

대기-산림생태계 CO₂ 플럭스 특성 연구



생태관측연구 표준화 매뉴얼

대기-산림생태계 CO₂ 플럭스 특성 연구

발행일	2025년 11월 20일
발행처	국립생태원 생태변화연구팀 충청남도 서천군 마서면 금강로 1210 www.nie.re.kr
저자	국립생태원 생태변화연구팀 박정수, 한아름, 주성배, 이응필, 이영상, 이일환, 이재연, 홍민기, 김미라, 장혜정, 김준모, 정의, 대기환경모델링센터 주승진
연구사업	2025년 국가장기생태연구 (NIE-B-2025-02) 생태계 기후대응 표준관측망 구축(1차) (NIE-C-2025-136)

디자인·제작 오피스배재

© 국립생태원. National Institute of Ecology. 2025

인용 표기

국립생태원. 2025. 생태관측연구 표준화 매뉴얼: 대기-산림생태계 CO₂ 플럭스 특성 연구. 충청남도, 국립생태원

Citation Information

National Institute of Ecology. 2025. The Standard Manual for Ecological Monitoring: Study on the Characteristics of CO₂ Flux within the Atmosphere-Forest Ecosystem. National Institute of Ecology, Chungcheongnam-do, Republic of Korea

ISBN 979-11-6698-711-3

979-11-6698-301-6(세트)

비매품 / 무료

생태관측연구 표준화 매뉴얼

대기-산림생태계 CO₂ 플럭스 특성 연구

THE STANDARD MANUAL
FOR ECOLOGICAL MONITORING:

Study on the Characteristics of CO₂ Flux within
the Atmosphere-Forest Ecosystem

생태관측연구 표준화 매뉴얼

대기-산림생태계 CO₂ 플럭스 특성 연구

작성자

국립생태원
생태변화연구팀

박정수, 한아름, 주성배, 이응필, 이영상,
이일환, 이재연, 홍민기, 김미라, 장혜정,
김준모, 정의

외부

주승진(대기환경모델링센터)

변경 사항
Change Record

버전(개정)	날짜	변경 세부 사항
25_Flux_01	2025.11.	초판발행

CONTENTS

1. 개요 Overview	04
2. 용어 정의 Definition of terms, Acronyms	06
3. 방법 Method	08
4. 안전 Safety	16
5. 표준 운영 절차 Standard Operating Procedures, SOP	19
참고 문헌 References	29
부록 Appendix	31

1. 개요 Overview

1-1.

배경

Background

산림을 포함하는 다양한 육상 생태계는 지구 규모의 탄소순환 및 탄소수지에 있어서 중요한 구성원이며, 기후시스템에 매우 중요한 역할과 기능을 담당하고 있다. 육상에 분포하는 다양한 수종의 식생들은 광합성 작용을 통하여 대기의 이산화탄소(CO_2)를 흡수하고 탄소화합물의 형태로 저장시키며 성장한다. 또한 동시에 성장하는 식생의 지상부 및 지하부로부터의 호흡 작용을 통하여 대기 중으로 CO_2 를 배출한다. 한편, 매년 연중 토양생태계에 공급되어지는 많고 다양한 형태의 잔재유기물들은 풍부한 토양 미생물과 동물들에 의해 물리·화학적 분해과정을 거쳐 최종적으로 토양으로부터 대기로 CO_2 를 배출시킨다. 이러한 지속적인 생물학적 프로세스를 통하여 산림생태계는 탄소흡수원(carbon sink area)이자 기후변화를 완화시키는 역할 속에 기여하지만, 동시에 대기 중으로 고농도 CO_2 의 급격한 배출은 현재 진행 중인 지구 온난화 및 이상 기후변동을 가속화 시키고 고유의 CO_2 균형 수치 및 생태적 기능과 역할에 매우 심각한 악영향을 미칠 수 있다.

이처럼 산림생태계의 CO_2 흡수량/배출량 교환수치는 그 유동속도가 매우 크기 때문에 세계적으로 넓고 다양한 산림에서 탄소순환 프로세스 전 과정의 이해와 분석 및 정량적 고분해능의 측정·분석을 통하여 대표적인 탄소수지를 명확하게 평가하려는 연구기술개발이 활발하게 진행 중에 놓여있다.

그러므로 이와 관련된 야외 모니터링 생태타워와 탄소플럭스(carbon flux) 측정망을 구축하여, 미기상학적인 방법인 에디 공분산(eddy covariance) 기술을 적용시킨 대기-산림생태계 간의 난류에 의한 에너지, 운동량, 물질 수송 등의 관측뿐만 아니라, 특히 이산화탄소 플럭스(CO_2 flux) 및 온실 기체인 대기 CO_2 농도의 변화를 장기적으로 관측하고 종합적인 자료 분석이 요구되어지고 있다.

이를 통하여 대표적인 한반도 산림생태계의 정량화 CO_2 흡수/배출 능력을 발굴하고 세밀한 탄소순환 메커니즘을 규명하여, 가까운 장래에 기후변화 및 지구 온난화에 의한 산림생태계 고유의 탄소수지 균형과 변동에 미칠 영향을 예측·대비하고 미래의 환경변화에 적극 대응하기 위한 중요한 분석 데이터로 활용될 것이다.

1-2.

목적

Scope

강원도 점봉산 지역의 우점식생 군락인 신갈나무림(*Quercus mongolica forest*) 지역에 구축된 42m 생태타워(Eco-Tower)를 이용하여 군락위의 높이에 오픈형 및 폐쇄형 경로의 기체($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$) 분석기들과 3차원 초음파풍향풍속계를 설치하고 단위 시간당, 단위 면적당의 난류 CO_2 flux를 10 Hz의 높은 빈도로 연속적으로 측정한다. 이 난류 플럭스의 관측 고도 아래에 위치한 산림생태계의 식생 군락과 대기 사이의 상호작용을 통한 교환수지로 주요 대기 CO_2 농도 변화 및 flux의 면밀한 시계열 관측 자료들을 분석하여 한반도 냉·온대지역의 대표적인 낙엽활엽수종인 신갈나무림의 탄소플럭스(carbon flux) 메커니즘을 규명하고 정량적인 CO_2 교환수지의 일변화 및 계절적 특성과 경향을 파악한다. 또한 장기간의 시계열 CO_2 flux 분석 결과물을 활용하여 연간 순생태계교환량(NEE)의 변화를 산정하고 앞으로 한반도 미래의 산림생태계 변동을 명확하게 예측·진단함으로써 장기적인 지구 온난화와 기후변화의 대응·방안 수립에 기여하고자 한다. 이에 본 ‘국가장기생태연구 대기탄소플럭스 매뉴얼’의 제작 과정을 기반으로, 점봉산 생태타워의 자동 관측시스템을 보다 효율적이고 안정적으로 유지·관리하기 위한 내용을 제시한다. 또한 에디 공분산 방법에 따라 난류에 의해 교환되는 열, 에너지, 수증기, 운동량 등의 집록된 자료 중에서 대기-산림생태계 사이의 CO_2 flux 특성 분석을 중점적으로 안내 설명하고자 한다.

2. 용어 정의 Definition of terms, Acronyms

2-1

정의

Definition

용어(영문)	정의
생태타워 (Eco-Tower)	대기와 산림 생태계 간의 미기상 요소, 대기의 이산화탄소 농도와 난류 플렉스를 관측하고자 구축된 약 42 m 높이의 구조물로, 관련 연구자 및 관리자의 야외실험 활동이 편리하고 안전한 워킹타워 구조를 갖추었으며, 특히 수관부의 이동성 및 접근성을 높은 효율적인 자연생태계 모니터링 용도의 다목적 타워
대기 이산화탄소 농도 (Atmospheric CO ₂ concentration above the forest canopy)	산림의 수관부 위에서 관측된 대기 중의 온실기체 이산화탄소(CO ₂)의 농도(unit: ppm, mg m ⁻³)
이산화탄소 플렉스 (CO ₂ flux)	단위 시간당 연직 단위 면적을 통과하는 이산화탄소(CO ₂)의 물리적 수송량(unit: mg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹ , μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)
오픈-경로의 이산화탄소 및 수증기 농도 분석기 (Open-path CO ₂ /H ₂ O analyzer)	기본 측정 반응속도가 10 Hz 이상으로 야외에서 측정 가능한 오픈-경로의 이산화탄소(CO ₂) 및 수증기(H ₂ O) 적외선 기체 분석기
폐쇄-경로의 이산화탄소 및 수증기 농도 분석기 (Enclosed-path CO ₂ /H ₂ O analyzer)	기본 측정 반응속도가 10 Hz 이상으로 야외에서 측정 가능한 개량형 폐쇄-경로의 이산화탄소(CO ₂) 및 수증기(H ₂ O) 적외선 기체 분석기
3차원 초음파풍향풍속계 (3D ultrasonic anemometer)	측정 범위가 0~60 m s ⁻¹ 이며 측정 반응속도가 10 Hz 이상으로 3차원의 바람 성분들(u , v , w m s ⁻¹)과 온도(초음파) 관측 기기
에디 공분산 방법 (Eddy covariance method)	대기 지표층 사이에서 난류 교환되는 물리량의 연직 플렉스를 정량화하며 그 과정 중의 난류 구조를 밝히는데 사용된다. 운동량 플렉스, 현열 및 잠열과 같은 에너지 플렉스, 수증기, 이산화탄소, 메탄, 산화질소, 에어로솔 등과 같은 기체 플렉스 등을 측정할 수 있다. 이 방법은 다양한 생태계의 지표면에 적용되어 미기상학적 특성을 분석하는 가장 대표적인 방법
순생태계교환량 (Net ecosystem exchange, NEE)	미기상학적 접근법인 에디 공분산 적용에 따른 대기와 생태계 사이에 연속적인 관측과 분석을 통해 얻어진 난류 이산화탄소 플럭스의 시계열 결과 값들을 연간 종합적으로 계산하여 산정한 순 CO ₂ 의 교환량으로 주로, 특정 생태계를 대표하는 연간 이산화탄소(순 이산화탄소)의 정량적 교환수지 또는 단위 전하하여 연간 탄소(C)수지로 나타냄
이산화탄소 흡수원 (CO ₂ sink area)	자연적(광합성 과정)이거나 인위적으로 대기 중의 순 이산화탄소를 저장하는 지역
이산화탄소 배출원 (CO ₂ source area)	자연적(호흡 과정)이거나 인위적으로 대기 중으로 순 이산화탄소를 배출하는 지역

