

Red mud와 제지회를 혼합한 CLSM의 적정 혼합비 산정

The Estimation of Optimal Mixing Ratio of CLSM Mixed with Red Mud and Paper Sludge Ash

노성오¹⁾ · 김태연²⁾ · 이봉직[†]

Seongoh Roh · Taeyeon Kim · Bongjik Lee

Received: February 16th, 2022; Revised: March 2nd, 2022; Accepted: March 21st, 2022

ABSTRACT : Recently, numerous studies are being performed to examine alkali-activated cement which uses industrial by-products, such as GGBS and fly ash, as well as alkali activators. Alkali-activated cement is a type of binder that exerts the same strength as cement without using cement by mixing industrial by-products with alkali activators. Alkali activators, which are used mainly for carbon-reducing technologies and alkali activation, are expensive and difficult to apply in the field due to risks related to strong alkalinity. Therefore, this study intends to explore methods to use red mud as a substitute for an alkali activator. To that end, this study has evaluated engineering properties, such as flow and strength, of CLSM that uses red mud and paper sludge ash as binders and its possibility to cause soil pollution. This study also aims to present the appropriate mixing ratios of red mud and paper sludge ash to produce CLSM.

Keywords : CLSM, Cementless, Red mud, Paper sludge ash, Optimal mixing ratio

요지 : 최근 GGBS 및 Fly ash 등과 같은 산업부산물과 알칼리 자극제를 활용한 알칼리 활성화 시멘트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 알칼리 활성화 시멘트는 산업부산물에 알칼리 자극제를 혼합함으로써 시멘트를 사용하지 않고 강도를 발휘하는 결합재의 일종으로 대표적인 탄소저감 기술이나, 알칼리 활성화를 위해 사용되는 알칼리 자극제는 고가이며 강알칼리성으로 인한 위험성으로 현장적용에 여러 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 알칼리 자극제의 대체재로 Red mud의 활용방안을 모색하고자 Red mud와 제지회를 결합재로 활용한 CLSM의 유동특성, 강도특성 등의 공학적 특성과 토양오염 발생가능성을 평가하였으며, Red mud와 제지회를 혼합한 CLSM의 적정 혼합비를 제시하였다.

주요어 : CLSM, 무시멘트, Red mud, 제지회, 적정 혼합비

1. 서론

최근 전세계적으로 온실가스 감축 목표를 설정하고 이를 위한 다양한 탄소저감 기술개발이 진행되고 있으며, 건설산업 분야에서도 탄소저감을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 건설산업의 주재료로 사용되고 있는 시멘트의 경우 시멘트 1톤 생산 시 약 0.9톤의 이산화탄소가 발생됨에 따라 최근 탄소저감을 위한 방안으로 시멘트를 효과적으로 대체할 수 있는 재료에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 Ground Granulated Blast-furnace Slag(이하 GGBS) 및 Fly ash 등과 같은 산업부산물과 알칼리 자극제를 활용한 알칼리 활성화 시멘트(Alkali Activated Cement, 이하 AAC)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Kang & Hwang, 2018). 또한, 최근에는 AAC의 주재료로 사용되는

GGBS와 Fly ash를 대체할 수 있으며, 동시에 재활용이 저조한 제지회의 활용도 증가하고 있는 실정이다(Susan et al., 2014; Maria & shamil, 2021).

AAC는 SiO_2 및 Al_2O_3 를 함유하고 있는 산업부산물에 알칼리 자극제를 혼합함으로써 시멘트를 전혀 사용하지 않고도 강도를 발휘하는 결합재의 일종으로(Kang, 2012) 탄소배출량을 효과적으로 저감할 수 있는 대표적인 탄소저감 기술이다. 그러나, 알칼리 활성화를 위해 사용되는 수산화나트륨 수용액($NaOH$)과 규산나트륨 수용액(Na_2SiO_3) 등의 알칼리 자극제는 매우 고가이며 강알칼리성으로 인한 위험성으로 현장적용에 다소 어려움이 있다(Kang & Kwon, 2017). 이에 최근 알칼리 자극제를 대체하여 활용가능한 산업부산물인 Red mud의 활용방안에 대한 연구가 진행되고 있다(Kang & Kang, 2017).

1) Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation

2) Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation

† Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation (Corresponding Author : bjlee@ut.ac.kr)

따라서, 본 연구에서는 산업부산물인 Red mud와 제지회를 혼합한 무시멘트 결합재의 적정 혼합비와 이를 결합재로 활용한 CLSM(Controlled Low Strength Material, 유동화 채움재)의 공학적 특성을 파악하기 위해 Red mud와 제지회의 혼합비에 따른 결합재의 압축강도변화 특성과 결합재 혼합율에 따른 CLSM 유동특성 및 강도변화 특성을 평가하고 결합재를 혼합한 CLSM의 중금속 검출시험을 수행함으로써 Red mud와 제지회를 혼합한 CLSM의 적정 혼합비를 제시하였다.

2. CLSM

2.1 CLSM의 개요

구조물의 뒷채움 시 발생하는 과다짐이나 빈다짐 등과 같은 다짐불량으로 발생하는 구조물의 손상이나 침하 등의 문제를 해결하기 위해 개발된 CLSM(Controlled Low Strength Material, 유동화 채움재)은 저강도 콘크리트를 지반공학에 적용하여 만들어진 슬러리계 복토재의 일종으로 지중관 매설공사나 지중구조물의 뒷채움재 및 소·대규모 공동충전 등을 목적으로 주로 활용되고 있다(ACI Committee 229, 2005). 일반적으로 CLSM의 강도는 일축압축강도시험을 통해 평가되며 ACI Committee 229(2005)에서는 CLSM의 압축강도를 8.3MPa 이하로 정의하고 있으나, 향후 재굴착이 필요할 경우 압축강도를 2.1MPa 이하로 요구하고 있다. 유동성에 대한 품질기준은 ASTM D 6103(2004)에 의거한 플로우 값으로 규정하고 있으며, CLSM의 사용목적에 따라 보통 150~200mm로, 저유동의 경우 150mm 이하, 고유동의 경우 200mm 이상을 기준으로 하고 있다(Lee et al., 2020).

또한, 최근 ACI Committee 229(2005)에서는 CLSM을 구성하는 재료는 비용, 사용목적 및 요구되는 특성을 만족시키기 위해 표준제조방식을 항상 준수하지 않아도 되며, 친환경적인 건설을 위해 부가가치가 없는 산업부산물의 활용을 적극 권장하고 있다. CLSM 활용 실적이 많은 일본의 경우, 활용목적에 따라 성의 경우 JHS A 313에 의거하여 플로우 값을 110~CLSM의 품질기준을 세분화하여 유동 200mm 이상까지 요구하고 있으며, 강도의 경우 지하구조물의 되메움 및 소규모 공동 충전 등에 활용 시 0.3MPa 이상, 매설관의 되메움으로 활용 시 0.14~0.6MPa를 요구하고 있다(Japan Civil Engineering Research Institute, 2007).

2.2 본 연구의 품질기준

본 연구에서는 해외에서 규정하고 있는 CLSM의 품질기준을 참고하여 Table 1과 같이 품질기준을 설정하였다. 산업

부산물을 활용한 무시멘트 CLSM을 공동충전, 지하 매설물이나 구조물의 뒷채움재 등에 적용하기 위해 유동성은 ASTM D 6103(2004)에 의거 플로우 값 200mm, 일축압축강도의 경우 양생 28일을 기준으로 0.3~2.1MPa로 설정하였다.

Table 1. CLSM design criteria

Flowability	200mm
Compressive strength	Curing 28 day : 0.3~2.1MPa

3. 실내실험 및 방법

3.1 실험계획

Red mud와 제지회를 혼합한 무시멘트 CLSM의 적정 혼합비를 산정하기 위한 실험은 2단계로 구분하여 실시하였다. 1단계에서는 Red mud와 제지회의 혼합비에 따른 모르타르의 압축강도시험을 실시하여 CLSM에 혼합되는 결합재 조성을 위한 Red mud와 제지회의 적정혼합비를 산정하였다. 2단계에서는 1단계에서 도출된 적정혼합비로 제작된 결합재의 혼합율에 따른 CLSM의 유동성 시험 및 일축압축강도시험을 실시함으로써 산업부산물을 활용한 무시멘트 CLSM의 공학적 특성과 활용가능성을 평가하였다.

