

## 비회와 저회의 적정 혼합비로 다짐한 석탄회의 강도와 내구성

The Strength and Durability of Compacted Coal Ash with  
Proper Mixing Ratio of Fly Ash to Bottom Ash

천병식\*·이은수\*\*·고용일\*\*\*

Chun, Byung Sik · Lee, Eun Soo · Koh, Yong Il

### Abstract

In this study, the strength and durability of compacted coal ash with proper mixing ratio of fly ash to bottom ash, such as 5:5 or 6:4, are examined for use of highway embankment and subgrade materials. Right after compaction, the strength of bituminous mixed coal ash is greater than that of anthracite mixed coal ash. The distinguished increase of strength with curing time is observed only in Ho-nam mixed coal ash that contains a lot of free lime, and the strength increase with curing time are not seen or little in the others.

The durability in sinking test is good also in Ho-nam mixed coal ash, but satisfactory by adding 2% cement in the others. And it is seen that the effects of the strength increase with adding cement are greater in coal ash with proper mixing ratio than in fly ash or bottom ash respectively.

### 요 지

본 연구는 비회와 저회를 5:5 또는 6:4 까지의 적정비로 혼합한 석탄회를 도로 성토 및 노상재로서 도로 축조에 사용하기 위하여 다짐할 경우의 강도 및 내구성에 대해 검토한 것이다. 다짐한 직후의 강도는 유연탄 석탄회가 무연탄 석탄회보다 다소 크다. 재령에 따른 현저한 일축압축강도 증가는 유리된 석회의 양이 많이 함유된 호남 화력발전소의 석탄회에서만 관찰될 수 있었고, 나머지 4개 화력발전소의 석탄회에서는 강도 증가가 없거나 매우 적었다.

수침에 대한 내구성에 있어서도 호남석탄회의 경우는 만족한 결과를 보였으나, 나머지 4개 화력발전소의 석탄회는 2%정도의 시멘트를 첨가함으로써 만족할 수 있었다. 또한, 비회와 저회를 별도로 사용하는 것보다 적정비율로 혼합하여 사용하는 것이 시멘트 첨가에 의한 강도 증대효과가 크다는 사실을 알 수 있었다.

\* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원 · 한양대학교 산업과학연구소

## 1. 서 론

우리 나라 8개 석탄화력발전소에서 발생되어 발생량의 대부분이 회사장(Ash Pond)에 폐기되고 있는 석탄회는 현재 연간 200만톤에서 2000년에는 500만톤을 상회할 것으로 전망되는 데, 운용중인 회사장의 규모가 발전소 용량에 훨씬 미달되고 있어 현재 대폭 확장중에 있다. 한 편, 현재 서해안고속도로, 경부고속전철등 대규모 국토건설공사로 인해 막대한 토공제가 소요될 것으로 전망되고 있다.

지금까지 산업 폐기물인 석탄회를 건설재로서의 활용을 목적으로우리 나라 5개 석탄화력발전소의 석탄회(서천, 영동, 영월등의 3개 무연탄 석탄회와 호남, 삼천포등 2개 유연탄 석탄회등 총 5개)를 대상으로 석탄회의 성질에 대한 연구<sup>(1,2)</sup>를 수행하였으며, 석탄회를 매립재나 성토재로 사용할 경우 향타나 충격 등에 의한 진동감쇠 특성을 위주로 석탄회의 동적 성질에 대하여도 보고한 바 있다.<sup>(3)</sup> 이와 같은 기초적 연구를 바탕으로 이들 석탄회의 구체적인 연구로서 도로 성토 및 노상재로서 석탄회의 활용에 관한 연구가 수행된 바 있는 데,<sup>(4)</sup> 여기서는 비회(F. A.:fly ash)의 발생량이 8:2로서 저회(B.A.:bottom ash)에 비해 훨씬 많은 점을 감안, 석탄회의 대량 활용을 위해서는 공학적 성질이 열등한 비회의 사용이 최대로 되어야 하므로 비회와 저회의 장단점을 상호 보완할 수 있는 비회:저회의 적정 혼합비를 산정하였고 이들의 지지력은 실내CBR 시험으로 확인하였다.

비회와 저회를 적정비로 혼합하고 다짐한 석탄회를 도로 성토 및 노상재로서 도로 축조에 활용하기 위하여서는 이들의 장기 안정성에 대해서도 검토하여야 하는 바, 본 연구에서는 적정 비율로 비회와 저회를 혼합하여 다짐할 경우 이들의 재령에 따른 강도특성과 수침시에 대한 내구성을 검토한 것이다.

