

굴착잔토를 재활용한 지중 전력케이블 유동성 뒤채움재의 열저항 특성

Thermal Resistant Characteristics of Flowable Backfill Materials Using Surplus Soil for Underground Power Utilities

오 기 대[†] · 김 대 홍¹⁾

Oh, Gidae · Kim, Daehong

ABSTRACT : In the case of underground power utilities pipe such as circular pipe, the most difficult problem is low compaction efficiency of the bottom of pipe inducing the failure of utilities. To overcome this problem, various studies have been performed and one of these is CLSM(Controlled Low Strength Materials) accelerated flow ability. But underground power utilities pipe backfill materials is also needed to have good thermal property that can dissipate the heat as rapidly as it is generated. 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) with accelerated flow ability for various conditions(water content, unit weight, void ratio, curing time) and to evaluate the applicability for backfill material of underground power utilities pipe. The test results of 16 specimens for thermal resistancy test showed good thermal property that maintained below 85°C cm / W.

Keywords : CLSM, Surplus Soil, Thermal Resistancy

요 지 : 지중전력선은 연성관을 다발로 지하에 매설함으로 관의 하단부 다짐효율이 낮아 파손 등과 같은 구조적 문제점에 항상 노출되어 있고 이러한 문제점을 해결하기 위해서 다양한 방법들이 강구되어 왔으며 그중 하나가 유동성이 뛰어난 저강도 콘크리트의 개발이다. 그러나 지중전력선 뒤채움재는 이러한 구조적 안정성 뿐만 아니라 전력선에서 발생하는 열을 효율적으로 외부로 배출시키는 우수한 열적 특성도 동시에 요구된다. 따라서 본 연구에서는 급결성 유동성 뒤채움재의 물리, 역학적 조건에 따른 열 저항특성을 파악하고자 한다. 국내 토질조건을 고려하여 풍화토, 자갈, 점토를 혼합한 혼합토 총 17종류의 다양한 토양에 대해서 고화재를 적용하여 물리, 역학적 특성(함수비, 단위 중량, 간극비, 양생 시간)에 따른 열저항 특성을 파악하고, 현장의 적용성을 확인하고자 실증실험을 수행하였다. 연구결과, 실제 지반조건과 유사한 17종 혼합토에 대해서 수축팽창, 양생조건을 고려한 실내실험과 현장토에 대해서 실험을 수행한 결과, 다양한 현장조건에 대해서 85°C cm / W 이하 열 저항성 값으로 우수한 열특성을 나타냈다.

주요어 : 저강도 유동성 뒤채움재, 굴착잔토, 열 저항값

1. 서 론

최근 도시미관 및 신뢰도향상 등의 이유로 전력, 통신, 상하수도 등 다양한 선로들이 지중에 매설되고 있다. 이런 지중관로들은 많은 장점들이 있는 반면, 집중호우와 같은 외부적인 요인 및 관로내 열폭주와 같은 내부적인 요인에 의한 위험에 쉽게 노출되어 엄청난 피해가 발생할 수도 있다. 따라서 전력선과 같은 라이프라인의 경우에는 안정성 확보를 위해서 관의 재질, 뒤채움재의 역학 및 열적 특성에 대해서 많은 연구가 수행되었다.

지중송전선로의 실제 송전용량은 케이블 자체의 최대허용온도 또는 주위지반의 허용온도에 의해 결정된다. 송전으로 인해 발생된 열을 케이블 주위의 뒤채움재가 효과적으로 방출시키지 않으면 열폭주(thermal runaway)에 의한 케이블

의 절연파괴가 일어날 수 있으며, 이러한 문제는 열에 의한 뒤채움재에서의 수분이동으로 인해 건조영역이 발생하면 더 악화된다. 이러한 현상은 케이블의 열 저항성을 더욱 증가시키게 되므로 정상적인 지중내 송전이 어렵게 된다. 지중송전케이블의 송전용량을 증대시키기 위해서는 전압 및 전류를 증가시켜야 되나 이들은 모두 발생열의 증가를 가져오게 된다. 케이블 주변토사의 고유 열저항은 함수량에 따라 크게 변화하기 때문에 열저항을 높게 설정하여 보수적으로 설계한다 하더라도 건조기에 토사의 함수량 변화로 인한 열폭주 현상이 일어날 수 있다. 따라서 지중송전선로의 효과적인 설계 및 운영을 위해서는 그림 1과 같이 케이블주위 지반 및 뒤채움재의 열적거동, 특히 온도구배하에서의 수분 이동현상도 아울러 규명하여야 한다(Yoshinari N. 등, 2007).

현재까지는 지중송배전선로의 뒤채움재로써 역학 및 열

† 정회원, 한전 전력연구원 선임 연구원(E-mail : 05100160@kepeco.co.kr)

