

영주댐 운영 전 내성천에서 하도 형태의 단기 변화

Short-term Change in Channel Morphology of the Naeseong Stream before the Operation of Yeongju Dam, Korea

이찬주* · 김동구

한국건설기술연구원 수자원하천연구소

Chanjoo Lee* and Donggu Kim

Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

Received 3 April 2017, revised 4 April 2017, accepted 4 April 2017, published online 5 April 2017

ABSTRACT: The Naeseong Stream is a meandering sand-bed stream flowing through mountains and has so long maintained its geomorphological uniqueness characterized by extensive braided bare bars. Recently, its long-lasting landscape has been changed due to encroachment of vegetation. In this study being a part of long-term monitoring research morphological changes of the 56.8 km long study reach of the Naeseong Stream, which occurred during the period of 2012 - 2016 were analyzed. Airborne LiDAR and terrestrial cross-section surveys were carried out. Hydrological and on-site investigation data were also collected. Among the main four sites, two bend reaches showed point bars enlarged, while along the other two straight reaches mid-channel bars were either newly formed or increased in area and height. At the highest deposition point of each bar, vertical changes which were caused by one or two times of sediment deposition amounted to 0.6 - 1.4 m. On the contrary channel bed degradation was not obvious. Overall morphological changes in the study reach were attributed to deposition of sediment which occurred during the flood in July 2016 on the bar surfaces vegetated during the precedent dry seasons. These kind of geomorphological processes are thought to be the same as those related to the existing mid-channel islands along the mid- and downstream reach of the Naeseong Stream.

KEYWORDS: Bar, Morphological change, Naeseong Stream, Vegetation

요 약: 내성천은 산지를 사행하는 모래하천으로 오랫동안 그 하천지형학적 특성을 유지해왔다. 그러나 최근 식생의 활착으로 종래의 경관을 상실해 가고 있다. 본 연구에서는 내성천 장기조사 연구의 일환으로 내성천의 56.8 km 구간을 대상으로 지난 2012 - 2016년 기간에 발생한 지형변화를 분석하였다. 항공 라이다 및 하천측량기 시행되었고 수문자료와 현장 조사자료가 함께 활용되었다. 주요 4개 지점중에서 만곡부 지점에서는 만곡사주가 확장되었고, 직선구간에서는 하중 사주가 발달하였다. 한 두 번의 유사 퇴적으로 인해 발생한 하중 사주의 고도 변화는 0.6 - 1.4 m에 달하였으나 하상저하는 분명하지 않았다. 이러한 변화는 2014 - 2015년의 갈수기에 식생이 크게 활착하였다가 2016년에 홍수로 인해 퇴적이 일어났던 기인하는 것으로 보인다. 이러한 과정은 이전에 내성천 중하류 구간에 형성되어 있는 하중도의 주된 형성과정으로 판단된다.

핵심어: 사주, 하천지형 변화, 내성천, 식생

*Corresponding author: c0gnitum@kict.re.kr, ORCID 0000-0001-9176-2622

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

내성천은 경북 북부 지역의 산지를 사형하며 흐르는 모래하천으로 산지와 어루어진 모래사주가 발달한 하천지형이 특징적이다. 화룡포, 무섬마을, 선몽대 등은 내성천의 대표적인 하천 경관이다. 하지만, 이러한 모래하천 지형은 최근 들어 점차 감소하고 있으며, 식생의 활착과 함께 종래의 고유한 경관이 사라져 가고 있다.

내성천의 하천지형학적 특성은 하폭이 넓은 모래하천에서의 역동적인 지형형성작용을 반영한다. 모래하천에서는 유사를 이송시키는 임계 전단응력이 낮으므로 소류사 및 부유사의 형태로 유사가 쉽게 이동한다. 홍수시에는 흐름의 상태 (regime)에 따라 하상파가 변화하면서 다량의 유사가 이송된다. 수위가 하강하면 다수의 이차류 세포에 의해 형성된 하중사주가 노출되면서 유로는 여러 갈래로 분기하여 망상하도의 형상을 나타낸다.

모래하천에서 발달하는 사주들은 하천의 역동성을 반영할 뿐만 아니라 식생의 활착으로 안정화되기도 한다 (Richards 1982). 식생의 초기 활착 상태에서는 홍수가 발생할 경우 식생이 제거되거나 소멸하지만, 유량이 감소하거나 홍수가 늦어져서 성장한 식생을 제거하지 못하는 경우 식생이 유지된다. 식생은 하천의 지형형성작용을 촉진하여 (Hickin 1984), 흐름 저항을 증가시키고 퇴적을 유도하여 하중도와 홍수터 발달에 영향을 미친다.

내성천에는 2009년부터 4대강 사업의 일환으로 영주댐이 건설되기 시작하였고, 2016년 7월에는 담수를 시작하였다. 댐은 홍수 조절, 수력발전, 용수 공급 등의 역할을 수행한다. 그 과정에서 자연적인 수문 특성은 인위적으로 변화하게 되어 하류 하천의 지형 및 경관도 변화하게 된다. 침투홍수량의 감소는 하천의 지형학적 역동성을 감소시키며, 사주를 중심으로 식생 활착이 증가하고 수림화되어 점차 하폭이 감소하게 된다. 댐 건설 후의 하천변화에 관해서는 많은 연구가 수행된 바 있다 (Williams and Wolman 1984, Gordon and Meentemeyer 2006, Park et al. 2008).

한국건설기술연구원에서는 2012년부터 영주댐 건설 전후 내성천을 장기적으로 조사하여 하천의 변화를 분석하고자 하는 연구를 시작하여 지속적으로 수행하고 있다 (KICT 2016). 본 논문은 내성천 장기조사의 일환으로 실시한 내성천의 하천 지형 모니터링의 중간 결

과를 제시하는데 그 목적이 있다. 조사 대상 기간은 2012년부터 2016년까지이다. 이 기간 동안 영주댐의 댐체는 건설되었으나 담수는 이루어지지 못하였고 댐의 유량 조절은 거의 이루어지지 못하였다. 또한 일부 구간을 제외하면 공사, 하상정리 등 하천의 인위적 교란도 거의 없었다. 반면에 수문학적으로는 지난 40여년의 기간 중에 홍수량이 최소인 갈수기가 발생하기도 하였으며, 그로 인해 식생이 급격하게 활착하기도 하였다. 이에 따라 본 논문에서는 지난 5년간의 내성천에서 발생한 하천지형학적 변화를 수문 특성 및 식생 변화와 함께 분석하고자 한다.

