

낙동강 상류 폐탄광의 산성광산배수가 저서성 대형무척추동물 군집에 미치는 영향

이황구 · 정상우¹ · 김동건¹ · 배연재^{1,*}

(상지대학교 생명과학과, ¹고려대학교 생명과학대학)

Effects of Acid Mine Drainage from Abandoned Coal Mines on Benthic Macroinvertebrate Communities in the Upper Reaches of the Nakdong River. Lee, Hwang Goo, Sang Woo Jung¹, Dong Gun Kim¹ and Yeon Jae Bae^{1,*} (Department of Biological Science, College of Science & Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea; ¹College of Life Sciences and Biotechnology, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

We investigated the effects of acid mine drainage (AMD) from abandoned coal mines on benthic macroinvertebrate communities in the upper reaches of the Nakdong River from May to October in 2009. Qualitative and quantitative sampling (Surber sampler: 50 × 50 cm; mesh size, 0.2 mm) was conducted at 7 study sites and 3 control sites in the study area. We thus sampled 117 species belonging to 53 families, 15 orders, 6 classes, and 5 phyla; the Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera group (EPT-group) represented the majority of the benthic macroinvertebrate community (71 species; 64.5%). In the quantitative sampling, a total of 11,575 individuals belonging to 58 species of benthic macroinvertebrates were sampled from the study sites (Sites 1-7), whereas 2,844 individuals belonging to 79 species were sampled from the control sites (Sites A-C). Tolerant species such as oligochaetes, *Epeorus pellucidus*, *Baetis fuscatus*, Hydropsychidae species, and Chironomidae species were predominant in the study sites. The community indices for the study sites, such as MacNaughton's dominance index (DI) (mean ± SD, 0.52 ± 0.21; range, 0.33-0.85) and the Shannon diversity index (*H'*) (2.06 ± 0.60; 1.06-2.57), were different from those for the control sites (DI: 0.29 ± 0.07, 0.22-0.35; *H'*: 3.13 ± 0.14; 3.03-3.30). In the study sites, shredders and scrapers were scarce, whereas gathering-collectors (mainly Chironomidae species) were relatively abundant, as were clingers and burrowers. The detrended correspondence analysis (DCA) and similarity analyses showed that benthic macroinvertebrate communities in the study sites were clearly separated from those of the control sites, with the greatest dissimilarity being noted at the uppermost study site (Site 1), which is located close to an abandoned coal mine. The Korean saprobic index (KSI) and the ecological score using benthic macroinvertebrates (ESB) showed that the uppermost study site (Site 1) was α-mesosaprobic or heavily polluted, whereas other study sites were in a fair or relatively good condition.

Key words : abandoned coal mines, acid mine drainage, benthic macroinvertebrates, community index, biotic index, functional groups, Nakdong River

* Corresponding author: Tel: 02) 3290-3408, Fax: 02) 3290-3623, E-mail: yjbae@korea.ac.kr

서 론

우리나라는 20세기 초 이래 석탄자원과 기타 광물자원의 수요가 급증하게 되어 많은 광산이 개발되었으나 1980년대 후반에 들어 산업구조가 변화하면서 석탄의 수요가 감소하고 광산업의 채산성이 악화되어 대다수의 탄광들이 휴·폐업하게 되었다(Jeong, 2001). 낙동강 수계 상류 지역인 강원도 태백시와 경상북도 봉화군에는 90여개의 대형 또는 중소 휴·폐탄광과 비금속광산이 분포하고 있으며, 그에 따른 광산폐기물이 상당한 규모로 적치되어 있다(Kim et al., 2005). 여름철 우기에는 집중강우로 인하여 휴·폐광산 유역에 산재해 있는 광미, 광폐석, 퇴적장 광석들이 유실될 가능성이 높으며, 특히 휴·폐광산의 방치로 인한 산성광산배수(Acid mine drainage)의 유출은 인근 지역 하천의 오염을 가중시키고 있다.

산성광산배수는 폐광산의 갱내 지하수와 적재된 폐석 더미로부터 나오는 침출수를 이르며, pH가 낮고, 다량의 금속이온과 황산이온을 포함하고 있다(Kim and Kim, 2002). 폐탄광 인근 하천은 산성광산배수의 영향으로 강한 산성(pH 3~6)을 나타내고 있으며, 다량의 중금속(Al, Ca, SO₄, Fe, Si, Mg, Mn)을 포함하여 수생태계에 심각한 악영향을 미치고 있다(Kim and Kim, 2002; Kim et al., 2003; Kim et al., 2005). 산성광산배수가 유입되는 폐탄광 하류의 하천은 적갈색이나 흰색 침전물이 지속적으로 축적되므로 그곳에 서식하고 있는 저서성 대형무척추동물들을 포함한 하천 생물의 분포와 생존에 직접적인 영향을 주고 있으며(DeNicola and Stapleton, 2002; Battaglia et al., 2005; Pond et al., 2008), 특히 심미적 불쾌감, 수질악화, 지하수 이용의 제한, 수서 생태계 파괴 등의 폭넓은 영향을 미친다(Michaud, 1995).

저서성 대형무척추동물은 하천의 주요 구성원으로서 생활사의 대부분을 물속에서 서식한다. 또한 이들은 이동성이 적고, 개체수가 풍부하며 서식환경과 오염물질에 민감하게 반응하므로 수환경을 평가하는 지표생물로서 널리 이용되고 있다(Yoon et al., 1981; Yoon et al., 1992; Kim et al., 2005; Won et al., 2006; Lee et al., 2009). 지금까지 국내에서 이루어진 휴·폐광산의 환경학적 연구는 수질, 중금속오염 농도 및 이화학적 환경영향 연구가 일부 있을 뿐(Jeong, 2001; Kim and Kim, 2002; Kim et al., 2003; Kim et al., 2005), 저서성 대형무척추동물에 대한 영향 연구는 없는 실정이다.

본 연구는 낙동강 상류에 위치한 동해 폐탄광의 산성광산배수가 유입되는 하천을 대상으로 저서성 대형무척추

동물에 대한 정량 조사를 실시하여 군집구조와 섭식기능군 및 서식기능군의 특성을 분석하고, 대조하천과의 비교를 통한 산성광산배수의 영향을 알아보려고 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지역 및 조사지점

본 연구를 위한 조사지점은 강원도 태백시에 위치한 폐탄광의 산성광산배수가 유입되는 낙동강 상류하천 7개지점(St. 1~7)을 선정하여 정량조사 및 정성조사를 병행하였다. 본 조사지역의 최상류에는 1992년에 폐광한 동해탄광이 위치하고 있으며, 중류 지역에는 석포제련소가 위치하고 있다.

