

## 성토재 적용을 위한 경량폐기물의 기본물성 및 압축특성 연구

### A Study on the Basic and Compression Characteristics of Lightweight Waste for Use as Fill Materials

이 성 진<sup>1</sup> Lee, Sung-Jin

김 윤 기<sup>2</sup> Kim, Yun-Ki

고 태 훈<sup>3</sup> Koh, Tae-Hoon

이 수 형<sup>3</sup> Lee, Su-Hyung

신 민 호<sup>4</sup> Shin, Min-Ho

#### Abstract

This is a fundamental research on use as fill material of lightweight waste such as bottom ash and tire shred. We carried out the test for particle size distribution, specific gravity, density, shear strength, permeability and vertical compression settlement, considering water content change and temperature effect of several waste materials. Bottom ash, which is lighter than soils, has similar permeability and particle size distribution to those of weathered soils. But permeability may differ depending on the particle size distribution. The shear strength aspect of bottom ash and tire shred mixed materials are similar to that of natural fill materials. In the 1-D vertical compression settlement test, we could be assured that bottom ash and tire shred mixed materials showed similar compression settlement to that of sand under actual vertical stress. Furthermore, materials including bottom ash showed smaller compression settlement than that of weathered soils in the long-term settlement test under wetting and freezing-thawing condition.

#### 요 지

본 연구는 석탄회와 페타이어, 그리고 두 재료의 혼합재료 등 경량 폐기물의 성토재 활용을 위한 기본적인 연구로서, 이들 재료의 입도분포, 비중, 다짐밀도, 전단강도, 투수특성 등 기본물성 및 지반공학적 물성 평가를 위한 실험을 수행하였으며, 현장 조건에 따른 함수비와 온도변화를 고려한 1차원 압축 침하특성 등을 평가하였다. 석탄회 재료의 경우 대표적인 성토재료인 풍화토와 유사한 입도분포를 가지면서, 경량의 특징을 확인할 수 있었다. 그러나 강도측면에서는 풍화토와 유사한 수준을 보이고, 투수특성은 입도에 따라 매우 큰 차이를 나타냈다. 페타이어가 포함된 재료들의 경우에도 강도값은 성토재로 충분한 값을 보였다. 이들 재료의 1차원 수직압축특성 실험 결과에서도 일정 수직응력 수준 하에서는 모래와 유사한, 비교적 압축성이 낮은 재료로 평가할 수 있었으며, 함수비변화와 반복적인 동결융해조건 하에서는 석탄회가 포함된 재료들이 풍화토 및 풍화토-페타이어 혼합재료에 비해 낮은 압축침하거동을 보였다.

**Keywords :** Bottom ash, Basic characteristics, Compression characteristics, Lightweight fill, Tire shred

1 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, KRRI, geolsj@krii.re.kr, 교신저자)

2 정회원, 삼성물산 건설부문 대리 (Member, Samsung C&T Engrg., & Construction Group)

3 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, KRRI)

4 정회원, 한국철도기술연구원 수석연구원 (Member, KRRI)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

## 1.1 연구 배경

현재 폐자원의 건설분야 활용은 세계적 추세이며, 국내에서도 천연골재 채취로 인한 자연훼손방지, 토취장 확보문제 해결, 천연골재의 수급난 해결 등을 위해 자원순환형 지반재료의 활용이 요구되고 있다. 특히 폐타이어와 석탄회는 그 발생량의 급증에 따라 야적장 및 회사장 확보에 어려움을 겪고 있다.

먼저 석탄회의 경우, 국내에서 2005년 말 현재 약 600만톤이 발생되고 있으며, 이 중 재활용량은 약 350만톤으로 재활용률이 약 58%정도에 머무르고 있다. 석탄회발생량 중 약 15-25%를 차지하는 저회(Bottom Ash)는 대부분 매립되고 있다. 그러나 이러한 석탄회를 매립하기 위한 회처리장의 용량이 절대 부족한 상황으로 대부분의 화력발전소는 새로운 회처리장 건설과 관리에 많은 비용을 지불하고 있으며, 자연환경 훼손에 따른 환경민원이 발생되고 있다. 또한 당진, 태안, 보령, 하동, 영흥 등에 추진 중인 석탄화력발전소의 건설로 인해 향후 약 800만톤까지 석탄회의 발생이 증가할 것으로 예상되고 있으나 제철설비 증가에 따라 시멘트를 50%까지 대체할 수 있는 슬래그(Slag Powder)가 증가되고 있으며 건설경기 침체로 수요가 감소하는 등 석탄회의 수요는 지속적으로 감소 추세에 있다. 이러한 현상은 경제성장과 비례하여 미국, 일본, 영국, 독일 등 선진국에서도 경험하고 있는 현상이다.

폐타이어도 전 세계적으로 매년 수십억 개에 달하는 양이 발생되고 있으며, 미국의 경우 매년 5천만 개가 발생한다고 보고되고 있다(Garga and O'Shaughnessy, 2000). 국내도 2007 환경통계연감에 따르면 폐타이어의 발생이 지속적인 증가추세에 있으며 2006년 현재 23,689,000개에 이르고 있다. 또한 이러한 증가 추세는 계속될 전망이다. 한편 폐타이어의 회수비율은 약 40-80%로 전량 수거되지 못하고 있으며, 야외 적치 등으로 미관을 해칠 뿐 아니라 각종 병원체의 전달 매개체인 동물의 서식지 역할을 하게 되어 여러 가지로 사회적 문제를 야기하고 있다(윤여원, 2004). 최근 폐타이어의 발생량과 함께 재활용량의 증가도 계속되고 있다. 그러나 현재 재활용의 약 70%가 시멘트 킬른에서 소각원료로 활용되면서 석탄이나 갈탄을 연료로 활용한 시멘트에 비해 납, 아연, 카드뮴 등의 중금속이 수백배 포함되어 건설 후 심각한

2차 환경문제의 야기가 지적되고 있다. 따라서 보다 환경오염을 줄일 수 있고 대량으로 활용할 수 있는 분야의 개발과 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

## 1.2 국내외 연구동향

미국의 경우, 1995년 대규모 타이어 야적장에서 발생한 화재를 계기로 폐타이어의 대규모 활용을 위한 "General Guidelines for All Tire Shred Fills(FHWA)"이 제정되었으며 이후 "ASTM D 6270 Design Guideline"에 채택되었다. 특히 워싱턴 도로국(WSDOT)에서는 최근 30년 동안 연약지반 위에 도로성토시공에 있어서 안정성 확보를 위하여 경량재료인 폐타이어를 사용하여 왔으며, 미네소타의 경우 50개소 이상의 성공적인 시공실적을 보유하고 있다. 또한 폐타이어와 모래 혼합재료에 관한 지반공학재료로서의 성능에 관한 연구가 Salgado 등(2003), Zornberg 등(2004a, 2004b) 등 여러 연구자들에 의해 수행된 바 있으며, 폐타이어와 석탄회를 활용한 지반공학 특성에 관한 연구가 다수 진행되어 오고 있다. 그러나 국내의 경우, 사회적으로 폐자원 활용에 대한 중요성은 인식되어지고 있으나, 인식에 비해 지반공학재료로서의 대규모 활용에 대한 연구개발과 활용실적은 매우 부족한 실정이다. 폐타이어 재료에 대해서 수행된 대표적인 연구사례로서는 폐타이어를 이용한 옹벽뒤채움과 철도방진재료, 지반보강재료의 활용연구가 윤여원 등(2004)에 의해 수행되어 기존 재료와 공학적, 환경적, 경제적 측면에서 비교했을 때 충분히 지반공학 재료로서 활용 가능하다는 결론을 제안한 바 있다. 석탄회의 경우에는 1980년 대부터 비회와 저회를 적정비율 혼합해서 도로성토재료 활용하고자 하는 연구결과(천병식 등 1990, 1992)를 비롯하여 연직배수재료로서의 저회의 활용연구(고태훈 1997), 건설재료로서의 토질공학적 특성에 대한 연구(이영생 등, 2000) 등 상대적으로 연구 활동은 활발하나 그 역시 지반공학재료로서의 활용은 제한적이다.

따라서, 본 연구에서는 석탄회와 폐타이어, 두 가지 재료의 혼합재료 등 경량 폐기물의 성토재료로서의 활용을 위한 기본적인 연구로서, 이들 재료의 입도분포, 비중, 상대다짐밀도, 전단강도, 투수특성 등 기본물성 및 지반공학적 물성 평가를 위한 실험을 수행하였으며, 현장 조건에 따른 함수비와 온도변화를 고려한 1차원 압축 침하특성 등을 평가하였다.

