댐 하류 충적하천에서 식생이입 및 천이 - 낙동강 안동/임하 댐 하류하천을 중심으로 -

Recruitment and Succession of Riparian Vegetation in Alluvial River Regulated by Upstream Dams

- Focused on the Nakdong River Downstream Andong and Imha Dams -

우 호 섭* / 박 문 형** / 조 강 현*** / 조 형 진**** / 정 상 준*****

Woo, Hyoseop / Park, Moonhyung / Cho, Kang-Hyun / Cho, Hyungjin / Chung, Sangjoon

Abstract

Changes of geomorphology in alluvial river and vegetation recruitment on its floodplain downstream from dams are investigated both qualitatively and quantitatively focusing on the downstream of Andong dam and Imha dam on the Nakdong River. Results of the analyses of river morphology and bed material in the study site show a general trend of riverbed degradation with a max scour of 3 m and bed material coarsening from pre-dam value of 1.5 mm in D50 to post-dam value of 2.5 mm. Decrease in bed shear stress due to the decrease in flood discharge have caused vegetation recruitment on the once-naked sandbars. As result, the ratio of area of vegetated bars over total area of bars has drastically changed from only 7% in 1971 before the Andong dam (constructed in 1976) to 25% after it, and increased to 43% only three year after the Imha dam (constructed in 1992) and eventually to 74% by 2005. Analysis of the vegetation succession at Wicjeol subreach, one of the three subreaches selected in this study for detailed investigation, has clearly shown a succession of vegetation on once-naked sand bars to a pioneering stage, reed and grass stage, willow shrub and eventually to willow tree stages. At the second subreach selected, two large point bars in front of Hahoe Village seem to have maintained their sand surfaces without a significant vegetation recruitment until 2005. The sand bars, however, seem to have been invaded by vegetation recently, which warns river managers to have a countermeasure to protect the sand bars from vegetation invasion in order to conserve them for the historical village of Hahoe. On the other hand, recruitment and establishment of vegetation on the sand bars by artificial disturbance of the river, such as damming, can create a unique habitat of backmarsh in the sandy river, as shown in the case of Gudam Wetland, and may increase the biodiversity as compared with relatively monotonous sand bars. Last, the premise in this study that decrease in flood discharge due to upstream dams and decrease in bed shear stress can induce vegetation recruitment on the naked sand bars in the river has been verified with the analyses of the distribution of dimensionless bed shear stress along the selected cross section in each subreach.

Keywords : alluvial river, dam, vegetation recruitment, riverbed degradation, riverbed shear stress

* 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 하천해안항만연구실 선임연구위원

Senior Research Fellow, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Korea (e-mail: hswoo@kict.re.kr)

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 하천해안항만연구실 연구원

Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do 411-712, Korea (e-mail: moon@kict.re.kr)

*** 인하대학교 자연과학대학 생명과학과 교수

Professor, Dept. of Biological Sciences, University of Inha, Incheon, Korea (e-mail: khcho@inha.ac.kr)

**** 인하대학교 대학원 생명과학과 박사과정

Graduated student, Dept. of Biological Sciences, University of Inha, Incheon, Korea (e-mail: popoin@hanmail.net)

***** 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 하천해안항만연구실 연구원

Researcher, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do, Korea (e-mail: jsj@kict.re.kr)

요 지

낙동강 상류에 위치한 안동, 임하 댐 하류 하천에서 두 댐에 의한 충적하천의 변화와 식생이입 현상을 정성적, 정량적으로 조사, 분석하였다. 하천형태 및 하상재료 분석 결과, 댐 하류는 전반적으로 저하되었고 일부 구간은 최대 3m 이상 세굴 되었다. 하상재료도 전반적으로 임하댐 건설 전 평균 1.5mm에서 건설 후 2.5mm로 조립화되었다. 댐 건설로 인한 하상소류력의 감소는 사주에 식생 활착을 촉진시켰으며, 그 결과 사주의 식생이입률은 1971년 자연 상태에서 8% 수준에서 안동댐 건설 후 1988년에 25%로 증가하였다. 임하댐이 완공된 1992년 이후 사주 상 식생이입은 가속화되어 겨우 3년이 지난 1995년에 사주 식생이입률은 43%가 되고, 그 후 10년이 지난 2005년에는 74%까지 증가하였다. 세부조사구간 중 하나인 윗절에서 항공사진에 의한 식생천이 현상을 분석한 결과 모래와 자갈이 노출된 ‘땀’ 사주에서 시작하여 큰개여뀌, 달뿌리풀, 버드나무류 유식물 등 개척 단계를 지나, 일부 달뿌리풀은 유지되고 버드나무 관목이 등장하고 나중에는 선버들이나 왕버들 같은 교목림으로 정착되는 것으로 나타났다. 하회마을 앞과 강 건너 점 사주의 경우 타 논문에서 제시된 여건 등으로 2005년 항공사진에서 식생이입은 억제되는 것으로 보였지만, 2009년에 촬영한 사진에 상당 부분 확대되는 것으로 나타나 이에 대한 대책이 필요하다. 사주 상 식생이입의 가속화는 구담습지 등 자연 상태의 모래하천에서 찾아보기 어려운 독특한 배후습지를 창출하여 환경적으로 종의 다양성이 커져서 서식처로서 가치 자체는 높아질 수 있다. 마지막으로, 댐에 의한 홍수량 감소와 그에 따른 하상소류력 감소가 사주 상 식생이입 및 활착을 가속화시켰다는 가설은 대표 단면에서 무차원 하상전단응력의 검토 결과 확인되었다.

