

용암류 특성에 의한 제주도 폭포의 유형화*

김 태 호**

Classification of Waterfalls in Jeju Island Based on Properties of a Lava Flow*

Kim, Taeho**

요약: 제주도 폭포의 지형 특성을 파악하기 위하여 한라산 산록과 서귀포 해안지대에 소재하는 26개 폭포를 대상으로 용암류의 형태와 물리적 성질에 의해 폭포를 분류하고, 후퇴프로세스를 검토하였다. 폭포벽과 폭포를 구성하고 있는 용암류 유형과 매수에 근거하여 단일 용암류형, 복수 용암류형, 기저부 연암형 및 용암류 암괴형으로 유형화할 수 있다. 단일 용암류형 폭포는 조면암이나 조면안산암 분포지역에, 복수 용암류형 폭포와 기저부 연암형 폭포는 현무암이나 조면현무암 분포지역에 잘 발달하여 폭포 유형에 용암류의 암질이 반영되고 있다. 폭포의 후퇴프로세스는 단일 용암류형 폭포에서는 감경사적 후퇴나 교체후퇴가 나타나는 반면 기저부 연암형 폭포는 전형적인 평행후퇴를 한다. 복수 용암류형 폭포는 용암류의 물리적 성질에 따라 세 후퇴 유형을 모두 보인다. 수직절리가 잘 발달한 용암류가 폭포 벽을 만들고 있으므로 대부분의 폭포는 수직에 가까운 폭포벽을 지닌다.

주요어: 폭포, 용암류, 절리, 암반강도, 제주도

Abstract: In order to examine geomorphic characteristics such as form and retreat process of waterfalls in Jeju Island, 26 waterfalls were classified based upon materials forming a fall face. The waterfalls could be categorized into three types such as single unit, multiple units and basal soft-rock based upon the number and type of a lava flow. A block fall, composed of a pile of large blocks, could be added to the typology of waterfalls in Jeju Island. While the single unit fall is distributed in a region of trachyte or trachyandecite, the multiple units fall and basal soft-rock fall are largely developed in a region of basalt or trachybasalt. A retreat process of the single unit fall is an inclination or a replacement, but the basal soft-rock fall shows a parallel retreat. The multiple units fall exhibits three types of a retreat process according to the physical properties of a lava flow. The fall face is generally vertical due to well-developed vertical joints of a lava flow.

Key Words: waterfall, lava flow, joint, rock resistance, Jeju Island

1. 서론

하천 중단면에 출현하는 경사급변점으로서, 유수가 수직방향으로 떨어지는 지형(자연지리학사전 편찬위원회, 1996)을 가리키는 폭포는 형태적인 특이성 때문에 일찍부터 많은 사람들의 관심을 끌고 있는 가장 대표적인 하천지형 가운데 하나이다. 김홍도의 「금강폭포」나 정선의 「박연폭포」와 같이 조선시대에 그려진 산수화에서도 그 사례를 쉽게 찾아볼 수 있듯이 폭포에 대한 사람들의 관심은 과거에도 오늘날과 크게 다르지 않았으며, 이런 관심을 반영하여 지금도 폭포는 가장 중요한 관광자원의 하나로 활용되고 있다(Hudson, 1998;

Hudson, 2003; 손명원, 2006). 따라서 환경부의 전국자연환경기초조사에서도 폭포는 주요 지형경관 항목(GS01)으로 지정되어 있는 등 국내에서도 폭포에 대한 발굴조사는 현재도 활발하게 이루어지고 있다(국립환경과학원, 2007).

그러나 일반인의 높은 관심에 비하여 폭포를 대상으로 하는 지형학적 연구는 매우 적은 편이다. 전 세계 폭포 가운데 가장 유명한 나이아가라폭포의 경우에도 Gilbert(1907)를 비롯한 일련의 폭포 후퇴에 관한 연구(Philbrick, 1970; Tinker, 1987; Tinkler *et al.*, 1994)를 제외하면 눈에 띄지 않을 만큼 관련된 연구주제와 사례가 많지 않다. 따라서 하곡지형의 발달과정에서 폭포가 지닌 역할이

* 이 논문은 2010년도 제주대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었음.

** 제주대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, Jeju National University)(kimtaeho@jejunu.ac.kr)

나 폭포의 침식메커니즘 등에 대해서는 아직도 규명되지 않은 부분이 많다. 이런 측면에서 최근 폭포와 같은 천이점의 후퇴가 하천 중단면의 발달에 중요한 역할을 하고 있다는 인식(Seidle *et al.*, 1997; Zaprowski *et al.*, 2001) 아래 폭포벽 구성물질의 물성을 고려한 폭포의 후퇴속도에 관한 연구(Hayakawa and Matsukura, 2003; Hayakawa *et al.*, 2008)는 폭포의 분류체계에 관한 종래의 연구(Young, 1985; Alexandrowicz, 1994)와는 다른 새로운 지형학적 접근방법으로 주목을 받고 있다. 국내에서는 폭포의 성인을 단층과 관련시켜 해석한 김주환(1997)과 폭포의 성인과 발달과정을 근거로 폭포를 유형화한 김지영(2006)을 제외하면 대부분 활용 가능한 자연자원으로서의 사례 소개(문화재청, 2011)에 초점이 맞추어져 있어 지형학적 연구라고 보기는 어렵다.

한편, 제주도의 해안지대에는 서귀포의 천지연 폭포와 정방폭포를 비롯하여 중문의 천제연폭포 등 다수의 폭포가 출현하고 있으며, 이들 폭포는 용암류로 이루어진 폭포벽의 층리나 주상절리와 어우러져 우수한 지형경관을 만들고 있다. 하천 하류역에 충적지형이 발달하지 않은 제주도의 지역성을 고려하면 이들 폭포가 지닌 하천지형으로의 가치는 매우 높아 오름이나 용암동굴과 같은 화산지형과 더불어 제주도를 대표하는 지형경관으로 간주되고 있다. 그 결과 이들 폭포는 지역주민의 친수공간뿐 아니라 관광객을 유인하는 공간으로 제주도의 관광산업에도 크게 이바지하고 있다.

지형발달사적 관점에서 유년기 지형으로 분류되는 제주도에는 하천을 따라 경사급변점이 잘 발달할 뿐 아니라 하도가 암반으로 이루어진 제주도의 산지하천은 한반도의 충적하천과는 달리 마식작용이 탁월하고 하상은 계단모양을 이루는 경우가 많다. 이런 지형학적 배경 때문에 한라산 산록에는 많은 급류와 폭포가 출현하고 있으나 아직까지 이들 경사급변점에 대한 체계적인 조사는 이루어지고 있지 않다. 이는 투수성이 큰 지질조건으로 인하여 대부분의 하천이 건천을 이루는 탓에 하상에 경사급변점이 출현하더라도 낙수가 동반되지 않으므로 폭포가 지형경관으로는 크게 주목받지 못했기 때문일 것이다.

