

화력발전소 부산물인 석탄회의 공학적 특성에 관한 연구

A Study on the Engineering Characteristics of Power Plant Coal Ash

국 길 근¹⁾ · 김 혜 양²⁾ · 천 병 식[†]

Kuk, Kilkeun · Kim, Hyeayang · Chun, Byungsik

ABSTRACT : In this study characteristics for reclaimed ash was studied to enlarge the usage of reclaimed ash which is reaching to 72 million ton produced from whole thermal power plants in South Korea. Fly ash and bottom ash are reclaimed separately at some of thermal power plants. However, typically bottom ash and fly ash are mixed when they are buried at most of the thermal power plant, as a result the engineering characteristics of ponded ash are not investigated properly. In order to investigate the engineering characteristics of the ponded ash, laboratory tests were performed with ponded ash and fly ash from youngheung and samcheonpo thermal power plants. Specific gravity, unit weight, and grain size analysis test were fulfilled to evaluate the physical characteristics and triaxial permeability test, direct shear test, unconfined compressive strength test, compaction test were performed to evaluate the mechanical characteristics. And also engineering characteristics of coal ash from anthracite and Bituminous thermal power plants were compared and studied respectively. As a result of the study, it was confirmed that using coal ash from Bituminous thermal power plants can be effective in the place where lightweight materials are required and using coal ash from anthracite thermal power plants can be effective as backfill material which require higher permeability. Finally, it was confirmed that fly ash from youngheung thermal power plants which has the lowest permeability among the tested material is suitable for a field requiring impermeable material.

Keywords : Fly ash, Ponded ash, Construction material

요 지 : 본 연구에서는 전국 화력발전소에서 부산되는 7,200만톤에 이르는 누적 매립회량을 대량 활용하기 위해 매립회의 특성 연구를 진행하였다. 일부 화력발전소에서는 비회와 저회가 분리되어 매립되고 있으나, 대부분의 화력발전소에서는 혼합 매립되고 있어 매립회의 공학적 특성이 규명되지 않아 이러한 공학적 특성을 규명하고자 영흥화력본부, 삼천포화력본부에서 부산되는 매립회와 비회를 사용하여 실험을 실시한 후 두 발전소의 매립회와 비회의 공학적 특성을 비교·분석하였다. 석탄회를 건설재료로 활용하기 위해 시료의 물리적 특성을 규명하고자 비중, 단위중량, 입도분석시험을 실시하였고, 역학적 특성을 규명하고자 삼축투수시험, 직접전단시험, 일축압축강도시험, 다짐시험을 실시하였다. 그리고 각 발전소에서 부산되는 석탄회의 특성을 알아보고자 무연탄 및 유연탄을 사용하는 발전소에서 부산된 석탄회의 공학적 특성들을 비교·고찰하였다. 시험결과 경량성의 건설재료로서 무연탄 발전소에서 부산된 석탄회를 사용하는 것이 유리하며 뒷채움재로의 활용은 투수계수가 상대적으로 큰 무연탄을 사용하는 발전소에서 부산되는 석탄회를 사용하는 것이 효과적이라 판단된다. 본 논문에서는 영흥화력본부의 비회가 가장 작은 투수계수를 나타냈으므로 불투수층을 요구하는 현장에 적용하기에 가장 적합할 것이라 판단된다.

주요어 : 비회, 매립회, 건설재료

1. 서 론

최근 급속한 산업발전과, 국민 생활수준 향상에 따른 에너지 사용량이 증가함에 있어서 산업부산물이 기하급수적으로 늘어나고 있는 실정이다. 산업부산물 중 석탄회는 화력발전소에서 발생하는 산업폐기물로서 상당히 많은 양이 발생한다. 현재 원활한 전력수급을 위해 화력발전소가 증가함에 따라 석탄회 발생량이 2010년에는 약 700만톤에 못 미칠 것으로 전망된다(환경부, 2008). 석탄회는 비회와 저회로 분류되며 비회는 콘크리트 혼화용 재료로 정제되어 사용되

고 있는 반면에 저회는 대부분 폐기 매립되고 있는 실정이다. 석탄회를 재활용해야 하는 이유는 우리나라의 좁은 국토여건으로 볼 때 현재 우리나라 화력발전소 주변에는 이미 막대한 양의 석탄회가 폐기 매립되어 있어 앞으로 발생 될 석탄회를 폐기 매립시키기 위한 석탄회 매립장이 부족한 상황이고, 석탄회를 자원으로 재활용하면 실질적으로 경제적 이득이 고려되어진다. 석탄회 매립장의 부족 및 자원 재활용으로 인해 석탄회의 재활용에 대한 연구가 사회 전반에 걸쳐 계속 진행되고 있으나 석탄회 발생량에 비해 국내에서의 석탄회 재활용 실적은 미미한 상태이다(권혁두, 2008).

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정희원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

따라서, 본 연구에서는 현재 영흥화력본부 및 삼천포화력본부에서 부산되는 석탄회의 재활용률을 극대화시켜 건설재료로 재활용 하는 데에 그 목적이 있다. 이를 위해 본 연구에서는 첫째, 매립석탄회의 대량 활용을 위해 국내 2개 화력발전소의 매립회의 물리적 특성을 비교·분석하였고, 둘째, 매립회의 강도특성 파악을 위해 일축압축강도, 전단 강도특성을 비회와 비교·분석하였으며, 셋째, 국내 6개 화력발전소의 유연탄과 무연탄 석탄회의 공학적 특성을 비교·분석하여 매립회를 건설재료로써 활용하기 위한 시험적 분석을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 건설재료로써 활용 가능한 기준

2.1.1 노체 및 노상

석탄회를 건설재료로써 활용하여 도로의 노반이나 노상에 적용하기 위한 기준은 아직 마련되어 있지 않은 실정이지만 일반도로의 노체 및 노상의 기준과 비교하여 석탄회를 도로 노반재료로써 사용성 여부를 알아보고자 하였다. 노체에서 사용되는 재료로써 흙의 다짐도는 KS F 2312의 A-1, B-1, C-1, D-1의 방법에 따라 실시한 최대밀도의 90%이상을 목표로 한다. 또한 상부노상의 최대치수는 100mm이고, 하부노상의 최대치수는 150mm이다. 노상에서 사용되는 재료로써 흙의 다짐도는 KS F 2312의 A-2, B-2, C-2, D-2의 방법

에 따라 실시한 최대밀도는 상부노상은 95%이상이고, 하부노상은 90%이상을 목표로 한다. 일반적으로 최대 건조밀도가 높은 흙일수록 최적함수비가 낮고, 최대 건조밀도가 낮은 흙은 최적 함수비가 높다. 노체 및 노상재료의 특성은 표 1과 같다.

