한국지반환경공학회 논문집
제11권 제6호 2010년 6월 pp. 77~83

바텀애쉬의 유해물질 함량 측정 및 용출특성 평가연구

Evaluation for Contents of Contaminants and Leaching Characteristics of Bottom Ash

고 태 훈[1] · 이 성 진[2] · 신 민 호[3] · 김 병 석[4] · 이 제 근[5] · 이 태 윤†
Koh, Taehoon · Lee, Sungjin · Shin, Minho · Kim, Byongsuk · Lee, Jeakeun · Lee, Taeyoon

ABSTRACT : In this study, we tried to determine any detrimental effects on water quality when bottom ash obtained from a coal-fired power plant intended to be used as a fill material in construction sites. Physical-chemical properties of bottom ash were determined using proximate analysis, elemental analysis, XRD, and XRF. Classification of bottom ash as a waste material and soil contamination due to the use of bottom ash were performed by Korea waste standard leaching test and soil toxicity test, respectively. Results of leaching tests were compared to the regulations for water quality and groundwater quality and no harmful effects on water quality were found. Most of heavy metals in leachate were below detection limits but trace amount of Cr^{6+} was found. However, concentration of Cr^{6+} was below the regulation criteria. Column leaching tests indicated that concentrations of Pb and Zn were slightly higher than regulations but below regulations within 1 PVE, but concentrations of sulfate were 10 times higher than regulation and thus, the required time to reach regulation was almost 8 PVE.

Keywords : Bottom ash, Heavy metals, Anions, Korea waste standard leaching test, Korea soil toxicity test, Pore volume of effluent (PVE)

요 지 : 본 연구에서는 화력발전소에서 발생한 바텀애쉬를 성토재로 사용하기 전 환경에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 바텀애쉬에 대한 기본 물성치는 공업분석, 원소분석, XRD, XRF를 통해 구하였고, 폐기물 용출실험, 토양오염 공정실험을 통해 바텀애쉬에 대한 폐기물 분류 및 토양오염 가능성을 평가하였다. 위 용출실험 결과는 국내 수질환경기준 및 지하수 수질기준과 비교하였고 수질오염의 가능성은 없는 것으로 평가되었다. 측정된 대부분의 중금속은 검출한도 이하였으며 Cr^{6+}의 경우 미량이 검출되었으나 기준치 이하였다. 컬럼실험에서는 Pb, Zn 및 황산염이 기준치를 초과하였으나, Pb과 Zn은 1 PVE 전에 모두 기준치 이하로 감소하였고 황산염은 기준치 이하로 감소하는데 최대 8 PVE의 시간이 소요되었다. 중금속의 경우 대부분이 기준치 이하이므로 문제가 없으나 황산염은 기준치를 10배 정도 초과하므로 사용에 주의를 요한다.

주요어 : 바텀애쉬, 중금속, 음이온, 폐기물용출실험, 토양오염공정실험, 공극통과유량

1. 서 론

급속한 경제발전과 산업화에 따른 에너지 사용량의 급격한 증가는 에너지 발전설비용량의 증가를 가져왔으며, 전체 발전설비용량의 40.4%를 화력발전이 차지하고 있다. 연소과정에서 발생하는 석탄재의 양은 지속적으로 증가하고 있으며, 향후 추가적인 화력발전소의 건설을 고려할 때 발생되는 석탄회의 양은 더욱 증가할 것으로 예상된다(표 1). 화력발전 시 사용되는 화석연료의 연소과정에서 발생되는 석탄회는 크게 플라이애쉬와 바텀애쉬로 구분이 되는데, 연간 발생되는 석탄재 약 736만톤(2009년 기준) 중 58%(연간 426만톤)는 건설재료 등으로 재활용 되고 있으나, 42%(연간 310만톤)은 매립처리되고 있는 실정이다(http://www.kepid.co.kr). 전체 석탄회 중 바텀애쉬의 발생비율은 약 15-25%(연간 110-184만톤, 2009년 기준)이며 대부분이 매립하여 처리되는 실정을 감안할 때 방대한 면적의 매립장이 지속적으로 필요함을 알 수 있다.

석탄회 중 약 15-25%를 차지하는 바텀애쉬는 연소 중 바

표 1. 연도별 바텀애쉬 발생량 동향(http://www.kepid.co.kr)

Year	2006	2007	2008	2009	2010
Production rate (10^4 ton)	568	613	697	736	736

1) 정회원, 한국철도기술연구원 신소재틸팅열차시스템연구단 선임연구원
2) 비회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원
3) 비회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 수석연구원
4) 비회원, 부경대학교 환경해양대학 환경공학과 대학원
5) 비회원, 부경대학교 환경해양대학 환경공학과 교수
† 정회원. 부경대학교 환경해양대학 환경공학과 조교수(E-mail : badger74w@pknu.ac.kr)

