

## 열 저항특성을 고려한 지중송전관로 친환경 되메움재 개발

## Development of Environmentally Friendly Backfill Materials for Underground Power Cables Considering Thermal Resistivity

김 대 홍<sup>†</sup> · 오 기 대<sup>1)</sup>

Kim, Daehong · Oh, Gidae

**ABSTRACT** : Because the allowable current loading of buried electrical transmission cables is frequently limited by the maximum permissible temperature of the cable or of the surrounding ground, there is a need for cable backfill materials to be maintained at a low thermal resistivity during the service period. Temperatures greater than 50°C to 60°C may lead to breakdown of cable insulation and thermal runaway if the surrounding backfill material is unable to dissipate the heat as rapidly as it is generated. This paper describes the results of studies aimed at the development of backfill material to reduce the thermal resistivity. A large number of different additive materials were tested to determine their applicability as a substitute material. The results of Dong-rim river sand (relatively uniform) show that as water content level increases, thermal resistivity tends to decrease, whereas the thermal resistivity on dry condition is very high value(260°C-cm/watt). In addition, other materials(such as Jinsan granite screenings, A-2(sand and gravel mixture), E-1(rubble and granite screenings mixture) and SGFC(sand, gravel, fly-ash and cement mixture)) are well-graded materials with low thermal resistivity(100°C-cm/watt when dry). Based on this research, 4 types of improved materials were suggested as the environmentally friendly backfill materials with low thermal resistivity.

**Keywords** : Underground power cables, Thermal resistivity, Backfill materials, Granite screenings, SGFC

**요 지** : 지중송전케이블의 송전용량은 케이블 또는 주변지반의 최대허용온도에 좌우되기 때문에 케이블 주위 되메움재는 운영기간동안 낮은 열 저항성을 유지하여야 한다. 케이블 주위에 발생된 열은 되메움재를 통해 즉시 주위에 발산시켜 제거하여야 하며, 그렇지 않으면 통상온도(50~60°C)에서도 열폭주에 의한 절연파괴에 이를 수 있다. 본 논문에서는 되메움재의 열 저항을 낮추기 위한 여러 가지 방법에 대해 논하였으며, 다양한 첨가제를 사용하여 시험을 수행함으로써 열 저항 효과를 측정하였다. 연구결과, 영광 동림천 모래의 경우 상대적으로 균등한 입도분포를 나타내는 모래로써 함수비가 증가함에 따라 열저항은 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 특히 건조상태에서의 열저항치는 매우 높은 값(260°C-cm/watt)을 보여주었다. 또한 진산 화강암 석분 및 모래-쇄석(A-2), 석분-쇄석 혼합재(E-1), SGFC(모래-자갈-플라이애시-시멘트 혼합재)의 경우 양호한 입도와 낮은 열저항(100°C-cm/watt 건조시)을 보여주었으며, 이들 연구결과를 토대로 열저항이 낮고 환경친화적인 4가지 형태의 개선된 되메움재를 제시하였다.

**주요어** : 지중송전관로, 열 저항값, 되메움재, 석분, SGFC

## 1. 서 론

지중송전선로의 실제 송전용량은 케이블 자체의 최대허용온도 또는 주위지반의 허용온도에 의해 결정된다. 발생된 열을 케이블 주위의 되메움재가 효과적으로 방출시키지 않으면 열폭주(thermal runaway) 또는 케이블이 절연파괴에 이를 수있으며, 이러한 문제는 열에 의한 되메움재에서의 수분이동으로 더 악화된다. 지중송전케이블의 송전용량을 증대시키기 위해서는 전압 및 전류를 증가시켜야 되나 이들은 모두 발생열의 증가를 가져오게 된다. 케이블 주변토사의 고유 열 저항은 함수량에 따라 크게 변화하기 때문에 열

저항을 높게 설정하여 보수적으로 설계한다 하더라도 건조기에 토사의 함수량 변화로 인한 열 폭주 현상이 일어날 수 있다(Imajo, 1976). 지중전력케이블의 되메움재로서 역학적으로 안정하고 시공성이 우수한 강모래가 사용되고 있으나, 100°C-cm/watt의 건조 열 저항을 얻기 위해서는 간극율이 25% 이하가 되어야 하는 것으로 나타났으나 비교적 균등한 강모래의 경우 최대 다짐상태에서도 35% 이하의 간극율을 얻기는 곤란한 것으로 보고되어 있다(Fukagawa 등, 1974). 따라서 사용가능한 여러 재료를 혼합하여 간극율을 최소화할 수 있는 배합비를 선정하여 최적의 혼합재료를 개발하고 이를 통해 열 특성을 개선함으로써 단위 송전용량 증대는

† 비회원, KEPCO 전력연구원 책임연구원(E-mail : dhkim@kepcoco.kr)

1) 정회원, KEPCO 전력연구원 선임연구원

물론 기존 강모래를 대체함으로써 환경훼손을 최소화할 수 있다.

본 연구에서는 열 저항이 최소가 되는 지중송전관로용 되메움재를 개발하고자 한다. 이를 위해 열 특성 측정장치인 탐침법(thermal needle method)을 이용하여 현재 지중전력케이블 되메움재로 쓰이고 있는 강모래에 대해 물성시험 및 열 저항 시험을 수행하고 다짐도 및 함수비에 따른 열 특성을 규명하였다. 또한 강모래를 주축으로 여러 재료(전로슬래그, 자갈, 석분, 플라이애시, 시멘트 등)를 혼합한 시료를 사용하여 간극율이 최소가 되는 최밀충전계의 입도분포를 도출하고 함수비 변화에 따른 열 특성을 규명하여 열 저항이 최소가 되는 혼합비 선정 및 재료를 개발하였다. 또한 다짐이 필요없는 저장도 되메움 콘크리트에 대한 열특성 시험을 수행하여 최적의 배합비를 제시하였다.

## 2. 되메움재의 열 저항 및 측정방법

### 2.1 열 저항 측정법

토사의 열 저항을 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 온도상승을 일으키는 토사의 열특성을 나타내는 것으로서 토사가 열원으로부터 받은 열을 얼마나 쉽게 heat sink로 전달할 수 있는가를 의미한다. 열 저항을 측정하는 대부분의 방법은 열원을 토사나 시료에 삽입하여 열원에 의한 토사 내의 온도를 측정함으로써 열 저항을 구하도록 되어 있다.

열 저항 측정법은 열원에서 발생한 열이 시료를 통과할 때 토사 내에서 발생하는 온도차를 실측함으로써 열 저항을 구하는 직접법과 토사의 건조밀도, 수분함량, 모래와 점토의 구성비율에 대한 토사의 모델을 가정하여 실험실에서 열 저항을 구하는 간접법이 있다. 토사의 열 저항을 측정하는 방법 중 탐침법은 다른 방법에 비해 상대적으로 단순하고 짧은 시간 내에 측정이 가능할 뿐만 아니라 현장에서 직접 열 저항을 측정할 수 있으며, 시료에 대한 비열(specific heat) 계산이 필요 없어 편리한 장점이 있다.

탐침법의 원리를 살펴보면 열 확산율이  $\delta$ 인 매질 내에 길이가 무한대인 선형 열원이 있을 때 선형 열원으로부터 반경  $r$ 인 임의의 지점에서 온도  $\theta$ 는 발열 후 시간  $t$ 에 대해 원통 좌표계에서 Fourier 방정식으로부터 식 (1)과 같은 열전도식으로 표현할 수 있다(Carslaw 등, 1959).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \delta \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (1)$$

식 (1)의 해는 식 (2)와 같다.

$$\theta(t, r) = \frac{\rho Q}{4\pi} E_i(-\chi) \quad (2)$$

여기서,  $\delta$  : 열확산율

$Q$  : 단위시간/길이에서 발생한 열량

$\rho$  : 열 저항율

$\theta(t)$  : 시간  $t$ 에서의 온도

$r$  : 열원으로부터 반경방향 거리

$t$  : 시간

$$\chi = \frac{r^2}{4\delta t} \quad E_i(-\chi) = \int_{\chi}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

도출된 식 (2)를 전개하면 식 (3)과 같이 된다.

$$\theta(t, r) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[ \ln \frac{4\delta t}{r^2} - \gamma + \frac{1}{1!} \frac{r^2}{4\delta t} - \frac{1}{2!} \left( \frac{r^2}{4\delta t} \right)^2 + \frac{1}{3!} \left( \frac{r^2}{4\delta t} \right)^3 - \frac{1}{4!} \left( \frac{r^2}{4\delta t} \right)^4 + \dots \right] \quad (3)$$

