

## 석탄회의 자경성에 따른 공학적 특성연구

### The Study on the Engineering Characteristics by Self-Hardening of Coal Ash

정혁상<sup>1)</sup>, Jung-Hyuk Sang, 신웅기<sup>2)</sup>, Woong-Gi Shin, 김지원<sup>2)</sup>, Ji-Won, Kim, 천병식<sup>3)</sup> Byung-Sik Chun

1) 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanyang University

2) 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanyang University

3) 한양대학교 건설환경공학과 교수, Dept. of Civil and Environmental Eng., Hanyang University

**SYNOPSIS** : As enormous construction projects of land development are carried out around Korea, useful construction materials are needed to perform the construction projects. However, there are no more enough of fill and reclamation materials in our country. That is why the coal ash is expected to be utilized as an alternative material. Since the coal ash has the characteristics of a pozzolan and a selfhardening material, it is adjudged that coal ash has a great possibility to be used as a fill and reclamation material. In this study, grain size analysis, Atterberg limit test, and specific gravity test were performed to examine the physical characteristics of the coal ash about a self-hardening material before utilizing the coal ash in the construction. Compaction test, unconfined compression test were conducted to investigate the engineering characteristics according to mixture ratios of fly ash and bottom ash. As a result of the tests, it was confirmed that the mixing ratio 1:1 of fly ash and bottom ash is the most effective to use as a fill and reclamation material. If the mixture of coal ash is used as a backfill material with light weight around structure, it is expected to play a significant role in reducing earth pressure on the back of the structure. As described above, the coal ash should be considered as an alternative material of fill and reclamation materials since the result of the tests indicates that the coal ash is suitable to a useful material on the construction design.

**Keywords** : Coal ash, Fly ash, Bottom ash, Fill material, Self-hardening, Lightness

## 1. 서 론

최근 우리나라는 정부의 새만금지구 개발, 경인운하 건설 계획, 4대강 사업, 해안매립공사 등 대단위 국토개발이 실시되고 있으며, 대규모의 매립·성토·뒷채움재 등 막대한 건설재료가 소요되고 있다. 그 중에서도 특히 골재 및 매립·성토재의 부족은 토취장의 운용 등으로 인한 자연의 훼손으로 직결되어 국토 환경의 보존에도 역행하는 결과를 초래하고 있다. 또한 대규모의 공유수면매립공사는 매립재료를 준설토에 의지 하고 있는 실정이어서 준설토 인한 막대한 공시기간 및 비용의 지출은 국가 차원에서 막대한 손실을 불러 올 수 밖에 없다. 현재 국내의 준설토 매립토 부족과 매립토의 가격상승으로 준설토의 대체재료가 시급한 실정이며, 대규모 매립공사시 준설토 재료의 대체재로서 석탄회의 활용이 대두 되고 있는 실정이다. 국내의 경우 10개 화력발전소에서 연간 약 600만톤의 석탄회가 부산되며, 이중 약 350만 톤(58%)은 시멘트 대체재로 사용하고 나머지 약 250만톤(42%)은 인근 석탄회 매립장에 매립 처리되고 있는 실정이고, 석탄재중 비회(fly ash)는 재활용되고 있으나 저회(bottom ash)는 활용하기 어려워 전망

매립장에 매립 처리되고 있는 실정이다. 그러나 일부 발전소에서 매립장 용량이 한계에 부딪혀 최악의 경우 전기 생산을 중단할 수 밖에 없는 위기에 처할 수도 있는 상황에 놓이게 되었다. 따라서 폐기되고 있는 석탄회를 국토개발사업에 있어서 직접적인 건설재료로서 활용하게 되면 건설재료난 해소는 물론 산업폐기물의 유효이용 및 회사장의 규모 축소로 인한 국토의 효율적 이용과 환경보호 등의 효과를 거둘 수 있을 것으로 기대 된다(환경부, 2008).

