

박 경 교수지도  
석사학위 청구논문

폭포의 성인과 발달과정에 따른  
유형 분류

-설악산, 제주도, 한탄강 유역 폭포를 중심으로-

2006

성신여자대학교 대학원  
지리학과  
金知永

폭포의 성인과 발달과정에 따른  
유형 분류

-설악산, 제주도, 한탄강 유역 폭포를 중심으로-

박 경 교수지도

이 논문을 석사학위논문으로 제출함

2005년 11월


성신여자대학교 대학원


지리학과

金知永

# 인 준 서

金知永의 석사학위 논문으로 인준함

심사위원           權容友           

심사위원           朴正宰           

심사위원           朴  재           

성신여자대학교 대학원

## 논문개요

폭포(瀑布)는 하나의 하천단위(channel unit)이며, 소규모 급경사 산지하천 중 기반암하상(bedrock bed)의 종단면이 급경사인 지점에 물이 흐르는 것으로 아직까지 절대적인 높이, 경사, 유량에 대한 기준은 없다. 우리나라에서 폭포를 하천지형으로 인식하고 연구한 사례가 없으며, 이번 연구를 필두로 장기적인 경관변화의 전개양상까지 알 수 있는 심도 있는 연구가 요구된다.

본 연구의 목적은 폭포의 성인과 발달과정을 통해 지형적 형상으로 표출되는 유형을 분류하는 것이다. 폭포의 성인과 발달과정은 폭포침식의 특징에 의해 결정된다. 침식에 영향을 주는 요인을 폭포의 높이, 경사도, 구성암석, 하천력(stream power)으로 간주하고 이들 요인에 따라 폭포의 유형이 상이하게 나타날 것이라는 가설을 검증하고자 하였다.

연구대상으로 선정한 설악산 폭포 23개, 제주도 폭포 4개, 한탄강 유역 폭포 3개, 총 30개에 임의대로 번호를 붙였다. 실외에서 폭포의 높이, 경사도, 계곡의 주방향, 유수의 방향, 폭호너비, 구성암석을 조사했으며 실내조사에서 구성암석과 폭포가 위치한 고도를 파악하였다.

화강암과 현무암지역의 폭포는 다양한 절리계에 따른 경사도에 의해 폭포가 발달하고 있음을 관찰할 수 있었다.

조사 결과, 세 가지 범주로 폭포유형을 분류하였고 결과는 다음과 같다.

1. 형성원인을 절리계와 경사도로 간주하고 분류한 결과 나타나는 유형이다.

1) 절리발달에 의해 형성된 폭포유형은 사면에 발달한 절리계를 따른 유로 변경형, 판상절리부분의 분리에 의한 돌출형, 굴식(plucking)작용에 의

한 돌출형, 수직절리에 의한 수직형, 절리면을 따른 암괴의 분리에 의한 계단형, 절리에 의해 분리된 암괴가 유로를 막아 형성된 암괴형이 있다.

2) 하상 경사도에 의해 발달되는 폭포는 수평이거나 수평에 가까운 사면( $20^\circ$  이하의 경사도), 하류기반형 사면( $20\sim 60^\circ$ ), 수직적이거나 수직에 가까운 사면( $60^\circ$ 이상) 총 3가지 유형이 있다.

2. 침식의 유형에 따른 폭포 분류에서 설악산 폭포는 뒤로 후퇴하면서 천이점에서 상단의 각을 이루는 부분이 완만해지고 높이도 낮아지는 침식유형인 ‘대체후퇴형’을 보였으며 제주도와 한탄강 유역의 폭포는 경사도와 높이의 변화 없이 평행하게 수직절리를 따라 뒤로 후퇴하는 ‘평행후퇴형’을 보였다.

3. 지형적 특색에 따라 폭포를 분류할 때는 하류경사형(슬라이드 폭포, 유로 변경형 폭포), 계단형(cascade), 돌출형(돌출형, 돌출선반형 폭포, 원형극장형 폭포, 암괴형 폭포), 수직형 등 크게 4가지 유형이 나타난다.

최종적으로 사례지역을 연구할 때 침식유형을 제외한 형성원인과 그에 따라 발달한 지형적인 형상을 기준으로 하여 분류방법을 개발하였다.

A(수평: $20^\circ$  이하), B(하류경사:  $20\sim 60^\circ$ ), C(수직:  $60^\circ$  이상) 총 3가지의 범위의 경사도를 갖는 사면 형상과 1(하류경사형), 2(계단형), 3(돌출형) 총 3개의 지형적 형상을 결합하여 9개 유형으로 30개의 폭포를 분류한 결과이다.

1. 1/B형(하류경사형,  $20\sim 60^\circ$ )의 폭포가 15개로 50%를 차지하고 제일 많은 유형이다.

2. 1/C형(하류경사형,  $60^\circ$ 이상)과 3/C형(돌출형,  $60^\circ$ 이상)은 각각 4개씩의 폭포가 해당되고 두 번째로 많은 유형이다. 3/C형이 많이 나타나는 이유는 수직절리가 잘 발달한 현무암 폭포하단이 분리되는 발달과정을 거쳤기 때문이다.

3. 1/A형(하류경사형, 20°이하), 2/B형(계단형, 20~60°), 3/B형(돌출형, 20~60°)은 각각 두개의 폭포가 해당되는데 세 번째로 많은 유형이며, 모두 설악산에 분포한다.

4. 2/C형(계단형, 60°이상)에는 제주도의 천제연폭포 하나만이 이 유형에 해당된다.

연구 결과, 폭포의 발생과 발달과정에 영향을 가장 많이 주는 요인은 절리유형이다. 절리유형은 암석의 종류에 따라 다른 양상을 보인다. 결국 폭포의 유형을 결정하는 가장 큰 요인은 '구성암석'이다. 폭포가 형성될 때부터 구성암석에서 발달한 절리에 따라 폭포의 침식의 방향과 유형이 결정되고 이는 폭포의 높이, 하상의 경사도에도 영향을 미친다. 가시적으로 절리유형은 경사도로 반영되고 절리유형과 경사도, 높이 등은 지형적인 형상으로 표출되기 때문에 본 연구에서 개발한 방법에 이 두 항목을 적용한 것이다.

# 목 차

## 논문개요

<b>I. 서론</b> .....	1
1. 문제 제기 및 연구목적 .....	1
1) 문제 제기 .....	1
2) 연구목적 .....	3
2. 연구방법 .....	6
3. 연구지역개관 .....	7
1) 설악산 .....	7
2) 제주도 .....	11
3) 한탄강 유역 .....	14
<b>II. 이론적 배경</b> .....	17
1. 폭포의 정의 .....	17
2. 폭포의 하천지형학적 분류 .....	19
3. 폭포의 유형분류 .....	23
<b>III. 폭포의 분류 방법</b> .....	26
1. 형성원인에 따른 분류 .....	27
1) 절리발달에 의해 형성된 폭포 .....	27
2) 하상 경사도에 의해 발달되는 폭포 .....	28

2. 침식의 유형에 따른 분류 .....	29
3. 지형적 형상에 따른 분류 .....	31
4. 경사도와 지형적 형상의 조합으로 개발한 분류 .....	32
<b>IV. 사례지역 연구 .....</b>	<b>33</b>
1. 형성원인에 따른 분류 .....	39
1) 설악산 .....	39
2) 제주도 .....	43
3) 한탄강 유역 .....	44
2. 침식유형에 따른 분류 .....	47
3. 지형적 형상에 따른 분류 .....	48
4. 경사도와 지형적 형상의 조합으로 개발한 분류 .....	49
5. 연구폭포의 사진 .....	50
<b>V. 결론 .....</b>	<b>54</b>

## 참고문헌

## ABSTRACT(영문초록)

## 그림 목 차

그림 1. 설악산의 지질분포도 .....	7
그림 2. 설악산의 하계망과 폭포 위치도 .....	10
그림 3. 제주도의 지질분포도 .....	11
그림 4. 제주도의 하계망과 폭포위치도 .....	13
그림 5. 한탄강 유역의 지질분포도 .....	15
그림 6. 한탄강 유역의 하계망과 폭포위치도 .....	16
그림 7. 천이점의 침식유형 .....	29
그림 8. 천이점의 형태 .....	30
그림 9. 경사도와 지형적 형상의 조합으로 개발한 폭포유형 분류 .....	32
그림 10. 설악산 기반암과 폭포의 분포도 [폭포번호: 1~23] .....	34
그림 11. 제주도 폭포의 분포도 [폭포번호: 24~27] .....	35
그림 12. 한탄강 유역 폭포의 분포도 [폭포번호: 28~30] .....	35
그림 13. 폭포의 높이 빈도 .....	38
그림 14. 폭포가 위치한 고도 빈도 .....	38
그림 15. 폭포의 경사도 빈도 .....	38
그림 16. 폭포의 너비 빈도 .....	38
그림 17. 폭포의 구성암석 빈도 .....	38
그림 18. 수렴동 계곡과 천불동 계곡의 종단면 .....	39
그림 19. 설악산 폭포의 경사도 빈도 .....	42

## 사 진 목 차

사진 1. 이름 없음 .....	50
사진 2. 오련폭포 .....	50
사진 3. 양폭포 .....	50
사진 4. 음폭포 .....	50
사진 5. 천당폭포 .....	50
사진 6. 육담폭포 .....	50
사진 7. 비룡폭포 .....	50
사진 8. 용손폭포 .....	50
사진 9. 용아폭포 .....	50
사진 10. 쌍용폭포(좌, 우) .....	51
사진 11. 양폭포 .....	51
사진 12. 응봉폭포 .....	51
사진 13. 이름 없음 .....	51
사진 14. 십이선녀탕폭포(상, 중, 하) .....	51
사진 15. 사중폭포 .....	51
사진 16. 대승폭포 .....	51
사진 17. 무명폭포 .....	51
사진 19. 등선폭포 .....	52
사진 19. 십이폭포 .....	52
사진 20. 주전폭포 .....	52
사진 21. 용소폭포 .....	52
사진 22. 여심폭포 .....	52
사진 23. 도적폭포 .....	52

사진 24. 천체연폭포(2단, 3단) .....	52
사진 25. 천지연폭포 .....	53
사진 26. 정방폭포 .....	53
사진 27. 돈내코폭포(정면, 측면) .....	53
사진 28. 직탕폭포(정면, 측면) .....	53
사진 29. 삼부연폭포 .....	53
사진 30. 재인폭포 .....	53

## 표 목 차

표 1. 설악산의 구성암석 .....	8
표 2. 제주도의 구성암석 .....	12
표 3. 한탄강 유역의 구성암석 .....	14
표 4. 기존연구와 본 연구에서의 boulder하상에서 하상형태기술에 대한 명칭 비교 .....	21
표 5. 각 하천유형의 특징적인 형상 .....	22
표 6. 기반암 하도의 지형학적인 분류 .....	22
표 7. 연구대상 폭포의 특징 .....	36
표 8. 연구대상 폭포의 형성원인에 따른 분류(절리발달) .....	45
표 9. 연구대상 폭포의 형성원인에 따른 분류(경사도) .....	46
표 10. 연구대상 폭포의 침식유형에 따른 분류 .....	47
표 11. 연구대상 폭포의 지형적 형상에 따른 분류 .....	48
표 12. 연구대상 폭포의 경사도와 지형적 형상의 조합으로 개발한 분류 .....	49

# I. 서론

## 1. 문제 제기 및 연구목적

### 1) 문제 제기

폭포(瀑布)는 매력적인 경관이기에 대중의 관광지로 각광을 받는 것은 물론이고 각종 문학과 회화의 소재로 오랜 시간 이용되어 왔다(Hudson, 1998). 그러나 폭포를 하천지형으로 인식하고 연구한 사례는 드물다. 이는 폭포자체에 대한 연구부재로 그치는 것이 아니라 하천의 2대 종류 가운데 하나인 산지하천 중 기반암 하도에 대한 경시의 한 부분이라 할 수 있다(Young, 1985).

이후, 영미권에서는 Chin(1989)과 Grant et al.(1990)의 스텝-풀(step-pool) 연속체 연구를 시작으로, 산지하천지형인 스텝-풀 연속체에 대한 논문이 쇄도하였다(Chin and Wohl, 2005). 주기적인 기반암 하도의 연구가 비교적 많이 이뤄진 것은 급경사 하도의 불안정한 측사면의 관리와 더불어 침식기준면의 변화 관찰, 장기적인 지형경관의 전개양상을 알 수 있기 때문이다(Howard, 1998; Sklar and Dietrich, 1998<sup>1)</sup>; Whipple et al., 2000a). 그러나 일관된 지적 기반이 부족할 뿐만 아니라(Chin and Wohl, 2005) 그 외의 기반암하천지형에 대한 연구는 침식과 관련된 마식지형과 굴식지형에 대한 연구(Wohl, 1992; Wohl, 1993; Wohl et al., 1999; Whipple et al., 2000b)에 한정됐다.

폭포지형이 출현하는 기반암 하도(bedrock channel)는 산지하천<sup>2)</sup> 중 상류에 국지적으로 나타난다. 기반암 하도에 나타나는 지형 중, 폭포의 한 종

---

1) Wohl et al.(2001)에서 재인용.

2) 산지하천에 대한 하천지형의 분류는 II. 이론적 배경 중 '2. 폭포의 하천지형학적 분류' 참조.

류는 cascade와 스텝-풀(step-pool)<sup>3)</sup>이다(Grant et al., 1990). 산지하천에 대한 분류를 시도한 여러 연구(Grant et al., 1990; Chin, 2002; Montgomery et al., 1997; Wohl, 2001<sup>4)</sup>)에서 유역분지와 하도경사와의 관계, 유역분지와 이동능력 등 여러 가지 측면에서 산지하천지형을 분류하고 있는데, 폭포의 한 유형인 cascade와 스텝-풀(Step-pool)과 같은 지형은 사면경사도 2% 이상인 비교적 하도의 경사가 급한 하천에서 나타난다는 공통적인 결과가 도출됐다.

우리나라에서 층적 하천의 수리기하학과 물질의 침식·운반·퇴적 작용에 대한 연구는 많이 진행되어 왔으나, 산지 하천은 상대적으로 접근이 어렵고 효율성이 낮다는 이유로 그 동안 활발한 연구가 진행되지 못했다(양희경, 2003). 산지하천에 대한 연구는 상류산간지역에 발달하는 bar의 형태 연구(손명원, 1984), 자갈하상하천의 bar지형 발달에 관한 연구(양희경, 1997), 산지하천의 주기적인 연속체인 스텝-풀(step-pool)에 관한 연구(오성원, 2000; 양희경, 2001), 산지하천을 분류한 연구(양희경, 2003) 등이 있지만 그 중에서도 실제적인 기반암 하도에 대한, 특히 폭포와 관련된 하천지형에 대한 이렇다할 연구는 없다.

또한 폭포를 하나의 기반암하도지형의 주제로 인식한 연구 사례는 전무하다. 김주환(1997)은 직탕폭포 주변 지형에 대해 기술하면서 폭포선에서 곡벽으로 연장된 부분에 단층으로 추정되는 구조를 확인하여 직탕폭포 형성 원인을 단층에 의한 차별침식에 의한 것으로 기술하였다. 그러나 이는 폭포를 하나의 하천지형으로 인식하고 연구한 것이라기보다 주변지형발달과 함께 전반적인 지형발달사를 연구한 것이다. 권동희(2000, 2002, 2003,

---

3) 폭포의 또 다른 용어 중 단(step)이 있는 것은 'cascade'라고 하기 때문에 산지하천유형 중 단이 있는 cascade와 step-pool을 살펴볼 것이다. cascade는 bedrock cascade와 boulder cascade가 있으며 step-pool은 bedrock step-pool, boulder step-pool, log step-pool이 있다(Grant et al., 1990).

4) Chin and Wohl(2005)에서 재인용.

2004, 2005)는 폭포의 정의를 '하천의 경사급변점(천이점)에 나타나는 낙수 현상'이라고 하면서 보존가치가 있는 지형경관 중 하나로 폭포를 언급할 뿐이다.

폭포의 침식률을 구해 지형발달사를 연구한 것(Gilbert, 1896<sup>5)</sup>; Philbrick, 1970; Yuichi and Yukinori, 2003)과 폭포의 지형적인 유형분류를 시도한 외국의 연구(Von Engeln, 1940; Young, 1985; Alexandrowicz, 1994)는 '폭포'를 하천지형의 한 주제로 여기고 연구하고 있음을 반영한다.

주요 연구지역으로 선정한 설악산 국립공원지역은 암석의 대부분이 화강암이며 이들이 지표면으로 분출 시, 절리계가 발달하여 웅장하고 다채로운 암석경관을 볼 수 있다. 산지하천 기반암하도에도 반영된 절리계로 인해 다양하게 형성된 수많은 폭포<sup>6)</sup>를 관찰할 수 있다. 제주도와 한탄강유역에 발달한 폭포도 연구하여 용암분출과 관련한 폭포유형을 살펴볼 것이다.

설악산, 한탄강, 제주도에 존재하는 폭포의 특징을 파악하는 것은 폭포를 단순한 관광의 대상에서 학문적인 연구대상으로 여기는 시발점이다. 유형분류는 연구된 폭포 이외의 폭포유형분류에 기초 자료로 쓰일 것이다. 지금까지 명명해왔던 폭포뿐만 아니라 cascade나 스텝-풀(step-pool) 중에서 연구에서 제시된 기준에 적합한 지형은 새롭게 폭포로 정의할 수 있는 기준 마련에 도움이 될 것이다.