닥에 낙하된 입자가 큰 석탄재를 의미하며 다양한 용도로 재활용되는 플라이애쉬와는 다르게 대부분 매립처리되고 있다. 이러한 바텀애쉬를 재활용하기 위한 연구는 세계 각국의 다양한 연구자들에 의해 수행이 되고 있다. 재활용 관련 대부분의 연구는 경량 및 기공 콘크리트용 골재, 채움재, 도로 공사용 골재 등과 관련된 내용이다(Cheriaf 등, 1999; Churchill 등, 1999; Kayabali 등, 2000; Kim 등, 2008; Kurama 등, 2008; Andrade 등, 2009; Kurama 등, 2009; Park 등, 2009; Trifunovic 등, 2010). 바텀애쉬를 콘크리트용 굵은 골재로 사용한 연구에서는 천연골재 대체율이 40%를 초과할 경우 압축 및 휨강도가 최대 27%까지 감소하지만, 대체율이 40% 이하인 경우는 굵은 골재 표준규격(KS F 2507, KS F 2508, ASTM C 88, ASTM C 535)에 부합되는 것으로 판명되었다(Park 등, 2009). 기공경량 콘크리트와 아스팔트 콘크리트 골재로 사용된 연구에서도 기존 천연골재와 동등한 물성치를 나타내었다(Churchill 등, 1999; Kurama 등, 2009). 하지만, 바텀애쉬에 포함된 미연소 탄소 성분과 입자가 균일하지 않은 구조적 특성은 바텀애쉬를 구조용 골재로 사용하는데 있어 제약으로 작용한다(Kurama 등, 2008; Kurama 등, 2009; Trifunovic 등, 2010). 이러한 문제점은 기계적 입자선별법, 비중분리법, 정전기적 방법 등을 통해 미연소 탄소를 바텀애쉬에서 분리함으로써 해결이 될 수 있다. 콘크리트 배합에 사용되는 포틀란트 시멘트 대체용으로 바텀애쉬를 사용한 연구의 경우, 기계적 입자선별법, 비중분리법, 정전기적 방법을 이용하여 바텀애쉬에 포함된 미연소 탄소를 제거한 후 콘크리트 배합에 사용하여 강도특성을 연구하였으며, 10%까지의 포틀란트 시멘트를 대체할 경우 강도가 오히려 증가하는 것을 알 수 있었다(Kurama 등, 2008). 이러한 강도의 증가는 바텀애쉬에 의한 포졸란반응으로 밝혀졌는데, 포졸란반응을 촉진시키기 위해서는 바텀애쉬를 일정한 입자크기 이하로 분쇄하는 공정이 필요하였다(Cheriaf 등, 1999).

바텀애쉬를 구조용 골재 및 성토재로 재활용하기 위해서는 현장에 적용하기 전 바텀애쉬로부터 용출될 수 있는 환경오염물질을 측정하여 환경에 미치는 영향을 파악하여야 한다. 재활용 시 오염물질의 용출량을 규제하는 법률이 각국에서 제정되어 바텀애쉬의 재활용 가능여부를 명시하고 있다. 바텀애쉬는 주로 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3), 석회(CaO), 철산화물(Fe_2O_3)로 구성되어 있으나, 미량의 중금속도 함유하고 있다(Fytianos 등, 1997; Wang 등, 1999; Hansen 등, 2002; Vassilev 등, 2005; Shan 등, 2008; Wang 등, 2008). 바텀애쉬 구성성분의 변화는 석탄의 광물적 특성, 연소에 사용된 석탄의 입자크기 및 연소방법에 기인하며(Skodras 등, 1997), 실제 용출특성은 pH, 이온강도, 용출액과 바텀애쉬의 함량비 등을 변화시켜 다양한 환경에서 규명되었다(Fytianos 등, 1998). 용출실험 결과 다양한 종류의 중금속 성분이 검출되었으며, 특히 As, Cd, Cu, Pb, Zn, Se이 높은 농도로 용출이 되는 것으로 알려졌다(Bin-Shafique 등, 2006; Shah 등, 2008; Wang 등, 2008).

따라서, 본 연구에서는 바텀애쉬를 철도노반 성토재로 재활용이 가능한지 여부를 환경적 측면에서 검토하고자 한다. 바텀애쉬의 용출실험 결과는 한국환경부(KMOE), 미국환경청(U.S. EPA), 세계보건기구(WHO)에서 제시하는 먹는물 수질기준 및 폐기물 재활용 용출기준과 비교하여 재활용 가능여부를 검토하고자 하였고 컬럼 용출 실험을 통해 보다 더 현실적이고 정확한 용출특성을 살펴보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

