

하천에서 식생활착 연구 문헌조사(I) - 화이트리버가 그린리버로 변하는 과정의 연구 -



우 효 섭 |
한국수자원학회 참여회원
hswoo@kict.re.kr

필자는 지난 12월호 학회지에 “화이트리버? 그린리버?”라는 기사를 소개하면서 한국의 하천에서 왜 백사장이 사라지고 녹색의 풀과 나무로 덮이게 되었는지 개괄적으로 설명하였다. 말미에 이러한 현상의 문제점을 분석하고 가능한 해소방안을 찾기 위해 하천 연구자들이 할 일이 무엇인지를 제시하였다. 즉, 화이트리버가 그린리버로 변하는 인과 과정을 이해하고, 다음 이를 재현할 수 있는 모형을 개발하는 것이 중요함을 강조하였다. 이러한 모형을 보통 수변식생모형(riparian vegetation model), 또는 홍수터식생모형(floodplain vegetation model)이라 한다. 이러한 연구개발의 첫 걸음으로서 필자는 하천에서 식생활착에 관련된 외국 논문을 광범위하게 조사하고 그 결과를 정리하여 관심 있는 독자들을 위해 이 지면을 통해 소개한다. 문헌 조사 내용이 많기 때문에 본 기사는 I부와 II부로 나누어 게재한다.

관련 문헌의 분류

하천에 인위적인 교란으로 식생이 들어와서 생장하는 과정, 구체적으로 이입(recruitment), 활착(establishment), 천이(succession), 퇴행(retrogression) 등에 대한 연구는 국제 문헌에서 1980년대부터 보이기 시작한다. 즉 1984년에 미지질조사국(USGS)에서 10개의 댐을 대상으로 댐에 의한 하천 상하류 영향을 조사하면서 하류 하천에서 가속화된 식생활착에 대해 간략히 보고하였다. 그 이후 지금까지 많은 연구들이 주로 환경관리학, 삼림학, 지형학, 하천공학 분야에서 수행되었다. 이러한 연구조사 문헌들은 조사 대상과 방법에 따라 다음과 같이 구분된다.

- 현지 조사·시험 연구
- 기초 실험, 분석 연구
- 홍수터 식생모형 연구
- 홍수터/사주 복원 연구

위의 구분에서 식생 이입의 현지조사 연구는 다시 다음과 같이 세분화 할 수 있다.

- 댐에 의해 조절되는 하천에서 식생이입 연구
- 비조절하천에서 식생이입 연구
- 비조절 하천과 조절 하천의 비교 연구
- 수목성장과 지하수위(토양습윤) 연구
- Hydrochory(식물 씨앗의 분산)

본고는 위의 분류 체계에 따라 관련 문헌 조사 성과를 정리한다. 이러한 문헌조사 결과를 다시 씨앗의 퍼짐, 발아, 묘목의 성장과 생존 등 이입(recruitment)의 세부과정으로 나누어 요약한다. 마지막으로 문헌조사 결과를 토대로 식생이입의 필요, 충분조건을 정리한다.

1. 현지 조사 · 시험 연구

하천에 식생이 이입, 활착하는 과정에 대한 연구는 현지에서 조사, 시험을 통해 수행되는 경우가 많다. 이를 다시 세분하여 정리하면 다음과 같다.

(댐에 의해) 조절되는 하천에서 식생이입 연구

조절 하천(regulated river)이란 댐이나 기타 취배수 등으로 하천 유황이 인위적으로 조절되는 하천을 말한다. 조절 하천에서 식생 이입에 관한 연구로 시대적으로 앞 선 것은 1984년 발간된 지질조사국의 Williams와 Wolman 연구이다. 이 연구는 댐에 의한 하류하천의 변화를 유량, 유사량, 평균하상고, 하상재료 및 하상저하, 하폭, 제거된 유사량과 하도안정, 식생 등으로 나누어 검토한 것으로서, 본고에서는 식생에 대해서 한정하여 검토한다.

