

용출실험에 의한 석분토의 지표환경 오염 평가

강민주¹ · 이평구^{2*} · 염승준²

¹충북대학교 지구환경과학과, ²한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Assessment of Environmental Contamination caused by the Stone-dust using Leaching Tests

Min-Ju Kang¹ · Pyeong-Koo Lee^{2*} · Seung-Jun Youm²

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

The stone-dust is an unavoidable by-product of aggregate production, which is produced about 0.8~1.0 million m³ annually. The stone-dust is currently regarded as a hazard material on environment because it is classified as an industrial waste in the Waste Management Law of Korea. At present, the stone-dust is considered as a environmentally hazardous material, and is classified as an industrial waste according to the Waste Management Law of Korea. In this study, we assessed the heavy-metal contamination of the stone-dust on surrounding environments by various leaching tests. Leaching experiments (such as Korea Standard Leaching Procedure (KSLP), Soil Environment Preservation Act of Korea (SEPAK), Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), and Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP)) show that very low heavy metals (As, Cd, Cu, Pb, Zn, Hg) and CN are leached out, or much less than each regulatory thresholds. The results of the leaching test with time in acidic solution (initial pH 5 and 3) indicate that pH-buffering minerals are present in the stone-dust. These results suggest that the stone-dust can not potentially affect adverse impact on surrounding environments such as surface water, groundwater and soil etc..

Key words : Stone-dust, Aggregate, Leaching test, Heavy-metal, Assessment

1. 서 론

국내 골재 채취량은 1997년 이후 급격히 증가하였으며 산업골재가 차지하는 비율은 약 60%에 해당한다. 석분토는 쇄석골재를 생산하기 위하여 원암을 분쇄하는 과정에서 발생하는 미세립질의 부산물로서 특히 모래를 생산하는 과정에서 연간 80-100만 m³의 석분토가 발생되고 있다(이평구 외, 2006). 폐기물처리법에서 오니는 유해물질을 함유하고 있거나 유기성 오수를 발생할 위험성이 있는 물질이라는 전제하에 관리형 처분장 또는 차단형 처분장에서 처리하게 되어 있다. 석분토는 쇄석원암을 원료로 하고 쇄석과 쇄사의 제조공정에서 화학적으로 오염되는 공정이 없으므로 유해물질을 함유하지 않고 유기성 오수의

우려가 없는 무기성 세립분이므로 안정성에는 문제가 없다는 것이 일반적인 의견이다. 그럼에도 불구하고 국내에서 석분토는 폐기물관리법 2조(정의) 및 폐기물관리법시행령 제2조(사업장의 범위) 규정에 따라 산업폐기물의 무기질 오니로 규정되어 있어 폐기물처리법상의 엄격한 규제를 받고 있다(환경부, 2003b, c).

골재를 세척하는 과정에서 미세한 암석의 분말을 침전시키기 위하여 응집제를 사용한다. 응집제가 환경에 유해한 미량원소 및 독성유기화합물을 함유하고 있다면 석분토는 환경오염원으로서 적절한 처리 및 격리가 필요하다고 할 수 있다. 그러나 일본에서는 석분토에 함유되어 있는 유기계 고분자 응집제가 자연계에서 생분해성이 높고 급속히 무해화되므로 생활환경보전상 문제가 되지 않는

*Corresponding author : pkleee@kigam.re.kr

원고접수일 : 2010. 2. 2 심사일 : 2010. 3. 13 게재승인일 : 2010. 4. 26

질의 및 토의 : 2010. 8. 31 까지

것으로 평가되고 있다. 이에 석분토를 거의 대부분 표토, 폐토석 및 석회 등과 혼합하여 채석원석 채굴적지의 복구 매립용 및 복토식재용에 이용하고 있는 중요한 자원소재로 판단하고 있다. 따라서 국내에서도 응집제를 함유한 석분토에 대하여 환경에 유해한 성분을 함유하고 있는 가에 대한 평가를 실시한 후, 일본의 경우처럼 석분토를 재활용하는 방안을 강구해야 한다.

이번 연구에서는 석분토를 대상으로 국내·외 다양한 용출실험법을 실시하여 석분토가 주변 환경오염에 미치는 영향을 판단하고자 한다. 즉, 석분토에 대한 환경지구화학적 특성을 평가함으로써 석분토가 유해물질에 오염되어 있지 않으며, 중금속 및 CN 등 중금속 원소들에 오염된 침출수가 발생되지 않을 경우 폐기물관리법상 현행 처리 규정을 개선하는데 필요한 기본 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구지역

석분토 시료 채취 장소는 우선 전국을 대상으로 권역별로 대표할 수 있고, 생산 규모가 크고, 생산 원석의 종류별로 대표성이 있는 석산을 선정하였으며, 경기도의 삼표산업, 강원도의 신한산업, 충북의 서릉개발, 충남의 아세아산업개발, 경남의 동명산업 및 전북의 대운산업개발 등이다(Fig. 1).

