

## Bottom Ash의 물리·역학적특성에 대한 실험적 연구 Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Bottom Ash

윤원섭<sup>1)</sup>, Won-Sub Yoon, 조철현<sup>2)</sup>, Chul-Hyun Cho, 박상준<sup>3)</sup>, Sang-Jun Park,  
김종국<sup>4)</sup>, Jong-Kook Kim, 채영수<sup>5)</sup>, Young-Soo Chae

<sup>1)</sup>수원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

<sup>2)</sup>보강 엔지니어링 전무이사, Executive Director, Bokang Engineering.

<sup>3)</sup>수원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

<sup>4)</sup>한국건설품질시험원 지반공학센터 팀장, Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.

<sup>5)</sup>수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

**SYNOPSIS** : An elementary particle of bottom ash is similar to fine sand. so which expected from replace expensive sand. Especially, If using for improvement of soft ground, It will need of study about strength, permeability and environment of the bottom ash. In this study, the bottom ash operate of physical quality, direct shear test and triaxial compression test so analyze and compare with standard sand.

**Key words** : Bottom ash, Direct shear test, Triaxial compression test, Physical quality

### 1. 서론

최근 각종 산업시설 및 주거시설의 부지확보를 위해 서·남해안을 중심으로 해안 및 연안부의 평야에 연약지반개량이 많이 이루어지고 있다. 서·남해안의 경우 대부분의 지반은 연약한 충적토가 퇴적되어 있어 구조물을 지지할 수 있는 지반이 많지 않다. 이러한 지리적인 여건뿐 만 아니라 급격한 경제성장으로 연약지반의 개량공법들이 많은 발전을 거듭하고 있다. 그 중 모래를 이용한 연약지반개량공법은 연약지반에 모래를 다지면서 압입하여 지름이 큰 모래말뚝을 지중에 형성시켜 지반을 개량하는 공법으로 지반개량효과가 큰 것으로 확인되었다. 그러나 모래를 이용한 연약지반개량공법은 최근 모래부족의 영향을 크게 받고 종래 방식에 의한 시공이 갈수록 어려워 설계 및 시공의 합리화가 절실히 요구되고 있다. 이러한 원자재 공급의 어려움을 극복하기 위해 모래를 대체할 수 있는 대체 재료의 개발이 절실한 것으로 판단된다. 현재 모래를 대체할 수 있는 연약지반개량공법으로는 최근 토목섬유를 이용한 플라스틱 보드 드레인(plastic board drain, PBD) 등의 연직배수재(PVD)가 많이 사용되고 있으나 실제 지반에 타설되는 배수재가 토립자와 결합되어 구멍막힘현상(clogging)과 굴곡이나 휘어짐 등의 변형이 발생할 수 있고, 맨드릴(mandrel)의 타입으로 주변지반의 교란영역이 형성하게 되어 압밀을 지연시키는 요인으로 작용하는 문제점이 발생하여 모래의 대체 재료의 공급이 절실한 실정이다. 이러한 모래의 대체 재료로는 화력발전소에서 발생하는 유·무연탄을 1600℃로 연소한 후 발생하는 비산재(플라이애시, fly ash)와 바닥재(바텀애시, bottom ash)의 석탄회(석탄회)가 있다. 현재 화력발전소에 발생하는 석탄회 중에 fly ash는 건설자재로 많이 사용이 되고 있지만 bottom ash에 대해서 모래의 대체 재료로써 가능한지 물리·역학적으로 시험을 통해 분석할 필요가 있다.

Bottom ash 석탄회는 국내 10개 화력발전소에서 연간 약 600만톤이 발생하며, 약 58%인 350만톤은 시멘트 대체제로 사용하고 나머지 약 250만톤(42%)은 인근 매립장에 매립 처리해왔다. Bottom ash의

경우 입자가 모래와 비슷하여 최근 원자재 수급이 어려운 모래의 대체재로 사용이 가능할 것으로 판단되어지며 특히 연약지반의 개량에 사용될 경우 bottom ash의 강도 및 배수능력, 환경 등의 특성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 bottom ash의 물성시험 및 역학시험을 통한 bottom ash의 물리·역학적 특성과 표준사에 대한 물성 및 역학특성을 비교하여 물리·역학적 측면에서 건설재료로써 가능한지 bottom ash의 재료 특성을 비교·분석하고자 한다.

