

## 폐석회를 이용한 석탄회의 고품화/안정화 연구

진호섭 · 박주양

한양대학교 토목공학과

### I. 서 론

석탄회의 재활용은, 외국의 경우 콘크리트나 도로포장용 골재, 벽돌 및 블록제조 등 구조용재료 뿐만 아니라 성토, 매립의 토공재료나 폐기물 매립장의 복토재 등으로 많은 양이 재활용되고 있다. 이에 비하여 국내에서의 석탄회 재활용이 미흡한 큰 이유중의 하나는 석탄회를 산업 부산자원 이라기보다는 환경오염을 유발하는 폐기물이라는 인식이 증대하고 NIMBY의 대상이 되고 있다는 점이다. 이는 석탄회의 환경안전성에 대한 불신에서 비롯된 것으로 재활용을 하고자하는 주체가 당해 현장에 적용 시 어떠한 환경영향과 어느 정도의 환경위해도(Environmental Risk)를 가져올 수 있다는 것을 정량적 수치로 명확히 제시하고 또 그 수치가 인근 주민과 시민단체를 안심하고 허용할 수 있는 수준이라는 것을 인식시키지 못하였다는데 원인이 있다.

석탄회의 경우 지금까지의 연구결과<sup>1)</sup>에 의하면 중금속 용출실험결과는 허용치를 훨씬 밑돌고 있으나, 타 폐기물에 비해 산중화능력(Acid Neutralizing Capacity, ANC)이 떨어지므로 폐기물매립지와 같은 낮은 pH 조건 하에서는 용출량이 늘어나는 경향이 있다. 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는, 폐석회를 이용하여 상대적으로 연구가 부진한 석탄화력발전소에서 배출되는 바닥재를 고품화/안정화한 시료의 물리화학적특성 변화를 분석하여 폐기물 매립지 복토재로서의 재활용 가능성을 검토하였다.

### II. 실험재료 및 방법

본 연구에서는 다양한 산지의 유연탄을 사용하는 삼천포 화력발전소에서 배출된 바닥재를 시료로 사용하였다. 고화재로는 소다회를 생산하는 공장의 부산물인 폐석회를 사용하였다.

#### 1. 시료양생

석탄회와 폐석회를 30℃로 일주일간 건조시킨 후, 막자사발로 파쇄하여 No.10(2mm)체를 통과한 시료시료를 중량비(석탄회:폐석회)로 1:1, 1:2, 1:4의 비율로 잘 혼합한 후, w/c=0.75의 비율로 물을 첨가하여 5×10cm 몰드에 넣어 성형한 후 48시간 후 탈형하였다. 14일간 습윤상태로 30℃를 유지하면서 양생하였다.

#### 2. 실험방법

양생이 끝난 시료는 일축압축강도시험과 국내의 5가지 용출시험(ANC, Availability, TCLP, 폐기물공정시험, 토양오염공정시험)을 행하였다.

ANC Test는 캐나다 환경청의 Wastewater Technology Centre에서 개발한 Test Method 11을 따라 입자크기를 150 $\mu$ m이하로 한 시료를 L/S비를 6/1로 하여 질산량을 서로 달리한 9개의 샘플을 48시간동안 진탕시키고 여과한 후, 최종 pH 값과 건조시료 g당 산첨가량을 플로팅하여 산중화능력을 판단하였고 그 용출액의 중금속농도를 분석하였다. Availability Test는 NEN 7341을 따라 입자크기를 125 $\mu$ m이하로

한 시료 10g과 증류수 500ml을 비이커에 넣고, HNO<sub>3</sub>을 첨가하여 pH 7로 유지하여 3시간 교반한 후 여과하여 그 여액을 별도 보관하고, 다시 pH 4로 유지하면서 3시간 교반 후 여과하여 여액을 얻은 후 처음의 여액과 합쳐 중금속분석을 하였다. TCLP Test는 EPA Method 1311에 따랐으며 국내용출실험법으로 각각 폐기물공정시험과 토양오염공정시험을 행하였다.

모든 실험은 2회에 걸쳐 실시하였으며, 용출액은 여과후 중금속 침전방지를 위해 pH를 2이하로 고정시킨 후, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Mg, Pb, Se, Zn는 ICP- MS(Varian Ultramass 700)로 Ca는 AA(Perkin-Elmer 5100PC)로 분석하였다.