삼표산업은 경기도 양주시 광적면 가남리와 은현면 도하리 일대에 위치하고 1986년부터 채석허가를 받아 가행되고 있다. 채석 대상암인 흑운모화강암은 이 일대 전역에 걸쳐 분포하며 이를 관입한 석영맥과 중성암맥이 소규모로 분포한다. 연간 약 350만 m³의 골재를 생산하며 단일 석산으로는 국내 최대 규모이었다. 이 중 자갈은 약 200만 m³ 생산하고 부순모래는 약 150만 m³ 정도 생산하였다. 부순모래 생산 시 발생하는 석분토는 연간 약 40만 톤인 것으로 추정된다. 신한산업은 강원도 춘천시 신동면 혈동리에 위치하고 1992년부터 채석허가를 받아 산림골재를 채취하고 있다. 이 지역의 지질은 선캄브리아기의 암층군의 창춘리층과 동산층으로 구성되어 있다. 채석 암종은 편마암으로 연간 50만 m³의 골재를 생산하고 있었고 부순모래 생산 시 발생하는 석분토는 약 10만 m³인 것으로 추정된다. 서릉석산은 충청북도 청원군 옥산면 금계리에 위치하며 1993년부터 채석허가를 받아 산림골재를 개발해오고 있다. 이 지역 일대는 선캄브리아기의 흑운모편마암을 기반암으로 분포되어 있으며, 후기에 관입한 맥암류가 소규모로 분포한다. 채석 대상암종은 편마암

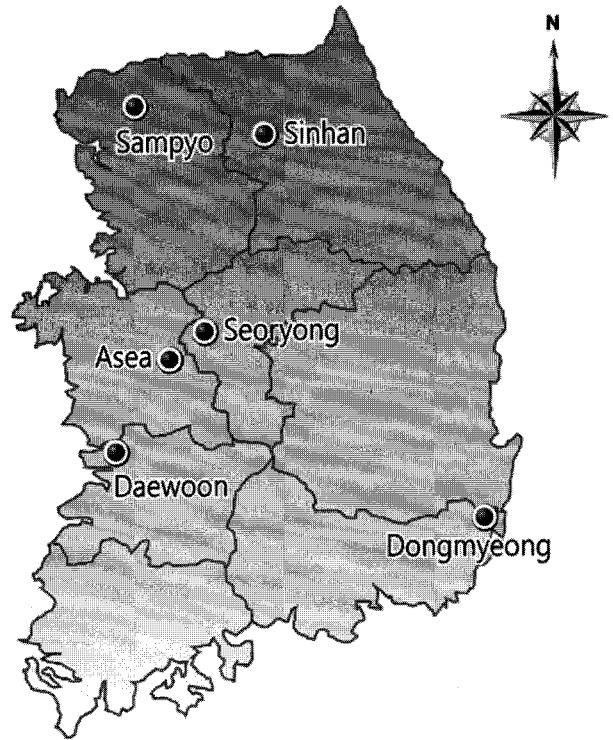


Fig. 1. Locations of sampling sites.

이고 연간 40만 m³의 골재를 생산하였다. 아세아산업개발은 충청남도 공주시 장기면 평기리에 위치하며 1992년부터 채석허가를 받아 가행하고 있다. 이 지역의 지질은 주로 선캄브리아기의 화강암질편마암과 운모석영편암 및 장석편암으로 이루어져 있으며, 주라기 반상화강암이 이들을 관입하고 있다. 편마암과 편암을 대상으로 연간 생산량은 약 100만 m³이었고, 그 중 부순 모래 25만 m³ 정도 생산되는 과정에서 발생하는 석분토는 연간 약 3~4만 m³로 추정된다. 대운산업은 전라북도 군산시 나포면 서포리에 위치하며 1999년부터 채석허가를 받아 골재를 생산하고 있다. 골재 대상 암종인 선캄브리아기의 편암과 편마암이 전역에 걸쳐 분포하며 연간 100만 m³를 생산하고 있다. 부순모래는 연간 약 5만~10만 m³를 생산하고 있으며 석분토는 이 중 20~30%인 것으로 추정된다. 동명산업은 울산시 북구 대안동에 위치하며 1987년부터 채석허가를 받아 산림골재를 생산하고 있다. 이 지역의 지질은 백악기 퇴적암류인 울산층과 이를 관입내지 분출한 백악기의 안산반암, 그리고 이들을 모두 관입한 화강반암이 분포한다. 골재 대상 암종은 안산반암으로 자갈은 연간 약 60만 m³, 부순모래는 연간 25만 m³을 생산하고 있으며 석분토는 연간 약 1만 m³인 것으로 추정된다.

