



## Characteristics of step-pool structure in the mountain streams around Mt. Jiri

Kim, Ki Heung<sup>a\*</sup> · Jung, Hea Reyn<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

Paper number: 17-109

Received: 26 December 2017; Revised: 14 January 2018; Accepted: 14 January 2018

### Abstract

The height of the steps was almost the same as the grain size of bed materials and increased with channel slope. The step widths and step wavelengths are almost the same size, and the step wavelength was decreased when the channel slope was increased. It was analyzed that there was a clear correlation between channel width and step width, and the step width increases with channel width. In addition, the step wavelength was scaled by channel width, and the step height is governed by the grain size of the rock forming the step, so that the profile structure of the step-pool was changed according to the channel slope. the scale of the pool was found to be highly correlated with the channel width, grain size, and slope gradient. Therefore, the characteristics of step-pool structure in mountain streams were influenced by various factors, but it can be explained as the grain size, channel width and channel slope.

**Keywords:** Step width, Step height, Step wavelength, Pool width, Pool length, Scour depth

## 지리산 주변 산지하천의 step-pool 구조 특성

김기흥<sup>a\*</sup> · 정혜련<sup>a</sup>

<sup>a</sup>경남과학기술대학교 토목공학과

### 요 지

Step의 높이는 하상재료 입경의 크기와 거의 같은 상관관계가 있으며, 하도경사에 따라 증가하고, 하도 폭과 step 파장은 거의 같은 크기로서 하도 경사가 증가하면 step 파장은 감소하는 것으로 분석되었다. 하도 폭과 step 폭은 뚜렷한 상관관계가 있으며, 하도 폭의 증가에 따라 step 폭도 증가 하는 것으로 분석되었다. 또한, step 파장은 하도 폭에 의하여 규모가 정해지고, step 높이는 step을 형성하는 암석의 크기에 의해 지배되기 때문에 step-pool의 종단면의 하상구조는 하도경사에 따라 변화하는 것으로 판단된다. Pool의 규모는 하도 폭, 입경 및 하도경사와 상관성이 큰 것을 확인 하였다. 따라서 하천의 step-pool 구조 특성은 다양한 인자들의 영향을 받지만 대표적으로 입경, 하도 폭 및 하도경사로서 설명할 수 있는 것으로 분석되었다.

**핵심용어:** Step 폭, Step 높이, Step 파장, Pool 폭, Pool 길이, 세굴심

## 1. 서 론

우리나라의 하천들은 산지가 국토면적의 70%를 차지하는 지형특성 때문에 상류의 지류들은 하상경사가 급하고 하상재료 입경이 굵어 하상경사가 완만한 하류의 하천들과는 완전히 다른 지형특성을 나타낸다. 하천은 경사에 따라 폭포(cascade),

계단상 하상(step-pool bed), 평탄하상(plane bed) 및 여울-소 하상(riffle-pool bed)의 순서로 하도지형을 형성하고 있으며, 이 중에서 폭포(cascade) 및 계단상 하상(step-pool bed)은 산 지 소규모 하천의 하도 지형을 대표하는 특징적인 지형이다. 그러나 하천의 지형학적 연구 분야에서 폭포 및 계단상 하상에 대한 연구는 상대적으로 여울-소 하상에 비하여 다소 미흡한 실정이다.

Step-pool 은 일반적으로 전석 및 거석이 수로 횡단 방향에 연속적으로 나타나는 지형구조로서 계단(step)이 되고, step

\*Corresponding Author. Tel: +82-55-751-3294  
E-mail: khkim@gntech.ac.kr (K. H. Kim)

과 step 사이가 세굴되어 소(pool)가 형성되는 것이다. 이러한 하도지형이 종단방향으로 연속되면서 계단 모양의 하상을 형성한다. 산지 유역에서 하도경사가 약 2% 이상의 영역에 step-pool은 분포한다(Grant *et al.*, 1990; Takahashi, 1994; Montgomery and Buffington, 1997; Chin, 1999a). 1990년대 이후 step-pool 구간의 하도에 대한 지형학적인 관계(Wohl *et al.*, 1997; Chin, 1999a; Chartrand and Whiting, 2000), 유속 특성(Wohl and Thompson, 2000), step-pool 안정성(Chin, 1998), step-pool 연속의 기원(Grant and Mizuyama, 1991; Abrahams *et al.*, 1995; Chin, 1999b; Chartrand and Whiting, 2000) 등에 대한 연구가 많은 정보를 제공하고 있지만 여전히 step-pool 시스템에 대한 설명은 이루어지지 않고 있다. 또한, 상세한 현장조사를 통하여 산지하천의 수리학적 기하 특성의 중요한 부분인 step-pool을 보여주는 경사와의 지형학적 관계를 규명하기 위한 연구도 수행되었다(Hayward, 1981; Wohl and Grodek, 1994, Wohl *et al.*, 2000, 2001). 미국에서 다양한 조사연구가 수행되었는데 즉, Oregon주(Grant *et al.*, 1990), Alaska주와 Wasington주(Montgomery *et al.*, 1995) 및 California주(Chin, 1989, 1999a)의 step-pool에 대한 자료는 체계적이고 규칙적인 step-pool 간격으로서 하도 폭의 1~4배 범위로 제시하였다(Montgomery and Buffington, 1997).

