

NIE Issue Brief

NIE IB 17-05(통권 8호) 2017년 8월 31일 | 발행처 : 국립생태원 | 발행인 : 이희철 | www.nie.re.kr

강과 바다를 연결하는 생태학 지속가능한 댐 하류 생태계 복원을 위한 노력

저자 국립생태원 생태기반연구실 옥기영

1. 연어가 전하는 생태학의 메시지

2017년 현재 국립생태원 에코리움 영상관에서는 연어의 일대기를 다룬 애니메이션 ‘엄마숲’이 상영중에 있다. 이 영화가 인상적인 이유는 연어가 바다에서 강으로 돌아오면서 만나는 상어와 물개, 독수리, 회색곰과 같은 천적을 차례대로 이겨내는 기존의 스펙타클한 모험이야기 뿐만 아니라, ‘어미 연어가 죽으면 숲이 되어 새끼 연어의 탄생으로 다시 돌아온다’는 ‘생태계 물질순환’과, 대륙으로부터 수천킬로미터 떨어진 태평양의 바다와 육지의 숲이 생명이라는 에너지로 서로 긴밀하게 연결되어 있다는 ‘생태계 연결성’이라는 생태학의 메시지를 전달하고 있기 때문이다(그림 1).

이러한 엄마숲의 이야기에 숨어있는 생태계 물질순환과 생태계 연결성을 과학적으로 설명해보자. 나의 박사후과정 연구대상지였던 미 서부 캘리포니아의 트리니티강(Trinity River)에는 태평양으로부터 세 종류의 연어가 돌아온다. 현지 인디언 말로 왕을 가리키는 치누크연어(chinook salmon, *Onchorhynchus tshawytscha*), 과란색을 띠는 코호연어(coho salmon, *O. kisutch*) 그리고 같은 속에 속하지만 송어로 분류되는 스틸헤드(steelhead trout, *O. mykiss*)는 알래스카 바다에서 이동을 시작하여 캘리포니아 서쪽해안까



〈그림 1〉 국립생태원에서 상영중인 애니메이션 엄마숲

지 도착하여 강하구에 대기하고 있다가 강과 바다의 수온이 맞춰지는 시그널에 따라 봄(spring runs)과 가을(fall runs)철에 무리지어 강 상류를 향하여 산란을 위한 여정을 다시 시작한다. 이러한 연어 개체군의 대규모 이동은 물질순환의 측면에서 보면, 길게는 무려 5년동안 3,000km 떨어진 먼 바다에서 몸에 저장했던 풍부한 영양소를 육지로 옮기는 과정이다. 안정동위원소라는 바이오마커를 이용하여 물질의 발생기원을 분석한 결과, 1년생 미만의 새끼연어의 살에서는 무려 40%의

해양탄소와 31%의 해양질소가 발견되었다¹⁾. 산란처 인근에 자라는 나무와 덩굴에도 22~24%에 해당하는 해양질소가 포함되어 있는 것이 보고되었다²⁾. 생태계 물질순환으로 설명해보면, 어미연어가 죽어서 배출한 바다의 풍부한 유기물을 미생물이 분해하여 무기탄소와 무기질소로 변환시켜 강에 내보낸다. 그러면, 이를 기반으로 짧은 기간동안 부착조류가 물속에서 일차생산을 증가시켜 척박한 환경에서 새끼 연어에게 먹이자원을 제공한다. 그리고 인근 육상 식물 또한 이러한 어미연어에서 비롯한 무기질소를 이용하여 성장하고 있다는 것을 보여준다.

이와 같이, 자연계의 생태계 시스템은 개별적으로 독립되어 유지되는 것이 아니라, 주변의 이웃한 또는 멀리 떨어진 생태계와 공간적인 경계를 넘어서 물질이 이동하고 있고, 먹이사슬을 따라 에너지를 주고 받는 등 긴밀하게 연결되어 있다. 특히, 강에서 부화한 새끼연어는 아직 바다를 본 적도 없지만, 탄소 물질을 기준으로 보면 바다가 40%에 해당하는 에너지를 공급하여 강과 바다가 함께 생명체를 부양하고 있는 것이다. 생태학에서 이러한 생태계 연결성을 연구하는 것은 단위 생태계에서는 개별적으로 이해하기 어려운 물질이동과 에너지 흐름을 유역 또는 지구라는 전체론적 관점에서 생태계를 바라볼 수 있게 한다.