## 2) 연구목적

본 연구의 목적은 폭포의 성인과 발달과정이 폭포 형성에 미치는 영향을 파악하고, 폭포유형을 분류하는 것이다. 이론적인 폭포의 정의, 폭포의 하천 지형적 위치, 유형분류를 연구하여 연구대상 폭포에 적합한 유형분류방법을

---

5) Young(1985)에서 재인용.

6) 설악산 국립공원에서 2004년에 발행한 '설악산 국립공원지도'에 표기된 공식적인 폭포의 개수는 36개이다.

개발할 것이다.

폭포의 성인과 발달과정에 영향을 주는 요인을 구조적인 요인(용기, 지질의 차이에 따른 경암과 연암의 차이, 단층선, 절리선)에 따라 유형이 상이하게 나타날 것이라는 가설을 검증하고자 한다. 결국 폭포침식에 영향을 주는 요인을 밝히는 과정이다.

지형학은 지표형태분류학(morphography), 기능적 지형학(functional geomorphology), 역사-성인적 지형학(historic-genetic geomorphology)으로 나뉜다(김종욱, 1989). 가설검증을 위해 폭포의 기능적 접근과 함께 형태분류로 폭포 유형을 살펴보고자 한다. 기능적인 접근은 지형을 체계로 보고 그 구성요소들간의 상관관계를 토대로 지형체계의 변화과정을 분석해 내는 일이다(김종욱, 1993)<sup>7)</sup>. 폭포의 높이, 경사도, 유수와 주류의 방향, 폭호의 너비, 폭포가 위치한 고도 등을 측정하여 상관관계를 알아보고 폭포의 형성원인과 변화과정을 해석하고자 하였다. 지질도에 폭포위치를 표기하여 구조적인 영향도 살펴봤다. 이러한 요인들을 조합하여 폭포의 형태적 특징을 기술하고 분류하는 지표형태분류법을 시도하였다.

폭포의 단차는 하천을 가로 지르는 단층작용으로도 형성되는데 물이 떨어지는 힘과 암석의 침식 저항력간의 함수가 결국 폭포를 발달시키는 중요한 변수가 되는 것이다(박중관, 2005). 침식과 관련된 구조적인 요인을 살펴보는 것이 폭포형성원인을 밝히는데 중요한 단서를 제공할 것이다. 본 논문에서는 실제적인 침식율을 구하진 않지만 침식의 형태를 살펴봄으로써 폭포사면에서 작용하는 유수의 힘과 암석의 저항력의 크기를 가늠하고자 한다.

또한 하도의 하상경사도는 유수의 흐름이 저항력보다 크면 요면(凹面)의 종단면과 완경사를 보일 것이고 유수의 흐름이 저항력보다 작으면 급경사이며 하천종단면이 직선이나 볼록한 모양을 나타낸다(Wohl, 1992). 하천종단

---

7) 김종욱(1998)에서 재인용.

면을 통해 하상경사도와 침식력 사이의 관계를 규명할 수 있을 것이다.

가설검증을 통해 개발한 방법으로 유형분류를 시도할 것이며, 이는 여타의 폭포도 유형화 시키는 기본 자료가 될 것이다.

본 연구는 앞으로 기반암의 침식률을 구해 우리나라 기반암 하도의 장기적인 경관의 전개양상을 규명해 볼 수 있는 또 하나의 하천지형의 연구방향도 제시할 수 있기에 그 의의가 크다고 본다.

## 2. 연구방법

연구를 위해 1년 동안 설악산은 우수량이 비교적 적어 폭포를 잘 관찰할 수 있는 봄과 가을을 중심으로 6회, 제주도와 한탄강 유역은 각각 1회의 현지답사를 진행하였다. 실내연구는 국토지리정보원에서 발간하는 1:25000 지형도, 1:5000 지형도, 한국수자원공사에서 발간한 우리가람길라잡이를 참고하였다.

폭포의 형성과 발달에 영향을 주는 지형변수를 폭포높이, 폭포경사도, 계곡의 주방향, 우수의 방향, 폭포가 위치한 고도, 폭호너비, 폭포 구성암석으로 간주하였다. 현지답사를 통해 실측하고 부족한 부분은 실내조사를 통해 보충하였다. 높이와 경사도, 폭호너비 측정을 위해 전자클리노미터와 레이저거리측정기를 이용하였다. 계곡의 주방향과 우수의 방향을 알기위해 클리노미터를 이용해 측정하였다. 폭포가 위치한 고도는 국토지리정보원에서 발간한 1:25000, 1:5000 지형도와 한국수자원공사에서 발간하는 우리가람길라잡이를 참고하였으며 폭포의 구성암석은 관련논문과 한국지질자원연구원 홈페이지에서 제공하는 1:250000 지질도를 참고하여 작성하였다.

실내의 연구는 폭포를 크게 형성원인(기능적, 구조적), 침식유형(기능적), 지형적 형상에 따라 분류하기 위한 기초조사이다.

이에 더해 폭포의 형성원인 중 불규칙적인 용기에 의한 천이점(Knick point)에 의한 것인지 알아보하고자 1:5000 지형도상에 50m간격으로 고도를 기록하여 설악산 국립공원 대청봉을 정점으로 동·서 방향으로 흐르는 수렴동계곡과 천불동계곡의 종단면을 작성하였다. 폭포의 한 유형인 cascade, 스텝-풀(step-pool)의 기준<sup>8)</sup>들에 적합한지 알아보하고자 가로축, 세로축을 측정하여 이론적 배경을 증명하였다.

---

8) 산지하천에 대한 하천지형의 분류는 II. 이론적 배경 중 '2. 폭포의 하천지형학적 분류' 참조.

### 3. 연구지역개관

연구지역은 설악산, 제주도, 한탄강유역에 분포하는 폭포이다. 설악산은 대부분 화강암으로 구성되어 있는데, 화강암의 분출시 보이는 다양한 절리계로 인해 화강암지역의 기반암하상 또한 여러 가지 형상을 보인다. 제주도와 한탄강 유역은 화산 분출로 수직절리가 발달한 현무암 지역으로 설악산 지역에서 볼 수 없는 폭포를 관찰할 수 있기에 세 지역을 연구지역으로 선정하였다.

#### 1) 설악산

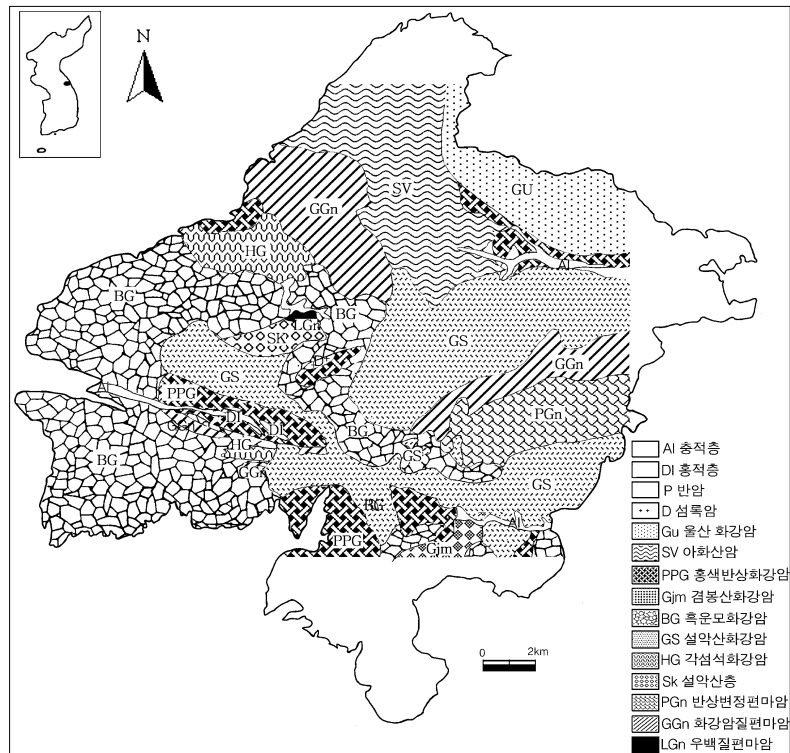


그림 1. 설악산의 지질분포도  
<출처: 최명윤(1994)을 기반으로 작성>

설악산은 주로 선캠브리아기 변성암류를 기반으로 중생대의 화강암류로 이뤄져 있고, 약 2억 1천만 년 전 이후에 화강암류가 관입하였다. 내설악 지역을 이루는 화강섬록암, 중립질흑운모화강암, 복운모 화강암은 약 2억 1천만 년 전에 화성기원의 마그마가 주변의 변성암류의 오염을 받으면서 분별결정에 의해 형성됐다. 백담사 남측에 중생대 퇴적층이 소규모 존재한다. 대청봉 정상부근과 외설악 남동부는 변성암류인 경기기저변성암복합체로 이뤄져 있다. 이 지역에 분포하는 우백질화강암 및 화강암은 약 5천 5백만 년 전에 형성된 것이다(박경, 2004)(그림 1, 표 1).

표 1. 설악산의 구성암석

지질시대		지층 · 암석명	상호관계
신생대	제4기	충적층	부정합 부정합 관입 관입 관입 관입 관입 관입 관입 관입 부정합. 단층 관계불명 점이적?
		홍적층	
중생대 말엽	백악기	섬록암, 반암, 맥암	
		울산화강암	
		마산암	
		홍색화강암	
		점봉산화강암	
		흑운모화강암	
		설악산화강암	
		각섬석화강암	
		설악산층	
		선캠브리아대	
화강암질편마암			
우백질편마암			

한반도가 남서쪽으로 기울고 동쪽이 융기한 운동 결과로 태백산맥이 형성된 것으로 논의되고 있다. 그렇다면 동해 쪽은 함몰 내지 침강운동이 진행되는 것으로 간주되는 바, 해발고도가 1,500m이상 되는 태백산맥의 원지형면은 제3기 이래로 계속하여 바다 쪽으로 침식 운반되었을 것이고 지금도 진행되고 있다(국립공원관리공단, 2001). 태백산맥은 고생대 제 3기(약 6,500만 년 전에서 약 2,500만년 전 사이)에 일어난 지각변동의 결과 형성되었으나 신생대 3기에도 일시적인 침강에 따른 융기가 있었다고 한다(정창희 외, 1984)<sup>9)</sup>. 대청봉을 중심으로 서해안까지 거리와 동해안까지의 비율은 약 13:1로서, 동고서저의 지형으로 알려져 있는데 서측으로는 5°내외의 완경사를 보이고 동측으로는 약 18°내외로 급경사를 보인다.

위와 같은 지형발달과정을 거친 결과, 설악산의 깊은 계곡과 험준한 산봉우리들이 형성됐다. 이러한 지형은 다시 침식에 영향을 주고 받으며 결과적으로 지질학적 기준으로는 매우 짧은 시간동안 침식이 진행되고 있다.

설악산 지형을 형성하는 주요 요인 중 하나는 지질조건이다. 설악산은 앞에 살펴봤듯이 대부분의 지질은 화강암으로 이뤄져 있다(그림 1). 지형적으로 설악산의 웅장하고 다채로운 경관은 대규모의 화강암 관입과 이에 수반되는 암석의 질과 구조상의 차이에 의한 차별침식의 결과로 볼 수 있다. 지하 깊은 곳에서 형성된 화강암류가 융기에 의해 지표로 상승하면 암석들은 풍화와 침식작용을 받아 삭박되고, 냉각, 프와송효과(Poission effect) 및 막효과(membrane effect)에 의해 응력 분포가 변하게 되어 X, Y, Z 세 축 방향으로 절리가 발생하게 된다. 설악산에 분포하는 화강암류에는 저각도의 경사각을 가진 판상절리(sheeting joint)와 고각도의 경사각(60°이상)을 가진 인장절리(extension joint)가 발달되어 있다(국립공원관리공단, 2001).

설악산의 암석의 차이나 절리에 의해 암석들은 차별침식을 받고 험준하

---

9) 국립공원관리공단(2001)에서 재인용.

고 다채로운 경관을 형성하며, 기반암하천인 산지하천에도 반영되어 다양한 하천지형을 형성한다. 암질의 차이와 절리 발달은 설악산의 귀면암, 울산암 등과 같은 기암을 형성하거나 절리방향에 따르는 차별침식으로 폭포, 구혈(Pothole), 급류, 소 등의 하천지형을 형성하기도 한다.

지질학적이고 지형적인 요인들은 하천의 흐르는 방향을 좌우하고 계곡의 형상과 발달과정에 영향을 미친다. 설악산의 하계망은 설악산의 구조선과 상당한 상관관계를 갖는 것으로 나타났다(국립공원관리공단, 1999)<sup>10</sup>. 내설악 하천은 이상적인 수지상(樹枝狀)을 이루고 있다(그림 2). 백담계곡과 수렴동계곡 및 구곡담계곡의 굴곡과 계곡 양측의 높은 산지는 평탄면을 흐르며 곡류하던 계곡이 그대로 깊이를 증가시켰다. 지반의 용기를 입증하는 하각작용이 활발한 감입곡류천을 이룬다(최명윤, 1994).

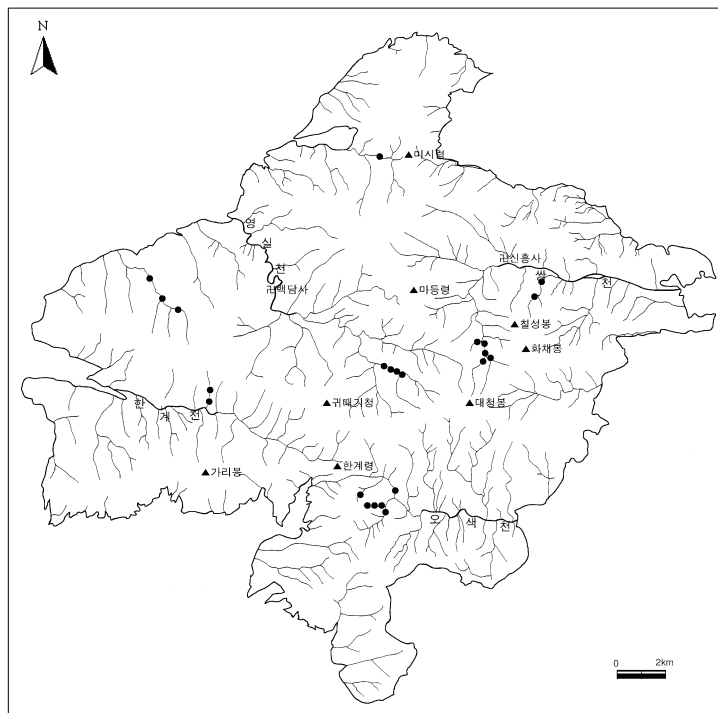


그림 2. 설악산의 하계망과 폭포 위치도

10) 국립공원관리공단(2001)에서 재인용.

본 연구 지역인 백담사계곡과 구곡계곡 사이의 수렴동 계곡의 전체 기울기는 완만한 편이다. 백담사에서 수렴동 계곡은 하천길이가 약10km인데 그 고도차는 500m에 이른다.

외설악의 하계는 3개의 지류가 신흥사 부근에서 합쳐 쌍천을 이뤄 동해로 유입된다. 하나는 흔들바위 부근과 내원골에 이르고 황철봉 북동쪽 능선에 달하는 북지류, 둘째는 신흥사에서 비선대를 지나 무내미 고개 부근을 지나 대청봉에 이르는 남지류이며 이를 설악골이라 한다. 설악골은 마등령과 연화대 사이의 공룡능으로 작은 지류를 형성한다. 이 가운데 서지류와 공룡능 사이의 산지는 이 지역의 용기에 따라 급격한 하각작용을 받아 깊은 골짜기와 급경사의 사면을 형성하여 절벽이 곳곳에 용립하고 폭포를 곳곳에 형성시킴으로서 설악산에서 가장 험준한 지형을 이룬다(국립공원관리공단, 2001).

## 2) 제주도

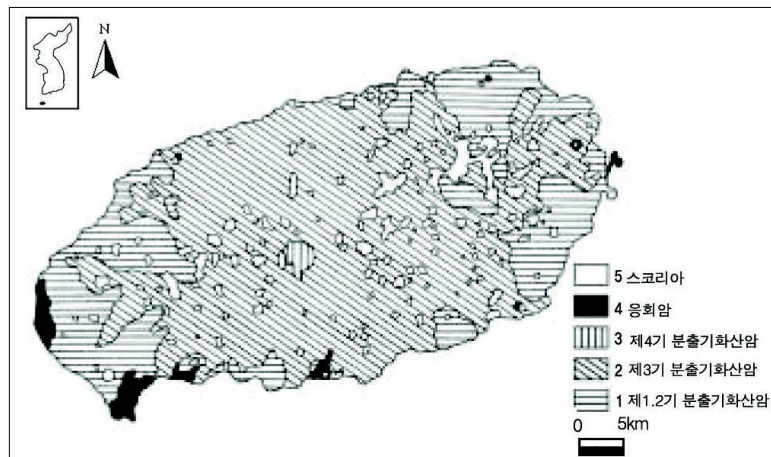


그림 3. 제주도의 지질분포도  
<출처: 원종관, 1975>11)

11) 김태호(2004)에서 재인용.

제주도는 보통 4번의 분출기를 통해 형성된 것으로 간주된다. 1분출기(87만 년)는 해수면 아래의 기저부를 형성, 2분출기(60만 년~37만 년)에 용암대지 형성기로 한라산 본체를 제외한 제주도 대부분 모습이 결정됐다. 3분출기(27만 년)는 중앙부의 중심분화로 변화하여 한라산의 순상화산을 형성하였고 4분출기는 제주도 전역에 걸쳐 소형 화산체가 형성된 시기이다. 그 결과 제주도의 지질은 기반암과 화산분출암인 현무암류, 조면암류, 조면암질안산암류와 화산분출물 및 화산쇄설성 퇴적암, 사구 등으로 구성되어 있다(그림 3, 표 2).

