

## 석산개발에 따른 주변 환경오염 및 석분토 처리를 위한 연구

이평구<sup>1</sup> · 염승준<sup>1\*</sup> · 강민주<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부, <sup>2</sup>충북대학교 지구환경과학과

### Environmental Contamination and Best Management of Stone-dust from Quarry Mine

Pyeong-Koo Lee<sup>1</sup>, Seung-Jun Youm<sup>1\*</sup> and Min-Ju Kang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

<sup>2</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

All of the water and stone-dust samples with or without flocculant, in and around quarry mines, were analyzed for total concentrations of heavy metals, cyanide(CN), toxic organic compounds and organic phosphorus. Extraction experiments on stone-dust by EDTA and various pH solutions were also carried out, in order to evaluate the contaminant leaching from the long-term heaped stone-dust within quarry mines. The concentrations of Cr<sup>6+</sup>, Hg, CN, TCE/PCE and total phosphorus in all samples (water and stone-dust) were under detection limits, confirming no environmental contamination from stone-dust in quarry mine areas. Lead and cadmium were not detected in all water samples. Copper and zinc were found in some water samples, and arsenic was detected in a few water samples. But they also showed levels much lower than the drinking water standard. Results of the extraction experiments by EDTA and pH solutions showed that Pb, Cr, Cd, Cu and Zn were leached out in less amounts or under detection limits. Arsenic was detected only at pH 3. From above results, we suggested that environmental contamination by quarry mine development is likely to be minor or negligible.

**Key words** : stone-dust, quarry mine, contamination, best management

이번 연구에서는 석산 내부(광산) 및 외부(주변 환경)에서 채취한 모든 물 시료와 응집제를 함유한 석분토에 대해 중금속, 시안, 독성 유기화합물 및 유기인의 총합량을 분석하였다. 그리고 EDTA 용출실험법 및 산농도 변화에 따른 용출실험법 등을 이용하여 석분토를 장기간 석산 내부에 보관할 경우 발생할 수 있는 중금속 원소의 용출특성을 평가하였다. 모든 물 시료와 석분토에서 검출된 Cr<sup>6+</sup>, Hg, CN, TCE/PCE 및 총 인의 농도는 모두 검출한계 이하로, 오염되지 않았음을 확인하였다. 석산 내부 및 외부에서 채취한 물 시료에서는 Pb와 Cd가 검출되지 않았고 구리와 아연은 일부 시료에서만, 비소는 일반적으로 검출되었으나 검출된 비소 함량은 모두 먹는 물 수질기준보다 훨씬 낮은 값을 보여주고 있다. EDTA 및 산도변화를 이용한 용출실험 등의 결과에서 Pb, Cr, Cd, Cu 및 Zn의 용출함량은 검출한계 이하 혹은 매우 낮은 함량만이 검출되었으며, 비소는 pH 3의 용출실험에서 검출되었다. 따라서 석산 개발에 따른 수계 오염은 없는 것으로 판단된다.

**주요어** : 석분토, 석산, 환경오염, 최적관리

### 1. 서 론

석분토는 골재를 생산하기 위하여 원암을 분쇄하는 과정에서 발생하는 미세한 분말로 75 μm 이하의 실트

및 점토로 구성되어 있고 화학적으로는 SiO<sub>2</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 주 구성 성분이며 함수율은 보통 20-30% 정도이다. 일반적으로 석분토는 원암과 동일한 화학적 성분을 갖고 원암이 풍화되어 형성된 주변 토양과도 화

\*Corresponding author: sjyoum@kigam.re.kr

학적으로 거의 유사한 성분을 갖게 된다.

국내에서는 1990년대 이후, 암반을 발파한 후 그 암편들을 적절한 크기로 파쇄하여 자갈로 사용하기 시작하였다. 부순모래는 굵은 골재를 생산하고 남은 암편을 활용하여 생산하게 되는데, 이때 생성되는 석분을 모래에서 분리시키기 위하여 물로 세척하게 된다. 이때 석분이 현탁상태로 존재하는데, 석분을 물로부터 분리시키기 위하여 응집제(flocculant)를 이용하여 석분을 응집시킨다. 하부에 침전되는 석분의 응집물(Cake)은 filter pressure를 이용하여 석분 내의 수분을 압착시켜 탈수시키게 되고 따라서 응집제 반응수와 Cake 탈수는 석분을 응집시키기 위해 사용되는 응집제를 포함하게 된다. 한편 위와 같은 과정을 통해 생성된 Cake 형태의 석분을 석분토라고 하고 석분토의 발생량은 모래 생산량의 약 15-20%정도이다. 이를 토양과 1:1의 비율로 섞어서 채석장에 보관 후, 90일 이내에 사업장 매립지에 매립한다. 이에 소요되는 처리 비용은 톤당 3만원(사업장 폐기물 기준)에 달한다. 한편, 석분토는 매립 이전에 석산 내에 90일까지 보관할 수 있으므로 석분토의 침식 혹은 붕괴로 인하여 발생할 수 있는 탁류를 효과적으로 예방하기 위해서 저류조가 설치되어 있는 것이 일반적이다.

응집제는 무기계 응집제와 유기계 고분자 응집제로 크게 구분되고 일반적으로 두 응집제를 병행하여 사용하고 있으나, 최근에는 유기계 고분자 응집제를 더 많이 사용하는 추세다. 국내에서 사용하는 무기계 응집제의 종류에는 소석회(수산화칼슘), 백반, 염화알루미늄, 산화철(III) 및 황산철(II) 등이 있고 유기계 고분자 응집제로는 녹말류, 폴리아크릴아미드와 그 유도체 등이 있다. 대부분의 응집제는 유해 위험성이 적고 상온 상압 하에서 화학적으로 안정한 것으로 보고되고 있다. 한편 독성에 대한 동물실험 결과, 현재까지는 생체 축적이 없는 등 독성이 없는 것으로 알려져 있다.

현재 석산 개발에 있어 석분토의 처리 비용 증가에 따른 경제성의 저하로 석산 산업이 위축되어 있는 실정이다. 그러므로 석분토 자체에 오염물질이 없어 환경 유해성이 없을 경우에는 석분토를 사업장 폐기물로 취급하여 매립하는 것 보다 석산 내에 보관하고 있다. 석산 개발이 종료될 때 석산 내에 재매립하는 것이 바람직하고 석분토를 재활용할 수 있도록 법적으로 허용할 필요가 있다. 따라서 법적 검토 이전에 석분토가 환경오염을 유발할 수 있는 일반 사업장 폐기물에 해당하는지의 여부를 명확하게 밝힐 필요가 있고 석산 개발에 따른 석산 주변 환경오염의 발생 여부, 특히

수질오염 및 토양오염 여부를 조사하여야 할 것이다.

그러므로 이번 연구에서는 석산 내부(광산) 및 외부(주변 환경)에서 채취한 모든 물 시료와 응집제를 함유한 석분토에 대해서 중금속, 시안(CN), 독성 유기화합물 및 유기인의 총합량을 분석하여 그 결과를 각각 국내 각종 수질기준과 원암 및 토양과 비교하여 석분토가 환경오염원으로서 가능성이 있는지를 판단하고자 하였다. 그리고 EDTA 용출실험법 및 산농도 변화에 따른 용출실험법 등을 이용하여 석분토를 장기간 석산 내부에 보관할 경우 발생할 수 있는 중금속 원소의 용출특성을 평가함으로써 폐기물관리법상 일반폐기물로 적용되어 석분토를 사업장에서 현행 90일 이상 보관할 수 없는 규정을 개정하기 위한 기본 자료로 제시하고자 한다.

## 2. 조사대상 석산의 현황

### 2.1. 봉재 석산

봉재석산은 경기도 양주시 은현면 도하리에 위치하고 있다. 1986년 이전에는 석재 광산이었고 1986년에 (주)삼표에서 인수하여 석산으로 가행하고 있다. 이 지역 일대에는 주라기 흑운모화강암이 분포하는데, 이는 서울에서 북동쪽으로 연장 발달되는 대보화강암의 일부이다. 석산의 개발 방법은 bench cut이고 Cake의 수분함유량은 30% 이하이다. 생산물은 자갈(12, 25 mm)과 모래(5 mm 이하)로 총 골재 생산량은 350만 m<sup>3</sup>/년(자갈 200만 m<sup>3</sup>/년, 모래 150만 m<sup>3</sup>/년)정도이다. 발생하는 석분토는 전체 생산량의 6-7% 정도이고 연간 약 40만 톤의 석분토가 발생한다.

### 2.2. 신한 석산

신한석산은 강원도 춘천시 신동면 혈동리에 위치하고 있고 1992년부터 (합)신한산업에서 개발을 시작하였으며 1997년부터 모래를 생산하고 있다. 이 지역의 지질은 선캄브리아기 의암층군의 창춘리층과 동산층으로 구성되어 있다. 조사지역의 서북단에 분포하는 창춘리층은 주로 호상편마암으로 구성되며 간혹 규암층이 협재하기도 한다. 조사지역에 주로 분포하는 동산층은 호상편마암과 안구상편마암으로 구성되는데, 이들은 암색에 따라 분홍색과 백색으로 구분된다. 개발 중인 곳은 계단식의 bench-cut 형으로 수직높이는 약 20 m이며 3단으로 되어 있다. 생산량은 연간 약 50만 m<sup>3</sup>로 자갈 30만 m<sup>3</sup> 및 부순모래 20만 m<sup>3</sup>이다. 부순모래 생산 시 발생하는 석분토는 약 10만 m<sup>3</sup>로 추정된다.

