

연구보고서(연차)

NIE-A-2024-04

2024년 환경부 LMO 위해성평가기관 운영

Operation of the Institute of LMO risk assessment under
the jurisdiction of the Ministry of Environment

NATIONAL
INSTITUTE OF ECOLOGY

연구진

연구책임자	남경희	LMO팀	선임연구원(연구책임자)
연구참여자(내부)	이준우	LMO팀	전임연구원(연구부책임자)
	천성준	LMO팀	전임연구원
	이재림	LMO팀	전임연구원
	이은선	LMO팀	전임연구원
	김지훈	LMO팀	연구원
	설민아	LMO팀	연구원
	이중로	LMO팀	책임연구원
	박진호	LMO팀	선임연구원
	최원균	LMO팀	선임연구원
	임혜송	LMO팀	연구원
	윤아미	LMO팀	연구원
	노동현	LMO팀	연구원

본 연구진은 연구윤리를 준수하였음을 서약합니다.

목 차

요약문	1
I. 서론	3
1. 환경부 LMO 안전관리	3
2. 국내 수입 LMO 및 위해성심사 현황	5
3. 환경정화용 LMO 연구개발 동향	8
4. 환경부 LMO 위해성평가기관	13
5. 연구 목표	14
II. 연구내용 및 방법	17
1. 환경정화용 LMO 환경방출 안전관리 지원체계 마련	17
가. 격리포장 식물상 및 식생 변화 조사 방법(안) 제시	17
나. 환경방출에 따른 주변 환경 영향조사 방법 개발	18
2. 환경부 LMO 위해성평가기관 격리포장 재배환경 개선	19
3. 국내 기후환경을 반영한 LMO 종자 월동성 검정 방법 개발	20
가. 의도적·비의도적 환경방출을 고려한 종자 월동성 조사	20
1) 국내 승인 4대 LM 작물 매몰 종자의 매립 기간별 발아율 및 휴면종자 비율 검정	20
2) 국내 기온을 반영한 처리 온도별 종자 발아율 및 휴면을 비교 분석	22
3) 국내 강수량을 반영한 상대 습도별 종자 발아율 및 휴면을 검정	22
나. 종자 밀도가 LM 식물의 잡초화 가능성에 미치는 영향 분석	23
4. 위해성평가용 환경정화용 LM 포플러 우성형질 선별	25
가. Genomic DNA 추출	25
나. PCR 및 염기서열 분석	25

다. RNA 추출 및 cDNA 합성, qRT-PCR	26
라. 환경정화용 LM 포플러 생물학적 특성 분석	28
5. LM 목본류 자연생태계 위해성평가 환경 조성	28
6. LM 목본류의 위해성평가 방법 개발	28
가. 토양 오염도별 포플러 형질 특성 분석	28
나. 오염환경 내 포플러의 생장 및 대사경로에 미치는 영향 분석 · 30	
Ⅲ. 연구결과	32
1. 환경정화용 LMO 환경방출 안전관리 지원체계 마련	32
가. 격리포장 식물상 및 식생 변화 조사 방법(안) 제시	32
나. 격리포장 환경·공간정보 통합 DB 구축 기준 마련	34
다. 환경방출에 따른 주변 환경 영향조사 방법 개발	35
1) 국내 환경정화용 LMO 환경방출 도입 가능 지역 분석	35
2) 도입 가능 지역의 근연종 종류 및 분포 조사	40
3) 환경정화용 LMO 환경방출 안전관리 가이드라인 발간	44
2. 환경부 LMO 위해성평가기관 격리포장 재배환경 개선	60
가. 환경부 LMO 격리포장시설 안전관리 강화	60
1) 배수·집수시설 정비로 LMO 유출 방지	60
2) LMO와 주변 야생식물 간 교잡 방지를 위한 주변 식물 제초 관리	63
나. 격리포장 환경방출실험 대비 재배환경 개선	65
다. 환경부 LMO 위해성평가 식물 채종포 및 증식포 유지관리	67
3. 국내 기후환경을 반영한 LMO 종자 월동성 검정 방법 개발	68
가. 국내외 LMO 위해성평가 환경요인 비교 분석	68
나. 의도적·비의도적 환경방출을 고려한 종자 월동성 조사	71
1) 국내 승인 4대 LM 식물 매물 종자의 매립 기간별 발아율 및 휴면종자 비율 검정	71
2) 국내 기온을 반영한 처리 온도별 종자 발아율 및 휴면을 비교 분석	74

3) 국내 강수량을 반영한 상대 습도별 종자 발아율 및 휴면율 검정	77
다. 환경부 LMO 종자 월동성 위해성평가 방법(안) 제시	80
라. 종자 밀도가 LM 식물의 잡초화 가능성에 미치는 영향 분석 ...	82
4. 위해성평가용 환경정화용 LM 포플러 우성형질 선별	91
가. 환경정화용 LM 포플러 우성형질 선별	91
나. 환경정화용 LM 포플러 생물학적 특성 분석	99
다. 자연생태계 환경방출실험용 LM 포플러 확보	101
5. LM 목본류 자연생태계 위해성평가 환경 조성	101
가. LMO 목본류 위해성평가 사례 분석	101
1) LM 목본류 재배면적 및 채택률 증가	101
2) LM 목본류 연구개발 현황	105
3) LM 목본류 환경방출 실험 사례	106
4) 국내 LM 목본류 개발 연구 현황	108
나. 환경정화용 LM 목본류 평가항목 개발	109
1) LM 초본류와 목본류 간 평가항목, 평가방법 등 비교 분석 ·	109
2) 환경정화용 LM 목본류 평가항목 및 기준 발굴	112
다. LM 목본류 자연생태계 위해성평가 시험포 모델 제시	113
6. LM 목본류의 위해성평가 방법 개발	116
가. 토양 오염도별 포플러 형질 특성 분석	116
나. 오염환경 내 포플러의 생장 및 대사경로에 미치는 영향 분석	123
다. 자연환경을 반영하는 환경부 위해성평가 방법(안) 제시	126
 IV. 고찰 및 제언	130
 참고문헌	132
 부록	141

표 목차

표 1. 월동성 실험 식물 종자의 물리적 특성	21
표 2. YCF1 유전자 발현 확인을 위한 프라이머 정보	26
표 3. 상대적인 YCF1 유전자 발현량 검증을 위한 프라이머 정보	27
표 4. 국내 환경정화용 LMO 환경방출 도입 가능 지역 토양 내 중금속 함량(mg/kg)	36
표 5. 우점 ASV 평균 상대풍부도 및 분류학적 계통	39
표 6. 폐광산에서 자생하는 식물 종의 건중량 비교	43
표 7. 기습폭우 피해 유형 분포	63
표 8. 국내·외 종자 월동성 위해성평가 사례	69
표 9. 4대 식물 종별 매립 기간별 발아율과 휴면을 General Linear Model (GLM) 분석 결과	72
표 10. 저온 조건에서 식물 종별 발아율과 휴면을 General Linear Model (GLM) 분석 결과	75
표 11. 해바라기 밀도별 발아율 General Linear Model (GLM) 분석 결과 ..	84
표 12. 시험 기간 관찰된 식물 종 목록	86
표 13. RNA 추출 시 목본 식물과 초본 식물 비교	94
표 14. LM 포플러 신초와 묘목 RNA 정량 및 순도	95
표 15. 후보 포플러 내재유전자 특징	96
표 16. 주요 국가(10개국)의 LM 작물 재배면적	102
표 17. LM 목본류 재배 승인 현황	103
표 18. 중국 유전자변형 파파야 재배면적 현황(2019년 기준)	104
표 19. 유전자편집 기술을 이용한 LM 목본류 개발 현황	105
표 20. LM 목본류의 환경방출 사례	107
표 21. 국내 LM 목본류 연구개발 현황	109
표 22. 식물신품종보호법에 의한 품종보호 내용	111
표 23. 농림축산산업용 LMO의 관리방법과 조치사항	111

표 24. LMO 격리포장시설 구비요건	112
표 25. LM 목분류 위해성 평가항목	113
표 26. 포플러 수종별 6년생의 수고	115
표 27. 포플러 수종별 식재 간격 및 식재 본수	115
표 28. 국내·외 오염물질에 따른 정화 식물의 형질 특성 분석 사례	117
표 29. 일반 목본과 불임 목본의 위해성평가 항목 비교	127
표 30. 일반 목본과 불임 목본의 자연생태계 위해성평가 항목 비교	128

그림 목차

그림 1. 국내 용도별 LMO 안전관리 체계	3
그림 2. 환경부 LMO 안전관리 업무체계	4
그림 3. 전 세계 LMO 재배면적 현황	5
그림 4. 국내 식품용 LMO 수입승인 현황	6
그림 5. 국내 농업용 LMO 수입승인 현황	6
그림 6. 국내 LMO 심사승인 현황	7
그림 7. 환경부 LMO 자연생태계 협의심사 현황	8
그림 8. 연도별 환경정화(bioremediation) LMO 연구 개발 논문 및 숙주 비중	9
그림 9. Neoplant사 환경정화용 LM 식물(스킨답서스)	10
그림 10. 중국 환경오염방지 투자액	11
그림 11. 일본 신에너지산업기술종합개발기구 R&D 사업	11
그림 12. EU ‘Green deal’ 정책	12
그림 13. 세계 환경정화시장 규모	13
그림 14. 환경부 LMO 위해성평가기관 역할	14
그림 15. 연구 추진체계	15
그림 16. 2024년 연구목표	16
그림 17. 식물상 및 식생변화 조사구 사진	17
그림 18. 조사지 사진	18
그림 19. 격리포장 내 월동성 조사 종자 사진	20
그림 20. 겨울철 월동성 실험 시험포 사진	21
그림 21. 처리 온도별 종자 검정 사진	22
그림 22. 상대 습도별 종자 검정 사진	23
그림 23. 잡초화 가능성 조사 사진	24
그림 24. 격리포장에 식재된 포플러	29
그림 25. 삼목할 포플러 준비 과정	29

그림 26. 토양 오염도별 포플어의 표현형 검증 과정	30
그림 27. 격리포장 계절별 및 거리별 식물상 변화 조사 결과 예시	32
그림 28. 격리포장 연도별 식물상 변화 조사 결과 예시	33
그림 29. 격리포장 환경·공간정보 통합 DB 구축 일부	34
그림 30. 국내 환경정화용 LMO 환경방출 도입 가능 지역 사진	36
그림 31. 폐공장 주변 오염지 박테리아 문(Phylum)	37
그림 32. 폐공장 주변 오염지 박테리아 속(Genus)	38
그림 33. 폐광산에서 식물 조사 지역. Site A, 갯구; Site B, 갯미, Site C, 대조구	40
그림 34. 폐광산에서 자생하는 식물 종의 초장 비교. Site A, 갯구; Site B, 갯미, Site C, 대조구	41
그림 35. 환경부 LMO 포장시험 안전관리 가이드라인	44
그림 36. 내외부 배수로 정비 구역도	60
그림 37. 내외부 배수로 작업 사진	61
그림 38. 정상영상을 통해 시각화한 기습폭우 지역	62
그림 39. 제초관리 구역도	64
그림 40. 격리포장 주변 식물 제초 관리 사진	65
그림 41. 시험포 보수 구역도	66
그림 42. 방초포 교체 사진	66
그림 43. 시험포 1 내 관수시설 확장 사진	67
그림 44. 격리포장 채종포 및 증식포 사진	67
그림 45. 시험 포장의 기온(A), 강수량(B), 토양온도(C), 토양 수분(D)	72
그림 46. Seedbag에 넣은 종자(A, C)와 넣지 않은 종자(B, D)의 매립 깊이와 매립 기간별 발아 종자 및 휴면 종자 비율	73
그림 47. 저온에서 발아한 종자의 발아 사진(A)과 초기 발아율(B), 최종 발아율(B) 및 휴면율(C)	76
그림 48. 상대 습도별 콩 종자의 발아율(A)과 휴면율(B)	77
그림 49. 상대 습도별 옥수수 종자의 발아율(A)과 휴면율(B)	78
그림 50. 상대 습도별 면화 종자의 발아율(A)과 휴면율(B)	79
그림 51. 상대 습도별 카놀라 종자의 발아율(A)과 휴면율(B)	79

그림 52. 종자 밀도에 따른 해바라기 품종별 생존 개체수 변화	83
그림 53. 종자 밀도에 따른 해바라기 품종별 표현형 변화	85
그림 54. 종자 밀도에 따른 해바라기와 야생 식물의 중요도 변화	88
그림 55. 종자 밀도에 따른 식생 중요도를 통한 잡초와의 경쟁 가능 시기 분석 결과	89
그림 56. 발근 유도가 완료된 환경정화용 LM 포플러	92
그림 57. LM 포플러 도입유전자 검증을 위한 유전자 증폭	92
그림 58. 염기서열 분석을 통한 도입유전자 서열 비교	93
그림 59. 도입유전자 발현 수준 검증을 위한 잎 샘플링	94
그림 60. LM 포플러 신초와 묘목 RNA 분리	95
그림 61. 포플러 내재유전자 선별	97
그림 62. 프라이머 제작을 위한 포플러 내재유전자 DNA 서열 검색	97
그림 63. LM 포플러 신초에서 도입유전자의 상대적인 발현 수준	98
그림 64. LM 포플러 묘목에서 도입유전자의 상대적인 발현 수준	98
그림 65. LM 포플러 개발 과정	99
그림 66. 순화처리 후 LM 포플러의 생장 표현형	100
그림 67. 2019년 전 세계 LMO 재배면적 및 채택률	102
그림 68. 격리포장 시험포 전경	114
그림 69. 격리포장 시험포 1, 2에 4 × 4 m의 시험구 가상 배치 사진	116
그림 70. 포플러 토양 오염도별 표현형 검증 과정	119
그림 71. 대조구와 카드뮴 처리구의 생장 단계별 포플러 표현형 변화	120
그림 72. Non-growth 생장 단계의 포플러의 주기별 개체수 변화 비교	121
그림 73. Callus or leaf bud 생장 단계의 포플러의 주기별 개체수 변화 비교	121
그림 74. Leaf 생장 단계의 포플러의 주기별 개체수 변화 비교	122
그림 75. 뿌리 유도 중인 포플러 삽목 개체	122
그림 76. 카드뮴 처리구(위)와 대조구(아래)에서 자란 포플러의 대표적 크로마토그램	123
그림 77. 카드뮴 처리구와 대조구에서 자란 포플러의 대사산물 PCA 및 PLS-DA 분석 결과	124

그림 78. 카드뮴 처리구와 대조구에서 자란 포플러의 대사산물 Heatmap	125
그림 79. 카드뮴 처리구와 대조구에서 자란 포플러의 대사산물 상대정량 분석 결과	125

요약문

본 과제의 목적은 환경부 소관(환경정화용) LMO의 상업화에 대비하여 LMO 위해성평가기관의 효율적 운영을 통해 환경부 위해성심사·평가 가이드라인을 마련하고, 안전관리 체계를 구축하는 것이다.

본 연구에서는 격리포장 주변의 식물상 및 식생 변화에 대해 계절별 및 연도별 생물다양성 변화를 파악할 수 있는 조사 방법을 제시하였다. 또한, 격리포장의 기후, 토양, 미생물, 곤충, 식생 변화 등을 조사날짜별로 확인할 수 있는 환경·공간정보 통합 DB 구축 방안을 제시하였다. 이를 바탕으로 환경부의 LMO 환경방출 안전관리 체계를 지원하기 위해 LMO 포장시험 안전관리 가이드라인을 발간하였다. 또한, 격리포장의 배수·집수시설 개선과 주변 식물의 제초 관리로 안전성을 강화하고, 관수시설 확장과 자체적인 종자·묘목 생산을 위한 채종포 및 증식포 관리로 위해성평가 식물 재배 환경을 개선하였다.

국내 기후 환경을 반영한 LMO 종자 월동성 검정 방법을 개발하기 위해, 국내에서 가장 많이 수입·유통되는 4대 LM 식물(카놀라, 면화, 콩, 옥수수)의 비변형 종자를 이용하여 국내의 기온과 강수량을 반영한 저온(-5, -1, 5 °C) 및 상대 습도별(15, 30, 50%) 종자 발아율과 휴면율을 검정하였다. 또한 의도적 및 비의도적 환경방출을 고려한 종자 월동성 검정을 위해 Seedbag에 넣은 종자와 넣지 않은 종자의 격리포장 내 월동성을 비교 분석하였다.

환경정화용 LMO 심사를 대비하여 LM 목본류의 위해성평가 체계를 마련하기 위해, 환경정화용 LM 포플러의 우성형질을 선별한 후 안정적인 유전자 발현과 발현 수준이 개체에 따라 차이가 없음을 확인하였다. 또한 비변형 포플러와 변형 포플러 간 생물학적 차이가 없음을 입증하였다. 이어서, 격리포장 내 LM 목본류의 자연생태계 위해성평가를 위한 시험포 모델을 제시하였고, 카드뮴으로 오염된 토양과 오염되지 않은 토양에서 포플러 삼목 후 형질 특성과 대사산물 변화 분석을 통해 LM 목본류 위해성평가 가이드라인 개발을 위한 과학적 근거 자료를 마련하였다.

주요어: 환경정화용 LMO, 위해성평가, 유전자변형

Abstract

This study aims to establish a risk assessment system and guidelines for living modified organisms (LMOs) used in environmental remediation through the efficient operation of the LMO risk assessment institute under the jurisdiction of the Ministry of Environment (MOE) of Korea.

We proposed a method for surveying flora and vegetation to monitor seasonal and annual biodiversity changes in plants around the confined field. Additionally, we outlined a plan to build an integrated database of environmental and spatial information to track changes in climate, soil, microorganisms, insects, and vegetation over time. Furthermore, we developed the MOE's safety management guidelines for LMO field tests. We also strengthened the safety of the field facility and improved the cultivation environment of the risk assessment plants.

To develop a method for assessing the overwintering potential of LMO seeds in line with Korea's domestic climate conditions, we tested the seed germination and dormancy rates at low temperatures (-5, -1, 5 °C) and relative humidity levels (15, 30, 50%) that reflect the country's typical temperature and precipitation patterns. This was done using unmodified seeds of the four most commonly imported LM crops in Korea (canola, cotton, soybean, and corn). Additionally, to evaluate the overwintering ability of seeds under both intentional and unintentional environmental release scenarios, we tested seeds encapsulated and unencapsulated in seed envelopes, buried in the fields.

In order to establish a risk assessment system for LM woody plants, we selected dominant LM poplar traits intended for environmental remediation. We also proposed a model test site for assessing the natural ecosystem risk of LM woody plants in confined fields. Furthermore, we analyzed the trait characteristics and metabolic changes in poplar cuttings grafted onto cadmium-contaminated and uncontaminated soils to provide scientific data for the development of risk assessment guidelines for LM woody plants.

Keyword: Environmental remediation, Living modified, Risk assessment

I. 서론

1. 환경부 LMO 안전관리

유전자변형생물체(Living Modified Organism, LMO)의 개발과 상업적 활용이 증가하면서, 인체 및 환경에 미칠 잠재적 영향을 우려하는 목소리가 높아짐에 따라 안전관리의 중요성이 부각되고 있다. 이에 2000년 1월, 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity, CBD)의 부속 의정서로 「바이오안전성에 대한 카르타헤나 의정서(Cartagena Protocol on Biosafety, 이하 카르타헤나의정서)」가 국제적으로 채택되었고, 우리나라는 2007년에 143번째로 이 의정서에 가입하였다. 이후, 우리나라는 카르타헤나 의정서 이행을 위해 「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률(LMO법)」을 제정하고 2008년부터 이를 시행하고 있다. 현재 국내의 LMO 안전관리는 용도에 따라 체계적으로 이루어지며, 용도별로 안전관리를 담당하는 7개의 소관 부처가 지정되어 있다. 이 가운데 환경부는 환경정화용 LMO의 개발, 생산, 수입, 수출, 판매, 운반, 보관 및 이용과 같은 전반적인 업무를 맡고 있으며, 환경에 방출되었거나 방출 가능성이 있는 LMO의 자연생태계에 미치는 위해성을 평가, 심사하고 관리하는 역할을 담당하고 있다(그림 1).

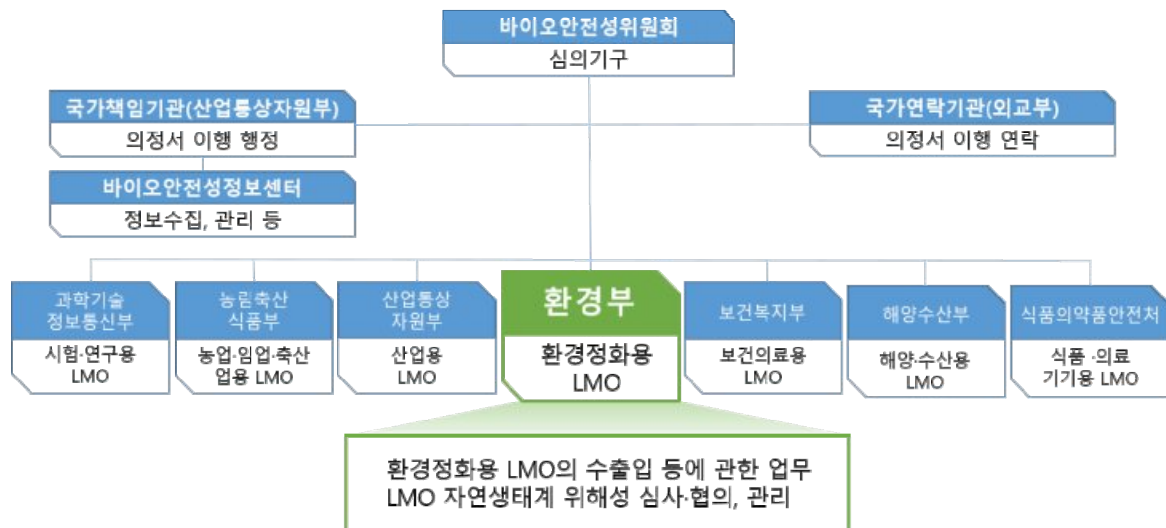


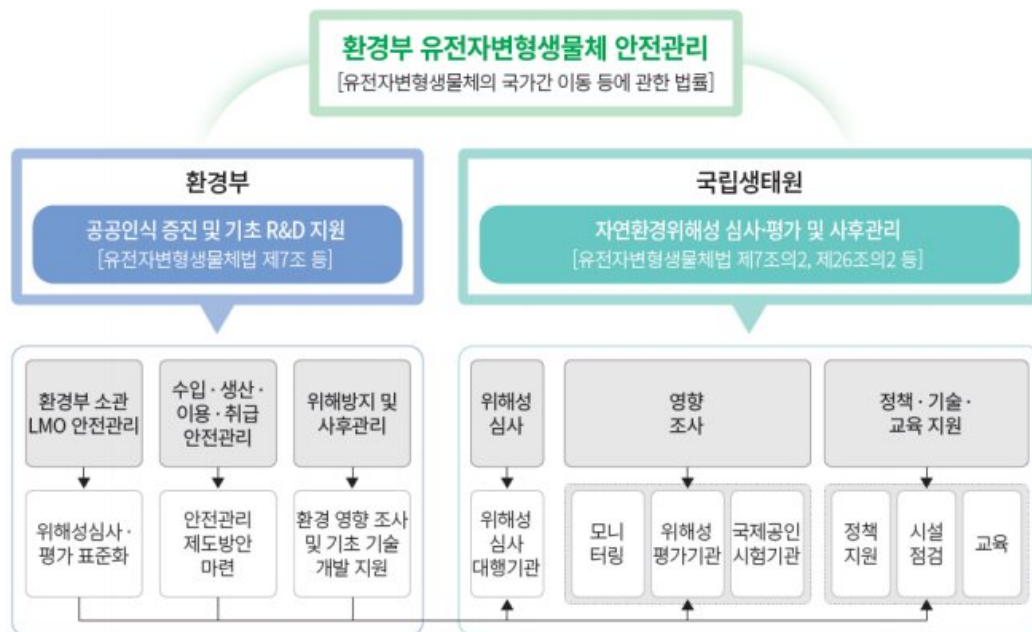
그림 1. 국내 용도별 LMO 안전관리 체계

국내에서도 LMO의 상업화를 위한 연구와 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 이와 함께 매년 LMO의 수입과 이용이 증가하면서, 비의도적인 환경

유출 사례가 발생하고 있어 환경 분야에서의 LMO 안전관리와 생태계 위해 예방의 중요성이 점점 더 부각되고 있다. 환경부 산하 국립생태원은 LMO법 통합고시 제1-4조(업무의 위탁)에 따라 환경부로부터 LMO 안전관리 업무를 위탁받아 이를 수행하고 있다(그림 2; 출처: 환경부 LMO 포장시험 안전관리 가이드라인, 2024).

2018년 12월에는 환경부로부터 LMO 위해성평가기관으로 지정받아, 위해성평가 체계구축, 평가 가이드라인 마련, 단백질 및 신기술 기반의 LMO 위해성평가를 진행하고 있다. 또한 매년 전국 자연생태계를 대상으로, 비의도적으로 유출된 LMO와 국내 자생종 간의 교잡 가능성을 확인하기 위한 모니터링과 유전자 오염 조사를 수행하고 있다. 이와 더불어, LMO 검출법 개발, 국제공인시험기관 운영, 모니터링 결과에 대한 공인시험성적서 발급 등의 업무도 수행하고 있다.

국립생태원은 정부의 5개년 LMO 안전관리계획 및 환경부의 세부시행계획 수립과 이행을 지원하며, 국민과 관련 이해관계자를 대상으로 안전관리 및 인식 제고를 위한 교육을 추진하는 등 다양한 안전관리 업무를 수행하고 있다.

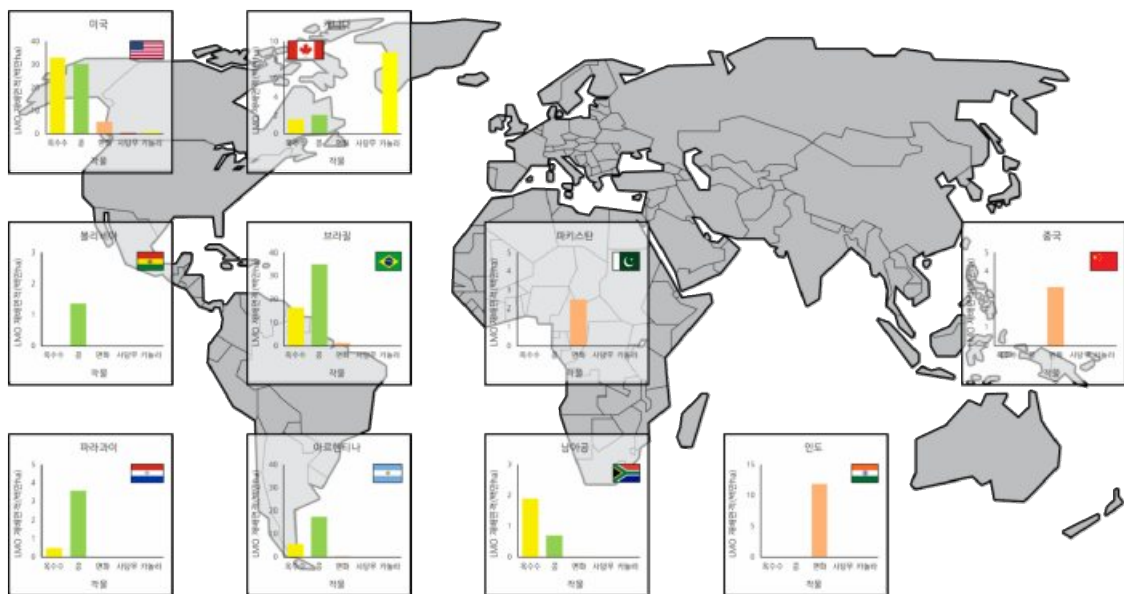


출처: 환경부 LMO 포장시험 안전관리 가이드라인, 2024

그림 2. 환경부 LMO 안전관리 업무체계

2. 국내 수입 LMO 및 위해성심사 현황

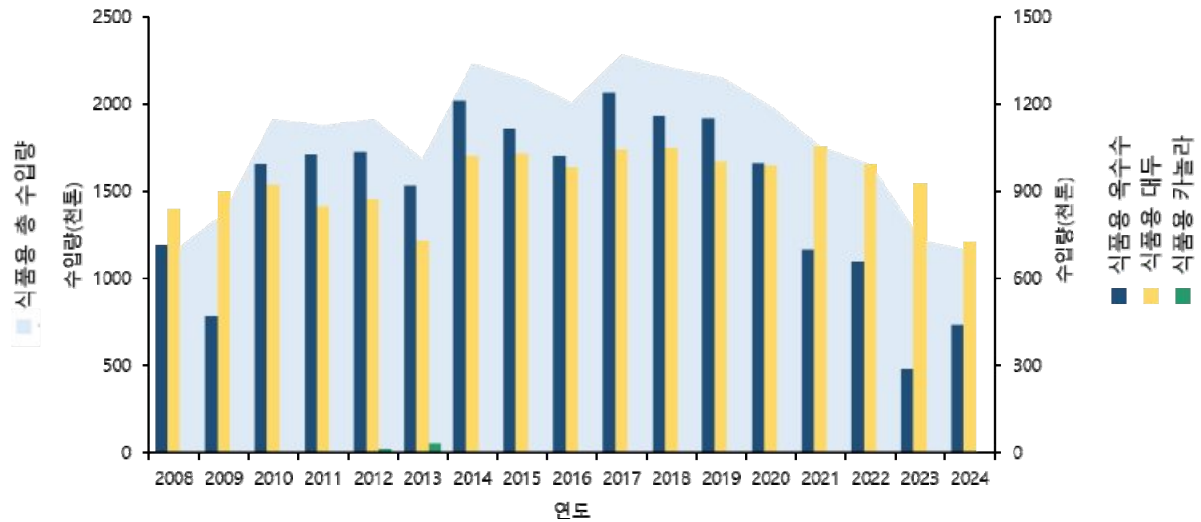
전 세계적으로 LM 작물(콩, 면화, 옥수수, 카놀라)의 재배면적은 약 190 백만 ha로 보고되었다(그림 3; KBCH, 2024a). 미국, 브라질, 아르헨티나, 캐나다, 인도, 파라과이, 중국, 파키스탄, 남아공, 볼리비아에서 LM 작물을 재배하고 있다. 작물별로 73~100%의 비율로 LM 작물을 채택하고 있으며, 가장 일반적으로 사용되는 LM 작물 형질은 제초제내성(HT)과 해충저항성(Bt)이다. 전 세계 면화 재배면적의 79%가 LM 면화이며, 콩 재배면적의 74%가 LM 콩이다. 옥수수 재배면적의 31%는 LM 옥수수가 차지하고, 카놀라 재배면적의 27%는 LM 카놀라가 차지하고 있다.



출처: KBCH, 2024a

그림 3. 전 세계 LMO 재배면적 현황

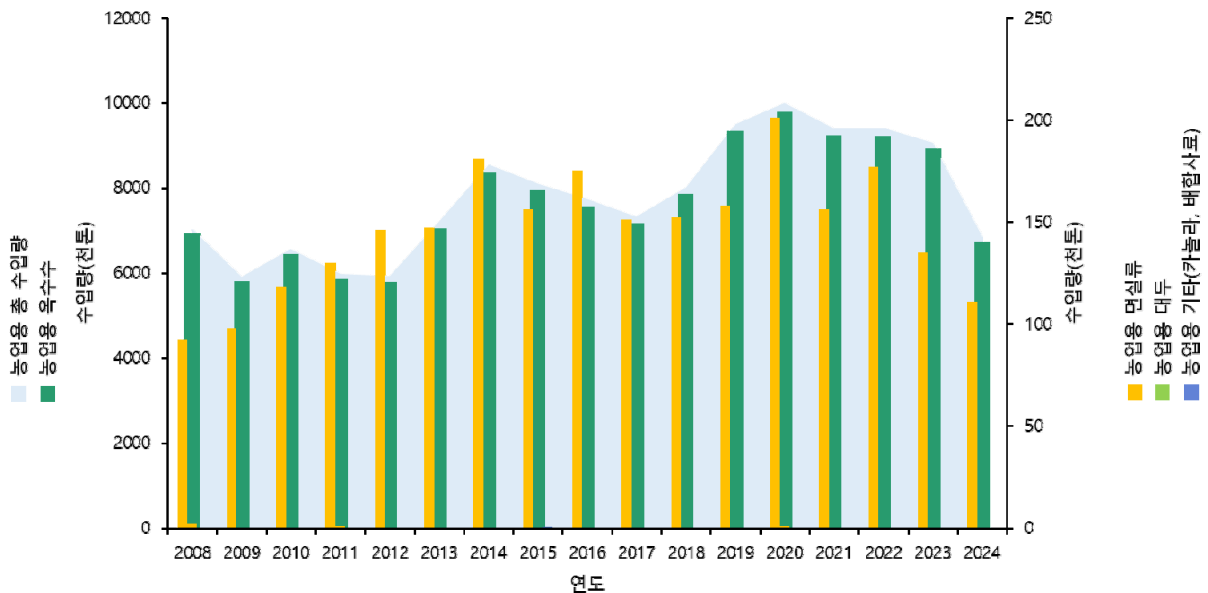
우리나라는 LMO를 재배하지 않고, 2008년부터 식품용과 농업용 LMO를 수입하고 있다. 2024년 9월 기준 올해 LMO 수입량은 8,003천 톤이며, 그중 식품용은 1,164천 톤이고, 농업용은 6,839천 톤이 수입되었다. 식품용 옥수수가 전체 수입 LMO의 38%를 차지하고, 대두는 62%를 차지하였다. 2024년에 수입되는 식품용 LM 카놀라는 없었고, 식품용 LM 대두와 LM 옥수수는 미국과 브라질에서 수입했다(그림 4; 출처: KBCH, 2024b).



출처: KBCH, 2024b

그림 4. 국내 식품용 LMO 수입승인 현황

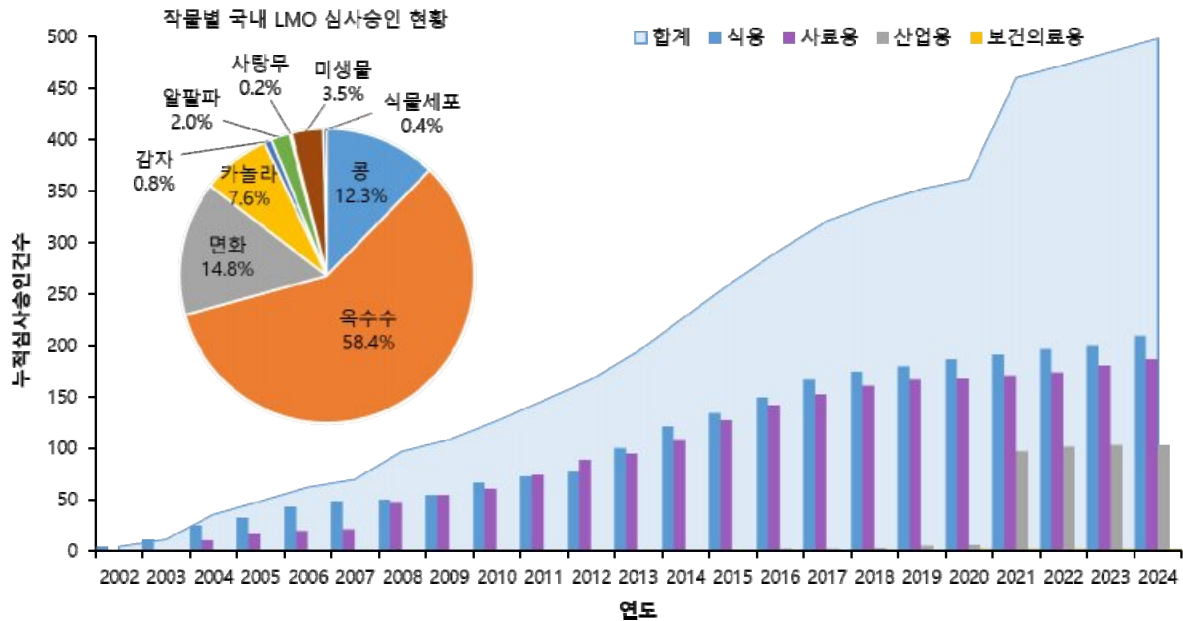
수입승인 농업용 LMO의 대부분은 면실류와 옥수수이며, 카놀라와 배합사료도 12톤 수입되었다(그림 5; 출처: KBCH, 2024b). LM 면실류는 미국과 호주, 브라질, 아르헨티나에서 수입하고, LM 옥수수는 미국, 브라질, 아르헨티나에서 수입하였다.



출처: KBCH, 2024b

그림 5. 국내 농업용 LMO 수입승인 현황

LMO 수입을 위해서는 용도별로 관계 중앙행정기관의 위해성심사를 받아야 한다. 2024년 8월까지 누적된 위해성심사 승인 건수는 500건이고, 이 중 식품용 LMO는 209건으로 가장 큰 비중을 차지하고 있다(그림 6; 출처: KBCH, 2024c). 사료용 LMO는 186건으로 식품용 LMO 다음으로 큰 비중을 차지하고, 산업용 LMO는 2021년 97건으로 가장 많았고 현재까지 103건이 승인되었으며, 보건의료용은 2건이 승인되었다.



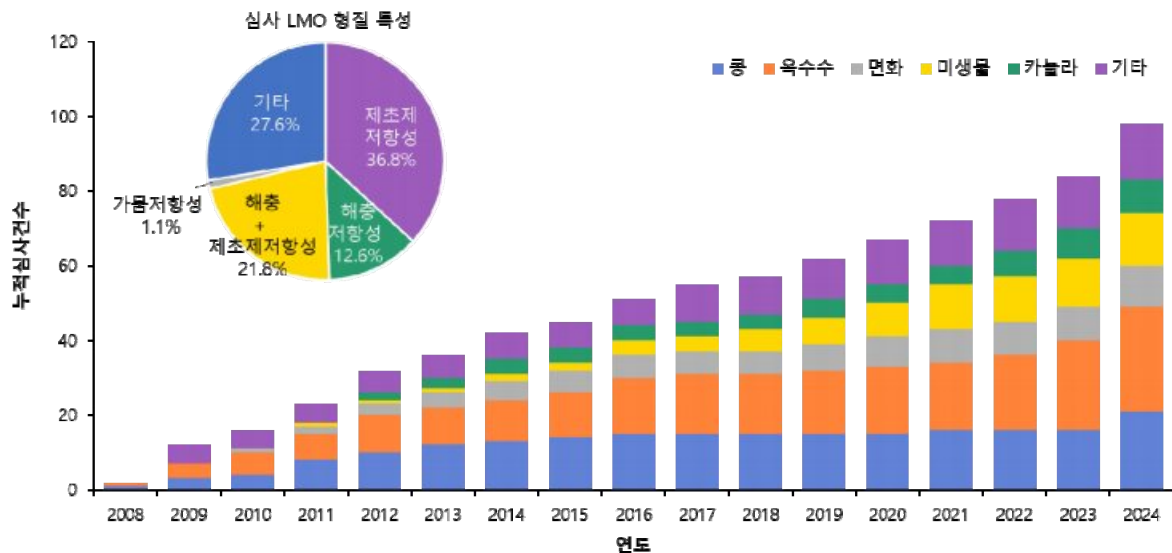
출처: KBCH, 2024c

그림 6. 국내 LMO 심사승인 현황

환경정화용 및 해양수산물용 LMO의 연구·개발은 활발하지만 국내 심사승인 LMO는 없다. 작물별 국내 LMO 심사승인 현황은 옥수수가 58.4%로 가장 많고, 다음으로 면화가 14.8%, 콩이 12.3%, 카놀라가 7.6%를 차지했다. 이외에도 미생물(3.5%), 알팔파(2.0%), 감자(0.8%), 식물세포(0.4%), 사탕무(0.2%) 등 다양한 작물이 승인되었다. 식품용 LMO는 콩이 30건, 옥수수가 101건, 면화가 38건, 카놀라 19건, 감자 4건, 알팔파 5건, 사탕무 1건, 미생물 11건이 승인되었다. 농업용 LMO는 콩이 30건, 옥수수 96건, 면화 36건, 카놀라 19건, 알팔파 5건이 승인되었으며, 산업용 LMO는 옥수수 90건, 미생물 12건, 식물세포 1건이 승인되었다. 보건의료용 LMO는 미생물과 식물세포가 각각 1건 승인되었다. 승인 LMO의 형질로는 제초제저항성 및 해충저항성 복합성이 96건으로 가장 많고, 제초제저항성은 73건, 해충저항

성은 17건이 승인되었다. 고올레인산, 알라닌, 바이오부탄올, 베타-글루코시다아제 등 기능성 물질을 생산하는 기능성 LMO는 30건이 승인되었다.

환경정화용 LMO의 국내 수입·심사 승인은 없지만, 타 부처 소관 LMO의 자연생태계 위해성 협의심사는 2008년 이후 꾸준히 진행되고 있다(그림 7; 출처: LESC, 2024). 작물별로는 LM 옥수수(28건), 콩(21건), 미생물(14건), 면화(11건), 카놀라(9건), 알팔파, 들잔디, 감자 등 기타 작물(7건)의 순서대로 비중을 차지하고 있다. 이들 LM 작물에 도입되는 형질은 제초제저항성이 36.8%로 가장 많고, 해충저항성 및 제초제저항성 복합형질이 21.8%, 영양성분 강화가 27.6%, 해충저항성이 12.6%, 가뭄저항성이 1.1%를 차지하였다. 또한 타가토스 생산, 올레산 함량 증가, 리그닌 감소, 이삭 중량 증가, 효소 생성 등 기타 형질은 27.6%이다.



출처: LESC, 2024

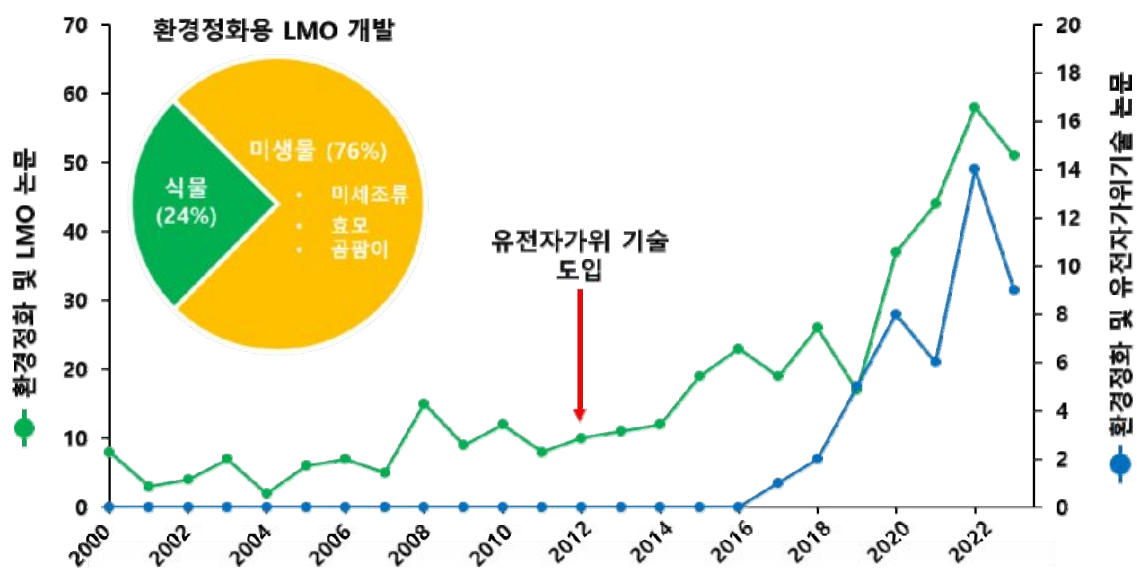
그림 7. 환경부 LMO 자연생태계 협의심사 현황

3. 환경정화용 LMO 연구개발 동향

기후변화와 환경오염에 대한 국민적 관심이 증가하면서 환경산업이 발전하고 있으며, 대기, 토양, 수질, 해양 등 다양한 분야에서 오염물질을 제거하기 위한 환경정화용 LMO 연구가 활발히 진행되고 있다. 미세플라스틱, 미세먼지, 항생제 등 환경에 유출되는 오염물질의 종류는 점점 다양화되고 있으며, 특히 국내 하천과 하수에 포함된 환경호르몬과 항생제와 같은 미량유해물질 처리 시장은 연간 약 1,000억 원 규모로 추산되며 매년 6%의

성장률을 기록하고 있다(바이오안전성백서, 2023).

아울러, 유전자가위와 인공지능 등 첨단 기술의 발전은 국내외 환경정화용 LMO 개발에 새로운 동력을 제공하고 있으며, 연구 대상은 미세조류와 균류를 포함한 다양한 생물종으로 확대되고 있다. 국내에서는 환경정화용 LMO가 개발과 위해성평가 과정에서 높은 비용 대비 낮은 시장성으로 인해 상용화된 사례는 아직 없지만, 연구 활동은 꾸준히 진행되고 있다. 이와 관련하여 매년 논문발표와 특허출원이 이어지며 꾸준한 연구 성과를 나타내고 있다(그림 8; 출처: Pumed).



출처: Pubmed

그림 8. 연도별 환경정화(bioremediation) LMO 연구 개발 논문 및 특허 비중

국내 환경정화용 LMO의 주요 동향으로는, 미세플라스틱을 분해하고 제거하기 위해 *PETase* 유전자를 활용한 미세조류를 세계 최초로 개발한 사례가 있으며(Kim et al., 2020), 이를 기반으로 한 다양한 연구가 이어지고 있다. 주요 연구로는 환경정화용 LMO 미세조류의 고효율 단백질 분비 생산 시스템 개발, 미세조류를 활용한 인공지능 기반 실외 공기정화 시스템, 그리고 머신러닝 기술을 적용한 중금속 오염토양의 식물정화 모델 개발 등이 있다(바이오안전성백서, 2023). 이 외에도 마이크로바이옴을 활용한 차량 실내 공기 정화를 위한 신기술이 자동차 산업을 중심으로 연구되고 있다(바이오안전성백서, 2023). 다만, 환경정화용 LMO의 상업화를 현실화하기 위해서는 향후 개발될 LMO의 안전성을 철저히 확보하는 한편, 국민의

인식 개선을 위한 노력이 병행되어야 할 필요가 있다.

국외에서는 미국과 유럽을 중심으로 유전자가위 등 신규 유전체 기술(New Genomic Techniques, NGT)을 활용한 새로운 LMO 품종이 시장에 출시되어 유통되고 있으며, 이러한 상업화는 점차 확대될 것으로 예상된다(바이오안전성백서, 2023).

미국 조지아주 남부에서는 NGT 기술을 활용하여 탄소흡수량이 높고 빠르게 성장하는 포플러 5,000그루가 식재되었으며, 앞으로 약 400만 그루의 LMO 포플러를 민간 산림 지역에 추가로 식재하여 기후변화에 대응할 계획이 진행 중이다(opkin et al, 2023). 이 외에도 소나무, 아마, 지팡이풀 등 다양한 식물을 활용한 환경정화용 LMO가 개발되어 시범 재배가 예정되어 있다.

프랑스의 한 생명공학 기업에서는 휘발성 유기화합물(VOC)을 기존 대비 30배 더 효율적으로 정화할 수 있는 관상용 LMO 스킨답서스를 개발하며 상업화를 준비하고 있다(그림 9; 출처: Neoplants).

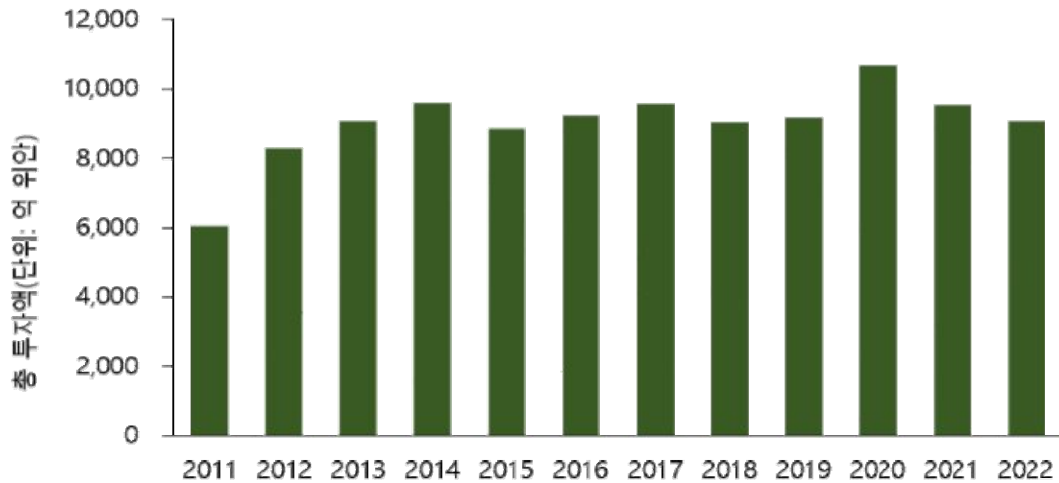


출처: Neoplants

그림 9. Neoplant사 환경정화용 LM 식물(스킨답서스)

중국은 국가적으로 환경오염 방지를 위한 대규모 투자를 진행하고 있으며, 환경오염 통제 관련 총 투자액이 2022년 기준 GDP의 약 10%에 달하는 것으로 보고되었다(그림 10; 출처: 중국 생태환경부 보고서; 2024년 환경부 소관 LMO 안전관리 세부시행계획). 또한, 중국에서는 환경정화용 LMO 개발 연구를 위해 국가 차원에서 생태환경 과학 혁신 시스템을 구축하였다. 예를 들어, *DsPht1* 유전자를 활용하여 물속의 비소를 흡수하는 LM 미세

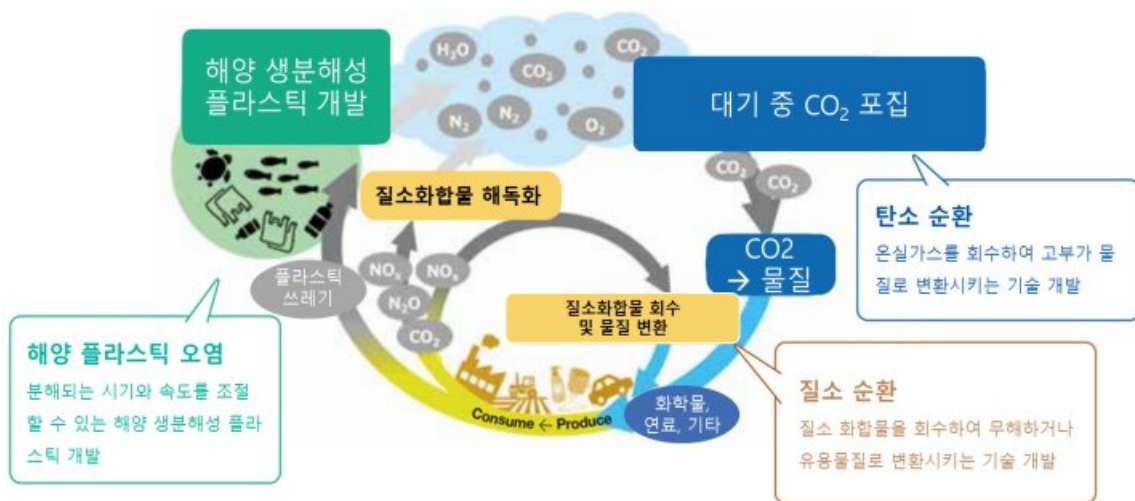
조류와 *EC20* 및 *irrE* 유전자를 이용해 석유화학 폐수에 포함된 카드뮴을 제거하는 LM 대장균이 개발된 사례가 보고된 바 있다(Kong et al., 2023; Zong et al., 2023; 2024년 환경부 소관 LMO 안전관리 세부시행계획).



출처: 중국 생태환경부 보고서

그림 10. 중국 환경오염방지 투자액

일본 신에너지산업기술종합개발기구에서는 이산화탄소와 질소화합물을 제거하고 생분해성 플라스틱을 생산하는 LMO를 연구개발 중이다(그림 11; 출처: <https://www.nedo.go.jp/index.html>; 2024년 환경부 소관 LMO 안전관리 세부시행계획).



출처: <https://www.nedo.go.jp/index.html>

그림 11. 일본 신에너지산업기술종합개발기구 R&D 사업

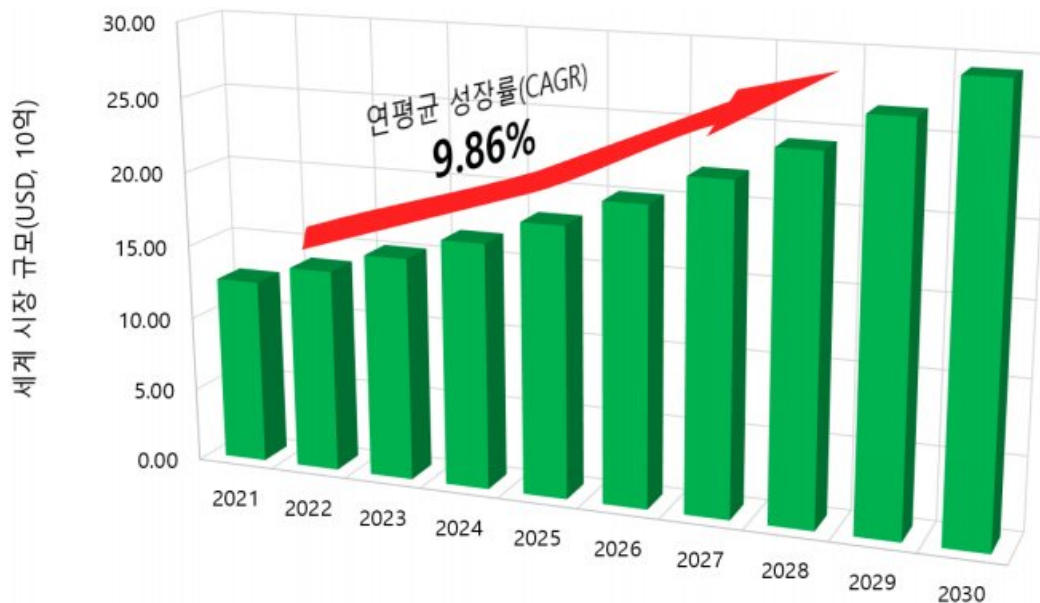
유럽연합에서는 NGT을 적용한 식물에 대해 기존 GMO법을 면제하는 개정안을 발표하였고, 탄소중립 정책인 ‘그린딜’ 및 ‘Farm to Fork’ 이행을 위한 탄소포집용 환경정화용 LM 식물을 연구·개발 중이라고 보고하였다 (그림 12; 출처: <https://euinasean.eu/eu-green-deal>; 환경부 소관 LMO 2024년 세부시행계획).



