Ecology and Resilient Infrastructure (2019) 6(1): 23-33
https://doi.org/10.17820/eri.2019.6.1.023

http://www.kseie.or.kr/
Online ISSN: 2288-8527

ORIGINAL ARTICLE

내성천의 수문, 하도 형태, 경관 및 식생 특성에 관한 장기모니터링 자료 (I)

Dataset of Long-term Monitoring on the Change in Hydrology, Channel Morphology, Landscape and Vegetation Along the Naeseong Stream (I)

이찬주[1]* · 김동구[2] · 지 운[1] · 김지성[1]

[1]·한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원, [2]한국건설기술연구원 국토보전연구본부 전임연구원

Chanjoo Lee[1]*, Dong Gu Kim[2], Un Ji[1] and Jisung Kim[1]

[1]Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 10223, Korea

[2]Research Specialist, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 10223, Korea

Received 12 March 2019, revised 21 March 2019, accepted 21 March 2019, published online 31 March 2019

ABSTRACT: Naeseong Stream is a sand-bed river that flows through the northern area of Gyeongbuk province. It is characterized by dynamic sandy bedforms developed in response to the seasonal hydrological fluctuation and by its unique riverine landscape called "white river." However, changes including construction of Yeongju Dam from 2010 and the extensive vegetation establishment around 2015 occurred along the Naeseong Stream. This paper aims to analyze climate, hydrology, and water quality as factors and to examine the possibility of channel changes accordingly. The second least precipitation during the last 60 years happened in 2015, which led to the lowest peak discharge in 50 years. The sediment characteristics of Naeseong Stream were not significantly different along the upstream and downstream reaches, but it was confirmed that annual minimum water level of the stream decreased continuously regardless of the dam construction. This suggests that intermittent drought and change in water quality are likely to provide favorable conditions for riparian vegetation establishment and the resulting physical changes have affected riverbed degradation. Therefore, it is necessary to conduct diversified monitoring in connection with river vegetation change in order to analyze the causes of river changes.

KEYWORDS: Hydrology, Long-term monitoring, Naeseong Stream, Rainfall, Water quality

요 약: 내성천은 경북 북부지역을 흐르는 모래하천으로 계절적 변동이 큰 수문학적 특성에 반응하여 발달하는 모래 하상의 역동성과 이른바 '화이트 리버'라고 하는 경관상 고유성으로 대표되는 하천이다. 하지만 2010년부터 영주댐이 건설되기 시작하고 2015년 전후로 식생이 광범위하게 활착하는 등 하천 변화가 발생하였다. 본 논문의 목적은 하천 변화의 원인이 될 수 있는 기후, 수문, 수질의 변화를 분석하고, 이에 따른 하천 변화의 가능성을 검토하기 위함이다. 분석 결과, 2015년에 1982년 다음으로 적은 강우량이 발생하였으며 이로 인해 여름철 첨두유량은 50년래 최저를 기록하였다. 내성천의 유사량 특성은 상하류가 크게 다르지 않았으나, 댐 건설과 무관하게 내성천의 연 최저수위가 지속적으로 감소하고 있었음을 확인하였다. 이는 간헐적 가뭄과 수질의 변화가 하천 식생의 활착에 유리하게 작용하고, 이에 따른 물리적 변화가 하도 및 식생 활착에 영향을 준 것으로 추정된다. 그러므로 하천 변화의 원인 분석을 위해서는 하천 식생 변화와 연계한 다각적인 모니터링이 필요함을 확인하였다.

핵심어: 수문, 장기 모니터링, 내성천, 강우량, 수질

***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. 서 론

내성천은 경북 북부지역의 산지를 사행하며 흐르는 모래하천으로 계절적 변동이 큰 수문학적 특성에 반응하여 발달하는 모래 하상의 지형학적 역동성과 이른바 '화이트 리버 (white river)'라고 하는 경관상의 고유성이 대표적인 특징으로 알려져 있다 (Gurnell and Petts 2002, Woo 2008). 하지만 2010년부터 영주댐이 건설 공사가 시작되고 이와 비슷한 시기인 2014년부터 내성천 대부분의 구간에 식생이 활착하면서 과거로부터 유지되어 온 내성천의 고유성이 사라질 것으로 예상됨에 따라 개발과 보전의 가치가 대립되면서 사회적 관심이 집중되어 왔다. 이는 댐에 의해 첨두홍수량이 감소되고 하도의 유사가 차단됨으로써 그 하류 하천에서는 하상이 저하되고 하도의 측방 이동성이 약화되며, 식생 활착과 수림화가 일어나면서 하폭이 감소하기 때문이다 (Williams and Wolman 1984, Kondolf 1997, Choi et al. 2005).

식생 활착과 하도의 역동성 감소는 직접적으로는 유량과 유사량 감소에 기인하므로 댐 건설 외에도 기후 변화나 골재 채취, 호안 공사, 유역의 산림조성 등이 원인이 되어 나타날 수 있다 (Warner 2000, Liebault and Piegay 2003, Rinaldi 2003). 이런 측면에서 우리나라에서 1960년대까지 많았던 민둥산이 1970년대 이후 성공적인 산림조성에 따라 감소한 것이 유사량 감소에 일조했을 것으로 추정된다. 이와 함께 수질 변화도 하천 내 식생 활착의 요인 중 하나로 여겨진다 (Woo 2008). 따라서 현재 나타난 하도의 역동성 감소와 식생 활착에 의한 경관 변화는 단순히 댐과 같은 하나의 구조물 영향뿐 아니라 다양한 요인들이 복합적으로 작용한 결과로 보아야 한다.

