

## 석탄재의 콘크리트 활용에 따른 중금속 함량변화 연구

이진원<sup>1</sup> · 최승현<sup>1</sup> · 김강주<sup>1\*</sup> · 김석휘<sup>2</sup> · 문보경<sup>3</sup>

<sup>1</sup>군산대학교 환경공학과, <sup>2</sup>고등기술연구원, <sup>3</sup>한국서부발전(주)

## A Study on Changes in Heavy Metal Contents in Concrete Prepared Using Coal Ashes

Jinwon Lee<sup>1</sup>, Seung-Hyun Choi<sup>1</sup>, Kangjoo Kim<sup>1\*</sup>, Seok-Hwi Kim<sup>2</sup> and Bo-Kyung Moon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

<sup>2</sup>Institute for Advanced Engineering, Yongin 17180, Korea

<sup>3</sup>Korea Western Power, Co., Ltd., Taean 32140, Korea

(Received: 14 August 2018 / Accepted: 29 August 2018)

In many countries, recycling coal ashes as backfill materials for subsided lands, abandoned mine tunnels, and road pipeline constructions by making low-strength concretes with minimal amounts of cement is frequently considered for massive treatment of coal ashes. This study investigates the variation of heavy metals in the concrete test pieces prepared for the cases of using only Portland cement as binding material, fly ash as a replacement of the cement, sand as aggregates, and disposed ashes in the ash ponds as a replacement of aggregates. Heavy metal contents were measured based on the aqua regia extraction technique following the Korean Standard for Fair Testing of Soil Contamination and the influences of each materials on the total heavy metal contents were also assessed. Results show that the cement has the highest Cu, Pb, and Zn concentrations than any other materials. Therefore, the test pieces show significant concentration decreases for those metals when the cement was replaced by fly ash. Pondered ash shows low concentrations relative to fly ash in most of the parameters but shows higher Cu and Ni, and lower Pb levels than the sand aggregate. In overall, heavy metal levels of the test pieces are regulated by mixing among the used materials. Test pieces prepared during this study always show concentrations much lower than the Worrysome Level of Soil Contamination (Area 1), which was designated by the Soil Environment Conservation Act of Korea.

**Key words** : low strength concrete, backfill, heavy metals, coal ashes, pondered ashed, cement

많은 나라에서는 화력발전소 석탄연소 잔재물로 생산되는 석탄재를 소량의 시멘트와 혼합, 저강도 콘크리트를 만들어 지반함몰지, 폐갱도, 도로관거 뒷채움재 등으로 재활용하는 방안이 석탄재의 대규모 처리방안으로 자주 검토된다. 본 연구에서는 석탄재로 저강도콘크리트를 만들어 콘크리트 내 중금속함량 변화를 고찰하였다. 이를 위하여 시멘트만을 사용하는 경우와 시멘트의 반을 비산재로 대체하는 경우, 모래를 골재로 사용하는 경우, 그리고 회처리장의 매립재로 모래골재를 대체하는 경우에 대한 콘크리트 공시체를 제작하여 중금속농도 변화를 고찰하였다. 중금속 함량은 토양오염공정시험기준에 따라 이루어졌으며, 중금속함량에 가장 큰 영향을 주는 재료들도 평가하였다. 연구결과, 시멘트는 다른 어떤 재료를 보다 Cu, Pb, Zn에서 현격히 높은 중금속농도를 보였다. 이로 인하여 시멘트를 비산재로 대체할 경우 중금속 농도는 뚜렷이 낮아지는 경향을 보였다. 매립재는 전체적으로 비산재에 비하여 낮은 중금속농도를 보였지만, 모래보다는 높은 Cu 및 Ni농도와 낮은 Pb농도를 보였다. 전체적으로는 콘크리트 내 중금속농도는 각 재료

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

\*Corresponding author: kangjoo@kunsan.ac.kr

의 혼합에 의하여 결정되는 양상을 보였다. 본 연구에서 제작된 공시체는 모든 조사된 항목에 있어 토양환경보전법이 정한 토양오염우려기준(1지역)보다 현격히 낮은 농도를 보였다.

**중요어** : 저강도 콘크리트, 뒷채움, 중금속, 석탄재, 매립재, 시멘트

## 1. 서 론

화력발전소에서 석탄연소의 부산물로 발생하는 석탄재는 전기집진장치로 집진되는 비산재(fly ash)와 연소로의 바닥으로 낙하하여 포집되는 바닥재(bottom ash)로 구분된다. 재활용되지 않는 비산재는 분쇄된 바닥재와 함께 물에 혼합되어 관을 통하여 ash pond라고 하는 저수지로 이송, 매립된다. 석탄화력발전소의 증설에 따라 석탄연소의 부산물인 석탄재 발생은 날로 증가할 것으로 예상되고 있다. 그러나, 최근에는 주민의 반대와 전량 재활용을 목표로 하는 정부정책에 의하여 신규 석탄재 매립장 확보가 매우 어려운 실정이다. 이와 같은 문제는 우리나라 뿐 아니라, 전 세계 대부분의 나라가 직면하고 있으며, 이에 석탄재를 대규모로 소비할 수 있는 방안을 마련하는 연구가 오래전부터 활발하게 진행되어 왔다(Ahmaruzzaman, 2010; Hemalatha and Ramaswamy, 2017; Jiang *et al.*, 2017). 그러나, 석탄재, 특히, 비산재에는 일부 중금속을 포함하고 있는 것으로 알려져 있으며(Eary *et al.*, 1990; Kim *et al.*, 2009, 2010, 2017), 이로 인하여 석탄재 재활용에 장애가 되고 있다.