### 2.3. 서릉 석산

서릉석산은 충청북도 청원군 옥산면 금계리 산 83에 위치하고 있다. 1993년에 개발을 시작하여 2002년부터 부순모래를 생산하고 있다. 이 채석장은 선캠브리아기의 흑운모편마암으로 구성되고 구성광물과 암질특성에 따라 흑운모호상편마암, 화강암질편마암 및 안구상편마암으로 구분된다. 생산하는 자갈의 종류는 13, 19, 25, 40 및 75 mm 등이 있다(13 mm:8과 13 mm 사이의 자갈을 의미). 이 중 25 mm 자갈이 가장 많이 생산되어 총 생산량의 약 80%에 해당된다. 모래의 크기는 타 석산과 같이 5 mm-#200이고 그 생산량은 500-600 m<sup>3</sup>/일 정도이다. 골재의 총 생산량은 약 40-43만 m<sup>3</sup>/년 정도이다.

### 2.4. 아세아 석산

아세아 석산은 충청남도 공주시 장기면 평기리 산-10에 위치하고 있다. 1992년부터 개발을 시작하였고 부순모래는 2002년 2월부터 생산하고 있다. 이 지역의 지질은 주로 선캠브리아기의 화강암질편마암, 운모석영편암 및 장석석영편암으로 이루어져 있고 이들을 주라기의 반상화강암이 관입하였다. 이 업체의 연간 생산량은 약 100만 m<sup>3</sup> 정도이고 그 중 부순모래는 25만 m<sup>3</sup> 정도 생산된다. 부순모래 생산에 따라 발생하는 석분토는 연 약 3~4만 m<sup>3</sup>로 추정된다.

### 2.5. 대운 석산

대운 석산은 전라북도 군산시 나포면 서포리 24-3에 위치하고 있다. 석산의 개발은 90년대 초에 시작되었고 99년에 (유)대운산업개발에서 인수하였으며 부순모래의 생산은 2002년부터 시작하였다. 이 지역의 지질은 선캠브리아기의 편암과 편마암으로 구성된다. 편마암의 암색은 흑색이고 입도는 대체로 세립질 내지 중립질로 외견상 치밀하고 견고하다. 편마암은 호상편마암과 안구상편마암으로 구분된다. 생산하는 자갈의 종류에는 40, 25, 19 및 13 mm 등이 있고 총 생산량은 100만 m<sup>3</sup>/년 정도이다. 석분은 전체 생산량의 약 25%에 해당하고 혼합석 역시 전체 생산량의 약 25% 정도를 차지한다. 모래는 총생산량의 약 5%를 차지하고 있다.

### 2.6. 동명 석산

본 석산은 경북 울산시 북구 대안동 277-1에 위치한다. 1986년부터 골재를 생산하였고 1995년부터 부순모래를 생산하고 있다. 이 지역에는 백악기 퇴적암류인 울산층과 이를 관입 내지 분출한 백악기의 안산반암,

그리고 이들을 모두 관입한 화강반암이 분포한다. 석산의 부지 면적은 약 15만 m<sup>2</sup>이고 계단식(bench cut)으로 개발을 하고 있다. 생산되는 골재 중에서 자갈은 다양한 크기(8, 13, 19, 25 및 40 mm 등)이고 이중 25 mm가 70%정도로 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 자갈의 생산량은 약 4만5천 m<sup>3</sup>/월이다. 모래는 5 mm에서 0.074 mm의 크기이고 생산량은 2만2천 m<sup>3</sup>/월이다. 한편 석분토는 1천 m<sup>3</sup>/월 정도이다.

## 3. 시료채취 및 분석

### 3.1. 물 시료 채취

석산에서 채취한 물 시료의 종류는 크게 석산 내부(광산)와 석산 외부(주변 환경)로 나눌 수 있다. 석산 내부의 물에는 석분토를 처리하기 위해 이용하는 모든 종류의 물(강수, 지하수 및 일부 저류지 물 포함), 석분토를 처리하는 과정에서 발생하는 물(석분 혼합수, 응집제 반응수 및 Cake 탈수), 석분토 처리 후 발생하는 물(배수로, 저류지 및 저류탱크 등) 및 석분토 처리와는 관계없으나 석산 내부에서 발생하는 물(석산 내 하천수와 지하수)이 있다. 한편 석산 외부의 물은 석산에 인접한 하천수를 대상으로 하여 석산의 영향을 받지 않았을 것으로 판단되는 하천의 상류수와 석산의 영향을 받았을 것으로 생각되는 하류의 물을 선택하였다. 석산 근처에 저수지(농업용)가 위치하는 지역에서는 저수지의 물 시료를 채취하였다. 또한 주변 마을 주민에 미치는 영향을 알아보기 위하여 석산에 가장 가까운 마을의 지하수를 채취하였다(Table 1).

석산에서 채취한 물 시료는 현장에서 온도, pH, EC, Eh 및 DO를 측정하였다. 중금속 분석용 물 시료 채취는 0.45 μm의 멤브레인 여과지(Advantec MFS, INC)를 이용하여 200 ml를 여과한 후, 이 중 100 ml는 양이온 분석용으로 65% 농질산으로 pH<1 이하로 처리하였고 분석 전까지 4°C에서 실험 냉장고에 보관하였다.

### 3.2. 원암, 토양 및 석분토 시료 채취

골재의 원료물질인 원암(모암)과 석산 내 토양 및 석분토의 중금속 및 유기화합물의 농도를 비교하기 위하여 6개 석산마다 각각 1개씩의 모암(울산 동명 석산의 경우에는 2개 채취)과 토양 및 석분토를 채취하여 중금속(As, Cd, Cu, Pb, Zn, Hg, Cr<sup>6+</sup>, CN) 및 유기화합물(TCE/PCE 및 총 인)의 성분을 분석하였다. 총인은 8개의 인(P) 성분을 분석하였다(demeton, diazinon,

**Table 1.** Type and number of water samples in and out quarry mines

Sample Types		quarry mines							Sum
		Bongjae	Shinhan	Dongmyung	Asea	Seoryong	Daeun		
In quarry	Water mixed with stone-dust	1	1	1	1	1	1	6	
	Water reacted with flocculant	1	1	1	1	1	1	6	
	Pressing water from Cake	1	1	1	1	1	1	6	
	Water in retention pond	3	2	3	3	2	3	16	
	Seepage from sand	1	1	1	1	1	1	6	
	Seepage from gravel	1	1	-	1	1	1	5	
	Groundwater	-	1	1	3	3	1	9	
	Discharge water	-	-	-	2	-	-	2	
	Stream water	1	1	-	1	1	1	5	
	Other water	1	1	2	-	1	3	8	
Out quarry	Stream water	1	2	2	2	2	2	11	
	Groundwater	1	1	1	1	1	1	6	
	Reservoir water	1	-	-	-	-	-	1	
Total		13	13	13	17	15	16	87	

carbaryl, fenitrothion, melathion, parathion, phenthoate, EPN).

### 3.3. X-선 회절분석

6개의 채석장에서 채취된 토양, 석분토, 부순모래, 석분, 원석 및 부순모래의 200 mesh 이하시료(이하 부순모래 under 200 mesh), 석분의 200 mesh 이하시료(이하 석분 under 200 mesh)에서 광물의 종류와 변화를 비교하고자 하였다. 석분토는 미립의 광물들로 구성되어 있으므로 육안 및 현미경 조사에 의해서는 광물의 구별이 어려워 X-선 회절 분석 방법에 의해 광물조성과 종류를 판별하였다. X-선 회절분석은 PHILIPS X'PERT MPD Diffractometer(Cu Ka:40 kV, 25 mA)를 이용하였고, Cu target을 사용하여 3°-45°까지 2°/1분의 속도와 0.01°의 간격으로 하였다.

### 3.4. 화학분석

#### 3.4.1. 중금속 전함량 분석

중금속의 전함량 분석은 국제표준기구(International Organization for Standardization)에서 제안한 왕수(aqua regia:ISO 11466)법을 따라 분석하였다 (International Organization for Standardization, 1995). 화학분석용(생략) 시료 3g에 염산(37% HCl)과 질산(70% HNO<sub>3</sub>)을 3:1로 혼합한 왕수 28 ml를 섞은 후 실온에서 16시간 동안 반응시켰다. 이후 130°C에서 2시간 동안 용해시킨 뒤, 0.45 µm 필터로 여과하고 0.5 mol/L 질산 용액으로 희석하였다.

전처리시료와 물시료에 대한 중금속 분석은 고려대

학교 전라광물자원연구센터의 ICP-AES(Perkins-Elmer Optima 3000XL)를 이용하였고 분석조건은 RF Power 1300 W, Plasma Flow 15 L/min, Coolant Flow 0.5 L/min 및 Nebulizer Flow 0.8 L/min이었다. 사용된 시약은 analytical grade(Merck)이고, ICP 분석 시 사용된 표준용액은 1,000 ppm stock solution(Merck)을 희석하여 사용하였다. 물시료의 음이온(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 분석은 한국지질자원연구원의 IC(Model Dionex 120)을 이용하였다. 전 분석과정에 이용된 탈이온수를 얻기 위해 Milli-Q Millipore system을 사용하였다.