### III. 결과 및 고찰

석탄회와 세가지 배합비로 14일간 양생시킨 석탄회-폐석회 고화시료에 대한 ANC를 그림 1에 나타내었다. 석탄회 자체의 산중화능력은 0.2eq/kg 정도로 미약했으나 배합비가 1:1, 1:2, 1:4로 증가함에 따라 산중화능력이 10.4eq/kg, 12.9eq/kg, 14.4eq/kg 등으로 크게 증가함을 볼 수 있었다. 특히 pH 8과 pH 6 부근에서 높은 산중화능력을 보였는데 이는 석탄회와 폐석회가 반응하여 생성된 낮은 Ca/Si ratio의 CSH(Calcium Silicate Hydrate)와 MSH(Magnesium Silicate Hydrate) 등이 작용한 결과로 보여진다. 배합비 1:4의 경우에는 pH 12부근에서도 약간의 산중화능력을 보였는데, 이 경우는 높은 Ca/Si ratio의 CSH가 생성되어 작용한 결과로 추정된다. 그러나 pH 6 이후에는 급격하게 산중화능력이 떨어지고 있는데 이는 산중화능력을 나타내는 CSH, MSH 등이 대부분 소모되었기 때문으로 판단된다. 이를 뒷받침하는 자료로서, 그림 2에 ANC Test의 최종 pH에 따른 Ca와 Mg의 용출농도 변화를 나타내었다. pH 12~9까지는 Ca의 농도가 Mg에 비해 훨씬 높은 것을 볼 수 있는데, 이 부근에서는 CSH가 주로 산중화능력을 발휘하기 때문이다. 이후 Mg의 농도가 높아지는 부근에서 산중화능력이 커지는 것을 볼 수 있는데, 이 부근에서는 MSH가 주로 작용하여 산중화능력을 보이기 때문이다.

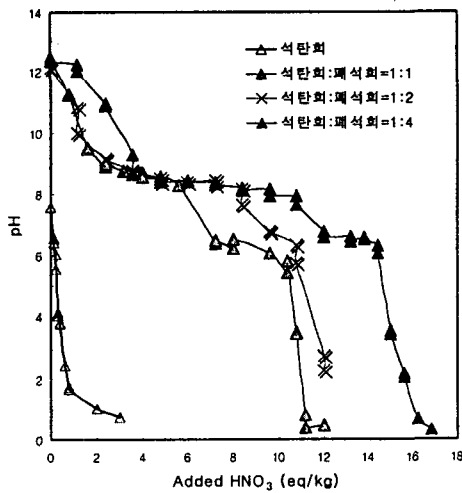


그림 1 석탄회와 폐석회의 혼합비에 따른 산중화능력

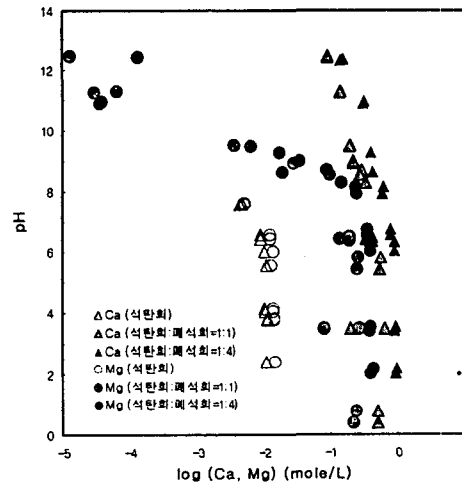


그림 2 석탄회와 폐석회의 혼합비에 따른 Ca 및 Mg의 용출농도 변화

그림 3에 두가지 중금속에 대한 각 용출시험결과를 표시하였다. 두 금속 모두 시험법에 관계없이 pH에 따라 일정하게 변하고 있음을 볼 수 있다. 결국 용출농도는 고형물과 주변환경이 평형을 이룬 최종 pH에 따르게 되므로 장기적인 용출거동을 예측하는데 pH가 중요한 요소임을 추정할 수 있다.

Pb의 경우 석탄회-폐석회 고화체의 농도곡선은 석탄회의 용출 농도곡선과 구분이 되는데 이는 Pb의 지배 Mineral 침전물(Controlling Solid)이 처음과 달라졌음을 의미한다. 이와는 대조적으로 Zn의 경우 석탄회와 석탄회-폐석회 고화체의 용출농도곡선이 거의 일치함을 볼 수 있었다. 이는 Zn의 경우 지배 Mineral 침전물이 변하지 않았음을 의미한다.