3.2 재료특성

3.2.1 화강풍화토

실험에 사용된 화강풍화토의 물리적 특성을 평가하기 위해 체분석, 비중 및 다짐시험을 실시하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Properties of weathered granite soil

USCS	SM
Specific gravity	2.68
O.M.C. (%)	10.78
$\gamma_{dmax} (kN/m^3)$	19.01

3.2.2 Red mud

Red mud는 Bayer 공정을 통해 보크사이트 광물로부터 산화알루미늄 및 알루미늄을 제조하는 과정에서 발생하는 산업부산물로 약 45%의 함수율을 갖는 Slurry로 배출되고 있다(Kang & Kang, 2019). 본 연구에서는 Slurry 상태로 배출되는 Red mud를 건조·분쇄하여 건조상태의 Red mud 분말을 사용하였으며, 실험에 사용된 Red mud의 특성은 Table 3과 같다.

Table 3. Physical and chemical properties of red mud

Chemical component (%)		Physical characteristics	
Fe_2O_3	41.85	Specific gravity	3.43
Al_2O_3	18.14		
SiO_2	12.43	Blaine (cm^2/g)	2353
Na_2O	9.79	pH	11
TiO_2	7.43		
CaO	2.91	Moisture content of red mud slurry (%)	45

3.2.3 제지회

제지회는 종이를 생산하는 공정에서 발생하는 Paper sludge 를 소각로에서 소각 후 전기집진기를 통해 포집된 산업부산물로(Lee et al., 2002), 실험에 사용된 제지회의 화학적 특성은 Table 4와 같다.

Table 4. Chemical properties of paper sludge ash

Chemical component (%)	
CaO	54.87
SiO_2	11.68
Al_2O_3	7.25
MgO	2.83
SO_3	1.98
Fe_2O_3	1.24

3.3 실내실험 및 방법

3.3.1 배합조건

Red mud와 제지회를 혼합한 결합재의 적정혼합비를 산정하기 위한 1단계 시험에서는 Red mud와 제지회의 혼합비를 주요 변수로 하였으며, 1단계 시험을 위한 배합조건은 Table 5와 같다.

2단계에서는 Red mud와 제지회를 혼합한 결합재의 혼합율에 따른 CLSM의 공학적 특성을 평가하기 위해 Table 6과

Table 5. Mixture proportions of binder

Mixture type	Mixing ratio (wt, %)		Curing time (days)
	Paper sludge ash	Red mud	
Binder-1	90	10	1, 7, 14, 28, 60, 90
Binder-2	80	20	
Binder-3	70	30	
Binder-4	60	40	
Binder-5	50	50	
Binder-6	40	60	
Binder-7	30	70	
Binder-8	20	80	
Binder-9	10	90	

Table 6. Mixture proportions of CLSM

Mixture type	Mixing ratio (wt, %)		Curing time (days)
	Weathered granite soil	Binder	
CLSM-A	80	20	1, 7, 14, 28, 60, 90
CLSM-B	70	30	
CLSM-C	60	40	
CLSM-D	50	50	
CLSM-E	40	60	
CLSM-F	30	70	

같이 시료를 조성하였으며, 결합재의 혼합율을 주요 변수로 하였다.

3.3.2 결합재의 압축강도시험

CLSM의 결합재로 활용하기 위한 Red mud와 제지회의 적정혼합비를 산정하기 위해 KS L 5105에 의거하여 결합재의 압축강도시험을 실시하였다. 혼합되는 Red mud와 제지회의 혼합비에 따라 제작된 결합재를 50mm의 입방체 몰드에 타설하여 공시체를 제작하였으며, 양생 1일 후 탈형하여 목표양생일까지 습윤양생(온도 21°C, 상대습도 95% 이상)을 실시하였다. 압축강도시험은 목표양생일마다 실시하였으며, 각 양생일에서 3번의 시험을 실시하여 강도를 평가하였다.