본 연구에 사용된 바텀애쉬는 충청남도 태안군에 위치한 태안화력발전소 인근 적치장에서 채취하였다. 바텀애쉬의 물리·화학적 조성을 알기 위해 공업 분석(approximate analysis)과 X-ray fluorescence spectrometry(XRF) 분석을 실시하였으며, 광물조성을 알아보기 위해 XRD 회절분석을 실시하였다. 공업분석을 통해 바텀애쉬의 96.7%가 회분, 휘발분 2.07%, 고정탄소 0.77%로 구성되어 있으며, XRF분석 결과 SiO_2> Al_2O_3> Fe_2O_3> CaO> MgO 순으로 SiO_2와 Al_2O_3, Fe_2O_3의 성분이 각각 63.2%, 18.9%, 7.8%로 전체의 90%이상을 구성하고 있음을 알 수 있다(표 2). XRD 분석을 통해 바텀애쉬는 주로 quartz, hematite, kaolinite, mullite, illite,

표 2. 바텀애쉬 시료의 물리·화학적 분석 결과

Proximate analysis	Contents (%)
Moisture content	0.47
Volatile matter	2.07
Fixed carbon	0.77
Ash content	96.70
Sum	100
Chemical composition	
SiO_2	63.2155
Al_2O_3	18.9522
Fe_2O_3	7.8265
CaO	3.5125
MgO	1.4541
K_2O	1.3101
TiO_2	1.2544
SO_3	1.2192
Sum	98.7445

magnetite, siderite, feldspar 등의 광물로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

2.2 실험방법

2.2.1 총함량 실험(total elemental analysis)

바텀애쉬에 포함된 중금속의 총함량을 측정하기 위해 0.5g의 바텀애쉬를 10mL의 농질산과 혼합한 후 fluorocarbon 용기에 넣은 후 마이크로파로 574W의 출력으로 10분간 소화시켰다(U.S. EPA Method 3051). 고체 및 부유성분은 0.45μm 유리섬유필터로 걸러낸 후 중금속 농도를 측정하였다.

2.2.2 국내 폐기물 용출실험(Korea Waste Leaching Test, KWLT)

고상 또는 반고상 폐기물에 대하여 국내 폐기물관리법에서 규정하고 있는 지정폐기물의 판정 및 지정폐기물의 중간처리방법 또는 매립방법을 결정하기 위한 실험으로 각 시료 100g을 3차 증류수(pH 6.3)와 1:10의 비율(100g 시료 : 1L 증류수)로 2L 시료 병에 넣어 혼합한다. 혼합액을 상온, 상압에서 진탕횟수는 매분 당 약 30회, 진폭 4～5cm의 수평진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한 후 0.45μm 여과지로 거른 후 양이온, 음이온 및 유기물질을 분석하였다. 분석항목은 TCE, PCE, organic phosphate, Cd, Cu, Pb, Cr^{6+}, CN^-, As, Hg, TPH였다.

2.2.3 토양오염 공정실험(Korea Soil Toxicity Test, KSTT)

바텀애쉬에 포함된 오염물질의 총함량 측정은 국내 토양환경보전법에서 제시한 추출방법을 사용하였다. 국내 토양환경보전법에 의해 폐기물을 재활용 시 토양 오염도를 평가하기 위해 시료 10g을 삼각플라스크에 넣고 0.1N 염산용액 50mL를 넣은 후 수평 진탕기(100회/분, 진폭 10cm)를 사용하여 30℃를 유지하면서 1시간 동안 진탕시킨 다음, 0.45μm 여과지로 거른 후 양이온, 음이온 및 유기물질을 분석하였다. 분석항목은 Cd, Cu, Pb, Hg, As, Cr^{6+}, Zn, Ni, F^-, CN^-, 유기인, PCB, Phenol, TCE, PCE, TPH, BTEX였다.

2.2.4 컬럼 실험

실제 현장에서의 상황을 모사하기 위해 컬럼 용출실험(CLTs)을 실시하였다. CLTs에 사용된 실험장치의 모식도는 그림 1에 나타나 있다. 유리컬럼(length = 30cm, diameter = 10cm)의 유입구와 유출구는 테플론 어뎁터로 연결되었으며, 나머지 튜브와 셈플링백도 테플론 재질을 사용하여 흡착에 의한 손실을 방지하였다. 용액은 펌프를 이용하여 컬럼 아래쪽에서 유입이 되었으며, 유속은 분당 1mL(1×10^{-3}L/min)로

