

성토재로서 석탄회의 안정제 혼합 효과에 관한 연구

A Study on the Admixture Stabilization of Domestic
Coal Ashes as the Fill Material

박 은 영*1	조 삼 덕*2
Park, Eun-Young	Cho, Sam-Deok
김 진 만*3	김 종 학*4
Kim, Jin-Man	Kim, Jong-Hak

Abstract

Recently, the treatment of coal ashes produced from thermal electric power plants have been raised as a serious problem in according to the increasing of electric power demand in Korea. This paper deals with a re-use method of coal ash as a fill material. Two domestic coal ashes are mixed with cement and lime to improve the mechanical properties of coal ash. The mechanical properties such as compressive strength, compressive deformation, permeability and frost heaving property are investigated in according to the change of admixture rate, curing temperature and curing time.

In this study, it is found coal ash (fly ash+bottom ash) and fly ash with 2%~3% cement can be used as a fill material, respectively. It is also found the frost heaving properties of coal ash is effectively improved by the mixture of 6%~9% cement.

요 지

최근 우리 나라의 경우 산업 발달과 함께 급속히 증가하는 전력 수요에 따라 화력발전소에서 발생하는 산업 부산물인 석탄회 처리 문제가 심각하게 대두되고 있다. 따라서 산업 부산물을 재활용하는 차원에서 석탄회를 성토재로 활용하기 위한 공학적 성질 개선 방안으로 안정제 혼합 효과를 구명하기 위하여 삼천포, 서천 화력 발전소에서 부산되는 석탄회 시료에 대해 시멘트와 석회를 안정제로 사용하여 석탄회의 혼합률, 장기 재령, 양생 온도 변화에 따른 강도 특성을 살펴 보았으며, 동결융해시험, 압밀시험 그리고 투수 시험에 따른 내구성 증대, 압축성 및 투수성 감소 특성을 검토 하였다.

연구 결과 매립회(coal ash)는 각종 성토 재료로 사용이 가능한 것으로 나타났으며, 특히 비회(fly ash)는 2~3% 정도의 시멘트를 첨가함으로써 양호한 성토재로 사용할 수 있는 것으로 나

*1 정희원, 코오롱건설기술연구소 선임연구원

*2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

*3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원

*4 한국전력공사기술연구원 선임연구원

타났고 동결 용해가 우려되는 지역에 성토재로 석탄회를 활용할 경우는 안정제를 6~9% 정도 적절히 혼합하여 사용하는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

1. 서론

최근 급속한 경제발전에 따라 에너지 수요가 급격히 증가하고 있으며 이로 인해 현재 석탄을 원료로 사용하는 화력발전소에서 발생하는 석탄회는 연간 약 200만 톤에 달하고 있다. 또한 정부의 장기 전력 수급 계획에 따르면 2006년에는 연간 약 550만 톤의 석탄회가 발생되리라 전망되고 있는데 반하여 현재 운용 중인 회처리장의 규모는 가동 중인 화력 발전소의 내구 용량에 훨씬 미달되고 있는 실정이다. 따라서 폐기물의 재생 활용 차원에서 석탄회의 대량 이용 가능 분야의 연구, 개발이 시급한 시기이다. 이와 같이 현재 국내의 협소한 국토 여건상 대규모의 회처리장을 신축하는 것은 매우 어려운 실정이므로 이러한 문제점을 해소하고자 하는 방안 중의 하나로 본 연구에서는 우리 나라 서·남해안의 매립 현장을 비롯한 각종 성토 공사에서 필요한 토공재료로서의 석탄회 대량 활용 방안을 모색하고자 수행하였으며, 이를 위해서는 무엇보다 우선적으로 석탄회의 물리·역학적 특성 등이 구명되어야 한다.

본 연구에서는 국내 화력 발전소에서 부산되는 석탄회중 지지력이 낮은 비회를 도로 성토재로 활용하고자 할 경우나 매립회의 지지력을 개선하여 보다 높은 지지력이 요구되는 성토 분야에서의 활용성을 모색하기 위하여 석탄회의 강도 및 내구성을 증가시키기 위한 공학적 성질 개선 방안으로 시멘트, 석회, 시멘트+석회를 안정제로 사용한 혼합 석탄회의 강도변화특성, 내구성 증대, 압축성 및 투수성 감소 특성을 검토함으로써 회처리장 내의 매립회를 포함한 석탄회의 대량 이용이 가능할 것으로 예상되는 성토재로서의 활용 가능성을

모색하고 국내의 실용화 기반을 구축하고자 수행하였다. 이에 본 연구에서는 국내의 삼천포(유연탄계), 서천(무연탄계)화력 발전소에서 부산되는 석탄회를 대상으로 석탄회의 장기 재령에 따른 자체 경화특성 및 내구성을 구명하였으며, 안정제 혼합 석탄회의 혼합률, 장기 재령, 양생 온도 변화에 따른 압축강도변화 특성을 검토하였다.

또한 국내 기후 여건상 겨울철에 동결되었다가 봄철에 용해되는 동결용해작용에 의하여 노반의 지지력 감소를 유발할 수 있는 한랭지나 고산악지에서 석탄회를 도로 성토재로서 효율적으로 활용하기 위해서는 내구성이 확보되어야 하며, 이를 구명하기 위해 안정제의 혼합률 변화에 따른 동결용해시험과 압밀, 투수 시험을 병행하여 실시함으로써 안정제 혼합 석탄회의 내구성 증대, 압축성 그리고 투수성 감소 특성을 검토하였다. 기존의 연구로 석탄회를 도로성토재로 활용시 비회와 저회의 적정 혼합비를 산정한 후 안정제로서 시멘트 혼합시 동해 및 동상 저항 특성에 관한 연구와는 달리 본 연구에서는 회 수송관을 통해 매립장에 투기된 매립회와 사일로(silo) 및 전기집진기의 판로를 통해 채취한 비회를 대상으로 재령 및 안정제 혼합률에 따른 강도 특성, 투수 및 압축 특성, 내구성에 관한 연구를 수행하여 적정한 안정제 혼합 효과를 구명하였다.

2. 국내외 연구 동향

안정제 혼합 석탄회에 관한 기존 외국의 연구 동향은 석탄회의 비중이 작아 비회는 장기적으로 수평토압을 감소시킬 수 있다는 점을 응용하여 압축성이 큰 지반에 뒷채움재로서의 활용에 관한 연구(Gray-Lin, 1972)⁽¹⁾, 안정제 혼합에 따른 장기 강도증가에 관한 연구

(Joshi-Nagaraj, 1987)⁽²⁾, 경량 콘크리트의 혼화재 및 황화물에 대한 저항력 증가, 비회를 이용한 잔류토의 부식 저항에 관한 연구, 팽창성 지반에서의 Swelling 방지 효과에 관한 연구(Indraratna, 1991)⁽³⁾ 등 순수석탄회 및 안정제 혼합시 포졸란 반응 효과에 의한 역학적 특성 개선 효과를 위하여 안정제 종류, 혼합률, 온도 등에 따른 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

