



댐 건설로 인한 모래하천의 지형 및 수변식생 변화에 관한 모니터링 연구: 댐 건설 전 단계, 내성천을 사례로¹⁾



이 찬 주
한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원



정 상 준
한국건설기술연구원 하천해안연구실 전임연구원



황 승 용
한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원

1. 서론

댐은 홍수 조절, 물 이용, 수력 발전 등의 다양한 목적으로 건설된다. 이러한 혜택은 주로 댐과 먼 거리에 있는 지역에서 얻지만, 댐 하류 하천은 그로 인해 상당한 영향을 받는다. 특히 침투 유량 및 유사량의 감소와 같은 수문학적인 변화는 댐 건설로 인해 직접 야기되는 변화이며, 하류 하천의 지형과 식생은 그 결과로 영향을 받게 된다. 댐 건설로 인한 변화에 대해서는 1980년대 이래로 다수의 연구가 수행되었는데, 그 중에 Williams와 Wolman(1984),

Johnson(1994), Nakamura(1999) Azumi 등 (2004), Choi(2005) 등 여러 연구가 있다. 그런데, 이들 연구의 대부분은 댐 건설 후 최소 십 수 년이 경과한 후에 이루어졌기에 상세한 하천 지형 및 수변식생의 변화는 수문학적인 그리고 다른 환경 조건상의 변화와 더불어 충분히 다루어지지 못했는데, 이는 모니터링 자료의 부족이라는 시간적 측면에서 그렇고 또 모래 하천에서 더욱 그러하다. 그러나 변화를 최소화하기 위한 대책을 마련하고 댐 하류의 하천을 자연적으로 유지하기 위해서는 댐 담수 후에 하천의 변화에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

내성천 상류에는 현재 영주다목적댐(이하 영주댐)이 건설 중이며, 2012년말에 본체가 완공되었고, 조만간 담수가 시작될 것이다. 영주댐이 건설된 내성천은 모래가 풍부한 하도와 좁은 골짜기를 가진 사행하천으로 회룡포와 수도리라는 두 곳의 역사적으로 유명한 만곡부를 갖고 있다. 따라서 댐 건설 발표 후에 유량과 유사량 감소 후에 나타나는 침식과 식생화에 따라 아름다운 백사장의 감소 또는 소멸을 우려하는 사회적 관심이 증가하고 있는 실정이다.

본 연구는 이러한 맥락에서 영주댐 건설 후 내성천의 장기적인 하천 지형 및 식생 변화를 모니터링하기 위해 시작되었다. 연구는 2012년에 시작되었고, 2016년까지 약 5년간 수행될 예정이다.

하천의 지형과 형성 작용, 그리고 식생 변화를 기술하기 위해서 모니터링은 세 가지 부문으로 나뉘어 수행될 예정이다. 수질을 포함한 수문 부문, 하천 지형, 그리고 식생 분야이다. 모니터링은 거시적 관점

1) 이 글은 저자가 2013년 국제하천유사학회(ISRS)에 투고한 논문을 전재한 것임을 밝힙니다.



및 미시적 관점에서 수행되는데, 연례적인 하천 및 식생의 패턴의 변화는 거시적 관점에서 조사하며, 식생과 그 주변 환경 및 생육조건, 이를테면 하상재료 특성, 지하수위, 토양수분 상황, 수질 등은 미시적인 관점에서 모니터링 할 예정이다. 이를 통해 본 연구에서는 댐 하류의 하천 지형과 수변 식생의 변화를 보다 상세하게 이해할 수 있을 것으로 기대하고 있으며, 하천의 자연성을 유지하기 위해 하상과 식생을 관리하기 위한 방안을 마련하게 될 것이다.

여기에서는 5년간 계속될 연구의 초기 단계에 수집, 분석한 내성천의 과거 및 현재 상태에 대한 예비 조사 결과를 간략하게 서술한다.

2. 대상하천

이 연구의 대상하천은 내성천이다. 내성천은 경북 봉화군에서 발원하여 남류하다가 다시 서쪽으로 흐르면서 영주시와 예천군을 지나가며 낙동강으로 합류한다(그림 1 참조). 유로연장은 108.2 km이며, 유역면적은 1,814 km²이다.