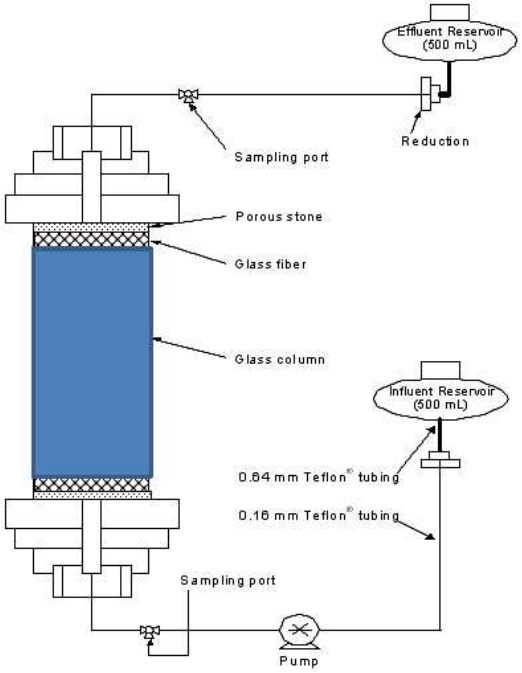

그림 1. 컬럼 실험장치 개요도

일정하게 유지하였다. 유입용액은 산성비의 침투를 모사하기 위해 일반적 산성비의 pH 범위인 pH 4와 6으로 조정하였으며, 또한 일반적 지표수의 pH 범위에 해당하는 pH 8로 조정하여 사용하였다. pH의 조정은 증류수에 HCl과 NaOH를 첨가하였다. 유출수는 컬럼 유출구에 설치된 테플론 백에 포집되었으며 정해진 시간에 일정량의 시료를 채취하여 대상 오염물질을 분석하였다.

2.3 분석방법

2.3.1 중금속(heavy metals)

폐기물 용출실험 및 컬럼 용출실험의 중금속 성분들(As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)은 Elan 6100 inductively coupled plasma mass spectrometer(ICP-MS)을 이용하여 분석하였다. 플라즈마 파워는 2.0kW, 냉각수 유속은 15L/min, 분무(nebulizer) 가스 유속은 1.0L/min, 압력은 22kPa로 고정시킨 후 분석하였다. 검량선을 작성하기 위한 표준용액은 Aldrich Chemical Co.(Milwaukee, WI)에서 구입하여 사용하였다. 분석 시 시료에 포함된 불순물에 의한 간섭효과를 배제하기 위해 표준첨가법(standard addition)을 사용하였다(Lee 등, 2004). 수은(Hg)의 경우 수은분석기(flow injection mercury system)를 사용하여 별도로 분석하였다(FIMS 400, Perkin elmer).

2.3.2 음이온(anions)

토양오염공정시험법에 따른 용출실험 후 대상 음이온인 F^- 분석과 컬럼 용출실험 시료에 대해 6개의 음이온(F^-, Br^-,

NO_2^-, NO_3^-, PO_4^{2-}, SO_4^{2-})을 ion-chromatograph을 이용하여 분석하였다. 사용된 ion-chromatograph는 Alltech Model 651, 641 Series 200(Perkin-Elmer)이며, 검량선을 작성하기 위한 표준용액은 Aldrich Chemical Co.(Milwaukee, WI)에서 구입하여 사용하였다. 토양오염공정시험법 및 폐기물공정시험방법에 의해 용출된 시료에 포함된 CN^-은 일정량의 시료를 pH 2이하의 산성에서 에틸렌디아민테트라아세트산 이나트륨을 넣고 가열증류하여 시안화물 및 시안착화합물의 대부분을 시안화수소로 유출시키고 수산화나트륨용액에 포집하였다. 포집된 시안이온을 중화하고 클로라민T를 넣어 염화시안으로하여 피리딘·피라졸론 혼합액을 넣어 나타나는 청색을 UV를 이용하여 파장 620nm에서 측정하였다.

2.3.3 유기물질(organic chemicals)

토양오염공정시험법과 폐기물공정시험방법에 의해 용출된 시료에 포함된 유기인화합물은 FPD 검출기를 장착한 Shmadzu GC-17A를 이용하여 분석하였다. TCE와 PCE는 FID 검출기를 장착한 Perkin Elmer ATD400 GC를 이용하여 분석하였다. 석유계총탄화수소(TPH)는 속슬렛 추출장치(soxhlet extraction device)를 이용하여 시료에서 TPH를 추출한 후 FID 검출기를 장착한 Perkin Elmer ATD400 GC를 이용하여 분석하였다. 토양오염공정시험법에 명시된 BTEX 화합물은 Tekmar 3100 Purge & Trap을 이용하여 농축한 후 Perkin Elmer ATD400 GC를 이용하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 총함량 분석(total elemental analysis)

바텀애쉬에 대한 총함량 분석 결과는 표 3에 요약되어 있다. As과 Cd은 검출되지 않았고, Zn가 가장 높은 농도를 나타냈으며 Cu, Pb, Cr의 순으로 점차 감소하였다. 총함량에 대한 국내의 기준치는 존재하지 않으므로 본 결과는 해석의 참고자료로 사용하였다.

3.2 회분식 용출실험 결과

바텀애쉬를 성토재로 활용 시 침출수가 주변지역에 미치는 영향을 예측하여 재활용이 가능한지의 여부를 판단하고자 하였다. 폐기물용출실험 결과는 석탄회 폐기물을 분류하기

표 3. 바텀애쉬 총 함량분석 결과값

Element	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
Concentration (mg/kg)	ND[a]	ND	22.4	44.9	32.7	820.4

[a] Non-detectable.

