

마식에 의한 기반암면의 표면 변화에 대한 실험 연구

김종연*

3 Dimensional Changes of Bedrock Surface with Physical Modelling of Abrasion

Jong Yeon Kim*

요약 : 기반암 하상의 침식현상은 지형발달의 1차적인 통제 요소이다. 그러나 기반암 침식과정에 대한 연구는 오랜 시간 동안 지체되어 왔다. 이러한 지체는 실험하도에서의 결과를 기반암 하천에 적용시키는데 있어서의 스케일링 문제 등에 기인한다. 기반암 하상에 대한 침식 통제 변수에 대한 조사의 일환으로 마식과정에 대한 물리적 실험에서의 기반암면의 변화 과정이 연구되었다. 18개의 기반암 시료들이 다양한 퇴적물 양과 퇴적물 입자 크기에 의해서 마식되었다. 3차원적인 기반암면의 변화는 고해상도 3차원 스캐너를 이용하여 기록되었다. 기반암 시료의 표면 변화를 파악하기 위하여 다양한 방식을 사용하였으나, 거칠기의 변화와 기반암면의 전반적인 변화를 단일한 방식으로 나타낼 수 있는 방식은 파악되지 않았다. 음영기복도와 기복도에 의하면 마식은 횡단면 곡선상의 중심부와 종단면 곡선상의 상부와 하부 말단에서 시작되어 성장하는 것이 일반적인 경향으로 나타났다. 표면의 전반적인 형상에 있어서는 앞서 지적한 마식의 공간적 분포의 영향으로 종단면에 있어서는 평탄화가 나타났다. 횡단면의 경우 기울기가 증가하는 것이 우세하였다. 표면의 거칠기 정도는 일반적인 경향을 발견하기 어려웠으며, 일반적으로 추정되어진 마식에 따른 거칠기 감소가 나타나지는 않았으며, 암석에 따라서 서로 다른 결과가 나타났다. 주사전자현미경(SEM)을 이용한 분석에 의하면 기반암의 일반적인 특성보다는 조암 광물의 미세구조(microstructure)가 마식의 공간적인 유형과 거칠기 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

주요어 : 마식, 기반암 하상, 미세구조, 물리적 실험, 3D scanning

Abstract : Incision into bedrock channel is the primary control of landform evolution, but research into bedrock incision process stagnated for long time. Due to the scaling problem of the application of results from flume studies to bedrock channel, there is a strong need to simulate the bedrock incision process with more realistic models. As a part of investigation into controls of bedrock channel incision, three-dimensional changes of rock surface with abrasion was investigated with physical modelling. 18 rock plates were abraded with various sediment particle size and sediment load and abraded surfaces of the plates were scanned with high resolution 3-D scanner.

To identify the spatial pattern of erosion of the rock plates, various methods were used. There was no synthetic or holistic method that showed all features of bedrock plate produced by abrasion, so each plate was analyzed using some available methods. Contour maps, shaded relief maps and profiles show that abrasion concentrated on the centre of plate (cross profile) and upstream and downstream edges (longitudinal profile) and eroded area extended inwards. It also found that the cracks and boundaries of forming materials easily eroded than other parts.

Changing patterns of surface roughness were investigated with profiles, regression analysis and spectral analysis. Majority of plates showed decrease in small-scale roughness, but it depends on microstructures of the plates rather than general hardness or other factors. SEM inspection results supported this idea.

Key Words : abrasion, bedrock river, microstructure, physical modelling, 3D scanning

* 대통령자문 지속가능발전위원회 기획운영실 전문위원(Expert Staff, Planning and Management Office, Presidential Commission on Sustainable Development, Republic of Korea), terraic@president.go.kr

1. 서론

마식은 유수에 의하여 미끄러짐, 도약 그리고 부유 의 방식으로 운반되는 퇴적물질과 하상과의 마찰 및 충돌에 의하여 발생하는 침식과정이다. 마식은 기반암 하상의 저하 과정에서 가장 활발하게 발생하는 침식과정인 관제로 지형 발달과정에서 중요한 역할을 하는 것으로 이해되어 왔다(Lugeon, 1914; Maxon and Campbell, 1935). 유수와 더불어 이동되는 퇴적 물질에 의한 하상의 저하에 대한 논의는 지형학에서 상당히 오래된 가설 가운데 하나이다. Gilbert(1877)의 경우 Henry Mountains의 지형 발달에 대한 연구에서 하상 침식에 있어서 퇴적물 입자의 역할에 대하여 강조하였으며, 퇴적 물질을 포함하지 않은 순수한 유수에 의한 침식, 즉 청수 침식(clear water erosion)의 유효성에 대한 의문을 제기하였다. 그에 의하면 퇴적 물질을 포함하지 않은 유수에 의한 주된 침식은 주로 석회암 등 용식(corrosion)이 우세한 환경에서 주로 유효한 것으로 보인다. 건조지역에서의 현장연구와 북부 유럽의 하천 지형의 형성과정에 대한 일반적인 연구 등에서 역시 운반중인 퇴적물 입자에 의한 침식의 전개가 소위 '도구효과(tool effect)' 라는 이름으로 제기되었다(Hjulstrom, 1935; Bryan, 1936; Kuenen, 1947). 그러나 이후 침식과정에 미치는 퇴적물질의 영향에 대한 본격적인 연구는 진행되지 못하였으나, 현장연구에서 침식의 주요 메커니즘으로 지적되었다.

기반암 하상의 침식과정에 대한 현장연구는 주로 미지형에 대한 연구를 중심으로 이루어졌다. 하상에 노출된 기반암과 조립 퇴적 물질의 표면에는 다양한 미지형이 형성되고 있으며 기반암의 표면에는 마식에 의해 만들어진 부드러운 표면이 형성된다. 특히 부유하는 모래 입자들이 많은 경우 부유 입자가 와류(渦流)에 따라 이동하면서 장애물의 성격을 지니는 기반암 노출부와 조립 퇴적 물질을 마식하게 된다. 이러한 과정을 'fluting' 혹은 'sand blasting'(Maxon, 1940)라고 명명하였으며, 이러한 과정을 통해 형성된 기반암면 혹은 퇴적물의 입자 표면은 매우 부드러운 형상을 가지고 매끈한 것으로 이해되고 있다. Whipple 등(2000)은 기반암 하천 구간의 지배적인 침식과정을 인식하는 방법으

로 기반암에 형성된 미지형의 특성을 이용한 바 있다. 이러한 미지형들의 형성과 변화과정에 대한 연구는 제한적으로 이루어졌다. Gregory(1915)는 기반암 마식이 발생하는 지점에서의 침식률을 측정하기 위하여 침식 측정용 표식을 부착하고, 부분적으로 침식 측정공(測定孔)을 만들었다. 기반암에 인공적으로 만들어진 일정한 깊이의 측정공의 심도 변화에 대한 측정 결과를 통해 마식률이 유수에 직면하게 되는 방향에 따라 변화한다고 주장하였다. 즉, 기반암의 특성보다도 침식을 지배하는 유수의 노출되는 강도가 침식에 중요한 요소로 판단되었다. Hancock 등(1998)은 히말라야의 Gilgit River에서의 연구에서 기반암 하상에 연속적인 침식 측정공을 굴착하여 심도 변화를 계속하였다. 이들의 연구 역시 1년간의 기반암 하상 침식률이 하천수가 접촉하는 기간과 강도에 따라서 영향을 받는 것으로 결론졌으나, 침식에 영향을 미치는 침수 기록, 하천의 유속 및 퇴적물 조건 등 정량적 관계를 추정할 수 있는 증거들은 제시되지 않았다. 한편 하천 침식과정에서의 마식의 효과가 중시되지 못한 이유로 Young(1985)은 하천 지형연구가 상대적으로 물리적 실험이 용이하고 수요가 집중된 총적 하천을 중심으로 이루어진데서 들고 있다.

기반암 하상에서의 침식과정에 대한 연구에서 발생하는 이러한 어려움을 극복하기 위한 대안은 물리적 모형을 이용한 실험 연구이다. 물리적 모형(physical modelling)을 통한 통제 환경에서의 실험을 통해 특정 프로세스의 물리적 과정과 통제 변수의 파악이 가능해진다. 특히 기반암의 경우 시료의 강도를 표현하는 다양한 기법이 존재한다. 기반암의 마식에 대한 연구에서 Bitter(1963)와 Foley(1980)는 금속물질에 대한 실험 연구 결과를 바탕으로 마식 작용에 의한 하상의 침식률(ϵ)이 기반암의 다축 압축 실험 기법에 의하여 결정되는 탄성에 견디는 강도(elastic load limit: MPa)의 제곱과 반비례 관계에 있다고 밝혔다. 또한 하상 침식률은 휨 변형(bending)실험에 의해서 결정되는 계수인 연신탄성률(Young's modulus; MPa)¹⁾에 비례한다고 추정했다. Sklar and Dietrich (2001)는 암석의 강도를 압열인장강도(tensile strength(σ_t))로 표현하였으며 시료에 대한 브라질식 인장실험(Brazilian test)²⁾을 통하

여 그 값을 구하였다. 주로 이암(siltstone)을 포함하는 연암을 이용한 실험 결과, 하상의 마식을 통한 침식률은 인장강도와 반비례 하는 것으로 나타났다. 그러나 Sklar와 Dietrich의 실험의 경우 마식을 위해 이용된 퇴적물 입자의 크기가 제한된 관계로 실제 적용에 어려움이 있으며, 침식된 기반암의 공간적인 형상 변화 특성에 대한 계측과 분석이 이루어지지 못한 문제점이 있다. 미끄러짐에 의해 운반되는 퇴적물에 의한 기반암의 침식 특성에 대한 연구는 빙하침식에 대한 실험 연구를 통해 주로 이루어 졌다. Lee and Rutter(2004)는 미끄러지는(Sliding) 암체에 의하여 발생하는 마식률은 침식되는 면에 가해지는 수직적 접촉 스트레스(normal contact stress(σ , MPa))와 침식되는 면을 형성하는 기반암의 공극률(porosity(ϕ): $dT/dx=As^m$, $n, m>0$)에 의하여 결정된다고 주장했다. 기반암에 따라 서로 다른 침식 미지형이 나타나는 이유로 기반암이 지니고 있는 암석의 미세구조(microstructure)의 차이로 인한 접촉 스트레스에 대한 적용 방식의 차이로 추정하였다. 그러나 미세구조의 특성 등에 대한 실증적인 고찰은 진행되지 못한 한계점을 지니고 있다. 즉, 기반암의 마식에 영향을 미치는 기반암의 물리적 특성의 정량화와 특성을 밝히는 데에는 많은 연구가 요구되고 있다.

그러나 앞서 소개된 연구들을 제외한 기존의 침식에 대한 연구의 대부분은(예를 들어, Allen, 1971; Shepherd and Schumm, 1974) 모래와 점토로 구성된 하상을 이용한 실험수로(flume)에서 이루어졌으며, 모래와 점토를 이용한 하상의 경우 기반암의 침식에 대한 저항 정도를 나타내는데 이용되는 암석의 강도에 대한 추정치를 적용하는 것이 불가능하다. 기반암 침식에의 적용을 위한 실험에서는 최소한 구성 물질들 간의 전단력-전단응력 관계에 대한 비율 산정이 이루어져야 한다. 그러나 모래와 진흙으로 구성된 실험 수로 하상의 압열인장강도와 연신탄성률(Young's modulus)은 0이며, 공극률은 매우 높게 나타나는데 비하여 침식을 행하는 퇴적물 입자의 경우 일반 암석과 동일하게 나타난다. 따라서 이러한 실험 하도 실험의 결과들을 시사점은 줄 수 없으며, 현실의 기반암 하상의 침식에 대한 이해에 적용하는 것에는 문제가 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 방안으로 제시된 것은 기반암의 특성을

정확히 반영한 실험 설비의 구축과 이용이며 퇴적물 입자와 기반암 시료를 장착한 마식 실험기(abrasion mill, tumbling mill)를 이용한 마식 실험이다(Thompson and Wohl, 1998).

