

## 석탄회의 정적 및 동적 특성 평가

### Evaluation of Static and Dynamic Characteristics of Coal Ashes

윤 여 원<sup>†</sup> · 채 광 석<sup>1)</sup> · 송 규 환<sup>2)</sup>

Yoon, Yeowon · Chae, Kwangsuk · Song, Kyuhwan

**ABSTRACT** : This study presents static and dynamic strength of coal ashes collected from disposal site of power plant. Main compositions of coal ashes were bottom ashes. In order to evaluate static and dynamic characteristics of coal ash, NGI direct-simple shear tests, cyclic simple shear tests and direct shear tests were conducted. The strengths of coal ashes from those tests were compared to those of sands. Bottom ashes among coal ashes used for this study were classified as sand from the grain size distribution and show higher strength properties than the sands. For utilization of coal ashes in civil engineering project, mixing coal ashes with sandy soil using batch plant is inconvenient and the cost is higher than the spreading sand layer and coal layer alternately. In order to simulate both mixing type and layered type construction, sands and coal ashes were mixed with volume ratio 50:50 and prepared sand and coal ash layers alternately with the same volume ratio. From the tests mixed coal ashes-specimen shows slightly higher static and cyclic strength than the layered specimen at the same density. The higher strength seems due to the angular grain of bottom ashes. The cyclic stress ratio at liquefaction decreases rapidly as the number of cycle increases at mixed specimen than that of layered specimen.

**Keywords** : Coal ash, Sand, Static strength, Cyclic strength, Cyclic stress ratio

**요 지** : 본 연구는 발전소의 적치장에서 채취한 석탄회의 정적 및 동적 강도를 제시하였다. 석탄회는 주로 저회로 이루어져 있으며 정적 및 동적 강도를 평가하기 위하여 NGI형 단순전단시험, 반복단순전단시험 및 직접전단시험을 수행하였으며, 이러한 시험으로부터의 강도를 모래의 강도와 비교하였다. 본 연구에 사용된 석탄회 속에 있는 저회는 입도분포에 의하면 모래로 분류되었으며 모래보다 높은 강도 특성을 보였다. 석탄회를 토목공사에 활용되기 위해서 사질토와 석탄회를 50:50의 비율로 배치플랜트에서 섞어 사용하는 것은 사질토층과 석탄회층을 교대로 층별 시공하는 것보다 비효율적이다. 혼합시공과 층별시공을 모사하기 위하여 모래와 석탄회가 50:50으로 조성된 시료를 준비하였다. 시험결과 혼합에 의한 시료가 층별시료보다 약간 큰 정적 및 동적 강도를 나타내었다. 높은 강도는 주로 저회의 모난 입자로부터 기인된 것으로 보인다. 혼합시료에서 액상화시의 반복응력비는 반복횟수가 증가함에 따라 층별시료보다 급격히 감소하였다.

**주요어** : 석탄회, 모래, 정적 강도, 동적 강도, 반복응력비

## 1. 서 론

1980년의 제 2차 오일쇼크 이후 국내에서도 가격과 공급이 불안정한 석유의 대체연료로서 장기적으로 안정적인 공급이 가능한 석탄을 이용하는 석탄 화력발전소의 신규 건설이 추진됨에 따라 전력수급량의 비율이 1990년도에 12.8%, 1996년도에 25.9%, 2001년도에 30.6%로 점차 증가하는 추세에 있으며 이에 따른 석탄회의 발생량도 급증하게 되었다. 국내의 경우 화력발전소는 무연탄계의 5개 발전소, 유연탄계의 3개 발전소에서 발생하는 석탄회의 재사용률은 약 15%~20%로 전체 사용량이 지극히 미미한 실정이며, 이 중 삼천포 화력발전소의 경우 발전 부산물로 현재 연간발생량은 600만 톤을 넘어섰다. 이러한 매립석탄

회의 처리를 위해서는 고가의 비용과 대규모 회처리 매립장 확보가 필요한 실정이다.

매립석탄회의 활용방안은 크게 2가지 방향으로 나눌 수 있으며 하나는 소량의 석탄회를 사용하더라도 높은 부가가치를 가질 수 있는 용도로의 활용이고, 또 하나는 부가가치는 낮아도 석탄회의 성질과 상태에 크게 좌우되지 않고 대량으로 활용하는 방향이다. 현재 석탄회의 재활용을 위하여 기존에 실시된 연구로는 석탄회 자원의 최적 활용 기술 개발연구(산업자원부, 2000), 성토재로서의 석탄회 이용방안 연구(한국전력공사, 1992), 폐석탄회를 재활용한 저장도 고유동 충전재의 특성(이용수, 2002), 화력발전소에서 부산되는 석탄회의 활용에 관한 실험적 연구(천병식 등, 1989) 등이 있으나, 기존의 연구들은 석탄회의 물리역

† 정희원, 인하대학교 사회기반시스템공학부 교수(E-mail : yoonyw@inha.ac.kr)