## 2. 기본 물성

대표적 경량 폐기물인 석탄회와 페타이어를 성토재료로 사용하기 위해 먼저 기본 물성 실험을 수행하여 기존 성토재료와 비교 평가하였다. 본 연구에서는 태안 화력발전소에 매립된 석탄회를 실험 재료로 사용하였으며, 타이어는 페타이어 수거 및 가공업체를 통해 공급하였다. 페타이어의 경우 실험에 적용할 수 있는 크기로 가공하면 거의 균일한 특성을 보일 것으로 예상되며, 본 연구에서는 실내실험용의 경우 최대 크기 50mm 입도의 재료를 사용하였다. 그러나 석탄회의 경우, 재료의 원산지, 유/무연탄, 비회와 저회의 혼합비율 등에 따라 재료의 특성이 매우 크게 달라질 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 재료원에서 5mm이하로 정제한 석탄저회(이하 BA)와 매립된 상태 그대로의 석탄회(이하 RBA)를 따로 분석하였다. 또한 페타이어와 기반재료의 혼합재료에 대한 검토도 수행하였으며, 이상과 같이 본 연구에 사용된 경량폐기물 재료를 정리하면 다음 표 1과 같다(이하에서는 재료명을 표의 영어 약자 표기로 함).

### 2.1 입도분포

그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 본 연구에서 사용된

표 1. 대상 폐기물 표시 및 설명

표기	재료	비고
BA	5mm이하로 스크린된 석탄저회	
RBA	매립장의 매립회	
TBA	Tire shreds-BA 혼합재료	부피비 (50:50)
TRBA	Tire shreds-RBA 혼합재료	부피비 (50:50)
TWS	Tire shreds-WS 혼합재료	부피비 (50:50)
WS	풍화토	
TS	Tire shreds-Sand 혼합재료	부피비 (50:50)
Tire Shred	Tire shreds(조각)	50mm이하

표 2. 재료별 입도분포 특성

Materials	Classification USCS	Particle size distribution		
		No. 200 passing (%)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>
WS	SM	31.4	11.0	0.8
RBA	SM	42.7	15.1	0.3
BA	SP	4.8	12.1	0.6
Sand	SP	2.85	1.77	1.11
Tire Shred	GP	-	1.35	0.99
TBA	SP	4.1	22	0.59
TS	SP	1.9	1.93	0.95

RBA와 BA는 통일분류법으로 각각 SM과 SP로 분석되었으며, 200번체 통과량은 각각 42.7%와 4.8%의 결과를 보였다. 앞에서 설명되었듯이 본 연구에서 사용된 BA는 5mm이하로 스크린된 석탄회이고 RBA는 임의의 지점에서 매립된 상태의 석탄회를 실험에 사용하였으나 같은 현장에서도 큰 입도 차이를 보여주고 있다. 즉, 주로 큰 입자인 저회(Bottom Ash)가 포함된 경우에는 풍화토보다는 모래에 가까운 특성을 보였으며, 세립분, 즉 비회(Fly Ash)가 많이 포함된 석탄회의 경우에는 풍화토에 가깝거나 경우에 따라서는 이보다 더 세립토의 경향을 보이는 것으로 평가할 수 있었다. 이러한 경향은 기존 연구 결과에서도 유사한 내용을 확인할 수 있었으며, 저회의 입도에 대한 국내의 주요 문헌 내용을 정리하면 다음과 같다. 먼저 입경이 모래입자와 비슷하며(채광석, 2007), 콘크리트용 잔골재의 표준입도 범위와도 비슷하고(송민섭 등, 2003), 대체로 모래-잔자갈 범주(차동원 등, 1999; Huang, 1990; Kim, 2003)에 포함되는 것으로 제시되고 있다. 그리고 4.75mm 이상의 입자는 0-12% 이상으로 전체적으로 거친 입도를 형성하고 있으며(김강덕과 강승구, 2007), 0.425-4.75mm의 입자의 분포로

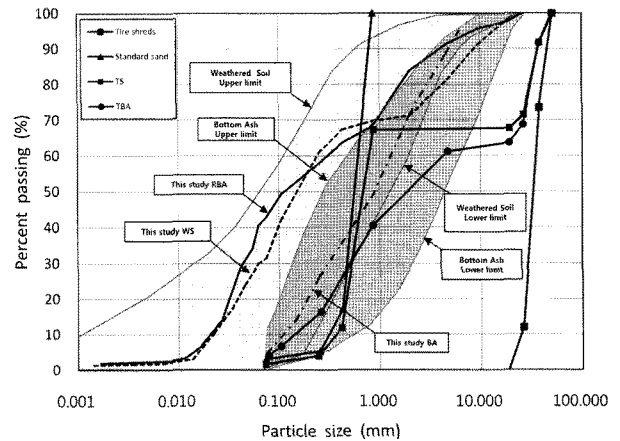


그림 1. 재료들의 입도분포 특성

표 3. 석탄회 비중 관련 문헌자료

원산지	유/무연탄	Bottom Ash	Fly Ash	Reference
태안	확인불가	1.98	2.14	원종필과 이우수(2001)
서천	무연탄	1.97		이종호 외(2002)
삼천포	유연탄	1.9 ~ 2.4		한국남동발전(2006)
당진	확인불가	2.32		도영곤 외(2009)
삼천포	유연탄		1.93 ~ 2.3	차동원 외(1999)
보령	유연탄	2.28 ~ 2.31		이영생 외(2000)
영동	무연탄	2.12 ~ 2.17	2.12 ~ 2.17	천병식(1990)
삼천포	유연탄	2.33		윤여원 외(2000)
보령	유연탄		2.04 (BA20%)	이병식과 정경순(2001)
영월	무연탄	2.32	2.23	천병식(1998)
서천	무연탄	2.24	2.33	천병식 등(1989)
호남	확인불가	2.56	2.56	정승용과 김수삼(1991)
영동	무연탄	2.43	2.40	홍성완 등(1992)
영월	무연탄	2.43	2.23	Kim(2003)
삼천포	유연탄	2.39	1.99	Seals et al.(1972)
보령	유연탄	2.17		Huang(1990)
서천	무연탄		2.33	
삼천포	유연탄	2.12 ~ 2.17		
서천	무연탄	2.24 ~ 2.30		
보령	유연탄	2.05 ~ 2.34		
확인불가	확인불가	1.6 ~ 2.6		
확인불가	확인불가	2.0 ~ 2.6		
확인불가	확인불가	1.9 ~ 3.2		

불 때 크기의 관점에서 인공모래로 활용 가능하다. 또한 저회는 매립위치에 따라 비회(FA)의 혼합율이 달라 위치마다 차이가 있다(홍성완 등, 1992). 따라서 석탄회의 경우 입도에 따른 기본물성이나 역학적 물성차이가 크게 발생할 수 있으므로 사용 재료와 목적에 따라 입도분포에 대한 사전검토가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

## 2.2 비중 및 다짐특성

저회의 비중은 화학적 성분조성 뿐 아니라 물리적 외형(appearance)에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Huang, 1990; Kim, 2003). 저회의 입자들은 다공질의 모난 형태로, 대부분의 흙(2.2 - 2.8)보다 낮은 비중을 갖고 있으며 산화철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 성분이 높은 저회일수록 큰 비중을 갖는다. 다공성입자의 경우 비중이 1.6보다 작은 경우도 보고되고 있다(Kim, 2003). 국내외 여러 연구자들에 의해 수행된 석탄회의 비중시험 결과는 다음 표 3과 같다.