여기서,  $\gamma$  : Euler 상수(=0.5772)

식 (3)은 탐침의 길이가 무한대이고 탐침이 삽입될 토사의 열전도 및 열확산이 균일한 매질로 가정하였으며, 탐침의 표면과 외부입자 사이에 접촉저항이 없고, 선형 열원의 직경이 무한소인 경우에 성립한다. 그러나 탐침의 직경과 길이가 일정한 경우에도 식 (3)을 사용하여 반경  $r$ 과 열확산이  $\delta$ 인 매질 내에서 충분한 시간이 경과한 경우로 가정하여 근사화할 수 있다. 즉,  $\frac{r^2}{4\delta t}$ 가 충분히 작다고 가정하면 식 (3)의 3항 이하를 무시할 수 있으며 따라서, 식 (3)은 식 (4)와 같이 된다.

$$\theta(t, r) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[ \ln \frac{4\delta t}{r^2} - \gamma \right] \quad (4)$$

식 (4)에서 자연대수부분을 시간항과 상수항으로 분리하면 식 (5)와 같이 된다.

$$\theta(t, r) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[ \ln t + \ln \frac{4\delta}{r^2} - \gamma \right] \quad (5)$$

식 (5)를 사용하여 y축을 온도, x축을  $\ln t$ 로 하는 그래프를 그려보면 그림 1과 같이 된다.

이때 열 저항률은 그래프의 기울기 ( $Q\rho/4\pi$ )로부터 구할 수 있다. 즉, 시간  $t_1$  과  $t_2$ 에 대해 온도가 각각  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  일 때 그 온도차  $\Delta\theta$ 는 식 (6)과 같이 되며,

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[ \ln \frac{t_2}{t_1} \right] \quad (6)$$

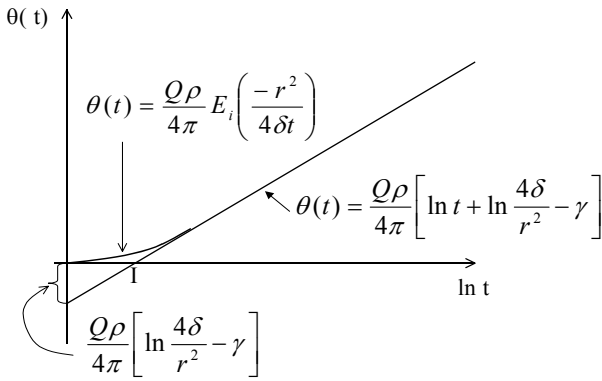


그림 1. 온도와 시간 곡선

따라서 열 저항률은 식 (7)과 같이 된다.

$$\rho = \frac{4\pi}{Q} \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln \frac{t_2}{t_1}} \quad (7)$$

탐침법에 의한 실측 결과가 이상에서 열거한 식들과 잘 일치하기 위해서는 실험절차가 다음과 같은 주요 가정과 일치하도록 주의를 기울여야 한다.

- ① 실험용 프로브는 연속적이며 열원은 일정하다.
- ② 열은 방사상으로 흐른다.
- ③ 토사와 탐침간의 접촉이 우수하고 탐침의 직경이 충분히 작다.
- ④ 실측 데이터는 시편의 경계효과에 영향을 받지 않는다.
- ⑤ 열전달은 전도에 의해서만 일어난다.
- ⑥ 시료의 재질은 균일하며, 수분 및 온도는 평형상태에 있다.

## 2.2 TPA 시스템

선형열원모델에서의 기본방정식은 열전도 계수를 측정하려는 무한체의 물질에 무한히 길고 직경이 없는 열선이 삽입되어 있다는 가정 아래 해석한 것이다. 그러나 실제 실험에서 시료케이스의 직경은 유한하며 가열시간이 길어질수록 원통형 케이스의 크기에 대한 영향을 크게 받게 된다. de Vries와 Peck(1958)는 선형열원에 적용할 수 있는 충분한 열량이 열선으로부터 발생한다면 시료케이스의 벽면을 통하여 빠져나가는 열량은 이에 비해 작은 양이므로 시료케이스의 유한 외경으로 인한 오차는 무시할 수 있음을 밝힌바 있다. 긴 원통형의 시료케이스의 반지름이  $R_1$ 이라고 할 때 오차를 무시할 수 있는  $R_1$ 을 구하는 조건은 식 (8)과 같다.

$$\exp\left(-\frac{R_1^2}{4\alpha t_1}\right) \ll 1, \quad \text{여기서, } t_1 : \text{heating time} \quad (8)$$

또한, Horrocks와 McLaughlin(1963)은  $\frac{\alpha t_1}{R_1^2}$  이 작아짐에 따라 무한체로의 가정에 근사하게 됨을 보였으며,  $\frac{\alpha t_1}{R_1^2}$  이 0.12 이하인 범위에서는 약 0.01[%]의 오차를 보이고 0.25 이하인 범위에서는 약 0.4[%]의 오차가 발생함을 증명하였다. 시료케이스의 반지름을 4.5[cm]로 하고, 흙의 열확산계수,  $\alpha$  ( $10^{-2} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ) 라 할때, 가열시간은 약 20~40초 정도이므로  $\exp\left(-\frac{R_1^2}{4\alpha t_1}\right) = 1.01606 \times 10^{-11}$ 에서  $3.1875 \times 10^{-6}$ 이고, 약 0으로 볼 수 있게 된다. 또한  $\frac{\alpha t_1}{R_1^2} = 9.8765 \times 10^{-3}$ 에서  $1.9753 \times 10^{-2}$ 이므로 직경 10[cm]이상의 케이스를 이용한 실험에서는 유한 외경에 의한 오차는 무시할 수 있다. 한편, 선형열원이론은 열선을 무한히 긴 완전 도체로 가정한다. 그러나 실제로 탐침의 길이는 유한하며 이에 따라 오차가 발생할 수 있다.

Blackwell(1956)은 온도와 로그시간( $\ln t$ )의 함수에서 축방향의 열전달로 인한 오차의 한계를 결정하는 방법을 제안한 바 있으며, 이를 통해 지나치게 긴 탐침의 제작이 필요없음을 밝혔다. Hopper(1950)는 길이-직경의 비가 100 이상이 되어야 유한길이에 대한 오차의 영향을 받지 않는다고 하였지만, Blackwell은 탐침의 길이가 지름에 비해 25~30배가 된다면 유한한 탐침의 길이로 인한 오차를 무시할 수 있음을 증명한 바 있다.

한편, de Vries와 Peck는 수분이 함유된 토양을 측정할 경우 가열선 근처에 있는 높은 열량을 공급하는 것이 항상 좋은 것은 아님을 파악하고, 가열선을 약 0.5[cm]의 가는 유리관으로 감싸서 토양으로 전달되는 열량을 감소시켜 토양에서의 온도상승을 줄이고 대신에 유리관 안에서의 온도상승으로 열전도 계수를 측정한 사례가 있다. 이상과 같은 이론적 고찰을 바탕으로 TPA 시스템의 구성에 적합한 각각의 요소에 대해 다음과 같은 가이드라인을 선정할 수 있다.

발열특성에 따른 부위별 온도를 모니터링하기 위해서는  $\pm 0.1[^\circ\text{C}]$ 의 정도를 지니며, 비교적 크기가 작은 측정소자를 요구로 한다. 또한, 측정소자는 일정이상의 압력이나 수분에 대한 내성을 지녀야만 하며 DAQ 시스템을 적용하는 것이 용이하여야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 전기저항기(thermistor)를 측요소자로서 선정하였다. 그림 2는 전기저항기의 일반적인 구성을 보이고 있다. 전기저항기는 온도에 따라 자체의 저항치가 변화하는 소자로서 YSI사의 46000 시리즈, 10k의 경우, 그림 3과 같은 특성곡선을 나타낸다. 전기저항기의 선정에 있어서는 NTC(Negative Temperature Coefficient)의 특

