

폐주물사의 성토재로서의 토양위해성 평가

정경원* · 김광수 · 서윤하

폐기물분석과

Study on Soil Risk Assessment of Waste Foundry Sand for Filling Materials

Kyung-Won Jung*, Kwang-Soo Kim and Yun-Ha Seo

Industral waste analysis division

Abstract

The WFS(Waste Foundry Sand) generated from casting iron has been disposed in landfill site as industrial wastes and it was occasionally dumped illegally in open space. It has own color identified easily as industrial wastes. And dweller living around landfill site insisted on not using WFS as recycling fill or cover materials in landfill site. This study was performed to estimate the usage of it as recycling fill or cover materials by investigating physical and chemical characteristics of the WFS. And the effect of heavy metals was also investigated after disposing WFS in landfill site by comparing pretreatment methods described in Control Act and in Soil Environment Conservation Act.

Key Words: Waste Foundry Sand, industrial wastes, fill and cover materials, Waste Control Act, Soil Environment Conservation Act

서론

우리나라 전체적으로 주물생산 업체수는 2002년 기준 전국에 약 700업체로서 이는 한국주물공업협동조합이 중심이 되어 협동화, 공동화, 집단화 등의 공장형태로 주물전문공단 조성을 추진하여 일차적으로 인천시 서구 경서동에 '85년부터 44개 업체가 입주를 시작하였으며, 부산 사상지역은 '84년도에 주물단지 추진위원회를 구성하여 1990년부터 입주를 시작하였다.

위와 같은 주물공단 외에도 경기도 김포군, 부천시, 화성군, 안산공단 등 공단에 입주하지 않은 주물공단 업체 등을 포함하여 이들 업체에서 발생하는 폐주물사는 2004년 현재 연간 약 4,000t에 발생되고 있으며 이중 75%는 재활용되며 나머지 25%는 매립되고 있는 실정이다.¹⁾

사업장에서 발생하는 주물사는 Fe과 다른 비금속을 함유하여 주물을 일정형태로 만들고 난 뒤 발생하는 폐기물로 Cu 및 Zn 등의 중금속이 함유된 폐기물이다. 그러나 주물사의 주성분은 모래성분이 SiO₂성분으로 일반폐기물로 매립되고 있는 실정이다. 또한 폐주물사의 처리비용은 12,000~20,000원으로 주물사의 원사 가격 대비 처리비용이 30% 이상을 차지하여 재활용이 많이 이루지고 있으나 일부는 아직 매립되고 있는 실정이다. 또한 지정폐기물로 판정된 폐주물사는 전량 매립 처리되고 있어 토양성토재의 부족현상을 겪고 있는 전국의 토

목현장에서 폐기물 발생량의 감소 및 재이용 측면에서 부가가치가 높을 것으로 사료된다.²⁾

주물사는 약 90% 이상이 모래성분(SiO₂)으로 구성되어 있으며 또한 주물의 일정형태를 유지시키기 위한 주물사의 점도를 위해 약 5%의 벤토나이트(bentonite)와 주물과 주물사의 이형재(異型材)역할을 하는 석탄가루가 약 2%로 구성되어 있다.³⁾ 이 이형재 역할을 하는 석탄가루의 색깔이 검정색으로서 주물사와 혼합되었을 때 검정색을 띄게 된다. 이러한 이유로 성토재로 재활용되었을 경우 색깔로 인한 민원인의 거부감이 생겨 다수의 민원을 발생시키는 원인이 되기도 한다.

따라서 본 연구에서는 사업장에서 발생하는 폐주물사가 주변토양에 미칠 수 있는 영향을 현행 폐기물관리법(용출시험)과 토양환경보전법(함유시험)을 통해 주변토양에 미치는 영향을 예측하고 성토재로 재활용할 경우 토목학적 시험을 통해 지반 안정도에 미치는 영향을 검토해 보았다.

폐주물사의 일반적인 특성

폐주물사는 크게 점토점결과 화학점결로 분류되며 현행은 점토점결만이 성토재로 재활용 할 경우 일반토양을 50%이상 혼합하여 성토할 수 있게끔 되어 있다. 이 점토점결 폐주물사는 생형법(Green sand casting)으로 사용되는 모래로 화학점결과 달리 한번 사용된 이후 재생이 거의 불가능하며, 광택이 없

* Corresponding author. E-Mail: jkw1187@hanmail.net
Phone: 051-757-6936, Fax: 051-757-7505