본 연구는 내성천의 변화에 관여하는 수문, 하도 형태, 식생 등 다양한 요인들과 그것들의 상호작용을 이해하기 위해 장기적인 관점에서 모니터링을 수행하고자 의도되었다. 아울러 댐이라는 수공구조물의 건설이 하천 변화에 미치는 영향도 함께 추적하며 조사하는 것이 포함된다. 장기 조사가 시작된 2012년은 영주댐이 건설 중인 기간이었으며, 2016년 이후의 자료는 댐의 완공과 담수 이후의 자료가 포함된다. 이 논문은 장기 조사의 중간 단계인 현 시점에서 내성천에서 수집된 자료를 수문, 수질, 하도 형태, 그리고 하천 지형과 식생 등의 분야별로 제시하고 지난 6년 (2013년~2018년)여 동안 내성천 하도에 나타난 변화의 주요한 특징을 분석하는데 그 목적이 있다. 분야별 조사 범위와 분석이 방대하여 내성천 변화 모니터링 및 분석 결과를 기초자료 부분 (I)과 현장조사 부분 (II)으로 구분하였다.

2. 대상 하천

본 연구의 대상인 내성천은 낙동강의 제1지류 하천으로 경북 봉화군 물야면 오전리에서 발원하여 경북 예천군 용궁면 향석리에서 낙동강에 합류한다. 법정 유로연장은 108.2 km로 지방하천 구간 (시점～월포수위관측소)은 80.29 km, 국가하천 구간은 27.91 km이다. 내성천 유역은 소백산백 남쪽의 경북 북부 내륙에 위치하며, 유역면적은 1,814.7 km^2이다. 주요 지류는 상류로부터 낙화암천, 토일천, 영주서천, 옥계천, 석관천, 한천, 금천 등이다. 본 연구의 구간은 영주댐으로부터 낙동강 합류점까지 약 57 km이다 (Fig. 1 참조).

지형학적으로 내성천은 하상과 사주가 주로 모래로 이루어진 사질하천이며 하도경사는 0.09 - 0.17 %로 비교적 완만하다. 내성천은 골짜기의 폭이 하폭의 1.5 - 3배에 불과한 좁은 하곡을 관류하는데, 만곡부에서는 그 폭이 더 좁아 산사면과 직접 면해 있는 곳이 많은 반면 직선구간에서는 홍수터가 발달한 상대적으로 넓은 하곡을 흐른다. 이 홍수터는 대부분 경작지로 활용되고 있다. 따라서 자연성이 비교적 높은 편이다. 하도분류

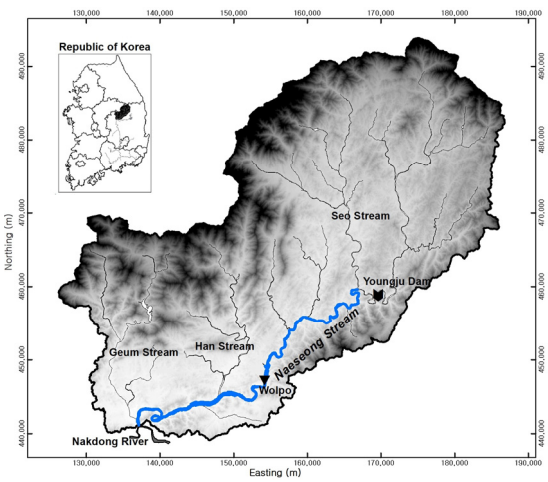

Fig. 1. Watershed and study reach of the Naeseong Stream.

Table 1. List of weather and rain observation stations. Abbreviations of KMA, NRFCO, KWT and KRCC indicate Korea Meteorological Agency, The Nakdong River Flood Control Office, K-water and Korea Rural Community Corporation, respectively

Authority	Station	Type	Altitude (m)	Longitude	Latitude	Watershed	Period of record	Data source
KMA	Yeoungju (272)	Weather	211	128.51681	36.87188	Seocheon	1973~	www.weather.go.kr
	Isan (837)	Weather (AWS)	189	128.64290	36.82680	Seocheon	1993~	〃
	Buseok (814)	〃	300	128.66110	36.97920	Nakwhamcheon	1991~	〃
	Bongwhaeup (835)	〃	301	128.75346	36.87013	Naeseongcheon	1993~	〃
	Yecheon (815)	〃	101	128.46440	36.66002	Hancheon	1991~	〃
	Dongno (838)	〃	450	128.27070	36.79050	Geumcheon	1993~	〃
NRFCO	Yeoungju	Rain	150	128.62250	36.82806	Seocheon	1914~41, 1959~	www.nakdongriver.go.kr
	Huibang	〃	800	128.45889	36.91389	Seocheon	1984~	〃
	Buseok	〃	370	128.65333	36.97556	Nakwhamcheon	1961~	〃
	Punggi	〃	210	128.52611	36.86861	Seocheon	1998~	〃
	Bongwha	〃	190	128.74278	36.89278	Naeseongcheon	1998~	〃
	Dongno1	〃	340	128.31806	36.77361	Geumcheon	1962~	〃
	Dongno2	〃	350	128.33917	36.70417	Geumcheon	1988~	〃
	Wolpo	〃	85	128.48972	36.61667	Naeseongcheon	1996~	〃
KWT	Yeongjudam	〃	195	128.65528	36.72667	Naeseongcheon	2015~	www.wamis.go.kr
KRCC	Gyeongcheondam	〃	229	128.31401	36.87188	Geumcheon	1988~	〃

관점에서 보면 내성천은 하폭이 넓고 수심이 얕은 망상하도의 조건을 갖추고 있으며, 하상과 강턱의 입경 특성과 단위폭당 하천력 (25 - 80 Wm^{-2})을 고려해 볼 때, Nanson의 홍수터 분류를 적용하면 망상하도가 발달할 수 있는 중간 에너지-비응집성 하천에 해당한다(Nanson and Croke 1992, Lee et al. 2015).

내성천 유역의 지질은 대부분 대보화강암 (53.3 %)과 소백산편마암류 (27.0 %)로 구성되어 있고 기타 퇴적암이 유역의 일부를 구성하고 있다. 내성천 하상에 풍부한 조립질 모래는 화강암 풍화에 의한 것이다(Lee 2010).

하류 말단에 유입하는 금천을 제외하면 내성천은 영주댐 건설 전에는 자연 상태의 수문 특성을 가지고 있었다. 2016년 영주댐 완공에 따라 내성천은 댐의 직접적인 영향을 받게 되었다.