## 2. 연구방법

석탄회 중에서 비회는 인공포졸란이기 때문에 비회와 저회를 혼합하여 다짐한 석탄회도 포졸란 특성을 갖게 될 것이다. 그러나 포졸란 이라고 해서 반드시 포졸란 반응을 하는 것은 아니므로 일반적

으로 일축압축강도 시험을 하여 포졸란 반응을 검토하게 되는 것이다. 본 연구에서는 적정혼합비로 다짐한 석탄회의 재령에 따른 강도의 변화를 일축압축강도시험을 통해 알아 보았다.

적정 혼합비로 다짐한 석탄회의 수침에 대한 내구성<sup>(5)</sup>은 BS 1924에 따라 14일간 습윤 양생한 공시체와 7일간 습윤양생후 다시 7일간 수침 시킨 공시체의 일축압축강도를 비교하는 방법으로 검토하였다. 즉,

수침강도비=

$$\frac{(7\text{일간 습윤양생} + 7\text{일간 수중양생})\text{한 공시체의 일축압축강도}}{14\text{일간 습윤양생한 공시체의 일축압축강도}} \times 100$$

가 80% 이상을 확보되면, 내구성은 충분히 양호하다고 평가한다.

한편, 鳥居和之등<sup>(6-7)</sup>은 그들의 연구에서 시멘트나 시멘트 혼합물을 첨가해서 다짐한 석탄회는 수중에서도 현저한 강도 발현을 나타낸다는 사실을 확인하고, 내구성을 개선할 목적으로는 시멘트나 시멘트 혼합물을 사용할 것을 권장하고 있다.

내구성 시험에 의하여, 적정 비율로 혼합하여 다짐한 석탄회의 내구성이 만족되지 못할 때는 석탄회에 시멘트를 소량 첨가하여 내구성 증대를 위한 적정 시멘트 첨가량을 산정하였다.

## 3. 일축압축강도 및 수침에 대한 내구성시험

본 연구는 현재 우리나라 8개 석탄 화력발전소 중 유연탄 화력 발전소로서 호남, 삼천포 등 2개소와 무연탄 화력발전소로서 서천, 영동, 영월 등 3개소 총 5개 석탄 화력 발전소에서 부산되는 비회와 저회를 적정비인 5:5와 6:4로 혼합한 총 10종류의 혼합회를 대상으로 하였다. D-2 다짐시험으로 구한 이들의 최대건조밀도  $\gamma_{dmax}$ 와 최적함수비 O.M.C는 표 1과 같다.

공시체는 표 1에서의  $\gamma_{dmax}$ 의 95% 밀도로 3층 정적 다짐하여  $\Phi 5 \times 10\text{cm}$  크기로 제작하였고, 양생은 상대습도 98% 이상, 온도  $23 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 습윤양생하였다.<sup>(8,9)</sup>

공시체 제작 직후와 7일, 14일, 28일 양생하여,

표 1. D-2 다짐한 혼합회의  $\gamma_{dmax}$ 와 O.M.C

혼합회종류	호 남		서 천		삼 천 포		영 동		영 월	
	5:5	6:4	5:5	6:4	5:5	6:4	5:5	6:4	5:5	6:4
다짐시험결과										
$\gamma_{dmax}(t/m^3)$	1.496	1.480	1.561	1.558	1.286	1.250	1.660	1.659	1.512	1.495
O.M.C. (%)	17.25	18.09	11.28	12.18	25.00	25.55	10.50	12.29	11.45	12.62

각각 2개의 공시체에 대하여 일축압축강도를 측정하였으며, 내구성검토를 위하여는 각각의 혼합회에 대하여 같은 방법으로 각각 2개의 공시체를 별도로 더 제작하여 7일간은 같은 방법으로 습윤양생 시킨후 공시체를 꺼내어 수중에 7일간 다시 수침 시켜둔다. 이와 같이 7일간 습윤양생하고 7일간 수침 시켜둔 공시체에 대하여서도 일축 압축강도를 측정하게 된다.

#### 4. 시험 결과 및 고찰

##### 4.1 재령과 강도

5개 석탄 화력발전소의 비회와 저회를 적정 비율로 혼합하여 제작한 공시체를 대상으로 일축압축 시험 결과를 재령과 강도와의 관계로 도시하면 그림 1, 2와 같다.

