

퇴적물 입자의 점하중강도지수와 마식율의 관계에 대한 연구

김종연*

A Study on Relationship between Point Load Strength Index and Abrasion Rate of Sediment Particle

Jongyeon Kim*

요약 : 하천 퇴적물질의 마식은 하상과의 충돌과 퇴적물질 입자간의 충돌에 의하여 발생한다. 하천 퇴적물질의 물리적 강도는 마식에 대한 저항의 정도를 나타내는 것으로 정의할 수 있으나, 이에 대한 실증적인 연구는 큰 진전을 보이지 못해왔다.

본 연구에서는 퇴적물질의 마식에 영향을 미치는 요소들(퇴적물질의 물리적강도, 퇴적물질의 크기, 퇴적물질의 양등)의 관계를 파악하기 위해서 마식기를 이용한 물리적 실험을 실시하였으며, 특히 퇴적물질의 물리적 강도가 마식율에 미치는 영향을 분석하는데 강조점을 두고 있다. 이 실험에서는 266개의 퇴적물을 이용했으며, 퇴적물질의 양과 퇴적물질의 평균 무게에 따라 11개의 소집단으로 나눠 실험하였다. 각 실험은 1시간 단위로 이루어 졌으며 퇴적물질은 최장 8시간 동안 마식되었다. 마식율은 각 실험단계마다 퇴적물질 입자 무게의 변동으로 측정하였으며, 총 2,128번의 측정이 이루어졌다. 퇴적물질의 물리적 강도는 시험이 종료한 뒤에 파괴하중을 측정하여 계산한 점하중강도지수를 통해 측정하였다.

퇴적물질의 점하중강도지수는 마식율과 음의 상관성이 있는 것으로 나타났으나, 두 변수들 간의 회귀식의 설명율(R^2)은 0.22로 나타났다. 퇴적물질의 전반적인 마식은 실험 초기에는 빠르게 진행되지만, 풍화각이 제거된 뒤에는 마식율이 급감하는 경향을 보여주고 있다. 풍화각을 제거하는 초기 단계에는 퇴적물질의 물리적 강도와 마식율의 관계가 미약하지만 이후로 점점 설명율이 상승한다. 이 실험 결과에 의하면 퇴적물질의 물리적 강도는 마식율의 결정적인 설명변수가 아닐 수 있으며, 물리적 속성 이외에도 퇴적물질의 운반조건 등이 마식율에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

주요어 : 마식, 점하중강도지수, 물리적 모형, 마식기

Abstract : Sediment abrasion in rivers is caused by the interaction between bedrock channel bed and sediment particles transported through the river. Abrasion rate of sediment particles in rivers is controlled by two major factors; Sediment transport conditions including hydraulic conditions form the erosive forces and physical and chemical strengths of the particles form a resistance force against abrasion and other erosional processes.

Physical experiments were performed to find the role of each variable on sediment abrasion process. Total 266 sediment particles were used in this experiment. All sediment particles were divided into 11 independent sediment groups with sediment particle size and sediment loads. Each sediment groups were abraded in tumbling mill for up to 8 hours. Changes in weight were recorded by run and total: 2,128 cases of abrasion rate were recoded. Physical strength of rock particles was measured with point load strength index.

It is found that sediment abrasion rate has a negative functional relationship point load strength index ($I_{pl(50)}$). ($R^2=0.22$). It was suggested that physical strength of sediment particles set the "maximum possible abrasion rate". As sediment flux increases, abrasion rates of sediment particles with similar point load strength index were changed. It

* 국회입법조사처 입법조사관(Legislative Researcher, National Assembly Research Service, Republic of Korea), terraic@assembly.go.kr

could be concluded that not only physical characteristics of sediment particles, but also sediment transport conditions control sediment abrasion rates.

Key Words : abrasion, point load strength index, physical modelling, tumbling mill

1. 서론

하천의 하상을 구성하는 퇴적물질의 입자 크기는 상류에서 하류로 가면서 거리 증가에 따라 지수함수 곡선의 형태로 감소하는 경향성을 지니고 있다. 하천 퇴적물질의 입경 감소 현상은 충적 하도에서 하천의 하도 경사 조정을 통하여, 하천의 수문과 하천 퇴적물질의 운반 정도에 큰 영향을 주며, 그에 따라 하천의 측방 및 하방 침식에 영향을 미친다(Wolman and Brush, 1961). 또한 하천 퇴적물질은 하천 생태계에서 동식물의 서식 및 산란 공간을 구성하는 기본적인 요소이기 때문에, 퇴적물질의 입경 변화는 하천의 수생 생태계의 변화에 큰 영향을 준다(김익재 등, 2007). 이러한 하천 퇴적물 입자의 입경 감소에 대한 현장 보고는 19세기 후반부터 이루어졌으며(Bonney, 1888), Sternberg는 하상에서의 퇴적물질의 입경의 감소를 $W=W_0e^{-awx}$ 의 함수식으로 표현하기도 하였다.

퇴적물질의 입경 감소 현상의 원인으로는 하천의 하천 중단 곡선(longitudinal profile)에 기인한 하천력의 분급에 따른 공간적 분급(spatial sorting)과 운반과정에서 입자들의 충돌 등에 의하여 발생하는 퇴적물질의 마식 현상이 있다(Ferguson *et al.*, 1996). 기존의 실험 하도 연구에 의하면, 하천 퇴적물질의 입자 입경 감소에 대한 마식의 기여율은 낮은 것으로 알려져 있으나, 수로 실험의 경우 단기간에 걸친 단거리 이동에 따른 결과인 수로 실험의 결과를 시간과 공간 단위를 달리 하는 하천 전체에 직접 적용시키는 데에는 문제가 있다. 또한 공간적 분급을 입경 감소의 주 원인으로 가정할 경우, 빙하에 의해 운반되어 퇴적된 후 하천에 의하여 재 이동 퇴적이 발생하는 빙하지역을 제외하고는 다양한 크기의 퇴적물질 입자의 생산 과정을 설명하기에 곤란하다. 빙하지역의 경우 빙하의 주변과 빙하 하부에서 생산된 암석이 빙하를 따라 이동하면서 다양한

크기를 지니는 입자를 생산하고 모래인과 같은 빙하퇴적지형에 집적된다. 빙하 소멸 이후 이 빙하기원의 퇴적물질들은 하천에 공급되면서 다양한 크기의 입자들을 하상을 따라 이동시키게 된다. 그러나 빙하퇴적지형이 존재하는 상황을 제외한 경우 다양한 퇴적물질이 공급되는 데에는 일반적인 어려움이 있다. 즉, 상당 부분의 입자들은 운반과정에서 생성되어야 하며, 이는 퇴적물 운반과정에서의 입경 감소를 유발하는 마식이 필수적이라는 점을 시사한다. 따라서 일부 특정한 환경의 하천을 제외한 하천에서의 마식 현상의 중요성은 무시될 수 없을 것이다.

퇴적물질의 마식 현상은 퇴적물질 입자와 입자간의 충돌(inter-particle collision)과 퇴적물질과 하상간의 충돌에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히 퇴적물질 입자들 간의 충돌은 퇴적물질 운반 과정에서의 입자들의 운동 방식과 관련이 있으며 주로 도약운동과 부유에 의해 운반되는 퇴적물질 입자의 마식 가능성이 높은 것으로 지적되고 있다(Lee *et al.*, 2002). 또한 퇴적 하상이나 기반암 하상에서 침식이 시작되기 직전 단계에서의 퇴적물질의 하상에서 떨림(vibration)이 마식의 주요 메커니즘이라는 주장도 있다(Stevens and Schumm, 1981). 그러나 하천 퇴적물질의 마식 현상과 관련하여 하천 퇴적물질의 물리적 속성, 하천 퇴적물질의 운반 조건등과 마식율의 정량적 관계에 대한 연구는 많은 진전을 이루지 못해왔다.

