

하천 복원의 이해와 국내외 사례

우효섭, 박재로 (정회원, 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 연구위원·선임연구원)

하천복원(河川復元, stream restoration)이란 이·치수 위주의 하천 정비나 불량한 유역 관리에 의해 훼손된 하천의 생태 서식처를 되살리기 위해 하도와 하천 변을 원래의 자연 상태에 가깝게 되돌리는 것이다. 본 하천복원 특집은 사적인 연구 동호회인 '하천복원 연구회'의 회원 중 하천 기술자와 생물 전문가들에 의해 꾸며졌다. 이 특집에서는 하천 복원의 개론 성격으로 하천 복원의 이해와 국내외 사례 등을 먼저 소개하고, 다음 하천 복원의 주요 대상인 하천 식생과 물고기의 서식처 특성에 대해 소개한다. 마지막으로 하천 복원의 주요 도구인 자연형 하천공법에 대해 호안 재료와 환경변화를 중심으로 소개한다. 하천 복원은 선진 외국의 경우 하천 수리학과 생태학 등에서 이미 보편화되고 있는 분야이다. 우리도 자연 생태 복원에 대한 사회의 욕구가 점차 높아지고 있으므로 이에 관련된 지식과 기술의 이해와 관심이 요구된다(편집자 주).

1. 서론

하천은 인류 사회에 이익을 주는 이수(利水) 기능과 재해로부터 사회를 보호하는 치수(治水) 기능, 그리고 자연적 기능인 환경(環境) 기능 등이 있다. 이 중 이·치수는 공학적 기능(engineering function)이며, 환경은 자연적 기능(natural function)이다¹⁾. 여기서 환경 기능은 다시 생태 서식처, 수질 자정, 심미적 친수(親水) 기능 등이 있으나, 뒤의 두 기능은 생태 서식처 기능이 만족되면 자연히 수반되는 기능이다²⁾. 문제는 지금까지 국내 대부분의 하천 관리에서 자연적 기능보다는 공학적 기능을 강조하여 왔다는 것이다. 구체적으로, 1960~1980년대 산업화와 도시화는 토지이용의 제고와 더불어 하천의 공학적 기능만을 위해 하천을 인공화, 반 인공화 시켰다. 그

림 1.이나 그림 3a.는 그 예로서, 자연적으로 구부러진 하도는 직선으로 만들고, 양안에는 제방을 쌓고, 그 안의 하천 수는 인공적으로 만든 저수로(低水路)에 국한시키고, 나무, 돌, 부유목 등 홍수 소통에 장을 줄 수 있는 것들은 모두 제거되었다. 더욱이 1990년대 들어 도시교통의 수요가 폭발하여 도로 건설이 급해지자 급기야 국유지인 하천에 그림 2.와 같이 도로 건설이 유행이 되었다. 이러한 인위적인 정비는 특히 도시 하천에 집중되었다. 이렇게 정비된 하천에는 생물이 살 수 없게 되고, 사람들이 가까이 가기 싫어지게 되었다. 더욱이 하천에 유입하는 수질이 나빠지게 됨에 따라 결국 하천은 단순 '배수로'로 전략된 것이다. 농촌 하천이나 산지 하천의 경우 도시 하천보다 사정이 낫지만 환경 기능이 악화된 것은 부인하기 어렵다.

1) 엄밀한 의미에서 이수는 하천의 기능(function)이라기보다는 가치(value)이며, 치수는 하천관리의 목표이며, 환경만이 순수한 의미의 하천 기능(한 시스템에서 서로의 역할을 하며 스스로 돌아가는 것)인.

2) 유역에서 오염물이 하천의 자정 능력의 범위 내로 들어오는 경우에 한정됨.



그림 1. 도시하천의 치수 정비(성북천)



그림 2. 하천에 고가도로 건설(서울 홍제천)

그러나 1980년대 말부터 일부 하천 관리자 사이에 하천의 자연적 기능, 즉 환경 기능의 보전과 개선의 필요성에 대한 공감대가 형성되기 시작하였다. 이러한 변화는 그 당시 경제 개발의 진전과 국민 생활의 향상에 따라 이제는 주변을 돌아볼 필요가 있다는 환경 보전에 대한 사회적 분위기에 의한 것이다. 특히 도시 하천을 복개하여 하천을 소멸시키고 다른 용도로 전용하는 그 때까지 하천관리 관행에 대한 반성과 함께 훼손된 하천을 환경적으로 정비하려는 노력이 시도되었다. 이에 따라 1990년대 들어 하천의 환경적 기능을 고려하는 하천 정비와 관리에 관한 연구가 시작되었고(건교부/건기연, 1991~1996), 나아가 훼손된 하천의 환경 기능을 부분적으로 회복시킬 수 있는 공법에 관한 연구도 진행되어(환경부 등, 1997~1999) 그림 3.과 같이 일부 도시 하천에 시험 적용되었다.

실제 국내 하천 관리에서도 1990년대 초부터 하천환경 개선에 대해 하천관리자(지자체)의 관심이 커

지면서 일부 지자체에서는 '○○ 하천 살리기' 등의 운동을 비롯하여 나름대로 하천의 환경 기능을 개선하려는 노력이 시작되었다. 그러나 이러한 하천환경 정비사업들은 자연에 가까운 하천 가꾸기라는 점을 표방하고 있지만 실제적으로 자연성보다는 친수성, 조경성 성격이 강하다. 그에 따라 하천 생태계 서식 환경을 되살리기보다는 또 다른 반인공 하천을 만드는 결과를 가져오고 있다. 이러한 결과의 원인 중 하나는 국내에서 하천 실무자들 사이에 하천 복원의 개념이 아직 정립되지 않았기 때문이다.

본고에서는 먼저 하천 복원의 의미를 알아보고, 다음 국내의 하천복원 사례를 소개한다. 다음 국내에서 지자체 별로 유행처럼 퍼지고 있는 하천환경정비나 하천공원화 사업의 문제를 하천복원 개념에 입각하여 검토한다. 마지막으로 2001년 말 완성을 목표로 현재 필자의 연구팀이 제작 중인 하천복원 가이드라인(잠정안)의 주요 내용 등을 소개한다.