표 2. 제주도의 구성암석

시기	암석
제4기	조면현무암(VIII)
	조면현무암(VII)
	현무암(III)
	조면현무암(VI)
	조면현무암(V)
	조면암
	퇴적암
	조면현무암(IV)
	조면현무암(V)
	조면암
	퇴적암
	조면현무암(IV)
	조면현무암(III)
	현무암(II)
	조면현무암(II)
	현무암(I)
	조면현무암(I)
조면안산암	
제3기	서귀포층
	미고결퇴적층(U층)
백악기	응결응회암
	화강암

제주도 해안은 용암류로 이뤄진 화산해안으로 전체 해안의 75%에 이르는 229.7km가 암석해안으로 분류된다. 현무암질 용암은 유동성이 크므로 특히 파호이호이용암이 분포하는 동·서부 해안에는 높은 비고를 보이는 지형의 출현은 적고 바다를 향하여 완만하게 기울어진 평탄한 사면지형이 대부분을 차지한다. 반면에 남부해안에 분포하는 유동성이 작은 조면암질 용암은 상당한 두께로 흘러 비고가 큰 지형을 형성하므로 조면암에 잘 발달하는 주상절리도 가세하여 남부해안에는 급경사의 해식애가 출현하기 쉽다(김태호, 2004). 이러한 지형적 요인은 제주도의 대부분의 폭포가 남부해안 쪽에 분포하고 있는 이유이기도 하다(그림 4).

지형적인 요인으로 한라산과 동서 장축을 분수령으로 하여 60여개의 하천이 북류 또는 남류한다. 하도는 중·상류뿐만 아니라 하구 부분의 최하류 구간에서도 기반암으로 구성되어 있어 전체 구간이 산지하천의 양상을 보인다(김태호, 2004).

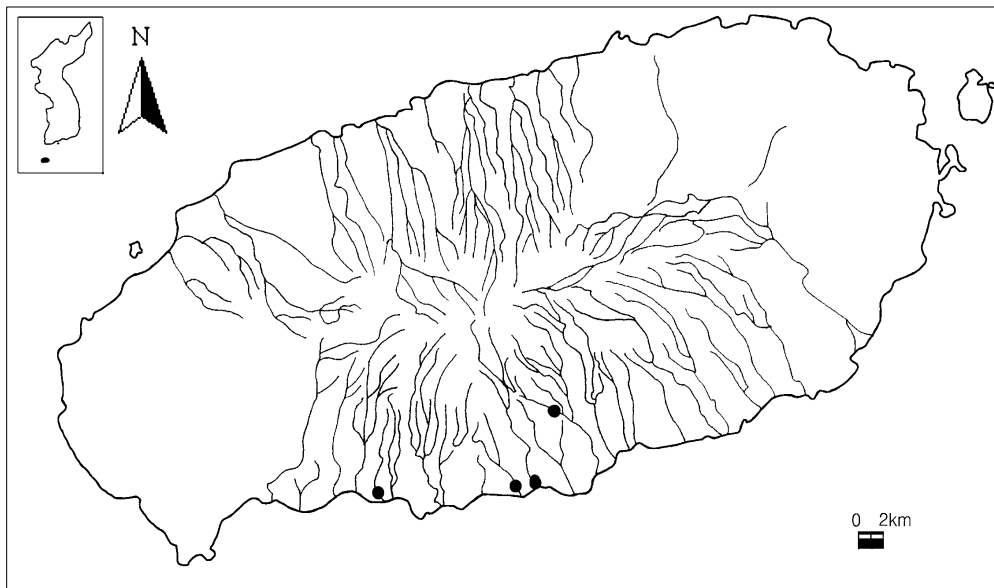


그림 4. 제주도의 하계망과 폭포 위치도

### 3) 한탄강 유역

한탄강 유역의 기반암은 연천계 변성암이며 상부는 화산암류이다. 변성암류의 분포지역은 대체로 높고 험준하며, 화산암 중 현무암이 분포되어 있는 지역은 낮은 구릉지나 저지대를 형성하고 있다. 저지대는 용암류가 계곡을 메워 형성된 것으로 보이며 수평의 현무암층에는 다수의 주상절리가 발달되어 있고 고각의 곡벽과 몇 개의 단상을 이루고 있다. 그 아래 구하상력들이 존재하는데 이 하상층을 백의리층이라고 한다(임만빈, 1984)<sup>12)</sup>(표 3).

표 3. 한탄강 유역의 구성암석

지질시대		지층명	구성암석	관계
제4기	충적세	충적층 사, 역, 점토	전곡현무암 알카리.감각석 현무암	부정합 분출 부정합 관입 및 분출 관입 분출 분출 부정합 관입
	홍적세	백의리층 사, 력(미고질)		
제3기		장탄리현무암	현무암	
백악기		화강반암	불국사화강암	
		응회각력암	유문암질 바탕	
		통현현무암		
		녹색응회암		
		각력암		
จู라기		흑운모화강암섬록암	대보화강암	
선 캄브리아기		연천계	편마암, 편암, 규암, 석회암	

한탄강은 임진강 지류이며 원산-서울 간의 소위 추가령 열곡내에 위치하고 있다. 한탄강 연안의 현무암 대지는 마그마의 열하분출에 의한 것이며, 하곡발달방향은 대체적으로 열곡의 방향과 일치하는 경향을 띤다(김주환, 2000). 한탄강 연안의 현무암 지대의 지형적 특성은 4회 이상에 달하는 용암유출에 의해 결정됐다. 지형은 선지형, 원지형, 차지형으로 구분(전용목,

12) 김주환(1997)에서 재인용.

1980) 되는데 선지형은 백악기말에 형성된 것으로 보이는 열하와 암석분포 차이에 의한 용암유출 이전의 지형이다. 선지형은 차별침식에 의해 형성된 분지지형과 하곡지형이었으나, 현재 한탄강 유로와 유사한 선지형상에 발달한 분지와 하곡의 저지대에는 4회 이상에 달하는 용암유출이 있어 현무암 대지의 새로운 원지형이 형성되어 한탄강 연안의 지형변화를 이루었다. 용암유출은 주로 선한탄강 유로에 따라 이뤄졌다. 지류와의 합류지점에서는 역류되어 영평천에서와 같이 궁평리 부근의 합류점에서 4km 상류지점인 백의리까지 현무암 대지의 원지형이 형성됐다. 차지형은 대지상의 원지형이 유수에 의한 침식으로 인하여 개석을 받아서 구릉지는 steptoe를 이룬다(그림 5).

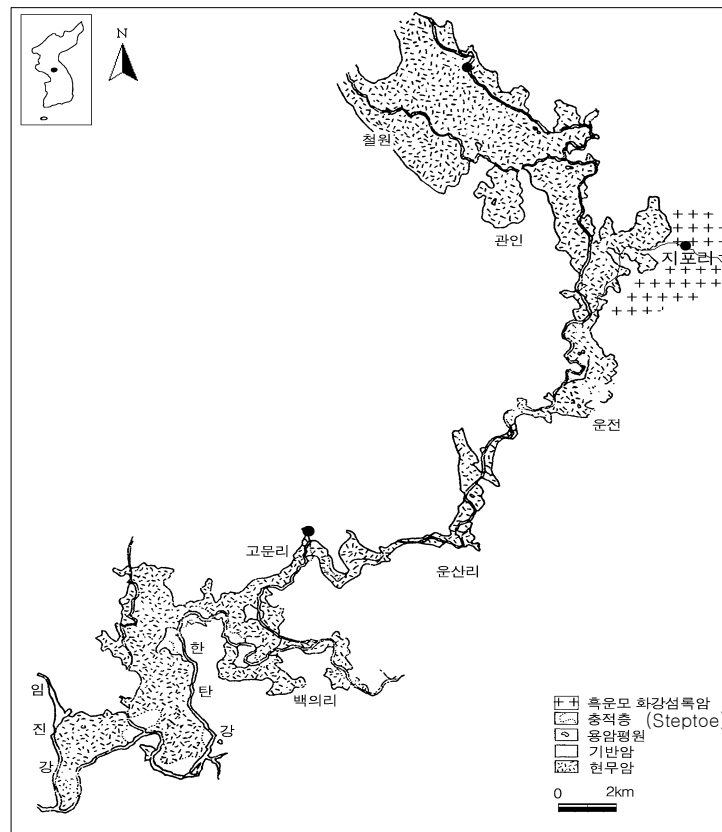


그림 5. 한탄강 유역의 지질분포도

<출처: 전용목, 1980, p.250; 양교석, 1982, p.15 >



## II. 이론적 배경

### 1. 폭포의 정의

폭포는 하천 유로에서 하천 종단면이 급경사인 지점 즉, 높이의 차가 있는 곳에 물이 흐르는 것이다. 하천 종단면 상에서 유량과의 조화를 이룬 지역과 달리 부조화를 이룬 것이라 할 수 있다(Von Egeln, 1942). 폭포의 크기는 ‘유량×높이’로 결정되는데(Ford, 1968), ‘높이’나 ‘유량’에 대한 절대적인 기준이 제시된 경우는 없다.

현재 폭포에 대한 정의는 크게 하천지형학적 발생과 발달과정의 관점에서 정의하는 것과 발달과정을 거친 결과 나타나는 지형적인 형상 중 폭포에 속하는 지형의 종류를 정의하는 것으로 양분된다.

지형학관련 사전에서 정의한 것을 살펴보면 하천지형학적인 발생과 발달과정을 고려하여 정의했으며 동의어인 cascade를 언급하였다. Fairbridge의 지형학사전(Ford, 1968)과 브리태니커 온라인 영문백과사전<sup>13)</sup>(Lustig)은 폭포란 ‘하천의 유로에서 높이의 차가 있는 매우 급한 경사나 대부분 수직적인 낙차가 있는 부분’이라고 정의하였다. cataract는 동의어이고 cascade는 상대적으로 낙차가 작거나 작은 낙차가 연속적인 단(step)으로 이뤄진 것이라 하였다. 자연지리학사전(한국지리정보연구회 엮음, 2004)은 ‘하천의 종단면에서 급격한 경사의 변화, 즉 천이점에 해당하는 수직의 경사를 갖는 부분’이라고 하였다. 한국민족문화대백과사전(김영담)은 ‘강물이 수직적으로 흐르다가 떨어지는 물’이라며, 폭포는 지형의 침식윤회에 따라 유년곡에서 가장 많이 볼 수 있는데 장년곡에서 절정에 이르고, 침식이 더 진행됨에 따라 차츰 후퇴하다가 노년기 지형에서는 퇴화하여 낮아지고 준평원지형에서

13) <http://www.britannica.com/>에서 ‘waterfall’을 검색어로 하였다.

는 사멸하고 만다고 기술하였다.

지형적 유형별로 폭포에 속하는 지형학적 용어를 정의한 경우, 웹사이트<sup>14)</sup>에서 폭포를 표준적으로 묘사하기 위해 Hiker의 어휘를 사용하여 6개의 용어를 제시하였다. waterfall(어떤 방법으로 수직적으로 떨어지거나 미끄러지는 강이나 하천의 정단면), cascade(작은 폭포로, 폭포의 한 부분인 작은 단의 구성), cataract(보통 하천에서 일어나는 아주 강력하거나 높은 폭포), chute(두개의 큰 boulder나 낭떠러지 사이의 좁은 정단면), talus(사면 경사가 60°이거나 더 가파른 거친 바위의 단애의 가파른 정단면), scree(사면 경사가 30°보다 적은 거친 바위 단애의 정단면)를 폭포로 간주하고 정의하였다.

폭포의 특징은 침식의 특징에 의해 결정된다(Lustig, 전계서). 폭포는 하천에서 가장 큰 에너지가 소실하는데 위치해 있기 때문에(Young, 1985) 하식(Stream erosion)작용이 가장 활발하게 일어나는 하천 지형이다. 폭포 침식의 정도는 폭포의 높이, 하상(bed)의 기울기, 유량(discharge), 암석의 구조와 유형에 의해 결정된다. 폭포 침식의 역사를 통해 하천 시스템의 삭박의 역사를 해독하는데 중요한 단서를 찾아낼 수 있다(Young, 1985). 하천의 기반암의 침식의 결과 나타나는 후퇴율을 측정하여 하천에서 삭박의 역사를 해독한 연구에서도(Yuichi and Yukinori, 2003; Philbrick, 1970)알 수 있듯이 폭포의 침식의 정도로 지형발달사를 연구할 수 있다. 하식작용은 두부침식을 진행하고 두부침식은 하상을 깎고 평형하천을 만든다. 이러한 지형형성과정의 반복의 결과, 폭포는 지사학적 시간에서 결국 사라지게 되는 일시적인 지형 중 하나이다. 정규침식유희설에 적용시켜보면 폭포는 천이점(Knick point)에 해당하며 유년기에 일시적인 현상으로 치부되기도 한다.

---

14) <http://www.aria-database.com/waterfall/>의 'waterfall classification' 항목에서 제시된 용어를 정리하였다.

## 2. 폭포의 하천지형학적 분류

폭포가 위치한 기반암 하도는 다양한 경사도를 보이므로(Wohl, 2001) 경사가 다른 하도보다 급하며(Wohl, 2000), 하상물질은 암석, 하상패턴은 불규칙적, 퇴적물의 공급량보다 이동량이 크며 그 값이 하천 구간에서 최대를 이룬다(Montgomery et al., 1996; Montgomery, 1997). 또한 유수의 방향과 평행한 하도의 길이/하도너비의 비율이 1~10배 사이에 있는 하천단위이다(Grant et al. 1990). 폭포는 하천지형학에서 소규모 급경사 산지하천의 기반암하상(bedrock bed)에 존재한다. 산지하천은 충적하천과는 다른 패턴이 나타나는데(Wohl et al., 2005) ‘폭포’라는 산지하천지형은 하나의 하천구간(channel reach)이 아니라 하천단위(channel unit)<sup>15)</sup>라 할 수 있다. 용암이 분출되어 하천유로를 막아 형성된 폭포가 경우가 아닌 이상 대부분의 폭포는 산지하천의 기반암하상에 위치하고 있다.

하천은 크게 경사가 급한 소규모 하천인 산지하천과 경사가 완만하고 대규모 하천인 충적하천으로 나뉜다. 하천구간(channel reach)을 분류하는 방법은 하상형태에 따른 분류, 하상물질에 따른 분류, 하천지형형성에 관여하는 변수들의 조합 등으로 분류하는 방법이 있다(양희경, 2003).

하상형태로 하천지형을 분류하면 직류하천, 사행하천, 망류하천으로 나뉘고, 하상물질로 분류하면 기반암하상(bedrock-bed), 자갈하상(gravel-bed), 사질하상(sand-bed)로 구분하며(Knighton, 1998), 이 중에서 기반암 하도(bedrock channel)는 하천의 상류에서 국지적으로 나타난다. 하천지형형성에 관여하는 변수들의 조합으로 분류하는 이 방법(Rosgen, 1994)은 분류방법이 복잡하며, 분류결과로 제시되는 하도구간 유형도 수십 개에 달한다.

폭포지형이 출현하는 산지하천에 대한 분류는 Grant et al.(1990), Mont

---

15) Grnat et al.(1990)이 하천단위(channel unit)개념을 처음 사용했으며 관련 내용은 20쪽에 상술하였다.

gomery(1997), Wohl(2001) 등에 의해 이뤄졌다. 각 연구에서 폭포에 대한 직접적인 언급은 없었으나 Wohl은 천이점(knick point)을, Grant et al.과 Montgomery는 cascade와 스텝-풀(step-pool)을 분류항목에 넣었다.

Grant et al.(1990)은 처음으로 소규모 경사가 급한 하도에서 하천의 길이가 하천폭의 1배에서 몇 배가 되는 하천 단위(channel unit)의 개념을 사용하여 하천지형을 소(pools), 여울(riffles), 급류(rapids), 폭포(cascades), 스텝(steps) 등으로 분류하였다. 하천단위개념으로 하천지형의 형태에서의 세로/가로 비율이 1~10배인 경우에 cascade와 기반암 스텝-풀(step-pool)이라고 한다. cascade는 boulder cascade와 bedrock cascade로 나뉘는데 본 논문에서는 기반암 하도상에 나타나는 bedrock cascade가 연구 대상이다(표 4). 여울-소(riffle-pool)는 경사도가 2% 미만일 때, cascade는 2%~4%에서 스텝(step)은 4%~40%에서 잘 형성된다.

Montgomery et al.(1997)는 산지하천을 colluvial, alluvial, bedrock으로 나누어 지형적인 구간에 따른 특성을 밝혔다. 경사도, 입자크기, 압력, 원마도 범위에 따라 각기 다른 하천지형을 관찰하였다. 경사가 급할수록 하상물질 이동력이 큼을 알아냈으며 스텝소의 너비/길이 비율이 1~4배라는 규칙성을 밝혔다.

Montgomery가 말하는 cascade는 boulder로 이뤄진 것으로서 기반암 하도에 있는 것이 아니기에 본 연구에서 살펴보고자 하는 폭포와는 거리가 멀다. 다른 하도에 비해 충적층이 적고 경사가 더 급하며 계곡에서 발생하는 것으로서 같은 유역분지 안에서도 가장 큰 사면경사도를 가진 기반암 하도는 그래서 colluvial 구간과 alluvial 구간보다 하천력이 크며, 기저의 압력도 크다(Howard and Kerby, 1983; Montgomery et al.,1996)<sup>16)</sup>. 또한 하각작용의 연속체는 하도경사, 유량, 침전물 공급, 기반암 지질, 요란(지층

---

16) Montgomery(1997)에서 재인용.

