

수생태계에 미치는 석산개발의 영향 - 생물군집과 입지유형을 중심으로

이성진 · 김명철 · 김지영* · 노태호*[†]

고려대학교 부설 한국곤충연구소

*한국환경정책·평가연구원

Environmental Impacts of Stone Quarry Exploitation - Aquatic Macroinvertebrate Community and Quarry Locality

Lee, Sung Jin · Myoung Chul Kim · Ji Young Kim* · Tae Ho Ro*[†]

Korean Entomological Institute, Korea University

*Korea Environment Institute

(Received 11 March 2005, Accepted 27 April 2005)

Abstract

Inorganic matters originated from stone quarries and manufacturing plants could alter the ecological characteristics of adjacent aquatic systems, especially the structure and function of benthic macroinvertebrate community. In such situation, the locality of stone quarry and the quantity of inorganic matters would be important factors that determined the disturbing strength to the benthic macroinvertebrate community. Locality patterns of stone quarries were classified into 3 types in relation to the stream ecosystem; stream-proximity, upstream-inclusion and tributary-inclusion type. In the result of species:abundance analysis, stone quarry B (upstream-inclusion type) showed geometric distribution, while others showed broken-stick distribution pattern. The benthic macroinvertebrate communities closer to stone quarries showed smaller species numbers and standing crops among all types of stone quarries. However the values of species evenness index were not seriously different between controls and directly affected sites. These results indicated that the effect of inorganic disturbance would differ from those of organic pollution that induced the highly dominant state occupied by tolerant species. Number of occurred species, standing crops, community indices and biotic indices indicated that the community of upstream-inclusion type was the most seriously damaged from the inorganic disturbance, and the community would be very simple and unstable. Tributary-inclusion stone quarry heavily damaged to tributary system in biologically, but influence to the main stream seemed to be depended on the scale of main stream. Among 3 types of stone quarry localities, stream-proximity type induced the least damages to benthic macroinvertebrate community, though the degrees of damage were different along with distances between stream and stone quarry.

keywords : Inorganic matter, Stone quarry, Benthic macroinvertebrate community

1. 서론

하천은 자연의 작용에 의해 형성되었으며, 그곳에는 다양한 생물들이 서로 어우러져 먹이를 획득하고, 생활을 하며, 생식을 위한 장소로 이용해 왔다. 그러나 근래에는 농경지 개간, 댐 건설, 골재채취, 하천정비공사 등과 같은 교란요인들과 인구의 집중화, 산업화, 도시화에 따른 오·폐수의 수계 내 유입, 그리고 여가생활을 위해 스키장이나 골프장을 건설 및 운영함으로써 수질오염과 생태계 파괴가 심각한 상황에 이르고 있다. 이 중에서 석산개발은 직·간접적으로 다량의 무기물입자를 수계로 방출하는데, 이러한 광물질은 부유물질로서 수체의 흐름에 따라 하류로 운반되거나 또는 하상입자 위로 퇴적된다. 운반 및 퇴적되는 부유 또

는 침전성 물질량의 증가는 하천의 생물서식처를 단순화하는 효과를 보이는 것으로 알려져 있다(Berkman et al., 1987; Carling et al., 1987). 특히 직경 2 mm 이하의 미세한 퇴적물은 수계의 탁도 증가에 따른 빛투과량의 감소를 유발하여 인근 수계의 1차 생산력 감소를 초래할 가능성이 있고, 이와 함께 생태계 먹이그물의 나머지 부분에도 큰 영향을 줄 수 있다(Davies-Colley et al., 1992). 이러한 생물적 영향에 더불어 생태계 내 물질의 원활한 순환 저해 및 총체적인 자기조절 능력의 저해 등 심각한 생태계 기능 저하가 발생할 것으로 판단되는데 이러한 기능적 저하는 더욱 뚜렷한 수서생물군집 변화를 야기할 것이다. 하천의 생태적 안정성과 건전성의 유지 그리고 복원에 있어서 유층의 시기 또는 전 생애를 담수에서 생활하는 수서생물군의 중요성은 이미 잘 알려져 있다. 특히 저서성 대형무척추동물의 대부분(95%)이 수서곤충으로서 이들이 하천생물

[†] To whom correspondence should be addressed.
thro@kei.re.kr

의 종 다양성과 풍부성을 결정한다(2002).

무기퇴적물에 의한 교란의 영향은 저서성 대형무척추동물군집의 구조 및 기능에 큰 변화를 야기하는 것으로 알려져 있다(Lemly, 1982; Minshall, 1984; Waters, 1995). 이들은 주로 하상과 연결하여 서식하므로 하상의 상태는 이들의 연속성 유지에 직결되는 주요한 환경요인이라 할 수 있으며, 특히 수서곤충류는 미세퇴적물에 대한 지표생물로서 연구되고 있다(Relyea et al., 2000). 무기퇴적물과 부유물질의 대량발생은 수서곤충류 뿐만 아니라 저서성 대형무척추동물군집 전반에 걸쳐 영향을 주고 이것이 top-down 또는 bottom-up 효과를 통하여 결국 생태계 전반에 걸친 구조적 변화 및 기능적 저하를 야기하게 된다(Wood et al., 1997). 유수생태계의 기능을 분석함에 있어 하천이 지닌 고유한 물리적 특성과 지역성 그리고 인위적 간섭의 정도를 포함시키는 총체적인 재량화는 생태적 원리의 적극적인 응용성이라는 측면에서 매우 중요하며(2002), 이를 위해 생물군집의 항상성 기작에 작용하는 저항력과 회복력에 대한 연구가 요구되어 진다(2004). 이러한 관점에서 석산개발로 인해 발생하는 무기퇴적물이 수환경에 미치는 영향을 파악하기 위한 저서성 대형무척추동물에 대한 연구는 매우 중요하다 하겠다. 그러나 현재까지 이에 대한 국내의 연구사례는 보고된 바 없다.

본 연구에서는 석산개발지를 인근의 수계와 관련하여 유형별로 구분하고 각 수계의 생물상 현황을 파악하여 각 유형이 수계에 어떠한 영향을 주는지에 대해 살펴보고자 한다. 이와 함께 각 유형에 대한 하천생태학적 관점에서의 평가 및 석산개발지 선정에 있어 고려할 사항 등을 제시하고자 한다. 따라서 본 연구의 결과는 앞으로 석산개발지의 입지선정에 생태학적 기준을 제공하는 기초자료로서 그리고 석산 인근 수계의 보존 및 복원에 대한 토대로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지역

본 연구를 위하여 경기도 및 강원도에 위치하는 석산 중 수계와 지리적 연관성이 있는 4개 석산개발지(A, B, C, D 석산)를 선정하였다. 각 석산개발지의 유형은 현지답사와 지도(1:25,000)를 이용하여 인근의 수계와의 관계를 중심으로 결정하였다. 각 조사지역에는 1개의 대조구와 3-4개의 조사정점을 두었으며, 대조구는 석산의 영향을 받지 않거나 가장 적게 받는 상류에서 선정하는 것을 원칙으로 하였다. 그러나 수계의 상류가 개발지에 포함된 경우에는 지류의 한 곳을 대조구로 선정하였다. 나머지 조사정점은 개발지가 가장 가까운 곳에 조사정점1(경우에 따라서는 조사정점2도 포함되었음)을 두었고 하류로 진행함에 따라 순차적으로 조사정점을 설정하였다. 각 조사정점간의 거리는 500 m를 넘지 않았다.

A석산은 개발지가 수계의 좌우변에 근접하여 위치하고 있었으며, 발원지는 개발의 영향이 미치지 않는 상태였다(Fig. 1(a)). B석산은 산림의 산정역이 개발된 곳으로 이곳에서 발원하는 모든 수계에 영향을 미치고 있었으며, 전반적으로 탁도가 매우 높은 수준을 나타내는 특성을 보였다(Table 1; Fig. 1(b)). C석산의 경우는 조사수계의 지류에 직접적으로 영향을 주며, 그 지류를 통하여 간접적으로 본류역 하천에 영향을 주는 특성을 나타내고 있다(Fig. 1(c)). 마지막으로 D석산은 수계 주변으로 다수의 석산 개발이 있는 형태로 수계가 석산을 직접 관통하지는 않지만, 개발지로부터 유입되는 수로를 통하여 지속적인 영향을 받는 양상을 보였다(Fig. 1(d)).