본 연구에서는 비회와 저회의 배합비를 달리하여 각 배합비에 따른 자경특성을 규명하고 이를 통하여 국내의 건설산업 여건을 고려하여 대량 활용의 가능성이 높은 매립재 및 성토재로서의 활용을 그 목적으로 한다.

## 2. 석탄회의 특성

### 2.1 석탄회의 자경성

인공적인 포졸란재료인 비회는 대부분이 구상이고, 유리결정질( $3Al_2O_3 \cdot SiO_2$ )의 형태로 존재하고 있으므로 물과의 접촉을 통해 수산화칼슘( $Ca(OH)_2$ )과 결합하여 불용성 경화물질인 실리카질 화합물을 생성함으로써 자경성을 나타낸다. 선행연구에 의하면 비회의 자경성은 무연탄 비회에서는 거의 발생되지 않고, 유연탄 비회중에서도 역청탄 비회보다 아역청탄과 갈탄 비회에서 보다 크게 발현되며, 아역청탄과 갈탄 비회의 자경효과는 포틀랜드시멘트와 유사한 과정으로 수화반응을 일으켜 발현되는 것으로 보고된 바 있다. 따라서 비회의 자경성은 식(1), (2)에서 보는 것과 같이 비회에서 용출되는  $(SiO_3)^{-2}$ 나  $(Al_2O_4)^{-2}$ 가 칼슘이온( $Ca^{+2}$ )과 반응(포졸란반응)하여 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)이나 칼슘알루미네이트 수화물(C-A-H)을 생성하고, 장기간에 걸쳐 고화되어 높은 강도를 발현하는 과정으로 나타내어진다(한국건설자재시험연구원, 2008).



자경효과는 산화칼슘(CaO)의 함유량, 가용성 실리카와 알루미나의 양, 보일러의 종류와 연소온도, 비표면적, 다짐정도와 양생온도 등에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 비회의 자경성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 산화칼슘(CaO)의 함유량이다(Metha, 1984).

### 2.2 화학적 특성

석탄회는 일반적으로 실리카( $SiO_2$ ), 알루미나( $Al_2O_3$ ), 산화제2철( $Fe_2O_3$ ) 등이 전체 화학 성분 중 80~90%를 차지하는 주성분이며 그 밖의 성분으로 CaO, MgO,  $SO_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  등의 산화물이 존재한다. 다음 표 1은 탄종에 따른 미국 석탄회의 화학성분을 비교하여 보여준다. ASTM에서는 비회의 품질을 크게 Class C등급과 Class F등급으로 구분하여 콘크리트 혼화재로 사용한다. Class C의 비회는  $SiO_3+Al_2O_3+Fe_2O_3$ 의 함유량이 50%이상이고 강열감량이 6.0%이하이며 CaO함량이 10%이상으로 자경효과(self hardening effect)가 뚜렷이 나타나는 특징이 있으며, Class F의 비회는  $SiO_3+Al_2O_3+Fe_2O_3$ 의 함유량이 70%이상이고 강열감량이 6.0~12.0이하이다.

성토재로서 비회를 사용할 경우에도 Class C등급과 Class F등급으로 비회의 자경성을 평가하는 지표로 사용하기도 한다

표 1. 탄종별 석탄회의 화학성분 비교(DiGioi 등, 1986, 단위: %)

탄 중 화학성분	무연탄	역청탄	아역청탄	갈탄
SiO <sub>2</sub>	48~68	7~68	17~58	6~40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25~44	4~3	4~35	4~26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2~10	2~44	3~19	1~34
TiO <sub>3</sub>	1~2	0.5~4	0.6~2	0~0.8
CaO	0.2~4	0.7~36	2.2~52	12.4~52
MgO	0.2~1	0.1~4	0.5~8	2.8~14
Na <sub>2</sub> O	-	0.2~3	-	0.2~28
K <sub>2</sub> O	-	0.2~4	-	0.1~1.3
SO <sub>3</sub>	0.1~1	0.1~32	3.0~16	8.3~32
기타	4~19	3~32	3~16	4~19