대조지점(Control site 또는 Reference site)으로는 같은 낙동강 수계에 있지만 폐탄광의 영향을 전혀 받지 않는 지류인 경상북도 울진군 서면 전곡리와 광회리 일대의 골포천(대조하천)에서 3개지점(St. A~C)을 선정하였다. 각

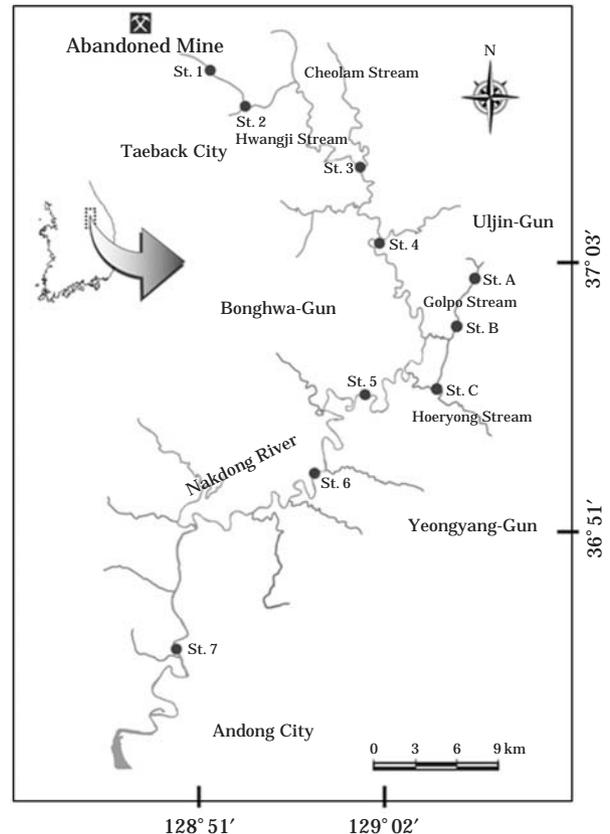


Fig. 1. Study area indicating study sites (St. 1~7), control sites (St. A~C), and an abandoned mine from the Nakdong River in Korea.

조사지점의 행정구역 명칭 및 GPS (WGS) 좌표는 다음과 같다(Fig. 1).

1) 산성광산배수가 유입되는 대상하천

(Acid mine drainage stream, AMDS: St. 1~7)

조사지역의 최상류 지점이 위치한 강원도 태백시 소도동은 폐광된 상태의 동해탄광이 조사지점(St. 1) 상방 약 500 m 지점에 위치하고 있으며, 수 km 주변으로 여러 개의 휴·폐광산이 분포하고 있다. St. 1~2는 산성광산배수가 직접적으로 유입되는 지점으로 pH 4.30 (St. 1)~6.18 (St. 2)의 범위를 나타냈으며, 하상에 적갈색(reddish brown) 및 흰색(white)의 침전물이 축적되어 있었다. St. 3부터는 낙동강 본류수역으로 하폭과 수폭이 넓어지고, 유량이 비교적 풍부하여 하류로 갈수록 침전물의 양이 점차 감소하는 것으로 추정되었으며, pH 6.72~8.16의 범위를 나타냈다. St. 4는 석포제련소 하방으로 제련소의 직간접적인 영향이 예상되는 지역이다.

St. 1: 강원도 태백시 소도동 동해광산 하방, 소도천 지류 (E 128° 56'52.3", N 37° 08'33.9")

St. 2: 강원도 태백시 소도동 동해교, 소도천 (E 128° 57' 15.5", N 37° 07'52.6")

St. 3: 강원도 태백시 동점동 구문소 삼거리, 낙동강(황지천-철암천 합류부) (E 129° 02'40.8", N 35° 07'22.2")

St. 4: 경북 봉화군 석포면 석포리 석포제련소 하방, 낙동강 (E 129° 03'19.3", N 37° 02'06.1")

St. 5: 경북 봉화군 소천면 분천리, 낙동강 (E 129° 02'07.9", N 36° 56'01.2")

St. 6: 경북 봉화군 소천면 임기리 임기교, 낙동강 (E 129° 00'09.4", N 36° 52'42.9")

St. 7: 경북 봉화군 명호면 관창리 양삼교, 낙동강 (E 128° 53'08.5", N 36° 46'45.4")

2) 대조하천 (Control stream 또는 Reference stream, CS: St. A~C)

대조하천으로 선정된 골포천은 낙동강의 지류하천으로 폐탄광의 산성광산배수가 유입되는 대상하천과는 약 2~3 km 가량 떨어져 있었다. 해당 대조하천 유역에는 광산이 존재하지 않아 산성광산배수의 직접적인 영향이 없는 하천으로 판단되었으며, pH 7.14 (St. C)~10.06 (St. B)의 범위를 나타냈다. 상류 지역은 하폭이 좁고, 유량이 적으며, 하상은 대부분 암반과 큰 돌로 구성되어 있었다. 중, 하류 지역은 하폭이 넓어지고, 하상은 대부분 호박돌과 자갈로 구성되어 있었으며, 여울(riffle)과 소(pool)가 발달하여 있었다.

St. A: 경북 울진군 서면 전곡리 국유림관리사무소 상방, 골포천 (E 129° 08'04.05", N 37° 00'37.6")

St. B: 경북 울진군 서면 전곡리 국유림관리사무소 하방, 골포천 (E 129° 07'00.6", N 36° 58'39.2")

St. C: 경북 울진군 서면 광회리 광회2교, 골포천 (E 129° 06'19.2", N 36° 57'01.4")

2. 현지 조사 및 분석

현지 조사는 저서성 대형무척추동물의 계절별 군집 특성을 고려하여 2009년 5월부터 10월까지 총 3회(봄, 여름, 가을)에 걸쳐 실시하였으며, 각 조사 시기는 다음과 같다.

1차조사 : 2009년 5월 24일~25일(봄)

2차조사 : 2009년 8월 16일~17일(여름)

3차조사 : 2009년 10월 24일~25일(가을)

1) 채집 및 동정

저서성 대형무척추동물의 채집은 수생태계 건강성 조사 및 평가방법에 준하였으며 (Ministry of Environment, 2006), 계류형 정량채집망(Surber sampler, 50×50 cm, 망목 0.2 mm)을 이용하여 각 조사지점에서 총 2회(riffle, run/pool)의 정량채집을 하였다. 추가로 각 조사지점에서 등근 뜰채(Hand net, 망목 0.5 mm)를 이용하여 다양한 미소서식처에서 정성채집을 병행하였다. 채집된 채집물은 각각 500 mL 플라스틱 vial에 담아 현장에서 99%에틸알코올로 고정하였고, 실험실로 옮긴 후 저서성 대형무척추동물을 골라내어 80% 에틸알코올에 보존하였다.

