

## 굴착잔토를 재활용한 지중전력구조물 급결성 유동화 뒷채움재의 최적배합비 Optimal Mixture Contents of Accelerated Flowable Backfill Materials Using Surplus Soil for Underground Power Utilities

천선호<sup>1)</sup>, Seon-Ho Cheon, 정상섭<sup>2)</sup>, Sang-Seom Jeong, 이대수<sup>3)</sup>, Dae-Soo Lee, 조화경<sup>4)</sup>, Hwa-Kyung Cho

<sup>1)</sup> 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

<sup>2)</sup> 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

<sup>3)</sup> 한국전력공사 전력연구원 책임연구원, Chief Researcher, KEPI/KEPCO

<sup>4)</sup> 한국전력공사 전력연구원 일반연구원, Researcher, KEPI/KEPCO

**SYNOPSIS** : This study is to evaluate the physical and mechanical characteristics of flowable backfill and search for the optimal mixture contents of it used for constructing underground power utilities. Flowable backfill is known as soil-cement slurry, void fill, and controlled low-strength material(CLSM). The benefits of CLSM include reduced equipment costs, faster construction, re-excavation in the future, and the ability to place material in confined spaces such as narrow parts nearly impossible for compaction or perimeter of underground power cables. The flowable slurry mixtures made with 9 types of soil and 6 types of accelerated mixtures in the laboratory were evaluated for bleeding, flowability, heat resistance, and unconfined compressive strength to meet the aim values of this study.

**Keywords** : optimal mixture content, flowable backfill, controlled low-strength material(CLSM), soil-cement slurry, underground power utility

### 1. 서 론

도심지의 지중구조물은 주로 지중전력케이블, 상하수도관, 도시가스관, 각종 통신구등의 지중매설관이 주류를 이루고 있으며, 굴착 시 발생하는 잔토를 지중화 공사에 재이용하기 보다는 거의 폐기처분 하고, 뒷채움재로 다시 양질의 모래를 구입하여 사용하고 있다. 굴착 잔토의 폐기 처분과 모래의 채취는 환경에 악영향을 미치고 있으며, 뒷채움재 다짐 시 발생하는 소음과 진동 그리고 관하부 다짐이 매우 어렵고, 다짐효율이 떨어지는 문제점을 발생시키고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법 중 하나가 flowable backfill(slurry soil-cement, controlled low-strength material)을 이용하는 것이다.

CLSM(controlled low-strength material)의 장점은 다짐이 필요하지 않는 빠른 시공성, 자원의 재활용을 통한 경제성, 그리고 작업자에 대한 안전성이다. 지중전력구조물을 위한 유동성 뒷채움 재료로서 CLSM을 고려할 때 가장 중요한 특성은 유동성, 일축압축강도, 그리고 열저항성이다. 유동성은 시공 시 작업인원과 생산성에 매우 밀접한 관계가 있다. 일축압축강도는 시공 성과와 장기적으로 재굴착성을 나타내는 지표로 쓰인다. 열저항성은 전기의 흐름으로 지중전력구조물에서 열이 지중으로의 방산성을 나타내는 지표이다. 현재 미국과 일본에서는 굴착잔토, 플라이애쉬 및 폐주물사, 시멘트 및 혼화제를 차별적으로 혼합하여 시공 목적에 적합한 유동성 및 강도발현성을 갖는 유동화 저강도 뒷채움재에 대한 연

구가 진행 중에 있다(Wayne, 1994; Takahashi, 1994). 국내에서는 이를 지중매설관, 옹벽(조재운 et. at., 2000; 박재현 et. at, 2004) 등의 뒷채움 재료로 적용한 경우는 있으나 대부분 굴착잔토의 재활용율이 매우 낮고 국내 토질 조건을 고려한 연구는 매우 미비하였다. 또한, 대부분의 지중화 공사가 도심지에서 주로 야간 시간에 차량소통이 적은 틈을 이용하여 단시간에 이루어지는 상황을 고려할 때, 시공의 신속성, 단시간에 고결되는 뒷채움재의 필요성, 유지 및 보수를 위한 재굴착성, 그리고 열방산성을 고려한 유동화 뒷채움재에 대한 연구는 매우 미비하다.

따라서, 본 연구에서는 지중 전력구조물 공사에서 발생하는 잔토를 재활용하기 위하여 지중전력구조물의 뒷채움재료로 사용 할 수 있는 유동화 되메움 재료인 고화재와 흙 혼합재료의 물리적 성질과 블리딩률, 유동성, 일축압축강도, 열저항성 등의 역학적 성질을 만족하는 유동성 뒷채움재의 최적배합비를 산정하는데 그 목적이 있다.

## 2. 대상시료

### 2.1 흙

기존에 국내에서 사용되는 지중 전력구조물 뒷채움 재료는 양질의 토사 또는 모래를 이용하여 다짐을 수행하고 있다. 본 연구는 뒷채움 재료로서 굴착잔토의 재활용을 목표로 하기 때문에 친층에 존재하는 토사를 대표할 수 있는 흙을 선정하였다. 대상시료(표 1)는 유동화 되메움 재료로 규정되어 있는 ASTM C33의 최대 세립분 함량(10%)을 함유한 순수 풍화토 100%, 풍화토에 점토를 10-30% 함유한 혼합토, 풍화토에 자갈을 10-30% 함유한 혼합토, 강모래, 그리고 순수 점토 100%를 대상으로 시험을 수행하였다.

