

함수비에 따른 유동성 뒤채움재의 열저항 특성 Thermal Resistant Characteristics of Accelerated Flowable Backfill Materials on Water Content

오기대¹⁾, Gi-Dae Oh, 김대홍²⁾, Dae-Hong Kim

¹⁾ 한전전력연구원 선임연구원, Korea Electric Power Research Institute

²⁾ 한전전력연구원 책임연구원, Korea Electric Power Research Institute

SYNOPSIS : Backfill material of buried electrical transmission cable should dissipate the heat as rapidly as it is generated, or high temperatures will lead thermal runaway. These problems could raise thermal resistance and reduce transmission efficiency. So Backfill material of buried electrical transmission cable should have not only structural safety but good thermal property. So, in this study, we performed thermal resistancy test for various materials such as sand, weathered soil, clay and mixed soil to analyze the thermal characteristics of CLSM(controlled low strength materials) for water content.

Key words : CLSM, water content, thermal resistance

1. 서 론

최근 도시미관 및 신뢰도향상 등의 이유로 전력, 통신, 상하수도 등 다양한 선로들이 지중에 매설되고 있다. 하지만, 지중전력선 공사시 가장 큰 문제점은 하단부 다짐효율이 낮아 파손등과 같은 구조적 문제점에 항상 노출되어 있다는 것이다. 지중전력선은 주로 PE과형관을 이용하여 시공하게 되는데, 전력선의 특성상 여러 다발을 사용하여 시공하기 때문에 뒤채움재로 주로 사용하는 모래의 경우 물다짐과 같은 방법을 사용하더라도 과형관 사이 및 원형관 저부를 다짐하기는 쉽지 않아, 다짐이 쉽고, 자기 강도를 발현하여 관을 보호할 수 있는 새로운 재료 개발의 필요성이 요구된다. 이러한 문제점들 때문에 다양한 방법들이 강구되어 왔으며 그중 하나가 유동성이 뛰어난 저강도 콘크리트(CLSM)의 개발이다. 외국에서는 이미 오래전부터 연구개발을 진행하여 전력회사를 중심으로 이미 실용화 단계에 와있다. 하지만, 국내에서는 지중매설과 옹벽(조재운 등, 2000; 박재현 등, 2004; 이관호 등, 2006) 등의 뒤채움재료에 대해서 연구가 진행되었지만, 열저항 특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 지중송전 케이블은 송전으로 인해 발생된 열을 케이블 주위의 뒤채움재가 효과적으로 방출시키지 않으면 열폭주(thermal runaway)에 의한 케이블의 절연파괴가 일어날 수 있으며 열방출이 제대로 되지 않으면 케이블 주위 온도상승으로 송전 효율이 저하되는 문제점을 일으키는 바, 이에 대한 연구는 매우 중요하다. 이에 KEPCO(한국전력)에서도 현장에서 급속시공 및 보수시 시공품질을 향상하고 송전케이블에서 발생하는 열을 효과적으로 지반으로 배출시킬 수 있는 굴착잔토를 이용한 유동성 뒤채움재 개발하였다. 본 연구에서는 현장 굴착잔토를 활용하여 함수비에 따른 열적특성에 대해서 조사하였다.

2. 대상시료

2.1 흙

본 연구에서는 화강풍화토 중 세립분 함량이 10 %인 사질토를 기본 대상시료로 선정하고, 그 외 다양한 토질을 대표하고자 점토를 10-30 % 함유한 혼합토, 자갈을 10-50 % 함유한 혼합토, 자갈과 점토를 모두 함유한 혼합토, 강모래 100 %, 그리고 순수한 점토 100 % 등 총 17종류(표2)의 시료를 대상으로 실험을 수행하였다.

2.2 흙

본 연구에 사용된 고화재는 상용화 되고 있는 제품을 시험목적에 적합하도록 고화재의 비율을 조정하여 혼합 초기 유동성, 초기강도 발현, 장기강도를 작게 만들어 타입별로 A는 혼합재료에 적용하고, B, C는 강모래와 순수점토에 적용토록 개선되었다(표 1).

