

석탄재의 건설재료로서의 활용에 관한 연구

—환경적 특성 검토를 중심으로—

A Study on the Utilization of Coal Ash as Construction Materials

—In Focus on the Environmental Analysis—

천 병 식*1

Chun, Byung-Sik

고 용 일*2

Koh, Yong-Il

Abstract

Although lots of experimental studies of coal ash have been performed to study the utilization as construction materials, the environmental characteristics of coal ash are still questionable. In this study, fly ash is examined to be classified according to Korean Environmental Standard and analyzed whether the batch test results are within the tolerance limit when utilized or treated as reclamation and earth-work materials. The batch test was performed to examine pH and contaminant contents.

Consequently, fly ash is classified as non-hazardous industrial waste. The pH value shows a strong alkalinity than the tolerance limit, but it is implied that fly ash can be used to neutralize the acid ground. All other items except pH satisfy the tolerance limit. In addition, a small quantity of additives(cement) which used to improve the poor geotechnical properties of coal ash, could decrease the pH value into the tolerance limit as well as improve strength, durability and permeability.

It is concluded that when coal ash is used properly, there is no environmental harmfulness as construction materials.

요 지

기본적인 성질 평가와 많은 실내실험을 통해 우리나라에서 부산되는 석탄재는 이제 실용화 단계에 있지만, 가장 문제 제기가 되고 있는 부분은 환경적 특성 검토이다. 본 연구에서는 석탄재 발생량의 대부분을 차지하고 있는, 역학적 특성이 열악한 fly ash를 대상으로 우리나라 환경기준에 의하여 폐기물 분류를 분석 확인하고, 매립 및 대규모 토공재 등 건설재료로 처리 또는 사용하였을 시 오염물질 배출허용기준에 의한 문제점이 있는가를 검토하기 위하여 회분식 용출시험에 의하여 수소이온농도 및 오염물질 함유량을 조사·분석해 보았다.

*1 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 한라건설 기술연구소 차장

그 결과 fly ash는 일반폐기물로 분류됨을 확인하였고, fly ash의 pH는 오염 물질 배출허용 기준치보다 알칼리성을 강하게 띠고 있어 문제가 되고 있으나 이는 산성화된 토양을 중성화하는 토양개량재로서 fly ash의 역할을 기대할 수 있으며, 그 외에는 오염물질 배출허용 기준치에 훨씬 못 미치는 것으로 나타나고 있다. 더구나 석탄재의 열악한 역학적 특성을 개량하기 위하여 사용되는 정도의 소량의 첨가제(시멘트 또는 석회 등)에 의하여 강도 및 내구성 증가, 투수성 억제 는 물론 문제가 되는 수소이온농도가 오염물질 배출허용기준(pH 5.8~8.6) 이하로 낮아져, 석탄 재의 건설재료로서의 활용에 있어 환경적인 문제의 여지는 없을 것으로 여겨진다.

1. 서론

정부의 장기전원개발계획에 따르면 2001년 까지 신규 대형발전소 건설은 대부분 석탄화력(16기)과 원자력(5기)으로 구성되어 있다. 이렇게 되면 총발전량의 40% 이상을 석탄화력이 담당하게 될 추세에 있어, 2001년에는 이들 석탄화력발전소에서 폐기물로 부산되어 나오는 석탄재의 양만도 무려 연간 500만톤에 이를 것으로 전망되며, 지금 현재도 석탄재 발생량은 연간 200만톤에 달하고 있다. 더구나 최근에는 도시나 공단주위에 전력 수요충족과 지역난방 등을 목적으로 크고 작은 열병합발전소가 설립되고 있는데 이들 열병합발전소의 상당수는 석탄화력으로 계획되어 있어 여기서도 상당량의 석탄재의 발생이 예상되고 있다.

한편, 석탄재의 처리와 관련하여 이의 처리장의 확보와 유효이용에 관한 연구가 최근 국내에서 활발하게 진행되어, 시멘트분야에서는 실용화되는 등 석탄재의 이용률은 총발생량의 10%정도 되고 있으나 대규모의 사용이 가능한 토공재나 지반안정재로의 사용은 거의 없는 실정이다. 千 등^(1, 2, 4, 5)은 지난 수년간 석탄재의 공학적 특성에 대한 연구를 실시해 왔으며, 최근 들어서는 석탄재의 토공재나 지반안정재로서의 실용화 방안에 관한 연구를 활발히 진행하고 있다.

