

석탄회를 활용한 경량기포 CLSM의 압축강도와 단위중량의 상관관계

Correlation between Compressive Strength and Unit Weight of Lightweight Foamed Controlled Low Strength Material (CLSM) Using Coal Ash

이 중 휘¹ Lee, Jong-Hwi

이 혜 진² Lee, Hye-Jin

천 병 식³ Chun, Byung-Sik

Abstract

With the increase in the application of CLSM using coal ash, we performed a basic research on CLSM material, laying focus on the correlation between compressive strength and unit weight of lightweight foamed CLSM. The unconfined compression strength is a criterion for the judgment of the possibility of re-excavation and an important factor determining the economy, efficiency, and excavation character. However, to know the quantitative compression strength value takes a certain amount of time, because the applicability of unconfined compression strength of CLSM is judged by the standard of 28days. Therefore, in this study the relation between compressive strength and unit weight (foam slurry unit weight, apparent unit weight) is analyzed focusing on lightweight foamed CLSM. We also suggested a formula which can easily predict the 28-day compressive strength only using unit weight value without the need to cure the slurry for 28 days.

요 지

석탄회를 활용한 CLSM(Controlled Low Strength Material)의 적용성이 증가됨에 따라, 본 연구에서는 경량기포 CLSM의 압축강도와 단위중량과의 관계에 초점을 맞추어, CLSM 재료에 관련된 기초연구를 수행하였다. 일축압축강도는 구조물에 적용시 재굴착이 가능한지를 판단할 수 있는 기준이 되고 있으며 시험결과를 통해 경제성 및 효율성, 굴착성 등을 판단할 수 있는 중요한 배합설계변수이다. 그러나 CLSM의 일축압축강도는 재령 28일 기준으로 적용성을 판단하기 때문에, 정량적인 일축압축강도값을 알기 위해서는 배합 후 일정시간이 지나야한다. 본 연구에서는 저장고 고유동화재(CLSM)에 기포를 혼입하여 경량화시킨 경량기포 CLSM에 중점을 두어 경량기포 CLSM의 압축강도와 단위중량(기포슬러리 단위중량, 겉보기 단위중량)과의 관계를 분석하였고, 슬러리를 28일까지 양생시키지 않고 단위중량만으로 28일의 압축강도를 쉽게 예측할 수 있는 관계식을 제안하였다.

Keywords : Coal ash, Lightweight foamed CLSM, Unconfined compression strength test, Foam slurry unit weight test, Apparent unit weight test

1 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ.)

2 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ.)

3 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0326, Fax: +82-2-2298-3270, hengdang@unitel.co.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 7월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 천연재료의 고갈로 인하여 건설재료난이 심화되고 있으며 고로슬래그, 부산석회, 광산폐기물, 석탄회, 인산폐기물, 건설폐기물, 준설폐기물 등의 폐기물을 재활용하고자 하는 노력이 활발히 진행되고 있다. 특히, 폐기물재활용과 관련하여 화력발전소에서 석탄회를 유효활용하기 위하여 석탄회를 활용한 재활용 연구들이 활성화되고 실용화 단계에 있다.

석탄은 전 세계적으로 화력발전의 근간이 되는 원료로서 국내의 경우 석탄발전소, 열병합 시설 증설 등으로 인하여 석탄회 발생량은 2007년 600만톤에서 2011년 890만톤으로 증가하였고 2012년에는 900만톤 이상으로 예상되고 있다. 그중 석탄회의 재활용률은 전체발생량의 약 70%미만이며 현재 회처리장에 매립되어 있는 석탄회의 총량은 2008년 기준으로 약 7,200만톤에 달하는 것으로 추정된다(Ministry of Environment, 2008). 또한 석탄회를 재활용할 수 있는 용도는 제한되어 있고 석탄회 중에서도 비회(fly ash, FA)는 재활용되는 반면 저회(bottom ash)는 대부분 재활용되지 못하고 회처리장에 매립되는 실정이다(Kong et al., 2010). 이마저도 성질이 다른 저회와 비회를 바닷물에 같이 혼합해서 회처리장에 매립시키고 있기 때문에 매립된 석탄회(pond ash, PA)의 공학적 성질이 일정치 않아 재활용이 어렵다. 따라서 현재 지속적으로 발생하는 석탄회를 대량유효활용하기 위한 방안 마련이 시급하다. 현재 이러한 석탄회를 대량유효활용하기 위하여 연구가 진행 중에 있으며, 본 연구에서는 저장도 고유동화재에 기포를 혼입하여 단위중량을 경량화시킨 경량기포 CLSM 재료의 기초연구에 초점을 두었다.