핵심용어 : 충적하천, 댐, 식생이입, 식생천이, 하상저하, 하상소류력

1. 서 론

충적하천에서 흐름은 유사이송을 통해 경계를 이루는 주변 지형을 변화시키며, 변화된 하천지형은 다시 경계마찰을 통해 흐름을 변화시킨다. 이러한 흐름-유사의 상호작용에 덧붙여 하천에 자생하는 식생은 흐름과 유사 이송 모두에 영향을 주며, 식생 성장 또한 흐름과 유사, 지형과 같은 물리적 서식기반에 의해 영향을 받는다(우효섭, 2002a). 따라서 인위적, 자연적 하천교란에 의해 무생물적 요소인 흐름, 유사, 지형이 영향을 받으면 그에 따라 식생도 영향을 받게 된다.

한반도는 아시아 몬순기후의 영향을 받아 여름철에 홍수가 나고 그 밖의 계절에는 상대적으로 유량이 적다. 이러한 하천유량의 계절적 변화를 나타내는 척도로 이른바 유황계수(regime coefficient)라는 일 최대유량과 최소유량의 비가 사용된다. 한반도 하천의 유황계수는 댐에 의해 유황이 인위적으로 변화되기 전에는 대부분의 하천에서 수백 이상(이진원과 우효섭, 1993)이 되어 홍수 시에 충적하천 전체를 가득 채우지만 그 밖의 계절에는 좁고 얇은 하도를 겨우 채울 뿐이다. 그에 따라 평상시 노출되는 사주와 홍수터는 보통 모래, 자갈 등 충적토로 덮여 있어 이른바 “white river(흰색 하천)”가 된다(우효섭, 2008).

국내에는 1960년대부터 급속한 산업화, 도시화를 겪으면서 댐 건설, 골재채취, 하천 개수 등으로 흐름, 유사, 지형,

식생 간 상호작용을 촉진시켜 그에 따라 수문지형적 과정의 변화가 촉진되었다. 특히 댐 건설로 하류 충적하천은 상류에서 신선한 유사가 더 이상 공급되지 않게 되고, 홍수를 조절함에 따라 하천 흐름은 과거 한계소류력 이상에서 하상을 쓸고 내려가는 힘이 줄게 되었다. 그 결과 나타나는 현상이 이른바 “green river(녹색하천)”(우효섭, 2008)으로서 전국적으로 크고 작은 댐이 있는 하천 하류의 일정구간은 이 같은 하천에 식생이 이입되어 활착하게 되었다. 현재 대부분의 댐과 보 하류 하천은 갈대/달뿌리풀과 같은 초본류나 버드나무와 같은 목본류 식생으로 덮여 있다. 식생이 가득한 하천은 서식하는 생물종의 고유성은 물론 다양성에도 영향을 준다. 나아가 흐름저항과 하도의 고정화를 촉진시켜 홍수 위험을 가중시킨다.

사주와 홍수터에서 식생확장에 관한 연구 문헌조사 결과는 우효섭(2009a)에 구체적으로 나와 있다. 문헌에 보이는 이 분야 초기 연구는 1984년 USGS 연구(Williams and Wolman, 1984)로서, 그들은 댐 건설 후 식생으로 덮인 10개 하천을 조사한 결과 식생이입의 주요 요인은 하상소류력의 감소이며, 이입된 식생은 하도의 통수능을 감소시키는 것으로 보고하였다. 이후 미국과 캐나다에서 댐에 의해 변화된 유황과 유사이송이 하천에 자생하는 식생(주로 북미산 포플러)에 미치는 부정적 영향을 조사하였으며, 홍수터에서 식생이입을 모의하는 반경험적 모형을 제시하였다(Rood and Mahoney, 1990; Mahoney and Rood, 1998).

일본에서도 1990년대 중후반 이후 댐이 하류하천 식생 이입에 미치는 영향(Nakamura, 1999; Kamada et al., 2002)부터 시작하여 원래의 자갈하천으로 복원하기 위한 식생의 물리적 제거방안(Maenor and Watanabe, 2008) 등 다양한 연구가 진행되었다.

국내에서는 Choi et al. (2005)은 황강댐 건설 전후의 하류하천 비교 조사에서 댐에 의한 홍수량 감소와 그에 따른 하상소류력 감소, 그리고 그에 따른 하천 사주 및 홍수터에 식생 활착 상황을 정량적으로 분석하였다. Woo et al. (2004)은 안동/임하 댐 하류하천의 식생이입을 보고하면서 특히 하류 하회마을 강 건너 대형 점사주 상 식생이입 가능성에 대해 검토하였다. 이 사주는 식생이 이입되지 않고 그대로 보존시키는 것이 하회마을의 역사성 및 문화성에 필요하다. 그 결과, 주변 사주 표고가 평상시 하천수위보다 매우 높아 토양습윤 상황이 식생 발아 및 성장에 불리하고, 특히 홍수시 사주의 하상소류력이 커져서 식생이입이 물리적으로 가능하지 않은 것으로 보고하였다. 박봉진 등 (2008)은 항공사진을 이용하여 안동, 임하, 합천댐 등 21개 댐을 대상으로 댐 하류하천의 사주와 식생의 면적 변화, 변화지수, 변화정도와 경년변화 등을 조사하였다. 그 결과 안동댐 하류의 경우 내성천 합류점까지 약 65km 구간에서 '땀' 사주 면적은 78% 감소하였고, 식생사주 면적은 무려 630% 증가한 것으로 나타났다. 나중에 본 논문에서 제시되지만 임하댐이 건설되기 전에는 안동댐 하류 하천은 실질적인 변화가 없었기 때문에 안동댐 하류 하천의 식생이입은 상당부분 임하댐 건설에 따른 것이다.