출처: <https://euinasean.eu/eu-green-deal>

그림 12. EU ‘Green deal’ 정책

한편, 탄소중립, 재생 가능 에너지 발전 확대 등 환경 규제가 강화됨에 따라 환경정화 시장 규모 역시 성장하는 추세이다(그림 13; 출처: Vision research report, 2022; 2024년 환경부 소관 LMO 안전관리 세부시행계획). 특히, 바이오 신기술 관련 규제 패러다임의 변화로 유전자가위 기술 등을 이용한 환경정화용 LMO의 연구·개발이 증가할 것으로 예상됨에 따라 환경정화용 LMO 국내 수입·방출 시 자연생태계의 안전성 확보를 위한 대책 마련이 시급한 실정이다.



출처: Vision research report, 2022

그림 13. 세계 환경정화시장 규모

4. 환경부 LMO 위해성평가기관

국립생태원은 사전 위해성평가를 통하여 환경정화용 LMO 및 국내 수입·유통되는 LMO의 비의도적 유출로부터 자연생태계의 안정성을 확보하기 위해 2018년 12월 환경부로부터 LMO 위해성평가기관을 지정받아 운영하고 있다. 환경부 LMO 위해성평가기관은 환경부 소관 LMO의 위해성평가 수행과 위해성평가 기술 개발로 국내 자연환경에 적합한 위해성평가 가이드라인을 개발하여 위해성심사 전문성을 강화하는 역할을 하고 있다. 이처럼 위해성평가기관은 환경정화용 LMO 및 LMO의 자연생태계 위해성 영향평가 체계를 구축하여 환경부 LMO 위해성심사와 평가 기준 정립을 통한 안전성 검증으로 환경부의 LMO 안전관리 정책을 지원하고 있다(그림 14; 환경부 유전자변형생물체 위해성평가기관 안전관리 지침, 2023).

2019년부터 환경부 LMO 위해성평가기관에서는 환경정화용 LMO 및 자연생태계 위해성심사 및 평가 가이드라인 개발을 위해 다양한 위해성평가 연구를 수행하고 있다(국립생태원, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023). 그 중 특히 LMO가 국내 자연환경에 유출되었을 시 국내 환경요인에 따른 생태계 침입 가능성을 평가하는 연구와 국내 자연환경의 비표적 곤충상 및 토양 생물상에 미치는 위해 가능성 연구, 환경 오염물질에 따른 형질 특성 변화 연구 등이 보고되었다.



출처: 환경부 유전자변형생물체 위해성평가기관 안전관리 지침, 2023

그림 14. 환경부 LMO 위해성평가기관 역할

5. 연구 목표

본 연구 과제는 환경부 LMO 위해성평가기관의 운영을 통해 환경부 소관 (환경정화용) 및 자연생태계 위해성평가 체계를 구축하고, 실질적인 위해성 평가 연구로 환경부 LMO 위해성심사·평가 가이드라인을 마련하고자 수행 하였다. 2024년 연구의 추진체계는 그림 15와 같다.

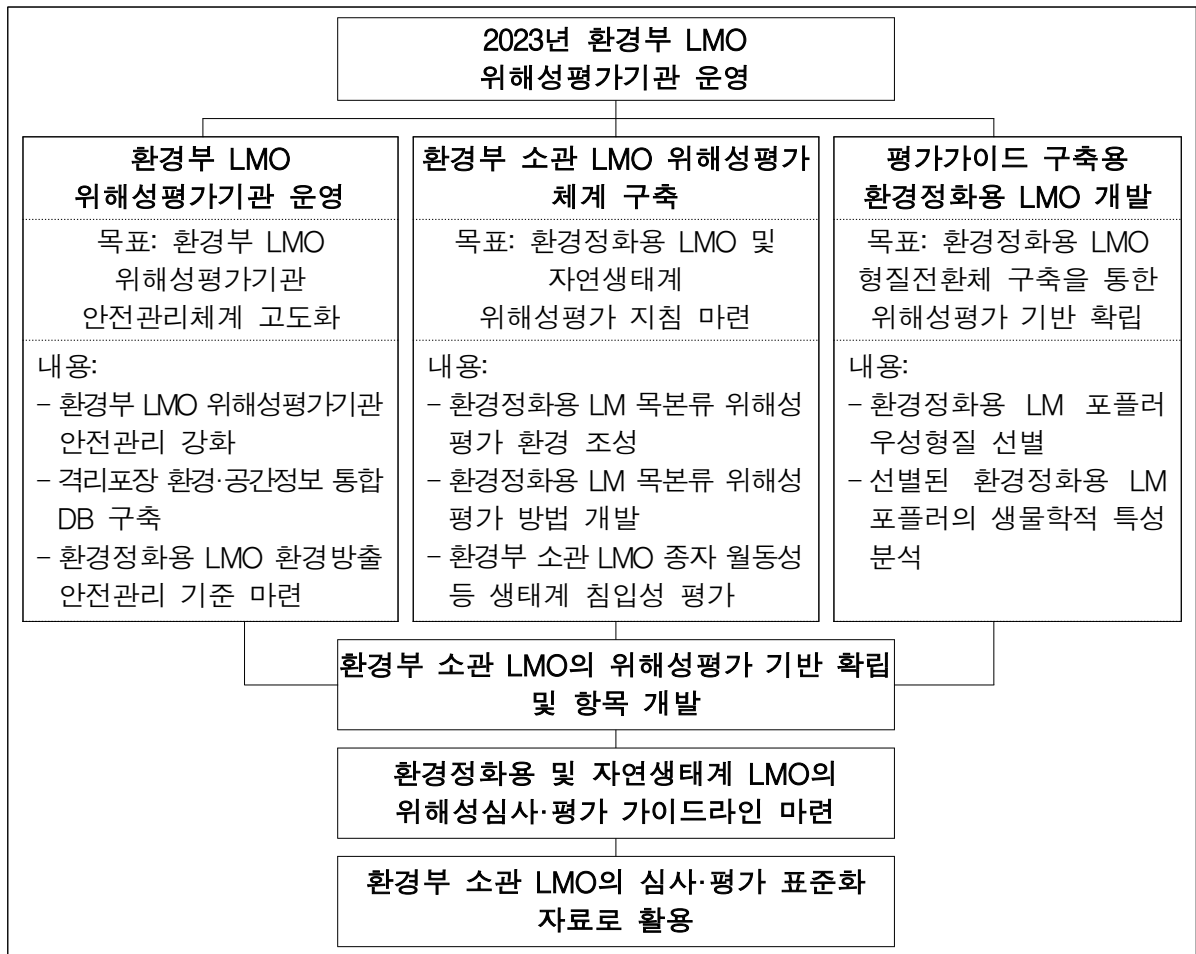


그림 15. 연구 추진체계

2024년 연구 목표는 그림 16과 같다. 첫 번째는 환경정화용 LMO의 환경 방출 안전관리 지원체계를 마련하고, 환경부 LMO 위해성평가기관 내 격리 포장 재배 환경을 개선하여 환경부 LMO 위해성평가기관의 안전관리 체계를 고도화하고자 한다. 두 번째는 국내 기후환경을 반영한 LMO 종자 월동성 검정 방법을 개발하여 환경부 소관 LMO의 생태계 침입성 평가 기준을 개발하고자 한다. 마지막으로 위해성평가를 위한 환경정화용 LM 포플러의 우성 형질 선별과 LM 목본류에 대한 자연생태계 위해성평가 환경 조성, LM 목본류의 위해성평가 방법 개발을 통해 환경정화용 LMO 심사 대비 LM 목본류의 위해성평가 체계를 마련하고자 한다.

1

환경부 LMO 위해성평가기관 안전관리체계 고도화

- 환경정화용 LMO 환경방출 안전관리 지원체계 마련
- 환경부 LMO 위해성평가기관 격리포장 재배환경 개선

2

환경부 소관 LMO 생태계 침입성 평가 기준 개발

- 국내 기후환경을 반영한 LMO 종자 월동성 검정 방법 개발

3

환경정화용 LMO 심사 대비 LM 목본류 위해성평가 체계 마련

- 위해성평가용 환경정화용 LM 포플러 우성형질 선별
- LM 목본류 자연생태계 위해성평가 환경 조성
- LM 목본류의 위해성평가 방법 개발

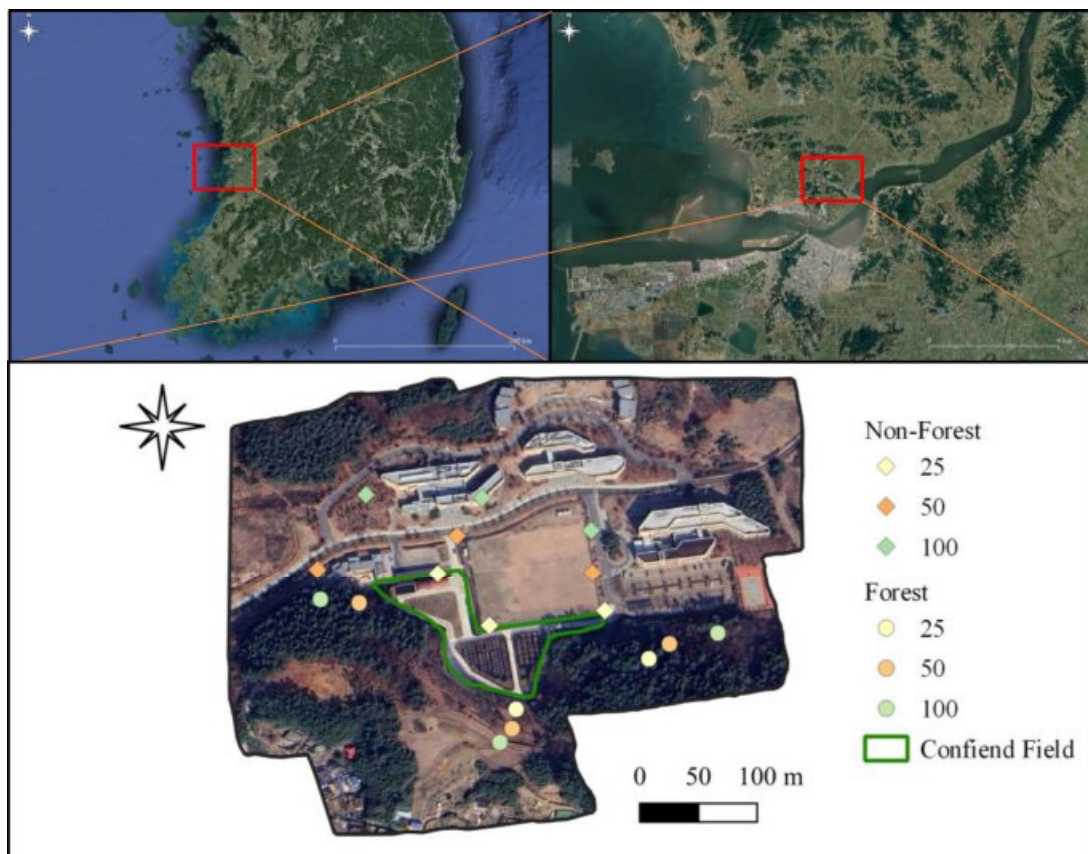
그림 16. 2024년 연구목표

II. 연구내용 및 방법

1. 환경정화용 LMO 환경방출 안전관리 지원체계 마련

가. 격리포장 식물상 및 식생 변화 조사 방법(안) 제시

격리포장 식물상 및 식생 변화 조사 방법(안)을 제시하기 위해 2020년부터 시행한 내외부 식물상 및 식생 변화를 조사하였다(국립생태원, 2020, 2021, 2022, 2023). 식물상은 산림지역과 비산림지역을 구분하여 격리포장 외부 100 m 거리 내에 서식하는 모든 종을 조사하였고, 국가표준식물목록(국립수목원, 2017)과 국가생물종목록(국립생물자원관, 2022)에 따라 동정하였다. 식생 변화는 격리포장 외부 25 m, 50 m, 100 m 거리에 설치된 18개의 고정조사구와 격리포장 내부에 설치된 9개의 고정조사구를 식물사회학적 방법(Braun-Blanquet, 1964)에 따라 조사하였다(그림 17). 봄철 조사는 5월에 수행하였고, 여름철과 가을철 조사는 8월과 10월에 수행하였다.



출처: Han et al., 2023; 국립생태원, 2023

그림 17. 식물상 및 식생변화 조사구 사진

나. 환경방출에 따른 주변 환경 영향조사 방법 개발

국내 환경정화용 LMO 환경방출 도입 가능 지역은 문헌조사와 보도자료 등을 통해 전국의 오염지 중 국립생태원이 위치한 서천과 가까운 충남과 전북을 중심으로 조사하였다(그림 18). 오염지 토양의 중금속 함량은 토양 오염공정시험기준(환경부고시)에 따라 질산-염산에 의한 분해방법을 이용하여 전처리한 후 유도결합플라즈마 발광광도계를 이용하여 정량분석(정량 한계 Cd, 0.01 mg/kg, Pb 0.05 mg/kg, As 0.05 mg/kg) 하였다.



그림 18. 조사지 사진

오염지의 미생물 다양성은 오염이 가장 심한 지역에서 토양 시료를 채취하여 조사하였다. 채취된 시료는 FastDNA SPIN Kit for Soil(MP Biomedicals 6560-200)를 이용해 제조사의 매뉴얼을 따라 추출을 진행하였다. NGS 라이브러리는 Illumina사의 16S Metagenomic Sequencing Library Preparation 지침서(Part # 15044223 Rev. B, 2013)를 참고하여 제작하였다. 1차 PCR 프라이머는 표적 유전자 증폭을 위해 제작되었으며, overhang 시퀀스가 포함된 구조로 설계되었고, 2차 PCR 프라이머는 adapter 및 index가 포함된 형태로 Nextera XT Index V2 Kit의 i7 및 i5 프라이머를

사용하였다. PCR 과정에서 비특이적 증폭 방지를 위해 TaKaRa사의 Ex Taq® Hot Start를 사용하였으며, PCR inhibitor 억제를 위해 Bovine Serum Albumin(BSA)을 추가하였다. PCR 후 정제 과정은 AMPure XP beads를 활용해 수행하였고, 정량은 Varioskan LUX로 진행하였다. 최종적으로 각 시료를 40~50 ng/μl 농도로 pooling하여 MiSeq 시퀀싱을 진행하였다. QC 과정에서는 LightCycler qPCR을 이용해 농도와 길이를 확인한 뒤 적합한 시료만 시퀀싱하였다.

시퀀싱 데이터를 기반으로 군집 분석은 DADA2를 통해 Amplicon Sequence Variant (ASV) 수준에서 진행되었으며, 박테리아 분류에는 SILVA 데이터베이스(silva_nr99_v138.1_train_set.fa.gz)를 이용하였다. 박테리아 군집 분석 결과에서는 chloroplast 및 mitochondria 관련 시퀀스를 제외하여 최종 데이터를 정제하였다.

도입 가능 지역인 폐광산의 토양 오염도에 따른 식물의 생장 특성을 분석은 갯구와 갯미 주변 및 대조구 주변에서 자생하는 7종의 식물체를 최대한 온전히 확보하여 채취한 후 초장과 건중량을 측정하였다(Nam, 2021). 초장은 지면에서부터 식물체의 정단부까지의 길이를 측정하였다. 건중량은 식물체를 지상부와 지하부로 나누어 65 °C 건조기에서 5일간 건조한 후 측정하였다.

2. 환경부 LMO 위해성평가기관 격리포장 재배환경 개선

격리포장시설 안전관리 강화를 위해 LMO 유출 방지를 위한 내외부 배수·집수시설 정비와 시설 주변 식물의 제초 관리를 연중 수행하였다. 또한 재배환경 개선을 위해 노후화된 방초포를 교체·보수하고, 시험포 내부에 관수시설을 확장하였다. 위해성평가 연구 시 원활한 종자 수급을 위해 식물채종포와 증식포를 유지, 관리하였다.

기습폭우에 따른 격리포장시설 안전관리 모니터링은 무인항공기(DJI MAVIC 2 pro; DJI, Guangdong, China)를 사용하여 항공사진을 촬영하였다(Han and Nam, 2024). 사진은 2024년 3월부터 7월까지 매월 1회 13:00~16:00 사이에 촬영하였다. UAV 비행은 지상 150 m 상공에서 수행되었고 카메라는 지상과 수직으로 유지되었다. 조사 지역 1회 촬영 시간은 약 1시간 정도 소요되었다. 촬영된 사진은 PhotoScan Professional (Agisoft LLC, St. Petersburg, Russia)을 사용하여 처리 및 편집하였다. 디지털 표고모델(Digital elevation model, DEM)을 생성한 후 정사영상 이미지를 생성

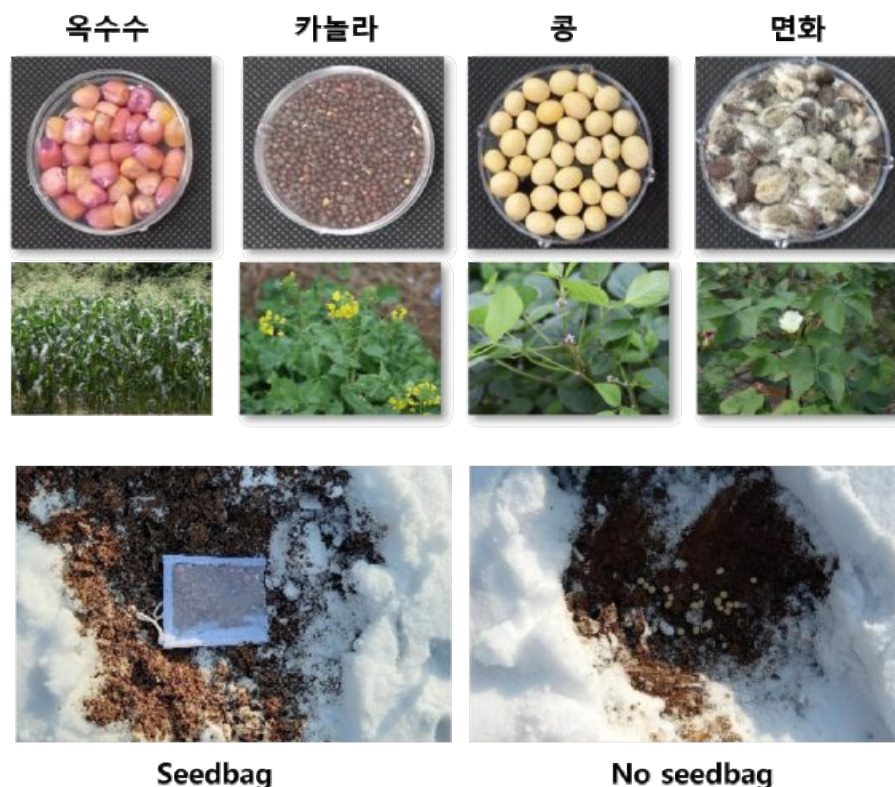
하여 국립생태원 전체 지형의 구조와 상태를 확인하였다. 집중호우로 인한 피해지역 면적 계산은 QGIS (QGIS Development Team, 3.22.9-Białowieża, Poland)를 사용하였다.

3. 국내 기후환경을 반영한 LMO 종자 월동성 검정 방법 개발

가. 의도적·비의도적 환경방출을 고려한 종자 월동성 조사

1) 국내 승인 4대 LM 작물 매물 종자의 매립 기간별 발아율 및 휴면종자 비율 검정

국내에서 수입승인이 가장 많이 이루어지는 4대 LM 작물(옥수수, 콩, 카놀라, 면화)의 비변형 작물을 대상으로 매몰된 종자의 매립 기간에 따른 발아율과 휴면종자 비율을 조사하였다(국립생태원, 2023; Nam et al., 2024a). LMO 종자가 의도적이든 비의도적이든 환경에 방출되었을 경우의 월동 가능성을 평가하기 위해, 종자를 Seedbag에 넣어 매립한 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어 실험을 진행하였다(그림 19, 20; 출처: 국립생태원, 2023).



출처: 국립생태원, 2023

그림 19. 격리포장 내 월동성 조사 종자 사진

각각의 조건에서 종자는 50 cm × 50 cm 크기의 방형구에 20립씩 배치하고, 깊이 10 cm로 매립하였다. 매립된 종자는 2주, 4주, 8주, 16주, 24주, 48주가 지난 후 회수하여 발아율을 측정하였다. 발아하지 않은 종자 중 경질 종자는 25 ℃의 배양기에서 7일간 발아를 유도하여 실내 발아율을 확인하였고, 이 과정에서도 발아하지 않은 종자는 테트라졸륨(TZ) 검사를 통해 휴면율을 분석하였다. 종자의 물리적 특성은 표 1(출처: Nam et al., 2024a)에 나타내었다.



그림 20. 겨울철 월동성 실험 시험포 사진

표 1. 월동성 실험 식물 종자의 물리적 특성

	<i>p</i> -value	카놀라	면화	콩	옥수수
Length (cm)	< 0.001	0.20 ± 0.03d	0.83 ± 0.08b	0.68 ± 0.05c	1.03 ± 0.16a
Width (cm)	< 0.001	0.18 ± 0.03c	0.43 ± 0.05b	0.63 ± 0.08a	0.61 ± 0.10a
Thickness (cm)	< 0.001	0.19 ± 0.02d	0.49 ± 0.05c	0.69 ± 0.05b	0.81 ± 0.10a
Weight (g)	< 0.001	0.24 ± 0.02c	5.10 ± 1.32b	17.87 ± 2.05a	18.69 ± 1.33a

출처: Nam et al, 2024a

실험 기간 토양온도와 토양 수분은 격리포장에 설치된 HOBO 기기 (U30-NRC-10-S100; Onset Computer Co., Pocasset, MA, USA)를 사용하여 토양 깊이 10, 20, 30, 40, 50 cm에서 측정하였다(Nam et al., 2024a). 기온과 습도 데이터는 한국 기상청(KMA 2024)의 군산 기상대(36°00′19.1″ N, 126°45′40.9″ E; 고도: 23.2 m a.s.l.)에서 획득하였다.

2) 국내 기온을 반영한 처리 온도별 종자 발아율 및 휴면율 비교 분석

국내 기온 조건을 반영한 처리 온도에 따른 종자의 발아율과 휴면율을 조사하기 위해, 페트리디쉬에 종자를 파종한 뒤 -5, -1, 5 °C로 설정된 배양기에 배치하고, 1, 2, 4, 8, 12주 동안 발아율과 휴면율을 측정하였다(그림 21; 국립생태원, 2023; Nam et al., 2024a). 사각 페트리디쉬(125 × 125 mm, SPL Life Sciences Co., Ltd., Pocheon, Korea)에 여과지(Whatman filter paper)를 깔고 종자 20립을 배치한 후 증류수 20 mL를 공급하였고, 유근의 길이가 2 mm 이상일 때 발아된 것으로 간주하여 초기 발아율을 계산하였다. 이후 남은 종자는 25 °C에서 7일간 추가로 발아시켜 최종 발아율을 측정하였다. 7일간 발아하지 않은 종자 중 온전한 종자는 TZ 검사를 통해 휴면율을 분석하였다.



그림 21. 처리 온도별 종자 검정 사진

3) 국내 강수량을 반영한 상대 습도별 종자 발아율 및 휴면율 검정

국내 강수량을 반영한 습도별 종자 월동성 평가를 위해 지난 30년간 겨울철 평균 습도 및 격리포장 겨울철 토양 수분함량을 고려하여 15%, 30%, 50%의 습도조건 하에서 4대 작물 종자의 월동성을 검정하였다. 페트리디쉬(100 × 20mm, SPL Life Sciences Co., Ltd., Pocheon, Korea)에 충분히 가열하여 식물이 가용할 수 있는 수분을 모두 제거한 토양 200 g을 채운 후 습도별 물을 공급해 주었고 4종류의 종자를 각각 20립씩 치상하였다. 월동 환경을 맞춰주기 위한 저온처리 온도는 -1 °C로 진행하였으며,

처리 기간은 1주, 4주 2가지 조건으로 진행하였다(그림 22). 1, 4주 동안의 저온 처리 후 초기 발아율을 계산하였고, 이후 정상종자를 25 ℃ 조건의 생장상으로 옮겨 7일간 발아시켜 최종 발아율을 계산하였다. 배양 7일 후 부패한 종자를 제외하고 발아되지 않은 온전한 종자를 대상으로 TZ 검사를 수행하여 휴면율을 계산하였다.



그림 22. 상대 습도별 종자 검정 사진

나. 종자 밀도가 LM 식물의 잡초화 가능성에 미치는 영향 분석

국내에 수입 승인된 LMO의 운송 또는 취급 과정 중 의도치 않게 자연 환경으로 유출되는 종자의 잡초화 가능성을 조사하기 위하여 환경정화용 LMO 후보 식물인 해바라기를 사용하여 종자 밀도에 따른 종자 생존과 번식 및 개체군의 변화를 조사하였다(Nam et al., 2024b). 실험은 격리포장 시험포 2에서 수행되었다(그림 23). 이 연구에 사용된 해바라기 품종은 표준 품종인 “재래종자”와 극왜성 품종인 “재래종3”(대농(주), 남양주, 대한민국)이었다. 총 48개의 구획이 4개의 완전 무작위 블록으로 설정되었으며, 각각 구획 크기는 1 m × 1 m와 2 m × 2 m였다. 종자는 2020년 5월에 0, 50, 100, 150개의 씨앗으로 토양에 직접 파종되었다(국립생태원, 2020). 각 구획의 내부는 자연환경과 동일하도록 해충이나 잡초 방제를 하지 않았다.



그림 23. 잡초화 가능성 조사 사진

해바라기의 발아 및 표현형 특성은 파종 후 3주 차부터 시작하여 한 달에 한두 번 측정했다. 토양 표면 위로 솟아나와 자엽을 형성한 묘목은 발아한 것으로 간주했다. 성장 특성은 파종된 씨앗의 다른 성장 단계(묘목, 성장, 개화 및 종자성숙)에서 개체 수를 세어 결정했다. 본엽 단계 이상의 식물은 파종된 종자를 구별하기 위해 개별적으로 표시했으며, 살아남아 종자가 형성한 해바라기 개체가 겨울 이후에도 개체 수를 유지하는지 관찰했다. 파종 후 4주 차에 살아남은 해바라기 식물의 성장 특성은 초장, 줄기 직경 및 꽃 길이를 측정하여 조사했다. 초장은 토양 표면 위의 가장 높은 지점에서 결정되었고 줄기 직경은 토양 표면에 가장 가까운 줄기 부분에서 측정되었다. 꽃 길이는 개화 중에 피는 첫 번째 꽃의 길이를 측정하였다. 최종 발아율이 해바라기 품종, 파종 밀도, 구획 크기에 미치는 영향은 SAS Studio(버전 3.8; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)에서 일반 선형 모델(GLM)을 사용하여 일원 분산 분석(ANOVA)을 통해 분석했다.

식생 조사는 파종 후 4주에 시작하여 한 달에 한두 번 각 구획에서 실시했다. 모든 종의 종 목록, 적용 범위, 빈도, 상대적 중요성은 실험 구획에 기록했다. 식물 종은 시각적 관찰과 National Institute of Biological Resources (NIBR, 2020)를 기반으로 식별했다. 중요도 값(IV)은 구획에서 해바라기와 잡초의 상대적 우세도를 나타내는 지표로 사용되었다. 상대적 우세도는 각 구획에서 해바라기와 야생 식물의 우세도 순위를 측정하여 얻었다. 우세도 순위는 Braun-Blanquet (Braun-Blanquet, 1964)의 중간값을 대입하여 계산했다. 상대빈도는 식물이 존재하는 구획에서 얻어서 모든

종의 빈도의 합에 대한 종의 빈도의 백분율로 계산하였다. 해바라기의 IV와 모든 잡초의 IV의 비율을 추가로 조사하여 해바라기와 잡초의 경쟁기간을 분석하였다. 조사 기간 동안 해바라기의 IV와 모든 잡초의 IV의 변화를 조사하였고, 해바라기가 전체 잡초보다 우수하거나 비슷한 수준을 보인 기간을 경쟁 기간으로 판단하였다.

4. 위해성평가용 환경정화용 LM 포플러 우성형질 선별

위해성평가용 환경정화용 LM 포플러를 개발하기 위해 납, 카드뮴과 같은 중금속 오염에 저항성을 부여하는 유전자(YCF1)를 도입한 포플러를 개발하였다. 야생형 BH 포플러(hybrid poplar; *Populus alba* × *Populus glandulosa*)에 YCF1이 발현된 아그로박테리움을 형질전환하여 캘러스 유도, 신초 재분화, 발근유도를 거쳐 순화처리를 한 LM 포플러 묘목을 얻을 수 있었다. LM 포플러 우성형질 선별을 위해 묘목 잎에서 genomic DNA를 추출하고 PCR을 통해 목표 유전자가 증폭됨을 검증하였다.

가. Genomic DNA 추출

Genomic DNA 추출은 포플러 잎을 homogenizer로 파쇄한 후 식물핵산 추출장치(Nucleic acid Extractor NP968-S)와 핵산추출키트(plant tissue genomic DNA extraction kit; Xi'an Tianlong Science & Technology, 중국)를 이용하여 제조사의 프로토콜에 따라 진행하였다. 식물잎 100 mg 샘플링하여 e-tube에 넣고 homogenizer로 파쇄한 후 REAG2 버퍼 400 µL와 REAG3 버퍼 60 µL를 넣고 65 °C incubator에서 30분간 회전시키면서 섞어 주었다. 12,000 rpm, 10분간 원심분리 후 상등액을 96 deep well plate의 1번과 7번 column에 넣고 Ribonuclease A 20 µL를 3번과 9번 column에 넣어주었다. 샘플이 들어있는 96 deep well plate는 식물핵산추출장치에 넣고 mixing sleeve를 holder에 꽂아주고 식물핵산추출 매뉴얼에 따라 작동시킨 후 6번과 12번 column의 genomic DNA를 nano-drop으로 정량하였다.

나. PCR 및 염기서열 분석

목표 유전자 증폭에 필요한 PCR은 BioFACTTM 2xLamp Taq PCR Pre-Mix(LT402, 바이오팩트, 한국)를 사용하여 진행했다. 2xLamp Taq

PCR Pre-Mix 15 μ l, genomic DNA (100 ng/ μ l) 1 μ l, *YCF1* Forward 프라이머 (10 pmol/ μ l) 1 μ l, *YCF1* Reverse 프라이머 (10 pmol/ μ l) 1 μ l, 증류수 12 μ l를 섞어 준비하였다. PCR 반응 조건은 95 $^{\circ}$ C에서 5분간 initial denaturation, 95 $^{\circ}$ C에서 30초 denaturation, 58 $^{\circ}$ C에서 30초 annealing, 72 $^{\circ}$ C에서 1분 extension 과정을 35 cycle 반복하여 증폭한 후 72 $^{\circ}$ C에서 10분간 final extension을 진행하였다. PCR 산물은 2% agarose gel에 전기영동하여 Chemi-DocTM XRS(바이오라드, 미국)을 이용하여 확인하였다. PCR에 사용한 *YCF1* 특이적 프라이머는 표 2에 나타내었다. 예상 사이즈의 PCR 밴드를 확인한 후, (주)바이오팩트에 의뢰하여 염기서열 분석을 수행하였다.

표 2. *YCF1* 유전자 발현 확인을 위한 프라이머 정보

프라이머 이름	프라이머 서열(5'→3')
YCF1F_RT	CATGAGTGCGTTCTATCCCTCTAT
YCF1R_RT	CCACCTTCGGTTAGTTGGGCATCT

다. RNA 추출 및 cDNA 합성, qRT-PCR

LM 포플러의 *YCF1* 발현량을 검증하기 위해 신초와 순화처리 된 묘목의 잎을 샘플링하여 RNA를 추출하고 cDNA 합성을 진행하였다. RNA 분리는 TRIzol (Ambion, 미국)과 QIAGEN RNeasy kit (Qiagen, 미국)를 사용하여 진행하였다.

RNA 분리를 위해 식물잎 100 mg 샘플링하여 2ml tube에 넣고 metal bead로 1차적으로 파쇄하였다. 1차 세포벽 파쇄 이후, Trizol reagent 1ml을 넣고 피펫팅 후 12,000 rpm, 10분간 원심분리 후 상등액을 새 e-tube에 옮겼다. 추가적으로 순도를 높이기 위해 QIAGEN RNeasy kit를 사용하여 정제를 진행하였다. RLT 버퍼 450 μ l를 넣고 vortex 후 QIAshredder spin column이 들어있는 2 ml tube에 옮기고 12,000 rpm, 2 분 간 원심분리 하였다. 상등액을 새로운 e-tube에 옮겨 담고 0.5 volume 100% ethanol을 넣고 피펫팅 후 RNeasy Mini spin column이 들어있는 2 ml tube에 옮긴 후 10,000 rpm, 15초간 원심분리하였다. flow-through는 제거하고 RW1 버퍼 700 μ l를 넣고 10,000 rpm, 15초간 원심분리하였다. flow-through는 제거하고 RPE 버퍼 500 μ l를 넣고 10,000 rpm, 15초간 원심분리하였다. flow-through는 제거하고 RPE 버퍼 500 μ l를 넣고 10,000 rpm, 2분간

원심분리하였다. RNeasy spin column을 새로운 tube에 넣고 membrane을 건조시키기 위해 12,000 rpm, 1분간 원심분리하였다. RNeasy spin column을 새로운 tube에 넣고 RNase-free water 30 µl을 membrane에 넣고 10,000 rpm, 1분간 원심분리하여 RNA를 추출하였다.

cDNA는 분리한 total RNA와 GoStripreverse transcription system (Promega, 미국)을 이용하여 합성되었다. cDNA 합성을 위해 PCR tube에 25 mM MgCl₂ 4 µl, Reverse Transcription 10X Buffer 2 µl, 10 mM dNTP Mixture 2 µl, Ribonuclease Inhibitor 0.5 µl, AMV Reverse Transcriptase 1 µl, Oligo(dT)15 primer 1 µl, total RNA 200 ng mixture에 Nuclease-Free water를 넣어서 총 20 µl로 맞춘 후 PCR 기계로 42 °C에서 60 분, 95 °C에서 5 분, 4 °C에서 5분간 반응시킨 후 합성된 cDNA를 획득하였다.

표 3. 상대적인 *YCF1* 유전자 발현량 검증을 위한 프라이머 정보

프라이머 이름	프라이머 서열(5'→3')
YCF1F_qRT	GAACCATGAACGGTGGCGAA
YCF1R_qRT	ATGGCAACGGAACCGGAAT
Actin F-qRT	GCCATCTCTCATCGGAATGGAA
Actin R-qRT	AGGGCAGTGATTCCTTGCTCA

상대적인 *YCF1* 발현량을 검증하기 위해 필요한 포플러 내재유전자를 선별하기 위해 웹서버 기반 발현검증 내재유전자 후보 리스트를 선정하였다. 주로 사용하는 내재유전자로 *Actin*을 선별하였고, 프라이머 제작을 위한 서열을 웹서버에서 확인하였다. qRT-PCR에 사용한 *YCF1* 특이적 프라이머와 포플러 내재유전자 *Actin* 특이적 프라이머는 표 3에 나타내었다.

LM 포플러 내 *YCF1*의 상대적인 발현량을 확인하기 위해 CFX Connect Real-Time System (BioRad, 미국)을 이용해 qRT-PCR을 수행하였다. cDNA 합성을 위해 2xSYBR Green mix 10 µl, cDNA (100 ng/µl) 1 µl, *YCF1* / *Actin* Forward 프라이머 (10 pmol/µl) 1 µl, *YCF1* / *Actin* Reverse 프라이머 (10 pmol/µl) 1 µl, 증류수 7 µl를 섞어 준비하였다. PCR 반응 조건은 95 °C에서 15분간 initial denaturation, 95 °C에서 20 초 denaturation, 60 °C에서 30 초 annealing, 72 °C에서 20 초 extension 과정을 44 cycle 반복하여 증폭한 후 72 °C에서 1분간 final extension을 진행하였다.

라. 환경정화용 LM 포플러 생물학적 특성 분석

형질전환부터 순화처리까지 LM 포플러 개체별 생장 차이를 고려하여 생물학적 특성을 분석하였다. 순화처리가 완료된 LM 포플러 묘목을 대상으로 초장, 잎의 길이 및 잎 모양과 같은 주요 생물학적 특성을 평가하였으며, 이를 통해 LM 포플러의 기본 생장을 파악하였다. LM 포플러의 생장 표현형은 순화처리 전 식물생장 배지와 순화처리 후 식물생장조절실에서 관찰하였으며, 줄기 길이의 생장과 잎 형성 과정이 정상적으로 진행됨을 확인하고자 하였다. 또한, 배양실 내 환경을 계절과 유사하게 유지하고자 하였고 빛과 온도 조건도 동일시하였다. 이 연구는 향후 비변형 포플러와 LM 포플러의 생물학적 특성을 비교 분석하여 LMO법 통합고시 별표 10-1 유전자변형식물의 위해성평가 중 ⑧유전자변형생물체와 비변형생물체의 비교자료와 ⑨세부 위해 영향 자료로 사용될 예정이다. 세부적으로 통합고시 별표 10-1 ⑧유전자변형생물체와 비변형생물체의 비교자료 다) 숙주 또는 숙주가 속하는 생물종과의 차이점 (1) 자연환경 또는 자연환경을 반영하는 시험 조건하의 생존 및 생식·번식 능력 및 ⑨세부 위해 영향 자료 나) 주변 생물 및 생태계에 미칠 수 있는 영향에 관한 평가 자료로 사용될 예정이다.

추가적으로, 자연생태계 환경방출실험을 위해 LM 포플러를 격리포장에 방출하여 환경정화용 LM 포플러의 위해성평가 지침을 개발하기 위해 LM 포플러를 삼목 번식하여 개체수를 유지하고자 한다.

5. LM 목본류 자연생태계 위해성평가 환경 조성

국내외 LMO 목본류의 동향은 참고문헌을 토대로 분석하였으며, 평가항목 및 평가방법은 국내 법안을 참조하여 분석하였다. LM 목본류 자연생태계 위해성평가 시험포 모델은 환경부 LMO 위해성평가기관 내 격리포장을 기준으로 하였다.

6. LM 목본류의 위해성평가 방법 개발

가. 토양 오염도별 포플러 형질 특성 분석

LM 목본류의 위해성평가 방법 개발을 위해 중금속으로 오염된 토양과 오염되지 않은 토양에서 자란 포플러의 형질 특성을 조사하였다. 실험에 사용된 포플러는 2019년 국립산림과학원으로부터 분양받아 격리포장에

식재한 환경정화용 LM 포플러의 모본으로(그림 24), 일반 포플러와 비교하여 카드뮴을 5배 많이 흡수하는 특성이 있다(국립생태원, 2019).



그림 24. 격리포장에 식재된 포플러

생장 상태가 양호한 포플러 줄기를 선별하여 잎을 제거한 후 1개체에 마디가 7개가 되는 길이가 되도록 줄기의 위, 아래를 비스듬하게 잘라주었다(그림 25).



그림 25. 삼목할 포플러 준비 과정

전처리한 포플러는 개체별로 카드뮴 20 ppm이 처리된 토양과 카드뮴이 처리되지 않은 토양 300 mL가 담긴 80개(카드뮴 처리구 40개, 대조구 40개)의 플라스틱 용기에 삼목한 후 물 50 mL를 주입하였다. 이후 플라스크의 뚜껑을 닫아준 후 생장상(온도: 25 °C, 일장: 12h Light/12h Dark)에서 6주간 생장시키며 표현형을 조사하였다(그림 26).

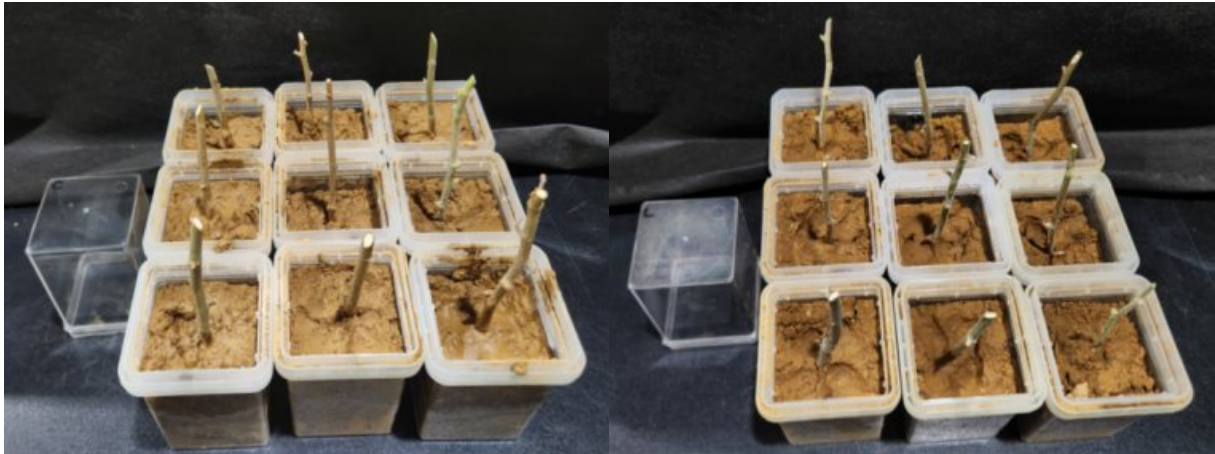


그림 26. 토양 오염도별 포플러의 표현형 검증 과정

표현형은 생장 단계에 따라 캘러스 또는 잎눈, 잎의 생장 반응 없이 삼목 시 상태를 그대로 유지하고 있는 생장 반응이 없는 개체(Non-growth)와 캘러스 또는 잎눈을 형성한 개체(Callus or leaf bud), 잎눈에서 잎이 형성된 개체(Leaf) 등 3개의 단계로 구분하였다. 잎이 형성된 개체는 개체별로 길이가 가장 긴 잎을 선정하여 길이도 함께 조사하였다.

나. 오염환경 내 포플러의 생장 및 대사경로에 미치는 영향 분석

오염환경이 포플러의 생장과 대사경로에 미치는 영향 분석을 위해 카드뮴 20 ppm이 처리된 토양과 카드뮴이 처리되지 않은 토양에서 자란 포플러의 대사산물을 분석하였다(국립생태원, 2023). 포플러 시료는 동결건조한 후 대사산물을 추출, 정제한 후 트리메틸실릴(trimethylsilyl, TMS)를 사용하여 유도체화 다음 GC-MS로 분석하였다. 그 후 NIST, Chenomx 등을 이용하여 정성 분석한 후 pattern recognition, data normalization, 등 데이터를 도출하였다.

카드뮴 20 ppm이 처리된 토양과 카드뮴이 처리되지 않은 토양에서 자란 포플러 내 대사산물 변화 양상은 주성분(principal component analysis,

PCA)분석과 부분최소자승 판별분석(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)을 MetaboAnalyst (www.metaboanalyst.ca)에서 실시하였고, 토양 내 카드뮴 농도가 포플러의 대사산물의 변화에 미치는 영향은 Heatmap을 작성하여 결과를 시각화하고 VIP score 분석을 수행하였다 (국립생태원, 2023).

III. 연구결과

1. 환경정화용 LMO 환경방출 안전관리 지원체계 마련

가. 격리포장 식물상 및 식생 변화 조사 방법(안) 제시

환경정화용 LM 식물을 격리포장시설에서 활용하여 환경방출실험을 진행할 경우, LMO법 제26조의2(유전자변형생물체로 인한 환경영향 등의 조사)에 따라 LMO가 환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 주변 환경 조사를 수행할 수 있다. 이러한 조사의 목적은 LMO가 격리포장시설을 벗어나 다른 지역으로 확산될 가능성을 사전에 예측하고, 이를 방지하기 위한 대책을 마련하는 데 있다. 특히, 방출된 LMO가 생물다양성에 영향을 주거나 생태계에 부정적인 변화를 초래할 가능성을 확인하고 예방하는 것이 중요하다. 따라서 유출된 LM 식물이 주변 식물상과 식생에 영향을 미쳤는지를 식물상과 식생 변화 조사 후 우점종의 변화와 종풍부도, 종균등도, 다양성지수 등 생물다양성의 변화 관찰을 통해 분석할 수 있다.

격리포장 식물상 및 식생 변화 조사 방법(안)을 제시하기 위해 2020년부터 시행한 내외부 식물상 및 식생 변화를 조사한 결과 식물상과 식생 변화는 거리별, 계절별, 연도별로 수행하며, 특히 고정조사구를 선정하여 지속적으로 변화 양상을 관찰하는 것을 권장한다(그림 27, 그림 28).

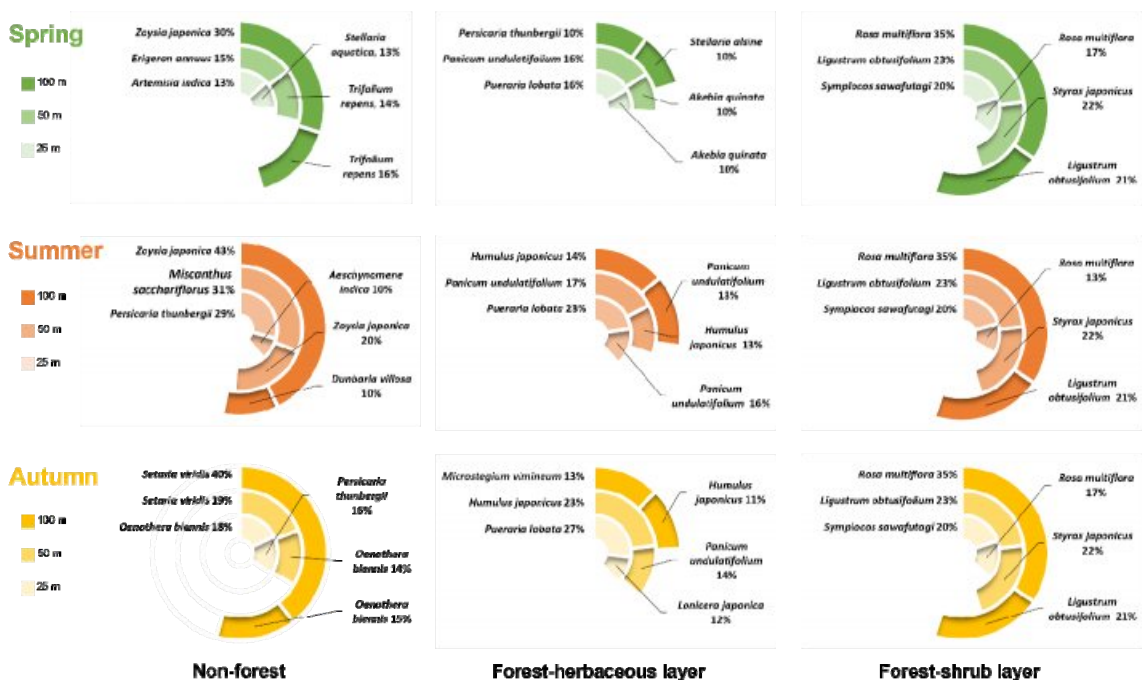


그림 27. 격리포장 계절별 및 거리별 식물상 변화 조사 결과 예시



그림 28. 격리포장 연도별 식물상 변화 조사 결과 예시

나. 격리포장 환경·공간정보 통합 DB 구축 기준 마련

격리포장 환경·공간정보 통합 DB 구축 기준을 마련하기 위하여 다음과 같은 기초 자료를 조사하였다. 격리포장 내외에서 조사된 데이터를 정리하고, 연결할 수 있는 자료를 조사했다. 요약된 데이터들은 크게 식물상 및 식생중요치와 같은 생물 데이터와 환경 데이터로는 기상, 토양 성분이 있었다. 이러한 데이터들의 공간정보로는 매일 촬영된 항공사진을 통해 제작된 정사 영상과 조사지의 GPS 좌표가 있었다. 해당 데이터들은 항목별로 필드화시켜 중첩되거나 연결할 수 있는 필드를 시각화하였다. 구성된 테이블을 정리하여 하나의 데이터로 구축하였고 완성된 DB는 QGIS에서 정사영상과 객체 분할된 폴리곤에서 각각의 데이터를 호출하였다. 그 결과 식생우점도, 토양 물리적 성질, 조사일의 기온 등을 불러올 수 있었다 (그림 29).

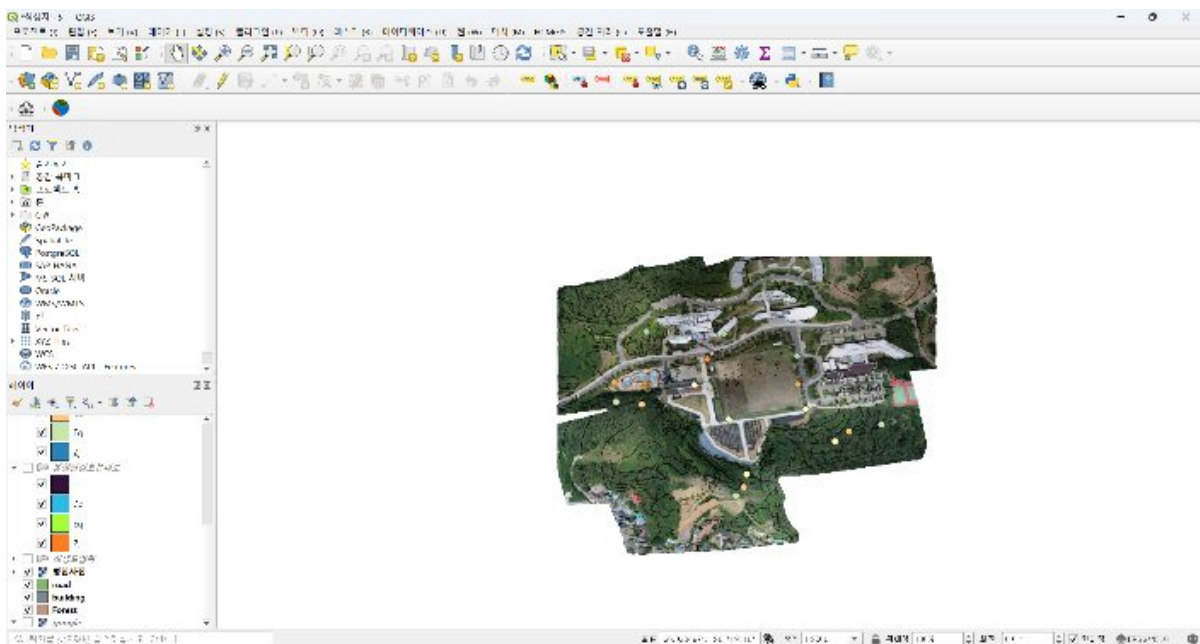


그림 29. 격리포장 환경·공간정보 통합 DB 구축 일부

다. 환경방출에 따른 주변 환경 영향조사 방법 개발

1) 국내 환경정화용 LMO 환경방출 도입 가능 지역 분석

환경방출에 따른 주변 환경 영향조사 방법을 개발하기 위해 향후 환경정화용 LMO가 도입될 가능성이 높은 국내 환경방출 가능 지역을 조사하였다. 환경오염물질을 감소, 제거시키거나 오염된 환경을 복원하는 목적으로 사용되는 환경정화용 LMO는 국내의 오염된 토양을 비롯하여 강, 호수, 바다, 대기 중에 적용될 수 있다. 따라서 중금속과 휘발성 유기화합물 등 독성물질이 축적되어 있을 가능성이 높은 폐광산, 폐석산, 쓰레기 매립장, 소각장 및 폐공장 주변을 조사하였다(그림 30).



폐석산 주변



쓰레기 매립장 주변



소각장 주변



폐공장 주변

그림 30. 국내 환경정화용 LMO 환경방출 도입 가능 지역 사진

오염지 주변의 토양 내 중금속 함량은 표 4에 나타내었다. 쓰레기 매립장 주변 토양은 납 함량이 토양오염 우려기준을 초과한 555.0 mg/kg으로 분석되었고, 소각장 주변 토양은 아연 함량이 토양오염 우려기준을 초과한 432.2 mg/kg이었다. 폐공장 주변 토양은 구리 함량이 토양오염 우려기준을 초과한 578.6 mg/kg으로 확인되었다.

표 4. 국내 환경정화용 LMO 환경방출 도입 가능 지역 토양 내 중금속 함량(mg/kg)

	비소	카드뮴	구리	니켈	납	아연
폐석산 주변	2.70-7.9	0.42-0.49	11.8-20.7	4.5-8.0	9.3-13.5	51.3-104.5
매립장 주변	3.80-9.33	0.44-1.21	6.3-61.2	4.0-16.1	10.4-555.0	68.9-90.5
소각장 주변	2.61	0.74	21.5	14.9	26.2	432.2
폐공장 주변	3.27-4.00	1.01-1.08	489.4-578.6	8.6-11.2	4.3-7.7	87.9-93.1

한편, 폐공장 주변 오염지에서 미생물 다양성 사전 조사를 수행하였다. 조사는 오염이 가장 심각한 지역을 중심으로 이루어졌으며, 현장에서 진한 검은색 토양과 강한 악취가 동반된 유출수가 확인되었다. 이는 토양 내 유기물 및 화학적 오염물질이 축적되어 혐기성 조건이 형성되었음을 시사한다.

군집 분석 결과, 총 2,095개의 ASV가 확인되었다. 본 연구에 사용된 프라이머 세트인 341F-805R은 주로 박테리아(Bacteria)를 타겟으로 설계되어, 일반적으로 고세균(Archaea)으로 분류되는 ASV는 분석 과정에서 제거되는 경향이 있다. 그러나 본 연구에서는 분석 결과 고세균에 해당하는

ASV의 비중이 전체의 14%에 달하며, 이는 기존의 박테리아 중심의 프라이머 적용 범위를 넘어선 결과로 주목할 만하다. 이러한 고세균의 높은 비율은 부여 오염지의 특수한 환경적 요인, 특히 혐기적 조건과 화학적 스트레스에 의해 영향을 받았을 가능성을 시사한다. 이에 따라 고세균 ASV를 제거하지 않고, 원핵생물(Prokaryote) 전체 관점에서 군집 구조를 통합적으로 분석하였다. 문(Phylum) 수준에서 Firmicutes (21%), Halobacterota (Archaea, 13%), Desulfobacterota(11%)가 주요 우점 분류군으로 나타났다(그림 31). 이는 일반적으로 Proteobacteria, Bacterioidetes, Actinobacteria, Acidobacteria와 같은 분류군이 우점하는 일반적인 토양 생태계와는 현저히 다른 분포를 보여준다.