저서성 대형무척추동물의 동정은 Yoon (1988, 1995), Kawai and Tanida (2005), Merritt *et al.* (2008) 등을 이용하여 동정하였다. 특히 곤충류 중 꼬마하루살이과(Baetidae)는 Bae *et al.* (1998)을 참고하였고, 깔따구과(Chironomidae)는 Wiederholm (1983)을 이용하여 동정하였다.

2) 군집 분석

조사지점별 군집구조를 비교하기 위해 정량채집 자료를 이용하여 McNaughton 우점도지수(McNaughton, 1967)와 Shannon 다양도지수(Shannon-Weaver, 1949)를 산출하였다.

군집 기능군의 분석은 정량채집 자료를 이용하여 조사지점별 섭식기능군(Functional feeding groups: FFGs) 및 서식기능군(Habitat orientation groups: HOGs)을 분석하였다(Ro and Chun, 2004; Merritt *et al.*, 2008).

AMDS와 CS의 종조성 차이를 파악하기 위해 PC-ORD (ver. 4.25; McCune and Mefford, 1999)를 이용하여 DCA

Table 1. Number of benthic macroinvertebrate taxa collected from the acid mine drainage stream (AMDS) and control stream (CS) in the upper reaches of the Nakdong River.

Phylum	Class	Order	Family		Species	
			CS	AMDS	CS	AMDS
Platyhelminthes	Turbellaria	Tricladida	1	1	1	1
Nematomorpha	Gordioida	Gordea	1		1	
Annelida	Oligochaeta	Archilogochaeta	1	1	1	1
		Rhynchobdellida		1		1
		Arhynchobdellidae		1		1
Mollusca	Gastropoda	Mesogastropoda	1	1	1	1
		Basommatophora		1		1
Arthropoda	Insecta	Ephemeroptera	7	6	26	18
		Odonata	1	3	1	4
		Plecoptera	6	2	12	2
		Hemiptera		2		2
		Megaloptera		1		1
		Coleoptera	3	4	2	5
		Diptera	10	7	21	14
		Trichoptera	11	6	24	13
Total			42	37	90	65

(Detrended correspondence analysis) (Hill and Gauch, 1980) 서열법으로 분석하였다. 도출된 그룹간의 유의성은 MRPP (Multiple responses permutation procedure) 기법으로 검증하였다. 또한 AMDS와 CS의 조사지점별 유사성을 분류하고자 군집의 유사도 (Bray and Curtis, 1957) 분석을 실시하였다.

3) 생물학적 수질 및 환경질 평가

저서성 대형무척추동물을 이용한 생물학적 수질평가는 오락계급치 및 지표가중치를 적용한 한국오수생물지수 (KSI, Won *et al.*, 2006)를 이용하였고, 환경질의 평가는 환경부 (Ministry of Environment, 2006)의 저서성 대형무척추동물을 이용한 생태점수 (ESB)를 산출하였다.

결 과

1. 종조성

전체 조사지역에서 채집된 저서성 대형무척추동물은 총 5문 6강 15목 53과 117종이었다. 절지동물문 (Arthropoda)에서 110종 (94.0%)이 출현하여 다양성이 가장 높았으며, 환형동물문 (Annelida) 3종 (2.5%), 연체동물문 (Mollusca) 2종 (1.7%), 그리고 편형동물문 (Platyhelminthes) 과 유선형동물문 (Nematomorpha)에서 각각 1종 (0.9%)이 출현하였다 (Table 1). 곤충강 (Insecta)의 주요 출현종인

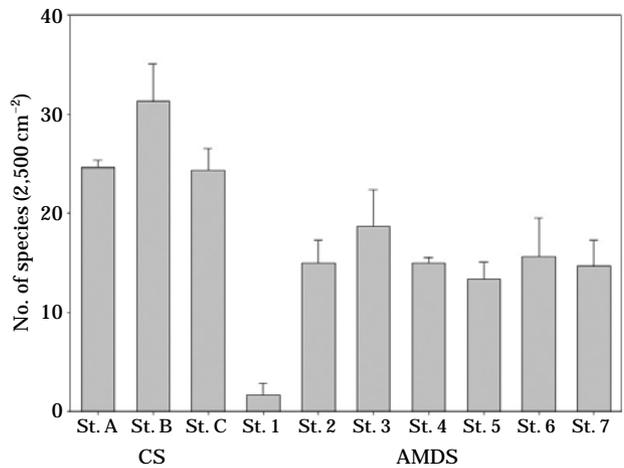


Fig. 2. Mean (±SE) species number of benthic macroinvertebrates from the acid mine drainage stream (AMDS: St. 1~7) and control stream (CS: St. A~C) of the Nakdong River in Korea.

EPT-group (Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera)은 71종으로 전체 출현종의 64.5%를 차지하였으며, AMDS에서 33종 (30.0%), CS에서 62종 (56.4%)이 출현하였다. 정량채집에서는 AMDS (St. 1~7)에서는 총 4문 4강 12목 31과 58종 11,575개체였으며, 평균 27종 1,654개체가 출현하였다. CS (St. A~C)에서는 총 5문 5강 10목 35과 79종 2,844개체였으며, 평균 50종 948개체가 출현하여 AMDS와는 종수 및 개체수에서 차이가 있었다 (Figs. 2, 3).

특히, AMDS의 St. 3에서는 봄 조사시 실지렁이 (*Limnodrilus gotoi*)가 매우 높게 출현하여 개체수 밀도 증가의 원인이 되었다.

AMDS에서는 오염에 내성이 비교적 강한 거머리강 (Oligochaeta), 복족강 (Gastropoda), 잠자리목 (Odonata) 등과 대기호흡을 하는 노린재목 (Hemiptera), 딱정벌레목 (Coleoptera) 등의 분류군이 상대적으로 많이 출현한 반면, CS에서는 하천의 청정지역에 주로 서식하는 연가시목 (Gordea), 하루살이목 (Ephemeroptera), 강도래목 (Plecoptera), 날도래목 (Trichoptera) 등의 분류군이 대부분을 차지하였다.

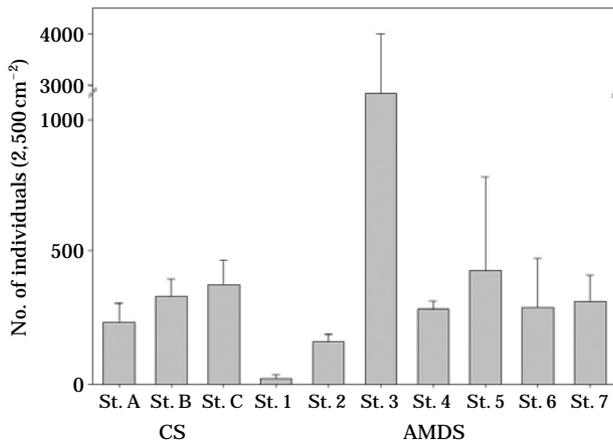


Fig. 3. Mean (\pm SE) individual number of benthic macroinvertebrates from the acid mine drainage stream (AMDS: St. 1~7) and control stream (CS: St. A~C) of the Nakdong River in Korea.

