

계단상 하상구조를 이용한 계류복원 방안*

김석우¹⁾ · 전근우¹⁾ · 김경남²⁾ · 박종민³⁾ · 마루타니 토모미⁴⁾

¹⁾ 강원대학교 산림자원학과 · ²⁾ 강원발전연구원 녹색정책연구소
³⁾ 전북대학교 산림환경과학과 · ⁴⁾ 일본 홋카이도대학 농학연구원

Restoration Method of Small Stream using Artificial Step-pool Sequences*

**Kim, Suk-Woo¹⁾ · Chun, Kun-Woo¹⁾ · Kim, Kyoung-Nam²⁾
Park, Chong-Min³⁾ and Marutani, Tomomi⁴⁾**

¹⁾ Department of Forest Resources, Kangwon National University,

²⁾ Green Growth Policy Research Division, Research Institute for Gangwon,

³⁾ Department of Forest and Environmental Sciences, Chonbuk National University,

⁴⁾ Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Japan.

ABSTRACT

Mountain streams, which are major components of an entire river network, play an important role as the source of water, sediment, coarse and fine organic matter, and nutrients for lowland rivers. Therefore, dynamics and downstream linkages of each compartment of the mountain stream can be essential for watershed management in catchment scale. The dynamics and downstream linkages are understood as a development of step-pool sequences along a river course. Recently, stream restoration after flooding event often employ the development of step-pool sequences in the world. In this paper, we 1) examined the geomorphic characteristics and the role of step-pool sequences in steep mountain

* 이 연구는 산림청 '산림과학기술개발사업(과제번호 : S210811L010110)'의 지원에 의하여 수행되었음.

First author : Kim, Suk Woo, Part-time lecturer, Department of Forest Resources, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea,
Tel : +82-33-250-7311, E-mail : sukwoo.k@gmail.com

Corresponding author : Chun, Kun Woo, Professor, Department of Forest Resources, College of Forest and Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea,
Tel : +82-33-250-8313, E-mail : kwchun@kangwon.ac.kr

Received : 22 March, 2011. **Revised** : 16 May, 2011. **Accepted** : 17 June, 2011.

streams by reviewing the results of past studies, and 2) introduced the case studies of stream restoration using step-pool sequences, and finally 3) addressed design methods considering geometry and stability of artificial step-pool sequences for stream restoration. Step-pool sequences play an important role not only as roughness with energy dissipation but also as heterogeneity of stream feature for aquatic habitat. Step-pool sequences, even if they are constructed artificially along a stream, may be effective for small stream restoration considering eco-friendly torrent controls. So far the artificial step-pool sequences were employed for mountainous streams, but those would be applied to urban stream.

Key Words : *Stream restoration, Step-pool sequences, Energy dissipation, Aquatic habitat.*

I. 서 론

도시화가 가속화되면서 인간의 생활권은 산지 유역까지 확대되고 있으며, 이 과정에서 산지개발은 산지의 침식을 가속화시키고, 산림의 다양한 기능을 저해하고 있다(Wohl, 2006). 도시화에 따른 생활권 확대지역은 산지사면에 인접한 중간지대로서의 산지계류를 교란·파괴함으로써 결국 하류부에 위치한 하천의 물리적·생태적 환경을 저하시키는 요인이 되고 있다(Elmore and Kaushal, 2008). 따라서 산지계류의 동태에 관한 인식 및 관리기법은 유역관리에 있어서 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.

유역의 상류부에 위치하는 산지계류는 유역 내 총 유로연장의 약 80%를 차지하며(Sidle et al., 2000; Meyer and Wallace, 2001), 수문지형학적·생물학적 측면에서 하류부의 하천과 유기적으로 연결되어 있다(Vannote et al., 1980; Gomi et al., 2002). 특히 산지계류는 산지사면과 직·간접적으로 연결되어 있기 때문에 물과 토사 및 각종 영양·유기물들의 근원지인 동시에 이들을 하류의 하천까지 공급하는 중간지대로서 중요한 역할을 한다(Sidle et al., 2000; Moore and Wondzell, 2005). 또한, 산지계류는 풍부한 생물종다양성을 유지하고 있으며, 수계의 건전한 계류생태계를 유지하는데 크게 기여한다(Meyer et al., 2007). 결국, 하류의 하천을 포함한 유역의 특성인 건전도와 기능은 산지계류의 동태에 의해

결정된다고 할 수 있다(Meyer and Wallace, 2001; Gomi et al., 2002).

따라서, 최근 전 세계적으로 효과적인 유역관리를 위해 상류부에 위치하는 산지계류의 물리적·생태적 기능과 중요성에 대한 재조명 연구가 진행되고 있고(Gomi et al., 2002; JAWRA, 2005), 유역관리의 근본적인 대책으로써 산지계류를 보다 건전하고 효과적으로 관리·복원하려는 시도가 계속되고 있다(Lenzi, 2002; Roni et al., 2006; Yu et al., 2010). 국내에서도 산지계류의 중요성에 대한 인식이 고조되면서 방재공간의 확보와 주변 환경을 고려한 자연친화적인 계류복원 기법(김경하, 2002; 2003; 박종민·전근우, 2009) 및 계류복원의 추진전략(박재현, 2002)에 관한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 산지계류의 복원기법이나 효과에 관한 구체적인 연구사례는 현지모니터링에 의해 진행되어 온 하류부의 하천복원기법에 관한 연구(예를 들어 최정권, 1997; 김혜주, 1997)에 비하여 매우 드문 실정이다.

최근 산지계류의 자연친화적인 복원기법 중, 물매가 급한 산지계류에 형성된 계단상 하상구조(step-pool sequences)의 특징과 기능을 이용한 복원사례가 전 세계적으로 이슈가 되고 있다(Comiti et al., 2009; Chin et al., 2009). 이러한 계단상 하상구조는 산지계류뿐만 아니라 경관성을 기대하는 도시근교 계류의 복원에도 이용되고 있다(Purcell et al., 2002; Chin et al., 2009). 국내의 경우 산림부서에서 거석을 이용한 낙차공, 골

막이 등과 같은 계단상 인공구조물을 산지계류에 시공하고 있고, 최근 현지에서 구득한 간벌목과 전석을 이용한 계류정비 사업도 추진하고 있지만, 이를 계류복원에 이용하기 위한 구체적인 설계방안에 대해서는 아직 검토되고 있지 않다.