2-2

약어

Acronyms

약어	설명
CO_2 (Carbon Dioxide)	이산화탄소
EC method (Eddy Covariance Method)	에디 공분산 방법
NEE (Net Ecosystem Exchange)	순생태계교환량
u (Horizontal Wind Velocity Component)	수평 바람 성분
v (Lateral Wind Velocity Component)	측면 바람 성분
w (Vertical Wind Velocity Component)	연직 바람 성분
T (Sonic Temperature)	소닉(초음파) 온도
ρ_c (CO_2 Density)	이산화탄소 질량 농도
ρ_w (Water Vapor Density)	수증기 질량 농도
F_c (CO_2 flux)	이산화탄소 플럭스
MAD (Median of Absolute Deviation)	중위절대편차
Md (Median)	중앙값
WPL (Weeb-Pearman-Leuning)	수증기 및 밀도 보정
M_v (Mol Mass of Water Vapor)	수증기의 몰 질량
M_a (Mol Mass of Air)	공기의 몰 질량
ρ_a (Mean Dry Air Density)	평균 건조 공기밀도
ρ_v (Mean Water Vapor Density)	평균 수증기 밀도
PPFD (Photosynthetic Active Poton Flux Density)	광량자속밀도
R_d (Dark Respiration)	식생의 호흡속도
R_e (Ecosystem Respiration)	생태계호흡량
E_0 (Activation Energy)	활성에너지

3. 방법 Method

3-1

요구 장비 목록

Required equipments or Materials checklist

번호	제품명(제조사)	규격	목적	수량
3-2 ~ 3-4, 3-6	생태타워(42 m) (예: Working Eco-Tower, (주) 웨더텍)	Working ecological tower	대기 CO ₂ 농도 및 CO ₂ flux 미기상 관측 및 생태 모니터링	1식
	제어실 (예: 운영 전력공급 220V, (주) 웨더텍)	야외 현장 관리동 (컨테이너)	생태타워 장비 및 센서 기기의 운영 전력	1식
	오픈 경로의 이산화탄소 및 수증기 적외선 농도 분석기 (예: Open-path CO ₂ /H ₂ O analyzer, Campbell Scientific, Inc. USA)	EC150	대기 이산화탄소 및 수증기 농도 측정(33 m)	1기
3-4, 5-1, SOP. A ~ SOP. B	개량형 폐쇄 경로의 이산 화탄소 및 수증기 적외선 농도 분석기 (예: Enclosed-path CO ₂ /H ₂ O analyzer, LI-COR, Inc. Lincoln, NE, USA)	IL-7200RS	대기 이산화탄소 및 수증기 농도 측정(31 m)	1기
	3차원 초음파풍향풍속계 (예: Ultra sonic 3D-anemometer- thermometer, Campbell Scientific, Inc. USA)	CAST3	10 Hz 이상의 3차원 바람 성분 및 온도(초음파) 관측(33 m)	1기
	3차원 초음파풍향풍속계 (예: Ultra sonic 3D-anemometer- thermometer, Gill Instruments, Ltd., UK)	WindMaster Pro	10 Hz 이상의 3차원 바람 성분 및 온도(초음파) 관측(31 m)	1기

번호	제품명(제조사)	규격	목적	수량
3-4 ~ 3-6, 5-1,	캠벨사의 전용 필드 멀티 채널 CR3000 데이터로거/제어기(CR S/W) 및 자료통신모뎀 (Field multi-channel datalogger/controls with the CR software) including the dedicated modem for data communications)	CR3000	생태타워(플렉스 및 미기상)의 무인 자동 관측시스템 제어·운용과 자료 전송(2 m)	1기
	라이코사의 전용 필드 스마트플렉스 시스템(데이터로거/제어기와 에디프로 S/W) 및 자료통신모뎀 (Field SmartFlux System (datalogger/controls with the EddyPro® software) including the dedicated modem for data communications)	The SmartFlux® System	생태타워(플렉스 및 미기상)의 무인 자동 관측시스템 제어·운용과 자료 전송(20 m)	1기

3. 방법 Method

3-2

조사지 정보 Site information

- 1) 행정구역(주소): 강원도 인제군 기린면 진동리 산 71
- 2) GPS 위치정보: 38° 02' 15.6"N, 128° 28' 05.8"E, a.s.l. 981 m
- 3) 현장 사진: 점봉산 생태타워 관련 사진 및 구성도

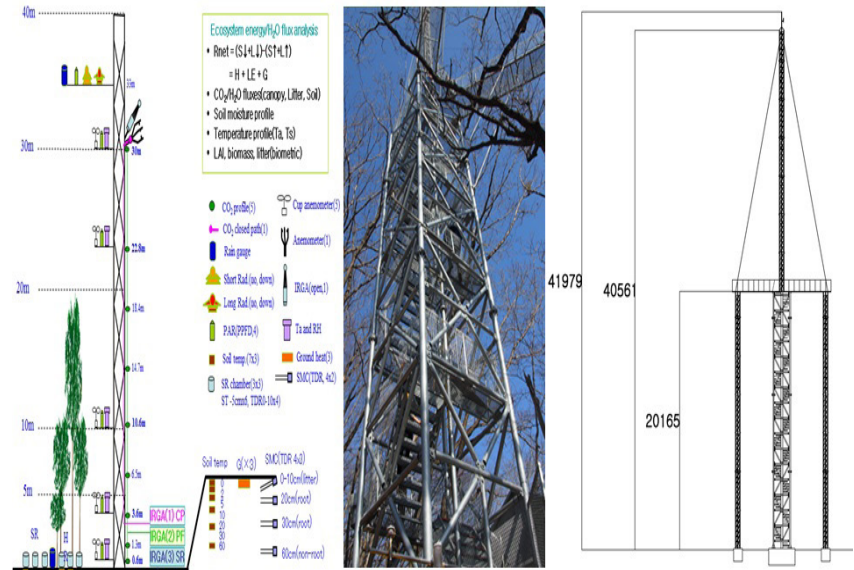
강원도 점봉산에 위치한 신갈나무림(*Quercus mongolica* forest)에 장기적인 대기 CO₂ 농도 및 CO₂ flux와 미기상 요소를 관측하기 위한 생태타워 구축



점봉산 신갈나무림 군락 위의 난류 플럭스 관측 장비 및 식생 군락의 수관부 접근이 용이한 생태타워 현장 사진



강원도 점봉산 생태타워(Eco-Tower)의 외관구성도 및 설치된 각 CO₂ flux 및 미기상 관측 장비 및 센서 기기의 구성도



점봉산의 지표면으로부터 생태타워 33 m 및 31 m의 고도에 설치된 주요 Open-path (Model: EC150) and Enclosed-path (Model: LI-7200RS) CO₂/H₂O analyzers와 3D ultrasonic 초음파풍향풍속계(Model: CSAT3 and WindMaster PROc).



3. 방법 Method

3-3

현장조사 수행시 주의사항

- 1) 설치된 대부분의 장비 및 센서 등의 전자기기들은 365일 연중 연속적으로 일정하고 높은 반응속도로 측정되고 동시에 규칙적으로 기록·저장되기 때문에, 일반적으로 야외 현장에서 연구자들이 직접 행하는 수동적 측정 방법보다 자동화 장비 및 기기에 대한 유지·관리 및 점검에 소홀히 대처하는 경우가 빈번하게 발생되므로 생태타워의 자동화 관측시스템에 각별한 주의가 필요하다.
- 2) 다음 아래에 생태타워 운영 관련 관리자 및 연구자를 위한 간단한 현장 방문 점검 방법을 제시한다.
 - ① 현장에 도착한 관련 운영 관리자 및 연구자는 우선, 관리창고 내부의 전원부의 상용(220V) 전원공급 및 누전차단기 상태를 점검한다.
 - ② 현장용 데이터로거와 휴대용 PC를 접속 연결시킨 후, 검색 창을 열고 10 Hz(1초당 10회 측정 빈도) 간격으로 연속측정 되어지는 3차원 초음파풍향풍속계와 CO₂ 및 H₂O 농도의 샘플링 값들과 데이터로거 운용 전압을 동시에 확인 점검한다.
 - ③ 순간 측정 되어지는 각 센서 항목들의 값들이 현장 운용 환경에 따른 관측 센서의 표준 규격의 측정 범위 및 정확도의 범용을 벗어났는지를 우선 파악하고 순간 샘플링 값이 “Nan”, “-99999”, “-9999”, “0 or ”zero”, “누락”)등으로 나타나는 오류 표시가 있는지를 확인한다.
 - ④ 데이터로거 검색 창에 표시되는 각 센서 항목들 가운데, 매 순간 샘플링 값이 10~30분 동안 변화가 없이 일정한 경우를 확인 및 기록에 남긴다.
 - ⑤ 현장 데이터로거에 저장되어 있는 관측 데이터 저장파일을 열고 현장 관리 점검 이전의 과거 원시자료(raw data)를 다음과 같이 확인 점검한다.
 - 현장 데이터로거 A/D변환기에 변환 값이 들어오지 않는 경우
 - 현장 데이터로거의 입출력 전압이 10 mV 이하인 경우
 - 각 관측 센서로부터 관측 값이 4~6시간 동안 변화가 없는 경우
 - ⑥ 폭우, 폭설, 태풍, 돌풍 등의 피해로 생태타워에 설치된 관측 장비 및 센서 기기들 주변에 방해가 되는 낙엽 및 낙지 등의 이물질이 쌓여있는 지를 육안으로 확인 점검한다.
 - ⑦ 외부 충격에 각 센서들의 거치대 및 고정판이 파손되거나 수평각이 기울어져 있는지를 육안으로 확인 점검한다.
 - ⑧ 현장에서 관측 장비 및 센서 기기의 문제 발생 및 오류를 확인할 시에 일정 점검표에 정확한 일시와 중요한 요점 사항을 반드시 기록한다. 특히, 고층의 생태타워 특성상 직접적인 현장 수리와 보수가 어렵고 위험하기 때문에 신속하게 타워 전문기술자에게 연락하고 대행 점검 관리 및 보수 작업을 요청한다.