그러나 앞으로는 국내외적으로 환경관련 문제들의 심각성이 고조되고, 더구나 UR 등으로 인한 건설시장의 국제화와 GR로 인한 환경문제가 최대 현안으로 부각되고 있는 시점에서,

석탄재와 같은 폐기물의 활용에 관한 연구의 실용화에 있어서는 이의 환경적 특성 검토가 반드시 이루어져야 한다.

2. 석탄재의 유효이용

석탄재의 건설재료로서의 활용에 관한 千 등의 연구^(1, 2, 4, 5)와 선진 외국에서의 연구를 토대로 석탄재 이용가능 분야를 정리해 보면 표 2.1과 같다.

표 2.1 석탄재의 이용가능 분야

분 야	이용 형태
시멘트 분 야	시멘트 제조용 원료
	콘크리트용 혼화재
도 로 분 야	아스팔트 충전재 (filler)
	노반재
	노상재(도로성토재 포함)
일반토목 분 야	매립·성토재
	채움재
	지반 안정재
	광산 충전재
	경량골재
건축재료 분 야	기와 및 벽돌 제품
	단열재
농·수산 분 야	비료
	토양개량재
	인공 어초
기 타 분 야	고무, 플라스틱 충전재
	탈황·탄소재
	경화재

매립·성토재외의 토공재로서 연약지반상에 축조되는 교대같은 구조물의 뒤채움재로서의 석탄재의 활용성에 관한 연구나 지반 개량재로서 세립토의 연약지반상에서 배수공법 등 지하수위저하에 의한 주변 지반의 침하 등을 방지하기 위하여 대상지반 주위에 선행적으로 실시되는 차수벽 및 터파기를 위한 흙막이 벽체와 병행하여 실시되는 차수공법 등에의 석탄재를 주재료로 한 공법개발에 관한 연구는 현실성 있는 연구들이라 할 수 있다.

3. 용출액의 조제 및 시험방법

본 연구에서는 수입 유연탄을 사용하는 안산 열병합 발전소에서 부산되는 석탄재를 대상으로, 이들 석탄재의 기본적 성질을 파악하기 위한 화학적 성분분석과 토질역학적 물리시험 그리고 다짐시험, CBR시험을 실시하였다.

한편, 폐기물은 일반폐기물과 특정폐기물로 나눈다. “폐기물 관리법”⁽⁶⁾ 시행령 제2조(특정 폐기물의 종류)에서 정한 분류 및 기준에 의한 용출시험 결과 석탄재는 일반폐기물로 분류되고 있는데 본 연구에서는 이를 실제로 시험 판정하여 확인하고자 하며, 또한 매립 및 대규모 토공재 등 건설재료로 폐기물을 처리 또는 사용하였을 때 강우나 기존의 지하수와 접촉에 의해 배출되는 침출수의 “수질환경보전법”⁽⁷⁾에 의한 오염물질 배출허용기준에 대해 검토하여 매립 및 건설재료 특히, 대규모적으로 사용되는 토공재나 지반개량재 등으로 활용 가능한 석탄재의 환경적 특성에 대하여 검토한 것이다. 이를 위하여 “폐기물 관리법”이나 “수질환경보전법”에서 검토 대상으로 하고 있는 유해물질에 대하여 폐기물공정시험방법(廢藥物公定試驗方法)에 의하여 조제한 용출액을 대상으로 각 항목별 회분식 용출시험(batch test)을 실시한다.

3.1 용출액의 조제^(3, 8)

固狀 또는 半固狀 폐기물에 대하여 폐기물을

판정(일반 또는 특정 폐기물)하고, 폐기물의 처리 및 매립 그리고 사용 방법을 결정하기 위하여서는 우선적으로 다음과 같은 과정으로 용출액을 조제한다.

