

지중송전관로 되메움재의 열저항 특성

Thermal Resistivity of Backfill Materials for Underground Power Cables

김 대 홍*¹ Kim, Dae-Hong

이 대 수*² Lee, Dae-Soo

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 that can maintain a low thermal resistivity (less than 50°C-cm/watt) even while they are subjected to high temperatures for prolonged periods. 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 aiming 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. Tests were carried out for Dongrim river sand, a relatively uniform sand of very high thermal resistivity (50°C-cm/watt at 10% water content, 260°C-cm/watt when dry), and Jinsan granite screenings, and A-2(sand and gravel mixture), E-1(rubble and granite screenings mixture), a well-graded materials with low thermal resistivity (about 35°C-cm/watt when at 10 percent water content, 100°C-cm/watt when dry). Based on this research, 3 types of backfill materials were suggested for improved materials with low thermal resistivity.

요 지

지중송전케이블의 송전용량은 케이블 또는 주변지반의 최대허용온도에 좌우되기 때문에 케이블 주위 되메움재는 운영기간동안 낮은 열저항성을 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 열저항을 낮추기 위한 여러 가지 방법에 대해 논하였으며, 다양한 첨가제를 사용하여 시험을 수행함으로써 열저항 효과를 측정하였다. 연구결과, 영광 동림천 모래의 경우 상대적으로 균등한 입도분포를 나타내는 모래로써 대단히 높은 열저항치(50°C-cm/watt at 10% 함수비, 260°C-cm/watt 건조 시)를 나타냈다. 또한 진산 화강암 석분 및 모래-자갈(A-2), 석분-쇄석 혼합재(E-1)의 경우 양호한 입도와 낮은 열저항(35°C-cm/watt 10% 함수비, 100°C-cm/watt 건조시)을 보여주었으며, 이들 연구결과를 토대로 열저항이 낮은 3가지 형태의 되메움재를 제시하였다.

Key words : Backfill materials, Thermal resistivity, Underground power cables

1. 서 론

최근 경제성장과 함께 전력수요가 급증하고 있으나,

한때 산업화의 상징이었던 발전 및 송변전 시설은 근래에는 환경 비친화적 혐오시설로 인식되고 있다. 이에 따라 대도시를 중심으로 선로의 지중화가 활발히

*1 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KEPRI/KEPCO, dhkim@kepco.co.kr)

*2 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원 (Member, Chief Researcher, KEPRI/KEPCO)

진행되고 있으나 이들 시설 전체를 지중화하는 것은 기술적 측면뿐만 아니라 경제적 측면에서도 불가능한 일이다.

이와 같은 전력수요의 증대 및 과밀화에 대처하기 위해서는 지중송전망의 확대뿐만 아니라 선로자체의 송전용량증대가 요구되고 있으며, 지중전력케이블의 대용량화에 따른 케이블 외부의 열적 환경개선 대책이 시급한 실정이다. 최근에는 지중케이블의 대용량화 및 폭주화, 기타 열수관 등 타열원으로부터의 열적간섭이 증대되고 있는 실정이어서 지중선로의 설계 및 시공에 있어서도 지중 시스템의 특성을 감안한 시공방법의 경제성 확보, 단위선로당 전력공급능력의 증대는 물론 케이블을 포함하는 각종 지중 구조물의 진단 및 평가를 통해 시스템의 정도를 높여야 할 것이다(김대홍, 2001).

지중송전선로의 실제 송전용량은 케이블 자체의 최대 허용온도 또는 주위지반의 허용온도에 의해 결정된다. 발생된 열을 케이블 주위의 되메움재가 효과적으로 방출시키지 않으면 열폭주(thermal runaway) 또는 케이블이 절연파괴에 이를 수 있으며, 이러한 문제는 열에 의한 되메움재에서의 수분이동으로 더 악화된다. 이러한 현상은 케이블의 열 저항성을 더욱 증가시키게 되므로 실제 케이블 되메움재는 낮은 열저항성($50^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/watt}$ 이하, Mitchell, 1982)을 요구하고 있다.

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 케이블주위 지반 및 되메움재의 열적거동, 특히 온도구배하에서의 수분이동현상도 아울러 규명하여야 한다(Imajo, 1976).

지중전력케이블의 되메움재로서 역학적으로 안정하고 시공성이 우수한 강모래가 사용되고 있으나, 그 열적 특성은 명확하게 규명되어 있지 않다. 연구결과(Imajo, 1976)에 의하면 모래의 경우 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/watt}$ 의 건조열저항을 얻기 위해서는 간극율이 25%이하가 되어야 하는 것으로 나타났으나 비교적 균등한 강모래의 경우 최대 다짐상태에서도 35%이하의 간극율을 얻기는 곤란한 것으로 보고 되고 있다(Fukagawa, 1974). 따라서 사용가능한 여러 재료를 혼합하여 간극율을 최소화할 수 있는

배합비를 선정하여야 한다.

일본의 경우 낮은 열저항($100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/watt}$)을 갖는 지중케이블 되메움재를 개발한 바 있으나 그 조성 및 시공 조건 등은 알려져 있지 않다.

본 연구에서는 열저항이 최소가 되는 지중송전관로용 되메움재를 개발하고자 한다. 이를 위해 열특성 측정장치인 탐침법(thermal needle method)의 기본이론과 선형열원모델 및 열저항 영향인자에 대해 살펴보았으며, 탐침법을 이용하여 현재 지중전력케이블 되메움재로 쓰이고 있는 강모래에 대해 물성시험 및 열저항 시험을 통해 다짐도 및 함수비에 따른 열 특성을 규명하였다. 또한 강모래를 주축으로 여러 재료(전로슬래그, 자갈, 석분, 플라이애쉬 등)를 혼합한 시료를 사용하여 간극율이 최소가 되는 최밀충전계의 입도분포를 도출하고 함수비 변화에 따른 열특성을 규명하여 열저항이 최소가 되는 재료 및 혼합비를 선정하였다.

