

## 고유동성 채움재 타설장비를 이용한 모형시험

### A Small Scale Test using the Coal Ash Placement Equipment

김주형<sup>1)</sup>, Ju Hyong Kim, 조삼덕<sup>2)</sup>, Sam-Deok Cho, 함태규<sup>3)</sup>, Tae-Gyu Ham, 도종남<sup>4)</sup>, Jong-Nam Do, 천병식<sup>5)</sup>, Byung-Sik Chun

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology.

<sup>2)</sup> 한국건설기술연구원 책임연구원, Research Fellow, Korea Institute of Construction Technology.

<sup>3)</sup> 대우엔지니어링 과장, General Manager, Daewoo Engineering.

<sup>4)</sup> 한양대학교 박사과정, Ph.D Candidate, Hanyang University.

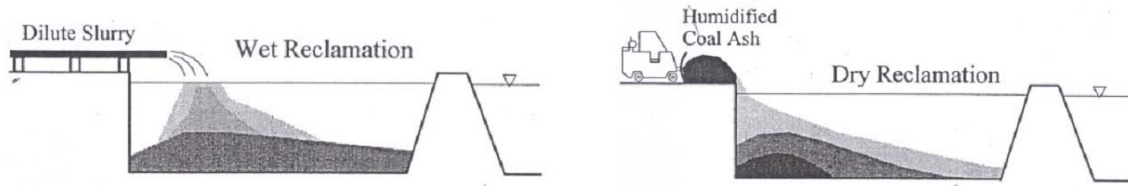
<sup>5)</sup> 한양대학교 교수, Professor, Hanyang University.

**SYNOPSIS** : Recently, coal ash is used as resources to make controlled low-strength material (CLSM) which a self-compacted, cementitious material used primarily as a backfill in lieu of compacted fill. Pozzolanic reaction is strongly related with self-cementation of coal ashes. However, this reaction depends on pozzolanic content in fill materials and is disappeared in 2-3 days after placement of coal ash fill. Therefore, state of coal ash fill is commonly very loose and not appropriate for foundations of structures without special treatments. In this study, a coal ash placement device was developed to place coal ashes effectively to improve density of coal ash fills. The device consists of a ribbon type mixer to obtain homogeneous materials mixture and a piston type pump for density control of fill materials. Based on several laboratory test results, more stable coal ash fill state can be obtained with controlling placement pressure.

**Keywords** : CLSM, Pozzolanic Reaction, Coal Ash Placement, Backfill

## 1. 서론

미국, 일본 등의 선진국에서는 화력발전소에서 배출되는 석탄회 재활용의 역사가 매우 오래되었으나, 우리나라의 경우에는 1990년대 후반까지만 해도 석탄회를 폐기물로 인식하여 폐기에 상당한 비용이 들었다. 그러나 국내에서도 최근 석탄회 재활용에 대한 꾸준한 노력으로 시멘트의 혼화재료, 비료, 성토 및 복토재료, 경량성 골재 및 복토재 등의 다양한 용도로 개발하여 사용하기 시작하였다. 그러나 여전히 회처리장에 매립되는 매립회의 양은 계속 증가하고 있어 매립이나 뒷채움재 등과 같은 대규모로 사용할 수 있는 토목용 재료로서의 재료 개발이 매우 필요한 실정이다. 본 연구에서는 매립회에 소량의 시멘트와 물을 혼합하여 초기에는 고함수 고유동성의 슬러리 상태이지만 일정 시간이 경과하면 다짐을 수행한 것과 같이 단단한 지반으로 형성되는 유동화토 (flowable fills 또는 controlled low strength materials)를 개발하고 이를 매립이나 구조물 뒷채움재 등의 건설분야에 대량으로 활용할 수 있는 시공방법을 개발하였다 (천병식 등 2009). 석탄회의 건설분야 활용에 매우 적극적인 미국과 일본에서는 석탄회에 대량의 물을 혼합해 저밀도로 슬러리화 시킨 후 매립 용지까지 압송해 수면으로부터 투척하는 습식방법과, 석탄회를 최적함수비로 조절하여 매립지까지 벨트컨베이어나 트럭으로 운반하여 수면으로부터 투척하는 건식방법을 활용하여 석탄회를 활용한 공유수면 매립을 수행하고 있다.

