

열저항 특성을 고려한 지중송전관로 되메움재의 최적화(I)

Optimization of the Backfill Materials for Underground Power Cables considering Thermal Resistivity Characteristics (I)

김 유 성^{1*} Kim, You-Seong
조 대 성² Cho, Dae-Seong
박 영 준³ Park, Young-Jun

ABSTRACT

River sand has generally used for the backfill material of underground power cables. The thermal resistivity of it has $150^{\circ}\text{C-cm/Watt}$ in wet condition and more than double in dry condition. The final goal of this study is to find the backfill material which has a small change in thermal resistivity with various water contents, for example thermal resistivity is $50^{\circ}\text{C-cm/Watt}$ and $100^{\circ}\text{C-cm/Watt}$ in wet and dry conditions respectively. In this study it is presented that the comparison of thermal resistivity using stone powder, crush rock, weathered granite soil and Jumunjin sand as well as river sand in the needle method regarding water content, dry unit weight and particle size distribution. As a result, the thermal resistivity of a material is minimized when they have maximum dry unit weight at optimum moisture content and maximum density by appropriately mixing materials for particle size distribution. Therefore thermal resistivity characteristics should be considered two factors: one is the difference between natural dry condition and dry state after optimum moisture content, and the other is the difference between unit weight of raw material and maximum dry density.

요 지

지중송전관로의 되메움재로는 보통 강모래를 사용하고 있다. 그러나 강모래의 열저항률은 습윤시 $150^{\circ}\text{C-cm/Watt}$ 정도이고 건조시에는 이보다 2배 이상의 값을 나타낸다. 연구의 최종목표는 함수비 변화에 따라 열저항률의 변화가 작은 재료(습윤시 열저항률 $50^{\circ}\text{C-cm/Watt}$, 건조시 열저항률 $100^{\circ}\text{C-cm/Watt}$ 를 목표로 함)의 개발이나, 이 연구에서는 강모래를 포함한 각종 되메움재 후보군에 대하여 함수비, 건조단위중량, 입도분포 등의 차이에 따른 열저항 특성을 탐침법에 의해 조사하고, 시험결과를 비교 분석하였다. 분석 결과, 열저항 특성은 단위중량의 변화, 건조상태의 경우 최적함수비의 상태를 그대로 대기 중에 건조시킨 경우와 최초의 건조 상태에서의 열저항률의 차이 등을 고려하여야 하는 것으로 나타났다. 또한 최대밀도가 되도록 입도분포가 개선된 혼합재료는 원재료에 비해 열저항률을 크게 낮출 수 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Thermal resistivity, Thermal needle, Backfill material, Moisture content, Particle-size distribution

1. 서 론

경제성장과 더불어 전력수요가 매년 급증하고 있다. 이
에 따라 대도시를 기반으로 한 전력송전선로의 지중화가

활발히 진행되고 있다. 이와 같은 전력수요 과밀화에 대처
하기 위하여는 지중송전 관로의 확대와 더불어 송전케이
블의 송전용량 증대 또한 시급한 실정이다. 지중송전 관로
의 대용량화, 폭주화 및 기타 열수송관로 등 여타 열원으

1* 정회원, 전북대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ., E-mail: yusung@jbnu.ac.kr)

2 학생회원, 전북대학교 토목공학과 석사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ.)

3 학생회원, 전북대학교 토목공학과 석사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ.)

로부터의 열적간섭도 증대되고 있어 지중환경을 고려한 지중송전 관로의 설계 및 시공이 송전관로의 송전능력 증대를 위해 절실히 요구되고 있다. 지중송전관로의 송전용량의 증대를 위해서는 전압 및 전류를 증가시켜야하나, 이들의 증가는 관로내의 열 발생의 증가를 초래한다. 한편 관로주변의 되메움재의 열저항률은 함수비에 따라 변화한다. 따라서 통상적인 열(약 60°C)이 발생되고 있을 경우라 하더라도, 건조시에는 되메움재의 열저항 특성에 따라 열폭주(thermal runaway)현상이 발생하여 케이블의 절연과괴를 일으키거나 송전효율의 저하 요인이 된다(한국전력공사 전력연구원, 2003). 따라서 송전관로 주변의 되메움재는 발생열을 신속하게 소산시킬 수 있는 재료, 함수비 변화에 따라 열저항률의 변화가 작은 재료(습윤시 열저항률 50°C-cm/Watt, 건조시 열저항률 100°C-cm/Watt를 목표로 함)의 사용이 요구된다. 실제로 송전관로의 되메움재로 가장 사용빈도가 큰 강모래의 경우 습윤시 150°C-cm/Watt 정도이다. 건조시에는 이보다 2배 이상의 값을 나타낸다. 연구결과에 따르면 모래의 경우 100°C-cm/Watt의 건조 열저항값을 얻기 위해서는 간극률이 25%이하가 되어야 하는 것으로 나타났으나, 균등한 강모래의 경우 35%이하의 간극률을 얻기가 곤란하고 투수계수가 커 상대적으로 건조측으로 변화하기 쉽다(Imajo, 1976). 이를 대체할 수 있는 재료로 석재 생산과정에서 연간 수십만톤이 발생(일반폐기물)되어 현장 석산복구용이나 흙의 입도조정 이외에 대부분 매립 처리되고 있는 석분이 열소산 측면에서 우수한 재료로 분석되고 있다(김대홍과 이대수, 2002). 따라서, 석분과 같은 재료를 주재료로 하여 낮은 열저항률을 유지하기 위한 함수정도, 다짐밀도 등의 영향을 최소화하기 위해 쇄석, 모래 등의 기존의 되메움재 재료를 일정배율로 혼합한 혼합토에 대한 열저항 특성의 검토가 필요하다. 이와 같은 혼합재료에 대하여, 다짐특성, 관로 주변 온도변화에 따른 함수특성, 열저항 특성 등을 다양한 현장조건과 시공성을 고려한 평가를 통해 열저항률을 최소화 할 수 있는 되메움재의 개발이 가능할 것으로 판단된다. 이와 같은 체계적인 연구를 통해 목표의 친환경 최적 열소산 되메움재가 개발된다면 지중송전효율 증대에 따른 경제성 향상과, 모래채취 및 운반에 따른 환경훼손 최소화 및 석분 및 쇄석 등 폐기물의 재활용이라는 경제적·환경적 측면에서 시너지효과를 제고 할 수 있을 것으로 판단된다. 이 연구에서는 주로 되메움재로 사용되고 있는 강모래와 화강풍화토, 재생모래, 쇄석, 석분과 같은 되