2. 되메움재의 열저항 및 측정방법

2.1 열저항

토사의 열저항을 나타내는 단위는 [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/watt}$] 혹은 [$\text{K}\cdot\text{cm/watt}$]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 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 법, Rhometer법, 안내가열판(guarded hot plate)법 그리고 Rapid K법 등이 있으며, 현장에서 직접 토사 내에 매설하여 열저항을 측정할 수 있는 가열구 매설법과 모의 케이블 매설법 등이 있다. 또한, 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 가정하

여 Kersten, Mickley, Gemant 등이 제안한 방법을 이용하여 실험실에서 열저항을 구하는 간접법이 있다.

한편, 토사의 열저항을 측정하는 방법 중 탐침법과 Shannon-Wells(1947)법은 다른 방법에 비해 상대적으로 단순하고 짧은 시간 내에 측정이 가능할 뿐만 아니라 현장에서 직접 열저항을 측정할 수 있다. 또한, Shannon-Wells법은 시료에 대한 비열(specific heat)을 미리 알고 있어야 하지만, 탐침법은 비열계산이 필요없다.

2.2 탐침법

열 확산율이 δ 인 매질 내에 길이가 무한대인 선형 열원이 있을 때 선형 열원으로부터 반경 r 인 임의의 지점에서 온도 θ 는 발열후 시간 t 에 대해 원통 좌표계에서 Fourier방정식으로부터 식 (1)과 같은 열전도식으로 표현할 수 있다(Carlsaw & Jaeger, 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.

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

여기서, δ : 열확산율

Q : 단위시간/길이에서 발생한 열량

ρ : 열저항을

$\theta(t)$: 시간 t 에서의 온도

r : 열원으로부터 반경방향 거리

t : 시간

$$\chi = \frac{r^2}{4\delta t}$$

$$E_i(-\chi) = \int_{\chi}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

도출된 식 (2)를 전개하면 식 (3)과 같이 된다.

$$\theta(t) = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln \frac{4\delta t}{r^2} - \gamma + \frac{1}{111} \frac{r^2}{4\delta t} - \frac{1}{2!2} \left(\frac{r^2}{4\delta t} \right)^2 + \frac{1}{3!3} \left(\frac{r^2}{4\delta t} \right)^3 - \frac{1}{4!4} \left(\frac{r^2}{4\delta t} \right)^4 + \dots \right] \quad (3)$$

여기서, γ : 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 δ 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.

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

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

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

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 θ_1, θ_2 일 때 그 온도차 $\Delta\theta$ 는 식 (6)과 같이 되며,

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

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

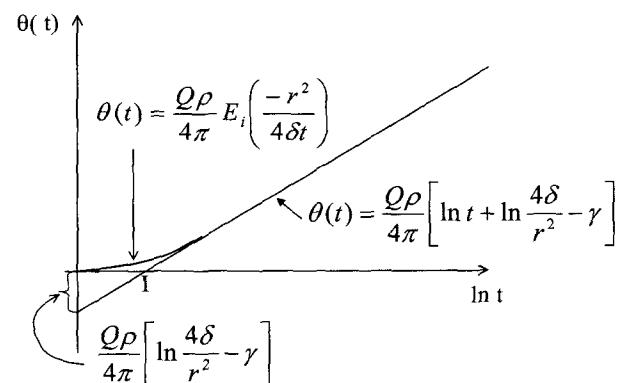


그림 1. 온도와 시간 곡선

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.

2.3 측정장치

열특성의 측정과 관련된 주요 규격으로는 IEEE Std. 442(IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements)와 ISO 8894-1(Refractory materials, Determination of thermal conductivity - Part 1: Hot-wire method), ISO 8894-2(Refractory materials, Determination of thermal conductivity - Part 2: Hot-wire method (parallel)) 등이 있으며, 본 연구에서는 퇴매움토사의 열저항과의 관련성을 고려하여 IEEE Std. 442를 중심으로 측정장치 및 측정방법에 대해 논하였다.

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, 측온저항체, 전력계, 온도계 등으로 구성된다.

선형열원모델에서의 기본방정식은 열전도 계수를 측정하려는 무한체의 물질에 무한히 길고 직경이 없는 열선이 삽입되어 있다는 가정아래 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 시료 케이스의 유한 외경으로 인한 오차는 무시할 수 있음을 밝힌바 있다. 또한 Horrocks와 McLaughlin(1963)은 직경 10cm이상의 케이스를 이용한 실험에서는 유한 외경에 의한 오차는 무시할 수 있음을 보였다.

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 축 방향의 열전달로 인한 오차의 한계를 결정하는 식을 유도한바 있으며, 이로부터 지나치게 긴 탐침의 제작이 필요 없음을 밝혔다. Hopper(1950)는 길이-직경의 비가 100이상이 되어야 유한 길이에 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.

3. 퇴매움토사의 열특성 평가시험

퇴매움재의 열특성 시험은 탐침법 및 전술한 측정장치 원리를 이용하여 미국 전력연구소(Electric Power Research Institute)(Mitchell, 1982)에서 개발한 열저항측

