

## 열특성 효과를 고려한 지중송전관로용 되메움재 개발

### Development of Backfill Materials for Underground Power Cables Considering Thermal Effects

이 대 수<sup>1</sup> Lee, Dae-Soo

김 대 홍<sup>2</sup> Kim, Dae-Hong

홍 성 연<sup>3</sup> Hong, Sung-Yun

#### 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 even while 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 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. Tests were carried out for Donggrim 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 D-2 (sand and granite screenings 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 and the applicability was assessed through field tests.

#### 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 열저항율이 낮은 지중송전관로의 되메움재를 개발하기 위해 다양한 첨가제를 사용하여 시험을 수행하였다. 연구결과, 영광 동림천 모래의 경우 상대적으로 균등한 입도분포를 나타내는 모래로써 함수비 10%에서 50°C-cm/watt, 건조시에는 260°C-cm/watt를 나타내는 등 대단히 높은 열저항치를 보여주었다. 또한 진산 화강암 석분 및 모래-자갈(D-2), 석분-쇄석 혼합재(E-1)의 경우 양호한 입도분포를 나타냈으며, 열저항은 함수비 10%의 경우, 35°C-cm/watt, 건조할 경우 100°C-cm/watt를 나타냈다. 이들 연구결과를 토대로 열저항이 낮은 3가지 형태의 되메움재를 제시하였다. 또한 제시된 되메움재를 대상으로 현장실증시험을 통해 적용성을 평가하였다.

**Keywords :** Applicability assessment, Backfill materials, Thermal resistivity, Underground power cables

1 정희원, 한전 전력연구원 책임연구원 (Member, Chief Researcher, KEPRI/KEPCO, dslee@kepri.re.kr)

2 정희원, 한전 전력연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KEPRI/KEPCO)

3 정희원, 한전 전력연구원 일반연구원 (Member, Researcher, KEPRI/KEPCO)

## 1. 서론

지중송전선로의 실제 송전용량은 케이블 자체의 최대 허용온도 또는 주위지반의 허용온도에 의해 결정된다. 송전으로 인해 발생된 열을 케이블 주위의 되메움재가 효과적으로 방출시키지 않으면 열폭주(thermal runaway)에 의한 케이블의 절연파괴가 일어날 수 있으며, 이러한 문제는 열에 의한 되메움재에서의 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 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°C-cm/watt의 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°C-cm/watt)을 갖는 지중케이블 되메움재를 개발한 바 있으나 그 조성 및 시공조건 등은 알려져 있지 않다.

본 연구에서는 송전효율을 높이기 위해 열저항이 최소가 되는 지중송전관로용 되메움재를 개발하고자 한다. 이를 위해 열특성 측정장치인 탐침법(thermal needle method)을 이용하여 현재 지중전력케이블 되메움재로 쓰이고 있는 강모래 및 다양한 재료(전로슬래그, 자갈, 석분, 플라이애쉬 등)를 혼합한 시료에 대해 열저항을 측정하였다. 본 실험을 통해 간극율이 최소가 되는 최밀 충전계의 입도분포를 도출하고 함수비 변화에 따른 열 특성을 규명하여 열저항이 최소가 되는 재료 및 혼합비

를 선정하였다. 또한 제시된 재료에 대해 실규모 현장시험을 수행하여 시공단계 및 차량하중에 대한 응력분포 및 변위특성을 규명함으로써 현장적용성을 검토하였다.

## 2. 되메움재의 열저항 및 측정방법

### 2.1 열저항

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

열저항을 측정하는 방법은 열원에서 발생한 열이 시료를 통과할 때 토사 내에서 발생하는 온도차를 실측함으로써 열저항을 구하는 직접법과 토사의 건조밀도, 수분함량, 모래와 점토의 구성비율에 대한 토사의 모델을 가정하여 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 현장에서도 직접 열저항을 측정할 수 있다. 또한, Shannon-Wells법은 시료에 대한 비열(specific heat)을 미리 알고 있어야 하지만, 탐침법은 비열계산이 필요 없다.

본 연구에서는 탐침법을 이용하여 재료의 열저항을 측정하였다.

### 2.2 탐침법

열 확산율이  $\delta$ 인 매질 내에 길이가 무한대인 선형 열원이 있을 때 선형 열원으로부터 반경  $r$ 인 임의의 지점에서 온도  $\theta$ 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,  $\delta$  : 열확산율  
 $Q$  : 단위시간/길이에서 발생한 열량  
 $\rho$  : 열저항율  
 $\theta(t)$  : 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.

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

여기서,  $r$  : 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.

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

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 열저항율은 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,

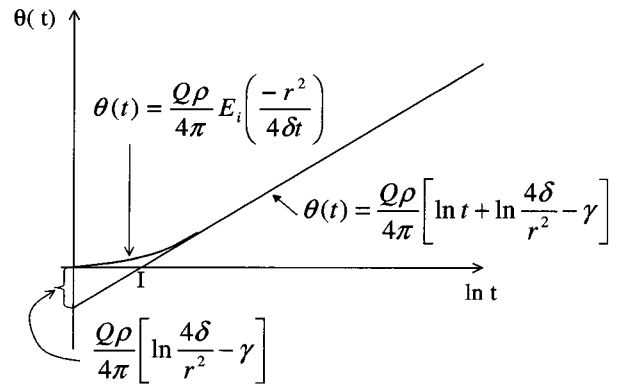


그림 1. 온도와 시간 곡선

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

따라서 열저항율은 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.