본 연구에서는 기반암면의 마식을 통한 기반암 표면의 변화를 파악하고 그 통제 변수를 파악하기 위하여 마식 실험기를 이용한 기반암 마식 실험을 하였다. 실험에서는 기반암의 마식 특성을 반영하기 위하여 실제 기반암 시료와 퇴적물 시료를 사용하였다. 또한 기반암의 암석 종류가 마식에 미치는 영향을 파악하기 위하여 화강암, 안산암, 유문암, 화산각력암, 규암, 사암, 섬록암 등이 사용되었으며, 실제 하천의 퇴적물들이 투입되었다. 기반암의 표면 변화 정도를 파악하기 위하여 3차원 레이저 스캐너를 이용한 고해상도 스캐닝을 하였다. 얻어진 계측 자료를 이용하여 음영기복도 등 분석이 가능한 3차원 자료를 구축하여 변화의 정도를 파악하였으며, 주사전자현미경(SEM)을 이용한 시료의 정성적 특성을 파악하였다.

2. 실험, 계측 및 분석 방법

기반암 마식에 대한 연구의 진행에서 애로 요소가 되는 것은 기반암의 마식으로 인한 표면변화를 계측하고 기록하는 기법의 표준화가 이루어져 있지 않으며, 특히 지형학 분야에서는 이에 대한 연구가 극히 미진하다는 것이다. 이러한 현상은 현재까지의 지형학 연구의 대상이 되어 온 지형의 규모가 일정 규모 이상이었던 관계로 통상적인 측량을 통한 개별 암석의 표면의 변화에 대한 기록이 존재하지 않는다. 소규모 표면 변화에 대한 연구가 상대적으로 활발하게 이루어진 공학 분야의 연구 기법을 차용하는 것이 불가피하다(Henning and Mewes, 1995).

공학 분야에서 활용되고 있는 표면의 침식을 특성화하는 기법은 크게 정성적(qualitative)방식과 정량적 방법(quantitative)한 방식으로 나누어 볼 수 있다(표 1). 표 1에서 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy)로 분류된 기법으로 대표되는 정성적 접

근은 주로 표면의 거칠기 패턴을 분석하는데 유리하다. 또한 기반암 시료 등에 대한 직접적인 관찰을 통하여 기반암의 미세 구조 등을 관찰하기에 유리하다. 시료 표면의 탄소 코팅 등과 같은 과정이 요구되기는 하나 사용이 용이 하고 자료 처리가 간편하다는 것 역시 장점으로 지적될 수 있다. 그러나 해상도가 올라갈 경우 한 번에 분석 가능한 면적이 제한되는 한계가 있어 기반암 시료들의 전반적인 침식 양상을 파악하거나 계량화하여 비교하기에는 어려움이 있다. 정량적 기법은 침식 실험이 행해진 암석면 굴곡의 형상 변화를 접촉 혹은 비접촉 방식으로 측정, 기록하거나 기반암 시료의 무게의 변동을 통하여 계량적 변동을 추정하는 기법을 의미한다(Dong and Stout, 1995). 표 1에서 무게 측정(weighing), 2차원 단면 작성, 3차원 촬영이 이 범

주에 해당한다. 정량적 기법은 마식에 의하여 발생한 기반암면의 변화의 정도를 정확히 파악할 수 있도록 하고 실험 조건에 따른 변화의 정도를 파악할 수 있도록 하는 장점이 있다. 특히 2차원 및 3차원 단면의 경우 기반암 마식의 공간적 특성을 보여 줄 수 있어 통제 변수(control factors)의 파악 등에 유용하다. 이에 따라 레이저 스캐닝이 추가 되는 3차원 측정을 표면의 변화 측정을 위한 기법으로 활용하는 사례가 점점증하고 있다 (eg. Nagihara *et al.*, 2004).

본 연구에서 기반암의 마식에 따른 전반적인 마식률은 기반암 표본의 무게 변동을 통해 결정되었으나 본 고에서는 논의되지 않았다³⁾. 마식에 의한 기반암 시료의 표면 거칠기 측정은 3차원 레이저 스캐너를 이용되었다. 3차원 데이터의 구축에는 Glasgow 소개

표 1. 실험실에서 기반암 표면의 변화를 측정하기 위한 주요 기술

Measurement method	특성과 장점	취약점
주사전자현미경 (SEM ; scanning electron microscopy)	시료에 대한 정교한 조사. 시료의 암석학적 특성과 광물학적 특징이 침식에 미치는 영향에 대한 평가가 가능하다 (Bhushan <i>et al.</i> , 1995; Alman <i>et al.</i> , 2001; Huq and Celis, 2002).	조사 대상 면적이 매우 좁다.
무게변동측정(Weighing)	실험전과 실험후의 질량의 변화를 무게 변동의 기록을 통해 추정. 측정과 결과 비교가 용이하다 (Gahlin and Jacobson, 1998; Sklar and Dietrich, 2001; Alman <i>et al.</i> , 2001; Cho <i>et al.</i> , 2002).	1. 측정의 정밀도가 부족하다. 2. 수분 함량 등 실험 조건의 변동에 따른 결과의 변화 존재한다. 3. 마식의 공간 분포 등에 대한 구체적 정보의 획득이 어렵다.
2차원 단면 작성 (Cross profile) (Optical interferometer/ profilometer/ stylus profiler)	접촉 혹은 비접촉 방식으로 나노미터 단위까지의 표면의 고도 차이를 기록하여 분석 (Huq and Celis, 2002).	1. 전반적인 거칠기의 변화와 형상의 변화를 표현 하기 위해서는 내삽을 통해 3차원 면으로의 변환이 요구된다. 2. 고도의 변화를 추적하기 위해서 동일한 위치에서 단면을 실험 전후에 측정 하는 것은 어려움이 크다. 특히 정밀도가 올라 갈수록 동일한 지점에서의 측정을 시행하는 것은 대단히 어렵다 (Rosen <i>et al.</i> , 1996; Cho <i>et al.</i> , 2002).
3차원 면 촬영(3-D surface) Fibre optical laser scanning microscopes (LSCM) / atomic force microscopes (AFM)	1. 기록의 형상을 나노미터 스케일로 측정할 수 있다. 2. 실제 마식 혹은 침식된 부피를 측정 할 수 있으며 공간적 분포 특성의 표현이 가능하다 (Anamalay <i>et al.</i> , 1995; Patton and Bhushan, 1996; Gahlin <i>et al.</i> , 1998).	1. 대용량의 자료 저장 공간과 고성능 프로세서가 요구된다. 2. 측정 지점의 일치와 보정에 어려움이 있다.



그림 1(가). 실험에 사용되기전 수지를 부착한 화강암 2-A 시료의 측면. 시료의 높이는 20mm였다.

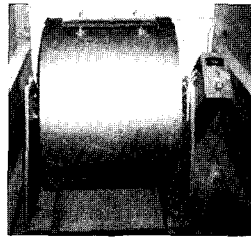


그림 1(나). LA type 마식 실험기

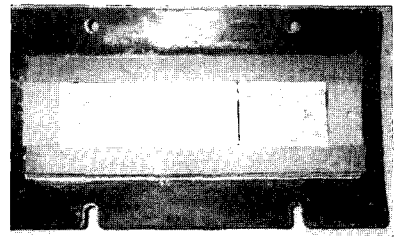


그림 1(다). 실험을 위해 부착된 시료들

Archaeoptics Limited사가 보유한 MINOLTA VI-900 laser scanner[®]가 이용되었다. 이 장비는 0.047mm의 수직적 해상도를 지니고 있으며, 3개의 렌즈를 이용하여 3차원 정보를 수집하도록 되어 있다. 해당 장비를 이용하여 수집된 정보는 Digital Elevation Model을 구축하여, 이후 분석에 이용되었다. 정성적 분석을 위하여 University of Glasgow의 Cambridge Instruments S360 SEM[®](Cambridge Instruments S360 SEM equipped with an Oxford Instruments ISIS microanalysis system)을 이용하였다. 주사전자현미경을 이용한 분석은 모든 기반암 시료에 대하여 이루어지지 못하였으며 추가적인 분석을 행하는 것이 필요한 경우에 한하여 이루어졌다.

실험실에서 마식에 의한 침식 과정을 재현하기 위하여 기반암 시료나 골재의 강도를 추정하는 표준 시험 기법인 로스앤젤리스형 마식 실험기(Los Angeles test mill)를 이용하였다(Gerrard, 1988; British Standard, 1998). 표준 시험 절차는 시료와 강철로 된 마식용 쇠 구슬을 혼합하여 강철관으로 만들어진 회전통(내경 711mm, 폭 508mm)에 넣은 뒤 강철 지지대를 이용하여 회전시킨 뒤 시료의 마식에 의한 부피와 무게 감소 정도를 측정하는 것이다. 그러나 이 실험 방식은 본 실험이 의도하는 입자들과의 마찰에 의한 기반암의 마식 수준과 그 구체적인 과정에 대한 연구에 부합하지 않으므로 실험 설비와 방식에 대한 수정이 요구되었다. 실험 과정에서 퇴적물을 제외한 마식용 쇠 구슬은 투입되지 않았다. 이를 통하여 기반암의 마식에 퇴적물 이외의 요소가 개입되는 것을 차단하였다. 기반암 마식 실험을 위한 기반암 시료의 장착을 위하여 마식 실험기의 시료 투입부 뚜껑을 개조하여, 기

반암 시료를 장착할 수 있는 강철 슬롯(slot)을 설치하였다. 슬롯은 나사를 이용하여 부착되었으며 입자들의 이동을 방해하거나 불필요한 도약 운동을 유발하지 않기 위하여 슬롯의 주변 부분에는 경사로가 만들어졌다. 또한 입자들의 강철 마식 실험기 본체와의 충돌을 통한 급격한 입자 감소 현상을 막기 위하여 본체의 내부에는 7mm 두께의 고무판이 완충재로 설치되었다. 또한 퇴적물과 마식용 쇠 구슬과의 충돌을 극대화 하고 퇴적물 시료에 가혹 이동 환경을 조성하기 위해 설치된 내부의 강철 거치대를 제거하였다. 마식 실험기의 회전 속도는 1분간 30회 이었다. 마식 실험은 총 83시간에 걸쳐 이루어졌으며 기반암 시료는 각각 41~42시간 동안 다양한 입자 크기와 퇴적물질의 양에 의한 마식에 노출되었다.

실험에 사용된 기반암 시료 가운데 사암을 제외한 기반암 시료들은 스코틀랜드 그램피언 하일랜드(Grampian Highland)의 Glen Etive를 관류하는 River Etive와 그 지류인 River Coupal의 하상에서 획득한 직경 10cm 이상의 자갈들을 이용하였다. 해당 지역을 시료 채취 지역으로 선택한 이유는 기반암 하상에 다수의 마식에 의한 지형이 형성되어 있으며, 수문적인 상황의 유사성에도 불구하고 다양한 형태의 미지형이 나타나 마식에 영향을 주는 비 수문적인 요소의 확인이 필요하였기 때문이다. 사암을 이용한 이유는 다른 암석에 비하여 빠른 마식이 기대되어 변화의 정도를 비교하기에 유리하기 때문이었다. 그러나 해당 지역에서 사암을 구하기 어려워 실험에 사용된 시료들은 상업적으로 판매되는 건축용 외장재를 이용하였다. Glen Etive는 중생대 화산암과 화강암이 혼재하는 지역에 위치하는 계곡으로 지난 마지막 빙기에 강력한

빙식을 받았으며, 하천의 측방 침식을 통해 모레인을 비롯한 빙하 퇴적 지형으로부터의 직접적인 퇴적물 공급이 이루어지고 있으며 후빙기 사면 안정화 과정에서 발생한 사면의 토석류로 인하여 다량의 토사가 곡지 내로 공급되어진 후 하천으로 점진적인 퇴적물 공급이 이루어지는 지역이다. 마식을 위해 투입된 하천 퇴적물 역시 동일한 지역에서 획득되었다(Kokelaar and Moore, 2006).

