

석탄회의 도로성토재 및 노상재로서의 활용을 위한 비회와 저회의 적정혼합비

The Proper Mixing Ratio of Fly Ash to Bottom Ash for Use of Highway Embankment and Subgrade Materials

천병식* · 고용일**

Chun, Byung Sik · Koh, Yong Il

Abstract

In this study, the proper mixing ratio of fly ash to bottom ash is evaluated and bearing capacity of this mixed ash is examined for use of highway embankment and subgrade materials in large quantities. Independently of the mixing ratio of fly ash to bottom ash or the method of compaction test, maximum dry density γ_{dmax} and CBR value of anthracite mixed coal ash is greater than that of bituminous mixed coal ash. The mixed ashes to contain more fly ash than that of which the ratio of fly ash to bottom ash is 8 : 2, are slaked readily when the water contents of compaction are greater than optimum moisture content O.M.C. The proper mixing ratios of fly ash to bottom ash are about 5 : 5 to 6 : 4. Coal ashes mixed with these ratios exhibit proper physical and geotechnical properties for use of highway embankment and subgrade materials, and enable coal ashes to be used in large quantities.

요 지

본 연구는 석탄회의 대량적인 활용을 목적으로 도로 성토재 및 노상재로의 이용을 위한 비회와 저회의 적정혼합비를 산정하고 이들의 지지력을 검토한 것이다. 비회와 저회의 혼합비율이나 다짐방법에 관계없이 일반적으로 다짐한 석탄회는 보통 흙 보다 가볍고, 무연탄 석탄회가 유연탄 석탄회 보다 큰 최대건조밀도 r_{dmax} 를 가지며 CBR값도 큼을 알 수 있었다. 또, 비회 : 저회의 혼합비가 8 : 2인 혼합회 보다 비회를 많이 함유한 경우에는 다짐할 때 함수비가 최적함수비 O.M.C를 넘어서면 쉽게 비화하였다. 비회 : 저회의 적정혼합비는 5 : 5 또는 6 : 4 정도 까지이며, 이런 비율로 혼합된 석탄회는 물리적 성질이나 공학적 성질로 보아 큰 무리는 없으며 대량으로 석탄회를 활용할 수 있을 것으로 보인다.

* 정희원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서 론

최근 발표된 정부의 국토종합개발계획에 따르면 대규모 임해공업 용지와 주택단지의 조성, 교통문제 해결을 위한 고속도로 등 도로의 대폭적인 신설 및 확장외에도 대규모 건설사업으로서 경부고속전철, 신국제공항 등이 건설되고, 서해안 개발 사업을 위한 대규모 매립·성토 공사 등이 이미 진행되고 있어, 장차는 이에 따른 막대한 건설재료가 소요될 것으로 전망되고 있다. 그 중에서도 특히 골재 및 매립·성토재의 부족은 토취장 운용 등으로 인한 자연 훼손과도 직결되어 국토환경보존과 관련된 종합적 녹색계획(Green Plan)에도 역행하는 결과가 되는 것이다.

한편, 석탄 화력을 주요 발전원의 하나로 전환 시켜가고 있는 정책⁽¹⁾에 따라 최근 석탄 발전의 비중이 높아가는 추세에 있고, 여기서 발생하는 많은 양의 석탄회 처리와 관련하여 회사장 확보와 석탄회의 유효이용에 관한 종합적 연구의 중요성이 강조되고 있다.⁽²⁾

본 연구는 석탄회의 유효 이용 분야 중에서 재자원화에 의한 이용에 관한 국내외의 동향과 자연 골재 사정 등으로 볼 때 대량 활용가능성이 매우 높다고 생각되는 토목 재료 이용에 착안, 특히 피부로 느낄 수 있는 도로 축조예의 활용을 목적으로 사용 가능한 비회와 저회의 적정 혼합비를 실험적으로 산정하고자 한다.

2. 석탄회의 공학적 특성

석탄을 연소한 경우 석탄에 함유되어 있는 무기질의 대부분이 산화물로 변해서 남는 것을 석탄회라 하는데, 이 석탄회는 석탄의 성질, 생산 과정 그리고 배출 후의 처리방법과 경과 일수 등에 따라서 현저히 달라지기 때문에 일률적으로 석탄회의 공학적 성질을 이렇다 라고 말하기는 매우 곤란하다. 본 연구에서 실험대상으로한 석탄회는 현재 우리나라 8개 석탄화력발전소 중 유연탄 화력발전소로서 호남, 삼천포와 무연탄 화력발전소로서 중유와 혼합하여 연소시키나 일부 유연탄과 혼합하여 연소시키는 영동, 영월, 서천 등 5개 화력발전소에서 부산되는 비회(FA : fly ash)와 저회(BA : bottom ash)이다.

이들 석탄회의 공학적 성질은 기발표된 연구⁽³⁾를 참고하여 특징적인 것을 위주로 간단히 기술하고자 한다.