### 2.3 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 있다.

IEEE Std. 442에서는 토사의 열저항성에 영향을 미치는 인자로 수분함량과 건조밀도, 입자의 구성성분 (structural composition) 및 각종 환경인자를 제시하고

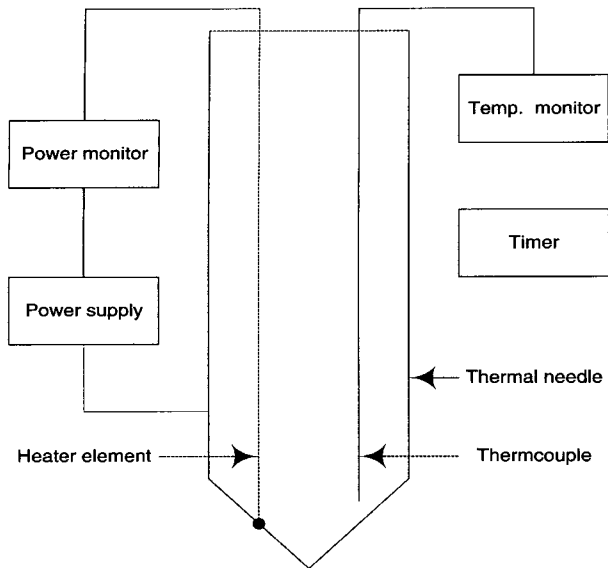


그림 2. 열저항 측정장치 개요도

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 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.

### 3. 퇴매움토사의 열특성 평가

선행연구결과(Imajo, 1976)에 의하면 강모래의 건조시 열저항은 습윤시의 5~6배나 크고 온도구배하에서의 수분이동이 커서 장기적 안정성이 불확실한 것으로 보고 된 바 있다. 지중케이블 퇴매움재가 갖추어야 할 조건은 장기적 안정성을 갖고 낮은 열저항을 유지하여야 하며, 건조시와 습윤시의 열저항 변화가 작아야 한다. 특히 건조시의 열저항이 작은 것이 필요하다. 한편 Fukagawa(1974)는 강모래의 건조열저항과 간극율과의 관계를 실내시험을 통해 규명한바 있는데, 이 결과에 따르면 건조 열저항치 100°C-cm/watt를 얻기 위해서는 간극율이 25%이하이어야 되는 것으로 밝혀진 바 있다.

퇴매움재의 열특성 시험은 탐침법 및 전술한 측정장치 원리를 이용하여 미국 전력연구소(Electric Power Research Institute)(Mitchell, 1982)에서 개발한 열저항측정기 TPA6000+를 사용하였으며, 강모래 및 여러 혼합시료에 대한 열특성을 측정한 결과는 다음과 같다.

#### 3.1 강모래

실험에 사용된 시료는 영광 동림천 강모래이며, 노건조상태부터 자연건조(포화도=5%), 포화도 70%까지 수분함유량을 변화시키고 다짐도는 75%~96%(간극율 약 32~48%)에서 열특성을 측정하였다(그림 3).

시험결과, 건조모래의 열저항은 250°C-cm/watt 이상이지만 수분을 조금이라도 함유하면 열저항은 급격히 감소함을 알 수 있다. 포화도가 0~20% 범위에서는 수분증가에 따른 열저항 감소가 크고, 포화도 20%일 때 열저항은 80°C-cm/watt가 된다. 또한 포화도가 20% 이상의 영역에서는 열저항의 감소는 미미하며, 포화도 60% 이상에서는 50°C-cm/watt내외로 일정한 값을 나타내고 있다. 이와 같이 토사 열저항의 함수량에 의한 변화는 토사 간극내의 수분상태로부터 평가할 수 있다. 모래의 건조열저항이 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.

또한 함수비가 작은 영역(0~2%)에서 열저항은 다짐도에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 함수비가 크면(5% 이상) 다짐도에 의한 영향은 작은 것으로 나타났다(그림 4). 즉 건조시에는 입자의 접촉면을 따라 열

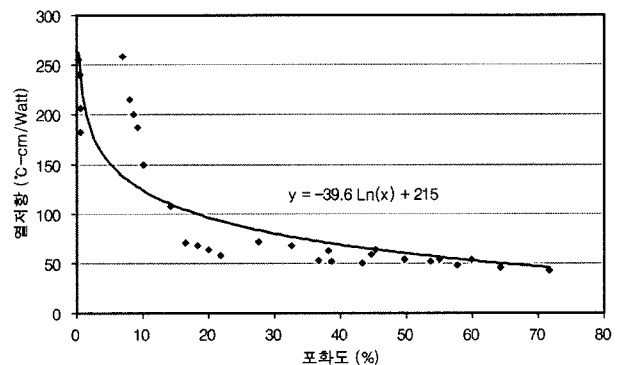


그림 3. 포화도와 열저항과의 상관관계

이 전도되고 열저항율은 간극을 채우고 있는 공기에 지배를 받기 때문에 다짐도의 영향이 상대적으로 크게 된다. 또한 함수비가 증가할수록 입자사이의 간극을 공기 대신 물로 채워지기 때문에 입자사이의 접촉면보다는 간극수에 의해 열의전달이 좌우되게 된다. 따라서 함수비가 증가할수록 다짐도의 영향은 작아지게 되며, 열저항성은 함수비의 영향을 크게 받는다. 참고로 공기의 열저항은 물보다 약 22배 크기 때문에 다짐밀도가 큰 최밀 충전 못지않게 일정한 함수비 이상을 유지하는 것이 대단히 중요하다.