메움재 후보군에 대한 열저항 특성의 비교분석과 함수비, 단위중량, 배합비에 따른 열저항 특성의 변화를 평가하였다. 이와 같은 열저항 특성의 평가를 통해 향후의 연구방향을 모색하고자 한다.

2. 열저항률 측정장치

지중송전케이블 주위의 되메움재로 사용되는 여러 형태 흙의 실험실내에서의 열저항률 평가를 위해 몇 가지 방법이 사용되고 있다(IEEE Std 442-1981, 1981). 그 중 가장 많이 사용되고 있는 방법은 탐침법이고, 그 외에 Shannon and Wells(1959) 방법, Rhometer법(Stolpe, 1970), 보호 열판 방법(Guarded Hot Plate Method) 등이 있다. Shannon and Wells 방법은 탐침법과 함께 원주형 시료를 일정한 온도를 유지하는 수조(±20°C)에 일정시간동안 침수시켜 시료를 정상상태의 일정한 온도로 만든 후, 시료를 따뜻한 수조(±40°C)로 옮겨 시료 중앙에서의 온도변화를 측정하는 방법이다. Rhometer법은 정상상태에서 방사열 흐름 이론을 토대로 한 시험법으로, 시료를 내부원통과 외부원통을 각각 열원과 히터싱크(heater sink)로 구성된 동축 원통사이에 넣어서 정상상태인 두 원통사이의 온도차를 실측하는 방법으로 열저항률을 측정하는 방법이다. 또, 보호 열판 방법은 ASTM(American Society for Testing and Materials) C 177-10에 규정된 시험방법으로, 정상상태의 열흐름이 요구된다. 시료를 한 개의 발열판과 냉각판 사이에 위치시켜 온도차를 측정하고, 평균온도를 이용하여 열저항률을 측정한다. 이 연구에서는 가장 보편적인 열탐침법을 사용하였다. 열탐침법은 유한하고 균질한 매체 내에서 선상의 열원을 따라 온도상승비율 측정에 근거한다. 열원에서 일정시간 t 에서의 온도 θ 는 Carlslaw와 Jaeger (1959)가 제안하였는데 그 내용을 요약하면 다음과 같다. 열확산율이 δ 인 매질 내에 길이가 무한대인 선형 열원이 있을 때 선형 열원으로부터 반경 r 인 임의의 지점에서 온도 θ 는 발열 후 시간 t 에 대해 Fourier방정식으로부터 식 (1)과 같은 열전도식으로 표현할 수 있다.

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

식 (1)의 해는 다음과 같다.

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

여기서, $\theta(t)$ 는 t 초 후의 온도 ($^{\circ}\text{C}$), ρ 는 되메움재의 열저항률($^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$), δ 는 되메움재의 열확산(cm^2/sec), r 는 열원으로부터의 거리(cm), Q : 열류 (W/cm), t 는 시간(sec)을 나타낸다.

식 (2)를 전개하고, 미소항을 생략하면 식 (3)과 같이 정리된다.

$$\Delta\theta = \frac{Q\rho}{4\pi} \left[\ln \frac{t_2}{t_1} \right] \quad (3)$$

따라서, 열저항률은 다음 식 (4)에 의해 얻을 수 있다.

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

이 연구에서는 탐침법을 적용하여 되메움재의 열저항률을 파악하기 위해 Hukseflux사의 열전도를 측정장치인

TP System을 시험에 사용하였다. 그림 1은 실험실 또는 현장에서의 열 저항률 측정시에 요구되는 TP System 장치의 개요를 나타낸 것이다. TP System은 TP-02와 CR 10X 계측기, 그리고 데이터를 저장하는 컴퓨터 등으로 구성된다. 사진 1에 연구에 사용된 TP System과 탐침인 TP-02를 나타내었다.

탐침의 내부에는 열선(heating wire)과 2개의 열전대(thermocouple)가 존재하며, TP-02를 사용한 열저항률의 측정은 열선을 통해 일정한 열을 공급하여 온도경사에 의해 열이 상대적으로 저온부인 선단부로 흐르게 하고 2개의 열전대에서 각각의 온도를 측정하여 시간에 따른 온도 차이와 공급열량을 고려하여 열저항률을 측정한다.