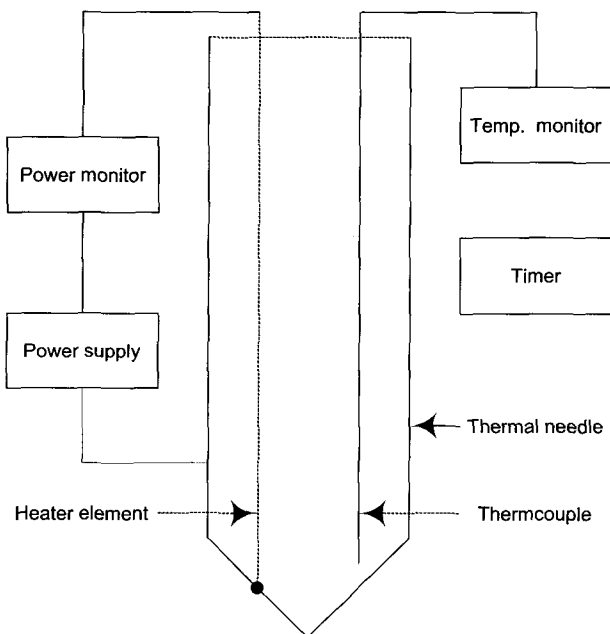


그림 2. 열저항 측정장치 개요도

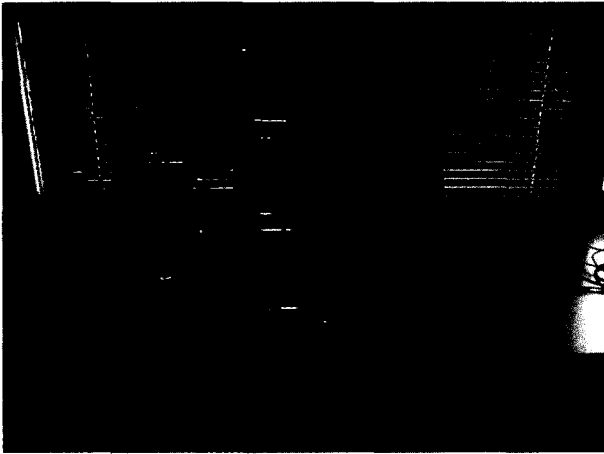


사진 1. 열저항 측정장치(TPA 6000+)

정기 TPA6000+를 사용하였다(사진 1). 우선 지중전력 케이블 되메움재로 현재 사용하고 있는 강모래에 대해 물성시험 및 열저항 시험을 통해 다짐도 및 함수비에 따른 열특성을 규명하였다.

또한 강모래를 주축으로 여러재료(전로슬래그, 자갈, 석분, 플라이애쉬 등)를 혼합한 시료를 사용하여 간극율이 최소가 되는 최밀충전계의 입도분포를 도출하고 함수비변화에 따른 열저항 특성을 규명하여 열저항치가 최소가 되는 재료 및 혼합비를 선정하였다.

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 가장안정된 실리카(SiO_2)로 구성되어 있다. 이와 같은 성질로 인해 모래는 표면에 흡착하는 수분이 적고, 함수량 증감에 의한 체적변화도 무시할 수 있다. 또한 수분흡수에 의한 열저항의 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 최밀충진에 접근할 수 있으나 실제로는 아무리 장시간 다짐을 해도 35% 이하의 간극율은 얻기 힘든 것으로 알려져 있다 (Imajo, 1976). 이것은 모래와 같이 비교적 입경이 크고 균일한 토사의 경우도 이와 유사하다고 말할 수 있다.

강모래의 경우 역학적으로 안정하고 구입이 비교적 원활하며, 시공이 간편한 이유로 지중케이블 되메움재로 널리 활용되어 왔으나 그 열적 특성은 명확하게 규명되어 있지 않다. Imajo(1976)의 연구결과에 의하면 강모래의 건조시 열저항은 습윤시의 5~6배나 크고 온도구배하에서의 수분이동이 커서 장기적 안정성이 불확실한 것으로 보고 된 바 있다. 지중케이블 되메움재가 갖추어야 할 조건은 장기적 안정성을 갖고 낮은 열저항을 유지하여야 하며, 건조시와 습윤시의 열저항 변화가 작아야 한다. 특히 건조시의 열저항이 작은 것이 필요하다.

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

3.1.1 시험방법

흙의 열저항 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

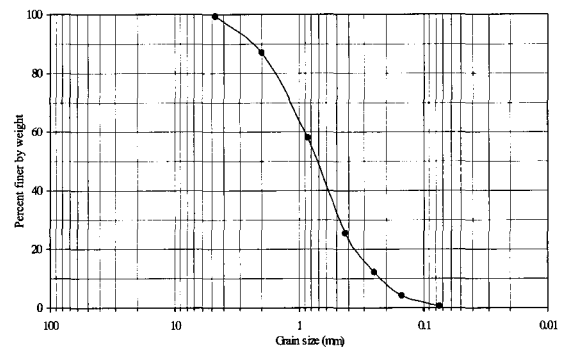


그림 3. 강모래의 입도분포곡선

다짐곡선

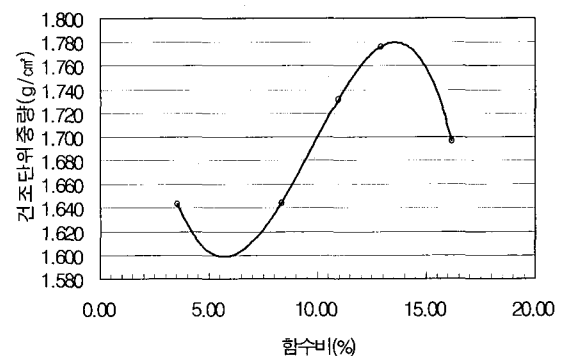


그림 4. 강모래의 다짐곡선

계산하고 이를 통해 각 흙 시료의 상대다짐도 및 간극비를 계산하였다.

시료는 영광 동립천 강모래를 사용하였으며, 노건조 상태부터 자연건조(S=5%), 포화도 70%까지 수분함유량을 변화시키고 다짐도는 75%~96%(간극율 약 32~48%)에서 열특성을 측정하였다. 다짐은 램머에 의한 탭핑법을 사용하였으며, 각종 기초시험을 수행하여 물성을 파악하였다(그림 3~4).

3.1.2 시험결과

토사의 열저항에 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 열저항이 증가한다.

건조 모래의 열저항은 250°C-cm/watt 이상이지만 수분을 조금이라도 함유하면 열저항은 급격히 감소함을 알 수 있다. 포화도가 0~20% 범위에서는 수분증가에 따른 열저항 감소가 크고, S=20%에서는 열저항은 80°C-cm/watt가 된다. 또한 포화도가 20% 이상의 영역에서는 열저항의 감소는 미미하며, S=60% 이상에서는 50°C-cm/watt내외로 일정한 값을 나타내고 있다.