대상 시료의 입도분포는 그림 1, 그림 2와 같으며 최대 입경은 자갈 13mm 이하, 강모래와 풍화토 4.75mm 이하, 그리고 점토 0.075mm이하로 제한하였다.

표 1. 시료 및 물성

번호	대상시료	비중	액성 한계 (%)	소성 한계 (%)	소성 지수	No.200 통과 중량 백분율(%)	흙의 분류 (USCS)
①	점토 100%	2.609	71.58	29.29	42.28	100	CH
②	풍화토 70% + 점토 30%	2.643	37.24	23.75	13.48	31.15	SC
③	풍화토 80% + 점토 20%	2.648	34.91	23.38	11.54	21.79	SC
④	풍화토 90% + 점토 10%	2.653	32.58	22.93	9.62	13.32	SM
⑤	풍화토 100%	2.658	30.82	-	-	10	SP-SM
⑥	풍화토 90% + 13mm자갈 10%	2.652	30.82	-	-	9.25	SP-SM
⑦	풍화토 80% + 13mm자갈 20%	2.646	30.82	-	-	8.28	SP-SM
⑧	풍화토 70% + 13mm자갈 30%	2.641	30.82	-	-	7.88	SP-SM
⑨	강모래	2.640	-	-	-	4.79	SP

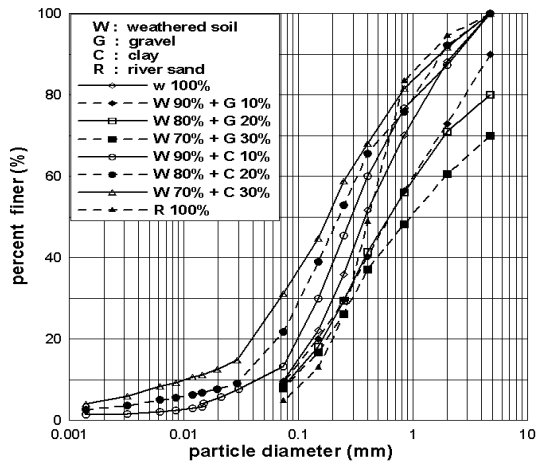


그림 1. 풍화토, 강모래, 혼합토의 입도분포곡선

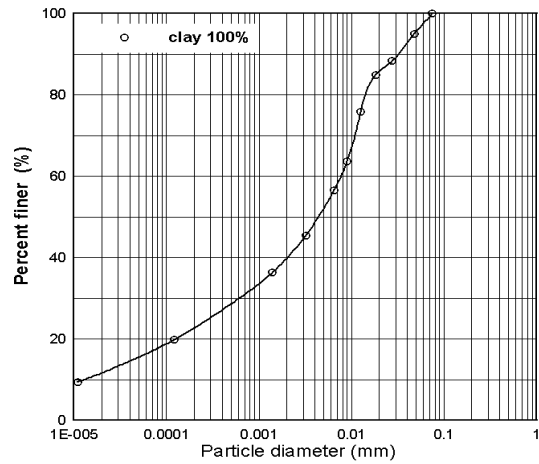


그림 2. 점토의 입도분포곡선

## 2.2 급결제

일반적으로 급결제는 급결제의 첨가량이 증가함에 따라 조기강도가 증가한다. 이는  $C_3A$ , 에트링가이트,  $C_3S$ 에 의한 팽창작용 및 간극 충전으로 발생한다. 본 실험에서 사용한 급결제는 무기질계 지반주입제(A급결제)와 Shotcrete용 무기염계(B급결제)를 사용하였다.

A급결제는 물유리 주입제(규산소다, sodium silicate)를 보강한 것으로 환경성과 내구성을 개선한 급결제이며 화학조성은 표 2와 같다. A급결제는 물과 반응하는 즉시 활성화되어 침상형 결정인 에트링가이트를 형성한다. 이 침상형 결정이 점차 성장하여 토립자들을 가교 상으로 연결하고 칼슘실리케이트수화물이 이들 사이의 공극을 충전하여 고결제의 강도를 증가시킨다. 보통 포틀랜드 시멘트와 조강 포틀랜드시멘트의 시멘트의 응결시간이 수 시간이고 초속경 시멘트의 경우라도 응결시간이 수 십 분에 이르나 A급결제는 높은 함수비에서도 그 응결시간이 수초에 지나지 않아 지반주입제에 필요한 급결성을 확보할 수 있게 된다.

B급결제의 화학조성은 표 3과 같으며 조기강도 발현은 빠르나 후기로 갈수록 강도 발현이 낮고 급결제를 많이 사용할수록 첨가량에 비해 장기 강도가 저하되는 특징을 갖고 있다.

표 2. 무기질계 급결제의 화학조성

분류	lg. loss	Insol	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)
%	0.6	0.8	2.2	23.9	0.70	43.3	0.2	28.3	2.9	5500

표 3. 무기염계 급결제의 화학조성

분류	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)
%	-	11	-	25	-	-	1.5	29	2.6	5000

## 2.3 고화재

보통포틀랜드시멘트(OPC)와 급결제등의 혼화제의 혼합재료(binder)는 실험목표 유동성과 조기 강도를 만족하지 못하였다. 따라서, 초기 유동성을 유지하며 시공성 향상을 위해 조기강도는 크고 재굴착을 위하여 장기강도는 작은 열전도성이 우수한 고함수토용 고화재를 사용하였다.