항공사진 등을 이용하여 조사된 10개 댐 하류 하천에서 대부분의 경우 식생 영역이 증가하여 물이 흐르는 하도가 매우 좁아진 것으로 나타났다. Republican강의 경우 특히 식생 확장이 댐 전에 비해 90%까지 증가하여, 댐 건설 전에는 다지하천의 형태를 띠었으나 건설 후에는 식생으로 가득차서 하도는 식생 숲 사이에 좁게 형성되었다. 이 연구에서 식생변화의 원인으로서 1차적으로 댐에 의해 홍수가 줄어들어 식생 활착(특히 발아 및 유식물(seedling) 시기)에 유리한 환경이 조성되는 점을 들었다. 다만 Garrison 댐의 경우 홍수터 식생은 오히려 줄어들었는데, 이는 홍수가 줄어들어 비옥

한 토사 퇴적이 줄어들고 지하수위가 낮아져서 식생 성장에 불리한 조건이 형성되었기 때문으로 나타났다. 하도 형태도 영향을 주어 좁고 깊은 하천의 경우 댐에 의해 식생이 확장될 가능성이 적으나, 넓고 얇은 다지하천에서는 그 가능성이 큰 것으로 나타났다. 특정 시기의 강수량 변화 역시 식생 활착에 영향을 줄 수 있는 것으로 조사되었다. 결론적으로 댐은 홍수를 감소시켜서 하류 하천의 식생활착에 큰 기여를 한다. 이러한 식생 활착의 공학적 문제로서 우선 홍수시 통수능 감소를 꾀할 수 있으며, 아울러 좁고 깊은 저수로의 형성에 따른 평상시 유속 증가와 그에 따른 하상세굴 문제, 그리고 주변 식생 사주 상 퇴적 문제 등을 들 수 있다.

Fenner 등(1985)은 애리조나 주의 Salt River를 조사하여, 댐에 의해 하류 하반림에서 포플러 군락 면적이 오히려 감소한 것으로 관찰하였다. 그 이유로 댐에 의해 홍수터가 물에 적셔지는 기간이 줄게 되고, 겨울과 봄 홍수가 없어지고 그에 따라 신선한 유사 공급도 없어져서 식생이 이입될 '터전'이 줄어들었기 때문으로 나타났다. 댐에 의해 하류 하천 수위가 급변하여 발아된 씨에 수분을 공급하는 기회가 줄어들고, 발아된 식생을 반복적으로 침수시킴으로써 식생활착에 불리한 조건이 형성된 것이다. 이 결과는 보통 댐에 의해 하류하천 식생이입에 유리한 조건이 형성되는 것과 정 반대로서, 하천 사주나 홍수터에 식생 이입은 홍수시 소류력 변화 이외에도 토양습윤 변화, 신선한 토사공급, 침수기간의 변화 등이 작용함을 알 수 있다.

Rood와 Mahoney(1990)는 댐에 의해 조절되는 미 서부 하천에서 왜 포플러 군락이 줄어들지는지와 그 대책 등을 연구하였다. 그 결과 댐은 전체적으로 하류 유량을 감소시키고, 봄 홍수를 감소시키고 여름 유량을 일정하게 만들어 하반림을 고갈시키는 것으로 나타났다. 구체적으로, 하천유량 감소는 특히 묘목과 성목에 수분 공급을 중단시켜 치명적이고, 봄 홍수의 감소는 씨가 싹을 트기 위한 터전(퇴적토)을 제공하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한

부정적 영향을 줄이기 위한 가능한 방안으로 1) 간헐적인 봄 홍수를 유지시키고, 2) 하류 유량을 급격히 줄이기보다 점차 줄이고, 3) 여름철 적절한 유량을 유지시키는 것을 제안하였다.

Johnson(1994)은 네브래스카 Platte강에서 포플러 나무의 확장에 대한 유형과 원인에 관한 연구를 위해 Platte강 본류와 그 두 지류인 남 Platte강, 북 Platte 강에 서식하는 포플러, 버드나무의 확장 과정을 항공사진 등으로 조사하였다. 항공사진 조사 결과 1900년 이후 Platte 강의 모래 사주에 식생이 이입, 확장되기 시작하여 1930년대에 모든 하천 사주에 퍼지게 되었다(연 10% 정도의 확률). 이 하천의 식생 이입에 기여하는 요인으로 6월 흐름, 여름 가뭄, 겨울추위 등을 들었는데, 6월은 씨앗의 발아기로서 이때 흐름이 씨앗의 이입, 발아에 영향을 준다. 1930년대부터 관개사업과 상류 저수지 건설 등으로 하천 흐름이 조절되기 시작하여 홍수가 줄어들어 하상이 확장되어 발아에 양호한 조건을 제공한 것이다. 1969년부터는 더 이상 확장은 되지 않고 비교적 식생역과 하도역의 비율이 일정하게 유지되었다. 그 이유로 하도는 안정화 되고 흐름도 비교적 정상류가 되어 종자의 이입을 감소시키고 유식물 생존율도 저하되었기 때문이다. 포플러나 버드나무가 이렇게 빨리 성장하는 것은 그 수목의 특성으로서 바람과 물에 쉽게 흩어지는 씨앗, 급속한 발아, 홍수/가뭄/퇴사에 견딜 수 있는 급속한 뿌리 내리기와 성장, 저영양 토양에 잘 자라기, 버드나무 같이 무성생식을 통한 재생 등을 꼽을 수 있다. 하천 변 모래 사주는 새 서식에 중요하므로 더 이상의 식생 확장은 바람직하지 않다. 지금의 상황은 시간이 가면 생물 다양성이 낮은 나무와 관목으로 천이 될 것이다.