유해물질을 포함하는 토양 또는 폐기물의 처리공법 중에는 고화제를 첨가하여 고형물질을 형성시킴으로써, 유해물질을 안정화시키는 고형화/안정화 공법이 있다(USEPA, 2000). 이는 유해물질을 고화제 등과 혼합하여 물리적 및 화학적으로 안정한 형태로 전환시켜 이동성이 적거나 덜 유해하게 만드는 공법이다. 시멘트는 낮은 투수성과 높은 내구성으로 인하여 고형화/안정화의 고화제로 가장 흔하게 사용된다(Park, 2000). 시멘트를 이용한 고형화 공법은 특히 중금속을 안정화하는 효과가 높다고 알려져 있으며(Van der Sloot, 2002; Chen *et al.*, 2009; Choi *et al.*, 2009; Shi and Kan, 2009; Vyšvaril and Bayer, 2016), 일찍이 1950년대부터 방사성 폐기물을 안정화시키는 데에 사용되어져 왔다(Park, 2000).

시멘트는 CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등을 주성분으로 하며, 포졸란 반응을 일으키는 alite(3CaO·SiO<sub>2</sub>; C<sub>3</sub>S)와 belite(2CaO·SiO<sub>2</sub>; C<sub>2</sub>S)와 같은 광물상을 포함

하고 있다(Chen *et al.*, 2009). C<sub>3</sub>S는 시멘트 화합물 중 가장 많은 부분을 차지하며, 초기강도 발현과 관련이 있으며, C<sub>2</sub>S는 장기 강도발현과 관련이 있다. C<sub>3</sub>S와 C<sub>2</sub>S가 물과 반응하면 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)이 생성되고, 이것이 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>과 반응하면서 C-S-H(calcium silicate hydrate gel)가 형성되고 강도는 높아지게 된다(Taylor, 1997). 이러한 과정을 포졸란 반응이라고 한다.

비산재도 시멘트에 비하여는 작지만 포졸란 특성을 가지고 있기 때문에, 시멘트나 콘크리트 원료로 흔하게 사용되어 지기도 한다(ACAA, 2003; Bui *et al.*, 2015). 비산재를 콘크리트 생산에 있어 시멘트 대체재로 사용하면, 구형의 입자로 인하여 콘크리트 반죽의 유동성이 증가하고, 수화열 발생이 낮아지며 장기강도는 향상되는 장점을 가지고 있다(Sahmaran and Li, 2009). 이에 따라, 콘크리트 생산, 시멘트 클링커 등 시멘트와 관련된 분야에 비산재가 가장 많이 재활용된다(Hemalatha and Ramaswamy, 2017). 이 경우, 석탄재에 포함된 중금속이 같이 안정화될 수 있다는 장점도 있다.

최근, 우리나라에서는 도심에서의 지반침하 또는 지반함몰현상이 빈번하게 관찰되고 있다. 이는 뒷채움재로 사용된 골재가 시공 후 시간이 지남에 따라 침하되거나, 상하수도관이 누수 됨에 따라 씻겨나가는 것과 관련이 있다(Tohda and Hachiya, 2005; Oh *et al.*, 2015; Sato and Kuwano, 2015). 이에 따라, 도로의 차랑허중은 견디고 상하수도관의 누수에 의해 씻겨나가지 않을 만큼의 강도를 갖는 저강도 콘크리트를 뒷채움재로 활용하기 위한 방안이 제안되고 있다(Lee, 2017). 마찬가지로, 국내의 모 기관에서 폐광산 갱도를 석탄재로 채우는 시범사업을 실시하여 본 결과, 석탄재가 지표로 흘러나오는 경우가 발생한 바 있었다고 한다. 이는 점착성이 거의 없고 밀도 또한 작은 비산재의 특성 때문에 지하수에 의하여도 유출된 것으로 보인다. 그러나, 석탄재를 소량의 시멘트와 섞어 갱도를 채워준다면 지하수에 의한 침식을 막아줄 뿐 아니라, 어느 정도의 강도도 확보되어 갱도의 매몰방지도 도움이 될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 이처럼 석탄재를 소량의 시멘트와 섞어 저강도 콘크리트제조

**Table 1.** Size analysis results of the concrete materials used for this study (Lee *et al.*, 2018)

Size range (mm)	>5	1-5	0.5-1	0.25-0.5	0.15-0.25	0.063-0.15	<0.063
Ponded Ash	21.5%	30.8%	9.8%	5.8%	4.1%	8.4%	19.6%
Fly ash	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	1.0%	7.9%	90.7%
Cement	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
Sand	0.0%	27.1%	30.0%	19.8%	12.4%	8.6%	2.2%

에 사용함에 따라 콘크리트 내 중금속의 함량이 어떻게 변화되는지를 고찰하였다.

국내에서는 고품 폐기물의 경우, 환경부가 마련한 폐기물공정시험기준에 따라 pH를 중성으로 조정한 증류수를 이용한 용출법으로 분석하도록 하고 있다(환경부, 제2016-196호). 그러나, 콘크리트를 갱도매립재나 도로 뒷채움재로 사용하면, 중국에는 그대로 토양화되는 상황이 흔하게 발생할 수밖에 없으며, 본 연구는 이와 같은 상황을 대비하기 위한 것이라고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 제작한 콘크리트의 중금속함량을 토양오염공정시험기준(환경부, 제2013-113호)을 이용하여 분석하고, 토양오염기준과 비교하였다. 토양오염공정시험기준은 왕수(aqua regia)를 이용하여 중금속을 추출하며, 이 때문에 폐기물공정시험기준에 따른 분석보다 훨씬 높은 중금속 농도가 도출된다.

본 연구 결과는, 석탄재를 시멘트와 혼합하여 콘크리트를 제작한다고 했을 때, 콘크리트 내 중금속의 대부분은 석탄재가 아니라 시멘트에서 기원하는 것을 보여준다. 이 때문에, 비산재를 시멘트의 대체재로 사용할 경우, 시멘트에 포함된 중금속의 상당부분이 저장될 수 있음을 지시한다.

