

# 저희의 입도변화에 따른 CLSM의 공학적특성

## Engineering Characteristics of CLSM with Regard to the Particle Size of Bottom Ash

이 용 수<sup>1)</sup> · 김 태 연<sup>1)</sup> · 이 봉 직<sup>†</sup>

Yongsoo Lee · Taeyeon Kim · Bongjik Lee

Received: July 21<sup>st</sup>, 2020; Revised: August 5<sup>th</sup>, 2020; Accepted: September 30<sup>th</sup>, 2020

**ABSTRACT** : As the demand for the recycling of industrial by-products increases due to various environmental restrictions including the prohibition of ocean disposal, various studies regarding the recycling of industrial by-products are currently being carried out. One of the industrial by-product, coal ash is produced from thermal power generation; studies on the recycling of fly ash have been actively carried out and it is currently recycled in various fields. In the case of bottom ash, however, only a portion of the total amount generated is primarily processed into a particle size of 2~4mm or less than 2mm to be used for gardening purpose and light weight aggregate and so on. The remaining amount is buried at ash disposal sites. Therefore, various studies are needed to develop measures to use bottom ash. This study aimed at identifying the optimal particle size and mixing ratio of bottom ash to be used as CLSM aggregate. To this end, it evaluated the usability of bottom ash as CLSM aggregate, by investigating the flowability and strength change characteristics of CLSM produced with regard to the mixing ratio of weathered granite soil and bottom ash, particle size of bottom ash to be mixed and soil binder addition rate and conducting a heavy metal leaching test.

**Keywords** : Bottom ash, CLSM, Flowability, Uniaxial compressive strength

**요 지** : 해양투기 금지와 같은 여러 환경적 제약으로 인해 산업부산물의 재활용에 대한 요구가 증가함에 따라 이들의 재활용에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 이 중 석탄회는 화력발전소에 따른 산업부산물로 석탄회중 비회의 재활용을 위한 연구는 활발히 진행되어 다방면에서 재활용되는 반면 저희의 경우에는 발생량의 일부분만 2~4mm 또는 2mm 이하의 입도로 1차 가공하여 주로 원예용 및 경량골재 등에 사용되고 대부분은 회처리장에 매립됨에 따라 저희의 활용방안을 모색하기 위한 다양한 연구가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 CLSM의 골재로 활용하기 위한 저희의 최적입도와 혼합비를 도출하기 위하여 화강풍화토와 저희의 혼합비, 혼합되는 저희의 입도 및 고결제 첨가율에 따라 제작된 CLSM을 대상으로 유동특성, 강도변화 특성 등을 구명하고, 중금속 검출시험을 수행하여 CLSM 골재로 저희의 활용성을 평가하였다.

**주요어** : 저희, CLSM, 유동성, 일축압축강도

## 1. 서 론

해양투기 금지와 같은 여러 환경적 제약으로 인해 산업부산물의 재활용에 대한 수요가 증가함에 따라 이들의 재활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 여러 산업부산물 중 석탄회는 화력발전소에 따른 산업부산물로 매년 재활용률이 증가하고 있으나, 이는 석탄회중 많은 연구가 진행되어 여러 방면에서 재활용되는 비회의 경우로, 저희의 경우에는 발생량의 일부분은 2~4mm 또는 2mm 이하의 입도로 1차 가공하여 원예용, 경량골재 등으로 사용되나, 대부분 재활용되지 못하고 회처리장에 매립됨에 따라 저희에 대한 재활용 요구가 증가하고 있다. 이에 저희의 재활용률

을 높이기 위하여 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 특히 최근 저희를 혼합골재로 활용한 CLSM(Controlled Low Strength Materials)에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Park et al., 2019a).

일반적으로 관매설공사는 관 등의 매설물을 시공하고 나머지 부분을 모래나 토사로 되메움하는 방식으로 진행된다. 그러나 매설물 주변 다짐의 어려움 및 다짐효율의 저하 등 여러 문제가 발생되고 있으며, 되메우기 공사 시 관 주변의 다짐불량은 지속적인 상부하중에 의해 관에 응력집중을 유발하여 관이 파손되고 궁극적으로 도로함몰의 원인으로 발전하게 된다(Park et al., 2019b). 이러한 현상은 박스구조물과 교대 및 용벽 등과 같이 다짐효율이 좋지 않은 구조물의

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

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

되메우기 공사에서도 유사하게 나타난다(Lin et al., 2007).