2.1 토질공학 성질

흙의 통일분류에 의하면 비회는 대부분 ML에 속하지만 영월 비회만이 SM으로 분류되며 저회 경우 대부분 SW, SP 또는 SP-SM 등 sand으로 분류된다. AASHTO분류법으로는 비회는 A-4군에 해당하고 저회는 A-1-b군에 해당한다. 따라서 입도 분포에 따른 도로포장기초로서의 가치⁽⁴⁾나 노상재료로서의 적합성⁽⁵⁾으로 본다면 저회는 양호하다고 할 수 있으나 비회의 경우는 만족하지 못하다.

실험 석탄회는 모두가 비소성이고, 비중은 1.99~2.56 정도로서 보통 흙보다 작은 값을 가진다. 또한 최적함수비로 다져진 석탄회는 A-1 다짐의 경우 최대건조밀도가 1.040~1.482 g/cm³, D-2다짐의 경우 1.060~1.700 g/cm³로서 보통 흙보다 작은 값으로 나타났으며, 이러한 다짐 석탄회의 경량성은 원지반이 연약층일 경우 원지반의 압축성과 관련해서 보면 우수한 공학적 성질로 볼 수 있는 것이다.

실내 CBR값은 저회의 경우는 작게는 15에서 크게는 100 이상으로 도로공사 표준시방기준⁽⁶⁾에 의하면 어떤 저회라도 최소한 노상층 까지는 사용 가능할 것으로 여겨지나, 비회의 경우는 모두가 너무 작은 CBR값을 갖기 때문에 이들을 단독으로 도로에 사용하기에는 불가능할 것으로 여겨진다. 한편 CBR 시험시 측정되는 흡수에 의한 팽창비는 55회 다짐을 기준으로 보았을 때 그 값이 충분히 작아, 흡수에 의한 팽창 때문에 석탄회를 노상으로 사용하는 데⁽⁷⁾에 문제는 없을 것이다.

압밀실험에 의하면 석탄회의 전침하량의 90% 정도가 30초 전 후에서 발생하므로, 석탄회 지반의 침하는 압밀침하가 아니고 급속침하(탄성침하)로서 공사기간 중에 대부분이 발생하게 되므로 침하문제는 없을 것으로 여겨진다.

2.2 화학성분

석탄회의 주성분은 실리카(SiO₂ : 43~65%), 알루미늄(Al₂O₃ : 16~26%), 산화제2철(Fe₂O₃ : 4~12%), 산화칼슘(CaO : 0.6~18%) 등이며, 非結晶質(glassy : 3Al₂O₃·2SiO₂)형태로 존재하고 있다. 일반적으로

광물의 조성이 비결정질인 경우에는 결정에너지를 내부에 보존하고 있는 데, 특히 물과 반응해서 응결 경화하는 성질, 즉 잠재 수경성이 대표적이다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 석탄회 경우 비회에 있어서는 포졸란반응에 의한 잠재수경성이 있다. 실리카 성분이 소석회(시멘트 등의 용출에 의해 생긴다)와 반응하여 불용성 화합물을 생성하여 경화하는 포졸란 반응 이외에도 비회는 물을 가하여 다지게 되면 접합되어 굳게 되는 자경성을 나타내게 되는데, 이것은 비회에 포함되어 있는 유리된 석회(free lime) 때문이고 물에 용해되는 일부 성분의 존재에 의해 영향을 받는다.⁽¹⁰⁾ 그리고 석탄회에 함유된 탄소량은 포졸란 반응이나 자경성에 마이너스요인이 되는 것으로 알려져 있다.^(9,11)

한 편, 환경보전상의 중요한 지표가 되는 석탄회의 중금속 용출 결과는 법정 기준치 이하로 알려져 있어서⁽¹²⁻¹⁴⁾ 이용에 있어 문제는 없겠으나, pH로 볼 때 석탄회 중 일부(영동비회와 영월저회)는 산성을 나타내고 나머지는 모두가 알칼리성이어서 식생상 좋지 않거나 다른 건설재료에 침식작용을 일으킬 수 있으므로 설계나 시공시에 있어 주의할 필요는 있다. 그러나 시일이 경과하고 포졸란 반응이나 자경성이 발휘됨에 따라 중성화되어 큰 문제는 없을 것으로 보인다. 실제로 어느 정도 시일이 경과하면 회사장에서도 초목이 자랄 수 있다는 사실을 회사장 조사 및 현장시험시 확인할 수 있었다.

3. 비회와 저회의 혼합 사용

석탄회의 공학적 특성을 검토한 바에 의하면 저회는 도로 성토재·노상재는 물론 보조기층재까지도 사용가능할 것으로 보이지만, 비회는 낮은 CBR값과 입도분포상 도로 노체로서의 사용도 적절치 않다. 그런데 발생 석탄회중 비회 : 저회 비율은 8 : 2 정도⁽¹⁵⁾로 비회가 석탄회 발생량의 대부분을 차지하고 있어 저회만을 사용하게 된다면 석탄회의 활용면에서 비경제적일 뿐만 아니라, 일반적으로 저회는 다짐성이 좋은 편이 아니고 점착성과 자경성이 없으며 포졸란반응도 하지 않는다는 약점이 있다.