## 2. 연구재료 및 방법

### 2.1. 연구재료

본 연구에 사용된 매립재와 비산재는 (주)한국서부발전의 태안화력발전본부에서 제공 받았다. 매립재(ponded ash)는 태안화력발전본부의 회처리장(ash pond)에 매립되어 있던 석탄재를 말한다. 매립재는 비산재와 바닥재가 혼합된 것이라고 할 수 있다. 본 연구에 사용된 비산재는 발전소에서 연소 후에 곧바로 포집된 것으로써, 물과는 한 번도 접촉하지 아니한 것이다. 반면 매립재는 상당부분의 중금속이 물에 의해 씻겨진 상태라고 할 수 있다(Kim, 2013). 시멘트는 시멘트 규격(KS L 5201)에 만족하는 국내 A사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하였다. 콘크리트용 골재로는 염분이 제거된 바닷모래를 구매하여 사용하였다.

본 연구에 사용된 콘크리트 재료에 대한 입도분석결과에 의하면(Lee *et al.*, 2018), 비산재는 0.063 mm이하 크기가 전체의 약 90.7%를 차지하였다(Table 1). 매립재는 1 ~ 5 mm구간의 입도가 전체의 52.3%, 0.150 mm 이하 크기는 28%의 입도분포를 보였다. 본 입도분석을 바탕으로 볼 때, 비산재는 매립재의 약 28%를 차지하는 것으로 보여 진다. 골재로 사용된 모래는 0.5 mm~1 mm 크기가 전체의 30%를 차지하였으며, 0.15 mm이하 입도는 바닥재(28%)에 비하여 미미하였다(10.8%). 시멘트는 0.063 mm 체를 100% 통과하였다.

### 2.2. 공시체제작

본 연구를 위하여 제조된 공시체는 크게 시멘트의 50%를 비산재로 대체한 집단(Group A)과 그렇지 않은 집단(Group B)으로 구분된다(Table 2). 전자의 경우, 시료의 ID가 'A'로 시작하며, 후자의 경우는 'B'로 시작한다. 각 집단 내의 공시체들은 매립재와 모래의 비를 0:100, 30:70, 60:40, 100:0 등 4가지로 달리하여 제작하였다(Table 2).

본 연구에서는 뒤채움재로 활용하기 위한 저강도 콘크리트를 대상으로 하기 때문에, 시멘트 사용량을 최소화하였다. 사용된 시멘트량은 공시체 전체무게의 6%이며, 시멘트 대신 비산재를 첨가할 때는 시멘트를 3%만 사용하고 나머지 3%는 비산재를 첨가하여 공시체를 제작하였다. 일반 콘크리트(ordinary concrete) 제

**Table 2.** Relative fractions of solid materials used for test piece preparation

Group	Sample ID	Cement	FA	BA	Sand
		wt% (dry)			
Group A	A1	3	3	0	94
	A2	3	3	28	66
	A3	3	3	56	37
	A4	3	3	93	0
Group B	B1	6	0	0	94
	B2	6	0	28	66
	B3	6	0	56	37
	B4	6	0	93	0

FA = fly ash, BA= bottom ash



Fig. 1. Concrete test pieces prepared for this study.

조에 있어 시멘트의 함량은 그 용처, 골재종류에 따라 다르나 10~25%정도의 범위를 갖는다.

공시체 제작을 위하여, Table 2에 제시된 배합비에 따라 준비된 재료들을 건비빔한 후, 건조중량의 20%에 해당하는 물을 첨가하여 모든 재료들이 고루 섞일 수 있도록 충분히 혼합하였다. 이와 같이 준비된 콘크리트반죽은 높이 200 mm, 지름 70 mm 되는 원통형 몰드에 붓고 7일간 상온에서 굳힌 후 몰드를 분리하였다(Fig. 1). 이후 공시체에 젖은 덮개를 씌워 다시 21일간 습윤-양생하였다.

### 2.3. 중금속 분석

중금속 분석은 시멘트, 모래, 비산재, 바닥재 등의 공시체 재료와 제조된 공시체에 대하여 이루어졌다. 중금속 분석을 위해 공시체를 3등분하여, 가운데 부분을 대상으로 분석을 수행하였다. 우리나라의 토양오염공정시험기준은 토양을 채질하여 0.15 mm이하의 입자를 대상으로 분석하도록 하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 시료 전체가 0.15 mm체를 통과하도록 공시체를 완전히 분쇄하는 방법으로 분석용 시료를 조제하였다. 조제된 시료 약 3 g을 250 mL 반응용기에 넣고 증류수로 시료를 적셨다. 이후, 염산 21 mL와 질산 7 mL을 첨가하여 가열-분해시켜 중금속이 용출되도록 하였다.

이처럼 용출된 용액은 불꽃원자흡광도계(Varian AA240FS)로 정량하였으며, 비소는 불꽃원자흡광도계에 수소화물발생장치(Hydride generator, Varian VGA77)를 장착하여 분석하였다. 수은은 냉증기법으로 분석하였다.

## 3. 결 과

### 3.1. 공시체 재료의 중금속 함량

시멘트, 비산재, 매립재, 모래 등 콘크리트 재료들에

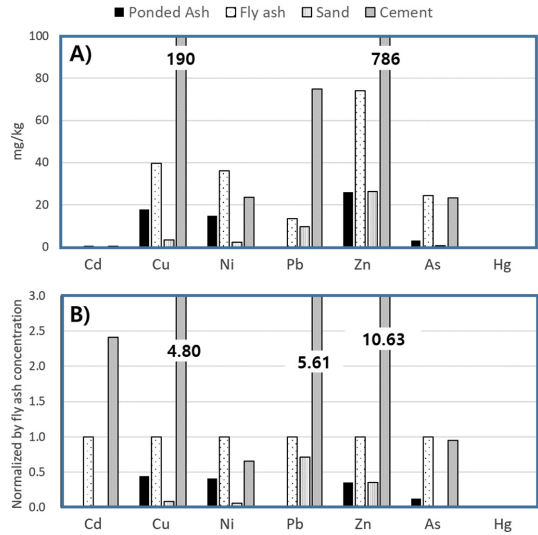


Fig. 2. Heavy metal analysis results for concrete materials. A) measured concentration and (B) concentrations normalized by fly ash level.