경량기포 CLSM은 매립회, 비회, 시멘트, 물, 기포를 혼입하여 만든 유동성을 함께 지닌 경량재료로서 경량기포콘크리트의 역학적 특성을 기반으로 한다. 경량기포콘크리트는 경량콘크리트의 한 종류로, 시멘트 슬러

리 내에 다량의 기포를 혼합시킴으로써 동일한 체적의 보통콘크리트보다 가벼운 콘크리트로 정의된다(Amon, 1990). 경량기포 CLSM과 관련하여 각 배합비에 따라 일축압축강도 시험, 플로우 시험, 건조수축 시험 등을 수행함으로써 경량기포 CLSM의 공학적 특성을 연구한 사례(Kim, 2011)가 있었고, 기포량, 희석비, 최종비빔시간에 따라 단위중량시험, 플로우시험, 일축압축강도시험을 실시함으로써 경량기포 CLSM의 역학적 특성을 연구한 사례가 있었다(Na, 2011). 하지만 경량기포 CLSM의 일축압축강도와 단위중량의 관계를 도출한 사례가 없었기 때문에, 본 연구에서 기초연구로서 경량기포 CLSM 재료의 일축압축강도와 단위중량의 관계를 규명하고자 한다.

경량기포 CLSM의 활용에 있어서 일축압축강도는 구조물에 적용시 재굴착이 가능한지를 판단할 수 있는 기준이 되며, 시험결과를 통해 경제성 및 효율성, 굴착성 등을 재고할 수 있다. 그러나 CLSM의 일축압축강도는 재령 28일 기준으로 적용성을 판단하기 때문에 정량적인 일축압축강도값을 알기 위해서는 배합 후 일정시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 배합된 슬러리를 28일까지 양생시킬 필요 없이 28일의 일축압축강도를 미리 예측하는 데에 목적을 두었고, 단위중량(겉보기, 기포슬러리)과 일축압축강도의 상관성을 비교 분석함으로써 28일의 압축강도를 쉽게 예측할 수 있는 일축압축강도와 관련된 관계식을 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 경량기포 CLSM의 특성

경량기포 CLSM은 기존의 저장도 고유동화재(CLSM) 슬러리에 기포를 혼입하여 적정시간 교반하여 슬러리 내부에 작고 미세한 기포(0.1~1mm)를 다량 형성시켜 CLSM보다 경량화에 중점을 둔 신개념 재료이다. 기포

Table 1. The characteristics according to foaming agents mixing method (Ministry of Construction & Transportation, 1997)

Type	Contents
pre-foaming type	• Foaming agents are made by foaming machine in advance, and which are mixed with other materials. The strong point of this type is that the control of foaming is easier and using for placement.
after-foaming type	• For chemical reaction, powders such as aluminum and zinc are mixed with cement slurry before stirring. Gases which are results from these reactions are formed and foaming according to time. Called as ALC(Autoclaved Lightweight Concrete) in Korea. They are usually used as building materials(panels and blocks).
mix-foaming type	• Using admixture like AE into cement slurry, and foaming. This type reveals in-between features above 2 types.

콘크리트와 유사한 성격을 가지나 대신에 산업폐기물로 분류되어 있는 석탄회를 주골재로 사용한다. 유동성, 자기수평, 자기다짐능력, 투수성, 인위적인 강도조절 등의 장점을 가지며 강도조절 채움재, 다짐조절 채움재, 유동성 플라이애쉬 등으로 불리기도 한다(Choi, 2004).

2.2 경량기포 CLSM의 분류

경량기포콘크리트의 경우, 기포의 혼입방식에 따라 선기포 방식, 후기포 방식, 혼합기포 방식으로 나뉘며, 경량기포 CLSM도 마찬가지로 상기 방식에 따라 기포를 혼입할 수 있다(Ministry of Construction & Transportation, 1997). Table 1은 기포제 혼입 방식에 따른 특징이다.

3. 재료의 준비 및 시험방법

3.1 시험재료

3.1.1 석탄회

본 시험에서는 영흥화력본부에서 부산된 석탄회를 사용하였고, 저회의 경우 석탄회 매립장에 매립되어 있는 회(매립회)를, 비회의 경우 재활용되는 정제회가 아닌 매립되는 잔사회를 사용하여, 매립되어 가치가 없는 석탄회를 대상으로 연구를 진행하였다. 연구에 사용된 석탄회의 입도분포곡선 및 물리적·화학적 특성을 Fig. 1