국내에서는 비회를 레미콘 혼화재, 시멘트 원료, 벽돌이나 기와 제조 등에 한정적으로 사용하고 있는 실정이며⁽⁴⁾ 최근 성토재나 도로 기층재 등에 관심이 고조되면서 활발한 연구가 이루어지고 있다. 특히 현재까지 국내에서의 연구 동향은 석탄회의 토질 역학적 특성에 관한 연구,^(5, 6, 7, 8) 국내 석탄회와 화강토에 대해 M_R 시험을 수행하여 응력-변형 거동을 비교하고 CBR치로부터 M_R 환산식을 도출하여 M_R -CBR의 상관관계를 규명하는 연구⁽⁹⁾, 도로성토재로 활용시 동결융해특성 규명 및 내구성 시험에 관한 연구로 비회와 저회의 적정 혼합비를 산정하고 안정제로서 시멘트 혼합시 동해 및 동상 저항 특성에 관한 연구^(10, 11), 비회와 저회 혼합 석탄회의 재령에 따른 강도 특성 및 수침시 내구성에 관한 연구, 환경 영향에 관련한 연구로 회처리장에 매설된 금속 및 콘크리트 시료 등에 대해 고유 저항치를 측정하는 방법으로 부식량을 측정함으로써 건설 자재에 미치는 부식측정에 관한 연구⁽¹²⁾, 석탄회의 침강에 따른 침강 특성과 유효응력 변화의 특성에 관한 연구⁽⁷⁾, 성토재로서의 석탄회의 대량 활용 방안에 관한 연구⁽⁴⁾ 등의 다각적인 연구가 수행된 바 있다.

3. 시료 및 실험 방법

3.1 시료

국내 석탄회는 비회의 일부분만이 사일로(silo)에 저장되고 나머지 대부분이 회처리장에 혼합 매립되는 실정으로 매립회는 순수한

회가 물과 접촉함으로써 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)과 결합하여 불용성 경화 물질을 생성하는 일련의 수화 반응에 의한 자경성 발현 효과와 같은 특성에 의해 다른 공학적 성질을 나타낸다. 따라서 무연탄, 역청탄, 아역청탄, 갈탄 등의 유연탄으로 분류되는 실험 석탄회는 석탄중 회분이 식물 중의 무기질 및 석탄 생성시 혼입된 점토와 석분으로 구성되어 화학 성분의 조성이 다를 수 있기 때문에 원탄의 종류, 연소 방식 및 회처리장 주변의 운반 수송이 용이한 지형적인 조건 등을 고려하여 삼천포(유연탄계), 서천(무연탄계)화력 발전소에서 부산되는 비회와 매립회를 구분하여 사용하였다. 이러한 석탄회는 미분탄기 내에서 건조, 분쇄 후 보일러에서 연소시켜 발생되는데 이때 채취되는 석탄회는 전체 미분탄의 15~45% 정도이며 이들 전체 석탄회중 60~80% 정도 발생하는 비회는 집진 설비에서 포집되며, 20~40% 정도 발생하는 저회는 보일러 저부에서 발생하며 호퍼내에 집적되어 분쇄기에 의해 분쇄된 후 회수송관을 통해 회처리장에 배출된다. 본 연구에 사용된 서천 석탄회의 경우 비회는 전기집진기에서 포집한 후 사일로(silo)에서 채취하였고, 삼천포의 경우는 전기집진기에 연결된 관을 통해 비회를 채취하였으며, 매립회는 회처리장에서 채취하였다.

3.2 실험 방법

3.2.1 화학적 성분

석탄회는 각 화학 성분이 단독으로 존재하는 것이 아니라 용융에 의해 화합물이 되어 존재하며 주요 결정질 광물은 Quartz(석영, SiO_2), Mullite($3Al_2O_3SiO_2$), Magnetite(Fe_3O_4)이고 비결정질의 유리분이 다량 존재해 있다. 석탄회의 화학 성분은 탄종에 따라 다소 차이가 있지만 실리카, 알루미나, 산화세이철이 전체의 80~90%를 차지하는 주된 성분이며 이밖에 CaO , MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O 등의 산화물이 존재하는 것으로 실험 석탄회에 대하여 화학 성분 및 함유량 측정을 위한 성분 분석을 수행하였다.

3.2.2 공학적 특성

석탄회를 성토재로 활용하는데 있어서 선행되어야 할 순수 석탄회 자체에 대한 공학적 특성 실험과 물리적 특성 실험으로는 입도분포, 연경도, 비중, 분말도 그리고 투수 시험을 수행하였으며 역학적 특성 실험으로는 다짐 시험, 압밀 시험, CBR 시험 그리고 강도 시험 등에 대해 재령, 온도, 혼합률 등의 요소를 변화시키면서 수행하였다.

3.2.3 안정제 혼합 효과

본 연구에서 사용된 안정제는 포졸란 활성화 반응에 민감하고 안정제의 수화 작용으로 발생하는 칼슘 이온(Ca^{+2})과 비회에서 용출되는 SiO_3^{-2} 나 $Al_2O_3^{-2}$ 가 반응하여 칼슘실리케이트 수화물(CSH)과 칼슘알루미네이트(CAH)를

생성함으로써 수화물이 장기간에 걸쳐 고화되어 높은 강도 발현 효과를 나타내는데 효과적인 보통 포틀랜드 시멘트와 소석회를 사용하였다. 또한 유리성이 강한 CaO , $CaSO_4$ 를 다량 함유하는 석탄회는 포졸란 활성이 강하고 적량의 수분이 가해지면 Ca^{+2} 를 용출하여 서서히 반응하면서 스스로 경화하여 강도를 발현하는 자경 효과의 특성을 가지고 있으며 석탄회의 포졸란 반응 과정은 다음과 같다.

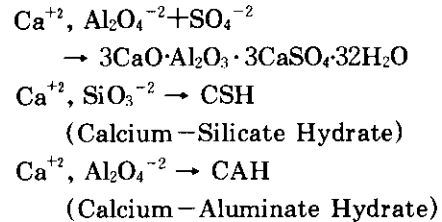


표 1. 안정제 혼합 실험의 항목 및 범위

실험항목	실험석탄회	변화인자	범 위	비 고
다짐시험	삼천포, 서천 (비회, 매립회)	안정제 혼합률	시멘트 : 3%, 6% 석 회 : 3%, 6% 시멘트+석회 : 3%+3%, 3%+6%, 6%+3%	
일축압축 강도시험	삼천포, 서천 (비회, 매립회)	혼합률	시멘트 : 3%, 6% 석 회 : 3%, 6% 시멘트+석회 : 3%+3%, 3%+6%, 6%+3%	
		재 령	0, 3, 7, 28, 57, 90, 180, 280일	
	삼천포, 서천 (비회, 매립회)	양생온도	5, 20, 35℃	
동결융해 시 험	삼천포, 서천 (비회, 매립회)	안정제 혼합률	시멘트 : 3%, 6%, 9%, 12% 석 회 : 3%, 6%, 9%, 12% 시멘트+석회 : 3%+3%, 3%+6%, 6%+3%	· 동결융해에 따 른 중량 감소분 측정 · 압축강도 측정
		동결융해 주 기	3, 6, 9, 12 cycle	
투수시험	삼천포, 서천 (비회, 매립회)	혼합률	시멘트 : 3%, 9% 석 회 : 3%, 9%	
		재 령	0, 7일	
압밀시험	삼천포, 서천 (비회, 매립회)	혼합률	시멘트 : 3%, 9% 석 회 : 3%, 9%	
		재 령	0, 7일	

안정제를 각각 한가지 혼합하였을 경우나 두 가지를 섞어 혼합한 경우, 이때 같은 양의 안정제 혼합물에서 역학적 특성 및 안정제 종류별 우수 효과를 비교하기 위하여 안정제 혼합 실험의 항목 및 범위를 결정하였다. 또한 일반 토사성토재의 역학적 특성 평가 기준에 따른 시공 조건 및 현장 적용시 경제성 등을 고려하여 결정하였으며 이는 표1과 같다.