## 2. 석탄회의 발생현황

산업자원부(2002)에서 우리나라에서 연간 발생하는 석탄회의 양을 조사한 결과 민간 열병합발전소 발생분을 제외한 석탄회는 평균 약 300만톤으로 이중 무연탄 석탄회와 유연탄 석탄회는 각각 45대 55를 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 무연탄 발전소의 용량이 유연탄 발전소의 용량에 비해 월등히 적음에도 불구하고 회발생량이 비슷한 것은 무연탄 발전소의 석탄회 발생량은 석탄사용량의 50%인데 비해 유연탄 발전소의 석탄회는 석탄사용량의 15%정도이기 때문이다. 그림 1은 화력발전소에서 석탄회가 생성되는 과정을 도시화한 것으로 미분쇄기를 거친 석탄이 보일러의 연소실에서 연소가 되면서 석탄회가 발생하기 시작한다. 이렇게 발생된 석탄회 중에 연소실 하부에서 채취되는 bottom ash와 연소실에서 생성되어 공기 유동을 따라 이동하여 집진기에서 채취되는 fly ash가 있다(산업자원부, 2002).

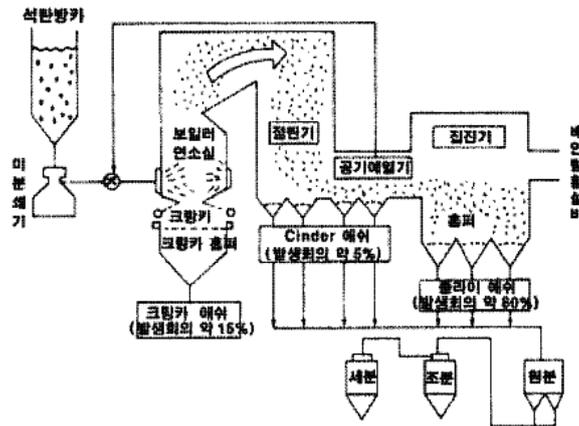


그림 1. 석탄회 생성과정(산업자원부, 2002)

산업자원부(2002)에서 제시한 연도별 석탄회 발생량과 2006년의 예상 석탄회 발생량은 표 1과 같다.

표 1. 연도별 석탄회 발생량과 2006년의 예상 석탄회 발생량(산업자원부, 2002) (단위 : 천톤)

구분	1992	1994	1996	1998	2000	2006
무연탄	948	864	970	980	1,026	1,026
유연탄	920	1,564	2,150	2,830	3,390	4,687
계	1,868	2,428	3,120	3,810	4,416	5,713

2002년에 산업자원부에서는 표 1과 같이 석탄회의 발생량을 추정한 결과 2006년에 약 570만톤으로 추정하였으나 현재 bottom ash에서만 발생하는 석탄회는 약 600만톤이며 약 58%인 350만톤은 시멘트 대체재로 사용하고 나머지 약 250만톤(42%)은 인근 매립장에 매립 처리하고 있다. 석탄회의 매립에 따른 경제적인 손실은 큰 것으로 판단되며 매립에 따른 추가 비용을 줄이고 연약지반의 개량 등에 석탄회를 사용한다면 경제적인 이익이 클 것으로 추정된다.

국내의 석탄회의 활용률은 통계화할 수 있는 수치를 기준으로 할 때 최근까지 45%정도로 파악되고

있으나 품질의 불균일, 처리설비의 미비 등으로 인해 실제로는 이에 미치지 못하고 있다. 현재 국내 산업업체에서 석탄회 재활용에 대한 인식의 단계가 취약한 점도 재활용이 부진한 문제점으로 부각되는 이유다. 천연골재가 비교적 풍부하고 유연탄 발전소의 가동년한이 그리 오래되지 않은 우리나라의 특성으로 볼 때 유럽, 일본과는 달리 폐기물을 재활용하는 여건은 매우 미흡하다. 더구나 풍부한 시멘트 생산, 모래와 자갈의 값 싼 조달 등 토건재료의 물량확보에는 어려움이 없었고 대규모의 도로공사 등에도 산과 계곡을 조화롭게 토공 물량으로 구태여 먼 거리 운송이 용이하지 않은 석탄회를 적절하게 이용하기란 쉽지 않은 일이며 발전소측에서도 회처리 부지확보가 용이하여 운전 및 보수 등이 저렴한 점을 감안하여 석탄회를 대부분 회처리장으로 폐기하는 방법을 사용하였다(산업자원부, 2002). 그러나 최근 들어 모래 등의 원자재 수급의 어려움으로 토목공사 등의 차질이 발생하고 있어 모래와 입도가 비슷한 석탄회의 재활용에 대한 관심이 증가하고 있으며 연구가 많이 수행되고 있다. Fly ash의 경우에는 이미 건설자재로 사용을 하고 있으며 fly ash에 관련된 연구실적은 많이 수행되었다. 하지만 bottom ash의 경우에는 환경적인 측면에서 건설자재로써 부적합하여 사용이 제안되었으나 최근 들어 보도 블럭 등의 재료로 사용이 증가하고 있다. 하지만 아직도 많은 양이 폐기되고 있어 건설재료로의 활용에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