Rood 등(1998)은 캐나다 앨버타 주의 Oldman 강에서 포플러 유식물의 이입, 활착, 생존, 성장 과정을 현지 조사하였다. Oldman강에서는 1995년에 기록적인 홍수가 발생하여 포플러에 양호한 발아 조건을 조성하였다. 그들은 9개의 조사 사이트를

를 선정하여 성숙한 포플러 구역에서 하천에 연직으로 조사선(transect)을 설정하고 총 131개의 조사구(quadrats)를 설정하였다. 1996, 1997년에 현장을 답사한 결과 모든 사이트에서 표고 0.6~4m 구역에 왕성한 묘목들이 성장하였으며, 얼음과 세굴 등에 의해 1996, 1997년에 표고가 낮은 구역의 포플러는 죽었으며, 높은 표고에서 포플러는 가뭄 스트레스로 고사했다. 그 결과 1996, 1997년에 생존한 포플러 묘목은 1.7~3m 구역이며, 2.5m 이상 구역에서는 성장이 더디게 나타났다. 식생밀도는 1996년에 80~4,000개/m² 정도이었으나, 그 다음해 2년 동안 매년 각각 10%, 5%까지 떨어졌다. 묘목 높이는 1995년에 약 2cm 높이이었으나, 1996, 1997년에 8~25cm로 성장하였다. 이러한 조사 결과 묘목은 큰 홍수이후 대규모로 생길 수 있으며, 홍수 후 댐에 의한 점차적인 수위 하강은 묘목 성장을 촉진하는 것으로 나타났다.

일본에서 Nakamura(1999)는 하류 하천 식생 이입에 미치는 댐의 영향으로서 유량 조절, 유사이송 차단, 홍수교란 주기 변동 등을 거론하며 특히 홋카이도 지역에서 봄 홍수의 중요성을 강조하였다. 봄 철 홍수는 홍수터에 신선한 토사를 공급하고 토양을 적서 식물의 씨가 발아하기 좋은 조건을 형성하기 때문이다. 특히 물에 의한 '씨앗의 퍼짐(종자 분산)'은 특히 식생 다양성에 중요하나, 댐에 의해 여름철 홍수 규모와 빈도가 줄어들면 다양성에 부정적 영향을 주게 된다. Nakamura는 이러한 조사를 위해 댐 건설 전후 성숙한 나무의 나이테(dendrochronology) 조사, 항공사진 분석 등을 활용하였다. 마지막으로 댐에 의한 부정적 효과를 저감시키기 위해 인공홍수 같은 적응관리를 제안하였다.

Kamada 등(2002)은 댐에 의해 하류 하상이 잠감화된 하천과 자연 상태의 하천에서 식생이입을 비교 조사하였다. 그들은 일본 시코쿠 Katsuura강 상류에 있는 Masaki 댐 하류의 하상저하와 잠감화 현상에 초점을 맞추었다. 댐에 의해 자갈 (입경

250~500mm)로 덮인 홍수터는 하상이 낮아져 더 내려간 저수로 수위보다 높은 위치에 있지만 세 종의 식생이 이입되었다. 그러나 댐 상류나 하류 자연상태의 구간에서 하상은 더 작은 토사로 덮여서 그러한 식생 이입을 막고 있다. 즉, 자갈밭과 모래밭은 서로 다른 식물군락이 분포하게 된다.