각 실험 공시체는 정적다짐기와 성형모울드를 사용하여 최적함수비와 최대건조밀도 상태로 제작하였으며, 성형된 공시체는 수분의 증발을 방지하기 위해 랩(wrap)으로 포장하여 상대습도 80~90%, 온도 20℃~25℃의 항온항습기에 보관한 후 재령 변화에 따라 각각 일축압축시험, 투수시험, 압밀시험을 수행하였다.⁽¹³⁾ 동결융해실험은 KS F-2332의 규정에 따라 최대건조밀도 상태로 A-1 공시체와 일축압축시험용 공시체를 성형, 7일간 습윤 양생(상대습도 100%) 시킨 후 24시간 동결(-21℃)을 1cycle로 하여 cycle 변화에 따른 석탄회 시료의 중량과 일축압축 강도의 감소 정도를 측정하였다.

실험시 A-1 모울드는 3, 6, 9, 12 cycle 마다 1.4kg의 힘으로 전 표면을 철술로 2회씩 긁어 중량 감소를 측정하는 방법을 사용하였으며, 병행 제작된 일축압축용 시료에 대한 일축압축 실험을 수행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 화학적 성분 및 함유량

실험 석탄회의 화학적 성분 및 함유량은 표2와 같다. 표2에서 보듯이 국내 석탄회의 성분은 SiO_2 와 Al_2O_3 의 함유량이 80% 이상을 차지하고 있으며 국내, 미국의 비회에 대하여 석탄회의 자경효과에 직접적인 영향을 미치는 CaO 및 각 성분의 화학적 성분 함유율 정도를 비교 도식한 그림1에서와 같이 미국의 석탄회에 비해 포졸란 반응에 의한 자경효과에 영향

을 미치는 CaO 함유량이 상대적으로 저기 때문에 장기 재령에 따른 강도 증가 효과가 비교적 미미하게 나타나는 요인임을 알 수 있다.

표 2. 화학적 성분 및 함유량

발전소 성분(%)	삼천포 (유연탄계)	서천 (무연탄계)
SiO ₂	59.69	55.56
Al ₂ O ₃	28.78	25.82
Fe ₂ O ₃	3.07	4.54
CaO	0.37	0.82
MgO	0.42	1.05
TiO ₂	0.74	
Na ₂ O	0.11	0.33
K ₂ O	1.32	5.81
SO ₃	0.09	1.79
Unburnt	5.06	2.98
Carbon	-	-
강열감량	10.3	5.69
PH	8.47	7.52
비중(g/cm ³)	2.02	2.79

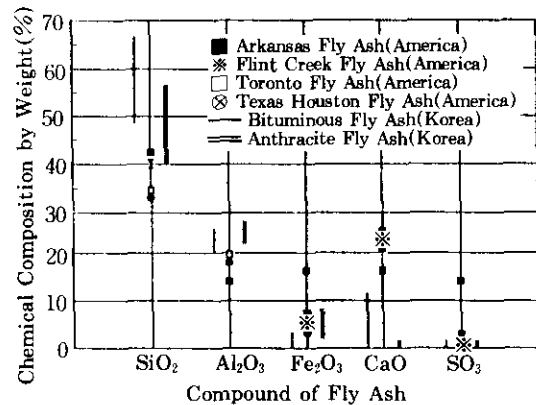


그림 1. 국내·외 석탄회의 화학적 성분 함유율(%)

4.2 공학적 특성

성토재로서 석탄의 적합성을 평가하기 위해서는 물리적, 역학적 기본 특성 실험이 필수적으로 수행되어야 하며 다양한 용도의 성토재료

로 석탄의 활용 가능성을 평가하기 위해 수행한 국내 각 발전소별 실험 석탄회의 물리·역학적 특성치는 표 3과 같다. 표 3에서 보듯이 실험 석탄회의 물리·역학적 특성은 NP(Non Plastic)이고 비중은 2.0~2.3으로 흙에 비해 다소 경량인 특성을 보이고 있어 압축성이 큰

지반에서 뒹채움재로서의 활용성이 기대 된다. 전단 특성은 화강풍화토에 비해 손색이 없는 전단 강도를 나타내고 있으며 투수계수는 $1.360\sim 2.192\times 10^{-5}\text{cm/sec}$ 정도로 실트질 흙과 유사하다. 또한 다짐 특성은 일반적으로 모래질흙에 가까우며 일반흙에 비해 최대전조밀

표 3. 실험 석탄회의 물리·역학적 특성

특성	석탄회종류	삼 천 포		서 천		
		비 회	매 립 회	비 회	매 립 회	
입도 분포	유효입경, $D_{10}(\text{mm})$	0.011	0.013(0.012~0.014)	0.010	0.013(0.008~0.030)	
	균등계수, Cu	1.7	2.7(1.5~3.8)	2.0	24.0(6.5~25.0)	
	곡률계수, Cg	0.7	0.8(0.5~1.0)	0.9	0.4(0.3~1.1)	
연경도	액성한계, LL(%)	-	-	-	-	
	소성지수, PI(%)	NP	NP	NP	NP	
흙분류	통일분류	ML	ML(ML)	ML	ML(ML~SM)	
	AASHTO분류	A-4	A-4(A-4)	A-4	A-4(A-4~A-2-4)	
비중	비 중	2.12	2.17(2.12~2.25)	2.30	2.24(2.02~2.30)	
분말도	분말도(cm^2/g)	1,580~1,960	1,386~1,610	1,315~1,551	1,200~1,278	
다짐	A-1 다짐	$\gamma_{\text{dmax}}(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.20	1.18	1.46	1.49
		O.M.C(%)	26.0	28.0	17.0	16.0
	D-2 다짐	$\gamma_{\text{dmax}}(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.24	1.25	1.50	1.55
		O.M.C(%)	23.7	23.0	14.5	12.3
전단 강도	일축 압축 강도	$q_u(\text{kg}/\text{cm}^2)$	1.09	0.93	0.82	0.43
	직접 전단 강도	$\phi_u(^{\circ})$	32.0	36.9	32.2	39.5
		$C_u(\text{kg}/\text{cm}^2)$	1.50	0.98	0.88	0.82
CBR	CBR 값(%)		1.1	5.7	1.0	21.3
	팽창률 (%)	10회 다짐	3.06	2.21	0.63	0.15
		25회 다짐	2.97	2.12	0.47	0.13
		55회 다짐	2.65	1.97	0.13	0.13
투수	투수계수, $k(\text{cm}/\text{sec})$	1.360×10^{-5}	2.192×10^{-5}	1.490×10^{-5}	2.192×10^{-5}	
압밀	압축지수, C_c	0.13~0.14	0.06~0.11	0.08~0.10	0.06~0.07	
	선형압밀하중, $P_c(\text{kg}/\text{cm}^2)$	0.52~0.65	0.64~1.00	0.34~0.52	0.90~1.50	

주) 매립회에 대한 () 내의 값들은 회처리장 내에서 채취한 3개 시료에 대한 실험값의 범위를 나타냄.