CLSM은 위와 같은 문제를 해결할 수 있는 공법으로 모래나 토사를 이용한 채움재에 비해 자기수평성(Self-leveling), 자기다짐성(Self-compacted), 유동성(Flowability), 강도조절, 시공 후 재굴착 및 공기의 단축 등 많은 장점이 있다(ACI 229, 2005).

이에 본 연구에서는 CLSM 골재로 저회를 활용하기 위하여 현재 공장에서 가공된 생산품을 대상으로 CLSM 골재에 적합한 저회의 최적입도와 배합비를 도출하기 위하여 화강풍화토와 저회의 혼합비, 혼합되는 저회의 입도 및 고결제의 첨가율에 따라 제작된 CLSM을 대상으로 유동특성, 강도변화 특성 등을 평가하였다. 또한, 증금속 검출시험을 수행하여 CLSM 골재로 저회를 활용 시 발생할 수 있는 토양오염 가능성을 평가하였다.

## 2. CLSM

### 2.1 CLSM의 설계기준

미국콘크리트협회에서는 CLSM의 압축강도를 8.3MPa 이하로 정의하고 있으나, 향후 재굴착이 필요한 경우 일축압축강도를 2.1MPa 이하로 설정하고 있다(ACI committee 229, 2005). 유동성에 대한 설계기준은 ASTM D 6103에 의거한 플로우 값으로 정하고 있으며, 보통 150~200mm 값의 범위에 있고, 저유동의 경우 150mm 이하, 고유동의 경우 200mm 이상으로 기준으로 하고 있다.

일본의 경우 CLSM을 “유동화 처리토”로 명명하여 사용되고 있다. 일반적으로 유동화 처리토는 현장발생토에 물과 고화제를 혼합하여 사용되며, 유동화 처리토의 활용 실적도 많은 상태이다(Kang et al., 2019). 유동화 처리토의 강도는 사용목적에 따라 0.1~0.6MPa까지 요구되고 있으며, 매설관이 차도하부인 경우 교통개방 시 0.14MPa 이상, 28일 이후 0.6MPa 이하를 요구하고, 소규모 공동충전의 경우 0.3MPa 이상, 지하공동 충전 시는 0.1MPa 이상의 강도품질을 요구한다(Japan Civil Engineering Research Institute, 2007).

유동성은 JHS A 313에 의거한 플로우 값으로 110mm~200mm 이상까지 사용목적에 따라 다양하게 요구하고 있으며, 매설관의 되메우 용은 타설 시 140mm 이상으로 요구하고 있다.

### 2.2 본 연구의 적용기준

본 연구에서는 미국과 일본의 CLSM의 설계기준을 참고하여 Table 1과 같이 CLSM의 품질기준을 설정하였다. 본

연구에서 활용하고 하는 CLSM의 사용목적이 대부분 관 등과 같은 지하매설물의 되메우재로 사용되는 것을 감안하여 유동성의 경우 ASTM D 6103에 의거한 플로우 값 200mm, 일축압축강도의 경우에는 향후 재굴착을 고려하여 28일의 일축압축강도를 0.6MPa 이하로 설정하였다. 또한 빠른 경화특성을 만족하기 위해 1일 재령 후 0.14MPa 이상, 재령 7일에서는 0.3MPa 이상으로 설정하였다.

Table 1. CLSM design criteria

Flowability	200mm
Compressive strength	Curing 1 day : greater than 0.14MPa
	Curing 7 day : greater than 0.30MPa
	Curing 28 day : less than 0.60MPa

## 3. 실내실험 및 방법

### 3.1 재료특성

#### 3.1.1 화강풍화토

실험에 사용된 화강풍화토의 물리적특성을 평가하기 위하여 체분석, 비중 및 다짐시험을 실시한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Characteristics of weathered granite soil

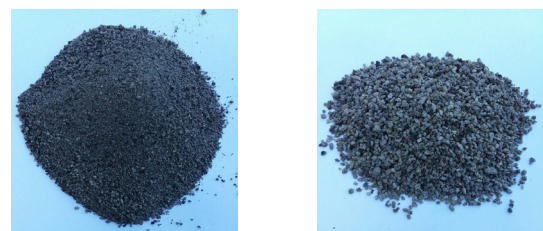
USCS	SM
Specific gravity	2.68
O.M.C. (%)	10.78
$\gamma_{dmax}$ ( $kN/m^3$ )	19.01