2. 군집지수

조사지역의 군집구조를 파악하기 위하여 우점종 및 아우점종을 구하였으며, 우점도지수와 다양도지수를 분석하였다 (Table 2). 우점도지수는 AMDS에서 값이 0.33 (St. 4, 7)~0.85 (St. 1), 평균 0.52로 나타났으며, 산성광산배수의 직접적인 영향을 받는 St. 1에서 우점도지수 값 (0.85)이 가장 높게 나타났다. 명주각다귀 KUa (*Antocha KUa*)가 St. 1과 St. 4 (석포제련소 하방)에서 우점하였고, 대부분의 조사지점에서 깔따구아과 (Chironominae spp.)의 종이 우점하였다. CS에서는 0.22 (St. B)~0.35 (St. A), 평균 0.29로 나타났으며, 감초하루살이 (*Baetis silvaticus*), 애호랑하루살이 (*Baetiella tuberculata*) 및 실지렁이 (*Limnodrilus gotoi*)가 우점하였다 (Fig. 4).

다양도지수는 AMDS에서 값이 1.06 (St. 1)~2.57 (St. 2), 평균 2.06이었다. CS에서는 3.03 (St. C)~3.30 (St. B), 평균 3.13이었다. 산성광산배수의 영향이 가장 직접적이고, 적갈색 침전물이 덮여 있는 AMDS의 St. 1에서 다양도지수 값 (1.06)이 가장 낮았으며, 산성광산배수의 발원지에 가까우면서도 흰색 침전물이 덮여 있는 St. 2에서는 다양도지수 값 (2.57)이 상대적으로 높았다.

AMDS와 CS의 종다양성을 *t*-검정을 통하여 비교한 결과 종수 및 다양도지수 모두 CS에서 값이 유의하게 높았다 (Fig. 5).

3. 기능군

조사지역에서 정량채집된 수서곤충을 대상으로 섭식기능군 및 서식기능군을 분석하여 산성광산배수의 영향에

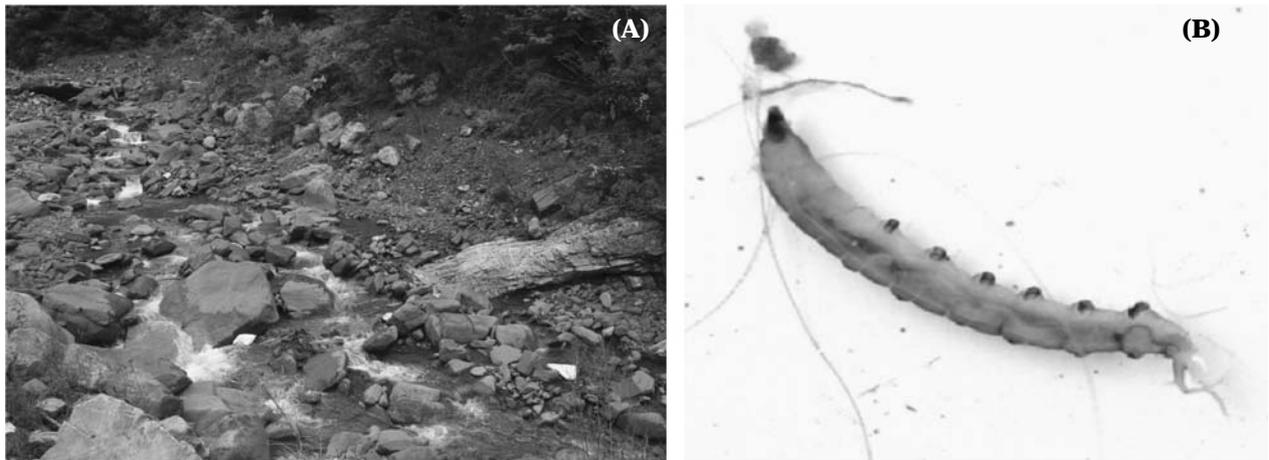


Fig. 4. The acid mine drainage stream (AMDS) and dominant aquatic insect species: (A) Study site 1 near an abandoned mine in the upper reach of the Nakdong River; (B) *Antocha KUa*.

Table 2. Dominant species, McNaughton's dominance index (DI), and Shannon diversity index (*H'*) in the benthic macroinvertebrate communities from the acid mine drainage stream (AMDS: St. 1 ~ 7) and control stream (CS: St. A ~ C) of the Nakdong River in Korea.

Sites	1st dominant species	2nd dominant species	DI	<i>H'</i>	
CS	St. A	<i>Baetis silvaticus</i>	<i>Ecdyonurus kibunensis</i>	0.35	3.08
	St. B	<i>Baetiella tuberculata</i>	<i>Paraleptophlebia chcorata</i>	0.22	3.30
	St. C	<i>Limnodrilus gotoi</i>	<i>Simulium</i> sp.	0.29	3.03
AMDS	St. 1	<i>Antocha</i> KUa	Chironominae sp. 4	0.85	1.06
	St. 2	Chironominae sp. 2	Chironominae sp. 3	0.36	2.57
	St. 3	<i>Limnodrilus gotoi</i>	Chironominae sp. 3	0.77	1.35
	St. 4	<i>Antocha</i> KUa	Chironominae sp. 3	0.33	2.44
	St. 5	Chironominae sp. 2	<i>Baetiella tuberculata</i>	0.54	2.14
	St. 6	<i>Baetis fuscatus</i>	Chironominae sp. 2	0.49	2.38
	St. 7	Chironominae sp. 2	<i>Cheumatopsyche brevilineata</i>	0.33	2.47

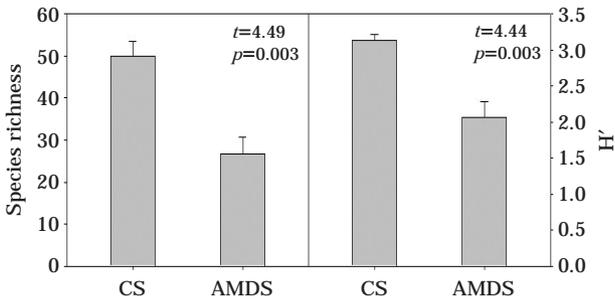


Fig. 5. Species richness and Shannon diversity index (*H'*) between the acid mine drainage stream (AMDS: St. 1 ~ 3) and control stream (CS: St. A ~ C).

