

4대강 자연성회복 마스트플랜 수립을 위한 선진사례 연구

2020년 7월

환 경 부
염 정 섭

< 요약 문 >

○ 하천의 구조와 기통

- 상류로부터 물, 퇴적물, 영양물질 등과 같은 물질과 위치에너지가 운동에너지로 바뀌는 힘에 의한 침식-퇴적 작용 통해 변화해 감
- 하천은 이수적인 기능뿐만 아니라 다양한 생태적 기능 등 생태계 서비스 기능을 다양하게 함

○ 하천복원 이론과 실제

- 하천복원(Restoration): 훼손된 하천을 원래 교란 이전에 가지고 있던 생태적 기능과 구조에 최대한 가깝게 되돌리는 것이나, 특정한 시점을 목표로 복원하는 것은 아니며 훼손 이전의 역동성과 다양성 복원에 초점
- 하천의 연속성은 종적, 횡적, 수직적 요소가 있으며, 이를 교란하는 요인으로는 자연적, 인공적 요인이 있음
- 주요 복원기법으로는 하천공간 확대, 홍수터 연계 활용, 유사 투입, 댐/보 철거, 수로 변경, 수변완충대 조성, 강변저류지 조성, 복개하천 복원, 환경유량 도입 등이 있음
- 생태계 회복을 중심에 둔 설계 기법으로는 공간적 변화의 순이득 증대 방안, 자생적 에너지 우선 활용, 유연한 재료 활용한 복원, 직접적인 서식지 조성이 아니라 시간이 지남에 따라 적합한 서식지 생성에 초점 등을 들 수 있음

○ 도시하천의 이론과 실제

- 불수투층 증가로 인해 침투유량 증가, 발생시간 감소, 기저유출량 감소 등의 특성 보임
- 도시하천에서는 사회적 연결성이 매우 중요하며, 이를 통한 도시민의 친수활동 제고 사례 다수 있음

○ 하천복원 추진방향

- 상하류를 아우르는 통합적 유역관리가 필요하며, 이때 환경유량 (Environmental Flow) 도입하여 강의 역동성 높이며, 유역 시스템의 내재적 에너지 최대한 활용
- 적응적 관리 기법을 도입하여 하나의 사건으로 종결되는 복원사업이 아니라 과정으로 지속되는 패러다임으로 전환 필요

차 례

I 서론 -- 5

II 하천 개요 및 변화 과정 -- 8

1. 하천 개요 -- 8)
2. 하천의 변화 과정 -- 11

III 하천 복원 이론과 사례 -- 28

1. 하천 복원 이론 -- 28
2. 미국의 하천복원 사례 검토 -- 56
3. 복원 사업 평가 -- 66

IV 하천과 도시 -- 69

1. 도시 하천의 특성 -- 69
2. 하천의 사회적 연결성 -- 72

V 하천복원 추진 방향 -- 91

1. 통합적 유역관리 -- 91
2. 적응적 관리 기법 -- 93

VI 결론 -- 95

참고문헌 -- 99

국외훈련 개요

1. 훈 련 국 : 미국

2. 훈련기관 : 캘리포니아대학교 버클리캠퍼스, 환경대학원, 하천 연구실
(River Lab, College of Environmental Design,
University of California Berkeley)

3. 훈련분야 : 과장급 국외직무훈련 / 환경정책

4. 훈련기간 : 2019. 8. ~ 2020. 8.

훈련기관 개요

1. 훈련 대학 : University of California Berkeley

- University of California 계열 학교는 각각 자체적인 완결성을 가지고 있는 거대한 규모를 갖춘 9개의 캠퍼스로 이루어짐
 - 교수는 약 8,000명, 총학생수는 약 13만 명에 이르며, 버클리, 데이비스, 애버딘, 로스앤젤레스, 리버사이드, 샌디에이고, 산타바바라, 산타크루스, 샌프란시스코의 캠퍼스에 독립된 학장이 존재
 - 각 캠퍼스는 캘리포니아주의 고등교육계획에 의하여 106개 지역 대학들과 다른 19개 주립 대학교들과 기능을 분담
 - 그 중 Berkeley Campus는 UC 계열 중에서 가장 먼저 설립이 되었고, 전체 대학본부가 여기 위치
- Berkeley Campus의 기원은 1868년 설립된 랜드그랜트 칼리지
 - 초기에는 서부의 Yale을 표방하였다 하며, 학교 이름은 영국의 유명한 성직자인 Berkeley 경에서 따 왔다고 함
- 학문적 탁월성과 수준 높은 교수진으로 정평이 있으며, 대학원 수준은 Harvard, Stanford 등 명문 사립대학교와 경쟁 중
 - 인문·교육·음악·예술·상업·보건학과 등이 있는 2개의 학부와 9개의 대학원
 - 특히 과학·공학 분야는 전 세계에서 가장 우수한 대학 중 하나이며, 美 서부에서 졸업생, 전현직 교수 중 가장 많은 노벨상 수상자 배출
- Berkeley Campus는 1960년대에 미국 학생운동, 사회운동의 시발점
 - 60년대 당시 레이건 주지사가 공권력을 투입하여 인권운동 등에 대한 학생들의 격정적인 참여 활동(Free Speech Movement)을 진압하였지만, 이후 Berkeley Campus는 진보와 자유의 상징으로 자리매김 됨
 - 2020년 인종 갈등 국면에서도 학생과 교수진은 활발하게 사회적으로 발언
- 매우 자유로운 학풍으로, 학교 내에서 이루어지는 대부분의 Off-line & On-line 세미나, 행사 등은 재학생과 교수진뿐 아니라, 방문학자, 지역 주민 등 모두(심지어 여행객까지) 참여할 수 있도록 개방되어 있음

2. 훈련 기관 : College of Environmental Design

- College of Environmental Design은 환경계획, 건축, 조경 등 20세기 중반까지는 별개로 존재했던 학문 영역을 하나의 대학원으로 종합하여 출범
 - 이러한 착안은 William Wurster가 1950년대 MIT에서 UC Berkeley로 옮겨 오면서 실현
- UC 내부의 치열한 토론을 거쳐 새로운 대학원 건설이 1959년에 결정, 수많은 설계 논의를 통해 콘크리트로 된 현재의 건물이 1964년에 완공(현재 Wurster Hall로 불림)
- 당초의 융합 학풍 정신에 따라 학제 간 연구 풍토가 지속되어 옴

3. 소속 연구그룹 : River Lab

- River Lab은 G. Mathias Kondolf 교수의 지도하에 아시아, 유럽 등의 대학 및 연구기관에서 온 방문학자, 다양한 국적의 박사과정 학생 5명, 석사과정 학생 4명 등으로 구성(2019~2020 학기 기준)
- 캘리포니아 및 미국뿐만 아니라 전 세계 하천 복원 분야에 대한 폭넓고 선도적인 연구 활동 수행 중
 - 하천 복원: 미국-캐나다 공동 콜럼비아江 복원 프로젝트 연구, 수문학적-생태적-사회적 연계성 강화 방안 등 다수
 - 인프라 지속성: 콘크리트 하천 구조물 관리 방안 등
 - 홍수 관리: 댐 등에 의한 퇴적물 관리 통한 홍수 저감 평가 등
 - 하천 지형학: LiDAR 등의 기법 이용한 tool kit 개발 · 보급
 - 물-에너지 연계: 수력발전이 하천에 미치는 영향 분석(중국, 라오스 등) 등
- 연락처: G. Mathias Kondolf, PhD Professor of Environmental Planning, Landscape Architecture & Environmental Planning
address) 202 Wurster Hall, UC Berkeley 94720-2000 USA
email) kondolf@berkeley.edu
tel) +1 510 664 7804 (no voice mail)

I. 서론

헤아릴 수 없는 길고 긴 세월 동안 빗물이 물길을 내어, 강은 저마다의 모습을 만들어 왔다. 때때로 큰물이 지기도 하고, 간간이 바닥을 드러내는 자연의 이치에 따라 못 생명은 피고 지며, 무성해졌다.

선조들 또한 강에 기대어 터를 잡고, 이에 힘입어 찬란한 역사를 일구어 왔다. 강은 발원부터 하구까지, 선사(先史)부터 지금까지 굽이굽이 베풀면서 흘러왔다.

하지만, 세계사에 유래 없는 도약을 이루어 오면서 우리의 강은 제 모습을 잃어왔다. 논밭, 공장, 도시에 물을 대느라 정작 자신은 말라갔다. 물길은 제방으로 뿔뿔해졌고, 곳곳에서 댐, 보, 하굿둑으로 막혔다. 모래와 자갈이 뜰겨 나와 강의 속살 여기저기에 생채기가 남았다.

모듬살이 터전이 바뀌니 낯선 목숨들이 가람에서 세력을 넓혀갔다. 아이들은 더 이상 물장구로 여름을 나고, 뽕뽕 언 강 위로 미끄러지며 한 철을 보내지 않는다.

욕심과 무지로 달콤한 눈앞의 이익만 쫓은 셈이다. 그러는 동안 강은 생기를 잃고 제 빛깔이 흐려졌다. 그동안 인간이 강에 해 왔던 유위(有爲)는 외눈박이 결과만 낳은 셈이다.

무위(無爲)의 강은 훨씬 더 웅숭깊게 나누어 줄 수 있다. 못 생명의 집터이자 활기를 불어 넣는 원천이다. 윤택한 문명의 마중물이자, 쓰고 남긴 잔재를 맑게 되돌리는 정화수이다. 지친 하루가 기대어 쉴 수 있는 휴식처이자, 문학과 예술에 영감을 주는 영원한 시원지이다.

2008년 12월 국가균형발전위원회에서 “4대강 살리기 프로젝트”를 한국형 녹색뉴딜 사업으로 추진하기로 결정하고, 2012.5월 대부분의 보가 준공 되었다. 사업 추진단계에서부터 수질 악화, 생태계 파괴 등에 대한 문제 제기가 사업 완료 이후해도 지속적으로 제기 되어 왔다

그동안의 수차례 감사원 감사와 조사·평가에도 지속되는 사회적 논란 종식하기 위해, 2017년 4대강 자연성 회복을 국정과제(59-3)로 선정하여 역점 추진하고 있다.

국조실 통합물관리상황반('17.5~18.6) 및 환경부 4대강 자연성 회복을 위한 조사·평가단(대통령훈령 제393호, '18.8~) 주관 하에, 물이용에 제약이 발생하지 않는 범위 내에서 2017년 6월부터 보 개방을 추진하고 있다.

지금까지 13개 보를 전부 또는 부분적으로 개방하였다.

보 개방 결과를 토대로 자연성 회복 방안 마련에 활용할 수 있도록, 14개 분야별(수질, 수생태, 육상생태, 수리수문, 지하수, 물이용(취수, 양수), 경관, 퇴적물, 구조물, 어패류 구조, 하천시설(친수시설, 어도 등), 농어업 피해, 지류하천 영향, 보 활용) 과학적은 모니터링을 진행하고 있다.



< 4대강 16개 보 개방 현황 >



< 보 개방 이후 자연성 회복 사례 >

이러한 보 개방의 결과 물 흐름 회복되어 수질 일부 개선, 여울 생성, 모래톱 복원, 동식물 서식처 증가 등 4대강 자연성 회복 가능성이 실증적으로 확인되었다.

하지만 강의 자연성 회복은 16개 보에 대한 문제에 국한되지 않는다.

유역 전체의 관점의 자연성 회복이라는 측면에서 종적 연결성 회복 측면의 보에 대한 정책방향과 더불어 생물의 서식지 복원 통한 다양성 증진, 맑은 물로의 회복, 아울러 지역주민의 일상의 삶과 함께 하는 강으로 되살아나는 것을 포괄하는 것이 바람직하다.

강의 자연성 회복을 과거 또는 현재보다 나은 본연의 모습으로 가는 일련의 과정으로 이해될 수 있으나, 아직 자연성 회복에 대한 바람직한 미래상이나, 추진과정에서 단계별 세부 목표 등은 구체화되어 있지 못한 상황이다.

1990년대 이후 하천복원 노력이 시작되었지만, 일관된 철학과 방향 속에서 추진되지 못하고 주체가 분절되어 진행되는 등 여러 시행착오도 겪었다. 강의 자생력을 스스로 키워주는 것 보다는 인위적으로 자연형 하천을 만드는 데 치중하는 경우가 많았고, 기존 하천 개발의 방식에 일부 환경적 요소를 가미하는 데 그치는 경우가 많았다.

기후변화에 대비한 이·치수 대책 및 하천복원을 표방한 ‘4대강 살리기 사업’ (2009~2012)도 대규모 준설과 보 건설 등으로 하천의 환경에 큰 변화를 가져와 녹조빈발, 생태계 교란 등 많은 문제점을 드러내며 사회적 논란과 갈등을 유발했다.

이에 국정과제 59. 지속가능한 국토환경조성(환경부) 중 ③ 4대강 재자연화 과제로 명기되어 있는 [4대강 재자연화 대책에 따라 자연성 회복·복원 사업 추진]은 매우 필요한 사업으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 하천의 자연성 회복에 관한 선진 사례를 조사·분석하여 앞으로 수립 될 종합적인 계획에 기여하고자 한다.

이를 위해 우선 하천의 구조적인 변화와 관련된 제반 이론과 사례를 검토한다. 하천복원과 관련된 이론과 다양하게 시도되고 있는 복원기법과 이에 대한 사례도 연구한다. 하천복원 사업을 평가하는 기법도 조사한다.

뿐만 아니라 하천과 도시와의 관계도 연구한다. 시가화 된 지역이 많은 우리 국토의 현실에서는 도시의 하천 복원도 중요한 사항이기 때문이다. 도시 하천의 특성을 파악하고, 하천을 통한 사회적 연결성을 높이는 방안과, 미국 도시하천 복원의 성공과 실패 사례를 분석한다.

마지막으로 최근 하천복원의 바람직한 추진방향 제시되고 있는 방안을 조사한다. 통합적 유역관리 방안과 적응적 관리방안을 조사한다.

Ⅱ 하천 개요 및 변화 과정

1. 하천 개요

가. 기본적인 구조와 기능

하천이라는 생태계는 중력에 의해 상류에서 하류로 흐르는 물의 위치에너지를 기반으로 지형이 변화변해 간다. 아울러 물과 관련된 다양한 식생과 동물이 지속적으로 상호작용하는 복잡한 시스템이다. 하천의 역동적인 모습은 캘리포니아 Carmel 강의 사례에서 잘 드러난다.

Carmel River

1987



1993



1995



강의 공간적 범위를 평상시 물 흐르는 수로와 그 주변만아니라 홍수터(또는 둔치)를 망라한 상하류를 아우르는 유역적 관점에서 보는 것이 좋다.

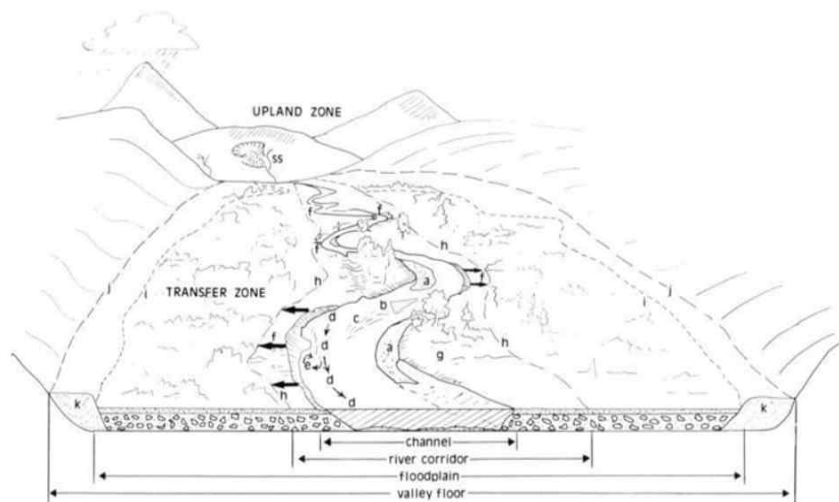
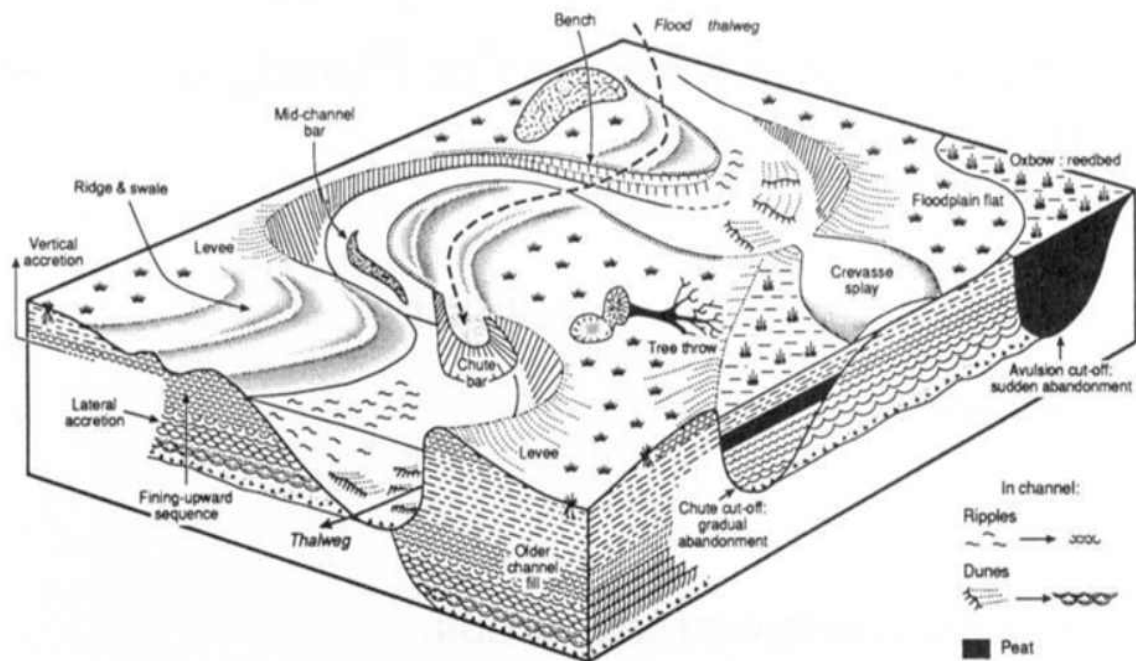


Figure 8.1 The catchment context for restoration. Key: (a) point bar; (b) mid-channel bar; (c) shallow still water, typical of riffle; (d) deeper, convergent flow corresponding to pool; (e) secondary current; (f) erosion of bank as point bars form (arrow indicates direction of change); (g) vegetation in river corridor increases hydraulic roughness; (h) boundary of river corridor; (i) edge of floodplain; (j) limit of valley floor; (k) terrace; (ss) zone of sediment supply and storage (after Brookes (1995a); reproduced by permission of John Wiley & Sons Ltd)

강의 자연적 물길은 하나에서 시작하지만 아래로 내려가면서 다른 하천과 합쳐진다. 각각의 강은 물리적, 화학적, 생태적 특성이 다르며, 합류된 이후에는 새로운 환경을 만들어 낸다. 구불구불하게 흐르는 물길에서는 빠르게 흐르는 여울과 천천히 흐르는 소(웅덩이)가 다양하게 나타나며, 이는 각각에 적합한 생물에 역동적인 서식처를 제공한다.

이러한 측면에서 도시화 등으로 사라진 물길, 하도, 샛강을 복원하는 것은 해당 지역의 생태계 서비스를 다양하게 해 준다.



하천에 흐르는 수량과 수질은 하천의 서식환경에 기본적인 토대를 제공한다. 상류에 댐이 만들어지거나 물길의 방향이 달라진다면, 생물의 서식에 큰 영향을 미칠 수밖에 없다. 오염물질이 늘어나는 것도 생물의 서식에 부정적인 영향을 미친다.

하천은 적정 부분까지 물이 흘러야 식생이 과도하게 자라는 것을 막을 수 있다. 식생이 과도하게 자라면 홍수위가 올라가고, 평상시 물 흐름에서도 하천 바닥이 더 깊게 파이며, 홍수 시 토사 이동이 제한되어 어류의 서식지도 줄어들다.

자연적인 강은 물리적으로 상류와 하류, 좌안에서 우안이, 수면에서 지하수가 물리적으로 연결되어 있어 다양한 동식물의 이동 통로이자, 토사, 유기물, 영양물질 등의 운반통로 역할을 한다.

하천 생태계는 서식지를 기반으로 생물 간의 먹이 사슬, 생태적 지위 등으로 이해될 수 있다.

먹이 사슬은 하천 외부로부터 영양물질, 이산화탄소 같은 물질과 태양빛과 같은 에너지를 받아들이는 것부터 시작한다. 광합성을 하는 1차 생산자로부터 유기물이 만들어지면 상위 포식자들에 의해 먹힌다. 이러한 기본원리를 토대로 하천 생태계는 지속적으로 순환하게 된다.

공간적으로 하천을 계층적으로 나누어 볼 수 있다. 가장 큰 범위는 하천 유역이다. 하나의 집수구역 전체를 이르는 말이다. 그 속에 각각의 하천구역이 있다. 하나의 물줄기를 이루는 공간적 범위이다. 하천구역은 그 보다 작은 하천구간으로 나뉘 수 있다. 하천구간은 다수의 여울-소 구간으로 구성된다. 여울과 소에서 물 흐름은 종적-횡적 변화가 다양하며, 생태계의 다양성도 높아진다. 물 흐름이 역동적이기에 수중 생물의 산소 공급원인 용존 산소가 풍부하게 된다. 가장 작은 생태적 단위로 미소서식처가 있다.

나. 하천의 종류

1) 암반하천(bedrock river)

하상이 고정되어 있어 침식과 퇴적 작용에 영향을 거의 받지 않는 하천이다. 하지만 아주 긴 시간에 걸쳐서는 점진적으로 퇴적과 침식이 일어나기는 한다.



South Fork Yuba River, California

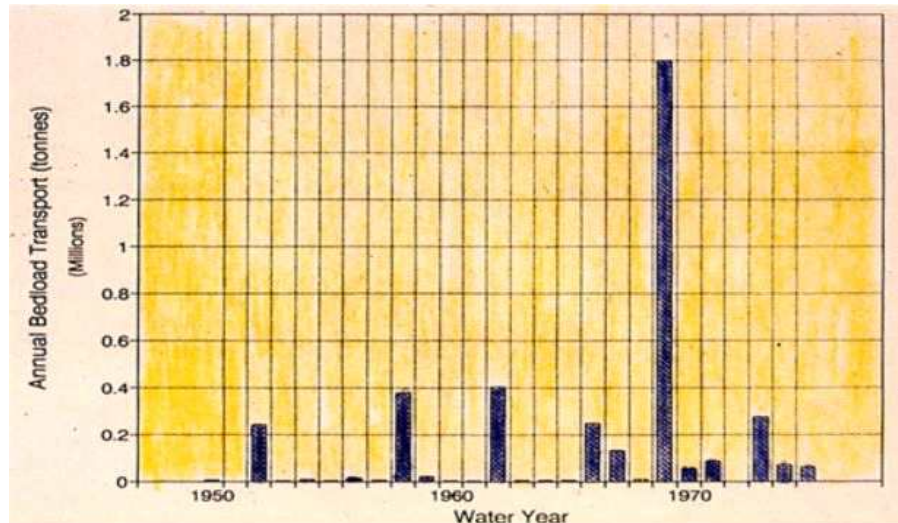
2) 충적하천(alluvial river)

물의 흐름에 따라 평면, 단면, 종단면이 변하는 하천을 말한다. 다시 말하면 물이 흘러 시간에 따라 스스로 형태를 바꾸는(self-formed) 3차원적 변화가 지속되는 하천이다.

2. 하천의 변화 과정

가. 침식-퇴적작용

평상시 유량에서 일어나는 침식-퇴적에 비해 간헐적으로 일어나는 홍수 등에 의해 발생하는 침식-퇴적량은 매우 크다. 아래 캘리포니아 산타 블라라 강의 경우, 대부분의 퇴적은 40년 빈도 강우인 1969년 홍수에서 일어났음을 알 수 있다.



이러한 침식-퇴적 작용이 일어나는 빈도의 차이에 따라, 평상시 하천의 모습은 아래와 같이 다르게 보인다.



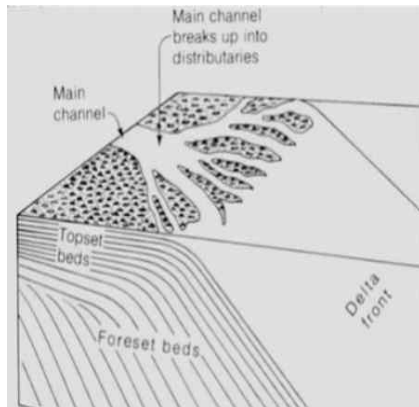
홍수 빈번한 하천의 평상시 모습



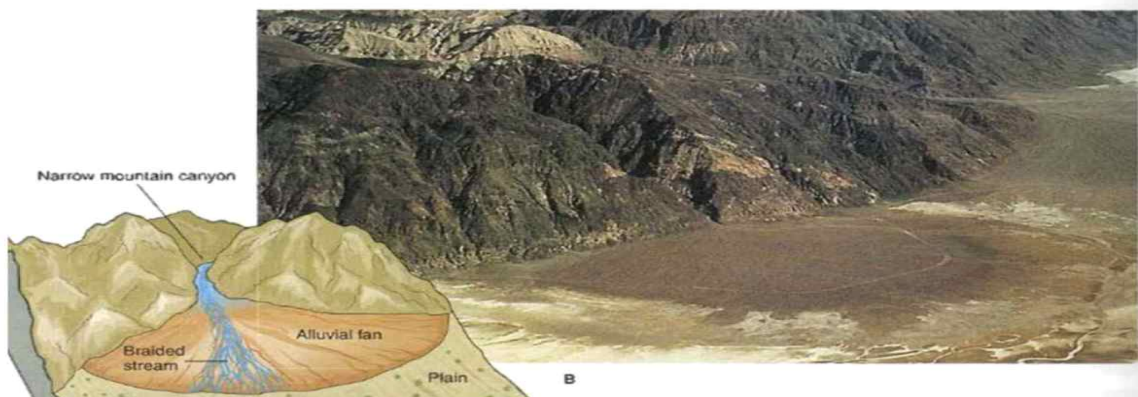
홍수가 드문 하천의 평상시 모습

나. 삼각주와 선상지

유사를 이동시켜 온 에너지가 급격히 낮아지면, 유사는 부채꼴 모양으로 퇴적된다. 이러한 퇴적지를 삼각주라고 한다.



삼각주는 선상지와는 다르다. 선상지는 산간지대에서 갑자기 평야지대로 내려오면서 운동에너지가 급격히 낮아져, 입자가 상대적으로 굵은 퇴적물이 쌓인 지대이다. 도심지 인근의 선상지는 잠재적 홍수 위험이 있으며, 많은 사람들이 선상지를 안정화되어 있다고 오해하기도 한다.



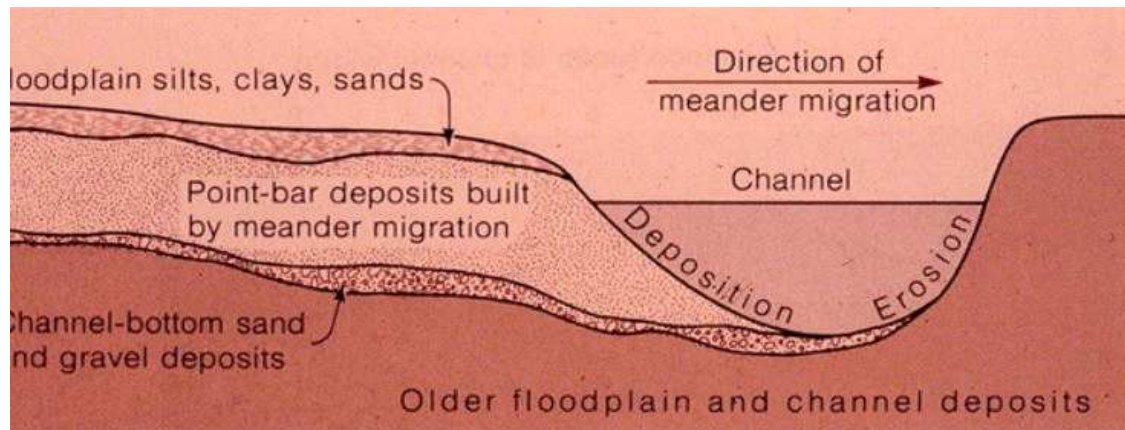
또한 선상지 지역의 하천복원 사업은 종종 실패하는데 이는 선상지로 유입되는 간헐적인 강한 유사이동을 고려하지 못해서 일어난다.



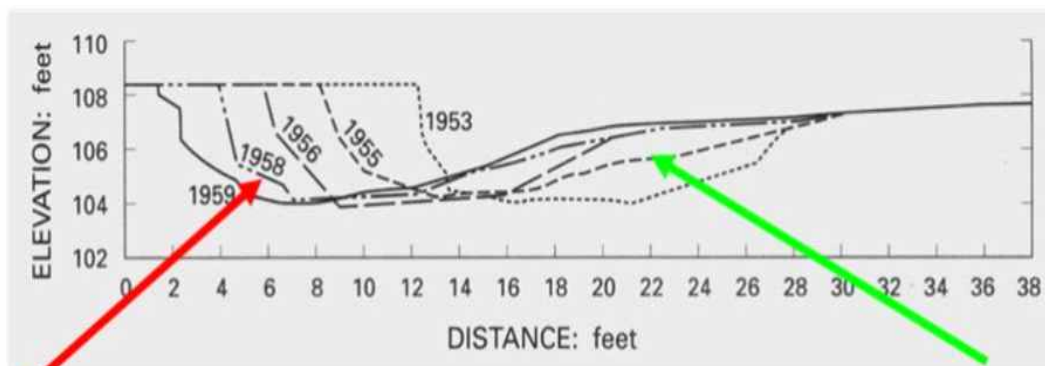
하천 복원 사업 이후 파괴된 현장(캘리포니아 Napa, Selby Creek, 2006)

다. 홍수터의 형성과 변화

횡적 퇴적과 종적 퇴적을 통해 하천 수로와 제방의 모습은 바뀌어 간다.



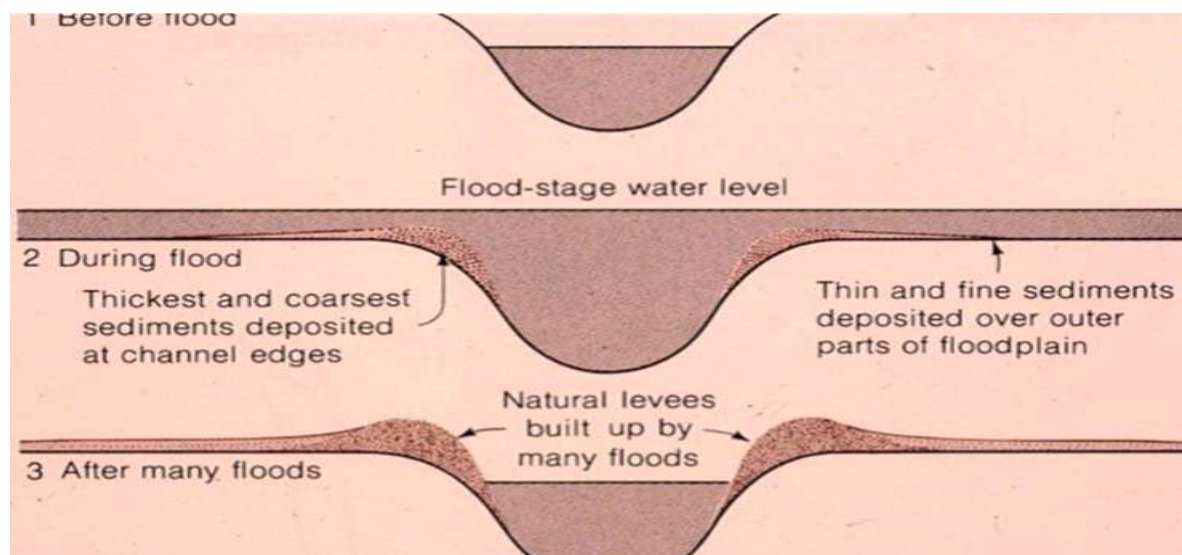
이렇듯 홍수터 좌우안 사이의 침식과 퇴적 양상이 달라지면서 하천수로는 시간에 따라 바뀌어 간다.



Bank retreat

Construction of point bar; the upper surface is called the active floodplain

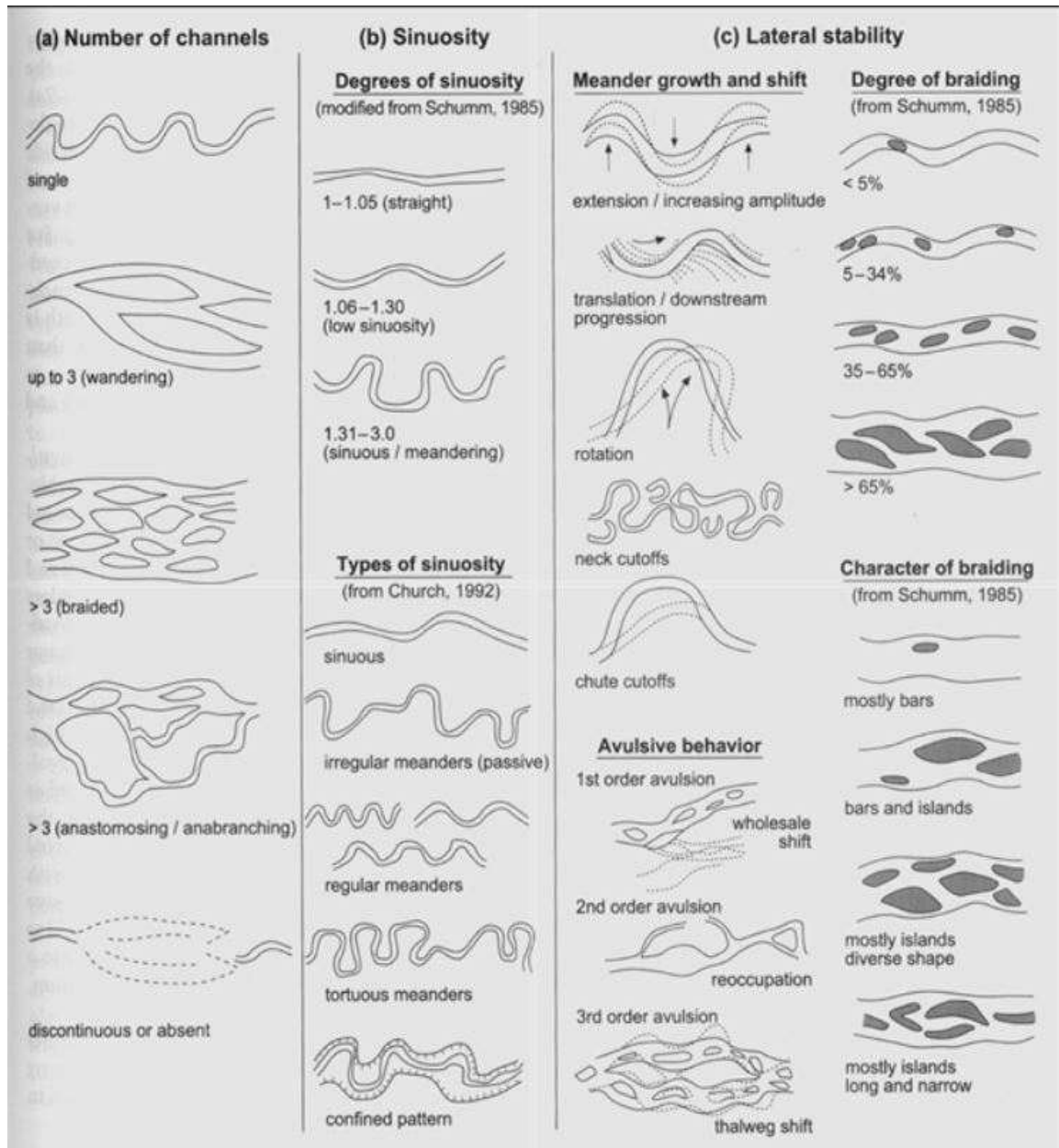
둔치는 홍수터가 지속적으로 올라가 과거부터 퇴적이 누적된 곳이다.