### 3. 시험계획 및 결과 분석

화력발전소에서 발생하는 bottom ash의 양은 전체 석탄회중에서 20%를 차지하며 bottom ash가 일반적으로 가지고 있는 특성은 다음과 같다(산업자원부, 2005).

- 1) 천연골재보다 작지만 어느 정도 골재로서의 필요한 경도를 가진다.
- 2) 다공질의 재료로 비중이 낮다.
- 3) 발생과정에서 염분을 함유한다.
- 4) 탄산칼슘계 재료의 반응과정에서 포졸란계 역할을 하여 강도를 증가를 돕는다.

위와 같은 특성을 갖는 bottom ash와 입도가 대체적으로 고른 표준사의 특성을 분석하였다. Bottom ash의 입도 및 비중, 액·소성시험의 물성시험을 실시하고 직접전단시험 및 삼축압축시험을 통한 역학적 특성을 분석하였다. 또한 표준사의 입도 및 비중, 액·소성시험과 직접전단시험을 실시하였다. 표준사의 삼축압축시험 결과는 기존의 연구결과와 비교·분석하였다.

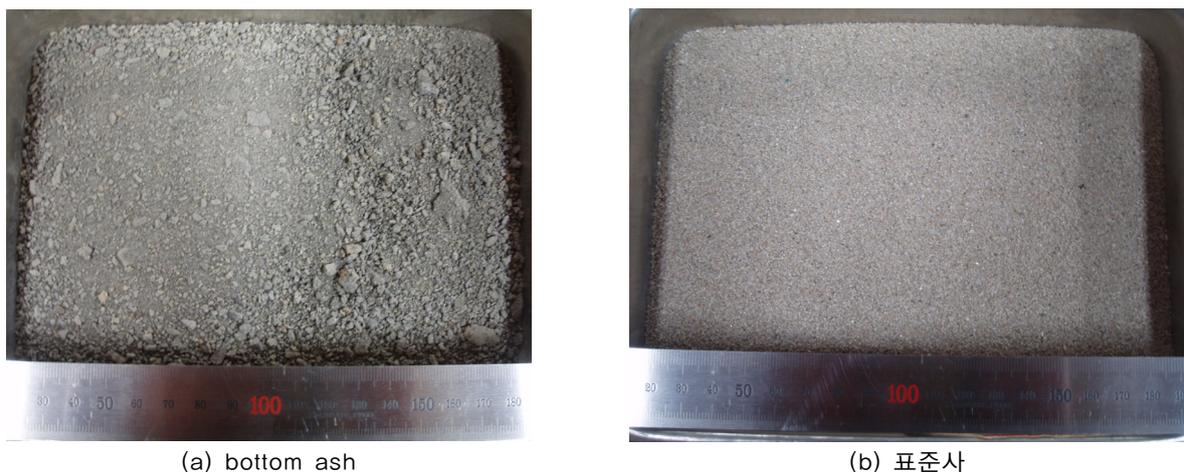


그림 2. Bottom ash와 표준사의 시료 전경

그림 2는 표준사와 bottom ash 시료이다. 육안으로 관찰한 결과 입도는 대략 사질토의 성격을 가지며 화력발전소에서 발생된 시료로 재가 일부 함유되어 있었다. 시험 시 물에 시료가 녹지는 않았으나

채취하는 과정에서 함유된 재와 기름이 물에 뜨는 것이 확인되었다. 본 논문에서는 시료의 물리·역학적 측면에서 시험결과를 분석하였으며 환경적인 문제점이 발생하는 부분에 대해서는 배제하였다.

