

중금속오염 토양의 자기분리에 의한 오염농축효과

Concentrating Effect of Heavy Metals from Heavy Metal Contaminated Soil by Magnetic Separation

김 지 은(Jee-Eun Kim)¹ · 김 정 진(Jeong-Jin Kim)² · 김 영 훈(Young-Hun Kim)^{1,*}

¹안동대학교 환경공학과

(Department of Environmental Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

²안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

요약 : 슬래그를 매립한 토양을 대상으로 자기분리연구를 수행하였다. 토양세척을 거친 토양과 토양 세척 전 토양을 대상으로 습식자기분리와 건식자기분리를 수행하여 분리된 부분과 분리되지 않은 부분의 중금속 농도를 측정하여 중금속의 농축효과를 측정하였다. 습식자기분리의 경우 토양세척 전 시료의 자력분리율이 상대적으로 높으며 토양세척 후 시료의 경우 약 40% 정도가 자기분리 되었다. 토양 : 물의 비가 농축효과에는 큰 영향을 미치지 못하며, Fe, Pb, Cu, Zn, Cd의 세척 전 토양과 세척 후 토양의 자기분리에 의한 평균 농축비는 3.2, 2.1, 12.1, 2.5, 1.5와 17.4, 7.0, 15.7, 9.6, 7.0으로 토양 세척을 거친 경우 자기분리에 의해 토양 세척 전 토양에 비해 더 큰 토양 부피 감량효과를 기대할 수 있다. 건식자기분리의 경우에도 자기분리에 의해 중금속의 농축효과를 얻을 수 있으나 자기분리에 의한 회수율이 너무 높은 경우 오염토 저감을 기대하기 어렵다. 철과 같은 강자성체를 포함하는 토양의 경우 자기분리에 의해 토양세척의 효과와 유사하게 오염토양의 양을 줄일 수 있고, 오염이 한쪽에 농축되는 결과를 얻을 수 있다.

주요어 : 중금속, 자기분리, 토양, 슬래그, 농축

ABSTRACT : A magnetic separation study was conducted for a soil sampled from a landfill site where steel slag had been dumped for a long time. Heavy metal concentrating effect was evaluated by analyzing heavy metal content of magnetically separated soil and passed through soil. The effect was compared between soil after soil-washing process and original landfill soil and the effect was also tested between wet condition-magnetic separation and dry condition-magnetic separation. Separated ratio was relatively higher in non-soil washed sample. The water content has no significant effect on the separation rate. The concentrating effect of Fe, Pb, Cu, and Cd were 3.2, 2.1, 12.1, 2.5, 1.5 and 17.4, 7.0, 15.7, 9.6, 7.0 respectively for non-soil washed sample and soil washed sample. We can expect a bigger volume reduction effect from soil-washed samples. The volume reduction effect was obtained from the separation in dry condition. However, when the separation ratio is too high the volume

*Corresponding author: +82-54-820-5818, E-mail: youngkim@andong.ac.kr

reduction effect decreases. The magnetic separation leads to a volume reduction and concentration of heavy metals into a portion of soil in case of paramagnetic particles contained soil.

Key words : heavy metal, magnetic separation, soil, slag, concentrating

서 론

지난 수십 년간 산업활동 및 농업활동의 결과로 토양은 다양한 오염물질에 의해 오염되어 있다. 토양오염은 유해유기물질, 중금속 등이 흔히 발견되는 오염이며, 수질오염 및 대기오염과 다른 특성을 갖고 있다. 수질오염이나 대기오염과 달리 확산, 희석 및 자연적 정화가 쉽지 않고 많은 비용을 투입하여 오염을 제거하여야 하는 경우가 많다. 특히 중금속 등의 무기물질로 오염이 된 경우 오염물질을 분해하여 제거하는 기작을 사용할 수 없고 환경위해성을 줄이기 위해서는 토양으로부터 중금속을 제거하여야 한다.

우리나라는 제철산업이 발달하여 지난 수십 년간 국내 소비는 물론 해외에 수출할 수 있는 양의 철을 생산하여 왔다. 그 결과 철강을 소재로 하는 산업이 발전하였으나 제철산업의 부산물로 발생하는 슬래그를 포함하는 다양한 오염물질에 의해 국토가 오염되는 부정적 결과도 함께 얻게 되었다. 제강슬래그를 다양한 방법으로 활용하고자 하는 연구가 수행되었으나 슬래그에 포함된 높은 농도의 중금속으로 인하여 쉽게 활용되지 못하고 상당량이 매립되어 있다. 슬래그에 포함된 중금속은 토양에 흡착되어 있는 중금속과는 달리 쉽게 용출되지 않으나 빗물 등의 외부적 요인에 의해 용출될 가능성을 배제할 수 없다. 장기간에 걸친 매립으로 인하여 매립장 주변의 토양이 함께 오염되었을 가능성이 있으며 중금속으로 오염된 토양은 유기물에 비하여 정화하기가 쉽지 않다.

슬래그에 포함된 중금속은 다양한 원인에 의해 서서히 용출될 수 있으며 그 오염은 주변토양으로 전이된다. 매립과정에서 복토 등 비 오염토양이 유입되었으며 비 오염토양은 슬래그에 비해 중금속 오염도가 낮으며 오염이 전이된 경우에도 토양에 물리적으로 흡착되어 있을 가능성이 높아 비교적 쉽게 제거될 수 있다. 그러나 슬래그의 경우 중금속의 용출률은 낮으나 장기적으로 오염원으로 작용할 가능성이 있으며 인간과 주변 환경의 위해성

저감을 위하여 분리 및 제거하여 안전하게 처리하는 것이 필요하다.