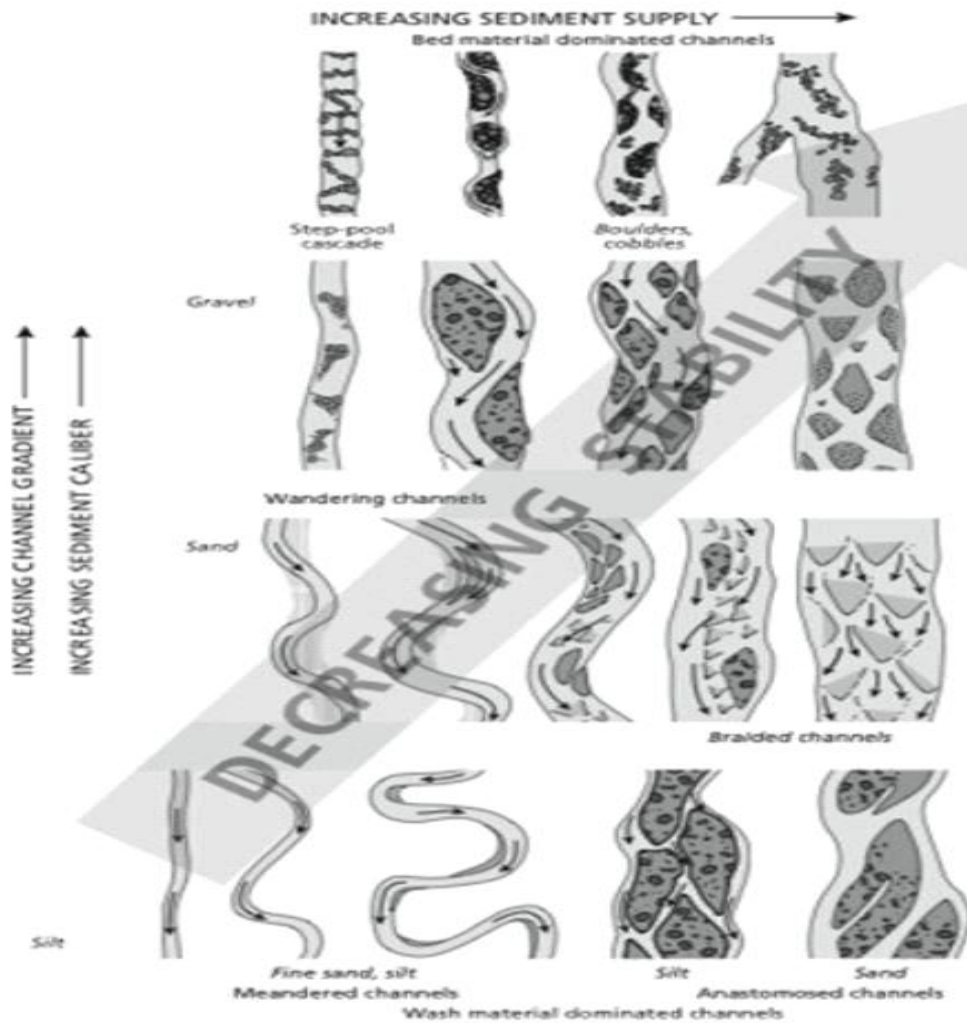
라. 하천 수로의 다양한 형태와 변화

1) 하천 수로의 형태

기후, 강수량, 고도, 하상의 물리적 성질 등 다양한 요인에 의해 하천 수로는 매우 다양하며, 아래 그림과 같이 그룹핑 할 수 있다.

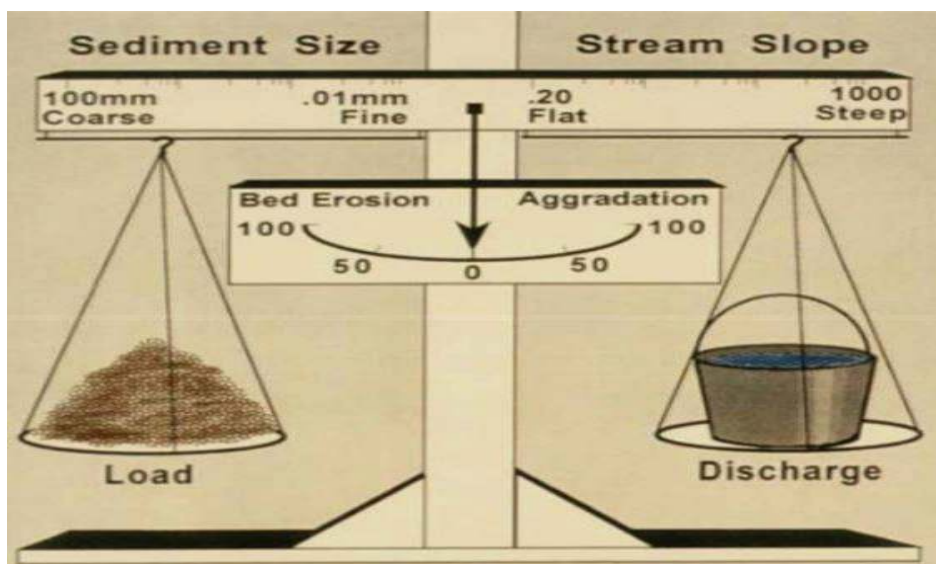


유사 이동과 공급, 수로의 경사도에 따라 수로의 모양은 바뀌며, 유사 이동이 많아질수록 직강화 하천이 사행하천으로, 나중에는 망상하천으로 바뀌게 된다. 하천의 운동에너지가 커지고 유사량이 커질수록 하천의 안정도는 낮아진다.

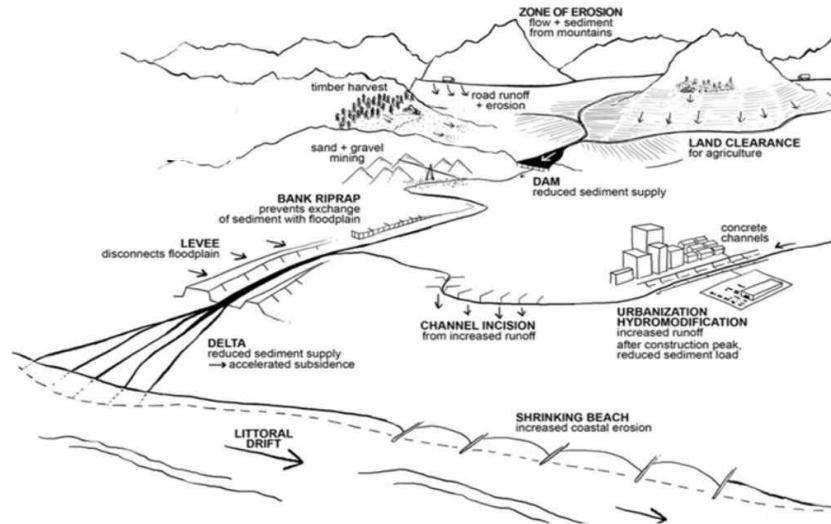


2) 하천 수로의 변화

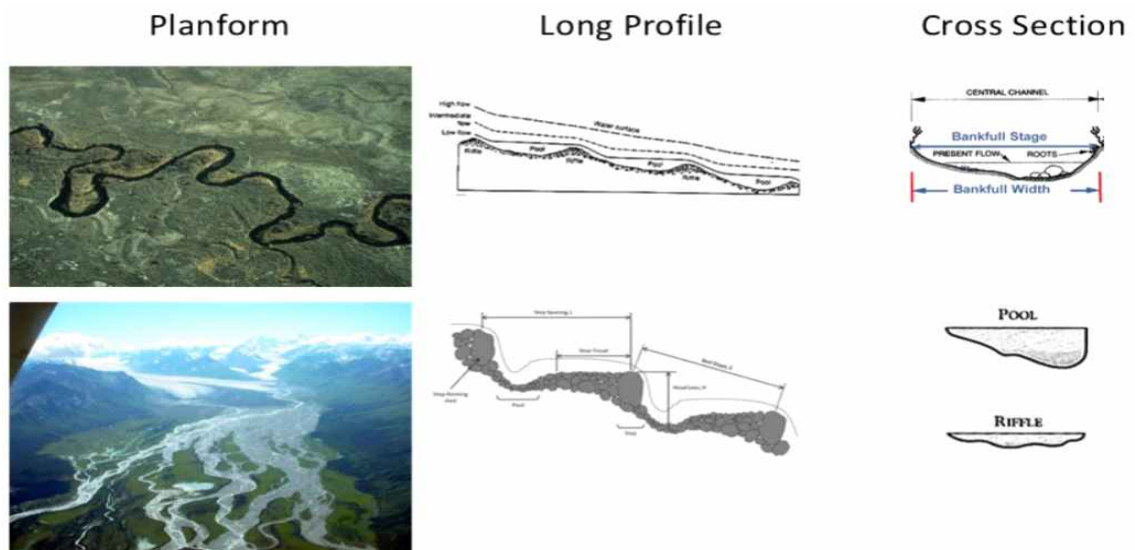
유량의 변화와 유사이동에 따라 하천 수로는 변동하게 된다. 안정된 수로에서는 퇴적과 유하고도 사이의 균형이 이루어진다.



하지만 인간의 개입에 의해 이러한 균형점은 파괴되고 하천 수로의 인위적 변동이 일어난다.



하천의 수로는 평면적 변화, 수직적 편화, 횡단면 변화로 나눌 수 있다.



우선 하천에는 평면적 변화가 있다. 자연 상태의 강은 구불구불 흐르고, 크고 작은 섬들이 생멸하지만, 강을 통제하기 시작하기 위해 제방으로 물길을 곧게 만들었다. 직강화로 새로 만들어진 공간은 농경지나 공업용지 등으로 활용되었다.

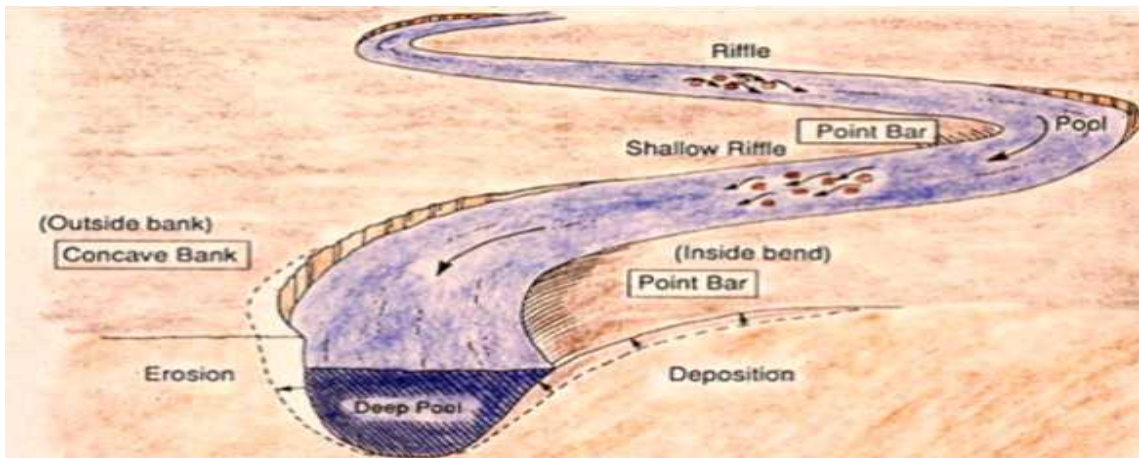
직류하천은 하천구간에 걸쳐 곡선하도가 없는 경우를 말한다. 자연적인 하천은 이런 경우가 거의 없다. 인공하천에 많다.

사행하천은 물길이 곡선을 이루는 하천이다. 대부분의 자연하천이 사행하천에 해당한다. 물길은 구불구불하게 흐른다는 통념에 가장 어울리는 하천의 모습이다. 하천의 최심선 길이(만곡 하도의 길이)와 직선거리의 비율이 만곡도인데, 보통 1.5 이상이면 사행하천으로 본다.

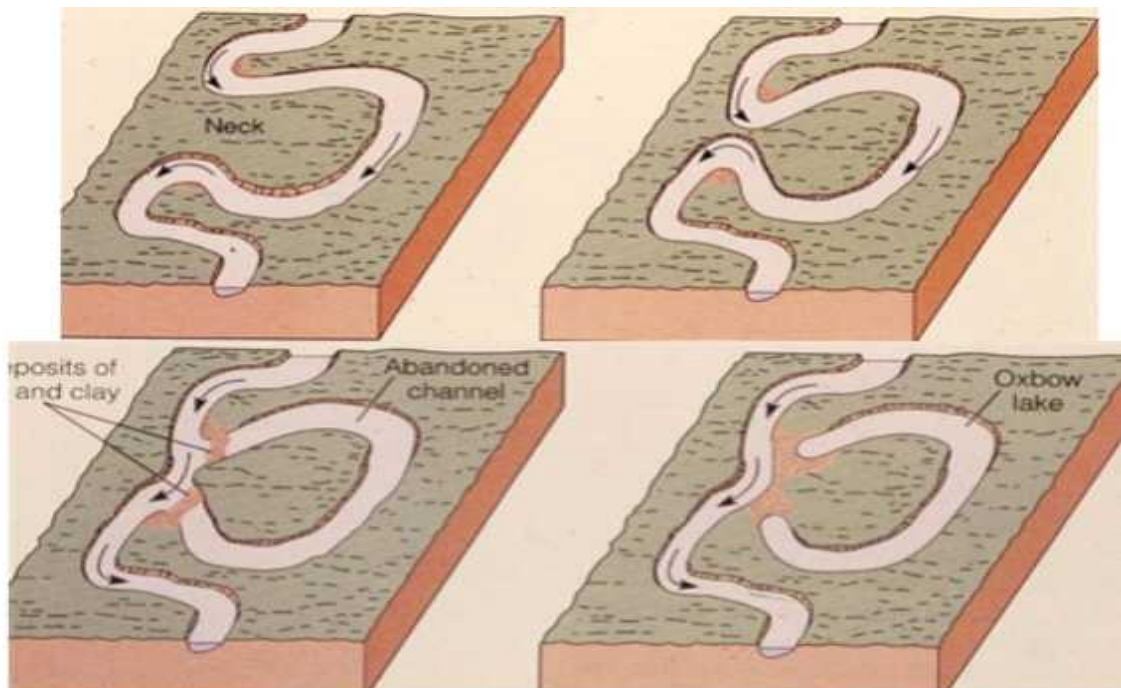


Carmel river, California

사행하천의 측면은 침식과 퇴적이 일어나는 공간이 차이가 난다.



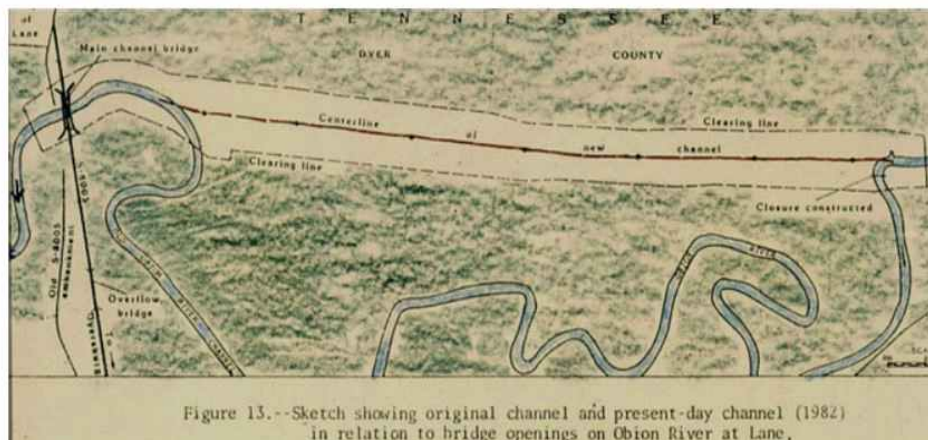
사행하천에서 침식과 퇴적이 계속 일어나면 만곡도가 점점 커져서 만곡부의 바깥쪽과 다른 바깥쪽이 만나 새로운 물길과 우각호가 생긴다.



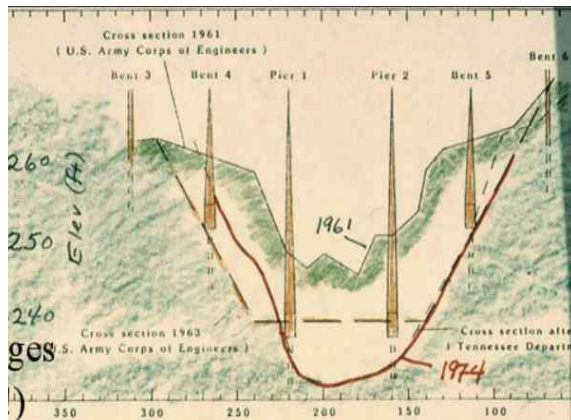
캘리포니아 새크라멘토 강에서 1970년대에 인위적으로 사행하천의 만곡부를 잘라내고 수로를 짧게 만들었다. 이로써 유속이 빨라지고 수로 내 침식 가속되어 물고기의 서식환경이 나빠지는 상황이 발생하기도 했다.



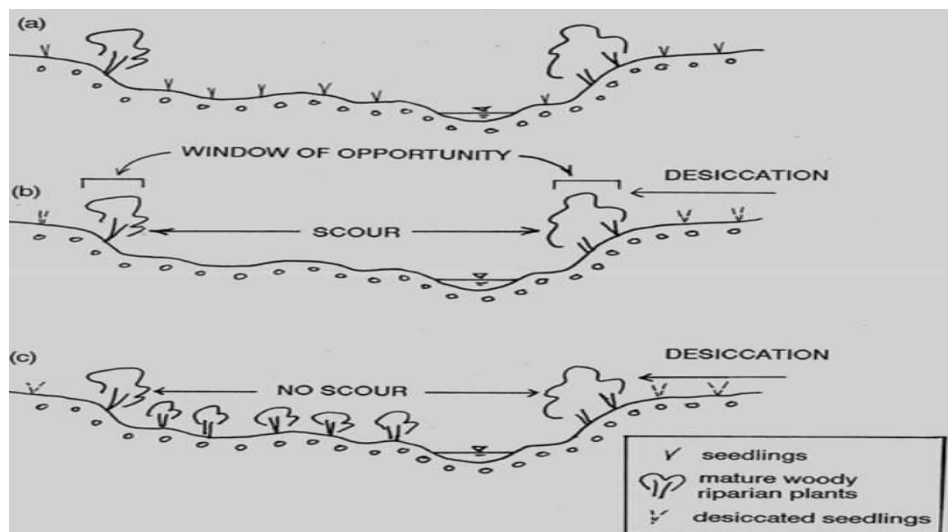
다른 사례로 테네시주의 Obion river의 경우에도 1980년대 사행하천을 직강화로 정비한 사례가 있다.



이후 홍수를 거치면서 교각의 지지대가 침식되어 다리의 안정성이 파괴되고, 지류 침식도 일어나 해당 지역의 식생에 피해가 생기기도 했다.



사행하천에서 새로 인입한 식생은 퇴적이 최근에 일어난 곳에 주로 식생하며, 이후 식생천이를 거쳐 높고 오래된 표면으로 이동하게 된다. 이렇듯 사행구간은 역동성이 높아 불안정성이 큰 구간이다.



사행하천에서는 역사적인 하천지형에 대한 이해가 필수적이다. 아래와 같이 사행하천은 하천구간 내에서 물길의 자주 바뀌어 왔음을 알 수 있다.



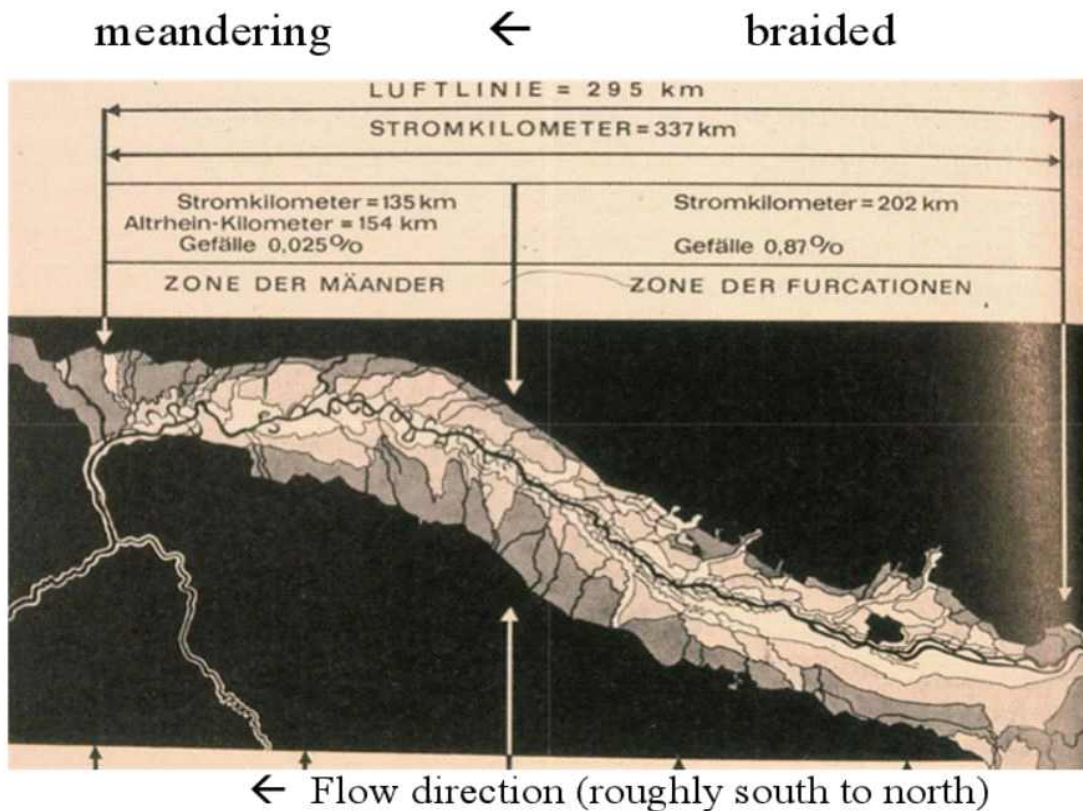
From Shelton 1968 *Geology Illustrated*

다지하천 또는 망상하천은 하천경사가 급하고 수심이 얇은 여러 줄기로 물이 흘러 나가는 하천을 말한다. 이는 퇴적량 이송 능력 보다 많이 유사가 이동되거나, 갑자기 하폭이 넓고 수심이 얕아지는 곳, 또는 제방이 침식에 불안정한 지역에서 만들어진다.



Rakaia River, South Island, NZ

라인강의 경우에 하천 수로의 모습이 상류의 망상하천 모습에서 하류의 만곡하천으로 바뀌는 것을 확인할 수 있다.



퇴적물 크기에 따라 하상과 제방의 모습은 달라진다. 점토질 수로의 경우 좁아지고 깊어짐에 반해 모래질 수로는 넓어지고 얕아지는 경향이 있다.



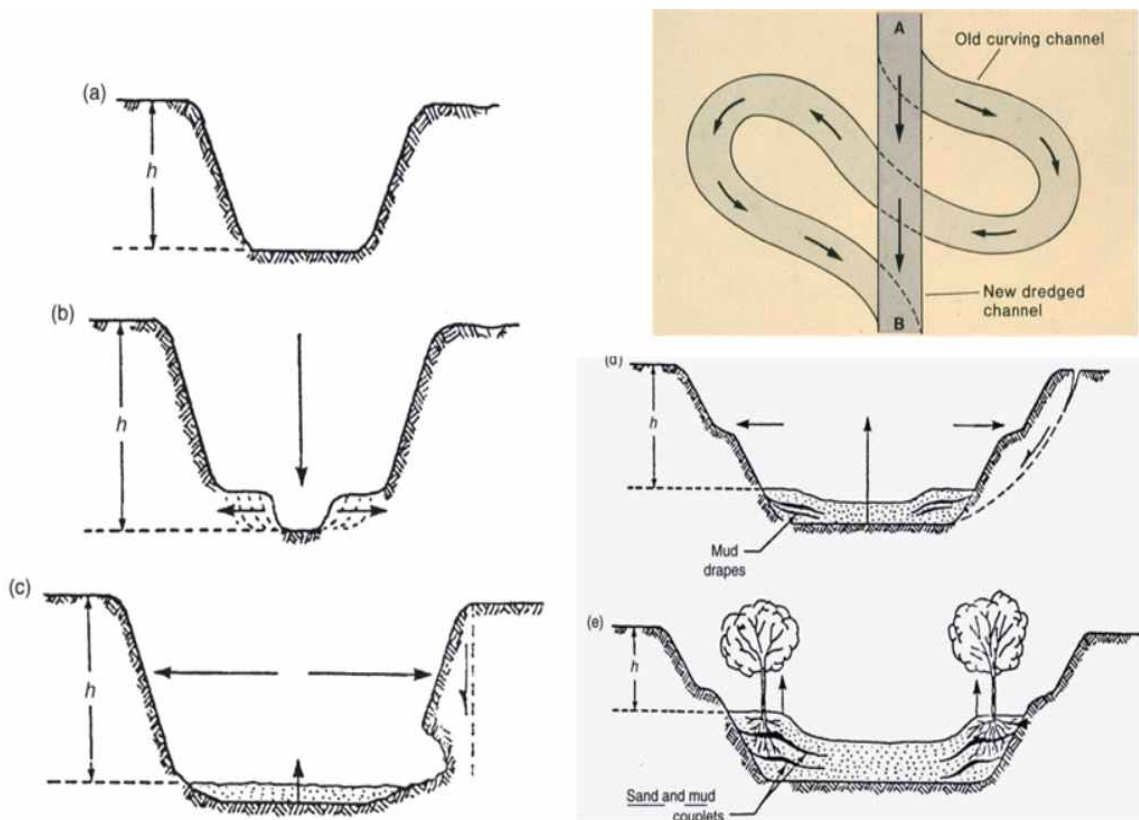
Rio Pueroco, NW(점토질)



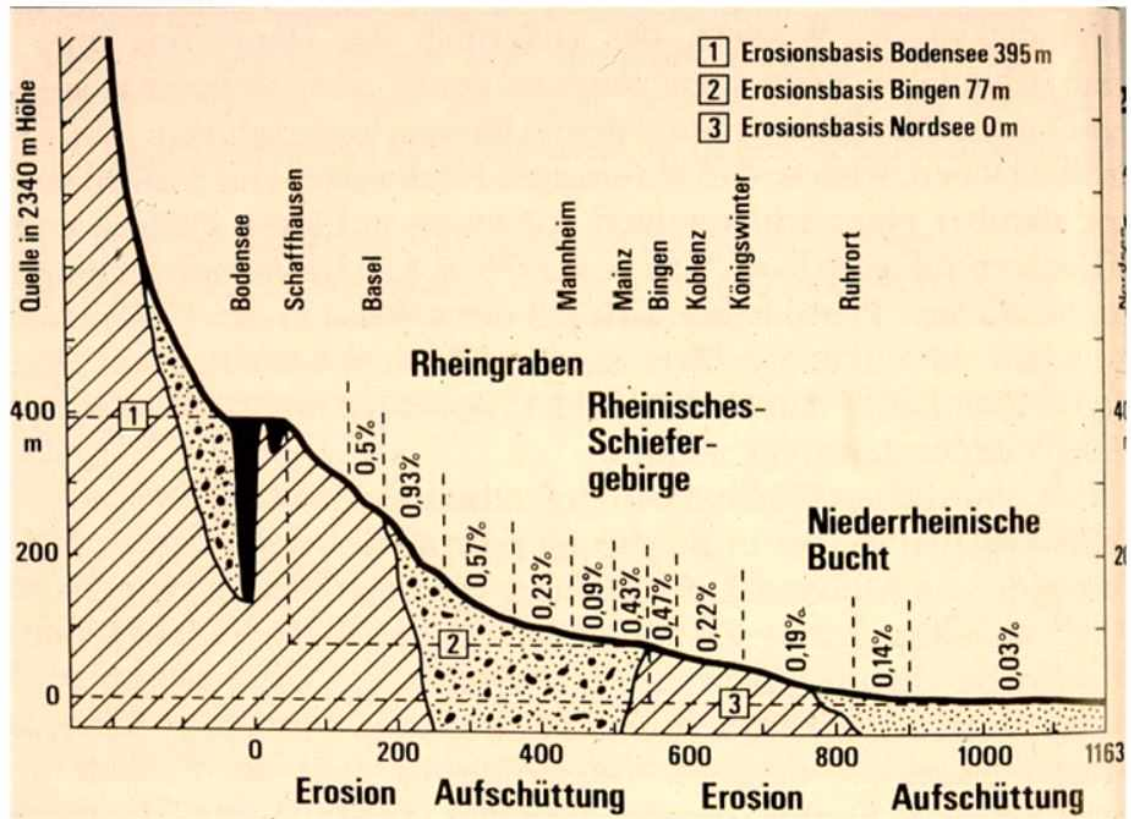
Caynon de Chelly, NW(모래질)

Schumm은 시간에 따른 수로의 진화를 모델로 제시하였다. 단단면 하상 (a)의 중앙이 새로운 물길이 나면서 복단면(b)으로 진행된다. 시간이 더욱 지나면 하상 중앙의 수로가 넓어지면서 다시 단단면(c)로 바뀌고 강택의 침식도 초래한다. 넓어진 수로에 퇴적이 일어나면(d) 여기에 관목 등이 천이 (d)해 와서 육역화가 진행된다.

이러한 과정은 사행하천에 우각호가 생기면서 새로운 물길이 만들어지는 과정과 같이 일어날 수 있다.

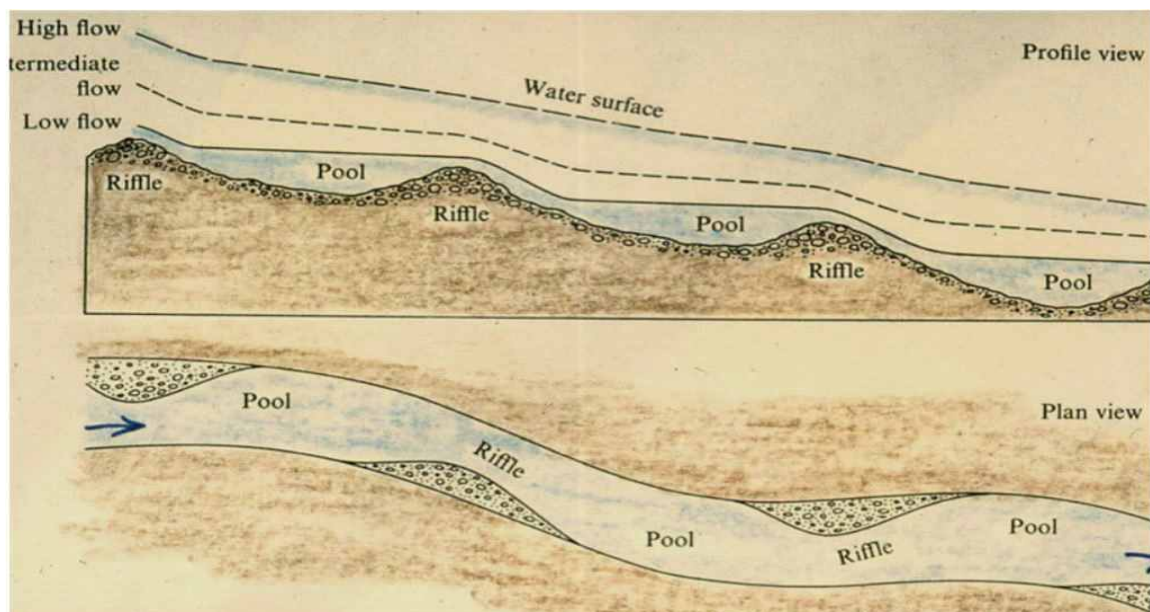


강의 종단적 변화는 고도 차, 하상의 형태, 소(pool)의 빈도와 깊이 등에 따라 일어난다.

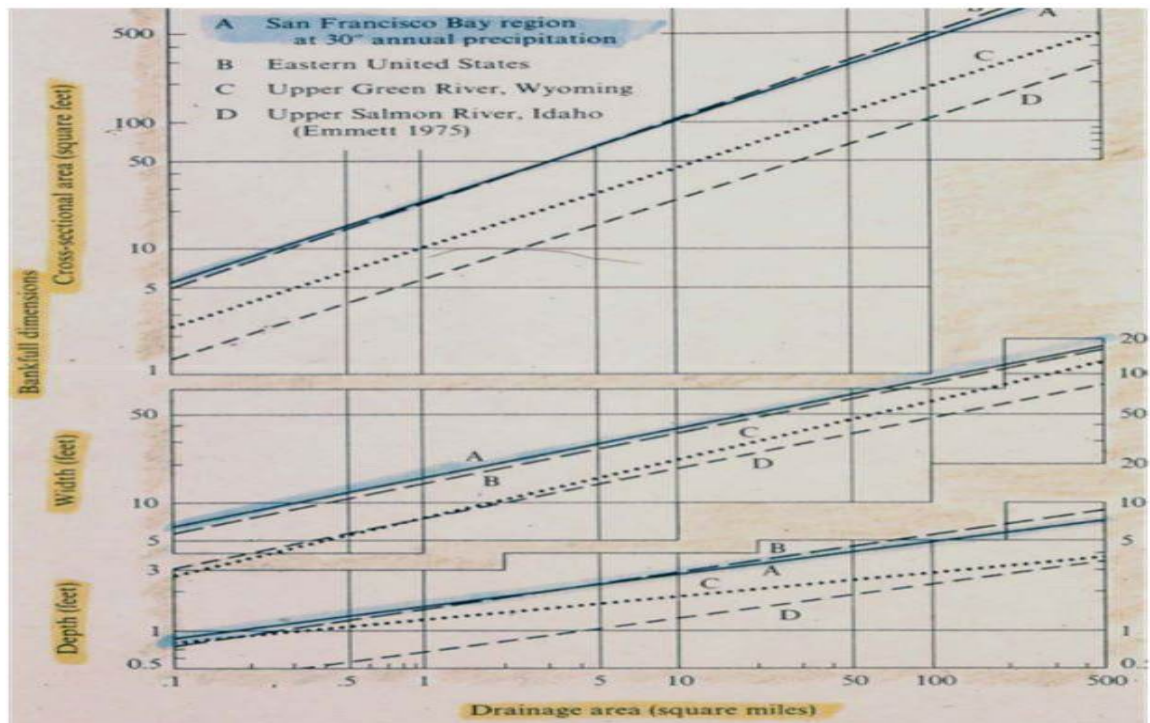


암반하천 영향을 받는 라인강의 종단면도

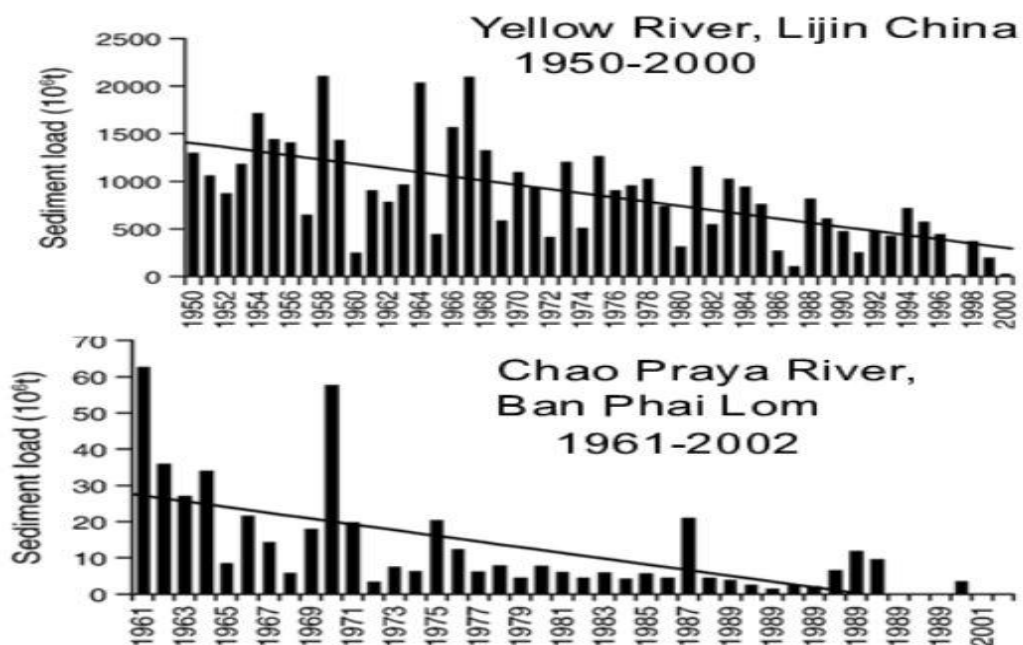
대표적인 변화는 여울-소(沼)의 변화이다. 자연 상태에서는 큰 자갈이나 바위가 있는 부분은 침식이 약하고, 작은 자갈이나 모래가 있는 부분은 잘 쓸려 나간다. 이렇게 단단한 부분은 여울로 되어 수심이 얇고 유속은 빠르다. 침식이 많이 일어난 공간은 소가 되어 수심이 깊고 유속은 느리다.