대한 중금속 분석한 결과는 Fig. 2에 도시하였다. 본 분석은 환경부가 고시한 토양오염항목(토양환경보전법 시행규칙 별표 1)의 중금속 8개 항목 중 6개 Cr을 제외한 As, Cd, Cu, Pb, Zn, Hg, Ni등 7개 항목에 대하여 이루어졌다. 분석결과, 비산재의 중금속 농도는 토양오염우려기준 1지역의 기준치(토양환경보전법 시행규칙 별표 1)를 모두 넘어서지 아니하는 것으로 나타났다. 다만, As에 있어서만 1지역 기준치(25 mg/kg)에 근접하는 값(23.2 mg/kg)을 보였다.

시멘트는 사용된 콘크리트 재료를 중에서 가장 높은 수준의 중금속농도를 보였다. 시멘트의 Zn, Pb, Cu, Cd 등은 비산재보다 각각 10.6, 5.6, 4.8, 2.4배 높은 농도를 보였다. Zn와 Cu는 토양오염우려기준 1지역 기준(각 300, 150 mg/kg)을 상회하였다. Ni의 경우는 시멘트가 비산재보다 농도가 낮았으며, As는 시멘트와 석탄재가 비슷한 농도값을 보였다. 시멘트에서 높은 중금속의 농도를 보인 것은 비산재, 슬래그, 폐주물사, 폐타이어, 폐합성수지, 고형폐기물 등이 시멘트 생산의 대체 원료 및 대체 연료로 사용되기 때문으로 보인다(Lee, 2017; Ke, 2018).

골재로 사용된 모래는 Pb를 제외한 대부분의 항목에서 중금속 농도가 사용된 재료들 중 가장 낮았다(Fig. 2). Pb의 경우는 대체골재로 사용된 매립재(0.21 mg/kg)보다 약 47배 높은 값(9.53 mg/kg)을 보였으며, 이는 비산재(13.4 mg/kg)보다 조금 낮은 수치이

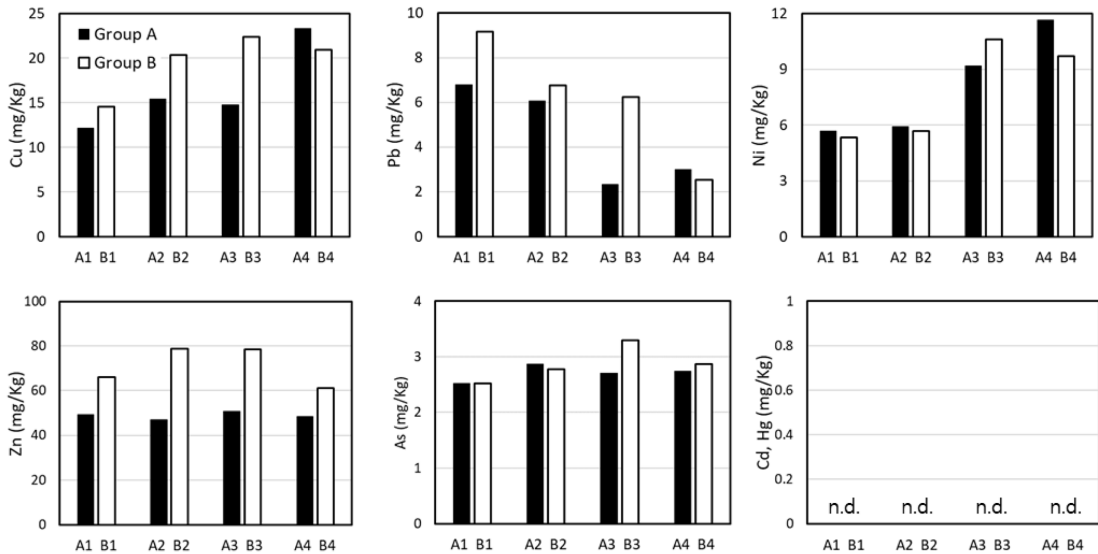


Fig. 3. A comparison of the heavy metal contents between Group A and Group B test pieces.

다. 그러나, 시멘트(74.9 mg/kg)에 비하여는 현저히 낮았고, 토양오염우려기준(1지역) 200 mg/kg의 5%에도 미치지 아니하였다. 이밖에 Hg는 모든 시료에서 검출한계 이하의 값을 보였고, Cd도 시멘트와 비산재를 제외하면 모두 검출한계 이하의 값을 보였다.

### 3.2. 비산재를 시멘트 대체재로 사용함에 따른 중금속 함량변화

Fig. 3는 비산재를 시멘트 대체재로 사용하여 제작한 공시체(Group A)와 비산재를 사용하지 않은 공시체(Group B)에 대한 중금속 분석 결과이다. 비산재를 첨가하여 만든 공시체(Group A)는 비산재를 첨가하지 않은 공시체(Group B)에 비해 Zn의 함량이 낮게 나타났다. Cu와 Pb의 경우도 매립재로 모래를 완전히 대체한 경우(A4, B4)를 제외하고는 시멘트의 일부를 비산재로 대체한 경우에 농도가 낮게 나타났다. 공시체 제작 재료의 중금속 함량(Fig. 2)을 고려할 때, 이와 같은 결과는 시멘트가 비산재보다 Cu, Pb, Zn의 함량이 현저히 높은 것을 반영하는 것으로 판단된다. 반면, Ni과 As는 두 공시체 집단 간 차이가 크지 않았으며, 이 역시 시멘트와 비산재가 Ni과 As 농도에서는 큰 차이를 보이지 않았던 것을 반영하는 것으로 보인다.