3-4

세부관측항목의 주기 및 샘플링 시간

Standard
Measurement
Period and
Sampling Time

관련 매뉴얼	세부 관측 항목 (Measurement item)	주기 (Interval)	샘플링 시간 (Sampling time)	소요 인원	비고 (etc)
SOP. A ~ SOP. B	대기 이산화탄소 및 수증기 농도	연중	10(Hz)	무인 자동	현지
SOP. A ~ SOP. B	3차원 바람 성분, 온도, 난류, 에너지, 운동량 등	연중	10(Hz)		현지
3-6	생태타워의 무인 자동 관측시스템 제어·운용 (전용 데이터로거/제어기 포함: 상시 AC220V 및 DC12V의 전력 공급)	연중	연속		현지 및 실험실
3-5	생태타워 현지의 자료 통신모뎀 및 국립생태원의 주요 서버 운용	연중	1(h) ~ 3(h)		현지 및 실험실
SOP. A ~ SOP. C	수집된 에디 공분산 관측 자료 분석	연중	연속		실험실

※ Hz: Hertz, h: Hour

3. 방법 Method

3-5

관측(샘플링) 시작과 종료 기준

Criteria for
Determining Onset
and Cessation of
Sampling

- 1) 점봉산 생태타워의 무인 자동관측시스템의 경우, 대기 CO₂ 농도 및 CO₂ flux를 측정하기 위하여 관측 센서부, 자료수집/전송부, 부대 시설부의 주요 세부부분으로 구성되어 있으며 야외 생태타워 관측사이트에서는 연중 365일, 연속적인 주기로 10 Hz 빈도의 고속반응 샘플링 속도로 에디 공분산 관련 자료들을 측정한다.
- 2) 생태타워의 관측 장비 및 센서 기기로부터 순간 샘플링 측정값들은 아날로그 신호를 디지털 값으로 변환되어 관측시스템의 제어·운용 목적을 위한 전용 프로그램의 명령어에 따라 자료수집 장치인 다채널 데이터로거에 자동 저장·기록되며 동시에 무선 자료통신모뎀 시스템을 통하여 연중 연속적으로 1~3시간 간격으로 강원도 점봉산 생태타워에서 원거리에 위치한 국립생태원 실험실 내의 전용 서버로 연속적으로 자동 전송된다.
- 3) 관련 운영 관리자 및 연구자는 최소 매 1일 1회의 주기로 반드시 국립생태원의 서버로 전송되는 관련 타워 플렉스 및 미기상 모니터링 관측데이터 값들을 반드시 확인·검토하여, 귀중한 점봉산 생태타워의 시계열 관측 자료의 누락 및 손실이 발생되지 않도록 한다. 특히, 주요 서버로 수신된 자료 점검을 통하여 점봉산 생태타워의 전력수급(상용 AC220V) 상태, 각 장비 및 센서 기기의 정상 작동 여부와 전송된 관측 값들로부터의 오류 및 이상치를 파악하는 자체 수시 점검 관리를 수행한다.
- 4) 상기의 자체 수시 점검 관리(최소 매 1일 1회)를 통해 발견된 문제점들을 보다 명확하게 재확인하고 신속한 후속 판단·조치를 시행하기 위하여, 관련 운영 관리자 및 연구자들은 현장에 즉각적으로 이동·방문하여 생태타워에 설치된 각 센서들과 측정 장비들의 외관 상태, 데이터로거 저장 값들, 타워전력공급 상태 등의 이상 유무를 점검한다. 직접적으로 복구 가능하고 단순한 문제들은 이 현장 방문을 통해 해결한다.

3-6

실험실 추가 분석 여부

Timing for
laboratory
processing and
analysis

- 1) 국립생태원의 전용 서버에 수집된 원시자료들은 각각의 측정 항목 및 이름으로 일정한 시계열에 따라 서버전용 ASCII text 파일 또는 Excel 파일의 형태로 저장·보관 처리된다.
- 2) 각 원시자료는 일련의 자료품질 관리를 통하여 시각 동기화, 중복, 결측, 오작동, 이상치 등을 선별하고 검토하여 오류 제거 및 처리하여 새로운 파일명으로 편집하여 저장·관리한다.

3-7

조사 불가능시 조치 사항

Sampling timing
contingencies

3) 서버에 집록된 모든 에디 공분산 자료들로부터 난류 이산화탄소 플렉스를 분석하기 위하여, 본 매뉴얼에서 제시한 '5. 표준 운영 절차'에 따라 실험실 분석을 수행한다. 대부분의 관측 자료들은 대용량의 시계열 자료이므로 관련 연구자는 연중 지속적인 자료 처리 및 분석 진행이 요구된다.

1) 대기-산림생태계 간의 CO₂ flux 연구를 수행함에 있어서 우선적으로 생태타워에 설치된 자동 관측시스템의 각종 장비로부터 좋은 품질의 유효한 자료 획득은 관측용 센서 및 기기의 표준규격을 반드시 지키고, 관련 운영 관리자는 현장에서 정기적으로 전용 데이터로거에 순간 관측(샘플링) 값들이 저장되는 과정을 직접 확인하여 이상 유무를 판단하는 자체 현장 방문 점검이 필요하다.

2) 그러나 자체 현장 방문 점검으로 해결 할 수 없는 복잡한 경우에는 점봉산 생태타워의 귀중한 관측 시계열 자료의 누락과 손실이 발생하지 않도록 신속하게 관련 장비 업체의 전문기술자에게 연락 및 복구문의 등의 요청을 통하여 생태타워의 무인 자동관측시스템이 효율적이고 안정적으로 운영·유지 되도록 관리 수행한다.

3) 생태타워의 대기 CO₂ 농도 및 플렉스 관련 관측 장비들은 지면으로부터 최대 높이 33 m 지점에 이르는 매우 접근하기 어려운 공간 지점에 위치하고 있기 때문에 관련 운영 관리자 및 연구자들이 직접적으로 오류 및 불량 상태를 확인하고 점검 수리 활동은 극히 위험하고 안전상 불가능하다. 게다가 관측 센서들의 특성상 인위적인 오염에 민감하고 외부 충격에 매우 약하며 비용이 높은 자동화 관측시스템 장비들로 이에 반드시 숙련된 고층 타워관측 관련 전문기술자의 도움이 필요하다.

4. 안전 Safety

4-1

조사 전 점검 (관리)

1) 출발 전

- ① 현장 이동(출발) 전 조사 활동 대상자는 안전점검표[부록 1] 작성을 통해 활동 종사자의 건강상태, 활동지 기상사항, 안전보호구 유무 등 작업 전후 발생할 수 있는 안전사고 유무를 사전에 확인한다.
- ② 안전 점검표 상 점검 항목 및 조사 시 안전수칙 등은 조사 활동에 맞게 수정 가능하며, 각 항목은 조사 활동 간 발생할 수 있는 안전사고를 예방에 필요한 항목을 포함한다.
- ③ 작업 전 확인된 점검 사항 중 조치가 가능한 사항에 대해서는 사전 조치를 통해 현장 조사 활동간 안전사고가 발생할 수 있는 가능성을 차단하고, 조사 활동에 임한다.
- ④ 점검 사항 중 현장 조사 활동 이전까지 조치가 어려운 문제가 확인된 경우, 현장 조사 활동을 중단하고 문제 해결이 완료된 이후에 조사에 임한다.

2) 현장 활동시

- ① 연구지 내에서 현장 조사 활동 시작 전, 현장 책임자(전문조사원)는 출장자 전원에 대한 일일 안전확인일지[부록 1]를 작성하고, 활동 시 발생할 수 있는 안전사고 및 주의사항에 대한 교육을 진행한 이후 조사 활동을 수행한다.

3) 복귀 후

- ① 현장 책임자(전문조사원)는 외부활동 종료 후 향후 현장 조사 활동과 관련한 안전 점검 여부를 확인할 수 있도록, 안전 증빙 서류(원본)를 확인 및 보관한다.