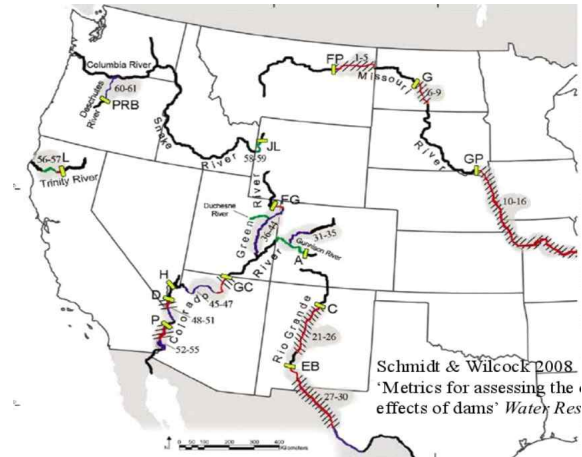
미국의 대표적인 하천의 수심, 하폭, 종단면적과 유역 면적을 분석하면, 아래와 같이 각 하천 내의 균형적 경향성은 다른 하천과 차이를 보인다. 하천마다 침식과 퇴적 사이 고유한 역학 균형을 이룬다는 것을 알 수 있다.



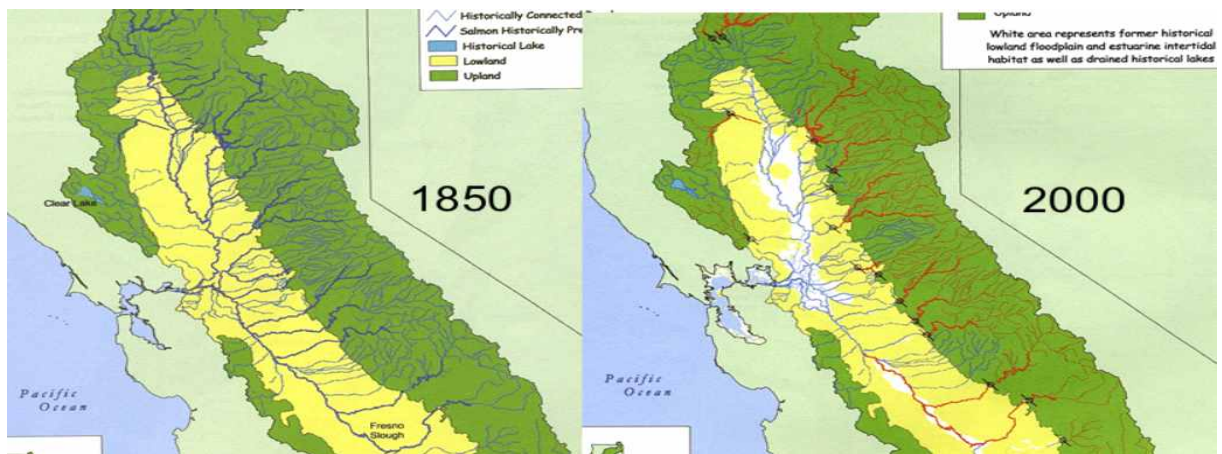
하천 종단면은 준설과 같은 인공적인 교란 요인에 의해 변형되어 왔다. 또한 상류 댐으로 인한 줄어드는 유량과 평탄해진 유황으로 인해 퇴적물 이동 또한 줄었다. 현대의 많은 하천에서는 댐 등에 의해 퇴적량이 줄어드는 경향을 보이고 있다.



댐 등으로 인한 퇴적량이 줄어드는 문제는 1) 댐 내 퇴적 증가로 인한 담수용량 저하와 2) 댐 하류 수로의 자연적 퇴적 감소를 초래한다. 수력발전용 댐의 증가로 이러한 경향은 가중되어 왔다. 댐 하류 등에서 퇴적 공급량이 줄어들고, 여분의 에너지가 있는 상태를 Hungry water 현상이라고 부른다. 북미의 많은 강에서 Hungry water 현상이 확인되고 있다.

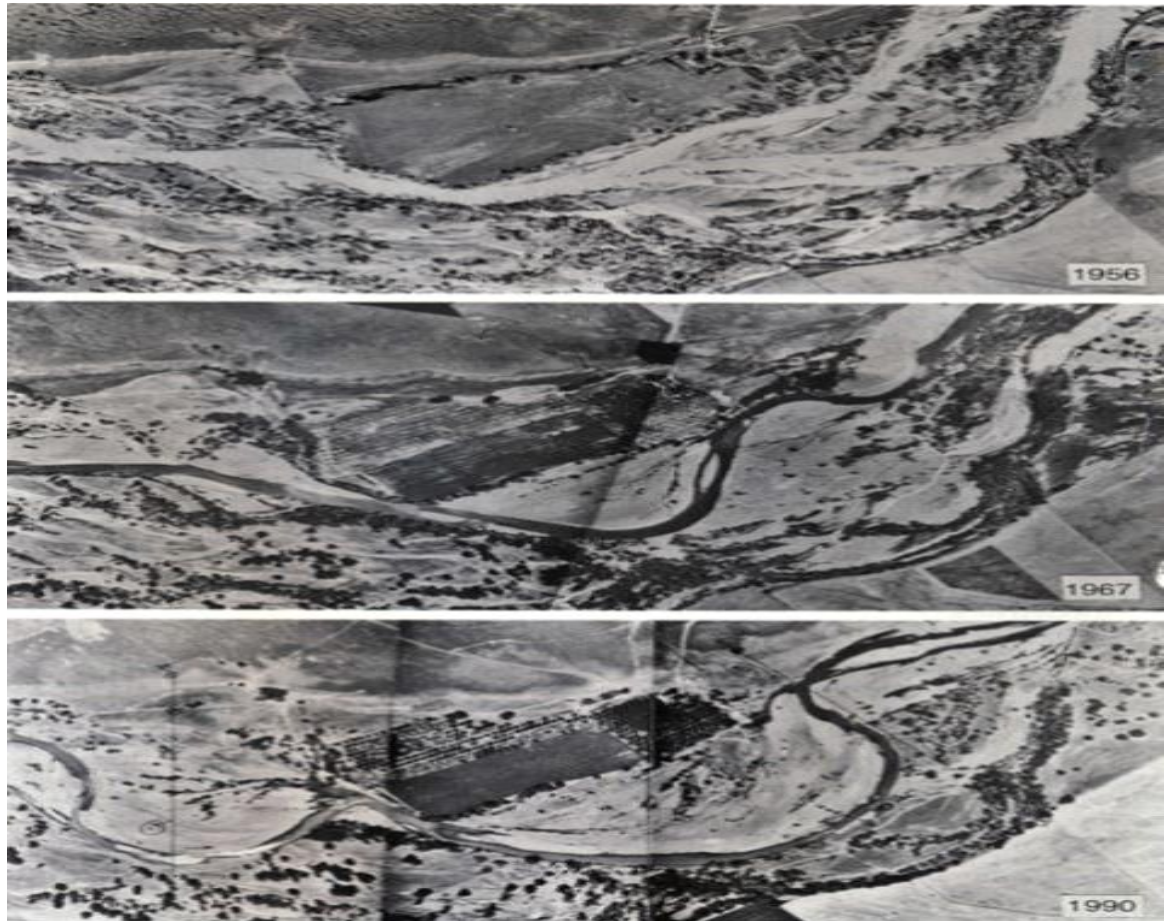


캘리포니아 새크라멘토 강 유역도 20세기에 지류 상류의 많은 지역에서 댐을 건설했다. 이로 인해 댐 하류 지역에 퇴적 기근 현상이 일어났다.



The reservoir above Englebright Dam on the Yuba River—a third filled up with sediment.

1963년 건설된 Black Butte Dam의 하류인 Stony Creek의 사례를 보면, 수로가 2m로 협소해지고, 망상하천에서 사행하천으로 바뀐 것을 항공사진을 통해 확인할 수 있다.



Hungry water 현상의 결과, 다리의 교각 침식 등과 같은 인프라의 부실화, 하천 수로의 확대와 불안정화, 수위 저하 및 서식지 훼손, 해안 침식 등과 같은 부작용이 일어난다. 이러한 영향은 댐 하류 지역의 하천 모래와 자갈 채취와 같은 사업에 의해 가증되기도 한다.



캘리포니아 해안지역의 4개 댐도 댐 내 퇴적 증가로 인해 안전성에 문제가 있는 것으로 밝혀지기도 했다.



Searsville



San
Clemente



Matilija

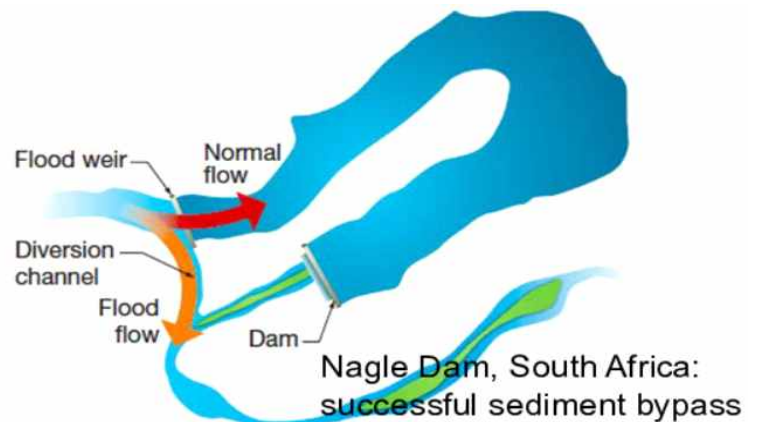
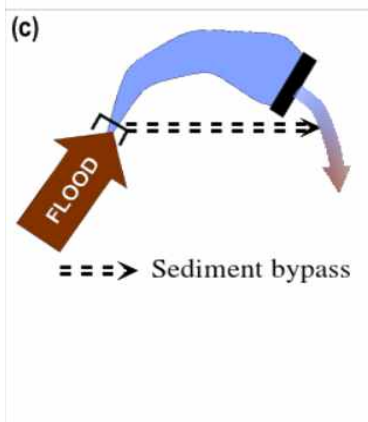


Rindge

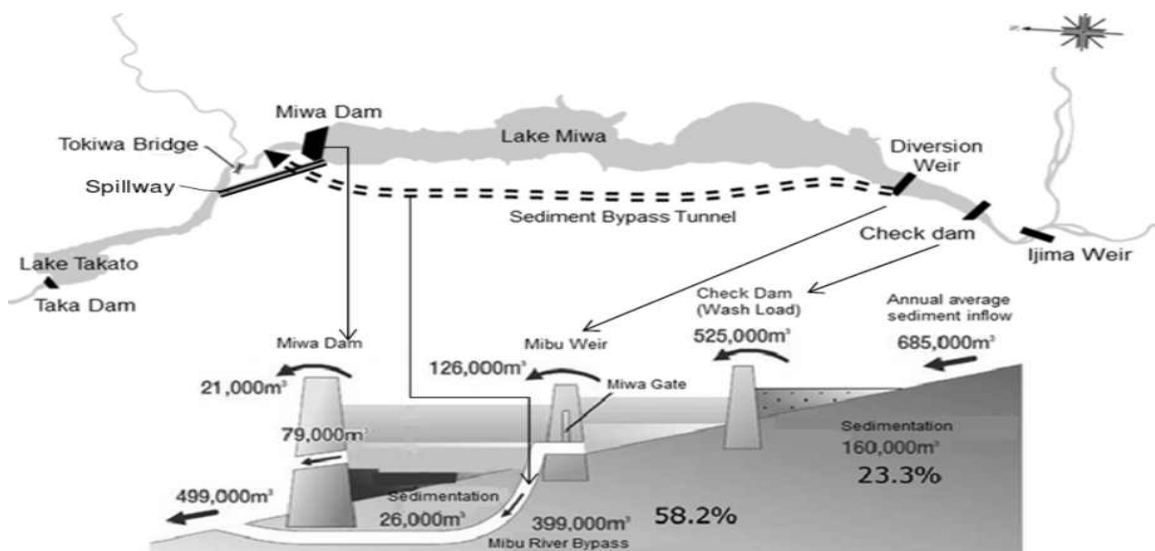


댐 내 퇴적 증가로 인한 문제를 해결하기 위해, 여수로를 통해 퇴적물이 많은 홍수를 댐 하류로 옮기는 방안이 있다. 이는 홍수기에만 시행한다. 이상적인 조건은 여수로가 댐 하류로 연결되는 지름길인 경우이다.

남아프리카 공화국 Nagel 댐에서 시행한 사례가 있다.



일본의 Miwa 댐의 경우에도, 2005년에 퇴적물 여수로를 만들어 댐 내 퇴적 문제를 해소한 사례도 있다.



강의 횡단면 변화는 좌우안의 사이의 넓이와 깊이, 제방의 양태, 좌우 대칭성에 따라 일어나는 양상이 달라진다.

이는 주로 홍수터 변형을 일컫는다. 원래 홍수터는 홍수가 일어나면 물에 잠기는 공간이다. 하지만 제방으로 홍수가 퍼져 나갈 공간이 막히면서 홍수터가 줄었다.

또한 평상시에 물을 중앙의 깊은 수로에 집중하여 흐르게 함으로써 하천 단면이 2개 이상의 단면으로 바뀌는 복단면화로 인해 홍수터는 둔치 공원 등으로 바뀌었다. 이럴 경우 치수와 여가 공간으로 활용 할 수 있으나, 인위적인 공간 분할로 인해 단순화된 서식처에서 생물상은 줄어든다. 물에 잠기지 않는 둔치 또한 육지화된다.

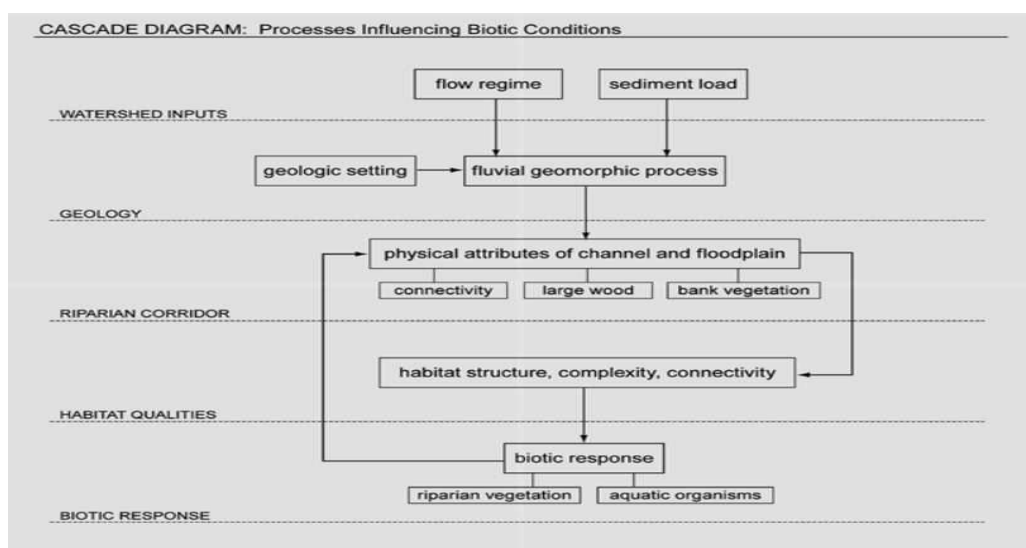
홍수가 발생하면 육역화 된 홍수터는 홍수 배제의 장애가 되고 홍수 토사의 퇴적을 가속시켜 둔치를 더욱 높이게 된다. 반면 수로는 홍수 시 더욱 세굴 되어 둔치와 저수로의 높이는 더욱 차이가 나게 된다.

마. 소결론

이렇듯 하천의 변화는 계층적 위계에 의한 과정에 따른다. 하천의 변화 과정은 유역 차원의 변화가 최상위 위계에 있다. 이는 유황의 변화와 유사 이동의 변화에서 시작한다.

이러한 유역 차원의 변화는 하천의 지형적 변화를 초래한다. 수로와 홍수터의 물리적 요인이 변함에 따라, 연결성, 거대 수목, 제방 식생 등과 같은 수변회랑의 변화가 촉발되고, 이는 서식지의 질을 변화시킨다.

서식지의 구조가 바뀌고, 연결성과 복잡성이 바뀔에 따라, 종국적으로 생물상의 반응이 일어나 수변 식생과 수중 식생의 변화가 일어난다.



adapted from Stillwater Sciences 2002

Ⅲ 하천 복원 이론과 사례

1. 하천복원 이론

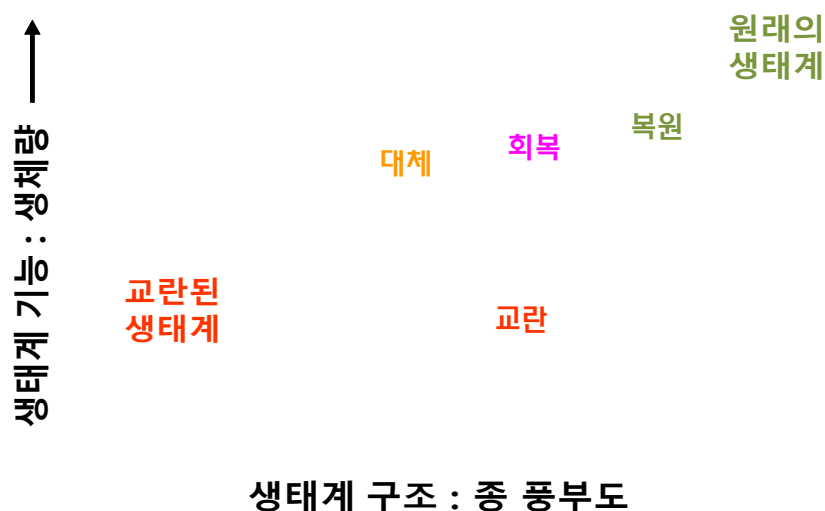
가. 정의 및 기본 방향

인위적 하천사업이나 불량한 유역 상황에 의해 훼손된 하천의 환경적 기능(서식지, 수질자정, 친수 등)을 되살리기 위해 하천의 물리적 구조와 생태적 기능을 되살리는 것을 말한다.

미국의 수변복원가이드(FISRWG 1998)에서는 유사한 개념을 아래와 같이 구분하여 설명하고 있다.

- 하천복원(Restoration): 훼손된 하천을 원래 교란 이전에 가지고 있던 생태적 기능과 구조에 최대한 가깝게 되돌리는 것
- 하천회복(Rehabilitation): 훼손된 하천에서 생태계가 자연적으로 되살아나도록 물리적으로 안정된 환경을 만들어 주는 것으로, 원래 생태계의 구조와 기능으로 똑같이 되돌리고자 하는 노력이 반드시 필요한 것은 아님
- 하천대체(Reclamation): 인간이 자연을 이용하는 과정에서 원래 생태계의 생물적, 물리적 능력을 변경하는 것

이래 그림은 하천복원, 회복, 대체의 의미를 생태계 기능과 구조라는 두 축으로 나누어 보여준다.



많은 학자들이 하천복원을 과거로 돌아가는 것을 이야기하고 있다. 하천이 수문학적 기능과 이와 연관된 물리적, 화학적, 생물학적 특성이 교란 이

전으로 돌아가는 것이자, 교란 이전의 조건과 비슷하게 생태계가 돌아가는 것(이상 NRC 1992)으로 정의하고, 인간에 의한 훼손을 생태계의 내재된 다양성과 역동성으로 복구하는 과정(Jordan et al 1987)이나 교란 이전으로 구조적 기능적 완전한 회복(Cairns 1991)로 정의되기도 한다.

하지만 하천복원이 문명 이전의 하천을 목표로 돌아가야 한다고 보기는 어렵다. 이는 원래의 하천 모습을 정확히 안다는 것이 매우 어렵고 또한 재정적 측면에서도 사회적 수용성 측면에서도 불가능에 가깝기 때문이다.

과거의 역사적 기록이 인간에 의한 교란이 있기 이전의 원시의 하천을 그대로 드러내 준다는 보장은 없다.

프랑스의 Eygues River의 수변 산림은 하천 복원의 참조(Reference)가 될 수 있다고 오랫동안 여겨졌다. 종 다양성, 서식지 다양성 등이 높았다. 하지만 현재의 수로는 100m 정도이나 과거에는 훨씬 더 넓었다. 19세기에 산림 벌채가 집중적으로 일어났으며, 이로 인해 유사이동이 많아져 넓고 역동적인 수로로 바뀌었다. 1830년대 지도를 보면, 당시 하폭은 300m에 달하는 것으로 나타난다. 하지만 농촌 지역의 인구가 줄어들면서 산림은 다시 무성해졌고, 이로 인해 유사이동이 줄어들어 하천 수로는 다시 좁아졌다.



현재 모습



1830년대 Napoleonean cadastral map

따라서 대안적 방안으로 하천이 주는 사회적, 경제적 가치와 환경적 가치의 조화를 이룬다는 기본적인 원칙하에, 사회적 소통을 거쳐 하천복원의 목표를 명확하게 하는 것이 바람직하다. 과거에 바람직한 조건을 특정하여 하천 복원을 시도하는 것을 바람직하지 않다. 즉, 인간 또한 생태계의 한 구성원이므로, 산업화 이전 또는 인류 문명 이전을 상정하여 하천을 복원하는 것은 반드시 좋은 것은 아니다.

Rehabilitation, Enhancement, Reconciliation과 같은 다른 개념이 제안되기도 하였으나, 이러한 개념적 정의 보다 중요한 점이 있다. 하천은 어떤 조건과 과정을 통해 중요한 생물 종을 영속시키고, 변화의 이유와 방법을 이해하고, 생물 종과 서식지를 회복시키는 자연적 메커니즘을 이해하는 것이 더 중요하다.

실무적으로 하천복원을 다수 실행한 미국 등에서는 통상적으로 1) 사람이 수영할 수 있는 하천이자, 2) 물고기가 돌아오는 하천을 목표로 사업을 수행하고 평가해 왔다.

하천복원이라는 개념은 종종 잘못 적용되어 왔다. 대표적인 사례가 녹화(Greener) 사업이다. 홍수를 관리하고, 제방을 안정화시키고, 수로를 다시 옮기는 사업을 녹화사업의 일환으로 추진한 사례가 많다.

하지만 이러한 사례는 환경적으로 재앙인 경우가 종종있다. 대표적으로 199년 캘리포니아 새크라멘토 강에 수행한, 하천을 횡으로 가로 지르는 Gradient restoration facility를 들 수 있다.



하천복원은 하천에 교란을 주는 활동이나 하천생태계의 복원력을 억제하는 제반 활동을 막는 것에서부터 시작한다. 하천복원의 대상은 기본적으로 하도를 포함한 강터, 홍수터, 제방, 하천회랑 등을 포함한 유역 전반으로 접근해야 한다.

아울러 본 보고서는 하천 복원의 추진방향의 하나로, 하천의 생태적 서비스의 질과 양을 점진적으로 늘려 가는데 초점을 맞추는 방안을 제시한다.

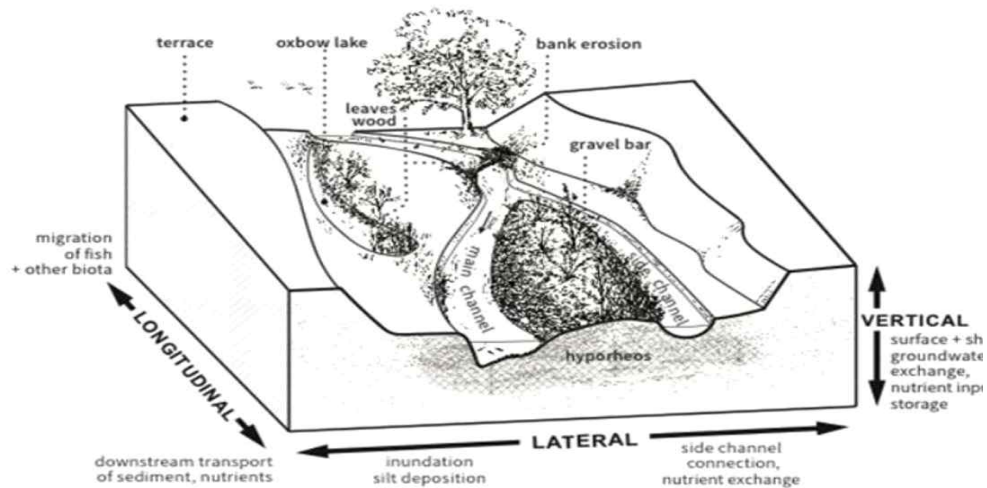
나. 하천의 연속성

하천의 연결성은 3가지 축으로 이해할 수 있다.

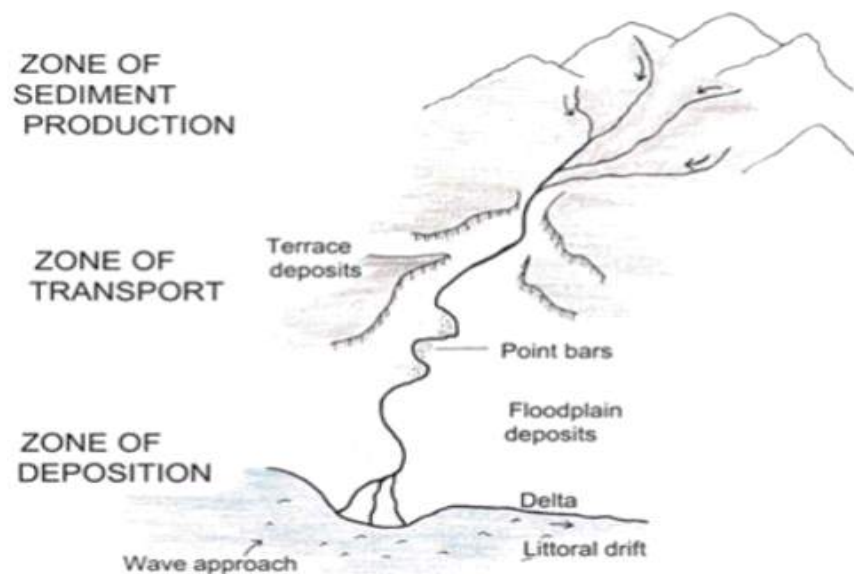
종적 연결성으로는 상하류 간의 연결이다. 이는 댐 철거나 자갈 투입 등으로 회복될 수 있다.

횡적 연결성은 좌안과 우안의 연결성이다. 이는 제방 후퇴나 침식된 하안 복원으로 회복될 수 있다.

수직적 연결성은 지표/수표면과 지하 사이의 연결성이다. 이는 미세 퇴적물을 하상에서 제거하는 것 등으로 회복될 수 있다.

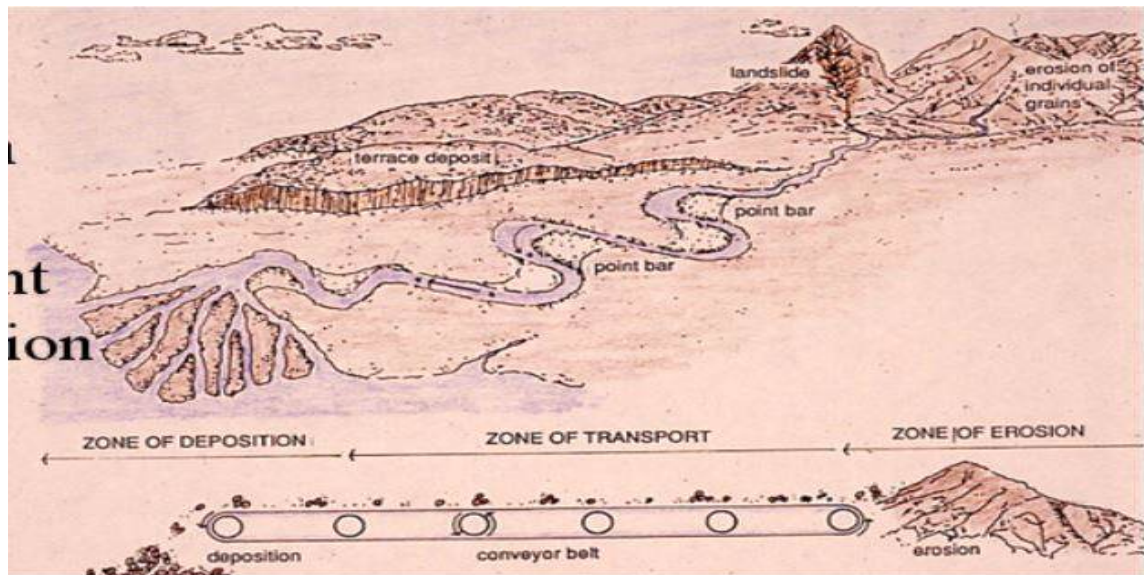


상류와 중류, 하류는 침식과 퇴적의 과정이 아래 그림과 같이 서로 다르다. 하천의 변화과정을 이해함에 있어 유역 단위의 침식, 유사이동, 퇴적의 메커니즘이 가장 중요하다.



상하류 간의 퇴적수지(sediment budget) 이해가 하천의 변화과정에 대한 이해의 기본이 된다. 물의 흐름이 바뀔에 따라 퇴적 공급량이 변하면 이는 하류의 변화를 촉발한다. 이러한 종합적인 시각에서 하천을 이해하는 것이 중요하다.

상류 계곡이 잠재적으로 가지는 에너지와 퇴적물은 하류의 하천 지형 변화에 우선적인 영향을 미친다. 좁은 계곡일수록 이러한 영향력은 커진다.



발원지나 상류에서는 여울-소 구간이 반복적으로 나타나고, 발달한 수변 식생에 의해 일조량이 낮다. 입자는 굵으며 냉수성 어류가 우점 한다.

중류에서는 여울-소 구간이 점차 감소하며, 유기물 퇴적이 점점 증가하고, 수변식생다가 줄어들어 일조량이 늘어난다. 어류의 군집도 변화하기 시작한다.

하류는 유속이 균일하여 여울-소 구간이 거의 사라지며, 하상은 가는 유기물 퇴적으로 바뀐다. 온수성 물고가가 우점하게 된다.

다. 하천 교란의 종류

하천이나 유역은 항상 변하고 있다. 이러한 물리적, 화학적, 생물학적 교란 요인과 그 영향 및 결과의 역동적인 과정을 이해하는 것이 하천복원에 있어 선행되어야 할 것이다.

하천지형의 변화는 지질시간대 차원의 장구한 시간이 걸린다. 하지만 하천복원을 논의함에 있어서는 약 백년 이하의 상대적으로 짧은 시간대에서 벌어지는 변화에 초점을 맞추는 것이 현실적이다.

하천생태계는 회복력을 일정 부분 가지고 있기에, 외부의 교란에 의해 생태계가 일부 훼손되더라도 교란 요인이 끝나면 원래의 상태로 돌아가는 능력이 내재되어 있다.

하천을 훼손하는 교란은 그것이 자연적이던 인위적이던 1) 강도, 2) 빈도, 3) 범위 등으로 나뉘어 분석할 수 있다.

1) 자연적 교란

홍수에 의한 교란은, 하폭의 확대, 하도의 직선화, 하도의 급경사화 등 주로 하천의 형태 변화를 유발한다. 홍수에 의한 충격의 강도, 빈도, 범위에 따라 하천 구조의 변화는 원래로 돌아오기도 하고, 긴 시간에 걸쳐 복구되기도 하고, 영구히 변하기도 한다.

생물서식처 교란 중 자연적인 요인은 산불이나 집중호우를 들 수 있다. 이와 같은 자연적인 요인에는 해당 하천의 생태계가 장구한 시간에 걸쳐 나름대로 적응해 왔다.

2) 인위적 교란

문명의 발전과 더불어 하천을 홍수 관리와 공간 활용이라는 측면에서 변형해 왔다. 인간 중심의 혜택을 위해 하천을 길들여 온 셈이다. 물길을 따라 길게 독을 만들고, 새로 만들어진 홍수터는 인간의 활동 공간으로 바뀌었다.

하천이 포함된 유역 전체가 인간만의 이익을 위해 변형되어 온 것이다. 하지만, 농업, 벌채, 도시화, 산업화와 같은 짧은 시간의 급격한 인위적 요인에는 생태계가 적응하기 어렵다.

이러한 인위적 교란에서 회복하기 위해서는 각 생물의 생활사, 군집의 특성, 재정착을 위한 개체군의 특성 등 다양한 요인을 검토해야 한다.