도는 작고 물에 민감하여 큰 함수비에서는 이 토화하는 경향이 있다.

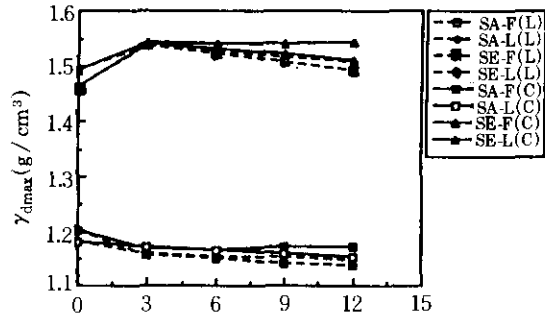
4.3 안정제 혼합 효과

안정제 종류 및 혼합물에 따른 다짐 특성을 살펴보기 위하여 삼천포, 서천 석탄회의 최대 건조밀도와 최적함수비 곡선을 그림2에 나타내었다. 안정제 혼합 석탄회의 다짐곡선은 안정제를 혼합하지 않은 석탄회와 비슷한 경향의 다짐 특성을 보여주며, 그림2에서 보듯이 전반적으로 최적함수비(O.M.C)는 매립회가, 최대 건조밀도(γ_{dmax})는 비회가 약간 크게 나타났다. 안정제 종류 및 혼합물에 따른 삼천포와 서천 석탄회의 다짐 특성을 살펴보면, 석회를 첨가한 경우 최대건조밀도는 매립회가 비회보다 약간 크게 나타나며, 시멘트를 첨가한 경우는 비회가 매립회보다 약간 크게 나타났는데, 이는 시멘트 혼합시 포졸란 반응에 의한 비회 입자간의 고착화 현상 때문인 것으로 판단된다.^(14, 15)

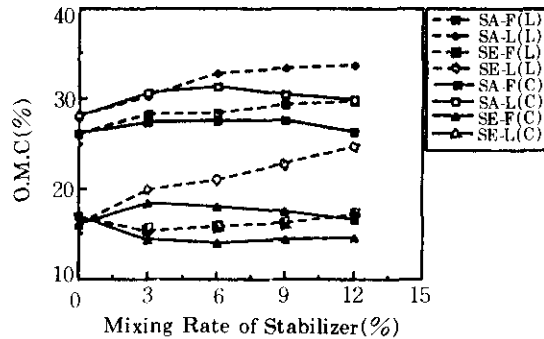
한편, 안정제 종류에 따른 최적함수비는 시멘트를 혼합한 경우 안정제 혼합물이 증가할수록 최적함수비는 거의 일정한 추세를 보이는 반면 석회를 혼합한 경우에는 안정제 혼합물이 증가할수록 최적함수비가 점차 증가하는 경향을 보인다. 또한 최대건조밀도는 안정제로서 석회를 혼합한 경우가 시멘트를 혼합한 경우보다 약간 작게 나타나는데, 이는 석회가 물과 혼합할 때 부피팽창으로 인한 밀도 감소와 친수성에 의한 석탄회 입자간의 마찰 저감 효과 때문인 것으로 사료된다.⁽¹⁶⁾

본 고의 이해를 돕기 위해 그래프에 사용된 실험 석탄회 및 안정제 종류는 삼천포-SA, 서천-SE, 비회-F, 매립회-L, 시멘트-C, 석회-L의 영문 약자로 정의하였다.

그림3에서는 안정제 종류 및 재령에 따른 일축압축 강도를 살펴보기 위하여 안정제를 혼합하지 않은 석탄회와 시멘트, 석회를 각각 6% 혼합한 석탄회에 대하여 재령 0일을 기준으로 재령 280일 경과 후의 강도 증가 특성을 비교



(a) 안정제 혼합물에 따른 최대건조밀도의 변화곡선



(b) 안정제 혼합물에 따른 최적함수비의 변화곡선

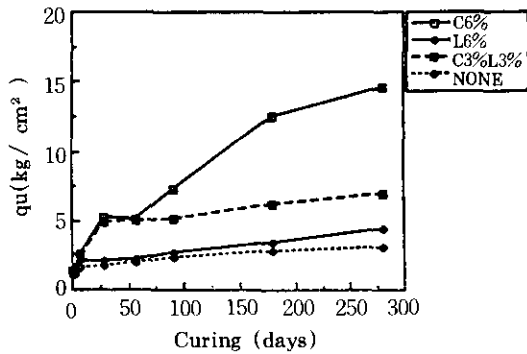
그림 2. 안정제 혼합물에 따른 최대건조밀도와 최적함수비 곡선

하였다. 그림3에서 보듯이 6%의 시멘트와 석회를 각각 혼합한 석탄회와(시멘트 3%+석회 3%)를 혼합한 석탄회의 압축강도 증가율은 안정제를 혼합하지 않은 석탄회에 비해 각각 275~1,023%, 149~250%, 174~478%의 범위로 나타났으며 또한, 안정제로서 6%의 시멘트를 혼합한 석탄회가 6%의 석회를 혼합한 석탄회와(시멘트 3%+석회3%)를 혼합한 석탄회보다 각각 1.51~3.34배, 1.28~2.12배 큰 강도 증가를 보이는 것으로 평가되었다.

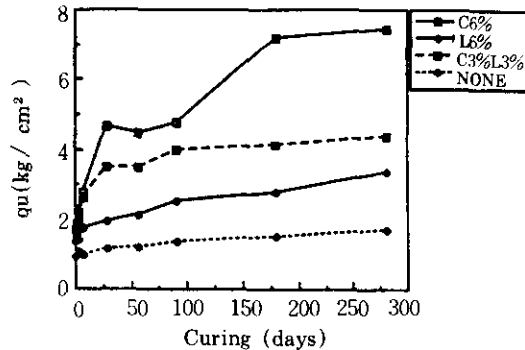
이는 시멘트를 혼합하는 경우가 석회 혼합시보다 활발한 포졸란 반응이 발생하기 때문으로 사료되며 이로부터 국내 석탄회에는 안정제로서 시멘트를 사용하는 것이 석회나 석회와 시멘트를 혼합하는 경우보다 강도 증가 효과보다 효율적임을 알 수 있다. 또한, 시멘트, 석

회비 혼합율이 증가할수록 석탄회의 압축강도는 재령에 관계없이 거의 비례적으로 증가하며 매립회 보다는 비회에서 보다 큰 강도 증가 효과를 보이는데 이는 CaO 함량이 더 큰 비회에

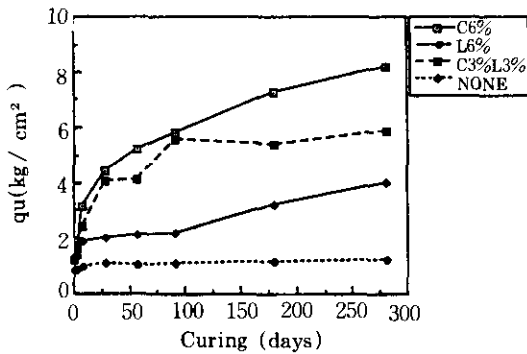
서 수화 반응에 의한 수화물이 재령에 따른 입자간의 고착화 현상이 두드러졌기 때문으로 판단된다.



