식생사주 역에서 지하수위와 토양수분의 현장 조사·분석**A Field Survey and Analysis of Ground Water Level and Soil Moisture in
A Riparian Vegetation Zone**

우 호 섭* / 정 상 준** / 조 형 진***

Woo, Hyoseop / Chung, Sangjoon / Cho, Hyungjin

Abstract

Phenomenon of vegetation recruitment on the sand bar is drastically rising in the streams and rivers in Korea. In the 1960s prior to industrialization and urbanization, most of the streams were consisted of sands and gravels, what we call, 'White River'. Owing to dam construction, stream maintenance, etc. carried out since the '70s, the characteristic of flow duration and sediment transport have been disturbed resulting in the abundance of vegetation in the waterfront, that is, 'Green River' is under progress. This study purposed to identify the correlation among water level, water temperature, rainfall, soil moisture and soil texture out of the factors which give an effect on the vegetation recruitment on the sand bar of unregulated stream. To this purpose, this study selected the downstream of Naeseong Stream, one of sand rivers in Korea, as the river section for test and conducted the monitoring and analysis for 289 days. In addition, this study analyzed the aerial photos taken from 1970 to 2009 in order to identify the aged change in vegetation from the past to the present. The range of the tested river section was 361 m in transverse length and about 2 km in longitudinal length. According to the survey analysis, the tested river section in Naeseong Stream was a gaining river showing the higher underground-water level by 20~30 m compared to Stream water level. The difference in the underground water temperature was less than 5°C by day and season and the Stream temperature did not fall to 10°C and less from May when the vegetation germination begins in earnest. The impact factor on soil moisture was the underground water level in the lower layer and the rainfall in the upper layer and it was found that all the upper and lower layer were influenced by soil particle size. The soil from surface to 1 m-underground out of 6 soil moisture-measured points was sand with the D_{50} size of 0.07~1.37 mm and it's assumed that the capillary height possible in the particle size would reach around 14~43 cm. On the other hand, according to the result of space analysis on the tested river section of unregulated stream for 40 years, it was found that the artificial disturbance and drought promoted the vegetation recruitment and the flooding resulted in the frequency extinction of vegetation communities. Even though the small and large scales of recruitment and extinction in vegetation have been repeated since 1970, the present vegetation area increased clearly compared to the past. It's found that the vegetation area is gradually increasing over time.

Keywords : sand bar, vegetation recruitment, water level, gaining stream, soil moisture, soil texture

* 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 하천해안항만연구실 선임연구위원 (e-mail: hswoo@kict.re.kr)

Senior Research Fellow, Water Resources & Environment Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do, Korea

** 교신저자, 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 전임연구위원 (e-mail: jsj@kict.re.kr)

Corresponding Author, Research Specialist, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do 411-712, Korea

*** 인하대학교 대학원 생명과학과 박사과정 (e-mail: popoin2@daum.net)

Graduated student, Dept. of Biological Sciences, University of Inha, Incheon 402-751, Korea

요 지

국내 하천에서 사주 상 식생 활착 현상이 급속하게 진행되고 있다. 1960년대 산업화와 도시화 이전 우리나라 하천은 모래, 자갈이 대부분인 이른바 'White River'(백사장 하천)이었으나, 1970년대 이후 댐건설, 하천정비 등으로 유황과 유사이송 특성이 교란되어 수변에 식생이 번무하게 되는 이른바 'Green River'(식생하천)가 진행 중이다. 본 연구는 비 조절하천 사주 상 식생활착에 영향을 미치는 인자 중에서 수위, 수온, 강우, 토양수분, 토양입경 등의 상호연관성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 우리나라 모래하천인 내성천의 하류를 시험하천구간으로 선정하고, 289일간 모니터링 및 조사 분석을 실시하였다. 또한 과거로부터 현재까지 식생의 경년변화를 파악하기 위해 1970년부터 2009년까지의 항공사진을 분석하였다. 시험하천구간의 범위는 횡단길이 361 m, 종단길이 약 2 km이다. 조사 분석 결과 내성천 시험하천구간은 지하수위가 하천수위보다 20~30 cm 가량 높게 나타나는 이득하천이었다. 지하수온은 일별, 계절별 차이가 5°C 미만이었으며, 하천수온은 식생활착이 본격적으로 시작되는 5월부터 10°C 이하로 떨어지지 않았다. 토양수분의 영향인자는 하층은 지하수위, 상층은 강우이며, 상하층은 모두 토양입경에 영향을 받는 것으로 나타났다. 토양수분측정지점 6곳의 지표면~지하 1 m까지의 토양은 D_{50} 입경 0.07~1.37 mm의 모래이며, 이 입경에서 가능한 모세관 높이는 약 14~43 cm 범위로 추정된다. 한편 비 조절하천인 시험하천구간의 40년간 공간분석 결과, 인위적인 하천교란과 가뭄은 식생활착을 촉진하며, 홍수로 인해 식생균락이 자주 소멸될 수 있음을 확인하였다. 1970년부터 식생의 크고 작은 활착과 소멸이 반복되고 있지만 현재의 식생면적은 과거에 비해 뚜렷하게 증가되어 있다. 식생면적은 시간에 따라 점진적으로 증가하고 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 사주, 식생활착, 수위, 이득하천, 토양수분, 토양입경