3.3.3 유동성 시험

Red mud와 제지회를 혼합한 무시멘트 CLSM의 유동특성을 파악하기 위해 ASTM D 6103(2004)에 의거하여 유동성 시험을 실시하였다. 시험은 직경 75mm, 높이 150mm의 원형 몰드에 배합조건에 따라 제작된 CLSM을 다짐없이 채운 후 2~4초에 걸쳐 원형 몰드를 수직으로 올렸을 때 흘러나온 시료의 가장 큰 흐름 직경과 직각방향의 직경을 측정하여 두 측정값의 평균을 플로우 값으로 하였다. 두 직경의 측정차가 10% 이상인 경우 재실험을 실시하였으며, 시험은 함수비를 추가시켜가며 각 함수비에서 3회씩 실시하고 시험 종료 후 시료를 채취하여 함수비를 측정하였다.

3.3.4 일축압축강도시험

Red mud와 제지회를 혼합한 결합재의 혼합율과 양생방법에 따른 CLSM의 강도변화 특성 및 강도기준에 적합한 적정혼합비를 파악하기 위해 배합조건에 따라 시료를 제작하여 일축압축강도시험을 실시하였다. 배합조건에 따라 제작된 CLSM을 양생 1일 후 탈형하여 양생을 실시하였으며, 시료의 양생을 습윤양생(온도 21°C, 상대습도 95% 이상)과 수중양생(온도 21°C)으로 구분하여 실시하였다.

일축압축강도시험용 공시체 제작 시 공시체의 높이와 직경의 비에 따른 영향을 배제하기 위해 높이 10cm, 직경 5cm의 원형몰드를 사용하였으며, 일축압축강도시험 시 1분간 공시체 높이의 1%의 압축이 일어나도록 재하속도를 1mm/min으로 유지하고 일정 변형율마다 축하중을 측정하면서 공시체의 파괴가 발생할 때까지 시험을 실시하였다.

3.3.5 중금속 검출시험

Red mud와 제지회를 혼합한 무시멘트 CLSM 사용 후 중금속(*As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn*)에 의한 토양오염 발생가능성을 평가하기 위해 ICP-MS를 활용하여 중금속 검출시험을 실시하였다. 플라즈마 파워는 2.0kW, 냉각수 유속은 15 L/min, 분무가스 유속은 1.0L/min, 압력은 22kPa로 고정시킨 후 분석하였으며, 표준첨가법을 사용하여 시료에 포함된 불순물에 의한 간섭효과를 배제하였다(Koh et al., 2010).

4. 실험결과 및 분석

4.1 Red mud와 제지회의 혼합비에 따른 결합재의 압축강도 특성

Red mud와 제지회의 혼합비에 따른 결합재의 압축강도 시험결과는 Fig. 1과 같이 모든 혼합비에서 양생기간이 증가함에 따라 강도는 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 양생 7일까지의 강도증가가 매우 큰 것으로 나타났으며, 양생 7일 이후의 강도증가는 다소 낮아짐을 알 수 있다.

또한, Red mud 혼합비를 기준으로 Red mud 혼합비가 50%인 경우(Binder-5)에서 가장 높은 압축강도를 발휘하는 것으로 나타났으며, Red mud 혼합비 50%(Binder-5) 까지는 Red Mud 혼합비가 증가함에 따라 강도는 증가하는 것으로 나타났으나, 이후 Red mud 혼합비가 50% 이상인 경우(Binder-6~

Binder-9)에서는 Red mud의 혼합비가 증가함에 따라 강도는 저하되는 것으로 분석되었다. 따라서, CLSM의 결합재로 활용하기 위한 Red mud와 제지회의 적정혼합비는 중량비 기준으로 50 : 50으로 혼합한 경우가 가장 적합한 것으로 판단된다.

4.2 유동성 시험 결과 및 분석

결합재의 혼합율에 따른 CLSM의 유동특성을 파악하기 위해 배합조건에 따라 제작된 시료에 함수비를 추가시켜가며 시험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다.