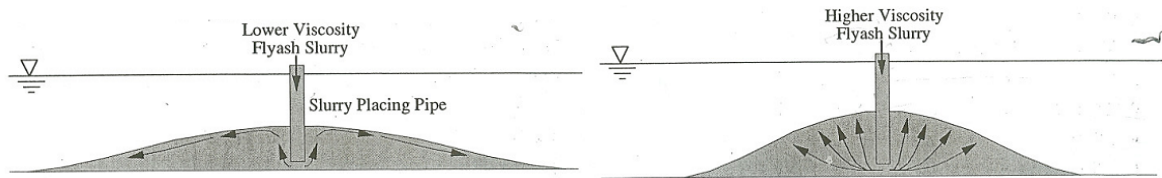


(a) 습식 방법

(b) 건식 방법

그림 1. 대표적인 매립 시공 방법 (堀内, 1996)

미국 전력연구소 (Electric Power Research Institute, 1979)에서 발간한 회처리 매뉴얼(EPRI, 1979)에 의하면 습식법에 의한 매립밀도는  $0.72t/m^3$  정도 얻을 수 있으며, 석탄회의 종류에 따라 매립 밀도는 현저히 변화되는 것으로 언급하고 있다. Cunningham 등 (1977)에 의하면 습식방법을 활용한 석탄회의 매립밀도는 약  $1.20t/m^3$  정도까지 얻을 수 있으며 최대건조밀도의 83%에 해당하는 것으로 나타났다. 습식법으로 매립한 지반의 표준관입시험 결과인 N값은 0~25로 분산정도가 매우 심하며, N값이 0일 때가 압도적으로 많은 것으로 관측되었다. 일본에서는 습식방법에 대한 매립 모형시험을 통해 7m 높이에서 2.4m/day의 속도로 매립한 경우 약  $0.9\sim 1.1t/m^3$ 의 건조밀도를 얻을 수 있는 것으로 보고되었으며 (安原 등 1988), 3m 높이에서 1.2m/day의 속도로 매립한 경우에 건조밀도는  $0.72t/m^3$ 으로 나타남을 보고한 바 있다 (Sugimoto 등, 1989). 또한, Sugimoto 등 (1989)은  $6m^3$  수조 모형시험 결과로부터, 건식방법의 매립방법을 사용하여도 석탄회 입자가 먼 곳까지 확산되어 느슨하게 퇴적되어 재하하중이 작용되는 부분 이외의 밀도는 습식매립지반과 동일하다는 결과를 보고하고 있다.堀内 (1996)는 그림 2와 같이 공유수면 습식 타설시 석탄회 슬러리를 저면에서 배출압력을 조절할 실험결과를 보고하고 있다. 그림 2에 나타낸 것과 같이 석탄회 타설 후의 슬러리는 화산으로부터 흘러나오는 용암과 같은 움직임을 나타내며, 유동성이 높은 저점도의 슬러리는 측방으로 넓게 퍼지고, 연속되어 타설되는 슬러리는 상부로 이동해 물과의 경계면에 도달되어 측방에 흘러 떨어지는 것으로 확인되었다.



