환경영향평가 제8권 제4호 : 25~35

국내 석탄회 육상매립의 오염 잠재성 평가+

이 상 훈
가톨릭대학교 환경학과

Assessment of potential environmental impact from fly ash landfill+

Lee, Sang Hoon
Department of Environmental Sciences, The Catholic University of Korea

Abstract

Fly ash, by-product from coal fired power station, has long been regarded as a potential contamination source for heavy metals and inorganics due to their enriched concentrations and associations with particle surface. Feed coal and fly ash samples were collected from two power stations; Yongdong deliang with domestic anthracite coals and Boryong with imported bituminous coals. The coal and fly ash samples were analyzed for chemical composition and mineral components, using XRF and XRD. Batch leaching experiments were conducted by agitating samples with deionised water for 24 hours. Anthracite coals are generally higher in Al and Si contents than bituminous coals. This is due to the higher ash contents of the anthracite coal than bituminous coal. The chemistry of the two fly ash samples shows broadly similar compositions each other, except for the characteristically high contents of Cr in anthracite coal fly ash. Leaching experiments revealed that concentrations of metals gradually decreased with leachings in general. However, measurable amounts of metals were present in the effluent from weathered ash and the samples subjected to the leaching procedure. These metals are likely to indicate that the metals in fly ash were incorporated into glass fraction as well as associated with particle surface of samples. Dissolution of aluminosilicate glass would control releasing heavy metals from fly ash as weathering progresses during landfill with implication of possible groundwater contamination through fly ash landfill.

Key words: Fly ash, Goundwater pollution, Heavy metals, Leaching

+ 이 논문은 1999년도 가톨릭대학교 교비연구비 지원으로 이루어졌음.

I. 서 론

석탄회는 석탄 화력발전소에서 연소부산물로 발생하며 전기집진기에 포집되는 미세한 입자들의 비산재(fly ash)와 보일러 바닥에 남는 비중이 큰 바닥재(bottom ash)로 구성된다. 석탄회는 석탄회에 함유된 광물질, 유기물 및 미연소 탄소 등으로부터 기인하며 이중 fly ash가 전체 석탄회의 약 80%를 차지한다.[1] 석탄회는 1000°C이상의 고온에서 연소될 때 형성된 구형의 유리질 알루미나 규산 입자로 주로 구성되며 실트에서 모래사이에 걸친 입자크기를 가진다. 유리질 물질 외에도 자철석, 적철석 등과 부분 용융된 석영입자 등의 독립광물을 함유한다.[4][11]

석탄은 유기물이나 황화광물 등의 작용으로 지각물질에 비하여 미량원소 함량이 높다.[2] 석탄에 함유된 As, B, Cd, Cr, Mo, Ni, Pb, Se, V 및 Zn 등 미량원소는 연소시 탄소성분의 강열감량으로 원탄에 비해 석탄회에 더 농축되며, 높은 연소온도로 인하여 원소들의 증발과 연소 후 냉각과정을 거치면서 석탄회 입자 표면에 선별적으로 농축된다.[12] 이러한 표면 농축 원소들은 석탄회의 육상매립시 물과 접촉할 때 용출을 쉽게 할 것으로 예상된다 . 또한 석탄회의 주 구성 물질인 유리질 물질은 상온에서 불안정하다. 이런 특성으로 석탄회의 지상매립은 침출수 방출로 인해 오염원이 될 수 있으며 이 때 지표수의 경우 희석효과에 의해 그 피해가 적으나 유속이 느린 지하수의 경우는 이러한 희석효과를 기대할 수 없어 오염잠재성이 더 클 것이다.[8][10] 실제 매립장 주변 지하수층에서 상승된 중금속 농도가 보고되기도 하였으며 외국의 경우 이러한 오염잠재성을 고려하여 석탄회의 환경영향에 관해 많은 연구가 이루어져왔다.[2][5] 국내에서 1996년 발생한 석탄회의 양은 290만톤 가량으로 이중 22%인 64만톤이 콘크리트 혼합재, 경량벽돌 등으로 재활용되었으며 나머지는 폐기물로 매립장에 매립되었다.[19][22]

국내 화력발전에 사용하는 석탄은 과거 무연탄이 주를 이루었으나 최근 수입 유연탄을 사용하는 화력발전소들이 증가하고 있으며 이러한 추세는 계속되어 2010년에는 석탄회 발생량이 600만톤에 이를 것으로 예상된다.[19] 이렇듯 석탄회 발생량은 점차 증가하고 있으나 재활용 비율은 석탄회의 증가 추세를 따라가지 못하여 폐기물로 매립되는 석탄회의 양이 계속 늘어날 것으로 보이며 이는 매립부지 확보의 어려움, 지하수·토양 오염가능성의 증가 등 환경문제를 야기할 것으로 예상된다. 따라서 석탄회 재활용율을 늘이는 연구와 함께 석탄회 매립으로 인한 환경영향을 파악하는 것이 시급한 실정이나 이 분야의 국내 연구와 관심은 아직 미약한 상태이다.