### 3.3. 매립재를 모래골재 대체재로 사용함에 따른 중금속 함량변화

모래골재의 대체재로 매립재를 사용할 경우, 매립재

의 대체비율이 많아짐에 따라(즉, A1, B1에서 A4, B4로 감에 따라) Cu와 Ni의 경우는 뚜렷이 증가되는 양상을 보였다(Fig. 3a,c). 비록 매립재의 Cu, Ni농도는 시멘트나 비산재에 비하여는 매우 낮았지만, 모래보다는 현저히 높았고, 또, 본 연구의 경우, 골재 함량이 94%에 이르기 때문에 이들 중금속의 전체 농도는 매립재의 사용에 크게 의존하여 나타난 것이다. 반면, Pb의 경우는 매립재를 골재의 대체재로 사용할수록 콘크리트 내 농도는 급격히 낮아지는 경향을 보였다. 이는 Pb가 매립재에서는 거의 검출되지 않았던 반면, 모래는 비산재에 필적하는 수준의 농도를 보인 것(Fig. 2)과 관련이 있어 보인다. 모래와 매립재간의 농도차이가 크지 않았던 Zn과 As의 경우는 매립재를 모래의 대체재로 사용하여도 농도변화가 크지 않았다.

## 4. 토 의

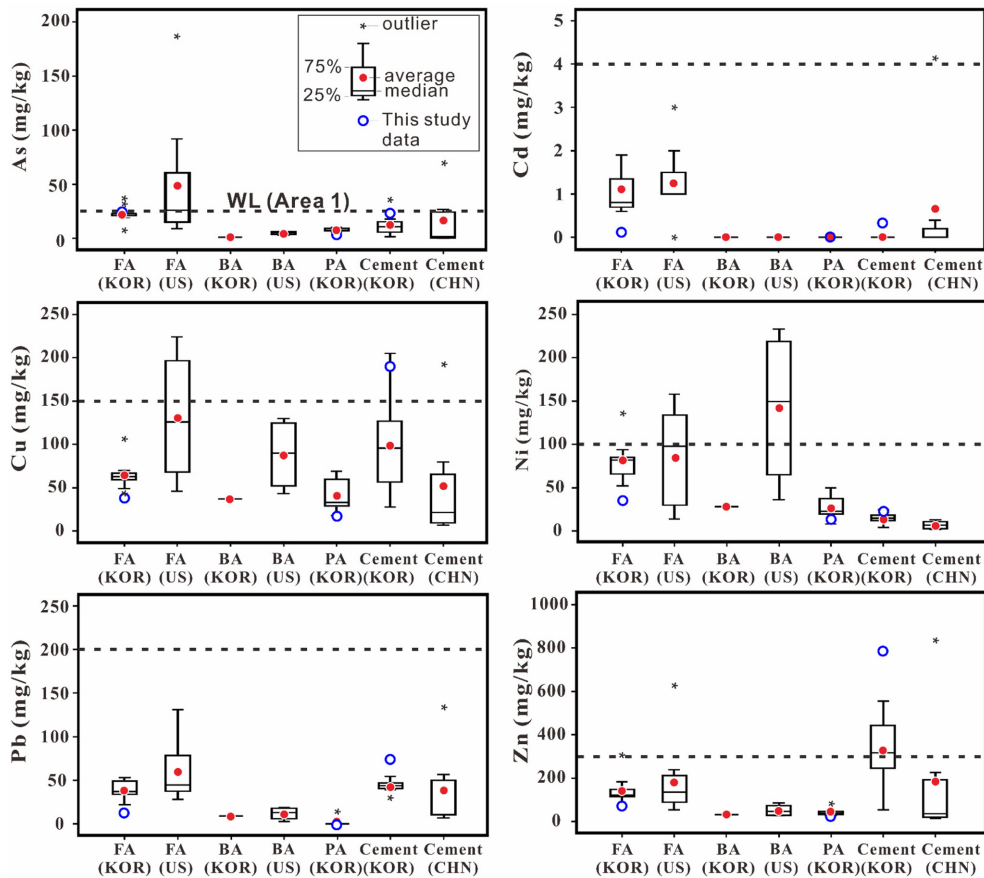
폐기물공정시험기준과 같이 약한 용출용액을 이용하는 경우에는 석탄재로 콘크리트를 만든다고 했을 때, 중금속의 용출은 현저히 줄어들 것으로 예상된다(Park, 2000; Choi *et al.*, 2009). 석탄재를 콘크리트로 만들어 하나의 큰 덩어리로 존재하면, 접촉면적도 줄어들어 중금속의 용출은 더욱 줄어들게 될 것이다. 본 연구에서는 중금속분석이 왕수를 사용하여 이루어졌기 때문에 콘크리트의 중금속함량이 사용된 재료들의 혼합비에 의해 결정되는 것을 보여주었다. 따라서, 유희폐

기물을 콘크리트로 만들어 고형화한다고 해도 토양오염공정시험기준에 따른 분석결과를 바탕으로 법적 환경관리기준을 설정한다면 실질적인 고형화/안정화 효과를 기대할 수는 없을 것으로 보인다.