2. 연구 지역

본 연구의 대상은 내성천으로 낙동강의 제 1 지류하천이다. 그 유역은 소백산맥 남부의 경북 북부 내륙 지역에 위치하고 있다 (Fig. 1). 내성천 본류는 경북 봉화군 물야면 오전리에서 발원하여 낙화암천, 토일천, 영주서천, 옥계천, 석관천, 한천, 금천을 차례로 합류한 후 경북 예천군 용궁면 향석리에서 낙동강에 합류한다. 유역면적은 1,814.7 km²이며, 법정 유로연장은 108 km이다. 내성천의 본류를 가로막아 건설한 영주댐은 영주시 평은면 용혈리 만곡부에 위치하고 있으며, 유역면적은 496.6 km²이다 (MLTM 2013).

내성천 유역은 대보화강암 (53.3%)과 소백산편마암 (27.0%) 지질이 80% 이상을 차지한다. 내성천의 지배적인 모래하천의 경관은 유역의 절반 이상을 차지하

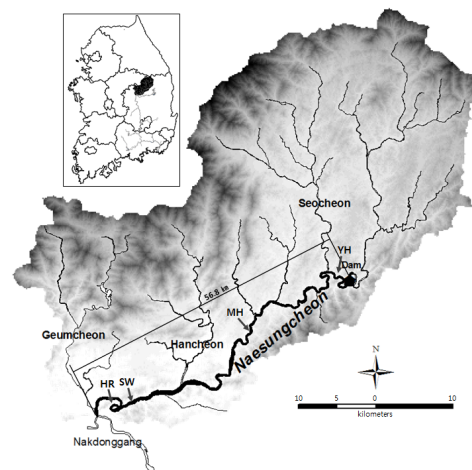


Fig. 1. Map showing the study reach of the Naeseong Stream and its watershed.

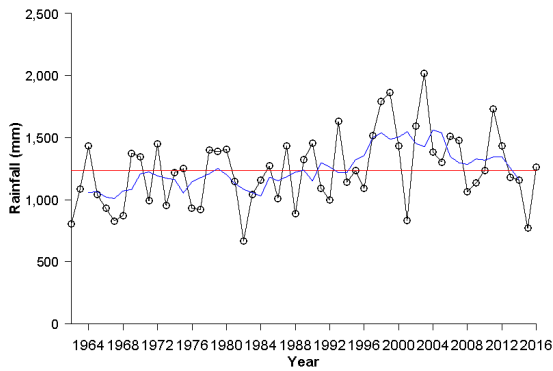


Fig. 2. Annual precipitation in the Youngju city from 1962 to 2016.

는 화강암 지대에서 입상붕괴한 조립질 모래가 다량으로 공급되어 형성된 것이다(Lee 2010). 하상경사가 급한 상류 구간(봉화읍 상류)의 경우 자갈(호박돌) 하천의 특성이 나타난다. 연구 구간인 영주댐 하류는 전구간이 모래하천의 특성을 나타내며, 하상재료의 대표입경 (D_{50})은 0.92 - 1.63 mm 정도이다(Lee et al. 2015). 내성천은 1910년대에도 현재와 거의 동일한 모래하천의 특성을 지녔던 것으로 보고되어 있고(JGJK 1920), 1950년대 이래로 항공사진에서도 모래하천의 경관을 지속적으로 보여주고 있으므로, 지난 100여년간 모래하천의 본질적인 특성은 유지되어 왔다고 볼 수 있다.

내성천 유역의 연평균 기온은 11.3°C이고, 연평균강수량은 1,234 mm이다. 연구 기간(2012 - 2016) 동안에는 기온은 약간 증가하였고 강수는 연별 변동성이 다소

증가하였다(Fig. 2). 2015년의 연평균기온은 12.5°C로 기상관측기간(44년) 중에 최고 기온이며, 연강수량은 769 mm로 1982년에 이어 두 번째로 적다(KICT 2016).

내성천 장기조사의 일환으로 실시한 본 연구의 대상 구간은 영주댐으로부터 낙동강 합류점에 이르는 56.8 km 구간이다(Fig. 1). 또한 그 중에서 용혈하류, 미호, 상월, 회룡 등의 4개 지점을 선정하여 집중적으로 분석하였다(Table 1). 용혈하류 지점은 영주서천의 합류 전에 위치한 곳으로서 영주댐의 영향만을 직접적으로 받는 곳이며, 미호 지점은 전체 조사구간의 대략 중간 정도에 위치하는 곳이고, 상월과 회룡 지점은 내성천 하류에 위치하여 댐의 직접적인 영향이 가장 적은 지점이다. 용혈하류와 회룡 등 2개 지점은 만곡부 지점이며, 미호, 상월 지점은 직선 구간에 해당한다.

3. 연구 방법

3.1 항공 라이다 측량 및 DEM 구축

내성천 하도에서의 지형 변화 특성을 분석하기 위해 다양한 자료를 사용하였다. 측량 자료로는 항공 라이다 측량 자료와 하천 측량 자료이며, 그 외에 현장 조사 자료, 수문 자료 등을 수집하여 분석하였다.

한국건설기술연구원에서는 내성천 영주댐 하류 구간에 대해 2012년부터 2016년까지 매년 11 - 12월 사이 대부분의 낙엽이 떨어진 후에 항공 라이다 측량을 수행

Table 1. Study sites for the cross-section survey in the Naeseong Stream.

Site	Distance from Yeongju Dam (km)	Time of survey (year/month)
Mirim (MR)	1.8	2013/05, 2013/12, 2014/03, 2015/03, 2016/04
Yonghyeol 4 (YH4)	3.5	2013/05, 2013/12, 2014/03, 2015/04, 2015/10
Yonghyeol 3 (YH3)	3.8	2013/05, 2013/06, 2013/12, 2014/03, 2015/04
Yonghyeol 2 (YH2)	4.0	2013/05, 2013/06, 2013/12, 2014/03, 2015/04
Yonghyeol 1 (YH1)*	4.2	2013/05, 2013/06, 2013/12, 2014/03, 2015/04, 2016/04, 2016/08
Sudo (SD)	6.5	2013/05, 2013/06, 2013/12, 2014/03, 2015/04, 2016/04
Woorae (WR)	14.6	2014/07, 2014/12, 2015/10, 2016/04
Miho (MH)*	23.5	2013/05, 2014/12, 2015/03, 2015/10, 2016/04
Sangwol (SW)*	48.0	2013/05, 2014/03, 2015/04, 2016/04
Hyeoryong (HR)*	50.1	2013/05, 2013/06, 2013/12, 2014/03, 2014/12, 2015/10, 2016/04

*Main investigation site.