#### 3.4.2. TEC 및 PCE

P&T를 탁상형 GC/MS에 적용하였다. 흡착은 P&T를 분산 모드로 둔 상태에서 분산형 시료용기(fritted sparger)에 물 시료 적당량을 취하였고 헬륨을 폭기 기체로 사용하여 11분간 분당 40 ml를 폭기시켰다. 탈착은 트랩을 가열하여 탈착된 분석물들이 GC 쪽으로 이동되도록 하였다. 이 방식에서 P&T와 GC의 연결 방식은 다음과 같다. GC 컬럼은 정상적인 방식대로 주입구에 연결하였고 P&T의 전송라인을 주입구 셉텀(septum)을 관통하여 주입구 가운데 위치하게 하였다. 운반기체의 공급은 T자형 밸브를 이용하여 공급라인과 P&T의 탈착 흐름, GC의 총 흐름(total flow)을 동시에 연결하여 필요한 경우 P&T 쪽은 닫고 GC 방향의 흐름만을 열어 GC/MS만의 사용이 가능하게 하였다. P&T 장치로부터 GC로의 운반기체 공급은 T자형 밸브에서 GC 방향의 라인을 완전히 잠근 상태에서 P&T 쪽의 유량을 조절하여 이 때 흐르는 탈착 흐름량

**Table 2.** Analytical conditions of TEC and PCE

Parameters	Conditions
Trap material	Carbopack B/carboxene 1000 S 1001
Prepurge time	0.2 min
Purge time	11 min
Dry purge time	2 min
Desorption time/temp	6 min/250°C
Bake time/temp	6 min/260°C
Purge flow	40 ml/min
Desorption flow	15 ml/min

이 곧 GC의 총 흐름량이 되도록 하였다. 이때 컬럼 흐름량은 GC의 조절 밸브로 일정량이 유지되도록 하였고 이 결과 P&T 장치에서 자유롭게 GC의 분산비(split ratio) 조절이 가능하도록 하였다. 세부적인 실험 조건은 특성에 맞게 수정하였고 Table 2에 요약하여 나타내었다. 분리 및 검출조건은 동일하게 적용하였다. 질량검출기는 scan과 SIM(Selected Ion Monitoring) 두 가지 모드를 함께 적용하였고 정량은 내부표준법과 각 화합물의 고유 특성이온만을 선정하여 적분하는 방법을 사용하였다. 오븐온도는 초기온도 40°C에서 5분간 유지한 후 분당 8°C씩 120°C까지 승온하였고 다시 분당 15°C씩 250°C까지 승온하여 5분간 유지하였다.

3.4.3. 총 유기인

고체시료 20 g을 100 ml 원심 분리관에 넣고 염산용액 10 ml를 가하여 잘 혼합한 후 다시 크로마토그래프용 헥산 40 ml를 가하여 10분간 격렬히 진탕하고 이것을 원심 분리한 후 헥산 층을 분액 깔때기에 옮긴다. 다시 크로마토그래프용 헥산 25 ml를 넣어 추출 조작을 2회 이상 반복하고 헥산 층을 250 ml 분액 깔때기에 합친다. 헥산 층을 크로마토그래프용 증류수 20 ml로 2회 이상 씻어 주고 소량의 크로마토그래프용 무수 황산 나트륨으로 탈수한 다음 여지로 여과하여 농축기의 플라스크에 옮긴다. 분액 깔때기와 무수 황산나트륨을 소량의 크로마토그래프용 헥산으로 씻은 다음, 위에서 사용한 여과 장치로 여과하여 농축기의 플라스크에 합친다. 농축기를 40°C 이하 감압 상태에서 작동하여 헥산 층의 대부분을 휘산시키고 실온에서 질소를 송기하여 잔류 헥산 층을 모두 휘산시킨다. 추출 조작에서 얻은 잔류물에 크로마토그래프용 아세톤 0.5 ml를 정확히 넣어 녹이고 검액으로 한다. 계측기기는 GC/MSD(HP 5973) SIM mode 이고 계측 조건은 80°C 5 min, 20°C/min 180°C 1 min 및 300°C 2 min 이다.

물 시료의 총 유기인 분석은 다음과 같다. 시료

500 ml를 11 분액 깔때기에 취하여 염화나트륨 5 g을 넣어 녹인 다음 지시약으로 메틸 오렌지 용액을 사용하여 염산을 넣어 pH를 3-4로 조절한다. 이후 고체시료의 분석방법과 동일한 방법으로 시행하였다.

3.4.4. EDTA 용출분석

폐기물로 오염된 오염물질이 자연환경에 노출되었을 때 폐기물에 함유되어 있는 오염물질로 인한 동식물 등 생명체에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 생물체를 비롯한 자연생태계에 흡수될 수 있는 오염물질의 양을 결정하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 생체흡수(phytoextraction)를 평가하기 위해서는 EDTA를 이용한 화학적인 방법 등이 가장 널리 사용되고 있다 (Barona *et al.*, 2001; Nyamangara and Mzezewa, 1999; Sun *et al.*, 2001; Fytianos and Charantoni, 1998; Tarvainen and Kallio, 2002). Nyamangara, J.와 Mzezewa, J.(1999)는 목초지의 영양분 공급을 위한 하수슬러지를 이용 시, 환경에 해를 입히게 되는 중금속의 흡수도를 측정하기 위해서 0.05M EDTA(solution:solid=1:5 w/v) 를 이용하였다. Sun *et al.*(2001) 은 phytoextraction의 이용에 있어 중금속의 흡수도를 측정하기 위해 EDTA extraction(0.01M Na<sub>2</sub>-EDTA, solution:solid=1:5 w/v)을 이용하였다. Fytianos, K.와 Charantoni, E.(1998)는 다양한 용출액을 이용한 중금속 용출실험을 한 결과, EDTA가 가장 큰 중금속의 생체흡수도를 보여준다고 하였다.

본 연구에서도 6개 골재광산으로부터 채취한 석분토를 대상으로 중금속의 생체흡수도를 조사하기 위해 물에 잘 용해되는 0.01 M Na<sub>2</sub>-EDTA를 이용하였다. 용액과 퇴적물 시료의 비는 1:20으로 변화를 주었고 용출액의 pH는 6으로 하였다. 용출실험은 실온에서 항온수평진탕기로(100회/분, 진폭 10 cm) 24시간동안 진탕한 후 0.45 μm의 membrane filter로 여과하여 ICP로 분석하였다.

3.4.5. 산농도 변화에 따른 용출 분석

석분토를 채석현장에 장기간 보관할 경우, 석분토 또는 빗물과 석분토가 반응하여 발생하는 침출수가 지표수 및 지하수를 오염시킬 가능성이 있으므로 이에 대한 정량적인 평가가 필요하다. 따라서 산농도 변화에 따른 용출특성 분석은 골재광산에서 발생하는 석분토를 90일 이상 보관할 수 있는지를 판단할 수 있고 장기간 보관시 침출수가 지표수 및 지하수 수질오염을 발생시킬 가능성이 있는지를 평가할 수 있으므로 석분

토를 보관 혹은 매립할 경우 가장 적합한 방법을 제안하는데 중요한 자료로 활용할 수 있다.

골재광산으로부터 발생하는 석분토를 대상으로 pH를 변화(3, 4, 5, 6, 7, 및 8) 시키고 반응시간을 7일로 고정하여 용출실험을 수행하였다. 반응용액의 초기 산도는 탈이온수(deionized water)에 질산과 황산(analytical grade, Merck)을 첨가(무게비 4:6)하여 조절하였다. 실제 국내에서 측정된 강우산도는 3.4-8.0의 범위(평균 4.6-4.8)를 갖는 것으로 보고된 바 있다 (Chung *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 2000). 또한 Lee *et al.*(2000)의 연구결과에 의하면 강우빈도의 연간 약 4%가 pH 4 이하의 산성비가 내린 것으로 보고되었다. 용출실험은 반응용액 200 ml에 시료 20 g를 혼합하여(시료:반응용액=1:10) 실온에서 교반 후, 용액의 pH(최종 pH)와 Eh를 측정하였고 즉시 0.45 µm 멤브레인 으로 여과하였다. 여기서 시료와 반응용액의 혼합비를 1: 10으로 한 것은 국내 폐기물관리법의 용출실험 기준을 따른 것이다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 석분토의 광물학적 특성

석분토 및 원지반토의 유효입경은 각각 평균 0.06 mm 및 0.44 mm로서 모래와 자갈이 섞인 원지반토가 석분토에 비해 조립질이다. 그리고 통일분류법에 의하면,

석분토는 주로 실트와 점토 크기 입자들로서 입도분포가 불량한 점토질모래로 분류되고 대부분의 원지반토는 입도분포가 불량한 모래 또는 자갈혼합토로 분류된다. 6개 채석장의 시료별 광물감정결과, 원석, 부순모래 및 석분의 광물 조성 변화는 서로 유사하였다. 석분토와 비슷한 입도를 보이는 200 mesh 이하의 부순모래와 석분은 원석과 비교하여 대부분 운모, 점토광물(카올리나이트) 및 녹니석의 함량이 높았고 석영과 장석의 함량은 낮았다. 이는 암석을 파쇄하여 생산되는 부순모래는 석영과 장석 등의 광물들로 구성되고 나머지 광물들은 석분토로 남는 것으로 생각된다. 그러므로 석분토에는 원석과 비교하여, 점토광물이나 운모 등이 석영, 장석 등에 비해 상대적으로 많게 된다. 화강암, 편마암 등이 원석인 경우에는 석영, 사장석, K-장석, 운모류(흑운모), 녹니석, 카올리나이트 및 불투명광물(자철석)이 나타난다.