표 1. 고화재의 화학조성

구분	Lg.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total	비중	분말도(cm ² /g)
A 고화재	2.03	20.5	22.2	1.2	42.6	3.6	7.0	99.13	2.88	4500
B 고화재	1.81	29.2	16.2	0.7	43.2	4.7	3.3	99.21	2.89	4500
C 고화재	2.68	20.2	13.7	1.5	48.1	3.5	9.8	99.48	2.97	4600

표 2. 시료 및 물성(전력연구원, 2006)

토질	분류 (USCS)	대상토질	가적 잔류율 (%)			소성 지수
			4.75 ~ 13 mm	0.075 ~ 4.75 mm	0.075 mm 이하	
사질토	SW-SM	풍화토 100%	-	90	10	-
	SP	강모래 100 %	-	95	4.91	-
점토	CH	점토 100 %	-	0	100	33.7
혼합토	SW-SM	풍화토 90%+자갈 10%	10	81	8.60	-
	SW-SM	풍화토 80%+자갈 10%+점토 10%	10	72	17.78	6.88
	SP-SM	풍화토 80% + 자갈 20%	20	72	8.09	-
	SP-SM	풍화토 70% + 자갈 30%	30	63	6.62	-
	SP-SM	풍화토 60% + 자갈 40%	40	54	5.99	-
	SP-SM	풍화토 90% + 점토 10%	-	81	18.82	6.72
	SC	풍화토 80% + 점토 20%	-	72	27.63	8.48
	SC	풍화토 70% + 점토 30%	-	64	36.45	9.80
	SC	풍화토 70%+자갈 10%+점토 20%	10	63	27.01	8.62
	SC	풍화토 70%+자갈 20%+점토 10%	20	63	16.57	7.09
	SC	풍화토 60%+자갈 20%+점토 20%	20	55	25.42	8.81
	SC	풍화토 60%+자갈 30%+점토 10%	30	54	15.94	7.29
	SC	풍화토 50%+자갈 30%+점토 20%	30	45	24.88	9.38
	GP-GM	풍화토 50% + 자갈 50%	50	45	4.79	-

표 5. slurry 뒤채움재의 품질 기준(이대수 등, 2006)

항 목	목 표
특징	현장잔토 사용
유동성	195 ± 10mm 이상
일축압축강도	- 1시간 : 39.2 kN/m ² 이상
	- 4시간 : 147.1 kN/m ² 이상
	- 28일 : 686.5 kN/m ² 이하
열 저항성	85℃ cm / W 이하
블리딩	3% 이하
침하	3mm/30cm 이하

3. 시험방법

토사의 열저항을 나타내는 단위는 [℃·cm/watt] 혹은 [K·cm/watt]이며, 한 변의 길이가 1 [cm]인 정육면체 내부를 통해 1 [watt]의 열이 흐르면 정육면체 전체에 1[℃]의 온도상승을 일으키는 토사의 열특성을 나타내는 것으로서 토사가 열원으로부터 받은 열을 얼마나 쉽게 heat sink로 전달할 수 있는 가를 의미한다.

열저항을 측정하는 대부분의 방법은 열원을 토양이나 시료에 삽입하여 열원에 의한 토양 내의 온도를 측정함으로써 열저항을 구하도록 되어 있다. 이때 열원을 선형열원 또는 원통형열원으로 가정하여 열저항을 계산하는 이론식을 유도하여 구하고 있으며, 시료를 이용한 실험실에서만 열 저항을 측정할 수 있는 Shannon-Wells(1947)법과 현장과 실험실 양쪽에서 열저항을 측정할 수 있는 탐침법이 있다. 위 방법들은 열원에서 발생한 열이 시료를 통과할 때 토사 내에서 발생하는 온도차를 실측함으로써 열저항을 구하는 직접법인 반면, 토사의 건조밀도, 수분함량, 모래와 점토의 구성비율에 대한 토사의 모델을 가정하여 Kersten(1949) 등이 제안한 방법을 이용하여 실험실에서 열저항을 구하는 간접법이 있다. 한편, 토사의 열저항을 측정하는 방법 중 탐침법과 Shannon-Wells법은 다른 방법에 비해 상대적으로 단순하고 짧은 시간 내에 측정이 가능할 뿐만 아니라 현장에서도 직접 열저항을 측정할 수 있다. 또한, Shannon-Wells법은 시료에 대한 비열(specific heat)을 미리 알고 있어야 하지만, 탐침법은 비열계산이 필요없어 가장 많이 사용되는 방법이다.