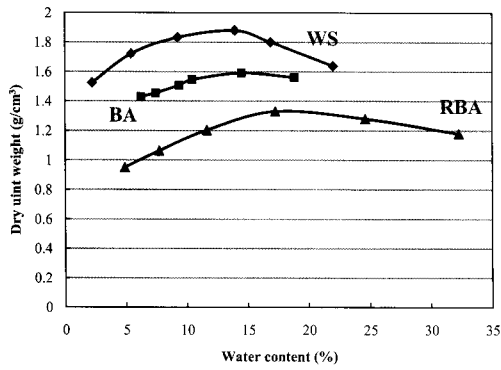
페타이어의 비중은 기존의 연구결과(Manion et al., 1992;

표 4. 비중 실험 결과

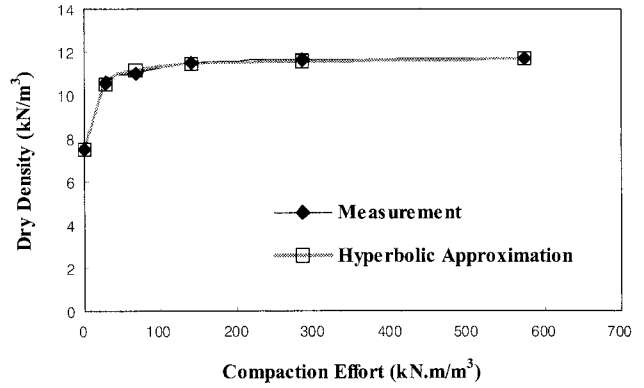
	저회(BA)	주문진 표준사	타이어 슈레드
Gs	2.22	2.63	1.26

Edil and Bosscher, 1992;1994; Humphrey et al., 1993; Zornberg et al., 2004a; 2004b)에서 입자 크기와의 상관 없이 1.05에서 1.27의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 본 연구에서도 실험 대상 재료에 대한 비중 시험을 수행하였으며, 그 결과는 다음 표 4와 같이 기존 연구결과와 비슷한 수준으로 확인할 수 있었다.

WS, RBA, BA재료는 일반 토사재료에서 수행하는 방법인 수정다짐시험을 통해 최대건조단위중량과 최적함수비를 구할 수 있었다. 그러나 재료가 큰 페타이어조각이나, 이를 포함한 재료들(TBA, TS)은 전통적인 다짐 방법에 적용될 수 없어, 대형 타격식 다짐장비를 이용해 다짐 에너지에 따른 건조밀도의 경향으로 최대건조단위중량을 산정하였다. 다짐실험결과와 기존 문헌에 제시된 다른 지역의 석탄회 재료에 대한 결과를 표 5에 정리하였다. 풍화토(WS)의 최대건조단위중량은 18.4(kN/m<sup>3</sup>)으로 나타났으며, 이때 최적함수비는 14%이다. 반면 석



(a) WS, BA, RBA



(b) TBA

그림 2. 다짐시험 결과

표 5. 재료별 최대건조단위중량과 최적함수비

시료	최대건조단위중량 $\gamma_{d,max}$ (kN/m³)	최적함수비 OMC (%)	석탄회 원산지	참고 문헌
WS	18.4	14.0	-	This study
BA	15.6	15.5	태안	
RBA	13.1	18.3	태안	
TBA	11.8	-	태안	
TS	15.0	-	-	
Tire Shred	7.9	-	-	-
BA	15.0	18.95	영월	천병식(1998)
	16.7	16.96		
	14.6	25.2	영월	장명순 등(1996)
	15.3	17.3		
	14.6	15.4	서천	고용일(1992) 박흥규(1992)
	13.3	27.2	호남	
	17.0	16.2	영동	
	15.3	17.3	영월	
	13.4	27.4	삼천포	홍성완 등(1992)
	14.6~14.9	16~17	서천	
	11.8~12	25~28	삼천포	
	11~11.2	31.2~34.7	보령	Seals et al(1972) and Usmen(1977)
11.6~18.4	12~34	-		

탄회인 RBA와 BA는 최대건조단위중량이 13.1(kN/m³) 과 15.6(kN/m³)으로, 폐타이어가 포함된 재료들 TBA, TS, Tire shred는 각각 11.8(kN/m³), 15.0(kN/m³), 7.9(kN/m³)로 풍화토 대비 약 42%-85% 수준의 낮은 단위중량을 나타냈다(표 5). 이와 같이 다짐한 석탄회의 경량성은 원지반이 연약층일 경우 원지반의 침하성과 구조물 뒷채움재로써의 사용할 경우 토압면에서 우수한 공학적 특성이라 할 수 있다.

### 3. 지반공학적 특성

#### 3.1 전단강도

전단강도는 성토체의 안전한 설계를 위한 기본적인 물성이다. 따라서 본 연구에서도 실험 대상인 경량 폐기물(TBA, TWS, TS, RBA, BA)과 일반성토재료인 풍화토(WS)에 대한 삼축압축실험을 수행하여 강도 특성을 검토하였다. WS, BA RBA 등의 재료는 강도특성을 비교하기 위하여 다짐시험을 통해 얻어진 최대건조단위

중량의 95%에 해당하는 단위중량과 최적함수비로 시료를 성형한 후, 압밀배수(Consolidated Drain, CD)조건에서의 삼축압축시험과 직접전단시험을 수행하였고 페타이어가 포함된 혼합재료들-TBA(페타이어-저회), TS(페타이어-모래), TWS(페타이어-풍화토)의 경우에는 페타이어의 최대입경 50mm를 고려하여 시편직경 300mm로 성형하여 대형삼축압축시험을 수행하였다. 페타이어가 혼합된 재료의 경우에는 페타이어와 다른 혼합재료의 비율을 부피비로 50:50의 비율로 혼합 성형하였다. 이번

실험 결과와 기존 문헌에 제시된 다른 지역의 석탄회, 풍화토와 페타이어 혼합재료에 대한 유효점착력과 내부마찰각의 결과는 표 6과 같다. 석탄회와 페타이어 재료에 대한 강도특성은 일반적으로 사용되는 성토재료인 풍화토와 비교해서도 유사한 수준의 값을 보여, 성토재료로 사용될 경우 강도측면에서의 문제는 우려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 오히려, 자경성의 특성을 갖는 석탄회의 경우, 시간이 경과할수록 강도가 증가되는 경향도 보일 것으로 판단된다.

표 6. 대상 시료의 역학적 특성

	건조단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	강도 정수		석탄회원산지	참고 문헌	비고
		유효 점착력 c' (kPa)	유효 마찰각 φ' (°)			
WS	17.5	26.57	32.93	-	This study	삼축압축시험(CD) KS F 2346 (ASTM D-2850)
TBA (페타이어-저회)	11.8	35	38.3	석탄회 (태안)		대형삼축압축시험(CD) KS F 2346 (ASTM D-2850)
TS (페타이어-모래)	14.2	41	39.1			대형삼축압축시험(CD) KS F 2346 (ASTM D-2850)
TW (페타이어-풍화토)	14.0	26	23.8			대형삼축압축시험(CD) KS F 2346 (ASTM D-2850)
BA	14.8	4.62	37.33	태안		삼축압축시험(CD) KS F 2346 (ASTM D-2850)
RBA	12.5	5.69	36.43	태안		직접전단시험 ASTM D-3080-04
BA			30~45	삼천포	한국남동발전(2006), 홍성완 등(1992)	
	11.05	9.5~15.6	43.8~ 52.1	삼천포	채광석 등(2007) 윤여원 등(2000)	대형전단시험 (30×30)
	14.49	0	33	영월	장명순 등(1996) 천병식 등(1995)	삼축압축시험(UU) KS F 2346 (ASTM D-2850)
	15.86	0.25	41.5	영월	천병식과 여유현 (2000)	직접전단시험
	12.58	19.6	34.2	호남	고용일(1992)	삼축압축시험(UU) KS F 2346 (ASTM D-2850)
	13.87	16.67	34.7	서천		
	12.73	1.96	40.9	삼천포		
	16.15	9.8	43.5	영동		
	14.49	0	41.6	영월		
TS	15.64	22.3~ 30.4	38.7~ 40.2		Zornberg 등(2004a, 2004b)	대형삼축압축시험
	16.21	30.7	40.8			
WS	17.01	18.46~ 27.28	28.69~ 34.35	조치원	이성진(2002)	불포화 삼축압축시험
	14.47	12.40~ 22.51	34.60~ 36.80	옥천		
	17.29	24.5	37.5	가평	신지수(2010)	전단강도시험 (KS F 2343-97)
	16.34	2.05	28.6	진주	오세봉(2008)	삼축압축시험 (KS F 2346)
	16.15	10	31	영덕		

### 3.2 투수특성

석탄회의 투수특성은 입자의 형상, 입도, 다짐도 등에 따라 다양한 특성을 보일 수 있으며, 저회의 경우 일반적으로 비슷한 입도의 조립토와 유사한 투수특성을 보이는 것으로 평가되고 있다. 본 연구에서도 몇가지 재료에 대해 포화투수계수시험과 함수특성곡선시험을 수행하여, 그 특성을 분석하였다.