본 연구에서는 퇴적물 입자의 마식 과정에 영향을 미치는 변수들 가운데 암석의 물리적 속성이 미치는 영향을 검토하였다. 암석의 물리적 속성과 마식율과의 관계를 파악하기 위하여 마식기를 이용하여 퇴적물질의 마식 실험을 실시하였으며, 퇴적물 입자의 물리적 속성을 파악하기 위하여 퇴적물 입자들에 대한 파괴하중을 측정하여 점하중강도지수를 계산하였다. 파괴하중으로부터 계산된 점하중강도지수와 같은 퇴적물질의 물리적 강도가 다양한 퇴적물 운반환경에서 퇴적물

질의 입자무게 감소에 미치는 영향을 파악하기 위하여 마식기내에 투입되는 퇴적물질의 양, 퇴적물질의 평균 입경 등을 변동시키는 실험을 실시하였다. 또한 이 실험에서 마식기내에 기반암 편을 설치하여 기반암 편과 입자의 충돌에 의한 마식의 양상 등을 정리하였다. 기반암편이 이동하는 퇴적물질에 의하여 마식되는 것에 대한 실험 연구에서 기반암 표면 형상의 변화가 보고된 바 있으며(김종연, 2007), 퇴적물의 입자크기, 퇴적물질의 양의 변동에 따른 퇴적물질의 마식을 변화에 대한 보고는 추후에 이루어질 것이다.

2. 실험장비 및 실험과정

1) 실험장비개관

퇴적물질의 마식을 인위적으로 모사하기 위한 실험에는 크게 2종의 마식기가 사용되고 있다. 그러나 표준적인 실험 도구와 실험과정, 표준적인 장비에 대한 기준이 정립되어 있지 않은 관계로 실험 결과들 간의 상호 비교 등에 어려움이 존재한다(Lewin and Brewer, 2002). 이러한 문제를 극복하기 위하여 본 연구에서는 기반암 시료나 골재의 강도를 추정하는 표준 시험 기법인 로스앤젤레스형 마식기(Los Angeles test mill)를 이용하였다(Gerrard, 1988; British Standard, 1998). 표준 마식 실험 절차는 시료와 강철로 된 마식용 쇠 구슬을 혼합하여 강철관으로 만들어진 넣은 회전통(내경 711mm, 폭 508mm)에 넣은 뒤 강철 지지대를 이용하여 회전시킨 뒤 시료의 마식에 의한 부피와 무게 감소 정도를 측정하는 것이다. 그러나 이 통상적인 실험 방식은 입자들과의 마찰에 의한 퇴적물의 입자무게 변화 연구라는 이 실험의 목적에 부합하지 않는다. 만일 통상적인 시험 방식을 채택할 경우 인위적으로 추가적인 마식을 유발하는 금속구의 존재로 인하여 마식율이 자연 상태에 비하여 과장될 수 있으며, 좁은 마식기의 폭에 따라 마식기의 금속성 몸체와의 충돌에 의한 추가적인 마식이 나타날 수 있기 때문이다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 실험 설비와 방식을 수정하였다. 실

험 과정에서 퇴적물질을 제외한 마식용 쇠 구슬은 투입되지 않으며, 이를 통하여 기반암의 마식에 퇴적물 질 이외의 요소가 개입되는 것을 차단하였다. 또한 마식의 강철로 된 몸체와의 충돌을 줄이기 위하여 마식기 내부에 고무패드를 부착하여 마식기 몸체와 퇴적물 입자의 충돌을 줄이고 입자간의 충돌에 의한 마식의 효과가 크게 나타나도록 하였다.

2) 시료의 채취와 실험 조건

실험에 사용된 퇴적물질들은 스코틀랜드 그람피언 하이랜드(Grampian Highland)의 Glen Etive를 관류하는 River Etive의 하상에서 채집한 자갈들을 이용하였다. Glen Etive는 중생대 화산암과 화강암이 혼재하는 지역에 위치하는 계곡으로 지난 마지막 빙기 빙하의 활동으로 강력한 빙식을 받았으며, 모레인을 비롯한 빙하 퇴적 지형과 후빙기 사면 안정화 과정에서 발생한 다수의 사면붕괴과정에서 생산된 사면 퇴적층으로부터 다량의 토사가 곡지로 공급되고 있다. 퇴적물 질 시료들은 하천의 하상에서 Wolman(1954)의 무작위 시료 획득 방법에 따라 수집되었다.

실험에 투입된 퇴적물질들은 세척과정을 통해 유기물질과 토양 등 불순물을 제거하고 50℃로 건조한 뒤 0.01g의 오차 한도로 계량하였다. 퇴적물질 가운데 손으로 부서지는 수준의 풍화를 보이는 역들을 실험에 사용하지 않았으며, 이러한 과정을 거친 시료들을 대상으로 암석 종류를 판정하였다.

퇴적물질의 마식 실험은 퇴적물 입자의 크기, 퇴적물질 운반 조건 가운데 각 실험에 투입된 퇴적물질의 양과 퇴적물질의 평균 무게를 기준으로 하여, 11개 집단으로 나누어 이루어 졌다. 퇴적물질의 양에 따라 4개의 집단으로 나누었으며(표 1), 퇴적물질의 입자 크기를 입자의 평균 무게를 기준으로 7개 집단을 추가적으로 구분하여 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 마식기의 회전 속도는 1분당 30회였으며, 실험 과정에서 퇴적물 입자가 파괴되거나 심하게 마식된 경우 유사한 크기의 동일한 암종의 퇴적물 질로 교체하였다. 실험은 1시간 단위로 이루어졌으며, 입자의 상태에 따라 최장 8시간까지 마식이 이루어졌

표 1. 초기 퇴적물 입자의 특성

실험집단		초기 시료 평균무게(g) (입자의 수)	초기 시료 총무게(g)	평균 I_{500}
퇴적물 총 무게에 따른 집단	GR 1	121.51 (9)	1093.56	8041.96(2641.08)
	GR 2	106.84 (19)	2029.93	7570.49(3245.36)
	GR 3	106.06 (38)	4030.35	8114.16(2836.03)
	GR 4	102.95(78)	8030.10	8971.21(3349.88)
개별 퇴적물 입자의 평균 무게에 따른 집단	GR 5	192.72 (11)	2119.94	8092.79(2188.24)
	GR 6	250.40 (8)	2003.23	10265.45(3083.97)
	GR 7	334.81 (6)	2008.85	6255.52(2673.63)
	GR 8	456.12 (5)	2280.59	7609.(2673.62)
	GR 9	48.15 (42)	2022.49	8400.36(3885.74)
	GR 10	63.14 (33)	2083.74	9180.88(3663.0)
	GR 11	83.44 (24)	2002.45	8865.97(3811.36)

다. 각 시기의 마식 실험에 따른 퇴적물질의 무게 변동은 매 실험 종료 시마다 앞서 기술한 방식으로 반복 측정되었다. 마식육은 개별 퇴적물질 입자 무게의 감소 비율(%)을 단위 거리(km)로 환산하여 표시하였다.

위와 같은 방식으로 마식육을 계산하기 위해서는 입자의 이동거리가 계산되어야 하며, 본 연구에서는 Wentworth의 마식기(tumbling mill)내에서의 퇴적물질의 이동거리에 대한 추정 방식을 따라 계산하였다(Wentworth, 1919). Wentworth는 마식기내에서의 입자의 이동거리를 $S=k\pi D$ 로 계산하였으며, k는 마식기의 회전 속도이고, D는 m 단위로 환산한 마식기의 내경이다. 이 방식에 따라 계산할 경우 입자는 시간당 4.2km를 이동한 것으로 환산되며, 8시간의 마식실험이 이뤄질 경우 퇴적물 입자의 최대 이동거리는 32.16km이다. 그러나 이 32.16km라는 거리는 하천에서 특정구간 간의 거리가 아니라 퇴적물질이 매몰되거나 이동이 중단되지 않고 하상면을 따라서 이동하는 구간의 거리를 말하는 것이다.