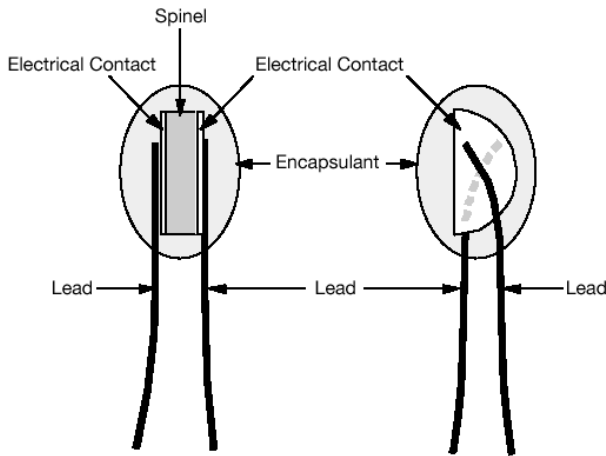


그림 2. 전기저항기 구조

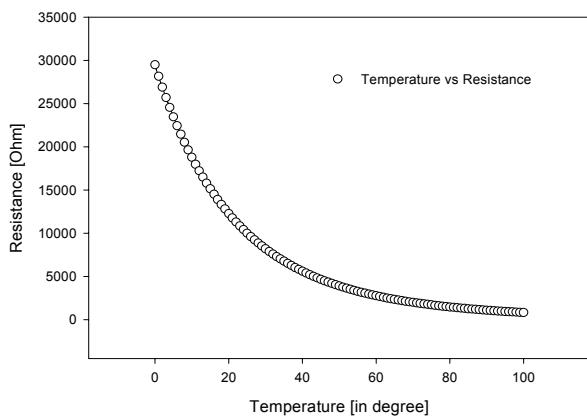


그림 3. YSI 46000(10k) 특성곡선

성을 지니며, 2단자 구조 및 내부저항이 10[kΩ]이상인 소자가 바람직한 것으로 판단된다.

### 3. 되메움재의 열특성 평가시험

열특성 시험은 토사의 경우 탐침법의 측정원리를 이용하

여 미국 EPRI(Mitchell 등, 1982)에서 개발한 열 저항측정기 TPA6000+를 이용하였으며, 저장도 콘크리트는 열전도 측정기(QTM-D3)를 사용하였다(사진 1). 우선 지중전력케이블 되메움재로 현재 사용하고 있는 강모래에 대해 물성시험 및 열 저항 시험을 통해 다짐도 및 함수비에 따른 열특성을 규명하였다.

또한 강모래를 주축으로 여러재료(전로슬래그, 쇄석, 석분, 플라이애시 등)를 혼합한 시료를 사용하여 간극율이 최소가 되는 최밀충전계의 입도분포를 도출하고 함수비변화에 따른 열 저항 특성을 규명하여 열 저항치가 최소가 되는 재료 및 혼합비를 선정하였다. 아울러 다짐작업이 필요없는 되메움 콘크리트는 결합재에 일정양의 혼화재를 첨가하여 SFC(모래+플라이 애시+시멘트), SGFC(모래+쇄석+플라이 애시+시멘트) 및 PGC(석분+쇄석+시멘트) 조건으로 실험을 수행하고 열 저항특성을 분석하였다.

### 3.1 강모래

모래는 일반적으로 둥근입자형태를 가지고 있으며, 주성분은 석영이다. 본래 무색이지만 입자표면에서 난반사를 일으켜서 백색으로 보인다. 모래에 산화철이나 역청의 혼합이 많으면 전체가 검은 색이 된다. 석영은 물리적 풍화만이 아닌 화학적 풍화에도 가장 안정된 실리카(SiO<sub>2</sub>)로 구성되어 있다. 이와 같은 성질로 인해 모래는 표면에 흡착하는 수분이 적고, 함수량 증감에 의한 체적변화도 무시할 수 있다. 또한 수분흡수에 의한 열 저항의 증대는 없으며 수분의 대부분 간극안에 함유한 간극수로 생각할 수 있다. 단일구경의 입자를 규칙적으로 충전한 경우, 간극율은 26.0~47.6% 사이의 값이 되기 때문에 단일입자를 임의로 충전해 충분히 다짐을 실시하면 최밀충전에 접근할 수 있으나 실제로는 아무리 장시간 다짐을 해도 35% 이하의 간극율은 얻기 힘든 것으로 알려져 있다(Imajo, 1976). 이것은 모래와 같이 비교



(a) TPA 6000+



(b) QTM-D3

사진 1. 열 저항 측정장치

적 입경이 크고 균일한 토사의 경우도 이와 유사하다고 말할 수 있다. 강모래의 경우 역학적으로 안정하고 구입이 비교적 원활하며, 시공이 간편한 이유로 지중케이블 되메움재로 널리 활용되고 있으나 열 저항특성은 잘 알려져 있지 않다. 또한 지중케이블 되메움재가 갖추어야 할 조건은 장기적 안정성을 갖고 낮은 열 저항을 유지하여야 하며, 건조 시와 습윤 시의 열 저항 변화가 작아야 한다. 특히 건조 시의 열 저항이 작은 것이 필요하다.

본 절에서는 실내시험을 통해 강모래의 다짐도 및 함수비에 따른 열특성을 측정하여 되메움재로서의 적합성을 평가하고, 추후 개발하고자 하는 다른 혼합재와의 열 특성치를 비교하였다.

### 3.1.1 시험방법

흙의 열 저항 측정은 TPA 6000+를 이용하였으며, 사용된 몰드의 크기는  $\Phi=10.78\text{cm}$ ,  $H=11.49\text{cm}$  이다. 이 몰드의 부피에 탐침기의 부피를 뺀 값을 흙의 부피로 계산하고 이를 통해 각 흙 시료의 상대다짐도 및 간극율을 계산하였다.

시료는 영광 동림천 강모래를 사용하였으며, 노건조상태부터 자연건조( $S=5\%$ ), 포화도 70%까지 수분함유량을 변화시키고 다짐도는 75%~96%(간극율 약 32~48%)에서 열특성을 측정하였다. 다짐은 램머에 의한 탬핑법을 사용하였으며, 각종 기초시험을 수행하여 물성을 파악하였다(그림 4, 5).

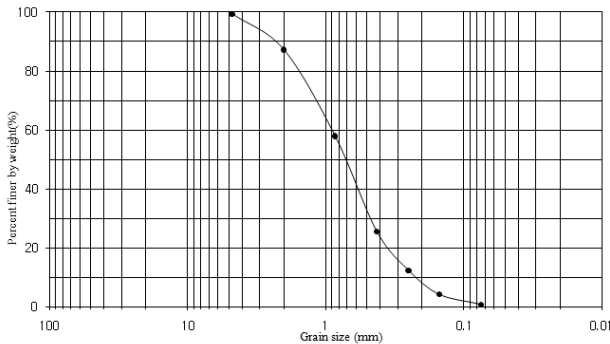


그림 4. 강모래의 입도분포곡선

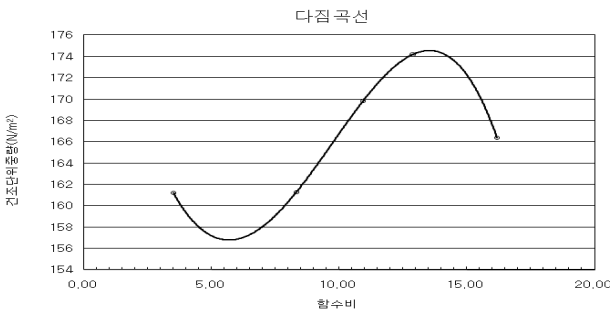


그림 5. 강모래의 다짐곡선

### 3.1.2 시험결과

토사의 열 저항에 가장 큰 영향을 주는 요소 중의 하나는 토사의 함수비이다. 수분을 많이 함유한 모래에서는 건조도 일어나지 않고, 온도구배도 대수함수에 비례해 완만하지만 건조영역에서의 시료는 온도가 급격히 올라가 열 저항이 증가한다. 건조 모래의 열 저항은  $250^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}$  이상이지만 수분을 조금이라도 함유하면 열 저항은 급격히 감소함을 알 수 있다. 포화도가 0~20% 범위에서는 수분증가에 따른 열 저항 감소가 크고,  $S=20\%$ 에서는 열 저항은  $80^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}$ 가 된다. 또한 포화도가 20% 이상의 영역에서는 열 저항의 감소는 미미하며,  $S=60\%$  이상에서는  $50^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}$  내외로 일정한 값을 나타내고 있다.

이와 같이 토사 열 저항의 함수량에 의한 변화는 토사 간극내의 수분상태로부터 평가할 수 있다. 모래의 건조 열 저항이 큰 것은 건조된 모래안에서 열이동이 입자내부 및 그 접촉점을 통해서만 전달되기 때문이며, 토사가 수분을 함유하면 입자간의 접촉점에서 물이 연속되어 접촉을 공고히 하고 접촉면적을 현저히 증가시킨다.