### 4.2. 수질 특성 비교

#### 4.2.1. 현장 측정 자료

6개 석산의 현장측정 자료는 Table 3에 정리하였다. 석산 내부의 물 시료들의 pH는 석분 혼합수 7.9-9.4(평균 8.5), 응집제 반응수 7.8-9.9(평균 8.5), Cake 탈수 7.6-9.7(평균 8.4), 저류지 6.9-9.6(평균 8.1), 모래침출수 7.8-9.1(평균 8.3), 자갈 침출수 7.8-8.2(평균 8.0), 지하수 6.3-8.1(평균 7.4) 및 기타 물 7.0-9.6(평균 8.0)의 범위

Table 3. Field measurement statistics of water samples in and out quarry mine areas

Sample Types		T(°C)	pH	EC (µS/cm)	Eh (mV)	DO (mg/l)
In quarry	Water mixed with stone-dust	21.1	8.5	438	76	5.0
		(15.0-24.5)	(7.9-9.4)	(250-704)	(40-146)	(3.3-6.8)
	Water reacted with flocculant	21.5	8.5	443	83	4.9
		(16.4-24.7)	(7.8-9.9)	(265-692)	(45-147)	(3.8-6.1)
	Pressing water from Cake	21.5	8.4	466	87	4.5
		(15.9-24.6)	(7.6-9.7)	(281-758)	(36-135)	(3.6-5.3)
	Water in retention pond	21.3	8.1	418	92	5.1
		(16.1-4.3)	(6.9-9.6)	(112-1,047)	(28-152)	(3.5-7.1)
		22.0	8.3	432	84	4.6
	Seepage from sand	22.7	8.0	411	99	4.9
(20.0-24.4)		(7.8-8.2)	(79-765)	(80-135)	(4.5-5.7)	
Groundwater	22.5	7.4	366	137	3.9	
	(15.7-4.4)	(6.3-8.1)	(132-1,064)	(86-226)	(2.7-5.1)	
Other water	22.1	8.0	562	103	5.0	
	(17.8-4.7)	(7.0-9.6)	(92-1,905)	(33-169)	(4.0-6.5)	
Out quarry	Stream water	21.8	7.4	234	124	5.2
		(16.6-4.5)	(6.9-8.4)	(30-812)	(58-185)	(4.0-6.3)
Groundwater	22.0	6.6	163	177	3.8	
	(17.4-4.6)	(5.8-7.1)	(69-279)	(119-258)	(3.0-4.7)	

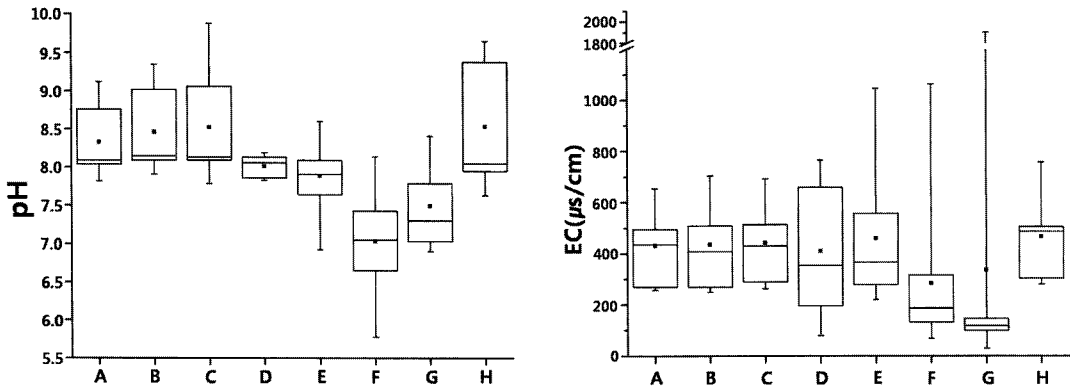


Fig. 1. Ranges of pH and EC values in water samples (A. seepage from sand; B. water mixed with stone-dust; C. water reacted with flocculant; D. seepage from gravel; E. water in retention pond; F. groundwater; G. stream water; H. pressing water from cake).

를 보여준다(Fig. 1). 석산 외부의 물시료들 중 하천수의 pH는 6.9-8.4(평균 7.4)이고, 지하수는 5.8-7.1(평균 6.6)의 범위를 보인다. 석산 내 석분 혼합수의 pH가 가장 높은 값을 보이고 인근 마을의 지하수가 가장 낮은 값(거의 중성)을 보인다. 한편 지하수를 제외한 석산 내부의 모든 물은 8.0 이상의 알칼리성을 보이고 석산 외부의 물시료는 중성에 가까운 값을 보인다. 석산 내부의 물 시료들의 EC값은 석분 혼합수 250-704  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 438  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 응집제 반응수 265-692  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 443  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), Cake 탈수 281-758  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 466  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 저류지 112-1047  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 418  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 모래침출수 258-655  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 432  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 자갈침출수 79-765  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 411  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 지하수 132-1064  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 366  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) 및 기타 물 92-1905  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 562  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )이다(Fig. 1). 석산 외부의 물 시료들 중 하천수의 EC는 30-812  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 234  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )이고 지하수의 EC는 69-279  $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 163  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )의 값을 보인다(Fig. 1). Eh의 경우, 가장 낮은 값을 보이는 물시료는 석분 혼합수로서 평균 69 mV(40-146 mV)의 값을 보이고 가장 높은 값은 석산 외부의 인근 마을 지하수로서 평균 177 mV이며 119-258 mV의 범위를 보인다. DO의 경우, 석산 내부와 외부 물시료들의 값이 서로 비슷한 범위를 보인다. 석산 내부의 물시료의 DO 값은 평균 3.9-5.0 mg/l의 범위를 보이고 석산 외부의 물시료는 평균 2.8-5.2 mg/l의 범위를 보여 매우 유사한 값을 나타내고 있다.

#### 4.2.2. 미량 원소 및 유기화합물

6개 석산에서 채취한 모든 물 시료의 중금속(Cu,

Pb, Zn, Cd 및 As) 함량과 수질분류기준(하천수 수질 기준, 오염물질 배출허용 기준 및 지하수 수질 기준)을 Table 4에 정리하였다. 모든 물 시료에서 Cu, Pb 및 Cd은 검출되지 않았고 Zn과 As의 함량은 수질분류 기준보다 낮았다.

As의 경우, 다른 중금속과 달리 비교적 많은 물 시료들에서 그 함량이 검출되었으나 대운석산은 평균 0.007 mg/l, 동명석산은 평균 0.007 mg/l, 서릉석산은 평균 0.001 mg/l 및 아세아석산은 평균 0.006 mg/l의 값으로 이들 함량은 모두 수질분류 기준보다 훨씬 낮은 값이었다(Fig. 2). 특히 아세아 석산, 동명 석산 및 대운 석산의 경우, As함량이 상대적으로 높았던 시료는 케이크 탈수, 침출수, 저류지 혹은 매립지 물 시료이었던 것으로 나타났다. Zn의 경우, 군산 대운석산의 석산 내 지하수와 주거용 지하수에서 각각 0.39 및 0.25 mg/l, 울산 동명석산의 주거용 지하수에서 0.02 mg/l, 청원 서릉 석산 내 지하수와 주거용 지하수에서 각각 0.01-0.35 mg/l 와 0.06 mg/l, 그리고 공주 아세아석산의 주거용 지하수와 채석장 내 하천수 등에서 0.03-0.24 mg/l의 범위의 농도가 검출되었을 뿐, 나머지 물 시료 및 신선 석산과 봉재 석산의 모든 물 시료에서는 검출되지 않았다. 하지만 석산 내 지하수 혹은 주거용 지하수에서 검출된 As 함량도 모두 먹는 물 수질기준 이하였다(Table 4). Cu의 경우, 군산 대운석산의 지하수(주거)에서 미약하게 검출(0.14 mg/l)되었고 나머지 모든 시료에서는 검출되지 않았다. 한편 Pb와 Cd의 경우, 모든 물 시료에서도 검출되지 않았다.