(a) 복원 전(1996. 4)



(b) 복원사업 직후(1997. 7)



(c) 성숙기(2000. 4)

그림 3. 도시 하천의 환경 기능의 회복(과천 양재천: 환경부/건기연, 1997~1999)

II. 하천 복원의 의의와 배경

1. 의의

하천 복원(河川 復元, stream restoration)³⁾이란 이·치수 위주의 하천정비나 불량한 유역 관리에 의해 훼손된 하천의 생태 서식처를 되살리기 위해 하도와 하천변을 원래의 자연 하천에 가깝게 되돌리는 것이다. 여기서 하천은 하도, 홍수터, 강덕, 기타 경관 생태적으로 연속성이 있는 주변을 망라한 것으로, 다른 표현으로 수변(水邊, river corridor)이라 할 수 있다. 나아가 하천복원 사업은 하천의 생태적 가치와 하천 환경의 잠재적 생물 다양성을 향상시키기 위해 환경적으로 하천을 보호하고, 지속 가능한 방법으로 자연 상태에 가깝게 되돌리는 행위이다(Klingeman, 2000). 이에 따라 하천복원 사업의 계획/설계의 목표는 1) 하천의 물리적 상태를 자연에 가깝게 복원시키고, 2) 생태계 과정, 기능, 보존의 자연성과 역동성을 복원시키고, 3) 인간의 간섭과 관리가 없어도 스스로 돌아갈 수 있고 지속 가능한 상태를 마련해주는 것이다.

여기서 하천복원과 하천회복 개념의 구분이 중요하다. 하천 복원은 훼손된 하천을 원래 그 하천이 가지고 있던 생태적 기능과 구조에 가능하면 가깝게 되돌리는 것이다. 반면에 하천 회복(河川 回復, rehabilitation)은 훼손된 하천에서 자연적으로 생태계를 다시 지속시킬 수 있는 지질, 수문적으로 안정된 지형을 만들어 주는 것이다. 하천 회복은 훼손된 서식처에서 생태계 구조와 기능을 회복시키는 것으로, 하천 복원과 달리 원 생태계의 구조와 기능에 최대한 가깝게 되돌리는 노력이 반드시 필요하지 않다. 한편, 하천 개척(開拓, reclamation)은 하천의 원 생태계가 가지고 있는 생물적, 물리적 능력을 변경시키는 것이다. 이는 인간을 위해 자연 자원을 이용하는 과정으로, 수변을 농경지나 기타 거주지로 바꾸는 것 등을 의미한다⁴⁾.

하천 복원은 하천 생태계의 구조와 기능을 이해하고 그 생태계를 만드는 물리적, 화학적, 생물적 과정을 이해하는 것이 중요하다. 하천의 친수성과 오염정화 기능은 이러한 생태계의 복원을 통해 따라서 얻어진다. 구체적으로 설명하면, 생태 서식처의 복원을 통해 생물이 살게 되면 하천의 심미적 친수성은 따라서 높아진다. 동시에 여울과 소, 수변 식생에 의한 오염물 유입 차단, 수생식물의 정화 작용 등에 의해 수질 자정 기능도 따라서 커진다.

하천 복원은 하천에 교란을 주는 활동이나 자연적인 회복을 막는 활동 등을 가능하면 억제하는 것으로부터 시작한다. 여기서 특히 하천에 지속적인 교란 활동을 제거하거나 저감시키는 활동을 '교정(remediation)'이라 한다. 하천 복원의 다음 단계는 교란으로부터 훼손된 하천을 적극적으로 복원하는 것이다. 하천 복원에 접근하는 기본적인 방법은 다음과 같다(USDC, 1998).

- 비간섭과 비교란적인 회복: 수변이 급속히 회복되어 적극적인 복원 활동이 불필요하고 나아가 오히려 해가 될 수 있는 상태
- 회복 지원을 위한 부분 간섭: 수변이 회복하려고 하고 있으나 그 정도가 느리고 불확실하여, 자연적으로 일어나는 회복을 지원하는 활동이 필요한 상태
- 회복을 관리하기 위한 적극적인 간섭: 원하는 하천 기능의 자연적 회복이 불가능하여 적극적인 복원 활동이 필요한 상태

2. 배경

하천의 환경 기능은 동식물 서식처 기능, 자정 기능, 경관·친수(親水) 기능 등을 말한다. 이 중 서식처 기능은 대부분의 경우 자정과 친수 기능을 자연적으로 포함한다. 따라서 하천의 환경 기능은 곧 생태 서식처로서의 역할을 의미한다. 세계적으로 18세기

3) 하천 복원에 관련된 용어의 범위는 매우 다양해서, 복원(restoration)이라는 표현과 함께 회복(rehabilitation), 보존(preservation), 재자연화(re-naturalization), 완화(mitigation), 향상(enhancement), 창조(creation) 등이 사용됨. 이러한 다양한 하천복원 관련 용어의 해설은 Brookes(1995)의 '하도 복원-이론과 실무'를 참고할 수 있음.

4) 국내에서 해안 간척지를 제외하고는 내륙 수변의 개척은 사실상 끝났음.

산업혁명 이후 하천은 도시화와 산업화의 영향으로 환경적 기능이 점차 악화되었다. 특히 하천을 단순히 자원으로 간주하고 이수 기능을 확대하거나 홍수로부터 도시와 농경지를 보호하기 위해 치수 기능을 확대하는 과정에서 하천의 환경적 기능은 간과되었다. 나아가 이러한 이·치수 목적의 하천 개발과 변형에 의해 환경 기능은 깊이 악화되었다.

이러한 하천 환경의 악화 문제는 1970년대 들어 구미의 선진국들을 중심으로 환경 보전의 중요성에 대한 인식의 커짐에 따라 대두되었다. 특히 생태 환경의 보전, 복원의 중요성이 강조되면서 1980년대 이후 그 사급석 성격으로서 하천환경의 복원, 또는 간단히 하천복원 개념이 하천 관리자 사이에 보급되기 시작하였다.

환경 보전과 복원, 그리고 친수성 차원에서 하천 복원 사업들이 처음으로 구체화된 곳은 유럽의 독일어권 국가들이다. 독일, 오스트리아, 스위스 등에서는 1970년대부터 이른바 '근자연형 하천공법(Naturnahe Wasserbau)' 이용하여 치수나 이수 사업 등 새로운 하천 사업을 계획하거나 과거 인공적으로 정비된 하천의 복원 사업을 시작하였다⁵⁾. 이러한 자연형 하천공법은 결국 하천의 재자연화를 위한 도구이다. 독일에서 첫번째 본격적인 하천 복원은 1970년대 Stuttgart 시 부근의 Murr 강이다. 다음 1990년 들어 Enz 강이 종합적인 복원 계획과 철저한 수리모형 실험에 의해 복원되었다. 그 이후 도나우강과 라인강에 대해서도 종합적인 하천복원 계획이 수립되었다. 라인강의 하천복원 사업은 이 강을 경계로 하는 여러 국가들이 공동으로 참여하는 것으로, 'Salmon 2000'⁶⁾이라는 기치를 걸고 있다. 독일의 여러 주들은 1992년에 법률로서 하천 사업에서 재자연화, 또는 하천 복원을 강조하고 있다(Larsen, 1996). 독일의 하천 복원의 경험은 'Ministerium fuer Umwelt'에서 출간된 '水工 핸드북(1992)'에 집약되어 있다.