### 3. 실내시험

#### 3.1 시험재료의 특성

자경성 연구를 위해 영흥화력발전소의 저회와 비회를 채취하였으며, 기본적인 물성치를 구하기 위해 저회와 비회에 대한 입도분석시험(KS F 2302), 연경도를 측정하기 위한 Atterberg한계시험(KS F 2303), 비중시험(KS F 2308) 등을 실시하였다. 흙의 통일분류법에 의하면 영흥화력발전소의 비회는 SM, 저회는 SW로 분류되며, Atterberg한계시험 결과 두 시료가 비소성으로 나타났고, 비중은 비회의 경우 2.23, 저회가 2.32로 보통 흙보다는 작은 값을 갖는다는 것을 알 수 있었다.

표 2. 석탄회의 기본 물성시험 결과

항목 종류	비중 Gs	흙의 종류	Atterberg Limit		입도분포						
			WL (%)	IP (%)	No.4 통과량 (%)	No.200 통과량 (%)	D <sub>60</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>g</sub>
비회	2.23	SM	N.P	N.P	100.0	41.0	0.11	0.49	0.018	6.1	1.2
저회	2.32	SW	N.P	N.P	99.47	2.96	2.40	1.20	0.30	8.0	2.0

#### 3.2 시험개요

영흥화력발전소에서 부산되는 저회와 비회의 배합비를 100:0, 70:30, 50:50, 30:70의 4가지 경우로 구분하여 공시체를 제작하였으며, 제작 직후와 3일, 7일, 14일, 28일 양생하여 각 재령별 3개의 공시체에 대하여 일축압축강도를 측정하였다.

표 3. 공시체 제작시 저회와 비회의 배합비

구분	저회(%)	비회(%)
CASE I	100	0
CASE II	70	30
CASE III	50	50
CASE IV	30	70

### 3.3 시험항목

#### 3.3.1 다짐시험

다짐시험은 KS F 2312의 D다짐 방법에 따라 실험을 수행 하였으며, (사)한국도로협회(1990) 기준인 상대다짐도 90~95%가 되도록 실시하였으며, 다짐시험전경은 그림 1과 같다.

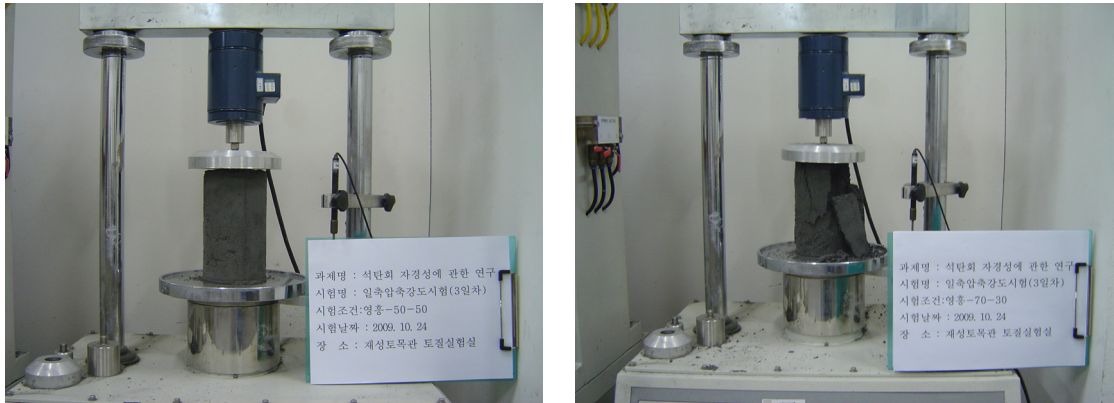


(a) 시료준비 (b) 시험기구전경 (c) 다짐시험실시 (d)다짐완료

그림 1. 다짐시험전경

#### 3.3.2 일축압축강도 시험

일축압축강도시험은 KS F 2314의 변형률 제어법에 근거하여 수행되었으며, 직경 10cm, 높이 20cm의 원통형 공시체를 각 CASE별 15개씩 제작하였으며, 다짐시험결과를 반영하여 통해 최대건조단위중량의 95%로 제작하였다. 재하 시 편심이 작용하지 않도록 Capping하여 받침대와 공시체가 수직이 되는지 확인 후 가압하였다.