3. 기초자료 조사 및 모니터링

3.1 기후 자료

기온과 강수로 대표되는 기후 특성은 유역의 수문 순환과 식생의 생장에 지배적인 영향을 미치는 요소로서 고려되어야 한다. 내성천 유역의 기상 자료를 기상청, 환경부, 한국수자원공사, 한국농어촌공사 등의 기상관측소, AWS 및 우량관측소로부터 얻을 수 있다(Table 1 참조). 내성천 유역의 대표적인 관측소는 기상청 영주관측소로서 1973년부터 관측을 시작하였다. 환경부 영주 우량관측소는 1914년부터 운영되어 가장 긴 관측 기록을 가지고 있으므로 과거 자료 분석에 활용할 수 있다.

영주기상관측소 자료를 중심으로 내성천 유역의 특징을 살펴보면, 연평균기온은 11.4°C이며, 1962 - 2018년 기간의 연평균강수량은 1,237 mm이다. 강수량의 경우 유역은 다르지만 인접한 관측소인 문경관측소(영강 유역)는 1,242 mm, 봉화관측소 (낙동강)는 1,181 mm로 유역 동쪽 강수량이 비교적 적은 특징을 보이고 있다. 여름철 (6 - 8월) 강수량은 연강수량의 57.1 %이며, 가장 강우량이 많은 달은 7월이다. 연강수량의 표준편차 (σ)는 288.6 mm인데, 연강수량 1위 (2003년)와 2위 (1999년)는 +2σ를 초과하였으며, 강우량이 가장 적었던 해인 1982년 (57위, 667.6 mm)에도 −2σ 미만으로 낮아지지는 않았다. 연구 기간에 속하는 2015년은 강우량이 두 번째로 적었던 해(56위)로서 768.7 mm의 연강수량을 나타냈다. 영주관측소의 연도에 따른 강수량 변동 패턴은 문경, 봉화 관측소가 유사한데, 이는 내성천 유역이 소백산맥을 북쪽 지붕으로 두는 유사한 지형을 갖고 있기 때문이다.

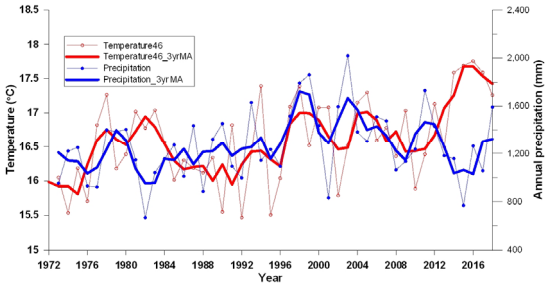

Fig. 2. Mean air temperature of April to June and annual precipitation at Yeongju weather station. Thick blue line and thick dashed line indicates 3-year moving average of temperature and precipitation, respectively. (Data source: www.weather.go.kr).

연평균 기온의 표준편차 (σ)는 0.61°C이며, +2σ인 12.6°C를 초과하였던 해는 없으나 2015년에 역대 최고인 12.5°C를 기록하였다. 1974년에는 -2σ 미만인 10.03°C를 나타내었다. 식생 성장기에 해당하는 4 - 6월 기온의 경우 +2σ를 초과한 해는 없지만, 연구 기간인 2014 - 2017년에 전체의 1 - 4위를 모두 차지하였다.

Fig. 2는 영주관측소의 4 - 6월 기온과 연강수량의 추이를 각 연도와 3년 이동평균으로 나타낸 것이다. 4 - 6월 기온의 경우 1982년을 전후로 높아졌다가 다시 낮아졌으며, 그 후에 1999년 전후와 2005년 전후로 고온기가 있었고, 최근 2014년 이후로 계속 높은 기온을 나타내고 있다. 강수량은 1982년 전후와 2015년 전후로 적었던 반면 1998년 전후, 2003년 전후, 2011년 전후에 비교적 많았다. 연구 기간 (2012 - 2018년)만을 보면, 기온은 평년 기온보다 높은 상태가 지속되었으며, 강수량은 적은 해와 많은 해가 고르게 발생하였다.

3.2 수문 특성

3.2.1 수문 자료

2018년 현재 내성천 본류와 주요 지류에서 운영 중인 수위관측소는 환경부 9개소, 한국수자원공사 4개소와 이 연구에서 자체적으로 운영하는 수위계 5개소 등 총 18개소이며, 고장, 댐 담수, 망실 등으로 철거된 관측소는 4개이다 (Table 2 참조). 40년 이상 장기간의 수위 자료를 보유하고 있는 곳은 내성천 본류는 송리원 (철거됨), 예천군 (고평교), 예천군 (신음리) 관측소 등이며, 지류 중에는 한천의 예천군 (예천교), 금천의 예천군 (산양교) 관측소 등이다. 장기 자료 중 신뢰성이 높다고 판단되어 본 연구에서 대표적으로 사용한 지점은 예천군 (고평교) 관측소이며, 다른 지점의 경우 활용시 자료의 품질에 대한 검토가 필요하다.

Fig. 3은 예천군 (고평교) 관측소에 대해 1969년 1월부터 2018년 12월까지의 영점표고를 적용한 일수위 자료와 실측된 유량측정성과를 보여준다. 수위 기록을 최저수위를 중심으로 장기적으로 보면 1986년 이전까지는 79.0 m 부근에서 대체로 일정하다가 1993년까지는 점진적인 저하가 나타났다. 1993 - 1994년 사이에 급격한 수위 저하를 볼 수 있다. 이 기간에는 수위표의 영점 조정이 이루어졌으며, 집중적인 골재 채취로 인한 하상 저하가 원인으로 짐작된다. 1994년 이후에는 77.5 m 부근에서 승강을 거듭하면서 점차 하강하여 2012년에는 77.0 m까지 낮아졌다. 연구 기간인 2012년 이후로도 지속적으로 감소하여 최저수위는 76.5 m 부근에 도달하였다. 그러므로 최저수위만을 보면 지난 49년간 약 2.5 m 하강하였다.