이와 같이 토사 열저항의 함수비에 의한 변화는 토사 간극내의 수분상태로부터 평가할 수 있다. 모래의 건조 열저항이 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 5~8에 나타내었다. 다짐효과를 고려할 때, 함수비가 작은 영역(0~2%)에서는 간극율에 따라 열저항이 100~180°C-cm/watt로 크게 변하므로 되메움재의 다짐도에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 함수비가 크면(5% 이상) 다짐도에 의한 영향은 작은 것으로 나타났다(그림 5, 6). 또한 동일한 다짐도(상대다짐도 90% 경우)를 갖는 시료라 하더라도 함수비에 따라 열저항치는 50~260°C-cm/watt로 건조시와 습윤시의 열저항이 5배 이상 차이가 남을 알 수 있다(그림 7). 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, 고체중 액체

의 밀도에 관계없이 표시할 수 있기 때문이다. 따라서 포화도와 열저항과의 관계는 회귀분석을 통해 식 (8)과

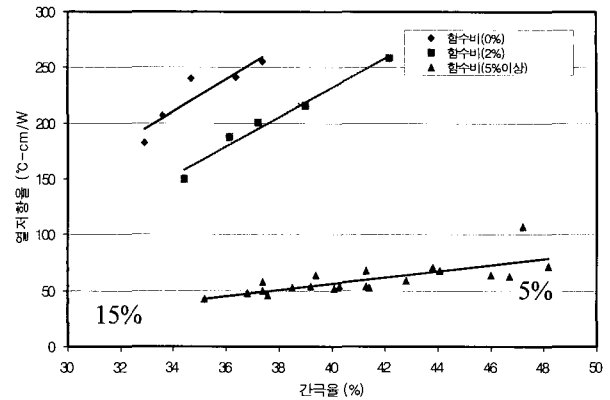


그림 5. 강모래의 간극율과 열저항과의 관계

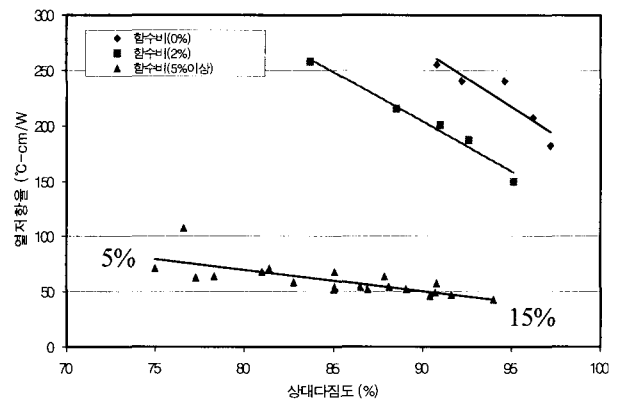


그림 6. 상대다짐도와 열저항과의 관계

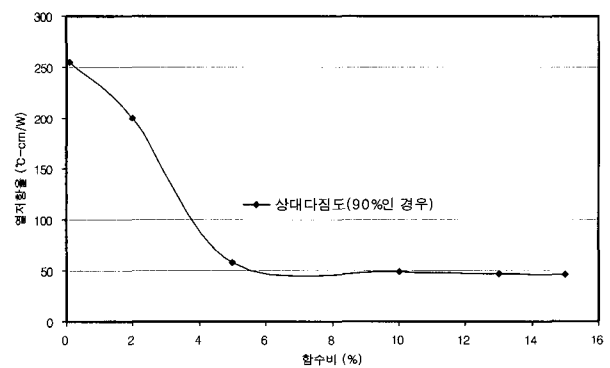


그림 7. 함수비와 열저항과의 관계

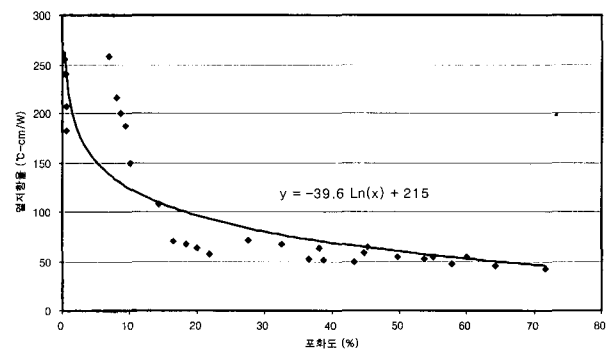


그림 8. 포화도와 열저항과의 상관관계

같이 로그함수로 제안하였으며(그림 8), 추후 다양한 혼합재의 다짐도 및 함수비에 따른 열저항 시험을 통해 본 식을 일반화할 수 있을 것으로 사료된다. 이럴 경우 간단한 물성시험만으로 열저항 산정이 가능할 것으로 기대된다.

$$C = -39.6 \ln(S) + 215 \quad (8)$$

여기서, C : 열저항(°C-cm/W)

S : 포화도(%)

최대다짐도에서의 간극율은 약 32%를 보여 상당히 큰 것으로 나타났으며, Fukagawa(1974)의 연구결과에 의하면 건조 열저항치 100°C-cm/watt를 얻기 위해서는 간극율이 25% 이하이어야 되는 것으로 밝혀진 바 있다. 따라서 모래 단일재료에 의한 100°C-cm/watt이하의 건조 열저항값을 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 장기안정성에 대한 열안정도 평가가 이루어져야 할 것이다.

3.2 단일재료의 열특성

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

Imajo(1976)의 연구에 의하면 강모래 및 각종 산업부산물, 자갈 등을 혼합하여 열특성을 조사해 본 결과 건조 열저항은 다짐밀도에 크게 의존되는 것으로 밝혀졌다. 또한 열전도는 입자 및 접촉면을 통해 전달되기 때문에 촘촘히 다지는 것이 가장 중요하며, 입자자체의 고유열저항의 영향은 작은 것으로 나타났다. 한편 수분에 의한 열저항의 감소효과는 크지만 사질토 등 투수성이 큰 재료의 경우 온도구배하에서의 장기 안정성 측면에서 열저항 감소효과는 기대하기가 어렵다. 따라서 장기적인 열적 안정성을 확보하기 위해서는 건조시의 열저항이 작아야 하고, 함수비에 따른 열저항 변화도 작아야 하기 때문에 흙의 다짐밀도는 대단히 중요하다.