본 연구에 사용된 콘크리트 재료 중 시멘트가 가장 높은 중금속함유량을 보였고, 비산재나 매립재의 사용은 시멘트의 중금속농도를 현격히 희석해주는 효과를 보여주었다. 이로 인하여 본 연구에서 제작한 공시체는 모두 토양오염우려기준 1지역기준치에 크게 미치지 못하였다. 국내에서 발생하는 시멘트, 비산재, 매립재 등의 중금속농도가 본 연구에 사용한 재료들과 비슷한 상황이라면, 본 연구의 결과는 석탄재로 저항토 콘크리트를 만들어 도로뒤편재나 광산의 폐갱도층진재로 활용하고 그대로 토양화시키는 것도 가능한 방법임을

지시하는 것이다.

본 연구에서는 국내의 시멘트, 비산재, 바닥재, 매립재의 중금속농도 자료를 조사하였다(Fig. 4). Ke (2018)가 국내 7개 회사에서 생산된 시멘트를 수집하여 토양오염공정시험기준에 따라 분석한 결과(Table 3), 이들은 Cu와 Zn항목에서 국내에서 발생하는 비산재보다 높은 농도를 보였고, As와 Pb는 비슷한 수준을, Ni과 Cd는 다소 낮은 농도를 보였다(Fig. 4). 그러나 바닥재와 매립재는 시멘트나 비산재보다 현격히 낮은 농도를 보였다. 본 연구에 사용되었던 시멘트의 중금속농도는 대체로 Ke (2018)가 제시한 범위 안에 해당되나, Pb와 Zn는 그 범위를 상회하였다. 이는 시멘트의 중금속 농도가 그때그때 사용하는 폐기물에 크게 영향을 받음을 지시하는 것으로 판단된다. 시멘트가 높은 Zn농도를 보



**Fig. 4.** A comparison of reported heavy metal contents in fly ashes, bottom ashes, ponded ashes, and cements. Data are (1) from Kim (2013), Jeong *et al.* (2015), and references therein for FA (fly ash) and BA (bottom ash), (2) from Jung *et al.* (2012) for PA (ponded ash), and (3) from Ke (2018) for Cement. WL –Worrysome Level of Soil Contamination of Korea, KOR-Korea, US-United States, and CHN-China.

**Table 3.** Heavy metal concentrations of the Portland cements produced by 7 different companies in Korea (Ke, 2018)  
(unit = mg/kg)

	Cd	Cu	Pb	Ni	Zn	As
Average	n.d.	99.3	43.2	14.8	329	12.7
Standard deviation	n.d.	60.4	7.80	6.62	182	11.1
Maximum	n.d.	205	54.6	24.5	556	34.7
Minimum	n.d.	27.7	29.3	3.91	52.9	1.40

All the analyses were done based on Korean Standard for Fair Testing of Soil Contamination.

인 것은 페타이어와, Cu와 Pb는 폐주물사 등 다른 폐기물과 관련이 있을 것으로 추측된다(Achternbosch *et al.*, 2003; Rhodes *et al.*, 2012).

외국에서도 각종 폐기물을 시멘트제조에 대체 연료나 대체 원료로 사용하기 때문에, 외국산 시멘트도 높은 중금속농도를 보이기도 한다(Achternbosch *et al.*, 2003). 평균만을 비교했을 때, 중국 시멘트는 우리나라 시멘트에 비하여 As, Cd에 있어 높은 농도를 보였고, Cu, Ni, Pb, Zn 등에서는 낮은 농도를 보였다(Fig. 4). 중국에서는 폐기물을 사용하지 않는 시멘트공장도 있으며, 여기에서 생산된 시멘트는 매우 낮은 중금속 농도를 보이는 것으로 보고되어 있다(Ke, 2018).

석탄에 포함된 중금속은 상당부분 노내 연소온도에서 휘발된다(Eary *et al.*, 1990). 휘발된 중금속은 비산재와 함께 배기구를 통하여 노를 빠져나가며, 배기 가스의 온도가 낮아지면서 비산재의 표면에 침착되고(Eary *et al.*, 1990) 비산재는 전기집진장치로 포집된다. 국내 비산재는 미국 비산재에 비하여 상대적으로 좁은 농도범위를 보인다(Kim, 2013; Jeong *et al.*, 2015). 이는 국내 석탄화력발전소가 대부분 비슷한 탄종(무연탄 또는 역청탄)과 비슷한 연소방식을 사용하는 것(미분탄 연소방식)과 관련이 있어 보인다(Kim, 2013). 본 연구에 이용된 비산재의 중금속 농도는 Jeong *et al.*(2015)과 Kim(2013)이 전국 석탄화력발전소에서 발생된 비산재에 대하여 분석한 결과 값보다 다소 낮거나 하한치에 가까웠다(Fig. 4). 이 같은 차이는 분석방법의 차이에 의한 것이라고 할 수 있다. Jeong *et al.*(2015)과 Kim(2013)의 결과는 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn는 완전분해 방식으로, As와 Hg는 중성자활성화분석(Instrumental Neutron Activation Analysis; INAA)법으로 분석한 것이다. 여기에서 완전분해 방식이란, 불산 그리고 질산 및 과염소산 혼합액으로 가열 및 용해하여 말린 다음, 왕수를 가하여 완전히 용해시키는 것을 말한다. 이 경우, 왕수에 녹지 않는 석영, 장석 등 규산염

광물까지 모두 용해되기 때문에 실제적인 '전함량'분석 방법이라고 할 수 있다(Kim, 2013). INAA법은 증성자를 조사하여 여기에서 발생하는 방사선으로 시료에 포함된 원소를 분석하는 방법으로 이 역시 전함량분석이라고 할 수 있다.