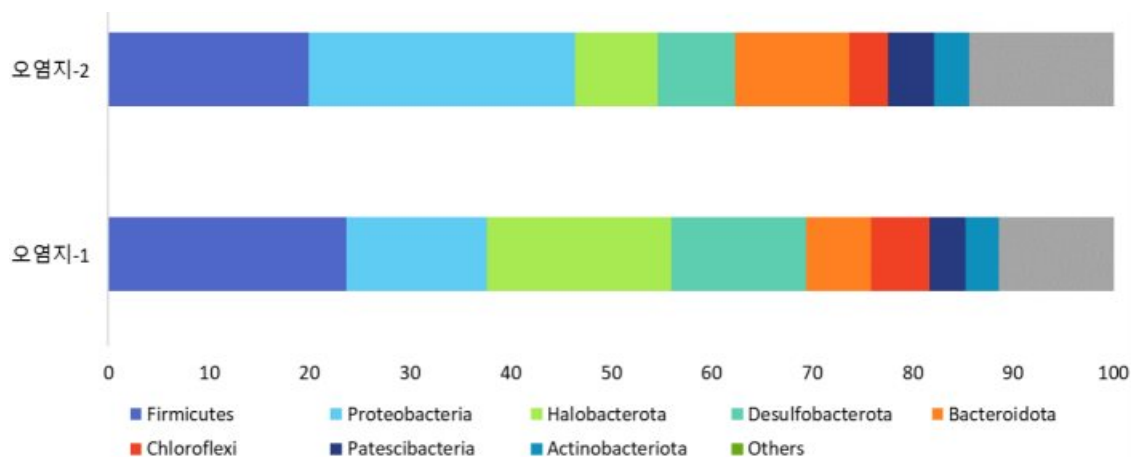


그림 31. 폐공장 주변 오염지 박테리아 문(Phylum)

속(Genus) 수준에서는 *Methanosarcina* (6.9 - 12.0%), *Methanosaeta* (0.7 - 5.4%)와 같은 메탄 생성 고세균이 주요 미생물 속으로 확인되었으며, *Desulfobulbus* (2.9 - 5.8%), *Desulfomicrobium* (1.5 - 1.8%), *Desulfococcus* (0.3 - 1.3%)와 같은 황산염 환원 세균도 다수 검출되었다(그림 32, 표 5). 이러한 미생물은 주로 혐기성 환경에서 서식하며, 유기물 분해 과정에서 메탄(CH_4)과 황화수소(H_2S)를 생성하는 것으로 알려져 있다. 특히 황화수소는 오염지에서 확인된 강한 악취의 주요 원인 중 하나로 판단된다.

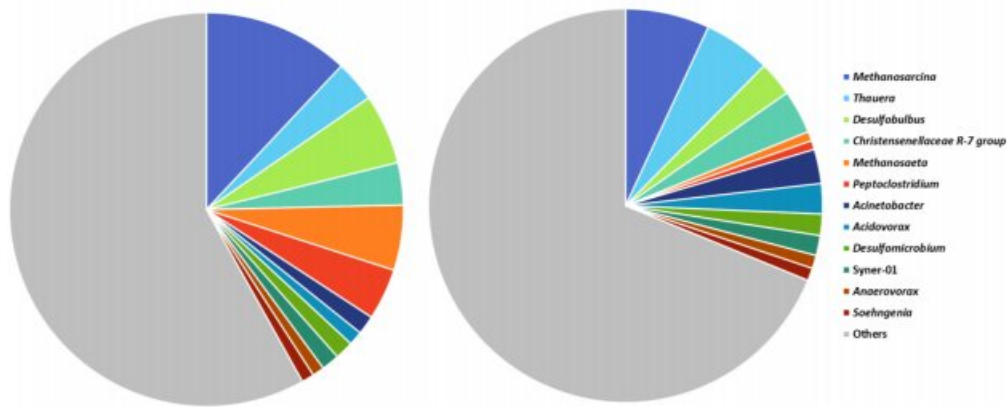


그림 32. 폐공장 주변 오염지 박테리아 속(Genus)

또한, *Acetoanaerobium*, *Syntrophomonas*, *Ercella*와 같은 유기물 분해 세균도 다수 검출되었으며, 이들 미생물은 메탄 생성 고세균과 공생적으로 작용하며 지방산 및 유기산을 분해하는 역할을 한다. *Gemmobacter*와 *Paracoccus*는 질소 화합물의 대사에 관여하며, 오염지 내 질산염 및 아질산염과 같은 화합물이 존재할 가능성을 시사하였다. 그 외에도 *Pseudarcobacter*와 *Trichloromonas*와 같은 유기 및 염소계 화합물 분해 미생물이 검출되어, 해당 지역이 특정 화학적 오염물질의 영향을 받았음을 나타냈다. *Erysipelothrix*는 일반적으로 동물성 유기물과 연관된 환경에서 발견되는 미생물로, 오염지 유출수가 동물성 부산물과 관련되었을 가능성을 제기한다.

이와 같은 분석 결과는 폐공장 주변 오염지가 복합적인 화학적 및 생물학적 스트레스를 받고 있으며, 일반적인 토양 생태계와는 현저히 다른 생물학적 특성을 보이고 있음을 보여준다. 특히, 메탄 생성 및 황산염 환원 미생물의 높은 비율은 혐기적 환경에서의 유기물 분해가 주요 대사 경로로 작용하고 있음을 나타낸다. 이는 환경정화용 LMO가 방출될 경우, 해당 지역에서 기존 미생물 군집과의 상호작용이 중요할 수 있음을 시사한다.

본 연구는 환경정화용 LMO의 방출 가능 지역을 평가하는 과정에서 오염지 특성을 사전 조사한 예비 연구로, 향후 오염지 복원 및 생태적 위해성 평가에 중요한 기초 자료를 제공할 것이다. 추가 연구에서는 유출수와 토양 내 오염물질의 정량 분석과 함께, 환경정화용 LMO와 미생물 군집 간의 상호작용을 실험적으로 검증하여 생태계 안전성을 평가하고 환경정화용 LMO의 위해성평가 및 안전관리를 위한 전략을 수립할 계획이다.

표 5. 우점 ASV 평균 상대풍부도 및 분류학적 계통

ASVs	Relative abundance (%)	Taxonomy
ASV0001	10.9	<i>Archaea; Halobacterota; Methanosarcinia; Methanosarcinales; Methanosarcinaceae; Methanosarcina</i>
ASV0002	5.0	<i>Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Peptostreptococcales-Tissierellales; Peptostreptococcaceae; Peptoclostridium</i>
ASV0003	4.3	<i>Archaea; Halobacterota; Methanosarcinia; Methanosarcinales; Methanosarcinaceae; Methanosarcina</i>
ASV0004	3.7	<i>Bacteria; Desulfobacterota; Desulfobulbia; Desulfobulbales; Desulfobulbaceae; Desulfobulbus</i>
ASV0005	3.5	<i>Archaea; Halobacterota; Methanosarcinia; Methanosarcinales; Methanosaetaceae; Methanosaeta</i>
ASV0006	2.9	<i>Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Burkholderiales; Rhodocyclaceae; Thauera</i>
ASV0007	2.8	<i>Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Burkholderiales; Comamonadaceae; Acidovorax</i>
ASV0008	2.2	<i>Bacteria; Desulfobacterota; Desulfobulbia; Desulfobulbales; Desulfobulbaceae; Desulfobulbus</i>
ASV0009	2.0	<i>Bacteria; Chloroflexi; Anaerolineae; Anaerolineales; Anaerolineaceae; NA</i>
ASV0010	1.8	<i>Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Pseudomonadales; Moraxellaceae; Acinetobacter</i>
ASV0011	1.8	<i>Bacteria; Firmicutes; Clostridia; Peptostreptococcales-Tissierellales; Peptostreptococcaceae; Acetoanaerobium</i>
ASV0012	1.8	<i>Bacteria; Proteobacteria; Alphaproteobacteria; Rhodobacterales; Rhodobacteraceae; Gemmobacter</i>
ASV0013	1.5	<i>Bacteria; Chloroflexi; Anaerolineae; Anaerolineales; Anaerolineaceae; NA</i>
ASV0014	1.2	<i>Bacteria; Proteobacteria; Gammaproteobacteria; Burkholderiales; Rhodocyclaceae; Thauera</i>
ASV0015	1.2	<i>Bacteria; Patescibacteria; Parcubacteria; Candidatus Moranbacteria; NA; NA</i>

2) 도입 가능 지역의 근연종 종류 및 분포 조사

국내 환경정화용 LMO 도입 가능 지역의 식물 종류 및 분포를 알아보기 위하여 2019년 중금속으로 오염된 폐광산에서 조사한 서식 식물 종들의 특성을 더욱 상세하게 분석하였다(그림 33; 출처: Nam, 2024). 본 연구의 결과는 한국자원식물학회지에 게재되었다(Nam, 2024). 폐광산 토양의 중금속 농도는 갯구(Site A) 토양의 비소와 아연 함량이 각각 435.3 mg kg⁻¹, 191.1 mg kg⁻¹, 갯미(Site B) 토양의 비소와 아연 함량은 각각 12,686.1 mg kg⁻¹, 2,042.2 mg kg⁻¹ 인 반면 대조구(Site C) 토양의 비소와 아연 함량은 각각 36.0 mg kg⁻¹, 103.8 mg kg⁻¹ 이었다(Chun et al., 2021; Nam, 2024).

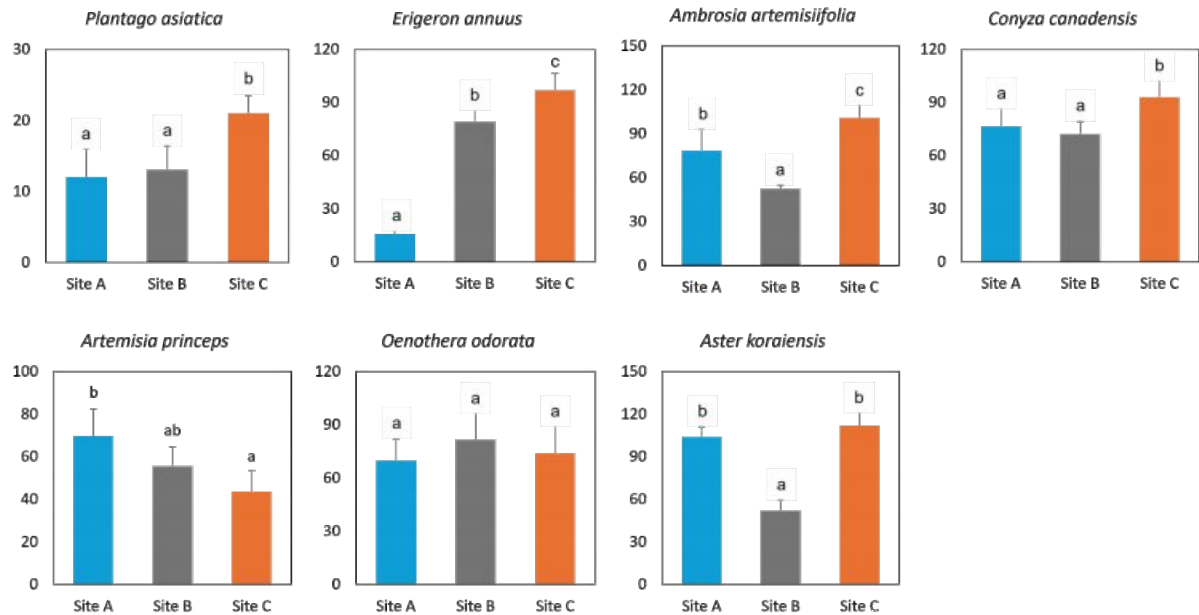


출처: Nam, 2024

그림 33. 폐광산에서 식물 조사 지역. Site A, 갯구; Site B, 갯미, Site C, 대조구

폐광산에서 자생하며 중금속 축적능이 높은 7종(개망초, 망초, 쭉, 벌개미취, 질경이, 돼지풀, 달맞이꽃) 식물의 생장 특성을 비교 분석한 결과 달맞이꽃을 제외한 대부분의 식물 초장이 토양오염도에 따라 크게 달랐다(그림 34; 출처: Nam, 2024). 중금속 농도가 높은 갯구와 갯미 토양에서 자란 질경이의 초장은 오염되지 않은 토양에서 자란 질경이보다 각각 42.9%, 38.1% 작았다. 갯구와 갯미 토양에서 자란 망초의 초장은 오염되지 않은 토양에서 자란 망초보다 각각 17.8%, 22.6% 작았다. 개망초의 초장은 갯구에서 자란 식물체에서 83.9% 감소한 반면 돼지풀은 갯미에서 자란 식물체에서 48.2% 감소하였다. 벌개미취의 초장은 오염되지 않은 토양에서 자란 식물체와 갯구에서 자란 식물체 간에는 차이가 없었으나 갯미에서 자란 식물체에서는 53.7% 감소하였다. 반면, 쭉의 경우 갯구와 갯미에서 자란 식물체의 초장이 오염되지 않은 토양에서 자란 식물체보다 컸으며,

특히 갯구에서 자란 쑥의 초장은 59.6% 더 증가하였다.



출처: Nam, 2024

그림 34. 폐광산에서 자생하는 식물 종의 초장 비교. Site A, 갯구; Site B, 갯미, Site C, 대조구

토양오염도에 따른 식물체의 건중량 변화를 비교 분석한 결과 질경이와 망초, 쑥, 달맞이꽃, 벌개미취의 지상부 건중량은 중금속으로 오염된 토양에서 자란 식물체와 오염되지 않은 토양에서 자란 식물체 간에 차이가 없었다(표 6; 출처: Nam, 2024). 개망초의 경우 갯미에서 자란 식물체는 오염되지 않은 토양에서 자란 식물체보다 지상부 건중량이 127.4% 더 증가하였다. 반면, 돼지풀의 지상부 건중량은 오염되지 않은 토양에서 자란 식물체와 비교하여 갯구와 갯미에서 자란 식물체에서 각각 42.0%, 91.0% 감소하였다. 지하부의 건중량은 조사된 모든 식물에서 토양오염도에 따른 통계적 유의차가 없었다. 토양오염도에 따른 지상부와 지하부의 건중량 비율은 개망초에서 통계적 유의차를 보였고, 갯구에서 자란 식물체의 지상부와 지하부의 건중량 비율은 오염되지 않은 토양에서 자란 식물체의 지상부와 지하부의 건중량 비율보다 53.0% 감소하였다.

중금속 스트레스는 식물 생장에 중요한 효소와 단백질들을 불활성화하거나 광합성, 호흡과 같은 대사 반응을 변화시켜 성장을 방해한다고 알려져 있다(Ghori et al., 2019; Hossain et al., 2012). 따라서 중금속에

노출된 식물은 성장이 둔화되고 바이오매스 생산이 감소하여 결국 수확량이 줄어든다. 본 연구에서는 비소가 토양환경보전법상의 토양오염우려기준을 8.7배 초과한 갯구(Site A) 토양에서 자란 식물과 비소와 아연의 토양오염우려기준을 각각 253.7배, 3.4배 초과한 갯미(Site B) 토양에서 자란 식물을 오염되지 않은 대조구(Site C) 토양에서 자란 식물과 비교하였을 때 대부분의 식물 초장은 오염환경에서 감소하였으나 건중량은 돼지풀을 제외하고는 크게 감소하지 않는 것으로 확인되었다. 특히 갯구와 갯미에서 자란 개망초의 초장은 대조구 초장의 0.16배, 0.81배였으나, 지상부 건중량은 대조구보다 1.2배, 2.3배 더 증가하는 것으로 나타났다. 오염지의 환경복원을 위해 사용되는 식물은 오염물질의 분해능과 축적능이 뛰어나야 할 뿐만 아니라 바이오매스 생산량이 높아야 하며, 특히 지상부 건중량이 높을 때 경제적으로 더 유리하다고 보고된 바 있다(Kwon et al., 2019; Martínez et al., 2006). 따라서 해바라기와 벌개미취, 왕갯쭉부쟁이와 같은 국화과 식물들의 이용가치가 높게 평가되어 왔다(January et al., 2008; Kwon et al., 2019). 본 연구에서는 개망초, 벌개미취, 쭉 등의 국화과 식물을 비롯하여 달맞이꽃이 중금속으로 오염된 환경에서도 생육이 양호한 것으로 확인되었다.

본 연구의 결과는 국내의 오염지 복원 및 생태적 위해성 평가에 중요한 기초 자료로 사용될 뿐 아니라 향후 생태계 안전성을 평가하고 환경정화용 LMO의 위해성평가 및 안전관리를 위한 전략 수립 시 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

표 6. 폐광산에서 자생하는 식물 종의 건조량 비교

	Shoot dry weight (g)				Root dry weight (g)				Shoot/Root ratio			
	<i>p</i> -value	Site A	Site B	Site C	<i>p</i> -value	Site A	Site B	Site C	<i>p</i> -value	Site A	Site B	Site C
<i>Plantago asiatica</i>	ns	5.55 ± 2.49 ^a	2.35 ± 1.48 ^a	4.01 ± 1.58 ^a	ns	1.80 ± 0.91 ^a	0.62 ± 0.29 ^a	1.32 ± 1.02 ^a	ns	3.69 ± 1.76 ^a	3.91 ± 1.75 ^a	3.98 ± 2.06 ^a
<i>Erigeron annuus</i>	**	1.29 ± 0.23 ^a	2.54 ± 0.70 ^b	1.12 ± 0.53 ^a	ns	0.30 ± 0.16 ^a	0.30 ± 0.15 ^a	0.11 ± 0.07 ^a	**	4.80 ± 1.46 ^a	9.39 ± 3.11 ^b	10.2 ± 1.94 ^b
<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	***	4.17 ± 2.29 ^b	0.65 ± 0.23 ^a	7.19 ± 2.25 ^c	ns	1.13 ± 1.42 ^a	0.07 ± 0.04 ^a	1.11 ± 0.45 ^a	ns	6.96 ± 4.48 ^a	10.7 ± 2.55 ^a	6.79 ± 1.41 ^a
<i>Conyza canadensis</i>	ns	2.83 ± 1.13 ^a	2.55 ± 0.98 ^a	4.12 ± 1.43 ^a	ns	0.65 ± 0.25 ^a	0.42 ± 0.20 ^a	0.70 ± 0.26 ^a	ns	4.60 ± 1.57 ^a	6.50 ± 1.39 ^a	6.05 ± 1.57 ^a
<i>Artemisia princeps</i>	ns	4.66 ± 1.95 ^a	3.16 ± 0.30 ^a	3.50 ± 1.23 ^a	ns	1.68 ± 1.27 ^a	1.12 ± 0.60 ^a	1.24 ± 0.23 ^a	ns	3.28 ± 1.30 ^a	3.59 ± 1.99 ^a	3.00 ± 1.51 ^a
<i>Oenothera odorata</i>	ns	2.50 ± 1.05 ^a	4.78 ± 1.44 ^a	4.79 ± 2.19 ^a	ns	0.40 ± 0.33 ^a	0.89 ± 0.41 ^a	0.58 ± 0.44 ^a	ns	8.00 ± 3.41 ^a	6.23 ± 3.22 ^a	10.1 ± 3.41 ^a
<i>Aster koraiensis</i>	ns	8.48 ± 2.87 ^a	9.00 ± 4.36 ^a	10.2 ± 5.42 ^a	ns	1.77 ± 0.89 ^a	1.87 ± 0.90 ^a	1.43 ± 0.54 ^a	ns	5.24 ± 1.22 ^a	4.84 ± 0.34 ^a	7.14 ± 2.65 ^a

Samples were collected from mine entrance (Site A), mine tailing area (Site B), and control area (Site C). Data are means ($n = 5$) ± standard deviations. P-values are based on one-way ANOVA tests. Values within rows followed by the same letters are not significantly different at $p < 0.05$ per Duncan's test.

출처: Nam, 2024

3) 환경정화용 LMO 환경방출 안전관리 가이드라인 발간

환경정화용 LMO 환경방출 안전관리 지원체계 마련을 위해 이상과 같이 격리포장 식물상 및 식생 변화 조사 방법(안)을 제시하고, 격리포장 환경·공간정보 통합 DB 구축 기준을 마련하였다. 또한 국내 환경정화용 LMO 환경방출 도입 가능 지역 분석과 도입 가능 지역의 근연종 종류 및 분포 조사를 통해 향후 생태계 안전성을 평가하고 환경정화용 LMO의 위해성 평가 및 안전관리를 위한 전략 수립 시 유용하게 사용될 기초자료를 확보하였다. 더욱이, 이러한 결과들을 종합하여 1. 환경정화용 LMO 개요 2. 환경정화용 LMO 적용 3. 환경정화용 LMO 관리 4. 환경부 LMO 포장 시험 실시요건을 포함하는 「환경부 유전자변형생물체 포장시험 안전관리 가이드라인」을 발간하였다(그림 35).



출처: 환경부 유전자변형생물체 포장시험 안전관리 가이드라인, 2024

그림 35. 환경부 LMO 포장시험 안전관리 가이드라인

	 환경부 유전자변형생물체 포장시험 안전관리 가이드라인 	목차 CONTENTS 1 환경정화용 유전자변형생물체 개요 01 1-1. 환경정화용 유전자변형생물체 정의 02 1-2. 국내외 환경정화용 유전자변형생물체 연구 04 1-3. 환경부 유전자변형생물체 안전관리 07 2 환경정화용 유전자변형생물체 적용 11 2-1. 환경정화용 유전자변형생물체 적용 분야 12 2-2. 환경정화용 유전자변형생물체 환경방출실험 13 3 환경정화용 유전자변형생물체 관리 15 3-1. 환경정화용 유전자변형생물체 위해성심사 및 수입·생산승인 16 3-2. 환경정화용 유전자변형생물체 취급관리 26 4 환경부 유전자변형생물체 포장시험 실시 요건 37 4-1. 환경부 유전자변형생물체 포장시험 절차 38 4-2. 격리포장시설 안전관리 46 4-3. 포장시험에 따른 주변 환경영향조사 54 5 참고문헌 59
--	--	--



CHAPTER 1 환경정화용 유전자변형생물체 개요

1-1.

환경정화용 유전자변형생물체 정의

바이오안전성에 관한 카르타헤나 의정서(Cartagena Protocol on Biosafety, 이하 바이오안전성협정서)는 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity, CBD)의 부속 의정서로, 유전자변형생물체(Living Modified Organism, LMO)가 생물다양성과 인체 건강에 미칠 수 있는 잠재적인 위험을 사전에 방지하는 것을 목적으로 하는 최초의 국제협약이다. 2000년에 채택된 이 의정서의 이행을 위해, 우리나라는 2001년에 「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률(이하 유전자변형생물체법)」을 제정하였고, 7개 부처*가 유전자변형생물체를 사용 용도별로 구분하여 관리하고 있다. 그중 환경정화용 유전자변형생물체는 환경오염물질을 제거하거나 제거하고, 오염에 내성을 갖추어 환경을 복원하는 목적으로 자연환경이나 시설에 의도적으로 방출하는 유전자변형생물체를, 환경부가 안전관리의 책임을 맡고 있다.

CHAPTER 2 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 *

제1·2조(용어의 범위)

1. "생물체"란 유전물질을 전달 또는 복제할 수 있는 생물학적 존재(생식능력이 없는 생물체, 배아세포 및 배아세포를 포함한다)를 말한다.
2. "유전자변형생물체"라 함은 법 제1조제2항에 정의된 바와 같이 다음 각 목의 현대생명공학기술을 이용하여 새롭게 조합된 유전물질을 포함하고 있는 생물체(동물, 식물, 균류, 곤충, 미생물 등)를 말한다.
 - 가. 인위적으로 유전자를 재조합하거나 유전자를 구성하는 핵산의 세포 또는 세포 내 소기관으로 직접 투입하는 기술
 - 나. 분류학적 외관 개편의 변화를 낳는 세포융합으로서 자연상태의 생리적 종이나 계통이 아니고 인공적인 교배나 선발에서 사용되지 아니하는 기술
3. "시험 연구용 유전자변형생물체"라 함은 시험 연구용으로 사용하기 위하여 연구시설에서 이용되는 유전자변형생물체를 말한다.

* 과학기술정보통신부, 농림축산식품부, 산업통상자원부, 보건복지부, 환경부, 해양수산부, 식품의약품안전처

CHAPTER 1 환경정화용 유전자변형생물체 개요

1-2.

국내외 환경정화용 유전자변형생물체 연구

환경정화용 유전자변형생물체는 토양, 수질, 대기, 해양의 다양한 오염물질을 효과적으로 제거하거나 무해화하여 오염된 환경을 원래 상태로 복원하고, 인간과 생태계의 건강을 보호하기 위해 국내외에서 활발히 연구개발되고 있다*. 특히, 이산화탄소 및 미세먼지 저감, 중금속과 휘발성 유기화합물의 정화, 방사성물질 처리, 플라스틱 제거를 제거를 다양한 오염물질을 감소 및 제거할 수 있는 환경정화용 유전자변형생물체는 심화하고 있는 기후 위기와 전 지구적인 환경 오염 문제를 해결하기 위한 중요한 도구로 부상하고 있다. 이러한 기술의 수요는 지속해서 증가할 것으로 전망되며, 이는 보다 안전하고 지속 가능한 환경을 구축하는 데 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

* 국내외 환경정화용 유전자변형생물체 연구개발 사례

(출처: 제4차 유전자변형생물체 안전관리계획)

대기 환경 정화	
1. 미세먼지 미국 미세먼지 저감 포플러 개발 미국, 산둥성 중국 유전자기위 기술 적용 공기 중 질소 비 개발 미국, 캘리포니아 대학교	2. 이산화탄소 미국 이산화탄소 고장-환경 정화 포플러 개발 미국, 버클리대학교 미국 유전자기위 기술 적용 이산화탄소 포집 가능 갈매 나무 개발 미국, 버클리대학교 미국 이산화탄소 포집 가능 갈매 나무 개발 미국, 버클리대학교
3. 휘발성 유기 화합물 미국 대기 중 이산화탄소 저감 포플러 개발 미국, 알버트 라우터 연구소 미국 대기 중 휘발성 유기 화합물 포집 포플러 개발 미국, 버클리대학교 미국 변형 제기 포플러 개발 미국, 버클리대학교 미국 유전자기위 기술 및 합성생물학 기술 적용 공기정화 포플러 개발 미국, 버클리대학교	

* 제4차 유전자변형생물체 안전관리계획 2003-2007, 2003. 산업통상자원부 한국바이오안전성정보센터

4. "농업용 생체유-육산생물(동물-식물) 또는 동물-식물 유전자변형생물체"라 함은 "농업육산생물 유전자변형생물체"와 같다)라 함은 농업용-동물용-식물용 의약품으로 사용되는 유전자변형생물체로서 다음 각 목의 유전자변형생물체를 말한다.
 - 가. 환경정화용 사용되는 종자용 육산생물(근종포함) 또는 농업/식물용 유전자변형생물체
 - 나. 사료로 사용되거나 사료로 가공하기 위하여 방출 상태(이하 "사료용"이라 한다.)로 수입되는 유전자변형생물체
 - 다. 비료 및 비료배지용 등 가공용 목적으로 농업에 사용하기 위하여 방출 상태(이하 "농업/가공용"이라 한다.)로 수입되는 유전자변형생물체
 - 라. 「약사법」 제85조제1항에 따른 농림축산식품부장관 소관의 동물용 의약품(이하 "동물용 의약품"이라 한다.)으로 사용되는 유전자변형생물체
 - 마. 그 밖에 농림축산업을 유전자변형생물체
5. "산업용 유전자변형생물체"라 함은 시험·연구용 유전자변형생물체, 농림축산업을 유전자변형생물체, 보건/의료용 유전자변형생물체, 환경정화용 유전자변형생물체, 또는 해양·수산물 유전자변형생물체를 제외한 섬유·기계·화학·전자·에너지·자본 등의 산업분야에 이용되는 유전자변형생물체를 말한다.
6. "보건/의료용 유전자변형생물체"라 함은 국민의 건강을 보호·증진하기 위한 목적으로 사용되는 유전자변형생물체(식물·동물·가공품은 제외)를 말한다.
7. "환경정화용 유전자변형생물체"라 함은 환경오염물질을 감소·제거 시키거나 환경오염에 내성을 가지고 성장함으로써 환경을 복원하는 목적으로 사생물 또는 자연환경에 의도적으로 방출하는 유전자변형생물체를 말한다.
8. "해양·수산물 유전자변형생물체"라 함은 해양수산, 수산업 또는 「약사법」 제85조제1항에 따른 해양수산부장관 소관의 동물용 의약품(이하 "수산물용 의약품"이라 한다.)으로 사용되는 유전자변형생물체를 말한다.
9. "식물용 또는 의료기기용 유전자변형생물체"라 함은 국민의 건강을 보호·증진하기 위하여 식물 또는 의료기기 분야에 사용되는 유전자변형생물체를 말한다.

CHAPTER 3 환경정화용 유전자변형생물체 개요

토양 환경 정화	
1. 중금속 미국 구리, 아연, 망간, 크롬 속적 제비나무 개발 미국, 캘리포니아 대학교 미국 토양 속 카드뮴 스트레스 저항성 담배 개발 미국, 산둥성대학교 미국 구리 속적 저항성 담배 개발 미국, 스탠퍼드 대학교 미국 카드뮴, 구리, 납, 니켈, 비나를 저항성 담배 개발 미국, 과학연구원 미국 토양 구리 제거 대장균 개발 미국, 유크대학교	
2. 농약 미국 제초제 분해 대기정화 개발 미국, 캘리포니아 대학교 미국 제초제 제거 Sphingopyxis sp. 개발 미국, 서울대학교	
3. 다량 영양소 인화수소 미국 아세나트 분해 대장균 개발 미국, 캘리포니아 대학교	
4. 플라스틱 제거 미국 아이노산 치환 폴리머에 이온 미세 플라스틱 분해 대장균 개발 미국, 로렌스, 리버모어 연구소	
5. 방사성물질 미국 토양 내 세슘 속적 감소 비 개발 미국, 로렌스, 리버모어 연구소	

CHAPTER 3 환경정화용 유전자변형생물체 개요

수질 환경 정화	
1. 납/카드뮴 제거 미국 폴리머화비티베닐(PCBs) 제거 박테리아 개발 미국, 로렌스, 리버모어 연구소	
2. 방사성물질 미국 우라늄 분해 Deinococcus radiodurans 개발 미국, 하버드 대학교	
3. 중금속 미국 폐수 내 카드뮴 속적 효과 개발 미국, 캘리포니아 대학교 미국 수질 수은 제거 대장균 개발 미국, 유크대학교	

다양성/특성 강화요소

특성

물류요원, 제노토프, 메틸요원자, 루비돌 브로마이드 제거 효능이 개발

삼귀모르, 니안, 물리테르

기능성

특성

특해 효소 이용 배수 내 탈암성 아조염로 정화 대장균 개발

세균493, 배오그라드대학교

특성

배수 내 염로 제거 미생물 개발

리파노스, 제비산도, 일리지 대학

물리학적 특성

특성

물리학적 분해 효소 발현 *Phaeodactylum tricornutum* 개발

독일, 테르부르크 대학교

특성

미세플라스틱 제거 *Chlamydomonas reinhardtii* 개발

한국, 한국생명공학연구원

1-3. 환경부 유전자변형생물체 안전관리

유전자변형생물체법 시행령 제2조(관계 중앙행정기관의 업무)에 따라 환경청을 유전자변형생물체의 개발·생산·수입·수출·관리·운반·보관·이용 등에 관한 업무는 환경부에서 담당하고 있다. 또한 환경부는 환경에 발출되거나 발생할 우려가 있는 타 용도 유전자변형생물체의 지원생태계 위해성 심사, 평가 및 사후관리 업무를 담당한다.

■ 환경부 유전자변형생물체 안전관리 역할



유전자변형생물체법 제14조(업무의 위탁)에 따라 환경부는 환경청을 유전자변형생물체에 대한 각종 신청·신고·통보·요청의 접수 업무를 비롯하여 유전자변형생물체 안전관리계획 및 세부시행계획 수립·이행 지원, 위해성심사 및 심사위원회 운영 지원, 환경영향조사, 안전교육 등 안전 조치에 관한 사항, 바이오안전성위원회의 업무 중 실무위원회의 운영에 관하여 필요한 사항 등을 소속기관인 국립생태원에 위탁하여 관리하고 있다.

■ 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통상고시

제14조(업무의 위탁)

- 환경부장은 이에 따른 다음 각 호에 관한 업무를 국립생태원에 위탁한다.
 - 법 제73조에 따른 유전자변형생물체 안전관리계획 및 영 제4조에 따른 세부시행계획 수립, 이행 등의 지원
 - 법 제73조에 따른 위해성심사, 협의 등에 대한 심사 신청의 접수, 심사위원회 운영 등 지원
 - 법 제83제1항부터 제3항, 제83제1항 제2항, 제123제1항 제2항, 제183제1항, 제223제1항 제2항, 제223제3항 제2항 제4항, 제223제4항 제1항 제2항에 따른 환경청을 유전자변형생물체에 대한 각종 신청·신고·통보·요청의 접수
 - 법 제263제2항에 따른 유전자변형생물체 안전관리계획의 조사
 - 법 제273제2항에 따른 유전자변형생물체 안전관리계획의 조사
 - 법 제313조의 바이오안전성위원회 업무 중 환경부의 업무와 관련한 위원회, 평가위원회, 실무위원회 운영에 관하여 필요한 사항

■ 환경부 유전자변형생물체 안전관리 업무체계



또한, 제4차 유전자변형생물체 안전관리계획(2023-2027)에 따라 환경부는 환경청을 유전자변형생물체의 개발에서 위해성평가, 위해성심사, 안전관리까지 상업화 단계별 지원을 위해 2027년까지 환경청을 유전자변형생물체 상업화 지원 플랫폼을 구축하고 상업화 지원센터를 운영한다.

■ 환경청을 유전자변형생물체 상업화 지원센터 구축·운영

(출처: 제4차 유전자변형생물체 안전관리계획)

- ☒ 환경청을 LMO 상업화 진주기 지원 플랫폼 구축
 - 상업화 지원 안내서 개발 및 배포·제공 지원
 - 환경부-평가기관-개발자 협업을 통한 상업화 지원체계 마련
 - 상업화 단계별(개발 → 위해성평가 → 안전관리) 지원 매뉴얼 발간 및 보급(29년)
- ☒ 환경청을 LMO 상업화 지원센터 구축·운영
 - 환경청을 LMO 상업화 지원 센터를 운영 기반 조성(상업화 및 기술·경영·서비스 지원 등, 29년)
 - 상업화 단계별 컨설팅(평가·기술, 평가·서비스, 생산·경영 및 안전관리 등) 및 현장 지도(29년)



CHAPTER

2

환경정화용 유전자변형생물체 적용

- 2-1. 환경정화용 유전자변형생물체 적용 분야
- 2-2. 환경정화용 유전자변형생물체 환경방출실험

CHAPTER 2 환경정화용 유전자변형생물체 적용

2-1. 환경정화용 유전자변형생물체 적용 분야

오염된 환경을 깨끗하게 정화하거나 복원하는 데 사용되는 환경정화용 유전자변형생물체는 여러 종류의 오염된 장소에서 활동할 수 있다. 예를 들어, 기름 유출이나 산업 폐수, 생활 하수로 오염된 강, 호수, 바다 같은 통속에서 오염물질을 제거하기 위해 사용될 수 있다. 또한, 산업 공정이나 농업 활동으로 인해 중금속, 유기화합물, 살충제 등이 방출된 토양에서도 유전자변형생물체가 효과적으로 작용할 수 있다. 이외에도, 공기 중의 특정 오염물질을 흡수하거나 분해할 수 있는 유전자변형 식물과 미생물이 대가 오염이 심한 지역에서 사용될 수 있다. 광산 지역처럼 중금속이나 독성 물질이 축적된 환경, 그리고 폐기를 태입지나 소각장, 도로와 철도 주변의 오염된 지역에서도 환경정화용 유전자변형생물체가 오염을 줄이는 데 도움을 줄 수 있다.

■ 환경정화용 유전자변형생물체의 적용 예상 환경



CHAPTER 2 환경정화용 유전자변형생물체 적용

2-2. 환경정화용 유전자변형생물체 환경방출실험

전 세계적으로 환경정화용 유전자변형생물체가 정식으로 재배 승인을 받은 사례는 없지만, 시험적인 환경방출³⁾은 여러 나라에서 이루어졌다. 미국에서는 탄소를 많이 흡수하고 빠르게 성장하는 유전자변형 포플러 5,000그루를 조지아주 남부 숲에 심어 시험했으며⁴⁾, 폭발성 화학물질인 RDX⁵⁾를 분해하는 유전자변형 스위치그래스를 사용한 환경방출실험이 뉴욕주 군사 훈련소에서 진행되었다⁶⁾. 또한, 셀레늄과 불소로 오염된 퇴적지에서 유전자변형 식물 이용한 안전성 평가가 진행된 사례도 있다⁷⁾. 독일에서는 오염된 토양을 정화하기 위해 중금속으로 오염된 구리 광산 지역에 유전자변형 포플러를 식재하고, 이 식물이 주변 미생물에게 유전자를 전달할 가능성을 연구하는 실험이 이루어졌다⁸⁾. 급변하는 기후변화와 환경오염에 대응하기 위해 이러한 환경정화용 유전자변형생물체의 환경방출실험은 점차 증가할 것으로 예상된다.

■ 환경정화용 유전자변형생물체 환경방출실험 사례



◀ 미국 소나무 숲 내 RDX 포플러의 환경방출실험 ▶

- 3 유전자변형생물체를 시험, 평가, 그 밖의 구조물을 이용하여 일체화하지 아니하고 의도적으로 자연환경에 노출하게 하는 것을 말함(유전자변형생물체법 제2조 제4호)
- 4 <https://www.livingcarbon.com/>
- 5 군과 산업에서 널리 사용되는 폭발성 1,3,5-트라이노 메틸벤젠
- 6 PNAS Highlights newsletter, <https://www.pnas.org/journal-club>
- 7 USDA, UC Berkeley News, <https://news.berkeley.edu>
- 8 Peuke and Rennerberg, 2005. Phytoremediation with transgenic trees. 2. Naturforsch. C. J. Biosci. 60: 199-207.



<독일 경산 및 미국 군사 훈련소 내 환경방출실험>

CHAPTER

3

환경정화용
유전자변형생물체 관리

3-1. 환경정화용 유전자변형생물체 위해성심사 및
수입·생산승인

3-2. 환경정화용 유전자변형생물체 취급관리

CHAPTER 3 환경정화용 유전자변형생물체 관리

3-1.

환경정화용 유전자변형생물체의 위해성심사 및 수입·생산승인

환경정화용 유전자변형생물체를 환경에 방출하게 되면 해당 환경 내의 오염물질을 효율적으로 정화할 수 있지만 환경방출은 생태계에 미칠 수 있는 영향과 안전성을 고려하여 신중하게 관리되어야 한다. 따라서 환경과 생태계 및 인간의 안전을 보장하고 유전자변형생물체가 초래할 수 있는 잠재적 위험을 최소화하기 위하여 과학적이고 체계적인 위해성심사가 선행되어야 한다. 현재까지 국내에서 환경정화용 유전자변형생물체의 위해성심사 사례는 없지만 환경정화용 유전자변형생물체의 개발·생산·수입·수출·판매·운반·보관·이용 등을 위해 위해성심사를 받으려는 자는 유전자변형생물체법 둘째조시 제6-1조(위해성심사신청서 제출 등)에 따라 위해성심사를 받아야 한다.

■ 환경정화용 유전자변형생물체 심사 과정



유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

제6-1조(위해성심사신청서 제출 등)

- ① 환경정화용 유전자변형생물체의 위해성심사를 받으려는 자(이하 "신청인"이라 한다)는 규칙 별지 제1호서식의 "유전자변형생물체 위해성심사신청서"와 별표 30-1의 "유전자변형생물체의 위해성심사자료" 1부, 컴퓨터디스크CD 등 전자로서 20부를 환경부장관에게 제출하여야 한다. 이 경우 유전자변형생물체의 위해성심사자료는 다음 각 호의 어느 하나에 해당하여야 하며, 평가서 자료가 외국어일 때에는 원문 및 별표 10-1의 평가항목에 포함된 한글 요약을 각각 첨부하여야 한다.
 1. 전문학술지재 발췌 자료
 2. 대학 또는 연구기관 등 국내외 전문기관에서 실험한 것으로 기관의 장이 발췌한 자료(평가관련 컨설팅조직·전문단체 및 기술능력의 규모·수준에 관한 정보, 평가연구시설 및 실험의 적정성에 대한 정보 포함)
 3. 유전자변형생물체의 생산국 또는 수출국 정부가 위해성심사 및 승인을 위하여 확인한 공문된 모든 관련자료
- ② 신청인은 유전자변형생물체의 위해성심사자료 중 정보보호가 필요할 경우에 정보보호 범위 및 대상에 대한 자료를 제출해야 하며 이 경우 환경부장관은 신청인 등과 협의하여 정보보호 등 필요한 조치를 하여야 한다.
- ③ 신청인은 환경부장관에게 평가자료의 제출방식 등에 대한 사전상담을 요청하거나 작성한 자료에 대한 설명회의 개최를 요청할 수 있다.

제6-2조(심사신청서류의 보완, 시정 및 반려)

- ① 환경부장관은 제6-1조에 따라 접수된 유전자변형생물체자료가 다음 각 호에 해당하는 경우에는 신청인 등에게 자료의 보완, 추가자료 제출 및 시정을 요구할 수 있다.
 1. 별표 30-1의 평가항목을 갖추지 못한 경우
 2. 위해성심사를 위하여 추가 검토 자료가 필요할 때
 3. 신청서 제출 후에 해당 유전자변형생물체의 위해성에 대한 새로운 과학적 증거 등이 발표된 경우
- ② 제1항에 따라 자료의 보완, 추가자료 제출 및 시정을 요청받은 신청인 등은 60일 이내에 보완한 자료를 제출하여야 하며, 보완에 소요되는 기간은 심사기간에 산입하지 아니 한다.
- ③ 환경부장관은 제2항에 불구하고 신청인 등이 보완기간 연장을 요청하는 경우에는 사유를 고려하여 보완기간을 정할 수 있다.
- ④ 환경부장관은 보완자료를 정당한 사유 없이 기간 내에 제출하지 아니하거나 보완내용이 불충분하여 심사가 불가능한 경우에는 신청서를 반려할 수 있다.

제6-3조(위해성심사 방법)

- ① 환경부장관은 제6-1조에 따른 위해성심사신청서를 접수 한 때에는 유전자변형생물체의 위해성 여부를 다음 각 호의 기간 내에 심사하여야 한다.

1. 법 제78조의제1항 및 제2항에 따른 위해성심사: 270일 이내
2. 법 제78조의제3항에 따른 심사일: 270일 이내
3. 환경부장관이 소관 유전자변형생물체의 위해성을 심사할 때에 법 제7조의제2항에 따라 위해성심사 협의가 필요하다고 판단한 경우에는 제10항의 위해성심사 협의 절차에 따라 해당하는 관계 중앙행정기관의 장 등에게 협의를 요청하여야 한다.
3. 환경부장관은 심사를 위하여 필요한 경우 법 제36조에 따라 신청인 등에게 설명 또는 현지조사 동행 등을 요구할 수 있다.

제6-4조(심사결과와 통지 등)

1. 신청인 등이 심사결과에 불복할 경우에는 통지를 받은 날부터 30일 이내에 규칙 별지 제23호서식의 "유전자변형생물체 위해성심사 결과통보서"를 신청인 등에게 통지하여야 한다.
3. 환경부장관은 제1항에 따른 심사결과 통지 후 환경에 위해한 정보가 발견된 경우 즉시 신청인 등에게 통보하고, 법 제14조에 따라 필요한 후속조치 등을 요구할 수 있다.

제6-5조(재심사)

1. 신청인 등이 심사결과에 불복할 경우에는 통지를 받은 날부터 30일 이내에 규칙 별지 제23호서식의 "재심사요청서"와 재심사 요청서류를 증명하는 서류를 환경부장관에게 제출하여야 한다.
2. 환경부장관은 제1항에 따라 재심사를 요청받은 경우에는 90일 이내에 재심사 한 후 그 결과를 신청인 등에게 통지하여야 한다.

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙

[별지 제1호서식] 유전자변형생물체 위해성심사신청서

■ 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙(별지 제3호서식)에 따른(2013.12.30)

유전자변형생물체 위해성 심사 신청서

[] 농림·축산용 [] 산업용 [] 보건·의료용
[] 환경정화용 [] 해양수산용 [] 식품·의료기기용

본 신청서의 하등은 신청인이 적지 않으며, []에는 적당하는 문항을 선택하십시오.

접수번호	접수일	처리기간	270일
신청인	상호	사업자등록번호(법인등록번호)	
	대표자 성명	전화번호	
	사업장 주소		
	팩스번호	전자우편주소	
개발자	개발자명		
	주소		

유전자변형생물체 위해성심사 신청내용

유전자 변형 생물체	분류명	학명	제출명
	부대칭 특성	도입유전자	
심사목적	[] 수입승인 [] 생산승인 [] 이용승인		
최종용도			

「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률」 제7조의제2항, 같은 법 시행령 제4조의제2항 및 같은 법 시행규칙 제1조의제2항에 따라 위와 같이 유전자변형생물체의 위해성심사를 신청합니다.

년 월 일

신청인 (인명 또는 인)

(관계 중앙행정기관) 장관(처장) 귀하

첨부서류: 위촉 검토
270일 이내(제3호서식) 30일 이내

첨부서류	유전자변형생물체 관리에 관계 중앙행정기관의 장이 고시하는 위해성심사자료	
수수료	430만원 「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률」 제35조제2항제1호 및 같은 법 시행령(별표3)의 규정에 따른	
작성방법	관계 중앙행정기관은 다음 표에서 유전자변형생물체의 용도에 따라 선택하여 작성한다.	
	유전자변형생물체의 용도	관계 중앙행정기관
	농림·축산용	농림축산식품부
	산업용	산업통상자원부
	보건·의료용	보건복지부
	환경정화용	환경부
해양수산용	해양수산부	
식품·의료기기용	식품의약품안전처	

처리절차

이 신청서는 아래와 같이 처리됩니다.

```

graph TD
    A[신청인] --> B[접수]
    B --> C[심사]
    C --> D[결정]
    C --> E[협의부처 협의]
    D --> F[결과 통지]
    D --> G[결과 통보]
    
```

위해성심사를 거쳐 승인받은 환경정화용 유전자변형생물체를 수입하기 위해서는 유전자변형생물체법 규칙 별지 제5호서식의 "유전자변형생물체 수입승인 신청서"와 첨부서류를 환경부장관에게 제출하여 수입승인을 받아야 한다. 또한 위해성심사를 거쳐 승인받은 환경정화용 유전자변형생물체를 생산하기 위해서는 유전자변형생물체법 규칙 별지 제30호서식의 "유전자변형생물체 생산승인 신청서"와 첨부서류를 환경부장관에게 제출하여 생산승인을 받아야 한다.

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통고고시

제6-9조(수입승인)

1. 환경정화용 유전자변형생물체를 수입(후대하여 수입하는 경우를 포함한다)하려는 자는 규칙 별지 제5호서식의 "유전자변형생물체 수입승인 신청서"와 첨부서류를 환경부장관에게 제출하여야 한다.
2. 환경부장관은 제1항에 따른 신청서를 접수한 날부터 10일 이내에 수입승인 여부를 결정하여 신청인에게 통지하여야 한다.
3. 환경부장관은 수입승인 등을 결정하기 위하여 필요한 경우에는 신청인에게 기간을 정하여 필요한 자료를 제출하게 할 수 있다.
4. 환경부장관은 수입 또는 생산승인 현황을 별지 제5호서식의 "유전자변형생물체의 수입·생산승인 현황"을 예 정기별로 산업통상자원부장관에게 통보하여야 한다.

제6-11조(생산승인)

1. 환경정화용 유전자변형생물체를 생산하려는 자는 규칙 별지 제20호서식의 "유전자변형생물체 생산승인 신청서"와 첨부서류를 환경부장관에게 제출하여야 한다.
2. 환경부장관은 제1항에 따른 신청서를 접수한 날부터 10일 이내에 생산승인 여부를 결정하여 신청인에게 통지하여야 한다.
3. 환경부장관은 생산승인 등을 결정하기 위하여 필요한 경우에는 신청인에게 기간을 정하여 필요한 자료를 제출을 요청할 수 있다.

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙

[별지 제5호서식] 유전자변형생물체 수입승인 신청서

■ 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙 (별지 제5호서식) <개정 2013.12.10>

유전자변형생물체 수입승인 신청서

[] 농림·축산용 [] 산업용 [] 보건의료용
 [] 환경정화용 [] 해양수산물 [] 식품·의료기기용

※ 해당사항이 없을 시란 신청인이 적지 않으며, [] 표시는 해당사항이 있는 경우에만 표시합니다. (일괄)

접수번호	접수일	처리기간	10일
신청인	성명	무작업 고유번호	제 호
	대표자 성명	대표자 생년월일	
	사업자등록번호(법인등록번호)	전화번호	
	팩스번호	전자메일주소	
	사업장 주소		

수입승인 신청내용							
종류	보통용	학명	계통명	용도	수입국	수입수량	수입금액
1							
2							
3							
4							

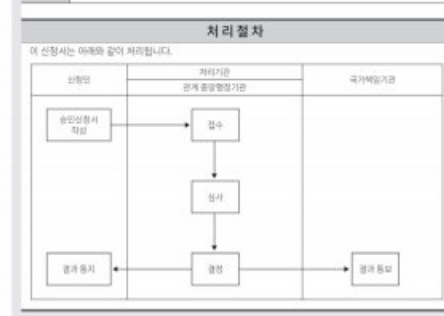
* 식품이나 식품으로 직접 이용하거나 식품원으로 또는 식품으로 이용되는 유전자변형생물체 (LMO-Food)의 수입승인을 신청할 때 계통명, 작물에 대한 수입수량 및 수입금액을 명확하게 할 수 있을 경우에는 마의 사항에 따라 계통명, 수입수량, 수입금액을 작성한다.

1. 계통명(한글) 수입 신청일이 포함된 일기나 포함될 가능성이 있는 모든 계통명을 작성한다.
 2. 수입수량(한글) 수입승인일 기준, 수입금액(한글) 수입승인일 기준을 작성한다.

「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률」 제8조제1항, 같은 법 시행령 제5조제1항 및 같은 법 시행규칙 제2조제1항에 따라 위와 같이 유전자변형생물체의 수입승인을 신청합니다.

신청인 (서명 또는 인) 년 월 일
 (관계 중앙행정기관) 장관(차장) 귀하
 첨부서류: 1. 원본 1부, 2. 사본 1부
 210mm×297mm(백지 80g/㎡)

첨부서류	1. 수입계약서(수입을 증명하는 경우에는 수입계약서(수입)를 포함한다) 또는 후문서 사본 1부 2. 운반서류: 운반수단 및 운반입자가 기록된 운반서류 또는 자가 운반기록서 1부 3. 취급: 보관에 관한 안전관리방안과 안전관리제 등 필요한 안전관리, 살처분 등에 관한 서류 1부														
수수료	52만원 「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률」 제25조제1항제2호 및 같은 법 시행령 (별표)에 규정에 따른														
작성방법	관계 중앙행정기관은 다음 표에서 유전자변형생물체의 용도에 따라 산책하여 작성한다. <table border="1"> <tr> <th>유전자변형생물체의 용도</th><th>관계 중앙행정기관</th></tr> <tr> <td>농림·축산용</td><td>농림축산식품부</td></tr> <tr> <td>산업용</td><td>산업통상자원부</td></tr> <tr> <td>보건의료용</td><td>보건복지부</td></tr> <tr> <td>환경정화용</td><td>환경부</td></tr> <tr> <td>해양수산물</td><td>해양수산부</td></tr> <tr> <td>식품·의료기기용</td><td>식품의약품안전처</td></tr> </table>	유전자변형생물체의 용도	관계 중앙행정기관	농림·축산용	농림축산식품부	산업용	산업통상자원부	보건의료용	보건복지부	환경정화용	환경부	해양수산물	해양수산부	식품·의료기기용	식품의약품안전처
유전자변형생물체의 용도	관계 중앙행정기관														
농림·축산용	농림축산식품부														
산업용	산업통상자원부														
보건의료용	보건복지부														
환경정화용	환경부														
해양수산물	해양수산부														
식품·의료기기용	식품의약품안전처														



유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙

[별지 제20호서식] 유전자변형생물체 생산승인 신청서

■ 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙 (별지 제20호서식) <개정 2018. 11. 13>

유전자변형생물체 생산승인 신청서

[] 농림·축산용 [] 산업용 [] 보건의료용
 [] 환경정화용 [] 해양수산물 [] 식품·의료기기용

※ 해당사항이 없을 시란 신청인이 적지 않으며, [] 표시는 해당사항이 있는 경우에만 표시합니다. (일괄)

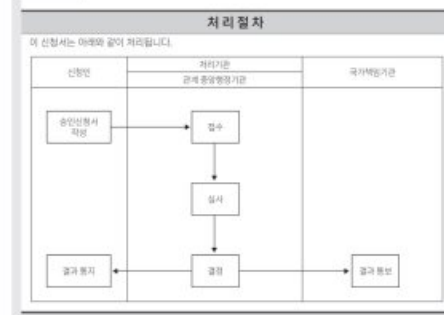
접수번호	접수일	처리기간	10일
신청인	성명	사업자등록번호(법인등록번호)	
	대표자 성명	대표자 생년월일	
	팩스번호	전화번호	
	사업장 주소	전자메일주소	

신청 내용	유전자변형 생물체	용도	특성
	생산방법	생산기간	생산수량
	저장장소		
	저장능력		

「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률」 제12조제1항, 같은 법 시행령 제13조제1항 및 같은 법 시행규칙 제8조제1항에 따라 위와 같이 유전자변형생물체의 생산승인을 신청합니다.