그러나 최근 많은 사람들이 찾고 있는 서귀포의

영또폭포¹⁾에서 볼 수 있듯이 제주도의 폭포는 경사급변점만으로도 매력을 지니고 있으며, 여기에 우천으로 유수가 출현하면 이들 폭포의 지형경관으로의 가치는 훨씬 더 높아진다. 특히 중산간지대와 산악지대의 폭포는 관광지 다변화를 모색하고 있는 제주도 입장에서는 지금까지 전혀 생각하지 않았던 자원일 뿐 아니라 오히려 우천중에 관광객을 유인할 수 있는 틈새시장의 성격을 지닌 독특한 관광자원이라고도 할 수 있다.

따라서 제주도의 폭포는 잠재적 가치가 매우 높은 숨겨진 자연자원으로 볼 수 있으므로 폭포의 가치를 찾아내고 이를 활용할 수 있는 방안의 개발이 시급하며, 이를 위한 기초작업으로 제주도에 분포하는 폭포를 발굴하고 이들 폭포의 지형 특성을 밝히는 것이 필요하다. 본 논문에서는 제주도 폭포의 지형 특성을 파악하기 위한 일환으로 폭포벽과 폭포 전면의 하상을 구성하고 있는 용암류의 유형과 매수, 암반강도와 절리 등의 물리적 성질을 근거로 폭포를 유형화하고, 폭포 형태와 관련된 후퇴프로세스를 검토하였다.

2. 연구지역 및 방법

1) 제주도의 하천 특성

한라산 정상으로부터 발산하는 방사상 하계모양을 보이는 제주도 하천의 총연장은 828.8km²)이며 하계밀도는 0.45km/km²이다(제주특별자치도, 2010; 그림 1). 축척 1:5,000 지형도에 표시된 17개 지방하천에 대한 하계망 분석에 따르면 유로가 가장 긴 천미천을 비롯하여 한천과 효돈천 등 3개 하천만이 5차수하천으로서, 전반적으로 하천차수가 낮고 1차수하천의 수도 같은 규모의 한반도 하천에 비하여 적은 편이다. 하천분기율도 작아 천미천 3.0, 한천 2.7, 효돈천 2.7로 하천차수가 높아져도 하천의 수가 크게 증가하지 않는다. 이런 제주도의 저밀도 하계는 지표유출이 일어나기 어려운 지질조건 때문에 한반도에 비하여 낮은 개석도(開析度)를 반영하고 있다. 하천 평균길이의 차수별 증가율도 일정하지 않고, 하천마다 크게 다른 것도 한반도 하천과는 다른 제주도 하천의 특징이다(김미령, 2003).

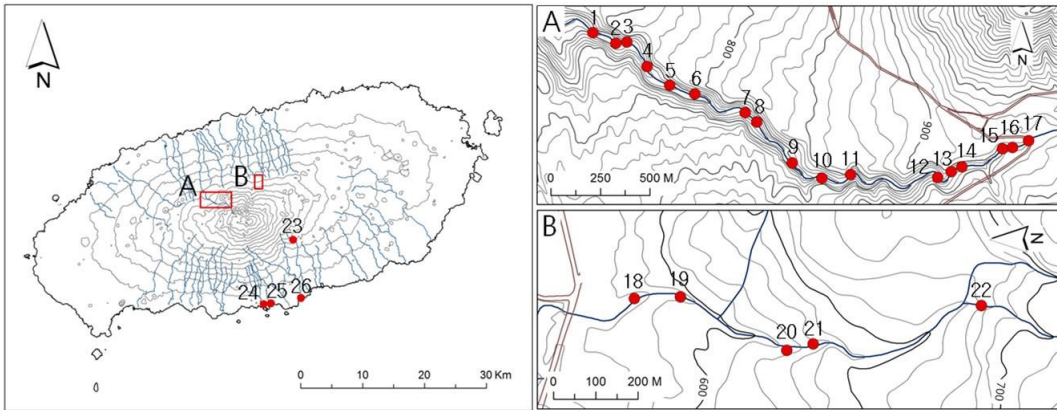


그림 1. 제주도의 하계 및 조사 폭포의 위치

주로 한라산 산록을 흘러내리는 제주도 하천은 직류하천을 이루는 경우가 많다. 곡률도는 1.1~1.3에 불과하여 1.5 이상을 보이는 한반도의 곡류하천과는 차이가 크다(강상배, 1980). 본류에 합류하는 지류도 사면경사에 지배되어 최단거리의 유로를 유지하면서 본류와 동일한 방향으로 흘러내리므로 유역별로는 평행상 하계모양이 잘 나타난다(그림 1).

제주도 하천의 가장 큰 특징으로 강우 직후에만 유수가 나타나는 건천을 들 수 있다. 유역이 층리, 절리, 습골 및 동굴이 잘 발달한 현무암이나 조면현무암질 용암으로 이루어져 있으므로 유수가 지하로 쉽게 침투할 수 있다. 따라서 강우강도가 일정 수준에 도달하지 않으면 표면유출이 일어나기 어렵다. 반면에 침투율을 초과하는 강우가 발생하면 급격하게 유량이 증가하는 섬광적인 유출을 보이기도 한다(안중기·김태호, 2006). 지하수위의 고도가 낮아 기저유출로 함양되는 무강수기의 유수는 해안 인근의 최하류역에만 나타나므로 산록의 폭포에서는 폭포수를 보기 어렵다.

제주도 하천은 기본적으로 기반암하도가 탁월한 산지하천에 속한다. 하도가 사력(砂礫)으로 이루어진 충적하천과는 달리 산지하천은 사력의 분급, 파쇄 및 마모기능이 활발하고 하상은 계단모양을 이루는 경우가 많다(Wohl, 2000). 제주도 하천도 급류와 폭포 등 경사급변점의 출현빈도가 매우 높아 전형적인 계단모양의 종단면을 만들고 있다. 또한 경사급변점 전면의 폭포를 비롯하여 소와 포

트홀 등 암반하천 특유의 마식지형이 잘 발달한다(국립공원관리공단, 2002).

2) 연구지역 개관

제주도에서는 서귀포 해안지대의 폭포들이 잘 알려져 있으나 하상의 경사급변점에 해당하는 폭포는 하천 상류역에 집중적으로 출현하므로 한라산 국립공원 구역을 흐르는 외도천, 병문천 및 신례천을 중심으로 현지조사를 실시하였다.

한라산 북서사면을 흐르는 외도천에서는 하상고 690m부터 910m까지 길이 2.8km의 구간에 전부 17개의 폭포가 출현하고 있어 한라산에서도 가장 고밀도의 폭포 출현빈도를 보인다(그림 1A). 이 구간은 최대높이 50m에 달하는 하곡사면이 임박하고 있는 협곡지대이며, 하상고 약 820m를 기준으로 하류는 해안동조면안산암, 상류는 대포동조면현무암이 분포하고 있다(제주도, 2000).