1) 비회원, 한전 전력연구원 책임 연구원

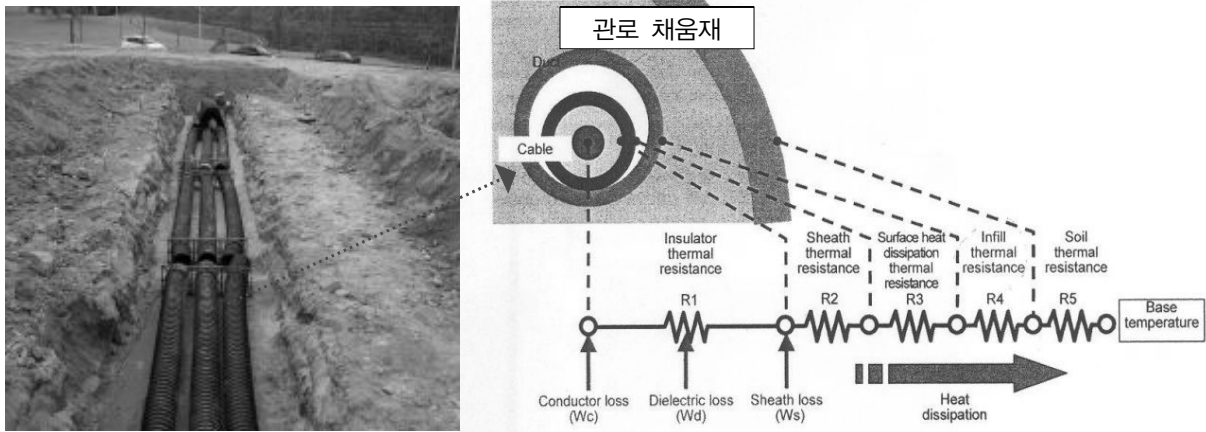


그림 1. 지중관로 열전이 특성관계

특성이 우수한 모래가 사용되어오고 있다. 그러나 최근 모래의 가격상승 및 관로의 뒤채움 시 관로사이의 다짐이 어려워 역학 및 열적 특성에 대한 문제점이 제기되고 있다. 따라서 사용가능한 여러 재료를 혼합하여 간극율을 최소화할 수 있는 배합비를 선정하거나, 새로운 재료의 개발이 필요하다고 할 수 있다.

최근에 자기 수평성(시공성)으로 다짐이 쉽고, 초기 강도를 발현하여 시공 중 관을 보호할 수 있고 강도가 낮아 유지보수를 위한 재 굴착이 가능하며 열방사능력이 우수한 저강도 유동성 뒤채움재(CLSM : Controlled Low Strength Material)에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 국외에서는 미국, 대만, 일본 등에서 플라이애쉬 및 폐주물사, 시멘트 및 혼화제를 차별적으로 혼합하여 시공목적에 맞는 유동성 뒤채움재에 대한 연구(Jakardhanam 등, 1992; Tarun 등, 2001; Wayne, 1994)가 진행 중이고, 국내에서는 지중매설과 옹벽(조재운 등, 2000; 박재현 등, 2004; 이관호 등, 2006) 등의 뒤채움재료에 대해서 연구가 진행되었다. 국내에서는 CLSM에 대해서 역학적 특성에 대한 연구는 활발히 진행 중이다. 그러나, 열특성에 대한 연구는 모래 대체 재료로 고로 슬래그, 석분 등의 재료에 대한 연구(김대홍 등, 2002) 및 최근 신재생에너지 분야에서 지중 열교환기의 뒤채움재로 벤토나이트 및 시멘트계 그라우트에 대해서 열특성 연구(최항석 등, 2008)를 수행하였으나, 관로 뒤채움용 CLSM의 열특성에 대한 연구는 전무한 상황이다.

이에 선행연구(천선호, 2006)에서 국내 토질조건을 고려하여 굴착 잔토 재활용이 가능한 지중 전력케이블 뒤채움재 개발을 위해서 17종의 대상 시료와 3종류의 고결재료를 혼합하여 다양한 지반조건에 대해서 역학적 특성을 검토하였고, 본 연구에서는 이에 대한 열저항 특성을 파악하기 위하여 탐침법(thermal needle method)을 이용하여 총 17종류의

혼합토에 대해서 양생 시간별 함수비, 단위 중량, 수축팽창에 대한 열저항 측정실험을 수행하고, 실제와 동일한 조건으로 실증실험을 수행하여 현장 적용성을 검증하였다.

2. 실내 열저항 실험

2.1 실험시료 및 제작

본 연구에 사용된 대상 시료는 국내 표토층의 70-80%를 차지하고 있는 다양한 풍화토 지반을 모사하기 위하여 사질토(풍화토), 순수점토, 그리고 SW-SM으로 분류된 사질토에 점토분의 함유량을 10-30%, 13mm 이하 자갈의 함유량을 10-50%까지 적용한 단일, 2종 혼합토와 사질토에 자갈 10-30%와 점토 10-20%가 함유된 3종 혼합토, 총 17종과 고화재 3종류(A type : 풍화토와 혼합토용, B type : 강모래용, C type : 점토용)로 구성된다(표 1, 2). 그리고 이 시료들은 선행연구에서 역학적 특성에 따라 산출한 최적 배합비를 이용하여 시료를 제작하였으며, 고화재의 고화작용, 흙의 구성성분 및 양생 시간(1시간, 4시간, 7일, 28일, 56일)에 따른 열특성의 변화를 확인하기 위해서 총 17종의 시료에 대해서 열특성 실험을 수행하였다. 본 실험의 시편은 높이 100mm, 폭 50mm 원기둥 몰드에 대상 시료별로 Sealing을 통한 습식양생 방법으로 제작하였다. 그리고 실내 실험조건은 표 3과 같다.

2.2 열저항 및 측정방법

토사의 열저항을 나타내는 단위는 [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}/\text{watt}$] 혹은 [$\text{K} \cdot \text{cm}/\text{watt}$]이며, 한 변의 길이가 1[cm]인 정육면체 내부를 통해 1[watt]의 열이 흐르면 정육면체 전체에 1[$^{\circ}\text{C}$]의 온도 상승을 일으키는 토사의 열특성을 나타내는 것으로써 토사

표 1. 대상 시료의 기본물성(17종)

분류 (USCS)	대상토질	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	비중 Gs	액성한계 (LL)	소성지수 (PI)
SW-SM	풍화토 100%	0.073	0.22	0.57	2.65	26.85	NP
SP	강모래 100 %	0.1	0.25	4	2.64	NP	NP
CH	점토 100 %	0.00001	0.0006	0.008	2.60	63	33.70
SW-SM	풍화토 90%+자갈 10%	0.079	0.25	0.69	2.65	26.85	NP
SW-SM	풍화토 80%+자갈 10%+점토 10%	0.033	0.2	0.605	2.64	28.38	6.88
SP-SM	풍화토 80% + 자갈 20%	0.083	0.3	1.10	2.64	26.85	NP
SP-SM	풍화토 70% + 자갈 30%	0.13	0.36	1.70	2.64	26.85	NP
SP-SM	풍화토 60% + 자갈 40%	0.13	0.41	4.76	2.63	26.85	NP
SP-SM	풍화토 90% + 점토 10%	0.057	0.15	0.51	2.65	28.02	6.72
SC	풍화토 80% + 점토 20%	0.035	0.088	0.48	2.64	31.18	8.48
SC	풍화토 70% + 점토 30%	0.031	0.06	0.34	2.64	33.50	9.80
SC	풍화토 70%+자갈 10%+점토 20%	0.035	0.096	0.49	2.63	31.62	8.62
SC	풍화토 70%+자갈 20%+점토 10%	0.034	0.22	0.81	2.63	28.99	7.09
SC	풍화토 60%+자갈 20%+점토 20%	0.036	0.13	0.75	2.63	32.11	8.81
SC	풍화토 60%+자갈 30%+점토 10%	0.044	0.27	1.30	2.63	29.44	7.29
SC	풍화토 50%+자갈 30%+점토 20%	0.038	0.17	1.20	2.62	33.08	9.38
GP-GM	풍화토 50% + 자갈 50%	0.16	0.58	-	2.62	26.85	NP