#### 3.1.2 저회

실험에 사용된 저회는 영흥화력발전소에서 발생한 산업부산물로 현재 저회의 재활용을 위해 공장에서 생산되고 있

Table 3. Chemical characteristics of bottom ash

Chemical components					
$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$
54.6	23.4	8.6	4.97	1.5	0.02



(a) Less than 2mm

(b) 2~4mm

Fig. 1. Bottom ash

는 가공품인 입도 2~4mm, 2mm 이하의 두 가지 저회와 이들 두 가지를 혼합하여 제작한 입도 4mm 이하 등 3가지 입도를 대상으로 실험을 실시하였다.

Table 4. Physical characteristics of bottom ash

Item	Less than 4mm	Less than 2mm	2~4mm
U.S.C.S.	SP	SP	SP
$C_u$	6.21	3.55	1.55
$C_g$	0.64	0.93	0.91
Specific gravity	2.04	2.07	1.93

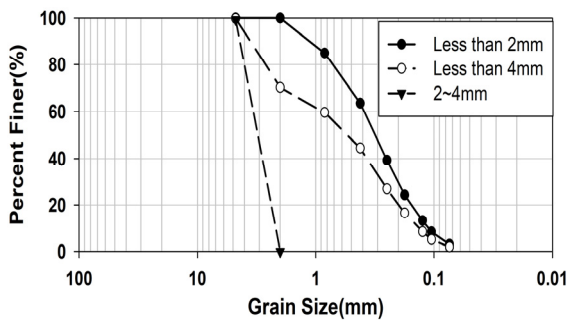


Fig. 2. Grain size distribution curve of bottom ash

### 3.1.3 고결제

실험에 사용된 고결제는 다공성 실리카( $SiO_2$ )와 탄산칼슘( $CaCO_3$ )을 배합하여 제작된 재료로 일반적인 시멘트에 비해 pH지수가 낮고 초기강도의 발현이 우수하며, 용출시험 시 고결제가 포함하고 있는 납( $Pb$ )과 시안( $CN$ )이외의 유해물질이 검출되지 않는다는 장점이 있다(Oh et al., 2016).

Table 5. Physical and chemical characteristics of soil binder

Chemical component (%)		Physical characteristics	
$SiO_2$	20.07	Specific gravity	3.08
$Al_2O_3$	5.21	Blaine ( $cm^2/g$ )	120
$Fe_2O_3$	2.96	Hydration heat ( $cal/g$ )	14
$MgO$	2.67	Setting time (min)	Initial
$CaO$	63.08		
$SO_3$	2.98		Final
IG-LOSS	2.67		

Table 6. Summary of CLSM mixing design

Mixture type	Mixing ratio		Particle size of bottom ash	Eco-friendly soil binder (wt, %)	Curing time (days)
	Bottom ash (wt, %)	Weathered granite soil (wt, %)			
BA75WGS25	75	25	Less than 4mm, Less than 2mm, 2~4mm	3, 5, 7	1, 7, 28
BA50WGS50	50	50			
BA25WGS75	25	75			

## 3.2 실험방법

### 3.2.1 배합비

저회의 혼합비와 혼합되는 저회의 입도에 따른 CLSM의 특성을 파악하기 위하여 Table 6과 같이 CLSM을 조성하였으며, 혼합되는 저회의 입도(2mm 이하, 2~4mm 및 두 가지 저회를 혼합하여 제작한 4mm 이하)와 저회와 화강풍화토의 혼합비(저회 : 화강풍화토(중량비(%)) = 25 : 75, 50 : 50, 75 : 25) 및 고결제 첨가율(고결제 첨가량/총 중량(%)) = 3, 5, 7)을 주요 변수로 하였다.

### 3.2.2 유동성시험

배합비에 따른 CLSM의 유동특성을 파악하기 위하여 ASTM D 6103(2004)에 의거하여 시험을 실시하였다. 비흡수성 판 위에 직경 75mm, 높이 150mm의 원통을 올리고 혼합비에 따라 제작한 CLSM을 무다짐으로 채운 후 2~4초에 걸쳐 원형몰드를 수직으로 올렸을 때 흘러나온 시료의 가장 큰 흐름직경과 직각 방향의 직경을 측정하여 두 지름의 평균값을 플로우 값으로 하였다. 양 지름의 측정값 차이가 10% 이상인 경우에는 재실험을 실시하였으며, 시험은 함수비를 추가시켜가며 각 함수비에서 3회씩 실시하고 시험 종료 후 시료를 채취하여 함수비를 측정하였다.