이 밖에도 Prowse 등(2002)은 캐나다 로키산맥의 Peace강과 Slave강에 대해 원류 하천에서 댐에 의한 식생 이입을 비교조사 하였다. 그 결과 Peace강의 경우 댐 하류 하천의 하도는 폭이 좁아지고 과거 하도나 배후습지가 고립되었고 주변 사주에는 식생이 활착되었다. Slave 강역의 경우 하류 델타 지역에서 생태적으로 민감한 외부 변두리의 지형변화가 뚜렷하였다. Graf 등(2006)은 미국의 72개 하천에 대해 지형 및 생태 변화를 조사하였다. 그들은 댐에 의한 하류 하천 변화에서 가장 두드러진 것은 하천지형 변화로서, 저수로는 커지고 고수위 하도는 줄어들고, 활성 홍수터(유사 이송이 있는 홍수터)는 줄어들고 비활성 홍수터는 늘어나는 것으로 보고하였다. 특히 건조한 서부내륙 하천의 경우 댐 하류 하천은 줄어들고, 단순화되어 하천생태에 직접적인 영향을 주는 것으로 보고하였다. 아래 사진은 원래 다시 모래하천이 댐 건설 후 수목으로 덮이고 저수로는 단순화된 것을 보여준다.

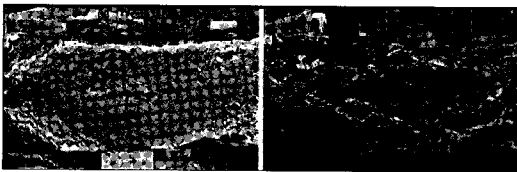


그림 1. Platte강의 Kingsley댐 건설 후 하류 다시하천에서 식생하천으로 변모(댐 건설 1941, 좌측 사진 1938년, 우측사진 1998년) (Graf, 2006)

한국에서 Choi 등(2005)은 황강댐 건설 전후의 하류 하천 비교 조사에서 댐에 의한 홍수의 감소와 그에 따른 하상 소류력의 감소, 그리고 그에 따른 하천 사주 및 홍수터에 식생 활착 상황을 정량적으로 분석하였다. 조사하천 하류 30km 구간에서 식

생 이입은 댐 건설 전 2~3% 수준에서 건설 후 80%까지 증가하였다. 이 연구는 하천에서 식생 활착에 관한 국내 최초의 연구이다. 박봉진 등(2008)은 항공사진을 이용하여 안동, 임하, 합천댐 등 21개 댐을 대상으로 댐 하류하천의 사주와 식생의 면적 변화, 변화지수, 변화정도와 경년변화 등을 조사하였다. 그들은 Richter 등(1996)의 변화지수 개념을 차용하여 변화 정도를 낮은 변화(0.33 이하), 중간 변화(0.33~0.67), 높은 변화(0.68 이상)로 나누었다. 이 연구 역시 댐에 의한 유황변화를 하류 하천 식생이입의 가장 큰 원인으로 진단하였다.

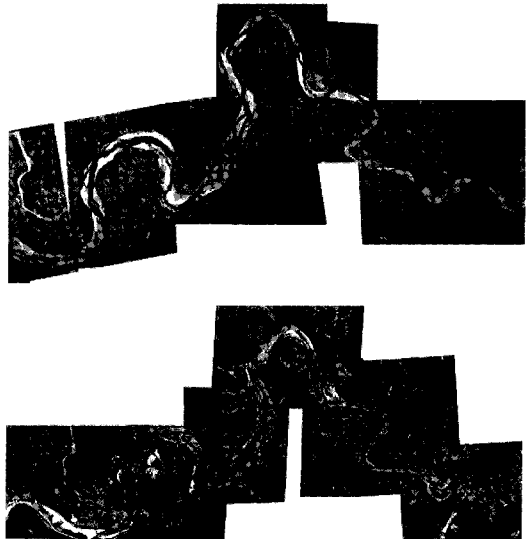


그림 2. 황강댐 건설 전후의 항공사진 비교(상: 댐 건설 전, 하: 건설 후; 모래사주는 흰색, 식생사주는 짙은 회색으로 나타남; 사진의 좌단은 합천읍이며, 우단은 낙동강 합류점) (Choi 등 2005)

비조절하천에서 식생이입 연구

비조절하천(non-regulated river)이란 댐이나 기타 취배수 등으로 하천 유황이 인위적으로 조절되지 않는 하천을 말한다. 즉 유황 측면에서 자연상태 하천이다. 비조절 하천에서 식생이입에 관한 본격적인 연구는 아무래도 연구 성격상 조절하천에서

연구보다 시대적으로 늦다.

문헌에 의한 비조절하천에서 식생이입에 관한 초기 연구로는 미지질조사국 자료(Williams와 Wolman, 1984)에 소개된 Gila강(Turner, 1974; Burkham, 1972)과 Cimarron강(Schumm와 Lichty, 1963) 등이다.