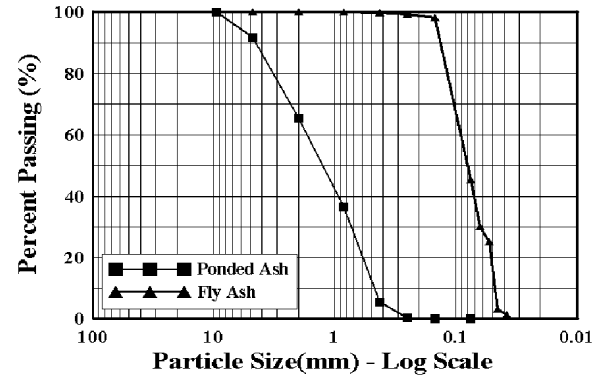


Fig. 1. Particle-size distribution of pond ash and fly ash

과 Table 2에 각각 나타내었다. 비중은 비회의 경우 2.23, 매립회의 경우 1.84로 보통 흙보다는 다소 작은 값을 갖고 있으며 통일분류법에 의하여 두 시료 모두 비소성으로 나타났다.

3.1.2 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 KS L 5201을 만족하는 국내 S사 제품의 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며, 시멘트의 특성은 Table 3과 같다.

3.1.3 기포제

본 연구에서는 동물성, 식물성기포제의 단점을 보완한 폴리아크릴레이드 계통의 고분자기포제를 사용하였다. 고분자기포제의 물리적 성질은 다음 Table 4와 같다.

Table 2. Physical and chemical properties of pond ash and fly ash

Physical Properties					
Specific gravity			L.O.I (%)		
Pond ash		Fly ash	Pond ash		Fly ash
1.84		2.23	6.78		3.12
Chemical components(%)					
Components	Pond ash	Fly ash	Components	Pond ash	Fly ash
SiO ₂	50.6	52.8	Al ₂ O ₃	24.7	22.7
Fe ₂ O ₃	11.5	9.28	CaO	5.91	7.43
K ₂ O	1.75	2.33	TiO ₂	1.72	1.55
MgO	0.85	1.17	Na ₂ O	0.37	0.57

Table 3. Properties of cement

Fineness (m ² /kg)	Specific gravity	Stability (%)	UCS (kPa)		
			3-day	7-day	28-day
348.8	3.15	0.08	21,966	30,204	39,618
Initial setting time (min.)			231		
Final setting time (min.)			407		

Table 4. A high polymer foaming agent

Color	Viscosity (CPS)	pH	Surphate (%)	Freezing point (°C)	Specific gravity
Dark brown	500~1,000	7	-	-5	1.12~1.20

3.2 배합비

본 연구에서는 “석탄회를 활용한 구조물뒤틀림용 경량기포유동화재의 공학적 특성 연구”(Kim, 2011)를 참고하여 적정 배합비를 산정하였으며, 이 배합비 안에서 경량기포 CLSM의 일축압축강도에 관한 특성을 파악하고자 한다.

3.3 시험방법

3.3.1 배합순서 및 혼합

배합순서는 각 배합비에 따라 매립회와 비회, 시멘트를 함께 넣어 건비빔을 1분간 행한 후, 배합수를 투입하고 2분간 비빔을 하였다. 마지막으로 미리 발포시킨 기포와 배합수를 투입하여 1분간 더 혼합하여 최종비빔을 완료하였다.

사용한 기포제는 폴리아크릴레이드 계통의 고분자기포제를 사용하였으며, 기포양의 조절이 쉽고 현장 발포가 용이한 선기포방식을 사용하여 시멘트 슬러리에 미리 발포시킨 기포를 혼입하였다.

3.3.2 일축압축강도 시험

본 시험방법은 ASTM D 4832-02(CLSM 표준시험법)에 준하여 실시하였으며, 배합된 슬러리를 공시체에 주입하여 $\Phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 의 공시체를 배합비별로 각각 15개씩 제작하였다. 완성된 공시체는 72시간동안 초기양생을 실시한 후 탈형하여 $22 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 수조에서 수중양생 실시하였으며, 재령별 1일, 3일, 14일, 28일로 3개의 공시체의 일축압축강도를 측정하였다. 재하하중 용량이 30kN인 변위제어 방식의 만능재료시험기를 이용하였으며, 재하속도는 1mm/min로 설정하여 실험을 실시하였다.