내성천은 좁은 골짜기를 관류하며 흐르는 사행 모래하천의 특성을 갖고 있으며, 자연성이 높다. 내성천의 주요 지류는 서천, 한천, 금천으로 대부분의 지류 유역면적은 내성천의 북쪽에 위치한다. 내성천 유

역 대부분의 지질은 풍화된 화강암으로 구성되어 있어 조립질 모래가 하천에 많이 공급된다. 이에 비해 유역의 남부와 하류 쪽은 편마암 지질로 구성되어 있다(손명원, 1985).

본 연구의 주요 대상 구간은 영주댐 하류로부터 낙동강 합류점까지로서 구간 길이는 55.0 km 이다.

3. 수문 특성

3.1 수위

하천의 지형은 형상 그리고 독립적인 수문 및 퇴적상을 반영하는 프로세스 사이의 상호작용에 반응하여 조절된다. 유사 이송을 야기하는 침투 유량 사상은 유역의 수문학적 특성을 반영한다. 따라서 침투 유량의 변화는 하도의 형상과 유사 이송 프로세스에 영향을 미친다. 뿐만 아니라 식생 역시 유역의 수문과 수질에 영향을 받는다.

그림 2는 내성천의 하류 말단부에 근처에 위치한 죽전 수위관측소에서 얻어진 40년간의 수위 기록이다. 죽전 관측소에서 지속적인 유량측정이 이루어지지 않았기에 수위수문곡선이 간단하게 유량 수문곡선으로 변환되지는 않지만 유량을 가늠하는데는 활용될 수 있다. 저수시의 수위는 장기적인 변화를 나타내는

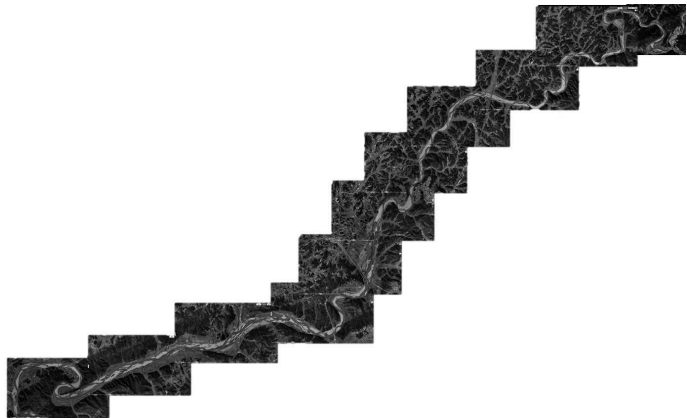


그림 1. 내성천의 위치, 유역경계 및 연구구간(영주댐 하류)

