



## A review on sediment replenishment to river channel for natural recovery of regulated rivers below large dams

Ock, Giyoung<sup>a\*</sup> · Jang, Chang-Lae<sup>b</sup> · Kim, Bomchul<sup>c</sup> · Choi, Mikyoung<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Senior Researcher, Department of Ecosystem Assessment, National Institute of Ecology, Seocheon, Korea

<sup>b</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea

<sup>c</sup>Professor, Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

<sup>d</sup>Researcher, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University, Daejeon, Korea

Paper number: 19-046

Received: 17 July 2019; Revised: 15 September 2019 / 2 October 2019; Accepted: 2 October 2019

### Abstract

This study dealt with a systematic approach for sediment replenishment works which defines the artificial supply of coarse sediment to downstream river channels of dams. That is an increasing practice in Japanese, American and European rivers for the purpose of compensating sediment deficits downstream and rehabilitating geomorphological habitats below dams. We introduced five main objectives of the sediment replenishment, simply from construction of artificial spawning redds for anadromous fish to restoration of fluvial geomorphological process of river system. Then we suggested determination of sediment size distribution and quantity of coarse sediment as well as selecting an effective implementation method in corresponding to specific objectives and local restrictions in the basin, reservoir and river.

**Keywords:** Sediment supply, Dam impacts, River restoration, Natural recovery

## 댐하류 조절하천의 자연성 회복을 위한 하천 유사환원 연구 고찰

옥기영<sup>a\*</sup> · 장창래<sup>b</sup> · 김범철<sup>c</sup> · 최미경<sup>d</sup>

<sup>a</sup>국립생태원 생태평가연구실 선임연구원, <sup>b</sup>한국교통대학교 토목공학과 교수, <sup>c</sup>강원대학교 환경융합학부 교수,

<sup>d</sup>충남대학교 국제수자원연구소 연구원

### 요 지

본 연구는 댐에 의해 유사공급이 제한되는 댐하류 하천에서 자연성 회복을 위한 근본적 방안으로서 댐 건설 후 감소된 유사의 공급과 이송능력을 회복하기 위하여 인공적으로 하천에 모래와 자갈과 같은 토사를 공급하는 하천 유사환원 연구 기술을 체계적으로 고찰하였다. 유사환원의 목적을 초기의 수질 개선과 어류의 인공산란처 조성에서부터, 이후 저수지 퇴사대책, 하천구조물 안전성 유지, 그리고 최근의 하천의 지형형성 과정 회복까지 다섯 개로 구분하여 제시하였으며, 이러한 사업 목적에 따른 공급토사의 크기, 공급량, 현장에서 적용되는 공급방법과 모니터링 방안을 국내외 연구사례를 들어 체계적으로 고찰하였다. 앞으로 국내 하천관리에서 환경유량과 유사환원이 연계된 통합 하천관리 기술발전에 기여하기를 기대한다.

**핵심용어:** 유사공급, 댐 영향, 하천복원, 자연성 회복

\*Corresponding Author. Tel: +82-41-950-5472  
E-mail: ockgy@nie.re.kr (G. Ock)

## 1. 서론

전 세계 290여 개 대하천 유역의 절반 이상(약 60%)이 댐에 의해 조절되고 있으며, 전 지구적으로는 45,000여 개 이상의 높이가 15 m 이상의 대댐(large dam)이 지구상 강물의 약 15%에 해당하는 6,500 km<sup>3</sup>의 물을 저장하고 있다(Nilsson *et al.*, 2005). 2018년 세계대댐회(ICOLD) 통계에 따르면 한국의 국토에는 1,338개의 대댐이 있다. 이는 중국(2만3천), 미국(9천2백), 인도(5천1백), 일본(3천1백), 브라질(1천3백)에 이어 6번째로 많은 수치로서(ICOLD, 2018), 댐밀도(dam density)로 보면, 경기도 면적과 비슷한 약 1만 km<sup>2</sup>의 국토에 약 134개의 대댐이 건설된 것과 같다. 건설 추이로 보면, 1910년 이후 일제강점기까지 점진적으로 만들어진 농업용 저수지가, 한국전쟁 이후 1990년대까지 농업화와 산업화 시기에 급증했다. 대부분의 다목적댐과 생공용수댐도 이 시기에 만들어졌다. 그러나 2000년 이후 신규 댐 건설은 감소되고 있으며, 기존 댐 또한 건설된 지 40년 이상 경과되는 등 댐의 노후화가 진행되면서 저수지 퇴사에 따른 댐의 기능 저하, 그리고 하류 하천 환경과 생태계에 미치는 영향은 점차 누적되어 가속화되고 있다.

유역에 댐 건설 후 야기되는 주요 환경요인은 종방향으로 유사이송과 물흐름에 대한 연속성 차단으로, 이러한 영향으로 하천과 해안에 이르기까지 광범위한 지형적 변화를 유발하고 있다. 저수지는 일반적으로 총 유사량의 90% 이상을 차단하며, 특히 대규모 저수지에서는 소류사와 부유사를 포함하여 99% 이상의 유사이송을 차단한다(Williams and Wolman, 1984). 이러한 저수지에 의한 유사이동 차단은 댐의 유효저수용량을 감소시키고, 하류에 유사부족(sediment deficit)을 유발한다(Kondolf, 1997). 이 결과, 댐에서 방류된 유량은 유사이송 에너지에 비해 소류사 농도가 매우 낮은 상태가 된다. 이러한 댐 하류역의 유사 결핍 유량(sediment starvation flow)은 하도의 세굴력을 증가시켜 하상세굴, 강턱침식에 에너지를 소비하며, 연쇄적으로 하상저하를 유발하여 하상재료는 굽어진다. 이러한 과정은 평형상태에 도달하여 하상재료가 이동할 수 없거나 암반에 이르기까지 지속된다. 따라서 새로운 유사 공급이 없으면, 결국에는 여울과 소와 같은 중요 생물서식처가 소실되고, 하천구조물의 교각세굴, 해안선 후퇴와 같은 지형적 변화를 유발한다(Kondolf, 1997). 수문학적으로는 홍수량이 감소되며, 홍수량의 빈도와 크기가 줄고 연중 유량이 균일화되어, 하도 내에 육상식생의 침입을 용이하게 한다(Ligon *et al.*, 1995). 결과적으로 이러한 생물서식처의 물리적 변화는 이를 기반으로 살아가는 어류와 저서생물, 조류 등의 생물종다양성 감소를 가져온다(Power *et al.*, 1996).