한라산 북사면의 관음사등산로를 따라 흐르는 병문천의 등산로 초입구간에도 폭포가 연속적으로 출현하고 있다(국립공원관리공단, 2002). 즉 병문천 하상고 570m부터 680m까지 길이 1.2km 구간에 전부 5개의 폭포가 발달하고 있다(그림 1B). 이 구간이 위치하는 북사면의 지형면은 여러 단의 계단모양으로서, 급경사에 해당하는 사면 말단으로부터 병문천이 상류 쪽으로 파고 들어가면서 폭포를 만들고 있으므로 급사면 말단에서 폭포 지점까지만 짧은 협곡이 단속적으로 출현하고 있다.

이 일대는 오등동현무암으로 이루어져 있다(제주도, 1998).

한라산 남동사면을 흐르는 신례천의 수악계곡 하상고 500m 일대에는 3단구조의 폭포가 출현하는데(그림 1의 23; 이하 번호만 표시함), 폭포 단면형태의 특이성과 도로 인근에 소재하는 접근의 편리성을 고려하여 조사지로 선정하였다. 수악계곡 일대는 보리악조면현무암이 분포하고 있다(제주도, 2000).

이외에 서귀포 해안지대에서는 연외천(숨반내) 최하류역에 위치하는 천지연폭포(24)를 비롯하여 정방천(에이리내) 하구의 정방폭포(25), 효돈천 하구의 쇠소깍폭포(26)도 조사대상에 포함시켰다. 이들 조사지에는 각각 천지연조면안산암, 정방동조면안산암 및 한라산조면암 등 중성 마그마에서 유래한 용암류가 분포하고 있다(제주도, 2000).

3) 연구방법

폭포의 성인으로는 암석의 경연차와 하천을 가로지르는 경암 등의 암석학적 요인뿐 아니라 대지상 지형의 가장자리나 열곡의 단애면(rift scarp)에 발달하는 폭포와 빙하지대의 현곡에 출현하는 폭포에서 볼 수 있는 지형조건이나 하천과 교차하는 단층선 같은 지질구조도 중요하다. 석회암지대에서는 하상에 탄산염이 집적되어 림스톤폭포(rimstone waterfall)가 만들어지기도 한다(Fairbridge, 1968; Goudie, 2004). 따라서 폭포를 유형화하기 위해서는 폭포의 성인이 반영되어 있는 분류기준을 만드는 것이 필요하다.

예를 들면, 김지영(2006)은 화강암으로 이루어진 설악산 일대의 폭포를 중심으로 절리방향과 경사도 같은 침식요인, 침식유형 및 지형적 형상을 기준으로 폭포를 분류한 후 최종적으로 경사도와 지형적 형상에 의해 9개로 유형화하고 있다³⁾. 반면에 Alexandrowicz(1994)는 사암, 세일, 이암 등으로 이루어진 카르파티아 산지의 폭포를 대상으로 퇴적암층의 층서와 배열방향, 폭포벽의 단면형태를 기준으로 15개 유형으로 세분하고 있다⁴⁾.

한편, 제주도는 다양한 암질의 용암류로 이루어진 지역으로서, 폭포벽 단면에도 용암류의 층상구조가 잘 나타나고 있다(국립공원관리공단, 2002).

하상에는 대부분 수평에 가까운 용암류가 하천 유로와 같은 방향으로 놓여 있으므로 제주도의 폭포는 Alexan drowicz(1994)의 분류에서 중요한 기준이었던 암층의 배열방향에 차이를 보이지 않는다. 또한 수직절리로 인하여 폭포벽도 대부분 수직에 가까우므로 경사도도 분류기준으로는 적절하지 않다. 반면에 용암류의 암질에 따라 폭포벽 단면의 두께와 형태가 달라지므로 용암류 유형과 폭포벽에 드러난 용암류의 매수와 암반강도 등 용암류의 특성을 이용하면 용암류로 이루어진 제주도 폭포의 유형화가 가능하다.

폭포의 지형 특성을 파악하기 위하여 폭포를 폭포벽과 폭호로 구분하고, 폭포벽에서는 높이와 폭, 단면형을 폭호에서는 소의 폭과 길이를 형태요소로 선정하였다. 레이저 거리측정기(Leica Distol-50)를 사용하여 폭포벽과 폭호의 형태요소를 측정하고, 동시에 각 유형을 대표하는 모식적인 폭포에 대해서는 간이측량을 실시하고 단면도를 작성하였다. 또한 이들 폭포에서는 폭포벽을 구성하고 있는 용암류를 대상으로 슈미트햄머(OT-80R)를 사용하여 암반강도를 측정하고 필요한 경우에는 암반에 발달한 절리간격도 측정하여 폭포 구성물질의 물리적 성질을 조사하였다. 폭포에 물이 흐르지 않는 경우에는 폭포벽에 노출되어 있는 암반을 대상으로 암반강도를 측정하였다. 슈미트햄머의 반발치는 각 측정지점에서 햄머를 20회 연속적으로 타격하는 방법(松倉·青木, 2004)을 적용하여 구하였다. 폭포를 구성하고 있는 용암류의 암질은 제주도(1998, 2000)를 따랐다.

3. 제주도 폭포의 유형

1) 단일 용암류형 폭포

단일 용암류형은 폭포벽과 폭호가 발달한 하상이 동일한 용암류로 이루어진 폭포를 가리킨다. <그림 2>는 외도천에 출현하는 높이 11.5m, 폭 11.1m의 폭포(2)로 폭포벽 전면의 하상에는 길이 18m, 폭 21.5m의 타원형 폭호가 발달한다. 폭포벽 상부는 약 40° 기울어져 있으며, 하부 벽의 경사는 56°로 더 급하다. 폭포벽 하부에 발달한 절리의 간격은 평균 209cm이나 폭포벽 상단까지 이



그림 2. 단일 용암류형 폭포



그림 3. 그루브가 발달한 단일 용암류형 폭포

어지는 주 절리의 간격은 313cm로 넓다. 반면에 폭포벽 중단에는 하천을 가로지르는 방향으로 폭 10~30cm의 절리가 비교적 조밀하게 발달하며, 이들 절리를 따라 암벽이 벗겨지면서 폭포벽에 40~60°의 경사면을 만들고 있다. 이 일대에 분포하는 현무암질 조면안산암은 용암류의 두께가 5m 정도로 알려져 있으나(제주도, 2000), 폭포벽 단면에 용암류의 경계는 나타나지 않는다. 폭포벽 하부에서 계측한 슈미트해머의 반발치는 59%이다.

