

성토재로서 석탄회 사용에 따른 수질오염도 평가

The Assessment of Water Quality Contamination Following the Utilization of Coal Ash as Fill Material

| | |
|---------------------|---------------------|
| 김 학 삼* ¹ | 홍 성 완* ³ |
| Kim, Hak-Sam | Hong, Sung-Wan |
| 조 삼 덕* ² | 김 종 학* ⁴ |
| Cho, Sam-Deok | Kim, Jong-Hak |

Abstract

In this paper, two leaching tests(batch test & column test) were carried out to estimate the detrimental effects of coal ash leachates. The variation of constituents and concentration of coal ash leachate with the lapse of leaching time was analysed through the column tests. From the test results, it was found coal ash can be classified as a general waste, and all other items except pH of coal ash leachate are satisfied the concentration requirements for the drinking water. It was also found the concentration of coal ash rapidly decrease with the lapse of the leaching time and become the insignificant value after an elapsed time.

요 지

본 연구에서는 석탄회를 성토재로 활용시 침출 시간경과에 따른 석탄회 침출수의 성분 및 농도변화 특성을 파악하므로써 주변환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 비회 및 혼합회를 대상으로한 연속식 용출시험과 회분식 용출시험을 수행하고 시험결과를 수질기준과 비교, 검토하였다. 시험결과, 대상 석탄회는 일반 폐기물로 분류되었으며, 석탄회 침출수의 농도는 시간경과에 따라 급격히 감소하여 일정시간 경과후에는 극히 미미하게 나타났다. 또한 대상 석탄회 침출수의 수질은 pH를 제외한 기타 성분들이 모두 유용수 수질기준과 폐수배출 허용기준을 만족하는 것으로 나타났다.

1. 서 론

국내에서 석탄 화력발전의 부산물로 생성되

는 석탄회의 대부분은 현재 대규모 회처리장에 매립처분 되고 있는 실정이며 이러한 석탄회를 도로 성토재, 채움 및 뒷채움재 등과 같

*¹ 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

*² 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

*³ 정회원, 한국건설기술연구원 부원장

*⁴ 정회원, 한국전력공사 기술연구원 과장

이 일반토사 대응으로 재활용하는 것은 폐기물의 자원화 측면에서 매우 고무적인 일이다. 그러나 석탄회를 성토재로 재활용하기 위해서는 우선 주변환경에 미치는 영향 평가가 선행되어야 하므로 석탄회에 함유되어 있는 화학 성분들 중 일부가 강우와 접촉하여 생성된 침출수에 의해 인근 토양 및 지하수 오염문제를 일으킬 가능성이 있는지의 여부에 대한 검토가 필요하다.

석탄회 침출특성과 관련된 외국의 연구동향은 시험성토지역에서의 시간 경과에 따른 침출수의 확산 및 침출수 수질특성 연구⁽⁸⁾, 용출 실험에 의한 석탄회 침출특성연구⁽⁷⁾ 등이 체계적으로 이루어지고 있으며, 한걸음 더 나아가 석탄회를 매립장 라이닝재⁽⁹⁾, 도시 폐수처리재⁽¹²⁾ 등에 활용을 위한 연구가 진행중이다. 한편, 국내에서는 최근 성토재로서의 석탄회 활용에 관한 관심이 점차 고조됨에 따라 석탄회의 공학적인 특성연구가 부분적으로 이루어지고 있으나^(5, 4, 3, 2), 수질환경적인 측면에서의 연구는 미미한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 국내 회처리 시스템의 특성을 고려하여 비회(fly ash) 및 혼합회(mixed ash)를 대상으로 시간경과, 주입수의 종류에 따른 석탄회의 침출특성을 규명하기 위해 석탄회를 성토재로 사용시의 현장조건을 실내에서 재현한 연속식 용출시험(column leaching test)과 회분식 용출시험(batch leaching test), 흙 두께 변화에 따른 침출특성시험, 국내의 수질기준과의 비교 평가 등을 수행하여 성토재로서의 석탄회 이용에 따른 침출수의 제반특성을 연구하였다.

2. 용출이론 및 용출시험 방법

2.1 용출이론

석탄회의 용출이 발생하는 동안 질량이동(mass transfer)은, i) 석탄회 표면으로부터의 석탄회 성분의 용해, ii) 석탄회 간극내 용

해성분의 확산, iii) 석탄회 입자를 둘러싸고 있는 수막(liquid film)을 통한 확산 등과 같은 메카니즘(mechanism)에 의해 발생한다. 이러한 메카니즘에 대해서 Amy 등⁽⁶⁾은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다고 제안하였다.

$$N = k(X_e - X)$$

여기서, N : 질량이동 속도, k : 전달계수, X_e : 변수 X 의 평형값, $X_e - X$: 질량이동의 driving force이다.

또한, 석탄회 용출특성에 관해서 Reed⁽¹¹⁾는 표면수막(surface liquid film)을 통한 질량이동(mass transfer)을 속도한계단계(rate limiting step)로 가정하였으며, 침전 특성과 같이 어떤 화학반응에 관여하지 않는 성분에 대한 용출속도를 다음과 같이 나타내었다.

$$N = \frac{dC}{dt} = k \cdot a \cdot w (C_i - C)$$

여기서, C : 유체의 몰(mole)농도, k : 전달계수, a : 비표면적, w : 단위체적당 석탄회 입자의 중량, C_i : 석탄회 입자와 유체 접촉면에서의 몰농도이다.

C_i 는 석탄회 입자의 농도와 평형을 이룬 유체 농도로서, 회분식 용출실험이 이루어지는 동안 석탄회 입자의 농도는 점차 감소되어 C_i 에 도달하게 된다.

