

다량의 산업부산물을 활용한 슬러리게 되메움 재료의 물성 평가

Properties Evaluation of Controlled Low Strength Materials Used Industrial by-Products of A Great Quantity

료 호 개¹

김 동 훈^{2*}

Liao, Xiaokai¹

Kim, Dong-Hun^{2*}

Doctor's Course, Graduate School, Tong Myong University, Nam-Gu, Busan, 48520, Korea¹

Adjunct Professor, Department of Architectural Engineering, Tong Myong University, Nam-Gu, Busan, 48520, Korea²

Abstrac

In this study, the engineering characteristics of CLSM mixed with GBFS and GF were identified to review the applicability as a replacement material and further evaluate the recharge and field applicability as a joint filler material. This study has resulted in the following findings. First, Using more than 30% of GBFS to replace FA enabled bleeding control through improved fluidity. Moreover, it has been confirmed that effective strength and proper quality can be achieved when it was applied as a refiller and joint filler material with higher early strength than the base material. Second, When using more than 30% of FNS to replace sand, it was found that adding 0.3~0.35 of the AE agent is effective for bleeding control through improved fluidity. Third, When using more than 30% of both GBFS and FNS in combination, it was found that adding 0.3~0.35 of the AE agent is effective for bleeding control through improved fluidity. Also, it was confirmed that proper mixing of 15~60% of GF secured the effective strength and desired quality as a refiller and joint filler material. Fourth, The relationship between the superficial level and internal micro pores of CLSM from the curing process needs to be discussed and reviewed in more detail through further research studies.

Keywords : coal ash, back filling, high flowable, recycling, industrial by-products

1. 서 론

1.1 연구의 목적

미국콘크리트협회(ACI 229)에서는 CLSM(Control Low Strength Materials, 이하 CLSM)을 재령 28의 압축강도를 8.3MPa 이하로 제어시킨 슬러리게 되메움 재료로 정의하고 있다[1-3]. 또한, 일본에서는 “제어형저강도재료”로 즉, 제어된 저강도재료로 정의되고 있는 유동화처리토의 일종이다 [3-5,10].

CLSM의 주 사용재료는 현시점에서 플라이애쉬(Fly Ash,

이하 FA)가 주로 사용되고 있으나, 고로슬래그미분말(Granulated Blast Furnace Slag, 이하 GBFS) 및 페로니켈슬래그잔골재(Ferronickel Slag for Fine Aggregate, 이하 FNS), FRP폐재 및 유리폐자재(Foam Glass) 등의 각종 산업부산물 및 폐기물은 물론 하수슬러지 등의 도심형 리사이클링 재료에 이르기까지 다양한 형태의 재생자원을 FA 및 모래의 대체 재료로써 충분히 검토해 볼 수 있다[4-9].

CLSM의 가장 큰 특징은 산업부산물 및 폐기물을 다량으로 유효 또는 경제적으로 사용할 수 있다는 점과 압축강도의 최소치가 아닌 최대치가 제어된다는 것이다. 즉, 소요강도 이상의 성능을 가지면서 또한, 장기적으로는 일정강도 이하로 제어된 슬러리게 재료이다. 또한, 시공 후에 있어 굴착 가능한 강도의 범위를 제안하고 있는데 ACI Committee 229[1]에서는 인력 굴착의 경우 0.3MPa 이하, 백호 등의 기계장비를 이용하는 경우에는 0.7~1.4MPa로 규정하고 있

Received : August 6, 2020

Revision received : September 28, 2020

Accepted : September 29, 2020

* Corresponding author : Kim, Dong-Hun

[Tel: 82-51-629-2477, E-mail: 97421053@hanmail.net]

©2020 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

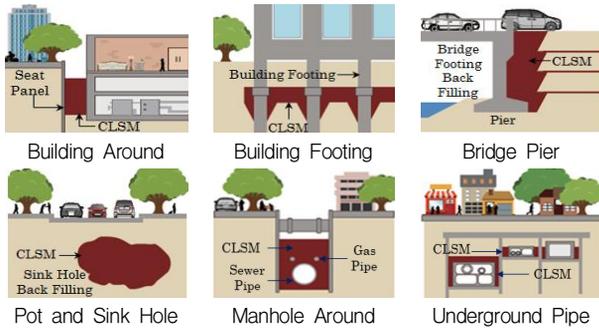


Figure 1. CLSM Application purpose

다. 또한, CLSM은 고유동성 및 자기충전성 등의 성능을 가지고 있어 협소한 공간으로 다짐 작업이 어려운 현장 등의 되메움 재료로 이용하면 대단히 효과적이다. 또한, CLSM은 전용의 플랜트 설비 및 진동 다짐 등이 필요하지 않기 때문에 공사비용 절감 및 시공속도의 향상이 가능하다.