저회의 역학적 성질을 증대 또는 유지시키면서 가능한한 어느 정도의 자경성이나 포졸란반응을 갖게 하고 석탄회를 가장 많이 사용하게 하여 결과

적으로 석탄회의 활용을 극대화시키기 위하여 5개 화력발전소의 비회 : 저회 혼합중량 비율을 0 : 10, 5 : 5, 6 : 4, 7 : 3, 8 : 2, 10 : 0 등 6종류로 하여 총 5×6=30 종류에 대한 물리실험(비중, 입도분석 등)과 다짐시험(A-1다짐, D-2다짐)을 실시한다. 이들 다짐실험 결과와 다짐성에 따라 비회 : 저회의 적정 혼합비를 선택하고, 선택된 혼합비를 갖는 석탄회의 지지력을 실내 CBR 시험으로 확인한다.

4. 시험결과 및 고찰

물리실험결과를 정리하면 표 1과 같고, 5개 석탄화력발전소 각각의 비회와 저회 배합비별 입도분포 곡선은 그림 1~5와 같다.

다짐시험결과를 비회 : 저회 배합비 별로 5개 석탄화력발전소에 대해서 비교하면 그림 6~11과 같다.

다짐에너지가 크면 보통 흙에서와 마찬가지로 석탄회에서도 최대건조밀도 γ_{dmax} 는 증대하고 O.M.C.는 감소함을 알 수 있다. 즉, D-2다짐의 경우가 A-1다짐에 비해서 γ_{dmax} 는 크고 O.M.C.는 작다. 또, 비회와 저회의 혼합중량비율이나 다짐방법(A-1, D-2)에 관계 없이 영동, 영월, 서천 등 무연탄 석탄회가 삼천포, 호남 등 유연탄 석탄회보다 큰 γ_{dmax} 와 작은 O.M.C.를 갖는다고 할 수 있겠다.

다짐시험 결과를 다른 면에서 검토하기 위하여, 혼합회 중 저회의 혼합비에 따라 γ_{dmax} 의 변화를 각 발전소별로 그려보면 그림 12~16과 같다.

이들 5가지 그래프를 관찰해 보면 다음과 같이 3가지 유형으로 나눌 수 있다. 즉, A형(삼천포), B형(호남과 서천), C형(영동과 영월)이다. A형의 경우 저회의 혼합중량비율이 증대함에 따라 γ_{dmax} 값이 증대하는 경우로서, 저회의 혼합중량비율이 40% 이상인 경우부터 다짐성이 현저하게 증가하고 있다.

B형의 경우는 저회의 혼합중량비율이 증대하면 처음에는 γ_{dmax} 의 값이 떨어지지만 저회가 어느 비율 이상으로 혼합되면 γ_{dmax} 의 값이 혼합하지 않는 경우보다 증대하다가 다시 감소하게 되어 순수하게 저회만을 다짐하면 다짐성이 상당히 저하하는 형태이다. 호남 석탄회의 경우에는 저회의 혼합중량비율이 40%와 50%인 경우에 다짐성이 상당히 증대하였고 서천 석탄회의 경우에는 30, 40, 50%인 경

표 1. 물리실험결과

종류	혼합중량비 비회 : 저회	비중 Gs	흙의 분류법		No.4체 통과량 (%)	No.200체 통과량 (%)	D60 (mm)	D30 (mm)	D10 (mm)	Cu	Cg
			통일 분류	AASHTO 분류							
남	10 : 0	2.56	ML	A-4	100.00	71.00	0.064	0.060	0.050	1.3	1.1
	8 : 2	2.56	ML	A-4	99.00	58.80	0.075	0.060	0.053	1.4	0.9
	7 : 3	2.56	ML	A-4	98.50	57.70	0.088	0.060	0.054	1.6	0.8
	6 : 4	2.56	SM	A-4	98.00	46.60	0.120	0.060	0.055	2.2	0.5
	5 : 5	2.56	SM	A-4	97.50	40.50	0.150	0.062	0.056	2.7	0.4
	0 : 10	2.56	SP-SM	A-1-b	95.00	10.00	0.950	0.150	0.074	12.8	0.3
서 천	10 : 0	2.33	ML	A-4	100.00	82.00	0.046	0.019	0.012	3.8	0.7
	8 : 2	2.31	ML	A-4	97.20	67.00	0.062	0.025	0.009	6.9	1.1
	7 : 3	2.30	ML	A-4	95.80	59.50	0.074	0.030	0.010	7.4	1.2
	6 : 4	2.29	ML	A-4	94.40	52.00	0.092	0.036	0.011	8.4	1.3
	5 : 5	2.28	SM	A-4	93.00	44.50	0.160	0.045	0.012	13.3	1.1
	0 : 10	2.24	SP-SM	A-1-b	86.00	7.00	2.500	0.280	0.084	29.8	0.4
삼 천 포	10 : 0	1.99	ML	A-4	100.00	58.00	0.076	0.036	0.017	4.5	1.0
	8 : 2	2.06	SM	A-4	99.60	47.20	0.100	0.045	0.020	5.0	1.0
	7 : 3	2.10	SM	A-4	99.40	41.80	0.120	0.052	0.021	5.7	1.1
	6 : 4	2.15	SM	A-4	99.20	36.40	0.160	0.060	0.024	6.7	0.9
	5 : 5	2.19	SM	A-2-4	99.00	31.00	0.220	0.071	0.026	8.5	0.9
	0 : 10	2.39	SP	A-1-b	98.00	4.00	0.950	0.280	0.130	7.3	0.6
영 동	10 : 0	2.40	ML	A-4	100.00	67.00	0.061	0.024	0.009	6.8	1.0
	8 : 2	2.41	ML	A-4	96.10	53.80	0.090	0.031	0.010	9.0	1.1
	7 : 3	2.41	SM	A-4	94.10	47.20	0.110	0.037	0.012	9.2	1.0
	6 : 4	2.41	SM	A-4	92.20	40.60	0.150	0.046	0.014	10.7	1.0
	5 : 5	2.42	SM	A-2-4	90.25	34.00	0.240	0.060	0.016	15.0	0.9
	0 : 10	2.43	SW	A-1-b	80.50	1.00	1.600	0.500	0.120	13.3	1.3
영 월	10 : 0	2.23	SM	A-4	100.00	45.00	0.091	0.042	0.013	7.0	1.5
	8 : 2	2.24	SM	A-4	92.40	36.40	0.110	0.060	0.015	7.3	2.2
	7 : 3	2.25	SM	A-2-4	88.60	32.10	0.140	0.070	0.018	7.8	1.9
	6 : 4	2.25	SM	A-2-4	84.80	27.80	0.180	0.080	0.020	9.0	1.8
	5 : 5	2.26	SM	A-2-4	81.00	23.50	0.340	0.089	0.025	13.6	0.9
	0 : 10	2.28	SP	A-1-b	62.00	2.00	4.100	0.650	0.140	29.3	0.7