Table 1. Use and section by WFS(Waste Foundry Sand)³⁾

Items	Name	Application material and use	Mixing material and ratio	Classification method			
				Color before mdding	Color after mdding	Gloss	Moisture
Clay coking-WFS	Green sand mold	Using mold of cast iron	Silica sand : 93% Bentonite : 5% Coal powder : 2%	Black	Black	None	Done
	Gas hardening cast	Using mold of cast iron, cast steel	Silica sand : 91% Silicic acid soda:9% CO ₂ : little amount	Yellow/White	Yellow/White	None	None
Chemistry coking-WFS	Self-hardening cast	Using mold of cast iron, cast steel	Silica sand : 96% Furan resin : 3% Hardening material :1%	Black	Black	Done	None
	Themosetting mold	Using mold of cast iron, cast steel	Silica sand : 98% Penol resin : 2% Hardening material (hexamine):micro	Yellow	Black	Done	None

고 수분을 약간 함유하고 있어 손으로 잡았을 경우 그 형태가 일정시간 유지되는 것이 화학점결과 다른 점이다. 또한 생사(生砂), 고압(高壓), 정압조형(靜壓造型) 등으로 사용되고 있고 주철의 주형의 제조 때 주로 사용되고 있어 이형제의 입자는 매우 미세하고 경제성 또한 갖추어야 한다.³⁾

Table 1은 폐주물사의 일반적인 분류 및 그에 따른 용도 및 특성을 나타낸 것으로 점토점결과 화학점결의 가장 큰 차이점은 색깔과 함수율에 있으며, 화학점결과 다르게 점토점결은 주형 cast의 점도를 높이기 위해 고령토(bentonite)와 석탄가루를 사용한다.

한편 폐주물사가 토양으로 성토되었을 경우 토양환경보전법의 토양우려기준에 적합한 기준을 만족시키기 위하여 정형화된 배합비율이 필요할 것으로 사료되며, 폐기물을 성토재로 재활용할 경우 표준화된 시험법 정립이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 사업장 폐기물로 발생하는 폐주물사를 토양 성토재로 재활용할 경우 표준화된 시험법 제시 및 시험항목을 제시하여 추후 토양에 미치는 영향을 고려한 폐기물별 재활용 방법 제시와 위해성 평가를 하기 위한 기초 자료로서 활용될 가능성이 있을 것으로 사료된다.

실험재료 및 방법

폐기물 실험

용출대상 폐기물 : 본 연구에서 사용한 폐주물사는 부산 사창구에 위치한 폐주물사 재활용 사업장으로 Fig. 1과 같이 입도 분석 결과 토양의 분류(USCS : Unified Soil Classification System)⁴⁾ 방법에 의해 SP-SM으로 Silt를 함유한 Sand로 분류되었으며 최적함수비(Optimum moisture content(O.M.C),%) 14%일때 최대건조밀도(Maximum dry density($r_{dm\max}$), g/cm³)는 1.73으로 나타났다. 그리고 토목학적 물성분석 결과 비중(Specific gravity,

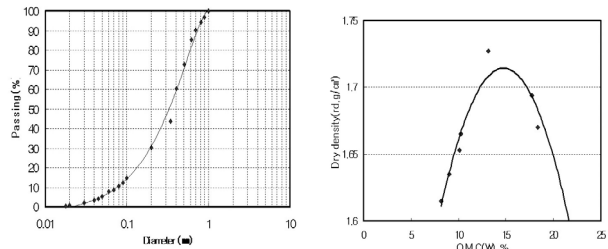


Fig. 1. Particle size distribution curve and optimum density for moisture content.

KS F2308) 2.55, 액·소성한계시험(Liquidity·Plasticity limit, KS F2303/ KS F2304)⁵⁾에서 비소성(Non-plasticity)으로 나타났으며, 균등계수(Uniformity coefficient, Cu) 12.55, 곡률계수(Curvature coefficient, Cg) 4.9로 입도분포가 균일하며 성토재로서의 안정화에 도움이 될 것으로 판단된다. Table 2는 폐주물사의 물리적 특성을 나타내었다.

Fig. 2는 실험에서 사용한 폐주물사로 육안으로 확인한 바 검은색을 띄었으며, 6시간 용출 후에도 그 상등액이 검은색을 띄었다.

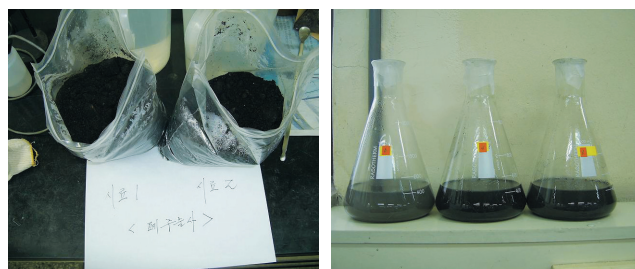


Fig. 2. Picture of sample(Waste Foundry Sand).