1. 서 론

최근 국내 하천에서 사주 상 식생 활착 현상이 급속하게 진행되고 있다. 1960년대 산업화와 도시화 이전 우리나라 하천은 모래, 자갈이 대부분인 'White River'이었으나, 1970년대 이후 댐건설, 하천정비 등으로 유황과 유사이송 특성이 교란되어 수변에 식생의 번무가 진행 하게 되는 이른바 'Green River'가 진행 중이다(우효섭, 2008). 하천에서 식생활착은 생태 측면에서는 생물 종의 다양성에 일부 긍정적인 역할을 하는 반면에, 치수 측면에서는 하천의 흐름저항 증가와 하도의 고착화를 촉진시켜 홍수위험을 가중시킨다. 하천 식생의 이입-활착-천이-퇴행 등에 관한 연구가 여러 나라와 분야에서 수행되었다.

Williams and Wolman(1984)는 10개의 댐 상하류 하천 조사 결과, 댐은 홍수를 감소시켜 하류 하천의 식생활착에 큰 기여를 하며, 댐 건설 전에 비해 식생확장이 90%까지 증가한 사례를 보고하였다. 또한 좁고 깊은 하천보다 넓고 얕은 다지 하천에서 식생활착 가능성이 더 크다고 하였다. Fenner et al. (1985)은 애리조나 주의 Salt River에서 댐에 의해 하류 하반림 포플러 군락 면적이 오히려 감소한 사례를 보고하였다. 그 원인으로는 홍수 감소로 인한 수분 감소, 유사 공급 중단에 따른 식생이입 터전의 감소를 지목하였다. Rood and Mahoney(1990)는 미국 서부 하천에서 댐에 의해 봄 홍수가 감소되고 여름 유량이 일정하게 됨으로서 하반림인 포플러 군락이 고사됨을 보고하였다. 식생의 고사를 막기 위해서 간헐적인 봄 홍수 유지, 완만한 하

류 유량 감소 유도, 적절한 하절기 유량 유지를 제안하였다. Nilsson et al. (1999)은 스웨덴의 조절하천과 비 조절하천 비교연구에서 조절하천에서 종 다양성이 낮게 나타난 사례를 보고하였다. 다중회귀분석 결과 조절 전 식생 피복, 수위 변화, 강터 높이, 연평균 유량 등은 식생 종 다양성에 가장 큰 영향을 미치고, 수위변화, 연평균 유량, 저질의 세립도 등이 식생 피복에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다. Amlin and Rood(2003)는 캐나다 Willow Creek에서 지하수위를 2.5 m로 낮추어 주변 포플러 생장에 미치는 영향을 조사한 결과 하천수위는 홍수터 지하수위에 바로 영향을 미치며 수위강하에 따른 포플러 생장의 취약성을 확인하였다. Stave et al. (2005)은 건조 지역의 하반림 수목 생존은 나무뿌리가 지하수위와 접촉할 수 있는가에 전적으로 달려있다는 점을 확인하였다. *Acacia tortilis*(아카시아) and *Faidherbia albida*(아프리카/중동이 원산인 아카시아 속 식물)는 수위 감소에 따라 뿌리가 아래로 연장되는 것을 관찰하였다. 두 종 모두 이상적인 수위 감소율은 5 cm/d 정도로 분석되었다. Polzin and Rood(2006)는 1993~2005년 브리티시컬럼비아의 비조절하천인 Elk 강 조사연구를 통해 유식물의 안전지역(seedling safe sites)으로서 표고 0.6~2.8 m 높이, 5 cm 이하의 세굴, 40 cm 이하의 퇴적 조건을 제시하였다. Gordon and Meentemeyer(2006)는 캘리포니아에서 댐 건설 이후 강터 폭(river bank width)은 94%, 하도면적은 64% 줄고, 식생 면적은 72% 증가한 사례를 보고하였다. 한편, 일본의 Nakamura(1999)는 하류 하천 식생 이입에 미치는 댐의 영향으로서 유량 조