표 2. 석탄회의 CBR

(%)

혼합중량비율		석탄회의 종류				
		호 남	서 천	삼천포	영 동	영 월
비 회 : 저 회	10 : 0	5.4	0.6	2.1	0.2	2.0
	6 : 4	19.0	19.5	16.0	21.5	24.0
	5 : 5	19.5	23.0	17.5	26.0	27.5
	0 : 10	15.0	21.0	19.0	77.0	100 이상

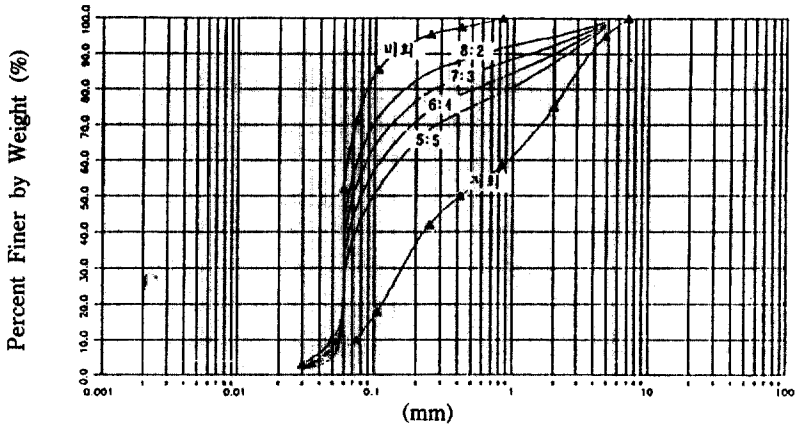


그림 1. 호남 석탄화력발전소의 비회 : 저회 배합비별 입도분포곡선

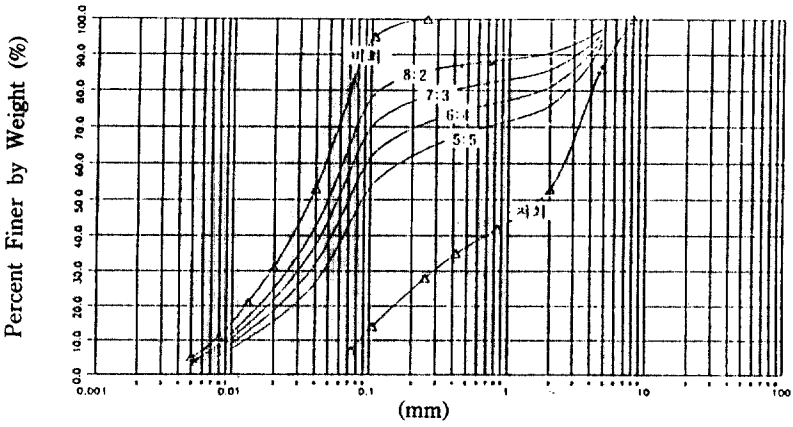


그림 2. 서천 석탄화력발전소의 비회 : 저회 배합비별 입도분포곡선

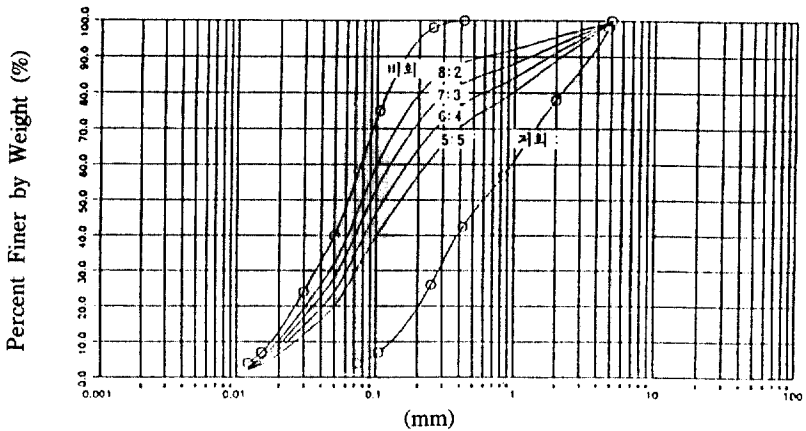


