

하천 복원을 위한 과거 및 현재 자료 기반의 하천지형학적 특성 분석: 미호천과 내성천을 중심으로

Analysis on Fluvial Geomorphological Characteristics based on Past and Present Data for River Restoration: An Application to the Miho River and the Naesung River

이 찬 주* / 김 지 성** / 김 규 호*** / 신 형 섭****

Lee, Chan Joo / Kim, Ji Sung / Kim, Kyu Ho / Shin, Hyoung Sub

Abstract

As a basic work for river restoration, analysis on fluvial geomorphological characteristics is made using past and present data to understand close-to-nature geomorphic status. The Miho and the Naesung Rivers are targets of this study. Fluvial geomorphic variables including valley-floor width, sinuosity, bankfull width, channel gradient, bed material size, bankfull discharge and unit stream power are evaluated with dominant processes. Though common sand-bed rivers with similar catchment area, the Miho and the Naesung Rivers are different in terms of valley-floor width, channel shape variables and dominant processes related with longitudinal location. In addition, analyses on interrelationship among the geomorphological variables are carried. Bankfull width is shown to be proportional to bankfull discharge, as is in a rough agreement with the previous studies. Relationship of bankfull discharge and channel gradient shows meandering and braiding are prevalent in the Miho River, whereas the most of the sub-reaches of the Naesung River fall to braiding. Relationship of channel gradient with width-depth ratio indicates dune-ripple processes are dominant in the Miho River, while the Naesung River shows longitudinal diversity from braiding in the downstream sub-reaches to riffle-pool and plane-bed along the upper ones. Analyses based on the past data on a river in a close-to-nature status are thought to be rather reasonable in comparison with those on the same river in a engineered condition.

Keywords : river restoration, old maps, fluvial geomorphic variables, fluvial processes

요 지

하천 복원을 위한 기초 작업으로서 자연 상태에 가까운 하천의 지형학적 특성을 파악하기 위해 과거 및 현재 자료를 이용하여 하천지형학적 분석을 실시하였다. 대상 하천은 미호천과 내성천이다. 분석에 포함된 지형학적 변수는 하곡변수인 곡저폭, 하도 형상변수인 사행도, 강덕하폭, 하도경사, 구성재료 변수인 하상재료, 지배 변수인 강덕유량, 비유수력이며, 지배적인 프로세스가 함께 고려되었다. 분석 결과 두 하천은 비슷한 유역면적을 갖는 모래하천이지만, 곡저폭, 하도 형상변수, 중단적 위치에 따른 지배적인 프로세스 등에서 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 지형학적 변수들 사이의 상호 관계를 분석하였다. 그 결과 강덕하폭은 강덕유량에 비례하여 증가하였고, 그 경향성은 기존의 연구 결과와 대체로 일치하고 있다. 강덕유량과 하도경사를 분석한 결과 미호천은 사행하천과 망상하천의 특성을 나타내고 있는 반면, 내성천은 대부분의 구간에서 망상하천에 해당하는 것으로 나타났다. 하도경사와 하폭수심비 관계를 이용하여 지배적인 프로세스를 분석한 결과 미호천은 사구-연흔의 특성을 나타내고 있으나 내성천은 하류에서는 망상하천 특성이 지배적인 반면, 상류에서는 여울-소 내지는 평하상 특성이 지배적인 것으로 나타났다. 과거 자료를 이용한 분석 결과는 정비된 하천의 자료를 이용한 분석 결과에 비해 합리적인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 하천 복원, 고지도, 하천지형학적 변수, 하천 프로세스

* 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원 (e-mail: c0gnitum@kict.re.kr)

Senior researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원 (e-mail: jisungk@kict.re.kr, Tel: 82-31-995-0826)

Corresponding Author, Senior researcher, Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*** 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 연구위원 (e-mail: khkim1@kict.re.kr)

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

**** 네이처앤휴먼 대표 (e-mail: subihoho@hanmail.net)

President, Nature and Human Co., Goyang 410-837, Republic of Korea

1. 서론

최근 들어 과거에 하천의 홍수터였거나 하천의 영향을 받았던 하천 공간을 발굴하고 활용하려는 연구가 시도되고 있다. 이는 하천 생태계의 중흥단적인 연속성(continuum)이 고려되어야 한다는 점(Lee et al., 2014)과 홍수 배제 위주의 기존의 치수 개념에서 유역과 하천변 공간을 활용하여 홍수를 저류, 지체시키는 치수 개념으로의 정책적 전환과도 맞물려 있는 것으로 보인다. 이에 따라 과거에는 활용하지 않던 하천변의 폐천부지, 구하도를 복원하거나 제방을 뒤로 물리면서 제외지의 공간을 확대하는 등 하천 공간에 대한 지형학적 복원 및 활용 방안에 관한 연구가 진행되고 있다(Hong, 2014).

하천의 공간 복원을 수반하는 지형학적 복원을 위해서는 대상 하천의 지형학적인 특성에 대한 지식이 필수적이다. 하천의 지형학적 특성은 평면적인 유로의 배치와 중흥단 형상을 포함하는 형태적 특성, 하상과 강택의 구성 재료에 관계된 물질적 특성, 하천의 물질을 이동시키고 형태를 변화시키는 지배 변수인 유량과 에너지 특성인 유수력 등을 포함한다. 이와 함께 하천이 놓여 있는 하곡의 특성이나 식물, 동물의 영향이 반영되기도 한다. 이러한 특성은 상호 결부되어 특정한 하천 프로세스(fluvial processes)를 나타낸다.

이러한 하천지형학적 특성에 대한 정보는 인위적 간섭이 최소화된 자연 상태의 하천으로부터 획득하는 것이 바람직하다. 하지만 일반적 관점에서 볼 때 복원의 대상인 교란된 하천에서는 하천의 자연스러운 모습과 그로부터 나타나는 구조적, 생태적 기능을 파악할 수 없다. 그래서 기존의 연구에서는 복원 대상과 유사한 규모와 지형학적, 자연지리학적 특성을 가진 참조하천을 선정하여 복원 목표로 활용하도록 권고하고 있다(MOE, 2011). 하지만 국내에서는 참조하천을 하천복원 모델로 도입한 사례가 매우 드문데(Kim et al., 2014), 이는 산간 지역을 제외하면 대부분의 하천이 개수되어 있어서 복원의 주요 대상인 중하류 하천에서 인위적인 교란이 없는 하천을 찾기가 어려운 데 기인한다고 볼 수 있다.

이러한 경우 대안적인 복원의 목표로 생각할 수 있는 것이 바로 대상 하천이 공학적으로 변경되기 전이나 인위적인 큰 교란을 받기 전의 옛 모습이다. 이는 현실적인 제약을 고려한 차선의 방법이라고 생각된다. 외국의 경우 직강화된 하도를 다시 사형하도록 하기 위해 오래된 과거 지도를 이용하거나(Brookes, 1987), 직강화 이전의 유로의 형태를 참고하는 사례가 있다(Iversen et al., 1993). 우

리나라의 경우 하천에 대해 대규모 인위적 교란이 가해지기 전인 일제 강점기 초기에 제작된 지도가 있으므로 하천의 옛 모습을 파악하는데 활용할 수 있다. 나아가 이러한 과거 자료를 기초로 자연 상태에 가까운 하천의 지형학적 특성에 관한 정보를 얻을 수 있다. 다만, 과거 지도에 나타난 하천의 모습은 당시의 유역 상태가 반영된 하천 상태를 반영하고 있으므로 현재의 유역 특성과 관련된 자연 상태를 나타내지는 못한다는 한계가 있다. 또한 과거 지도에는 하천의 지형학적 특성에 대한 제한적인 정보만이 담겨져 있으므로 종합적인 지형학적 특성을 분석하기 위해서는 과거와 현재의 유역 및 하천 상태에 관한 차이가 있다는 점을 인식한 상태에서 현재 자료를 함께 활용하는 것이 바람직하다.

이러한 배경에서 본 연구의 목적은 과거와 현재 자료를 이용하여 과거 시점을 기준으로 대상 하천의 자연 상태에 가까운 모습을 기준으로 하천지형학적 변수를 파악하고 그 특성을 분석하는데 있다. 이렇게 얻은 하천지형학적 지식은 변화된 유역 특성에 대한 고려와 함께 개수된 현재의 하천을 지형학적으로 복원하는데 활용할 수 있는 참고 자료가 될 것이다. 분석의 대상은 국내의 대표적인 중규모 모래하천인 미호천과 내성천이다. 하천의 지형학적 특성은 평면, 종단, 단면 형태, 하상재료, 하천에 가해지는 에너지, 프로세스 등으로 구별하여 살펴 볼 것이며, 이를 종합하여 하천의 지형학적 변수들 간의 상호관계를 분석함으로써 기존의 연구와 비교하며, 두 하천의 지형학적 특성을 구체화할 것이다.