(a) 저점도 슬러리

(b) 고점도 슬러리

그림 2. 습식방법 사용시 슬러리의 움직임 (堀内, 1996)

점도가 높은 슬러리의 경우 타설 후의 슬러리가 두껍게 가라앉기 때문에 타설관 선단으로부터 방사형으로 이동되어, 용암 돔과 같은 반구형을 나타내는 것을 알 수 있다. 일본 시미즈(清水)건설에서 수행한  $6m^3$  크기의 수조시험의 결과에 의하면, 슬러리의 슬럼프 값을 11cm로 조정하여 매립한 경우 최대건조밀도가 일반 습식매립법의 1.59배에 해당하고, 육상에서의 다짐으로부터 얻은 밀도보다 높은 밀도를 얻을 수 있는 것으로 보고한 바 있다.

## 2. 석탄회 매립현황

국내 화력발전소에서 생산되는 석탄회는 크게 석탄 연소시 보일러 하부로 낙하되는 저회(bottom ash)와 입경이 저회보다 작아 집진기에서 포집되는 미분말회인 잔사회 또는 비회(fly ash)로 구분한다. 국내에서 발생하는 석탄회는 연간 약 600만톤이며, 이 중 58%는 재활용하고 있으나 나머지 42%는 매립처리를 하고 있는 실정이다. 석탄회 발생량 중 비회는 전체의 약 75%~80%를 차지하며, 화학적/물리적 특

성상 알루미늄 실리카 계열의 구형 입자형태로 포졸란성을 지니고 있어 콘크리트의 혼화재료나 비료재료 등으로 상당수 재활용되고 있다. 저회는 석탄회 발생량 중 약 10%정도를 차지하고 있으며, 일부 벽돌이나 경량성 골재 등으로 사용하고 있으나 대부분을 회매립장에 매립하고 있는 실정이다.

석탄회의 대규모 재활용을 위해서는 회매립장에 매립되어 있는 매립회를 그대로 사용하는 것이 가장 바람직하지만, 발전에 사용하는 석탄은 대부분 수입에 의존하고 있기 때문에 수입지역에 따라 석탄의 성분이 달라 매립되는 석탄회의 물리적/화학적 특성이 상이한 것으로 알려져 있다. 그림 3과 표 1은 남해안에 위치한 ○○발전소의 석탄회 매립장에서 표준관입시험 결과와 채취한 시료의 입도 분포 결과를 나타낸 것이다.

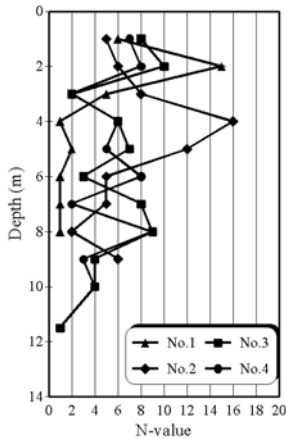


그림 3. 표준관입시험 결과

표 1. 위치별 저회/비회 비율 (%)

심도(m)	No.1	No.2	No.3	No.4
1	68/32	27/73	15/85	49/51
2	72/28	43/56	17/83	14/86
3	55/45	28/72	9/91	24/76
4	40/60	40/60	12/88	13/87
5	31/69	31/69	12/88	3/97
6	17/83	17/83	11/89	10/90
7	-	25/75	16/84	2/98
8	-	6/94	16/84	1/99
9	-	68/32	4/96	5/95
10	-	0/100	5/95	0/100
11.5	-	-	7/93	-

그림 3에서 보면 회매립장의 표준관입시험 결과 N값이 대부분 10이하로 매우 느슨한 상태인 것을 알 수 있다. 입경을 기준으로 비회와 저회 분류하기는 어렵지만, 회 발생 단계에서 저회와 비회를 따로 채취하여 두 재료의 입도를 분석한 결과 두 재료의 입도 경계는 0.25mm 정도인 것으로 판단되었으며, 표 1에는 이를 근거로 저회와 비회를 분류한 결과를 나타내었다. 저회와 비회의 혼합비율은 매립위치 및 매립 층에 따라 달라지는데, 표준관입시험을 수행한 No.3과 No.4은 발전소 운용 초기에 발생한 석탄회를 매립한 지역으로 당시에는 비회의 재활용 비율이 높지 않아 매립 하부 또는 상부에 모두 비회의 매립비율이 저회보다 월등히 높은 것을 확인할 수 있었다. 반면에, 비교적 최근에 석탄회를 매립되고 있는 지역인 No.1과 No.2 지역에서는 하부에는 비회가 상대적으로 높은 비율로 매립되어 있으며 상부에는 저회가 상대적으로 높은 비율로 매립되어 있는 것으로 나타났다. 이는 과거보다는 비회의 재활용 비율이 높아진 것이 나타난 결과로 판단된다. 이와 같이 매립되어 있는 석탄회는 비회와 저회의 비율이 위치마다 시기마다 다르기 때문에 일정한 품질의 석탄회를 사용하는 것은 매우 어려운 것으로 나타났다.