3.3.3 기포슬러리의 단위중량 시험

본 시험방법은 KS F 4039에 의거 및 실시되었으며, 굳지 않은 경량기포 CLSM을 1000ml 비커에 담아 남은 부분을 수평으로 제거한 후 비커 질량을 뺀 기포 슬러리의 질량을 측정하였다. 식 (1)과 같이 측정된 질량을 비

커의 체적으로 나눠 기포 슬러리의 단위중량을 측정하였다.

$$\frac{\text{기포슬러리의 질량}(gf)}{\text{비커의 체적}(cm^3)} = \text{기포슬러리의 단위중량}(gf/cm^3 = 9.8kN/m^3) \quad (1)$$

3.3.4 겉보기 단위중량 시험

본 시험방법은 KS F 2459에 의거 및 실시되었다. 수중양생 시킨 공시체를 재령 28일 후 꺼내 $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 건조조에 24시간 노건조 시켰으며, 건조시킨 경량기포 CLSM의 무게를 측정하는 다음 식 (2)와 같이 측정된 무게를 공시체의 체적으로 나누었다. 이 때 체적은 공시체의 실제 치수를 측정하였다.

$$\frac{\text{재령 28일 후 공시체 질량}(gf)}{\text{공시체 체적}(cm^3)} = \text{겉보기 단위중량}(gf/cm^3 = 9.8kN/m^3) \quad (2)$$

4. 시험결과 및 분석

4.1 측정항목 시험결과

4.1.1 일축압축강도시험 결과

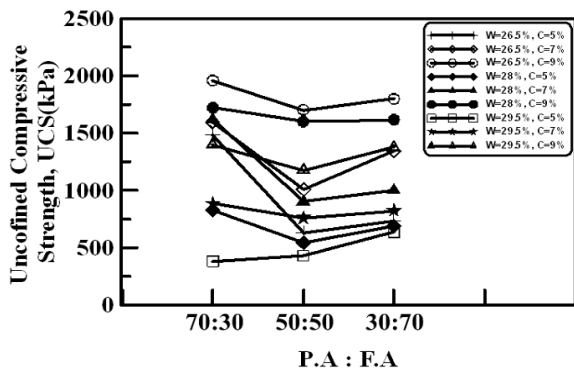
일축압축강도시험 결과는 Table 5와 같으며 매립회와 비회의 혼합비에 따른 일축압축강도 변화는 Fig. 2와 같다. 매립회와 비회의 혼합비에 따른 일축압축강도 증진 경향을 살펴보면 기포량 2%에서는 매립회 70%에서 50%로는 감소하는 추세를 보이다가 다시 강도가 증가하는 추세를 보였으며, 기포량 3%에서는 매립회의 양이 감소할수록 일축압축강도는 증가하는 경향을 보였다. 특히, 본 연구에서 실시한 배합비, A군(기포량 2%, 시멘트량 5, 7, 9%, P.A:F.A=70:30)(Kim 2011 참조)에서는 강도가 급격히 증대하는 경향을 보였는데, 이는 공시체 제작시 슬러리상태가 되지 않아 다짐을 하였기 때문이다. 또한 기포비가 증가함에 따라 일축압축강도는 감소하는 경향을 보이는데, 이는 기포의 혼입으로 인한 공극의 증가에 기인하는 것으로 사료된다.

Table 5. UCS test results at 28-day

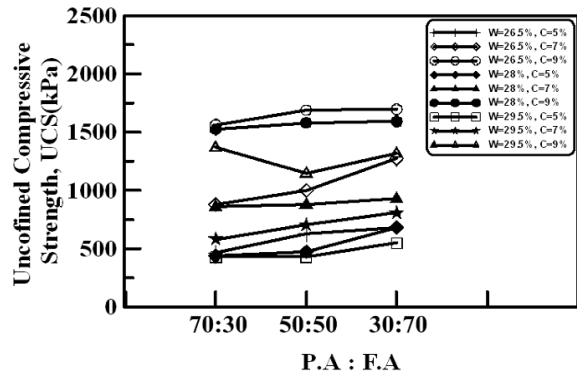
unit : kPa

Contents	Foaming agents 2%								
	Water contents 26.5%			Water contents 28%			Water contents 29.5%		
	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%
P.A : F.A									
70:30	1483.07	1600.46	1963.45	825.61	1623.38	1723.38	380.38	883.94	1402.05
50:50	630.89	1009.25	1704.15	543.35	903.13	1600.96	430.18	760.17	1176.55
30:70	730.52	1344.75	1800.36	689.46	1001.83	1618.12	636.72	821.24	1381.46

Contents	Foaming agents 3%								
	Water contents 26.5%			Water contents 28%			Water contents 29.5%		
	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%
P.A : F.A									
70:30	463.65	880.23	1564.81	434.46	860.94	1525.17	426.53	579.51	1367.41
50:50	624.76	998.9	1690.86	473.01	876.25	1580.72	427.44	703.67	1144.59
30:70	681.13	1273.24	1697.76	678.64	927.98	1592.21	546.91	808.61	1320.35