(a) 일축압축강도 시험 전 전경 (b) 일축압축강도 시험 후 전경

그림 2. 일축압축강도시험 전·후 전경

### 3.4 시험결과 및 분석

#### 3.4.1 다짐시험결과

다짐시험방법에 따른 결과는 다음 표 4에 나타냈으며 다짐곡선은 그림 3, 그림 4와 같다. 도로공사표준시방서(1990)에 의하면 성토재(화강풍화토)의  $\gamma_{dm,max}$ 는 각 지역별로 17.3~17.5kN/m<sup>3</sup>정도이며, 본 연구에서 다짐시험 결과 저회의  $\gamma_{dm,max}$ 는 14.9kN/m<sup>3</sup>, 비회의 경우 13.3kN/m<sup>3</sup>인 것으로 나타났다. 이와 같이 석탄회는 화강풍화토에 비해

경량성을 가지고 있는 것으로 나타났으며, 이러한 석탄회의 경량성은 원지반이 연약층일 경우 원지반의 압축성과 관련해서 보면 우수한 공학적 성질로 볼 수 있다(천병식 등, 1992).

표 4.영흥발전소 석탄회의 다짐시험 결과

구분	다짐방법	$\gamma_{dmax}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	O.M.C(%)
저회	D다짐	14.9	19.9
비회		13.3	19.1