2.1.2 콘크리트용 재료

콘크리트용 골재는 KS F 2526의 규정에 적합한 것을 사용해야 한다. 콘크리트 표준시방서 규정에 의하면 잔골재의 최대치수는 10mm이하, 굵은 골재의 최대치수는 일반적인 경우 20mm이하, 단면이 큰 경우 40mm이하, 무근콘크리트인 경우 40mm이하로 규정하고 있다. 한편 잔골재 4.75mm(No.4체) 통과량은 85%이상, 조립률은 2.3~3.1로 규정하고 있다. 잔골재 모래, 굵은 골재 자갈의 절대건조밀도는 모두 24.5kN/m³ 이상으로 규정하고 있다. 콘크리트 재료에 대한 추가적인 규정은 표 2와 같다.

일반적으로 석탄회의 입도는 통일분류법에 의하면 비회는 대부분 ML에 속하고 저회의 경우 대부분 SW, SP 또는 SP-SM 등 sand로 분류된다. AASHTO분류법으로는 비회는 A-4군에 해당하고 저회는 A-1-b군에 해당한다(천병식 등, 1992). 따라서, 실트질인 비회는 콘크리트용 골재로 사용이 적합하지 않고, 저회는 모래와 비슷한 입도분포를 나타내어 콘크리트용 재료로 사용 시 잔골재로 활용될 수 있을 것이라 사료된다.

표 1. 노체 및 노상재료의 특성(한국도로공사, 2001)

	노체	상부노상	하부노상	비고
최대치수	-	100mm	150mm	
No.4체 통과량	-	25~100%	-	
No.200체 통과량	-	0~25%	50%이하	
다짐도	90%이상	95%이상	90%이상	노체 : KS F 2312(A-1, B-1, C-1, D-1) 노상 : KS F 2312(A-2, B-2, C-2, D-2)

표 2. 콘크리트 재료의 규정(한국콘크리트학회, 2003)

구분	잔골재	굵은 골재	
재료에 대한 일반적 설명	<ul style="list-style-type: none"> · 체가름 시험은 KS F 2502에 따른다. · 미립분이 많으면 콘크리트의 워커빌리티, 블리딩 등에 좋다. · 입도가 적당하면 콘크리트의 강도, 수밀성, 내구성 등에 좋다. 	<ul style="list-style-type: none"> · 굵은 골재의 단단한 정도에 대해서는 KS F 2508, KS F 2516, KS F 2503에 의한 시험을 실시한다. · 입도의 크기가 적당히 혼입 되어 있으면 단가를 낮춰서 경제적인 콘크리트를 만들 수 있다. 	
재료 품질 기준	최대치수	10mm 이하	일반적인 경우 : 20mm 이하, 단면이 큰 경우 : 40mm 이하, 무근콘크리트 : 40mm 이하
	No.4체 통과량	85% 이상 통과한 골재	85% 이상 남는 골재
	No.200체 통과량	-	-
	조립률	2.3~3.1	-
	절대건조밀도	모래 : 24.5kN/m ³ 이상	자갈 : 24.5kN/m ³ 이상

2.1.3 구조물 뒷채움 재료

도로공사 표준시방서에 의하면 뒷채움에 사용되는 재료는 SB-1의 품질기준에 적합한 것을 사용해야 한다고 명시되어 있다. SB는 보조기층 재료의 입도 기준으로 SB는 입도에 따라 SB-1, SB-2로 구분되며 SB-1의 최대골재가 SB-2보다 크다. SB-1의 기준은 표 3과 같다. 도로공사 표준시방서 규정에 의하면 골재의 최대치수는 100mm이하이며, 고속도로 일반시방서(한국도로공사, 2001)에 의하면 골재의 최대치수는 80mm이하로 규정하고 있다. 한편 도로공사 표준시방서 규정에 의하면 4.75mm(No.4체) 통과량은 25~100%이고, 0.075mm(No.200체) 통과량은 15%이하로 규정하고 있으며, 고속도로 일반시방서(한국도로공사, 2001)는 4.75mm(No.4체) 통과량은 30~65%이고, 0.075mm(No.200체) 통과량은 2~10%로 규정하고 있다. 구조물 뒷채움의 다짐도는 상대 밀도 95%(KS F 2312 : A-2, B-2, C-2, D-2) 이상이어야 하며, 시공함수비는 '다짐시험방법에 의한 최적함수비 부근과 다짐곡선의 90%밀도에 대응하는 습윤축 함수비로 한다.'라고 규정하고 있다. 재료에 대한 추가적인 규정은 표 4와 같다.

2.2 포졸란 반응

포졸란 반응이란 유리질실리카(SiO_2)나 알루미늄실리케이트($SiO_2 \cdot Al_2O_3$)가 상온에서 물이 존재하면서 수화반응에 의해 생성된 수산화칼슘과 반응해서 C-S-H를 생성하여

표 3. SB-1의 기준(한국도로공사, 2001)

구 분		단 위	SB-1
재료기준	최대치수	mm	75 이하
	수정 CBR	%	50 이상
	5mm체 통과율	%	30~65
	0.08mm체 통과율	%	0~8
	소성지수	%	6 이하
	액성한계	%	25 이하

표 4. 뒷채움 재료 시방 규정(한국도로공사, 2001)

구 분		고속도로 일반시방서	도로공사 표준시방서	일 본	
재료에 대한 일반적 설명		<ul style="list-style-type: none"> SB-1 규격이상의 재료 뒷채움 상대밀도는 95% 이상일 것 이토, 실트, 유기불순물 등을 포함하지 않은 비동결 재료 	<ul style="list-style-type: none"> SB-1의 품질기준에 적합한 재료 단, 현지재료의 활용 경제성 등을 고려하여 설계도서에 명시되어있는 경우 다음 규정의 재료를 사용 할 수 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> 성토재료 중에서 양질인 재료 현장 발생재료로 압축성과 팽창성이 없는 재료 	
재료품질기준	재 료	-	-	상 부	하 부
	최대치수	80mm 이하	100mm 이하	150mm 이하	300mm 이하
	No.4체 통과량	30~65%	25~100%	-	-
	No.200체 통과량	2~10%	15% 이하	-	-
시 공	1층 다짐두께	20cm이하	20cm이하	20cm 이하	
	다 짐 도	최대건조밀도의 95% 이상	최대건조밀도의 95% 이상	최대건조밀도의 95% 이상	

불용성의 화합물을 만드는 작용이다.

석탄회의 주성분은 실리카(SiO_2), 알루미늄(Al_2O_3), 산화제2철(Fe_2O_3), 산화칼슘(CaO)등이며, 대부분 실리카(SiO_2)와 알루미늄(Al_2O_3)가 약 70%를 차지하고 있다. 포졸란 반응은 산화칼슘(CaO)에 의해 좌우되는데 산화칼슘(CaO)은 석탄회의 특성이 포졸란 반응을 일으키는 주원소로 포졸란 반응에 의하여 수화물이 형성되어 석탄회의 입자공극을 메우는 결합체를 형성시켜 응결고화를 촉진시킨다. 비회는 인공 포졸란이며, 대부분의 입상이 구형이고, $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 의 형태로 존재하고 있어 물의 존재상태에서 $Ca(OH)_2$ 와 화합하는 성질을 가져 불용성 실리카질 화합물($CaO-SiO_2-Al_2O_3-nH_2O$)로 경화하는 Gel상을 다량 생성한다(천병식 등, 1990).