슬래그에 의해 오염된 토양은 고형화 안정화, 위생매립, 토양세척 등 다양한 정화방법에 의해 처리될 수 있으며 각각의 방법은 장점과 단점을 동시에 갖고 있다. 고형화 안정화 및 위생매립 등의 방법이 활용될 경우 집중적으로 처리해야 될 오염토양의 양을 줄이기 위해 토양세척 등과 같은 전처리 공법을 동시에 사용하는 것이 고려될 수 있다. 발생된 모든 토양을 처리하는 것 보다 오염도가 높은 토양과 오염이 비교적 낮아 재매립할 수 있는 토양을 분리하여 처리하는 것은 경제적 관점에서 매우 유리하다.

토양세척기술과 함께 부피감량의 목적으로 사용될 수 있는 기술은 자기분리기술이다. 특히 철 등 강자성체의 함량이 높은 슬래그의 경우 자기분리기술이 성공적으로 적용될 가능성이 높다. 주변토양 및 일반토양에 비해 슬래그는 비교적 높은 오염을 함유하고 있으며, 이 경우 자기분리공정은 슬래그 함량이 높은 토양과 그렇지 않은 토양을 분리하여 부피감량의 목적을 달성하고 오염물질을 농축하는 효과를 얻을 수 있다.

자기분리기술은 최근 많은 연구자들에 의해 다양한 방향으로 적용되고 있으며 특히 수질오염처리, 토양오염처리 등 환경분야에 적용하기 위한 연구가 일본 등 선진국의 연구자들을 중심으로 활발하게 진행되고 있다(Fontes *et al.*, 2000; Cho *et al.*, 2006; Eom, 2010; Ha, 2010; Hayashi *et al.*, 2011; Igarashi *et al.*, 2013; Igarashi *et al.*, 2014). 최근에는 토양오염처리에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있으며 토양에서 중금속 분리 오염토양의 감량 등의 목적에 적합한 기술로 평가되고 있다(Rikers *et al.*, 1998; Fontes *et al.*, 2000; Igrashi *et al.*, 2013; Sierra *et al.*, 2013; Igrashi *et al.*, 2014; Sierra *et al.*, 2014). high intensity magnetic separation 장치를 이용한 습식과 건식 분리법으로 토양으로부터 중금속을 회수하는 연구결과 자기분리된 토양은 토양세척 프로세스를 거친 토양에 비

해 낮은 농도의 중금속을 함유하고 있으며 자기분리 프로세스는 토양세척 및 중금속 처리기술로서 높은 가능성이 있다고 평가하였다(Rikers *et al.*, 1998). 납 광산지역의 중금속 오염된 토양을 대상으로 자기분리를 이용한 토양세척 연구에서 습식분리는 미세입자에 효과적이며 건식분리는 사질 토양에 적합하며, 이론적 계산에 의해 자기분리의 최적화가 가능해 토양세척 프로세스로 활용하는 것이 가능하다(Sierra *et al.*, 2013; Sierra *et al.*, 2014). 초전도자석을 이용하여 오염토양으로부터 세습 분리 연구 결과에 의하면 방사성물질로 오염된 지역에서 오염제거 및 방사성 폐기물의 감량에도 효과가 있다고 보고하였다(Igarashi *et al.*, 2013). 제지폐수와 같은 환경오염 처리에도 초전도자석을 이용할 경우 효과적인 결과를 나타내었다(Nishijima *et al.*, 1987; Kakihara *et al.*, 2004; Nishijima and Takeda, 2006; Nishijima and Takeda, 2007; Takeda and Nishijima, 2007).

본 연구에서는 슬래그로 오염된 매립지 토양을 대상으로 자기분리 기술을 적용하였으며 전처리 기술로서 자기분리기술의 가능성을 평가하였다. 이를 위해 습식자기분리 및 건식자기분리기술에서 자기분리에 의해 회수된 토양과 분리되지 않는 토양의 비 및 분리 전 후 납, 구리, 등의 중금속 농축비를 계산하였다.

재료 및 실험방법

시약 및 재료

본 연구에는 납, 철, 아연, 구리 등의 중금속 분석용 표준시약이 사용되었으며 이들 시약은 일본의 Kanto사로부터 1,000 ppm 용액을 구입하여 희석해 사용하였다. 중금속 분석용 전처리에 사용되는 산은 고순도 질산(Merck, 65%)과 염산(Merck, 37%)을 사용하였다. 모든 시약은 고순도 시약으로 추가정제 없이 사용하였다.

오염토양의 채취

제강슬래그를 포함하는 토양시료는 과거 제강슬래그를 매립하였던 경남의 A매립시설에서 채취하였으며 시료는 여러 곳에서 채취하여 혼합하여 사용하였으며 토양세척프로세스를 거친 토양도 채취하여 그 특성을 비교하였다. 이 매립시설에는 상당

량의 슬래그가 매립되어 있으며 토양세척 등의 다양한 정화기술이 적용될 수 있다.