Fig. 3. View of flow test (ASTM D 6103, 2004)

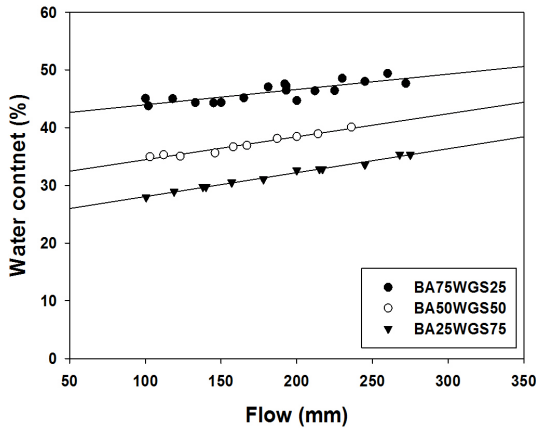
### 3.2.3 일축압축시험

배합비에 따라 제작된 CLSM을 양생 1일 후 탈형하여 재령일까지 기건양생을 실시하였으며, 시료 제작 시 공시체의 크기에 따른 강도의 영향을 배제하기 위하여 높이 20cm, 내경 10cm인 몰드를 사용하여 제작하였다. 일축압축강도 시험은 1분간 공시체의 높이의 1%의 압축이 일어나도록 재하

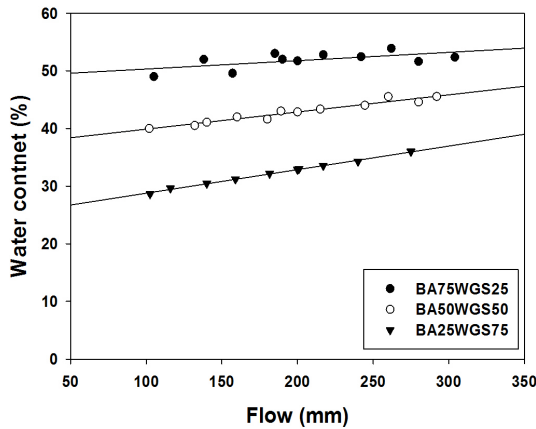
속도를 2mm/min으로 유지하고 일정 변형률마다 축하중을 측정하면서공시체의 파괴가 발생할 때까지 시험을 실시하였다.

### 3.2.4 중금속 검출시험

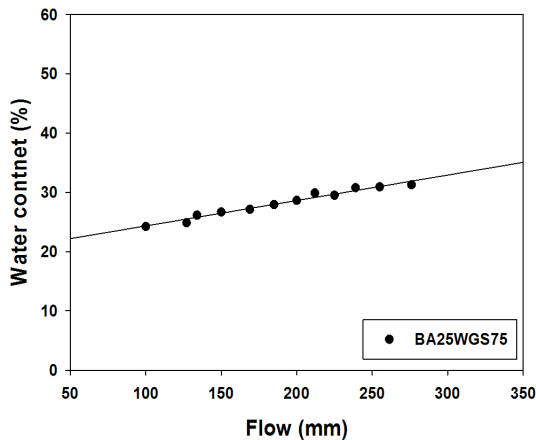
저회를 골재로 활용한 CLSM의 중금속(*As*, *Cd*, *Cr*, *Cu*, *Ni*, *Pb*, *Zn*) 검출여부를 파악하기 위해 ICP-MS를 활용하



(a) When the particle size of bottom ash is less than 4mm



(b) When the particle size of bottom ash is less than 2mm



(c) When the particle size of bottom ash is 2~4mm

Fig. 4. Flow test results with regard to the mixing ratio of bottom ash

여 분석을 실시하였다. 시료에 포함된 불순물에 의한 간섭 효과를 배제하기 위하여 표준첨가법을 사용하였으며, 측정 시 플라즈마 파워는 2.0kW, 냉각수 유속은 15L/min, 분무 가스 유속은 1.0L/min, 압력은 22kPa로 고정시킨 후 분석을 실시하였다(Koh et al., 2010).