절, 유사이송 차단, 홍수교란 주기 변동 등을 제시하고 봄 홍수의 중요성을 강조하였다. 봄 홍수는 홍수터에 신선한 토사를 공급하고 토양에 수분을 공급하여 발아하기 좋은 조건을 형성한다. Okabe et al. (2001)은 일본 요시노천에서 1970년 초부터 버드나무 군락이 형성되었지만 확장은 식생 이입 특성과 하상재료의 이동성에 의해 시공간적으로 제한됨을 보고하였다. 또한 버드나무 활착조건 중 하나로서 발아 후 2~3년 동안 무차원 한계 소류력이 0.06 이하이어야 함을 제시하였다. 국내에서는 Choi et al. (2005)이 황강 댐 하류 30km 구간에서 댐 건설 전 식생이 약 2% 수준에서 댐 건설 후 약 80%까지 증가한 사례를 보고하였다. 그 원인으로는 댐에 의한 홍수의 감소와 하상 소류력 감소를 제시하였다. 박봉진 등 (2008)은 국내 21개 댐을 대상으로 사주와 식생의 면적변화, 변화지수, 변화정도, 경년변화 등을 조사한 결과 댐에 의한 유황변화를 하천 식생이입의 가장 큰 원인으로 파악하였다. 우효섭 등 (2010)은 낙동강 상류 2개 댐 하류하천을 대상으로 유황변화, 하천형태 변화, 소류력 변화, 식생이입 변화 등을 조사 분석하였다. 임하댐 건설 전·후의 무차원 하상전단응력은 각각 0.06, 0.02로 나타나 댐 건설이 소류력과 홍수위를 감소시켜 사주에 식생이입을 촉진함을 확인하였다. 한편 표층토양의 이화학적 인자특성에 관한 남웅 등 (2008)의 연구에서는, 식생 생육에 관계하는 염분, 칼륨, 마그네슘, 질소, 미사, 점토 함량 등이 0~20cm 표층토양에서 강우에 의해 많은 영향을 받음을 보고하였다.

선행연구사례 분석결과 비 조절하천 보다 조절하천 연구가 더 활발히 진행되었으며, 사주 상 식생 이입 및 활착의 영향인자로서 수위 (하천 및 지하), 토양수분, 토양입경, 유황, 표고, 기온, 기후, 소류력 등이 제시되고 있다. 소류력은 Shields 한계조건에 따라 무차원 하상전단응력이 0.06 이상인 경우 소류사 이동이 시작되어 식생활착이 억제되며, 선행연구사례에서 확인되었다.

본 연구의 목적은 우리나라 비 조절하천을 대상으로 식생활착 영향인자의 특성과 상호관계를 현장 조사를 통해 분석하는 것이다. 본 연구에서는 다양한 식생활착 영향인자 중에서 특히 토양수분에 초점을 맞추었다. 이를 위해 내성천에 시험하천구간을 설정하고 모니터링 시스템을 설치하여 하천과 지하수의 수위 및 수온, 토양수분, 토양입경을 약 1년간 조사 분석하였다. 또한 경년변화에 따른 식생활착 패턴과 특징을 파악하기 위해 최근 40년간의 시험하천구간 항공사진을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 대상지역

본 연구구간은 내성천의 낙동강 합류점으로부터 상류로

약 8km 지점이다 (Fig. 1). 시험하천구간의 하폭은 361 m이다. 내성천은 낙동강의 제1지류로서 유역면적은 1,806.7 km²이며 낙동강 전 유역면적의 4.6%를 차지한다. 시험하천구간의 하도는 충적층, 그 주변은 금곡리 편암으로 구성되어 있다. 내성천 유역의 토지이용현황은 유역 총면적 1,806.7 km² 중에서 전, 답, 과수원, 목장, 임야, 대지, 기타의 비율은 각각 10.3%, 11.1%, 0.8%, 0.3%, 67.9%, 1.4%, 8.3%로서 임야가 대부분을 차지하며 농경지는 대부분 밭으로 이용되고 있다. 또한 각 하천변에는 농경지가 집중적으로 분포하고 있다. 내성천 국가하천 구간의 하상경사는 1/826~1/1088 정도의 평지하천으로 비교적 완만한 형태를 보이고 있다 (건설교통부, 2001).

2.2 조사 및 분석 방법

본 연구를 위해 대상구간의 하천수위, 지하수위, 강우량, 토양수분, 토양입도, 과거로부터 현재까지의 식생분포 및 공간변화 양상 등을 조사하고 상호 관계를 비교분석하였다. 1차적으로 물리적 환경인자 분석을 위해 대상지점의 횡단에 하천 수위계 1기, 지하 수위계 2기, 토양수분 측정 지점 6곳에 Profile probe tube를 각각 설치하고 (Fig. 2) 모니터링 분석을 주기적으로 실시하였다. 강우량은 인근에 위치한 지보 강우관측소 (경북 예천군 지보면 소재, 국토해양부 관리)의 자료를 이용하였다. 수위 및 강우량의 측정분석 기간은 2010. 8. 25~2011. 6. 10이며, 측정간격은 1시간이었다. 수위계 방식은 압력식이며 오차율은 0.05%, 자동 측정 및 저장 방식이다. 토양수분은 수위, 강우량

Fig. 1. A basin Map of Naeseong Stream, Location of Study Area and the Jibo Meteorological Station

