

# 석탄회를 활용한 경량기포유동화재의 플로우 및 강도 특성

## Flow and Strength Characteristics of the Lightweight Foamed CLSM(Controlled Low-Strength Materials) with Coal Ash

이 승 준<sup>1)</sup> · 이 종 휘<sup>2)</sup> · 채 휘 영<sup>2)</sup> · 천 병 식<sup>†</sup>

Lee, Seungjun · Lee, Jonghwi · Chae, Hwiyoung · Chun, Byungsik

**ABSTRACT** : Coal ash of industrial by-products was not recycled about 30% in total emissions. Moreover, it caused environmental pollution as well as wasted unnecessary expenses and time. Currently, fly ash(FA) is recycled as construction material however ponded ash(PA) is mostly buried. Lightweight foamed Controlled Low-Strength Materials(CLSM) evaluated in this study reduces unit weight by mixing foam in the traditional Controlled Low-Strength Material and has lightweight and flowability to be available for backfill materials in construction. Flow test, unconfined compressive strength test, and foamed-slurry unit weight test were performed in this study and the applicability of lightweight foamed CLSM for construction materials was evaluated. The results indicate that the mixture ratio(PA:FA) ranging from 70:30 to 50:50, cement of 7%, foam of 2~3%, and water content of 26.5~29.5% were required to satisfy the following standards such as flow value(i.e., 20cm), unconfined compressive strength(i.e., 0.8~1.2MPa), and foamed-slurry unit weight(i.e., 12~15kN/m<sup>3</sup>).

**Keywords** : Coal ash, Lightweight Foamed CLSM(Controlled Low-Strength Materials), Unit weight test, Flow test, Unconfined compression strength test

**요 지** : 산업부산물 중 석탄회는 전체배출량의 약 30%가 재활용되지 못하고 매립되고 있으며, 매립에 따른 비용 등의 문제가 심각하다. 국내 석탄회 중에서 비회는 건설재료로서 재활용되나, 매립회는 대부분 재활용되지 못하고 매립되고 있다. 본 연구에서 석탄회를 활용하여 개발한 경량기포유동화재는 기존의 유동화재에 기포를 더하여 단위중량을 낮추었으며, 교대 및 응벽 등의 뒷채움에 적용가능한 경량성과 유동성을 지닌 재료이다. 또한, 단위중량, 일축압축강도, 플로우 시험 등과 같은 실내시험을 통해 적용성을 검토하였다. 시험결과 매립회와 비회의 혼합비 70:30~50:50에서, 기포량 각각 2~3%, 함수량 26.5~29.5% 범위에서 단위중량기준 12~15kN/m<sup>3</sup>, 일축압축강도기준 0.8~1.2MPa, 플로우기준 20cm 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

**주요어** : 석탄회, 경량기포유동화재, 단위중량 시험, 플로우 시험, 일축압축강도 시험

## 1. 서 론

급속한 산업발전에 따른 산업부산물의 양은 기하급수적으로 늘어나고 있으며, 산업부산물 중 석탄회는 화력발전소 등에서 부산되는 산업폐기물로서 상당히 많은 양이 발생되고 있다. 국내 전력의 65%를 차지하고 있는 화력발전의 경우 국내 10개의 화력발전소에서 연간 약 600만 톤이 부산되며, 환경부 자료에 의하면 석탄회 재활용률은 2004년 67.9%, 2005년 59.4%, 2006년 67.7%로 전체 발생량에 비해 약 70% 미만으로서 현재 회처리장에 매립되어 있는 석탄회의 총량은 2008년 기준으로 7,200만 톤에 달하는 것으로 추정된다(환경부, 2008). 이러한 상당한 규모의 회처리장이 필요하기 때문에 그에 따른 투자비용, 환경문제발생, 민원 등으로 인해 회처리장의 확보는 해결하기 어려운 현안이며(김

현숙, 2006), 최악의 경우 전기 생산을 중단할 수 밖에 없는 위기에 처할 수도 있는 상황에 놓일 수도 있을 것이다. 현재 석탄회 중에서 비회(fly ash, FA)는 건설재료로서 재활용되는 반면에 매립회(ponded ash)는 대부분 재활용되지 못하고 회처리장에 매립되고 있다. 석탄은 풍부한 매장량과 저렴한 가격, 재료취득의 이점 등 국내 뿐 아니라 전 세계적으로 화력발전의 원료로 사용되고 있으며, 그에 따른 부산폐기물인 석탄회를 재활용하기 위한 연구가 절실히 필요하다.

저강도고유동화재(CLSM, Controlled-Low Strength Material)는 유동성채움재라고도 불리며, 저강도 콘크리트 개념을 지반공학에 적용하여 만들어지는 것으로 유동성 채움재(Flowable fill), 강도조절 채움재(controlled strength fill), 다짐조절 채움재(Controlled Density Fill ; CDF), 유동성 플라이애쉬(flowable ash) 등으로도 불린다(최남훈, 2004). 국내에서도

1) 학생회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

2) 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정회원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

지반 및 도로분야에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다(원종필, 2001; 조재운, 2000; 박재현 등, 2004; 이관호 등, 2006; 2007; 임유진 등, 2009).

기존의 저강도 고유동성 채움재는 대개 모래를 잔골재로 사용하지만, 우리나라에서는 모래 가격이 점점 비싸지고 있기 때문에 그대로 활용하기 곤란한 점이 있다. 최근 모래 대신 석탄회를 활용한 저강도고유동화재를 개발하려는 연구가 진행되고 있다(공진영 등, 2010). 일반적으로 경량화, 동결융해에 대한 저항성 증대, 물시멘트비 저하, 재료비 저감 등을 위하여 저강도고유동화재에 기포제 또는 AE제를 첨가하기도 한다(TRB, 2008).

본 연구에서는 석탄회를 활용하여 구조물 뒤채움 용도로 강도, 유동성 및 경량성을 동시에 만족하는 경량기포유동화재를 개발하고자 하였다.