- (1) Fly ash 적당량(g)을 정밀히 달아 정제수에 염산을 넣어 pH를 5.8~6.3으로 한 용매(ml)를 1:10(W:V) 비율로 혼합하고 혼합액이 500ml이상 되도록 한다.
- (2) 이 혼합액을 상온, 상압에서 진탕회수가 매분당 약 200회, 진폭이 4~5cm의 진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한 다음 여과하고 여과액을 적당량 취하여 용출시험용 검액으로 한다.
- (3) 용출액 적당량을 취하여 수소이온농도(pH)와 오염물질(CN⁻, Cu, Cd, Hg, Org, P, As, Pb, Cr⁶⁺, Cr, Fe, Zn, Mn) 함유량을 각각의 장비와 시험법을 이용하여 분석한다.

3.2 분석기기 및 용출시험방법^(3, 8)

3.2.1 SP(Spectrophotometer)

(1) 원리 및 적용범위

용해된 물질의 종류와 농도에 따라 특유 파장의 빛의 흡수가 정량적으로 측정되는 현상을 이용하여 용해된 물질을 분석할 수 있다.

(2) 장치

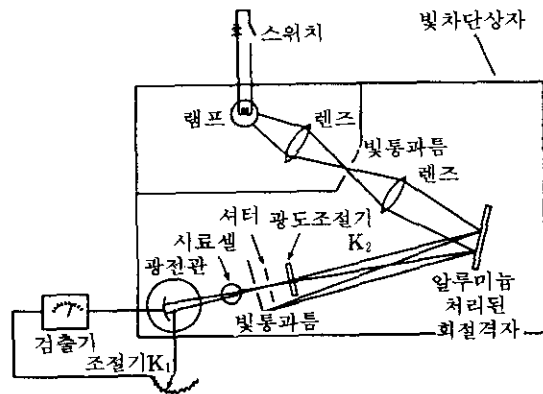


그림 3.1 Spectrophotometer의 구성

(3) 용출시험 적용항목

CN⁻, As, Cr⁶⁺

3.2.2 AA(Atomic Absorption

Spectrophotometer : 원자흡광광도계)

(1) 원리 및 적용범위

이 시험방법은 시료를 적당한 방법으로 해리(解離)시켜 중성원자로 증기화하여 생긴 기저상태(ground state or state)의 원자가 이 원자 증기층을 투과하는 특유 파장의 빛을 흡수하는 현상을 이용하여 광전측광(光電測光)과 같은 개개의 특유파장에 대한 흡광도를 측정하여 시료중의 원소(元素) 농도를 정량하는 방법으로 시료 중의 유해중금속 및 기타 원소의 분석에 적용한다.

(2) 장치

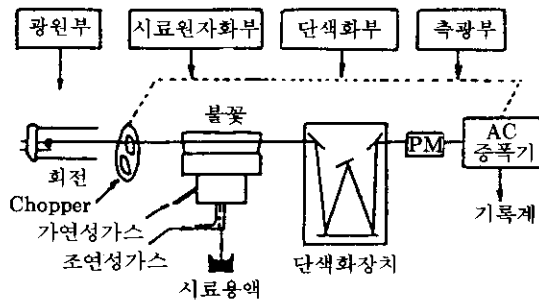


그림 32 원자흡광 광도계의 구성

(3) 용출시험 적용항목

Cu, Cd, Hg, Pb, Fe, Zn, Mn

3.2.3 ICP(Inductively Coupled Plasma -

Automic Emission Spectrometer :

유도결합플라스마-원자발광광도계)

(1) 원리 및 적용범위

시료를 고주파유도코일에 의하여 형성된 알콘 플라스마에 도입하여 6,000~8,000°K에서 여과된 원자가 이동할 때 방출하는 발광선 및 발광광도를 측정하여 원소의 정성 및 정량분석에 이용하는 방법이다.