본 절에서는 건조열저항이 작은 되메움재를 얻기 위한 혼합재의 배합비 선정에 몇몇 기본재료를 선정하고 최적의 배합비를 도출하기 위하여 우선 각각의 단일재료에 대한 기본물성시험과 함수비 및 다짐도에 따른 열특성시험을 수행하였다. 이를 통해 열저항이 가장 작고 수분함유량에 따른 열저항의 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 열특성을 규명하였다. 함수비, 비중, 체가름 시험을 수행하여 시료의 기본물성 및 입도분포곡선, 토사의 구성비율 등을 파악하고, 다짐도의 효과를 분석하기 위하여 동일한 함수비에 대해 다짐에너지를 달리하여 다짐 시험을 수행하였다. 즉, 2층 5회, 3층 10회, 3층 25회, 3층 55회, 5층 55회의 5가지로 다짐방법 변화를 고려하였다. 이를 통해 현장에서 건조 및 습윤층의 특성, 다져진 지반의 상대다짐도 등을 평가할 수 있다. 시료에 따라 다르나 함수비는 노건조부터 자연건조 및 포화도 기준 약 70%까지 증가시키면서 열저항을 측정하였다.

시험에 사용된 재료는 쇄석, 강모래, 플라이애쉬, 전로슬래그, 석분 등이며, 이 중 쇄석은 영광 5,6호기 본관 기초 파쇄암반이며, 영광 동림천의 강모래 및 국내 화력발전소에서 생산되고 있는 정제된 석탄회인 플라이애쉬, 포항제철 제2 제강공장 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 및 그림 9, 10과 같다.

표 1. 단일재료의 물성시험 결과

시험명 시료명	함수비 (%)	비중	다짐시험			체분석	
			γ_{dmax} (g/cm ³)	OMC (%)	간극율 (%)	균등계수	곡률계수
쇄 석	0.2	2.65	1.57	0.9	40.8	1.44	0.99
강모래	0.3	2.58	1.78	13.5	32.8	3.96	1.10
전로슬래그	0.1	3.42	2.34	7.5	33.6	2.62	1.00
석 분	6.1	2.68	2.08	9.5	22.4	23.64	2.07
플라이애쉬	1.2	2.23	1.25	25.0	44.0	2.40	0.98

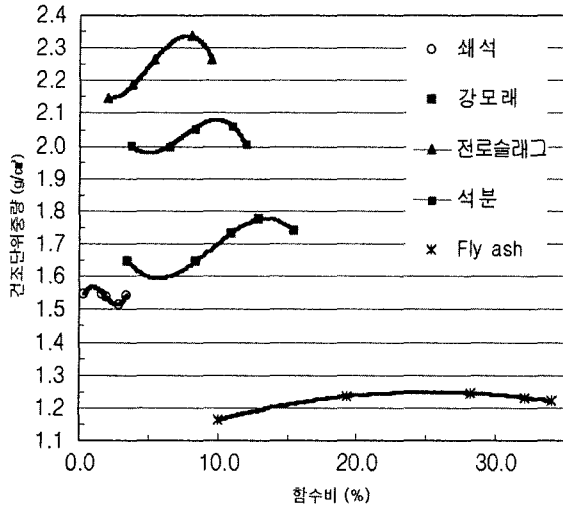


그림 9. 각 재료의 다짐곡선

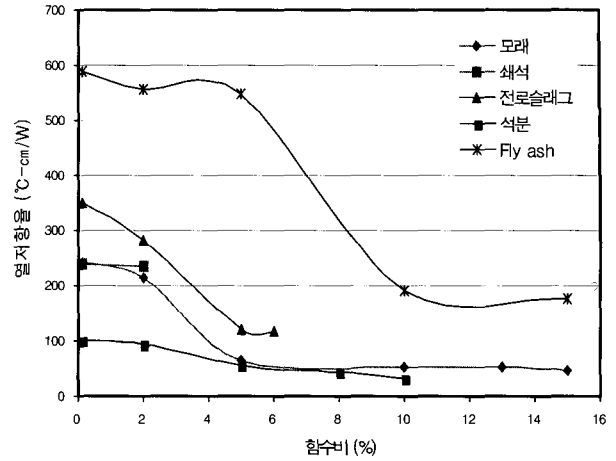


그림 11. 재료별 함수비에 따른 열저항

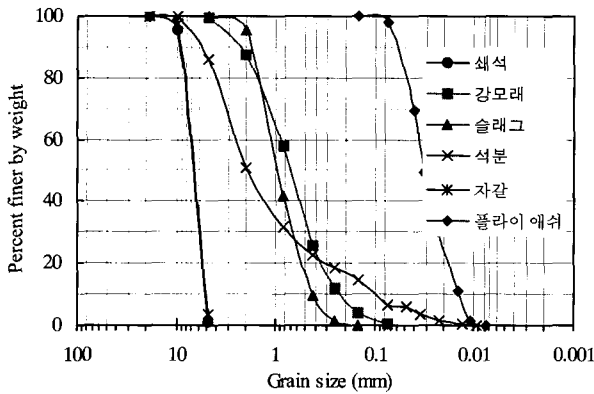


그림 10. 각 재료의 입도분포곡선

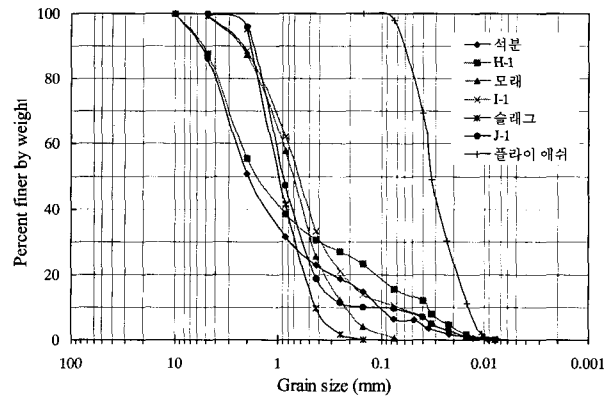


그림 12. 단일 재료 및 플라이애쉬 10% 첨가 시료의 입도분포

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, 입도 분포 또한 가장 양호한 것으로 나타났다.