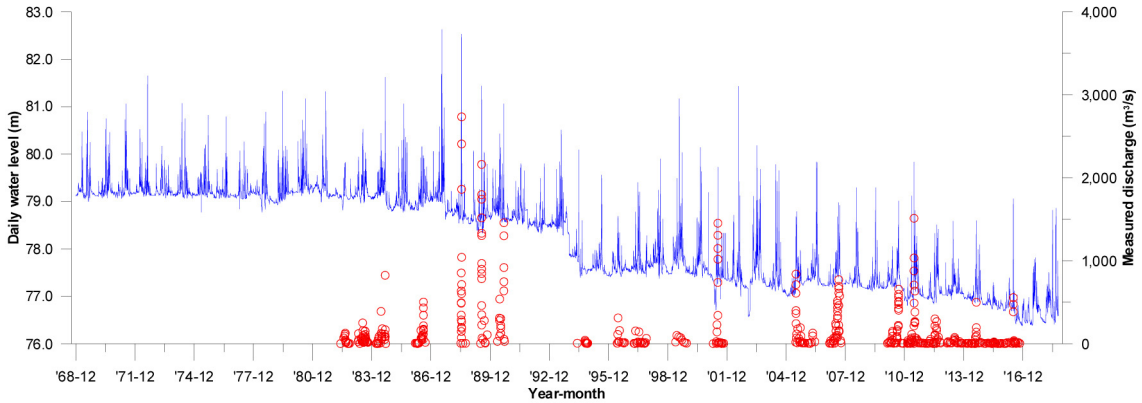

Fig. 3. Daily water level at Yecheongun (Gopyeonggyo) station during 1969 to 2018 with discharge measurements of 1982 to 2016. (Data source: www.wamis.go.kr, www.hrfco.go.kr).

Table 2. List of hydrological gauging stations. Abbreviations of NRFCO, KWT and KICT represent The Nakdong River Flood Control Office, K-water and Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (this study), respectively

Authority	Station	Longitude	Latitude	Reference altitude (m)	Type of gauges	Period of record (Hourly data)	Time spacing (min)	Remark	Data source
NRFCO	Yecheongun (Hoiryonggyo)	128.31944	36.58361	52.804	Float	2007-01-26~	10		www.nakdongriver.go.kr
	Yecheongun (Sineumri)	128.34833	36.58417	60.428	〃	1971-01-01 (1980-07-01)~	10		〃
	Yecheongun (Gopyeonggyo)	128.48778	36.61944	78.177	〃	1969-01-01 (1982-06-01)~	10		〃
	Yecheongun (Mihogyo)	128.51833	36.66972	85.712	〃	2008-01-01~	10		〃
	Yeongjusi (Seoktapgyo)	128.59972	36.71667	100.856	〃	2008-01-01~	10		〃
	Songriwon	128.68667	36.73556	134.269	〃	1971-06-26 (1983-06-01)~	10		〃
	Bongwhagun (Bongwhadaegyo	128.73250	36.88861	184.120	〃	2009-01-01~	10		〃
	Yeongjusi (Wolhogyo)	128.62111	36.75222	118.601	〃	2007-01-26~	10		〃
	Yecheongun (Yecheongyo)	128.44861	36.65056	81.087	〃	1963-01-01 (1983-06-01)~	10		〃
	Yecheongun (Sanyanggyo)	128.26083	36.61139	67.990	〃	1968-01-01 (1981-06-01)~	10		〃
KWT	Sinamgyo	128.68722	36.85278	164.072	Radar	2015-09-01~	10		www.wamis.go.kr
	Yeonggu sand dam	128.70028	36.78444	-	〃	2014-12-01~	10		〃
	Yeongju dam	128.65667	36.72194	-	Float+ Pressure	2016-07-01~	10		〃
	Mirim	128.64528	36.71833	118.890	Radar	2014-12-01~	10		〃
KICT	Mirim	128.64400	36.72080	116.198	Pressure+ Bubble	2013-06-27~	10	closed	This study
	Yonghyeol	128.63800	36.73020	112.249	Pressure	2013-03-28~	10		〃
	Yonghyeol-ground	-	-	-	〃	2014-06-18~	60	closed	〃
	Sudori	128.61800	36.73100	108.935	Pressure+ Bubble	2013-06-27~	10		〃
	Gopyeong-ground	-	-	-	〃	2014-06-17~	60	closed	〃
	Sangwol-ground (left)	128.33900	36.57610	57.288	〃	2010-08-25~	60		〃
	Sangwol (right)	128.33700	36.57920	58.940	〃	2010-08-25~	60		〃
	Hoiryong	128.31600	36.57470	56.287	Pressure+ Bubble	2012-11-23~	10		〃

홍수를 살펴보면 1987, 1988, 1999, 2002년 등 두드러진 홍수가 기록되고 있는 반면, 1973, 1982, 1991, 2015년에는 비교적 큰 홍수가 없었다. 그 중 연구 기간에 해당하는 2015년은 첨두 수위가 가장 낮은 연도이다.

유량은 1982년부터 측정되기 시작하였는데, 가장 큰 유량측정값은 2,734 m^3/s로 1988년 7월 20일의 기록이며, 2010년 이후에는 1,511.7 m^3/s (2011년 6월 25일)이다. 2015년에는 가장 낮은 첨두유량 (22.3 m^3/s)

Table 3. Comparison of calculated flood discharges

Item	Basis	Method	Recurrence interval or frequency (year)							
			1	1.5	2	5	10	20	50	100
This study	Daily discharge	Gringorten	312	533	690	1,189	1,567	1,945	2,445	2,823
		Weibull	281	521	692	1,235	1,647	2,058	2,602	3,013
	Hourly discharge	Gringorten	399	780	1,051	1,912	2,564	3,216	4,077	4,729
		Weibull	337	757	1,056	2,006	2,726	3,445	4,395	5,115
River basic plan	year 1984	Synthetic unit hydrograph	-	-	-	-	-	-	2,544	2,929
	year 2001	NRCS method	-	-	-	-	-	-	3,020	3,420
	year 2013	Clark method	938*	1,198*	1,382*	1,969*	2,412*	2,860	3,440	3,885

* indicates extrapolated value using the 20 to 200 year frequency discharges. (Data source: MC (1984), MCT (2001), MLIT (2013))