모든 결합재의 혼합율에서 함수비가 증가함에 따라 플로우 값은 선형적으로 증가하는 경향으로 나타났으며, 유동성 기준(Flow 200mm)을 만족하기 위해 요구되는 함수비는 결합재의 혼합율에 따라 57.60~69.30%로 결합재의 혼합율이 증가함에 따라 유동성 기준을 만족하기 위해 요구되는 함수비는 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 화강풍화토에 비해 작은 입경과 높은 흡수력을 갖는 Red mud와 제지회의 물리적 특성에 따른 것으로 판단된다.

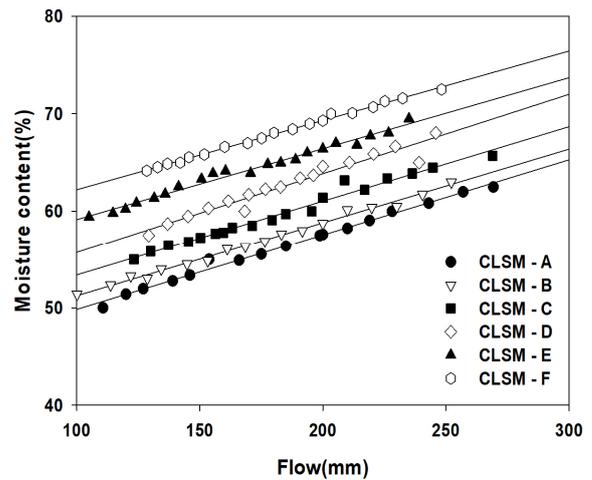


Fig. 2. Flow test results with regard to the mixing ratio of binder

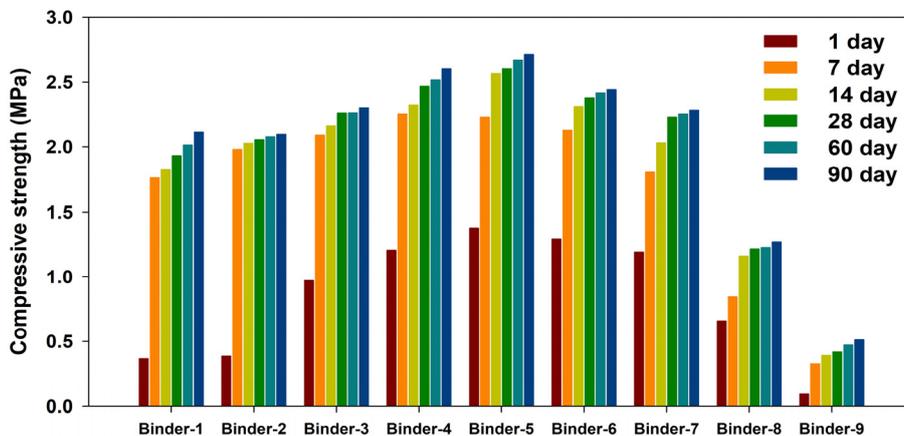


Fig. 1. Compressive strength of binder with regard to the mixing ratio of red mud and paper sludge ash

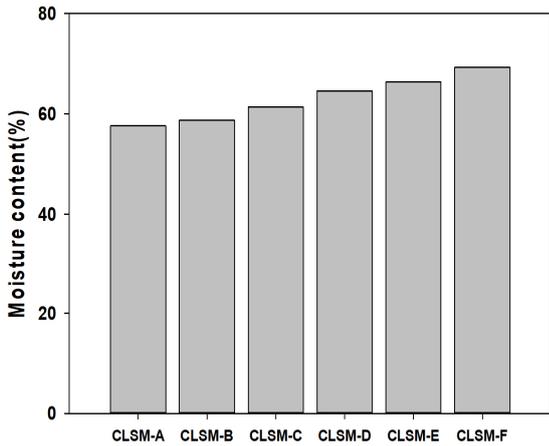
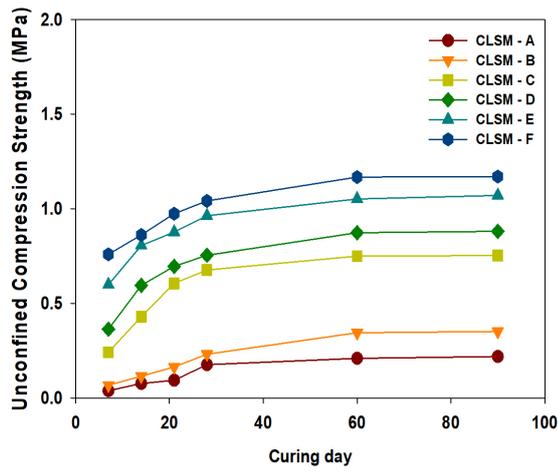