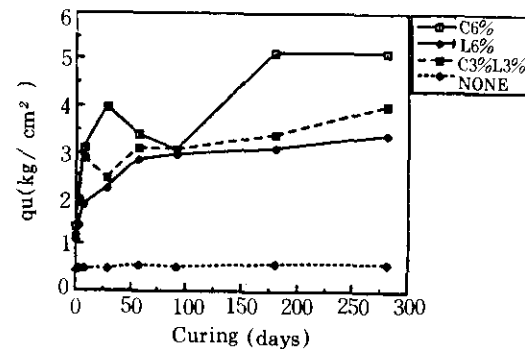
(a) 삼천포 비회



(b) 삼천포 매립회



(c) 서천 비회



(d) 서천 매립회

그림 3. 재령에 따른 압축강도 곡선

그림4는 재령 7일시 안정제 종류별 혼합율 변화에 따른 강도변화특성을 보여준다. 그림4에서 보는 바와 같이 삼천포, 서천 석탄회의 경우 모든 안정제 혼합률 6%정도까지는 뚜렷한 강도 증가현상을 보이며, 그 이상에서는 완만한 강도 증가 추세를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 재령 7일시 안정제를 첨가하지 않은 석탄회를 기준으로 안정제 혼합률 12%에서의 강도 증가율은 시멘트를 혼합한 경우 삼천포 비회, 삼천포 매립회, 서천 비회, 서천 매립회가 각각 98.9%, 253%, 275%, 608%로 석회를

혼합한 경우는 각각 60%, 152%, 160%, 400%의 강도 증가율을 보이고 있으며 초기 재령시는 전반적으로 매립회가 비회보다 압축강도 효과가 크게 나타났다.

그림5에서는 양생 온도 변화에 따른 안정제 혼합 석탄회의 압축강도 특성을 살펴보기 위하여 재령 7일에서의 강도변화특성을 비교 도시하였다. 그림5에서 보듯이 안정제 혼합석탄회는 양생 온도가 높아질수록 강도는 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 양생 온도 변화에 따른 강도변화특성은 양생 온도가 30℃인 경우 5℃

인 경우에 비해 시멘트 혼합시 1.42~2.37배, 석회 혼합시 1.5~1.74배 큰 강도 증가를 보여 주는데 이는 안정제로서 시멘트가 석회보다 양

생 온도의 증가에 따라 포졸란 활성의 정도가 더욱 크기 때문으로 판단된다.^(3, 13)

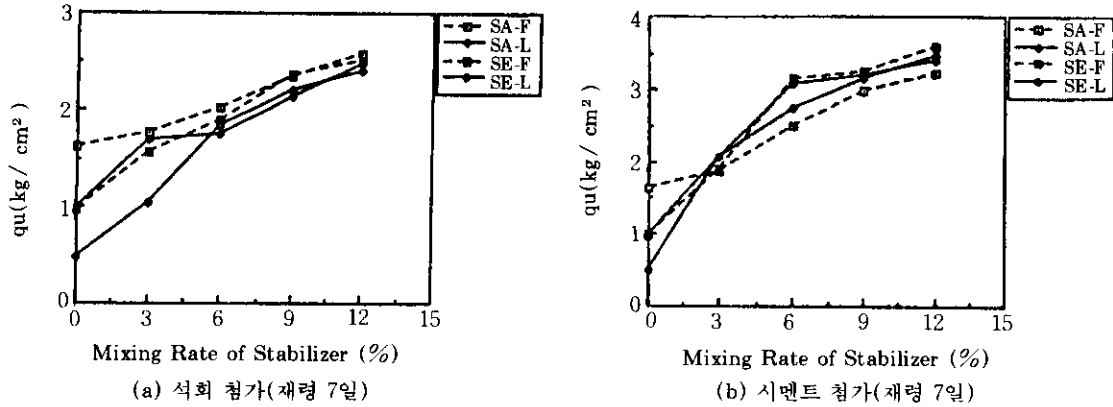


그림 4. 안정제 종류별 혼합률 변화에 따른 강도 변화 특성(재령 7일)

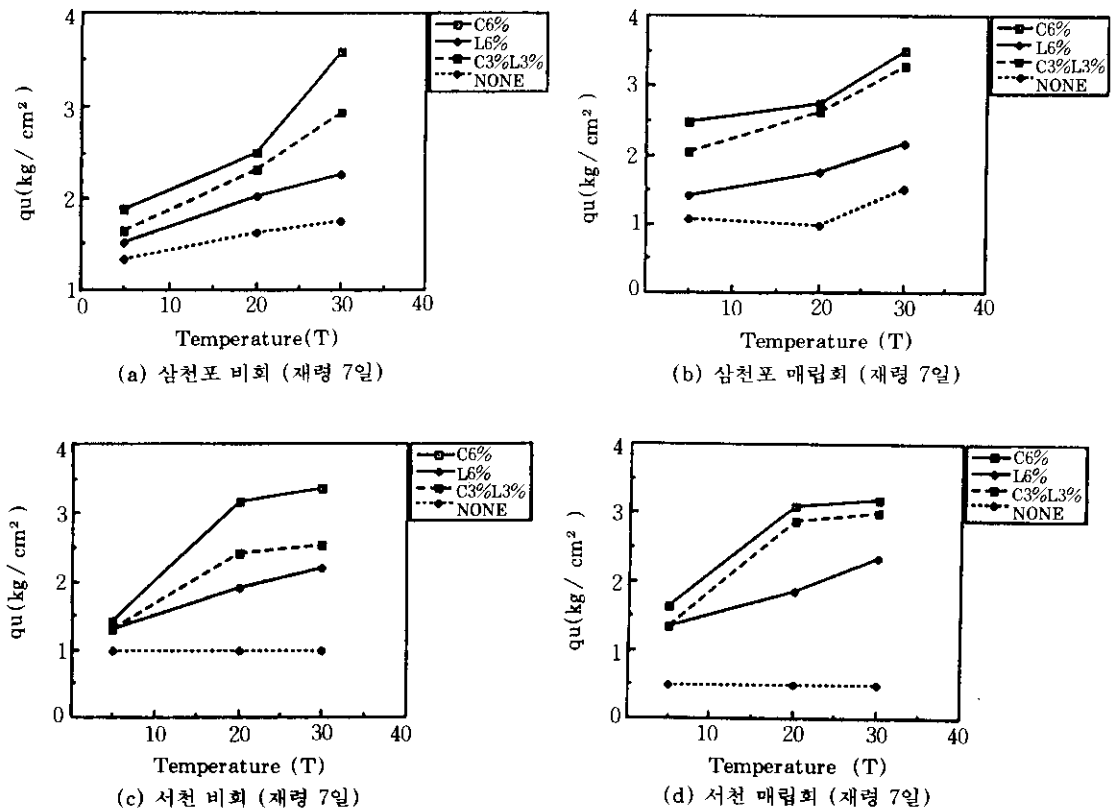


그림 5. 양생온도 변화에 따라 압축강도특성(재령 7일)