국내에서 생산되는 '순수 바닥재'에 대한 분석결과는 단 1개 발전소(미분탄 연소 발전소)에 대한 것만이 유효하였다(Kim, 2013). 여기에서 '순수 바닥재'라 함은 물과 한 번도 접촉하지 않아, 원래의 원소가 그대로 표면에 보존되어 있는 바닥재를 말한다. 그러나, 연소 방식이 비슷한 다른 발전소에서 생산되는 바닥재들도 비슷한 수준의 농도를 보일 것이라고 판단된다. 국내 발전소에서 바닥재는 연소로에서 용융된 회가 서로 엉겨 붙어 크기가 커지면서 노의 아래로 떨어지면서 생성된다. 따라서, 바닥재는 고온에서 배기가스와 분리되고 이 때문에 국내 바닥재는 매우 낮은 중금속농도를 보인다(Kim, 2013; Kim *et al.*, 2017). 미국의 바닥재가 상대적으로 매우 높은 중금속농도를 보이는 것은 탄종 및 연소방식의 차이에 의한 것으로 판단된다.

매립재도 비산재나 시멘트에 비하여 매우 낮은 농도를 보였다. 이는 매립재의 대부분(본 연구의 경우, 약 70%)을 바닥재가 차지하고, 나머지 20~30%를 차지하는 비산재도 ash pond에 씻기게 된 결과로 판단된다(Jung *et al.*, 2012; Kim, 2013; Kim *et al.*, 2014). 본 연구에 사용된 매립재가 모래보다도 낮은 Pb농도를 보인 것(Fig. 2)도 이와 관련된 것으로 판단된다.

기존 자료에 대한 검토결과, 국내에서 생산되는 석탄재 중, 적어도 바닥재와 매립재는 국내생산 시멘트에 비하여 상당히 낮은 농도를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 상황에서는 이들을 소량의 시멘트를 사용하여 최소한의 강도만을 요구하는 콘크리트로 만들어 갯도채움재나 도로 뒷채움재 등에 사용하고 토양화 되도록 두어도 토양환경기준치(우리기준 1지역)를 넘어설 우려는 없을 것으로 보인다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 석탄재를 도로관로 또는 폐갱도 뒤편 채움재용 저강도콘크리트로 재활용함에 따른 환경적 영향을 평가, 고찰하였다. 석탄재를 아무런 처리 없이 그대로 뒤편채움재로 활용한다고 하였을 때, 상하수도관의 누수 또는 지하수로 인하여 침식되는 것을 방지하기 위하여 소량의 시멘트를 첨가하여 저강도 콘크리트를 제작, 사용하는 방안을 생각하였고, 그에 따라, 콘크리트 내 중금속함량 변화를 조사하였다. 비록 저강도 콘크리트이기는 하나, 석탄재를 그냥 매립하는 것보다는 차량의 하중으로 인한 침하, 지반함몰 방지에도 큰 도움이 될 것이라고 판단된다.

본 연구를 위하여 콘크리트 재료(포틀랜드 시멘트, 모래, 매립재, 비산재)들을 다양하게 혼합하여 실험용 콘크리트 공시체를 제작하였다. 본 연구에서는 비산재를 시멘트 대용으로 사용하고 매립재를 골재대용으로 사용함에 따른 콘크리트내 중금속함량 변화를 검토하였다. 본 연구에서는 채움재로 사용된 콘크리트를 그대로 토양화시키는 것을 생각하였기 때문에 공시체에 대한 중금속 분석은 토양오염공정시험법을 따랐으며, 이를 위하여 0.15 mm 표준체를 모두 통과되도록 공시체를 완전히 분쇄하였다.

본 연구에 사용된 공시체 재료(비산재, 매립재, 시멘트, 모래)에 대한 중금속 분석 결과, 시멘트와 비산재는 비교적 높은 중금속함량을 보였고, 모래와 바닥재의 중금속함량은 매우 낮았다. 시멘트에서는 Cu, Zn 및 Pb의 농도가 다른 어떤 재료 보다 높았으며, 특히, Cu와 Zn는 토양오염우려기준(1지역)을 상회하였다. 반면, Ni은 비산재에서 높게 나타났다. As는 비산재와 비슷한 수치를 보였다. 골재로 사용된 모래는 전체적으로 가장 낮은 농도를 보였다. 모래의 대체재로 사용된 매립재는 중금속농도가 낮은 바닥재가 대부분을 차지할 뿐 아니라, 소량을 차지하는 비산재도 저수지 물에 씻겨, 막 생산된 비산재나 시멘트보다 매우 낮은 중금속 농도를 보였다. Cd, Pb, Hg는 매립재에서 거의 검출되지 않았다. 매립재의 Pb농도는 모래보다도 현격히 낮은 값을 보였다.

제작된 콘크리트 공시체들의 중금속 농도는 사용된 재료의 혼합비율에 의해 결정되는 양상을 보였다. 이로 인하여, 비산재로 시멘트를 대체할수록 Cu, Pb, Zn의 농도가 낮아지는 경향을 보였고, 매립재로 모래를 대체할수록 Ni, Cu는 증가되는 양상을, Pb는 감소되는 양상을 보였다. 매립재의 낮은 중금속농도로 인하여 모

래골재를 매립재로 100% 대체한다고 하여도 모두 토양오염우려기준(1지역)에 크게 미치지 못하였다. 이와 같은 결과는 소량의 시멘트만을 섞어 매립재를 저강도 콘크리트로 만들어 뒤편채움재 등으로 활용하는 것은 고려할 만한 석탄재 재활용방안임을 지시한다.

## 사 사

본 논문은 (주)한국서부발전이 연구비를 지원하여 수행된 “친환경 석탄회 재활용 기술개발: 도로굴착 복구 뒤편채움재 활용기술 개발”연구 결과로 작성되었다.