## 2. 경량기포유동화재

### 2.1 경량기포유동화재 정의

경량기포유동화재는 경량콘크리트를 지반공학분야에 적용한 재료로써, 기존의 석탄회를 활용한 저강도 고유동성 채움재(CLSM) 슬러리에 기포를 혼입하여 적정시간 교반하여 슬러리 내부에 작고 미세한 기포(0.1~1mm)를 다량 형성시켜 CLSM보다 경량화에 중점을 둔 뒤채움재료이다. 본 연구에서 개발한 경량기포유동화재는 산업폐기물로 분류되어 있는 석탄회를 주골재로 사용하며, 경량기포콘크리트와 유사한 성격을 가진다. 특히, 경량기포콘크리트는 기포를 혼합시킴으로써 동일한 체적의 보통 콘크리트보다 가벼운 콘크리트로 정의된다(Waston 등, 1978). 이러한 경량기포콘크리트는 선진 각국에서 이미 상당한 수준의 건축 단열 및 방음 재료로서 사용되고 있으며(서두원 등, 2010), 최근에는 토목구조물의 성토 재료로서도 많은 연구가 진행되고 있다.

경량기포유동화재와 유사한 개념으로 경량기포혼합토가 있는데, 이는 모래, 실트, 점토 등에 물과 시멘트를 혼합하여 유동성을 증대시킨 재료이다(송준호 등, 2008). 일본에서는 연약지반에서의 성토·교대·옹벽 뒤채움용으로 기포혼합경량토를 적용되고 있다(三嶋 등, 2000). 국내에서는 이와 같은 용도로 발포스티로폼을 불록제품으로 만든 EPS(Expanded Polystyrene) 공법이 적용되기도 한다.

### 2.2 기포혼입방식 및 기포제의 특징

경량기포콘크리트의 경우, 기포의 혼입방식에 따라 선기포 방식, 후기포 방식, 혼합기포 방식으로 나뉘며, 본 연구

표 1. 기포제 혼합 방식에 따른 특징(건설교통부, 1997)

방식	특징
선기포방식 (pre-foaming type)	기포기의 압축공기로 미리 발포시킨 기포를 시멘트 슬러리에 혼합하는 방법으로 기포의 양을 조절하기 쉽게 현장 발포가 용이한 것이 장점이다.
후기포방식 (after-foaming type)	시멘트 슬러리 내에 처음부터 알루미눔 분말, 아연 분말 등 기타 발포제를 혼합하여 화학반응에 의해 발생하는 가스에 의해 소정의 시간 경과에 따라 발포하는 방법으로 국내에서는 ALC(Auto-claved Lightweight Concrete)로 알려져 있으며, 건축 자재(패널, 블록)을 만드는데 사용된다.
혼합기포방식 (mix-foaming type)	계면활성제(AE제) 등을 슬러리 중에 첨가하여 혼합 과정에서 발포시키는 방법이다.

표 2. 기포제의 종류에 따른 특성

구분	동물성기포제	고분자기포제	계면활성제 (식물성)
주성분	동물의 혈액, 카제인, 젤라틴 등	폴리아크릴레이드 계통의 고분자 중합물	이온계, 비이온계, 카치온계, 양성계
물리적 성질	pH 7, 비중 1.2, 담황색	pH 7, 비중 1.12, 백색	pH 6.8, 비중 1.08, 투명색
장점	탄력성이 좋다. 안정성이 우수.	포막이 안정. 탄력성이 우수.	-
단점	악취발생. 부식의 원인. 장기보존의 곤란.	-	시멘트 슬러리 속에서는 동물성기포제와 고분자기포제보다 포막이 불안정.

에서는 혼합기포 방식을 사용하였다. 표 1은 기포제 혼합 방식에 따른 특징이다.

국내에서 사용되는 기포제는 동물성 단백질계 기포제, 고분자 기포제, 계면활성제계 기포제 등이 있으며 콘크리트의 양생과 장기적인 사용에 악영향을 주지 않는 범위 내에서 사용한다. 표 2는 기포제의 종류에 따른 특성이다.

### 2.3 경량기포유동화재의 영향인자

경량기포유동화재의 주요 영향인자에는 비빔시간, 희석비 및 기포량이며, 이에 따라 역학적 특성인 강도와 유동성 및 경량성 등에 상이하게 영향을 끼칠 수 있으므로 경량기포유동화재의 중요한 영향인자라 볼 수 있다.

비빔시간은 경량기포유동화재의 강도와 유동성, 경량성을 결정하는 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 경량기포콘크리트와 동일한 건비빔(매립화+비화+시멘트) 1분, 된비빔(물 50% 배합) 2분, 최종비빔(물 50%+기포) 순서로 배합하였다. 특히, 기포를 투입한 후 최종비빔시간에 따라서 소포(defoaming)율에 영향을 끼친다. 따라서 그림 1과 같이 최종비빔시간이 짧을수록 기포가 상당히 많아지고 공극이 상대



그림 1. 최종비빔시간별 공시체의 상태 (왼쪽부터 1, 2, 3, 4분)

적으로 많이 늘어나면서 공시체의 강도가 약해지며, 길어질수록 기포가 상당수 소포가 되어 기포 본래의 성질을 잃게 된다.

희석비는 물과 기포제의 비율을 의미하며 강도를 좌우하는 중요한 영향인자이다. 기포제의 종류와 배합재료에 따라 단위중량의 차이가 나타나고, 경제성 및 역학적 특성 등을 고려하여 희석비를 산출해야 할 필요가 있다.

기포량은 전체 중량비에 따른 기포의 혼합비율을 가리키는 것으로, 혼합되어지는 기포량의 증감에 따라 유동성과 강도 및 단위중량에 직접적인 함수관계를 가진다(건설교통부, 1997).