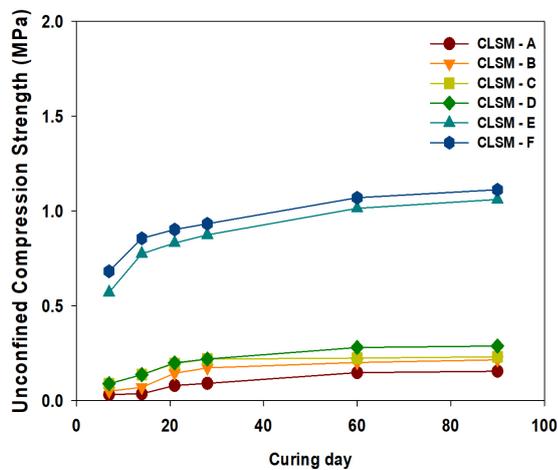
Fig. 3. Comparison of moisture content required for flowability criteria with regard to the mixing ratio of binder

4.3 일축압축강도시험 결과 및 분석

Red mud와 제지회를 혼합한 결합재의 혼합율과 양생기간에 따른 CLSM의 일축압축강도시험결과는 Fig. 4와 같이



(a) Moisture curing



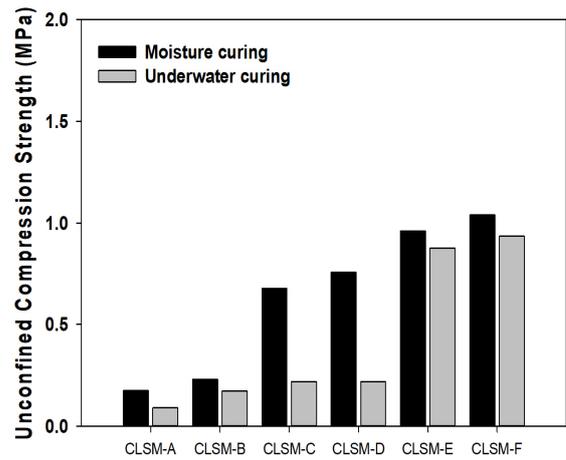
(b) Underwater curing

Fig. 4. Unconfined compressive strength of CLSM with regard to the mixing ratio of Binder

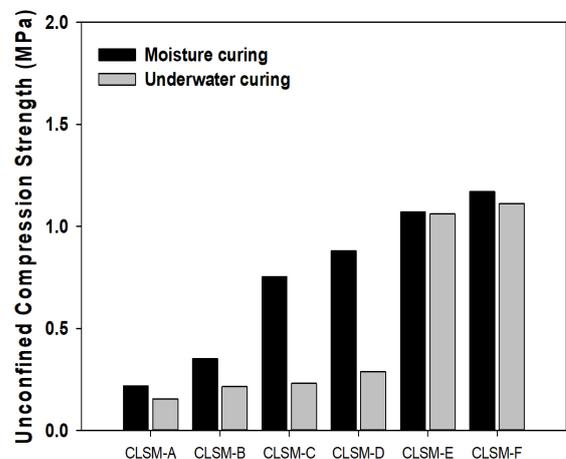
결합재 혼합율과 양생기간이 증가함에 따라 CLSM의 강도는 증가하는 것으로 나타났다.