3) 퇴적물질 강도추정 기법 및 관련 선행 연구

퇴적물질의 마식육을 찾아내기 위한 다양한 실험 연구들(Wentworth, 1919; Krumbein, 1941; Sarmiento,

1945; Kuenen, 1959; Schbert, 1964; Kodama, 1992; Mikos, 1994)이 진행되어 왔으나 퇴적물질의 강도를 일정한 지표에 따라 계량화하고, 마식육과 입자의 물리적 특성과의 관계를 계량적으로 설명하고자 한 시도는 제한적으로만 이루어졌다. Wentworth(1919), Krumbein(1941), Sarmiento(1945), Kuenen(1959) 등의 실험은 마식에 의한 퇴적물질의 입경 감소 내지 무게 감소의 양상을 보여 주는데 그쳤으며, 퇴적물질의 물리적 성질을 정량적으로 파악하지 않았다는 한계를 지니고 있다. 현대적인 실험에서는 퇴적물질의 물리적인 속성을 밝히기 위한 노력이 부분적으로 있었다. 예를 들어 Kodama(1992)는 Watarase 강에서의 자갈 입자의 입경 감소에 대한 연구의 일환으로, 마식기를 이용한 퇴적물질의 마식 실험을 실시하였으며, 퇴적물 입자들에 대한 압축강도를 측정하였으나 입자의 무게 감소로 표현된 마식육과 압축강도실험 결과와의 관계에 대한 정량적 분석 결과는 발표되지 않았다. 재료공학 분야의 연구에서 Loveday and Naidoo(1997)는 슈미트해머의 반발지수로 표현되는 암석의 경도(hardness)가 입자의 마식육을 설명하는 주요 지표라고 주장하였으며, 특히 무게가 1kg 이상인 조립 입자의 마식육 설명에 적합하다고 주장하였다. 그러나 슈미트해머의 경우 시료의 크기, 두께 등과 같은 시료의

상태와 측정기의 접촉 부분과 측정대상의 접촉 각도와 같은 실험 조건에 따라 많은 영향을 받는 관계로 해당 기법은 다양한 형태를 지니는 퇴적물질에 대한 연구에서는 적용하기에 어려움이 있다(Day, 1980). Brewer *et al.*(1992)은 웨일즈의 Hafren과 Tanilwyth 강의 하상에 25mm의 높이와 길이, 너비를 갖는 정육면체를 고정시키고 암석의 마식울을 조사하였으며, 암석의 암종(lithology)이 마식울에 상당한 영향을 미쳤다고 주장하였으나, 암석의 어떤 물리적인 속성이 마식울을 통제하였는지를 정량적으로 제시하지 않았다. Sklar and Dietrich(2001)는 기반암 시료에 대한 브라질식 인장실험(Brazilian test)을 실시하였으나 퇴적물질을 대상으로 한 것은 아니었다. 이들이 퇴적물질을 대상으로 한 실험을 진행하지 못한 이유는 브라질식 인장실험에는 일정한 크기 이상의 원통형의 코어(Core)상태로 가공된 시료가 요구되어, 퇴적물질의 다양한 크기 및 형상에 적용시키기에는 무리가 따르기 때문이었다.

본 연구에서 퇴적물질의 물리적 강도를 추정하기 위한 기법으로 미국재료시험협회(ASTM)에 의해 인증된 방식인 점하중강도지수(Point load strength index (ASTM D 5731-95))를 사용하였다. 점하중강도지수의 측정은 일반적인 점하중 측정 기법과 마찬가지로 시료를 고정시킨 뒤 시료의 상부와 하부를 유압 혹은 기계적 방식으로 압축하여 시료가 파괴되는 순간에 힘의 크기를 계산하는 방식이다. 본 연구에서 사용된 점하중강도지수는 암석의 강도 분류에 이용되는 지수로서, 실험에서 시료의 파쇄를 유발한 점 하중의 정도(uncorrected point load strength index (I_s , MPa))를 이용하여 계산된다.

$$I_s = P/D_e^2 \quad \text{식 1)}$$

식 1)에서 P는 파괴하중(failure load, N), D_e 는 환산등가면적(square of equivalent core diameter, mm²)이다. 원주형 시료의 경우 D_1^2 (D_1 : core 시료의 직경)을 기준으로 계산하며, 불규칙한 형태의 암괴에 대해서는 환산등가면적을 환산하여 $(4 \times W \times D_2)/\pi$ 의 방식으로 계산한다(W: 불규칙 시료의 파단면 최소폭; D_2 : 시료의 두께=재하점 거리). 시료의 파괴하중은 시료의

크기와 형태에 따라 다르게 나타난다. 따라서 비교와 추가적인 표준화된 활용을 위해서 원 지수 I_s 는 입자의 크기와 형상과 관계없는 표준적인 값으로 전환되어야 한다. 이때 시료의 크기보정상수(F)는 $F = (D_e/50)^{0.45}$ 의 식으로 구해진다. 표준화된 값인 점하중강도지수($I_{s(50)}$)는 50mm의 직경을 갖는 시료의 점하중강도를 표현한 것으로 $I_{s(50)} = F \times I_s$ 로 계산된다. 점하중강도지수는 일반적으로 MPa나 GPa 단위로 표시된다.

점하중강도지수는 지리학 분야에서는 널리 사용되지 않았으나, 공학 분야에서 국내에서 암석 강도의 현장 추정 기법으로 활용되고 있다. 김재석(2004)은 산성비로 인한 암석의 화학적 풍화가 사면의 안정성을 저해하는 현상에 대한 현장 연구에서 점하중강도지수의 변화가 사면 안정성과 밀접한 관계가 있음을 보였다. 김해경 등(2004)은 고충지역의 응회암에 대한 점하중강도와 일축압축강도에 대한 조사를 통해 암석의 강도를 나타내는 두 지수 사이에 직선의 상관관계가 나타남을 보였다. 최성운(2005)은 도로공사중 발생한 사면의 붕괴현상에 대한 분석에서 기반암인 세일의 풍화에 따른 강도 약화를 점하중강도지수를 통하여 검토하였다. 이창섭 등(2007)은 제주도 한라산 조면암의 풍화 특성에 대한 연구에서 공학적 풍화지수의 증가에 따라서 점하중강도지수가 감소한다고 보고하였다. 그러나 퇴적물질을 이용한 국내에서의 선행 연구는 파악되지 않았다.

점하중강도의 측정은 시료의 파괴를 수반하므로, 실험이전에는 측정이 불가능하여, 본 연구에서 점하중강도의 측정과 점하중강도지수의 계산은 마식 실험이 종료된 이후에 실시되었다. 실험에 사용된 각 퇴적물질 집단의 집단 내, 집단 간의 점하중강도지수의 통계적 차이 등은 일원분산분석(Oneway ANOVA)을 통하여 검증하였으며, 실험에 사용된 모든 퇴적물질 집단들은 하나의 퇴적물질 집단을 모집단으로 하는 소집단 표본으로 나타났다. 퇴적물질의 강도와 관련된 특성을 추가적으로 파악하기 위하여 퇴적물질의 밀도를 추가적으로 측정하였다.

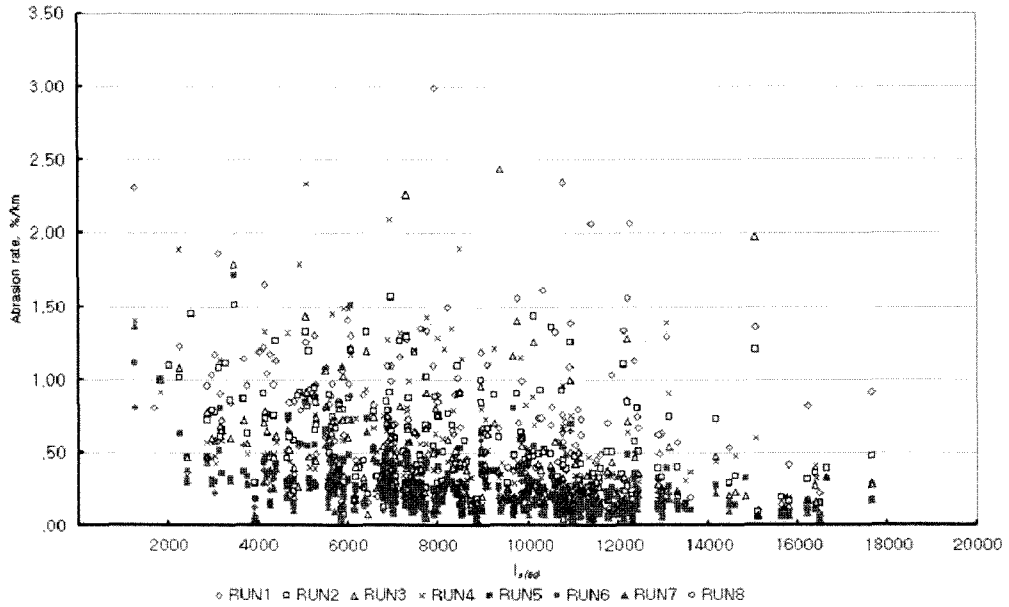


그림 1. 전체 시료를 대상으로 한 점하중강도지수 ($I_{s(50)}$)와 마식율의 관계

3. 실험 결과 및 토론

1) 전체적 마식율의 변화

실험에는 총 266개의 퇴적물질이 투입되었으며, 마식기 내부에서의 마식을 통하여 변화된 무게의 변화정도를 마식율로 간주하여 얻은 마식율 값은 총 2,128개였다. 실험에 투입된 모든 퇴적물질의 점하중강도와 마식율사이의 관계는 그림 1에 나타나고 있다. 이 실험 결과에 의하면 대부분의 입자들은 각 실험 단계에서 1km이동시 1% 이내의 무게 감소가 나타났었다. 특히 점하중강도지수가 15,000MPa이하인 경우 동일한 점하중강도지수에서 상당한 마식율의 편차가 나타나고 있다. 즉, 점하중강도지수가 퇴적물질의 단단한 정도를 표현한다고 본다면, 강도가 낮은 퇴적물질은 동일한 강도에서 다양한 조건에 따라서 다양한 마식율을 보인다고 간주할 수 있다. 그러나 점하중강도지수가 15,000MPa이상의 강도가 높은 퇴적물질은 마식율의 편차가 상대적으로 적은 것으로 나타나고 있다. 전체