석탄회 성분의 반을 차지하고 있는 SiO_2 는 물과 접촉하면 미량의 SiO_2 가 용출하며, CaO 와 수화하여 비회 표면에 치밀한 수화물을 형성한다. CaO 가 1%미만일 때는 수화반응이 매우 느리게 일어난다. 수경성 발견 시 알칼리 자극제의 존재 하에서 Al_2O_3 가 가해지면 $CaO-SiO_2-Al_2O_3-nH_2O$ 등의 수화생성물인 Gel을 형성한다. 그러므로 시멘트 원료로서 점토는 $SiO_2/Al_2O_3 = 4.25$ 이지만 석탄회는 $SiO_2/Al_2O_3 = 2$ 전후로써 적다(천병식 등, 1988).

2.3 국내·외 석탄회 재활용 현황

2.3.1 국내 현황

우리나라는 국토가 좁고 화력발전소에 매립된 석탄회가 포화상태여서 향후 발생하는 석탄회를 매립시키기 어려운 실정이다. 또한 천연골재의 고갈로 인해 수급이 점점 더 어려워 것으로 예상된다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위한 대책방안으로 연간 600만톤 이상 발생하는 석탄회를 폐기물로서 취급하는 것이 아니라 재활용을 극대화시켜 자원화 하려는 노력을 계속해 오고 있다. 현재 국내의 석탄회 발생 및 재활용 전망은 표 5와 같다. 석탄회 재활용 분야에는 대표적으로 레미콘 혼화재, 시멘트 제조용 원료, 시멘트

표 5. 석탄회 발생 및 재활용 전망(환경부, 2008) (단위:천톤, %)

구분	2008년	2009년	2010년	2011년	2012년
발생량	6,146	6,787	6,920	6,970	6,937
재활용량	4,515	4,982	5,074	5,110	5,087
재활용률	73.5	73.4	73.3	73.3	73.3

2차 제품, 성토재, 비료, 토양개량재 등이 있지만 실제로 국내에서 대부분 사용되는 석탄회 재활용 분야는 레미콘 혼화재로 재활용률이 약 70~80%정도이고, 시멘트 제조용 원료로 15~20%정도 사용되고 있다. 그리고 석탄회를 경량골재로 사용하기 위한 연구·개발이 진행 중에 있다. 국외의 경우에는 ACAA(American Coal Ash Association) 및 ECOBA(European Coal Combustion Products Association)에서 매년 석탄회의 용도별 재활용 현황을 분석하여 제시해주고 있는 반면, 국내는 그러지 못하고 있는 실정인데 이는 석탄회 재활용률을 통계화 할 수 있는 시스템이 제대로 갖춰져 있지 않고, 국가 차원에서 석탄회 재활용에 대한 인식이 아직 미미한 상태이기 때문이다.

2.3.2 국외 현황

국가가 좁고 천연자원이 부족한 유럽의 경우 석탄회 재활용률은 매우 높다. 특히, 벨기에의 경우에는 80%이상이 재활용되고 있다. 동남아시아의 경우 30%미만으로 그리 높지 않으나, 일본의 경우 시멘트 및 토목분야의 재활용률이

표 6. 2008년 미국에서의 석탄회의 활용분야 및 이용량(ACAA, 2008) (단위:톤)

CCP Use	Fly Ash	Bottom Ash
2008 Total CCPs Produced by Category	72,454,230	18,431,297
2008 Total CCPs Used by Category	30,142,274	8,076,255
1. Concrete/Concrete Products/Grout	12,592,245	720,948
2. Blended Cement/Raw Feed for Clinker	3,174,264	610,194
3. Flowable Fill	74,794	0
4. Structural Fills/Embankments	8,012,825	2,996,388
5. Road Base/Sub-base	1,027,568	767,013
6. Soil Modification/Stabilization	627,810	431,664
7. Mineral Filter in Asphalt	7,781	257,806
8. Snow and ice Control	0	699,561
9. Blasting Grit/Roofing Granules	84,881	66,670
10. Mining Application	960,911	63,648
11. Gypsum Panel Products	0	0
12. Waste Stabilization/Solidification	2,923,592	84,901
13. Agriculture	35,340	3,771
14. Aggregate	154,992	727,048
15. Miscellaneous/Other	465,271	646,643
Category Use to Production Rate (%)	41.60%	43.82%

약 70%정도로 매우 높은 편이다(강철, 2006).

미국에서는 1968년에 ACAA를 설립하여 석탄회를 자원으로 재활용하기 위한 기술을 개발하여 현재 여러 분야에서 석탄회를 재활용하고 있다. 2001년에 발생한 석탄회의 양은 약 1억 1천만여 톤으로써 그 중 약 30%만이 재활용되었다(김범주, 2004). 표 6은 2008년 미국에서의 석탄회의 활용분야 및 이용량을 나타낸 것으로 비회의 경우 17.4%가 시멘트, 콘크리트 제조공정에 재활용되며, 저회의 경우 16.3%가 구조물의 뒷채움재(Structural Fill)로 재활용되고 있음을 알 수 있다. 그리고 국내의 석탄회 재활용 분야는 대부분 레미콘 혼화재, 시멘트 제조용 원료로 사용되고 있는 반면, 미국은 다방면에 석탄회의 재활용이 이뤄지고 있음을 알 수 있다.

3. 시험개요

3.1 사용재료

3.1.1 매립회

매립회란 화력발전소에서 부산된 비회와 저회를 해수로 혼합하여 석탄회 매립장에 슬러리 상태로 매립되어 있는 재료를 말한다. 현재까지는 대부분 비회와 저회에 대한 연구만 이루어져 왔으나 매립회에 대한 연구는 미진한 실정이다. 매립회는 대부분 회백색이나 미연탄소분이 증가함에 따라 점점 검은색을 띠고, 비중은 1.9~2.4의 범위로 모래의 일반적인 비중 2.6~2.8보다 작아 경량성의 재료이다. 비회와 저회의 강도는 다르기 때문에 구성성분이 일정치 않은 매립회의 정확한 강도 값을 알아내기는 쉽지 않다. 더욱 강우나 해수에 노출되어 화학적 반응이 이미 발생한 상태이다. 매립회에는 비회가 섞여 있는데 비회는 물과 접촉 시 포졸란 반응을 일으키는 성질을 가지고 있는 재료이다. 포졸란 반응이 일어나면 초기 강도는 감소하나 장기강도는 증가하는 효과가 일어나지만 매립회는 이미 포졸란 반응이 발생된 재료로써 강도가 감소된 상태이다. 따라서, 향후 매립회의 강도특성에 대한 연구가 이루어져 건설재료로서의 활용 방안을 모색해야 할 것이다. 본 연구에 사용된 매립회는 영흥화력본부 및 삼천포화력본부에서 부산되었으며, 물리(비중, 단위중량, 입도분석)·역학(다짐, 삼축투수, 일축압축, 전단)적, 공기량 실험을 통하여 건설재료로서의 활용성에 대해 알아보고자 하였다.

