

인간과 하천

4

River & Culture

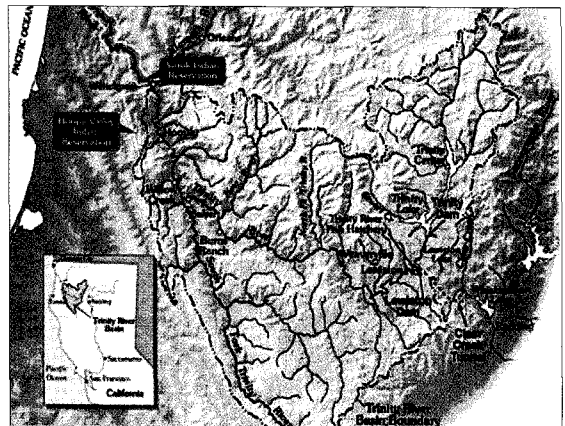


김 원 | 한국건설기술연구원
책임연구원
(wonkim@kict.re.kr)

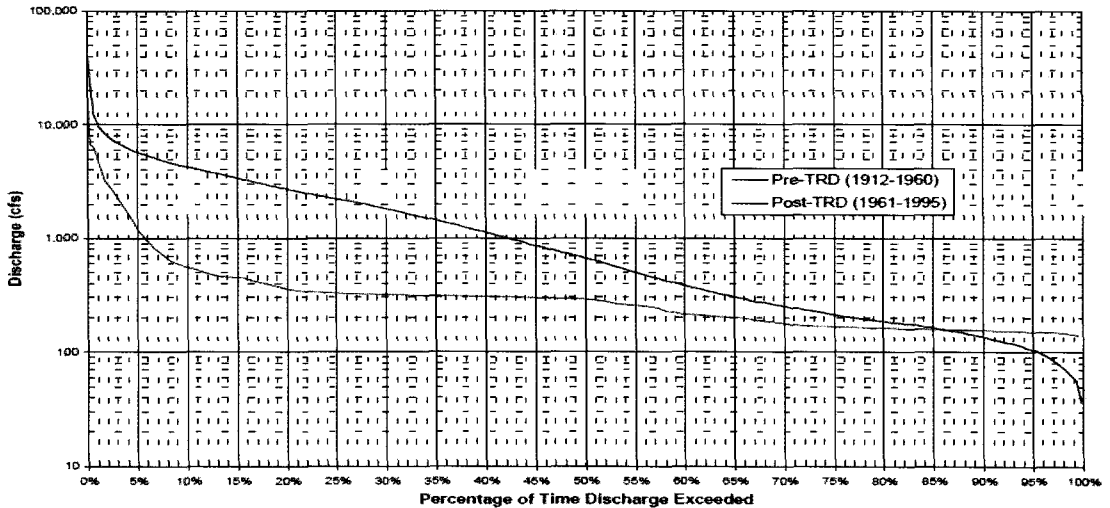
[외국의 하천복원 시리즈 2]

미국 트리너티 강의 연어 서식처 복원

미국 캘리포니아 주의 북서쪽에 위치한 트리너티 강은 클램스 강의 가장 큰 지류로서 길이는 209km이며 유역면적은 7,389 km²이다. 트리너티 강에는 1963년에 트리너티 댐과 루이스 댐 등 2개의 댐과 유역간 물이동을 위해 1개의 도수터널이 건설된다. 트리너티 강으로 유입되던 강물의 대부분이 인근의 새크라멘토 강으로 공급되었고, 댐으로 인해 홍수가 사라졌다. 이로 인해 하천변에는 과도한 식생이 자라서 자연하천의 모습을 잃어 가게 되었고, 토사 이동이 막혀 어류 서식처가 줄어들게 되었다. 그에 따라 1970년대 들어 연어와 무지개 송어의 개체수가 급격하게 감소하게 된다.