하였다. 연속적인 항공 라이다 측량은 지형 변화를 야기하는 주요 사건의 전후에 시행되어 그 변화의 정도와 공간적 변화를 분석하는데 유용하게 활용될 수 있다 (De Rose et al. 2011, Burvingt et al. 2016). Matzek et al. (2012)의 연구는 연속적인 5개년간의 라이다 자료를 이용하여 토사의 침식과 퇴적을 계량화하였다. 본 연구에서는 RIEGL사의 완전 파형 (full waveform) LiDAR를 고정밀 GPS와 관성항법장치 (INS, inertia navigation system)를 탑재한 항공기를 통해 전개하여 3차원 측량을 실시하였다. 라이다 측정점들 (point cloud)은 VRS (virtual reference station) GPS로 측량한 지상 기준점 (GCP, ground control points)을 이용한 보정을 수행한 후 해발고도로 변환되었다. 원시자료 측정점의 밀도는 1 m^2 당 4-5개 정도이다. 측정점들은 불규칙 삼각망으로 변환되며, 1차적으로 DSM (digital surface model)이 생성되고, 식생 및 기타 피복, 인공 지물의 제거 등을 거쳐 최종적으로 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 해상도의 지상 DEM을 구축하였다. DEM의 수직 정확도는 0.15 m 수준이다 (Kim 2003). 본 연구에서 사용한 라이다는 적색 레이저를 이용한 것으로 수면 아래의 수심 0.3 m를 넘는 깊이의 하상을 측량할 수 없다. 따라서 하도 내의 지형 측량은 수면 위에 노출된 사주 및 하중도에 국한되었고 수중 구간은 외삽을 통해 DEM에서 불규칙 삼각망 형태로만 표현되었다. 본 논문에서는 전체 라이다 자료 중에서 내성천 전체 구간 중에서 주요 4개 지점을 주변으로 약 500 - 1,000 m 길이 범위에 대해 내성천 하도를 중심으로 2012년과 2016년 DEM 자료를 추출하여 Surfer 8.0을 이용하여 색채와 함께 3차원 지형을 형상화하여 기술적으로 비교하였다.

3.2 하천 측량

주요 지점을 중심으로 수중을 포함한 하도의 지형 변화를 분석하기 위해 하천에서 단면 측량을 실시하였다. 측량은 영주댐 하류 내성천 구간 (56.8 km)에서 앞서 언급한 4개 구간을 포함하여 주요한 10개 단면에서 실시하였는데, 2013 - 2016년 기간에 지점별로 4 - 8회의 성과가 포함되었다 (Table 1). 하천 측량은 Topcon사의 GTS-700 시리즈 광파측량기를 사용하였다. 좌우안의 기준점은 VRS GPS로 수 회 반복 측량하여 값을 결정하였고, 내성천 주변에 소재하는 국토지리정보원 통합기준점의 표고를 적용하여 지상보정 (localization)

을 수행하여 해발고도로 변환하였다. VRS GPS의 수평오차는 대략 4 cm 정도이고 (Han et al. 2010), 수직정확도는 평균 7 cm 정도이다 (Kim et al. 2008). 단면 측량은 영주댐 하류의 5 km 이내 구간의 5개 단면에서 댐 하류의 영향을 보기 위해 집중적인 측량을 수행하였으나 2015년부터 이 구간에 시행된 하천 공사로 인해 해당 구간에 있는 3개 단면에서는 2016년에는 측량을 수행하지 않았다. 서천 합류점부터 회룡까지의 7개 단면에서는 매년 1 - 3회 측량을 수행하였다. 이렇게 얻은 자료는 지형 변화, 하상고 변동 등을 분석하는데 사용하였다.

3.3 수문 및 식생 조사

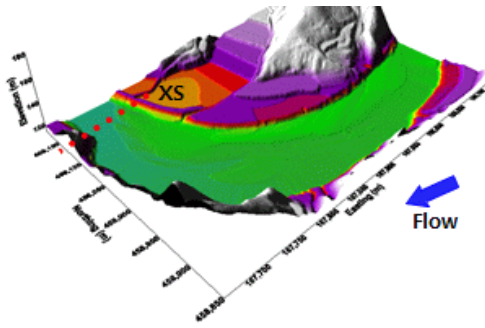
연구 기간동안 내성천의 지형 변화를 살펴보기 위해 각종 기상수문 자료, 현장 사진, 항공사진 등의 자료를 수집하여 분석에 함께 활용하였다. 수문 자료는 낙동강 홍수통제소에서 제공하는 내성천 내의 수위관측소 자료와 한국건설기술연구원에서 2013년부터 2016년까지 직접 운영하여 수집했던 수위 자료 및 유량 측정 자료 등이 포함된다. 현장 사진 자료는 하천 지형과 식생의 단기적 변화를 기록하기 위한 2012년부터 2016년까지 총 13개 지점에 매년 5 - 6회의 촬영 자료가 있다. 그 중에서 본 논문에서는 주요 3개 지점 (용혈하류, 미호, 회룡) 자료를 활용하였다.

4. 결과

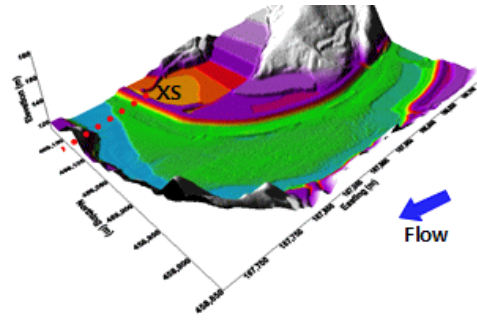
4.1 주요 지점의 지형 변화

Fig. 3은 주요 4개 지점의 항공 라이다 측량 결과를 3차원 지형으로 표현한 것이다. 각 그림에는 단면 측량의 위치 (XS)가, 우측 하단에는 흐름의 방향 (flow)이 표시되어 있다. 전체적으로 보면 2016년의 내성천 하도는 2012년에 비해 저수로 수면이 감소하고 사주가 증가한 특성을 나타내고 있다. 만곡부 (용혈하류, 회룡)와 직선부 (미호, 상월)를 비교해 보면, 만곡부에서는 지형의 변화가 만곡사주의 크기의 증가로 나타난다. 직선부에서는 사주의 새로운 형성과 기존 사주의 크기 증가를 확인할 수 있다.

