

## 성 · 복토용으로 사용된 전로제강슬래그가 주변 토양환경에 미치는 영향

이호섭<sup>1</sup> · 남택우<sup>1</sup> · 조은혜<sup>2\*</sup> · 남경필<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 건설환경공학부

<sup>2</sup>한국외국어대학교 환경학과

## Effect of Basic Oxygen Furnace Slag used as Structural Filling Materials on the Subsurface Environment

Hosub Lee<sup>1</sup> · Taekwoo Nam<sup>1</sup> · Eun Hea Jho<sup>2\*</sup> · Kyoungphile Nam<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2</sup>Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies

### ABSTRACT

The effect of blast oxygen furnace (BOF) slag used as filling materials on the soil environment was studied using column tests that simulated the flow of the BOF slag leachate through the soil layer. The Cu, Mn, Zn, Ni, and F contents of the leachate affected soil were similar to that of the controls (i.e., soils that were not affected by the leachate). The As, Cd, and Pb contents were lower in the leachate affected soils than the controls. The changes in these contaminants contents can be attributed to the interactions between anions such as alkalinity generating anions (e.g., CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>) or calcium ions with heavy metals or F, which consequently affected the fate of heavy metals and F in the leachate affected soils. The germination and growth of *Spinapis alba* in the soils affected by the leachate and the controls were also similar. However, the proportion of alkaliphilic bacteria in the soils affected by the leachate significantly increased, and this can be explained by the increased soil pH due to the alkaline leachate. Overall, this study shows that the alkalinity of the BOF slag leachate, rather than the presence of heavy metals and F in the leachate, needs to be considered when the BOF slag is to be reused as structural filling materials.

**Key words :** Basic oxygen furnace (BOF) slag, Structural filling material, Leaching, BOF slag leachate, Toxicity

### 1. 서 론

국내 철강슬래그 발생량은 철강 생산능력 증가로 인해 매년 꾸준히 증가하고 있다. 제선과 제강과정으로 발생하는 슬래그는 고로슬래그와 제강슬래그로 나뉜다. 제강슬래그는 다시 불순물을 제거하는 공정에 따라 전로제강슬래그(Basic oxygen furnace slag) 또는 전기로제강슬래그(Electric arc furnace slag)로 구분한다. 2010년도 자료에 따르면 제선공정에서 발생하는 고로슬래그(Converter slag)는 약 11백만톤이었고 제강공정에서 발생하는 제강슬래그(Steel slag)는 약 9백만톤이었다(KISA, 2010). 발생한 철강슬래그는 ‘폐기물관리법’에 의하여 지정폐기물로 구분

되나, ‘폐기물관리법 시행규칙’에 의하여 용출시험 기준을 통과하게 되면 재활용이 가능하다. 재활용이 가능한 슬래그는 ‘자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률’에 의하여 지정부산물로 구분이 되며, ‘철강슬래그 및 석탄재 배출 사업자의 재활용지침’에 따른 용도로 재활용할 수 있다.

고로슬래그, 제강슬래그 중 전로제강슬래그와 전기로제강슬래그의 주요 구성 성분은 Table 1과 같다. 고로슬래그는 수경성 및 천연모래를 대체할 수 있는 물리적 특성을 가지고 있어 토목용 골재로 많은 양이 사용되고 있고, 전기로제강슬래그는 KS 규격에 따라 콘크리트 골재로 활용 가능하도록 규정되어 있다(Na et al., 2011; Kim, 2002). 하지만 전로제강슬래그는 제강과정에 사용하는 생

\*Corresponding author : ehjho@hufs.ac.kr

Received : 2015. 10. 6 Reviewed : 2015. 11. 6 Accepted : 2016. 3. 3

Discussion until : 2016. 8. 31

**Table 1.** Major chemical composition of converter slags and steel slags

Component	Converter slag (%)	Steel slag (%)	
		Basic oxygen furnace slag	Electric arc furnace slag
CaO	42-44 <sup>2,4,7</sup>	36-52 <sup>2,3,7,9,11-13,15</sup>	14-52 <sup>1,6,8,13,14</sup>
SiO <sub>2</sub>	33-36 <sup>2,4,7</sup>	8-15 <sup>2,3,7,9,11-13,15</sup>	15-31 <sup>1,6,8,10,13,14</sup>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14-20 <sup>2,4,7</sup>	1-4 <sup>2,3,9,11-13,15</sup>	4-13 <sup>1,6,8,10,13,14</sup>
Total Fe	0-1 <sup>2,4,7</sup>	3-38 <sup>2,3,7,9,11,13,15</sup>	0-47 <sup>1,5,6,8,10,13,14</sup>
MgO	4-7 <sup>2,4,7</sup>	1-10 <sup>2,3,7,9,11,13,15</sup>	3-10 <sup>1,6,8,10,13,14</sup>
MnO	0-1 <sup>2,4,7</sup>	0-9 <sup>2,3,9,11,13,15</sup>	1-8 <sup>1,6,8,10,13,14</sup>