최근의 연구로서 Hupp and Osterkamp(1996)는 미국의 4개 지역(습윤산지, 동부해안, 대평원, 남서부 건조 지역)의 하천을 대상으로 하천식생 이입, 활착에 관한 조사를 하였으며, Scott 등 (1996)은 몬태나 주의 미주리 강을 대상으로 조사하였다.

일본에서도 Maekawa and Nakagoshi(1997)는 일본 고유의 버드나무와 미국에서 들어온 아까시나무가 자라는 일본 중부 Azusa 강에 대해 46년 기간 동안 항공사진을 이용하여 식물군락의 변화와 그에 따른 하안경관의 변화를 조사하였다. 그 결과 버드나무는 하중도나 새롭게 형성된 하안 테라스를 따라 자라고, 아까시나무는 호안에서 시작하여 육지부(다른 종이 이미 서식하는)로 퍼지는 것으로 나타났다. 아까시나무의 과다 생육과 퍼짐은 하안 경관을 오히려 단조롭게 하는 것으로 보고하였다.

Okabe 등(2001)은 일본 시코쿠의 요시노천에서 지난 50년 동안 세 개의 비슷한 교호사주가 형성된 곳을 대상으로 버드나무 군락의 확립과 수문지형적 과정과의 관계에 대해 생태적, 수리적 관점에서 조사하였다. 이 하천은 1970년 초부터 버드나무 군락이 생기기 시작하였지만 확장은 식생 이입 특성과 하상재료의 이동성에 의해 시공간적으로 제한되었다. 즉, 버드나무 활착은 무차원 소류력이 발아 후 2~3년 동안 0.06(무차원한계소류력) 정도 이하인 경우로 제한되는 것으로 조사되었다. 교호사주의 하상은 특히 버드나무 군락의 가장자리에서 높아지며, 사주가 식생에 의해 육화됨에 따라 저수로는 몇몇 구간에서 저수호안시설에 위험을 미칠 만큼 저하(degradation)되었다.

2000년대 들어 최근 연구로서 Polzin과 Rood(2006)는 습윤한 삼림 생태지역에서 포플러

생장과 홍수 관계를 조사하였다. 조사 대상은 1993~2005년 사이 브리티시컬럼비아의 비조절하천인 Elk 강으로서, 홍수는 통상 포플러 생장에 유리한 나대지(nursery sites)를 만들어 주지만, 얼음과 홍수에 의한 퇴적과 세굴, 가뭄 등으로 급격히 줄어들어 드는 것으로 나타났다. 이 연구는 이른바 '유식물안 전지역(seedling safe sites)'으로서 표고 0.6~2.8m 높이, 5cm 이하의 세굴, 40cm 이하의 퇴적 조건을 제시하였다. 결론적으로 습윤지역에서는 물보다는 지형적 교란이 더 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.

영국의 Gilvear와 Wilby(2006)는 지난 20년 동안 25년 빈도 홍수로 생겨난 스코트랜드의 Tummel 강의 2ha 크기의 자갈 하중주의 식생 동역학을 조사하였다. 이 하중주에는 총 180종의 식생이 정착했으며, 식생 종의 구성에 영향을 미치는 요인으로 표고, 사립도, 습기, 그리고 세립토사의 침투 및 포착 등으로 나타났다. 이는 하중주에서 66개 위치의 표본조사 결과를 다중회귀분석한 결과이다. 연구의 결론 성격으로 그들은 하천에서 자갈 하중주는 하천 식생 다양성에 중요한 역할을 하며(일종의 서식처 모자이크), 하천의 자연적 역동성에 의해 하중주가 되살아날 수 있는 여건을 만들어주는 것이 중요하다고 하였다.

Meier와 Hauer(2007)는 직선 하천이 아닌 만곡 자갈하천에서 포플러 모목이 활착하는 조건을 야외조사를 통해 확인하였다. 일반적으로 하천 사주에서 식생의 정착은 빈번한 수몰, 흐름과 유빙에 의한 하상 침식, 여름철 건조(마름) 등 악조건에 좌우된다. 이 연구는 단일의 직선 하천이 아닌 만곡 하천, 사주와 구하도, 반영구적 하중도 등 복잡한 지형에서 식생 활착 조건을 조사한 것이 특별하다. 기존의 'Recruitment Box Model'은 유사로 새롭게 덮힌 만곡하천에서 식생 활착은 홍수 시 침투유량과 홍수 후 유량 감소율이 적절한 경우에 있어 활착 가능한 '표고 범위(elevational range)'가 있다는 것이나, 위와 같이 복잡한 지형의 하천에서 이

같은 기존 모형은 한계가 있음을 강조하였다. 이 연구에서 지하수위, LWD(Large Wood Debris) 분포, 수위-유량 관계, 수변 토양에서 유사의 연직 분포 등을 현지 조사한 결과 일반적으로 홍수 후 자갈 하상 아래 습기를 오래 품을 수 있는 세류사(wash load) 층이 있는 경우 식생 활착이 유리함을 알 수 있었다. 왜냐하면 자갈층은 묘목을 하상침식으로부터 보호하고, 세류사층은 식생활착에 필수적인 습기를 제공하기 때문이다.