2.2. 저서성 대형무척추동물

수서곤충류를 비롯한 대부분의 저서성 대형무척추동물은 태어나서 재생산활동을 시작하기까지 대략 1년의 기간이 요구된다. 따라서 저서성 대형무척추동물의 군집분석이나 이들을 이용한 생물모니터링은 최소한 1년을 단위로 계절별 또는 월별로 조사를 수행하는 것이 바람직하다. 그러나

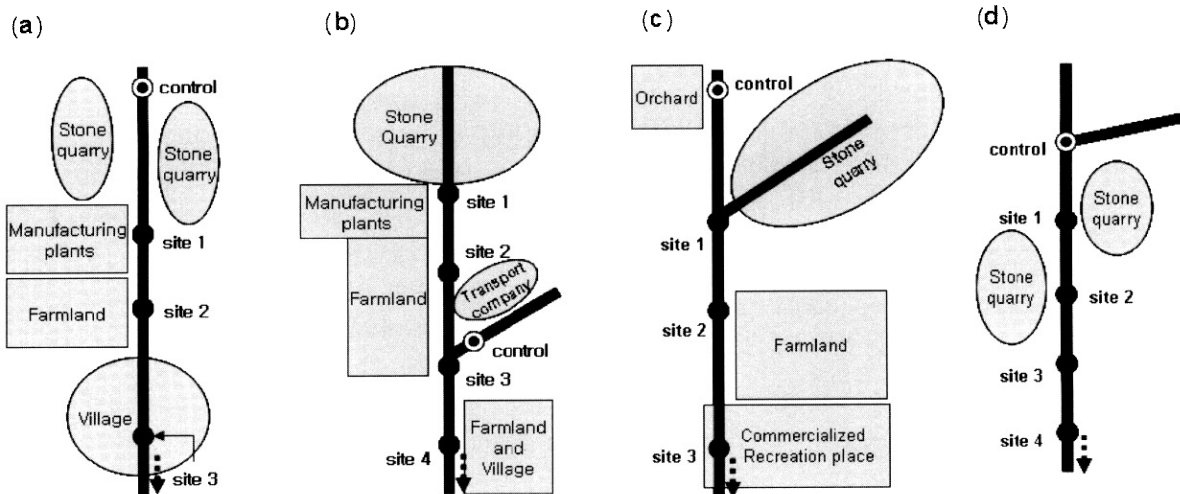


Fig. 1. Locations of stream, stone quarries and other artifacts causing possible disturbances in the each survey area. Dotted arrow indicates flow direction: (a) Quarry A, (b) Quarry B, (c) Quarry C, (d) Quarry D.

우리나라처럼 여름에 강우가 집중되고 겨울에 하천이 결빙되는 기후적 조건에서는 생물들의 활동시기를 고려하여 생물상 조사를 수행하는 것이 불가피하다. 생물상의 정확한 파악을 위해서는 일반적으로 각 개체군이 충분히 성숙하여 우화하기 직전 또는 우화중인 4-6월경이나 우기가 지나고 새로 생산된 개체들이 어느 정도 자라 종동정이 가능해지는 시기인 9-11월경에 조사하는 것이 효과적이다. 조사가 시행된 2004년의 경우, 강우의 양상이 예년과는 다소 달라 1차 조사를 우화기 및 그 전에 실시하지 못하였고 일부 곤충류의 우화기가 지난 7월 초에 실시하였다. 그러나 본 조사지역이 자연하천이 아니라 지속적인 인위적 영향권에 속한 하천이라는 점 그리고 수계 주변에 분포하는 수서곤충류의 성충의 종류가 채집된 유충에서 모두 확인되었다는 점 등으로 고려할 때, 조사시기가 결과에 큰 영향을 미치지 않았을 것으로 판단되었다. 2차 조사는 일반적인 수서곤충류의 생활환에 따라 9월에서 10월 초 사이에 실시하였다.

저서성 대형무척추동물의 채집은 각 조사정점별로 그곳의 특성을 잘 나타내는 곳을 선정하여 Surber net(망목: 0.1 cm, 크기: 30×30 cm²)로 2회씩 정량채집을 하였다. 또한 다양한 미소서식처 상황을 고려하여 hand-net(망목: 0.1 cm, 지름: 30 cm)로 정성채집을 병행하였다. 채집된 저서성 대형무척추동물의 표본은 Kahle's 용액에 고정하여 2-3일 후 80% ethanol에 옮겨 보존하였다. 채집된 종의 동정은 대부분의 수서곤충은 Merritt 등(1996) 및 윤(1988, 1995)을 참고하여 실시하였고 파리목 중 깔따구과(Chironomidae)는 Wiederholm(1983)을 이용하여 외부형태, 특히 체장, 체색, mouth part 형태, abdominal tubules의 유무, 강모의 형태 등의 특징을 고려하여 아과수준으로 임의로 분류하였다. 연체동물의 경우는 권(1990)을 참고하였다.

2.3. 군집 및 생물지수에 의한 수환경 평가

저서성 대형무척추동물의 군집을 분석하기 위하여 정량 조사를 통해 채집된 종의 개체수 현존량을 1 m²의 단위면적 당 확인된 개체수로 환산하여 구하였다. 각 조사정점의 군집을 분석하기 위하여 species:abundance analysis 및 군집지수분석(다양도, 종풍부도, 균등도 및 우점도지수)을 수행하였다. 정량조사를 근거로 한 수리생태학적 군집분석과 병행하여 윤 등(1992c)에 의해 제시된 29개 지표생물군의 상대출현도에 따른 오락계급치에 근거한 한국생물지수(Korean Biotic Index: KBI) 및 저서성 대형무척추동물을 이용한 수환경평가 방법으로 제시된 저서성 대형무척추동물 생태점수(Ecological Score using Benthic macroinvertebrate community: Kong's ESB)를 이용하여 각 조사정점에 대한 수환경을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 석산개발지의 유형

하폭 및 수폭 등의 특징을 고려할 때, 연구대상 지역들의

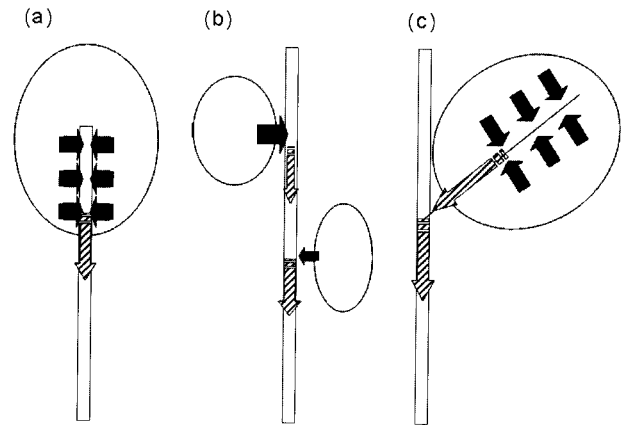


Fig. 2. Types of stone quarries in relation to stream impact. Each circle means stone quarry area, black arrows mean the pathway of inorganic matters from stone quarry to stream, and arrows embedding oblique lines mean the movement of inorganic matters along to stream channel: (a) upstream-inclusion type, (b) stream-proximity type, (c) tributary-inclusion type.

물리적 및 하천 경관생태학적 유형은 대부분 산간계류에 해당하는 유형으로 분석되었다(Table 1). 석산의 영향으로 유입·퇴적된 저질을 제외한 하천 본래의 하상구조는 비교적 이질성이 높았고, 일반적인 산간계류의 중하류에서 흔히 관찰되는 바와 같이 지름 32 mm에서 257 mm의 저질입자가 가장 넓은 하상의 표면적을 덮고 있었다. 수변의 식생 등은 석산에 따라 차이를 보였으나, 식생에 먼지가 덮여 교란을 받는 점 등은 공통적으로 나타났다. 제방의 상태는 대부분 반자연형이었는데, 이는 석산개발지로 대형차량의 통행을 위한 도로가 설치되어 있기 때문이다. 유기물의 양은 대조구를 제외한 조사정점에서는 매우 적었다.