<sup>1</sup>Barra et al., 2001; <sup>2</sup>Choi et al., 2007; <sup>3</sup>Das et al., 2007; <sup>4</sup>Ahn et al., 2003; <sup>5</sup>Kim et al., 2009; <sup>6</sup>Kim, 2002; <sup>7</sup>Lee et al., 2011; <sup>8</sup>Luxan et al., 2000; <sup>9</sup>Mahieux et al., 2014; <sup>10</sup>Manso et al., 2003; <sup>11</sup>Poh et al., 2006; <sup>12</sup>Shen et al., 2009; <sup>13</sup>Tossavainen et al., 2007; <sup>14</sup>Tsakiridis et al., 2008; <sup>15</sup>Waligora et al., 2010

석회(CaO)로 인해 팽창 및 붕괴의 불안정성이 있어 골재로 사용하기 어려워 성·복토재로 사용되고 있고, 이 때 물과 만나면 생성되는 알칼리 화합물인 Ca(OH)<sub>2</sub>는 환경오염원으로 간주되기도 한다(Choi et al., 2007; Mayes et al., 2006). 기존 연구에서는 알칼리 용출수가 수계 내 화학적 산소 요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 황산염, 염분, oxyanion 및 amphoteric 중금속을 증가시켜 어류종 개체수에 영향을 미침을 보고한 바 있다(Mayes et al., 2006, 2008). 또한, 실제 대수층에 슬래그를 사용한 부지에서 CaO와 이산화탄소의 반응으로 형성된 CaCO<sub>3</sub>에 의해 샘플의 광투과가 저하되고, 고알칼리성 용출수에 의한 pH 상승으로 저서성 생물의 성장 및 개체수가 악영향을 받을 것으로 보고하였다(Hull et al., 2014; Riley and mayes, 2015). 고알칼리성 용출수가 수계에 미치는 영향을 알아본 몇몇 연구 외에 전로제강슬래그가 성·복토재로 사용될 경우 토양 환경에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다.

기존 연구에 따르면 고로슬래그와 전로제강슬래그에서 발생하는 용출수에 함유되어 있는 오염물질의 농도는 ‘폐기물관리법 시행규칙’의 용출시험 기준을 대부분 만족하는 것으로 알려져 있다(Kang, 2001; Kim, 2003; Lee and Lee, 2005; Na et al., 2011). 그러나 전로제강슬래그가 토목·건설재료로 재사용되어 ‘토양 또는 그 일부’로 존재하게 되고, 토양이 장기적으로 전로제강슬래그에서 발생한 용출수에 노출되면 용출수 내 함유된 오염물질에 의해 토양 환경이 영향을 받을 수 있다. 하지만 오염물질의 토양축적, 용출수의 지속적인 유입에 의한 토양 생태환경 변화 등 전로제강슬래그의 토양에서의 사용이 장기적으로 주변 토양 환경에 미치는 영향에 관한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 철강 생산 중 발생하는 전로제강슬래그가 ‘토양 또는 그 일부’로 사용되었을 경우

전로제강슬래그 내 오염우려물질의 용출 정도와 용출수가 주변 토양 환경에 미치는 영향을 알아보았다. 이를 위해 전로제강슬래그 용출수가 토양에 지속적으로 유입되는 환경을 모사한 칼럼실험을 수행하여 원토양 대비 용출수의 영향을 받은 토양 내 오염우려물질 함량, 식물독성, 미생물 군집 변화를 통해 전로제강슬래그의 재사용이 토양 환경에 미치는 영향을 알아보았다.

## 2. 실험방법 및 분석방법

### 2.1. 전로제강슬래그 및 토양 시료준비

국내에서 숙성된 전로제강슬래그 시료를 채취하여 2 mm 체로 거른 후 사용하였다. 실험에 사용한 토양은 sand 30.5%, silt 61.3%, clay 9.1%를 함유한 silt loam이었고, 토양의 pH와 유기물 함량은 각각 5.3과 1.8%이었다. 전로제강슬래그와 토양 내 중금속과 불소의 함량은 ‘토양오염공정시험기준’에 따라 분석하였고(KMOE, 2009), 함량은 Table 2와 같다. 전로제강슬래그와 토양 시료 모두에서 Cr<sup>6+</sup>와 Hg는 검출되지 않았다. X-선 형광분석기(X-ray Fluorescence; XRF, S4 PIONEER, Bruker AXS, Germany)를 사용하여 분석한 전로제강슬래그의 주요 구성 성분은 Table 2와 같다.

### 2.2. 칼럼실험

전로제강슬래그 용출수 영향을 받은 토양을 준비하기 위해 up-flow percolation test 방법을 이용한 칼럼실험을 수행하였다(ISO, 2007). 칼럼실험에 사용한 칼럼의 직경과 길이는 각각 4.5 cm와 36 cm이었다. 전로제강슬래그와 토양의 밀도는 각각 1.88 g cm<sup>-3</sup>와 1.05 g cm<sup>-3</sup>였고, 전로제강슬래그(아래층)와 토양(윗층)을 다짐하여 높이비 1:4로 30 cm의 칼럼을 채웠다. 이는 ‘철강슬래그 및 석탄재

**Table 2.** Heavy metals and fluoride concentrations of the soil and the steel slag (blast oxygen furnace, BOF) used in this study and major chemical composition of the steel slag used in this study