조절/비조절 하천의 비교 연구

조절하천의 식생 이입 변화를 조사하기 위해서는 댐에 의한 영향만을 고립시키기 위해 조절하천과 비슷한 특성을 가진 비조절 하천을 비교하는 것이 바람직하다.

Nilsson 등(1999)은 스웨덴에서 조절되지 않은 하천과 조절된 하천의 식생 등 생태환경을 비교 평가하였다. 그 결과 일반적으로 강의 하폭, 강턱 높이, 하상재료, 연평균 유량 등은 거의 변화가 없는 반면에, 종 다양성과 식생 피복율은 조절 하천에서 적게 나타났다. 다중회귀분석 결과 조절 전 식생 피복, 수위 변화, 강턱 높이, 연평균 유량 등은 식생 종 다양성에 가장 큰 영향을 미치고, 수위변화, 연평균 유량, 저질의 세립도 등이 식생 피복에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Polzin과 Rood(2000)는 미국과 캐나다 국경을 관류하는 Kootenai 강을 조사한 결과 1972년에 댐이 만들어져 하류 하천의 유량은 1~2년 빈도 침투 홍수 이하로 낮아졌고, 그에 따라 댐 건설 전 하도가 자유스럽고 많은 노출된 사주가 있었으나, 건설 후 하도가 고정되며 모래 사주가 없어진 것으로 관찰되었다. 댐에 의한 영향을 정량적으로 분석하기 위해 댐 상하류 구간과 댐이 없는 지류 구간을 대조 구간으로 선정하여 하안제방까지 단면 조사선을 설정하여 비교 조사한 결과 댐 상류는 모래 사주와 자

갈 사주가 있으나, 하류는 노출된 사주가 적음이 분명히 나타났다. 특히 1996, 1997년 대홍수 이후 댐 상류 구간과 지류 구간은 대규모의 점성 포플러 식생이입이 발생하였지만 댐 하류는 거의 없는 것으로 나타났다. 댐 하류는 하도가 고정 되어 가고 식생이 강턱까지 자라면서 포플러와 낙엽성 관목의 성장을 억제하고 있다. 그들은 하류 하천의 포플러 서식처 복원을 위해서는 댐으로부터 봄철 인공 홍수가 필요함을 강조하였다.

Merritt와 Copper(2000)는 미국 콜로라도 주의 자연상태 하천 Yampa River와 조절되는 하천 Green River 두 하천을 직접 비교 평가하였다. Gordon과 Meentemeyer(2006)는 캘리포니아에서 댐에 의한 영향을 받는 하천과 참조하천을 각각 하나씩 선정하여 댐과 하류 토지이용에 따른 하천 형태와 식생면적 변화를 항공사진으로 비교, 관찰하였다. 그 결과 댐 건설 이후 강턱 폭(river bank width)은 94%나 줄고, 하도는 64%나 줄고, 식생면적은 72% 증가한 것으로 나타났다.

일본에서 Azami(2004)는 Ara 천에서 댐이 없는 하천과 인접한 지류에 댐이 있는 하천을 항공사진 등을 이용하여 비교하였다. 그 결과 댐이 있는 하천은 홍수가 줄어들어 식생이 확장되고 종이 다양해졌음이 확인되었다. 이 결과는 한국의 황강 댐 하류 하천 경우와 비슷한 것이다.

수목성장과 지하수위(토양습윤)

토양습윤은 식생 성장의 필수조건이다. 일반적으로 토양수분은 통상 지하수위와 관계가 있으며, 홍수터 및 사주에서 지하수위는 하천 수위와 연동되어 있다.