지역 내 개발지의 위치와 수계와의 공간적 관계를 고려할 때(Fig. 1), 본 연구 대상인 4개 석산에서 3가지의 입지 유형을 파악할 수 있다(Fig. 2). 먼저 A석산과 D석산과 같이 개발지가 수계 종축을 따라 측면 쪽에 위치하는 유형(수변근접형)은 개발지가 수계를 완전히 포함하지는 않았지만 배출수 및 표면수 그리고 부유토사와 먼지 등의 형태로 무기물이 수계로 유입될 수 있는 형태이다(Fig. 2(a)). 다음은 B석산과 같이 개발지가 수계의 상류부를 완전히 포함하는 유형(상류점유형)으로(Fig. 2(b)), 이 경우에는 수계의 상류를 비롯하여 상당한 거리까지 다량의 무기물이 퇴적되어 있는 것을 관찰할 수 있었다. 마지막 유형으로는 C석산과 같이 큰 수계의 지류를 완전히 포함하는 경우를 들 수 있다(지류점유형, Fig. 2(c)). 본 유형은 지류의 발원지에서부터 하류까지를 모두 개발지가 포함한다는 점에서 상류점유형과 뚜렷이 구별되었다. 지류점유형에서 지류는 이미 개발지에 포함된 부분이므로 이 지류를 통하여 분류가 받는 영향이 더욱 문제가 되므로 다른 유형과 구별하여야 할 것으로 판단된다.

Table 1. Summary of environmental conditions or characteristics of each survey area

Quarry	Site	Altitude (m)	Stream Width (m)	Channel Width (m)	Depth (mm)	Main Particle	Bank* Type	Algae	Organic** Matter Deposit	Turbidity (NTUs)
A	control	172	5-6	1-2	115-140	Cobble	semi-natural	none	little	0.99
	1	137	7-10	1-3	80-160	Gravel	artificial	none	none	2339.85
	2	115	5-6	0.5-2	40-70	Sand (Rock)	semi-natural	little	none	1421.57
	3	89	4-5	0.4-2	70-75	Gravel	artificial	little	little	14.56
B	control	109	0.5	0.3-0.4	10-15	Gravel	semi-natural	none	CPOM	70.89
	1	146	1-2	0.5	10	Gravel	artificial	none	none	3006.94
	2	115	3-4	0.3-0.5	10-12	Gravel	artificial	none	none	3006.94
	3	108	5	0.5-1.2	20-85	Gravel	artificial	little	none	2629.75
	4	96	5-6	1-2	75-120	Rock	artificial	little	none	1249.72
C	control	255	15	9-10	100-215	Pebble	semi-natural	none	none	2.65
	1	220	20-25	3-11	80-410	Pebble	artificial	little	none	35.07
	2	215	18-20	2-6	110-300	Gravel	semi-natural	little	none	14.39
	3	201	20-24	5-10	120-130	Gravel	semi-natural	little	none	16.39
D	control	239	4-5	1-3	106-236	Cobble	natural	none	CPOM	2.13
	1	231	5-7	2-4	152-280	Cobble	semi-natural	none	none	126.16
	2	229	7-9	5-7	105-270	Cobble Pebble	artificial	none	none	1.45
	3	207	7-10	2-5	180-195	Pebble	semi-natural	none	little	3.38
	4	164	10-13	6-8	85-170	Pebble	semi-natural	none	little	3.23

* semi-natural type means that one of two stream sides is artificially maintained or constructed

** Little means coverage of organic matter is less than 1/3 of Surber net area, and CPOM indicates coverage of organic matter (mainly Coarse Particulate) is more than 1/3 of the area

3.2. 출현종수 및 개체수현존량 분석

정량 및 정성조사를 통해 각 석산의 영향을 받는 수계에서 출현한 저서성 대형무척추동물은 C석산에서 총 4문 4강 9목 23과 45종으로 가장 많았고 다음으로 D석산에서 총 4문 5강 10목 26과 44종, A석산에서 총 2문 3강 8목 20과 41종이 각각 출현하였으며, B석산에서는 가장 적은 총 3문 5강 12목 20과 27종이 출현하였다. 그러나 분류군의 개체수현존량을 석산별로 살펴볼 경우, B석산의 현존량(약 11,255.56 개체/m²)이 다른 지역과 비교하여 월등히 높았다(D석산: 약 2,538.89 개체/m², A석산: 약 2,094.44 개체/m², C석산: 약 2,088.89 개체/m²). 각 석산의 출현종수와 개체수현존량의 관계를 토대로 한 species:abundance 분석에서 B석산은 geometric 분포를 보여 broken-stick 분포를 보인 다른 석산들과 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 3). 이러한 분포는 Niche pre-emption model로서 설명되는데, 특정종이 생태계 내 자원의 많은 부분을 점유하고 다른 종에 의한 사용을 적극적으로 방어하는 것을 의미한다(Putman et al., 1984). 특정종 외의 나머지 종은 다시 순차적으로 자원 점유에 대한 경쟁력에 따라 점유율이 달라지고 그에 따라 풍

부도도 결정된다. 따라서 종풍부도는 총 자원이용도에 비해 낮게 된다. 이러한 모형이 실제로 잘 들어맞는 생태계는 천이가 시작되는 단계의 생태계, 점차 훼손되어가는 생태계 그리고 서식처 환경이 매우 열악한 생태계 등으로 출현종수가 매우 적다는 특징을 보인다. 이는 B석산의 경우와 잘 부합하는 것으로 판단된다. 나머지 석산에서 보이는 유형은 broken-stick model에 의해 설명될 수 있다(Putman et al., 1984). 이는 생태계 내 자원의 분포가 동시에 그리고 무작위로 발생하는 것으로 간주한다. 따라서 이 유형을 보이는 생태계에서는 어떠한 종이 먼저 유입되었는가 하는 사항은 각 종의 풍부도에 영향을 주지 않으며, 서로 선호하는 자원이 뚜렷이 구별된다. 이러한 특징을 고려할 때 B석산을 제외한 나머지 석산의 수계에서는 자원량에 비해 생물량이 적은 것으로 판단된다.

청정한 수환경의 지표종인 강도래류(*Amphinemura coreana*), 먹파리류(*Simulium uchidai*) 그리고 옆새우류(*Gammarus* sp.)는 A석산의 대조구에서 출현하였고, 강도래류(*Amphinemura* KUb)는 B석산의 대조구에서 출현하였다. 이와 반대로 오염된 수환경의 지표인 실지렁이(*Limnodrilus*

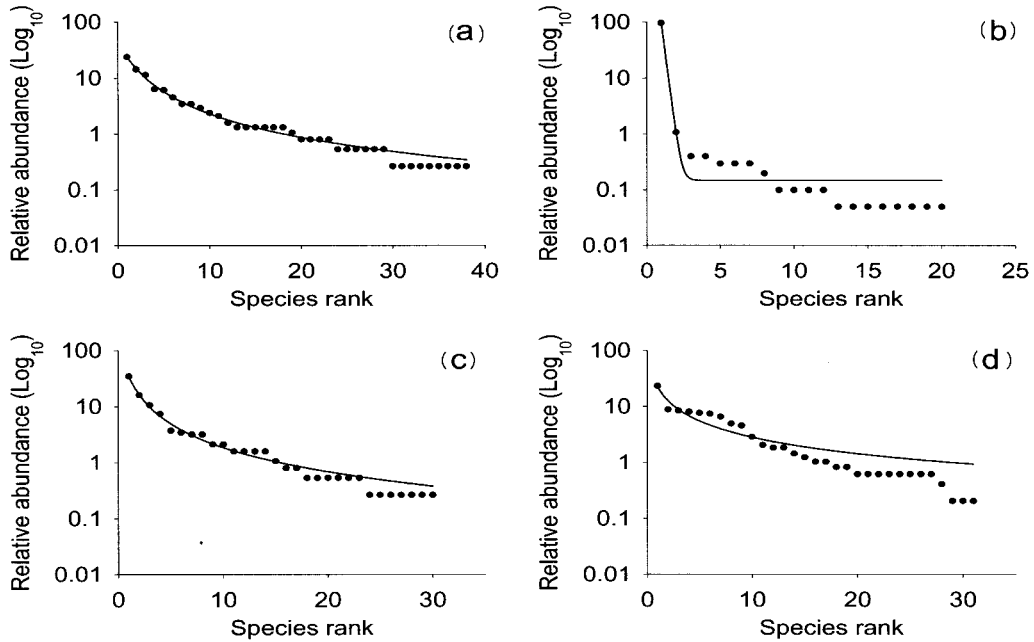


Fig. 3. Species : abundance curve analysis for each stone quarry: (a) stone quarry A, (b) stone quarry B, (c) stone quarry C, (d) stone quarry D.

