

## 석탄회를 활용한 CLSM의 동결융해에 의한 강도 특성

### The Strength Characteristics By Freezing and Thawing of Controlled Low Strength Material Using Coal Ash

현호규<sup>1)</sup>, Hogyu Hyun, 김선태<sup>1)</sup>, Suntae Kim, 정혁상<sup>2)</sup>, Hyuksang Jung, 천병식<sup>3)</sup>, Byungsik Chun

- 1) 한양대학교 건설환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University
- 2) 한양대학교 건설환경공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University
- 3) 한양대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**SYNOPSIS** : Recently, the land area for many people has been limited because of industrialization and modernization in Korea. The large-scale constructions like the reclamation development projects have been progressed to resolve this problem mentioned above. Therefore, as many of the useful construction materials as possible are needed to perform the large-scale construction projects. Many studies for the utilization of pond ash which has a similar characteristic of sand have been conducted and there has been often occurred many structural problems on roadbed in winter. Therefore, the characteristics of the freezing and thawing for Controlled Low-Strength Material (CLSM) using pond ash were analyzed and evaluated by unconfined compressive strength test in this study. As a result of this study, it was confirmed that new CLSM using pond ash with cement (8.2% by weight) was able to stand for the freezing and thawing behavior.

**Keywords** : Pond ash, Controlled Low-Strength Material, Freezing and Thawing Test

## 1. 서 론

최근 국민 생활수준 향상과 함께 에너지 사용량이 증가함에 따른 산업부산물인 기하급수적으로 늘어나고 있는 실정이다. 그 산업부산물 중 석탄회는 화력발전소에서 발생하는 산업폐기물로서 상당히 많은 양이 발생된다. 2008년 환경부 조사를 통해 국내 10개 화력발전소에서 연간 약 600만톤 부산되는 석탄회 재활용률은 2004년 67.9%, 2005년 59.4%, 2006년 67.7%로 전체발생량에 비해 약 70%미만이며 현재 회처리장에 매립되어 있는 석탄회의 총량은 2008년 기준으로 약 7,200만톤에 달하는 것으로 추정된다(환경부, 2008). 현재 회처리장에 매립되어 있는 매립회로 인해 일부 발전소에서 매립장 용량이 한계에 부딪혀 최악의 경우 전기 생산을 중단할 수 밖에 없는 위기에 처할 수도 상황에 높이게 되었다. 또한 막대한 양의 석탄회를 폐기 처분하는데 과도한 경비가 소요될 뿐 아니라 이렇게 폐기처분된 석탄회는 환경오염의 원인이 될 수도 있다. 따라서 현재 매립된 석탄회의 재활용을 극대화하기 위해 기존의 재활용 용도 이외에 추가적으로 대량 활용할 수 있는 방안 마련이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 대량으로 매립되어 있는 석탄회를 대량 유효활용함에 있어 계절동토지역인 우리나라 실정을 고려하여 동결융해로 인해 토목구조물이 파손되거나 기능이 저하되는 문제점을 해결하고자 매립

회를 활용한 저강도 고유동화재(CLSM)의 동결융해에 따른 강도 변화 및 내구성 특성을 조사하여 사용 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 CLSM의 특징

CLSM는 저강도 콘크리트개념을 지반공학분야에 적용하여 만들어진 것으로 유동성채움재(CLSM, Controlled Low Strength Material, 혹은 Flowable Fill), 강도조절채움재(Controlled Strength Material), 다짐조절채움재(controlled density fill), 유동성플라이애쉬(flowable fly ash) 등으로 불린다. CLSM는 일반적으로 잔골재(모래), 비회, 물, 시멘트, 혼화제 등을 혼합하여 만들며, 자기수평성, 자기다짐성, 유동성, 인위적 인강도조절, 시공 후 재굴착의 용이성 및 시공단계 단축에 의한 시공비 절감가능성의 특징을 갖는다(ACI 229 Committee, 1994). 이러한 특징을 갖는 CLSM는 트렌치, 옹벽, 기초 등의 공동 채움재 도로노상재 등의 용도로 토사 대신 사용되며, 그에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다 (원종필 등 2001, 조재윤 등 2000, 박재현 등 2004, 이관호 등 2006 ; 2007, 임유진 등 2009).