Table 2. Physical specification of waste foundry sand

Test items		Results	Soil texture(USCS)
Specific gravity		2.55	SM
Liquidity limit		Non-plasticity	
Plasticity limit		Non-plasticity	
Permeability coefficient k[cm/sec]		1.81×10^{-5}	
Maximum dry density(ρ_{dmax}) [g/cm ³]		1.73	
Rod tamping	Optimum moisture content(O.M.C.) [%]	14	
Mechanical analysis	Passing # 4sieve [%]	96.25	
	Passing # 200sieve [%]	15.46	
	D ₁₅ , mm	0.0075	
	D ₈₅ , mm	0.4435	
	Uniformity coefficient, C _u	12.55	
	Curvature coefficient, C _g	4.9	

Table 3. Comparison of KSLT^{*)} and KSST^{**)}

Items	KSLT*	KSST**
Application	As classifying waste	Analysis of contaminants in soil
Sample amount(g)	50	10
Partical size(mm)	<5	<2
Extraction solvents	DW+HCl	0.1N HCl
Instrument	Horizon round shaker	Thermo-horizon shaker
Extraction pH	5.8~6.3	<1.0
Sample & extraction ratio	1:10	1:5
Temperature(°C)	Room temperature	Room temperature
Extraction time(hr)	6	1
Extraction condition	200rpm	100rpm

* KSLT : Korean Standard Leaching Test

** KSST : Korean Standard Soil Test

실험방법

조사 대상 폐기물의 시료는 우리나라 폐기물 공정시험방법에 준하여 채취하였으며, 용출 및 함유시험방법은 각각 폐기물 공정시험법과 토양환경보전법상의 KSLT와 KSST를 기초로 하여 pH변화에 따른 중금속(As, Hg, Cd, Cu, Pb, Cr, CN)과 양·음이온(Na⁺, NH⁴⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻)의 농도변화를 각각 AAS(Atomic Absorption Spectrophotometry, SpectraAA 220FS, Varian) 및 양·음이온은 IC(Ion Chromatogram, DX-12, DIONEX)로 분석하여 그에 대한 상관성(Correlations, R²)과 실측치(Measured concentration)와 예측치(Predicted concentration)를 다중회귀식(SPSS)으로 검토하였다.

폐기물관리법과 토양환경보전법의 비교실험

동일시료에 대한 비교실험을 통해 폐기물관리법과 토양환경보전법상의 폐기물에 대한 용출농도를 비교함으로써 일반폐기물의 성토재로 재활용 시 토양환경보전법에 어느 정도 기준을 초과하는 지를 알아보기 위한 실험을 실시하였다.

Table 3은 폐기물관리법과 토양환경보전법의 실험법을 비교한 표로서 두 법의 큰 차이는 용출용매가 각각 증류수(Distilled water, pH 5.8~6.3)와 0.1N HCl으로 폐기물관

리법은 강우에 의한 중금속의 용출정도를 알아보는 실험인 반면 토양환경보전법은 토양으로 성토된 이후 여러 가지 조건에 의해 지속적인 중금속의 용출정도를 알아보는 실험이다.

결과 및 고찰

본 실험결과 2가지 시료에서 폐기물공정시험법 제2장의 폐기물분석방법에 준하여 실험한 결과 Table 5와 같이 지정폐기물 유해물질 함유기준을 초과하지 않아 일반폐기물로 판정되었다.

또한 동일 시료에 대해 토양보전법에 의한 분석을 실시한 결과 일반폐기물로 판정이 난 경우라도 토양오염공정시험법으로 분석할 경우 토양오염우려기준을 초과하는 경우가 있어 본 연구에서는 사업장 일반폐기물로 분류된 폐주물사를 폐기물관리법과 토양환경보전법으로 동시에 분석을 실시하여 그 오염도를 비교분석하였다.

폐주물사의 재활용 전·후의 유해중금속 농도변화

본 실험에서는 폐기물로서의 폐주물사 및 토양으로의 재활용 개념에 관한 2가지 관점에서 시험분석을 실시하였다. 즉 폐주물사는 사업장에서 배출 당시 사업장 폐기물로 배출되므로서 토양으로 재활용할 때 유해중금속의 용출농도 및 그 유해성

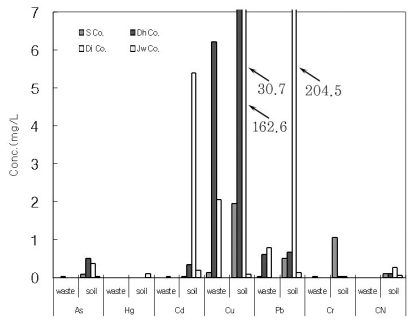


Fig. 3. Concentration of heavy metals in waste foundry sands.