Amlin과 Rood(2002)는 서부 북미의 대표적인 하반림 수종인 포플러와 버드나무가 지하수위 저하에 견디는 정도를 조사하기 위해 각각의 묘목을 지하수위를 조절할 수 있는 곳에 이식하고, 수위 저하

를 0~12cm/일 정도로 하여 묘목의 생존율을 모니터링 하였다. 두 번째 연구에서 0~8cm/일 정도로 한 결과 1~2cm/일 정도의 저하는 수위를 전혀 저하시키지 않은 경우와 같게 뿌리가 길게 자라는 것으로 나타났으나, 2cm/일 이상의 감수는 묘목의 성장과 생존을 감소시키는 것으로 나타났다. 그 영향은 두 종 모두 비슷하나, 버드나무가 조금 더 민감한 것으로 나타났다. 그들은 늦은 봄 2.5cm/일 정도의 수위 감소는 포플라 묘목의 활착을 촉진하나, 버드나무의 경우 물가 가까운 저지대에서 1cm/일 감수가 바람직하다고 결론지었다.

다시 Amlin과 Rood(2003)는 캐나다 앨버타 주 Willow Creek에서 깊이 5m의 구덩이를 파고 지하수위를 2.5m로 낮추어 주변 포플라 생장에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 가뭄영향을 받는 구역에 자라는 나무는 8월 말 이미 노쇠현상과 낙엽이 생겼고, 영향을 받지 않는 구역의 나무는 9월 말에 정상적으로 낙엽이 생겼다. 이 실험으로 하천수위는 홍수터 지하수위에 바로 영향을 미치며, 수위 강하에 따른 포플라 생장의 취약성이 잘 확인되었다. 포플라는 그 다음 해 습기를 공급 받으면 바로 되살아나는 것으로 확인되었다.

Stave 등(2005)은 건조지역의 하반림 수목 생존

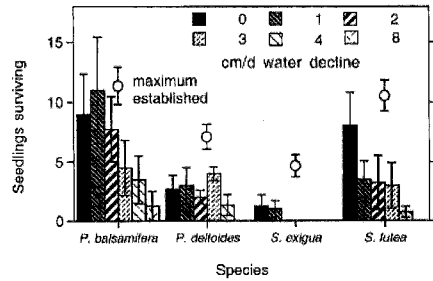


그림 3. 지하수위 감소율에 따른 수종별 묘목 생존율 (감수율: 0~8 cm/d; 수종: 좌측 두 종은 포플라, 우측 두 종은 버드나무 임) (Amlin과 Rood, 2002)

은 나무뿌리가 지하수위와 접촉할 수 있는가에 전적으로 달려있다는 점을 확인하였다. 그들은 수위 변화를 0, 5, 10cm/일 등으로 나누어 강수가 없는 경우를 상정하여 *Acacia tortilis*(아카시아)와 *Faidherbia albida*(아프리카/중동이 원산인 아카시아 속 식물) 두 종에 대해 실험한 결과 수위 감소는 아카시아 등 두 종 모두에 대해 뿌리 연장을 가져왔지만, 후자가 전자에 비해 'shoot' (경엽부) 성장이 크게 나타났다. 수위 감소율이 커지거나 강수가 없는 경우 후자보다는 아카시아가 가뭄에 더 견디는 것으로 나타났으며, 두 종 모두 이상적인 수위 감소율은 5cm/d 정도로 판단되었다. 🌿

참고문헌

1. Amlin, N. M. and Rood, S. B.(2002). "Comparative tolerances of riparian willows and cottonwoods to water table decline", *Wetlands*, 22(2).
2. Amlin, N. M. and Rood, S. B. (2003). "Drought stress and recovery of riparian cottonwoods due to water table alteration along Willow Creek, Alberta", *Trees*, 17. 351-358.
3. Azami, K. Suzuki, H., and Toki, S. (2004). "Changes in riparian vegetation communities below a large dam in a Monsoonal region: Futase Dam, Japan", *River Research and Applications*, 20: 549-563.
4. Burkham, D. E. (1972). Channel changes of the Gila River in Safford Valley, Arizona, 1846-1970: USGS Professional Paper 655-G, p. 24.
5. Choi, S.-U., Yoon, B. M., and Woo, H. (2005). "Effects of dam-induced flow regime change