따라서, 이 논문에서는 산지계류의 계단상 하상구조에 관한 선행연구 결과를 토대로 지형적 특징과 기능에 대하여 고찰하고, 중·소규모의 계류에 있어서 계단상 하상구조의 인공조성을 통한 자연친화적 복원방안에 대하여 구조적·안정적 설계방안을 중심으로 검토하였다.

II. 산지계류의 계단상 하상구조

1. 지형적 특징

산지계류에서는 거석의 집적으로 형성된 스텝(step)과 직하부가 세굴되면서 토사가 퇴적된 소(pool)가 종단상으로 교차하며 연속적으로 분포하는 하상구조가 나타나는데, 이를 계단상 하상구조(step-pool sequences)라고 한다(그림 1, 2). 계단상 하상구조는 일반적으로 0.02(m/m)이상의 경사가 급한 계류에서 발생하는데(Grant et al., 1990; Montgomery and Buffington, 1997), 국내의 산지계류를 대상으로 실시한 연구에서도 하상경사 0.06~0.22(m/m)의 구간에 형성되어 있는 것으로 보고되고 있다(오성원, 2000; 김석우 등, 2011).

계단상 하상구조는 유목(large wood) 및 거석(boulder)의 집적과 기반암(bedrock)의 침식 등으로 형성되는데 거석에 의해 형성된 구조가 가장 일반적인 형태이다(그림 1; Chin and Wohl, 2005). 일본 규슈지역의 산지계류를 대상으로 거석스텝의 입경을 측정된 결과, 하상재료보다 약 4배(스텝의 중심거석을 제외한 평균입경)에서 8배 정도(스텝의 중심거석)의 거석으로 구성된 것으로 나타났다(그림 3). 이러한 거석에 의해 형성된 계단상 하상구조는 20~50년 빈도의 대홍수에 의해 형성되기 때문에(Grant et al., 1990; Chin,

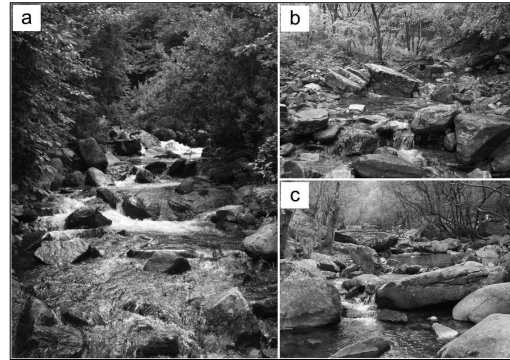


Figure 1. Step-pool sequences in natural mountain streams : (a) Mt. Daeam in Inje, Gangwon-do, (b) Mt. Yeonyeop in Chuncheon, Gangwon-do and (c) Mt. Yumyeong in Gyeonggi-do.

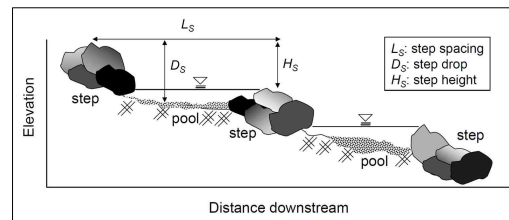


Figure 2. The longitudinal sketch of step-pool sequences.

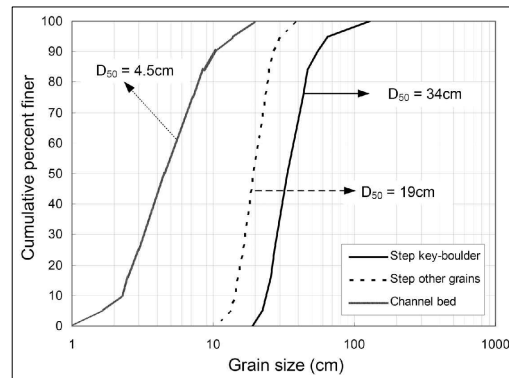


Figure 3. Grain size distributions of step and channel bed in Oyabu Creek, Kyushu, Japan (Modified from Kim, 2009). Data of channel bed grain size were obtained from pebble counts (at least 30 particles in each 0.5m×0.5m plot) at five sampling sites (three riffles and two pools).

1998; Lenzi, 2001) 비교적 저강도의 홍수나 평수 시에는 유수에 대하여 비교적 안정한 상태를 유

지하고 있다(Lenzi, 2002; Chin et al., 2009).

계단상 하상구조의 규모와 기하학적 특징은 스텝의 간격(L_s), 낙차(D_s), 높이(H_s) 및 스텝을 구성하는 재료들의 입경을 이용하여 나타낼 수 있다(그림 2). 선행연구에 의하면 스텝의 간격은 하폭(Whittaker, 1987; Wohl et al., 1997; Chin, 1999; Chartrand and Whiting, 2000) 및 유량(Chin, 1999)과 정의 상관을 갖는 것으로 나타났다. 또한, 스텝의 낙차와 간격은 스텝을 구성하는 재료의 입경과 정비례하는 것으로 나타났고(Wohl et al., 1997; Chin, 1999; Chartrand and Whiting, 2000), 스텝의 낙차 및 높이와 간격 사이에도 정의 상관이 존재하는 경우도 보고되고 있다(Chartrand and Whiting, 2000; Kim, 2009).