1990년대 이후 계단상 하상의 형성과정에 대한 연구가 계속되고 있으며, 하도지형에 대한 요소로서 이해가 필요하다(Grant and Mizuyama, 1991; Abrahams *et al.*, 1995). 실제로 계단상 하상은 협준하여 접근할 수 없는 산지하천에서 큰 규모의 강우사상에 의한 사면붕괴, 산사태 및 하도의 측방침식 등에 의하여 발생하는 하상변동으로 형성되기 때문에 그 과정을 현장에서 관측하기가 어렵다. 따라서 계단상 하상의 형성에 대한 메카니즘을 이해하기 위하여 많은 실험적 연구가 수행되었다(Whittaker and Jaeggi, 1982; Ashida *et al.*, 1984; Grant and Mizuyama, 1991; Abrahams *et al.*, 1995). 이러한 산지하천들은 최상류에 속하는데 Rosgen (1994)의 분류체계에 의한 하천유형은 하상경사가 2% 이상인 A 및 B에 해당되고(Rosgen, 1994), Yamamoto (1988)에 의한 하천유형은 하상경사가 1.7% 이상인 Segment M에 해당된다(Yamamoto, 1988). 국내에서도 지형학과 지리학 분야에서 산지하천에서 step-pool 연속체에 대한 연구가 수행된 바 있으나(Oh, 2000), 1개소의 계곡을 대상으로 하였기 때문에 지역적 범위가 좁은 한계가 있으므로 다양한 지형 및 지질조건을 가진 산지하천의 step-pool 구조에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 산지하천에 분포하는 계단상 하상(step-pool bed)의 구조적 특성을 규명하는 것이다. 이를 위하여 지

리산 주변의 4개 하천에 대한 하도의 지형특성 즉, step-pool의 구조를 조사, 분석하였다. 산지하천에서 step-pool 지형의 특성과 step-pool의 분포를 파악하기 위해 지리산 인근의 4개 하천 14개 조사구간의 하도구조 즉 하도경사, 하도 폭, step-pool 치수, step 구성 재료의 크기 및 개수 등을 조사하였다. 또한, 하도 조건(하도경사, 하도 폭, 입경) 및 step-pool 지형 구조와의 관계를 검토하고, 그 결과를 step의 종단면에 대한 데이터로 제시하였으며 하도 조건과 step-pool 간의 관계에 대한 기초자료를 제공하였다.

## 2. 연구 범위와 방법

지리산 주변은 국립공원구역으로 개발이 제한되기 때문에 구간에 따라 step과 pool이 비교적 잘 보존되어 있으며, 하천 기본계획이 수립되어 있는 지방하천을 대상하천으로 선정하였다.

본 연구의 대상구간은 지리산 주변의 경남의 하동군(범왕천, 화개천), 구례군(내서천) 및 함양군(의탄천)에 위치하고 있으며(Fig. 1), 범왕천은 섬진강의 제2지류이고, 화개천 및 내서천은 섬진강의 제1지류이며, 의탄천은 남강의 3지류이다. 대상하천들은 21.36 km<sup>2</sup>에서 115.25 km<sup>2</sup> 범위의 유역면적으로 호박돌과 전석-암반 하도를 포함하는 복잡한 지질 및 다양한 지형을 가지고 있다. 유역의 평균표고는 700 m에서 980 m로 상당히 높고, 평균경사는 약 28~30°의 급경사 산지이다.

지리산 부근의 연평균기온은 13°C 정도이고, 연평균 강수량은 약 1,350~1,510 mm의 범위이며, 지리산 부근의 조사대



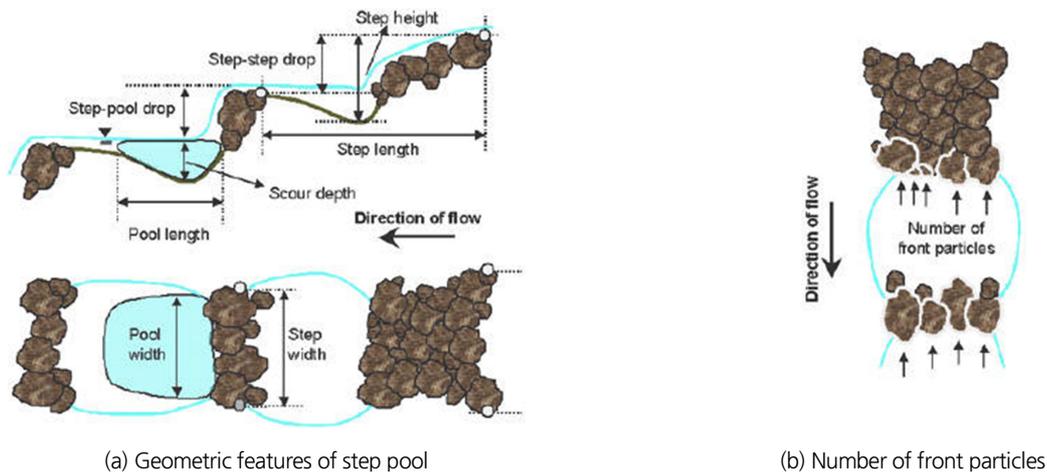
Fig. 1. Location map of study sites around Mt. Jiri

상 하천은 6월에서 9월 사이에 발생하는 강우가 약 69%로서 다우지역이다. 각 하천의 조사는 2016년부터 2017년 사이에 조사되었다.

조사구간은 4개 하천의 14개 구간으로서 구간 길이는 44~200 m, 경사는 0.016~0.043의 범위였다(Table 1). 종단면은 하천기본계획의 종단면 자료를 바탕으로 하도의 중심선을 따

**Table 1.** Basin characteristics of study streams

Stream	Drainage area (km <sup>2</sup> )	Channel length (km)	Maximum height (EL.m)	Mean height of basin (EL.m)	Area of basin (>600 m) (%)	Mean slope of basin (°)
Beomwangcheon	21.36	7.04	Samdo Peak (1556)	742.79	65.02	28.34
Hwagaecheon	115.25	21.21	Meyngseon Peak (1586)	701.76	59.66	30.28
Naeseocheon	39.41	14.20	Samdo Peak (1556)	701.31	58.93	27.99
Uitancheon	28.19	10.05	Cheonwang Peak (1915)	976.79	83.93	29.95



**Fig. 2.** Definitions of (a) geometric features of step pool and (b) number of front particles (Okazaki *et al.*, 2006)