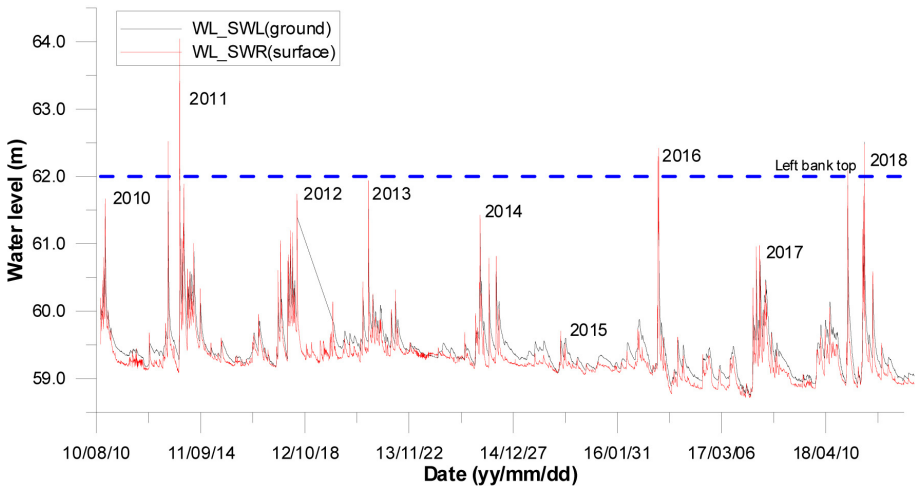

Fig. 4. Water level record at Sangwol gauging stations during 2010 to 2018.

을 보였다. 평저수기 유량의 최저 측정값은 1.05 m^3/s로서 2014년 7월 31일의 기록이다.

예천군 (고평교) 관측소의 수위 기록과 수문조사연보와 하천기본계획 자료 등에 수록된 수위-유량 관계식을 적용하여 일유량 (또는 24시간 평균)과 시유량으로 첨두유량을 계산하여 Gringorten 방법과 Weibull 방법 (Shaw 1994)으로 빈도분석을 실시하고 기존 하천기본계획 등에서 계산한 기본홍수량 값과 비교하였다 (Table 3 참조). 첨두유량 자료로 계산한 방법과 하천기본계획의 방법은 자료 및 계산 과정 자체가 다르므로 직접적인 비교는 할 수 없지만 참고를 위해 제시하였다. 이 연구 자료로 분석하면 하도형성 유량으로 주로 사용되는 2년 빈도유량은 일유량 기준 약 690 m^3/s이며, 시유량 기준 약 1,050 m^3/s이다. 계획홍수량으로 사용되는 100년 빈도 유량의 경우, 시유량 기준으로 하천기본계획은 3,885 m^3/s, 빈도분석은 5,115 m^3/s로 계산되었다.

3.2.2 수위관측소 운영 자료

내성천 연구 구간의 연장이 약 57 km에 달하므로 본 연구에서도 자체적인 수위계를 운영하고 있다 (Table 2 참조). 그 중 4개는 하천수이며, 1개는 지하수인데, 상월 (우) 수위계의 경우 2013년 이후로는 하상변동에 의해 매몰되어 있다. 기종은 수위와 수온을 동시에 측정할 수 있는 압력식 수위계 (모델명:Orpheus Mini, 정밀도 1 mm)이며, 수위 자료 이중화를 위해 일부 지점에 기포식 수위계 (모델명: Nimbus)를 병행하여 운영하고 있다. 본 연구에서는 매년 4 - 6회 현장에 방문하여 자료를 수집하고 있다.

Fig. 4는 2010년부터 2018년 현재까지 운영 중인 상월 (좌)와 상월 (우) 지점의 수위 기록이다. 예천군 (고

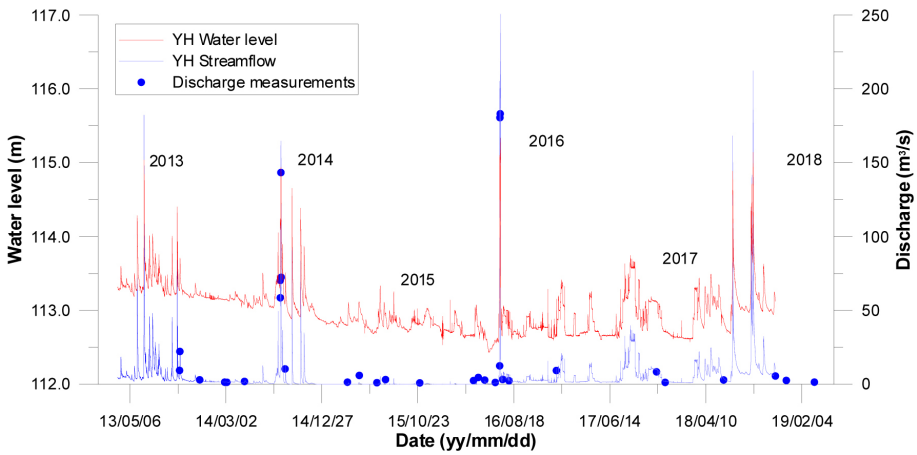

Fig. 5. Water level record at the Yonghyeol gauging station during 2013 to 2018 and its discharge measurements.

평교) 지점 (Fig. 3 참조)과 마찬가지로 최저수위는 점차 하강하고 있다. 관측 기간 중 가장 큰 홍수는 2011년에 발생했는데 2회에 걸쳐 강턱을 월류하였고 2011년 6월 25일은 강턱을 2 m 가량 월류하는 큰 홍수가 있었으며, 첨두유량으로 1,944 m^3/s (일유량 규모로 1,122 m^3/s)를 기록하였다. 그러나 2012년부터는 홍수가 적었으며, 2015년에 첨두유량은 가장 적었다. 그리고 다시 유량이 증가하여 2016년과 2018년에 강턱을 넘는 홍수가 발생하였다.