저회의 재료와 타이어-저회 혼합토의 투수특성을 파악하기 위하여 정수위법으로 실험을 수행하였다. 특히 Tire shreds의 큰 입자크기를 고려하여 지름 60cm, 높이 60cm의 대형 실험 장비를 이용하여 ASTM D 6270-98의 시험법에 의해 실험을 진행하였다. 각 시료들은 앞서 수행된 다짐실험 결과와 현장 조건을 고려하여 95%의 상대다짐 밀도를 맞추어 다져서 조성하였으며, 수행된 각 재료의 투수특성 시험 결과는 다른 재료의 투수특성과 함께 다음 표 7에 정리하였다. 타이어-저회 혼합토(TBA)는 크고 불규칙한 타이어 조각으로 인해 다른 재료에 비해 투수특성이 매우 큰 경향을 보이며, 모래나 자갈의 대체재로서 충분히 우수한 배수특성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나, 석탄회 재료들(BA, RBA)은 입도분포에 따라 투수특성이 큰 차이를 보이고 있어,

사용목적에 맞도록 입도 기준을 적용해야할 필요가 있을 것이다.

본 연구에서 대상으로 하는 재료들은 성토재료 목적으로 주로 지하수위 상부에서 불포화상태로 거동할 것이 예상되므로, 불포화상태의 투수특성을 평가할 수 있도록 함수특성곡선에 대한 실험으로 불포화투수 특성도 검토하였다. 함수특성곡선 실험은 SWC-150(GCTS) 압력판추출실험장비(Volumetric Pressure Plate Extractor, VPPE)를 이용하여 RBA와 BA 시료에 대한 함수특성 실험을 수행하였다. 3kPa 보다 작은 모관흡수력 범위에서는 시료 내부에 직접 부의 간극수압을 유발하여 함수비 변화를 측정하는 hanging column 기법을 적용하고 3kPa보다 큰 모관흡수력에서는 외부 셀에 공기압을 가하여 모관흡수력을 유발시키는 축변환기법을 적용하였다. 본 실험결과로부터 얻어진 연속적인 함수특성곡선과 각 맞춤형수들은 그림 3과 같다. 그림에서 해치된 부분은 이승래 등(2009)이 제시한 국내 풍화토에 대한 함수특성곡선의 분포범위를 보여준다. WS, RBA, BA 모두 이 범위 내에 나타나고 있으며, 따라서 석탄저회의 모관흡수력과 함수비의 관계특성 즉, 함수특성곡선이 입도 특성에 따라 풍화토와 유사하게 나타날 수 있음을 보여준다.

표 7. 재료별 투수계수 관련 실험 자료 및 문헌 자료

시료	95% $\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )	포화투수계수 (cm/s)	간극비 $e$	원산지	참고 문헌	비 고
TBA	11.2	$1.6 \times 10^{-2}$			This study	ASTM D 6270-98
WS	17.5	$6.57 \times 10^{-5}$	0.90	-		KS F 2322 (ASTM D-2434)
BA	14.8	$6.50 \times 10^{-5}$	0.92	태안		KS F 2322 (ASTM D-2434)
RBA	12.5	$1.32 \times 10^{-4}$	0.82	태안		ASTM D-5084-03
BA	22.52~24.7	$1.092 \times 10^{-5} \sim 2.19 \times 10^{-5}$		영월	채광석 등(2007)	
	10.45~14.16	$1.270 \times 10^{-5} \sim 2.192 \times 10^{-5}$		삼천포	홍성완 등(1992)	
	11.05	0.0127		삼천포	윤여원 등(2000)	
		$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-1}$			Huang(1990) GAI and USIFCAU(1993)	
	11.02~17.48	$5.0 \times 10^{-3} \sim 9.4 \times 10^{-2}$			seal et al(1972)	
	5.13~17.96	$3 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-1}$			Huang(1990)	
WS		$1.43 \times 10^{-5} \sim 9.16 \times 10^{-5}$			박병기(1973)	KS F 2322 (ASTM D-2434)
	16.53	$9.13 \times 10^{-5}$	0.606	서창	김윤기(2003)	KS F 2322 (ASTM D-2434)
	16.15	$2.47 \times 10^{-5}$	0.3	아산		
	16.34	$2.38 \times 10^{-4}$	0.77	옥천		
	16.34	$9.83 \times 10^{-6}$		진주	오세봉(2008)	KS F 2322 (ASTM D-2434)

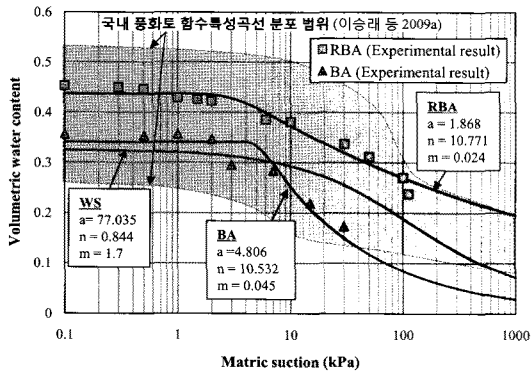
불포화 투수곡선은 모관흡수력 상태에 따라 투수값이 변하는 특성을 표현하게 되고, Fredlund 등(1994)이 제안한 식으로 적분형식을 통하여 불포화 투수계수 곡선을 추정하였다. 그림 3(b)은 모관흡수력에 따른 불포화 투수계수값을 의미하며, RBA와 BA 시료가 유사하게 감소하는 경향을 보여주고 있다. WS 시료의 경우 투수계수의 감소가 비교적 완만하게 나타나고 있다. RBA 시료를 살펴보면 2kPa 내에서는 감소하는 폭이 작지만 2kPa 보다 큰 모관흡수력 범위에서는 이보다 더 급격히 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 반면 WS 시료는 20~30kPa 모관흡수력까지도 감소하는 기울기는 다른 시료들에 비해 비교적 완만하게 나타난다. 실제 불포화 투수계수값을 비교해보면, 0~2kPa 범위에서는 RBA 시료의 투수값이 가장 크며, 3~10kPa 범위에서는 BA 시료의 투수값이 가장 크게 나타나고 있다. 10kPa 보다 큰 모관흡수력 범위에서는 WS 시료의 투수값이 가장 크게 나타

났다(그림 3(b)). 이처럼 재료별 포화투수계수와 SWCC의 특성에 따라 모관흡수력 구간별로 투수계수의 차이를 나타낼 수 있으므로, 두가지 재료를 사용해서 성토체를 조성할 경우 이러한 재료들의 투수특성을 고려하여 설계와 시공에 반영되어야 할 것으로 판단된다. 앞에서 언급된 다른 기본적인 물성의 특징과 같이 포화/불포화 투수특성의 경우에도 사용되는 재료의 입도에 따라 기존의 성토재료인 풍화토의 투수특성과 유사한 특성으로 평가할 수 있었으며, 타이어가 포함된 재료의 경우 월등히 큰 투수특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

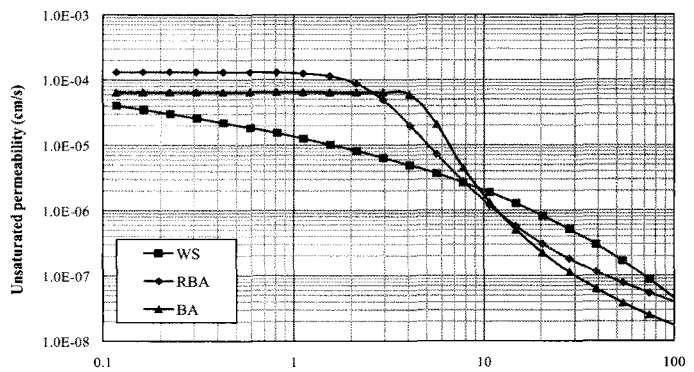
#### 4. 압축특성

##### 4.1 하중에 따른 압축 특성

성토재료의 압축성은 하중을 받는 성토체의 침하를 예

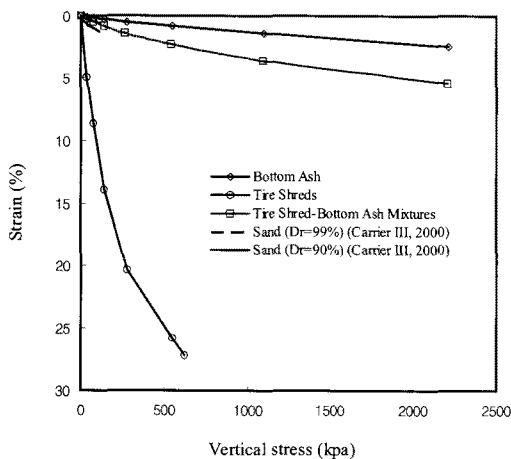


(a) 함수특성곡선

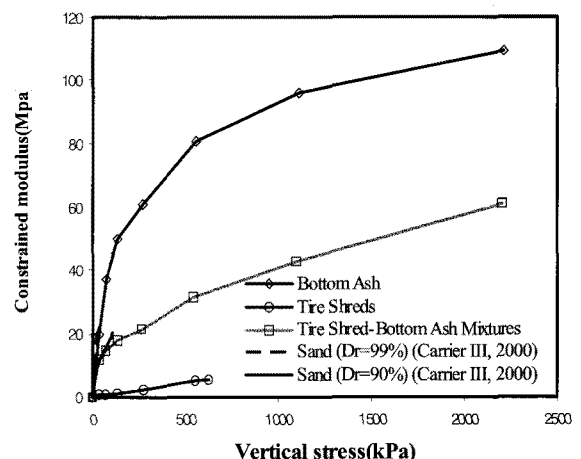


(b) 불포화투수계수

그림 3. 석탄회 및 풍화토의 불포화 투수특성



(a) 오이도미터시험(응력-변형률) 결과



(b) 구속계수(Constrained Modulus)