	Heavy metals/metalloid concentration (mg kg <sup>-1</sup> )							Chemical composition of slag (%)				
	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	F	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO
Soil	9.4 ± 0.13	1.1 ± 0.18	26 ± 16	52 ± 30	61 ± 62	170 ± 49	220 ± 31	-	-	-	-	-
BOF slag	2.3 ± 0.26	0.58 ± 0.12	7.9 ± 1.4	6.6 ± 3.5	7.1 ± 0.45	35 ± 8.6	2,900 ± 360	32	16	4.0	3.7	3.7

배출사업자의 재활용지침에 따라 최소의 슬래그가 토양 환경에 미치는 영향을 알아보기 위해 보수적으로 결정한 비율이다. 다짐 후 peristaltic tubing pumps(Masterflex® L/S®, Cole Parmer Instrument Company, USA)로 전로제강슬래그 층만 증류수로 채워 유출수의 pH가 일정(pH 변화 ≤ 0.5)하게 유지될 때까지 48 h 동안 평형상태를 이루게 하였다. 이는 전로제강슬래그가 성·복토제로 사용된 후에 빗물 또는 외부의 표면 유출수(surface runoff)의 유입으로 포화된 후에 공극수로 용출되어 나오는 토양오염 우려물질이 지하토양에 영향을 주는 상황을 묘사하기 위함이다. 본 연구에서는 이를 percolation-controlled scenario라고 칭하였다(Kosson et al., 2002). 대조군으로는 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받지 않은 원토양을 사용하였다. 전로제강슬래그 용출수 발생을 위해 3차 증류수(0.2 mL min<sup>-1</sup>; pH 5.8-6.3)를 사용하였고, 총 유량은 10.4 L 였다.

### 2.3. 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양 분석

칼럼실험 종료 후, 칼럼을 해체하여 전로제강슬래그 용출수의 직접적인 영향을 받은 토양 시료를 채취하기 위해 전로제강슬래그와 직접 접촉하고 있는 토양(두께 6 cm)을 채취하였다. 채취한 토양 시료는 건조 후 토양오염공정시험 기준(KMOE, 2009)에 따라 pH(Orion™ 815600 ROSS™, Thermo Scientific, USA)를 측정하고, 전로제강슬래그 용출수가 토양 내 오염우려물질 함량 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양과 받지 않은 원토양(대조군) 내 오염우려물질 함량을 토양오염공정시험기준에 따라 추출하여 분석하였다. 추출액 내 중금속은 ICP-OES(ICAP 7400 Duo, Thermo Scientific, USA)를 사용하여 분석하였고, 불소는 토양오염공정시험 기준(KMOE, 2009)에 따라 지르코늄 발색시약(zirconyl-SPADNS)과 추출액을 1:5(v/v) 비율로 혼합 후 570 nm에서 흡광도를 측정하였다. 6가크롬은 디페닐카르바지드(diphenylcarbazide) 용액(0.5%)과 추출액을 2:95(v/v) 비율로 혼합 후, 20% 황산으로 pH를 2.0으로 조정하여 540 nm에서 흡광도를 측정하였다.

전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양의 독성변화를 알아보기 위해 OECD 208 방법에 따라 적겨자 씨앗(*Spinapis alba*)을 사용해 발아시험을 수행하였다(Czerniawska-Kusaza et al., 2006; OECD, 2006). 적겨자 씨앗은 OECD 208 방법에 제시되어 있는 식물종으로 높은 중금속 오염토양에서도 생존가능한 식물로 알려져 있다(Anderson et al., 2001). 용출수의 영향을 받은 토양과 받지 않은 토양을 각각 30 g씩 담은 petri dishes(Ø=14 cm)를 네 개씩 준비하여 각 petri dish에 10개의 적겨자 씨앗을 심어 네 번 반복 실험을 수행하였다. 발아시험은 생장상(growth chamber)을 이용하여 14일 동안 23°C에서 상대습도 90%를 유지하면서 수행하였다. 빛 주기는 16시간 낮과 8시간 밤으로 설정하였고(Adam and Duncan, 2002), 토양의 수분함량은 Water Holding Capacity의 70%를 유지하였다.

또한, 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양 내 미생물 군집 변화를 알아보기 위해 FastDNA SPIN Kit for soil(MP Biomedicals, USA)을 이용하여 0.5 g 토양 내 DNA를 추출하였다. 프라이머로 9F(50-CCTATCCCC TGTGTGCCTTGGCAGTCTCAGACAGAGTTTGATCM-TGGCTCAG-30)와 541R(50-C CATCTCATCCCTGCGTGTCTCCGACTCAG-X-ACATTACCG-CGGCTGCTGG-30)을 사용하여 polymerase chain reactions(PCRs)을 수행하였다. PCR 반응은 95°C에서 5분 동안 초기 변성 후, 95°C에서 30초, 55°C에서 30초, 72°C에서 30초 반응을 30회 반복한 후 72°C에서 5분간 유지하였다. Pyrosequencing은 GS Junior Sequencing system(Roche, Branford, CT, USA)을 사용하여 Chunlab, Inc.(Seoul, Korea)에서 제조자의 지시에 따라 수행하였다.