2. 연구 방법 및 대상 하천

2.1 고지도 및 과거 자료 수집 분석

과거의 하천 특성을 파악하기 위한 기본 자료로 주로 1914~1918년에 발행된 근세한국오만분지일지형도(이하 고지도)를 이용하였다. 이 지형도는 국내 최초로 근대적인 지도제작방법에 의해 작성된 것으로 한반도의 모든 지역을 대상으로 동일한 축척으로 제작되었고, 근대적인 의미의 토목공사가 시작되기 이전에 제작되어 조선 말기의 한반도 모습이 반영되었다는 점에서 매우 중요하다(Bae, 2007). 이보다 앞서 1899년경에 편찬된 군사지도가 있으나(Nam, 2007), 해당 지역에서는 도곽 좌표가 맞지 않아 사용하기 곤란하였으며, 주요 지점을 지상기준점으로 하여 고지도와 비교한 경우 하천의 대략적인 형상이 유사한 관계로 별도로 분석하지는 않았다. 국내의 대부분의 하천은 일제에 의한 하천 측량이 완료된 후 1920~1930년대에

개수공사가 진행된 점을 고려할 때(JGGK, 1937; JGGK, 1938) 본 지도에는 대규모 공학적인 변경이 가해지기 전의 자연 상태에 가까운 하도 형태가 기록되어 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 고지도를 스캔하여 영상처리 프로그램에서 경위도 도곽좌표를 입력한 후 각각 중부원점(미호천)과 동부원점(내성천) TM 좌표계로 변환하였다. 그 후에 GIS 프로그램에서 수치화 입력 작업을 수행하여 하천 지형 분석에 필요한 공간 자료를 산출하였다. 고지도와 함께 유사한 시기의 하천과 유역 상태에 대한 개략적인 정보를 얻을 수 있는 치수 및 수리답사서(JGGK, 1920)와 조선하천조사서(JGGK, 1929) 등의 자료를 추가로 활용하였다.

2.2 과거 및 현재 자료의 가용성 검토 및 활용

고지도에 수록된 정보는 자연 상태에 가까운 하천의 모습을 살펴보는데 매우 유용하지만 매우 제한적인 정보만을 담고 있다. 따라서 하천의 지형학적인 특성을 종합적으로 파악하기 위해서는 현재 자료를 적절히 병용해야 한다. Table 1은 하천의 지형학적 변수에 영향을 미치는 인위적 요인, 그리고 과거 및 현재 자료의 가용성에 대한 평가를 토대로 분석을 위해 어떤 시기의 자료를 선택했는지를 나타내고 있다. 자료가 분명한 정보를 제공할 수 있는 경우에는 ○, 일정한 정도로 지형학적 변수를 추정하는

것이 가능한 경우 △, 인위적 영향이나 자료 자체의 한계로 인해 정보를 제공할 수 없는 경우 ×로 구별하였다. 그 결과 장기간 변화가 없을 것으로 판단되는 하곡 변수는 과거 및 현재 자료가 활용 가능하지만, 제방 축조, 저수호 안 건설 등으로 자연 상태에 뚜렷한 변형이 가해진 형상 변수는 강터수심을 제외하면 과거 자료가 이용이 가능하였다. 하도경사는 구간별 세부 자료가 있는 현재 자료를 주로 이용하되 과거 자료를 참고하였다. 구성 재료의 경우 과거 자료는 자갈, 모래 정도의 개략적인 구분만 가능하므로 상세한 입경 대푯값은 현재 자료를 이용하였다. 이상의 현재 자료는 1980년대와 2000년대에 수립된 하천 기본계획 자료를 주로 이용하였다.

하도의 지형 형성에 관여하는 지배 변수인 강터유량과 비유수력 역시 과거 자료를 얻을 수 없으므로 불가피하게 현재 자료를 이용해야 한다. 하였다. 하지만, 동일한 하천이라고 해도 현재의 유량은 거의 100년 전의 과거와는 다른 유역과 기후 조건을 반영한다. 따라서 이를 해석할 때는 서로 다른 두 시기의 유역 및 기후 조건의 차이가 있다는 점이 고려되어야 한다. 마지막으로 프로세스는 형상, 구성 재료, 지배 변수 등이 종합적으로 반영되어 나타나는 지형 형성 작용을 의미하는데, 이 역시 과거 자료로는 충분히 판단하기 어려우므로 현재 하천의 모습을 참고하여 추정하였다.

Table 1. Assessment of Availability of Past and Present Data for Fluvial Geomorphic Variables

Type	Geomorphic variables		Disturbance factors	Data Availability		Used data
				Past data	Present data	
Valley	Valley bottom width(w_{vf})		Urbanization	○	△	Past
Shape	Planform	Sinuosity(P_0)	Levee, straightening	○	×	Past
	Cross-section	Bankfull width(w_{bk})	Low flow channel revetment	△	×	Past
		Bankfull depth(\bar{d})	Low flow channel revetment	×	×	-
	Longitudinal	Channel gradient (S_0)	Weir, cross structures	△	△	Present/past
Material	Bed material(d_r)			△	○	Present/past
	Bank material(d_b)		Low flow channel revetment, straightening	×	×	Assumed as bed material
Control	Bankfull discharge(Q_{bk})		Change in watershed hydrology	×	△	Present
	Specific stream power(ω)			×	△	Present
Processes	Dominant processes		Weir, cross structures	×	△	Present

2.3 대상 하천

본 연구에서는 국내 대표적인 모래하천인 미호천과 내성천을 중심으로 분석을 실시하였다(Fig. 1, 2). 미호천은 금강의 제 1 지류이며, 내성천은 낙동강의 제 1 지류이다. 두 하천은 모두 유역의 상당한 면적이 화강암 지질로 구성되어 있으며, 풍화된 화강암에서 기원한 입상 붕괴한 모래의 공급이 지배적인 조건을 갖고 있다. 또한 일부 구간에서 편마암이 나타나 하천이 편마암 지역을 관류하는 특성을 공유하고 있다. 하지만 두 하천 유역의 기복은 서로 다른데, 미호천은 최상류 분수계의 고도가 500 m 미만으로 유역이 전체적으로 기복이 낮은 구릉지역인 반면에 내성천은 최상류에는 1,000 m 이상의 높은 산지로 급경사의 지형으로 구성되어 있다. 두 하천의 유역면적은 대체로 비슷하며 유로연장은 내성천이 약 20 km 정도 긴 특징을 가지고 있다. Table 2에는 미호천과 내성천의 유역 특성이 간략하게 제시되어 있다.

Figs. 1, 2는 각각 미호천과 내성천의 유역과 주요 지류를 보여주는데, 미호천에는 상류로부터 한천, 백곡천, 초평천, 보강천, 무심천, 병성천, 조천 등의 주요 지류가 있

으며, 내성천은 낙화암천, 토일천, 영주서천, 한천, 금천 등을 주요 지류로 갖는다.

본 연구에서는 분석의 기본 단위가 되는 하도 구간을 본류에 주요 지류가 유입하는 것을 기준으로 구별하였는데, 지류의 유입이 없는 하도 구간은 동일한 수리수문학적, 지형학적 연속성을 가지는 하천의 종단적 공간 범위라고 할 수 있기 때문이다. 이와 함께 지형 및 하곡이 크게 변할 경우 추가로 구간을 구분하였다. 그리하여 미호천의 경우 14개 구간으로, 내성천의 경우 11개 구간으로 구분하였다. 각 구간의 시종점과 기준 유역면적은 Table 3과 같다.

3. 하천지형학적 변수와 그 추정 방법

3.1 하곡 변수

하곡 변수에는 곡저폭이 해당된다. 곡저(valley bottom 또는 valley floor)는 곡사면(valley side 또는 hillslope)와 대비되는 개념으로 곡사면에서 침식, 이동된 물질이 퇴적되는 곳이다(Gallant and Dowling, 2003). 곡저는 넓은 개념으로 하도, 홍수터, 그리고 하안단구를 포함한다. 본 연

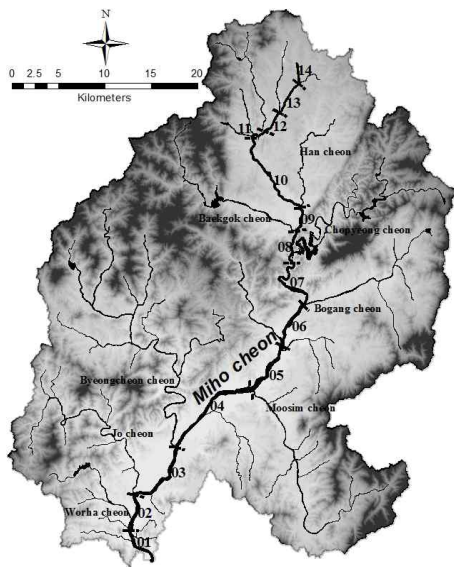


Fig. 1. Watershed and sub-reaches of the Miho River

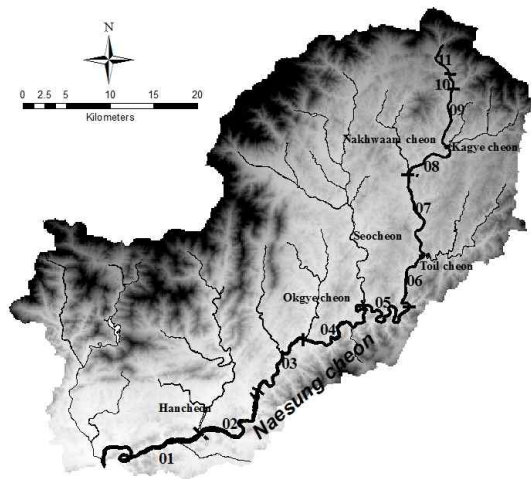


Fig. 2. Watershed and sub-reaches of the Naesung River

Table 2. Watershed characteristics of the Miho and Naesung Rivers (From : MLTM, 2011; MLTM, 2013)