따른 기능군의 분포양상을 분석한 결과, 섭식기능군의 경우 AMDS에서 깔따구류(Chironominae spp.)가 풍부하게 출현하여 gathering-collectors가 높았으며, 줄날도래류(Hydropsychidae spp.)에 의해 filtering-collectors의 비율이 다음으로 높게 나타났다. CS에서는 gathering-collectors가 대부분을 차지하였으며, scrapers, filtering-collectors, predators가 비교적 고르게 출현하였다. shredders의 경우, CS에 비하여 AMDS에서는 거의 출현이 없거나 St. 2에서 매우 빈약하게 분포하고 있었으며, 특히, St. 1 ~ 4는 St. 5 ~ 7 또는 CS에 비하여 scrapers의 출현율이 상대적으로 낮았다(Fig. 6).

서식기능군은 AMDS의 St. 1, 4, 7에서 clingers, St. 2, 3, 5에서 burrowers가 상대적으로 높게 출현하였다. CS에서는 clingers가 대부분을 차지하였으며, swimmers와 burrowers가 다음으로 높게 나타났다(Fig. 7).

4. DCA 및 유사도

AMDS와 CS의 저서성 대형무척추동물의 종조성 차이

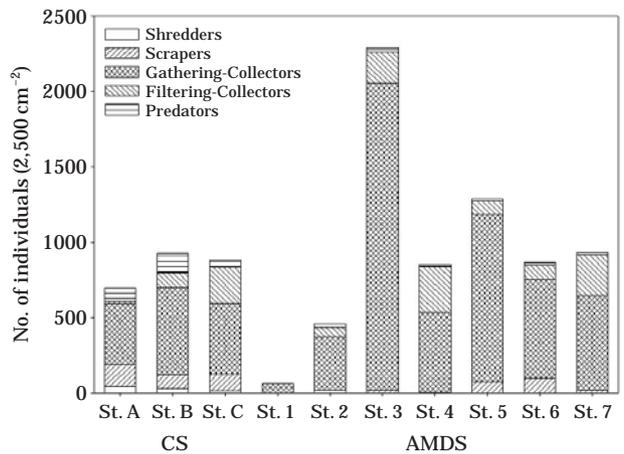


Fig. 6. Composition of functional feeding groups (FFGs) of benthic macroinvertebrates from the acid mine drainage stream (AMDS: St. 1 ~ 7) and control stream (CS: St. A ~ C) of the Nakdong River in Korea.

를 DCA 서열법으로 분석한 결과(Fig. 8), Axis I과 Axis II의 고유치는 각각 0.623 및 0.247이었으며, AMDS는 Axis I의 왼편에서 중간, Axis II의 하부에서부터 상부에 분포하였고, CS는 Axis I의 중간에서 오른편, Axis II의 상부에 분포하여 AMDS와 CS 사이에 차이가 있었다. AMDS와 CS를 비교 그룹으로 한 MRPP 분석 결과 두 그룹은 종조성에 있어서 유의한 차이(A=0.167, p=0.002)가 있었다. 따라서 산성광산배수의 영향을 받고 있는 AMDS와 CS의 저서성 대형무척추동물 군집은 뚜렷한 종조성의 차이가 있는 것으로 분석되었다.

조사지점별 유사도분석 결과 크게 2개의 그룹(AMDS, CS)으로 나뉘어졌으며(Fig. 9), AMDS는 산성광산배수 및 제련소에 상대적으로 인접한 지점(St. 2, 4)과 그 이외의 지점(St. 5 ~ 7)으로 분리되어 나타났다. 산성광산배수

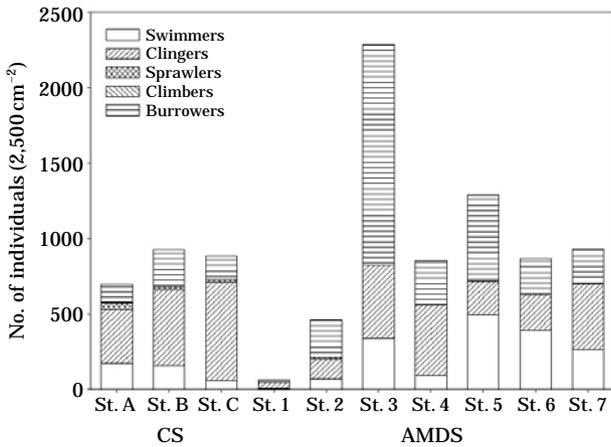


Fig. 7. Composition of habitat oriented groups (HOGs) of benthic macroinvertebrates from the acid mine drainage stream (AMDS: St. 1~7) and control stream (CS: St. A~C) of the Nakdong River in Korea.

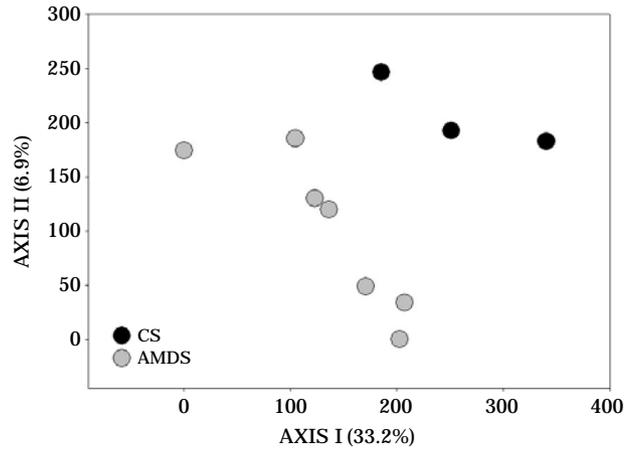


Fig. 8. DCA ordination for the analysis of benthic macroinvertebrate communities from the acid mine drainage stream (AMDS: St. 1~7) and control stream (CS: St. A~C) of the Nakdong River in Korea.

의 발원지에 가장 가까이 위치한 St. 1은 다른 모든 지점과 가장 유사도가 낮은 것으로 분석되었으며, 하류의 St. 6과 St. 7 사이가 유사도가 가장 높은 것으로 분석되었다.

5. 생물학적 수질 및 환경질 평가

산성광산배수에 의한 영향을 파악하기 위하여 생물학적 수질 및 환경질 평가를 KSI와 ESB를 각각 적용하여 평가하였다(Table 3). AMDS의 KSI는 평균 0.85 (St. 6)~2.48 (St. 1)로 평가되었으며, 반면에, CS는 0.27 (St. A)~0.88 (St. C)로 최적의 환경상태인 A등급으로 생태적 건강성이 높게 평가되었다. 생물학적 수질평가에 있어서 AMDS는 CS와 크게 차이가 났으며, 하류지역으로 갈수록 건강성이 점차 높아지는 것으로 분석되었다.