최근에 건설되는 화력발전소들의 경우 차수시설을 가진 전용 회처리장을 갖추고 있으나 과거의 경우 대부분 차수시설 없이 발전소 주변에 매립을 하거나 해안 투기 등에 의존해 왔는 바 이들 회처리장에서의 오염 잠재성 검토가 필요하다. 또한 최근에 건설된 회처리장의 경우도 주로 해안의 갯벌의 해성점토층을 차수막으로 활용하고 있으나 바닥 두께가 불균질한 해성점토의 특성상 부분적인 함몰에 의한 누수로 인하여 통하여 연안해 오염 가능성도 배제할 수 없다. 이러한 잠재성을 검토하기 위하여는 실내 시험과 함께 현장조사를 통한 정량적이고 포괄적인 석탄회 용출행태 파악이 필요하며 이러한 조사는 석탄회 매립장 주변의 환경영향 파악뿐 아니라 회처리장의 합리적 설계기준을 유도할 수 있을 것이다.

본 연구는 국내 석탄회의 화학적, 광물학적 특성을 파악하며 회분식 용출시험을 통하여 석탄회의 원소 용출특성을 알아봄으로서 석탄회 육상매립에 따른 지하수 오염잠재성을 평가하고자 한다. 국내 화력발전소에서 쓰는 국산 무연탄과 수입유연탄 시료를 영월화력과 보령화력에서 각각 채취하였다.

II. 실험방법

1. 시료채취 및 분석

무연탄을 사용하는 영월화력과 수입유연탄을 사용하는 보령화력의 2곳에서 석탄과 석탄회를 각각 채취하였다. 석탄회 시료의 경우 전기집진기에서는 비매립 석탄회(fresh ash)를 회매립장에서는 풍화석탄회(weathered ash)를 각각 채취하였다. 채취된 석탄과 석탄회 시료는 전기오븐에서 105℃ 건조 후 2 mm채를 통해 큰 입자들을 걸러내었다. 전처리를 거친 시료는 ICP-AES(Perkin Elmer Optima 3000XL, USA)를 이용하여 화학분석을 실시하였다.

석탄회의 경우 입도에 따른 화학조성변화를 알아보기 위하여 45μ이하 크기와 90μ이상으로 분리하여 입도별 화학분석을 실시하였다. 석탄과 석탄회의 광물조성을 알아보기 위하여 X-ray 회절분석기(MAC MXP-18A Rint-2500, Japan)를 이용, 분석하였다. 이때 분석조건은 흑연 monochrometer를 거친 Cu-Kα선을 사용하였으며 입사각은 3°에서 70°까지 0.010도 간격으로 scanning하였다.

두곳에서 채취한 시료의 실내분석외에 실제 회처리장에서의 환경영향을 알아보기 위하여 영동화력발전소 회처리장에서 석탄회와 해수가 혼합된 slurry 시료, 석탄회 매립장 주변의 수로에서 지표수 시료 및 지하수 감시정에서 지하수 시료를 채취, 분석하였다. slurry 시료를 포함한 모든 수질시료는 0.45μ 멤브레인 필터와 진공펌프를 이용하여 여과하였으며 ICP-MS(Perkin Elmer Optima 3000XL, USA)를 이용하여 분석을 시행하였다.

2. 회분식 시험

석탄회 매립으로 인한 원소 용출가능성을 알아보기 위하여 석탄회와 증류수를 1:10(w/v)의 비율(건조석탄회 시료 50gr + 증류수 500ml)로 1L 폴리에틸렌 용기에 담고 24시간 동안 회전식 교반기에서 교반, 진탕하였다. 회분식 시험은 24시간이 지난 후 용액을 비우고 새로 증류수를 채워넣는 과정을 계속하여 총 4회를 실시하였다. 각 용출단계마다 채취된 용액은 원자흡광분석기(Shimadzu AF6701F, Japan) 를 이용하여 이온 농도를 측정하였다. 또한 장기간 노출에 따른 원소 용출정도를 알아보기 위하여 증류수보다 용출효과가 큰 0.1N HCl을 이용한 회분식 시험도 시행하였다. 즉 0.1N HCl을 사용하여 6시간 동안 진탕한 후 0.45μ필터에 여과, ICP-MS(Perkin Elmer Elan 6000, USA)를 이용하여 분석했다.