Table 5에는 석산 내 물 시료 중에서 석산 개발에 의해 주변 환경에 미치는 오염가능성을 판단할 수 있

Table 4. Heavy metals concentrations of water samples

Classification			Result (Units:mg/l)					
			Cu	Pb	Zn	Cd	As	
Drinking water			1.00	0.05	1.00	0.005	0.05	
Water Quality Level	Stream Water	Human Health Protection	-	0.1	-	0.01	0.05	
	Contaminant Discharge	Clean Zone	0.5	0.2	1.0	0.02	0.1	
		Special Area	3.0	1.0	5.0	0.10	0.5	
	Groundwater	Water of life	-	0.1	-	0.01	0.05	
		Water of agriculture	-	0.1	-	0.01	0.05	
		Water of industry	-	0.2	-	0.02	0.10	
Daeun	DW-1	Water reacted with flocculant	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	
	DW-2	Pressing water from cake	0.00	0.00	0.00	0.00	0.014	
	DW-3	Water in retention pond (near cake)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.011	
	DW-4	Stream water	0.00	0.00	0.00	0.00	0.020	
	DW-5	Water in retention pond	0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	
	DW-6	Groundwater	0.00	0.00	0.39	0.00	0.002	
	DW-7	Water mixed with stone-dust	0.00	0.00	0.00	0.00	0.006	
	DW-8	Water in final retention pond	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	
	DW-9	Stagnant water (near cake)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	
	DW-10	Seepage from gravel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004	
	DW-11	Seepage from sand	0.00	0.00	0.00	0.00	0.007	
	DW-12	Spill water in quarry mine	0.00	0.00	0.00	0.00	0.008	
	DW-13	Discharge water	0.00	0.00	0.00	0.00	0.008	
	DW-14	Stream water (lower)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.009	
	DW-15	Stream water (upper)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.008	
	DW-16	Groundwater (house)	0.14	0.00	0.25	0.00	0.004	
Quarry mines	Dong-myung	DM-1	Pressing water from cake	0.00	0.00	0.00	0.00	0.016
		DM-2	Groundwater	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
		DM-3	Water reacted with flocculant	0.00	0.00	0.00	0.00	0.010
		DM-4	Water mixed with stone-dust	0.00	0.00	0.00	0.00	0.007
		DM-5	Stagnant water (near cake)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.015
		DM-6	Water in retention pond used in sand production	0.00	0.00	0.00	0.00	0.012
		DM-7	Seepage from sand	0.00	0.00	0.00	0.00	0.005
		DM-8	Water in retention pond used in gravel production	0.00	0.00	0.00	0.00	0.005
		DM-9	Stream water (upper)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
		DM-10	Stagnant water in cake landfill	0.00	0.00	0.00	0.00	0.016
		DM-11	Water in retention pond used cake treatment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.006
		DM-12	Stream water (lower)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001
		DM-13	Groundwater (house)	0.00	0.00	0.02	0.00	0.001
Bongjae	SP-1	Water in retention pond	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	SP-2	Seepage from cake	0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	
	SP-3	Stream water	0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	
	SP-4	Water mixed with stone-dust	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	SP-5	Water reacted with flocculant	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	SP-6	Pressing water from cake	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	SP-7	Water in retention pond (upper)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	SP-8	Water in retention pond (lower)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	SP-9	Seepage from sand	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004	
	SP-10	Seepage from gravel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	SP-11	Reservoir	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SP-12	Stream water	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SP-13	Groundwater	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	



Table 4. Continued

Classification			Results (Units:mg/l)					
			Cu	Pb	Zn	Cd	As	
Drinking water Level			1.00	0.05	1.00	0.005	0.05	
Water Quality	Stream Water	Human Health Protection	-	0.1	-	0.01	0.05	
	Contaminant Discharge	Clean Zone	0.5	0.2	1.0	0.02	0.1	
		Special Area	3.0	1.0	5.0	0.10	0.5	
	Groundwater	Water of life	-	0.1	-	0.01	0.05	
Water of agriculture		-	0.1	-	0.01	0.05		
Water of industry		-	0.2	-	0.02	0.1		
Sinhan	SH-1	Groundwater (in mine)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SH-2	Seepage from sand	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SH-3	Seepage from cake	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SH-4	Water in settlement tank	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	SH-5	Seepage from gravel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SH-6	Water in settlement tank (gravel/landfill)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	SH-7	Stream water (upper)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SH-8	Spring water (near cake)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SH-9	Stream water (lower)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SH10	Water mixed with stone-dust	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SH-11	Water reacted with flocculant	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	SH-12	Pressing water from cake	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	SH-13	Groundwater (house)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	
	Seoryong	SL-1	Pressing water from cake	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
		SL-2	Water reacted with flocculant	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001
		SL-3	Water mixed with stone-dust	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001
		SL-4	Water tank (cake treatment)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001
SL-5		Groundwater (in mine)	0.00	0.00	0.02	0.00	0.000	
SL-6		Groundwater (in mine)	0.00	0.00	0.01	0.00	0.000	
SL-7		Groundwater (in mine)	0.00	0.00	0.35	0.00	0.000	
SL-8		Water in final retention pond	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
SL-9		Seepage from sand	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
SL-10		Spill water from landfill	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
SL-11		Seepage from gravel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	
SL-12		Stream water (in mine)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004	
SL-13		Stream water (upper)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
SL-14		Groundwater (house)	0.00	0.00	0.06	0.00	0.001	
SL-15		Stream water (lower)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
Asea	A-1	Water in final retention pond	0.00	0.00	0.10	0.00	0.010	
	A-2	Water mixed with stone-dust	0.00	0.00	0.00	0.00	0.007	
	A-3	Water reacted with flocculant	0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	
	A-4	Pressing water from cake	0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	
	A-5	Water tank (cake treatment)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.006	
	A-6	Water in discharge channel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.005	
	A-7	Weepage from sand	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004	
	A-8	Seepage from gravel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.017	
	A-9	Water in discharge channel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.031	
	A-10	Water in retention pond (landfill)	0.00	0.00	0.07	0.00	0.002	
	A-11	Groundwater	0.00	0.00	0.00	0.00	0.007	
	A-12	Other water in quarry mine	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	A-13	Groundwater	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	A-14	Groundwater	0.00	0.00	0.03	0.00	0.003	
	A-15	Stream water (upper)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	
	A-16	Stream water (lower)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	
	A-17	Groundwater (house)	0.00	0.00	0.24	0.00	0.000	

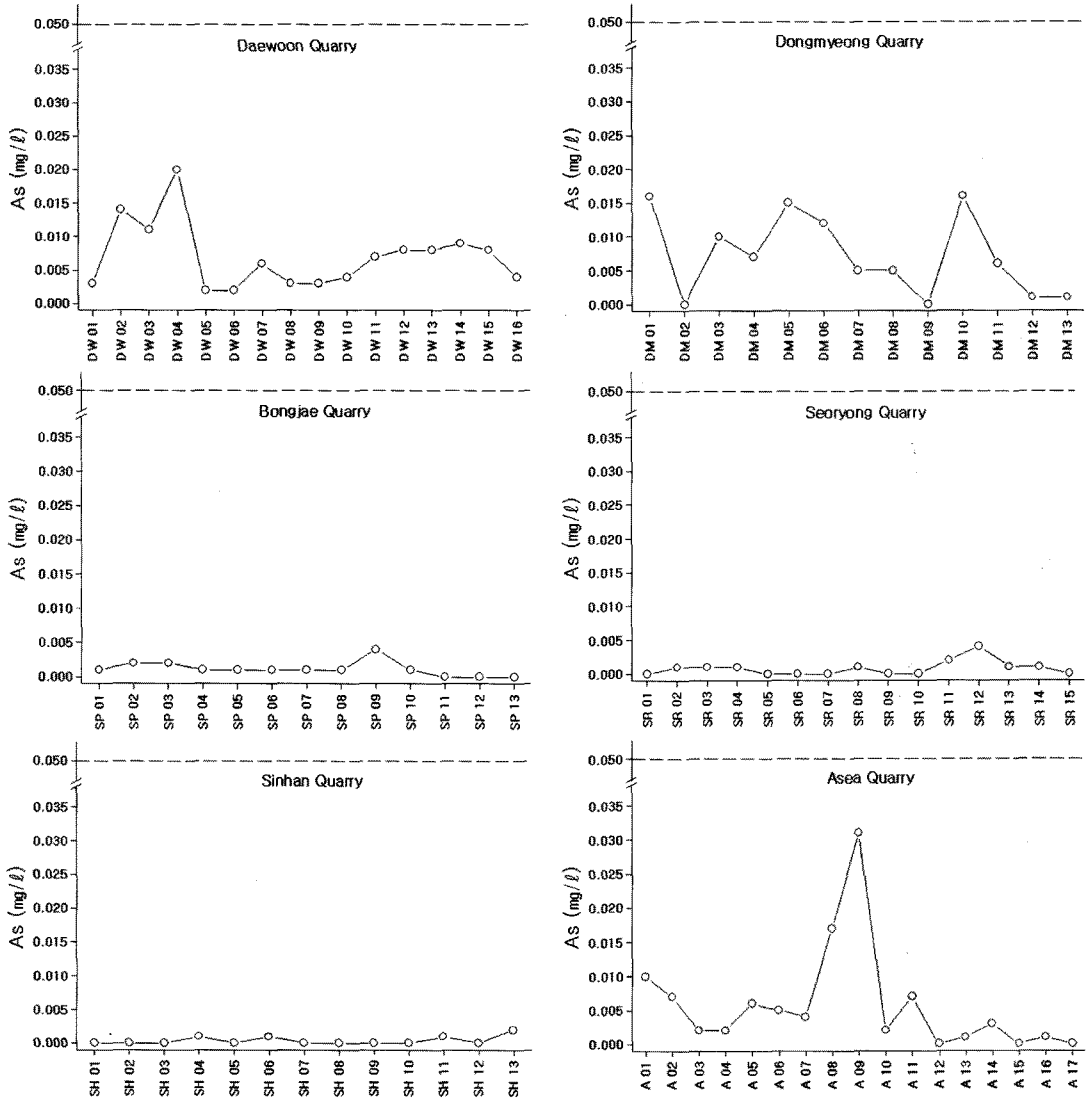


Fig. 2. Arsenic contents of water samples in quarry mines. The dashed line indicates the Domestic drinking water level.