채취된 토양시료는 사질 양토이며 시료의 균일성 확보를 위하여 실험 전 10 mesh 및 100 mesh 체로 체거름하여 사용하였다. 토양은 건식자기분리와 습식자기분리를 위하여 일부는 건조 후 사용하였으며 습식 자기분리용 시료는 건조과정 없이 일정량의 수분과 혼합하여 슬러리 형태로 하여 사용하였다.

입도분석방법

입자크기분석기(Mastersizer 2000, Malvern)를 이용하여 자력분리 전후의 입자크기를 비교하여 보았다. 분말의 시료를 물과 에탄올 등의 액상에 부유시켜 그 입자의 크기 및 분포를 분석하는 것으로 시료의 물성에 따라 달라지지만 0.02-2,000 μm 범위의 사이즈를 측정할 수 있다. 본 연구에 측정된 시료는 토양 시료 1-2 g 정도를 1 L의 물에 분산시켜 분석하였다.

X-선회절분석

자력분리 전 후의 토양 및 잔류물에 대한 광물 조성을 밝히기 위하여 X-선회절분석(Ultima IV, Rigaku)을 수행하였다. 분석 조건은 scanning speed 5° 2 θ /min, 2 θ 범위 5-65°, step size 0.05, CuK α (35 kV and 30 mA)이다.

습식 및 건식 자기분리 실험방법

토양입자의 자기분리는 습식 또는 건식분리가 가능하며 각각의 장단점이 있다. 습식분리의 경우 물과 같은 용매에 분산시켜 액상에서 유동되어 분리되며, 건식분리의 경우 토양이 건조된 상태에서 분말형태로 분리된다. 습식자기분리실험을 위해 일정 토양을 물에 분산시켜 30분간 교반 시킨 후에 영구자석을 이용하여 자력분리를 하였다. 사용한 영구자석은 네오디움자석으로 제조사제공자료에 의하면 표면자장이 약 3,000 Gauss이다. 자석에 중금속이 달라붙지 않도록 자석 겉을 자석에 붙지 않는 얇은 비닐 소재로 감싼 후에 자석을 토양을 분산시킨 물에 넣어 분리하였다. 물에 넣기 전의 토양과 자석에 붙은 토양의 무게를 측정하여 자력에 의하여 분리된 비율을 계산하였다.

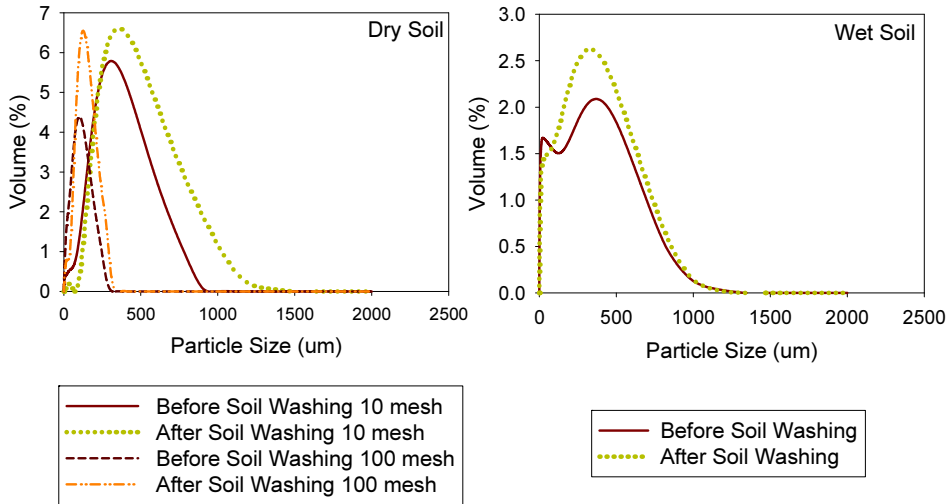


Fig. 1. Particle size distribution before and after the soil washing process.

건식자기분리는 건조된 입자낙하 하거나 공기에 의해 부유되게 하여 자기분리하는 방법이다. 본 연구에서는 자기분리 전후의 중금속 농축 정도를 파악하기 위한 연구로 고정상태에서 영구자석을 이용하여 자기분리 하였다. 건식 자기분리 연구에서는 건조된 토양을 체거름 하여 100 mesh 이하 및 10-100 mesh 크기로 구분하고 고정된 상태에서 분리하였다. 습식분리와 마찬가지로 영구자석에 중금속이 달라붙지 않도록 자석 겉은 비닐로 감싼 후에 분리하였고, 자석으로 분리 전후의 토양의 무게를 측정하여 자석에 의한 분리율을 구하였다.

중금속 분석법

토양 내의 중금속 전함량 분석을 위해 왕수(질산:염산=1:3)를 사용하였다. 독일 연방 위험물질 연구 시험소(BAM, Federal Institute for Materials Research and Testing)의 ISO 11466는 왕수와 Microwave (Mars 5, CEM)를 이용하여 토양 내의 중금속을 추출하는 방법이다. BAM ISO 11466 전처리 방법은 산화 용해성이 큰 왕수를 이용하여 토양, 퇴적물 및 슬러지 등의 중금속을 분석하는 표준분석법이다. 토양은 앞선 습식과 건식 자력분리에 사용된 토양 0.5 g에 왕수 10 ml를 넣고 Microwave에서 175℃에서 5분간 용출하였다. Microwave로 용출된 용액은 0.45 μm 막여과지 (cellulose filter)를 이용하여 여과 후 분석이 가능한

농도까지 희석하여 원자흡수분광분석기(AAnalyst 100, Perkinelmer)로 분석하였다. 정도 관리를 위하여 독일 BAM의 ISO 11466으로 분석된 SRM 물질 BRM#09a를 이용하여 시료와 동일한 조건으로 Microwave를 이용한 산분해 추출법을 적용하였다.