(2) 장치

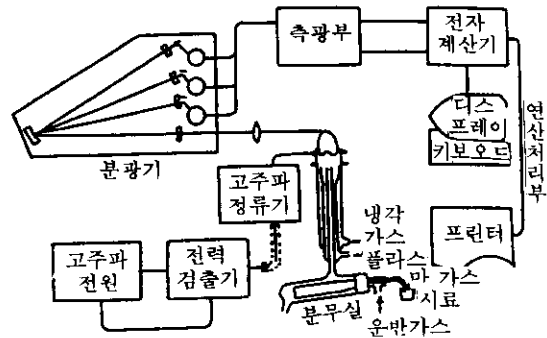


그림 33 ICP 분석장치의 구성

(3) 용출시험 적용항목

Total Cr

3.2.4 GC(Gas Chromatograph)

(1) 원리 및 적용범위

이 시험방법은 적당한 방법으로 전처리한 시료를 운반가스(carrier gas)에 의하여 크로마토 관내에 전개시켜 분리되는 각 성분의 크로마토그램을 이용하여 목적성분을 분석하는 방법으로 일반적으로 유기화합물에 대한 정성(定性) 및 정량(定量)분석에 이용한다.

(2) 장치

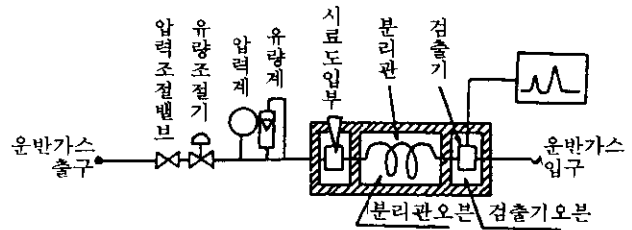


그림 34 GC 분석장치의 구성

(3) 용출시험 적용항목

Org. P(유기인)

3.2.5 수소이온농도(pH)

(1) 측정원리

pH는 수소이온 농도를 그 역수의 상용대수로서 나타내는 값이다. pH는 보통 유리전극과

비교전극으로 된 pH미터를 사용하여 측정하는데 양전극간에 생성되는 기전력의 차를 이용하여 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$pH_s = pH_s \pm \frac{F(E_s - E_s)}{2.303RT}$$

pH_s : 시료의 pH측정값

pH_s : 표준용액의 $pH(-\log_{10}[H^+])$

E_s : 시료에서의 유리전극과 비교전극간의 전위차(mV)

E_s : 표준액에서의 유리전극과 비교전극간의 전위차(mV)

F : 패러데이(Faraday) 정수(9.649×10^4 coulomb/mole)

R : 기체정수($8.314 \text{ joule}/^\circ\text{K} \cdot \text{mole}$)

T : 절대온도($^\circ\text{K}$)

(2) pH미터의 구조

pH미터는 보통 유리전극 및 비교전극으로 된 검출부와 검출된 pH를 지시하는 지시부로 되어 있다. 지시부에는 비대칭 전위조절(영점조절)용 꼭지 및 온도보상용 꼭지가 있다. 온도보상용 꼭지가 없는 것은 온도보상용 감온부가 있다. pH미터는 임의의 한 종류의 pH표준액에 대하여 검출부를 물로 잘 씻은 다음 5회 되풀이하여 pH를 측정하였을 때 그 재현성이 ± 0.05 이내의 것을 쓴다.

3.3 시험결과의 보정^(3,8)

각 항목별 규정에 따라 시험한 결과는 시료 중의 수분함량을 보정하기 위하여 $15/(100 - D)$ (여기서, D : 시료의 함수율, %)를 곱하여 계산된 값을 용출시험결과로 한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 기본적인 성질

본 연구에 사용된 석탄재의 입도분포 및 분류 그리고 물리 시험결과는 그림 4.1 및 표 4.1

과 같다. 특히 석탄재 발생량의 대부분을 차지하는 fly ash는 거의 SM 또는 ML로 분류되고 비중은 보통 흙보다 작은 편인데, 이번 분석에 사용된 fly ash의 경우도 ML로 분류되고 비중은 1.995 정도로 보통 흙보다 상당히 작은 편이다.