### 2.4. 슬래그 층과 토양 층을 통과한 칼럼 유출수 분석

전로제강슬래그 용출수가 토양층을 통과한 후 발생하는 칼럼 유출수가 주변 토양 또는 수계에 미치는 영향을 알아보기 위해 liquid-to-solid ratio(L/S)가 0.1, 0.2, 0.5, 1.4, 5.0, 8.3, 13.8, 34.6 L kg<sup>-1</sup> 일 때 유출수 시료를 채취하여 0.45 µm GHP 필터로 여과한 후 pH와 산화환

**Table 3.** Effect of the basic oxygen furnace slag leachate on soil heavy metals and fluoride concentrations

Element	Control soil (mg kg <sup>-1</sup> )	Soil affected by the slag leachate (mg kg <sup>-1</sup> )	p-value (t-test)
As	9.4 ± 0.1	6.5 ± 0.1	< 0.001
Cd	1.1 ± 0.2	0.7 ± 0.0	0.013
Cr <sup>6+</sup>	ND	ND	NA
Cu	26 ± 16	11 ± 0.20	0.081
F	220 ± 31	250 ± 32	0.19
Hg	ND	ND	NA
Ni	52 ± 30	42 ± 0.8	0.29
Pb	61 ± 62	18 ± 0.4	< 0.001
Zn	170 ± 49	140 ± 2.4	0.22
pH (unitless)	5.3	11	NA

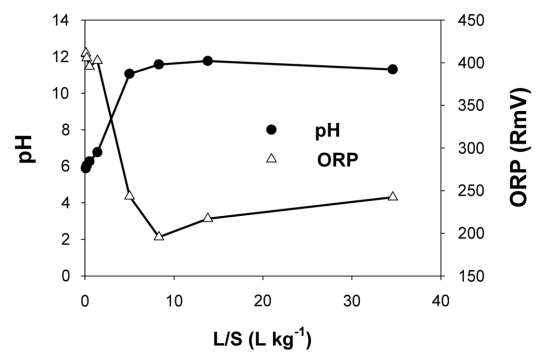
ND: Not detected (detection limit: Cr<sup>6+</sup> < 0.05 ppm, Hg < 0.3 ppb), NA: Not applicable. All the measurements were done in triplicate except pH (single measurement).

원전위를 측정하였다. 또한 유출수 내 불소와 6가크롬은 각각 지르코늄 발색시약과 디페닐카르바지드(diphenyl-carbazide)용액(0.5%)을 이용한 흡광도법으로 분석하였고, 그 외 중금속은 ICP-OES를 사용하여 분석하였다. 대조군으로는 토양 층으로부터 구성된 칼럼을 사용하였고, 유출수를 채취하여 중금속과 불소를 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 칼럼실험에서 전로제강슬래그 용출수가 토양 내 중금속 및 불소 함량에 미치는 영향

Table 3는 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양 내 오염우려물질의 함량을 대조군으로 사용한 원토양 내 오염우려물질 함량과 비교하고 있다. 전로제강슬래그 용출수, 즉, 전로제강슬래그 층을 통과한 용출수의 영향을 받은 토양층의 As, Cd, Pb 농도는 대조군과 비교하여 감소하였으나(p-value < 0.05), 나머지 물질(Cu, F, Mn, Ni, Zn)의 함량은 유의한 차이를 보이지 않았다(p-value > 0.05). 토양에서의 중금속과 불소 농도가 비슷하거나 감소한 현상은 전로제강슬래그에서 용출된 알칼리도를 유발하는 음이온(예: CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>) 또는 칼슘이온이 토양에 흡착되어 있는 중금속과 경쟁하여 용출수 내 중금속이 토양에 흡착하는 것을 방해하거나 토양 내 중금속을 탈착했기 때문이라고 볼 수 있다(Munoz-Melendez et al., 2000). 하지만 용출수 내 높은 알칼리도로 인해 용출수 내 중금속이 수산화물의 형태로 침전할 가능성도 있다. 시간에 따라, 즉, L/S 값이 증가함에 따라 슬래그 층과 토양 층을 통과한 칼럼 유출수의 pH가 증가하는 것은(Fig. 1) 전로제강슬래그가 함유하고 있는 free-CaO(Table 2)가 물과 반응하여 형성된 CaOH<sub>2</sub>가 OH<sup>-</sup>를 생성하였기 때문이라고



**Fig. 1.** Changes in pH and oxidation-reduction (redox) potential (ORP) of the eluates from the column containing the basic oxygen furnace slag layer and the soil layer.

볼 수 있다(Mayes et al., 2006; Barisic et al., 2010). 또한 토양층을 통과한 전로제강슬래그 유출수의 pH 증가는 토양층의 완충작용보다 OH<sup>-</sup>에 의한 영향이 더 컸음을 의미한다. 따라서 본 결과는 전로제강슬래그 재사용시 토양 환경의 pH 변화를 고려해야 함을 보여준다.