3. 연구방법

6개 석산에서 채취한 석분토는 냉동건조기를 이용하여 완전하게 건조한 후, 전체가 균질하게 되도록 잘 섞은 다음 아케이트 몰타르를 이용하여 74 μm 내지 53 μm 정도 까지 연마하여 분말로 만들어 준비하였다. 이들 석분토를 대상으로 유해성 여부를 판단하기 위하여 일본과 국내 폐기물공정시험법(환경부, 2003a), 토양오염공정시험법(환경부, 2002), TCLP(EPA, 1992) 및 SPLP(EPA, 1994)를 실시하였다. 또한 석분토를 장기간 보관할 경우 석분토의 환경 유해성 여부를 알아보기 위하여 반응용액의 pH를 5와 3으로 고정시키고 각각의 pH 조건에서 반응시간(1, 4, 7, 14, 21, 30, 60일)에 따른 용출실험을 실시하여 석분토로부터 용출된 중금속 함량을 국내 토양환경보전법과 비교하였다. 반응시간에 따른 용출실험은 반응용액 200 mL에 시료 20 g를 혼합하여(시료 : 반응용액 = 1 : 10) 실온에서 교반 후, 용액의 pH(최종 pH)와 Eh를 측정하였으며, 즉시 0.45 μm 멤브레인으로 여과하였다. 용출실험에 사용한 반응용액의 초기 산도는 탈이온수(deionized water)에 질산과 황산(analytical grade, Merck)을 무게비로 4대 6의 비율로 첨가하여 조절하였다. 양이온 분석은 고려대학교 전략광물센터의 ICP-AES(Perkins-Elmer Optima 3000XL)를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 국내 용출실험법에 따른 석분토 중금속 함량 오염평가

4.1.1. 폐기물공정시험법

골재광산에서 발생하는 석분토는 사업장 일반폐기물로 간주되고 있다. 그러나 골재광산에서 발생하는 석분토가

암석을 분쇄하여 골재를 생산하는 과정에서 발생된 미세한 입자이기 때문에 다른 산업시설물에서 발생하는 사업장 오염물질이 다량으로 함유되어 있는 일반폐기물과는 차이가 매우 크다. 그러므로 이번 연구에서는 석분토를 대상으로 국내 폐기물공정시험법에 따른 전처리방법을 수행하여 석분토로부터 용출된 중금속 함량을 측정하여 폐기물공정시험법의 시행규칙에 정해진 규정과 비교하고자 하였다.

폐기물공정시험법에 따른 용출실험 결과, 골재광산의 석분토로부터 용출된 비소(As)는 군산 대운과 공주 아세아광산의 석분토에서만 용출되었으며, 각각 0.001 mg/L과 0.003 mg/L만이 검출되어 폐기물관리법 시행규칙에 정해진 1.5 mg/L에 비교할 때 현저하게 낮은 것으로 평가되었다(Table 1). 이외, 울산 동명광산, 양주 삼표광산, 청원 서릉광산 및 춘천 신한광산의 석분토에서는 비소가 검출되지 않았다. 구리(Cu)의 경우, 울산 동명광산, 양주 삼표광산, 춘천 신한광산 및 공주 아세아광산의 석분토에서 0.01 mg/L만이 검출되었고 이는 폐기물관리법 시행규칙에 정해진 3 mg/L에 크게 못 미치는 함량이며 군산 대운광산과 청원 서릉광산의 석분토에서는 구리가 검출되지 않았다. 아연(Zn)은 폐기물관리법에 규정된 유해물질이 아니나, 석분토로부터 용출된 함량이 0.01~0.16 mg/L로 매우 낮은 함량만이 용출되었다. 시안(CN)은 폐기물관리법 시행규칙에 정해진 기준함량이 1 mg/L이나, 검출된 시안 함량은 <0.005 mg/L로 나타나 시안에 의한 오염 확산 우려는 없는 것으로 판단된다(Table 1). 카드뮴(Cd), 납(Pb), 6가 크롬(Cr^{6+}) 및 수은(Hg)은 폐기물공정시험법에 의한 용출실험 결과, 6개 광산의 석분토에서 모두 검출되지 않았다(Table 1). 이는 석분토가 다른 사업장 폐기물과 달리 이들 금속원소에 오염되어 있지 않음을 시사한다.

Table 1. The concentrations of metals by KSLP methods for the stone-dust

		mg/L							
		As	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr^{6+}	Hg	CN
Regulatory Threshold	Korea	1.5	0.3	3	3	-	1.5	0.005	1
	Japan	0.3	0.3	-	0.3	-	1.5	0.005	1
Quarries	Daewoon	0.001	n.d.	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	<0.005
	Dongmyeong	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	0.14	n.d.	n.d.	<0.005
	Sampyo	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	0.16	n.d.	n.d.	<0.005
	Seoryong	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.03	n.d.	n.d.	<0.005
	Sinhan	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	0.05	n.d.	n.d.	<0.005
	Asea	0.003	n.d.	0.01	n.d.	0.04	n.d.	n.d.	<0.005