### 3. 시험 재료 및 방법

#### 3.1 시험재료

##### 3.1.1 석탄회

본 시험에서는 영흥화력발전본부에서 부산된 석탄회를 사용하였다. 석탄회의 대규모 재활용을 위해서는 회매립장에 매립되어 있는 매립회를 그대로 사용하는 것이 바람직하지만, 발전에 사용하는 석탄의 종류에 따라 그리고 석탄회 매립시기에 따라 매립된 석탄회의 물리적·화학적 특성이 상이한 것으로 알려져 있다(김주형 등, 2010). 저회의 경우, 주로 회사장에 매립된 매립회를 사용하였고, 비회의 경우 재활용률이 낮은 잔사회를 사용하였다. 즉, 매립되어 가치가 없는 석탄회를 대상으로 하였으며, 연구에 사용된 영흥화력발전본부의 석탄회를 다량으로 확보하여 입도분포 및 물리·화학적 특성을 분석해 본 결과들은 그림 2와 표 3에 각각 나타내었다. 또한 본 시험에 사용된 매립회는 모래와 자갈의 분류기준(통일분류법)인 4번체(4.75mm)로 체를 통

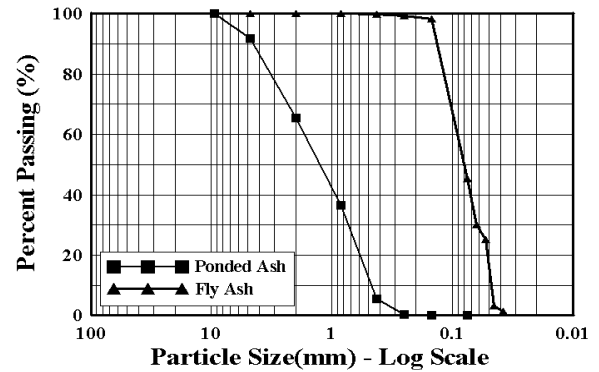




그림 3. 기포발생기에 의한 기포발생 광경

### 3.1.3 기포제

본 시험에서 사용된 기포제는 동물성, 식물성 기포제의 단점을 보완한 폴리아크릴레이드 계통의 고분자기포제를 사용하였다. 고분자기포제의 물리적 특성은 표 5와 같으며, 기포발생 광경은 그림 3과 같다.

### 3.1.4 배합비

배합비를 선정하기에 앞서, 기존 저강도 고유동화재의 시멘트량에 따른 일축압축강도 시험 분석 결과, 함수량 32.5%에서 매립회와 비회의 혼합비가 100:0, 70:30, 30:70 이면서 시멘트량이 약 5%인 경우에, 함수량 34.0%에 속하는 군에서는 비회와 매립회의 혼합비가 30:70, 50:50, 70:30 이면서 시멘트량이 약 5.0%인 경우가 기준 일축압축강도 (0.8~1.2MPa)와 플로우값(20cm 이상)을 만족하는 것으로 나타났다(지식경제부, 2009).

뒤채움재료의 단위중량을 줄임으로써 구조물에 작용하는 하중을 경감시켜 안정성을 제고할 수 있다는 장점도 있지만, 우기 시 수위에 의한 양압력이 발생할 경우 구조물이 불안정해지는 단점이 되기도 한다. 따라서, 본 연구에서는 개발하고자 하는 경량기포유동화재의 단위중량 범위를 일반적인 콘크리트 토사의 단위중량보다는 가벼우면서 일반적인 물의 단위중량보다는 무거운 범위로 정하였다. 기포의 혼입에 따라, 소정의 강도가 감소하는 경향이 있다고 보고된 바에 의하여(건설교통부, 1997), 함수량을 줄이고 시멘트량을 늘리는 방안을 검토하게 되었다. 따라서 검토 후, 적정 시멘트량을 7%로 고정하여 함수량과 기포량에 따른 강도, 유동성 및 경량성을 분석하였다. 표 6은 시멘트량을 7%로 고정했을 때 각 CASE별 배합비를 나타낸 것이다.

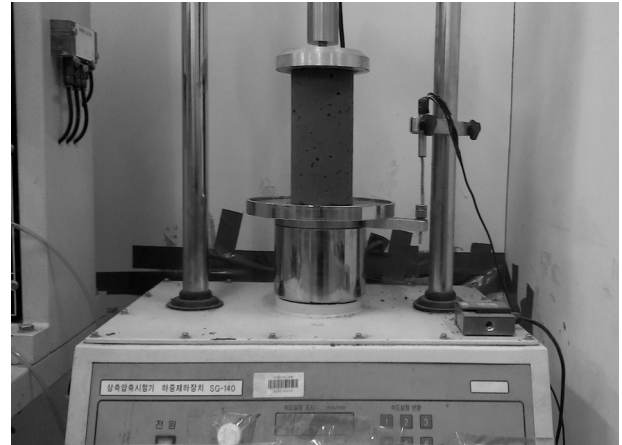


그림 4. 일축압축강도 시험 전경

## 3.2 시험방법

### 3.2.1 일축압축강도 시험

일축압축강도는 경량기포유동화재를 평가하는 데 있어서 중요한 공학적 특성으로서 타설 후 재굴착이 가능한지를 판단할 수 있는 기준이 된다. 시험 결과를 통해 경제성 및 효율성, 굴착성 등을 재고하여 기준 일축압축강도를 만족시키기 위해 매립회, 비회, 시멘트, 함수량, 기포량의 최적 배합비 산정을 목적으로 한다.

특히, 구조물 뒤채움재는 구조물 보수 등의 이유로 향후 재굴착을 해야 하는 경우가 발생할 수 있으므로 재굴착이 용이하여야 한다. 재굴착이 용이한 뒤채움용 CLSM의 강도 기준은 국외의 경우 ASTM D 4832에서는 0.35~0.70MPa(50~100psi), Amon(1990)은 1.05MPa 이하로 제시하였다. 국내에는 재굴착에 대한 강도 기준은 별도로 없고, 다만 구조물 뒤채움용 CLSM과 유사한 재료인 현장타설용 경량기포 콘크리트에 대해 KS F 4039에서 약 0.8MPa 이상(비중별 상이)으로 규정하고 있다. 또한 경량기포콘크리트가 구조물의 뒤채움재로 사용되는 경우 재령 28일 강도기준으로 건설교통부(1997)에서는 0.1~1MPa, 한국도로공사(2001)에서는 0.3MPa 이상으로 규정하고 있다.