A고화재는 속경성 고화재와 촉진제(알칼리금속염)로 구성되어 있으며, 이를 풍화토100%, 풍화토와 자갈, 풍화토와 점토의 혼합토에 적용하여 장기강도를 검토하였다. B고화재(풍화토 및 혼합토용)는 A고화재의 혼합비율을 참고하여 속경성 고화재와 촉진제의 혼합 비율을 조정하여 사용하였고 C고화재(점토용)는 점토의 고유성분 및 흡착수 등의 영향과 순수 점토의 경화 시 큰 강도 발현성을 고려하여 수화작용을 촉진시키는 촉진제와 속경성 고화재를 사용하였다. D고화재(강모래용)는 높은 투수성과 고결 뒤 강도발현성이 우수함을 고려하여 유동화제, 촉진제, 그리고 속경성 고화재를 사용하였다. 각 고화재의 비중 및 성분을 표 4와 같이 보통포틀랜드 시멘트(OPC)와 비교하였다.

표 4. 고화재의 화학조성

구분	lg. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Total	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	1.90	20.70	4.20	3.10	63.90	3.90	-	2.30	100	3.15	3200
A고화재	2.03	22.36	22.36	1.03	41.91	4.90	0.56	4.86	97.96	2.951	4500
B고화재	2.03	22.36	22.36	1.03	41.91	4.90	0.56	4.86	97.96	2.956	4500
C고화재	1.81	19.55	24.33	1.21	41.87	4.47	0.70	6.07	98.18	2.955	4600
D고화재	2.68	30.79	16.47	0.48	42.05	6.17	0.14	1.21	97.32	2.954	4500

### 3. 시험 목표 및 시험방법

#### 3.1 시험목표

한국전력공사에서는 전력공급의 한 방법으로 지중화 공사를 수행하고 있으며 지중전력구조물 뒷채움 시공에서 열방산성, 관 주변의 다짐불량, 그리고 기존 되매움재료(모래)의 점차적인 경제적 취약성을 해결하기 위한 방법으로 대체 재료(방식사등) 또는 굴착잔토를 재활용한 유동성 뒷채움공법에 대한 연구를 진행하고 있다(이대수, 2003). 유동성 뒷채움공법의 적용은 국내에서 극히 미비하며, 특히 미국과 일본의 적용 대상 토질 조건과는 상이하다. 따라서, 굴착토의 재활용율을 극대화하고 국내 토질조건에 적합하며, 고화재와 혼화제의 양을 최소화하여 경제적인 지중전력구조물 뒷채움재의 최적배합비 산정을 시험목표로 하였다. 이를 위한 시험항목 및 적용기준은 표 5에 정리하였다.

표 5. 시험항목 및 적용기준

시험항목	적용기준
블리딩률	1% 이하
흐름값	JHS A 313기준 195 ±10mm, ASTM D 6133기준 200mm 이상
일축압축강도	목표 1시간강도 : 0.5kg/cm <sup>2</sup> 이상, 목표 4시간강도 : 1.5kg/cm <sup>2</sup> 이상, 목표 28일 강도 : 6.5kg/cm <sup>2</sup> 이하
열저항성	85cm-°C/w 이하

#### 3.2 시험 방법

본 연구의 주요 시험은 유동성, 블리딩률, 열저항성, 그리고 일축압축강도이다. 유동성시험은 JHS A 313(Ø80mm, H=80mm)과 ASTM D 6133(Ø3in., H=6in.)기준 몰드를 각각 사용하였다. 시험과정은 끝이 뚫린 플라스틱 몰드에 혼합물을 채운 다음 평탄한 유리판위에 놓고 들어 올렸을 때 최대값과 그 수직값의 평균값을 사용하였다. 블리딩률 시험은 JSCE-F522-1999 및 KS F 2442-1996의 주입모르타르의 블리

딩를 시험 방법으로 폴리에틸렌 실린더( $\phi 5\text{cm}$ ,  $H=50\text{cm}$ )를 사용하여 10분 간격으로 30분간의 블리딩량(ml)을 측정하였다. 열저항성 시험은 Decagon Devices사의 KD2 thermal properties analyzer를 사용하였으며, 대상 시료에 대하여 90초간 열안전성을 확인한 후 30초 동안 대상 시료의 온도, 열 전도성, 열 저항성, 그리고 열방산을 계산하여 화면에 나타낸다. 일축압축시험은 허용하중이 200kg인 Tokyo Sokki Kenkyuio사의 load cell과 displacement transducer를 사용하였다. 하중은 수직변형률이 분당 1% 재하되었으며, 하중재하는 변형이 증가함과 함께 하중 값이 감소 할 때 까지 또는 10%의 변형률에 도달할 때 까지 하중재하를 계속하였다. 일축압축강도의 측정 오차 범위는 각각의 목표 강도에 대하여 약 10% 범위 내에 있는 것을 측정값으로 하였다. 일축압축시험용 몰드는 직경은 50mm이고 높이는 100mm인 토질시험용 규격몰드를 사용하였고 몰드성형 시 구리스를 이용하여 몰드 밖으로의 물 빠짐을 억제하였다. 양생방법은 EPRI(미국 전력연구원)의 기준안인 sealing 방법으로 온도는  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , 습도는 70-80%로 항온수조에서 양생하여 급격한 함수비의 변화가 없는 지중상태를 구현하였다. 총 실험 횟수는 블리딩률 시험 54회, 유동성 시험 490회, 일축압축강도 시험 268회, 그리고 열저항성 시험 108회를 수행하였다.