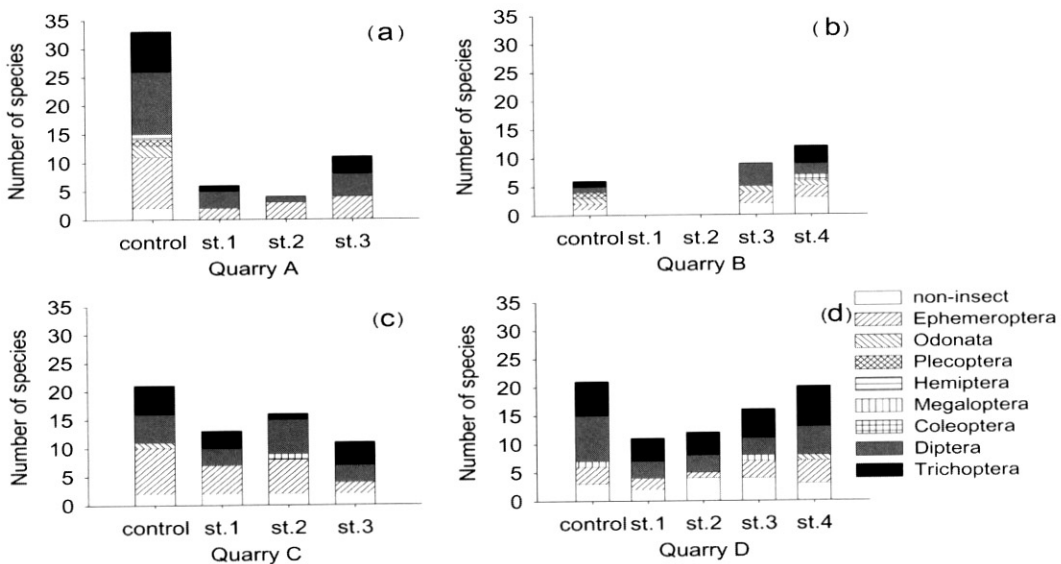


Fig. 4. Species diversity and composition of aquatic macroinvertebrates inhabiting each site in surveyed area.

gotoi) 및 깔따구류(*Chironomidae* spp.) 등은 모든 석산에서 다양하게 출현하였다. 전반적으로 각 석산의 대조구에서 비교적 다양한 분류군이 출현하였으나 그 외의 조사정점에서는 출현분류군이 매우 적거나 또는 전혀 없는 경우도 있었다. C석산을 제외한 나머지 석산에서는 개발지에 가장 가까운 조사정점에서 가장 적은 출현종수를 보였다(Fig. 4). 각 석산의 조사정점별 출현종의 분류군별 개체수현존량을 분석한 결과에서도 석산에 가장 가까운 조사정점에서 현존량이 급격히 감소하는 양상이 나타났다(Fig. 5). 특히 B석산의 경우는 조사정점에 따라 개체수현존량이 큰 차이를 보였고 대조구보다 가장 하류에 위치한 조사정점에서 높은

현존량을 보였다. 조사정점4(st. 4)의 높은 개체수현존량은 실지렁이(*Limnodrilus gotoi*)의 현존량에 의해 큰 영향을 받은 것으로 나타났다(B석산 전체 개체수현존량의 약 96%, 약 10833.33개체/m²). 무기물의 유입은 가벼운 부유물질량의 증가와 무거운 무기물입자의 퇴적으로 인한 하상조성의 변화를 통하여 담수생태계에 영향을 미칠 수 있다. 이는 4가지의 주요 경로를 통하여 저서성 대형무척추동물에 영향을 줄 수 있는데, 첫째, 하상구조의 변형과 이에 따른 특정 분류군에 대한 하상저질의 적합성이 변화함으로써 그 분류군이 서식하기 어렵게 할 수 있다(Erman et al., 1988; Richard et al., 1994). 둘째, 퇴적물 증가 및 하상저질의 안

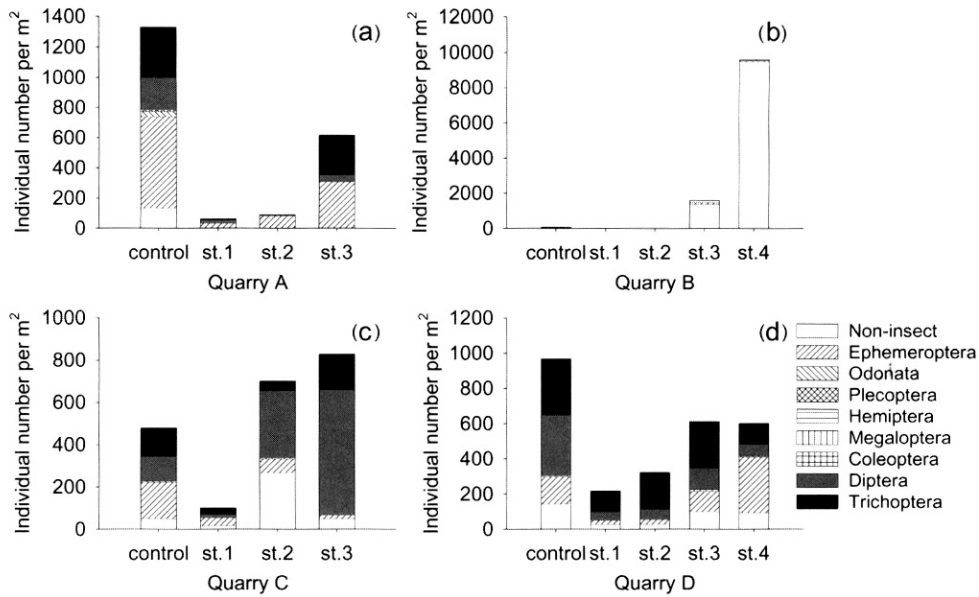


Fig. 5. Composition of standing crops at each site in quarries.

정성 감소로 인한 생물유출(drift)의 증가를 유발한다(Culp et al., 1985). 세 번째 경로는 생리학적 측면으로, 저서성 대형무척추동물의 호흡구조에 미세한 무기물이 퇴적되어 호흡에 영향을 주는 경우(Lemly, 1982)와 니질퇴적과 연계되어 발생하는 저산소상태의 영향으로 인한 변화이다(Eriksen, 1966). 마지막으로 고려할 수 있는 경로는 섭식활동과 관련된 것으로 생산자에 영향을 미쳐 저서성 대형무척추동물의 먹이자원의 질적 그리고 양적 저하를 유발하거나(Cline et al., 1982; Graham, 1990; Peckarsky, 1984) 또는 걸러먹는무리의 섭식활동을 직접적으로 저해하는 것이다(Aldridge et al., 1987). 이번에 연구대상이 된 지역에서 발생하는 무기물의 크기가 니사에 해당하는 것보다 다소 큰 입자였기 때문에 위의 주요경로 중 네번째 경로는 정확히 확인하지 못하였지만, 나머지 3가지 경로는 모두 적용되는 것으로 사료된다. 첫 번째 경로는 A석산의 결과에서 확인되었다. A석산에서는 대조구에서 수환경지표종인 강도래류가 출현하였으나, 나머지 조사정점에서는 출현하지 않았다. 각 조사정점 간의 거리는 매우 가까운 편으로 특히 대조구와 조사정점1(st. 1)과의 거리는 500 m를 넘지 않았다. 그러나 조사정점1에서는 대조구와 달리 하상표면이 2 mm 내외의 무기퇴적물에 의해 덮여 있었는데, 이러한 하상구조는 굵은 입자가 많은 서식처를 선호하는 강도래류의 서식이 불가능한 환경이다.