따라서 이와 같은 선행연구결과를 바탕으로 본 연구에서는 재굴착이 용이하면서 구조물 뒤채움 시 소정의 강도가 발현될 수 있는 범위를 0.8~1.2MPa로 설정하여 실험을 실시하였다. 본 시험방법은 ASTM D 4832에 준하여 실시하였으며, 재령 3일, 7일, 14일, 28일에 재령별 3개의 공시체의 일축압축강도를 측정하여 평균값을 산정하였다. 재하하중 용량이 3ton인 변위제어 방식의 만능재료시험기를 이용하였으며, 재하속도는 1mm/min로 설정하여 시험을 실시하였다(그림 4 참조).

표 6. 경량기포유동화재의 배합비

구 분		배 합 량									단위 : kg
		기포량 2%			기포량 3%			기포량 4%			
PA:FA	구 성	합수량 26.5%	합수량 28%	합수량 29.5%	합수량 26.5%	합수량 28%	합수량 29.5%	합수량 26.5%	합수량 28%	합수량 29.5%	
		시멘트비 7%			시멘트비 7%			시멘트비 7%			
100:0	PA	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	
	FA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Water	19.5	20.5	21.5	19.5	20.5	21.5	19.5	20.5	21.5	
	Cement	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
	Foam	1.4	1.4	1.4	2.1	2.1	2.1	2.8	2.8	2.8	
	total	72.4	73.4	74.4	73.1	74.1	75.1	73.8	74.8	75.8	
70:30	PA	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	
	FA	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	
	Water	19.5	20.5	21.5	19.5	20.5	21.5	19.5	20.5	21.5	
	Cement	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
	Foam	1.4	1.4	1.4	2.1	2.1	2.1	2.8	2.8	2.8	
	total	72.4	73.4	74.4	73.1	74.1	75.1	73.8	74.8	75.8	
50:50	PA	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	
	FA	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	23.3	
	Water	19.5	20.5	21.5	19.5	20.5	21.5	19.5	20.5	21.5	
	Cement	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
	Foam	1.4	1.4	1.4	2.1	2.1	2.1	2.8	2.8	2.8	
	total	72.5	73.5	74.5	73.2	74.2	75.2	73.9	74.9	75.9	
30:70	PA	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	
	FA	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	
	Water	19.5	20.5	21.5	19.5	20.5	21.5	19.5	20.5	21.5	
	Cement	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
	Foam	1.4	1.4	1.4	2.1	2.1	2.1	2.8	2.8	2.8	
	total	72.4	73.4	74.4	73.1	74.1	75.1	73.8	74.8	75.8	
0:100	PA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	FA	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	46.5	
	Water	19.5	20.5	21.5	19.5	20.5	21.5	19.5	20.5	21.5	
	Cement	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
	Foam	1.4	1.4	1.4	2.1	2.1	2.1	2.8	2.8	2.8	
	total	72.4	73.4	74.4	73.1	74.1	75.1	73.8	74.8	75.8	

### 3.2.2 플로우 시험

본 시험의 목적은 경량기포유동화재의 유동성(flowability)을 파악하기 위한 시험으로서 CLSM이 트렌치, 옹벽, 교대 등의 뒷채움으로 사용 가능한지 여부를 판단하는 데 중요한 기준이 된다. 점성이 크거나 유동성이 적은 상태에서는 CLSM을 별도의 다짐장비 없이 구석구석까지 채울 수가 없으며, 재료분리 현상만 없다면 합수량이 많아도 큰 문제를 야기하지 않는다(TRB, 2008).

뒤채움용 경량 CLSM의 적절한 플로우 값의 범위로 미국 교통수송연구위원회(Transportation Research Board; TRB)에서 발행한 NCHRP report 597에는 20~25.4cm(8~10in,

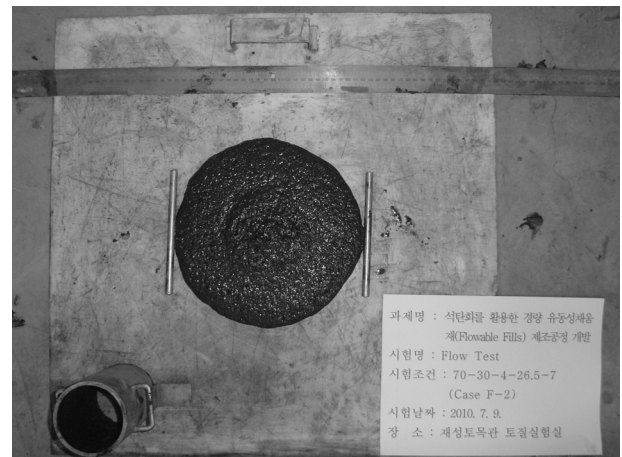


그림 5. 플로우 시험 전경

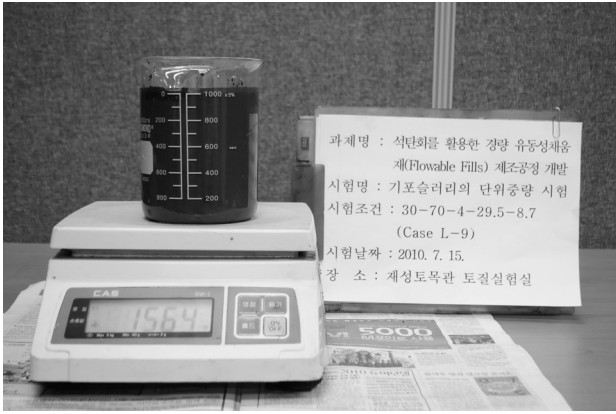


그림 6. 기포슬러리의 단위중량시험 전경

ASTM D 6103 기준을 제시하였으며(TRB, 2008), 미국 콘크리트 학회(American Concrete Institute; ACI)에서 발행한 ACI committee 229 report(1994)에는 고유동성의 기준으로 8in(20cm)이상을 제시하고 있다(ACI 229 Committee, 1994). 따라서 연구결과와 기준을 종합하여 본 연구에서는 플로우값의 고유동성 기준을 20cm 이상으로 선정하였으며, ASTM D 6103에 의거하여 실시하였다(그림 5 참조).