적으로 보아 마식율과 퇴적물질의 점하중강도지수 사이에는 특이한 상관관계가 나타나지 않고 있다. 이러한 결과는 하나의 시료가 여러 차례의 실험 과정을 거치면서 동일한 점하중강도지수에 따라 여러 개의 값이 나타나기 때문일 수도 있다. 즉, 반복 투입 상황에서 동일한 독립변수(점하중강도지수($I_{s(50)}$))에 따라서 다수의 값(마식율)이 나타나는 관계로 두 변수 사이의 상관관계를 명확히 판단하는데 어려움이 있었다.

두 변수들 간의 상관관계를 보다 명확하게 살펴보기 위하여, 각 개별 실험에서 나타난 마식율의 평균값을 점하중강도지수와 비교하여 본 결과, 표본 전수에 대한 점하중강도지수에 비하여 상대적으로 명료한 상관관계가 드러났다(그림 2). 각 퇴적물 시료 집단(11개)의 시험 구간별 마식율(%/km)을 점하중강도지수와 비교해 본 결과 두 변수 사이에는 음의 상관관계가 존재하는 것으로 나타났으며, 그 상관식은 $\text{마식율} = 276 \cdot I_{s(50)}^{-0.7397}$ ($R^2 = 0.22$) 이었다. 0.22의 낮은 설명률이 나타나는 이유 역시 앞서 지적한 바와 같은 동일한 시료의 반복 사용에 의해 다수의 값이 나타나는 것에 의한 것으로 판단되어 진다.

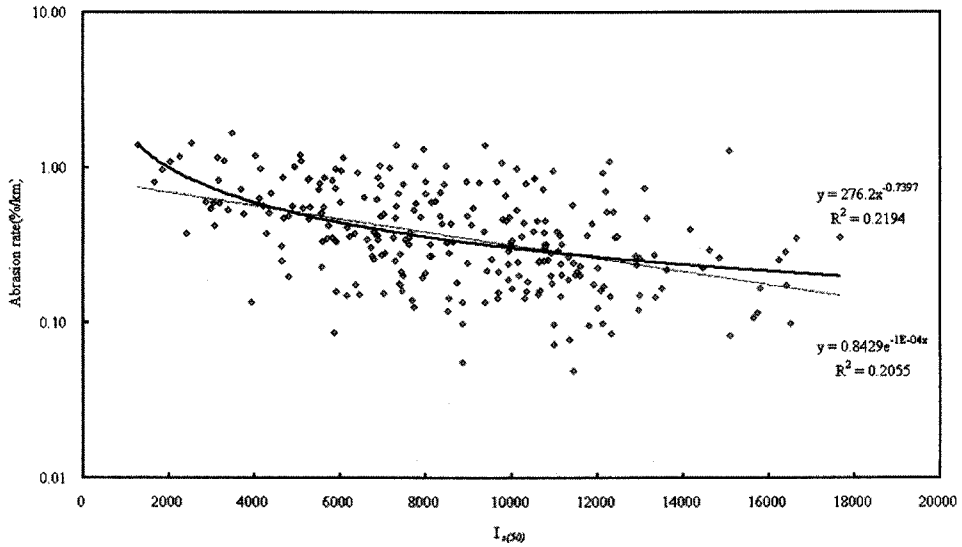


그림 2. 점하중강도지수(MPa)와 각 실험의 평균값들과의 관계

보다 정교한 분석을 위하여 각 실험 조건에 따라서 나타나는 마식율을 비교하였다. 이 분석에서는 각 단계의 실험값에서 표준편차의 범위를 벗어나는 값을 나타낸 경우들은 이상점으로 판단하여 분석에서 배제하였다.

2) 각 실험 단계별 마식율의 변화

본 실험에서 각 단계에서 나타난 퇴적물질의 마식율의 평균값을 비교해 본 바에 의하면(그림 3), 마식되는 시간이 증가함에 따라 즉, 퇴적물질의 이동거리가 증가함에 따라서 평균 마식율(%/km)이 지수함수적으로 감소하는 것으로 드러났다($y=0.7849e^{-0.1892x}$, $R^2=$

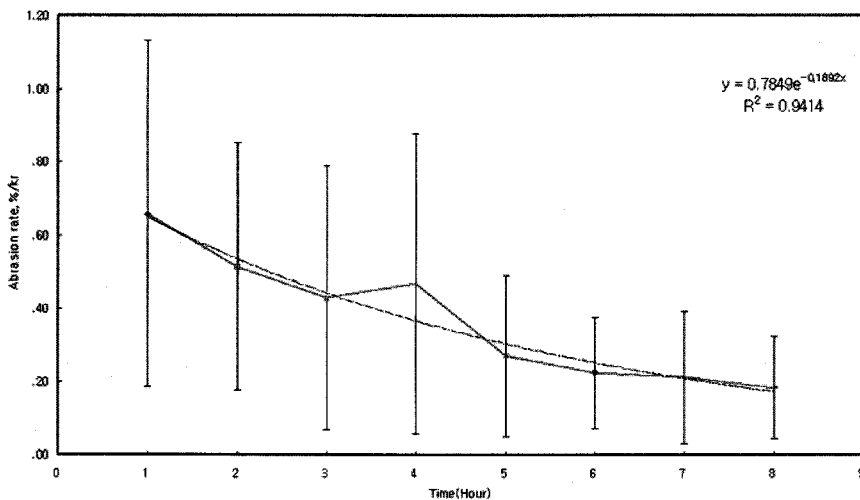


그림 3. 실험단계별 퇴적물질의 평균 마식율 변화(Loveday and Naidoo, 1997)

0.94). 그러나 각 실험 단계에서의 분산 역시 상당히 큰 것으로 나타나 개별 입자의 마식은 전반적인 경향과는 다르게 나타날 수 있음도 알 수 있다.

퇴적물질의 마식 특성에 대한 선행 연구 결과들 (Bradley, 1970; Adams, 1979; Jones and Humphrey, 1997; Heller *et al.*, 2001)에 의하면, 하천 자갈의 이동 초기에 관찰되는 마식울은 역(礫)의 표면에 존재하는 풍화각(weathering rind)의 제거에 의한 것으로 매우 높은 마식울을 나타내며, 시간이 경과하면서 풍화각의 제거가 종료된 이후에는 생경한 기반암 부분의 마식이 발생하는 단계로 마식울이 급격히 감소하는 경향을 보여준다. 풍화각의 자체의 물리적 강도와 풍화각을 포함하는 시료의 전반적인 점하중강도지수와 어느 정도의 상관관계가 있는가에 대한 정량적 정보는 아직 없으나, 모암인 암석의 물리적 강도 보다는 풍화에 의하여 형성된 풍화각의 두께가 마식의 진행에 더 큰 영향을 미칠 것으로 추정된다.

풍화가 진행된 부분 내지 풍화각 부분의 제거 이후

에 하천 퇴적물질의 초기 마식울에 영향을 미치는 과정은 마식에 의한 입자 모서리의 원만화(rounding)와 조각 떼내기 작용(chipping)이었다. Loveday and Naidoo(1997)의 실험 연구에 의하면, 초기의 모서리에서 발생하는 조각 떼내기와 마식에 의한 원만화는 퇴적물 입자 부피를 7%정도 감소시키며, 초기의 급격한 부피 감소 이후 입자의 부피 감소 양상은 안정화된다. 떼내기 과정 역시 하천 퇴적물 입자의 강도 특성과의 관계는 명확하지 않다.