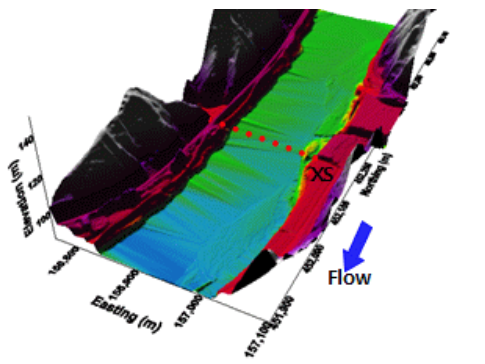
4개 지점 중에서 용혈하류는 영주댐에서 가장 가까운 지점이며, 주요 지류인 영주서천이 합류하기 전에



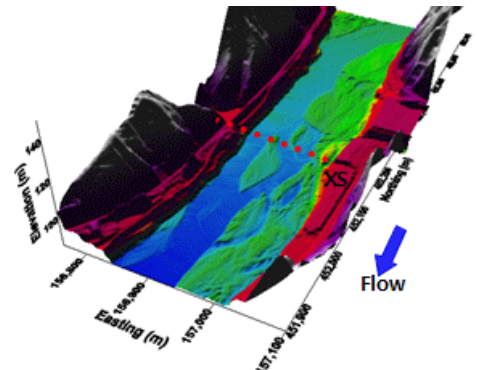
(a) Yonghyeol 4, 2012



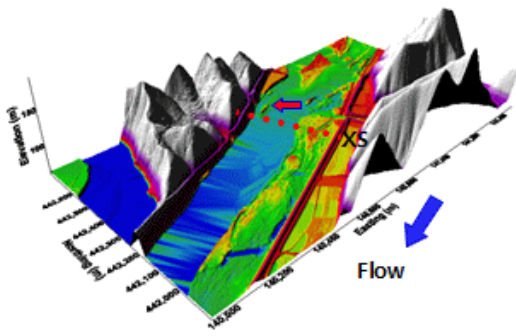
(b) Yonghyeol 4, 2016



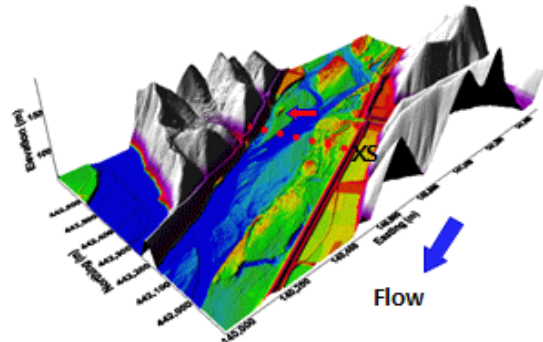
(c) Miho, 2012



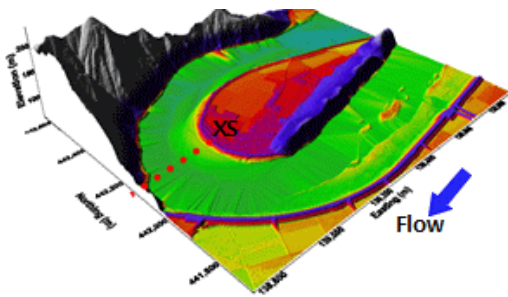
(d) Miho, 2016



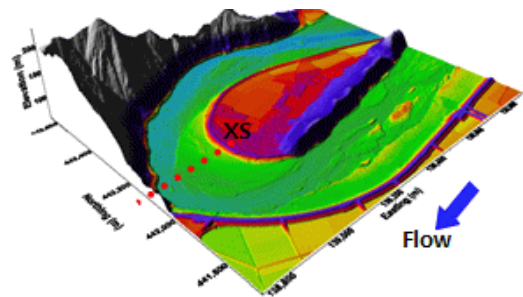
(e) Sangwol, 2012



(f) Sangwol, 2016



(g) Hyeoryong, 2012



(h) Hyeoryong, 2016

Fig. 3. Change in channel morphology between 2012 and 2016 at the four main sites of the Naeseong Stream.

위치한다. 이 지점에서는 2012년과 비교하여 2016년에는 만곡사주의 면적이 확장되고 저수 흐름 영역이 감소하였고 수역과 사주의 경계가 확연해졌다. 사주의 표면은 매우 거칠게 보이는데, 이는 사구 (dune) 형태로 퇴적이 이루어져 있기 때문이다. 아울러 상류 쪽에는 공사로 인해 하상을 파낸 흔적이 확인된다. 미호 지점은 영주댐으로부터 하구까지 약 40% 거리에 위치하는 지점이다. 이 지점의 경우 수역이 대부분을 차지하던 2012년과는 달리 사주의 형성과 발달이 뚜렷하다. 좌안을 따라 2012년에 뚜렷하지 않던 사주 영역이 뚜렷해졌고, 구간의 중간에 고구마 형태(길이 150 m, 폭 50 m, 약 4,756 m²)의 사주를 비롯하여 새로운 사주가 형성되었다. 상월 지점 (영주댐으로부터 48 km)의 경우 좌안의 고수부지 영역은 대체로 변화가 없으나 좌안 저수로를 따라 퇴적이 증가하여 사주가 뚜렷해졌고, 그림 4(f)의 상류 쪽에 우안 제방 부근의 사주는 하류 방향으로 확장되면서 그 면적이 1,212 m²에서 4,617 m²으로 크게 증가하는 등 전체적으로 사주 면적이 증가하였다. 회룡 지점의 경우 만곡사주는 그 범위가 증가하였고, 상류 구간인 만곡 진입부에는 소규모로 여러 개의 하중 사주가 형성되면서 수면이 감소하였음을 알 수 있다.

4.2 하천 단면의 지형 변화

Fig. 4는 Fig. 3의 XS 위치에서 지속적으로 측량한 단면을 보여준다. 이와 함께 2016년 12월에 측량한 라이다 DEM에서 동일한 위치에서 추출한 단면이 추가되었다. 본 논문에 수록하지 않은 기타 6개 지점 결과는 KICT (2016)에 제시되어 있다.

지점별로 보면, 용혈하류는 2013년부터 2014년 3월까지의 단면은 전반적으로 좌안에서 우안으로 약간 경사가 있으나 평탄한 형태를 나타내고 있다. 식생이 본격적으로 이입하였던 2014년 3월 이후에는 좌안에서 약 40 - 50 m 구간에서 퇴적으로 인한 하상의 상승이 관찰된다. 2016년 7월에 있었던 홍수 이후에는 좌안의 저수로 하상은 약 2 - 3 m 정도 세굴되었고, 우안의 사주는 추가적으로 0.5 m 정도 퇴적되었다. 2017년 2월 현장 확인 결과 좌안의 세굴심이 감소하여 최심부는 112 m 정도의 높이까지 높아진 것으로 파악되었다. 미호 지점은 2014년 이후로 Fig. 3(d)에서 보여지는 하중 사주가 형성되었는데, 이것은 2014년부터 좌안으로부터 약 130 m 지점에 형성되기 시작하였다. 단면 위치에서 폭 15 m 정도로 퇴적이 이루어졌고, 2016년에는 그 폭이 상대적으로 증가하면서 좌우 주변에서는 하상이 다소