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

(2) 열특성 시험

그림 11은 단일재료에 대한 열특성 시험 결과를 보여 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 재료가 함수비의 영향을 크게 받고 있으며, 플라이애쉬를 제외한 대부분의 재료가 함수비 5% 이상에서 열저항의 변화는 거의

없음을 알 수 있다. 각 재료마다 열저항 차가 뚜렷하며, 특히 건조영역에서 차이는 더욱 크다. 열저항이 가장 큰 재료는 플라이애쉬로서 함수비에 따라 약 175~593°C-cm/watt범위를 갖는다. 석분의 열저항은 강모래의 약 절반에 해당하는 29~107°C-cm/watt로 가장 작은 값을 보여주고 있다. 전로슬래그의 경우 열저항은 강모래의 약 1.5배 큰 값을 나타내었는데 재료자체의 열저항은 나쁘지 않으나 간극율이 비교적 크고 입도분포가 좋지 않은 결과로 보여지며, 다른 재료와 적절히 혼합하면 열특성을 다소 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

석분의 경우 입도분포가 좋고 간극율이 작아 강모래보다 수분이동이 적을 것으로 예상되므로 장기적인 안정도 면에서도 유리할 것으로 판단된다. 또한 건조열저항이 작고 수분유지력이 좋으며, 최적함수비가 작아 되메움재로서 적합할 것으로 판단된다.

플라이애쉬의 경우 열저항이 월등히 크고 함수비에

표 2. 플라이애쉬 10% 첨가시료의 열저항 특성

시료명	조 건(%)				T. R. (°C-cm/W)
	함수비	포화도	간극율	다짐도	
H-1	2.0	11.8	31.5	87.9	108.3
		11.1	32.6	86.4	120.4
		9.7	35.5	82.7	155.2
I-1	2.0	9.3	36.1	92.6	163.5
		8.7	37.2	91.0	167.7
		8.0	39.0	88.5	208.0
J-1	2.0	11.5	37.4	91.4	137.9
		11.1	38.2	90.4	141.5
		10.7	38.7	89.6	182.2

따른 감소율도 작아서 되메움재로서의 열특성면에서 불리한 것으로 나타났으나 다른 재료와의 혼합에 의한 효과를 파악하기 위하여 각 단일재료에 플라이애쉬를 10%씩 첨가한 시료 H-1(석분+), I-1(모래+), J-1(전로슬래그+)에 대해 물성시험(그림 12) 및 열 특성 시험을 수행하고 저항율의 변화를 살펴보았다.

시험결과(표 2) 모래의 경우 10%내외의 열저항 감소가 있었으며, 전로슬래그는 약 50% 열저항이 감소되었다. 즉 플라이애쉬 단일재료의 열저항은 크지만 다른 재료와 혼합하면 입도분포를 개선시킴으로서 간극율 감소 및 다짐도 향상으로 열특성이 개선된 것으로 보여진다. 한편 석분의 경우 플라이애쉬를 섞었을 때 열저항이 약 10% 증가하여 오히려 열특성이 나빠지는 것으로 나타났다. 따라서 단일재료보다 2개 이상의 재료를 적당한 배합비로 혼합할 경우 열특성 개선이 가능한 것으로 나타났으므로 추후 혼합비율에 따라 좀더 많은 시험을 수행할 필요가 있다.

3.3 혼합재료의 열특성

본 시험에서는 건조열저항 및 함수량에 따른 열저항 변화가 작은 되메움재의 혼합비율을 결정하고 최밀충전을 얻을 수 있는 입도분포를 도출하고자 한다. 즉, 간극율 20% 이하의 최밀충전을 갖는 입도분포(혼합비)를 도출하고 최소의 건조열저항을 나타내는 혼합재의 배합비를 결정하기 위한 시험을 수행하였다. 이를 위해 시료는 자갈(쇄석), 강모래, 전로슬래그, 플라이애쉬, 석분 등을 사용하였으며, 단일재료 시험 및 외국의 연구결과(Fukagawa, 1974 및 Wiseman & Burrell, 1969)를 참조하여 배합비를 선정하였다(표 3).

한편, 점토 및 실트는 수분을 함유하면 뭉치는 경향이

표 3. 혼합재 시료의 배합비 (단위 : %)

재료명 시료명	쇄석	모래	전로 슬래그	석분	플라이 애쉬	비고
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	
K-1	45	45			10	
K-2	42	43			15	
K-3	40	40			20	
L-1	36	12		42	10	
L-2	45	10		35	10	
L-3	54	8		28	10	
M-1	36	6	6	42	10	
M-2	45	5	5	35	10	
M-3	54	4	4	28	10	

있고 특히 점토의 경우 팽창성을 나타내므로 광물입자를 서로 밀어내어 열 저항성을 증가시키게 된다. 따라서 본 시험에서는 점토와 실트는 제외하였다.

표 4. A시료의 물성시험 결과

시료명	비중	다짐시험			체분석	
		γ_{dmax} (g/cm ³)	OMC (%)	간극율 (%)	균등 계수	곡률 계수
A-1	2.61	2.04	10.5	21.8	15.67	0.35
A-2	2.61	2.07	10.0	20.8	15.26	0.36
A-3	2.62	2.05	9.5	21.4	15.85	0.74
A-4	2.63	1.99	8.5	24.3	13.80	6.40

3.3.1 A 시료

표 3의 배합표중 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 4) 쇄석의 함유량이 커질수록 비중이 증가되고, 최적함수비(OMC)는 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 쇄석이 물을 함유할 수 있는 능력이 적기 때문이다. 간극율은 각 시료의 성분에 따라 달라지겠지만 최대건조밀도가 가장 큰 A-2 시료가 가장 작은 값을 나타냈다. 체분석 결과 약간의 차이는 있으나 모든 시료가 유사한 값을 보여주고 A-4의 경우 곡률계수는 가장 좋은 값이지만 스텝형의 입도분포를 갖게 되어 양입도의 토사(well graded soil)라고는 말할 수 없다.