표 2. 고화재의 화학특성(3종)

구분	lg. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total	비중	분말도 (cm ² /N)
A 고화재(풍화토)	2.03	20.5	22.2	1.2	42.6	3.6	7.0	99.13	2.88	459183
B 고화재(강모래)	1.81	29.2	16.2	0.7	43.3	4.7	3.3	99.21	2.89	459183
C 고화재(순수점토)	2.68	20.2	13.7	1.5	48.1	3.5	9.8	99.48	2.97	459387

표 3. 실내 실험조건

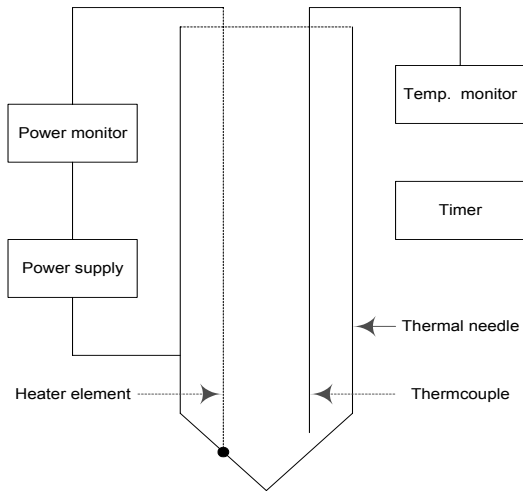
실험조건	대상시료	실험항목
양생 시간 (1hr, 4hr, 7day, 28day, 56day)	혼합토 17종류	열 저항값, 단위 중량, 함수비, 일축압축강도
수축팽창 (건조, 수침 각 3회)	풍화토 100% 풍화토 70% + 자갈 30% 풍화토 80% + 점토 20%	열 저항값, 일축압축강도, 체적변화

가 열원으로부터 받은 열을 얼마나 쉽게 외부로 전달할 수 있는 가를 의미한다.

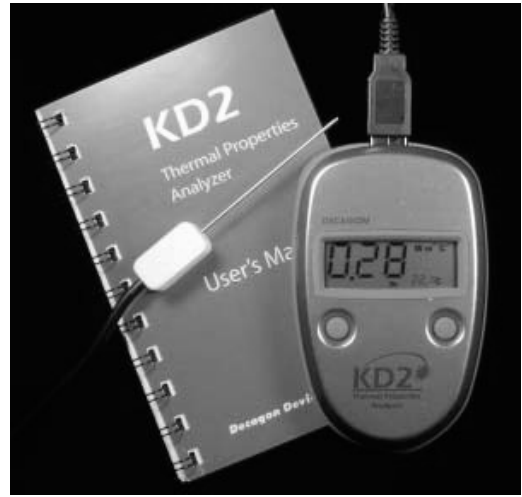
열저항을 측정하는 대부분의 방법은 열원을 토양이나 시료에 삽입하여 열원에 의한 토양 내의 온도를 측정함으로써 열저항을 구하도록 되어 있다. 이때 열원을 선형열원 또는 원통형열원으로 가정하여 열저항을 계산하는 이론식을 유도하여 구하고 있으며, 시료를 이용한 실험실에서만 열 저항을 측정할 수 있는 Shannon-Wells(1947)법과 현장과 실험실 양쪽에서 열저항을 측정할 수 있는 탐침법이 있다. 위 방법들은 열원에서 발생한 열이 시료를 통과할 때 토사 내에서 발생하는 온도차를 실측함으로써 열저항을 구하는 직접적인 반면, 토사의 건조밀도, 수분함량, 모래와 점토의 구성

비율에 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 필요 없어 가장 많이 사용되는 방법이다.

본 연구에서는 되메움토사의 열저항과의 관련성을 고려하여 IEEE Std. 442(1981)를 중심으로 측정장치 및 측정방법을 사용하였다. IEEE Std. 442에서는 토사의 열 저항성에 영향을 미치는 인자로 수분함량과 건조밀도, 입자의 구성성



(a) 개요도



(b) 실험기

그림 2. 열저항 측정장치 개요도 및 실험기

분(structural composition) 및 각종 환경인자를 제시하고 있다. 또한, 측정에 영향을 미치는 인자들로서는 토사내 수분의 이동, 중력에 의한 수분의 재배치, 전원의 안정성, 프로브를 중심으로 한 설치상의 오류, 재료의 불균질성, 층상지반의 존재 등을 지적하고 있다. 아울러, 지중선로에의 응용에 있어서는 계절적 요인에 따른 열 저항성의 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, 측온저항체, 전력계, 온도계 등으로 구성된다. 본 연구에서는 열 저항치를 측정하기 위해서 탐침법을 적용한 Decagon Devices사의 KD2 열저항 측정기(thermal properties analyzer)를 사용하였다. 이는 대상 시료에 대해서 90초간 열안정성을 확인한 후 30초 동안 열 저항성을 계산한다(그림 2).