결과 및 고찰

연구에 사용될 토양입자의 분포를 분석하였다. 건조 전의 습식시료와 건조 후 체 분리된 건조입자를 각각 위에서 설명한 바와 같이 물에 분산하여 입도를 분석하였다. Fig. 1과 같이 습식토양과 건조토양 모두에서 토양세척 처리 후의 경우가 입자의 크기가 크게 나타났다. 이는 토양세척과정에서 미세입자가 일부 제거된 결과로 토양세척의 주된 목적이 표면적이 높은 미세토양을 분리하는 것이기 때문이다. 건조된 토양의 경우 체거름으로 입자 크기를 분리하여 분석하고, 습식토양의 경우 체 분리를 이용한 입자크기의 분리가 어려워 10 mesh 이하의 토양을 모두 분석하여서 보다 입자크기의 분포가 넓다. 건조 후 체 분리된 토양은 입도분포 범위가 좁다.

-100 mesh 시료에 대한 자력분리 전 토양의 X-선회절분석결과 주 구성광물은 석영과 사장석이며 소량의 점토광물을 포함하고 있다(Fig. 2). 토양을 세척한 후 사장석(albite)의 함량이 증가하지만 자

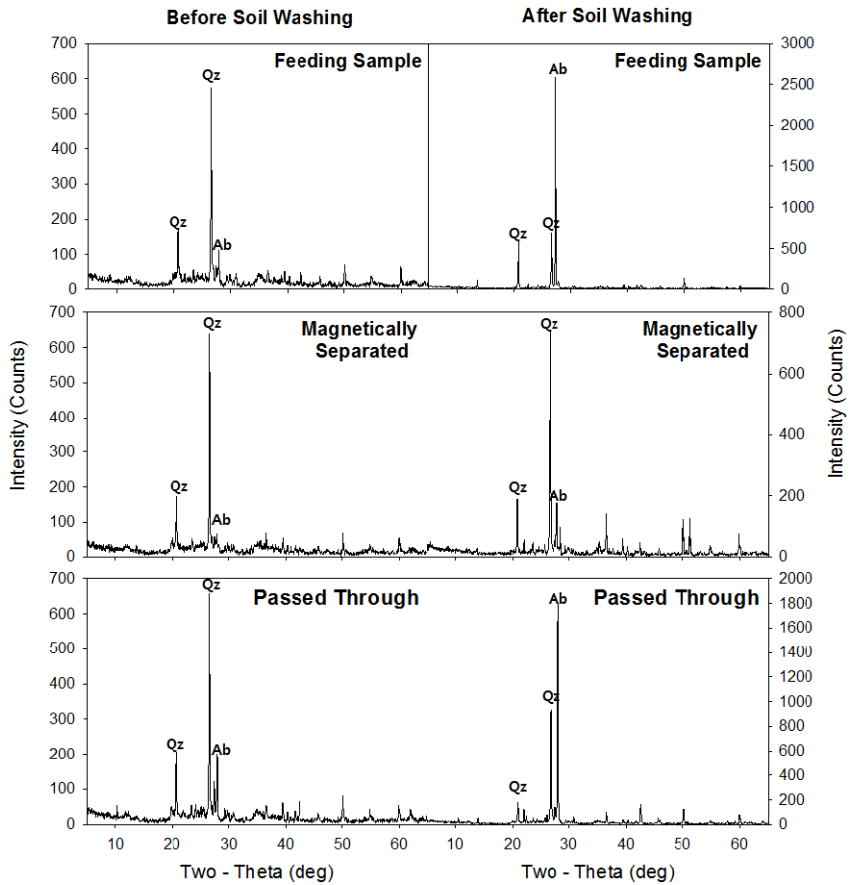


Fig. 2. XRD patterns of magnetically separated and non-separated soil samples. Qz: quartz, Ab: albite.

력에 의해 분리된 시료는 사장석이 감소하고 석영이 증가한다. 자력분리 후 잔류된 토양은 분리 전 토양과 구성광물의 조성 차이는 없지만 사장석의 함량이 증가하는 경향을 나타낸다. 선행연구에서도 자기분리 전후의 토양에 대해 X-선회절분석을 통한 연구를 수행하여 특징을 보고하였다(Fontes *et al.*, 2000).

Fig. 3은 토양 세척 공정을 거친 토양과 토양세척을 하지 않은 토양시료에 대해 자기분리에 의해 회수된 토양과 자력에 의해 분리되지 않은 토양을 나타내었다. 습식 자력분리의 경우 영구자석에 의하여 분리된 토양의 무게측정은 가능하나 물에 남아있는 토양의 양은 정확하게 측정하기 힘들어 분리된 토양의 무게를 측정하고 함수율을 계산하여 비율을 산정하였다.