기반암 시료들은 수집된 뒤 세척 과정을 거치고 10cm×5cm×2cm의 크기로 절단되었다. 절단된 시료들은 육안 검사를 거쳐 절리와 같은 흠결을 지니지 않은 것들로 선별하였으며, 시료로 사용되지 않은 암석 가운데 균열이나 절리가 생성되지 않은 생경한 부분을 대상으로 슈미트해머(Schmidt hammer)를 이용한 간이 강도 조사를 실시하였다(표 2). 기반암 시료에 대한 직접적인 조사를 하지 않은 이유는 슈미트해머 시험이 시료에 대해 직접 검사를 하는 방식으로 기반암 시료에 균열 형성을 유발할 수 있고, 특정한 암석의 경우 충격으로 인해 파괴되는 일이 발생하기 때문이었다. 실험에 사용된 기반암 시료들의 실험이 이루어질 면은 기계적으로 평면으로 절삭하는 과정을 거쳐 인공 다이아몬드 분말을 주성분으로 하는 polishing powder를

이용하여 거칠기 요소 제거 작업을 수행하였다. 동일한 암석에 있어서 유사한 패턴이 관찰되는가를 파악하기 위하여 동일한 것으로 추정되는 동일 기반암 시료를 2개씩 활용하여 그 결과를 비교하였다. 가공이 마쳐진 기반암 시료들은 표면의 거칠기 변화를 측정하기 위한 기준점을 정하고, 마식 실험기 내부에의 장착을 용이하게 하기 위하여 플라스틱수지(plastic resin)를 일종의 지지대로 부착시켰다. 기반암 시료들을 실험실시 이전에 50℃로 건조한 뒤 무게 측정과 3차원 레이저를 이용한 거칠기 측정 작업을 하였다. 마식을 유도한 퇴적물 역시 손으로 부서지는 수준의 풍화를 보이는 역들을 제거한 뒤 암석 종류의 판정, 세척 뒤 50℃로 건조한 뒤 계량을 실시하였다.

3차원 레이저를 이용한 거칠기 측정 작업에서 평면 해상도는 1mm²당 57개의 자료를 획득하도록 하였으며, 수직 자료(z)의 측정 정밀도는 0.047mm이었다. 측정된 자료는 SURFER[®]와 ARCGIS[®]를 이용하여 도시(圖示)가능한 자료로 변환되었다. 변환은 선형 내삽을 통한 삼각법(triangulation with linear interpolation)을 이용하여 이루어 졌으며, 결과로 나타난 자료의 수평적 (x,y) 삼각망의 포인트별 거리는 0.1mm 간격으로 하였다. 본 연구에 사용된 내삽 기법은 격자망 내에 균

표 2. 기반암 시료들의 실험 전 무게와 슈미트 해머 측정값

Sample	암종	Schmidt Hammer reading*	시험전 무게 (g)**: A	시험전 무게 (g)**: B
1	화강암(Cruachan Granite)	51	333.93	335.15
2	규암(Quartzite)	47	241.02	233.10
3	화강암(Granite)	52	239.39	246.30
4	섬록암(Diorite)	45	280.55	322.96
5	화산각력암(Breccia)	44-52***	326.21	313.71
6	안산암(Andesite)	51	287.09	298.24
7	안산암(Andesite)	44	261.83	244.11
8	사암(Sandstone)****	17	236.11	231.83
9	유문암(Rhyolite)	52	326.10	318.55

* ELE사의 Schmidt Hammer를 이용한 실험 결과 가운데 최고값과 최저값을 제외한 10번의 측정값의 산술 평균

** 3번의 무게 측정 결과의 산술 평균.

*** Schmidt Hammer의 접촉 부분에 따른 측정값의 차이가 발견되었으며, 52는 규암 부분의 측정값을 44는 다른 암석에서의 측정값을 나타냄.

**** 사암표본은 University of Glasgow의 건물 보수 공사장에서 얻어졌으며 출처는 밝혀져 있지 않다.

일하게 존재하는 것으로 추정되는 자료 획득점에 타당하며 사면의 경사 변곡점(breaks of slope)의 유지에 유리하다(Keckler, 1997).

표면의 전반적인 변화 상황을 분석하기 위하여 기반암 면의 정밀 음영기복도(shaded relief maps)가 제작되었다. 경사와 음영 기법은 central difference 와 Lambert reflection 기법이 각각 활용되었다. 도시된 음영기복도의 광원은 수평 135°, 수직 45°를 채택하였다. 음양기복도를 기반으로 기복도(contour maps)와 단면도가 기반암 시료의 변화를 보여주기 위하여 추출되었다. 각 지점의 시료 높이는 측정 당시의 기반암이 놓인 면과 스캐너와의 거리가 동일하다는 전제하에서 기반암 시료의 바닥으로부터 90%에 해당하는 지점을 기준으로 하여 제도되었다. 이러한 방식을 이용한 이유는 기반암 시료의 표면 전체가 마식된 관계로 동일한 기준점을 기반암 시료 표면에서 찾을 수 없는 상황에서 시료의 높이차를 명확히 드러나게 하기 위한 것이었다. 앞서 지적한 바와 같이 그려진 기복도의 자료는 x, y, z 모두 0.1mm 간격으로 그려졌다. 기반암 시료 표면의 기복도를 기반으로 횡단면 및 종단면 곡선이 그려졌다. 각 종단면 곡선과 횡단면 곡선의 계량적 비교를 위하여 표면의 형상에 대한 곡선들에 대한 회귀식을 추정하였으며, 회귀선으로부터의 잔차(residuals)를 분석하여 거칠기 정도의 변화에 대한 지표로 활용하였다(Mulla, 1988). 대부분의 표면 단면이 곡선의 형상을 가지고 있으므로 2차 방정식으로서의 최적 회귀식이 유도되는 경우가 많았으나, 일부 시료(화강암1, 사암)의 경우 통계적으로 유의한 식의 추정이 불가하였다.

시료의 거칠기 변화에 대한 분석을 위하여 시료의 평균 높이면을 기준으로 kriging 기법으로 처리되었다. 추가적인 기반암면의 거칠기 정도에 대한 분석은 시계열 분석기법을 활용하였다. 시계열 분석기법은 다양한 지형적면(geomorphological surfaces)의 거칠기 요소(roughness)의 특성을 파악하는데 사용되어 왔다. Robert and Richards(1988)는 시계열 분석을 이용하여 하천의 미세 지형을 분석하였으며, 하상 지형, 사면 단면, 퇴적물 개별입자의 표면에 대한 연구 등에도 활용된 바 있다(예를 들어, Jain and Kennedy, 1974). 특히

Spectral analysis는 암석의 표면에 존재하는 거칠기 요소를 표현하는데 유용한 기법으로 인정되어 왔다(Chae *et al.*, 2004). 이에 따라 본 연구에서는 표면의 소규모 거칠기 요소의 분석에 Spectral analysis를 사용하였다. 각 자료들에 대한 복스-젠킨스 모형을 구축하여 최적 모형을 찾은 뒤 모형에 대한 잔차 분석을 통하여 분산(variance)을 Spectral density function에 대하여 표시한 뒤(Jenkins and Watts, 1968), 이를 도시하여 분석하였다(Percival and Walden, 1993).

주사전자현미경을 이용한 정성적 조사는 조사 가능한 기반암 시료 표면의 공간적인 범위가 제한되고, 기반암편의 절단 및 파괴가 불가피한 관계로 실험이 종료된 후 육안 검사를 통하여 마식의 정도가 심하게 나타난 부분과 다수의 조암광물이 혼재하는 경우 등에 대하여 제한적으로 시행되었다. 이 조사를 위하여 절단된 시료들은 1시간 동안 초음파 세척기를 이용하여 세척, 마식에 의하여 형성된 물질들을 제거하고 건조한 뒤 탄소 코팅을 하여 조사하였다(Skopp *et al.*, 1995).

3. 분석 결과 및 토론

1) 종단면 및 횡단면 곡선의 변화

기반암 시료표면의 시험 이전과 이후의 DEM모델에서 추출한 종단 곡선과 횡단 곡선의 변화는 2차항인 x^2 와 y^2 의 계수의 변동에 따라 해석되었다. 종단 곡선이라 함은 퇴적물의 이동 방향과 일치하는 방향을 횡단면 곡선은 종단면 곡선과 정각을 이루는 시료 단면 중앙의 선을 의미한다. 계수의 증가는 접촉면에서의 기울기의 증가를 의미하며, 감소는 기울기의 감소 즉, 전반적인 경사의 감소를 의미한다. 앞서 지적한 바와 같이 최적 회귀선으로부터의 mean square (MS)는 1차적인 거칠기의 변화 정도를 표현하고 있다(표 3, 표 4). 주의해야 하는 것은 전반적으로 계수가 0에 근접하는 매우 작은 것으로 나타나고 있다는 것이며 이는 앞서 지적한 시료의 전처리 과정의 결과에 의한 것이다. 완

표 3. 기반암 시료의 횡단면 곡선 최적 회귀 모형

구분		회귀곡선(regression curve)	mean square	R ²
규암-A(QU-A)	실험전	$-2.76E^{-05}x^2+0.0044x+1.4114$	0.0010	0.6795
	실험후	$-3.90E^{-05}x^2+0.0059x+1.5222$	0.0004	0.8926
규암-B(QU-B)	실험전	$0.20E^{-05}x^2+0.0087x+0.7726$	0.0004	0.9928
	실험후	$1.77E^{-05}x^2+0.0069x+0.8575$	0.0005	0.9911
화강암2-A(GR 2-A)	실험전	$2.48E^{-05}x^2-0.0255x+6.2956$	0.0018	0.9946
	실험후	$7.22E^{-05}x^2-0.0309x+6.7093$	0.0025	0.9928
화강암2-B(GR 2-B)	실험전	$2.63E^{-05}x^2-0.0074x+1.4796$	0.0016	0.8924
	실험후	$7.07E^{-05}x^2-0.0126x+1.5468$	0.0039	0.7686
섬록암-A(DI-A)	실험전	$5.48E^{-05}x^2-0.0045x+1.4834$	0.0009	0.7279
	실험후	$10.60E^{-05}x^2-0.0098x+1.7641$	0.0005	0.9044
섬록암-B(DI-B)	실험전	$2.73E^{-05}x^2-0.0010x+1.4749$	0.0010	0.7660
	실험후	$6.56E^{-05}x^2-0.0050x+1.4839$	0.0005	0.8982
화산각력암-A(BR-A)	실험전	$2.02E^{-05}x^2-0.0049x+1.5114$	0.0009	0.8750
	실험후	$4.59E^{-05}x^2-0.0067x+1.6195$	0.0013	0.7149
화산각력암-B(BR-B)	실험전	$7.24E^{-05}x^2-0.0115x+1.7465$	0.0013	0.9094
	실험후	$9.82E^{-05}x^2-0.0149x+1.8079$	0.0021	0.8972
안산암1-A(AN1-A)	실험전	$2.29E^{-05}x^2-0.0159x+1.1712$	0.0006	0.9904
	실험후	$2.72E^{-05}x^2-0.0203x+1.3374$	0.0007	0.9883
안산암1-B(AN1-B)	실험전	$1.09E^{-05}x^2-0.0178x+1.9982$	0.0008	0.9770
	실험후	$1.36E^{-05}x^2-0.0210x+2.0957$	0.0004	0.9877
안산암2-A(AN2-A)	실험전	$2.01E^{-05}x^2-0.0488x+5.8266$	0.0015	0.9968
	실험후	$2.38E^{-05}x^2-0.0518x+7.2443$	0.0105	0.9743
안산암2-B(AN2-B)	실험전	$2.21E^{-05}x^2-0.0550x+2.4644$	0.0022	0.9918
	실험후	$1.66E^{-05}x^2-0.0545x+4.3717$	0.0015	0.9974
유문암-A(RH-A)	실험전	$0.76E^{-05}x^2-0.0063x+1.4773$	0.0004	0.9306
	실험후	$1.05E^{-05}x^2-0.0091x+1.6753$	0.0003	0.9581
유문암-B(RH-B)	실험전	$1.43E^{-05}x^2-0.0150x+1.6402$	0.0006	0.9294
	실험후	$1.76E^{-05}x^2-0.0183x+2.0125$	0.0004	0.9630

전 평탄면이라면 0이 나타나야 하지만 현실적으로는 불가능에 가깝다.