이 정확하게 규명되지 않아 재활용에 따른 주민인식 부족 및 막대한 폐기물에 대한 불신감을 해소하는 차원에서 이번 연구 사업을 실시하였다.

Fig. 3은 재활용하기전의 대상 폐주물사에 대해 각각 폐기물과 토양환경보전법에 준하여 시험한 결과로 $Pb > Cu > Cd > Cr > As > CN$ 의 순으로 폐기물공정시험법보다 토양환경보전법에 의한 결과 값이 높게 나타났다. 또한 Pb, Cu, Cd 순으로 폐기물법에 의한 용출실험보다 토양법의 함유실험의 농도가 약 80~250배 정도 높게 나타났다.

진탕시간별 pH 및 양·음이온 변화

폐기물관리법에 의한 용출용매의 pH는 진탕 전 5.8~6.3으로 조정 후 1:10(W/V%)의 비율로 폐기물과 용출용매를 혼합

한 후 6시간 진탕을 하며, 토양환경보전법은 0.1N HCl의 용출용매를 이용하여 1시간 항온수조에서 진탕을 한다. 따라서 진탕시간이 경과함에 따라 중금속의 탈착농도를 알아보기 위하여 시간변화에 따른 pH 변화 및 그에 따른 양이온(Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) 및 음이온(SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-)농도변화와 상관성을 조사하였으며 두 법의 농도차이 또한 조사하였다.

먼저 DW를 약산으로 조정한 후 중금속을 용출하는 폐기물 공정시험법의 경우 Na^+ 의 농도가 가장 높게 나타났으며, 진탕 2시간과 4시간 이후 Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ 이 각각 증가하기 시작하였다. 이는 진탕시간이 경과함에 따라 중금속의 용출이 증가함으로써 다른 물질과 결합되어 있던 양이온들이 분리됨으로서 농도가 증가하는 것으로 판단된다. 양이온 중 가장 높은 농도를 나타낸 Na^+ 의 경우 5시간 7%, 6시간 11%가 증가함으로써 시간과 pH농도와의 상관성이 있는 것으로 사료된다.

진탕시간에 따른 pH변화와 그에 따른 양이온의 농도변화를 살펴보면 진탕 4시간 이후 용출용매의 변화가 가장 크게 나타났으며, 그에 따른 양이온의 농도변화도 발생하였다. 양이온 중 가장 높은 농도는 나트륨(Na^+)이온으로 진탕초기 약 155 mg/L에서 진탕 4시간 이후 165 mg/L으로 약 6%증가됨으로써 pH가 떨어짐에 따라 나트륨(Na^+)이온의 농도도 증가하는 것으로 나타났다. 폐주물사에서 가장 많은 농도를 차지하는 Na^+ 의 경우 용출 4시간 이후 pH가 변화하면서 Na^+ 의 농도도 증가하는 것으로 나타났으며, Mg^{2+} 과 Ca^{2+} 의 경우 용출 2시간 이후 농도가 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

음이온의 경우 황산염 이온(SO_4^{2-})과 질산염 이온(NO_3^-)은

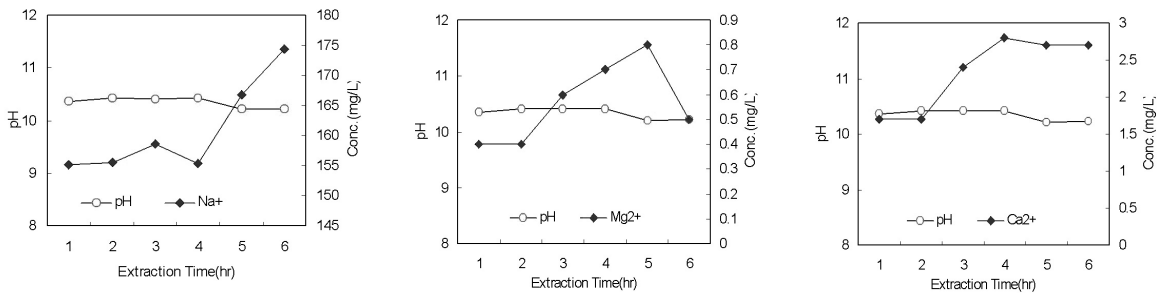


Fig. 4. Variation of cation concentration and pH depending on extraction time.