3.1.2 비회

비회는 석탄을 미분말 형태의 연료로 사용하는 화력발전소에서 이를 연소할 때, 굴뚝을 통해 대기 중으로 날아가는

재(Ash)를 집진장치로 포집한 것이다. 이러한 비회는 천연적으로 발생하는 포졸란이나 시멘트와 유사한 성질을 가지고 있으며, 이러한 특성으로 인해 콘크리트용 혼화재료로 사용한다. 입자의 크기는 1~150 μm 의 범위에 속하며 평균 입경은 20~30 μm 로 시멘트와 비슷하다. 비중은 1.9~2.3으로 시멘트 비중의 약 2/3에 해당하는데 비중은 화학성분 중의 Fe_2O_3 에 의해 좌우된다. 분말도는 포졸란의 활성도와 콘크리트의 작업성에 영향을 주는 매우 중요한 특성으로 3,000~4,500 cm^2/g 정도이다. 본 연구에 사용된 비회의 특성은 표 7과 같다.

3.2 시험 방법

본 연구에서는 비중, 단위중량시험을 통하여 재료의 경량성 파악 및 자중산정을 하여 경량성토재 및 콘크리트 벽돌 제작에 적합한지 파악해 보고자 하였다. 비중은 KS F 2518, 단위중량은 AASHTO T 121에 근거하여 실시하였다.

입도시험은 공학적으로 입도분포가 좋고 나뭇을 판정하는 중요한 자료로써 도로의 노상재료, 뒷채움 재료로 사용가능한지에 대해 알아보하고자 KS F 2301에 근거하여 실시하였다.

다짐시험은 간극 내의 공기를 배출시켜 입자간의 결합을 치밀하게 함으로써 단위중량을 증가시키는 과정이며 석탄회가 일반도로성토재료로써 사용가능 여부에 대해 알아보하고자 KS F 2312에 근거하여 실시하였다.

흙의 투수성은 흙댐과 하천제방, 간척제방의 제체와 기초 지반 중의 투수 또는 지하수위 이하에 설치된 구조물에 미치는 양압력을 알아내어 제체와 배수공 등을 설계, 시공하는데 활용된다. 따라서, 삼축투수시험을 수행하여 투수계수를 측정하였으며, 건설재료로써 매립회와 비회의 활용성을 평가하는 것을 목적으로 하고 있다. 시험은 ASTM D5084-90의 유연벽 투수시험(Flexible Wall Permeameter test)방법에 근거하여 실시하였다.

일축압축시험은 직경 10cm, 높이 20cm의 원통형 공시체를 제작하여 측정하였으며, 도로의 보조기층재 및 빈배합 콘크리트 기층재의 사용성에 대해 알아보하고자 KS F 2314에 근거하여 실시하였다.

표 7. 실험에 사용된 비회의 특성

항목	수치
이산화규소(%)	46~52
수분(%)	0.05
강열 감량(%)	5
밀도(kN/m^3)	20.6
활성도 지수(%)	재령 28일
	재령 91일
	98~100

직접전단 시험은 파괴면에 일정한 수직응력을 가하고 전단응력을 계속 증가시켜 전단파괴가 발생될 때의 전단강도를 구하여 일반도로성토재로 사용이 가능한지에 대해 알아보고자 KS F 2343에 근거하여 실시하였다.

지반 내의 적정한 공기량은 내부수분의 동결로 인한 팽창압력을 상쇄시켜 주기 때문에 균열발생을 억제시켜주며, 워커빌리티(Workability)에 큰 영향을 미친다. 굵은 골재 최대치수가 20~40mm인 재료에서는 공기량 3~5%를 표준으로 하고 있다. 배합시료 안에 포함되어 있는 공기량을 측정하기 위하여 AASHTO T 152에 근거하여 실시하였다.

4. 결과 분석 및 고찰

4.1 비중 및 단위중량

영흥, 삼천포화력본부 매립회와 비회의 비중 및 단위중량은 표 8과 같다. 일반적으로 모래의 비중은 2.65, 점토질 흙은 2.65~2.75, 사질토는 2.55~2.65, 실트질 흙은 2.40~2.60 정도이다. 따라서, 매립회와 비회 모두 일반적인 모래의 비중보다는 작아 경량성의 특징을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 석탄회를 경량성토재로 사용하기 위해서는 단위중량이 10.78~14.7 kN/m^3 의 범위 안에 들어야 하는데 영흥 및 삼천포화력본부의 매립회는 범위를 만족시키고 있으므로 경량성토재료로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다. 표 9는 콘크리트 벽돌 제작을 위한 비중 값을 보여주고 있는데 매립회와 비회 모두 범위 안에 들지 않는다. 따라서 매립회와 비회는 콘크리트 벽돌 및 속빈 콘크리트 벽돌의 재료로 활용되기에 부적합한 반면에, 보·차도용 인터록킹 블록에는 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

4.2 입도 및 다짐시험

체분석 및 비중계 실험을 통하여 영흥 및 삼천포화력본부에서 부산되는 매립회와 비회의 입도분포곡선을 그림 1에 나타내었다. 통일분류법에서는 자갈의 경우 $C_u \geq 4$, $C_g = 1 \sim 3$,

표 8. 비중 및 단위중량시험결과

구분	매립회		비회	
	비중	단위중량(kN/m^3)	비중	단위중량(kN/m^3)
영흥화력본부	1.84	14.03	2.23	15.30
삼천포화력본부	1.99	12.85	2.39	15.70

표 9. 콘크리트 벽돌 제작을 위한 비중 값

구분	콘크리트 벽돌	속빈 콘크리트 벽돌	보차도용 인터록킹 블록
비중	1.7미만	1.7미만	규정없음

모래의 경우는 $C_u \geq 6$, $C_g = 1 \sim 3$ 이면 양입도이다. 단, 위 조건을 하나라도 만족시키지 못하면 빈입도로 판정하고 있다. 입도분석결과 영흥화력본부 매립회는 $C_u=3.2$, $C_g=0.71$, 비회는 $C_u = 1.875$, $C_g=0.97$, 삼천포화력본부 매립회는 $C_u = 3.83$, $C_g=0.66$, 비회는 $C_u = 1.91$, $C_g=0.59$ 로 나타나 영흥 및 삼천포화력본부의 석탄회의 입도분포는 빈입도 상태임을 알 수 있었다. 삼천포화력본부에서 부산된 석탄회의 입도 분포가 영흥화력본부에서 부산된 석탄회의 입도 분포보다 더 좋음을 알 수 있었다. 영흥, 삼천포화력본부의 매립회와 비회의 입도분석 결과 표 10에서 보여주고 있는 도로의 노상재료로서의 사용기준과 비교해본 결과 매립회의 경우 빈입도 상태를 보이지만 상부노상의 채움재료로서는 기준을 만족하여 상부의 노상재료로서의 활용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 비회의 경우에는 조건을 만족하지 못하는 것