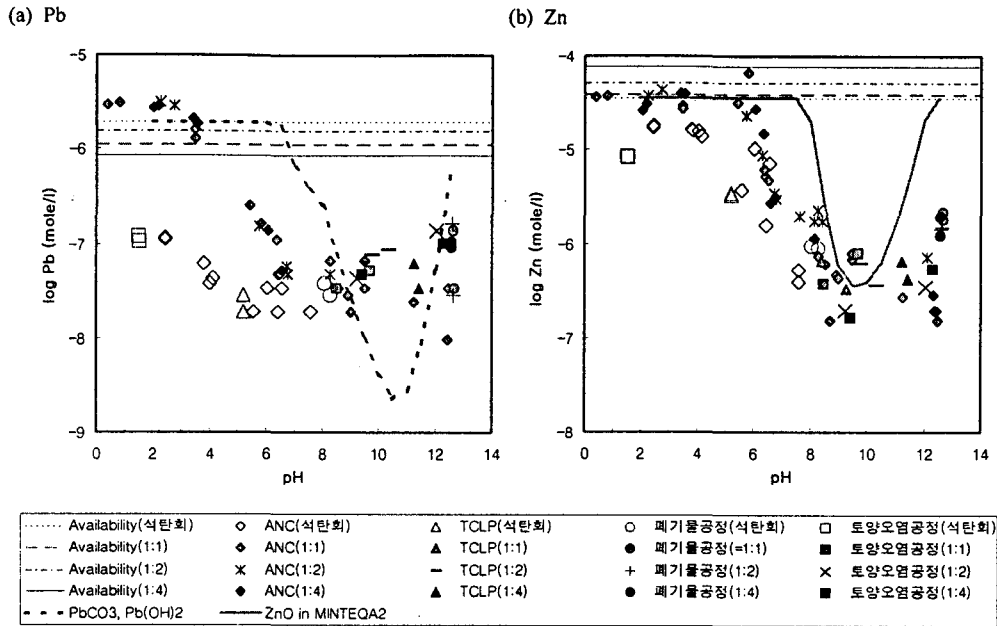


그림 3 혼합비(석탄회:폐석회)에 따른 각 시험법 별 용출농도

표 1에 각 용출실험법에 따른 석탄회 및 석탄회-폐석회 고화체의 용출농도를 표시하였다. 모든 결과는 2회 실험결과의 평균치로 나타내었고, pH는 여과후 용출액의 최종 pH를 나타내었다. 분석결과 중금속 용출농도는 각국의 기준치를 모두 만족하는 것으로 나타났다. 특히 자연환경에 최악의 조건으로 알려진 Availability 용출결과도 각국의 기준을 만족하는 것으로 나타나 위에 분석된 중금속 속에 대해서는 재활용시 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

Availability의 경우 As, Cd, Cr, Cu, Zn 등은 폐석회 혼합비가 증가됨에 따라 용출농도가 약간 증가하였으나 규제치에는 훨씬 못미치는 수준이었다. As의 경우 1:1 혼합시 용출농도가 가장 안정화되었음을 볼 수 있다. Ba와 Pb의 경우는 폐석회혼합비가 증가할수록 용출농도가 낮아지는 경향을 보였다.

토양오염공정시험 결과로는 1:1혼합시 As, Ba, Cr, Cu, Pb의 용출농도가 가장 낮게 나왔으며 그 외의 금속들도 대체로 큰 차이가 없어 가장 안정된 것으로 판단되었다. 이 경향은 TCLP 결과에는 더욱 두드러지는데 As, Cd, Cu, Pb, Se 이상 5가지 중금속들은 검출한계이하였고 나머지 중금속들도 대체로 안정된 결과치를 보여주었다. 그 이유로는 토양오염공정시험과 TCLP의 1:1 혼합고화체의 최종 pH가 9전후로 중금속 Solubility Curve의 가장 낮은 부분에 해당하고 특히, TCLP의 경우 L/S ratio=20/1로서 상대적으로 다른 용출시험법보다 L/S ratio가 높기 때문에 용출량이 매우 적을 경우 회석효과에 의해 농도가 감소된 것으로 판단된다. 이러한 효과는 Availability(L/S=50/1)에서도 볼수 있는데 Se과 같이 극히 미량물질인 경우 다른 실험법에서는 검출되었음에도 불구하고 Availability에서는 모두 불검출됨을

볼 수 있다.