(그림 1) Trinity 강 유역도



(그림 2) 댐 건설 전후 유량의 변화(루이스튼 지점)

문제 해결을 위해 1984년에 관련법이 제정되었고, 1999년 6월에는 하천 상황 및 복원에 대한 평가보고서가 작성되었다. 그 과정에서 복원사업에 대한 의견 차이로 법률 소송이 진행되기도 하였다. 2000년대 들어서 본격적인 복원사업이 시작되었는데, 하천수량과 하안식생의 복원, 토사이송의 복원 등을 위해 다양한 대책이 시행되고 있다. 또한 강의 복원 과정에서 발생할 수 있는 불확실성과 시행착오를 줄이기 위해 '복원에 대한 평가 및 관리 프로그램(AEAM, Adaptive Environmental Assessment and Management)'이 시행되고 있다. 이 복원사업에서는 댐 건설로 인한 생태환경 문제를 해결하기 위해 댐을 물리적으로 철거하기 보다는 댐의 기능과 용도를 유지한 채로 댐 건설 이전의 자연하천 상황으로 복원하려는 시도가 중요한 의미라 할 수 있다.

문제의 발단

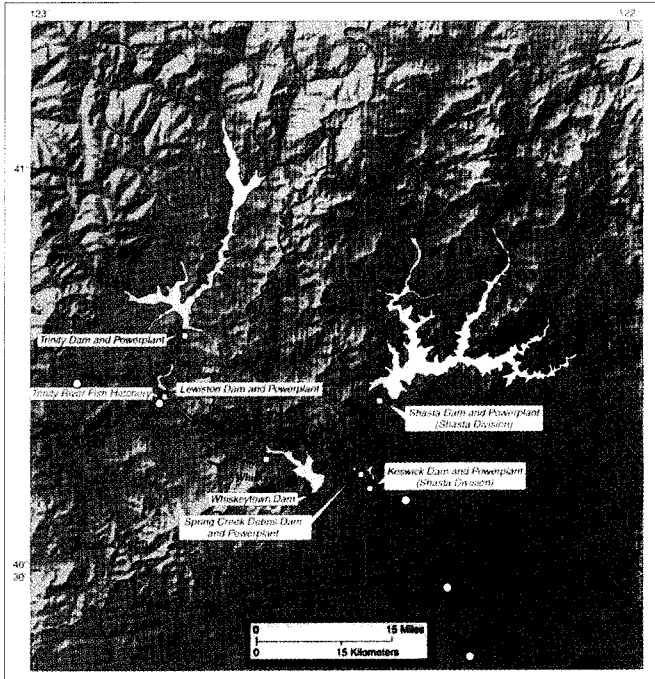
트리너티 강의 문제는 두개의 댐(트리너티 댐, 루이스튼 댐)과 도수터널의 건설에서 비롯된다. 트리너티 댐은 1962년에 완공된 높이 163m, 길이 750m의 흙댐으로 저수용량은 30억 m^3 , 발전용량은 106 메가와트이다. 루이스튼 댐은 트리너티 댐 하류 약 13km 지점에 위치하는 조정지 댐으로 저수용량은 18백

만 m^3 이며 이 댐에서 새크라멘토 강으로 물의 유역이동이 시작된다. 물의 이동을 위해 클리어크리크 터널이 건설되었는데 (직경 5.3m, 길이 17.2km) 초당 90.6 m^3 의 물을 이동시킬 수 있는 규모이다.

댐 건설과 유역간 물이동으로 인해 트리너티 강의 유량은 크게 변화하였다. 첫 번째 변화는 평상시 하천 유량의 감소이다. 강으로 유입되는 연간 유량의 88%인 약 15억 m^3 의 물을 인근의 새크라멘토 유역으로 이동시킴으로써 트리너티 강의 평상시 유량은 크게 줄어들어 초당 4.2~8.5 m^3 의 유량만 흐르게 되었다. 두 번째 변화는 홍수량의 감소이다. 댐 건설 전에는 홍수시에 최대 초당 2,830 m^3 의 물이 흘렀지만 댐 건설 후에 대부분의 홍수가 사라져 비교적 균일한 유량만 흐르게 되었다.