전체적으로 세척 전의 토양이 세척 후의 토양에 비해 자력분리에 의해 회수되는 양이 많았다. 이는

토양 세척 과정에서 미세오염토양이 일부 분리된 것이 원인으로 판단된다. 토양과 물의 비를 달리 했을 때 토양세척 전 시료의 경우 물의 비율이 높은 경우 자력분율이 높으며 토양세척 후 토양시료의 경우 물의 비율이 높은 경우 자력에 의해 분리된 양이 미세하게 많으나 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 물을 충분히 사용하여 토양을 분산할 경우 자기분리의 효율을 증가시킬 수는 있으나 물에도 오염물질이 포함되어 있어 수처리 해야 될 양이 많아지는 단점이 있다. 그러므로 최적의 토양 : 물의 비를 구하는 것이 효율적 자기분리를 위해 중요하다. 본 연구에서는 1 : 1.5 정도가 최적으로 나타났다. 본 연구에서는 영구자석을 사용하였으나 자기장의 크기에 따라 분리율의 변화가 가능하므로 자기장의 변동이 가능한 전자석 및 초전도자석을 이용한 연구도 필요하다(Sierra *et al.*, 2014).

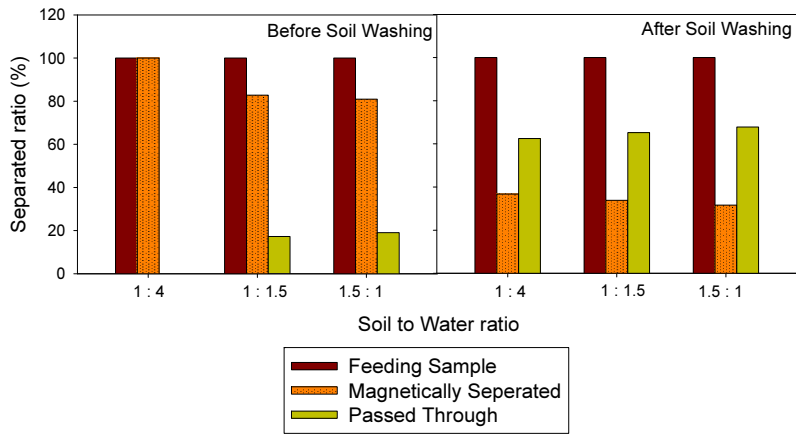


Fig. 3. The magnetically separated ratio of soil upon the soil to water ratio.

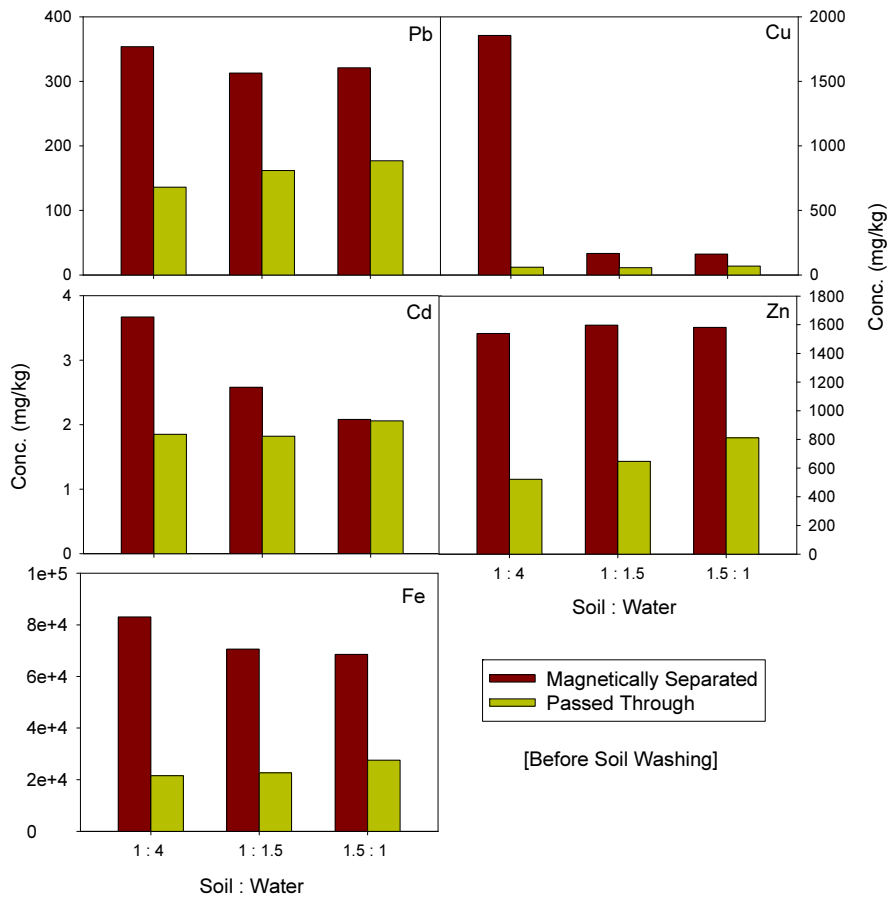


Fig. 4. Heavy metal content of the magnetically separated soil and passed through soil in wet condition (Before Soil Washing).