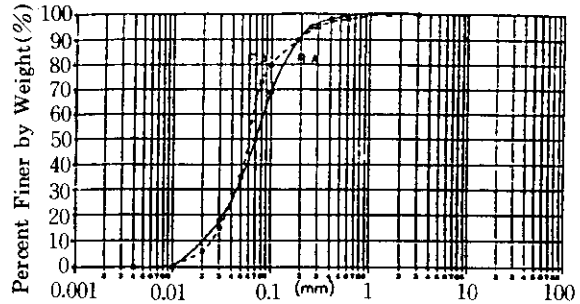


그림 4.1 석탄재의 입도 분포

표 4.1 석탄재의 분류 및 물리시험 결과

석탄재의 종류	비중	흙의 분류법		입도 분석	
		AASHTO분류	통일분류	>4.76mm	>0.074mm
Bottom Ash	1.995	A-4	ML	0%	55%
Fly Ash	1.933	A-4	ML	0%	74%

원자흡광광도계를 이용한 정량적인 fly ash의 성분분석결과는 표 4.2와 같다.

화학분석 및 환경적 특성검토에 있어서는 발전소에서 발생하는 상태를 그대로 유지하고 있는 fly ash만을 대상으로 하였다. Bottom ash의 경우 냉각을 위하여 대부분 그렇듯이 해수가 첨가된 상태이고 발생량이 소량이기 때문에 제외하였다.

표 4.2 Fly Ash의 화학분석 결과

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O ₃
53.18	28.79	7.72	3.92	2.84	2.08	0.82

일반적인 fly ash의 화학성분에서와 마찬가지로 실리카(SiO₂)와 알루미나(Al₂O₃)가 82% 정도로 성분의 대부분을 차지하고 있으며 CaO

가 3.92% 함유되어 있는 것으로 보아 어느 정도의 자경성을 발휘할 것으로 보인다.

4.2 토질역학적 성질

4.2.1 다짐 특성

A-1다짐과 D-2다짐 시험방법에 의한 fly ash, bottom ash의 다짐곡선은 그림 4.2와 같다.

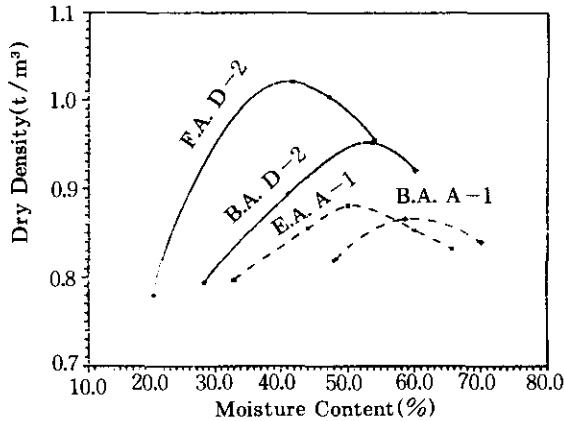


그림 4.2 석탄재의 다짐곡선

작은 비중과 균등한 입경으로 인하여 γ_{max} 는 보통 흙보다 상당히 작게 나타나고 있으며, 최적함수비는 45% 이상 60% 정도까지로 보통 흙보다 매우 큰 편이다.

4.2.2 C.B.R. 특성

Fly ash, bottom ash의 실내 C.B.R. 시험을 실시하였으며, 그 결과 fly ash의 경우 C.B.R.은 4%, bottom ash의 경우 C.B.R.은 15.7%로, 대부분의 석탄재에서의 경우와 마찬가지로 bottom ash 경우가 fly ash 경우보다는 상당히 크게 나타났다. fly ash의 C.B.R. 4%는 자경성에 의해 어느 정도 지지력이 발휘되었기 때문인 것으로 보인다.

4.3 환경적 특성

Fly ash를 대상으로 용출시험을 실시한 결과, 수소이온 농도 및 오염물질 함유량은 표 4.3과 같다.