본 연구에서는 다량의 산업부산물 및 폐기물을 안전하게 유효 활용할 수 있는 CLSM의 물성실험을 실시하였다. 즉, CLSM의 주 사용재료인 FA 및 모래의 대체 재료로서 GBFS 및 FNS, 그리고 GBFS와 FNS를 각각 혼입한 복합형태의 GF(GBFS+FNS, 이하 GF)를 다량 활용한 CLSM의 물성시험을 통해 FA 및 모의 대체 재료로서의 적용가능성을 검토하고자 한다. 나아가 지금까지는 하중을 지지하지 않는 되메움 및 뒷채움 재료로 일부 적용되었던 것을 도로 및 노면 하부, 싱크홀(Sink Hole) 및 포토홀(Pot Hole) 등의 되메움 및 공동충전재로서의 현장 적용성에 대해서도 검토하고자 한다. CLSM의 사용 용도는 Figure 1과 같다.

이를 통해 선진외국 대비 재생자원의 유효 재활용을 향상 시키는 물론 국내에서의 CLSM 확대적용 및 보급을 위한 기초적인 자료로 제안하고자 한다. 나아가 “자원순환형건설사회”의 기반구축에 있어서도 그 토대로 활용하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 다량의 산업부산물 및 폐기물을 안전하게 유효 활용할 수 있는 CLSM의 물성시험을 실시하기 위하여 다음과 같은 방법으로 실험을 진행하였다.

첫째, 다량의 산업부산물을 활용한 CLSM의 공학적 특성 파악을 위해 f/a를 30% 설정하여 실험을 실시하였다.

둘째, FA 및 모래의 대체 재료로서의 적용가능성을 검토하기 위하여 GBFS 및 FNS, GF를 각각 FA 및 모래에 중량 치환하는 방법으로 실험을 실시하였다.

셋째, 플로우 시험을 통해 CLSM의 유동성을 평가하고 또한, 블리딩 시험을 실시하여 표면침하에 따른 CLSM의 재료 분리저항성을 평가하였다.

넷째, CLSM의 강도거동을 평가하기 위하여 일축압축강도 시험을 실시하였고 또한, 재령 7일 강도치를 기준으로 현장 적용을 위한 품질기준을 평가하였다.

다섯째, SEM촬영분석을 통해 CLSM의 표면 미세공극과 내부 미세공극과의 관련성을 검토하였다.

2. 실험계획

2.1 실험재료

본 실험에서는 GBFS 및 FNS, GF를 혼입한 CLSM의 물성 평가를 위하여 다음과 같은 재료를 이용하여 실험을 진행하였다. 시멘트는 보통포틀랜드시멘트(비표면적 : 3,150cm²/g), FA는 KS L 5405에 규정된 2종(비표면적 : 3,370cm²/g, 밀도 : 2.18g/cm³)을 사용하였다. 또한, GBFS는 KS F 2563에 규정된 3종(비표면적 : 3,980cm²/g, 밀도 : 2.80g/cm³)을 사용하였고, FNS는 KS F 2502에 규정된 콘크리트용 페로니 켈슬래그잔골재(밀도 2.89g/cm³)를 사용하였다. 또한, 모래는 KS L 5100에 규정된 압축강도 시험용인 주문진산 모래를 사용하였다. 본 실험에서 사용한 재료의 물성은 Table 1과 같다.

Table 1. Physical properties of use materials

	Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)	Absorbing ratio (%)
Cement	3.16	3,150	.
FA	2.18	3,370	.
GBFS	2.80	3,980	.
FNS	2.89	.	0.4
Sand	1.54	.	1.40
AE	AE agent for mortar and concrete		

2.2 배합 및 공시체, 양상

본 실험에서는 단위시멘트량(kg/m³) 20, f/a(FA와 잔골재 S의 용적비율 : a는 FA와 S의 합계용적)30%, 물결합제비(WB)는 55%로 고정하고, 목표 플로우 값 200±20mm (160mm 이상)를 얻는데 필요한 최소단위수량을 설정하는 방법으로 CLSM의 배합을 최종적으로 결정하였다. CLSM의 배합표는 Table 2와 같다.

Table 2. Mixture proportion

	f/a (%)		W	C	FA	S	GBFS	FNS	Flow (mm)	Air (%)
Base	252	20	499	787	·	·	205	5.2		
GBFS15	252	20	424	787	75	·	215	4.8		
GBFS30	252	20	350	787	149	·	195	4.9		
GBFS45	252	20	274	787	225	·	195	4.9		
GBFS60	252	20	174	787	325	·	190	5.0		
GBFS75	252	20	149	787	350	·	180	5.1		
FNS15	252	20	499	669	·	118	168	5.1		
FNS30	252	20	499	551	·	236	188	5.0		
FNS45	252	20	499	433	·	354	201	5.1		
FNS60	252	20	499	315	·	472	204	4.9		
FNS75	252	20	499	197	·	590	211	4.9		
GF15	252	20	424	669	75	118	171	4.9		
GF30	252	20	350	551	149	236	217	4.8		
GF45	252	20	274	433	225	354	228	5.1		
GF60	252	20	174	315	325	472	231	5.3		
GF75	252	20	149	197	350	590	233	5.4		

Temperature 20°C, Moisture 60%, AE = Fly Ash concrete Admixture
W/B = 55%, S(Sand)/B(Binder, FA+C) = 1.52