독일 뮌헨 지역 River Lech, 1920년대

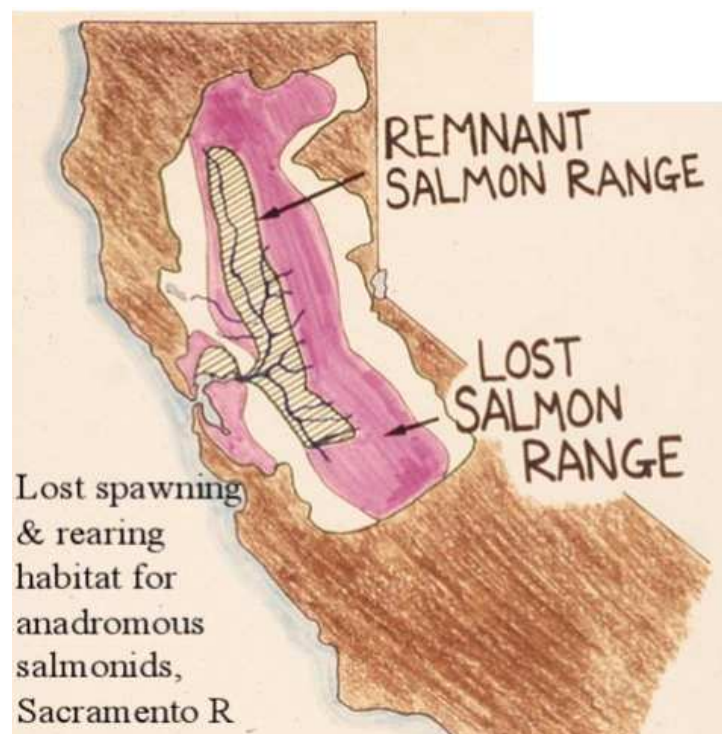


독일 뮌헨 지역 River Lech, 1970년대

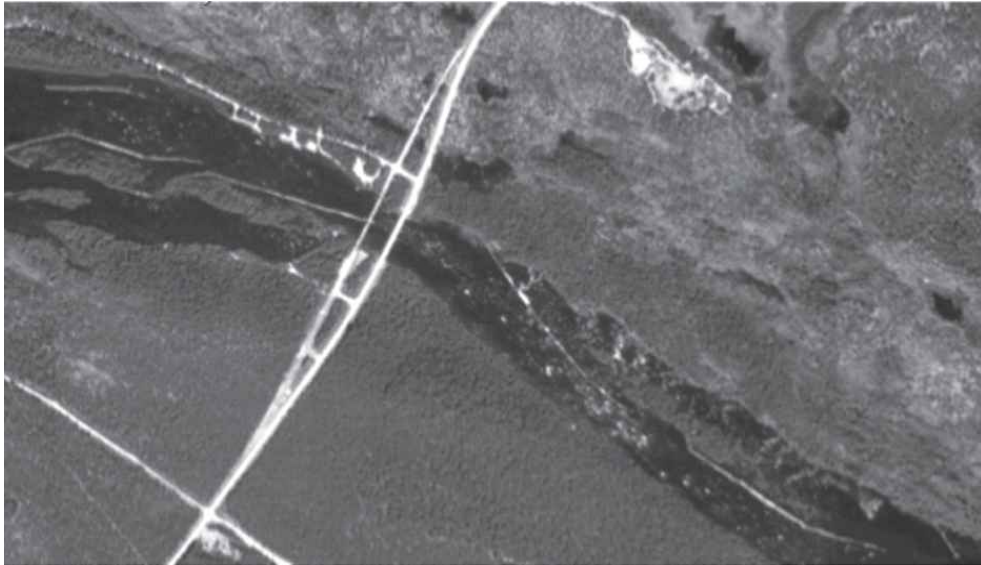
댐 건설이나 하천정비사업 등과 같은 하천에 직접 가해지는 교란과 주변의 토지이용이 주는 영향에 따라 간접적으로 바뀌는 경우로 나뉘어 볼 수 있다.

댐, 보, 낙차공과 같이 하천을 가로막는 구조물은 가장 큰 영향을 준다. 하천의 연속성(흐름, 유사, 기타 물질 등)을 차단하고, 상류의 수물, 하류의 유량 감소, 하상 변화, 수질 악화, 서식지 변화 등을 초래한다.

횡적 연결성이 훼손되면 어류의 이동이 제한된다. 미국 캘리포니아 새크라멘토 강 유역에서는 anadromous 연어의 산란장과 유어장이 상류지역의 댐 건설로 인해 사라진 사례가 대표적이다.



중적 연결성이 훼손된 사례로는 스웨덴의 Pite 강을 들 수 있다. 목재를 물에 띄워 이동시키려는 목적으로 측면 수로를 막았다. 하지만 더 이상 목재를 이동시킬 필요가 없어짐에 따라 측면 수로는 다시 연결되었지만 상류 댐은 계속 운영됨에 따라 횡적 연결성은 계속 낮은 상태이다.



이수와 치수를 위한 하천 정비사업은 여울-소 등을 없애 유속을 올리고, 서식처 다양성을 낮춘다.

골재 채취는 하상을 교란시켜 수생서식처에 치명적인 영향을 주며, 장기적으로는 하천의 형태를 변화시킨다.

토지이용에 의한 교란 중 가장 광범위한 요소는 농업활동이다. 수변식생 제거, 농경지 토지 침식 증가와 이의 하류 퇴적 증가, 관개배수로 인한 토양 수분 변화와 지하수위 영향, 가축분뇨 또는 비료나 농약 등으로 인한 비점오염 증가와 이로 인한 수질악화 등을 초래한다.

임산활동은 수목의 제거로 하류의 영양물질 공급원 감소를 일으킨다. 또한 숲의 증산효과로 인해 하류 하천의 유출량을 변화시키기도 한다.

광산활동 중 노천광산은 하천에 광범위한 영향을 준다. 특히 광산에서 나오는 버력이나 유사는 하류에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

도시화 또한 하천의 훼손에 많은 영향을 미친다. 도시하천의 물수지 변화로 인해 지반침하 등의 부작용이 발생하기 한다.

독일 뮌헨 인근 이자르 강변에 위치한 Landshunt 대성당은 1980년대에 기초공사를 보강했다. 당초 충적지대(암반이 거의 없는)에 건설 당시 오크나무로 지반을 다져서 그 위에 커대한 석조건물을 지었다. 지하수위가 충만한

시기에는 문제가 없었지만, 지하수가 줄어들고 지하수위가 내려가면서 오크 나무 기둥이 공기에 노출되기 시작했다. 그 결과 부식이 일어나 대성당 벽면에 균열이 생겨, 기초를 보강했다.



다. 하천복원 주요 방법론

1) 하천 공간 확대

하천 공간 확대는, 네덜란드에서 추진했던 Room for the River 등과 같은 개념으로, 제방을 뒤로 물리거나 홍수터를 파거나, 구하도를 연결하여 하천의 통수능력 확대와 종 다양성을 동시에 꾀하는 기법이다. 네덜란드에서는 하천관리 정책의 일환으로 2000년대에 처음 하도와 홍수터 굴착을 통해 통수 공간 확대를 추진했다.

선진국은 자연적인 수로 형성에 맡겨두는 새로운 하천 복원 기법 시도하고 있다. 즉 수로, 제방, 홍수터 등의 변화를 인간이 사전에 설계하지 않고, 침식과 퇴적이 일어나는 자연적 역동성에 맡겨두는 방식이다.

나라마다 Room for the River(네덜란드), The Erodible Corridor(프랑스), Elbow Room for the River(Bavaria), Channel Migration Zone(미국) 등으로 불린다.



인위적 직강화 수로



자연적으로 바뀌는 수로

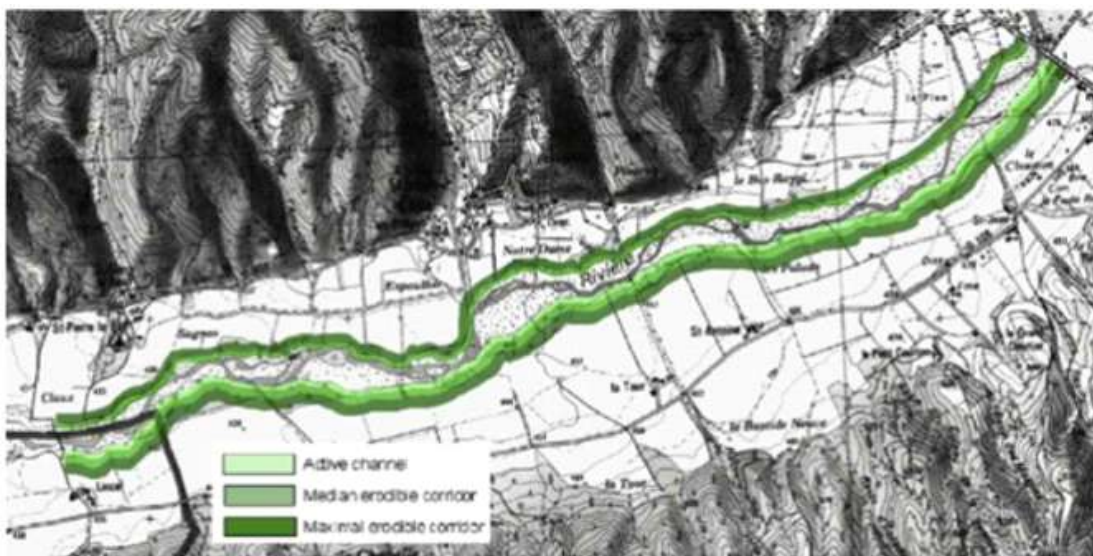
전통적인 농촌 하천 등은 1960년대에 직강화 되었으나, 1980년대에는 인위적으로 구불구불하게 사행화 하였다. 하지만 하천복원을 위해 추진했던 인위적인 사행하천 공사가 많은 부분 실패로 끝났다.

아래 그림과 같이 강은 인공수로를 빠르게 변형시킬 수 있는 에너지를 가지고 있었다.



지도, 사진 등 과거 자료 분석해 볼 때, 물길은 해마다 변화 폭이 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

캘리포니아 새크라멘토 강의 경우(Red Bluff~Colusa 160km), 지난 100년간 하천구역(inner river zone) 내 크고 작은 물길의 변화가 있었다.



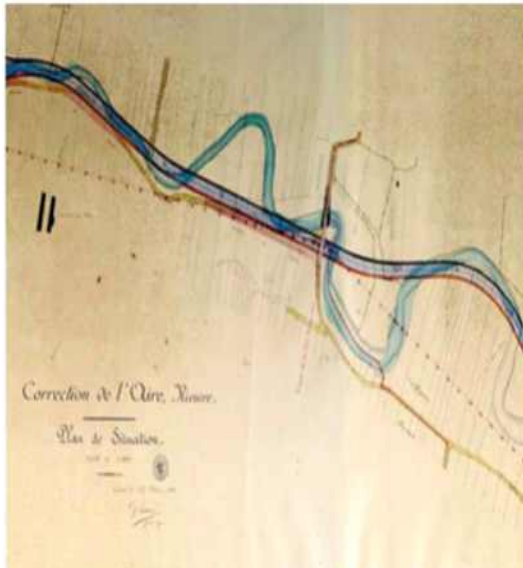
From Piegay et al 2005

자연적인 수로 변형이 실현되기 위해서는, 1) 가용한 예산 내에서 토지 이용이 가능해야 하고(밀집된 도시지역은 제외), 2) 다양한 형태를 만들어 낼 수 있도록 물살의 세기와 퇴적물 운반이 충분히 커야 한다.

큰 저수지 또는 댐의 하류에는 퇴적량과 운동 에너지가 적기 때문에, 자연적 수로 형성은 어려운 실정이다.

스위스 제네바 Aire강은 인구 밀도가 높은 시가화 지역 인근 농업 지대에 추진한 대표적인 하천 공간 확대를 성공시킨 사례로 많이 연구되어 왔다.

Aire강은 알프스에서 발원, 빙하 계곡을 지나 충적지인 하류로 흐른다. 도시와 농업이 발전과 더불어, 19세기에 홍수량을 하류로 효과적으로 신속하게 배제하기 위해 3km의 사행 하천 구간이 직강화되었다.



직강화 수로 지도



직강화 된 수로 현장

이후 1960년대에 Praille 공업지대 지하를 관통하는 1.5km 길이의 콘크리트 도수로가 건설되었다.

상류의 침투 홍수량 저감시켜 하류의 도수로와 홍수 부담 경감 필요성 대두되어 공업지대 지하의 65cm 도수로만으로는 홍수 방어가 부족하여, Rhone강과 직접 연결되는 45cm 도수를 추가로 건설되었다.



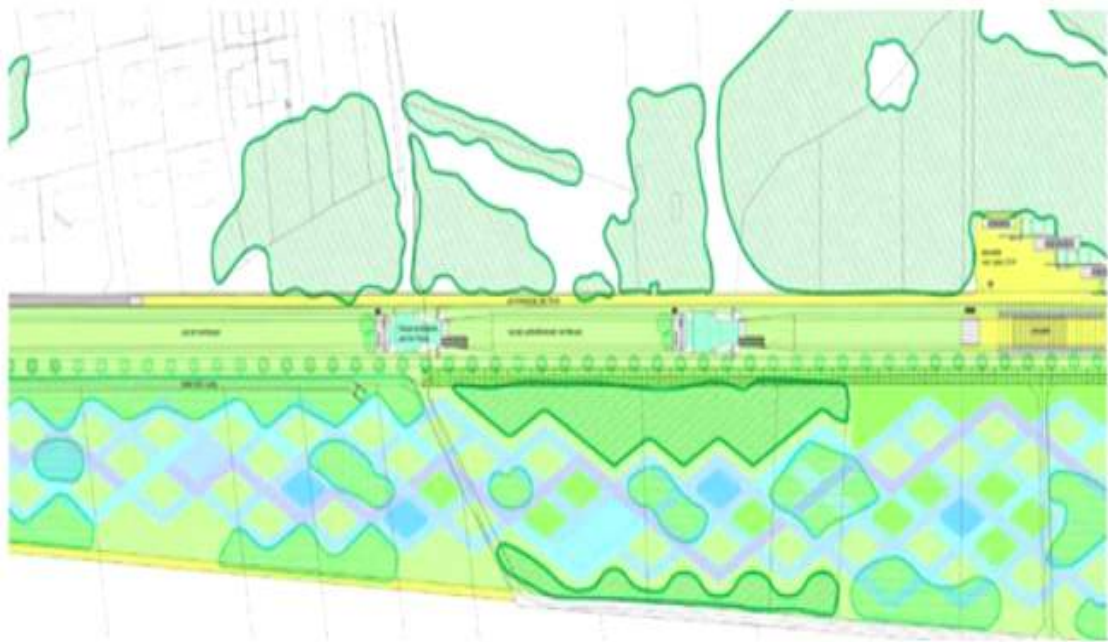
1997년 제네바 Canton은 Aire강을 복원하기로 결정, 2004년부터 4단계 복원 작업 추진하였다.

기본방향을 1) 원시의 강으로 복원하는 것은 아나고, 2) 19세기 만들어진 수로는 대부분 원형을 유지하며, 3) 인근 농경지 수로는 Room for the River 기법 적용하여 자연스러운 물길의 사행(蛇行)을 유도하는 것으로 삼았다.

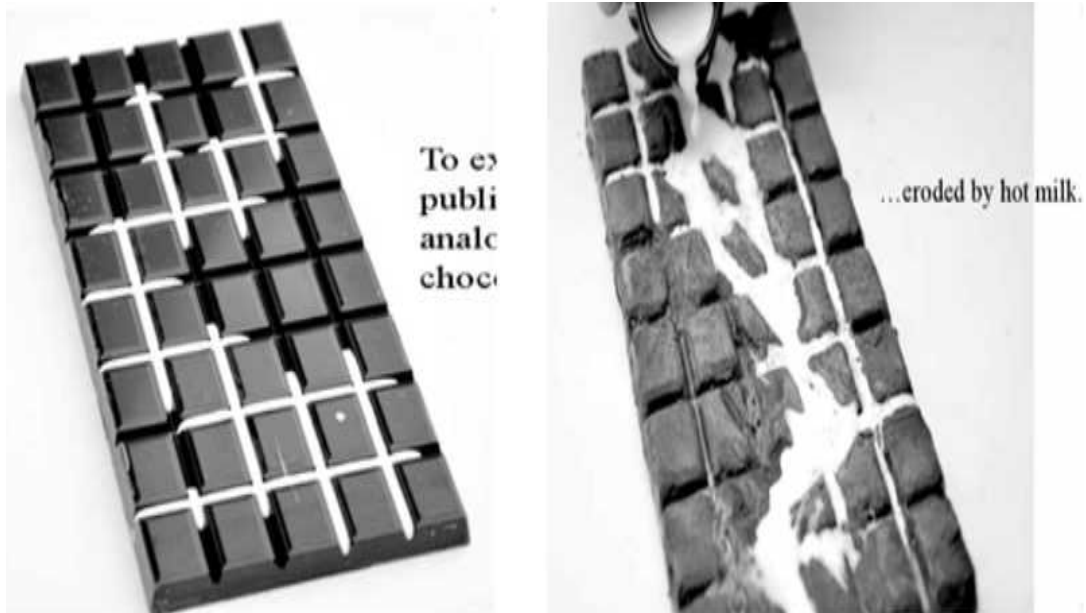
또한 19세기 유산인 도심지의 수로는 그대로 유지하되, 도시에서 인간의 활동과 연계 될 수 있도록 다른 맥락에서 접근성과 친수성을 강화하고자 하였다.



농경지 수로는 상하류 간 에너지 흐름과 분산이라는 자연스러운 과정에 따라 강 자체가 물길을 정할 수 있는 디자인이 제시되었다.



이러한 과정은 스위스 지역의 정서에 맞게 비유적으로 대중에게 설명되었다. 즉 스위스 초콜릿 위로 뜨거운 우유가 흘러 나가면서 새로운 자연적인 물길이 만들어 진다는 것이다.



질세 진행 과정도 인위적으로 구불구불한 물길을 만들지 않고, 자갈과 실트로 된 격자형 수로를 만들어 두고, 이를 자연적 홍수에 맡겨 두었다.



2014년 봄 사업 현장



2015년 4월 홍수 이후

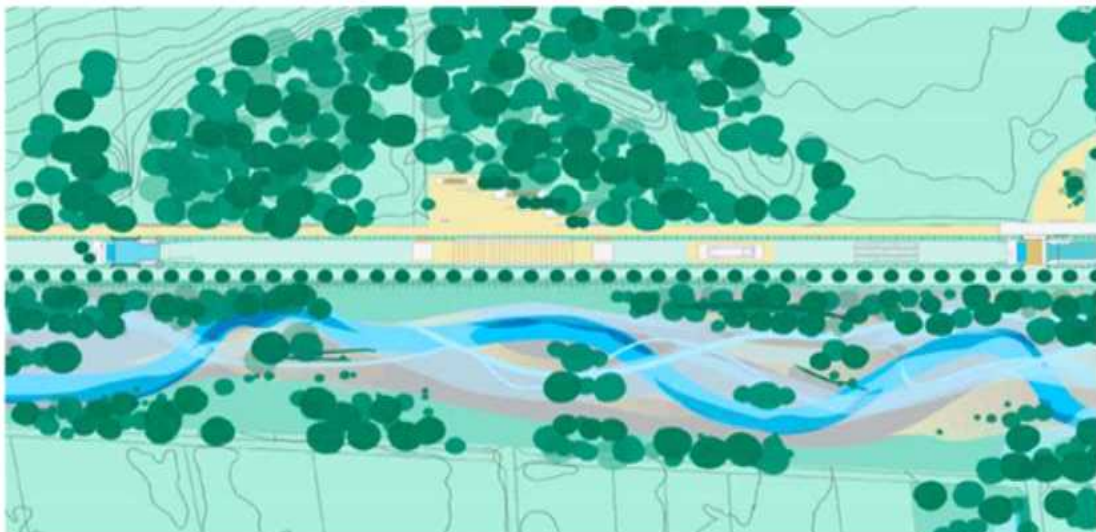


2015년 4월 홍수 이후



지역 주민의 다양한 활동

사업 이후 인간 활동이 많은 오래된 수로 인근에 생태적 가치로 역동적인 살아 있는 하천으로 복원된 것으로 평가 되고 있다.



이 사업은 하천복원과 관련된 많은 시사점을 주고 있다.

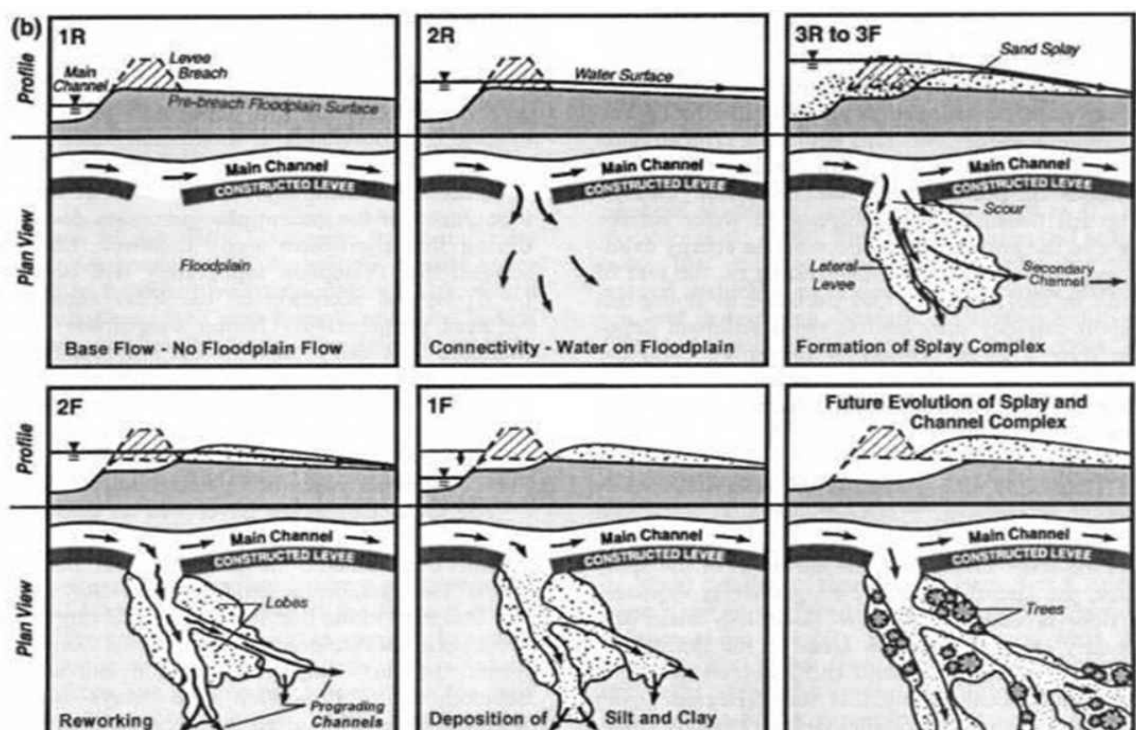
강을 바라볼 때, 짧은 기간만 볼 것이 아니라 긴 시간을 두고 보아야 한다. 에너지 흐름 측면에서도 장기간을 염두에 두어야 한다. 강을 살아 있게, 상류의 위치에너지가 운동에너지로 바뀌어 내려오면서 하천의 물길이 자연적으로 형성된다는 점을 충분히 인식할 필요가 있다. 즉, 인위적인 직강화나 복원을 위한 사행화 공사마저 자연의 에너지에 의해 변형될 가능성이 많다는 것이다.

생태계의 다양성과 건강성을 높이는 비용효과적인 방안 중의 하나가 자연적 물길이 다양한 하천 공간을 만들어 내게 하는 것이다.

우리나라에서 시범 사업을 추진할 경우, 침식과 퇴적량이 낮은 대형 댐과 저수지 직하류는 피하고 홍수터 넓은 농업지역을 선정하는 것이 바람직하다고 할 것이다.

2) 홍수터와 연계한 하천 복원

홍수터는 새로운 물길이 나는 길목이기도 하며, 또한 홍수를 방지하는 이중적인 역할을 해 왔다. 홍수터 복원에는 다양한 기법이 있다. 물웅덩이 복원, 어류 산란장 조성, 측면 수로(side channel) 복원, 배후습지 조성 등을 들 수 있다.



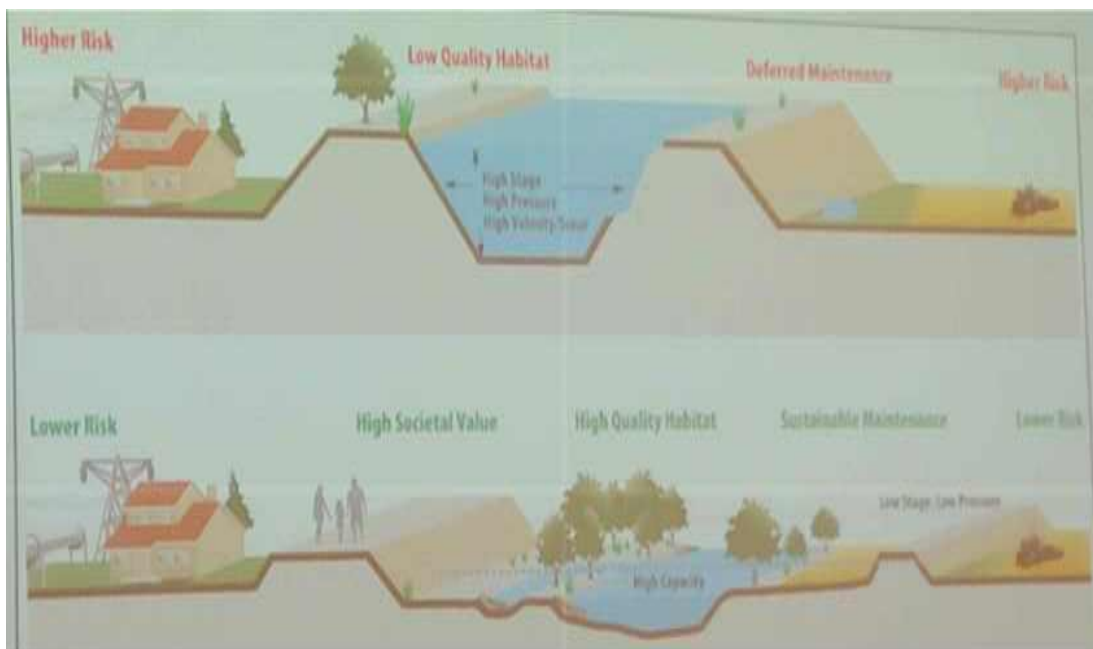
홍수터 복원을 위해 둔치와 저수로의 차이를 줄여 평상시에도 물이 둔치로 넘어가게 하고, 육지화 된 둔치의 과도한 식생을 주기적으로 제거해야 한다.

주요 선진국은 홍수조절과 강의 자연성 회복을 병행하는 관리 방안 모색하고 있다.

통상적으로 홍수 대비와 자연성의 하천은 상충하는 것으로 인식하고 있다. 댐 등에 의한 홍수 조절로 인해 자연적인 유황이 평탄한 인위적 유황으로 변하는 등 치수 위해 일정부분 강의 자연성 훼손은 감내 해 왔다.

하지만 선진국은 다양한 대책을 통해 두 가지 정책목표를 동시에 이루는 방안 추진하고 있다.

과거의 습지와 수변 식생대의 95%, 연어가 회귀 서식지의 90% 사라진 미국의 현 상황에서 홍수터 복원 등을 통해 생태 복원 시도하고 있다.



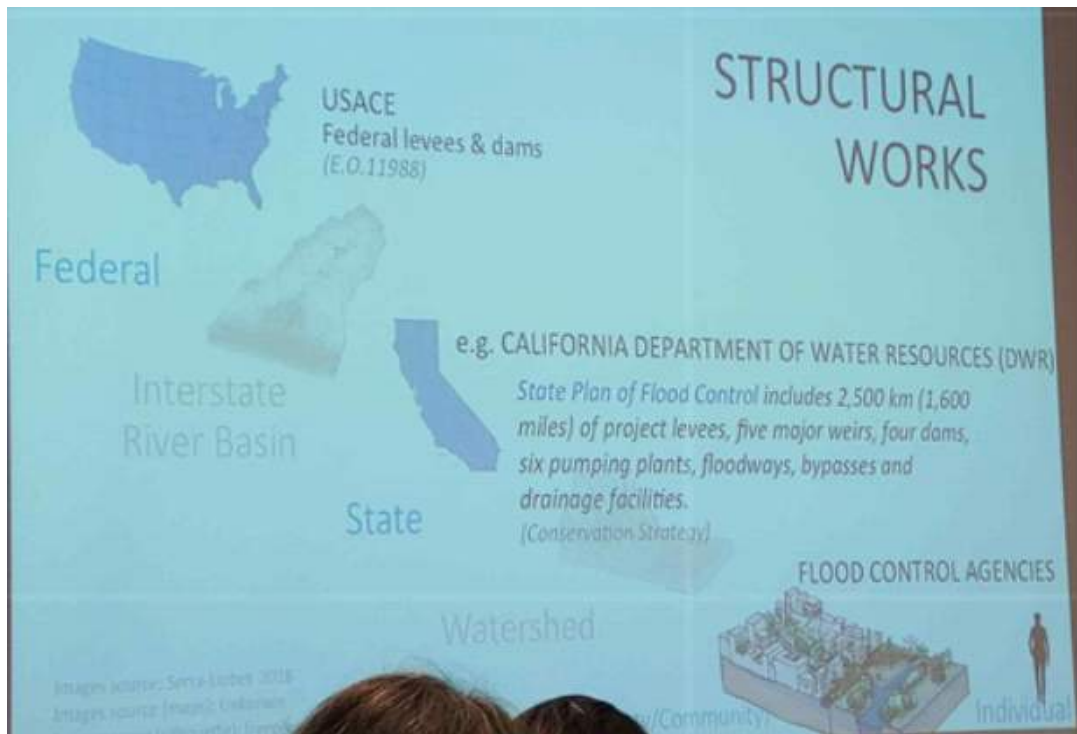
<제방 후퇴와 홍수터 복원 통한 강의 자연성 회복 개념도>

미국은 개별 법*에 근거하던 홍수, 수질, 생물다양성 관련 정책을 종합적으로 추진하고 있다.

* National Flood Insurance Act(1968), Clean Water Act(1972), Endangered Species Act(1973)

이를 통해 홍수에 의한 피해 저감, 수질 오염 방지, 멸종 위기종 보호 등 다각적으로 추진하고 있다.

현재는 하천 관리 신규 예산은 홍수 조절과 생태회복을 동시에 도모하는 ‘다목적(multi-benefit)’ 사업에 우선순위 두고 있다.



i . California Yolo Bypass 사례

주 청사 소재지인 Sacramento市는 주기적으로 홍수 피해를 입었다. 그 중에서도 1870년대에는 대 홍수기 빈번했다. 이를 해결하기 위해 많은 노력을 기울였는데, 그 중 하나가 여수로를 만드는 것이었다.



대홍수 사진



Yolo Bypass 위치

새크라멘토 강의 홍수량 분산시키기 위해 지역 농민들과 협의 및 보상 등 통해 넓은 농경지를 홍수터로 바꾸면서 새크라멘토 시의 홍수 피해는 크게 낮아졌다.



<Yolo Bypass와 Sacramento Valley의 홍수 관리>

아울러 홍수터 중 평상시 일부는 쌀 경작지, 중앙 지역은 자연 습지, 일부는 목초지로 이용, 자연습지는 대표적인 철새 도래지 등으로 복원되었다.

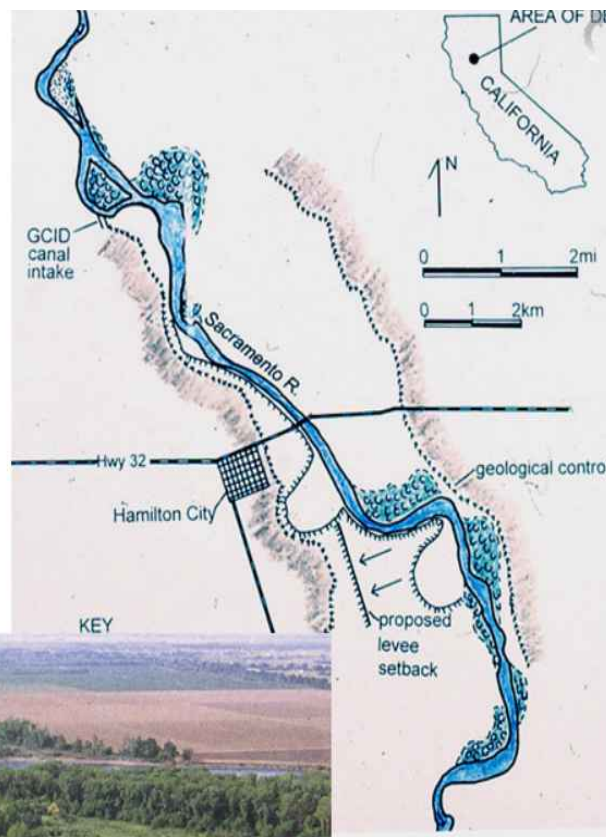
ii. California Lower Elkhorn 유역 제방 후퇴 사례

새크라멘토 강에 의한 홍수를 막기 위해 해밀턴 시에도 제방을 쌓아 왔다. 하지만 환경적, 생태적 문제가 커짐에 따라 다른 대안을 모색하기 시작했다.

그 일환으로 약 250만\$ 투자하여 당초 제방 보다 7마일 뒤로 이동(10년 빈도 홍수 → 75년 빈도 홍수 대비)했다. 이를 통해 홍수 조절 능력이 늘어났으며 생태계 건강성과 Yolo Bypass 지역의 농업 생산량도 늘어나는 것을 확인할 수 있었다.

제방 후퇴 사업 이후 이후 7년마다 겪는 홍수 피해를 최소화 할 수 있었으며, 또한 600ha의 홍수터가 서식지로 바뀌면서 다양한 생태적 효과도 거두었다.

Reconnecting the Floodplain of the Sacramento River by setting-back the levee, Partly restoring lateral Connectivity.
(But floods also reduced by Shasta Dam, so lateral connectivity still reduced)



iii. 미시시피 강 사례

미국 대륙을 남북으로 흐르며, 대륙을 동서로 나뉘는 미시시피 강에서도 주기적으로 큰 홍수가 났다.

특히 1927년 홍수는 미국 역사상 큰 피해를 입힌 홍수로 기록된다. 당시 홍수로 인해 대비하지 못한 지점에서 제방이 터져 막대한 생명과 재산상 피해가 났다.

하지만, 2011년 홍수 때에는 오하이오 강에서 오는 홍수를 카이로 제방을 헐어서 피해 없게 했다.