Fig. 2. Cross Section, Water Level and Soil Moisture Measurement Points at Study Srea

Table 1. Soil Moisture Measurement Points

Measurement point No.	1	2	3	4	5	6
Distance (m) from levee (left side)	20	45	70	95	120	140
Surface altitude (EL. m)	61.4	61.2	61.7	60.5	61	61
Innermost sensor altitude (EL. m)*	60.4	60.2	60.7	59.5	60	60

* 지표면 해발고도 (EL. m)에서 토양수분 센서 최대심도 (1 m)를 뺀 값임

의 다양한 변화가 시작되는 시기인 2011. 2. 23~6. 10 기간 동안 약 7~15일 간격으로 측정을 실시하였다. 토양수분 측정은 6지점 Profile probe tube 각각에 측정센서를 삽입하여 측정하며, 측정심도는 횡단상의 6개 지점 각각의 지표면으로부터 10, 20, 30, 40, 60, 100 cm 지점이다. 따라서 측정지점은 총 36개 지점이다 (Table 1). 지하수온과 하천수온 측정센서의 위치는 각각의 수위측정 센서의 위치와 같다.

토양수분계는 토양부피당 물이 차지하는 비율을 측정하며 물의 극성을 이용한 유전상수 값으로 환산하는 방식이다. 수분측정센서의 정확도는 $0.0 \sim 0.4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 일 때 $\pm 0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, $0.4 \sim 0.6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 일 때 $\pm 0.035 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 이다. 한편 토양수분, 지하수위, 모세관 현상간의 상호관계와 거동특성을 파악하기 위해 토양 (퇴적토)의 입도분석을 실시하였다. 토양입도분석 대상지점은 횡단 6개 지점 및 그 각각의 6개 심도로서 총 36개 지점이며 토양수분 측정지점과 같다. 토양채취는 굴삭채취기를 이용하였으며 채취 즉시 밀봉하여 실험실에서 분석을 실시하였다. 입도분석방법은 표준분석방법인 KS F 2302를 이용하였다.

또한 연구대상 구간의 과거로부터의 공간변화 양상을 분석하기 위해 1970, 1988, 1991, 1995, 1996, 2005, 2009년도의 항공사진을 비교 분석 하였고 2011년 현재의 평면상 식생을 현장 조사하였다. 해당지역의 공간분석은 과거로

부터 현재까지의 변화패턴을 분석함으로써 향후 식생활착 경향을 유추하기 위한 것이다.

3. 결과 및 분석

3.1 환경인자

3.1.1 수위 / 수온 및 강우량

연구대상지점의 2010. 8. 25~2011. 6. 10까지 289일간의 하천수위, 지하수위, 강우량, 그 각각의 변화패턴은 Fig. 3과 같다. 본 조사기간 동안 하천수위는 2011년 5월 11일에 EL 62.5m를 보여 하절기인 2010. 9. 12의 EL 61.6 m 보다 높은 최대수위가 관측되었다. 이는 해당유역에 5월 10~11일 발생한 총 119mm의 강우에 의한 것으로 파악되었다 (WAMIS, 2011). 하천의 수위상승은 하도에 소류력을 발생시키고 수변식생을 침수시켜 식생활착을 저해한다. Fig. 4는 하천수위 상승이 식생에 미치는 영향을 잘 보여준다. 2010년 8월 5일, 연구구간 표고 EL 59.6 m의 사주에서 활착초기단계의 대규모 식생군락이 관찰되었다. 버드나무의 경우 높이가 21 cm로서 활착 직전의 단계로 판단된다. 그러나 2010년 8월 25일부터 2010년 10월 4일까지 크고 작은 몇 차례의 홍수가 발생하였다. 그 결과 하상의 퇴적과 침식에 의해 대부분의 식생이 사라진 것을

Fig. 3. Changes in Water Level and Precipitation (25 Aug. 2010~10 Jun. 2011)

Before flood (2010. 8. 5)

Young willows before flood (2010. 8. 5)

Flood (2010. 8. 25)

After flood (2010. 10. 5)

Fig. 4. Influence of Rising Water Levels on Riparian Vegetation

2010년 10월 5일에 관찰하였다. 한편 지하수위는 강우가 집중되는 시기를 제외하면 하천수위보다 약 20~30 cm가량 높게 나타났으며 하천수위와의 시간 차이, 즉 지체시간은 약 20시간으로 나타났다. 평시에 지하수위가 높게 나타나는 현상은 좌안 고지 (upland)에서 내려오는 지하수의 영향 또는 유사분급 현상에 의한 것으로 판단되며 그 패턴

은 매우 전형적인 이득하천의 경향을 보이고 있다.