3. 열저항률 측정방법 및 내용

이 연구에서는 우선 현장에서의 최적다짐상태를 고려하여 사진 2와 같이 수정다짐(D다짐)방법에 의해 수정다짐몰드(직경 15cm, 길이 17.5cm)에 건조상태와 함수비(ω)

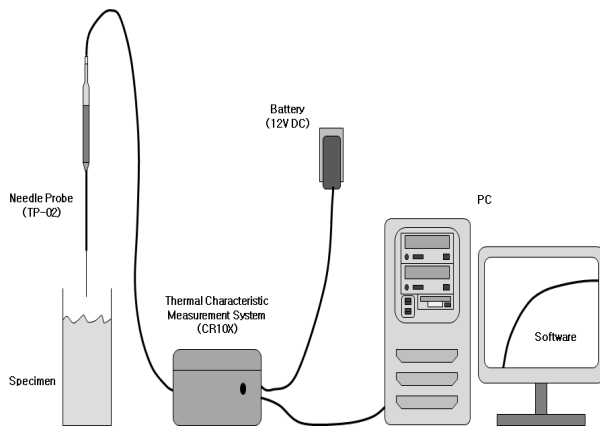


그림 1. TP-02를 사용한 TP System의 일반도

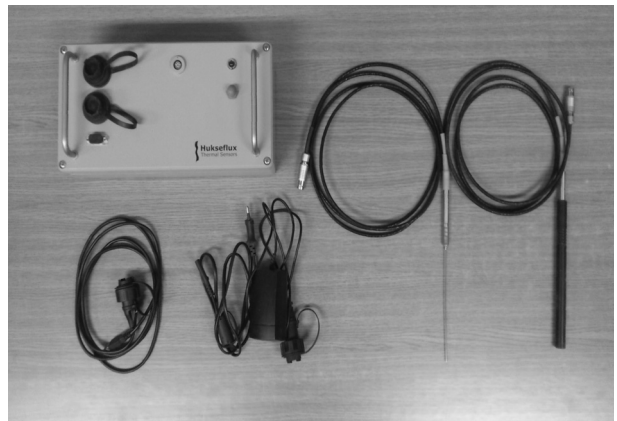


사진 1. Hukseflux사의 TP System과 TP-02



(a) 시료의 다짐에 사용된 몰드



(b) 완성된 시료

사진 2. 열저항률 측정을 위한 시료 제작



사진 3. TP System을 사용한 열저항률 측정

표 1. 실험내용 및 시료

시 료	혼합재료	최소 열저항률(°C-cm/Watt)			
		Dry	$\omega=5\%$	Optimum State	Dry after Optimum
강모래(River Sand)	-	380	80	40	175
	재생모래 (10, 20, 30, 40, 50%)	250	135	40	150
화강풍화토 (Whethered Granite Soil)	-	220	70	60	165
재생모래(Recycled Sand)	-	270	170	55	255
쇄석(Crush Rock)	-	640	85	30	170
	재생모래(10%)	180	45	35	190
	재생모래(5%)와 Fly-Ash(5%)	190	55	25	200
석분(Stone Powder)	-	590	125	105	115

5%의 상태, 최적함수비상태, 최적함수비에서 다짐 후 건조된 상태에 대한 각각의 시료를 제작하였고, 탐침의 삽입을 위해 시료제작 후 보링을 하게 되면 시료가 교란되어 정확한 열저항률의 측정이 어려우므로 TP-02와 같은 스테인리스 재질의 케이싱을 미리 삽입한 후 다짐을 실시하여 시료가 균질한 상태를 유지할 수 있도록 하였다.

제작된 시료에 TP System과 연결한 TP-02를 삽입하여 사진 3과 같이 열저항률을 측정하였다. 시험이 종료된 후 단위중량과 함수비를 측정한다. 시험 중 측정된 데이터는 가해진 열, 시간, 온도변화 및 함수비, 단위중량이다.

4. 시험에 사용된 시료 및 배합비

시험에 사용된 시료는 강모래와 강모래+재생모래, 화강

풍화토, 재생모래, 쇄석, 쇄석+재생모래, 쇄석+재생모래+플라이애쉬(fly-ash) 및 석분이다. 시험내용은 표 1에 나타내었다.

5. 되메움재의 열저항률 영향인자

이 연구의 최종 목적은 되메움 재료의 열저항률을 감소시키기 위해 그리고 지중 케이블시스템의 운영기간동안 낮은 열저항률을 유지하기 위해 사용될 수 있는 처리방법 또는 첨가재를 개발하는 것이다. 흙의 열저항률 결정에는 흙의 구성물질, 밀도, 함수비, 입자크기 및 형상, 입도분포, 온도, 다짐방법과 같은 인자들이 작용하나, 그 중 함수비, 입도분포, 단위중량 순으로 큰 영향을 미치는 것으로 조사되고 있다(Fukagawa et al., 1974).