이러한 댐에 의한 생태계와 환경영향은 선진국과 개발도상국을 가리지 않고 댐을 보유한 국가에서 공통적으로 발생하는 국제적인 현상이다(WCD, 2000). 더불어, 신규댐 건설의 한계와 기존 댐의 노후화로 인하여, 20세기 후반부터 선진국에서는 기존 댐의 지속가능한 이용과 환경영향 저감, 더 나아가 생태계 복원에 이르기까지 21세기 하천관리의 도전 목표로 설정하고 있으며, 이와 관련한 연구와 기술은 예상보다 빠르게 발전하고 있다(Beechie *et al.*, 2010). 댐개수 세계 6위, 댐밀도 세계 2위라는 댐 강대국로서의 우리나라의 위상을 고려할 때 이 분야의 연구기술개발은 더욱 시급하게 요구되고 있다.

우리나라는 2018년 6월 국회에서 물관리일원화법이 통과되면서 댐의 영향을 받는 조절하천에서 하천 서식처와 수생태계의 자연성 회복을 위하여 수량과 유사, 수질 관리와 연계한 보다 실효적인 통합 하천관리의 기반이 마련되었다. 이에 따라, 본 연구에서는 댐 하류 조절하천에서 하천의 자연성을 회복하기 위하여 최근에 일본과 미국의 하천에서 활발하게 적용되고 있는 하천 유사환원 연구와 기술에 대하여 체계적으로 고찰해 보고자 한다.

## 2. 댐 하류 유사환원

댐 하류역과 같이 유사 결핍된 하도에서 상류나 지천으로부터 유사 공급되지 않는다면 하상세굴이 발생하여 하상재료는 양적으로 감소된다. 이러한 현상은 비홍수기 조건에서도 발생한다고 보고된다(Paintal, 1971; Kondolf, 1997; Merz *et al.*, 2006). 따라서, 댐 하류 조절하천에서 서식처와 생태계 기능을 근본적으로 복원하기 위해서는 댐에 의해 단절된 유사이송의 자연성을 회복하는 것이 필요하다. 이를 위하여 최근의 하천관리에서는 유역 또는 해당 사업구간에서 유사 이동과 유사량의 밸런스를 중요한 목표로 설정하고 있다(Ashida *et al.*, 2008; Palmer *et al.*, 2005). 이 가운데 현재 일본, 북미, 유럽에서 활발하게 적용되고 있는 댐하류 유사환원(sediment replenishment)이란 댐 하류 하천에서 유사결핍에 의해 발생하는 다양하고 지속적인 환경영향을 저감하기 위하여 인공적으로 모래와 자갈과 같은 토사를 공급하여 댐 건설 이후 단절된 유사이동 능력을 회복하는 방안이다. 공간적으로 전체 유역(Reid and Dunne, 2003) 또는 하폭의 10~100배 크기의 특정 사업구간(Fuller *et al.*, 2003)에서 유사 공급량과 퇴적량, 이동량, 손실량 간의 유사수지(sediment budget)를 반영하고 있다(Merz *et al.*, 2006). 이러한 유사수지는 공급토사의 크기와 양을 결정하는 중요한 요소로서 자세한 내용은 아래에서 정리하였다.

하천에 유사를 공급하는 이러한 하천관리 방법은 목적에 따라 다양한 용어로 사용되고 있다. 유사수지를 중요하게 고려하지 않는다면, 하천에 유사가 양적으로 증가되는 의미로 유사증가(sediment augmentation)를 사용하기도 하며, 단순한 공급행위를 가리키는 일반용어로 유사공급(sediment supply) 또는 유사도입(sediment introduction)으로 기술되기도 한다.

최초의 유사환원 사업은 1970년대 미국 서부 트리니티강(Trinity River) 강에서 연어의 산란을 위한 서식처를 조성하기 위하여 시작되었다. 이후 캘리포니아 세크라멘토-샌호아킨 유역의 13개 이상의 강으로 확대되었고, 북쪽으로 전파되어 워싱턴주의 그린강(Green River)과 캐나다 브리티시 콜롬비아의 캠펠강(Campbell River)에서도 적용되었다(Wheaton et al., 2004). 현재 가장 대규모로 유사환원을 하고 있는 곳은 독일 라인강(Rhine River)의 이페츠하임보(Iffezheim Barrage) 하류로서 매년 17만톤의 자갈을 라인강에 공급하여, 하상저하를 방지하고 교각과 같은 하천시설물을 보호하고 있다(Kuhl, 1992). 일본에서는 2000년을 전후하여 중부의 미하루강(Miharu River), 나가시마강(Nagashima River), 아키하강(Akiha River)에서 도입하였고, 이후 간사이지역의 누노메강(Nunome River)과 홋카이도의 니부타니강(Nibutani River)등 현재 전국적으로 약 30여 개의 주요하천에서 유사환원사업을 실시하고 있다(Sumi et al., 2017).

유사환원은 국외의 하천관리에서 비교적 빠른 속도로 적용범위가 확산되고 있으며, 하천 관리와 복원의 다양한 목표에 따른 계획, 실행, 모니터링, 적응관리 등의 연구기술 또한 빠르게 발전하고 있다. 예를 들면, 1970년대 미국 트리니티강에서 실시된 초기에는 세굴로부터 여울을 구성하고 있는 자갈을 보호하기 위하여 하상경사의 변곡점 상류단에 인공적으로 자갈을 보충하여 고정식 인공여울을 조성하였다. 그러나 모니터링 연구결과 고정식 여울은 홍수에 의해 재유실되거나 세립사가 공극을 메우는 등 경제적, 생태적으로 비효율적으로 평가되었다(Gaeuman, 2014). 점차적으로 기술이 발달함에 따라 최근에는 하천의 지형학적 형성과정을 통하여 하도의 물리적 복잡성과 하상재료의 질, 서식처 다양성을 높이기 위한 하천관리 전략으로 전환되었다(USDOI, 2000). 이러한 지형형성과정 유도를 목표로 하는 유사환원 사업에서는 유사의 이동(sediment transport)과 하상의 이동성(bed mobility)은 중요한 요소가 된다. 실제적으로 유사환원 사업을 계획, 실행, 모니터링 할 때는 사업의 목표, 상류 댐의 종류와 크기, 유역의 특성을 고려해야 하며, 아래에 기술하는 영향요소를 고려하여 사업의 규모와 방법, 효과적인 실행방법 등을 설정해야 한다.