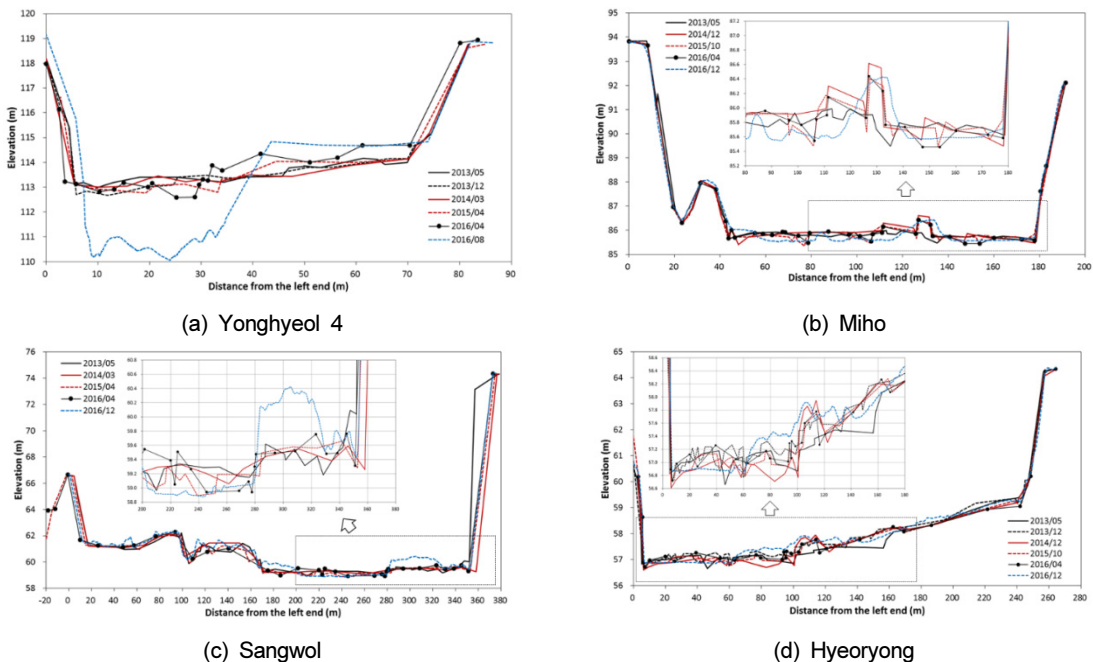


Fig. 4. Change in cross-section morphology at the four main study sites of the Naeseong Stream.

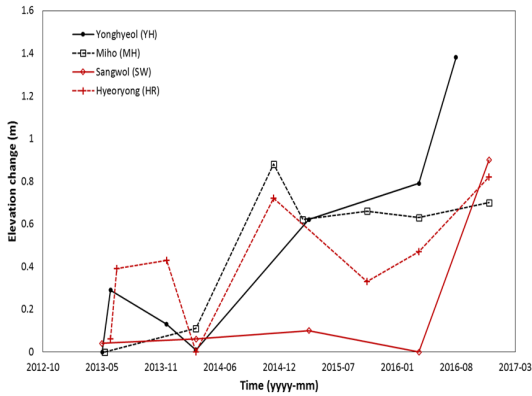


Fig. 5. Change in the bed surface elevation of the vegetated points at four main sites of the Naeseong Stream.

세굴되었다. 상월 지점의 경우 2013년부터 2016년 4월 홍수 이전까지는 우안 부근의 사주의 고도 변화가 없다가 2016년 홍수 이후에 좌안부터 280 - 330 m 지점에 상당한 퇴적이 발생하였다(파란색 파선). 회룡 지점을 보면 좌안으로부터 5 - 100 m에 해당하는 주수로 부분에서는 시간에 따른 하상의 승강이 반복되었지만 그 정도는 크지 않았다. 좌안부터 100 - 120 m 지점에서 2013년 12월 이후 퇴적이 이루어졌고, 2016년 12월에는 퇴적이 60 - 100 m 구간에도 추가적으로 이루어졌다.

Fig. 5는 4개 주요 지점에서 하상고가 증가한 위치에서 시간에 따른 하상고 변화를 나타내고 있다. 2014년 12월 이전에는 지점에 따라 0.4 m 내외의 승강이 있으나 본격적인 하상고 상승은 2014년 8 - 10월 홍수에 의한 퇴적으로 볼 수 있는데, 이는 2014년 12월 및 2015년 4월 측량 결과를 통해 알 수 있다. 2014년에 퇴적이 발생하지 않은 상월 지점을 제외한 3개 지점에서 하상의 상승 정도는 0.6 - 0.8 m 정도이며, 대개는 1회의 홍수에 의해 퇴적된 것으로 판단된다. 2016년 8월 홍수 이후의 측량 결과에는 지점에 따라 하상의 상승 양상이 다른데, 상월 지점의 경우 대략 0.8 m의 하상 상승이 발생하였고, 용혈하류 지점의 경우 만곡사주 전체를 덮는 퇴적과 함께 0.6 m의 추가적인 하상 상승이 발생하였다. 미호 지점의 경우 2016년 홍수로 인해 하상의 상승은 거의 없었다. 회룡 지점의 경우 2015년 이후 약간 낮아졌다가 2016년에 2014년 12월의 하상고 수준을 회복하는 것으로 나타났으나 이는 측량 위치의 좌우 변동에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 Table 1의 10개 단면 측량 지점에서 2013 -

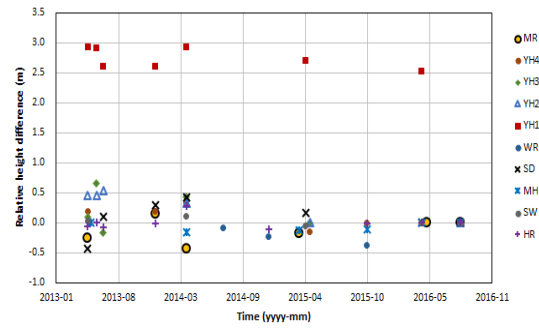


Fig. 6. Temporal changes in elevation of the deepest points on the cross-sections of the Naeseong Stream.

2016년 기간 동안의 최심부 기준 상대적인 고도 변화를 보여준다. 기준은 마지막 측량 시점의 최심고도이다. 이를 Fig. 7과 함께 보면 용혈하류 (YH1) 지점에서 최심하상의 저하가 가장 뚜렷하며, 공사 구간이면서 영주댐 직하류 구간인 용혈중간 (YH2), 용혈상류 (YH3) 지점에서도 0.5 m 정도의 최심 하강이 확인된다. 그 외의 지점들은 하상이 소폭 하강하거나(우래), 승강을 반복하거나(미림, 수도, 미호, 회룡 등) 하는 특성을 보이고 있다.

용혈하류 (YH1) 지점은 가장 큰 최심하상 저하를 보였는데, 이는 2016년 홍수로 인한 것이다. 2014년까지는 하상의 승강이 반복되다가 2015년 4월 이후 저하되기 시작하였고, 2016년 홍수시 크게 세굴되었고, 이후 최심부가 매립되어 다소 높아졌다. 이러한 하상 저하는 홍수의 영향과 함께 용혈하류 지점의 하천 공사로 인해 저수로를 파낸 것도 영향이 있다고 할 수 있다.