종합적으로 A석산, C석산 그리고 D석산에서는 개발지에 가까울수록 중수 및 개체수현존량이 감소하였으나 개발지에서 멀어질수록 다시 증가하는 양상을 보였다. 이는 두 번째 경로에서 지적한 무기물유입 증가로 인한 생물유출작용에 의하여 발생할 수 있는 현상이다. 저서성 대형무척추동물에 미치는 영향 중 세 번째 경로는 생리학적 측면이므로 본 연구에서 직접적인 증거를 확보할 수는 없었으나 석산 인근 수계에서 호흡기관이 외부로 드러나 있는 하루

살이류의 다양성 및 현존량이 상대적으로 낮다는 점과 용존산소량이 서식여부의 주요 제한요인으로 알려진 강도래류가 출현하지 않는다는 점 등은 간접적인 증거로 고려할 수 있을 것이다.

B석산의 현지조사 당시 대상수계 및 석산 개발지 내부에 위치하는 정수역과 그 부근에 잠자리류의 성충이 많이 날아다니는 것이 목격되었다. 수서곤충류의 성충이 주로 재생산활동에 에너지를 투입하는 점을 고려할 때, 수서곤충들에 의한 수계 상류에 대한 정착시도는 계속 발생하고 있으나, 석산에서 발생하는 다양한 교란(특히 미세무기물에 의한 탁도 증가와 퇴적물 증가)에 의하여 유충들이 사망하거나 정착 및 서식이 불가능하여 하류로 이동하는 재앙적 생물유출양상(catastrophic drift; Waters, 1972)을 보이는 것으로 사료된다.

진 등(1999)은 석산개발지 및 인근의 석가공업체에서 발생하는 석폐기물에 포함된 미량원소의 함량은 대상암석의 조성 이외에 석폐수로부터 슬러지를 회수하기 위한 응결제와 결합제의 첨가에 따라 매우 큰 변화를 보이며, 이러한 과정에서 일부 미량원소(Cu, Pb, Cd, Co 등)는 농작물에 독성을 줄 수 있는 토양 중의 최대 허용한계 이상의 값을 보이게 됨을 지적하고 있다. 그리고 농지개량의 객토용으로 석분과 슬러지를 사용함에 있어 주의를 요할 것을 제안하였다. 그러나 이보다 더 심각한 것은 개발지 및 석가공업체로부터 직접 수계로 유입되는 석폐기물이 미치는 수계에 대한 생태적 교란이라 판단된다. 본 연구결과에서 나타난 개발지 인근의 직·간접 영향을 받는 조사정점과 대조구 간의 생태학적 비교는 이러한 심각성을 잘 보여주는 결과라 판단된다. 특히 B석산과 같은 유형에서 이러한 교란은 매우 심각하였다.

일반적으로 온대지역의 경우, 여름철 집중호우기로 인해 다량의 무기퇴적물이 해소되는 양상을 보여줄 수 있다. 우

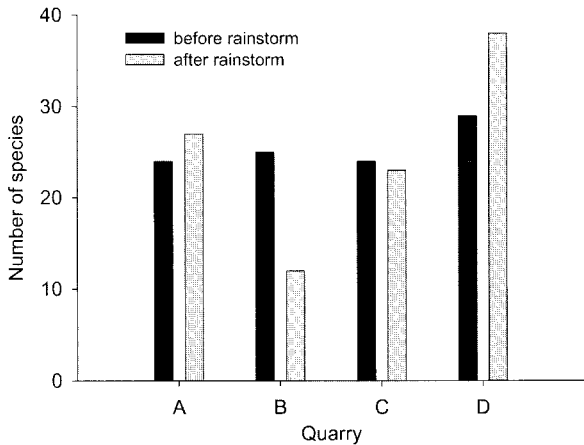


Fig. 6. Changes in number of species before and after rainstorm in the survey area.

기를 기준으로 전기와 후기에 실시된 조사를 결과를 볼 때, 전후기에 따른 출현종수의 차이는 일관된 양상을 보이지 않고 석산에 따라 다른 양상을 나타냈다(Fig. 6). 첫 번째의 경우, A석산과 D석산에서는 우기가 지난 후 출현종수가 증가하였다. 이러한 경우 조사정점별로 출현종수를 살펴보면, 대조구 및 석산의 영향권에서 먼 하류가 전체 출현종수에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 두 번째 유형은 C석산의 경우로서 우기를 전후로 출현종수의 변화가 거의 나타나지 않는 것이다. 이 경우에도 대조구에서 가장 많은 종수를 보였으나 첫 번째 유형과는 달리 석산의 영향권에서 먼 하류에서 많은 종이 출현하지는 않았다. 이는 하류의 주변 환경과 큰 연관이 있을 것으로 사료된다. 마지막으로 B석산과 같이 우기 후에 오히려 종수가 감소하는 유형을 고려할 수 있다. 이러한 경우는 우기에 발생한 생물유출(drift)에 의한 종수의 감소가 아직 회복되지 않은 것으로 판단된다. 하지만 본 지역과 같은 경우 생물상이 회복되기 전에 또 다시 석산의 영향을 받을 것이므로 점차 생물상이 감소할 가능성이 매우 크다 하겠다. 각 유형을 수계의 자연성을 고려하여 생각해 보면, 우기 후 종수가 증가하는 유형은 위의 세가지 유형 중 가장 일반적인 현상인 것으로 판단할 수 있다. 일반적으로 자연하천의 저서성 대형무척추동물군집은 홍수 이후 매우 빠르게 이전의 수준으로 회복하는 것으로 알려진다(Fisher et al., 1982). 대체로 짧고 집중된 우기가 존재하는 우리나라와 같은 경우는 우기 후 군집이 안정되기 전까지 초기에는 종수가 증가하다가 어느 순간을 조사정점으로 다소 감소를 하여 안정적으로 유지되는 경향이 있다. B석산과 같은 곳은 석재원의 특성상 미세입자가 매우 높게 하천에 유입됨으로써 서식처의 질적 저하가 현저하여 자연적 교란(우기)에 의해 교란된 이후 생물상의 회복에 오랜 시간이 요구된다. 만약 생물상이 회복되기에 충분한 시간이 보장된다면 그 생태계는 낮은 수준에서 안정적으로 유지될 수 있을 것이다. 그러나 B석산의 경우는 우기 후 빠르게 교란이 재발생하여 생물상의 회복이 원활히 이루어지지 않는 것으로 판단된다(Wood et al., 1997). 이러한 경우는 교란의 정도가 심화되어 유수

의 생태적 기능 및 안정성이 극히 열악한 상태를 의미하며(노, 2002) 만약 주변으로부터 생물상의 유입이 없다면 유지될 수 없는 생태계라 할 수 있다.

3.3. 군집지수 및 생물지수

우점도지수는 생물군집의 총현존량에 대하여 특정종이 차지하는 비율을 나타내는 것으로 생물군집이 소수의 특정종에 의해 구조 및 기능이 좌우되는지를 판단할 수 있는 척도가 된다. 본 연구에서 나타난 조사정점의 우점도지수는 0.29에서 1.00의 범위를 보였다(Table 2). 각 석산의 대조구의 우점도지수는 0.29에서 0.65의 범위를 보였고, 석산의 영향을 받는 조사정점 및 그 하류조사정점들에서는 0.33에서 1.00의 범위를 보였다. 대조구의 우점종은 각 석산의 특성에 따라 차이를 보였으며 조사대상 중 조사정점들의 우점도가 가장 높은 지역은 B석산이었다. B석산의 수계는 전 조사기간에 걸쳐 0.55에서 1.00의 우점도를 보였으며 평균 0.76의 우점도를 보였다. A석산은 대조구를 제외한 나머지 조사정점에서 0.80 이상의 높은 수치를 보여 우점도지수가 가장 높은 지역이었다. 각 석산의 조사정점별 우점도지수의 변화를 살펴보면, 대부분의 석산에서 대조구에서는 낮은 수치를 보이고 개발지에 가까울수록 우점도가 높은 양상을 보였다(Table 2). D석산의 경우는 가장 하류인 조사정점3에서 조사정점1보다 높은 우점도를 보였는데 이는 주변 유원지로부터 발생하는 유기물의 유입에 의한 결과라 사료된다. 비록 조사정점1에서 우점도지수치는 상대적으로 낮게 나타났지만, 출현종수(평균 7종) 및 개체수현존량(1차 조사시기: 77.78 개체/m², 2차 조사시기: 138.89 개체/m²)이 가장 낮았다. 이는 본 조사정점에서 전반적인 자원량의 감소로 인한 개체수현존량의 감소현상이 발생하고 있음을 보여주는 결과로서 이러한 경우에는 출현종수가 매우 적지만 개체수현존량에서 큰 차이를 보이지 않아 우점도지수가 낮게 산출될 수 있다.