댐 건설과 유역간 물이동으로 인해 자연하천에서 유량의 다양성(작은 유량과 큰 유량의 지속적인 변화)이 사라지고 거의 일정한 유량만 흐르게 되면서 하천변에는 과도한 식생이 자라게 되었다. 또한 하천의 모래 유입이 댐으로 인해 차단되면서 어류의 서식처가 사라지게 되어 연어나 무지개 송어의 개체수가 급격하게 줄어들었다.

강과 생태계에 미친 영향



〈그림 3〉 트리니티 강의댐과 물의 이동

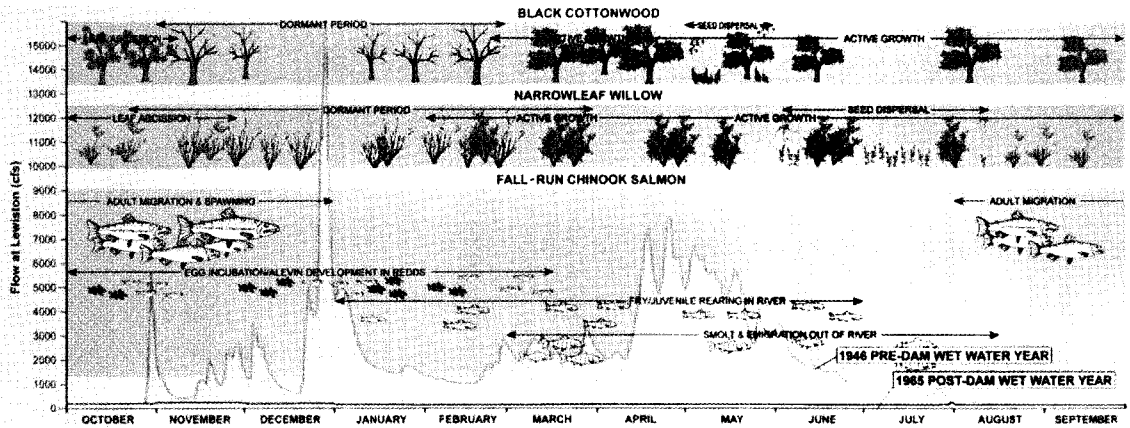
댐 건설 이전의 트리니티 강에는 이 강의 유량 조건에 맞는 식생과 어류가 살아왔다. 늦가을과 초겨울의 홍수가 연어의 회귀를 도왔으며, 겨울의 유지유량은 산란을 가능하게 하였다. 봄에 눈 녹은 물은 여름 건기 이전에 치어가 바다로 갈 수 있도록 하였다. 수목도 강의 유량조건에 잘 적응해 있었다. 겨울과 봄의 홍수는 강변에서 자라고 있는 어린 묘목을 씻어 내렸다. 봄과 초여름의 씨앗은 수위가 높을 때 물가 높은 곳에서 발아하고 어린 묘목은 봄 융설기에 자라게 된다. 이와 같이 댐

건설 이전에 자연 생태계는 하천의 유량 조건에 잘 적응되어 있는 상태였다.

그러나 댐 건설로 인해 하천의 유량 조건은 크게 변화하였다. 댐 건설 전에는 여름에 작게는 초당 2.8m³의 물이 흘렀으며 융설기에는 최대 초당 2,830m³의 물이 흘렀다. 그러나 댐이 건설된 이후에는 큰 홍수시 댐에서 방류하는 경우를 제외하고는 대부분 초당 4.2~8.5m³의 물만 흐르게 되었다. 자연적인 유량 변화와 토사 공급은 생태계에 유리한, 복잡하고도 역동적인 서식 조건을 만들 수 있었다. 그러나 댐 건설로 인해 유량 변화와 유사 공급이 차단되었고 이로 인해 댐 하류에는 변화가 발생하게 되었다. 가장 큰 변화는 수변식생이다. 자연 조건하에서는 겨울과 봄에 큰 유량이 발생하여 갈대나 오리나무가 하천의 낮은 부분에 자라는 것을 막을 수 있었다. 하지만 댐 건설 후에 큰 유량이 발

생하지 않자 이와 같은 식생은 하천변에 큰 띠들이 루면서 자라기 시작하였고, 이로 인해 토사가 퇴적되어 강변에 작은 독을 만들게 되었다. 작은 독은 높이가 최대 3.7m에 이르고 홍수터와 사주를 갈라놓는 제방의 역할을 하게 되었다.