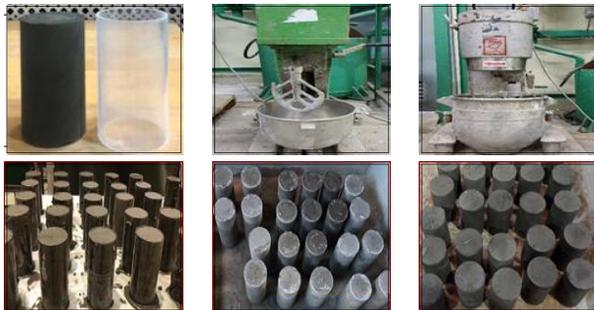


Figure 2. Specimen and mixer, curing process

한편, 배합은 모르타르 믹서기(5, 20L)를 이용하여 각 배합별로 비빔을 완료하였다. 각 배합별 비빔은 시멘트 및 분체(FA, GBFS, FNS, GF), 잔골재를 먼저 혼합하여 1분간 건비빔을 실시한 후, AE제가 첨가된 배합수를 믹서에 첨가하여 30초간 더 비빔을 실시하였다. 비빔을 완료한 시료는 아크릴 몰드(Ø 50×100mm)를 이용하여 일축압축강도용 공시체를 제작하였다. 제작한 공시체는 24시간 경과 후에 탈형하여 기중 양생을 실시하였으며, 이후 재령 3, 7, 14, 28일의 일축압축강도시험을 실시하였다. 본 실험에서 사용한 공시체 및 모르타르 믹서기, 공시체의 양생과정은 Figure 2와 같다.

2.3 시험항목

ACI Committe 229[1] 및 “유동화처리토이용기술매뉴얼

[2]”에 의하면 FA를 주 사용재료로 활용한 CLSM의 경우 최소단위수량의 설정에 따른 플로우 및 블리딩, 일축압축강도를 기준으로 CLSM의 공학적 특성 및 현장적용에 따른 품질기준을 평가하고 있다[4-6]. “유동화처리토이용기술매뉴얼[2]”에서 규정하고 있는 CLSM의 사용용도별 품질기준은 Table 3과 같다.

Table 3. Use quality of CLSM

Use	Test Item	Standard Limit	Test Method
Building Underground Structures Backfill	Flow	160mm ~	Once/50m ³
	Strength	0.2MPa(7day)	Once(3ea)/day
Civil Underground Structures Backfill	Flow	160mm ~	Once/50m ³
	Strength	0.2MPa(7day)	Once(3ea)/day
Underground Space Filling	Flow	160mm ~	Once/50m ³
	Strength	0.2MPa(7day)	Once(3ea)/day
Footing Around Backfill	Flow	160mm ~	Once/50m ³
	Strength	0.3MPa(7day)	Once(3ea)/day

2.3.1 플로우시험

CLSM의 유동성 평가는 플로우 시험을 통해 얻어진 값을 그 기준으로 평가하고 있다. 특히, 북미 및 일본의 경우는 CLSM의 자기수평성 및 원활한 유동성의 확보를 위해 플로우 값에 대한 기준치를 설정하고 있는데 ACI Committe 229[1]에서는 200mm 이상, “유동화처리토이용기술매뉴얼 [2]”에서는 160mm 이상 또한, 현장적용에 있어서는 200±20mm으로 설정하고 있다.

본 실험에서는 GBFS 및 FNS, GF를 혼입한 CLSM의 현장 적용을 고려하여 플로우 값을 최소 160mm이상을 만족하는 범위에서 200±20mm로 설정하였다. 플로우 시험방법은 KS F 2594에 규정된 굳지 않은 콘크리트의 플로우 시험방법에 기준하여 실험을 실시하였다. 본 실험에서의 플로우 시험 방법은 Figure 3과 같다.



Figure 3. Flow test method

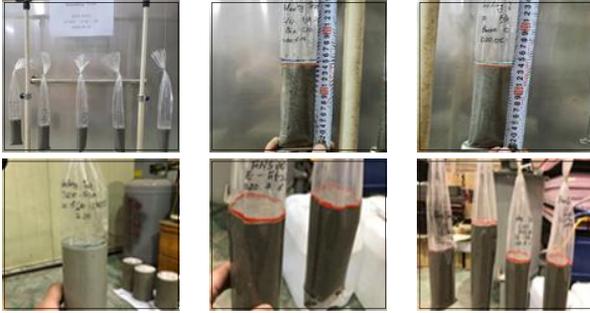


Figure 4. Bleeding test method



Figure 5. Compressive strength test method

2.3.2 블리딩시험

기존의 연구사례[4,7,8]에 의하면 FA를 활용한 CLSM의 경우 대략적으로 1~3% 정도의 범위에서 블리딩이 발생하는 것으로 보고되고 있다. 하지만, FA를 혼합하지 않은 즉, 분체량이 적은 CLSM 경우에는 약 10% 정도의 블리딩이 발생하는 것으로 보고되고 있다[4,5,9].

블리딩 제어는 CLSM의 재료분리저항성에 많은 영향을 미치는 주요 항목으로 특히, 충전개소의 공극 및 표면침하의 요인이 될 수 있기 때문에 이용용도 또는 구조물의 중요도 등 필요에 따른 타설량의 할증을 고려해 두는 것이 필요하다. 본 실험에서는 KS F 2433 및 JSCE-F522에 규정된 주입 모르타르의 블리딩 시험방법에 의거하여 20시간 이후의 표면침하량을 측정하였다. 본 실험에서의 블리딩 시험방법은 Figure 4와 같다.