영어권에서 하천복원 개념이 구체화된 계기는

1990년에 영국에서 하천 관리자들에 의해 수립된 하천복원사업(River Restoration Project, RRP)이다. 이 기구는 하천의 보전, 위락, 친수 등을 위해 하천복원을 장려하는 비영리 단체로서, 1992년에 영국 수상이 공식적으로 출범시켰다. 이 기구의 임무는 훼손된 하천의 복원을 위한 시범 사업을 하고, 하천 복원이 자연 보전, 수질, 경관, 위락, 공공의 견해 등에 미치는 효과를 이해하고, 다른 사업 주체로 하여금 하천복원 사업을 장려하는 것이다. 1990년대에 RRP가 추진한 하천복원 시험 사업은 Darlington의 Skerne 강과 Swindon의 Cole강의 2~4km 구간이다(Brookes, 1995).

미국에서는 1990년대 들어와 지방 정부의 하천관련 기관들을 중심으로 하천복원 사업이 시작되었다. 이러한 하천복원 사업은 그 지역의 시민 단체나 NGO 등이 주체가 되고 정부는 일부 재정과 기술 지원을 한다는 점이 특별하다. 1998년 말에는 15개의 연방 정부 물·토지 관련 기관들이 공동으로 참여하여 '수변 복원(stream corridor restoration) - 원리, 과정, 실무'라는 하천 복원에 관한 종합적인 지침을 만들었다(우효섭, 2000). 미국의 하천복원 사업은 2000년대 들어와 보나 저낙차 댐의 해체까지 확대되고 있다(Doyle 등, 2000; Rye, 2000).

2000년 들어 하천·수자원 분야 국제학회에서도 이제 하천복원 문제는 수자원 관리나 유사 이송 등과 동등하게 한 분야를 차지하고 있다. 한 예로 지난 2000년 7월에 개최된 미 토목학회(ASCE) 수자원 학술대회에서는 하천 복원이 가장 관심 있는 사안이 되었으며, 2001년 중국에서 열릴 제29차 국제수리학회(IAHR)에서도 중심 과제로 제시되고 있다.

III. 국내의 하천복원 사례

문헌에서 국내의 하천복원 사례는 다양하게 제시되고 있다. 여기서는 외국의 사례로서 독일어권의 오스트리아 쾰스부르크 하천복원 사업과 미국 미시시

5) 근자연형 하천공법 개념은 1980년대 일본으로 도입되어 '다자연형(多自然型) 하천 공법'이라는 이름으로 소하 개량되었음.

6) 2000년까지 라인강을 연어가 되돌아올 수 있는 하천을 만들겠다는 의지 표시로, 실제 현재까지 상당한 효과를 거둔 것으로 알려져 있음.

피주 하천복원 사업을 구체적으로 소개한다. 두 사업은 그 배경이 사뭇 다르지만(산지 하천 대 평지 하천: 도시 하천 대 전원 하천) 생물 서식처의 회복, 복원이라는 점에서 공통점을 가지고 있다. 마지막으로 국내의 하천복원 연구 사례로서 필자의 연구진에 의해 현재 진행중인 양재천 우면동 구간의 시험 사업을 소개한다.

♣ 오스트리아 쾰름부르크 시의 Alterbach 강 복원 사례 (Mader, 1999)

쾰름부르크는 알프스 산맥 북쪽 기슭에 있는 오스트리아의 한 도시로서 모차르트의 출생지로 유명하다. 이 도시에는 소하천인 Alterbach 강이 시내를 관류하고 있으며, 이 하천은 1940년대 나찌 시대에 하천의 이치수 기능을 위해 정비되었다. 그러나 1980년대 후반 들어 지역 주민들의 하천 복원에 대한 욕구를 만족시켜주기 위해 시는 치수기능 유지와 생태 서식처의 개선을 목표로 하천복원 사업을 시작하였다. 사업 후 생물과 무생물 특성을 고려한 학제간 모니터링 결과에 의하면, 복원 사업이 생물 서식처 가용성을 증가시킨 것으로 나타났다. 이 사업에 의해 100년 빈도의 홍수에 견디어냄과 동시에 자연에 가까운 서식처 조건이 달성된 것으로 나타났다.

이 하천은 유역 면적 30.2km², 길이 10.5km, 낙차 186m 정도의 급경사 산지 하천으로, 때로는 매우 큰 홍수가 발생한다. 복원 사업 대상 구간의 길이는

1.2km, 하상 경사는 8/1,000 정도이다. 복원 사업에는 하천 정비 사업 전 19세기 하천 지도를 참조하여 만곡을 조성하였다.

이 하천의 구체적인 복원 대책은 1) 하천의 만곡을 살리기 위해 가능한 주변 토지 구입, 2) 종단 변화와 하폭의 변화, 3) 얇은 구역을 만들기 위해 하폭의 확대, 4) 수심 변화의 조정, 5) 깊게 놓인 안정공(安定工, stabilization elements)을 이용한 하도 형태의 자동 조절, 6) 초기 식생과 물가 그늘의 조성, 7) 강턱의 변화(급함과 완만함), 8) 하상의 변화(교란 요소의 조성), 9) 下水의 경감, 10) 위락 기능, 자전거, 출구 등의 조성 등이다.

그림 4.와 같이 Alterbach 강 복원 사업은 자연에 가까운 하천 형태의 조성으로 생태계 기능을 회복하고 동시에 친수성을 증진시켰다는 점에서 긍정적으로 평가되고 있다. 비록 하천 변 도로, 자전거 도로, 건물, 기타 기존의 시설에 의해 완전한 하천 복원이 되지 못하였지만 자연형 하천공법의 적용으로 서식처 가용성과 수중 유기체는 분명히 개선된 것으로 나타났다. 동시에 통수능도 유지되고 있다. 그러나 완전한 의미의 하천 복원을 위해서는 강차 하천 부근의 토지를 수용하여 하천에 편입시키는 노력이 필요하다.

♣ Hotophia Creek 시험 사례 (우효섭, 2001)

이 사례는 미국 미시시피 주 북부에 있는 Hotophia Creek에 대해 국립 유사실험실 (NSL)에서 1991년



(a) 복원 전(물고기는 황색 송어 한 종이있음)



(b) 복원 후(물고기 종의 수가 8종으로 증가하였음)

그림 4. Alterbach 강의 하천 복원

부터 1993년 간 수행된 하천복원 시험 결과이다 (Shields 등, 1995). 이 하천은 상류 유역에서 인간 활동으로 토지 이용과 흐름이 변화하여 하류 하천의 하상과 강턱이 침식되어(incised) 하천 서식처가 악화되어 생태계는 물론 심미적으로도 문제가 되었다.