표 4. 국내 폐기물 용출실험 결과

Elements	Unit	Standards for Hazardous Waste	Water Quality Standards				Groundwater Quality Standards			국내 폐기물 용출실험 (pH = 6.3)
			청정	가	나	특례	Domestic water	Agricultural water	Industrial water	바텀애쉬 (BA)
pH	-		5.8～8.0	5.8～8.6	5.8～8.6	5.8～8.6	5.8～8.5	6.0～8.5	5.0～9.0	7.3
As	μg/L	1,500	100	500	500	500	50	50	100	N.D.
Cd	μg/L	300	20	100	100	100	10	10	20	N.D.
Cu	μg/L	3,000	500	3,000	3,000	3,000	-	-	-	N.D.
Cr^{6+}	μg/L	1,500	500	2,000	2,000	2,000	50	50	100	130
Hg	μg/L	5	0	5	5	5	0	0	0	N.D.
Mn	μg/L		2,000	10,000	10,000	10,000	-	-	-	-
Ni	μg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb	μg/L	3,000	200	1,000	1,000	1,000	100	100	200	N.D.
Se	μg/L	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	μg/L	-	1,000	5,000	5,000	5,000	-	-	-	-
Cl	mg/L	-	-	-	-	-	250	250	500	-
F	mg/L	-	3	15	15	15	-	-	-	-
TCE	mg/L	0.3	-	-	-	-	-	-	-	N.D.
PCE	mg/L	0.1	-	-	-	-	-	-	-	N.D.
TPH	%	5	-	-	-	-	-	-	-	N.D.
Organic Phosphate	mg/L	1.0	-	-	-	-	-	-	-	N.D.
CN^-	mg/L	1.0	-	-	-	-	-	-	-	N.D.

위해 국내 폐기물관리법 시행규칙에 규정된 폐기물에 함유된 유해 폐기물 함유기준과 비교하였고, 폐기물관리법에 규정된 매립시설 오염물질 배출허용기준, 수질환경기준, 지하수질기준과 비교하여 침출수가 주변지역에 미치는 영향을 검토하였다. 토양오염공정실험결과는 토양환경기준법에 규정된 토양환경우려기준과 토양환경대책기준과 비교하였다.

폐기물 용출실험 결과는 폐기물 관리법에서 규정하는 모든 항목에 대해 기준치를 초과하지 않았으며, 대부분의 항목들은 검출이 되지 않았다(표 4). Cr^{6+}의 경우 폐기물 관리법의 유해물질 기준치인 1,500μg/L 보다 적은 130μg/L가 검출되어 국내 지정폐기물 함유기준보다 월등히 작은 값을 나타내었으나, 수질환경기준 중 청정지역 기준치인 500μg/L 보다는 약간 초과하는 것을 알 수 있었다. 지하수 수질기준과 비교하면 생활용수(50μg/L), 농업어업용수(50μg/L), 공업용수(100μg/L) 기준보다 초과하였으므로 위 물질들을 재활용 시 지하수 수질에 영향을 줄 수 있음을 예측할 수 있다.

토양오염 공정실험에서도 모든 항목에서 기준치 이하의 농도를 나타내었다(표 5). Zn, Ni, F^-가 일부 검출이 되었으나, 기준치 보다 훨씬 낮은 농도이기 때문에 토양오염의 우려는 없다고 할 수 있다.

표 5. 토양오염 공정실험 결과

Elements	Unit	Concerned Criteria		토양오염공정실험 (0.1N HCl)
		A	B	바텀애쉬(BA)
As	mg/kg	6	20	0.44
Cd	mg/kg	1.5	12	0.04
Cu	mg/kg	50	200	1.76
Cr^{6+}	mg/kg	4	12	0.61
Hg	mg/kg	4	16	N.D.
Ni	mg/kg	40	160	17.69
Pb	mg/kg	100	400	0.88
Zn	mg/kg	300	800	86.94
F^-	mg/kg	400	800	26.80
CN^-	mg/kg	2	120	N.D.
Organic Phosphate	mg/kg	10	30	N.D.
PCB	mg/kg	-	12	N.D.
페놀	mg/kg	4	20	N.D.
TCE	mg/kg	8	40	N.D.
PCE	mg/kg	4	24	N.D.
TPH	mg/kg	500	2000	N.D.
BTEX	mg/kg	-	80	N.D.