## 2.1 유사환원의 목표와 계획

현재 일본, 미국, 캐나다, 스위스, 독일 등의 하천관리에서 적용되고 있는 유사환원의 목표는 크게 다섯 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 가장 초기단계의 목적이지만 현실적으로 많이 대두되는 문제로서 하상재료의 플러싱을 통한 수질 개선이 있다. 둘째, 기존 댐의 지속가능한 운영, 하천 시설물의 유지관리를 위하여 저수지 퇴사 대책과 병행하여 활용될 수 있다. 셋째, 하상저하에 따른 하천구조물의 안전성 유지를 목표로 하며 이에 대한 연구는 비교적 활발하게 이루어졌다고 할 수 있다. 넷째, 북미를 중심으로는 생물서식처 기능을 향상시키기 위한 목적으로 회귀성 어류의 인공산란용 여울 조성이 있다. 마지막으로 하천 자연성 회복을 통한 지형형성 과정 복원을 들 수 있다(Gaeuman, 2014). 후자로 갈수록 보다 상위의 목표로서 실행단계에서 많은 노력과 높은 기술이 요구된다. 이러한 목표설정은 지역의 현안과 우선순위에 따른 세부목표를 포함하고 있지만, 최근에는 유사환원을 단일목적에 국한하지 않고 저수댐의 운용과 연계를 가지는 현실적인 필요성과 함께 하천지형과 시설물, 수질, 생태계를 회복하기 위한 보다 통합적인 차원으로 목표를 설정하고 있다.

유사환원의 목표를 효과적으로 실현하기 위하여 공간적인 범위와 장소, 토사공급 방법, 공급토사의 크기와 양을 결정해야 한다. 유사환원의 적합지 선정을 위한 단계에서 연어와 은어와 같은 회귀성 어류의 산란 서식처 조성을 목적으로 하는 경우에는 직접적으로 산란에 이용되는 여울지형 구조를 개선하거나 또는 새롭게 조성할 수 있는 가능성을 중요하게 고려한다. 유사환원을 위한 사업구간은 기존에 자연적으로 분포되어 있는 여울을 대상으로 그 공간적 크기를 확장하고 높이를 보충할 수 있는 장소를 우선 후보지로 선정하는 것이 유사환원의 효과를 높일 수 있다. 또한 댐과의 근접성과 지류유입의 유무를 판단하여 유사부족으로 인한 지형변화가 나타나기 쉬운 곳을 우선 사업대상지로 고려한다.

특히, 최근 하천관리에서 중요한 목표가 되는 지형학적 유사환원 사업에서는 공급토사의 크기를 어떻게 결정하는지, 중장기적으로 얼마나 많은 토사를 공급해야 하는지, 그리고, 어떻게 하류로 토사를 공급해야 하는지에 대하여 아래와 같이 이론적이고 실증적인 연구가 요구된다.

## 2.2 공급토사의 입도 분포

초기의 유사환원 사업에서 공급토사의 크기와 입도분포(particle size distribution)는 대상 하천에 살고 있는 어류의 산란에 필요한 하상재료의 크기를 고려하여 결정했다. 일반적으로 공급재료의 크기는 해당 댐 하류 하천의 하상 구성재

료를 조사하여 결정한다. 그러나 댐 하류에서 하천의 지형 형성 과정을 복원하고자 한다면, 자연유량이 아닌 댐에 의한 조절 유량(regulated flow)을 대상으로 홍수 조건에서 충분히 이동 가능한 크기와 양을 지형모델을 이용하여 계산하여 결정할 수 있다. 댐 직하류 하상이 저하되어 암반이 노출되어 있는 구간에서는 어류의 물리적 산란장소를 개선하기 위하여 주로 자갈크기의 재료를 포함하여 공급한다. 유사계 전체로 공간 범위를 설정할 경우에는 해안재료를 구성하는 모래 크기를 고려한다. 공급토사의 입경이 지나치게 크면, 해안에 도달하기 전에 국부적인 하상상승의 가능성이 있으며, 반대로 점토 질과 같은 미세입자의 경우 하류역에 탁수를 유발하거나 해안에 퇴적되지 못하고 오히려 먼 바다로 유출될 수도 있다.

### 2.3 공급토사량의 산정

공급토사량 산정은 우선적으로 사업의 목적을 고려하여 결정될 수 있다. 초기 미국 서부해안에서 실시되었던 회유성 어류인 연어의 산란을 위한 여울을 조성하는 사업에서는, 단기간의 효과를 위해 경험적으로 확인된 성어의 산란구역을 대상으로 대상 여울의 면적과 적정수심에 요구되는 자갈층의 두께를 계산하여 총 공급량을 산정하였다.

그러나 저수지 퇴사 대책과 하류 하천의 서식처 지형관리를 목적으로 하는 경우에는 하천의 수리지형적 조건과 서식처의 생물학적 요구조건과 함께 유역이나 구간의 유사수지를 고려해야 하는 보다 복잡한 과정이 요구된다. 저수지 퇴사를 저하와 댐 하류 세굴방지를 통한 하천시설물 안전성을 동시에 고려하는 일본의 사례에서는, 저수지의 규모와 유사의 유입량을 반영하여 연평균퇴사량의 0.1-10%의 규모에서 유사공급량을 결정하고 있다(Sumi *et al.*, 2017). 중장기적으로 댐 하류 하천의 하상관리와 서식처 지형복원을 목적으로 유사공급량을 결정하는 과정은 상대적으로 어려운 과정이다. 우선 해당 하천의 지형복원에 필요한 연간 요구량(restoration annual load)을 계산하고, 해당구간에서 고수위때 하천의 수리조건과 하도의 지형조건, 계산된 공급토사의 양과 재료의 크기 조건에 따라 소류사 이동과 퇴적과 손실(bedload transport, storage and loss), 지형변화(downstream gravel movement)를 모의하고 평가한다. 그리고 해당 하천과 하도의 수리조건 및 토사의 물리적인 특성간의 적합한 조합을 선정하여 공급토사량을 결정한다(Merz *et al.*, 2006).