### 3.2.3 기포슬러리의 단위중량측정 시험

기포슬러리의 단위중량측정 시험은 구조물 뒤채움재 경량기포유동화제의 기본적인 물리적 성질로서 경량성 여부를 판단하는데 중요한 시험이다. 성토재나 뒤채움재로 사용되는 경량기포콘크리트의 경우  $4 \sim 10 \text{ kN/m}^3$ 의 범위내로 나타나 있으며(토목공법사전편집위원회, 1988), 외국의 시공 사례에서는  $4 \sim 14 \text{ kN/m}^3$ 인 것으로 규정되어 있다(건설교통부, 1997). 따라서, 본 연구에서는 우기 시 수위에 의한 양압을 방지할 수 있는 범위와 경화 후 수분증발에 의한 단위중량 감소를 고려하여 슬러리 상태일 때 약  $12 \sim 15 \text{ kN/m}^3$ 을 기준값으로 선정하였다. 본 시험방법은 KS F 4039에 의거 및 실시되었으며, 그림 6과 같이 굳지 않은 경량 CLSM(기포 슬러리)을 1,000mL 비커에 담아 남은 부분을 수평으로 제거한 후 비커 질량을 뺀 기포 슬러리의 질량을 측정된 뒤 비커의 체적으로 나눠 단위중량을 측정하였다.

## 4. 시험 결과 및 고찰

### 4.1 시험 결과

#### 4.1.1 일축압축강도 시험 결과

일축압축강도를 결정하는 인자는 다양하지만, 그 중에서 가장 중요하게 여겨지는 매립회와 비회의 상대적인 배합비,

기포량, 함수량에 의한 강도변화를 검토하였다.

배합비에 따른 비회량을 늘리면서 일축압축강도변화를 실시한 결과, 비회량이 많을수록 강도가 커지는 경향을 나타냈으며, 이는 물과 접촉 시 포졸란 반응을 보이는 성질 때문으로 판단된다. 또한, 매립회가 100%에서 0으로 감소함에 따라 일축압축강도는 최대 1.4MPa 까지 증가하였다(그림 7 참조).

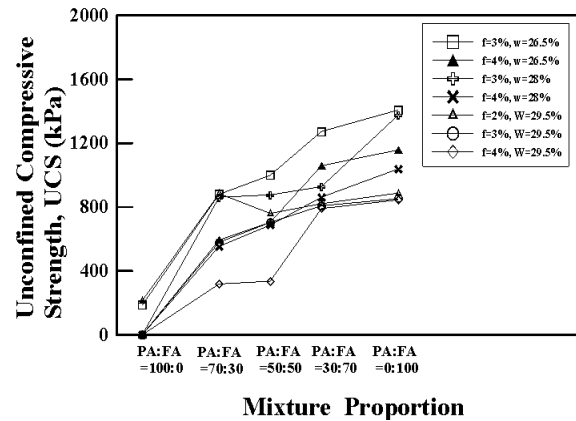


그림 7. 배합비에 따른 일축압축강도 시험 결과

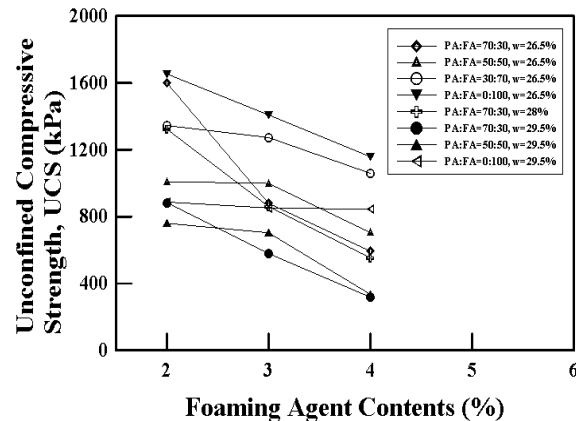


그림 8. 기포량에 따른 일축압축강도 시험 결과

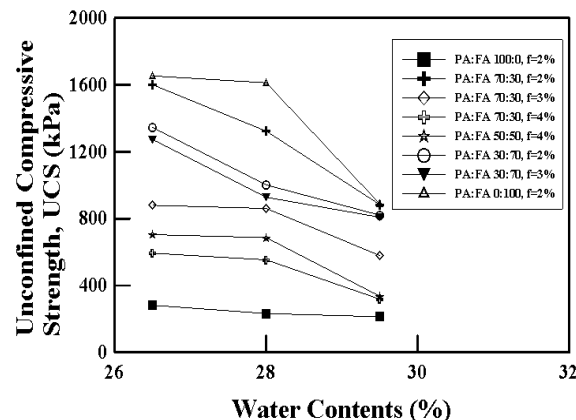


그림 9. 함수량에 따른 일축압축강도 시험 결과

기포량이 2~4%로 증가함에 따라 일축압축강도는 감소하는 경향을 보이며 약 10~1,100kPa이 감소하였다. 평균적으로 기포량을 1% 증가시킬 때마다 일축압축강도는 평균 약 20~1,000kPa 정도 감소하였다(그림 8 참조). 이는 기포의 혼입으로 인한 공극의 증가에 기인하는 것으로 사료된다.

함수량에 따른 일축압축강도의 경향을 살펴보면 함수량이 증가함에 따라 일축압축강도는 감소하는 경향을 보였으며, 평균적으로 함수량이 1.5% 증가할 때 일축압축강도는 약 2~700kPa 감소하였다(그림 9 참조).

실험결과를 종합해 보면, 기준강도범위(0.8~1.2MPa)를 만족시키면서 매립회량을 가능한 많이 사용하며, 시멘트량을 적게 사용하는 배합비는 시멘트량 7%, 배합비 PA:FA=70:30 또는 PA:FA=50:50인 경우였다.