3.3 컬럼 용출실험 결과

다양한 pH 상황에서 BA에 포함된 오염물질의 용출농도를 측정하여 세계 각국의 먹는물 수질기준과 비교하였다. 컬럼실험에서 얻어진 용출수에 포함된 오염물질의 농도는 한국, 미국 EPA와 세계보건기구(WHO)의 먹는물 수질기준과 비교하였다. 측정된 중금속과 음이온의 농도는 각국의 수질기준과 같이 표 6에 정리하였다. As, Cd, Hg의 경우 검출한도(MDL) 이내로 측정이 되었고 Cr과 Cu의 경우 검출한도 이상의 농도로 측정이 되었으나 수질기준 이하이기 때문에 수질에 영향을 주지는 않는 것으로 판명되었다. Pb의 경우는 초기 pH를 달리한 바텀애쉬(BA)의 경우에 한국(50μg/L) 및 WHO(10μg/L)의 기준을 초과하였다. Zn의 경우도 모든 실험에서 기준치 이상의 농도가 검출되었다. 초기 pH가 중금속 용출에 미치는 영향은 본 실험에서는 명확히 밝혀지지 않았다. 음이온 분석결과 PO_4^{2-}는 검출한도 이내였으며, F^-, NO_2^-와 NO_3^-는 기준치 이내로 검출되었다. SO_4^{2-}의 경우는 모든 실험에서 수질기준을 크게 초과하였다. 한국 기준(200,000μg/L)과 비교 시 BA의 경우 10배 이상 초과하였다.

Pb과 Zn의 용출농도는 각국의 먹는 물 수질기준과 같이 그림 2에 표시되었다. 한국의 Pb과 Zn의 수질기준이 US EPA와 WHO의 수질기준보다 훨씬 엄격함을 알 수 있으며,

표 6. 컬럼 용출실험(CLTs)의 용출농도 및 먹는물 수질기준

Material	pH	Leachate concentration (μg/L)											
		As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Hg	F^-	NO_2^-	NO_3^-	PO_4^{2-}	SO_4^{2-}
BA	4	<0.1	<0.1	30.0	65.0	**80.0**[a]	**2,000.0**	<0.1[c]	298.5	67.4	1,289.0	<50.0	**1,940,000**
BA	6	<0.1	<0.1	20.0	80.0	**71.0**	**1,500.0**	<0.1	340.0	99.8	1,527.0	<50.0	**2,066,000**
BA	8	<0.1	<0.1	21.0	42.0	**76.8**	**1,249.0**	<0.1	374.0	74.0	2,034.0	<50.0	**2,391,000**
Korea[b]	-	50.0	10.0	50.0	1,000.0	50.0	1,000.0	1.0	2,000.0	-[c]	10,000.0	-	200,000
U.S. EPA[d]	-	10.0	5.0	100.0	1,300.0	150.0	5,000.0	2.0	4,000.0	1,000.0	10,000.0	-	250,000
WHO[e]	-	10.0	3.0	50.0	2,000.0	10.0	3,000.0	6.0	1,500.0	200.0	50,000.0	-	500,000

[a] 진한 숫자는 어떠한 관리기관의 먹는물 기준(DWS)도 뛰어넘는 값.
[b] 환경부(Korea Ministry of Environment)에 의해 정의된 먹는물 기준(DWS).
[c] 정의된 규약이 없는 상태, <검출한계 아래를 나타낸다.
[d] 미 환경보호청(Environmental Protection Agency)에 의해 정의된 먹는물 기준(DWS).
[e] 세계보건기구(World Health Organization)에 의해 정의된 먹는물 기준(DWS).

그림에 표시되지 않은 수질기준은 용출농도보다 훨씬 높으므로 그림에 나타내지 않았다. 초기에 용출된 Pb과 Zn의 농도는 모두 한국의 먹는 물 수질기준을 초과하였으나, 대부분이 1 pore volume의 시간 안에 수질기준을 만족하였다.

시간에 따른 황산염이온(SO_4^{2-})의 용출농도와 각국의 먹는 물 수질기준은 그림 3에 나타나 있다. 황산염 먹는 물 수질기준은 500mg/L(WHO), 250mg/L(U.S. EPA), 200mg/L(KME)인데 반해 BA 시료에서는 초기 농도 2,000mg/L를 초과하는 많은 양의 황산염이 검출되었다. 초기 농도가 높기 때문에 Pb과 Zn의 경우와는 다르게 수질기준을 만족하기 위해서는 보다 긴 시간인 6.75～8.21 PVE가 필요하였다. 이는 컬럼내의 공극을 V라고 할때 V의 6.75～8.21배 만큼의 물이 통과하는 시간을 의미한다.