연도별로 홍수가 반복적으로 발생하였지만, 지점에 따라 홍수의 강도가 다소 달랐다. 특히 영주댐 직하류에 위치한 용혈 지점과 서천이 합류한 후 직하류 지점인 수도리 지점의 대비가 비교적 뚜렷하다. 용혈 지점의 2018년 첨두 수위는 2016년보다 낮은 반면, 수도리 지점은 2018년 수위가 2016년보다 상당히 높다. 이러한 차이는 내성천 본류 유역과 서천 유역의 홍수량 차이가 반영된 점과 내성천 본류는 영주댐의 영향으로 홍수가 자연 유하하지 못하고 댐의 배사문을 통해 최대 유량이 조절된 상태로 유하하기 때문으로 생각된다. 이는 댐에서 담수나 직접적인 유량 조절을 하지 않더라도 댐체에 의해 불가피하게 유량이 조절됨을 의미한다.

3.2.3 댐 직하류 수문 특성

내성천에서 영주댐 하류 5 km 이내에 주요 지류인 서천이 유입하므로 영주댐의 조절로 인한 하류의 수문학적인 변화를 파악하기 위해서는 댐 직하류에 수문 모니터링이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 서천 합류점 상류에 있는 용혈 지점에 수위계를 설치하여 2013년부터 계속해서 수위를 관측하고 있으며, 저수위부터 홍수위까지 유량 측정을 실시한 후 수위-유량 관계를 수립하여 연속 유량을 산정해 왔다. 유량 측정은 댐 직하류, 미림, 용혈 지점 등에서 31회 실시하였으며, 측정한 유량 범위는 0.9 - 183.1 m^3/s이다. 2015년까지는 댐 직하류 미림 지점을 중심으로 유량 측정을 실시하였으나 미림교 - 서천 합류점 구간의 공사로 인해 용혈 지점으로 변경하였다. 변경된 지점은 접근 가능한 교량이 없는 관계로 홍수시 직접 유량 측정이 곤란하다. 따라서 2016년 홍수시 유량은 서천 합류점 하류의 무섬교에서 측정한 유량에서 서천 하구 부근의 섬잠교에서 측정한 유량을 뺀 값으로 추정하였다.

Fig. 5는 용혈 지점의 관측 수위와 수위-유량 관계를 이용하여 계산한 시계열 유량 곡선이다. 참고로 영주댐 공사 진행에 따라 시기별 홍수의 유하 경로가 다르다. 2013 - 2015년까지는 도수 터널로 홍수가 유하하였고, 2016년 이후로는 댐체의 배사문과 발전소를 통해 방류가 이루어졌다. 여수로 방류는 한 번도 없었다. 관측수위를 보면 최저수위는 2017년까지 하강하고 있음을 알 수 있고 이는 다른 지점의 최저수위 변화와 일치하여 하상의 저하가 반영되었음을 보여준다. 유량의 경우 2015년에는 홍수가 없었으며, 2017년의 경우 수위와 유량 모두에서 댐에 의한 방류량 조절이 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 하지만 2018년의 경우에는 방류량 조절이 이루어지지 않았고 배사문으로 유출되었다.

Table 4는 용혈 지점의 연도별 첨두 홍수량만을 나타낸 것이다. 2016년의 첨두유량은 249.4 m^3/s이며, 가장 유량이 적은 2015년의 첨두유량은 5.2 m^3/s에 불과하다.

Table 4. 10-minute peak water level and discharge at the Yonghyeol and Mirim stations

Year	Time	Peak water level (m)				Peak discharge (m^3/s)	
		Yonghyeol		Mirim		Yonghyeol	Mirim
		Instrument	Elevation	Instrument	Elevation		
2013	2013-06-19 00:50	2.329	115.037			182.3	
2014	2014-08-21 06:00	2.232	114.940	2.449	118.656	164.7	164.5
2015	2015-06-27 07:10	0.625	113.333	0.568	116.775	5.2	
2016	2016-07-07 09:30	3.081	115.330			249.4	
2017	2017-08-21 17:50	1.449	113.698			36.7	
2018	2018-09-04 19:10	2.891	115.140			212.3	

Table 5. List of water quality observation points. Abbreviations of DEO, NRWEI and GBP represent Daegu Environmental Office, Nakdong River Water Environment Institute and Gyeongsanbuk Provionce, respectively

Authority	Observation point	Longitude	Latitude	Period of record	Data source
DEO	Naeseongcheon1 (Gopyeonggyo, 1GP)	128.48831	36.61934	1995-01-01~	water.nier.go.kr
	Naeseongcheon2 (Gyeongjingyo, 2GJ)	128.41795	36.60002	1989-01-01~	〃
	Naeseongcheon4 (Mirimgyo, 4MR)	128.64568	36.71915	1992-01-01~	〃
NRWEI	Naeseongcheon3-1 (Seongjeogyo, 3SJ)	128.30536	36.58726	2002-01-01~	〃
	Naeseongcheon5 (Seoktapgyo, 5MR)	128.60031	36.71577	2002-01-01~	〃
GBP	Yeongjuseocheon2 (stream terminus, SC)	128.62922	36.73658	2002-01-01~	〃

3.2.4 유사량 자료

내성천의 유사량 조사는 환경부(한국수자원조사기술원), 한국수자원공사, 한국건설기술연구원 등에 의해 이루어졌다. 조사는 송리원(1992년, 12회), 석포교(1992년, 11회), 예천군(고평교)(2002 - 2003년, 19회), 예천군 (회룡교)(2010 - 2016년, 97회), 미림 (2013 - 2016년, 7회) 등에서 실시되었다. 이 중에 가장 지속적으로 조사가 이루어지는 곳은 예천군(회룡교) 지점이다.

Fig. 6은 내성천 5개 지점의 실측 부유사량 자료를 함께 나타낸 그래프이다. 예천군(고평교) 지점의 200 m^3/s 이하의 자료를 제외하고 내성천의 주요 지점의 유량에 따른 부유사량 증가 경향은 유사한 것을 알 수 있다. 한편 동일한 유량이 발생하는 경우 송리원 지점에서 관측된 부유사량이 다른 지점에 비해 상대적으로 높았고, 200 m^3/s 이하의 유량에서 예천군(고평교) 지점의 관측 부유사량이 다른 지점에 비해 적은 것을 알 수 있다.