Rivers	Catchment area (km ²)	Legal length (km)	Watershed mean gradient(%)	Watershed mean height(m)
Miho	1,855	89.2	17.6	130.1
Naesung	1,814	108.0	22.7	303.6

Table 3. Sub-reach Division of the Miho and the Naesung Rivers (Downstream and upstream ends indicate confluences with the named tributary rivers)

River	Sub-reach	Downstream end	Upstream end	Catchment area (km ²)	Sub-reach	Downstream end	Upstream end	Catchment area (km ²)
Miho	MH01	river mouth	Wolha R.	1,812	MH08	Bogang R.	Baekgok R.	413
	MH02	Wolha R.	Jo R.	1,759	MH09	Baekgok R.	Han R.	283
	MH03	Jo R.	Byungcheon R.	1,575	MH10	Han R.	Jangryang R.	149.7
	MH04	Byungcheon R.	Musim R.	1,118	MH11	Jangryang R.	Chiljang R.	109.5
	MH05	Musim R.	Seokwha R.	898	MH12	Chiljang R.	Seongsan R.	66.4
	MH06	Seokwha R.	Bogang R.	738	MH13	Seongsan R.	Docheong R.	32.9
	MH07	Bogang R.	Chopyung R.	551	MH14	Docheong R.	Legal start point	14.2
Nae-sung	NS01	River mouth	Han R.	1,446	NS07	Toil R.	Nakwhaam R.	282
	NS02	Han R.	Gopyung	1,158	NS08	Nakwhaam R.	Gagye R.	157
	NS03	Gopyung	Okgye R.	1,019	NS09	Gagye R.	Munyang R.	63
	NS04	Okgye R.	Seo R.	879	NS10	Munyang R.	Apdong R.	43
	NS05	Seo R.	Songniwon	482	NS11	Apdong R.	Legal start point	21
	NS06	Songniwon	Toil R.	458				

구에서는 곡사면의 급경사에서 곡저의 완경사로 바뀌면서 등고선 간격이 급변하는 지점을 곡저의 외곽 경계로 파악하였다. 곡저폭(w_{vf})은 하도의 주방향과 직각인 방향으로 양쪽 외곽 사이의 폭을 GIS 프로그램에서 계산하였으며, 강턱하폭의 배수로 그 상대적 너비를 나타내었다.

3.2 하천 형상 변수

하천 형상 변수에는 평면형을 나타내는 사행도, 단면형을 나타내는 강턱하폭, 강턱수심, 그리고 종단형을 나타내는 하도경사가 포함된다. 그 중에서 사행도는 과거 지도에서 저수로를 기준으로 실제 유로의 길이와 하곡 방향의 직선거리와의 비율로 계산하였다. 사행도는 과거의 사행도(P_0)를 분석에 사용하였지만, 과거와 현재 유로의 변화를 확인하기 위해 현재의 사행도 역시 계산하여 참고 자료로 제시하였다.

단면형을 나타내는 변수 중에 강턱하폭은 강턱유량과 경험적인 비례 관계에 있으며, 한 지점의 수리기하학을 나타내는 변수 중에 하나이다(Leopold and Maddock, 1953; Hey and Thorne, 1986; Soar and Thorne, 2001). 강턱하폭은 사행하천, 망상하천 등 하천의 유형과도 직접적인 관련이 있으며, 사행과장과 자갈하천에서 여울-소의 간격 등이 강턱하폭과의 비례 관계로 표현되므로(Soar and Thorne, 2001), 하천 설계에서도 중요한 변수라고 할 수 있다. 또한 하천의 에너지를 나타내는 비유수력은 총 유수력을 강턱하폭으로 나눈 것이므로 강턱하폭은 하천의 에너지 특성을 나타내는데 중요한 변수라고 할 수 있다.

강턱하폭은 강턱수위에서의 하폭이다. 강턱수위를 결정하는 방법에는 몇 가지가 있다: i) 활성 홍수터의 고도, ii) 단면에서 하폭수심비가 최소가 되는 지점의 높이, iii) 사주에서 가장 높은 고도에 해당하는 지점의 고도, iv) 흔히 수목고도로 알려진 다년생 식생의 최저 고도, v) 초본에서 목본 또는 초본에서 관목으로 천이되는 지점의 고도 등이다(Rosgen, 1994; VANR, 2009; Wolman and Leopold, 1957; Williams, 1978). 위의 다섯 가지 기준 중에서 과거 자료인 고지도에서 추정할 수 있는 것은 iii) 또는 v)에 대응하는 것으로 하도의 사주와 다른 토지이용(특히 식생지, 경지 등)과의 경계와 ii)에 대응하는 하천변의 절개지선(bluff line)이다. 하천 단면의 비대칭성으로 인해 양안의 강턱수위는 대부분 같지 않다. 하지만 지도상에 하천 양안에 이러한 기호가 분명한 구간에서 강턱하폭이 추정될 수 있다. Fig. 3은 1918년 고지도의 청주 도폭에서 오송 부근의 미호천에 대해 강턱하폭을 추정한 사례를 보여준다. 하천변의 절개지 선과 사주 경계를 따라 강턱하폭 선을 그린 후 하천 중심선을 따라 직각 방향으로 500m 간격으로 구간별로 하폭을 평균하여 추정하였다.

강턱하폭의 추정과 관련하여 몇 가지 한계가 인식될 필요가 있다. 첫째, 고지도 제작 과정에서 항공사진이 없이 지형 측량을 수행하는 과정의 오차, 둘째, 현장에 나타난 지형학적 사실과 측량과 작도를 거쳐 지도화되어 표현된 자료의 차이, 셋째, 지도의 축척, 인쇄표시상의 선의 굵기와 이를 수치 도형으로 입력하는 과정에서의 오차 등이다.

하천 종단형을 나타내는 변수인 하도경사는 유량, 비유

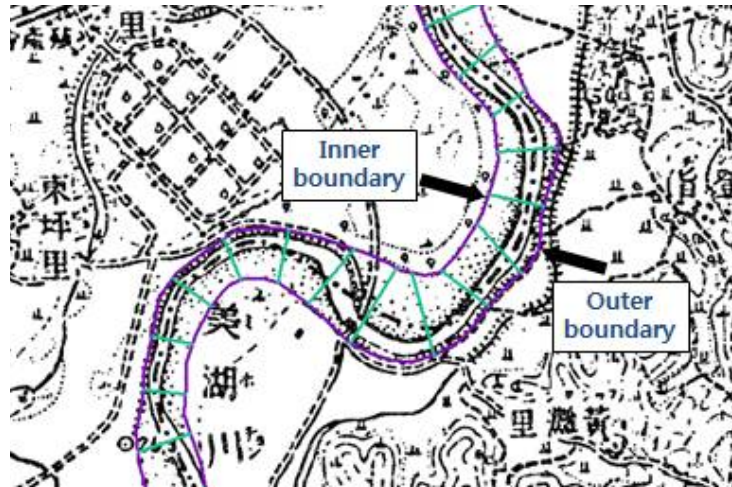


Fig. 3. An Example of Determination of Bankfull Width from the 1918 Old Map Near Osong

수력, 하상재료 및 지배적인 프로세스과 관련이 있다. 하도경사는 현재의 측량 자료로부터 구간별로 평균하상고의 고저차를 구하여 산정하였다. 미호천과 내성천의 경우 1970~80년대와 2010년대에 각각 측량이 이루어졌는데, 두 시점의 하상고는 전반적으로 저하되었지만, 본질적인 하상경사는 거의 동일하다. 이와 함께 과거 자료로서 1920년대 하천의 개수가 이루어지기 전에 조사된 자료인 치수 및 수리답사서(JGGK, 1920)의 하도경사를 유사 구간에 대해 참고하였다. 한편, 하도경사는 유로연장의 영향을 받는다고 볼 수 있는데, 이는 직강화된 유로는 하상경사를 급하게 하기 때문이다. 그러므로 본 연구에서는 1918년의 사행도를 현재의 하도경사(S_p)에 적용하여 Eq. (1)과 같이 하도경사를 재계산함으로써 과거 상태에 해당하는 하도경사를 추정하였다.

$$S_0 = S_p / P \quad (1)$$

3.3 구성재료 변수

하도의 구성재료는 하상재료와 강터재료로 구분된다. 하지만, 대부분의 경우 하상재료만이 채취되어 입경분석 자료가 있다. 따라서 본 연구에서는 하상재료만을 사용하였다. 하상재료는 하천기본계획 등에 의한 조사가 이루어지기 전에는 정량적인 값이 거의 없으므로 현재의 값을 사용하였다. 이 때 분석 대상 구간에 해당하는 자료들의 대표입경 중에 D_{50} 에 해당하는 값을 평균하여 사용하였다. 과거의 하상재료는 수치적인 대푯값은 확인할 수는 없지만, 고지도에 나타난 도해적 표현(빨, 모래, 자갈 등)과 치수 및 수리답사서(JGGK, 1920)의 기록을 통해 모래, 자갈, 실트-점토 등의 등급별 구별은 가능하다. 현재의 하

상재료에 대한 정량적인 값은 주로 하천기본계획의 자료를 참고하였다(MLTM, 2011; MLTM, 2013; Gyeongsangbukdo, 1985; Gyeongsangbukdo, 2002).