을 것으로 판단되는 물 시료 5개를 선택하여 중금속 중  $Cr^{6+}$ , Hg, CN 및 TCE/PCE 및 총 인의 농도를 분석한 값을 기재하였고 Table 4에서 기재하였던 다른 중금속의 농도도 함께 기재하였다. 선택한 물 시료들은 석분 혼합수, 응집제 반응수, Cake 탈수, 최종저류지 및 주변 하천수이다. 아세아석산을 제외한 나머지 5개 석산에서의 모든 물 시료에서는 어떠한 중금속 및 유기화합물이 검출되지 않았다. 다만 공주 아세아석산의 석분 혼합수, Cake 탈수 및 하천수(상류)에서 CN이 검출(0.01 mg/l) 되었다. 하지만 이들 함량은 오염물질 배출허용기준보다 훨씬 낮은 값이었고 먹는 물 수

질기준과 같은 값을 보였다(Table 5).

결론적으로 석산 개발에 따른 석산 및 주변 환경에서의 수계 오염의 영향은 없는 것으로 판단된다.

#### 4.3. 석분토의 중금속 및 유기오염물질 총합량 분석 결과

연구대상 6개 석산에서 채취한 원암, 토양 및 석분토를 대상으로 토양 pH 및 총합량을 분석하였고 그 결과 들을 원암 및 토양과 비교하여 석분토가 환경오염원으로 작용하는지 여부를 판단하고자 하였다. 6개 석산을 대상으로 석산의 원암을 분쇄하여 측정한 pH는 9.7-10.1로

Table 5. Concentrations of heavy metals and organic compounds in water samples

Classification	Result (Units : mg/l)																		
	pH	As	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr <sup>6+</sup>	Hg	CN	TCE	PCE	deme- ton	diazi- non	carba- ryl	fenitro- thion	mala- thion	para- thion	phen- thoate	EPN
Drinking water	5.8-8.6	0.05	0.005	1.00	0.05	1.00	0.05	0.001	0.01	0.03	0.01	0.02	0.07	0.04	0.25	0.06	-	-	-
Stream Water	-	0.05	0.01	-	0.1	-	0.05	n.d.	n.d.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Human Health Protection																			
Contaminant	Clean Zone	5.8-8.6	0.1	0.02	0.5	0.2	1.0	0.1	n.d.	0.2	0.06	0.2	-	-	-	-	-	-	-
Quality Discharge	Special Area	5.8-8.6	0.5	0.10	3.0	1.0	5.0	0.5	0.005	1.0	0.3	0.1	-	-	-	-	-	-	-
Water Level	Water of life	5.8-8.5	0.05	0.01	-	0.1	-	0.05	n.d.	n.d.	0.03	0.01	-	-	-	-	-	-	-
	Water of agriculture	6.0-8.5	0.05	0.01	-	0.1	-	0.05	n.d.	n.d.	0.03	0.01	-	-	-	-	-	-	-
	Water of industry	5.0-9.0	0.1	0.02	-	0.2	-	0.1	n.d.	n.d.	0.06	0.02	-	-	-	-	-	-	-
	SP4 <sup>1)</sup>	8.09-7.67	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SP5 <sup>2)</sup>	8.09-7.33	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SP6 <sup>3)</sup>	7.95-7.67	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SP8 <sup>4)</sup>	7.82-7.66	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SP-12 <sup>5)</sup>	7.24-6.96	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SH-4 <sup>6)</sup>	8.70-8.44	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SH-7 <sup>7)</sup>	6.90-6.96	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SH-10 <sup>1)</sup>	8.15-8.41	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SH-11 <sup>2)</sup>	8.13-8.20	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	SH-12 <sup>3)</sup>	8.05-8.22	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	DM-1 <sup>3)</sup>	9.38-11.28	0.016	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	DM-3 <sup>2)</sup>	9.06-11.30	0.010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	DM-4 <sup>1)</sup>	9.02-10.47	0.007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	DM-6 <sup>4)</sup>	9.58-9.93	0.012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	DM-9 <sup>7)</sup>	7.52-7.57	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

1) Water mixed with stone-dust,  
 2) Water reacted with flocculant,  
 3) Pressing water from cake,  
 4) Water in final retention pond,  
 5) Stream water (lower),  
 6) Water in settlement tank,  
 7) Stream water (upper)  
 \*n.d. : not detected



**Table 6.** Concentrations of heavy metals and organic compounds in solid samples (soil, cake and host rock)

Classification	Result (Units : mg/kg)																		
	pH	As	Cd	Cu	Pb	Zn	Hg	Cr <sup>6+</sup>	CN	TCE	PCE	demeton	diazinon	carbaryl	fenitrothion	mala-thion	para-thion	phen-thoate	EPN
Daeun	Soil	7.79	70.5	2.0	24.0	22.0	79.0	0.0	0.0	n.d.	n.d.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Cake	8.60	44.5	1.5	47.0	52.5	157.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Rock	10.00	6.0	1.0	18.0	22.0	86.0	n.d.	0.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Dongmyung	Soil	8.17	18.50	1.5	11.5	50.5	128.5	0.0	0.0	n.d.	n.d.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Cake	9.40	6.50	1.0	20.0	44.5	98.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Rock1	10.11	1.80	0.0	2.0	0.0	7.0	n.d.	0.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Rock2	9.75	4.00	1.5	5.0	25.5	213.5	n.d.	0.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Bongjae	Soil	8.00	0.05	1.0	2.5	14.5	70.5	0.0	0.0	n.d.	n.d.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Cake	9.33	3.35	1.0	11.5	32.0	158.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Rock	10.11	5.00	0.5	2.5	9.5	43.5	n.d.	0.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Seoryong	Soil	8.92	7.50	1.0	29.0	26.5	85.0	0.0	0.0	n.d.	n.d.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Cake	8.97	4.80	1.0	52.0	44.5	130.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Rock	9.97	5.00	0.5	31.5	18.5	28.5	n.d.	0.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Snhan	Soil	6.42	9.50	0.5	5.0	28.0	34.0	0.0	0.0	n.d.	n.d.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Cake	9.05	1.35	0.5	8.0	46.5	73.0	0.0	0.0	n.d.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Rock	9.92	4.75	0.5	2.0	16.5	27.0	n.d.	0.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Asea	Soil	7.01	9.50	0.5	23.0	56.5	60.0	0.0	0.0	n.d.	n.d.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Cake	9.46	8.50	1.5	27.0	43.0	88.0	0.0	0.0	n.d.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Rock	9.68	5.00	1.0	12.0	18.5	55.0	n.d.	0.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

\* n.d. : not detected

알칼리성이었고 석분토의 pH는 8.6-9.5로 원암보다 약간 낮아진 것으로 나타났다. 한편 석산 주변 토양의 pH는 6.4-8.9로 중성에서 알칼리성인 것으로 나타났다.

조사 대상 석산의 모든 고체 시료 별(즉, 원암, 토양 및 석분토) 비교 결과 (Table 6, Fig. 4), 모든 고체시료 내 중금속 중 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn이 검출되었으며, Hg, Cr<sup>6+</sup> 및 CN은 검출되지 않았다. 6개 석산의 원암, 석분토 및 토양 중의 As, Cu, Pb, Cd, Zn의 함량을 종합하여 보면, As의 함량은 원암 1.8-6.0 mg/kg(평균 4.5 mg/kg), 토양 0.1-70.5 mg/kg(평균 19.3 mg/kg) 및 석분토 1.4-44.5 mg/kg(평균 11.5 mg/kg) 이었다. 원암, 토양 및 석분토의 Cu의 함량은 각각 2-32 mg/kg(평균 10.4 mg/kg), 3-29 mg/kg(평균 15.8 mg/kg) 및 8-52 mg/kg(평균 27.6 mg/kg)이었고 Pb 함량은 각각 0-26 mg/kg(평균 15.8 mg/kg), 15-57 mg/kg(평균 33.0 mg/kg) 및 32-53 mg/kg(평균 43.8 mg/kg)이었고 Cd 함량은 각각 0.0-1.5 mg/kg(평균 0.7 mg/kg), 0.5-2.0 mg/kg(평균 1.1 mg/kg) 및 0.5-1.5 mg/kg(평균 1.1 mg/kg) 이었다. 원암, 토양 및 석분토의 Zn 함량은 각각 7-214 mg/kg(평균 65.8 mg/kg), 34-129 mg/kg(평균 76.2 mg/kg) 및 73-158 mg/kg(평균 117.6 mg/kg)이었다. As

는 원암<석분토<토양의 순으로 함량이 증가하였고 Cu, Pb 및 Zn의 경우는 원암<토양<석분토의 순으로 중금속의 함량이 증가하는 경향을 보였다. Cd는 모든 고체 시료에서의 함량이 유사하게 나타나고 있다. 토양과 원암에 비교해서 일부 석산의 석분토에 Cu, Pb 및 Zn의 함량이 증가하는 현상을 보이는 데, 이는 석분토에 석영과 장석 등의 함량이 원암보다 낮아지고 운모류, 녹니석 등과 같은 광물의 상대적인 함량이 증가하기 때문이다. 그러나 국내 하천퇴적물의 평균 함량(Cu 28 ppm, Pb 29 ppm 및 Zn 139 ppm)과 유사한 함량(Lee *et al.*, 2007)을 보이고 있거나 현저하게 낮은 함량을 보이고 있으므로 석분토가 Cu, Pb 및 Zn의 잠재적인 오염원일 가능성은 없을 것으로 판단된다.