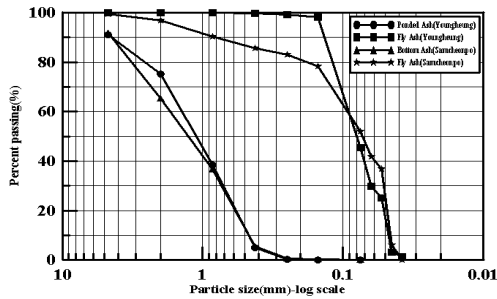
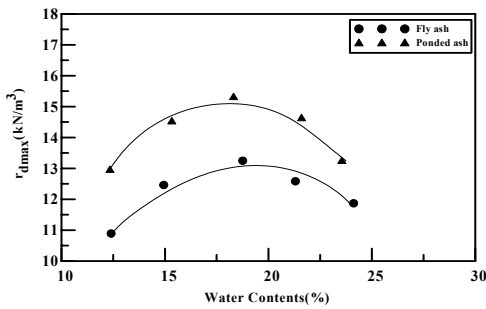


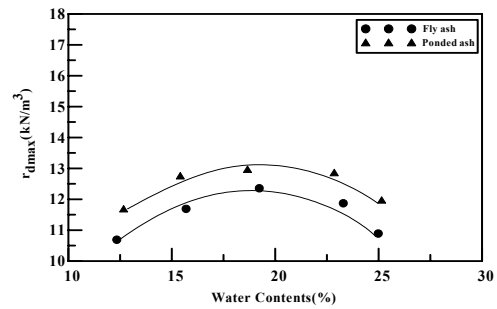
그림 1. 입도분포곡선(영흥 및 삼천포화력본부)

표 10. 노상재료의 특성(한국도로공사, 2001)

노상의 구분	최대치수	No.4체 통과량	No.200체 통과량
상부노상	100mm	25~100%	0~25%
하부노상	150mm	-	50%이하



(a) 영흥화력본부



(b) 삼천포화력본부

그림 2. 다짐곡선

표 11. 다짐시험결과

구분	매립회		비회	
	γ_{dmax} (kN/m ³)	O.M.C(%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	O.M.C(%)
영흥화력본부	15.2	18.7	13.77	19.1
삼천포화력본부	13.14	18.9	12.3	19.8

으로 나타났다. 따라서, 비회를 적극 활용하기 위해서는 함수조건, 기타 재료와의 배합조건, 첨가제의 사용 등의 다양한 시료 조건에 대한 시험이 요구된다.

흙의 다짐은 함수비를 크게 변화시키지 않고 간극 내의 공기를 배출시켜 입자간의 결합을 치밀하게 함으로써 단위중량을 증가시키는데 목적이 있다. 보통 일반도로성토재로 사용되는 화강토는 $r_{dmax}=18.14 \sim 18.83 \text{ kN/m}^3$, O.M.C=12.1~14.7% 이다(천병식 등, 1996). 영흥, 삼천포화력본부의 매립회와 비회 다짐시험 결과는 표 11, 그림 2와 같다. 실험결과 영흥, 삼천포화력본부 매립회와 비회는 일반도로성토재로 사용되는 화강토의 r_{dmax} 보다는 작고 O.M.C는 큰 값을 나타내었다. 이와 같이 다짐한 석탄회는 화강토와 비교하여 경량성의 특징을 띠고 있다. 특히, 구조물의 뒷채움재로 사용할 경우 토압면에서 보아 매우 우수한 성질을 갖고 있다고 볼 수 있다(천병식 등, 1996). 경량성토재는 시공재료 자체의 단위중량이 작기 때문에 하중의 증가가 적으므로 하중의 영향으로 인한 지반의 응기 및 압밀침하에 따른 함몰 등으로 인한 인접 구조물에 미치는 영향이 적다(박민용, 2004). 그리고 도로공사 표준시방서에 다짐 후 건조밀도가 14.72 kN/m^3 이상이면 성토재료로 사용 가능하다고 표기되어 있는데 다짐시험결과 영흥화력본부의 매립회는 건조밀도가 15.2 kN/m^3 로써 14.72 kN/m^3 이상을 만족시키므로 성토재료로 사용될 수 있지만, 삼천포화력본부의 매립회는 13.14 kN/m^3 로 성토재료로 부적합하다고 판단된다.

4.3 삼축투수시험

본 연구에서 사용한 석탄회의 투수계수는 표 12에 나타나

있고, 표 13에서의 포화토의 대표적인 투수계수와 비교해 보면, 영흥화력본부 매립회의 평균 투수계수는 4.83×10^{-4} cm/sec, 비회의 평균 투수계수는 1.42×10^{-6} cm/sec로써 매립회는 세립질 모래의 투수계수와 일치하고 비회는 점토의 투수계수 범위 안에 포함된다. 삼천포화력본부 매립회의 평균 투수계수는 4.01×10^{-2} cm/sec, 비회는 1.76×10^{-4} cm/sec로써 매립회는 조립질 모래에 속하고, 비회는 세립질 모래에 속함을 알 수 있었다. 실험결과, 매립회의 경우 뒷채움재를 요구하는 현장의 경우에 활용될 수 있을 것으로 판단되나 비회의 경우는 차수층으로 사용되기 위한 재료의 기준 투수계수인 1.00×10^{-7} cm/sec을 만족시키지 못하고 있으므로 불투수층을

표 12. 삼축투수 시험결과

구분	매립회	비회
	투수계수(cm/sec)	투수계수(cm/sec)
영흥화력본부	4.83×10^{-4}	1.42×10^{-6}
삼천포화력본부	4.01×10^{-2}	1.76×10^{-4}

표 13. 포화토의 대표적인 투수계수(이인모, 2000)

흙의 종류	투수계수	k(cm/sec)
깨끗한 자갈		1.0~100
조립질 모래		0.01~1.0
세립질 모래		0.001~0.01
실트질 점토		0.00001~0.001
점토		0.000001이하

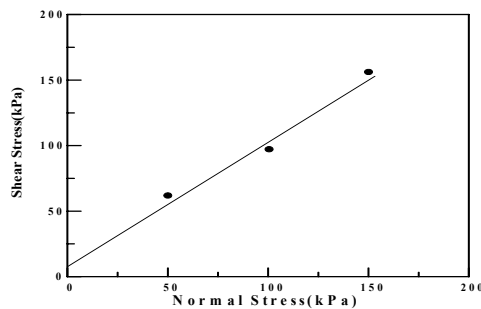
요구하는 현장에 단독으로 적용시키기 힘들 것으로 판단된다.