### 2.2 국내 석탄회의 매립량 조사

현재 국내는 5개 발전사에서 총 10개 화력발전소가 운용중에 있으며, 이들 모두 석탄회 매립장을 보유하고 있다. 한국중부발전(주)의 보령발전본부와 같이 넓은 석탄회 매립장을 보유하고 있고, 매립량도 여유가 있는 발전사가 있는 반면 한국남동발전(주)의 삼천포발전본부 및 영동발전본부와 같이 매립율 97% 이상 육박하는 발전사들도 있다. 따라서 일부 발전소에서 매립장 용량이 한계에 부딪혀 최악의 경우 전기 생산을 중단할 수 밖에 없는 위기에 처할 수도 있는 상황에 놓이게 되어, 석탄회 재활용이 시급한 당면 과제로 떠오르고 있다. 석탄회의 매립량 및 매립율은 표 1에 나타내었다.

표 1. 석탄회 매립량 및 매립율(2008년 기준)

구 분	매립량 (천 m <sup>3</sup> )	매립율 (%)	
한국남동발전(주)	삼천포발전본부	11,164	97.3
	영흥발전본부	1,111	14.2
	영동발전본부	2,106	98.3
한국중부발전(주)	보령발전본부	9,579	41.4
	서천발전본부	5,380	84.8
한국서부발전(주)	태안발전본부	3,500	59.0
한국남부발전(주)	하동발전본부	4,816	52.2
한국동서발전(주)	당진발전본부	2,564	28.4
	호남발전본부	4,113	87.1
	동해발전본부	806	38.1

### 3. 시험재료 및 방법

#### 3.1 시험재료

본 연구에서 사용된 매립회는 영흥화력발전소 매립장에 매립되어 있는 석탄회를 사용하였고, 비회의 경우 재활용되는 정제회가 아닌 잔사회를 사용하여 석탄회의 재활용을 극대화하는 것에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 비중은 비회의 경우 2.23, 매립회의 경우 2.32로 보통 흙보다는 다소 작은 값을 갖고 있다. 통일분류법에 의하면 비회는 SM, 매립회는 SW로 분류되며, Atterberg한계시험 결과 두 시료 모두 비소성으로 나타났다. 연구에 사용된 석탄회의 자세한 물리적·화학적 특성은 표 2에 나타내었다. 또한 본 연구에 사용된 시멘트는 국내에서 많이 사용되는 일반적인 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

표 2. 석탄회의 기본 물성시험 결과

항목 종류	비중 Gs	흙의 종류	Atterberg Limit		입도분포			
			WL (%)	Ip (%)	No.4 통과량 (%)	No.200 통과량 (%)	Cu	Cg
비회	2.23	SM	N.P	N.P	100.0	41.0	6.1	1.2
매립회	2.32	SW	N.P	N.P	99.47	2.96	8.0	2.0

#### 3.2 배합비

배합비의 경우는 석탄회를 활용한 CLSM의 일축압축강도 및 플로우 특성에 관한 연구를 진행한 공진영 등 (2010)의 논문을 참고하여 배합비를 선정하였으며, 경제성을 고려하여 시멘트함량을 최소화하기 위해 시멘트량의 범위를 전체중량 대비 약 10%이하로 선정하였다. 따라서 시멘트 첨가율(약 4.9%, 6.6%, 8.2%, 9.7%)를 고려하여 총 4가지 경우에 대해 공시체를 제작하여 시험하였으며, 배합비는 표 3에 나타내었다.

표 3. CLSM 배합비

Mixture	Cement Ratio 4.9%	Cement Ratio 6.6%	Cement Ratio 8.2%	Cement Ratio 9.7%
매립회 (kgf)	7.00	7.00	7.00	7.00
비회 (kgf)	3.00	3.00	3.00	3.00
물 (kgf)	4.90	4.90	4.90	4.90
시멘트 (kgf)	0.77	1.05	1.33	1.61