전로제강슬래그의 용출수 내 인 성분이 있을 경우 중금속과 침전물을 형성해 중금속 거동에 영향을 줄 가능성도 있지만(Proctor et al., 2000; McGowen et al., 2001), 인 성분이 용출수 내 CaO와 반응하여 침전물(예: CaPO<sub>4</sub>)을 형성하여 제거될 가능성도 있어(Blanco et al., 2016), 인 성분의 영향은 크지 않을 것으로 볼 수 있다. 불소의 경우 유의한 차이는 없었으나 평균값이 증가하였는데, 이는 전로제강슬래그 용출수 또는 토양 내 칼슘이온과 불소이온이 결합하여 알칼리 환경에서 CaF<sub>2</sub>를 형성하여 토양에 침전되었기 때문이라고 할 수 있다(Peek and Volk, 1985). 전반적으로 전로제강슬래그의 영향을 받은 토양 내 오염우려물질 함량은 대체적으로 유의한 큰 변화는 없었

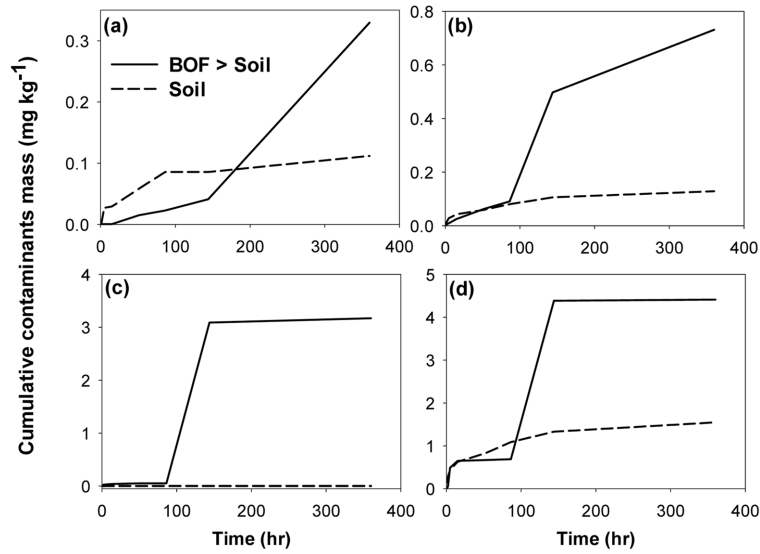


Fig. 2. Cumulative concentrations of (a) As, (b) Ni, (c) Pb, and (d) Zn in the basic oxygen furnace slag leachates that passed through the soil layer (BOF > Soil) and in the control soil (Soil) during the column test.

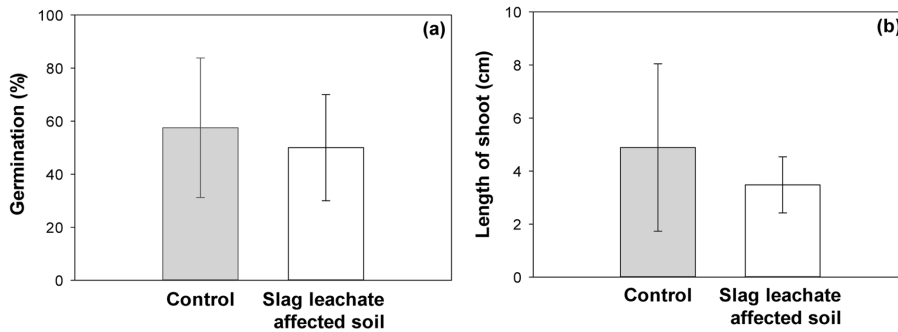


Fig. 3. Effect of basic oxygen furnace slag leachate on plant toxicity (a) Germination of *Spinapis alba* seeds. (b) Length of the shoot in the soil affected by the slag leachate.

지만, Fig. 2에서 보는 것과 같이 중금속마다 시간에 따른 변화 양상은 달랐으나 시간에 따라 슬래그 층과 토양 층을 통과한 유출수의 누적 As, Ni, Pb, Zn 농도가 증가하였다. 반면, 토양 층만 사용한 칼럼의 유출수 내 중금속 누적 농도는 슬래그 층과 토양 층이 있는 칼럼의 유출수에 비해 낮았고, 시간에 따른 변화도 크지 않았다(Fig. 2). 이는 전로제강슬래그를 재사용하여 장기적으로 용출이 지속될 경우 슬래그와 접촉하고 있는 토양층의 주변 토양 내 중금속 축적을 증가시킬 수 있는 가능성을 보여준다.