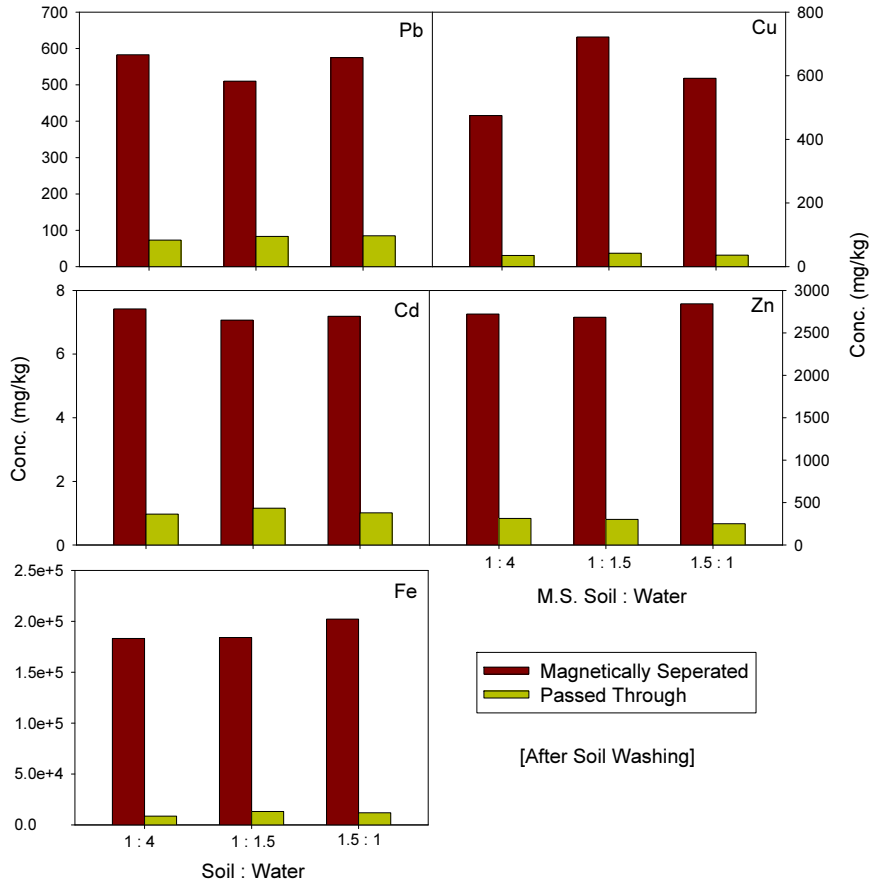


Fig. 5. Heavy metal content of the magnetically separated soil and passed through soil in wet condition (After Soil Washing).

Fig. 4는 토양 세척 전 시료에 대하여 자석에 의해 회수된 토양입자와 회수되지 않은 토양입자에 함유된 Pb, Cu, Cd, Zn, Fe 등의 중금속 농도에 관한 그래프이다. 기대한 바와 같이 자석에 의해 회수된 토양은 철뿐만 아니라 납, 구리, 아연 등의 중금속의 함유량이 높고, 자석에 붙지 않은 토양의 경우 상대적으로 낮은 농도의 중금속을 포함하고 있어 결국 중금속이 농축된 효과를 얻게 되었다. 하지만 그 농축비(회수된 토양의 중금속 농도/남은 토양의 중금속 농도)는 각 금속에 따라 다르며 철, 아연, 납의 경우 3.2, 2.5, 2.1로 비교적 높으며 카드뮴은 1.5로 상대적으로 낮다. 토양과 물의 비에 따른 영향은 철, 아연, 납의 경우 비교적 크지 않으며 카드뮴의 경우 토양 : 물의 비가 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 5는 토양 세척 후 시료에 대

하여 자석에 의해 회수된 토양입자와 회수되지 않은 토양입자에 함유된 중금속 농도에 관한 그래프이다. 전체적으로 세척 전의 토양에 비해 농축비가 높으며 철의 경우 그 값이 가장 크다. 토양 : 물의 비가 농축효과에는 큰 영향을 미치지 못하며 Fe, Pb, Cu, Zn, Cd의 평균적 농축비는 17.4, 7.0, 15.7, 9.6, 7.0이다. 이 결과는 중점 처리 토양의 양을 감축시키는 공정인 토양 세척 공정을 거친 토양의 경우에도 자기분리에 의해 오염도가 높은 토양과 집중처리 없이 매립이 가능한 토양으로 선별할 수 있음을 보여준다. 세척공정을 거친 토양의 경우 자석에 의한 회수량은 작으나 오염농축 및 선별효과는 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다.

건조된 토양의 자력분리에서는 토양의 불균일한 특성으로 인하여 입자크기가 자력분리에 영향을

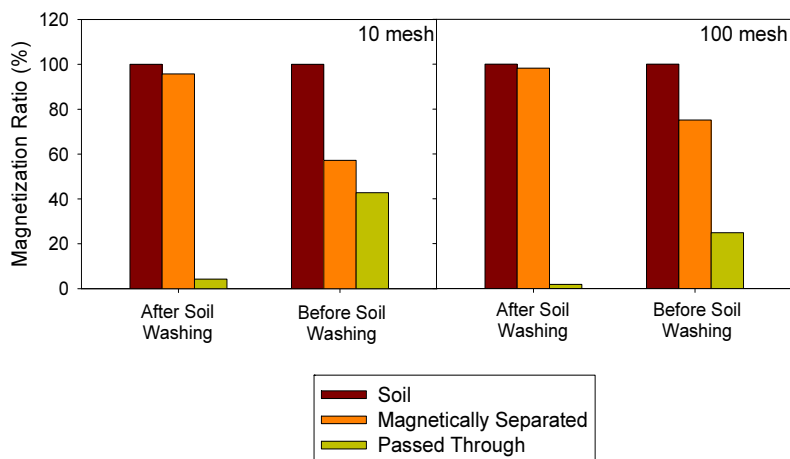


Fig. 6. The amount of magnetically separated soil in dry condition.