(a) Foaming agents 2%



(b) Foaming agents 3%

Fig. 2. UCS results according to PA:FA

4.1.2 기포슬러리의 단위중량 시험

기포 슬러리의 단위중량시험 결과는 Table 6과 같으며, 조건에 따라 12.2~15kN/m³의 분포를 띄는 것으로 나타났다. 매립회와 비회의 혼합비에 따른 기포슬러리의 단위중량 경향은 Fig. 3과 같으며, 기포량 2%에서는

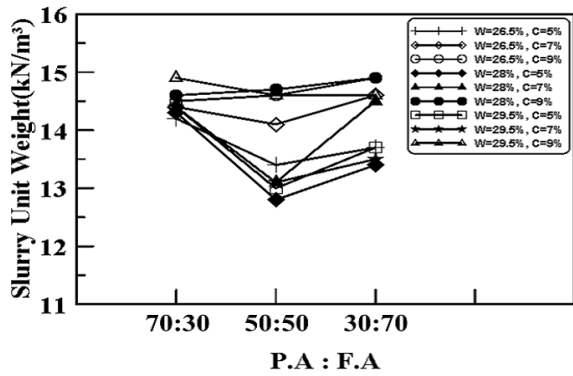
매립회의 양이 70%에서 50%로 감소할 때는 단위중량이 감소하다가 50%에서 다시 30%으로 감소할 경우는 단위중량이 다시 증가하는 경향을 띄었다. 하지만 3%에서는 매립회의 양은 70%에서 30%로 감소함에 따라 대체적으로 단위중량은 증가하는 경향을 띄었다. 이는 상

Table 6. The results of foam slurry unit weight test

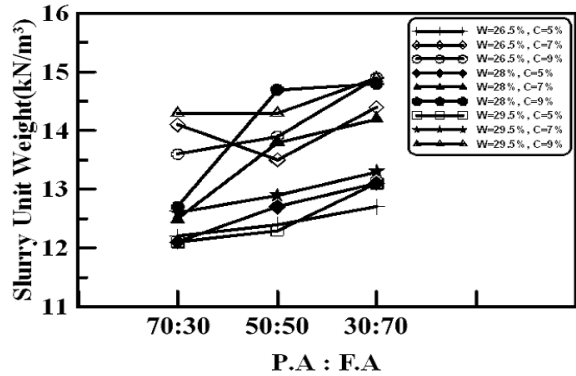
unit : kN/m³

Contents	Foaming agents 2%								
	Water contents 26.5%			Water contents 28%			Water contents 29.5%		
	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%
P.A : F.A									
70:30	14.2	14.4	14.5	14.3	14.4	14.6	14.4	14.4	14.9
50:50	13.4	14.1	14.6	12.8	13.1	14.7	13.0	13.1	14.6
30:70	13.7	14.6	14.9	13.4	14.5	14.9	13.7	13.5	14.6

Contents	Foaming agents 3%								
	Water contents 26.5%			Water contents 28%			Water contents 29.5%		
	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%
P.A : F.A									
70:30	12.2	14.1	13.6	12.1	12.5	12.7	12.1	12.6	14.3
50:50	12.4	13.5	13.9	12.7	13.8	14.7	12.3	12.9	14.3
30:70	12.7	14.4	14.9	13.1	14.2	14.8	13.1	13.3	14.9



(a) Foaming agents 2%



(b) Foaming agents 3%

Fig. 3. Foam slurry unit weight according to PA:FA

대적으로 비중이 큰 비회가 기포를 꺼뜨리는 현상(소포 현상)을 더 유도하는 것으로 판단이 되며, 이는 기포량이 증가할수록(2% → 3%) 이러한 경향은 더 클 것으로 판단된다. 이는 기포량과 함수비, 매립회, 비회의 관계에 따른 단위중량의 대소에 대하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

4.1.3 겉보기 단위중량 시험

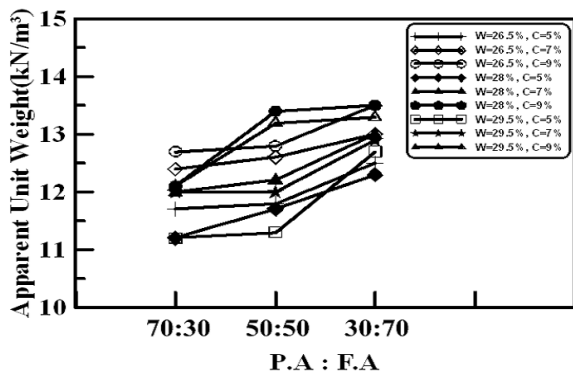
겉보기 단위중량시험 결과는 Table 7과 같이 조건에 따라 10.5~13.5kN/m³의 범위를 가지며, 매립회와 비회의 혼합비에 따른 겉보기 단위중량 변화는 Fig. 4와 같다. 기포슬러리 상태의 단위중량과 비교했을 때, 재령 28일 후 노건조 상태에서는 약 1~2kN/m³의 단위중량