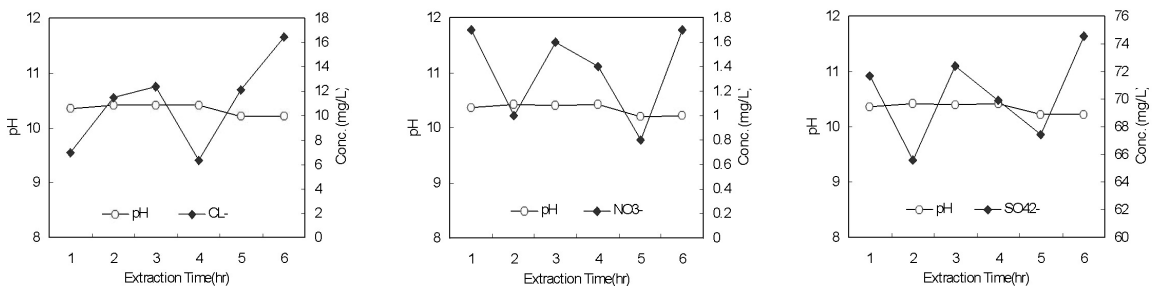


Fig. 5. Variation of anion concentration and pH depending on extraction time.

Table 4. Correlations of heavy metals for pH variation

		Correlations							
Items		pH	Pb	Cu	Cd	Cr	As	Hg	CN
pH	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	1							
Pb	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	-0.708 0.116	1						
Cu	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	-0.759 0.080	0.982** 0.000	1					
Cd	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	0.327 0.527	-0.232 0.659	-0.189 0.720	1				
Cr	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	-0.761 0.079	0.907* 0.013	0.965** 0.002	-0.009 0.986	1			
As	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	-0.809 0.051	0.613 0.196	0.693 0.127	0.220 0.675	0.820* 0.046	1		
Hg	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	-0.591 0.216	0.899* 0.015	0.807 0.052	-0.412 0.417	0.639 0.172	0.349 0.497	1	
CN	Pearson Correlation Sig. (2-tailed)	-0.553 0.255	0.842* 0.035	0.907* 0.013	0.116 0.827	0.944** 0.005	0.653 0.160	0.544 0.264	1

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)
 ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

농도의 변화가 심하였으나 대체적으로 진탕 5시간이후 그 농도가 증가하였으며, 염소이온(Cl⁻)은 4시간 이후 그 농도가 증가하는 것으로 나타났다.

다중회귀식을 이용한 중금속과 이온 간의 상관성 및 용출농도 예측

pH변화에 따른 중금속별 용출농도와의 상관성 분석에서 As, Cr이 각각 -0.809, -0.761로 타 중금속보다 다소 높은 상관성을 나타내었으나, 그 농도가 극히 미량이고 pH변화에 따른 농도변화가 적어 성토이후 용출농도가 많고 변화가 큰 Cu(R²=-0.759)와 Pb(R²=-0.708)에 의한 영향이 클 것으로 판단된다. Table 4는 폐주물사에서 검출된 중금속의 농도를 pH와의 상관성을 다중회귀식(SPSS)을 통해 검토한 결과 중금

속간의 상관성(Pearson Correlation, R²)이 가장 높은 항목은 Cu와 Pb (R²=0.982), Pb와 Cr(R²=0.907)으로 폐주물사의 경우 Cu 및 Pb, Cd 등이 함유된 주물이 주물사에 흡착되는 것으로 판단된다.

Table 5는 As, Hg, CN을 제외한(농도변화가 거의 없고 미량으로 회귀분석에서 제외) Pb, Cu, Cd, Cr에 대한 양이온(Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)과의 상관성을 다중회귀식(SPSS)으로 나타내었다. 양이온별 중금속과의 상관성에서 Cu와 Pb이 나트륨(Na⁺)과의 상관성이 높은 것(다중회귀분석치가 0.05이하)으로 나타났다. 따라서 시간경과에 따라 Cu와 Pb의 용출농도 증가에 따른 나트륨(Na⁺)이온의 증가가 예상된다.

Table 6은 양이온과 동일한 방법으로 중금속에 대한 음이온(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)과의 상관성을 다중회귀식(SPSS)으로 검토

Table 5. Multiple regression formulas using cation(Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) for Pb, Cu, Cd, Cr

Y(Conc./cation) = Constant + a Na ⁺ + b K ⁺ + c Mg ²⁺ + d Ca ²⁺ + SE							[N=6]
Item	Constant	a	b	c	d	SE*	
Pb	0.123	0.002	-0.020	-0.055	0.052	0.320	
Cu	-1.964	0.029	-0.165	-0.186	0.535	2.527	
Cd	0.059	0.000	-0.005	-0.016	0.001	0.138	
Cr	0.136	0.005	-0.016	-0.025	0.063	0.032	

* SE : Standard Error

Table 6. Multiple regression formulas using anion(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) for Pb, Cu, Cd, Cr

Y(Conc./anion) = Constant + a Cl ⁻ + b NO ₃ ⁻ + c SO ₄ ²⁻ + SE						[N=6]
Item	Constant	a	b	c	SE*	
Pb	1.687	0.003	0.200	-0.022	0.938	
Cu	17.216	0.048	2.503	-0.253	11.583	
Cd	0.017	0.000	0.009	0.000	0.186	
Cr	2.410	0.007	0.316	-0.028	1.371	