본 연구에서는 되메움토사의 열저항과의 관련성을 고려하여 IEEE Std. 442(1981)를 중심으로 측정장치 및 측정방법을 사용하였다. IEEE Std. 442에서는 토사의 열저항성에 영향을 미치는 인자로 수분함량과 건조밀도, 입자의 구성성분(structural composition) 및 각종 환경인자를 제시하고 있다. 또한, 측정에 영향을 미치는 인자들로서는 토사내 수분의 이동, 중력에 의한 수분의 제배치, 전원의 안정성, 프로브를 중심으로 한 설치상의 오류, 재료의 불균질성, 층상지반의 존재 등을 지적하고 있다. 아울러, 지중선로에의 응용에 있어서는 계절적 요인에 따른 열저항성의 시간적 변화와 열안정성을 가장 중요한 인자로 제시하고 있다. 그림 2는 IEEE Std. 442에 제시된 열저항 측정설비의 개념도를 보여주고 있다. 측정 시스템은 프로브(또는 needle)와 전원장치, 발열체, 측온 저항체, 전력계, 온도계 등으로 구성된다. 본 연구에서는 열저항치를 측정하기 위해서 탐침법을 적용한 Decagon Devices사의 KD2 thermal properties analyzer를 사용하였다. 이는 대상 시료에 대해서 90초간 열안정성을 확인한 후 30초 동안 열저항성을 계산한다(그림 1, 2).

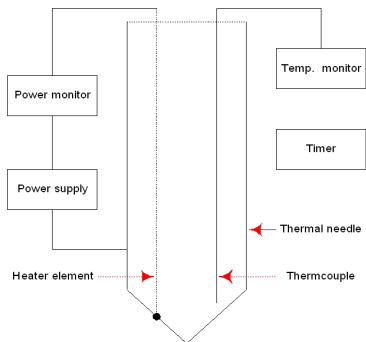


그림 1. 열저항 측정장치 개요도

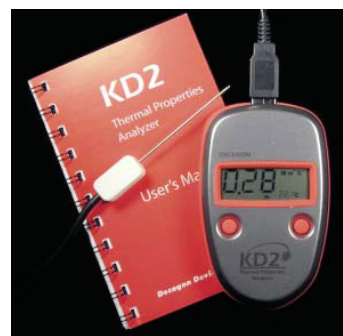


그림2. 열저항 측정장치(KD2)

4. 시험결과

함수비와 단위중량은 일반 토사의 열특성에 영향을 미치는 가장 큰 인자이다(Kersten, 1949). 일반 모래의 경우 함수비와 단위중량이 증가하면 열저항값이 감소하고, 그 반대의 경우에는 열저항값이 증가하는 경향을 보인다. 한편 점토의 경우는 단위중량값에 대해서는 모래와 같은 경향을 보이지만, 함수비는 반대의 경향을 나타낸다고 보고되고 있다(백성권 등, 2005). 특히, 함수비는 모래의 경우 수분을 많이 함유하는 영역에서는 함수비-열저항값 함수 구배가 대수함수에 비례하며 완만하지만, 건조영역에서는 온도가 급격히 올라가는 특징을 나타낸다(김대홍 등, 2002).

유동성 뒤채움재는 고화재를 사용하기 때문에 재료의 양생시간 또한 중요한 물리 역학적 특성인자이다. 일반적으로 양생에 의해서 재료가 고화되는 시간은 시멘트가 액체에서 고체로 변화하는 기간인 응결시간과 응결된 재료가 수화작용이 계속되어 시멘트 입자사이가 조밀하게 채워져 굳어짐으로써 강도가 커지게되는 경화(hardening)으로 크게 나누어진다(신방웅 등, 2002). 본 유동성 뒤채움재는 도심지 시공을 위해서 급속시공이 가능하도록 일반적으로 1시간에서 10시간으로 규정하고 있는 응결을 약 4시간내에 종료하여 조기 강도를 발현할 수 있도록 개발된 재료로 양생에 따른 물리 역학적 특성의 변화가 심한 재료이다.

이에, 본 연구에서는 양생시간 및 재료의 함수비에 따른 열저항 특성을 분석하였다. 그림 3~5는 단일 및 2중 혼합토, 3중 혼합토 총 17종에 대해서 양생시간에 따른 재료의 일축압축강도와 열저항성을 나타낸 그래프로 일축압축강도와 열저항성 모두 양생 시간에 비례하여 강도증가 및 열저항값 감소와 같은 성능개선을 나타냈다. 이는 유동성 뒤채움재가 고화재의 수화작용으로 인하여 양생이 되면서 화학작용으로 경화가 이루어져 압축강도가 증가하고, 수분이 감소하면서 입자들사이가 치밀해져 입자들사이의 접촉성이 증가하여 열저항값이 점차적으로 감소하는 것으로 판단된다.