〈그림 3〉도 외도천의 현무암질 조면안산암 분포구역에 출현하는 폭포(5)로 폭포벽의 높이는 가장 낮은 하도 중앙에서 3.7m이나 양쪽 가장자리에서는 5.1m와 5.8m로 높아진다. 폭포의 폭은 9.8m이며, 폭포벽 전면의 하폭 17.4m 하상에는 길이 16m, 폭 13m의 원형에 가까운 폭호가 발달한다. 폭포벽은 수직에 가까운 경사면으로 이루어져 있으며, 폭포벽 중앙에는 4.2m 간격의 절리가

나타난다. 폭포벽 상단으로부터 상류 쪽으로 이들 두 절리 사이의 암반이 하방침식을 받아 하상에는 폭 1.8~5.4m, 깊이 2.1~3.4m의 그루브가 길이 28.5m에 걸쳐 발달한다.

외도천 구간에는 5번 폭포와 같이 수직단면의 폭포벽에 발달한 절리를 따라 폭포벽 상단으로부터 상류 쪽으로 하상에 그루브가 만들어진 단일 용암류형 폭포가 세 곳(3/8/9) 더 출현한다. 효돈천 하구 쇠소각에 발달한 폭포(26)는 이런 유형의 극단적인 사례라고 할 수 있다. 한라산 정상 일대에서 30~50m의 두께를 보이는 한라산조면암(제주도, 2000)의 단일 용암류로 이루어진 폭포벽의 높이는 1.2~3.7m에 불과하나 폭이 14.4m에 달하는 쇠소각폭포는 효돈천 최하류 하상에 만들어진 그루브의 말단에 해당한다. 폭포벽으로부터 상류 쪽으로 170m 구간에 걸쳐 출현하는 그루브는 규모로 보아 협곡에 가까운 하식지형으로 효돈천을 단

표 1. 유형별 대표 폭포의 특징

유형	지점	수계	폭(m)	높이(m)	암반강도(%)	단면형	폭호(m)	암질
단일 용암류형	2	외도천	11.1	11.5	59.0	경사	21.5×18.0	조면안산암
	26	효돈천	14.4	1.2~3.7	62.9	수직	-	조면암
복수 용암류형	19	병문천	8.8	6.0	49.2~52.2	수직	14.9×25.5	현무암
	23	신례천	9.9	4.5	49.4	3단·수직	-	조면현무암
			10.9	9.4	49.0~49.9		12.0×12.8	
10.7	5.4	54.6	8.5×8.0					
기저부 연암형	13	외도천	12.5	2.9	52.0 26.8	역경사	11.0×8.5	조면현무암
	25	연외천	15.4	22.0	54.1 22.6	역경사	-	조면안산암
용암류 암괴형	12	외도천	10.3	3.2	-	-	10.3×8.1	-

구화하고 있으며, 협곡의 최상류 지점에 다시 최대높이 6.9m, 폭 6.4m의 폭포를 만들고 있다.

2) 복수 용암류형 폭포

복수 용암류형은 폭포벽을 만들고 있는 용암류와 폭호가 발달한 하상의 용암류가 같지 않은 폭포를 가리킨다. 폭포벽이 복수의 용암류로 이루어진 경우에는 암반강도와 절리밀도 등 용암류의 물리적 성질 차이로 인하여 폭포벽의 단면형태가 달라진다.

<그림 4>는 신례천 수악계곡에 출현하는 3단폭포(23)로 폭포벽의 높이와 폭은 상단폭포 4.5m, 9.9m, 중단폭포 9.4m, 10.9m 및 하단폭포 5.4m, 10.7m이다. 하단폭포 전면의 하상으로부터 상단폭포 상류 하상까지의 높이는 19.3m이며, 하단 폭포벽부터 상단 폭포벽까지의 거리는 42.8m이다. 상단폭포 전면에는 폭호가 뚜렷하지 않은 반면 중단폭포와 하단폭포 전면에는 길이가 각각 12.8m와 8m인 원형 폭호가 발달한다.

폭포벽에는 전부 4매의 조면현무암질 용암류가 출현하여 상단폭포는 두께 3.4m 용암류 1매, 중단폭포는 4.5m 및 2.9m 용암류 2매, 하단폭포는 3.9m 용암류 1매로 이루어져 있다. 상단폭포와 중단폭포의 기저부에는 최대두께가 각각 1.2m 및 2m인 클링커층이 구성된 집괴암층이 나타나 용암류의 경계를 이루고 있다(그림 4). 하단폭포 기저부와 중단폭포의 두 용암류 사이에도 얇은 클링커층이 보

이며, 특히 하단폭포 기저부에는 높이 2m, 폭 4.4m, 최대깊이 5.3m의 계⁹도 출현한다.

용암류의 슈미트해머 반발치는 상단 폭포벽에서는 49.4%, 중단 폭포벽의 상위 용암류는 49.9%, 하위 용암류는 49.0%로 큰 차이를 보이지 않는 반면 하단 폭포벽에서는 54.6%로 다른 용암류에 비하여 반발치가 다소 높다. 모든 용암류에 수직절리가 발달하고 있으나 특히 상단폭포 용암류 단면에는 간격 181cm의 수직절리와 더불어 파쇄균열이 조밀하게 발달하고 있으며, 이들 절리와 균열을 따라 분리된 암괴들이 주변에 쌓여 있다.

한편, 암반강도에 큰 차이가 없고 용암류 사이에 클링커층의 발달이 미약하여 여러 장의 용암류가 연속적으로 붙어 있는 경우에는 수직에 가까운 폭포벽을 지닌 폭포가 출현하기 쉽다. <그림 5>는 병문천에 발달한 높이 6m, 폭 8.8m의 폭포(19)로 폭포벽 전면의 하상에는 길이 25.5m, 폭 14.9m의 타원형 폭호가 발달한다. 병문천 일대에 분포하는 오등동현무암은 용암류 두께가 1m 이내로 얇고, 용암류 사이에는 클링커층이 없거나 있더라도 10cm 정도에 불과한데(제주도, 1998), 이 폭포벽에서도 50~120cm 두께의 6매로 구분되는 현무암질 용암류의 층상구조를 확인할 수 있으며 용암류 사이에 클링커층은 나타나지 않는다. 폭호를 둘러싸고 있는 하안에도 용암류의 층상구조가 잘 나타나는데, 가장 얇은 용암류의 두께는 40cm에 불과하다.