3.4 지배 변수

강터유량은 하천을 변화시키는 동인이자 다른 형태 변수들에 대한 독립변수로 작용하는 변수이다. 강터유량을 추정하는 방법은 몇 가지가 있으나 그 중에 하나는 빈도유량을 이용하는 것이다. Wolman and Leopold (1957)는 홍수터가 발달한 자연 하천에서 연최대 홍수량 자료를 이용할 때 강터유량 재현 기간이 1.0~5.0년이라고 하였으며, Woodyer (1968)은 1.02~2.69년을 제시하였다. 이와 함께 몇몇 연구는 2년 빈도 유량이 강터유량의 대체값으로 적절하다고 하였다(Bray, 1982; USACE, 1994; Wilkerson, 2008). 또한 일유량을 기준으로 평균 연 홍수량은 2.33년 빈도 유량과 일치하므로 이를 강터유량으로 판단하기도 한다. 본 연구에서는 여러 값들 중에 직접적인 자료를 얻을 수 있는 2년 빈도 유량을 강터유량으로 보았다. 하지만, 미호천과 내성천의 강터유량은 과거 자료에서 얻을 수가 없으므로 현재 자료로부터 간접적으로 추정할 수밖에 없다. 미호천의 경우 2011년 하천기본계획에 산정된 2년 빈도 홍수량 자료를 사용하였고(MLTM, 2011), 일부 상류 구간에 대해서는 면적비로 추정하였다. 내성천의 경우 서천 하류에 해당하는 구간에 대해서는 월포 지점의 일유량 연최대치 시계열 자료를 이용하여 2년 빈도 유량을 계산한 후 면적비로 추정하였으며, 서천 상류 구간은 영주댐 실시설계보고서(K-Water, 2010)에 추정된 2년 빈도유량을 기초로 역시 면적비로 추정하였다.

단위하폭당 유수력(Bull, 1979)이라고도 할 수 있는 비

유수력(specific stream power)은 강덕유량과 하도경사의 곱으로 표현되는 총 유수력(Ω)을 강덕하폭으로 나눈 것으로 Eq. (2)와 같다.

$$\omega = \Omega / W_{bk} = \gamma Q_{bk} S_0 / W_{bk} \quad (2)$$

위 식에서 γ 는 물의 비중이다. 비유수력은 하천 시스템 내에서 개별적인 지형을 침식하고 조성할 수 있는 힘에 대한 지표로 사용된 바 있다(Nanson and Croke, 1992).

3.5 지배적인 프로세스

하천 프로세스(fluvial processes)는 유수와 하도 사이의 물리적인 상호작용을 말한다. 하천 프로세스는 하상에서 유사 침식, 이송 및 퇴적을 포함하며(Wohl, 2014), 지형형성 작용, 양식과 관계된다. 특정한 하도 구간에서 나타나는 지배적인 프로세스는 하천의 종단적 위치, 하상재료, 하도경사, 하곡의 제약도 등에 의해 영향을 받으며, 특정한 하도 형상과 연관된다. Buffington and Montgomery (2013)는 프로세스에 기반한 하천 이해는 하천의 상태를 해석하고 평가하며 지형 경관의 교란에 대한 과거 및 미래의 반응에 대한 가설을 수립하는데 도움을 준다고 하였다.

그런데, 고지도에서는 지배적인 하천 프로세스를 직접 파악할 수 없고, 하천의 형태, 종단적 위치 및 하상재료 등을 통해 미루어 짐작할 수밖에 없다. 다만, 동일한 위치에서 현재 하천의 프로세스를 현장 답사를 통해 파악할 수는 있다. 본 연구에서는 과거와 현재 상태를 종합적으로 고려하면서 각 구간의 종단적 위치와 현장 답사 결과를 토대로 하천 프로세스를 추정하였다.

4. 분석 결과

4.1 하곡 변수

두 하천은 유사한 규모와 지질을 갖고 있으나 상이한 하곡 특성을 나타내고 있다. 미호천은 초평천 유입 전후의 구간(MH07~MH08)과 금강 유입 직전의 구간(MH01)을 제외하면 곡저폭이 1,450~3,000 m이고, 강덕하폭 대비 8.2~27.1배로 하곡이 비교적 넓다(Table 4). 이에 따라 1918년 지도에 나타난 미호천은 하도의 수평이동이 넓은 범위에서 나타나고 있으며, 하천 직강화 등에 반영되어 시기에 따른 유로 변화도 뚜렷하다(Fig. 4).

이에 비해 내성천은 상류 일부 구간을 제외하면 좁은 골짜기를 관류하는 하천으로 미호천에 비해 곡저의 범위

가 현저히 좁다. Fig. 5에는 하류 일부 구간이 나타나 있는데, 곡저는 최하류 만곡부 일부분 등 부분적으로만 분포하고 있다. 미호천의 곡저폭은 1,000 m를 대부분 넘는데 비해 내성천 곡저폭은 386~935 m 정도로 좁으며, 강덕하폭 대비 2.3~11배 정도이다(Table 5). 다만 하류의 좁은 골짜기를 진입하기 전인 분지형 하곡이 나타나는 상류 일부 구간(NS07~NS09)에서만 하곡에 비해 다소 넓은 하

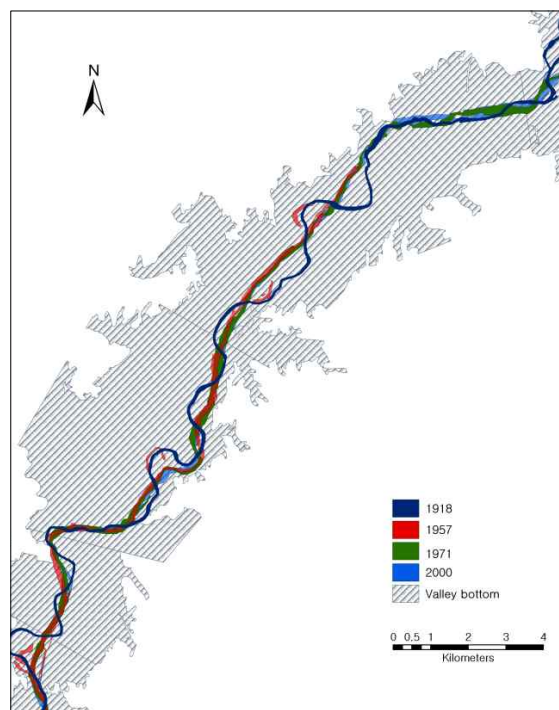


Fig. 4. Channel planform along the downstream sub-reaches (MH01~05) of the Miho River

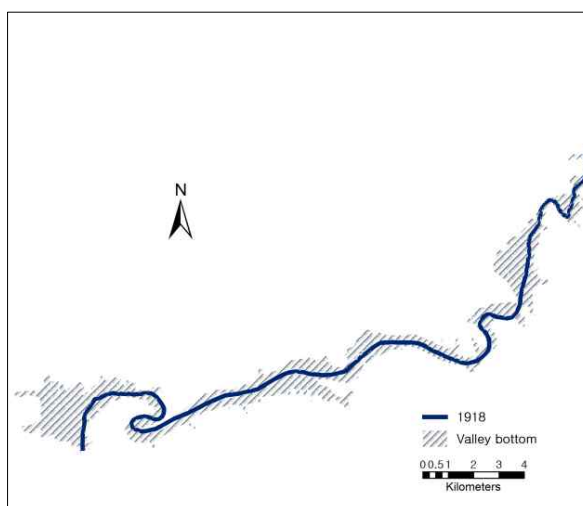


Fig. 5. Channel planform along the downstream sub-reaches (MH01~03) of the Naesung River

곡이 존재한다. 내성천은 좁은 하곡을 따라 관류하고 있어 1918년과 현재의 하도가 거의 변화 없이 일정하다.

4.2 하천 형상 변수

미호천은 상류에서는 완만하게 곡류하며, 편마암 지역을 통과하는 MH07~MH08구간은 하곡이 사행한다. 보강천 합류부 하류의 MH01~MH06구간은 넓은 하곡을 관류하면서 사행이 발달하며 1.1~1.68 범위에 있다. 무심천 상류 MH05구간의 경우 하도가 두 줄기로 갈라지는데, 주유로의 사행도는 1.21 정도지만, 상시 유로의 분기에 따른 하도 길이의 총연장이 반영되는 총 사행도(total sinuosity)는 1.79에 해당한다(Table 4). Fig. 4에는 연도별 유로 변화가 나타나 있는데, 1918년에 비해 하천 정비가 이루어진 1957년의 경우에는 직강화가 확인되며, 1971년 역시 직선에 가까운 유로를 나타내어 사행도는 1.1 미만으로 감소하였다. 대부분의 구간에서 하곡의 제약을 받는 내성천의 경우 하곡 자체는 최대 사행도 1.8 정도이나, 하도의 사행도는 최대 1.11 정도이며, 과거와 현재가 모두 거의 동일하다.