Table 7. The results of apparent unit weight test

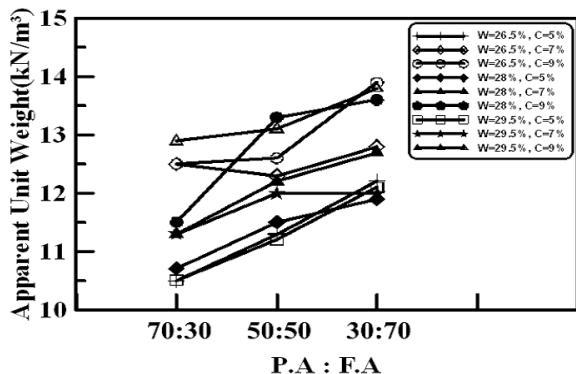
단위 : kN/m³

Contents	Foaming agents 2%								
	Water contents 26.5%			Water contents 28%			Water contents 29.5%		
	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%
P.A : F.A									
70:30	11.7	12.4	12.7	11.2	12.0	12.1	11.2	12.0	12.1
50:50	11.8	12.6	12.8	11.7	12.2	13.4	11.3	12.0	13.2
30:70	12.5	13.0	13.5	12.3	13.0	13.5	12.7	12.9	13.3

Contents	Foaming agents 3%								
	Water contents 26.5%			Water contents 28%			Water contents 29.5%		
	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%	Cement 5%	Cement 7%	Cement 9%
P.A : F.A									
70:30	10.5	12.5	12.5	10.7	11.3	11.5	10.5	11.3	12.9
50:50	11.3	12.3	12.6	11.5	12.2	13.3	11.2	12.0	13.1
30:70	12.2	12.8	13.9	11.9	12.7	13.6	12.1	12.0	13.8



(a) foaming agents 2%



(b) foaming agents 3%

Fig. 4. The results of apparent unit weight according to PA:FA

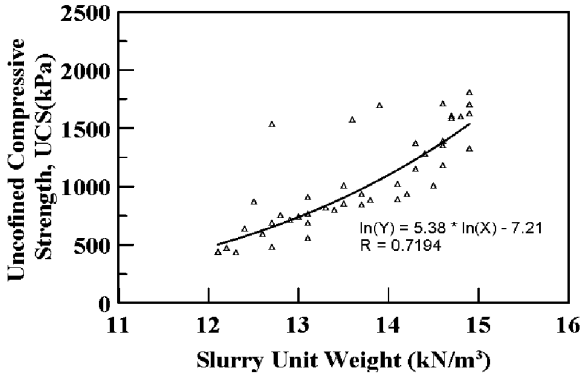


Fig. 5. The correlation between foam slurry unit weight and UCS

의 감소가 발생한 것으로 나타났다.

4.2 경량기포 CLSM의 일축압축강도 특성

4.2.1 일축압축강도와 기포슬러리 단위중량과의 관계

앞의 시험결과를 바탕으로 경량기포 CLSM의 일축압축강도와 기포슬러리 단위중량과의 관계를 분석하였다. 각 배합인자에 따른 특성으로 A군(기포량 2%, P.A.F.A =70:30인 경우)을 제외한 나머지 군에서 매립회의 양이 감소할수록, 함수비가 감소할수록, 시멘트비가 증가할수록 일축압축강도와 기포슬러리의 단위중량값은 모두 증가하며, 기포량이 증가할수록 일축압축강도와 기포슬러리의 단위중량값은 모두 감소함을 알 수 있었다. 또한 이들의 값들 사이에는 상관성이 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 경량기포 CLSM의 일축압축강도는 기포슬러리 단위중량과 밀접한 관계가 있으며 기포슬러리의 단위중량이 증가할수록 일축압축강도는 증가함을 알 수 있다. 또한, 이들의 상관관계를 식으로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$\ln(\sigma_{28}) = 5.38 \times \ln(\gamma_s) - 7.21 \quad (3)$$

$$R = 0.7194$$

여기서, σ_{28} : 28일의 일축압축강도(kPa)

γ_s : 기포슬러리 상태의 단위중량(kN/m³)

$$R : \text{상관계수} \left(R = \frac{\sum (\gamma_s - \bar{\gamma}_s)(\sigma_{28} - \bar{\sigma}_{28})}{\sqrt{(\gamma_s - \bar{\gamma}_s)^2} \sqrt{(\sigma_{28} - \bar{\sigma}_{28})^2}} \right)$$