#### 3.3 시험방법

##### 3.3.1 동결융해시험 및 일축압축강도 시험

동결융해시험 시험방법은 ASTM D 560(2003)에 준하여 실시하였다. 공시체는 배합비에 따라 CLSM을 배합하여 믹싱한 후 다짐 없이 슬러리 상태로  $\phi$  50mm×100mm 크기의 공시체를 배합비별로 제작하였다. 완성된 공시체는 상온 16~27℃에서 72시간 동안 건조양생을 실시한 후 탈형하여 22±2℃의 수조에서 7일간 수중양생 후 실시하였다. 항온항습도 캐비닛에서 -19℃로 20시간 동안 동결시키고 21℃에서 20시간 동안 융해 시켰다(그림 1). 일축압축강도 시험방법은 ASTM D 4832(2002)에 준하여 실시하였다. 공시체는 동결융해 시험과 동일한 방법으로 배합비별로 각각 33개씩 (동결융해 실험용 15개, 수중양생 18개) 제작하였고, 매 시험시 3개의 일축압

축강도의 평균값을 구하였다. 시험시 재하하중 3ton용량의 변위제어 방식의 만능재하시험기를 이용하였으며, 재하속도는 1mm/min로 실시하였다. 또한 본 연구에서 일축압축강도기준은 표 4를 참고하여 동결융해를 받은 후에도 재굴착이 가능하며 소정의 강도가 발현 될 수 있는 범위를 고려하여 1MPa로 선정하였다. 그림 2(a), 2(b)는 일축압축시험전경을 보여주고 있다.

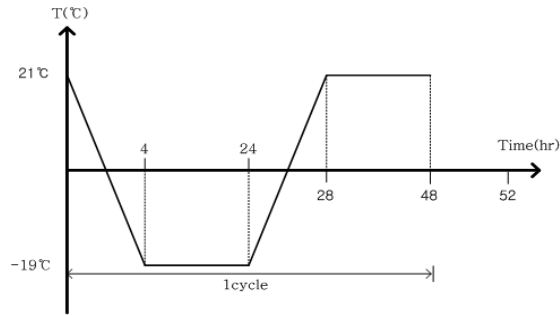
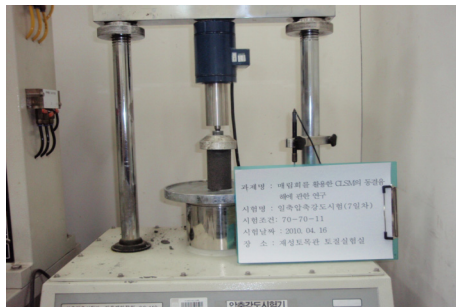


그림 1 동결융해시 시간과 온도와 관계

표 4. CLSM의 일축압축강도 적용사례(공진영 등, 2010)

목록	일축압축강도
ACI Committee229 (1994)	• 2,068kPa(300psi)이하
ASTM (2002)	• 인력굴착시 : 345kPa • 기계굴착시 : 1,380kPa
TRB (2008)	• 350~1,000kPa (51~145psi)
Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus(2004)	• 굴착시 : 1,034kPa(150psi)이하    • 비굴착시 : 1,034kPa(150psi) 이상
Sumio Horiuchi (1996)	• 경량 성토재 : 490kPa(71psi)    • 인공섬 구축 : 840kPa(122psi)