본 연구의 목적은 다양한 인위적 교란 요인별 식생이입 및 활착 과정(우효섭 등, 2009b) 중에서 특히 댐에 의한 영향을 낙동강 안동, 임하 댐 하류 하천에 초점을 맞추어 정성적, 정량적으로 분석하여 충적하천에서 홍수의 감소

와 그에 따른 하상소류력의 감소는 식생이입을 촉진한다는 가설을 본 연구에서 확인하는 것이다.

이를 위해 댐 건설 전후의 유황변화를 안동댐 이전, 안동댐 이후 및 임하댐 이전, 임하댐 이후 등 세 기간으로 나누어 분석하고, 각 기간별 거리에 따른 하상고와 중앙입경 변화를 비교 분석하고, 식생활착 상황을 분석하기 위해 댐 건설 전후의 항공사진을 비교하였다. 다음 식생이입의 원인을 확인하기 위해 한계 하상소류력 변화를 분석한다. 마지막으로 조사구간 내 세 소 구간에 대해 항공사진 비교 및 식생천이 상황을 분석하였다.

2. 안동/임하댐에 의한 하류하천의 지형, 식생 변화

2.1 안동/임하댐 하류 하천

본 연구에서 조사구간은 낙동강 본류와 반변천이 만나는 안동시 합류점부터 시작하여 하류 하회마을 지나 구담습지 하류의 구담교까지 35km이다 (Fig. 1). 낙동강은 한반도의 대표적인 모래하천으로서 조사구간의 하상도 과거에는 대부분 모래로 구성되어 있었다. 조사구간 본류의 상류에 위치한 안동댐은 1975년 말에 담수를 시작하여 그 이후부터 여수로 시험 방류 몇 회를 제외하고는 홍수를 100% 차단하였다 (본 댐 하류에 있는 조정지대에서 평균 방류량은 $32.6 \text{ m}^3/\text{s}$).

반변천 임하댐의 경우 1991년 12월에 담수를 완료하였으므로 사실상 1991년 초부터 하천유황을 변화시켰다. 다만 이 댐의 저수량 (5.95 억 m^3)은 댐유역 연평균 유입량 (7.22 억 m^3)에 비해 상대적으로 적어서 준공 이후 큰 홍수 때마다 여수로 방류를 연 평균 0.7회 하였으므로 반변천 홍수가 100% 소멸된 것은 아니다. 본 댐 하류의 조정지대 일평균 방류량은 $21.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다.

Fig. 1. Map of Study Reach

2.2 댐에 의한 하천유량 변화

조사구간 상류 두 댐에 의한 하류 하천의 유량 변화를 분석하기 위해 안동댐 조정지댐 방류량, 임하댐 조정지댐 방류량 및 조사구간 내 주요 수위표인 안동수위표 자료를 이용하였다. 여기서 1975년 안동댐 준공 이후 유량 자료는 자료의 신뢰성을 고려하여 두 조정지댐 방류량 자료를 이용하였다. 그에 따라 1974년 이전 하천유량 자료는 안동 수위표 자료를 기준으로 하되, 1975년 이후 두 댐 방류량 자료와 같은 기간의 수위표 유량 자료를 이용하여 보정하였다.

Fig. 2는 댐 건설 전후 일유량의 평균 및 표준편차를 보여준다. 이 그림에서 보는 바와 같이 댐 건설 전후 일평균 유량은 큰 차이를 보이지 않으나 표준편차는 안동댐과 임하댐 건설 후 각각 약 40%와 15% 정도 감소한 것으로 나타났다. 이는 그 만큼 댐 조절에 의해 홍수시 유량은 줄어들고 저수시 유량은 늘어났기 때문이다. Fig. 3은 댐에

Fig. 2. Variations of Average Daily Flow and Standard Deviation

의한 하천 유황변화를 잘 보여주고 있다.

2.3 댐에 의한 하상고 및 하상재료 변화

충적하천에 만들어진 댐은 유황만 변화시키는 것이 아니라 유사 이송도 변화시킨다. 그 결과 대표적으로 나타나는 현상이 댐 하류 하천의 하상저하 (degradation)와 하상재료의 조립화 (coarsening) 현상이다.

Fig. 4는 임하댐 조정지댐부터 구담교까지 최심선 변화를 댐 건설 전후로 비교한 것으로, 원 자료 (장창래, 2008)에서 신뢰도가 의심스런 1983년 자료는 제외하였다. 이 그림에서 1993년은 임하댐 준공 이후이므로 유출이 대부분 차단되었기 때문에 인위적인 골재채취나 하상정비가 없는 경우 하상저하 현상이 나타났을 것으로 추론된다. 이 같은 댐 하류의 하상저하 현상은 이미 국내 여러 곳에서 확인되었다 (유권규와 우효섭, 1993; Choi et al., 2005).

Fig. 3. Variation of Flow Duration Curves

Fig. 4 Changes in Thalweg Elevation in Study Reach

Fig. 5. Changes in Bed Material in Study Reach (Median Diameter)

이러한 추론은 Fig. 4에서 확인된다. 1993년의 하상고를 10년이 지난 2003년의 하상고와 비교하면 기준점 상류 19, 23 km 두 구간을 제외하고는 임하댐 조정지대부터 기준점 상류 12 km 지점까지 하상이 저하되었다가 그 이후부터는 하상이 상승한다. 다만 2000년 이후 합류점 직하류 안동시 구간에서 대규모 하도정비사업으로 하상이 인위적으로 변화된 점을 고려하여야 할 것이다. 더욱이 Fig. 4는 단순히 최심선을 비교한 것으로서 사주 상 골재채취 등 인위적인 하상 변화를 감안하면 전체적인 경향을 확인하는 수준이며, Fig. 4를 이용하여 지점별로 침식과 퇴적 상황을 검토하기에는 한계가 있다.