**Table 2.** Characteristics of study reaches

Stream	Reach	Drainage area (km <sup>2</sup> )	Mean gradient (m/m)	Mean channel width (m)	Mean particle size* (mm)	Number of front particles	Survey channel length (m)	Number of step-pool unit
Beomwangcheon	A	9.08	0.039	17.4	1,591	10	100	9
	B	10.59	0.035	16.4	1,302	9	140	10
	C	16.00	0.034	18.3	1,163	11	120	8
	D	16.81	0.030	21.3	1,700	10	60	6
Hwagaecheon	A	73.95	0.031	40.00	1,467	15	44	5
	B	76.45	0.027	39.63	1,316	16	69	8
	C	78.95	0.023	45.45	1,866	15	102	7
	D	81.45	0.018	34.35	1,510	17	95	4
	E	83.52	0.015	43.86	1,687	16	116	7
Naeseocheon	A	25.44	0.033	21.04	1,738	12	120	10
	B	25.44	0.033	20.24	1,525	12	200	8
Uitancheon	A	26.44	0.043	25.25	2,175	10	141	8
	B	26.74	0.042	26.50	2,035	11	162	8
	C	27.04	0.042	30.00	1,832	9	197	10

\*Calculated by the b-axis of the five largest rocks at each step

라 거리계(또는 줄자)와 표척을 이용하여 측정하였다. 하도의 하상고는 각 step의 마루와 각 pool에서 측정하고 종단면도에 보간하여 표시하였다. 하도 폭은 모든 구간의 각 step에서 흐름 방향에 수직인 방향으로 하안(bank) 사이의 거리를 줄자로 측정하였다. Step의 입경 측정은 step을 형성하는 대표입경으로서  $D_{84}$  또는  $D_{90}$ 를 나타내는 최상위 입경 3개의 장축, 중축 및 단축의 기하평균값 또는 최상위 입경 5개의 중축값 중 각 step에서 가장 큰 다섯 개의 암석을 선택하여 중축값을 측정하고, step 입경을 나타내기 위하여 사용하였다(Costa, 1983). 또한, 각 step에서 「전면의 입자수」를 측정하였으며, 「전면 입자수」는 「하류에서 관측할 수 있으며 하류측의 각 step을 형성하는 전석의 수」를 의미한다(Okazaki *et al.*, 2006) (Fig. 2(b)).

표척과 줄자를 사용하여 측정된 step-pool 기하구조는 산지하천의 하도지형 특성을 잘 나타낼 수 있다(Fig. 2(a)). Step의 기하구조는 step 높이, step 사이의 낙차, step 파장 및 step

폭으로 측정하였다. Step-step 낙차는 연속적인 step 마루 사이의 수직 거리이고, step 파장은 하도 중심선에서 측정된 연속적인 step 마루의 하류방향 거리이며, step 폭은 step 마루 위의 하도횡단 거리이다. Pool의 기하구조는 흐름으로 인한 세굴부분의 세굴깊이, 길이 및 폭과 step-pool 낙차를 측정하였다. Step-pool의 낙차는 step 직상하류 수면의 표고차이다. 조사된 step과 pool은 108개소이다(Table 2).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 하도의 지형특성

하천은 하도 단위에서 전체 유역에 이르는 공간규모에서 구별할 수 있는 연속성을 지니고 있다. 산지 하천은 입경이 큰 전석 이상의 하상재료로 형성된 규칙적이고 연속적인 step-



(a) Beomwangcheon

(b) Hwagaechon

(c) Uitancheon

(d) Naeseocheon

Fig. 3. Photographs of reaches in study streams

Table 3. Results from the measurement of step-pool geometry

Stream	Reach	Mean step height (m)	Mean interval of steps (m)	Mean step width (m)	Mean pool length (m)	Mean pool width (m)	Mean scour depth (m)	Mean step-pool drop (m)	Mean interval of steps/ Channel width
Beomwangcheon	A	1.39	18.50	13.89	5.46	5.91	0.75	0.74	1.06
	B	1.44	20.10	15.50	5.64	4.66	0.62	0.82	1.23
	C	1.31	22.00	19.80	6.14	5.02	0.60	0.59	1.20
	D	1.40	18.60	12.30	6.38	5.21	0.67	0.73	0.87
Hwagaechon	A	1.34	49.08	30.50	5.63	6.89	0.91	0.43	1.23
	B	1.30	42.55	28.15	7.50	7.72	0.79	0.71	1.07
	C	1.26	44.47	27.08	7.78	6.84	0.81	0.89	0.98
	D	1.32	35.96	26.26	7.34	7.34	0.88	0.64	1.05
	E	1.13	51.77	28.32	8.11	8.21	0.94	0.89	1.18
Naeseocheon	A	1.57	23.00	16.14	6.63	6.86	0.73	0.84	1.09
	B	1.60	32.64	14.29	6.45	6.07	0.59	1.01	1.61
Uitancheon	A	1.94	32.22	16.50	8.47	7.77	0.84	1.20	1.28
	B	1.70	34.92	24.50	7.32	7.85	0.85	0.85	1.32
	C	1.79	33.71	24.80	6.49	7.60	0.88	0.81	1.12

pool이 나타나는 종단방향의 지형특성을 가진다. Step-pool 구간의 흐름 및 하상 변동은 소-여울(pool-riffle) 하도에서의 측면변화 보다는 수직적 변화가 대표적이다. 하상의 step은 step 위의 사류 흐름과 소(pool)에서의 상류 흐름까지 교대로 한계상태를 반복한다. Step-pool의 간격은 하도 폭의 1~4배 간격으로 나타나는 데 총적하천의 하도에서 나타나는 소-여울 간격 5~7배 보다 훨씬 적다(Montgomery *et al.*, 1997).

대상구간의 step-pool의 간격은 구간에 따라 평균적으로 하도 폭의 0.58~2.33배로서 조사되었다. 이러한 결과는 지리 산 주변 하천유역의 모암은 암질이 단단한 편마암이고, 각 하도구간에서 step을 구성하는 상위 5개 하상재료 직경이 약 1.16~2.18 m로서 거석(large boulder)이 step을 형성하고 있을 뿐 아니라 하도구간에 산재하고 있기 때문에 하도 지형특성은 cascade와 step-pool이 혼재하는 것으로 분석되었다.