재령 0, 7일에서 삼천포, 서천 석탄회의 안정제 혼합물에 따른 압축성, 투수성 감소 특성은 그림6, 그림7과 같다. 그림 6, 7에서 보는 바와 같이 안정제 혼합 석탄회의 압축 지수(C_c)와 투수 계수(k)는 혼합률이 증가할수록 감소 추세가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있으며, 안정제를 혼합하지 않은 석탄회를 기준으로 혼합물 9%에서의 안정제 종류별 압축 지수와 투수 계수 감소 정도는 석회 혼합 석탄회의 경우 각각 1.34~4.11배, 시멘트 혼합 석탄회의 경우는 1.58~4.61배의 큰 감소를 보여주는 것으로 평가되었다. 또한 재령 경과에 따라 안정제 혼합 석탄회의 압축 지수와 투수 계수 감소 효과는 더욱 양호하게 나타나며 안정제 혼합물 9% 정

도의 시멘트와 석회를 첨가함으로써 압축 지수와 투수 계수를 상당히 감소시킬 수 있는데 이는 석탄회에서 용출되는 SiO_3^{-2} 와 $\text{Al}_2\text{O}_3^{-2}$ 가 칼슘 이온(Ca^{+2})과 반응하여 CSH, CAH의 수화물을 생성하면서 시간 경과에 따라 안정성과 밀도가 점점 커짐으로서 지지력 및 저항성이 더욱 증대되기 때문으로 판단된다. 즉, 이러한 압축 지수와 투수 계수의 감소는 석탄회를 성토재나 매립재로 활용할 때 장기적인 자중이나 상재하중에 의한 부등침하, creep 등의 압축성에 대한 저항을 증가시킬 수 있으며 안정제 혼합 석탄회의 동상에 대한 저항의 증가를 나타내는 것으로 평가할 수 있다.^(17, 18)

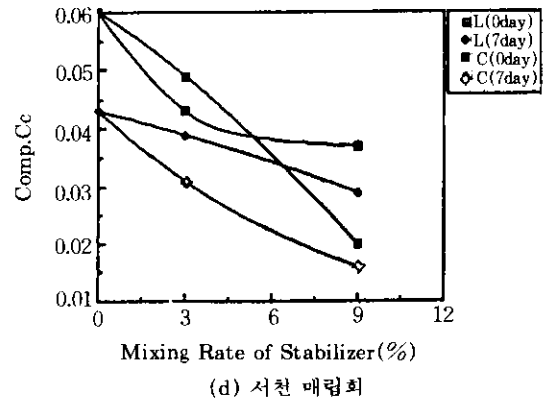
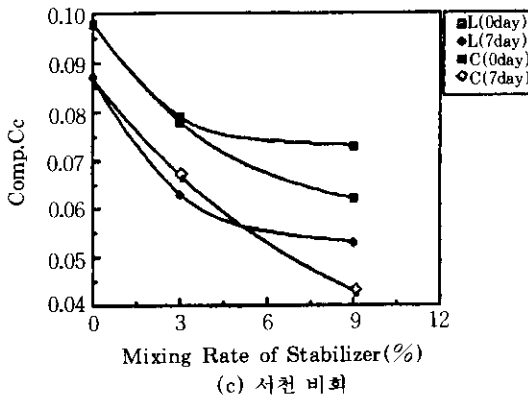
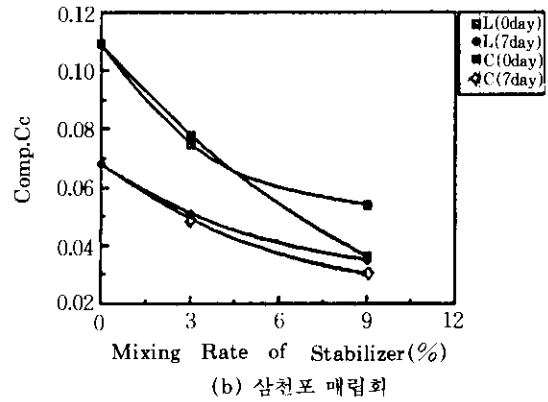
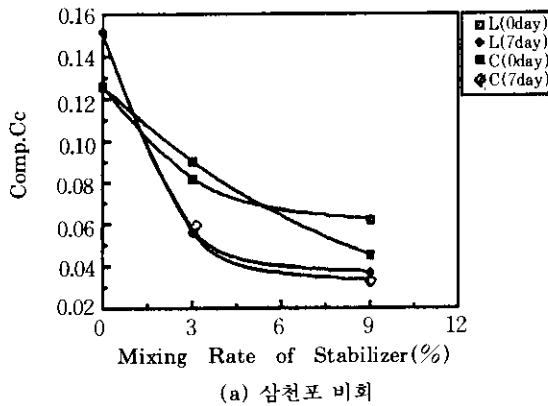
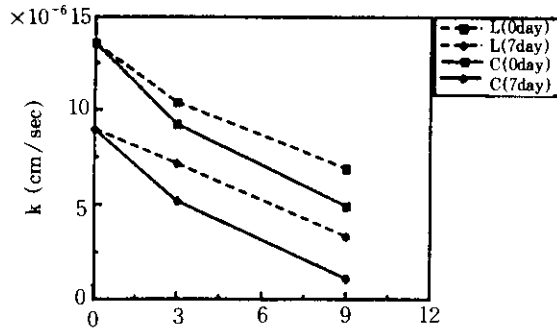
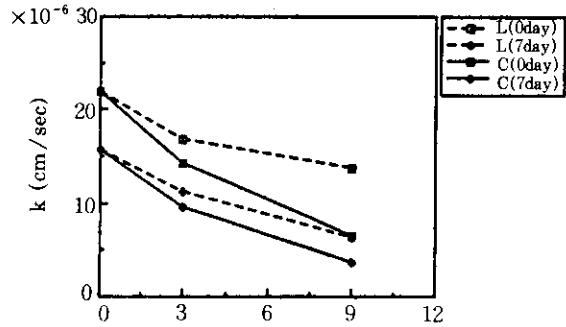


그림 6. 안정제 혼합물에 따른 압축성 감소특성



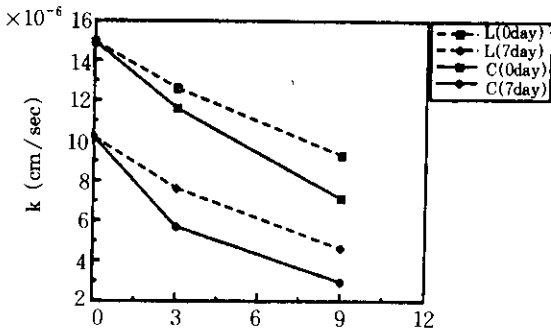
Mixing Rate of Stabilizer(%)