2.3.3 일축압축강도시험

ACI Committe 229[1] 및 “유동화처리토이용기술매뉴얼 [2]”에 의하면, CLSM의 일축압축강도는 사용용도에 따라 시멘트 및 모래의 첨가량을 변화시키는 방법으로 강도를 설정하는 방법이 가장 일반적으로 많이 사용되고 있다. 또한, CLSM의 강도 평가는 일축압축강도의 크기로 평가되고 있으

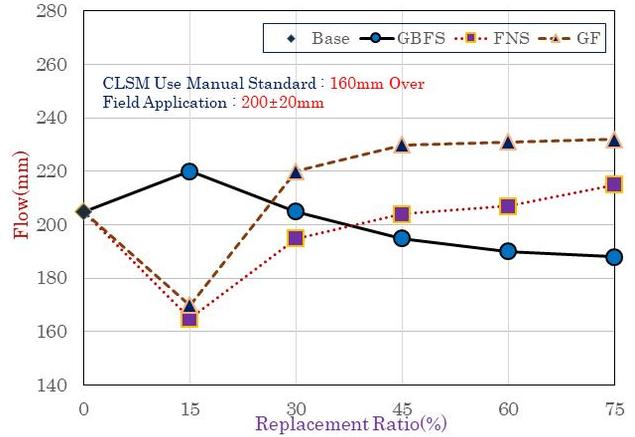


Figure 6. Flow Test result of GBFS and FNS, GF mixed CLSM

나, 용도 및 적용 개소에 따라 특별한 강도정수가 적용되어 평가되는 경우도 있다.

본 실험에서는 전용의 CBR 압축강도시험기를 이용하여 KS F 2426에 규정된 일축압축강도 시험방법에 의거 재령 3, 7, 14, 28일의 일축압축강도를 측정하였다. 본 실험에서의 일축압축강도 시험방법은 Figure 5와 같다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 유동성

GBFS 및 FNS, GF를 혼합한 CLSM의 플로우 시험 결과는 Figure 6과 같다. 그림으로부터 GBFS를 혼합한 CLSM의 경우 15% 혼합한 것은 Base 대비 플로우가 높은 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 유동성 확보를 위해 추가 혼합된 AE제가 영향을 미친 것으로 판단된다. 본 실험의 결과에서는 GBFS를 15% 이하에서 혼합하는 경우에는 AE제를 0.1~0.15(%, kg/m³) 혼합하는 것이 유동성 제어에 유효한 것으로 나타났다.

한편, 그림으로부터 GBFS를 30% 이상 혼합한 경우는 GBFS의 혼합율이 증가할수록 플로우가 감소하는 경향이 파악되었다. 이러한 결과로부터 FA의 대체 재료로서 GBFS를 30% 이상 다량 활용하면 목표 플로우를 만족하는 범위에서의 유동성 확보가 가능한 것으로 확인되었다. 본 실험의 결과에서는 GBFS를 30% 이상 혼합하는 경우 AE제를 0.15~0.2(%, kg/m³) 혼합하면 205~188mm 정도의 플로우 확보가 가능한 것으로 확인되었다.

또한, Figure 6으로부터 모래 대체 재료로서 FNS를 활용한 CLSM의 경우 먼저 15% 치환하여 혼합한 것은 “유동화처

리토이용기술매뉴얼[2]”의 현장적용을 위한 160mm 이상을 만족하였으나, Base 대비 플로우가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 FNS 대비 잔골재의 높은 흡수율이 영향을 미친 것으로 판단된다. 본 실험의 결과에서는 FNS를 15% 이하로 모래에 대체하는 경우 AE제를 0.25~0.3(% kg/m³) 범위에서 혼입하면 유동성 향상에 효과적인 것으로 확인되었다.

하지만, 그림으로부터 FNS를 30% 이상 혼입하는 경우 플로우가 증가하여 Base 대비 동등 이상의 유동성을 나타내는 것으로 파악되었다. 본 실험의 결과에서는 FNS를 30% 이상 치환하는 경우 AE제를 0.3~0.35(% kg/m³) 적정 혼입하면 목표 플로우를 만족하는 195~215mm의 플로우 확보가 가능한 것으로 확인되었다.

한편, Figure 6으로부터 GBFS와 FNS를 복합적으로 혼입한 GF의 경우 먼저 15% 혼입한 것은 “유동화처리토이용기술매뉴얼[2]”의 현장적용 기준인 160mm 이상을 만족하였으나, Base 대비 플로우가 감소하는 것으로 나타났다. 하지만, GF를 30% 혼입한 것은 Base 대비 플로우가 크게 증가하여 목표 플로우의 허용 오차 범위인 220mm으로 파악되었고 또한, 45% 이상 혼입한 것은 플로우가 230mm 정도로 파악되어 목표 플로우의 범위를 초과하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 AE제 및 GBFS의 혼입량 증가가 CLSM의 유동성 거동에 영향을 미친 것으로 판단된다.