### 3. 실내모형시험

#### 3.1 시험장치

앞서 언급한 시험재료를 매립용 또는 뒷채움재용으로 사용하기 위해 각 재료들을 섞는 혼합장치와 섞인 재료들을 원하는 위치까지 이송하여 타설할 수 있는 펌프 등으로 구성된 장치 Coal ash Slurry Placement (CSP) 시스템을 제작하였다. 1회 혼합 가능량은 약 1m<sup>3</sup>정도로 비회, 저회, 시멘트와 물을 공급하기 위한 스크류 타입의 공급장치도 함께 제작하였다. 재료 혼합 장치의 혼합날개는 리본 형태이며 부식 및 강성에 충분히 견딜 수 있는 구조로 제작하였다. 혼합장치는 날개의 속도를 조절 할 수 있고, 회전속도의 표시 및 회전에 따른 부하를 측정할 수 있도록 각각의 센서를 부착하였다. 또한 혼합장치 하부에는 혼합물의 무게를 측정할 수 있는 측정장치를 장착하여 혼합물을 정량공급 할 수 있다. 또한,

재료 공급장치, 혼합장치 그리고 펌프의 정확한 동작을 제어하기 위해 전자식 컨트롤러를 제작하였다. 컨트롤러에서는 호퍼에 담겨져 있는 각 재료를 혼합장치에 자동적으로 공급할 수 있도록 하였으며, 혼합장치에는 공급된 재료의 무게가 혼합기 하부에 설치된 무게 측정장치를 통해 컨트롤러에 표시하도록 하였다. 또한 혼합장치의 운행 속도를 자유자재로 조절할 수 있도록 하였다. 그림 4는 실내시험용 CSP 시스템을 나타낸 것이다.



그림 4. 실내모형시험용 CSP 시스템

### 3.2 시험 결과

천병식 등 (2009)은 실내시험을 통해 기준 일축압축강도인 0.5MPa~1.0MPa을 만족하는 배합비는 매립회의 혼합비인 저회:비회의 혼합비 3:7~7:3 상태에서 시멘트비 3~5%, 함수비 31~34%로 제시하고 있다. 이 경우 초기에는 매우 높은 유동성을 가지지만 일정시간이 경과하면 다짐이 필요 없을 정도의 단단한 지반이 형성되는 유동화 지반이 형성된다. 본 실내모형시험에서는 이 결과를 근거로 하여 표 2에 나타낸 것과 같이 시멘트를 첨가하지 않은 실내모형시험용 지반과 시멘트를 1.4% 첨가한 두 종류의 모형지반을 조성하였다. 또한 재료의 유동성을 원활하게 하기 위해 실내시험에서 최적으로 평가했던 약 32%의 물을 첨가한 모형지반과 약 44%의 물을 첨가한 모형지반 등 총 4가지 경우에 대해 그림 5에 나타낸 것과 같은  $\Phi 800\text{mm}$ 의 실내시험용 고무 토조에 모형지반을 조성하였다.