그림 3. 삼천포 석탄화력발전소의 비회 : 저회 배합비별 입도분포곡선

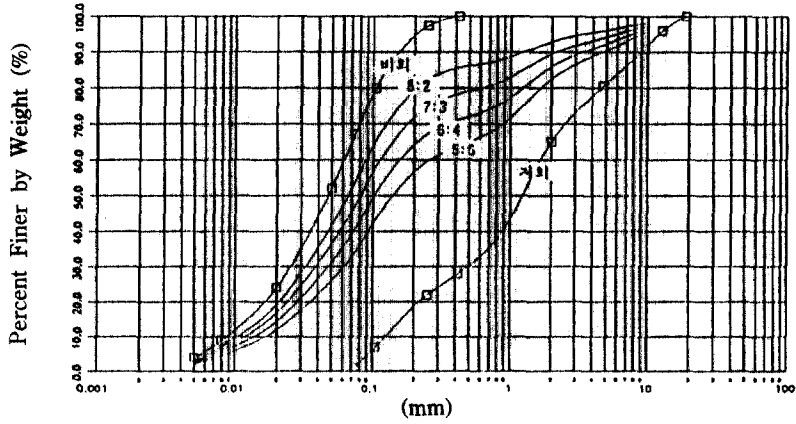


그림 4. 영운 석탄화력발전소의 비회 : 저회 배합비별 입도분포곡선

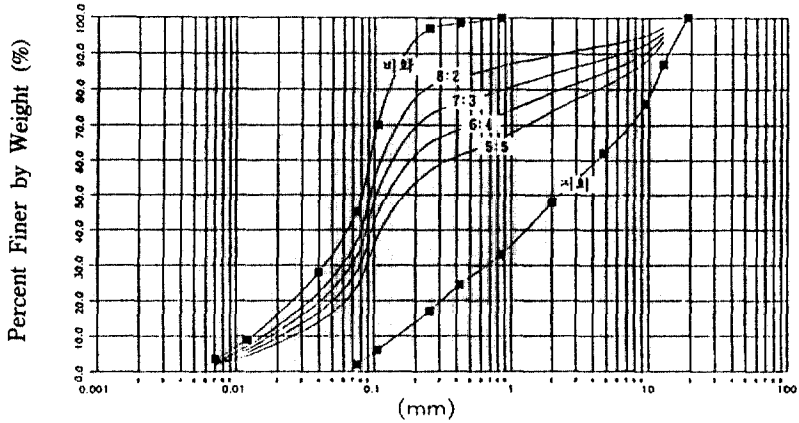
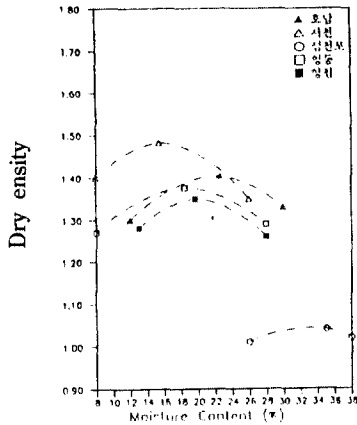
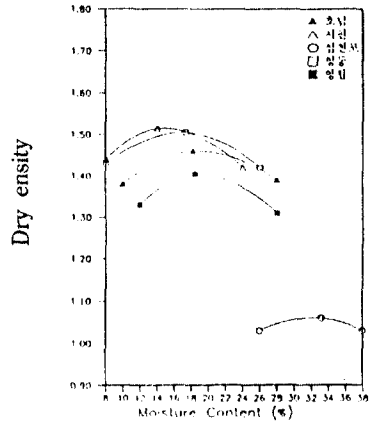


그림 5. 영운 석탄화력발전소의 비회 : 저회 배합비별 입도분포곡선

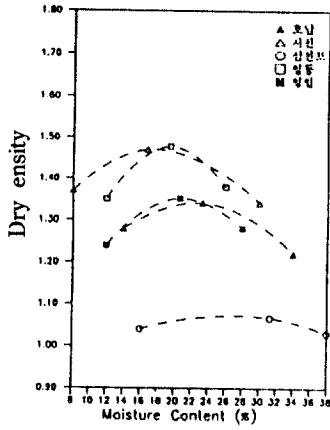


(a) A-1 다짐

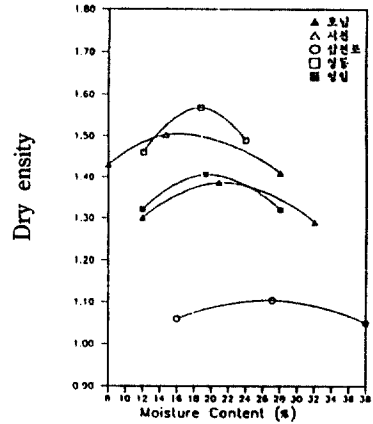


(b) D-2 다짐

그림 6. 다짐 시험 결과 (비회 : 저회 = 10 : 0)