기반암 시료의 장축을 따라 추출된 횡단면 곡선의 전반적인 기반암 시료의 기울기 정도의 변화에서는 크게 두 가지 유형이 인식되었다. 첫 유형은 각 기반암 시료의 중앙부 횡단면 곡선에서의 기울기 증가 유형으로 규암A(QU-A)와 안산암B(AN-B) 시료를 제외한 모든 시료에서 관찰되었다. 기울기의 증가는 형상적으로

보았을 때 기반암 시료의 중앙부의 마식이 활발하게 진행되면서 기반암 시료의 평탄한 정도가 감소하고 하향 만곡의 정도가 증가한다. 특히 화강암2(GR2) 시료와 섬록암(DI) 시료의 경우 이러한 경향성이 강력하게 나타나는데 비하여 안산암(AN1-A, AN1-B, AN2-A)과 유문암(RH) 기반암 시료의 경우 변화의 정도가 적은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 기반암의 암석 차이에 의한 것으로 추정되지만 실험 과정에서 각 시료의

표 4. 기반암 시료의 종단면 곡선 최적 회귀 모형

구분		회귀곡선(regression curve)	mean square	R ²
규암-A(QU-A)	실험전	$0.29E^{-05}y^2-0.0047y+1.7137$	0.0007	0.8967
	실험후	$-9.40E^{-05}y^2+0.0019y+1.7837$	0.0002	0.9680
규암-B(QU-B)	실험전	$6.90E^{-05}y^2-0.0129y+1.6566$	0.0007	0.9595
	실험후	$4.01E^{-05}y^2-0.0112y+1.6510$	0.0003	0.9829
화강암2-A(GR2-A)	실험전	$1.46E^{-05}y^2+0.1530y-0.5964$	0.0017	0.9997
	실험후	$-4.83E^{-05}y^2+0.1576y-0.3722$	0.0012	0.9998
화강암2-B(GR2-B)	실험전	$5.53E^{-04}y^2-0.0163y+1.4796$	0.0013	0.9647
	실험후	$1.47E^{-04}y^2-0.0131y+1.7464$	0.0020	0.9359
섬록암-A(DI-A)	실험전	$8.15E^{-05}y^2-0.0122y+1.7182$	0.0007	0.9389
	실험후	$0.91E^{-05}y^2-0.0075y+1.8129$	0.0003	0.9758
섬록암-B(DI-B)	실험전	$2.88E^{-05}y^2-0.0107y+1.8333$	0.0007	0.9686
	실험후	$-2.39E^{-05}y^2-0.0065y+1.6580$	0.0003	0.9808
화산각력암-A(BR-A)	실험전	$2.09E^{-05}y^2-0.0099y+1.6423$	0.0010	0.9543
	실험후	$-2.44E^{-05}y^2-0.0067y+1.6836$	0.0005	0.9721
화산각력암-B(BR-B)	실험전	$5.32E^{-05}y^2-0.0079y+1.5497$	0.0007	0.8664
	실험후	$0.47E^{-05}y^2-0.0043y+1.4554$	0.0006	0.8571
안산암1-A(AN1-A)	실험전	$8.50E^{-05}y^2-0.0148y+1.4805$	0.0002	0.9906
	실험후	$7.60E^{-05}y^2-0.0147y+1.4805$	0.0001	0.9951
안산암1-B(AN1-B)	실험전	$1.50E^{-04}y^2-0.0105y+1.5700$	0.0004	0.7947
	실험후	$1.27E^{-04}y^2-0.0010y+1.5663$	0.0002	0.8198
안산암2-A(AN2-A)	실험전	$1.43E^{-04}y^2+0.0609y+1.2711$	0.0016	0.9981
	실험후	$-0.57E^{-04}y^2+0.0800y+2.2421$	0.0079	0.9948
안산암2-B(AN2-B)	실험전	$1.18E^{-04}y^2+0.3252y-12.4837$	0.00242	0.9997
	실험후	$0.54E^{-04}y^2+0.3301y-9.6124$	0.00092	0.9999
사암-B(SA-B)	실험전	$0.51E^{-04}y^2-0.0098y+1.7680$	0.0005	0.9422
	실험후	$-3.46E^{-04}y^2+0.0375y+0.6465$	0.0029	0.9245
유문암-A(RH-A)	실험전	$2.72E^{-05}y^2-0.0088y+1.6291$	0.0002	0.9869
	실험후	$-2.72E^{-05}y^2-0.0055y+1.6972$	0.0001	0.9905
유문암-B(RH-B)	실험전	$4.76E^{-05}y^2-0.0104y+1.5855$	0.0003	0.9755
	실험후	$4.27E^{-05}y^2-0.0096y+1.8555$	0.0002	0.9805

위치에 따라서 퇴적물에 의한 마식 정도의 차이일수 있다. GR2와 AN1 그리고 RH의 경우 3개가 동시에 장착되는 시료 설치 슬롯의 가장 오른쪽 외곽에 장착되었다. 중앙부에는 규암(QU), 화산각력암(BR), 사암(SA)이 장착되었다. 가장 왼쪽에는 화강암1(GR1), DI, AN2 시료가 고정되어 이용되었으며 각 시료의 위치는

변하지 않았다. 따라서 실험 상황에서의 시료의 위치 차이가 각 횡단면의 변화의 정도의 차이에 영향은 미치지 않은 것으로 판단된다.

횡단면 곡선의 두 번째 변화 유형은 중심부의 볼록성(convexity)이 강화되거나 오목한 정도(concavity)가 감소되는 유형이다. 이 유형들은 공통적으로 중앙부에

비하여 양측 주변부의 마식이 활발하게 이루어진 결과로 파악할 수 있다. 규암(QU-A)의 경우 오목한 정도가 증가한 대표적인 유형으로 볼 수 있으며, 안산암 2(AN2-B)의 경우 오목한 정도가 감소하는 유형을 보여 주고 있다. 동일한 암석으로 동일한 위치에서의 실험이 이루어진 경우에도 가장 강력한 마식이 발생하는 위치는 서로 다른 경우가 나타났으며 그 원인에 대해서는 주사전자현미경분석 결과를 토대로 추가적인 논의가 이루어질 것이다. 전반적으로 암석의 종류가 기반암의 기율기 변화 등에 미친 영향은 미미한 것으로 판단된다. 그러나 시료의 수가 많지 않아 그 통계적인 의미를 주장하기는 어렵다.

중단면 곡선은 기반암 시료의 단축을 따라 추출되었으며 마식 실험기의 회전 과정에서 퇴적물과의 충돌이 일어날 것으로 추정되는 기반암 시료의 전면부와 후면부의 시료높이 변화를 비교할 수 있다. 시험 이전의 자료에서 추출된 중단면 곡선은 전반적으로 외곽 부분의 시료높이가 중앙 부분보다는 높은 모습을 띄고 있다(표 4). 실험 이후에 측정된 자료에 의한 중단면 곡선은 전반적으로 이 차이가 완화되거나 평면에 가까운 모습으로 나타나고 있으며, 일부에서는 시료높이의 역전이 나타났다. 이는 실험 이전에 가설로 제기된 중앙부보다는 주변부에서의 우세한 마식을 부분적으로 뒷받침하는 것으로 판단할 수 있다. 변화의 강도는 각 기반암에 따라 다르게 나타났으며, 동일한 암석인 경우에도 서로 다른 결과를 보여 주고 있다. GR2-B, DI-A, BR-B, AN1-A, AN1-B, RH-B의 경우 중단면 곡선의 기율기가 완화되는 수준의 변화를 보이고 있는데 반하여 GR2-A, DI-B, BR-A, AN2-A, SA-B, RH-A의 경우에는 오목 형상에서 볼록 형상으로의 변화가 나타났다. 기반암의 강도와 변화의 정도가 서로 음의 상관을 갖고 있다는 것을 전제로 한다면 상대적으로 강도가 떨어지는 사암(SA)의 급격한 변화는 설명이 가능하다. 그러나 동일한 기반암 혹은 유사한 슈미트해머 측정값을 지니는 경우에서의 서로 다른 반응의 양식은 추가적인 설명이 필요로 한다. 단, 일반적으로 야외에서 널리 사용되는 슈미트해머 측정값이 마식의 강도에 대한 설명은 매우 강도가 약한 암석인 경우에만 의미를 지닌다는 것을 알 수 있다.

한 가지 주목할 만한 사실은 시료의 외곽에서 시작 된 마식이 중단면곡선상의 시료 중앙 부분으로의 확산 되는데 있어서 시료의 횡단면상의 중앙 부분만을 중심으로 이루어진다고 볼 수는 없다는 것이다. 물론 중앙 부분의 마식이 탁월한 것이 횡단면 곡선이 추출된 기반암의 일정 부분에 대해서는 타당하나 처음으로 기반암 시료가 퇴적물과 충돌하는 전면부(leading edge) 부분의 경우 각 기반암이 지니는 부분적인 특성이 마식의 정도에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 불규칙적으로 형성되는 전면부의 특징은 공학 분야의 이전의 연구(Dogan and Hawk, 1999)에 의하면 기반암 혹은 실험 대상이 되는 물체를 구성하는 입자의 크기, 입자들 간의 경계부 특성, 화학적 특성 등 미세구조에 영향을 미치는 요소들이 마식에 대한 저항 정도의 차이를 유발함에 따라 나타난다. 이러한 요소들에 대한 구체적인 확인은 주사전자현미경 관찰 편에서 다루어질 것이다.