변형을 가져오는 운동)역사 등에 의해 조절된다고 했다(표 5).

Wohl(2001)은 유역단위의 수문과 하상물질의 이질성에 따라 기반암하도 지형을 분류하였다. 수력에 의해 질주하는 물과 하상물질의 저항력은 정량적인 균형을 이루고 있다면서, 하상경사도가 일정한 경우와 다양한 경우에 나타나는 하천지형을 분류하였다(표 6).

표 4. 기존연구와 본 연구에서의 boulder 하상에서 하상형태기술에 대한 명칭비교

유수의 방향과 평행하는 단위의 길이 /하도 너비	이 논문에서의 학술명	다른 전문용어
$10^{-2}$ - $10^0$	Particle	Boulder clusters
$10^{-1}$ - $10^0$	Subunit Within-unit steps	Step-pool morphology Chute-and-pool topography Transverse ribs "Minor" steps Boulder steps Rock steps
$10^0$ - $10^1$	Channel unit Pools Riffles Cascades Isolated steps Log steps Boulder steps Bedrock steps	Step-pool sequences Transverse rib sequences Stepped-bed morphology Regular Transitional Rapid segments Riffle steps "Major" steps Habitat units Pools Glides Riffles Cascades Swells
$10^2$ - $10^3$	Reach Constrained Earthflow Bedrock Unconstrained	

<출처: Grant et al., 1990, p.341>

표 5. 각 하천유형의 특징적인 형상

하도구간	Colluvial	Dune ripple	Pool riffle	Plane bed	Step-pool	Cascade	Bedrock
	Colluvial	alluvial					Bedrock
	공급량 > 이동량 ←→				공급량 < 이동량		
Typical bed material	variable	sand	gravel	gravel-cobble	Cobble-boulder	boulder	Rock
bedform pattern	variable	Multilayered	laterally oscillatory	featureless	vertically oscillatory	random	irregular
Dominant roughness elements	Grains	Sinuosity, bedforms(dune, ripples, bars) grain, banks	bedforms (bars, pools), grains, sinuosity, banks	Grains, banks	bedforms (steps, pools), grains, banks	Grains, banks	boundries (bed and banks)
Doninant sediment sources	Hillslope, debris flow	fluvial, bank failure	fluvial, bank failure	Fluvial, bank failure, debris flows	Fluvial, hillslope, debris flows	Fluvial, hillslope, debris flows	Fluvial, hillslope, debris flows
sediment element	bed	overbank, bedforms	overbank, bedforms	overbank	bedforms	lee and stoss sides of flow obstructions	Pockets
Typical confinement	confined	unconfined	unconfined	variable	confined	confined	confined
Typical pool spacing/channel width	unknown	5-7	5-7	none	1-4	<1	variable

<출처: Montgomery, 1997, p.597>

표 6. 기반암 하도의 지형학적인 분류

복수 유로		단일 유로	
		Sinuous planform	Non-Sinuous planform
anastomosing		meandering	straigh-walls Undulating walls
Uniform bed gradient			variable bed gradient
			Pool-riffle/rapid step-pool knickpoints
uniform across cross section pland bed	Differential across cross section inner channel		

<출처: Wohl, 2001, p.1206>

### 3. 폭포의 유형분류

폭포의 유형분류는 성인과 발달과정에 따라 나타나는 지형적 형상을 보고 하는 경우가 많다. 크게 세 가지 방법으로 분류하는데 가장 많이 사용한 방법은 폭포의 크기, 지질적인 위치, 구조, 급경사 모양으로 폭포를 구분한 것이다. 두 번째 방법은 폭포의 층서와 층서대면, 지형적인 외형 등을 종합하여 계량적인 수치를 측정하여 폭포를 분류한 경우다. 마지막 방법은 관광 관련 웹사이트에서 지형적인 형상 위주로 폭포 용어를 정의하여 분류하기도 하였다.

분류방법 중 첫 번째 방법은 폭포의 크기, 지질적인 위치, 구조, 급경사 모양 등 폭포를 성인별로 분류하는 방법이다(Von Engeln, 1942; Ford, 1968; Young, 1985; Lusting, 브리태니커 온라인 영문백과사전). 이 경우는 폭포의 발생지역에 따라 폭포의 성인을 알 수 있고 지질학적이고 물리적인 요소가 폭포 형성에 더 큰 영향을 미친다는 관점으로, 세가지로 분류한다.

첫째, 침식폭포 가운데 침식에 대한 저항력에 의해 생긴 폭포이다. 이러한 폭포는 크게 두 가지로 나뉘는데 하나는 수평이거나 경사가 완만한 지역에 발생하는 폭포이며, 나이아가라폭포가 대표적 예인 모암(冒岩)폭포(Cap-rock fall)와 암괴(block)가 매우 큰 경우 후퇴를 막아 계단을 형성하는 계단폭포(Step fall)가 있다. 또 다른 하나는 수직구조(Vertical rock bars)가 있는 경우 발생하는 폭포로 화산재와 용암의 연약구조와 수직구조가 교차해서 형성된 옐로우스톤의 Great falls가 그 예이다.

둘째, 하천중단면의 자연 부조화 현상으로 인해 형성되는 폭포이다. 침식폭포 가운데 침식저항력 외 단층선, 빙하에 의한 현곡, 후퇴하는 해안절벽 위의 폭포, 용암 분출에 의한 하천의 막힘 등에 의해 형성된다.

셋째, 카르스트 지형 등에서 형성되는 방해석의 결정화로 발생하는 폭포 (self-perpetuating)이다. 림스톤(limestone)폭포는 12m도 보고 된다.

이 분류과정에서 Von Engel(1942)은 모암 폭포(Cap-rock Falls)에 대해 더 세부적으로 살펴봤다. 폭포가 잘 형성되어 폭포의 정상부가 빠르게 후퇴하는 것, 수량이 적은 지역에서 폭포 아래 부분이 습해서 폭포 밑에 넓은 원형극장상의 웅덩이가 만들어지는 것, 마지막으로 암층의 저항성이 비슷하고 유수량이 적어서 폭포가 형성되지 않고 능보(稜堡)같이 하단이 돌출을 이루는 폭포 유형이 있다고 하였다. Young(1985)는 당시까지 Von Engel(1942) 이전에 40년이 넘는 기간 동안 폭포의 일반화된 모델로 인식된 Gilbert의 모암(冒岩)폭포(Cap-rock waterfall)는 하나의 유형뿐이라면서 그가 말한 ‘하방침식모델(undercutting)’에 적용될 수 없는 돌출부가 침식(buttrissing)되는 폭포 형태에 관한 연구를 진행하여 새롭게 폭포의 형태를 서술하였다.

분류방법 중 두 번째 방법은 Alexandrowicz(1994)가 시도한 방법으로, 사암과 셰일 등으로 이뤄진 퇴적암지역인 폴란드 Outer Carpathians에 존재하는 40여개의 폭포를 층서의 척도, 층서대면의 척도, 지형적 특징의 척도로 분류하는 것이다. 폭포의 특징은 기반암의 모양, 층의 암층서학적 연속적인 형태, 기반의 하상대면위치, 강이나 하천의 경로, 하각작용의 정도와 두부침식의 정도에 의해 결정된다고 하였다. 4개의 층서(사암, 이암, 점토층의 두께에 따라 나눔), 5개의 층서대면의 척도(수평, 수직, 하류 기반, 상류 기반, 지층과 평행)로 총 20개의 유형을 만들어서 적용시켰으며 이들을 최종적으로 지형적 특징에 따라 수직형, 하류경사감입형(downstream-inclined), 돌출형(overhanging ones)으로 분류하기도 하였다.

마지막 분류방법은 폭포의 성인이나 발달과정의 결과 지형적인 경관으로 나타나는 폭포유형을 분류한 경우로 두개의 인터넷 사이트에 제시됐다.

첫 번째 사이트에서<sup>17)</sup> Cascading Fall(몇 개의 단으로 이뤄짐), Ledge Falls(단애의 가장자리의 흐름의 끝에서 형성되는 것으로 수량이 적고 하류로는 오목한 모양이고 상류로는 볼록하거나 직선형태), Overhanging ledge Falls(가장 인상적인 폭포로, 하천에 의해 흐르는 선반 정상에 단애벽의 나머지에서 밖으로 돌기할 때 형성), Slide Falls(하천에 의해 가파르게 경사진 바위 단애면 아래쪽으로 형성된 것이며, 가장 매력이 없음), Parallel Falls(나란하게 떨어지는 두개의 폭포), Multi-cascading Falls(여러개의 평행한 폭포가 작은 단을 이루며 아래쪽으로 유수가 흐르는 것), Fan Falls(좁은 폭포가 폭포의 바닥에 부채꼴과 같은 대형이 안에서 밖으로 펼쳐질 때 만들어지는 형태의 폭포), Staircase Falls(하천안에서 가장자리를 넘어 작고 많은 계단의 형상을 형성하는 폭포), Combination Falls(한개 이상 유형의 특징을 포함하는 폭포로 그들이 한개 이상 단순한 특징의 구성되기 때문에 폭포의 대다수는 이 종류임) 총 9개의 유형을 기술했다.

두 번째 사이트는<sup>18)</sup> Block(폭포의 높이보다 너비가 더 큼), Cascade(작은 단(step)의 연속체이며 경사면 표면이 거침), Curtain(폭포의 높이가 너비보다 높음), Fan(물이 떨어지면서 유수가 접하는 면적이 점차 증가하여 상부보다 하단의 수량이 많음), Horsetail(유수량이 일정하게 유지되며 기반암과 일정한 면을 접하고 있음), Plunge(가장 진부한 폭포이며 수직으로 물이 떨어짐, 거대하고 수직적인 폭포), Punchbowl(좁은 너비로 압축되는 곳에서 바깥쪽으로 힘차게 물이 나가서 하류에 큰 pool이 있음), Segmented(절벽으로 떨어지기 전에 하천이 두개 이상의 수로로 갈라짐), Slide(cascade와 비슷하나 더 부드럽게 내려가고 기반암이 완만함), Tiered(물줄기가 두개 이상을 이루나 하나의 폭포로 보임) 등 총 10개의 유형을 제시했다.

17) <http://www.aria-database.com/waterfall/> 'waterfall classification'에 제시된 용어를 정리하였다.

18) <http://www.world-waterfalls.com/help.php> 'waterfall classification'에 제시된 용어를 정리하였다.

### Ⅲ. 폭포의 분류 방법

설악산의 화강암이 지상으로 용기할 때 발생한 X, Y, Z 축의 절리계와 암질의 차이로 다양한 기암이 형성되고, 절리방향에 따르는 차별침식으로 폭포, 구혈, 급류, 소 등의 하천지형도 많이 발생한다. 용암분출시 발달하는 수직절리로 인해 제주도과 한탄강유역의 폭포는 수직형을 띤다.

폭포 침식의 정도는 폭포의 높이, 하상(bed)의 기울기, 유량(discharge), 암석의 구조와 유형에 의해 결정된다. 즉, 폭포의 특징을 결정하는 요인은 기반암의 모양, 층의 암층서학적인 연속적 상태, 하상대면상태, 강이나 하천의 경로, 하각작용의 정도와 두부침식의 정도에 따라 결정되는(Alexandrowicz, 1994) 것이다. 그의 연구에서 기반암의 모양과 층의 암층서학적인 연속적 상태는 퇴적암의 암석학적 특징을 고려한 항목이다. 퇴적암 지역의 폭포의 형성원인은 퇴적암 내의 암석의 연암차이에 의한 것이다. 본연구의 대상인 폭포가 위치한 암석은 화강암과 현무암이기 때문에 새로운 분류방법이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 세 가지 범주로 폭포분류 항목을 선정하였다. 첫째, 폭포의 침식요인으로 절리의 방향과 폭포사면의 경사도를 선정하여 분류한다. 두 번째, 침식의 특징적인 유형을 통해 폭포를 분류한다. 세 번째, 형성요인과 침식의 결과 지형적으로 나타나는 형상에 따라 분류를 진행한다.

최종적으로 사례지역을 연구할 때 사용할 일괄적인 분류기준은 침식유형을 제외한 형성원인과 지형적인 형상을 기준으로 하였다. 발달과정상에서 나타나는 침식유형은 결과적으로 지형적인 형상으로 나타나기 때문에 침식유형은 각 지역의 폭포를 분류할 때만 적용하기로 한다.

## 1. 형성원인에 따른 분류

### 1) 절리발달에 의해 형성된 폭포

절리(joint)가 많으면 상대적으로 절리가 적은 암석에 비해 약하다는 것은 주지의 사실이다. 절리가 많으면 상대적으로 적은 암석에 비해 유수에 대한 저항력이 약하고 절리를 따라 흐르는 물에 의해 침식이 진행된다. 연구대상으로 선정한 폭포는 크게 6가지 형태로 나타난다.

· **사면에 발달한 절리계를 따른 유로 변경형:** 사면을 따라 연속적으로 발달한 절리계로 인해 유수의 방향이 바뀌는 형태이다. 방향이 서로 다른 절리와 절리 사이에 담(潭)을 이룬 경우도 있다.

· **판상절리부분의 분리에 의한 돌출형:** 판상절리 부분에 유수의 힘이 가해지면 상대적으로 약한 판상절리 부분이 분리되고 정단면상으로 중간이 돌출된 형태를 보인다.

· **굴식(plucking)작용에 의한 돌출형:** 폭포하단 부분에 절리가 있는 상태에서 유수의 힘에 가해지면 굴식되고, 상단이 돌출된다.

· **수직절리에 의한 수직형:** 수직절리가 발달하여 수직형을 이룬다.

· **절리면을 따른 암괴의 분리에 의한 계단형:** 절리에 의해 기반암사면의 중간부분의 암괴가 분리되어 계단형을 이루는 형태다.

· **절리에 의해 분리된 암괴가 유로를 막아 형성된 암괴형:** 하나였던 기반암이 절리면을 따라 침식되고 분리된 암괴가 하천의 유로를 막아 단차를 만들어서 형성됐다. 이 경우 암괴와 암괴 사이로 물이 여러 갈래로 흐르면서 하천력(stream power)이 분산되고 하천유로의 침식이 진행된다. 물이 암석 위로 흐르진 않지만 정단면상으로는 돌출형이다.

## 2) 하상 경사도에 의해 발달되는 폭포

하천침식력에 영향을 주는 요인으로 하상경사도와 하천력(stream power)(Seidl et al., 1994)을 들 수 있다. 하천지형의 유형을 결정하는 것은 하상경사도이며 이는 하천을 구분·집단화하는데 실용적이다(Chartrand, 2000; Halwas and Church, 2002; Wooldridge and Hickin, 2002). 폭포는 지사학적으로 결국 사라지게 되는 천이점(Knick point)이라는 지적도 있었듯이 침식을 지속적으로 받으면서 하천사면 경사도는 완만해지고, 평형을 이루게 된다. 사면경사도는 현재와 과거, 미래를 이어주는 중요한 지표가 된다. 지속적인 관찰을 통해 침식률을 살펴볼 수 있기 때문이다.

실제로 산지하천 단위를 분류하는데 경사도가 적용되었다. 여울-소(riffle-pool)는 경사가 2% 미만인 경우, cascade는 2~4%에서 스텝(step)은 4~40%에서 보이는 하천지형이다(Grant et al., 1990). 기반암 cascade는 암석이 노출되어 있고 경사도가 49%(26°)인 지역에서 나타나는 지형이라는 연구결과도 나왔다(Halwas and Church, 2002). 공통적으로는 경사도 2% 이상에서 cascade와 스텝(step)지형이 나타나지만 그 안에서 연구지역에 따라 경사도는 변이를 갖는다.

Alexandrowicz(1994)가 시도한 경사도와 유수의 흐름을 고려한 분류는 퇴적암의 층서배열형태와 유수의 흐름이 결합되었기 때문에 가능한 것이므로 연구대상이 화강암과 현무암인 본 논문에서는 경사도만을 적용했다.

- 수평이거나 수평에 가까운 사면: 20° 이하의 경사도
- 하류기반형 사면: 20~60°
- 수직이거나 수직에 가까운 사면: 60° 이상

## 2. 침식의 유형에 따른 분류

결국 폭포의 특징은 절리와 경사도, 하천력에 의한 침식의 특징에 의해 결정된다. 이들 요인이 종합해서 침식을 진행할 때 침식의 유형은 다른 양상을 보인다. Gardner(1983)는 천이점(Knick point)의 두부침식의 유형을 살펴보기 위해 동질의 물질로 천이점의 형상을 재현하여 실험을 시행했다. 실험결과 천이점의 두부침식의 유형은 3가지로 나뉜다(그림 7).