조사구간에서 하상재료 분포 변화는 Fig. 5와 같다(장창래, 2008). 이 그림에서 광덕교와 미천 합류점 사이의 1983년 자료(입경 20 mm)는 신빙성이 떨어지므로 검토에서 제외시킬 수 있다(조사구간 내 조정지대 직하류 일부 장갑화 구간 이외는 대부분 모래하상임). 이 그림에서 확인할 수 있는 것은 안동, 임하 댐 이후 낙동강 본류 하상재료는 임하댐 건설 전 평균 1.5 mm 수준에서 건설 후 2.5 mm 수준으로 전반적으로 조립화되었으며, 이 현상 또한 충적하천에서 댐에 의해 나타나는 일반적인 현상이다. Fig. 5 역시 한 단면에서 채취한 하상재료의 대표성 문제가 있으므로 전체적인 경향을 확인하는 수준이며, Fig. 5를 이용하여 지점별 하상재료의 변화를 검토하기에는 한계가 있다.

2.4 댐에 의한 하류 하천 식생이입

안동/임하 댐 건설로 인한 낙동강 상류 하천 변화에서 잘 나타나는 현상 중 하나는 사주에 식생이입 및 확장 이

다. 이는 Fig. 6과 같은 일련의 항공사진 비교에서 잘 나타난다. 여기서 회색 보이는 것은 사주이며, 회색으로 나타나는 것은 사주 상 식생이다(물은 검게 나타남). 안동댐 건설 전인 1971년 사진에는 장차 댐 건설지 상하류 모두 저수로 부분을 제외한 모든 하천의 사주가 그대로 노출되어 있음을 볼 수 있다. 안동 댐 건설 후(1976년) 12년 지난 1988년 촬영한 항공사진을 1971년 사진과 비교하면 본류/반변천 합류점 직 하류와 그 밖에 하류 하천 일부에 식생이 이입되었지만 전체적으로 큰 차이는 없는 것으로 보인다. 그러다 반변천에 임하댐이 건설되고(1992년) 3년이 지난 1995년 항공사진을 그 전 사진과 비교하면 사주에 식생이입이 확대되어 조사구간 전체에 걸쳐 식생이 활착한 것으로 보인다. 그 이유는 임하댐 건설 전만 해도 본류의 홍수는 완전히 조절되었으나, 반변천에서 내려오는 홍수로 하천 사주에 식생활착 조건이 충분하지 않았지만 임하댐 건설 후 두 하천에서 사실상 홍수가 소멸되어 거의 모든 하천 사주에 식생이 활착한 것으로 보인다. 구체적으로 합류점에서 연평균 최대유량(홍수량)은 안동댐 건설 전 1,390 m³/s에서 건설 후 970 m³/s로 줄었고, 다시 임하댐 건설 후 470 m³/s로 급속히 줄었다.

위와 같은 결과를 ‘댐’ 사주와 식생 사주의 면적 변화로 비교하면 Table 1과 같다. 조사구간 내 사주의 식생이입률(식생사주 면적/전체사주 면적)의 변화를 보면 1971년 자연 상태에서 8% 수준이었다가 안동댐이 담수를 시작한 1975년 이후 서서히 증가하여 1988년에 25%로 증가하였다. 즉 전체 사주의 1/4 면적에 식생이 이입된 것이다. 그러나 1988년 항공사진을 보면 여전히(하얀색) 사주가 지배적으로 보인다. 안동댐에 의해 낙동강 본류에서 일어나

는 홍수는 사라졌지만 여전히 반변천과 그 밖의 지류에서 유입하는 홍수는 사주 상 식생이입을 억제한 것으로 추정된다. 그러나 임하댐이 완공된 1992년 이후 사주 상 식생이입은 가속화되어 겨우 3년이 지난 1995년에 사주 식생이입률이 43%가 되고, 그 후 10년이 지난 2005년에는 74%까지 증가하였다. 사주 상 식생이입은 근본적으로 하상소류력과 사주 토양습윤 변화에 지배를 받으며, 이 두 인자는 사주의 지형적, 수리적 특성에 의존한다 (Woo et al., 2004).

3. 식생천이 및 수리 검토

3.1 식생천이 분석

본 연구조사 구간에서 몇 소구간을 정해 세부적인 식생이입, 활착, 천이 현상을 분석하였다. 이를 위해 Fig. 7과 같이 윗절, 병산서원/하회마을, 광덕교 등 세 구간을 정하였다.

Fig. 6. Aerial Photos of Study Reach for Vegetation Recruitment on Sand Bars

Table 1. Changes in Vegetated Bar Areas (unit: km²)

Year	Area of Sand Bar (A)	Vegetated Area (B)	Vegetated Area (B) / Total Area (A+B) (%)	Increasing Rate of Vegetated Area (%)	Remarks
1971	4.38	0.39	8	-	
1988	3.55	1.15	25	195	
1995	2.69	2.01	43	75	
2005	1.22	3.48	74	73

Fig. 7. Three Sub-Reaches at Study Reach

3.1.1 윗절 구간

Fig. 8은 윗절 구간의 항공사진을 경년 비교한 것이다. 여기서 1979년 항공사진도 가용하지만 1971년과 비교하여 큰 차이가 없어 제외하였다. 이는 1975년 말에 담수가 완료된 안동댐은 하류 하천 식생이입에 거의 영향을 주지 못하였다는 반증이다. 1971년과 1988년 사진을 비교하면 우안 사주가 일부 개간된 것과 저수위가 변경된 것 이외에는 1988년 사진에 사주 식생이 사실상 안 보인다. 이는 안동댐 하나만으로 하류 하천에 식생이입의 호조건을 제공하지 못한다는 것을 보여준다. 그러나 1995년이 되면 저수로는 다지하천이 되면서 하중도와 사주에 초기 식생이 정착한 것으로 보인다. 그로부터 10년이 지난 2005년에는 식생 활착이 진전되고 식생종이 달라진 것으로 보인다. 이 점은 식생분포 변화에서 구체적으로 다룰 것이다. 윗절 항공사진 비교에서 다시 확인되는 점은 임하댐 건설(1992년)로 하류 하천의 홍수는 대폭 줄어들어 사주 상 식생 활착이 가속화된 것이다.