그림 5는 동일한 다짐도(상대다짐도 90% 경우)를 갖는 시료를 대상으로 함수비에 따라 열저항치를 측정된 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 열저항치는 50~260°C-cm/watt로 건조시와 습윤시의 열저항이, 5배 이상 차이가 나는 것으로 나타났다. 또한 최대다짐도에서 강모래의 간극율은 약 32%를 보여 상당히 큰 것으로 나타났으며, Fukagawa(1974)의 연구결과와 비교하여 볼 때 모래 단일재료에 의한 100°C-cm/watt이하의 건조 열저항값을 얻기는 불가능한 것으로 나타났다.

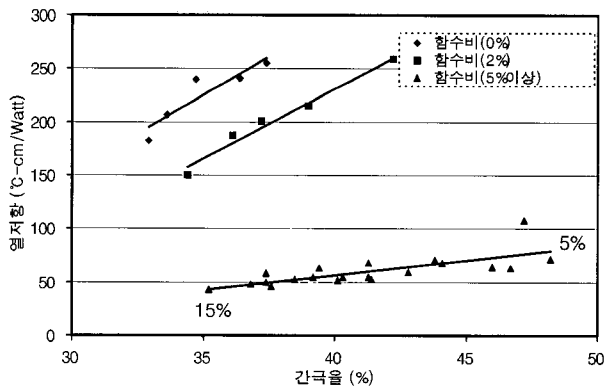


그림 4. 강모래의 열저항과 간극율과의 관계

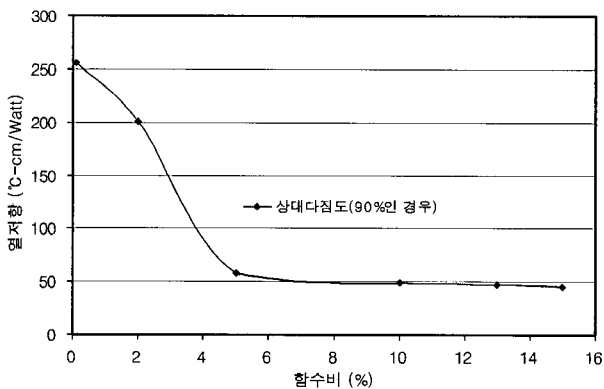


그림 5. 함수비와 열저항과의 관계

### 3.2 단일재료의 열특성

지중케이블의 송전용량에 큰 영향을 미치는 관 주위의 되메움재로 강모래가 사용되고 있으나 전술한 바와 같이 열 특성은 건조열저항이 크고 건조시와 습윤시의 차가 약 5배로 대단히 크며, 간극율을 또한 32% 이상으로써 적합한 재료라고는 할 수 없다. 따라서 열 방산 특성이 양호한 되메움재의 개발이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 건조열저항이 작은 되메움재를 얻기위한 혼합재의 배합비 선정을 위해 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 비교하였다.

시험에 사용된 재료는 쇄석, 강모래, 플라이애쉬, 전로슬래그, 석분 등이며, 이 중 쇄석은 영광 5, 6호기 본관기초 파쇄암반이며, 영광 동립천의 강모래 및 국내 화력발전소에서 생산되고 있는 정제된 석탄회인 플라이애쉬, 포항제철 제2 제강공장 전기로에서 생산된 전로슬래그, 금산군 진산지역 골재장의 역청포장혼합물용 화강암 석분 등을 대상으로 하였다.

단일재료에 대한 기초물성 평가결과 석분의 경우 자연상태의 함수비는 단일재료 중 가장 크고, 간극율은 22.4%로 가장 작은 값을 보여 주었으며, 입도분포 또한 가장 양호한 것으로 나타났다. 전로슬래그의 경우 재료 특성상 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(표 1, 그림 6).

그림 7은 단일재료에 대한 열특성 시험 결과를 보여

표 1. 단일재료의 물성시험 결과

시료명	함수비 (%)	비중	다짐시험			체분석	
			$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	OMC (%)	간극율 (%)	균등 계수	곡률 계수
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

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/watt 범위를 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.

플라이애쉬의 경우 열저항이 월등히 크고 함수비에 따른 감소율도 작아서 되메움재로서의 열특성면에서 불리한 것으로 나타났다.