시험 구간의 개요

시험하천 구간은 길이 약 1km로서, 평면도는 그림 5와 같으며 전형적인 하천 전경은 그림 6과 같다. 이 구간의 상류 유역면적은 91km², 만곡도는 1.2, 하폭은 44~77m, 하도 깊이는 3~4m, 최심선 경사는 0.0011, 하상 재료는 중앙 입경 0.2~0.56mm의 모래, 평균 유량은 1.9m³/s, 연평균 비유사량은 985ton/km²/yr 이다. 이 유역은 1830년대 이주민들이 정착한 후 삼림 벌채와 개간 등 토지 이용의 급격한 변화로 하류 하천은 퇴적되어 하상이 높아지다가 1930년대 이후 하천 정비와 홍수 조절용 저수지 축조 등으로 하류 하천은 하도와 하상이 다시 침식되기 시작하였다. 이러한 하천 침식은 두부 침식, 만곡도의 축소와 하도 확대 등으로 나타났다. 그에 따라 1976년부터 1991년 사이 하상은 평균 1.2m가 저하되었다. 이러한 하천 변화는 결과적으로 생태 서식처를 악화시키고, 하천에 대한 친수성 또한 낮아졌다.

설계와 시공

이 시험 사업에서는 사석과 생물 재료를 이용한 하천의 안정과 생태 서식처의 복원, 그리고 친수성 향상 등을 사업 목적으로 두었다. 그러나 경제성 면에서 비용이 과다하게 소요되는 것은 고려하지 않았다. 하천복원 설계의 기본 개념으로 1) 비용 절감을 위해 하천 경사를 바꾸거나 만곡도를 늘리는 대형 토목 사업은 지양하고 기존의 수제를 활용하고 2) 기존의 사석 수제를 연장하여 여울과 소를 조성하되, 흐름 방향과 반대 방향으로 교대로 경사지게 설치하고(그림 5. 참조), 3) 수제의 연장으로 인해 생길 수 있는 막은 편 강턱의 불안정을 막기 위해 강턱 밑에 사석 호안을 하고, 4) 호안 주위와 사주(sand bars)에 토종 버드나무(salix)를 삼목하는 것 등을 채택하였다. 길

이가 연장된 수제는 최심선의 만곡을 유도하며, 수제 뒤로 소(沼)를 형성한다. 물가 식생은 수중에 유기물 공급과 그늘을 만들어준다는 점에서 중요하다. 또한 하도 내 식생은 유사의 퇴적을 유발하여 다른 식생의 자연 활착을 도와준다. 물가 식생 활착을 위해 총 3,445개의 휴면 버드나무 삼목을 심었다. 삼목의 직경은 2~25cm, 길이는 150~180cm 정도이며, 시험 구간의 주위 1km 범위에서 잘라서 그 날로 삼목 하였다. 삼목 위치는 1) 강턱 밑 끝 사석의 바로 뒤, 2) 사주, 3) 수제가 강턱과 만나는 곳 주위 점착성 강턱 등이다.

성과의 평가 - 모니터링 결과

하천복원 시험의 성과를 평가하기 위해 사업 전후에 걸쳐 자료를 수집하였다. 복원 공사는 '92년 2월에 시작하여 '93년 3월에 끝났다. 하천단면은 100m 간격으로 12개 단면에 대해 사업전후 측량을 하였다. 물고기는 100~137개의 격자점에서 1991~1994년에 주기적으로 조사하였다.

공사가 끝난 지 10일 만에 최대 유량 380m³/s의 강턱 유량에 가까운 홍수가 났다. 그러나 모니터링 기간 중 하천 단면의 변화는 거의 없었다. 기저 유량에 의한 평균 수심은 전체적으로 공사후 처음 1년은 9cm에서 22cm로 대폭 늘었다가 그 다음 해부터 15cm 정도를 유지하였다. 어류 서식처 조사 결과 수제가 만든 세굴공에서 개체 수, 종의 수, 평균 길이 등이 3~5배정도 크게 증가하였다. 구체적으로, 종의 수와

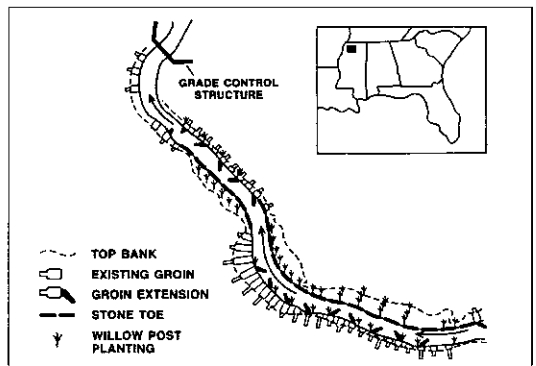


그림 5. Hotophia Creek 시험구간



(a) 사업 전



(b) 사업 후 2년

그림 6. Hotophia Creek 시험 구간(Shields 등, 1995)

물고기 평균 길이는 약 50% 증가하였으며, 채집된 물고기 수는 사업 전 300마리 수준에서 사업 후에는 1,000마리 수준으로 3배 정도 늘었다. 세굴공의 깊이도 32cm에서 84cm 정도로 크게 늘었다가 나중에 약간 줄었다. 이러한 세굴공 깊이의 감소는 시간이 감에 따라 돌 수제 바닥의 세굴로 수제가 점차 주저앉았기 때문이다. 그림 6(b)는 복원 사업 후 두 번의 성장기를 지난 후 하천 사진이다. 버드나무의 짙은 삼목 후 바로 1개월 후에 나기 시작하여 1년 이내에 강바닥에서 높이 2m 정도까지 자라고, 물가는 진한 숲으로 변하였다. 강턱 밑 사석과 버드나무는 맞은 편에 연장 수제로 인한 강턱 침식에 잘 저항하고 있었다.

교훈과 개선

이번 시험 사업으로 하천의 단면형, 하상 재료, 마찰 계수 등의 변화는 거의 없었던 반면에, 식생을 지탱하는 물가 사주(sand-bar)의 길이는 두 배로 늘고, 세굴공의 확장 등으로 물고기 수도 3배로 늘었다. 그러나 일부 수제는 주저앉아 제대로 역할을 하지 못했다. 따라서 수제 마루의 높이는 1m에서 2m 정도로 늘리는 것이 바람직하다. 다음, 강턱 밑의 사석은 대부분 제 기능을 발휘하고 퇴사는 자연적으로 묻혔다. 여기서 강턱 밑에 심은 버드나무는 1.5m 정

도 깊이로 심으면 사석 없이도 홀로 침식에 저항할 수 있다.