폐기물공정시험결과는 석탄회보다 고화체의 용출농도가 대체로 높게 나왔다. 이는 Cr, Cu, Pb, Zn와 같은 양쪽성 물질인 경우 pH가 12 이상으로 매우 높을 때는 Solubility가 상승하게 되는데, 산중화능력이 뛰어난 고화체의 경우 산침가에도 불구하고 pH가 12.5부근까지 상승했기 때문이다.

표 1 용출시험법에 따른 석탄회와 폐석회의 혼합비별 중금속 용출농도

용출시험법	혼합비	pH	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Pb	Se	Zn
Availability (mg/kg)	석탄회:폐석회=4:1		1.854	47.595	0.619	2.015	7.719	1.057	N.D.	30.163
	석탄회:폐석회=2:1		1.555	60.683	0.553	2.294	6.178	1.929	N.D.	20.315
	석탄회:폐석회=1:1		0.356	67.438	0.496	0.492	4.498	1.390	N.D.	14.938
	석탄회		0.752	75.470	0.100	0.200	3.608	2.355	N.D.	13.781
토양오염 공정시험 (mg/kg)	석탄회:폐석회=4:1	10.84	0.335	5.895	0.018	0.245	0.103	0.078	0.161	0.118
	석탄회:폐석회=2:1	10.63	0.290	5.120	0.013	0.243	0.123	0.095	0.400	0.090
	석탄회:폐석회=1:1	9.08	0.183	3.358	0.008	0.110	0.100	0.045	0.143	0.193
	석탄회	1.52	0.228	5.435	0.005	0.338	3.160	0.118	0.008	2.735
TCLP (mg/L)	석탄회:폐석회=4:1	11.33	0.017	0.907	0.003	0.054	0.037	0.010	N.D.	0.036
	석탄회:폐석회=2:1	10.04	0.021	0.966	0.003	0.055	0.024	0.017	0.031	0.033
	석탄회:폐석회=1:1	8.84	N.D.	0.940	N.D.	0.031	N.D.	N.D.	N.D.	0.033
	석탄회	5.20	0.007	0.446	0.001	0.012	0.025	0.005	N.D.	0.220
폐기물 공정시험 (mg/L)	석탄회:폐석회=4:1	12.58	0.042	0.916	0.003	0.039	0.034	0.021	0.033	0.106
	석탄회:폐석회=2:1	12.62	0.036	1.032	0.002	0.032	0.041	0.020	0.041	0.096
	석탄회:폐석회=1:1	12.66	0.019	1.236	0.002	0.015	0.023	0.018	0.027	0.130
	석탄회	8.17	0.007	0.570	N.D.	0.003	0.014	0.007	N.D.	0.061

그림 4에 재령 14일째의 혼합비에 따른 석탄회-폐석회 고화체의 일축압축강도 실험결과를 나타내었다. 폐석회의 비율이 증가할수록 0.3kg/cm<sup>2</sup>에서 0.9kg/cm<sup>2</sup>까지의 강도증가를 보였다. 일반적인 건설기계의 주행이 가능한 일축압축강도가 qu=0.5~1.0kg/cm<sup>2</sup>인 것을 감안한다면 1:4 혼합고화체의 경우 건설기계의 주행이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서의 결과를 종합해보면 안정화면에서는 혼합비 1:1 고화체가 안정성이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 더구나 폐기물 매립지의 환경이 약한 산성을 띄고 있는 것을 감안하면 산중화능력이 뛰어난 고화체의 안정성은 더욱 높아졌다고 볼 수 있다. 하지만, 강도면에서의 보완을 위한 첨가제의 사용 등이 필요할 것으로 보인다. 앞으로 입도시험, 투수계수시험 등 복토재로 사용하기 위한 토질공학적 특성 및 SEM(Scanning Electron Micrograph)을 통한 심층적인 화학특성 변화에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

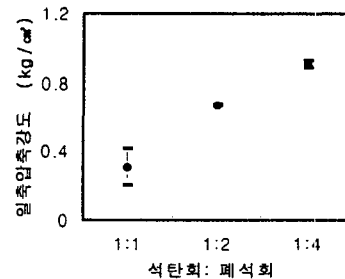


그림 4 혼합비에 따른 일축압축강도 변화(재령14일)

### 감사의 글

본 연구는 2000년도 한국전력공사의 전력기술 기초연구과제(과제번호:00-049)의 일환으로 수행된 연구의 일부임을 밝히며 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- 1) 이동석, 김종부, 주광석, "비산석탄회의 화학조성과 용출특성", 분석과학, 제11권, 5호, pp.394-399, (1998).