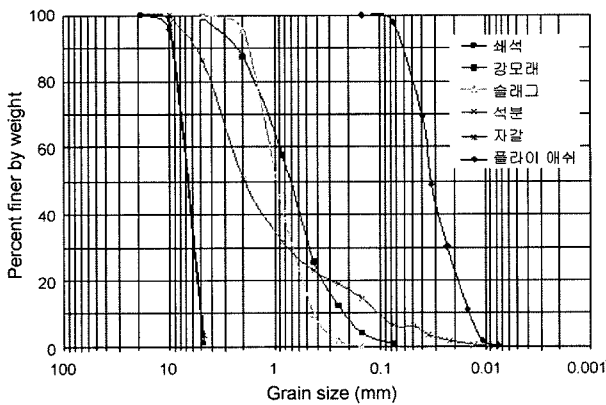


그림 6. 단일재료의 입도분포곡선

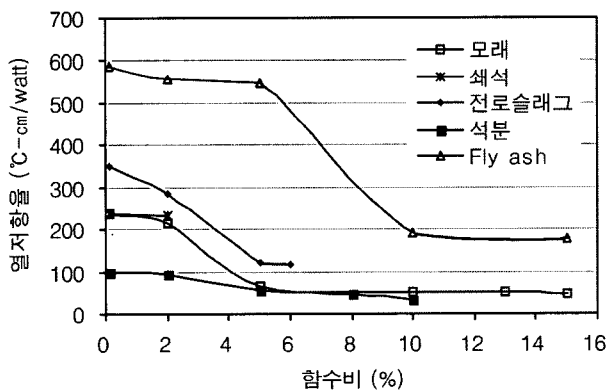


그림 7. 재료별 함수비에 따른 열저항을

### 3.3 혼합재료의 열특성

본 시험에서는 건조열저항 및 함수량에 따른 열저항 변화가 작은 되메움재의 혼합비율을 결정하고 최밀충전

표 2. 혼합재 시료의 중량 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	

을 얻을 수 있는 입도분포를 도출하고자 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 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(Imajo, 1976).

### 3.3.1 A 시료

표 2의 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 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 성분에 따라 달라지겠지만 최대 건조밀도가 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

표 3. A시료의 물성시험 결과

시험명 시료명	비중	다짐시험			체분석	
		$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	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

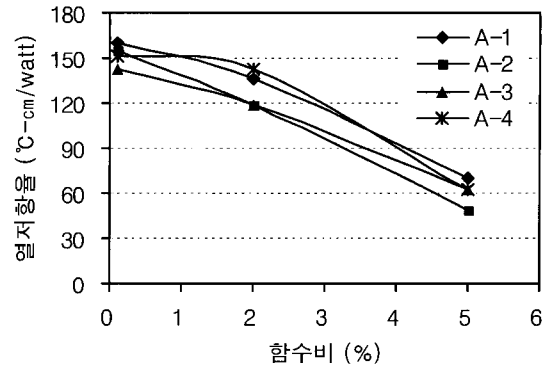


그림 8. 함수비와 열저항과의 관계(A시료)

나타났다(그림 8). 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 A-1 시료보다 12~15% 열저항이 감소하는 것으로 나타났으며, 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.

### 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, 최대건조밀도도 약간 감소하였다. 이는 철분성분을 많이 함유하고 있는 전로슬래그의 함유량이 작아진데 기인하며, 간극율의 감소는 다짐도가 향상되었음을 의미

하고 있다. 또한 곡률계수 및 균등계수도 다소 증가하여 입도분포가 좋아졌음을 알 수 있다(표 4).

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 9).

한편 B-1시료와 같이 전로슬래그의 함유량이 클 경우 전체적으로 열저항값은 크게 나타났으나 함수비에 따른 열저항 변화는 상대적으로 작았다. 쇄석-전로슬래그-

표 4. B, C시료의 물성시험 결과

시험명 시료명	비중	다점시험			체분석	
		$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	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

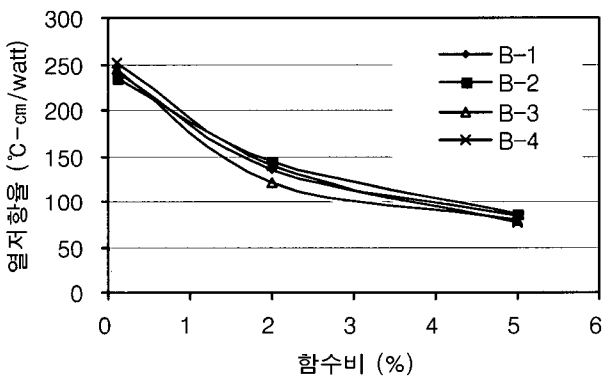


그림 9. 함수비와 열저항과의 관계(B시료)

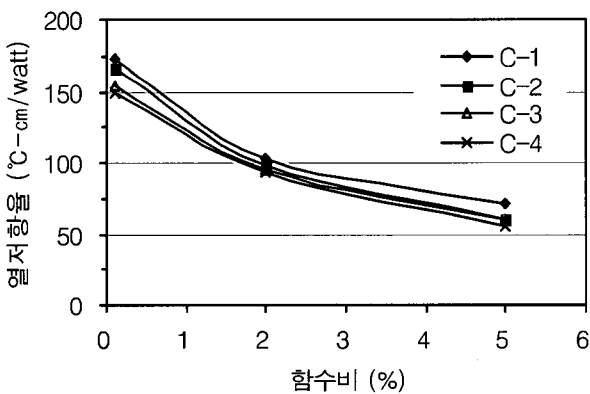


그림 10. 함수비와 열저항 관계(C시료)

모래의 혼합재인 C시료의 경우 전로슬래그의 비율이 상대적으로 작은 C-4시료의 열저항치가 가장 작게 나타났다(그림 10).