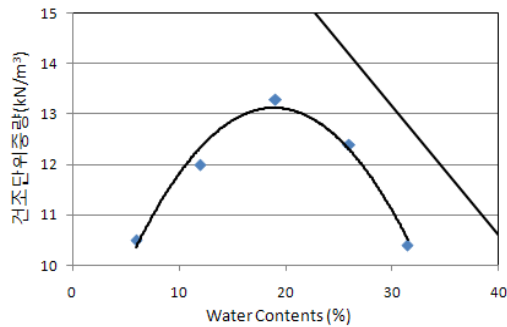


그림 3. 비회의 다짐곡선

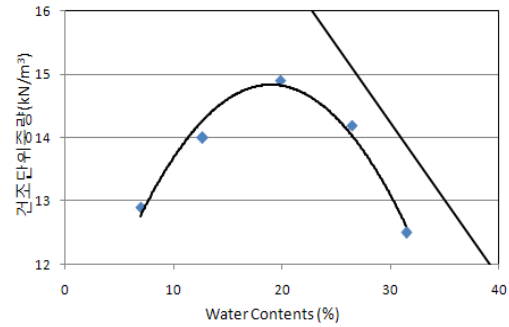


그림 4. 저회의 다짐곡선

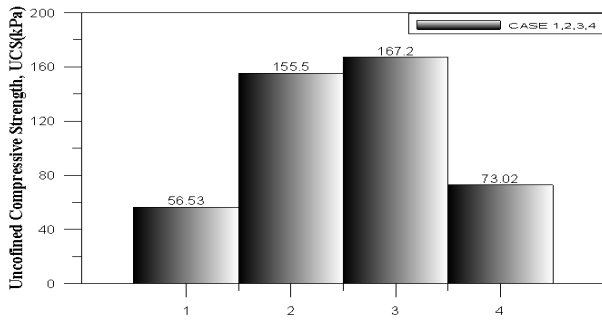
### 3.4.2 일축압축강도시험 결과

일축압축강도 시험은 저회와 비회의 배합비에 따른 자경성 과약을 위해 배합비를 CASE I, II, III, IV로 나누어 다짐시험에서 구한 최적함수비를 적용하여 시료를 제작하였다. CASE I, II, III, IV를 재령 28일간 양생 시킨 후 측정된 일축압축강도 결과는 표 5, 그림 5와 같다. 실험결과 각각의 CASE는 재령이 증가함에 따라 강도 역시 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 강도 증가현상은 석탄회 속에 포함되어 있는 석회로 인한 자경성 때문으로 판단된다. 그러나 CASEIV의 경우 재령 28일 강도는 CASE I 과의 강도차이는 크지 않다. 이는 일정 수준이상의 비회함량은 강도증가에 영향을 적게 미치는 것을 알 수 있다. 또한 CASEII와 III의 경우 CASE I 에 비해 2배 이상의 강도가증가하는 경향이 나타났는데 비회의  $(\text{SiO}_3)^{-2}$ 나  $(\text{Al}_2\text{O}_4)^{-2}$ 가 칼슘이온과 포졸란 반응하여 높은 강도를 발현했기 때문으로 판단된다. 이는 기존의 Thorne, D.J(1965)의 연구결과인 석탄회의 자경성에 의한 강도 증가 정도는 비회에 포함되어 있는 석회량에 따라 달라지게 된다는 사실을 확인할 수 있었다

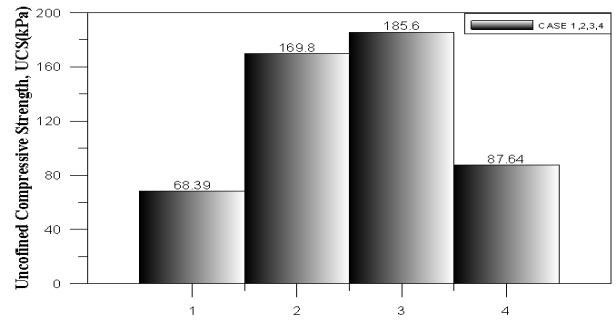
시간에 따른 일축압축강도 측정결과 재령 14일 강도가 재령 28일 강도의 85~90%정도는 이루어 짐을 볼수 있다.

표 5. 일축압축강도 결과

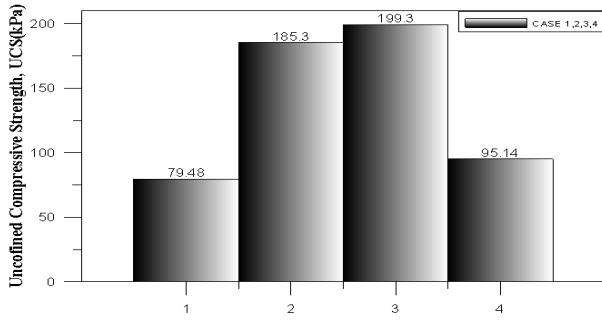
재령	일축압축강도(kPa)			
	CASE I	CASE II	CASE III	CASE IV
0	56.53	155.47	167.24	73.02
3	58.89	157.82	169.60	75.38
7	68.39	169.82	185.64	87.64
14	79.48	185.31	199.31	95.14
28	81.48	187.41	201.11	98.14