습윤양생의 경우 결합재의 혼합율이 증가함에 따라 강도는 비교적 일정하게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 결합재 혼합율이 20~30%인 배합조건(CLSM-A~CLSM-B)을 제외한 모든 혼합율(CLSM-C~CLSM-F)에서 본 연구의 최소기준 강도를 만족하는 것으로 분석되었다. 반면, 수중양생의 경우 결합재 혼합율 50%(CLSM-D)를 기점으로 강도의 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 특히, 결합재 혼합율 50% 이하인 배합조건(CLSM-A~CLSM-D)의 경우 본 연구의 최소기준강도인 0.3MPa 보다 낮은 강도를 보이는 것으로 나타남에 따라 본 연구에서 활용하고자 하는 CLSM으로의 활용은 부적합한 것으로 판단된다.

또한, 습윤양생을 실시한 경우가 수중양생을 실시한 경우에 비해 양생 28일에서 1.11~3.09배, 양생 90일에서는 1.05~3.26배 높은 압축강도를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 이러한 경향은 결합재 혼합율이 50% 이하인 경우(CLSM-A~CLSM-D)에서 뚜렷하게 나타났으며, 결합재 혼합율이



(a) Samples cured for 28 days



(b) Samples cured for 90 days

Fig. 5. Comparison of U.C.S. with regard to the curing method

60% 이상인 배합조건(CSLM-E~CSLM-F)에서 습윤양생을 실시한 경우와 수중양생을 실시한 경우의 압축강도차는 미미한 것으로 분석되었다.

4.4 Red mud와 제지회를 혼합한 CLSM의 적정혼합비

Red mud와 제지회를 혼합한 CLSM의 적정혼합비를 결정하기 위한 일축압축강도시험결과, 결합재 혼합율이 30% 이하인 배합조건(CSLM-A~CSLM-B)의 경우 양생방법과 무관하게 본 연구의 최소기준강도보다 낮은 강도를 보이는 것으로 나타남에 따라 본 연구에서 활용하고자 하는 CLSM으로의 활용은 다소 어려울 것으로 판단된다. 또한, 결합재 혼합율이 40~50%인 경우(CSLM-C~CSLM-D) 습윤양생을 실시할 시 본 연구의 최소기준강도를 상회하는 결과를 보였으나, 수중양생을 실시할 시 기준강도보다 낮은 강도를 보이는 것으로 분석되었다. 따라서, 이상의 결과를 종합하면 강도기준으로 CLSM의 활용을 위한 결합재의 최적 혼합율은 60~70%(CSLM-E~CSLM-F)로 판단된다.

4.5 중금속 검출시험결과 및 분석

Red mud와 제지회를 결합재로 활용한 CLSM 사용 후 중금속에 의한 토양오염 발생가능성을 평가하기 위해 결합재 혼합율이 가장 높은 배합조건(CSLM-F)을 대상으로 중금속 검출시험을 실시하였으며, 그 결과는 Table 7과 같다. 국내 토양환경보전법에 규정된 토양오염우려기준 중 1지역과 비교한 결과는 모든 항목에서 기준치 이내인 것으로 나타났다.

Table 7. Result of Heavy metals leaching test

Elements	Concerned criteria (mg/kg)	CLSM (CSLM-F)
As	25	7.48
Cd	4	3.39
Cu	150	62.55
Ni	100	14.29
Pb	200	52.12
Zn	300	141.56

5. 결 론

산업부산물인 Red mud와 제지회를 혼합한 결합재의 적정혼합비와 이를 결합재로 활용한 CLSM의 공학적 특성을 파악하기 위해 Red mud와 제지회의 혼합비에 따른 결합재의 압축강도변화 특성과 결합재의 혼합율에 CLSM의 공학적 특성과 적정 혼합비를 산정하였으며, 산업부산물을 활용한

무시멘트 CLSM 사용 후 발생가능한 토양오염 가능성을 평가한 결과는 다음과 같다.