재령과 일축압축강도와의 관계를 보면 공시체 성형직후의 강도는 호남, 삼천포 등 유연탄 석탄회화 영동, 영월, 서천 등 무연탄 석탄회보다 다소 큰 편이지만, 장기강도발현에서 보면 호남 석탄회 경우에서만 재령에 따라 강도가 증가하는 확실한 자경성을 볼 수 있고, 나머지 4개 화력발전소의 석탄회에서는 강도증가가 있다하더라도 매우 적음을 알 수 있다.

이러한 석탄회의 강도 증가현상은 석탄회속에 포함되어 있는 유리된 석회(free lime)로 인한 포졸란 반응 때문인 것이다. 따라서 석탄회의 자경성에 의한 강도 증대 정도는 석회량에 따라 달라지게 된다는 사실을 확인할 수 있었다.<sup>(10~15)</sup>

실험에 사용된 5개 석탄 화력 발전소의 비회에 포함된 유리된 석회량에 대한 화학분석은 표 2와 같다.

##### 4.2 수침에 대한 내구성

비회와 저회를 산정된 적정비율(5:5, 6:4)로 혼합

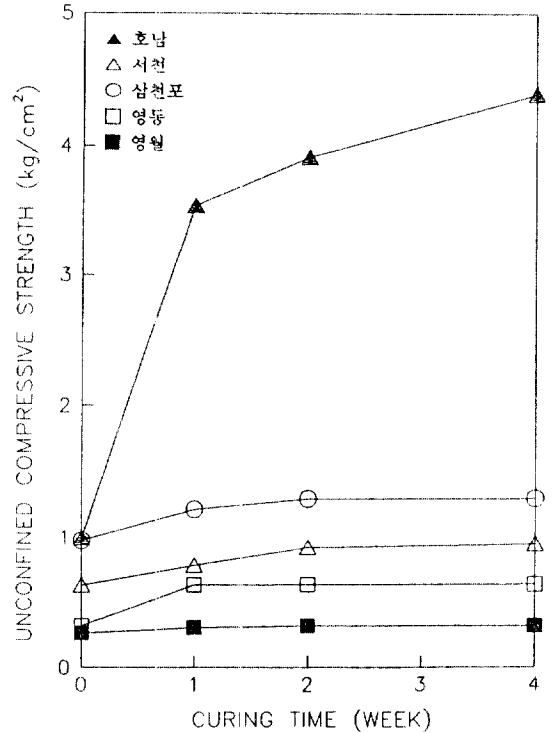


그림 1. 재령과 일축압축강도와의 관계 (비회:저회 = 5:5)

하여 다짐한 석탄회가 수침되었을 때에 대한 내구성 시험 결과는 표 3과 같다.

표 3에서 보는 바와 같이 호남 화력발전소 석탄회의 경우는 수침시험을 한 결과 내구성에 있어서 모두 만족하고 있지만, 나머지 4개 화력발전소 석탄회 경우는 수침을 시작한 시점에서의 강도가 1 kg/cm<sup>2</sup> 전후의 값으로 상당히 작고, 수침하였을 때는 차이가 있지만 비화(slaking)하여 7일 이내에 모두 붕괴하였다.

붕괴된 4개 화력발전소의 석탄회에 대해서는 강도증대와 내구성을 개선하기 위하여 같은 비율(5:5,

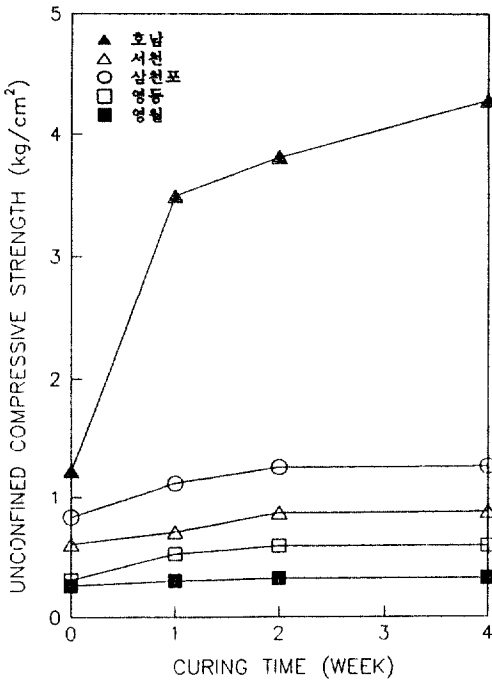


그림 2. 재령과 일축압축강도와의 관계 (비회:저회=6:4)