4.4 일축압축시험 및 직접전단시험

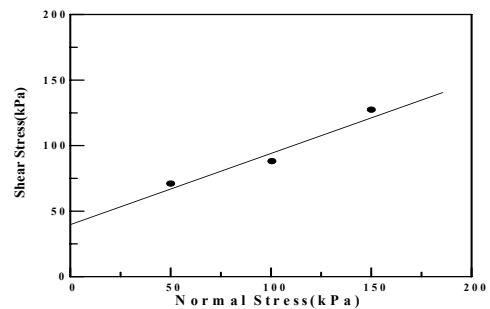
매립회 100%, 비회 100% 만을 사용하여 제작한 공시체의 일축압축강도 실험결과는 표 14와 같다. 석탄회를 도로의 보조기층재로써 활용하기 위해서는 일축강도가 200kPa, 기층재로써 활용하기 위해서는 일축강도가 300kPa을 만족시켜야 한다(천병식 등, 1997). 실험결과, 영흥화력본부 매립회는 55kPa, 비회는 40kPa, 삼천포화력본부 매립회는 50kPa, 비회는 42kPa의 강도가 나왔다. 매립회만을 사용했을 때는 매립회 사이의 공극으로 인한 영향으로 도로 보조기층재 등으로 사용 시 침하가 발생할 가능성이 크고 비회만을 썼을 때는 유동성이 좋지 않아 작업공정에 영향을 미칠 수 있다. 그리고 빈배합 콘크리트 기층의 일축압축강도 기준은 도로공사 표준시방서에서 4.9MPa로 규정하고 있다. 이렇듯 매립회와 비회만을 단독으로 도로 보조기층재 및 기층재, 빈배합 콘크리트 기층재로 사용하기에는 충분한 강도를 발휘할 수 없을 뿐 아니라 침하 및 작업성에 영향을 줄 것으로 판단된다. 따라서 매립회와 비회를 도로 보조기층재로, 기

표 14. 일축압축 시험결과

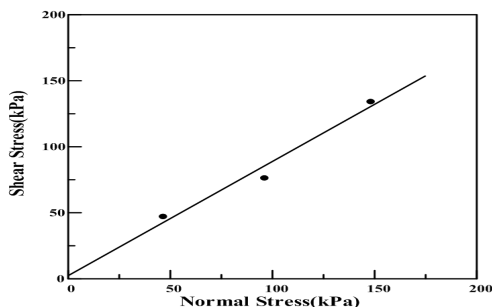
구분	매립회(kPa)	비회(kPa)
영흥화력본부	55	40
삼천포화력본부	50	42



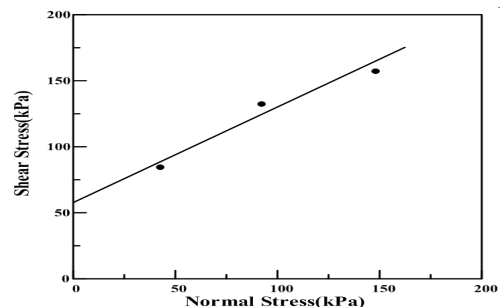
(a) 매립회(영흥화력본부)



(b) 비회(영흥화력본부)



(c) 매립회(삼천포화력본부)



(d) 비회(삼천포화력본부)

그림 3. 전단시험결과

표 15. 직접전단 시험결과

구분	매립회		비회	
	c(kPa)	ϕ (°)	c(kPa)	ϕ (°)
영흥화력본부	10	43.5	35	28.5
삼천포화력본부	2	40.9	65	34.1

층재, 빈배합 콘크리트 기층재로 사용하기 위해서는 시멘트 및 화강토와 같은 재료와 혼합하여 사용해야 건설재료로서의 활용이 가능할 것이라 판단된다.

직접전단시험을 통하여 영흥화력본부, 삼천포화력본부의 매립회와 비회를 일반도로성토재로 사용하기 위한 적합성을 알아보려고 하였다. 실험결과는 그림 3, 표 15와 같다. 영흥 및 삼천포화력본부의 매립회는 흔히 각진 모래의 입자에서 나타나는 30°~45°의 범위에 속하고, 비회는 일반적인 실트질 흙의 내부마찰각 26°~35°의 범위에 속하는 것으로 나타났다. 일반도로성토재로 쓰이는 화강토의 점착력은 10kPa, 내부마찰각은 32°이다. 따라서, 영흥 및 삼천포화력본부의 매립회를 일반도로성토재로 사용 시 화강토의 대체재료로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

4.5 공기량 시험

지반 내의 적정한 공기량은 내부수분의 동결로 인한 팽창압력을 상쇄시켜 주기 때문에 균열발생을 억제시켜주며, 워커빌리티(Workability)에 큰 영향을 미친다. 지반의 동결융해 작용에 저항하고자 내부에 3~5%의 공기를 함유해야 한다. 실험결과, 비회의 혼합율이 100%일 경우는 공기량이 약 0.25~1% 범위에 나타났는데 이는 미연탄소분의 함량이 높아 이들이 기포에 흡착하여 공기량을 저하시키는 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 반면, 매립회의 혼합율이 100%일 경우는 공기량이 약 4~4.7% 범위에 나타났는데 이는 입자크기가 작은 분말 상태의 비회와는 달리 저회는 잔골재와 유사한 정도로 입자가 크기 때문에 비회와 같은 공기량 흡착현상이 발생하지 않았던 것으로 판단된다. 따라서, 동결융해에 저항하기 위한 목표공기량은 3~5%이므로 건설재료로 비회만 사용했을 시 목표공기량을 얻을 수 없다. 반면 매립회의 경우에는 목표공기량 범위 안에 포함되므로 건설재료로 유용하게 쓰일 것이라 판단된다.