표 4. 현장실험 대상 지반의 물성치

분 류		현장발생토
No. 200체 통과량 (%)	F200	7.231
균등계수	C _u	3.655
곡률계수	C _e	0.846
비중	G _s	2.600
통일분류(USCS)		SP-SM

표 5. 현장배합비, 유동성 및 일축압축강도

구 분	함수비 (%)	FLOW (mm)	1m ³ 당 배합량(kN)			강도 (kN/m ²)
			고화재	현장토	물	
시방배합	0	215	1.6	11.2	4.9	33.3(1시간) 149.0(4시간)
현장배합	11.21	295	1.6	12.5	4.4	79.4(1시간) 199.0(4시간)

3. 현장 열저항 측정실험

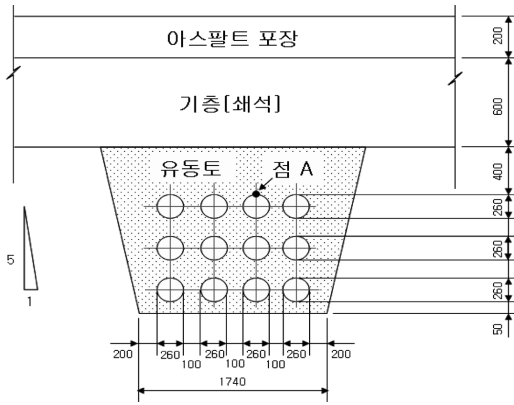
본 실험의 목적은 실제 현장시공 단면으로 시공하였을 때 실제 시공조건에서의 유동성 뒤택음재의 열 저항성을 확인하기 위해서이다.

3.1 지하매설용 뒤택음재

본 연구에서는 실내실험과 동일하게 국내 70-80%를 차지하는 풍화토(사질토에 자갈 2.53%, 그리고 세립분 7.231%가 함유)를 대상으로 선정하였다(표 4). 유동성 뒤택음재는 아래 표 5에 나타난 배합비와 같이 11.21%인 현장 함수비를 고려하여 현장발생토 67.4%, 고화재 8.8%, 물 23.9%를 혼합하여 사용하였다.

3.2 실험계획

본 연구에서는 한국전력의 실제 지중송배전선로 시공 절차에 따라서 한전 전력연구원 실증실험장에 실험체를 시공하였고 현장과 동일하게 하기 위해서 PE파형관을 3단 4열을 배치한 상태에서 뒤택음재를 시공하였다. 아스팔트 포장은 주요간선도로에 적용되는 A-1급 포장도로를 시공하였다



(a) 실험단면



(b) 시공장면

그림 3. 지중관로 실험단면 및 시공장면

표 6. 유동성 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°C cm / W 이하
블리딩	3% 이하
침하	3mm/30cm 이하

(그림 3). 표 6은 유동성 뒤채움재의 품질기준(이대수 등, 2006)을 나타낸 것으로 시공 완료 후 본 기준을 근거로 재료의 열 저항성을 평가할 예정이다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 양생에 따른 열저항 특성

유동성 뒤채움재는 고화재를 사용하기 때문에 재료의 양생 시간 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 경화시간(hardening)으로 크게 나누어진다(신방웅 등, 2002). 본 유동성 뒤채움재는 도심지 시공을 위해서 급속시공이 가능하도록 일반적으로 1시간에서 10시간으로 규정하고 있는 응결을 약 4시간 내에 종료하여 조기 강도를 발현할 수 있도록 개발된 재료로 양생에 따른 물리 역학적 특성의 변화가 심한 재료이다. 따라서 양생 시간에 따른 역학적 특성변화를 분석해 보았다.

그림 4, 5는 단일 및 2종 혼합토 11종에 대해서 양생 시간에 따른 재료의 일축압축강도와 열 저항성을 나타낸 그래프

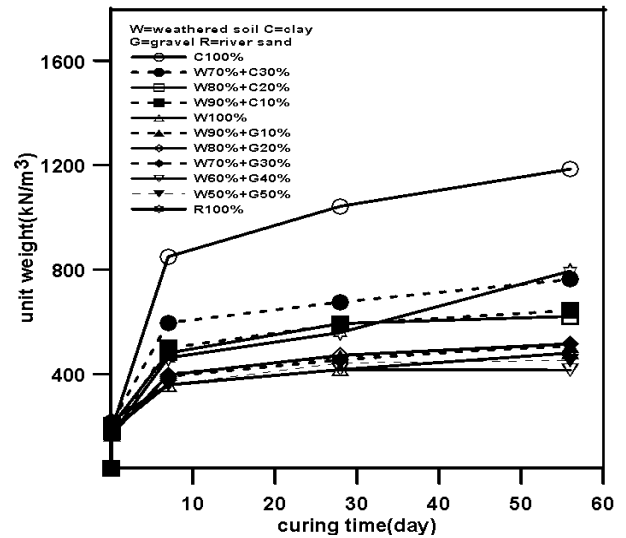


그림 4. 양생 시간에 따른 일축압축강도

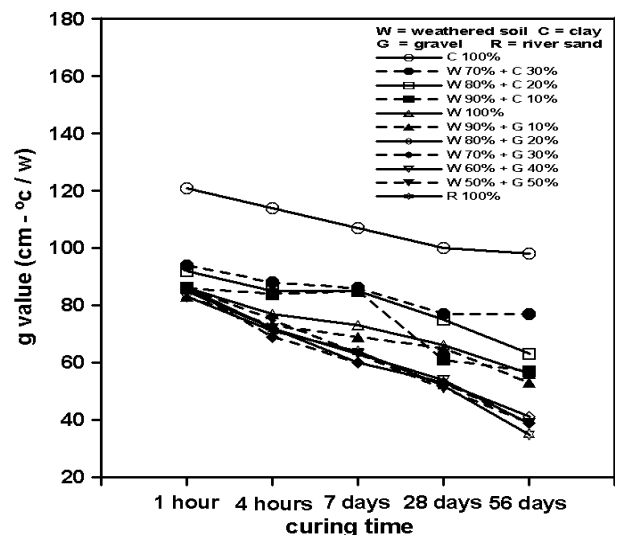


그림 5. 양생 시간에 따른 열 저항성

로 일축압축강도와 열 저항성 모두 양생 시간에 비례하여 강도증가 및 열 저항값 감소와 같은 성능개선을 나타내고 있다. 그런데 일축압축강도는 양생 7일까지는 급격하게 강