용암류 단면에는 파쇄균열이 조밀하게 발달하고 있어 암괴가 쉽게 분리되고 있다. 폭포벽 상위 4

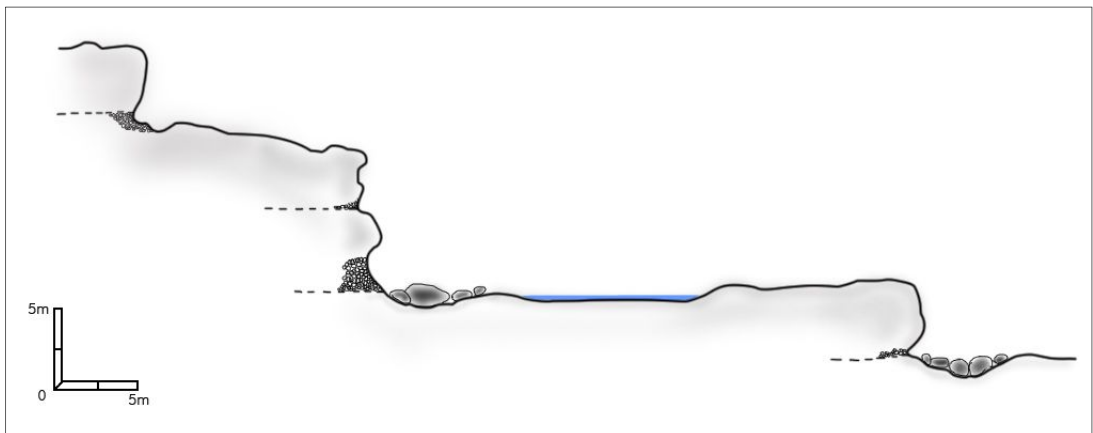


그림 4. 신례천 수악계곡 3단폭포의 종단면도



그림 5. 폭포벽이 6매의 용암류로 이루어진 복수 용암류형 폭포

매의 용암류 단면에서 측정한 슈미트해머 반발치는 각각 52.2%, 49.2%, 51.6% 및 51.4%로 암반 강도의 차이는 크지 않은 편이다. 병문천 구간에는 이런 유형의 폭포가 탁월하여 조사한 5개 폭포(18~22)가 모두 같은 유형에 속한다.

3) 기저부 연암(軟岩)형 폭포

기저부 연암형은 복수 용암류형 폭포 가운데 폭포벽 기저부에 클링커와 스펀터로 구성된 집괴암층이 출현하여 폭포벽 전면의 하상을 이루고 있는 용암류와의 사이에 뚜렷한 경계를 만들고 있는 유형이다. 폭포벽 기저부의 연암층에 대하여 폭포벽 상부의 용암류가 앞으로 돌출된 단면형태가 특징적으로 폭포벽이 역경사를 보이는 경우도 많다. 즉 기저부 연암형은 나이아가라폭포로 대표되는 모암폭포(caprock waterfall)와 동일한 유형으로 볼 수 있다.

〈그림 6〉은 외도천에 출현하는 높이 2.9m, 폭 12.5의 폭포(13)로 폭포벽 전면의 하상에는 길이 8.5m, 폭 11m의 타원형 폭호가 발달한다. 폭포벽 상부는 120~160cm 두께의 조면안산암질 용암류로 이루어져 있으며, 기저부에는 최대두께가 160cm에 달하는 집괴암층이 노출하고 있다. 기저부의 집괴암층은 굴식작용에 의해 용암류 단면보다 더 후퇴한 상태이므로 상부 용암류가 폭포 중앙에서 70cm를 비롯하여 최대 240cm 앞으로 튀어나와 있다. 용암류 단면에는 간격 164cm의 수직절리가 잘 발달한다. 용암류에서 측정한 슈미트해머의 반



그림 6. 폭포벽 상단이 돌출한 기저부 연암형 폭포

발치는 52.0%인 반면 기저부 집괴암의 반발치는 26.8%로 폭포벽 구성물질의 강도에 큰 차이를 보인다.

외도천 구간에 분포하는 17개 폭포 가운데 기저부 연암형은 전부 8개(6/10/11/13~17)로 전체의 47.1%를 차지하고 있어 제주도에서는 가장 보편적인 폭포 유형으로 보인다. 복수 용암류형에 속하는 수악계곡의 3단폭포 가운데 폭포벽 기저부에 2m 두께의 클링커층이 나타나는 중단폭포도 기저부 연암형으로 분류할 수 있다(그림 4).

서귀포 시가지를 흐르는 연외천(숨반내)의 최하류역에 출현하는 높이 22m, 폭 15.4m의 천지연폭포(24)도 기저부 연암형으로 폭포벽 높이 8m 지점을 경계로 상부는 조면안산암질 용암류, 하부는 서귀포층과 송산동역층으로 이루어져 있다(제주도, 2000). 상부 조면안산암은 폭포벽 최상단에서 최대 10m 정도 튀어나와 있어 폭포벽 단면은 하류 방향으로 역경사를 이룬다. 또한 돌출된 용암류 바닥은 용암류를 가로지르는 절리를 따라 암반이



그림 7. 기저부 연암형으로 분류되는 천지연폭포

떨어지면서 계단모양을 만들고 있다(그림 7). 폭포벽 바로 상류의 연외천 하상에서 계측한 조면안산암의 슈미트해머 반발치는 54.1%이다. 반면에 폭포벽 기저부 이외에는 천지연폭포 주위에 서키편층은 출현하지 않으므로 인근 해안에서 계측한 서키편층의 반발치는 층상에 따라 11~34%로 달라지는데, 평균값은 22.6%로 폭포벽 구성물질 간에 암반강도는 큰 차이를 보인다.

4) 용암류 암괴형 폭포

용암류 암괴형은 협곡구간의 하곡사면에 노출된 용암류의 절리면을 따라 떨어진 대형암괴와 상류로부터 운반되어온 암괴가 뒤엉켜 하도를 가로막음으로써 출현하는 폭포이다. 암반으로 이루어진 일반적인 폭포와는 구성물질에 차이가 있으나, 하상에 수직적인 낙차를 만들고 또 그 전면에는 폭호와 같은 소가 발달하는 등 폭포의 정의⁶⁾에 부합하므로 본 논문에서는 폭포로 간주하였다.

<그림 8>은 외도천에 출현하는 높이 3.2m, 폭 10.3m의 폭포(12)로 폭포벽 전면의 하폭 12.5m 하상에는 길이 8.1m, 폭 10.3m의 폭호가 발달하여 일반적인 폭포와 같은 모습을 보인다. 폭포벽을 구성하는 암괴 가운데 특히 하도 좌안 가장자리에 놓여 있는 암괴는 높이가 5.7m, 폭이 5.5m, 길이가 4m에 달할 만큼 대형이다. 협곡의 하곡사면에 수직절리를 지닌 두꺼운 용암류 단면이 잘 나타나는 외도천 구간에는 폭포벽 높이가 각각 2.6m, 2m, 2.5m인 3개의 암괴형 폭포(1/4/7)가



그림 8. 폭포벽이 대형암괴로 이루어진 용암류 암괴형 폭포

더 분포한다.