#### 4. 시험결과 및 분석

본 연구에서의 시험 과정은 지중 전력구조물 유동성 뒷채움재로 보통포틀랜드시멘트(OPC)와 상용화되고 있는 급결제 2종류를 적용하여 목표 유동성 및 목표 일축압축강도의 만족 여부를 확인한 후 만족하지 않을 경우 고화재를 적용하였다. 고화재의 적용은 재굴착이 가능한 강도를 나타내는 배합비에 대하여 촉진제의 함량을 조절하여 목표 조기강도를 만족시켰다.

##### 4.1 물리적 특성

물리적 성질 시험 종류는 단위중량(그림 8)과 함수비(그림 9)이다. 각 고화재와 대상시료의 물리적 성질은 블리딩률, 유동성, 일축압축강도, 그리고 열저항성에 중요한 영향인자이다.

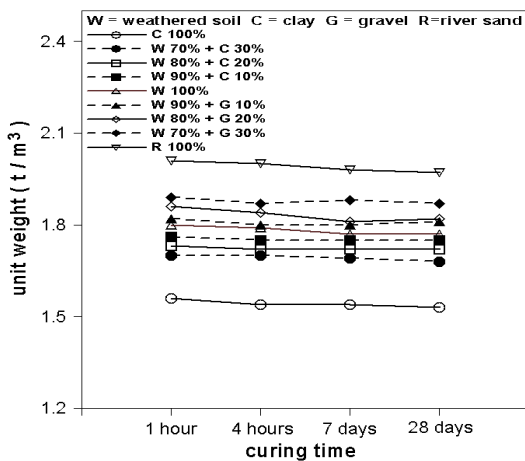


그림 3. 재령에 따른 단위중량 변화

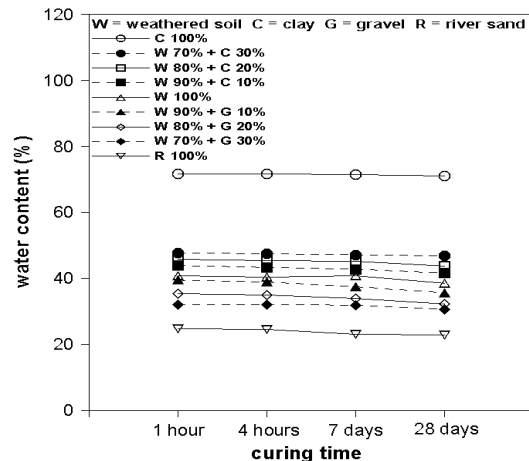


그림 4. 재령에 따른 함수비 변화

시험 결과, 풍화토에 자갈함량이 증가할수록 함수비는 감소하는 경향을 보였으며, 단위중량은 증가하는 경향을 보였다. 반면, 풍화토에 점토함량이 증가할수록 함수비는 증가하였으며, 단위중량은 감소하는 경향을 보였다. 그러나 재령에 따른 변화는 거의 없었다. 이는 sealing에 의한 양생으로 인하여 함수비 또는 단위중량의 급격한 감소가 발생하지 않도록 하여 지중의 토질상태가 실험적으로 구현되고 있다고 판단된다.

## 4.2 역학적 특성

### 4.2.1 블리딩률 및 유동성

블리딩률 및 유동성시험결과는 표 8과 같다. 블리딩률은 기존의 플라이애쉬, 폐주물사, 그리고 굴착잔토를 사용한 기존 연구에서 다양한 기준을 적용하고 있으나 약 1%이하를 적용하고 있다(Wayne, 1994; Takahashi,1994). 블리딩률은 풍화도에 자갈함량이 증가할수록 증가하고, 점토함량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다.

표 8. 블리딩률 시험 및 유동성 시험 결과

대상시료		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
블리딩률(%)		0.04	0.09	0.12	0.25	0.57	0.58	0.66	0.74	0.24
유동성(mm)	JHS A 313	200	204	200	202	200	198	198	197	200
	ASTM D 6103	280	265	265	260	250	250	250	250	260

기존의 유동성은 ASTM D 6103 몰드 사용 시 평균 퍼짐 직경이 약 200-300mm(Wayne, 1994, Pons et al., 1998)의 범위를 갖는다. 유동성은 재료의 종류에 따라 차이가 나며 좋은 유동성은 시공성을 향상 시켜주므로 재료분리가 발생하지 않는 범위에서 최대 유동성을 증진시켜야 한다. 본 연구에서는 재료 분리가 발생하지 않는 최대 유동성으로 대상 시료에 따라 250-280mm의 범위를 나타내어 유동성은 우수하였다.

### 4.2.2 일축압축강도

#### 4.2.2.1 급결제 첨가 유·무에 따른 일축압축강도 특성

유동성 뒷채움재(CLSM)의 중요한 특징 중 2가지는 유동성과 일축압축강도이다. 그림 5, 6은 순수 풍화토 100%에 OPC만을 적용한 경우와 OPC와 상용화되고 있는 급결제 2종류(A, B급결제)를 이용하여 목표 최소유동성(185mm)과 조기 일축압축강도(1시간 0.5kg/cm<sup>2</sup> 이상, 4시간 1.5kg/cm<sup>2</sup> 이상)의 만족 여부를 판단하기 위한 시험이었다.