댐 건설은 연어와 무지개 송어 서식처의 양과 질을 모두 변화시켰다. 연어와 무지개 송어는 트리니티 강의 역동적으로 변화하는 충적하천에서 잘 산다. 댐 건설 후 수심이 깊어서 연어가 살던 소(웅덩이)가 모래로 채워져 버렸다. 여름철에는 수



〈그림 4〉 강의 유량변화에 따른 식생과 생태계의 변화

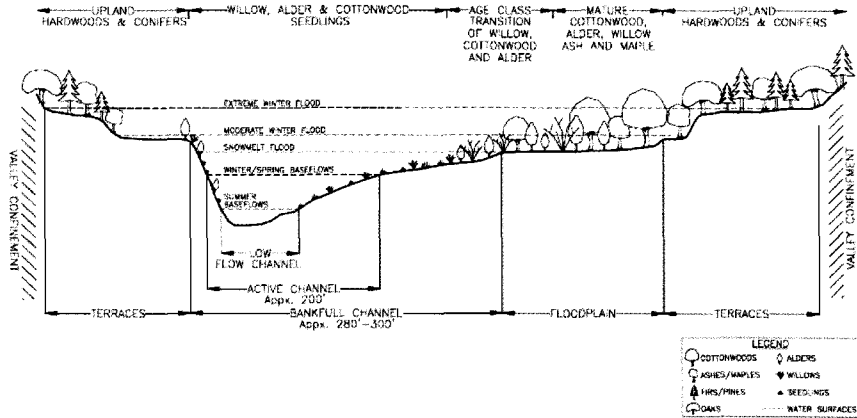


Figure 4.27. Present idealized channel cross section and woody riparian communities near Steiner Flat (RM 91.7).

(그림 5) 댐 건설 전 하천 단면

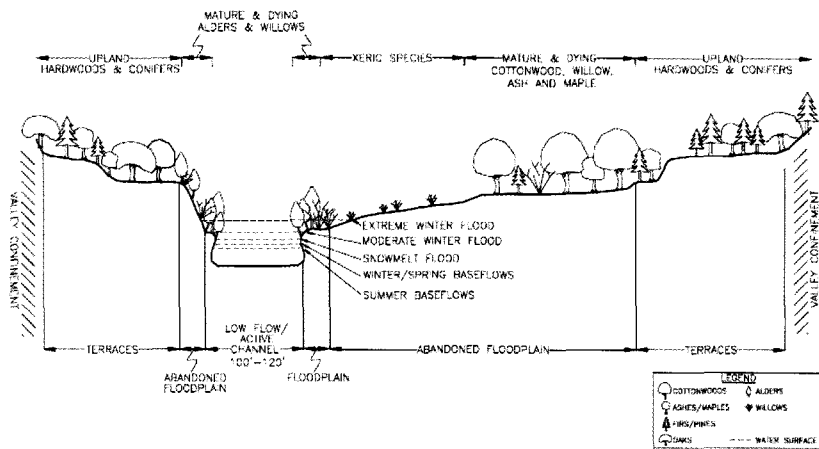


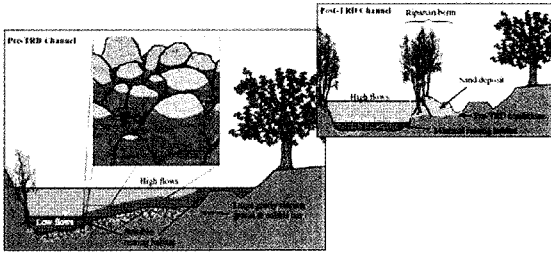
Figure 4.28. Conceptual evolution of the Trinity River channel cross section following the operation of the TRD.