4.6 유·무연탄의 공학적 특성 비교·분석

본 연구에서는 국내 화력발전소에서 부산되는 유연탄 석탄회와 무연탄 석탄회의 특성을 비교·분석 하고자 하였다. 휘발성 물질이 비교적 많이 포함되어 있어 연소할 때 화염과 연기를 내며 타는 물질을 유연탄이라 하며, 휘발성 물질

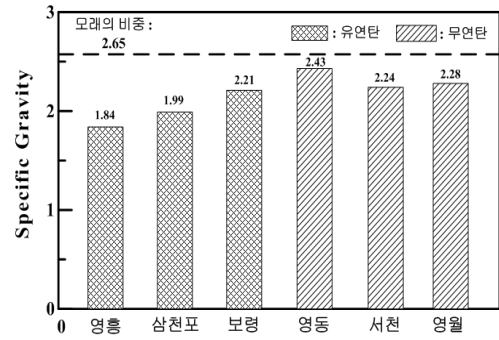


그림 4. 유연탄과 무연탄의 비중 비교 그래프

의 함유량이 적은 것을 무연탄이라 한다. 무연탄은 유연탄보다 탄화 정도가 높아 화력이 강하고 발열량이 가장 높은 석탄이다. 무연탄 석탄회와 유연탄 석탄회를 비교해보면 평균입경, 미연탄소량, 알칼리 함량, CaO 함량 등이 다르기 때문에 공학적으로 성질이 다를 것으로 판단된다. 따라서 유연탄 석탄회를 연소하는 영흥화력본부, 삼천포화력본부, 보령화력본부와 무연탄 석탄회를 연소하는 3개의 발전소에서 부산되는 저회와 비회를 영흥화력본부의 매립회, 비회와 공학적 특성을 비교·분석해 보았다. 그림 4는 유연탄과 무연탄의 비중을 비교한 그래프이다. 유연탄을 연소시키는 발전소에서 부산된 저회는 비중이 1.84~2.21로 나타났고, 무연탄을 연소시키는 발전소에서는 2.24~2.43으로 나타났다. 일반적으로 모래의 비중은 대략 2.65 정도인데 유·무연탄을 연소시킨 발전소에서 부산된 저회의 비중은 모두 모래의 비중보다 낮은 값을 보이고 있고, 특히 유연탄의 비중이 무연탄의 비중보다 더 작은 값을 보이고 있었다.

표 16은 대상시료의 물리실험결과를 보여주고 있다. 통일분류법(KS F 2324)에 의하면 유·무연탄에 관계없이 비회는 대부분 ML에 속하지만 영월화력본부와 삼천포화력본부 비회만이 SM으로 분류되며 매립회 및 저회의 경우 SW, SP와 같이 sand로 분류된다. AASHTO 분류법으로 분류해 본 결과 비회는 A-4군에 해당하고 저회는 A-1-b에 해당한다. AASHTO 분류법에 의하면 A-4는 실트질 흙으로써 노상토로서의 적용은 어렵다. 또한 A-1-b는 주요구성재료가 석편, 자갈, 모래로써 노상토에 적용하기 아주 좋다. 따라서 입도 분포에 따른 도로포장기초재료로서의 가치나 노상재료로서의 적합성을 봤을 때 유·무연탄과 관계없이 매립회 및 저회가 적합하다고 판단된다.

다짐시험결과 유연탄의 경우 γ_{dmax} 는 10.40~16.38kN/m³, 무연탄의 경우 γ_{dmax} 는 13.77~16.67kN/m³로써 보통 흙보다 작은 값을 나타내어 경량성의 특징을 가졌고, 무연탄 석탄회가 유연탄 석탄회 보다 큰 γ_{dmax} 를 가졌다. 특히, 구조물의 뒷채움재로 사용할 경우 토압면에서 보아 매우 우수한

표 16. 물리실험결과

구 분	비중	투수계수 (cm/sec)	AASHTO	통일 분류법	점착력 (kPa)	내부마찰각 (deg)	γ_{dmax} (kN/m ³)	O.M.C (%)	
유연탄	영흥화력본부 매립회	1.84	4.83×10^{-3}	A-1-b	SP	10	43.5	16.38	18.7
	영흥화력본부 비회	2.23	1.42×10^{-6}	A-4	ML	35	28.5	13.77	16.05
	삼천포화력본부 매립회	1.99	4.01×10^{-2}	A-1-b	SW	2	40.9	13.14	23.1
	삼천포화력본부 비회	2.39	1.76×10^{-6}	A-4	SM	65	34.1	10.40	19.8
	보령화력본부 저회 (천병식 등, 1988)	2.21	2.893×10^{-5}	A-1-b	ML	-	-	15.60	25.6
	보령화력본부 비회 (천병식 등, 1988)	2.1	2.130×10^{-5}	A-4	ML	2.5	32	14.57	26.4
무연탄	영동화력발전처 저회 (천병식 등, 1988)	2.43	1.543×10^{-3}	A-1-b	SW	-	-	14.22	20.20
	영동화력발전처 비회 (천병식 등, 1988)	2.4	1.883×10^{-5}	A-4	ML	1	31	16.67	21.9
	서천화력본부 저회 (천병식 등, 1990)	2.24	6.51×10^{-3}	A-1-b	SW	17	34.7	14.32	15.40
	서천화력본부 비회 (천병식 등, 1990)	2.33	1.76×10^{-4}	A-4	ML	25	23.7	13.83	14.10
	영월화력본부 저회 (천병식 등, 1990)	2.28	1.05×10^{-1}	A-1-b	SW	0	33	14.96	17.30
	영월화력본부 비회 (천병식 등, 1990)	2.23	1.02×10^{-4}	A-4	SM	3	28	13.77	18.50

성질을 갖고 있다고 볼 수 있다(천병식 등, 1996). 경량성토재는 시공재료 자체의 단위중량이 작기 때문에 하중의 증가가 적으므로 하중의 영향으로 인한 지반의 용기 및 압밀침하에 따른 함몰 등으로 인한 인접 구조물에 미치는 영향이 적다(박민용, 2004).

투수계수는 비슷한 입도분포를 갖는 보통 흙의 투수계수와 비슷하다고 볼 수 있다. 전반적으로 봤을 때 유연탄의 저회보다 무연탄의 저회의 투수계수가 더 큼을 알 수 있었다. 비회의 투수계수는 작은 편이고 그 중에서 영흥화력본부의 비회가 가장 작은 투수계수를 보이고 있다. 일반적으로 비회는 포졸란 반응에 의한 잠재수경성을 가지므로 자체의 석회 함유량 등에 따라 시간에 따른 투수계수는 더 작아질 가능성이 있다. 또한, 저회의 투수계수는 큰 편으로 특히 영동, 삼천포화력본부 매립회의 투수계수가 크게 나타났다.

위의 사항들을 조합해볼 때 석탄회가 경량성을 요구하는 곳에 건설재료로 사용 시에는 무연탄 발전소에서 부산된 석탄회 보다는 유연탄 발전소에서 부산된 석탄회를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 그리고 무연탄의 저회 보다 유연탄의 저회 투수계수가 크기 때문에 뒷채움재를 요구하는 현장에서는 무연탄 발전소에서 부산되는 석탄회를 사용하는 것이 효과적일 것이라 판단된다. 마지막으로 영흥화력본부의 비회가 가장 작은 투수계수를 나타냈으므로 불투수층을 요구하는 매립장 등의 현장에 적용하기에 가장 적합할 것이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 영흥화력본부에서 부산되는 비회, 매립회를 건설재료로 활용하기 위한 기초적 연구로서 사용재료의 물리 시험과 역학시험을 실시하여 건설재료로서 활용하기 위해 공학적 특성을 검토하였고, 삼천포화력본부에서 부산되는 비회와 매립회의 특성과 비교·분석을 실시하였다. 추가로 무연탄 및 유연탄을 사용하는 발전소에서 부산된 석탄회의 공학적 특성들을 비교하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 비중 및 단위중량 시험결과 일반적인 모래의 비중보다는 낮은 값을 보이고 있어 경량성 재료로 사용될 수 있을 것이라 판단된다. 콘크리트 벽돌 제작을 위한 비중의 범위에 따르면 매립회와 비회를 보·차도용 인터록킹 블록에 활용가능성이 큰 것으로 판단된다.
- (2) 입도분석 결과를 토대로 영흥화력본부와 삼천포화력본부의 매립회와 비회를 도로의 노상재료로써의 사용기준과 비교해본 결과 매립회의 경우 상부노상의 채움재료로써의 기준을 만족하여 활용이 가능할 것으로 판단되나 비회는 조건을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 비회는 기타 재료와의 배합 등을 통하여 사용될 것으로 요구된다.