출발 전	▶	현장 활동 시	▶	복귀 후
※ 안전점검표 작성 - 외부조사(연구)원의 경우 전문조사원이 작성		※ 일일 안전확인 일지 작성 - 일일 단위 실시 (출장자 전원)		※ 안전 증빙 서류 관리 - 안전점검표, 일일 안전 확인 일지 보관

4-2

안전장비리스트

번호	장비명	용도	수량
1	모자	충격 또는 찰림 위험으로부터 보호	인당 1개
2	장갑	충격 또는 찰림 위험으로부터 보호	인당 1개
3	안전화/등산화	충격 또는 찰림 위험으로부터 보호	인당 1개
4	응급키트	응급 상황에서의 긴급 조치	1-2 세트
5	우비	예상치 못한 기상 상황에 대처	인당 1개
6	호루라기	조난 상황 또는 위험 상황을 알림	인당 1개
7	식별용 팔찌	야간 상황에서의 연구자 식별	인당 1개
8	해충기피제	진드기, 모기 등 해충 방지	2인당 1개

4-3

현장 조사 활동 시 주의사항

- 1) 해충: 6월 경이 되면 눈 주위를 맴돌다 눈으로 달라붙는 파리가 많이 발생한다. 따라서 망이 달린 모자나 기피제를 활용하여 해충에 의한 피해를 예방한다. 조사 후에는 진드기에 물린 곳이 있는지 반드시 점검한다.
- 2) 미끄럼: 대부분의 조사지에 경사지가 많으므로 미끄럼에 유의한다. 특히 여름의 강수 직후나 봄철의 잔설이 있는 경우, 지중은 동결되어 있고 지표면만 녹아있는 경우 매우 미끄러우므로 각별히 주의한다.
- 3) 고사목 낙지: 대형 고사목의 경우 고사 초기에는 작은 가지가 떨어지나 점차 굵은 가지가 낙하여 안전사고 위험이 상존하므로 바람이 불거나 비가 온 직후 등은 대형 고사목 주위를 피하여 이동하고, 안전모를 착용한다.
- 4) 갑작스런 기상 변화: 강풍, 소나기, 폭우 등의 갑작스런 기상변화가 발생하면 일단 기기보관실과 같은 공간으로 대피하고 안전하다고 판단되면 하산한다.
- 5) 위험작업: 망치, 톱, 드릴 등을 이용한 작업 시 불안정한 자세가 되지 않도록 주의하며, 장갑이나 보안경 같은 보호구를 반드시 착용한다.

4. 안전 Safety

4-4

안전사고 발생 시 대처요령

1) 현장 조사 활동 중 안전사고 발생 시 아래의 절차 순서를 따른다.

- ① 안전사고 발생 시 현장 책임자는 즉각 조사 활동을 중단한다.
- ② 경미한 수준의 안전사고가 발생했을 경우, 휴대한 구급키트를 이용하여 1차 응급 조치를 실시하고, 현장 책임자의 판단하에 현장 조사 재개 여부를 결정한다.
- ③ 현장 조치가 불가능한 안전사고 발생 시, 현장 조사원을 인솔하여 부상자를 신속하게 병원으로 인도하고 적절한 치료를 받을 수 있도록 우선 조치한다.

2) 안전사고 발생 보고

- ① 현장 책임자는 안전사고 발생 시 위의 절차대로 조치 이후, 연구 지소 담당자(국립생태원 연구 담당자)에게 안전사고 발생 사실을 알린다.
- ② 안전사고 발생 사실 전파 시에는 연구 지소 담당자(국립생태원 연구 담당자)가 사고 내용을 파악할 수 있도록 사고 상황(사건 발생 시간, 장소, 부상 부위 및 부상 강도 등)에 대한 상세한 내용을 포함하여 전파한다.
- ③ 지소 담당자는 현장으로부터 접수된 안전사고 내용을 연구책임자와 국립생태원 안전보건부에 즉각 보고하여 안전사고 발생 사실을 전달한다.
- ④ 안전사고와 관련된 모든 조치가 완료된 이후, 지소 담당자는 현장 책임자에게 해당 사고에 대한 안전 사고 조사표[부록 1]를 요청하여, 사고와 관련한 구체적인 사항을 파악하고, 안전사고보고서를 작성하여 안전보건부에 보고하여야 한다.

사건발생	접수자	1차 보고	2차 보고
현장 책임자 (전문조사원)	지소 담당자 (국립생태원 연구담당자)	안전보건부	국립생태원 체계 보고
		연구책임자	팀장

이름	소속	직책(담당업무)	연락처
이 일 환	국립생태원 생태변화연구팀	지소 안전 담당	041-950-5612
이 영 상	국립생태원 생태변화연구팀	외부연구원 관리 담당자	041-950-5614
박 정 수	국립생태원 생태변화연구팀	팀장, 연구책임자	041-950-5600

5. 표준 운영 절차 Standard operating procedures, SOP

본 매뉴얼의 표준 운영 절차(SOP)는 생태타워에서 관측된 에디 공분산(eddy covariance) 자료로부터 난류 플럭스를 산출하기 위하여 보편적으로 널리 사용되는 자료의 품질 관리 방법(data quality control)을 제시한다((Forken and Wichura, 1996; Vicker and Mahrt, 1997; Lee et al., 2004).

SOP. A

난류 관측 자료 의 품질 관리

A-1. 각 변수들의 최댓값과 최솟값 확인 점검

- a) 생태타워에서 10 Hz로 관측된 3차원 바람 성분(u, v, w), 온도(T), $\text{CO}_2(\rho_c)$ 그리고 $\text{H}_2\text{O}(\rho_w)$ 의 변수값들이 해당 지역의 관측값을 반영하여, 다음의 $|u| \leq 20 \text{ m s}^{-1}$, $|v| \leq 20 \text{ m s}^{-1}$, $|w| \leq 5 \text{ m s}^{-1}$, $-40^\circ\text{C} \leq T \leq 50^\circ\text{C}$, $400 \text{ mg m}^{-3} < \rho_c \leq 1000 \text{ mg m}^{-3}$, $0 \text{ g m}^{-3} < \rho_w \leq 40 \text{ g m}^{-3}$ 의 각 최댓값과 최솟값의 범위 안에 들어 있는지를 확인 점검한다(표 1).

표 1. 각 주요 변수들의 최댓값 및 최솟값 허용 범위

변수	최 대	최 소
$u \text{ m s}^{-1}$	20	-20
$v \text{ m s}^{-1}$	20	-20
$w \text{ m s}^{-1}$	5	-5
$T^\circ\text{C}$	50	-40
$\rho_w \text{ g m}^{-3}$	40	0
$\rho_c \text{ mg m}^{-3}$	1,000	400

- b) 상기의 현실적인 허용 범위를 벗어난 값들을 오류 및 이상치로 결정하고 “-9999.9” 또는 “Nan”으로 표시(flag) 처리한다.

5. 표준 운영 절차 Standard operating procedures, SOP

A-2. 튀는(spike) 자료 1차 점검

a) 튀는(spike) 자료 1차 제거를 위하여 각 변수별 최댓값과 최솟값의 허용 범위 내에서 관측된 시계열 자료를 이용하여 30분 평균과 표준편차를 계산한다. 관측된 자료(x_i)와 30분의 평균 자료(\bar{x})의 절대값 차이가 표준편차의 d_f 배 이상으로 큰 경우, 튀는 이상치로 결정하고 “-9999.9” 또는 “Nan”으로 표시(flag) 처리한다.

$$|x_i - \bar{x}| > d_f \sigma \quad (\text{Eq.1})$$

b) 여기서, $d_f (= 3.5 + 0.3r)$ 는 시계열 분석 구간의 필터계수로 반복 회수(r)를 3회까지 증가시키며 점검 수행한다(Schmid et al. 2000).

A-3. 원시자료 등급 분류

a) 시계열의 분석 구간 30분 자료를 적용하는 플렉스 계산 이전에 원시자료의 등급을 결정하는 방법으로 상기의 각 변수들의 최댓값과 최솟값 확인 점검과 튀는 값의 결정 처리 후, 오류 및 이상치 표시(flag)인 “-9999.9” 또는 “Nan”을 제거한 시계열 관측 자료의 개수를 이용하여 등급을 구분한다.

b) 30분의 구간 내에 자료의 수가 18,000개가 있을 경우에 A-등급(100%)으로 “-9999.9” 또는 “Nan”인 자료가 5% 이상일 경우는 C-등급(95% 미만)으로 그 외의 나머지 자료들은 B-등급(95~100% 사이)으로 표시한다.

c) 한편, 각 변수들의 결측 및 누락된 시계열 자료들도 “-9999.9” 또는 “Nan”로 표시(flag) 처리하고 30분 자료수의 등급 계산에 적용시킨다.

A-4. 좌표 변환

a) 에디 공분산 방법을 사용하여 난류 플렉스를 산출하려면 관측하려는 장소가 수평적으로 균질하고 편평하여 이류의 효과 및 측정 변수의 시간에 따른 변화를 무시 할 수 있어야 한다(Baldocchi et al., 1988). 그러나 대부분 산림지역으로 이루어진 우리나라의 경우, 난류 플렉스 관측 지점은 경사진 복잡한 지형 및 비균질적인 지표면으로 피복되어 있으므로 에디 공분산 측정 자료의 좌표계 편향(coordinate tilt) 효과에 대한 적절한 보정이 필요하다.

b) 주로 측기의 좌표계를 기준으로 측정된 평균 측면 바람 성분인 \overline{v} 와 평균 연직 바람 성분인 \overline{w} 가 0이라는 가정 하에 주로 편평한 지표면에서 사용되는 이중 회전(double rotation; McMillen, 1988) 좌표 변환 방법을 사용하기 보다는, 본 매뉴얼에서는 산림의 복잡한 지형으로 인한 기울기 차이로부터 공기 흐름의 변동 특성을 고려하고 장기간 관측된 자료로부터 좌표계 평균 유선면을 찾는 플래너 피트 회전(planar fit rotation; Wilczak et al., 2001)을 선택 적용하고 다음의 아래에 제시한다.

c) 또한, 분석 대상인 에디 공분산 시계열 자료들로부터 비현실적인 회전 좌표 변환 효과를 제거하기 위하여 상기(A-1, A-2, A-3)의 품질 관리 과정을 통하여 선별된 오류 및 이상치 관측 자료들은 플래너 피트 회전 좌표 변환 분석에서 제외시킨다(Lee et al., 2004).

d) 수주 이상의 장기간에 걸쳐 연속 관측된 3차원 각 수평(u), 측면(v), 연직(w) 바람 성분으로부터 평균 유선면을 결정하고 연직 측에 수직이 되도록 회전 좌표 변환을 수행한다. 다음으로 수평면은 평균 유선면과 평행하게 수평 회전 좌표 변환을 재조정한다(Wilczak et al., 2001).