Fig. 9는 항공사진을 토대로 식생분포를 추정한 것이다. 추정 방법은 Azami et al. (2004) 방법에 기초한 것으

로서 먼저 항공사진을 정사 보정하고, 주요 식생의 좌표(위치)를 확인하고, 현장 조사(수목 위치, 나이테 조사 및 초본류 식생 위치 파악)를 통해 수목 정착년도를 추정하고, 가장 최근 항공사진(2005)에서 식생 종류를 역 추정하고, 마지막으로 1995년부터 항공사진을 오버랩 하여 식생 종류를 추정한다. 현 식생도에서 찾아 볼 수 없는 1971년의 경우 내성천 형호교 통과구간(1970년대에서 부터 변화가 없는 곳)에서 식생 종을 추정한다. 이 분포도에서 보는 바와 같이 조사대상 구간 우안에 홍수터가 끝나고 산지(upland)가 시작되는 부분에 자연 식생이 있었으나 1988년에는 그 부분이 도로가 생기고 홍수터가 개발되어 농경지가 되었다. 그 결과 1988년에 자연식생은 농경지가 끝나는 부분에 일부 패치 형태로 생겼다. 1995년에는 상당 부분에 갈대가 활착한 것으로 나타났으며, 이는 임하댐에 의한 영향으로 추정된다. 2008년에는 달뿌리풀 군락이 버드나무 관목과 교목 군락으로 천이된 것으로 나타났다. 이러한 천이과정을 도식적으로 나타내면 Fig. 10과 같다. 이 모식도에서 알 수 있는 것은 맨 사주에서 식생이 정착하는 시작 단계를 지나면 초본류와 버드나무류는 경쟁관계에 있게 되고, 버드나무류는 다시 관목을 지나 교

(a) 1971

(b) 1988

(c) 1995

(d) 2005

Fig. 8. Aerial Photos of Wicjeol Subreach

Fig. 9. Vegetation Recruitments at Wicjeol Subreach

Fig. 10. Vegetation Succession Model in Sand River

목류로 변화한다는 것이다. 이러한 ‘진행’ 과정과 달리 기록적인 홍수 등 자연적, 인위적 환경변화로 식생 사주/홍수터는 다시 ‘멘 사주’로 ‘퇴행’될 수 있다는 것이다.

3.1.2 병산서원/하회마을 구간

이 구간은 조사구간의 중하류에 위치한 곳으로 Fig. 11과 같이 댐 준공 이후 일부 식생이 활착한 것을 보여주고 있으나, 전체적으로 식생이입은 다른 구간에 비해 적다. 특히 하회마을 앞 점사주(A)와 대안의 점사주(B)는 아주 일부를 제외하고는 식생이입이 완만하게 나타난다. 그 이유에 대해서는 다른 논문에서 이미 지적되었다(Woo et al., 2004). 병산서원 앞 사주(C)도 마찬가지이다. 다만 그

직상류(D) 구간에는 유로가 바뀌면서 식생이 이입되었다. Fig. 12는 D 지점의 식생 사진이다. 이 그림의 좌측에 보이는 버드나무는 수령이 최고 16년으로서 1992년 임하댐 준공년 이후 2009년까지 경과년도와 사실상 일치한다.

여기서 하천관리 측면에서 관심 중 하나는 하회마을 앞 사주(A)와 강 건너 사주(B)의 보전 문제이다. 이 두 사주는 하회마을의 하천문화를 대표하는 것으로서 사주 상태를 그대로 유지하는 것이 중요하다. 그런데 Fig. 11을 보면 두 사주는 2005년 항공사진에서와 같이 그 정도는 상대적으로 약하지만 상류 두 댐 건설로 인한 식생이입 영향을 점차적으로 받고 있다. 최근에 촬영한 Fig. 13과 2005년 항공사진을 비교하면 두 사주에 점차적으로 식생

Fig. 11. Aerial Photos of Byeongsanseowon and Hahoe Village Subreach

Fig. 12. Willows at Right Upstream of Byeongsanseowoon (16-year old willows)

Fig. 13. A Ground Photo of Hahoe Village (taken by Won Kim, KICT in October, 2009)

이 이입되고 있는 것을 확인할 수 있다. 두 사주에 식생이 입을 저감하거나 차단할 수 있는 대책을 제시하는 것은 실무적으로 중요하다.

3.1.3 광덕교 하류 구간

이 구간은 조사구간의 하류에 위치한 곳으로 댐 준공 이후 거의 모든 사주에 식생이 활착하였다. Fig. 14는 이 구간의 경년변화를 항공사진으로 보여준 것으로, 이 구간의 하류는 구담습지이다 (Fig. 15). Fig. 16은 이 광덕교 하류방향으로 촬영한 사진이다.