생물군집을 이루는 출현종의 수와 각 출현종의 현존량을 고려한 종다양성의 척도인 종다양도지수는 0.47에서 2.40까지의 범위를 보였다(Table 3). 각 석산에서의 조사정점에 따른 다양도지수치는 대조구에서 높고 대조구 외의 지역에서 상대적으로 낮은 양상을 보였다. 그러나 D석산에서는 조사정점3과 조사정점4의 수치가 대조구보다 높은 수치를 보였다. D석산의 조사정점별 출현종수를 보면 조사정점3에서부터 대조구의 수준까지 회복되는 양상을 보였다(Fig. 4). 주어진 생물군집의 출현종수에 대한 척도인 종풍부도지수는 0.26에서 3.03의 범위를 보였다(Table 3). 각 석산별 전체적 양상은 수치만 다를 뿐 종다양도지수 분석결과와 일치하였다. 조사정점 별로 가장 큰 차이를 보인 곳은 A석산으로 대조구에서는 3.03을 보인 반면 석산의 영향과 답압을 함께 받는 조사정점2에서 가장 낮은 0.26의 수치를 보였다. 생물군집 내 출현종이 보이는 현존량의 균일한 정도에 대한 척도인 균등도지수는 B석산 조사정점3에서 가장 낮은 0.36의 수치를 기록하였고 C석산 조사정점1에서 0.98로 가장 높은 수치를 보였다(Table 3). 균등도의 결과를 살

Table 2. Dominant species and value of dominance index (McNaughton's index) at each sampling point

Quarry	Site	Season	1st Dominant Species	2nd Dominant Species	Dominance Indices	
A	control	summer	<i>Ecdyonurus levis</i>	<i>Ephemera orientalis</i>	0.38	
		autumn	<i>Hydropsyche orientalis</i>	<i>Ephemera strigata</i>	0.49	
	1	summer	<i>Tipula</i> KUa	<i>Baetis fuscatus</i>	0.50	
		autumn	<i>Baetis fuscatus</i>	<i>Epeorus latifolium</i>	1.00	
	2	summer	<i>Baetis pseudothermicus</i>	Chironominae sp.4	1.00	
		autumn	<i>Baetis fuscatus</i>	<i>Epeous curvatulus</i>	1.00	
	3	summer	<i>Cincticostella levanidovae</i>	<i>Antocha</i> KUa	0.83	
		autumn	<i>Hydropsyche orientalis</i>	<i>Baetis fuscatus</i>	0.83	
	B	control	summer	<i>Davidius lunatus</i>	<i>Ephemera strigata</i>	0.58
autumn			<i>Davidius lunatus</i>	<i>Ephemera strigata</i>	0.57	
1		summer	-	-	-	
		autumn	-	-	-	
2		summer	-	-	-	
		autumn	-	-	-	
3		summer	<i>Limnodrulus gotoi</i>	<i>Baetis fuscatus</i>	0.93	
		autumn	<i>Limnodrulus gotoi</i>	<i>Tipula</i> KUa	0.93	
4		summer	<i>Limnodrulus gotoi</i>	<i>Baetis fuscatus</i>	1.00	
		autumn	Chironominae sp.1	<i>Erpobdella lineata</i>	0.55	
C		control	summer	<i>Antocha</i> KUa	Tanipodinae sp.	0.39
			autumn	<i>Epeorus pellucidus</i>	<i>Baetis pseudothermicus</i>	0.29
	1	summer	<i>Baetis pseudothermicus</i>	<i>Hydropsyche orientalis</i>	0.33	
		autumn	<i>Hydropsyche orientalis</i>	<i>Epeous curvatulus</i>	0.44	
	2	summer	Tanipodinae sp.	<i>Hydropsyche orientalis</i>	0.73	
		autumn	<i>Baetis pseudothermicus</i>	<i>Ecdyonurus kibunensis</i>	0.43	
	3	summer	<i>Antocha</i> KUa	Tanipodinae sp.	0.63	
		autumn	Tanipodinae sp.	<i>Hydropsyche orientalis</i>	0.76	
	D	control	summer	Tanipodinae sp.	<i>Dugesia japonica</i>	0.61
autumn			<i>Hydropsyche orientalis</i>	<i>Baetis pseudothermicus</i>	0.47	
1		summer	Tanipodinae sp.	<i>Glossosoma</i> KUa	0.57	
		autumn	<i>Hydropsyche orientalis</i>	<i>Glossosoma</i> KUa	0.52	
2		summer	<i>Apatania</i> KUa	<i>Hydropsyche orientalis</i>	0.63	
		autumn	<i>Hydropsyche orientalis</i>	<i>Antocha</i> KUa	0.77	
3		summer	<i>Apatania</i> KUa	<i>Limnodrilus gotoi</i>	0.44	
		autumn	-	-	-	
4		summer	<i>Apatania</i> KUa	<i>Dugesia japonica</i>	0.42	
		autumn	<i>Hydropsyche orientalis</i>	<i>Antocha</i> KUa	0.63	

해보면 B석산을 제외한 나머지 석산에서 조사정점1이 가장 높은 수치를 보였다. 이는 무기물이 저서성 대형무척추동물 군집에 미치는 영향이 유기물이 미치는 영향과는 다르다는 것을 보여주는 결과이다. 일반적으로 유기물 오염에 의한 교란은 출현종수를 감소시키지만, 특정종의 개체수를 증가시키는 양상을 보이며 이것이 전체적인 군집수준에서의 개체수현존량의 증가로 연결되는 경우가 많다(Mackenthun, 1969). 그리고 이러한 경우 균등도는 매우 낮아지게 된다. 미세한 무기퇴적물에 의해 교란된 수계에서도 깔따구류 및 환형동물류 등이 개체수현존량의 증가를 보이기도 하지만, 무기퇴적물 및 부유물질의 양이 매우 많거나 또는 지속적으로 수계에 유입될 경우에는 오히려 전반적인 개체수현존량이 감소하는 것으로 알려진다(Dudgeon, 1994; Armitage, 1995). 따라서 각 출현종에 따른 개체수현존량은 매우 낮게

유지되므로 종간의 개체수현존량 차이가 상대적으로 감소하여 균등도는 높게 나타날 수 있다.