2. 댐과 생태계 연결성

오늘날 전 세계적으로 생태계 연결성에 가장 중요하게 영향을 미치고 있는 환경요인 중의 하나는 강과 하천을 가로막고 있는 댐과 대형보, 하구둑과 같은 대형 수리구조물이라고 할 수 있다.

특히 댐은 그동안 경제개발과 함께 산

업화와 도시화가 진행되면서 인구증가에 따른 다양한 수자원의 수요를 충족해 주었고, 홍수로부터 인명과 재산을 보호하였으며, 수력발전을 통하여 전기에너지를 제공해 왔다. 그렇지만, 이러한 댐의 경제·사회적 기여에도 불구하고, 상류에서 들어오는 물을 인공호수에 저장하면서, 강에서 바다까지 이동하는 물의 흐름(water flow), 그리고 자갈과 모래와 같은 유사의 이동(sediment transport)이 양적으로 차단되거나 감소한다. 또한 물의 체류시간이 증가하면서 인공저수지 내에서 생산된 식물플랑크톤이 다시 하류로 방류되면서, 강물에 포함된 유기물의 조성이 달라지게 된다. 그리고 이를 먹이원으로 하는 저서성대형무척추동물과 어류군집까지 영향을 미치게 된다.

이와 같은 댐에 의한 물질이동의 교란과 단절은 수질문제와 같이 시설물 운영 직후 즉시적으로 그 영향이 나타날 수 있다. 그렇지만, 생태계 전반에 걸쳐 나타나는 변화는 댐이 건설되고 수 십년간 물과 유사, 유기물 이동의 감소와 단절이 장기적으로 누적되면서 발생한다.

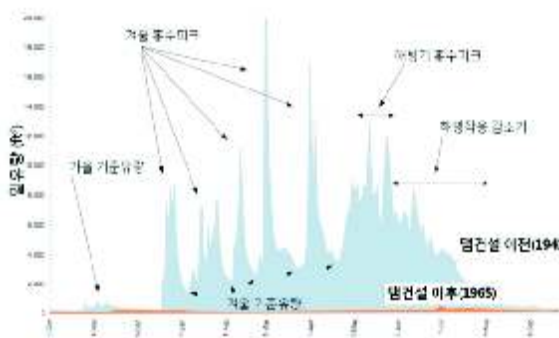
2.1 유량 변화에 따른 생태계 영향

댐이 저수지에 물을 저장하면서 발생하는 가장 중요한 변화는 시간적으로 댐 건설 전·후, 그리고 공간적으로 상·하류간에 유역의 수문학적 변화가 발생하는 것이다. 다목적 댐을 예로 들면, 상수원수 또는 농업용수 등으로 물을 취수하는 만큼 하류로 방류되는 유량의 절대량은 감소하게 되어 평수위가 낮아진다. 그리고 홍수기에는 치수효과로 인하여 홍수위의 빈도와 크기가 줄어들고, 갈수기에도 발전을 위해 일정유량의 방류가 지속되면서 갈수위가 높아지게 된다. 따라서 결과적으로 연중 유량의 변화폭이 감소하고 균

1) Bilby RE, Fransen BR, Bisson PA. 1996. Incorporation of nitrogen and carbon from spawning coho salmon into the trophic system of small streams: evidence from stable isotopes. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 53: 164-173.
2) Helfield JM, Naiman RJ. 2001. Effects of salmon-derived nitrogen on riparian forest growth and implications for stream productivity. Ecology 82: 2403-2409.

일화된다.

그림 2는 미국 캘리포니아의 트리니티강의 댐 건설 전후 일년간의 유량그래프를 비교한 것이다. 댐 건설전의 자연유량에 비해 댐 건설후에는 유량의 절대값이 큰폭으로 감소하고 균일화되는 것을 볼 수 있다³⁾. 이와 같은 유량의 감소와 균일화로 인하여, 댐 건설 전 38,600여 마리였던 치녹연어는 건설직후 12,550로 연어 회귀율이 67% 감소하였고, 코호연어는 이 보다 더 심각해서 96% 감소율을 기록하여 절멸의 위기를 맞게 되었다.