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 유동성시험 결과 및 분석

저회의 입도변화에 따른 저회 혼합 CLSM의 유동특성을 파악하기 위해 배합비에 따라 제작된 시료에 함수비를 추가시켜 가며 유동성시험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다.

유동성 기준을 만족하기 위해 요구되는 함수비는 혼합된 저회의 입도가 4mm 이하인 경우 저회 혼합비에 따라 32.61~44.70%, 2mm 이하인 경우 32.86~51.75%로 나타났다. 특히, 혼합된 저회의 입도가 2~4mm인 경우 BA25WGS75를 제외한 나머지 배합비에서 재료분리로 인해 CLSM으로 조성되지 않았다. 따라서 2~4mm 입도를 갖는 저회를 CLSM의 골재로 활용한 경우 저회의 혼합비를 25% 이하로 설정하여 활용할 수 있으나, 다른 입도의 저회를 활용한 경우에 비해 저회의 사용량이 현저히 작아짐으로 저회의 재활용률을 높이기 위해서는 다른 입도의 저회를 사용하는 것이 더욱 적합하다고 판단된다.

또한, 혼합되는 저회의 입도와 관계없이 모든 경우에서 저회의 혼합비가 증가할 수 록 유동성 기준을 만족하기 위한 함수비는 증가하였으나, 저회의 혼합비가 75%인 경우 함수비 증가에 따른 플로우값이 일정한 경향을 보이지 않았다. 따라서 저회의 혼합율이 75%인 경우 저회의 입도와 무관하게 유동성에 대한 품질관리가 어려워 CLSM으로 활용하기에 적합하지 않음을 알 수 있다.

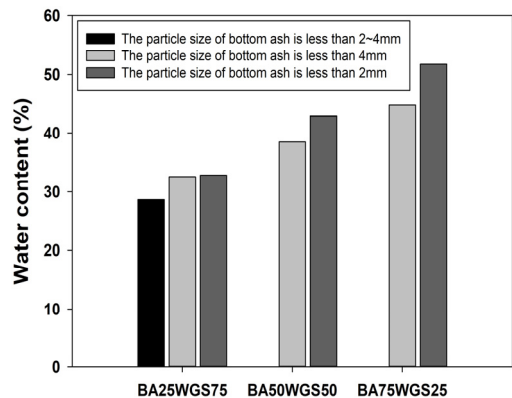


Fig. 5. Comparison of moisture content required for flowability criteria with regard to the particle size of the bottom

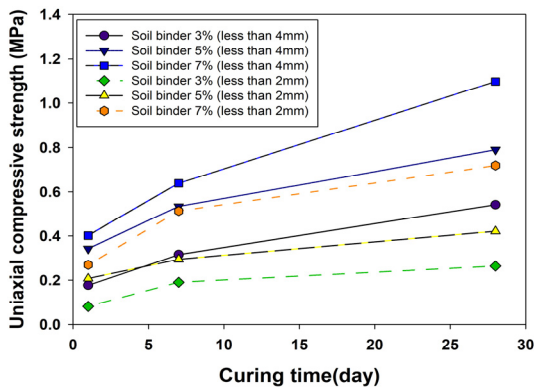
## 4.2 일축압축강도시험 결과 및 분석

일축압축강도시험은 유동성 시험을 통해 확인된 저회의 입도가 2~4mm인 경우와 품질관리가 어려워 CLSM으로 활용이 적합하지 않은 저회 혼합율 75%인 경우를 제외하고 실시하였으며, 저회의 입도와 배합비 및 재령일에 따른 시험결과는 Fig. 6과 같다.

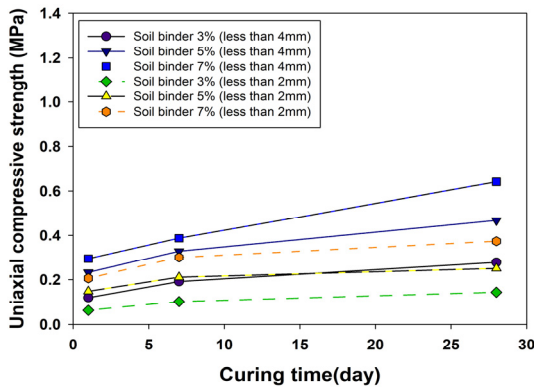
Fig. 6에 도시된 바와 같이 일축압축강도는 저회의 입도와 무관하게 저회의 혼합비가 증가함에 따라 저하되는 것으로 나타났으며, 재령일에 따른 강도증가폭도 저하되는 것으로 나타났다. 특히 저회의 혼합비가 증가함에 따라 재령 초기인 재령 7일까지의 강도증가가 현저히 저하되는 경향을 보였으며, 혼합되는 저회의 입도가 4mm 이하인 경우가 2mm 이하인 경우보다 더욱 큰 강도저하를 보였다.