같은 기간 하천수온과 지하수온은 온도변화 특성과 패턴에서 극명한 차이를 보였다 (Fig. 5). 하천수온은 낮과 밤의 온도차가 극명하게 나타났으며, 혹한이 극심했던 2011년 1월에는 지표수의 동결로 인해 하천수온의 변화는 거의 관찰되지 않았다. 반면 지하수온은 낮과 밤, 계절의

Fig. 5. Changes in Water Temperature (25 Aug. 2010~10 Jun. 2011)

차이가 거의 나타나지 않았으며 수개월에 걸쳐 매우 완만하게 변화하는 경향을 보였다. 전반적으로 2010년 10월말에서 2011년 3월초까지는 하천수온보다 지하수온이 높으며 나머지는 하천수온이 대체적으로 높은 경향을 보였다. 지표수 수온은 대기온도에 직접적으로 영향을 받아 일변화는 최대 10°C, 계절 변화는 최대 30°C로 매우 큰 반면에, 지하수온은 토양의 대기온은 차단효과로 일변화는 거의 없었고, 계절 변화도 5°C를 넘지 않았다. 하천수온의 경우 식물의 본격적인 발아가 시작되는 5월부터는 최저온도가 약 10°C 이하로 저하되지 않았다.

3.1.2 토양수분

토양수분 측정은 강우량의 본격적인 변화가 시작되는 2011. 2. 23~6. 10까지 107일간 실시하였다. 토양수분량은 강우량과 지하수위에 영향을 받으며 분포범위나 함수지속시간은 토양입경에 따라 달라진다. Fig. 6은 6개 측정지점의 기간경과별 토양수분을 변화경향을 보여준다. 이 경향은 측정기간 중 강우사상, 지하수위의 변화 패턴과 대체로 유사하게 나타났다(Fig. 3). 6개 토양수분 측정지점 지표면 표고는 최저 EL 60.5m(측정지점 4)~최고 EL 61.7m(측정지점 3)로 측량되었다. 한편 토양수분 측정기간 동안 하천수위는 EL 59.1m~EL 62.5m, 지하수위는 EL 59.3~EL 62.4m로 관측되었다. 토양수분 측정센서 중에서 가장 깊은 곳의 센서는 6개 측정지점 각각의 지하 1m 깊이에 위치한다. 따라서 6개 지점에서 가장 깊은 측정센서 표고범위는 최저 EL 59.5m(측정지점 4)~최고 EL 60.7m(측정지점 3)이다. 그러므로 이 지점은 토양수분 측정기간 동안 지하수에 의해 직접 포화(특히 측정지점 4)되었거나 모세관 현상에 의해 간접포화 되었을 것으로

추정된다. Fig. 6에서 측정지점 1은 제방으로부터 제방에서 가장 가까운 곳이다. 이 지점 100cm 심도 토양수분은 40% 이상으로 가장 높게 나타나 지하수의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 측정지점 2의 10cm 심도 토양수분은 강우와 민감하게 연동하는 것으로 관찰되었다. 나머지 심도에서는 의미 있는 변화가 없었다. 측정지점 3은 6개 측정지점 중 표고가 가장 높은 지점으로서 심도 60cm에서 상대적으로 높은 수분이 측정되었다. 측정지점 4, 5, 6 각각의 100cm 심도는 지하수위까지 약 0~50cm에 불과하여 지하수의 영향을 많이 받는 지점으로 판단된다. Fig. 6의 그래프는 이러한 특징을 잘 보여준다. 특히 측정지점 5는 지하수위에 가까울수록 토양수분이 증가하는 매우 전형적인 분포 경향을 보여주고 있다. 그러나 센서표고가 측정지점 5와 같은 측정지점 6에서는 전혀 상이한 깊이별 패턴이 관찰되었다. 즉 심도 100cm에서의 토양수분은 평상시에 10% 이하로 낮게 나타나다가 특정기간에 급격히 상승한 뒤 다시 빠르게 하강하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 수위 측정 자료 확인결과 2011년 5월 중순의 강우량 및 수위 증가와 직접적인 관련이 있는 것으로 분석되었다.

토양수분 분석결과 토층의 하부는 지하수위, 상층은 강우가 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러나 조사지점별로 토양수분 변화의 경향, 민감도, 지속성은 상이하게 나타났다. 그 이유는 토층구조, 즉 토양입경의 차이 때문인 것으로 판단된다.