〈그림 2〉 미국 트리니티댐 건설 전후의 트리니티강 수문그래프 비교 (자료출처, TRRP보고서)

2.2 유사이동 단절에 따른 생태계 영향

댐에 의한 유사차단의 문제는 저수지에서 강, 바다까지 그 영향이 지속적으로 이어지기 때문에, 보다 광범위하고 장기적인 환경문제를 가져오게 된다. 댐과 저수지에서 자갈과 모래와 같은 큰 입자의 소류사(bed load)가 물리적으로 퇴적되면, 하류 하천에서는 여울과 소와 같은 서식처 지형을 만들 수 있는 하상재료가 부족해지고, 실트와 점토 크기와 같은 워시로드(wash load)라고 부르는 가는 입자만이 이동하게 된다. 이 워시로드는 모래와 자갈사이의 틈새를 매우면서 오히려 물과 산소의 이동을 방해하여 강바닥까지

의 산소확산이 줄어들게 되어 생물의 이차피해를 가져오게 된다. 다른 한편으로는 댐과 저수지가 소류사의 이동을 거의 100% 차단하게 되면, 저수지에 퇴사가 진행되어 댐의 유효저수용량이 감소된다. 댐하류역에서는 상대적으로 유사가 부족해지면서 제방과 강바닥을 침식시켜 유사 농도를 맞추려고 하는데, 미국 캘리포니아 버클리대학의 콘돌프 교수는 ‘hungry water’⁴⁾ 라는 표현으로 강에서 바다까지 광범위하게 나타나는 하상저하와 여울과 소의 소실, 해안선 후퇴와 같은 지형적인 변화를 과학적으로 설명하였다.

실제로 일본 교토시의 우지강(Uji River)에서는 상류에 아마가세댐이 건설된 이후,



〈그림 3〉 댐에 따른 하류 하천지형 변화 (일본 교토소재 우지강과 키즈강) (2007년 옥기영 촬영)

3) USDOl, 2000, Record of Decision: Trinity River Mainstem Fishery Restoration, Final Environmental Impact Statement/ Environmental Impact Report, US Department of the Interior, Washington DC.

4) Kondolf GM, 1997, Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels, Environmental Management 21, 533-552.

그림3에서 보는 바와 같이 여울과 소가 사라지고, 강바닥 하상이 6m 이상 낮아졌다. 일본 시즈오카현의 텐류강(Tenryu River)에서는 1930년 이래 30년간 본류에 6개의 댐이 연속적으로 건설된 이후, 강으로부터 바다로 공급되는 모래의 양이 줄어들게 되었다. 이로 인해 모래사장의 면적은 줄어들고, 해안선이 점점 후퇴하고 있다⁵⁾. 또한, 홍수에 의한 자연적인 교란이 감소하면서, 하천으로 육상식생이 침입하여 하천변의 둔치공간이 육지로 변하고 있다.

이와 같이 일련의 지형적인 변화로 댐 하류 생태계에서는 서식처 다양성이 현저하게 감소하면서, 결국에는 다양한 생물을 품을 수 없게 되어 생물종다양성이 감소한다⁶⁾. 연어와 같은 회귀성어류의 경우에는 산란, 부화, 치어성장 등에 필요한 복잡한 서식처가 사라지면서 연어 회귀율이 급감하는 원인이 된다⁷⁾. 수질적인 측면에서도 하천의 자정능력이 감소한다고 보고되고 있다⁸⁾.

2.3 유기물 조성 변화

댐하류 하천에서 유기물 조성의 급격한 변화의 원인은 저수지에서 방류되는 식물 플랑크톤이라고 할 수 있다. 일반적으로 댐의 위치는 급격한 홍수를 효과적으로 제어하기 위하여 유역의 상류에 자리하고 있다. 이러한 계류하천에 사는 수서곤충은 주로 주변의 산림에서 들어온 낙엽과 수심이 얇은 여울에서 충분한 햇빛을 받으며 생산된 신선한 부착조류를 먹고사는

썰어먹는무리(shredders)와 갹아먹는무리(grazers)가 많다. 그렇지만 댐 하류에서 먹이자원의 조성을 분석한 결과 식물 플랑크톤이 무려 50-70%를 차지하는 등 낙엽이나 부착조류의 비율이 상대적으로 매우 작았으며⁹⁾, 수서곤충 또한 플랑크톤을 먹이원으로 하는 걸러먹는무리(filterers)가 우점하였다. 이와 같이, 저서성대형무척추동물의 종조성 또한 연쇄적으로 변하고 있으며, 결과적으로 종다양성도 감소하고 있다¹⁰⁾.