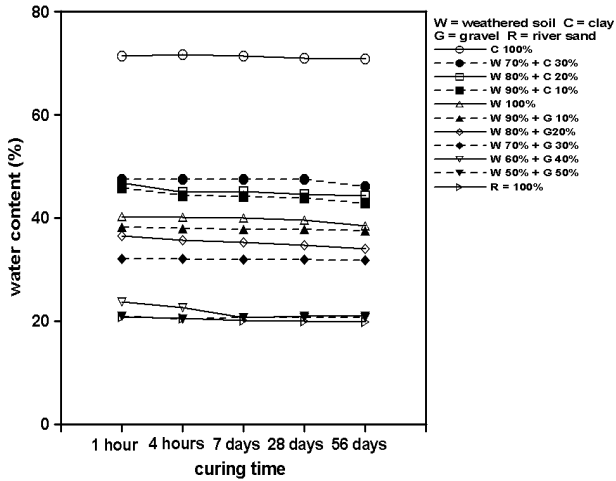


그림 6. 양생 시간에 따른 함수비 특성

도가 증가하고 이후에는 강도값이 수렴하는 경향을 보이나, 열 저항값은 양생 시작 이후 비례하여 일정하게 감소하는 경향을 나타내고 있다.

이는 시간이 경과함에 따라서 재료를 경화시키는 고화제의 수화작용이 원인인 것으로 판단된다. 유동성 뒤채움재의 일축압축강도는 구성 입자들을 결합(binding)하여 강도를 발휘하는 고화제의 수화작용의 진행정도에 영향을 받는데 일반적으로 양생 7일 정도에 전체 강도의 70-80%를 발휘한다. 따라서 7일까지 일축압축강도가 급속히 증가하고 이후 증가 속도가 둔화되는 것으로 판단된다. 하지만, 열 저항성은 이런 화학작용 보다는 입자들 간의 접촉성에 영향을 받게되는데, 그림 6에서 보듯이 양생이 진행됨에 따라서 수화작용에 의해서 함수비가 0.9~11.9% 정도로 적은 양이지만 꾸준히 줄어들면서 입자들 사이가 조밀해져 재료를 사이의 접촉성이 좋

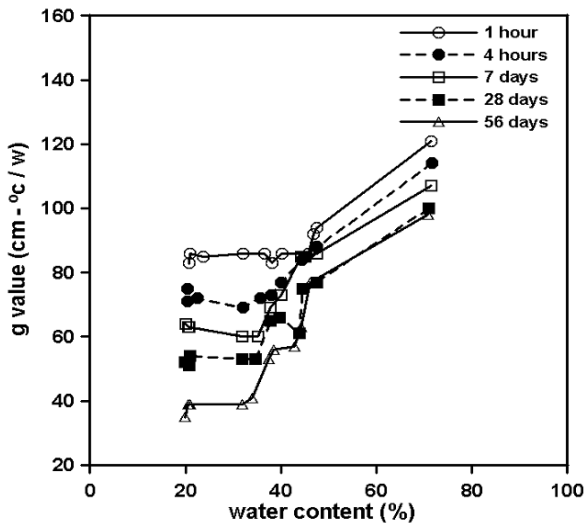
아졌기 때문에 열 저항값이 감소한 것으로 판단된다.

4.2 역학적 특성에 따른 열저항 거동

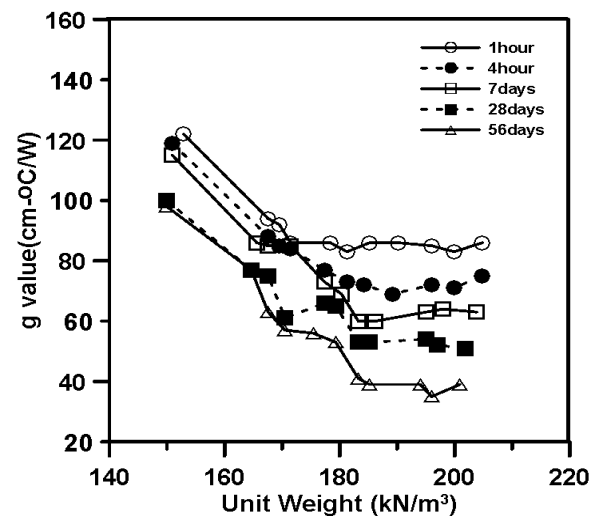
함수비와 단위 중량은 일반 토사의 열특성에 영향을 미치는 가장 큰 인자이다(Kersten, 1949). 일반 모래의 경우 함수비와 단위 중량이 증가하면 열 저항값이 감소하고, 그 반대의 경우에는 열 저항값이 증가하는 경향을 보인다. 한편 점토의 경우는 단위 중량값에 대해서는 모래와 같은 경향을 보이지만, 함수비는 반대의 경향을 나타낸다고 보고되어 있다(백성권 등, 2005). 특히, 함수비는 모래의 경우 수분을 많이 함유하는 영역에서 함수비-열 저항값 함수 구배가 대수 함수에 비례하며 완만하지만, 건조영역에서는 온도가 급격히 올라가는 특징을 나타낸다(김대홍 등, 2002).

이에 열특성에 주요인자인 함수비 및 단위 중량에 따른 유동성 뒤채움재의 열 저항특성을 분석하였다. 그림 7은 표 1의 대상시료 중 단일 및 2중 혼합토 11종에 대해서 함수비와 단위 중량 변화에 따른 열 저항값을 양생 시간별로 나타낸 그래프로 동일 대상시료에 대한 값은 아니지만, 양생 시간별 열 저항값이 단위 중량에는 비례하고, 함수비에는 반비례하여 증가하는 일관된 경향을 나타냈다.