특히, 계단상 하상구조가 잘 발달된 경우 스텝의 간격은 하상구배가 커질수록 지수함수적으로 감소하며(Judd, 1963; Whittaker, 1987; Chin, 1999), 이러한 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_s = a/S^b \quad (1)$$

여기서, L_s 는 스텝의 간격, S 는 하상물매(m/m), a 와 b 는 파워함수 회귀식에서 결정되는 상수이다. Judd(1963)의 연구에서 a 와 b 는 각각 2.67과 0.206로 나타났고, 미국의 산지계류에서 실시된 Chin(1999)의 연구에서도 이와 동일한 수치를 나타내었지만, 뉴질랜드의 산지계류를 대상으로 실시한 Whittaker(1987)의 연구에서는 각각 0.311과 1.188인 것으로 보고되고 있다. 이러한 스텝의 간격과 하상물매의 회귀관계에서 나타난 상수값의 차이는 하도의 규모, 계류의 수문·수리학적 특성 및 하상재료의 차이로 인해 발생한다(Heede, 1981; Chin, 1999). 특히 붕적작용(colluvial process)보다 하성작용(fluvial process)이 탁월한 산지계류(Gomi et al., 2003)와 동적평형 상태를 유지하고 있는 계류(Heede, 1981; Kim et al., 2009)에서 이와 같은 부의 상관관계가 잘 나타나는 것으로 보고되고 있다. 이러한 관계는

산지계류의 수리기하학적 구조에 대한 계단상 하상구조 사이에서 발생한 상호조절의 결과에 기인하며, 현재 계류의 상태를 기술했을 수 있는 중요한 지표라고 할 수 있다(Chin, 1989; Chin and Wohl, 2005).

한편, 스텝의 높이는 하상물매가 급해질수록 비례적으로 증가한다고 보고되고 있다(Wohl and Grodek, 1994; Chin, 1999).

2. 산지계류 내에서의 기능

계단상 하상구조는 거석으로 구성되기 때문에(그림 3) 토사이동 및 유수흐름에 대해 하상의 조도(bed roughness)로 작용하여 유동에너지를 분산시키는 역할을 한다(Abrahams et al., 1995; Curran and Wohl, 2003). 특히 Wang et al.(2009)은 거석의 집적과 낙차로 인해 연속적으로 발생한 종단상 기복이 커질수록 매닝(Manning)의 조도계수가 증가하는 것으로 보고하고 있다. 일본 규슈지역의 산지계류를 대상으로 거석과 스텝을 구성하는 재료와의 관계를 분석한 결과, 부동산태에 있는 중심거석(immobile key-boulders)의 입경이 클수록 포착된 다른 구성물질들(cobbles and gravels)의 입경도 증가하는 것으로 나타났다(그림 4). 이는 스텝을 구성하는 중심거석의 입경이 클수록 하상조도로써의 기능이 더 크게 발휘되어 유동에너지의 저감에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이러한 스텝의 중심거석은 결국 계단상 하상구조의 기하학적인 특징과 하상의 안정성을 컨트롤하는 요인으로 작용하게 된다(Chin, 1999; Chartrand and Whiting, 2000; Zimmermann and Church, 2001).

또한, 계단상 하상구조는 수서곤충이나 어류의 서식처를 제공하는 등 산지계류의 생태계에 있어서도 중요한 역할을 한다(藤田와 道上, 1996; 山口와 丸谷, 1996; Duan et al., 2009). 특히, 저서성 무척추동물(benthic macroinvertebrates)은 계류 생태계의 건강도를 평가하는 중요한 지표 중 하나로(Smith et al., 1999), 계단상 하상구조가

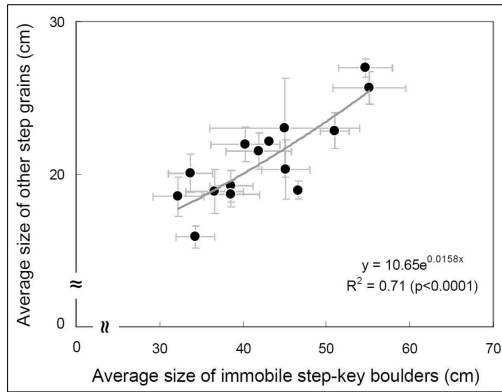


Figure 4. Relationship between immobile step-key boulders and other step grains (Modified from Kim, 2009).

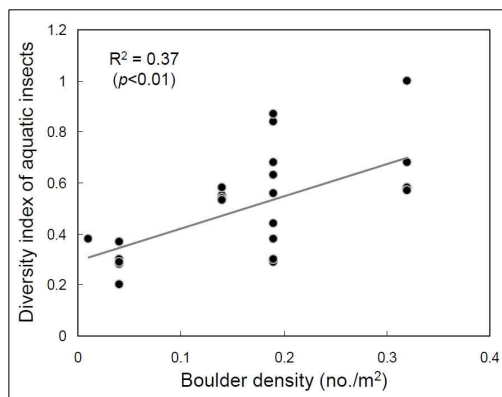


Figure 5. Relationship between diversity index of aquatic insects and boulder density (Modified from Seomun and Chun, 1999).

잘 형성된 계류에 서식하는 저서성 무척추대형동물의 종수는 계단상 하상구조가 없는 계류에 비해 훨씬 많은 것으로 보고되고 있다(Duan et al., 2009; Wang et al., 2009). 하상재료가 수서곤충의 서식에 미치는 영향에 대한 서문원과 전근우(1999)의 연구에서도 단위면적 당 거석이 차지하는 비율이 높을수록 서식하는 수서곤충의 종 다양도는 증가하지만(그림 5), 단위면적 당 자갈의 비율이 증가하면 수서곤충의 종 다양도는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 동일한 수리조건 내에서 거석의 이동빈도가 자갈의 이동빈도에 비해 낮고 유수에 대한 저항력이 높기 때문에

보다 안정적인 서식공간을 제공할 수 있게 된 것에 기인한 결과로 추측할 수 있다.

III. 계단상 하상구조를 이용한 국내·외 복원사례

최근 해외에서는 산지계류에 형성된 계단상 하상구조의 물리적·생태적 기능에 주목하면서 황폐계류의 복원과 안정화를 위한 친환경적인 사방공법으로써 자연석이나 도·유목을 이용하여 계단상 하상구조를 인공적으로 조성하는 사례가 증가하고 있다(그림 6).