그림 4. 대형오이도미터 실험 결과



측하기 위해서 평가될 필요가 있다(Manion and Humphrey, 1992). 특히 타이어조각은 낮은 하중수준에서도 재료 자체의 압축성으로 인해 상당한 침하를 야기할 수 있기 때문에, 타이어조각의 압축성은 성토재료로 활용되는 데에 중요한 관심사가 될 수 있다.

성토재료의 압축은 1차원적 거동으로 가정할 수 있기 때문에 본 연구에서도 타이어조각(Tire Shred), 저회(BA), 페타이어-저회 혼합재료(TBA)에 대한 압축특성을 검토하기 위해 직경 60cm, 높이 60cm의 대형오이도미터시험장비를 이용하여 다음과 같이 실험을 수행하였다. 먼저 시료를 대형의 실린더에 성형하여, 유압하중장치로 단계적 하중을 증가시켜 시험을 수행하였으며, 각 단계의 하중은 변위가 더 이상 발생되지 않을 때까지 가하였다. 수직 응력이 증가할 때 구속계수(Constrained Modulus)의 변화 경향을 파악하고 수직응력-변형률 관계를 얻기 위하여 2200kPa까지 수직응력을 증가시켜 수직변위를 측정하였으며, 추가적으로 이를 상대다짐도 99%와 90%의 조밀한 모래의 압축성(Carrier III, 2000)과 비교하여 보았다.

구속계수는 수직응력 변화량에 대한 수직변형률에 대한 비로 정의될 수 있으며( $M = \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta\epsilon_v}$ ), 1차원 압축상태 하에서의 침하량을 추정할 수 있다. 대부분의 실험 결과는 전형적인 조립재료의 압축거동에 유사한 경향을 보이고 있으며, 이러한 단시간의 즉시 수직변위 또는 침하 거동은 부피변화와 변형(Distortion) 모두에 의해 발생하게 된다(Salgado, 2003). 조립재의 입도를 갖고 있는 BA(저회)의 압축성에 대해서 Karim 등(1997)은 상대적으로 낮은 중간주응력이 입자의 변형과 재배열을 유도하게 되며, 높은 응력은 낮은 구속계수의 원인인 입자의

파쇄를 야기하는 것으로 평가했다.

순수 Tire shreds의 압축성은 상대적으로 TBA(Tire shreds-저회 혼합재료)나 BA(저회 재료)에 비해 훨씬 큰 압축성을 보였다. 이는 하중을 받을 때 타이어 슈레드의 큰 간극, 재배치, 변형, 휘어짐, 탄성변형 등의 영향으로 정리할 수 있을 것이다(Ahmed et al., 1993; Edil et al., 1992; Zornberg et al., 2004a).

Tire shreds에 저회를 혼합한 재료의 경우에는 Tire shreds의 간극을 저회로 채울 수 있기 때문에 순수 Tire shreds 재료에 비해 상대적으로 압축성의 큰 감소를 가져올 수 있었다. 즉, Tire shreds와 저회의 혼합은 높은 응력수준에서 저회 입자들의 파쇄를 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 그림 5와 그림 6은 200kPa까지, 즉 도로 등의 성토에서 예상되는 응력수준까지의 1차원 압축 응력-변형률 곡선과 구속계수를 나타내고 있다. 실험 결과 저회와 타이어-저회 혼합토의 압축특성은 90% 이상 다져진 모래의 압축특성과 유사한 결과를 나타내고 있다. Seals 등(1972)도 West Virginia 저회를 대상으로 수행한 1차원 오이도미터 실험 결과, 낮은 응력수준에서 같은 상대밀도의 모래의 압축특성과 유사한 결과가 있었음을 보고하고 있다.

결론적으로 BA(저회)재료는 물론 타이어를 혼합한 재료인 TBA(Tire shreds-저회 혼합재료)의 경우에도 실제 기대되는 수직응력수준에서는 비교적 압축성이 낮은 재료로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4.2 함수비와 온도변화를 고려한 장기압축특성

기존 연구에서는 석탄회가 동결융해에 민감한 입도

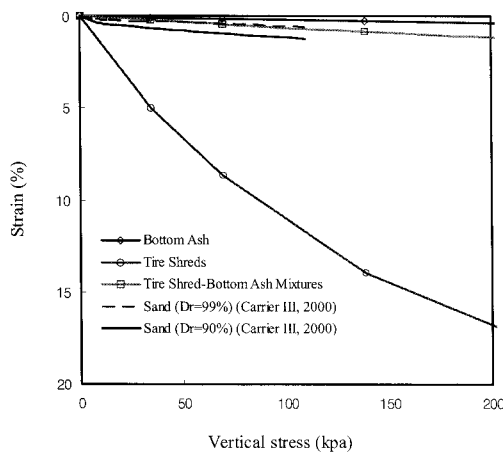


그림 5. 200kPa까지의 응력-변형률 곡선

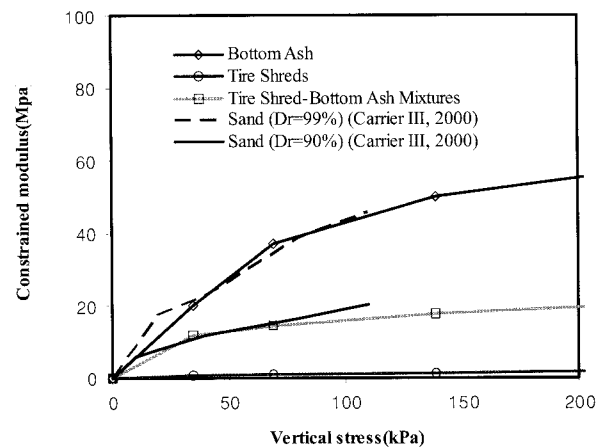


그림 6. 200kPa까지의 구속계수

분포를 갖고 있고 동결융해에 따른 일축압축시험 결과 안정처리되지 않은 석탄회와 강도감소율이 약 70%에 이르는 것으로 보고되고 있다(홍성완 등, 1992). 반면 외국의 여러 종류의 석탄회에 대한 동결융해 실험 결과에서는 유사한 입도분포 석탄회들의 동결융해 특성은 매우 다양하게 나타나고 있기 때문에 동결융해가 우려되는 지역에서는 활용대상의 석탄회에 대한 동결융해 특성평가를 수행 후 설계에 반영되어야 할 것으로 판단된다. 또한 조성된 성토체에서 발생될 수 있는 침하의 경향을 확인하는 것이 필요하다. 이와 관련해서 선행 연구에서는 TBA층과 WS층을 포함하는 실대형의 성토구조물을 조성하여 정적 동적 하중에 대해 발생하는 침하정도를 비교하여 1m의 복토 조건 하에서 그 차이가 매우 미미한 것을 확인할 수 있었다(이성진 등, 2009). 하지만 성토구조물의 경우 장기간 활용되어야 하기 때문에 온도 및 함수비 등의 변화 조건을 포함하여 장기적인 침하 경향을 확인하고 이에 대비하는 것이 필요할 것이다. 이에 본 연구에서는 페타이어 및 석탄회 등 성토재료

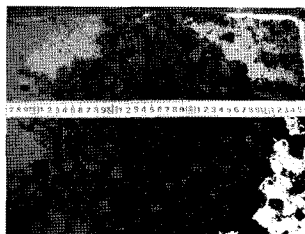
들의 장기압축침하거동을 실내에서 확인, 비교할 수 있도록 다음과 같이 6종류의 재료를 실험에 이용하였다(표 8, 그림 7).