1) 비희원, GS 건설 기술연구소 선임연구원

2) 정희원, 대우건설, 인하대학교 대학원

학적 특성, 환경 영향적 평가, 국부적인 활용화 방안에 대한 다소 포괄적인 내용을 함유하고 있고 정적 및 동적특성에 대한 연구는 불충분한 실정이다. 본 연구에서는 석탄회 의 대량 활용방안을 중점적으로 연구하기 위하여 화력발전소 중 삼천포 화력발전소에서 발생하는 석탄회를 대상으로 시험하였다. 2007년 3월부터 시행된 “자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률(환경부, 2006)”에 석탄회는 지정 부산물로 지정되어 적극적인 자원재활용의 근거를 마련하게 되었으며, 일반토사 또는 건설폐재류를 50퍼센트 이상 혼합하여 성토재, 보조기층재, 도로기층재, 복토재 등의 일반토사 대체골재로 활용이 가능하도록 하였다. 따라서 회 처리장에 그대로 매립되고 있는 석탄회를 가공을 거치지 않은 상태에서 정적 및 동적 특성을 고찰하기 위하여 석탄회와 모래를 완전혼합 및 층별혼합 방식에 의한 체적비 50:50의 시료를 조성하여 시험하였다. 수행된 시험은 성토재로서의 특성을 고찰하기 위한 것으로 대형직접전단시험, NGI 단순전단시험, NGI반복단순전단시험, 투수시험 등이다.

## 2. 문헌고찰

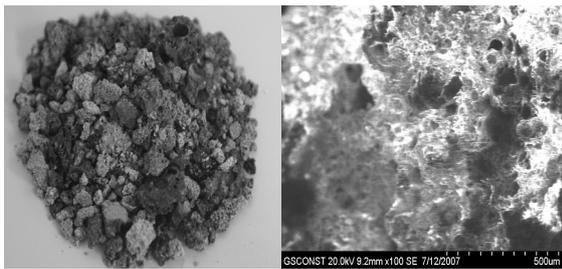
### 2.1 석탄회

석탄회는 석탄을 보일러에서 연소시킬 때 발생하는 부산물을 의미하며, 이 중 집진설비에 포집되는 것을 비회(fly ash)라 하고 보일러 저부에서 채취되는 것을 저회(bottom ash)라 한다. 삼천포 화력발전소의 석탄회는 상기

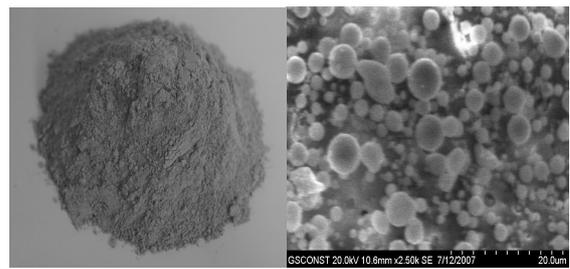
비회와 저회를 해수로 혼합하여 석탄회 처리장으로 슬러리 상태로 매립하고 있다. 산업자원부(2000)에 의하면 석탄회는 일반 토목재료에 비하여 단위체적중량이 작아서 경량특성을 가지고 있고 장기적으로 활성 반응하는 포졸란 특성을 가지고 있기 때문에 연약지반에서의 침하가 억제되어 결과적으로는 기초처리비를 절감할 수 있으며, 또한 지반 활동에 대한 하중경감, 매립재료 이용시 토압경감 등 구조물의 단면이 축소될 수 있는 등 많은 장점을 갖고 있다고 한다. 석탄회는 대부분이 회백색이나 미연탄소분이 증가함에 따라 점점 검은색을 띠고, 비중은 1.9~2.4범위이다. 석탄회 중 비회는 물과 접촉을 통해 수산화칼슘과 결합하여 불용성 경화물질인 실리카질 화합물을 생성함으로써 자경성을 나타낸다. 그러나 이러한 자경성은 무연탄 비회에서는 거의 발생하지 않는다(한국남동발전, 2005). 또한 환경적 평가로서, 채광석 등(2007)에 따르면 매립석탄회의 토양 및 지하수에 대한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그림 1에 비회와 저회에 대한 정밀사진을 나타내었으며, 표 1에 현재 석탄회가 활용되는 분야를 나타내었다.

### 2.2 액상화

석탄회 중 저회는 입자의 크기가 주로 사질토 크기에 해당되며, 사질토지반에 중요구조물 축조시 액상화에 대한 평가는 필수적으로 수반된다. 느슨하고 포화된 사질토 지반에 지진 등과 같은 급속한 반복하중이 가해지는 경우 순간적으로 비배수 상태에서 과잉간극수압이 발생한다. 이로 인해 토립자 상호간의 유효응력이 계속 감소된다. 이로 인



(a) 저회의 외관 및 SEM 사진



(b) 비회의 외관 및 SEM 사진

그림 1. 저회와 비회의 형상 분석

표 1. 석탄회의 현장 적용(오재현 등, 1999)

분야	시멘트 분야	건축 분야	토목 분야	농수산 분야
적용	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 시멘트 원료</li> <li>- 시멘트 혼화제</li> <li>- F/A 시멘트 혼화제</li> <li>- 레미콘 혼화제</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 인공경량 골재</li> <li>- 기와, 세라믹</li> <li>- 기포콘크리트</li> <li>- 시멘트 2차제품</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 아스팔트필러</li> <li>- 노반재</li> <li>- 노상재</li> <li>- 매립, 성토용</li> <li>- 충전재</li> <li>- Grout 공사</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 비료</li> <li>- Compost</li> <li>- 인공어초</li> </ul>