신청인 (서명 또는 인) 년 월 일
 (관계 중앙행정기관) 장관(차장) 귀하
 첨부서류: 1. 원본 1부, 2. 사본 1부
 210mm×297mm(백지 80g/㎡)

첨부서류	1. 취급: 보관 등에 관한 안전관리방안(한글) 서류 1부 2. 안전관리: 필요한 경우 안전관리, 살처분 등에 관한 서류 1부														
관계 중앙행정기관 장 확인사항	본인 등 기사항(승인)에 대한 경우(한글)														
작성방법	관계 중앙행정기관은 다음 표에서 유전자변형생물체의 용도에 따라 산책하여 작성한다. <table border="1"> <tr> <th>유전자변형생물체의 용도</th><th>관계 중앙행정기관</th></tr> <tr> <td>농림·축산용</td><td>농림축산식품부</td></tr> <tr> <td>산업용</td><td>산업통상자원부</td></tr> <tr> <td>보건의료용</td><td>보건복지부</td></tr> <tr> <td>환경정화용</td><td>환경부</td></tr> <tr> <td>해양수산물</td><td>해양수산부</td></tr> <tr> <td>식품·의료기기용</td><td>식품의약품안전처</td></tr> </table>	유전자변형생물체의 용도	관계 중앙행정기관	농림·축산용	농림축산식품부	산업용	산업통상자원부	보건의료용	보건복지부	환경정화용	환경부	해양수산물	해양수산부	식품·의료기기용	식품의약품안전처
유전자변형생물체의 용도	관계 중앙행정기관														
농림·축산용	농림축산식품부														
산업용	산업통상자원부														
보건의료용	보건복지부														
환경정화용	환경부														
해양수산물	해양수산부														
식품·의료기기용	식품의약품안전처														



CHAPTER 3-2. 환경정책용 유전자변형생물체 관리

3-2.

환경정책용 유전자변형생물체의 취급관리

현재까지 국내에서 환경정책용 유전자변형생물체의 수입·생산·수입 사례는 없지만, 수입 혹은 생산·수입을 받은 환경정책용 유전자변형생물체를 취급할 때는 안전을 위하여 주의하여야 한다. 환경정책용 유전자변형생물체를 취급 및 보관하는 시설에는 포장 또는 압내표지판 등으로 표시하여야 한다. 또한 환경정책용 유전자변형생물체의 용기나 포장에 표시사항(유전자변형생물체명, 명칭·종류·유도 및 특성, 안전한 취급을 위한 주의사항, 개발자 또는 생산자, 수출자 및 수입자의 성명·주소 및 전화번호, 유전자변형생물체에 해당하는 사실, 환경영향으로 사용되는 유전자변형생물체 해당여부)이 인쇄된 스티커를 부착하여야 한다.

환경정책용 유전자변형생물체를 안전하게 관리하기 위해서는 유전자변형생물체법 통합고시 제6-19호(취급관리기준 및 대상자)에 따라 관리 기준을 준수하여야 한다. 환경정책용 유전자변형생물체의 생산·포장은 외부인의 출입을 금지하고, 유전자변형생물체가 포장·발포 방식으로 비의도적으로 유출되지 않도록 적절하게 조치하여야 한다.

■ 환경정책용 유전자변형생물체의 취급관리



■ 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

제6-19호(취급관리기준 및 대상자)

- ① 법 제25조제2항에 따른 환경정책용 유전자변형생물체의 관리기준은 다음 각 호와 같다.
 1. 환경정책용 유전자변형생물체의 생산·포장은 다음 각 호의 생산·포장시설을 하여야 한다.
 - 가. 생산·포장시설, 외부인 출입금지 등을 기록한 표지판
 - 나. 생산·포장에서 사출한 기계의 세척설비 등 재조합 능력이 비의도적으로 생산·포장되지 않도록 하는 방지설비
 - 다. 종자를 유전자변형생물체와 구분할 수 있는 화분·색깔이 상이한 경우에는 방출설, 방출설 등 환경적 격리를 통하여 화분·색깔을 감소시키기 위한 설비
 2. 생산·포장의 관리방법은 별표 3-5의 유전자변형생물체의 종류별 조치사항에 준한다.
 3. 일반적인 취급관리
 - 가. 환경정책용 유전자변형생물체를 수출, 포장, 적재 및 가공 등 작업에 할 때에는 작업 과정에서 비의도적으로 일반생물체와 섞이지 않도록 관리한다.
 - 나. 종자를 유전자변형생물체를 생산·포장에서 수확 후에는 재배로 인해 알이 섞인 식물체나 산물을 분할·분포 시켜야 한다.
- ② 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자는 별 제25조제1항의 취급관리기준을 준수하여야 한다.
 1. 별 제8조제1항, 별 제10조제1항 또는 별 제12조제1항에 의한 환경정책용 유전자변형생물체의 수출입 통틀 하는 자
 2. 환경정책용 유전자변형생물체를 수출입 업체(의) 취급 관리자
 3. 환경정책용 유전자변형생물체를 취급시설 관리자
 4. 취급·보관·가공·처리 등 직접 받은 자
 5. 제6-1호제2항제4호에 따라 환경정책용 연구시설을 설치·운영하는 자

■ 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

[별표 3-5] 농림축산식품 유전자변형생물체의 관리방법과 조치사항

제조업체	관리대상	조치사항
식물체	재배 관리	가. 유전자변형식물의 재배 또는 재배는 지정된 작업장 내에서 해야 하고 종묘 품이 작업장 밖으로의 확산되는 것을 방지하기 위한 조치를 하여야 한다. 나. 유전자변형식물을 재배하는 구역 및 그 근방에는 해당 식물과 고해가 가능한 식물의 식생을 최소한으로 제한할 수 있는 조치를 한다. 다. 화분, 종자 등이 확산되기 쉬운 시설인 경우에는 재배 및 분포 허용기 등을 하여 화분 및 종자류 유출을 최소화할 수 있도록 조치한다. 라. 종자, 덩이줄기, 덩이뿌리 등에서 식물체가 재배·분포되기 쉬운 유전자변형식물에 대하여는 재배·분포를 위하여 필요한 조치를 한다. 수확의 경우, 뿌리에서 유출되는 근방의 발생 방지를 위하여 필요한 조치를 한다. 마. 유전자변형식물을 재배하고자하는 권리보장시설 설치자는 대상물 및 외부인 등에 의해 유전자변형식물의 종자나 식물체 일부가 외부로 분출되지 않도록 고려하여야 한다. 바. 유전자변형식물이 해수 등에 분출되지 않도록 조치한다. 사. 유전자변형식물의 천재 및 이와 관련한 폐기물, 퇴출 등의 처리는 적절한 방법으로 하여야 하며 필요한 때에는 소각, 증기 소독 등의 불활성화 조치를 강구한 후 폐기하여야 한다. 아. 대풍, 홍수 등 천재지변으로 인한 유전자변형식물체가 확산되지 않도록 안전대책을 강구하여야 한다. - 유전자변형생물체의 사용요소를 설명하는 표시·분류·유전자변형생물체의 사용에 관한 생물학적 데이터
	보관	가. 유전자변형식물을 포함한 재배에 대하여는 "유전자변형식물"이라는 표시를 하여 보관하여야 한다. 나. 유전자변형식물을 포함한 보관물은 그 목적을 작성·비지한다.
	운반	가. 유전자변형식물을 포함한 재배를 작업구역 밖으로 운반하는 경우에는 해당 식물체의 환경분출 방지를 위하여 필요한 조치를 하여야 한다. 나. 유전자변형식물을 운반하는 용기에는 눈에 잘 띄는 곳에 적색으로 "유전자변형식물" 표시와 "취급주의" 표시를 하여야 한다.
	폐기물 관리	가. 유전자변형식물체 폐기물 관리는 유전자변형이 되지 않은 일반생물과는 분리된 시설에서 하여야 한다. 나. 유전자변형식물을 처리하여 방출(환경방출)하고자 하는 경우에는 유전자변형 생물체 도입·가치 못하도록 이를 물리적으로 분리·폐기·처리, 분쇄·분쇄하여 무해·도입할 무리가 있는 유전자변형식물은 조차에서 방출을 금지한다. 다. 유전자변형식물을 자연 교배, 인공 수정과 수정된 이식 등으로 일반생물과 교잡을 실시할 수 있다. 교잡을 통해 생산된 모든 후대는 유전자변형식물과 동일하게 관리한다.
동물	사육 관리	가. 유전자변형동물의 사육·관리에는 유전자변형이 되지 않은 일반동물과는 분리된 시설에서 하여야 한다. 나. 유전자변형동물을 사육·관리하는 시설에서 사육·관리하는 동물은 유전자변형 동물에 도입·가치 못하도록 이를 물리적으로 분리·폐기·처리, 분쇄·분쇄하여 무해·도입할 무리가 있는 유전자변형동물은 조차에서 방출을 금지한다. 다. 유전자변형동물을 자연 교배, 인공 수정과 수정된 이식 등으로 일반동물과 교잡을 실시할 수 있다. 교잡을 통해 생산된 모든 후대는 유전자변형동물과 동일하게 관리한다.
	사육 관리	가. 유전자변형동물의 사육·관리에는 유전자변형이 되지 않은 일반동물과는 분리된 시설에서 하여야 한다. 나. 유전자변형동물을 사육·관리하는 시설에서 사육·관리하는 동물은 유전자변형 동물에 도입·가치 못하도록 이를 물리적으로 분리·폐기·처리, 분쇄·분쇄하여 무해·도입할 무리가 있는 유전자변형동물은 조차에서 방출을 금지한다. 다. 유전자변형동물을 자연 교배, 인공 수정과 수정된 이식 등으로 일반동물과 교잡을 실시할 수 있다. 교잡을 통해 생산된 모든 후대는 유전자변형동물과 동일하게 관리한다.

제조업체	관리대상	조치사항
식물체	사육 관리	가. 유전자변형식물의 사육·관리에는 유전자변형이 되지 않은 일반동물과는 분리된 시설에서 하여야 한다. 나. 유전자변형동물을 사육·관리하는 시설에서 사육·관리하는 동물은 유전자변형 동물에 도입·가치 못하도록 이를 물리적으로 분리·폐기·처리, 분쇄·분쇄하여 무해·도입할 무리가 있는 유전자변형동물은 조차에서 방출을 금지한다. 다. 유전자변형동물을 자연 교배, 인공 수정과 수정된 이식 등으로 일반동물과 교잡을 실시할 수 있다. 교잡을 통해 생산된 모든 후대는 유전자변형동물과 동일하게 관리한다.
	운반	가. 유전자변형식물을 포함한 재배에 대하여는 "유전자변형식물"이라는 표시를 하여 보관하여야 한다. 나. 유전자변형식물을 포함한 보관물은 그 목적을 작성·비지한다.
	폐기물 관리	가. 유전자변형식물체 폐기물 관리는 유전자변형이 되지 않은 일반생물과는 분리된 시설에서 하여야 한다. 나. 유전자변형식물을 처리하여 방출(환경방출)하고자 하는 경우에는 유전자변형 생물체 도입·가치 못하도록 이를 물리적으로 분리·폐기·처리, 분쇄·분쇄하여 무해·도입할 무리가 있는 유전자변형식물은 조차에서 방출을 금지한다. 다. 유전자변형식물을 자연 교배, 인공 수정과 수정된 이식 등으로 일반생물과 교잡을 실시할 수 있다. 교잡을 통해 생산된 모든 후대는 유전자변형식물과 동일하게 관리한다.
	사육 관리	가. 유전자변형동물의 사육·관리에는 유전자변형이 되지 않은 일반동물과는 분리된 시설에서 하여야 한다. 나. 유전자변형동물을 사육·관리하는 시설에서 사육·관리하는 동물은 유전자변형 동물에 도입·가치 못하도록 이를 물리적으로 분리·폐기·처리, 분쇄·분쇄하여 무해·도입할 무리가 있는 유전자변형동물은 조차에서 방출을 금지한다. 다. 유전자변형동물을 자연 교배, 인공 수정과 수정된 이식 등으로 일반동물과 교잡을 실시할 수 있다. 교잡을 통해 생산된 모든 후대는 유전자변형동물과 동일하게 관리한다.
동물	사육 관리	가. 유전자변형동물의 사육·관리에는 유전자변형이 되지 않은 일반동물과는 분리된 시설에서 하여야 한다. 나. 유전자변형동물을 사육·관리하는 시설에서 사육·관리하는 동물은 유전자변형 동물에 도입·가치 못하도록 이를 물리적으로 분리·폐기·처리, 분쇄·분쇄하여 무해·도입할 무리가 있는 유전자변형동물은 조차에서 방출을 금지한다. 다. 유전자변형동물을 자연 교배, 인공 수정과 수정된 이식 등으로 일반동물과 교잡을 실시할 수 있다. 교잡을 통해 생산된 모든 후대는 유전자변형동물과 동일하게 관리한다.
	사육 관리	가. 유전자변형동물의 사육·관리에는 유전자변형이 되지 않은 일반동물과는 분리된 시설에서 하여야 한다. 나. 유전자변형동물을 사육·관리하는 시설에서 사육·관리하는 동물은 유전자변형 동물에 도입·가치 못하도록 이를 물리적으로 분리·폐기·처리, 분쇄·분쇄하여 무해·도입할 무리가 있는 유전자변형동물은 조차에서 방출을 금지한다. 다. 유전자변형동물을 자연 교배, 인공 수정과 수정된 이식 등으로 일반동물과 교잡을 실시할 수 있다. 교잡을 통해 생산된 모든 후대는 유전자변형동물과 동일하게 관리한다.

[illegible]

개요	원리	조치 사항
기술	작업 시절	가. 사할당 내외부의 건물배치 및 명칭, 집안구조를 도식화하여 비치한다. 나. 사할당에 포함된 원형을 직접에 내보내 비치한다. 다. 조류배치의 위치 및 명칭을 표기하여 비치한다. 라. 외부출입구에 대한 주시서 등의 위치를 지정하여 표시 비치한다. 마. 불꽃 및 보란시성등 각종 화물 경량기와 및 화물 통로의 출입을 통제할 수 있는 조치를 취한다. 바. 폐기물 등 사할당의 각종구조를 활용한 원형을 비치한다. 사. 사할당시절, 사할당구조의 안전성을 보장하는 우수 건축성 시설을 구비할 것을 권장한다. 자. 군을하여 사할당과 유사되는 조장을 갖는다. 차. 군을을 사할당이 전 경향에 걸맞는 대한 예식조장을 취한다. 카. 군을을 사할당으로 한 정적으로 군을배치한 집사공과를 기록한다. 키. 사할당의 물질을 군을에서 투여할 경우에는 그 내역을 기록한다.

환경정화용 유전자변형생물체를 운송할 때는 밀폐하여 운송하여야 하며, 운송책임자는 유전자변형생물체법 규칙 별지 제43호서식 "유전자변형생물체 운반 관리대장"을 기록하고 5년간 보관하여야 한다.

 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

제6-20조(일제운송)

환경친화적 유전자변형생물체를 운송할 경우에는 영 제25조제1항제1호에 따라 밀폐하여 운송하여야 하며, 다음 각 호의 사항을 준수하여야 한다.

1. 유전자변형생물은 유전자 7개로 넣고, 더 큰 물리적 환경까지 담도록 구분하여 운송하여야 한다.
2. 운송 시 파손가능에 유전자변형생물의 분열, 분산, 유전자변형과 연직 및 취급조건 사항 등 제8조 17항의 사항을 지켜야 한다.
3. 운송수단은 운송생물을 위한 안전조치를 할 경우 들어 필요하고 있어야 하며, 운송생물은 운송 중에 유전자변형생물과 혼하여 운송되는 비생체는 반드시 실 불발착 시키거나 확산방지를 위한 접근금지 등의 비생체조치 취하여야 한다.
4. 운송생물은 국제 발지 제43호에서 "유전자변형물 안전 관리대상"을 기록하고 5년간 보관하여야 한다.

 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙 ▼

[별지 제43호서식] 유전자변형생물체 운반 관리대장

● 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙 (별지 제43호서면) <신설 2013.12.10>

연월일	모집원	명칭	수업 유인 번호	순번 일정	출발 지점	도착 지점	차량 번호	위탁인		운반자 (서명 또는 인)
								성명 (성명)	전화 번호	사업자등록번호 또는 법인등록번호
										부서장 또는 책임자 (서명 또는 인)

※ 기재방법 : 명칭란에는 권선하고자 하는 유전자변형 생물체의 명칭을 기재합니다.

200mm×297mm(백상지 80g/㎡)

환경청차용 유전자형상분석복제 보관할 때는 비록 더욱 환경변화를 방지하고 비상사태를 대비하여 필요한 정보를 보존시킬 수에 확보되지만이 아니다. 또한 비록 분석의 취급권과 책임자가 지정되어 관리하여야 하며, 규칙 제244호에서 "유전자형상분석복제 보관 관리대장"을 기록하고 5년간 보관하여야 한다. 인쇄 건강 및 지능상태에 대한 환경정보를 유전자형상분석복제의 위험을 미칠지도 안한게 취급하는 취급 취급권과 책임자가 취급 취급과 환경정보의 안전과 관련된 의무를 기록하고 수행하여야 한다.

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

제521조(유전자변형생물체의 보관)

- ① 환경정보를 유전자변형생물체의 보관을 경우에는 비의도적 환경파괴를 방지하고, 생물체 특성을 유지할 수 있는 시설, 물가에 넣어 보관하여야 한다.
- ② 환경정보를 유전자변형생물체의 환경유출을 등 비상사태를 대비하여 필요한 장비 등을 보관시설 내에 확보·비치하여야 한다.
- ③ 환경정보를 유전자변형생물체 수출을 등을 하는 자는 보관시설이 취급관리 책임자를 지정하여 관리하여야 하며, 국립·국립 2개 AEE에서 실시 "유전자변형생물체 보관시설"을 가리키고 5년간 보아야 한다.

제6-22조(취급관리 책임자 지정)

- ① 환경영향평가 및 환경영향평가위원회 수습을 돕기 취급업무부 담당자는 지는 안전관리 및 자생생태계에 대한 위험성 분석을 실시하기 위하여 취급근로자에 적합한 작업자(또는 작업자)와 "책임자"로 한인을 지정하여야 한다.
- ② 제1항에 따라 선임되는 책임자는 다음 각 호의 업무를 수행하여야 한다.
 - 가. 취급업무에 환경영향평가 안전 관리 관련 책임자로서 항상 임명된 채 근무
 - 나. 환경영향평가 유전자변형생물체의 원자, 포획, 보관, 사용, 운반, 반출 등의 사실을 돕 취급근로자 안전관리 업무
 - 다. 기타 환경영향평가 유전자변형생물체의 취급근로자 생리, 보관, 사용 등에 관한 유지 관리 등

제6-23조(설비의 유지·관리)

- ① 환경영향평가 목적(환경영향평제의 기술임) 등에 사용되는 표기나 표장, 보관시설 등의 취급관리를 위한 설비는 본래의 성능을 발휘하도록 관리하여야 한다.
- ② 설비는 설치일로부터 매년 1회 이상 일제도로 성능검사를 실시하여야 하며, 일제도로 성능검사를 기준 등은 제95제1절의 연구시설의 설치·운영 기준에 따른다.

제6-24조(안전교육)

- 환경친화적 유전자변형생물체의 수출입 등을 하려는 자는 취급업무에 종사하는 관계자에게 위해장치를 위한 비상조치 방법 등 사전 안전교육을 실시하여야 한다.

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙 ▼

[별지 제44호서식] 유전자변형생물체 보관 관리대장

■ 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙 [별지 제44호서신] (간행 2013.12.10)

유전자변형생물체 보관 관리대장

[illegible]

※ 기재방법
1. 법정은 권리와고자 하는 유전자변형생물체의 명칭을 기재합니다.
2. 유체인의 정보란: 유체인의 성명, 주민등록번호 및 사업자등록번호(법인인 경우에는 법인등록번호)를 기재합니다.

210mm×297mm(배심지 80g/㎡)

환경정화용 유전자변형생물체와 수출입 등에 승인을 받은 자는 때 전기법 수출입 실적 등을 환경부장관에게 보고하여야 하며, 운송·보관·판매 등의 과정에서 비생사태가 발생할 때는 신속한 조치를 취하고, 그 결과를 환경부장관에게 즉시 보고하여야 한다.

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

제6-25조(보고)

- ① 환경정책을 위한 자연환경물체의 수질 등 환경을 평가하는 자는 매 칸기씩 15일마다 수질 및 수질 관련 법률부담관계에 보고하여야 한다. 단, 양, 온도, 보안, 판매 등의 과정에서 환경정책을 위한 비시장거래 발생할 경우에는 신중한 조치를 취하고, 그 결과를 환경부담관계에 즉시 보고하여야 한다.

제6-26조(검사절차 및 기간 등)

- ① 제3회제2차에 따라 환경부공판된 제19호의 취급관리 대상지에 대해 정기 정기는 수시검사를 실시할 수 있다.
- ② 정기검사는 연 1회 이상 실시하여야 하며, 환경검사와 유전자검정결과에의 수출입과 관세청이 승인 등을 받지 아니한다면 의심이 있는 자에 대해서 수시검사를 실시 할 수 있다.
- ③ 제2차에 보고되는 기간은 10월 이후에 하역, 필요하다고 인정되는 경우 1월에 한하여 연장할 수 있다.
- ④ 제3조에 따라 물, 검사하는 공구등의 법적 규정 제48조서사의 종류를 지니고 이를 관제에게 내보여야 한다.

제6-27조(검사결과)

- ① 환경부장관은 제6·26조에 따라 검사한 경우에는 그 검사결과를 14일 이내에 검사받은 자에게 통보하여야 한다.
- ② 제1항에 따라 지적사항 등을 통보 받은 자는 30일 이내에 개선하고, 그 결과를 환경부장관에게 제출하여야 한다. 다만, 개선기간이 장기인 소묘물 경우 미리 환경부장관의 승인을 얻어 기간을 연장할 수 있다.

환경보호를 위한 자연생물보호를 꾀할 때는 물리·화학적 방법을 사용하여 불발성화시켜 자연환경에 피해가 발생하지 않도록 하여야 하며, 환경보호를 위한 자연생물보호가 자연환경에 부정적인 영향을 미치는 것을 알게 된 때에는 즉시 환경부장관에게 보고하여야 한다.

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

제5-28조(환경정화용 육천자연형생물체의 폐기처분 등)

- ① 환경부장관은 법 제23조의2제1항의 각 호에 해당하는 유전자변형생물체일 경우에는 폐기·반출 등을 명할 수 있다.

- ③ 연구시설, 생산시설 또는 환경정화 시설에서 배출되는 환경오염물류 유전자형물질에 포함된 폐수나 폐기물은 소각, 소독, 열분해 등 물리·화학적 방법을 사용하여 불활성과 시키는 등 환경오염을 자연환경에 피해가 발생되지 아니하도록 처리하여야 한다.

제6-29조(사후관리)

- ① 환경청장은 제 1제2조 및 제23조제4항에 위임 받은 생산자 승인권 유권자행위권한에 관하여 법률에서 정한 제24조제1항과 제25조 제1항에 위배되는 자에게 제24조 제4항 제1호에 위배하는 자를 신고하는 수시로 조사를 하고 유죄의자가 있는 경우 법원에 고소하는 조처를 할 수 있다.
- ② 제1항에 위배한 경우 환경청은 유권자행위권한행위권한을 정정할 것을 자의로 자의로 재료를 공판심사할 수 있다. 재료를 승인받은 자는 공판심사 결과 재료를 승인받은 자로 인정된다.
- ③ 선진된 기술 등 승인받은 환경청장은 유권자행위권한행위권한을 가진 자에게 부당한 영향력을 미치는 것을 알면, 다른 때에는 즉시 환경청장에게 보고하여야 한다.
- ④ 관계 유권자행위권한을 가진 법인은 법 제23조제4항에 따라 임의한 제24조 유권자행위권한행위권한을 가진 자에게 부당한 영향력을 미치는 것을 알면, 다른 때에는 즉시 환경청장에게 보고하여야 한다.
- ⑤ 환경청장은 승인된 유권자행위권한행위권한을 가진 자에게 제24조 제4항 제1호에 위배하는 경우에는 직권으로 재심을 실시할 수 있다.
1. 제24조에 위배하는 자는 수시로 결과와 직결을 위해 조사를 할 수 있다.
2. 제24조에 위배하고 제24조의 통보를 받은 자는 수시로 조사를 할 수 있다.
3. 선진기술에 관한 법률 제23조제4항에 위배하는 자는 수시로 조사를 할 수 있다.

4

환경부 유전자변형생물체 포장시험 실시 요건

CHAPTER 4 환경부 유전자변형생물체 표시제도 실시 요건

4-1.

환경부 유전자변형생물체 표시제도 절차

환경부 소속 국립 연구기관은 환경영향용 유전자변형생물체의 개발·실험승인을 받아 포장시험 등 환경영향실험을 할 때는 유전자변형생물체 통합고시 번호 9-7에 따라 유전자변형생물체의 격리포장시설⁸⁾ 구비요건을 준수하여 포장시험을 실시할 수 있다. 이때 격리포장시설을 설치·운영하기 위해서는 별지 제9-7호서식 "1·2등급 연구시설 설치·운영 점검 결과서(격리포장 연구시설)"와 별지 제9-8호서식의 "유전자변형생물체 격리포장시설 신고서"에 따라 격리포장시설을 환경부장관에게 신고하여야 한다.

■ 환경부 유전자변형생물체 표시제도 절차



※ 유전자변형생물체 표시제도를 위하여 안전 기준에 적합한 시설장치 그 밖의 구조물을 이용하여 주위와 물리적인 격리가 이루어진 경우로서 해당 종의 환경에 노출된 구조물을 포함함

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

[별지 제9-7] 유전자변형생물체 격리포장시설 구비요건

구분	구비요건
식물	- 격리포장시설은 물타리를 설치하여 주위와 물리적인 격리가 이루어져야 한다. 물타리의 높이는 지면으로부터 최소한 땅속 지저층을 포함하여 2m이상 되어야 한다. 다만, 비닐온실의 물타리(높이는 지면으로부터 1m이상이며, 비닐온실과 1m이상 거리에 설치되어야 한다). - 물타리는 쓰러지지 않도록 바닥에 단단하게 고정시켜야 하며 물타리 밑으로는 설치류 등의 출입을 막을 수 있는 설비를 갖추어야 한다. - 격리포장시설은 출입을 제한할 수 있는 잠금장치와 유전자변형생물체의 실험장소임을 알리는 표지판이 눈에 띄도록 설치되어야 한다. - 필요한 경우에, 개화기 등 적절한 시기에 생식기관을 제거하거나, 불지 허우기, 암사미복 설치 등으로 확률의 배산을 방지한다. - 격리포장시설 근처에 유전자변형생물체와 교잡 가능한 동종 또는 근연 야생종의 분포를 조사하고 교잡 거리 내에 분포되어 있는 경우에는 이들을 제거하여야 한다. - 병충성이 있는 유전자변형식물을 취급하였을 경우에는 반드시 도망, 식물체, 사육농기구, 작업복 등을 작업이 종료된 후 소독/제거한다. - 격리포장시설의 구역 내에 침수로, 침수장을 설치하고 배수구를 땅 등으로 막아 유전자변형생물체 및 부산물 등이 배수 중에 배출되지 않도록 조치한다.(관정장치용의 경우는 분 항 제외) - 유전자변형생물체가 외부로 유출되지 않도록 격리포장시설 구역 내에 농기구, 작업복 등을 보관하고 충분한 작업공간을 확보하여야 한다. - 격리포장시설 내 발생하는 폐기물(식물체, 종자 등) 처리 시 '유전자변형생물체 취급관리기준'에 준수하여 운반 및 소각할 수 있는 폐기물위탁처리업체의 증명서류(계약서 등)를 보관해야 한다.

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

[별지 제9-7호서식] 1·2등급 연구시설 설치·운영 점검 결과서(격리포장 연구시설)

■ 유전자변형생물체 국가간 이동 등에 관한 통합고시(별지 제9-7호서식)

1·2등급 연구시설 설치·운영 점검 결과서(격리포장 연구시설)

※ []에는 해당되는 곳에 ✓표를 함(나·다).

점검일: 20

신청인	연구시설명	안전관리등급 [] 1등급 [] 2등급	설치·운영책임자명	전화번호
항목 설치 기준 격리포장시설은 물타리를 설치하여 주위와 물리적인 격리가 이루어져야 한다. 물타리의 높이는 지면으로부터 최소한 땅속 지저층을 포함하여 2m이상 되어야 한다. 다만, 비닐온실의 물타리(높이는 지면으로부터 1m이상이며, 비닐온실과 1m이상 거리에 설치되어야 한다). 물타리는 쓰러지지 않도록 바닥에 단단하게 고정시켜야 하며 물타리 밑으로는 설치류 등의 출입을 막을 수 있는 설비를 갖추어야 한다. 격리포장시설은 출입을 제한할 수 있는 잠금장치와 유전자변형생물체의 실험장소임을 알리는 표지판이 눈에 띄도록 설치되어야 한다. 필요한 경우에, 개화기 등 적절한 시기에 생식기관을 제거하거나, 불지 허우기, 암사미복 설치 등으로 확률의 배산을 방지한다. 격리포장시설 근처에 유전자변형생물체와 교잡 가능한 동종 또는 근연 야생종의 분포를 조사하고 교잡 거리 내에 분포되어 있는 경우에는 이들을 제거하여야 한다. 병충성이 있는 유전자변형식물을 취급하였을 경우에는 반드시 도망, 식물체, 사육농기구, 작업복 등을 작업이 종료된 후 소독/제거한다. 격리포장시설의 구역 내에 침수로, 침수장을 설치하고 배수구를 땅 등으로 막아 유전자변형생물체 및 부산물 등이 배수 중에 배출되지 않도록 조치한다.(관정장치용의 경우는 분 항 제외) 유전자변형생물체가 외부로 유출되지 않도록 격리포장시설 구역 내에 농기구, 작업복 등을 보관하고 충분한 작업공간을 확보하여야 한다. 격리포장시설 내 발생하는 폐기물(식물체, 종자 등) 처리 시 '유전자변형생물체 취급관리기준'에 준수하여 운반 및 소각할 수 있는 폐기물위탁처리업체의 증명서류(계약서 등)를 보관해야 한다.				
비고 점검자 소속: 성명: (인) 설치·운영책임자 성명: (인)				

210mm×297mm(검정용지 60g/㎡(제출용지))

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

[별지 제9-8호서식] 유전자변형생물체 격리포장시설 신고서

■ 유전자변형생물체 국가간 이동 등에 관한 통합고시(별지 제9-8호서식)

유전자변형생물체 격리포장시설 신고서

[] 신규 [] 변경

※ 해당사항이 없을 경우 신청인이 체크 할 것임. []에는 해당되는 곳에 ✓표를 함(나·다).

접수번호	접수일	처리기간	60일
신청인	신규	사립지동화(비밀)업(등록번호)	
	사립지동화 주소		
	대표자명	연락처	
시설	시설책임자	성명	전화번호
내역	종류	[]는 []법	
	면적(㎡)		
	주소		
변경내용 변경 전 변경 후			
유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 제9-5조제6항에 의하여 유전자변형생물체의 격리포장시설을 신고함(나·다). 신청인 년 월 일 (인명 또는 인) 관계 중앙행정기관의 장 (또는) 위임기관의 장 귀하			
첨부서류 1. 별지 제9-7호 유전자변형생물체 격리포장시설 구비요건을 충족함을 증명하는 서류 2. 격리포장 시설 도사진 처리절차 이 신청서는 아래와 같이 처리됩니다. 신청서 작성 → 접수 → 현장점검 → 평가 → 검토결과 통지 신청인 관계 중앙행정기관의 장 (또는) 위임기관의 장 신청인 210mm×297mm(검정용지 60g/㎡(제출용지))			

환경정책을 유전자변형생물체 개발·실험승인을 받아 포장시험 등 환경방출실험을 할 때는 유전자변형 생물체법 규칙 별지 제31호서식의 "유전자변형생물체 개발·실험 승인신청서" 및 통고서지 별표 9-8의 유전자변형생물체의 환경방출실험 심사자료를 첨부하여 환경부장관에게 제출하여야 한다. 격려포장의 관리방법은 유전자변형생물체법 통고서지 별표 3-5의 유전자변형생물체의 함몰별 조치 사항에 준한다.

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

제9-13조(포장시험을 포함한 환경방출 실험승인 등)

- [illegible]

[참고]

장부서무	관계 행정안전기관과 장외 청허와 고시하는 데에 의함(나).		
가제법	관계 행정안전기관은 다음 표에서 심사요청사항 및 안전지원행정물체의 용도에 따라, 정책구체습나).		
	심사요청사항	안전지원행정물체의 용도	관계 중앙행정기관
	심사요청사항	부 안전지원행정물체의 용도에 의함	장외청허
	제(습)부(습)제(습)제(습)	시(습) 장(습)청	국립(습)행정안전부
		농(습) 축(습)산	농림(습)수산(습)부
		산업(습)	산업(습)광산(습)부
		보건(습)의료(습)	보건(습)복지(습)부
		환경(습)자연(습)	환경(습)부
제(습)도 및 제(습)호	국(습)가(습)관(습)부	국(습)가(습)관(습)부	
제(습)도 및 제(습)호	국(습)가(습)관(습)부	국(습)가(습)관(습)부	

처리절차

이 신청서는 아래와 같이 처리됩니다.

신청면

신청서 작성

승인서 교부

처리기관
관계 중앙행정기관

접수

심사

결정

신청서 작성 → 접수

접수 → 심사

심사 → 결정

결정 → 승인서 교부

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙 ▼

[별지 제9-31호서식] 유전자변형생물체 개발·실험 승인신청서

■ 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률 시행규칙(별지 제31호서식) <개정 2018.11.13>

유전자변형생물체 개발 · 실험 승인신청서

※ 표정색의 어두운 눈은 신장염에 적지 않으며, []에는 해당하는 글씨 ✓표를 합니다.

접수번호	접수일	처리기간	60일
신청인 (시험연구 기관)	선호 대표자 성명 사업장 주소	사업자유족면허(법정면허번호) 전화번호	
과제명	[신규 계속 변경]		
연구기간	- - - - - / - - - - - 연		
연구책임자	성명 관저제출 주소 주소 직가번호(신고목민번호)	직위 전화번호 영전지리등록금 원.	
연구시설	주소 생물안전관리책임자 성명	소속	

심사요청사항 (해당사항 모두 ☒ 표함)

1. **종교개혁** : 라틴 교회의 권위와 대립하여 성경을 권위자로 삼았으며, 사탄을 타락의 근원으로 규정하였다.
2. **종교개혁** : 라틴 교회의 권위와 대립하여 성경을 권위자로 삼았으며, 사탄을 타락의 근원으로 규정하였다.
3. **종교개혁** : 라틴 교회의 권위와 대립하여 성경을 권위자로 삼았으며, 사탄을 타락의 근원으로 규정하였다.
4. **종교개혁** : 라틴 교회의 권위와 대립하여 성경을 권위자로 삼았으며, 사탄을 타락의 근원으로 규정하였다.
5. **종교개혁** : 라틴 교회의 권위와 대립하여 성경을 권위자로 삼았으며, 사탄을 타락의 근원으로 규정하였다.
6. **종교개혁** : 라틴 교회의 권위와 대립하여 성경을 권위자로 삼았으며, 사탄을 타락의 근원으로 규정하였다.
7. **종교개혁** : 라틴 교회의 권위와 대립하여 성경을 권위자로 삼았으며, 사탄을 타락의 근원으로 규정하였다.
8. **종교개혁** : 라틴 교회의 권위와 대립하여 성경을 권위자로 삼았으며, 사탄을 타락의 근원으로 규정하였다.
9. **종교개혁** : 라틴 교회의 권위와 대립하여 성경을 권위자로 삼았으며, 사탄을 타락의 근원으로 규정하였다.
10. **종교개혁** : 라틴 교회의 권위와 대립하여 성경을 권위자로 삼았으며, 사탄을 타락의 근원으로 규정하였다.

「유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률」 제22조의2제1항, 같은 법 시행령 제23조의6제2항 및 같은 법 시행규칙 제14조의5제1항에 따라 위와 같이 유전자변형생물체의 개발·실험 승인을 신청합니다.

신정인 (서명 또는 인) (관계 중앙행정기관) 장관(처장) 귀하 210mm×297mm(백서지 80g/㎡)

4-2.

격리포장시설 안전관리

환경영향평 유전자변형 작물을 격리포장시설에서 실험할 때는 환경 및 인체 건강에 미치는 위험을 최소화하고 예상치 못한 사고에 신속하게 대응할 수 있도록 유전자변형생물체법에 따라 체계적으로 관리하여야 한다. 격리포장시설의 안전관리 방법은 「환경부 유전자변형생물체 위해성평가기준 안전관리 지침」²⁾의 항목별 조치 사항에 준한다.

격리포장시설의 위치는 부위의 출입이 쉽지 않고 자연태화에 의한 회색이 쉽게 발생하지 않는 모래 선형위에 한다. 또한 환경검출물상에 의한 잠재적인 영향을 고려하여 주변에 식물과 생물학적 격리가 가능한 곳일 경우, 물리학적 설치하여 주위 물리학적 격리가 이루어지도록 한다. 격리포장의 물리학적 시설은 격리포장 시설의 땅속 깊이를 포함하여 2m 이하에 있어야 하며, 비밀순의 물타는 지면으로부터 1m 이상이며 비밀순과 1m 이상 거리로 설치되어야 한다.

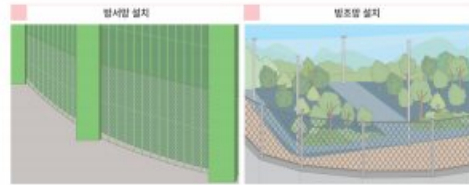
물타리 설치



물리치는 소스까지 알도록 바닥에 단단하게 고정하고, 설치류의 침입을 막기 위하여 물리치 하단에 철망도 설치하여야 하며, 해충 방제 잔류 기간에 취약하여 관리할 수도 있다. 또한, 유전자변형생물체의 종자나 영양체 등이 조류 등의 침입으로 외부로 유출되지 않도록 환경방출 전 범포장과 설치를 권장한다.

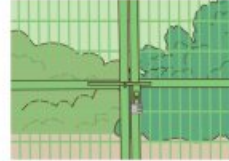
1) 환경부 무전자변환성물체 위해성평가기관 안전관리 지침, 2023. 환경부-국립생태원

46



격리포장시설은 허가받은 자만이 출입할 수 있도록 출입문에 잠금장치를 설치하여야 하며, 유전자변형농산물체의 실질 잠소입을 알 수 있도록 표지판을 눈에 띄도록 설치하여야 한다. 잠금장치는 비밀번호 입력과 카드키, 지문 인식 시스템 등을 사용할 수 있으며, 단일 또는 혼합 방식 중 선택하여 설치할 수 있다.

비밀번호 입력 잠금장치



카드키 잠금장치



출입구 위치



생물안전표지



46

47

제리프모정식승인된 사람만 출입할 수 있도록 출입구에 출입대장을 비치하고 기록하는 것을 권한다. 상시 출입자는 연구원/동승자 및 관리자의 경우 소속과 성명, 민가 일지, 방문 사유 등이 표시된 민가 대장을 작성하여 비치하는 것을 권한다. 일시적으로 방문하는 출입자는 성명, 소속, 방문 목적, 출입 시간, 안내자 등 출입대장에 기록할 것을 권한다. 또한 제리프모정식승인을 이용하는 연구원/동승자에서는 면 2시간 이상의 생활 연구교역을 이수하여야 한다.

출입대장 양식

[illegible]

상시출입자 연가대장 양식

[illegible]

결리포지셔닝은 실험에 사용된 유전자변형생물체의 확률이 비산에 의해 주변의 동물 또는 근면 야생종과 교감하는 것을 방지하기 위해 확률 비산 방지망을 설치하는 것을 권장한다. 또한 필요한 경우에, 개체가 등 적절할 시기에 생식기관을 제거하거나, 불치 부위, 암사체로 설치 등으로 확률 비산을 방지하여야 한다.

화분 배선 방지망



봉지 싸우기



당 해우기



한정된 전 범용성은 유전자변형생물체의 위험 또는 거리 평가를 고착하여 격리포장시설 근처에 유전자변형생물체와 교감할 수 있는 동종 또는 근연 야생종의 분포를 조사하고, 교감 거리 내에 분포되어 있을 때는 재평가 이전에 이들을 제거하여야 한다.

식물 조사



주변 매초



병원성여 있는 유전자변형식물을 취급하였을 때는 반드시 토양, 식물체, 사용 농기구, 작업복 등을 작업이 종료된 후 소독/폐기하여야 한다.

격리포장시설은 구역 내에 침수구와 침수장을 설치하고 배수구는 월터나 토질판 가림방 등으로 막아 유전지반형성층과외 그 부산물들이 배수 중에 매몰되지 않도록 하거나 한다. 격리포장시설 내 오염물의 하부 구조물인 콘크리트와 같은 불투수 재질을 사용하여 유전지반형성층과의 유출을 방지하며, 배수구는 침수로 침수구로 수로에 이동하도록 한다. 폭우와 홍수 등에 따른 배의 범람을 고려하여 침수구와 침수장은 충분한 크기로 설치하여야 하며, 침수구의 부산물을 설치하고 배수계와외로 유출할 수 있도록 해야 한다.

48

49

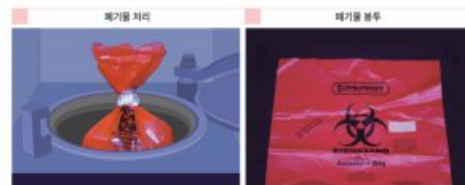


특허포장시설은 작업 중 사형한 농기구나 작업복에 포함된 유전자변형생물체가 외부로 유출되지 않도록 특허포장시설 구역 내에 농기구와 작업복 등을 보관하는 장소를 설치하여야 한다. 또한 충분한 작업공간을 확보하고 세척장을 마련하여 유전자변형생물체의 외부 유출을 최소화하여야 한다. 그 외에도 차량 세척기, UV 소독기, 에어 커튼 등을 설치하여 유전자변형생물체의 유입과 유출을 방지할 수 있다.



유전자변형생물체를 사용한 실험체계를 일 때는 반드시 고압증기멸균 또는 화학적처리 등을 통해 생물학적 활성을 제거한 후 사용하도록 규정된 절차를 준수하여야 한다. 고압증기멸균을 사용하여 생물학적 활성을 제거할 때는 해당 분자를 사멸하여 없애주어야 한다. 고압증기멸균을 할 때는 고압 용기, 멸균 용액, 용기 자체, 비산성 폐기물, 폐기 화학물질 등을 폐기할 때는 폐기물의 성질에 따라 적절한 방법으로 생물학적 활성을 제거하여 폐기하여야 한다. 적절한 실험이 끝나고 난 후에는, 치명적인 폐기물 용기에 보관한 후 폐기물처리업체를 통해 폐기물인멸을 해야 하며 폐기물처리업체에 연락하여야 한다.

격리포장시설 내 발생하는 폐기물(식물체, 종자 등) 처리 시 "유전자변형생물체 취급관리기준"을 준수하며 운반 및 소각할 수 있는 폐기물위탁처리업체와 중병서류(계약서 등)를 보관하여야 한다.

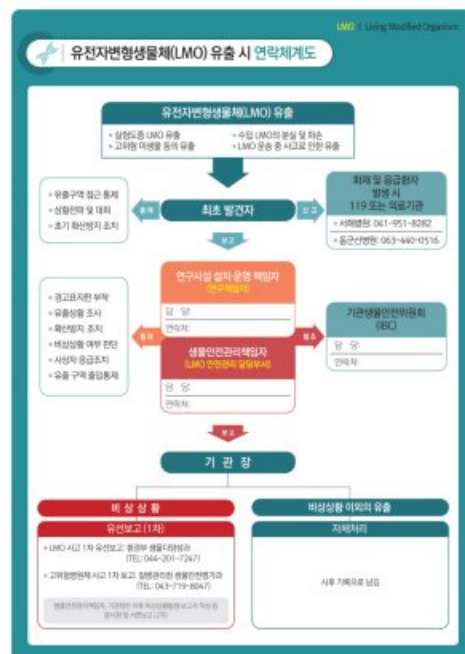


비로즈시정에서는 실업률 수치를 얻기 위한 통계조사에는 실업 2주 후의 비로즈시정현황을 통계로 통합하고 몇몇 지점 11호시에서 실업률 통계조사에 관여하고 있다(비로즈시정) 작성하고 2주 간격에서의 확률 분석은 수 주전 2주분이며이다. 반면, 실업률 통계는 4년과 20주 분의 기간을 두고 고령 및 청년층과 같은 군단별, 또는 유색인종별, 성별, 시정구별 별지 5000002에서 수치를 통합하고 몇몇 지점 2호시에서 "시정구"연평균의 유색인종별 통계 취급과 관련된"을 작성하고 2주 간격에서의 확률 분석은 2주 5000 분의 분포이며이다. 기록의 수치를 2주 분의 평균으로 전국 전역 기록 대체로 대체할 수 있지만, 기간, 또는 연평균 특성에서 수치를 정형화하고 적용할 수 없다. 또한 전국 기록을 대체할 수 없을 수 있고 이를 보완하기 위해 전국기록에서 대체되는 식을 몇 유색인종에서 몇 명, 상위 유색인, 형식적, 식을 수량, 대체, 비전, 수확일, 취업자 등 대체되는 기록을 유색인종으로 대체.

[illegible][illegible]

핵심포장시설에서 사용한 유전자변형생물체가 누출·유출되어 질병 및 생태계 교란 파괴 등 피해가 발생하는 경우 안전사고를 대대적으로 비상 상황 시 행동 요령을 포함한 비상대응체제를 마련하여야 한다. 행동 요령은 만약의 경우, 상황관리대처, 조사·판단, 유출·확산 방지 조치, 보고, 분석 및 재발 방지 등이 포함된다.

参考文献



CHAPTER 4: 2009-2010 UNIVERSITY STUDENT GRADUATE SURVEY

4-3.

포장시험에 따른 주변 환경영향조사

제2포로식생에서 환경정화용 유전자변형 식물을 이용한 환경정화물질을 수형할 때는 유전자변형식물과 제2포로식생 유전자변형식물인 다른 품종간의 등의 조성에 따라 유전자변형물질에 환경에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수형 품종을 조합할 수 있다. 유전자변형식물은 제2포로식생과 유사한 다른 지역으로 퍼질 수 있는 위험을 최소화하고 나아가며, 특히 환경정화용 유전자변형식물체가 생물다양성에 변화를 일으키는 등 직접적으로 위해를 가질 가능성을 사전에 확인하여 잠재적인 위험을 차단하는 데 의미가 있다.

유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 법률

제26조의2(유전자변형생물체로 인한 환경영향 등의 조사)

- 1) 경제 중앙은행의 장은 국내 통화 발행은 유관장관회의를 거쳐 국민 건강과 환경에 미치는 영향, 화석유가 부족에 소요되고 인명피해 연구서를 생산·생물자이용기술·식품질·보안정보 및 그 주변지식기술 등을 조사를 할 수 있다.
- 2) 경제 중앙은행의 장은 경제에 대한 조사를 위하여 필요할 때는 다른 경제 중앙은행의 장에게 협조를 요청할 수 있다. 이 경우 요청 받은 경제 중앙은행의 장은 특별한 사유가 없는 한 협조하여야 한다.
- 3) 경제 중앙은행의 장은 제4항에 따른 조사업결과를 대통령령으로 정하는 방법과 절차에 따라 공개한다.
- 4) 제4항에 따른 조사의 방법, 절차에 관하여 필요한 사항은 대통령령으로 정한다.

 유전자변형생물체의 국가간 이동 등에 관한 통합고시 ▼

제6-30조(환경영향 등의 조사 방법 및 절차)

- ① 관계 중앙행정기관의 장은 법 제26조제2항에 따른 조사 결과 발견된 유전자변형생물체가 환경영향평가 유전자변형생물체임 경우에는 환경부장관 및 국가책임기관의 장에게 통보하여야 한다. 다만, 발견된 해당 유전자변형생물체의 규모가 작을 경우에는 발견한 관계 중앙행정기관의 장에 수가 재가 할 수 있다.

2. 환경부장관은 제1회와 제2회 발표를 받은 때에는 발원지 유전자변형생물체를 수거·제거하여야 한다.

3. 환경부장관은 제1제2조의제1항에 따른 조사 결과 발원지 유전자변형생물체의 소관 관청·중앙청장·지자체장 또는 관청·지방자치단체의 수장 등 경우에는 국가환경안전국의 장과 협의하여 처치하여야 한다.

4. 제2조 중 생물안전국의 장은 제1제2조의제3항의 규정에 따라 환경청장명 유전자변형생물체 조사결과를 공개할 경우에는 미리 환경부청장과 협의하여야 한다.

5. 제4기 개발을 앞둔 조제에 관한 세부적인 사항은 환경부장관이 별도로 정할 수 있다.

포스트시대에 따른 주요 환경영향조사는 다음과 같은 주요 단계를 포함하여 체계적으로 수행될 수 있다. 1. 환경영향평가의 범위와 비범위를 기준으로 하는 대상시설 선정 단계로 사업권과 범용성 유무에 따라 환경영향평가 목적 및 목적을 달리하며 비대상 시설은 조사가 필요하지 않으나 환경영향평가 대상 시설은 목적, 성격, 영향 예측 3. 환경영향실험을 실시하고 실험 결과를 환경 변화를 감지하고 문제가 발생할 경우 즉각적으로 대응할 수 있는 모니터링, 진단 및 예외처리 방법 환경변화에 뒤이어 비대상 시설은 조사를 즉각적으로 종료하여 영향을 최소화하는 위험 관리 단계 5. 환경영향실험을 위한 일정 기간을 주된 환경관리 조사(예컨대, 정기 측측과 실제 결과)의 위험 관리 단계 주요 환경영향실험 계획에 대한 내용을 장기적인 영향 평가 수단 평가가

* 환경방출실험에 따른 주변 환경영향조사 단계

[illegible]

■ 주변 식물에 미치는 영향조사 체계



* 주변 식물에 미치는 영향조사 모식도

¹¹ Nam and Lee, 2023. Safety management regulation and practice standards on living modified organism (LMO) facilities under the Ministry of Environment. *Plant Biotechnol Rep* 17: 787–802.

2. 환경부 LMO 위해성평가기관 격리포장 재배환경 개선

가. 환경부 LMO 격리포장시설 안전관리 강화

1) 배수·집수시설 정비로 LMO 유출 방지

LMO법 통합고시 별표 9-7(유전자변형생물체 격리포장 구비요건)에 따라 LMO와 그 부산물 등이 배수 중에 배출되지 않도록 격리포장 내외부의 배수·집수시설을 연중 관리하였다(그림 36).



그림 36. 내외부 배수로 정비 구역도

준설 차량을 통해 내부 배수로 30 m 길이에 퇴적된 준설토를 고압 살수를 통해 제거하였고, 외부 배수로는 전체 140 m 모두에 위치한 준설토를 고압 살수와 빗자루를 통해 정기적으로 제거하였다(그림 37).



내부 배수로 준설토 제거

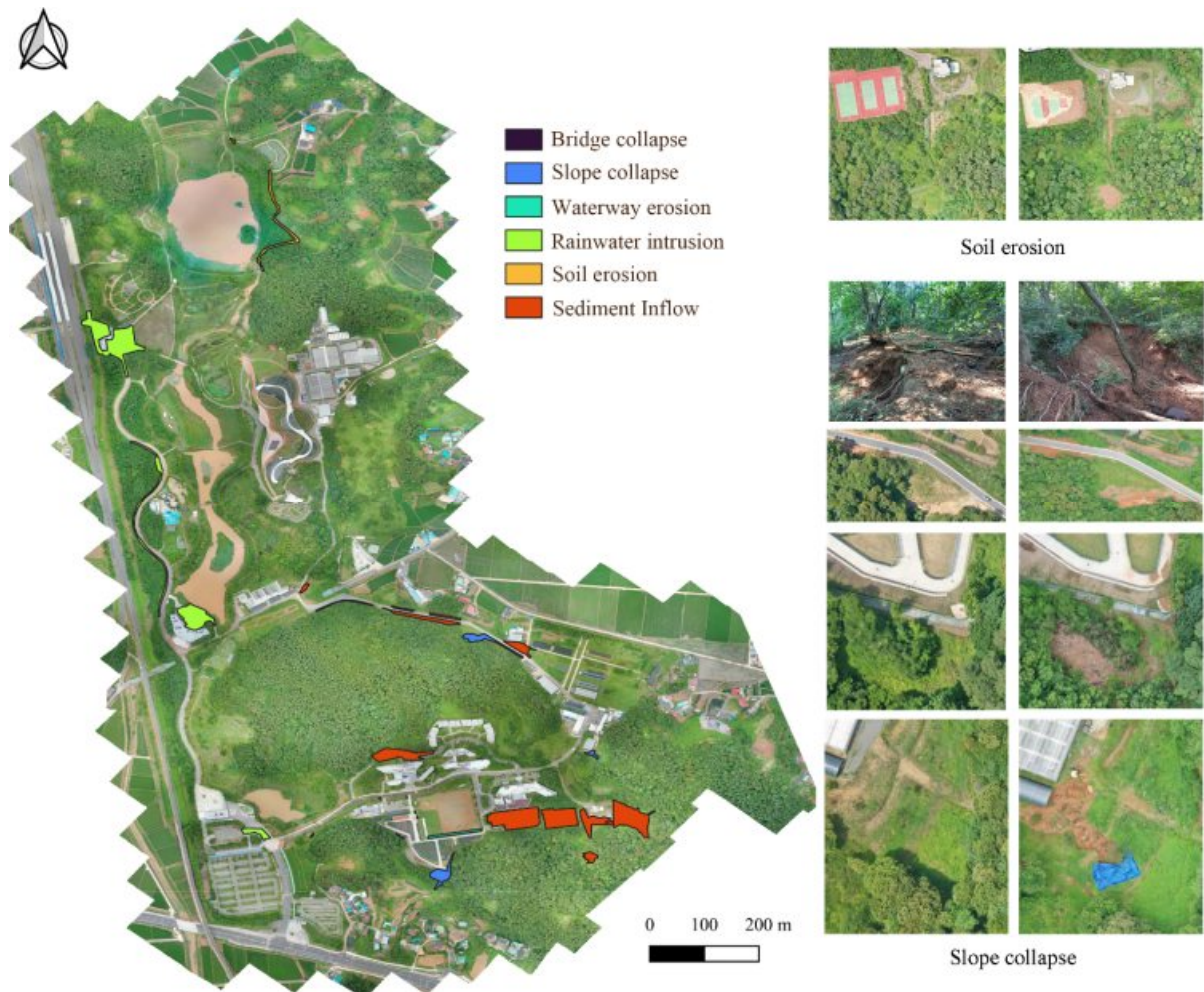
외부 배수로 준설토 제거

그림 37. 내외부 배수로 작업 사진

LMO 격리포장시설이 위치한 서천군 일대에 2024년 7월 시간당 최대 강수량 111.5 mm(02~03시), 일 강우량 232 mm의 기습폭우로 격리포장 외부 사면(1,054 m²)과 수로(584 m²)가 침식되어 큰 피해를 입었다. 사면의

토사 유실로 인해 우수집수정이 범람하고, 내부 배수로 내 토사 퇴적으로 인한 배수불량 역시 내외부 배수로 퇴적토 제거로 개선하였다.