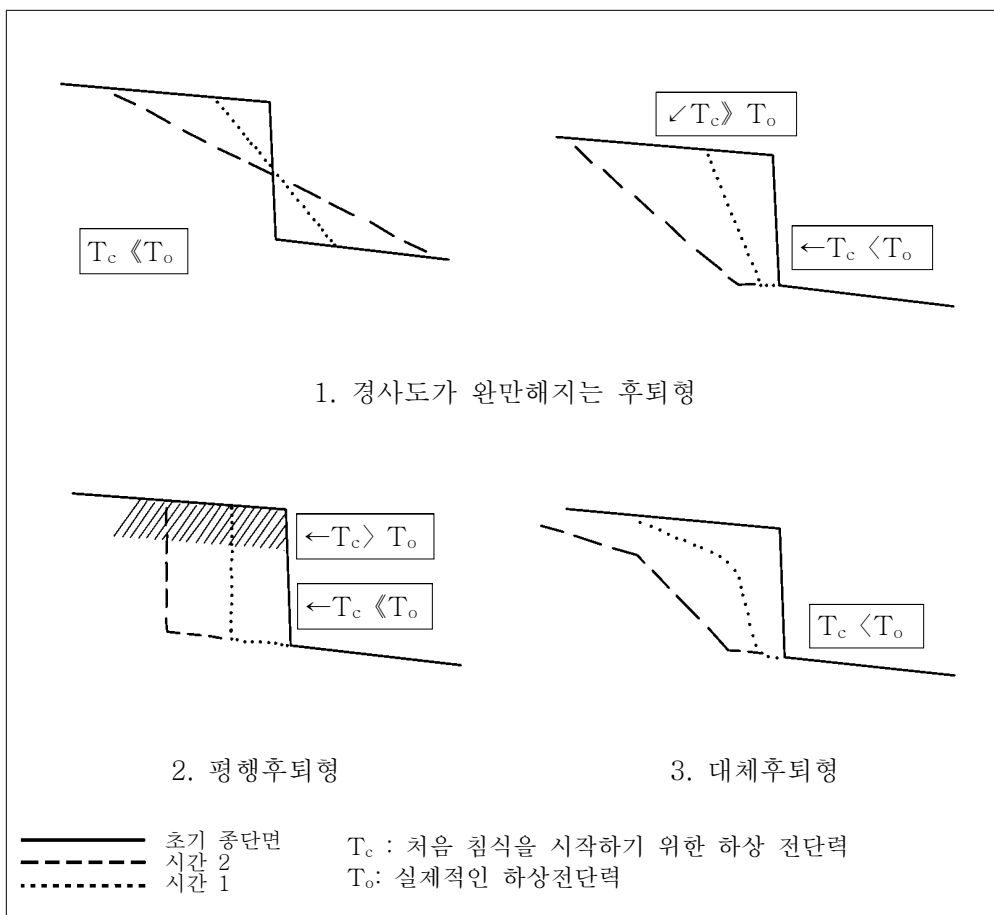


그림 7. 천이점의 침식유형

<출처: Gardner, 1983, p.671>

실제 침식율을 구할 수는 없지만 절리계의 형태와 경사도를 통해 침식의 유형을 짐작할 수 있으리라 판단된다. 천이점이 상류에서 하류로 꺾어지는 부분을 천이점 lip이라고 하며 이 부분에 오면 하도너비가 줄어들고 속도가 증가하고, 하상전단압력(bottom shear stress)가 증가하여 침식력이 최고에 달한다(그림 8). 이 실험에서 기반암에서 침식이 진행될 때 사면의 경사도가 완만하게 후퇴하는 것과 사면 경사도의 변화 없이 평행후퇴하는 것 외에 침식되면서 사면의 경사도가 완만해지고 하상의 높이도 낮아지는 ‘대체후퇴’의 개념을 정립했다.

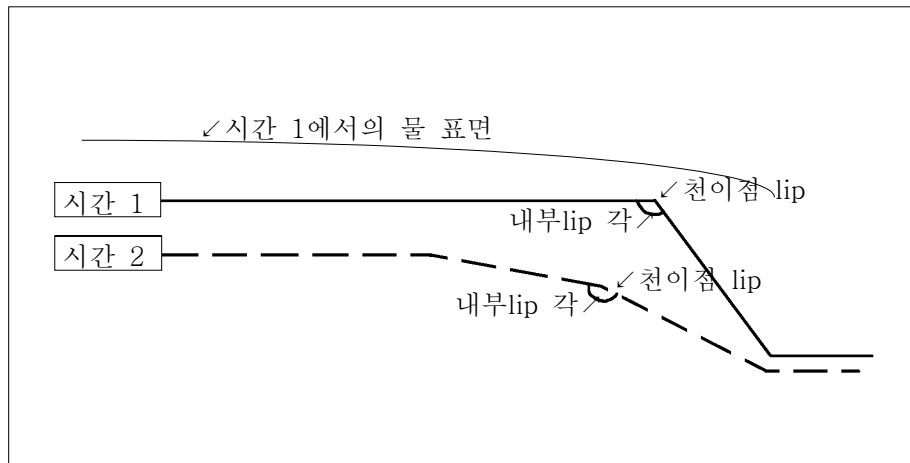


그림 8. 천이점의 형태  
<출처: Gardner, 1983, p.664>

- **경사도가 완만해지는 후퇴형**: 하상의 높이의 변화 없이 사면 경사도만 완만해지는 침식형태
- **평행후퇴형**: 사면 경사도와 하상의 높이의 변화 없이 평행하게 뒤로 후퇴하는 침식형태
- **대체후퇴형**: 뒤로 후퇴하면서 천이점에서 상단의 각을 이루는 부분이 완만해지고 전체적인 하상의 높이도 낮아지는 침식형태

### 3. 지형적 형상에 따른 분류

2장 이론적 배경에서 폭포를 분류할 때 지형적인 형상으로 나눈 것을 참고하여 분류를 시도하였다. 지형적 형상은 크게 하류경사형, 계단형, 돌출형, 수직형으로 구분할 수 있으며 이들은 세부적으로 여러 가지 유형을 나타낸다.

- **하류경사형**: 하류경사형은 가장 일반적인 형태의 폭포이며 침식이 진행될 때 절리발달이 미약하여 높이와 경사도가 점차 낮아지는 형태이다. 하위단위에 속하는 형태의 폭포로 경사도가 비교적 낮은 화강암지역에서 보이는 ‘슬라이드 폭포’와 하류를 향해 경사진 절리계를 따라 유로를 변경하며 흐르는 ‘유로 변경형 폭포’을 들 수 있다.
- **계단형**: 절리에 의해 암괴가 빠져나가서 발달된 것이며 본 논문에서는 크게 ‘cascade 폭포’가 한 종류이다.
- **돌출형**: 절리가 떨어져나가거나 굴식이나 마식작용으로 인해 측면에서 보면 폭포의 하단보다 상단이 돌출된 형태인 것이다. 절리부분을 따라 암괴가 형성되어 암괴사이로 물이 흘러 암석이 돌출된 폭포도 있다. ‘돌출선반형 폭포’, ‘원형극장형 폭포’, ‘암괴형 폭포’가 있다.
- **수직형**: 수직절리의 발달로 인해 수직형으로 나타나며 하위단위로 분류할만한 형태는 없다.

#### 4. 경사도와 지형적 형상의 조합으로 개발한 분류

폭포의 경사도를 크게 수평형(20°이하), 하류경사형(20~60°), 수직형(60°이상)으로 간주하고 각각의 경사도와 지형적 형상이 각각 하류경사형인 경우, 계단형인 경우, 돌출형인 경우를 최대한 일반화 시켜 아래와 같이 유형분류 방법을 개발하였다(그림 9).

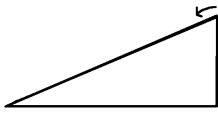
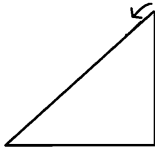
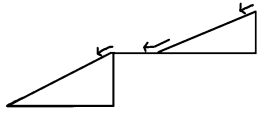
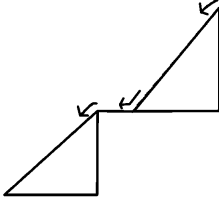
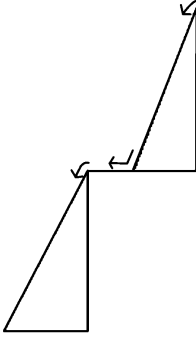
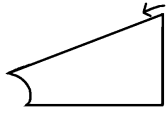
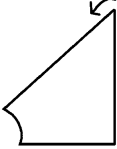
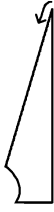
경사도 지형적 형상	(A) 수평 (20°이하)	(B) 하류경사 (20~60°)	(C) 수직 (60°이상)
	(1) 하류경사형		
	1/A	1/B	1/C
(2) 계단형			
	2/A	2/B	2/C
(3) 돌출형			
	3/A	3/B	3/C

그림 9. 경사도와 지형적 형상의 조합으로 개발한 폭포유형 분류

#### IV. 사례지역 연구

사례지역은 설악산의 명칭 있는 폭포 21개와 이름 없는 폭포 2개, 제주도 폭포 4개, 한탄강유역의 폭포 3개이다. 설악산의 이름 없는 폭포 2개를 제외하고 이들은 ‘폭포’로 불리고 있었다. 2장 이론적 배경 중 폭포의 정의에서 서술하였듯이 폭포로 명명되는 것은 ‘하천 종단면이 급경사인 지점’이다. 지금까지 ‘급경사’의 절대적인 기준에 대해 이론적으로 언급된 바 없지만 step지형과 cascade지형은 경사도가 2% 이상(Grant et al., 1990, Montgomery et al., 1997, Whol, 2001)에서 나타난다는 이론적 배경을 기반으로 본 연구를 진행하였다. 조사결과 가장 낮은 경사도를 보이는 폭포는 설악산 오련폭포가 20°로 2%(약 12°)를 초과하였다.

폭포는 하천단위(channel unit)의 지형으로서 ‘유수의 방향과 평행하는 단위의 길이/하도너비’의 값이 1~10의 값(Grant et al., 1990)을 갖는다. 실제 설악산 사중폭포의 경우 하도의 너비(유수의 흔적이 있는 하단의 너비 측정)가 약 3m이고, 상단(上段)사면은 26.6m, 하단(下段)사면은 11.6m로, 하천단위 값은 각각 ‘약 9’와 ‘약 4’이다. 이 수치는 하천단위에 적합하다. 설악산 주전폭포의 경우도 상단(上段)은 사면은 19.7m, 하단사면은 8.6m, 하도너비가 약 4m, 하천단위 값은 ‘약 5’와 ‘약 2’로 연구대상으로 삼은 폭포는 하천단위에 속한다. 그러나 폭포는 산지하천 중에서 상류에 위치해 있기 때문에 유수량이 많을 때와 적을 때의 편차가 심하여 하도너비를 선정하기가 모호하다. 식생이 자라나지 않고 암반으로 드러나 있는 기반암 자체를 하도너비로 간주하기에도 오차가 발생할 여지가 많다. 본 연구에서는 사례로 두개의 폭포만을 조사해 봤지만 앞으로 본격적인 연구가 필요하다.

분석 대상이 되는 폭포의 위치는 다음(그림 10, 11, 12)과 같고 그 특징은 표(표 7)와 같다. 폭포번호는 임의대로 1~30번까지 붙였으며 표에 제시

된 유형은 앞으로 기술할 ‘경사도와 지형적 형상의 조합으로 개발한 폭포 분류’를 통해 얻어진 결과이다. 폭포 높이는 사면의 길이가 아닌 전체 고도 차이를 일컬으며 폭포가 위치한 고도는 1:5000지형도와 1:25000지형도를 통해 구하였다. 구성암석은 지질도에 폭포위치를 표시하여 파악할 수 있었다. 그 외의 값은 직접 측정하여 구한 값이다.

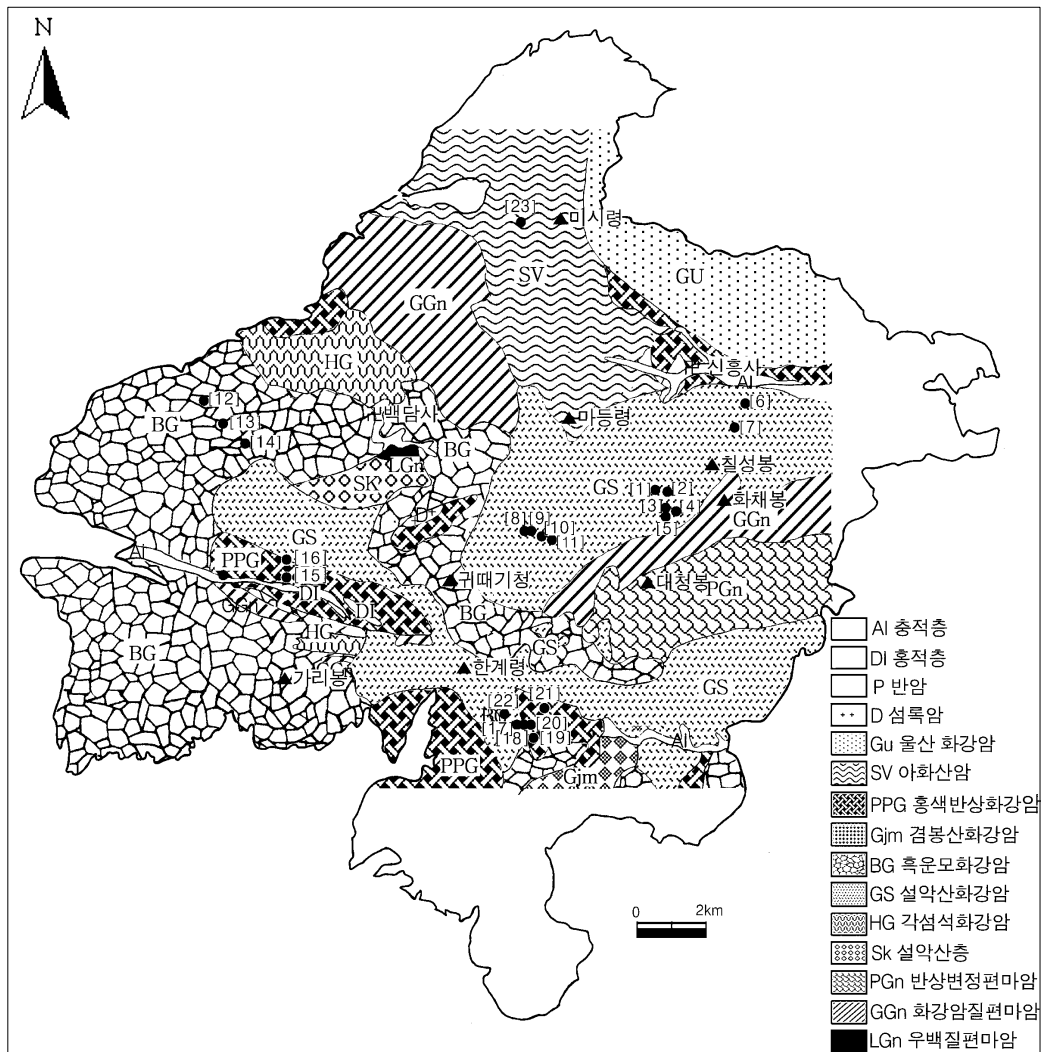


그림 10. 설악산 기반암과 폭포의 분포도 [폭포번호: 1~23]

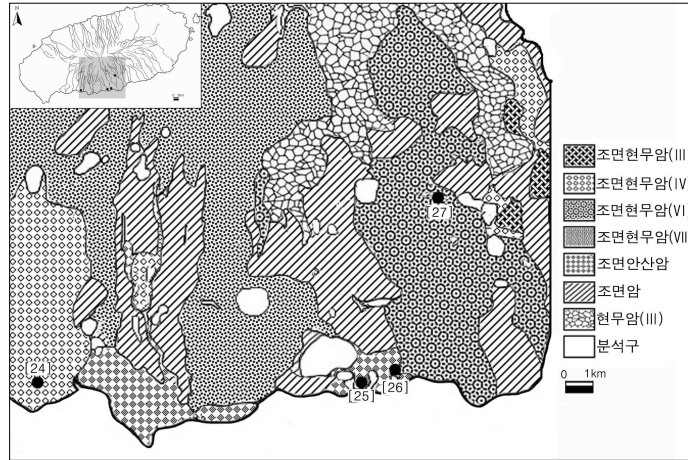


그림 11. 제주도 폭포의 분포도 [폭포번호: 24~27]

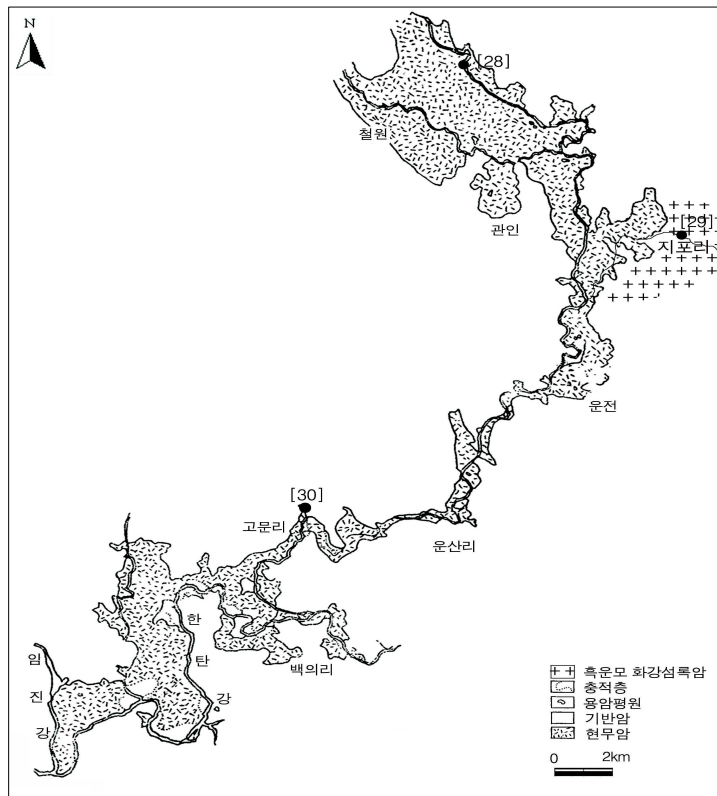


그림 12. 한탄강 유역 폭포의 분포도 [폭포번호: 28~30]