2.2 용출시험 방법

고형물질에 의한 수질 오염을 시험하는 데에는 통상 용출시험에 의한 방법을 사용하는데 이는 폐기물 중에 함유되어 있는 유해물질이 우수 침투로 인하여 폐기물로부터 침출되어, 지하수, 하천 등을 오염시키는 것을 미연에 방지하기 위한 하나의 검정방법으로 크게 회분식 용출시험과 연속식 용출시험으로 분류할 수 있다.

2.2.1 회분식 용출시험(batch leaching test)

회분식 용출시험은 한 반응조내에서 시험대상 물질과 pH를 조절한 용매를 연속적으로 접

촉시키는 방법으로 1973년 일본 정부와 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에 의해 처음 채택되었다. 그 이후 AFS(American Foundrymen's Society), MPCA(Minnesota Pollution Control Agency), IEPA(Illinois Environmental Protection Agency) 등의 연구기관에서 관련 시험법들이 제안되었으며 일반적인 회분식 용출 시험과정은 그림 1과 같다.⁽¹⁰⁾

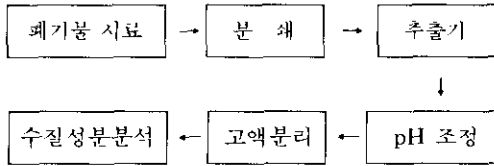


그림 1. 회분식 용출시험 과정

본 연구에서는 국내 폐기물 관리시험 규정에서 채택하고 있는 그림 1과 같은 시험과정을 따랐으며, 0.5N 초산을 사용하여 폐기물 증류수비가 1:20으로 혼합된 용액을 pH 5±0.2상태로 유지시키면서 6시간 동안 교반시킨 후 고액분리하여 수질분석을 수행하였다.

2.2.2 연속식 용출시험(column leaching test)

연속식 용출시험은 컬럼(column)내에 시료를 채우고 연속으로 주입수(증류수)를 통과시킨 후 침출수의 성분을 조사, 분석하는 방법으로 현장상황을 실내에서 모사할 수 있도록 만들어져 있어 좀 더 정확하게 침출특성을 조사할 수 있으며, 특히 pH, 이온전도도, 중금속류 등의 성분에 대해 시간경과에 따른 변화를 예상할 수 있는 장점이 있다. 그러나 본 시험은

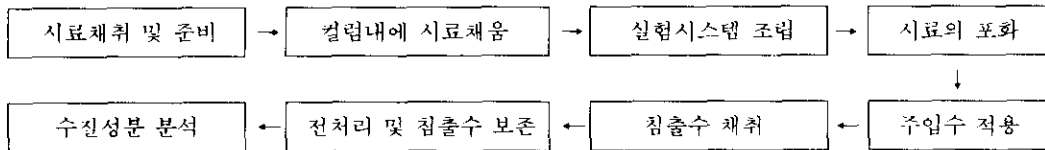


그림 2. 연속식 용출시험 과정

회분식 용출시험보다 시험 소요시간이 길며 컬럼 측벽을 따라 wall effect가 생기는 단점이 있다. 이러한 wall effect를 줄이기 위하여 본 연구에서는 컬럼의 직경을 폐기물 입자의 최대 입경보다 30배 이상으로 한 컬럼을 사용하였으며, 일반적인 연속식 용출시험과정은 그림 2와 같다.

3. 시 험

3.1 시험시료

본 시험에서는 국내의 8개 석탄 화력발전소 중에서 무연탄계 발전소로 서천 화력발전소를 유연탄계 발전소로 삼천포 화력발전소를 임의 선정하여 사일로(서천)나 전기집진기(삼천포)에서 채취한 비회 및 비회와 저회를 실제 석탄회의 조성비를 감안하여 중량비 8:2의 비율로 혼합한 혼합회를 사용하였다. 또한 석탄회 침출수가 일반 토층을 통과할 경우의 침출특성을

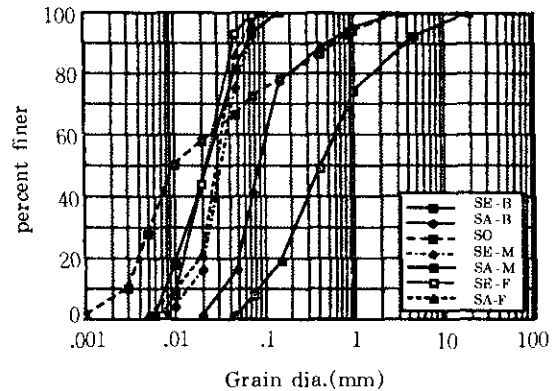


그림 3. 용출시험에 사용된 시험 시료의 입도분포곡선

표 1. 용출시험에 사용된 시험 시료의 물리적 특성

| 시료명 | 기호 | 비중 | Atterberg 한계 | | O.M.C. (%) | γ_{dmax} (g/cm ³) | 입도분포 | | 분류 |
|--------|------|------|--------------|----|---------------|---|------|------|----|
| | | | LL | PI | | | Cu | Cg | |
| 삼천포비회 | SA-F | 2.12 | - | NP | 31 | 1.19 | 2.55 | 1.57 | ML |
| 삼천포혼합회 | SA-M | 2.06 | - | NP | 25 | 1.21 | 2.53 | 1.18 | ML |
| 서천비회 | SE-F | 2.19 | - | NP | 27 | 1.36 | 1.69 | 0.90 | ML |
| 서천혼합회 | SE-M | 2.25 | - | NP | 17 | 1.51 | 2.13 | 1.41 | ML |
| 삼천포저회 | SA-B | 2.15 | - | NP | 14 | 1.58 | 2.24 | 1.13 | SP |
| 서천저회 | SE-B | 2.26 | - | NP | 9.8 | 1.69 | 7.18 | 1.21 | SW |
| 토사성토재 | SO | 2.58 | 37 | 6 | 26 | 1.54 | 7.58 | 0.35 | CL |