한편, 기습폭우로 인한 격리포장 시설물의 안전관리 모니터링을 위해 무인항공기를 활용한 원격탐사 영상데이터를 확보한 후 구축된 데이터를 토대로 격리포장시설의 안전관리 방안을 마련하였다. 본 연구의 결과는 GEO DATA에 게재되었다(Han and Nam, 2024).



출처: Han and Nam, 2024

그림 38. 정상영상을 통해 시각화한 기습폭우 지역

국립생태원 내부의 피해를 확인하기 위해 그림 38(출처: Han and Nam, 2024)과 같이 정사영상을 제작하여 실제 피해 규모를 확인하였다. 피해 유형은 토사 유입, 수로 침식, 사면 붕괴, 토양 침식, 교량 붕괴, 우수 침투로 구분하여 표시하였다. 피해 유형 중 사람의 접근이 어려운 산림의 토양 침식으로 인한 사면 붕괴와 연구 및 전시 시설의 피해 범위를 빠르게

파악할 수 있었다. 특히 많은 강수로 인한 전시 구역 내에서의 물길 형태 및 위치를 확인할 수 있어 추가 강우에 대한 대비가 가능하였다.

한편, 피해 정도를 관측한 정사영상은 QGIS에서 피해 유형과 구역별로 분류하여 면적을 산출하였다(표 7; 출처: Han and Nam, 2024). 전체 피해 면적은 29,384 m²이었고, 가장 많은 피해 유형은 토사 유입이었다. 폭우로 인한 피해는 야외 전시구역이 38.2%로 가장 컸고, 실내시설과 연구시설의 피해가 33.0%로 높았다. 특히 연구시설인 LMO 격리포장의 경계면 상당 부분이 절토사면으로 이루어져 있어 토사 유입으로 피해가 높은 것으로 나타났다. 유형별로는 토사 유입으로 인한 피해가 51.8%로 가장 높았고, 우수 침투로 인한 피해가 33.5%로 나타났다. 사면 붕괴에 의한 피해 면적은 7.3%로 적었으나 다른 피해와 연쇄적으로 작용하는 모습을 보였다. 이러한 피해 유형 파악과 피해 구역의 면적 산출을 통해 신속하게 피해 현황을 파악할 수 있었고, 피해 복구를 위한 계획수립에도 유용하게 활용할 수 있었다.

표 7. 기습폭우 피해 유형 분포

Category		Count	Min (m ²)	Max (m ²)	Sum (m ²)
District	Buildings and research	10	5	3,623	9,708
	Forest	9	27	3,182	7,380
	Tree nursery	2	184	724	908
	Road	1	157	157	157
	Exhibition	7	6	5,166	11,231
Damage type	Sediment Inflow	12	63	3,623	15,231
	Waterway erosion	8	5	509	845
	Slope collapse	3	184	1,054	2,140
	Soil erosion	1	1,321	1,321	1,321
	Bridge collapse	1	6	6	6
	Rainwater intrusion	4	612	5,166	9,841

출처: Han and Nam, 2024

2) LMO와 주변 야생식물 간 교잡 방지를 위한 주변 식물 제초 관리

LMO법 통합고시 별표 9-7(유전자변형생물체 격리포장 구비요건)에 따라 격리포장 근처에 LMO와 교잡 가능한 동종 또는 근연 야생종의 분포를

조사하고 교잡 거리 내에 분포되어 있는 식물은 제거하기 위해 격리포장 내부($8,369 \text{ m}^2$)와 주변 수로 및 내부 울타리($1,336 \text{ m}^2$), 격리포장 경계 및 외부 울타리($1,095 \text{ m}^2$)에 자생하는 식물들을 제거하였다(그림 39).



그림 39. 제초관리 구역도

격리포장 주변 식물 관리는 연중 이루어졌으며, 특히 여름철에는 더 빈번하게 관리하였다(그림 40). 연중 총 관리면적은 격리포장 내부의 경우 $54,883 \text{ m}^2$ 였고, 주변 수로 및 내부 울타리와 격리포장 경계 및 외부 울타리는 각각 $9,352 \text{ m}^2$, $7,665 \text{ m}^2$ 였다.



격리포장 내부 관리



주변 수로 및 내부 울타리 관리



격리포장 경계 및 외부 울타리 관리

그림 40. 격리포장 주변 식물 제초 관리 사진

나. 격리포장 환경방출실험 대비 재배환경 개선

격리포장 내 환경방출실험 대비 재배환경 개선을 위해 시험포 1과 시험포 2의 방초포를 교체 및 보수하였다(그림 41, 그림 42).



그림 41. 시험포 보수 구역도



시험포 1

시험포 2

그림 42. 방초포 교체 사진

또한, 시험포 1 내 관수시설을 확장하여 위해성평가 식물의 재배 환경을 개선하였다(그림 43).



그림 43. 시험포 1 내 관수시설 확장 사진

다. 환경부 LMO 위해성평가 식물 채종포 및 증식포 유지관리

환경정화용 및 자연생태계 LMO의 위해성평가를 위한 자체적인 종자·묘목 생산을 위해 격리포장 내 유채와 해바라기, 콩, 포플러의 채종포와 증식포를 조성하여 관리하였다(그림 44).



그림 44. 격리포장 채종포 및 증식포 사진

3. 국내 기후환경을 반영한 LMO 종자 월동성 검정 방법 개발

가. 국내의 LMO 위해성평가 환경요인 비교 분석

국내 기후환경을 반영한 환경부 LMO 종자 월동성 검정 방법 개발을 위하여 국내외에서 연구된 종자 월동성 위해성평가 사례를 표 8에 나타내었다. 대상 식물로는 국내 수입되는 4대 LM 작물인 콩, 옥수수, 면화, 유채를 중심으로 조사하고자 하였으나, 연구 사례가 적어 4대 작물 외에도 벼, 아마, 부추 등의 사례를 함께 조사하였다. 월동성 연구에 사용된 환경 데이터로는 연평균 기온, 일조량, 강수량, 강수일수 등 실험지역의 기상 데이터가 사용되었으며 기상데이터는 실험기간 동안만 수집한 사례가 대다수 였으나 실험지역의 30년 동안의 평균 기후와 매립 깊이별 토양 온도를 측정한 사례도 있었다. 매립 기간으로는 짧게는 6개월부터 7개월, 10개월이 있었고 가장 길게는 20개월이 있었다. 매립 깊이는 표면(0 cm)부터 15 cm 범위에 있었고 범위 내에서 2개 또는 3개 구간으로 나누어 매립하였다. 매립한 종자량은 50립부터 100, 120, 400립 등 다양했고 1,000립이 넘는 사례도 있었다. 조사는 1회만 한 사례도 있었지만 15일 또는 3~4회부터 12회에 이르기까지 수차례 조사하는 것이 일반적이었다. 월동 평가항목으로는 발아율과 활력검사를 통한 휴면율을 가장 많이 조사하였으며, 활력검사는 TZ 검사 또는 육안을 통해 조사하였다.

표 8. 국내·외 종자 일동성 위해성평가 사례

No	사용 식물	LMO 유/무	실험 국가	측정 환경 데이터	매립 깊이 (cm)	매립 시기	매립 기간 (개월)	종자 회수 처수 및 간격	매립 종자 개수	매립 면적	Seedbag 유/무	회수 방법	참고문헌
1	잡초벼	무	중국	• 토양 이화학적 • 실험지역의 기상데이터(연평균 기온, 연평균 일조량, 연평균 강수량, 연평균 무상(서리)기간) • 실험기간 동안의 월평균 기온, 월평균 강수량, 월평균 일조량 • 토양수분 보유 여부	0-5, 5-10, 10-15	2011년 11월	6	15일 간격으로 12회	1000 3000 4000 5000	2 m × 2 m	무	토양 코어 표본 추출	Zhang et al., 2019
2	콩, 돌콩	유	한국	• 실험기간 동안의 평균 기온, 월간 강수량, 총 강수량 • 토성	2, 15	2015년 9월	10	1, 2, 6, 10개월	50	30 × 30 cm	유	시드백 회수	Ko et al., 2016
3	<i>Muehlenbeckia astonii</i>	무	영국	• 실험지역의 기상데이터(연평균 강수량, 일일 평균 최저 기온, 최고 기온)	5	2010년 10월	48	12, 24, 36, 48개월	25	50 × 50 cm	유	시드백 회수	Watton 2018
4	유채	유	한국	-	5, 25, 30	2018년 4월 2018년 7월	18 15	2, 3, 4, 5, 7, 12, 15, 18개월 12, 4, 8, 12, 15개월	100	-	유	시드백 회수	Umurzkov et al., 2019
5	아마	무	미국	• 토양 이화학적 • 30년 기후 평균(온도, 강수량) • 실험지역의 기상 데이터(월평균 기온 및 총 강수량)	0, 3, 10	2005년 10월 2006년 10월	20 20	175, 271, 328, 574일 216, 277, 339일	200	80 × 90 cm	유	시드백 회수	Dexter et al., 2011
6	유채	무	독일	• 실험지역의 기상데이터(연평균 기온, 연평균 강수량) • 토성	10	2001년 8월 2002년 8월	6 7	1회 1회	500	-	유	시드백 회수	Gruber et al., 2004
7	벼	무	한국	• 실험지역의 기상데이터(기온, 영하일수, 강수량, 강수 일수) • 토성	표면, 10	2008년 11월 2009년 11월	6 7	1회 1회	100 400	- 41.0 × 24.5 × 15.0 cm	무	종자 회수 종자회수	Baek & Chung 2012
8	<i>Allium tenuissimum</i>	무	중국	• 실험지역의 기상데이터(연평균 기온, 연평균 강수량, 월 평균 최저기온, 월 평균 최고 기온, 강수량 집중 기간) • 매립깊이별 토양 온도	0, 2, 5	2014년 12월	13	1개월마다 12회	120	-	유	시드백 회수	Ye et al., 2019
9	콩, 아생콩	유	한국	-	5	수확 직후	6	120, 150, 180일	50	-	유	시드백 회수	Yook et al., 2021

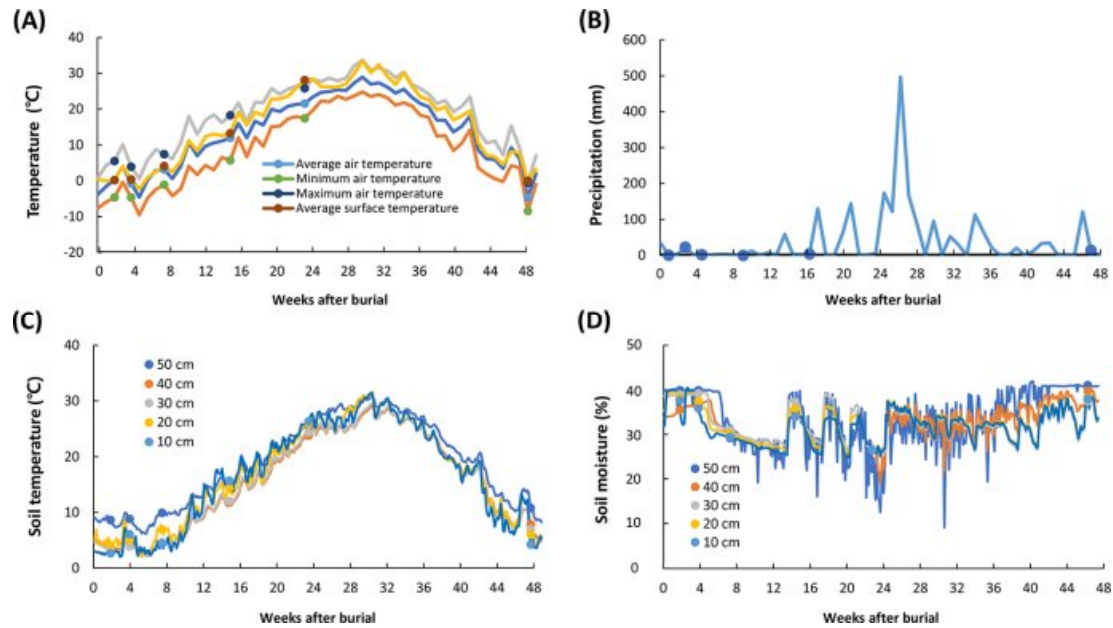
No	사용 식물	LMO 유/무	실험 국가	측정 환경 데이터	매립 깊이 (cm)	매립 시기	매립 기간 (개월)	종자 회수 처수 및 간격	매립 종자 개수	매립 면적	Seedbag 유/무	회수 방법	참고문헌
10	<i>P. alpicola</i> <i>P. fletcheri</i>	무	중국	- 실험지역의 기후 특징 - 실험지역의 기상 데이터(연간 강수량, 연평균 기온, 일일평균 기온, 월평균 기온, 적설양, 지온변화) - 매립 깊이별 토양 온도	1	2014년 1월	23	2개월부터 1달마다	1000	-	유	시드백 회수	Wang et al., 2017
11	<i>Anagallis anensis</i> L. <i>Bifora radicans</i> M. Bieb <i>Bifora testiculata</i> (L.) Spreng. <i>Centaurea sostiialis</i> L. <i>Onchus benedictus</i> L. <i>Nigella damascena</i> L. <i>Papaver rhoeas</i> L. <i>Ranunculus anensis</i> L. <i>Ceratocephalus falcatius</i> (L.) Pers. <i>Roemeria hybrida</i> (L.) DC.	무	프랑스	- 실험지역의 기상데이터(일일 강수량, 일별 변동 온도) - 매립 깊이별 토양 온도	5, 10, 25	2009년 10월	5	3, 5개월	20	-	유	시드백 회수	Saatkamp et al., 2011

나. 의도적·비의도적 환경방출을 고려한 종자 월동성 조사

1) 국내 승인 4대 LM 식물 매물 종자의 매립 기간별 발아율 및 휴면종자 비율 검정

국내 기후환경을 반영한 LMO 종자의 월동성 검정 방법 개발을 위해 국내에 가장 많이 수입·유통되는 4대 LM 식물(카놀라, 면화, 콩, 옥수수)의 실내 및 실외 월동성 실험을 수행하였다. 본 연구의 결과는 *Journal of Ecology and Environment*에 게재되었다(Nam et al., 2024a).

매물 종자의 매립 기간별 발아율 및 휴면종자 비율 검정을 위해 4대 LM 식물(카놀라, 면화, 콩, 옥수수)의 비변형종자를 이용하여 Seedbag에 넣은 종자와 넣지 않은 종자를 10 cm 깊이에 묻고 48주 동안 발아율과 휴면율을 조사하였다. 조사 기간 중 평균 기온은 매립 2주 후에 0.2 °C 였지만 4주 후에 -0.7 °C로 떨어졌다(그림 45; 출처: Nam et al., 2024a). 평균 기온은 매립 8주 후에 3.2 °C로 상승했고 24주 후에는 21.6 °C로 크게 상승하였으나 48주 후에는 -4.7 °C로 감소하였다. 실험 기간의 평균 강수량은 39.9 mm였고 7월에 최대 주 강수량이 496.7 mm였다. 종자 매립 후 전체 실험 기간 10~50 cm 깊이에서 측정된 토양온도는 영상으로 유지되었다. 매립 2주, 4주, 8주 후에 10 cm 깊이의 토양온도는 각각 2.6, 6.0, 4.4 °C였다. 토양온도는 매립 16주 후에 15.7 °C, 24주 후에는 26.3 °C로 상당히 증가했다. 그런 다음 매립 48주 후에 4.2 °C로 다시 떨어졌다. 매립 기간의 온도 차이는 토양 깊이가 깊어질수록 크지 않았다. 토양 수분은 매립 2주 후에 10 cm 깊이에서 38%였고, 전체 기간 27~38%로 유지되었다. 토양온도와 달리 토양 수분 차이는 토양 깊이가 깊어질수록 따라 증가하였다.



출처: Nam et al., 2024a

그림 45. 시험 포장의 기온(A), 강수량(B), 토양온도(C), 토양 수분(D)

매립된 종자의 초기 및 최종 발아율은 Seedbag의 유무, 식물 종 및 매립 기간에 따라 상당히 달랐다(표 9; 출처: Nam et al, 2024a).

표 9. 4대 식물 종별 매립 기간별 발아율과 휴면율 General Linear Model (GLM) 분석 결과

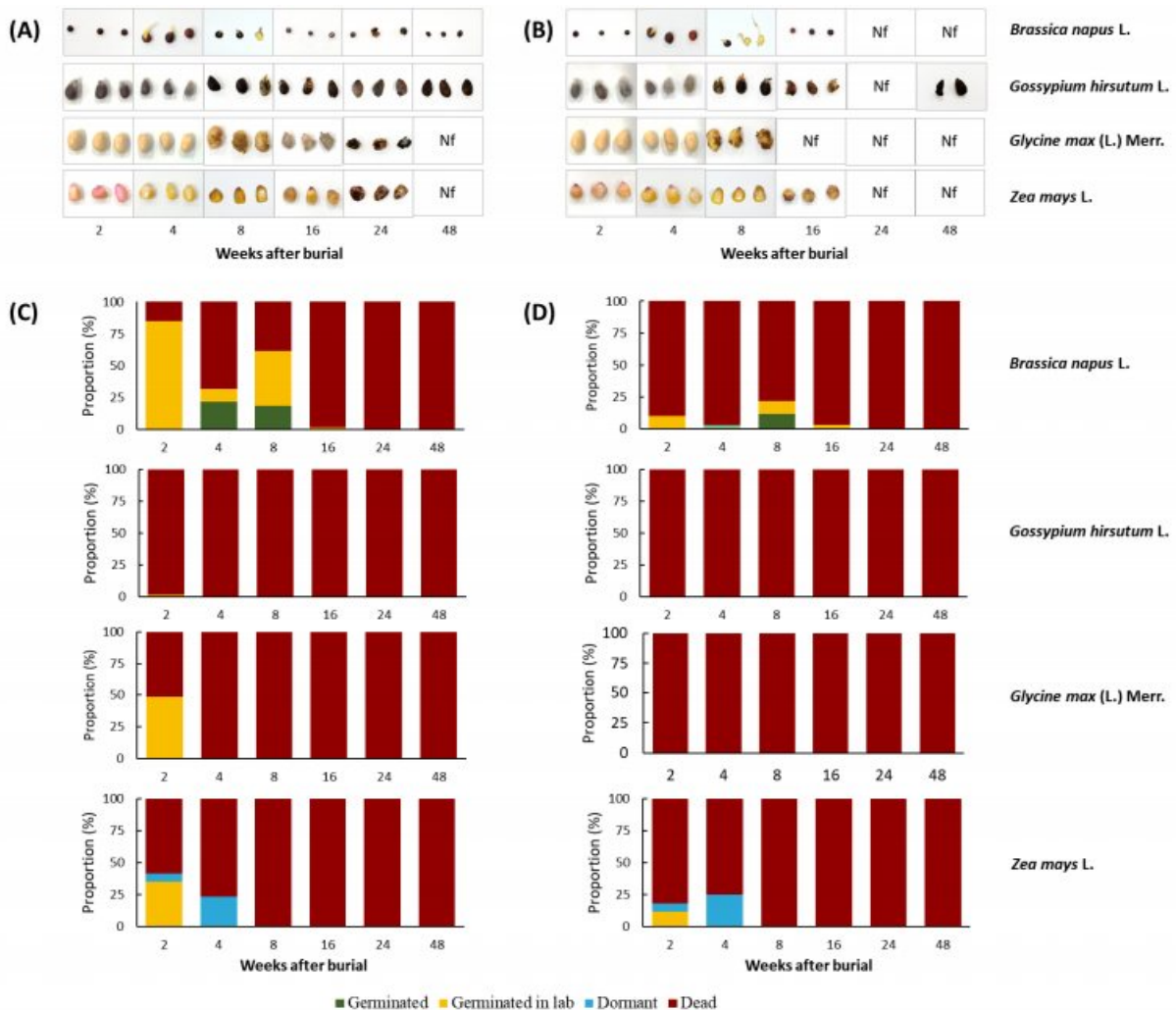
	초기발아율	최종발아율	휴면율
식물 종	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Seedbag 유무	0.008	< 0.001	0.690
매립 기간	< 0.001	< 0.001	< 0.001
Seedbag × 매립 기간	0.002	< 0.001	0.958
Seedbag × 식물 종	< 0.001	< 0.001	0.984
식물 종 × 매립 기간	< 0.001	< 0.001	< 0.001
식물 종 × Seedbag × 매립 기간	< 0.001	< 0.001	1.000

출처: Nam et al, 2024a

또한, Seedbag 유무 × 식물 종, Seedbag 유무 × 매립 기간, 식물 종 × 기간, Seedbag 유무 × 식물 종 × 매립 기간의 초기 및 최종 발아율에 대한 유의한 상호 작용이 확인되었다. 휴면율에서 유의한 차이는 식물 종($p <$

0.001), 매립 기간($p < 0.001$) 및 식물 종 $\times$ 매립 기간의 상호 작용($p < 0.001$) 간에만 발견되었다.

Seedbag에 넣고 토양에 매립한 종자와 Seedbag에 넣지 않고 매립한 종자의 48주 동안의 발아율 및 휴면율은 그림 46(출처: Nam et al, 2024a)에 나타내었다.



출처: Nam et al., 2024a

그림 46. Seedbag에 넣은 종자(A, C)와 넣지 않은 종자(B, D)의 매립 깊이와 매립 기간별 발아 종자 및 휴면 종자 비율

토양에 매립한 종자의 발아율은 카놀라 종자에서만 관찰되었다. Seedbag을 사용한 카놀라 종자의 발아율은 매립 4주 차와 8주 차에 각각 21.7%와 18.3%였다. 반대로, Seedbag을 사용하지 않고 매립한 카놀라 종자의 발아율은 8주 차에 11.7%였다. Seedbag에 넣어 매립한 종자 중

발아하지 않은 카놀라 종자를 7일 동안 25 °C 배양하였을 때 85.0%가 2주 차에 발아했고, 4주 차와 8주 차에 각각 10.0%, 43.3% 발아하였다. Seedbag에 넣지 않고 토양에 매립한 카놀라 종자를 2, 4, 8, 16주 후에 채취하여 정상 종자를 25 °C에서 배양한 결과 발아율은 각각 10%, 1.7%, 10%, 3.3%였다. 한편, Seedbag에 넣지 않고 토양에 매립한 카놀라 종자의 1.7%에서 휴면 종자가 관찰되었고, Seedbag에 넣고 토양에 매립한 카놀라 종자는 매립 4주 후에 휴면 종자가 관찰되었다.

실험 기간 면화 종자는 토양에서 발아하지 않았다. 토양에서 발아하지 않은 면화 종자를 최적 발아 온도인 25 °C로 옮겼을 때, Seedbag에 넣어 매립한 종자의 1.7%만이 2주 후에 발아하였다. 면화 종자와 마찬가지로 옥수수 종자도 Seedbag에 넣어 토양에 매립한 종자한 넣지 않고 매립한 종자 모두 48주 동안 발아하지 않았다. 토양에서 발아하지 않은 옥수수 종자를 실험실의 25 °C로 옮겨 배양했을 때, Seedbag에 넣어 토양에 2주 동안 매립한 종자의 48.3%만이 발아하였다. 콩 종자도 토양에서 발아하지 않았지만, 매립 2주 차의 정상종자를 최적 발아 온도인 25 °C로 옮겼을 때, Seedbag에 넣고 매립한 종자와 넣지 않고 매립한 종자의 각각 35.0%와 11.7%가 발아하였다. Seedbag 유무와 관계없이 콩 종자는 매립 4주 후까지 휴면 종자가 관찰되었다. Seedbag에 넣고 매립한 종자의 휴면율은 매립 2주 차와 4주 차에 각각 6.7%와 23.3%였다. 반대로, Seedbag에 넣지 않고 매립한 종자의 휴면율은 매립 2주 차와 4주 차에 각각 6.7%와 25.0%였다.

2) 국내 기온을 반영한 처리 온도별 종자 발아율 및 휴면율 비교 분석

콩, 옥수수, 카놀라, 면화를 최적 발아 온도인 25 °C에서 배양했을 때 발아율은 각각 98.8%, 96.3%, 95.0%, 71.3%였다(데이터 미제시). 실험실의 조절된 저온(-5, -1, 5 °C)에서 배양한 4가지 식물 종의 발아율과 휴면율을 표 13(출처: Nam et al, 2024a)와 그림 47(출처: Nam et al, 2024a)에 나타냈다. 종자의 초기 및 최종 발아율과 휴면율은 식물 종, 배양 온도, 배양 기간에 따라 유의하게 달랐다(표 10; 출처: Nam et al, 2024a). 또한 식물 종 × 배양 온도, 식물 종 × 배양 기간, 배양 온도 × 배양 기간, 식물 종 × 배양 온도 × 배양 기간 간의 유의한 상호 작용 효과가 초기 및 최종 발아율과 휴면율에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

표 10. 저온 조건에서 식물 종별 발아율과 휴면율 General Linear Model (GLM) 분석 결과

	초기발아율	최종발아율	휴면율
식물 종	< 0.001	< 0.001	< 0.001
배양 온도	< 0.001	< 0.001	0.021
배양 기간	< 0.001	< 0.001	0.048
식물 종 × 배양 온도	< 0.001	< 0.001	< 0.001
식물 종 × 배양 기간	< 0.001	< 0.001	< 0.001
배양 온도 × 배양 기간	< 0.001	< 0.001	0.005
식물 종 × 배양 온도 × 배양 기간	< 0.001	< 0.001	0.009

Seeds of four plant species (*Glycine max* (L.) Merr., *Zea mays* L., *Brassica napus* L., and *Gossypium hirsutum* L.) were cultivated at three different temperatures (-5, -1, and 5 °C) for 12 weeks. Data are presented as the mean ± standard deviation ($n = 3$); P-values were calculated using a general linear model-based method.

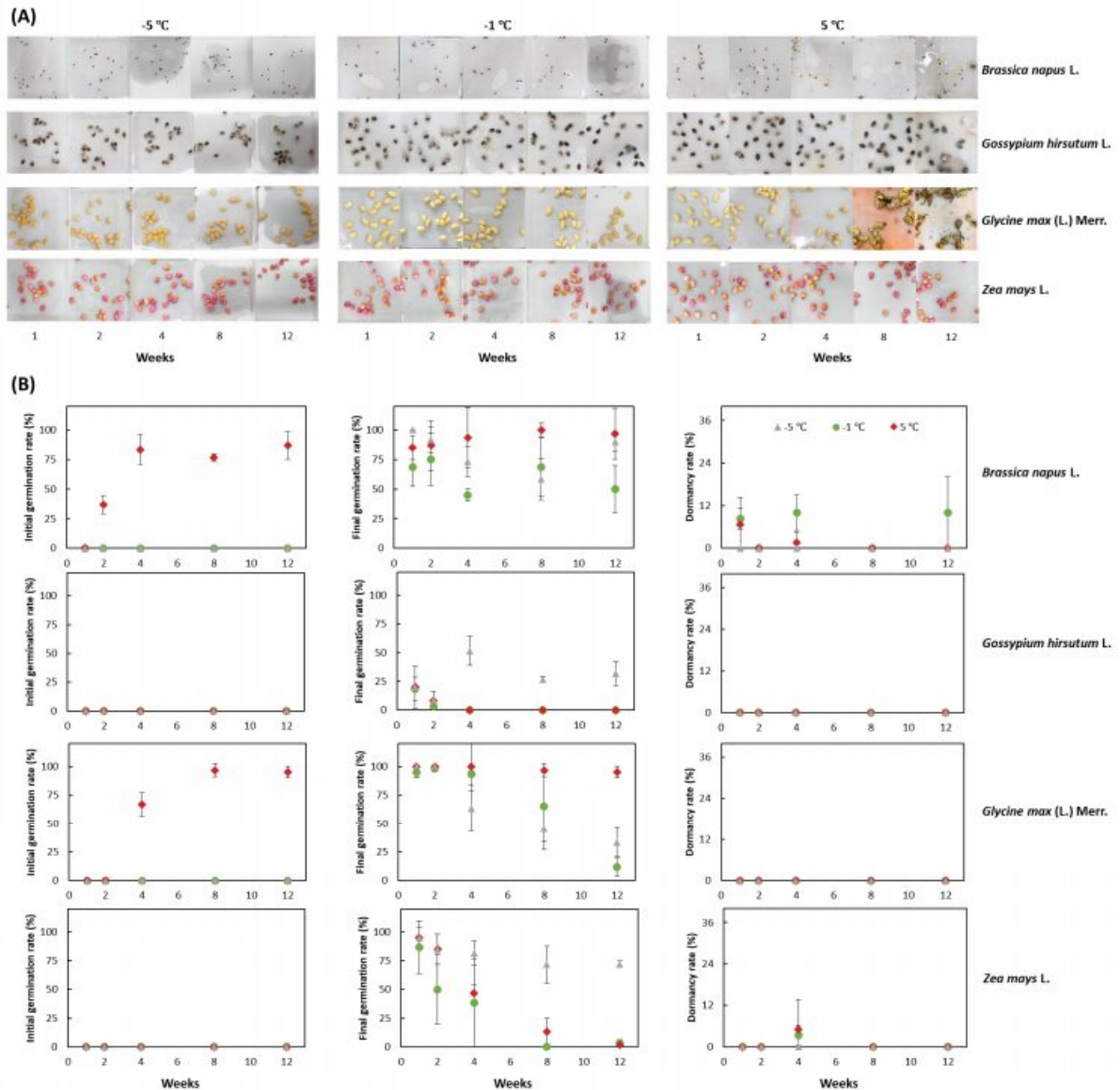
출처: Nam et al, 2024a

-5, -1 °C의 저온에서는 카놀라 종자가 발아하지 않았으나, 5 °C에서는 2주 배양 후 발아율이 36.7%였고, 4주 배양 후 83.3%로 증가하였다(그림 47; 출처: Nam et al., 2024a). -1, -5, 5 °C에서 배양한 종자를 최적 발아 온도인 25 °C로 7일 동안 옮긴 후 측정한 최종 발아율은 각각 45.0~75.0%, 58.3~100%, 85.0~100%였다. -1, 5 °C에서 배양한 종자에서만 휴면이 관찰되었고, 각각 8.3~10%, 1.7~6.7%의 휴면율을 보였다. -5 °C에서 배양한 종자는 휴면하지 않았다.

-5, -1, 5 °C에서 12주간 배양한 면화 종자의 초기 발아율은 모든 온도에서 0%였다. 배양 1주 차에 -1 °C와 5 °C에서 배양한 종자의 최종 발아율은 각각 18.3%와 20.0%였다. 2주 차에 발아율은 각각 3.3%와 8.3%로 감소했다. 4주 차부터 발아율은 0%였다. -5 °C에서 배양한 면화 종자의 최종 발아율은 배양 4주 차에 51.7%로 최고치를 보였다. 다른 경우에는 발아율이 8.3% 또는 31.7%였다. 면화 종자의 휴면율은 모든 온도에서 0%였다.

콩 종자는 -1 °C와 -5 °C의 저온에서 발아하지 않았다. 5 °C에서 배양 4주 차에 종자의 66.7%가 발아하였고, 8주 차에 96.7% 이상이 발아하였다. 5 °C에서 배양한 콩 종자의 최종 발아율은 1~12주 동안 66.7~96.7%였다. 그러나 -1 °C에서 배양한 종자의 최종 발아율은 배양 4주 차까지 93.3~98.3%였지만, 8주 차에 65.0%, 12주 차에 11.7%로 급격히 감소하였다.

-5 °C에서 배양한 종자의 최종 발아율은 1, 2주 차에는 100%였지만, 4주 차에서 12주 차에는 33.3~63.3%로 감소하였다. 콩 종자는 휴면율은 0%로 면화 종자와 유사하였다.



출처: Nam et al., 2024a

그림 47. 저온에서 발아한 종자의 발아 사진(A)과 초기 발아율(B), 최종 발아율(B) 및 휴면율(C)

12주간 저온에서 배양한 옥수수 종자의 초기 발아율은 온도와 관계없이 0%였다. -5 °C에서 배양한 종자의 최종 발아율은 배양 1주 차에 95.0%, 2~12주 차에 71.7~81.7%로 비교적 높았다. -1 °C에서 배양한 종자의 최종

발아율은 발아 1주 차에 86.7%였지만 2주 차와 8주 차에 각각 50.0%와 0%로 감소했다. 5 °C에서 배양한 종자의 최종 발아율은 배양 2주 차에는 85.0~95.0%였지만 4주 차부터 46.7%로 감소했다. 8주 차와 12주 차에는 각각 13.3%와 1.7%였다. -1 °C와 5 °C에서 배양된 옥수수 종자의 3.3 - 5.0%에서만 휴면이 관찰되었다.

3) 국내 강수량을 반영한 상대 습도별 종자 발아율 및 휴면율 검정

국내 강수량을 반영한 습도별 종자 발아율과 휴면율 검정은 콩, 옥수수, 면화, 카놀라를 대상으로 15%, 30%, 50% 습도 조건별로 진행하였다. -1 °C로 세팅된 배양기에서 1주, 4주간 종자를 배양한 후 초기 발아율을 측정하였으며 25 °C로 옮겨 1주간 배양한 다음 최종 발아율을 측정하였다. 부패한 종자를 제외한 발아하지 않은 건전한 종자를 대상으로 TZ 검사를 진행하여 휴면율을 측정하였다.

4가지 종 모두 습도별과 처리 기간별로 종자 발아율과 휴면율에서 차이가 관찰되었다. 콩의 경우 저온처리 1주, 4주 두 가지 조건 모두 중간 습도 조건인 30%에서 발아율이 98%, 96.7%로 가장 높았으며 4주 처리, 50% 습도 조건을 제외한 모든 데이터 값에서 65~100% 사이의 분포를 보였다 (그림 48). 이는 다른 종자의 데이터값과 비교하였을 때 높은 수치에 속하였다. 반대로 휴면율은 중간 습도 조건에서 가장 낮았고, 4주의 조건에서 습도가 15%, 50% 조건일 때 각각 35%와 58.3%의 수치를 나타내었다. 이 결과로 짐작해 보면 콩 종자는 옥수수, 면화, 카놀라와 비교하였을 때 종자 발아에 수분이 영향을 덜 미친다고 유추해 볼 수 있다.

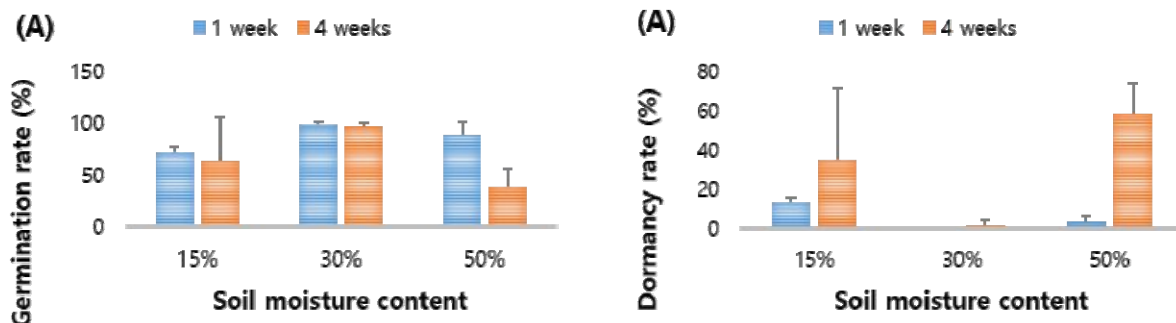


그림 48. 상대 습도별 콩 종자의 발아율(A)과 휴면율(B)

옥수수의 경우 습도가 높아짐에 따라 확연히 낮아지는 발아율을 보여주었다. 1주간 처리하였을 때 15% 습도 처리한 실험군에서는 평균 85%의 발아율을 나타냈지만 50% 습도에서의 발아율은 10%에 불과하였다. 4주 처리한 경우에서도 15% 습도 처리 실험군에서는 45%의 발아율을 보였지만 50%에서는 0%의 발아율을 보였다(그림 49). 반대로 휴면율은 1주 조건에서 습도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. 15% 조건에서의 휴면율은 3%로 낮은 결과값을 보였으나 30%, 50% 조건에서는 각각 58%, 57%의 결과 값을 보였다. 그러나 4주 조건에서는 습도가 높아질수록 휴면율은 26.7%, 21.7%, 11.7%로 점차 낮아지는 경향을 보였다(그림 49).

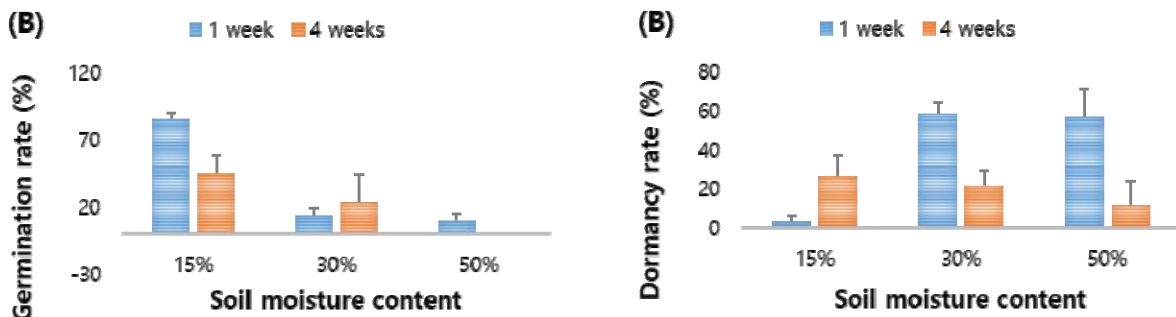


그림 49. 상대 습도별 옥수수 종자의 발아율(A)과 휴면율(B)

면화의 경우 옥수수와 유사하게 습도가 15%에서 50%로 높아질수록 발아율이 점차 줄어드는 경향을 보였지만 그 폭은 옥수수보다 작았다. 1주 처리한 15% 습도 실험군에서는 75%의 발아율을 보였고, 50% 습도 조건에서의 발아율은 43.3%로 측정되었다. 4주 처리한 15% 습도 실험군에서의 발아율은 41.7%였지만 50%로 습도가 증가된 조건에서는 16.7% 발아율로 감소하였다. 옥수수와 마찬가지로 1주 처리했을 때 분포가 4주 처리한 분포보다 높은 발아율 값을 보여주었다(그림 50). 휴면율은 1주 조건에서 수분함량이 50%에서만 25%였고, 15%와 30%일 때는 각각 2%의 낮은 결과값을 나타내었다. 4주 조건에서는 수분함량 15%와 30%인 경우 1주 차보다 높은 각각 6.7%, 20%를 보였으나 수분함량 50%에서는 1주 차보다 낮은 15%의 휴면율을 나타내었다(그림 50).

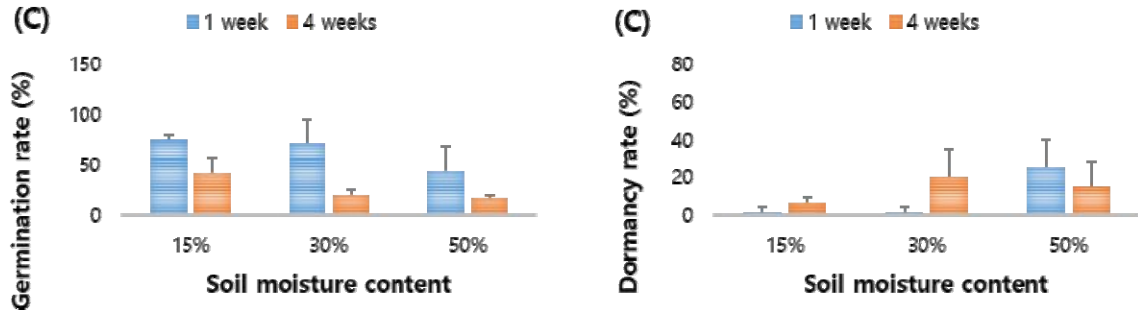


그림 50. 상대 습도별 면화 종자의 발아율(A)과 휴면율(B)

카놀라의 경우 습도별 발아율 차이가 가장 적었다(그림 51). 1주차 조건에서는 수분함량 15% 조건에서 발아율은 68.3%였고, 수분함량 50% 조건에서 발아율은 56.7%였다. 또한 콩과 마찬가지로 수분함량 30% 조건에서 발아율이 73.3%로 가장 높은 수치를 보여주었다. 하지만 4주 차 조건에서는 30% 조건에서의 발아율이 51.7%로 15% 수분함량(75.0%), 50% 수분함량(55.0%)와 비교하였을 때 가장 낮은 값을 보여주었다. 1주 차 발아율과 마찬가지로 4주 차 발아율 역시 다른 종보다 습도에 따른 차이가 크지 않는 것으로 확인되었다. 휴면율 또한 수분함량에 따른 차이 폭이 가장 작았다(그림 51). 1주 차 조건에서 수분함량 15%와 30%는 각각 8%의 휴면율을 보였고, 50%에서는 그보다 낮은 2%였다. 4주 차에서는 수분함량 세 가지 조건에서 휴면율이 5~8.7% 사이의 분포를 보이며 비슷한 결과값을 나타내었다.

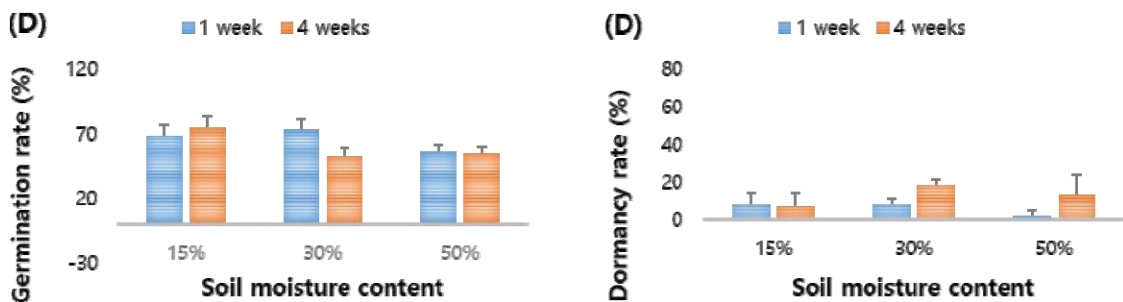


그림 51. 상대 습도별 카놀라 종자의 발아율(A)과 휴면율(B)

다. 환경부 LMO 종자 월동성 위해성평가 방법(안) 제시

LM 식물이 자연생태계에 부정적인 영향을 미칠 가능성은 LM 식물의 꽃가루가 주변의 야생 근연종과 교차 수분할 수 있다는 가능성에서 비롯된다. 이는 야생 근연종에 형질 전환 유전자가 안정적으로 전달되어 스트레스 저항성이 향상되고 종자 생산이 증가할 수 있다. 결과적으로 야생 개체군의 풍부함은 증가하는 반면 귀중한 종의 풍부함은 감소할 수 있다(Raybould 2010). 따라서 한국에서 새로운 LMO와 관련된 위해성을 검토할 때 이러한 잠재력의 기초가 되는 LM 종자의 발아율과 활력을 평가하는 것이 중요하다. 본 연구는 우리나라에 가장 많이 수입되는 4가지 LM 식물 종의 비형질전환 종자를 사용하여 -5, -1, 5 °C의 겨울 온도에서 실내 실험을 수행하였다. 4가지 식물 종자는 모두 -1과 -5 °C에서 발아하지 않았지만, 카놀라와 옥수수 종자는 5 °C에서 발아했다. 저온에서 발아하지 않은 종자를 최적 발아 온도인 25 °C로 옮겼을 때 모든 식물 종의 종자가 발아했다. 카놀라 종자의 발아율은 12주 동안 높았지만, 콩과 옥수수 종자의 발아율은 시간이 지남에 따라 감소했다. 그럼에도 불구하고 면화 종자의 발아율은 최적 발아 온도인 25 °C에서도 낮았다. 종자 휴면은 -1 및 5 °C에서 배양한 카놀라와 옥수수 종자에서만 관찰되었다. 이러한 결과는 콩과 옥수수의 발아 능력이 시간이 지남에 따라 감소하지만 카놀라, 콩, 옥수수는 국내에서 겨울 이후 다음 해에 온도가 상승하면 발아 및 생존 확률이 높을 수 있다는 것을 나타낸다.

통제된 실험실 환경과 달리 자연환경은 낮과 밤 사이에 큰 온도 변동, 강우에 따른 토양 수분함량 변화, 토양 구성성분과 깊이의 영향을 받는 다양한 미생물 분포에 차이가 있다. 이러한 요인은 종자 발아와 휴면에 상당한 영향을 미칠 수 있다(Nam and Han 2020; Han and Nam 2022; Han et al. 2023). 형질전환 콩 종자의 활력은 국내 격리포장 실험에서 2~4 개월 동안 유지되었고 방출 시점의 토양온도와 수분, 매몰 깊이와 같은 다양한 환경요인에 따라 달랐다. 따라서 일시적으로만 토양 종자 은행을 형성하여 잡초가 될 가능성이 낮은 것으로 판단되었다(Ko et al. 2016; Kim et al. 2020b). 카놀라 종자는 국내 격리포장에서 16개월 동안 생존력을 유지하여 성공적으로 종자를 생산하고 월동한 것으로 보고되었다. 그러나 카놀라 식물은 전반적인 성장과 생존율이 낮기 때문에 다른 야생 식물에 비해 경쟁에서 유리하지 않았다(Ko et al. 2022).

본 연구에서 자연환경을 나타내는 관리되지 않은 포장에서 겨울 이후 종자 발아는 카놀라에서만 매립 후 최대 8주 동안 관찰되었다. 토양에서

발아되지 않은 정상 종자를 실험실의 25 °C에서 배양했을 때, 면화, 옥수수, 콩의 경우 매립 후 2주 종자에서 발아가 관찰되었다. 휴면 종자는 매립 후 최대 4주 동안 카놀라와 옥수수에서만 관찰되었다. 이러한 영향은 Seedbag에 넣고 매립한 종자보다 넣지 않고 매립한 종자에서 더 컸다. 본 연구에서 실험 기간 토양온도가 빙점 이상이었지만, 4종의 식물 종자 모두 종자 발아율과 생존율이 낮아 자연 생태계를 침입할 가능성이 낮은 것으로 판단되었다.

Moravcová et al. (2022)은 21종의 침입성 식물과 38종의 귀화 초본 식물에서 종자 발아율과 생존율의 역학을 조사하였다. 그들은 종자 은행 전략이 침입성 외래종과 귀화 종 사이에서 달랐으며, 이는 식물의 정착과 확산에 상당한 영향을 미쳤다는 것을 발견하였다. 이 연구는 침입종이 처음 몇 계절 동안은 높은 종자 생존력을 활용하는 반면, 귀화종은 귀화 개체군을 유지하기 위해 시간이 지남에 따라 종자 생존력과 발아력을 확장한다는 것을 밝혔다. 한편 토양 종자 은행의 지속성은 다양한 식물 종의 수명과 종자 크기와 상관관계가 있다. 구체적으로, 1년생과 2년생 식물은 다년생 식물보다 토양에서 지속성이 더 높은 경향이 있다. 게다가, 작은 종자를 가진 초본 식물은 큰 종자를 가진 식물보다 더 지속성이 있다(Thompson et al. 1993, 1998). 본 연구과제에서 사용된 모든 식물은 1년생과 2년생이었다. 주목할 점은 카놀라가 가장 작은 종자 크기를 가지고 있어 한국에서 장기 종자 은행을 형성할 수 있는 가장 큰 잠재력을 보였다. 여러 연구에 따르면 카놀라 식물은 관리되지 않은 토양에서 11년 이상 생존할 수 있으며, 제초제 내성 LM 카놀라 자생체는 수확 후 최대 15년 동안 포장시험 현장에서 발견되었다(Lutman et al. 2003; Belter 2016).

LM 종자의 지속성 외에도 생존한 LM 자생체가 유전자를 야생 근연종에 전달하고 야생 근연종들 사이에 개체군을 분산시킬 수 있는 능력은 자연 생태계에 대한 위해성을 평가할 때 중요한 고려 사항이다(Chèvre et al. 1997). 그러나 LMO에서 야생종으로의 유전자 전이 위험은 국가별 토착 식물의 분포 차이로 인해 식물 분류군마다 다를 수 있다. 4가지 식물 종의 야생 근연종이 우리나라의 경우 농업 환경에는 존재하지만, 옥수수와 면화와 교차 수분할 수 있는 야생 근연종은 자연 생태계에서 거의 발견되지 않았다. 반대로, 형질 전환된 카놀라와 콩의 야생 근연종인 유채와 돌콩은 국내 자연생태계에 널리 분포한다(NIBR 2024). 형질 전환된 콩에서 돌콩으로의 유전자 전이는 국내 포장 시험에서 발견되지 않았다. 그러나 형질

전환 콩에서 비형질전환 콩으로의 유전자 전이는 거리가 멀어질수록 감소하지만 최대 13.1 m 떨어진 곳에서도 관찰되었다(Kim et al., 2019; Kim et al., 2020a). 게다가 형질전환 카놀라에서 밀접한 관련 종인 유채로의 유전자 전이가 국내의 실제 자연생태계에서 발생했을 수 있다고 보고되었다(NIE, 2023).

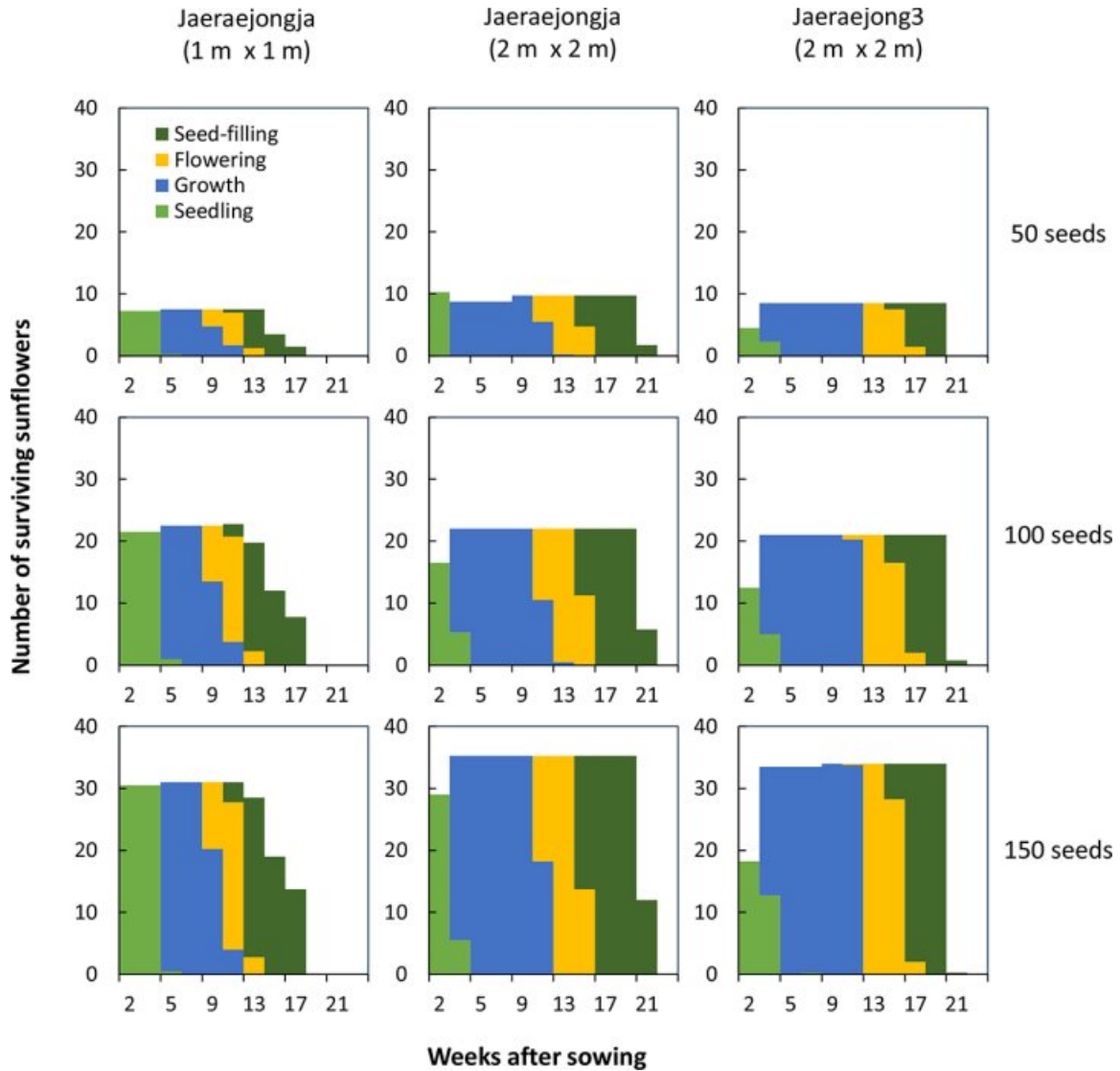
결과적으로 LMO의 종자 생존 및 분산 잠재력을 고려한 본 연구는 새로 도입된 LMO의 영향을 평가할 때 형질전환 카놀라가 형질전환 면화, 옥수수, 콩보다 국내 생태계의 생물다양성에 더 큰 위협을 초래한다는 것을 나타낸다. 그러나 본 연구의 결과를 형질전환 종자에 일반화하는 것은 제한적일 수 있다. 이는 실제 LMO가 개량된 형질로 인해 다양한 생물학적/비생물학적 스트레스에 저항할 수 있고, 결과적으로 야생식물에 비해 경쟁 우위를 가질 수 있기 때문이다. 따라서 LM 종자를 사용한 장기적이고 광범위한 연구가 가까운 미래에 수행되어야 할 것으로 판단되며, 각 식물 종에 대한 체계적인 위해성평가 및 안전관리 대책을 수립하여 국내 자연생태계의 생물다양성을 보호해야 할 것이다.