유럽에서는 계단상 하상구조를 산지 황폐계류의 안정화와 소규모 계류의 복원에 이용하고 있다. 이탈리아에서는 계단상 하상구조를 이용한 소형 체크댐의 시공을 통해 황폐계류의 안정화를 도모하고, 계류 생태계의 안정에 관한 사후 모니터링을 실시하고 있으며(Lenzi, 2002; Comiti et al., 2009), 독일과 오스트리아의 경우 소규모의 계류의 복원과 생태통로의 확보를 위해 계단상 하상구조를 인공적으로 조성하고 있다(그림 6A, B). 미국에서는 주로 도시유역을 대상으로 소규모 계류의 복원공사에 계단상 하상구조를 인공적으로 조성하고 있으며(Purcell et al., 2002; Chin et al., 2009), 특히 암거(culvert)가 시공된 계류(Maxwell et al., 2001)나 유속이 빠르고 하상에 퇴적물질이 없는 산지의 기반암 계류(bedrock stream)의 복원(Roni et al., 2006)에도 이를 이용하여 계류 생태계의 안정에 관한 연구를 진행하고 있다. 최근 중국에서도 침식이 활발하게 발생하는 산지계류에 계단상 하상구조를 조성하여 유속의 감속을 통한 계류의 물리적 안정을 도모하고 계류생태계의 서식처를 조성하기 위한 연구가 진행되고 있다(Yu, 2010).

우리나라와 지형조건이 비슷한 일본의 경우, 계단상 하상구조를 이용한 계류복원은 1945년 히로시마(廣島縣) 미야지마(宮島) 모미지타나가와(紅葉谷川)의 정원사방(庭園砂防)에서부터 시작되었다고 할 수 있다. 이 지역에서는 사적명승

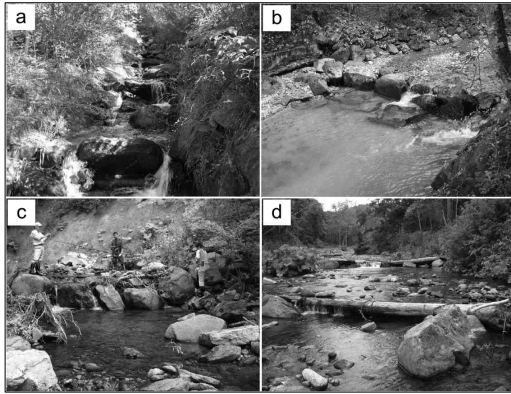


Figure 6. Stream restoration using artificial boulder steps (a : Austria, b : Germany and c : Japan) and log- and boulder steps (d : Japan) in mountain catchments (Photos c and d : Courtesy of Nobuo Yasuda).

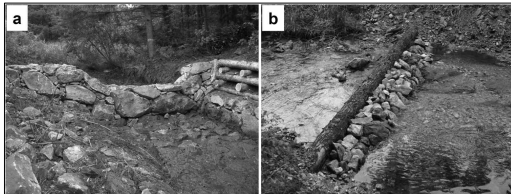


Figure 7. Stream restoration using natural stones and log in a mountain catchment, Jeongseon, Gangwondo : (a) boulder-drop structures and (b) bed sill using log and cobbles. This work was first conducted in Korea in 2010 by Jeongseon National Forest Office (Photo courtesy of Jeongseon National Forest Office).

지에 적합한 사방공사를 시행하기 위해 현지에서 구득한 자연상태의 거석을 활용하여 천연담이나 낙차공을 적용함으로써 재해방지 기능뿐만 아니라 경관·생태적 기능도 함께 발휘할 수 있도록 시공되었다(전근우, 2009). 최근에는 토석류 피해가 발생한 계류를 정비하면서 현장에서 구득한 자연상태의 거석과 유목을 활용하여 계류의 복원 공사에 계단상 하상구조를 조성하고 있다(그림 6C, D). 또한, 계단상 하상구조의 수리학적 기능에 주목하여 거석의 배치방법 등 현장에서의 설계지침에 관한 실험적 연구가 진행되고 있다(예를 들어 長谷川와 上林, 1996).

한편 국내의 경우, 최근 산림청이 추진하고 있는 계류복원사업에서 현지의 간벌목과 전석을 활용한 횡공작물이 계단상 하상구조와 유사한 형태로 시공되고 있으며, 이를 통한 황폐계류의 안정화와 복원이 시도되고 있다(그림 7).

IV. 계단상 하상구조의 설계방법

계단상 하상구조를 조성하기 위해서는 하상물 매 및 홍수 시의 최대수심에 대한 기초조사가 선행되어야 하며, 설계는 「스텝 구성재료의 안정성 검토→기하학적 안정성을 고려한 형상의 결정→배치방법(평면형)의 검토」의 순(그림 8)으로 실시하는 것이 효과적인 것으로 판단된다. 구체적인 설계방법은 다음과 같다.

1. 스텝 구성재료의 안정성

계단상 하상구조는 스텝을 구성하고 있는 2~5개의 중심거석이 이동하게 되면 계단상 하상구조의 기하학적 관계에도 영향을 미쳐 파괴 혹은 변형을 야기하며(藤田 등, 1999; Chin, 1999; Turowski et al., 2009), 결국 계류의 물리적 불안정성(Zimmermann and Church, 2001) 뿐만 아니라 계류생태에도 부정적인 영향을 미친다(Roni et al., 2008). 따라서, 계단상 하상구조는 이러한 중심거석들이 홍수 시에도 이동하지 않도록 설계하는 것이 무엇보다 중요하다.