3. 생태계 연결성 복원을 위한 노력

댐 건설 후 나타나는 이러한 일련의 생태계 문제는 비단 일부 지역과 나라에 한정되지 않는다. 세계댐위원회(The world commission of dams)가 발표했듯이 선진국과 개발도상국을 구분하지 않고 댐을 보유하고 있는 국가에서는 이미 공통적으로 인지하고 있다¹¹⁾.

북미와 일본, 유럽에서는 이미 2000년대 이후부터 보다 근본적인 해결책을 모색하기 위하여, 댐 상하류 간의 물질이동의 연결성을 개선하거나, 댐 건설이전 수준으로 회복시켜주기 위한 연구기술을 지속적으로 발전시켜왔다. 특히, 댐 건설후 감소된 홍수에너지와 발생빈도를 회복하기 위하여 생태유량(ecological flow) 설정과, 유사의 이동과 유사량의 밸런스를 회복하기 위하여 인공적으로 소류사를 하천에 공급하는 유사환원(sediment replenishment)은 현재 전세계적으로 가장 활발하게 연구되는 하천생태계 재자연

5) Sumi T, Fujita M. 2009. Current status and future challenges of sediment replenishment to downstream river, Japanese journal of river techniques 15: 459-464.

6) Power ME, Dietrich WE, Finlay JC. 1996. Dams and downstream aquatic biodiversity: potential food web consequences of hydrologic and geomorphic change. Environmental Management 20: 887-895.

7) Kondolf GM, Wolman MG. 1993. The sizes of salmonid spawning gravels. Water Resources Research 29: 2275-2285.

8) Ock G, Takemon Y. 2010. Estimation of transport distance of fine particulate organic matter in relation to channel morphology in tailwaters of the Lake Biwa and reservoir dams. Landscape and ecological engineering 6: 161-169.

9) Ock G, Takemon Y. 2014. Effect of reservoir-derived plankton released from dams on particulate organic matter composition in a tailwater river (Uji River, Japan): source partitioning using stable isotopes of carbon and nitrogen. Ecohydrology 7: 1172-1186.

10) Richardson JS, Mackay RJ. 1991. Lake outlets and the distribution of filter feeders: an assessment of hypotheses. Oikos 62: 370-380.

11) World Commission on Dams. 2000. Dams and Development: A New Framework for Decision-making, Earthscan.

화 복원기술이라고 할 수 있다.

3.1 생태유량 설정

생태유량이란 기존 수질유지 또는 용수 공급 목적으로 가뭄기에 일정량의 하천유지유량을 보전해주는 ‘환경유량’ 개념에서 보다 발전한 것으로, 연어와 같은 회유성 어류의 생활사를 반영하여 자연유량의 크기와 빈도를 재설정하는 등 생태계의 보전과 복원을 목적으로 한다.

미국 캘리포니아의 북서부에 위치한 트리니티강에서는 1962년 상류역에 트리니티댐이 건설된 후, 하류로 공급되는 유량과 유사량이 급감하였다. 그 결과, 댐 하류에서는 앞서 설명했던 전형적인 지형변화가 발생하여, 하상저하와 육상 식생이 확산되었다. 그리고 이에 따라 어미연어가 알을 낳을 수 있는 산란장소, 새끼연어가 숨을 수 있는 은신처와 같은 다양한 서식처가 줄어들었다. 이러한 복합적인 영향으로 코호(coho)연어의 회귀율은 최대 96% 감소하였다.

1970년 미연방정부는 캘리포니아 주 정부와 협력하여 미개척국(USBR), 어류 및 야생동물관리국(USFWS), 산림청(USFS), 해양대기청(NOAA)과 공동으로 트리니티강복원연구사업(Trinity River Restoration Program, TRRP)을 설립하였다. 이후 40여년간 지속적인 연구개발과 누적된 기술을 바탕으로 트리니티강의 생태유량을 개발하고 성공적으로 적용하였다. 그 결과 연어의 회귀율은 트리니티댐 건설 이전 수준으로 복원되었다.

생태유량의 설정기준을 보면, 우선, 직전 연도의 저수지 유입유량을 기준으로 트리니티강으로 흘러가는 유량의 총합을 체계적으로 설정하였다. 그리고 이 할당된 유량을 연어의 생활사(알은 여울에 알

을 놓는 산란기, 풍부한 산소를 필요로 하는 부화기, 치어를 성장시키는 시기, 바다로 나갈 준비를 하는 유어기, 하구에서 강으로 이동하는 성어기 등)를 고려하고, 그리고 이어서 설명하는 유사환원과 연계하여 일년간의 홍수의 크기와 빈도를 결정하여 배분한다¹²⁾.