한편, 연구 기간 (2013 - 2016년)의 낙동강홍수통제소 수위 자료를 분석해 보면, 2013년의 연최저 수위에 비해 2016년의 연최저수위가 낮아진 것을 확인할 수 있다. 최저수위 하강 폭은 상류로부터 조제 지점에서는 0.13 m, 미호 0.4 m, 월포 0.55 m, 죽전 0.35 m, 향석 0.41 m 등으로 전반적으로 연최저수위가 낮아진 것이 확인된다. 다만, 수위 저하는 2016년 하반기부터 시작된 영주댐의 유량 조절을 포함한 자연적, 인위적인 수문학적 변동이 반영된 것으로 하상저하의 직접적인 결과라고는 할 수 없다.

4.3 수문 변화

내성천 유역의 연구 기간 (2013 - 2016) 동안의 기상 특성으로 인해 홍수 역시 같은 패턴을 나타냈다. Fig. 7

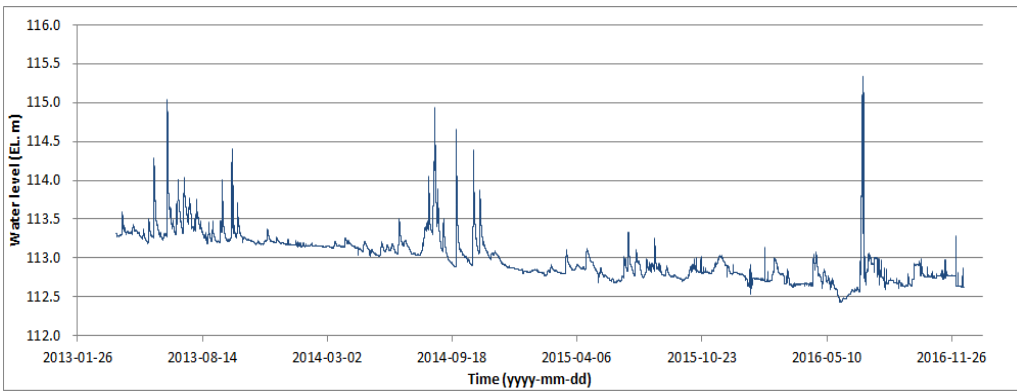


Fig. 7. Changes in water level from 2013 to 2016 at the Yonghyeol 4 site of the Naeseong Stream.

은 용혈하류 지점에 설치한 수위계의 수위 변화를 나타낸다. 2013년은 5월말과 6월 20일경에 홍수가 발생하였으며, 2014년에는 연초부터 8월 후반까지 내내 홍수가 없었다가 다소 약한 홍수가 8월부터 10월 사이에 3회 발생하였다. 2015년은 홍수가 거의 없었던 해인데, 용혈하류 지점에서의 연최대유량은 $11.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 이며, 월포 지점에서는 연최대일유량이 $32.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 로 지난 1969년 이래로 유량이 가장 적은 해였다. 2016년은 2016년에는 7월 초에 모니터링 기간 중 최대 규모의 홍수가 있었으며, 월포 지점을 기준으로 연최대일유량이 $650 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 로 약 1.75년 빈도의 홍수로 판단되는데, 이는 연구기간 중에 가장 큰 홍수였다.

4.4 식생 변화

본 연구에서는 하도 지형 변화에 영향을 미치는 주요 요소로서 식생 변화를 주기적으로 모니터링하였다. Fig. 8은 용혈하류와 미호 지점에서 촬영한 사진이다. 이외에도 10여개 지점에서 현장 모니터링과 매년 항공 사진을 촬영하여 모니터링을 실시하였다. 식생 변화 특성은 대부분의 지점에서 정도의 차이는 있으나 연도별 특성이 유사하게 나타났다. 이에 따라 본 논문에서는 지면 관계상 제시하지 않았다.

Fig. 8(a) 및 and 8(d)에서 보듯이 2013년에는 연중 식생이 없는 상태가 유지되었다. 하지만, 2014년의 경우 5월 이후로 수변부의 식생 이입이 급격하게 이루어졌다가 (Fig. 8(b)), 8월 후반부 홍수 이후 일부 식생이 매몰되면서 사주 면적이 증가되었다. 2015년의 경우에도 재차 식생의 이입이 이루어졌다. 전반적으로 2014년과 2015년에는 식생이 기존의 사주 영역에 밀집되게

이입하였으며, 저수로 흐름부의 일부를 제외하면 상당한 면적이 식생으로 피복되었다 (Fig. 8(e)). 2016년에는 홍수로 인해 식생이 매몰되었으며, 지점에 따라서 다르나 상당한 면적에서 식생 피복이 감소하였다 (Fig. 8(c) 및 8(f)).

5. 고찰

5.1 하도에서의 지형 변화 양상, 과정 및 원인

지난 5년간 내성천 주요 4개 지점에 나타난 변화의 양상을 요약하면 저수로에서의 퇴적이 증가하여 기존의 하폭 범위 내에서 사주가 확대되고 저수로가 감소한 것이라고 할 수 있다. 다만 이러한 변화는 만곡부와 직선부에서 다른 양상으로 나타났다. 만곡부에서는 퇴적이 증가하면서 만곡사주가 확장되고 저수로의 폭이 줄어들었다. 직선부에서는 하중 사주 및 부착형 사주가 형성되고 성장되었다. 이러한 하도 내에서의 지형학적 변화는 수문학적인 변화에 반응하여 쉽게 지형이 형성, 변화되는 모래하천에서는 자연스럽게 활발한 하도 변화의 과정으로 볼 수 있다.

변화의 과정에는 식생의 이입과 밀생이 중요한 영향을 끼친 것으로 판단된다. 사주에서의 식생의 이입과 밀생은 그 자체로서는 퇴적을 야기하는 것은 아니지만, 홍수시 발생할 수 있는 흐름 저항을 증가시키고 운반되는 유사의 퇴적을 유도한다. 측량 단면 및 라이다DEM에서 보여진 미호, 상월, 회룡 지점에서의 퇴적과 하상 상승은 모두 식생이 이입한 사주에서 발생하였다. 또한, 용혈 지점의 경우 수변에 피복되어 있던 식생은 사주의 상승과 함께 매몰되었는데, 2014년 8월 홍수시 수



(a) Yonghyeol 4, 27 June 2013



(d) Miho, 16 May 2013



(b) Yonghyeol 4, 11 July 2014



(e) Miho, 22 October 2015



(c) Yonghyeol 4, 14 July 2016



(f) Miho, 14 July 2016

Fig. 8. Annual changes in vegetation on the bar of the monitoring sites of Yonghyeol 4 and Miho in the Naeseong Stream.