해 지반은 외력에 대한 저항력을 상실하게 되어 액체처럼 유동하게 되는데 이러한 현상을 액상화(liquefaction)라고 한다. 이 액상화 현상은 단일재하(monotonic loading)와 반복재하(cyclic loading)에 의해 모두 발생될 수 있으며, 두 경우 모두 지반의 대규모 변형 또는 액상화 이후의 침하 및 분사현상을 수반하게 되어 구조물과 인명에 큰 피해를 줄 수 있다. 액상화 현상(liquefaction phenomena)은 유동액상화(flow liquefaction)와 Cyclic mobility로 나뉘어진다.

유동액상화는 토체(soil mass)내의 정적 평형상태의 전단응력(정적전단응력)이 정상상태강도(steady-state strength)보다 큰 경우에 발생하는 현상으로서 정적전단응력과 반복전단응력 모두에 의해서 일어나며 경사면에서의 대규모 변형은 주로 유동액상화에 의해서 일어난다. 이 유동액상화는 유동과괴(flow failure)라는 결과를 가져오며 지진이 계속되는 동안이나 끝난 후에도 발생한다.

Cyclic mobility는 포화사질토가 일정한 함수비에서 반복하중을 받아서 일어나는 진행성 연화현상(progressive softening)으로서 정적전단응력이 정상상태강도보다 작은 상태에서 일어나며 반복전단응력에 의해서 일어난다. 이 변형은 지진이 계속되는 동안에 점차적으로 증가하면서 일어나며 물에 인접하고 있는 평지나 대단히 완만한 경사지반에서 발생하고 구조물이 있을 경우 큰 피해를 줄 수 있다. 이러한 Cyclic mobility는 뚜렷한 시작점은 없지만 영구변형이 누적해서 증가하고 크기는 정적응력의 크기와 지진동 지속시간에 의해서 좌우되며 느슨한 모래와 조밀한 모래에서 모두 일어날 수 있으나 밀도가 증가할수록 변형은 크게

감소한다. 액상화강도는 액상화시의 반복전단응력과 유효수직응력과의 비로 표시되며 이를 반복응력비(CSR, Cyclic Strength Ratio)라 한다. 반복응력비는 반복횟수가 증가함에 따라 감소한다.

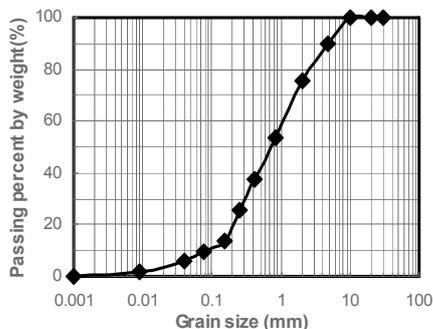
### 3. 재료 및 시험방법

#### 3.1 시료

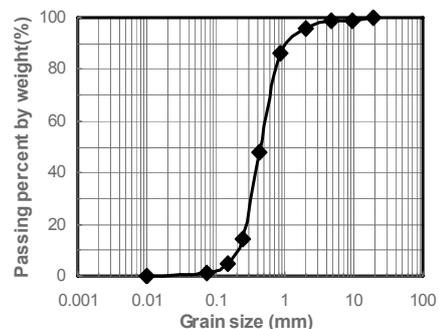
시료는 삼천포 화력발전소 제1,2 회처리장의 지표면하 1m의 시료를 채취하였다. 회처리장에는 비회와 저회가 함께 매립되어 있으며, 강우에 의해 지표근처에 있는 비회의 탈착이 발생하여, 채취된 시료는 저회의 특성이 두드러지게 나타났다. 현장에서 채취된 시료는 약 10%정도의 세립분을 함유하고 있으며 표 2에는 시료 특성, 그림 2(a)에 입도분포를 나타내었다. 입자의 모양은 모난 형태이고 비중( $G_s$ )은 2.33정도로 일반 모래의 비중 2.6~2.8보다 작게 나타났다. 또한 비소성이었으며 균등계수( $C_u$ )는 13.72, 곡률계수( $C_c$ )는 1.08로 통일 분류법으로는 SW에 해당되었다. 표준다짐시험에서의 높은 최적함수비는 석탄회 표면이 다공질로 구성되어, 일반모래의 수분 보유특성보다 높기 때문으로 판단된다. 저회와 공학적 특성을 비교하기 위한 모래(그림 2(b))는 인천해안지역에서 채취한 시료이며, 입도분포를 인위적으로 조절하지 않고 자연 상태 그대로의 입도분포를 유지하였다. 다짐시험은 KS F2312에 정해진 A 다짐방법을 적용하였으며, 최대건조단위중량과 최소건조

표 2. 석탄회와 모래의 물리적 특성

시료	$G_s$	$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{60}$	$C_u$	$C_c$	표준 다짐 시험		최대, 최소 건조단위중량		USCS
							$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	OMC (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{dmin}$ (kN/m <sup>3</sup> )	
(a)석탄회	2.33	1.07	0.3	0.078	13.72	1.08	11.64	32	-	8.1	SW
(b)모래	2.65	0.21	0.33	0.51	2.81	1.02	-	-	16.17	13.53	SP



(a) 석탄회



(b) 모래

그림 2. 시료의 입도 분포도

단위중량은 KS F 2345에 정한 방법에 의하여 구하였다.