2) 거칠기 요소의 변화 분석

각 기반암 시료의 마식에 따른 표면 변화 특성에 대한 관찰은 각 기반암 시료별로 이루어졌다. 가장 특징적인 변화의 양상을 보인 것은 GR1과 SA, 즉 화강암과 사암이었다. 다른 시료들과 마찬가지로 이들에 대해서 기복도와 음영기복도가 그려졌다. 화강암의 경우 동일한 원 재료에서 얻어진 시료들임에도 불구하고 서로 다른 전반적인 기반암 표면의 마식에 따른 거칠기의 변화가 나타났다. GR1의 A 시료의 경우 시험 이전의 양상은 상대적으로 단순한 모습을 띄고 있다(그림 2(가)). 시료 준비의 과정에서 형성된 완만한 경사가 나타나고 있으나 전반적으로 표면은 평탄한 모습을 지니고 있는 것으로 판단된다. 그러나 실험 과정을 거치면서 기존의 기반암 시료 표면의 평탄성과 규칙성은 완전히 사라지고 매우 불규칙한 형상을 지니는 불규칙한 면으로 변화하였다(그림 2(나)). 그러나 다른 부분에 비하여 중앙부가 주변부에 비하여 전반적으로 낮은 것으로 나타나고 있다. 동일한 하천의 조립 퇴적 물질로부터 준비된 GR1의 A와 B는 기반암의 특성에 있어서 큰 차이가 존재하지 않는다. B 시료의 경우 실험 이전에는 0.2mm 이내의 높이 차이를 지니고 있는 전반적으

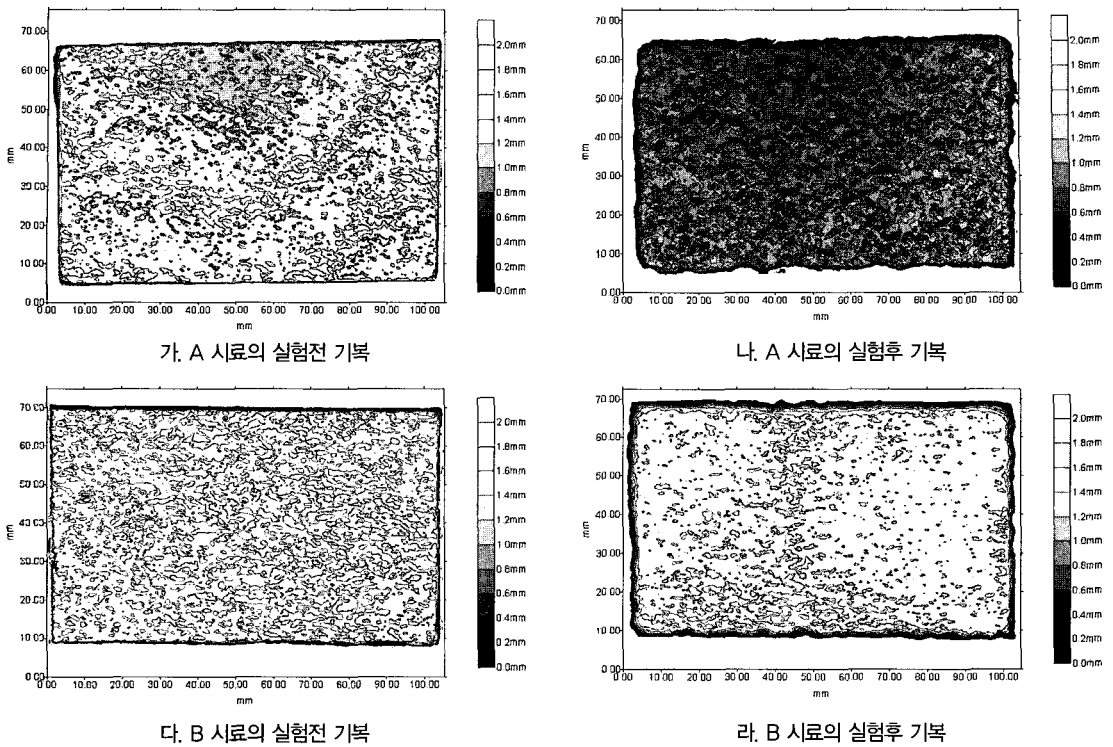


그림 2. 화강암 시료 1의 기록

로 평탄한 모습이나 일부 0.05mm이내의 폭을 지나는 돌출부가 존재 하고 있다(그림 2(다)). 마식 실험의 결과 이러한 돌출부의 대부분이 사라졌으며 전반적으로 시료의 높이 차이가 거의 없는 형태로 바뀌었다(그림 2(라)). 마식은 시료의 횡단면 곡선상의 중앙부와 종단면 곡선상의 전면부와 후반부에 집중되어 있다. 실험의 과정에서 GR1-A 시료는 슬롯의 좌측면에 장착되었으나 마식이 집중된 곳은 기반암 시료의 중앙 부분이다. 도리어 양측면의 모서리 부분의 변동은 크지 않은 것으로 나타나고 있다. 일반적인 마식에 대한 논의들은 한쪽 측면에 대한 지지가 약한 경우 해당 부분의 전반적 마식의 저항력이 취약한 것으로 이해되고 있으나, 이러한 실험 결과는 이전의 논의와는 상당히 다르며 도리어 퇴적물 입자의 이동 경로 등의 영향도 중요한 것을 판단된다. 한편 동일한 암석인 시료 A와 B에서 발견된 차이는 화강암의 조암 광물의 결합과 관련된 미세구조의 문제에 기인하는 것으로 추정된다.

횡단면에 대한 분석에서도 화강암 1-B는 거칠기의 감소 유형이 앞서 지적한 바와 같이 나타나고 있다. 화

강암 1A의 경우 실험 이전의 계측에 의하면 거칠기 요소의 높이는 0.4mm 내외로 나타나고 있으나, 실험 이후의 계측에 의하면 그 거칠기의 정도는 2배 이상 규모로 성장하였다. 마식은 주로 기반암 시료의 중앙부에 집중되는 것으로 나타났다. 1B의 시료에 대한 횡단면 분석의 경우 특징적인 모습을 보여주고 있다.

사암 시료의 기록도는 모든 시료 가운데 가장 큰 변화를 보여주고 있다(그림 3). 실험 이전의 스캔 결과에 의하면 약간의 경사를 지니는 거의 평탄한 면이었으나(그림 3(가)) 마식 실험의 결과 시료의 외곽 부분의 강력한 마식으로 둥근 모양을 지니는 면으로 변모하였다. 이러한 강력한 마식은 다른 암석보다 상대적으로 마식에 취약한 시료의 물리적 특성에 의해서 설명되어질 수 있다. Lee and Rutter (2004)는 화강암과 변성암 등 공극률이 낮은 암석과 공극률이 큰 사암과의 접촉 마식 과정에서 나타나는 특성을 비교하였다. 공극률이 낮은 암석의 경우 주로 일련의 마식흔(striation)이 형성되고 다른 면에 있어서는 광택을 지니는 면(polished surface)이 형성되는데 반하여 공극률이 높은 암석은

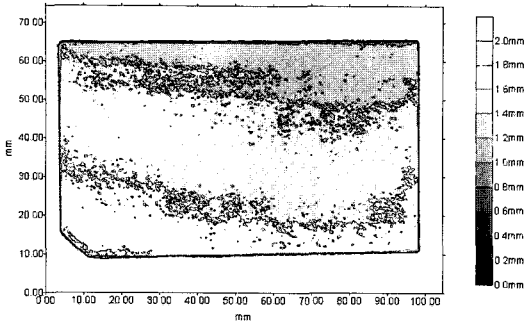


그림 3(가). 사암B 시료의 실험전 표면 기록

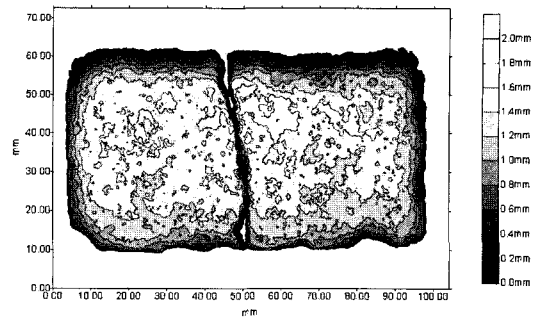


그림 3(나). 사암B 시료의 실험후 표면 기록

약한 입자에 의하여 결합된 강한 암석(석영입자)들이 전체적으로 떨어져 나가 거친 면이 형성되게 된다. 이들의 연구에서는 시료가 깨진 부분을 중심으로 강력한 마식이 나타나는 것이 발견되었으며, 이는 시료의 경계부와는 다른 내부의 깨진 부분에서 발생하는 현상으로 파악된다. 유사한 마식 유형이 사암에서 발견되었으며 화강암 가운데 일부에서도 나타났다.

사암 시료(SA-B)의 단면에 대한 스펙트럼 분석 결과는 앞서 제시한 사암의 마식 과정의 특징을 뒷받침 하는 것으로 판단된다. 실험 이전의 스펙트럼은 <0.12 이하의 저빈도(low frequency) 구간에서 2차에 걸친 정점이 나타나는 것으로 관찰되었다. 일반적인 빈도-강도 곡선과 마찬가지로 저빈도 구간은 파장의 길이가 길고 파고가 높은 요소에 의한 거칠기 요소를 의미하며, 고빈도 구간은 파장의 길이가 짧고 파고가 낮은 거칠기 요소를 말한다. 따라서 저빈도 구간의 정점의 출현은 다른 부분에 비하여 상대적으로 높이가 높은 즉, 규모가 큰 거칠기 요소에 의하여 표면의 거칠기가 지배된다는 것을 의미하며, 이는 사암을 구성하는 석영 입자의 크기와 관련이 깊은 것으로 판단할 수 있다. 실험 이후 스펙트럼은 저빈도 구간의 거칠기 요소가 완화 되거나 사라지고 고빈도(high frequency) 구간의 스펙트럼이 전체 거칠기 요소에서 차지하는 비중이 높아지는 것으로 나타났다. 이는 개별 입자가 충격에 의해서 탈락하는 현상에 기인하는 것으로 보인다.

다양한 암석의 결합으로 구성된 퇴적암인 Glen Coe의 화산각력암(Breccia)은(Kokelaar and Moore, 2006)은 다른 기반암 시료들과는 다른 유형을 나타냈으며(그림 4), 이는 다양한 암석들 간의 결합구조가 가

시적으로 마식의 정도에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 화산각력암A(BR-A)의 경우 실험 이전에 존재하던 소규모의 균열(crack)들이 보다 큰 규모의 균열으로 성장한 것으로 판단된다. 화산각력암 A의 경우 마식에 약한 것으로 생각되는 입자 부분에 다른 부분에 비하여 깊은 와지(窪地) 형상의 미지형이 형성되었으며, 시료 전면부의 마식이 전반적으로 중앙부를 향해 성장하는 모습을 보여 주고 있다. 전반적으로 화산각력암의 마식에 의한 와지의 형성은 특정 광물의 분포와 깊은 관련이 있으며, 이질적인 광물 간의 경계부가 마식 작용에 의해 가장 빠르게 해체되는 것으로 판단된다. 그림 4(다)에 나타나고 있는 것은 실제 성장한 광물 경계부의 균열이며, 균열부를 따라 차별적인 마식이 발생한 결과이다.

마식에 강한 저항력을 지니는 유리질의 결정 구조를 지니고 있으며, 운모(Mica)를 중심으로 한 물질들이 산포하는 안산암(Kokelaar and Moore, 2006)의 경우 마식 과정에서 거의 변화를 보여주지 않고 있다. 다만, 퇴적물 입자와의 충돌로 인하여 형성된 직경 2~3mm의 충격흔(percussion marks)이 나타났으며(그림 5), 이 충격흔의 형성은 퇴적물과 기반암의 충돌 과정에서 가해지는 힘에 의해 입자 결합 부위가 약화 되고 일시에 입자가 제거되었던 것으로 판단된다. 안산암의 경우에도 기반암 시료의 전면부로부터의 마식 발생과 중앙부로의 확장이 부분적으로 관찰되었으며, 이는 일반적인 현상으로 판단된다.