“폐기물 관리법” 시행령 제2조에서 정하고 있는 폐기물 분류 기준인 표 4.4는 용출시험 결과에 의하여 폐기물을 일반 폐기물과 특정 폐

표 4.3 Fly Ash 용출액의 pH 및 오염물질 함유량

분석 시험 항목(단위 : mg/l)												
pH	시안	구리	카드뮴	수은	유기인	비소	납	6가크롬	크롬	철	아연	망간
12.1	0.001이하	0.02이하	0.02이하	0.001이하	0.01이하	0.01이하	0.05이하	0.01	0.01	0.02이하	0.05이하	0.02이하

표 4.4 일반/특정 폐기물의 분류 기준⁽⁶⁾

항 목	시 안 (mg/l)	구 리 (mg/l)	카드뮴 (mg/l)	수 은 (mg/l)	유기인 (mg/l)	비 소 (mg/l)	납 (mg/l)	6가크롬 (mg/l)
기준치	1	3	0.3	0.005	1	1.5	3	1.5

표 4.5 처리 또는 사용되는 폐기물 침출수의 오염물질 배출허용기준⁽⁷⁾

항목 지역 구분	수소이온 농도	시 안 (mg/l)	구 리 (mg/l)	카드뮴 (mg/l)	수 은 (mg/l)	유기인 (mg/l)	비 소 (mg/l)	납 (mg/l)	6가크롬 (mg/l)	크 롬 (mg/l)	용해성 철 (mg/l)	아 연 (mg/l)	용해성 망 간 (mg/l)
청정	5.8~8.6	0.2	0.5	0.02	불검출	0.2	0.1	0.2	0.1	0.5	2	1	2
가	5.8~8.6	1	3	0.1	0.005	1	0.5	1	0.5	2	10	5	10
나	5.8~8.6	1	3	0.1	0.005	1	0.5	1	0.5	2	10	5	10
특례	5.8~8.6	1	3	0.1	0.005	1	0.5	1	0.5	2	10	5	10

- 주) 청정지역 : 환경기준(수질) I 등급정도의 수질을 보전하여야 한다고 인정되는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경처장관이 정하여 고시하는 지역
- 가 지역 : 환경기준(수질) II 등급정도의 수질을 보전하여야 한다고 인정하는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경처장관이 정하여 고시하는 지역
- 나 지역 : 환경기준(수질) III, IV, V 등급정도의 수질을 보전하여야 한다고 인정하는 수역의 수질에 영향을 미치는 지역으로서 환경처장관이 정하여 고시하는 지역
- 특례지역 : 환경처장관이 공단 폐수종말처리구역으로 지정하는 지역 및 시장·군수가 산업입지 및 개발에 관한 법률 제8조의 규정에 의하여 지정하는 농공단지

기물로 구분하게 되는 것이다. 표4.4의 기준에 의하면 fly ash는 일반 폐기물임을 확인 할 수 있다.

석탄재의 이용가능 분야에 대한 기존의 연구나 계속되는 연구에 의하여 대규모 토공재 및 지반 개량재 등 건설재료로 실제 매립·사용하였을 시 강우나 지하수 등의 접촉에 의해 배출되는 침출수의 환경오염 가능성에 대한 문제를 검토하기 위한 “수질 환경 보전법”에 의한 오염물질 배출허용 기준은 표 4.5와 같다.

Fly ash를 대상으로 실시한 용출시험 결과(표 4.3 참조)에 의하면 수소이온농도(pH)만이 12.1로 강알칼리성을 띠고 있어, 오염물질 배출허용 기준치를 훨씬 상회하는 문제가 되고 있고 나머지 물질에 대해서는 배출허용 기준치에 훨씬 못미치는 것으로 나타나고 있다. 그러나 fly ash의 이런 성질을 이용하면 산성화된 토양을 중성화하는 토양 개량재로서 활용 및 개발 연구될 가능성이 있을 것이다.

또, fly ash는 석탄재 발생량의 대부분을 차지하고 있지만 일반적으로 역학적 특성이 열악하여 대규모의 석탄재 활용을 위해서는 이의 역학적 특성을 증대시킬 수 있는 다양한 방법의 연구가 수행된 바 있다.^(1, 2, 4, 5) 그 중에서도 토공재의 활용시 수침에 대한 내구성 및 동상에 대한 피해를 줄이기 위해서는 소량의 첨가제(시멘트 2%~4% 정도)를 혼합하여 사용하는 방법이 있다.