Cascade 하도의 흐름특성은 하도 폭보다 작은 간격으로 배치된 작고 불규칙하게 배치된 소(pool)과 함께 길이가 하도 폭을 초과하는 일련의 개별 거석 사이로 격렬하게 흐르는 분류(jet) 및 후류(wake) 흐름으로 정의하고 있다(Montgomery *et al.*, 1995). Step-pool 하도에서의 소(pool)와 step의 규칙적인 순서는 아마도 총적하도에서 구조적으로 형성되는 여울-소 지형과 유사하게 나타난다.

Step-pool 지형은 하도경사가 급하고 하도 수심에 대한 하도의 비가 작고 산지 계곡사면에 의하여 유로 변화가 제한을 받기 때문에 Fig. 3의 현장 사진과 Table 3의 평균 step 높이 조사 결과와 같이 종단방향으로 수직적 하상변화가 크게 발생한다.

일반적으로 하천의 물리적 조건은 하류방향의 거리(유역면적)에 따라 변화하며, 경사의 감소는 일반적으로 하류방향의 거리에 따라 입경의 감소와 유량의 증가를 수반한다.

대상하천들에 대한 분석결과 하도 폭이 명백하게 유역면적과 상관관계( $r^2 = 0.89$ )가 있음을 나타내고 있다(Fig. 4). 일반적으로 유량은 하류방향의 유역면적에 따라 증가한다고 가

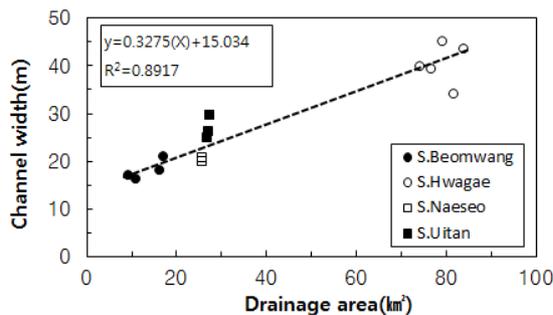


Fig. 4. Relationship between the channel width and drainage area

정하는 것이 합리적이기 때문에 유량의 지표로서 하도 폭을 사용하였다.

### 3.2 Step의 종단 특성

Step의 종단면에서 step 높이와 입경은 중간정도의 상관관계( $r^2 = 0.38$ )를 보여준다(Fig. 5). 기존의 연구는 step간 낙차는 step을 형성하는 암석의 평균입경 만큼 큰 것으로 제시하고 있다(Ashida *et al.*, 1984; Ashida *et al.*, 1985; Fujita and Michiue, 1995). 평균 step 높이는 모든 조사구간에서 입경의 약 1~2배 정도의 범위에 있다(Fig. 5). Fig. 6은 각 조사구간에서 하도경사와 step 높이 사이의 관계를 나타낸 것이다. 하도경사가 0.015~0.43 범위인 경우, step 간의 최대 낙차가 증가하는 경향을 나타내고, step 높이와 하도경사 사이의 중간정도의 상관관계( $r^2 = 0.66$ )가 있는 것으로 나타났다.

또한, Fig. 7은 하도 폭과 step 파장은 명백한 상관관계( $r^2 = 0.86$ )를 나타내며, step 파장과 하도 폭의 비는 0.87~1.61로서 크기가 유사하게 변화한다. Chin (1989)은 Santa Monica 산맥의 step들은 하도 폭의 약 1.9배의 파장을 나타내고, Chartrand and Whiting (2000)은 Idaho의 step들은 하도 폭의 약 0.6~1배 범위까지 변화한다고 보고된 바 있으며, Okazaki *et al.* (2006)은 Niigata와 Mie의 step 파장은 하도 폭의 약 0.9~1.9배까지 변화한다고 제시한 바 있다. 기존의 연구대상 하천