- on downstream river morphology and vegetation cover in the Hwang River, Korea", *River Research and Application*, 21: 315-325.
6. Fenner, P. W. W. Brady, and Patton, D. R. (1985). "Effects of regulated water flows on regeneration of Fremont cottonwood", *J. of Range Management*, 38(2): 135-138.
 7. Gilvear, D. and Willby, N. (2006). "Channel dynamics and geomorphic variability as controls on gravel bar vegetation: River Tummel, Scotland", *River Research and Applications*, 22: 457-474
 8. Gordon, E. and Meentemeyer, R. K. (2006). "Effects of dam operation and land use on stream channel morphology and riparian vegetation", *Geomorphology*, 82: 412-429.
 9. Graf, W. L. (2006), "Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American Rivers, *Geomorphology*, 79(3): 336-360
 10. Hupp, C. R. and Osterkamp, W. R. (1996). "Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes", *Geomorphology*, 14: 277-295
 11. Johnson, W. C. (1994). "Woodland expansions in the Platte River, Nebraska: patterns and causes", *Ecological Monographs*, 64: 45-84
 12. Maekawa, M. and Nakagoshi, N. (1997). "Riparian landscape change over a period of 46 years, on the Azusa River in Central Japan", *Landscape and Urban Planning*, 37: 37-43.
 13. Meier, C. and Hauer, F. R. (2007). "Cottonwood seedling establishment in a wandering gravel-bar bed", *Proceedings of the 6th International Symposium on Ecohydraulics*, Christchurch, New Zealand.
 14. Merritt, D. M. and Cooper, D. (2000). "Riparian vegetation and channel change in response to river regulation: A comparative study of regulated and unregulated streams in the Green River Basin", *Regulated Rivers: Research and Management*, 16: 543-564.
 15. Nakamura, F. (1999). "Influence of dam structures on dynamics of riparian forests", *Ecology and Civil Engineering*, 2(2): 125-139 (in Japanese)
 16. Nilsson, C., Ekblad, A., Gardgjell, M., and Carlberg, B. (1999). "Long term effects of river regulation on river margin vegetation", *J. of Applied Ecology*, 28: 963-987.
 17. Okabe, T., Anase, Y., and Kamada, M. (2001). "Relationship between willow community establishment and hydrogeomorphic process in a reach of alternate bars", *Proceedings of the IAHR*, Beijing, China.
 18. Polzin, M. L. and Rood, S. B. (2000). "Effects of damming and flow stabilization on riparian processes and black cottonwoods along the Kootenay River", *Rivers*, 7(3): 221-232.
 19. Polzin, M. L. and Rood, S. B. (2006). "Effective disturbance: seedling safe sites and patch recruitment of riparian cottonwood after a major flood of a mountain river", *Wetlands*, 26(4).
 20. Prowse, T. D., Conly, F. M., Church, M. and English, M. C. (2002). "A review of hydroecological results of the northern river basins study, Canada, Part 1. Peace and Slave Rivers", *River Research and Applications*, 18(5): 429-446.
 21. Rood, S. B. and Mahoney, J. M. (1990). "Collapse of riparian poplar forests downstream from dams in Western Prairies: Probable causes and prospects for mitigation", *Environmental Management*, 14(4): 451-464.

22. Rood, S. B., Kalischuk, A. R., and Mahoney, J. M. (1998). "Initial cottonwood seedling recruitment following the flood of the century of the Oldman River, Alberta, Canada", *Wetlands*, 18(4).
23. Scott, M. L., Friedman, J. M., Auble, G. T. (1996). "Fluvial process and the establishment of bottomland trees", *Geomorphology*, 14: 327-339
24. Schumm, S. A. and Lichty, R. W. (1963). "Channel widening and floodplain construction along Cimarron River in southwestern Kansas: USGS Professional Paper 352-D, pp. 71-88.
25. Stave, J., Oba, G., and Eriksen, A. B. (20005). "Seedling growth of *Acacia tortilis* and *Faidherbia albida* in response to simulated groundwater table", *Forest Ecology and Management*, 212(1-3).
26. Turner, R. M. (1974). Quantitative and historical evidence of vegetation changes along the upper Gila River, Arizona: USGS Professional Paper 655-H, p. 20.
27. Williams, G. P and Wolman, M. G. (1984). Downstream effects of dams on alluvial channels, USGS Professional Paper 1286, Department of the Interior, USA.
28. 박봉진, 장창래, 이삼희, 정관수 (2008). "댐 하류하천의 사주와 식생 면적 변화에 관한 연구", *한국수자원학회 논문집*, 41(12): 1163-1172.
29. 우효섭 (2008), "화이트리버, 그린리버?", *한국수자원학회지 기술기사*, 12월호.
30. Kamada, M., Kojima, M., Yoshida, R, Asai, K, and Okabe, T. (2002). "댐 하류에 있어서 하상 변화가 사력퇴상의 식물군락의 분포에 미치는 영향", *應用生態工學*, 5(1): 103-114. (in Japanese)