강모래의 열특성 시험결과를 그림 6~9에 나타내었다. 다

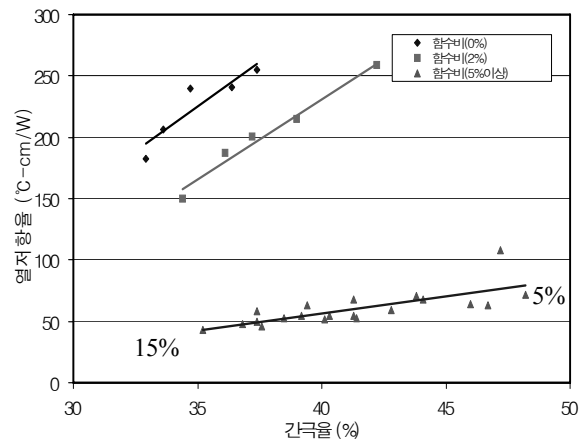


그림 6. 강모래의 간극율과 열 저항과의 관계

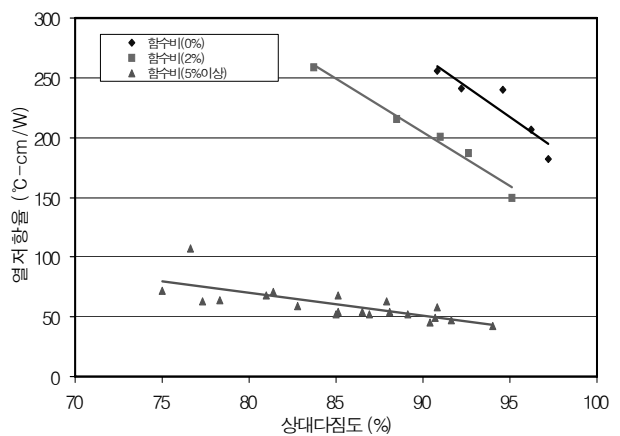


그림 7. 상대다짐도와 열 저항과의 관계

집효과를 고려할 때, 함수비가 작은 영역(0~2%)에서는 간극율에 따라 열 저항이 150~260°C-cm/watt로 크게 변하므로 되메움재의 다짐도에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 함수비가 크면(5% 이상) 다짐도에 의한 영향은 작으므로 나타났다(그림 6, 7). 또한 동일한 다짐도(상대다짐도 90% 경우)를 갖는 시료라 하더라도 함수비에 따라 열 저항치는 50~260°C-cm/watt로 건조 시와 습윤 시의 열 저항이 5배 이상 차이가 남을 알 수 있다(그림 8). 한편, 토사의 수분함유량은 실용적 측면에서 함수비(중량비)로 나타내나 해석적으로는 체적비인 포화도로 나타내면 편리하다. 특히, 모래와 같이 수분에 따른 체적의 변화가 없는 매질에서는 포화도 자체가 간극안에 존재하는 물의 비율이 되며, 고체 중 액체의 밀도에 관계없이 표시할 수 있기 때문이다. 따라서 포화도와 열 저항과의 관계는 회귀분석을 통해 식 (9)와 같이 로그함수로 제안하였으며(그림 9), 추후 다양한 혼합재의 다짐도 및 함수비에 따른 열 저항 시험을 통해 본 식을 일반화할 수 있을 것으로 사료된다. 이럴 경우 간단한 물성

시험만으로 열 저항 산정이 가능할 것으로 기대된다.

$$C = -39.6 \ln(S) + 215 \quad (9)$$

여기서, C : 열 저항(°C-cm/W)

S : 포화도(%)

최대다짐도에서의 간극율은 약 32%를 보여 상당히 큰 것으로 나타났으며, Fukagawa(1974)의 연구결과에 의하면 건조 열 저항치 100°C-cm/watt를 얻기 위해서는 간극율이 25% 이하이어야 되는 것으로 밝혀진 바 있다. 따라서 모래 단일 재료에 의한 100°C-cm/watt 이하의 건조 열 저항값을 얻기는 불가능할 것으로 판단된다.

따라서 여러 혼합재를 적당한 배합 및 다짐을 통해 새로운 되메움재를 개발하여야 할 필요가 있다. 또한 강모래의 경우 간극율이 큰 특성으로 인해 열 구배하에서의 수분이동 등 장기 안정성에 대한 열 안정도 평가가 이루어져야 할 것이다.

### 3.2 단일재료의 열특성

지중케이블의 송전용량에 큰 영향을 미치는 주위 되메움재는 강모래가 사용되고 있으나 전술한 바와 같이 열 특성은 건조 열 저항이 크고 건조 시와 습윤 시의 차가 많이 나며(약 5배) 간극율 또한 크기 때문에(약 32% 이상) 최선이라고는 할 수 없다. 따라서 열 방산 특성이 양호한 되메움재의 개발이 필요하다.

본 절에서는 건조 열 저항이 작은 되메움재를 얻기 위한 혼합재의 배합비 선정에 위해 몇몇 기본재료를 선정하고 최적의 배합비를 도출하기 위하여 우선 각각의 단일재료에 대한 기본물성시험과 함수비 및 다짐도에 따른 열특성 시험을 수행하였다. 이를 통해 열 저항이 가장 작고 수분함유량에 따른 열 저항의 변화가 가장 작은 재료를 선정하고 선정된 재료를 중심으로 혼합재의 배합비를 도출, 시험결과를 상호 비교하고자 한다.

#### 3.2.1 시험방법

시험은 먼저 각각의 단일재료에 대해 물성을 파악하고 열 특성을 규명하였다. 함수비, 비중, 체가를 시험을 수행하여 시료의 기본물성 및 입도분포곡선, 토사의 구성비율 등을 파악하고, 다짐도의 효과를 분석하기 위하여 동일한 함수비에 대해 다짐에너지를 달리하여 다짐시험을 수행하였다. 즉, 2층 5회, 3층 10회, 3층 25회, 3층 55회, 5층 55회의 5가지로 다짐방법 변화를 고려하였다. 이를 통해 현장에서 건조 및 습윤측의 특성, 다져진 지반의 상대다짐도 등을 평가할 수 있다. 시료에 따라 다르나 함수비는 노건조부터 자연건조 및 포

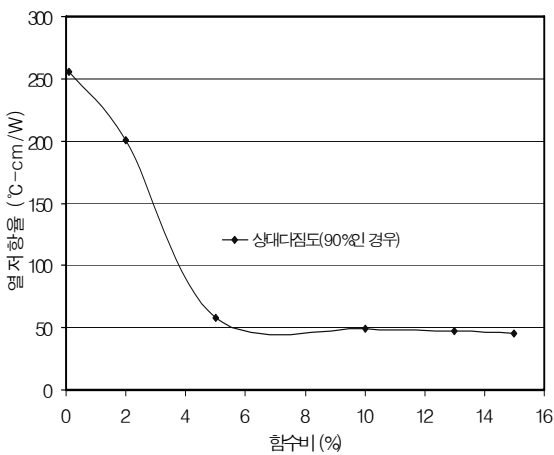


그림 8. 함수비와 열 저항과의 관계

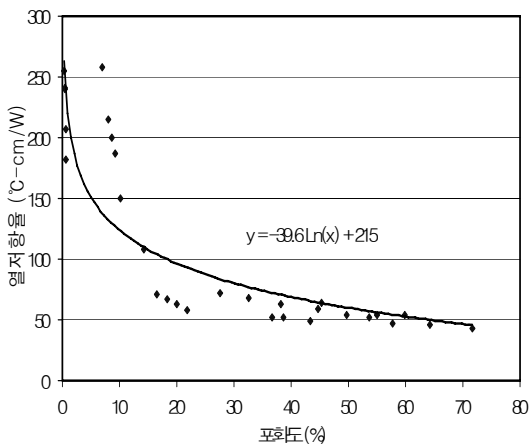


그림 9. 포화도와 열 저항과의 상관관계

화도 기준 약 70% 까지 증가시키면서 열 저항을 측정하였다.

시험에 사용된 재료는 쇄석, 강모래, 플라이애시, 전로슬래그, 석분 등이며, 이 중 쇄석은 영광 5, 6호기 분관기초 파쇄암반이며, 영광 동림천의 강모래 및 국내 화력발전소에서 생산되고 있는 정제된 석탄회인 플라이애시, 포스코 포항 제2제강공장 전기로에서 생산된 전로슬래그, 금산군 진산지역 골재장의 역청포장혼합물용 화강암 석분 등을 대상으로 하였다.