안산암에 대한 스펙트럼 분석에 의하면 안산암 역시 동일한 기반암으로 추정되는 경우에도 강도가 다른 마식 방식을 보인다. AN1-A의 경우 제한된 부분에서의

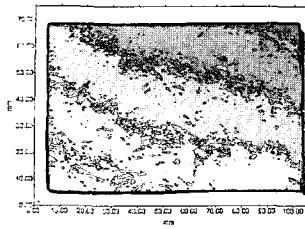


그림 4(가). 화산각력암A의 실험전 기록

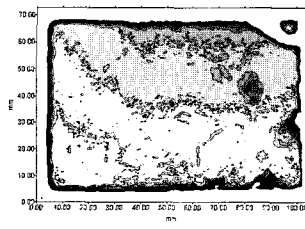


그림 4(나). 화산각력암A의 실험후 기록

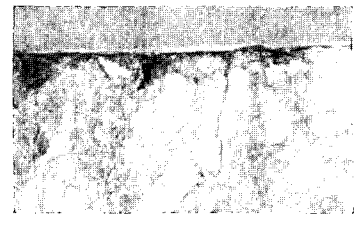


그림 4(다). 화산각력암A에서 서로 다른 조암 광물 사이에 형성되어 성장한 균열

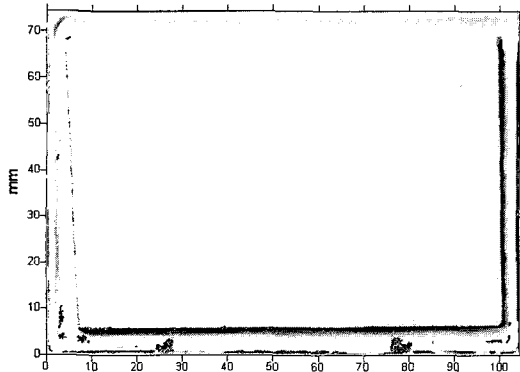


그림 5(가). 안산암-B의 실험전 음영기록도

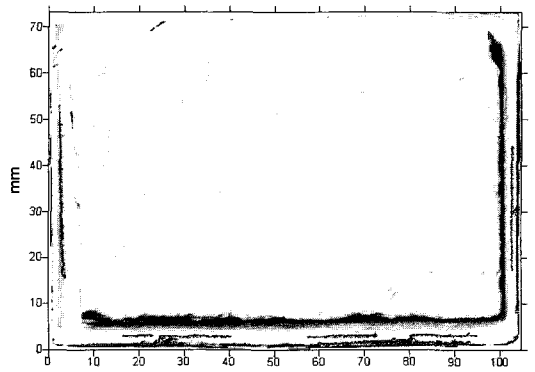


그림 5(나). 안산암-B 실험후 음영기록도

마식으로 인하여 거칠기의 정도가 증가한 것으로 나타나고 있다. 결과적으로 소규모 거칠기 요소를 나타내는 고빈도 부분의 전체 거칠기예의 기여가 감소하고 있으며 대신 저빈도 부분으로 표현되는 상대적으로 큰 거칠기 요소의 기여도가 증가하는 유형을 보여 주고 있다. AN1-B의 경우 AN1-A의 경우에 비하여 강력한 소규모 거칠기 요소의 기여도 감소가 나타나고 있다. 일반적으로 이러한 현상은 마식의 과정에서 소규모 거칠기 요소가 파괴되는 과정에 의한 것으로 판단되고 있다(Wang and Scholz, 1994). 실험에 사용된 시료의 경우 입자의 빠짐 현상도 큰 거칠기 요소의 전체 거칠기 증가에 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다.

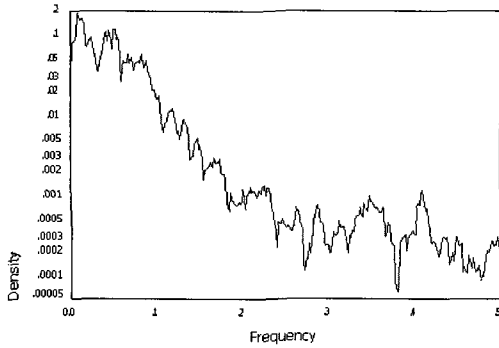
동일한 결과가 종단면에 대한 분석 결과에서도 나타났다. 특히 AN2-A의 경우 전반적으로 표면이 거칠어졌으며, 규모가 큰 거칠기 요소의 기여도가 10배 이상 증가한 것으로 나타났으며, 소규모 거칠기 요소 역시 상대적 기여도는 감소하였지만, 절대적인 정도는 증가하였다.

규암(QU)-A시료의 종단면에 대한 스펙트럼 분석에

의하면 기반암의 표면 거칠기의 스펙트럼은 크게 두 부분으로 나뉜다(그림 6). 저빈도 (<0.1)구간과 고빈도 구간 (>0.2)은 확고히 구분되는 양상을 지니고 있으며 마식에 의하여 두 거칠기 요소 구간의 구분은 크게 줄어들어 가는 것으로 나타나고 있으며, 전반적으로 거칠기 요소가 감소하는 양상을 보여 주고 있다. 규암(QU)-B 시료들의 경우 횡단면의 측면에서 본다면 실험 결과 시료 표면의 거칠기 정도가 증가한 것으로 나타났으며 규암의 경우에도 소규모 거칠기 요소보다는 보다 규모가 큰 거칠기 요소가 증가 하는 양상으로 나타났다. 스펙트럼에 의하면 고빈도 구간(>0.3)에서의 분산은 감소하였으며, 전반적으로도 분산은 감소하는 유형을 보이고 있다. 또한 지배적인 파장 즉, 거칠기 요소의 크기 역시 감소하였다.

3) 주사전자현미경을 이용한 분석 결과

이상 논의한 바와 같이 모든 암석에 일반적으로 적용할 수 있는 마식의 유형은 실험을 통해서 파악되지



(가) 실험이전의 Spectral density



(나) 실험후의 Spectral density

그림 6. 규암A 시료의 종단면에 대한 Spectra

(Spectrum을 추정을 위해서 Tukey-Hamming을 이용하였다. Box-Jenkins model (ARIMA(2,1,1))에서 발견된 추세는 분석 이전에 제거되었다. 저빈도 구간의 거칠기 요소의 지배정도가 약화된 것으로 나타나고 있다.)

않았으며 동일한 기반암의 경우에도 서로 다른 반응의 양식을 보이는 것으로 파악되었다. 따라서 이러한 현상이 발생한 구체적 원인을 파악하기 기반암 시료들에 대한 주사전자현미경을 이용한 조사를 실시하였다. 본 연구에서는 마식 특성을 파악하기 위한 특징적인 결과들이 나타난 기반암 시료들에 대한 결과를 제시하고자 한다.

화산각력암에 대한 주사전자현미경을 이용한 분석 결과에 의하면 마식은 마식되는 면 전반에 걸쳐서 일어나는 것이 아니라 특정 지점에서 시작되어 주변 지역으로 확산되는 것으로 보인다. 이동 중인 퇴적 물질과 충돌에 의하여 기반암면에 미세한 충격흔(crater)을 남기게 되며, 추가적인 충격에 의하여 충격흔이 성장되거나 다른 충격흔과 결합하여 마식에 의하여 형성되는 와지의 면적을 증가시키게 된다(그림 7). 그림 7(가)의 흰색 화살표는 다양한 형상의 충격흔을 보여 주고 있다. 그림 7A의 중앙부에 대한 확대 결과에 의하면 충격흔이 형성되는 지점과 성장하는 과정에는 기반암을 구성하고 있는 물질의 국지적인 차이가 상당한 기여를 하고 있음이 나타난다(그림 7(나)). 그림 7(나)의 1과 2로 표기된 부분은 마식이 시작되는 것으로 판단되는 지점으로 서로 다른 구성 광물의 경계부를 나타내고 있다. 1로 표기된 부분은 장석류(feldspar)가 노출된 부분으로 마식에 취약한 광물로 판단되는 장석류가 쉽게 제거된 뒤, 주변으로 침식되는 부분이 확대되고 있다.

확대되는 부분에 위치하는 광물의 마식의 저항도는 약하지 않으나, 주변 부분이 침식되어 나감에 따라 지지력이 약화되어 침식에 취약해지는 것으로 판단할 수 있다. 장석류는 주로 판상(板狀)으로 떨어져 나가는 과정을 겪는 것으로 판단할 수 있다. 2로 표기된 부분의 경우 주변부에 비하여 침식에 강한 것으로 추정되는 석영(quartz)과의 경계부를 보여주고 있다. 석영은 풍화와 침식에 매우 강한 광물이나, 물리적인 충격에 의해서 깨지는 특성을 지니는 것으로 보인다. 깨어진 석영 주변의 암석 역시 쉽게 마식 과정에 의해서 제거되는 것으로 보인다.

유사한 과정들이 안산암과 화강암과 같은 다른 시료에서 역시 관찰되었다. 그림 8(가)에 보이고 있는 석영 입자 주변 부분의 경우 역시 이전의 그림 7(나)에서 나타나는 것과 유사한 모습이다. 화살표 1과 3은 석영 입자 주변에 형성된 깨진 틈을 보여주고 있으며 석영 입자 주변의 지지력이 취약한 부분이 이동 중인 입자와의 충돌로 인하여 부서지는 과정이 나타나고 있다. 이 부분들을 퇴적물과의 충돌로 인한 압력으로 파쇄된 압쇄(壓碎: crushed) 부분이라고 표현할 수도 있다. 이러한 압쇄의 과정으로 형성된 산물은 원마도(圓磨度)가 낮고 예리한 각을 지니는 작은 입자들로 추정된다. 실험 과정에 대한 설명에서 지적한 바와 같이 1시간 동안 초음파 세척을 통해 마식에 의한 부산물을 제거한 관례로 이미지에 나타나는 깨진 틈들은 아직 완전히 분

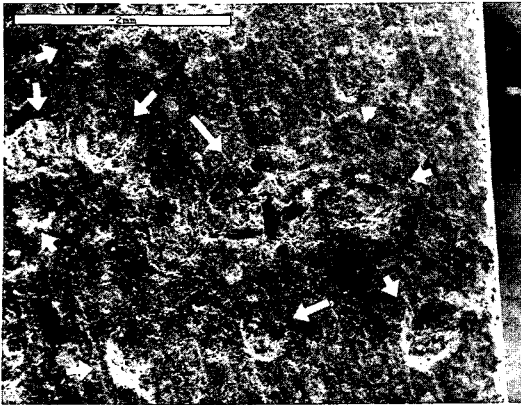


그림 7(가). 화산쇄설암A의 침식에 저항력이 강한 부분에 대한 주사현미경사진. 흰색 화살표가 가리키는 부분은 퇴적물질과의 충돌에 의해 형성되었다.

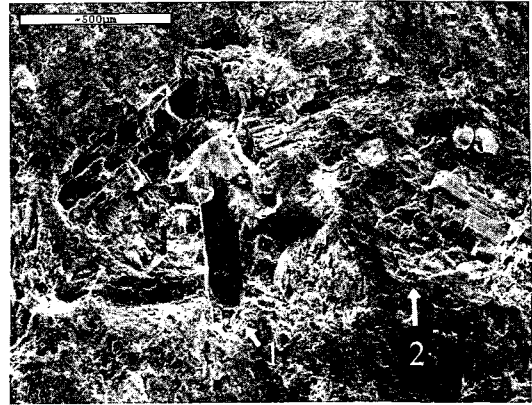


그림 7(나). 그림 7(가)의 중심부에 대한 확대 사진. 1로 표기된 부분에서는 장석류의 제거 현상이 2로 표기된 부근에서는 석영주변의 마식 양상을 보여주고 있다.

리되지 않은 것으로 판단 할 수 있으며, 완전히 분리된 부분들은 세척 과정에서 제거되었다고 볼 수 있다. 이러한 주변부의 압쇄 과정이 발생할 경우 석영 입자는 전면에 노출되며 퇴적물 입자와의 충돌에 의해서 집단적으로 깨져 나가는 현상이 나타나게 되며, 그 이전에 입자와의 충돌로 인하여 주변의 다른 광물과 물리적으로 분리되는 현상이 나타난다. 최종적으로 석영 부분이 제거되고 난 뒤 형성되는 면은 2번 화살표에 나타나는 바와 같이 매우 부드러운 cast형식의 단면이 된다. 해당 부분은 매끄러운 편이며 이전 석영이 자리하고 있던 모습을 보존하고 있다.