III. 결과 및 고찰

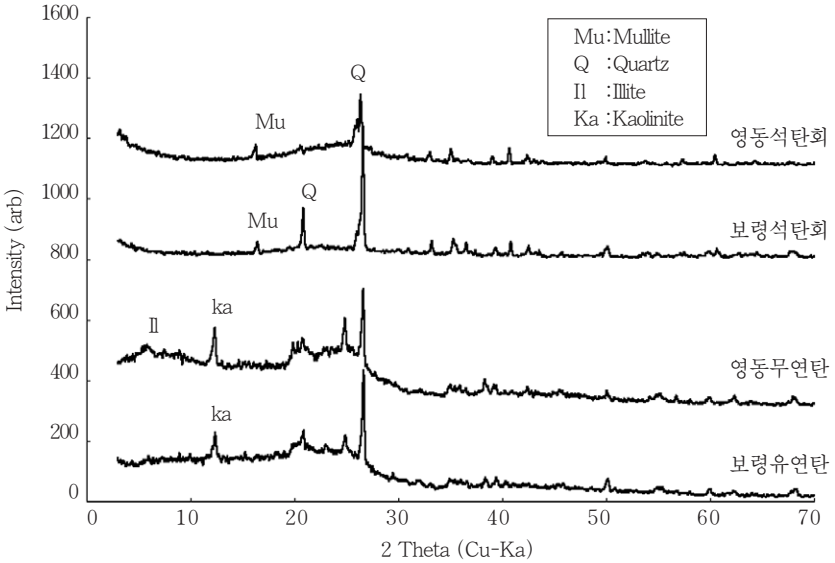
1. 광물조성

1) 석탄

무연탄과 유연탄 시료의 X선 회절분석 결과를 〈그림 1〉에 나타내었다. 영동시료의 경우 카올리나이트, 파이로필라이트 및 카올리나이트 등의 점토광물을 나타낸다. 무연탄인 영동화력의 석탄은 유연탄인 보령화력 시료와 비교시 특징적으로 일라이트 광물을 함유하며 이러한 광물학적 특징은 유연탄에 비해 무연탄의 K 함량이 상대적으로 높은 것을 의미한다(표 1). 유연탄 시료의 경우 점토광물로는 카올리나이트가 우세하며 두 시료 모두 석영을 함유하였다(그림 1).

2) 석탄회

〈그림 1〉에서 보듯이 석탄회의 경우 매립, 비매립시료 모두 특별한 점토광물을 보이지 않으며 고온 알루미나 광물인 멀라이트와 석영이 주를 이루고 있다. 또한 석탄회의 경우 원탄과는 달리 기원에 따른 광물학적 특성 차이가 크지 않으며 두 시료간에 유사한 양상을 보인다. 무연탄 및 유



<그림 1> 석탄 및 석탄회 광물조성

연탄회 두시료 모두 황철석을 포함한 철광물들이 미량으로 나타난다.

2. 화학성분

1) 석탄

채취된 석탄과 석탄회의 화학성분은 〈표 1〉과 같다. 원탄의 경우 무연탄이 SiO_2와 Al_2O_3 함량이 월등 높았으며 미량원소의 경우 Zn를 제외하고는 두 시료가 유사하였다. Si, Al의 상대적 높은 함량은 유연탄과 비교시 3배내지 5배 가량 높은 회분 함량 때문인 것으로 생각된다. 즉, 회분의 주성분인 점토광물류의 높은 함량 때문인 것으로 생각된다.

미량원소의 경우 역시 무연탄에서의 함량이 유연탄보다 일반적으로 높으며 특히 Cr, Cu 및 V의 함량이 높은 것을 보인다. Ni과 Co의 두 원소들은 유연탄에서 더 높은 함량을 보인다.

2) 석탄회 - 주원소

석탄회의 경우 K 함량을 제외하고는 유연탄에서의 함량이 높았다. 무연탄의 K 함량이 높은 것은 이에 수반되는 일라이트의 영향으로 생각된다. 45μ이하와 90μ이상 크기의 시료들을 비교할 때 유연탄 시료가 무연탄 시료에 비하여 상대적으로 입자크기가 작아질수록 더 높은 함량을 보였다(표 2). 입자 크기가 작은 시료에서 원소농도가 높은것은 상대적으로 표면 부화율이 더 높음을 시사하는 것으로 생각된다. 보령 유연탄회 시료중 Al, Si, Na, K 원소들의 경우 입자크기에 따른 큰 변화를 보이지 않았다. 반면 영동 무연탄회 시료는 이들 원소에 대해 입자가 작은 시료들이 더 큰 부화경향을 나타낸다. 유연탄회의 경우 주원소들이 알루미나 규산염 유리질이나 석영 등의 광물형태로 존재하며 표면에 부화된 부분이 적기 때문인 것으로 생각된다. 반면 무연탄회의 경우 이러한 주원소 성분들 중 일부가 표면에 원소나 광물형태로 분포하여 유연탄회에 비하여 상대적으로 표면부화 정도가 높아진 때문인 것으로 생각된다.

3) 석탄회 - 미량원소

미량원소의 경우 특징적으로 Cr의 함량이 무연탄회에서 높게 나타나며 Cu와 Pb의 경우도 무연

표 1. 석탄 및 석탄회 화학조성

	Coal		Fly ash			Coal		Fly ash	
%	BR	YD	BR	YD	ppm	BR	YD	BR	YD
SiO_2	8.49	15.17	55.20	47.27	Co	11	5	53	8
Al_2O_3	3.47	11.03	19.86	29.15	Cr	19	39	95	498
Fe_2O_3	1.49	1.54	9.70	4.41	Cu	13	39	66	109
MgO	0.16	0.24	1.18	0.66	Ni	41	22	174	72
CaO	0.56	0.21	3.72	0.54	V	38	62	147	157
Na_2O	0.05	0.07	0.28	0.16	Pb	6	28	29	68
K_2O	0.15	1.35	0.97	3.87	Zn	21	34	93	97