### 3.2.2 시험결과

#### (1) 기초시험

단일재료에 대한 기초시험 결과 각 재료의 물성은 표 1

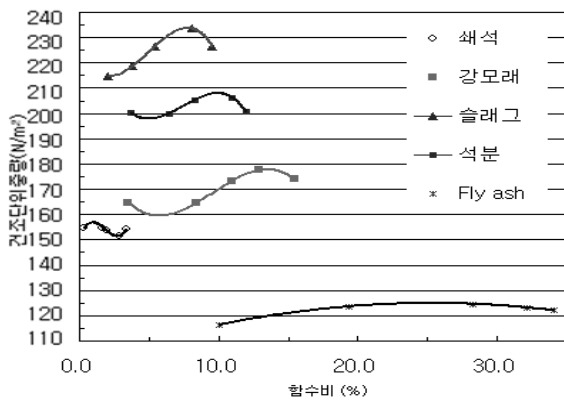


그림 10. 각 재료의 다짐곡선

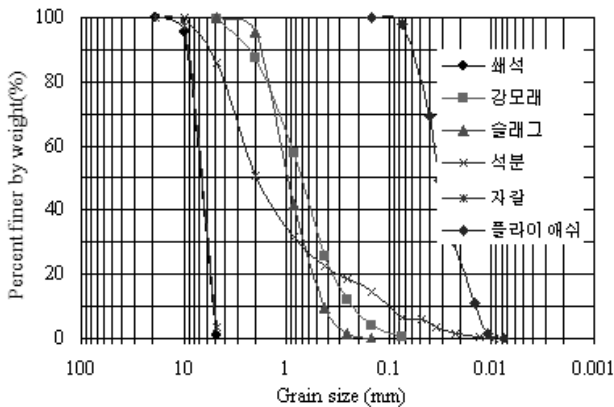


그림 11. 각 재료의 입도분포곡선

및 그림 10, 11과 같다. 석분의 경우 자연상태의 함수비는 단일 재료 중 가장 크고, 간극율은 22.4%로 가장 작은 값을 보여 주었다. 또한 최적함수비는 9.5%로 자연상태의 함수비와 유사하므로 수분유지력 및 다짐도 측면에서 유리하며, 입도분포 또한 가장 양호한 것으로 나타났다.

전로슬래그의 경우 재료특성상 최대건조밀도 및 비중은 가장 크게 나타났으나 간극율이 비교적 크고 입도가 좋지 않았다. 플라이애시의 경우 간극율이 가장 크고 최대건조밀도 및 비중은 가장 작으며, 체분석 결과 입도도 좋지 않아 되메움재로서 불리할 것으로 예상된다.

#### (2) 열특성 시험

그림 12는 단일재료에 대한 열특성 시험 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 재료가 함수비의 영향을 크게 받고 있으며, 플라이애시를 제외한 대부분의 재료가 함수비 5% 이상에서 열 저항의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 각 재료마다 열 저항 차가 뚜렷하며, 특히 건조영역에서 차이는 더욱 크다. 열 저항이 가장 큰 재료는 플라이애시로서 함수비에 따라 약 175~593°C-cm/watt 범위를 갖는다. 석분의 열 저항은 강모래의 약 절반에 해당하는 29~107°C-cm/watt로 가장 작은 값을 보여주고 있다. 전로슬래그의 경우 열 저항은 강모래의 약 1.5배 큰 값을 나타내었는데 재료자체의 열 저항은 나쁘지 않으나 간극율이 비교적 크고 입도분포가 좋지 않은 결과로 보이며, 다른 재료와 적절히 혼합하면 열

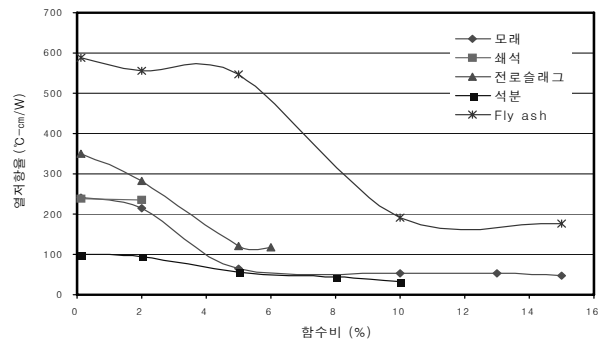


그림 12. 재료별 함수비에 따른 열 저항을

표 1. 단일재료의 물성시험 결과

시료명	시험명	함수비 (%)	비중	다짐시험			체분석	
				$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	OMC (%)	간극율 (%)	균등 계수	곡률 계수
쇄석		0.2	2.65	15.7	0.9	40.8	1.44	0.99
강모래		0.3	2.58	17.8	13.5	32.8	3.96	1.10
전로슬래그		0.1	3.42	23.4	7.5	33.6	2.62	1.00
석분		6.1	2.68	20.8	9.5	22.4	23.64	2.07
플라이애시		1.2	2.23	12.5	25.0	44.0	2.40	0.98

특성을 다소 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

석분의 경우 입도분포가 좋고 간극율이 작아 강모래보다 수분이동이 적을 것으로 예상되므로 장기적인 안정도 면에서도 유리할 것으로 판단된다. 또한 건조 열 저항이 작고 수

분유지력이 좋으며, 최적함수비가 작아 되메움재로서 적합할 것으로 판단된다.

### 3.3 혼합재료의 열특성

본 시험에서는 건조 열 저항 및 함수량에 따른 열 저항 변화가 작은 되메움재의 혼합비율을 결정하고 최밀층전을 얻을 수 있는 입도분포를 도출하고자 한다. 즉, 간극율 20% 이하의 최밀층전을 갖는 입도분포(혼합비)를 도출하고 최소의 건조 열 저항을 나타내는 혼합재의 배합비를 결정하기 위한 시험을 수행하였다. 이를 위해 시료는 자갈(쇄석), 강모래, 전로슬래그, 플라이애시, 석분 등을 사용하였으며, 단일재료 시험 및 외국의 연구결과(Fukagawa 등, 1974; Wiseman 등, 1969)를 참조하여 배합비를 선정하였다(표 2). 한편, 점토 및 실트는 수분을 함유하면 뭉치는 경향이 있고 특히 점토의 경우 팽창성을 나타내므로 광물입자를 서로 밀어내어 열 저항성을 증가시키게 된다. 따라서 본 시험에서는 점토 및 실트는 제외하였다.

표 2. 혼합재 시료의 배합비(단위 : %)

재료명 시료명	쇄석	모래	전로 슬래그	석분	플라이 애시
A-1	40	60			
A-2	50	50			
A-3	60	40			
A-4	70	30			
B-1		40	60		
B-2		50	50		
B-3		60	40		
B-4		70	30		
C-1	50	20	30		
C-2	50	25	25		
C-3	50	30	20		
C-4	50	35	15		
D-1		10		90	
D-2		20		80	
D-3		30		70	
E-1	30			70	
E-2	40			60	
E-3	50			50	
F-1	30	14		56	
F-2	40	12		48	
F-3	50	10		40	
G-1	30	7	7	56	
G-2	40	6	6	48	
G-3	50	5	5	40	
H-1				90	10
H-2				80	20
H-3				70	30
I-1		90			10
I-2		80			20
I-3		70			30
J-1			90		10
J-2			80		20
J-3			70		30

#### 3.3.1 A 시료

표 2의 배합표 중 쇄석과 모래를 혼합한 재료를 A-1~A-4시료로 분류하여 배합율에 따라 물성시험 및 열특성 시험을 수행하였다. 함수비는 노건조상태로부터 5.0% 까지 증가시켰으며, 다짐에너지를 달리하여 동일한 함수비에 대해 다짐도에 따른 영향을 파악하였다. 물성시험결과(표 3) 쇄석의 함유량이 커질수록 비중이 증가되고, 최적함수비(OMC)는 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 쇄석이 물을 함유할 수 있는 능력이 적기 때문이다. 간극율은 각 시료의 성분비에 따라 달라지겠지만 최대건조밀도가 가장 큰 A-2 시료가 가장 작은 값을 나타냈다.

열특성 측정결과 함수비에 따라 열 저항은 50~160°C-cm/watt로 변화하는 것으로 나타났으며, 함수비가 큰 영역에서 더 차이가 크게 발생함을 알 수 있었다(그림 13). 또한 동일한 함수비 및 다짐도 조건에서 자갈 및 모래의 혼합비가 50 : 50인 A-2 시료의 경우 A-1 시료보다 12~15% 열 저항이 감소하는 것으로 나타났으며, 감소정도는 함수비에 따라 큰 차

표 3. A시료의 물성시험 결과

시료명	시험명	비중	다짐시험			체분석	
			$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	OMC (%)	간극율 (%)	균등 계수	곡률 계수
A-1		2.61	20.4	10.5	21.8	15.67	0.35
A-2		2.61	20.7	10.0	20.8	15.26	0.36
A-3		2.62	20.5	9.5	21.4	15.85	0.74
A-4		2.63	19.9	8.5	24.3	13.80	6.40



이가 없었다. 따라서 같은 재료라 하더라도 혼합비 및 구성 재료의 입도분포에 따라 열 저항치가 달라짐을 알 수 있다.