AMDS의 ESB 지수는 평균값이 6 (St. 1)~52 (St. 3)로 환경상태가 다소 양호~매우 불량한 것으로 평가되었으며, CS는 82 (St. C)~106 (St. B)으로 환경상태가 매우 양호한 빈부수성의 우수생물계열로 나타나 AMDS와는 큰 차이가 있었다.

고찰

산성광산배수의 직접적인 영향권이라 할 수 있는 AMDS (St. 1~3)의 종풍부도를 대조하천인 CS의 3개지점 (St. A~C), 그리고 유역규모가 유사하고 청정계류에 속하는 경기도 가평천의 상류(Lee and Bae, unpublished data)의 종풍부도와 조사 시기, 지점수, 조사 회수 및 채집

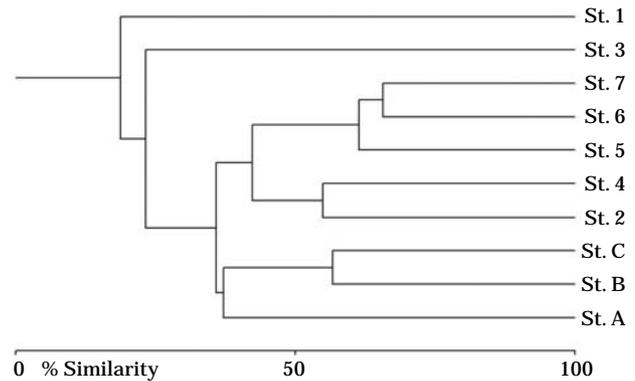


Fig. 9. Bray-Curtis similarity for the analysis of benthic macroinvertebrate communities from the acid mine drainage stream (AMDS: St. 1~7) and control stream (CS: St. A~C) of the Nakdong River in Korea.

방법을 동일하게 하여 비교한 결과 가평천 (96종), CS (79종), AMDS (44종)의 순으로 나타나 AMDS의 종풍부도가 현저히 낮은 것을 알 수 있다. 이는 AMDS 주 오염원인 산성광산배수에 의해 pH가 큰 폭으로 낮아지고, 다량의 중금속이 하상에 침전되어 저서성 대형무척추동물의 서식처와 먹이자원에 악영향을 끼치고 있기 때문인 것으로 사료된다. 과거 Yoon *et al.* (1981)이 조사한 낙동강 상류 수계의 수서곤충 군집에 관한 연구 역시 본류 39종, 지류 82종으로 지류에서 2배 이상 종풍부도가 높게 나타났으며, 이는 본 연구의 AMDS 및 CS에서의 종풍부도와 유사한 결과를 보여준다.

폐탄광에서 유출되는 산성광산배수의 적갈색 및 흰색의 침전물은 하상을 교란시켜 수서생물들이 서식할 수 있

Table 3. Korean saprobic index (KSI) and the ecological score using benthic macroinvertebrates (ESB) for the evaluation of environmental conditions from the acid mine drainage stream (AMDS: St. 1~7) and control stream (CS: St. A~C) of the Nakdong River in Korea.

Sites	KSI		ESB		
	Value (Mean)	Condition	Value (Mean)	Saprobity	
CS	St. A	0.27	High	85	Oligosaprobic
	St. B	0.29	High	106	Oligosaprobic
	St. C	0.88	High	82	Oligosaprobic
AMDS	St. 1	2.48	Fair	6	Polysaprobic
	St. 2	1.16	Good	40	β-mesosaprobic
	St. 3	3.10	Fair	52	Oligosaprobic
	St. 4	1.30	Good	42	β-mesosaprobic
	St. 5	1.04	Good	37	β-mesosaprobic
	St. 6	0.85	High	48	β-mesosaprobic
	St. 7	0.99	High	42	β-mesosaprobic

는 서식 공간과 호흡계에 영향을 미치며 (Rosemond *et al.*, 1992), 주요 먹이원인 조류 (algae)의 성장을 제한하고, 하상의 이동 공간을 교란시켜 (Hoehn and Sizemore, 1977) 수서 생물상을 단순화 시키는 것으로 알려져 있다. 한편, 일반적인 하천에서는 상류 또는 중상류에서 저서성 대형 무척추동물의 종풍부도가 상대적으로 높게 출현하는데 반하여 AMDS에서는 하류로 갈수록 오히려 종풍부도가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 상류 하천에서는 침출수에 함유된 중금속 등 오염물질의 함량이 높으나 하류로 갈수록 희석되어 낮아지는 경향이 있기 때문이며 (Kim and Kim, 2002), 본 대상하천 역시 하류로 갈수록 오염물질이 자정되고, 여러 지류에서 유입된 풍부한 유량으로 산성광산배수가 희석되기 때문으로 사료된다. AMDS의 중하류에서는 출현종의 대부분이 실지렁이 (*Limnodrilus gotoi*), 개똥하루살이 (*Baetis fuscatus*), 부채하루살이 (*Epeorus pellucidus*), 깔따구류 (Chironomidae spp.), 줄날도래류 (Hydropsychidae spp.) 등 오염에 내성이 비교적 강하고, 유기오염 하천에 주로 나타나는 종들로 구성되어 있어서 중하류역은 산성광산배수의 직접적 영향보다는 유역에서 유입된 유기오염물의 영향이 더욱 큰 것으로 추정된다. AMDS에서는 노린재목 (Hemiptera)과 딱정벌레목 (Coleoptera)의 종들이 상대적으로 많이 출현하였는데, 이들 종은 대부분 대기호흡을 하며, 육상을 통한 이동이 가능하므로 산성광산배수 및 유기오염의 영향을 상대적으로 적게 받는 것으로 생각된다.

군집지수 (DI, *H'*)로 볼 때, St. 1의 군집구조가 가장 단순하였는데 이는 철산화/수산화물의 침전으로 하상에 서

식하는 수서생물의 서식공간이 교란된 결과로 추정되며, Iwasaki *et al.* (2009)에 의하면 산성광산배수에 의한 중금속의 침전은 저서성 대형무척추동물의 다양성을 감소시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. St. 2의 하천바닥은 흰색을 띠고 있었으며, 이는 알루미늄수산화물의 침전에 의한 것으로 이 지점의 군집지수가 낮을 것으로 예상되었으나 다양도지수가 상대적으로 높았다. 이는 St. 2가 규모가 큰 다른 지류하천이 유입되는 합류지점에 위치하고 있기 때문인 것으로 사료된다. 본 조사자료의 결과로 볼 때, 상류에서 나타나는 적갈색의 철산화/수산화물 침전물이 흰색의 알루미늄수산화물 침전물 보다 저서성 대형무척추동물에 더 큰 악영향을 미칠 것으로 추정되지만, 이는 실험에 의한 검증이 필요하다.