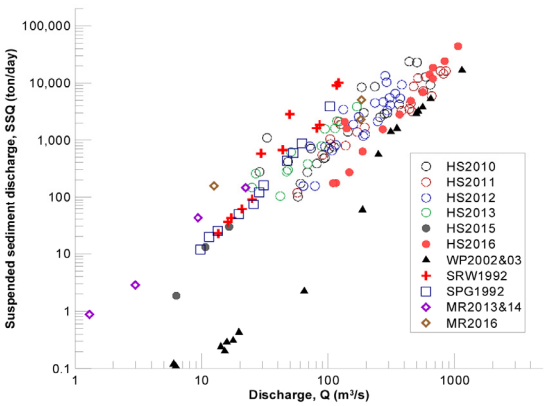

Fig. 6. Relationship of flow discharge and suspended sediment discharge for several gauging stations along the Naeseong stream. HS: Yecheongun (Hoiryonggyo), WP: Yechoengun (Gopyeong), SRW: Songriwon, SPG: Seokpogyo, MR: Mirim. (Data source: www.hrfco.go.kr).

3.3 수질 자료

내성천 유역의 하천수 수질은 환경부, 경상북도 등에

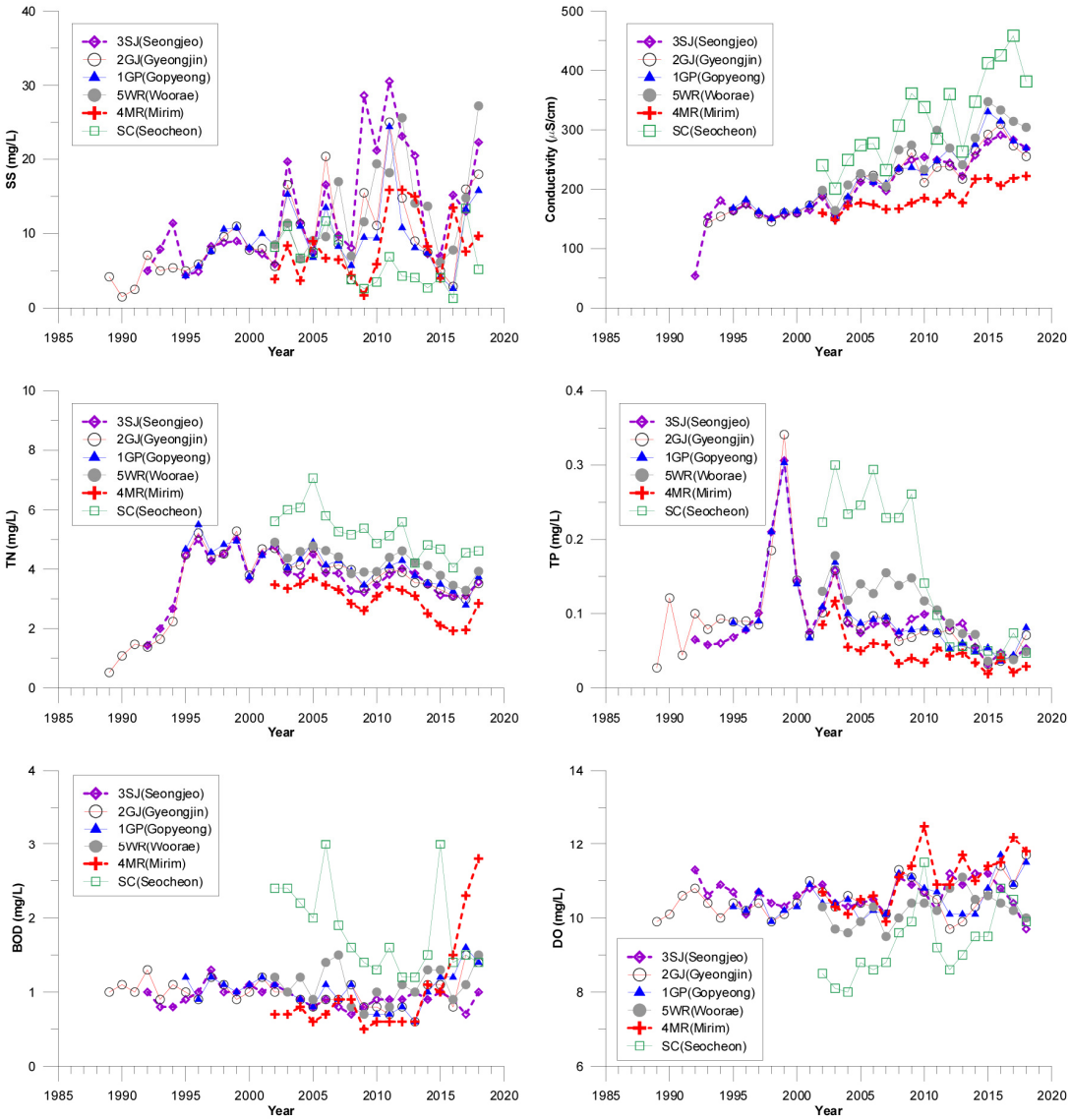

Fig. 7. Temporal change of six water quality indicators in Naeseong stream during 1989 to 2018. Abbreviation of 1GP to SC corresponds to observation points in Table 5. (Data source: http://water.nier.go.kr).

서 측정하며 총 지점 수는 본류 5개, 지류 8개 (토일천 1, 서천 2, 옥계천 1, 석관천 1, 한천 1, 금천 2개) 등 13개이다. 본 연구에서는 본류의 5개 지점과 영주댐 합류 직후의 영향을 파악하기 위한 서천 1개 지점 등 6개 지점의 자료를 수집하고 분석하였다 (Table 5 참조). 그 중에 성저교와 석탑교 지점은 수질총량 지점으로서 연간 약 50회, 나머지 4개 지점에서는 월 1회 측정이 이루어지고 있다.