미칠 것으로 판단하여 10 mesh와 100 mesh로 체 거름 후에 자력분리를 하였다. 실험결과 Fig. 6에서와 같이 입자의 크기는 자력분리에 큰 차이는 없으나 토양세척 전과 후는 자기분리에 의한 회수율에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 토양 세척 후 시료의 경우 입자의 크기에 상관없이 90% 이상이 자석에 의해 회수되었으며 토양 세척 전 토양의 경우 60-80%의 회수율을 보였다. 이 결과는 습식분리에 비해 높으며 건식분리의 경우 강자성체 입자에 자화능이 없는 입자도 함께 묻혀져 있어 경우에 따라 90% 이상이 자석에 의해 분리되는 것으로 판단된다. 습식분리의 경우 공정에서 발생하는 폐수를 처리해야 하는 단점이 있고 건식의 경우 폐수발생은 없으나 자력에 의한 분리효율이 감소되는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해서는 충분히 건조시키고 분말화시켜 응집되는 현상을 최소화 하여야 할 것이다. 선행연구에서는 건식분리는 전처리로 사용가능하고 습식분리를 미세토양에 적용할 수 있다고 발표하였다(Sierra *et al.*, 2013).

건조된 토양을 자력분리 하여 자력에 의해 회수된 입자와 자력에 의해 분리 되지 않은 입자에 대한 중금속 분석결과가 Fig. 7과 같이 나타났다. 건조된 토양의 경우 입자크기 별로 분리하여 분석하였으며, 100 mesh 토양세척 전 토양의 경우 Fig. 7에서와 같이 자력에 의해 대부분 분리되어 자석에 붙지 않은 부분이 미량이어서 중금속 분석을 위한 전처리를 진행할 수 없었다. 습식 자력분리와 같이 자력에 분리된 토양의 경우 분리되지 않은 토양에

비해 중금속의 농도가 높게 나타났다. 농축비는 Fe, Pb, Cu, Zn, Cd에 대하여 10 mesh 처리 전의 경우 각각 4.8, 4.1, 4.4, 7.1, 5.7이다. 처리 후 토양의 경우 10 mesh에서 Fe, Pb, Cu, Zn, Cd의 농축비가 각각 9.2, 5.0, 5.5, 9.4, 34.7이고, 100 mesh에서 1.4, 1.9, 5.2, 5.8, 3.7이다. 전체적으로 토양 세척 후 토양의 경우 중금속 함량이 높았으며, 이는 습식 자기분리에서와 같은 경향이다. 입도별 구분에서는 100 mesh 토양이 10 mesh 토양에 비해 중금속 농도가 높은 것으로 나타났다.

결 론

슬래그가 다량 매립되어 있어 중금속 오염도가 높은 토양을 대상으로 습식 및 건식자기분리 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

습식자기분리의 경우 토양세척 전 시료의 자력분리율이 상대적으로 높으며 토양세척 후 시료의 경우 약 40% 정도가 자기분리 되었다. 일반적으로 자기 분리된 토양의 중금속 함량이 높으며 자기분리 전후의 중금속 함유비는 세척 전의 토양에 비해 세척 후 토양이 높다. 토양 : 물의 비가 농축효과에는 큰 영향을 미치지 못하며, Fe, Pb, Cu, Zn, Cd의 세척 전 토양과 세척 후 토양의 자기분리에 의한 평균 농축비는 3.2, 2.1, 12.1, 2.5, 1.5와 17.4, 7.0, 15.7, 9.6, 7.0으로 토양 세척을 거친 경우 자기분리에 의해 세척 전 토양에 비해 더 큰 토양 부피 감량효과를 기대할 수 있다.