압축침하 경향의 정확한 정량적 평가를 위해서는 실제 현장에서 활용되는 실제 입도의 재료를 활용하여 실험하는 것이 필요하지만, 이에 앞서 실내에서 소형의 실험으로 그 경향을 파악하기 위해 페타이어의 경우 토조의 직경(150mm)을 고려하여 약 30mm 이하로 잘라 실험에 이용하였다. 본 실험에서도 앞선 연구와 같이 TRBA, TBA, TWS 시료들은 페타이어 조각과 저회 및 풍화토를 각각 1:1의 부피로 혼합하여 실험을 수행하였다.

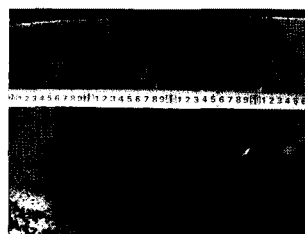
실험에서 같은 조건(하중, 시간, 온도 및 함수비 변화) 하에서 RBA, BA, WS재료들의 장기압축침하거동과 함께 페타이어를 혼합한 시료들(TRBA, TBA, TWS)의 거동을 비교 평가하고자 하였다. 압축침하거동을 장기간 동안 실내에서 확인, 비교할 수 있도록 다음 그림과 같이 사하중을 재하하도록 장비를 제작하여 실험에 사용하였다.

표 8. 실험 대상 재료 설명 및 단위중량

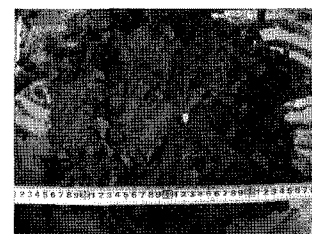
	Material	단위중량( $t/m^3$ )
TRBA	30mm이하의 페타이어와 매립저회 혼합재료	1.19
TBA	30mm이하의 페타이어와 5mm이하의 정제저회 혼합재료	1.19
TWS	30mm이하의 페타이어와 풍화토 혼합재료	1.49
RBA	매립저회(Reclaimed Bottom Ash)	1.35
BA(<5mm)	5mm이하의 정제저회	1.35
WS	풍화토	1.88



(a) TRBA



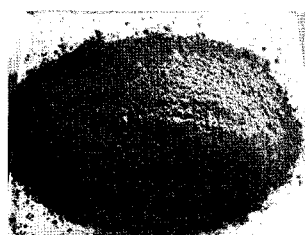
(b) TBA



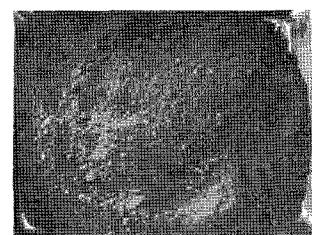
(c) TWS



(d) RBA



(e) BA(<5mm)



(f) WS

그림 7. 실험 대상 재료

실험은 직경 150mm의 원통형 셀(그림 8(a))에 재료를 표 8의 밀도로 다져서 조성한 후 그림 8(b)와 같은 재하판을 덮고 그 위에 그림 8(c)와 같이 사각하중판을 얹어 사하중을 재하하여 장기간 압축침하거동을 계측하였다. 시료가 받는 응력은 다음 표 9와 같으며, 본 실험에서는 약 100(kPa)의 수직응력상태에서 장기거동을 계측하였으며, 계측은 그림 8(c)와 같이 4지점에서 침하량을 평균하여 시료의 압축침하량을 산정하였다.

실험 과정 중에는 함수비 변화 현상을 모사하기 위해 약 30,000(min) 부근에 시편 내부로 물을 주입하고 이에 따른 Wetting collapsing 영향을 측정하였으며, 이후 동결기를 지내면서 영하와 영상온도의 반복적인 조건에서 실제 현장에서 발생할 수 있는 동결/융해 조건에서의 거동의 경향을 비교, 검토하였다. 6개의 재료들을 대상으로 약 2달동안의 장기 압축침하거동을 계측한 결과는

다음 그림 9와 같다.

전체적으로 하중에 의한 즉시침하는 재료의 특성상 압축성이 큰 타이어가 포함된 재료들(TRBA, TBA, TWS)에서 크게 발생되었다. 동결융해에 따른 침하, Wetting에 따른 침하, 동결융해의 반복과 시간에 따른 침하 경향은 석탄회가 포함된 재료들(TRBA, TBA)에서 현격히 적게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 경향은 타이어가 포함되지 않은 재료들에서도 확인된다. 즉 RBA, BA의 재료들도 아래 그림 10과 같이 동결융해가 반복됨에 따라 침하가 발생되고는 있으나 매우 작은 변형을 범위에서 발생되고 있으며, 일반적인 성토재료인 WS에 비해 즉시침하 및 동결융해에 따른 침하, Wetting에 따른 침하, 동결융해의 반복과 시간에 따른 침하에서 모두 상대적으로 작게 발생하는 것을 확인할 수 있었다(그림 10). 특히 풍화토 계열의 재료

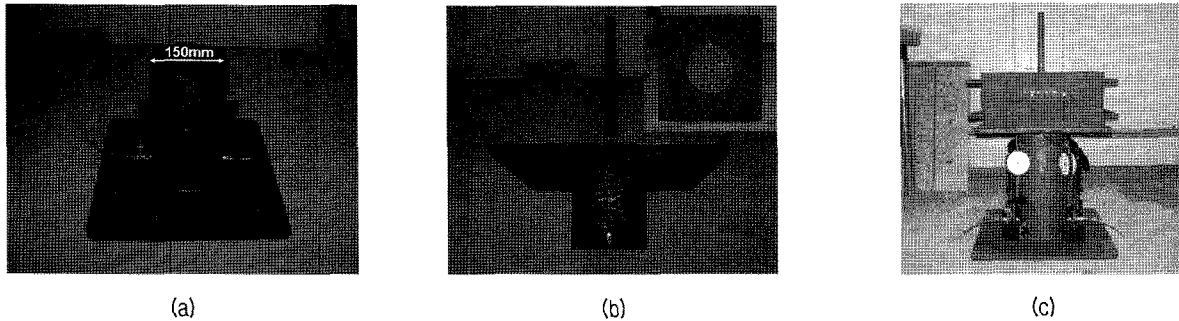


그림 8. 1차원 장기압축실험 장비

표 9. 장기압축시험의 하중조건

하중 조건	수직응력(kPa)	비고
Steel Plate + 재하판	13.6(kPa)	Steel Plate : 1.78(kg) 재하판 : 22.18(kg) 하중판 1개 : 51.26(kg)
Steel Plate + 재하판 + 하중판 1	40.5(kPa)	
Steel Plate + 재하판 + 하중판 2	71.2(kPa)	
Steel Plate + 재하판 + 하중판 3	100(kPa)	

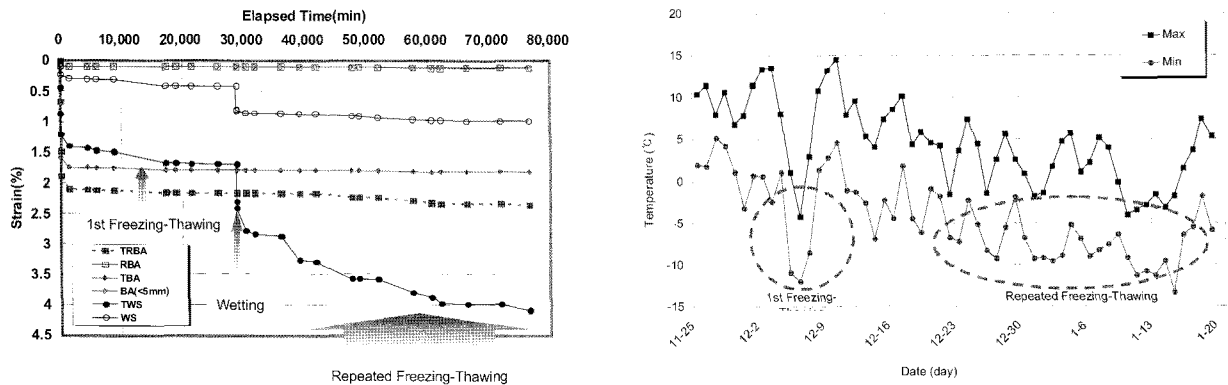
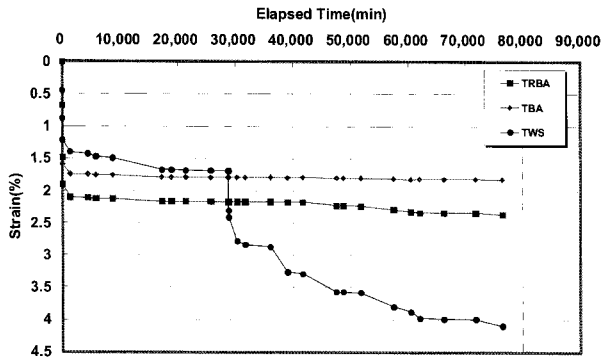
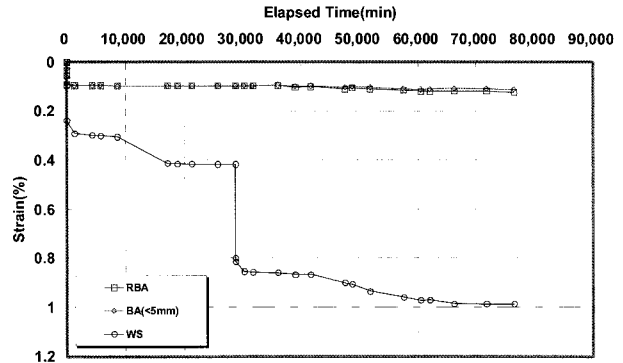