그리고 그림 8은 28일 양생된 유동성 뒤채움재의 함수비와 단위 중량에 따른 열 저항값의 관계를 나타낸 그래프로 총 17종의 혼합토를 구성성분별로 구분한 결과 동일한 함수비와 단위 중량에 대해서 점토를 함유한 시료가 자갈을 함유한 시료에 비해서 열 저항값이 최대 2배 정도 크게 나타났다. 이는 유동성 뒤채움재의 배합에 사용된 구성재료인 점토와 자갈의 물리적 특성 때문으로 판단된다. 점토는 수

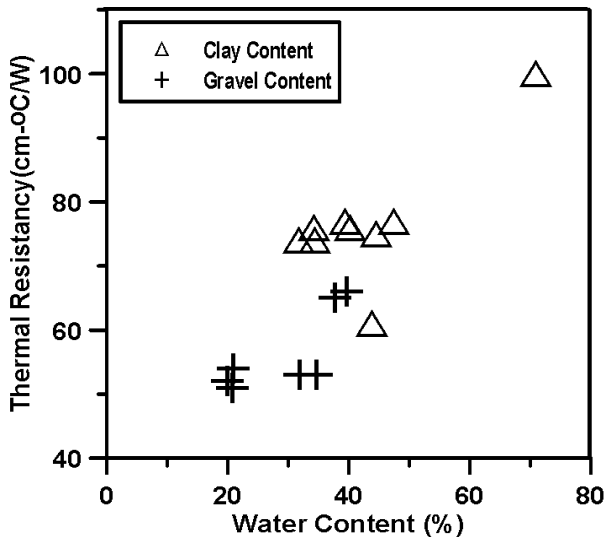


(a) 함수비-열 저항값

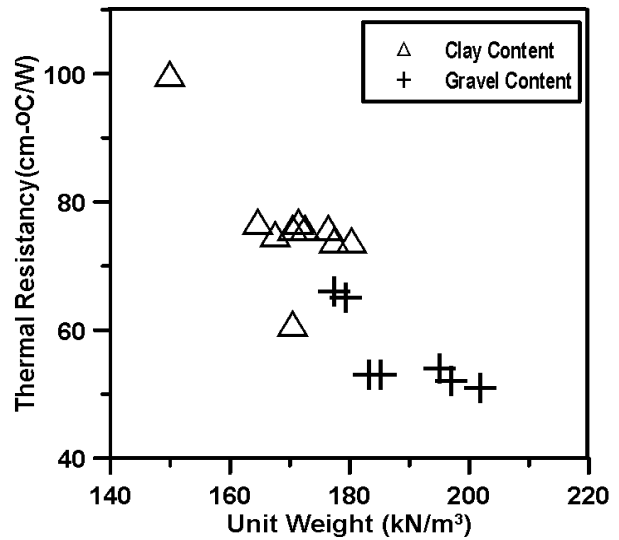


(b) 단위 중량-열 저항값

그림 7. 양생에 따른 단일 및 2중시료의 함수비, 단위 중량에 따른 열 저항값



(a) 함수비-열 저항값



(b) 단위 중량-열 저항값

그림 8. 양생 28일인 17종 혼합토의 함수비, 단위 중량에 따른 열 저항값

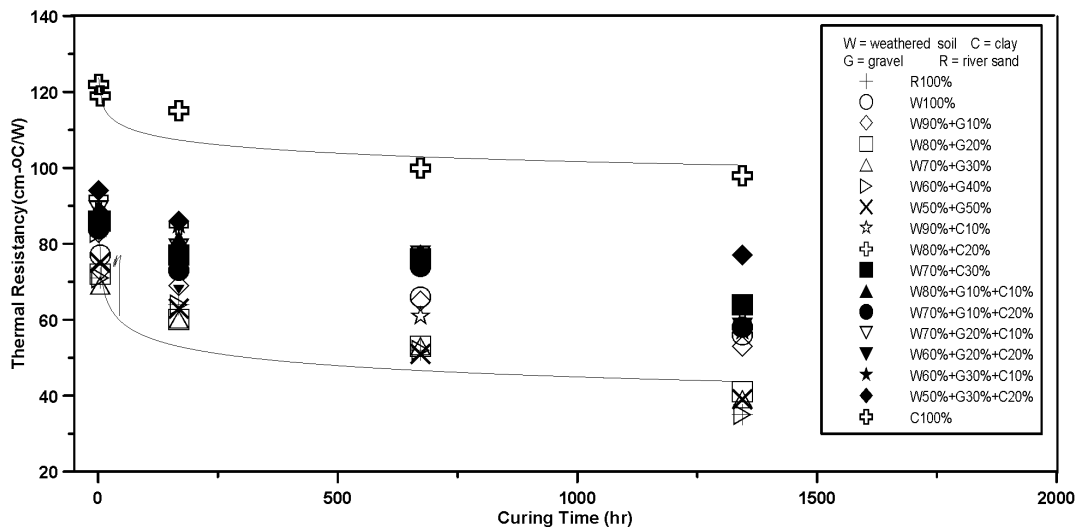


그림 9. 17종 혼합토의 양생에 따른 열 저항값

분을 많이 흡수하지만 단위 중량이 작고 자갈은 수분을 흡수하지 못하지만 단위 중량이 큰 물리적 특성을 가지기 때문이다. 자갈은 주성분이 물리, 화학적 풍화에 안정화된 물질들로 구성되어 있어 표면에 흡착하는 수분은 적지만, 함수량 증감에 의한 체적변화가 없어 단위 중량은 크고 수분을 흡수하면 체적이 팽창하는 점토와 달리 동일한 함수비에도 높은 열전도성을 나타내기 때문이다.