* SE : Standard Error

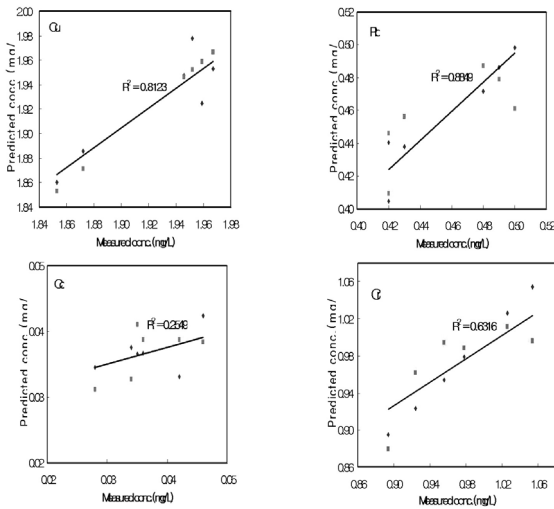


Fig. 6. Plots of measured versus predicted concentration of heavy metals by using multi-regression formulas.

한 결과 음이온별 중금속과의 상관성에서 Cu와 Pb이 염소이온(Cl⁻)과의 상관성이 높았으며, 황산염이온(SO₄²⁻, NO₃⁻) 등은 미량의 농도변화를 보여 상관성이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

따라서 양·음이온과 중금속의 상관성을 보여주는 수치로서 Cu와 Pb이 각각 Na⁺, Cl⁻에서 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 상대적으로 Cd, Cr은 상관성이 낮을 것으로 나타났다. 또한 진탕시간이 진행될수록 K⁺, SO₄²⁻ 이온은 조금씩 감소함으로써 진탕초기 중금속 용출에 따른 양·음이온의 농도증가가 대부분의 항목에서 적용되는 것은 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

한편, Fig. 6은 Cu, Pb, Cd, Cr에 대해 실측치와 예측치를 다중회귀분석에 의한 비교하면 Cu, Pb의 결정계수(R²)가 각각 0.812, 0.885로 Cd, Cr(R²=0.255, 0.632)보다 높았으며, 나트륨과 염소이온(Na⁺, Cl⁻)은 폐주물사가 성토재로 매립되었을 시 시간경과에 따른 용출농도변화에 상관성이 높은 것으로 나타났다.

폐주물사의 성토재 및 복토재로서의 재활용 가능성 검토

Fig. 7는 현재 폐주물사를 성토재로 사용하는 현장의 사진으로 부산의 S업체를 대상으로 현재 재활용되고 있는 폐주물



Fig. 7. Scene of recycling waste foundry sand as filling soil.

사를 중심으로 현장에서 직접 성토되고 있는 시료와 성토 이후 일정기간이 지난 시료를 채취하여 폐기물관리법 및 토양환경보전법에 따라 분석을 하였으며, 대상 시료의 액·소성한계를 시험하여 성토·복토재로서의 가능성을 검토하였다.

성토재의 조건으로는 분해능(decomposition)이 없어야 하며 또한 압축강도 및 중금속 등 오염물질의 누출 가능성도 없어야 한다. 또한 액·소성한계 등에서 각각 50%, 25%미만과 비소성이 되어야만 성토재로서 적합하다고 할 수 있다.⁹⁾ 이러한 면에서 볼 때 폐주물사는 여러 조건을 만족하며 성토재로서의 재활용 가능성이 충분하게 있다고 사료된다. Table 5는 폐주물사를 성토재로서의 적합성 여부를 검토한 결과로 투수성 및 액·소성한계실험에서 적합한 것으로 나타났다.

폐주물사의 물리적 특성실험에서도 투수계수(Permeability coefficient k) 1.81×10⁻⁵ cm/sec으로 매립장의 차수재에 요구되는 투수성 1.0×10⁻⁷ cm/sec⁹⁾에 근접하며 균등계수(Cu)와 곡률계수(Cg)를 조사해 보면 12.55, 4.9로 미사토에 해당하는 물리적 특성을 지니고 있어 성토재로 적합하며, 실트(silt)나 점토(clay)와 같은 점도가 높은 토양과 적정비율로 혼합하여 차수재로 사용하면 좋을 것으로 판단된다.