변부를 중심으로 0.6 m의 퇴적이 이루어지고 이후에 2016년에 2015년에 피복되어 있던 식생이 재차 매몰되면서 퇴적이 이루어졌다 (Fig. 5). 이는 식생 피복이 없는 사주나 식생이 이입하지 않은 만곡사주 내측에서 하상의 상승이 0.2 m 미만인데 비해 훨씬 큰 것이다. 식생이 이입하여 밀생한 사주는 그 자체로서 흐름을 저해하는 장애물이 되며, 하류 쪽에 퇴적을 유도하기도 하는데, 상월 지점의 식생 사주(붉은 화살표)의 하류로의 확장은 2013년까지는 거의 일어나지 않다가 2014년에 식생 이입과 함께 하류로 약 175 m가 길어졌고, 2015년에는 220 m, 2016년에는 240 m까지 길어졌고 폭도 증가하였다. 미호 지점 단면에 나타난 사주 역시 2014년에 처음 형성되어 약 38 m 정도의 길이였다가 2015년에는 120 m, 2016년에는 152 m로 길어졌다. 이러한 과정은 정도의 차이는 있지만, 내성천 전체 구간에서 유

사하게 나타났다. 또한 이러한 과정은 주로 활성 하도 (active channel)로 볼 수 있는 고수부지 고도 미만의 저수로에서 발생하였다.

그러면 2013 - 2016년에 내성천에서 일어난 하도의 변화의 주된 요인은 어떤 것인가를 살펴볼 필요가 있다. 지난 4년 동안 발생한 사건 중 하도의 지형과 관련된 주요한 것은 수문기상학적 변화, 영주댐 건설, 하천 공사 등이다. 이 중에 가장 유력한 원인은 수문기상학적 변화이다. 앞서 언급한 것처럼 2014년 8월 이전의 갈수기와 2015년의 갈수기는 그 이전과는 달리 사주에서의 식생 이입이 크게 발생하였고 그런 상태에서 2016년의 홍수로 인해 식생 밀집 구역에 퇴적이 야기된 것이다. 영주댐의 경우 2013년 하반기에 이미 댐 본체가 건설되었으나 2015년까지는 담수가 이루어지지 않고 도수로를 통해 상류에서의 유량을 거의 하류로 배출하였다.

2016년의 경우 배사문을 통한 유량 배출로 인해 침두 유량은 다소 낮아졌을 것으로 판단되나 4년 기간 중 가장 큰 유량이 내성천에서 발생하였고, 월포 지점의 유량 역시 4년중 최대치에 달하였다. 한편, 영주댐 - 서천 합류점 구간의 하천 공사는 2015년 하반기에 시작되어 현재까지 진행 중이다. 이로 인해 하상의 교란과 식생의 제거 등이 수반되었다. 따라서 하도 내에서만 볼 때는 2016년 홍수시 식생이 교란된 하상과 하도 내 임시 적치된 하상토의 침식으로 인해 자연 상태에 비해 쉽게 유사가 공급될 수 있는 조건이 이루어졌을 가능성이 있다. 영주댐 상류의 경우에도 하상 굴착, 골재채취와 준설, 하상토의 임시 적치 등으로 유사 농도가 증가할 수 있는 소지가 있으나 2016년에는 홍수가 배사문을 통해 하류로 방류되었으므로 일부 유사는 댐 상류에 저류될 수도 있으므로 유사 공급이 증가하는 방향으로만 작용한 것은 아니라고 판단된다. 다만, 하천공사 및 댐 방류로 인한 유사량의 증감 여부는 조사하지 않았으므로 계량적인 판단보다는 임의적 추정만 가능한 상황이다. 종합해 보면, 지난 4년간의 내성천에서의 하도 지형 변화에는 수문기상학적 요인이 주로 영향을 미쳤다고 판단할 수 있다. 아울러 하상의 교란으로 인해 2016년 홍수시 유사량이 증가하였을 것으로 추정된다.

5.2 하도의 역동성과 안정성

모래하천에서 저수로 하도는 매우 역동적인 변화를 나타낸다. 식생이 없는 경우 사주의 위치와 규모는 매 홍수시마다 변화하고 저수로의 물길은 유량에 따라 여러 갈래로 갈라졌다가 합쳐지는 과정이 반복된다. 특히 하폭이 크고 수심이 얇은 조건에서는 수심 규모의 2차류 세포가 다수 형성되며 (Richards 1982), 저수시에는 퇴적 구역이 노출되어 다수의 사주가 노출되는 망류 하도를 나타낸다. 이러한 사주들은 수평적 규모는 다양하지만, 수직적으로는 크지 않으며, 모래하천의 속성상 쉽게 침식된다. 따라서 식생이 초기에 이입하더라도 후속하는 증수 또는 홍수가 사주를 침수, 침식하거나 추가 퇴적을 발생시키면 씨앗의 정착 자체가 제한을 받을 수도 있고, 발아한 유식물이 제거되거나 매몰되어 식생의 이입이 억제되므로 역동성이 유지될 수 있다.

반면에 2 - 3년간 계속되는 갈수기는 저수로 하도의 역동성을 감소시키는 계기가 될 수도 있다. 이는 하중

사주가 잘 발달하는 직선 구간에서 두드러진다. 홍수가 발생하지 않는 갈수기가 계속되면 수면과의 고도 차이가 낮은 물가를 중심으로 식생이 이입하고 밀생할 수 있는 조건이 형성된다. 이러한 변화는 수년 이내의 단기간에 발생할 수 있다 (Woo et al. 2010). Fig. 8(c)에서 볼 수 있는 것처럼 활착된 식생은 상대적으로 낮고 수면이 가까운 곳에서 더 밀생한다. 밀생한 식생은 후속하는 홍수시에 퇴적을 유도하며, 사주를 안정시키고 사주의 수직적, 수평적 성장을 유도한다. 그림 5에서 보듯이 식생이 밀생한 상월 지점은 2016년에 단 한 번의 홍수로도 최대 0.8 m 이상의 하상 상승이 일어났고 기존의 하중도 하류로 약 200 m 이상, 4,600 m² 이상의 면적에 퇴적이 발생하였다. 만곡부인 회룡 지점에서도 0.5 m 이상의 퇴적이 한 번에 발생했는데, Nanson and Beach (1977)은 만곡부의 주름형 사주 형성시 퇴적 속도가 10 cm s⁻¹ 이상이라고 보고한 바 있다. 이러한 급격한 퇴적은 홍수시 주변부로부터 이동된 소류사의 퇴적에 기인하는 것으로 하중도의 수직적 성장의 초기 단계에서 발생하는 것이다 (Wintenberger et al. 2015). 이렇게 형성된 사주는 홍수시에도 쉽게 소멸되어 저수로로 복귀되지 않으며, 밀생하는 식생이 유지되면 강터의 안정성이 증가하여 침식에 더욱 강해지며, 목본이 성장하는 경우 후미부 (lee side)에서 추가적인 퇴적으로 수평적으로 성장하고 홍수시 세립질의 퇴적이 이루어지면서 수직적으로 성장하여 나중에는 강터흐름에도 침수되지 않는 하중도로 발달하게 될 가능성이 높다. 하중도는 자체로는 안정성이 높아서 흐름을 저해하거나 주변으로 분산시켜서 저수로의 침식을 야기할 수도 있으며, 좌우안에 가까운 경우 지속적인 퇴적시 부착되어 홍수터가 되기도 된다. 현재 내성천 하류 구간에 형성되어 있는 하중도들은 주로 이러한 과정으로 형성된 것으로 판단된다.