미호천의 강턱하폭은 구간에 따라 20~286m이며, 최대 하폭 구간은 MH04~MH06 구간이다. 이 구간은 주요 지류인 보강천, 석화천, 성암천, 무심천 등이 약 12km의 짧은 구간에 집중적으로 합류하는 구간이다. 이 네 하천의 합류로 인해 유역면적이 2배 이상 증가하고 하폭도 급

증한다. 고지도에서 이 구간에 사주가 면적이 크고 유로의 분기로 인한 망상하천이 발달하는 것은 그러한 이유에 기인한다고 보여진다. 하류 구간인 MH01~MH03 구간은 강턱하폭이 다시 감소하여 156~226m 정도인데, 이는 금강 배수위 영향을 받는 지역에서 하도 구성재료에서 점착성 물질 비중이 높아지면서 하폭 감소하는 것으로 파악되며(JGGK, 1920), 대신 사행도가 증가하는 특성을 나타내고 있다. 이와 달리 내성천의 경우 전체 구간에서 하류로 가면서 하폭이 증가하는 경향만 나타난다. 내성천의 경우 고지도에서 강턱 경계가 하천변 절개지선보다는 양안 모두가 사주인 경우가 더 빈번한데, 이는 점착성 물질이 적고 하곡이 좁아 홍수 범람으로 인한 미립질 퇴적도 적은 것과 관계가 있는 것으로 판단된다.

미호천과 내성천은 하도경사에 있어서도 매우 대조적이다. 미호천은 MH08 구간 하류로는 대부분 1/1,000 미만의 하도경사를 나타내며, 사행도가 높은 중하류(MH02~MH04) 구간의 경우 1/4,500~1/2,000의 경사로 매우 완만하다. 중상류에서도 미호천의 하도경사는 1/500을 넘지 않는다. 이에 비해 내성천은 미호천보다 약 2배의 하도경사를 가지고 있으며, 하류 구간에서도 1/1,000을 넘고, 중상류는 1/100 이상에 달하기도 한다. 치수 및 수리답사서(JGGK, 1920)에는 1910년대에 측량한 수면경사의 근사값이 제시되어 있는데, 구간별로 직접적으로 비교하기는 어

Table 4. Fluvial Geomorphic Characteristics of the Miho River Sub-reaches

Sub-reaches	Valley bottom width (m)	sinuosity	bankfull width (m)	channel gradient(%)		Bed material (D_{50} ,mm)	Bankfull discharge (Q_2 ,m ³ /s)	Specific stream power	Dominant processes
				Present	Past				
MH01	624	1.14	222	0.068	0.033	1.45	2,435	35.5**	Dune-Ripple
MH02	2,860	1.68	156	0.022		1.35	2,415	33.4	"
MH03	3,012	1.39	226	0.034		1.99	2,255	33.3	"
MH04	2,990	1.25	282	0.050		1.15	1,680	29.2	"
MH05	2,626	1.21(1.79)	286	0.062	0.083	0.95	1,405	29.8	"
MH06	2,135	1.12	261	0.077		1.56	1,225	35.4	"
MH07	413	1.11	184	0.077	0.143	1.28	1,005	41.2	"
MH08	265	1.01	104	0.097		2.43	9000	82.0	"
MH09	2,464	1.34	91	0.132	0.100	1.5	685	97.6	"
MH10	1,455	1.24	77	0.135		1.73	362*	62.1	"
MH11	N/A	1.51	47	0.170		1.7	265*	93.4	"
MH12	N/A	1.16	52	0.162		1.5	161*	48.8	"
MH13	N/A	1.18	30*	0.178		1.7	80*	46.3	"
MH14	N/A	1.11	20*	-		1.7	34*	74.4	"

*indicates estimated values from area ratio, **calculated using the past channel gradient data

Table 5. Fluvial Geomorphic Characteristics of the Naesung River Sub-reaches

Sub-reaches	Valley bottom width (m)	sinuosity	bankfull width (m)	channel gradient (%)		Bed material (D_{50} ,mm)	Bankfull discharge (Q_2 ,m ³ /s)	Specific stream power	Dominant processes
				Present	Past				
NS01	935	1.02	295	0.101	0.083	0.92	964	32.3	Dune-Ripple
NS02	800	1.02	321	0.109		1.28	772	25.7	"
NS03	492	1.04	206	0.135	0.156	1.42	679	43.7	"
NS04	404	1.06	159	0.141		1.33	586	51.0	"
NS05	340	1.06	102	0.184		1.13	497	88.1	"
NS06	386	1.01	122	0.215	0.179	1.21	472	81.8	"
NS07	638	1.02	87	0.179		1.15	291	58.6	"
NS08	570	1.12	78*	0.275		1.63	162*	55.7	"
NS09	398	1.04	34*	0.806		9.58	65*	148.9	Riffle-Pool
NS10	N/A	1.11	27*	1.209		> 20	44*	194.1	"
NS11	N/A	1.04	16*	1.828		> 50	22*	250.0	Plane-bed

* indicates estimated values from area ratio

렵지만, 대체로 현재의 하도경사가 큰 차이가 없으므로 (Tables 4 and 5), 하도경사는 과거와 현재가 비슷하게 유지되고 있다고 볼 수 있다.

4.3 구성 재료 변수

미호천과 내성천 모두 대부분의 구간에서 하상의 대표 입경(D_{50})은 약 1~2mm 정도로 굵은 모래와 잔자갈이 섞여 있는 전형적인 모래하천의 하상 특성을 나타낸다. 미호천의 경우 중하류 구간(MH01~MH07)에서 금강 배수로 인해 미립질 입자의 비율이 상대적으로 높게 나타났다(MLTM, 2011; Table 4). 강턱이 뚜렷이 발달하는 구간에서 하안에 논 등의 경지가 분포하는 것을 고려하면 강턱 구성물질은 하상재료에 비해 더 미립질일 것으로 추정된다. 1918년 지도에 의하면 미호천 하류 일부 지역은 실트, 점토와 같은 점착성 물질을 나타내는 빨 표시도 나타난다.

내성천은 중하류인 NS01~NS08 구간에서 거의 일정하게 모래 입자가 주를 이루고 있다. 봉화읍 이상의 상류 구간(NS09~NS11)은 자갈하천으로 볼 수 있는데, 이는 D_{50} 이 2mm를 초과할 뿐만 아니라 하상의 경관 자체도 잔자갈 내지 호박돌로 구성되어 있기 때문이다. 이 구간은 하도경사가 급격하게 증가하는 구간과도 일치하여 하류의 모래하천 구간과 현저한 대조를 이루고 있다(Table 5).

4.4 지배 변수

구간별 강턱유량(2년 빈도 유량)은 미호천의 경우 34~2,435m³/s이고, 내성천의 경우 22~964m³/s로 상대적으로 미호천의 강턱유량이 두 배 이상으로 크게 나타났다 (Table 4, 5). 또한 유역면적에 따른 강턱유량의 증가율

역시 차이가 있다(Fig. 6). 두 하천의 유역면적이 비슷함에도 이러한 차이가 나는 것은 강우량, 유역의 기복, 수계 특성과 관련된 강우에 대한 유역 응답 등의 차이에 기인한다고 판단된다. 아울러 사용한 자료의 차이도 일부 반영되어 있다고 볼 수 있다.

비유수력은 추정된 강턱유량을 토대로 계산되었다. Table 4를 보면, 미호천은 전체 구간에서 비유수력이 100을 초과하지 않는다. 하지만, 초평천 하류인 MH01~MH07 구간은 50 미만이며, MH08~MH14 구간은 이보다 다소 높아서 50을 초과한다. 내성천은 최하류의 NS01~NS03 구간은 비유수력이 50 미만이며, NS04~NS08 구간은 50~100, 자갈하천 구간에 해당하는 NS09~NS11 구간은 100을 초과하여 상류로 갈수록 비유수력이 증가하는 경향이 뚜렷한데, 이는 주로 하도경사가 증가하는데 기인한다고 볼 수 있다(Table 5).