### 3.2. 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양의 식물독성 변화

Fig. 3는 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양과 그렇지 않은 토양에서의 식물 발아 및 성장을 비교하고

있다. 용출수의 영향을 받은 토양과 대조군 토양에서 적겨자 씨앗의 발아율과 성장 정도는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Fig. 3). 평균값을 비교해 볼 때, 용출수의 영향을 받은 토양에서의 발아율과 식물성장이 다소 감소한 경향을 보이는데, Table 3에서 토양 내 중금속 함량이 As, Cd, Pb의 경우는 감소하는 경향을 보이고 나머지는 유의한 변화를 보이지 않은 것으로 보아, 이는 토양 내 중금속 함량 보다는 pH 변화에 식물 발아와 성장이 영향을 받은 것이라고 볼 수 있다. 대조군 토양의 pH는 5.3인 반면 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양의 pH는 10.9로 증가하였다. 이러한 토양 pH의 증가는 32% 정도의 free CaO를 함유하고 있는 전로제강슬래그가 고알칼리 용출수를 발생하여(Kim, 2014; Choi et al., 2007) 토양 pH에 영향을 준 것으로 볼 수 있다. 마찬가지로

**Table 4.** Effect of the basic oxygen furnace slag leachate on the soil microbial community

Control soil				Soil affected by the slag leachate			
(Sub)Class	Species	Accession#	%	(Sub)Class	Species	Accession#	%
Alphaproteobacteria	<i>Aquamicrobium defluvii</i>	Y15403	68	Bacilli	<i>Brevibacillus limnophilus</i>	AB112717	41
Gammaproteobacteria	<i>Pseudomonas caeni</i>	EU620679	9.2	Actinobacteridae	<i>Arthrobacter oryzae</i>	AB279889	12
Alphaproteobacteria	<i>Reyranella massiliensis</i>	EF394922	4.8	Bacilli	<i>Aeribacillus pallidus</i>	Z26930	11
Betaproteobacteria	<i>Methylibium petroleiphilum</i>	CP000555	3.4	Betaproteobacteria	<i>Massilia aerilata</i>	EF688526	9.1
Betaproteobacteria	<i>Aquabacterium commune</i>	AF035054	3	Actinobacteridae	<i>Arthrobacter pascens</i>	X80740	6.4
Actinobacteridae	<i>Arthrobacter oryzae</i>	AB279889	2.8	Actinobacteria	<i>Cellulomonas carbonis</i>	HQ702749	5.7
Actinobacteridae	<i>Arthrobacter humicola</i>	AB279890	2.5	Betaproteobacteria	<i>Herbaspirillum canariense</i>	HQ830496	4.1
Alphaproteobacteria	<i>Afipia broomeae</i>	U87759	2.1	Actinobacteridae	<i>Arthrobacter humicola</i>	AB279890	4
Bacilli	<i>Paenisporosarcina macmurdoensis</i>	AJ514408	2	Betaproteobacteria	<i>Massilia brevitalea</i>	EF546777	3.5
Gammaproteobacteria	<i>Pseudomonas abietaniphila</i>	AJ011504	1.9	Actinobacteridae	<i>Arthrobacter defluvii</i>	AM409361	3.3

지로, 산성인 하·폐수오니를 토양개량제로 사용할 때 석탄재와 같이 CaO 함량이 높은 폐기물을 섞어 사용하는 연구에서 석탄재 혼합비가 증가함에 따라 토양의 pH가 8-12 정도로 높아지면서 적겨자 씨앗의 발아가 저해 받는 것을 확인하였다(Samara et al., 2008). 전로제강슬래그에서 발생하는 고알칼리 용출수의 영향을 받은 토양 pH의 상승 정도는 성토제로 사용되는 전로제강슬래그의 입자 크기, 즉 물과 접촉하는 표면에 영향을 받을 수 있음을 고려하여야 한다(Lekakh et al., 2008).

**3.3. 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양 내 미생물 군집 변화**

Table 4는 전로제강슬래그의 용출수가 토양으로 유입되는 환경을 모사한 칼럼실험 진행 후, 용출수의 영향을 받은 토양과 그렇지 않은 토양의 미생물 군집을 Class 수준에서 비교하고 있다. 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양에서는 영향을 받지 않은 토양에는 없었던 알칼리 조건에서 포자를 형성하는 Bacilli에 속하는 미생물 종인 *Brevibacillus limnophilus*가 우점하였다(Goto et al., 2004). 또한 극한 환경 조건을 더 잘 견딜 수 있는 그램 양성 미생물 종들이 증가하였다. 예를 들어, 용출수의 영향을 받지 않은 토양에서는 *Arthrobacter oryzae*가 2.8% 밖에 차지하지 않았으나, 알칼리 용출수의 영향을 받은 토양에서는 *A. oryzae*가 12%로 증가하였다(Table 4). 또한 다른 그램 양성 미생물인 *Arthrobacter defluvii*, *Cellulomonas carbonis*, *Aeribacillus pallidus* 등도 용출수의 영향을 받은 토양에서만 발견되었다(Table 4). 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받지 않은 토양에서는 일반 토양에서 주로 서식하고 그램 음성 미생물 종들인 *Aquamicrobium defluvii*와

*Pseudomonas caeni*가 우점하고 있었다(Table 4)(Willems, 2014). 이러한 미생물 군집의 변화는 알칼리 용출수에 의해 토양 pH가 영향을 받아 알칼리를 띠게 되어, 극한 환경에서 견딜 수 있는 미생물 종들이 우점하는 미생물 군집으로 변한 것으로 볼 수 있다(Goto et al., 2004; Garcia-Gil et al., 2013).