내성천은 중상류 구간과 회룡포 구간에서는 산지를 관류하는 하천이며, 하폭이 넓은 구간에서도 견고한 제방에 의해 제약되는 (confined) 하천이다. 따라서 하도의 수평이동은 제한되며, 침식과 퇴적이 지속되어 일어나는 하도의 지형변화는 주로 제약 범위 내에서 이루어진다. 갈수기가 길고 홍수가 크지 않았던 본 연구 기간 (4년)의 지형변화는 그러한 특성을 보여주었다. 보따긴 기간으로 볼 때, 안정된 하중도가 증가하고 저수로가 좁아질 경우 유속의 집중이 심해지고 하상이 상대적

으로 세굴되어 하폭수심비가 감소하거나 강턱 침식이 발생할 수도 있다. 따라서 앞으로도 지속적인 하천 지형 모니터링을 통해 큰 홍수를 포함하는 다양한 상황에서 하천이 변화하는 과정을 관찰할 필요가 있다.

6. 결론

본 연구에서는 항공 라이다 측량, 단면 측량을 실시하고 수문 및 지형학적 하천 조사 자료를 이용하여 2012 - 2016년 기간에 내성천에서 일어난 하도의 지형 변화를 분석하였다. 주요 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 용혈하류, 미호, 상월, 회룡 등 주요 4개 지점의 항공 라이다 DEM 분석 결과 만곡부에서는 사주가 확장되고, 직선부에서는 하중 사주가 형성, 성장하는 방식으로 하도의 지형학적 변화가 발생하였음을 확인하였다.
- 2) 4개 주요 지점의 단면에서 퇴적이 발생한 곳을 중심으로 1회 내지 2회의 퇴적을 거쳐 하상고가 0.6 - 1.4 m까지 상승한 반면, 국지적인 세굴이 발생한 용혈하류 지점을 제외하면 시간에 따른 최심하상의 저하는 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다.
- 3) 수문기상자료와 현장에서의 식생 모니터링 결과를 종합해 볼 때, 2014 - 2015년간 홍수가 약하게 발생하고 상대적으로 갈수기간이 지속되면서 식생이 크게 활착하였는데, 이로 인해 2016년의 홍수시 식생 사주에서의 퇴적이 유도되어 하도의 지형이 현재와 같은 모습으로 변화된 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Burvingt, O., Masselink, G., Russell, P. and Scott, T. 2016. Beach response to consecutive extreme storms using LiDAR along the SW coast of England. *Journal of Coastal Research: Special Issue* 75: 1052-1056.
- De Rose, R.C. and Basher, L.R. 2011. Measurement of river bank and cliff erosion from sequential LIDAR and historical aerial photography. *Geomorphology* 126: 132-147.
- Gordon, E. and Meentemeyer, R.K. 2006. Effect of dam operation and land use on stream channel morphology and riparian vegetation. *Geomorphology* 82: 412-429.
- Han, J.H., Kwon, J.H. and Hong, C.K. 2010. Analysis of network-RTK (VRS) positioning accuracy for surveying public control point. *Journal of Korean Society for GeoSpatial Information Science* 18: 13-20. (in Korean)
- Hickin, E. 1984. Vegetation and river channel dynamics. *Canadian Geographer* 28: 111-124.
- JGJK. 1920. Survey on Flood Control and Water Use. The Japanese Government General of Korea, Seoul, Korea. (in Japanese)
- KICT. 2016. Analysis of Change in River Morphology and Vegetation Due to Artificial Structures. KICT Report 2016-187, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea. (in Korean)
- Kim, D-S. 2003. Application of airborne laser mapping system, LiDAR, and GPS technologies. *Korean National Committee on Irrigation and Drainage* 10: 103-111. (in Korean)
- Kim, H.I., Yu, G.S., Park, K.D. and Ha, J.H. 2008. Accuracy evaluation of VRS RTK surveys inside the GPS CORS network operated by National Geographic Information Institute. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography* 26: 139-147. (in Korean)
- Lee, C., Kim, J.S., Kim, K.H. and Shin, H.S. 2015. Analysis on fluvial geomorphological characteristics based on past and present data for river restoration: An application to the Miho River and the Naesung River. *Journal of Korea Water Resources Association* 48: 169-183. (in Korean)
- Lee, G.R. 2010. A comparative analysis on channel forms and landscapes at Naeseongcheon River and Wicheon River in Gyeongpook Province. *Journal of the Korean Geomorphological Association* 17: 1-16. (in Korean)
- Matzek, C.D., Ely, L.L. and O'Connor, J.E. 2012. Using repeat LiDAR surveys to determine the geomorphic changes related the removal of the Marmot Dam on the sandy river, Oregon. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2012*, abstract #EP13E-0895.
- MLTM. 2013. Basic Plan for the Downstream of the Naesung River. Ministry of Land, Maritime and Transportation, Sejong, Korea. (in Korean)
- Nanson G.C. and Beach, H.F. 1977. Forest succession and sedimentation on a meandering-river floodplain, northeast British Columbia, Canada. *Journal of Biogeography* 4: 229-251.
- Park, B.J., Jang, C.L., Lee, S.H. and Jung, K.S. 2008. A study on the sandbar and vegetation area alteration at the downstream of dam. *Journal of Korea Water Resources Association* 41: 1163-1172. (in Korean)
- Richards, K. 1982. Rivers: Form and Processes in Alluvial

- Channels. Methuen, London, UK.
- Williams, G.P. and Wolman, M.G. 1984 Downstream Effects of Dams on Alluvial Channels. USGS Professional Paper 1286, Department of the Interior, USA.
- Wintenberger, C.L., Rodrigues, S., Bréhéret J-G. and Villar, M. 2015. Fluvial islands: First stage of development from nonmigrating (forced) bars and woody-vegetation interactions. *Geomorphology* 246: 305-320.
- Woo, H., Park, M., Cho, K-H., Cho, H. and Chung, S. 2010. Recruitment and succession of riparian vegetation in alluvial river regulated by upstream dams - Focused on the Nakdong River downstream Andong and Imha Dams -. *Journal of Korea Water Resources Association* 43: 455-469. (in Korean)