3.2 하천 유사환원

유역의 최상류 산지에서부터 해안까지 하천 지형의 다양성을 유지, 재생, 복원하기 위해서는 유사(의동과 유사량)의 밸런스를 하천생태계 복원의 중요한 목표로 삼아야 한다¹³⁾. 이를 위하여, 최근 자연적 홍수유출과 또는 인위적 환경유량을 설정하여 댐 하류 하천에 부족한 소류사를 공급해주는 ‘유사환원’ 연구가 북미와 일본을 중심으로 적용되고 있다(그림 4).

유사환원 사업은 1970년대 회귀성어류의 산란여울을 인공적으로 조성하기 위하여 미국 서부 트리니티 강에서 처음 실시되어 이후 1990년대와 2000년대 초반을



〈그림 4〉 댐하류 유사환원 사업 모식도

12) Ock G, Gaeuman D, McSloy J, Kondolf GM. 2015. Ecological functions of restored gravel bars, the Trinity River, California. Ecological Engineering 83: 49-60.

13) Beechie TJ, Sear DA, Olden JD, Pess GR, Buffington JM, Moir H, Roni P, Pollock MM. 2010. Process-based principles for restoring river ecosystems. BioScience 60: 209-222.

거치면서 크리어강(Clear Creek), 아메리칸강(American River), 머세드강(Merced River), 마켈럼니강(Mokelumne River) 등 캘리포니아 세크라멘토-샌호아킨



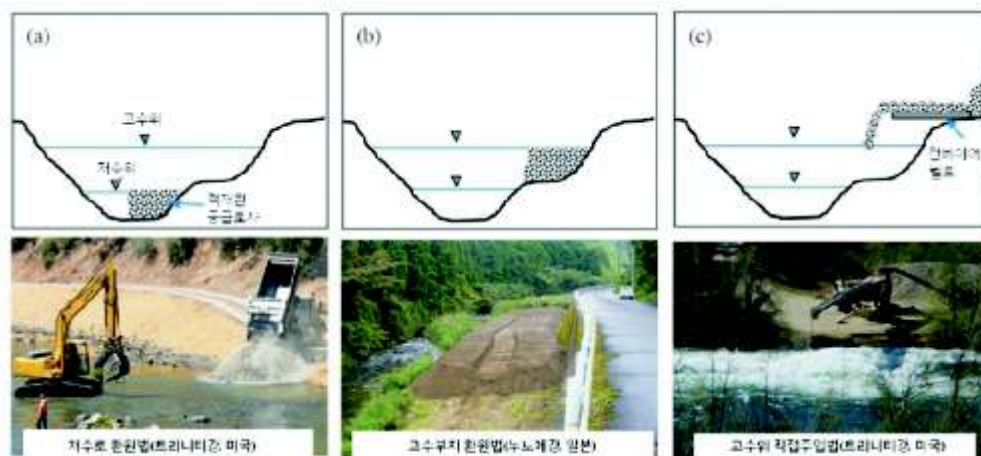
〈그림 5〉 미국 케스윅(Keswick)댐 하류 세크라멘토강의 지속적인 유사환원 현장 (위: '93년 Kondolf 촬영, 아래: '12년 욱기영 촬영)

(Sacramento-San Joaquin River) 유역에서 20여개의 하천, 워싱턴 서부해안, 캐나다 서부해안 등에서 하천 지형과 생태계 관리에 실질적으로 적용 중에 있다.

현재 가장 대규모로 유사환원을 하고 있는 곳은 독일 라인강의 이페자임 댐(Iffezheim barrage) 하류로서 이곳에서는 매년 17만톤의 소류사를 인공적으로 강에 공급하면서 교각과 제방을 보호하고 있다. 일본에서는 2000년을 전후하여 간사이지역의 누노메강(Nunome River)을 비롯하여 전국 15개 이상의 지역에서 하류 하천환경을 개선하기 위하여 실시하고 있다.

필자가 속해있는 연구그룹에서는 이러한 유사환원의 방법론과 효과를 체계화하기 위하여, 일본과 미국 캘리포니아에서 적용되고 있는 유사환원방법을 저수로 환원법(In-channel bed stockpile), 고수부지 환원법(high-flow stockpile), 고수위 직접주입법(high-flow direct injection) 등으로 구분하여, 적용상의 장단점과 생태계에 미치는 영향 등을 분석하였다¹⁴⁾. 그리고 이러한 유사환원 사업을 실시한 이후 서식처 지형과 물질순환, 생물다양성이 복원되어 가는 과정을 실증적으로 규명하였다¹²⁾.