♣ 양재천 하천복원 시험연구 사례

필자의 연구팀은 지난 1995년 12월부터 지금까지 환경부 G-7 연구 사업의 일환으로 자연형 하천 공법에 관한 연구를 수행하고 있다(환경부/건기연, 1997~1999). 이 연구의 핵심은 과천시와 서울시 서초구 구간 양재천에 자연형 하천공법의 시험 적용과 모니터링이다. 이 시험 연구의 성과와 교훈에 대해서는 지난 7월호 본 학회지(우효섭 등, 2000)에 과천시 시험 구간을 중심으로 이미 소개하였기 때문에 이번에는 서초구 우면동 구간의 사례를 하천복원의 측면에서 소개한다⁷⁾.

이 시험 구간은 서울시 서초구 우면동에 있는 양재천의 무지개 다리에서 하류 우면교간 300m 구간으로서, 이 구간의 하천 경사는 1/500으로서 비교적 완만하며, 하상재료는 모래이다. 복원 전 식생은 양안 고수부지에 환삼덩굴이 지배적이었다. 시험 적용을 위한 공사는 1998년 11월에 시행되어 그 다음해 2월에 완료되었으며, 적용된 제 공법들은 중간에 천이 단계를 거쳐 현재 정착 단계에 있다.

이 하천 구간의 수질은 BOD 기준 6~11ppm으

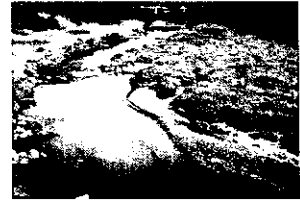
7) 이 연구는 하천복원 차원보다는 하천복원의 주요 도구인 자연형 하천공법의 여러 요소 공법에 대한 적용성 시험이 주 목적이다. 따라서 하천복원의 기본 취지인 원래 그 하천이 가지고 있었던 물리적, 화학적, 생물적 특성에 가깝게 되돌린다는 것보다는 새로운 서식처 환경을 조성한 것으로, 하천 회복수준이다.



(a) 공사 직전(1998. 8)



(b) 공사 후 첫 강탁 유량(1999)



(c) 성숙기(2000. 9)

그림 7. 서초구 양재천의 하천복원 시험 구간

로 상류 과천 시험구간보다 약간 불량하나 다른 도시 하천에 비해서는 비교적 양호한 편이다. 이 하천 구간에서 하천복원을 위한 자연형 하천공법의 설계 목표는 하천 서식처의 물리기반을 복원하여 생태 서식처 기반을 조성하고, 부수적으로 경관을 개선으로 친수성을 제고시키는 것이다. 그러나 이러한 하천복원 사업에 하천의 치수능력은 반드시 유지·보전되어야 한다. 설계의 기본 원칙은 1) 저수로의 만곡, 2) 저수로 평면의 좌우 비대칭, 3) 한 단면을 4개의 소구

간으로 구분하여 각각 적용(하도+저수로 호안+고수부지+제방), 4) 하천수질정화시설 시범 설치·운영, 5) 제방은 일부 식생 호안을 제외하고 치수 기능 유지를 위해 그대로 유지시키는 것이다. 아래 그림 8.은 이 구간의 복원을 위해 적용된 자연형 하천 공법의 평면도이다.

다음 그림 9.는 이 구간에 적용된 요소 공법의 예로서, 좌로부터 자연형 호안의 한 예인 갯버들 사석공법, 인공 여울과 소의 한 예인 V자 여울, 그리고 친

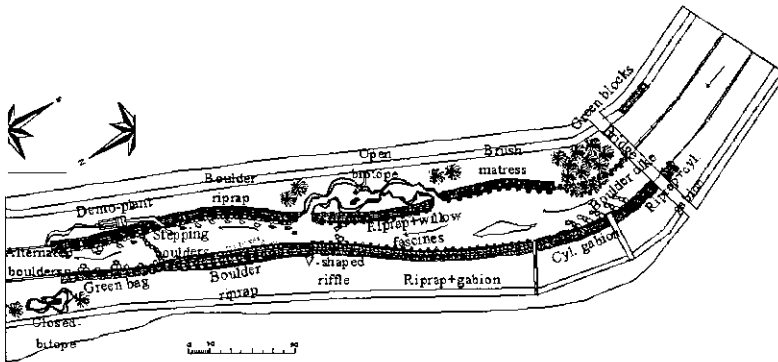


그림 8. 양재천 우면동 구간의 하천복원 시험 연구를 위해 적용된 공법 종류와 위치



(a) 사석과 갯버들 호안 공법



(b) V자 여울



(c) 징검다리 여울

그림 9. 자연형 하천공법의 요소 공법의 예

수성을 위한 징검다리 여울 등이다.

한편 홍수터의 서식처 다양성을 창출하기 위해 그림 10.과 같이 이른바 개방형과 폐쇄형 비오톱을 조성하였다. 여기서 개방형 비오톱은 주 하도와 연결된 셋강이며, 폐쇄형 비오톱은 홍수터(고수부지)에 조성된 주 하도와 연결되지 않은 웅덩이이다. 군락은 억새 등 홍수터에 조성된 물가 식물의 집중 서식지이다.

하천 복원에서 기본적으로 전제되는 것은 하천을 흐르는 물의 양과 질이다. 특히 적정한 수질의 유지는 하천 복원을 위한 물리적 서식처 조성의 선결 조건이다(Kern, 1992). 미국, 유럽 등 외국의 경우 대부분 수질 문제가 없는 하천을 대상으로 하천복원 사업이 행하여지나 국내의 경우 하천 복원에서 수질 문제가 걸림돌로 작용한다. 이 때문에 외국과 국내의 하천복원 개념과 실무의 차이 중 하나는 국내의 경우 하천 내 수질개선 방법이 하천 복원이나 자연형 공법의 일부가 된다는 점이다. 서초구 구간의 시험 연구에서도 하천 수질정화 공법으로 자갈 접촉 산화법과 습지와 토양을 이용한 정화법 등이 시험 적용되었다.