평가해 보기 위하여 대표적인 토사 성토재 1종을 선정하여 사용하였다. 용출시험에 사용된 시료의 입도 분포곡선은 그림 3과 같으며 시료 각각의 물리적 특성은 표1과 같다. 한편, 그림 및 표의 내용을 간략히 표기하기 위하여 삼천포 석탄회는 "SA", 서천 석탄회는 "SE", 비회는 "F", 혼합회는 "M", 저회는 "B", 토사 성토재는 "SO"의 기호로 표시하였다.

3.2 시험의 종류 및 방법

3.2.1 회분식 용출시험

서천과 삼천포 석탄회를 대상으로 국내 폐기물 관리법에 의거하여 석탄회의 유해성 여부를 평가하기 위해 회분식 용출시험을 수행하였다. 시험방법은 증류수 500mℓ 석탄회 100g을 용량 1,000mℓ 바이커에 넣고 마그네틱 스테러 (magnetic stirrer)와 스핀 바 (spin bar)를 이용하여 분당 25±5회 정도로 연속교반시키며 6시간 경과후 0.45 μ m 필터를 사용하여 혼합물을 고액 분리하고 침출수의 중금속 농도를 측정하였다.⁽¹⁾

3.2.2 연속식 용출시험

석탄회를 성토재로 사용할 경우와 유사한 상태를 실내에서 재현하여 장기간 시간경과에 따른 석탄회 침출수의 특성변화를 분석하고, 이 침출수가 주변 토층에 유입되어 지하수에 미치는 영향을 조사하기 위해 연속식 용출시험을 수행하였다. 시험방법은 석탄회의 유실을 방지하면서 시료의 투수성과 침출수의 성분농도에

영향을 미치지 않는 채석과 섬유필터를 컬럼 (column) 하부에 설치한 다음, 실제 성토의 현상상태를 고려하여 시료를 최대전조밀도의 90%로 다지고, 시료두께를 7cm가 되도록 하였다. 컬럼 상부에서도 컬럼 하부에서 사용된 동종의 채석과 섬유필터를 설치함으로써 컬럼 내로 유입된 주입수를 균등히 분산시키고 시료를 구속하는 기능을 동시에 수행하도록 하였다.

용출시험 개시 전에 수두차를 이용한 주입수의 상향흐름을 유도하여 1~2일 동안 석탄회 시료를 완전히 포화시킨 후, 주입수를 하향흐름 상태로 전환하여 용출시험을 수행하였다. 용출시험에서는 월 평균 강우량 중 최대 강우 강도를 보이는 6, 7, 8, 9월의 강우량과 컬럼의 단면적을 고려하여 24시간 동안 720mℓ의 침출수를 균등하게 배출하였고, 하부 밸브를 통해 침출수가 흘러나올 때를 시점으로 하여 2, 10, 25, 63, 78, 105일 째의 침출수를 채취, 분석하였다. 침출수 채취시에는 pH와 이온 전도도를 즉시 측정하였고, 침출수가 대기와 접촉하는 과정에서 화학적 반응에 의한 새로운 침전물의 생성을 방지하기 위하여 분석성분에 따라 HNO₃, HCl 등으로 전처리하여 pH<2 상태로 4℃ 이하의 냉장실에 보관후 성분분석을 수행하였다.

4. 시험 결과 및 분석

4.1 회분식 용출시험 결과 및 분석

서천과 삼천포 비회 및 혼합회를 대상으로

표 2. 석탄회의 회분식 용출시험 결과와 폐기물 분류

(단위 : mg / ℓ)

| 성 분 | 평가기준치 | 삼 천 포 | | 서 천 | |
|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | 비 회 | 혼 합 회 | 비 회 | 혼 합 회 |
| Cd | 0.5 | ND | ND | ND | ND |
| CN | 1.0 | ND | ND | ND | ND |
| 유기인 | 1.0 | | | | |
| Pb | 3.0 | ND | ND | ND | ND |
| Cr ⁺⁶ | 1.5 | 0.0707 | 0.0948 | 0.2164 | 0.1457 |
| As | 1.5 | 0.025 | 0.040 | 0.055 | 0.049 |
| Hg | 0.005 | ND | ND | ND | ND |
| Cu | 3.0 | 0.0007 | ND | 0.0041 | ND |
| 트리클로로에틸렌 | 0.3 | | | | |
| 테트라클로로에틸렌 | 0.1 | | | | |
| 폐기물분류 | | 일반폐기물 | 일반폐기물 | 일반폐기물 | 일반폐기물 |

주) ND : Not Detectable, Tr : Trace

수행한 회분식 용출시험 결과는 표 2와 같다. 표 2에서 보듯이 1991년 9월에 개정된 폐기물 관리법 시행령에 따라 시험 석탄회를 판정한 결과 모든 중금속 성분들의 농도가 허용치 보다 작게 검출되어, 서천과 삼천포 석탄회는 폐기물 관리법상 “일반 폐기물”로 분류될 수 있음을 알 수 있다. 또한, 석탄회는 고온에서 연소된 후 발생하는 무기질 재료이므로 표 2의 평가성분들 중 유기인과 트리클로로 에틸렌 및 테트라클로로 에틸렌 등의 유기질 성분에 대한 분석은 생략하였다.