㉠ 관련 좌표 변환 계수는 다음의 다중 선형 회귀(multi-linear regression) 방법을 적용하여 결정한다.

$$\overline{w_0} = A\overline{u_0} + B\overline{v_0} + C \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서, $\overline{u_0}$, $\overline{v_0}$, $\overline{w_0}$ 는 측정된 평균 바람 성분이고 A 와 B 는 연직 바람 성분에 대한 수평 바람 성분들의 관련 계수들이며 C 는 연직 바람 성분의 측기 변위 관련 계수이다.

5. 표준 운영 절차 Standard operating procedures, SOP

㉞ 상기의 b_1 과 b_2 좌표 변환 계수로부터 다음과 같이 계산한다.

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{-A}{\sqrt{A^2+B^2+1}}\right) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\beta = \arctan(B) \quad (\text{Eq. 4})$$

여기에 α (pitch angle)와 β (roll angle)는 평균 유선면의 기울기를 의미한다.

㉟ 상기의 α 와 β 를 적용한 다음의 행렬식에 맞추어 플레너 핏 1차 회전 좌표 변환을 수행한다.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha\sin\beta & -\sin\alpha\cos\beta \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ \sin\alpha & -\cos\alpha\sin\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ (w_0 - C) \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 5})$$

여기에 $\overline{u_1}$ $\overline{v_1}$ $\overline{w_1}$ 는 1차 회전된 바람 성분이며, 측기 변위의 계수인 C 을 이용하여 연직 바람 성분을 보정한다.

㊱ 아래의 행렬식으로부터 플레너 핏 1차 회전된 수평 바람 성분이 유선 좌표계에 나란히 평행하도록 2차 회전 좌표 변환($\overline{v_2} = 0$)을 수행한다. 또한 γ 는 다음의 식을 적용하여 계산한다.

$$\begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\overline{v_1}}{\overline{u_1}}\right) \quad (\text{Eq. 7})$$

여기에 $\overline{u_2}$ $\overline{v_2}$ $\overline{w_2}$ 는 2차 회전으로부터 결정된 바람 성분이며 γ 는 1차 회전 이후, 분석 구간(매 30분)에서 평균된 수평 바람 성분이다. 플레너 핏 2차 회전 좌표 변환은 매 분석 구간 마다 반복적으로 수행한다.

에디 공분산
자료 분석

a) 에디 공분산 방법(eddy covariance method)은 난류에 의해 발생되어지는 에너지와 물질의 연직 플럭스를 장기간에 걸쳐 직접적으로 연속 측정이 가능하다(Baldocchi et al., 1988). 예를 들면 이산화탄소 플럭스(CO_2 flux)는 연직 바람속도의 순간 편차와 CO_2 혼합비의 순간 편차에 대한 공분산과 공기의 밀도와의 곱한 값을 일정시간 평균하여 계산한다(그림 1).

A 3D diagram illustrating a flow field over a canopy. A rectangular volume is defined by dashed lines. A vertical probe is positioned in the center, with a sensor at the top. A coordinate system (x, y, z) is shown at the top left. Velocity vectors are indicated: $\overline{u_C}$ (horizontal, left to right), $\overline{w_C}$ (vertical, up), $\overline{v_C}$ (diagonal, up-right), and \overline{S} (horizontal, right). The canopy is represented by a grid of trees on a flat surface.

5. 표준 운영 절차 Standard operating procedures, SOP

b) 특히, 대기-산림생태계에서 단위 시간과 면적당의 CO₂ flux는 NEE(net ecosystem exchange, 순생태계교환량)으로 표현된다. 이는 타워의 관측 높이 아래에 분포한 식생 군락이 대기와 상호작용하는 CO₂의 순 수지를 의미하며, CO₂가 흡수되는지(흡수원, sink area) 혹은 배출되는지(발생원, source area)를 정량적으로 보여준다(Aubinet et al., 2000; Finnigan et al., 2003). 에디 공분산 타워 관측에서 CO₂의 거동은 보존 법칙에 따라 설명할 수 있다. 이 방정식을 지표면에서 기준 측정 높이까지 적분하면, 해당 구간 전체에서 나타나는 CO₂ flux(F_c)를 정의할 수 있다.

$$F_c(CO_2 \text{ flux}) = \underbrace{\int_0^{Z_r} \frac{\partial \rho_c}{\partial t} dz}_{[I]} + \underbrace{\overline{w' \rho_c'}(Z_r)}_{[II]} + \underbrace{\int_0^{Z_r} \overline{w} \frac{\partial \rho_c}{\partial z} dz}_{[III]} + \underbrace{\int_0^{Z_r} \overline{u} \frac{\partial \rho_c}{\partial x} dz}_{[IV]} \quad (\text{Eq. 8})$$

여기에 Term [I]는 타워의 기준 관측 높이인 Z_r 의 아래에 저장된 CO₂의 저류량; Term [II]는 타워의 기준 관측 높이인 Z_r 에서 난류에 의한 연직 에디 플럭스; w 는 연직 바람속도(m s^{-1}); ρ_c 는 CO₂의 밀도(mg m^{-3}); Term [III]와 [IV]는 각각 수평 이류향과 연직 이류향; \overline{w} 와 \overline{u} 는 각각 평균 연직과 수평 바람속도(m s^{-1}); ‘ $\overline{\quad}$ ’(over bar)는 일정 시간 평균이며 ‘ \prime ’(primes)는 평균으로부터 변동하는 편차를 나타낸다.

c) 관측하고자 하는 지역의 지표면이 수평적으로 균질하고 편평하여 수평 이류향을 무시할 수 있고 관측 변수들의 시간에 따른 변화, 밀도 변동, 흐름의 발산 및 수렴을 또한 무시할 수 있다는 가정이라면 Term [II]의 근거만으로도 에디 공분산에 의한 CO₂ flux를 구할 수 있다.

d) 그러나 직접적으로 저류량 및 이류향 부분을 관측하고 비교·분석할 수 있는 시스템의 부재로 인하여 관련 점봉산 생태타워 대기탄소플럭스 연구의 범위에서 제외한다. 상기의 조건하에 레이놀즈 평균법(Reynolds, 1894)을 적용하면 변동분의 평균은 0로, 평균 연직 바람속도를 $\overline{w} \approx 0$ 가정하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_c = \overline{(\overline{w} + w')(\overline{\rho_c} + \rho_c')} = \overline{w \rho_c} + \overline{w' \rho_c'} = \overline{w' \rho_c'} \quad (\text{Eq. 9})$$

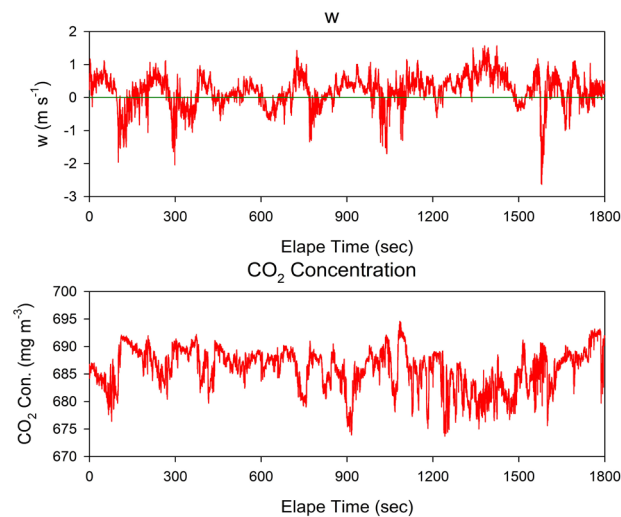
따라서, CO₂ flux (F_c)는 난류에 의한 평균 연직 공분산으로 표현할 수 있다.

B-2. 에디 공분산 자료 처리

- 점봉산 생태타워에 설치된 3차원 초음파풍향·풍속계(CSAT3 또는 WindMaster Pro)와 적외선 기체 분석기(EC150 또는 LI-7200RS)에서 수집된 에디 공분산 자료는 자동 전송모뎀을 통해 서버에 저장된다. 이후 이 원시자료는 품질 관리 과정을 거쳐, 텍스트 형식의 새로운 파일명으로 다시 저장된다.
- 집록된 분석 대상의 각 원시자료를 30분의 단위로 자른다(그림 2).
- 각 관측 자료의 30분 평균값을 계산하고 또한 허용 범위를 초과하는 자료를 다시 제거한다.
- 그리고 30분 동안에 나타나는 기울기 효과를 제거하기 위하여 각 자료에 대해 매 30분 간격으로 1차 선형식($\bar{y} = at + b$)의 경향을 구하고 이를 평균값으로 사용한다(Park and Park 2006).
- 각 자료에서 선형 회귀(linear regression)의 평균값을 뺀 나머지 값을 난류 플럭스 값으로 설정한다.

$$\rho_e'(t) = \rho_e(t) - \overline{\rho_e(t)} \quad (\text{Eq. 10})$$

연직 바람속도(w , m s^{-1})와 CO_2 농도(mg m^{-3})의 30분 시계열 자료



5. 표준 운영 절차 Standard operating procedures, SOP

f) 다음의 에디 공분산법(eddy covariance method)을 이용하여 CO_2 flux(F_c)를 구한다.

$$F_c(CO_2 \text{ flux}) = \overline{w' \rho_c'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w'(t) \rho_c'(t) \quad (\text{Eq. 11})$$

g) 분석 대상 기간의 자료를 30분 단위로 처리한 뒤에는 CO_2 플럭스를 포함한 모든 공분산 관측 자료의 시간 간격, 기록 시각, 배열 상태 등을 꼼꼼히 확인한다. 이어서 시계열에서 나타나는 결측 값을 다시 점검하고, 중복된 기록이나 불필요한 오류, 이상치, 반복 등의 자료는 제거한다.