KSLP : Korea Standard leaching procedure
n.d. : not detected

한편, 일본의 폐기물공정시험법은 환경청고시 13호와 46호가 있다. 일본의 폐기물공정시험법 46호는 13호와 실험 조건은 같으나 13호 기준(5 mm 이하)보다 작은 2 mm 이하까지 분쇄하도록 규정하고 있다. 이번 연구에서 사용된 석분토는 모두 2 mm 체를 통과하였기 때문에 일본의 폐기물공정시험법 46호와 13호를 구별하지 않았다. 일본의 폐기물공정시험방법은 국내 폐기물공정시험방법과 동일한 방법이나 일본의 규제농도는 국내보다 좀 더 엄격한 기준(국내와 비교할 때 비소 5배, 납 10배)을 실시하고 있다. 국내 폐기물공정시험법을 실시하여 석분토로부터 검출된 비소를 일본의 폐기물 규제농도(0.3 mg/L)와 비교한 결과, 1/100~1/300에 해당되는 함량이었다(Table 1).

이러한 폐기물공정시험법을 실시한 결과를 종합하면 석분토가 다른 사업장 폐기물과 달리 이들 금속원소에 오염되지 않은 것임을 시사한다.

4.1.2. 토양오염공정시험법

골재광산에서 발생하는 석분토가 토양오염을 유발시킬 수 있고 적절한 조치를 취하지 않아 오염의 확산이 예측된다면 이를 방지하기 위한 적절한 조치가 필요하다. 따라서 연구대상 6개 골재광산으로부터 채취한 석분토를 대상으로 토양오염공정시험법의 전처리방법으로 분석을 실시하여 그 결과를 '나' 지역의 토양오염 우려기준 및 대책기준과 비교하여 골재광산에서 발생하는 석분토가 토양오염 확산이 우려되는 오염물질 인지 혹은 대책이 필요한 수준인지를 평가하였다.

토양오염공정시험법으로 분석한 결과, 석분토로부터 용출된 함량이 가장 높았던 원소는 아연이었다(Table 2). 연구대상 6개 골재광산으로부터 채취한 석분토 중 용출된 아연함량이 가장 높은 광산은 양주 삼표광산으로 158

mg/kg이 용출되었으나 이는 토양오염 우려기준 800 mg/kg보다 현저하게 낮은 수준인 것으로 나타났다. 그 외 다른 광산에서 채취한 석분토로부터 용출된 아연 함량은 73~157 mg/kg인 것으로 확인되어 토양오염 우려기준보다 훨씬 낮은 것으로 평가되었다(Table 2). 비소의 경우, 용출된 함량이 가장 높은 것은 대운광산의 석분토로 7.1 mg/kg이 용출되었으나 이는 토양오염 우려기준 20 mg/kg보다 현저하게 낮은 수준인 것으로 나타났다(Table 2). 그 외 다른 석분토 시료들은 0.1~1.3 mg/kg의 낮은 비소함량이 검출되었다. 납은 울산 동명광산의 석분토에서 18.2 mg/kg이 검출되어 분석된 석분토 시료들 중 가장 높은 함량을 보였으나 토양오염 우려기준 400 mg/kg보다 현저하게 낮은 수준인 것으로 나타났다. 그 외 다른 광산에서 채취한 석분토로부터 용출된 납은 0.8~16.7 mg/kg이었다(Table 2). 토양오염공정시험법으로 총 크롬을 분석한 결과, 용출된 총 크롬 함량이 가장 높은 시료는 동명 골재광산에서 채취한 석분토인 것으로 확인되었다. 그러나 이는 토양오염 우려기준 12 mg/kg보다 낮은 3.5 mg/kg이었고 그 외 다른 광산의 석분토는 0.5~1.5 mg/kg의 낮은 함량이 검출되었다(Table 2). 구리의 경우, 연구대상 6개 골재광산으로부터 채취한 석분토 중 용출된 함량이 가장 높은 광산은 군산의 대운광산으로 4.6 mg/kg이 용출되었으나 이는 토양오염 우려기준 200 mg/kg보다 현저하게 낮은 수준인 것으로 나타났다(Table 2). 그 외 다른 광산에서 채취한 석분토로부터 용출된 구리 함량은 0.7~2.9 mg/kg인 것으로 확인되어 토양오염 우려기준에는 훨씬 못 미치는 것으로 평가되었다. 카드뮴은 0.0~0.2 mg/kg이었으며, 이는 토양오염 우려기준 12 mg/kg보다 현저하게 낮은 수준인 것으로 나타났다(Table 2). 따라서 토양오염공정시험법을 실시한 결과, 석분토로부터 비소, 카드뮴, 구리, 크

Table 2. The concentrations of metals by SEPAK methods for the stone-dust

	mg/kg						
	1.0N HCl		0.1N HCl			Aqua regia	
	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	
Warning level	20	12	12	200	400	800	
Action level	50	30	30	500	1000	2000	
Quarries	Daewoon	7.1	0.2	1.5	4.6	7.0	157
	Dongmyeong	1.0	0.1	3.5	2.9	18.2	98
	Sampyo	0.6	0.2	0.5	2.2	13.7	158
	Seoryong	0.5	0.1	0.4	0.7	2.2	130
	Sinhan	0.1	0	0.9	1.5	16.7	73
	Asea	1.3	0.2	1.5	2.8	0.8	88