국내에서도 2010년 양양발전소 하부댐



〈그림 6〉 유사환원을 위한 방법론 비교 (출처 Ock et al., 2013)

14) Ock G, Sumi T, Takemon Y. 2013. Sediment replenishment to downstream reaches below dams: implementation perspectives. Hydrological Research Letters 7: 54-59.

하류역에서 부착조류를 제거하기 위한 수질개선의 목적으로 홍수기에 모래를 공급한 첫 번째 연구가 실시되었지만, 상대적으로 서식처 지형 개선을 목적으로 유사환원을 실시한 사례와 이에 따른 생태계 평가는 부족하거나 이루어지지 않고 있다.

4. 지속가능한 댐하류 생태계 복원을 위하여

2010년 기준, 전 세계적으로 약 38,000여개의 대형댐이 건설되어 있으며, 우리나라는 공식적으로 약 1,300여개의 대형댐이 기록되어 있다¹⁵⁾. 이는 미국, 중국, 인도, 일본에 이어 세계에서 다섯 번째로 많은 수치이다. 그러나 기존 댐의 경우 건설된 지 50년이 넘어 노령화가 진행 중이고, 신규댐 건설은 사회적 합의의 어려움과 최적 건설입지의 부족으로 현실적 한계에 도달했다.

21세기 이후 이미 일부 선진국에서는 기존 댐의 기대수명을 높이고, 더불어 생태계 연결성을 회복하여 생태계에 미치는 부정적인 영향을 저감할 수 있는 연구가 활발하게 진행되고 있다¹⁶⁾. 이는 어찌보면 댐과 환경의 두 마리 토끼를 잡고자 하는 이상적인 목표라고 할 수 있지만, 이미 이 분야의 기술수준 또한 유역과 댐, 하천, 생태계 및 서식처 복원의 조건에 맞게 빠르게 발전하고 있다.

우리의 현실은 어찌보면 다른 선진국들보다 더 시급하다고 할 수 있다. 댐과 대형보, 하구둑에 의한 생태계 영향을 과학적으로 평가하는 것과 더불어, 이제는 물의 흐름과 유사의 이동, 유기물 조성에서 생태계 연결성을 회복시켜 주는 보다 구체적인 연구개발이 필요한 때이다. 국내에서는 지금까지 환경유량이라는 명목으로 갈수기의 최저유량만을 소극적으로 보전해주었다면, 앞으로는 생물의 생활사에

맞는 생태유량을 설정하여 서식처 지형 복원을 도모해야 한다. 본 이슈에서는 유사연속성을 복원하는 가장 대표적인 유사환원 연구를 다루었지만, 홍수기때 저수지로 유입되는 대량의 유사를 하류로 우회시키는 ‘유사바이패스’ (sediment bypassing), 그리고 평수기에는 하천이지만 홍수기에만 저수댐으로서 물을 저류하는 드라이댐(dry dam) 기술 또한 생태계 연결성을 복원하는 대안의 하나로 기술개발이 이루어져야 한다. 그리고 최종적인 대안으로 기존에 설치된 구조물이 본래의 이수과 치수 기능을 상실했다면, 우리도 댐 해체(decommissioning)와 철거(removal)를 고려하여 관련 기술개발 연구를 발전시켜야 한다.

국립생태원에서는 2016년부터 국내 유역을 대상으로 육상에서 하천을 거쳐 강하구와 기수역으로 유출되는 유기물의 이동량과 그 조성변화를 규명하는 연구를 진행하고 있다. 그리고 단계적으로 유량과 유사 이동과 연계하여 댐에 의한 생물 서식처 지형변화와 생태계 기능변화 연구를 추진하고 있다. 하천관리와 생태계 복원에 대한 높은 국민적인 관심과, 그리고 세계 수위의 댐 보유국의 현실을 고려할 때, 유량-유사-생태의 종합적 하천관리와 복원연구에 대한 국립생태원의 역할이 보다 중요해지는 때이다.

15) International commission on large dams, 2010. World Register of dams.

16) Kondolf GM et al, 2014. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. Earth's Future 2: 256-280.