### 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 입도분포 또한 양호한 것으로 나타났다. 최대건조밀도의 경우도 쇄석이나 모래의 경우보다 약 20~30% 증가하였으며, 석분보다도 약 5% 크게 나타났는데 이는 입도분포가 양호하고 간극율이 쇄석이나 모래에 비해 10~20% 작아 대단히 조밀한 특성을 나타내는데 기인하는 것으로 판단된다.

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 11은 현재 지중케이블 되메움재로 사용하고 있는 강모래와 본 시험을 통해 열특성이 우수한 것으로

표 5. D, E시료의 물성시험결과

시험명 시료명	비중	다점시험			체분석	
		$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	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

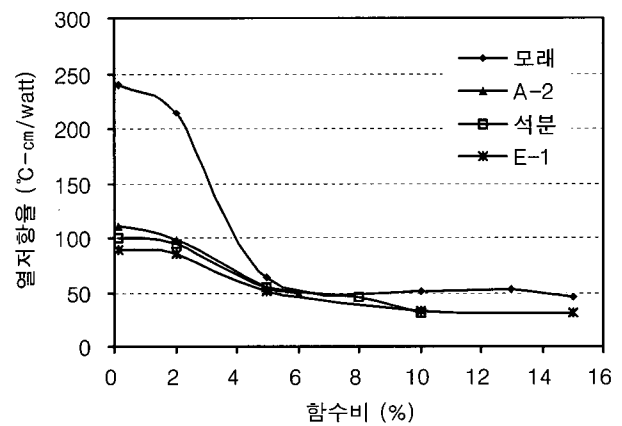


그림 11. 모래 및 도출된 재료의 열저항



파악된 재료의 열저항치를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 석분, D-2, E-1 등은 모래에 비해 열저항이 낮고 함수비에 따른 변화가 작아 열안정도 면에서도 유리한 것으로 나타났다.

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

#### 4. 선정된 되메움재의 역학적 안전성 평가

열저항 시험결과 열특성이 우수한 것으로 판명된 다음 3가지 형태의 되메움재에 대해 현장적용성을 평가하기 위하여 실규모의 송전관로를 포설하고 현장시공조건과 동일한 다짐 및 포장, 표준 트럭하중의 재하 등을 통해 송전관로의 안전성 및 아스팔트 포장도로의 건전성에 미치는 영향을 평가하였다(표 6).

지중송전관로 설계시 일반적으로 사용되는 내경 200mm의 PE파형관을 사용하였으며(그림 12, 표 7), 관로의 배열은 그림 13과 같이 2단 3열 배열을 적용하였다. 선행 연구결과(Kataoka, 1988)에 의하면 하중 재하에 따른 관로의 변형량 및 작용압력은 상단 중앙관이 가장 큰 것으로 나타난바 있다. 따라서 본 시험에서는 상단 중앙관의 내부에 LVDT(Range 50mm) 및 토압계(Range 5.1kgf/cm<sup>2</sup>)를 설치하고 데이터로거를 이용하여 변형량 및 작용압력을 측정하였다.

시험에 사용된 포장등급은 현재 주요 간선도로(폭20m 이상) 및 이에 준하는 도로의 아스팔트 포장에 사용하는 A-1급 포장단면을 적용하였으며(그림 14), 표준트럭하

표 6. 선정된 되메움재료 및 배합비(단위 : %)

재료명 사료명	쇄석	강모래	전로 슬래그	석분	플라이 애쉬	비고
단일재료				100		
D-2		20		80		
E-1	30			70		

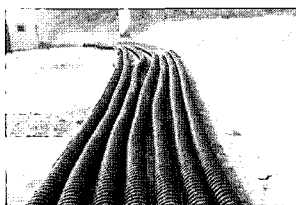


그림 12. PE파형관

표 7. PE파형관 규격

구분	규격
외경(mm)	260
내경(mm)	200
최소두께(mm)	4.0 이상
인장응력(kgf/cm <sup>2</sup> )	225 이상
압축하중(kgf)	312 이상