우선 실내 모형시험에서 조성한 모든 지반에 대해서 그림 6에 나타낸 동적콘관입(Dynamic Cone Penetration, DCP) 시험을 경과시간에 따라 각각 2회씩 실시하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보면 지반조성 초기에는 지반이 매우 연약해 자중관입으로 콘관입저항값 측정이 불가능 하였으나, 시멘트 함량비가 1.4%인 case 1과 case 3의 모형지반에서는 지반조성 후 약 63시간 후에는 콘관입저항값이 약 250mm/blow, 192시간 경과 후에는 콘관입저항값이 55mm/blow 측정되어 시간이 경과함에 따라 지반의 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 지반의 함수비가 각각 44%와 32%인 case 1과 case 3의 모형지반의 콘관입저항력은 비슷하게 나타나, 일정한 범위 내의 함수비 변화는 지반의 강성에 크게 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 특히, 192시간이 경과한 후에는 콘관입저항력이 증가하는 양상이 급격히 감소하는 것으로 나타나, 시멘트 첨가로 인한 고결현상은 초기 8일에 모두 발휘되는 것으로 나타나났다. 반면에 시멘트를 첨가하지 않은 case 2와 case 4 모형지반에서는 시멘트를 첨가한 모형지반에 비해 더 오랜 기간 동안 자중관입으로 콘관입저항값을 측정하지 못하였으며, 모형지반 조성 후 1,440시간이 경과한 이후에 동적콘관입시험을 비로소 수행할 수 있었다. case 2와 case 4 지반에서는 2,300시간이 경과된 후 약 60mm/blow 정도의 콘관입저항력이 측정이 되었는데, 이는 시멘트 함량비 1.4%가 혼합되어 있는 모형지반의 경우 120시간이 경과된 이후의 지반 강성과 유사한 것으로 나타나, 시멘트 혼합 여부에 따라 지반 경화 속도에 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

표 2. 실내모형시험용 지반 제작 배합비(%)

case	water	bottom ash	fly ash	cement
1	43.74	34.96	19.90	1.40
2	44.29	35.41	20.30	0.00
3	32.40	46.30	19.90	1.40
4	32.80	46.90	20.30	0.00



그림 5. 실내시험용 모형 토조

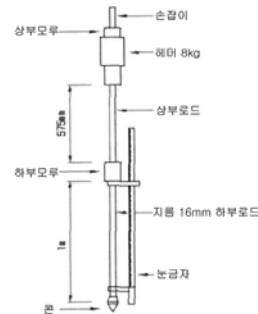


그림 6. DCP 장비 개요도

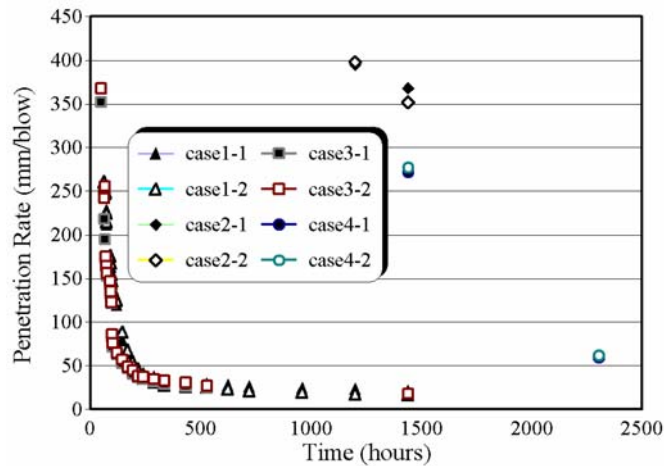


그림 7. 시간 경과에 따른 콘관입저항력

### 3.3 지반 강도 추정

본 실내모형시험에서 조성한 모형 지반에 대한 압축강도를 간접적으로 평가하기 위해 동적콘관입시험을 위한  $\Phi 400\text{mm} \times 500\text{mm}$ 의 소형모형지반과 일축압축강도 시험을 위한  $\Phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  크기의 공시체를 제작하였다. 그림 8에서 보면 일축압축강도와 콘관입저항력과의 관계에는 일정한 관계가 있음을 알 수 있으며, 500kPa의 일축압축강도는 콘관입저항력 20mm/blow 정도로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 실제로 본 모형시험에서 case 1과 case 3 모형지반에서 500kPa의 일축압축강도에 도달하기 위해서는 약 1,440시간 (60일) 정도가 필요한 것으로 나타났으며, 지반경화 속도가 급속히 저하되는 192시간(8일) 경과시에 일축압축강도는 약 100kPa 정도인 것으로 나타났다.