산성광산배수는 하천뿐만 아니라 주변의 먹이자원인 수변 식생대에도 영향을 미치며, shredders와 herbivores 등의 먹이활동을 저해하는 것으로 알려져 있다 (Nelson and Roline, 1996). 본 연구에서도 AMDS의 상류지역은 산성광산배수의 침전물로 인하여 외부에서 유입된 주요 먹이자원인 대형입자성유기물질 (Coarse particulate organic matter)의 공급과 하천 내에서의 conditioning이 원활하게 이루어지지 못하고, 가용성 부착조류의 생장이 저해되는 것이 shredders와 scrapers의 개체수가 매우 빈약하게 나타난 주요 원인으로 사료된다.

DCA와 유사도 분석의 결과 저서성 대형무척추동물의 군집에 있어서 AMDS와 CS간에 현저한 차이를 보여주었으며, 생물학적 수질평가 역시 산성광산배수가 직접 유입되는 AMDS의 상류지역은 CS와 비교하여 건강성 및 수환경 상태가 현저히 낮은 것으로 분석되었다. AMDS의 하류로 갈수록 여러 지류하천이 합류되어 유량이 풍부해지고, 산성광산배수의 직접 영향권을 벗어나기 때문에 저서성 대형무척추동물의 군집이 종풍부도와 종다양성 등에서 많이 회복되는 것으로 보인다. 그러나 본 조사에서 나타난 AMDS의 저서성 대형무척추동물의 다양성은 하천의 규모, 산림 보존 정도, 유역 환경 등이 유사하지만 광산이 없는 다른 수계의 하천인 가평천 등의 저서성 대형무척추동물 다양성과 비교해 볼 때 약 절반 정도의 종풍부도와 종다양성을 나타낸다 (Bae *et al.*, 2003a, b). 이는 대상하천이 낙동강 상류 지역에 산재해 있는 광산과 제련소의 영향을 한 세기 가까이 받아온 결과를 방증하는 자료이며, 하천 본류 곳곳에 남아있는 광미 (鑛尾)의 흔적이 당시의 하천 상황을 일부 대변하여 주고있다.

결론적으로, 본 연구의 대상하천인 AMDS 유역의 휴·폐광산에 대한 최근의 복원사업과 하천 유역의 환경 정비 사업에 힘입어 하천의 수질과 서식 환경은 외관상 많이

개선된 것처럼 보이지만 그곳의 저차소비자인 저서성 대형무척추동물 군집은 전체 하천구간을 비교하였을 때 다른 자연하천의 절반 수준으로 빈약하게 나타났으며, 군집이 완전히 회복되기까지는 상당한 시간이 더 소요될 것으로 예측된다. 본 연구는 국내에서 처음으로 산성광산배수가 하천의 저차소비자인 저서성 대형무척추동물에 미치는 영향을 조사한 것으로 연구의 의의를 찾을 수 있다.

적 요

본 연구는 2009년 5월부터 10월까지 태백시에 위치하고 있는 낙동강 상류의 폐탄광으로부터 유입되는 산성광산배수(Acid mine drainage)가 저서성 대형무척추동물의 군집에 미치는 영향을 파악하고자 실시하였다. 폐탄광의 영향을 받는 대상하천의 7개 지점과 대조하천의 3개 지점에서 계류형 정량채집망(Surber sampler 50×50 cm, 망목 0.2 mm)을 사용하여 정량채집을 하였고, 다양한 미소서식처에서 정성채집을 병행하였다. 조사 결과 전체조사 지역에서 총 5문 6강 15목 53과 117종이 출현하였으며, 하천의 주요 분류군인 EPT-group이 71종(64.5%)으로 전체 출현종의 큰 부분을 차지하였다. 정량조사에서 대조하천 지점(St. A~C)의 저서성 대형무척추동물은 총 79종 2,844개체가 출현한 반면, 폐탄광의 영향권에 있는 산성광산배수하천(Acid mine drainage stream, AMDS) 지점(St. 1~7)에서는 총 58종 11,575개체가 출현하였다. AMDS에서는 오염에 내성이 강한 실지렁이, 부채하루살이, 개똥하루살이, 줄날도래류, 깔따구류 등이 우점하였다. 특히, AMDS의 군집지수(MacNaughton 우점도지수 평균 \pm 표준편차 0.52 ± 0.21 , 범위 $0.33 \sim 0.85$; Shannon 다양도지수 2.06 ± 0.60 , $1.06 \sim 2.57$)가 대조하천의 군집지수(우점도지수 0.29 ± 0.07 , $0.22 \sim 0.35$; 다양도지수 3.13 ± 0.14 , $3.03 \sim 3.30$)에 비해 큰 차이가 있었다. AMDS의 섭식기능군은 shredders와 scrapers의 비율이 낮았으며, 깔따구류(Chironomidae spp.)가 많이 출현하여 gathering-collector가 상대적으로 풍부하였다. 서식기능군은 clingers와 burrowers가 AMDS에서 상대적으로 더 풍부하였다. DCA 서열법과 유사도 분석 결과 AMDS와 대조하천의 지점들끼리 각각 묶어서 두 개의 그룹으로 구분되었으며, 폐탄광에 인접한 최상류 지점(St. 1)과 다른 지점들 간의 유사도가 가장 낮게 나타났다. 생물학적 수질평가를 나타내는 한국오수생물지수(KSI)와 저서성 대형무척추동물을 이용한 생태평가점수(ESB)는 대부분의 지점에서 보통 및 양호의 상태를 나타냈으나, 최상류 지점(St. 1)은 매우 불

량한 상태인 α -중부수성으로 분석되었다. 결론적으로, 폐탄광에서 유출되는 산성광산배수의 영향권에 있는 하천의 저서성 대형무척추동물 군집에 악영향을 미쳐서 종풍부도와 군집구조, 기능군의 조성 및 수환경 건강성을 나타내는 생물지수에 있어서 대조하천의 군집과 큰 차이를 나타냈다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사의 연구비 지원(2009년)에 의하여 수행되었습니다.