6. 퇴메움재 후보군의 열저항률 실험결과 및 평가

6.1 강모래 시료군

그림 2(a)는 여러 모래질 흙에 대한 열저항률(thermal resistivity) 시험결과를 정리한 것이다. 그림에서 함수비 증가에 따라 강모래를 포함한 모래의 열저항률은 크게 감소하는 경향을 보인다. 개략적으로 모래의 함수비가 5% 이상이 되면 열저항률은 100°C-cm/Watt이하가 된다. 그림에서 좌측 상단에 나타난 그림은 이 연구에서의 강모래(river sand)(▲)에 대한 다짐곡선이다. 이 연구에서의 강모래의 최대건조단위중량은 18.6kN/m³이고 건조시(함수비 0%)의 건조단위중량은 16kN/m³로 최적함수비(이 연구에서의 강모래, 10.6%)의 건조단위중량의 84% 정도이다. 이 연구에서의 강모래의 최적함수비가 10.6%이므로 그림 2(a)에서의 열저항률의 감소경향에서 함수비가 증가함과 동시에 건조단위중량도 증가하고 있다는 사실을 간과해서는 안된다. 그림에서의 실리카 샌드(silica sand)(■)의 경우 문헌에서는 건조단위중량이 19kN/m³로만 표기되어 있어 함수비 변화에 따른 건조단위중량의 증가를 고려하고 있는지는 알 수가 없다. 또한, 김대홍과 이대수 등(2002)에 의한 강모래(river sand)(●)의 경우 최적함수비 $\omega \approx 13.5\%$ 일 때, 최대건조단위중량 $\gamma_{d(max)} \approx 18\text{kN/m}^3$ 이고, 이 그림에서의 건조단위중량은 상대다짐도 90%로 표기되어 있어 시험시의 $\gamma_d \approx 16\text{kN/m}^3$ 인 것으로 판단된다. 다만, 모든 시험에서 동일한 건조단위중량을 나타내고 있는지는 알 수 없다. 그림 2(a)에 주문진 표준사(jumunjin sand)(▼)의 열저항률도 표기하였다. 이 연구에서의 강모

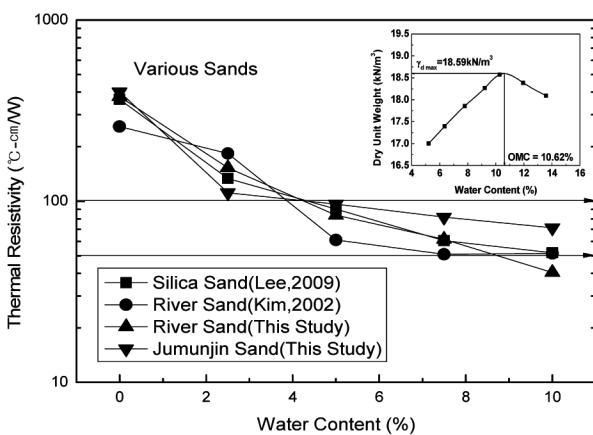
래에 비해 작은 최대건조단위중량(17kN/m³)을 보이고 있어 이 연구에서의 강모래에 비해 작은 열저항률을 보이고 있다. 그림 2(b)에는 그림 2(a)에 Kersten(1949)이 제안한 열전도도에 관한 식 (5)를 이용하여 $\gamma_d=18\text{kN/m}^3$ 의 경우와, $\gamma_d=15\text{kN/m}^3$ 의 경우의 열저항률을 구한 결과를 도시하였다.

$$k = 0.1442[0.71\log(\omega) + 0.4] \times 10^{0.6243\gamma_d} \quad (5)$$

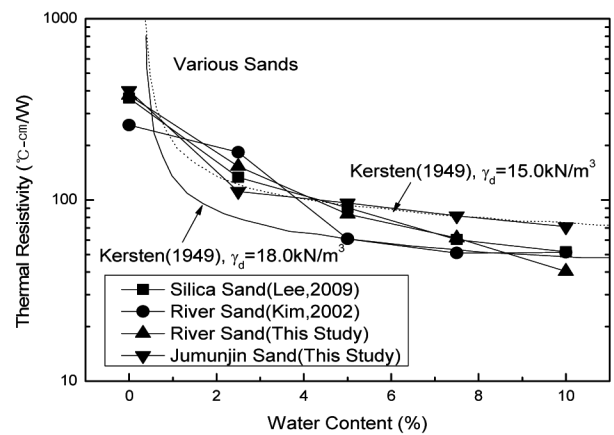
식 (5)에서 k 는 열저항률의 역수인 열전도도이고 ω 는 함수비이다. 이 식은 함수비가 0%인 경우 무한 값이 얻어진다는 단점이 있으나, 개략적으로는 이 식을 이용해 모래질 흙의 열저항률을 추측할 수 있을 것으로 판단된다. 식과 실제 데이터와의 차이점을 보면, 함수비가 커지면 근접하게 되나 함수비가 작을 경우 식에 의한 값보다 계측값이 작은 것을 알 수 있다. 이는 계측값의 경우 함수비가 증가함에 따라 건조단위중량도 증가할 경우의 값이나, 식에 의한 값은 모두 동일한 건조단위중량에서의 값을 나타내고 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 건조시의 열저항률은 최적다짐후의 자연건조과정을 거쳐 최적다짐과 동일한 건조단위중량에서 열저항률을 측정하여야 할 것으로 판단된다.