기포슬러리 단위중량은 경량기포 CLSM의 슬러리 상

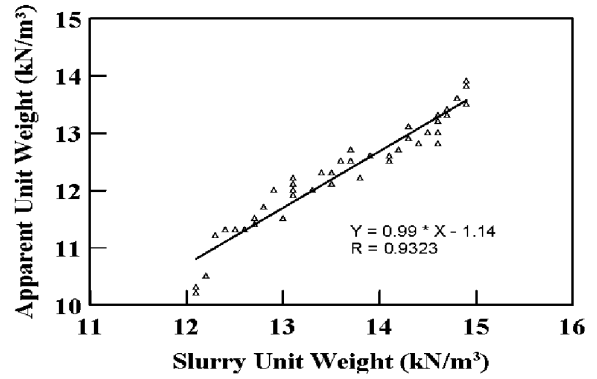


Fig. 6. The correlation between foam slurry unit weight and apparent unit weight

태에서의 단위중량으로, 배합설계시 경량기포 CLSM 활용에 있어 슬러리 상태에서의 단위중량값을 알면 Fig. 5를 이용하여 28일의 일축압축강도를 쉽게 예측할 수 있다.

4.2.2 일축압축강도와 겉보기 단위중량과의 관계

겉보기 단위중량 시험은 최종 양생된 기포 콘크리트의 품질을 결정하는 중요한 항목으로서, 다공질의 조직 구조 특성을 가지는 경량기포 CLSM의 역학적 특성과도 관계가 있다. 배합설계시에는 기포슬러리의 단위중량시험으로 기준을 산정하지만 실제 설계 시 또는 콘크리트의 역학적 특성 평가시에는 겉보기 단위중량 값을 고려하는 경우가 많으므로 기포슬러리의 단위중량과 겉보기 단위중량 각각에 대하여 경량기포 CLSM의 일축압축강도와와의 관계를 분석하였다.

겉보기 단위중량과 일축압축강도와와의 관계를 분석하기에 앞서 기포슬러리의 단위중량과 겉보기 단위중량은 서로 상관관계가 있음을 알 수 있었으며, 겉보기 단위중량을 기포슬러리 상태의 단위중량과 비교했을 때 약 1~2kN/m³ 단위중량이 감소함을 알 수 있었다. 이는 겉보기 단위중량이 28일 양생 후, 건조시킨 공시체의 단위중량을 잰 것이기 때문에 단위중량이 전반적으로 감소했음을 알 수 있다. 한편 기포슬러리의 단위중량과 겉보기 단위중량은 선형비례관계를 이루며 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 또한 이들의 관계를 식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\gamma_a = 0.99 \times \gamma_s - 1.14 \quad (4)$$

$$R = 0.9323$$

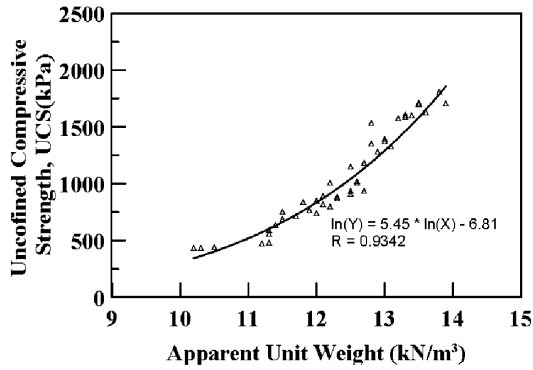


Fig. 7. The correlation between apparent unit weight and UCS

여기서, γ_a : 겉보기 단위중량(kN/m³)

γ_s : 기포슬러리 상태의 단위중량(kN/m³)

$$R : \text{상관계수} \left(R = \frac{\sum (\gamma_s - \bar{\gamma}_s)(\gamma_a - \bar{\gamma}_a)}{\sqrt{(\gamma_s - \bar{\gamma}_s)^2} \sqrt{(\gamma_a - \bar{\gamma}_a)^2}} \right)$$

겉보기 단위중량은 기포슬러리 상태의 단위중량의 약 90%를 나타냈으며, 기포슬러리의 단위중량이 1%씩 늘어남에 따라 겉보기 단위중량도 약 1%씩 늘어남을 알 수 있다.