SEPAK : Soil Environment Preservation Act of Korea

Table 3. The concentrations of metals by the TCLP and SPLP methods for the stone-dust

Regulatory Threshold		mg/L									
		As		Cd		Pb		Cu		Zn	
		5.0	5.0	1.0	1.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
		T	S	T	S	T	S	T	S	T	S
Quarries	Daewoon	0.002	0.002	n.d.	n.d.	0.10	n.d.	0.02	n.d.	0.24	0.02
	Dongmyeong	0.001	0.004	n.d.	n.d.	0.06	n.d.	0.03	n.d.	0.32	0.01
	Sampyo	0.001	0.002	n.d.	n.d.	0.09	n.d.	0.02	n.d.	0.33	0.03
	Seoryong	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.17	n.d.	0.07	n.d.	0.36	0.01
	Sinhan	n.d.	0.004	n.d.	n.d.	0.05	n.d.	0.02	n.d.	0.27	0.01
	Asea	0.001	0.006	n.d.	n.d.	0.26	n.d.	0.09	n.d.	0.57	0.00

T : TCLP, Toxicity characteristic leaching procedure.

S : SPLP, Synthetic precipitation leaching procedure.

n.d. : not detected

름, 납 및 아연에 의한 주변 토양의 오염 우려는 없는 것으로 확인되었다.

4.2. 국외 폐기물공정시험법에 따른 석분토 중금속 함량 오염평가

4.2.1. TCLP(Toxicity Characteristics Leaching Procedure)

미국 EPA의 TCLP는 폐기물에 대한 위생매립지의 오염 침출수를 가정한 EPA SW-846(Method 1311) 분석 방법이다. TCLP 용출실험 결과, 골재광산의 석분토로부터 용출된 비소 함량은 0.000~0.002 mg/L이었고 TCLP 용출실험 규제농도 5.0 mg/L에 비교할 때 현저하게 낮았으며 국내 폐기물관리법 시행규칙에 정해진 1.5 mg/L에 비해서도 매우 낮은 것으로 평가되었다(Table 3). 검출된 납의 함량은 규제농도 5.0 mg/L 보다 훨씬 낮은 0.05~0.26 mg/L의 범위이었고 국내 폐기물관리법 시행규칙에 정해진 3.0 mg/L보다 현저하게 낮았다(Table 3). 카드뮴은 국내 폐기물공정시험법의 결과와 마찬가지로 TCLP 용출 실험에서도 검출되지 않았다. 구리의 경우, TCLP 실험에 의해 검출된 함량이 0.02~0.09 mg/L이었으며(Table 3), 이런 결과는 국내 폐기물관리법 시행규칙에 정해진 3.0 mg/L에 크게 못 미치는 함량이다. 아연의 경우는 폐기물관리법에 규정된 유해물질이 아니라, 석분토로부터 용출된 함량이 0.24~0.57 mg/L로 매우 낮은 함량만이 용출되었다. TCLP 용출실험 방법으로 연구한 결과를 종합하면, 모든 석분토로부터 비소, 카드뮴, 구리 및 납 함량은 검출되지 않았거나(예: 카드뮴) 혹은 국내 폐기물관리법의 규제함량(폐기물관리법 시행규칙)보다 월등하게 낮은 함량만이 검출되었다. 이는 석분토가 매립처분 시 유해한 성분을 함유한 침출수를 발생시킬 우려는 없는 것임을 시사한다.

4.2.2. SPLP(Synthetic Precipitation Leaching Procedure)

SPLP는 1980년 후반에 EPA에 의해 산성강우 현상을 가정하여 오염물 아래의 지하수면에 대한 독성 유기물과 무기 토양오염물의 이동도를 결정하기 위해 고안되어진 EPA SW-846(Method 1312) 분석방법이다. 규제 농도 기준은 TCLP 기준처럼 명확하게 정의되어지지 않아 기준치 비교 연구를 위해 국내 폐기물관리법 기준치 및 TCLP 규제농도와 비교하였다.

SPLP 분석 결과, 골재광산의 석분토로부터 카드뮴, 구리 및 납은 용출되지 않았다. 비소의 용출된 함량은 0.000~0.006 mg/L으로 국내 폐기물관리법 기준치(As 1.5 mg/L)에 현저하게 낮은 함량으로 평가되었다. 아연의 석분토로부터 용출된 함량은 0.00~0.03 mg/L로 매우 낮은 함량만이 용출되었다(Table 3). SPLP 용출실험 후 용출된 함량을 TCLP 규제농도와도 비교한 결과, 검출된 비소의 최대 함량은 TCLP 용출실험 규제농도(5.0 mg/L)의 약 1/833에 해당하는 현저하게 낮은 함량이었다. 이러한 결과는 석분토가 산성비 혹은 지표수와 반응하여 용출된 중금속 원소가 지하수 오염을 발생시키지 않는 것으로 평가된다.