산지계류에 형성된 스텝 구성입경의 이동성은 많은 선행연구에서 Shields 수(the Shields number; Shields, 1936)를 이용하여 평가하고 있다(Zimmermann and Church, 2001; Kim, 2009; Turowski et al., 2009). Shields 수는 무차원 소류력(nondimensional shear stress)이라고도 하며, 다음의 식 (2)로 정의된다.

$$\tau_* = \frac{\rho g h s}{(\rho_s - \rho) g D} \quad (2)$$

여기서, τ_* 는 Shields 수, ρ 는 물의 밀도

(1.00g/cm^3), ρ_s 는 토양 입자밀도(2.65g/cm^3), g 는 중력가속도 (980cm/s^2), h 는 홍수 시의 최대수심 (cm), S 는 하상물매(m/m), D 는 평균입경(cm)이다. 위의 식 (2)는 홍수 시의 이동최대입경을 구하기 위해 다음의 식 (3)으로 간략하게 표현할 수 있다.

$$D = \frac{hs}{1.65\tau_*} \quad (3)$$

하상의 입자가 이동하기 위해서는 일정치 이상의 소류력이 필요한데, 이를 한계 Shields 수 (the critical Shields number; τ_*) 혹은 한계소류력(critical shear stress)이라고 하며, 무차원으로 표현된다. 한계 Shields 수는 하상재료의 입경 및 이동특성에 따라 0.030~0.073의 값을 나타내며(Buffington and Montgomery, 1997), 하상에 자갈 등과 같은 석력이 분포하는 산지계류에서는 보통 0.045~0.05가 적용되고 있다(예를 들어 Zimmermann and Church, 2001). 특히, 산지계류에서 하도 내에 거석이 산재하는 경우는 0.03(Church, 2002) 혹은 0.04(Buffington and Montgomery, 1997; Church, 2006; Turowski et al., 2009)의 값을 적용하기도 한다. 이러한 무차원 한계소류력을 식 (3)의 무차원 소류력에 대입하면, 최대 홍수시의 수심과 하상물매를 이용하여 이동한계에 있는 최대입경을 계산할 수 있다. 따라서, 식 (3)에 의해 구해진 이동최대입경 이상의 입경을 갖는 거석을 계단상 하상구조의 설계에 적용하면 안정성을 기대할 수 있다.

다만, 식 (3)에서 한계 Shields 수의 선택에 따라 홍수 시 이동하는 최대입경이 달라질 수 있으며(그림 9), 이는 곧 공사규모나 현지에서 구득이 부득이한 경우 시공단계에도 영향을 미칠 수 있으므로 설계과정에서 충분한 검토가 이루어져야 할 것이다.

2. 계단상 하상구조의 형상 및 기하학적 안정성
자연계류에서 계단상 하상구조의 낙차는 보통

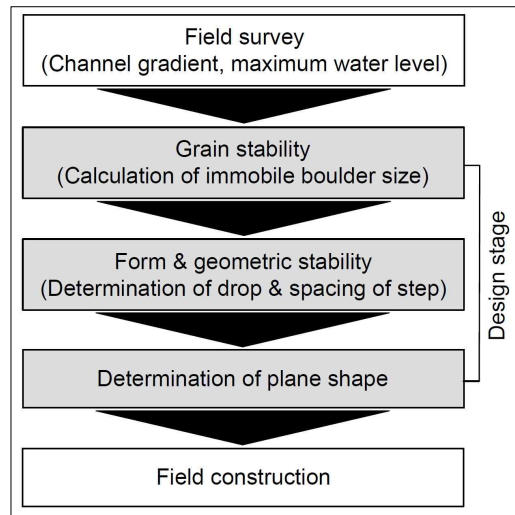


Figure 8. Design procedures for stream restoration using artificial step-pool sequences.

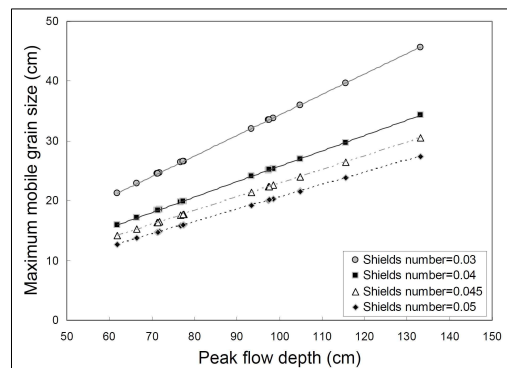


Figure 9. Differences in maximum mobile grain size at peak flow by choice of the Shields number (An example of Oyabu Creek in Kyushu, Japan). Maximum mobile grain size was estimated by Eq.(3), using 0.017(m/m) of channel gradient and each flow depth derived from gauging station.

스텝을 구성하는 재료들의 입경과, 그리고 간격은 하폭 및 하상물매와 깊은 관련이 있다. 芦田 등(1984; 1985)은 수리실험을 통해 스텝의 낙차와 구성재료의 평균입경과의 비는 약 1의 상수 값을 갖는다고 보고하고 있으며, 자연상태의 산지계류에서도 약 1.2~1.3의 값을 유지하는 것으로 보고되고 있다(芦田 등, 1984; 1985; Wohl

et al., 1997; Chin, 1999; 김석우 등, 2011). 따라서 스텝의 낙차는 전술한 식 (3)을 이용하여 계산된 구성재료 평균입경의 1~1.3배로 설계하도록 한다.

한편, Abrahams et al.(1995)는 수리실험을 통해 스텝의 간격(L_s), 높이(H_s) 및 하상물매(S)의 관계가 $1 \leq H_s/L_s/S \leq 2$ 일 때 유수에 대한 수리학적 저항이 최대가 되어 안정상태를 유지하며, 1.5일 경우를 이상적인 상태로 보고 있다. 여기서, 스텝의 높이는 낙차(D_s)로도 볼 수 있다 (Abrahams et al., 1995). 자연 상태에서도 이 값은 주로 1과 2의 범위에 위치하며(Abrahams et al., 1995; Wohl et al., 1997; Lenzi, 2001; 김석우 등, 2011), 이러한 관계는 계단상 하상구조의 기하학적인 안정조건으로도 널리 받아들여지고 있다(Abrahams et al., 1995; Zimmermann and Church, 2001; Kim, 2009).

따라서, 위의 기하학적 안정조건을 만족하는 스텝의 간격은 「 $L_s = D_s/1.5S$ 」의 관계를 이용하여 계산할 수 있다. 강원대학교 학술림 내의 산지계류 1.4km를 대상으로 위의 식을 이용하여 추정된 스텝 간격과 현지에서 실측한 스텝 간격과의 관계를 분석한 결과, $R^2=0.68(p<0.0001)$ 로 비교적 상관관계가 높은 것으로 나타났다(그림 10).