6.2 강모래+재생모래 혼합시료군

그림 3(a)는 강모래와 재생모래의 혼합시료에 대한 열저항률 변화를 재생모래 혼합율에 대해 나타낸 것이다. 재생모래를 혼합하게 되면 건조시(dry)(■)의 열저항률이 약

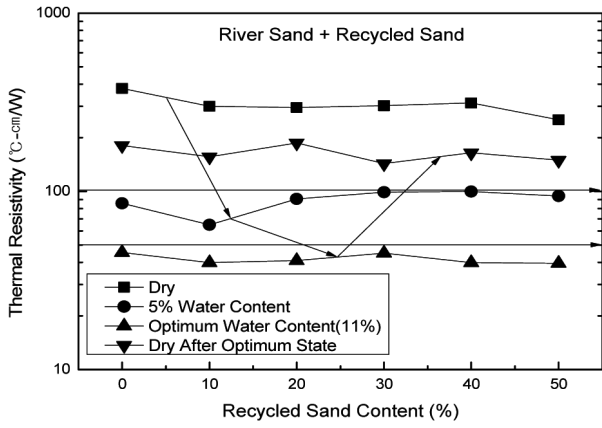


(a) 여러 모래의 함수비에 따른 열저항률

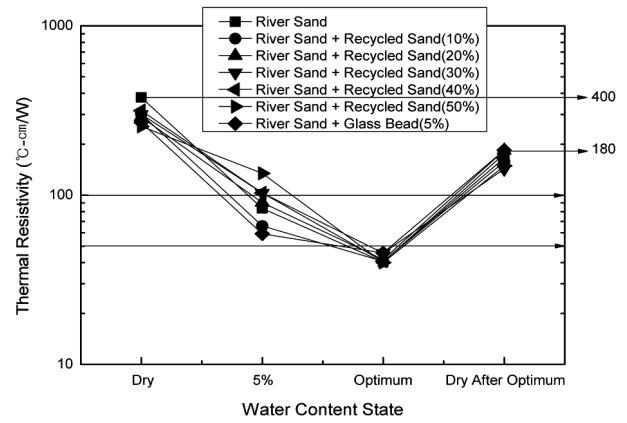


(b) 시험결과와 Kersten식의 비교

그림 2. 여러 모래질 흙의 함수비에 따른 열저항률

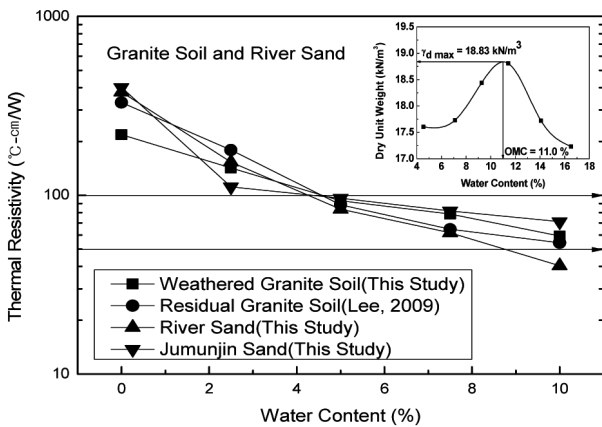


(a) 재생모래 함유율에 따른 열저항률

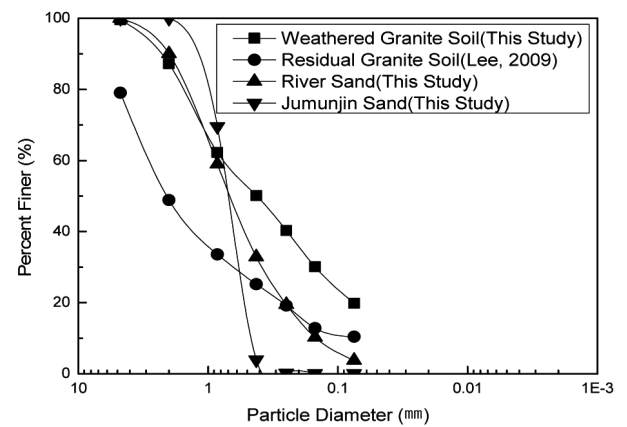


(b) 함수상태 변화에 따른 열저항률

그림 3. 재생모래 혼합율에 따른 강모래의 열저항률 및 함수상태 변화에 따른 열저항률



(a) 화강풍화토의 함수비에 따른 열저항률



(b) 화강풍화토의 입도분포

그림 4. 화강풍화토의 함수비에 따른 열저항률과 입도분포

간 감소하는 경향을 보이나 뚜렷하지는 않다. 함수비가 증가하여 함수비 5%의 경우(5% water content)(●) 약간 증가 경향을 보이나, 최적함수비 경우(optimum water content)(▲)의 열저항률은 대폭 감소하여 거의 모든 혼합율에서 50이하의 열저항률 값을 나타내고 있다. 이 그림에서 특이한 것은 최적함수비의 상태를 그대로 대기중에 건조시킨 경우(dry after optimum state)(▼)의 열저항률(범위: 180~142)은 최초의 건조상태에서의 열저항률(범위: 378~254)에 비해 개략 1/2정도의 매우 작은 값을 보이고 있다는 것이다. 따라서 열저항률의 되메움재료는 최적다짐을 통해 자연 건조시에도 최초부터 건조상태에서 다짐하는 경우에 비해 보다 작은 열저항률을 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 3(a)에서 화살표(→)는 그림 3(b)의 함수상태에 따른 시험 순서를 나타낸다. 그림 3(b)는 강모래와 강모래+재생모래 및 강모래+Glass Bead의 함수상태 변화에 따

른 열저항률의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에는 글래스 비드(glass bead(5%))혼합재료의 시험결과도 비교를 위해 포함하였다. 글래스 비드(5%)혼합재료의 경우 함수비가 5%의 경우 열저항률이 급감하나, 그 이후의 결과는 재생 모래 혼합의 경우와 유사하다. 그러나, 모든 경우에서 최초의 건조상태에 비해 최적함수비상태에서 자연건조시킨 경우가 열저항률이 최대 1/2이하로 감소하고 있음을 알 수 있다.