기존의 플라이애쉬 또는 폐주물사를 이용한 유동성 뒷채움재의 요구 시멘트량은 30kg/m<sup>3</sup>-119kg/m<sup>3</sup>(Naik, 1997; Du, 2002; FHWA-IF-03-019, 2003)이다. 이에 본 연구에서는 순수 풍화토 100%에 OPC를 120kg/m<sup>3</sup>으로 고정하고 물-시멘트비(W/C)를 496-451%로 줄여가며 일축압축강도 시험을 수행한 결과 1시간 강도는 공시체가 직립하지 않아 측정할 수 없었으며, 4시간 강도는 0.10-0.27 kg/cm<sup>2</sup>의 범위를 나타내었다(그림 5). 따라서, 재령 1시간에 공시체가 직립하지 않으므로 순수 풍화토 100%에 시멘트량을 100, 130, 160kg/m<sup>3</sup>(W/C : 498-312%)로 변화시키며 A급결제(0, 10%)를 첨가 하였다. 또한 같은 대상시료에 시멘트량을 160, 200, 240, 280kg/m<sup>3</sup>(W/C : 338-180%)로 변화시키며 B급결제(0, 5, 7%)를 첨가하였다(그림 5). 그 결과, 재령 1시간 공시체의 자립을 기대하였으나 몰드에서 공시체를 분리하는 순간 공시체가 주저 않아 일축압축강도를 측정할 수 없었다. 재령 4시간 일축압축강도는 공시체가 직립하여 측정할 수 있었으나 시험 목표 강도인 1.5kg/cm<sup>2</sup>에 대하여 A급결제 적용 시 14-36%와 B급결제 적용 시 15-23%의 강도발현성을 나타내었다. 이는 급결제의 급결력으로 목표 유동성을 만족시키기 위하여 배합비 별 물 첨가량이 증가하여 급결제 미첨가시 보다 낮은 일축압축강도 값을 보이고 있다고 판단된다.

따라서, 기존에 제안한 시멘트량 30kg/m<sup>3</sup>-119kg/m<sup>3</sup>보다 큰 시멘트량을 배합에 적용한 결과 목표 조기강도(1시간, 4시간)가 만족하지 않으므로 제안된 시멘트량 이하를 배합에 적용하여 혼합동안 초기 유동성의 변화가 적고 조기강도를 촉진시키는 촉진제와 고화제가 필요하였다.

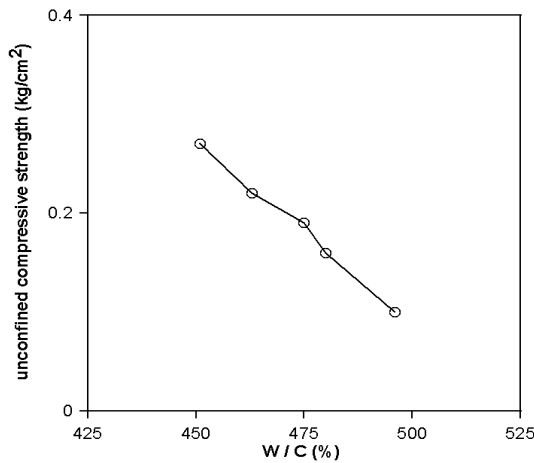


그림 5. 급결제 미 첨가 시

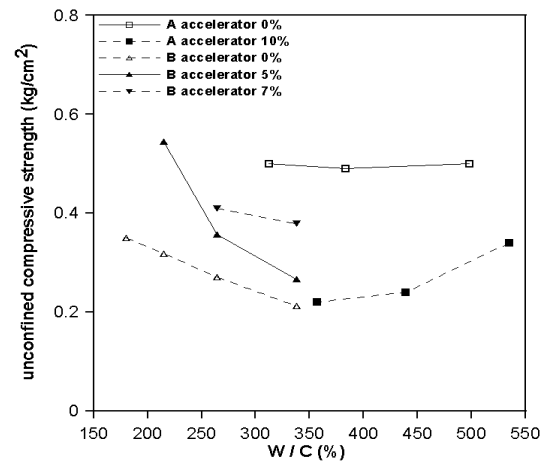


그림 6. 급결제 첨가 시

#### 4.2.2.2 고화재를 적용한 장기 일축압축강도 특성 (재굴착성)

유동화 뒷채움재는 시공 후 보수 및 유지를 위하여 재굴착이 가능해야한다. 재굴착 가능성은 굴착 방법에 따라 강도기준이 분류된다. 즉, 최대 일축압축강도는 손굴착 시 0.7MPa 이하, 백호 등의 장비 굴착 시 1.4MPa 이하, 중장비를 사용한 굴착 시 8.3MPa 이하로 분류된다(Wayne et al., 1994; Du, 2002).

본 연구에서는 지중전력구조물 뒷채움재의 손 굴착이 가능한 최대 일축압축강도로 6.5kg/cm<sup>2</sup>을 시험 목표 강도로 선정하였다. A고화재를 적용한 풍화토 100% 및 혼합토(풍화토+자갈, 풍화토+점토)의 재령 7일 일축압축강도는 4.23-8.52kg/cm<sup>2</sup>의 범위에 있고 재령 28일 강도의 71-79%의 강도가 발현되었다. 재령 28일 일축압축강도는 5.97-10.84kg/cm<sup>2</sup>의 범위를 나타냈다. 이는 본 연구의 목표 강도보다 높아 손굴착이 불가능한 것으로 판단되었다. 따라서, A고화재 중 속경성 고화재의 비율을 낮추었다.

#### 4.2.2.3 고화재를 적용한 조기 일축압축강도 특성 (시공성)

지중전력구조물 뒷채움공사는 주로 야간 시간에 차량소통이 적은 틈을 이용하여 신속한 뒷채움 시공을 끝마친 후 빠른 시간 내에 고결되어 교통해방이 가능해야한다. 유동화 뒷채움재의 고결과 교통해방의 가능성을 나타내는 지표로 일축압축강도가 있다. 1시간 일축압축강도가 0.3kg/cm<sup>2</sup> 이상인 경우 사람이 설 수 있는 강도로 뒷채움재 시공 후 후속공정을 할 수 있으며, 4시간 일축압축강도가 1.3kg/cm<sup>2</sup> 이상이면 교통해방이 가능하다(Takahashi, 1994).