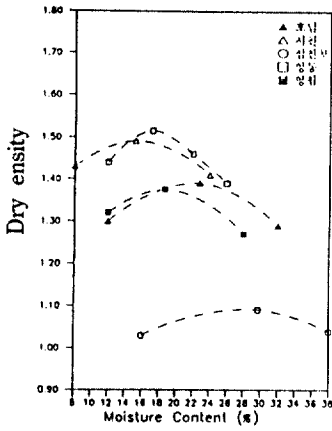


(a) A-1 다짐

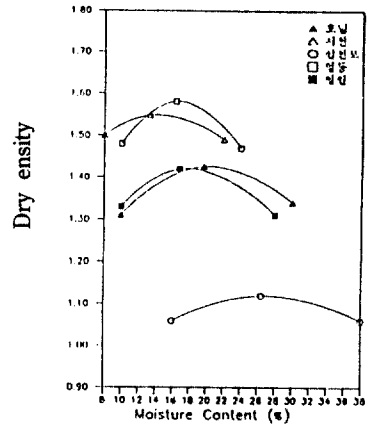


(b) D-2 다짐

그림 7. 다짐 시험 결과 (비회 : 저회=8 : 2)

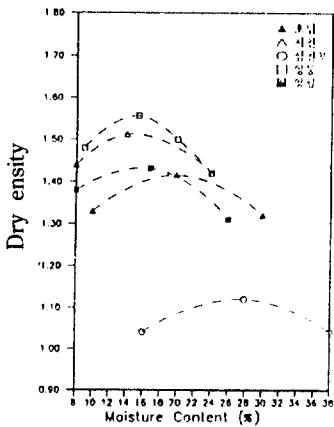


(a) A-1 다짐

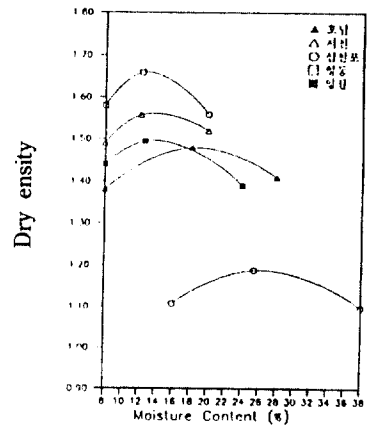


(b) D-2 다짐

그림 8. 다짐 시험 결과 (비회 : 저회=7 : 3)

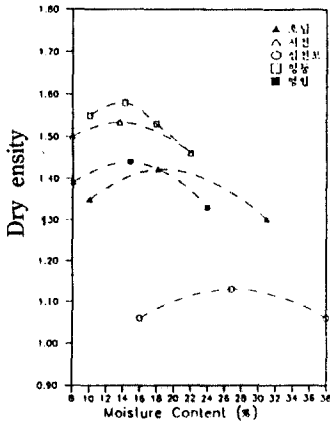


(a) A-1 다짐

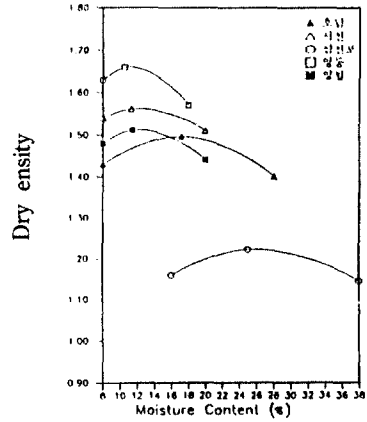


(b) D-2 다짐

그림 9. 다짐 시험 결과 (비회 : 저회=6 : 4)

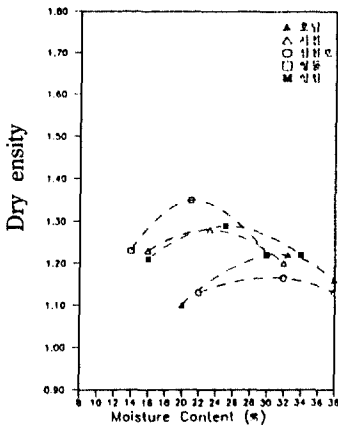


(a) A-1 다짐

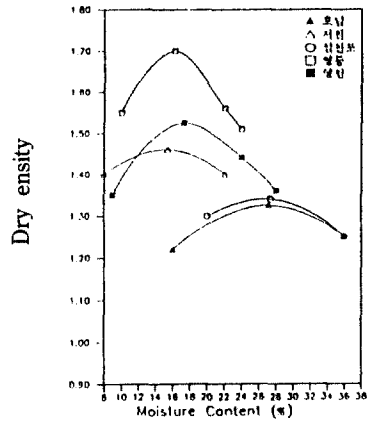


(b) D-2 다짐

그림 10. 다짐 시험 결과 (비회 : 저회 = 5 : 5)



(a) A-1 다짐



(b) D-2 다짐

그림 11. 다짐 시험 결과 (비회 : 저회 = 0 : 10)