(그림 6) 댐 건설 후 하천 단면

(표 1) 댐 건설 전후 연어 개체수 변화

Species	Pre-TRD Average	Post-TRD Average for Naturally Produced Spawners	Percent Reduction
Chinook Salmon (Spring-Run/Fall-Run)	38,600 (not available)	12,550 (1,550/11,000)	68%
Coho Salmon	5,000	200	96%
Steelhead	10,000	4,700	53%

은이 너무 높아 어린 연어가 자랄 수 없게 되었고, 수변 식생에 의해 치어가 자랄 수 있는 완만한 하안은 사라져 버렸다. 또한 산란에 적합한 자갈이 쓸려 내려가 사라져 버렸고, 남아있는 자갈도 모래로 막혀버렸다. 그 결과 연어 개체수는 급격하게 줄어들게 되었다.



〈그림 7〉 댐 건설 전후의 연어 서식처 변화

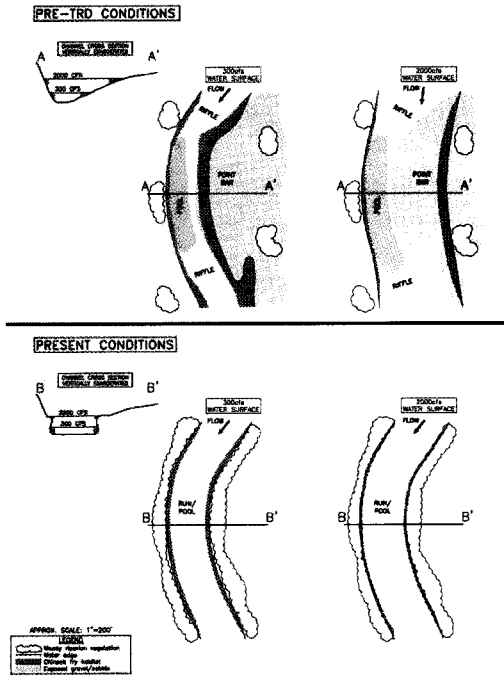


Figure 4.30. Idealized pre-TRD point bar showing relative surface area of fry chinook rearing habitat in comparison with present conditions of riparian encroachment and narrow channel.

〈그림 8〉 댐 건설 전후의 어류 서식처 변화(모식도)

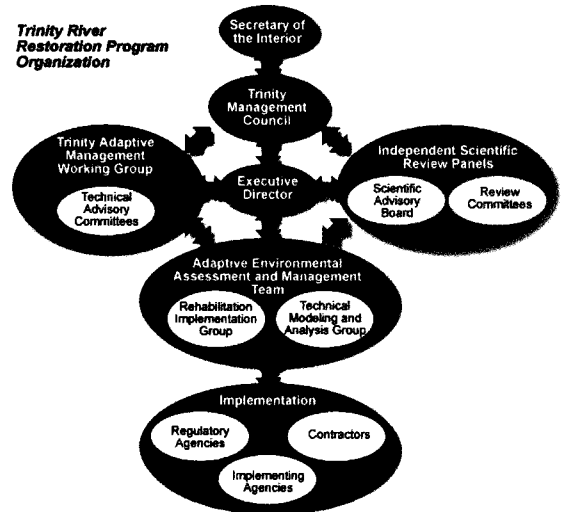
복원의 시작

하천 유량의 감소로 인해 발생한 식생의 과도한 성장과 어류 서식처 감소 피해를 줄이고 댐 건설 이전의 상태로 하천을 복원하기 위한 사업은 1984년에 관련법이 통과되면서 시작된다.

첫 단계에서 복원을 위한 TF가 구성되어 실행계획이 수립되었는데 이 실행계획에는 다섯 가지 목표가 있었다.