### 2.4 하천 유사공급의 방법론 선정

현장에서 토사를 하천으로 공급하는 기술은 상류댐에서 방류되는 홍수에너지, 토사공급원, 운반거리와 경로, 적토지

의 지리적 여건, 접근성과 작업환경의 용이성, 공급토사의 이동능력 등을 종합적으로 고려하여 판단한다. 일반적으로 공급토사는 환경교란을 방지하기 위하여 동일 유역안의 재료를 활용하고 있다. 댐 상류역과 지천의 저사지 또는 체크댐에서 저수지로 퇴사되기 이전의 토사를 채취하거나, 하천사업에서 발생하는 제방과 고수부지의 토사를 이용하기도 한다. 모든 경우 공급지에서 하류의 적재지로 운송과정의 필요하며, 공급재료로 사용하기 위하여 크기 분급과 불순물 제거 등의 전처리가 요구된다. 본 연구에서는 토사공급원과 운반과정에 대한 내용은 별도로 하고, 현장에서 운반된 토사를 하천구역으로 적재하고 홍수기에 하류로 이동시키는 방법론을 중심으로 제시하고자 한다.

Ock *et al.* (2013b)은 일본과 미국 캘리포니아에서 실시된 유사환원 연구사례를 대상으로 유사의 공급방식에 따라 저수로 적재법(In-channel bed stockpile), 고수위적재법(high-flow stockpile), 고수위직접주입법(high-flow direct injection) 등 세 가지로 구분하였다(Fig. 1). 저수로적재법은 유사환원의 초기단계에서 적용되었지만, 현재에도 여울에 자갈을 직접 보충하는 목적으로 사용되고 있다. 이 방법은 비홍수기때 저수로에 자갈크기의 하상재료를 직접 여울에 쌓아서 서식처로 바로 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 저수지의 시기에 저수로에 유사를 적재하는 공사가 필요하며, 하류에 고농도의 탁수를 유발하는 단점이 보고되었다. 또한 다음 홍수가 하상재료의 한계 소류력을 초과하게 되면 하상재료가 하류로 이동하기 시작하여 소실된다. 두 번째 고수위적재법은 자갈이나 모래를 하도의 고수부지에 적재하고 홍수기때 점차 수위가 고수부지까지 증가하면 적재된 재료를 하류로 이동시켜 하류역의 하상을 관리하는 방법이다. 이와 같이 일시적으로 증가한 홍수에너지로 단기적인 고수부지의 침식작용을 이용하는 방안은 주로 홍수피크가 크지만 기간이 짧은 아시아 몬순기후대의 하천에서 효과적으로 적용될 수 있다. 마지막으로 고수위직접주입법은 현재까지 미국 트리니티강에서 유일하게 적용되고 있는 방법으로 홍수기때 컨베이어벨트와 같은 특수장비를 사용하여 유심부에 연속적으로 유사를 주입한다(Gaeuman, 2014). 트리니티강의 모니터링 결과에 따르면, 고수위직접주입법으로 하천에 들어간 재료는 기존의 하상재료와 더해져 세굴과 이동, 퇴적과 같은 하천의 지형형성과정을 통해 하류에 하중도와 점사주, 여울과 소와 같은 지형 구조를 복원시켰다. 이 방법의 장점은 홍수피크의 지속시간에 따라서 유사공급량을 결정할 수 있으며, 자갈이상의 큰 입경의 재료를 효율적으로 멀리 이동시킬 수 있다는 것이다. 무엇보다도 상류 댐 저수지에서 환경유량 설정하여 홍수의 크기와

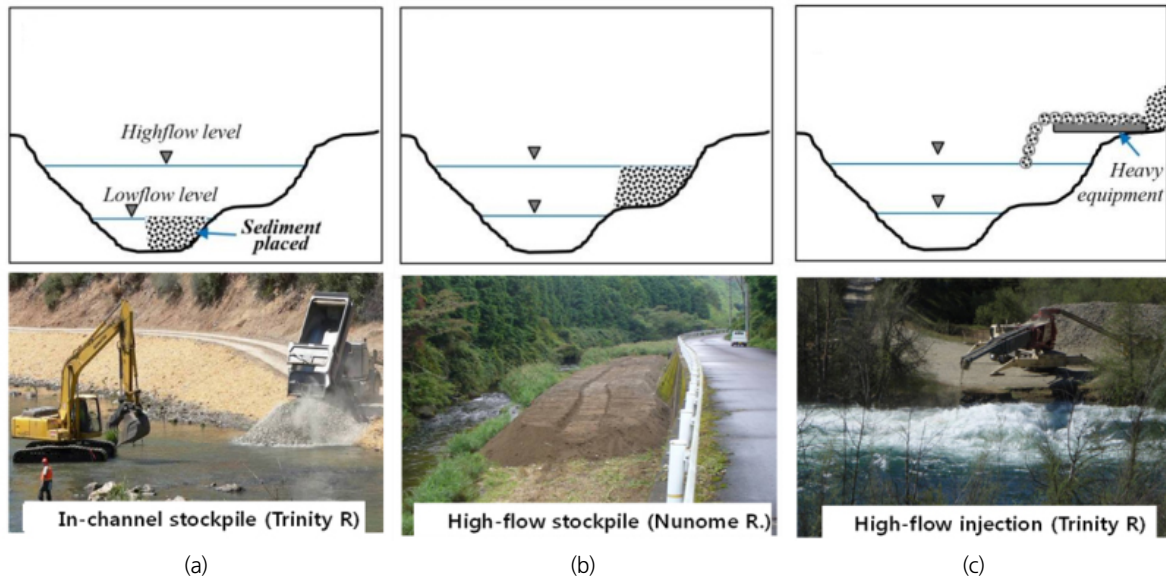


Fig.1. Sediment replenishment implementation in field; (a) Low-flow stockpile, (b) high-flow stockpile, (c) high-flow direct injection (source from Ock *et al.*, 2013b)

지속시간을 결정할 수 있는 조건에서 홍수의 지속시간이 길다면 다른 방법에 비해 대용량의 토사를 공급할 수 있다(Ock *et al.*, 2013b).