(a) 일축압축시험 전



(b) 일축압축시험 후

그림 2. 일축압축시험 전·후 전경

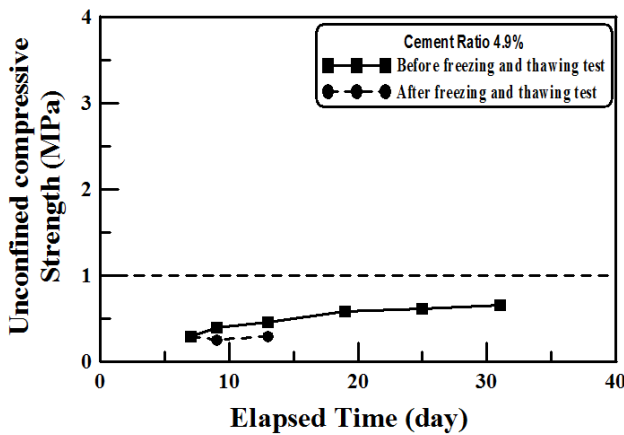
## 4. 시험결과 및 고찰

### 4.1 동결융해반복에 따른 일축압축강도의 변화

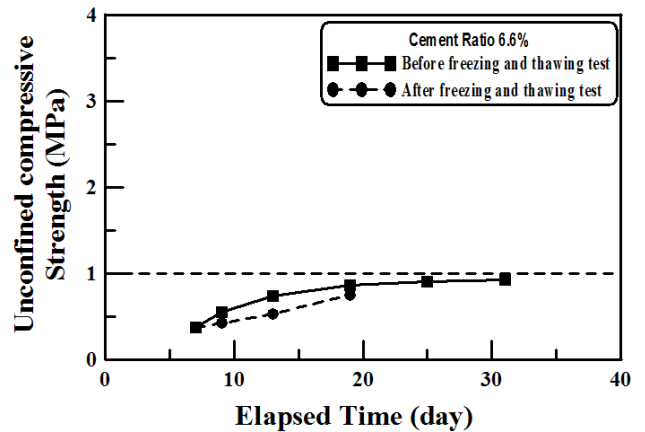
동결융해 cycle수의 증가에 따른 일축압축강도와 재령별 수중양생 공시체의 일축압축강도를 비교하여 그림 3에 나타내었다. 그 중 시멘트 첨가율(4.9%, 6.6%)인 공시체는 동결융해 전체 cycle인 12cycle을 견뎌내지 못해 일축압축강도 실험이 불가능 하였다. 전체적으로 시간이 지남에 따라 강도가 증가하는 양상을 보였으나, 동결융해 cycle을 거친 공시체는 수중양생 공시체보다 강도가 낮게 측정이 되었다. 이는 동결융해 작용이 시멘트와 석

탄화의 포졸란 반응을 지연시키고 부착강도를 저하시킨 것으로 판단된다. 또한 대부분 1cycle의 동결융해작용을 받은 공시체는 수중양생한 공시체의 일축압축강도 보다 강도가 작게 측정되었다. 이는 동결융해 초기 cycle에서 압축강도가 증가하지 못한 원인으로 동결기간 중 시멘트의 양생온도가 영하로 떨어짐으로서 시멘트의 경화가 거의 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다. 또한, 시멘트 첨가율 8.2% 와 9.7%를 비교해 볼 때 일축압축강도는 시멘트 첨가율 9.7%가 8.2% 일 때 보다 다소 높았지만 동결융해에 의한 압축강도감소량 또한 더 높은 것으로 나타났다. 이는 시멘트 첨가량이 높을수록 강도는 높아지지만 동결융해에 대한 강도 감소량도 증가하는 것으로 나타났다.

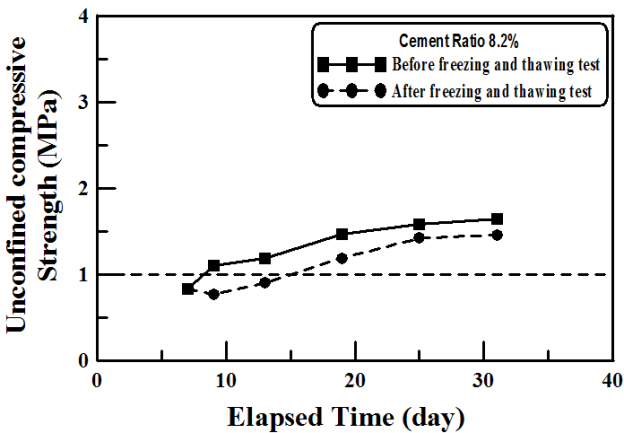
따라서 앞에서 제시한 재굴착에 용이하며 소정의 강도가 발현되는 일축압축강도기준(1MPa)에 적합한 시멘트 첨가율은 8.2%로 판단된다. 하지만 석탄회를 활용한 CLSM을 동토지역인 곳에 추가적으로 현장실험이 요구되는 것으로 사료되어진다.



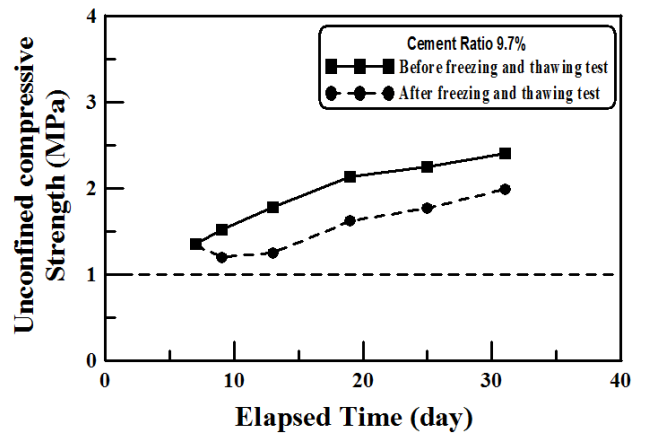
(a) 시멘트 첨가율 4.9%



(b) 시멘트 첨가율 6.6%



(c) 시멘트 첨가율 8.2%



(d) 시멘트 첨가율 9.7%

그림 3. 동결융해 반복에 따른 재령별 일축압축강도 변화

## 5. 결론

본 연구에서는 매립회를 대량 유효 활용하고자 개발한 매립회의 CLSM 동결융해에 대한 연구를 진행하였으며, 그 결과는 종합적으로 요약·정리하면 다음과 같다.