대상시료 중 열특성이 가장 좋은 재료는 쇄석과 모래의 비율이 50 : 50인 A-2시료로서 열 저항은 함수비에 따라 다소 차이는 있으나 강모래의 50~60%이며, 쇄석의 33~50%, 함수비 2% 이상일 때의 석분의 경우와 유사하고, 건조 시 석분의 약 110%로 나타났다. 간극율은 강모래의 70~75%, 쇄석의 55~60%로 나타났다.

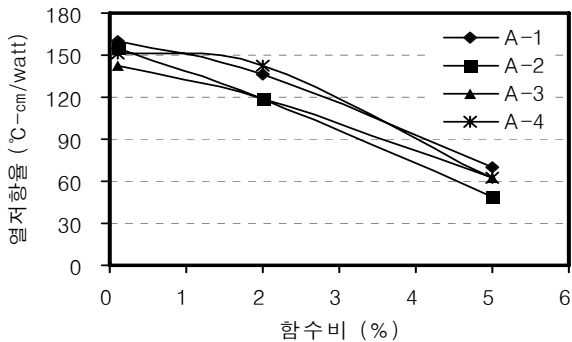
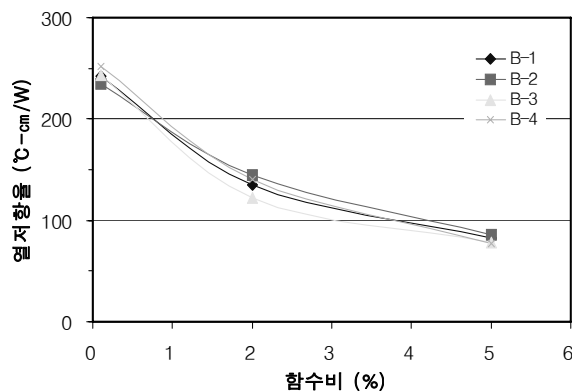
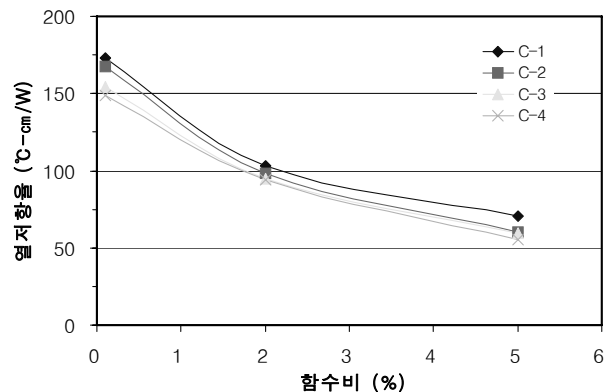


그림 13. 함수비와 열 저항과의 관계(A시료)



(a) B시료



(b) C시료

그림 14. 함수비와 열 저항과의 관계

표 4. B, C시료의 물성시험 결과

시료명	시험명	비중	다짐시험			체분석	
			$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	O.M.C (%)	간극율 (%)	균등 계수	곡률 계수
B-1		3.08	21.7	10.0	29.6	3.44	1.02
B-2		3.00	21.2	10.5	29.3	3.50	1.03
B-3		2.92	20.6	11.0	29.4	3.64	1.02
B-4		2.83	19.6	11.5	30.8	3.85	1.04
C-1		2.87	22.3	9.0	22.2	12.34	0.44
C-2		2.83	21.9	9.5	22.5	12.89	0.46
C-3		2.78	21.7	10.5	22.0	13.49	0.48
C-4		2.74	21.4	11.0	21.9	14.15	0.42

### 3.3.2 B, C 시료

배합 설계표 중 전로슬래그를 기본으로 모래와 쇄석을 각각 혼합하여 물성시험 및 열특성 시험을 수행하였다. 물성시험결과 B시료의 경우 전로슬래그 단일재료의 간극율이 31.6%에서 29.5%내외로 다소 감소하였으며, 최대건조밀도는 약간 감소하였다. 이는 철분성분을 많이 함유하고 있는 전로슬래그의 함유량이 작아진데 기인하며, 간극율의 감소는 다짐도가 향상되었음을 의미하고 있다. 또한 곡률계수 및 균등계수도 다소 증가하여 입도분포가 좋아졌음을 알 수 있다(표 4).

열특성 시험결과 열 저항이 가장 낮게 나타난 B-4시료의 경우 강모래의 100~120%의 열 저항치를 나타냈으며, 전로슬래그의 60%로 나타나 열특성이 상당히 개선됨을 알 수 있었다(그림 14(a)). 한편 B-1시료와 같이 전로슬래그의 함유량이 클 경우 전체적으로 열 저항값은 크게 나타났으나 함수비에 따른 열 저항 변화는 상대적으로 작았다. 쇄석-전로슬래그-모래의 혼합재인 C시료의 경우 전로슬래그의 비율이 상대적으로 작은 C-4시료의 열 저항치가 가장 작게 나타났다(그림 14(b)).

즉, 함수비 2% 이상에서 열 저항치는 석분의 경우와 유사

한 값을 보이고 있으나 건 조열 저항은 석분보다 약 40% 큰 값을 나타내어 함수량에 따른 변화가 크므로 석분보다 불리함을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 3가지 재료를 적절히 혼합한 결과 각각의 단일재료 어느 것보다도 열 저항이 작게 나타나 혼합에 의한 열특성 개선 효과가 현저함을 알 수 있다.

### 3.3.3 D, E 시료

D, E시료의 물성시험결과는 표 5에 제시되어 있는데 표에서 보는 바와 같이 D-1 및 E-1, E-2시료의 경우 간극율이 20% 이내이며 균등계수 및 곡률계수 또한 대단히 양호한 입도분포를 보여주고 있다. 최대건조밀도의 경우도 쇄석이나 모래의 경우보다 약 20~30% 증가하였으며, 석분보다도 5% 내외 증가하였다.

열 저항 시험결과 D-1시료의 열 저항은 전체적으로 석분과 매우 유사하였다. E-1시료의 경우 열 저항은 석분의 약 90%로 우수한 것으로 나타났으며, 함수량에 따른 변화도 적어 혼합재 중 열특성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

그림 15는 현재 지중케이블 되메움재로 사용하고 있는 강모래와 본 시험을 통해 열특성이 우수한 것으로 파악된 재료의 열 저항치를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 석분, A-2, E-1 등은 모래에 비해 열 저항이 낮고 함수비에 따른 변화가 작아 열 안정도 면에서도 유리한 것으로 나

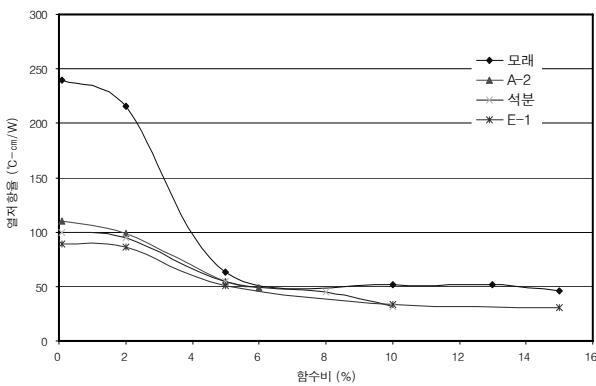


그림 15. 모래 및 도출된 재료의 열 저항율

표 5. D, E시료의 물성시험결과

시료명	시험명	비중	다짐시험			체분석	
			$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	OMC (%)	간극율 (%)	균등 계수	곡률 계수
D-1		2.67	21.4	9.5	19.9	20.91	1.83
D-2		2.66	21.2	9.0	20.3	17.50	1.48
D-3		2.65	20.7	9.0	21.9	14.62	1.36
E-1		2.67	21.4	9.0	19.8	33.57	3.42
E-2		2.67	21.4	9.0	19.9	30.56	4.04
E-3		2.67	21.4	9.0	19.9	17.59	5.30

타났다.

한편, 표 2의 F~J시료의 경우 함수비 및 다짐도에 따라 차이는 있으나 도출된 재료(석분, A-2, E-1)에 비해 열 저항치는 다소 높게 나타나는 경향을 보여주었기 때문에 본 논문에서는 시험결과에 대해 논하지 않았다.