3.1.3 토층구조

토양은 입경에 따라 공극(porosity)이 다르며, 이에 따라 포화될 수 있는 수분의 한계가 토양별로 다르게 나타

Fig. 6. Changes in Soil Moisture at Measurement Points (23 Feb. 2011~10 Jun. 2011)

난다. 또한 수분 지속시간과 모세관 높이도 토양입경에 따라 다르게 나타나는 특성을 앞에서 확인하였다. 본 분석에서는 토양수분 측정 지점과 동일한 36개 지점의 토양을 채취하여 입경분석을 실시하였고 중앙입경(D_{50} , mm)을 산출하였다. 그 결과는 Fig. 7과 같으며 명암이 짙을수록 작은 입경, 옅을수록 큰 입경을 의미한다. 토양입경 분석결과는 토양수분의 변화에서 나타난 특이현상의 원인을 잘 설명해 준다. 측정지점 1 심도 100 cm의 토양수분은 다른 심도에 비해 약 1.5배 높게 나타나는데, 이 심도의 토양 중앙입경은 0.15 mm로서 타 심도의 0.21~0.52 mm에 비해 미세한 편이다. 측정지점 1 심도 100 cm 지점에서 평수기 지하수위까지의 거리는 약 1 m로서 모세관 작용이 영향을 미치기 어려운 거리이다. 따라서 이 토양수분은 하층으로부터의 지하수 상승 시 또는 상층으로부터의 강우침투 시 공급된 수분을 상대적으로 잘 보존하는 것으로 판단된다. 측정지점 5와 6은 직선거리 20 m에

인접하면서 표고가 같음에도 심도 100 cm의 토양수분은 큰 차이를 보였다. 그 이유는 토양입경 분석결과 입경의 차이 때문인 것으로 분석되었다. 평수위 시 측정지점 5 심도 100 cm의 토양수분은 측정지점 6에 비하여 5~6배 높게 나타난다. 그러나 강우 시 지하수위가 상승하면 측정지점 6 심도 100 cm의 토양수분은 급격히 상승하였으며 상승률은 지점 5보다 매우 높았다. 또한 지하수위 하강 시에는 토양수분이 지점 5보다 빠르게 감소하였다. 즉 지점 6 심도 100 cm 토양수분은 지점 5보다 지하수위에 빠르게 연동하는 경향을 보였다. 심도 100 cm의 D_{50} 은 측정지점 5와 6이 각각 0.16, 0.53 mm로서 약 3배의 차이를 보였다. 이에 따라 수분보존에 차이를 보인 것으로 판단된다. 한편 측정지점 1~6에서 지표면~심도 100 cm 범위의 토양 D_{50} 은 0.07~1.37 mm로서 모래에 해당되며, 이 입경에서 가능한 모세관 높이는 약 14~43 cm 범위로 추정된다 (Batu, 1998).

Soil Depth	M.P. NO. 1	M.P. NO. 2	M.P. NO. 3	M.P. NO. 4	M.P. NO. 5	M.P. NO. 6
10 cm	0.25	0.08	0.26	0.15	0.27	0.25
20 cm	0.21	0.07	0.25	0.51	1.37	0.33
30 cm	0.30	0.08	0.23	0.66	0.89	0.40
40 cm	0.52	0.43	0.25	0.63	0.53	0.29
60 cm	0.27	0.51	0.24	0.45	0.17	0.12
100 cm	0.15	0.74	0.52	0.47	0.16	0.53

Fig. 7. Distribution of Soil Texture at Soil-moisture Measurement Points (D_{50} , mm)

3.2 공간변화와 식생분포

본 조사에서는 내성천 연구대상구간의 1970~2011까지의 경년변화를 항공사진과 현장조사를 통해 조사하였다. 과거 사주와 사주식생의 변화양상, 현재의 식생분포를 분석함으로써 향후 물리적 여건변화와의 연관성을 성립시키고자 한다. Fig. 8은 연구대상지의 최근 40년간 사주 및 식생 변화 양상을 보여준다. Fig. 8 하도의 실선은 2010년 현재의 제방 경계선 표시이며 종 방향 길이는 약 2km이다. 1970년에는 제방이 축조되기 전으로서 하도에서는 식생의 흔적을 거의 찾아볼 수 없다. 약 20년이 경과한 1988년에는 좌안의 하도에 식생이 부분적으로 관찰된다. 관련 자료 (건설교통부, 2001)에 의하면, 1982년부터 1987년까지 다른 해에 비해 평균하천수위가 20~50%에 불과했고, 1988년에는 하천개수공사가 진행되었다. 극심한 가뭄과 하천의 인공적인 교란은 식생활착에 기여했을 것으로 판단된다. 1991년에는 식생이 현저히 감소하였고, 그 원인은 대규모 홍수에 의한 것으로 추정된다. 1996년에는 다시 식생활착이 증가하였고, 2005년에도 식생범위가 유지 또는 다소 증가가 관찰된다. 이때 하중도에서 관찰되었던 식생의 흔적 (원형 점선 표시)은 2009년에는 관찰되지 않아 홍수에 의해 소실된 것으로 판단된다. 이러한 현상은 본 연구의 현장 모니터링 기간 중에도 관찰된 바 있다 (Fig. 4).