결론적으로, 카놀라 종자는 통제된 저온에서 면화, 옥수수 및 콩 종자보다 더 높은 발아율과 생존력을 보였다. 자연적인 겨울 환경을 나타내는 격리 포장 실험에서 카놀라 종자는 가장 높은 발아율을 보였다. 또한 콩과 카놀라 종자 모두 휴면율이 더 높았다. 그러나 형질전환 카놀라의 도입은 카놀라의 야생 근연종이 한국의 자연생태계에 더 널리 분포되어 있기 때문에 자연 환경에 가장 큰 잠재적 위협을 초래할 것으로 예상된다. 실제로 지속적인 세대는 아직 검증되지 않았지만 형질전환 카놀라 자생체는 지난 10년 동안 자연생태계에서 지속적으로 관찰되었다(NIE, 2023). 본 과제의 연구는 LM 종자를 활용하는 미래 연구를 위한 실증적 기반을 제공하며, 이는 새로 도입된 LMO가 자연생태계에 초래할 수 있는 잠재적 위협에 대한 보다 심층적인 지식을 제공할 수 있을 것이다. 본 내용은 모두 *Journal of Ecology and Environment*에 게재되었다(Nam et al., 2024a).

라. 종자 밀도가 LM 식물의 잡초화 가능성에 미치는 영향 분석

국내에 수입 승인된 LMO의 운송 또는 취급 과정 중 의도치 않게 자연 환경으로 유출되는 종자의 잡초화 가능성을 조사하기 위하여 환경정화용 LMO 후보 식물인 해바라기를 사용하여 종자 밀도에 따른 종자 생존과 번식 및 개체군의 변화를 조사하였다. 본 연구의 결과는 *Journal of Ecology*

and Environment에 게재되었다(Nam et al., 2024b). 해바라기의 발아 및 생장은 종자량, 구획 크기, 품종에 따라 달랐다(그림 52; 출처: Nam et al., 2024b).



출처: Nam et al., 2024b

그림 52. 종자 밀도에 따른 해바라기 품종별 생존 개체수 변화

1 m × 1 m 구획에 "재래종자" 씨앗 50개체, 100개체, 150개를 파종했을 때 각각 최대 7.5개체, 22.5개체, 31.0개체가 생존했다. 2 m × 2 m 구획에 "재래종자" 씨앗 50개체, 100개체, 150개를 파종했을 때 각각 최대 10.3개체, 22.0개체, 35.3개체가 생존했다. "재래종3"은 2 m × 2 m 면적에 종자를 50개, 100개, 150개 파종했을 때 각각 최대 8.5개, 21.0개, 34.0개체가 생존하였다.

GLM 분석 결과, 파종 밀도($p < 0.001$)와 구획 크기($p < 0.001$)에 따라 최종 발아율이 통계적으로 유의하게 달랐지만, 품종 간에는 차이가 없었다($p = 0.2538$)(표 11; 출처: Nam et al., 2024b).

표 11. 해바라기 밀도별 발아율 General Linear Model (GLM) 분석 결과

	SS ¹	DF ²	MS ³	F ⁴	p ⁵
파종 밀도	2904.056	2	1452.028	36.55	< 0.001
품종	52	1	54	1.36	0.2538
Plot 사이즈	696.8889	1	696.8889	17.54	< 0.001

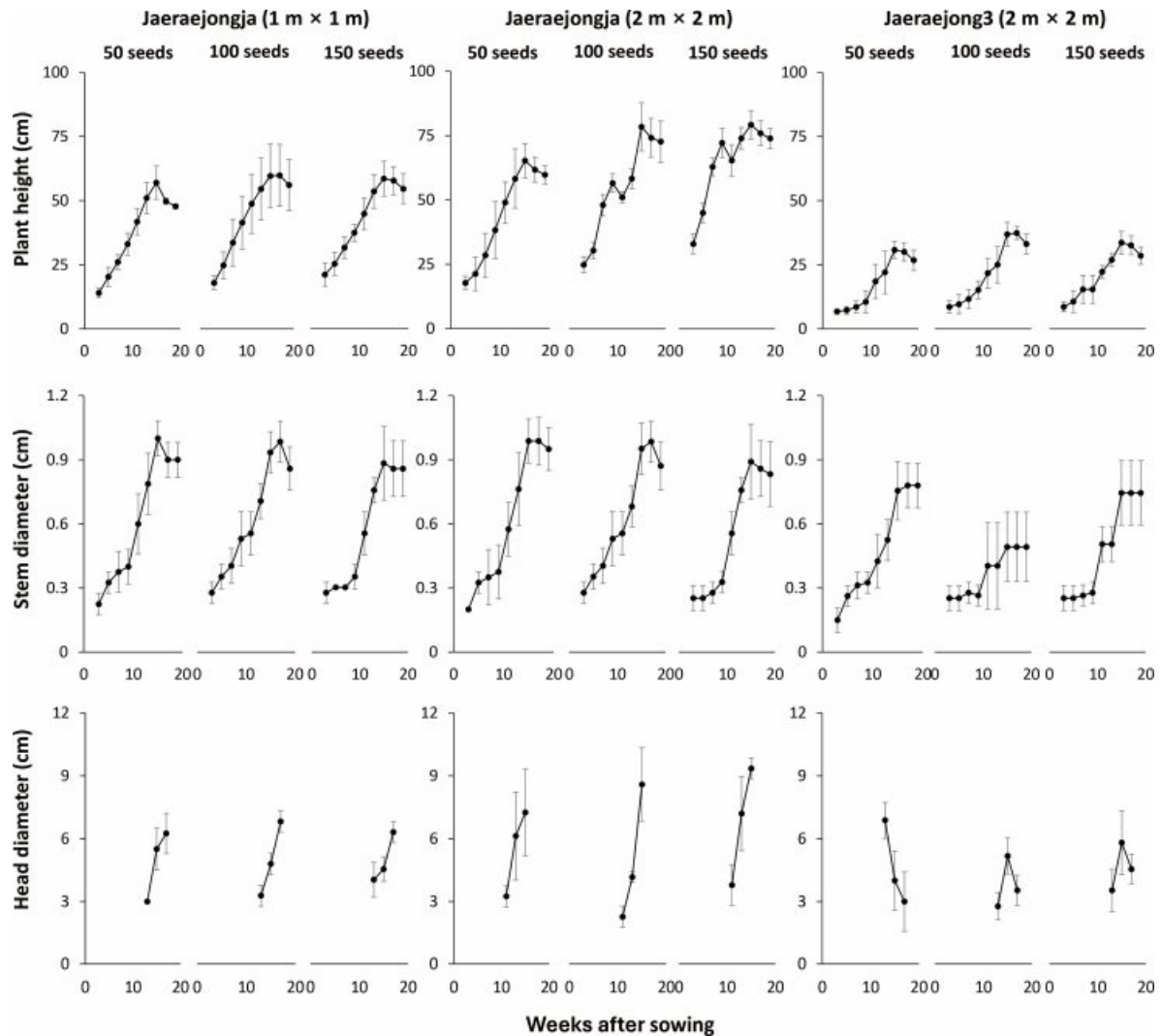
¹ SS, sum of squares; ² DF, degrees of freedom; ³ MS, mean square; ⁴ F, F-statistic; ⁵ p , p -value.

출처: Nam et al, 2024b

발아, 성장, 개화, 종자 성숙을 포함한 해바라기의 발달 단계는 파종 밀도, 품종 및 구획 크기에 따라 달랐다. 모든 실험 구획에서 파종 후 2주 후에 식물이 발아하였고, 모든 생존 개체는 개화하였다. 1 m × 1 m 구획에서는 파종 후 최대 17주 동안 발아된 개체가 관찰되었다. 2 m × 2 m 구획의 경우 "재래종3" 종자 150개를 파종한 경우를 제외하고 최대 21주 동안 발아된 개체를 관찰하였다. 1 m × 1 m 구획에 파종한 "재래종자"의 경우 파종 후 9주 후에 개화가 시작되었고 파종 후 11주 후에 종자 성숙이 시작되었다. 반면 2 m × 2 m 구획에 파종한 경우 파종 후 각각 11주와 15주 후에 개화가 시작되었고 종자 성숙이 시작되었다. 개화 기간은 1 m × 1 m 구획에서는 3주, 2 m × 2 m 구획에서는 3~4주였다.

생존 개체의 파종 밀도에 따른 표현형 특성의 변화는 초장, 줄기 직경, 꽃 길이를 측정하여 비교했다(그림 53; 출처: Nam et al., 2024b). 생존한 해바라기 개체의 초장, 줄기 직경, 꽃 길이는 모든 실험 구획에서 15주 차와 17주 차 사이에 가장 컸다. 1 m × 1 m 구획에 "재래종자" 품종을 50개, 100개, 150개를 파종했을 때 가장 높은 초장은 각각 57.0 cm, 59.3 cm, 55.5 cm였다. 2 m × 2 m 구획에서 최대 초장은 각각 65.3 cm, 78.0 cm, 78.8 cm였다. "재래종3" 품종의 경우, 2 m × 2 m 구획에서 가장 높은 초장은 각각 50, 100, 150개의 종자를 파종했을 때 각각 30.8 cm, 37.0 cm, 33.3 cm였다. "재래종자"의 최대 줄기 직경은 1 m × 1 m 구획과 2 m × 2 m 구획 모두에서 0.98~0.99 cm로 비슷했지만, "재래종3"의 최대 줄기 직경은 0.78 cm로 측정되었다. "재래종자"의 가장 긴 꽃 길이는 1 m ×

1 m 구획에서 6.8 cm였지만, 2 m × 2 m 구획에서는 9.3 cm로 유의하게 달랐다. “재래종3”의 최대 꽃 길이는 6.9 cm로 측정되었다. 겨울이 지난 후 새로 돌아난 해바라기는 어느 실험 조건에서도 관찰되지 않았다.



출처: Nam et al., 2024b

그림 53. 종자 밀도에 따른 해바라기 품종별 표현형 변화

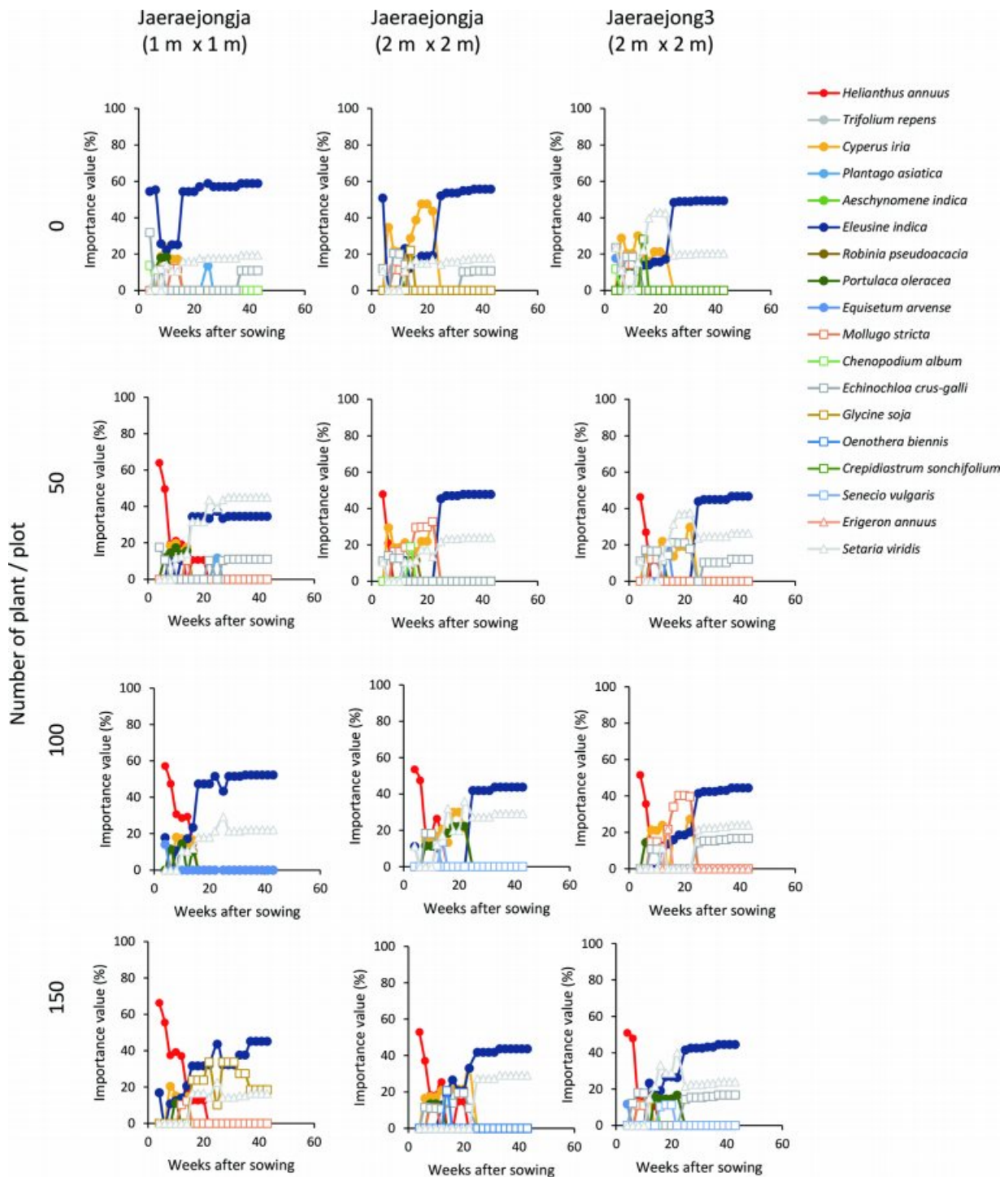
표 12. 시험 기간 관찰된 식물 종 목록

Common name	Life cycle	Family	Species
Sunflower	Annual	Asteraceae	<i>Helianthus annuus</i>
White clover	Perennial	Fabaceae	<i>Trifolium repens</i>
Rice Flat Sedge	Annual	Cyperaceae	<i>Cyperus iria</i>
Indian jointvetch	Annual	Fabaceae	<i>Aeschynomene indica</i>
Indian Goosegrass	Annual	Poaceae	<i>Eleusine indica</i>
Marshpepper knotweed	Annual	Polygonaceae	<i>Persicaria hydropiper</i>
Japanese thistle	Perennial	Asteraceae	<i>Cirsium japonicum</i>
Black locust	Perennial	Fabaceae	<i>Robinia pseudoacacia</i>
Purslane	Annual	Portulacaceae	<i>Portulaca oleracea</i>
Common Horsetail	Perennial	Equisetaceae	<i>Equisetum arvense</i>
Carpetweed	Annual	Molluginaceae	<i>Mollugo stricta</i>
Common dandelion	Perennial	Asteraceae	<i>Taraxacum officinale</i>
Fireweed	Annual	Asteraceae	<i>Erechtites hieracifolia</i>
Baconweed	Annual	Chenopodiaceae	<i>Chenopodium album</i>
Canadian fleabane	Annual	Asteraceae	<i>Conyza canadensis</i>
Common knotgrass	Annual	Polygonaceae	<i>Polygonum aviculare</i>
Barnyard millet	Annual	Poaceae	<i>Echinochloa crus-galli</i>
Wild soybean	Annual	Fabaceae	<i>Glycine soja</i>
Evening primrose	Biennial	Onagraceae	<i>Oenothera biennis</i>
Sonchus-leaf crepidiastrum	Biennial	Asteraceae	<i>Crepidiastrum sonchifolium</i>
Groundsel	Annual	Asteraceae	<i>Senecio vulgaris</i>
Annual fleabane	Biennial	Asteraceae	<i>Erigeron annuus</i>
Green Foxtail	Annual	Poaceae	<i>Setaria viridis</i>
Chinese bushclover	Annual	Fabaceae	<i>Lespedeza cuneata</i>
Indian wormwood	Perennial	Asteraceae	<i>Artemisia indica</i>
Barnyard grass sp.	Annual	Poaceae	<i>Echinochloa sp.</i>
Chinese plantain	Perennial	Plantaginaceae	<i>Plantago asiatica</i>

출처: Nam et al, 2024b

조사 기간 모든 실험 구획에 나타난 식물 분류군은 표 12(출처: Nam et al., 2024b)에 나타내었다. 해바라기를 포함하여 관찰된 총 식물 종의 수는 27종으로, 8목 10과로 분류되었다. 생활 양식 유형에 관해서는 63.0%가 1년생, 25.9%가 다년생, 11.1%가 2년생으로 확인되었다.

그림 54(출처: Nam et al., 2024b)는 실험구에서 파종 밀도, 구획 크기, 해바라기 품종에 따라 나타나는 식물 종의 중요도 변화를 나타낸다. 해바라기를 파종하지 않은 구획에서는 *Eleusine indica*가 초기에 중요도가 가장 높았고, *Cyperus iria*, *Echinochloa crus-gall*, *Setaria viridis*, *Chenopodium album*도 중요도가 높았다. 종자 50개를 파종한 구획에서 초기 해바라기의 중요도는 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 구획은 46.3~47.8%, $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 구획은 64.0%였다. 해바라기의 중요도는 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 구획은 파종 후 8주부터, $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 구획은 파종 후 14주부터 10% 미만으로 감소하였다. 구획 크기가 감소함에 따라 *S. viridis*, *E. crus-gall*, *E. indica*, *C. album*의 중요도가 증가하였다. 종자를 100개 파종한 구획에서는 품종과 구획 규모에 관계없이 초기 해바라기의 중요도가 51.6~57.2%로 나타났다. 그러나 “재래종자”를 파종한 구획에서는 해바라기의 중요도가 16주 후에 10% 미만으로 감소하였고, “재래종3”을 파종한 구획에서는 해바라기의 중요도가 14주 후에 10% 미만으로 감소하였다. 종자를 150개 파종한 $1 \times 1\text{ m}$ 와 $2 \times 2\text{ m}$ 구획에서는 해바라기의 초기 중요도 값이 각각 66.3%와 50.9~52.9%였다. “재래종자” 품종을 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 포장에 파종한 경우 해바라기의 중요도가 파종 후 22주차부터 10% 이하로 떨어졌으나, “재래종자” 품종을 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 포장에 파종한 경우 14주 차에 10%로 떨어졌다. “재래종3” 품종을 50개와 100개 파종한 경우를 제외한 모든 실험구에서 파종 후 22주 차부터 해바라기가 관찰되지 않았다. “재래종3” 품종을 50개와 100개 파종한 경우 각각 파종 후 16주와 18주 차까지 해바라기가 관찰되지 않았다.

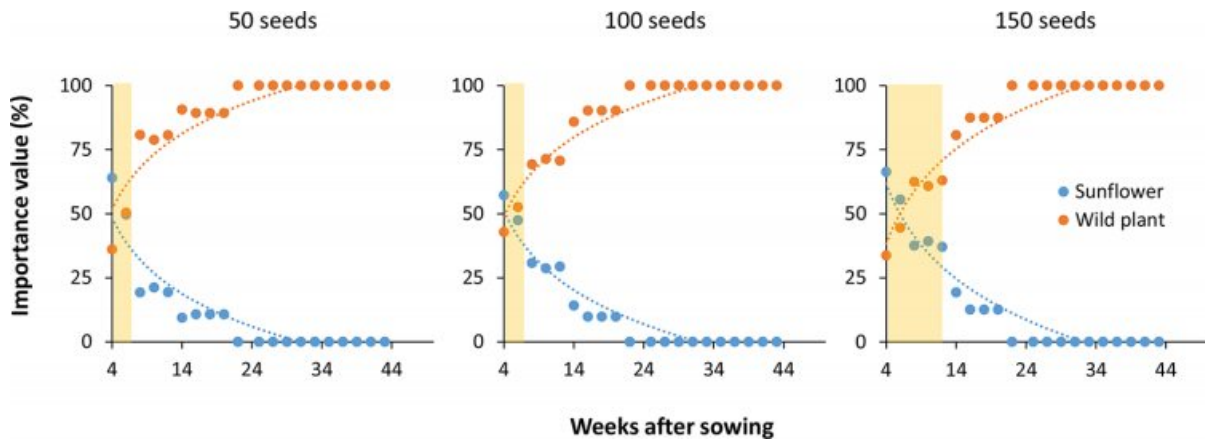


출처: Nam et al., 2024b

그림 54. 종자 밀도에 따른 해바라기와 야생 식물의 중요도 변화

해바라기와 야생 식물의 경쟁은 그림 55(출처: Nam et al., 2024b)에 나타냈다. 본 연구에서는 2×2 m 면적에 100개 이상의 종자를 파종한 경우 파종 후 4주까지 해바라기와 야생 식물의 경쟁이 가능했다. 특히 1×1 m 면적에 150개의 종자를 파종한 경우 해바라기는 6주 후까지 야생

식물과의 경쟁에서 우위를 보였다. 그러나 다른 면적에서는 6주 후부터 해바라기의 우세도가 감소했다. 따라서 해바라기 씨앗의 수가 100개 이상일 때는 처음에는 야생 식물보다 우세했지만 6주 후에는 감소하여 해바라기가 자연생태계를 우세하게 하기 어려웠다.



출처: Nam et al., 2024b

그림 55. 종자 밀도에 따른 식생 중요도를 통한 잡초와의 경쟁 가능 시기 분석 결과

새로 도입된 형질전환 식물이 자연환경에서 생태적 이점을 갖기 위해서는 생존 및 생식 능력이 향상되어야 한다. 따라서 새로 도입된 형질전환 식물이 생존, 성장 및 생식 능력과 같은 표현형 성능 측면에서 기존의 비형질전환 식물과 동등한지 확인하는 것이 필요하다. 여러 연구에 따르면 생물학적 및 비생물학적 스트레스에 대한 내성을 획득한 형질전환 식물의 유전자가 야생 식물로 전이되면 교잡종의 경쟁적 적합도 및 침입성이 증가하여 생태적 위험이 더욱 증가할 수 있다고 보고되었다(Pilson and Prendeville 2004; Nam et al. 2020).

온도 및 토양 수분을 포함한 환경적 매개변수, 종자 크기 및 파종 깊이와 같은 다양한 요인이 식물의 발아 및 성장에 영향을 미친다(Fernandez Quinantilla et al. 1990; Lamb and Johnson 2004; Nam and Han 2022; Han et al. 2023). Javaid et al. (2022)는 *Lolium perenne* L.의 종자가 토양 표면이나 6~7 cm 깊이에서는 발아하지 않고 1 cm 깊이에서 발아했다고 보고했다. Domic et al. (2020)은 묘목이 처음 자랄 때의 종자 질량과 크기가 *Polylepis tomentella*의 지속성, 개체군 통계 및 보존에 중요하다고 보고했다. 이전 연구에서는 해바라기의 침입 잠재력이 방출 시점의 환경 조건에

따라 달라지며, 특히 3월에 파종했을 때 발아율이 높고 더 오랫동안 야생 식물과 경쟁할 수 있다고 보고하였다(Han and Nam 2022).

본 연구에서 해바라기의 발아율은 품종에 따라 크게 다르지 않았지만 파종 밀도와 구획 크기에 따라 차이를 보였고 파종한 종자 수가 증가함에 따라 발아율이 증가했다. 발아된 식물의 개화 및 종자 성숙은 종자 밀도에 따라 다르지 않았지만 1 m × 1 m 구획에서 2 m × 2 m 구획보다 빨랐다. “재래종자”의 경우 파종 밀도에 관계없이 생존 식물의 초장과 꽃 길이는 2 m × 2 m 구획에서 재배된 식물에서 1 m × 1 m 구획에서 재배된 식물보다 각각 14.6 - 42.0%와 36.8% 더 높았다. 이러한 결과는 방출 시점의 파종 밀도가 식물 발아에 큰 영향을 미치지 않지만 발아된 식물의 성장과 발달에 영향을 미친다는 것을 시사한다.

키가 더 크거나 바이오매스를 더 많이 생산하는 LM 작물은 광합성을 위해 햇빛을 사용하거나 뿌리로 물을 흡수할 때 다른 야생 식물보다 유리할 수 있다. 작물이 잡초와 경쟁할 수 있는 능력은 빛, 물, 영양소 및 기타 제한된 자원을 효과적으로 활용할 수 있도록 하는 다양한 생리적 및 형태적 특성에 따라 달라진다(Jha et al. 2017). 따라서 파종 날짜, 파종량, 영양소 관리와 같은 문화적 관리의 조정은 잡초에 대한 작물 경쟁력을 강화할 수 있다(Chauhan and Opeña 2013, Swanton et al. 2015). 발아와 성장에 온도와 습도가 이상적인 3월에 심은 해바라기는 다른 시기에 심었을 때 더 오래 살아남고 야생 식물보다 발아와 성장과 관련된 표현 형질이 우수했다(Han 및 Nam 2022).

본 연구에서 1 m × 1 m 실험 구획에서 해바라기의 초기 중요도는 2 m × 2 m 면적보다 38.2% 더 높았다. 또한 해바라기의 중요도는 150개의 종자를 뿌린 구획에서 가장 오랫동안 유지되었다. 해바라기의 중요도가 10% 미만으로 떨어진 값을 비교했을 때, 1 m × 1 m 구획에 “재래종자” 150개를 뿌렸을 때 2 m × 2 m 구획에 “재래종3” 50개를 뿌렸을 때보다 14주 더 오래 유지되었다. 이러한 결과는 종자의 수가 많을수록 해바라기의 초기 중요도 값이 높아질 뿐만 아니라 우세 기간도 길어짐을 나타낸다. 이러한 결과는 방출 시점의 씨앗 수가 형질전환 식물의 발아, 성장 및 잡초와의 경쟁에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

요약하면, 유출된 종자의 수가 적다고 가정하면 해바라기의 성장이 더 유리할 수 있다. 그러나 유출된 씨앗의 수가 많을 때 잡초와의 경쟁이 더 오래 지속될 수 있다. 싹이 튼 해바라기는 모두 꽃을 피웠지만, 다음 해에는

새로 돌아난 해바라기가 관찰되지 않았다. 따라서 해바라기의 생태적 침입성은 관리되지 않은 자연환경에서 높지 않을 것으로 예상되었다. 그럼에도 불구하고, LM 식물의 발아, 성장, 잡초와의 경쟁력은 유출된 형질전환 씨앗의 양에 따라 달라질 수 있기 때문에 본 연구 결과는 LM 식물의 잡초화 가능성을 평가할 때 이러한 물리적 요소를 고려하는 것이 중요하다는 것을 보여준다. 본 내용은 모두 Journal of Ecology and Environment에 게재되었다(Nam et al., 2024b).

4. 위해성평가용 환경정화용 LM 포플러 우성형질 선별

가. 환경정화용 LM 포플러 우성형질 선별

환경정화용 LM 포플러는 ‘2023년 신기술 LMO의 위해성 평가 기술 및 가이드라인 개발’ 연구 과제의 일환으로 개발된 형질전환 식물로, 올해 본 과제에서는 이 LM 포플러의 우성형질 선별 연구를 진행하였다. 2023년 연구에서는 아그로박테리움 방법을 활용하여 환경정화용 유전자를 포플러 세포 내에 도입하였으며, 이를 기반으로 조직배양, 신초 및 발근 유도 과정을 통해 1차적인 형질전환체 선별 과정을 완료하였다. 이번 연구에서는 이 과정에서 발근이 유도된 환경정화용 LM 포플러를 토양에 이식하여 2차 우성형질을 선별하고, 도입 유전자의 안정성과 발현 특성을 검증하였다 (그림 56). 올해 연구에서는 2023년에 발근 유도가 완료된 LM 포플러를 2월경 식물생장조절실 내의 토양에 식재하였다. 식재 후 생장한 LM 포플러 잎을 채취하여 도입 유전자의 존재 여부와 발현 여부를 검증하였다. 이 과정에서 LM 포플러의 잎에서 genomic DNA를 추출하였고, 이를 기반으로 도입유전자 특이적 프라이머를 사용하여 PCR을 수행하였다. 실험 결과, 모든 샘플에서 도입 유전자가 성공적으로 증폭되었음을 확인하였으며, 증폭된 PCR 산물을 염기서열 분석한 결과 도입 유전자 서열과 완전히 일치하는 것을 확인하였다.

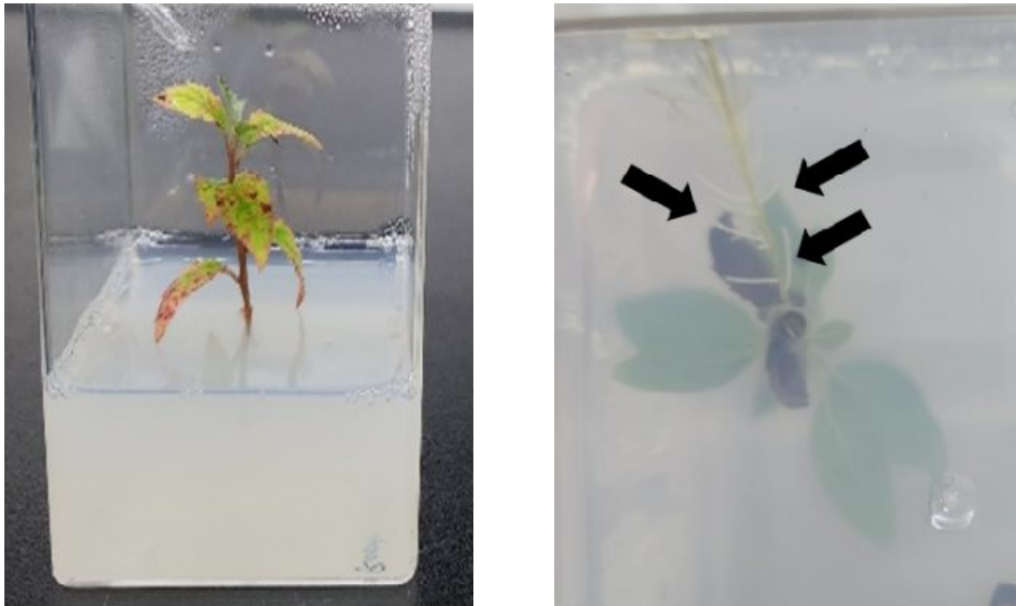


그림 56. 발근 유도가 완료된 환경정화용 LM 포플러

본 연구에서는 6개의 LM 포플러 개체를 대상으로 실험을 진행하였으며, 모든 개체에서 도입 유전자의 안정적 증폭 및 서열 일치를 확인하였다. 이는 LM 포플러가 형질전환 과정에서 유전적 변형이 안정적으로 이루어졌음을 나타내며, 도입된 유전자가 각 개체 내에서 유지되고 있음을 증명한다. 이어서, 실험실 환경에서 검증된 6개의 LM 포플러 개체를 식물생장조절실의 토양에 이식하여 성장 과정을 관찰하였다. 토양에서의 생장이 진행된 후 채취된 잎을 대상으로 동일한 PCR 및 염기서열 분석을 수행한 결과, 실험실에서 확인된 결과와 동일하게 모든 개체에서 도입 유전자가 증폭되었으며 서열 또한 일치함을 확인하였다(그림 57, 58). 이는 실험실과 실내 환경 모두에서 도입 유전자가 안정적으로 유지됨을 나타낸다.

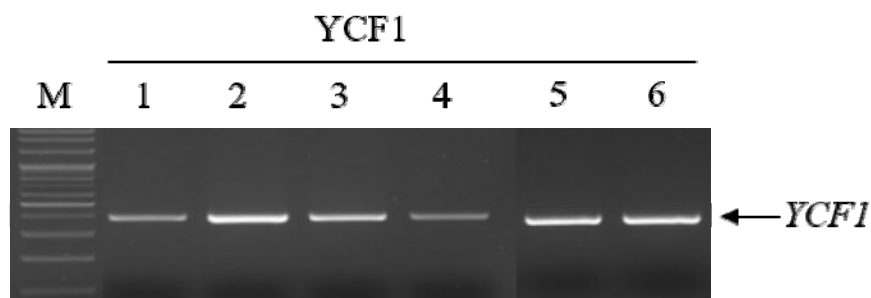


그림 57. LM 포플러 도입유전자 검증을 위한 유전자 증폭

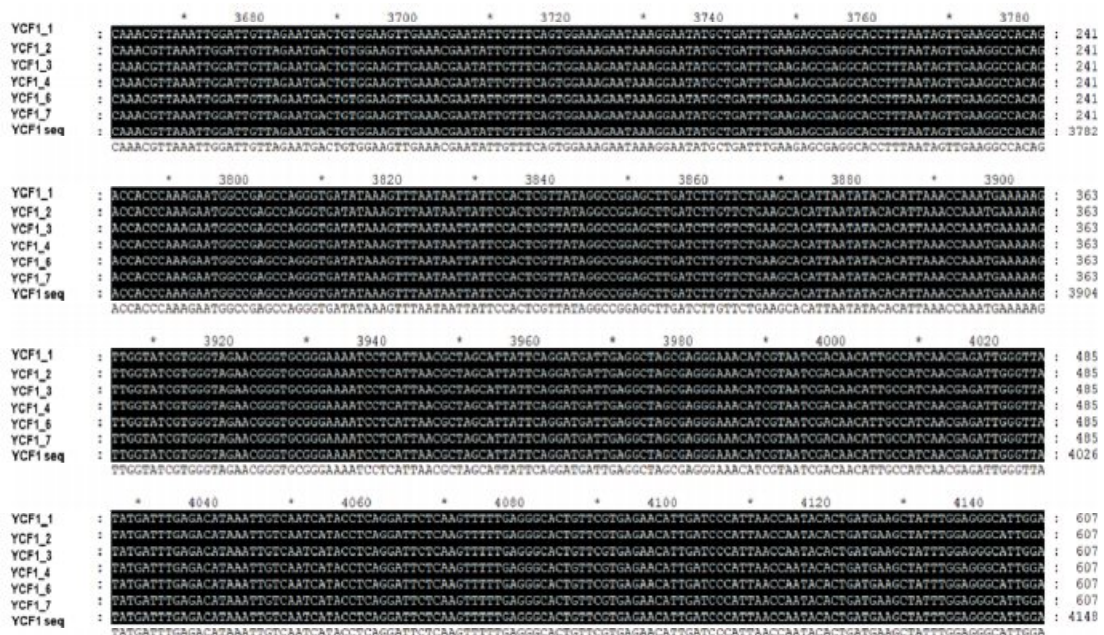


그림 58. 염기서열 분석을 통한 도입유전자 서열 비교

성공적으로 선별된 6개체의 우성형질 환경정화용 LM 포플러를 대상으로 LMO법 통합고시 별표 10-1 유전자변형식물의 위해성평가 중 ⑦유전자변형 생물체 특성에 관한 자료 중 가. 유전자변형생물체 내 도입유전자에 관한 자료 및 나. 도입유전자 발현산물에 관한 자료의 위해성평가 자료를 확인 하고자 하였다. 이를 위해 우성형질 6개체의 환경정화용 LM 포플러의 도입유전자 발현정도를 비교하였다. 시기별 발현정도 비교를 위해 토양으로 식재된 후 생성된 신초, 그리고 일정 기간이 지나고 생성된 묘목의 잎을 샘플링한 후 RNA를 추출하였다(그림 59). 포플러는 초본류와 달리 조직 구조와 세포벽의 강도 차이가 있기 때문에 RNA 추출전 세포 파쇄단계가 달라져야 했다(표 13).

표 13. RNA 추출 시 목본 식물과 초본 식물 비교

항목	목본 식물	초본 식물
세포벽 강도	• 두꺼운 세포벽	• 얇은 세포벽
세포 파쇄 방법	• 금속 비드 사용한 조직 파쇄기 • 강한 기계적 압력 필요	• 액체질소와 모르타르/막자 이용 • 간단한 beadvortex 가능
추출시 샘플 요구	• 조직 밀도가 높아 적은 양으로도 충분한 RNA 추출 가능	• 조직 크기가 작아 비교적 더 많은 양의 샘플 필요
RNA 오염 가능성	• 폴리페놀 및 다당류 함량 높음 • 추가 정제 단계 필요	• 폴리페놀 함량이 낮아 오염 위험 적음 • 표준 TRIzol 및 컬럼 키트
파쇄 후 처리	• 세포 잔해가 많아 원심분리 시간이 더 길 수 있음	• 세포 잔여물이 적고 상등액 분리가 용이

비변형 및 LM 포플러의 세포벽을 파쇄하기 위해 금속 비드를 이용하여 1차적으로 세포벽을 파쇄하였다. 파쇄한 후 RNA 분리 시약을 이용해 RNA를 추출하였다. 추출한 RNA는 정량 및 순도 측정, 그리고 전기영동을 통해 RNA가 성공적으로 분리된 것을 확인하였다(표 14, 그림 60). 이후 LM 포플러의 도입된 유전자 발현 수준을 비교하기 위하여 분리된 RNA를 이용하여 cDNA(complementary DNA)를 합성하였다. 포플러의 유전산물 분석을 위해 유전산물을 암호화하고 있는 exon 부분이 필요하기 때문에 역전사효소를 통해 exon으로 구성된 cDNA를 합성하게 되었다.

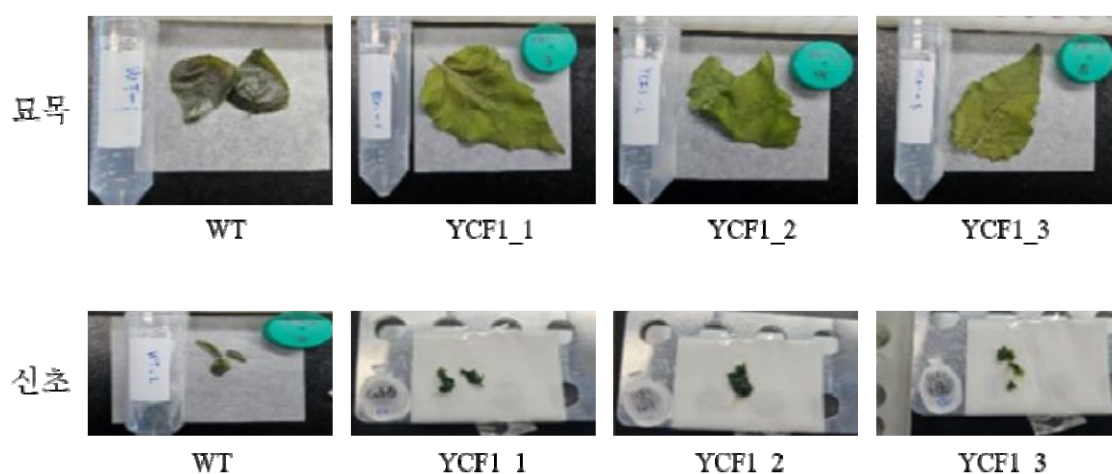


그림 59. 도입유전자 발현 수준 검증을 위한 잎 샘플링

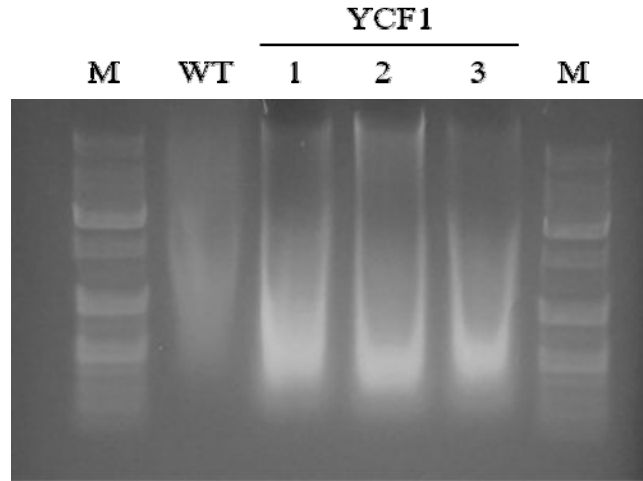


그림 60. LM 포플러 신초와 묘목 RNA 분리

표 14. LM 포플러 신초와 묘목 RNA 정량 및 순도

No.	시기	샘플 이름	농도 (ng/μL)	순도(A260/230)
1	신초	비변형 포플러	252.8	2.30
2		LM 포플러_1	337.2	2.31
3		LM 포플러_2	370.6	2.30
4		LM 포플러_3	574.4	2.28
5	묘목	비변형 포플러	230.1	2.12
6		LM 포플러_1	584.4	2.32
7		LM 포플러_2	885.4	2.29
8		LM 포플러_3	818.2	2.34

cDNA 합성 후 LM 포플러의 도입유전자 발현 수준 비교를 위해 포플러 내재유전자를 선정하였다. 내재유전자는 발현 수준을 비교하거나 정량화할 때 기준으로 사용되며, 달리 외부의 자극이나 환경에 크게 흔들리지 않고 일정하게 발현 수준이 유지되는 것으로 선정할 필요가 있다. 내재유전자는 에너지 대사, 단백질 합성 및 세포 구조 유지 등과 같은 항상성 유지에 필수적인 역할을 한다. 더욱이 특정 조직이나 세포에 국한되지 않고 포플러 대부분의 세포에서 발현되는 것이 특징이다. 후보 내재 유전자는 *Actin*부터 *Cyclophilin*까지 다양하게 선정하였으며, *Actin*은 다양한 조직에서 안정적으로 발현되며 식물분야에서 표준으로 많이 사용된다(표 15). *GAPDH*는 대사 관련 유전자로서 발현 수준이 높고 안정적이며 *Actin*과 마찬가지로 관련 데이터가 많이 있다. *EF1-α*는 단백질 합성과 관련된 필수 유전자이며,

*Ubiquitin*은 단백질 분해 과정의 필수적인 유전자이다. *Tubulin*은 세포골격 유지 관련 유전자이며, *18S rRNA*는 RNA 기반 실험에 안정적인 발현을 보이지만 높은 발현 수준 때문에 과도한 신호를 유발할 수 있는 단점이 있다. *PP2A*와 *Cyclophilin*은 각각 단백질 관련 유전자로 다양한 환경에서 민감하지 않고 일정한 수준을 유지할 수 있는 유전자이다. 본 연구에서는 조직 및 시기별 일정하게 유지되는 내재유전자가 필요함에 따라 최종적으로 *Actin*을 선정하였고, *Actin*의 서열을 얻기 위해 Phytozome(<https://phytozome-next.jgi.doe.gov/>)의 *P.tremula* x *Populus_alba*_HAP v5.1 기반 BLAST로 검색하여 포플러 *Actin* 서열을 얻은 후, qRT-PCR의 비교유전자로 사용하였다(그림 61, 62).

표 15. 후보 포플러 내재유전자 특징

유전자 이름	기능	설명
<i>Actin</i>	세포골격 단백질	다양한 조직에서 안정적으로 발현되며 qRT-PCR의 대표적인 housekeeping gene으로 사용됨.
<i>GAPDH</i>	해당과정 효소	대사 관련 유전자로 기본적인 세포 생리작용을 반영하며 안정적으로 발현됨.
<i>EF1-α</i>	신장인자 단백질	단백질 번역 과정에 필수적인 역할을 하며, 고유의 안정적인 발현 패턴으로 잘 알려져 있음.
<i>UBQ</i> (Ubiquitin)	단백질 분해 관련	단백질 분해 및 신호 전달에 관여하며 다양한 환경에서 안정적인 발현을 보임.
<i>TUB</i> (Tubulin)	세포골격 단백질	미세소관의 주요 구성요소로, 안정적이고 일정한 발현을 보여 qRT-PCR에서 자주 사용됨.
<i>18S rRNA</i>	리보솜 RNA	리보솜의 구조적 요소로 작용하며, RNA 기반 실험에서 높은 발현 안정성을 가짐.
<i>PP2A</i> (Protein Phosphatase 2A)	단백질 탈인산화 효소	대사 및 신호 전달 과정에서 중요한 역할을 하며 다양한 조건에서 안정적인 발현을 보임.
<i>CYP</i> (Cyclophilin)	단백질 접힘 및 안정화	단백질 접힘 및 안정화에 관여하며 다양한 환경에서 비교적 일정하게 발현됨.

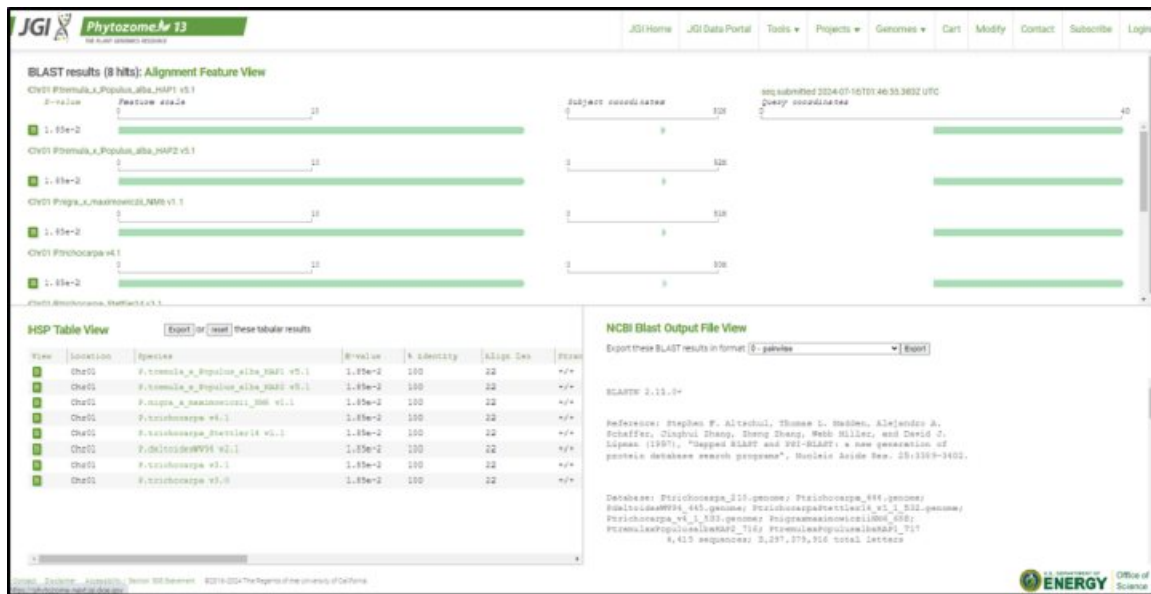


그림 61. 포플러 내재유전자 선별

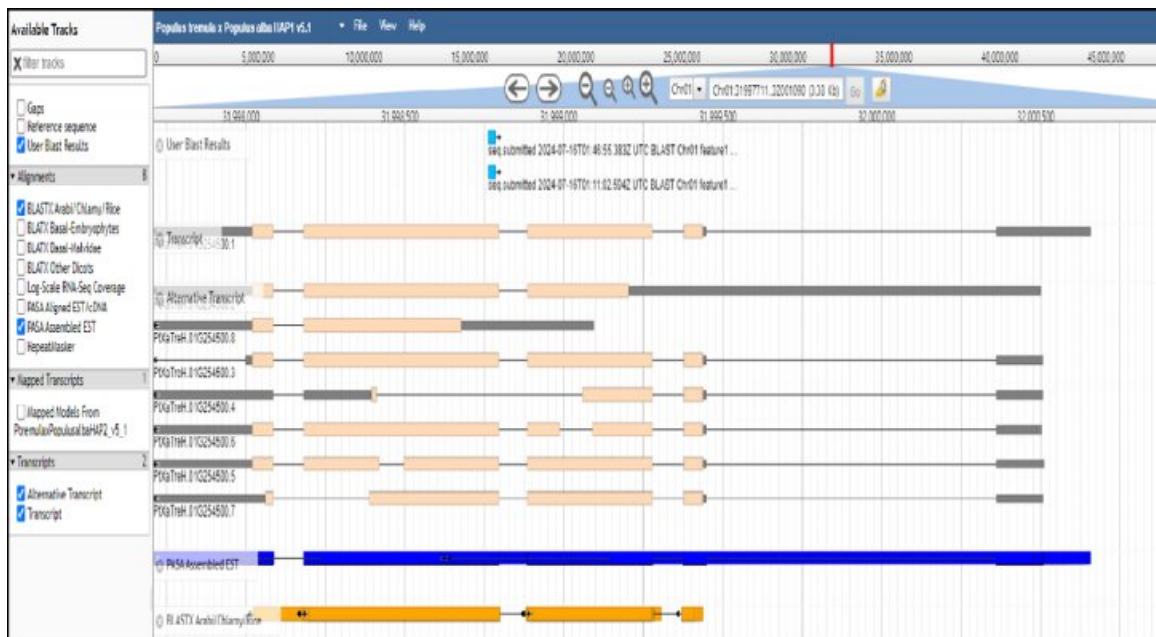


그림 62. 프라이머 제작을 위한 포플러 내재유전자 DNA 서열 검색

선정된 *Actin* 내재유전자와 도입유전자의 특이적 프라이머를 이용하여 발현 수준을 qRT-PCR로 확인하였다. LM 포플러 신초 개체에서 모두 도입 유전자 발현이 나타났으며, 개체에 따라 발현 수준의 차이가 보였다. 묘목 역시 신초의 발현 수준과 유사한 경향이 나타났다(그림 63, 64). 이를 통해 형질전환으로 개발한 LM 포플러가 제대로 구축됨을 확인할 수 있었다.

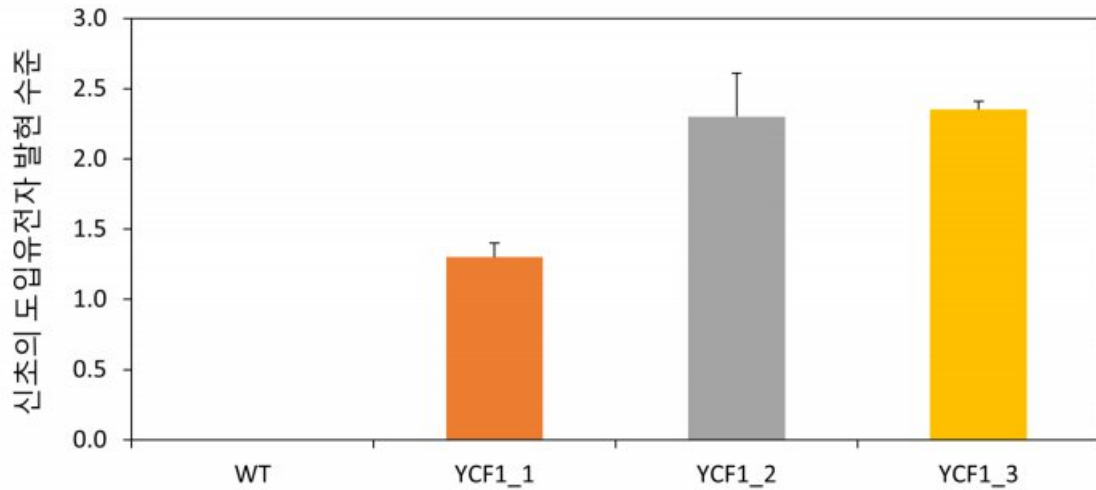


그림 63. LM 포플러 신초에서 도입유전자의 상대적인 발현 수준

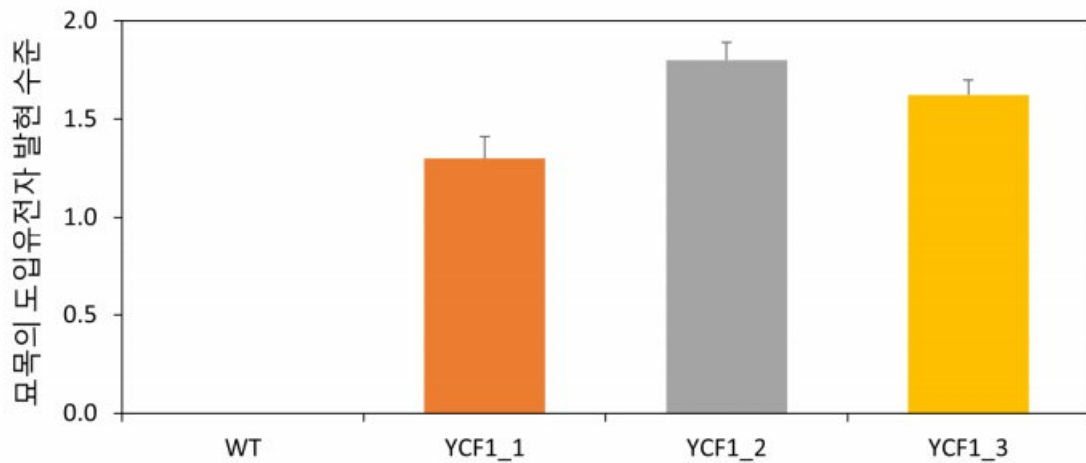


그림 64. LM 포플러 묘목에서 도입유전자의 상대적인 발현 수준

본 과제는 환경정화용 LM 포플러의 위해성평가 가이드라인을 개발하기 위해 위해성심사에 필요한 항목을 평가하는 데 중점을 두고 있다. 도입 유전자의 발현 수준이나 개체 간 발현 차이는 중요 참고 지표이지만, 주된 목적은 환경정화 기능을 가진 LM 포플러의 위해성을 평가하는 것이다. 따라서 개체 간 발현 차이는 존재하지만, 이러한 차이는 LM 포플러가 환경정화 용도로 활용될 수 있는 가능성을 크게 저해하지 않고 결과는 환경방출 시 위해성평가와 안전성 검증을 위한 기초 자료로 활용될 예정이다. 추후 연구에서 발현 수준이 검증된 환경정화용 LM 포플러를 이용하여 격리포장에서 실제적인 자연생태계 위해성평가를 진행하고 중요 지표를 도출할 계획이다.

나. 환경정화용 LM 포플러 생물학적 특성 분석

환경정화용 LM 포플러의 생물학적 특성을 분석하기 위해 형질전환부터 순화처리까지의 전 과정을 체계적으로 수행하였으며, 이를 통해 개체별 성장 특성과 표현형에 대한 분석을 진행하였다. LM 포플러는 아그로박테리움 매개 형질전환 기술을 이용하여 환경정화용 유전자를 도입하였으며, 이후 캘러스 유도과 신초 재분화, 발근 유도의 과정을 거쳤다(그림 65). 캘러스 단계에서는 일부 조직에서만 신초 유도가 이루어졌으며, 발근 유도 단계로 넘어간 개체는 비교적 높은 성공률을 보였다. 신초에서 유도된 뿌리는 안정적으로 형성되었고, 이를 기반으로 식물생장조절실에서 토양을 이용한 순화처리를 진행하였다. 이 과정에서 개체 간 성장 속도의 차이는 있었으나, 최종적으로 묘목으로 성장한 개체를 확보할 수 있었다. 발근 유도 후 순화 처리가 완료된 LM 포플러 묘목은 식물생장조절실 내에서 성장하면서 표현형적 특성을 관찰하였다. 묘목의 주요 생리적 지표로는 초장(plant height), 잎의 크기, 색상 및 잎의 형태를 포함하였다. 식물생장 배지에서 발근 유도 3주 후와 9주 후에는 줄기의 길이와 잎의 수가 유의미하게 증가했으며, 12주 후에는 모든 개체가 안정적인 성장을 유지하였다.