#### 4.1.2 플로우 시험 결과

전반적인 경향은 매립회와 비회를 혼합하여 사용한 경우가 매립회 또는 비회만을 사용한 경우보다 플로우값이 컸으며, 매립회만을 사용한 경우는 기준값(20cm 이상)에 미달하였다. 매립회와 비회를 혼합하는 경우도 비회의 상대적인 비율이 더 큰 PA:FA=70:30인 경우가 PA:FA=50:50인 경우에 비해 전반적으로 더 크거나 같게 나타났다. 이는 비회 입자가 매립회에 비해 상대적으로 대단히 작아서 혼합할 경우 다공성인 매립회 사이를 비회입자가 채워주기 때문인 것으로 판단된다. 이에 비해 매립회만을 사용하는 경우는 다공성인 매립회와 소량의 시멘트만으로는 적절한 플로우값을 얻을 수 없는 것으로 나타났다. 또한 비회만을 사용하는 경우도 배합된 경량기포유동화제는 상당히 끈끈한 상태를 보이며, 석탄회를 혼합하여 사용하는 경우보다 플로우값이 작게 나타났다(그림 10 참조).

기포량이 3, 4%인 경우에는 배합비나 함수량에 무관하게 플로우 값이 기준값 이상이었으며, 이는 기포량이 증가함에

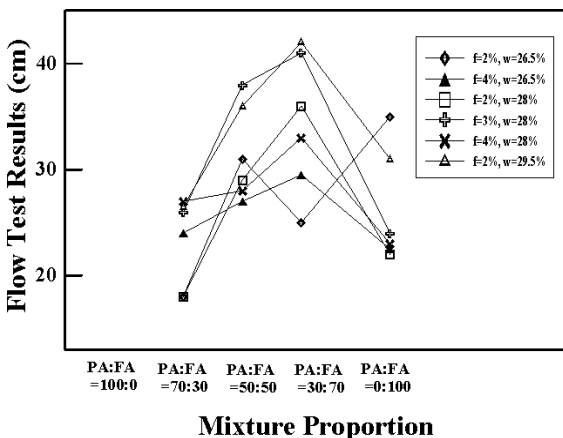


그림 10. 배합비에 따른 플로우 시험 결과

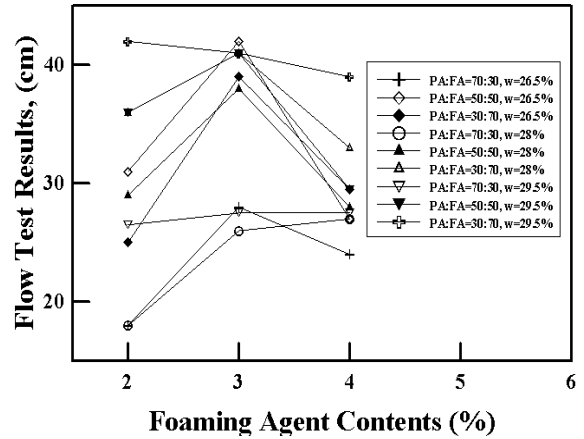


그림 11. 기포량에 따른 플로우 시험 결과

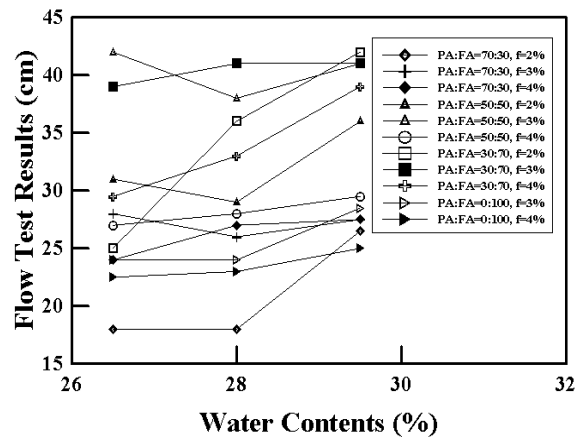


그림 12. 함수량에 따른 플로우 시험 결과

따라 연행공기(entrained air)의 증가로 인해 플로우가 증가한 것으로 보인다. 또한 기포량 2% 경우에는 50:50, 30:70, 0:100에서 만족하는 플로우 값이 나왔다(그림 11 참조). 하지만, 기포량, 함수량, 배합비에 대해서는 전반적으로 일정한 경향을 찾기 어려웠다.

#### 4.1.3 기포슬러리의 단위중량 시험 결과

기포슬러리의 단위중량 시험을 실시한 결과, 전반적으로 기포량이 증가함에 따라 기포슬러리의 단위중량 값은 1~2kN/m<sup>3</sup> 감소하는 경향을 나타냈다. 그리고 비회량이 증가할수록 단위중량 값은 증가하는 경향을 나타내었다(그림 13 참조). 이는 상대적으로 비회가 매립회보다 비중이 큰 것에 기인하며, 단위중량을 낮추기 위해서 기준을 만족하는 범위 안에서 매립회를 더 많이 혼합할 필요성이 있을 것으로 판단된다. 전반적으로 매립회와 비회의 혼합비에서는 70:30~30:70을 사용하는 경우에 기포슬러리의 단위중량 기준값(12~15kN/m<sup>3</sup>)을 만족하는 것으로 나타났다.