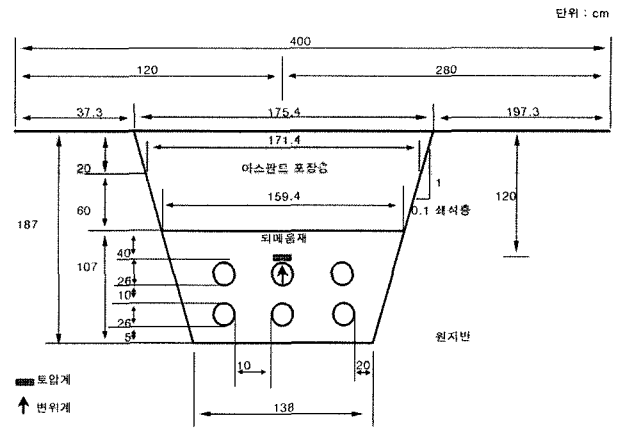


그림 13. 시공 단면도

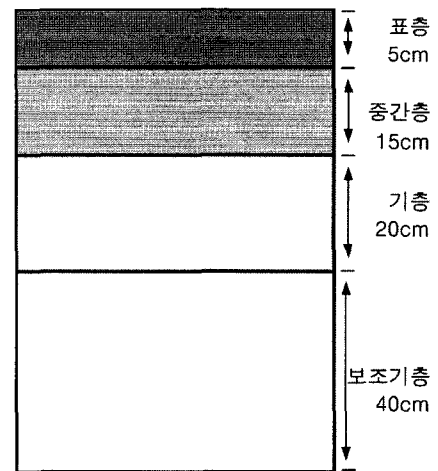


그림 14. A-1급 포장단면

중(DB-24)은 관재에 가장 큰 변형을 일으키는 것으로 알려져 있는 정재하 방법으로 가하였다(Kataoka, 1988). 정하중 재하는 DB-24차량의 후륜하중인 9.6ton을 LVDT 설치지점 상단의 도로 표층에 오도록 하여 차량을 정차시키고, 그 때 관상단의 변형량과 관 상부에서의 작용압력을 측정하였다.

#### 4.1 시험절차

시험부지는 2m높이의 실트질 모래가 성토된 지반으로, 실증실험 수행시 원지반의 침하방지 및 실제 도로 지반과 동일한 조건을 주기 위하여 부지정지 작업을 실시하였다. 부지정지 및 지반 다짐을 실시하지 않고 실험을 수행했을 경우 실험중 예상치 못한 지반침하가 발생할 수 있으며, 이로 인한 계측 데이터는 신뢰성을 잃을 수 있다. 따라서 실험계획고로부터 실험대상지반을 2m 깊이로 굴착한 다음 실험계획고까지 30cm씩 성토하여

층다짐을 실시하였으며, 도로시방서의 노체다짐도 규준인 90%에 맞게 진동롤러로 지반다짐을 실시하였다.

다짐도 관리는 방사능 밀도 측정기(RI 측정기)를 이용하였으며, 굴착저폭 및 구배는 지중송전 설계기준(한국전력, 2000)에 제시되어 있는 값을 사용하였다. 관을 실험단면에 맞게 5m길이로 자른 다음 2단 3열 배열로 간격재를 사용하여 관을 조립하였다. 상단 가운데에 위치할 관로 중앙에 구멍을 뚫고, 지그를 이용하여 LVDT (Range: 50mm)를 십자형으로 설치하여 관의 변형율을 측정하였다(그림 15).

굴착면에 LVDT를 설치하지 않은 관 3열을 하단에 설치한 후 각각의 되메움재로 채움을 하고, 다짐효과를 증대시키기 위해 물을 뿌린 다음 진동다짐기를 이용하여 다짐도 85% 이상이 되도록 다짐을 실시하였다(그림 16).

시험에 사용된 되메움재는 열저항 측정시와 동일한 강모래 및 석분을 사용하고, 현장배합을 통해 혼합비를 맞추었다. A-1급 포장시공 및 양생은 쇄석층(보조기층 40cm, 기층 20cm)을 포설한 후에 롤러 다짐을 실시하고, RI 계측기를 이용하여 다짐도를 관리하였으며, 아스팔트층(중간층 15cm, 표층 5cm)을 포설하고, 롤러 다짐을 실시하였다. 재하하중은 DB-24의 후륜하중인 9.6tonf가 되도록 계

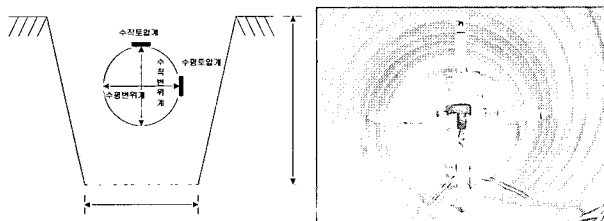
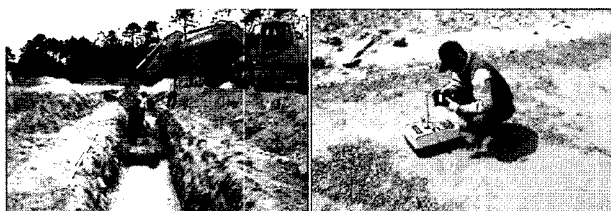
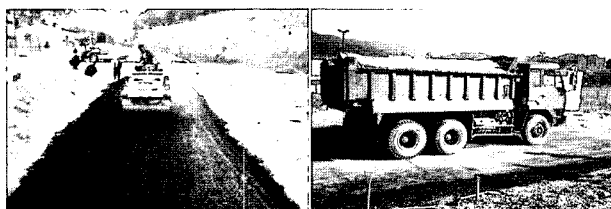


그림 15. LVDT 설치



관로 및 되메움재 포설

다짐도 확인



아스팔트 포설 및 다짐

차량하중 재하

그림 16. 실험 방법

근한 트럭을 이용하였고, 하중재하 위치는 미리 표시해 놓은 LVDT설치 지점 직상단의 아스팔트 표면에 트럭의 뒷바퀴가 위치하도록 하였다. 하중재하 방법은 정재하 후 관의 변형량이 일정한 값에 수렴할 때까지 계속수행하며, 변형량이 일정한 값에 수렴하면 다음 위치로 이동하여 같은 방법으로 계측을 수행하였다.