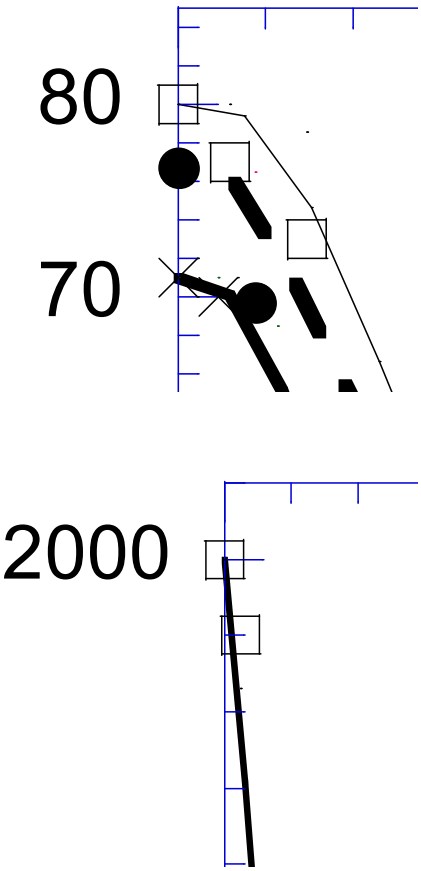

그림 2. 컬럼 용출실험에서의 공극통과유량(PVE)에 따른 (a) Pb와 (b) Zn의 유출 농도(DWS: 먹는물 기준)

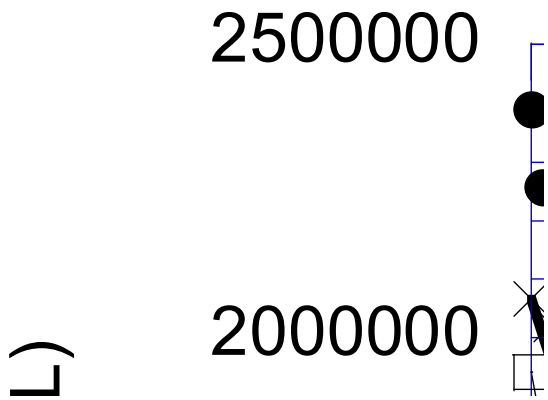

그림 3. 컬럼 용출실험에서의 공극통과유량(PVE)에 따른 황산염(SO_4^{2-}) 유출농도(DWS: 먹는물 기준)

4. 결 론

본 연구에서는 바텀애쉬를 성토재로 사용하기 전 회분식 및 컬럼 용출실험을 실시하여 폐기물관리법에 따른 폐기물 분류 및 토양환경기준법에 따른 토양환경 오염여부에 대해 분석하였고, 흐름상황에서의 용출특성을 파악하였다. 본 연구의 결과를 통해 바텀애쉬의 재활용 관리기준 수립의 근거와 관리의 기초자료로 활용하고자 하였으며 결과는 다음과 같다.

(1) 폐기물 용출실험 결과 바텀애쉬는 지정폐기물에 함유된 유해물질 기준보다 낮은 농도를 가지므로 일반폐기물로 분류가 될 수 있으며, 토양오염공정실험 결과 시료에서 용출되는 오염물질이 토양환경우려기준 이내의 농도를 가지므로 토양에 대한 유해성은 없는 것으로 판단된다.

(2) 폐기물 용출실험 결과를 수질환경보전법에 의한 수질환경 기준과 비교했을 때, 모든 항목이 청정지역에 해당하는 수질환경기준 값보다 작은 농도를 가지고 있어 주변 수질을 오염시킬 가능성은 희박하다고 할 수 있다.

(3) 컬럼용출실험 결과를 한국, U.S. EPA, WHO의 먹는물 수질기준과 비교하였을때 일부 항목의 경우 기준치를 초과하였으나, 대부분의 항목들은 기준치 이하 혹은 검출한도 이내로 용출되었다. 중금속 중 기준치를 초과하는 항목은 Pb과 Zn이었으나 모든 실험에서 1 PVE 이내에서 기준치 이하로 감소되는 것을 확인하였으므로 실제 현장에 적용 시 주변 수질을 오염시킬 가능성은 작다고 할 수 있다. 다만, 바텀애쉬 용출액에 포함된 황산염의 경우 기준치의 10배 정도의 농도로 용출이 되어 먹는물 기준치 이하로 감소되는 데 걸리는 시간이 최대 8.21 PVE로 수질오염의 가능성이 크다고 할 수 있다. 하지만, 먹는물 수질기준을 적용한 것은 최대한 보수적 접근으로 환경위해성을 평가하고자 한 것으로 본 실험 결과의 해석에 논란이 있을 수 있으나 최소한 황산염의 경우 과도한 양이 유출된다는 것은 확인되었으므로 사