- (1) Red mud와 제지회의 혼합비에 따른 결합재의 압축강도 시험결과, 모든 혼합비에서 양생 7일까지의 강도증가가 크게 나타났으며, Red mud와 제지회의 혼합비가 50 : 50인 배합조건에서 가장 높은 압축강도를 보이는 것으로 나타났다.
- (2) 유동성 기준을 만족하기 위해 요구되는 함수비는 결합재 혼합율에 따라 57.60~69.30%로 나타났으며, 결합재의 혼합율이 증가함에 따라 유동성 기준을 만족하기 위해 요구되는 함수비는 증가하는 것으로 분석되었다.
- (3) 결합재 혼합율에 따른 CLSM의 압축강도 시험결과, 양생기간과 결합재 혼합율이 증가함에 따라 CLSM의 강도는 증가하는 것으로 나타났으며, 습윤양생을 실시한 경우 결합재 혼합율이 30% 이하인 배합조건에서, 수중양생을 실시한 경우 결합재 혼합율이 50%인 배합조건에서 본 연구의 최소 기준강도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다.
- (4) 양생조건별 강도변화 특성은 습윤양생을 실시한 경우가 수중양생을 실시한 경우에 비해 양생일수 28일에서 1.11~3.09배, 양생일수 90일에서는 1.05~3.26배 높은 강도를 보였으며, 이러한 경향은 결합재 혼합율이 50% 이하인 배합조건에서 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.
- (5) 따라서, 결합재로 활용하기 위한 Red mud와 제지회의 적정혼합비는 중량비 기준으로 50 : 50이며, CLSM으로 활용하기 위한 결합재의 적정혼합율은 60~70%가 가장 적합하다고 판단된다.

References

1. ACI Committee 229 (2005), Controlled Low Strength Materials (CLSM), American Concrete Institute, 229R-2, pp. 1~12.
2. ASTM D 6103 (2004), Standard test method for flow consistency of controlled low strength material (CLSM), West conshohocken, PA. pp. 1~3.
3. Japan Civil Engineering Research Institute (2007), Technical Notes of Fluidization Surplus Soil.
4. Kang, S. P. (2012), A study on the usability of red mud as activator of alkali-activated cementless Binder, Journal of the architectural institute of Korea structure and construction, Vol. 28, No. 11, pp. 133~140 (In Korean).
5. Kang, S. P. and Hwang, B. I. (2018), Strength and efflorescence characteristics of alkali-activated slag cement mortar with red mud according to curing conditions, Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 18, No. 3, pp. 267~275 (In Korean).

6. Kang, S. P. and Kang, H. J. (2017), Pore and efflorescence characteristics of alkali activated slag-red mud cement mortar depending on red mud content, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 17, No. 3, pp. 261~268 (In Korean).
7. Kang, S. P. and Kang, H. J. (2019), Characteristics of redmud ceramics by sintering temperature and raw materials of clay bricks, *Journal of the architectural institute of Korea structure and construction*, Vol. 30, No. 10, pp. 199~206 (In Korean).
8. Kang, S. P. and Kwon, S. J. (2017), Effects of red mud and alkali-activated slag cement on efflorescence in cement mortar, *Construction and Building Materials*, Vol. 113, No. 15, pp. 459~467.
9. Koh, T. H., Lee, S. G., Shin, M. H., Kim, B. S., Lee, J. K. and Lee, T. Y. (2010), "Evaluation for contents of contaminants and leaching characteristics of bottom ash", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 11, No. 6, pp. 77~83 (In Korean).
10. Lee, Y. A., Lee, H. J. and Kim, Y. S. (2002), A study on the application of paper fly ash as stabilization/hardening agent, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 3, No. 2, pp. 23~33(In Korean).
11. Lee, Y. S., Kim, T. Y. and Lee, B. J. (2020), Engineering characteristics of CLSM with regard to the particle size of bottom ash, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 21, No. 10, pp. 5~10 (In Korean).
12. Maria, M. and Shamil, S. (2021), Alkali-acticated slag concrete with paper industry waste, *Waste Management and research : the journal for a sustainable circular economy*, Vol. 39, No. 3, pp. 466~472.
13. Susan, A. B., Richard, J. B., Oday, H. H., Andrew, H. and John, P. (2014), Paper sludge ash as precursor for production of alkali-activated materials, 2nd International conference on advances in chemically activated materials, Changsha, China, pp. 1~8.