## 4.2 시험결과

### 4.2.1 관의 변형거동

공정별 관의 변형률 및 작용압력을 되메움재별로 살펴보면 되메움층 시공 및 도로포장 시공 중에 대부분의 변형(전체변형의 약 97%)이 발생하는 것으로 나타났으며, 특히, 보조기층 다짐 작업 후에 급격한 변형률의 변화를 보이는 것으로 계측되었다. 또한 하중재하에 의한 변형률은 전체변형의 약 3%로 트럭하중에 의한 변형은 크지 않은 것으로 나타났다(그림 17, 표 8).

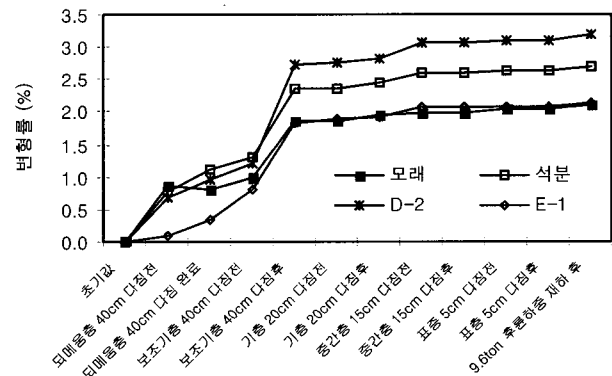


그림 17. 공정별 관의 변형률 변화

표 8. 되메움재의 공정별 변형률 및 작용압력

공정명	관 변형률(mm)				관 상부 작용압력(tonf/m <sup>2</sup> )			
	모래	석분	D-2	E-1	모래	석분	D-2	E-1
초기값	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
되메움층 40cm 다짐전	2.28	1.98	1.76	0.24	0.80	0.81	0.70	0.72
되메움층 40cm 다짐 완료	2.07	2.90	2.49	0.89	0.75	0.78	0.73	0.90
보조기층 40cm 다짐전	2.55	3.40	3.18	2.12	1.65	0.98	0.98	1.70
보조기층 40cm 다짐후	4.82	6.10	7.10	4.73	2.68	2.44	3.93	3.54
기층 20cm 다짐전	4.83	6.15	7.16	4.92	2.63	2.61	3.98	3.82
기층 20cm 다짐후	5.09	6.34	7.35	4.97	2.58	2.59	3.73	3.57
중간층 15cm 다짐전	5.13	6.77	7.99	5.37	2.68	2.83	4.23	4.06
중간층 15cm 다짐후	5.13	6.77	7.99	5.37	2.68	2.83	4.23	4.09
표층 5cm 다짐전	5.30	6.86	8.08	5.44	2.83	2.81	4.13	4.09
표층 5cm 다짐후	5.30	6.82	8.05	5.43	2.86	2.73	4.03	3.99
9.6tonf 후륜하중 재하 후	5.46	7.03	8.29	5.59	4.36	4.23	5.53	5.49

관 포설 직후부터 도로포장 완료시까지 관재에 일어난 시공 변형률이 모든 재료들에서 가장 큰 부분을 차지하고 있는데, D-2재료가 3.09%로 가장 크고 석분이 2.62%로 중간값을 보이며 E-1이 2.09%, 모래가 2.04%로 가장 작은 값을 보이고 있다(그림 18). 한편, 시공변형률 중 되메움재 및 쇄석층(기층 및 보조기층) 시공시 가장 큰 변형을 보여주었다. 즉 전체변형율에 대한 되메움재 시공시 발생한 변형율의 비율은 석분이 41.3%로 가장 크고, 모래(37.9%), D-2(30.0%), E-1(15.9%) 순으로 나타났다. 또한 관 포설 직후부터 하중 재하실험 완료시까지 관재에 일어난 총 변형률은 D-2(3.19%) > 석분(2.7%) > E-1(2.15%) > 모래(2.1%) 순으로 크게 나타났으며, KS C8455에 명시되어 있는 관재의 허용변형률 3.5%에 모든 값들이 만족하는 결과를 보이고 있기 때문에 실험한 4가지 재료를 이용하여 되메움을 실시할 경우 송전관로는 안전성을 확보할 것으로 나타났다.