기포슬러리의 단위중량과 겉보기 단위중량은 상관성이 있으므로, 겉보기 단위중량 또한 경량기포 CLSM의 일축압축강도와 상관성이 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 경량기포 CLSM의 일축압축강도는 겉보기 단위중량과 밀접한 관계가 있으며 겉보기 단위중량이 증가할수록 일축압축강도는 증가함을 알 수 있다. 또한 이들 값들은 곡선관계를 이루며, 상관관계를 식으로 표현하면 식 (5)와 같다. 식 (5)에 겉보기 단위중량값을 대입시키면 28일의 일축압축강도를 쉽게 예측할 수 있다.

$$\ln(\sigma_{28}) = 5.45 \times \ln(\gamma_a) - 6.81 \quad (5)$$

$$R = 0.9342$$

여기서, σ_{28} : 28일의 일축압축강도(kPa)

γ_a : 겉보기 단위중량(kN/m³)

$$R : \text{상관계수} \left(R = \frac{\sum (\gamma_a - \bar{\gamma}_a)(\sigma_{28} - \bar{\sigma}_{28})}{\sqrt{(\gamma_a - \bar{\gamma}_a)^2} \sqrt{(\sigma_{28} - \bar{\sigma}_{28})^2}} \right)$$

한편, 상관계수 R을 이용하여 정확성을 판단하는 상관분석법에 따르면 일반적으로 R값이 0.7 이상인 경우

상관관계가 높다고 해석하고 있으며, 본 연구에서 회기 분석 한 결과의 R값은 0.7194~0.9748의 범위로 상관관계식을 사용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문은 화력발전 부산물인 석탄회를 활용한 경량기포 CLSM의 재료개발을 위한 기초연구로서 매립회, 비회, 시멘트, 물의 혼합물로 만들어진 경량기포 CLSM의 단위중량(기포슬러리, 겉보기)과 일축압축강도와의 관계를 분석함으로써 배합된 슬러리를 28일까지 양생시킬 필요 없이, 28일의 일축압축강도를 미리 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

- (1) 단위중량 시험결과, 기포슬러리 단위중량은 12.2~15kN/m³의 범위를 나타내었고 겉보기 단위중량은 10.5~13.5kN/m³의 범위를 가지며, 기포슬러리 단위중량값이 겉보기 단위중량값에 비해 약 1~2kN/m³ 크게 나타났음을 알 수 있었다.
- (2) 경량기포 CLSM의 일축압축강도와 기포슬러리 단위중량과의 관계를 분석하여 관계식을 제시하였다. 배합설계시, 기포슬러리 단위중량과 일축압축강도와의 관계식을 이용하여 28일의 일축압축강도를 쉽게 예측할 수 있다.
- (3) 경량기포 CLSM의 일축압축강도와 겉보기 단위중량과의 관계를 분석하여 관계식을 제시하였다. 실제 현장배합시, 겉보기 단위중량과 일축압축강도와의 관계식을 이용하여 28일의 일축압축강도를 쉽게 예측할 수 있으며, 식을 적용함으로써 배합시간을 단축시킬 수 있다.
- (4) 회기분석 한 결과, 각 상관관계식들의 상관계수 R값은 0.7194~0.9748 범위를 나타내었다. 상관분석법에 따르면 R값이 0.7 이상인 경우 상관관계가 높다고 해석하고 있으며, 때문에 본 연구에서 제시한 상관관계식들은 사용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Amon, J. A. (1990), *Controlled Low-Strength Material*, The Construction Specifier, pp.98-101.
2. ASTM D 4832(2002), *Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material (CLSM) Test Cylinders*,

- ASTM, pp.1-5.
3. Choi, N. H. (2004), Analysis of Behavior for Undergroud Pipe Using Controlled Low Strength Material with Field Soil, Master thesis, Hanyang Univ., pp.17-20.
 4. Kim, Y. J. (2011), *Engineering characteristics of lightweight foamed controlled low-strength materials with coal ash for backfills*, Ph.D. thesis, Hanyang Univ., pp.1-97.
 5. Kong, J. Y., Kang, H. N., and Chun, B. S. (2010), "Characteristics of Unconfined Compressive Strength and Flow in Controlled Low Strength Materials Made with Coal Ash", *Journal of KGS*, Vol.26, No.1, pp.75-83.
 6. KS F 2459(2002), *Testing methods for density, water content, absorption and compressive strength of cellular concrete*, Agency for Technology and Standards, pp.1-3.
 7. KS F 4039(1999), *Foamed concrete for cast-in-site*, Agency for Technology and Standards, pp.1-95.
 8. KS L 5201(2006), *Portland cement*, Agency for Technology and Standards, pp.1-8.
 9. Na, J. H. (2011), *A Study on Impact factors for Optimum Mix Proportion Investigation of Lightweight Foamed CLSM using Coal Ash*, Master thesis, Hanyang Univ., pp.1-54.
 10. Ministry of Construction & Transportation(1997), *Development and Field Application of Foam Concrete*, Dongah Construction Industrial Co., Ltd., pp.10-18.
 11. Ministry of Environment(2008), *4th basic plan for recycling of resources*, pp.100-102.

(접수일자 2012. 7. 12, 심사완료일 2012. 12. 3)