### 3.2 실내시험

본 연구에서는 세립분 함유량 10%의 석탄회의 정적 및 동적 강도특성과 투수성을 고찰하기 위해서 그 비교시료로서 일반 모래를 선택하여 표 3에 나타난 실내시험을 수행하였으며 직접전단시험은 KS F 2343-1997의 규정을 적용하여 수행하였고 정적 및 동적시험은 1966년 Bjerrum과 Landva에 의해 처음 만들어진 NGI(Norwegian Geotechnical Institute) 타입의 DSSA(Direct Simple Shear Apparatus)를 1997년 NGI에서 사용이 용이하도록 개조한 장치를 이용하여 수행하였다. 기존의 직접전단시험에서는 미리 정해진 전단면을 따라 하중이 가해지게 되고 층별로 다른 재료로 이루어진 시료의 경우에 석탄회층과 모래층이 층별로 조성된 층별혼합시료 전체에 대한 강도를 측정하기에는 NGI 단순전단시험이 용이하기 때문에 이 시험을 채택하였다. 시험은 동일체적비로 모래와 석탄회를 각각 50%씩 완전 혼합한 시료와 동일체적비로 각각 50%가 되도록 층별로 구분하여 다진 시료 두 종류로 구분하여 시험하였다. 50% 모래 혼합은 2007년 3월부터 시행된 “자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률(환경부, 2006)”에 근거하였으며 이 법률에서 석탄회는 지정부산물로 일반토사 또는 건설폐재류를 50퍼센트 이상 혼합하여 일반토사의 대체골재로 활용하도록 되어 있다.

체적비 50:50으로 층별로 석탄회와 모래를 따로 조성한 것은 현장 성토 목적으로 시공시 완전히 혼합할 경우 별도

장비에 의해 혼합작업을 수행되어야 하는 시공성의 문제를 발생시킬 수 있으므로 따로 혼합공정이 필요치 않은 층별 시공을 하였을 때와의 결과를 비교하기 위한 것이다. 시험 항목에 대한 전체적인 요약은 표 3에 나타내었다. 여기서 2층 시료는 직경 6.675cm, 높이 1.70cm인 시료를 상부 1/2과 하부 1/2을 각각 석탄회와 모래로 전체체적의 1/2씩 나누어 다져 조성하였고 4층시료는 높이를 4등분하여 석탄회와 모래를 교대로 조성한 것이다.

## 4. 시험 결과 및 고찰

### 4.1 투수시험

본 연구는 석탄회의 투수성평가를 위하여 시료성형 방법을 완전혼합과 층별혼합으로 달리하여 실내에서 정수위 실험을 수행하였다. 그 결과를 표 4에 나타내었다.

시험을 수행한 결과 석탄회가 들어간 시료의 경우 모래에 비하여 약 80%정도 낮은 투수계수결과를 나타내었으며 이는 투수특성이 모래에 비해 좋지 않은 석탄회의 영향을 받았다고 판단된다. 그럼에도 KS F 2322 규정에 나타난 투수재료 사용할 시료의 투수계수 기준( $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$  이상)을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

### 4.2 대형전단시험

#### 4.2.1 석탄회

시료는 삼천포 화력발전소 매립장에서 채취한 석탄회를

표 3. 시험 계획

시험종류	투수시험	직접전단시험	정적단순전단시험	반복단순전단시험
시료	석탄회 (100%)	석탄회	완전혼합시료 (체적비 50:50)	석탄회 (100%)
	모래(100%)			모래 (100%)
	석탄회(50%)와 모래(50%)의 혼합 (혼합)			석탄회(50%)와 모래(50%) (혼합)
	석탄회(50%)와 모래(50%) (상층 석탄회)	모래	2층 시료 (체적비 50:50)	석탄회(50%)와 모래(50%) (혼합)
	석탄회(50%)와 모래(50%) (하층 석탄회)			석탄회(50%)와 모래(50%) (4 층)

표 4. 시료의 투수계수 비교

시료	모래	석탄회 (세립분 10%)	완전혼합	층혼합 (석탄회 상층)	층혼합 (석탄회 하층)
투수계수 (cm/sec)	0.0715	0.0127	0.0143	0.0144	0.0154