#### 4.2.2 도로의 침하량

DB-24설계하중의 후련하중인 9.6tonf가 도로표면에 재하되면 도로표층에 침하가 발생하는데 계측결과, E-1

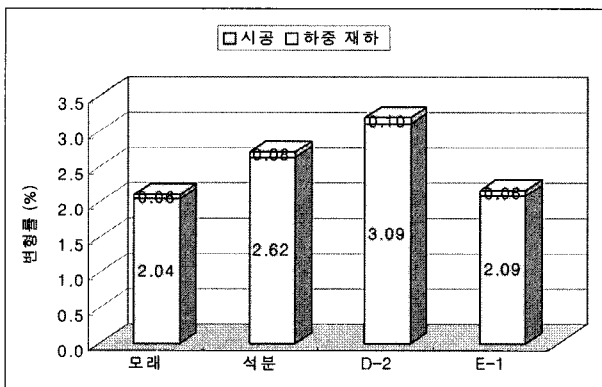


그림 18. 되메움 재료별 변형율 비교

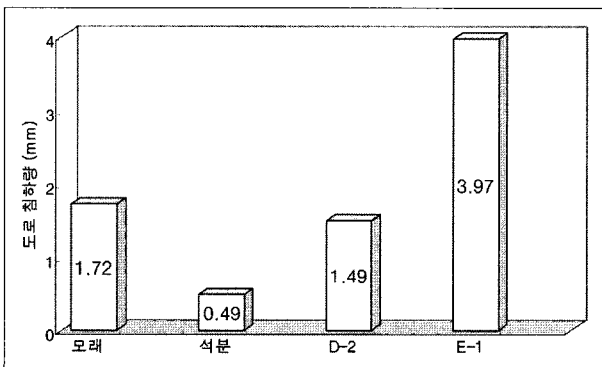


그림 19. 되메움 재료별 도로 침하량

되메움재료 시공구간이 3.97mm로서 최대값을 보이며, 모래가 1.72mm, D-2가 1.49mm로서 중간값을 보이고, 석분 되메움 구간이 0.49mm로서 가장 작은 값을 보이고 있다(그림 19).

이 도로표층 침하값들을 미루어 볼 때 매설관재의 되메움 재료로 상기의 4가지 재료를 시공했을 경우 도로 표면의 과도한 침하는 발생하지 않는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

지중송전용량의 증대를 위해 실내실험을 통해 열방산 효과가 우수한 되메움재를 도출하고 선정된 재료들을 대상으로 현장적용성을 평가시험을 수행하였으며, 그 결과로부터 다음결론을 얻었다.

- (1) 토사의 열저항은 흙 입자의 구성성분, 밀도, 함수비, 입자형상 및 크기, 입도분포, 주변온도 및 다짐방법 등에 영향을 받는다.
- (2) 최대다짐도에서 강모래의 간극율은 약 32%이며, 모래 단일재료에 의한 100°C-cm/watt이하의 건조 열저항값을 얻기는 불가능한 것으로 나타났다.
- (3) 금산군 진산지역 화강암 석분의 경우 간극율은 22.4%로 가장 작은 값을 보여 주었으며, 단일재료중 열저항이 가장 낮은 것으로 나타났다.
- (4) 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.
- (5) 본 시험에 사용된 4가지 시료의 경우 시공 중 다짐으로 인한 관의 변형은 97%, 트럭재하에 의한 변형은 3%내외로 측정되었으며, 관에 발생하는 대부분의 변형은 시공중에 발생하는 것으로 나타났다.
- (6) 관의 전체 변형율은 4가지시료 모두 허용변형률(KS C8455) 이내를 만족하는 결과를 보이고 있기 때문에 본 재료를 이용할 경우 지중송전관로는 안전성을 확보할 것으로 판단된다.
- (7) 하중재하에 의한 도로침하량은 D-2>석분>E-1>모래 순으로 나타났으며, 모두 도로의 허용침하량 내에 값을 보였다.
- (8) 본 연구를 통해 열 특성이 우수한 것으로 판명된 3종류의 되메움재는 관의 변형 및 도로 침하 등에 안

전한 것으로 나타났다. 한편 장기간의 기후변화에 의한 수분이동 및 복사열의 영향 등 되메움재의 열적 안정성 평가시험은 추후 수행할 예정이다.

## 참 고 문 헌

1. 한국전력공사 (2000), *지중송전관로 설계기준*.
2. Kataoka (1988), “配電地中化における 車道下埋設ケーブル 防護管の 浅層埋設の 検討”, 電力中央研究所.
3. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. (1959), *Conduction of Heat in Solids*, 2nd Edition, Oxford University Press, New York.
4. Fukagawa, H., Imajo, T., and Ogata, N. (1974), *Thermal Diffusion and its Application to Cable Ampacity*, CRIEPI-73087.
5. Imajo, T. (1976), *Development of Backfill Soils for Underground Cables(2) - Study on the Optimum Grading Distribution*, CRIEPI-72061, 175063.
6. IEEE Std 442-1981 (1981), *IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurements*, pp.6-15.
7. Mitchell, J. K. and Chan, C. K. (1982), *Backfill Materials for Underground Power Cables, Phase 1-3*, EPRI EL-506, EL-1894, EL-4150.
8. Shannon, W. L. and Wells, W. A. (1947), “Tests for Thermal Diffusivity of Granular Materials”, *Proceedings of ASTM*, Vol.47, pp.1044-1053.
9. 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.

(접수일자 2005. 3. 30, 심사완료일 2005. 8. 22)