4.2 연속식 용출시험 결과 및 분석

4.2.1 주입수의 수질분석

석탄회를 대상으로한 연속식 용출시험 결과와의 비교기준을 위하여 연속식 용출시험에 사용한 주입수들을 대상으로 수질분석을 수행하였으며, 그 수질분석 결과는 표 3과 같다. 본 시험에서 증류수는 증류수 발생장치에서 채취한 1차 증류수를 사용하였고 해수는 편의상 인천지역 해수를 사용하였다.

4.2.2 pH

삼천포 비회와 혼합회, 서천 비회와 혼합회 등 4종류의 석탄회 시료를 대상으로 증류수와 해수 등의 주입수를 적용시킨 시험결과, 시간 경과에 따른 각 석탄회 침출수의 pH변화는 그림 4와 같다.

그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 pH값은, 시료에 따라 각각 다른 8.5-12.1의 범위로 나

표 3. 주입수의 공시험(Blank Test) 분석 결과

(단위 : mg / ℓ)

| | | | | | | | | | | |
|-----|------|-------|------------------|-----------------|-------------------------------|-------|-------|------|-------|-----|
| 성 분 | pH | Ca | Mg | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻² | Mn | Cu | Hg | B | Cd |
| 농 도 | 6.49 | 11.1 | 5.4 | 12.92 | 26.68 | 0.099 | 0.011 | ND | 0.72 | Tr. |
| 성 분 | Ba | Fe | Cr ⁺⁶ | Zn | As | Pb | Ni | Si | Al | Se |
| 농 도 | - | 0.073 | ND | 0.126 | ND | Tr. | 0.011 | 5.56 | 0.121 | - |

주) ND : Not Detectable, Tr. : Trace

타났으며 석탄회와 주입수의 종류에 관계없이 침출초기에는 가장 높은 8.5~12.1을 보여주나 침출개시후 10일 이내에 급격히 감소하며, 그 이후에는 완만한 감소형태를 나타냄을 알 수 있다. 증류수(pH: 6.8) 주입시 삼천포 석탄회에서는 침출초기에 pH 11.5~12.1의 범위로 높은 알칼리성을 보였고, 서천 석탄회는 9.2~9.4의 범위로 다소 낮게 측정되었다. 한편 동일한 서천, 삼천포 혼합회에 해수(pH: 8.3)를 주입한 경우가 증류수를 사용한 경우보다 석탄회 침출수의 pH값이 보다 낮게 측정되었는데, 이는 증류수와는 달리 해수 주입시에는 해수와 석탄회가 연속적으로 접촉하는 과정에서 해수 내에 용해되어 있는 다양한 금속성분들이 석탄회에서 용출된 수산화(OH)와 반응하여 수산화물을 소모시킨 결과로서 판단된다.

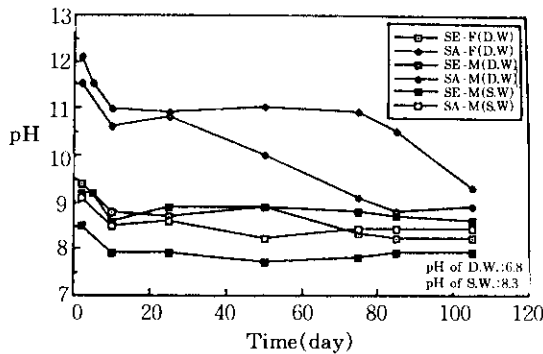


그림 4. 시간경과에 따른 석탄회 침출수의 pH의 변화

4.2.3 이온 전도도(Ion Conductivity)

이온 전도도는 용존고형물의 농도특성을 간접적으로 나타내는데, 그림 5에서는 시간경과에 따른 각 석탄회 침출수의 이온 전도도 변화를 보여준다.

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 석탄회 침출수의 이온 전도도는 침출 초기에 1,200~5,400 $\mu\text{mhos/cm}$ 정도로 크게 나타났으나, 침출개시후 10일 이내에 급격히 감소하여 그 이후에는 200~1,000 $\mu\text{mhos/cm}$ 정도로 거의 일정한 농도를 보이고 있다. 초기에 이온 전도도가 급

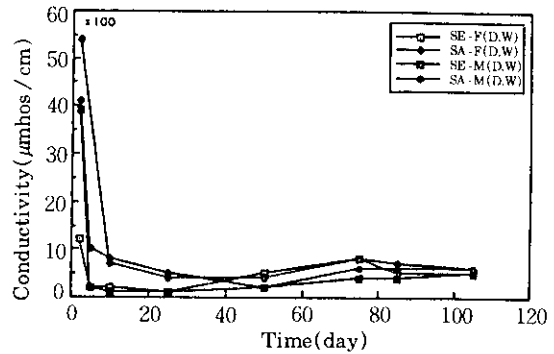


그림 5. 시간경과에 따른 석탄회 침출수의 이온 전도도 변화

격히 감소하는 원인은 석탄회 내에 있던 금속 이온들이 주입수와 함께 대부분 초기에 용해되어 침출된 결과로 판단되며, 침출초기에는 혼합회의 경우가 비회보다 이온 전도도가 높게 측정되었는데, 이는 전해질 성분이 풍부한 해수로 급냉각시킨 저회를 혼합회 제조시에 사용했기 때문으로 판단된다.

4.2.4 염화물(Chloride), 황산염(Sulfate)

증류수 주입시 석탄회 침출수의 시간경과에 따른 Cl^- 및 SO_4^{2-} 성분의 농도변화는 각각 그림 6 및 그림 7과 같다.