6.3 화강풍화토 시료군

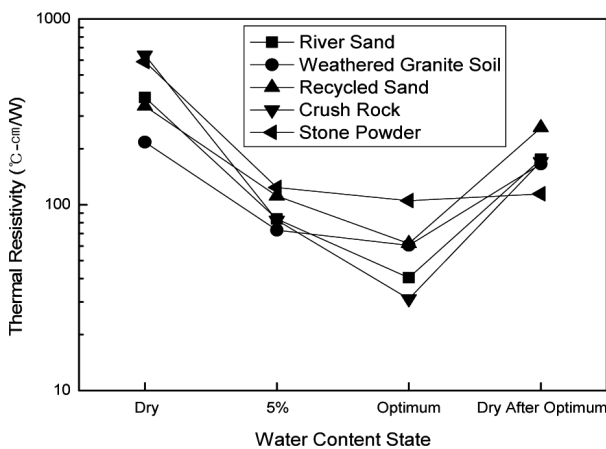
그림 4(a)는 두 종류의 화강풍화토에 대한 열저항률 실험결과와 강모래 및 주문진 모래의 열저항률 실험결과를 정리한 것이다. 그림에서 함수비 증가에 따라 강모래의 열저항률은 크게 감소하나, 주문진 모래는 감소경향이 작아

지고 있다. 이것은 그림 4(b)에서 알 수 있듯이 주문진 모래는 입도분포가 매우 균등하여 간극이 보다 크기 때문이다. 또한 화강풍화토도 강모래에 비해 함수비 증가에 따른 열저항률의 감소경향은 감소하고 있다. 개략적으로 모래의 경우와 동일하게 함수비가 5% 이상이 되면 열저항률은 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{Watt}$ 이하가 된다. 그림 4(a)에서 우측 상단에 나타난 그림은 이 연구에서의 화강풍화토(■)에 대한 다짐곡선이다. 다짐곡선에 따르면 이 연구에서의 화강풍화토의 최대건조단위중량은 $18.8\text{kN}/\text{m}^3$ 이고 건조시(함수비 0%)의 건조단위중량은 $16.6\text{kN}/\text{m}^3$ 로 최적함수비시(이 연구에서의 화강풍화토, 11%)의 건조단위중량의 86% 정도이다. 이 연구에서의 화강풍화토의 최적함수비가 11%이므로 그림 4(a)에서의 열저항률의 감소경향에서 강모래의 경우와 마찬가지로 함수비가 증가함과 동시에 건조단위중량도 증가하고 있다는 사실을 간과해서는 안된다. 그림에서 건조시의 열저항률은 모래에 비해 화강풍화토의 경우가 작게 나타나고 있으나, 함수비가 커지면 오히려 모래의 경우가 화강풍화토에 비해 다소 작은 열저항률을 보이고 있다. 그러나 그 차이는 크지 않다. 이 연구에서 강모래와 화강풍화토의 다짐특성의 차이는 크지 않다. 그러나 그림 4(b)에서와 같이 입도분포는 다소 차이가 있다. 따라서 다소의 오차는 있으나, 강모래와 화강풍화토의 열저항률 특성은 유사할 것으로 판단된다.