\* 완전혼합 및 층혼합 모두 체적비 석탄회50:모래50 이며 석탄회는 세립분10% 함유

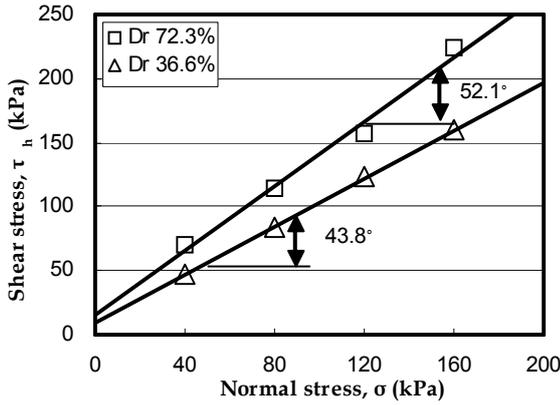


그림 3. 석탄회의 Mohr-Coulomb diagram

표 5. 석탄회의 강도정수

상대밀도(%)		36.6	72.3
강도정수	점착력(kPa)	9.5	15.6
	내부마찰각(°)	43.8	52.1

대형직접전단시험기(30cm×30cm)의 상자에 상대다짐도 80%, 90%상태로 조성하였고, 이는 상대밀도 36.6%, 72.3%로 각각 환산되었다. 이를 수직응력 40kPa, 80kPa, 120kPa, 160kPa를 가한 상태에서 전단시험을 수행하였으며 그 결과를 그림 3에 나타내었고 정량적 데이터를 표 5에 나타내었다.

그림 3에 나타난 바와 같이 상대밀도에 따른 석탄회의 내부마찰각은 상대밀도에 따라 43.8°~52.1°의 범위를 나타내어 일반모래에 비하여 내부마찰각이 비교적 큼을 알 수 있다. 모래와의 비교는 다음 절에 언급하였다.

#### 4.2.2 모래

모래는 상대밀도 40%, 55%, 70%로 조성한 후 수직응력 40kPa, 80kPa, 160kPa, 320kPa에 대하여 전단시험을 수행하였으며 상대밀도의 변화에 따른 강도정수의 변화를 그림 4에 나타내었고, 그 정량적 데이터를 표 6에 나타내었다.

그림 4에 나타난 바와 같이 전단응력-수평변형을 곡선에서 최대전단응력을 구하여 각각의 수직응력에 대한 최대전단응력을 Mohr diagram에 나타낸 후 선형회귀분석에 의하여 상대밀도에 따른 내부마찰각을 구하였으며 35.5°~41.6°의 범위를 갖는다. 실험을 수행한 결과 상대밀도 70%에 가까운 상대밀도 72.3%의 석탄회와 상대밀도 70%의 모래를 비교하였을 때 강도정수는 마찰각의 경우 석탄회가 모래에 비하여 약 18% 크게 나왔으며, 점착력의 경우 5%작게 나왔지만 전반적으로 석탄회의 강도특성이 좋은 것으로 나타났다. 이는 석탄회의 입자의 모양에 기인된다고 판단된다. 모래의 경우 입자의 모양이 둥근데 비해 채취된 석탄회는 대부분이 저회로 이루어져 있는 시료로 그

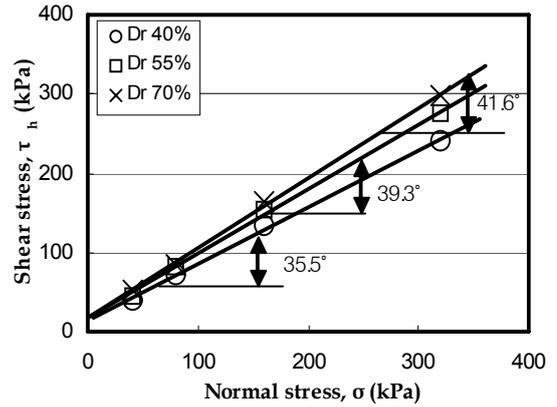


그림 4. 모래의 Mohr-Coulomb diagram

표 6. 모래의 강도 정수

상대밀도(%)		40	55	70
강도정수	점착력(kPa)	14.65	16.45	16.41
	내부마찰각(°)	35.5	39.3	41.6

림 1(a)의 저회에 대한 SEM 사진에서 나타나듯이 생성특성상 불규칙한 모난 형상의 입자를 갖기 때문이다.

#### 4.3 NGI 정적전단시험

본 시험은 석탄회의 토목재료로서의 사용가능성을 모색하기 위하여 1966년 Bjerrum과 Landva에 의해 만들어진 NGI(Norwegian Geotechnical Institute) 타입의 DSSA(Direct Simple Shear Apparatus)를 사용하여 시험을 수행하였다. 시료 성형은 노건조시킨 시료를 인위적으로 입도를 조성하여 계획한 실험 목록에 맞춰서 시료를 성형하였다. 직경 6.675cm, 높이 1.70cm의 공시체를 준비하기 위해 보강 고무 멤브레인(reinforced rubber membrane)안에 깔때기를 이용하여 시료를 서서히 뿌려 넣은 후에 시료의 상단을 평평하게 고른다. 그 후에 다짐봉으로 요구하는 높이가 잘 맞도록 다지고 나서 top cap을 열고 공시체가 미세한 충격이나 흔들림이 없도록 주의하면서 시료성형 주변장치들을 제거한다. 이렇게 시료성형이 끝나면 연직하중 트랜스듀서(vertical transducer)를 주춧돌(pedestal)에 연결하고 시험 기기에 안치시키게 된다. 그림 5는 공시체를 성형하는데 필요한 장치이다.