그림 9. 장기 침하 및 온도변화 추이



(a) 페타이어 포함 재료들의 장기침하거동



(b) 석탄회 및 풍화토의 장기침하거동

그림 10. 재료별 장기침하특성

들(TWS, WS)에서는 함수비 증가에 의해 입자구조의 붕괴나 재배열로 간극 부피가 감소되는 Wetting Collapse 현상이 매우 크게 발생하는 반면 석탄회 계열의 재료들(TRBA, TBA, RBA, BA)에서는 거의 관측되지 않았다(그림 10). Prakash and Sridharan(2009)은 석탄회재료가 경량임에도 일반성토재료에 비해 상대적으로 유사하거나 높은 강도를 갖고 있으며, 강우침투나 지하수위 상승과 같은 경우에도 강도의 손실이 매우 적다고 설명하고 있으며, 이러한 특성도 본 실험 결과에 반영된 것으로 판단된다.

앞서 언급된 바와 같이 석탄회는 동결 용해의 반복 과정에서 강도가 감소되는 것으로 밝혀진 바 있으나 본 연구에서 일정한 구속압(수직응력) 상태에서 동결 용해가 반복되는 상태에서 1차원 압축침하부분에서는 강도의 감소 우려와는 관계없이 일반 성토재료인 풍화토에 비해 함수비증가, 동결용해반복, 하중에 의한 즉시침하 등 모든 부분에서 작게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 성토재료 활용하였을 경우에 성토재 대비 침하문제에서는 안정적 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 물론 전단강도가 요구되는 사면에 적용될 경우에는 강도감소를 고려하여 적용되어야 할 것이지만, 본 재료는 일정 토피(약 1m)를 기본으로 사용하도록 제안되고 있기 때문에 대기 온도와 함께 내부의 온도 변화에 대한 장기적인 모니터링으로 향후 동결용해에 따른 강도감소를 고려할 수 있는 기준의 마련이 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 석탄회와 페타이어, 두 가지 재료의 혼

합재료 등 경량 폐기물의 성토재료로서의 활용을 위한 기본적인 연구로서, 이들 재료의 입도분포, 비중, 상대다짐밀도, 전단강도, 투수특성 등 기본물성 및 지반공학적인 물성 평가를 위한 실험을 수행하였다. 또한 현장 조건에 따른 함수비와 온도변화를 고려한 1차원 압축 침하특성을 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 주로 큰 입자인 저회(Bottom Ash)가 포함된 경우에는 풍화토보다는 모래에 가까운 특성을 보였으며, 세립분, 즉 비회(Fly Ash)가 많이 포함된 석탄회의 경우에는 풍화토에 가깝거나 경우에 따라서는 이보다 더 세립토의 경향을 보이는 것으로 평가할 수 있었다.
- (2) 본 연구에서 수행된 6가지 종류의 재료들의 경우 풍화토 대비 약 42%-85% 수준의 낮은 단위중량을 나타냈다. 이와 같이 다짐한 석탄회의 경량성은 원지반이 연약층일 경우 원지반의 침하성과 구조물 뒷채움재료로서의 사용할 경우 토압면에서 우수한 공학적 특성이라 할 수 있을 것이다.
- (3) 석탄회와 페타이어 재료에 대한 강도특성은 일반적으로 사용되는 성토재료인 풍화토와 비교해서도 유사한 수준의 값을 보여, 성토재료로 사용될 경우 강도측면에서의 문제는 우려하지 않아도 될 것으로 판단된다.
- (4) 타이어조각 혼합재료들은 크고 불규칙한 타이어 조각으로 인해 다른 재료에 비해 투수특성이 매우 큰 경향을 보이며, 모래나 자갈의 대체재로서 충분히 우수한 배수특성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나, 석탄회 재료들(BA, RBA)은 입도분포에 따라

투수특성이 큰 차이를 보이고 있어, 사용목적에 맞도록 입도 기준을 적용해야할 필요가 있을 것이다.

- (5) 본 연구에서 실험한 2종류의 석탄회의 경우 국내 풍화토의 함수특성곡선 범위 내의 결과를 보여, 입도에 따라 풍화토와 유사한 함수특성을 가질 수 있지만, 재료에 따라 모관흡수력 조건에 따라 다른 투수특성을 보일 수 있으므로, 상부 복토재료로 풍화토가 사용될 경우 이들 재료의 함수특성과 투수특성을 고려하여 설계와 시공에 반영되어야할 것으로 판단된다
- (6) 석탄회 재료는 물론 타이어를 혼합한 재료의 경우에도 실제 기대되는 수직응력수준에서는 비교적 압축성이 낮은 재료로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
- (7) 석탄회는 동결 융해의 반복 과정에서 강도가 감소되는 것으로 밝혀진 바가 있으나 본 연구에서 1차원 압축침하부분에서는 강도의 감소 우려와는 관계없이 일반 성토재료인 풍화토에 비해 함수비증가, 동결융해반복, 하중에 의한 즉시침하 등 모든 부분에서 작게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 성토재료로 활용하였을 경우에 성토재 대비 침하문제에서는 안정적 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.
- (8) 본 연구에서 검토한 부분에서는 석탄회, 페타이어, 두 재료의 혼합재료들은 성토재료로서의 적합한 특성을 보이는 것으로 판단할 수 있을 것이다. 그러나 석탄회의 경우 입도에 따라 그 특성이 크게 달라질 수 있으므로, 실제 현장에 적용될 경우에는 사용되는 재료의 입도 및 재료원산지별로 설계에 필요한 특성들에 대한 실험 분석 후 적절한 고려가 필요할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 고용일 (1992), *석탄회의 도로 성토재료로서의 활용에 관한 실험적 연구*, 박사학위논문, 한양대학교 일반대학원.
2. 고태훈 (1997), *압밀축진용 연직배수재로서 Bottom Ash의 활용을 위한 연구*, 석사학위논문, 한양대학교 일반대학원.
3. 김강덕, 강승구 (2007), “석탄 바닥재와 점토를 이용한 인공경량 골재 제조”, *Journal of the Korea crystal growth and crystal technology*, Vol.17, No.6, pp.277-282.
4. 김윤기 (2003), *투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수성에 관한 연구*, 석사학위 논문, KAIST.
5. 도영근, 권혁두, 이 송 (2009), “Bottom Ash를 이용한 그라우팅제의 환경적 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제22권, 11호, pp.5-11.
6. 박병기 (1973), “화강암질 풍화토의 특성연구”, *대한토목학회 논문집*, 제21권, 4호.