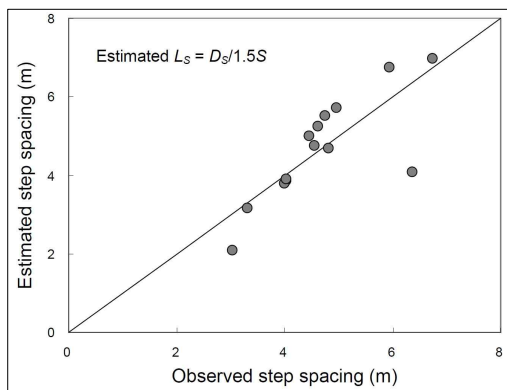


Figure 10. Estimated versus observed step spacing in a natural stream of Experimental Forests, Kangwon National University.

3. 계단상 하상구조의 배치방법

계단상 하상구조를 조성할 때에는 계류를 횡단하여 유심에 수직이 되도록 배치하는 형태가 가장 일반적이라고 할 수 있지만, 조성구간의 특성과 유속의 저감 및 유심방향의 조절 등의 목적에 따라 V자형, U자형 및 타원형(Weichert et al., 2008), 혹은 분산형 등의 평면형도 고려해 볼 수 있다. 또한, 찰쌓기를 이용한 시공은 지양하여 전석 사이에 생기는 빈틈에 의해 수서곤충의 서식처와 이동통로가 확보될 수 있도록 해야 한다. 대상지점에 따라 전석을 와이어로프로 연결·고정(그림 11)한다면 설계빈도 이상의 홍수 발생 시 중심거석의 이동에 따른 계단상 하상구조의 변형·파괴를 방지하고, 친환경적이며 유수의 변화에 대한 탄력성을 유지할 수 있을 것이다.

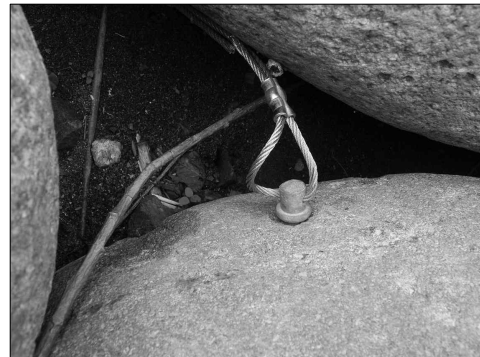


Figure 11. Fixation of boulder using a steel wire rope.

4. 계단상 하상구조의 적용범위

전석과 간벌재 등의 자연소재를 활용한 계단상 하상구조는 철근콘크리트 및 철강재 등으로 시공되는 사방시설물에 비해 강도가 약하다는 단점은 있다. 그러나 계류생태계의 복원·유지에 필요한 자연적인 하상과 기복 유지, 경관연출 및 거석과 소에 의한 퇴사공간 확보 등의 기능을 발휘할 수 있다. 따라서 방재기능 보다는 주로 경관성과 생태성이 크게 요구되는 계류를 대상으로 하여 선택적으로 조성하는 것이 바람직하다. 이러한 측면에서 계단상 하상구조를 국립공원 지역

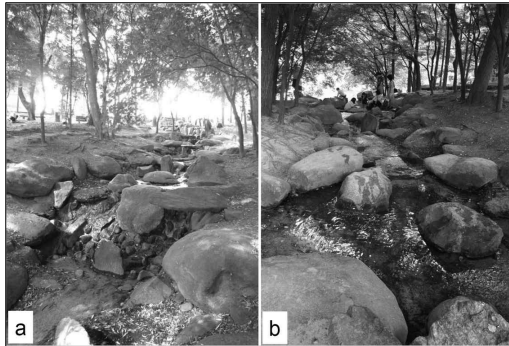


Figure 12. Urban stream restoration using artificial step-pool sequences in Kangwon National University : (a) upstream view and (b) downstream view.

내의 계류, 소규모의 토사이동이 빈번히 발생하는 계류 및 사방댐 시공지점의 하류부에 조성한다면 경관성·생태성의 향상과 함께 제한적인 방재기능도 기대할 수 있다. 특히 산지 고랭지재배 지역에서는 계단상 하상구조를 연속적으로 조성함으로써 다단계 저류과정에 의한 토사이동을 억제하여 탁수저감에 따른 수질개선에도 효과적인 것으로 추측된다.

한편, 도시 근교의 계류복원에 이용한다면 경관성의 향상과 소의 형성을 통한 친수공간의 조성(그림 12) 및 수질개선 효과도 기대할 수 있을 것이다.

V. 결 론

계류환경의 보전과 복원은 자연 상태의 계류가 갖고 있는 고유의 지형적 특성과 기능에 대한 이해가 선행되어야 하며, 계류의 물리·생태적 안정성을 확보할 수 있는 방향으로 진행되어야 한다. 이러한 배경을 바탕으로, 이 연구에서는 해외의 선행연구들을 통해 계단상 하상구조의 지형적 특징과 기능 및 이를 이용한 복원사례에 대해 고찰해 봄으로써 계단상 하상구조를 계류복원에 이용하기 위한 구체적인 방안을 검토·제시하고자 하였다.

선행연구의 결과를 종합할 때, 계단상 하상구조는 하상의 조도로 작용하여 토사이동 및 유수 에너지의 저감에 의해 하상을 안정시키고, 수서 곤충 및 어류의 서식공간을 제공한다는 점에서 계류환경의 물리·생태적 안정에 크게 기여하는 것으로 판단된다. 이러한 계단상 하상구조를 이용한 해외의 복원사례는 계류의 자연적인 하상형태를 유지하여 본래의 기능이 최대한 발휘될 수 있도록 실시한다는 점에서 국내의 계류복원 사업에 시사하는 바가 크다고 할 수 있다.