열특성 측정결과 함수비가 작은 영역에서 열저항은 다짐도에 따라 크게 변화하며(120~160°C-cm/watt), 같은 다짐도라 하더라도 함수비에 따라 50~160°C-cm/watt로 변화하므로 다짐도보다 함수비의 영향이 더 큰 것으로 나타났다(그림 13). 그 이유는 모래 및 자갈의 경우 간극율이 크기 때문에 다짐도를 개선시키는 데는 한계가 있기 때문이다. 또한 동일한 함수비 및 다짐도 조건에서 자갈 및 모래의 혼합비가 50 : 50인 A-2 시료의 경우

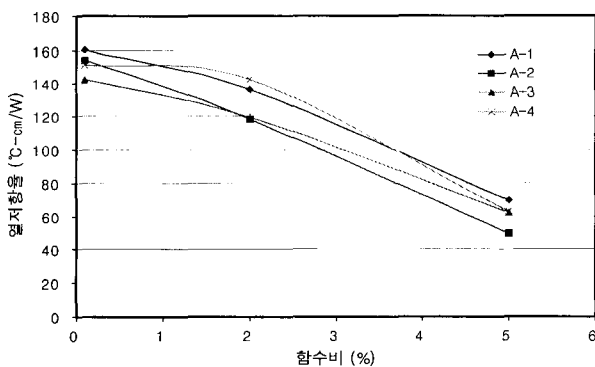


그림 13. 함수비와 열저항과의 관계(A시료)

A-1 시료보다 12~15% 열저항이 감소하는 것으로 나타났다으며, 감소정도는 함수비에 따라 큰 차이가 없었다. 따라서 같은 재료라 하더라도 혼합비 및 구성재료의 입도분포에 따라 열저항치가 달라짐을 알 수 있다.

대상시료 중 열특성이 가장 좋은 재료는 쇄석과 모래의 비율이 50 : 50인 A-2시료로서 열저항은 함수비에 따라 다소 차이는 있으나 강모래의 50~60%이며, 쇄석의 33~50%, 함수비 2% 이상일 때의 석분의 경우와 유사하고, 건조시 석분의 약 110%로 나타났다. 간극율은 강모래의 70~75%, 쇄석의 55~60%로 나타났다. 따라서 적당한 비율로 재료를 혼합할 경우 열특성치를 개선할 수 있음을 알 수 있으며, 더 많은 혼합재를 이용하여 적당한 배합을 통해 열 특성을 좀더 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 모래 및 자갈은 조골재로 간극율이 크기 때문에 혼합에 의한 다짐도 개선은 한계가 있을 것으로 사료되며, 추후 추가적인 혼합재의 배합시험이 필요할 것으로 판단된다.

3.3.2 B, C 시료

배합설계표중 전로슬래그를 기본으로 모래와 쇄석을 각각 혼합하여 물성시험 및 열특성시험을 수행하였다. 단일재료의 열특성시험결과 전로슬래그의 열저항치는 115~350°C-cm/W으로 강모래의 약 2배에 달하였으나 적당한 배합율로 혼합할 경우 혼합비 및 다짐도에 따라 혼합재의 열저항 변화를 살펴보고자 하였다.

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 기

표 5. B, C시료의 물성시험 결과

시료명	비중	다짐시험			체분석	
		γ_{dmax} (g/cm ³)	O.M.C (%)	간극율 (%)	균등 계수	곡률 계수
B-1	3.08	2.17	10.0	29.6	3.44	1.02
B-2	3.00	2.12	10.5	29.3	3.50	1.03
B-3	2.92	2.06	11.0	29.4	3.64	1.02
B-4	2.83	1.96	11.5	30.8	3.85	1.04
C-1	2.87	2.23	9.0	22.2	12.34	0.44
C-2	2.83	2.19	9.5	22.5	12.89	0.46
C-3	2.78	2.17	10.5	22.0	13.49	0.48
C-4	2.74	2.14	11.0	21.9	14.15	0.42

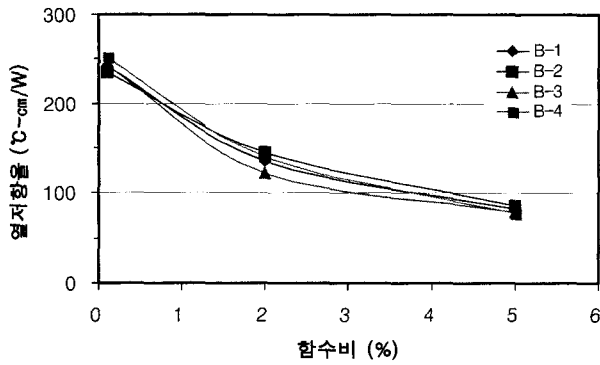


그림 14. 함수비와 열저항과의 관계(B시료)

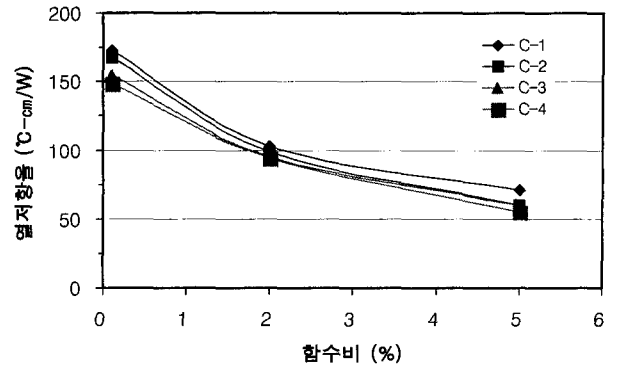


그림 15. 함수비와 열저항 관계(C시료)

인하며, 간극율의 감소는 다짐도가 향상되었음을 의미하고 있다. 또한 곡률계수 및 균등계수도 다소 증가하여 입도분포가 좋아졌음을 알 수 있다(표 5).

열특성시험결과 열저항이 가장 낮게 나타난 B-4시료의 경우 강모래의 100~120%의 열저항치를 나타냈으며, 전로슬래그의 60%로 나타나 열특성이 상당히 개선됨을 알 수 있었다(그림 14). 한편 B-1시료와 같이 전로슬래그의 함유량이 클 경우 전체적으로 열저항값은 크게 나타났으나 함수비에 따른 열저항 변화는 상대적으로 작았다.

쇄석-전로슬래그-모래의 혼합재인 C시료의 경우 전로슬래그의 비율이 상대적으로 작은 C-4시료의 열저항치가 가장 작게 나타났다(그림 15).

즉, 함수비 2%이상에서 열저항치는 석분의 경우와 유사한 값을 보이고 있으나 건조열저항은 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 열저항이 작게 나타나 혼합에 의한 열특성 개선 효과가 현저함을 알 수 있다.