Fig. 7은 6개 지점의 1989~2018년 기간에 대해 고형부유물, 전기전도도, T-N, T-P, BOD, DO 등 6개 지표를 중심으로 수질 연변화를 나타낸 것이다. 고형부유물은 2010년 이후로만 보면 연도별 변동성이 크고 홍수량과 비례하여 증감이 반복된다 (Fig. 4 참조). 전기전도도는 1990년대 이래로 지속적으로 상승하는 경향을 보이고 있으며 높은 수치를 나타내는 서천 (SC)의 영향이 내성천에 일부 반영되고 있음을 알 수 있다. 2010년 이후를 보면 서천 합류부 상류에 위치한 미림 (4MR)에서 전기전도도는 200 μS/cm 안팎의 값을 나타내다가 서

천 합류 후 우래 (5WR)에서 가장 높은 수치를 나타내며, 하류로 가면서 전기전도도가 낮아지고 있다. 총질소의 경우 1990년대 후반 이후 절대값은 낮아지는 추세이며, 전기전도도와 마찬가지로 미림에서 가장 낮고 서천의 높은 농도가 서천 합류부 하류 구간에 영향을 미치는 특성이 나타났다. 총인의 경우에도 전반적인 추세는 감소 경향이며 서천의 경우 2010년 이전에는 서천에서 유입된 고농도의 영향이 반영되었으나 2010년 이후로는 서천의 현저한 농도 감소로 모든 지점들이 유사한 수치를 보이고 있다. BOD의 경우에도 서천의 수치가 높게 나타났으며, 다른 지점들은 유사한 농도를 보이고 있다. 2010년 이후로 보면 서천에서 가뭄이 심했던 2015년에 일시적으로 3.0 mg/L로 상당히 높은 값을 나타냈으며, 미림의 경우 2015년부터 계속적으로 BOD가 증가하였다. 마지막으로 DO의 경우 내성천 본류에서는 1990년대 이래로 10 mg/L 내외에서 변동하는 특정을 보이는 가운데 서천이 가장 낮은 수치를 농도를 나타내고 있으며, 미림이 가장 높은 수치를 보이고 있다.

미림 지점에 나타난 특성을 중심으로 영주댐 담수 시점을 전후한 변화만을 살펴보면, 고형부유물, 전기전도도, 총인, DO 등과의 관계는 뚜렷하지 않으며, 총질소의 경우 2016년부터, BOD의 경우 2015년부터 증가하는 경향이 나타났다. 그 중에 가장 뚜렷한 것은 BOD의 급격한 증가로 2017 - 2018년의 BOD값은 관측 이래로 미림에서 볼 수 없었던 수치이다.

4. 결 론

본 논문에서는 내성천 변화의 원인을 분석하기 위하여 기초 조사로 기후, 수문, 수질 모니터링 결과를 제시하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다. 2015년에 1982년 다음으로 적은 강수량이 발생하였으며, 이로 인해 여름철 첨두유량은 50년래 최저를 기록하였다. 수질의 경우, 서천의 오염도가 높아 내성천에 영향이 있었지만 서천의 영향을 받지 않으면서 댐 직하류에 위치한 미림 지점은 2015년 이후 BOD가 급증하여 영주댐 건설의 영향이 큰 것으로 판단된다. 최근 내성천에서 발생한 뚜렷한 변화는 영주댐 건설과 하도 식생의 활착이다. 이 둘 사이의 직간접적인 연관성을 무시할 수는 없겠으나, 기초 조사 결과만으로 살펴본다면 식생 활착은 2014 - 2015년 기간의 가뭄에 영향을 받은 것으로 추정된다. 이는 홍수 유량의 감소가 식생 활착과 하폭 감소를 야기하기 때문이다 (Williams and Wolman 1984, Johnson 1994, Kondolf 1997). 본 논문과 이어지는 현장 조사(II) 편은 지난 6년 (2013년 - 2018년)여 동안 지형, 식생 등의 현장 모니터링 결과를 제시함으로써, 유수-물질-식생-지형 사이의 역동적인 상호작용과 댐으로 인한 하천 변화의 영향을 분석한 것이다. 이러한 장기 모니터링 연구는 하천 변화의 원인 규명뿐만 아니라 지속 가능한 하천관리 방향 설정에 크게 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 '(19주요-대2-장기조사) 수공구조물 건설 전후 하천변화 분석'의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Choi, S.U., Yoon, B.M. and Woo, H.S. 2005. Effects of dam-induced flow regime change on downstream river morphology and vegetation cover in the Hwang River, Korea, River Research and Applications 21: 313-325.

Gurnell, A.M. and Petts, G.E. 2002. Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective. Freshwater Biology 47: 581-600.

Johnson, W.C. 1994. Woodland expansion in the Platte River, Nebraska: Patterns and causes, Ecological Monographs 64(1): 45-84.

Kondolf, G.M. 1997. Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels, Environmental Management 21(4): 533-551.

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).

Liebault, F. and Piegay, H. 2001. Assessment of channel changes due to long-term bedload supply decrease, Roubion River, France, Geomorphology 36: 167-186.

MC (Minstry of Construction). 1984. River Basic Improvement Plan for the Nakdong river (Naeseongcheon and Gamcheon).

MCT (Ministry of Construction and Transportation). 2001. River Basic Improvement Plan (revised) for the Naeseong

stream.

MLIT (Busan National Land Management Agency of Ministry of Land, Infrastructure and Transportation). 2013. River Basic Plan (revised) for the Downstream of Naeseong stream (National river)

Nanson, G.C. and Croke, J.C. 1992. A genetic classification of floodplains, Geomorphology 4: 459-486.

Rinaldi, M. 2003. Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, central Italy, Earth Surface Processes and Landforms 28(6): 587-608.

Shaw, E.M. 1994. Hydrology in Practice 3rd Ed., International Thomson Publishing Asia.

Warner, R.F. 2000. Gross channel changes along the Durance River, Souther France, over the last 100 years using cartographic data, Regulated Rivers: Research and management 16: 141-157.

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.S. 2008. White river? Green river?, Water and Future 41(12): 38-47. (in Korean)

Korea Meteorological Agency. http://www.weather.go.kr (in Korean).

The Han River Flood Control Office. http://www.hrfco.go.kr (in Korean).

The Nakdong River Flood Control Office. http://www.nakdongriver.go.kr (in Korean).

Water Environment Information System. http://water.nier.go.kr (in Korean).

Water Resources Management Information System. http://www.wamis.go.kr (in Korean).