그림 6에서 보는 바와 같이 증류수 주입시 침출개시 후 2일째의 Cl^- 성분 농도는 각각 혼합회가 60~72mg/l, 2~3mg/l, 범위로 혼합회가 비회보다 높게 나타났으나, 침출개시후 10일 이내에 급격히 감소하여 그 이후에는 석

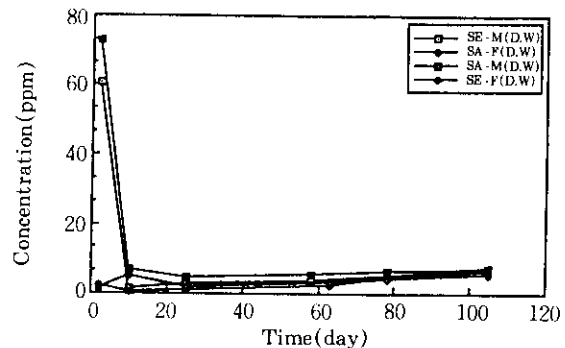


그림 6. 시간경과에 따른 석탄회 침출수의 Cl^- 성분의 농도 변화

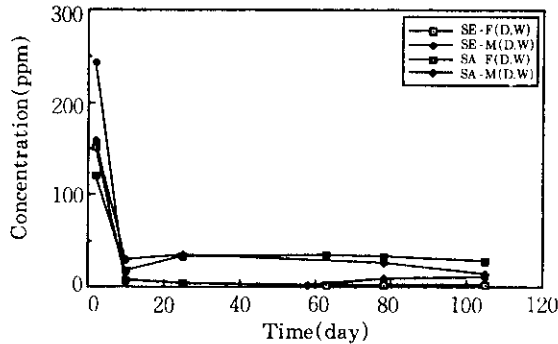


그림 7. 시간경과에 따른 석탄회 침출수의 SO₄²⁻ 성분 농도 변화

탄회 종류에 관계없이 7mg/ℓ 정도로 거의 일정하게 나타났다. 이와 같이 증류수 주입시에 침출초기의 Cl 성분농도가 석탄회 종류에 따라 크게 차이가 나고 시간경과에 따라 일정한 값을 보여주는 것은 혼합회 제조시 사용한 저회내의 해수에 의한 높은 Cl 성분이 침출초기 농도에 큰 영향을 미쳤고, 이 해수 성분이 시간경과에 따라 점차 용해되어 빠져나갔기 때문으로 판단된다. 또한, 그림 7에서 보듯이 시간경과에 따른 석탄회 침출수의 SO₄²⁻ 성분농도의 변화도 Cl 성분농도의 변화와 유사함을 알 수 있다.

4.2.5 칼슘(Calcium)

증류수 주입시 석탄회 침출수의 시간경과에 따른 Ca성분 농도변화는 그림 8과 같다.

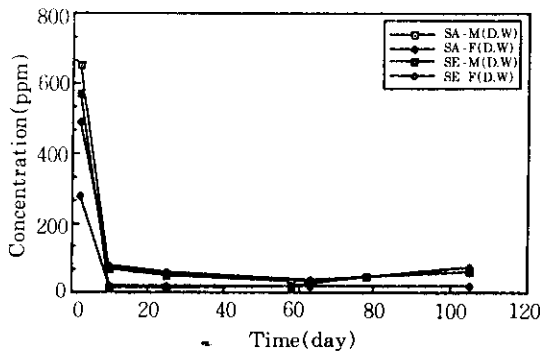


그림 8. 시간경과에 따른 석탄회 침출수의 Ca 성분의 농도 변화

그림 8에서 보듯이 시간경과에 따른 석탄회 침출수의 Ca성분 농도의 변화는 Cl⁻ 성분과 SO₄²⁻ 성분 농도의 변화와 유사한 경향을 보여 준다. 증류수 주입시 침출개시 후 2일째의 Ca 성분 농도는 혼합회가 560~650mg/ℓ 범위, 비회가 280~490mg/ℓ 범위로 혼합회가 비회보다 높게 나타났으나, 침출 개시후 10일 이내에 급격히 감소하여 그 이후에는 10~60mg/ℓ 정도로 석탄회 종류에 관계없이 거의 일정하게 나타났다. 이와 같은 현상은 혼합회 내에 함유된 Ca성분의 농도에 기인한 것으로 사료된다.

4.2.6 기타 중금속

증류수 주입시 석탄회 침출수의 시간경과에 따른 Mn, Cu, Hg, Fe, Cr⁶⁺, 기타 중금속 성분 농도의 변화는 표 4와 같다.

표 4에서 보듯이 석탄회 침출수에서 기타 중금속 성분들은 시간경과에 따라 불규칙적인 변화를 보이고 있으며, 이들 침출농도는 Cl⁻, SO₄²⁻ 농도의 1/1000배 이하의 극히 미량이 검출되었다. 증류수를 주입수로 사용할 경우, 중금속 성분들 중 Hg, Cr⁶⁺, Cd 성분들은 석탄회에서 거의 검출되지 않았고, Mn 성분은 삼천포 석탄회에서 침출개시 65일이 경과한 후 소량이 검출된 반면 서천 석탄회에서는 시간경과에 따라 감소하는 상반되는 경향을 보이고 있다. Cu와 Fe성분은 침출개시 후 2~25일 이내에는 검출되지 않고 침출개시 65일 경과후부터 검출된 반면, As와 Pb성분은 반대로 침출개시후 2~25일 이내에만 검출되었다.