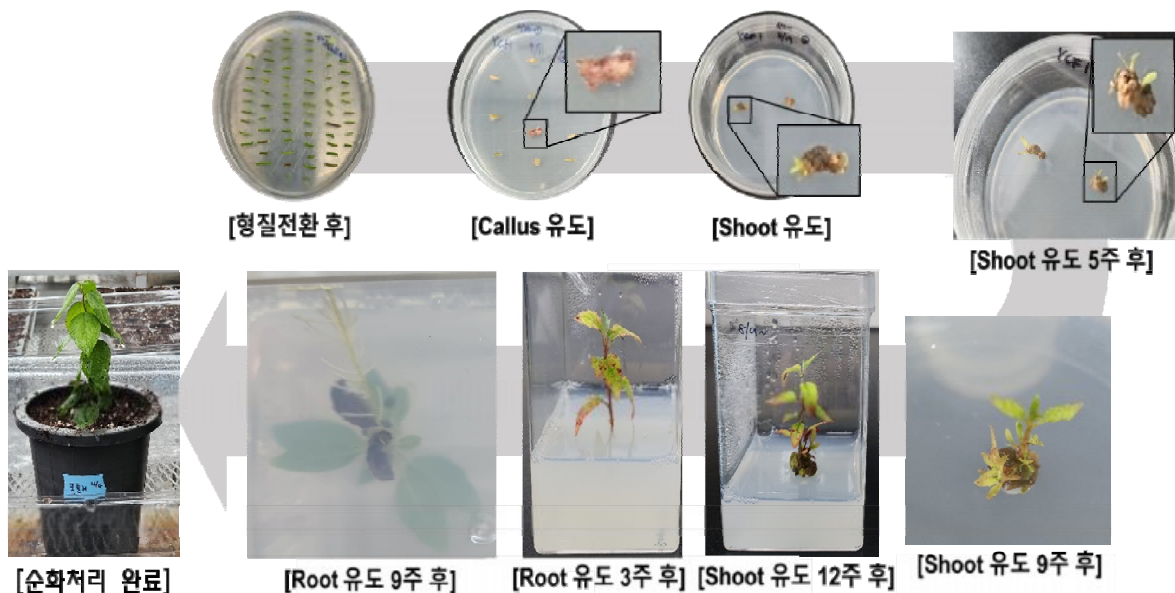


그림 65. LM 포플러 개발 과정

흙으로 순화처리가 완료된 LM 포플러를 식물생장조절실에서 재배하면서 표현형적 특성을 분석하였다. LM 포플러의 잎의 크기와 색에서 비변형 포플러와 유사한 생리적 특성을 보였다(그림 66). 도입 유전자의 발현에 따른 생리적 변화가 관찰되지 않았으며, 유전자 도입으로 인한 발현 불안정성 또한 확인되지 않았다. 잎의 건강 상태는 발근 유도과 신초 유도 단계에서부터 주기적으로 평가되었으며, 특히 배양실에서 병충해에 의한 손상 이후 새 잎이 재생되는 복원력에서도 큰 차이가 나타나지 않았다. 이는 LM 포플러가 환경정화 목적으로 활용되기에 적합한 내구성을 보유하고 있음을 시사한다. 식물생장조절실 조건에서 성장한 LM 포플러는 계절별 변화되는 온도와 빛 조건에서 안정적인 생리적 특성을 유지하였다. 묘목 단계에서는 초장과 잎의 크기가 지속적으로 증가하였으며, 계절에 따른 변화 역시 비변형 포플러와 유사한 경향으로 나타났다.



그림 66. 순화처리 후 LM 포플러의 성장 표현형

다. 자연생태계 환경방출실험용 LM 포플러 확보

본 과제에서 선별된 LM 포플러는 주기적으로 묘목을 삼목번식하여 개체수를 유지하고, 추후 격리포장에 식재하여 자연환경 방출 조건에서 위 표에 제시했던 불임 목본에 맞는 항목의 위해성평가 실험을 진행하고, 환경정화용 LM 포플러 위해성평가 가이드라인 개발에 사용할 예정이다.

5. LM 목본류 자연생태계 위해성평가 환경 조성

가. LMO 목본류 위해성평가 사례 분석

환경정화용 LM 목본류의 자연생태계 위해성평가 환경 조성을 위해 LM 목본류의 위해성평가 사례를 비교 분석하였다.

1) LM 목본류 재배면적 및 채택률 증가

전 세계적으로 LM 작물을 채택하여 재배하거나 사료용 또는 식품용으로 수입하여 이용하는 국가는 총 71개국이다(그림 67, 표 16; 출처: ISAAA, 2019). 그중 29개국(24개 개도국, 5개 선진국)은 LM 작물을 재배하고, 42개국은 수입하고 있다. LM 작물의 재배면적은 24개 개도국에서 56%, 5개 선진국에서 44%를 차지하고 있다. LM 작물이 상업화된 1996년 LM 작물의 재배면적은 170만 ha이었으나 2019년에는 112배 증가하여 1억 9,404만 ha에 달했으며, 24년(1996-2019) 동안 누적된 재배면적은 27억 ha에 이른다. 4대 LM 작물인 옥수수, 대두, 면화, 카놀라가 전체 재배면적의 99%를 차지하고 있고 가장 많이 재배되는 작물은 대두이며 전 세계 재배면적의 48%에 달하는 9,190만 ha에서 재배 중이며, 옥수수는 31%인 6,090만 ha, 면화는 79%인 2,570만 ha, 카놀라는 27%인 1,010만 ha를 차지하고 있다 (ISAAA, 2019).

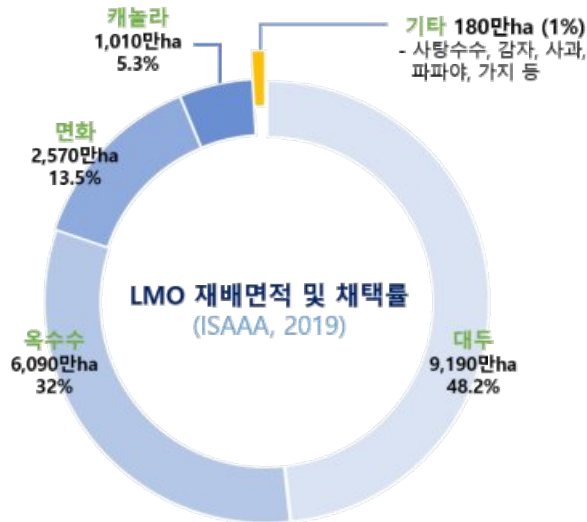


그림 67. 2019년 전 세계 LMO 재배면적 및 채택률(ISAAA, 2019 재구성)

4대 LM 작물 외에도 사탕수수, 감자, 사과, 호박, 파파야, 가지 등 기타 작물이 전 세계 재배면적의 1%를 차지하고 있다. 재배면적은 알팔파(130만 ha), 사탕무(473,000 ha), 사탕수수(20,000 ha), 파파야(12,000 ha), 홍화(3,500 ha), 감자(2,265 ha), 가지(1,931 ha) 및 1 ha 이하의 호박(squash), 사과, 파인애플 등이 포함되어 있다.

표 16. 주요 국가(10개국)의 LM 작물 재배면적

순위	국가	면적(백만ha)	유전자변형 작물
1	미국	71.5	옥수수, 대두, 면화, 카놀라, 사탕무, 알팔파, 파파야, 호박, 감자, 사과
2	브라질	52.8	대두, 옥수수, 면화, 사탕수수
3	아르헨티나	24	대두, 옥수수, 면화, 알팔파
4	캐나다	12.5	카놀라, 옥수수, 대두, 사탕무, 알팔파, 사과
5	인도	11.9	면화
6	파라과이	4.1	대두, 옥수수, 면화
7	중국	3.2	면화, 파파야
8	남아공	2.7	옥수수, 대두, 면화
9	파키스탄	2.5	면화
10	볼리비아	1.4	대두

출처: ISAAA, 2019

ISAAA에 보고에 따르면 현재 전 세계적으로 재배 승인된 LMO 35개 품목 중 대다수는 초본류이고, 목본류는 파파야, 사과, 자두, 포플러 등 4개 품목에 불과하다(표 17; 출처: [https://www.isaaa.org/GM Approval Database](https://www.isaaa.org/GM_Approval_Database)). 그러나 LM 목본류의 재배면적과 채택률이 미국과 중국을 중심으로 점차 증가하고 있다. LM 목본류의 재배는 1996년 미국 코넬 및 하와이대학교에서 개발한 바이러스 및 항생제 저항성 유전자가 도입된 파파야가 미국, 캐나다에서 승인된 것으로 시작되어, 현재까지 미국, 중국, 캐나다, 일본에서 개발하고 재배 승인을 받은 품목은 사과, 자두, 포플러 등 4개 품목 10개 이벤트가 있다.

표 17. LM 목본류 재배 승인 현황

구분	특성 (이벤트명)	도입유전자	개발사	승인연도	승인국가
사과	항생제 저항, 갈변방지(GD743)	<i>PGAS PPO suppression gene</i>	Okanagan Specialty Fruits Incorporated	2015	미국, 캐나다
	항생제 저항, 갈변방지(GS784)			2015	미국, 캐나다
	항생제 저항, 갈변방지(NF872)			2018 2019	미국, 캐나다
파파야	바이러스성 질병 저항성, 항생제 저항성, 시각적 마커(55-1)	<i>prsv_cp</i>	코넬 대학교 및 하와이 대학교	1997 2003 2011	미국, 캐나다, 일본
	바이러스성 질병 저항성, 항생제 저항성, 시각적 마커(63-1)	<i>prsv_cp</i>		1996	미국
	바이러스성 질병 저항성 (Huanong No.1)	<i>prsv_rep</i>	화남농업대학교	2006	중국
	바이러스성 질병 저항성, 항생제 저항성(X17-2)	<i>prsv_cp</i>	플로리다대학교	2008	미국
자두	바이러스성 질병 저항성, 항생제 저항성, 시각적 마커(C-5)	<i>ppv_cp</i>	미국 농무부 - 농업 연구 서비스	2009	미국
포플러	나비목 곤충 저항성, 항생제 저항성 (Bt poplar, poplar 12)	<i>cry1Ac</i>	임업 연구소 (중국)	1998	중국
	나비목 곤충 저항성, 항생제 저항성, 다중 곤충 저항성 (Hybrid poplar clone 741)	<i>cry1Ac</i>	임업 연구소 (중국)	2001	중국

출처: [https://www.isaaa.org/GM Approval Database](https://www.isaaa.org/GM_Approval_Database)

LM 목본류 중 가장 많이 재배되고 있는 작물인 파파야는 주로 바이러스 저항성 유전자를 도입하여 생산성 향상을 위해 개발되었으며 현재 미국과 중국을 중심으로 재배되고 있다. 일본에서도 2023년 7월 기준 농림수산성으로부터 LM 파파야가 제1종사용으로 승인되었으며 일반적인 재배가 가능하도록 격리포장 시험이 진행되었다. USDA NASS와 ERS 데이터를 바탕으로 한 2022년 미국의 주요 LM 작물에 대한 재배면적은 8,446만 ha로 2019년 ISAAA 보고서의 수치인 7,150만 ha보다 다소 증가하였다(KBCH, 2023). 미국은 전 세계 LM 작물 재배면적의 38%를 차지하는 가운데 LM 목본류로는 파파야와 사과를 각각 1,000 ha와 265 ha를 재배한 것으로 알려졌다(ISAAA, 2019). 미국은 과일나무 최초로 1997년 바이러스저항성 LM 파파야 ‘Sunup’, ‘Rainbow’에 대하여 상업적 재배를 승인하였다. 미국 농무성은 2017년 하와이에서 재배되고 있는 526 ha의 파파야 중 77%에 해당하는 약 405 ha가 바이러스저항성 LM 파파야(Rainbow)라고 추정하였다(바이오안전성백서, 2019). 중국의 경우 1997년 이후 LM 면화, 토마토, 고추, 피튜니아, 포플러, 파파야를 상용화했지만 현재는 면화와 파파야만 상업적으로 생산되고 있다(표 18; 출처: ISAAA, 2019). 파파야는 2006년부터 중국에서 재배되기 시작했는데, 2019년 85%의 채택률로 12,125 ha에서 재배하고 있다(ISAAA, 2019).

표 18. 중국 유전자변형 파파야 재배면적 현황(2019년 기준)

지역	전체면적(ha)	유전자변형 품종 재배 면적(ha)	채택률(%)
광둥	5,300	5,035	95
하이난	4,500	4,050	90
황시	2,000	1,600	80
연남	1,600	640	40
후지안	800	800	100
합계	14,200	12,125	85

출처: ISAAA, 2019

2015년 미국은 캐나다에 본사를 둔 Okanagan Specialty Fruit (OSF)사가 개발한 갈변 방지 LM 사과인 골드 딜리셔스, 그레니 스미스, 후지를 승인하고 2017년 11월 판매를 시작하였다. LM 사과는 개발회사인 OSF 회사 소유지 및 계약생산자에 의해서만 재배되고 있으며 미국의 사과나무

재배면적 13만 ha 중 0.4%에 해당하는 최대 567 ha까지 증가시킬 계획을 세우고 있다고 보고하였다(바이오안전성백서, 2019).

2) LM 목본류 연구개발 현황

유전자가위 기술의 발전으로 LM 목본류의 연구개발도 이전보다 활발하게 진행되고 있다(표 19; 출처: 바이오안전성백서, 2023). 유전자가위 기술을 이용한 LM 목본류의 논문을 가장 많이 발표한 중국의 경우 주요 연구 대상 종은 포플러이다. 유전자가위 기술을 이용한 포플러 연구는 대부분 리그닌 합성과 세포벽 관련 유전자들을 대상으로 하고 있다(바이오안전성백서, 2023)

미국에서는 오레곤주립대 연구팀에서 개화 억제 유전자를 이용하여 불임 포플러를 개발하였다(Azeez and Busov, 2021). 연구진들은 불임 포플러가 식재지에서 꽃가루 확산을 통한 야생종으로 유전자 전이를 막음으로써 생태계 교란의 우려를 줄일 수 있음을 강조하고 있다. 또한 유전자가위 기술이 LM 목본류의 규제 완화, 대중적 수용의 촉진에 도움이 될 것으로 평가하고 있다.

표 19. 유전자편집 기술을 이용한 LM 목본류 개발 현황

속명	종명	국가명	유전자	표현형
사시나무속 (Populus)	<i>P.tomentosa</i>	중국	<i>ptSGT1, ptSGT4</i>	셀룰로오스 함량 변화
	<i>P.tremula</i> × <i>P.alba</i> clone INRA 717-IB4	미국	<i>SHR</i>	뿌리 내피 단세포층 변화
	<i>P.tremula</i> × <i>P.alba</i> clone INRA 717-IB4	미국	<i>MYB186, MYB138, MYB38</i>	잎의 모용 제거, 왁스층 변화
	<i>P.alba</i>	이란	<i>PalCESA4</i>	셀룰로오스 함량 변화
	<i>P.tremula</i> × <i>P.alba</i>	벨기에	<i>CSE1, CSE2</i>	리그닌 저감, 셀룰로오스 증가
	<i>P.tremula</i> × <i>P.alba</i>	미국	<i>PopSAP</i>	개화 억제
	<i>P.trichocarpa</i>	중국	<i>CesA4, Ces7A/B, Ces8A/B</i>	셀룰로오스 함량 변화
	<i>P.trichocarpa</i>	미국	<i>PHBMT1</i>	리그닌 함량 변화
가문비나무속 (Picea)	<i>P.glauca</i>	중국	<i>DXS1</i>	체세포배 백화

속명	종명	국가명	유전자	표현형
삼나무속 (Cryptomeria)	<i>C. japonica</i>	일본	<i>CjCI1</i>	백화
밤나무속 (Castanea)	<i>C. sativa</i>	이탈리아	<i>PDS</i>	백화
유칼립투스속 (Eucalyptus)	<i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i>	미국	<i>FT</i>	개화 억제

출처: 바이오안전성백서, 2023

유전자가위 기술이 적용된 과일나무는 아그로박테리아를 이용한 형질 전환 방법으로 사과, 포도 그리고 스위트 중 오렌지 등에서 보고되고 있으며 배, 자몽, 카카오, 커피 및 키위 등에서 유전자가위 기술과 관련된 결과들이 보고되었다(바이오안전성백서, 2019). 그러나 대부분 대상 수종에 유전자교정 기술의 이용이 가능함을 검증하는 수준에 머물고 있으며 기능성 형질을 대상으로 하고 있지는 않은 것으로 보고되었다(바이오안전성백서, 2019).

3) LM 목분류 환경방출 실험 사례

앞에서 살펴본 바와 같이 LM 목분류는 포도, 키위, 자두, 오렌지 등 작물 위주로 내병성·내충성 향상 및 영양성분 향상을 목적으로 개발되고 있으나 실제 환경방출 시험 재배까지 진행된 경우는 많지 않다. 게다가 환경방출 시험을 성공적으로 완료했다 하더라도 상업적 용도에 대한 최종 승인을 받기까지는 여러 해가 소요될 것으로 예상된다.

대표적으로 미국 샌프란시스코의 리빙카본(Living Carbon)사에서는 최대 53%의 더 많은 탄소를 저장할 수 있는 환경정화용 LM 포플러를 자연 생태계에 약 600그루 규모로 식재하였고 상업화가 예정되어 있다. EU 연구기관과 미국 농무부 농업연구청(USDA ARS)이 참여하는 컨소시엄을 통해 바이러스 내성 HoneySweet GM 자두나무¹⁾를 개발하고 2017년 시험 재배도 성공적으로 완료하였으나 현재까지 상업적 용도에 대한 최종 승인을 받지 못한 상태이다(KBCH, 2023a).

환경방출 실험이 진행 중인 작물은 내병성·내충성 향상을 위해 개발된

1) 식물이 자체 조직 내에서 살충제를 생산하도록 하는 식물합성보호제(PIP)가 의도적으로 유전자변형을 통해 살충제를 생산할 경우 EPA가 실시하는 위해성평가에 대해서는 2008년 10월 29일 문의, 2010년 5월 7일 완료하였다.

밤나무, 자두, 바나나²⁾가 있고, 작물을 제외하고는 미국과 유럽에서 바이오매스 증대, 내병성·내충성 향상, 개화기 조절 등을 목적으로 개발된 환경정화용 LM 포플러의 환경방출 사례가 가장 많았다(표 20). 이 외에도 1988년 중국에서 재배 승인된 Bt 유전자가 도입된 최초의 해충 저항성 LM 포플러(*Populus nigra*)의 약 22종 품종이 만들어져 환경방출실험이 진행되었다(바이오안전성백서, 2019).

표 20. LM 목본류의 환경방출 사례

연도	국가	신청기관	품목	내 용	출처
2006	미국	워싱턴대학교	포플러	워싱턴 주 내 환경정화용 포플러 시험재배	제3차 LMO 안전 관리 계획, 2018
2008	미국	퍼듀대학교	포플러	인디애나 주 내 환경정화용 포플러 시험재배	제3차 LMO 안전 관리 계획, 2018
2012	미국	워싱턴대학교	포플러	내병성, 내충성(eugenol 생산)을 위한 포플러의 시험재배	바이오안전성백서, 2019
2017	미국	뉴욕대학교	밤나무	곰팡이에 의한 줄기마름병 저항성이 도입된 밤나무의 시험재배	바이오안전성백서, 2019
2017	스웨덴	Umeå University	포플러	모델 시스템으로서의 사시나무(Aspen) 연구	EC JRC
2017	체코	Crop Research Institut	자두	Plum pox virus 저항성 부여	EC JRC
2017	스웨덴	Swedish University of Agricultural Sciences	카멜리나	카멜리나 종자에 단일 불포화지방산(C14, C16) 생산 및 triacylglycerol과 waxester의 융합	EC JRC
2018	미국	오레곤주립대	포플러	15개 개화관련 이벤트가 도입된 3,000여본의 포플러 시험재배	바이오안전성백서, 2019
2018	호주	퀸즈랜드 기술대학	바나나	우간다에서 영양성분 개선(Pro-Vitamin A 함량 증가)된 바나나의 시험재배	바이오안전성백서, 2019
2018	스웨덴	SverigesLantbruksuniversitet	포플러	목재 재질 향상을 위한 시험재배	EC JRC
2018	핀란드	University of Helsinki	포플러	GM사시나무 교잡종에서 목질 형성 및 기공 조절 시험재배	EC JRC
2019	루마니아	Fruit Research and Development Station	자두	HoneySweet 교배종 시험재배	EC JRC
2019	영국	Forhamsted Research	카멜리나	카멜리나 종자저장 성분의 추적 및 합성	EC JRC

2) 바나나는 식물학 분류상 목본류가 아닌 초본류에 속하나 관목류보다 크기가 크게 자라는 파초속에 속하며 여러해를 살기 때문에 LM작물의 대부분을 차지하는 카놀라, 옥수수, 콩, 목화과 같은 초본류와 구분을 하기 위한 본 연구의 목적에 따라 목본류의 사례에 포함하였다.

연도	국가	신청기관	품목	내 용	출처
2020	스웨덴	SweTree Technologies AB	포플러	목질계 바이오매스 생산 증대	EC JRC
2021	벨기에	VIB	포플러	목재 구성이 변화된 포플러 시험재배	EC GMO Registers
2022	스웨덴	SweTree Technologies AB	포플러	유도돌연변이를 통해 리그닌에 변화가 생긴 포플러 시험재배	EC GMO Registers
2023	스페인	CEBAS-CSIC	자두	복숭아 및 살구 품종 대목으로 사용을 위하여 형질전환 자두 시험재배	EC GMO Registers
2024	벨기에	VIB	포플러	리그닌 함량 감소한 포플러 시험재배	EC GMO Registers
2024	스웨덴	Swedish University of Agricultural Science	포플러	전분합성 감소시킨 사시나무 시험재배	EC GMO Registers
2024	스웨덴	SweTree Technologies AB	포플러	가뭄 저항성 및 성장촉진 포플러 시험재배	EC GMO Registers

4) 국내 LM 목분류 개발 연구 현황

국내에서는 2009년 산림 생태계에 꽃가루 확산으로 인한 유전자 전이를 막기 위해 꽃이 피지 않는 LM 포플러를 개발하였다(국립산림과학원, 2009). 그 후 2014년 경희대에서 주관하고 국립산림과학원과 민간연구소가 참여한 ‘포플러 슈퍼클론 개발’ 과제가 시작되어 2017년 종료되었다. 그러나 이후 후속으로 대규모의 LM 목분류 개발 과제는 진행되지 않고 있다. 그 밖에도 국립산림과학원, 고려대학교, 서울대학교 그리고 한국생명공학연구원에서 포플러를 대상으로 내염성 향상, 바이오매스 증진 및 유전자 기능 검증 등의 연구가 진행된 바 있다(표 21).

국립산림과학원은 내염성 향상과 바이오매스 증가를 목적으로 LM 포플러를 개발하였고, 2017년 스트레스 관련 단백질인 SAP1(stress associated protein 1) 유전자가 도입된 LM 포플러를 개발하였다(Yoon et al., 2018). 연구자들은 SAP1 유전자가 세포의 이온 항상성 유지에 관여하는 유전자를 조절하며 염에 대한 내성을 향상시키는 것을 확인하였다.

또한 고려대학교와 국립산림과학원은 공동연구를 통해 온실에서 에탄올 수율과 바이오매스가 증가한 LM 포플러를 격리포장에 식재한 후 LM 포플러에서 바이오매스 생산이 더 증가하고 에탄올 생산량이 더 높다는 것을 확인하였다(바이오안전성백서, 2019).

표 21. 국내 LM 목본류 연구개발 현황

수종	학명	목표	보고 학술지	연도
포플러	<i>Populus alba</i> x <i>P. glandulosa</i>	건조 스트레스	J. Plant Biotechnol	2017
		생장 및 내염성	Plant Biotechnol. J.	2017
		노화 지연	J. Plant Biotechnol	2017
		내염성	Trees	2018
		수고 및 직경 생장	Plant Biotechnol. J.	2018
		바이오매스	Biomass&Bionergy	2018
		내염 및 내건성	Environ Exp. Bot.	2018

출처: 바이오안전성백서, 2019

2021년 국립산림과학원과 경희대학교의 공동연구진은 나무의 생장 증진을 위하여 지베렐린 생합성에 관여하는 소나무 유전자인 *PdGA20ox1*과 포플러의 2차 세포벽 생합성을 조절하는 것으로 알려진 *PtrMYB3* 유전자를 목부 특이적인 프로모터를 이용하여 발현시킨 현사시나무를 보고하였다(바이오안전성백서, 2023). 2022년에는 서울대학교와 한국과학기술연구원의 공동연구진이 테르페노이드 생합성과 관련된 MEP 대사경로의 마지막 단계에 해당하는 HDR 효소 유전자를 은행나무에서 포플러에 이식하여 생장이 가속화되고 겨울에 눈 형성이 지연되었다고 밝혔다(바이오안전성백서, 2023).

나. 환경정화용 LM 목본류 평가항목 개발

1) LM 초본류와 목본류 간 평가항목, 평가방법 등 비교 분석

생육기간이 1년 또는 2년으로 짧은 초본류와 달리 목본류의 유형기는 보통 5년 이상, 길게는 30~40년이고, 유성생식 기간은 온대지방에서 2년 혹은 3년에 걸쳐 화아의 원기형성, 개화, 종자성숙이 이루어지기 때문에 환경의 영향을 많이 받는다. 목본류는 대부분 타가수분을 하기 때문에 순계의 육성이 어려워 균일한 시험재료를 확보하기 힘들다. 또한 영양 번식은 형질전환 후 키메라를 만들어 내는 확률이 높아 형질전환에 어려움이 있으며, 종자번식이 가능한 경우 형질전환 후 종자번식까지 장시간이 소요되어 연구에 어려움을 주고 있다. 게다가 초본에 비해 크기가 커서 실험 대상으로 관리하기가 쉽지 않고 생육기간이 길고 삼림의 생태도 매우 복잡하여 환경을 인위적으로 조정하고자 할 때 어려움이 있다.

또한 목본류의 꽃가루는 이동 거리가 멀기 때문에 LM 목본류가 자연산림 생태계에 생태학적 위협을 미칠 수 있다는 우려로 인하여 지금까지 LM 목본류의 상업화는 작물 분야보다는 활발하지 못하였다. 그 외 형질전환된 수목에 꽃이 피고, 그 화분이 주변의 동종 수목의 꽃에 수분·수정을 함으로써 형질전환체에 도입된 유전자가 확산될 가능성과 형질전환체가 자연환경에서 기존의 식물에 비하여 확실히 강한 경쟁력을 가지고 있는 경우 주변 식물의 다양성을 상실하게 하고 우점종화 될 가능성이 있다는 것은 기타 초본류와 동일하다. 실제로 LM 목본류 개발에서 가장 큰 문제는 목본류는 초본류보다 긴 생장 기간과 꽃가루 이동 거리로 환경방출 실험의 어렵기 때문이다. 따라서 LM 목본류를 삼림에 심을 경우 삼림생태계에 대한 영향을 향후 상세하게 예측하는 데에는 어려움이 크다(수목생리학, 2014; 서울여대, 2010; KISTEP, 2010).

가) 식물신품종보호제도에서 초본류와 목본류의 차이

2002년 제정된 식물신품종보호법에 따르면 새로 육성된 품종이 신품종으로 보호받기 위해서는 ①신규성 ②구별성 ③균일성 ④안정성 ⑤고유한 품종명칭이라는 기본요건을 갖춰야 한다. 이 중에서 신규성(Novelty)이란 기존에 알려지지 않은 새로운 품종을 말한다. 품종보호 출원일 이전에 국내에서 1년 이상, 그 밖의 국가에서 4년 이상(과수 및 임목의 경우에는 6년 이상) 당해 종자 또는 수확물이 상업적으로 양도되지 아니한 경우에 신규성을 갖춘 것으로 본다(표 22).

품종보호권의 존속기간은 품종보호권자가 보호품종을 독점적으로 실시할 수 있는 법정기간으로 「종자산업법」 제56조에 따라 품종보호권의 설정등록이 있는 날부터 20년이며, 영년생 작물인 과수 및 임목의 경우에는 25년으로 되어 있다(표 22).

이처럼 품종보호 등록에는 초본류에 비해 목본류인 임목과 과수, 덩굴 식물의 필요조건과 품종보호권의 존속기간이 다르다. 품종보호의 요건 중 신규성에서도 초본류보다 상업적 이용이 없는 기간을 2년 더 요구하고 있으며, 품종보호권 존속기간도 5년의 기간을 더 부여하는 등 차이를 두고 있다. 이는 앞서 살펴본 바와 같이 초본류와 목본류의 차이를 반영했기 때문이다.

표 22. 식물신품종보호법에 의한 품종보호 내용

구 분	초본류	과수, 임목, 덩굴식물
품종보호의 요건 (신규성: Novelty)	국내 1년, 국외 4년 이상 상업적 이용이 없는 품종	국내 1년, 국외 6년 이상 상업적 이용이 없는 품종
품종보호권 존속기간	20년	25년

나) 농림축산업용 LMO의 포장시험 검토

LMO법 제3-31조제6항과 관련하여 농림축산업용 LMO의 포장시험 등 환경방출과 관련된 실험을 실시하는 격리포장시설에서도 수목의 경우에는 뿌리에서 유도되는 근맹아의 발생 방지를 위한 별도의 조치를 요구한다(표 23). 초본류와 비교하여 목본류(수목)의 경우 생식생장 보다 영양 번식을 통해 외부로의 유출 가능성을 반영한 것이다.

표 23. 농림축산산업용 LMO의 관리방법과 조치사항

재조합체	관리방법	조치사항
식물체	재배관리	라. 줄기, 덩이줄기, 덩이뿌리 등에서 식물체가 재분화되기 쉬운 유전자변형식물에 대하여는 재생 방지를 위하여 필요한 조치를 한다. 수목의 경우, 뿌리에서 유도되는 근맹아의 발생 방지를 위하여 필요한 조치를 한다.

다) LMO 격리포장시설 구비요건 검토

LMO법 통합고시 제9-13조(포장시험을 포함한 환경방출 실험 승인 등) 제4항 유전자변형생물체의 개발·실험승인을 받아 포장시험 등 환경방출과 관련된 실험을 실시하는 경우에는 별표 9-7의 유전자변형생물체의 격리 포장시설 구비요건에 따라 포장시험을 실시할 수 있다(표 24). 이때, 격리포장시설은 지면에서 2 m 이상 높이의 울타리를 설치해야 하며 비닐온실은 1 m 이상의 거리를 두고 지면에서 1 m 이상 높이에 설치해야 한다. 또한 필요한 경우에, 개화기 등 적절한 시기에 생식기관을 제거하거나, 봉지 씌우기, 망사피복 설치 등으로 화분의 비산을 방지하는 등 구비요건을 갖추어야 한다. 그러나 현재의 LMO 격리포장시설 구비요건은 초본류의 특성 및 생식생장을 통해 우려되는 교잡 가능성에 중점을 두고 있어 목본류의 특성을 반영한 시설 규모와 영양번식을 통한 외부 유출 가능성 등을 고려할 필요성이 있다.

표 24. LMO 격리포장시설 구비요건

구 분	구 비 요 건
식물	1) 격리포장시설은 울타리를 설치하여 주위와 물리적인 격리가 이루어져야 한다. 울타리의 높이는 지면으로부터 최소한 땅속 지지물을 포함하여 2m 이상 되어야 한다. 다만, 비닐온실의 울타리높이는 지면으로부터 1m이상이며, 비닐온실과 1m이상 거리에 설치되어야 한다. 2) 울타리는 쓰러지지 않도록 바닥에 단단하게 고정시켜야 하며 울타리 밑으로는 설치류 등의 출입을 막을 수 있는 설비를 갖추어야 한다. 3) 격리포장시설은 출입을 제한할 수 있는 잠금장치와 유전자변형생물체의 실험장소임을 알리는 표지판이 눈에 띄도록 설치되어야 한다. 4) 필요한 경우에, 개화기 등 적절한 시기에 생식기관을 제거하거나, 봉지 씌우기, 망사피복 설치 등으로 화분의 비산을 방지한다. 5) 격리포장시설 근처에 유전자변형생물체와 교잡 가능한 동종 또는 근연야생종의 분포를 조사하고 교잡 거리 내에 분포되어 있는 경우에는 이들을 제거하여야 한다. 6) 병원성이 있는 유전자변형식물을 취급하였을 경우에는 반드시 토양, 식물체, 사용 농기구, 작업복 등을 작업이 종료된 후 소독/폐기한다. 7) 격리포장시설의 구역 내에 집수로, 집수장을 설치하고 배수구를 망 등으로 막아 유전자 변형생물체 및 부산물 등이 배수 중에 배출되지 않도록 조치한다. (환경정화용의 경우는 본 항 제외) 8) 유전자변형생물체가 외부로 유출되지 않도록 격리포장시설 구역 내에 농기구, 작업복 등을 보관하고 충분한 작업공간을 확보하여야 한다. 9) 격리포장시설 내 발생하는 폐기물(식물체, 종자 등) 처리 시 ‘유전자변형생물체취급 관리기준’에 준수하여 운반 및 소각할 수 있는 폐기물 위탁처리업체의 증빙서류(계약서 등)를 보관해야 한다.

2) 환경정화용 LM 목본류 평가항목 및 기준 발굴

유럽, 미국, 호주 등에서 생체량이 큰 속성수 중 오염정화를 목적으로 주로 이용하는 포플러는 일 년에 3-5 m 까지 자라는 속성수이며, 증산량이 많아 지하수의 오염물질을 제거하는데 효과적이다. 또한 근권부의 깊이는 4-5 m에 이르기 때문에 심토 오염의 제거도 가능한 장점이 있으며 경관 개선에도 기여할 수 있다. 포플러를 이용한 중금속 해독연구가 다수 보고 되면서 국내에서도 *merA* 유전자를 도입한 유전자변형 미루나무(*Populus deltoids*)를 만들어 Hg(II) 40 ppm 수준의 토양 환경에 노출시켰을 때, 야생종에 비해 약 2~4배 Hg(0)를 방출하였다고 보고한 바 있다(Choi et al., 2007).

LMO법 통합고시 별표 10-1의 LMO의 위해성평가자료에 의하면 유전자 변형 식물체의 환경방출 시 주변 생물 및 생태계에 미칠 수 있는 영향과 잡초(야생)화 및 토착화 가능성에 관한 정보를 제출하도록 하고 있다. 여기서 주변 생물이란 화분 매개체, 뿌리 공생균, 초식동물, 조류, 토양

미생물, 토양 곤충 등을 지칭하며, 화분 매개체에 의한 유전자이동성에 대한 평가도 해당된다(Baek et al., 2010).

현재 국립생태원에서는 환경정화용 LMO의 상업화에 대비하여 위해성 평가 가이드라인 개발을 위한 위해성평가 용도의 환경정화용 LM 포플러를 개발하여 포장시험을 앞두고 있다. 환경정화용 LM 목본류 평가항목과 기준을 발굴하기 위해서는 앞서 살펴본 바와 같이 초본류와 비교하여 상대적으로 목본류는 생장 기간이 더 길고, 크기가 크므로 수목 생리와 생태, 그리고 생태계에 미치는 영향 등이 더 고려되어야 한다. 따라서 통합고시 별표 10-1에서 제시하는 평가자료에 LM 목본류의 특성을 반영한 세부 항목을 다음과 같이 평가 항목으로 제안하고자 한다(표 25).

표 25. LM 목본류 위해성 평가항목

통합고시 별표 10-1	목본류 평가항목
9. 세부 위해 영향자료 나. 주변 생물 및 생태계에 미칠수 있는 영향에 관한 정보	1. 근맹아 등 영양번식으로 번식하는 경우, 이에 대한 통계적인 분석자료 2. 주변 산지로의 이동 및 근연종과의 교배 가능성 3. 주변 환경의 표적·비표적 생물체과 직·간접 상호 작용의 효과
10. 유전자변형생물체의 환경방출·모니터링·폐기에 관한 자료 나. 재배용(이식용) 유전자변형 생물체에 해당하는 경우(국내 포장 및 격리 시험정보)	1. 환경방출지, 생장조건, 주변 산지로의 확산 가능성 등에 대한 모니터링 및 관리 방안 2. 일정기간 동안 목본 생장을 통해 환경정화 기능을 수행한 목본의 폐기를 위한 방안

다. LM 목본류 자연생태계 위해성평가 시험포 모델 제시

환경정화용 및 자연생태계 LMO 위해성평가를 위한 환경부 LMO 위해성 평가기관 내 격리포장은 9,973 m²의 규모로 관리동 1동(102.4 m²)과 방진망과 방조망이 설치된 2개의 시험포, 방진망과 방조망이 설치되지 않은 1개의 시험포로 이루어져 있다(그림 68). 방진망과 방조망이 설치된 시험포 2, 3에는 2020년부터 LMO 토착화 가능성 영향평가와 LMO가 주변 생태계에 미치는 영향평가 연구가 진행되고 있다. 이를 위해 시험포 내에는 0.5 m × 0.5 m, 1 m × 1 m, 2 m × 2 m의 시험구가 각각 1,056개, 40개, 80개가 배치되어 있다. 현재의 격리포장은 초본류인 카놀라, 면화, 콩, 옥수수, 해바라기 등을 대상으로 설계되어 방진망의 높이는 2.4 m이며, 방조망의 높이는 4.0 m이다. 따라서 환경정화용 LM 목본류인 포플러의 환경위해성

평가를 위한 포장시험을 위해서는 현재 시험대상인 초본류의 특성에 맞춰 설계된 격리포장 환경을 적절히 개선해야 할 필요성이 있다.



그림 68. 격리포장 시험포 전경

포플러는 수명은 짧은 대신 수종에 따라 차이가 있지만 6년생의 수고가 4~14 m나 되는 생장이 굉장히 빠른 속성수이다. 포플러를 인위적으로 증식하는 방법은 삼목이 일반적이며, 이식 후에는 한 해에 2~3 m 까지 자란다. 따라서 삼목한 수종을 식재할 때에는 시험구를 1 m × 1 m(10,000본/ha) 또는 1 m × 1.5 m(6,666본/ha)로 조성하여 한 줄 당 식재한 수종을 관리하기 쉽도록 한다. 이식 후 빠른 성장속도를 가진 포플러의 특성을 고려하여 묘목 간격은 20~30 cm, 열 간격은 50~60 cm로 하는 것이 적절하다(국립산림과학원, 2010).

수종에 따라 성장 속도가 다르기 때문에 빨리 자라는 수종은 식재 간격을 넓게 하고, 천천히 자라는 수종은 식재 간격을 좁게 해주는 것이 바람직하다. 국내 보급되고 있는 포플러류에 대한 단위 면적당 식재 간격과 본수는 아래와 같다(표 26, 27; 출처: 국립산림과학원, 2010)

표 26. 포플러 수종별 6년생의 수고

수 종	우량(m)	보통(m)	기준치(m)	불량(m)
현사시	12.61	7.54	6.28	5.03
수원포플러	12.75	9.14	6.94	4.74
양황철나무	13.51	9.79	7.39	4.99

출처: 국립산림과학원, 2010

표 27. 포플러 수종별 식재 간격 및 식재 본수

수 종	식재 간격(m)	식재본수/ha(본)
사시나무	3 x 3	1,100
현사시	3.5 x 3.5	816
양황철나무	4 x 4	625
수원포플러	4 x 4	625
이태리포플러	5 x 5	400

출처: 국립산림과학원, 2010

포플러는 자연 상태에서 대부분 근맹아를 통해 무성으로 번식하지만 수분이 되면 수 시간에서 수일 이내에 수정이 이루어지며, 수정이 되면 한달 이내에 종자가 성숙하고 종자는 솜털에 쌓여 눈송이처럼 바람에 날리게 된다(출처: 국립산림과학원, 2010). 이 종자는 미세하고 수명이 짧기 때문에 자연 상태에서 발아되는 경우는 드물지만 수분이 적당하고 직사광선이 없는 적당한 환경에 떨어지면 3일 이내 발아되어 나무로 자라게 된다(출처: 국립산림과학원, 2010). 따라서 비산에 의한 종자번식으로 LMO의 유출을 방지하기 위해서는 포플러의 수고 이상의 방진망과 방조망이 필요하다(출처: 국립산림과학원, 2010).

꽃가루의 비산 방지를 위해 이식부터는 방진망과 방조망이 설치된 시험포 2, 3에 이식을 하는 것이 바람직하기 때문에 현 격리포장에서 LM 포플러의 환경위해성 평가는 삼목과 이식 단계만 가능하다. 4 m × 4 m 간격의 시험구(사시나무, 현사시, 양황철나무, 수원포플러 식재)를 배치한다면 시험포 2, 3에 각각 최대 17구, 10구만을 식재할 수 있다(그림 69). 그러나 포플러를 비롯한 LM 목본류의 환경위해성 평가를 위해서는 시험포의 면적을 확대하고 방진망과 방조망의 높이를 높이는 것이 필요할 것으로 판단된다.



그림 69. 격리포장 시험포 1, 2에 4 × 4 m의 시험구 가상 배치 사진

6. LM 목본류의 위해성평가 방법 개발

가. 토양 오염도별 포플러 형질 특성 분석

환경부 소관인 환경정화용 LM 목본류의 위해성평가 방법을 개발하기 위해 국내·외에서 연구된 오염물질에 따른 정화 식물의 형질 특성 분석 사례를 비교 분석하여 표 31에 나타내었다. 오염물질의 종류로는 중금속이 가장 많았고, 축산폐수, 석유계총탄화수소(TPH)가 뒤를 이었다. 오염환경은 토양이 가장 많았으나 인공폐수와 지하수에서 실험한 사례도 있었다. 정화 식물로는 목본류 중에서는 포플러가 가장 많이 사용되었으며, 소나무가 이용되기도 하였다. 초본류에서는 담배, Grass 및 Legume 혼합, 양치식물이 이용되기도 하였으며, 상추, 미나리, 고사리 등 원예작물들이 사용되기도 하였다. 평가 항목은 식물체의 생장 특성으로 길이, 폭, 엽수, 지상부·지하부의 biomass 및 건중량의 변화를 가장 많이 조사하였고, 생존율과 엽록소 및 카로티노이드 지수, 순 광합성률을 조사하기도 하였다. 오염물질 변화량에 대해서는 식물체 내 및 토양의 오염물질 변화량에 대한 평가가 가장 많았고, 오염물질의 뿌리표면 흡착량도 중요한 평가 항목 중 하나였다. 그 외에도 토양 내 미생물활성도, 유기물 함량 변화, 해충 피해량 등 주변 환경에 대한 영향평가를 함께 실시하기도 하였다.

표 28. 국내·외 오염물질에 따른 정화 식물의 형질 특성 분석 사례

오염물질	오염환경	정화 식물	평가항목	참고문헌
추산폐수 (젖소)	토양	포플러(3종: <i>P. alba</i> x <i>glandulosa</i> , <i>P. euramericana</i> , <i>P. maximowiczii</i>)	- 생장특성(묘고, 엽수, 지상부·지하부 biomass 및 건중량, 엽록소 지수) - 추산폐수 흡수량	Yeo et al., 2001
디젤 (TPH)	토양	소나무(<i>Pinus sylvestris</i>), 포플러(<i>P. deltoides</i> <i>Wettsteinii</i>), Grass 혼합(<i>Festuca rubra</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Lolium perenne</i>), Legume 혼합(<i>Trifolium repens</i> , <i>Pisum sativum</i>)	- 생장특성(입경, 엽록소 지수, 지상부 biomass 및 건중량) - 디젤의 뿌리표면 흡착량 및 조직 내 흡수량	Palmroth et al, 2002
중금속 (4종: Zn, Cu, Cr, Cd)	토양	포플러(2종: <i>Populus deltoides</i> x <i>maximowiczii</i> , <i>P.</i> x <i>euramericana</i>)	- 생장특성(지상부·지하부 biomass 및 건중량) - 체내 중금속 흡수량	Sebastiani et al., 2004
디젤 (TPH)	토양	포플러(<i>P. nigra</i> x <i>P. maximowiczii</i>)	- 토양 내 TPH 농도 저감율 - 독성영향 평가(흡수능력, 증산량 변화) - 토양 내 미생물활성도(INT assay) - pH 및 토양유기물 함량(KSF 2014)	Chang, 2006
중금속 (3종: Cd, Zn, Cu)	토양	포플러(<i>P. canadensis</i>), 낙엽송(<i>Larix</i> spp.)	- 생장특성(뿌리, 줄기, 잎, 가지 biomass 및 건중량) - 중금속 흡착 및 축적 변화	Wang and Jia, 2010
중금속(Cd)	토양	담배(<i>Nicotiana tabacum</i> cv. <i>Xanthi</i>)	- 생장특성(묘고, 지상부·지하부 biomass 및 건중량) - 순광합성률, 수분이용효율, 기공전도도, 엽록소 및 카로티노이드 함량, 체내 카드뮴 함량 (westernman)	Jeoung et al, 2013
추산폐수 (양돈)	토양	포플러(5종: <i>P. euramericana</i> , <i>P. deltoides</i> x <i>P. nigra</i> , <i>P. deltoides</i> x <i>P. deltoides</i> , <i>P. alba</i> x <i>P. glandulosa</i> , <i>P. koreana</i> x <i>P. nigra</i> var. <i>italica</i> , <i>P. nigra</i> x <i>P.</i> <i>maximowiczii</i>)	- 생장특성(생존율, 지상부 biomass 및 건중량) - 적응능력(조기낙엽, 식염충 및 천공충에 의한 피해량)	Kim et al., 2013

오염물질	오염환경	정화 식물	평가항목	참고문헌
중금속 (4종: Cd, Cu, Pb, Zn)	토양 (제련소)	포플러(<i>P. Pyramidalis</i>)	- 생장특성(지상부·지하부 biomass 및 건물량) - 연령별 체내 및 토양의 중금속 함량 변화	Hu et al., 2013
중금속 (5종: As, Cd, Cu, Pb, Zn)	토양 (제련소)	양치식물(12종: <i>Adiantum capillus-veneris</i> , <i>Athyrium brevifrons</i> , <i>Athyrium vidalii</i> , <i>Athyrium yokoscense</i> , <i>Orytomium fortunei</i> , <i>Pteris cretica</i> , <i>Pteris dispar</i> , <i>Pteris ensiformis</i> , <i>Pteris multifida</i> , <i>Pteris vittata</i> , <i>Thelypteris dentata</i> , <i>Thelypteris viridifrons</i>)	- 생장특성(묘고, 초폭, 엽장, 엽폭, 엽수, 근장, 지상부·지하부 biomass 및 건물량) - 중금속 축적능(습식분해)	Kwon et al., 2014

카드뮴 농도별 포플러의 표현형 특성 조사 결과 카드뮴 처리에 따라 포플러의 성장단계별(Non-growth, Callus or leaf bud, Leaf 단계) 표현형의 차이가 관찰되었다(그림 70, 71). 생육 초반인 1주 차와 2주 차에는 Control의 조건에서 callus or leaf bud 단계의 개체수 비율은 각각 32.5%, 17.5%, leaf 단계는 17.5%, 17.5%으로 관찰되었다(그림 71). 그러나 카드뮴 처리 조건에서는 callus or leaf bud 단계의 개체수 비율은 10.0%, 2.5%, leaf 단계 또한 10.0%, 2.5%으로 관찰되어 두 실험군 차이는 1주 차에 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 3주 차부터 두 실험군 모두 성장반응이 급격히 줄어들었으며 callus or leaf bud 단계의 개체는 생장이 정지하거나 활성을 확인할 수 없었고, leaf 단계의 개체 또한 생장이 퇴화되어 6주 차에 실험이 종료되었다. 이상과 같이 6주간의 실험 결과 카드뮴이 포플러의 초기생장에 영향을 미친다고 유추해 볼 수 있었다.

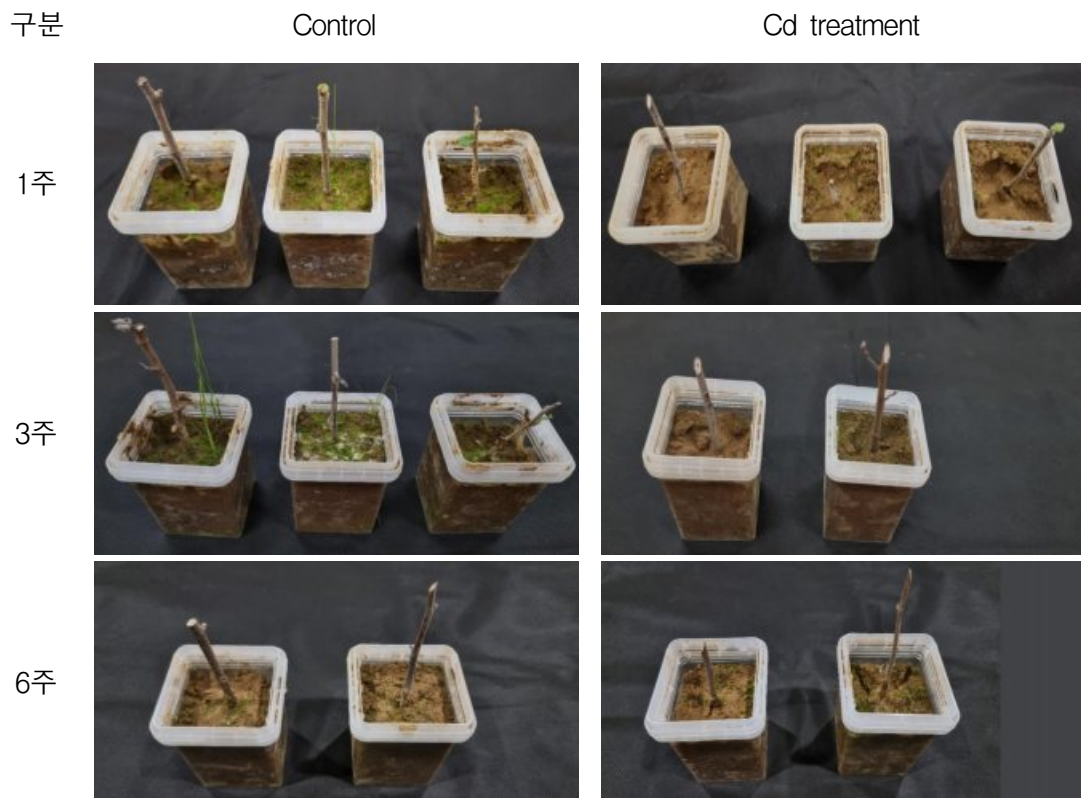


그림 70. 포플러 토양 오염도별 표현형 검증 과정

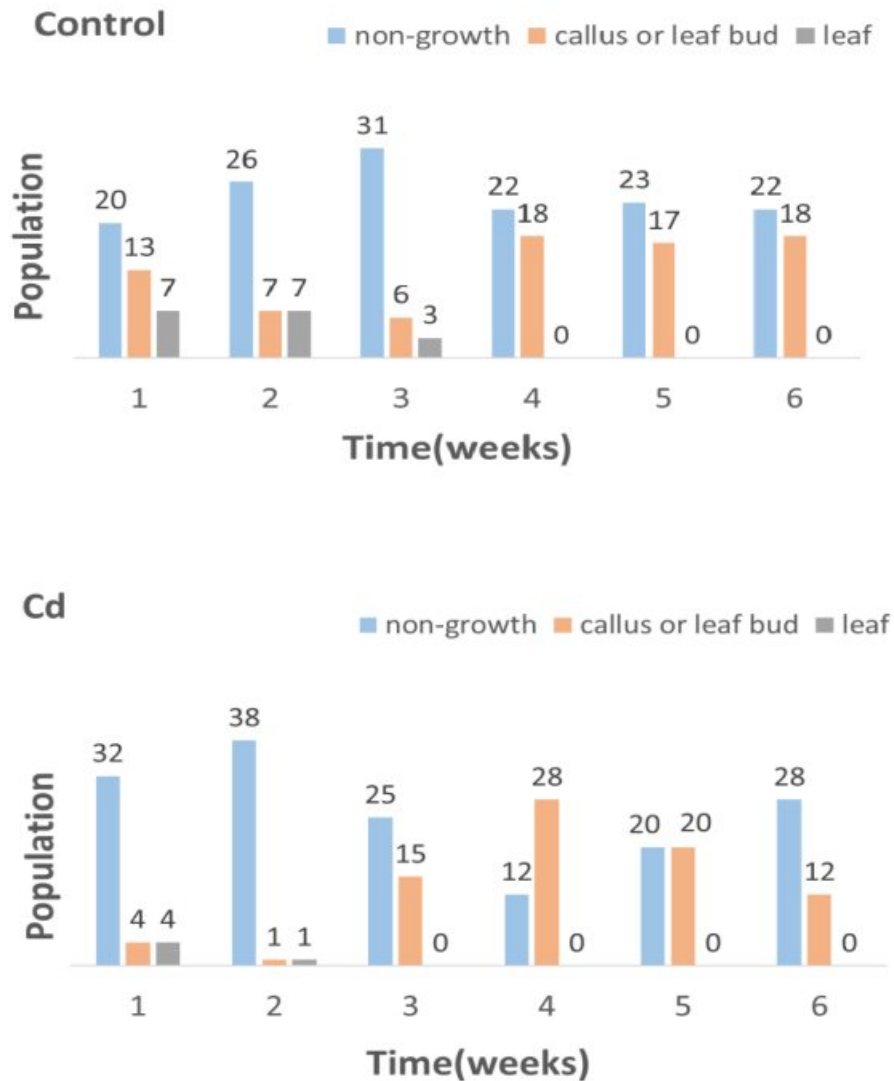


그림 71. 대조구와 카드뮴 처리구의 생장 단계별 포플러 표현형 변화

Non-growth 생장단계의 경우 생장 1주 차에 카드뮴 처리구가 Control에 비해 1.6배 높은 80%의 결과값을 보여주었다(그림 72). 생육 2주 차에는 95%의 수치로 조사 기간 중 가장 높은 값을 보여주었다. 이후 생육 3~4주 동안 30%까지 낮아진 후, 5~6주에는 다시 70%까지 수치가 증가하였다.