그림 6은 유동성뒤채움재 단일 및 2중 혼합토 11종에 대해서 양생시간별 함수비에 따른 열저항 값을 나타냈다. 비록, 동일 대상시료에 대한 값은 아니지만 양생 시간별로 함수비가 증가함에 따라서 열저항값이 비례하여 증가하는 일관된 결과를 나타내고 있음을 확인 할 수 있었다. 함수비 증가에 따라서 열저항값이 비례하여 증가하는 팽창성 점토의 열특성과 유사한 거동을 나타냈다. 이는 유동성 뒤채움재를 구성하고 있는 혼합토의 구성 성분의 영향을 많이 받는 것으로 판단되다(오기대, 2009).

그림 7은 단일 및 2중 혼합토 11종에 대해서 양생에 따른 함수비를 나타낸 그래프로 양생이 진행됨에 따라서 작은 양이지만 함수비가 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 재료의 수화작용에 의한 수분의 감소로 판단되며, 시간이 지남에 따라서 열저항성이 감소하는 것도 함수비 감소로 인한 조직이 치밀해짐 때문으로 판단된다.

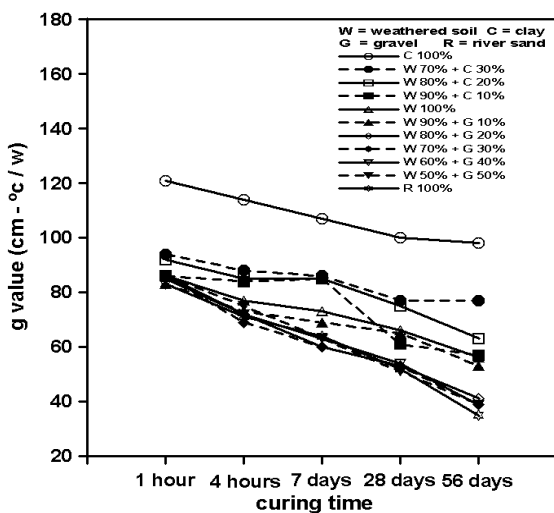


그림 3. 양생시간에 따른 열저항성(단일, 2중 혼합토)

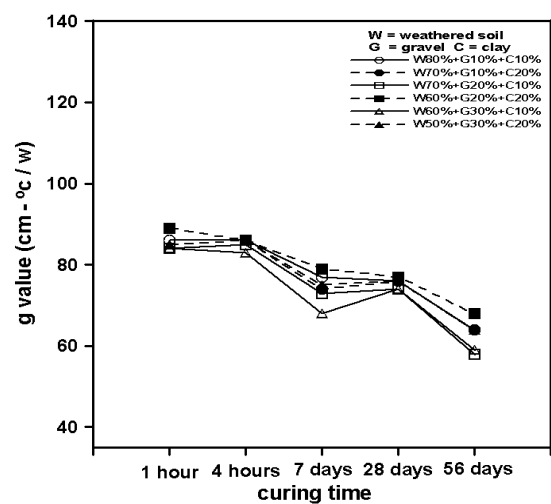


그림 4. 양생시간에 따른 열저항성(3중 혼합토)