표 7. 연구대상 폭포의 특징

위치	번호	폭포명	하천명	유형	폭포 높이	폭포 경사도	계곡의 주방향	유수 방향	폭포위치 고도	폭호 너비 <sup>19)</sup>	구성 암석	
설악산	1	이름 없음	천불동계곡	1/B	9.5	37	SW 40°	SE 54°	595	12	설악산화강암	
	2	오련폭포		1/A	27	20	SW 40°	SE 60°	598	-	설악산화강암	
	3	양폭포		1/B	12.6	52	SE 20°	WE	691	12	설악산화강암	
	4	음폭포		1/B	4	47	SE 38°	SE 38°	691	3	설악산화강암	
	5	천당폭포		1/C	10	63.5	SW 13°	SN	773	12	설악산화강암	
	6	육담폭포	토왕골	1/A	20	18	SE 50°	SE 30°	250	-	설악산화강암	
	7	비룡폭포		1/B	16	44	SW 14°	SE 34°	370	16	설악산화강암	
	8	용손폭포	수림동계곡	1/B	16.6	29	EW	SW 20°	755	20	설악산화강암	
	9	용아폭포		1/B	7	67	SN	SN	853	18	설악산화강암	
	10	쌍용폭포 <sup>20)</sup>		좌	1/B	22	41.5	EW	EW	864	18	설악산화강암
				우	1/B	75	35		SW 30°			
	11	양폭포	1/B	10.2	35	SN	WE	900	14	설악산화강암		
	12	응봉폭포	십이선녀탕계곡	1/B	13	47	SE 40°	SE 40°	860	16	흑운모화강암	
	13	이름 없음		1/B	8	45	SE 20°	SE 20°	900	10	흑운모화강암	
	14	십이선녀탕		3/B	23	46	SN	SW 30°	935	20	흑운모화강암	
	15	사중폭포	한계천지류	2/B	21	28	SN	SN	515	4	홍색반상화강암	
	16	대승폭포		1/C	89	70	SN	EW	740	-	홍색반상화강암	
	17	무명폭포	십이담계곡	1/B	10.8	30	SE 30°	EW	790	11	홍색반상화강암	
	18	등선폭포		1/B	19.7	49	EW	EW	750	1	설악산화강암	
	19	십이폭포		1/B	22	22	EW	SW 20° SW 40° SW 20°	540	-	홍색반상화강암	
	20	주전폭포	2/B	19	26	SE 70°	SE 50°	500	10	홍색반상화강암		
	21	용소폭포	3/B	14	30	SW 60°	SW 30°	540	16	홍색반상화강암		
	22	여심폭포	흘림골	1/B	25.6	59	SE 46° SW 40°	SE 14°	880	6	설악산화강암	
23	도적폭포	북천지류	1/B	14	56	SN	SE 30°	650	18	아화산암		
제주도	24	천계연폭포 <sup>21)</sup>	색달천	2/C	27	90	EW	SW 60° NE 60°	63(1단) 58(2단) 36(3단)	-	조면현무암	
	25	천지연폭포	외천	3/C	20	100	SE 40°	SN	25	70	조면안산암	
	26	정방폭포	동홍천	3/C	23	90	SN	SN	25	14	조면안산암	
	27	돈내코폭포	영천	3/C	8	100	SW 40°	SN	240	40	조면암	
한탄강	28	직탕폭포	한탄강	1/C	4	80	SN	SN	160	-	현무암	
	29	삼부연폭포	용화천	1/B	25	40	SN	EW	200	40	흑운모화강섬록암	
	30	제인폭포	한탄강	3/C	18.5	115	SW40°	SW40°	120	50	현무암	

19) 폭호가 없는 것과 폭호너비를 측정할 수 없는 것은 '-'로 표시하였다.

20) 쌍용폭포는 좌, 우 두개의 폭포의 특징이 다르기 때문에 앞으로 분석할 빈도수에서는 두개의 폭포로 간주하고 각각 해당되는 특징에 포함되었다.

21) 측정이 불가능하여 1단과 3단의 고도차를 높이로 하였고 경사도는 육안으로 파악하였다.

폭포의 특징을 조사한 결과에서 높이의 경우(그림 13), 10~20m에 해당하는 폭포가 13개로 가장 많은 빈도를 보였으며 9개의 폭포는 20~30m에 해당된다. 설악산의 쌍용폭포 우측 폭포와 대승폭포만이 70m를 넘는 비교적 큰 폭포에 해당되고 그 외의 7개의 폭포는 10m 미만의 작은 폭포다.

폭포가 위치한 고도(그림 14)를 살펴보면, 평지하천과 바다가에 위치하는 현무암 지역의 폭포는 고도가 비교적 낮은 250m 이하에 위치한다. 이는 현무암 분출로 인해 고도가 낮은 지역에도 폭포가 형성된 것이다. 그 외의 폭포 중 750m가 넘는 고도에 11개, 500~750m에는 10개가 위치하고 있어 폭포는 비교적 고도가 높은 산지하천에 위치하고 있음을 알 수 있다.

연구대상 폭포의 경사도에서(그림 15) 14개의 폭포가 30~60°의 비교적 완만한 경사도를 나타낸다. 30°이하의 경사도가 낮은 폭포는 7개, 비교적 경사도가 높은 60°이상의 폭포는 10개이다. 설악산 폭포 중에 수직에 가까운 경사도를 보이는 폭포는 대승폭포와 천당폭포, 용아폭포이며 그 외에 수직에 가까운 높은 경사도를 보이는 폭포는 현무암지역에 있는 폭포이다. 이는 화강암지역과 현무암 지역의 절리패턴의 양상이 다르기 때문으로 사료된다. 현무암지역은 수직절리가 발달되어 경사가 높은 반면 화강암지역은 판상절리나 측사면을 따라 발달한 절리로 인해 완만한 경사도를 갖고 있다.

폭호너비 빈도수에서(그림 16) 10~20m에 달하는 폭포가 14개로 가장 많았고 1~10m로 작은 폭호를 가진 폭포는 6개, 비교적 큰 폭호인 20m이상의 폭호를 가진 폭포는 4개에 불과하다. 대부분 경사도가 높은 지역에 폭호 너비가 넓은편인데 경사도가 높을 수록 하천력(stream power)이 커지면서 침식력 또한 커지게 되어 폭호너비가 넓어지는 것으로 판단된다. 폭포의 형상과 폭호의 너비는 상관관계가 있는데(Alexandrowicz, 1994) 수직형을 보이는 폭포는 비교적 큰 폭호를 가지며 경사도가 낮아질 수록 폭호의 크기도 작아지는 양상을 본 연구에서도 확인할 수 있었다.

폭포를 구성하는 암석(그림 17)에서 설악산 화강암이 12개로 가장 많은 빈도를 보이는 것은 설악산 폭포가 23개로, 전체 폭포 중 80%를 차지하기 때문이다. 기타에 해당하는 암석은 아화산암, 조면현무암, 조면암, 흑운모화강섬록암이다.

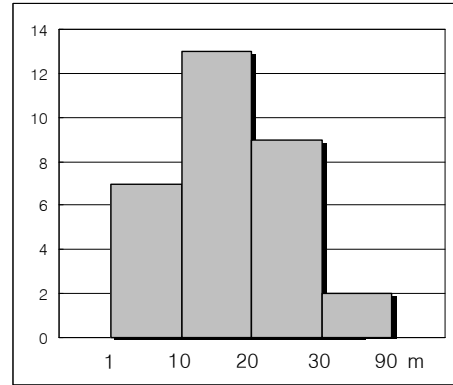


그림 13. 폭포의 높이 빈도

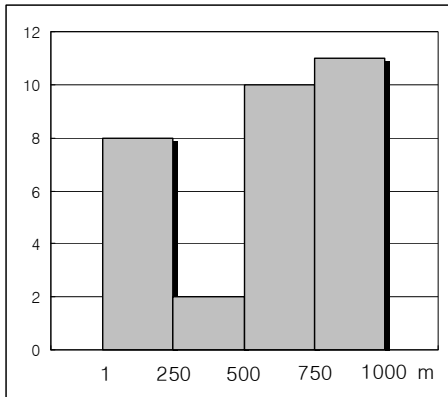


그림 14. 폭포가 위치한 고도 빈도

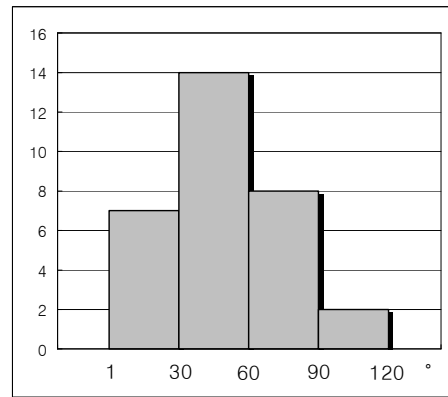


그림 15. 폭포의 경사도 빈도

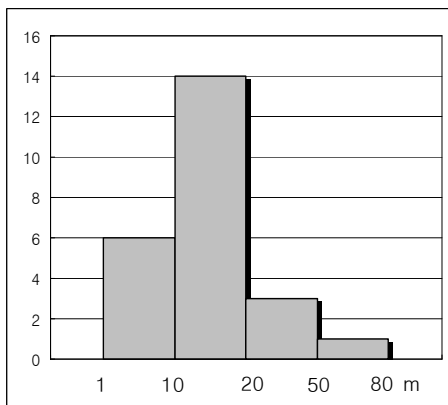


그림 16. 폭포의 너비 빈도

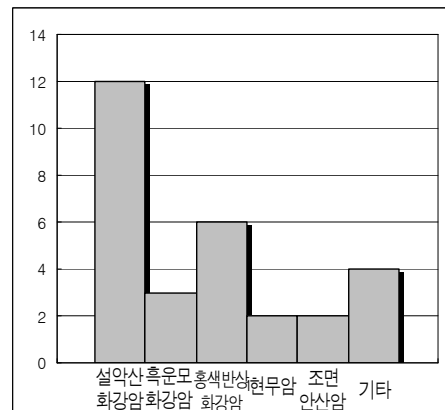


그림 17. 폭포의 구성암석 빈도

## 1. 형성원인에 따른 분류

### 1) 설악산

설악산 폭포 조사 결과 경사도가 20° 미만인 매우 완만한 폭포는 한 개에 불과하고 60°이상 수직에 가까운 경사도를 보인 것은 2개이다. 그 외의 폭포는 20~60°의 경사도를 보이는데, 비교적 완만한 경사를 가진 폭포가 발달해 있다. 기반암에서 오랜시간 침식이 진행됐음을 나타낸다.

설악산지역은 도적폭포를 제외한 폭포 대부분이 화강암질 암석에 있기 때문에(그림 10) 폭포의 발달은 암석의 경암의 차이보다 다양하게 발달한 절리계에 의한 것으로 판단된다.

설악산 폭포가 분포하는 지역 중 대청봉을 정점으로 동·서 방향으로 펼쳐지는 양계곡인 천불동 계곡과 수렴동 계곡의 종단면을 작성해 본 결과 각각 4개의 폭포가 비교적 비슷한 고도에서 발달됐음을 알 수 있다(그림 18). 폭포가 존재하는 고도까지는 볼록한 종단면을 보이다가 그 아래부터는 요면(凹面)을 나타낸다. 폭포가 있는 기반암 하상이 경사도가 다른 하상에 비해 급하다는 것이다. 약 1000m 고도까지 각 계곡에 4개씩 폭포가 나타났는데 이는 간헐적인 지반의 융기로 인한 것임을 나타낸다. 천이점은 불규칙적인 융기에 의해 발생하고, 하천이 회춘하면서 균일암석에서 두부침식이 진행되어 결국 사면이 완만해지는 평형하천이 된다(Gardner, 1983).

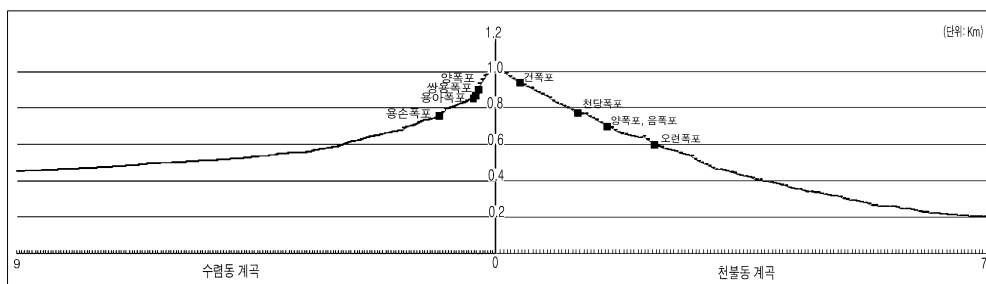


그림 18. 수렴동 계곡과 천불동 계곡의 종단면

### ① 절리발달에 의해 형성된 폭포

설악산 지형을 형성하는 주요 요인 중 하나인 지질조건은 화강암이다. 화강암이 용기에 의해 지표로 상승하면서 발달한 절리계로 인해 설악산에는 현무암과 퇴적암에서 발달하는 고유한 폭포유형 이외의 다양한 폭포유형이 나타난다.

#### · 사면에 발달한 절리계를 따른 유로 변경형

전체고도의 차이(높이)는 작으나 전체적인 사면의 길이가 길어서 절리를 따라 연속적인 담이 형성되고 폭포의 유로가 바뀌는 전형적인 폭포는 2번 오련폭포(사진 2), 6번 옥담폭포(사진 6), 14번 십이선녀탕폭포(사진 14)이다. 오련폭포의 사면은 84.4m이지만 경사도가 완만하여 높이는 27m에 불과하다. 옥담폭포도 사면은 65.6m이지만 경사도가 18°로 완만하여 고도는 20m에 이른다. 십이선녀탕폭포는 최상단에는 굴식에 의해 정단면이 돌출되어 있는 폭포가 있으나 전체적으로 보면 중간에 지름 20m 이상이 되는 폭호가 있으며 최하단은 판상절리가 발달되어, 침식되는 형상이 잘 나타난다.

연속적으로 큰 담이 있지는 않지만 절리계를 따라 유수의 방향이 바뀌는 폭포는 8번 용손폭포(사진 8), 11번 양폭포(사진 11)가 있다.

#### · 판상절리부분의 분리에 의한 돌출형

거의 수평의 형태로 발달한 절리, 즉 판상절리가 폭포 사면 중간에 발달하여 불연속면을 형성하는 형태이다. 대표적인 폭포는 12번 응봉폭포(사진 12)이다. 수분이 판상절리 부분에 들어가, 상대적으로 수분이 침투하지 않은 암석보다 약해진 부분에 유수의 힘이 작용하면 분리된다. 이 폭포는 종단면상으로 중간이 돌출된 형태를 이룬다.

#### · 굴식(plucking)작용에 의한 돌출형

폭포사면 하단의 절리부분에 유수의 힘이 가해진 결과 굴식(plucking)되면서 상단이 돌출된 형태이다. 12번 십이선녀탕의 최상단 폭포(사진 12), 21번 용소폭포(사진 21)가 대표적인 예이다.

#### · 수직절리에 의한 수직형

현무암지역처럼 거의 직각을 이루는 수직절리는 발견되지 않지만 설악산 안에서 수직절리가 발달한 폭포는 16번 대승폭포(사진 16)와 22번 여심폭포(사진 22)를 들 수 있다.

#### · 절리면을 따른 암괴의 분리에 의한 계단형

사면 중간에 상대적으로 강하고 크게 발달한 절리면에 유수의 힘이 가해져서 하나의 큰 암괴가 분리되면 계단형을 나타낸다. 설악산의 연구대상 폭포 중 계단형을 보이는 폭포는 15번 사중폭포(사진 15)와 20번 주전폭포(사진 20)가 있다. 두개의 폭포는 2개의 단으로 이뤄져 있으며 상단과 하단의 경사도가 다르지만 특징을 조사한 표에는 전체적인 사면과 높이를 측정하여 경사도를 계산하였다.

#### · 절리에 의해 분리된 암괴가 유로를 막아 형성된 암괴형

절리부분이 침식되면서 기반암이 분리되고 이 암괴가 하천의 유로를 막아 단차를 만들어서 형성됐다. 이 경우 암괴와 암괴 사이로 물이 여러갈래로 흐르면서 하천력(stream power)이 분산된다. 암괴의 크기도 한계가 있어 고도도 낮고 침식력도 약해서 폭포 발달이 미약하다. 4번 음폭포(사진 4)가 이 유형에 해당된다.

② 하상 경사도에 의해 발달되는 폭포

**수평이거나 수평에 가까운 사면: 20° 이하의 경사도**

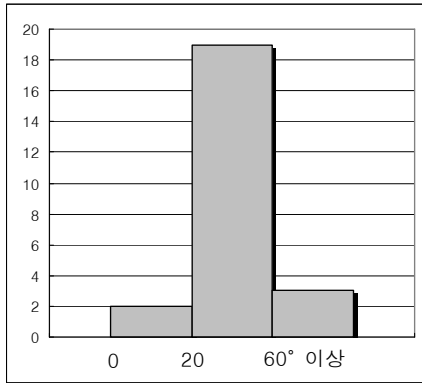


그림 19. 설악산폭포의 경사도 빈도

설악산 폭포의 하상경사도의 빈도를 살펴보면 20° 이하의 매우 완만한 경사도를 보이는 폭포는 2개에 불과한데 이는 긴 사면을 갖고 있는 2번 오련폭포(사진 2)와 6번 옥담폭포(사진 6)이다. 이 두개의 폭포는 오랜시간 절리를 따라 유수가 바뀌면서 침식이 많이 진행됐으며 장기적으로 봤을 때 완만한 사면을 이뤄서 평형하천을 이

룰 것이다. 오련폭포는 고도 598m, 옥담폭포는 고도 250m로 설악산에 분포하는 다른 폭포보다 비교적 하류에 있는 폭포로서 침식이 지속적으로 진행되다보면 평형하천이 될 것이다.