시험은 상대밀도 40%, 50%, 60%에 대해서 각각 수행하였으며 수직응력은 각각 50kPa, 100kPa, 150kPa로 하였다. 당초 대형전단시험과 비교하기 위하여 상대밀도 40%, 55%, 70%로 계획하였으나 저회의 입자가 모난 상태로 조밀한 다짐을 수행할 경우 멤브레인이 자주 찢어지는 어려움이 있어 밀도를 60%로 낮추어 조성하였다. 전단시험은 평균 0.3mm/min의 속도로 전단변형을 가하였으며, 최대수평변

위는 변형률 25%로 하였다. 혼합방법에 따른 시험결과에 대한 정적강도특성의 비교를 그림 6에 나타내었고, 그 데이터를 표 7과 표 8에 나타내었다.

시료간의 강도정수를 비교하기 위하여 모래와 석탄회의 완전혼합시료와 층혼합시료에 대한 시험 결과를 나타낸 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 같은 유효응력에서 전단 강도를 비교하였을 때 층별 시료의 경우 상대밀도가 작을 때는 완전혼합 시료와 비슷한 강도특성을 보였다. 상대밀도가 증가함에 따라 두 시료 모두 강도특성이 증가하였으

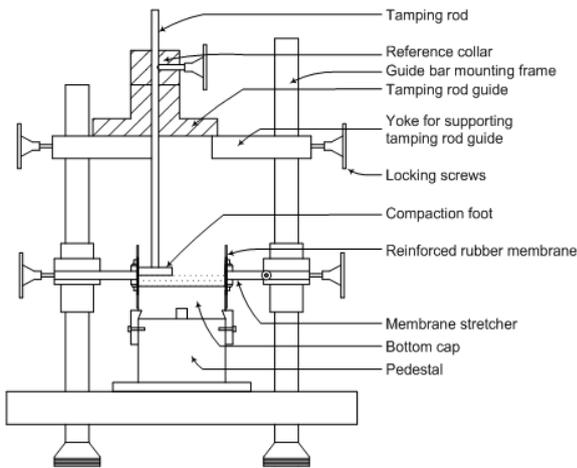


그림 5. NGI 공시체 성형 장치

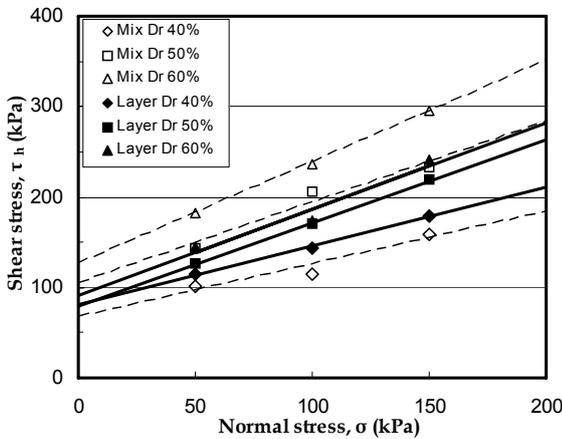


그림 6. 시료조성방법에 따른 파괴포락선

표 7. 상대밀도에 따른 완전혼합시료의 강도정수

상대밀도(%)		40	50	60
강도정수	점착력(kPa)	66.7	104.8	125.8
	내부마찰각(°)	30.2	41.7	48.3

표 8. 상대밀도에 따른 2층 혼합시료의 강도정수

상대밀도(%)		40	50	60
강도정수	점착력(kPa)	80.83	80.13	90.3
	내부마찰각(°)	32.9	42.6	43.8

나 층혼합시료는 증가폭과 양이 크지 않았고 완전혼합 시료에 비하여 강도특성이 더 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 시료가 두 층으로 나누어져 있을 때 시료의 파괴는 두 개 층의 시료 중 강도특성이 더 낮은 모래에서 중점적으로 일어나고 파괴가 진행되면서 입자간의 결속력 또한 낮아져 모난 입자의 석탄회가 갖는 맞물림에 의한 강도 특성 또한 발현되기 힘들기 때문이라 판단되며 완전혼합 시료의 경우에는 석탄회의 모난 입자사이에 모래입자가 완전히 맞물려 있어 전단에 대한 저항이 크게 나타난 것으로 보인다. 층으로 나누어진 시료의 경우 강도가 작은 모래가 전체 강도특성을 지배하는 것과는 달리 완전혼합시료는 맞물림에 의한 강도특성 역시 상대밀도가 증가함에 따라 크게 증가한 것으로 판단된다. 그렇지만 완전혼합시료와 층시료는 상대밀도 증가에 따른 전단강도 특성이 유사하고 층시료는 완전혼합시료에 비해 상대밀도 증가에 따른 강도증가는 둔화되는 경향이지만 순수 모래에 비하여 더 좋은 강도특성을 갖기 때문에 설계에서 요구되는 전단특성을 충족하고 현장에서의 빠른 시공이 요구되는 점을 감안했을 때 층시료는 혼합을 위한 Batch Plant와 같은 부대 설비가 필요 없는 장점이 있다.

#### 4.4 NGI 단순반복전단시험

지진발생시 지반에서 발생하는 대부분의 변형은 주로 반복되는 전단파에 의해 발생된다.