(1) 계절동토 지역인 우리나라에서 CLSM을 대량 유효 활용하기 위해서 제시한 재굴착이 용이하며 소정의 강도

(1MPa)가 발현 될 수 있는 시멘트 첨가율은 8.2%정도 인 것으로 실험을 통해 알 수 있었고 추가적으로 현장 시험이 요구 되어 지는 것으로 판단된다.

- (2) 동결융해 cycle 반복수의 증가에 따른 압축강도의 증가현상은 석탄회와 시멘트의 포졸란반응으로 인한 강도증가가 동결융해에 의한 강도감소보다 컸기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 동상의 피해가 적은 동결융해 초기 cycle에서 압축강도가 증가하지 못한 원인으로는, 동결기간 중 시멘트의 양생온도가 영하로 떨어짐으로서 시멘트의 경화가 거의 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.
- (4) 석탄회를 사용한 CLSM에 시멘트의 첨가율이 증가할수록 동결융해 cycle 반복 후 압축강도는 초기 cycle을 제외한 다른 cycle에서 선형적으로 증가하였지만, 9.7%이상의 시멘트를 첨가하였을 경우 동결융해 반복에 따른 강도감소율은 증가하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과 제입니다.

(No. 20091020100060, 석탄회를 활용한 경량 유동성채움재(Flowable Fills) 제조공정 개발 )

## 참고문헌

1. 공진영, 강형남, 천병식 (2010), 석탄회를 활용한 저강도 고유동화재의 일축압축강도 및 플로우 특성, **한국지반공학회논문집**, Vol.26, No.1, pp.75~83
2. 박재현, 이관호, 조재윤, 김석남(2004), 현장발생토 CLSM을 이용한 지하매설관의 변형, **한국지반공학회논문집**, Vol. 20, No. 3, pp. 129~139.
3. 원종필, 이용수(2001), Bottom Ash를 혼합한 저강도 고유동 충전재의 특성, **콘크리트학회논문집**, Vol. 13, No. 3호, pp.294~300
4. 이관호, 송창섭(2006), 현장발생토사 재활용 유동성채움재를 이용한 지하매설관의 거동평가, **한국도로학회논문집**, Vol. 8, No. 2, pp.1~12
5. 이관호, 김주득, 현성철, 송용선, 이병식(2007), 해양준설토를 CLSM을 이용한 지하매설관 변형특성, **한국방재학회논문집**, Vol. 7, No. 5, pp.129~137
6. 임유진, 서창범(2009), 화강풍화토를 이용한 CLSM의 공학적 특성평가, **한국방재학회논문집**, Vol. 9, No. 3, pp.19~26
7. 조재윤, 이관호, 이인모(2000), 유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽뒷채움재 연구, **한국지반공학회논문집**, Vol. 16, No. 4, pp.17~30
8. 환경부(2008), 제4차자원재활용기본계획, **환경부**, pp. 100~102
9. ACI Commitee 229 (1994), *Contreolled Low Strength Materials(CLSM)*, American Concrete Institute, 229R-2. pp.1~12.
10. ASTM(2002), *Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders*, ASTM D 4832, American Society for Testing Materials, pp. 1~7
11. ASTM(2003), *Standard Test Method for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures*, ASTM D 560, American Society for Test ing Materials, pp. 1~7
12. Tarun R. Naik, Rudolph N. Kraus(2004), *Properties of Flowable Self-Compacting Slurry Using Quarry By-Products and Ponded CCPs*, Publication SP, pp.523~538.
13. TRB(2008), *Development of a Recommended Practice for Use of Controlled Low-Strength Material in Highway Construction*, NCHRP Report 597, U.S. Transportation Research Board, pp.3~59.