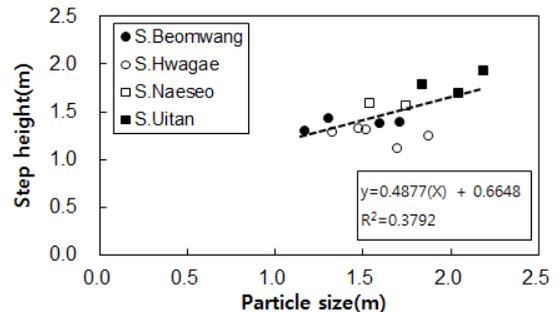


Fig. 5. Relationship between step height and particle size

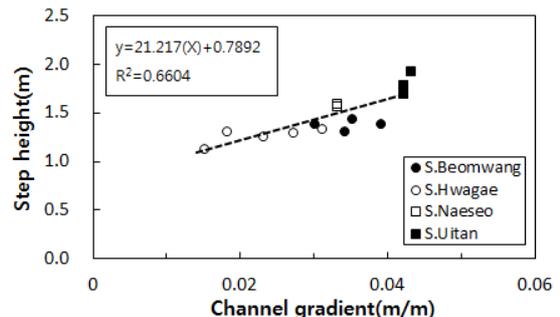


Fig. 6. Relationship between step height and channel gradient

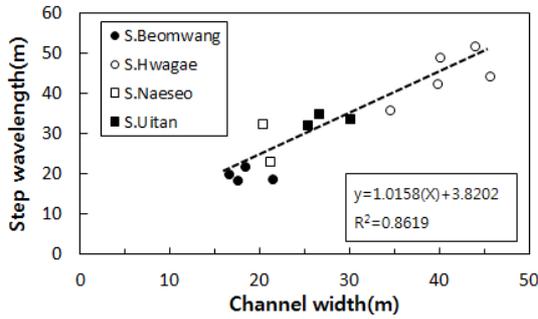


Fig. 7. Relationship between step wavelength and channel width

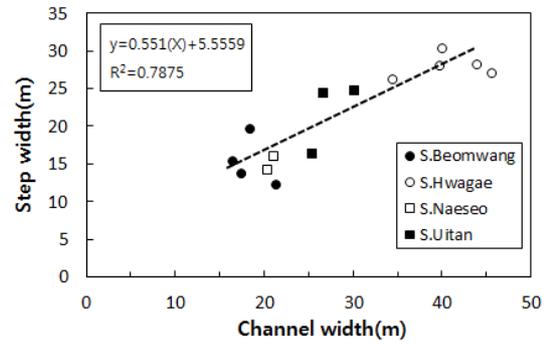


Fig. 9. Relationship between step width and channel width

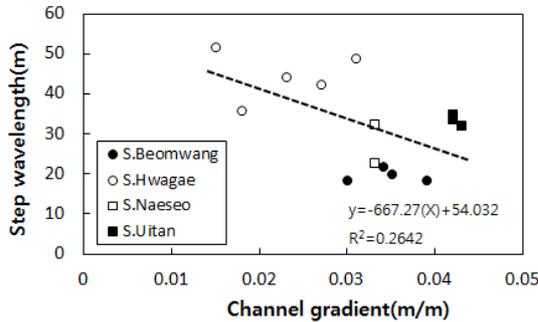


Fig. 8. Relationship between step wavelength and channel gradient

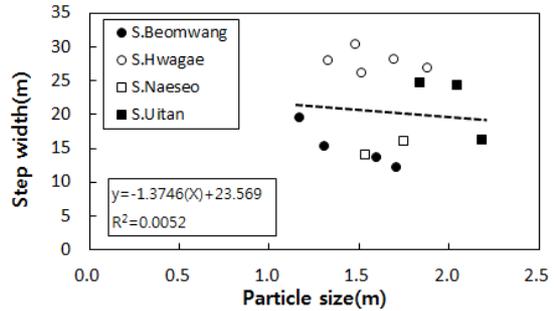


Fig. 10. Relationship between step width and particle size

은 하상재료 입경이 약 34~127 cm로 비교적 작은 반면에 본 연구의 대상하천은 약 1.16~2.18 m로 약 2배 이상 더 크지만 본 연구와 기존의 연구결과가 유사하게 나타나는 것은 step-pool 하상 구조가 수력학적으로 일관성이 있음을 의미한다.

Fig. 8은 하도경사와 step 파장의 관계를 도시한 것으로서 경사의 증가에 따라 step 파장이 감소하는 경향을 보이나 상관성은 낮다.

### 3.3 Step의 횡단특성

Fig. 9는 평균 하도 폭과 평균 step 폭 사이의 관계를 나타낸 것이며, step 폭은 대체로 하도 폭과 뚜렷한 상관관계( $r^2 = 0.79$ )를 나타내는 데 즉, 하도 폭이 크면, step 폭도 크다. Fig. 10에 나타낸 바와 같이, step 폭과 입경은 상관관계가 부족한 것으로 나타났고, 각 구간에서 입경과 step 폭의 평균 비율은 약 3.1~5.8 범위이며, 평균적으로 약 4.1로서 입경과 step 폭의 비는 하도경사에 따라 감소한다. 또한, 하도경사 변화에 대한 입경과 step 폭 비는 중간정도의 상관관계( $r^2 = 0.36$ )를 나타내는 것으로 분석되었다(Fig. 11). 각 구간에서 전면 입자 개수의 평균값은 약 9~17까지 다양하며, 하도경사와 명백한 상관관계( $r^2 = 0.71$ )를 나타낸다(Fig. 12). 이것은 하도경사가 높은 값에 접근할 때 입경과 step 폭의 비율이 감소함을 보여주는 Fig. 11의 결과와 일치한다. 이러한 결과는 step의 종단을 가로

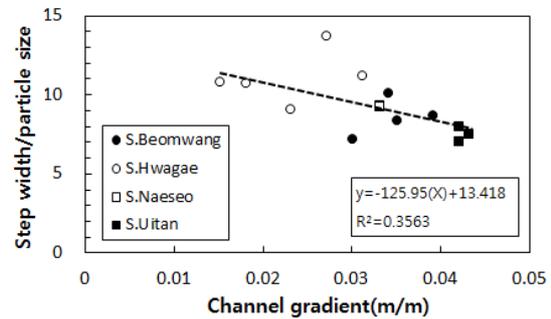


Fig. 11. Relationship between channel gradient and step width scaled by particle size

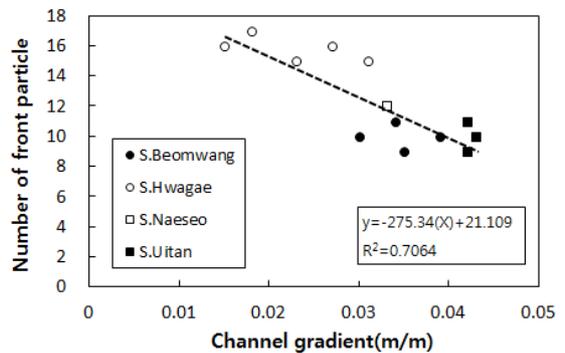


Fig. 12. Relationship between channel gradient number of front particles

지르는 step 폭이 하상재료 입경과 하도 폭 또는 이들 중 하나에 의해 제어된다는 것을 시사하고, 전면의 입자수는 하도 경사에 의해 결정된다는 것을 의미한다.

따라서 step 파장은 하도 폭 즉, 유량에 의하여 규모가 정해지는 반면에, step 높이는 직접적으로 step을 형성하는 암석의 크기에 의해 지배되는 것으로 가정하는 것이 합리적이다. 또한, 이러한 결과는 step의 종단면과 물리적 조건은 하도경사에 따라 변화한다는 것을 나타낸다. 즉, 0.043 미만의 경사를 가지는 구간에서는 평균 step 높이는 평균 입경만큼 크다(Fig. 6).