4.2.7 토층두께에 따른 석탄회 침출수의 특성변화

석탄회 침출수가 흙속을 침투할 경우, 토층의 두께변화에 따른 석탄회 침출수의 성분변화를 파악하기 위하여 먼저 흡시료를 대상으로 석탄회 사용시와 동일한 조건으로 증류수를 사용한 연속식 용출시험을 수행하였다. 표 5에서는 침출개시후 2일째의 침출수에 대한 성분분석 결과를 보여준다.

표 4. 시간경과에 따른 기타 중금속 성분들의 농도변화(서천/삼천포)

(단위 : $\mu\text{g}/\text{l}$)

| 구분 | 증 류 수 | | | | | | | | | | | | 해 수 | | | | | |
|-----------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 혼 합 회 | | | | | | 비 회 | | | | | | 혼 합 회 | | | | | |
| | 경과일수(일) | | | | | | 경과일수(일) | | | | | | 경과일수(일) | | | | | |
| | 2 | 10 | 25 | 63 | 78 | 105 | 2 | 10 | 25 | 63 | 78 | 105 | 2 | 10 | 25 | 63 | 78 | 105 |
| Mn | 32.7 ND | ND ND | ND ND | 3.3 1.4 | 3.0 2.1 | 8.9 1.6 | 18.5 ND | ND ND | ND ND | 0.4 Tr | 5.6 Tr | 6.6 2.0 | 8.48 ND | 57.9 ND | 80.8 ND | 25.3 51.4 | 13.5 70.4 | 29.3 29.3 |
| Cu | ND 12.0 | ND 0.24 | 11.1 ND | 3.0 3.0 | 9.0 5.0 | 3.0 3.0 | ND 20.1 | 2.87 2.58 | 4.46 4.08 | 4.0 5.0 | 3.0 5.0 | 5.0 4.0 | 11.3 3.74 | 54.3 70.1 | 32.6 82.7 | 25.0 1.6 | 40.0 11.0 | 25.0 Tr |
| Hg | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | 3.0 ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND |
| Fe | 7.40 ND | ND ND | ND ND | 33.3 90.7 | 48.8 58.2 | 25.3 24.3 | 6.13 1.95 | ND ND | ND 11.4 | 34.3 50.9 | 29.0 14.2 | 72.8 96.9 | 7.01 4.20 | 6.80 11.0 | 11.1 23.2 | 29.9 26.2 | 32.6 30.9 | 32.6 19.9 |
| Cr ⁺ | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND | ND ND |
| Zn | 207 17.1 | 1.23 ND | ND ND | 22.4 63.0 | 12.4 28.2 | 14.2 7.8 | 31.9 32.0 | ND ND | 6.42 ND | 4.1 Tr | 77.6 77.6 | 20.2 8.6 | 50.0 50.0 | 75.0 30.0 | 29.0 15.0 | 21.3 50.0 | 11.1 65.4 | 46.6 29.3 |
| As | 18.3 1.9 | 50.9 33.0 | Tr 7.0 | ND ND | ND ND | ND ND | 7.2 14.6 | 46.4 5.1 | 29.1 5.2 | ND ND | ND ND | ND 27.3 | 40.1 40.2 | 50.0 10.8 | 47.3 ND | ND ND | ND ND | ND ND |
| Pb | 0.83 1.97 | 1.45 0.23 | 1.95 ND | Tr Tr | Tr Tr | Tr Tr | Tr 3.0 | 1.18 ND | 4.14 0.9 | Tr Tr | Tr Tr | Tr Tr | 11.8 ND | 3.43 ND | Tr ND | 9.0 9.0 | 9.0 9.0 | 8.0 9.0 |
| Cd | ND ND | ND ND | ND ND | Tr Tr | Tr Tr | Tr Tr | ND ND | ND ND | ND ND | Tr Tr | Tr Tr | Tr Tr | 0.58 ND | 0.38 ND | 0.42 0.06 | 4.0 4.0 | 3.0 3.0 | 3.0 3.0 |
| Ni | 2.41 ND | 1.25 ND | ND ND | 4.4 2.2 | Tr Tr | Tr Tr | 8.98 ND | 0.31 ND | 2.3 ND | Tr Tr | Tr Tr | Tr 44.7 | ND ND | ND ND | 0.32 12.4 | 55.9 1.93 | 55.0 4.58 | 5.3 2.21 |

주) ND : Not Detectable, Tr : Trace

표 5. 흡사료의 침출수 성분분석 결과(침출개시 후 2일 경과시)

(단위 : mg/ℓ)

| | | | | | | | | | |
|-----------|-------|------------------|-----------------|-------------------------------|--------|-------|-------|------|-------|
| 성분 주입수 | Ca | Mg | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Mn | Ba | Cu | Hg | B |
| 증류수 | 4.8 | 0.8 | 6.8 | 3.45 | 0.02 | - | 0.013 | ND | ND |
| 해 수 | 1,640 | 1,520 | 13,426 | 2,083 | 0.0314 | - | Tr. | ND | 3.75 |
| 성분 주입수 | Fe | Cr ⁺⁶ | Zn | As | Pb | Cd | Ni | Si | Al |
| 증류수 | 0.067 | ND | 0.114 | ND | Tr. | Tr. | 0.002 | 0.05 | 0.095 |
| 해 수 | 0.015 | ND | 0.032 | ND | 0.009 | 0.004 | 0.018 | 0.55 | 0.545 |

주) ND : Not Detectable, Tr. : Trace

표 5의 결과를 토대로 침출개시 후 2일 경과 시 흡사료의 침출특성을 석탄회(특히 비회)와 비교해 보면 pH값은 석탄회보다 낮은 6.49 정도의 약산성으로 나타났으며, Ca와 SO₄²⁻ 성분들은 11.1~26.08mg/ℓ, B, As, Al 등의 성분들은 ND~0.72mg/ℓ 정도로 낮게 검출되었

다. 또한 Fe, Cl, Zn, Ni, Si, Mg 성분들의 농도는 석탄회보다 다소 높게 나타났으며, 나머지 성분들은 석탄회의 경우와 유사하였다.