### 3. 목표에 따른 유사환원 사례

#### 3.1 댐 하류 부착조류 및 수질개선

##### 3.1.1 한국 후천

강원도의 양양 양수발전소는 인제군 기린면에 위치한 상부댐(높이 95 m, 길이 360 m, 총저수량 4,932천  $m^3$ )과 양양군 서면의 하부댐(높이 53 m, 길이 250 m, 총저수량 9,222  $m^3$ )에서 두 저수지간의 낙차(818 m)를 이용하여 연간 19 kW의 전기를 생산한다. 특히 남대천 상류 후천에 위치한 하부댐 하류에서는 댐 건설 이후 하상에 부착조류가 과다변성하고 미립 부유사가 하상재료의 공극을 메워 수질이 악화되는 등 지역으로부터 관광자원으로서 경관가치와 수질에 대한 개선 요구가 제기되었다. 이러한 문제의 해결방안으로 하부댐 하류 구간에서 인공홍수를 이용하여 하천에 유사를 공급하여 부착조류를 탈착하고 세립사를 씻어내는 하상 플러싱을 시도하였다.

현장에서 유사 공급방법은 저수로적재법을 이용하였다. 공급토사는 하부댐 상류에 퇴적된 모래질 재료를 채취하여 하부댐 하류로 운반한 뒤, 댐 직하류와 하류 구간의 저수로에 하천의 흐름방향에 직각으로 횡단보 형태로 모래더미를 설치

하였다. 이후 인공홍수시 증가된 유량이 기설치된 모래보를 월류하면서 침식작용을 통하여 모래를 하류로 공급하도록 하였다.

비홍수기 하부댐의 기저유량은 소수력발전 유량으로 5  $m^3/s$  이하를 유지하지만, 2008년 7월 인공홍수시에는 약 120 분간 유량을 30~100  $m^3/s$  단계적으로 확대하여 총 34만  $m^3$ 의 유량으로 1000  $m^3$ 의 모래를 공급하였다. 2009년 7월에는 약 120분간 120  $m^3/s$ 까지 유량을 증가시켜 총 64만  $m^3$ 의 유량으로 2000  $m^3$ 의 모래를 공급하였다(Park *et al.*, 2012). 부착조류의 탈착을 모니터링 결과, 부착조류 밀도는 2008년에는 직하류에서 감소되었지만 2 km 떨어진 하류에서는 제거효과가 나타나지 않았다. 그러나 인공홍수량과 공급유사량을 증가했던 2009년에는 댐 하류 4.7 km까지 평균 56%의 제거효과가 나타났다(Park *et al.*, 2012). 이 연구는 비록 소규모 하천에서 적용되었지만, 국내에서 발표된 유일한 하천 유사환원 사례로서, 국내 하천에서도 유사공급을 통해서 부착조류의 과다 증식을 제어하는 데 효과적이라는 것을 실증적으로 보여주었다.

##### 3.1.2 일본 마나강

일본 중서부의 후쿠이현 쿠주류강(Kuzuryu River) 수계의 마나강(Mana River)은 상류에 마나가와댐(Managawa Dam)이 건설된 후 하상재료는 조립화되었고 유량은 균일화되었다. 특히 하류에서는 토사를 공급할 수 있는 지류가 없어 이러한 문제는 심화되었다. 마나강은 회귀성 어류인 은어의 대표



Fig. 2. Sand-gravel replenishment by high-flow stockpile method in the Nunome River, Japan (Ock *et al.*, 2013b)

적인 서식처로서 먹이원인 신선한 부착조류 관리가 중요하다. 그렇지만 댐에서 유출된 미립부유사가 하상재료에 표면에 퇴적되면서 부착조류의 질이 저하되어, 부착조류의 탈착과 재생산을 촉진하기 위하여 2004년부터 하천 유사환원 사업을 실시하였다.

현장에서 유사를 공급하는 방법은 고수위적재법을 이용하였다. 여름철 몬순강우기때 짧고 강한 홍수방류량(첨두유량  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , 지속시간 3시간) 증가에 맞추어 토사공급량을 산정하였다. 홍수기 이전 저수지 상단에 퇴적된 토사를 채취하여 댐에서 약 6 km 하류에 위치한 고수부지에  $220 \text{ m}^3$ 의 토사를 적재하고, 홍수기간에 침식과 세굴작용으로 하류로 토사를 이동시켰다. 토사공급 효과를 증대하기 위하여 추가적으로 부수로를 파서 제방세굴을 유도하였다.

부착조류의 무기물과 유기물 함량, 클로로필a 농도의 모니터링 연구 결과, 유수력만으로 세척효과가 일어나는 지점과 비교해서 유사공급이 이루어진 지점에서는 부착조류의 탈착 효과(클로로필a 농도의 감소 비율)가 약 10% 높게 나타났으며, 무기질/유기질 비로 평가한 부착조류의 질 또한 20% 높게 조사되었다(Miyagawa *et al.*, 2017). 이러한 결과는 홍수기 하천 유사환원이 하상 플러싱효과를 증대시켜 기존의 부착조류를 탈리시키고 신선한 부착조류를 유도하여 회유성 어류의 먹이원을 개선시키는 데 기여했음을 실증하였다.

## 3.2. 댐 하류 지형형성과정 복원

### 3.2.1 일본 누노메강

일본 나라현에 위치한 누노메강(Nunome River)은 1991년 누노메댐(Nunome Dam)이 건설된 후 10여년 만에 저수지 퇴사율이 예상치를 13% 이상 초과하여 유효저수용량이 빠르게 감소되었고, 하류에서는 유사공급이 차단되어 하상저하가 진행되는 문제가 발생하였다. 따라서 누노메강에서는 상

류댐의 퇴사대책과 함께 하류 하상저하를 방지하기 위하여 2004년부터 유사환원 사업을 실시하였다.