계단상 하상구조를 조성할 경우에는 안정적인 기능유지를 위해 설계단계에서 유수에 대한 안정성을 확보해야 한다. 이에 이 연구에서는 토사수리학적 접근법에 기초하여 두 가지 측면, 즉 홍수에 대한 스텝 구성재료의 안정성과 유수에너지에 대한 기하학적 안정조건을 고려한 설계방법을 제시하였다. 다만 자연상태의 계류에서 홍수 시 부동(不動)의 거석을 보다 정확히 예측하기 위해서는 현지모니터링을 통해 계류의 수리특성이 반영된 한계 Shields수의 검증이 실시되어야 할 것이다. 또한 기하학적 안정조건을 만족하는 관계식 $L_s = D_s 1.5 S$ 은 현지조사 자료의 한정성으로 인해 충분히 검증되지는 못했지만, 선행연구를 통해 자연상태와 수리실험에서도 확인이 된 바, 계단상 하상구조의 조성에 기본적인 설계지침으로 활용될 수 있다고 판단된다.

이 연구는 최근 국내에서 자연소재를 활용한 계류복원이 시도·확대되고 있는 상황에서 유용한 정보 및 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 기대되며, 미비한 부분은 향후 사업지에 대한 사후모니터링을 통해 지속적으로 보완해 나갈 예정이다.

감사의 글

이 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호 : S210811L010110)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 현장사진을 제공해 주신 산림

청 정선국유림관리소와 홋카이도 아바시리 서부 숲 만들기 센터(北海道網走西部森づくりセンター)의 야스다 노부오(安田伸生)씨께 감사의 말씀을 드립니다. 또한 이 논문의 완성도를 높일 수 있도록 좋은 의견을 주신 심사위원 여러분께 진심으로 감사드립니다.

인용문헌

- 김경하. 2002. 자연 친화적 산지계류 복원기법 (III) : 복원설계 및 공법. 임업정보 140 : 8-15.
- 김경하. 2003. 자연 친화적 산지계류 복원기법 (IV) : 복원설계 및 공법. 임업정보 142 : 12-17.
- 김석우 · 전근우 · 박종민 · 남수연 · 임영협 · 김영설. 2011. 강원도 춘천시 근교의 산지계류에 형성된 계단상 하상구조의 특징. 한국임학회지 100(2) : 202-211.
- 김혜주. 1997. 자연형 호안공법의 원리와 적용상의 문제 : 양재천 학여울 구간을 예를 들어. 한국수자원학회지 30(4) : 56-67.
- 박재현. 2002. 계류생태계 보전을 고려한 환경친화적 사방 전략(I). 한국환경복원녹화기술학회지 5(5) : 67-75.
- 박종민 · 전근우. 2009. 자연친화적인 산지계류 복구 · 관리 기술. 신(新)산지방재기술 매뉴얼 01. pp. 250.
- 서문원 · 전근우. 1999. 계류수의 음이온과 하상재료가 수서곤충에 미치는 영향. 삼림과학연구 15 : 89-97.
- 오성원. 2000. 산지하천의 step pool 연속체에 관한 연구. 한국지형학회지 7(2) : 33-52.
- 전근우. 2009. 일본 廣島縣 宮島 紅葉谷川の 정원사방. 산림공학기술 7(3) : 244-259.
- 최정권. 1997. 도시하천에서 자연형 저수로 호안공법의 적용과 식생복원 모니터링 : 서울시 양재천의 학여울 구간을 사례지역으로. 환경생태학회지 11(2) : 201-213.
- 芦田和男 · 江頭進治 · 安東尙美. 1984. 階段狀河床形の形成機構と形成特性に関する研究. 第28回水理講演會論文集 743-749.
- 芦田和男 · 江頭進治 · 澤田豊明 · 西本直史. 1985. 山地河道における階段狀河床形の構造. 京大防災研究所年報 28(B-2) : 325-335.
- 長谷川和義 · 上林悟. 1996. 溪流における淵・瀨(ステップ・プール)の形成機構とその設計指針. 水工學論文集 40 : 893-900.
- 藤田正治 · 道上正規. 1996. 千代川における淵の構造と魚類の生息. 水工學論文集 40 : 181-187.
- 藤田正治 · 道上正規 · 澤田豊明. 1999. 階段狀河床の洪水による變形に関する現地調査. 水工學論文集 43 : 725-730.
- 山口和也 · 丸谷知己. 1996. ヤマメの生息におけるプール内の河床礫の影響. 九州大學農學部學芸雜誌 50 : 173-178.
- Abrahams, A. D., G. Li and J. F. Atkinson. 1995. Step-pool streams : adjustment to maximum flow resistance. Water Resources Research 31 : 2593-2602.
- Buffington, J. M., and D. R. Montgomery. 1997. A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. Water Resources Research 33 : 1993-2029.
- Chartrand, S. M., and P. J. Whiting. 2000. Alluvial architecture in headwater streams with special emphasis on step-pool topography. Earth Surface Processes and Landforms 25 : 583-600.
- Chin, A. 1989. Step-pools in stream channels. Progress in Physical Geography 13 : 391-408.
- Chin, A. 1998. On the stability of step-pool mountain streams. The Journal of Geology 106 :