BR: 보령, YD: 영동

탄회에서 높게 나타나는 등 전반적으로 무연탄회의 중금속 함량이 높다(표 1). 입자크기에 따른 화학성분 변화는 보령과 영동시료 모두 입자크기가 작을수록 원소농도가 높았다(표 2). 이는 미량원소들의 표면수반을 시사하는 결과로 해석되며 특히 Cu, Pb, Zn 등의 원소들이 2에서 3배 정도의 농도차이를 보인다. 단 영동 석탄회의 경우 Cr의 농도는 입자크기가 작은 부분에서 오히려 낮은 함량을 보였다. 유사한 무연탄을 사용하는 서천화력발전소 석탄회와 수입 유연탄인 삼천포 석탄회의 경우 역시 입도변화에 따른 농도변화를 거의 보이지 않고 있으며 이는 Cr이 석탄 형성당시 혼입되는 육성점토질 또는 유기물에 흡착, 함유되었기 때문으로 설명된다.[20] 그러나 영동 시료와 같은 경우 석탄 형성당시에 점토질 또는 유기물에 흡착, 혼입되었을 가능성 외에 Cr을 함유하는 독립광물의 존재 가능성도 클 것으로 판단된다.[21]

Cr을 제외한 미량원소들은 입도크기에 따른 원소농도 특성은 국내 석탄회가 기존 연구에서 알려진 표면부화 경향과 일치함을 보인다. 이러한 표면부화 특성은 석탄회의 원소용출 가능성을 더욱 높인다고 할 수 있으며 특히 pH, Eh 조건에 따라 원소 용출도는 매우 민감하게 반응한다.[3)13) 14)17)]

3. 용출특성 및 환경영향

회분식 시험결과를 〈표 3〉에 나타내었다. 영동시료의 경우 pH가 7.43에서 9.31까지의 알칼리성을 보이는 데 비하여 보령시료는 10.95에서 12.01에 이르는 강한 알칼리성을 보이며 이러한 알칼리 용출 특성은 다른 연구자들의 결과와 유사하다.[6)7)11)] 무연탄회인 영동시료는 풍화받은

표 2. 입자 크기에 따른 석탄회 화학조성 비교

	BR		YD			BR		YD	
%	<90 micron	>45 micron	<90	45>	ppm	<90	>45	<90	45>
SiO_2	58.73	56.95	39.90	50.85	Co	25	65	5	9
Al_2O_3	18.08	21.47	21.91	32.55	Cr	82	102	635	522
Fe_2O_3	5.79	10.69	3.40	4.86	Cu	39	83	63	154
MgO	0.74	1.32	0.51	0.75	Ni	100	210	54	83
CaO	2.05	4.01	0.37	0.53	V	100	164	113	178
Na_2O	0.28	0.28	0.11	0.18	Pb	20	47	21	90
K_2O	0.92	0.99	2.90	4.36	Zn	58	123	37	137

시료가 신선한 시료에 비하여 더 높은 pH값을 보인다. 반면에 유연탄회인 보령시료는 매립여부에 따른 pH값의 차이를 거의 보이지 않는다.

전기전도도는 용액중 일반적으로 용존이온의 농도에 비례하므로 개략적인 오염정도를 나타낸다. 유연탄회 침출수내의 전기전도도는 유연탄회에 비하여 훨씬 높은 값을 보이는 데 이는 유연탄회 침출수의 높은 이온함량으로 인한 것이며 유연탄회가 무연탄회에 비하여 더 많은 물질을 방출함을 나타낸다. 또한 무연탄회의 경우 매립된 시료 용출시 전기전도도가 신선한 시료에 비하여 낮은 값을 보이는 반면 유연탄회는 매립시료에서의 전기전도도가 신선한 시료에 비하여 오히려 더 높음을 보인다(표 3). 이는 전자의 경우 해수와 슬러리 상태로 매립이 되는 동안 많은 양의 원소들이 용출되는 데 반하여 후자는 슬러리 상태가 아니며 빗물을 포함한 물과 접촉하면서 용출이 제한적으로 일어나며 용출가능 물질이 여전히 많이 남아있음을 시사한다.

1) 주원소

Na, K는 Al, Si와 함께 중요한 비정형 유리질구성 원소들이며 표면에도 수반되며 특히 Na는 상당량이 표면에 부화되는 것으로 보고된다.[4] 무연탄회 집진기시료의 첫 용출분인 YF1의 경우 이러한 표면에 수반된 부분의 초기 용출로 높은 농도를 나타내었다(표 3). 그러나 2회 이후부터 농도가 급격히 감소하는데 이러한 감소 경향은 표면에 수반된 부분이 초기에 다량 용출된 후 유리질에 혼재된 부분이 용출되기 시작함에 따라 보이는 특징으로 생각된다. 이러한 용출특징은 광물조성 분석에서 나타난 바와 같이 무연탄 석탄회 용출시의 K를 함유하는 일라이트 광물의 영향으로 생각된다. 유연탄회의 경우 Na의 농도는 첫 용출에서 매우 높은 농도를 보이며 그 이후 급격히 농도가 감소하였다. 반면에 K는 용출횟수에 따른 급격한 농도변화를 보이지 않으며 대부분의 K가 표면보다는 유리질 물질에 수반되어 서서히 용출되는 것으로 생각된다.