4.3. 반응시간에 따른 용출분석

채석현장에서 석분토를 장기간 보관할 경우 스며든 빗물과 석분토가 오랜 기간 동안 반응하여 발생하는 침출수가 지표수 및 지하수를 오염시킬 가능성에 대한 정량적인 평가가 필요하다. 따라서 반응시간을 달리한 용출실험을 실시하여 시간에 따른 중금속 등 오염물질의 용출 농도가 증가하는지에 대한 여부를 알아보려고 하였다. pH를 5와 3으로 고정시키고 각각의 pH 조건에서 반응시간을 1, 4, 7, 14, 21, 30 및 60일로 변화시키면서 용출실험을 수행하였다.

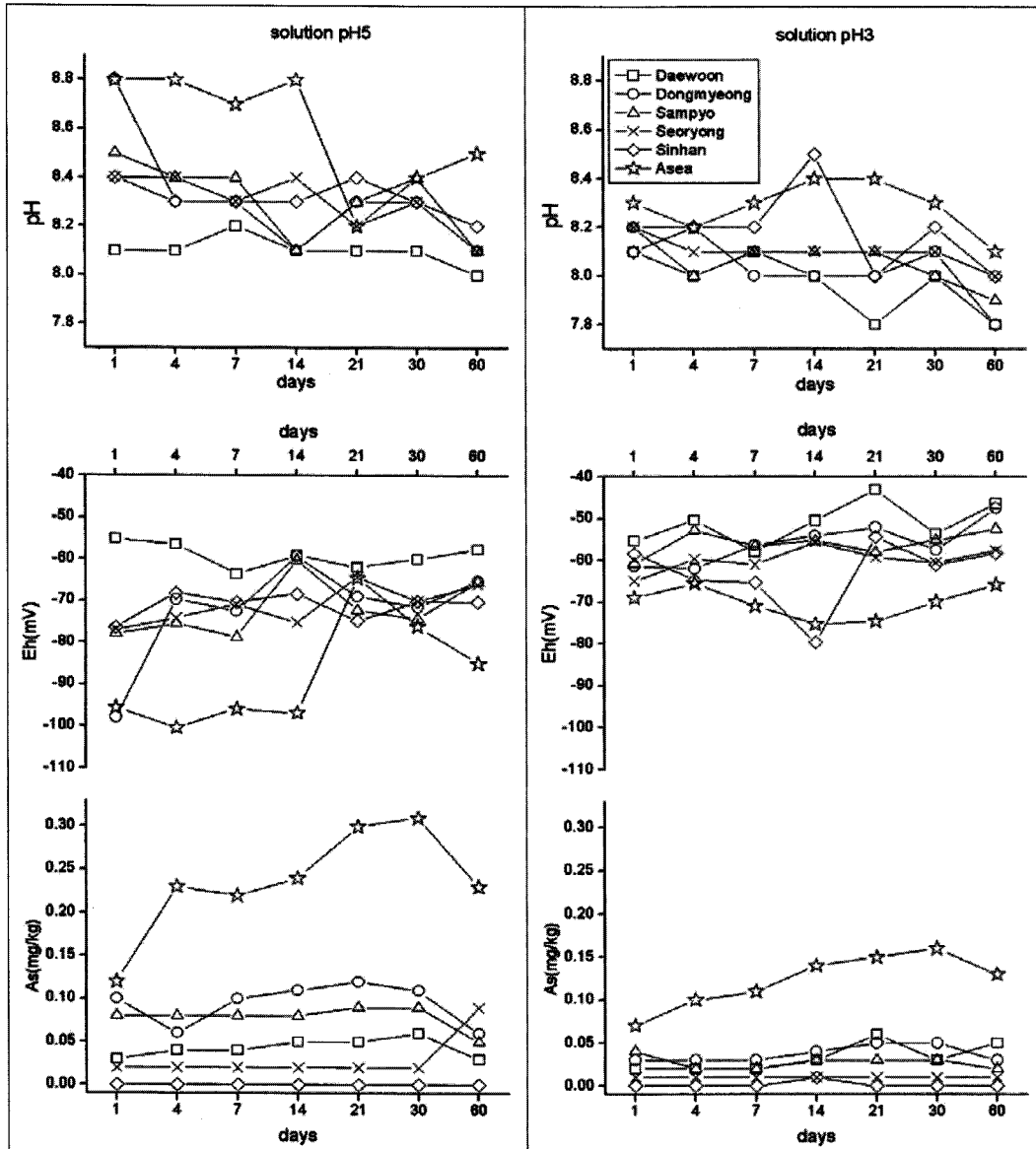


Fig. 2. Final pH and Eh variation and the concentrations of extractable As (mg/L of sample leached) with pH 5 and pH 3 solution as a function of leaching time.