그림 8(나)는 마식에 대한 저항도가 서로 다른 광물들이 혼재(混在)하는 경우의 마식의 유형을 제시하고 있다. 흰색의 선들은 광물 간의 경계선을 보여주고 색선으로 표시된 부분의 광물은 마식에 대한 저항도가 큰 광물로 판단된다. 마식에 대한 저항도가 상대적으로 큰 광물이 차지하는 면적이 넓은 경우, 마식에 의해 제거되지 않고 다른 부분에 비하여 광물의 경계선을 따라 돌출하는 경우도 나타나게 된다. 이미지 우측과 중앙부의 마식에 의하여 변형이 발생 하지 않은 부분의 경우 앞서 지적한 바와 같이 이후의 시료높이의 차이를 유발하는 한 원인이 된다. 이미지의 점선 좌측 부분과 중앙의 상하 부분의 경우 마식 과정에 의해서 층을 지니는 예리한 전단면(剪斷面)을 보여 주고 있다. 이러한 형상은 주로 광물의 깨짐 과정(breakage)에 의

하여 형성되는 것으로 판단된다. 깨짐이 우세한 부분인 좌측 부분과 중앙부 사이의 부분에는 압쇄에 의한 것으로 형성되는 형상과 함께 저항에 강한 부분과의 경계를 따라 깊은 홈(hollow)이 형성되어 나타나고 있다. 이 홈의 경우 마식에 약한 부분이 제거된 뒤 마식에 강한 부분이 탈락하는 과정을 거쳐 형성된 것으로 판단된다.

주사전자현미경을 이용한 분석의 결과 드러난 것은 앞서 지적한 바와 같이 기반암을 구성하고 있는 광물들의 마식에 대한 저항 정도의 차이에 따라서 마식에 의하여 형성되는 표면의 형상에 차이가 있다는 것이다. 또한 광물의 경계부 역시 마식 과정에 매우 취약한 부분으로 경계부를 따라 형성되는 균열이 이후의 마식 양상에 지배적인 요소로 작용 한다고 판단된다. 구성 광물의 차이와 그 광물들의 분포 등을 기반암의 미세구조로 정의한 이전의 연구들에 의한다면, 이 결과는 광물의 일반적인 강도, 공극률과 같은 특성과 함께 광물의 미세구조가 마식에 의한 기반암의 표면 형상 변화에 가장 중요한 원인이 된다는 이전의 결론들을 뒷받침하는 것으로 판단된다. (Dogan and Howk, 1995, 2001; Hussainova *et al.*, 2001; Lee and Rutter, 2004).

세라믹과 금속물질의 혼합으로 만들어진 cermets를 이용한 이전의 실험 연구들은 물질의 단순 경도(simple hardness) 혹은 탄성도(elasticity)가 마식률이

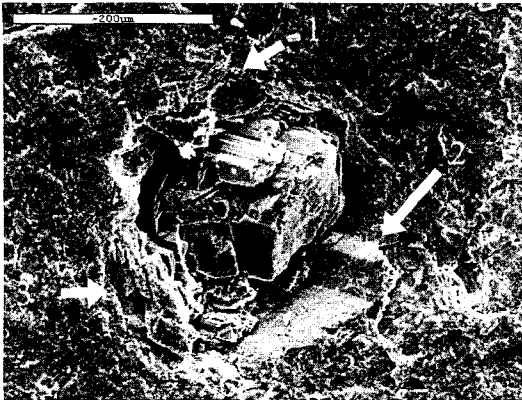


그림 8(가). 안산암 시료A(AN1-A)의 주사현미경 사진

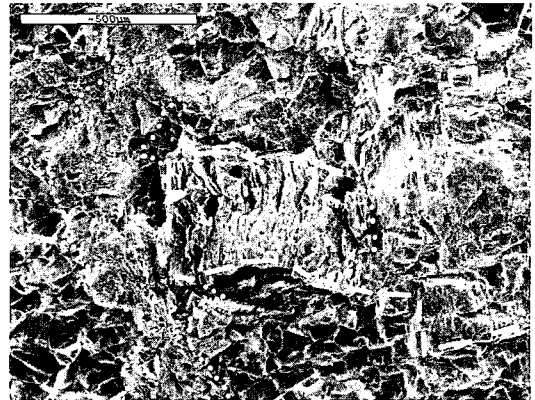


그림 8(나). 화산각력암 시료중 다양한 암석이 혼재한 부분의 주사전자현미경 사진. 선과 점은 광물간의 경계를 보여준다.

나 침식 메커니즘을 설명하지 못한다는 것을 밝힌바 있다(Hussainova *et al.*, 2001). Hussainova *et al.*(2001)은 특정한 경우 낮은 탄성도와 강도가 높은 마식률을 낳기도 하지만, 물질의 구성 방식에 따라서는 가장 강도가 높은 경우에서 가장 높은 마식률이 발견된다는 것을 보고하였다. 이때 서로 다른 조성은 서로 다른 미세구조를 의미하며 특히 구성 물질 간의 경계부에서 특징적인 구조가 발견되는 것으로 분석되었다. Dogan and Hawk(1995, 1999, 2001) 역시 일련의 실험을 통하여 구성 물질의 입자 크기와 입자들 간의 결합 구조가 마식의 공간적인 양식과 마식률을 통제한다는 것을 증명하였다. 특히 이들은 충돌로 인하여 발생하는 표면 하부의 균열들이 일차적인 충격에서는 물질을 제거하는 마식과정을 유발하지 못하지만, 이후 마식의 공간적인 양상을 결정하는 사전디자인(pre-design)의 역할을 수행한다는 것을 증명하였다. 이들은 또한 주사전자현미경을 이용한 조사를 통하여 이러한 균열의 형성이 서로 다른 조성 물질의 경계부에서 탁월하게 나타나는 것을 발견하였다. 그러나 이러한 현상이 기반암의 마식과정에서도 나타나는지의 여부에 대한 연구는 이루어지지 않았으며, 본 연구의 결과는 이러한 이전의 연구 결과들이 기반암 마식과정에서도 나타남을 보였다. 본 연구에서는 기반암 시료의 단면에 대한 주사전자현미경을 이용한 조사는 이루어지지 않았기 때문에 추가적인 연구를 통하여 소위 사전 디자인에 대한 논의를 실증적으로 입증할 필요가 존재

한다.

또한 이전의 실험 연구들에 충돌하는 퇴적물 입자의 형상, 상대적 강도, 지배적인 충돌각 등이 기반암의 마식율과 마식 방식에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으나(Oka *et al.*, 2001), 본 연구에서는 이에 대한 조사는 이루어지지 않았다. 따라서 추가적인 연구를 통하여 이에 대한 연구를 진행하는 것이 필수적인 것으로 판단된다.

다수의 기반암 마식지형이 존재하는 Glen Etive의 경우 동일한 기반암에 발달한 다양한 지형에서의 기반암 표면의 거칠기는 서로 다른 모습을 보여준다. 퇴적물 공급 조건을 포함하는 하천의 수문학적 조건이 동일한 경우 서로 다른 기반암 표면의 거칠기의 해명에는 어려움이 존재한다. 기반암 하상지형에 대한 일반적인 논의에 의하면(Richardson and Carling, 2005), 기반암 하상지형은 지질구조적 요인이 주도적인 성인이 되어 형성되는 경우와 수문학적 조건이 주도적인 경우로 나누어진다. 지질구조적 요인은 퇴적암의 경우 층서, 구조선, 절리등이 주요한 변수로 지적되고 있으며, 변성암과 화성암에서는 본 논문에서 미세구조로 지칭된 조암광물의 분포, 각 조암광물의 침식에 저항정도 등이 포함되어진다. 서로 다른 저항 정도는 전반적으로 기반암 하상 표면의 불규칙성을 유발하게 된다. 즉, 동일한 수문조건하에서 기반암의 미세구조의 차이는 장기적 지형발달에서 서로 다른 지형을 형성하게 된다. 본 연구의 결과에 의하면 동일한 암

석이 동일한 마식 조건에 직면한 경우에도 그 적응 방식은 암석이 지니고 있는 미세구조에 따라 서로 다른 것으로 나타나고 있어 이러한 일반론적 연구를 지지하는 것으로 볼 수 있다.

4. 결론

마식 실험기를 이용하여 기반암 시료를 퇴적물질과 충돌하여 마식하는 실험을 하고 기반암의 시료 표면의 변화를 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 추적하였다. 스캐너를 통하여 얻어진 자료를 DEM으로 구축하고 표면의 변화 양상을 통계적 처리 기법 등을 이용하여 분석하였다. 또한 주사전자현미경을 이용한 관찰을 통하여 마식 과정에 영향을 미치는 광물의 특성 및 미세구조의 영향에 대하여 조사하였다. 기반암의 마식 과정에서 발생 하는 표면의 변화를 고찰하기 위하여 다양한 방식의 접근법을 이용하여 고찰하였으나, 단일한 관찰 기법으로 총체적인 변화의 양상과 원인을 밝히는 데는 한계가 있으므로 다양한 기법의 복합적 이용이 필수적인 것으로 판단된다.

기복도와 음영기복도를 이용한 분석 결과에 의하면 시료의 외곽 경계 부분과 시료에 형성되는 균열을 중심으로 마식이 발생하는 것으로 드러났으며, 시료의 위치와는 무관하게 횡단면으로 본다면 중앙 부분에 마식이 집중되는 것으로 나타났다. 종단면 곡선상으로 본다면 시료의 전면부(이동하는 퇴적물과 처음 만나는 부분)를 중심으로 마식이 시작되어 점차 중앙 부분으로 성장해 들어가는 것으로 나타났으나, 그 마식의 시작 지점과 성장 지점을 일반화시키기는 어려운 것으로 나타났다. 형성된 균열을 중심으로 한 마식의 개시는 이러한 경향에도 불구하고 모든 시료에서 관찰되었다.

전반적인 표면 형상의 변화는 크게 두 가지 방향으로 전개 되는 것으로 나타났다. 횡단면에 있어서의 경사가 급해지면서 종단면상에 있어서의 경사가 감소하는 유형이 관찰되었다. 종단면의 경사 감소로 인하여 기반암 시료 표면의 단면 형상이 불룩형에서 오목형 혹은 보다 평탄한 형태로 변화하였다. 두 번째 유형은

횡단면과 종단면 모두의 평탄화이다. 두 경우 모두 종단면의 변화는 전면부(leading edge)의 경계 부분의 마식이 강력하게 나타나는 것으로 나타났다. 시료 표면의 거칠기 정도 변화는 각 시료의 암석학적인 특성에 의해 의하여 결정되는 것으로 나타났다. 거칠기의 변화 정도 역시 직접적으로 측정하는 기법에 대한 정리가 존재 하지 않는 관계로 다양한 기법이 동원되었으며, 통계적인 기법을 활용하는 것이 기본적인 차이의 해석에는 유용한 것으로 드러났다. 다만 추가적인 연구를 통해 계량적인 비교의 기법들은 추가적으로 개발되어야 할 것이다.

거칠기 정도의 감소는 소규모의 거칠기 요소를 제거하여 광택면(polished surface)을 형성하게 된다. 전반적으로 거칠기 요소의 감소는 일반적인 마식에 의한 변화 방향인 것으로 판단된다. 그러나 일부 시료에서는 거칠기 정도가 증가 하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 경향성은 기반암의 암석학적인 특징, 특히 광물 입자의 결합 형태에 의한 영향이 강력한 것으로 판단된다. 또한 서로 다른 구성 광물은 충격에 대한 다른 반응 양식을 보여주고 있다. 화산각력암의 사례를 본다면 서로 다른 구성 광물의 경계부를 중심으로 균열이 형성되었으며, 균열의 성장에 의하여 전반적인 거칠기의 증가가 나타났다. 화성암의 경우 작은 결정들이 이완되고 탈락하면서 거칠기 요소의 변화에 많은 영향을 미친 것으로 드러났다. 퇴적암 가운데 사암의 경우 표면 입자의 제거가 거칠기 요소의 감소로 연결되지 않았다. 암석의 강도를 추정하기 위하여 널리 이용되는 슈미트해머를 이용한 강도 측정 결과는 전반적인 표면 양식의 변화와 거칠기 요소의 변화 등 마식으로 인한 표면 변화의 설명에 기여하지 못하였다. 본 실험의 결과들은 이전의 공학 분야에서 세라믹과 금속에 대해 행해진 실험 연구에서 발견된 미세구조의 중요성 등이 기반암 마식 과정에도 적용됨을 실증적으로 밝혔다.