(a) 삼천포 비회



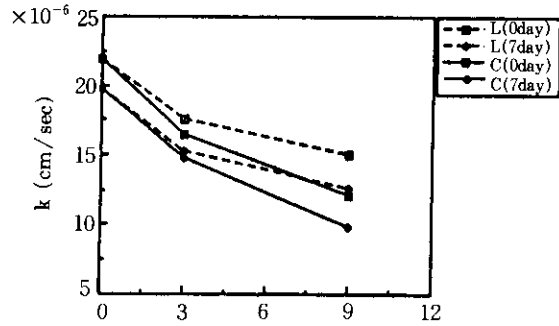
Mixing Rate of Stabilizer(%)

(b) 삼천포 매립회



Mixing Rate of Stabilizer(%)

(c) 서천 비회



Mixing Rate of Stabilizer(%)

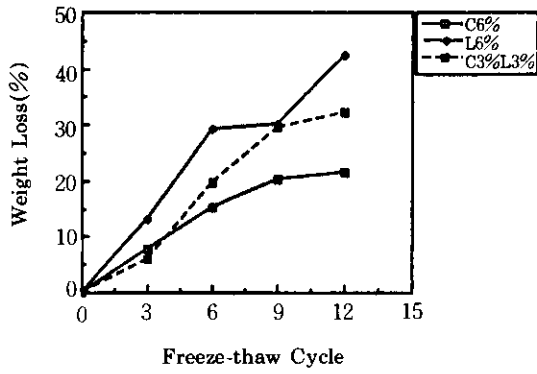
(d) 서천 매립회

그림 7. 안정제 혼합물에 따른 투수성 감소특성

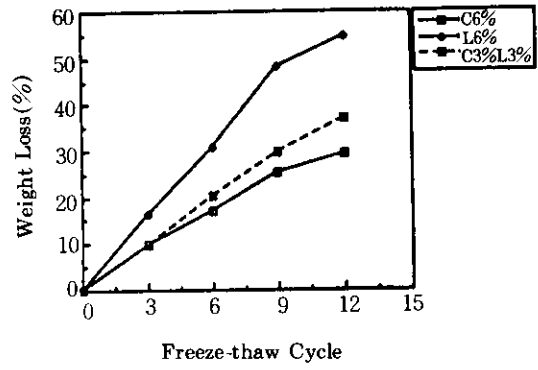
그림8은 6%의 안정제를 혼합하였을 경우 동결융해주기(3, 6, 9, 12 cycle)의 변화에 따른 중량손실률을 보여주며, 그림9에서는 주기 9cycle에서 안정제 혼합물에 따른 동결융해특성 개선 효과를 비교, 도시하였다.

그림8에서 보듯이 동결융해주기-중량손실률 관계 곡선은 안정제 종류나 혼합물에 관계 없이 거의 직선적으로 나타나며 비회보다는 매립회에서 보다 큰 중량손실율을 보여 주는데 이는 CaO 함량이 적은 매립회에서 포졸란 반응이 상대적으로 활발하지 못하기 때문으로 사료된다.

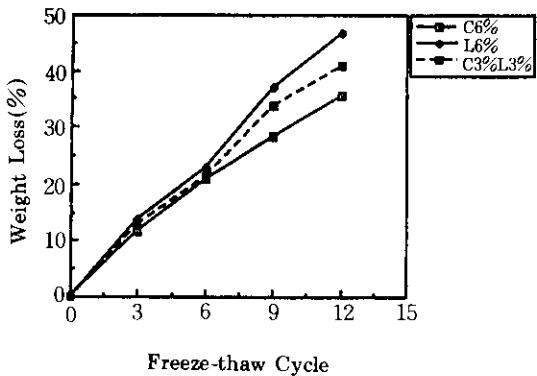
한편, 그림9의 안정제 혼합에 따른 삼천포, 서천 석탄회의 동결융해특성 개선 효과는 전반적으로 안정제 혼합률이 증가할 수록 더욱 커지나 그 경향은 안정제 종류에 관계없이 6~9% 정도의 혼합률까지는 급격히 커지고, 그 이상의 혼합률에서는 완만한 개선 효과를 보여 줄 수 있는데 이로부터 동상에 민감한 싯트질 크기의 석탄회를 동결 융해가 우려되는 지역에 성토재로 활용할 경우 동결융해억제 및 동해 방지 대책으로 안정제 혼합률 6~9% 정도로 적절히 혼합하여 사용함이 효과적임을 알 수 있었다.



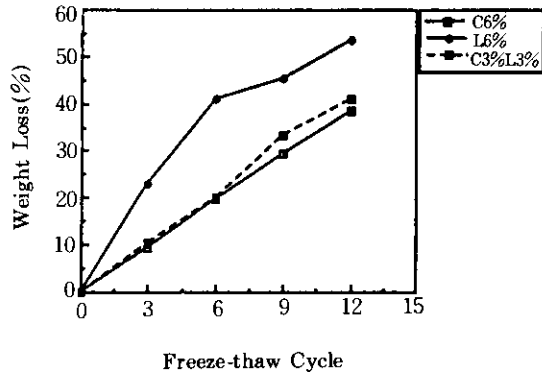
(a) 삼천포 비회



(b) 삼천포 매립회

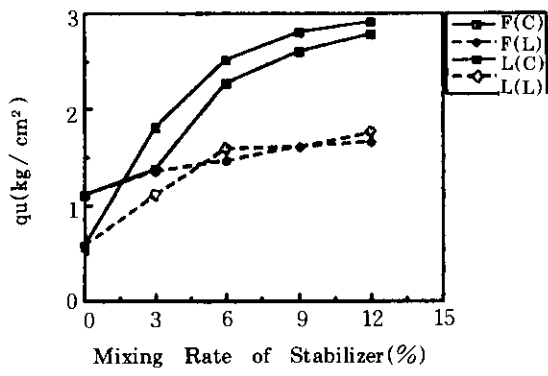


(c) 서천 비회

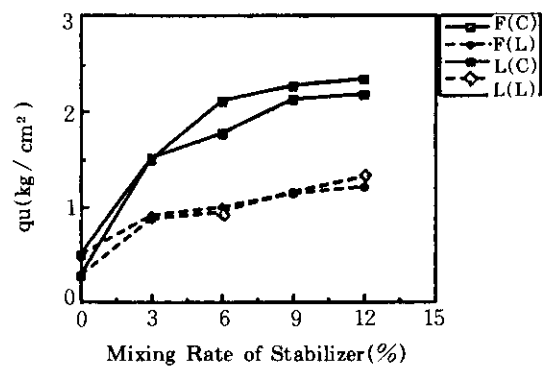


(d) 서천 매립회

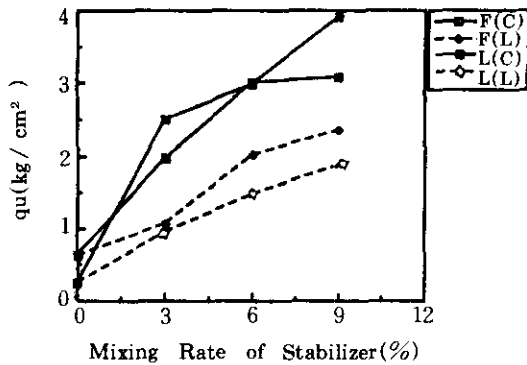
그림 8. 동결융해주기 변화에 따른 중량손실률



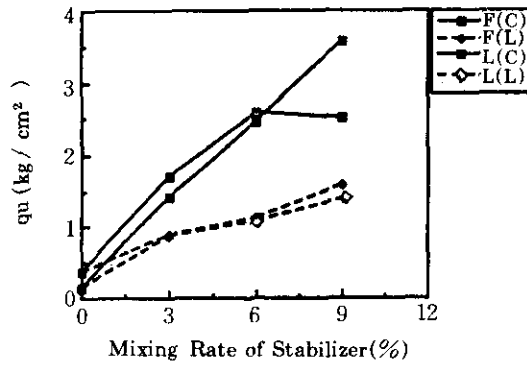
(a) 삼천포 석탄회 (3 cycle)