Non-growth 생장단계와 대조적으로 생장반응이 있는 개체수를 조사하여 비교한 결과, 생장 초반에 대조구와 카드뮴 처리구의 표현형 차이가 크다는 것을 확인할 수 있었다. 생장반응이 있는 개체수는 Callus or leaf bud와 leaf 생장 단계의 개체수를 조사한 것이다.

생육 1주 차에는 Control이 카드뮴 처리구와 비교하여 2.5배 높은 50%의

수치로 조사 기간 중 가장 높은 값을 보여주었다. 생육 2주 차에는 35%로 결과 값이 감소하였으나 카드뮴 처리구에 비해 7배로 가장 큰 차이를 보여주었다.

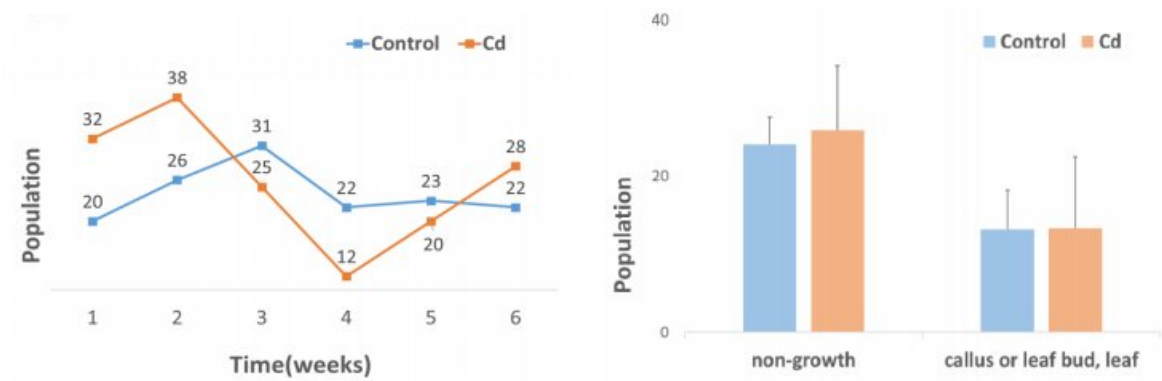


그림 72. Non-growth 생장 단계의 포플러의 주기별 개체수 변화 비교

Callus or leaf bud 생장 단계의 경우 Control은 5.01, 카드뮴 처리구는 9.2로 생육단계 중 가장 큰 편차값을 보였다(그림 73). Callus or leaf bud는 조사 기간이 지날수록 증가하는 추세였으나 그 이후 callus는 퇴화하였고 leaf bud는 생장 반응이 없어 생육이 정지되거나 휴면 상태인 것으로 추정되었다. 이는 전반적인 생장 반응 감소에 영향을 받은 것으로 유추할 수 있었다.

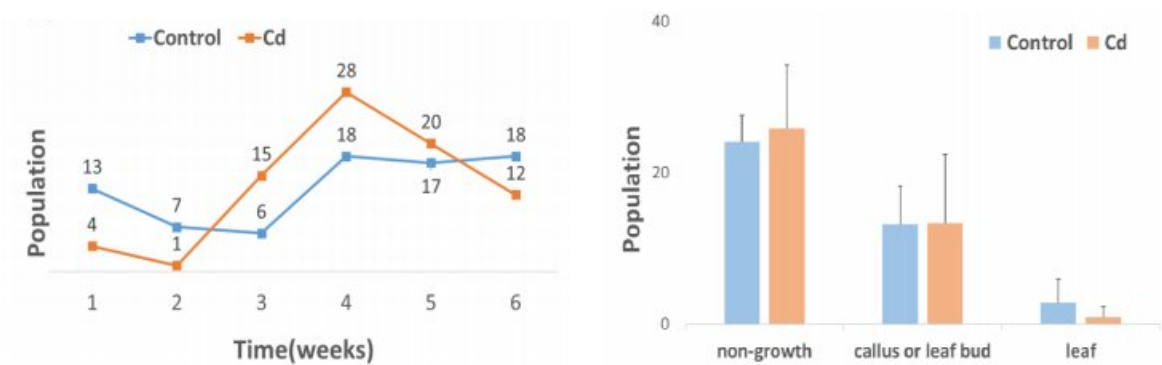


그림 73. Callus or leaf bud 생장 단계의 포플러의 주기별 개체수 변화 비교

leaf 단계의 경우 조사 기간 초반 이후인 4주 차부터는 개체수가 없었으나 2주 차에 Control이 카드뮴 처리구에 비해 7배가 많은 17.5%의 수치를 보여주었고, 잎의 길이도 카드뮴 처리구보다 control의 잎이 평균 116.2% 더 긴 길이를 보이며 가장 뚜렷한 생장 차이를 나타내었다(그림 74).

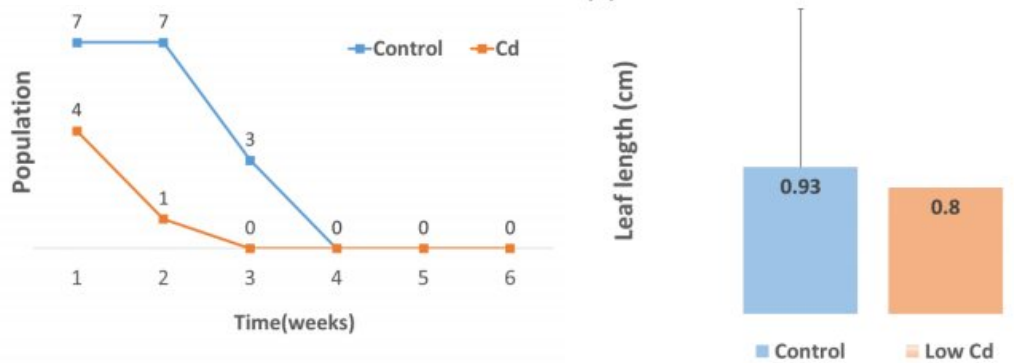


그림 74. Leaf 생장 단계의 포플러의 주기별 개체수 변화 비교

중금속 농도별 포플러의 표현형 조사 중 포플러의 생장 퇴화와 정지로 인하여 조사가 종료되어 처리구별 비교에 한계가 있었다. 따라서 추가적인 연구의 필요성이 있어 2024년 9월 27일, 2024년 10월 15일에 격리포장에 심겨 있는 포플러(국립산림과학원에서 2019년 분양) 중 60분을 삼목하여 뿌리를 유도하여 추가 실험을 진행 중이다(그림 75).



그림 75. 뿌리 유도 중인 포플러 삼목 개체

나. 오염환경 내 포플러의 생장 및 대사경로에 미치는 영향 분석

카드뮴을 처리한 토양에서 자란 포플러와 처리하지 않은 토양에서 자란 포플러의 식물체 내 대사산물의 변화를 분석하여 오염환경이 포플러의 생장과 대사경로에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 카드뮴을 처리한 토양에서 자란 포플러와 처리하지 않은 토양에서 자란 포플러의 식물체 내 대사산물을 추출한 후 GC-MS로 분석한 크로마토그램 결과는 그림 76에 나타내었다. 대사산물은 glucose, myo-inositol, 4-hydroxybenzoic acid, alanine, arabitol, gluconic acid, glyceric acid, lactic acid, mannitol, N-hydroxyurethane, trehalose, xylose 등 당과 당알콜, 유기산 등이 추출되었다.

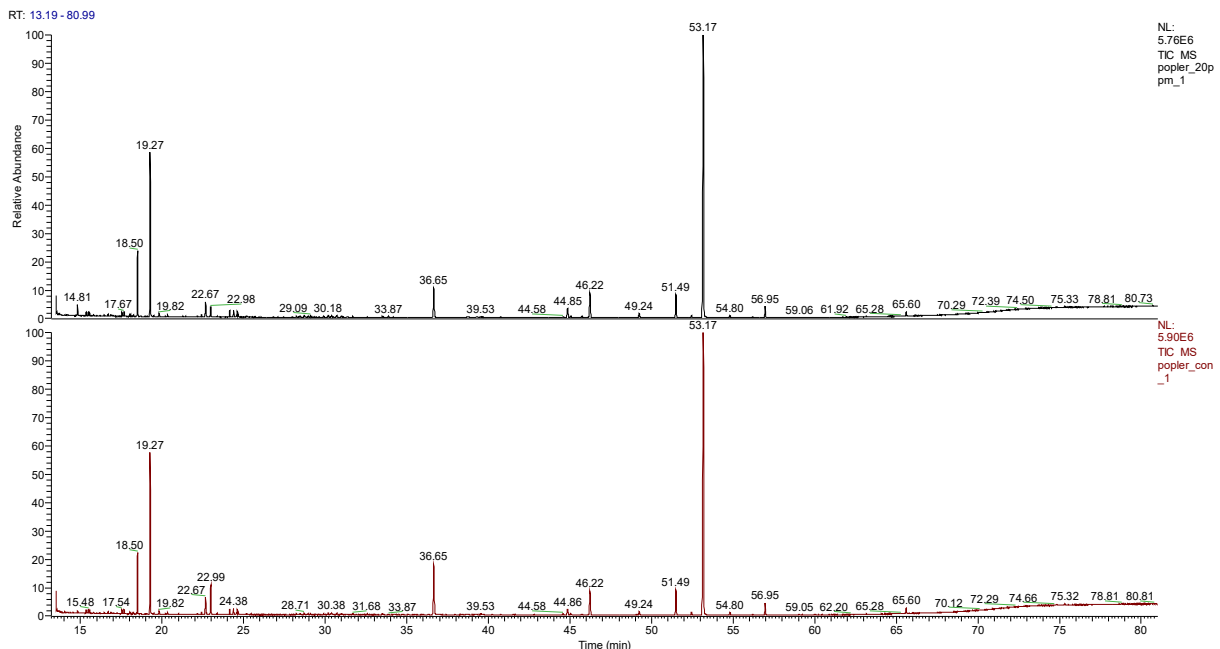


그림 76. 카드뮴 처리구(위)와 대조구(아래)에서 자란 포플러의 대표적 크로마토그램

카드뮴 처리에 따른 대사산물의 변화를 확인하기 위하여 PCA와 PLS-DA를 실시하였다(그림 77). 주성분 분석 결과 PC1과 PC2는 각각 93.9%와 5.4%로 설명되었으며, loading plot의 품질 인자들 간 분포 때문에 카드뮴 처리구와 대조구가 서로 다르게 그룹핑되었다. 또한 카드뮴 처리구와 대조구에서 자란 식물체의 Variable Importance in the Pro (VIP) score를 분석한 결과 arabitol과 glycerol이 1 이상으로 확인되어 두 대사물질이 카드뮴의 처리에 따라 포플러를 구분하는 가장 큰 요인으로 판단되었다.

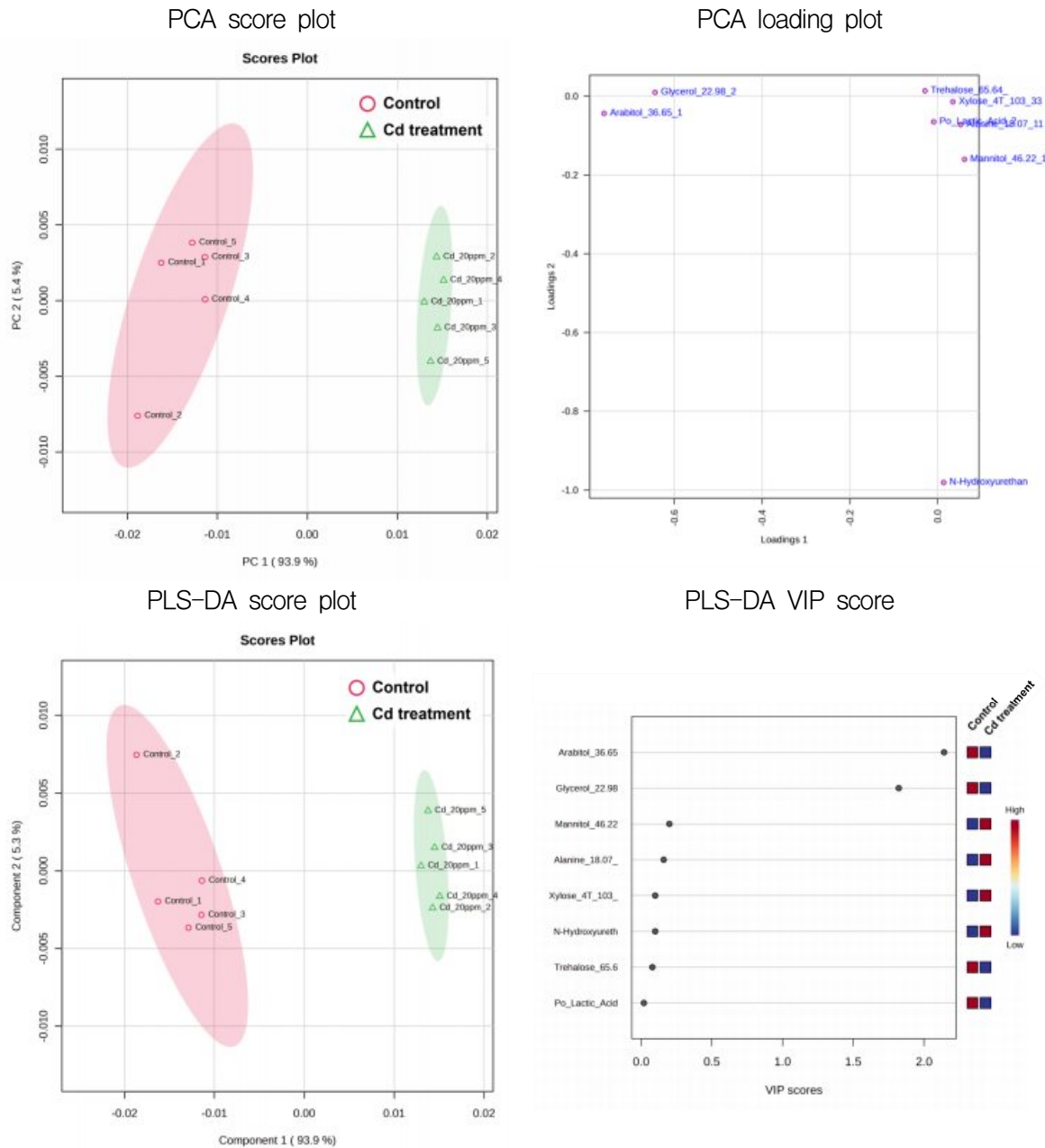


그림 77. 카드뮴 처리구와 대조구에서 자란 포플러의 대사산물 PCA 및 PLS-DA 분석 결과

카드뮴을 처리한 토양과 처리하지 않은 토양에서 자란 식물체 내 대사산물의 변화 양상을 시각화한 것을 그림 78과 그림 79에 나타내었다. 카드뮴을 처리한 토양에서 자란 포플러는 카드뮴을 처리하지 않은 토양에서 자란 포플러보다 glucose, alanine, mannitol, N-hydroxyurethane, xlyose 함량이 높았다. 반면 arabinol, glycerol, lactic acid, trehalose 함량은 카드뮴을 처리한 토양에서 자란 포플러보다 카드뮴을 처리하지 않은 토양에서 자란

포플러에서 더 높았다. Myo-inositol, 4-hydroxybenzoic acid, gluconic acid, glyceric acid의 함량은 두 처리구 간에 큰 차이가 없었다.

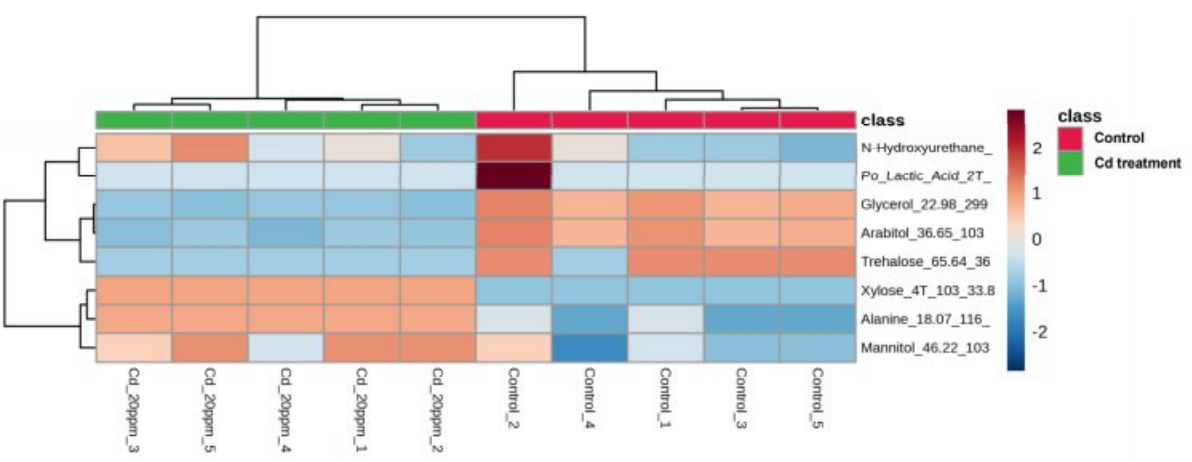


그림 78. 카드뮴 처리구와 대조구에서 자란 포플러의 대사산물 Heatmap

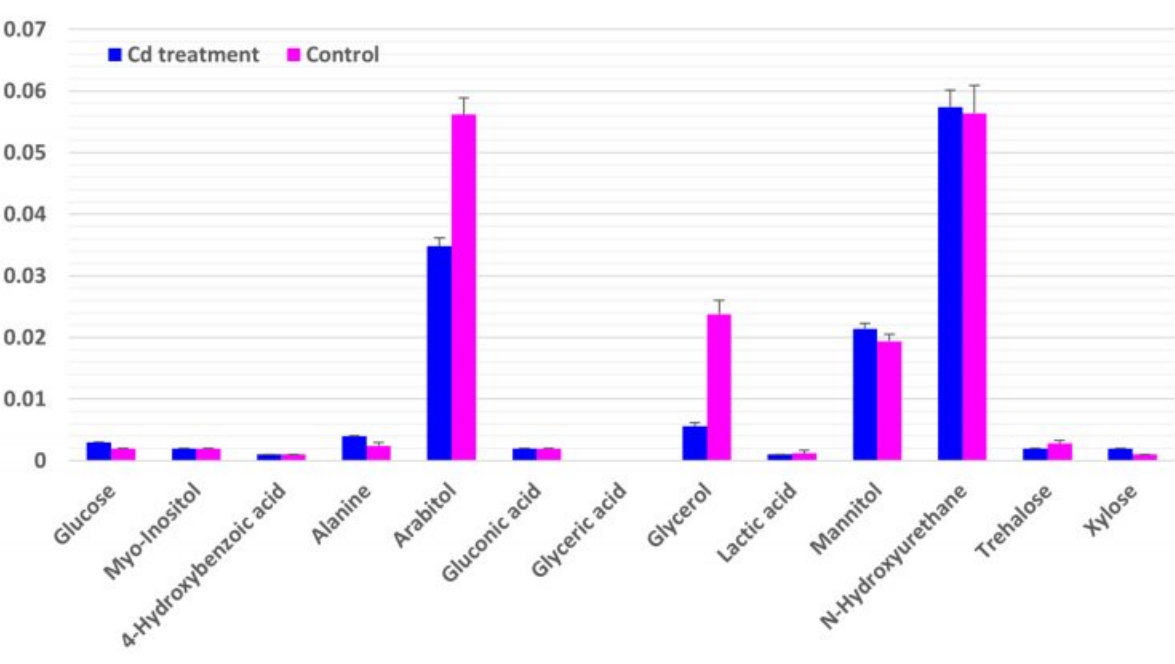


그림 79. 카드뮴 처리구와 대조구에서 자란 포플러의 대사산물 상대정량 분석 결과

다. 자연환경을 반영하는 환경부 위해성평가 방법(안) 제시

본 연구에서는 대조구와 저농도(20 ppm)의 카드뮴 처리 간의 결과만 확인되어 LM 목본류의 위해성평가 방법 개발을 위해 향후 다양한 중금속 인자와 농도에서의 비교 분석을 통한 추가적인 형질 특성 분석과 대사산물 분석이 필요할 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서 LM 포플러 형질전환에 사용된 야생형 BH 포플러는 꽃가루를 형성하지 않는 불임 목본으로, 자연생태계에 방출되더라도 근연종과의 생식적 호환성, 유전자 전이 및 확산 등의 위험이 적고 세대를 거치지 않는 특징을 가지고 있다. 통합고시 별표 10-1 ⑧유전자변형생물체와 비변형생물체의 비교자료 다) 숙주 또는 숙주가 속하는 생물종과의 차이점 (1) 자연환경 또는 자연환경을 반영하는 시험 조건하의 생존 및 생식·번식 능력의 위해성 평가는 불임 목본의 경우 일반 목본과 비교했을 때 몇 가지 중요한 차이점을 보인다(표 29). 일반 목본은 개화 및 생육 특성, 종자 휴면 및 발아, 화분 형태와 활력 등 재생산 관련 다양한 생리적 특성을 중심으로 환경에 미칠 영향을 평가한다. 반면, 불임 목본은 재생산 능력이 제한적이기 때문에 평가의 초점이 생육과 같은 다른 요소로 옮겨진다. 불임 목본의 경우, 개화와 결실이 제한적이므로 개화기, 결실기, 수확량 등과 같은 항목은 환경영향 평가에서 상대적으로 낮은 중요도를 가진다. 이에 따라 불임 목본의 평가에서는 수고, 수형, 지하부 길이, 엽록소 함량 등 생육 특성에 중점을 두어 개체의 생장과 환경 적응성을 분석한다. 이러한 생육 특성은 불임 목본이 자연생태계에서 장기적으로 미칠 수 있는 영향을 예측하는 데 중요한 지표로 활용될 수 있다. 또한, 종자는 바람이나 운송되는 동안 비의도적으로 자연계에 방출되어 유전자 이동의 위험이 있기 때문에 일반 목본에서는 열매와 종자의 형태를 관찰하거나 종자 발아력 검사를 통해 자가 번식 가능성과 주변 생태계로의 확산 위험성을 평가한다. 하지만 불임 목본은 화분이 형성되지 않아 종자가 맺히지 않으므로 종자와 관련된 특성을 평가하거나 비교할 필요가 없다. 이는 불임 목본이 자연생태계에서 유전자 전파 가능성이 낮음을 보여주며, 번식 확산으로 인한 생태계 교란 위험이 제한적임을 의미한다. 일반 목본에서 수행하는 화분관의 발아 검정이나 화분 비산거리 측정을 통한 유전자 확산 가능성 평가 또한 불임 목본에서는 필요하지 않다. 불임 목본은 화분이 형성되지 않기 때문에 유전자 이동에 따른 위해성은 일반 목본에 비해 현저히 낮게 평가된다. 결론적으로, 불임 목본은 재생산과 관련된 위해성이 제한적이기 때문에

환경정화와 같은 특정 목적을 달성하기 위해 자연생태계 방출 시 생태계 교란 가능성이 낮은 대안으로 간주 될 수 있다. 이는 불임 목본의 특성상 재생산과 확산에 의한 위험성을 고려할 필요가 적어, 환경 방출 시 상대적으로 높은 안전성을 제공한다.

표 29. 일반 목본과 불임 목본의 위해성평가 항목 비교

위해성평가	목본	불임 목본
개화 및 생육 특성	• 개화- 개화기, 결실기, 수확량, 맹아 수 • 생육- 수고 및 수형*, 지하부 길이, 엽록소 함량	• 개화- 개화기, 결실기, 수확량, 맹아 수 • 생육- 수고 및 수형, 지하부 길이, 엽록소 함량
종자 휴면 발아	• 열매 및 종자 형태, 종자 발아력 검사 (테트라졸륨 검사)	• 화분이 형성되지 않아 종자를 맺지 못함으로 비교 불가함
화분 형태 활력	• 화분관의 발아 검정, 화분 비산거리	• 화분이 형성되지 않아 종자를 맺지 못함으로 비교 불가함

통합고시 별표 10-1 ⑨세부 위해 영향 자료 나) 주변 생물 및 생태계에 미칠 수 있는 영향에 관한 정보를 평가하고자 하였다. 불임 목본의 위해성 평가는 자연생태계에서의 주변 생물 및 생태계에 미칠 수 있는 잠재적 영향을 다각도로 분석하기 위해 다양한 측면에서 논의되고 있다. 여기에 고려할 사항으로는 유전자변형 생물이 위해성을 가질 가능성 평가, 주변 곤충들과의 상호작용, 병해충에 대한 감수성 또는 저항성 등이 있다. 문헌 검토 및 기존 연구에 따르면, 절지동물 분포, 식물군락 및 미생물상, 그리고 토양 내 수평 유전자 이동 가능성이 주요 평가 항목으로 제시된다(표 30). 우선, 절지동물 분포와 관련하여 생육기 동안 포충망을 이용한 곤충 채집 방법과 함정 트랩을 활용한 곤충상의 밀도 비교가 고려된다. 이는 불임 목본이 주변 생태계에서 곤충의 서식 환경과 다양성에 미칠 수 있는 영향을 평가하는 데 중요한 지표로 제안된다. 또한, 식물군락과 식물상의 변화는 불임 목본이 자연환경과 동일한 조건에서 식재된 경우 주변 식생에 미치는 영향을 평가하기 위한 중요한 요소로 언급된다. 이 과정에서 기존 식물군락과의 경쟁 관계, 특정 종의 성장 변화, 생태적 다양성에 미치는 잠재적 영향을 관찰하고 분석하는 것이 중요하다고 보고되고 있다. 근권 또는 실험구 내의 토양 미생물상 군집은 불임 목본이 토양 생태계에 미치는 영향을 파악하기 위한 또 다른 핵심 항목이다. 자연환경과 유사한 조건에서 불임 목본을 식재한 뒤, 토양 미생물 군집의 변화와 분포를 분석하는 생화학적(PLFA: 지방산분석법), 분자생물학적(DGGE, T-RFLP: 패턴 분석 방법,

pyrosequencing: 실시간 염기다형성분석법) 방법이 자주 언급된다. 이는 불임 목본이 뿌리 분비물 등을 통해 미생물 생태계에 미치는 영향을 평가하는 데 유용하다는 점이 강조된다. 마지막으로, 근권 또는 실험구 내 세균 간의 수평 유전자 이동 가능성은 불임 목본의 안전성을 평가하는 핵심 요소 중 하나로 제안된다. 기존 연구에서는 불임 목본 식재 후 토양으로부터 추출한 total DNA를 대상으로 PCR을 수행해 도입 유전자의 전이 가능성을 확인하는 방법이 논의되고 있다. 이를 통해 유전자 전이가 생태계에 미칠 수 있는 잠재적 위험성을 사전에 예측할 수 있다. 결론적으로, 불임 목본의 위해성평가는 절지동물, 식물군락, 토양 미생물상, 수평 유전자 이동 가능성을 중심으로 문헌과 기존 연구에 기반한 자료를 통해 다각도로 접근할 필요가 있다. 이러한 분석은 불임 목본이 자연 생태계에 미치는 잠재적 영향을 예측하고 환경방출 시의 안전성을 검토하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

또한 비표적 생물체와의 상호작용을 평가함으로써, 유전자변형 생물체가 위해성을 가질 가능성을 평가할 수 있다. 꿀벌과 같은 화분매개자 또는 기생벌, 무당벌레, 반날개, 품잠자리, 애꽃노린재와 같은 생물방제 종을 대표하는 유익 곤충종의 급이시험 후 생존 및 성장, 생식을 조사하여 LM 목본의 위해성을 평가할 수 있다. 이 외에도 지렁이, 톱토기와 같은 대표적인 2개 토양생물상의 생존 및 생물량에 대한 실험실 수준에서 독성시험을 진행하여 위해성을 평가할 수 있다.

이와 같은 불임 목본의 위해성평가 시 고려할 항목들을 기반으로 LM 목본 위해성평가 가이드라인 개발을 진행할 예정이다.

표 30. 일반 목본과 불임 목본의 자연생태계 위해성평가 항목 비교

위해성평가	목본	불임 목본
절지동물분포	생육기 동안 포충망을 이용한 곤충 채집 평가, 함정트랩을 이용한 포획된 곤충상 및 밀도 비교	동일
주변 식물군락과 식물상	자연환경과 동일한 조건에 식재 후 식생조사	동일
근권 또는 실험구 내 토양 미생물상 군집	자연환경과 동일한 조건에 식재 후 식생조사	동일
근권 또는 실험구 내 세균으로 수평유전자이동 조사	식재 후 토양으로부터 total DNA 추출 후 PCR	동일
비표적생물체와의 상호작용	화분매개자, 유익곤충종의 급이시험, 생존 및 성장 조사, 대표적인 토양생물상의 생존 및 생물량에 대한 독성시험	동일

본 과제의 목적은 환경정화용 LM 목본을 중금속 등 오염된 토양에 식재하여 정화하고, 이 과정에서 자연생태계에 위협은 없는지 심사하기 위한 항목을 개발하는 것이다. LM 포플러 나무를 오염지에 심어 숲을 형성하는 것에 대한 대중의 인식이 고려되어야 하고, 아무리 좋은 목적이라도 넘어야 할 장애물이 많다. 미국의 스타트업 리빙카본은 식물의 광합성 효율을 개선한 유전자조작 포플러 약 5,000 그루를 조지아주 남부 소나무 지대에 심어 '생명공학 재조림 프로젝트'를 착수하였다. 이 프로젝트에 사용된 포플러 역시 꽃가루를 형성하지 않는 불임 목본이지만 숲에 인공 나무를 심을 경우 생태계 안정성에 미칠 불확실성에 대한 대중의 비판이 많다. 그래서 위해성심사를 통해 환경에 긍정적인 목적으로 개발된 유전자변형 포플러가 자연생태계에 안전하다는 것을 증명하고 설득하는 것이 중요할 것이다.

IV. 고찰 및 제언

본 연구의 목적은 환경부 LMO 위해성평가기관 안전관리 체계 고도화, 환경부 소관 LMO 생태계 침입성 평가 기준 개발 및 환경정화용 LMO 심사 대비 LM 목본류 위해성평가 체계 마련을 통해 환경정화용 LMO의 상업화에 대비하여 국내 위해성심사·평가 지침 마련 등 안전관리 체계를 구축하는 것이며, 도출된 결과는 다음과 같다.

1. 2020년부터 시행한 격리포장 식물상 및 식생 변화 조사 결과를 토대로 거리별, 계절별 및 연도별 생물다양성 변화를 확인할 수 있는 식물상 및 식생 조사 방법(안)을 제시하였다. 또한 격리포장의 기후, 토양, 미생물 등 환경정보의 공간데이터 확보 후 식생지도 작성 등을 통해 환경·공간 정보 통합 DB 구축(안)을 제시하였다. 국내 환경정화용 LMO 환경방출 도입 가능 지역과 그 지역의 근연종 종류 및 분포 조사 등을 통해 환경정화용 LMO 환경방출 안전관리 가이드라인을 발간하였다.
2. 환경부 LMO 위해성평가기관 격리포장의 배수·집수시설 정비와 주변 식물 제초 관리로 안전성을 강화하였고, 시험포 내부 방초망 수리 교체와 관수시설 확장 등으로 위해성평가 식물 재배 환경을 개선하였다. 또한 환경정화용 및 자연생태계 LMO의 위해성평가를 위한 자체적인 종자·묘목 생산을 위해 위해성평가 식물 채종포 및 증식포를 조성하고 관리하였다.
3. 국내 기후환경을 반영한 LMO 종자 월동성 검정 방법 개발을 위해 국내외에서 연구된 종자 월동성 위해성평가 사례를 비교 분석하였다. 국내에 가장 많이 수입·유통되는 4대 LM 식물(카놀라, 면화, 콩, 옥수수)의 비변형 종자를 사용하여 국내 기온과 강수량을 반영한 저온(-5, -1, 5 °C) 및 상대 습도별(15, 30, 50%) 종자 발아율과 휴면율을 검정하였다. 또한 의도적·비의도적 환경방출을 고려한 종자 월동성 조사를 위해 Seedbag에 넣은 종자와 넣지 않은 종자를 10 cm 깊이에 묻고 48주 동안 매물 종자의 매립 기간별 발아율 및 휴면종자 비율을 검정하여 향후 환경부 LMO 종자 월동성 위해성평가 가이드라인 개발에 활용하고자 하였다.

4. 환경정화용 LM 목본류 위해성평가 체계 마련을 위해 위해성평가 용도의 환경정화용 LM 포플러 우성형질을 선별하였다. LM 포플러는 안정적인 도입유전자 발현과 발현 수준이 개체에 따라 차이가 없음을 확인하였고, 비변형포플러-변형포플러 간의 유사한 생물학적 특성을 보였다. 또한 LM 포플러의 안정성을 유전자 수준에서 확인하였으며, 향후 격리포장 내 다양한 환경 조건에서의 실증 실험을 통해 LM 목본류 가이드라인 개발에 활용하고자 하였다.
5. 격리포장 내 LM 목본류의 자연생태계 위해성평가를 위한 환경 조성을 위해 국내외 LM 목본류 위해성평가 사례를 분석하였다. LM 초본류와 비교하여 목본류는 크기가 커서 실험 대상으로 관리가 어렵고 생육 기간이 길어 인위적인 환경 조성에 어려움이 있다. 또한 꽃가루 이동 거리가 길어 포장시험 설계에 제한적이며 삼림생태계 대한 영향 예측 역시 쉽지 않아 보다 체계적인 준비가 필요하다. 따라서 현재 초본류 중심으로 설계된 격리포장의 변형을 통한 LM 목본류 자연생태계 위해성평가 시험포 모델이 필요한 것으로 판단되었다.
6. LM 목본류의 위해성평가 방법 개발을 위해 카드뮴으로 오염된 토양과 오염되지 않은 토양에 포플러를 삼목한 후 형질 특성을 분석하고 오염 환경이 포플러의 생장 및 대사경로에 미치는 영향을 분석하였다. 국립 산림과학원으로부터 분양받은 환경정화용 LM 포플러의 모본을 대상으로 실험을 진행한 결과 카드뮴 오염토에서 자란 포플러와 오염되지 않은 토양에서 자란 포플러의 형질과 대사산물(glucose, myo-inositol, alanine, arabitol, 4-hydroxybenzoic acid, gluconic acid, glyceric acid, lactic acid, mannitol, N-hydroxyurethane, trehalose, xylose과 같은 당과 당알콜, 유기산 등)의 차이를 확인하였다. 그러나 LM 목본류의 위해성평가 방법 개발을 위해서는 향후 환경정화용 LM 포플러를 사용하여 다양한 중금속 인자와 농도에서의 비교 분석을 통한 추가적인 형질 특성 분석과 대사산물 분석이 필요할 것으로 판단되었다.

참고문헌

- 국립산림과학원. (2014). 유전자변형 나무의 안정성 평가에 관한 논의
- 국립산림과학원. (2010). 국립산림과학원 연구신서 제36호 포플러(Poplars in South Korea), 서울. www.kfri.go.kr.
- 국립생물자원관. (2022). 2022 국가생물종목록. 국립생물자원관, 인천. <https://www.kbr.go.kr/home/bio/bio04001s.do?menuKey=448> (2023.11.30.)
- 국립생태원. (2019). 2019년 환경정화용 LMO 위해성평가 체계 구축 및 평가기관 운영. 국립생태원, 서천. NIE-법정연구-2019-04.
- 국립생태원. (2020). 2020년 환경부 소관 LMO 위해성평가 체계 구축 및 평가기관 운영. 국립생태원, 서천. NIE-법정연구-2020-04.
- 국립생태원. (2021). 2021년 환경부 LMO 위해성평가기관 운영. 국립생태원, 서천. NIE-법정연구-2021-04.
- 국립생태원. (2022). 2022년 환경부 LMO 위해성평가기관 운영. 국립생태원, 서천. NIE-법정연구-2022-04.
- 국립생태원. (2023). 2023년 환경부 LMO 위해성평가기관 운영. 국립생태원, 서천. NIE-법정연구-2022-04.
- 국립생태원. (2023). 환경부 유전자변형생물체 위해성평가기관 안전관리 지침. 국립생태원, 서천.
- 국립생태원. (2024). 환경부 LMO 포장시험 안전관리 가이드라인. 국립생태원, 서천.
- 국립수목원. (2017). 국가표준식물목록. 국립수목원, 포천.
- 김현철, 신한나, 강규석. (2013). 양돈분뇨 처리에 대한 포플러류의 적응력 검정, 산림과학 공동학술발표논문집, 2013권, 963-966.
- 백형진, 손수인, 조명래, 이관석, 오영주, 박종석, 이기종, 오성덕, 서석철, 류태훈. (2010). 방화곤충에 의한 유전자변형 작물 화분 이동성 조사를 위한 프로토콜 개발. 한국국제농업개발학회지, 22(3), 293-297.
- 서울여자대학교. (2006). 환경정화용 유전자변형생물체(LMO)의 안전관리방안 연구 최종보고서. 환경생명과학부, 서울특별시.
- 서울여자대학교. (2010). 유전자변형생물체(LMO) 자연생태계 평가연구 최종 보고서. 동물생태학연구실, 서울.
- 제3차 LMO 안전관리계획(2018~2022). 2018.

중국 생태환경부(Ministry of Ecology and Environment) “2022年中国生态环境统计年报” 보고서

한국과학기술기획평가원(KISTEP). (2010). 유전자변형유기체/생물체(GMO/LMO) 관련 기술 동향, 음성.

한국바이오안전성정보센터(KBCH). (2008). BIOSAFETY Vol9, No.1, 대전. www.biosafety.or.kr (2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH). (2018). KBCH 동향보고서 No.2018-01 국가별 바이오안전성 동향: 유럽연합 2018, 대전. www.biosafety.or.kr (2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH). (2019). KBCH 동향보고서 No.2019-01 국가별 바이오안전성 동향: 유럽연합 2019, 대전. www.biosafety.or.kr (2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH). (2022a). KBCH 동향보고서 No.2022-01 국가별 바이오안전성 동향: 미국 2022, 대전. www.biosafety.or.kr (2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH). (2022b). KBCH 동향보고서 No.2022-02 국가별 바이오안전성 동향: 유럽연합 2022, 대전. www.biosafety.or.kr (2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH). (2023a). KBCH 동향보고서 No.2023-04 국가별 바이오안전성 동향: 유럽연합 2023, 대전. www.biosafety.or.kr (2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH). (2023b). KBCH 동향보고서 No.2023-10 국가별 바이오안전성 동향: 일본 2023, 대전. www.biosafety.or.kr (2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH). 2024a. 재배현황. https://www.biosafety.or.kr/portal/page/f_01 (2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH) 2024b. 수입 및 수출현황. https://www.biosafety.or.kr/portal/page/f_03 (2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH) 2024c. 국내 이벤트 승인현황. https://www.biosafety.or.kr/portal/page/f_02 (2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH). (2024d). KBCH 동향보고서 No.2024-04 국가별 바이오안전성 동향: 유럽연합 2024, 대전. www.biosafety.or.kr

(2024.11.30.)

한국바이오안전성정보센터(KBCH). (2024e). KBCH 동향보고서 No.2024-01
국가별 바이오안전성 동향: 중국 2024, 대전. www.biosafety.or.kr
(2024.11.30.)

바이오안전성백서 2019. (2019). 한국생명공학연구원 바이오안전성정보센터,
대전.

바이오안전성백서 2023. (2023). 한국생명공학연구원 바이오안전성정보센터,
대전.

한국환경정책평가연구원. (2000). 유전자변형생물체의 생태계영향평가기준에
관한 연구 최종보고서. 생명공학연구소, 세종.

환경부. (2024). 2024년 환경부 소관 LMO 안전관리 세부시행계획

Azeez, A., & Busov, V. (2021). CRISPR/Cas9-mediated single and biallelic
knockout of poplar STERILE APETALA (PopSAP) leads to complete
reproductive sterility. *Plant biotechnology journal*, 19(1), 23

Braun-Blanquet, J. (1964). *Pflanzensoziologie*. 3 Aufl. Springer-Verlag,
United States.

Chang, S. W. (2006). Phytoremediation Study of Diesel Contaminated Soil
by Indigenous Poplar Tree. *kossge*, 11(5), 51-58.

Choi, Y. I., Noh, E. W., Lee, H. S., Han, M. S., Lee, J. S. and K. S. Choi.
2007. Mercury-tolerant transgenic poplars expressing two bacterial
mercury-metabolizing genes. *J. Plant Biol.* 50(6):658-662.

Chauhan, B. S., Opeña, J. (2013). Implications of plant geometry and weed
control options in designing a low-seeding seed-drill for dry-seeded
rice systems. *Field Crops Research*, 2013;144:225-231.

Chèvre, A. M., Eber, F., Baranger, A., Renard, M. (1997). Gene flow from
transgenic crops. *Nature*, 389, 924.

Domic, A. I., Capriles, J. M., Camilo, G. R. (2020). Evaluating the fitness
effects of seed size and maternal tree size on *Polylepis tomentella*
(Rosaceae) seed germination and seeding performance. *Journal of
Tropical Ecology*, 36(3), 115-122.

Fernandez-Quinantilla, C., Andujar, J. L. G., Appleby, A. P. (1990).
Characterization of the germination and emergence response to

- temperature and soil moisture of *Avena fatua* and *A. sterilis*. *Weed Research*, 30(4), 289-295.
- Gabriel Popkin and Audra Melton; For the First Time, Genetically Modified Trees Have Been Planted in a U.S. Forest; *The New York Times*; 2023. 2. 16. <https://www.nytimes.com/2023/02/16/science/genetically-modified-trees-living-carbon.html>
- Ghori, N.H., T. Ghori, M.Q. Hayat, S.R. Imadi, A. Gul, V. Altay and M. Ozturk. 2019. Heavy metal stress and responses in plants. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16:1807-1828.
- Han, S. M., Chun, S. J., Nam, K. H. (2023). Comparison of overexpressing potential of seeds in laboratory and field conditions for the risk assessment of transgenic plants: a sunflower case study. *Journal of Ecology and Environment*, 47, 02.
- Han, S. M., Nam, K. H. (2022). Assessing the potential invasiveness of transgenic plants in South Korea: a three-year case study on sunflowers. *Journal of Ecology and Environment*, 49, 19.
- Han, S. M., Nam, K. H. (2024). Pest control and safety management monitoring in outdoor plantation using unmanned aerial vehicle captured images. *GEO DATA*, 6(3), 144-149.
- Hossain, M.A., P. Piyatida, J.A.T. Silva and M. Fujita. 2012. Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation. *J Bot.* 012:1-37.
- Hou, D.; Bi, J.; Ma, L.; Zhang, K.; Li, D.; Rehmani, M.I.A.; Tan, J.; Bi, Q.; Wei, Y.; Liu, G.; et al. Effects of Soil Moisture Content on Germination and Physiological Characteristics of Rice Seeds with Different Specific Gravity. *Agronomy* 2022, 12, 500. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020500>
- Hu, Y., Nan, Z., Su, J., Wang, N. (2013). Heavy metal accumulation by poplar in calcareous soil with various degrees of multi-metal contamination: implications for phytoextraction and phytostabilization, *Environ Sci Pollut Res*, 20:7194-7203.

- ISAAA. (2019). ISAAA BRIEF 55 EXECUTIVE SUMMARY, SEAsiaCenter, Philippines. <http://www.isaaa.org> (2024.11.30.)
- ISTA (2010). International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association, Bassersdorf, Switzerland.
- January, M.C., T.J. Cutright, H.W. Keulen and R. Wei. 2008. Hydroponic phytoremediation of Cd, Cr, Ni, As, and Fe: Can *Helianthus annuus* hyperaccumulate multiple heavy metals? Chemosphere 70:531-537.
- Javaid, M. M., Mahmood, A., Alshaya, D. S., AlKahtani, M. D. F. , Waheed, H., Wasaya, A., et al. (2022). Influence of environmental factors on seed germination and seeding characteristics of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). Scientific Reports, 12, 9522.
- Jeoung, Y. H., Kim, Y. N., Kim, K. R., Kim, K. H. (2013). Physiological Response and Cadmium Accumulation of MuS1 Transgenic Tobacco Exposed to High Concentration of Cd in Soil: Implication to Phytoremediation of Metal Contaminated Soil, Soil Sci. Fert. 46(1), 58-64. <http://dx.doi.org/10.7745/KJSSF.2013.46.1.058>
- Jha, P., Kumar, V., Godara, R. K., Chauhan, B. S. (2017). Weed management using crop competition in the United States: A review. Crop Protection, 95, 31-37.
- Kim, D. Y., Eom, M. S., Kim, H. J., Ko, E. M., Pack, I. S., Park, J. H., et al. (2020a). Gene flow from transgenic soybean, developed to obtain recombinant proteins for use in the skin care industry, to non-transgenic soybean. Applied Biological Chemistry, 63, 65.
- Kim, D. Y., Eom, M. S., Kim, H. J., Pack, I. S., Park, J. H., Park, K. W., et al. (2020b). Assessing invasiveness of genetically modified soybean expressing human epidermal growth factor gene. Weed & Turfgrass Science, 9(2), 119-128.
- Kim, H. J., Kim, D. Y., Moon, Y. S., Pack, I. S., Park, K. W., Chung, Y. S., et al. (2019). Gene flow from herbicide resistant transgenic soybean to conventional soybean and wild soybean. Applied Biological Chemistry, 62, 54.
- Kim, J. W., Park, S. B., Tran, Q. G. et al. (2020) Functional expression of

- polyethylene terephthalate-degrading enzyme (PETase) in green microalgae. *Microb Cell Fact* 19, 97 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01355-8>.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2024). Synoptic weather observation, statistics by condition. 2024. <https://data.kma.go.kr> Accessed 27 June 2024.
- Ko, E. M., Kim, D. Y., Kim, H. J., Chung, Y. S., Kim, C. G. (2016). Assessing weediness of herbicide tolerant genetically modified soybean. *Korean Journal of Agricultural Science*, 43(4):560-566.
- Ko E. M., Kim, D. Y., Moon Y. S., Kim H. J., Pack, I. S., Kim, Y. J., et al. (2022). Assessing persistence of cruciferous crops in the field. *Korean Journal of Agricultural Science*, 49(3), 655-666.
- Kong, X., Lv, N., Liu, S., Xu, H., Huang, J., Xie, X., Tao, Q., Wang, B., Ji, R., Zhang Q., Jiang, J. (2023). Phytoremediation of isoproturon-contaminated sites by transgenic soybean. *Plant Biotechnology Journal*, 21(2), 342-353.
- Kwon, N., Lee, K.E., Singh, M., Kang, S.G. (2021). Suitable primers for GAPDH reference gene amplification in quantitative RT-PCR analysis of human gene expression. *Gene Reports*, 24, 101272.
- Kwon, H. J., Cho, J. S., Lee, C. H. (2014). Screening for Heavy Metals Accumulation Ability of Twelve Pteridophyta Species at Soil Contaminated with Heavy Metals, *People Plants Environ.* 17(3), 203-210.
- Kwon, H.J., C.H. Lee and S.Y. Kim. 2019. Heavy metals uptake capability and growth of fifteen compositae plants for phytoremediation. *Korean J. Plant Res.* 32:1-8.
- Lamb, K. E., Johnson, B. L. (2004). Seed size and seeding depth influence on canola emergence and performance in the Northern Great Plains. *Agronomy Journal*, 96(2), 454-461.
- LESC. (2024). LMO 심사현황 및 통계, LMO Environmental Safety Center (LESC). http://lesc.nie.re.kr/lesc/bbsList.do?idx=13&BRD_ID=LMO_STATS (2024.11.30.).

- Linardic, M., Braybrook, S.A. (2021). Identification and selection of optimal reference genes for qPCR-based gene expression analysis in *Fucus distichus* under various abiotic stresses. *PLoS One*, 16(4).
- Lutman, P. J. W., Freeman, S. E., Pekrun, C. (2003). The long-term persistence of seeds of oilseed rape (*Brassica napus*) in arable fields. *Journal of Agricultural Science*, 141, 231-240.
- Moravcová, L., Carta, A., Pyšek, P., Skalová, H., Gioria, M. (2022). Long-term seed burial reveals differences in the seed-banking strategies of naturalized and invasive alien herbs. *Scientific Reports*, 12, 8859.
- Nam, K. H. (2024). Characteristic analysis of useful plant resources for phytoremediation in polluted environment. *Korean Journal of Plant Resources*, 37(5), 537-546.
- Nam, K. H., Han, S. M. (2020). Seed germination of sunflower as a case study for the risk assessment and management of transgenic plants used for environmental remediation in South Korea. *Sustainability*, 12, 10110.
- Nam, K. H., Han, S. M., Chun S. J., Lee J. W., Kim J. (2024a). Evaluating the risk of LMOs on the natural ecosystem by analyzing the overwintering potential of four major species imported into Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 48, 38
- Nam, K. H., Han, S. M., Chun S. J., Lee J. W., Kim J. (2024b). Effect of seeding density on the weediness potential of transgenic plants: A case study on sunflowers. *Journal of Ecology and Environment*, 48, 28
- National Institute of Biological Resources (NIBR). (2023). Biogeographic information service. <https://species.nibr.go.kr/geo/html/index.do>. Accessed 27 June 2024.
- National Institute of Biological Resources (NIBR). (2024). Biogeographic information service. <https://species.nibr.go.kr/geo/html/index.do>. Accessed 27 June 2024.
- NIE. Environmental monitoring and post-management of LMO. National Institute of Ecology, Seoecheon.
- Raybould, A. (2010). The bucket and the searchlight: formulating and

- testing risk hypotheses about the weediness and invasiveness potential of transgenic crops. *Environmental Biosafety Research*, 9, 123-133.
- Palmroth, M. R., Pichtel, J., Puhakka, J. A. (2002). Phytoremediation of subarctic soil contaminated with diesel fuel, *Bioresource Technology*, 84, 221-228
- Sebastiani, L., Scebba, F., Tognetti, R. (2004). Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I-214 (*P. × euramericana*) exposed to industrial waste, *Environmental and Experimental Botany*, 52, 79-88.
- Swanton, C. J., Nkoa, R., Blackshaw, R. E. (2015). Experimental methods for crop-weed completion studies. *Weed Science*, 63, 2-11.
- Thompson, K., Bakker, J. P., Bekker, R. M., Hodgson, J. G. (1998). Ecological correlates of seed persistence in soil in the north-west European flora. *Journal of Ecology*, 86, 163-169.
- Thompson K., Band S., Hodgson J. (1993). Seed size and shape predict persistence in soil. *Functional Ecology*, 7, 236-241.
- Wang, X., Jia, Y. (2010). Study on adsorption and remediation of heavy metals by poplar and larch in contaminated soil, *Environ Sci Pollut Res*, 17, 1331-1338.
- Wang, Y., Lin, J., Chen, Q., Zhu, N., Jiang, D., Li, M., Wang, Y. (2015). Overexpression of mitochondrial Hsp75 protects neural stem cells against microglia-derived soluble factor-induced neurotoxicity by regulating mitochondrial permeability transition pore opening in vitro. *International journal of molecular medicine*, 36, 1487-1496.
- Wei, H., Movahedi, A., Xu, C., Sun, W., Almasi Zadeh Yaghuti, A., Wang, P., Li, D., Zhuge, Q. (2019). Overexpression of PtDXS enhances stress resistance in poplars. *International journal of molecular sciences*, 20(7), 1669.
- Yeo, J. K., Koo, Y. B., Son, D. S. (2001). Growth Response and Absorption Capacity of Poplars on Livestock Waste Water. *Korean For. Soc.* 90(6). 734-741.
- Yoon S-K, Bae E-K, Lee H, Choi Y-I, Han M, Choi H, Kang K-S, Park E-J

- (2018) Downregulation of stress-associated protein 1 (PagSAP1) increases salt stress tolerance in poplar (*Populus alba* × *P.glandulosa*). *Trees* 32:823-833.
- Zhang, Y., Han, X., Chen, S., Zheng, L., He, X., Liu, M., Qiao, G., Wang, Y., Zhuo, R. (2017). Selection of suitable reference genes for quantitative real-time PCR gene expression analysis in *Salix matsudana* under different abiotic stresses. *Scientific Reports*, 7, 40290.
- Zong, S., Yun, H., Yu, X., He, Y., Khan, A., Tang, H., et al. (2023). Bioaugmentation of Cd (II) removal in high-salinity wastewater by engineered *Escherichia coli* harbouring EC20 and *irrE* genes. *Journal of Cleaner Production*, 137656.
- European Commission, Genetically Modified Organisms, https://food.ec.europa.eu/plants/genetically-modified-organisms_en
- European Commission, Farm to Fork strategy, https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
- <https://www.isaaa.org/> GM Approval Database
- <https://www.livingcarbon.com/>
- <https://neoplants.com>
- <https://euinasean.eu/eu-green-deal>
- <https://www.nedo.go.jp/index.html>

2) 정책활용

- 제4차 환경부 LMO 안전관리 계획('23~'27)
- 2024년 환경부 LMO 안전관리 세부시행계획 수립·이행
- 2025년 환경부 LMO 안전관리 세부시행계획에 반영 예정

3) 특허출원

- LMO 격리포장의 전이 유전자 이탈 방지 모니터링 서버 및 방법
- 드론 영상 기반 LMO 격리포장 관리 서버 및 방법

4) 도서발간

- 환경부 유전자변형생물체 포장시험 안전관리 가이드라인
- Guidelines on Safety Management for the Ministry of Environment's Risk Assessment Institute



5) 동영상 콘텐츠 개발·보급

- LMO 특허기술 교육영상 '바이오 분야 위해성평가 기술의 상업화 가능성'
[https://www.nie.re.kr/nie/bbs/BMSR00056/view.do?boardId=695965366 &menuNo=200033](https://www.nie.re.kr/nie/bbs/BMSR00056/view.do?boardId=695965366&menuNo=200033)



6) 2024 한국환경생물학회 정기학술대회 구두 발표

- 환경부 LMO 위해성평가기관 운영 및 환경위해성평가



2. 교육 콘텐츠

1) 전국 중학생·대학생 맞춤형 LMO 교육

- LMO에 대한 올바른 정보 제공, 환경부 LMO 위해성평가기관 연구시설 견학 및 LMO 위해성평가가 체험교육 등



환경부 LMO 정책 및 연구 소개



환경부 LMO 위해성평가기관 연구시설 견학



자연생태계 LMO 위해성평가 실습(휴면종자 활력 평가)