**· 하류기반형 사면: 20~60°**

20~60°에 해당하는 설악산 폭포는 총 19개이며 대부분의 폭포가 이에 속한다. 이들은 하류기반형 폭포로서 20°에 가까운 완경사를 가진 폭포와 60°에 가까운 급한 사면을 가진 폭포로 양분되는 경향도 보이지만, 30~50° 사에 12개의 폭포가 있어 극단적인 경우는 드문 것으로 나타났다.

**· 수직이거나 수직에 가까운 사면: 60° 이상의 경사도**

설악산 폭포 중 폭포사면이 60° 이상의 경사도를 가진 것은 3개에 불과하다. 현무암과 같은 수직절리의 발달이 미약하기도 하거니와 설악산이 형성되고 오랜시간동안 침식이 진행된 결과로 판단된다.

## 2) 제주도

제주도 폭포는 조면암질에 잘 발달하는 주상절리로 인해 수직형을 띄고 있고, 남부해안이 비고가 큰 지형을 형성하여 해안가에 폭포가 발달해 있다. 하천과 바다가 만나는 지점의 비고 차이로 인해 비교적 규모가 크다.

### ① 절리발달에 의해 형성된 폭포

#### · 수직절리에 의한 수직형

용암분출 시 발달하는 수직절리로 인해 형성된 것이다. 24번 천제연폭포(사진 24), 25번 천지연폭포(사진 25), 26번 정방폭포(사진 26)이다.

#### · 굴식(plucking)작용에 의한 들출형

수직형에 해당하는 세 개의 폭포 중 천지연 폭포와 정방폭포는 처음 폭포가 생성될 때는 수직형이었지만 발달과정이 다르다. 중간 중간 발달한 가로 절리에 의해 폭포 하단부터 굴식작용이 일어나 들출형을 이룬다.

#### · 절리면을 따른 암괴의 분리에 의한 계단형

천제연 폭포는 각각의 단은 수직형이지만, 3단 전체의 형태는 계단형이다. 전체 단의 길이가 매우 길어 측정할 수는 없으나 1:5000 지형도상 1단과 3단의 고도차가 27m, 3단을 이루는 하천의 총 길이는 250m이다.

#### · 절리에 의해 분리된 암괴가 유로를 막아 형성된 암괴형

절리면을 따라 분리된 암괴가 지속적인 유수에 의해 침식이 되어 유로를 만들었으나 암괴 자체의 단차로 폭포가 형성된 것이다. 두 갈래로 갈라진 유수로 인해 하천력이 약하나 27번 돈내코폭포(사진 27)는 폭포 높이에 비해 폭포의 발달이 뛰어나다.

② 하상 경사도에 의해 발달되는 폭포

· **수직이거나 수직에 가까운 사면: 60° 이상의 경사도**

제주도 폭포는 수직절리 특징에 맞게 경사도 또한 수직에 가깝고, 하단의 굴식작용으로 인해 정단면으로 보면 90°가 넘는 경우도 있다.

**3) 한탄강 유역**

한탄강 본류는 현무암지역이지만 지류인 용화천에 있는 삼부연폭포만이 흑운모화강섬록암 지역에 있어서 현무암과는 다른 형상을 보인다.

① 절리발달에 의해 형성된 폭포

· **사면에 발달한 절리계를 따른 유로 변경형**

29번 삼부연 폭포(사진 29)는 최상단에 비교적 짧은 사면에서 3개의 담이 형성된 좁은 유로를 벗어나면 약 20m에 해당하는 높이에 물이 떨어진다.

· **수직절리에 의한 수직형**

용암의 분출과 단층작용으로 인해 형성된 수직형 28번 직탕폭포(사진 28번)는 중간 중간 발달한 절리 부분이 유수의 힘에 의해 상대적으로 빨리 침식되기 때문에 침식의 정도가 다르다. 전형적인 주상절리형태를 보이는 현무암 지역에 위치한 30번 재인폭포(사진 30)도 대표적인 사례이다.

· **굴식(plucking)작용에 의한 돌출형**

30번 재인폭포는 형성 초기에는 수직이었으나 하단부터 절리면을 따라 굴식되면서 정단면상 돌출형을 보인다. 최하단이 가장 많이 침식되었고 점차 원형을 유지하며 계단상으로 최상단에 이르는 재인폭포와 같은 폭포를 원형극장형이라고 한다.

② 하상 경사도에 의해 발달되는 폭포

· 하류기반형 사면: 20~60°

29번 삼부연 폭포는 흑운모화강섬록암에서 발달하였기에 그 경사도가 40°이다.

· 수직이거나 수직에 가까운 사면: 60° 이상의 경사도

한탄강 유역의 폭포는 현무암 지역에 걸맞게 수직형을 보였으며 침식의 결과 돌출되면서 90°가 넘기도 한다.

표 8. 연구대상 폭포의 형성원인에 따른 분류(절리발달)<sup>22)</sup>

유형 \ 지역	설악산	제주도	한탄강유역
사면에 발달한 절리계를 따른 유로 변경형	2번 오련폭포 6번 육담폭포 8번 용손폭포 11번 양폭포 14번 십이선녀탕		29번 삼부연폭포
관상절리부분의 분리에 의한 돌출형	12번 응봉폭포		
굴식작용에 의한 돌출형	12번 십이선녀탕 최상단폭포 21번 용소폭포	25번 천지연폭포 26번 정방폭포	30번 재인폭포
수직절리에 의한 수직형	16번 대승폭포 22번 여심폭포	24번 천제연폭포 25번 천지연폭포 26번 정방폭포	28번 직탕폭포 30번 재인폭포
절리면을 따른 암괴의 분리에 의한 계단형	15번 사중폭포 20번 주전폭포	24번 천제연폭포	
절리에 의해 분리된 암괴가 유로를 막아 형성된 암괴형	4번 음폭포	27번 돈내코폭포	

22) 두 가지 이상의 유형에 속하는 폭포는 중복하여 분류하였다. 중복된 폭포는 수직절리에 의해 형성되었다. 하단의 굴식으로 인해 돌출된 현무암지역의 폭포와 14번 십이선녀탕 폭포이다.

표 9. 연구대상 폭포의 형성원인에 따른 분류(경사도)

지역 유형	설악산	제주도	한탄강유역
수평이거나 수평에 가까운 사면: 20° 이하의 경사도	2번 오련폭포 6번 옥담폭포		
하류기반형 사면: 20~60°	1번 이름없음 3번 양폭포 4번 음폭포 7번 비룡폭포 8번 용손폭포 10번 쌍용폭포 11번 양폭포 12번 응봉폭포 13번 이름없음 14번 십이선녀탕 15번 사중폭포 17번 무명폭포 18번 등선폭포 19번 십이폭포 20번 주전폭포 21번 용소폭포 22번 여심폭포 23번 도적폭포		29번 삼부연폭포
수직이거나 수직에 가까운 사면: 60° 이상의 경사도	5번 천당폭포 9번 용아폭포 16번 대승폭포	24번 천제연폭포 25번 천지연폭포 26번 정방폭포 27번 돈내코폭포	28번 직탕폭포 30번 재인폭포

## 2. 침식유형에 따른 분류

침식유형에 따르면 설악산 폭포는 ‘대체후퇴형’이 대부분이다. 절리가 수직으로 발달한 경우는 드물고, 수직과 수평 사이의 각을 가진 절리를 따라 유수의 방향이 바뀐다. 설악산의 폭포는 설악산 화강암지역에 놓인 경우가 50%가 넘는다. 현무암이나 퇴적암의 경우 절리의 발달이 수직이거나 수평이어서 뒤로 하상의 높이 변화 없이 평행후퇴하거나 하상의 높이가 수평으로 낮아지지만 그 외의 암석은 침식의 유형이 다르다. 화강암지역의 침식은 유량과 경사도, 절리에 의해 영향을 받으며, 하상의 높이가 낮아지면서 사면경사도도 완만해지는 침식이 진행된다.

제주도와 한탄강 유역의 폭포 중 27번 돈내코 폭포와 29번 삼부연 폭포는 ‘대체후퇴형’, 그 외의 폭포는 수직절리가 발달하여서 ‘평행후퇴형’을 보인다. 극단적 수직절리가 없는 이상, 기반암 수로에서 기반암 자체가 침식을 직접적으로 받기 때문에 하상의 높이도 낮아지고 사면경사도도 완만해진다.

표 10. 연구대상 폭포의 침식유형에 따른 분류

유형 항목	평행후퇴형	대체후퇴형
발달형태		
폭포번호	24, 25, 26, 28, 30	1~23, 27, 29
		$T_c$ : 처음 침식을 시작하기 위한 하상 전단력 $T_o$ : 실제적인 하상전단력

### 3. 지형적 형상에 따른 분류

절리와 경사도에 의한 발달과정은 결국 침식유형에 반영되며 이는 최종적으로 지형적인 형상으로 표출되며 아래(표 11)와 같이 분류된다.

표 11. 연구대상 폭포의 지형적 형상에 따른 분류<sup>23)</sup>

지역		설악산	제주도	한탄강유역
유형				
하류 경사형	슬라이드형	1번 이름없음 3번 양폭포 5번 천당폭포 7번 비룡폭포 9번 용아폭포 10번 쌍용폭포 좌, 우 13번 이름없음 17번 무명폭포 18번 등선폭포 19번 십이폭포 23번 도적폭포		
	유로변경형	2번 오련폭포 6번 옥담폭포 8번 용손폭포 11번 양폭포 14번 십이선녀탕		29번 삼부연 폭포
계단형	cascade	15번 사중폭포 20번 주전폭포	24번 천제연 폭포	
돌출형	돌출형	14번 십이선녀탕 21번 용소폭포		
	돌출선반형	12번 응봉폭포		
	원형극장형			30번 재인폭포
	암괴형	4번 음폭포	27번 돈내코 폭포	
수직형	수직형	16번 대승폭포 22번 여심폭포 <sup>24)</sup>	24번 천제연 폭포 25번 천지연 폭포 26번 정방폭포	28번 직탕폭포 30번 재인폭포

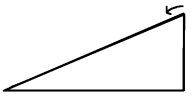
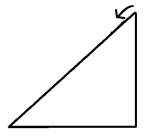

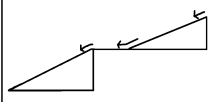
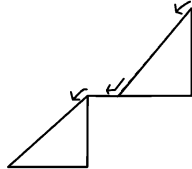
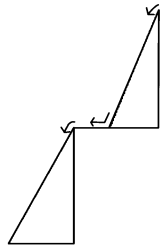
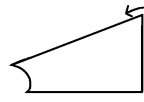
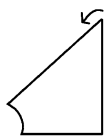

23) 두 가지 이상의 유형에 속하는 폭포는 중복하여 분류하였다. 중복된 폭포는 수직절리에 의해 형성되었으나, 발달과정에서 하단의 굴식으로 인해 돌출된 현무암지역의 폭포이다.

24) 여심폭포는 각도가 59°이지만 수직절리가 발달되어 있어 지형적인 형상은 ‘수직형’에 해당한다.

#### 4. 경사도와 지형적 형상의 조합으로 개발한 분류

폭포의 형성원인과 그에 따라 발달한 지형적인 형상을 기준으로 최대한 단순화한 일반적인 분류방법을 적용하여 분류를 시도한 결과 1/B형 폭포가 15개로 가장 많은 수를 차지했다. 20° 이하의 완경사에서는 계단형 폭포와, 돌출형 폭포가 발달하지 않음을 알 수 있었다.

표 12. 연구대상 폭포의 경사도와 지형적 형상의 조합으로 개발한 분류

경사도 지형적 형상		(A)	(B)	(C)
		수평 (20°이하)	하류경사 (20°~60°)	수직 (60°이상)
(1) 하류 경사형	종단면			
	유형	1/A	1/B	1/C
	폭포번호	2, 6	1, 3, 4, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 17, 18, 19, 22, 23, 29	5, 9, 16, 28
(2) 계단형	종단면			
	유형	2/A	2/B	2/C
	폭포번호		15, 20	24
(3) 돌출형	종단면			
	유형	3/A	3/B	3/C
	폭포번호		14, 21	25, 26, 27, 30

## 5. 연구폭포의 사진



사진 1. 이름 없음



사진 2. 오련폭포



사진 3. 양폭포



사진 4. 음폭포



사진 5. 천당폭포



사진 6. 육담폭포



사진 7. 비룡폭포



사진 8. 용손폭포



사진 9. 용아폭포



사진 10. 쌍용폭포(좌, 우)

사진 11. 양폭포



사진 12. 응봉폭포

사진 13. 이름 없음

사진 14. 십이선녀탕폭포(상,중,하)



사진 15. 사중폭포

사진 16. 대승폭포

사진 17. 무명폭포



사진 18. 등선폭포



사진 19. 십이폭포

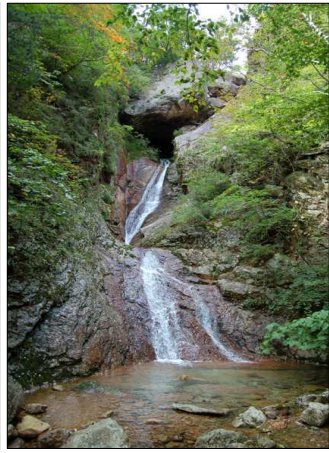


사진 20. 주전폭포



사진 21. 용소폭포

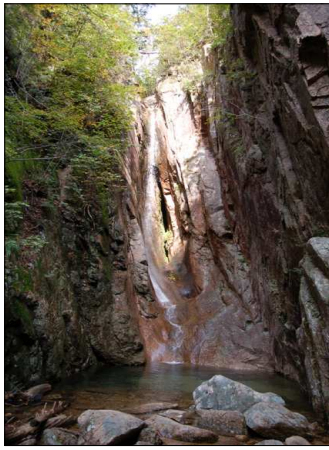


사진 22. 여심폭포



사진 23. 도적폭포

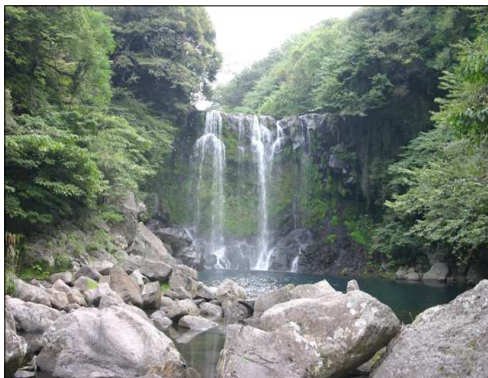


사진 24. 천제연폭포(2단, 3단)





사진 25. 천지연폭포



사진 26. 정방폭포



사진 27. 돈내코폭포(정면, 측면)



사진 28. 직탕폭포(정면, 측면)



사진 29. 삼부연 폭포



사진 30. 재인폭포

## V. 결 론

하천의 유로에서 하천 종단면이 급경사인 지점 즉, 높이의 차가 있는 곳에 물이 흐르는 것이 폭포이다. 폭포는 경사도가 급한 소규모 산지하천의 기반암하상에 위치하는 하천단위로서 하천지형 중 하나이다.

폭포가 위치한 기반암하도는 다른 하상에 비해 경사가 급하다. 실제 cascade와 step지형이 경사도 2% 이상에서 나타난다는 이론적 배경은 조사결과 가장 낮은 경사도를 보이는 설악산 오련폭포가 20°로 2%(약 12°)를 초과함으로써 검증됐다. 수렴동 계곡과 천불동 계곡의 종단면을 작성해 본 결과 폭포가 존재하는 고도까지는 볼록한 종단면을 보이다가 그 아래부터는 요면(凹面)을 나타낸다. 이는 폭포가 존재하는 기반암하상이 경사도가 다른 하상에 비해 급하다는 것을 반증한다.

폭포는 하천구간(channel reach)이 아닌 하나의 하천단위(channel unit)이다. 이론적으로 하천단위를 계산할 때 사용하는 ‘유수의 방향과 평행한 하도의 길이/하도 너비’의 값이 ‘1~10’ 값을 가져야 한다. 계단형을 보이는 설악산의 사중폭포와 주전폭포의 ‘유수의 방향과 평행하는 단위의 길이/하도 너비’의 값을 구하였다. 사중폭포의 상단은 ‘약 9’, 하단은 ‘4’이며 주전폭포 상단은 ‘약 5’, 하단은 ‘약 2’를 나타내어 하천단위임이 밝혀졌다. 그러나 이 결과는 모든 폭포를 대상으로 한 연구가 아니므로 앞으로 본격적인 연구가 필요하다.

연구대상으로 선정한 설악산의 23개, 제주도 4개, 한탄강 유역 3개 총 30개 폭포의 성인과 발달과정을 알아보고 지형적으로 나타나는 형상을 조합하여 분류방법을 개발하였다.

30개의 폭포에 임의대로 번호를 붙여, 실외 조사를 통해 폭포의 높이, 경사도, 계곡의 주방향, 유수의 방향, 폭포너비, 구성암석을 파악했으며 실

내조사를 통해 구성암석과 폭포가 위치한 고도를 파악하였다.

조사 결과, 폭포의 높이는 10~20m사이에 13개의 폭포가 속하여 가장 많은 수를 차지했으며 폭포가 위치한 고도를 살펴보면 11개의 폭포가 750~1000m에 있어 폭포가 산지하천지형임을 나타냈다. 폭포의 경사도에서 30~60°에 해당하는 폭포가 14개이고, 폭포의 너비 빈도수에서 14개가 10~20m에 달하였다. 연구대상 폭포 중 설악산 폭포가 차지하는 비율이 80%여서 구성암석은 설악산화강암이 12개로 40%를 차지했다.