7. 박홍규, 천병식, 임해식, 권형석 (1992), “석탄회와 화강토의 MR특성”, *대한토목학회 학술발표회 개요집*, Vol.1992, No.1, pp.547-550.
8. 송민섭, 김영덕, 나철성, 최경렬, 김재환, 김무한 (2003), “바탕에 시를 사용한 모르타의 특성에 대한 실험적 연구”, *한국건축시공학회 학술발표대회 논문집* 제3권 1호.
9. 신지수 (2010), *파괴화를 변화속도를 이용한 강우 시 철도사면의 안전관리기준에 관한 연구*, 석사학위논문, 한양대학교 일반대학원.
10. 오세봉, 문종호, 김태경, 김윤기 (2008), “불포화 지반특성 영향에 대한 강우시 사면붕괴의 사례연구”, *대한토목학회 논문집*, 제28권, 제3C호, pp.167-178.
11. 원종필, 이용수 (2001), “Bottom Ash를 혼합한 지강도 고유동 충전재의 특성”, *한국콘크리트학회 논문집*, Vol.13, No.3, pp.294-300.
12. 윤여원, 채광석, 송규환 (2000), “석탄회의 정적 및 동적특성평가”, *한국환경지반공학회 논문집*, 제10권, 제3호, pp.5-12.
13. 윤여원 (2004), “지반보강재로서 페타이어의 활용; 지반보강요과”, *한국지반공학회논문집*, 제20권, 3호 4월 pp.107-117.
14. 이병식, 정경순 (2001), “변형률제어 진동삼축압축시험법을 이용한 석탄회가 혼합된 모래시료의 액상화 평가”, *한국지반공학회논문집* 제17권 5호, pp.129-136.
15. 이성진, 이승래, 장범수 (2002), “화강풍화토의 불포화 전단강도 특성에 관한 연구”, *대한토목공학회논문집*, 제22권, 제1-C호, pp.81-88.
16. 이성진, 신민호, 고태훈, 황선근 (2009), “저회(Bottom Ash)와 페타이어를 활용한 성토구조물 거동에 관한 연구”, *대한토목학회논문집* C, 제29권 제1C호, pp.21-31.
17. 이승래, 오태규, 김윤기, 김희철 (2009), “강우침투시 강우강도와 포화투수계수가 안전율에 미치는 영향”, *한국지반공학회논문집*, 제25권, 제1호, pp.65-76.
18. 이영생 (2000), “석탄회를 이용한 기능성 건설재의 토질공학적 특성에 관한 실험적 연구”, *대한토목학회논문집*, 제20권, 제2-C호, pp.147-154.
19. 이종호, 김재환, 김용로, 강석표, 최세진, 김무한 (2002), “물시멘트비에 따른 바탕에시를 사용한 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구”, *한국건축시공학회 학술발표대회 논문집* 제2권 1호.
20. 장명순, 천병식, 최현식 (1996), “석탄회의 성토재 및 포장재로서의 재활용을 위한 기초연구”, 한국지반공학회, *한국지반공학회 연약지반처리위원회 분 학술세미나*, Vol.0, No.0, pp.91-107.
21. 정승용, 김수삼 (1991), “석탄회의 침강에 관한 실험적 연구”, *대한토목학회 학술발표회 개요집*, Vol.1991, No.0, pp.591-594.
22. 차동원, 이희상, 정종한 (1999), “전력산업에서의 석탄회 발생과 성장”, *한국전력공사 삼천포화력 부부 및 경성대학교 부설 농업자원이용연구소 공동주관 심포지엄 회보*: 석탄회의 농업적 이용, pp.1-23.
23. 채광석, (2007), *매립석탄회(Bottom Ash) 자원의 재활용기술 개발*, GS건설 기술연구소.
24. 천병식, 김양선, 고용일, 오민열, 권형석 (1989), “석탄회의 건설재료로서의 활용에 관한 연구(II)-반복하중에 의한 변형특성을 중심으로-”, *대한토목학회학술대회 개요집*.
25. 천병식, 김양선, 박홍규, 임해식, 김대영 (1990), “석탄회의 건설재료로서의 활용에 관한 연구(III) -동결융해를 중심으로-”, *대한토목학회 학술발표회 개요집*, Vol.1990, No.0, pp.467-470.
26. 천병식, 고용일 (1992), “석탄회의 도로성토재 및 노상재료로서의 활용을 위한 비회와 저회의 적정혼합비”, *대한토목학회논문집 대한토목학회*, 제12권, 제1호.
27. 천병식, 최현식, 박기천, 최상훈, 조규완 (1995), “석탄회의 건설재료로서의 활용에 관한 연구”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, Vol.1995, No.3, pp.567-570.
28. 천병식 (1998), “토질공학적 해석방법에 의한 석탄회 폐기물지반

- 의 안정처리에 관한 연구-지반변형해석을 위한 Cam-clay model 을 중심으로-”, *한국지반공학회지*, 제14권, 제1호.
29. 천병식, 여유현 (2000), “구조물 뒷채움재로서의 석탄회 활용에 관한 연구”, *한국해양공학회지*, 제14권, 제1호, pp.74-79.
  30. 한국남동발전 (2006), *삼천포화력 매립석탄회 재활용 및 적용방안*, 보고서.
  31. 홍성완 등 (1992), *성토재로서의 석탄회 이용방안 연구*, 한국건설기술연구원.
  32. Ahmed, I. (1993), “Laboratory Study on Properties of Rubber Soils, Report No. FHWA/IN/JHRP-93/4”, *Purdue University*, West Lafayette, IN,
  33. American Society for Testing and Materials (ASTM)(2004) Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Application. Designation D 6270-98.
  34. Carrier III, W. D. (2000), “Compressibility of a Compacted Sand”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.126, No.3, pp.273-275.
  35. Edil, T. B. and Bosscher, P. J. (1992), Development of Engineering Criteria for Shredded Waste Tires in Highway Applications. Final Report No. GT-92-9, University of Wisconsin-Madison, *Wisconsin Department of Transportation*, Wisconsin Department of Natural Resources.
  36. Edil, T. B. and Bosscher, P. J. (1994), “Engineering properties of tire chips and soil mixtures”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 17(4), pp.453-464.
  37. Fredlund, D. G., Xing, A. and Huang, S. (1994), “Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp. 533-546.
  38. GAI Consultants, Inc. and USIFCAU (1993), “Use of Coal Combustion By-Products in Highway Construction”, Prepared for the General Assembly of Indiana and Indiana Department of Transportation in response to House Enrolled Act 1056 and Senate Bill 209.
  39. Garga V.K., and O’Shaughnessy, V. (2000), “Tire-reinforced earthfill. Part I : Construction of a test fill, performance and retaining wall design”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.75-96.
  40. Huang W. H., (1990), *The use of bottom ash in highway embankment, subgrades, and subbases*, Joint highway research project final report.
  41. Humphrey, D.N., Sandford, T.C., Cribbs, M.M., Gharegrat, H., and Manion, W.P. (1993b), “Shear Strength and Compressibility of Tire Chips for Use as Retaining Wall Backfill”, *Transportation Research Record No. 1422, Transportation Research Board*, pp.29-35.
  42. Karim, A., Lovell, C. and Salgado, R. (1997), *Building Highway Embankments of Fly/Bottom Ash Mixtures*, Final Report No. FHWA/IN/JTRP-97/01, SPR-2115, Joint Transportation Research Program, Purdue University, Indiana Department of Transportation.
  43. Kim B. J. (2003), *Properties of coal ash mixture and their use in highway embankments*, Ph.D. Dissertation, Purdue University.
  44. Prakash K. and Sridharan A. (2009), “Beneficial Properties of Coal Ashes and Effective Solid Waste Management”, *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, Volume 13, Issue 4, pp. 239-248.
  45. Manion, W.P., and Humphrey, D.N. (1992), “Use of Tire Chips as Lightweight and Conventional Embankment Fill, Phase I—Laboratory”, Technical Paper 91-1, *Technical Services Division, Maine Department of Transportation*, Augusta, ME,
  46. Salgado, R., Yoon, S. and Siddiki, N. Z. (2003), “Construction of Tire Shreds Test Embankment”, Final Report No. FHWA/IN/JTRP-2002/35, Joint Transportation Research Program, *Purdue University*, Indiana Department of Transportation.
  47. Seals, R. K., Moulton, L. K., and Ruth, B. E. (1972), “Bottom Ash: An Engineering Material”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.98, No.SM4, pp.311-325.
  48. Turner-Fairbank Highway Research Center (TFHRC) (1997), User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. FHWA-RD-97-148, *Federal Highway Administration* (<http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/st4.htm>)
  49. Usmen, M. A. (1977), *A Critical Review of the Applicability of conventional Test Methods and Materials Specifications to the Use of Coal-Associated Wastes in Pavement Construction*, Ph. D. Dissertation, West Virginia University, Morgantown, WV.
  50. Zornberg, J. G. Costa, Y. D. and Vollenweider, B. (2004a), “Performance of Prototype Embankment built with Tire Shreds and Nongranular Soil”, *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1874, pp.70-77.
  51. Zornberg, J. G., Cabral, A. R. and Viratjandr, C. (2004b), “Behaviour of Tire Shred – Sand Mixtures”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, No.2, pp.227-241.

(접수일자 2011. 1. 24, 심사완료일 2011. 4. 21)