누노메강 유사환원 사업은 고수위적재법의 대표사례이다. 저수지 상류의 체크댐에서 채취한  $500 \text{ m}^3$ 의 모래와 자갈의 혼합재료를 댐하류 1 km 지점에 위치한 고수부지에 적재하였고, 하계 몬순강우기의 홍수유출(첨두유량  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ , 지속시간 4시간)시의 유체력을 이용하여 적재된 모래와 자갈을 하류로 공급하였다(Fig. 2). 하도지형의 모니터링 결과 약간의 토사가 직하류 만곡부에 퇴적되었지만, 하류구간에서 하상저하를 방지하면서 여울과 소가 지속적으로 유지되었다(Kantoush *et al.*, 2010). 유기물의 안정동위원소 분석결과 댐하류 하천에서는 댐에서 유래한 플랑크톤이 최고 60% 이상, 육상기원물질이 30%, 부착조류가 10% 포함되어 있었다(Ock and Takemon, 2014). 이는 상류댐에서 유래한 플랑크톤을 주요 에너지원으로 의존하고 있는 댐 하류 생태계가 하류 여울 구간을 지나면서 유의한 감소를 보여주는 것으로, 유사환원이 하천 유기물의 구성을 정수생태계에서 유수생태계로 회복시키는 역할을 하고 있음을 나타내고 있다(Ock *et al.*, 2013a).

### 3.2.2 미국 트리니티강

트리니티강(Trinity River)은 미국 캘리포니아 북서부에 위치한 클라메스강(Klamath River)의 지류로서, 1962년 상류역에 트리니티댐(Trinity Dam)과 르위스톤댐(Lewiston Dam) 건설 후 유입유량의 90% 이상이 셰크라멘토 유역으로 도수되면서 트리니티강 본류로 공급되는 유량과 유사량이 급감하였다. 그 결과, 하류에서는 하상 저하와 하도의 수림화 등 지형변화가 발생하여 회귀성 어류인 연어 서식처가 급속도로 파괴되거나 줄어들었고, 연어 회귀율은 종에 따라 최대 96%까지 감소하였다. 1970년 미연방정부는 캘리포니아 주정부와 협력하여 트리니티강 복원을 위한 연구조직(Trinity River

Restoration Program, TRRP)을 설립하였고, 2000년에는 하천복원의 패러다임을 생태유량(ecological flow) 복원과 하천 유사환원에 기반을 둔 하천의 자연성 회복으로 설정하고 (USDOI, 2000) 장기적이고 지속적인 하천관리와 복원기술을 발전시켜오고 있다.

트리니티강의 생태유량을 설계하기 위해서 직전 연도 트리니티댐 저수지 유입유량을 기준으로 5개의 수문연도로 구분하여, 세크라멘토강으로 도수되는 유량비율과 트리니티강으로 방류할 수 있는 연간 총유량이 결정된다. 유역관리위원회에서 해당년도의 트리니티강의 총방류량을 결정하면 이를 기준으로 서식처의 생물학적 요구조건(연어의 생활사 등)과 지역의 계절적 물이용을 반영하여 홍수 침투유량과 공급유사량을 설정한다(Table 1).

수문학적으로 유량이 가장 풍부했던 2011년(Extremely wet year)에 트리니티강의 로던랜치 구간(Lowden Ranch rehabilitation projection site)에서는 세계 최초로 고수위직접 주입법이 실시되었다. TRRP는 유역위원회에서 설계된 홍수량 방류 기간 동안 최대 311 m<sup>3</sup>/s 의 침투유량을 이용하여 자갈

크기 이상의 하상재료를 5일 동안 지속적으로 약 37천 m<sup>3</sup>을 하도 내에 직접 주입하여, 세굴과 이동, 퇴적의 지형형성과정을 통하여 새로운 자갈사주의 형성을 유도하였다(Ock *et al.*, 2015)(Fig. 3).

보다 자세한 과정은 Gaeuman (2014)을 참고할 수 있다. Ock *et al.* (2015)는 이러한 복원된 사주지형의 수리지형학적 모니터링 연구를 통하여 유사환원이 수리경사(hydraulic gradients)와 투수성(permeability)에 영향을 주어 하상간극수 흐름(hyporheic flow)을 유도하고, 수온(thermal diversity)과 먹이원(food-source diversity), 미지형 다양성(topographic diversity)을 증가시키는 등 서식처의 수리, 생물, 지형학적 다양성을 높이는 역할을 하고 있음을 발견하였다(Fig. 4).

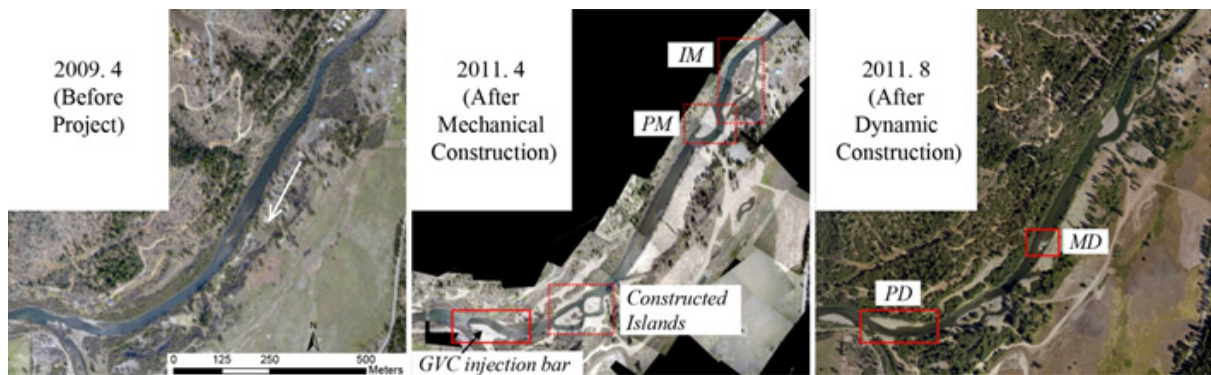
#### 4. 적용상의 한계

댐 하류 유사환원 사업을 국내에 효과적으로 적용하기 위해서는 국내 하천과 유역의 특성을 반영하여 목표와 사업구간,

**Table 1.** Criteria of environment flow and sediment replenishment depending on five water year types in the Trinity River (Ock *et al.*, 2013b)

Water year type	(a) Downstream release depending on reservoir inflow				(b) Peak flow and sediment augmented		
	Reservoir inflow (mcm)	Downstream allocation (mcm)	Ratio inflow to allocation	Probability of occurrence	Peak flow released (cms)	Peak flow duration (days)	Volume of sediment augmented (m <sup>3</sup> )
Extremely wet	>2,467	1,005	35%	0.12	311	5	23,701-51,224
Wet	1,665-2,466	865	44%	0.28	241	5	7,645-13,761
Normal	1,264-1,664	798	58%	0.20	170	5	1,376-1,628
Dry	801-1,263	559	56%	0.28	127	5	115-191
Critically dry	<801	455	81%	0.12	42	36	0
average		733	43%				

'mcm' and 'cms' indicate million cubic meters and cubic meters per second, respectively.