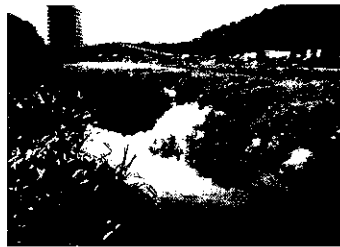
자갈접촉 산화법은 1990년대 이미 국내에서 시험·연구되어 실무에 이용되는 공법으로, 고수부지에 자갈을 담은 콘크리트 박스를 놓고 그 사이로 오염된 하천수를 통과시켜 자갈층 사이에 유기물의 흡착, 침전, 산화를 통해 하천수를 정화시키는 공법이다. 이번 우면동 구간에 시험 설치한 공법(그림 11. 참조)은 평행류가 아닌 상향류 식이라는 점이 기존의 공법과 다르다.

이 공법의 시범 시설은 8m L×1.8m W×2.4m H로 고수부지 지하에 콘크리트 상자를 매설하였다. 콘크리트 상자 안에는 직경 20~50mm, 50~100mm, 100~150mm의 자갈 등을 순서대로 깔았다. 이 데모 플랜트의 처리 용량은 500 m³/day이며, 지금까지의 시험 운전을 통해 얻은 BOD와 SS 제거율은 40 ~ 70% 수준이다.

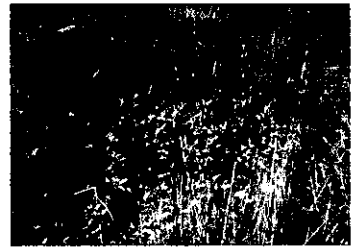
수질정화 습지는 식생과 자갈 층을 이용하여 지천이나 오우수합류식에 나오는 오염수의 수질정화를 위한 시설로서, 하천변 고수부지에 설치하여 식생에 의한 수질 정화와 홍수터 녹화를 동시에 꾀한다는 장



(a) 조류 서식처 식생 군락

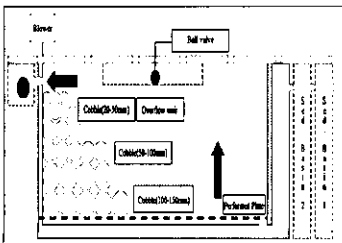


(b) 개방형 비오톱(셋강)

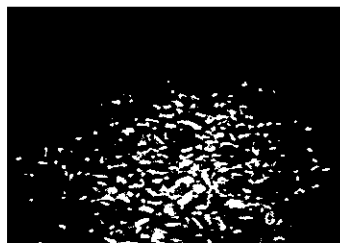


(c) 폐쇄형 비오톱(웅덩이)

그림 10. 홍수터 서식처 다양성 조성



(a) 시설 측면도



(b) 박스내 자갈 충전



(c) 하류 유출부

그림 11. 상향류식 자갈접촉 산화시설(시험 시설)

점이 있다. 본 시험 연구에서는 하천 변 고수부지에 갈대밭 습지를 조성하여 지류나 하수관거에서 나오는 오염수 정화시키는 방법과 고수부지에 자갈층을 깔고 그 위에 갈대를 심어 수질 정화를 시키는 방법 등을 시험하고 있다(그림 12. 참조). 중간 시험 결과 이러한 식생/자갈층에 의한 수질 정화는 BOD는 물론 기존의 자갈점축산화 방법으로는 제거할 수 없는 질소와 인의 제거가 가능한 것으로 나타났다.

서초구 우면동 구간의 양재천 시험 연구에서는 몇 가지 귀중한 교훈을 얻었다. 그 중 하나는 하도 형태의 변화이며, 다른 하나는 원하지 않는 식물의 우점(優占) 문제이다.

먼저, 부적절한 하도 만곡의 조성이다. 하천복원 사업에서는 하천의 특성을 충분히 이해하고 그에 맞

는 적절한 하도 만곡을 주어야지 그렇지 않고 짐작으로 설계하면 낭패를 본다. 아래 그림 13.은 우면동 구간에 조성된 만곡부와 홍수 후 변화를 비교한 것이다. 이 그림 13.과 같이 1999년 8월 홍수로 우안 상류의 만곡부 안쪽은 인공 섬과 붙어 커다란 사주가 형성되고, 원래 계획된 저수 호안은 토사로 매몰되었다. 이러한 시행착오는 모래 하천에 하도의 기하 특성과 흐름 특성과의 관계를 충분히 고려하지 않고 하천 복원을 설계하였기 때문이다.

다음, 시험 구간은 고수부지 식생 중 환삼덩굴이 우세한 곳이었다. 이 식물은 하천에 영양염류가 풍부하고 토층이 사질토인 경우 잘 자라는 것으로 알려져 있다. 이런 구간에 갯버들, 부들, 갈대 등 다른 물가 식물을 심자 바로 그해 여름에 환삼덩굴이 다시 지배



(a) 수질 정화용 식생(갈대+부들) 습지



(b) 식생(부들)과 자갈층을 이용한 습지

그림 12. 수질 정화 식생 습지와 식생/자갈층 습지



(a) 홍수전(1999. 5; 흐름은 우하단에서 중앙상단)



(b) 홍수후(1999. 10; 우안의 모래밭에 주시)

그림 13. 하천 복원 후의 하도 형태의 변화

하여 원하는 식물을 대부분 고사시켰다. 이러한 결과는 하천복원 사업 구간의 지배적인 식물과 그 특성을 이해하고 식재를 하여야 한다는 것을 시사한다.

Ⅳ. 하천복원과 하천환경정비 사업 - 유사점과 차이점

지난 1990년대 이후 도시 하천을 중심으로 지자체 별로 하천환경정비사업이 추진되고 있다⁸⁾. 이 사업은 도시 하천을 환경적으로 정비하여 하천의 환경기능을 개선시키려는 사업으로, 사업에 따라 오염하천정화사업, 또는 하천공원화 사업이라고 한다. 여기서는 이러한 하천의 환경정비사업과 하천복원의 유사점과 차이에 대해 검토한다.

먼저 국내 하천정비 사업의 시대적 변천 과정을 보면 앞서 서론에서 설명한 바와 같이 1960년대 도시화와 산업화 이후 그림 14(a)와 같은 자연 상태의 하천들이 치수 목적으로 대부분 정비되었다. 이러한 하천 정비는 주로 하천재해 방지 목적으로 이루어진 것으로 '방재 하천', 또는 토목공학적 기능 위주의 정비로서 '토목 하천'이라 할 수 있다. 그림 1.이나 그림 3(a)는 방재 하천의 예가 될 것이다. 반면에 하천환경정비사업이나 오염하천정화사업 등은 아직까지는 대부분 하천의 저수로에 돌 붙임을 하고 고수부지에 초목 식재, 산책로/자전거길 설치, 체육장/주차장 설치 등 일종의 하천 공원화 사업이다. 이러한 사업들은 치수 위주로 정비된 하천의 친수성을 높이고 하천오염 문제를 부분적으로 해소시키기 위한 것들



(a) 자연 하천(섬진강 지류)