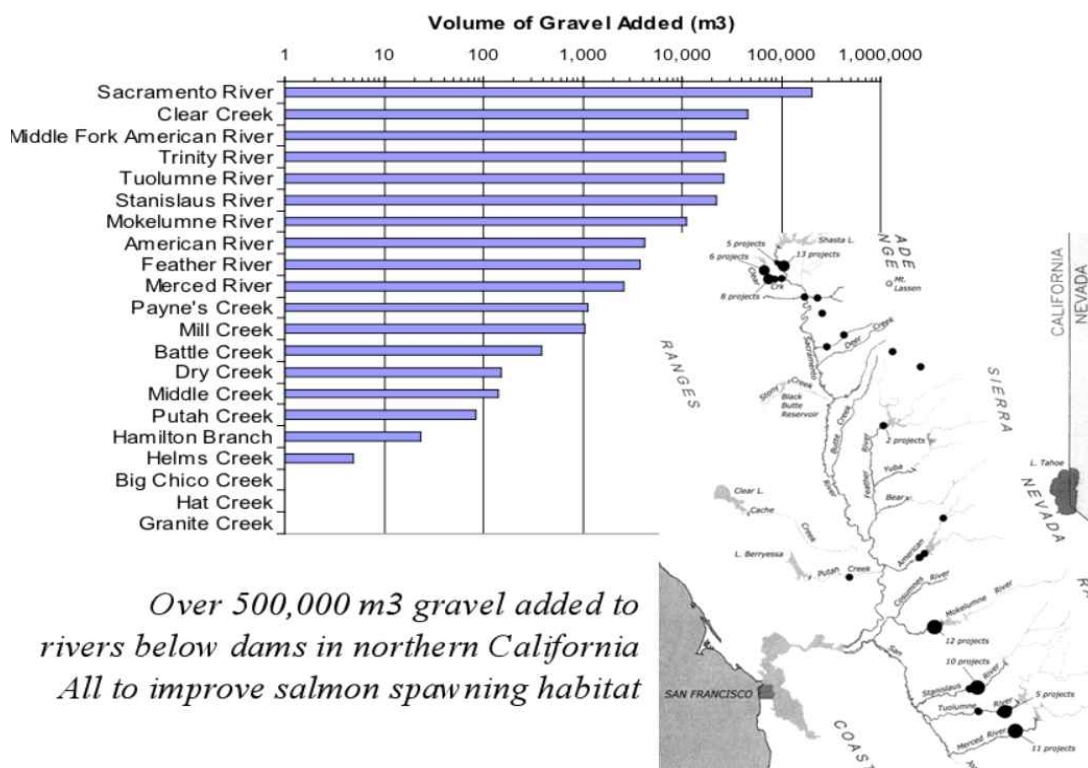
2011년 홍수가 1927년 홍수 보다 더 큰 홍수량이었으나, 제방 헐기를 통해 사망자, 추가 제방 파괴, 의도하지 않은 침수지 발생 등이 없었으며, 제방 하류의 백워터 지역에 상업적으로 이익이 되는 물고기 많아지는 부수효과 있었다. 두 홍수의 결말이 전혀 다르게 난 셈이다.



이를 통해 제방만을 통한 홍수 관리에 머무르지 않고, 홍수터를 통한 역동적인 관리가 필요하다는 점을 알 수 있다.

3) 유사 투입

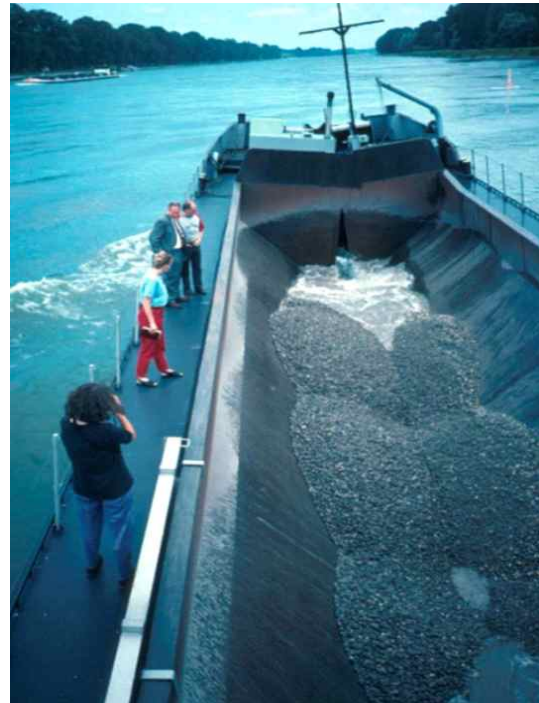
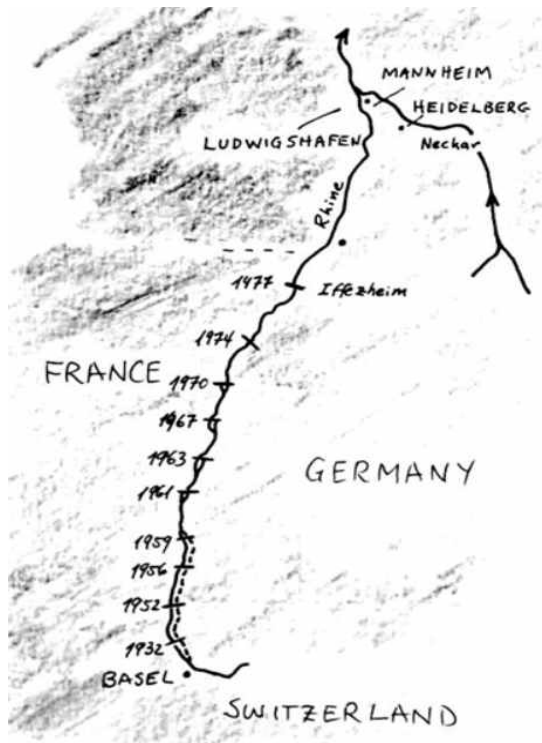
캘리포니아에서도 연어 산란을 도우기 위해 댐 하류에 다량의 자갈을 인공적으로 투입하기도 했다.



이와 같이 유사 주입도 하나의 방법이다. 상류 댐에 의해 직하류에 발생한 Hungry water 현상으로 퇴적량이 급감한 경우, 외부에서 자갈이나 모래를 인공적으로 투입하기도 한다. Colorado river의 Glen Canyon Dam의 경우, 퇴적 부족이 심각하자 미국 내무부 개척국(Bureau Reclamation)은 지천 삼각주에서 모래를 준설하여 댐 아래 지역에 투입하기도 했다.



프랑스와 독일의 라인강에는 보다 대규모의 자갈 투입이 있었다. 강에 준비한 수력발전 댐 등으로 인해 하류 지역의 퇴적 부족은 만성적이었다. 바지선 2대가 매년 355일 도안 평균 170천m³의 자갈과 모래를 투입한다.



4) 댐/보 철거

댐/보 철거는, 하천의 연속성 확보를 위해 구조와 기능을 다한 시설을 철거하거나 운용 방식을 바꾸는 것이다. 미국에는 보나 댐의 용도나 기능이 살아 있음에도, 연어 등 회유성 물고기가 돌아오게 하기 위해 시설물을 철거하는 사례도 있다.

불필요하거나 기능을 다한 제방을 변경하여 물 흐름을 자연의 에너지에 맡겨 하천 공간의 가변성을 높이는 것이 하천 복원의 한 가지 방법이다.

하천 종단면을 회복한다는 것은 하상의 변화에 동적 균형을 회복한다는 것이다. 상류에서 유입되어 하류로 유출되는 퇴적량을 균형을 맞추는 것과 하천 내에서 지형적 요인에 의해 발생하는 강바닥의 균형을 맞추는 것이다.

강 흐름의 복원은 댐의 방류량 조절로 일부 가능하다. 자연적 상태와 동일하게 유량의 변화를 줄 수는 없지만, 복원하고자 하는 생태계에 적합한 수준까지 도달할 수 있는 다양한 시나리오를 발굴해야 한다. 이는 하천의 물리적 구조 변화뿐만 아니라 생태적 변화까지 유도한다.

캘리포니아 Carmel River에 있는 San Clemente 댐의 경우, 지진에 대한 안전성이 약한 것으로 조사되어, 약 \$85백만의 비용으로 해체되었는데, 그 이후 San Clemente 강이 사행하천으로 되살아난 경우도 있다.



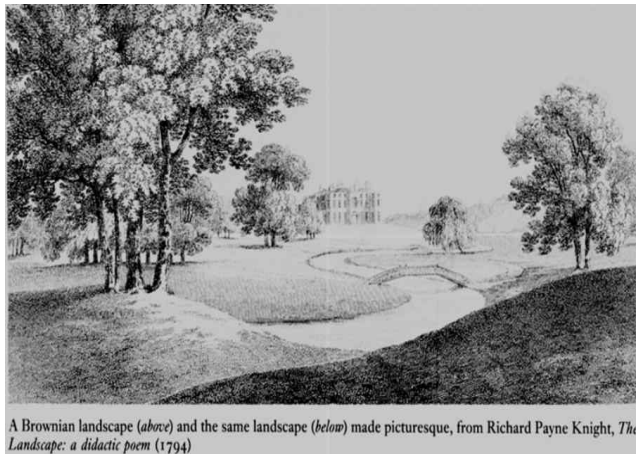
5) 수로 변경

하천 수로 변경은 최후의 수단으로 여겨진다. 하천 기능 회복이 가능한 곳이나 하천의 내재적 과정을 통한 자연적 회복을 우선시행 하나, 이러한 방식이 어려운 경우 마지막 수단으로 하천 수로를 인위적으로 개선한다. 하지만 많은 경우 인위적인 사업 시행 이후 홍수 등으로 인해 사업성고가 사라지는 경우를 보게 된다. 캘리포니아의 Cueno Creek 사례가 대표적이다.

with the project in place (ca1992) ... and after it washed out (ca1996)



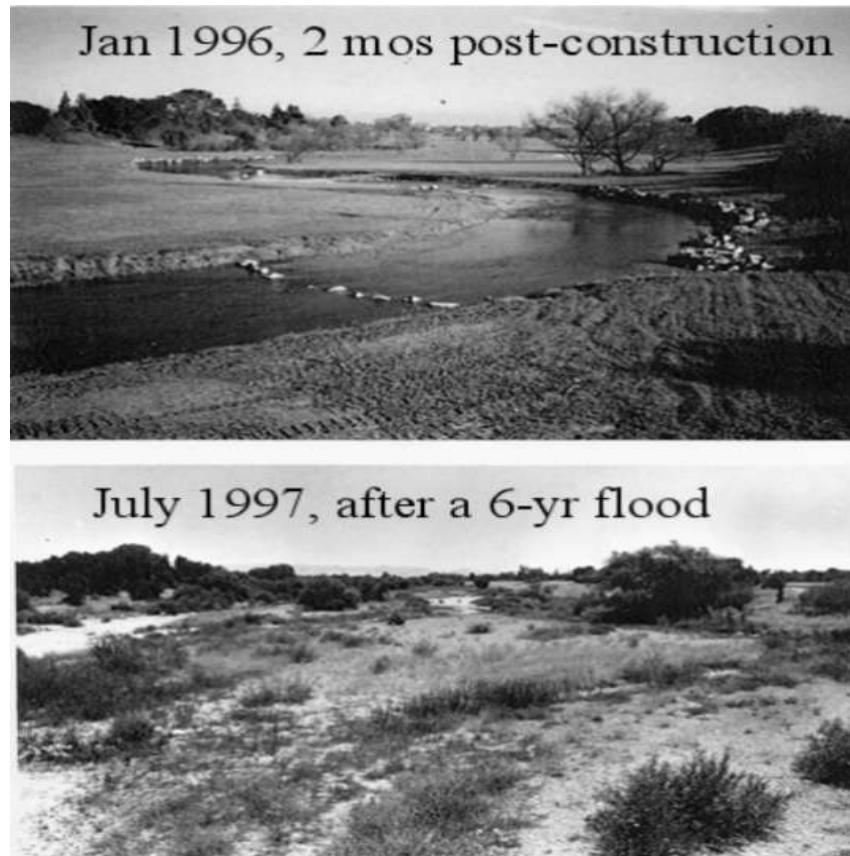
많은 경우 하천복원의 형태로 사행하천을 시행한다. 이상적인 하천의 모양을 찾는 작업은 오랫동안 이어져 왔다. 18세기와 19세기에 걸쳐 조경가들은 그들의 부유한 고객들의 영지에 적합한 하천의 모습을 찾아주고자 시도했다. 그 결과가 구불구불한 하천이었다. 이러한 관념은 20세기의 대중적인 광고를 통해 더욱 공고해졌다.



하지만 사행하천으로 복원하는 것은 하천으로 유입되는 에너지와 유사의 패턴에 적합하지 않을 수가 있다. 인공적으로 S 모양의 수로를 만드는 작업은 지양되어야 할 것이다.



다수의 하천복원 사례에서 하나의 물줄기가 사행하는 하천이 시도되었지만, 수년 뒤 홍수가 발생하면서 하나의 물줄기로 된 사행하천은 사라지는 경우를 목격한다. 아래의 캘리포니아 Uvas creek의 사례가 대표적이다.



6) 수변완충대(Riparian Buffer) 조성

하천 주변에 조성하는 일련의 식생 띠를 말하며, 이를 통해 하천으로 유입하는 비점오염원을 차단할 수 있다. 유역 전체의 약 5% 정도의 적은 비중을 차지하고 있으나, 육상서식지와 본질적으로 그 성격이 다른 다양한 야생종이 서식하므로, 경관복원 측면에서 중요하게 여겨지고 있다.

수변완충대는 유사나 오염물질의 여과 및 차단, 비점오염물질 유입 저감, 토양침식 방지, 강터의 안정화, 수변생물서식지 제공, 수변 그늘 제공으로 적정 수온 유지, 친수 및 교육 공간 제공 등의 기능을 한다. 식생은 초본, 관목, 혼합 형태로 구분할 수 있다.

수변완충대는 하천의 길이 방향으로서는 가급적 단절 없이 연속하여 조성할수록 좋으며, 긴 수변완충대는 생태통로 기능을 하여 생태적 기능이 향상된다. 고정된 완충 폭은 관리에는 용이하나 생태적으로는 바람직하다고만 볼 수는 없다.

다른 시설물에 비해 수변완충대는 보다 자연친화적이며, 유지관리가 상대적으로 유리하다. 하지만 홍수 시 장애물이 될 수도 있기에, 주기적인 가지치기나 고사목 제거와 같은 계절적 관리 필요성은 높다.

7) 강변저류지 조성

과거 홍수터였던 하천변 토지나 저습지, 구하도 등을 이용하여 홍수를 일시적으로 가두는 것이다.

저류지는 도시의 유수지와 성격이 비슷하여 홍수기를 제외한 1년 중 상당한 기간을 거의 빈 상태로 두어야 하기에 저류지 공간계획이 필요하다. 즉 다목적 이용이 요구된다. 저류지의 특성 상 하나의 큰 저류지 보다 다수의 작은 저류지가 더 효과가 크므로, 저류지 토지이용계획 시 저류지 간의 연계도 고려하는 통합적 접근법이 필요하다.

비 홍수기 저류지는 생물의 서식지와 친수공간으로 이용될 수 있다. 이를 위해 먼저 구역별로 침수기간을 산정하고 이에 맞는 식생 등을 조성해야 한다. 아울러 친수공간으로도 활용되기 위해서는 수질 관리도 유념한다.

8) 복개하천 복원

덮여 있던 하천의 구조물을 뜯어내고 하천에 햇빛이 들게(daylighting) 하는 작업을 말하며, 이미 하천 구조가 반영구적으로 변형된 하천을 복원하기에 다른 하천의 복원과를 그 성격을 달리한다.

하천이 복개되면 지하하천은 햇빛이 들지 않는 암거 구간이 되며, 서식지와 친수기능이 소멸되며, 수질자정 기능도 최악으로 추락한다. 하천은 단지 통로역할만 할 뿐으로 하수와 폐수, 홍수 등만 흘러 나간다.

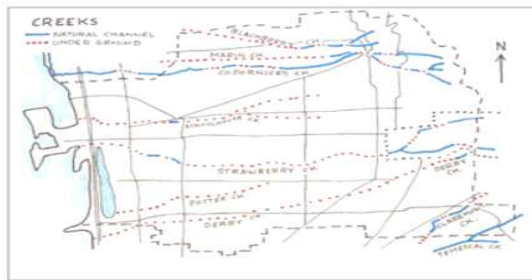


Image courtesy of Joe McBride



캘리포니아 버클리시의 도시화 이후 복개로 사라진 하천 현황 / Strawberry Creek 복개 청계천 같은 복개하천 복원 사례도 있으나 바르셀로나市 Rambla처럼 매우 어려운 경우가 대다수이다.



청계천, 서울시

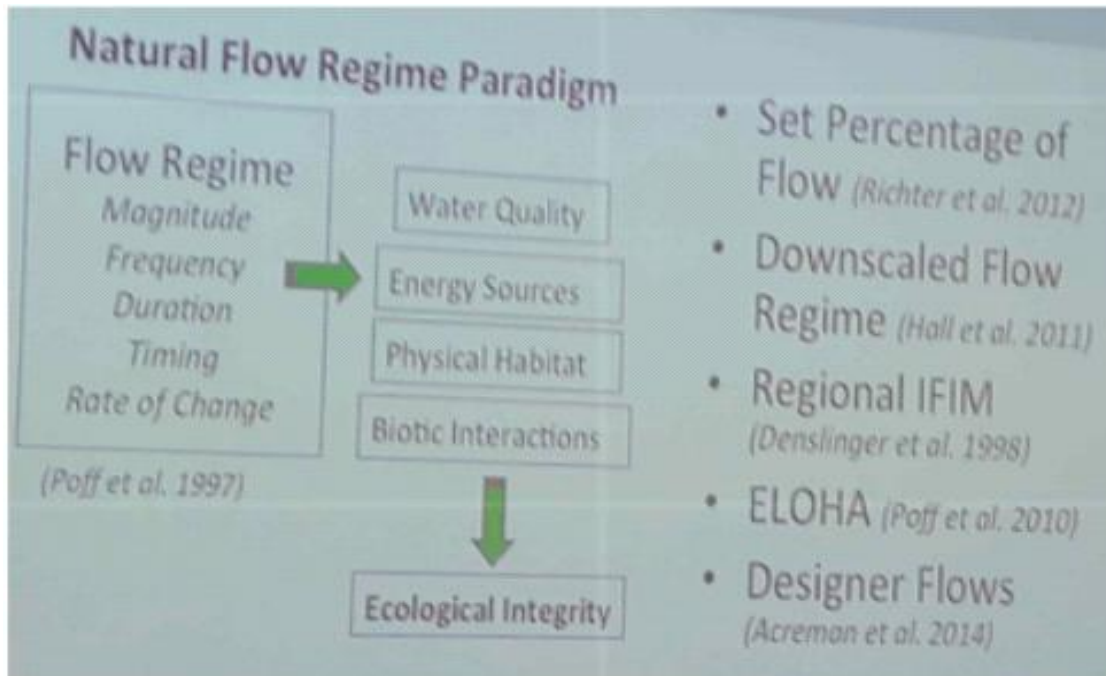


Rambla, 바르셀로나

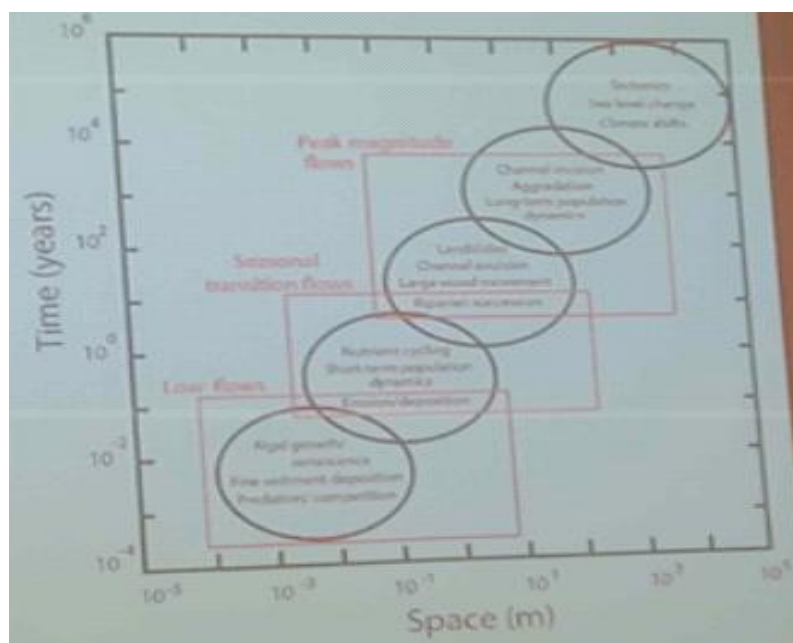
8) 환경 유황 회복을 통한 하천 복원

하천의 종적 연속성이 회복되거나, 댐/저수지의 유량을 조절하여 보다 더 역동적인 유황을 만드는 것은 하천 생태계에 활력을 불어 넣는 일이다.

하지만 조철하천이 원래의 자연유황을 되돌아가는 것은 지극히 어렵다. 유황의 변화가 생태계에 주는 영향은 보다 심층적으로 검토될 필요가 있다.

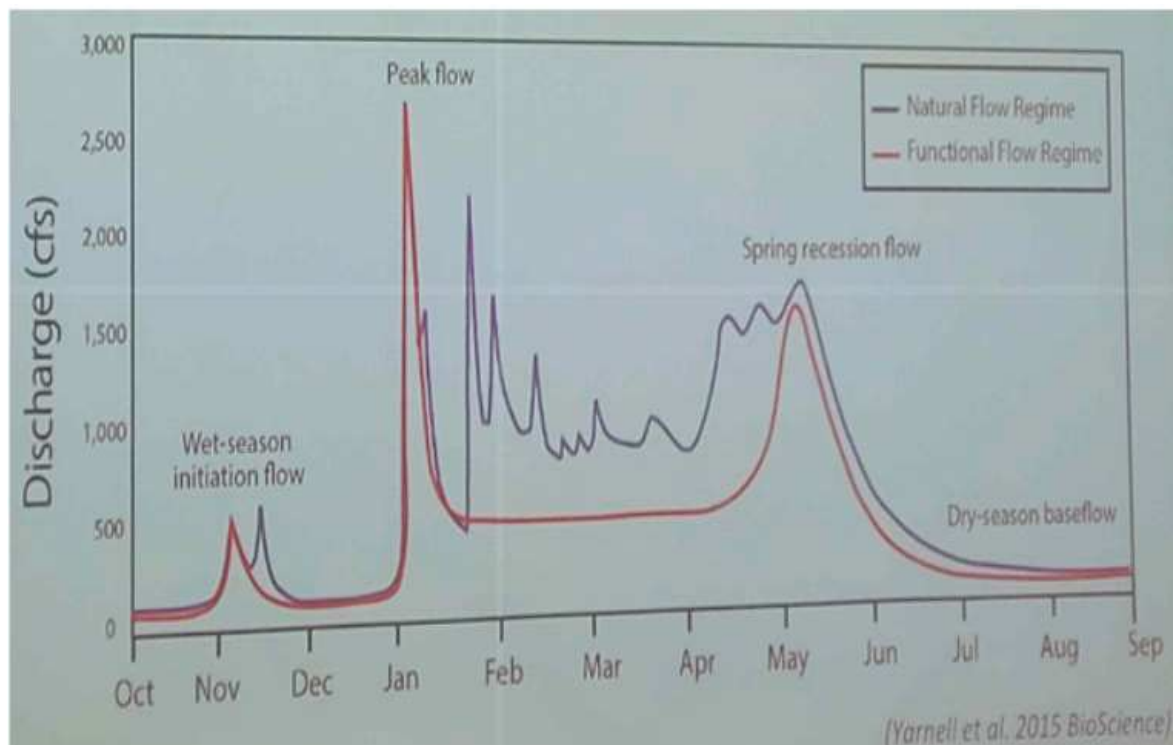


유황의 변화가 제약되는 상황에서는 자연 유황을 모사하는 것에 머무르지 않고, 유황의 변화가 하천 기능에 미치는 영향을 시공간적으로 면밀하게 분석할 필요가 있다.



일시적인 유황의 변이가 다양한 하천 공간에서 발생할 때 하천의 기능과 생태적 다양성이 증진된다. 이때 지형학적 상태와 수로-홍수터 간의 동적인 역학 관계에 주목할 필요가 있다. 하천 자체에는 영양물질이 적을 수 있으나, 홍수터에 영양물질이 축적되어 어류 증가 등 생물다양성 증진에 기여 가능하다.

기능적 유황(Functional Flow)은 하천이라는 시공간에서 일어나는 수문학적 요소로, 지형학적 및 생태학적 고유한 기능을 제공하는 것으로 정의할 수 있다. Yolo bypass 지역의 조사 결과 시기별로 아래와 같은 특성이 있다.



우기(Wet Season)의 초기 유황(Initiation Flow)는 하상의 유기물과 미세 퇴적물을 쓸어 내고, 수로-수변-홍수터 간의 서식지를 다시 연결시켜 준다.

침투 유황(Peak Magnitude Flow)는 주요한 지형학적 교란이자, 퇴적을 대규모로 재분배하며, 식생의 침투를 막고, 교란된 유황에 적응하지 못한 침입종을 줄여준다. 이러한 효과는 제방 후퇴, 홍수터 위한 제방 일부 유실, 지류 합류 등과 같은 공간적 변화가 있을 때 최대가 됨

높은 황에서 낮은 유황으로 바뀌는 춘계 회복 유황(Spring Recession Flow) 시기에 퇴적물이 재분배되며, 식생 침투가 제한적이며, 고유종의 번식이 왕성하게 일어났다.

이와 같이 하천 기능은 시간적 변화와 공간적 변화가 동시에 일어날 때 극대화 되었다.

2. 미국의 하천복원 사례 검토

미국은 1936년 홍수통제법(the Flood Control Act)을 제정한 이후 미군 공병단(Army Corps of Engineers)을 중심으로 제방, 댐 및 보, 주운 건설 등을 건설해 왔다. 미군 공병단에 공식 등록된 댐은 약 9만개이며, 등록되지 않은 댐을 전부 합치면 250만개로 추정된다. 우리나라의 기준을 적용할 때, 높이 15m 이상의 대형 댐은 9265개, 나머지는 15m이하의 댐으로 '보'라고 할 수 있다.

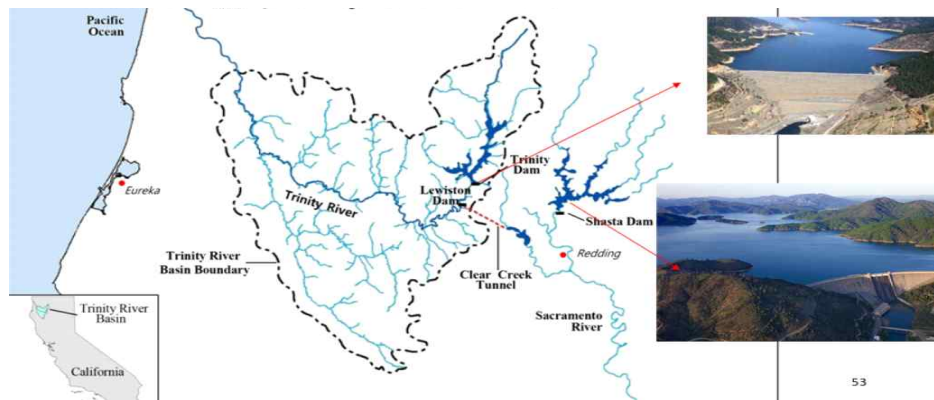
하지만 수질 악화, 서식지 파괴, 어류 이동 단절, 제방 안정 미흡 등과 같은 많은 문제 대두하자 하천복원을 사업 추진하였고, 다수의 성공 사례 도출하였다. 특히 1995년 연방 개척국은 “댐의 시대가 지났음”을 선언(The era of dams is over)하기도 하였다.

전통적으로 하천을 주운 수로, 홍수 통제 등의 관점에서 하천을 관리 해 왔던 미군 공병단이 미주리강 복원 프로그램을 주도하는 등 하천 관리 정책의 패러다임이 자연성 중심으로 전환하고 있다고 볼 수 있다.

가. Trinity River

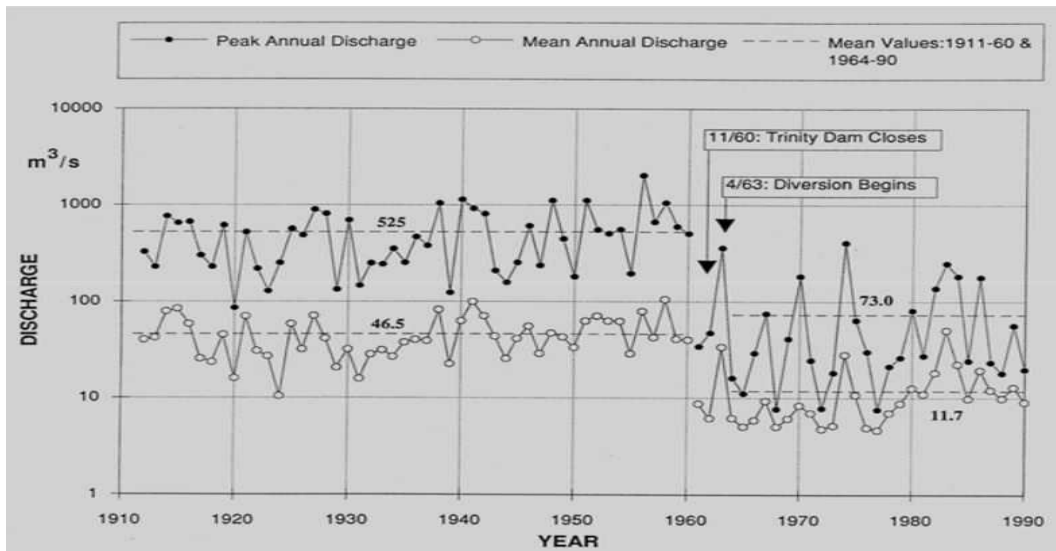
캘리포니아 북부의 Klamath강의 가장 큰 지류로서 길이는 약 209km이고, 유역면적인 약 7,389km²이다.

1963년 도수로가 건설되어 Trinity dam과 Lewiston dam 사이의 유역간 물 이동이 일어났다. 트리니티 댐은 높이 163m, 길이 750m의 흙댐으로 저수용량은 30억m³, 발전용량은 106MW이다. 루이스턴댐은 트리니티댐의 조정지 댐으로 저수용량 1,800만m³로 하류 13km에 위치하고 있다. 두 댐을 연결하는 Clear Creek 도수로는 직경 5.3m, 길이 17.2Km로 초당 90.6m³의 물을 이동시킬 수 있다.



53

이 도수로 인해 트리니티 강으로 흘러가는 물의 많은 부분이 다른 유역인 Sacramento 강으로 넘어감에 따라, 트리니티 강의 수량이 줄었다. 유량의 변화도 줄어들어 거의 일정한 유량만 흐르게 되었다. 댐과 도수로 건설 이전에는, 늦가을과 초겨울의 홍수로 연어가 회귀할 수 있었으며, 산란은 겨울 유량에 적합했다. 눈이 녹는 봄의 유량은 건기가 시작되는 여름 이전에 치어가 바다로 갈 수 있는데 적합했다.



또한 댐으로 인해 모래의 이동이 크게 바뀌어, 연어나 무지개 송어의 서식처가 크게 사라졌다. 이로 인해 강변에 육상식물이 많아졌다. 댐 이전에는 겨울과 봄에 물이 많아 하천 낮은 부분에서 자라는 갈대나 오리나무가 별로 없었다. 하지만 댐 이후 이런 식물들로 하천변에 큰 띠가 만들어졌고, 토사 퇴적이 늘어나 강변에 작은 둑까지 만들어지기도 했다. 르윈스턴 댐 하류의 유량이 줄어들면서 천이가 일어나고, 이로 인해 수로가 좁아졌다.



이러한 결과 1970년대에 연어와 무지개송의 등 어류의 서식처도 줄어들었다. 역동적인 강에 적응하여 살던 어류는, 댐 건설 이후 서식처인 소(웅덩이)가 모래로 채워졌고, 여름철 수온이 너무 높아져 어린 연어가 자랄 수 없었다. 산란에 적합한 자갈도 쓸려 나갔다.

이러한 문제를 해소하고자, 1999년 하천 복원에 대한 보고서가 만들어지고, 2000년부터 복원사업이 시작되었다. 이 복원사업은 댐을 해체함으로써 문제를 해결하는 것이 아니라, 댐의 용도와 기능을 유지하면서 생태적 서비스를 복원하는 것에 중점이 있다.

강 복원을 위해 우선 필요한 것은 유량을 복원하는 것이었다. 이는 어류의 산란 등에 적합한 환경을 조성하는 위함이었다. 하안 복원은 하천 내 퇴적으로 발생한 작은 둑을 제거하고, 둑 안의 모래를 밖으로 견어냈다. 홍수터가 유량에 따라 잠길 수 있도록 하였고, 수변식생을 복원된 홍수터에 심었다. 토사복원을 위해 2개 지점에 2009년 4월과 5월에 각각 2,500톤과 1천톤의 자갈을 투입했다.

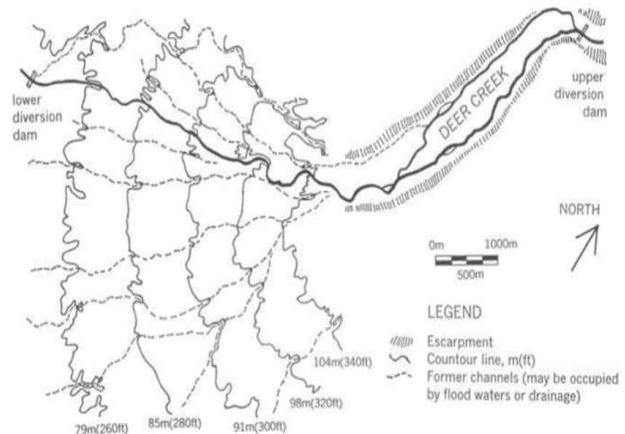


이러한 결과 Lowden Ranch의 경우 2011년에 다양한 형태의 자갈 받이 1.5km에 걸쳐 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

나. Deer Creek

수로와 홍수터 간의 연계를 통한 하천 복원을 시도하였다. 이 지역은 매 10년 주기로 홍수 피해를 보았는데, 주로 홍수 시 제방 붕괴가 일어났다. 홍수 피해를 줄이면서도 1900년대 이후 지속적으로 악화되어 온 서식지 개선과 수변 식생대 확대도 동시에 기획하였다. 홍수 방어를 위해 이 지역은 선상지 성격을 가지고 있어, 하천 수로의 가변성이 있었다.

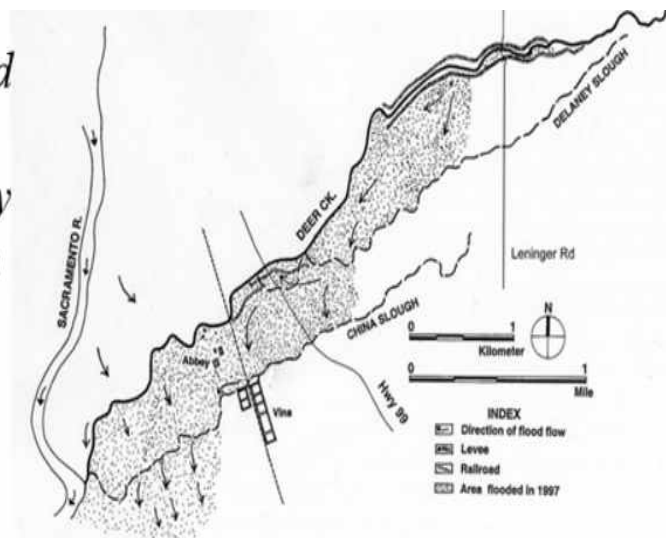
복원계획 수립 초기에는 연어 산란장을 위해 자갈을 투입하고 나무를 직재하는 것으로 제시되었다. 하지만 지형학적 검토와 과거 홍수 대비 문헌을 분석해 보니, 유량이 적은 지역에 큰 자갈이 많고 나무가 적은 것은 1949년의 홍수 대비 사업 때문이라는 사실을 알게 되었다.