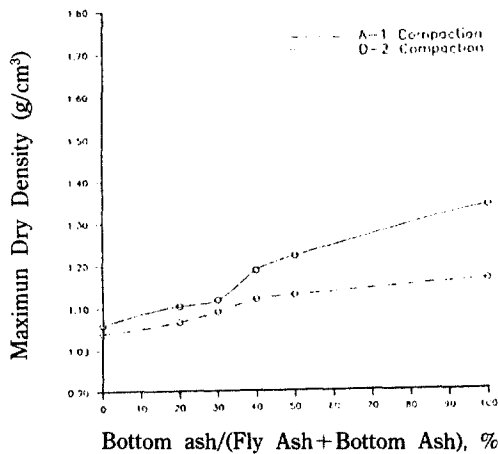


그림 12. 저회의 혼합중량비율에 따른 최대건조밀도의 변화(삼천포)

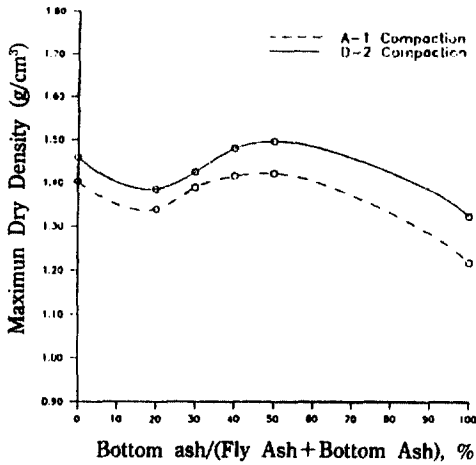


그림 13. 저희의 혼합중량비율에 따른 최대건조밀도의 변화(호남)

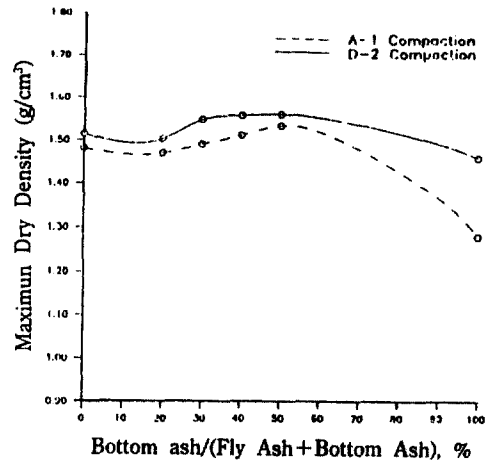


그림 14. 저희의 혼합중량비율에 따른 최대건조밀도의 변화(서천)

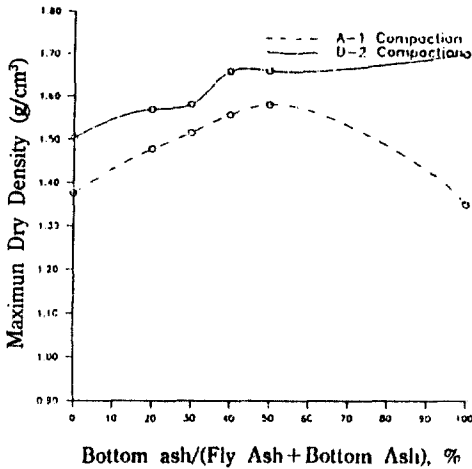


그림 15. 저희의 혼합중량비율에 따른 최대건조밀도의 변화(영동)

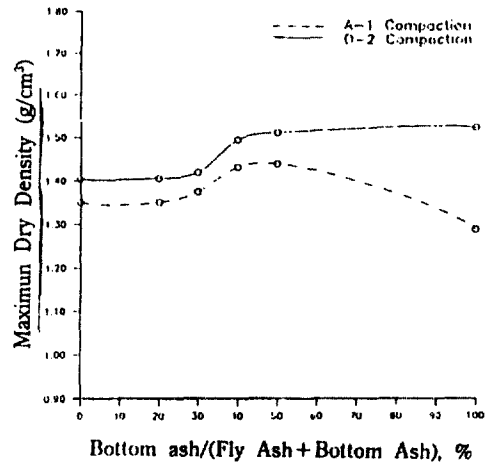


그림 16. 저희의 혼합중량비율에 따른 최대건조밀도의 변화(영월)

우에 다짐성이 상당히 증대하였다.

C형의 경우는 A-1다짐의 경우와 D-2다짐의 경우가 다른 형태를 이루고 있다. A-1다짐의 경우는 저희의 혼합중량비율이 증대하면 γ_{dmax} 값이 증대하지만 어떤 정점을 기준으로 다시 하락하여 순수 저희만을 다지게 되면 γ_{dmax} 의 값이 상당히 낮아지고, D-2다짐의 경우에는 저희의 혼합중량 비율이 증대함에 따라 계속해서 γ_{dmax} 가 증대하였다. 이러한 현상은 영동석탄화력발전소의 저희와 영월석탄화력발전소의 저희는 입자가 상당히 커서 어느 이상의 다짐 에너지를 가하게 되면 입자가 파쇄되기 때문인 것으로 보인다. 이런 점으로 볼 때 C형의 경우에 있

어서는 저희의 혼합중량비율인 40%와 50% 정도일 때가 다짐성이 가장 좋은 것으로 판단된다.