실험에 이용된 마식 실험기의 크기, 퇴적 물질의 양, 기반암 시료의 크기의 한계 등과 같은 한계점으로 인하여 본 연구의 결과들을 그대로 일반화시켜 현장 연구에 적용시키기에는 어려움이 있다. 그러나 이 실험의 결과는 절리가 조밀하게 발달한 암석에 대한 관찰에는 상당한 시사점을 제공할 수 있을 것으로 판단된

다. 특히 현장 조사에서 발견되고 있는 일부 기반암 마식 미지형에 대한 설명에 있어서는 유용한 틀을 제공하고 있다고 볼 수 있다. 이전의 현장 연구들은 기반암 하상에 형성되는 상당수의 미지형들이 특정한 지점에 집중되는 경향이 있다는 것을 밝혀냈으며(Gregory, 1915; Hancock *et al.*, 1998; Richardson and Carling, 2005). 이 미지형들이 절리와 같은 구조적 취약부와 관련이 크다는 것을 주장해왔다. 이 실험 연구에서 드러난 결과들은 이러한 이전의 연구들에 대한 실질적인 뒷받침이 될 것이다.

謝辭

본 연구는 필자 박사학위 논문 내용의 일부를 기초로 보강한 것이다. 본 연구의 시료 채취 과정과 시료의 준비 과정에 도움을 준 University of Glasgow의 Trevor Hoey, Avril McRobb, Peter Chung에게 감사한다. 세분의 익명의 심사자의 조언은 이 원고의 개선에 많은 도움이 되었다.

註

- 1) Young's Modulus란 힘이 가해졌을 때 물질의 변형 정도를 측정하는 기법이다. 같은 굵기의 막대시료를 양쪽에서 힘을 가하여 신장시킬 경우 시료에 가해지는 변형력은 시료의 단위 길이당 늘어나는 정도에 대하여 시료가 가진 탄성 한계에 비례한다. 이때 단위 길이당 늘어나는 정도를 탄성한계로 나눈 값을 연신 탄성률이라 하며 이를 도입한 이의 이름을 따서 Young's modulus라 한다.
- 2) 브라질식 인장실험(Brazilian test)는 암석의 인장 강도를 내는 시험 방법으로 원주형으로 생긴 시료에 대하여 측면에서 압력을 가하여 강도를 측정하는 실험이다.
- 3) 기반암 시료의 마식은 사용된 퇴적물질의 입자크기, 퇴적물질의 양에 따라 다른 것으로 나타났다. 그러나 해당 내용은 본 논문의 영역을 넘어서며, 시료의 퇴적물 운반 조건과 기반암의 종류에 따른 마식률 변화 등에 대한 실험 결과 및 토론은 추후 별도의 논문으로 보고될 것이다. 또한 퇴적물의 압축강도와 입자 자체의 마식률의 관계 역시 조사되었으며 별도의 논문을 통해 보고될 것이다.

文獻

- Allen, J.R.L., 1971, Transverse erosional marks of mud and rock: Their physical basis and geological significance, *Sedimentary Geology*, 5, 167-385.
- Alman, D.E., Hawk, J.A., Tylczak, J.H., Dogan, C.P., and Wilson, R.D., 2001, Wear of iron-aluminide intermetallic-based alloys and composites by hard particles, *Wear*, 252, 875-884.
- Anamalay, R.V., Kirk, T.B., and Panzera, D., 1995, Numerical descriptors for the analysis of wear surface using laser scanning confocal microscopy, *Wear*, 181, 771-776.
- Bhushan, B., Gupta, B.K., and Azarian, M.H., 1995, Nanoindentation, microscratch, friction and wear studies of coatings for contact recording applications, *Wear*, 181-183, 743-758.
- Bitter, J.G.A., 1963, A study of erosion phenomena: Part 2, *Wear*, 6, 196-190.
- British Standard, 1998, *Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates Part 2: Method for the Determination of Resistance to Fragmentation*: BS EN 1097-2:1998.
- Bryan, K., 1935, Processes of formation of pediments at Granite Gap, New Mexico, *Zeitschrift für Geomorphologie*, 9, 125-135.
- Chae, B.G., Ichikawa, Y., Jeong, G.C., Seo, Y.S., and Kim, B.C., 2004, Roughness measurement of rock discontinuities using a confocal laser scanning microscope and the Fourier spectral analysis, *Engineering Geology*, 72, 181-199.
- Cho, Y-J, Koo, Y-P, and Jeon, J-H., 2002, Surface profile estimation by digital filtering for wear volume calculation. *Wear*, 252, 173-178.
- Dogan, C.P. and Hawk, J.A., 1999, Role of composition and microstructure in the abrasive wear of high-alumina ceramics, *Wear*, 225-229, 1050-1058.
- Dogan, C.P. and Hawk, J.A., 1995, Effect of grain boundary glass composition and devitrification on the abrasive wear of Al₂O₃, *Wear*, 181-183, 129-137.
- Dogan, C.P. and Hawk, J.A., 2001, Microstructure and abrasive wear in silicon nitride ceramics, *Wear*,

- 250, 256-263.
- Dong, W.P. and Stout, K.J., 1995, An integrated approach to the characterization of surface wear 1: qualitative characterization, *Wear*, 181-183, 700-716.
- Foley, M.G., 1980, Bedrock incision by streams, *Geological Society of America Bulletin*, 91 (part2), 2189-2213.
- Gahlin, R., Larker, R., and Jacobson, S., 1998, Wear volume and wear distribution and wear distribution of hydraulic motor cam rollers studied by a novel atomic microscope technique, *Wear*, 220, 1-8.
- Gerrard, A.J., 1988, *Rocks and Landforms*, Unwin Hyman, London.
- Gilbert, G.K., 1877, *Report on the Geology of the Henry Mountains*, Department of Interior, Washington.
- Gregory, H.E., 1915, Note on the shape of pebbles, *American Journal of Science*, 39, 300-304.
- Hancock, G.S., Anderson, R.S., and Whipple, K.X., 1998, Beyond power: Bedrock river incision process and form. in Tinkler, K.J. and Wohl, E.E.(eds.), *Rivers over Rock: Fluvial Processes in Bedrock Channels*, American Geophysical Union, Washington, 35-60.
- Henning, C. and Mewea, D., 1995, Measuring the deformation of crystalline materials due to the impact of eroding particles, *Wear*, 181-183, 790-798.
- Hjulstrom, F., 1935, Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris, *Bulletin of the Geological Institution of the University of Upsala*, 25, 221-528.
- Huq, M.Z. and Celis, J.P., 2002, Expressing wear rate in sliding contacts based on dissipated energy, *Wear*, 252, 375-383.
- Hussainova, I., Kurbarsepp, J., and Pirso, J., 2001, Mechanical properties and features of erosion of cermets, *Wear*, 250, 818-825.
- Jain, S.C. and Kennedy, J.F., 1974, The spectral evolution of sedimentary bed forms, *Journal of Fluid Mechanics*, 63, 301-314.
- Jenkins, G.M. and Watts, D.G., 1968, *Spectral Analysis and Its Applications*, Holden-Day, San Francisco.
- Johnston, K., ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., and Lucas, N., 2001, *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*, ESRI, Redland, California.
- Keckler, D., 1997, *Surfer for Windows: Version 6 User's Guide*, Golden Software, Golden, Colorado.
- Kim, J.Y., 2004, *Controls over Bedrock Channel Incision*, Unpublished Ph.D thesis, University of Glasgow.
- Kokelaar, B. P. and Moore, I.D., 2006, *Classical Area of British Geology: Glen Coe Caldera Volcano, Scotland*, British Geological Survey, Nottingham
- Kuenen, Ph H., 1947, Water-faceted boulders, *American Journal of Science*, 245, 779-783.
- Lee, A.G.G. and Rutter, E.H., 2004, Experimental rock-on-rock friction wear: Application to subglacial abrasion, *Journal of Geophysical Research*, 109(B), doi:10.1029/2004JB003059.
- Luguen, M., 1914, Le straipe du lit fluvial, *Annales de Geographie*, 23-24, 385-393.
- Maxon, J.H. and Campbell, I., 1935, Stream fluting and stream erosion, *Journal of Geology*, 43, 729-744.
- Maxon, J.H., 1940, Fluting and faceting of rock fragments, *Journal of Geology*, 48, 717-751.
- Mulla, D.J., 1988, Using geostatistics and spectral analysis to study spatial patterns in the topography of Southeastern Washington state, U.S.A., *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, 389-405.
- Nagihara, S., Mulligan, K.R., and Xiong, W., 2004, Use of a three-dimensional laser scanner to digitally capture the topography of sand dunes in high spatial resolution, *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 391-398
- Oka, Y.I., Nishimura, M., Nagahashi, K., and Matsumura, M., 2001, Control and evaluation of particle conditions in a sand erosion test facility, *Wear*, 250, 736-743.
- Patton, S.T. and Bhushan, B., 1996, Micromechanical and tribological characterization of alternate

- pole tip materials for magnetic recording heads, *Wear*, 202, 99-109.
- Percival, D.B. and Walden, A.T., 1993, *Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Richardson, K. and Carling, P.A., 2005, *A Topology of Sculpted Forms in Open Bedrock Channels*, American Society of America Special Paper, 392, Geological Society of America, Boulder, Colorado
- Robert, A. and Richards, K.S., 1988, On the modelling of sand bedforms using the semivariogram, *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, 459-473.
- Rosen, B.G., Ohlsson, R., and Thomas, T.R., 1996, Wear of cylinder bore microtopography, *Wear*, 198, 271-279.
- Shepherd, R.G. and Schumm, S.A., 1974, Experimental study of river incision, *Geological Society of America Bulletin*, 85, 257-268.
- Sklar, L.S. and Dietrich, W.E., 2001, Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock, *Geology*, 29, 1087-1090.
- Skopp, A., Woydt, M., and Habig, K.H., 1995, Tribological behaviour of silicon nitride materials under unlubricated sliding between 22C and 1000C, *Wear*, 181-183, 571-580
- Thompson, D. and Wohl, E.E., 1998, Flume experimentation and simulation of bedrock channel processes, in Tinkler, K.J. and Wohl, E.E.(eds.), *Rivers over Rock: Fluvial Processes in Bedrock Channels*, American Geophysical Union, Washington, 279-296.
- Wang, W. and Scholz, C.H., 1994, Wear processes during frictional sliding of rock: A theoretical and experimental study, *Journal of Geophysical Research*, 99(B), 6789-6799.
- Whipple, K.X., Anderson, R.S., and Hancock, G.S., 2000, River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation, *Geological Society of America Bulletin*, 112, 490-503.
- Young, R.W., 1985, Waterfalls: form and process, in Bremmer, H.(ed.), *Fluvial Geomorphology*, Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband, 55, 81-95.
- 교신 : 김종연, 110-760, 대통령자문 지속가능발전위원회, 서울시 종로구 세종로 55 정부 중앙청사 6층(이메일: terraic@president.go.kr, 전화: 02-2100-8269, 팩스: 02-2100-8287)
- Correspondence: Kim, Jong Yeon, Presidential Commission on Sustainable Development, Republic of Korea, Central Government Complex, 55 Sejongno, Jongno-gu, Seoul 110-760(e-mail: terraic@president.go.kr, phone: 82-2-2100-8269, fax: 82-2-2100-8287)
- 최초투고일 07. 08. 28.
최종접수일 07. 09. 17.