광덕교 하류 구간은 안동댐 준공 12년 후인 1988년에

유로가 변경되고 식생이 일부 이입한 것 이외에는 큰 변화가 없어 보인다. 다만 우안은 이미 식생이 이입되면서 구담습지가 형성되기 시작하였다. 임하댐이 준공되고 3년이 겨우 지난 1995년 사진에는 사주에 식생이입이 본격화되었으며, 광덕교 하류 우안 사주에만 식생이입이 지체되었다. 그러나 10년이 지난 2005년에는 이 부분을 포함하여 거의 전 사주에 식생이 이입되었다. 구담교 상류 우안에 위치한 구담습지는 상류 댐의 영향을 받아 새로이 형성된 하천 내 배후습지이다. 이렇게 사주 상 식생이입으로 하천 내 습지가 형성되면 환경적으로 종의 다양성이 높아져 서식처 가치 자체는 높아질 수 있으며, 황강에서

Fig. 14. Aerial Photos of Kwangdeok-gyo Subreach

Fig. 15. Gudam Wetland (provided by Korea Wetland Project)

Fig. 16. A Downstream View of Kwangdeok-gyo

비슷한 사례가 이미 보고되었다(우효섭 등, 2002b).

3.2 대표유량에 대한 무차원 하상소류력의 변화

사주는 홍수시 하상소류력이 증가하면 불안정하게 되고 급기야는 소류사 형태로 이동한다. 사주 상 유사가 이동하게 되면 봄철 바람에 의해 날아온 식생이 발아하여 유목(seedling)으로 자라도 여름 철 홍수 시 하상 교란에 의해 쉽게 씻겨 내려가거나 퇴적토에 의해 매몰되어 성장이 불가능해진다(Williams and Wolman, 1984). 낙동강 상류 하천은 댐 건설 전 매년 반복되는 홍수로 식생이입과 활착의 기회가 없어 식생(초본류로는 주로 달뿌리풀, 목본류로는 주로 버드나무 등)이 자라지 못하고 유사입자가 그대로 노출된 사주를 형성하였다. 이러한 현상은 물론 기후의 영향을 받아 여름철 홍수가 빈번한 한반도의 하천에서는 일반적이다(화이트 리버). 그러나 상류 댐 건설로 여름 철 홍수가 줄어들거나 아예 없어져 하상소류력은 급속히 줄어들어 사주에 식생이입, 활착의 기회가 높아지게 된다.

본 연구에서는 위와 같은 사주 식생 활착의 제한요소인 하상소류력의 경년 변화를 분석한다. 이를 위해 안동댐 담수 이전(1961~1975), 중간(1976~1990), 임하댐 담수 이후(1991~2008) 등 3기간으로 나누어 낙동강 본류와 반변천이 합류하는 지점에서 연평균 최대홍수량을 계산하여 무차원 하상전단응력의 공간 분포를 검토한다. 중간에 유입하는 지류 유량은 본 검토에서 무시하였다.

무차원 하상전단응력 τ_* 는 다음과 같이 표시된다.

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) D_s} \quad (1)$$

위 식에서 τ_0 는 하상 전단응력이며 본 연구에서는 $\gamma d S_e$ (γ =물의 단위중량, d =수심, S_e =에너지 경사)로 계산하였다. γ_s 는 사립자의 단위중량이며, D_s 는 사립자의 평균입경이다. Shields 한계조건에 의하면 일반적으로 무차원 하상전단응력이 0.06 이상인 경우 소류사 이동이 시작되며 따라서 본 연구에서도 기존 연구(Benjankar et al., 2007)에서 채택한 대로 무차원 하상전단응력이 0.06을

Fig. 17. Variations of Dimensionless Bed Shear Stress and Water Level at a Cross Section of Wicjeol Subreach

넘는 경우 소류사가 이송됨에 따라 식생활착이 억제되는 것으로 상정하였다.

자연하천 단면은 하상고가 불규칙하므로 1차원 흐름 모형으로 전 조사구간을 대상으로 무차원 하상전단응력을 검토하기 위해서는 모든 하천단면 하나하나에 대해 하여야 하지만, 본 연구에서는 위에서 제시한 3개의 세부검토구간에서 대표 단면 하나씩 선정하여 검토하였다. 흐름 모형은 미 공병단의 1차원 모형인 HECRAS를 이용하였으며, 유량 자료로는 합류점에서 각 기간별 연 최대홍수량을 평균한 값으로서 안동댐 건설 전은 $1,390 \text{ m}^3/\text{s}$, 안동댐 건설 후 임하댐 건설 전은 $970 \text{ m}^3/\text{s}$, 임하댐 건설 후는 $470 \text{ m}^3/\text{s}$ 값을 이용하였다. 단면 자료는 과거 자료를 얻기 어려워 현재 상태를 기준으로 하였으며, 하상재료도 지점별 과거 자료를 구하기 어려워 현 자료를 이용하였으며 (윗절 2.10 mm, 병산서원 0.86 mm, 구담습지 1.63 mm), 한 단면에 대해서 균일하다고 가정하였다. 이러한 이용 자료 상 한계 문제는 추후 몇 개 구간에 대해 집중적인 분석을 하기 위해서는 극복되어야 할 것이다.

식을 하기 위해서는 극복되어야 할 것이다.