첫째는 루이스 댐 상류의 연어와 무지개 송어의 감소를 막기 위해 트리너티 강의 물고기 부화 조건을 개선하는 것이고, 둘째는 루이스 댐 하류의 본류와 지류에서 연어와 무지개 송어의 자연적 생산력을 복원하는 것이다. 셋째는 어업 허가 관리에 기여하는 것이며, 넷째는 사슴이나 다른 야생동물이 서식처의 범람으로 인해 받는 영향을 줄이는 것과 타 유역으로 물 이동으로 줄어든 하천 수량을 회복하는 것이다. 다섯째는 하천유역을 안정화시켜서 토사 발생을 줄일 수 있는 토지관리 대책을 개발하고 시행하는 것이다.

2000년에는 '트리너티 강 관리 의회(Trinity Management Council)'와 '트리너티 적응관리 실무그룹(Trinity Adaptive Management Working Group)'이 구성되었다. 지금은 '트리너티 강 복원 프로그램 기술진'과 기술자문단 등 2개 단체가 트리너티 강 복원 프로그램에 추가되어 모두 4개의 단체가 있다.

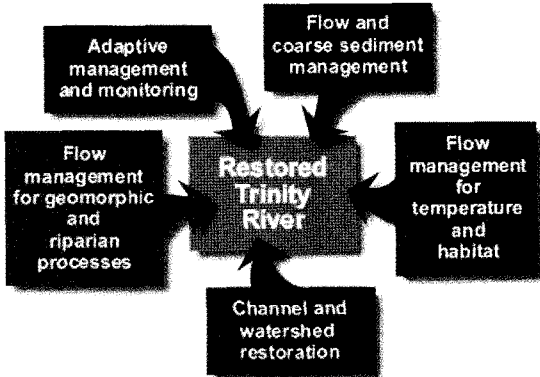


〈그림 9〉 트리너티 강 복원 프로그램의 조직구성

복원 방법

트리너티 강 복원은 어류에 적합한 수중서식처를 만들고 유지하기 위해 필요한 자연적인 물리 구조를 재수립하는 것과

댐 상류의 잃어버린 서식처를 대신하여 댐 하류에 부화과 양육에 적합한 조건을 만드는 것이다. 이 전략은 댐 건설 이전의 상태를 다시 만드는 것은 아니며, 댐 건설 이전의 특성을 지닌 작은 규모의 하천(역동적이며 총적하천의 특성을 지닌 하천)으로 복원하지는 것이다. 또한 복원의 목표를 이루는 동시에 댐의 목적과 용도를 유지하고자 하는 것이다. 복원을 위한 주요 사업내용은 그림과 같다.

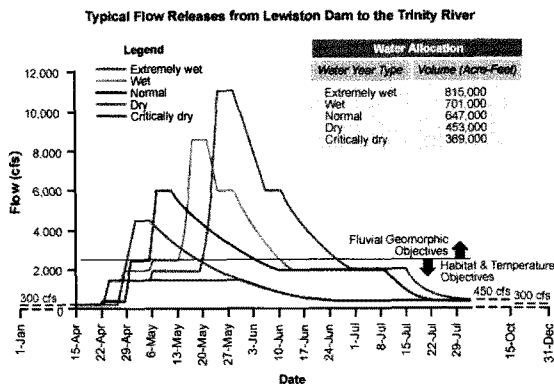


(그림 10) 트리너티 강 복원의 주요 방법

유량 복원

트리너티 강의 복원을 위해 먼저 필요한 것이 유량 복원이 다. 유량 복원은 세 가지 측면에서 이루어졌다. 첫 번째는 하천 복원을 위한 방류, 두 번째는 댐의 안전, 세 번째는 기타이다.

하천 복원을 위한 방류는 댐 건설 이전 자연상태의 유량 조건을 복원하는 것이다. 다양한 유량 조건은 산란을 위해 필요한 자갈의 세척, 자갈이나 거석 무더기의 형성, 소의 모래 제거,

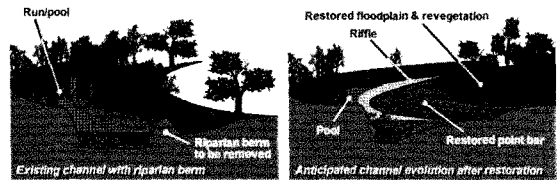


(그림 11) 하천유량 복원을 위한 댐 방류 시나리오

거, 어류와 야생동물을 위한 서식처와 적절한 온도 제공, 수변 식생의 제어를 비롯하여 다양한 생태적 역할을 수행한다. 트리너티 강 복원 프로그램에서는 하천유량 복원을 위해 다섯 가지 하천 수량 조건을 설정하고 각 조건에 적절한 댐 방류량을 결정하였다.