B-3. 튀는(spike) 자료 2차 점검

a) 평균 30분 단위로 계산된 에디 공분산 자료들 가운데, 튀는(spike) 값들을 제거하기 위한 2차 spike 점검을 수행한다.

b) 주어진 분석 기간 동안에 3개의 연속적인 자료의 차이를 이용하여 Eq. 12와 같은 d_i 를 구한다.

여기서 COV 는 공분산 관측 자료를 의미하며, COV_{i-1} , COV_i , COV_{i+1} , COV_{i+2} , COV_{i+3}는 관측된 공분산의 연속적인 자료 순서이다.

$$d_i = (COV_i - COV_{i-1}) - (COV_{i+1} - COV_i) \quad (\text{Eq. 12})$$

c) 다음의 Eq. 13에서 Md 는 d_i 의 중간 값(median)이며, 각 공분산 값에서 중간 값에 대한 편차의 절댓값으로부터 얻은 중위절대편차(MAD, median of absolute deviation)를 이용하여 튀는(spike) 값을 검사한다(Papale et al., 2006).

$$MAD = \text{median}(|d_i - Md|) \quad (\text{Eq. 13})$$

- d) 다음의 Eq. 14의 조건을 따르지 않는 경우, 의심 표시(flag)로 분류하고 직접적인 최종 수동품질검사(manual quality control)를 통한 오류-이상치의 여부를 판단하고 처리한다.

$$d_i \geq Md - \left(\frac{z \times MAD}{0.6745} \right) \text{ or } d_i \leq Md + \left(\frac{z \times MAD}{0.6745} \right) \quad (\text{Eq. 14})$$

여기서 z 는 임계값을 나타내며, 각 공분산 자료 값들에 대한 시간 편차들의 경향이 $Md + \left(\frac{z \times MAD}{0.6745} \right)$ 보다 크거나, $Md - \left(\frac{z \times MAD}{0.6745} \right)$ 보다 작으면 spike로 간주하여 제거한다.

B-4. WPL (Weeb-Pearman-Leuning) 보정

- a) 낮과 밤 동안에 걸쳐 지표면으로부터 연직 방향으로 열과 수증기가 수송되어질 때 공기의 밀도 차이로 인한 연직 바람 성분이 발생한다. 난류에 의한 연직 공분산외에 이러한 효과로부터 \overline{w} 을 고려한 WPL 보정 방법을 적용하여 CO_2 flux(F_c)를 정량화 한다(Webb et al., 1980; Fuehrer and Friehe, 2002; Tsukamoto and Kondo, 2008).

- b) 상기의 평균 30분 단위로 계산된 에디 공분산 자료들 가운데, 튀는(spike) 값들을 제거하기 위한 2차 spike 점검을 수행한다.

- c) 다음과 같이 수증기와 밀도 변화에 대한 보정을 시행하여 \overline{w} 을 구한다.

$$\overline{w} = (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{w' T'}}{\overline{T}} + \mu \frac{\overline{w' \rho_v'}}{\overline{\rho_a}} \quad (\text{Eq. 15})$$

여기서, $\mu = \frac{M_a}{M_v}$, $\sigma = \frac{\overline{\rho_v}}{\overline{\rho_a}}$ 를 나타내며 M_v 와 M_a 는 각각 수증기와 공기의 몰 질량이고 $\overline{\rho_a}$ 와 $\overline{\rho_v}$ 는 각각 평균 건조 공기밀도와 수증기 밀도이다.

- d) WPL 밀도 섭동 효과를 보정하여 CO_2 flux를 계산한다.

$$F_c(\text{CO}_2 \text{ flux}) = \overline{w' \rho_c'} + \mu \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_a}} \overline{w' \rho_v'} + (1 + \mu\sigma) \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \overline{w' T'} \quad (\text{Eq. 16})$$

5. 표준 운영 절차 Standard operating procedures, SOP

SOP. C

결측 자료 메우기

C-1. 주간 CO₂ flux 결측 자료

- a) 주간 시간 동안의 CO₂ flux 자료의 결측 보정은 식생들에 의한 주요 광합성 작용(light-response cure)을 고려하여 일반적으로 주로 Michaelis-Menten equation을 사용한다(Michaelis-Menten, 1931; Lee et al., 1999).

$$F_c(CO_2 flux) = R_d - \frac{\alpha P_{PPFD}}{\beta + P_{PPFD}} \quad (\text{Eq. 17})$$

- b) 여기서 R_d 는 주간호흡속도, αP_{PPFD} 는 최대광합성속도, β 는 Michaelis-Menten 상수, 그리고 P_{PPFD} 는 광합성에 의해 흡수된 광량자속밀도(PPFD)를 나타낸다.

C-2. 야간 CO₂ flux 결측 자료

- a) 야간 시간 동안의 CO₂ flux는 생태계의 호흡량과 같다. 이를 이용하여 기준이 되는 생태계 호흡량과 온도와의 회귀관계식을 구한다.

- b) 일반적으로 야간 플렉스 결측 보정은 다음의 지수함수 형태의 아레니우스 방정식(Arrhenius equation)을 사용한다(Lloyd and Taylor 1994; Saigusa et al., 2008).

$$R_e(CO_2 flux) = R_{ref} \exp \left(\frac{E_0}{R} \left[\frac{1}{T_k + T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_k + T_a - T_0} \right] \right) \quad (\text{Eq. 18})$$

- c) 여기서 R_e 는 생태계 호흡속도, R_{ref} 는 기준점 온도(T_{ref})에서의 생태계 호흡속도, E_0 는 활성화에너지(J mol⁻¹), R 는 이상기체상수(8.314 J mol⁻¹ K⁻¹), T_k 와 T_0 는 상수들로 각각 273.15 K와 227.13 K, T_{ref} 는 기준점 온도로 283.15 K, 그리고 T_a 는 관측된 온도(K)를 나타낸다. E_0 와 R_{ref} 는 온도와 회귀관계식을 통하여 구한다.

- d) 상기 위에서 제시한 주간 및 야간의 CO₂ flux 결측 자료 보정 및 메우기를 수행함에 있어서 부가적으로 해당 관측지 생태계의 식생 생장 단계와 생물계절학적 변화 그리고 환경적 변화의 특성들을 반영시킨 관련 자료 분석 주기를 효율적으로 선택하고 조정해야만 한다.

- e) 궁극적으로 주·야간의 CO₂ flux 자료 보정 방법의 적용에 따른 전체적인 시계열의 플렉스 자료들을 활용하여 관측 대상 생태계의 일변화 및 계절변화를 구하고 정량적인 연간 NEE, GPP, Re를 산출한다.

참고 문헌

- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A. S., Martin, P. H., Berbigier, P., Bernhofer, C., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grunwald, T., Morgenstem, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R. and Vesala, T., 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 30, 113-175.
- Baldocchi, D., Hicks, B. and Meyers, T., 1988. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometrological methods. *Ecology*, 69, 1331-1340.
- Belcher, S. E., Harman, I. N. and Finnigan, J. J., 2012. The wind in the willows: flows in forest canopies in complex terrain. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 44, 479-504.
- Finnigan, J. J., Clement, R., Malhi, Y., Leuning, R. and Cleugh, H. A., 2003. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part 1: averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorology*, 107, 1-48.
- Forken, T. and Wichura, B., 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78, 83-105.
- Fuehrer, P. L. and Fricke, C. A., 2002. Flux corrections revisited. *Boundary-Layer Meteorology*, 102, 415-457.
- Lee, X., Fuentes, J. D., Staebler, R. M. and Neumann, H. H., 1999. Long-term observation of the atmosphere exchange of CO₂ with a temperate deciduous forest in southern Ontario, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 104(D13), 15,957-15,984.
- Lee, X., Massman, W. and Law, B., 2004. *Handbook of Micrometeorology*. Kluwer Academic Publishers.
- Lloyd, J. and Taylor, J. A., 1994. On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, 8, 315-323.
- McMillen, R. T., 1988. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 43, 231-245.
- Michaelis, L. and Menten, M. L., 1913. Die Kinetik der invertinwirkung. *Biochemische Zeitschrift*, 49, 333.

참고 문헌

- Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T., Yakir, D., 2006. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 3, 571-583.
- Park, M. S., and Park, S. U., 2006. Effects of topographical slope angle and atmospheric stratification on the surface-layer turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 118(3), 613-633.
- Reynolds, O., 1894. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 186, 123-161.
- Saigusa, N., Yamamoto, S., Hirata R., Ohtani, Y., Ide, R., Asanuma, J., Gamo, M., Hirano, T., Kondo, H., Kosugi, Y., Li, S.-G., Nakai, Y., Takagi, K., Tani, M. and Wang, H., 2008. Temporal and spatial variations in the seasonal patterns of CO₂ flux in boreal , temperate, and tropical forests in East Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 700-713.
- Schmid, H. P., Grimmer, C. S. B., Cropley, F., Offerle, B. and Su, H.-H., 2000. Measurements of CO₂ and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the mid-western United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 357-374.
- Tsukamoto, O. and Kondo, F., 2008. Experimental validation of the Webb correction for CO₂ flux with an open-path gas analyzer. 18th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Stockholm University.
- Vicker, D. and Mahrt, L., 1997. Quality control and flux sampling problem for tower and aircraft data. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 14, 512-526.
- Webb, E. K., Paerman, G. I. and Leuning, R., 1980. Correction of flux measurements density effects due to heat and water vapor transfer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 106, 85-100.
- Wilczak, j. M., Steven, P. O. and Steven, A. S., 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 99, 127-150.

부록

Appendix

부록 1. Appendix	32
1-1. 에디공분산 측정시스템	32
1-2. 대기가스프로파일측정시스템	33
부록 2. 장비 리스트	34
부록 3. 안전 관련 서식	36
3-1. 안전 점검 체크리스트	36
3-2. 일일 안전 확인 일지	37
3-3. 안전 사고 조사표	38

부록 1.