표 3. 회분식 용출시험 결과

Unit	mg/l				ug/l						uS/cm
	K	Na	Mg	Ca	Cu	Fe	Cd	Pb	Zn	pH	EC
YF1	11.1	9.2	1.4	54.0	39.9	0.2	1.3	0.3	60.7	7.43	457
YF2	4.9	0.4	0.9	2.1	4.8	14.0	0.8	1.2	14.5	7.78	59
YF3	0.8	1.0	0.6	2.3	25.5	3.6	0.2	0.8	29.5	7.80	31
YF4	0.8	0.0	0.6	0.7	29.2	1.5	0.9	0.4	28.1	7.69	25
YW1	2.3	1.4	1.6	2.6	67.5	3.3	1.1	0.7	49.1	9.31	44
YW2	1.3	0.9	0.7	1.3	37.5	1.0	1.1	0.4	5.7	8.33	27
YW3	0.3	0.0	0.7	1.5	14.4	0.4	0.6	0.0	0.0	7.98	24
YW4	0.8	2.5	0.6	0.0	3.1	0.0	0.0	0.1	0.0	7.94	14
BF1	4.4	19.8	0.6	1067.4	19.5	1.3	0.6	0.5	52.8	12.01	1668
BF2	1.8	1.8	0.6	151.3	4.8	0.0	0.0	3.3	97.5	10.95	1089
BF3	0.2	1.2	0.6	55.1	17.0	0.0	1.5	0.0	32.0	11.38	680
BF4	0.7	0.7	0.7	59.6	0.0	1.4	0.3	0.0	54.9	11.18	461
BW1	1.7	15.4	0.6	1468.4	15.1	3.0	0.0	1.9	30.9	11.87	1832
BW2	11.5	3.9	0.7	84.5	6.5	0.2	0.3	0.0	23.0	11.07	1352
BW3	1.6	0.7	0.6	119.9	8.0	1.6	0.2	1.4	17.2	11.42	944
BW4	2.4	0.0	0.7	58.2	0.0	0.9	1.2	0.3	15.6	11.27	603

YF: 영동 fresh, YW: 영동 weathered, BF: 보령fresh, BW: 보령 weathered

Mg는 전 시료에서 매우 균질한 농도를 보이는데 이는 Mg의 용액에서의 농도가 표면으로부터의 용출 보다는 유리질의 용출에 의해 조정되는 것으로 생각된다. 이러한 Mg의 농도변화 양상은 Mg의 농도를 조정하는 2차 침전물의 형성에 의해 제한 될 수 도 있으며 이 경우 가능한 고형물질은 Brucite가 있다.[17] Ca농도는 무연탄회의 침출수에서는 집진기 시료에서만 1회 용출 후 급격한 감소를 보이며 매립시료의 경우 매우 완만한 변화를 나타내었다. 유연탄회의 경우 1회 용출 후 매우 높은 농도를 보이며 2회 이후 안정된 변화 양상을 보였다. 석탄회 침출수에서의 Ca 농도는 2차적으로 형성된 석고에 의해 조정되는 것으로 보고되었다.[6)7)9)] 매립시료에서도 첫 용출에서는 다량의 Ca이 용출되나 2회 이후로는 농도가 점차 안정되었다. 매립시료에서도 집진기 시료와 마찬가지로 초기 다량용출을 보이는 것은 용출된 Ca가 2차적으로 석고로 침전, 재용출되었기 때문으로 생각된다.

2) 미량원소

Cu, Zn를 제외한 Fe, Cd, Pb 등의 농도는 전반적으로 분석한계에 가까운 값을 보인다(표 3). 이는 표 4에서 나타났듯이 유사한 방법을 사용, 영국 화력발전소의 유연탄 시료를 이용한 시험결과에 비하여 훨씬 낮은 농도를 나타낸다. 이러한 차이는 석탄회 성분과 용출특성은 유사성분의 원탄을 사용하더라도 연소방법, 보일러 형태 등에 큰 영향을 받으며 이러한 연소 특성이 용출 정도에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.[11)15)] 즉, 국내 석탄회의 경우 미연 탄소분의 함량이 6% 정도로 영국화력발전소 석탄회 분석값인 2-3% 보다 높은 편이다.[6)23)] 또한 중금속의 경우 용출시험 방법에 따라 용출정도가 많은 영향을 받는 것으로 보고된다.[18)] 영국 Drax, Meaford 시료의 경우 폴리에틸렌 용기가 360도 회전하는 end-over-end shaker를 사용하였으나 금번 시험의 경우 좌우 진동 shaker를 사용하였으며 이러한 방법상의 차이에도 원인이 있을 것으로 생각된다. 또 다른 가능성으로는 분석방법의 차이도 생각할 수 있다. 즉, 과거 연구의 경우 ICP-AES를 사용하였으나 이번 분석에는 AAS를 사용하였으며 매트릭스나 간섭효과 등으로 인한 차이 또한 고려될 수 있다. Cu는 무연탄에서 더 많이 용출되어 나오며 전반적으로 용출횟수에 따라 농도가 감소하였다. Zn의 경우도 초기 용출 시료들에서 더 높은 농도를 보이며 점차 감소하나 일정농도를 유지한다. 이 두원소를 제외한 나머지 원소들의 경우 용출횟수에 따른 급격한 변화는 관찰되지 않았다. 특히 매립을 하지 않았던 전기집진기 시료에 비하여 매립시료에서 중금속이 덜 용출되나 매립시료에서도 어느 정도의 중금속이 검출되었다. 이는 석탄회의 중금속이 표면뿐 아니라 입자 내부에도 어느 정도 혼재되어 있으며 유리질 물질의 용출에 따라 이러한 내부 함유 중금속들이 방출되는 것으로 생각된다.