인 용 문 헌

- Bae, Y.J., D.H. Won, D.H. Hoang, Y.H. Jin and J.M. Hwang. 2003a. Community composition and functional feeding groups of aquatic insects according to stream order from the Gapyeong creek in Gyeonggi-do, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**: 21-28.
- Bae, Y.J., S.Y. Park and J.M. Hwang. 1998. Description of larval *Nigrobaetis bacillus* (Klugе) (Ephemeroptera: Baetidae) with a key to the larvae of the Baetidae in Korea. *Korean Journal of Limnology* **31**: 282-286.
- Bae, Y.J., Y.H. Jin, J.M. Hwang, V.V. Nguyen, D.H. Hoang and T.K.T. Cao. 2003b. Distribution, habitat environment, and conservation of aquatic insects from the Gapyeong creek in Gyeonggi-do, Korea. *Nature Conservation Research of Korea* **1**: 1-25.
- Battaglia, M., G.C. Hose, E. Turak and B. Warden. 2005. Depauperate macroinvertebrates in a mine affected stream: Clean water may be the key to recovery. *Environmental Pollution* **138**: 132-141.
- Bray, J.R. and J.T. Curtis. 1957. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monograph* **27**: 325-349.
- DeNicola, D.M. and M.G. Stapleton. 2002. Impact of acid mine drainage on benthic communities in streams: The relative roles of substratum vs. aqueous effects. *Environmental Pollution* **119**: 303-315.
- Hill, M.O. and H.G. Gauch. 1980. Detrended correspondence analysis: An improved ordination technique. *Vegetat* **42**: 47-58.
- Hoehn, R.C. and D.R. Sizemore. 1977. Acid mine drainage (AMD) and its impact on a small Virginia stream. *Journal of the American Water Resources Association* **13**:

- 153-160.
- Iwasaki, Y., T. Kagaya, K. Miyamoto and H. Matsuda. 2009. Effects of heavy metals on riverine benthic macroinvertebrate assemblages with reference to potential food availability for drift-feeding fishes. *Environmental Toxicology and Chemistry* **28**: 354-363.
- Jeong, Y.J. 2001. Environmental geochemistry of the stream system in the vicinity of the abandoned coal mine of the Sangdong-Taebaek area. Ph. D. Thesis, University of Chosun, Gwangju, Korea, 189 pp.
- Kawai, T. and K. Tanida. 2005. Aquatic Insects of Japan: Manual with Keys and Illustrations. Tokai University Press, Tokyo, 1342 pp.
- Kim, H.J., J.E. Yang, Y.S. Ok, J.Y. Lee, B.K. Park, S.H. Kong and S.H. Jun. 2005. Assessment of water pollution by discharge of abandoned mines. *Journal of KoSSGE* **10**: 25-36.
- Kim, J.J. and S.J. Kim. 2002. Variations in geochemical characteristics of the acid mine drainages due to mineral-water interactions in Donghae mine area in Taebaek, Korea. *Journal of Economic and Environmental Geology* **35**: 55-66.
- Kim, J.J., S.J. Kim and Y.Y. Kim. 2003. Mineralogy of evaporation residues and geochemistry of acid mine drainage in the Donghae mine area. *Journal of Economic and Environmental Geology* **36**: 103-109.
- Kim, Y.K., Y.J. Bae, G.S. Ryu, D.H. Yeom, S.K. Lee, S.H. Lee, J.H. Lee and K.J. Jo. 2005. Invertebrate Bioindicator and Environment Risk Assessment. Jeonghaengsa, Seoul, 211 pp.
- Lee, H.G. and Y.J. Bae. 2011. Recovery of aquatic insect communities after a catastrophic flood in a Korean stream. *Animal Cells and Systems* **15**: 169-177.
- Lee, J.H., S.H. Lee, Y.J. Bae, K.J. Cho, K.S. Ryoo, Y. Kim and M.P. Jung. 2009. Freshwater health assessment techniques. pp. 25-34 *In*: Assessment techniques for ecological effects on heavy metal pollution using invertebrate biomarkers (Kim, Y., Y.J. Bae, K.S. Ryoo *et al.*, eds.). Jeonghaengsa, Seoul.
- McCune, B. and M.J. Mefford. 1999. Multivariate Analysis of Ecological Data (Version 4.25). MjM Software, Glenden Beach, OR, USA.
- McNaughton, S.J. 1967. Relationship among functional properties of California grassland. *Nature* **216**: 168-169
- Merrit, R.W., K.W. Cummins and M.B. Berg. 2008. An Introduction to the Aquatic Insects of North America. 4th Ed. Kendall/Hunt Publish. Co. Dubuque, Iowa, 1158 pp.
- Michaud, L.H. 1995. Recent technology related to the treatment of acid drainage. *Earth and Mineral Science* **63**: 53-55.
- Ministry of Environment. 2006. The 3rd National Ecosystem Survey Guide. NIER, 298 pp.
- Nelson, S.M. and R.A. Roline. 1996. Recovery of a stream macroinvertebrate community from mine drainage disturbance. *Hydrobiologia* **339**: 73-84.
- Pond, G.J., M.E. Passmore, F.A. Borsuk, L. Reynolds and C.J. Rose. 2008. Downstream effects of mountaintop coal mining: Comparing biological conditions using family- and genus-level macroinvertebrate bioassessment tools. *Journal of the North American Benthological Society* **27**: 717-737.
- Ro, T.H. and D.J. Chun. 2004. Functional Feeding Group Categorization of Korean Immature aquatic Insects and Community Stability Analysis. *Korean Journal of Limnology* **37**: 137-148.
- Rosemond, A.D., S.R. Reice, J.W. Elwood and P.J. Mulholland. 1992. The effects of stream acidity on benthic invertebrate communities in the south-eastern United States. *Freshwater Ecology* **27**: 193-209.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1949. The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana, 233 pp.
- Wiederholm, T. (Ed.) 1983. Chironomidae of the Holarctic Region. Keys and diagnoses. Part 1-Larvae. Ent. Scand. Suppl. 19, pp. 457.
- Won, D.H., Y.C. Jun, S.J. Kwon, S.J. Hwang, K.G. Ahn and J.K. Lee. 2006. Development of Korean saprobic index using benthic macroinvertebrates and its application to biological stream environment assessment. *Journal of Korean Society on Water Quality* **22**: 768-783.
- Yoon, I.B. 1988. Illustrated Encyclopedia of Fauna & Flora of Korea Vol. 30 Aquatic Insect. Ministry of Education Republic of Korea, 840 pp.
- Yoon, I.B. 1995. Aquatic Insects of Korea. Junghaengsa, 262 pp.
- Yoon, I.B., D.S. Kim and J.W. Byeon. 1981. A Study on the aquatic insect community in the upper stream of Nakdong River. *Korean Journal of Limnology* **14**: 27-49.
- Yoon, I.B., D.S. Kong and J.K. Ryu. 1992. Studies on the biological evaluation of water quality by benthic macroinvertebrates. *Korean Journal of Environmental Biology* **10**: 24-39.

(Manuscript received 18 January 2012,
Revised 13 March 2012,
Revision accepted 15 March 2012)