4.5 지배적인 프로세스

하천 구간 전체를 보았을 때, 미호천과 내성천은 하도경사의 차이가 있기는 하나 대표적인 하상재료가 비슷한 모래하천이다. 하지만 구간별로 차이를 나타내고 있다. 미호천 하류는 금강 배수 영향을 받아 하상이 실트-점토의 점착성 물질로 구성되어 있으며, 이는 고지도에서 저습지로 확인된다(MH01~MH03 구간). 그보다 상류의 구간은 하상에서는 모래하천의 주된 프로세스인 사구-연흔(dune-ripple) 하상파(bedform) 위주의 프로세스가 지배적일 것으로 추정되는데, 이는 현장 답사 결과 확인한 프로세스와 유사할 것으로 판단된다(Fig. 7). 사구-연흔 프로세스는 저유속에서는 연흔을 통해 소류사가 이동되며, 유속이 증가하면서 사구, 반사구 등의 하상파를 형성하며 모래가

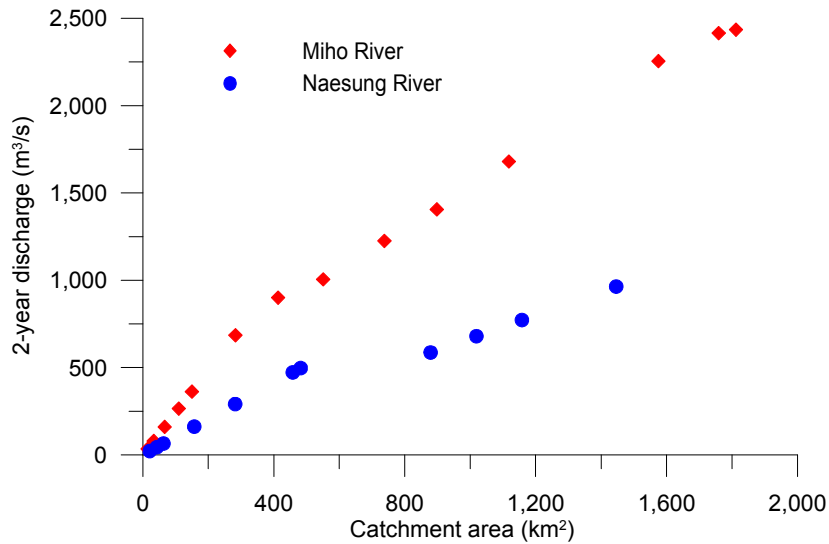


Fig. 6. Estimated 2-year Discharge for the Sub-reaches of the Miho and Naesung River

이송되는 유사 이송 양식을 나타낸다. 다만, 강터 재료와 하천변의 토지이용 등을 고려할 때 점착성 강터재료가 하상에 공급되고, 이것이 하상재료와 프로세스에도 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 이와는 달리 내성천은 전구간을 통틀어 점착성 물질의 퇴적 구간이 거의 없고 볼 수 있다. 고지도의 하도 경계 역시 점착성 강터물질을 반영하는 절개지 선보다는 비점착성을 나타내는 사주 형태가 지배적으로 나타난다. 내성천은 중하류에서는 대부분 모래 입자에 영향을 받는 사구-연흔 프로세스가 지배할 것으로 판단된다. 이에 비해 상류에서는 하도경사가 급하고 자갈 하상재료가 반영된 평하상(plane-bed)이 발달하는 구간도 있다(Fig. 8). 두 하천에서 공통적인 특성 중에 하나는 하폭이 매우 넓은 일부 구간에서 하중 사주가 널리 발달하는 망상하천의 특성도 일부 나타난다는 점이다.

$$W_{bk} = 4.94 Q_{bk}^{0.5} \quad (4)$$



Fig. 7. Channel Status of an Upstream Sub-reach of the Miho River (Sand-bed)

5. 지형학적 변수간의 상호관계

5.1 강터유량과 강터하폭

Soar and Thorne (2001)은 미국과 호주를 포함하는 모래하천 90개에 대한 수리기하학 자료를 취합하고 분석하여 강터유량과 강터하폭 사이에 다음의 식을 경험식(Eq. (3))을 얻었고 결정계수는 0.89이다.

$$W_{bk} = 4.13 Q_{bk}^{0.55} \quad (3)$$

또한, 동일한 자료에 대해 일반선형가설을 통해 지수값을 0.5로 고정하여 Eq. (4)를 도출하였다.



Fig. 8. Channel Status of an Upstream Sub-reach of the Naesung River (gravel plane-bed)

이러한 식들은 미국 등에서 하천 복원시 하폭 설계를 위한 참고자료로 제시되고 있다. 이에 비해 국내에는 호안이나 제방에 의해 변형되지 않은 자연 상태의 강터하폭 자료가 없는 관계로 외국의 경험식과 비교할 수도, 국내 하천에 대한 경험식을 제시할 수도 없었다. 그 대신 하도 설계에는 과거부터 사용하여 온 하천 규모별 하폭공식이 사용되어 왔다(KWRA, 2004).

본 연구에서 고지도를 이용하여 자연 상태로 추정되는 조건에서의 강터하폭을 추정하였으므로 제한적이거나 이를 기존의 외국 자료와 비교할 수 있게 되었다. Fig. 9를 보면, 미호천과 내성천은 NS02 구간을 제외하면 모두 Soar and Thorne (2001)이 경험식을 유도하는데 이용한 자료의 90% 범위 내에 들어가는 것으로 나타났고, 경향성은 Eq. (4)와 대체로 일치하는 것으로 볼 수 있다. 미호천의 경우 유사 유입이 많았을 것으로 추정되는 MH04~MH06 구간에서 다소 큰 하폭을 나타내고 있는 반면, 기타의 구간은 Eq. (4)를 기준으로 보면 하폭이 다소 작다. 이처럼 구간 특성에 따라 하폭의 차이가 있는 것으로 볼 수 있다. 내성천의 경우 전반적으로 Eq. (4)의 위쪽에 위치하고 있으며, 그 중에 하류 쪽인 NS01~NS02 구간은 유량에 비해 하폭이 다소 큰 특성을 보여주고 있다. 두 하천은 상이한 하폭 특성을 보이지만, 크게 보아서는 외국의 하천과 대략적으로 비슷한 강터유량-하폭 관계에 놓여 있음을 알 수 있다.

과거 자료를 이용한 분석 결과와 비교하기 위해 개수된 미호천과 내성천에서 하천정비계획이 처음 수립된 1975년과 1984년에 측량한 단면 자료를 이용하여 동일한 분석을 실시하였다. 분석은 국가하천 및 지방하천 일부에 해당하는 구간(MH01~MH04, NS01~NS05)에 대해 실시

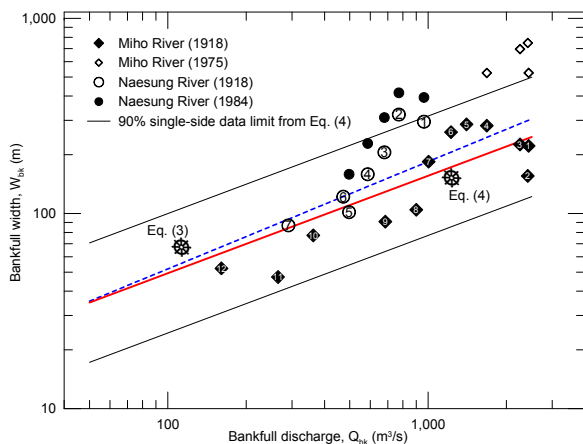


Fig. 9. Relationship between Bankfull Discharge and Width for the Miho and Naesung Rivers (Lines are drawn from Soar and Thorne, 2001) (numbers indicate sub-reaches)

하였다. 그 결과 미호천의 경우 과거 자료로 추정된 하폭보다 훨씬 큰 하폭을 타내고 있다. 이는 종래의 하폭 공식을 따라 하천정비를 시행하는 과정에서 저수로 하폭이 넓혀졌기 때문으로 풀이된다. 내성천의 경우에도 과거 하폭보다는 크지만, 과거 자료와 1980년대 측량 하폭의 차이는 미호천에 비해 상대적으로 작는데, 이는 내성천의 과거 하폭이 넓었고, 곡저폭 자체가 좁아 하폭 확대가 제한을 받기 때문으로 보인다.

5.2 강터유량과 하도경사

강터유량과 하도경사의 관계는 직류, 사행, 망상으로 대별되는 하천의 평면 형상에 관한 연속성(continuum)을 주제로 여러 연구에서 다루어졌다(Lane, 1957; Leopold and Wolman, 1957; Henderson, 1961; Parker, 1976). 그 중에 대표적인 것으로 Leopold and Wolman (1957)의 연구는 망상하천과 사행하천이 다음과 같은 유량-경사 판별식에 의해 구별된다는 점을 제시한 바 있다.

$$S_0 = 0.013 Q_{bk}^{-0.44} \quad (5)$$

Henderson (1961)은 그 연구를 보완하여 하상재료 입경에 의한 영향을 반영한 다음 식을 제시한 바 있다.

$$S_0 = 0.02 D_{50}^{1.15} Q_{bk}^{-0.46} \quad (6)$$

본 연구에서 도출한 강터유량과 과거 상태의 하도경사를 적용하여 두 변수 간의 관계를 분석하여 보았다. 현재의 하도경사는 과거와 비교하여 크게 달라진 것이 없으므로 현재 자료로만 분석하였다.