0.1N 염산을 사용한 용출시험 결과 침출액에서의 농도가 몇십배 이상 증가하였다(표 4). 이러한 증가는 중금속의 용출도가 pH에 매우 민감하게 반응하는데서 기인하며 특히 pH가 낮아질수록 중금속의 용출도는 증가한다.[3)6)13)16)17)] 비록 단기간에 일어날 수 있는 용출은 아니나 이는 장기간에 걸쳐서 물과 접촉시 주변 수환경으로 방출될 수 있는 양으로 간주되어야한다. 지표수로 용출되는 경우는 희석효과로 인하여 환경영향은 그다지 크지 않을 것이나 지하수의 경우 유속이 매우 느려 희석효과를 기대할 수 없으며 용출된 원소들이 지하수 중으로 인입, 축적될 것이다. 따라서 석탄회를 육상에 매립할 경우 침출수가 직접 지하로 흐르지 않도록 적정한 차수시설이 필요하며 지속적인 주변환경 감시가 필요할 것으로 생각된다.

2) 환경영향

〈표 4〉는 금번 연구결과와 같은 방법과 유사한

성분의 석탄회를 사용하는 영국 Drax 화력발전소에서 채취한 시료를 이용한 용출시험 결과를 영동화력발전소 회처리장 주변의 수로와 지하수 감시정에서 각각 채취한 지표·지하수의 화학성분과 석탄회 슬러리의 성분과 비교하였다. 영동화력의 회처리장은 해안에 자연적으로 형성된 호수 주변에 제방을 쌓은 후 그 안에 해수와 석탄회를 혼합 처리하였으며 따라서 석탄회는 해수와 혼합된 슬러리 상태로 존재한다. 매립장 바닥은 하부로부터 사질점토층과 바닥재(Bottom ash)를 깐 후 석탄회를 매립하였다. 매립장과 연결된 수로에서 채취한 지표수시료는 해수와 석탄회 혼합 매립장에서 월류되어 수로로 배출된 것으로 침출수의 성분과 유사할 것으로 추정된다.

영동화력 회처리장에서 채취된 슬러리와 회처리장 주변의 지표수, 지하수의 화학조성은 금번 연구에서 석탄회 용출실험을 통하여 얻은 침출수 시료의 특성과 유사하였다(그림 2, 표 4). 서로 다른 시료간에 화학 조성상의 유사함을 보이는 것은 접촉 및 이동에 따른 혼합, 희석 등의 결과로

표 4. 지하수, 지표수 및 용출시험 결과비교

Unit: mg/l

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Cl-	NO_3^-	SO_4^{2-}
0.1N HCl	1.772	0.041	3.086	1.141	0.014	0.079	59300	1060	1920
지하수	0.004	0.001	0.005	0.006	0.000	0.023	27	6	8
지표수	0.013	0.001	0.005	0.005	0.001	0.005	821	23	107
Slurry	0.011	0.001	0.005	0.006	0.001	0.005	25220	560	2880
침출수*	nd	0.014	0.003	0.128	nd	0.028	-	-	-
df1**	0.140	0.120	0.300	0.100	0.220	0.150	6.1	0.8	492.4
dw1***	0.310	0.010	0.010	0.010	0.010	0.020	7.3	24.3	17.5
mw1#	0.180	0.070	0.060	0.060	0.010	0.010	3.2	2.4	21.1
Drax##	0.004	0.030	0.170	0.020	0.300	0.370	200	87	3305