폐주물사의 유해물질에 대한 위해성 검토

폐주물사를 성토재로 재활용할 때 주변토양에 미치는 영향을 조사하기 위하여 현재 양산시 원동면의 성토장을 중심으로 본 연구사업의 폐주물사가 재이용되는 현장을 중심으로 시료를 채취하였다. 현재 폐주물사를 성토재로 재활용할 경우 환경부예규 제245호(2004.09.16) 『폐기물재활용신고업무처리지침, 환경부』에 의거 일반토양(오염되지 않는 토양) 50%이상을 혼합하여 토양오염우려기준에 적합한 지 여부를 검토하도록

Table 7. Use and section by WFS(Waste Foundry Sand)³⁾

	Test items	Specification	Results	Compatibility condition
Mechanical analysis	Passing # 4sieve[%]	25~100	96.25	O.K
	Passing # 200sieve[%]	25이하	15.46	O.K
	Liquidity limit[%]	50%미만	Non-plasticity	O.K
	Plasticity limit[%]	25%미만	Non-plasticity	O.K
	Specific gravity	-	2.55	O.K
Compaction test	Maximum dry density(r _{dmax})[g/cm ³]	1.5이상	1.73	O.K
	Optimum moisture content(O.M.C)[%]	-	14	O.K

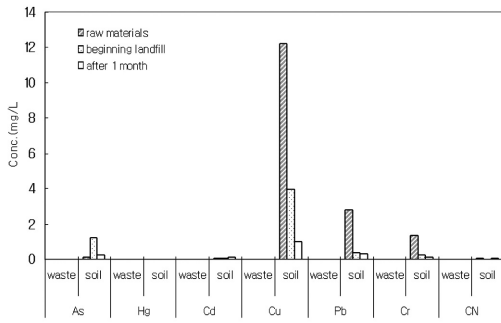


Fig. 8. Variation of heavy metals in the filling materials.

되어 있다.

Fig. 8은 현장에서 사용 중인 폐주물사를 중심으로 폐기물관리법과 토양환경보전법을 통해 현장에서 성토되는 시료를 중심으로 분석한 결과이다. 성토의 과정은 현장에서 폐주물사와 일반토양을 현장에서 혼합하는 과정을 거쳐 성토작업을 하고 있었다. 먼저 성토 전 폐주물사와 한달 뒤 혼합한 성토재 그리고 성토된 토양을 중심으로 폐기물관리법과 토양환경보전법에 의거 시료를 수거하여 분석한 결과, 성토 전 시료에서 폐기물관리법에 의한 폐기물분류상 일반폐기물로 법적기준을 만족하였으나, 토양환경보전법에 의한 성토제로서의 기준 준수여부에서 토양환경보전법 제2조의 의거 토양우려기준(“가” 지역)을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 Cu의 경우 약 12배, Pb 약 3배, Cr 약 2배 정도 높은 농도의 중금속이 용출되어 폐주물사를 복토용으로 재사용 시 그 규제범위 및 농도가 강화되어야 하며, 또한 폐주물사의 경우 1,200℃ 이상 고온에서 제품을 생산하는 과정에서 발생하는 폐기물이므로 비점이 낮은 휘발성 물질의 검사항목(예를들면, BTEX, TCE, PCE 등)은 제외시켜도 무방할 것으로 사료된다.

한편 현재로서는 재활용에 대한 정확한 법규 및 시행령이 없어 담당자에 따라 그 해석을 달리하고 있어 폐기물재활용업을 하는 사업장에서도 혼선을 야기 하고 있는 실정이다.

폐기물관리법에 의한 폐주물사의 용출시험은 약산(pH 5.8~6.3)의 용출액으로 200 rpm에서 6시간 동안 용출하여 그 상등액을 검액으로 사용하고 있다. 따라서 폐기물관리법은 대상 폐기물이 매립장에 매립된 이후 강우에 의해 유해중금속이 어느 정도 용출되는 지를 알아보는 시험으로 유해중금속의 결합정도에 따라 용출되는 농도도 달라진다.

한편 토양환경보전법은 토양 또는 대상 시료가 토양에 성토되거나 재활용된 이후 주변토양에 어느 정도의 유해중금속이 어느 농도로 영향을 미칠 수 있는가를 알아보는 시험으로 폐기물관리법과는 관련법 적용자체가 다르다. 즉 폐기물관리법상 시험법은 용출시험인 반면 토양환경보전법상 시험법은 함유시험으로 용출용매 또한 다르게 이용된다.

따라서 대상폐기물이 폐기물관리법상 지정폐기물의 유해중금속 규제농도보다 적다 하더라도 토양환경보전법상 시험에서

는 우려기준을 초과하는 경우가 대부분이다. 이는 관련법의 적용 대상 시료가 어떤 상태로 처분되는가에 따라 시험법이 달라지고 있다. 따라서 일반폐기물이라 할지라도 재활용을 목적으로 할 경우 시료분석 및 관리의 중요성이 필요한 이유가 여기에 있다.