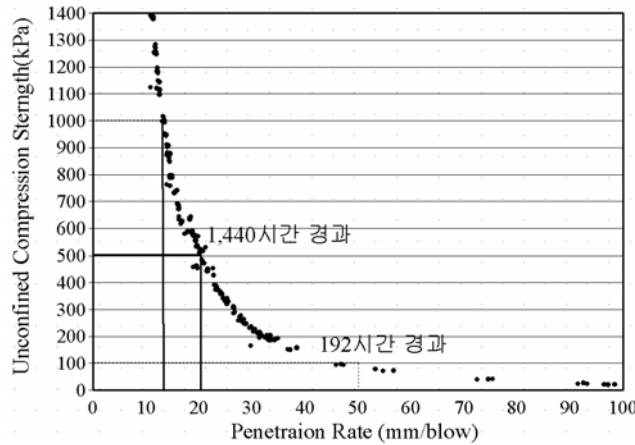


그림 7. 콘관입저항력과 일축압축강도 관계

#### 4. 요약

본 연구에서는 국내 회처리장에 매립되어 있는 매립회를 효율적으로 사용하기 위한 실내 모형시험장치인 CSP 시스템을 제작하여 매립회와 물 그리고 시멘트량을 조절하여 모형지반을 조성하고 이에 대한 강성변화를 평가하였다. 시멘트를 첨가한 모형지반이 시멘트를 첨가하지 않은 경우에 비해 빠른 속도로 경화가 진행되었으며 192시간 경과 후에는 경화속도가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 모형지반 조성시 전체 중량의 30~45% 사이의 물의 양 변화는 지반의 강성 변화에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다. 추후에는 지반 조성 초기에 큰 지반강성의 크기를 얻을 수 있도록 시멘트량을 증가시키는 등의 다양한 영향인자에 대한 시험을 수행하여 고유동성 채움재 활용성을 정량적으로 평가하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 천병식 (2009), “석탄회를 활용한 경량 유동성 채움재(Flowable Fills)제조공정 개발”, 1차년도 진도보고서, 한양대학교 산학협력단, 한국에너지기술평가원, pp.162
2. Cunnungham, J.A., Lukas, R.G., and Anderson, T.C. (1977) "Impoundment of fly ash and slag- A case study", Proceedings of the Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials, pp. 227~245.
3. EPRI (1979), "Coal ash disposal manual", EPRI FP-1257, pp. 7~110.
4. Sugimoto, T., Ohguchi, I. and Horiuchi, S. (1989), "Effective method for underwater disposal of coal fly ash", Proceedings of 2nd International Symposium, Environmental Geotechnology, Vol. 1, pp. 428~437.
5. 安原一哉, 平尾和年 (1988), “石炭灰の埋立て地盤への利用に関する模型實驗”, 西日本工業大學地盤工學研究所報告, No.4, pp. 17~26.
6. 安原一哉, 平尾和年, 堀内澄夫 (1989), “石炭灰の埋立て地盤への有効利用に関する基礎的研究第34回土質工學 シンポジウム”, pp. 341~348.
7. 堀内澄夫 (1996), “石炭灰の水域埋立てへの利用關する研究”, 清水建設報告書, pp. 5~200.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부가 주관하고 한국에너지기술평가원이 시행하는 2009년도 전력산업원천기술개발사업으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.