하안 복원

하안(물가) 복원은 하천 내 토사퇴적으로 인해 발생한 작은 둑(riparian berm)을 제거하고 작은 둑 안의 모래를 밖으로 견어내는 것부터 시작한다. 초당 170m³ 이상의 유량에서 홍수터는 정기적으로 잠길 수 있도록 지반고가 조정되었다. 수변식생은 복원된 홍수터에 심어졌으며, 큰 유량이 방류되어 자연적인 수변식생의 성장을 돕고, 새로이 형성된 자갈 무더기에는 식생 협착부가 형성되지 않도록 조절하였다.



(그림 12) 하안 복원 방법



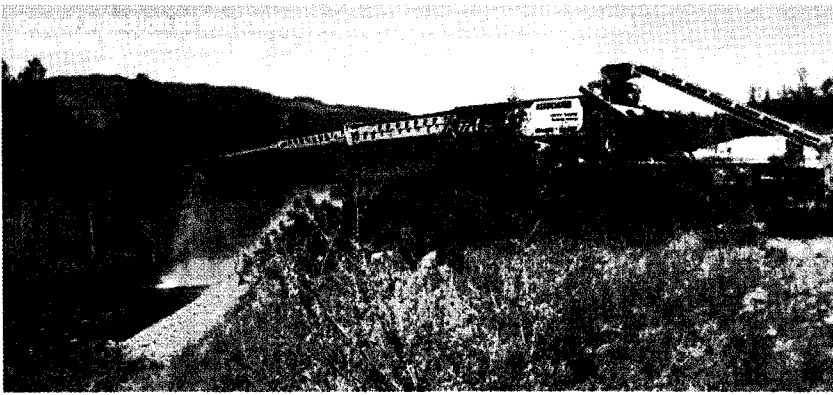
(1) 공사 전

(2) 공사 중



(3) 공사 후

(그림 13) 하안 복원 진행 과정



〈그림 14〉 연어서식처 복원을 위한 자갈 투입

토사 복원

댐 건설 후 상류에서 하류로 정상적인 토사 이동은 차단되었다. 반면에 큰 홍수에 의해 비정기적으로 댐 하류의 지류에서 많은 토사가 발생하였고, 이 토사는 댐 건설 전과 같이 본류에서 이동되거나 하류로 전파되지 못하고 퇴적되었다. 전체적으로 자갈이 줄어들었으며, 이에 따라 연어의 부화나 양육 서식처도 줄어들게 되었다.

줄어든 자갈로 인한 연어 부화지 감소를 방지하기 위해 트리너티 강의 2개 지점에서 자갈을 투입하였다. 2009년 4월과 5월에 각각 2,500톤과 1,000톤의 자갈이 트리너티 강에 투입되어 연어의 서식처와 양육장으로 활용될 수 있도록 하였다. 투입된 자갈의 크기는 0.95~12.7cm 정도로서 동전크기부터 어른 주먹크기까지 다양하였다.

토사유출 억제

댐 하류 지류유역에서는 모래나 실트 같은 가는 입자의 토사가 도로, 벌채 등으로 인해 유출된다. 이 같은 미세입자는 강바닥에 퇴적되어 연어나 무지개 송어 알의 부화에 위협적인 영향을 미친다. 토사 유출을 방지하기 위해서는 토지이용의 개선이 필요하며 사용하지 않는 임도 폐쇄 등의 조치가 필요하다. 이를 위해 미세 토사의 공급을 차단하기 위한 유역 복원, 계곡 출구에 침사지 건설, 토사이동을 촉진시키기 위한 유량 방류, 하도 내 작은 독 제거 및 미세 입자의 제거, 토사 침사지로 홍수터 활용 등이 고려되었다.