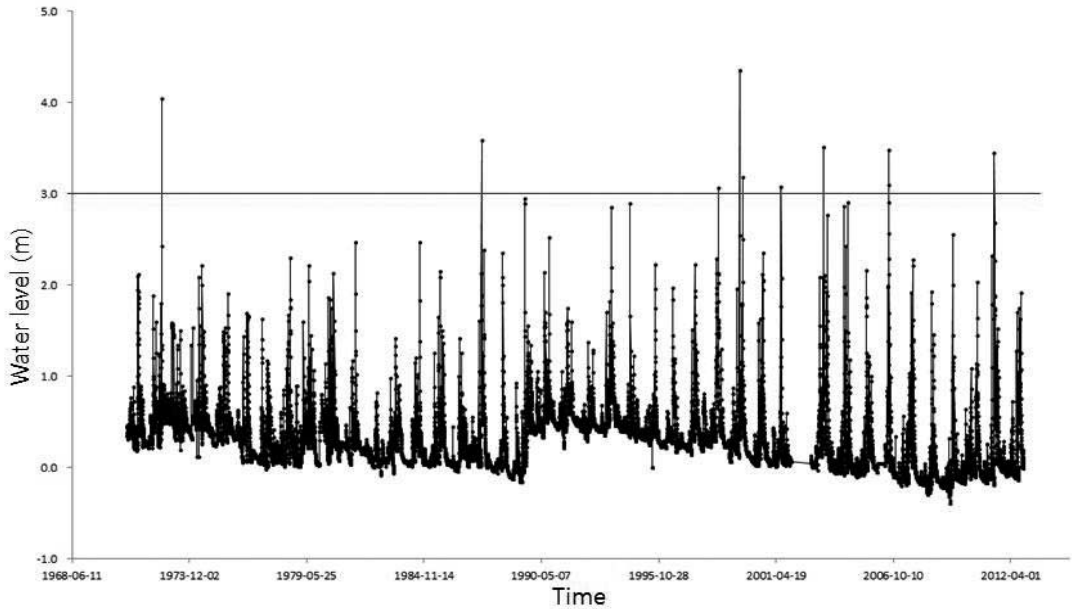


그림 2. 죽전관측소의 수위자료(1971~2012)

데, 이를 통해 하상의 변화 혹은 영점표고의 변화를 짐작할 수 있다. 자료를 보면, 2000년과 2011년에 공식적인 영점표고의 조정과 함께, 1990년경에 비공식적인 영점표고의 변화가 있어 보인다. 홍수 유량을 살펴보면, 몇 가지 경향이 관찰되는데, 1998년 이전에는 28년의 기간동안 수위 3 m를 넘는 단지 2회만 확인된다. 하지만 1998년 이후에는 5회의 연최고 침두사상이 3 m를 넘었고, 홍수 사상만으로 보면 3 m 초과 건이 7회가 있었다. 즉, 1998년을 기점으로 침두 홍수의 빈도가 증가한 것이다. 이러한 결과는 집중 홍수의 횟수가 1998년 이래로 통계적으로 증가하였다는 사실을 보고한 Oh et. al.(2007)의 연구와 유

사한 점이 있다.

3.2 유사량

유사량은 하천 지형과 식생에 영향을 미치는 중요한 인자 중 하나이다. 그러나 내성천 유역에 가용한 유사량 자료가 충분하지 않아 분석에 한계가 있다. 지난 20년간 단지 4회의 유사량 측정이 행해졌을 뿐이다. 자료는 1992년, 2003년, 2011년에 얻어졌다(표 1 참조).

측정 지점이 다르지만, 1992년과 2011년에 측정된 자료를 비교해 보면 비유사량이 크게 증가했음을 알 수 있다. 1992년에 연간 비유사량은 대략 477 톤/km²/년이었던 것이 2011년에는 3,956 톤/km²/년으로 약 8.3배 증가하였다. 이러한 큰 차이는 일부는 측정 당시의 침두 유량의 차이로도 설명될 수 있지만 논 위주의 경지가 밭으로 바뀌고, 도시면적이 증가하는 등의 토지 이용 변화에도 그 원인이 있을 것으로 보인다. 이에 대한 보다 심층적인 분석은 수질 자료의 변화와 연계하여 검토할 필요가 있다.

표 1. 지점별 비유사량값

Station	year	Drainage area (km ²)	Sediment discharge (ton/yr)	Specific sediment discharge (ton/km ² /yr)
Hyangseok	2011	1,514	5,988,920	3,956
Wolpo	2003	1,134	-	-
Songriwon	1992	491	222,423	453
Seokpo	1992	299	149,799	501