표 2. 비회에 함유된 유리된 석회의 양

비회의 종류	Free Lime ( CaO ; % )
호남 석탄회	13.06
서천 석탄회	0.95
삼천포 석탄회	2.04
영동 석탄회	0.64
영월 석탄회	0.86

표 3. 적정비율로 혼합한 석탄회의 수침시험 결과

혼합비	비회 : 저회 5 : 5			비회 : 저회 6 : 4		
	14일강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	수침강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	수침강도 비 (%)	14일강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	수침강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	수침강도 비 (%)
호 남	3.9177	3.1441	80.3	3.8116	3.2756	90.6
서 천	0.9272	붕괴	붕괴	0.8651	붕괴	붕괴
삼천포	1.2977	붕괴	붕괴	1.2569	붕괴	붕괴
영 동	0.6432	붕괴	붕괴	0.5869	붕괴	붕괴
영 월	0.3240	붕괴	붕괴	0.3150	붕괴	붕괴

6:4)로 비회와 저회를 혼합하고 여기에 시멘트를 각각 1%, 2%, 4% 첨가하여 같은 방법으로 공시체를 제작한 후 다시 수침시 내구성 시험을 실시한다.

그 결과는 표 4와 같다.

표 4에서 시멘트의 첨가량에 따라 수침강도비가 상당히 증가하는 것으로 보아 이들 혼합회의 수침에 대한 내구성이 상당히 개선된 사실을 알 수 있다. 그러나 시멘트 1%만을 첨가할 때는 수침강도비가 80%이하로 되는 경우가 많기 때문에, 산정된 적정 비율(5:5, 6:4)로 비회와 저회를 혼합하고 여기에 시멘트 2% 정도를 첨가하여 도로 축조시에 사용하면 가장 경제적이고 수침시 내구성에 있어서도 만족한 결과를 얻을 수 있을 것으로 여겨진다.

시멘트 첨가량에 따른 이들 혼합회의 일축압축강도(14일 습윤 양생)의 변화를 알아보면 그림 3, 4와 같다.

그림 3, 4에서 보는 바와 같이 적은 양의 시멘트 첨가에 의해서도 큰 강도 증대효과를 볼 수 있으며, 특히 서천, 영동 석탄회의 경우는 4%정도의 적은 시멘트 양의 첨가에도 비회:저회의 혼합비가 5:5인 혼합비의 일축압축강도가 20kg/cm<sup>2</sup> 이상을 발휘하므로, 도로의 보조기층재까지도 사용 가능할 것<sup>(6)</sup>으로 여겨진다.

또한, 적정 비율로 비회와 저회를 혼합하여 사용하는 것은 강도 발현의 주 원인인 포졸란 반응을 하는 것으로 알려진 비회만을 사용하는 것보다도 시멘트 첨가에 의한 강도증대 효과가 크다는 사실이 영동 화력발전소의 비회에 대하여 시멘트 첨가량에 따른 일축압축강도의 변화에 대해서 실험한 결과인 그림 5<sup>(1)</sup>와 그림 3, 4를 비교함으로써 알 수 있었다.

표 4. 시멘트를 첨가하여 다집한 석탄회의 수침시험 결과

혼합비		비회 : 저회 5 : 5			비회 : 저회 6 : 4		
		14일강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	수침강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	수침 강도비	14일강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	수침강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	수침 강도비
서 천	시멘트 1%	2.5235	1.7133	67.9%	2.2869	1.4229	62.2%
	시멘트 2%	16.8460	16.0216	95.1%	11.0347	9.4393	85.5%
	시멘트 4%	28.5113	27.8555	97.7%	17.6131	16.8786	95.8%
삼천포	시멘트 1%	2.4159	1.3059	54.1%	1.9915	1.3222	66.4%
	시멘트 2%	6.1051	5.2644	86.2%	5.8438	5.7133	97.8%
	시멘트 4%	16.9684	16.9259	99.7%	16.8672	15.8339	93.9%
영 동	시멘트 1%	3.5919	3.3300	92.7%	3.5055	2.8429	81.1%
	시멘트 2%	14.2464	13.2221	92.8%	13.2547	11.6146	87.6%
	시멘트 4%	24.1968	23.7612	98.2%	17.0255	16.8214	98.8%
영 월	시멘트 1%	1.6835	1.2079	71.7%	1.6038	1.1018	68.7%
	시멘트 2%	5.7023	5.5084	96.6%	5.3655	4.8933	91.2%
	시멘트 4%	14.5243	14.1176	97.2%	13.2400	11.5453	87.2%