또한, 혼합되는 고결제의 첨가율이 증가함에 따라 모든 경우에서 일축압축강도는 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 강도증가는 혼합되는 저회의 입도가 2mm 이하인 경우보다 4mm 이하인 경우에서 더욱 크게 나타났으며, 저회의 혼합비가 낮을수록 더욱 뚜렷하게 나타났다.

재령 28일의 압축강도를 기준으로 혼합된 저회의 입도가 4mm 이하인 경우가 2mm 이하인 경우에 비해 배합비에 따



(a) BA25WGS75



(b) BA50WGS50

Fig. 6. Uniaxial compression strength with regard to the mixing ratio

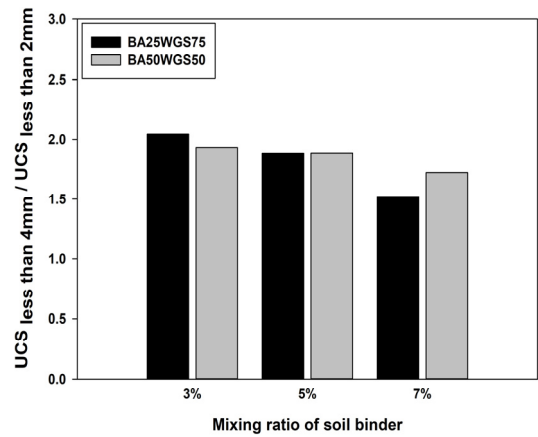


Fig. 7. Uniaxial compression strength ratio of CLSM with regard to the particle size of bottom ash (samples cured for 28days)

라 1.52~2.04배 큰 일축압축강도를 보이는 것으로 분석되었다. 따라서, 혼합된 저회의 입도가 4mm 이하인 경우가 2mm 이하인 경우보다 적은 고결제 혼합량으로 소요강도를 발휘할 수 있어 경제적으로 유리하나, 혼합공정이 추가되므로 현장요건에 따라 적절한 입도를 선택하여 사용해야 할 것으로 판단된다.

## 4.3 최적배합비

CLSM의 골재로 활용하기 위한 저회의 최적 입도와 배합비를 결정하기 위한 유동성 시험결과, 혼합되는 저회의 입도와 무관하게 저회의 혼합비가 75%인 경우 유동성에 대한 품질관리가 어려워 CLSM으로 활용하기에 적합하지 않을 것으로 판단된다. 또한 혼합되는 저회의 입도가 2~4mm인 경우 저회 혼합비 50% 이상에서 재료분리로 인해 CLSM으로 조성이 되지 않음에 따라 저회의 입도가 2~4mm인 경우 저회의 혼합비를 25% 이하로 설정하여 CLSM의 골재로 사용할 수 있으나, 다른 입도의 저회를 사용한 경우에 비해 저회의 사용량이 현저히 낮아 CLSM의 골재로는 적합하지 않을 것으로 판단된다.

다음으로 일축압축강도 평가결과는 혼합된 저회의 입도가 4mm 이하인 경우 대부분 재령 1일 기준강도를 만족하였으나, 재령 7일에서 저회의 혼합비가 75%인 모든 경우와 저회의 혼합비가 50%인 일부 경우에서 강도기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, 재령 28일에서 고결제 첨가율 5~7%인 일부 경우에서 기준 최대 강도인 0.6MPa를 상회하는 결과를 보였다. 또한, 저회의 입도가 2mm 이하인 경우에는 고결제 첨가율이 3%인 모든 경우와 첨가율이 5%인 일부에서 재령 1일 기준강도를 만족하지 않는 것으로 나타났으며, 재령 7일에서는 고결제 첨가율 5%인 모든 경



우에서 기준강도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

이상의 결과와 저회의 재활용량 등을 고려할 때 저회를 골재로 활용한 CLSM으로 최적 배합비는 저회와 화강풍화토의 혼합비를 50 : 50(중량비)으로 하며, 혼합되는 저회의 입도가 4mm 이하인 경우 고결제 5%, 2mm 이하인 경우 7%를 혼합하는 것이 적합하다고 판단된다.