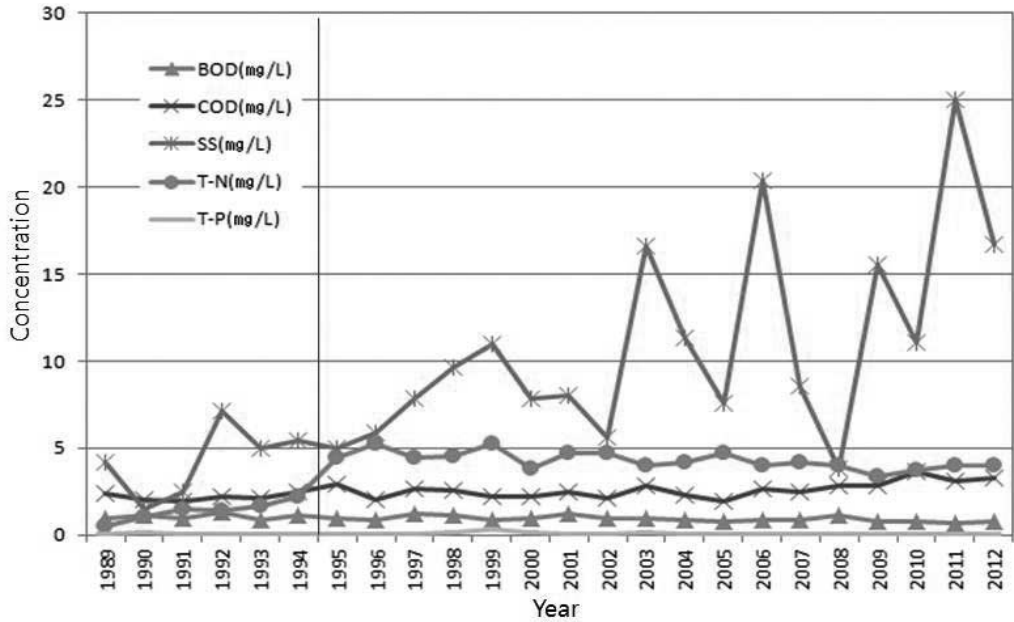


그림 3. 주요 수질변수의 경년 변화

3.3 수질

수질은 하천의 지형에 직접적인 영향을 미치지

않는다. 하지만 식생의 성장을 촉진하고 그 결과로 조도가 증가하여 사주 및 하중도 표면에서 미세 유사의 퇴적을 야기하는 방식으로 간접적인 영향을 미칠

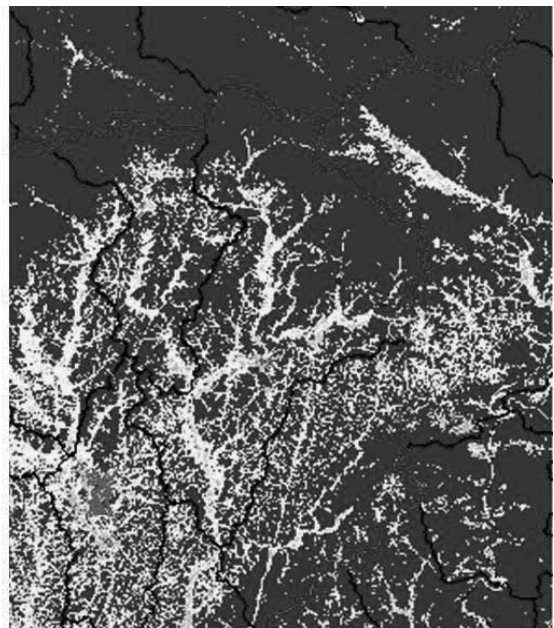
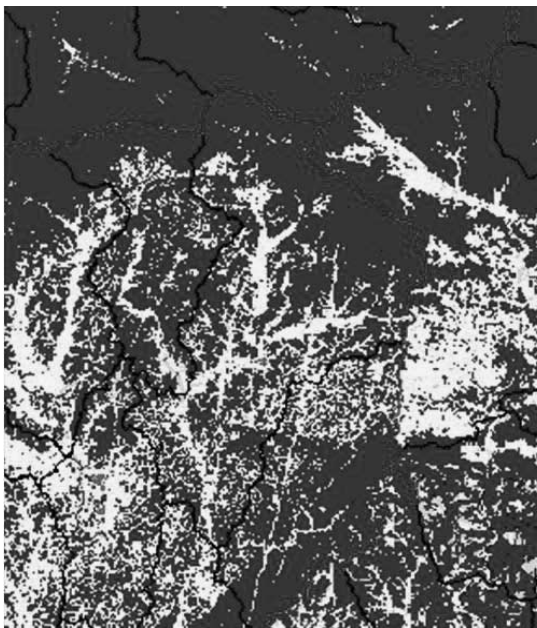