용에 주의를 요하며 추후 현장실험 결과를 토대로 바텀애쉬의 재활용 여부를 신중히 결정하여야 한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-4110)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Andrade, L. B., Rocha, J. C. and Cheriaf, M.(2009), Influence of Coal Bottom Ash as Fine Aggregate on Fresh Properties of Concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 2, pp. 609～614.
2. Bin-Shafique, S., Benson, C. H., Edil, T. B. and Hwang, K.(2006), Leachate Concentrations from Water Leach and Column Tests on Fly Ash-Stabilized Soils, *Environmental Engineering Science*, Vol. 23, No. 1, pp. 53～67.
3. Cheriaf, M., Rocha, J. and Pera, J.(1999), Pozzolanic Properties of Pulverized Coal Combustion Bottom Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 9, pp. 1387～1391.
4. Churchill, E. V. and Amirkhanian, S. N.(1999), Coal Ash Utilization in Asphalt Concrete Mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 295～301.
5. Fytianos, K. and Schroder, H.(1997), Determination of Polychlorinated Dibenzodioxins and Dibenzofurans in Fly Ash, *Chromatographia*, Vol. 46, No. 4, pp. 280～284.
6. Fytianos, K., Tsaniklidi, E. and Voudrias, E.(1998), Leachability of Heavy Metals in Greek Fly Ash from Coal Combustion, *Environment International*, Vol. 24, No. 4, pp. 477～486.
7. Guidelines for Drinking Water Quality(1993), *World Health Organization*(WHO), Geneva, Switzerland.
8. Hansen, Y., Notten, P. and Petrie, J.(2002), The Environmental Impact of Ash Management in Coal-Based Power Generation, *Applied Geochemistry*, Vol. 17, No. 8, pp. 1131～1141.
9. Kayabali, K. and Bulus, G.(2000), The Usability of Bottom Ash as an Engineering Material when Amended with Different Matrices, *Engineering Geology*, Vol. 56, No. 3-4, pp. 293～303.
10. Kim, B. and Prezzi, M.(2008), Compaction Characteristics and Corrosivity of Indiana class-F Fly and Bottom Ash Mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 4, pp. 694～702.
11. Korea Ministry of Environment(KMOE)(2002), *Drinking Water Management Law*(in Korean).
12. Korea Ministry of Environment(KMOE)(2004), *Waste Management Act*.
13. Korea Ministry of Environment(KMOE)(2005), *Soil Environmental Conservation Act*.
14. Kurama, H. and Kaya, M.(2008), Usage of Coal Combustion Bottom Ash in Concrete Mixture, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 9, pp. 1922～1928.
15. Kurama, H., Topcu, I. B. and Karakurt, C.(2009), Properties of the Autoclaved Aerated Concrete Produced from Coal Bottom Ash, *Jouranl of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 2, pp. 767～773.
16. Lee, T., Benson, C. and Eykholt, G.(2004), Waste Green Sands as Reactive Media for Groundwater Contaminated with Trichloroethylene(TCE), *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B109, No. 3, pp. 25～36.
17. Park, S., Jang, Y., Lee, J. and Lee, B.(2009), An Experimental Study on the Hazard Assessment and Mechanical Properties of Porous Concrete Utilizing Coal Bottom Ash Coarse Aggregate in Korea, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 166, No. 1, pp. 348～355.
18. Shah, P., Strezov, V., Prince, K. and Nelson, P.(2008), Speciation of As, Cr, Se and Hg under Coal Fired Power Station Conditions, *FUEL*, Vol. 87, No. 10-11, pp. 1859～1869.
19. Skodras, G., Grammelis, P., Prokopidou, M., Kakaras, E. and Sakellaropoulos, G.(2009), Chemical Leaching and Toxicity Characteristics of CFB Combustion Residues, *FUEL*, Vol. 88, No. 3, pp. 1201～1209.
20. Trifunovic, P. D., Marinkovic, S. R., Tokalic, R. D. and Matijasevic, S. D.(2010), The Effect of the Content of Unburned Carbon in Bottom Ash on its Applicability for Road Construction, *Thermochimica Acta*, Vol. 498, No. 1-2, pp. 1～6.
21. U. S. Environmental Protection Agency(2002), *Office of Water, Edition of the Drinking Water Regulations and Health Advisories*.
22. U.S. EPA Method 3051A, *Microwave Assisted Acid Digestion of sediments, sludges, soils, and oils*, Test Methods for Valuating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, SW-846, 3rd ed., Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1994.
23. Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., Karayigit, A. I., Bulut, Y., Alastuey, A., and Querol, X.(2005), Phase-mineral and Chemical Composition of Composite Samples from Feed Coals, Bottom Ashes and Fly Ashes at the Soma Power Station, Turkey, *International Journal of Coal Geology*, Vol. 61, No. 1-2, pp. 35～63.
24. Wang, W., Qin, Y., Song, D. and Wang, K.(2008), Column Leaching of Coal and Its Combustion Residues, *International Journal of Coal Geology*, Vol. 75, No. 2, pp. 81～87.
25. Wang, Y., Ren, D. and Zhao, F.(1999), Comparative Leaching Experiments for Trace Elements in Raw Coal, Laboratory Ash, Fly ash and Bottom ash, *International Jornal of Coal Geology*, Vol. 40, No. 2-3, pp. 103～108.

(접수일: 2010. 3. 17 심사일: 2010. 3. 31 심사완료일: 2010. 4. 28)