### 3.1 물리적 특성 비교

Bottom ash와 표준사의 물리적 특성을 비교하기 위한 물성시험을 실시하였다. 시험 항목은 위에서 언급한 바와 같이 입도, 비중, 액소성시험을 실시하였다. 그림 3은 bottom ash와 표준사의 입도분포 곡선이다. 물성시험결과 bottom ash는 입도가 양호한 모래 혹은 실트질 모래(SW-SM)의 성격을 갖는 것으로 나타났으며 발전소에서 채취할 당시의 함수비는 1.39%였다. 액성시험과 소성시험의 결과는 비소성(NP)로 판단되었으며 비중은 1.87로 다소 작은 값을 보였다. 입도분포곡선으로 구한 균등계수( $C_u$ )는 1.95의 값을 보였으며, 곡률계수( $C_c$ )는 0.05의 값으로 나타났다. 표준사의 시험결과 입도가 불량한 모래(SP)로 입도분포가 분석되었고, 액성시험 및 소성시험은 비소성(NP)로 판단되었으며, 비중은 2.65의 값을 보였다. 입도분포곡선을 통한 균등계수( $C_u$ )는 1.80, 곡률계수( $C_c$ )는 1.09의 값을 보였다.

Bottom ash의 입도분포결과 SW와 SM의 이중적인 성격을 갖는 것으로 나타났으며 bottom ash는 비중의 값이 표준사에 비해 0.78정도로 값이 많이 작았다. Bottom ash는 비중의 값이 작아 단위중량의 값이 작고 입도분포는 양호하여 투수성이 우수할 것으로 판단되므로 연약지반의 개량 효과가 클 것으로 사료된다.

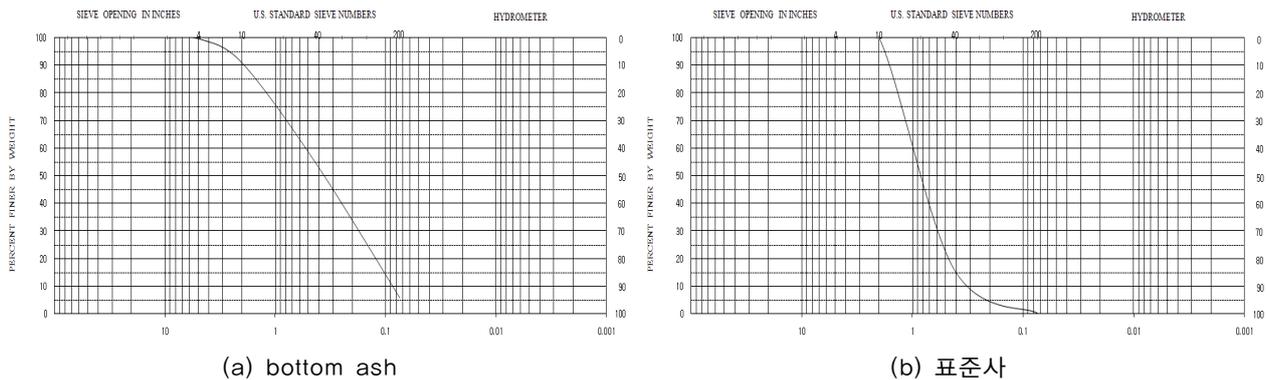


그림 3. 입도 분포 곡선

### 3.2 역학적 특성 비교

Bottom ash와 표준사의 역학적 특성을 직접전단시험과 삼축시험을 통해 비교·분석하였다. 기존의 표준사의 삼축시험과 관련한 연구결과가 있어 본 연구에서는 표준사의 삼축시험은 제외하였다. 표준사의 삼축시험 연구성으로 배성환(2002)은 삼축압축시험을 통해 상대밀도와 구속압에 따라 표준사의 역학적 특성을 규명하였다. 시험결과에 따르면 구속압에 따라 조밀한 모래의 마찰각은 39.92°~47.59°의 범위에서 강도특성을 보였으며 느슨한 모래의 경우의 마찰각은 35.7°~43.69°의 범위의 강도특성을 보였다. 표준사의 삼축압축시험 결과는 그림 4와 같다.

Bottom ash의 삼축압축시험 전경은 그림 5와 같다. 삼축시험 시 시료성형은 마이터박스에 시료를 넣은 후 충분히 다짐을 하여 시료의 성형을 실시하였다. Bottom ash의 시험결과 마찰각의 값이 14°~16°의 값을 보였다. 시험결과 표준사에 비해 비교적 마찰각이 작게 발생되었는데 이는 bottom ash의 경우 기존의 연구에서 실시한 표준사의 시료 성형방법 등의 시험방법이 상이하여 발생된 결과로 판단된다. 또한 bottom ash의 경우에는 비중이 작고 건조된 상태에서는 표준사에 비해 강도가 약하였으며 충분히 다짐을 하였으나 시료의 특성상 다짐이 제대로 이루어지지 않아 발생된 결과라 사료된다.