**4. 결 론**

본 연구에서는 전로제강슬래그에서 발생한 용출수가 주변 토양에 미치는 영향을 알아보았다. 중금속 및 불소의 토양 축적 측면에서 볼 때, 본 연구에 사용한 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양과 그렇지 않은 토양에서 유의적인 차이는 없었다. 또한, 적겨자를 이용한 식물독성 시험 결과에서도 유의한 용출수 영향이 확인되지 않았으나, 전반적으로 성장이 저해되는 현상이 관찰되었다. 이는 용출수 영향을 받은 토양의 pH 상승 때문으로 볼 수 있다. 이는 전로제강슬래그 용출수의 영향을 받은 토양에서 호알칼리균들이 우점하는 현상으로 뒷받침 할 수 있다. 따라서 본 연구 결과는 전로제강슬래그를 토양 또는 그 일부로 사용하는 경우, 토양의 중금속 및 불소 농도 영향보다는 고알칼리 용출수에 의한 영향에 유의하여야 한다는 것을 시사하며, 전로제강슬래그의 재사용 시 주변 토양 환경에 미치는 영향을 평가할 필요성이 있음을 보여 준다.

**사 사**

이 연구는 한국외국어대학교 교내학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## References

- Adam, G. and Duncan, H., 2002, Influence of diesel fuel on seed germination, *Environ. Pollut.*, **120**(2), 363-370.
- Ahn, J.W., Cho, J.S., Kim, H.S., Han, G.C., Han, K.S., and Kim, H., 2003, Activation property of blast furnace slag by alkaline activator, *J. Korean Ceram. Soc.*, **40**(10), 1005-1014.
- Anderson, C., Deram, A., Petit, D., Brooks, R.R., Stewart, R., and Simcock, R., 2001, Induced hyperaccumulation: metal movement and problems, In: I.K. Iskandar and M.B. Kirkham (ed.), *Trace Elements in Soils: Bioavailability, Flux and Transfer*, Lewis Publishers, New York, p. 63-76
- Barisic, I., Dimeter, S., and Netinger, I., 2010, Possibilities of application of slag in road construction, *Tech. Gazette*, **17**(4), 523-528.
- Barra, M., Ramonich, E.V., and Munoz, M.A., 2001, *Stabilization of soils with steel slag and cement for application in rural and low traffic roads, Proceedings of the beneficial use of recycled materials in transportation application, Arlington, Virginia*, p. 423-432.
- Blanco, I., Molle, P., Saenz de Miera, L.E., and Ansola, G., 2016, Basic oxygen furnace steel slag aggregates for phosphorus treatment, Evaluation of its potential use as a substrate in constructed wetlands, *Water Res.*, **89**(1), 355-365.
- Choi, S., Kim, V., Chang, W., and Kim, E., 2007, The present situation of production and utilization of steel slag in Korea and other countries, *J. Korea Concr. Inst.*, **19**(6), 28-33.
- Czerniawska-Kusaza, I., Ciesielczuk, T., Kusaza, G., and Cichon, A., 2006, Comparison of the Phytotoxkit microbiotest and chemical variables for toxicity evaluation of sediment, *Environ. Toxicol.*, **21**(4), 367-372.
- Das, B., Prakash, S., Reddy, P.S.R., and Misra, V.N., 2007, An overview of utilization of slag and sludge from steel industries, *Resour. Conserv. Recycl.*, **50**(1), 40-57.
- Garcia-Gil, J.C., Kobza, J., Soler-Rovira, P., and Javorekova, S., 2013, Soil microbial and enzyme activities response to pollution near an aluminum smelter, *Clean-Soil, Air, Water*, **41**(5), 485-492.
- Goto, K., Fujita, R., Kato, T., Asahara, M., and Yokota, A., 2004, Reclassification of *Brevibacillus brevis* strains NCIMB 132288 and DSM 64742 (=NRRL NRS-887) as *Aneurinibacillus danicus* sp. Nov. and *Brevibacillus limnophilus* sp. Nov. *Int. J. Sys. Evol. Microbiol.*, **54**, 419-427.
- Hull, S.L., Oty, U.V., and Mayes, W.M., 2014, Rapid recovery of benthic invertebrates downstream of hyperalkaline steel slag discharges, *Hydrobiologia*, **736**(1), 83-97.
- ISO, 2007, Soil quality – Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials; part 3: up-flow percolation test, ISO/TC 21268-3, International Organization for Standardization.
- Kang, W., 2001, Assessment of chemical leachability of steel slag before and after aging treatments for environmentally safe reuse, Master's degree dissertation, Department of Civil Engineering, Hanyang University, p. 28-29.
- Kim, D., 2003, A study on long-term leaching behavior of steel slag before and after aging, Master's degree dissertation, Department of Civil Engineering, Hanyang University, p. 57-71.
- Kim, K.H., Ryu, D.H., Kim, S.W., Lim, J.Y., Lee, J.M., and Lee, Y.J., 2009, Experimental study on Flexural Behavior of RC beams with electric arc furnace oxidizing slag aggregates, *J. Archit. Inst. Korea Struct. Constr.*, **25**(10), 27-34.
- Kim, T.H., 2002, Beneficial reuse of steel slag, *J. Korean Ceram. Soc.*, **5**(5), 14-18.
- Kim, W.K., 2014, Current state of recycling and properties of steel slag, *J. Korean Recycl. Const. Resour. Inst.*, **9**(2), 11-15.
- KISA, 2010, *Steel Statistical Yearbook 2010*, Korean Iron and Steel Association.
- KMOE, 2009, Official Standard Methods of Soil Quality - Metal, ES 07400, Korean Ministry of Environment.
- Kosson, D.S., van der Sloot, H.A., Sanchez, F., and Garra-brants, A.C., 2002, An integrated framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials, *Environ. Eng. Sci.*, **19**(3), 159-204.
- Lee, H. and Lee, D., 2005, Evaluation of Lead, Copper, Cadmium, and Mercury Species in the Leachate of Steel Making Slag by Seawater, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **27**(1), 75-84.
- Lee, K.J., You, S.Y., Lee, S.R., Ku, J.S., Kang, S.H., and Cho, B.S., 2011, Physicochemical properties analysis of rapidly chilled steel slag, *J. Korea Concr. Inst.*, **23**(1), 455-457.
- Lekakh, S.N., Rawlins, C.H., Robertson, D.G.C., Richards, V.L., and Peaslee, K.D., 2008, Kinetics of aqueous leaching and carbonization of steelmaking slag, *Metall. Mater. Trans. B*, **39**(1), 125-134.
- Luxan, M.P., Sotolongo, R., Dorrego, F., and Herrero, E., 2000, Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace, *Cem. Concr. Res.*, **30**(4), 517-519.
- Mahieux, P.Y., Aubert, J.E. Escadeillas, G., and Measson, M., 2014, Quantification of hydraulic phase contained in a basic oxygen furnace slag, *J. Mater. Civil Eng.*, **26**(4), 593-598.
- Manso, J.M., Lopez, V.O., Polanco, J.A., and Setien, J., 2003, The use of ladle furnace slag in soil stabilization, *Constr. Build. Mater.*, **40**, 126-134.
- Mayes, M.W., Younger, P.L., and Aumonier, J., 2006, Buffering of alkaline steel slag leachate across a natural wetland, *Environ.*