그림 9는 17종 시료에 대해서 양생 56일까지의 열 저항값을 모두 나타낸 그래프로 양생 시간이 증가함에 따라 열 저항값은 점점 줄어들고 log 함수로 나타낸 결과 수화작용이 마무리되는 56일 이후에는 거의 일정한 값에 수렴하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 본 그래프에서 다양한 재료들로 구성된 혼합토의 양생 58일차 열 저항값을 비교해보면 최소 $35\text{cm}^{\circ}\text{C}W^{-1}$ 에서 최대 $100\text{cm}^{\circ}\text{C}W^{-1}$ 까지 다양한 값을 나타내

어, 혼합토의 구성 재료에 따라서 열 저항값이 최대 280%까지 차이가 남을 확인할 수 있었다. 양생 58일차 열 저항값이 $100\text{cm}^{\circ}\text{C}W^{-1}$ 이상을 나타낸 점토 100%를 제외하고는 유동성 뒤채움재 품질기준을 만족하는 것으로 확인되었다.

본 실험결과, 지반굴착 시 건설폐기물로 버려지는 굴착잔토를 이용하여 시공하는 본 유동성 뒤채움재는 현장지반의 구성성분에 따라서 열저항 특성이 상이하게 변화하므로 시공 전에 지반의 구성성분 및 열특성에 대한 사전 조사가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

4.3 수축팽창에 따른 압축강도 및 열 저항특성

유동성 뒤채움재의 현장 시공 시 지하수는 재료의 품질을 저하할 수 있는 매우 중요한 요소이다. 지하수 유입 시 대상시료의 수분 흡수에 의한 팽창 또는 건조로 인한 수축

등이 물리 역학적 특성에 큰 영향을 미치기 때문이다. 지하수의 영향으로 유동성 뒤채움재에 팽창 또는 수축이 발생하면 재료의 강도가 약화되고 외력이 없어도 변위가 발생하여 지중 매설관에 악영향을 미칠 수 있다. 즉, 재료가 수분을 흡수하여 팽창한다면 지중 매설 구조물에 팽창압이 작용하고, 건조에 의해 수축된다면 지중구조물과 흙사이에 간극이 발생하여 수축 또는 팽창이 없는 재료보다 더 많은 변위가 발생할 것이다. 뿐만 아니라, 팽창과 수축이 반복된다면 강도 및 열 저항성에도 악영향을 미칠 수 있다.

이에, 본 실험에서는 총 17종류의 시료 중에서 공학적 성질이 확연히 구분되는 A고화재를 적용한 풍화토(SW-SM), 풍화토에 자갈이 30% 함유된 혼합토, 그리고 풍화토에 점토가 20% 함유된 혼합토에 대하여 7일간 양생 후 재령 28일까지의 팽창 및 수축 실험을 수행하였다. 7일 양생된 시료에 대하여 5일간 수침 시킨 후 110°C의 건조로에서 2일간

건조시켰다. 또한 수축, 팽창의 반복을 2회 이상 수행하여 변위가 발생하지 않을 때까지 실험을 반복하고, 이때 시료의 길이변화율, 일축압축강도 및 열 저항값을 측정하였다.

실험결과, 7일간 Sealing 양생된 공시체에 대하여 수축팽창실험을 3회 반복한 결과 초기에 평균 약 1%정도의 변화를 보이고 그 이후 2회 이상 반복 실험결과 일정한 값으로 수렴하였다. 이때 일축압축강도는 12~26% 정도 감소하고, 열 저항값은 약 15~33% 상승하는 결과를 나타냈다(표 7~9). 이는 대상 시료들이 팽창, 수축을 반복하면서 시료 내에 존재하는 공기가 빠져나와 입자들 간의 구조가 취약해짐에 따라서 간극이 커져 입자간의 접촉 면적이 줄어들어 때문으로 판단된다. 하지만, 압축강도 및 열 저항치 모두 유동성 뒤채움재(이대수 등, 2006) 품질기준값을 만족하는 것으로 나타났다.

표 7. 수축팽창 실험(28일 양생 시료에 대한 길이변화율)

대상시료	재령 28일	초기 길이 (mm)	1차 수축비 (%)	1차 팽창비 (%)	2차 수축비 (%)	2차 팽창비 (%)	3차 수축비 (%)	3차 팽창비 (%)
풍화토(SW-SM) 100%		100	- 1.17	- 0.86	- 1.49	- 1.15	- 1.54	- 1.51
풍화토 70% + 자갈 30%		100	- 1.59	- 1.37	- 1.70	- 1.39	- 1.74	- 1.59
풍화토 80% + 점토 20%		100	- 0.55	- 0.26	- 0.78	- 0.58	- 0.81	- 0.73

표 8. 수축 팽창 반복 수행한 공시체에 대한 일축압축강도(kN/m²)

대상시료	재령 28일	sealing 시 Qu	수축팽창반복 시 Qu	변화율 %
풍화토(SW-SM) 100%		417.48	321.44	- 23.00
풍화토 70% + 자갈 30%		454.72	335.16	- 26.29
풍화토 80% + 점토 20%		593.88	528.22	- 12.43

표 9. 수축팽창 반복 수행한 공시체에 대한 열 저항성(g value, cm-°C/w)

대상시료	재령 28일	g Value		변화율(%)
		sealing 시	수축팽창반복 시	
풍화토(SW-SM) 100%		66	83	+ 25.76
풍화토 70% + 자갈 30%		53	80	+ 33.75
풍화토 80% + 점토 20%		75	86	+ 14.67



그림 10. 열 저항성 측정을 위한 인력굴착



그림 11. 열 저항성 측정

표 10. 현장토의 열 저항성 측정 (단위 : $\text{cm}^{\circ}\text{C}W^{-1}$)