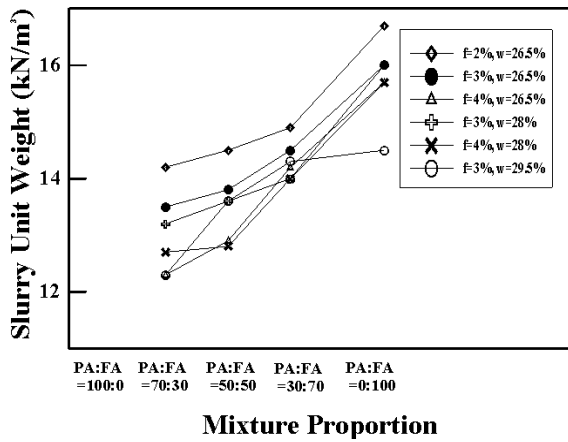


그림 13. 배합비에 따른 기포슬러리의 단위중량 시험 결과

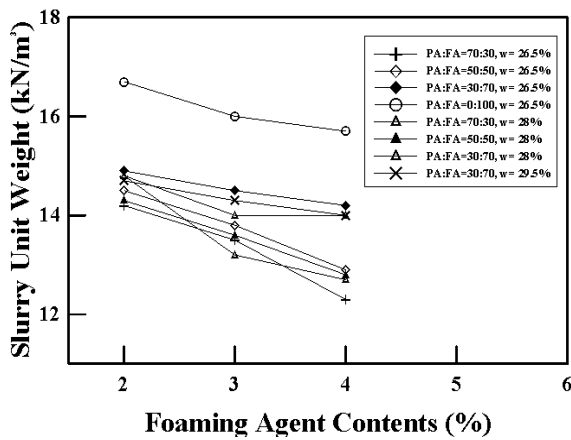


그림 14. 기포량에 따른 기포슬러리의 단위중량 시험 결과

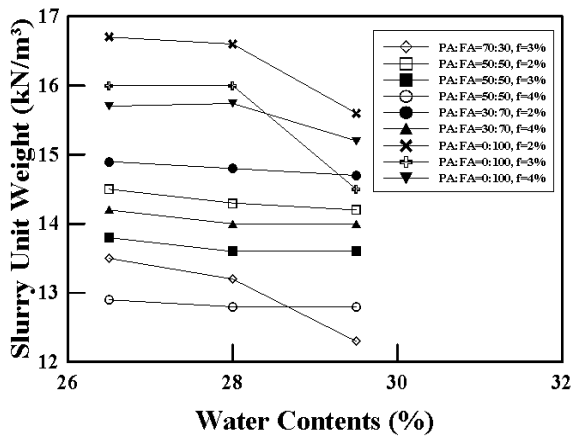


그림 15. 함수량에 따른 기포슬러리의 단위중량 시험 결과

## 4.2 고찰

본 연구에서는 배합비, 함수량 그리고 기포량에 따른 일축압축강도, 플로우 및 기포슬러리의 단위중량 시험을 실시하였다. 각 시험에서의 기준에 만족하는 CASE를 표 10, 11에 정리하였다. 총 13개의 CASE 중에서 기포량에 따라 각

CASE를 A, B, C로 분류하였다.

위 13개의 CASE 중, 매립회의 대량유효활용 측면에서 가장 적합한 CASE는 매립회를 상대적으로 많이 배합한 PA:FA=70:30, 50:50인 A-1, A-2, A-3, B-1, B-2, B-3라 판단된다. 단, PA:FA=100:0에서는 재료의 분리로 인해 일정량의 기포가 혼입이 되더라도 모두 소포되는 경향을 보여, 그 적용성이 떨어지는 것으로 나타났다. PA:FA=30:70에서는 비회가 다량 포함되어 점성의 증가로 인해 플로우가 상대적으로 크게 나타났다.

기포량이 증가할수록 전반적으로 플로우가 증가하는 것으로 나타났고, 단위중량이 감소하여 경량성이 확보되는 것으로 나타났으며, 이는 연행공기(entrained air)의 증가로 인한 것으로 판단된다. 또한, 기포량이 증가할수록 강도는 작아지므로 강도증가를 위한 재료와의 적절한 배합이 필요할

표 10. 각 실험별 기준을 만족하는 배합비

CASE	기포량	배합비(PA:FA)	시멘트량	함수량
A-1	2%	70:30	7%	29.5%
A-2	2%	50:50	7%	26.5%
A-3	2%	50:50	7%	28%
A-4	2%	30:70	7%	28%
A-5	2%	30:70	7%	29.5%
B-1	3%	70:30	7%	26.5%
B-2	3%	50:50	7%	26.5%
B-3	3%	50:50	7%	28%
B-4	3%	30:70	7%	28%
B-5	3%	30:70	7%	29.5%
B-6	3%	0:100	7%	29.5%
C-1	4%	30:70	7%	26.5%
C-2	4%	30:70	7%	28%

표 11. 각 CASE 별 시험 결과

CASE	일축압축강도 (kPa)	플로우 (cm)	단위중량 (kN/m³)	비고
기준	800~1,200	20cm 이상	12~15	
A-1	883.94	26.5	14.9	○
A-2	1,009.25	31	14.5	○
A-3	903.13	29	14.3	○
A-4	1,001.83	36	14.9	
A-5	821.24	42	14.7	
B-1	880.23	28	14.2	○
B-2	998.90	42	13.8	○
B-3	876.25	40	13.8	○
B-4	927.98	41	14	
B-5	808.61	40	14.3	
B-6	852.23	28.5	14.5	
C-1	1,059.01	29.5	14.2	
C-2	861.93	33	14.9	



것으로 판단된다. 하지만 경량기포유동화재는 기포의 혼입으로 인한 역학적 특성은 본 연구에서 중점적으로 검토해본 배합비, 함수량, 기포량 외에도 기포의 희석비, 최종비빔 시간에 따라 그 특성이 판이하게 달라지므로 넓은 범위에서 검토가 다각적으로 필요할 것으로 판단된다.