연구대상으로 선정한 21개의 폭포와 이름 없는 2개의 설악산의 폭포는 화강암이 분출할 때 보이는 절리계로 인해 다양한 유형을 나타냈다. 4개의 제주도 폭포와 3개의 한탄강유역의 폭포는 용암이 분출할 때 발달하는 수직 절리로 설악산 화강암지역에서 볼 수 없는 유형을 보였다.

화강암과 현무암지역의 폭포는 퇴적암에서 보이는 암석의 연암구조의 차이에 의한 폭포발달보다 절리계에 따른 경사도에 의해 폭포가 발달하고 있음을 관찰할 수 있었다.

따라서 세 가지 범주로 폭포분류 항목을 선정하여 분류하였다. 첫째, 폭포가 발달하는 과정에서 진행되는 침식요인으로 절리의 방향과 폭포사면의 경사도를 선정하였다. 둘째, 침식의 특징적인 유형을 통해 폭포를 분류하는데 이 과정에서 유수의 힘과 암석의 저항력의 크기를 가늠할 수 있다. 셋째, 형성요인과 침식의 결과 지형학적으로 나타나는 형상에 따라 분류를 진행했다.

최종적으로 사례지역을 연구할 때 사용할 일괄적인 분류기준은 침식유형을 제외한 형성원인과 그에 따라 발달한 지형적인 형상을 기준으로 하여 분류방법을 개발하였다.

세 가지 범주로 폭포 분류를 진행한 결과는 다음과 같다.

첫째, 형성원인에 따른 분류 항목 중 절리발달에 의해 형성된 폭포유형은 사면에 발달한 절리계를 따른 유로 변경형, 판상절리부분의 분리에 의한

돌출형, 굴식(plucking)작용에 의한 돌출형, 수직절리에 의한 수직형, 절리면을 따른 암괴의 분리에 의한 계단형, 절리에 의해 분리된 암괴가 유로를 막아 형성된 암괴형 총 6개로 나타났다. 형성원인에 따른 분류 항목 중 하상 경사도에 의해 발달되는 폭포는 수평이거나 수평에 가까운 사면( $20^\circ$  이하의 경사도), 하류기반형 사면( $20\sim 60^\circ$ ), 수직적이거나 수직에 가까운 사면( $60^\circ$ 이상) 총 3가지 유형으로 분류됐다.

둘째, 침식의 유형에 따른 분류에서 설악산 폭포는 뒤로 후퇴하면서 천이점에서 상단의 각을 이루는 부분이 완만해지고 하상의 높이도 낮아지는 침식유형인 ‘대체후퇴형’을 보였으며 제주도와 한탄강유역의 폭포는 사면경사도와 하상높이의 변화 없이 평행하게 수직절리를 따라 뒤로 후퇴하는 ‘평행후퇴형’을 보였다.

셋째, 지형적 특색에 따라 분류할 때는 하류경사형(슬라이드 폭포, 유로변경형 폭포), 계단형(cascade), 돌출형(돌출형, 돌출선반형 폭포, 원형극장형 폭포, 암괴형 폭포), 수직형 등 크게 4가지 유형이 나타난다.

최종적으로 경사도와 지형적 형상을 조합하여 9개 유형을 개발하였다. A(수평: $20^\circ$  이하), B(하류경사:  $20\sim 60^\circ$ ), C(수직:  $60^\circ$  이상) 총 3개의 경사도 유형과 1(하류경사형), 2(계단형), 3(돌출형) 총 3개의 지형적 형상을 결합하여 30개의 폭포를 분류하였다.

그 결과 1/B형(하류경사형,  $20\sim 60^\circ$ )의 폭포가 15개로 50%를 차지하여 제일 많은 유형으로 나타났다. 1/C형(하류경사형,  $60^\circ$ 이상)과 3/C형(돌출형,  $60^\circ$ 이상)은 각각 4개씩의 폭포가 해당되는데 이 유형은 두 번째로 많은 유형이다. 3/C형이 많이 나타나는 이유는 수직절리가 잘 발달한 현무암 폭포 하단이 분리되는 발달과정을 거쳤기 때문이다. 1/A형(하류경사형,  $20^\circ$ 이하), 2/B형(계단형,  $20\sim 60^\circ$ ), 3/B형(돌출형,  $20\sim 60^\circ$ )은 각각 두개씩 나타나서 세 번째로 많은 유형이며, 모두 설악산에 분포하는 폭포이다. 2/C형(계단형,

60°이상)은 제주도의 천제연폭포 하나가 해당된다.

연구 결과, 폭포의 발생과 발달과정에 영향을 가장 많이 주는 요인은 절리유형이다. 절리유형은 암석의 종류에 따라 다른 양상을 보인다. 결국 폭포의 유형을 결정하는 가장 큰 요인은 '구성암석'이다. 폭포가 형성될 때부터 구성암석에서 발달한 절리에 따라 폭포의 침식의 방향과 유형이 결정되고 이는 폭포의 높이, 하상의 경사도에도 영향을 미친다. 가시적으로 절리유형은 '경사도'로 반영되며 절리유형과 경사도 높이 등은 '지형적인 형상'으로 표출되기 때문에 본 연구에서 개발한 방법에서 이 두 항목(경사도와 지형적인 형상)을 적용한 것이다.

본 연구는 가시적으로 보이는 지형적 요인 절리패턴과 경사도, 주류의 방향, 유수의 방향, 폭호의 너비, 폭포가 위치한 고도 등을 파악하여 성인 및 발달과정을 분석한 결과를 근거로 하여 유형분류를 시도하는데 초점을 맞췄다. 그러나 화강암과 현무암 지역의 폭포만을 대상으로 유형분류를 시도하여 퇴적암과 석회암지역에서 보이는 특징적인 유형은 고려하지 못한 한계점이 있다. 또한 침식력과 하천력 사이의 실제적인 함수를 통한 경관변화의 전개양상에 대한 심도 있는 연구가 진행되지 않았다. 이 연구를 필두로 앞으로 '폭포'라는 하천지형에 대한 관심과 다양한 연구가 필요하다.

## 참 고 문 헌

### 1. 국내 단행본

- 국립공원관리공단, 2001, “설악산국립공원자연자원조사-V. 지형경관, VI. 암석·지질”, pp.63-105
- 김태호, 2004, 한국지리지 전라·제주편-제주편 “제2장 제주지방-자연 및 생태환경”, 국토지리정보원, pp.539-561
- 박종관, 2005, 박종관 교수의 LET'S GO! 지리여행, Geobook, pp.124-143
- 건설교통부 한국수자원공사, 2002, 우리가람길라잡이-우리 강을 한 눈에-, pp.15-16, 27-28, 20-21, 308-309
- 한국지리정보연구회 엮음, 2004, "폭포", 자연지리학사전, 한울아카데미, p.668

### 2. 국내 논문

- 권동희, 2000, “덕유산 국립공원 일대의 지형경관 특성과 활용방안”, 지리학연구, 제34권 2호, pp.73-85
- \_\_\_\_\_, 2002, “가평지역의 지형경관 특성과 활용방안”, 지리학연구, 제36권 3호, pp.217-226
- \_\_\_\_\_, 2003, “강릉 석방산 지역의 지형경관 특성과 활용방안”, 지리학연구, 제37권 2호, pp.127-137
- \_\_\_\_\_, 2004, “포천·동두천 일대의 지형경관 특성과 활용방안”, 한국지형학회지, 제11권 4호, pp.11-19
- \_\_\_\_\_, 2005, “삼척 사금산 일대의 지형경관 특성과 활용방안”, 한국지형학회지, 제12권 1호, pp.12-23

- 김일중, 2002, “단면도 분석을 통한 제주도의 지형 연구”, 동국대학교 대학원 지리학과 석사학위논문
- 김종욱, 1989, “Functional geomorphology의 연구방법론”, 지리교육 논집, 제22호, pp. 15-27
- \_\_\_\_\_, 1998, "지형학에서의 이론적 접근", 사회과학교육 제2집, pp. 23 -48
- 김주환, 1997, “직탕폭포와 고석정 주변의 지형”, 사진지리 제5호, pp. 45-62
- \_\_\_\_\_, 2000, “한탄강 일대의 지형정보에 관한연구”, 지리학연구 제34권 3호, pp.137-150
- 박경, 2004, “설악산 국립공원 지역의 암석붕락 현상에 대한 지형학적 고찰”, 한국지형학회지 제11권 제1호, pp.65-76
- 양교석, 1982, “추가령 열곡내 한탄강 하류 지역에 분포하는 화산암류에 관한 연구”, 한국지구과학회 Vol.3 No.1, pp.12-25
- 양희경, 1997, “자갈하상하천의 bar지형 발달에 관한 연구”, 대한지리학회지 제32권 4호, pp.435-444
- \_\_\_\_\_, 2001, “산지하천의 하도지형발달연속체에 관한 연구”, 한국지형학회지, Vol.8 No.1, pp. 27-38
- \_\_\_\_\_, 2003, “지형 및 인위적 변수에 의한 산지 하천의 분류-경기도의 수동천, 수입천, 조중천 및 가평천을 사례로-”, 서울대학교 대학원 지리교육과 박사학위논문
- 오성원, 2000, 산지하천의 step pool 연속체에 관한 연구, 한국지형학회지 Vol. 7 No.2, pp.33-52
- 손명원, 1984, 내성천 상류의 bar에 관한 연구, 서울대학교 대학원 지리학과 석사학위논문

전용목, 1980, “한탄강연안의 지형발달에 관한 연구”, 건국대학대학원  
논문집 제11집, pp.241-265

최명윤, 1994, “설악산지역에 분포하는 백악기 화강암류의 암석학적  
연구-국립공원지역 내-”, 강원대학교 교육대학원 지구과학교육  
학과 석사학위 논문

### **3. 국외 단행본**

Knighton D., 1998, Fluvial forms and processes-A New Perspect  
-ive, London: Edward Arnold(John Wiley & Sons )

Ford, D.C., 1968, "Waterfalls", Fairbridge, R.W.(edit), The Encyclope  
-dia of Geomorphology, Reinhold: New York, pp.1219- 1220

Von Engeln O. D., 1942, "Waterfall sites", Geomorphology, syste  
-matic and regional, New York, The Macmillan Company,  
pp.179-196

### **4. 국외 논문**

Alexandrowicz Z., 1994, "Geologically controlled waterfall types  
in the Quter Carpathians", Geomorphology 9, pp.155-165

Chartrand Shawn M. and Whithing Peter J., 2000, "Alluvial archi  
tecture in headwater streams with special emphasis on  
step-pool topography", Earth Surface processes and  
landforms 25, pp.583-600

Chin A., 2002, "The periodic nature of step-pool mountain stream  
-s", American Journal of Science, Vol.302, pp.144-167

Chin A. and Wohl Elle E., 2005, "Toward a theory for step poo

- ls in stream channels", *Progress in Physical Geography* Vol.29 No.3, pp.275-296
- Gardner T. W., 1983, "Experimental study of knickpoint and longitudinal profile evolution in cohesive, homogeneous material", *Geological Society of America Bulletin*, Vol.94, pp.664-672
- Grant G.E. and Squanson 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, pp.340-352
- Halwas Karen L. and Church Michael, 2002, "Channel unit in small, high gradient streams on Vancouver Island, British Columbia", *Geomorphology* 43, pp.243-256
- Hudson Brian J., 1998, "Waterfalls Resources for Tourism", *Annals of Tourism Research*, Vol.25, pp.958-973
- Montgomery David R., 1997, "Channel-reach morphology in mountain drainage basins", *Geological Society of America Bulletin* Vol.109 No.5, pp.596-611
- Montgomery David R. and Abbe, T.B., Buffington, J.M., Peterson, N.P., Schmidt, K.M., and Stock, J.D., 1996, "Distribution of bedrock and alluvial channels in forested mountain drainage basin", *Nature* Vol.381, pp.587-589
- Philbrick Shailer S., 1970, "Horizontal configuration and the Rate of Erosion of Niagara Falls", *Geological Society of America Bulletin*, Vol.81, pp.3723-3732

- Rosgen David L., 1994, "A classification of natural rivers",  
Catena 22, pp.169-199
- Seidl Michele A. and Dietrich Willian E. and Kirchner Jame W.,  
1994, "Longitudinal Profile Development into Bedrock An  
Analysis of Hawaiian Channels", The Journal of Geology,  
Vol.102, pp.457-474
- Whipple Kell X. and Hancock Gregory S. and Anderson Robers S.,  
2000a, "River incision into bedrock: Mechanics and relative  
efficacy of plucking abrasion, and cavitation", Geological  
Society of America Bulletin, Vol.112 No.3, pp.490-503
- Whipple Kelin X. and Snyder Noah P. and Dollenmayer Kate,  
2000b, "Rates and process of bedrock incisin by the Upper  
Ukak River since the 1912 Novarupta ash flow in the  
Valley of Ten Thousand", Geology Vol.28 No.9, pp.835-838
- Wohl Ellen E., 1992, "Bedrock benches and boulder bars: Floods  
in the Burdekin Gorge of Australia", Geological Society of  
America Bulletin, Vol.104, pp.770-778
- \_\_\_\_\_, 1993, "Bedrock channel incision along Piccaninny Creek,  
Australia", The Journal of Geology, Vol.101, pp.749-761
- \_\_\_\_\_, 2000, "Geological notes: substrate influences on step-pool  
sequences in the Christopher Creek drainage, Arizona",  
The Journal of Geology, Vol.108, pp.121-129
- Wohl Ellen E. and Thompson Douglas M. and Miller Andrew J.,  
1999, "Canyons with undulating walls", Geological Society  
of America Bulletin, Vol.111 No.7, pp.949-959

- Wohl Ellen E. and Merritt David M., 2001, "Bedrock channel morphology", Geological Society of America Bulletin, Vol.113 No.9, pp.1205-1212
- Wohl Ellen E. and Wilcox Andrew, 2005, "Channel geometry of mountain streams in New Zealand", Journal of hydrology, Vol.300, pp.252-266
- Wooldridge C.L. and Hickin E.J., 2002, "Step-pool and cascade morphology, Mosquito Creek, British Columbia: a test of four analytical techniques", Canadian Journal of Earth Sciences 39, pp.493-503
- Young, R.W., 1985, "Waterfalls: form and process", Zeitschrift für Geomorphologie N. F., Supplementband 55, pp.81-95
- Yuichi Hayakawa and Yukinori Matsukura, 2003, "Recession rates of waterfalls in Boso Peninsula, Japan, and a predictive equation", Earth Surface Process and Landforms 28, pp.675-684

## 5. 국내 웹사이트(website)

한국민족문화대백과사전 <http://www.encykorea.com/>

한국지질자원연구원 <http://geoinfo.kigam.re.kr/kigam/>

## 6. 국외 웹사이트(website)

브리태니커 온라인 영문백과사전 <http://www.britannica.com>

Eastern Waterfall Guide <http://www.aria-database.com/waterfall/>

World Waterfall Database <http://www.world-waterfalls.com/help.php>

## **ABSTRACT**

### **A study on waterfall classification by form and process**

**-Focusing on waterfall of Seoraksan, Jeju Island, Hantan River basin-**

Kim, Ji Young

Department of Geography

Graduate School

Sungshin Women's University

Waterfall is rather a channel unit, which flows over a steep bedrock channel bed. There is no criteria for height, water volume, gradient to define a waterfall. Moreover, there are no such studies to explain waterfall as a fluvial landform. This study is a starting point to go further to understand long-term landscape evolution surrounding mountain streams.

The goal of this study is to classify waterfalls based on morphological characteristics which are the outcomes of developmental processes. The genesis and process of waterfall depend upon erosional properties of waterfall. The height, gradient, bedrocks and stream power of waterfalls are regarded as the main factors, by which waterfalls can be classified.

23 waterfalls in Seoraksan National Park, 4 waterfalls in Jeju Island, and 3 waterfalls in Hantan River basin are studied and the height, direction of flow and valleys, width of plunge pools and basal

rocks of these waterfalls are measured.

The findings of this study are as follows:

1. Based on developmental processes such as joint system and gradient,

1) flow path changing type, ledge type caused by sheeting joint, protruding type formed by plucking process, vertical type caused by vertical joint, and step type following joint plane and block type can be detected.

2) depending on gradient, 3 types of waterfalls can be classified, they are horizontal and near horizontal type (under 20 degree), downstream-dipping bedrock type (20~60 degree), vertical and near-vertical type.

2. Based on erosional style, waterfalls in Seoraksan belong to the replacement retreating type and waterfalls in basalt bedrock belong to vertically retreating type.

3. Based on morphology, downward sloping type (sliding waterfall, path changing waterfall), cascading waterfall, protruding (protruding, ledge, amphitheater, block), and vertical types are 4 main types of waterfalls.

During the field investigation, classification scheme based on morphological form has been developed. Combining two schemes such as A type (horizontal: under 20 degree), B type (downstream-dipping: 20~60 degree), and C type (vertical: over 60

degree) solely based on gradient with 1(down sloping), 2(step), and 3(protruding), total 9 types of waterfalls are classified.

Findings are as follows:

1. 15 waterfalls belong to the 1/B type(down sloping, 20~60 degree).
2. 1/C and 3/C groups have 4 waterfalls in each group. Vertical joint system in basalt bedrock are the reason for the 3/C type dominance.
3. 1/A, 2/B, and 3/B groups have 2 waterfalls in each group.
4. 2/C group has only one waterfall, which is Chonjeyoun waterfall in Jeju Island.

This study finds out that the most important factor for the development of waterfalls is joint system. Development of joint system varies depending on bedrocks. Flow directions and erosional types are decided by the density and direction of joint system in the bedrock, which also decide the height and gradient of stream bed. Joint type decides the gradients of the bed, joint type, gradient and height of waterfalls, therefore, decides morphological characteristics, to which newly-developed scheme can be applied.