4. 고찰

제주도는 현무암에서 조면안산암에 이르는 다양한 용암류로 이루어진 화산섬으로서, 해안의 해식애나 하천의 폭포벽에는 용암류의 층상구조가 잘 나타난다. 제주도의 폭포 특성에는 이들 용암류의 성질이 중요한 역할을 하고 있다. 본 논문에서는 폭포를 구성하고 있는 용암류의 종류와 매수에 주목하여 폭포를 유형화하였다. 즉 폭포벽과 폭호가 동일한 용암류로 구성되어 있는지 여부에 의해 1매 용암류로 이루어진 폭포와 다수의 용암류로 이루어진 폭포로 구분하였다. 다수의 용암류로 이루어진 폭포 가운데 폭포벽 기저부에 클링커층을 비롯한 연암층이 출현하여 폭포벽 전면 하상과의 사이에 뚜렷한 경계를 만들고 있는 폭포를 다시 구분하였다. 그리고 대형암괴 더미가 하도를 가로질러 하상에 낙차가 만들어진 경우를 추가함으로써 단일 용암류형, 복수 용암류형, 기저부 연암형 및 용암류 암괴형의 4유형으로 분류하였다.

용암류는 마그마의 조성에 따라 점성과 유동성이 달라지며, 그 결과 외형과 두께가 다른 파호이호이, 아아 및 괴상용암으로 나누어진다(Ollier, 1988; 横山 등, 1992; Scarth, 1994). 따라서 제주도에서는 조면암이나 조면안산암질 용암류와 같이 비교적 두꺼운 층상을 만들며 흐르는 용암류 분포지역에는 단일 용암류형 폭포가 출현하기 쉬운 반면 현무암이나 조면현무암질 용암류는 일정 높이를 지닌 폭포벽이 만들어질 수 있을 만큼 용암류가 두껍지 않으므로 단일 용암류형 폭포가 출현하기는 어렵다. 조사대상 폭포 가운데 단일 용암류형으로 분류된 5개 폭포는 전부 조면암과 조면안산암 분포지역에 분포하고 있다. 천지연폭포와 정방폭포는 두께가 15~20m에 이르는 조면안산암질 단일 용암류로 이루어져 있으나 폭포벽 기저부에 서키편층이 출현하여 기저부 연암형으로 분류되므로 조면암이나 조면안산암질 용암이 단일 용암류형 폭포를 만드는 충분조건은 아니다.

얇은 층상의 현무암이나 조면현무암질 용암류는 복수 용암류형 폭포를 만들게 되는데, 폭포벽을 만드는 용암류 유형에 따라 단면형태가 달라진다.

한라산에서 가장 넓게 분포하고 있는 조면현무암은 주로 아아용암이다(제주도, 1998, 2000). 아아용암은 먼저 고결되는 용암류의 바닥과 표면이 흐르는 과정에서 부서지기 쉬우므로 용암류는 클링커로 둘러싸이며 결과적으로 뚜렷한 층상구조를 갖게 된다(Ollier, 1988; 横山 등, 1992; Scarth, 1994). 하상에 두꺼운 클링커층을 지닌 아아용암이 분포하면 용암류 매수가 1매일지라도 상부 용암층은 먼저 후퇴하는 기저부 클링커층의 모암(帽岩) 역할을 하게 되므로 돌출된 폭포벽을 지닌 기저부 연암형 폭포가 만들어진다.

폭포벽 기저부에 클링커층이 나타나지 않고, 또 폭포벽이 2매 이상의 용암류로 이루어진 경우에는 침식작용에 대한 암반 저항력이 폭포벽에 반영되어 단면형태가 다른 폭포가 만들어진다. 폭포벽 기저부를 구성하는 하위 용암류의 암반강도가 작고, 절리나 파쇄균열이 잘 발달하여 빨리 후퇴하는 경우에는 돌출된 상위 용암류가 무너지면서 수직의 폭포벽을 지닌 폭포가 출현한다. 반면에 상위 용암류보다 하위 용암류의 저항력이 더 커서 폭포벽 기저부의 후퇴속도가 더 느리면 계단모양의 폭포벽을 지닌 2단 또는 3단폭포가 만들어진다.

수악계곡 폭포(23)에서 볼 수 있듯이 암반강도가 54.6%로 가장 크고 절리가 발달하지 않은 최하위 용암류와 암반강도가 49.4%이며 절리와 파쇄균열이 잘 발달한 최상위 용암류 등 전부 4매의 용암류로 이루어진 폭포벽의 후퇴에는 이런 암반의 물리적 성질이 반영되어 폭포벽 상위 용암류로 올라갈수록 후퇴속도가 빨라져 결국 3단구조의 단면형태를 지닌 폭포가 만들어진다. 그러나 병문천 폭포(19)와 같이 폭포벽을 구성하는 용암류들이 1m 이내로 비교적 얇고 암반강도도 49.2~52.2%로 큰 차이를 보이지 않는 등 물리적 성질이 크게 다르지 않은 경우에는 용암류들의 후퇴속도에도 큰 차이가 나지 않으므로 1개의 폭포벽을 유지하는 폭포가 만들어진다.

용암류 암괴형 폭포는 현무암질 용암류가 분포하는 병문천 구간에서는 전혀 나타나지 않는 반면 조면안산암질 용암류가 분포하는 외도천 하류 구간에 3개 폭포가 출현하고 있다. 현무암질 용암류보다 조면암질 용암류에서 절리간격이 더 넓어지므로 절리면을 따라 대형암괴가 분리되기 쉬운 조

면암 분포지대에 용암류 암괴형 폭포가 집중되는 것으로 보인다.

한편, 제주도 폭포에서 쉽게 확인할 수 있는 지형 특성으로 수직에 가까운 폭포벽의 경사면을 들 수 있다. 조사대상 가운데 40°~56°의 경사각을 지닌 외도천 구간의 단일 용암류형 1개 사례(2)를 제외하면 모든 폭포가 수직의 폭포벽을 갖고 있으며, 폭포벽 상단이 앞으로 돌출하여 역경사면을 만들고 있는 폭포(13/24/25)도 출현한다. 폭포벽의 수직 단애면은 용암류가 냉각되는 과정에서 만들어지는 절리에서 기인한다. 절리간격과 밀도에는 차이가 있을지라도 대부분의 용암류에는 수직 방향으로 절리가 발달하며(Scarth, 1994), 폭포벽이 후퇴하는 과정에서 이들 절리면을 따라 암반이 쉽게 분리되므로 절리면을 계승한 폭포벽도 수직에 가까운 단애면을 갖게 된다.

절리를 따라 발생하는 낙반현상은 용암류 분포 지역에서는 보편적인 현상으로서, 제주도에서도 용암동굴 천장의 절리면에서 일어나는 낙반을 동굴훼손의 가장 큰 요인으로 지적하고 있다(김범훈·김태호, 2007). 또한 병문천 조사구간 바로 상류에는 지상의 유로와 교차하는 지점에서 용암동굴 천장이 붕괴되면서 병문천 유로가 지하의 용암동굴로 바뀐 사례도 보고되고 있다(김태호·안중기, 2008).