그림 4. 1975년과 2005년의 토지이용 변화

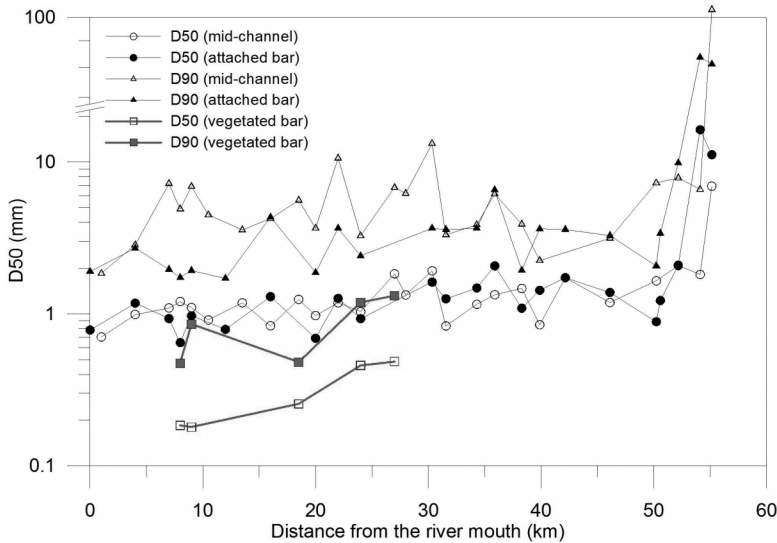


그림 5. 위치에 따른 하상재료의 입경(2012년)

수 있다. 그림 3은 내성천 하류의 경진교 지점에서 1989년 이래로 측정된 수질 자료를 나타낸다. 이 그래프를 보면, 1994년과 그 이후에 급변하는 특성을 볼 수 있는데, 총질소와 부유토가 확연하게 증가하였다. 총질소는 비료의 사용과 관계가 있고 부유토는 미세 입자의 세류사(wash load) 이송과 관련된다. 이러한 특성은 앞절에서 언급한 토지 이용 변화와의 연관성과 함께 고려해야 한다.

4. 지형

4.1 하상재료

내성천은 하상에 모래가 지배적인 특성을 가지고 있다. 하상재료의 대부분은 중간 내지는 조립질 모래로 구성되지만 세립 자갈(granule), 잔자갈이 대략 10% 정도를 차지하고 있다. 식생이 정착한 사주 표면에서 보다 세립질의 유사가 퇴적되어 있는데, 식생 사주의 D₅₀은 0.2~0.5mm 입경을 가진다.

내성천의 하상재료는 1984, 2001, 2012년 세 번 조사되었는데, 이 기간 동안의 추세적 변화는 하상재

료 채취 위치에 따른 공간적 차이에 비해 작은 것으로 나타났다(그림 5 참조).

4.2 하천 지형의 변화

하천은 상이한 시각에서 볼 수 있다. 공중에서 보면 하천의 평면적 형상과 하도의 역사적 변화가 관심의 대상이 된다. 내성천은 산지 골짜기와 인공 제방에 의한 제약으로 지난 25년간의 평면형 변화는 크지 않다. 그러나 식생 사주의 성장, 하

중도의 팽창, 그리고 하폭의 좁아짐은 내성천의 하류 구간에서 뚜렷하다(그림 6).

하천 지형에 대한 보다 상세한 측량은 LiDAR 측량을 통해 수행되었다(그림 7). LiDAR 측량의 공간 해상도는 평면적으로는 1 m² 당 5개 포인트이고, 수직적으로는 약 10 cm 이다. 따라서 하도 형태의 작은 변화도 충분히 확인 가능하다. 현재 1회의 항공 LiDAR 측량이 수행되었지만, 향후 매년 측량을 수행