- 59-69.
- Chin, A., 1999. The morphologic structure of step-pools in mountain streams. *Geomorphology* 27 : 191-204.
- Chin, A., S. Anderson, A. Collison, B. J. Ellis-Sugai, J. P. Haltiner, J. B. Hogervorst, G. M. Kondolf, L. S. O'Hirok, A. H. Purcell, A. L. Riley and E. Wohl. 2009. Linking theory and practice for restoration of step-pool streams. *Environmental Management* 43 : 645-661.
- Chin, A., and E. Wohl. 2005. Toward a theory for step pools in stream channels. *Progress in Physical Geography* 29 : 275-296.
- Church, M. 2002. Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology* 47 : 541-557.
- Church, M. 2006. Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 34 : 325-354.
- Comiti, F., L. Mao, M. A. Lenzi and M. Siligardi. 2009. Artificial steps to stabilize mountain rivers : A post-project ecological assessment. *River Research and Applications* 25 : 639-659.
- Curran, J. H., and E. E. Wohl. 2003. Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington. *Geomorphology* 51 : 141-157.
- Duan X. H, Z. Y. Wang, M. Z. Xu and K. Zhang. 2009. Effect of streambed sediment on benthic ecology. *International Journal of Sediment Research* 24 : 325-338.
- Elmore, A. J., and S. S. Kaushal. 2008. Disappearing headwaters : patterns of stream burial due to urbanization. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6 : 308-312.
- Gomi, T., R. C. Sidle and J. S. Richardson. 2002. Understanding processes and downstream linkages of headwater systems. *Bioscience* 52 : 905-916.
- Gomi, T., R. C. Sidle, R. D. Woodsmith and M. D. Bryant. 2003. Characteristics of channel steps and reach morphology in headwater streams, southeast Alaska. *Geomorphology* 51 : 225-242.
- Grant, G. E., F. J. Swanson and M. G. Wolman. 1990. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon. *Geological Society of America Bulletin* 102 : 340-352.
- Heede, B. H. 1981. Dynamics of selected mountain streams in the western United States of America. *Zeitschrift für Geomorphologie* 25 : 17-32.
- Judd, H. E. 1963. A study of bed characteristics in relation to flow in rough, high-gradient natural channels. Ph.D dissertation, Utah State University, Logan, UT.
- JAWRA. 2005. Special issue on headwater streams. *Journal of the American Water Resources Association* 41 : 753-947.
- Kim, S. W. 2009. Sediment transport and morphodynamics in a mountainous bedrock stream. Ph.D dissertation, Hokkaido University, Sapporo.
- Kim, S. W., T. Marutani and K. W. Chun. 2009. Changes in step-pool morphology with channel bed adjustment of a mountainous stream. *Proceedings of 2nd Joint Workshop between Germany and Japan : Climate and Human Impact on High Mountain Geosystems in mid Latitude Regions of the Northern Hemisphere*. 26-30 September 2009, Shneefernerhaus (Zugspitze), Germany. pp. 21.

- Lenzi, M. A. 2001. Step-pool evolution in the Rio Cordon, northeastern Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 26 : 991-1008.
- Lenzi, M. A. 2002. Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in northern Italy. *Geomorphology*, 45 : 243-60.
- Maxwell, A. R., A. N. Papanicolaou, R. H. Hotchkiss, M. E. Barber and J. Schafer. 2001. Step-pool morphology in high-gradient countersunk culverts. *Transportation Research Record* 1743(01-2304) : 40-56.
- Meyer, J. L., D. L. Strayer, J. B. Wallace, S. L. Eggert, G. S. Helfman and N. E. Leonard. 2007. The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks. *Journal of the American Water Resources Association* 43 : 86-103.
- Meyer J. L., and J. B. Wallace. 2001. Lost linkages and lotic ecology : Rediscovering small streams (In Huntly, M. C., and N. J. Levin eds., "Ecology : Achievement and Challenge"). Oxford : Blackwell Scientific. pp. 295-317.
- Montgomery, D. R., and J. M. Buffington. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* 109 : 596-611.
- Moore, R. D., and S. M. Wondzell. 2005. Physical hydrology in the Pacific Northwest and the effects of forest harvesting : A review. *Journal of the American Water Resources Association* 41 : 753-784.
- Purcell, A. H., C. Friedrich and V. H. Resh. 2002. An assessment of a small urban stream restoration project in northern California. *Restoration Ecology* 10 : 685-694.
- Roni, P., D. Van Slyke, B. A. Miller, J. L. Ebersole and G. Pess. 2008. Adult coho salmon and steelhead use of boulder weirs in southwest Oregon stream. *North American Journal of Fisheries Management* 28 : 970-978.
- Roni, P., T. Bennett, S. Morley, G. R. Pess, K. Hanson, D. V. Slyke and P. Olmstead. 2006. Rehabilitation of bedrock stream channels : The effects of boulder weir placement on aquatic habitat and biota. *River Research and Applications* 22 : 967-980.
- Sidle R. C., Y. Tsuboyama, S. Noguchi, I. Hosoda, M. Fujieda and T. Shimizu. 2000. Streamflow generation in steep headwaters : A linked hydro-geomorphic paradigm. *Hydrological Processes* 14 : 369-385.
- Shields, A. 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitt. Preuss. Versuchsanst. WasserbauSchiffbau* 26 : 5-24.
- Smith, M. J., W. R. Kay, D. H. D. Edward, P. J. Papas, K. S. Richardson, J. C. Simpson, A. M. Pinder, D. J. Cale, P. H. J. Horwitz, J. A. Davis, F. H. Yung, R. H. Norris and S. A. Halse. 1999. AusRivAS : using macroinvertebrates to assess ecological condition of rivers in Western Australia. *Freshwater Biology* 41 : 269-282.
- Turowski, J. M., E. M. Yager, A. Badoux, D. Rickenmann and P. Molnar. 2009. The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms* 34 : 1661-1673.
- Vannote R. L., W. G. Minshall, K. W. Cummins, J. R. Sedell and C. E. Cushing. 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37 :

- 130-137.
- Wang, Z. Y., C. S. Melching, X. H. Duan and G. A. Yu. 2009. Ecological and hydraulic studies of step-pool system. *Journal of Hydraulic Engineering* 135 : 705-717.
- Weichert, R. B., G. R. Bezzola and H-E. Minor. 2008. Bed morphology and generation of step-pool channels. *Earth Surface Processes and Landforms* 33 : 1678-1692.
- Whittaker, J. G. 1987. Sediment transport in step-pool streams (In Thorne, C. R., J. C., Bathurst and R. D. Hey eds., "Sediment transporting ravel-bed rivers"). Chichester : Wiley. pp. 545-579.
- Wohl, E. 2006. Human impacts to mountain streams. *Geomorphology* 79 : 217-248.
- Wohl, E. E., and T. Grodek. 1994. Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev desert, Israel. *Geomorphology*, 9 : 117-126.
- Wohl, E. E, S. Madsen and L. MacDonald. 1997. Characteristics of log and clast bed-steps in step-pool streams of northwestern Montana, USA. *Geomorphology* 20 : 1-10.
- Yu, G. A., Z. Y. Wang, K. Zhang, X. Duan and T. C. Chang. 2010. Restoration of an incised mountain stream using artificial step-pool system. *Journal of Hydraulic Research* 48 : 178-187.
- Zimmermann, A., and M. Church. 2001. Channel morphology, gradient stresses and bed profiles during flood in a step-pool channel. *Geomorphology* 40 : 311-327.