#### 4.4 중금속검출 시험결과 및 분석

저회를 골재로 활용한 CLSM 사용 후 발생할 수 있는 토양오염 가능성을 평가하여 규정된 토양오염우려기준과 비교 평가한 결과 Table 7과 같이 토양오염 우려기준치 이내인 것으로 나타났다.

Table 7. Result of heavy metals leaching test

Elements	Concerned criteria (mg/kg)			BA50WGS50 Binder 7%
	1	2	3	
As	25	50	200	N.D.
Cd	4	10	60	N.D.
Cu	150	500	2000	15.6
Cr	5	15	40	N.D.
Ni	100	200	500	11.2
Pb	200	400	700	6.2
Zn	300	600	2000	41.2

## 5. 결 론

CLSM 골재로 활용하기 위한 저회의 최적 입도와 배합비를 도출하기 위하여 저회와 화강풍화토의 혼합비, 저회의 입도 및 고결제 첨가율에 따른 CLSM 공학적 특성과 사용 후 발생할 수 있는 토양오염 가능성을 평가한 결과는 다음과 같다.

- (1) 저회의 입도변화에 따른 저회 혼합 CLSM의 유동성 시험 결과, 혼합된 저회의 입도가 2~4mm인 경우 BA25WGS75를 제외한 나머지 배합비에서 재료분리로 인해 CLSM으로 조성이 되지 않았다. 따라서 저회의 입도가 2~4mm인 경우에는 CLSM의 골재로 사용이 적합하지 않은 것으로 판단된다. 또한, 모든 경우에서 저회의 혼합비가 75% 이상인 경우 유동성에 대한 품질관리가 어려워 CLSM으로 활용하기에 적합하지 않을 것으로 나타났다.
- (2) 동일한 저회 혼합비에서 혼합되는 저회의 입도가 4mm 이하인 경우가 2mm 이하인 경우에 비해 더욱 큰 압축

강도를 보였다. 따라서 혼합된 저회의 입도가 4mm 이하인 경우가 2mm 이하인 경우보다 적은 고결제 첨가량으로 소요강도를 발휘할 수 있어 경제적으로 유리하나, 혼합공정이 추가됨으로 현장여건에 따라 적절한 입도를 선택하여 사용해야 할 것으로 판단된다.

- (3) 강도발현 범위, 저회의 재활용량 및 고결제의 첨가율 등을 고려할 때, CLSM으로 활용하기 위한 저회와 화강풍화토의 최적혼합비는 중량비 기준으로 50 : 50이며, 혼합되는 저회의 입도가 4mm 이하인 경우 고결제 5%, 2mm 이하인 경우에는 7%를 혼합하는 것이 가장 적합하다고 판단된다.
- (4) 중금속 검출시험을 실시하여 최적배합비로 제작된 CLSM 사용 후 발생할 수 있는 오염가능성을 평가한 결과, 모든 항목에서 기준치 이내인 것으로 나타났다.

## 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. H., Ryu, Y. S. and Han, J. G. (2019), "Tunnel filling method using rapid hardening high flow CLSM (Controlled Low Strength Material)", Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 31, No. 5, pp. 48~56 (In Korean).
5. 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).
6. Lin, D. F., Luo, H. L., Wang, H. Y. and Hung, M. J. (2007), "Successful application of CLSM on a weak pavement base/subgrade for heavy truck traffic", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 21, No. 1, pp. 70~77.
7. Oh, S. W., Kim, H. S., Bang, S. T. and JO, H. D. (2016), "Evaluation on the effect of soil pavement mixing friendly-soil binder", Annual Conference of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 17, No. 3, pp. 18~25 (In Korean).
8. Park, G. H., Kim, T. Y., Lee, Y. S. and Lee, B. J. (2019a), "Engineering characteristics of CLSM using bottom ash and eco-friendly soil binder", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 20, No. 5, pp. 23~29 (In Korea).
9. Park, J. J., Lee, I. H., Shin, E. C. and Hong, G. W. (2019b), "A study on unconfined compressive strength of CLSM with paper sludge ash", Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 18, No. 4, pp. 253~262 (In Korea).