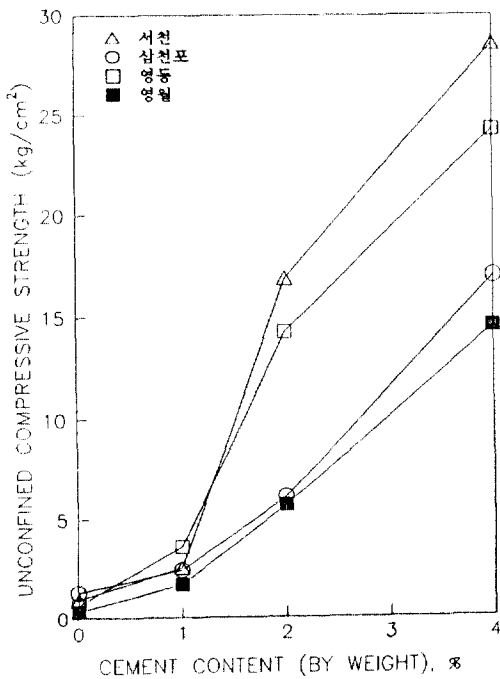


그림 3. 시멘트 함유량과 14일 양생 일축압축강도와  
의 관계  
(비회:저회=5:5)

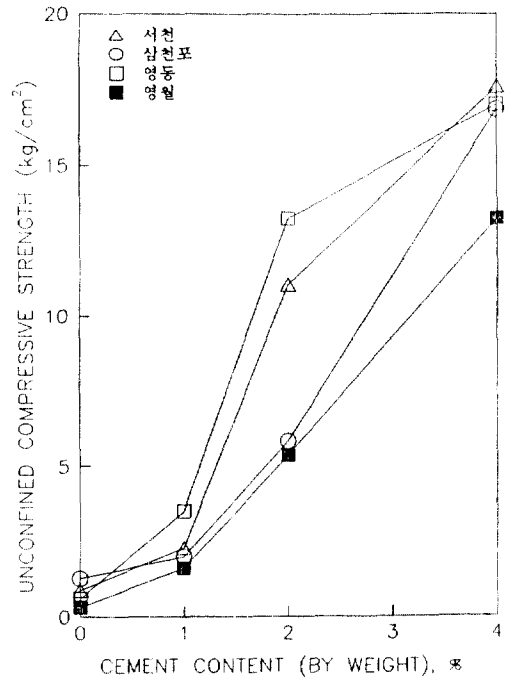


그림 4. 시멘트 함유량과 14일 양생 일축압축강도와  
의 관계  
(비회:저회=6:4)

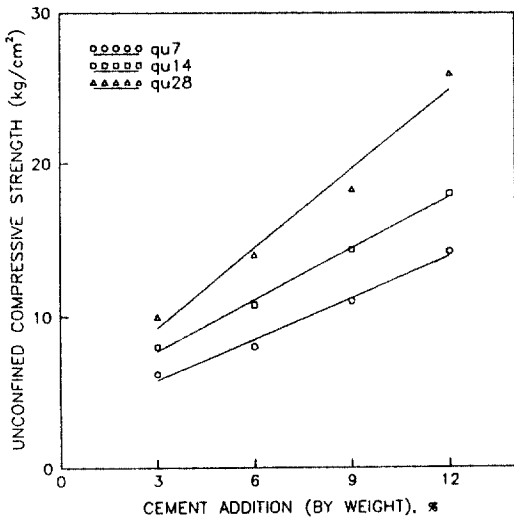


그림 5. 시멘트 첨가량과 영동 화력발전소 비회의 일축압축강도 관계

표 5. 석탄회의 CBR (%)

석탄회의 종류 혼합증량비율	호 남	서 천	삼천포	영 동	영 월	
	비 회	10 : 0	5.4	0.6	2.1	0.2
저 회	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

참고로 순수 비회와 저회 그리고 비회와 저회의 적정혼합비인 5:5 또는 6:4 로 혼합한 석탄회 지반의 지지력을 알기 위하여 실내 CBR시험을 실시한 결과는 표 5와 같다.