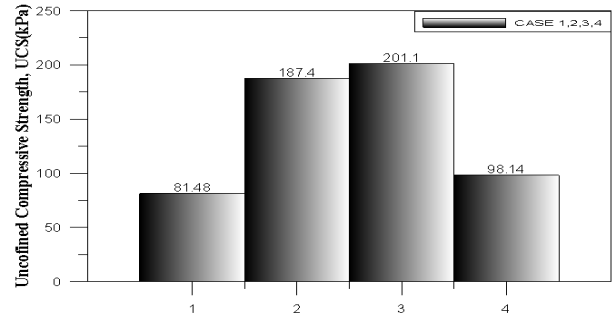
(a) 제작 직후 일축압축강도



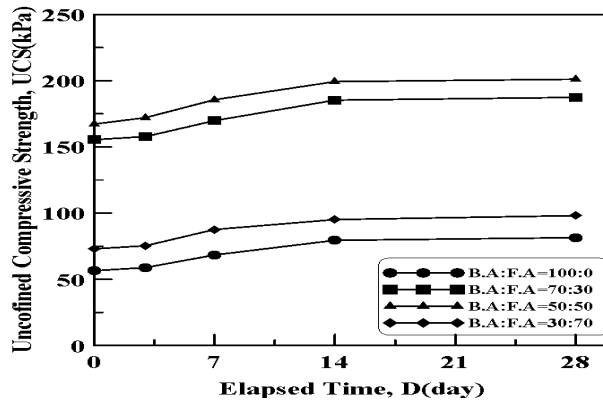
(b) 재령 7일차 일축압축강도



(c) 재령 14일차 일축압축강도



(d) 재령 28일차 일축압축강도



(e) 재령기간에 따른 CASE별 강도변화

그림 5. 일축압축강도 결과

## 4. 결론

본 연구는 영흥화력본부에서 부산되는 비회와 저회를 성토재 및 매립재로 활용하기 위한 자경성 연구로서 사용재료의 물리시험과 역학시험을 실시하였으며, 그 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

(1) 다짐시험결과 영흥화력본부에서 부산되는 저회의 최대건조밀도는  $14.9\text{kN/m}^3$ 로서 도로공사표준시방서에 명시된 성토재의 최대건조밀도 기준인  $14.72\text{kN/m}^3$ 을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 비중 시험결과 일반적인 건설재료로 활용시 모래의 비중보다는 낮은 값을 보이고 있어서 경량성 재료로 활용성이 클 것으로 판단된다.

(2) 일축압축강도시험 결과 저회화 100%인 경우 81.48kPa, 저회:비회화 1:1인 경우 201.11kPa의 강도가 발현되었다. 이와 같은 결과는 선행연구에서 석탄회의 자경성 정도가 비회에 포함되어 있는 석회량( $(\text{SiO}_3)^{-2}$ 나  $(\text{Al}_2\text{O}_4)^{-2}$ 가 칼슘이온의 포졸란 반응)에 따라 달라진다는 결과와도 상응되는 것임을 알 수 있다.

(3) 석탄회의 입도는 화강풍화토에 비하여 세립이고 비중 또한 화강풍화토에 비하여 훨씬 작은 값을 나타내고 있으며 전단강도와 투수특성은 거의 유사하며 경량성과 자경성등의 장점이 있기 때문에 장기적인 안정성에 보다 좋은 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No.20091020100060, 석탄회를 활용한 경량 유동성채움재(Flowable Fills) 제조공정 개발).

## 참고문헌

1. (사)한국도로협회(1990), *도로공사표준시방서*, pp.49~67.
2. 천병식, 고용일(1992), 석탄회의 도로성토재 및 노상재로서의 활용을 위한 비회화 저회화의 적정혼합비, *대한토목학회논문집*, Vol. 12, No. 1, pp.176~177.
3. 천병식, 권형석, 문보원, 류지양(1997), 석탄회의 도로노반재로서의 활용에 관한 연구, *1997년 학술대회 논문집(II)*, 대한토목학회, pp.61~64.
4. 한국건설기술연구원(1992), *성토재로서의 석탄회 이용방안 연구보고서*, OTKCRK500398, pp.86~94.
5. 한국전자재시험연구원(2008), *발전소 매립회의 친환경적 활용을 위한 규격화 요소기술 보고서*, 2차년도 진도보고서, pp.7~8.
6. 환경부(2008), *제4차 자원재활용 기본계획*, pp.100~102.
7. DiGioia. A.M, McLaren. R.J, Burns. D.L, Miller. D.E.(1986), *Fly Ash DesignSelf Cementitious Fly Ashes-Structure and Hydration Mechanism, Manual for Road and Site Applications Vol.1:Dry or Conditioned Placement(App.A)*, pp.A-1~A-49.
8. Metha. P.K.(1984), *Testing and Correlation of Fly Ash Properties with Respect to Pozzolanic Behavior*, Palo Alto. pp.3~10, 13~14.
9. Thorne, D.J., Watt J.D.(1965), Composition and Pozzolanic of Properties of Pulverised Fuel Ashes, Part, *Journal of Applied Chemistry*, London, Vol.15, pp.595~604