한편, 강우에 따라 석탄회 침출수가 흙을 통과한 후 성장변화를 알아보기 위해 석탄회층을 통과한 물이 연속적으로 토층속을 통과할

수 있도록 석탄회층 두께 7cm의 1, 2, 3배되는 토층을 column내에 각각 설치하고, 증류수를 하향으로 주입한 후 침출개시후 2일 경과시 침출수를 채취, 성분 분석을 하는 과정으로 수행한 용출 시험결과는 표 6과 같다.

표 6으로부터 토층을 통과하기 전의 석탄회 침출수의 pH는 12.1로 강알칼리성이었으나 pH가 6.39인 토층을 통과한 후에는 pH가 7.01~7.37의 범위로 나타나 토층속을 통과하면서 중성화되어가고 있음을 알 수 있다. 특히 석탄회층과 동일한 두께의 토층을 통과할 경우 pH가 크게 변화하며, 그 이상의 토층두께의 증가에 따른 pH의 변화폭은 크지 않음을 알 수 있다. 각종 중금속 성분들 중에서 Si, Mg, Zn, Fe, Ni 등의 성분농도는 석탄회층 두께의 1~2배 정도되는 토층까지는 증가하나 그 이상의 토층 두께에서는 완만하게 감소하거나 일정하게 되는 경향을 보여준다.

표 6. 토층의 두께변화에 따른 석탄회 침출수의 성분 분석 결과(삼천포 비회)

| 성분 | 단위 | 0(cm) | 7(cm) | 14(cm) | 21(cm) |
|-------------------------------|-----|-------|-------|--------|--------|
| pH | - | 12.1 | 7.37 | 7.23 | 7.10 |
| SO ₄ ²⁻ | ppm | 120 | 8.37 | 11.01 | 10.02 |
| Cl | ~ | 2.15 | 9.07 | 12.28 | 9.50 |
| Ca | ~ | 490 | 7.1 | 6.9 | 6.4 |
| Mg | ~ | Tr. | 2.2 | 3.1 | 1.9 |
| Si | ~ | 1.7 | 3.14 | 4.68 | 3.74 |
| B | ppb | 1.87 | 0.48 | 0.39 | 0.49 |
| Fe | ~ | 1.95 | 80.0 | 51.6 | 53.7 |
| Mn | ~ | ND | 19.8 | 26.0 | 12.1 |
| Cr ⁺⁶ | ~ | ND | ND | ND | ND |
| Cu | ~ | 20.1 | 12 | 15 | 9 |
| Zn | ~ | 32 | 65.6 | 131.5 | 29.6 |
| Pb | ~ | 3.0 | Tr. | Tr. | Tr. |
| Cd | ~ | Tr. | Tr. | Tr. | Tr. |
| Ni | ~ | 2.2 | 10.3 | 4.4 | 1.4 |
| Al | ~ | 2,609 | 34.0 | Tr. | 51.8 |
| As | ~ | ND | ND | ND | ND |
| Hg | ~ | ND | ND | ND | ND |

주) ND : Not Detectable, Tr. : Trace

이러한 현상은 토층두께가 상대적으로 얇으면 흡수에 포함되어 있는 성분들이 용해되어 석탄회 침출수와 함께 침출되나 토층두께가 두꺼워지면 그 성분들이 흡수에 다시 흡착, 정화되기 때문으로 볼 수 있다. 또한 As, Pb, Ca, B, Al, SO₄²⁻ 등의 성분농도는 석탄회층 두께 정도의 토층까지는 급격히 감소되며, 그 이상의 토층두께에서는 거의 일정하게 되는 경향을 보여주는데, 이는 이러한 성분들이 토층 통과 초기에 토양이 가지고 있는 복잡한 흡착 특성에 의해 정화되기 때문인 것으로 판단된다.

5. 석탄회를 성토재로 사용시 수질오염 평가

국내생산 비회나 비회와 저회를 혼합한 혼합회를 도로 성토나 지반조성 채움 등의 일반 성토재로 활용할 경우에 석탄회 성토로 인한 주위 지역의 수질오염 여부를 평가하기 위해 증류수를 주입수로 사용한 연속식 용출시험의 결과를 토대로 국내외 각종 수질기준들과 비교한 결과를 표 7에 나타내었다.

표 7에서 보듯이 대부분의 중금속 성분들은 국내외 음용수 수질기준을 만족하는 것으로 나타났다으며, SO₄²⁻ 성분의 최대농도가 혼합회에서 국내 음용수 수질기준 보다 약간 크게 측정된 경우가 있으나 그 사례는 거의 무시할 정도이다. 또한 연속식 용출시험에서 측정된 pH값은 국내외 음용수 수질기준, 폐수 배출 허용기준보다 매우 높게 나타났으나 실제로 국내 토양특성이 일반적으로 산성을 나타내므로 석탄회 성토층으로부터 흘러 나온 침출수가 흡수에 통과하면서 중성화되는 효과를 고려하면 그다지 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

따라서 국내생산 비회나 혼합회를 성토재로 활용할 경우, 석탄회 성토층으로부터 흘러나온 침출수의 각종 성분농도는 폐수배출허용기준은 물론 국내 음용수 수질기준을 만족할 정도로 양호함을 알 수 있다.