### 3.4 되메움 콘크리트

되메움 콘크리트는 저장도 콘크리트의 개념을 지반공학에 적용하여 만들어진 것으로서 비수축 채움재, 강도조절 채움재, 유동성 모르타르, 흙-시멘트 슬러리 등으로 불리고, 이의 대표적인 특성은 자기 수평능력, 자기 다짐, 유동성, 시공 후 재 굴착이 용이하다는 것이다. 이러한 다양한 특성을 가진 되메움 콘크리트의 혼합재료는 기존의 되메움재의 부적절한 다짐으로 인해 발생하는 여러 가지 문제점을 해결할 수 있다.

#### 3.4.1 실험방법

본 연구에서는 선행연구결과(Boggs 등, 1981)를 참고하여 SFC(모래+플라이애시+시멘트), SGFC(모래+쇄석+플라이애시+시멘트), PGC(석분+쇄석+시멘트) 배합을 기본 배합으로 선정하였으며 혼합재료는 재료의 구입 용이성, 유동성, 시공성, 경제성 등을 고려하여 27 Type의 배합설계를 수행하였다(표 6~10).

되메움 콘크리트의 배합설계는 물리적, 열적 특성에 대한 검토 후 각 재료의 특성값을 표준시험에 의해 산정하여 배합설계를 해야 한다. 콘크리트를 고체와 액상의 재료로 볼 때, 되메움 콘크리트의 컨시스턴시는 골재와 같은 고체 입자의 접촉, 마찰 등에 의한 변형 저항성 및 고체 입자의 간극에 존재하는 액상의 성질에 의해 좌우된다. 따라서 되메움 콘크리트는 골재의 충전성을 향상하여 열 특성을 증가시키는 것이 기본적 메카니즘이기 때문에, 단위 수량을 증가시켜 양호한 유동성을 부여함과 동시에 분리 저항성을 높일 수 있는 시멘트-페이스트에 적절한 점도를 유지하는 것

표 6. 배합재료 선정

결 합 재			혼 화 재
강 모 래 (#4체 통과)	쇄 석 (19[mm]골재)	시 멘 트	벤토나이트
		플라이 애시	풍쇄슬래그
		물	강 섬유 실리카흙 석 분

표 7. 되메움 콘크리트 배합설계표(SFC)

구분	번호	골재/시멘트			혼 화 재						비고	
		모래	쇄석	시멘트	플라이 애시	벤 토 나이트	풍 쇄 슬래그	강섬유	실리카흙	석 분		
SFC	1	91	-	2.3	6.7	-	-	-	-	-	-	
	2	89	-	2.3	6.7	-	-	-	2.0	-	-	
	3	88	-	2.3	9.7	-	-	-	-	-	-	
	4	81	-	2.3	6.7	-	10	-	-	-	-	
	5	78	-	2.3	10.1	-	10	-	-	-	-	
	6	78	-	2.3	9.7	-	10	-	-	-	-	
	7	71	-	2.3	6.7	-	20	-	-	-	-	
	8	68	-	2.3	9.7	-	20	-	-	-	-	
	9	78	-	2.0	9.5	0.5	10	-	-	-	-	
	10	81	-	2.3	6.7	-	-	10	-	-	-	

표 8. 되메움 콘크리트 배합설계표(SGFC)

구분	번호	골재/시멘트			혼 화 재						비고	
		모래	쇄석	시멘트	플라이 애시	벤 토 나이트	풍 쇄 슬래그	강섬유	실리카흙	석 분		
SGFC	1	51	39	2.5	7.5	-	-	-	-	-	-	
	2	47	39	2.5	11.5	-	-	-	-	-	-	
	3	47	39	2.5	11.5	-	-	-	-	-	-	
	4	34	46	2.5	11.5	-	10	-	-	-	-	
	5	24	42	2.5	11.5	-	20	-	-	-	-	
	6	34	42	2.5	11.5	-	10	-	-	-	-	
	7	24	42	2.5	11.5	-	20	-	-	-	-	
	8	41	49	2.5	7.5	-	20	-	-	-	-	
	9	51	39	2.5	7.5	-	-	-	-	2.0	-	
	10	36	54	2.5	7.5	-	-	-	-	-	-	
	11	47	39	2.5	11.5	-	-	1.0	-	-	-	
	12	47	39	2.5	11.5	-	-	2.0	-	-	-	
	13	51	39	2.5	7.5	-	-	4.0	-	-	-	
	14	27	39	2.5	11.5	-	20	-	-	-	-	

표 9. 되메움 콘크리트 배합설계표(PGC)

구분	번호	골재/시멘트			혼 화 재						비고	
		모래	쇄석	시멘트	플라이 애시	벤 토 나이트	풍 쇄 슬래그	강섬유	실리카흙	석 분		
PGC	1	-	-	2.0	-	-	-	-	-	-	100	
	2	-	-	2.0	-	0.5	-	-	-	-	98	
	3	-	49	2.0	-	0.5	-	-	-	-	49	

표 10. 골재의 물성시험 결과

구분	입경 (mm)	조립율	비중	흡수율 (%)	유기 불순물	#200 통과율(%)	안정성 (%)	염화물 (%)	마모율 (%)	비고
강모래	5	2.85	2.56	1.77	좋음	3.0	2.40	0.0018	-	
쇄석	19	6.65	2.65	1.95	-	1.0	2.83	0.0018	13.3	

이 유리하다.

되메움 콘크리트에 필요한 단위수량을 결정하기 위해서는 콘크리트의 유동성에 기여하지 않은 수량, 즉 고체입자의 구속 수량 용적비를 산정해야 한다. 여기서 수량은 플로우 및 깔대기 유하 시험을 실시하여 구한다. 또한 잔 골재 용적비, 굵은 골재 용적비를 산정하여, 유동성 및 충전성을

확보할 수 있는 범위에서 최적 배합비를 도출하여야 하며, 실험에 사용한 재료는 사진 2와 같다.