반응시간에 따른 용출실험 결과, 석분토는 pH 5의 산성 용액과 반응하여 반응시간 1일 후 최종 pH 값은 8.1~8.8의 알칼리 값을 보였고 60일 이후에는 8.0-8.5의 범위로 약간 감소하는 경향이 관찰되었다(Fig. 2). pH 3의 산성 용액과 1일 동안 반응 후 최종 pH는 1일 후 8.1~8.3이었고 60일 이후에는 7.8-8.1로 미약하게 감소하였으나 모두 알칼리성을 유지하고 있었다(Fig. 2). 이는 석분토가 산성용액과 반응할 경우 pH에 대해 완충역할을 하는 것으로 확인되었다. Eh 값은 1일 후 pH 5와 3에서 각각 -95.5 mV ~ -55.1 mV와 -69.0 mV ~ 55.4 mV이었고 60일 이후 각각 -84.9 mV ~ -57.6 mV와 -65.8 mV ~

-46.4 mV로 야간 상승하는 경향을 보였다(Fig. 2).

석분토를 pH 5와 3의 반응용액과 반응시간을 1, 4, 7, 14, 21, 30 및 60일로 변화시키면서 용출실험을 수행한 결과 골재광산의 석분토로부터 용출이 잘되는 원소가 비소인 것으로 밝혀졌다. 6개 연구대상 광산 중 비소의 용출함량이 가장 높았던 광산은 공주 아세이광산으로 pH 5의 반응용액과 반응 1일 후 검출된 함량이 0.012 mg/L이었으나 반응시간이 증가됨에 따라 용출된 함량이 지속적으로 증가되는 용출특성이 관찰되었다(Fig. 2). 반응 30일째에 검출된 함량이 0.031 mg/L로 최대 검출함량에 도달하였으나 반응 60일째에는 검출된 함량이 다소 감소하여

Table 4. The concentrations of metals with pH 5 and pH 3 solution as a function of leaching time

Quarries	Days	mg/L											
		Initial pH 5						Initial pH 3					
		Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As
Daewoon	1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002
	4	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.004	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002
	7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.004	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002
	14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.005	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003
	21	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.005	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.006
	30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.006	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003
	60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.005
Dongmyeong	1	0.01	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	0.010	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003
	4	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	0.006	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003
	7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.010	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003
	14	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	0.011	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.004
	21	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.012	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.005
	30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.011	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.005
	60	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.006	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003
Sampyo	1	0.01	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	0.008	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.004
	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.008	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002
	7	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.008	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002
	14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.008	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003
	21	n.d.	n.d.	0.01	n.d.	n.d.	0.009	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003
	30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.009	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.003
	60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.005	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002
Seoryong	1	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.001
	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.001
	7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.001
	14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.001
	21	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.001
	30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.001
	60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.009	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.001
Sinhan	1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.001
	21	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Asea	1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.012	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.007
	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.023	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.010
	7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.022	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.011
	14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.024	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.014
	21	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.030	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.015
	30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.031	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.016
	60	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.023	0.01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.013

n.d. : not detected

0.023 mg/L이었다(Table 4). 이러한 경향은 pH 3의 반응 용액과 반응 후에서도 관찰되는데 반응 1일 후 검출된 비

소 함량은 0.007 mg/L이었으나 반응시간이 증가됨에 따라 용출된 함량이 지속적으로 증가되는 용출특성이 관찰되었

으며, 반응 30일 째에 검출된 함량이 0.016 mg/L로 가장 높은 검출함량에 도달하였으나 반응 60일째에는 검출된 함량이 다소 감소하여 0.013 mg/L이었다(Fig. 2). 그러나 공주 아세아광산으로부터 용출된 모든 비소함량은 먹는 물의 수질기준(0.05 mg/L), 하천수 수질기준 중 사람의 건강보호기준(0.05 mg/L), 오염물질 배출 허용기준의 청정지역(0.1 mg/L) 및 지하수 수질 기준의 생활용수기준(0.05 mg/L)보다 낮은 것으로 나타났다. 이런 결과는 공주 아세아광산의 주변 지표수 혹은 지하수 수질 오염에 직접적인 영향을 주지 않을 것으로 해석된다. 대운광산, 동명광산 및 삼포광산의 석분토는 pH 5의 반응용액과 1일 반응 후 각각 0.003 mg/L, 0.01 mg/L 및 0.08 mg/L이 용출되었고 반응일 30일까지 미약하게 증가하다가 반응일 60일 이후에는 각각 0.003 mg/L, 0.006 mg/L 및 0.005 mg/L로 감소하였다(Table 4). pH 3의 반응용액과 반응 후 검출된 비소함량(0.002~0.006 mg/L)은 pH 5의 반응용액과 반응한 실험결과에서 검출된 비소함량(0.003~0.012 mg/L)보다 낮은 것으로 나타났다(Fig. 2). pH 5와 pH 3의 반응용액과 반응 후, 이들 석분토에서 검출된 모든 비소함량은 먹는 물의 수질기준, 하천수 수질기준 중 사람의 건강보호기준, 오염물질 배출 허용기준의 청정지역 및 지하수 수질기준의 생활용수기준 보다 현저하게 낮았다.