복원의 관리와 평가

트리너티 강 복원을 위한 핵심적인 프로그램 중 하나는 '적응 환경평가 및 관리(AEAM, Adaptive Environmental Assessment and Management)'이다. 이 프로그램은 결과에 대한 예측, 결과의 평가, 개선 관리에 의한 공

식적이고 체계적이며, 구체적인 방법이다. 강이라는 시스템은 매우 복잡한 반면 강 생태계에 대한 인간의 이해 수준은 완전하지 않기 때문에 트리너티 강의 관리는 과학적인 불확실성에 접하게 된다. 따라서 이 프로그램은 복원사업에서 흔히 발생할 수 있는 시행착오나 결정지연 등을 회피하고 불확실성에 대한 책임 있고 과학적인 진행을 도모할 수 있다.

이 프로그램의 구성요소는 7가지이다. 첫째 측정 가능한 목적과 목표를 정의하라. 둘째 목적과 목표의 측면에서 기본적인 조건을 정의하고 평가하라. 셋째 복원대책을 통해 목적과 목표를 달성하기 위한 검증 가능한 가설을 설정하라. 넷째 복원대책을 실행하기 이전에 복원대책에 대한 하천의 반응을 예측하라. 다섯째 복원대책을 실행하고 모니터링하며 평가하라. 여섯째 목적을 재평가하고, 가설을 재정립하고, 모델을 개선하며, 대책을 개선하라. 일곱째 외부 평가를 통해 이 프로그램의 과학과 관리를 지속적으로 자체 평가하라.

댐 하류에서 발생하는 문제 해결을 위한 노력

댐의 긍정적인 역할과 부정적인 역할에 대한 논란은 전 세계적으로 확대되고 있다. 댐은 홍수시 큰 홍수량을 줄이고, 평상시나 가뭄시 하천에 더 많은 물을 공급하는 것이 기본적인 기능이다. 이 같은 긍정적인 효과는 장기적인 관점에서 오히려 자연하천의 모습을 잃어버리게 하는 부작용으로 작용하기도 한다. 자연하천은 작은 유량부터 큰 유량까지 계속적으로

반복되는 역동성을 지니는 것이 바람직한데 댐에서 일정한 유량만 공급하는 경우 하류 하천에서는 여러 가지 생태환경적 문제가 발생될 수 있다. 하천의 적절한 부분까지는 자주 물이 흘러야 비정상적으로 발달하는 과도한 식생을 방지할 수 있다. 과도한 식생은 일단 발생하게 되면 제거하기 곤란하며 이로 인해 홍수위를 상승시키고, 평상시에 물이 흐르는 하천 바닥을 더 깊게 만들기 때문이다. 또한 댐으로 인해 토사 공급이 차단되고 홍수시 토사이드가 제한됨으로써 어류 서식처가 감소하게 된다.

트리니티 강 복원사업은 이 같은 문제의 해결을 위한 사업이다. 댐의 기능과 용도를 유지하면서도 하류하천에서 댐 건설 이전과 같은 다양한 유량이 발생할 수 있도록 크고 작은 유량을 댐에서 방류하고 있다. 토사이드 문제를 해결하기 위해 물고기 서식처로 사용될 수 있는 자갈을 인공적으로 공급하는 방법도 사용하고 있다. 그 외에도 댐 건설 이전의 하천으로 복

원하기 위한 다양한 방법을 사용하고 있으며, 복원과정에서 발생할 수 있는 불확실성과 시행착오를 줄이기 위해 적응관리라는 개념도 사용하고 있다. 많은 댐이 건설되었지만 아직까지 댐 하류에서 발생하는 여러 가지 하천 문제에 대해서 구체적인 조사나 대책이 미흡한 국내에서 트리니티 강 복원사업은 생태환경 복원사업의 좋은 사례가 될 것이다. 🌍

참고자료

U.S. Fish and Wildlife Service(1999), Trinity River Flow Evaluation.
<http://www.trrp.net/>