Fig. 9는 2011년 3월 현재 연구대상구간의 식생분포를 보여준다. 대상 하천에서 우점식생은 교관목으로는 버드나무류 (Willow)이며 초본류로는 갈대속 식물 (Reed)로 나타났다. 버드나무류는 왕버들 (*Salix chaenomeloides*)이 우점하였으며 드물게 선버들 (*S. subfragilis*)과 갯버들 (*S. gracilistyla*)이 분포하였다. 버드나무속 (*Salix* sp.) 식물은 천이 초기종으로 2월부터 6월 말까지 그 종류별로 종자를 산포하며 종자 수명은 매우 짧은 특징이 있다 (이팔홍, 2002). 나이테 분석결과, 5년 이상 최대 약 20년으로서 나타났으며, 제방사면 또는 제방사면 인근에 떠돌이 활착되어져 있었다. 이는 물의 흐름과 평행하게 정착된 현상으로 해석되며 따라서 정착 당시 표고가 낮고 물과 맞닿은 지역이었음을 유추할 수 있다. 갈대속 식물은 달뿌리풀 (*Phragmites japonica*)로 봄철에 새순이 올라 8월에서 9월 사이에 꽃이 피는 다년생 벼과식물로 (이창복, 2003) 땅속줄기와 지상의 기는줄기에 의존하여 생존력과 번식속도가 강한 특징이 있다 (Chapin et al., 1990). 본 연구대상구간에서 달뿌리풀은 버드나무속 식물과 마찬가지로 천이 초기종이며 대상구간에서 우점하여 조사 대상구간에서 분포 면적이 가장 넓었다. 달뿌리풀은 2010년 홍수 교란 이후 사주에 기는 줄기가 뻗어나가는 현상이 관찰되어 최근 그 면적이 다소 증가 되는 경향을 나타내지만 매년 반복되는 홍수 교란으로 활착여부는 확실하지 않다. 개방사주는 하도의 흐름에 의한 유사 이동에 의해

Fig. 8. Aerial Photos Showing Changes in Vegetation Recruitment at Sand Bars of the Study Area (1970~2009) (photo date; 1970: unknown, 1988: September, 1991: April, 1996: October, 2005: October, 2009: March)

미세지형이 지속적으로 변화하고 있다. 시험하천구간 토양수분 측정지점 4, 5의 경우 토양 D_{50} 평균크기가 다른 지점에 비해 1.5~2배 이상이었는데, 현장분석 결과 이곳의 식생은 목본이 없으며 초본도 타 지점에 비해 빈약한 것으로 나타났다 (Fig. 9의 화살표시). 결론적으로 본 공간분석을 통해 비 조질 자연하천에서는 식생의 이입과 소멸이 수년을 주기로 반복되고 있음을 확인하였다. 그러나 40년 전과 비교하면 본 하천구간에서 식생의 활착은 현재

뚜렷하게 나타나며, 진행형인 것으로 판단된다.

4. 결론

국내에서 모래하천이면서 비조질하천인 내성천 하류구간을 대상으로 식생의 활착인자를 정량적으로 규명하기 위한 과정으로서 하천수위, 지하수위, 수온, 토양수분, 토층구조, 최근 40년간 사주 및 사주식생의 공간적 경년변화

Fig. 9. Distribution of Vegetation of the Study Area (Mar. 2011)

등을 조사하고 상호연관성을 조사·분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대상구간의 하천수위와 지하수위, 강우패턴은 뚜렷하고 정량적인 상관관계를 가지며 전형적인 이득·하천의 형태를 띤다. 조사기간 동안 본 조사구간의 지하수위는 하천수위보다 보통 20~30 cm 높게 유지되었으며 지체시간은 약 20시간으로 나타났다. 그러나 강우량 증가로 하천수위가 증가하면 하천수면의 확장으로 양 수위 간 차이와 지체시간이 감소 또는 역전된다.
- 2) 대상구간에서 289일 모니터링 기간 동안 (2010. 8. 25 ~ 2011. 6. 10) 활착단계의 식생 (주로 버드나무와 달뿌리풀)은 8, 9월 크고 작은 홍수에 대부분 소멸하였다. 본 모니터링에서는 4회의 홍수로 인해 사주범람 후 유식물 군락이 거의 소멸하였고 다음해의 발아시기까지 식생의 추가 활착은 관찰되지 않았다.
- 3) 하천수온과 지하수온은 뚜렷한 일별, 계절별 특성 차이를 보인다. 하천수온은 혹한기를 제외하면 일별 온도차가 최대 10℃에 달하였고, 계절별 온도차는 최대 30℃에 달하였다. 반면 지하수온은 토양의 대기기온 차단효과로 일별 차이는 거의 없었으며 계절별로도 5℃를 넘지 않았다. 또한 식생활착이 본격적으로 시작되는 5월부터는 최저온도가 약 10℃이하로 떨어지지 않았다.

- 4) 토양수분에 영향을 주는 요인으로는 토양의 하층은 지하수위, 상층은 강우이며, 상하층은 모두 토양입경에 따라 토양수분 분포특성이 변화한다. 본 연구에서 일반적으로 지하수와의 근접, 강우량 변화 등에 따라 토양수분은 연동하였지만 일부 지점에서는 이러한 관계가 성립하지 않았다. 그 이유는 토양입경 때문이며 모세관 현상이나 배수, 함수 능력이 토층 구조 (soil texture)에 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 대상지점의 모세관 높이의 범위는 토양입경 분석에 기초하여 약 14~43 cm 범위인 것으로 판단되었다.