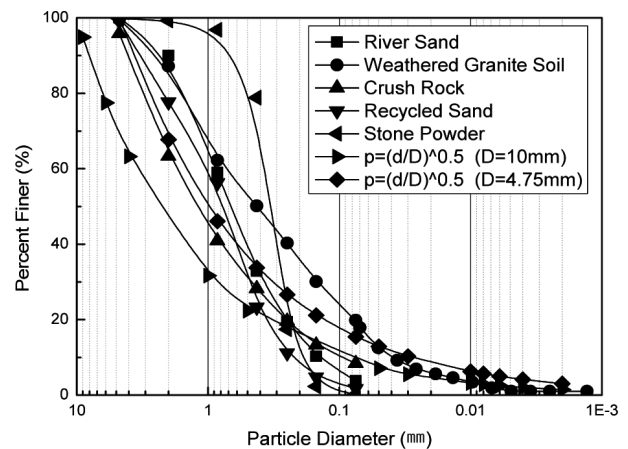
6.4 퇴매움재 후보군의 열저항률 실험결과 비교 분석

그림 5(a)는 이 연구에서 선정한 퇴매움재 후보군(강모래, 재생모래, 풍화토, 쇄석, 석분)의 함수비 변화에 따른

열저항률의 변화추이를 나타내고 있다. 위에서 검토하였듯이 모든 경우에서 함수비 증가에 따라 열저항률은 감소하고 있고, 최적함수비 상태에서 가장 작은 열저항률을 나타내고 있으나, 이후 함수비를 감소시켜 가면 최초의 건조 상태에 비해 최적함수비상태에서 자연건조시킨 경우가 열저항률이 최대 1/2이하로 감소하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 시공과정을 고려한다면, 건조시의 열저항률은 최적다짐후의 자연건조과정을 거쳐 최적다짐과 동일한 건조단위중량에서 열저항률을 측정하여야 할 것으로 판단된다. 식 (5)에 따르면, 동일재료일 경우 건조단위중량이 증가할수록 열저항률은 감소하게 되어 있는데, 토질재료의 다짐곡선에서 최대건조단위중량을 얻을 수 있는 것은 최적함수비의 경우이므로 당연한 결과이나, 동식에서 함수비가 무한대로 커진다고 해서 열저항률이 무한대로 작아지지는 않는다. 오히려 최적함수비 이상이 되면 최적함수비 이하로 감소할 경우와 유사하게 열저항률은 감소하게 되는데 이는 수분의 역할이 수분 그 자체의 존재가 아니라 수분의 간극에서의 특수한 역할이 열저항률에 관여하는 것으로 판단된다. 즉, 건조된 흙에 첨가된 약간의 수분(최적상태의 수분)은 그 자체가 흡입자 주위에 얇은 막과 같이 분포된다. 이들 얇은 막들은 입자사이의 접촉면적을 충분히 증가시킬 수 있어 흙의 열저항률을 크게 감소시키는 결과를 보여준다. 흡입자 주위의 수막을 형성하는데 필요한 양을 초과하는 물의 양은 입자사이의 간극을 채우기는 하나, 이 부가적인 수분으로 인한 열저항률의 추가적 감소는 극미하고 수분이 더 증가하면 오히려 열저항률은 감소하게 된다. 왜냐하면 열전달은 간극수를 통해서라기보다는 주로

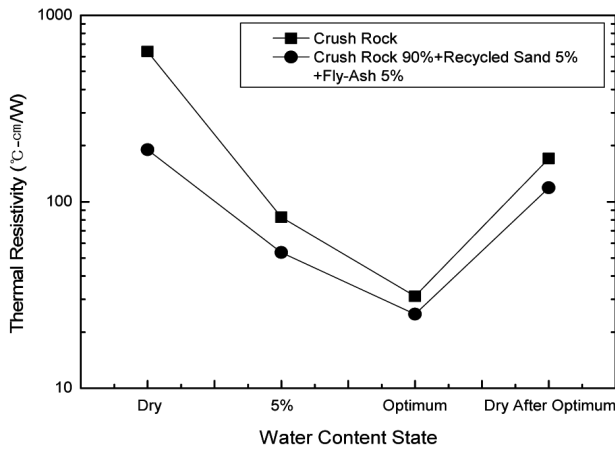


(a) 여러 후보군의 함수비에 따른 열저항률

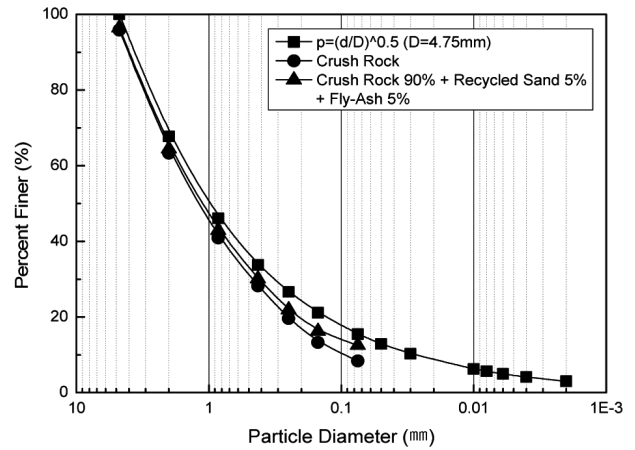


(b) 여러 후보군의 입도분포

그림 5. 여러 퇴매움재 후보군의 열저항률과 입도분포



(a) 혼합재료의 함수비에 따른 열저항률



(b) 혼합재료의 입도분포

그림 6. 혼합재료의 열저항률과 입도분포

낮은 열저항률의 고체입자와 그들의 접촉면을 통해 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. 그림 5(a)에서 석분(stone powder, ◀)이 가장 큰 열저항률을 보이고 있다. 그림에서 각 재료의 최대입경은 강모래(4.75mm), 재생모래(4.75 mm), 화강풍화토(4.75mm), 쇄석(4.75mm), 석분(2mm)이고, 2mm 통과백분율은 강모래(90%), 재생모래(78%), 화강풍화토(88%), 쇄석(65%), 석분(99%)를 나타내고 있다. 또한 평균입경은 쇄석(1.5mm), 재생모래(0.8mm), 강모래(0.6mm), 화강풍화토(0.4mm), 석분(0.3mm)으로, 입자의 굵기만을 비교하면 쇄석, 재생모래, 강모래, 화강풍화토, 석분 순으로 나열된다.

흙의 열저항률에 관한 입자크기와 형상의 영향에 관한 연구에서 Wisman and Burrel(1960)은 다음과 같은 결론을 얻고 있다.

- A. 일련의 실내실험에서 1mm 보다 큰 입자들은 200정도의 열 저항률을 가지고 있으나, 입자크기가 감소함에 따라 세립질로 분해되었을 때는 300정도로 상승한다.
- B. 블록형태의 입자가 둥근 입자보다 작은 열저항률을 보인다. 그러나 이러한 결론은 일반적으로 비교등급의 재료, 광물질 혼합과 밀도에 대한 비교가 이루어지지 않는 한 그 유효성은 제한된다.