1-1. 에디공분산 측정시스템

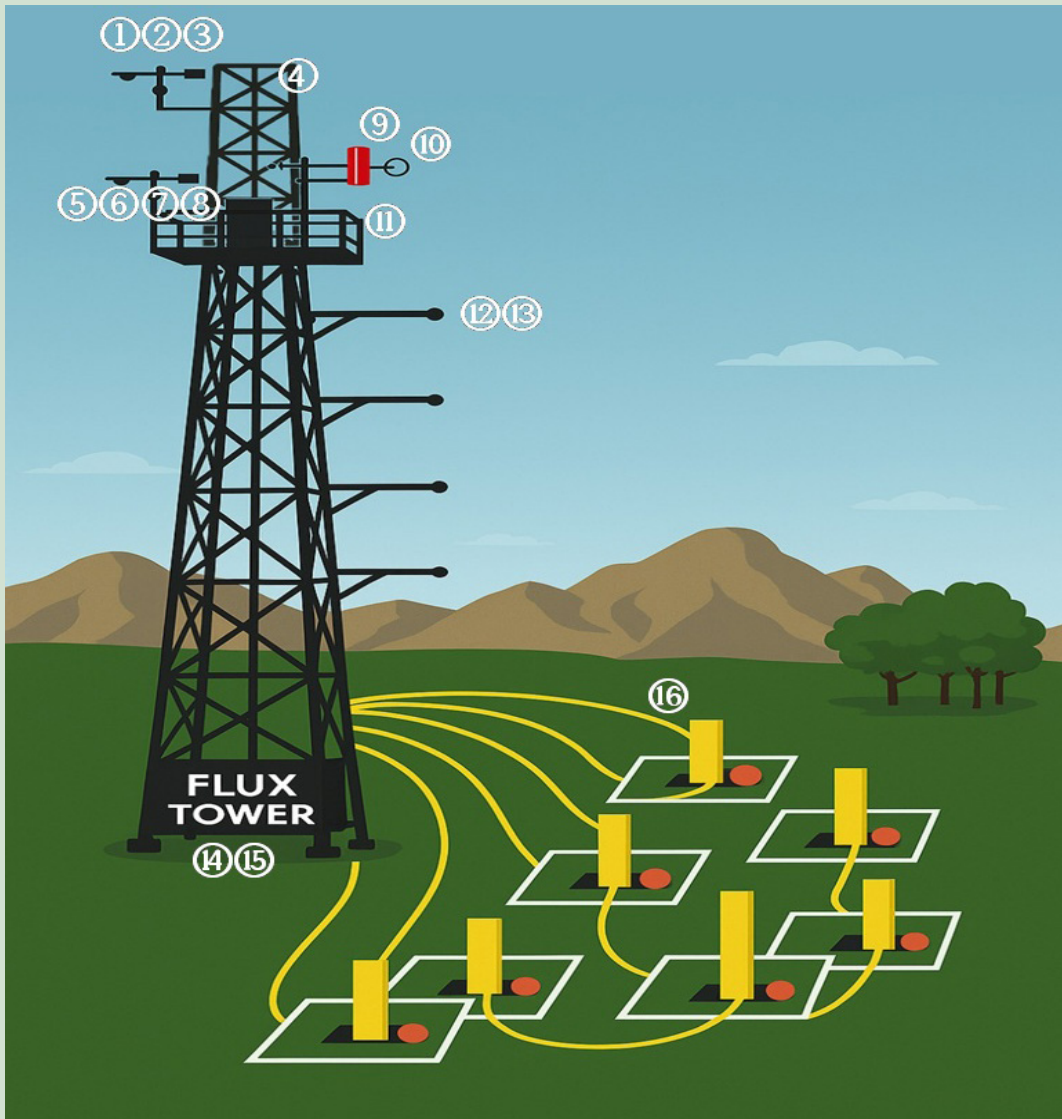
에디공분산 측정시스템		성능 및 규격
Enclosed Path CO ₂ /H ₂ O 기체분석기	기본 사양	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ 측정범위: 0 to 1000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ 혹은 그 이상 - CO₂ 측정정확도: 1% 이내 - Zero 드리프트: ± 0.3 ppm (maximum) 이내 - CO₂ Gain 드리프트: $\pm 0.1\%$ (maximum) 이내 - H₂O 측정범위: 0 to 60 mmol mol⁻¹ 혹은 그 이상 - H₂O 측정정확도: 2% 이내 - Zero 드리프트: ± 0.05 mmol mol⁻¹(maximum) 이내 - H₂O Gain 드리프트: $\pm 0.30\%$ (maximum) 이내
	Flow Module	<ul style="list-style-type: none"> - 유량: 15 LPM(Max) 혹은 그 이상 - 동작전압범위: 10.5 to 30 VDC - 소비전력: 16W (nominal) 이내
	일반사양	<ul style="list-style-type: none"> - Gas 샘플링 주기: 20 Hz 이상 - 데이터 저장 메모리: 16GB 이상의 분리형 USB Device 혹은 동등 장치 - 통신방식: 이더넷, SDM, RS-232, 통신이 가능하여야 함 - 동작온도범위 : -25 to 50 °C - 동작전압범위 : 10.5 to 16 VDC - 소비전력: 12 W (nominal) 이내
	Biomet센서	<ul style="list-style-type: none"> - 대기온습도(HMP155) 및 레디에이션 실드, 쿼텟센서(LI-190R), 강우량계 (TE525M), 토양수분/지온센서(3ea), 지중열플럭스(3ea), 순복사계(CNR4), 풍향풍속계(O5103), 데이터로거, 데이터로거 함체
실시간 EC 자료처리 디바이스		<ul style="list-style-type: none"> - 개요: EC 시스템 데이터 분석을 위한 Field 설치형 스마트 Device (하드웨어 및 GPS 포함) - 분석 가능한 EC 네트워크: FLUXNET, ICOS, AmeriFlux, Fluxnet, OzFlux, and ChinaFlux - 데이터 입력포트: RS-232/422/485 serial ports 3개 이상 - 네트워크 통신포트: Ethernet (TCP/IP) - 데이터저장 장치: 16GB USB 이상 - 동작온도범위: -25 to 50 °C 혹은 그 이상 - 동작전압범위: 10 to 30 VDC - 소비전력: 1.5W (typical) 이내 - GPS : 정확도 <15 m; 95% (typical); WAAS <3 m; 95% (typical)
3차원 Sonic		<ul style="list-style-type: none"> - 센서타입: 3차원 풍향풍속계 <ul style="list-style-type: none"> • 풍속범위: 0-65 m/s 이상 • 정확도: <1.5% RMS @12 m/s 이내 - 풍향범위: 0 to 359° 이상 <ul style="list-style-type: none"> • 정확도: 2° @12 m/s 이내 - 동작온도범위: -40 to +70 °C - 샘플링속도: 32Hz 이상 - 측정단위: m/s, mph, kph, knots, ft/min - 형식: UVW, Polar, NMEA - 통신방식: RS232, 422, 485 - 동작전압범위: 9 to 30 VDC - 전원 및 Digital(RS-485) 신호 케이블 포함

1-2. 대기가스프로파일측정시스템

대기가스프로파일측정시스템	성능 및 규격
대기중 CO ₂ /H ₂ O 기체분석기	<ul style="list-style-type: none"> - 측정 소자: 비 분산 적외선 (NDIR) - CO₂ 측정범위: 0~20,000 ppm - CO₂ 측정 정확도: < 1.5% of reading - H₂O 측정 범위 0~60 mmol/mol - H₂O 측정 정확도: < 1.5% of reading - 유량: 0.75 LPM - 측정 속도: 1Hz - 작동 온도 범위: -20 ~ 45 °C - 상대 습도 범위: 0 ~ 95 % RH
8포트 채널확장 시스템	<ul style="list-style-type: none"> - 확장가능 채널수: 8채널 - 방수등급: IEC IP55 standard - 동작온도범위: -20 to 45 °C - 동작습도범위: 0 to 95% RH, non-condensing - 데이터저장 메모리: 8 GB total non-volatile - GPS: 정확도 2.5 m CEP - 챔버유량: ~2 to 3 lpm - 펌프타입: 다이어프램 - 대기압력센서: <ul style="list-style-type: none"> 측정범위: 20 to 110 kPa 센서 오차범위: ±0.4 kPa from 50 to 110 kPa 분해능: 0.006 kPa - 통신포트: 이더넷, Wi-Fi, USB - 와이파이: 2.4 GHz, 802.11 a/b/g/n/ac
대기가스 프로파일 시스템	<ul style="list-style-type: none"> - 버퍼 인테이크 Kit: <ul style="list-style-type: none"> 버퍼볼륨: 3L Rain Cap 및 필터, 튜빙, 커플러, 마운팅 브라켓 일체 포함 - 플라스크 샘플링 키트 - 온도프로파일센서

부록 2. 장비 리스트 (그림/사진)

점봉산 연구지 내 설치 장비 내역





① 풍향 풍속계



② 대기 온·습도



③ 레디에이션 실드



④ 피노캠



⑤ Smartflux 2 System



⑥ Power Distribution Box



⑦ 데이터로거



⑧ 데이터로거 함체



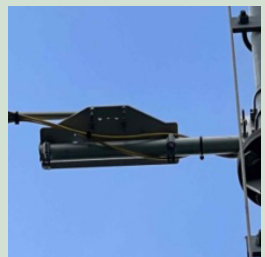
⑨ 기체분석기



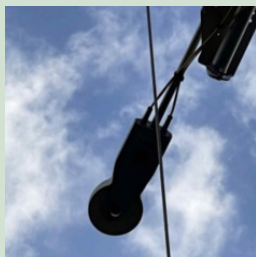
⑩ 3차원 Sonic



⑪ 강우량계



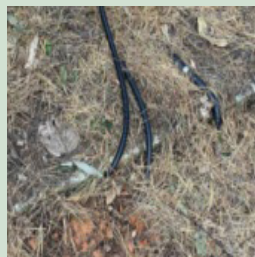
⑫ 쿼텨미터



⑬ 순복사계



⑭ 토양수분·지온센서



⑮ 지중열 플럭스



⑯ 토양호흡측정기

부록 3. 안전 관련 서식

3-1. 안전 점검 체크리스트

안전 점검 체크리스트

부서(팀)명 : 20 년 월 일 출장자 : (인)