경량기포유동화재의 경량성 기준을  $12 \sim 15 \text{ kN/m}^3$ 로 기존의 경량기포콘크리트(3.2.3절 참조)보다 크게 설정하였는데, 이는 수분증발에 의한 단위중량 감소를 고려하였다. 수분증발에 의해 단위중량은 약  $2 \text{ kN/m}^3$ 의 감소가 되는 것으로 나타났다으며, 이는 지식경제부(2009)에서 개발한 기존의 저강도 고유동화재보다  $3 \sim 4 \text{ kN/m}^3$  낮아 뒤채움재료로서의 경량성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 석탄회를 활용하여 경량성과 유동성을 갖춘 경량기포유동화재를 개발하고 공학적 특성을 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 일축압축강도 시험에서 기포량이 증가함에 따라 강도는 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 기포의 혼입으로 인한 공극이 증가하였기 때문으로 판단된다. 기포량 4%에서는 공시체가 형성이 되지 않아 강도 측정이 불가능하였으며, 이는 기포의 밀도가 증가하여 공극이 과대하게 증가하기 때문으로 판단된다. 그리고 비회량이 많을수록 강도가 증가하는 경향을 나타내었다.
- (2) 플로우 시험결과로부터 분석결과, 기포량이 2, 3, 4%로 증가함에 따라 플로우값도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 연행공기의 증가로 인해 유동성이 증가한 것으로 판단된다.
- (3) 기포슬러리의 단위중량 시험 분석 결과, 기포량이 증가함에 따라 기포슬러리의 단위중량 값은  $1 \sim 2 \text{ kN/m}^3$  감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 기포량은 재료의 경량화 및 강도와 밀접한 연관성을 가진다고 판단내릴 수 있었다. 매립회만 사용한 배합비에서는 재료분리가 발생하여 슬러리 형성이 되지 않아 시험 결과 측정이 불가능하였다. 매립회:비회=0:100, 함수량 26.5%, 기포량 2%, 시멘트량 7%에서 단위중량 값  $16.7 \text{ kN/m}^3$ 로 가장 큰 값을 나타냈으며, 이는 기포량이 적을수록 또한 비회량이 많아질수록 단위중량이 커진다는 것을 알 수 있다. 전반적으로 매립회:비회=70:30~30:70에서 사용하는 경우에 경량성을 확보하여 적정 혼합비로 판단된다.
- (4) 본 연구에서 플로우, 기포슬러리의 단위중량 및 일축압

축강도 시험에서 각 시험기준을 만족하는 것은 총 13 CASE로 분석되었다. 이 중에서 매립회의 대량유효활용 측면에서 가장 적합한 CASE는 매립회를 많이 사용할 수 있는 A-1, A-2, A-3, B-1, B-2, B-3로 판단된다. 향후 교대배면, 구조물 뒤채움용으로 개발된 경량기포 CLSM의 현장시험을 통해 현장적용성 및 환경적으로 규명이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (No. 20091020100060, 석탄회를 활용한 경량 유동성채움재 (Flowable Fill)제조공정 개발). 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부(1997), *경량기포콘크리트 재료개발 연구*, (주)동아건설 기술연구소, pp. 10~14, pp. 54~56, pp. 60~63, pp. 64~66.
2. 공진영, 강형남, 천병식(2010), 석탄회를 활용한 저강도고유동화재의 일축압축강도 및 플로우 특성, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 26, No. 1, pp. 75~83.
3. 기술표준원(1999), *현장 타설용 기포콘크리트*, KS F 4039, pp. 1~95.
4. 김주형, 조삼덕, 공진영, 정혁상, 천병식(2010), 석탄회를 사용한 저강도 고유동화재의 경화 특성 분석, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 11, No. 11, pp. 77~85.
5. 김현숙(2006), *화력발전소에서 발생된 석탄회의 재활용*, 석사학위논문, 강원대학교 산업대학원, pp. 1~3.
6. 박재현, 이관호, 조재운, 김석남(2004), 현장발생토 CLSM을 이용한 지하매설관의 변형, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 20, No. 3, pp. 129~139.
7. 서두원, 김혜양, 김경민, 천병식(2010), 가소성 경량기포콘크리트의 배합비 변화에 따른 공학적 특성, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 11, No. 4, pp. 33~42.
8. 송준호, 임종철, 홍석우(2008), 원료토의 특성에 따른 경량기포 혼합토의 압축강도 영향인자 분석, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 24, No. 11, pp. 157~166.
9. 원종필, 이용수(2001), Bottom Ash를 혼합한 저강도 고유동 충전재의 특성, *콘크리트학회 논문집*, Vol. 13, No 3, pp. 294~300.
10. 이관호, 송창섭(2006), 현장발생토사 재활용 유동성채움재를 이용한 지하매설관의 거동평가, *한국도로학회 논문집*, Vol. 8, No. 2, pp. 1~12.
11. 이관호, 김주덕, 현성철, 송용선, 이병식(2007), 해양준설토 CLSM을 이용한 지하매설관 변형특성, *한국방재학회 논문집*, Vol. 7, No. 5, pp. 129~137.
12. 임유진, 서창범(2009), 화강풍화토를 이용한 CLSM의 공학적 특성평가, *한국방재학회 논문집*, Vol. 9, No. 3, pp. 19~26.
13. 조재운, 이관호, 이인모(2000), 유동특성을 이용한 폐주물사 혼

- 합물의 응벽뒤채움재 연구, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 16, No. 4, pp. 17~30.
14. 지식경제부(2009), *석탄회를 활용한 경량 유동성채움재 제조 공정 개발 1차년도 보고서*, 한양대학교, pp. 8~19, pp. 40~51, pp. 144~147.
  15. 최남훈(2004), *현장 발생토 CLSM을 이용한 지하매설관의 거동특성 분석*, 석사학위논문, 한양대학교, pp. 17~20.
  16. 토목공법사전편집위원회(1988), *토목공법사전*, 건설문화사, pp. 105.
  17. 한국도로공사(2001), *도로설계요령-토공 및 배수*, pp. 97~100.
  18. 환경부(2008), *제4차 자원재활용 기본계획*, pp. 100~102.
  19. 三嶋信雄, 益村公人(2000), *FCB工法*, 理工圖書, 東京, pp. 1~50.
  20. ACI Committee 229 (1994), *Controlled Low Strength Materials (CLSM)*, American Concrete Institute, 229R-2, pp. 1~12.
  21. Amon, J. A. (1990), Controlled Low-strength Material, *Construction Specifier*, Vol. 43, No. 12, pp. 98~101.
  22. ASTM(2002), *Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders*, ASTM D 4832, pp. 1~5.
  23. ASTM(2004), *Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material (CLSM)*, ASTM D 6103, pp. 1~3.
  24. 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.
  25. Waston, K L., Eden, N. B. and Farrant, J. R. (1978), The Effect of Admixture on the Relationship between Compressive Strength and Density of Autoclaved Aerated Concrete Made from Slate Powder and Portland Cement, *Silicates Industrials*, Vol. 43, No. 3, pp. 57~64.

(접수일: 2011. 7. 29 심사일: 2011. 8. 19 심사완료일: 2011. 9. 6)