석산에서 발생하는 응집체를 포함한 석분토와 토양 시료 모두에서 Hg, Cr<sup>6+</sup>과 CN, TCE 및 PCE와 유기인이 불검출로 나타나(Table 6), 다른 산업폐기물(슬러지) 과는 달리 석분토는 Hg, Cr<sup>6+</sup>, CN, 독성 유기 화합물 및 유기인에 오염되지 않았음이 확인되었다.

4.4. 용출실험을 통한 지표환경오염 발생 가능성 평가  
석분토에 함유되어 있는 중금속 원소가 용출되어 등

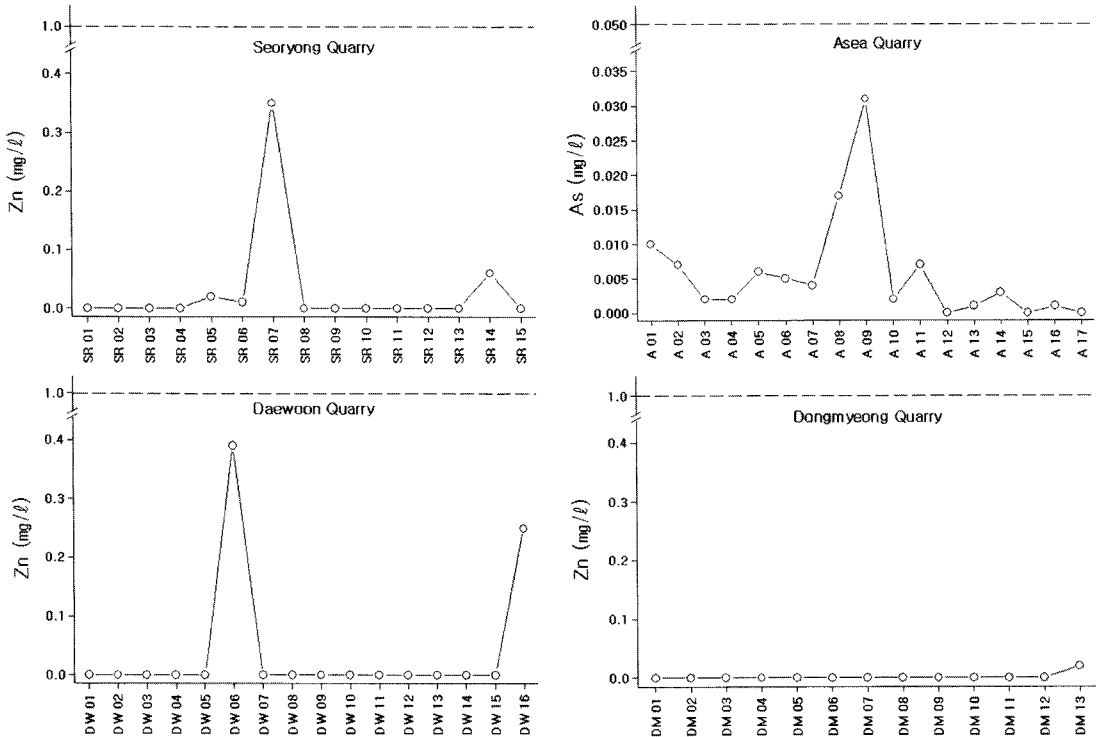


Fig. 3. Zinc contents of water samples in quarry mines. The dashed line indicates the Domestic drinking water level.

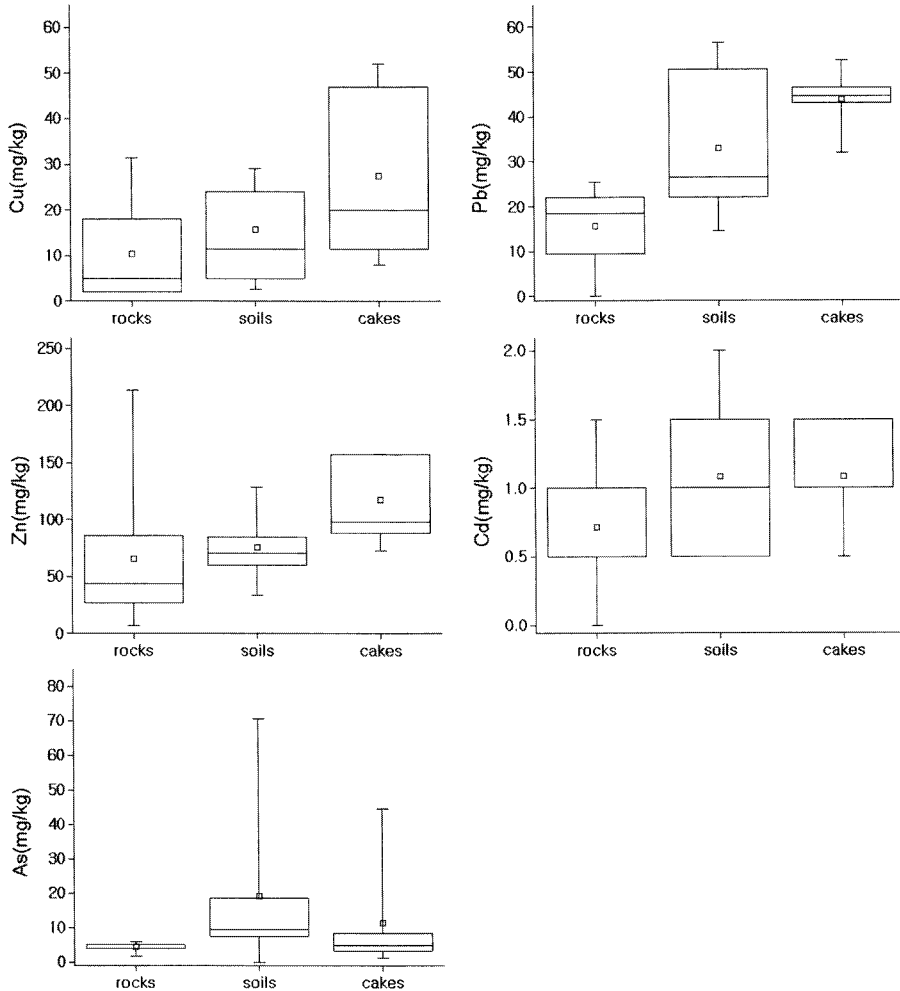


Fig. 4. Ranges of heavy metal concentrations in host rocks, soils and cakes.

식물 등 생명체에 미치는 영향을 평가하기 위해서 6개 골재광산으로부터 채취한 석분토를 대상으로 0.01 M EDTA로 용출실험을 실시한 결과를 Table 7에 정리하였다. As의 용출된 함량은 0.01-0.11 mg/kg으로 전체 As 함량의 0.1-1.3%만이 용출되었다. Zn은 1.0-4.7 mg/kg (전체 Zn 함량의 1.1-3.0%) 가 용출되었고 Cu는 0.4-2.3 mg/kg(전체 Cu 함량의 1.9-7.8%)이 용출되었다. Pb은 전체 Pb 함량의 11.9-27.2%인 6.2-12.1 mg/kg이 용출되었다. 한편 Cd은 검출되지 않았는데 이는 석분토에 함유된 Cd 함량이 1 mg/kg으로 낮아 용출된 Cd 함량을 검출하기가 어려웠던 것으로 판단된다. 이로써 석분토를 EDTA로 용출실험을 실시한 결과, 가장 용출이 잘되는 원소가 Pb이었고 그 다음으로는 Cu였으며 가장 EDTA에 의해서 용출되지 않은 원소는 Cd이었던

것으로 분석되었다. EDTA에 의한 용출이 잘되는 원소의 순서로 나열하면 다음과 같다: 납(Pb) > 구리(Cu) > 아연(Zn) > 비소(As) > 카드뮴(Cd).