(b) 삼천포 석탄회 (9 cycle)



(c) 서천 석탄회 (3 cycle)



(d) 서천 석탄회 (9 cycle)

그림 9. 안정제 혼합률에 따른 동결융해특성 개선효과

5. 결론

본 연구는 삼천포, 서천 화력 발전소에서 부산되는 석탄회를 대상으로 성토재로서의 활용성을 검토한 것으로, 석탄회의 강도 및 내구성을 증가시키기 위한 공학적 성질 개선 방안으로서 안정제 혼합 석탄회의 물리·역학적 특성실험, 동결융해시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 석탄회는 일반 흙에 비하여 비중 및 단위 체적 중량이 작고 자체 경화성이 있어 뒤채움재로 사용할 경우 토압의 경감 효과와 지지력이 부족한 곳에 사용할 수 있어 양호한 성토재로 활용할 수 있는 것으로 평가되었다.
- (2) 매립회는 각종 성토 재료로의 사용이 가능하며, 비회는 부지 조성용 성토나 철도 하부성토 등에 이용할 수 있으나 도로 성토재로서의 사용을 위해서는 2~3% 정도의 시멘트를 첨가하여 사용함이 바람직한 것으로 나타났다.
- (3) 국내 안정제 혼합 석탄회의 압축강도는 재령에 따라 점차 증가하며 재령 280일 경과 후 증가된 강도 증가율(100%)을 기준으로 재령 28일까지 증가된 강도 증가율은 25~68.4%의 범위로서 재령 초

기에 강도 증가 추세가 뚜렷함을 알 수 있었다.

- (4) 안정제 혼합 석탄회의 압축강도 특성은 재령, 양생 온도, 혼합률 등이 증가할수록 거의 직선적으로 증가하며 성토재로 활용시 각 시공 현장 조건을 고려하여 설계 기준치에 맞는 적절한 값을 사용함이 바람직하다.
- (5) 국내 안정제 혼합 석탄회는 순수 석탄회에 비해 9%의 안정제 혼합시 7일 재령 후 34~361% 정도의 압축성 감소와 46~720% 정도의 투수성 감소를 보이며, 그 효과는 장기적인 포졸란 반응을 고려하면 더욱 크게 나타날 것으로 판단된다.
- (6) 9%의 안정제를 혼합한 석탄회의 동결융해에 따른 강도 개선 효과는 순수 석탄회에 비해 동결융해주기 3cycle의 경우 1.5~4.96배, 9cycle의 경우 2.3~8.3배로 큰 효과를 보이는 것으로 평가되었으며 동상에 민감한 실트질 크기의 석탄회를 동결 융해가 우려되는 지역에 성토재로 활용할 경우 혼합률 6~9% 정도로 적절히 혼합하여 사용함이 효율적인 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Gray, D.H. and Lin, Y.K., "Engineering Properties of Compacted Fly Ash," Jour. of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of ASCE, 1972, pp.361~379.
2. Joshi, R.C. and Nagaraj, J.S., "Fly Ash Utilization for Soil Improvement", Environmental Geotechnics and Problematic Soil and Rocks, Balkema, Rotterdam, ISBN, 1987, pp. 15~24.
3. Indraratna, B. and Nulalaya, P., "Engineering Behaviour of a Low Carbon, Pozzolanic Fly Ash and Its Potential as a Construction Fill", Can. Geotech. Journal, Vol. 28, 1991, pp. 542~555.
4. 한국전력공사 기술연구원, "성토재로서의 석탄회 이용방안에 관한 연구", 1992.6.
5. 김진만, 박은영, 조삼덕, 홍성완, 김종학, "석탄회의 성토재로서의 활용에 관한 연구"-장기강도 및 동결융해를 중심으로-, 토목학회 학술발표회 개요집, 1991, pp.650~653.
6. 박은영, 조삼덕, 홍성완, 김종학, "국내 석탄회의 안정제 혼합연구", 대한토목학회 학술발표회 개요집 (I), 1992. 10, pp.515~518.
7. 정승용, 김수삼, "석탄회 침하에 관한 실험적 연구", 토목학회 학술발표회 개요집, 1991, pp. 591~594.
8. 천병식, 고용일 외 3인, "석탄회의 매립·성토시 FA와 BA의 적정 혼합비", 토목학회 학술발표회 개요집, 1993, pp.479~482.
9. 박홍규, 천병식, 임해식, 권형석, "석탄회와 화강토의 MR 특성", 대한토목학회 학술발표회 개요집 (I), 1992.10, pp.547~550.
10. 박홍규, 천병식, 강인성, 고용일, 신민호, "적정 혼합회의 동상성에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 개요집 (I), 1992. 10, pp.539~542.
11. 장명순, 김수삼, 천병식, 이은수, 고용일, "적정 혼합회의 강도특성과 수침에 대한 내구성", 대한 토목학회 학술발표회 개요집 (I), 1992. 10, pp. 535~538.
12. 조삼덕, 장연수, 정하익, 김학삼, 김진만, 홍성완, "폐기물 매립물질에 의한 건설자재의 부식성", 대한토목학회 학술발표회 개요집 (I), 1993. 10, pp.479~482.
13. Havukanen, J., "The Utilization of Compacted Coal Ash in Earth Works", Proceedings of the Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, 1983, pp.773~776.
14. Manz, O.E., "Lime-Fly Ash Stabilization for Road Building", Second International Conference on Ash Tech. and Marketing, Barbican Centre, London, September 16~21, 1984, pp. 505~512.
15. Transportation Research Board Committee on Lime and Lime-Fly Ash Stabilization, "Lime Stabilization", State of the Art Report 5, 1987, pp.6~11.
16. Moretti, C.J. and Wentz, C.A. and Wiken, "Development of Fly Ash Liners for Waste Disposal Sites", Proceedings of Eighth International Ash Utilization Symposium, EPRI, Vol.2, 1987, 10, pp.47-1~47-13.
17. Parker, D.G. and Thornton, S.I., "Permeability of Fly Ash Stabilized Bases and Subbase", Synthesis of Highway Practice 37, 1976, pp.10~23.
18. Yudhbir, Honjo, Y., "Applications of Geotechnical Engineering to Environmental Control", Proceedings of the Ninth Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, Bangkok, Thailand, December 9-13, 1991, pp.163~184.
(접수일자 1994. 11. 24)