본 연구에서는 A고화재를 적용한 시험 결과를 토대로 목표 장기강도 6.5kg/cm<sup>2</sup>에 근접한 배합비에 대상토질별로 B고화재, C고화재, D고화재를 적용하였다. 그림 7은 풍화토 100%에 B고화재량을 170kg/m<sup>3</sup>과 180kg/m<sup>3</sup>로 고정된 후 촉진제 함량을 각각 0.32-1.52%과 0.32-1.20%로 증가시켰을 때와 점토 100%에 C고화재량을 370kg/m<sup>3</sup>으로 고정된 후 촉진제 함량을 1-2.1%로 증가시켰을 경우의 일축압축강도를 나타내고 있다. B고화재와 C고화재를 적용하였을 때 목표 조기강도를 만족시키는 촉진제 함량은 각각 1.2%와 1%로 나타났다. 그림 8은 강모래 100%에 고화재량을 250-300kg/m<sup>3</sup>으로 증가시켰을 때의 일축압축강도를 나타내고 있으며 목표 조기강도를 만족시키는 D고화재량은 280kg/m<sup>3</sup>으로 나타났다.

순수 풍화토 100%, 점토를 함유한 혼합토, 그리고 자갈을 함유한 혼합토에 촉진제 함량 1.2%와 B고화재, 순수 점토 100%에 촉진제 1%와 C고화재, 그리고 강모래에 D고화재의 양을 조절하며 시험한 결과 각 배합비 별 조기 일축압축강도는 재령 1시간 0.5kg/cm<sup>2</sup> 이상과 재령 4시간 1.5kg/cm<sup>2</sup> 이상인 목표 강도를 만족시켰다. 조기 목표 일축압축강도를 만족하는 배합비는 장기 일축압축강도를 측정하기 위하여 사용하였다.