표 5에서 보듯이 적정비로 혼합한 석탄회의 CBR값은 도로공사 표준시방기준<sup>(17)</sup>에 의하면 도로 성토재는 물론 노상재까지의 사용에 있어 필요한 지지력을 충분히 갖는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

1) 공시체 성형 직후의 일축압축강도는 호남, 삼천포 등 유연탄 석탄회가 영동, 영월, 서천 등 무연탄 석탄회보다 다소 큰 편이었다.

2) 재령에 따른 일축압축강도의 증가현상은 호남 석탄회에서는 현저히 관찰할 수 있었으나 나머지 4개 화력발전소의 석탄회에서는 강도증가가 없거나 매우 적었는데, 이와 같은 강도증가 현상은 비회에 함유된 유리된 석회의 양과 관계됨을 확인할 수 있었다.

3) 비회와 저회를 5:5 또는 6:4 까지의 적정비로 다짐한 석탄회의 수침시 내구성은 호남 석탄회의 경우만 만족한 결과를 보였고, 나머지 4개 화력 발전소의 석탄회는 2% 정도의 시멘트를 첨가함으로써 만족할 수 있었다.

4) 비회와 저회를 따로 사용하는 것보다 적정혼합비로 혼합하여 사용하는 것이 시멘트첨가에 의한 강도증대효과가 크다는 것을 알 수 있었다.

## 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. 천병식, 이병하, 오재용, "화력발전소 산업폐기물인 석탄회의 건설재료로서의 활용에 관한 연구", 한국과학재단 목적기초연구(880607)결과 보고서, 1990
2. 천병식, 고용일 외 2인, "산업폐기물로 발생되는 석탄회의 토질역학적 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제10권, 제1호, 1990. 3., pp.115-123
3. 천병식, 고용일 외 2인, "약액처리된 석탄회의 동적감쇠 특성", 대한토목학회논문집, 제11권, 제1호, 1991.3., pp.145-151
4. 천병식, 고용일, "석탄회의 도로성토재 및 노상재료의 활용을 위한 비회와 저회의 적정혼합비", 대한토목학회논문집, 제12권, 제1호, 1992.3., pp.177-186
5. 鳥居 和之, 川村 滿紀, 柳場 重正, "締固めた石炭灰の強度發現と水糲時の耐久性について", 第21回土質工學研究發表會, 1986.6., pp.1921-1924
6. Sherwood, P.T., Ryley, M.D. "The Use of Stabilized Pulverized Fuel Ash in Road Construction", Road Research Laboratory, RRL Report No. 49, 1966., p.44

7. 堀内 澄夫 外 2人, “石炭灰の土木材料としての利用に関する研究(その2) -石膏およびセメントを添加した石炭灰の強度特性-”, 第17回 土質工學研究發表會, 1982., pp.2665-2668
8. 한국공업규격, “실험실에서 흙시멘트의 압축 및 휨강도 시험용공시체를 제작하고 양생하는 방법”, KSF 2329, 1976.
9. American Standards of Testing and Materials, “Standard Method of Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in The Laboratory”, ASTM D 1632-63, 1972.
10. 三木 五三郎, 今井 五郎 外 3人, “石炭灰の強度發現に関する實驗的研究”, 第19回 土質工學研究發表會, 1984.6., pp.1499-1500
11. 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
12. Thorne, D.J., Watt, J.D., “Composition and Pozzolan Properties of Pulverised Fuel Ashes”, Part, *Journal of Applied Chemistry*, London, Vol.15, 1965., pp.595-604
13. Joshi, R.C., Nagaraj, T.S., “Fly Ash Utilization for Soil Improvemnet ”, *Environmental Geotechnics and Problematic Soil and Rocks*, Balkema, Rotterdam, ISBN, 1987., pp.15-24
14. 五十嵐 和彦, “石炭灰のポゾラン反應と物理化學的・工學的特性の變化”, 第18回 土質工學研究發表會, 1983., pp.177-178
15. 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. Paper8840, April, 1972., pp. 361-380
16. 건설부, “도로포장 설계·시공 지침”, 1987., pp. 224-264
17. 건설부, “도로공사 표준시방서”, 1990., pp.59-63  
(接受: 1992. 5. 11)