3) 마식울과 점하중강도지수의 관계

퇴적물질의 점하중강도지수와 마식울 간의 기능적 관계를 살펴보기 위하여 각 실험 단계(run)에 따라 마식울을 점하중강도지수에 대하여 검토하였다(그림 4~그림 11).

검토 결과에 의하면 퇴적물질의 운반 조건, 퇴적물질의 크기 등 조건과 무관하게 퇴적물질 마식의 초기

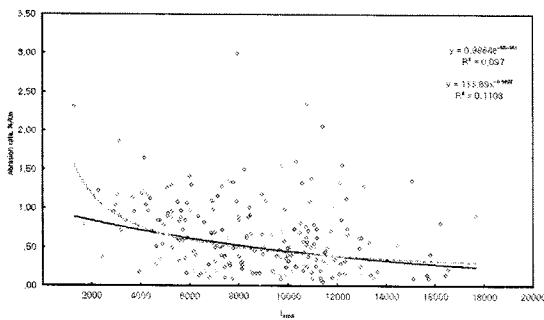


그림 4. 1차 실험에서의 마식울과 점하중강도지수

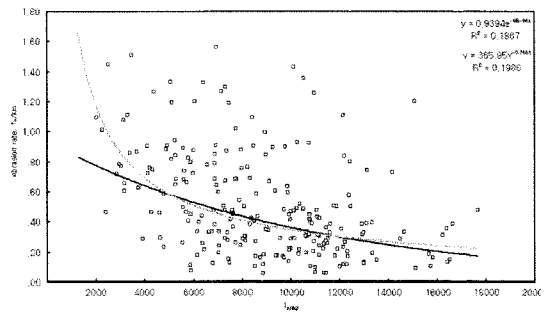


그림 5. 2차 실험에서의 마식울과 점하중강도지수

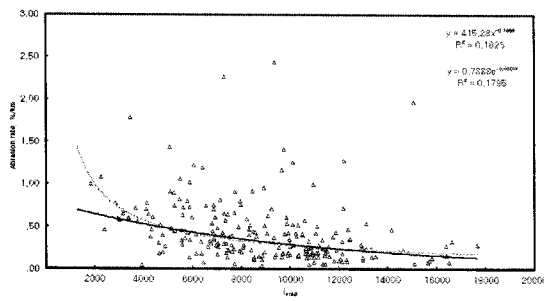


그림 6. 3차 실험에서의 마식울과 점하중강도지수

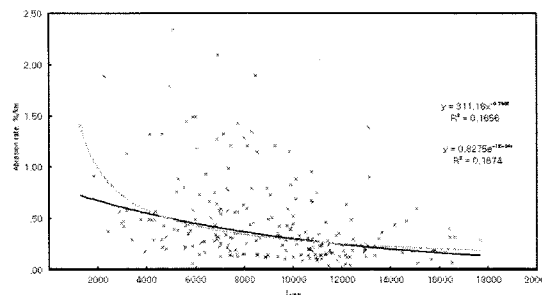


그림 7. 4차 실험에서의 마식울과 점하중강도지수

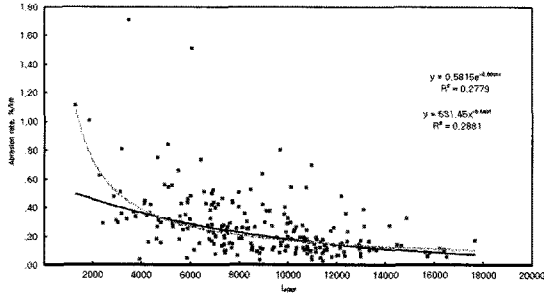


그림 8. 5차 실험에서의 마식율과 점하중강도지수

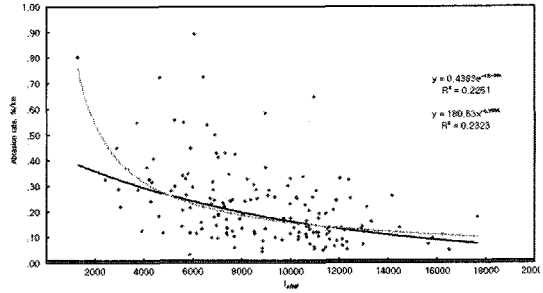


그림 9. 6차 실험에서의 마식율과 점하중강도지수

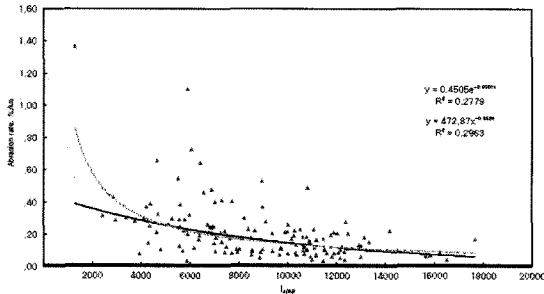


그림 10. 7차 실험에서의 마식율과 점하중강도지수

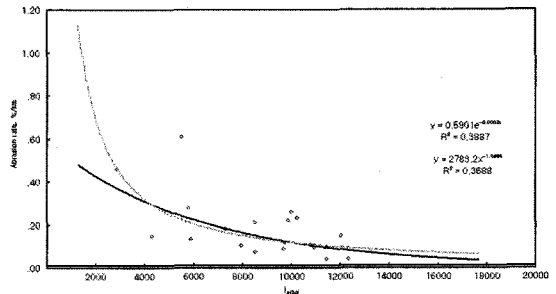


그림 11. 8차 실험에서의 마식율과 점하중강도지수

단계에서 마식율(%/km)은 점하중강도지수와 음의 상관관계를 보였으나, 회귀식의 설명률(R²)은 낮은 값을 나타냈다(y=1.33.69x^{-0.6222}, R²=0.11). 초기 단계에는 그림 4에서 나타나는 바와 같이 1시간당 1%이상의 급격한 무게 감소를 보여주는 입자들이 상당수 나타났으며, 특히 점하중강도지수 9,000~14,000GPa 사이의 구간에서는 입자의 마식율의 분산이 매우 크게 나타나고 있다. 또한 일부 입자들의 경우 입자의 점하중강도지수가 작은 즉, 입자의 강도가 약한 것으로 추정되는 퇴적물질들(9,000GPa)에 비하여 높은 마식율을 보여주고 있으며, 이는 회귀식의 설명율을 낮출 뿐만 아니

라 입자의 강도 추정에 있어서 입자 전체를 대상으로 하는 추정 방식에 한계가 있음도 시사하고 있다.

두 변수들 간의 Pearson 상관관계를 계산하여본 결과(표 2)에 의하면, 유의수준 95%에서 점하중지수와 퇴적물질의 평균 마식율 사이에는 95% 유의수준에서 음의 상관관계가 존재하며 이들의 상관계수는 -0.435인 것으로 나타났다. 즉, 퇴적물질의 점하중지수가 증가함에 따라서 평균 마식율은 감소하는 경향이 있다고 판단할 수 있다. 입자 마식의 단계마다의 마식율과 점하중지수사이에도 상관관계가 존재하는 것으로 나타났다.

표 2. 각 실험에서의 마식율과 점하중강도지수의 상관관계

마식단계	1	2	3	4	5	6	7	8
피어슨 상관계수 (Pearson Correlation)	-0.264	-0.424	-0.323	-0.359	-0.482	-0.464	-0.481	-0.611
Sig (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
사례수(N)	220	229	230	224	222	160	142	20

4. 고찰

특이할만한 사항은 마식이 시작되는 초기 단계인 1차 실험에서의 상관계수는 이후의 단계들에 비하여 낮은 것으로 나타났으며, 마식 실험의 시간이 증가함에 따라서 상관관계가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 앞서 논의함 바와 같이 초기 마식의 경우 퇴적물질의 표면에 형성된 풍화각의 제거 과정 혹은 주변부의 떼어내기 과정이 진행되는 것으로 판단되며, 이러한 과정은 점하중강도지수와는 관계가 크지 않은 것으로 생각된다.