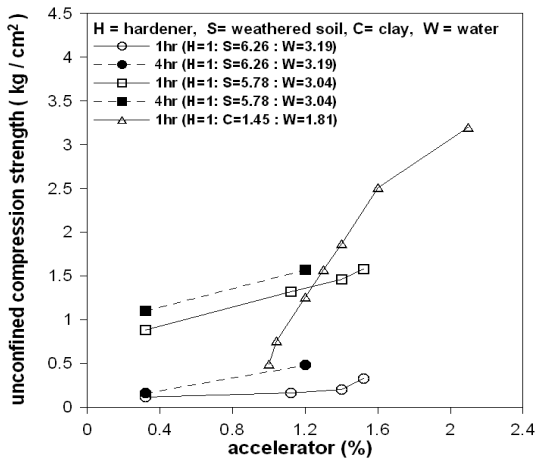


그림 7. 일축압축강도와 촉진제의 관계

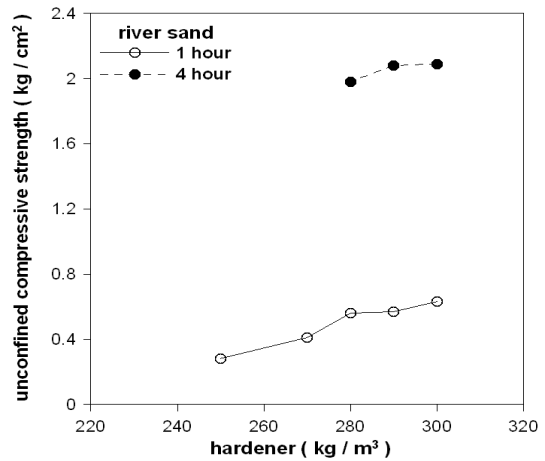


그림 8. 일축압축강도와 D고화제의 관계

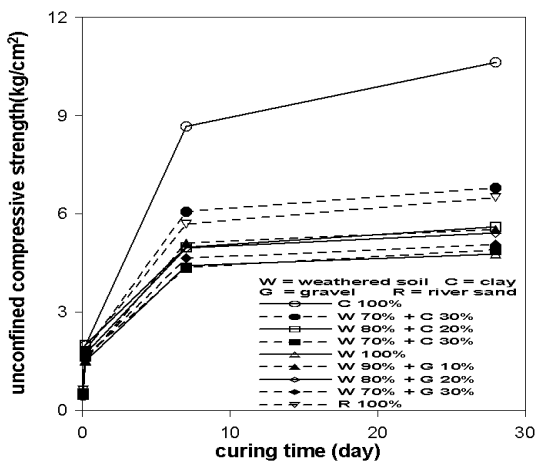


그림 9. 대상 시료 별 일축압축강도 특성

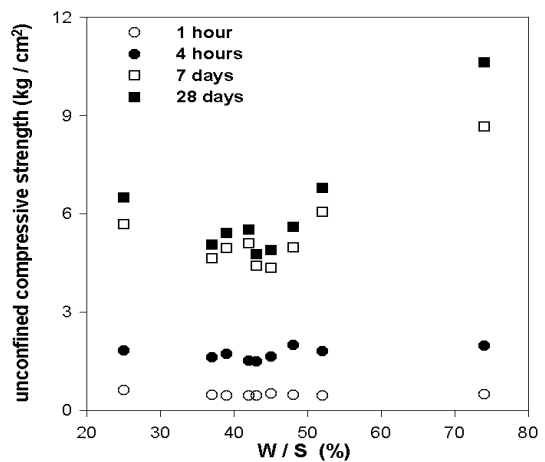


그림 10. 대상 시료 별 일축압축강도와 W/S 관계

그림 9는 대상 시료별 양생에 따른 일축압축강도를 나타내고 있다. 재령 28일 일축압축강도 범위는 4.78-6.50 kg/cm<sup>2</sup>이며 재령 7일 일축압축강도는 재령 28일 일축압축강도에 대하여 점토 100%(81.48%)를 제외한 대상 시료에 대하여 약 88%의 강도가 발현되었다. 이는 재령 7일 이후 강도가 소폭 증가하며 재령 28일 이후 강도 증진이 일어나지 않을 것으로 판단된다. 그림 10은 일축압축강도와 물/(고화제+흙)의 관계를 나타내고 있으며 B고화제를 적용한 풍화토 70%와 점토 30%의 혼합토와 C고화제를 적용한 점토 100%시료를 제외한 나머지 대상 시료는 시험 목표 강도를 만족시키고 있으며 w/s는 25-48%의 범위에 있음을 나타내고 있다.

#### 4.2.3 열저항성

토사의 열저항이란 한 변의 길이가 1cm인 정육면체 내부를 1watt의 열이 흐르면 정육면체 전체에 1°C의 온도상승을 일으키는 토사의 열 특성이다. 토사의 열전도율은 입자의 구성 성분, 입자크기 및 형상, 입도분포, 밀도, 함수비, 그리고 다짐도등에 따라 많은 영향을 받는다. 토사의 구성성분과 밀도는 간극내의 수분 또는 공기와 비교할 때 낮은 열저항성을 갖는다. 이는 대부분의 열전도는 입자간의 접촉에 의한 열의 전도가 일어나기 때문이다. 공기, 물, 및 모래질 광물입자 중 공기의 열저항값이 가장 크며, 모래질 광물입자의 열저항성이 가장 작다.



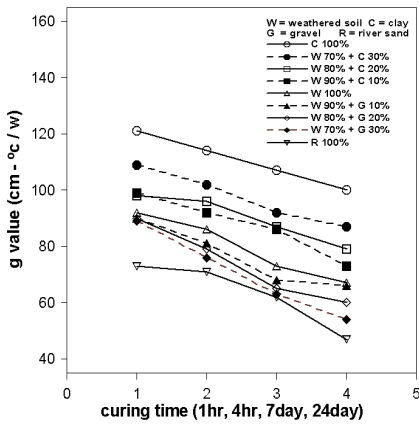


그림 11. 대상 시료 별 열저항성

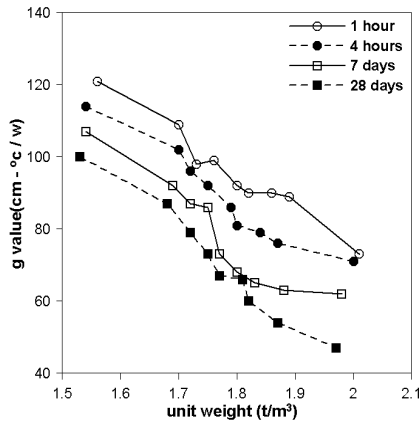


그림 12. 열저항성과 단위중량 관계

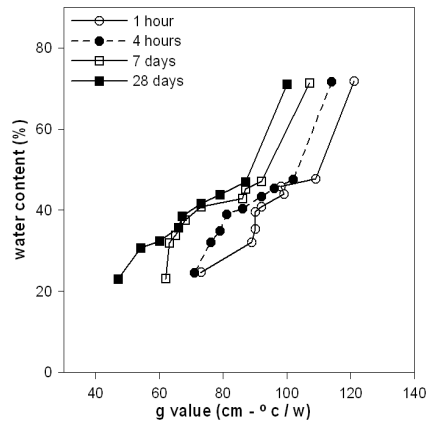


그림 13. 함수비와 열저항성의 관계

본 연구에서 재령 28일의 열저항성 범위는 47-100 cm-°C/w(그림 11)로 나타났고 자갈 함유량이 증가할수록 열저항성은 감소하였으며, 점토함유량이 증가할수록 열저항성은 증가하였다. 또한, 재령 28일을 기준한 열저항성 감소폭은 자갈 함유량이 증가할수록 크고 점토함유량이 증가할수록 작았다. 대상시료 별 열저항 특성은 재령 및 자갈 함유량에 따라 감소하며, 점토함유량에 따라 증가하였다(그림 11). 이는 자갈 함량이 증가 할수록 간극비가 감소하며 단위중량의 증가(그림 12)로 인하여 구성 입자가 조밀해져 구성 입자간 접촉점을 증가시켜 열저항성이 감소하는 것으로 판단된다. 반면, 점토함량의 증가할수록 간극비가 증가하고 단위중량이 감소하여(그림 12) 열저항성은 감소하는 경향이 나타났다.

강모래를 이용한 기존 연구 결과 함수비 5% 이상인 경우 열저항성은 설계기준인 100-120 cm-°C/w (한국전력공사 지중설계편람)를 만족하며, 함수비의 증가는 열저항성을 감소시키는 것으로 나타났다(김대홍 et. al., 2002). 그러나 본 연구의 유동성 되메움재는 슬러리 상태임으로 재령 28일을 기준한 함수비는 약 23-71%의 범위를 나타내고 있으므로 함수비 보다 단위중량이 열저항성에 더욱 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다(그림 13).