본 실험의 결과에서는 GBFS 및 FNS를 복합적으로 사용하는 경우 혼입율이 15% 이내인 경우는 AE제를 0.35~0.39(% kg/m³), 15~30% 혼입하는 경우는 0.35(% kg/m³) 이하 또한, 45% 이상을 초과하여 혼입하는 경우에는 AE제를 0.3(% kg/m³) 이하로 혼입하는 것이 유동성 제어에 효과적인 것으로 확인되었다.

3.2 블리딩

GBFS 및 FNS, GF를 혼입한 CLSM의 블리딩 시험 결과는 Figure 7과 같다. 그림으로부터 GBFS 및 FNS, GF 혼입 CLSM의 경우 ACI Committee 229[1] 및 “유동화처리토이용기술매뉴얼[2]”에서의 현장적용을 위한 블리딩을 3% 이하를 모두 만족하는 것으로 파악되었다.

그림으로부터 GBFS를 혼입한 CLSM의 경우 15%를 혼입한 것은 블리딩율이 약 1.89%로 Base 대비 조금 높은 블리딩이 파악되었다. 이러한 경향은 전술의 GBFS 혼입(15%)에 따른 Base 대비 비교적 높은 유동성이 표면침하에 영향을 미친

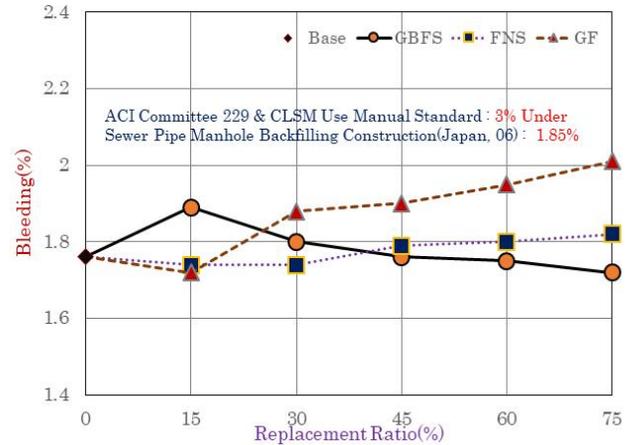


Figure 7. Bleeding test result of GBFS and FNS, GF mixed CLSM

것으로 판단된다. 하지만, GBFS를 30% 이상 혼입한 CLSM의 경우는 혼입율의 증가에 따라 블리딩이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 GBFS를 FA의 대체 재료로서 30% 이상 적정 혼입하면 블리딩의 제어가 가능한 것으로 확인되었다. 본 실험의 결과에서는 GBFS를 30% 이상 혼입하는 경우 AE제를 0.15~0.2(% kg/m³) 범위에서 혼입하면 유동성 확보를 통한 블리딩의 제어가 유효한 것으로 확인되었다.

또한, Figure 7로부터 모래의 대체 재료로서 FNS를 혼입한 경우는 혼입율 차이에 따른 블리딩율의 커다란 변화 없이 1.75~1.83%의 범위에서 일정하게 블리딩을 유지하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 잔골재 대비 FNS의 낮은 흡수율이 FNS 혼입 CLSM의 표면침하에 영향을 미친 것으로 판단된다. 본 실험의 결과에서는 모래의 대체 재료로서 FNS를 활용하는 경우 AE제를 0.3~0.35(% kg/m³) 혼입하면 블리딩율을 1.8±0.5% 범위에서 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

한편, Figure 7로부터 GBFS와 FNS를 복합적으로 혼입한 GF의 결과에서는 먼저 15%를 혼입한 것은 Base 대비 동등 이하의 블리딩율이 파악되었다. 하지만, GF를 15% 이상 혼입하면 블리딩율이 급격히 증가하는 것으로 확인되었다. 이러한 경향은 전술의 GF 혼입율 증가에 따른 높은 유동성이 CLSM의 표면침하에 영향을 미친 것으로 판단된다. 본 실험의 결과에서는 GBFS와 FNS를 복합적으로 사용하는 경우 혼입율 30% 이하인 경우는 AE제를 0.35~0.39(% kg/m³) 또한, 30% 이상 혼입하는 경우는 AE제를 0.3~0.35(% kg/m³) 혼입하면 블리딩율을 2% 이하로 제어할 수 있는 것으로 확인되었다.

3.3 일축압축강도

GBFS 및 FNS, GF를 혼입한 CLSM의 일축압축강도시험 결과는 Figure 8 및 Figure 9, Figure 10과 같다. Figure 8로부터 GBFS를 혼입한 CLSM의 강도가 Base 대비 전체적으로 높은 경향을 나타내고 있다. 또한, GBFS의 혼입율 증가에 따라 강도가 증가하는 것으로 파악되어 GBFS의 혼입량 증가에 따른 유효 강도 확보가 가능한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 고미분말의 GBFS 혼입에 의한 CLSM의 공극충전 및 치밀화가 강도거동에 영향을 미친 것으로 판단된다.