## References

- ACAA(American Coal Ash Association) (2003) Fly ash facts for highway engineers. Technical Report FHWA-IF-03-019.
- Achternbosch, M., Brautigam, K.R., Hartlieb, N., Kupsch, C., Richers, U. and Stemmermann, P. (2003) Heavy metals in cement and concrete resulting from the co-incineration of wastes in cement kilns with regard to the legitimacy of waste stabilisation. Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA 6923.
- Ahmaruzzaman, M. (2010) A review on the utilization of fly ash. *Prog. Energy Combust. Sci.*, v.36, p.327-363.
- Bui, P.T., Ogawa, Y., Nakarai, K. and Kawai, K. (2015) A study on pozzolanic reaction of fly ash cement paste activated by an injection of alkali solution. *Constr. Build. Mater.*, v.94, p.28-34.
- Chen, Q.Y., Tyrer, M., Hills, C.D., Yang, X.M., Carey, P. (2009) Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: A review. *Waste Management*, v. 29, p. 390-403.
- Choi, W.H., Lee, S.R. and Park, J.Y. (2009) Cement based solidification/ stabilization of arsenic-contaminated mine tailings. *Waste Management*, v.29, p.1766-1771.
- Eary, L.E., Rai, D., Mattigod, S.V. and Ainsworth, C.C. (1990) Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: II. Review of the minor elements. *J. Environ. Qual.*, v.19, p.202-214.
- Hemalatha, T. and Ramsawamy, A. (2017) A review on fly ash characteristics-Towards promoting high volume utilization on developing sustainable concrete. *J. Clean. Prod.*, v.147, p.546-559.
- Jeong, G.Y., Kim, S.H. and Kim, K. (2015) Rare metal chemistry, microstructures, and mineralogy of coal ash from thermal power plants of Korea. *J. Miner. Soc. Korea*, v.28, p.145-163.
- Jiang, N., Zhao, J., Sun, X., Bai, L. and Wang, C. (2017) Use of fly-ash slurry in backfill grouting in coal mines. *Heliyon* v.3, e00470. doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00470
- Jung, B.K., Kim, K. and Kim, S.H. (2012) Environmental assessment for reclamation using coal ash. *Academy-Industry Cooperation of Kunsan National University.*
- Ke, J.Y. (2018) A comparison on heavy metal in cement



- of Korean and China. M.E. thesis, Kunsan National University.
- Kim, K. (2013) A study on the possibility of economic metal extraction from coal ash. Academy-Industry Cooperation of Kunsan National University.
- Kim, K., Kim, S.H., Park, S.M., Kim, J. and Choi, M. (2010) Processes controlling the variations of pH, alkalinity, and CO<sub>2</sub> partial pressure in the porewater of coal ash disposal site. *J. Hazard. Mater.*, v.181, p.74-81.
- Kim, K., Park, S.M., Kim, J., Kim, S.H., Kim, Y., Moon, J.T., Hwang, G.S. and Cha, W.S. (2009) Arsenic concentration in porewater of an alkaline coal ash disposal site: Roles of siderite precipitation/dissolution and soil cover. *Chemosphere*, v.77, p.222-227.
- Kim, S.H., Choi, S.H., Jeong, G.Y., Lee, J.C. and Kim, K. (2014) A geochemical study on the enrichment of trace elements in the saline ash pond of a bituminous-burning power plant in Korea. *J. Miner. Soc. Korea*, v.27(1), p.31-40.
- Kim, Y., Kim, K. and Jeong, G.Y. (2017) Study of detailed geochemistry of hazardous elements in weathered coal ashes. *Fuel*, v.193, p.343-350.
- Lee, J.W. (2017) An environmental assessment study on the coal ash recycling for road backfill by making low-strength concrete. M.E. thesis, Kunsan National University.
- Lee, J.W., Choi, S.-H., Kim, K. and Moon, B.-K. (2018) Variations in heavy metal analytical results and leaching characteristics of coal ash recycled concretes according to sample crushing methods. *Econ. Environ. Geol.* (submitted)
- Oh, D.W., Kong, S.M., Lee, D.Y., Yoo, Y.S. and Lee, Y.J. (2015) Effects of reinforced pseudo-plastic backfill on the behavior of ground around cavity developed due to sewer leakage. *J. Korea Geo-Environ. Soc.*, v.16(12), p.13-22.
- Park, C.K. (2000) Hydration and solidification of hazardous wastes containing heavy metals using modified cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v.30, p.429-435.
- Rhodes, E.P., Ren, Z. and Mays, D.C. (2012) Zinc leaching from tire crumb rubber. *Environ. Sci. Technol.*, v.46(23), p.12856-12863.
- Sahmaran, M. and Li, V.C. (2009) Engineered cementitious composites: an innovative concrete for durable structure proceedings of ASCE structures congress, Proc., ASCE Structures Congress, Austin, Texas, April-May, 2009. <<http://hdl.handle.net/2027.42/84763>>
- Sato, M. and Kuwano, R. (2015) Influence of location of subsurface structures on development of underground cavities induced by internal erosion. *Soils and Foundations*, v.55, p.829-840.
- Shi, H.S. and Kan, L.L. (2009) Leaching behavior of heavy metals from municipal solid wastes incineration (MSWI) fly ash used in concrete. *J. Hazard. Mater.*, v.164, p.750-754.
- Taylor, H.F.W. (1997) *Cement Chemistry*, 2nd(ed.), Thomas Telford Press, London.
- Tohda, J. and Hachiya, M. (2005) Response and design of buried pipelines subjected to differential ground settlement. In: Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p.1659-1662.
- USEPA (2000) Solidification/Stabilization Use at Superfund Sites. EPA-542-R-00-010.
- Van der Sloot H.A. (2002) Characterization of the leaching behaviour of concrete mortars and of cement-stabilized wastes with different waste loading for long term environmental assessment. *Waste Management*, v.22, p.181-186.
- Vyšvaril, M. and Bayer, P. (2016) Immobilization of heavy metals in natural zeolite-blended cement pastes. *Procedia Engineering*, v.151, p.162-169.