표 7. 석탄회 성토시 예상되는 침출수 성분과 수질기준 비교

| 성분 | 단위 | 음용수수질기준 | | | | | 폐수배출 허용기준 (청정지역) | 연속식 용출 실험결과 |
|-------------------------------|-----|---------|---------|---------|-------|---------|------------------------|----------------|
| | | 한국 | WHO | EC | USA | 일본 | | |
| pH | - | 5.8~8.5 | 6.5~8.5 | 6.5~8.5 | 9.5 | 5.3~8.6 | 5.8~8.6 | 9.4~12.1 |
| SO ₄ ⁻² | ppm | 200 | 400 | 250 | 250 | 400 | - | 0.56~244 |
| Cl ⁻ | ppm | 150 | 250 | 200 | 250 | 200 | - | 1.25~72.6 |
| Fe | ppb | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 2,000 | 1.95~7.40 |
| Mn | ppb | 300 | 100 | 50 | - | 300 | 2,000 | ND |
| Cr ⁺⁶ | ppb | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 100 | ND |
| Cu | ppb | 1,000 | 1,000 | 500 | 1,000 | 1,000 | 500 | ND~20.1 |
| Zn | ppb | 1,000 | 100 | 5,000 | 5,000 | 1,000 | 1,000 | 17.1~207 |
| Pb | ppb | 100 | 50 | 50 | 50 | 100 | 200 | Tr.~3.0 |
| Cd | ppb | 10 | 50 | 5 | 10 | 10 | 20 | ND |
| As | ppb | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 100 | 1.9~48 |
| Hg | ppb | ND | 1 | 1 | 2 | - | ND | ND |

6. 결 론

본 연구는 석탄회를 성토재로 사용했을 경우, 수질환경에 미치는 영향을 규명하기 위해 회분식 용출시험, 연속식 용출시험, 수질기준과의 비교분석을 수행하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 국내의 폐기물 관리법에 의한 석탄회의 유해성 여부를 회분식 용출시험으로부터 평가한 결과, 서천과 삼천포 석탄회는 “일반폐기물”로 분류되었다.

2. 연속식 용출시험 결과, 석탄회 침출수 내에 있는 화학성분들의 농도는 석탄회의 종류에 관계없이 대부분 침출초기에 가장 높은 값을 보여주고, 시간경과에 따라 급격히 감소하여 침출개시로부터 10일 정도 경과후에는 석탄회 자체에 의한 화학성분의 침출농도는 매우 미미하게 나타났다.

3. 석탄회층으로부터 흘러나온 침출수의 수질은 pH를 제외한 다른 성분들은 모두 음용수 수질기준과 폐수배출 허용기준을 만족할 정도로 양호한 것으로 나타났다.

4. 석탄회층을 통과한 침출수가 토층을 다시 통과할 경우, 침출수의 pH는 중성화되며 침출수에 포함되어 있는 각종 중금속 성분들의 농도는 중금속 종류별로 토층두께가 증가함에 따라 불규칙하게 변화하는 특성을 보여주는데, 이는 흙의 복잡한 흡착특성에 기인된 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김갑수 외 9인 “산업폐기물 매립기본 계획보고서”, 포항종합제철 주식회사, 1991, pp.119-121.
2. 김수삼 외 1인, “석탄회 침하에 관한 시험적 연구”, 토목학회 학술발표회 개요집, 1991, pp. 591-594.
3. 김진만 외 4인, “석탄회 침하에 관한 시험적 연구”, 토목학회 학술발표회 개요집, 1991, pp. 650-653.
4. 조삼덕 외 5인, “폐기물 매립물질에 의한 건설자재의 부식성”, 토목학회 학술발표회 개요집, 1993, pp. 479-482.
5. 천병식 외 4인, “석탄회의 매립·성토시 FA와 BA의 적정혼합비”, 토목학회 학술발표회 개요집, 1991, pp. 681-684.

6. Amy, G. L. et al. "Groundwater Leaching of Organic Pollutants from in-situ Retorted Oil Shale: A Mass Transfer Analysis", *Env. Sci. and Tech.*, 14(7), 1980, pp.831-835.
7. Bowders, J. J., Gidley, J. S. and Usmenn, M. Z., "Permeability and Leachate Characteristics of Stabilized Class F Fly Ash", TRR 1288, 1990, pp.70~77.
8. Dodd, D. J. R., Colomb, A., Chan, H. T., and Chartier, D., "A Comparative Field and Laboratory Study of Fly Ash Leaching Characteristics", *Hazardous Solid Waste Testing: First Conference, ASTM STP460*, R. A., 1981, pp. 164-185.
9. Haxo, H. E., "Testing Material for Use in the Lining of Waste Disposal Facilities", *Hazardous Solid Waste Testing: First Conference, ASTM STP460*, 1981, pp. 269-292.
10. Perket, C. L. and Webster, W. C., "Literature Review of Batch Laboratory Leaching and Extraction Procedure", *Hazardous Solid Waste Testing: First Conference, ASTM STP760*, 1981, pp. 7-27.
11. Reed, G.D., "A Proposed Procedure for Aqueous Fly Ash Evaluation", Ph. D. Thesis, University of Arkansas, 1976.
12. Viraraghavay T. and Dronamraju, "Utilization of Coal Ash in Water Pollution Control", *Proceedings: Shanghai Ash Utilization Conference, Volume 1*, 1991, pp. 11.1-11.9.

(접수일자 1994. 11. 2)