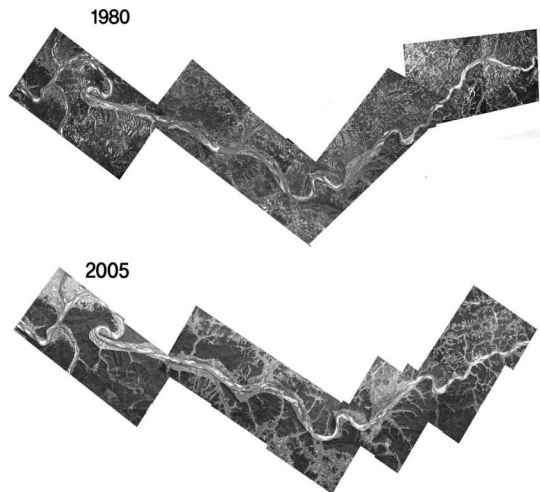


그림 6. 1980년과 2005년의 내성천의 항공사진 비교

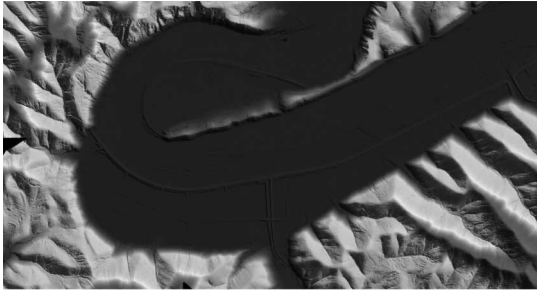


그림 7. 회룡포 구간에 대한 LiDAR 측량 결과

하여 연속적인 LiDAR 자료를 비교할 계획이다.

이와는 별도로 하천 측량 자료가 분석되었다. 1984년과 2001년 측량 결과 연구 구간에서 하상은 대략 1m 정도 낮아진 것으로 나타났다. 이러한 하상 저하의 주요 원인 중에 하나는 하도에서 이루어지는 광범위한 모래 골재 채취이다. 이외에도 하중도는 하천 관리청에 의해 통수능 확보 목적으로 식생과 함께 제거되기도 하였다. 그러나 수 년간의 유사 퇴적 후 에 동일한 위치에서 새로이 형성된다.

5. 식생

식생 분포 조사를 내성천 전체 구간에 대해 실시하였다. 내성천 하류에서 대부분의 식생은 고수부지 표

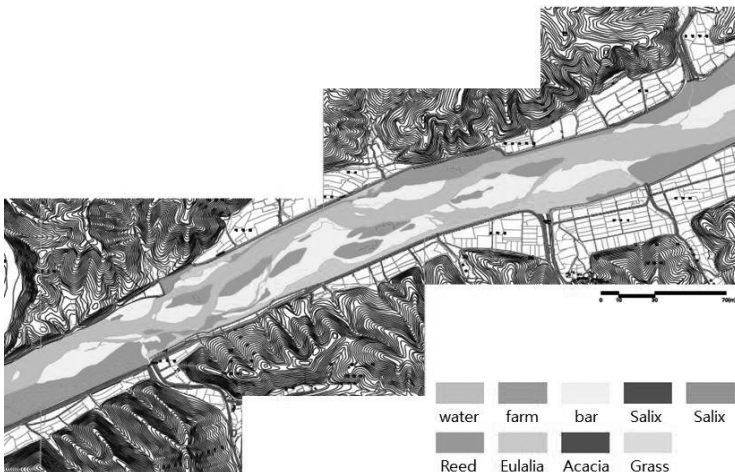


그림 8. 상월 구간의 현존 식생 분포

면에 정착하였다. 내성천의 식생 분포는 대략 단순한데, 갈대 및 달뿌리풀 군락이 대부분의 사주 구역에 자리잡고 있다. 강택선을 따라서는 버드나무가 지배수종이다.

식생이 덮인 하상면적이 수치적으로 산정되지는 않았지만 1990년대 이래로 하류의 어떤 지역은 식생화가 계속되어 왔다. 이러한 지역들은 고펡, 원곡, 그리고 상월 지역이다. 본 연구에서 중요한 것 중 하나는 댐 건설 전과 후에 식생 군락이 어떻게 변화하는지를 분별하는 일이다.