Fig. 17은 윗절 구간인 Fig. 8 (2005년)에 표시된 한 단면에서 무차원 하상전단응력 분포와 수위 분포를 보여준다. 이 그림에서와 같이 단면 우안은 임하댐 건설 전까지는 무차원 하상전단응력이 0.06을 넘으나, 임하댐 건설 후부터는 0.02 정도로 급속히 내려가고 홍수위도 사주를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 상황은 식생이입 및 활착에 유리하게 작용하였을 것으로 추정되며, Fig. 9 (2005년)에서도 확인된다. 마찬가지로 단면 중간의 무차원 하상전단응력이 0.1 이상 되는 부분은 지금도 ‘댄’ 사주로 그대로 남는 것을 볼 수 있으며, 다시 좌안 쪽으로 임하댐 이후 0.06 이하가 되어 식생이 이입된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 18은 병산서원 직하류의 한 단면에서 위와 같은 방법으로 검토한 결과이다. 이 하천 단면에서도 전체의 1/3 정도의 우안은 임하댐 건설 후 무차원 하상전단응력이 0.06 이하로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 임하댐 건설 전의 경우 무차원 하상전단응력은 0.5 정도가 되어

Fig. 18. Variations of Dimensionless Bed Shear Stress and Water Level at a Cross Section of Byeongsanseowon Subreach

Fig. 19. Variations of Dimensionless Ved Shear Stress and Water Level at a Cross Section of Gudam Wetland

안동댐이 건설된 이후에도 사주에 식생이 활착하기에 불리한 조건을 보여주며, 이 결과는 Fig. 11 (1988년)에서 확인된다.

Fig. 19는 구담습지의 한 하천단면에서 위와 같은 방법으로 검토한 결과이다. 이 하천 단면에서 전체의 반 이상의 우안은 임하댐 건설 이후 무차원 하상전단응력이 0.06 위 아래로 요동치는 것으로 나타났으며, 이는 Fig. 14 (2005년)에서 켄강과 식생이 변갈아 나타나는 것과 사실상 일치한다.

4. 요약 및 결론

낙동강 상류에 위치한 안동, 임하 댐 하류 구간에서 두 댐에 의한 충적하천의 변화와 식생이입 현상을 정성적, 정량적으로 조사, 분석하였다. 조사구간은 낙동강/반변천 합류점부터 하류 구담교까지 35km이다. 수문분석 결과, 낙동강과 반변천이 만나는 지점에서 유황곡선의 변화를 보면 댐에 의해 홍수량이 줄고 갈수량이 늘어나는 효과를 잘 보여준다. 일유량 자료의 표준편차 또한 댐 건설시마

다 감소하는 것으로 나타났다. 하천형태 및 하상재료 분석 결과, 댐 하류는 전반적으로 저하되었고 일부 구간은 최대 3m 이상 세굴 되었다. 하상재료도 전반적으로 임하댐 건설 전 평균 1.5mm에서 건설 후 2.5mm로 조립화되었으며, 이 현상 또한 충적하천에서 댐에 의해 나타나는 일반적인 현상이다.

댐 건설로 인한 유황의 변화와 그에 따른 하상소류력의 감소는 사주에 식생 활착을 촉진시켰으며 그 결과 사주 상 식생이입률은 1971년 자연 상태에서 8% 수준에서 안동댐 건설 후 1988년에 25%로 증가하였다. 임하댐이 완공된 1992년 이후 사주 상 식생이입은 가속화되어 겨우 3년이 지난 1995년에 사주 식생이입률이 43%가 되고, 그 후 10년이 지난 2005년에는 74%까지 증가하였다.

식생이입 현상을 구체적으로 확인하기 위해 조사구간 내 세 개의 세부조사구간을 설정하여 분석하였다. 윗절구간의 경우 안동댐 건설 전에는 '멘' 사주가 대부분이었고 우안 높은 곳에 일부 개척식물이 서식하였으나, 안동댐 건설 후 우안에 갈대 등 초본류가 나타나기 시작하여

임하댐이 완공된 이후 구간 대부분에 갈대가 서식하였다. 그러나 임하댐 건설 후 16년이 지난 2008년에는 버드나무 등 교목류가 사주 면적의 50% 이상을 점하게 되어, 하천에서 식생천이 현상을 잘 보여준다. 병산서원/하회마을 구간은 하천과 사주 자체가 역사문화적 가치가 높은 곳으로서, 수백 년을 유지하였을 것으로 보이는 하회마을 앞과 강 건너 점사주는 원래대로 유지하는 것이 중요하다. 다만 최근 들어 위 두 사주에 식생이입이 점차 확대되는 것으로 보여 그에 대한 대책 마련이 시급하다. 광덕교 하류 구간은 상류 댐에 의해 식생이입이 가속화되어 원래 사주이었던 곳에 ‘구담습지’로 명명된 배후습지가 형성될 정도로 식생 활착이 광범위하게 나타났다.

이 같은 댐 건설로 인한 사주 상 식생이입의 가속화 현상의 지배 요인을 확인하기 위해 댐 건설 전후 위와 같은 세 구간에서 각각의 대표 단면에 대해 하상소류력의 횡단 변화를 분석하였다. 그 결과 모든 단면에서 항공사진에 나타난 식생사주와 ‘땀’ 사주의 횡단 분포와 사실상 일치하는 것으로 나타났다. 특히 안동댐 하나만으로 하류 하천의 식생이입을 가속화 시키지 못한 것으로 나타났다.