재 령	실내실험					실증실험	기준
	1시간	4시간	7일	28일	56일	7일	
현장토	86	77	73	66	56	85	85 이하

4.4 현장실증실험결과

유동성 뒤택음재의 현장 시공 7일 양생 후 실증실험 단면의 열 저항성을 측정하기 위하여 단면 상단을 인력으로 굴착하였다. 여러 차례 측정을 시도하였으나 실험 후 측정까지 7일간 내린 비와 측정과정에서 외압에 의한 유동성 뒤택음재의 조밀도가 손상되는 것을 방지하기 위하여 인력으로 상부 포장을 제거하고 그림 10, 11과 같이 현장 열 저항치를 측정하였음에도 불구하고 굴착에 따른 외압으로 측정단면의 조밀도가 손상되어 신뢰할 만한 열 저항치를 얻기 어려웠다. 현장시공 시 대상 시료에 대해서 실내실험을 병행하여 수행하였는데, 그 결과 표 10과 같이 실내실험보다는 7일 양생기준으로 약 16.4% 크게 나타났다. 이는 인력굴착 시 지반의 교란 및 현장의 지하수 및 우수 유입에 따른 팽창의 영향으로 판단된다. 하지만, 양생 7일 열 저항치값이 $85\text{cm}^{\circ}\text{C}W^{-1}$ 으로 유동성 뒤택음재의 품질기준(이대수 등, 2006)을 만족하는 것으로 확인되어, 현장적용성이 우수한 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구는 지중전력케이블 유동성 뒤택음재의 열저항 특성을 검토하기 위해서 총 17종의 혼합토에 대해서 실내 및 현장실험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 열저항 측정실험 수행결과, 열특성에 주요인자인 함수비와 단위 중량에 대해서 일반모래와는 달리 함수비가 줄어들수록 열 저항값이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 고화재를 사용하는 재료 특성상 양생에 따라서 수분이 감소하고 고화재에 의한 결합이 발생하여 함수비는 다소 줄어들지만 입자간의 결합이 치밀해져 열 저항성이 낮아진 때문으로 총 17종의 혼합토에 대해서 양생 시간에 따라서 열 저항값을 측정한 결과 모두 시간이 지남에 따라서 열 저항값이 40-80% 수준 저감하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 동일한 함수비 및 단위 중량에서도 혼합토의 구성 비율에 따라서 양생 28일 기준으로 열 저항값이 최대 2배 까지 크게 나타나, 양생 시간 및 지반의 구성 성분이 유동성 뒤택음재의 열 저항값에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다.

(2) 시공 시 재료의 품질에 큰 영향을 미치는 지하수에 따른 수축팽창에 대한 영향을 검토하기 위해서 공학적 성질이 확연히 구분되는 A고화재를 적용한 풍화토(SW-SM), 풍화토에 자갈이 30% 함유된 혼합토, 그리고 풍화토에 점토가 20% 함유된 혼합토에 대해서 수축팽창에 따른 일축압축강도 및 열저항 특성을 검토한 결과 대상시료에 따라서 일축압축강도는 12~26% 정도 감소하고 열 저항값은 약 15~33%정도 상승하였다. 이는 재료의 수축 팽창에 따른 시료내에 존재하는 공기가 빠져나와 입자들 간의 구조가 취약해짐에 따라서 간극이 커져 입자간의 접촉 면적이 줄어든 때문으로 판단된다. 하지만, 압축강도는 $321\sim 528\text{kN/m}^2$, 열 저항치는 $83\sim 86\text{cm}^{\circ}\text{C}/W$ 으로 유동성 뒤택음재 품질기준값을 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 마지막으로, 현장실험부지 풍화토에 대해서 유동화 뒤택음재 현장시공단면에 대해서 열 저항값 측정을 수행한 결과, 현장 측정값이 동일시료에 대해서 실내실험을 수행한 실험값 보다 약 16.4% 크게 나타났다. 이는 시공 시 지하수의 영향 및 실험을 위한 인력굴착 시 발생한 지반의 교란의 영향으로 판단된다. 하지만, 양생 7일 후 측정된 현장 열 저항 실험결과가 $85\text{cm}^{\circ}\text{C}W^{-1}$ 으로 유동성 뒤택음재의 품질기준을 만족하는 것으로 확인되어, 현장적용성이 우수한 것으로 나타났다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 김대홍, 이대수(2002), 지중송전관로 뒤택음재의 열저항 특성, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 18, No. 5, pp. 209~220
2. 박재현, 이관호, 조재운, 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), 파형강관을 이용한 지하매설물용 뒤택음재 설계 및 시공성 평가, *한국도로학회 논문집*, Vol. 8, No. 2, pp. 63~74.

6. 이대수 등(2006), 굴착 잔토를 재활용한 지중 전력구조물 뒷채움재 개발, 연구보고서, 한국전력공사, pp. 183~202.
7. 조재운, 이관호, 이인모(2000), 유동특성을 이용한 폐주물사 혼합물의 옹벽뒷채움재 연구, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 16, No. 4, pp. 17~30.
8. 천선호, 정상섬, 이대수, 김대홍(2006), 굴착 잔토를 재활용한 지중전력구조물 뒷채움재의 역학적 특성, *대한토목학회 논문집*, Vol. 26, No. 5, pp. 303~312.
9. 최항석, 이철호, 최효범, 이상백(2008), 지중열교환기용 뒤채움재의 물리적 특성연구, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 24, No. 1, pp. 37~49.
10. Jakardhanam, R., Burns, F., and Peindl, R. D.(1992), Mix Design for Flowable Fly-ash Backfill Material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 252~262.
11. Kersten, M.S.(1949), *Thermal Properties of Soil*, Report, Bulletin of the University of Minnesota, Institute of Technology, pp. 55.
12. M.A.Martin, Jr 등(1981), *IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements*, IEEE Std 442-1981, pp. 6~15.
13. Shannon, W. L. and Wells, W. A.(1947), Tests of Thermal Diffusivity of Granular Materials, *Proceedings of ASTM*, Vol. 47, pp. 1044~1053.
14. Tarun, R. K., Shiw, S. S. and Bruce, W. R.(2001) Performance and Leaching Assessment of Flowable Slurry, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 127, No. 4, pp. 359~368.
15. Wayne, S.A. (1994), *Controlled Low Strength Materials (CLSM)*, ACI 229R-94, pp. 2~3.
16. Yoshinari, N., Hironori, M., Makoto, U., Hiroshi, S., Takeshi, I. and Satoshi, M.(2007), Development on the Mortar Material for Cable Systems in a Directional Drilling, *7th International Conference on Insulated Power Cable*, Jicable, Versailles-France, pp. 684~689.

(접수일: 2010. 7. 9 심사일: 2010. 7. 20 심사완료일: 2010. 9. 13)