하도 구성물질로 균질의 응집성 재료를 사용한 수로실험에 따르면 두부침식으로 인한 하천천이점의 후퇴는 평행후퇴, 감경사적 후퇴, 교체후퇴의 세 유형⁷⁾으로 나타나며, 절리가 발달하지 않은 균질의 암반하천에서 평행후퇴는 일어나지 않는다(Gardner, 1983). 제주도의 경우 감경사적 후퇴와 교체후퇴는 주로 단일 용암류형 폭포에서 나타나는데, 외도천 사례(2)에서 볼 수 있듯이 감경사적 후퇴일지라도 폭포벽 경사면의 형태는 절리의 영향을 받고 있으므로 평행후퇴적 요소를 포함하고 있다.

하천의 유로방향과 평행하게 발달한 주절리를 따라 폭포벽 상류 하상에 그루브가 만들어지고 있는 단일 용암류형 폭포(3/5/8/9/26)의 후퇴는 교체후퇴형으로 분류할 수 있다. 카르파티아 산지의 두터운 단일 퇴적암층으로 이루어진 폭포에서도 똑같이 폭포벽 상류 하상에 그루브와 협곡이 발

달하고 있다(Alexandrowicz, 1994). 폭포의 후퇴와 소멸은 마식작용과 암반낙하에 의해 일어난다(Alexandrowicz, 1994). 폭포벽 기저부에서 굴식이 일어나기 어려운 단일 용암류형 폭포의 경우 폭포벽 상부에서는 암반낙하보다 마식작용이 탁월하게 일어나므로 감경사적 후퇴나 교체후퇴를 보이게 된다. 그러나 제주도의 폭포는 수직절리가 잘 발달한 층상구조의 용암류로 이루어져 있으므로 주로 평행후퇴형에 속한다. 특히 기저부 연암형 폭포는 돌출된 상부 용암류의 절리면에서 암반붕괴가 쉽게 일어날 수 있으므로 지속적으로 수직단애면을 유지하며 후퇴한다.

5. 결론

제4기의 화산활동으로 만들어진 제주도는 유년기지형으로 분류되고 있다. 하천 종단면에는 유년기지형의 특징으로 언급되는 경사급변점이 많이 발달하여 화산지형인 오름처럼 제주도의 지역성을 보여주는 지형경관으로 알려져 있다. 그러나 서귀포 해안지대에 출현하는 천지연폭포, 정방폭포, 천제연폭포의 세 폭포를 제외하면 한라산 산록을 비롯한 제주도 내륙에 출현하는 경사급변점에 대한 세간의 관심은 거의 없는 편이다. 다행스럽게 최근 서귀포 중산간지대의 영도폭포가 신비의 폭포로 알려지면서 평소에는 폭포수가 나타나지 않는 제주도 내륙의 폭포에 대한 관심이 생기고 있으므로 이런 관심을 유지하고 또 높이기 위해서는 제주도 폭포에 대한 체계적인 발굴과 관련조사가 필요하다. 본 논문에서는 용암류로 이루어진 화산섬 제주도에 발달하는 폭포의 지형 특성을 파악하기 위한 일환으로 한라산 산록에 소재하는 23개 폭포와 서귀포 해안에 소재하는 3개 폭포를 대상으로 용암류 특성을 바탕으로 폭포를 유형화하고, 폭포의 후퇴프로세스를 검토하였다.

제주도의 폭포는 폭포벽과 폭포벽 전면 하상을 구성하고 있는 용암류의 종류와 매수에 의해 단일 용암류형, 복수 용암류형, 기저부 연암형으로 구분할 수 있으며, 여기에 주변 하곡사면에서 떨어진 대형암괴가 폭포벽을 만들고 있는 용암류 암괴형을 추가할 수 있다. 단일 용암류형 폭포는 두껍게 흐르는 조면암이나 조면안산암 분포지역에 잘 출현

하는 반면 비교적 얇게 흐르는 현무암이나 조면현무암 분포지역에는 복수 용암류형과 기저부 연암형 폭포가 잘 발달한다. 또한 단일 용암류형 폭포는 두부침식에 의해 감경사적 후퇴나 교체후퇴를 하는 반면 복수 용암류형 폭포는 폭포벽을 구성하고 있는 용암류의 성질에 따라 이들 후퇴프로세스뿐만 아니라 폭포벽의 높이와 경사각의 변화가 일어나지 않는 평행후퇴도 한다. 기저부 연암형 폭포는 폭포벽 기저부의 굴식으로 돌출된 폭포벽 상부 용암류가 절리면을 따라 붕괴하며 후퇴하므로 전형적인 평행후퇴형에 속한다. 폭포벽을 구성하는 용암류의 특성상 암반에는 수직방향의 절리가 잘 발달하고 절리면을 따라 암반붕괴가 일어나므로 대부분의 폭포는 수직에 가까운 폭포벽을 갖고 있다.

주

- 1) 서귀포시 서쪽을 흐르는 약근내 하상고 240m 지점에 발달한 영도폭포도 평소에는 물이 떨어지지 않는다. 그러나 제주도에서 낙차가 가장 큰 폭포로 높이 약 50m에 달하는 폭포벽에 우천 시 폭포수가 출현하면 장관을 이룬다. 최근 올레 코스에도 포함되어 많은 사람들이 찾고 있는 제주도의 비경 가운데 하나로 낙수현상의 희소가치 때문에 '신비의 폭포' 또는 '행운의 폭포'로 알려져 있다.



폭포수가 출현한 영도폭포

- 2) 제주도에 소재하는 하천은 전부 142개로 지방하천 60개, 소하천 82개이며, 지방하천과 소하천의 총연장은 각각 603.7km와 225.1km이다(제주특별자치도, 2010).
- 3) 김지영(2006)은 경사도는 수평(20° 이하, A), 하류경사(20°~60°, B), 수직(60° 이상, C)으로, 지형적형상은 하류경사형(1), 계단형(2), 돌출형(3)으로 구분하고 두 기준을 조합하여 전부 9개로 유형화하였

다. 조사한 30개 폭포 가운데 50%를 차지하는 15개 폭포가 1/B형(하류경사형, 20°~60°)으로 분류되었고, 1/C형과 3/C형이 각각 4개씩으로 뒤를 이었다. 조사대상에는 제주도에 소재하는 4개 폭포도 포함되어 있는데, 천제연폭포는 2/C형으로 천지연폭포와 정방폭포는 3/C형으로 분류되었다.