### 3.4 소의 지형특성

Pool 기하구조의 구성 요소인 pool 폭과 pool 길이는 Fig. 13과 같은 상관관계( $r^2 = 0.53$ )를 나타내는 반면, pool 폭과 세굴심은 명백한 상관관계( $r^2 = 0.72$ )가 있는 것으로 나타났다(Fig. 14). Pool 길이, pool 폭 그리고 세굴심의 상사비가 약 9 : 9 : 1의 범위로 분석되었는데, Niigata와 Mie 하천의 경우, pool 길이, pool 폭 그리고 세굴심의 상사비가 약 5 : 5 : 1이며, pool 기하구조는 종단면에서 뿐만 아니라 종단과 횡단면에서도 거의 상사를 유지한다는 연구(Okazaki *et al.*, 2006)와 차이가

있으므로 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

Figs. 15~17은 하상재료 입경과 pool의 지형특성 관계를 나타낸 것이다. 입경은 pool 길이, pool 폭과 세굴심은 명백하게 관계는 있으나 그 상관성이 낮으므로 향후에 더욱 많은 조사 자료를 확보하여 분석할 필요가 있다. 이러한 결과는 대상 구간의 pool 길이와 pool 폭은 평균적으로 입경의 약 4배이고, 세굴심은 입경의 약 0.5배 범위인 것으로 분석되었다. Figs. 18~20은 하도 폭과 pool의 지형특성 관계를 나타낸 것이다. 하도 폭과 pool 길이 및 pool 폭은 중간정도의 상관관계( $r^2 = 0.41$ 와  $r^2 = 0.45$ )가 나타났으며, 세굴심도 중간정도의 상관관계( $r^2 = 0.56$ )를 보인다.