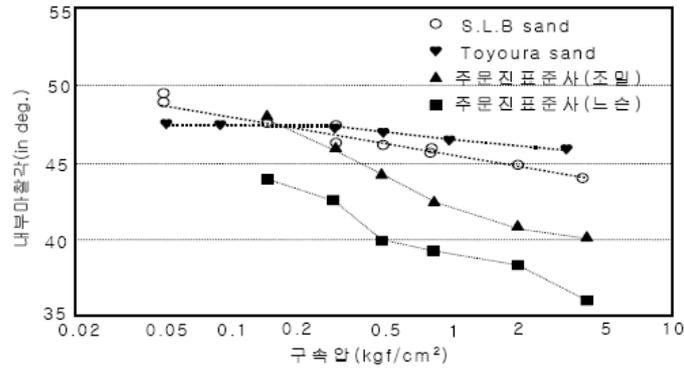


그림 4. 표준사의 삼축압축시험 결과(배성환, 2002)



그림 5. Bottom ash의 삼축압축시험 전경

Bottom ash와 표준사의 직접전단시험을 실시한 결과 bottom ash의 마찰각은 약 20°로 나타났다. 마찰각의 값이 입도분포결과와 비교했을 때 일반적인 사질토의 강도값에 비해 비교적 작게 발생되었다. 이는 시험 시 완전 건조된 bottom ash를 사용함으로써 충분하게 시료의 다짐이 되지 않고 구속압이 충분하지 않아 발생된 현상으로 보이며 추후에 충분한 다짐을 통해 추가적인 시험을 실시할 필요가 있을 것으로 판단되었다. 표준사의 직접전단시험 결과는 마찰각 28.4°로 나타났다. 표준사의 경우도 역시 완전 건조된 상태에서의 표준사를 시료로 사용하므로써 구속압이 크지 않아 시료가 쉽게 교란되고 다짐이 충분하지 않은 상태에서의 시험결과로 기존의 연구 결과와 비교 시 이러한 상황을 고려해야 할 것으로 판단된다.

Bottom ash의 물리·역학적 특성을 분석하기 위해 실시한 물성시험과 직접전단시험과 삼축압축시험 결과 표준사에 비해 강도가 작은 것으로 판단되었으며 입도시험 및 비중시험 결과 표준사에 비해 입도 분포는 bottom ash가 양호하였으며 입도분포결과 투수성이 양호할 것으로 판단되므로 연약지반의 개량의 목적으로 사용은 충분히 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 화력발전소에서 발생하는 석탄회인 bottom ash를 이용하여 연약지반 등의 건설재료인 모래의 대체 재료로서 평가하기 위해 표준사와 물리·역학적 특성을 실내시험을 통해 비교·분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Bottom ash는 입도가 양호한 모래 혹은 실트질 모래(SW-SM)의 성격을 가지며 비중은 1.87의 값을 보여 표준사에 비해 입도는 양호하며 비중값은 비교적 낮게 평가되었다.
2. Bottom ash는 비중이 작고 입도분포가 양호하여 투수성이 우수할 것으로 판단되므로 연약지반개량

시 단위중량과 입도분포에 따른 투수성을 고려한 경우 지반의 개량 효과가 클 것으로 판단된다.

3. Bottom ash에 대해 직접전단시험과 삼축압축시험의 역학적 시험을 실시한 결과 표준사의 강도보다 작은 것으로 판단되었으며 이는 시험방법의 차이와 bottom ash라는 시료의 특성상 충분한 다짐이 이루어지지 않은 결과로 판단된다.

이상에서와 같이 화력발전소에서 발생하는 석탄회 폐기에 따른 경제적인 손실은 큰 것으로 판단되며 매립에 따른 추가 비용을 줄이고 연약지반의 개량 등에 석탄회를 사용한다면 경제적인 이익이 클 것으로 추정된다.

## 참고문헌

1. 배성환, (2002), “삼축압축시험에 의한 주문진 표준사의 변형 강도특성에 관한 연구”, 창원대학교 대학원 석사학위 논문.
2. 산업자원부, (2005), “Bottom Ash를 활용한 Chemical Compaction Pile 제조 및 시공기술 개발”.
3. 산업자원부, (2002), “석탄회를 이용한 환경친화 건자재의 개발”.
4. 한국토목섬유학회, (2006), “토목섬유의 특성 평가기법 및 활용”, pp.19~135.
5. Akagi, T., (1994), “Hydraulic Applications of Geosynthetics to Filtration and Drainage Problems with Special Reference to Prefabricated Band-Shaped Drains”, Proc., 5th International Conference on Geotextiles, Geomembrance, and Related Products, Singapore, pp.99~119.