한편, “유동화처리토이용기술매뉴얼[2]”에서의 현장적용을 위한 강도 기준인 7일 강도(0.2MPa) 결과에서 GBFS를 혼입한 CLSM의 경우 규격 이상의 강도는 물론 Base 대비 비교적 높은 강도거동이 파악되었다. 본 실험의 결과에서는 GBFS를 15% 및 30% 혼입한 것은 Base 대비 305% 및 376% 정도 강도가 증가하였고, 45% 및 60% 혼입한 것은 각각 447% 및 552% 그리고 75% 혼입한 것은 약 605% 정도 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 FA의 대체 재료로서 GBFS를 활용하는 경우 특히, 조기에 강도 확보를 통한 빠른 교통개시 등이 요구되는 현장 즉, 도로 및 노면 하부, 싱크홀 및 포토홀 등의 되메움 및 공동충전재로서 적용하면 효과적인 것으로 판단된다.

한편, Figure 9로부터 FNS를 혼입한 CLSM의 경우는 전체적으로 Base 대비 낮은 강도가 나타났다. 또한, FNS의 경우 혼입율 차이에 따른 강도의 변화 없이 일정한 강도를 나타내는 것으로 확인되었다. 이러한 경향은 잔골재의 높은 흡수율이 영향을 미친 것으로 본 실험의 결과에서는 모래의 대체 재료로서 FNS를 혼입하는 경우 배합설계단계에서 GBFS 보강 및 AE제의 추가 적정 혼입에 따른 조기 강도의 확보가 필요한 것으로 확인되었다.

하지만, FNS 혼입 CLSM의 경우 “유동화처리토이용기술매뉴얼[2]”에서의 현장적용을 위한 강도 기준인 7일 강도 (0.2MPa) 결과 FNS를 15% 및 30%, 45%, 60% 혼입한 것은 강도가 1.9~1.95MPa 정도로 Base 대비 조금 낮은 강도가 나타났으나, 현장 적용기준인 0.2MPa 대비 동등 정도의 강도가 확인되었다. 하지만, FNS를 75% 혼입한 것은 Base 강도의 70% 정도인 1.6MPa로 현장적용을 위한 조기강도의 확보가 필요한 것으로 확인되었다. 하지만, 본 실험의 결과 3일에서 7일까지의 강도증가비율에서는 Base 162% 대비 FNS를 15% 및 30% 혼입한 것은 각각 237% 및 172% 정도 강도가 증가하였고 또한, FNS를 45% 및 60% 혼입한 것은

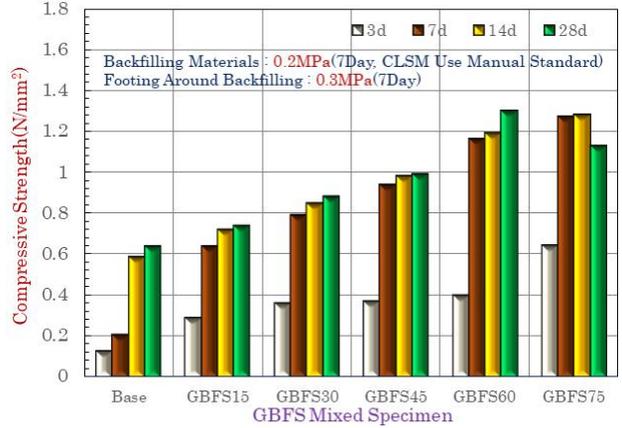


Figure 8. Compressive strength test result of GBFS mixed CLSM

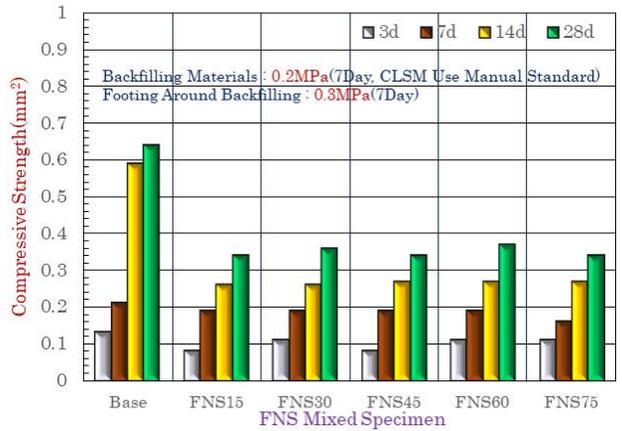


Figure 9. Compressive Strength Test Result of FNS Mixed CLSM

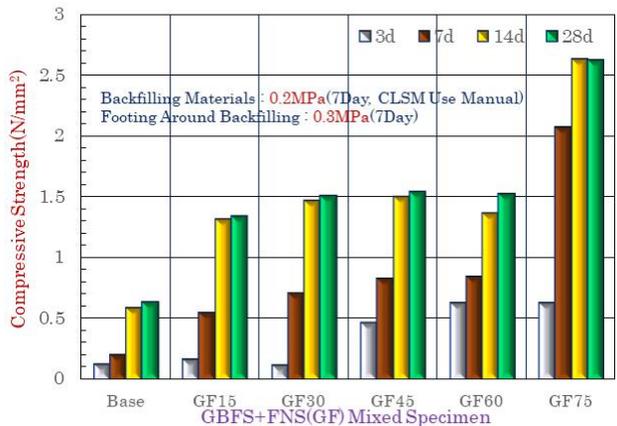


Figure 10. Compressive strength test result of GF mixed CLSM

각각 237% 및 173% 정도 강도가 증가하여 Base 대비 높은 강도증가비율이 확인되었다. 이러한 결과로부터 FNS의 경우 모래 대체 재료로서 15~60% 범위에서 적정 혼입하면 Base 대비 동등 정도의 조기강도 확보를 통한 현장적용이 가능할 것으로 확인되었다.