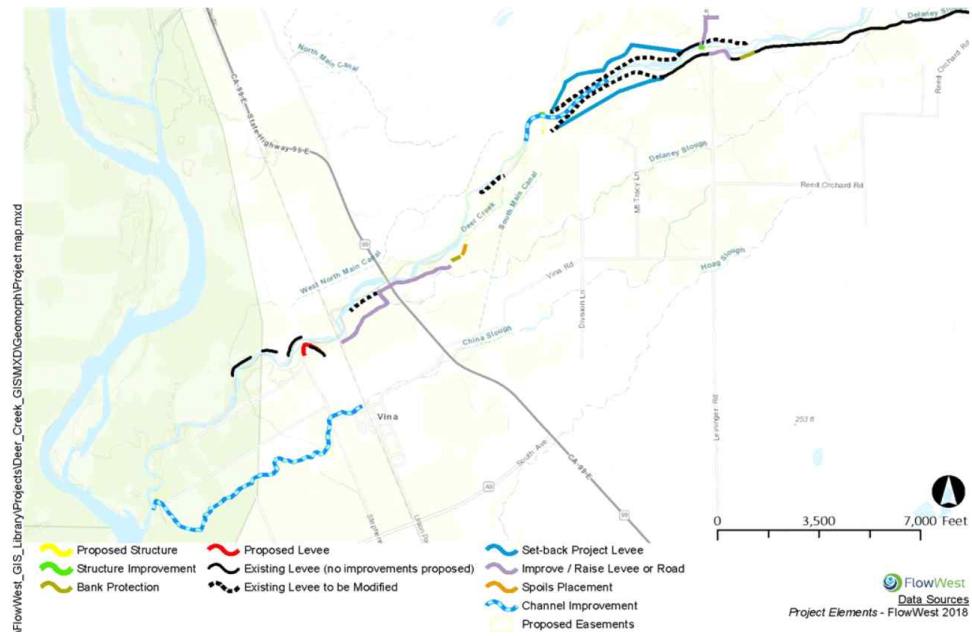
1949년 시행된 사업으로 인해 종래의 많은 물줄기와 여울-소가 풍부한 복잡한 하상 구조는 단일 물줄기의 하폭이 넓은 강으로 바뀌었다. 이러한 사실에 토대로 새로운 전략을 수립하였다.

제방 위로 홍수가 넘어가는 것을 허용하여, 수로의 홍수 부담을 줄여주는 것이다. 1949년 이후 인근 수역은 큰 변화가 없어 왔으며, 유량과 퇴적이 낮은 수준에서 안정화 되어 있기에 생태계 복원을 촉진하기 위해 월류를 허용하기로 했다.

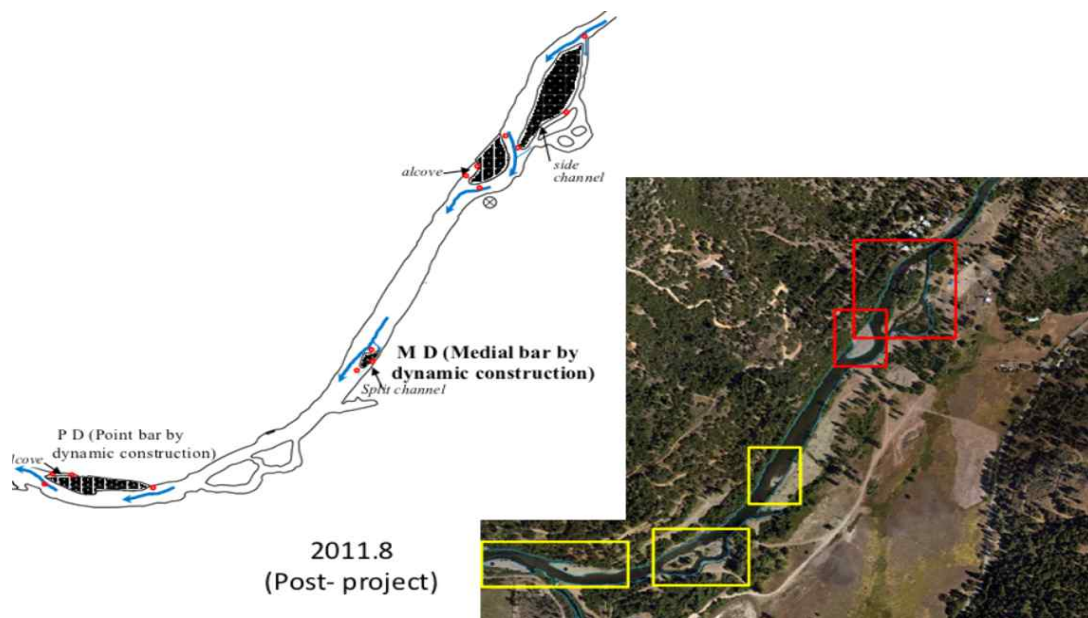
*1997 flood breached
levees,
created opportunity
to re-think the system*



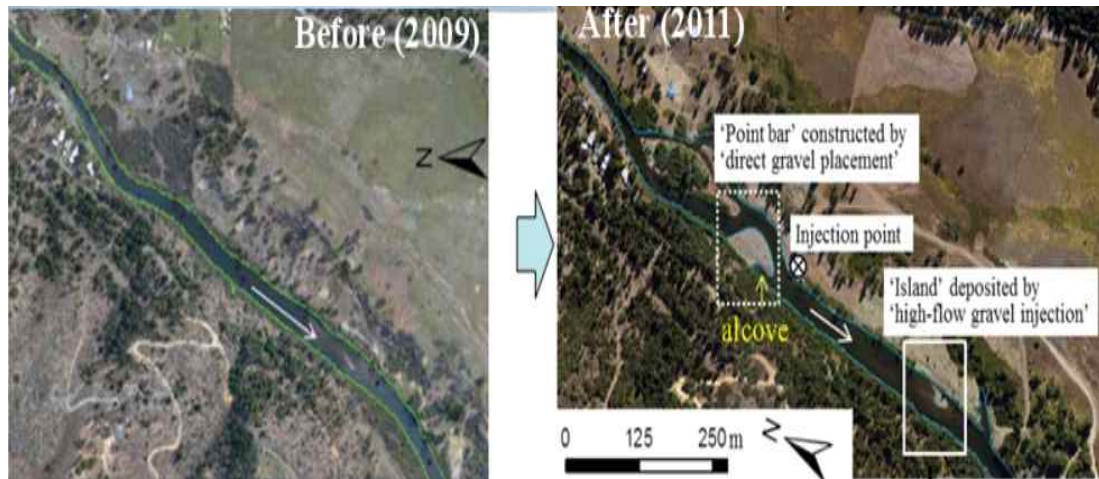
종합적으로는 일부 제방은 보강(지도의 검은 점선)하고, 제방을 후퇴도 시행하며(지도의 푸른 선), 하천 수로도 보강(지도의 푸른 점선)하는 등 다양한 사업을 수행하였다.



그 결과 하천의 식생도 다양해졌으며, 홍수위험도 줄어들었다.



아울러 댐 하류의 미세토사 유출을 방지하기 위해 토지 이용을 바꾸었고, 쓰지 않는 임도를 폐쇄했다.



자갈이 많이 투입 된 지점에서는 하천의 자연적인 동적 조절 시스템을 통해 400m 하류에 하중도가 만들어 지는 것도 확인할 수 있었다.



동전 크기부터 어른 주먹 크기의 자갈까지 다양한 크기의 자갈을 인공적으로 추가하여, 연어의 서식처와 양육장으로 활용될 수 있게 했다.



다. Kissimmee River

플로리다주 남부 최대의 호수인 Okeechobee로 흘러 들어가는 길이 216km의 강인 키시미강은 광활한 저습지를 관통하여 북에서 남으로 흐른다. 유역면적은 7,800km²이며 연평균 강우량은 약 1,330mm이다.

키시미강은 1960년대 하천정비 이전에는 홍수터인 아열대성 소택지에 다양한 물새와 어류가 있는 야생동물의 귀중한 서식지였다.

하지만 1947년부터 있어 온 대규모 허리케인의 막대한 피해를 줄이기 위해 대대적인 하천정비가 일어났다. 1971년까지 남부 플로리다 지역에는 2,300km의 수로와 제방이 만들어졌다. 이 수로를 C-38이라 부른다. 키시미 호수와 오키초비 호수 사이에 구불구불한 166km의 강이 90km의 직선으로 줄어드는 등, 저습지의 물을 최단시가에 하류로 흘러 보내는 홍수조절 사업이 대대적으로 일어났다.

이로 인해 강은 말라갔고, 조류와 어류는 줄어들었다. 겨울 철새의 90%, 왜가리와 같이 얕은 물 위를 걷는 새 대부분이 사라졌다. 대머리독수리의 2/3가 사라졌다는 보고도 있었다. 키시미강의 홍수터 대부분인 160km² 대부분이 목장으로 바뀌었다. 홍수 대비사업 이후 키시미강은 하류 오수오 유입되는 질소의 25%, 인의 20%를 차지하게 되는 등 비점오염물질 유입도 늘어나, 키시미강 하류의 오키초비 호수의 수질도 악화되었다.

이에 연방정부는 1992년 사업계획을 인준하고, 1997년부터 복원사업을 시작하였다. 결국 지금까지 해 온 하천 직강화를 되돌리게 되었다.

우선 1999년 6월 갑문 하나를 철거하고 12km의 수로를 흙으로 다시 메워 24km의 새로운 강과 44km²의 저습지를 복원하였다. 최종적으로 69km의 강과 102km²의 저습지가 복원되었다.

댜채우기, 굴착, 기능을 다한 보와 갑문 철거 등을 통해 강의 수위와 물길이 더 자연스러워졌으며, 저습지에 물이 공급되어 생태계가 살아났다. 특히 저습지가 홍수에 잠길 수 있게 하기 위해 주변의 토지를 매입하였다. 매입된 토지는 누구에게나 개방되었으며, 추가적인 저류 공간이 확보 됨으로서 홍수 조절 능력도 훼손되지 않았다.

복원된 강과 홍수터에는 물새들이 3배 이상 늘었고, 강바닥의 유기물질이 71% 정도 줄어들었으며, 모래 사주가 생멸하면서 물새, 조개 등의 서식처가 늘었다. 용존산소량 또한 늘어났다.

라. Red River

레드강은 콜로라도강의 지류로서 아이다호주에 있다. 유역면적은 405km², 숲으로 둘러싸인 산간지역 해발 1,280m에서 흐른다.

20세기초 광산, 사금채취, 벌목이 활발하여 결과적으로 강의 수문순환, 모래이동, 수질 등이 악화되었다. 물길의 직강화 되고, 수변식생이 제거 된 이후 강의 경사가 급해지고 토사 이동도 많아졌다. 하상 바닥도 불안정해졌다. 지하수위도 내려가고 침수빈도가 낮아진 홍수터에는 식생도 바뀌게 되었다. 어류 서식에도 불리하게 되었다.

이를 해소하고자 1993년 복원사업이 시작되었다. 1996년부터 자연 하천의 진화적 특성을 적극 활용한 복원사업이 본격적으로 시작되었다. 이를 위해 영구적인 하안 구조물을 건설했다. 강의 동적 평형상태에 맡겨두는 방식을 택했다. 자생종을 식재하고 자생종이 성장할 수 있도록 강의 수문학적 기능을 회복시켰다.

물길도 과거의 흐름을 기초로 더욱 구불구불하게 만들어 만족도가 60% 커져, 강의 길이도 그만큼 길어졌다. 하상경사는 40% 정도 줄어들었다.

강의 지형의 자연의 힘을 통해 역동적으로 바뀌게 함으로서 수변식생도 이에 따라 적응적으로 복원되어, 결과적으로 어류 복원까지 달성할 수 있었다.

마. Penobscot River

피놉스콧강은 메인주의 가장 큰 강으로 유역면적이 22,300km², 길이는 563km이다. 미국 최대의 연어 회귀지 중의 하나였다. 개발 이전에는 인디언들의 삶의 터전이자, 물고기가 넘쳐나 유역에 곰, 독수리가 많았던 강이었다.

그러나 1834년부터 시작된 댐 건설은 17개까지 늘어났다. 강의 연속성이 파괴되자 북대서양의 회귀성 어종은 더 이상 돌아오지 않았다.

이러던 중 PPL-Main이라는 에너지회사가 피놉스콧 강의 댐을 매입하면서 복원하면서 시작되었다. 이후 4년간의 논의를 통해, 유역 최하류의 댐을 철거하고 다른 댐의 수력발전량을 증대하는 합의가 도출되었다. 본류의

Veazie 댐과 Great Works 댐을 철거하고 Howland 댐에는 우회수로 설치하는 것을 핵심으로 하는 복원사업이 시작되었다. PPL-Main은 나머지 6개 댐의 발전량을 늘리는 허가를 받았다.

이 복원사업을 통해 연어와 같은 회귀성어류의 생태통로 복원과 수력발전 갈등을 해결하였다. 인디언의 어업권 보장 문제도 해소되었다.

바. Kennebec River

케네벡강은 메인주 중서부에서 대서양을 흘러나가는 길이 240km, 유역면적은 15,200km²이다. 19세기말 수력발전이 시작되면서 흐르던 강물은 막혔다.

그 중 에드워즈댐이 있다. 에드워즈댐은 높이 7.3m, 길이 280m, 저수량 2,100만m³, 발전용량은 3,500Kw이다. 1970년대와 80년대에는 이 댐의 발전 전력으로 큰 제지회사와 섬유회사가 있기도 했다.

댐으로 인해 회귀성 어류가 돌아오지 못하는 생태적 문제가 커지자 환경보전단체는 댐 철거를 요구하였으며, 연방정부는 수력발전 재허가를 통해 댐 철거를 검토하기 시작했다. 1996년 연방에너지규제위원회(FERC)는 약 890만불의 비용을 들여 어도를 설치하는 조건으로 수력발전을 재허가하는 안을 검토하였으나, 댐 철거로 인한 환경적, 경제적 편익이 수력발전 편익보다 크다는 연구결과에 따라, 댐 소유자 비용으로 철거하는 것으로 결론 내렸다.

이후 수많은 논의를 거쳐, 1999년 1월 댐 소유가 메인 주정부로 넘어갔고, 주정부가 댐 철거계획을 수립했다. 그해 7월 1일 댐이 철거되었다. 철거비용은 어도 설치 비용 보다 적었다. 이는 흐르는 강이 댐 유지 편익 보다 크다는, 강을 보는 미국의 관점을 변화를 상징하는 계기가 되었다.

댐이 철거 된 후 몇 달만에 대서양연어가 댐 상류 29km까지 나타났으며, 2000년 봄에는 모든 종류의 회귀성 어류가 상류 29km까지 돌아왔다. 강의 물고기가 늘어나자 대머리독수리 등 상위 포식자도 늘어났다.

수질도 B등급으로 올라갔다. 더불어 강을 이용한 수상스포츠도 활발해졌다. 강변의 진흙에는 고유 식생이 이입되는 등 강의 생태적 서비스가 되살아났다.

사. 기타

Elwha River에서는 2012년 3월 Elwha Dam이, 2014년 9월 Glines Canyon Dam이 철거된 이후 40만 마리 연어 회귀, 야생동물 증가, 하도 안정화, 하구 복원 효과를 거두었다.

Klamath River에서는 2010년 40개 이상 이해당사자 협약 맺어 2020년부터 댐 4개를 철거하기로 결정했다. 이를 통해 연어 서식지 480km 확보와 녹조 개선 및 지역공동체 회복을 기대하고 있다.

Missouri River는 9세기 말부터 경작지·주거지 보호 위해 댐·제방 등 인위적 치수 사업이 있어왔고, 그 결과 녹조 증가, 습지 감소, 생태계 파괴, 하구 침식이 초래되었다. 미국 공병단 중심으로 복원사업이 진행 중에 있다.

3. 하천복원 사업 평가

대규모 투자가 수반되고 그 효과가 지속적으로 나타날 수밖에 없는 하천복원 사업을 평가하는 방식은 다양하다. 사업 성공 여부를 평가하는 방식은 크게 두 가지가 있어 왔다.

물리적 평가 기법은 사업으로 개선된 부분을 직접 평가하는 것이다. 하상의 자갈 크기, 유속이 달라지는 수심, 회귀성 어종의 산란장 안정화 등이 주요 지표가 될 수 있다.

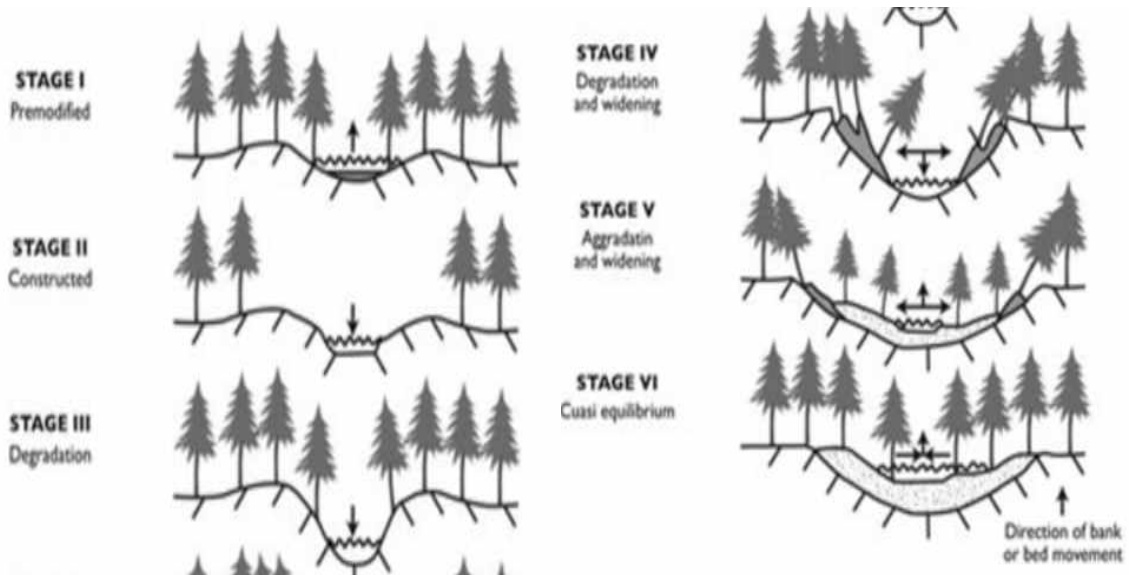
생태적 평가 기법은 하천 복원 사업의 결과 타나나는 생태계의 변화상을 평가하는 것으로, 종의 수, 다양성 등을 평가하는 방식이다.

하지만 수치에 기반 한 평가는 실제와 다른 경우가 많았다. 무엇이 나쁜 하천인지는 상대적으로 명확하다. 수질이 오염되어 있거나, 수생물이 집단적으로 폐사하거나, 아니면 하천 수로가 인공적으로 직강화 되어 있는 경우를 들 수 있다.



하지만, 무엇이 좋은 하천인지를 구체적으로 특정하기는 쉽지 않다. 통상적으로 자연성 높은 하천으로 단일 물줄기의 사행하천을 선호하고, 또는 역사에 기록된 과거의 하천 모습을 기준으로 삼기도 하다.

또한 하천의 자연적 변화 과정 중의 하나이나 아래 그림의 4번째 단계와 같이 식재한 식생이 쓰러지는 과정이 되면, 사업 수행자는 실패한 것으로 여기기도 한다.



하지만 하천은 각 유역마다의 물질적, 생물적, 기후적 특성이 다르기에 일률적으로 적용할 수치적 기준으로 적용할 평가 기준은 없다고 보는 것이 타당하다. 하천의 변화는 시간에 걸쳐 다양한 모습으로 장구하게 나타나기 때문이다.

따라서 하천의 자연성을 과정으로 이해하고, 이러한 과정을 통해 서식지의 질이 높아져 생물 다양성이 증진되고, 결과적으로 생태계 기능이 높아져, 하천이 제공하는 생태계 서비스가 좋아지는 것으로 보아야 할 것이다.

이러한 실정에 맞게, 과정에 기초한 생태계 회복 디자인 기준이 제시되기도 했다.(Damion Ciotti 등)

첫째, 하천의 공간적 변화 과정에서 순이득(net gain)을 가지는 방향으로 설계한다.

둘째, 유량이나 식생 성장과 같은 유역의 자연적 에너지를 이용하고 유역 밖의 에너지원은 부차적 또는 최소한만 이용한다.

셋째, 제방을 견고하게 하거나 수로의 변동을 저해하는 물질을 쓰지 않고, 수문학적 지형 변화가 용이한 물질을 사용한다.

넷째, 생물의 서식지를 직접적이고 즉시적으로 만들어 주는 것이 아니라, 시간이 지남에 따라 서식지가 만들어 지는 여건을 조성하는데 주안점을 둔다.

이와 같은 기준에 따라 하천 복원을 추진한다면 보다 높은 자연성을 가지는 하천으로 복원될 것으로 기대된다.

4. 주기적 모니터링 및 평가

미국의 National River Restoration Science Synthesis에 따르면 1900년부터 2004년까지 \$170억 이상이 투자되었고, 프로젝트 또한 37,000건이 수행되었다. 광범위한 지지를 받고 대규모 공공투자가 있어 왔다.

하지만 그 중 과학적인 사후 모니터링이 수행된 경우는 5% 미만이었다. 하천은 각기 다른 모습으로 점진적이고 지속적으로 변해가므로, 이후의 더 나은 하천 관리를 위해서는 장기적이고 지속적인 모니터링이 필수적이라고 하겠다.

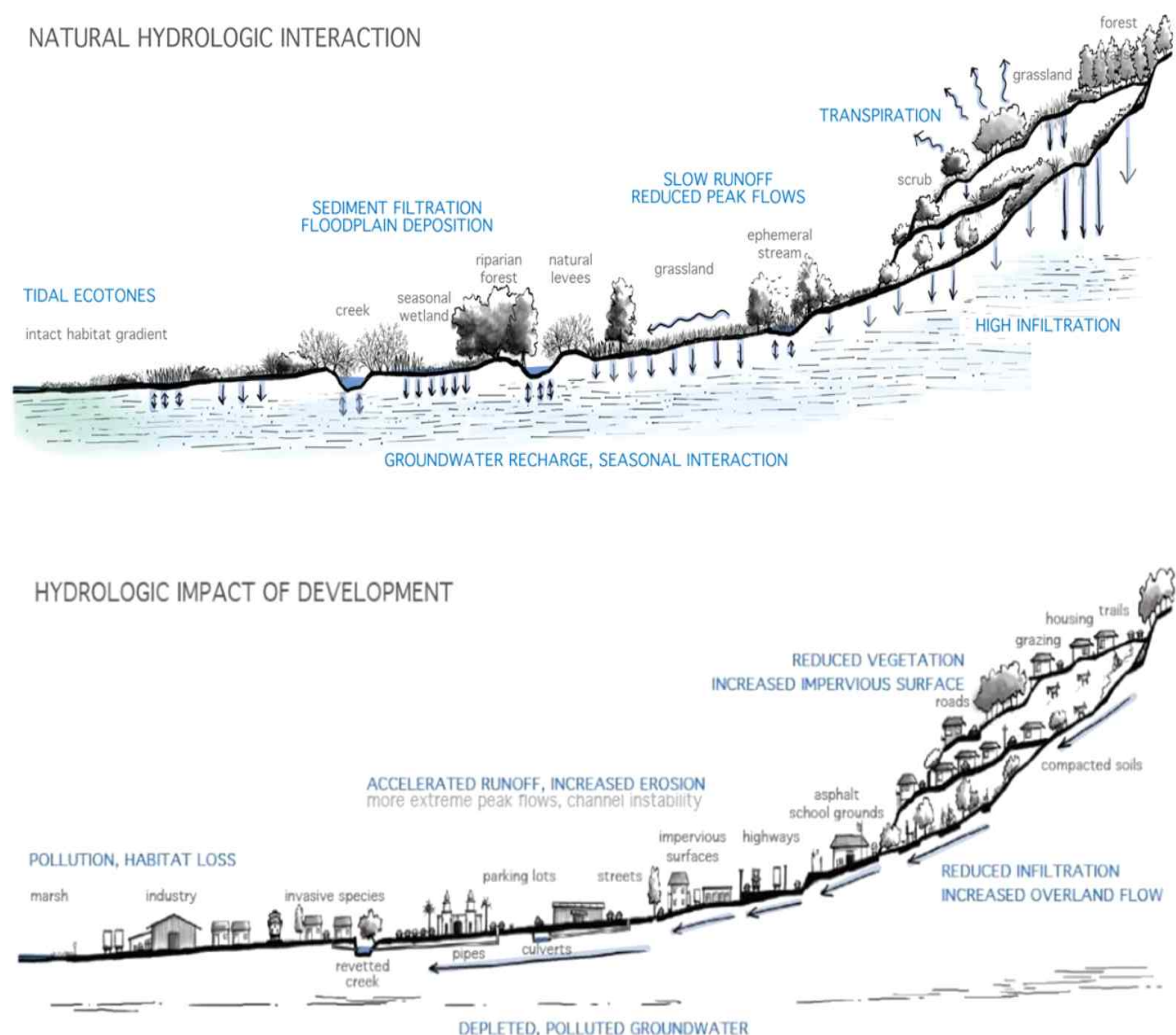
하천복원 사업 직후의 단기간의 일회적 평가 보다는, 주기적으로 장기적인 모니터링을 통한 점진적 변화를 추적하는 것이 더 바람직하다고 하겠다.

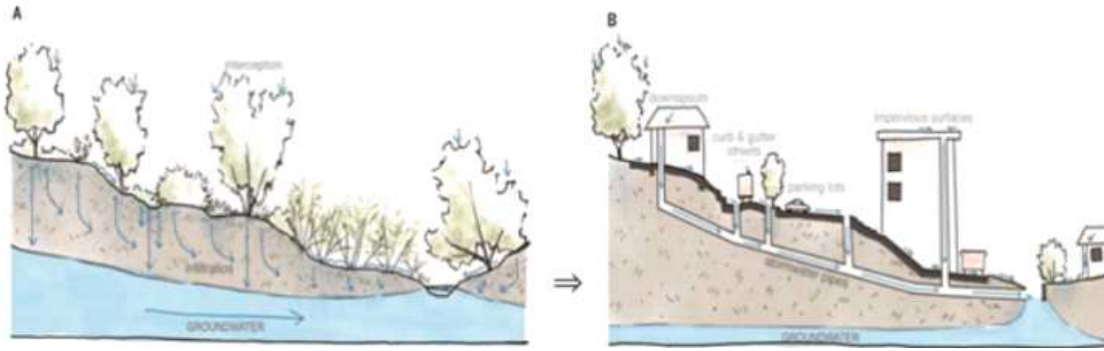
IV 하천과 도시

1. 도시하천의 특성

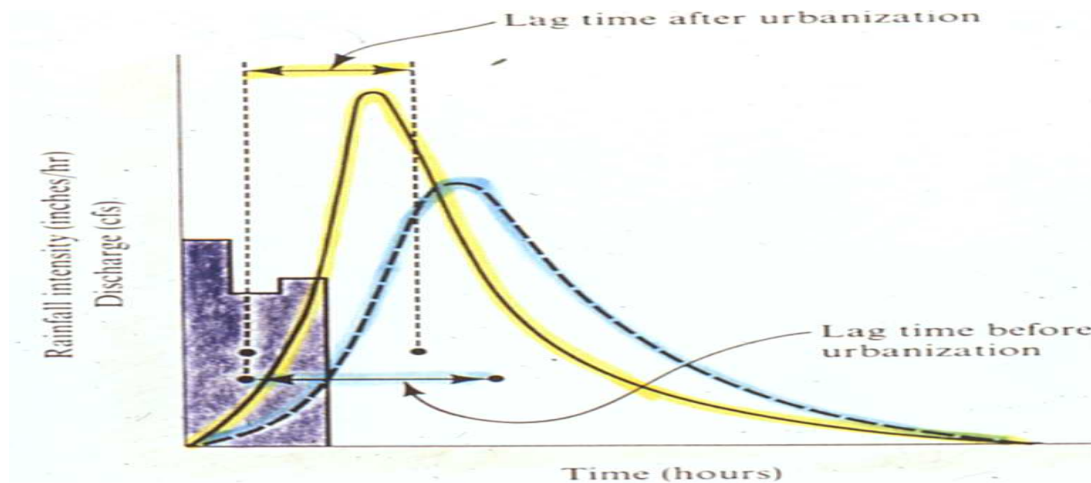
대다수의 도시는 하천과 같이 하고 있다. 하천의 특성에 따라 도시의 공간적 모습도 제약되기도 하면서 도시가 발전하면서 하천의 모습도 바뀌어 왔다. 홍수터와 인접한 이수의 이점도 있지만, 홍수터이기에 가지는 치수의 위험도 상존해 왔다.

도시화가 진행됨에 따라 불투수층이 넓어지고, 이에 따라 수문순환의 패턴은 바뀐다. 건물, 도로, 주차장, 보도 등과 같은 불투수층은 깊은 침투는 물론이고 얕은 지표 침투마저 어렵게 한다. 이에 따라 지표면의 유출은 증가한다. 비가 오지 않을 경우에는 유량이 거의 없거나 건천화 되고, 비가 많이 오는 시기에는 홍수가 빈번해진다.

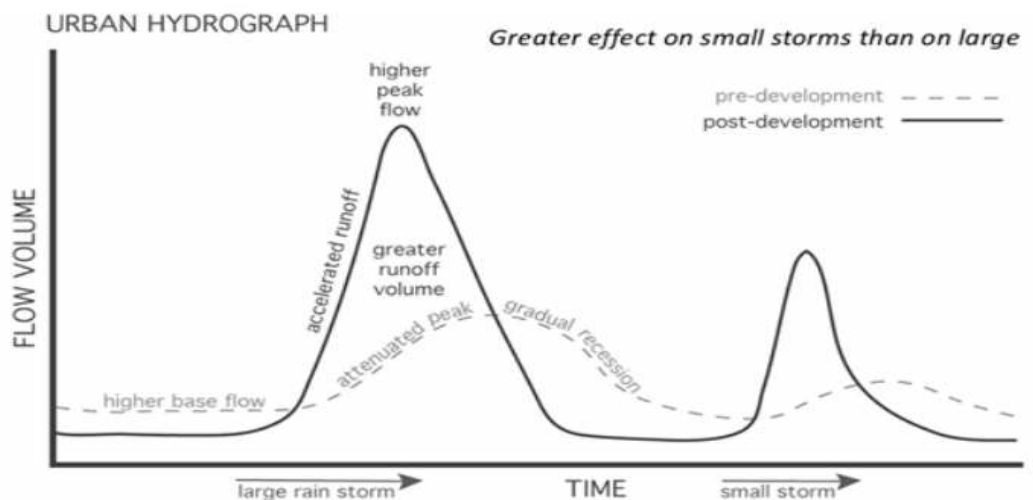




도시화 이전에는 호우가 숲이나 지표면에 의해 차단 또는 지체되고 지하로 침투하여 일부분만 하류로 흘러나가 수문곡선이 넓게 퍼지는 형태가 되지만, 도시화로 인한 불투수면의 증가는 하천유량의 급속한 증가를 초래하여 수문곡선의 침투유량이 커지고, 발생시간은 줄어들고, 기저유출량도 줄어들게 한다.



기저유량은 낮은 상태로 유지되나 홍수 전후로 유량 증감이 더욱 가파르게 일어나게 된다



source: Schueler 1987

생물의 서식지 관점에서 보면, 도시화 이후 서식지 훼손과 파편화, 나아가 고립까지 일어난다. 서식지 고립은 수생서식지 보다 수변서식지에서 두드러지게 나타난다. 서식지 훼손과 파편화로 생물상은 줄어들거나 사라지게 된다.

수질 자정능력도 낮아진다. 평상시의 점오염원 뿐만 아니라 강우 시 유출되는 비점오염원에 의해 오염의 유입량은 많아진다. 일부 노후 관로가 파괴되면 미처리 오염수가 누출되어 하천으로 흘러들기도 한다.

하지만 이를 정화하는 자정능력은 유속 저하, 빈약한 생물상 등으로 인해 낮아진다. 아울러 유량 감소 또한 희석효과 저감 등으로 도시하천의 수질 악화를 초래한다.

하천의 친수기능은 서식지 기능과 수질 기능이 온전하게 보장된 상태에서 제대로 된 역할을 할 수 있다.

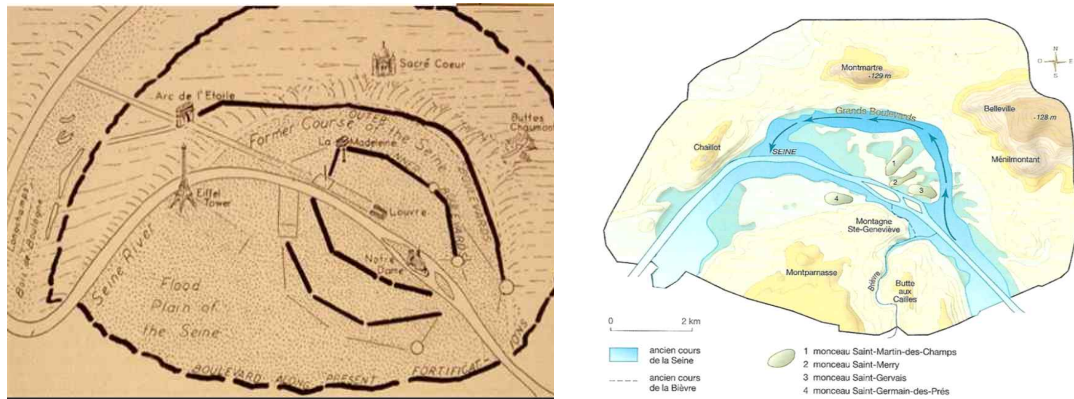
도시화로 일부 하천은 매립되고 인공배수로가 늘어나 수계의 밀도는 증가한다. 과도한 토지이용과 신속한 우수 배제를 위해 기존의 사행하도는 직강화 되기도 한다. 이로써 홍수 피해는 오히려 커 질 수 있다.

지하수 고갈과 오염 우려도 높다. 도시화로 강우 시 대부분 하천으로 유출되어 지하수 함량이 감소한다. 무분별한 도시의 지하수 이용은 지하수 고갈과 함께 수질에도 부정적인 영향을 미친다.

도시하천의 지형적 특성은 도시의 성격과도 연계가 된다. Bavaria의 Wasserburg 市는 사행하천의 만곡도가 커진 지역에 도시가 발전하면서 외부의 제방을 견고하게 했다. 이로서 하천 구조의 변화가 지체되고, 제방 윗부분의 침식도 막았다.



프랑스 파리市는 세느강의 만곡부에서부터 발전하기 시작했다. 시의 전경을 볼 수 있는 조망점인 몽마르뜨 언덕은 세느강의 만곡부 밖에 있는 제방의 정상부에 있었다.



2. 하천의 사회적 연결성

가. 기본 개념

사람, 재화, 아이디어, 문화 등이 강을 통해 연결되는 것으로, 도시 지역의 경우 사회적 상호작용이 더욱 중요하다. 종래의 하천에 대한 수문학적 연결성을 사회와 문화 관점으로 확장한 개념이다.

하천의 사회적 연결성을 만들고 변화시키는 주요 요인은 크게 세가지가 있다. 우선 지형학적 형태로, 하천 내재적 물리 특성, 낙차 형성, 바다와의 연결 정도, 제방 높이 및 인접 지형, 도심과의 거리, 계절적 및 연간 유황변이 등에 따라 사회적 연결성의 정도가 달라진다.

정치적 제도적 관리 측면에서는, 특정용도(주운, 치수 등)를 우선시 하는 하향식 정책 결정, 제방에 대한 공적 또는 사적 접근성 제고 등에 의해 사회적 연결성의 모습은 바뀌게 된다.

인공적, 물리적 변화, 즉 홍수 방어 위한 제방 축조, 교통 또는 공업 목적 등으로 제방 강화 등에 의해 사회적 연결성은 훼손되기도 한다.