이에 비하여 2차 실험 동안의 마식율은 전반적으로 감소하였으며, 퇴적물질의 점하중강도지수와 마식율 사이의 관계는 약한 음의 상관관계를 보여주고 있다 ($y=356.95x^{-0.7556}$, $R^2=0.20$). 특이할 만한 사항은 점하중강도지수의 증가에 따른 마식율의 감소가 이전에 비하여 회귀선상으로 보다 급격한 감소를 유발하고 있다는 것과 점하중강도지수 6,000~12,000MPa의 구간에서 많은 수의 이상점이 존재 한다는 점이다. 회귀식의 낮은 설명율은 3차, 4차 실험 결과에서도 나타나고 있으나, 5차 실험 결과부터는 설명율이 증가하고 있다(표 3). 이 결과에 의한다면 마식이 진행되면서 퇴적물질의 물리적 강도가 마식에 미치는 영향이 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 전반적인 설명율은 낮은 것으로 판단할 수 있다.

표 3. 각 실험 단계의 점하중지수와 마식율 사이의 회귀식과 설명률

실험차수	회귀식	설명률
1	$y=133.69x^{-0.6222}$	$R^2=0.11$
2	$y=356.95x^{-0.7556}$	$R^2=0.20$
3	$y=415.28x^{-0.7956}$	$R^2=0.18$
4	$y=311.18x^{-0.7566}$	$R^2=0.17$
5	$y=631.45x^{-0.8901}$	$R^2=0.29$
6	$y=180.63x^{-0.7864}$	$R^2=0.23$
7	$y=472.87x^{-0.8824}$	$R^2=0.30$
8	$y=2783.2x^{-1.0984}$	$R^2=0.37$

통상적으로 하천에서의 입자의 입경 감소는 서로 독립적인 과정인 파쇄(breakage)와 마식으로 나뉘볼 수 있다. 파쇄는 다시 쪼갬(splitting)과 깨짐(cracking)으로 나뉘지며 일정한 법칙성을 가지고 나타나기 보다는 랜덤하게 발생하는 특성을 지니고 있는데 반하여 마식은 지속적으로 일어난다. 쪼갬과 깨짐에는 퇴적물질에 존재하는 구조적 취약부위나 미세균열(micro-crack)의 존재가 큰 영향을 미칠 수 있다(김종연, 2007). Lewin and Brewer(2002)는 마식에 의하여 형성되는 표면의 침식흔이 쪼개짐과 깨짐, 모서리 떼어내기, 분쇄 등으로 이어지는 일련의 입자 감소 과정의 시발점이라고 주장한 바 있다. 특히 본 실험과정에서 나타난 일부 입자 마식율의 급격한 증가는 퇴적물질의 쪼개짐에 의한 것으로 판단되며, 부분적으로 파쇄(breakage)가 입자 크기 감소의 중요 원인으로 판단된다. 그러나 이 두 과정과 퇴적물질의 물리적 강도사이의 관계는 명료하게 밝혀져 있지 못하다. 이에 비하여 지속적으로 나타나게 되는 마식 과정은 퇴적물질의 점하중강도지수와 일정한 관련이 있는 것으로 추정할 수 있다.

본 연구에서 나타난 마식율의 순차적인 변화는 풍화가 진행된 퇴적물 입자의 마식속도가 급격히 감소한다는 이전의 연구 결과를 지지하고 있다(Bradley, 1970; Adams, 1979; Jones and Humphrey, 1997; Heller *et al.*, 2001). 이전 연구들과 마찬가지로 마식 실험초기의 급격한 마식의 진행은 풍화각의 제거 과정이며, 풍화각의 물리적 강도는 생경한 암석의 강도와는 큰 관련이 없는 것으로 판단된다. 그러나 Brewer(1991)의 실험 결과에 의하면 풍화각을 제거하고 마식 실험을 시행했을 때, 전반적인 마식율은 낮아지지만 풍화각의 제거로 인한 초기의 높은 마식율과 이후의 낮은 마식율 출현이라는 변화가 나타났다.

한편 각 표본 퇴적물질의 평균 마식율과 암석의 밀도 사이에도 95% 유의 수준에서 통계적인 상관관계가 존재하지 않는 것으로 나타났다. 즉, 암석의 밀도 자체는 퇴적물질의 마식율과 큰 관련을 지니지 못하는 것으로 판단할 수 있다. 한편 퇴적물질의 밀도와 점하중

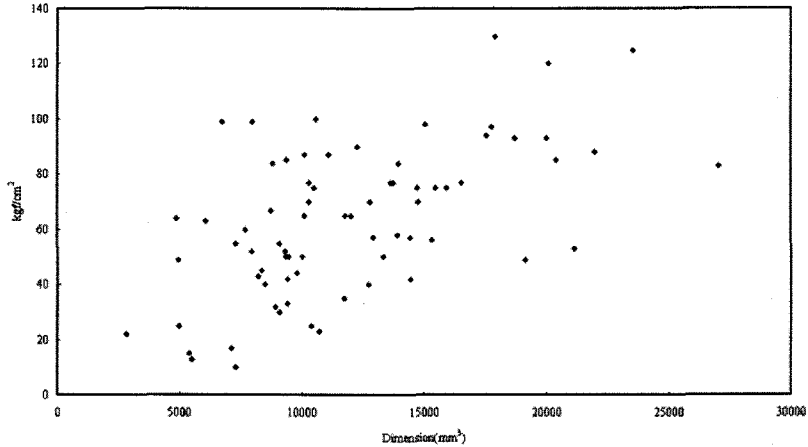


그림 12. 입자의 크기(Dimension)와 파괴하중(P)와의 관계(그룹 4)

지수와의 상관관계는 존재하기는 하나 낮은 것으로 나타났다. 두 변수들 간의 피어슨(Pearson) 상관관계를 내본 결과 95% 수준에서 통계적으로 유의미하기는 하나, 상관계수는 0.155로 나타나 큰 상관관계가 존재하지 않은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 암석의 밀도가 해당 시료가 지니고 있는 미세균열 등과 같은 요소를 반영하지 못하는데 기인하는 것으로 판단된다. 특히 동일한 밀도에서의 서로 다른 점하중강도지수 값의

출현은 주로 구성 물질의 비중에 의하여 영향을 받는 암석의 밀도 이외의 다양한 변수가 암석의 강도에 반영됨을 보여준다고 할 수 있다.

마식과 입자 크기 사이의 관계를 살펴보기 위한 다른 방식으로 입자의 파괴하중(failure load)과 입자의 크기와의 관계를 고찰하였다(그림 12). 그림 12에서 보이는 바와 같이 그룹 4의 경우 압력으로 표현된 파괴하중과 입자의 크기와는 양의 상관관계가 있다. 입자의

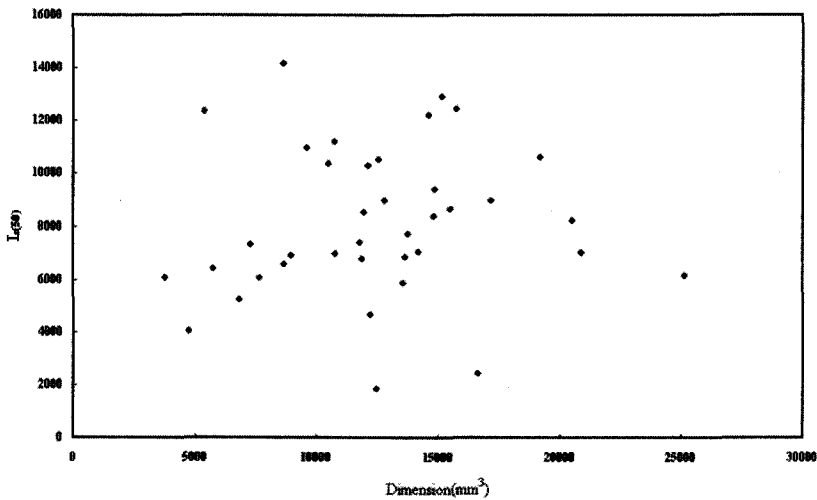


그림 13. 그룹4에서의 입자의 크기(dimension)와 점하중강도지수(I₅₀)와의 관계

크기가 클 경우 일반적으로 파괴에 요구되는 하중은 더 클 수밖에 없다. 그러나 둘 사이에는 유의한 선형 상관관계를 찾아보기 어렵다. 한편 입자의 크기가 점하중강도지수에 미치는 영향을 분석하였다. 앞서 지적한 바와 같이 일반적으로 시료의 파괴하중은 시료의 크기와 형태에 따라 다르게 나타난다. 실험 결과인 파괴하중에서 크기의 효과를 보정하기 위하여 점하중강도지수를 계산하여 입자의 크기와의 관계를 살펴보았으나 유의한 상관관계는 나타나지 않았다. 입자 크기와 점하중강도지수와는 낮은 상관관계는 입자의 물리적인 특성이 입자의 마식율에 입자의 부피 보다 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

그 이유는 앞서 논의한 바와 같이 마식이라는 과정이 입자 전체를 한번에 파괴하는 방식이 아니라 모서리 부분에서 일정 부분을 떼어내는 방식으로 이루어지는 침식과정이며, 파괴를 위해서 힘이 가해지는 부분 역시 실험환경에서의 실험 대상 물질의 중앙이 아니라 무작위한 부분이기 때문이다. 즉, 통상적으로 이뤄지는 암석의 강도를 측정하는 실험의 다른 한계점인 입자 충돌 위치의 차이는 입자의 물리적 강도 특성을 정량화하는데 부적절 할 수도 있다.