폐주물사의 재활용 가능성 검토

폐주물사를 성토제로 재활용할 경우 가장 곤란한 점이 폐주물사 자체의 색깔과 강우 시 유출되는 침출수의 색도로 인한 민원이 많이 발생하고 있는 실정이다.

주물사는 약 92%의 모래와 5%의 고령토(bentonite)와 3%의 석탄가루로 이루어져 있다. 여기서 주물사의 색깔을 좌우하는 석탄가루는 현장에서 주물을 만들 경우 모래와 주물사이의 이형재로써의 역할을 하는 것으로서 입도 및 경제성면에서 석탄가루가 가장 적합한 것으로 알려지고 있다.⁹⁾

그러나 석탄가루 자체의 색깔 때문에 주물사를 재활용할 경우 색깔로 인한 일반인들이 느끼는 거부감은 상당히 큰 것으로 나타났다. 또한 강우 시 그 침출수의 색깔이 검은색을 띄고 있어 인근 토양 및 농경지로 흘러갈 경우 이로 인한 분쟁 및 민원을 야기 하고 있다.

따라서 석탄가루를 대용할 수 있는 재료개발이 시급한 것으로 나타났다. 입도성상 및 이형재로써 경제성이 있는 재료개발이 있어야 할 것으로 사료된다.

결 론

1. 폐주물사의 용출시험 시 중금속간 상관성이 높은 항목은 Cu와 Pb, Pb과 Cr으로 각각의 상관계수(R^2) 0.982, 0.907로 타 중금속보다 상관성이 높은 것으로 나타났으며, 성토이후 Cu, Pb에 의한 영향이 가장 클 것으로 예측되었다.

2. Cu, Pb, Cd, Cr에 대한 실측치와 예측치에 대한 다중회귀분석(SPSS) 결과 Cu, Pb의 결정계수(R^2)가 0.812, 0.885로 Cd, Cr($R^2=0.255, 0.632$)보다 높았으며, 양·음이온과의 상관성이 Cu, Pb이 각각 Na^+ , Cl^- 이온과의 큰 상관성을 나타내어, 성토이후 주변토양에 영향을 미칠 것으로 예측되었다.

3. 성토제로서의 적합성 여부를 판단하는 액·소성한계(Liquidity·Plasticity limit) 실험에서 비소성(Non-plasticity), 최대건조밀도(Maximum dry density, $r_{dm,ax}$)는 $1.73 ttf/m^3$ (기준 1.5 이상)으로 성토제로 적합한 것으로 나타났다. 또한 폐주물사의 물리적 특성실험에서 투수계수(Permeability coefficient, k) $k=1.81 \times 10^{-6} cm/sec$ 으로 매립장의 복토재 및 차수재로 요구되는 투수성(k) $1.0 \times 10^{-7} cm/sec$ 에 근접하고 있어, 실트(silt)나 점토(clay)를 적정비율 혼합하여 복토재 및 차수재로 이용 가능할 것으로 사료된다.

4. 폐주물사는 1,200℃ 이상의 고온에서 제품을 생산하므로 성토제로서의 기준 준수여부(토양우려기준)를 판단하는 검사에서 휘발성물질의 검사항목(BTEX, TCE, PCE 등)은 제외시

켜도 무방할 것으로 판단된다.

5. 폐주물사를 성토재로 재사용할 경우 가장 많은 민원을 야기하는 원인 중 폐주물사 자체 색깔과 우수에 의한 침출수의 색깔이 검정색을 띄어 일반인들이 느끼는 거부감은 상당히 큰 것으로 나타나고 있다. 따라서 이형재(異型材)로 혼합되는 석탄 가루를 대체할 수 있는 재료 개발이 시급한 것으로 사료되었다.

참 고 문 헌

1. “2004 전국 폐기물 발생 및 처리현황”, 환경부·국립환경과학원, 2005.
2. “점토점결주물사의 성분특성”, (주) S.A.G, 1998.
3. “주물사 재활용 기술개발에 관한 연구”, 한국자원재생공사, 1995.
4. “토양환경공학”, 한국지하수토양환경학회 편, 향문사, 2001.
5. “토질시험법”, 이송·김태훈·이재현, 구미서관, 2002.
6. “토목공사 표준일반시방서(건설교통부제정)”, 대한토목학회, 2005.
7. “폐기물공정시험방법”, 환경부, 2000.
8. “토양오염공정시험방법”, 환경부, 2002.
9. “폐기물매립시설 유지관리실무”, 환경관리공단, 1994.
10. “도시고형폐기물 소각바닥재 용출액의 납, 구리, 카드뮴 및 크롬 화합물 평가”, 이한국·이동훈, 한국폐기물학회지, Vol. 21, NO. 8, pp. 791~801, 2004.