6. 토의

영주댐에서의 담수와 유사의 저류는 현 시점에서 아직 시작되지 않았으므로 댐 완공 이후에 발생하는 하천 지형과 식생의 변화는 아직 시작되지 않았다. 그러나 내성천은 이미 지난 30년간 지속적인 변화에 노출되어 있었다. 그 기간 동안에 내성천의 변화에 중요하게 영향을 미친 인자로 고려된 것들은 수문학적 특성, 토지 이용의 변화, 그리고 그에 따른 수질 및 유사량의 변화이다. 이러한 변화들은 농촌 지역에서 도시화와 산업화가 진행됨에 따른 결과라고 할 수 있다. 그에 따라 내성천은 하중 사주의 확장과 식생 성장에 따른 하폭의 축소를 겪어왔다. 그런데 이러한 하천 지형과 식생 성장상의 변화는 댐 건설에 의해 야기되는 것들로 인식되어 왔다. 이러한 변화의 설명 과정에서 많은 연구들은 하도에서 발생하는 프로세스나 수문-생물학적인 프로세스에 초점이 맞추어져 있다. 그러나 내성천에서는 이러한 변화들이 댐이 건설되기 전에 나타나는 것으로 보인다. 더 나아가 이러한 변화들은 내성천에만 국한

된 것은 아닌데 이는 복하천, 청미천, 그리고 감천과 같이 상류에 댐이 없는 모래하천에서도 유사한 변화가 관찰되었기 때문이다. 그러므로 하천 지형 및 식생 성장의 변화 요인을 분석하기 위해서는 더 심층적인 연구가 이루어져야 하며, 이는 유역의 수문학적 변화와 토지 이용의 변화에 대한 보다 넓은 관점을 포함하여야 할 것이다. 이를 고려하면, 내성천의 향후 연구에서 댐 건설로 인한 하천지형 및 식생의 변화를 적절하게 파악하기 위해서는 댐 건설 전과 후의 변화가 먼저 분별되어야 할 것이다.

7. 요약

이 글에서는 댐 담수 이후 하천 지형 및 식생의 변화를 분석하기 위한 장기적인 연구 과제의 첫단추로서 내성천의 과거와 현재 상태에 대한 조사로부터 예비적인 결과를 간단히 정리하여 제시하였다. 수질과 유사량을 포함하는 과거 수십년간의 수문학적인 자료

를 토지 이용의 변화와 함께 검토하였다. 하폭의 감소를 동반하는 하천 지형의 변화 역시 간략하게 검토하였다. 또한, 현재의 식생 분포 역시 간략하게 기술하였다. 마지막으로 내성천 및 다른 하천들에서 나타나는 댐과 관계없이 발생하였던 하천 지형 및 식생 성장의 원인에 관한 토의를 살펴보고 향후 연구 방향을 제안하였다.

이 글은 내성천에 대한 부분적이고 예비적인 조사 결과를 제시하였는데, 하천 지형과 식생 변화에 관계된 프로세스를 이해하기 위해서는 앞으로 진행될 댐 완공 후의 모니터링만큼이나 내성천의 역사에 대한 상세한 조사 및 분석이 필요하다.

사사

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 ‘(13주요-산업)구조물로 인한 하천 지형 및 식생 변화 분석’에 의해 수행되었습니다. ☺

참고문헌

1. 박봉진, 장창래, 이삼희, 정관수 (2008) 댐 하류하천의 사주와 식생 면적 변화에 관한 연구, 한국수자원학회 논문집, 제41권 12호, pp.1163-1172
2. 손명원, (1985) 내성천 상류 Bar의 형성과정, 지리학 31권 pp. 32-41
3. Azami, K., Suzuki, H., 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. Choi, S-U., Yoon, B. M., 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.
5. Johnson, W. C. (1994) Woodland expansion in the Platte River, Nebraska: Patterns and causes, Ecological Monographs, 64(1): 45-84



6. Nakamura, F. (1999) Influences of dam structure on dynamics of riparian forest, *Ecology & Civil Engineering*, 2(2): 125-139
7. Oh, J-S., Kim, C-Y. Kim, W. (2007) The shift characteristics of the rainfall in South Korea, *Proceedings of IAHR at Venice*, 1-11
8. Williams, G. P. & Wolman, M. G. (1984) Downstream effects of dams on alluvial channels, *USGS Professional Paper 1286*, Department of the Interior, USA.