한편, Figure 10으로부터 GBFS 및 FNS를 복합적으로 사용한 CLSM의 경우는 전체적으로 Base 대비 높은 강도가 파악되었다. 이러한 경향은 고미분말의 GBFS 혼입에 따른 CLSM의 공극충전 및 치밀화가 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한, “유동화처리토이용기술매뉴얼[2]”에서의 현장적용을 위한 강도 기준인 7일 강도 결과에서도 Base 대비 2배 이상의 높은 강도 발현이 확인되었다. 이러한 결과로부터 GF를 활용한 CLSM의 경우 조기강도의 확보를 통해 빠른 시일 내에 교통개시 등이 요구되는 도로 및 노면 하부 또한, 부분적인 형태의 싱크홀 및 포트홀 발생 현장에의 보수 및 보강공사 등에 적용하면 유효할 것으로 판단된다.

하지만, 그림으로부터 GF를 60% 이상 혼입한 경우는 비교적 빠른 재령에서부터 강도가 급격히 증가하는 것으로 파악되어 향후, 재굴착 및 현장에서의 품질관리에 있어 특별한 주의가 필요한 것으로 나타났다. 본 실험의 결과에서는 CLSM의 대체 재료로써 GF를 복합적으로 활용하는 경우 혼입율을 15%에서 최대 60%까지 혼입하면 되메움 및 공동충전재로서의 적정 품질확보에 있어 가장 적합한 것으로 확인되었다. 이상의 압축강도 시험결과를 현장적용 기준과 전체적으로 비교 분석한 것은 Table 4와 같다.

Table 4. Standard and test result of compressive strength

Test Item	Standard Limit*	Test Result	Test Item	Standard Limit	Test Result	Test Item	Standard Limit	Test Result
GBFS15	0.2	0.64	FNS15	0.2	0.19	GF15	0.2	0.55
GBFS30	0.2	0.79	FNS15	0.2	0.19	GF15	0.2	0.71
GBFS45	0.2	0.94	FNS15	0.2	0.19	GF15	0.2	0.83
GBFS60	0.2	1.16	FNS15	0.2	0.19	GF15	0.2	0.85
GBFS75	0.2	1.27	FNS15	0.2	0.16	GF15	0.2	2.07

* Underground Space Filling : 0.2MPa ↑ (Flow 160mm ↑, Bleeding 3% ↓)

3.4 SEM촬영 결과

GBFS 및 FNS, GF를 혼입한 CLSM 공시체의 표면 공극 및 SEM촬영 결과는 Figure 11과 같다. 그림으로부터 CLSM 공시체의 표면에 미세공극이 산발적으로 분포된 것을 알 수 있다. 본 실험에서는 공시체 표면에 분포된 미세공극과 내부 공극과의 관련성을 검토하기 위하여 재령 28일이 경과된 CLSM 공시체로부터 샘플을 채취하여 전문기관에 SEM촬영을 의뢰하였다.

Figure 11로부터 본 실험에 있어 공시체의 양생과정에서 발생한 산발적인 표면 미세공극은 양생과정에서의 표면침하

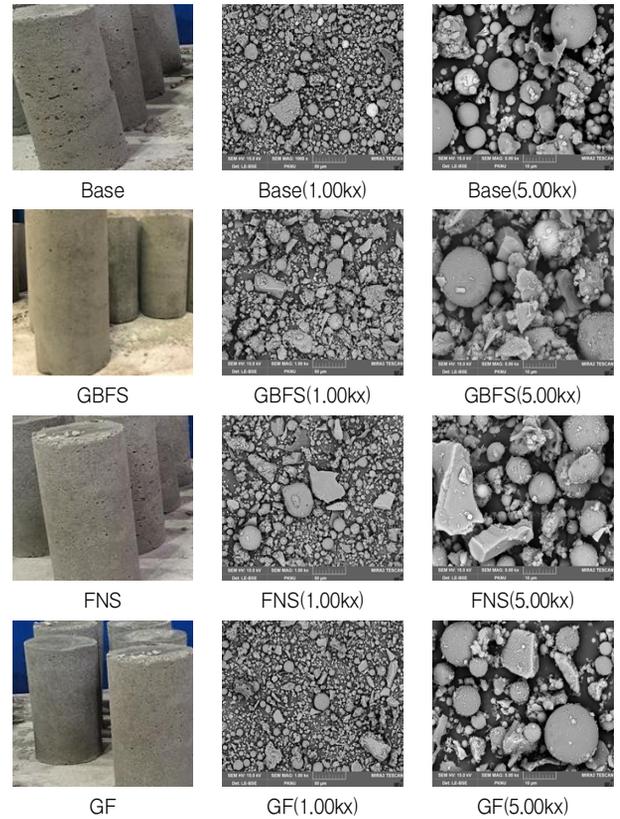


Figure 11. SEM analysis result

및 수분 증발 등이 영향을 미친 것으로 추측된다. 하지만, 그림으로부터 FA 및 GBFS, FNS, 잔골재 등 주요 사용재료의 개략적인 형상 및 분포현황 대비 공시체 내부의 미세균열 및 공극 상태 등은 명확한 판별이 어려운 것으로 확인되었다.