앞서 지적한 바와 같이 점하중강도지수와 마식율 사

이에는 미약한 선형 상관성이 있는 것으로 나타났으나, 퇴적물질의 점하중지수를 통해 표현된 입자의 물리적 강도가 입자의 마식에 관여하는 여러 중요 요인 가운데 하나인 것은 분명한 것으로 보인다. 각 실험단계에서의 마식율을 점하중강도지수를 GPa(1,000MPa)로 표현한 축을 따라 도시해 본 결과 대부분의 마식 데이터들은 $y=0.1x+2$ 선을 경계로 하여 좌측 하단에 위치하는 것으로 나타났다.

앞서 지적한 경계선내의 데이터들의 집중은 퇴적물질의 점하중강도가 ‘최대 가능 마식율(maximum possible abrasion rate)’을 결정하는 요인이라는 추정을 가능하게 한다. 즉, 통상적으로 발생할 수 있는 입자의 최대 마식율은 입자가 가지고 있는 물리적인 속성에 의하여 결정된다. 그러나 입자의 마식율 자체는 각 입자가 처하는 마식의 조건에 의하여 다양하게 나타나게 되며 그 결과가 그림 14에 나타난 구역 내에서의 다양한 마식율이라고 추정할 수 있다. 특히 자연 하천에서의 입자의 마식율은 퇴적물질의 입자 운반 환경과 큰 관련을 지닐 수 있다는 선행 연구의 결과(Kodama, 1989)를 참작한다면 마식율에 영향을 미치는 다양한 변수들을 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 퇴적물질 크기의 영향과 퇴적물질 운반 조건의

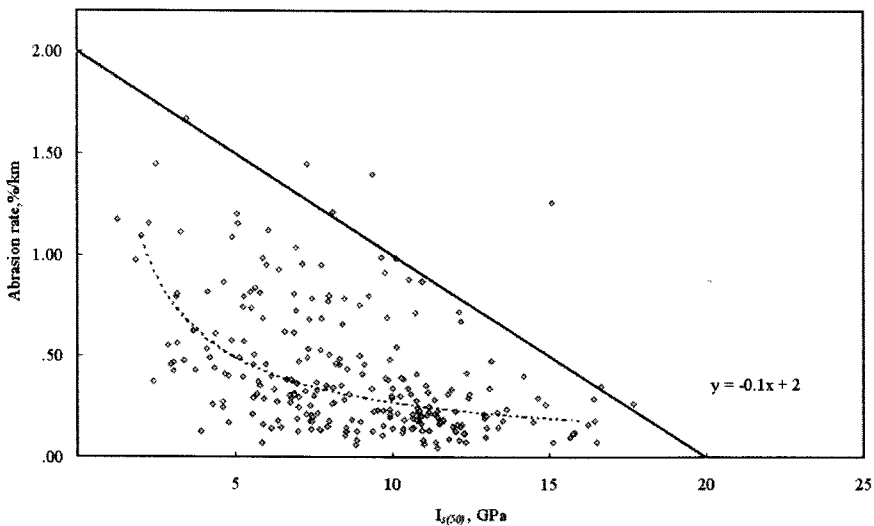


그림 14. 점하중강도지수(GPa)와 단계별 평균 마식율 사이의 관계

영향은 보다 구체적으로 분석되어야 할 것이며, 이는 추후에 보고될 것이다.

선행 연구에 의하면 Sklar and Dietrich(2001)는 마식율(g/hour)과 암석의 인장강도(tensile strength) 사이에 음의 상관관계가 존재한다고 주장하였다. 또한 퇴적물질의 인장강도가 강할수록 퇴적물질과의 충돌에 의하여 마식되는 하상의 마식율을 증가시키는 경향이 있다고 주장하였다. 그러나 그들이 이용한 시료의 수가 제한적이었으며, 퇴적물질 자체에 대한 강도 추정 이 아닌 동일한 종류의 암석에 대한 강도 측정 결과를 적용시킨 것으로 간접적인 추정으로 한정된다는 문제점이 존재한다. 서로 다른 강도를 지니는 기반암과 퇴적물질에 의한 마식 부분에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다(Whipple *et al.*, 2000).

본 연구 결과는 영국에서 구한 시료를 이용한 것으로 국내의 상황에 직접 적용시키는 문제에 대한 논의가 필요하다. 물론 퇴적물질의 강도 등은 물질의 일반적인 특징으로 시료의 채취 지점과 본 연구의 결론과의 관계는 크지 않을 수도 있다. 그러나 빙하의 직접적인 영향을 받은 영국의 시료와 빙하의 직접적인 영향을 받지 않은 우리나라의 퇴적물질과는 다른 물리적인 속성을 가질 가능성이 있으며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 결과는 하천에 의한 침식에 관여하는 변수들의 역할에 대한 보다 정량적인 연구가 필요하다는 사실을 지지한다.

본 실험의 결과는 부분적으로 실험 장비의 한계를 나타내는 것일 수도 있다. 마식기 내부에서의 입자의 운동방식은 실제 하천에서의 입자의 운동과 상당히 다를 수도 있다(Thompson and Wohl, 1998). 특히 집중적인 입자의 이동은 대규모 홍수 상황에서만 극히 제한적으로 일어나는 상황일 수도 있다. 마식기 내부에서의 입자의 운동 양식은 퇴적물질의 무게, 전체 퇴적물질의 무게, 마식기의 회전속도에 의하여 영향을 받게 되며 퇴적물질의 횡적 이동은 마식기 내부의 폭에 의하여 제한된다(Mikos and Jaeggi, 1995). 또한 퇴적물질 가운데 구르기(rolling)나 도약운동에 의해서 운반되는 퇴적물질의 마식만을 표현할 뿐 제자리에서의 흔들림에 의한 마식과 같은 부분은 적절히 모사되기 어렵다는 한계가 있다. 또한 마식기의 크기에 따라서

사용 가능한 입자의 크기는 제한적이며, 다양한 유속의 변동 등을 모사하는 데에는 상당한 어려움이 있다. 이 부분에 대해서 역시 추가적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

5. 결론

하천의 하상을 구성하는 퇴적물질의 이동과정에서 발생하는 마식을 통제하는 변수를 정량적으로 파악하기 위하여 개조된 LA표준 마식기를 이용하여 퇴적물질의 마식에 대한 물리적 실험을 하였다. 퇴적물질의 암석학적, 물리적 강도는 ASTM의 점하중강도평가 기법을 이용하여 측정되었으며, 마식율은 퇴적물질의 무게 변화를 비율로 산정하여 단위 거리(km)당 무게 변동률(%)로 계산하였다.

실험결과에 의하면 점하중강도지수로 측정된 퇴적물질의 물리적 강도는 하천에서의 운반과정에서 발생할 수 있는 '최대 가능 마식율'을 결정하고 있는 것으로 판단되나, 실제 마식율은 퇴적물질 운반 조건등과 같은 요인의 간섭으로 인하여 최대 가능 마식율과는 달리 상당한 편차를 지니는 것으로 나타났다.