*영동화력, **영국Drax fresh, ***영국Drax 17년 매립, #영국Meaford 40년 매립, ##영국 Drax 침출수

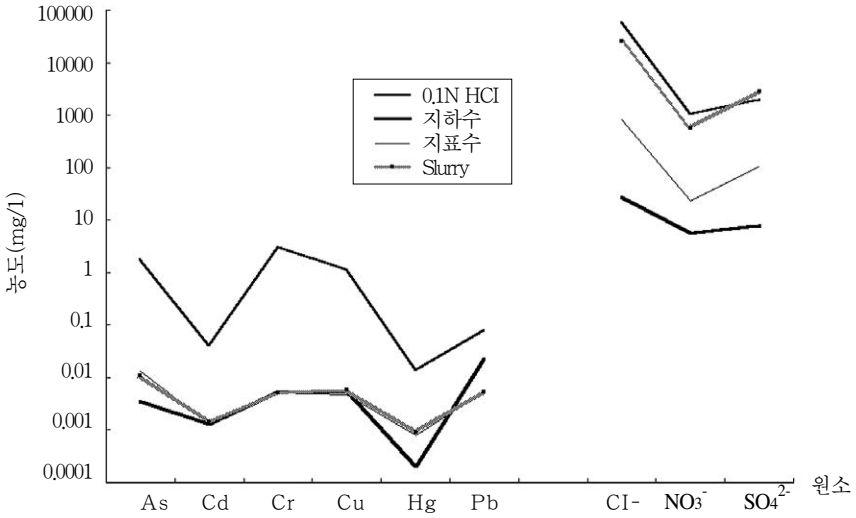


그림 2. 지하수, 지표수 및 침출수간의 조성비교 Finger diagram

해석되며 회처리장에서 완전 차수가 이루어지지 않은 상태에서 침출수가 주변의 지하수, 지표수로 이동하여 결과적으로 화학조성에 영향을 미친 것으로 생각된다. 풍화된 석탄회 시료를 이용한 실내 회분식 용출시험 결과에서 알 수 있듯이 석탄회로부터의 중금속 용출은 단기간에 걸친 표면부화분 뿐 아니라 유리질 내부 결정격자에 혼재된 중금속들의 장기간 매립에 따른 용출로 부터도 발생한다(표 3). 이러한 사실은 표 4에서 17년, 40년 정도 매립기간을 거친 석탄회 시료를 이용한 용출시험 결과인 dw1. mw1에서도 중금속 원소들이 용출되는 결과를 통하여도 확인 될 수 있다. 석탄회의 원소용출 특성과 회매립장 주변 지하수 화학 특성 등으로 미루어 볼 때 과거 적정한 차수시설 없이 건설된 회매립장의 경우 상당히 오랜 기간이 지난 경우에도 주변에 중금속의 용출 및 이동이 진행되며 지하수 오염이 발생하였을 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다. 따라서 차수시설이 미비된 회매립장 주변의 오염현황 파악을 위한 현장 조사가 시급히 이루어져야할 것으로 생각되며 향 후 회처리장의 설계에 있어서도 이러한 중금속의 장기용출 특성이 고려되어야 할 것이다. 특히, As, Cd, Pb, Hg 등의 원소들은 적은 양으로도 치명적 영향을 미칠 수 있는 원소들로서 각별한 주의가 요구된다.

IV. 결론 및 제언

국내 화력발전소 두곳에서 무연탄회와 유연탄회를 각각 채취하여 화학성분 및 광물조성을 분석하였으며 용출시험을 통하여 원소 용출도와 잠재적 위해성을 평가하였다. 용출시험 결과외에 무연탄을 사용하는 영동화력발전소의 회매립장과 주변 지표수 그리고 지하수 감시정에서 석탄회 슬러리, 지표수, 지하수 시료를 채취하여 실내 실험 결과와 연계, 실제적인 영향을 파악하고자 하였다.

회분식 용출시험 결과로 보아 석탄회의 용출은 단기간에 걸친 표면부화물질의 급격한 용출과 다음 단계로 유리질 물질에 혼재된 부분의 장기 용출로 나누어 생각할 수 있을 것이다. 이는 비교적 오래된 석탄회매립장에서도 일정량의 원소들이 계속 용출되는 것으로 추정 가능하다. 이 때 침출수에서의 중금속 농도는 비록 높지 않으며 현재 폐기물 관리법상 배출수 기준 이내로 법적인 문제는 없으나 영동화력 회처리장 주변의 지하수 감시정에서 채취한 지하수 성분과 침출수 성분과의 유사성으로 보아 적정 차수시설이 없는 상황에서 침출수가 지하수로 인입될 경우 유속이 느린 지하수 특성상 원소의 축적과 함께 지하수 성분에 영향을 미치며 궁극적으로 지하수 오염을 야기할 것으로 판단된다. 특히 장기간에 걸친 계속적인 원소 방출로 이 효과는 지속적으로 발생할 것으로 예상되며 적정 차수시설없이 건설된 회처리장에 대하여는 주변 환경영향에 대한 조사가 필요한 것으로 판단된다.

석탄회는 재활용 물질로 큰 잠재성을 가진다. 따라서 현재 20% 정도에 머물고 있는 석탄회 재활용율을 높여 회처리비용을 줄이고 석탄회를 이용한 값싼 원자재로의 활용 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 그러나 간과되지 말아야할 것은 재활용되는 양의 몇 배에 이르는 석탄회가 폐기물로 매립등의 방법으로 처리되나 이에 대한 환경영향 연구는 극히 적다는 것이다. 석탄회 발생량은 계속적으로 증가할 것으로 예측된다. 이에 따른 매립공간 확보는 점점 어려워지고 있는 실정으로, 최근에 건설된 화력발전소들의 경우 점토층을 차수막으로 활용하고 넓은 부지를 비교적 용이하게 확보하기 위하여 갯벌지역에 회매립장을 건설하고 있다. 이 역시 석탄회의 정확한 위해성이 검증되지 않은 상태에서 불균질한 두께로 인해 구조적으로도 불안정한 해상점토층을 활용한다는 문제가 있으며 타당성이 재검토 되어야할 것이다. 석탄회의 육상매립은 장기간에 걸친 원소 용출로

인하여 지하수를 오염시킬 수 있다. 그러나 정확한 위해성에 대해서는 야외조사를 바탕으로 한 좀 더 포괄적이고 정량적인 연구가 필요하며 정확한 위해성 평가를 바탕으로 매립장 위치선정과 합리적인 차수시설의 재평가가 이루어져야할 것이다.