Fig. 10을 보면, 미호천의 경우 전체적으로는 Leopold and Wolman (1957)의 판별식 부근에 모여 있다. 금강 배수 영향을 받는 구간에 가까운 MH01~MH03 구간은 사행하천 쪽으로 분류되는데, 이 구간은 사행도가 1.14~1.68로 크게 나타나는 구간이다(Table 4). 반면에, 그 이상의 구간에서는 망상하천 쪽에 해당된다. 미호천은 D_{50} 이 1.0 mm 내외인데, Henderson 식(Eq. (6))을 적용할 경우에는 MH08~09, MH11, MH14 구간을 제외한 모든 구간이 사행하천 쪽으로 분류된다. 내성천의 경우 전구간이 Eq. (5)의 위쪽인 망상하천 쪽에 속하고 있다. 내성천의 D_{50} 이 미호천과 유사하다는 것을 고려하여 Eq. (6)을 적용하더라도 내성천은 역시 대부분 망상하천에 해당한다. 다만, 자갈하천 구간인 NS09~NS11은 D_{50} 을 5.0 mm로 고려하더라도 Eq. (6) 아래쪽에 속하므로 망상하천보다는 사행하천 쪽에 해당한다. 이처럼 미호천과 내성천은 서로 다른 하도 형상과 관계된다는 점을 알 수 있다.

5.3 하도경사와 하폭수심비

하천의 지형학적 변수 중에 하도경사와 하폭수심비는 하천 분류의 주요 인자로 사용되어 왔다(Lee et al., 2004). 프로세스 기반의 하천 분류 기법으로 알려진 미북서태평양 하천분류(Montgomery and Buffington, 1993)의 경우 하도경사와 하폭수심비를 핵심 인자로 사용한다. 따라서 이 두 인자를 분석함으로써 미호천과 내성천 각 구간의 하도 특성과 지배적인 프로세스와의 관계를 기존 연구와 비교하면서 파악할 수 있다.

하폭수심비는 단면 자료가 있거나 강턱수심을 알아야만 추정할 수가 있다. 현재의 측량 자료를 단면자료로 이용할 수 있지만, 이럴 경우 고지도로부터 추정된 강턱하폭과 부합하지 않게 된다. 여기서는 이미 추정된 강턱유량과 강턱하폭, 하도경사를 이용하면서 추가적인 변수로 조도계수를 고려함으로써 강턱수심을 추정하는 방법을 사용하였다. 엄밀히 말하자면, 수심은 부등류 계산을 통해 추정하는 것이 타당하지만, 과거의 단면 자료가 없으므로 등류를 가정한 Manning 식을 이용하였다.

강턱수위에서 동수반경(R)과 강턱평균수심(\bar{d})이 같다고 가정할 경우 강턱평균수심은 Manning 식(Eq. (7))과 연속방정식(Eq. (8))으로부터 유도할 수 있다(Eq. (9)).

$$\bar{V} = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (7)$$

$$Q_{bk} = A_{bk} \bar{V} = W_{bk} \bar{d} \bar{V} \quad (8)$$

$$\bar{d} = \left(\frac{n Q_{bk}}{W_{bk} S^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (9)$$

여기서, \bar{V} 는 단면평균유속이고, n 은 Manning 조도계수

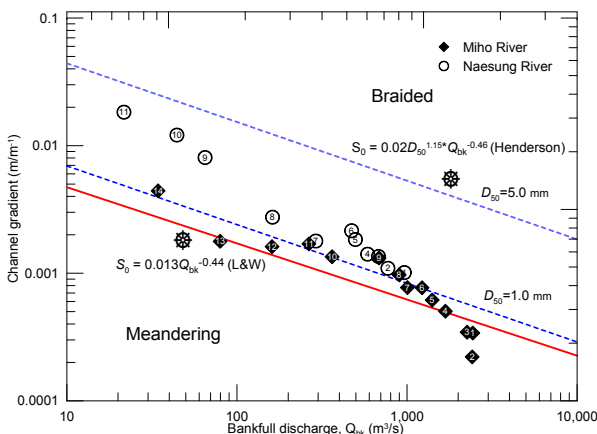


Fig. 10. Relationship between Bankfull Discharge and Channel Gradient (numbers indicate sub-reaches)

이며, 계산을 위해 S 대신 S_0 을 사용하였다. 하폭수심비는 강턱하폭(W_{bk})를 강턱평균수심(\bar{d})로 나눈 값이다. 조도계수(n)는 하도경사, 하상재료가 과거와 현재가 유사하다는 앞의 판단을 근거로 현재 자료인 하천기본계획에 제시된 값을 사용하였다. 미호천에서 MH01 구간은 0.027, MH02~MH07 구간은 0.029, 그 상류는 0.030을 적용하였고, 내성천에서는 NS01~NS02 구간은 0.03, NS03~NS05 구간은 0.031, NS06~NS09 구간은 0.032, 그 상류는 0.034를 적용하였다. 비교를 위해서 미호천과 내성천의 가장 오래된 측량단면 자료(미호천 1975년, 내성천 1984년)를 이용하여 국가하천 및 지방하천 일부에 속하는 하류 일부(MH01~MH04, NS01~NS05) 구간에 대해서 HEC-RAS로 부등류 계산을 하여 하폭수심비를 구하고 함께 제시하였다.

Fig. 11은 하도경사와 하폭수심비의 관계를 도시한 그림이다. 비교, 분석을 위해 Buffington and Montgomery (2013)이 제시한 충적하천의 지배적인 프로세스 유형별 하도경사-하폭수심비 범위가 함께 그려져 있다. Fig. 11에서 파란 실선은 각 프로세스 유형에 속하는 자료의 25~75 백분위의 범위이며, 파란 파선은 10~90 백분위 범위를 나타낸다.

미호천의 경우 하도경사가 큰 최상류 MH14 구간과 최하류의 MH01~MH03 구간을 제외한 모든 구간이 사구-연흔(dune-ripple, Dr) 하상과와 관련되는 프로세스 유형에 해당하면서 MH04~MH14 구간은 망상하천 프로세스(braiding, Br)와도 관련된다. 이는 미호천의 대부분 구간이 하폭수심비가 넓으면서 유사의 이송 형태는 모래 위주

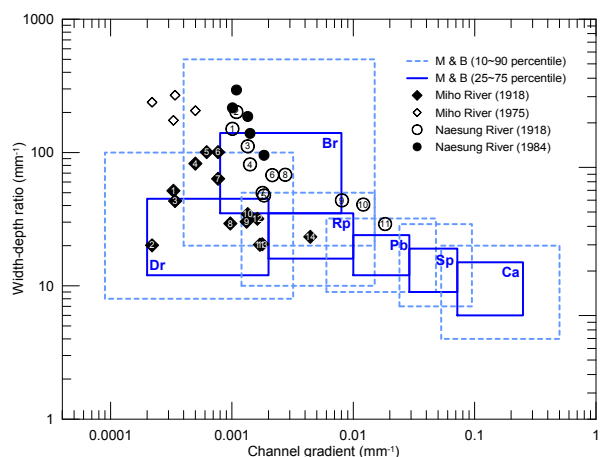


Fig. 11. Relationship between Channel Gradient and Width-depth Ratio Together with the Related Dominant Process Types Suggested by Buffington and Montgomery (2013). (Dr : dune-ripple, Br : braiding, Rp : riffle-pool, Pb : plane-bed, Sp : step-pool, Ca : cascade)

로 나타난다는 것으로 이해할 수 있다. 다만, 금강 배수 영향을 받고 사행도가 높은 MH02~MH03 구간은 오로지 사구-연흔 프로세스에만 속한다.

내성천의 경우 대부분(NS01~NS10) 구간이 망상하도에 속한다. 이는 강덕유량-하도경사 간의 관계에서 분석한 내용과 일치한다고 볼 수 있다. 그리고 중류인 NS04~NS08 구간은 사구-연흔 유형에 해당하여 미호천과 마찬가지로 모래하천의 특징적인 유사 이송 양식과 관계된다. 하폭이 넓은 하류 NS01~NS03 구간은 망상하도 특성이 보다 지배적이라고 볼 수 있다. 반면에 자갈하천이자 상류인 NS09~NS10 구간은 여울-소(riffle-pool, Rp) 유형에, 최상류 NS11 구간은 평하상(plane-bed, Pb) 유형에 해당하는 것으로 분석할 수 있는데, 이는 현장에서 관찰한 현상과 비교적 일치하며, 미호천에 비해 종단적으로 보다 다양한 유형의 하도가 존재한다는 것을 알려준다.

비교를 위해 1975년과 1984년의 단면 측량 자료를 이용하여 동일한 분석을 해 보았다. 미호천의 경우 하도경사는 큰 차이가 없으나 하폭수심비가 100을 훨씬 초과하여 MH01 구간을 제외한 3개 구간은 아무런 유형에도 속하지 않고 있어 기존 연구들이 제시하는 자료의 범위 밖에 있다고 볼 수 있다. 반면에 내성천은 과거나 현재나 하폭 차이가 크지 않은 관계로 분석 결과의 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 볼 때, 제한된 범위이긴 하지만 과거 자료를 이용한 분석 결과가 정비된 하도에 대한 측량 자료를 이용하여 분석한 결과에 비해 합리적임을 알 수 있다.