(b) 공원 하천(양재천 강남 구간)

(c) 자연형 하천(파천 구간)

그림 14. 하천 복원 관점에서 하천 분류

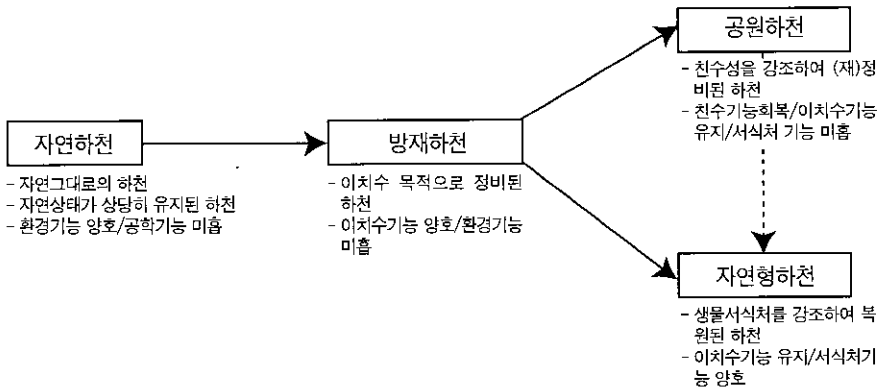


그림 15. 하천 정비와 복원의 상호 관계

8) 1980년대 시행된 서울시 한강종합개발도 넓은 의미로 하천환경정비 사업임.

이다. 따라서 이러한 사업에 의해 조성된 하천은 '공원 하천', 또는 '조경 하천'이라 부를 수 있을 것이다. 그림 14(b)는 공원 하천의 한 예가 될 것이다.

그러나 하천의 환경 기능 중에서 가장 기본적인 것은 생태 서식처 기능이며, 따라서 진정한 의미의 하천 복원은 하천 서식처의 복원에 초점을 맞추어야 한다. 하천 복원의 진정한 목표는 하천을 공원화 하거나 놀이장으로 만드는 것이 아니라 다시 자연화 시키는, 자연에 가깝게 되돌리는 것이다. 하천복원 사업에 의해 자연에 가깝게 되살아난 하천은 '자연형 하천', 또는 '생태 하천'이라 할 수 있다. 그림 14(c)는 완전하지는 않지만 자연형 하천의 한 예가 될 것이다.

이러한 하천 정비와 복원의 상호 관계를 흐름도로 나타내면 그림 15. 같다.

이 그림과 같이 과거 자연 상태의 하천은 하천재해 방지 차원에서 정비되어 '방재 하천'이 되고, 이러한 하천은 최근 들어 하천의 친수 기능을 위해 '공원 하천'으로 꾸며지고 있다. 공원 하천과 자연형 하천의 기본적인 차이는 전자가 친수성을 강조한 나머지 오히려 하천의 생태 서식처의 보전·복원을 저해시킬 수 있는 반면에, 후자는 서식처 복원을 통해 생물이 살게 되면 친수성과 수질 자정은 따라서 회복된다는 것이다. 결국 방재 하천이든 공원 하천이든 진정한 하천환경의 개선을 위해서는 하천의 생태 서식처의 복원이 전제되어야 한다. 따라서 방재 하천은 물론 공원 하천도 궁극적으로 자연형 하천이 되어야 할 것이다.

V. 하천복원 가이드라인(잠정안)의 제작

필자의 연구팀은 자연형 하천공법의 개발 연구의 마무리 성격으로 하천 관리자가 하천환경정비, 또는 하천복원 사업을 추진하는데 직접 이용할 수 있는 개념적, 교육적, 기술적 참고서가 될 수 있는 가이드라인을 개발 중이다. 연구팀은 외국의 기존 하천복원 가이드라인을 참고하여 국내 여건에 맞는 가이드라인의 개발 방향으로 다음과 같은 점들을 고려하고 있다(우효섭과 김성태, 2000).

- 국내의 도시하천은 대부분 크게 오염되어 있어 수질개선이 병행될 필요가 있다.
 - 외국의 하천 복원은 인공 제방을 넘어 과거의 수변 지역까지 고려될 수 있지만, 국내 여건상 토지 이용의 한계, 치수상의 문제 등 현실적으로 제방을 넘어 복원하기는 어려울 것이다.
 - 국내의 하천관리 특성상 하천복원에 의한 식생의 흐름저항 증가와 세굴 취약성 등 이른바 하천의 공학적 기능에 대하여 구체적인 검토 방법이 있어야 할 것이다.
 - 자연형 공법 등은 국내에 기 적용된 사례들을 중심으로 각 공법의 적용성과 한계 등을 고려하여야 할 것이다.
- 위와 같은 제작 방향을 감안하여 가이드라인의 주요 구성 내용과 목차(안)을 다음과 같이 고려하고 있다.

제 1 부 하천과 수변

- 1장 하천의 개관: 국토 환경과 하천, 하천의 시공간 규모, 하천의 공간적 구조
- 2장 하천의 물리적, 화학적 과정과 특성: 유역과 하천의 수리 수문 과정, 하천의 형태 과정, 화학적 특성
- 3장 하천 생태계 구조와 기능: 하천생태계의 구조, 하천 생태계의 기능
- 4장 하천의 교란: 자연적 교란, 인위적 교란, 하천 교란 실태

제 2 부 하천복원 계획의 수립

- 5장 하천 복원의 배경과 목적: 역사적 관점에서 하천의 변화, 하천 복원의 배경과 목적, 하천 복원의 원리와 기본원칙, 하천복원의 한계와 잠재력
- 6장 하천복원 계획의 과정: 조직의 구성과 문제/기회의 확인, 목적/목표와 대안의 설정, 복원 목적과 목표의 설정, 추진/모니터링/평가/적응관리 계획

제 3 부 하천 복원의 추진

- 7장 하천과 수변의 조사 분석: 수문·수리 과정,

형태적 과정, 화학적 특성, 생물적 특성
 8장 복원 설계: 하천 유형별 복원설계의 원칙, 하도 선형/단면형/종단형의 복원, 호안/홍수터/제방의 복원, 하도 내 서식처의 복원, 하도 안정과 흐름저항 해석, 자연형 수질개선 대책, 유역 대책, 수변의 경관생태와 연계 설계

9장 시공, 모니터링, 유지관리: 복원 사업의 시공, 모니터링, 유지관리

제 4 부 자연형 하천공법

10장 공법의 원리와 적용 기준: 자연형 하천공법의 개요, 공법 적용의 기준, 주요 재료

11장 유형별 공법의 예시: 하도 내 공법, 호안 공법, 홍수터/제방 공법, 수질정화 공법, 기타 공법

Ⅶ. 맺는 말

수변 복원, 또는 하천 복원이란 치수나 기타 다른 목적의 하천 사업이나 불량한 유역 관리에 의해 훼손된 하천의 생물 서식처와 친수성을 되살리기 위해 하도와 하천 변을 원래의 자연 하천에 가깝게 되돌리는 것이다. 이러한 하천 복원은 하천이 인간 사회에 주는 실제적, 심미적 중요성 때문에 자연 생태계 복원 중에서 우선적으로 요구되고 있다.