나. 역사적 사례

1) 미국

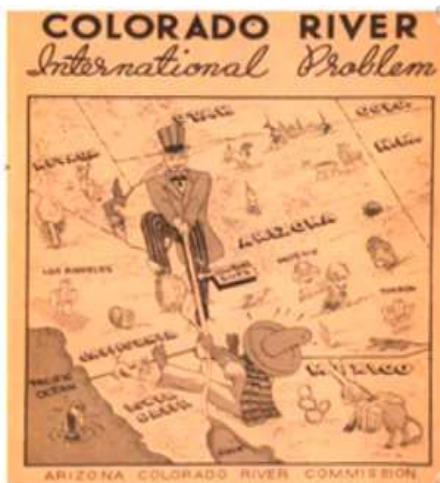
강은 물류 이동에 있어 최초의 고속도로 역할 수행, 이를 통해 개척, 식민화, 개발 등이 일어났다.



* 루이지애나 구입 이후 미주리강과 컬럼비아 강을 통해 최초로 서부 탐험한 루이스&클락 원정대

오하이오 강을 경계로 노예 소유주와 자유주로 나뉘는 등 정치적 경계선 역할도 했다.

강 양안 사이 단절로 인해 州 또는 국가 사이의 경계선 역할도 수행했다. 대표적으로 콜로라도 강을 둘러싼 미국과 멕시코의 갈등, 애팔래치아 강의 물이용 관련 조지아주와 플로리다주 사이의 소송 등을 들 수 있다.



콜로라도 강 분쟁



애팔래치아 강 분쟁

2) 프랑스 파리 세느강

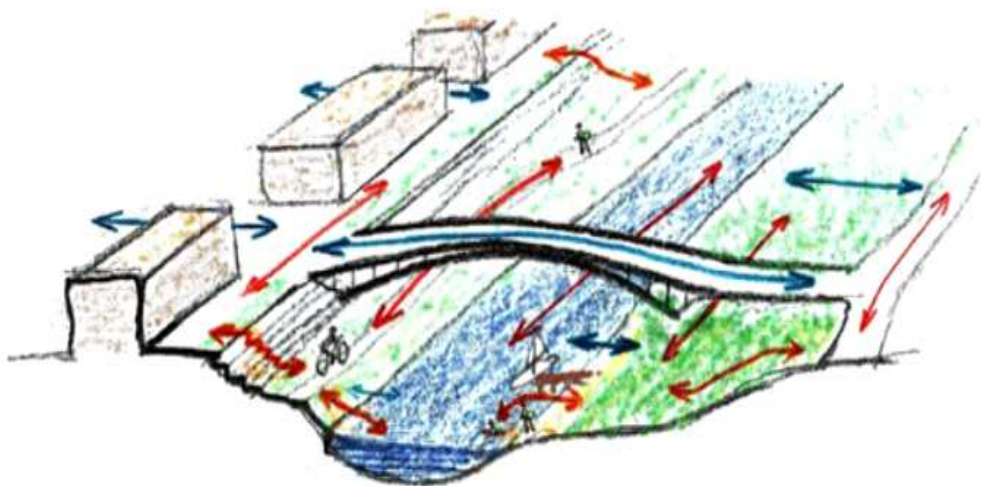
파리는 세느강 중류의 하중도 시테섬을 중심으로 도시가 성장했다. 1850

년 세느강 수운을 통한 국가적 연결성 높이기 위해(상하류 연계성) 양안을 개발하기 시작하면서 파리 구간 내 수평적 연결성은 크게 낮아지면서, 과거에 강변에서 일어났던 빨래터, 가죽공장 같은 소상공인, 양안 수송용 선박 가게 등은 대부분 사라지게 되었다.

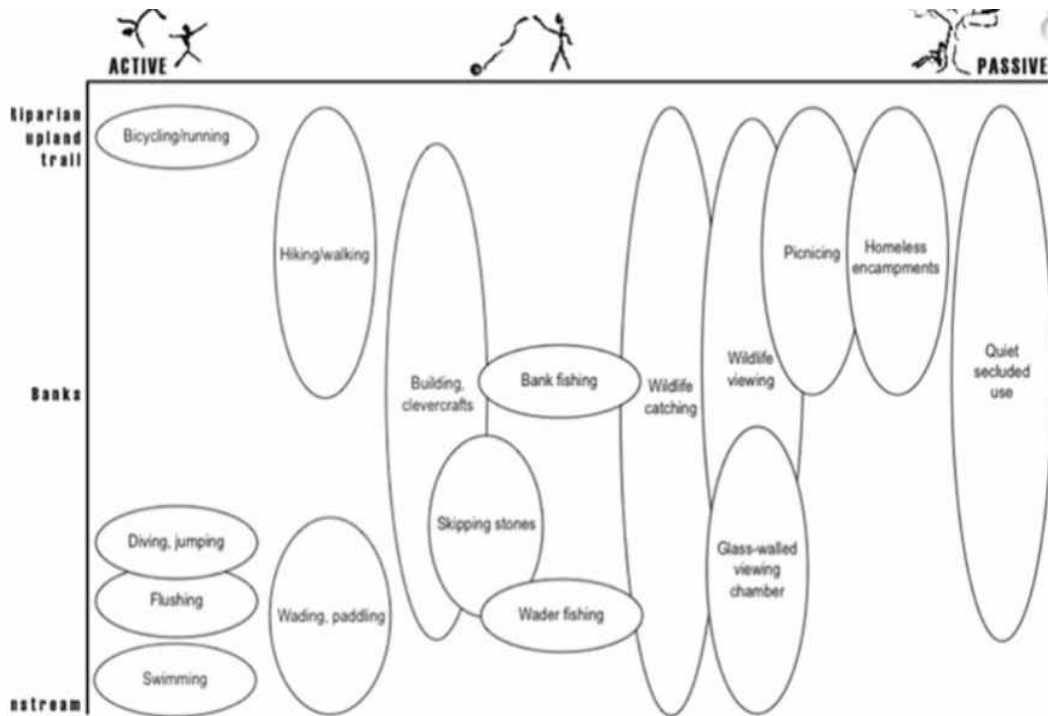


다. 도시 하천의 연결성과 인간의 활동

도시하천 연결성은 강둑을 따라 상하류, 양안 사이, 친수공간 등 3가지 축을 중심으로 분석할 수 있다.



하천 내 활동과 제방에서의 활동, 수동적 활동과 적극적 활동으로 구분하면, 아래 그림과 같다. 왼쪽 아래 부분(수영 등)으로 갈수록 수직적 연결성과 양호한 수질이 요구된다.



* 왼쪽 아래 부분 활동(수영 등)으로 갈수록 수직적 연결성과 양호한 수질 요구됨

하천 양안 거리에 따라 도시와 하천에 대한 인식의 범위는 달라진다. 양안의 거리가 약 15m인 경우 건너편 사람이 명확하게 인식되나, 1km 이상 멀어질수록 강 건너편은 단지 스카이라인으로 다가온다.

		RIVER WIDTH (m)						
		0	15	50	200	400	1000	>20k
How "close" is the other bank?	Able to talk to/ recognize people	Able to see people	Still see cars	See large trees	Still see buildings	See skyline		
Bridging the river	Culverting easy	Bridging easy	Bridging normal	Bridging hard	Bridging rare	Only major crossings		
Does the street pattern follow the river?	Streets ignore river	Organic street patterns follow river, grids do not			Grids follow river	Highways follow river		
What kind of waterfront uses?	Little or no setback	Narrow streets	Embankments, narrow gardens	Major streets, waterfront gardens and squares, dockings	Major linear infrastructure and waterfront squares	Large port areas, piers and docklands, waterfront parks		

이러한 특성은 도시 하천의 친수 성격의 사업을 기획할 때 유용하다.

라. 하천의 사회적 연결성 강화를 위한 다각적인 노력

제방의 벽을 헐어 수직적 연결성을 높이는 등 물리적 연결성 높임(예시: 제네바 라인강의 돌벽을 허물어 2011년부터 수영 가능)이거나, 상하류 연결성 높아지면 도심 하천 내 카누, 카약 활동 증가(밀워키 강)하기도 했다. 미국 네바다州 Reno市의 Wingfield Park는 도심 하천에서도 수영, 카누 등을 시민들이 폭넓게 즐기기도 한다.



밀워키 강 도심 카누



레노市 도심하천 공원

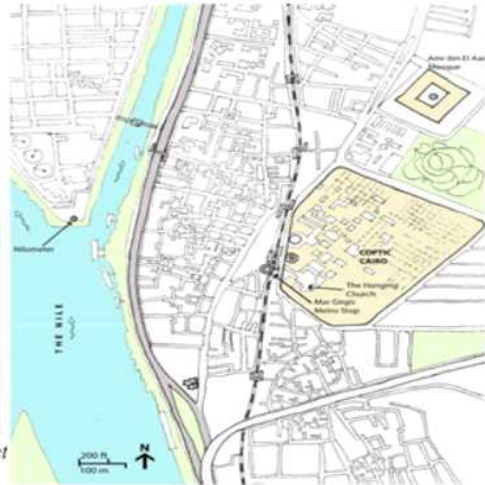
파리市는 2024년 올림픽 수영경기를 도심하천인 세느강 내에서 개최하는 준비하고 있다.



1970년 아스완 하이댐 건설 이후 이집트 카이로市의 나일강 수위 안정적으로 바뀌면서 수변공간 개발, 결과적으로 도시 저소득층은 나일강과의 연결성 매우 낮아졌다. 더구나 카이로 역사지구인 Coptic Cairo가 도심철도와 도로로 인해 강과 단절되었다.



View upstream along right bank, Central Business District



Rive Lab의 검토결과, 아스완 하이댐 건설로 인해 연중 건조한 상태 유지하는 낮은 홍수터는 향후 시민을 위한 트레일로 전환 가능하고, 나일 페리 정박지 늘려서 양안 및 상하류 연계성을 높일 수 있는 잠재력이 있었다.



마. 정책적 시사점

세계 각국은 전통적인 하천-도시 관계에서 벗어나, 도심의 하천 회랑 공간의 상하류 및 양안 간 연계성을 높여나가는 방향으로 전환 중에 있다. 수질 개선 등 하천 구역의 위생이 개선됨에 따라 선진국의 하천 직접 이용 사례는 늘어나고 있으며, 제방 인근 공장, 상업시설, 도로, 철도 등 인공시설물을 이전 또는 제거를 통한 하천의 사회적 연결성 높여나가고자 한다.

우리도 도심의 오염원 관리 강화하여 개선된 수질에서 하천 직접 이용(수영 등) 확대하고, 교량 이외의 수상 교통 통한 양안 간 연결성 회복하며, 수변공간을 통한 사회적 혼합(Social Mix) 위해 다양한 프로그램(자발적 탐조 활동, 하천 보호 활동에 시민 참여 등)의 확산 되도록 지원할 필요가 있다.

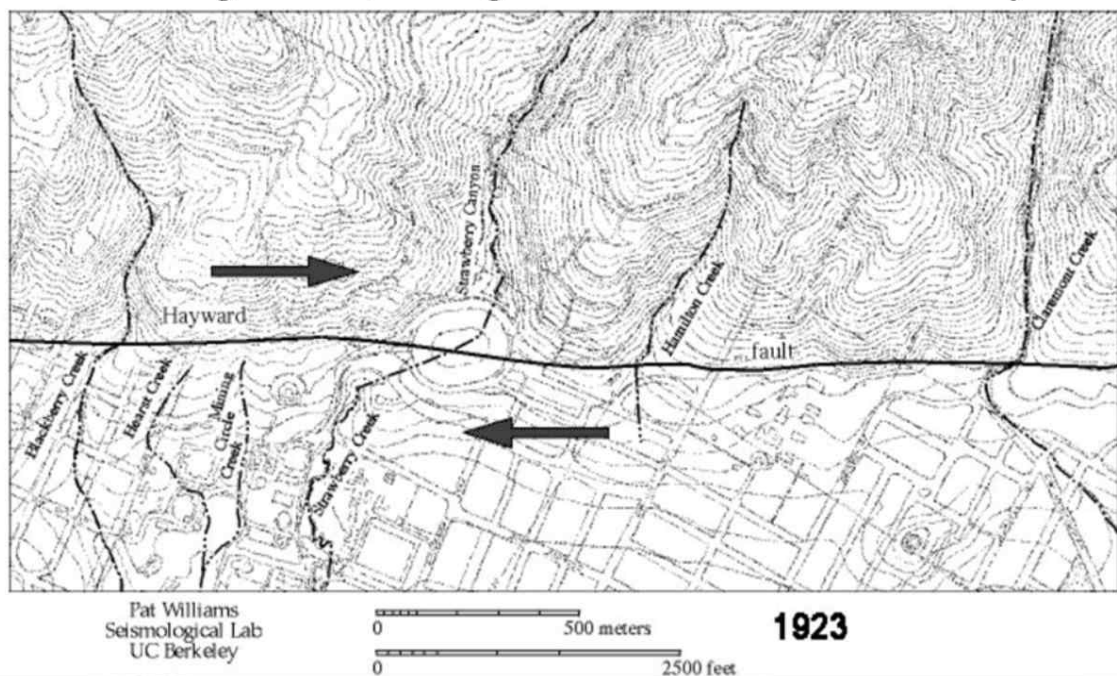
3. 도시하천 복원 사례

가. Berkeley市 Strawberry Creek 하천 복원

Strawberry Creek은 상류인 Tilden Regional Park에서 시작하여 UC Berkeley Campus를 관통하여 Berkeley市를 통해 Bay로 흘러나간다.



하천 중심부를 지나는 Hayward 단층선으로 인해 통상적인 부채 모양의 선상지와 달리, 단층선 북쪽으로 퇴적되어 물길을 사행하천으로 바꾼다.



대학이 들어서고 도시가 발전함에 따라, 수질오염, 유량 부족, 서식지 파괴, 직강화, 과도한 퇴적 등이 일어났다. 아래 유역도의 녹색 부분(UC Berkeley Campus)를 포함한 주요 지점의 수질 등 환경조사 결과, 40%가 이

미 도시화 되어 있으며, 100지점 이상의 점오염원 배출원이 있고, 홍수에 취약하고, 무척추수중생물 조사에서도 나쁜(poor) 생물지표로 나타났다.



현장조사를 토대로 복원계획을 세웠고, 1) 캠퍼스의 경관 보전, 2) 하천 복원 관련 교육과 연구 가치 증대, 3) 도시하천의 한계 내에서 생태적 기능 극대화, 4) 도시하천 복원기술 실증, 5) 대중 인식 증진을 목표로 추진했다.

이후 100개 넘는 점오염원 배출지점을 조사했고, Cribwall이라는 목재 활용 제방 보강 공사를 일부구간에 했다. 제방은 시간이 지남에 따라 물리적 안정성과 자연성을 동시에 가지게 되었다.





이러한 사업의 결과 도시하천이 되살아나 재학생뿐 아니라 인근 주민의 휴식처이자, 다양한 생물의 서식지로 바뀌었다.

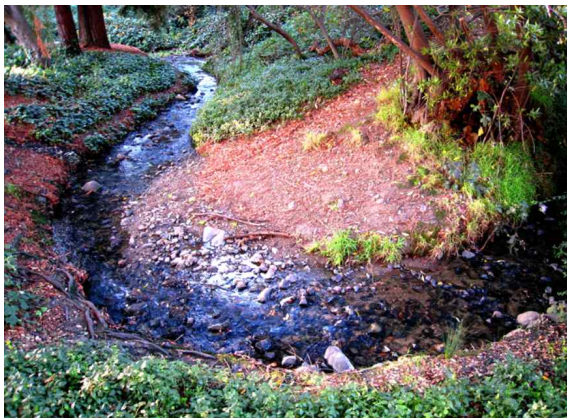


1989년의 하천 모습



최근 모습

하지만 홍수터와 연계되기 어려운 도시하천의 한계로 인해 홍수 배제가 힘들고, 도심 중심부는 복개되어 있어 복원이 현실적으로 어려운 등 장기적인 유역 차원의 관리가 힘들다. 이러한 한계에도 불구하고 UC 식물원 주관 답사, 대학원 강의 현장으로 활용하는 등 학생과 지역주민의 환경 교육의 장으로 다양하게 활용하고 있다.



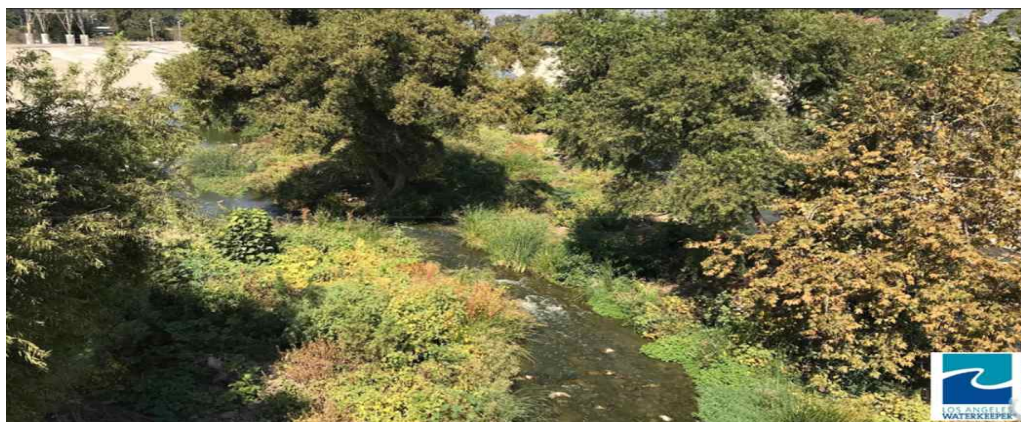
나. LA市 LA river 하천 복원

LA river는 미국 2번째 도시이자 서부 최대의 도시인 LA 관통한다. 북쪽의 San Gabriel 산맥에서 발원하여 LA 도심을 통과하여 남쪽의 Long Beach 항구를 통해 태평양으로 흘러나간다.

일부 상류 구간은 자연하천으로 남아 있으나, LA 성장과 더불어 물 부족 문제 해결과 홍수 방지를 위해 도심 구간의 강을 콘크리트 제방으로 직강화 하였으나, 이후 무수한 문제가 발생하여 복원사업이 추진 중에 있다.



LA 강 유역도



상류 자연하천 구간



직강화된 수로와 콘크리트 제방

당초에는 자연성이 높은 하천이었으나, 몇 번의 대홍수를 겪고 나서 침투 홍수량을 신속하게 배제시킬 필요성이 높아, 우수 유출에 가장 효과적이라고 검토된 콘크리트 제방으로 직강화 하였다.



하지만 정작 홍수가 나면 불투수층의 직강화로 인해 상류의 홍수가 하류로 빠른 속도로 증가하여, 홍수 지체 효과는 거의 없었다. 홍수 발생 시 수로에 있던 사람이 급류에 쓸려 나가기도 했다. 콘크리트 제방으로만 되어 있어 쓸려 나가는 사람이 급류에서 빠져 나오기도 어려웠다. 종종 인명 사고가 나기도 했다. 또한 홍수가 지나가고 나면 수로를 쓰레기로 가득 찼다.

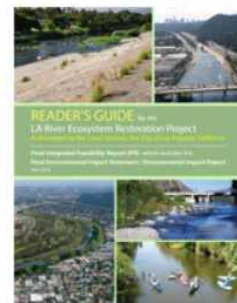
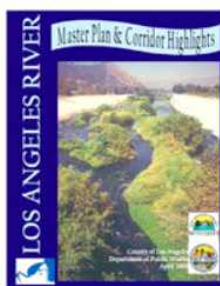
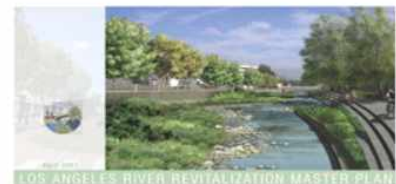


이러한 건천에서 생물은 살 수 없었고, 각종 생활 쓰레기가 쌓여 갔다..



Image Source: Figure 3.7 in Blake Gumprecht's The Los Angeles River: Its Life, Death, and Possible Rebirth

이에 2010년 EAP는 유역 복원을 위한 프로젝트를 착수하면서 다양한 계획을 수립했다. 하지만 각 계획, 정책마다 무엇이 LA 강 of 복원의 진정한 의미가 되어야 하는지에 대해서는 합의가 쉽지 않았다.

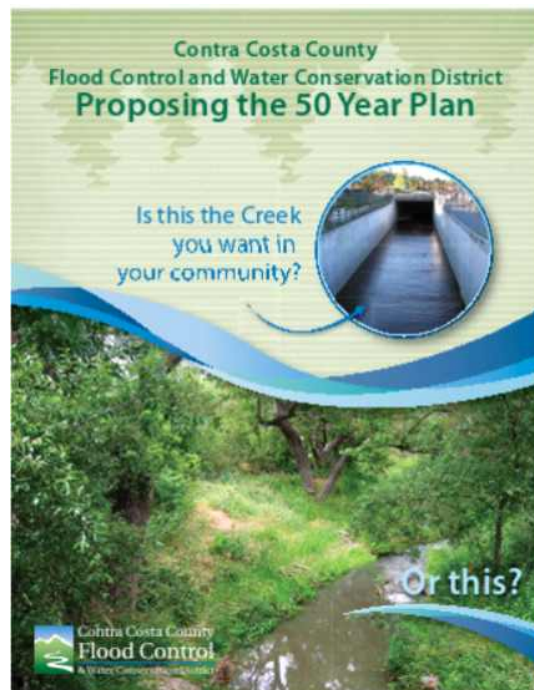


강을 복원한다는 것은 기본적으로 수문학적 지식에 근거하여 홍수 위험을 일정 수준 감내하고 이를 홍수터 복원 등과 연계하여 검토하는 것을 뜻한다. 특히 해당 지역의 지중해성 기후특성을 주요하게 고려해야 한다.

하지만 이러한 기본적인 복원 사업은 LA 도심 같은 고비용의 밀집 토지 이용 지역에서는 실현되기 어려웠다. 잠재적 사업예정지 주민과 유역 전체의 이익이 상충하고, 이를 해소할 기제도 부족했다. 사업비 자체도 막대했다. 도시하천 복원이 또다른 Gentrification을 초래할 우려도 높았다.

이러한 사유로 그동안의 많은 노력에도 불구하고 LA 강 복원은 현재까지 제대로 실현되지 못하고 있다.

콘크리트 수로의 내구연한은 75년으로 평가되고 있다. 1950년대부터 1990년대까지 지속되어 온 도심의 콘크리트 수로 하천은 2025~65년경 수명을 다한다. California Contra Costa County는 이러한 여건에서 향후 50년을 준비하는 ‘홍수 관리 및 수질 보전’ 계획을 수립하여 장기적으로 추진하고 있다. 이와 같이 장기적 목표 하에 개별 도시의 중장기 도시계획을 지속적으로 가이드 하는 정책적 노력을 우리도 참고할 필요가 있다.



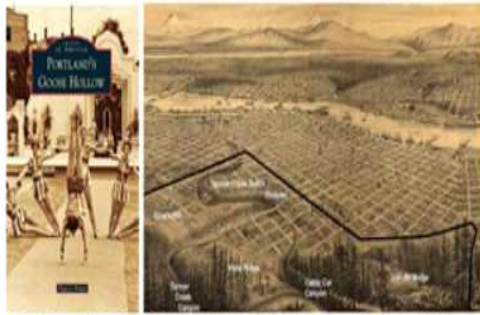
다. 사라진 옛 물길 복원

그동안 수많은 도시의 개발 과정에서 자연형 하천을 유로 변경, 복개 등으로 지도에서 사라지게 했다. 그 결과 현재 도시를 사는 사람들은 매일 걷거나 지나다니는 길 아래에 물이 흘렀다는 사실을 알지 못한다.

하지만 사라진 도시 하천의 물길은 과거 그림, 지도, 사진 등을 통해 개발 이전 상황에 가깝게 매핑 가능하다. 이러한 매핑을 토대로 도시 하천을 다양하게 복원시킴으로서 도시의 자연, 생태적 저항성(Resilience)과 녹색 인프라 간의 통일성을 높일 수 있다.

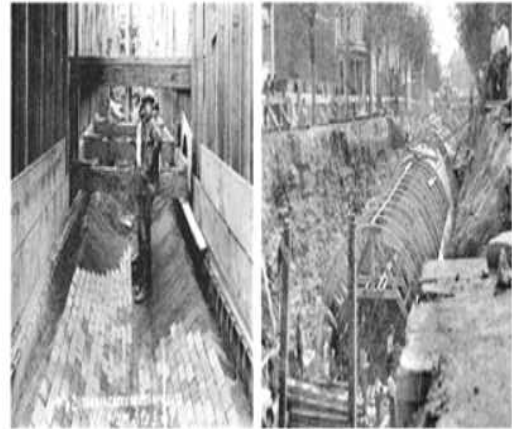
1) 미국 오레곤주 포틀랜드市 사례를 통한 옛 물길 복원 과정

우선 도시史의 내용, 당시 사진/그림, 지도, 공식적인 지적도 등을 상호 비교하여 과거의 하천 상황을 추출한다.



"Diverted underground from the 1870s to the early 1900s, with extensive use of Chinese and Irish laborers, Tanner Creek still drains the surrounding hills via storm drains, though it runs to the Willamette as a shadow of its former self in a deeply buried culvert. Even on a dry summer day, the creek can be heard rushing by under manhole covers near its historic course. One of the best spots to hear the creek is at a manhole cover on the west end of the Goose Hollow MAX Station."

Tracy J. Prince - Portland's Goose Hollow (2011, p.9)



포틀랜드 도시 역사서

Tanner Creek 하수도 건설 당시 사진(1920년대)



포틀랜드 지도(1854년)



Cadastral 지적 조사(1852-60)



포틀랜드 석판화(1870년)



포틀랜드 석판화(1879년)

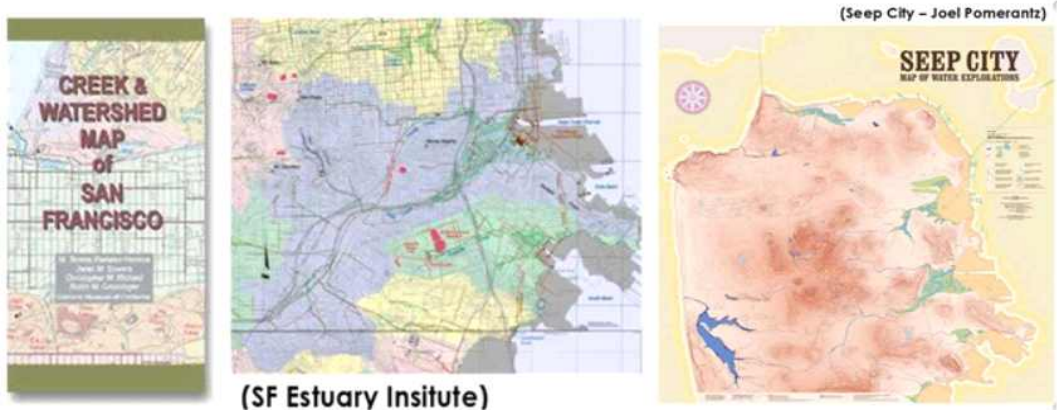
이렇게 확보한 다양한 자료를 디지털화하고 이를 GIS 기법을 이용하여 종합적으로 분석하면 과거 물길을 현재의 지도 위에 엮을 수 있다.



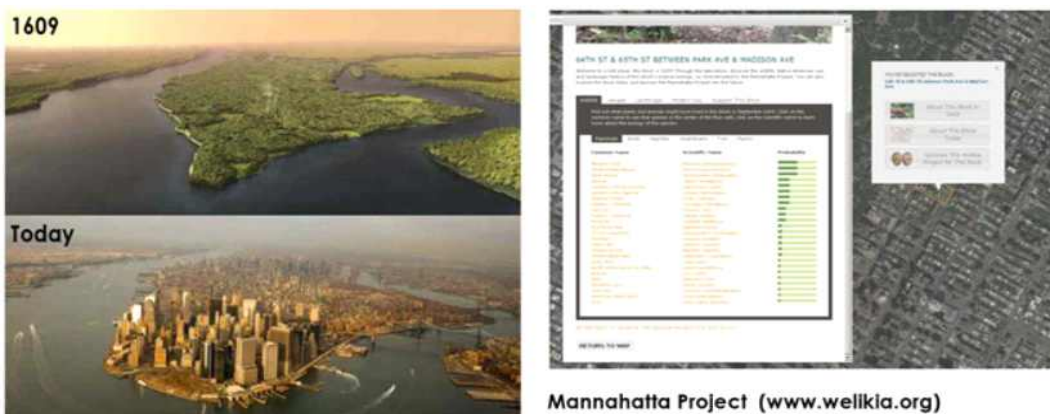
* 포틀랜드 남동부 지역 분석결과: 현재 지도 위에 푸른색의 과거 하천 도출

2) 도시화로 사라진 하천의 물길 매핑 사례

<미국 샌프란시스코 일대>



<미국 뉴욕 맨하튼>



Mannahatta Project (www.welikia.org)

<영국 런던>



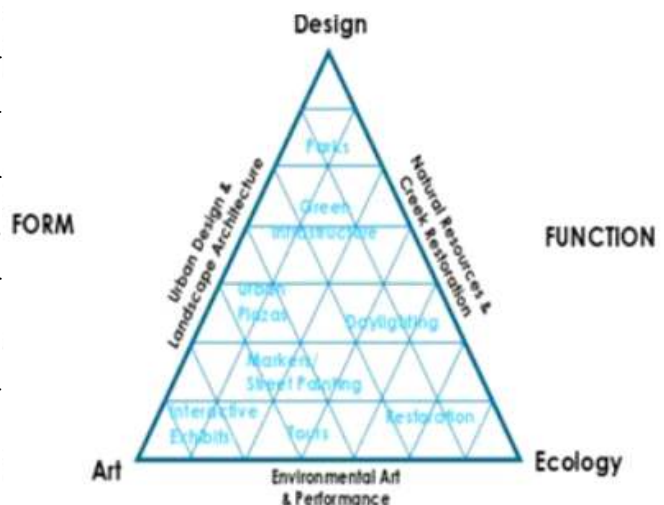
<캐나다 밴쿠버>



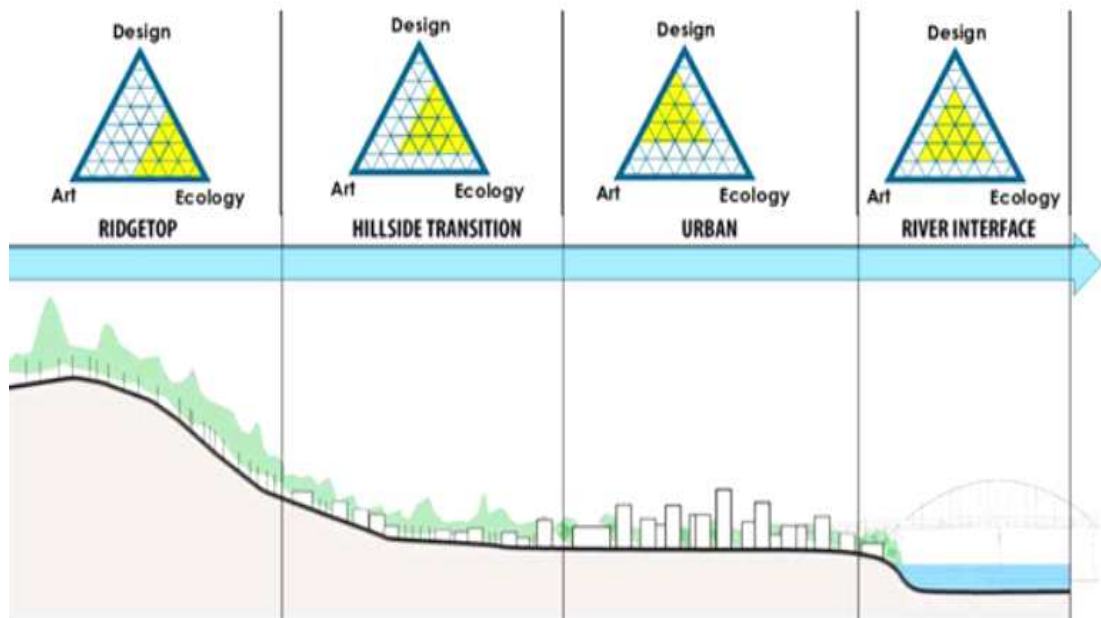
3) 복개하천 자연성 회복 추진 프레임워크

도시하천 물길 복원 시, 생태/디자인/예술의 3가지 요소를 구간 특성에 맞게 조화시키는 것이 바람직하다.

생태적 가치로 복원, 재생, 복개 하천 자연 채광(Daylighting) 등을 대안으로 검토하고, 디자인 요소로는 그린 인프라, 도시 공원, 오픈스페이스, 트레일 등을 고려하며, 예술적 요소로 거리 그림, 벽록시장, 상호작용적 시설, 소리통 등을 검토한다.



공간적으로도 이러한 3가 요소의 배분은 달라진다. 물길 상류에서는 생태적 요소가, 중류에서는 디자인적 요소, 하류에서는 세 가지 요소가 골고루 배분되는 것이 바람직하다.



4) 도심 복개하천 복원 사례

복개되어 있는 하천에 햇빛이 들게 복원하면 생물다양성 증진, 주민 삶의 질이 제고되고, 수질 개선, 자산 가치 상승, 여가 및 현장 교육 기회 확대, 홍수 예방, 기후 변화 대비, 습지 보전, 열섬 저감 등 다양한 효과가 있다. 이에 많은 도시에서 추진하였다.



미국 시애틀 Thornton Creek, 포틀랜드 Tryon Creek 및 Tanner park 등

5) 사라진 물길 복원 관련 대중과 소통하는 다양한 기법

물리적으로 실제로 복원하지는 못하더라도 과거 물길을 도로 위에 그려
둠으로서 대중의 인식 증진을 도모할 수 있다.

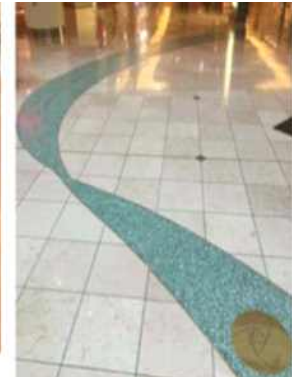


St. George Rainway

The Blue Road, Henk Hofstra

Ghost Array

도심 내 보도블럭, 도로, 건물 내 등에 간단한 정보가 있는 표지판 설
치하면, 도시의 일상에서도 물길이 흘러가는 것을 인식할 수 있다.



또한 과거 물길을 따라 물 흐르는 소리가 나는 시설을 도심에 설치하면,
소를 통해서도 물길을 인식할 수 있다.



전망대도 활용할 수 있다. 높은 곳의 망원경을 통해 지역 전체의 물길을
확인할 수 있도록 하면, 도시 경관에 대한 색다른 인식하게 할 수 있다.



온라인 가상 투어나 현장에서 가이드의 답사 등을 통해 현장감 있게 사라진 하천을 체험할 수도 있다.



6) 정책적 시사점

이미 디지털화 된 풍부한 기록문화(실록, 승정원일기 등)와 고지도 등을 GIS 기법을 이용하여 우리도 사라진 도시 하천의 물길을 찾을 수 있을 것이다.

이를 토대로 생태적, 예술적, 디자인적 요소를 조화시켜 거리 그림, 표지판, 소리통, 전망대, 답사 등 다양한 기법을 통해 사라진 물길을 체험함으로써 도시하천의 복원에 대한 인식 증진할 수 있을 것이다.