비소 이외의 다른 중금속 원소의 용출특성을 보면 pH 5의 용출용액과 실시한 용출실험의 결과, 구리와 아연이 일부 골재광산의 석분토에서 용출되는 것으로 나타났으며, 용출된 최대 함량은 0.01 mg/L이었고 납, 크롬 및 카드뮴은 전혀 용출이 되지 않는 것으로 나타났다(Table 4).

pH 3의 용출용액과 석분토를 1~60일까지 용출실험을 실시한 결과에서도 pH 5의 용출용액과 실시한 용출실험의 결과와 마찬가지로, 구리 이외의 납, 아연, 크롬 및 카드뮴 등 중금속 원소의 용출은 발생하지 않은 것으로 확인되었다(Table 4). 이로써 pH가 낮은 환경에서도 석분토로부터 이들 중금속 원소의 용출반응이 발생하지 않는 것으로 판단된다. 구리가 일부 골재광산의 석분토에서 용출되는 것으로 나타났으나 용출된 최대 함량은 0.01 mg/L이었다(Table 4). 따라서 골재광산에서 발생하는 석분토를 장기간 현장에 보관한다고 하여도 납, 크롬, 카드뮴, 구리 및 아연 등 중금속 원소의 용출에 의한 지표수 및 지하수 오염문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이번 연구에서 골재광산의 석분토를 대상으로 용출실험

을 통한 중금속의 오염 확산 여부를 평가하였다. 폐기물 공정시험법과 토양오염공정시험법을 실시한 결과, 비소, 카드뮴, 구리, 납, 아연, 6가 크롬, 수은 및 시안은 용출되지 않거나 각각의 시행규칙에 정해진 기준치보다 현저하게 낮은 함량만이 검출되었다. 독성물질 용출시험(TCLP)과 인공강우 용출시험(SPLP) 결과, 비소, 카드뮴, 구리, 납 및 아연은 용출되지 않거나 각각 기준치 이하의 함량이 검출되었다. 또한 반응시간에 따른 용출실험 결과에서도, 석분토는 산성용액과 반응할 경우 pH에 대해 완충역할을 하는 것으로 확인되었다. 용출된 중금속은 일부 시료에서 검출된 구리를 제외하고 비소만이 용출되었으며 카드뮴, 크롬, 납 및 아연은 검출되지 않았다. 비소는 일부 시료에서 반응일 30일까지 증가하는 경향을 보였으나 반응일 60일 이후에는 감소하는 것으로 나타났고 검출된 함량은 매우 미약하였다. 국내·외 용출실험 결과를 종합하면 석분토 자체가 주변 토양과 지표수 및 지하수 등 수계환경에 오염을 유발시킬 수 있는 오염물질이 아니라는 것이 확인되었다. 이는 석분토는 원암을 분쇄하는 과정에서 발생한 미세한 분말로서 일반적인 사업장에서 발생하는 금속을 다량 함유한 무기성오니와는 다르다는 것을 지시하고 있으며, 궁극적으로는 석분토가 폐기물로 보기 어렵다는 것을 지시한다. 석분토는 일반 사업폐기물과 달리 중금속에 오염되어 있지 않고 침출수가 발생되지 않으므로, 사업장 내에 장기간 지표에 적치 보관과 폐기물 처리시설 이외의 예외적 매립시설에 단순 매립할 수 있도록 폐기물관리법상 규정의 개정이 요구된다. 또한 석분토가 다른 사업장 폐기물과 다르게 주변 환경에 오염을 유발시키지 않고 사람의 건강과 동·식물의 생육에 지장을 초래하지 않는 것이 확인된다면 골재광산 자체에 복구매립용으로 재이용할 경우, 국내 폐기물관리법에 적용되는 관련 법규를 예외적으로 완화하도록 하는 것이 필요하다.

사 사

이 연구는 한국골재협회 수탁사업(석분토의 특성 및 활용방안을 위한 연구, IP2005-009-2006(1))의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

이평구, 염승준, 홍세선, 김경수, 윤현수, 음철현, 신성천, 김원영, 박성원, 강민주, 연구훈, 이욱중, 2006, 석분토의 특성 및 활용방안을 위한 연구, 한국골재협회, p. 391.

환경부, 2003a, 폐기물공정시험방법

환경부, 2003b, 폐기물관리법

환경부, 2003c, 폐기물관리법시행령

환경부, 2002, 토양오염공정시험방법

EPA, 1992, Toxicity characteristic leaching procedure, SW846,

Method 1311, <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1311.pdf>, p. 35.

EPA, 1994, Synthetic precipitation leaching procedure, SW846, Method 1312, <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1312.pdf>, p. 30.