#### 4.5. 산농도 변화에 따른 용출 분석

pH를 3부터 8까지 변화시키면서 용출실험 한 결과를 Table 8에 정리하였다. 7일간의 반응 후 측정 한 pH 값은 모두 pH 8.0-8.8로 알칼리성을 띄는 것으로 나타나 pH 3에서 pH 6까지의 산성의 빗물과 석분토가 반응하여도 침출수의 pH는 8 이상으로 증가하는 것으로 예측되었다. 이런 결과는 석분토에 함유된 탄산염광물과 같은 pH 완충제가 반응시스템의 pH를 알칼리성으로 유지시킨 것으로 판단된다. 이에 따라 중금속원소의 용출은 발생하지 않을 것이고 석분토로부터





터 발생된 침출수에 용해된 중금속이온도 이러한 알칼리성 환경에서는 수산화광물 형태로 침전될 것으로 예측된다.

pH 3에서 pH 8까지의 용출실험에서 Pb, Cr 및 Cd는 검출되지 않았고 Cu와 Zn은 일부 pH조건에서 미약한 함량이 검출되었으며 비교적 용출이 잘되는 원소는 As이었다. 신한석산의 석분토를 제외하고 분석된 모든 석산의 석분토에서 As가 용출되었다. 가장 As의 용출이 잘 되는 석분토는 아세아 석산으로 pH 3에서 0.011 mg/l이 용출되어 pH가 알칼리성으로 증가하면서 용출되는 As 함량도 증가하였고 pH 8에서 용출된 함량은 0.026 mg/l이었다(Table 8). 그러나 용출된 이들 함량은 폐기물관리법의 규제농도(1.5 mg/l)와 비교하여 크게 낮은 함량만이 용출되어 석분토가 산성비 등 빗물과 반응하여도 환경에 미치는 영향은 없을 것으로 판단된다. 또한 생활용수로 사용하는 지하수 수질기준(0.05 mg/l)과 먹는 물의 수질기준(0.05 mg/l)에 비교해서 석분토로부터 용출된 As함량은 1/2배 이하로 낮아 지하수와 지표수 오염문제는 없을 것으로 예측된다. 지표수 오염을 방지하기 위한 배출수의 허용기준(청정지역, 0.1 mg/l; 가, 나 특례지역, 0.5 mg/l)과 비교하여도 골재광산의 석분토로부터 발생하는 침출수가 허용기준에 훨씬 미달하는 것으로 나타났다. 한편 동명석산의 경우 pH 3에서 용출된 As함량이 0.003 mg/l이고 pH 8에서 용출된 As함량이 0.012 mg/l로 역시 pH가 증가하면서 용출된 As함량이 증가되는 현상이 관찰되었다(Table 8). 이외, 대운석산(0.002-0.005 mg/l), 봉재석산(0.002-0.009 mg/l) 및 서릉석산(0.001-0.002 mg/l)에서만 As가 용출되어 지표수 및 지하수 수질에 미칠 수 있는 영향은 미약하거나 없을 것으로 예측된다(Table 8). 알칼리성 환경에서 As는 arsenite 혹은 arsenate 등과 같이 착이온 형태의 음이온을 형성하므로 알칼리성 환경에서도 침전되지 않고 상대적으로 높은 함량이 검출된 것으로 판단된다.

Cu의 경우, 일부 시료에서 매우 미약한 함량만이 검출되었고 대부분의 시료에서는 검출되지 않았다. 대운석산의 반응용액 pH 7, 봉재석산의 반응용액 pH 5 및 신한석산의 반응용액 pH 4와 8의 용출실험에서만 최대 용출 함량이 0.01 mg/l이었다(Table 8). Zn의 경우에도 일부 시료에서 매우 미약한 함량만이 검출되었고 대부분의 시료에서 검출되지 않았다. 동명석산의 반응용액 pH 6과 7의 용출실험과 봉재석산의 반응용액 pH 7의 용출실험에서만 최대 용출 함량이 0.01 mg/l이었다(Table 8).

pH 3에서 pH 8까지의 용출실험 결과, 용출된 중금속 함량은 국내 폐기물관리법의 규정농도, 지하수 수질기준, 하천수 수질기준, 먹는 물의 수질기준 및 오염물질 허용기준 등 모든 규제농도와 비교하여 매우 미약한 것으로 나타났다. 알칼리성 환경에서는 중금속 원소의 용해반응이 크게 감소하고 오히려 용해된 중금속 이온이 수산화광물 혹은 산화광물 형태로 침전되어 침출수 중 용해된 중금속 원소의 함량을 크게 감소시킬 것으로 판단된다.

본 논문의 연구대상 지역은 국내 지질 및 석산의 분포를 고려하여 선정하였고, 국내 모든 석산을 대상으로 연구를 수행할 수 없는 한계로 인하여, 화강암 및 편마암 지역이 주 연구 지역으로 선정되었다. 하지만 국내 일부 퇴적변성암 지역 및 광화대 지역의 암석은 황화광물을 포함하고 있어, 석산에서의 중금속 원소에 의한 오염 가능성도 존재할 것으로 생각된다. 따라서 향후 이들 석산들을 대상으로 한 보완 연구가 수행되어야 할 것으로 시료된다.

## 5. 결 론

석산에서 골재(자갈 및 모래)를 생산과정에서 발생하는 모든 종류의 물과 석산 주변의 자연수 및 원암, 토양, 석분토 등 고체 시료를 대상으로 중금속 함량 및 유해성 유기화합물의 농도를 분석하였다. 모든 물 시료와 석분토에서 검출된 Cr<sup>6+</sup>, Hg, CN 및 TCE/PCE 및 총 인의 농도는 모두 검출한계 이하로 다른 산업폐기물(슬러지)과는 달리 석산 개발과정에서 발생하는 응집체를 포함한 석분토는 중금속 및 유기화합물에 오염되지 않았음을 확인하였다. 석산 내부 및 외부에서 채취한 물 시료의 분석결과에서도 Pb와 Cd은 모든 시료에서 검출되지 않았고 Cu와 Zn은 일부 시료에서 미약한 함량만이 검출되었으며, As는 비교적 많은 물 시료에서 검출되었지만, 검출된 As 함량은 모두 먹는 물 수질기준보다 훨씬 낮은 값을 보여주고 있어 석산 개발에 따른 석산 내부 및 주변 환경에서의 수계 오염이 발생되지 않는 것으로 판단된다. 생체흡수도(bio-availability) 평가를 위한 EDTA 용출실험과 산도변화를 이용한 용출실험의 결과에서도 Pb, Cr, Cd, Cu 및 Zn의 용출함량은 검출한계 이하 혹은 매우 미약한 함량만이 검출되었다. As는 산도변화 용출실험에서 신한석산을 제외하고 분석된 모든 석산의 석분토에서 검출되었으나 폐기물관리법의 규제농도, 오염물질 청정지역 배출허용기준, 지하수의 생활용수 기준 및 먹

는 물 수질기준과 비교한 결과, 이들 기준값보다 현저하게 낮은 것으로 나타났다. 이는 석분토를 90일 이상 장기간 석산 내에 보관하여 산성비 등 빗물과 반응하여도 지하수 및 지표수 오염문제 등 환경에 미칠 수 있는 영향은 없을 것으로 예측된다. 따라서 석분토를 폐기물처리시설 이외의 예외적 매립시설에 매립할 수 있도록 폐기물관리법시행규칙 제 7조(예외적 매립시설에서의 폐기물처리)에 의하여 허용할 수 있도록 하여야 한다. 또한 위해성이 없을 경우 일반적인 사업장 폐기물과 구분하여 법적인 규제를 완화하여 석분토를 골재광산의 복구매립용으로 매립 혹은 재활용할 수 있도록 허용할 필요가 있다.

## 사 사

본 논문은 한국골재협회 연구용역사업 “석분토의 특성 및 활용방안을 위한 연구 (IP2005-009-2006(1))”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Barona, A., Aranguiz, I. and Elias, A. (2001) Metal associations in soils before and after EDTA extractive decontamination: implications for the effectiveness of further clean-up procedures. *Environ. Pollut.*, v.113, p. 79-85.
- Chung, Y.S., Kim, T.K. and Kim, K.H. (1996) Temporal variation and cause of acidic precipitation from a monitoring network in Korea. *Atmos. Environ.*, v.30, p.2429-2435.
- Fytianos K. and Charantoni E. (1998) Leaching of heavy metals from municipal sewage sludge. *Environ. Inter.*, v.24, p.467-475.
- Lee, P.K., Youm, S.J., Shin, S.C., Park, S.W., Kang, M.J. and Moon, S.W. (2007) *Geochemical Atlas of Korea (1:1,800,000)*, Series 9, KIGAM. 68p.
- Lee, B.K., Hong, S.H. and Lee, D.S. (2000) Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ions on the Korean peninsular. *Atmos. Environ.*, v.34, p.563-575.
- Nyamangara, J. and Mzezewa, J. (1999) The effect of long-term sewage sludge application on Zn, Cu, Ni and Pb levels in a clay loam soil under pasture grass in Zimbabwe. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v.73, p.199-204.
- Sun, B., Zhao, F.J., Lombi, E. and McGrath, S.P. (2001) Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA. *Environ. Pollut.*, v.113, p.111-120.
- Tarvainen, T. and Kallio, E. (2002) Baselines of certain bioavailable and total heavy metal concentrations in Finland. *Applied Geochem.*, v.17, p.975-990.

2010년 6월 11일 원고접수, 2010년 8월 20일 게재승인