6. 요약 및 결론

하천 복원을 위한 기초 작업으로서 자연 상태에 가까운 하천의 지형학적 특성을 파악하기 위해 고지도를 포함한 과거 자료와 현재 자료를 이용하여 미호천과 내성천을 중심으로 하천지형학적 분석을 실시하였다. 또한, 기존의 연구를 바탕으로 변수들 간의 상호관계를 분석하여 두 하천의 특성을 파악하고자 하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 하천지형학적 변수 중에 하곡 변수로는 곡저폭, 하천 형상 변수로는 사행도, 강덕하폭, 강덕수심, 하도경사, 그리고 하상재료, 지배변수인 유량, 에너지 변수인 비유수력 등을 추정하고 분석하였다.
- 2) 미호천은 넓은 곡저를 기반으로 사행도가 크며 하도경사는 완만한 것으로 나타났다. 또한 강덕유량에 비해 강덕하폭이 작았으며, 비유수력 역시 작고 상하류

간에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이에 비해 내성천은 하도가 좁은 곡저를 따라 놓여 있고, 중하류와 상류 구간의 하도경사가 큰 차이를 보이고 있다. 강덕유량에 비해 강덕하폭은 다소 크며 비유수력은 상류로 갈수록 증가하는 특성을 보이고 있다.

- 3) 강덕유량과 강덕하폭의 관계를 분석한 결과, 미호천에 비해 내성천은 강덕유량 대비 강덕하폭이 다소 큰 것으로 나타났다. 하지만, 두 하천 모두 강덕유량이 증가할수록 강덕하폭이 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 내성천 하류의 NS02 구간을 제외하면 그 경향성은 외국의 기존 연구 결과와 크게 다르지 않은 것으로 나타났다.
- 4) 강덕유량과 하도경사의 관계를 통해 하도의 특성을 분석한 결과 미호천은 사행하천의 특성을 더 많이 나타내고 있는 반면, 내성천은 대부분의 구간이 망상하천 쪽에 해당하는 것으로 나타났다.
- 5) 하도경사와 하폭수심비 간의 관계를 주요 인자로 Buffington and Montgomery (2013)가 제시한 프로세스 유형별 자료 범위와 비교한 결과 미호천은 사구-연흔 및 망상하천 특성을 나타내는 것으로 나타났으며, 내성천은 사구-연흔, 망상하천 및 상류에서는 여울-소, 평하상 등 종단적으로 보다 다양한 프로세스와 관련된다는 것을 알 수 있다.
- 6) 제한된 범위이긴 하지만, 과거 자료를 이용한 분석 결과는 개수된 하도에 대한 자료를 이용하여 분석한 결과에 비해 합리적임을 알 수 있다.

본 연구의 결과는 과거 자료와 현재 자료를 함께 이용함으로써 하천의 지형학적 특성을 합리적으로 추정할 수 있음을 보여준다. 이를 통해 얻어진 정비되기 전의 자연에 가까운 하천 상태에 관한 정보를 하천 복원 및 관리 사업에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 과거 자료가 가진 정보의 제약성과 과거와 현재 시점에서의 유역 토지이용 상황과 기후 조건의 차이가 감안되어야 할 것이다.

감사의 글

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

References

Bae, S-H. (2007). "Urban change analysis using the

- 1:50,000 topographical map which is produced at 1910's." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 10, No. 3, pp. 93-103.
- Bray, D.I. (1982). Regime equations for gravel-bed rivers. In: Hey, R. D., Bathurst, J. C., Thorne, C. R. (Eds.), *Gravel-bed rivers*, Wiley, Chichester, pp. 517-542.
- Brookes, A. (1987). "Restoring the sinuosity of artificially straightened stream channels." *Environmental Geological Water Science*, Vol. 10, No. 1, pp. 33-41.
- Buffington, J.M., and Montgomery, D.R. (2013). "Geomorphologic Classification of Rivers." *Treatise on Geomorphology*, Vol. 9. Fluvial Geomorphology, Ed. Wohl. E., pp. 730-767.
- Bull, W.B. (1979). "Threshold of critical power in streams." *Bulletin of Geological Society of America*, Vol. 90, pp. 353-464.
- Gallant, J.C., and Dowling, T.I. (2003). "A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 12, p. 1347.
- Gyeongsangbukdo (1985). Basic plan for the Naesung River Improvement (in Korean)
- Gyeongsangbukdo (2002). Basic plan for the Naesung River Improvement (in Korean)
- Henderson, F.M. (1961). "Stability of alluvial channels." *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, Vol. 87, pp. 109-138.
- Hey, R.D., and Thorne, C.R. (1986). "Stable channels with mobile gravel beds." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 8, pp. 671-689.
- Hong, I. (2014). "Present status and type of the river restoration projects." Construction Brief, 2014-09.
- Iversen, T.M., Kronvang, B., Madsen, B.L., Markmann, P., and Nielsen, M.B. (1993). "Re-establishment of Danish streams: restoration and maintenance measures." *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, Vol. 3, pp. 73-92.
- JGGK (The Japanese Government General of Korea (1938). Annual Report on the National River Construction Works (1938) (in Korean)
- JGGK (The Japanese Government General of Korea) (1920). Survey on flood control and water use (in Korean)
- JGGK (The Japanese Government General of Korea) (1929). Investigation on the Korean Rivers (in Korean)
- JGGK (The Japanese Government General of Korea) (1937). Record on Civil Engineering Works on the Korean Rivers by 1928-River Improvement Part (1937). (in Korean)
- Kim, H-J., Shin, B-K., and Kim, W. (2014). "A study on hydromorphology and vegetation features depending on typology of natural streams in Korea." *Korean Journal of Environment and Ecology*, Vol. 28, No. 2, pp. 215-234.
- K-Water (Korea Water Resources Corporation) (2010). Report on Implementation Design for the Youngju Dam (in Korean)
- KWRA (Korea Water Resources Association) (2004). River design standard and explanation (in Korean)
- Lane, E.W. (1957). "A study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodible material." MRD Sediment Series 9, US Army Engineer Division, Missouri River
- Lee, J.W., Chun, S.H., Kim, K-H., and Kim, C.W. (2014). "Flow analysis based on the recovery of lateral connectivity in the river." *Journal of Korean Wetlands Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 213-220.
- Lee., C.J., Lee, D.H., Kim, K.H., and Woo, H.S. (2004). "Examination into the applicability of the river classification system based on the geomorphological criteria." *Journal of the Korean Water Resources Association*, Vol. 37, No. 1, pp. 1-11
- Leopold, L.B., and Maddock, T. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications, US Geological Survey Professional Paper 252
- Leopold, L.B., and Wolman, M.G. (1957). River channel patterns: Braided, meandering and straight, US Geological Survey Professional Paper 282-B.
- MLTM (Ministry of Land, Maritime and Transportation) (2011). Basic plan for the Miho River (in Korean)
- MLTM (Ministry of Land, Maritime and Transportation) (2013). Basic plan for the Naesung River (in Korean)
- MOE (Ministry of Environment) (2011). Technical Specification (in Korean)
- Montgomery, D.R., and Buffington, J.M. (1993). Channel classification, prediction of channel response and

- assessment of channel condition, Report prepared for the SHAMW committee of the Washington State Timber/Fish/Wildlife Agreement
- Nam, Y-W. (2007). "Making topographic maps of Korea during imperial reign and Japanese colonial rule." *Journal of the Korean Cartographic Association*, Vol. 7, No. 1, pp. 19-29.
- Nanson, G.C., and Croke, J.C. (1992). "A genetic classification of floodplains." *Geomorphology*, Vol. 4, pp. 459-486.
- Parker, G. (1976). "On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 76, pp. 457-480.
- Rosgen, D.L. (1994). "A classification of natural rivers." *Catena*, Vol. 22, pp. 169-199.
- Soar, P.J., and Thorne, C.R. (2001). Channel Restoration Design for Meandering Rivers, USACE Coastal and Hydraulic Laboratory Report, ERDC/CHL CR-01-1, 437p.
- USACE (United States Army Corps of Engineers) (1994). Engineering and Design: Channel stability assessment for flood control channels. Engineering Manual 1110-2-1418, CECW-EH-D, United States Department of the Army, Washington, D.C
- VANR (Vermont Agency of Natural Resources) (2009). Vermont Stream Geomorphic Assessment
- Wilkerson, G.V. (2008). "Improved bankfull discharge prediction using 2-year recurrence-period discharge." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 44, No. 1, pp. 243-257.
- Williams, G.P. (1978). "Bank-Full Discharge of Rivers." *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 6, pp. 1141-1154.
- Wohl, E. (2014). *Rivers in the Landscape: Science and Management*. Wiley-Blackwell. 330p.
- Wolman, M.G., and Leopold, L.B. (1957). *River Flood Plains: Some Observations on Their Formation*. U.S. Geological Survey Professional Paper 282-C, pp. 87-109.
- Woodyer, K.D. (1968). "Bankfull frequency in rivers", *Journal of Hydrology*, Vol. 6, pp. 114-142.

<p>paper number : 14-117 Received : 27 November 2014 Revised : 5 February 2015 / 9 February 2015 / 10 February 2015 Accepted : 10 February 2015</p>