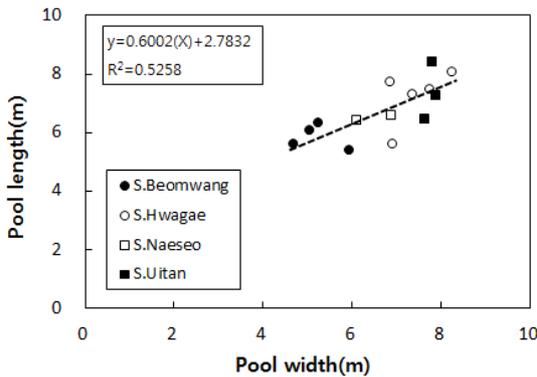


Fig. 13. Relationship between pool width and pool length

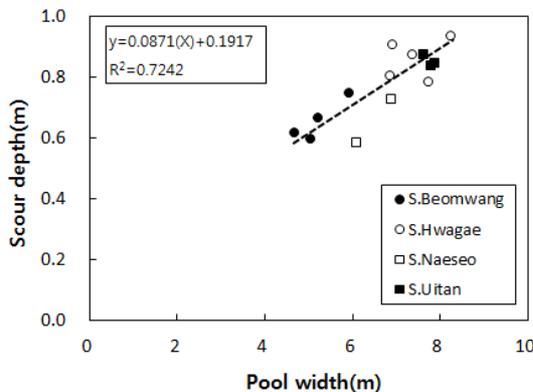


Fig. 14. Relationship between pool width and scour depth

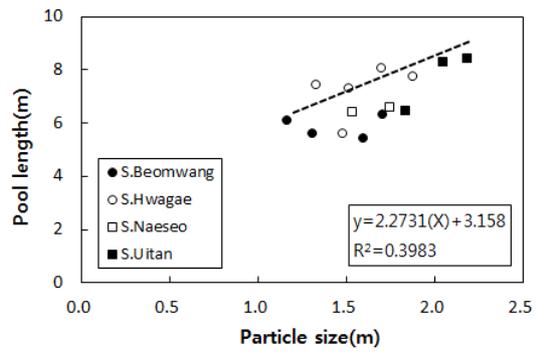


Fig. 15. Relationship with particle size and pool length

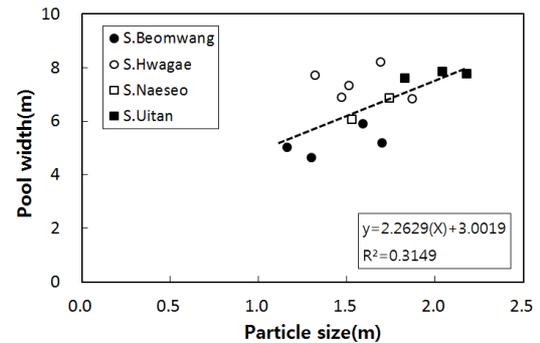


Fig. 16. Relationship with particle size and pool width

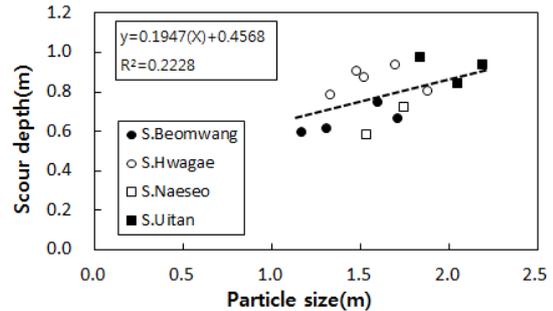


Fig. 17. Relationship between particle size and scour depth

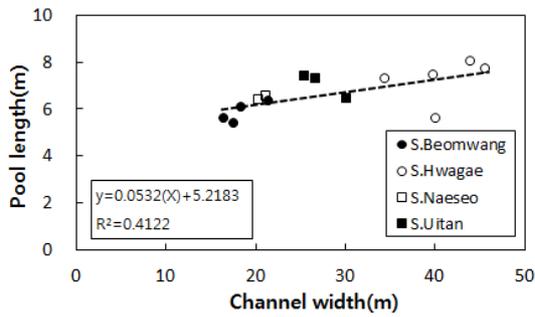


Fig. 18. Relationship between channel width and pool length

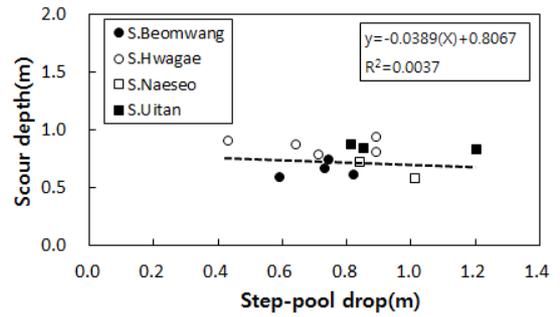


Fig. 21. Relationship between the step-pool drop and scour depth

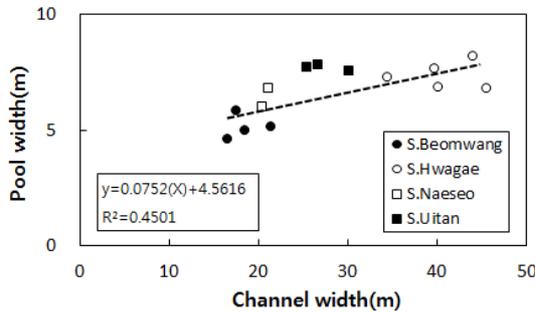


Fig. 19. Relationship between channel width and pool width

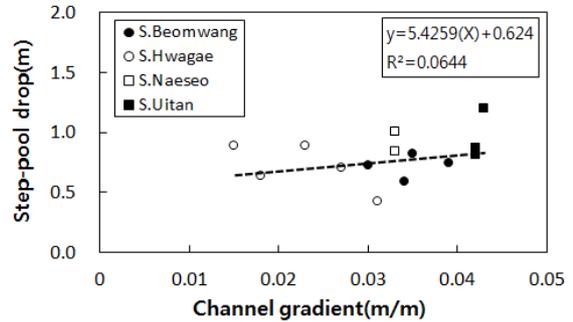


Fig. 22. Relationship between the step-pool drop and channel gradient

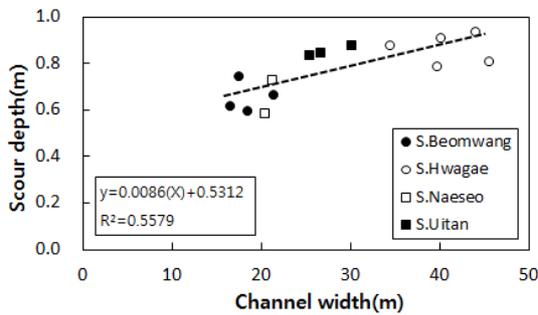


Fig. 20. Relationship between channel width and scour depth

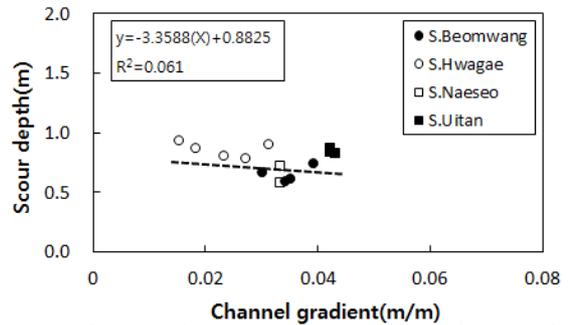


Fig. 23. Relationship between the channel gradient and scour depth

또한 Figs. 21 and 22에 나타난 바와 같이 step-pool 낙차와 세굴심 및 하도경사와 step-pool 낙차의 관계를 나타낸 것으로서 상관성이 없어 보인다. 세굴심은 그 자체와 step 높이에 의해 조정되기 때문에 하도경사에 따라 감소한다.

Fig. 23은 하도경사와 세굴심의 관계를 나타낸 것으로서 하도경사의 증가에 따라 세굴심이 감소하는 경향을 보이나 의탄천은 다르게 나타났다. 하도경사와 세굴심/step 높이 비의 관계는 전반적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다(Fig. 24). Fig. 25는 pool 길이/하도 폭 비와 세굴심/step-pool 낙차 비의 무차원 관계를 나타낸 것이다. Pool 지형은 step-pool 낙차와 유량과 관계를 가진다는 것을 의미한다. 즉, 상관관계가 명백하지는 않으나 step-pool 낙차와 유량이 크면, pool 길이와

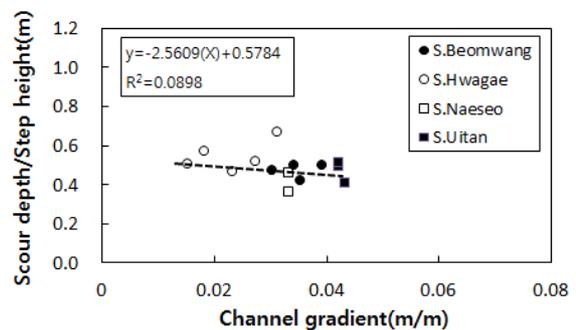


Fig. 24. Relationship between the channel gradient and scour depth/step height

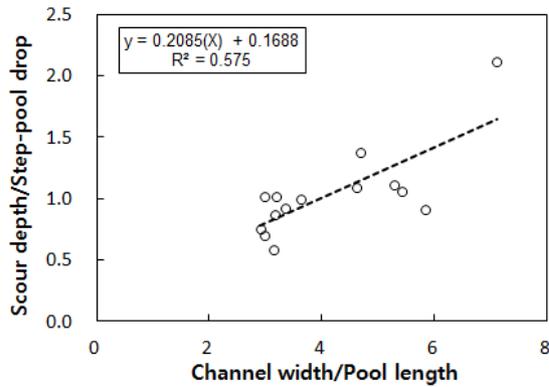


Fig. 25. Relationship between (channel width/pool length) and (scour depth/step-pool drop)

pool 폭도 증가하는 것으로 나타났다. 세굴심은 그 자체 또는 step-pool 낙차와 세굴심의 합에 의해 조정되기 때문에 하도 경사에 따라 감소한다.

Okazaki et al. (2006)은 유역면적 0.12~5.70 km<sup>2</sup>, 평균 하도 폭 0.65~4.99 m, 평균 하도경사 0.016~0.317 및 평균 입경 33.5~126.8 cm 범위에 비교적 작은 규모의 하도에서 pool 길이, pool 폭 및 세굴심의 상사비가 5 : 5 : 1 이라고 보고하였다. 유역면적 9.08~83.52 km<sup>2</sup>, 평균 하도 폭 16.40~45.45 m, 평균 하도경사 0.015~0.043 및 평균 입경 116.3~217.5 cm 범위의 더 큰 규모의 하도에서 상사비가 9 : 9 : 1인 연구 결과와 차이를 나타내고 있다. 이러한 결과는 pool 기하구조의 규모가 입경, 하도 폭 및 하도경사 사이의 인과관계에 의해 결정된다는 것이 분석 결과로부터 추정된다.