이러한 경우 지반에 발생하는 변형 및 응력조건은 그림 7에 나타낸 바와 같이 전단면에 작용하는 연직응력은 일정하게 유지되는 반면에 전단응력은 전단면에 반복적으로 작용한다고 볼 수 있다. 이러한 응력조건은 실험실에서 단순전단시험을 통해 가장 잘 반영될 수 있다. 단순전단조건시 초기액상화의 발생은 반복삼축조건과 마찬가지로 과잉간극수압이 시료 내 유효응력과 같아지는 시점, 즉 유효응력이 0이 될 때 액상

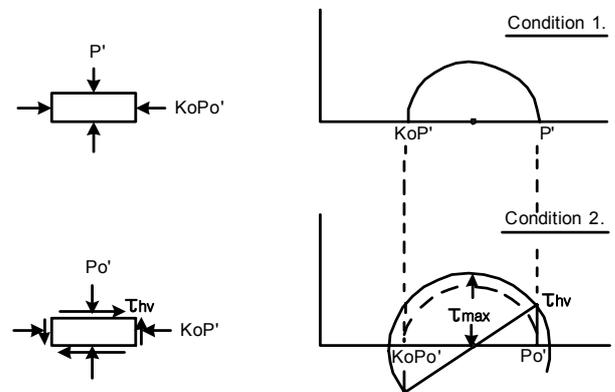


그림 7. 지진시 지중의 지반요소에 대한 이상화된 응력상태(Seed and Lee, 1967)

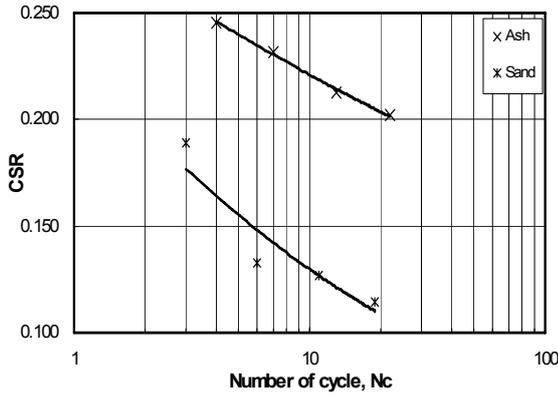


그림 8. 모래와 석탄회의 CSR값(Dr=60%)

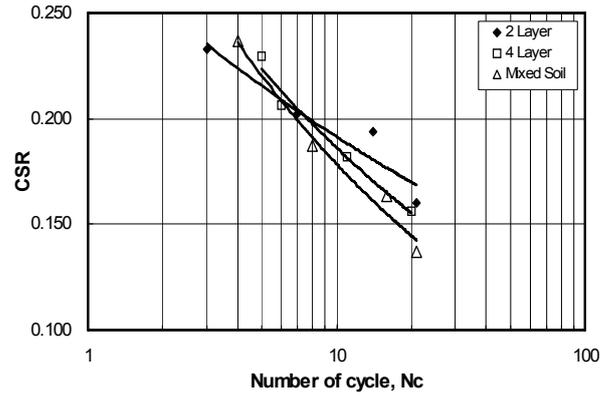


그림 9. 혼합방법에 대한 시료의 CSR값(Dr=60%)

표 9. 반복횟수 10일때 석탄회와 모래의 CSR값(Dr=60%)

시료	10회반복시 CSR
석탄회(100%)	0.221
모래(100%)	0.129

화가 발생하는 것으로 간주한다. 단순전단시험의 경우 양진폭 전단변형율이 7.5%일 때 초기 액상화가 발생한다고 간주할 수 있으며 이것은 반복삼축시험에서 양진폭 축변형율 5%에 해당되는 값이다(Vaid와 Sivathayalan, 1996). 반복응력은 모든 공시체에 10초당 1회씩 작용되도록 조절하였고 액상화는 양진폭 전단변형율이 7.5%일 때를 기준으로 하였다. 이 때 반복응력비(CSR, Cyclic Stress Ratio)는 실험에서 발생하는 반복전단응력과 압밀유효연직응력의 비로 나타낼 수 있다. 100kPa의 압밀유효연직응력으로 압밀을 한 후에 시료조성 방법에 따라서 초기상대밀도를 60%로 인위적으로 조성한 모래(100%), 석탄회(100%), 동일체적비의 석탄회(50%)와 모래(50%)의 완전혼합시료, 석탄회와 모래를 교대로 한 2층 및 4층 시료로 나누어 일정 체적 조건에서의 반복단순전단시험을 수행하였다. 그림 8에 석탄회와 모래의 반복전단횟수 10회에 대한 반복응력비를 나타내었으며, 그림 9에는 혼합방법에 따른 시료의 반복전단횟수 10회에 대한 반복응력비를 나타내었다.