**Fig 3.** Geomorphologic sediment replenishment in the Trinity River, US (Ock *et al.*, 2015)

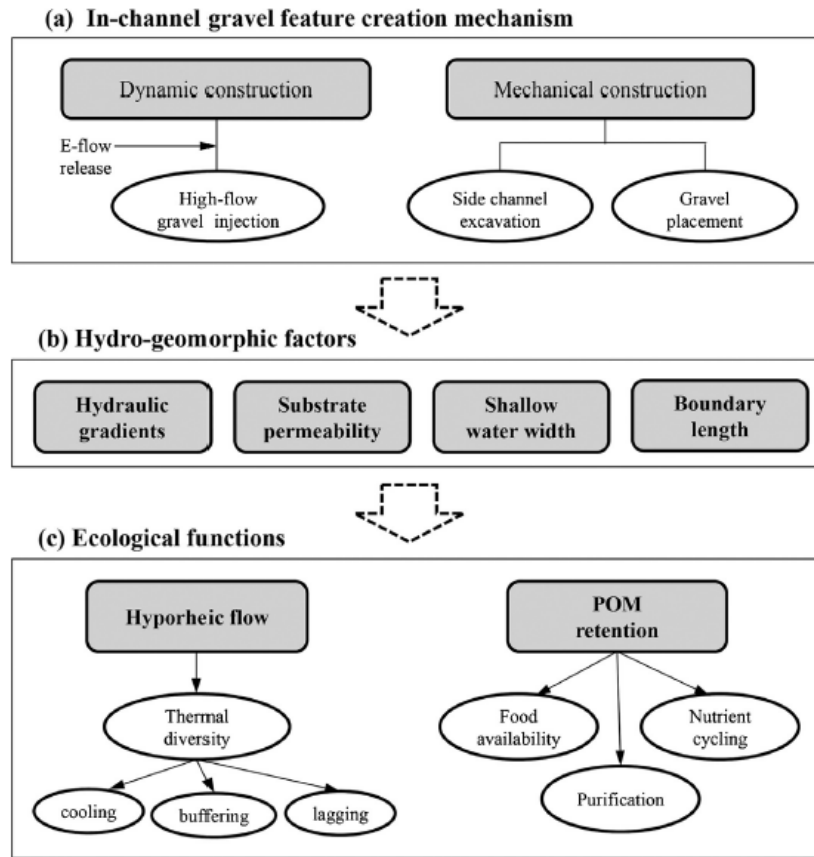


Fig 4. Conceptual model for restoration of ecological function through geomorphologic sediment replenishment in the Trinity River (Ock *et al.*, 2015)

방법론을 결정해야 할 것이다. 국내에서 가장 중요한 제한사항은 공급 유사를 충분히 이동시킬 수 있는 홍수의 침두유량과 지속기간이라고 할 수 있다. 미국 트리니티강의 사례와 같이, 상류의 규모가 큰 저수지에서 유사환원을 위한 홍수량과 지속기간을 조정해서 충분히 제공할 수 있다면 고수위직접주입법을 적용하여 상대적으로 많은 양의 유사를 하천에 공급하여 효과를 높일 수 있다. 국내의 중소규모 하천에서는 여름철 태풍과 집중호우에 의한 홍수량의 크기와 빈도를 예측하기 어렵고 지속기간이 상대적으로 짧기 때문에 일본 누노메강의 사례와 같이 고수위적재법을 적용하여 상대적으로 제한된 양의 유사를 홍수빈도에 맞추어 공급할 수 있다. 또한 양수발전소 하부댐 하류와 같이 비홍수기의 하천유량이 작은 경우에는 탁류로 인한 수질 문제의 영향이 작아 저수로적재법을 적용할 수 있다.

그리고, 해당 구간에서 유사수지 분석을 통하여 유사공급이 하류부의 유사과다로 인한 문제를 초래할 수 있는 지검토가 필요하다. 유사부족이 문제가 되지 않는 구간에서 부작조류를 탈리시키기 위해 유사를 공급하게 되고, 홍수에너지가 상대적으로 크지 않다면 하류유사가 이동·분급되어 퇴적되

는 거리가 제한이 되어 오히려 하류부에 유사과다에 따른 부작용을 발생시킬 수 있기 때문이다. 국내하천에서 보다 효과적으로 사업구간을 결정하기 위해서는 지류의 유사공급 능력을 검토해야 한다. 유역에서 본류는 댐에 의해 유사공급이 조절되고 있지만, 지천의 수리 및 지형 특성에 의해 일정량의 유사가 홍수기에 본류로 공급될 수 있다. 이 경우에는 유사수지 분석을 통해 사업구간을 지류 합류전으로 설정하고 본류의 유사이송능력을 증대시킨다면 보다 효과적으로 유사환원을 실시할 수 있다.

### 5. 결론

댐 하류 조절하천에 인공적으로 유사를 공급하는 하천 유사환원은 댐 건설 후 감소된 유사의 공급능력을 회복하여 하천의 자연성을 회복하기 위한 통합물관리 시대의 중요한 하천관리 기술로서 최근 국외에서는 빠르게 기술이 발전하고 있지만, 국내 연구는 상대적으로 부족하다. 본 연구에서는 국내



유사환원 연구의 활성화와 기술도입을 위하여 국외사례를 중심으로 수질개선, 저수지 퇴사 대책, 하천구조물의 안전성 유지, 생물서식처 기능 향상, 하천의 지형형성 과정 회복 등을 세부 목표로 제시하였으며, 이를 단일목적에 국한하지 않고 현실적인 필요성과 함께 하천지형과 시설물, 수질, 생태계를 회복하기 위한 보다 통합적인 차원으로 목표를 설정하고 있다. 그리고 세부목표에 따른 공급토사의 크기, 유사 공급량, 현장에서의 공급방법과 모니터링 등에 대하여 체계적으로 고찰하였다. 특히 현장에서 유사를 공급하는 저수로적재법, 고수부지적재법, 고수위직접주입법 등 대표적인 세 가지 방법론을 제시하고 이에 따른 홍수의 크기, 토사공급원, 운반거리와 경로, 접근성과 작업환경의 용이성, 공급토사의 이동능력 등과 같은 고려 사항과 제한 요소를 정리하였다. 그리고 이러한 유사환원 사업이 실제 현장에서 어떻게 적용하고 있는지를 보여주기 위하여 국내외 사례연구를 제시하고 적용상의 한계를 고찰하였다. 댐 하류 조절하천의 수생태계 복원에 대한 높은 국민적인 관심을 고려할 때, 본 연구가 앞으로 환경유량과 하천 유사환원이 연계된 통합 하천관리 기술발전에 기여하기를 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 국립생태원 기초생태연구사업“유역규모 수생태축의 기능적 연결성 복원 기반 연구”, 환경부 수탁연구사업“금강·영산강지역 하도내 서식처 다양성 변화 연구”의 일환으로 수행되었습니다.