- (3) 다짐시험결과를 토대로 영흥화력본부의 매립회는 건조 밀도가 15.2kN/m³로써 도로공사 표준시방서에서 성토 재료로 사용하기 위한 값인 14.72kN/m³ 이상을 만족시키므로 성토재료로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 삼축투수시험결과 매립회의 경우 뒷채움재를 요구하는 현장의 경우에 활용될 수 있을 것으로 판단되나 비회의 경우는 차수층으로 사용되기 위한 재료의 기준 투수계수인 1.00×10⁻⁷cm/sec을 만족시키지 못하고 있으므로 불투수층을 요구하는 현장에 단독으로 적용시키기 힘들 것으로 판단된다.
- (5) 일축압축시험결과로써 도로의 보조기층재료로서의 활용성을 분석해본 결과 매립회와 비회 단독으로 도로 보조기층재 및 기층재로 사용하기에는 적합하지 않다고 판단된다. 따라서 매립회와 비회를 도로 보조기층재로 사용하기 위해서는 두 가지 재료를 적정 혼합하여 적용성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (6) 직접전단시험결과 영흥 및 삼천포화력본부의 매립회는 일반도로성토재료 사용 시 화강토의 대체재료로 사용이 가능할 것으로 판단된다.
- (7) 경량건설재료가 요구되는 곳에 석탄회를 사용할 경우에는 무연탄 발전소에서 부산된 석탄회 보다 유연탄 발전소에서 부산된 석탄회를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 그리고 무연탄 보다 유연탄의 투수계수가 크기 때문에 뒷채움재를 요구하는 현장에서는 무연탄 발전소에서 부산되는 석탄회를 사용하는 것이 효과적일 것이라 판단된다. 영흥화력본부의 비회는 가장 작은 투수계수를 나타냈으므로 불투수층을 요구하는 매립장 등의 현장에 적용하기에 가장 적합할 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부가 지원하고 한국에너지기술평가원이 시행하는 전력산업연구개발 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 강철(2006), *바탕에시를 이용한 경량간막이재 개발에 관한 실험적 연구*, 석사학위논문, 공주대학교, pp. 17.
2. 권혁두(2008), *지반보강 및 차수 그라우팅재료로서의 Bottom Ash 활용에 관한 연구*, 박사학위논문, 서울시립대학교, pp. 2.

3. 김범주(2004), 미국의 석탄회 재활용 동향, *한국지반환경공학회*, Vol. 5, No. 3, pp. 62~64.
4. 박민용(2004), *경량성토재료로서의 부산석회 재활용 방안 연구*, 석사학위논문, 홍익대학교, pp. 12.
5. 이인모(2000), *토질역학의 원리*, 세론, pp. 151.
6. 천병식, 고용일(1992), 석탄회의 도로성토재 및 노상재료로서의 활용을 위한 비회와 저회의 적정혼합비, *대한토목학회 논문집*, Vol. 12, No. 1, pp. 177~176.
7. 천병식, 고용일, 오민열, 권형석(1990), 산업폐기물로 발생하는 석탄회의 토질역학적 특성에 관한 연구, *대한토목학회 논문집*, Vol. 10, No. 1, pp. 115~123.
8. 천병식, 권형석 문보원, 류지양(1997), 석탄회의 도로노반재로서의 활용에 관한 연구, *1997년 학술대회 논문집(II)*, 대한토목학회, pp. 61-64.
9. 천병식, 장명순, 최현석(1996), 석탄회의 성토재 및 포장재료로서의 재활용을 위한 기초연구, *1996년 연약지반처리위원회 봄 학술세미나*, 한국지반공학회, pp. 931~107.
10. 천병식, 조영구(1988), 화력발전소에서 부산되는 석탄회의 공학적 특성, *대한토목학회 논문집*, Vol. 8, No. 2, pp. 59~66.
11. 한국도로공사(2001), *도로설계요령*, pp. 35~104.
12. 한국콘크리트학회(2003), *콘크리트 표준시방서 해설*, 한국콘크리트 학회, pp. 49~78.
13. 한국표준규격(2001), *흙의 다짐 시험 방법*, KS F 2312, pp. 1~8.
14. 한국표준규격(2001), *흙의 일축 압축 시험 방법*, KS F 2314, pp. 1~7.
15. 한국표준규격(2005), *굵은 골재 및 잔골재의 체가름 시험 방법*, KS F 2502, pp. 1~8.
16. 한국표준규격(2005), *석재의 흡수율 및 비중 시험 방법*, KS F 2518, pp. 1~6.
17. 한국표준규격(2005), *흙의 입도 시험 및 물리 시험용 시료 조제 방법*, KS F 2301, pp. 1~7.
18. 한국표준규격(2006), *굵기 정도에 의한 굵은 골재의 연석량 시험방법*, KS F 2516, pp. 1~8.
19. 한국표준규격(2006), *흙의 공학적 분류 방법*, KS F 2324, pp. 1~10.
20. 한국표준규격(2007), *굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험방법*, KS F 2503, pp. 1~11.
21. 한국표준규격(2007), *로스앤젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모 시험*, KS F 2508, pp. 1~12.
22. 한국표준규격(2007), *압밀 배수 조건에서 흙의 직접 전단시험 방법*, KS F 2343, pp. 1~9.
23. 한국표준규격(2007), *콘크리트용 골재*, KS F 2526, pp. 1~13.
24. 환경부(2008), *제 4차 자원재활용 기본계획*, pp. 100~102.
25. American Coal Ash Association(2008), CCP Survey, Retrieved from http://aca.affiniscape.com/association/8003/files/2008_ACAA_CCP_Survey_Report_FINAL_100509.pdf.
26. AASHTO(2009), *Standard Method of Test for Density (Unit Weight)*, AASHTO T 121, pp. 1~4.
27. AASHTO(2005), *Standard Method of Test for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*, AASHTO T 152, pp. 1~4.
28. ASTM(2003), *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*, ASTM D5084-90, pp. 1~8.

(접수일: 2009. 12. 4 심사일: 2009. 12. 10 심사완료일: 2010. 1. 8)