- Sci. Technol.*, **40**(4), 1237-1243.
- Mayes, W.M., Younger, P.L., and Aumonier, J., 2008, Hydrogeochemistry of alkaline steel slag leachates in the UK, *Water Air Soil Pollut.*, **195**(1-4), 35-50.
- McGowen, S.L., Basta, N.T., and Brown, G.O., 2001, Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil, *J. Environ. Qual.*, **30**(2), 493-500.
- Munoz-Melendez, G., Korre, A., and Parry, S. J., 2000, Influence of soil pH on the fractionation of Cr, Cu and Zn in Solid phases from a landfill site, *Environ. Pollut.*, **110**(3), 497-504.
- Na, H., Yoon, Y., and Yoon, G., 2011, Environmental effect of the reduced slag in the electric furnace, *J. Korean Geo-Environ. Soc.*, **12**(7), 23-29.
- OECD, 2006, Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test, OECD/OCDE 208, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD).
- Peek, D.C. and Volk, V.V., 1985, Fluoride sorption and desorption in soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**(3), 583-586.
- Poh, H.Y., Ghataora, G.S., and Ghazireh, N., 2006, Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines, *J. Mater. Civil. Eng.*, **18**(2), 229-240.
- Proctor, D.M., Fehling, K.A., Shay, E.C., Wittenborn, J.L., Green, J.J., Avent, C., Bigham, R.D., Connolly, M., Lee, B., Shepker, T.O., and Zak, M.A., 2000, Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags, *Environ. Sci. Technol.*, **34**(8), 1576-1582.
- Riley, A.L. and Mayes, W.M., 2015, Long-term evolution of highly alkaline steel slag drainage waters, *Environ. Monit. Assess.*, **187**(7), 1-16.
- Samaras, P., Papadimitriou, C.A., Haritou, I., and Zouboulis, A.I., 2008, Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime, *J. Hazard. Mater.*, **154**(1), 1052-1059.
- Shen, D.H., Wu, C.M., and Du, J.C., 2009, Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture, *Constr. Build. Mater.*, **23**(1), 453-461.
- Tossavainen, M., Engstrom, F., Yang, Q., Menad, N., Lidstrom Larsson, M., and Bjorkman, B., 2007, Characteristics of steel slag under different cooling condition, *Waste Manage.*, **27**(10), 1335-1344.
- Tsakiridis, P.E., Papadimitriou, G.D., Tsvivilis, S., and Koroneos, C., 2008, Utilization of steel slag for Portland cement clincker production, *J. Hazard. Mater.*, **152**(2), 805-811.
- Waligora, J., Bulteel, D., Degrugilliers, P., Damidot, D., Potdevin, J.L., and Measson, M., 2010, Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slag: a multi-analytical approach, *Mater. Charact.*, **61**(1), 39-48.
- Willems, A., 2014, The family phyllobacteriaceae, In: Edward F.D., Stephen L., Erko S., and Fabiano T.(ed.), *The Prokaryotes: Other Major Lineages of Bacteria and The Archaea*, Springer, Berlin, p. 355-418.