전반적으로 마식율과 퇴적물질의 물리적 강도 사이에는 음의 상관관계가 나타나고 있으며, 이 관계들은 마식 실험의 초기 보다는 후반으로 가면서 보다 명확해지는 것으로 나타났다. 마식실험의 초기에는 입자의 표면에 형성된 풍화각등의 제거과정과 모서리 부분의 원만화 과정 등을 거치면서 퇴적물질의 물리적 강도와는 무관한 마식율을 보여주고 있다. 그러나 실험이 진행되면서 퇴적물질 표면의 풍화된 부분의 제거가 완료되면서 물리적 특성과의 상관관계가 증가하는 것으로 판단된다. 전반적으로 마식율은 풍화산물의 제거가 수반되는 초기 단계에는 매우 높다가 점점 낮아지는 특성을 보여 주며, 이는 이전의 현장 연구 결과들을 부분적으로 지지하는 것으로 판단된다. 그러나, 본 실험의 결과에 의하면 퇴적물질의 물리적 속성은 실제 하천에서의 마식율을 결정하는 유일한 변수로 볼 수 없다. 먼저 전반적인 퇴적물질의 마식율은 퇴적물질의 표면에 형성되는 풍화각의 두께에 의하여 큰 영향을 받는다고

판단할 수 있다. 즉, 입자의 풍화정도가 마식울 결정에 상당한 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. 두 번째로 퇴적물질의 입자 강도뿐만 아니라 운반조건도 상당한 영향을 미칠 것으로 판단할 수 있다. 그러나 본 실험의 결과에 의하면 퇴적물질의 운반조건 역시 높은 상관관계를 보이지는 않을 것으로 추정된다. 이에 대한 분석 결과는 다른 연구 결과로서 발표될 것이다.

마식기 내부에서의 입자의 운동양식은 실제 하천에서의 입자의 운동양식과 차이를 지닐 수 있으며, 실험 환경의 한계로 인하여 추가적인 마식이 발생하는 등의 문제점이 있을 수 있다는 점은 이 결과의 활용에서 유의해야 할 부분이다.

謝辭

이 연구는 University of Glasgow의 재정적인 지원에 의하여 이루어졌으며, 모든 장비는 University of Glasgow의 장비를 이용하였다. 이 논문의 작성을 위한 실험의 설계와 진행에 도움을 준 M. Mikos 교수(슬로베니아 류브리나대학교 공과대학)와 초고에 대하여 토론하며 방향을 잡는데 도움을 준 Leo Sklar 교수(San Francisco State University)에게 감사한다. Avril McRobb과 Peter Chung은 하천력의 수집과 실험의 전 과정에서 도움을 주었다. Trevor Hoey 교수와 Paul Bishop 교수는 실험의 전 과정을 감독하면서 많은 도움을 주었으며 이 원고의 완성을 위한 토론에서 많은 도움을 주었다. 익명의 심사자의 의견은 본 고의 수정에 큰 도움이 되었습니다. 심사자 분들의 의견에 감사드립니다.

文獻

김익재 · 이병국 · 최지용 · 한대호, 2007, 수생태계 보호를 위한 토사관리방안, 한국환경정책 · 평가연구원.
 김재석, 2004, 암반사면의 장기적 안정성평가기법, 영남대학교 박사학위논문.
 김중연, 2004, "기반암하상하천에서의 퇴적물 특성변화에

대한 연구," 한국지형학회지, 11(3), 47-61.
 김중연, 2007, "마식에 의한 기반암면 표면변화에 대한 실험연구," 대한지리학회지, 42(4), 506-525.
 김해경 · 고영구 · 오강호, 2004, "고흥지역에 분포하는 백악기 응회암의 역학적 특성에 관한 연구," 지질공학, 14, 273-285.
 이창섭 · 조태진 · 이상배 · 원경식, 2007, "제주도 한라산 조면암의 풍화특성에 관한 연구," 지질공학, 17, 235-251.
 최성운, 2005, 붕괴사면의 사례 검토 및 붕괴요인 분석에 관한 연구, 영남대학교 석사학위논문.
 Adams, J., 1979, Wear of unsound pebbles in River headwaters, *Science*, 203, 171-172.
 ASTM, 2003, *Standard test method for determination of the point load strength index of rock*, ASTM D-5731-02.
 Bonney, T. G., 1888, Observation on the roundings of pebbles by alpine rivers, with a note on their bearing upon the origin of the Bunter conglomerate, *The geological magazine, New Series, Decade III*, 5, 54-61.
 Bradley, W. C., 1970, Effect of weathering on abrasion of granitic gravel, Colorado river(Texas), *Geological Society of America Bulletin*, 81, 61-80.
 Brewer, P. A., 1991, *Sediment reduction processes in natural rivers*, Unpublished Ph.D Dissertation, University of Wales, Aberystwyth.
 Brewer, P. A., Leeks, G. J. L., and Lewin, J., 1992, Direct measurement of in-channel abrasion processes, in Bogen, J., Welling, D. E., and Day, T. J. (eds.), *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basin*, IAHS publication no.210, 21-29.
 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.
 Day, M. J., 1980, Rock hardness: Field assessment and geomorphic importance, *Professional Geographer*, 32, 72-81.
 Heller, P. L., Beland, P. E., Humphrey, N. F., Konrad, S. K., Lynds, R. M., McMillan, M. E., Valetine, K. E.,

- Widman, Y. A., and Furbish, D. J., 2001, Paradox of downstream fining and weathering-rind formation in the lower Iowa Hoh river, Olympic Peninsula, Washington, *Geology*, 29, 971-974.
- Jones, L. S. and Humphrey, N. F., 1997, Weathering-controlled abrasion in a coarse-grained, meandering reach of the Rio Grande: Implications for the rock record, *Geological Society of America Bulletin*, 109, 1080-1088.
- Kim, J. Y., 2004, *Controls over bedrock channel incision*, unpublished Ph.D dissertation, University of Glasgow.
- Kodama, Y., 1992, Effect of abrasion on downstream gravel size relation in the Watarase river, Japan, Environmental Research Center Papers 15, Environmental Research Center, The University of Tsukuba.
- Krumbein, W. C., 1941, The effect of abrasion on the size, shape and roundness of the rock fragments, *Journal of Geology*, 49, 482-520.
- Kuenen, Ph. H., 1959, Experimental abrasion:3 Fluvial action on sand, *American Journal of Science*, 257, 172-190.
- Lee, H. -Y., You, J. -Y., and Lin, Y. -T., 2002, Continuous saltating processes of multiple sediment particles, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 443-450.
- Lewin, J. and Brewer, P. A., 2002, Laboratory simulation of clast abrasion, *Earth Surfaces Processes and Landforms*, 27, 145-164.
- Loveday, B. K. and Naidoo, D., 1997, Rock abrasion in autogenous milling, *Minerals Engineering*, 10, 603-612.
- Marshall, P., 1928, The wearing of beach gravels, *Transactions and Proceedings of the New Zealand Institute*, 58, 507-532.
- Marshall, P., 1930, Beach gravels and sands, *Transactions and Proceedings of the New Zealand Institute*, 60, 324-365.
- Mikos, M., 1994, The downstream fining of gravel-bed sediments in the alpine Rhine river, in Eigenzinger, P., and Schmidt, K. -H.(eds.), *Dynamics and Geomorphology of Mountain River*, Springer Verlag, Berlin, 93-108.
- Mikos, M. and Jaeggi, M. N. R., 1995, Experiments on motion of sediment mixtures in a tumbling mill to study fluvial abrasion, *Journal of Hydraulic Research*, 33, 751-772.
- Sarmiento, A., 1945, *Experimental study of pebble abrasion*, Unpublished M.Sc Dissertation, The University of Chicago.
- Schbert, C., 1964, Size-frequency distributions of sand-sized grains in an abrasion mill, *Sedimentology*, 3, 288-295.
- Schumm, S. A. and Stevens, M. A., 1973, Abrasion in place: A mechanism for rounding and size reduction of coarse sediments in rivers, *Geology*, 1, 37-40.
- Sklar, L. S. and Dietrich, W. E., 2001, Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock, *Geology*, 29, 1087-1090.
- 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.
- Wentworth, C. K., 1919, A laboratory and field study of cobble abrasion, *Journal of Geology*, 28, 507-521.
- 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.
- Wolman, M. G., 1954, A method of sampling coarse river-bed material, *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 35, 951-956.

교신: 김종연, 150-703, 서울특별시 영등포구 여의도동1 국
회입법조사처 경제사회조사실 과학환경팀 (이메
일: terraic@assembly.go.kr, 전화:02-788-4591, 팩
스:02-788-4599)

Correspondence: Jongyeon, Kim, Science &
Environment Team, National Assembly Research
Service, Youeuido-dong, Youngdungpo-gu,

Seoul, 150-703, Republic of Korea(e-mail: terraic
@assembly.go.kr, phone: +82-2-788-4591, fax:
+82-2-788-4599)

최초투고일 08. 09. 30

최종접수일 08. 12. 24