3.3.3 D, E 시료

D, E시료의 물성시험결과는 표 6에 제시되어 있는데

표 6. D, E시료의 물성시험결과

시료명	비중	다짐시험			체분석	
		γ_{dmax} (g/cm ³)	OMC (%)	간극율 (%)	균등 계수	곡률 계수
D-1	2.67	2.14	9.5	19.9	20.91	1.83
D-2	2.66	2.12	9.0	20.3	17.50	1.48
D-3	2.65	2.07	9.0	21.9	14.62	1.36
E-1	2.67	2.14	9.0	19.8	33.57	3.42
E-2	2.67	2.14	9.0	19.9	30.56	4.04
E-3	2.67	2.14	9.0	19.9	17.59	5.30

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.

열저항 시험결과 D-1시료의 열저항은 전체적으로 석분과 매우 유사하였다. E-1시료의 경우 열저항은 석분의 약 90%로 우수한 것으로 나타났으며, 함수량에 따른 변화도 적어 혼합재중 열특성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

그림 16은 현재 지중케이בל 되메움재로 사용하고 있는 강모래와 본 시험을 통해 열특성이 우수한 것으로 파악된 재료의 열저항치를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 석분, A-2, E-1 등은 모래에 비해 열저항이 낮고 함수비에 따른 변화가 작아 열안정도 면에서도 유리한 것으로 나타났다.

한편, 표 3의 F~M시료의 경우 함수비 및 다짐도에 따라 차이는 있으나 도출된 재료(석분, A-2, E-1)에 비해 열저항치는 다소 높게 나타나는 경향을 보여주었기 때문에 본 논문에서는 시험결과에 대해 논하지 않았다.

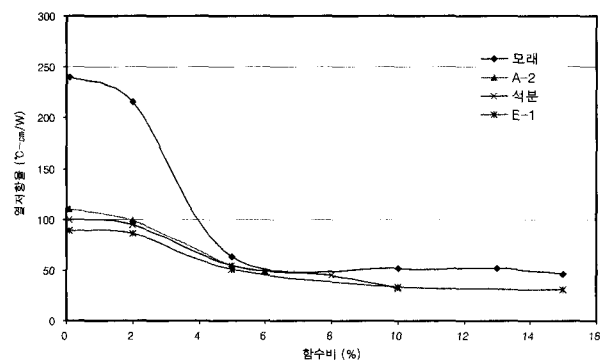


그림 16. 모래 및 도출된 재료의 열저항률

4. 결론

지중송전용량은 케이블 주위 되메움재의 열방산 특성에 좌우되는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 열방산 효과가 양호한 되메움재를 개발하기 위하여 현재 사용되고 있는 강모래를 비롯한 다양한 단일재료 및 혼합재의 열저항을 함수비와 다짐도별로 측정하고, 그 결과로부터 다음 결론을 얻었다.

- (1) 토사의 열저항은 흙 입자의 구성성분, 밀도, 함수비, 입자형상 및 크기, 입도분포, 주변온도 및 다짐방법 등에 영향을 받는다.
- (2) 영광 동림천 강모래의 열저항치는 함수비에 따라 50~260[°C-cm/watt]로 건조시와 습윤시의 열저항이 약 5~6배로 차이가 현저함을 알 수 있었다.
- (3) 최대다짐도에서 강모래의 간극율은 약 32[%]이며, 모래 단일재료에 의한 100[°C-cm/watt]이하의 건조 열저항값을 얻기는 불가능한 것으로 나타났다.
- (4) 강모래의 경우 간극율이 큰 특성으로 인해 열 구배 하에서의 수분이동 등 장기안정성에 대한 열안정도 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- (5) 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.
- (6) 강모래-쇄석(영광원전 본관기초 파쇄암반) 혼합재인 A시료의 경우 50:50으로 혼합한 A-2시료가 열특성이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 함수비 2%이상에서 석분과 유사하였다.
- (7) 쇄석-석분 혼합재(E-1시료)의 경우는 간극율이 20% 이내로 최밀충전이 가능한 것으로 나타났으며, 열특성은 석분보다 우수하고, 수분함유량의 영향도 적어 이제까지 시험한 재료중 되메움재로서 가장 좋은 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 열특성이 우수한 다음 3개의 재료를 도출하였으며(표 7), 추후 현장실증시험을 통해 시공성 및 역학적 특성을 평가하고 계절 및 기상조건에 따른

표 7. 선정된 되메움재료 및 배합비 (단위 : %)

재료명	쇄석	강모래	전로 슬래그	석분	플라이 애쉬	비고
A-2				100		
	50	50				
	30			70		

되메움재의 온도와 함수비변화를 규명할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 김대홍, 이대수, 정원섭, 정범용 (2001), "지중송전케이블 되메움 토사의 열저항 특성", *대한토목학회 학술발표회논문집*.
2. 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.
3. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. (1959), *Conduction of Heat in Solids*, 2nd Edition, Oxford University Press, New York.
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.
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, pp.464.
7. Horrocks, J. K. and McLanughlin. (1963), "Non-steady State Measurements of Liquid Polyphase", *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A*, Vol.273.
8. Imajo, T. (1976), *Development of Backfill Soils for Underground Cables(2) - Study on the Optimum Grading Distribution*, CRIEPI-72061, 175063.
9. IEEE Std 442-1981 (1981), *IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements*, pp.6-15.
10. ISO 8894-1 (1987), "Refractory Materials, Determination of Thermal Conductivity - Part 1: Hot-wire Method (cross-array)", *International Organization for Standardization*, Switzerland.
11. ISO 8894-2 (1990), "Refractory Materials Determination of Thermal Conductivity-Part 2 Hot-wire Method (Parallel)", *International Organization for Standardization*, Switzerland, 1990.
12. Mitchell, J. K. and Chan, C. K. (1982), *Backfill Materials for Underground Power Cables*, Phase 1~3, EPRI EL-506, EL-1894, EL-4150.
13. Shannon, W. L. and Wells, W. A. (1947), "Tests for Thermal Diffusivity of Granular Materials", *Proceedings of ASTM*, Vol.47, pp.1044-1053.
14. Wiseman, R. J. and Burrell, R. W. (1969), "Soils Thermal Characteristics in Relation to Underground Power Cable", *AIEE Committee Report, Transaction of AIEE*, Vol.79, pp.792-856.

(접수일자 2002. 7. 25, 심사완료일 2002. 9. 24)