인용문헌

1. Browman, 1996, Power Production waste, Water Environment Research, 68: 547-551.
2. Carlson, C. L & Adriano, D. C., 1993, Environmental impacts of coal combustion residues, Journal of Environmental Quality, 22: 227-247.
3. Dreesen, D. R., Gladney, E. S., Owens, J. W., Perkins, B. L., Wienke, C. L. and Wangen, L. E., 1977, Comparison of levels of trace elements extracted from fly ash and levels found in effluent waters from a coal-fired power plant, Environmental Science & Technology, 11: 1017-1019.
4. Hulett, L. D., Weinberger, A. J., 1980, Some etching studies of the micrstructure and composition of large aluminosilicate particles in fly ash from coal-burning power plants, Environmental Science & Technology, 14: 965-970.
5. Le Seur, S. L. & Drake, E. E., 1987, Hydrogeology of an alkaline fly ash landfill in eastern Iowa, Groundwater, 25: 519-526.
6. Lee, S, 1995a, Potential Element Retention by Weathered Pulverised Fuel Ash: I. Batch Leaching Experiments Econ, Environ. Geol, 28: 251-257.
7. Lee S, 1995b, Potential Element Retention by Weathered Pulverised Fuel Ash: II. Column Leaching Experiments, Econ. Environ. Geol, 28: 259-2699.
8. Lee, S and Hahn, J., 1997, Geochemistry of leachate from fly ash disposal mound. Journal of Environmental Science and Health - Part A. Environmental Science and Engineering, A32(3): 649-669.
9. Lee, S and Spears, D. A., 1997, Natural Weathering of Pulverised Fuel Ash and porewater evolution, Applied Geochemistry, 12: 367-376.
10. Lee, S. and Spears, D. A. 1998, Potential Contamination of Groundwater by Pulverised Fuel Ash. In: Mather J., Banks, D., Dumpleton, S. & Fermor, M. (eds) Groundwater contaminants and their migration, Geological Society of London, London, Special Publication, 128: 51-61.
11. Mattiogod, S. V., Rai, D., Eary, L. E. and Ainsworth, C. C., 1990, Geochemical factors controlling the mobilization of inorganic constituents from fossil fuel combustion residues: I. Review of the major elements, J. Environ. Qual, 19: 188-201.
12. Natusch, D. F. S., Wallace, J. R and Evans, C. A. Jr., 1974, Toxic trace elements: Preferential concentration in respirable particles, Science, 183: 202-204.
13. Smith, R.D., 1980, The trace lement chemsitry of coal during combustion and the emissions from coal-fired plants, Progress in Energy and Combustion Science, 6: 53-119.
14. Theis, T. L. and Wirth, J. L., 1977, Sorptive behaviour of trace metals on fly ash in aqueous systems, Environmental Science & Technology, 11: 1096-1100.
15. USEPA, 1988, Waste from the combustion of

coal by electric utility power plants. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USEPA Rep, 530-SW-88-002

16. van der Hoek, R. A., Bonouvrie, P. A. & Comans, R. N. J., 1994, Sorption of As and Se on mineral components of fly ash: relevance for leaching processess, Applied Geochemistry, 9: 403-412.
17. van der Sloot, H. A., Wijkstra J., van Dalen, A., Das, H. A., Slanina, J., Dekkers, J. J. and Wals, G. D., 1982, Leaching of trace elements from coal solid waste, Netherlands Energy Research Foundation, ECN-120.
18. 김정권, 안종수, 성낙창, 1997, 국내용출시험법, 유럽의 availbility법 및 EPA의 EP법의 비교검토에 관한 연구, 대한환경공학회지, 19: 855-862.
19. 오성원, 1997, 석탄회 및 탈황석고 배출 현황 및 대책. 석탄회 및 탈황석고 활용 국제워크숍, 한국전력공사.
20. 윤정한, 오근창, 김용웅, 신방섭, 1995, 삼천포와 서천 화력 발전소에서 발생하는 석탄회중의 중금속 함량에관한 연구, 자원환경지질, 25: 147-154.
21. 이규호, 최선경, 문희수, 이상훈, 1997, 영월 화력발전소에서 배출된 석탄회의 광물학적, 지화학적 특성, 자원환경지질학회지, 30: 443-457.
22. 최원길, 민병무, 김성현, 1993, 유연탄회의 활용방안, 한국폐기물학회지, 10: 463-475.
23. 황선국, 1997, 석탄회의 습식처리 및 고부가가치 향상연구, 석탄회 및 탈황석고 활용 국제워크숍, 한국전력공사.