이와 같은 연구에 의한 결과를 실용화하는 연장선 상에서 시멘트 2%, 4%를 혼합하여 pH를 다시 측정하여 보았다.

시멘트 2% 첨가시 pH는 8.4로, 4% 첨가시

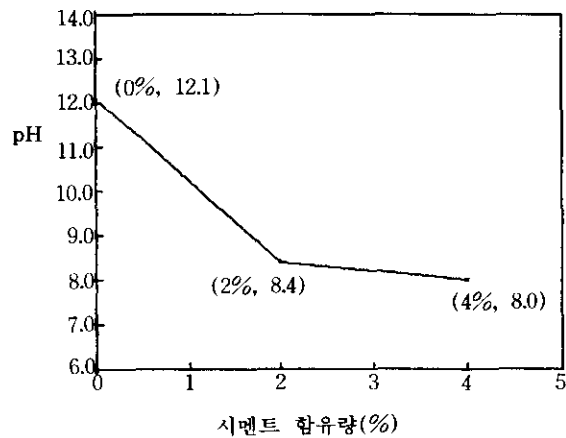


그림 4.3 시멘트 함유량에 따른 pH의 변화 (침출수의 온도 25℃)

pH는 8.0으로 저하함으로써, 폐기물 침출수의 오염물질 배출허용기준 이하로 낮아서, 알칼리성이 상당히 중성화 됨을 알 수 있다. 이는 fly ash의 구성성분중 이 침출수의 염기성을 나타내는 주요한 물질인 알칼리 금속산화물(CaO, MgO, K₂O, Na₂O₃ 등)이 포졸란 반응으로 그 농도가 많이 줄어들기 때문에 침출액의 pH가 줄어든 것으로 보인다.

5. 결론

- (1) 세계적으로 환경문제가 최대 현안으로 부각되고 있는 시점에서 석탄재와 같은 폐기물의 활용을 위해서는 환경적 특성 검토가 반드시 이루어져야 한다.
- (2) 폐기물은 폐기물 관리법에 의하면 일반 폐기물과 특정 폐기물로 구분하여, 특정

폐기물에 대해서는 그 처리 및 활용에 있어서 보다 엄격히 관리하고 있는데, fly ash는 일반 폐기물로 분류됨을 시험 확인하였다.

- (3) Fly ash 침출수의 pH는 오염물질 배출 허용 기준치보다 알칼리성을 강하게 띠고 있는 것 외에, 나머지 물질에 대해서는 기준치에 훨씬 못 미치는 함유량을 나타내고 있다.
- (4) Fly ash의 높은 pH는 산성화된 토양을 중성화하는 토양 개량재로서의 역할을 기대할 수 있으며, fly ash의 열악한 역학적 성질을 개량하기 위하여 사용되는 정도의 소량의 첨가제(시멘트 2~4%)에 의하면 pH도 허용 기준치(pH 5.8~8.6)이하로 낮출 수 있다.
- (5) 본 연구와 기발표된 관련문헌 등의 결과에 의하면 석탄재의 건설재료로서의 활용에 있어 환경적인 문제의 여지는 없을 것으로 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 신진연구인

력연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 동재단에 깊은 감사를 드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. 고용일(1992). "석탄회의 도로성토재로서의 활용에 관한 실험적 연구", 한양대학교 대학원, 박사학위논문.
2. 김수삼·정승용(1991). "석탄회의 침강에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 학술대회, pp.591~594
3. 동화기술(1993). "수질오염·폐기물 공정시험방법", pp.381~492
4. 천병식 외(1993). "석탄회와 성토 및 포장재로서의 개발연구", 한국과학재단 목적기초연구, 최종보고서.
5. 홍성환 외(1992). "성토재로서의 석탄회 이용방안 연구" 한국전력공사, 최종보고서.
6. 환경처(1992). "폐기물 관리법"
7. 환경처(1992). "수질환경 보전법"
8. Perket C.L. & Webster W.C.(1981). "Literature Review of Batch Laboratory Leaching and Extraction Procedures", Hazardous and Industrial Solid Waste Testing, First Conference, ASTM STP 760, R, A., Conway.
(접수일자 1995. 1. 10)