각 조사정점의 KBI(Korean biotic index)를 살펴본 결과, 모든 석산에서 대조구의 수치가 가장 낮게 나타났으나 석산의 영향을 직접적으로 받는 정점에서 뚜렷이 높은 수치를 보이지는 않았다(Table 4). KBI가 유기물 오염에 대한 지수로서 개발된 것임을 고려할 때 석산에 의한 하천의 영향은 무기물에 의한 물리적 교란이 주된 사항임을 함축적으로 의미하고 있음을 알 수 있다(윤 등 1992a, 1992b). Kong's ESB로 분석한 결과, 전반적으로 석산에 위치하는 수계는 환경상태가 불량한 것으로 나타났다(Table 4). 본 조사의 대부분의 조사정점이 개선이 요구되는 개선수역 또는 최우선개선수역으로 판정되었고 각 석산의 대조구는 동일 석산의 다른 조사정점들에 비해 상대적으로 높은 수치

Table 3. Community indices (Shannon's H' for diversity, Margalef's R1 for species richness, and Pielou's J' for evenness) at each sampling point

Quarry	Site	Shannon's H'	Margalef's R1	Pielou's J'
A	control	2.40	3.03	0.81
	1	1.12	0.72	0.97
	2	0.47	0.26	0.68
	3	0.96	0.87	0.55
B	control	1.63	1.19	0.91
	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	0.60	0.68	0.36
	4	0.85	0.88	0.47
C	control	2.39	2.38	0.91
	1	1.89	1.53	0.98
	2	1.76	1.58	0.79
	3	1.51	1.50	0.66
D	control	2.05	2.10	0.79
	1	1.68	1.17	0.92
	2	1.48	1.19	0.78
	3	2.15	2.00	0.90
	4	2.10	2.19	0.82

를 보였다. 특히 A석산의 대조구는 61로서 가장 높은 수치를 보였으며, 환경상태가 양호하여 개선의 노력보다는 보호에 중점을 두어야하는 곳으로 판정되었다. 보호의 우선순위도 비교적 높은 우선보호구역으로 판정되었다.

4. 결론

본 연구를 통하여 밝혀진 수계와의 지리적 관계를 고려한 석산개발지의 세가지 입지유형은 저서성 대형무척추동물 군집을 근거로 한 생태학적 특성에서 서로 뚜렷한 차이를 보였다. 먼저 상류점유형은 석산개발지가 수계의 상류를 포괄적으로 점유하는 경우이다. 이러한 경우 단지 하나의 수계에만 영향을 주는 것이 아니라 그 산지에서 발원하는 대부분의 수계에 동일한 효과를 줄 것으로 예상된다. B석산과 같이 상류 특히 수계의 발원지에서 석산이 조성된 경우에 수계의 생물상에 미치는 영향은 매우 컸다. 본 조사의 결과에서도 나타난 바와 같이 석산개발지에 가까운 곳에서는 전혀 저서성 대형무척추동물이 출현하지 않았다. 특히 주요 분류군인 하루살이류, 강도래류 및 날도래류의 상대적 서식정도를 의미하는 EPT 비율은 개체수현존량을 근거로 할 때, 매우 낮아지는 양상을 보였다. 또한 우점도지수는 매우 높게 나타나고 있었으며, 이와 반대로 종다양도는 매우 낮게 나타났다. 본 연구에서 비록 출현종이 완전히 일치하지는 않았지만 지류의 유입 이후 본류역에서 생물군이 출현하였다. 따라서 상류가 석산에 의해 점유된 경우에는 본류의 상류에서 유입되는 생물량이 매우 적으므로 하류에서 저서성 대형무척추동물이 다양하게 출현하기 위해서는 지류를 잘 관리함으로써 그 영향을 저감하고 수생태계의 건전성을 유지시킬 수 있음을 알 수 있다. 출현종

Table 4. Korean Biotic Index (KBI) and Ecological score using benthic macroinvertebrates community (Kong's ESB) evaluated environmental state at each sampling point

Quarry	Site	KBI	ESB	Environmental State	Management required
A	control	1.31	61	better	conservation
	1	1.43	9	worst	urgent improvement
	2	1.65	9	worst	urgent improvement
	3	1.32	18	worse	prior improvement
B	control	1	20	worse	prior improvement
	1	-	0	worst	urgent improvement
	2	-	0	worst	urgent improvement
	3	1.74	11	worst	urgent improvement
C	control	1.29	47	good	protection
	1	1.38	23	worse	prior improvement
	2	1.79	26	bad	improvement
	3	1.77	28	bad	improvement
D	control	1.39	38	bad	improvement
	1	1.40	20	worse	prior improvement
	2	1.67	18	worse	prior improvement
	3	1.84	29	bad	improvement
	4	1.56	39	bad	improvement

이 광범위하게 일치하지 않았다는 것은 지류에서 출현하는 종이 본류 수계에서 성공적으로 정착하지 못함을 의미한다. 그러나 지류는 이러한 생물상을 공급하는 역할 이외에 수환경을 정화하는 역할도 하기 때문에 유입부 이후의 조사 정점에서 생물이 정착할 수 있는 최소한의 조건을 조성하는 데에는 큰 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

수변근접형은 개발지가 수변을 따라 발달하며, 상류부에는 큰 영향을 주지 않아 상류 수계는 자연하천에서의 생물상과 유사한 군집구조를 보일 것이다. 그러나 석산 개발지가 나타나는 곳에서부터는 본격적으로 영향을 받게 되어 개발지와 수계의 근접성, 석산 개발지에서 방류되는 용수의 양과 질, 특히 방류수에서의 미세무기물 제거 정도 등에 따라 수계에 미치는 영향 및 교란은 상이하게 나타나는 것으로 판단된다. 금번에 조사된 석산 중에는 A석산이 상대적으로 수계에 가깝게 위치하고 있었으나, D석산의 경우에

는 도로를 사이에 두고 석산이 하나 위치하고 있었다. 또한 그 하류에서는 수계 쪽으로 개발지가 위치하기는 하였으나 개발이 되고 있는 곳과 수계 사이에는 자연적인 완충역이 위치하고 있었다(Fig. 1 참조). 이 두 석산을 서로 비교하면, 상류에 위치하는 대조구의 생물상에서는 A석산이 더 나은 생물상을 보였다. ESB, 다양도지수, 풍부도 그리고 균등도에 있어 A석산의 대조구가 D석산보다 높은 수치를 보였고 반면에 우점도지수는 낮게 나타났다. 이는 대조구의 경우에는 A석산이 뛰어난 생물상을 보유하고 있음을 보여주는 결과라 하겠다. 그러나 석산의 영향을 직접 받는 조사정점들과 그 하류의 조사정점에서는 이와 상반되는 결과를 보였으며 이는 출현종수 측면에서 명확한 대조를 보였다(Table 3 & 4). A석산에서는 석산 부근에서 생물상이 교란되어 낮은 수준으로 변화한 이후 다시 회복되지 않는 반면에 D석산에서는 대조구와 거의 유사한 정도의 출현종수를 보여 생물상이 다시 회복되는 양상을 뚜렷이 보였다. 그러므로 이와 같은 수변근접형 석산에서는 개발지와 수계와의 거리가 매우 중요할 것으로 판단된다.

결론적으로 지류점유형의 경우에 그 지류는 자연적인 유수생태계라기 보다는 단순한 수로기능만을 수행하는 정도로 교란이 심화된 경우였다. 현지에서의 정성조사에 있어 저서성 대형무척추동물이 전혀 출현하지 않았다는 점은 이러한 판단을 뒷받침해 준다. 따라서 석산에서부터 기원하는 지류의 경우에는 다량의 미세무기물을 함유하고 있으며 이를 분류 수계로 운반함으로써 합류부 이후의 하류에 큰 영향을 미치게 된다. 그러나 그 효과는 분류 수계와 지류의 규모차가 크면 클수록 작게 나타날 것으로 예상되며, 하류에서 또 다른 교란요인이 없다면 다른 유형에 비해 짧은 거리 내에서 생물상이 회복될 것으로 예상된다. 본 연구대상 수계인 C석산 수계의 경우에는 하류 쪽에 경작지 및 유원지가 존재하여 유기물에 의한 교란이 발생할 수 있는 조건을 갖추고 있었다. 하류에서 생물상의 회복이 뚜렷이 나타나지 않은 것은 석산에서 유발된 무기물에 의한 교란과 하류의 경작지 및 유원지에서 발생한 유기물에 의한 교란이 함께 작용한 결과로 판단된다.