결국 모든 경우에 있어 비회:저희 혼합중량비율을 5:5 또는 6:4 정도로 하였을 때 다짐성이 최대로 증대하거나 현저히 증대함을 알 수 있다. 이때의 지지력을 알기 위하여 실내 CBR 실험을 실시한 결과는 표 2와 같다.

CBR 실험결과에서 알 수 있듯이 모든 종류의 석탄회에 대해서 비회:저희 혼합중량비율이 5:5, 6:4인 경우는 순수 저희의 경우와 마찬가지로 실제 사용에 있어서 큰 지지력을 나타낼 것으로 보이며 또, CBR 시험에서 55회 다짐을 기준으로 보았을 때

흡수팽창은 어느 경우나 거의 일어나지 않았으며 가장 큰 경우라도 팽창비가 1% 정도로서 팽창에 의한 문제는 없을 것으로 판단된다.

5. 결 론

(1) 석탄회의 γ_{dmax} 범위는 A-1다짐의 경우는 1.040~1.580 g/cm³, D-2다짐의 경우는 1.060~1.700 g/cm³으로서 보통 흙 보다는 작은 편이고, O.M.C.는 10.5~35.0% 정도로 보통 흙 보다는 큰 편이다. 이와 같이 다짐한 석탄회의 경량성은 원지반이 연약층일 경우 원지반의 압축성과 관련해서 보면 우수한 공학적 성질로 볼 수 있다.

(2) 일반적으로 비회와 저회의 혼합비율이나 다짐종류(A-1, D-2)에 관계없이 영동, 영월, 서천 등 무연탄 석탄회가 삼천포, 호남 등 유연탄 석탄회보다 큰 γ_{dmax} 와 작은 O.M.C.를 갖으며, CBR 값도 더 큼을 알 수 있다.

(3) 석탄회 중에 비회의 혼합량이 많아서, 비회 : 저회 혼합중량비율이 8 : 2 이상인 경우에는 다짐시 함수비가 O.M.C.보다 크면 쉽게 沸化한다.

(4) 석탄회를 도로성토재나 노상재로 사용할 때는 저회나 비회를 각각 따로 사용하는 것보다 적정 비율로 혼합하여 사용하는 것이 더 효과적이라고 할 수 있다.

(5) 저회의 혼합비율이 크면 공학적 특성면에서 유리한 점도 있으나 용도에 따라서는 꼭 그렇지만도 않을 뿐 아니라, 우리나라 석탄회 발생비율이 비회 : 저회가 대략 8 : 2 정도로 비회가 훨씬 많다는 점을 감안하여 비회 : 저회를 5 : 5 또는 6 : 4까지로 혼합하여 사용하면 공학적 특성으로 보아 큰 무리가 없고 대량의 석탄회(비회)를 활용 또는 소모시킬 수 있게 된다는 점으로 보아서도 바람직하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구비(과제번호 90-16-00-08)지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 동 재단에 깊은 감사를 드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. 동력자원부, "장기전원개발계획" (1989-2001), 1989.
2. 천병식, 이병하, 오재응, "화력발전소 산업폐기물인 석탄회의 건설재료로서의 활용에 관한 연구", 한국과학재단 목적기초(880607) 연구 결과보고서, 1990, pp.1-30.
3. 천병식, 고용일 외 2인, "산업폐기물로 발생되는 석탄회의 토질역학적 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제 10권, 제 1호, 1990. 3., pp.115-123.
4. 松尾 新一郎, "新稿 道路工學", 山海堂, 1973, pp.19-44.
5. AASHTO, "Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing", 15th Ed., Part 1, Specification, 1990, pp.151-155.
6. 건설부, "도로공사표준시방서", 1986.
7. 日本 土質工學會, "土質試驗の方法と解説", 1990, pp.219-235.
8. 栗原 宏武, 深澤 榮造, 早崎 勉, "石炭灰の盛土材への適用性について", 第 19回土質工學研究發表會, 1984, pp.1501-1502.
9. Thorne, D.J., Watt, J.D., "Composition and Pozzolanic Properties of Pulverised Fuel Ashes", Part II, *Journal of Applied Chemistry*, London, Vol.15, 1965, pp.595-604.
10. R.C. Joshi, T.S. Nagaraj, "Fly Ash Utilization for Soil Improvement", *Environmental Geotechnics and Problematic Soil and Rocks*, Balkema, Rotterdam, ISBN, 1987, pp.15-24.
11. 五十嵐 和彦, "石炭灰のポゾラン反應と物理化學的・工學的的特性の變化", 第 18回土質工學研究發表會, 1983, pp.177-178.
12. Donald H. Gray, Yen-Kuang Lin, "Engineering properties of Compacted Fly Ash", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.98, SM4, Proc. Paper 8840, April, 1972, pp. 361-380.
13. フジテクノシステム, "石炭灰處理システムと有効利用技術", 1981. 9.
14. 五十嵐 和彦, 久保 宏, "石炭灰の道路路盤材への有効利用", 第 17回土質工學研究發表會, 1982, pp.13 37-1340.
15. 한국전력기술주식회사, "유연탄 화력 회사장 면적 축소 방안" 1990. 12, pp.1-6.

(接受 : 1991. 11. 2)