V 하천복원 추진 방향

하천을 복원한다는 것은 인간만의 혜택이라는 좁은 시야에서 벗어나, 유역 전체가 주는 생태적 혜택이라는 관점에서 접근할 필요가 있다.

1. 통합적 유역 관리 적용

통합적 유역관리는 하천 수로 중심의 접근이 아니라, 물 순환 전반의 관점에서 하천을 포함한 집수구역 전반에 대한 시스템적 접근을 말한다. 즉, 하천 유역 내 생태, 경제, 문화, 사회적 조건을 포괄적이고 통합적으로 관리하는 방식이다. 이러한 과정을 통해 하천과 토양을 포함한 유역 내 자원 전반에 미치는 부정적 영향을 줄이고, 생태적 서비스의 질과 양을 높이는 것이다.

예를 들면, 농업지역에서 나오는 관계용수가 비점오염물질을 다수 포함하고 있으며, 이는 결국 생활 및 공업용수의 질을 낮추고, 하천 생태계에도 악영향을 미친다. 반면, 하천 생태계를 위해 환경용수를 많이 확보하면 인간의 물이용은 제약을 받는다. 이러한 상충적 관계를 지양하고, 각 생태적 요소마다의 최소한의 기준을 확보함과 아울러, 최대공약수를 늘려가는 방식의 통합적 접근법이 필요하다.

이러한 유역 관리의 추진을 위해 유역 내 물과 관련된 모든 생물적, 무생물적 요소들은 각자 개별적으로 영향을 주고받기도 하지만, 결과적으로 서로 연결되어 상호작용 한다는 점을 중시하여, 아래와 같은 방식으로 관리한다.

첫째, 계획을 수립할 때 수문학적 단위를 중심으로 소유역, 중유역, 대유역 등을 대상으로 삼는다. 유역 사이에는 위계적 관계가 있다.

둘째, 모든 잠재적 물 배분을 고려하여, 포괄적으로 계획한다.

셋째, 물과 관련된 토지 및 생태적 자원을 통합하여 계획한다.

넷째, 환경의 질, 경제적 효율성, 사회적 목표 간의 조화에 입각하여 계획 및 결과를 평가한다.

가. 환경유량(Environmental Flow) 확대 적용

해당 유역 내 생태계는 물론 그 생태계에 의해 영향을 받는 인간의 삶을 지속하기 위해 필요한 물을 말하며, 이러한 요구에 충족하는 수량과 수질 기준을 달성한 하천의 유량을 말한다.

이러한 개념은 20세기 후반 댐 하류의 유량이 크게 감소하면서 발생한 문제를 해결하는 과정에서 등장하였다. 미국의 어류학자들이 댐 건설 이후 급감한 연어, 송어 등의 개체수를 확인하고, 이를 해결하기 위해 최소 유량(minimum flow)이라는 개념을 제시하였다.

이를 시작으로 1) 다양한 유기물 및 군집 고려, 2) 평균 유량 및 연간 변동 폭 등을 포함한 하천 수문 분석, 3) 형태, 재료, 서식지 등을 포함한 하천 지형, 4) 서식지 다양성, 5) 사회경제적 측면, 6) 생태계 서비스 등을 고려하는 종합적인 개념으로 발전하였다.

이와 같은 기준에 따라 환경유량을 산정하는 기법은 200여개 이상이 있으나, 크게 1) 수문학적 방법, 2) 수리학적 방법, 3) 서식지 모의 방법, 4) 통합적 분석 방법으로 나눌 수 있다.

환경유량을 산정하여 적용할 때는, 각 국가마다 하천의 특성이 다르고, 보호 또는 유지하려는 어류나 정책적 목표마다 적합한 기법이 다르다는 점을 유념해야 한다. 각 기법마다 과소 추정할 우려는 있다.

나. 유역 시스템의 내재적 에너지 최대한 활용

하천 복원 시 외부의 에너지, 특히 화석연료를 이용한 공사는 바람직하지 않다. 하천 스스로의 에너지를 활용하여 복원될 수 있는데, 인간의 인위적 개입을 통해 급격하게 하천 형상을 바꾸는 것은, 자연성 회복이라는 철학에 맞지 않을뿐더러, 전생애 주기를 통한 비용 측면에서도 비효율적이다.



2. 적응적 관리(adaptive management) 방안 도입

가. 의의

하천 복원의 과정은 불확실성이 크다는 점을 적극적으로 인정할 필요가 있다. 사업 추진 과정에서 당초의 계획이나 시뮬레이션과 다른 상황이 벌어질 가능성이 높다. 따라서 하천 복원 과정 자체를 하나의 가변적 과정으로 받아들여, 각 과정마다 하나의 실험(experiment)으로 간주하여 사회적 학습의 과정으로 받아들일 필요가 있다.

나. 적응적 관리의 과정

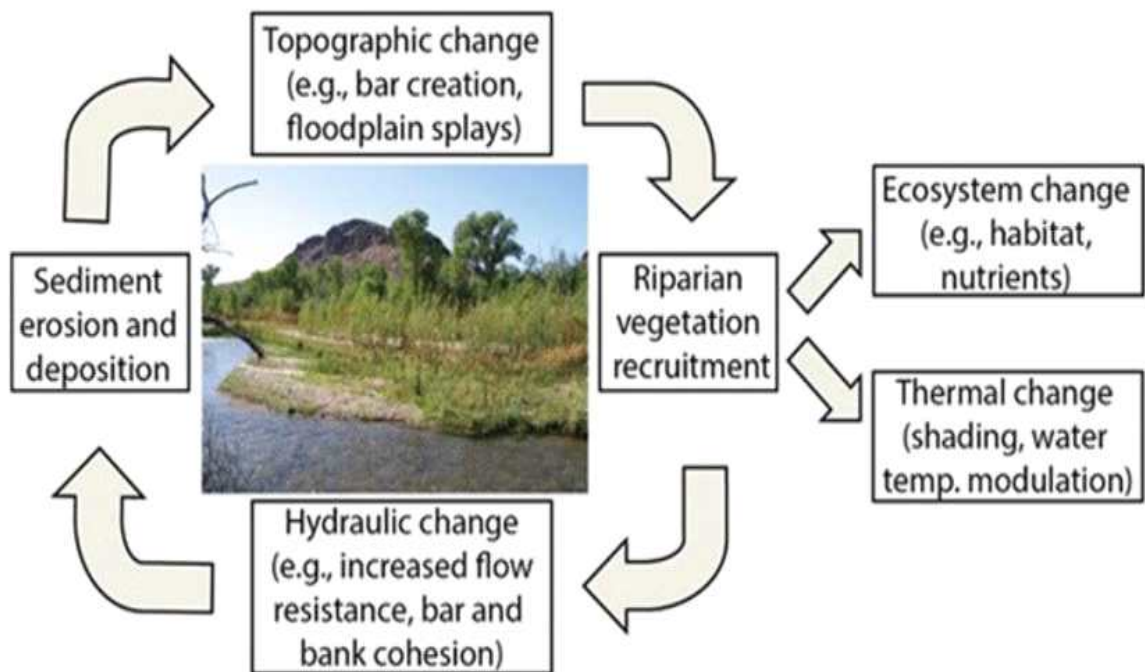
우선 정책의 목표를 확립한다. 이후 개념적 모형을 특정하고, 완벽한 정보가 없을지라도 활동을 개시한다. 이를 주기적으로 평가하여 그 결과에 따라 순환적으로 개선해 나가는 과정이다.



다. 예시

아래의 개념적 사례는 생태지형학적 피드백과 관련하여 높은 유량이 수문학적 변형을 초래하고, 홍수가 도입된 구역에는 침식과 퇴적이 일어나 수로의 변화와 수변식생의 변화를 초래하는 과정에 따라, 다시 수리적 변화를 초래하는 과정을 나타낸다.

다이어그램 중앙의 사진은 애리조나 Bill Williams 강에서 일어났던, 환경유량에 따라 수변에 씨앗이 다시 발아한 과정을 나타낸다.



IV. 결론

본 연구에서 하천의 기본적인 구조와 기능, 그리고 하천의 변화와 관련한 침식-퇴적 작용, 홍수터의 형성과 변화, 하천 수로의 변화 기작 등을 조사했다.

또한 하천을 훼손하는 교란 요인, 이를 복원하기 위한 다양한 방법론으로서 하천 공간 확대, 홍수터 연계, 유사 투입, 댐/보 철거, 수로 변경 등과 같은 기법을 검토하고, 이러한 기법을 실제 적용한 사례를 조사하였다. 하천 복원의 성과를 평가하는 선진적인 방안도 검토하였다.

아울러 도시 하천의 특성과 사회적 연결성을 높이기 위한 방안, 성공과 실패한 도시하천 복원 사례를 조사하였다.

마지막으로 앞으로의 하천복원 추진방향으로 논의되고 있는 통합적 유역관리 방안과 적응적 관리 기법에 대해서도 알아보았다.

이러한 연구 결과, ‘강의 자연성’은 고정되어 있는 불박이의 명사라기보다, 스스로 모습을 바꾸어가는 동사에 가깝다는 것을 알 수 있었다. ‘회복’은 어느 특정 시절로 돌아가는 복고라기보다, 여건과 상황에 맞게 다양한 얼굴을 만들어가는 과정이라고 보는 것이 타당하다. 그러기에 회복된 자연성의 모습은 박제된 모형으로 제시되기 어렵다.

하천의 역동적이 가변적인 특성에 맞게, 하천복원 사업도 하나의 과정으로 인식하고, 지속적인 모니터링과 평가를 통해 사업의 과정이 진화해 나가는 ‘적응적 관리기법’을 도입할 필요가 있다.

이와 같은 연구결과에 따른 주요내용과 정책건의를 요약하면 다음과 같다.

1) 자연성 회복은 열려 있는 길이므로, 올바르게 나가기 위해서는 먼저 원칙부터 세워야 한다. 아래와 같은 네 가지 원칙을 제안한다.

첫째, 자연의 질서를 최대한 존중하며 인간의 간섭은 필요최소한에 머무른다. 둘째, 강에만 한정하지 않고 물그릇인 유역까지 정책의 범위를 넓힌다. 셋째, 기후가 바뀌고 있으니 생태계뿐 아니라 이·치수까지 다방면으로 대응한다. 넷째, 더불어 살기 위해서는 내 욕심만 부릴 수 없으니, 인간이 자연에 양보할 바가 무엇인지를 공동체 내에서 곰곰이 숙고해 나간다.

2) 우리 강이 스스로의 힘으로 생기를 되찾을 수 있도록 아래와 같은 사업추진 방향을 제안한다.

우선 물길을 속박에서 풀어주어 맥박이 다시 뛰고, 제 몸을 시절에 따라 움직일 수 있게 여유를 준다. 윗물부터 아랫물까지, 강 이쪽에서 건너까지 또한 수면에서 땅속까지 물이 다닐 수 있는 길을 넓혀준다.

또한 점점이 흩어진 생명의 터전을 규모 있게 이어주고, 지킬 곳은 확실하게 보호한다. 예부터 이 땅에서 살아온 친숙한 생물이 많이 돌아 올 수 있도록 서식지 보전을 중심에 둔다.

그리고 빗물이 더 잘 스며들게 하고, 알뜰하게 물을 쓰고, 오염을 철저히 관리하여, 되살아나는 물로 강이 보다 맑고 넉넉해지도록 한다.

마지막으로 강을 둘러싼 사람 사이의 관계를 이해와 소통을 토대로 건전하게 회복시켜, 마침내 사람과 강의 관계도 바로 세운다.

3) 하천의 자연적 에너지에 의해 지형이 바뀌어 질 수 있도록 하는 ‘하천공간 확대’ 방안을 도입할 필요가 있다. 역사적 사례를 볼 때, 하천의 수로는 매우 가변적이어서 홍수 등 상류로부터 내려오는 에너지의 양상이 바뀌면 그에 따라 다양한 모습을 보여 준다. 단일한 물줄기로 사행하는 하천을 표준으로 삼아 하천 수로를 복원하는 것은 수년 내 실패할 수밖에 없다. 스위스 제네바 Aire 강의 사례와 같이, 하천복원 설계 시 하나의 방안이 아니라 강이 스스로 물길을 만들어 내도록 두는 방안도 도입할 필요가 있다.

4) 기후변화로 이상 기상 현상이 빈발해지고 있는 상황에서, 홍수 관리를 댐과 제방에만 의존하기에는 부족하다. 이에 홍수터를 적극적으로 고려하고, 하천의 자연성 회복과도 연계하여 추진하는 것이 바람직하다. 미국의 사례에서 보듯이, 홍수터는 평상시에는 생물다양성이 높은 습지이자, 홍수 시 도시의 홍수를 저감시켜주는 완충 역할을 충분히 하고 있다. 앞으로 하천복원 사업 시 인근의 홍수터 복원(필요시 보상)과 연계하여 예산을 책정하고 사업을 기획하는 다목적 사업 기획이 요구된다.

5) 4대강 사업으로 막대한 양의 모래가 파내어 졌다. 이로 인해 하상은 크게 바뀌었다. 사업 완공 이후 진행된 하상 변동으로 지금의 하상은 정확하게 파악되지 않고 있다. 하천의 자연성은 상류로부터 내려오는 퇴적물에

의해 역동적으로 바뀌어 왔다. 물 흐름을 통해 자연성을 높여가려고 할 때, 하상의 변동을 고려하지 않는다면 교각 붕괴를 초래할 수도 있는 과도한 침식을 유발할 수도 있다. 미국 트리니티 강 다양한 사례를 검토해 볼 때, 하상 보강이 필요한 지점을 선별하여 하천 외부에서 자갈이나 모래를 가져와 투입하는 복원사업도 추진할 필요가 있다.

6) 시기별로 유량과 유속이 달라지는 자연유황은 하천 생태계에 맥박과 같은 역할을 한다. 물의 많고 적음에 따라 침식과 퇴적 양상이 달라지고, 물고기 등 수생 생물의 생활사도 적응한다. 하천 복원을 기획할 때 상류의 댐과 저수지의 방류 패턴을 하천 생태계의 생명력 제고에 도움이 될 수 있도록 면밀하게 조절하여 자연유황에 가깝게 복원하는 것도 포함 시킬 필요가 있다.

7) 도시마다 대학이 있고, 하천이 있다. 대학에는 하천 복원과 관련한 환경공학, 토목공학, 생물학, 정책학 등 다양한 분야의 연구역량이 있다. 버클리 시에 있는 Strawberry 하천 복원 사례와 같이, 대학이 주관하여 캠퍼스 인근 하천의 지속적인 모니터링과 복원, 이를 교육 과정에 포함시킨다면 도시 하천 복원은 한 걸음 더 진전될 수 있다. 지자체 교부사업으로만 진행하고 있는 하천복원 사업을 대학의 연구사업 일환으로 학제간 프로그램을 지원받는 것이 바람직하다.

8) 도시화로 인해 사라진 물길을 실제로 복원하기가 현실적인 여건상 어려운 구간이 많이 있다. 하지만 옛 물길이 있던 자리를 거리예술 형태로 도로나 보도 등의 표면에 그려두거나 표지판을 설치하거나, 청량한 물소리를 들을 수 있게 소리통을 두거나, 전망대에서도 인식할 수 있게 특수 망원경을 설치하거나 하면, 도시의 하천복원에 대한 시민들의 생각을 일깨울 수 있다. 실록, 일성록 등 기록문화가 풍부한 역사가 있고, GIS 등 필요한 IT 기술도 저변이 확대되어 있으므로, 도시의 물길을 예술적 기법을 통해 복원하여 시민들과 공유하는 사업도 추진하는 것이 바람직하다.

9) 하천은 공간적으로도 시간적으로도 장구한 변화를 겪는다. 관계된 이해당사자도 다양하며, 각자 서로 상충될 수 있는 이해를 가지고 있다. 이러한 다층적이며 역동적인 과정을 총괄하면서 조율할 주체가 없으면 강의 자연성 회복은 제대로 나아갈 수 없다. 다행히 물관리기본법에 따라 4대강에

민관 합동 유역물관리위원회가 구성되어 발족되었다. 유역물관리위원회가 통합적 유역관리라는 철학에 입각하여 하천의 자연성 회복 사업을 총괄하는 것이 바람직하다. 또한 국가물관리위원회는 이러한 유역의 노력이 국가적으로 총합될 수 있도록 정책적, 기술적 지도를 하며, 국제적인 협력에도 노력하는 것이 바람직하다.

우리 강의 자연성은 짧은 기간 집중적으로 일을 한다고 당장 회복되지는 않을 것이다. 차근차근 긴 호흡으로 이루어 나아갈 일이다. 자연의 소리를 여러 모로 들으면서, 때로는 실수를 하며 배워가기도 하는, 끊임없는 성찰을 통해 조금씩 지혜로워지는 과정일 것이다. 이러한 노력으로 강이 스스로 살아나 온전히 베풀어준다면, 우리 삶은 좀 더 풍성해 질 것이다.

참고문헌

생명의 강 살리기, 2011, 생태공학포럼, 청문각

인간과 자연을 위한 하천공학, 2018, 우효섭, 오규창, 류권규, 최성욱, 청문각

- Angelo, H. 2019. The greening imaginary: urbanized nature in Germany's Ruhr region. *Theory and Society* 48:645-669.
- Beechie, T. J., D. A. Sear, J. D. Olden, G. R. Pess, J. M. Buffington, H. Moir, P. Roni, and M. M. Pollock (2010), Process-based principles for restoring river ecosystems, *BioScience*, 60(3), 209-222.
- Bernhardt, ES, and MA Palmer. 2011. River restoration: the fuzzy logic of repairing reaches to reverse catchment scale degradation. *Ecological Applications*, 21(6): 1926-1931.
- Bernhardt, ES, MA Palmer. 2007. Restoring streams in an urbanizing world. *Freshwater Biology* 52(4), 738-751.
- Booth, D.B., Fischenich, C.J., 2015. A channel evolution model to guide sustainable urban stream restoration: An urban channel evolution model. *Area* 47, 408-421. <https://doi.org/10.1111/area.12180>
- Buffington, J.M. and Montgomery, D.R. 2013. Geomorphic classification of rivers. In: Shroder, J. and Wohl, E., eds., *Treatise on Geomorphology*, Vol. 9, Fluvial Geomorphology, San Diego, CA: Academic Press, pp. 730-767.
- Charbonneau, R. 2000. Strawberry Creek I: the making of an urban stream, 1860-1960. *Chronicle of the University of California*, Spring 2000: 1-26.
- Charbonneau, R. and V. Resh. 1992. Strawberry Creek on the University of California Berkeley campus: a case study of urban stream restoration. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 2 : 293-307.
- Chin, A., S. Anderson, A. Collison, B. Ellis-Sugai, J.P. Haltiner, J. Hogervorst, G.M. Kondolf, L.S.
- Chinchilla Mazariegos, O. 2018. Technologies of urbanism in Mesoamerica: the pre-Columbian bridges of Cotzumalhuapa, Guatemala. *Antiquity* 92 362: 456-471. Excerpt from: Scarborough, V. 2003. *The Flow of Power: Ancient Water Systems and Landscapes*. SAR Press, Santa Fe. <https://doi.org/10.15184/aqy.2017.228>
- Church, M. 2006. Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 34:325-54 doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122721
- Curran, W, and T Hamilton. 2012. Just green enough: contesting environmental gentrification in Greenpoint, Brooklyn. *Local Environment* 17(9): 1027-1042.
- David Lowenthal (2013) Eden, Earth Day, and Ecology: Landscape restoration as metaphor and mission. *Landscape Research*, 38:1, 5-31, DOI: 10.1080/01426397.2012.751969
- DeGroot et al. 2018. Managing Floods in Urban Catchments: Experiences in Denver Area (Colorado, USA) and Geneva (Switzerland), in Serra-Llobet A, Kondolf GM, Schaefer K, Nicholson S. (eds) 2018. *Managing flood risk: innovative approaches from big floodplain rivers and urban streams*. Palgrave Macmillan, London, 162 pp.
- Dooling, S. 2009. Ecological gentrification: a research agenda exploring justice in the city. *International Journal of Urban and Regional Research* 33.3: 621-639.
- Doyle, MW, D Shields, KF Boyd, PB Skidmore, D Dominick. 2007. Channel-forming discharge selection in river restoration design. *Journal of Hydraulic Engineering* 133 (7): 831-837.
- Doyle, MW, J Singh, R Lave, MM Robertson. 2015. The morphology of streams restored for market and nonmarket purposes: insights from a mixed natural-social science approach. *Water Resources Research* doi: 10.1002/2015WR017030

- Dufour, S, and Piégay, H. 2008. From myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River Research and Applications* 25: 568–581.
- Fausch, KD, CE Torgerson, CV Baxter, HW Li. 2002 Landscapes to Riverscapes: bridging the gap between research and conservation of stream fishes. *Bioscience* 52(6): 1– 16.
- Fletcher, T.D., Vietz, G., Walsh, C.J., 2014. Protection of stream ecosystems from urban stormwater runoff: The multiple benefits of an ecohydrological approach. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 38, 543– 555. <https://doi.org/10.1177/0309133314537671>
- Gumprecht, B.2001. A stream that could not be trusted. Chapter 4 in *The Los Angeles River: Its Life, Death, and Possible Rebirth*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland.
- Gurnell, A, M Lee, C Souch. 2009. Urban Rivers: Hydrology, Geomorphology, Ecology and Opportunities for Change. *Geography Compass* 1/5 (2007): 1118–1137, 10.1111/j.1749–8198.2007.00058.x
- Harrelson, C.C., Rawlins, C.L. and Potyondy, J.P. 1994. Stream channel reference sites: An illustrated guide to field technique. General Technical Report RM-245, USDA, Forest Service, Fort Collins, CO, 61 p
- Henn, J.B, MR Metzger, JA Kwan, JE Harbison, CL Fritz, J Riggs-Nagy, M Shindelbower, VL Kramer. 2008. Development time of *Culex* mosquitoes in stormwater management structures in California. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 24(1), 90–97. <https://doi.org/10.2987/5644.1>
- Hilderbrand, R. H., A. C. Watts, and A. M. Randle 2005. The myths of restoration ecology. *Ecology and Society* 10(1): 19. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art19/>
- Innovations in River Management Germany & USA, Workshop: Integrating Ecosystem Restoration into Flood Risk Management, held at Room 223, Moses Hall, UC Berkeley, October 17th 2019
- Jahnig, S. C., A. W. Lorenz, and D. Hering. 2009. Restoration effort, habitat mosaics, and macroinvertebrates—does channel form determine community composition? *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 19:457–169.
- Jahnig, SC, AW Lorenz, D Hering, C Antons, A Sundermann, E Jedicke, P Haased. 2011. River restoration success: a question of perception. *Ecological Applications* 21(6): 2007–2015
- Jason King, Hidden Hydrology, April 6 2020, River Lab 발표자료
- Johnson, MF, C Thorne, J Castro, GM Kondolf, C Searles Mezzacano, SB Rood , C Westbrook. 2019 . Biomic river restoration: a new focus for river management and restoration. *River Research and Applications* DOI: 10.1002/rra.3529
- Junk, WJ, PB Bayley, RE Sparks. 1989. The flood-pulse concept in river-floodplain systems. in DP Dodge (ed) *Proceedings of the International Large River Symposium*, Can. Spec. Publ. Fish. Aquatic Sci. 106: 110–127.
- Katz, E. 1992. The big lie: human restoration of nature. *Research in Philosophy and Technology* 12: 231–241.
- Kaushal, S.S., Belt, K.T., 2012. The urban watershed continuum: evolving spatial and temporal dimensions. *Urban Ecosystems* 15, 409–435. <https://doi.org/10.1007/s11252-012-0226-7>
- Keenan-Jones, D. C. 2013 Large-Scale Water Management Projects in Roman Central-Southern Italy. In *The Ancient Mediterranean Environment between Science and History*, edited by William V. Harris, 233–56. *Columbia Studies in the Classical Tradition* 39. Columbia University Press, New York. https://doi.org/10.1163/9789004254053_011
- Kondolf, G.M. 1995. Five elements for effective evaluation of stream restoration. *Restoration Ecology* 3(2):133–136.

- Kondolf, G.M. 1997. Hungry water: Effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management* 21(4):533-551.
- Kondolf, G.M. 2000. Some suggested guidelines for geomorphic aspects of anadromous salmonid habitat restoration proposals. *Restoration Ecology* 8(1):48-56.
- Kondolf, G.M. 2011. Setting goals in river restoration: when and where can the river ‘heal itself’ ? in Simon, A. et al (eds) *Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems: Scientific Approaches, Analyses, and Tools*. Geophysical Monograph Series Vol.194 pp.29-43. American Geophysical Union, Washington DC. DOI: 10.1029/2010GM001020 .
- Kondolf, G.M. River restoration and meanders. 2006. *Ecology and Society*. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art42/>
- Kondolf, G.M., A. Boulton, S. O’Daniel, G. Poole, F. Rahel, E. Stanley, E. Wohl, A. Bang, J. Carlstrom, C. Cristoni, H. Huber, S. Koljonen, P. Louhi, and K. Nakamura. 2006. Process-based ecological river restoration: Visualising three-dimensional connectivity and dynamic vectors to recover lost linkages. *Ecology and Society* 11 (2): 5. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art5/>
- Kondolf, G.M., and C-N. Yang. 2008. Planning river restoration projects: Social and cultural dimensions. pp.43-60 in D. Sear and S. Darby (eds.) *River Restoration: Managing the Uncertainty in Restoring Physical Habitat*. Wiley, Chichester.
- Kondolf, G.M., K. Podolak, and T.E. Grantham. 2013. Restoring Mediterranean-climate rivers. *Hydrobiologia* 719:527-545. DOI 10.1007/s10750-012-1363-y
- Kondolf, G.M., P. Pinto. 2017. The social connectivity of urban rivers. *Geomorphology* 277:182-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.028>
- Kondolf, G.M., Y. Gao, G.W. Annandale, G.L. Morris, E. Jiang, R. Hotchkiss, P. Carling, B. Wu, J. Zhang, C. Peteuil, H-W. Wang, C. Yongtao, K. Fu, Q. Guo, T. Sumi, Z. Wang, Z. Wei, C. Wu, C.T. Yang. 2014. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: experiences from five continents. *Earth’s Future* doi: 10.1002/ef2 2013EF000184 Online at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013EF000184/pdf>
- Kondolf, GM, and Podolak K. 2014. Urban rivers: Landscapes of leisure and consumption. pp.33-44 in PM Santos and PC Seixas, eds. *Globalization and Metropolization – theory and practice from Europe’s west coast*. Berkeley Public Policy Press, Institute of Governmental Studies, Berkeley, 249 pp.
- Kondolf, GM, H Piégay, L Schmitt, and DR Montgomery. 2016. Geomorphic classification of rivers and streams. Chapter 7 in *Tools in Fluvial Geomorphology* (2 nd Ed), GM Kondolf and H Piégay (eds), John Wiley & Sons, Chichester UK, pp. 133-158.
- Kondolf, GM, P Pinto. 2017. The social connectivity of urban rivers. *Geomorphology* 277:182-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.028>
- Kondolf, GM, R Loire, H Piegay, and JR Malavoi. 2018. Dams and Channel Morphology. Chapter 8 in *Environmental Flow Assessment: methods and applications*, JG Williams, PB Moyle, A Webb, and GM Kondolf (eds), John Wiley & Sons, pp.143-162.
- Kondolf, GM, RJ Schmitt. 2018. Dams, sediment discontinuity, and management responses. Hydrolink published by the International Association for Hydro-Environment and Engineering Research, September 2018.
- Kondolf, GM, T.E. Lisle. 2016. Measuring bed sediment. pp.278-305 in *Tools in Fluvial Geomorphology* (2 nd Ed), GM Kondolf and H Piégay (eds), John Wiley & Sons, Chichester UK.

- Kondolf, GM. 2018. A primer on flow in rivers and streams. Chapter 3 in *Environmental Flow Assessment: methods and applications*, JG Williams, PB Moyle, A Webb, and GM Kondolf (eds), John Wiley & Sons, pp. 21-38.
- Lichtenberger, A and R Raja. 2016. Living with and on the river side: the example of the Roman settlement of Antiochia-on-the-river Chrysorrhoeas formerly called Gerasa. *Water of Life. Festschrift for Peder Mortensen. Proceedings of the Danish Institute in Damascus 11*, eds Kuhlmann Madsen J, Overgaard Andersen N, Thuesen I (Orbis, Copenhagen), pp 98-117.13.
- Ludy, J. and G.M. Kondolf. 2012. Flood risk perception in lands ‘protected’ by 100-year levees. *Natural Hazards* 61(2):829-842. DOI: 10.1007/s11069-011-0072-6
- McBride, JR. 2017. *The world’s urban forests: history, composition, design, function and management*. Springer Verlag. Available in UCB Library as electronic resource: *The world’s urban forests : history, composition, design, function and management / Joe R. McBride*
- Meyer, JL, MJ Paul, WK Taulbee. 2005. Stream ecosystem function in urbanizing landscapes. *Journal of the North American Benthological Society* 24: 602-612.
- O’ Hirok, A.H. Purcell, and E. Wohl. 2009. Linking theory and practice for restoration of step-pool streams. *Environmental Management* 43:645-661.
- Oidtmann, RJ, RC Christofferson, QA ten Bosch, G Espana, MUG Kraemer, A Tatem, A., CM Barker, TA Perkins. 2016. Pokémon Go and Exposure to Mosquito-Borne Diseases: How Not to Catch ‘Em All. *PLOS Currents Outbreaks*. doi: 10.1371/currents.outbreaks.2d885b05c7e06a9f72e4656d56b043cd
- Opperman, JJ, GE Galloway, J Fargione, JF Mount, BD Richter, S Secchi. 2009. Sustainable floodplains through large-scale reconnection to rivers. *Science* 326: 1487-1488.
- Opperman, JJ, R Luster, BA McKenney, M Roberts, AW Meadows. 2010. Ecologically functional floodplains: Connectivity, flow regime, and scale. *J Am Water Resources Association* 46(2):211-226. DOI: 10.1111 / j.1752-1688.2010.00426.x
- P. Boon & P. Raven, editors. John Wiley & Sons, *River Conservation and Management*, Chichester, 2012
- Pacific Standard. 2017. The unpaved path ahead for the Los Angeles River. By Tom Dibblee, June 2017.
- Palmer, M.A., E.S. Bernhardt, J.D. Allan, P.S. Lake, G. Alexander, S. Brooks, J. Carr, S. Clayton, C. Dahm, J. Follstad Shah, D.L. Galat, S. Gloss, P. Goodwin, D.H. Hart, B. Hassett, R. Jenkinson, G.M. Kondolf, R. Lave, J.L. Meyer, T.K. O’ Donnell, L. Pagano, P. Srivastava, and E. Sudduth. 2005. Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology* 42:208-217.
- Paul, M.J., Meyer, J.L., 2001. Streams in the Urban Landscape. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 32, 333- 365. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040>
- Piégay, H., S. E. Darby, E. Mosselman, and N. Surian. 2005. The erodible corridor concept: Applicability and limitations for river management. *River Res. Appl.* 21: 773-789.
- Pinto et al. 2018. Managing Floods in Mediterranean-Climate Urban Catchments: Experiences in the San Francisco Bay Area (California, USA) and the Tagus Estuary (Portugal), in Serra-Llobet A, Kondolf GM, Schaefer K, Nicholson S. (eds) 2018. *Managing flood risk: innovative approaches from big floodplain rivers and urban streams*. Palgrave Macmillan, London, 162 pp.
- Pinto, PJ and GM Kondolf. 2020. The fit of urban waterfront interventions: matters of size, money and function.
- Plummer, C.C., Carlson, D.H. and McGeary, D., 2007. Streams and floods. Chapter 10 in *Physical Geology*. McGraw-Hill Higher Education. 227-262.

- Podolak, K., and G.M. Kondolf. 2015. The line of beauty in river designs: Hogarth's aesthetic theory on Capability Brown's eighteenth-century river design and twentieth-century river restoration design. *Landscape Research* 41:149–167. DOI:10.1080/01426397.2015.1073705
- Power, ME, WE Dietrich, JC Finlay. 1996. Dams and downstream aquatic biodiversity: potential food web consequences of hydrologic and geomorphic change. *Environmental Management* 20: 887–895.
- Rosenberg, E. 2016. Gilpin in the city: The Baltimore stream valley parks, *Journal of Landscape Architecture*, 11:3, 6–19, DOI: 10.1080/18626033.2016.1252152
- Rubin, Z, B Rios-Touma, GM Kondolf, ME Power, P Saffarinia, and J Natali. 2019. Using prey availability to evaluate Lower Colorado River riparian restoration. *Restoration Ecology* 27(1): 46–53 <https://doi.org/10.1111/rec.12829>
- Rubin, Z, GM Kondolf, B. Rios-Touma. 2017. Evaluating Stream Restoration Projects: What Do We Learn from Monitoring? *Water* 9, 174; doi:10.3390/w9030174. Online at <http://www.mdpi.com/2073-4441/9/3/174>
- Rutherford, ID, AR Ladson, MJ Stewardson. 2004. Evaluating stream rehabilitation projects: Reasons not to, and approaches if you have to. *Aust. J. Water Resour.* 8: 57–68.
- Simon, A, J Castro, M Rinaldi. 2016. Channel form and adjustment: characterization, measurement, interpretation and analysis. pp.237–259 in *Tools in Fluvial Geomorphology* (2nd Ed), GM Kondolf and H Piégay (eds), John Wiley & Sons, Chichester UK.
- Stein, E.D., Federico, F., Booth, D.B., Bledsoe, B.P., Bowles, C., Rubin, Z., Kondolf, G.M., Sengupta, A., 2012. Hydromodification Assessment and Management in California (No. Technical Report 667). Southern California Coastal Water Research Project.
- Stella JC, PM Rodriguez-Gonzalez, S Dufour, and J Bendix. 2013. Riparian vegetation research in Mediterranean-climate regions: common patterns, ecological processes, and considerations for management. *Hydrobiologia* 719: 291–315. doi:10.1007/s10750-012-1304-9. (OK to read first 2 pages only, OK to skim the rest)
- Suding, K.N. 2011. Toward an Era of Restoration in Ecology: Successes, Failures, and Opportunities Ahead. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 42:465–87
- Tockner, K, F Malard, JV Ward. 2000. An extension of the flood pulse concept. *Hydrol. Process.* 14, 2861±2883
- Trush, WJ, SM McBain, and LB Leopold. 2000. Attributes of an alluvial river and their relation to water policy and management, *PNAS* 97 (22): 11858–11863.
- Tvedt, T. 2016. Between the hydrological and hydrosocial cycle: the history of cities. pp.91–110 in *Water and Society: Changing Perceptions of Societal and Historical Development*, IB Taurus, London, 292 pp.
- Walker, T. 2018. Can tall steel fencing prevent homeless encampments along flood control channels? *Orange County Register*, 30 August 2018.
- Walsh et al 2005. The urban stream syndrome: current knowledge and search for a cure. *J N Am Benthological Association.* 24:706–723.
- Wantzen, KM, CB Mascarenhas Alves, SD Badiane, R Bala, M Blettler, M Callisto, Y Cao, M Kolb, GM Kondolf, M Fernandes Leite, DR Macedo, O Mahdi, M Neves, M Elfrizson Peralta, V Rotgé, G Rueda-Delgado, A Scharager, A Serra-Llobet, J-L Yengué, and A Zingraff-Hamed. 2019. Urban Stream and Wetland Restoration in the Global South—A DPSIR Analysis. *Sustainability* 11, 4975; doi:10.3390/su11184975.
- Williams, PB. 2011. A ten step program for planning and designing river restoration projects. Unpublished document.