구 분	점검 항목	해당여부	확 인	비 고
일반사항	조사지역 현황 및 업무에 대한 안전교육 실시 확인			
	조사 전 출장자 건강상태 확인			
	차량 운행 전 차량상태 확인			
	차량 이동시 규정속도 준수, 위험지역 정차금지			
	단독조사 수행 금지(최소 2인 1조)			
안전보호구 구비	조사 전 필요한 안전장비 준비 상태			
	휴대폰 배터리 확인 및 물, 간식 준비			
	방한, 고온 대비 피복 및 보조기구 준비			
	비상 상황 대비 구급약품 준비			
기상 여건	조사지역 일기예보, 일몰시간 등 확인			
조사 시 안전수칙	위험지역 접근 금지 및 위험요소에 대한 안전교육			
	야외 활동 시 야생생물 주의사항(조우, 교상, 독성 생물 등)에 대한 안전교육			
	독초와 버섯 등 축수 및 섭취 금지			
	조사활동 중 건강 이상 시 조사 중단 후 적절한 조치			
추가조치	실시 부서 필요 시 추가 항목 작성 가능			

※ 점검 항목은 각 연구사업 성격에 적합한 내용으로 변경 가능

3-2. 일일 안전확인 일지

일일 안전확인 일지

장소 :

20 년 월 일

시간: : ~ :

팀(부서)명	출장 대표자	총 인원	참여 인원

구 분	점검 항목	해당여부	확 인	비 고			
일반사항	조사 전 출장자 건강상태 확인						
	차량 이동시 규정 속도 준수, 위험지역 정차금지						
	단독조사 수행 금지(최소 2인 1조)						
안전보호구 구비	조사 시 필요한 안전장비 준비 및 착용						
	휴대폰 배터리 확인 및 물, 간식 등 수량 확인						
	체온 유지를 위한 피복 및 보조기구 확인						
	비상 상황 대비 구급약품 확인						
기상여건	조사지역 일기예보, 일몰시간 등 확인						
조사 시 안전수칙	위험 지역 및 위험물 표지 장소 출입금지						
	위험발생 예상 시 조사활동 중지 후 안전한 장소 이동						
	독성생물 피해발생 시 신속하게 응급치료 후 병원진료						
	동물교상이 발생하지 않도록 과도한 접근 지양						
	독초와 버섯 등을 채취 및 섭취 금지						
	야생동물 조우 시 자극을 자제하고 상황을 주시하며 안전하게 회피						
	피부에 독이 있는 양서류와 피부 접촉 시 비눗물로 세척 후 병원 진료						
	추가조치						
참 석 자 서 명							
성 명	서 명	성 명	서 명	성 명	서 명	성 명	서 명

※ 점검 항목은 각 연구사업 성격에 적합한 내용으로 변경 가능

부록 3. 안전 관련 서식

3-3. 안전 사고 조사표<개정 2024. 10. 11.>

■ 연구실 안전환경 조성에 관한 법률 시행규칙 [별지 제6호서식]

연구실사고 조사표

※ 뒤쪽의 작성방법을 읽고 작성해 주시기 바라며, []에는 해당하는 곳에 √ 표시를 합니다. (앞쪽)

기관명				기관 유형		[] 대학 [] 연구기관 [] 기업부설(연) [] 그 밖의 기관							
주소													
사고 발생 원 인 및 발생 경 위 ¹⁾	사고일시	년 월 일 시											
	사고 장소	학과(부서)명: 연구실명: (연구 분야 :)											
	연구활동 내용	연구활동 수행 인원, 취급 물질·기계·설비, 수행 중이던 연구활동의 개요 등 기록											
	사고 발생 당 시 상황	불안정한 연구실 환경, 사고자나 동료 연구자의 불안정한 행동 등 기록											
피해 현황	인적 피해	성명	성별	출생 연도	신분 ²⁾	상해 부위	상해 유형 ³⁾	상해· 질 병 코드 ⁴⁾	치료 (예상) 기간	상해· 질병 완치 여부	후유 장해 여부 (1~ 14급)	보상 여부	보상 금액
		①											
		②											
		③											
		④											
	⑤												
※ 인적 피해가 5명을 초과하는 경우, '인적 피해 현황'부분만 별도로 추가 작성해 주시기 바랍니다.													
물적 피해	피해물품				피해금액		약 백만원						
조치 현황 및 향후 계획		보고 시점까지 내부보고 등 조치 현황 및 향후 계획(치료 및 복구 등) 기록											
재발 방지 대책		(상세계획은 별첨)											
연구실 안전관리 현황	점검·진단		[] 실시(실시일:) [] 미실시(사유:)										
	보험가입		[] 가입(가입일:) [] 미가입(사유:)										
	안전교육		[] 실시(실시일:) [] 미실시(사유:)										
별첨	재발 방지 대책 상세 계획 사고장소 현장 및 피해 사진 등												
관계자 확인 (년 월 일)		연구주체의 장 (서명 또는 인)											
		연구실안전환경관리자 (서명 또는 인)											
		연구실책임자 (서명 또는 인)											

210mm×297mm[백상지 80g/㎡]

작성 방법

1) 사고발생원인 및 발생경위

※ 연구실사고 원인의 상세한 분석이 가능하도록 사고일시[년, 월, 일, 시(24시 기준)], 사고발생 장소, 사고 발생 당시 수행 중이었던 연구활동 내용(연구활동 수행인원, 취급 물질·기계·설비, 수행 중이었던 연구활동의 개요 등), 사고 발생 당시 상황[불안전한 연구실 환경(기기 노후, 안전장치·설비 미설치 등), 사고자나 동료 연구자의 불안정한 행동(예시: 보호구 미착용, 넘어짐 등) 등]을 상세히 기재할 것

2) 신분은 아래의 항목을 참고하여 작성하여야 한다.

※ 기관유형이 “대학”인 경우에는 ① 교수, ② 연구원, ③ 대학원생(석·박사), ④ 대학생(학사, 전문학사)에 해당하면 그 명칭을 기재하고, 그 밖의 신분을 기입할 경우에는 그 상세 명칭을 기재할 것
 ※ 기관유형이 “연구기관”인 경우에는 ① 연구자(근로자 신분을 지닌 자), ② 학생연구원에 해당하면 그 명칭을 기재하고, 그 밖의 신분을 기입할 경우에는 그 상세 명칭을 기재할 것
 ※ 기관유형이 “기업부설연구소”인 경우에는 「기초연구진흥 및 기술개발지원에 관한 법률」에 따라 한국산업기술평화협회(KOITA)에 신고된 신고서를 기준으로 ① 전담연구원, ② 연구보조원, ③ 학생연구원에 해당하면 그 명칭을 기재하고, 그 밖의 신분을 기입할 경우에는 그 상세 명칭을 기재할 것

3) 상해유형은 아래의 항목을 참고하여 작성하여야 한다.

- ① 골절 : 뼈가 부러진 상태
- ② 탈구 : 뼈마디가 빠져 어긋난 상태
- ③ 찰과상 : 스치거나 문질러서 살갗이 벗겨진 상처
- ④ 찢림 : 칼, 주사기 등에 찢린 상처
- ⑤ 좌상 : 받치거나 넘어지거나 하여 피부 표면에는 손상이 없으나 피하조직이나 내장이 손상된 상태
- ⑥ 베임 : 칼 따위의 날카로운 것에 베인 상처
- ⑦ 이물 : 체외에서 체내로 들어오거나 또는 체내에 발생하여 조직과 익숙해지지 않은 물질이 체내에 있는 상태
- ⑧ 난청 : 청각기관의 장애로 청력이 약해지거나 들을 수 없는 상태
- ⑨ 화상 : 불이나 뜨거운 열에 데어서 상함 또는 그 상처
- ⑩ 동상 : 심한 추위로 피부가 얼어서 상함 또는 그 상처
- ⑪ 전기상 : 감전이나 전기 스파크 등에 의한 상함 또는 그 상처
- ⑫ 부식 : 알칼리류, 산류, 금속 염류 따위의 부식독에 의하여 신체에 손상이 일어난 상태
- ⑬ 중독 : 음식이나 내용·외용 약물 및 유해물질의 독성으로 인해 신체가 기능장애를 일으키는 상태
- ⑭ 질식 : 생체 또는 그 조직에서 갖가지 이유로 산소의 결핍, 이산화탄소의 과잉으로 일어나는 상태
- ⑮ 감염 : 병원체가 몸 안에 들어가 증식하는 상태
- ⑯ 물림 : 짐승, 독사 등에 물려 상처를 입음 또는 그 상처
- ⑰ 굶핍 : 동물에 굶혀서 생긴 상처
- ⑱ 염좌 : 인대 등이 늘어나거나 부분적으로 찢어져 생긴 손상
- ⑲ 절단 : 예리한 도구 등으로 인하여 잘린 상처
- ⑳ 그 밖의 유형 : ① ~ ⑲ 항목으로 분류를 할 수 없을 경우에는 그 상해의 명칭을 기재할 것

4) 상해·질병 코드는 진단서 상에 표기된 상해·질병 코드(질병분류기호 등)를 기재하여야 한다.

210mm×297mm[백상지 80g/㎡]