#### 4. 결론

본 연구는 산지하천의 step-pool 구조 특성에 관련된 하상 재료 입경, 하도경사 및 하도 폭의 상관관계를 분석하였으며, 요약하면 다음과 같다.

유량은 하류방향의 유역면적에 따라 증가한다는 가정 하에서 하도 폭은 유역면적과 명백한 상관관계를 가지며, step-pool의 간격은 구간에 따라 평균적으로 하도 폭의 0.6~4 배 범위 내에서 형성됨을 입증하였다.

Step의 높이는 하상재료 입경의 크기와 거의 같은 상관관계가 있으며, 하도경사에 따라 증가하고, 하도 폭과 step 파장은 거의 같은 크기로서 하도경사가 증가하면 step 파장은 감소하는 것으로 분석되었다.

하도 폭과 step 폭은 뚜렷한 상관관계가 있으며, 하도 폭의 증가에 따라 step 폭도 증가하는 것으로 분석되었다. 또한,

step 파장은 하도 폭에 의하여 규모가 정해지고, step 높이는 step을 형성하는 암석의 크기에 의해 지배되기 때문에 step의 종단면의 하상구조는 하도경사에 따라 변화하는 것으로 판단된다.

Pool 길이, pool 폭 및 세굴심의 상사비가 9 : 9 : 1로서 pool의 규모는 하도 폭, 입경 및 하도경사와 상관성이 큰 것을 확인하였다.

따라서 실제하천의 step-pool 구조 특성은 다양한 인자들의 영향을 받지만 대표적으로 하상재료 입경, 하도 폭 및 하도경사로서 설명할 수 있는 것으로 분석되었다.

치수, 이수 및 환경적 측면에서 산지하천에 대한 합리적인 하천관리와 하천사업을 위한 계획·설계를 위해서는 step-pool 구조 특성 등에 대한 지속적인 연구가 필요하며, 연구결과를 설계기준에 반영할 필요가 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의해 연구되었음.

#### References

- Abrahams, A. D., Li, G., and Atkinson, J. F. (1995). "Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 2593-2602.
- Ashida, K., Egashira, S., and Ando, N. (1984). "Generation and geometric features of step-pool bed forms." *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol. 27, No. B-2, pp. 341-353 (In Japanese).
- Ashida, K., Egashira, S., and Nishino, T. (1986b). "Structure and friction law of flow over a step-pool bedform." *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Vol. 29, No. B-2, pp. 391-403 (In Japanese).
- Chartrand, S. M., and Whiting, P. J. (2000). "Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 25, No. 6, pp. 583-600.
- Chin, A. (1989). "Step-pools in stream channels." *Progress in Physical Geography*, Vol. 13, No. 3, pp. 391-408.
- Chin, A. (1998). "On the stability of step-pool mountain streams." *The Journal of Geology*, Vol. 106, No. 1, pp. 59-70.
- Chin, A. (1999a). "The morphologic structure of step-pools in mountain streams." *Geomorphology*, Vol. 27, No. 3-4, pp. 191-204.
- Costa, J. E. (1983). "Paleohydraulic reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front Range."

- Geological Society of America Bulletin*, Vol. 94, No. 8, pp. 986-1004.
- Fujita, N., and Ikeda, H. (1996). "Experimental flume study on the bed-step formation in bedrock channels." *Bulletin of Environmental Research Center the University of Tsukuba*, No. 21, pp. 25-40 (In Japanese).
- Grant, G. E., and Mizuyama, T. (1991). *Origin of step-pool sequences in high gradient streams: a flume experiment*. Japan-US Workshop on Snow Avalanche, Landslide, Debris Flow Prediction and Control Proceedings, pp. 523-532.
- Grant, G. E., Swanson, F. J., and Wolman, M. G. (1990). "Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon." *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 102, No. 3, pp. 340-352.
- Hayward, J. A. (1980). "Hydrology and stream sediments from Torlesse stream catchment." *New Zealand, Lincoln College, Tussock Grasslands and Mountain Lands Institute, Special Publication*, No. 17, p. 236.
- Montgomery, D. R., and Buffington, J. M. (1997). "Channel-reach morphology in mountain drainage basins." *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 109, No. 5, pp. 596-611.
- Montgomery, D. R., Buffington, J. M., Smith, R. D., Schmidt, K. M., and Pess, G. (1995). "Pool spacing in forest channels." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 4, pp. 1097-1105.
- Oh, S. W. (2000). "The research of step pool sequence in the mountain stream." *Journal of The Korean Geomorphological Association*, Vol. 7, No. 2, pp. 33-52 (In Korean).
- Rosgen, D. L. (1994). "A classification of natural rivers." *Catena*, Vol. 22, No. 3, pp. 169-199.
- Tatsuya, O., Yutaka, G., Yohei, N., and Hiroshi, K. (2006). *Characteristics of step-pool morphology in the mountain streams of Japan*. Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides, Universal Academy Press, Inc., pp. 379-390.
- Whittaker, J. G. (1982). "Sediment transport in step-pool streams." *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, Edited by Thorne, C. R., Bathurst, J. C., and Hey, R. D., Chichester: Wiley, pp. 545-579.
- Whittaker, J. G., and Jaeggi, M. N. R. (1982). "Origin of step-pool systems in mountain streams." *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 108, No. HY6, pp. 758-773.
- Wohl, E. E., and Grodek, T. (1994). "Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev desert, Israel." *Geomorphology*, Vol. 9, No. 2, pp. 117-126.
- Wohl, E. E., and Merritt, D. M. (2001). "Bedrock channel morphology." *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 113, No. 9, pp. 1205-1212.
- Wohl, E. E., and Thompson, D. M. (2000). "Velocity characteristics along a small step-pool channel." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 25, No. 4, pp. 353-367.
- Yamamoto, K. (1988). *Channel specific analysis*. Public Works Research Institute Report 2662, pp. 56-64 (in Japanese).