### 3.4.2 실험결과

되메움 콘크리트의 열 저항 특성시험결과와 표 11과 같다. 그림에서 보는바와 같이 되메움 콘크리트의 열 저항은 SFC,

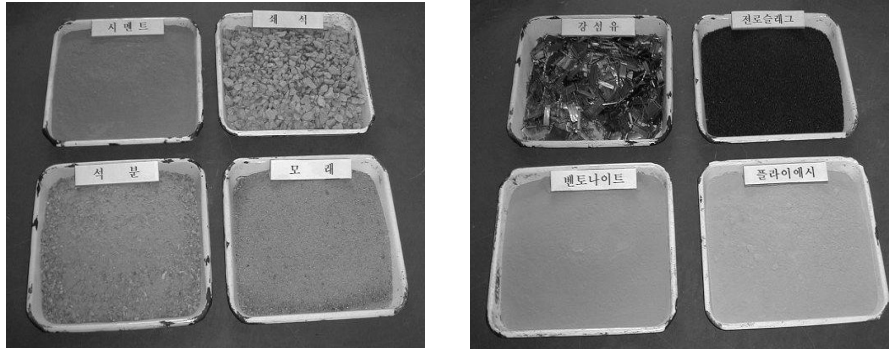


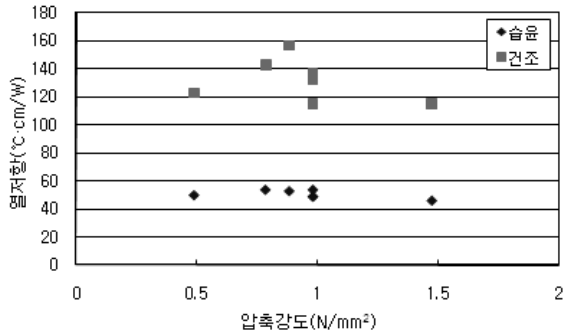
사진 2. 실험용 재료

표 11. 되메움 콘크리트 시험결과

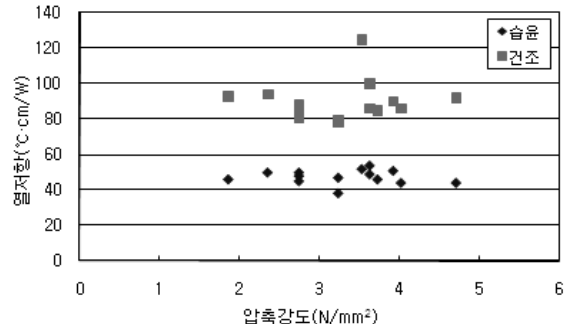
구 분	번호	열 저항 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$ )		열전도 ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{k}$ )		단위중량 ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )		압 축 강 도 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	비고
		습윤	건조	습윤	건조	습윤	건조		
SFC	1	50	123	1.948	0.809	20.7	18.0	0.5	습윤의 경우 흡수율 10%의 상태를 나타냄
	2	49	115	2.054	0.872	19.4	17.4	1.0	
	3	54	143	1.850	0.700	19.7	18.6	0.8	
	4	53	157	1.898	0.638	20.2	17.6	0.9	
	5	49	132	2.043	0.756	20.7	18.1	1.0	
	6	51	-	1.943	-	20.6	16.5	1.3	
	7	54	137	1.848	0.731	21.0	18.4	1.0	
	8	55	-	1.827	-	21.5	18.6	1.4	
	9	47	-	2.150	-	20.7	17.7	1.2	
	10	46	115	2.186	0.872	21.3	18.7	1.5	
SGFC	1	50	94	2.004	1.061	22.2	20.0	2.4	
	2	46	93	2.174	1.080	22.1	19.8	1.9	
	3	45	81	2.227	1.231	22.8	20.9	2.8	
	4	46	85	2.155	1.176	23.5	21.7	3.8	
	5	51	90	1.964	1.115	23.9	21.9	4.0	
	6	48	85	2.076	1.179	22.8	21.3	2.8	
	7	50	88	1.993	1.136	23.5	22.0	2.8	
	8	54	86	1.857	1.165	23.3	21.6	3.7	
	9	49	100	2.046	0.997	22.5	20.2	3.7	
	10	47	79	2.125	1.268	23.2	21.5	3.3	
	11	44	86	2.254	1.166	22.0	20.1	4.1	
	12	38	78	2.620	1.287	22.3	20.0	3.3	
	13	44	92	2.255	1.087	22.4	20.4	4.8	
	14	52	125	1.905	0.797	23.4	21.2	3.6	
PGC	1	38	121	2.643	0.827	21.4	18.5	0.3	
	2	41	110	2.418	0.907	21.4	18.4	0.3	
	3	46	115	1.191	0.869	22.6	22.0	0.6	

표 12. 선정된 되메움재료 및 배합비(단위 : %)

재료명 시료명	쇄석	강모래	전로 슬래그	석분	플라이애시	시멘트	강섬유	비고
단일재료				100				
A-2	50	50						
E-1	30			70				
SGFC	39	47			11.5	2.5	2.0	



(a) SFC



(b) SGFC

그림 16. 되메움 콘크리트의 압축강도

SGFC 및 PGC의 배합 모두 흡수율 6~16%인 상태에서 60 [°C·cm/W] 이내의 우수한 결과를 보였으나, 절대건조상태의 열 저항은 SGFC 배합이 100[°C·cm/W] 이하를 나타내었고, SFC 및 PGC는 지중송전관로의 목표 값(100°C·cm/W)을 상회하는 것으로 나타났다. 따라서 수분이동으로 인한 보수적인 설계 값을 절대건조상태로 가정할 경우 SGFC 배합이 가장 적절한 배합으로 판단된다. 또한 지중송전관로 되메움 콘크리트의 압축강도는 건설 후 유지보수의 편이성 등을 고려하여 가능한 한 낮은 강도를 요구하고 있다. 일반 구조물 콘크리트에서 압축강도에 미치는 영향 인자는 크게 구성재료, 콘크리트 배합, 시공방법, 콘크리트의 재령, 양생 등을 들 수 있으나, 되메움 콘크리트의 경우 저강도로 설계된 배합이므로 이를 단순 비교하기가 매우 어려운 실정이다. 본 실험을 통한 압축강도 측정결과 SGFC가 1.9~4.8N/mm<sup>2</sup>로 SFC 및 PGC의 압축강도 보다 다소 높게 나타났다. 이는 쇄석 혼입에 따른 강도증가 영향인 것으로 판단되며, 압축강도와 열 저항의 관계에서 되메움 콘크리트의 열 저항은 강도 증가에 관계없이 비교적 일정한 경향을 보여 주어 강도가 열 저항에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다(그림 16).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 열방산 효과가 양호한 되메움재료를 개발하기 위하여 현재 사용되고 있는 강모래를 비롯한 다양한 단일재료 및 혼합재, 되메움 콘크리트에 대한 열 저항 시험을

수행하고 열특성에 영향을 미치는 인자들을 분석하였으며, 그 결과로부터 최적의 배합비 및 되메움재료를 표 12에 제시하였다.

여기서 강섬유는 혼화재이므로 중량비에서 제외하였으며, 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 토사의 열 저항은 흙 입자의 구성성분, 밀도, 함수비, 입자형상 및 크기, 입도분포, 다짐도 등에 영향을 받는다.
- (2) 영광 동립천 강모래의 열 저항치는 함수비에 따라 50~260[°C·cm/watt]로 건조 시와 습윤 시의 열 저항이 약 5~6배로 차이가 현저함을 알 수 있었다.
- (3) 최대다짐도에서 강모래의 간극율은 약 32%이며, 모래 단일재료에 의한 100[°C·cm/watt]이하의 건조 열 저항 값을 얻기는 불가능한 것으로 나타났다.
- (4) 금산군 진산지역 화강암 석분의 경우 자연상태의 함수비는 단일 재료 중 가장 크고, 간극율은 22.4%로 가장 작은 값을 보여 주었다. 또한 최적함수비는 9.5%로 자연상태의 함수비와 유사하므로 수분유지력 및 다짐도 측면에서 유리하며, 입도분포 또한 가장 양호한 것으로 나타났다.
- (5) 강모래-쇄석(영광원전 본관기초 파쇄암반) 혼합재인 A 시료의 경우 50:50으로 혼합한 A-2시료가 열특성이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 함수비 2% 이상에서 석분과 유사하였다.
- (6) 쇄석-석분 혼합재(E-1시료)의 경우는 간극율이 20% 이내로 최밀축전이 가능한 것으로 나타났으며, 열특성은

석분보다 우수하고, 수분함유량의 영향도 적어 이제까지 시험한 재료 중 되메움재로서 가장 좋은 것으로 나타났다.

- (7) 되메움 콘크리트의 경우 SGFC가 건조 열 저항  $100[^\circ\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}]$ 이하를 나타내 가장 적합한 재료로 파악되었으며, 압축강도 또한 쇄석함유로 인해 다소 높게 나타났으나 유지보수에 의한 재굴착은 가능한 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. Blackwell, J. H.(1956), A Transient-flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Material in Bulk, *Journal of Applied Physics*, Vol. 25, No. 2, pp. 137~144.
2. Boggs S. A., Chu, F. Y., Radhakrishna, H. S. and Steinmanin, J. E.(1981), Underground Cable Thermal Backfill, *Proceedings of the Symposium on Underground Cable Thermal Backfill*, Toronto, Canada, pp. 37~56.
3. Carlslaw, H. S. and Jaeger, J. C.(1959), *Conduction of Heat in Solids, 2nd Edition*, Oxford University Press, New York, pp. 137~256.
4. de Vries, D. A. and Peck, A. J.(1958), On the Cylindrical Probe of Measuring Thermal Conductivity with Special Reference to Soils, *Aust. Jour. Physics.*, Vol. 11, No. 2, pp. 255~271.
5. Fukagawa, H., Imajo, T. and Ogata, N.(1974), *Thermal Diffusion and its Application to Cable Ampacity*, CRIEPI-73087, pp. 25~85.
6. Hopper, F. C. and Lepper, F. R.(1950), Transient Heat Flow Apparatus for the Determination of Thermal Conductivities, *Heating piping and Air Conditioning, ASHVE J. Sect.*, Vol. 24, No. 10, p. 464.
7. Horrocks, J. K. and McLanughlin.(1963), Non-steady State Measurements of Liquid Polyphenyls, *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A*, Vol. 273. pp. 34~45.
8. Imajo, T.(1976), *Development of Backfill Soils for Underground Cables(2) - Study on the Optimum Grading Distribution*, CRIEPI-72061, 175063, pp. 121~145.
9. Mitchell, J. K. and Chan, C. K.(1982), *Backfill Materials for Underground Power Cables, Phase 1 ~3*, EPRI EL-506, EL-1894, EL-4150, pp. 37~45.
10. Wiseman, R. J. and Burrel, R. W.(1969), *Soils Thermal Characteristics in Relation to Underground Power Cable*, AIEE Committee Report, Transaction of AIEE, Vol. 79, pp. 792~856.

(접수일: 2010. 9. 2 심사일: 2010. 9. 28 심사완료일: 2010. 11. 17)