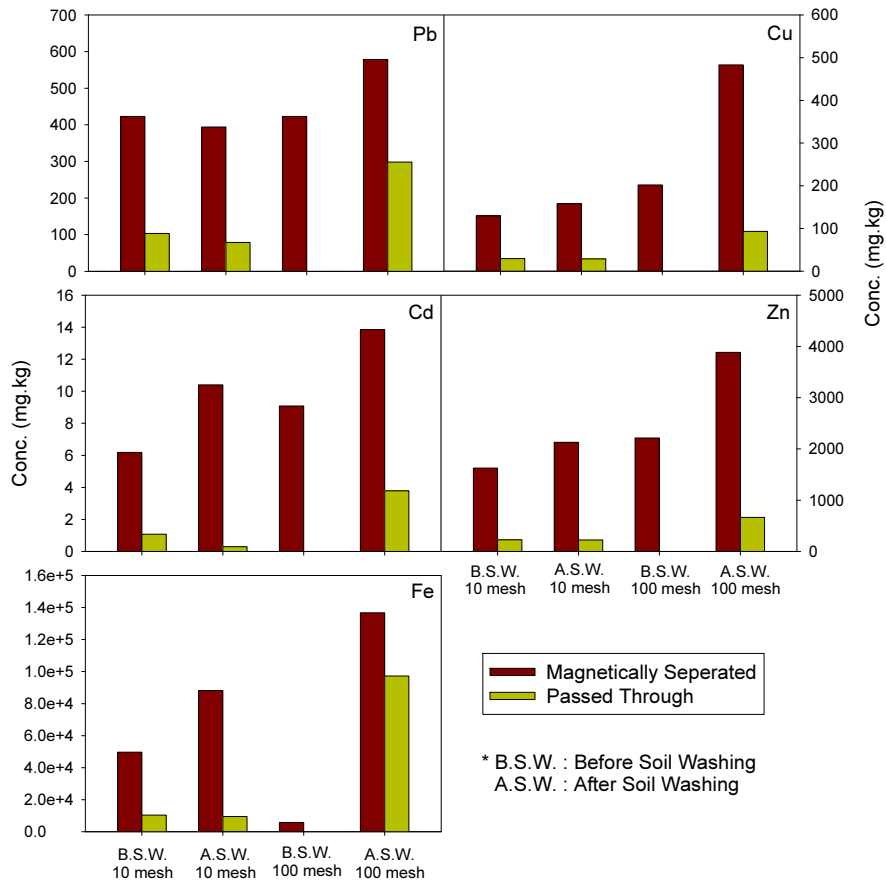


Fig. 7. Heavy metal content of the magnetically separated soil and passed through soil in dry condition.

건식자기분리의 경우에도 자기분리에 의해 중금속의 농축효과를 얻어 집중처리대상 토양의 부피를 저감을 기대할 수 있으나 토양 세척 전 시료의 경우 90% 이상이 자력분리 되어 자기분리효과가 습식자기분리에 비해 작을 수 있음을 보여준다. 이러한 현상은 토양입자의 응집효과에 의한 것으로 수분이 미량 존재하거나 분쇄가 충분히 이루어지지 않은 경우, 또는 미세토양의 분율이 높은 경우 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서와 같이 철과 같은 강자성체를 포함하는 토양의 경우 자기분리에 의해 토양세척의 효과와 유사하게 오염토양의 양을 줄일 수 있고, 오염이 한쪽에 농축되는 결과를 얻을 수 있다.

사 사

이 논문은 2011학년도 “안동대학교 국제학술교류사

업” 보조금에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Cho Y.D., Yoon W.J., Kang I.J., Yoo I.S., and Lee S.W. (2006) The Treatment of Flexo-inks Wastewater using Powdered Activated Carbon Including Iron-transition Metal, Journal of Korean Society on Water Quality, 22, 6, 996-1003 (in Korean with English abstract).
- Eom T.K. (2010) Wastewater Treatment by Magnetic Separation using Pulp Wastewater, Journal of Korean Society of Water Science and Technology, 18, 2, 57-68 (in Korean with English abstract).
- Fontes M.P.F., de Oliveira T.S., da Costa L.M., and Campos A.A.G., 2000, Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials, Geoderma, 96, 81-99.

- Ha D.W. (2010) Superconducting Magnetic Separation Technology Trends, The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, 23, 25-30 (in Korean with English abstract).
- Hayashi S., Mishima F., Akiyama Y., and Nishijima S. (2011) Development of superconducting high gradient magnetic separation system for highly viscous fluid for practical use, *Physica C: Superconductivity*, 471, 1511-1515.
- Igarashi S., Mishima F., Akiyama Y., and Nishijima S. (2013) Fundamental study of cesium decontamination from soil by superconducting magnet, *Physica C: Superconductivity*, 494, 221-224.
- Igarashi S., Nomura N., Mishima F., Akiyama Y., and Nishijima S. (2014) Study on magnetic separation for decontamination of cesium contaminated soil by using superconducting magnet, *Physica C: Superconductivity*, 504, 144-147.
- Kakahara Y., Fukunishi T., Takeda S., Nishijima S., and Nakahira A. (2004) Superconducting High Gradient Magnetic Separations for Purification of Wastewater From Paper Factory, *IEEE Transactions on applied superconductivity*, 14, 1565-1567.
- Nishijima S., Takahata K., Saito K., and Okada T. (1987) Applicability of superconducting magnet to high gradient magnetic separator, *IEEE Transactions on magnetics*, MEG-23, 2, 573-576.
- Nishijima S., and Takeda S.I. (2006) Superconducting High Gradient Magnetic Separations for Purification of Wastewater From Paper Factory, *IEEE Transactions on applied superconductivity*, 16, 1142-1145.
- Nishijima S., and Takeda S.I. (2007) Research and Development of Superconducting High Gradient Magnetic Separation for Purification of Wastewater from Paper Factory, *applied superconductivity*, 17, 2311-2314.
- Rikers R.A., Rem P., and Dalmijn W.L. (1998) Improved method for prediction of heavy metal recoveries from soil using high intensity magnetic separation (HIMS), *International Journal of Mineral Process*, 54, 165-182.
- Sierra C., Martínez J., Menéndez-Aguado J.M., Afif E., and Gallego J.R. (2013) High intensity magnetic separation for the clean-up of a site polluted by lead metallurgy, *Journal of Hazardous Materials*, 248-249, 194-201.
- Sierra C., Martínez-Blanco D., Jesús A.B., and Gallego J.R. (2014) Optimisation of magnetic separation: A case study for soil washing at a heavy metals polluted site, *Chemosphere*, 107, 290-296.
- Takeda S.I., and Nishijima S. (2007) Development of Magnetic Separation of Water-Soluble Materials Using Superconducting Magnet, *IEEE Transactions on applied superconductivity*, 17, 2178-2180.

Received December 15, 2014, Revised December 21, 2014, Accepted December 24, 2014, Responsibility Editor: Kangjoo Kim