## References

- Ashida, K., Egashira, S., Nakagawa, H. (2008). *River morphodynamics for 21st Century*. Kyoto University Press, Kyoto, Japan. pp. 91-106.
- Beechie, T. J., Sear, D. A., Olden, J. D., Pess, G. R., Buffington, J. M., Moir, H., Roni P., and Pollock, M. M. (2010). “Process-based principles for restoring river ecosystems.” *BioScience*, Vol. 60, No. 3, pp. 209-222.
- Fuller, I. C., Large, A. R., Charlton, M. E., Heritage, G. L., and Milan, D. J. (2003). “Reach-scale sediment transfers an evaluation of two morphological budgeting approaches.” *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 28, No. 8, pp. 889-903.
- Gaeuman, D. (2014). “High-flow gravel injection for constructing designed in-channel features.” *River Research and Applications*, Vol. 30, No. 6, pp. 685-706.
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (2018). *World register of dams*. International Commission on Large Dams.
- Kantoush, S. A., Sumi, T., and Kubota, A. (2010). “Geomorphic response of rivers below dams by sediment replenishment technique.” *Proceedings of River Flow 2010*, Braunschweig, Germany, pp. 1155-1163.
- Kondolf, G. M. (1997). “Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels.” *Environmental Management*, Vol. 21, No. 4, pp. 533-552.
- Kuhl, D. (1992). “14 years of artificial grain feeding in the Rhine downstream the barrage Iffezheim.” *Proceeding of 5th International Symposium on River Sedimentation*, Karlsruhe, Germany, pp. 1121-1129.
- Ligon, F. K., Dietrich, W. E., and Trush, W. J. (1995). “Downstream ecological effects of dams.” *BioScience*, Vol. 45, No. 3, pp. 183-192.
- Merz, J. E., Pasternack, G. B., and Wheaton, J. M. (2006). “Sediment budget for salmonid spawning habitat rehabilitation in a regulated river.” *Geomorphology*, Vol. 76, No. 1-2, pp. 207-228.
- Miyagawa, Y., Sumi, T., Takemon, Y., and Kobayashi, S. (2017). “Effects of sediment replenishment on riverbed material size distribution and attached algal biomass in the downstream reaches of a dam.” *Hydrological Research Letters*, Vol. 11, No. 2, pp. 114-120.
- Nilsson, C., Reidy, C. A., Dynesius, M., and Revenga, C. (2005). “Fragmentation and flow regulation of the world’s large river systems.” *Science*, Vol. 308, No. 5720, pp. 405-408.
- Ock, G., and 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.” *Ecology*, Vol. 95, No. 4, pp. 1172-1186.
- Ock, G., Gaeuman, D., McSloy, J., and Kondolf, G. M. (2015). “Ecological functions of restored gravel bars, the Trinity River, California.” *Ecological Engineering*, Vol. 83, pp. 49-60.
- Ock, G., Kondolf, G. M., Takemon, Y., and Sumi, T. (2013a). “Missing link of coarse sediment augmentation to ecological functions in regulated rivers below dams: comparative approach in Nunome River, Japan and Trinity River, California of US.” *Advances in River Sediment Research*, pp. 1531-1538.
- Ock, G., Sumi, T., and Takemon, Y. (2013b). “Sediment replenishment to downstream reaches below dams: implementation perspectives.” *Hydrological Research Letters*, Vol. 7, No. 3, pp. 54-59.
- Paintal, A. S. (1971). “Concept of critical shear stress in loose boundary open channels.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 91-113.
- Palmer, M. A., Bernhardt, E. S., Allan, J. D., Lake, P. S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C. N., Follstad Shah, J., and Galat, D. L. (2005). “Standards for ecologically successful river restoration.” *Applied Ecology*, Vol. 42, No. 2, pp. 208-217.
- Park, M., Lee, J., Jung, S., Park, C., Chang, K., and Kim, B. (2012). “Effects of sand supply and artificial floods on periphyton in the downstream of a dam (Yangyang Dam, Korea).” *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 28, pp. 418-425.

- Power, M. E., Dietrich, W. E., and Finlay, J. C. (1996). "Dams and downstream aquatic biodiversity: potential food web consequences of hydrologic and geomorphic change." *Environmental Management*, Vol. 20, No. 6, pp. 887-895.
- Reid, L. M., and Dunne, T. (2003). "Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology." *Tools in fluvial geomorphology*, John Wiley&Sons Ltd., West Sussex, UK. pp. 463-500.
- Sumi, T., Kantoush, S., Esmaili, T., and Ock, G. (2017). "Reservoir sediment flushing and replenishment below dams: insights from Japanese case studies." *Gravel-bed rivers: processes and disasters*, John Wiley& Sons, West Sussex, UK. pp 385-414.
- United States Department of the Interior (USDOI) (2000). *Record of decision: trinity river mainstem fishery restoration, final environmental impact statement/environmental impact report*. US Department of the Interior, Washington DC.
- Wheaton, J. M., Pasternack, G. B., and Merz, J. E. (2004). "Spawning habitat rehabilitation-I. Conceptual approach and methods." *International Journal of River Basin Management*, Vol. 2, No. 1, pp. 3-20.
- Williams, G. P., and Wolman, M. G. (1984). *Downstream effects of dams on alluvial rivers*. USGS professional paper 1286, Reston (VA).
- World Commission on Dams (WCD) (2000). *Dams and development: a new framework for decision-making: the report of the world commission on dams*. Earthscan Publication, London.