마지막으로 본 연구의 결과를 토대로 석산을 개발함에 있어 수계에 미치는 교란을 저감하기 위해서 반드시 고려해야 할 몇 가지 사항을 제안하고자 한다. 첫번째는 석산 개발지의 입지유형에 대한 것으로 가능하다면 중심수계에 영향을 직접적으로 미치는 상류점유형은 대체로 산지의 상층부에 위치하므로 하나의 수계만을 포함하는 경우는 드물 것으로 예상된다. 따라서 그 산지에서 발원하는 모든 수계를 교란하게 될 것이고 이것의 파급효과는 매우 클 것이다. 만약 부득이하게 상류점유형 개발을 하여야 할 경우에는 최대한 지류의 자연성을 보장하고자 하는 노력을 기울여야 할 것이다. 두번째로 석산개발지와 수계 간의 거리를 충분히 유지하여 다양한 경로를 통한 무기물의 유입을 예방하여야 할 것이다. 특히 수계의 수변부와 도로 사이에 다양한 식생(특히 교목류 및 관목류)을 도입하여 차량이동시 발생하는 먼지 형태로써 무기물이 유입되는 경우와 토양의

아표면층을 통한 무기물의 유입을 최대한 차단하여야 할 것이다. 이와 함께 쇄골장 등 석산개발 부속시설은 가능한 한 수계에서 멀리 두어야 할 것이다. A석산의 경우, 석산 자체보다는 쇄골장으로부터 유입되는 무기물양이 육안으로 보기에도 많은 것으로 판단되었다. 세번째는 석산으로부터 배출되는 배출수의 관리를 철저히 시행되어야 한다는 것이다. 이는 배출구를 통한 것뿐만 아니라 강우에 의한 유입도 포함된다. 석산으로부터 유입되는 무기물의 대부분은 이 과정을 통하여 유입될 확률이 높으므로 이 부분은 석산 인근 수계의 보전을 위하여 반드시 시행하여야 할 부분이라 하겠다.

사 사

본 연구는 KEI 기본연구사업(2004-RE-16) 및 차세대핵심환경기술개발사업(KIEST, 2004-05002-0019-1)에 의하여 일부 지원되어 수행되었음을 밝히며 분석방법에 대한 많은 의견을 개진하여 주신 전동준 박사, 박재홍 박사, 그리고 익명의 논문심사자에 감사를 표한다.

참고문헌

- 권오길, 한국동식물도감 제32권 동물편(연체동물 I), 문교부, 서울, pp. 1-446 (1990).
- 노태호, 생물 군집의 회복력 및 저항력: 하천생태계 건전성 평가를 위한 응용성, *환경정책연구*, 1(1), pp. 93-112 (2002).
- 노태호, 전동준. 한국산 수서곤충류 섭식기능군 유형 및 군집 안정성 분석, *한국육수학회지*, 37(2), pp. 137-148 (2004).
- 윤일병, 한국동식물도감 제30권 동물편(수서곤충류), 문교부, 서울, pp. 1-840 (1988).
- 윤일병, 수서곤충검색도설, 정행사, 서울, pp. 1-262 (1995).
- 윤일병, 공동수, 유재근, 저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가(I), *환경생물학회지*, 10, pp. 24-39 (1992a).
- 윤일병, 공동수, 유재근, 저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가(II), *환경생물학회지*, 10, pp. 40-55 (1992b).
- 윤일병, 공동수, 유재근, 저서성 대형무척추동물에 의한 생물학적 수질평가(III), *환경생물학회지*, 10, pp. 77-84 (1992c).
- 진호일, 민경원, 한상목, 신대용, 석산 및 석가공업체로부터 발생하는 석폐기물의 물리적·화학적 특성, *한국자원공학회지*, 36, pp. 290-298 (1999).
- Aldridge, D. W., Payne, B. S. and Miller, A. C., The Effects of Intermittent Exposure to Suspended Solids and Turbulence on Three Species of Freshwater Mussel, *Environmental Pollution*, 45, pp. 17-28 (1987).
- Armitage, P. D., Faunal Community Change in Response to Flow Manipulation, in Harper, D. M. and Ferguson, A. J. D. (eds.), *The ecological basis of river management*, Wiley, Chichester, pp. 59-78 (1995).
- Berkman, H. E. and Rabeni, C. F., Effects of Siltation on Stream Fish Communities, *Environmental Biology of Fishes*, 18, pp. 285-294 (1987).
- Carling, P. A. and McCahon, C. P., Natural Siltation of Brown Trout (*Salmo trutta* L.) Spawning Gravels during

- Low-flow Conditions, in J. F. Craig and Kemper, J. B. (eds.), *Regulated streams: Advances in ecology*, Plenum Press, NY, pp. 229-244 (1987).
- Cline, L. D., Short, R. A. and Ward, J. V., The Influence of Highway Construction on the Macroinvertebrates and Epilithic Algae of a High Mountain Stream, *Hydrobiologia*, **96**, pp. 149-159 (1982).
- Culps, J. M., Wrona, F. J. and Davies, R. W., Response of Stream Benthos and Drift to Fine Sediment Deposition Versus Transport, *Canadian Journal of Zoology*, **64**, pp. 1345-1351 (1985).
- Davies-Colley, R. J., Hickey, C. W., Quinn, J. M. and Ryan, P. A., Effects of Clay Discharges on Streams: 1. Optical properties and epilithon, *Hydrobiologia*, **248**, pp. 215-234 (1992).
- Dudgeon, D., The Functional Significance of Selection of Particles by Aquatic Animals during Building Behaviour, in Wotton, R. S. (eds), *The biology of particles in aquatic systems*, Lewis Publishers, London, pp. 289-312 (1994).
- Eriksen, C. H., Ecological Significance of Respiration and Substrate for Burrowing Ephemeroptera, *Canadian Journal of Zoology*, **46**, pp. 93-103 (1966).
- Erman, D. C. and Ligon, F. K., Effects of Discharge Fluctuation and the Addition of Fine Sediment on Stream Fish and Macroinvertebrates Below a Water-filtration Facility, *Environmental management*, **12**, pp. 85-97 (1988).
- Fisher, S. G., Gray, L. J., Grimm, N. B. and Busch, D. E., Temporal Succession in a Desert Stream Ecosystem Following Flash Flooding, *Ecological monographs*, **52**, pp. 93-110 (1982).
- Graham, A. A., Siltation of Stone-surface Periphyton in Rivers by Clay-sized Particles from Low Concentrations in Suspension, *Hydrobiologia*, **199**, pp. 107-115 (1990).
- Lemly, A. D., Modification of Benthic Insect Communities in Polluted Streams: Combined Effects of Sedimentation and Nutrient Enrichment, *Hydrobiologia*, **87**, pp. 229-245 (1982).
- MacKenthun, K. M., *The practice of water pollution biology*, FWPCA, CA, pp. 152-211 (1969).
- Merrit, R. W. and Cummins, K. W., *An Introduction to the Aquatic Insects of North America. 3rd ed*, Kendall/Hunt, Dubuque, Iowa, pp. 1-862 (1996).
- Minshall, G. W., Aquatic Insect-substratum Relationships, in Resh and Rosenberg (eds.), *The ecology of aquatic insects*, Praeger Publishers, NY, pp. 358-400 (1984).
- Peckarsky, B. L., Do Predaceous Stoneflies and Siltation Affect the Structure of Stream Insect Communities Colonizing Enclosures?, *Canadian Journal of Zoology*, **63**, pp. 1519-1530 (1984).
- Putman, R. J. and Wratten, S. D., *Principles of Ecology*, Croom Helm, London and Canberra, pp. 59-64 (1984).
- Relyea, C. D., Minshall, G. W. and Danehy, R. J., *Stream Insects as Bioindicators of Fine sediment*, Proceedings of Watershed Management 2000 Conference, Water Environment Federation, VA, Electric Material, pp. 1-16 (2000).
- Richard, C. and Bacon, K. L., Influence of Fine Sediment on Macroinvertebrate Colonization of Surface and Hyporheic Stream Substrates, *Great Basin Naturalist*, **54**, 106-113 (1994).
- Waters, T. F., The Drift of Stream Insects, *Annual Review of Entomology*, **17**, pp. 253-272 (1972).
- Waters, T. F., *Sediment in Streams: Sources, Biological Effects and Control*, American Fisheries Society Monograph 7, Bethesda, Maryland, pp. 78-136 (1995).
- Wiederholm, T., *Chironomidae of the Holarctic region Keys and diagnoses, Part 1-Larvae*. Motala, pp. 1-457 (1983).
- Wood, P. J. and Armitage, P. D., Biological Effects of Fine Sediment in the Lotic Environment, *Environment management*, **21**(2), pp. 203-217 (1997).