향후, 추가적인 연구를 통해 CLSM의 표면 미세공극과 내부 미세공극과의 관련성 검토는 물론 미세공극이 CLSM의 강도 거동에 미치는 영향을 보다 상세하게 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 GBFS 및 FNS, GF를 혼입한 CLSM의 공학적 특성을 파악하여 대체 재료로서의 적용가능성을 검토하고 나아가 되메움 및 공동충전재로서의 현장적용성을 평가하고자 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) FA의 대체 재료로써 GBFS를 30% 이상 다량 활용하면 유동성 향상을 통한 블리딩 제어가 가능한 것으로 나타났다. 또한, Base 대비 높은 조기강도의 발현으로 되메움 및 공동충전재로서 현장에 적용하면 유효 강도 및

적정 품질의 확보가 가능한 것으로 확인되었다.

- 2) 모래 대체 재료로써 FNS를 30% 이상 다량 활용하는 경우 AE제를 0.3~0.35(% kg/m³) 혼입하면 유동성 향상을 통한 블리딩 제어에 유효한 것으로 나타났다. 하지만, Base 대비 강도가 낮은 것으로 파악되어 배합 설계단계에서 GBFS 및 AE제의 혼입에 따른 강도 확보가 필요한 것으로 나타났다.
- 3) GBFS와 FNS를 30% 이상 복합적으로 다량 활용하는 경우 AE제를 0.3~0.35(% kg/m³) 혼입하면 유동성 개선을 통한 블리딩의 제어에 유효한 것으로 나타났다. 또한, GF를 15~60% 적정 혼입하면 되메움 및 공동충전재로서의 유효 강도 및 적정 품질확보가 가능한 것으로 확인되었다.
- 4) 양생과정에서 발생한 CLSM의 표면 미세공극과 내부 미세공극과의 관련성은 향후, 추가 연구를 통해 보다 상세히 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

요 약

CLSM은 다량의 산업부산물 및 폐기물을 안전하게 유효 활용할 수 있는 슬러리계의 되메움 재료이다. 본 연구에서는 FA 및 모래의 대체 재료로써 GBFS 및 FNS, GF의 적용가능성을 평가함은 물론 나아가 도로 및 노면 하부, 싱크홀 및 포토홀 등의 되메움 및 공동충전재로서의 현장적용을 위한 품질기준을 제안하고자 하였다. 이를 통해 선진외국 대비 재생자원의 유효 재활용을 향상시키는 물론 국내에서의 CLSM 확대적용 및 보급을 위한 기초적인 자료로 제안하고자 하였다.

키워드 : 석탄회, 되메움, 고유동성, 재활용, 산업부산물

Funding

Not applicable

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research

Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (2018R1D1 A1B0704681413).

ORCID

Xiaokai Liao, <http://orcid.org/0000-0001-6668-1193>

Dong-Hun Kim, <http://orcid.org/0000-0002-4843-1550>

References

1. ACI Committee 229. Controlled Low Strength Materials. ACI Manual of Concrete Practice. ACI 229 R(13). 2013.
2. Civil Research Institute Ministry of Construction Japanese Government. Liquified Stabilized Soil (CLSM) Uses Technical Manual. Gibodan publishing company. 2008.
3. Hokkaido Civil Technical Concrete Research Committee. CLSM Use Manual. Japan: CLSM Supply Review Committee; 2006. p. 1-14.
4. Kim DH, Lim NG, Horiguchi T. Rational method of clsm mixture with sewage sludge cinder. Journal of Concrete Institute of Korea. 2012 Aug;24(4):465-72. <http://doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.4.465>
5. Horiguchi T, Fujita R, Shimura K. Applicability of controlled low-strength materials with incinerated sewage sludge ash and crushed-stone powder. Journal of Materials in Civil Engineering. 2011 Jun; 23(6):767-9.
6. Mizuguchi O, Onodera T, Horiguchi T, Ii H. Application of CLSM(Controlled Low Strength Materials) in japan. Journal of Concrete Institute of Japan. 2004 Jan;42(10):19-28. https://doi.org/10.3151/coj1975.42.10_19
7. Horiguchi T, Okumura H, Saeki N. Durability of CLSM with Used Foundry Sand Bottom Ash in Cold Regions. ACI Special Publication SP. 2001 Jun;200(2):325-48.
8. Horiguchi I, Saeki N. Compressive strength and leachate characteristics of new green CLSM with ecocement and melted slag from municipal solid waste. ACI Special Publication SP. 2004 May;221:529-58.
9. Horiguchi T, Okumura H, Saeki N. Optimization of CLSM mixture proportion with combination of clinker ash and fly ash. ACI Special Publication SP. 2001 Jun;199:307-24.
10. Keon CW, Lim NG. Fundamental properties of low strength concrete mixture with blast furnace slag and sewage sludge. Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection. 2013 Apr;17(3):136-44. <http://doi.org/10.11112/JKSMI.2013.17.3.136>