표 9. 목표 기준을 만족하는 최적배합비

대상시료	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
고화재비	1	1	1	1	1	1	1
대상토비	4.11	5.06	5.91	5.99	6.67	7.40	4.74
물비	2.46	2.75	2.99	2.96	3.02	3.11	1.44

따라서 표 9는 본 연구의 시험목표 기준인 블리딩률, 유동성, 일축압축강도, 그리고 유동성 모두를 만족하는 최적배합비 이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 B고화재(풍화토용 및 혼합토용), C고화재(점토용), 그리고 D고화재(강모래용)을 적용하여 블리딩률 1%이하, 유동성 200mm이상(ASTM D 6103), 1시간 일축압축강도 0.5kg/cm<sup>2</sup> 이상, 4시간 일축압축강도1.5kg/cm<sup>2</sup> 이상, 28일 일축압축강도 6.5kg/cm<sup>2</sup> 이하, 그리고 열저항성 85 cm-°C/w 이하를 만족하는 지중전력구조물 되채움재의 최적배합비를 산정하기위한 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 보통포틀랜드시멘트와 무기질계 급결제 및 무기염계 급결제를 각각 사용한 결과 목표 유동성과 초기 일축압축강도를 만족시키지 못하였다. 이는 급결제의 사용으로 재료를 섞는 동안 유동성이 크게 감소

하여 배합비 별 요구수량의 증가로 강도가 저감되었음을 알 수 있었다. 따라서, 초기 유동성을 유지하며 초기 일축압축강도는 크고 장기 일축압축강도는 작은 촉진제와 고화제가 필요하였다.

2. 유동성 뒷채움재는 slurry 상태임으로 높은 함수비를 나타냈으며 목표 유동성을 만족시키기 위하여 점토함유량이 증가 할수록 함수비는 증가 하였으며 자갈 함유량이 증가 할수록 함수비는 감소하였다. 이는 대상 시료의 함수비가 증가 할수록 강도는 줄어들어 목표 강도를 만족시키기 위한 고화제량은 토질종류, 입경, 그리고 함수비등에 의하여 결정되었다. 그러나 재령에 따른 물리적 성질(함수비, 단위중량)은 거의 변화가 없어 지중의 토질 상태가 구현되었다고 판단된다.
3. 각각의 고화제 사용 시 9종류의 대상 시료는 블리딩률 1%이하와 유동성 200mm 이상을 모두 만족하였다.
4. 풍화토에 점토 함유량이 30%인 혼합토와 점토 100%의 대상 시료를 제외한 나머지 7종류의 대상 시료는 토질 종류와 시료의 입경을 고려한 고화제 종류와 양을 조절하여 4.78-6.50kg/cm<sup>2</sup> 범위의 재령 28일 일축압축강도를 나타냈고 재령 7일 일축압축강도는 재령 28일 일축압축강도에 대하여 약 88%의 강도가 발현되었다. 이는 재령 7일 이후 강도가 소폭 증가하며 재령 28일 이후 강도 증진이 일어나지 않을 것으로 예상된다. 따라서, 유지 및 보수를 위한 재굴착성에는 문제가 없다고 판단되었다.
5. 강모래를 이용한 다짐된 뒷채움재는 함수비의 증가가 열저항성을 감소시켰으나 고함수비를 나타내는 슬러리 상태의 뒷채움재의 열저항성은 재령과 단위중량에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 김대홍, 이대수(2002), '지중송전관로 되메움재의 열저항 특성', 한국지반공학회논문집, 제 18권 5호, pp.209~220.
2. 박재현, 이관호, 조재윤, 김석남(2004), '현장발생토 CLSM을 이용한 지하매설관의 변형특성', 한국지반공학회논문집, 제20권 3호, pp.129~139.
3. 조재윤, 이관호, 이인모(2000), '유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽뒷채움재 연구', 한국지반공학회논문집, 제 16권 4호, pp.17~30.
4. 이대수, 김경열, 홍성연, 상현규(2003), '방식사의 지중 전력설비 되메움재로의 활용성 평가', 한국지반공학회논문집, 제19권 1호, pp.201~207.
5. American Coal Ash Association(2003), 'Fly Ash Facts for Highway Engineers', Technical Report, FHWA-IF-03-019.
6. Du L., Folliard K. J., and Trejo D.(2002), 'Effects of Constituent Materials and Quantities on Water Demand and Compressive Strength of Controlled Low-Strength Material', Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 14, No.6, p.p.485-495
7. Katz A., Kovler K.(2004), 'Utilization of industrial by-Products for the production on controlled low strength materials(CLSM)', Waste Management 24, ELSEVER, p.p.501-512
8. Naik, T.R. & Singh S. S(1997), 'Permeability of Flowable Slurry Materials Containing Foundry Sand Fly Ash', ASCE, Vol.123, No5, pp446~452.
9. Peindle, R.D., Janardhanam, R., and Burns, F.(1992), 'Evaluation of Flowable Fly Ash Backfill', Journal of Geotech. Engrg., ASCE, Vol.118, No.3, pp.449~463.
10. Takahashi, M. Ito, H. Abe, H. and Tanaka H.(1994), 'A Study of Fluidity Requirements for Slurry Backfill Material Using Surplus Soil', 1st Symposium on Soil Improvement, The society of Materials Science.
11. Wayne S. A. et. al.(1994), 'Controlled Low Strength Materials(CLSM)', ACI 229R-94.