낙동강 안동, 임하 댐 하류 하천에서 유황변화, 하천형태 및 하상재료 변화, 하상소류력 변화, 식생이입 및 천이 등에 대한 조사 분석에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1. 충적하천에서 댐은 하류 하천의 형태, 하상재료 구성, 하상소류력 등을 변화시키며, 안동, 임하 댐 하류에서 조사된 결과는 위에서 제시한 보편적 현상을 뒷받침한다. 즉, 하상은 저하되고, 하상재료는 조립화되고, 하상소류력은 감소하였다.
2. 댐에 의한 홍수규모의 감소와 그에 따른 하상소류력의 감소는 사주에 식생이입을 촉진하였으며, 특히 임하댐 건설 이후 75%까지 증가하였으며 구간에 따라서는 90% 이상 증가하였다. 다만 안동댐 건설 후 임하댐 건설 전까지 식생이입률이 25% 수준에 머무른 것은 반변천에서 홍수가 유입하여 본류의 하상소류력을 어느 정도 유지시켜 식생이입을 억제하였기 때문이다.
3. 본 연구 세부조사구간 중 하나인 윗절에서 항공사진에 의한 식생천이 현상을 관찰한 결과 유사입자가 노출된 ‘땀’ 사주에서 시작하여 큰개여뀌, 달뿌리풀, 버드나무류 유식물 등 개척 단계를 지나, 일부 달뿌리풀은 유지되고 버드나무 관목이 등장하고 나중에는 선버들이나 왕버들 같은 교목림으로 정착되는 것으로 나타났다.
4. 하회마을 앞과 강 건너 점사주의 경우 타 논문에서 기 제시된 여건 등으로 2005년 항공사진에서 식생이입은 억제되는 것으로 나타났지만, 2009년 사진에

상당 부분 식생이입이 확대되는 것으로 나타나 이에 대한 대책이 필요하다.

5. 사주 상 식생이입의 가속화는 구담습지 등 모래하천에서 찾아보기 어려운 독특한 하천 배후습지를 창출하여 환경적으로 종의 다양성이 커져서 서식처로서 가치 자체는 높아질 수 있다.
6. 댐에 의한 홍수량 감소와 그에 따른 하상소류력 감소가 사주 상 식생이입 및 활착을 가속화시켰다는 가설은 대표 단면에서 무차원 하상소류력의 검토 결과 확인되었다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부/한국건설교통기술평가원이 주관하는 국가연구개발사업 중 하나인 “자연과 함께하는 하천복원기술개발 (이코리버21) (06건설핵심B01)” 사업에서 연구된 것을 바탕으로 작성한 것으로서, 이 연구를 지원한 기관에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 박봉진, 장창래, 이삼희, 정관수 (2008). “댐 하류하천의 사주와 식생 면적 변화에 관한 연구.” **한국수자원학회 논문집**, 제41권, 제12호, pp. 1163-1172.
- 우효섭 (2002a). “생태하천공학의 의의와 실무-생태학과 토목공학의 접목을 통한 새로운 연구분야.” **대한토목학회 학술발표회**, 부산, 10월. pp. 1737-1740.
- 우효섭, 유대영, 안홍규, 최성욱 (2002b). “황강댐 하류하천의 사주 식생활착과 침식 현상의 기초 조사·연구.” **대한토목학회 추계학술발표회**, 부산, 10월. pp. 1693-1696.
- 우효섭 (2008). “화이트리버, 그린리버?” **한국수자원학회지** 기술기사, 제41권, 제12호, pp. 38-47.
- 우효섭 (2009a). “하천에서 식생활착 연구 문헌조사-화이트리버가 그린리버로 변하는 과정의 연구 (I&II).” **한국수자원학회지** 기술기사, 제42권, 제8호, pp. 37-53.
- 우효섭, 박문형, 정상준 (2009b). “하천식생 활착 유형과 사례의 기초 조사연구.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 용평, 5월. pp. 474-478.
- 유권규, 우효섭 (1993). “HEC-6를 이용한 대청댐 하류의 하상변동 예측.” **대한토목학회논문집**, 제13권, 제5호, pp. 157-163.
- 이진원, 김형섭, 우효섭 (1993). “댐 건설로 인한 5대수계의 유황변화 분석.” **대한토목학회논문집**, 제13권, 제3호, pp. 79-91.
- 장창래 (2008). **하천교란백서**, Ecoriver21 연구단 기술보고서 ER 2008-4-1, p. 33.

- 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*, John Wiley & Sons, Vol. 20, pp. 549-563.
- Benjankar, R., Egger, G., Yi Xie, and Jorde, K. (2007). "Reservoir operations and ecosystem losses: concept and application of a dynamic floodplain vegetation model at the Kootenai River, USA.", *Proceedings of the 6th International Symposium on Ecohydraulics*, Christchurch, New Zealand.
- 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 Applications*, John Wiley & Sons, Vol. 21, pp. 315-325.
- Kamada, M., Kojima, M., Yoshida, R., Asai, K., and Okabe, T. (2002). "Influence of dam construction on distribution of riparian plant communities in the Katsuura River, Shikoku, Japan." *Ecology and Civil Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 103-114. (in Japanese)
- Maenor, S., and Watanabe, S. (2008). "Field experiment to restore a gravel bar and control growth of trees in the Asahi River." *Journal of River Basin Management*, Vol. 6, No. 3, pp. 225-232.
- Mahoney, J.M., and Rood, S.B. (1998). "Stream flow requirements for cottonwood seedling recruitment in integrative model." *Wetlands*, Vol. 18, No. 4, pp. 634-645.
- Nakamura, F. (1999). "Influence of dam structures on dynamics of riparian forests." *Ecology and Civil Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 125-139. (in Japanese)
- 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*, Vol. 14, No. 4, pp. 451-464.
- Williams, G.P., and Wolman, M.G. (1984). *Downstream effects of dams on alluvial channels*, USGS Professional Paper 1286, Department of the Interior, USA.
- Woo, H., Lee, D-S., Ahn, H.K., Lee, C.S., and Yeo, W.K. (2004). "Effect of River Channel Meander on Hydro-geomorphologically Induced Vegetation Expansion on Sandbars." *Proceedings of the 6th International Conference on Hydro-Science and-Engineering*, Brisbane, Australia, pp. 514-515.

논문번호: 10-008	접수: 2010.01.15
수정일자: 2010.03.10/04.02	심사완료: 2010.04.02