- 5) 대상하천의 40년간 공간분석 결과, 비 조절하천에서는 인위적인 하천교란과 가뭄이 식생활착을 촉진할 수 있으며, 홍수로 인해 식생군락이 일시에 소멸될 수도 있음을 확인하였다. 또한 지난 40년간 식생의 크고 작은 활착과 소멸 현상이 몇0 차례 반복되었지만, 1970년과 2009년의 식생면적은 뚜렷하게 구별된다. 결론적으로 대상하천구간의 식생면적은 시간 경과에 따라 점진적으로 증가하고 있는 것으로 판단된다.

마지막으로, 사주 식생의 이입과 활착에 영향을 주는 인자 간 상호연관성을 정리하면, 강우량, 하천수위, 지하수위는 순차적으로 토양수분에 영향을 미치나 수분의 공급량이나 지속성은 토양입경에 따라 상이하게 나타났다.

본 조사 분석에서는 토양입경이 클수록 식생의 성장상태와 밀도가 상대적으로 빈약한 것으로 나타났고, 공간분석을 통해서도 확인하였다. 한편 본 조사 분석은 물리적 영향인자에 초점을 맞춘 것이므로 향후 활착에 영향을 미치는 인자로서 영양물질에 대한 고찰과 이의 하천으로의 유입증가 원인에 대한 고찰도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 R&D사업인 “자연과 함께하는 하천복원기술개발 (06건설핵심B01)” 연구의 연구비 지원으로 진행된 결과이며 관계기관에 감사를 표합니다. 또한 본 논문은 2011한국수자원학회 학술발표회에서 발표한 논문을 확대·보완한 것임을 밝힙니다.

참고문헌

건설교통부 (2001). 내성천 하천정비기본계획 (변경).
국토해양부 (2011). 국가수자원관리 종합정보시스템 (WAMIS: <http://www.wamis.go.kr/>).
남웅, 곽영세, 정인호, 이덕범, 이상석 (2008). “임해준설매립지 식물분포와 표층토양의 이화학적 특성.” **한국조경학회지**, 한국조경학회, 제36권, 제3호, pp. 52-62.
박봉진, 장창래, 이삼희, 정관수 (2008). “댐 하류하천의 사주와 식생 면적 변화에 관한 연구.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제12호, pp. 1163-1172.
우효섭 (2008). “화이트리버, 그린리버?” 한국수자원학회지 기술기사, 12월호, pp. 38-47.
우효섭, 박문형, 조강현, 조형진, 정상준 (2010). “댐 하류충적하천에서 식생 이입 및 천이-낙동강 안동/임하 댐 하류하천을 중심으로-.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제5호, pp. 455-469.
이창복 (2003). 원색 대한식물도감. 향문사.
이팔홍 (2002). 하천변에 분포하는 버드나무속의 생장특성과 군집 동태. 박사학위논문, 경상대학교.
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*, Vol. 17, pp. 351-358.
Batu, V. (1998). Aquifer Hydraulics—a Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis. *John Wiley & Sons*, Inc. pp. 52-59.
Chapin, F.S. III, Schultze, E-D., and Mooney, H.A. (1990). “The ecology and economics of storage in plants”, *Annual Review of Ecological Systems*, Vol.

21, pp. 423-447.
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*, Vol. 21, pp. 315-325.
Fenner, P.W.W. Brady, and Patton, D.R. (1985). “Effects of regulated water flows on regeneration of Fremont cottonwood.” *J of Range Management*, Vol. 38, No. 2, pp. 135-138.
Gordon, E., and Meentemeyer, R.K. (2006). “Effects of dam operation and land use on stream channel morphology and riparian vegetation.” *Geomorphology*, Vol. 82, pp. 412-429.
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)
Nilsson, C., Ekblad, A., Gardgjell, M., and Carlberg, B. (1999). “Long term effects of river regulation on river margin vegetation.” *J of Applied Ecology*, Vol. 28, pp. 963-987.
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.
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*, Vol. 26, No. 4, pp. 965-980.
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.
Stave, J., Oba, G., and Eriksen, A.B. (2005). “Seedling growth of *Acacia tortilis* and *Faidherbia albida* in response to simulated groundwater table.” *Forest Ecology and Management*, Vol. 212, No. 1-3, pp. 367-375.
Williams, G.P., and Wolman, M.G. (1984). Downstream effects of dams on alluvial channels, USGS Professional Paper 1286, Department of the Interior, USA.

논문번호: 11-070	접수: 2011.06.28
수정일자: 2011.08.10/09.14	심사완료: 2011.09.14