이와 같은 결론에 비추어 보면 최적함수비의 경우에 쇄석, 강모래, 재생모래, 화강풍화토, 석분 순으로 열저항률이 나타나고 있어 쇄석과 강모래가 뒤바뀌어 있을 뿐 크게 어긋나 있지는 않다. Wisman and Burrel(1960)의 B 결론

을 참고하여, 가장 큰 밀도를 주는 입도분포에 대해 검토하지 않으면 안된다. 또한 입자크기가 작을수록 접촉면적의 감소로 인해 열저항률이 감소하는 것으로 판단된다. 큰 밀도를 얻기 위해서는 흙이 여러 크기의 범위를 가진 입자들로 구성되어 작은 입자들이 큰 입자들 사이의 간극을 메울 수 있게 하여야 한다. Mitchell and Chan(1982)은 입경과 통과중량백분율과의 상관관계에서 최대밀도를 제공하는 입도분포를 식 (6)과 같다고 하였다.

$$P = (d/D)^{0.5} \times 100\% \quad (6)$$

식 (6)에서 P 는 크기 d 보다 작은 입자의 통과중량백분율이고, D 는 최대입자크기이다. 그림 5(b)는 쇄석, 재생모래, 강모래, 화강풍화토, 석분의 입도분포와 식 (6)에 의한 입도분포를 나타낸 것이다. 그림 5(b)에서 식 (6)의 입도분포에 가까운 입도분포는 역시 쇄석, 재생모래, 강모래, 화강풍화토, 석분 순으로 열저항률이 낮은 순으로 나열되고 있다. 다만 그림 5(b)에서 쇄석, 재생모래, 강모래 등의 입도분포가 식 (6)에 의한 입도분포에 비하여는 세립분의 분포가 결여되어 있음을 알 수 있다. 따라서, 이들 재료에 세립분의 재료를 추가한다면 보다 큰 밀도를 얻을 수 있고, 즉 보다 작은 간극비를 얻을 수 있고, 결과적으로 보다 작은 열저항률을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그림 6(b)는 쇄석(●), 식 (6)(■) 및 쇄석의 입도분포를 식 (6)에 근접하게 만들기 위해 쇄석+재생모래 5%+플라이애쉬 5%의 혼합재료에 대한 입도분포(▲)를 나타내고 있다. 이 혼합재료의 입도분포는 쇄석에 비해 식 (6)에 근접한 입도분포를 보인다. 이 입도분포의 시료에 대해 열저항률을 측정

한 결과가 그림 6(a)이다. 그림에서 입도분포가 개선된 혼합재료의 열저항률은 쇄석에 비해 크게 낮아지고 있음을 알 수 있다. 추후 미세 혼합재료를 달리하여 이 부분에 대한 검증을 추가할 예정이다.

7. 결론

본 연구에서는 여러 종류의 되메움재 후보군에 대한 시료의 열저항률을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 강모래의 열저항률은 함수비가 커질수록 감소하나, 다짐곡선에서 함수비가 증가함과 동시에 건조단위중량도 증가하고 있으므로 단위중량의 변화를 간과해서는 안된다.
- (2) 최적함수비의 상태를 그대로 대기중에 건조시킨 경우의 열저항률은 최초의 건조상태에서의 열저항률에 비해 개략 1/2정도의 매우 작은 값을 보이고 있다.
- (3) 건조시의 열저항률은 최적다짐후의 자연건조과정을 거쳐 최적다짐과 동일한 건조단위중량에서 열저항률을 측정하여야 할 것으로 판단된다.
- (4) 입도분포에 큰 차이가 보이지 않는 강모래와 화강풍화토의 열저항률 특성은 유사한 것으로 나타났다.
- (5) 입자크기가 열저항률에 미치는 영향도 다소 크나, 입자크기가 작을수록 유효접촉면적의 감소로 열저항률은 증가한다.
- (6) 최대밀도를 얻을 수 있도록 입도분포가 개선된 혼합재료(쇄석(90%)+재생모래(5%)+플라이애쉬(5%))의 열저항률은 원재료(쇄석)에 비해 크게 낮아진다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 한국에너지기술평가원의 전력산업원천기술개발사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김대홍, 이대수 (2002), “지중송전관로 되메움재의 열저항 특성”, *한국지반공학회논문집*, Vol.18, No.5, pp.209-220.
2. 한국전력공사 전력연구원 (2003), *송전용량 증대를 위한 열방산회로 개선에 관한 연구 최종보고서*.
3. Carlslaw, 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 Diffusivity and its Application to Cable Ampacity*, CRIEPI-73087.
5. IEEE Std 442-1981 (1981), *IEEE Guide for Soil Thermal Resistivity Measurement*, pp.6-15.
6. Imajo, T. (1976), *Development of Backfill Soils for Underground Cable(2) - Study on the Optimum Grading Distribution*, CRIEPI-72061, 175063.
7. Kersten, M. S. (1949), *Laboratory Research for the Determination of the Thermal Properties of Soils. Research Laboratory Investigations*, Engineering Experiment Station, Technical Report 23, University of Minnesota, Minneapolis, Minn.
8. Mitchell, J. K. and Chan, C. K. (1982), *Backfill Materials for Underground Power Cable*, Phase 1-4., EPRI EL-506, EL- 1894, EL-4150, EL-4856.
9. Shannon, W. L. and Wells, W. A. (1959), “Tests for Thermal Diffusivity of Granular Materials”, *Proceedings of ASTM*, Vol.47, pp.1044-1053.
10. Stolpe, J. (1970), *Soil Thermal Resistivity Measured Simply and Accurately*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-89, No.2, February.
11. Wisman, R. J. and Burrell, R. W. (1960), *Soil Thermal Characteristics in Relation to Underground Power Cable*, AIEE Committee Report, Transaction of AIEE, Vol.79, pp.792-856.

(논문접수일 2011. 11. 18, 심사완료일 2011. 12. 23)