- 4) Alexandrowicz(1994)는 층서는 사암층과 하부 세일층형(1), 두꺼운 사암층과 하부 세일층형(2), 두꺼운 2~3개의 사암층과 그 사이에 얇게 협재된 세일층형(3), 4~6개의 사암층과 세일층의 호층형(4)으로, 유로방향에 대한 암층의 배열은 수평형(A), 수직형(B), 하류 쪽으로의 경사형(C), 상류 쪽으로의 경사형(D), 유로방향과 평행한 주향형(E)으로 구분하고 두 기준을 조합하여 20개로 유형화했으나 실제로 출현하는 유형은 15개이다. 그리고 다시 폭포벽의 단면형태를 수직형(a), 하류 쪽으로의 경사형(b), 돌출형(c)으로 구분하여, 각 유형을 세분하였다. 조사한 43개 폭포 가운데 2/A형과 2/D형이 각각 9개로 가장 많았고, 폭포벽의 단면형태는 주로 a형과 b형으로 나타났다.
- 5) 케는 용암에 만들어진 작은 공동(空洞)을 가리키는 제주어이다. 용암류의 유동으로 만들어지는 용암동굴과는 달리 케는 용암에 포함되어 있던 다량의 가스가 팽창함으로써 만들어진다.
- 6) 지형학 사전에서는 “a very steep (commonly vertical) fall of some magnitude in a river course (Fairbridge, 1968)” 또는 “a free fall of water over a very steep rock face (Goudie, 2004)”로 정의하고 있다. 또한 Fairbridge(1968)는 규모가 큰 폭포 앞 하상에는 어김없이 폭호가 발달한다고 언급하고 있다.
- 7) 경사급변점의 비교를 그대로 유지한 채 경사각만 감소하는 감경사적 후퇴(knickpoint inclination)에 대하여 비교는 물론 경사각의 변화도 일어나지 않는 유형이 평행후퇴(parallel retreat)이다. 또한 교체후퇴(knickpoint replacement)는 경사급변점의 비교와 경사각이 모두 감소하면서 후퇴하는 유형을 가리킨다(Gardner, 1983).

사사

논문 구성 및 수정에 적절한 검토의견을 주신 심사위원들을 비롯하여 조사지역 출입에 도움을 주신 한라산국립공원관리사무소의 오희삼씨와 김용범씨, 그리고 현지측량 및 도면작업을 도와준 제주대학교 교육대학원의 이승욱군에게 고마운 마음을 전합니다.

문헌

강상배, 1980, 제주도 남·북사면지형의 비교연구, 지리학연구, 5, 157-181.

국립공원관리공단, 2002, 한라산 국립공원 자연자원조사.

국립환경과학원, 2007, 제3차전국자연환경조사지침(지형).

김미령, 2003, 제주도 하천의 하계망 분석, 제주대학교 석사학위논문.

김범훈·김태호, 2007, 제주도 용암동굴의 보존 및 관리 방안에 관한 연구, 한국지역지리학회지, 13(6), 609-622.

김주환, 1997, 직탕폭포와 고석정 주변의 지형, 사진지리, 5, 46-62.

김지영, 2006, 폭포의 성인과 발달과정에 따른 유형 분류: 설악산, 제주도, 한탄강 유역 폭포를 중심으로, 성신여자대학교 석사학위논문.

김태호·안중기, 2008, 한라산 구린굴의 천장 함몰로 인한 병문천의 유로 변경, 대한지리학회지, 43(4), 466-476.

문화재청, 2011, 지형·지질 문화재자원보고서[카르스트·폭포].

손명원, 2006, 금호분지 내 지리관광자원의 자연지리학적 배경, 한국지역지리학회지, 12(2), 202-214.

안중기·김태호, 2006, 한라산 아고산 초지대 소유역의 물수지, 대한지리학회지, 41(4), 404-417.

자연지리학회사전편찬위원회, 1996, 자연지리학사전, 한울아카데미.

제주도, 2000, 서귀포·하효리도폭 지질보고서.

제주도, 1998, 제주·애월도폭 지질보고서.

제주특별자치도, 2010, 2010 환경백서.

松倉公憲·青木久, 2004, シュミットハンマー: 地形學における使用例と使用方法にまつわる諸問題, 地形, 25(2), 175-196.

横山泉·荒牧重雄·中村一明, 1992, 火山, 岩波書店.

Alexandrowicz, Z., 1994, Geologically controlled waterfall types in the Outer Carpathians, *Geomorphology*, 9(2), 155-165.

Fairbridge, R.W., 1968, *The Encyclopedia of Geomorphology*, Dowden, Hutchinson & Ross.

Gardner, T.W., 1983, Experimental study of knickpoint and longitudinal profile evolution in cohesive, homogeneous material, *Geological*

- Society of America Bulletin*, 94(5), 664-672.
- Gilbert, G.K., 1907, Rate of recession of Niagara Falls, *U.S. Geological Survey Bulletin*, 306.
- Goudie, A.S., 2004, *Encyclopedia of Geomorphology*, Routledge.
- Hayakawa Y. and Matsukura, Y., 2003, Recession rates of waterfalls in Boso Peninsula, Japan, and a predictive equation, *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(6), 675-684.
- Hayakawa Y., Yokoyama, S. and Matsukura, Y., 2008, Erosion rates of waterfalls in post-volcanic fluvial systems around Aso volcano, southwestern Japan, *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(5), 801-812.
- Hudson, B.J., 2003, Waterfalls attractions in coastal tourist area: the Yorkshire Coast and Queen's Gold Coast compared, *International Journal of Tourism Research*, 5(4), 283-293.
- Hudson, B.J., 1998, Waterfalls resources for tourism, *Annals of Tourism Research*, 25(4), 958-973.
- Ollier, C., 1988, *Volcanoes*, Blackwell.
- Philbrick, S.S., 1970, Horizontal configuration and the rate of erosion of Niagara Falls, *Geological Society of America Bulletin*, 81(12), 3723-3732.
- Scarth, A., 1994, *Volcanoes*, Texas A&M University Press.
- Seidle, M.A., Finkel, R.C., Caffee, M.W., Hudson, G.B. and Dietrich, W.E., 1997, Cosmogenic isotope analyses applied to river longitudinal profile evolution: problems and interpretations, *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(3), 195-209.
- Tinker, K.J., 1987, Niagara Falls 1750-1845: the idea of a history and the history of an idea, *Geomorphology*, 1(1), 69-85.
- Tinkler, K.J., Pengelly, J.W., Parkins, W.G. and Asselin, G., 1994, Postglacial recession of Niagara Falls in relation to the Great Lakes, *Quaternary Research*, 42(1), 20-29.
- Wohl, E.E., 2000, *Mountain Rivers*, American Geophysical Union.
- Young, R.W., 1985, Waterfalls: form and process, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 55, 81-95.
- Zaprowski, B.J., Evenson, E.B., Pazzaglia, F.J. and Epstein, J.B., 2001, Knickzone propagation in the Black Hills and northern High Plains: a different perspective on the late Cenozoic exhumation of the Laramide Rocky Mountains, *Geology*, 29(6), 547-550.

(접수: 2012.4.17, 수정: 2012.5.14, 채택: 2012.5.21)