그림 8과 같이 모래에 대한 반복응력비는 0.129이며 석탄회의 경우 0.221이며, 이를 표 9에 나타내었다. 혼합시료의 경우 그림 9와 같이 완전혼합시료, 4층시료, 2층시료의 반복응력비는 0.174, 0.186, 0.191이었으며 이를 표 10에 나타내었다. 혼합시료는 석탄회와 비교하였을 경우 상대적으로 작은 값을 보였으나 이는 동적강도가 석탄회보다 작은 모래의 영향을 크게 받은 것으로 보이며 시료간의 차이를 비교하였을 때 CSR라인의 기울기는 혼합시료의 경우 더 급격하게 기울어지는 경향을 보였으며 반복응력비는 반복횟수의 증가에 따라 작아지는 경향을 나타내고 있으나 그

표 10. 혼합 방법에 따른 시료의 반복횟수 10일때의 CSR값(Dr=60%)

시료	10회반복시 CSR
석탄회(50%)와 모래(50%) (혼합)	0.174
석탄회(50%)와 모래(50%) (4 층)	0.186
석탄회(50%)와 모래(50%) (2 층)	0.191

차이는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 층별 혼합에 의한 시료의 동적특성에서도 큰 차이는 보이지 않음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 삼천포 화력발전소에서 현재 폐기되고 있는 석탄회의 활용을 위하여 주로 저회로 구성된 석탄회의 정적 및 동적 강도특성과 투수특성을 연구할 목적으로 체적비 50:50으로 모래와 석탄회를 완전혼합 및 층별혼합한 시료를 대상으로 투수시험, 대형전단시험, NGI형 시험기를 이용한 단순전단시험과 단순반복전단시험을 수행하여 다음의 결과를 도출하였다.

- (1) 상대밀도 70%에 대한 직접전단시험을 수행한 결과 같은 상대밀도와 유효압밀응력에 대하여 석탄회는 균등질의 모래보다 강도특성이 우수한 것으로 나타났으며 이는 시료입자의 모양에 따른 것으로 판단된다.
- (2) 동일한 상대밀도에 대한 모래와 석탄회의 혼합방법을 달리한 시료에 대하여 투수시험을 하였다. 혼합방법을 변경한 시료에 대하여 비교하였을 경우 석탄회가 첨가된 시료의 경우 일반모래에 비하여 낮은 투수계수를 보였으나 현행 기준을 적용하였을 경우 투수재로서 조건을 만족하였으며 투수특성이 낮은 것은 정제되지

않은 비회의 영향을 받는 것으로 판단되었다.

- (3) 동일한 초기 상대밀도로 조성된 시료에 대한 정적특성을 비교한 결과 동일체적비의 완전 혼합된 석탄회와 모래는 상대밀도가 낮을 경우 2층으로 층별 조성한 동일체적비의 혼합시료보다 더 큰 강도특성을 보였다. 층시료는 상대밀도가 증가할수록 강도특성의 변화는 크지 않았으나 완전혼합시료의 강도특성은 눈에 띄게 증가하는 경향을 보였다.
- (4) 같은 상대밀도에서 석탄회의 반복응력비, 즉 동적전단 특성이 모래보다 더 큰 것으로 나타났다. 모래와 석탄회 혼합시료는 전체적으로 순수 석탄회보다 작은 동적 강도를 보였다. 반복응력횟수가 증가함에 따라 혼합시료는 CSR곡선의 기울기가 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 조성방법에 따른 시료간의 동적특성은 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다. 따라서 현장에서의 시공의 용이성을 감안하여 혼합시공보다는 층별 시공 방법이 유리할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 인하대학교 연구비 지원으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 산업자원부 (2000), *석탄회 자원의 최적활용기술 개발연구*. 기반개량재로서 활용기술을 중심으로, pp. 3~4.
2. 오재현, 오성원 (1999), 우리나라 석탄회의 이용현황, *자원리 사이클링*, 제8권 제1호, pp. 60~65.
3. 이용수 (2002), *폐석탄회를 재활용한 저장도 고유동 충전재의 특성*, 석사학위논문, 건국대학교, pp. 22~23.
4. 채광석, 이훈연, 윤여원, 김근수 (2007), 경량성토재로서 매립 석탄회의 활용을 위한 기초연구, 2007년 *대한토목학회 학술 발표회 논문집*, pp. 814~817.
5. 천병식, 김양선 (1989), 화력발전소에서 부산되는 석탄회의 활용에 관한 실험적 연구: 도로포장재를 중심으로, 한양대학교 산업과학연구소, pp. 7~10.
6. 한국남동발전 (2005), *매립석탄회 재활용 기술개발*, 삼천포화력본부, pp. 20~30.
7. 한국전력공사 (1992), *성토재로서의 석탄회 이용방안 연구*, p. 462
8. 환경부(2006), 자원의절약과재활용촉진에관한 법률 시행규칙, 별표 1, 환경부령 제211호.
9. Bjerrum, L. and Landva, A. (1966), Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay, *Geotechnique*, Vol. 16, No. 1, pp. 1~20.
10. Seed, H. B. and Lee, K. L. (1967), Drained strength characteristics of sands, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 93, No. 6, pp. 117~141.
11. Vaid, Y. P. and Sivathayalan, S. (1996), Static and Cyclic Liquefaction Potential of Fraser Delta Sand in Simple Shear and Triaxial Tests, *Journal of Canadian Geotechnical Engineering*, Vol. 33, pp. 281~289.

(접수일: 2007. 12. 4 심사일: 2008. 1. 11 심사완료일: 2008. 9. 26)