국내에서는 1990년대 들어 국민의 경제적 성장과 함께 주위 환경을 돌아 볼 수 있는 여유가 생기게 됨에 따라 주변의 훼손된 하천에 대한 복원의 욕구가 증대되었다. 이에 따라 하천 환경에 대한 하천관리자의 관심이 커지면서 일부 지자체에서 나름대로 하천의 환경 기능을 개선하려는 노력이 시작되었다. 그러나 이러한 하천환경 개선사업들은 하천의 친수성에 초점을 맞춘 것으로, 생태 서식처의 물리, 화학 조건을 조성하여 생태계 서식 환경을 되살리는 하천복원 개념과는 상당한 거리가 있다. 사실 하천환경정비사업은 하천복원에 의한 '자연형 하천'이 아닌 하천 공원화 사업에 의한 '공원 하천'을 만들고 있다. 그러나 서식처 환경의 복원은 궁극적으로 하천의 친수성과 자정 기능을 회복시킬 수 있으므로, 하천환경 개

선사업의 궁극적 목표는 단순한 친수 기능 향상이 아닌 하천 생태 서식처의 복원에 두어야 할 것이다. 이는 동시에 하천 사업의 ESSD(환경적으로 건전하고 지속가능한 개발)와도 맥락을 같이 하는 것이다.

그러나 실제 하천복원 사업을 추진하는데 있어 1) 국내의 도시하천은 대부분 크게 오염되어 있기 때문에 수질개선 노력의 병행이 필요하며, 2) 외국의 하천 복원은 인공 제방을 넘어 과거의 수변 지역까지 고려될 수 있지만 국내 여건상 토지 이용의 한계, 치수상의 문제 등 현실적으로 제방을 넘어 복원하기는 곤란하다는 점에 유의하여야 할 것이다. 동시에 국내 하천 여건상 1) 하천복원에 의한 식생의 흐름저항 증가와 세굴 취약성 등 이른바 하천의 공학적 기능에 대하여 구체적인 검토 방법의 필요하며, 2) 자연형 공법 등은 국내에 기 적용된 사례들을 중심으로 적용성과 한계 등 평가를 하여 선별적으로 추천할 필요가 있다.

하천 복원은 외국에서도 학문적, 실용적으로 확립된 분야가 아닌 이제 막 시작하는 새로운 분야이다. 따라서 상당한 시행 착오가 뒤따를 수밖에 없다. 이 점에서 하천 복원에 대한 설명적 안내 지침 성격의 자료가 필요하다. 필자의 연구팀은 하천 복원의 이해와 국내 적용 상 한계 및 유의점 등에 대한 설명적 안내 지침 성격으로 하천 복원 가이드라인을 제작하고 있다.

마지막으로 본 논문을 포함한 하천복원 특집이 국내에서 하천 기술자들은 물론 하천에 관련된 사람들이 하천 복원의 개념과 적용성 등을 이해하는데 도움이 되었으면 한다. 아울러 이 특집을 계기로 하천 전문가들 사이에 하천 복원의 개념적, 이론적, 응용적 연구가 한층 진행되기를 기대한다.

알림

이 논문의 상당 부분은 1996년부터 지금까지 환경부에서 지원하여 건기연의 필자의 연구팀과 서울대 환경계획연구소가 같이 수행하고 있는 G-7 연구 과제 "국내 여건에 맞는 자연형 하천공법의 개발" 연구 성과에서 인용하였다. ●

〈참고 문헌〉

- 건교부/건기연(1991~1996). 하천환경관리기법 연구 조사.
- 우효섭(2000), "수변복원의 이해 (I, II) - 미국의 수변 복원 가이드라인을 중심으로", 대한토목학회지.
- 우효섭, 하천 수리학, 제14장, 청문각, 2001년 2월 출판 예정.
- 우효섭, 김성태(2000), "외국의 하천복원 가이드라인의 검토와 국내 제작 방향", 대한토목학회 학술발표회.
- 우효섭, 김성태, 김광일(2000), "하천 치수와 하천환경 관리", 한국수자원학회지.
- 환경부/건기연(1997~1999), 국내여건에 맞는 자연형 하천공법의 개발, 제 1, 2, 3 차년도 연차 보고서.
- Brookes, A.,(1995), "Ch. 17 River Channel Restoration", *Changing River Channels*, A. Gurnell and G. Petts ed., Wiley.
- Doyle, M. W et al.,(2000), "Dam Removal: Physical, Biological, and Societal Consideration", Proceedings of 2000 Joint Conference on Water Resources and Water Resources Planning and Management, ASCE, Minneapolis.
- Kern, K.,(1992), "Ch. 20: Rehabilitation of Streams in South-West Germany", *River Conservation and Management*, Boon, P. J., Calow, P., and Petts, G. E., eds., John Wiley and Sons, Inc., Chichester, England.
- Klingeman, P. C.,(2000), "River Restoration Design and Stability, Short Course 4", Proceedings of 2000 Joint Conference on Water Resources and Water Resources Planning and Management, ASCE, Minneapolis.
- Larsen, P.,(1996), "Ch. 8 Restoration of River Corridors: German Experiences", *River Restoration*, Petts, G. and Calow, P. ed., Blackwell Science.
- Mader, H.,(1999), "Successful River Restoration within the Urban Area of Salzburg shown at River Alterbach," 3rd International Symposium on Eco-Hydraulics, Salt Lake City, Utah.
- Ministerium fuer Umwelt,(1992) Handbuch Wasserbau, Naturnahe Umgestaltung von Fließgewässern, Baden-Wuerttemberg.
- Rye, M. E.,(2000), "Dam Removal - A Discussion of Issues and Impacts", Proceedings of 2000 Joint Conference on Water Resources and Water Resources Planning and Management, ASCE, Minneapolis.
- Shields, Jr., F. D. and Cooper, C. M., and Knight, S. S.,(1995), "Experiment in Stream Restoration", *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 121, no. 6.
- US Department of Commerce(USDC),(1998), *Stream Corridor Restoration-Principles, Processes, and Practices*, Federal Interagency Stream Restoration Working Group, NTIS, Springfield, VA, USA.