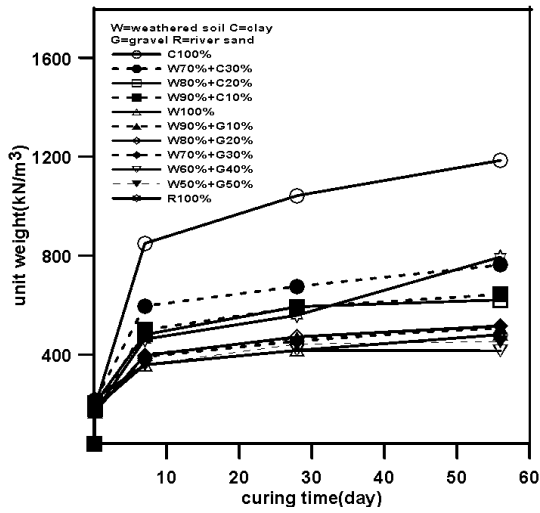


그림 5. 양생시간에 따른 일축압축강도

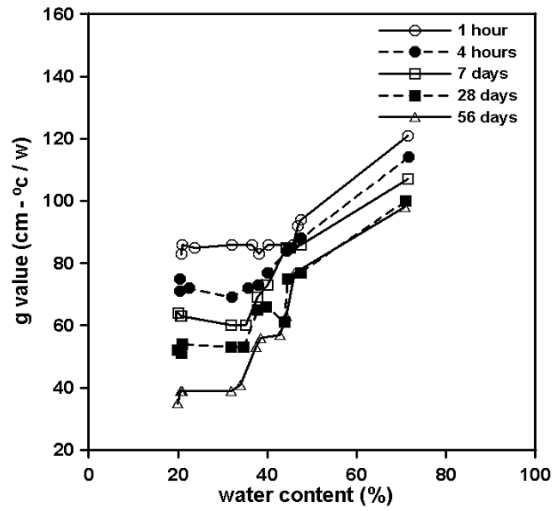


그림 6. 함수비 변화에 따른 열저항성

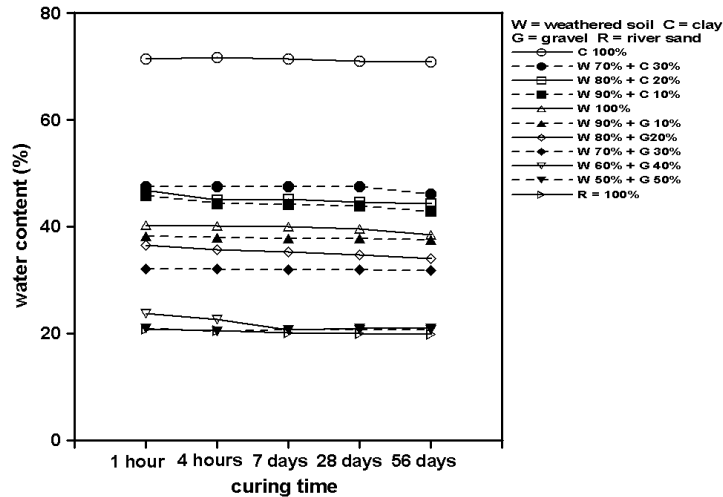


그림 7. 양생시간에 따른 함수비 특성

5. 결론

본 연구에서는 현장에서 발생하는 굴착잔토를 이용하여 유동성 뒤채움재에 대해서 열저항 특성을 수행하고 양생 및 함수비 변화에 따른 열저항특성을 검토하고 그 결과를 다음과 같이 기술하였다.

1. 일반적으로 흙의 열저항은 입자의 구성성분, 밀도, 함수비, 입자의 형상, 크기, 주변온도 및 성형 방법등에 따라서 영향을 받는다, 본 실험에서는 현장굴착토를 모사하기 위해서 17종의 혼합토에 대해서 열저항측정시험을 수행하였다.
2. 시험결과 양생이 진행됨에 따라서 수화작용에 일축압축강도는 증가하고, 함수비와 열저항값은 감소하는 경향이 나타났다. 이는 양생에 따른 수화작용으로 함수비가 감소하면서 조직이 치밀해진 때문으로 판단된다. 또한, 양생시간별 함수비에 따른 열저항값을 비교한 결과 함수비 증가에 따른 열저항값이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 혼합토의 구성성분의 특성상 함수비를 많이 포함하는 점토와 그렇지 못하는 자갈의 특성 때문으로 판단된다.

3. 17종의 시험결과에서 점토 100 %의 경우를 제외하고는 모두 한전 slurry 뒤채움재 품질기준(이대수, 2006)을 만족하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업인 “굴착 잔토를 재활용한 급결성 콘크리트 개발”과제로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

1. 김대홍, 이대수(2002), 지중송전관로 뒤채움재의 열저항 특성, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 18 No. 5, pp. 209~220
2. 박재현, 이관호, 조재윤, 김석남(2004), 현장발생토 CLSM을 이용한 지하매설관의 변형특성, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 20 No. 3, pp. 129~139.
3. 백성권, 안형준(2005), 지열냉난방시스템 적용을 위한 지반의 열전도 특성에 관한 연구, *2005 하계학술발표대회*, 대한설비공학회, pp. 356~361
4. 신방용, 김홍룡, 최기봉(2002), *건설재료학*, 구미서관, pp. 20~35
5. 이관호, 박재현(2006), 과형강관을 이용한 지하매설물용 뒤채움재 설계 및 시공성 평가, *한국도로학회 논문집*, Vol. 8, No. 2, pp. 63~74.
6. 조재윤, 이관호, 이인모(2000), 유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽뒤채움재 연구, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 16, No. 4, pp. 17~30.
7. 이대수 등(2006), *굴착 잔토를 재활용한 지중 전력구조물 뒤채움재 개발*, 연구보고서, 한국전력공사, pp. 183~202
8. M.A.Martin, Jr 등(1981), *IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements*, IEEE Std 442-1981, pp. 6~15
9. Wayne, S.A. (1994), *Controlled Low Strength Materials (CLSM)*, *ACI 229R-94*. pp. 2~3.