지중송전관로 되메움재의 종류에 따른 열 소산 효과의 비교에 관한 연구

A Study on the Comparison among Effect of Thermal Dissipation of Backfill Materials for Underground Power Cables

김유성¹, 박영준², 조대성^{3*}, 김재홍⁴

Kim You-seong¹, Park Young-jun², Cho, Dae-seong^{3*}, Kim, Jae-hong⁴

¹Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 561-756, Republic of Korea

²Non-Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 561-756, Republic of Korea

³Member, Graduate Student, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 561-756, Republic of Korea

⁴Non-Member, Researcher, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 561-756, Republic of Korea

ABSTRACT

Backfill material with thermal resistivity which has $50^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/Watt}$ in wet and $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/Watt}$ in dry is requested to improve the power transfer capability for dissipation of heat production in underground power cables. In the field test performed by buried cable backfills, the backfill material developed from this study is compared with river sand and weathered soil (native soil) to investigate the effect of heat transfer in various seasons and locations of thermal sensors. As a result, the developed backfill material is faster approaching yielding temperature (critical heat) than that of river sand and weathered soil, and it has good dissipation capacity rather than other materials by keeping moisture content at dry season.

요 지

지중송전관로를 통한 송전용량 증대를 위해서는 송전 시 발생하는 열을 빠르게 소산시킬 수 있도록 습윤 시 $50^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/Watt}$, 건조 시 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/Watt}$ 이하의 열 저항률을 갖는 재료를 되메움재로 사용하는 것이 요구되며, 이를 위해 선행연구에서는 요구되는 조건을 만족시키는 열 소산 되메움재를 개발하였다. 이 연구에서는 개발된 열 소산 되메움재의 열 소산효과를 알아보기 위하여 1회선의 단면을 현장에 설치하고 개발된 열 소산 되메움재와 강모래, 현장토에 대하여 열을 직접 가하고 일정한 지점에서 온도를 측정함으로써 현장시험을 수행하였고, 시험결과와 유한요소해석과의 비교를 통해 열 소산효과를 비교하였다. 비교결과, 열원과 가까운 지점에서는 개발된 열 소산 되메움재가 강모래와 현장토에 비해 열평형상태에 빨리 도달하는 것으로 나타났으며, 열평형에 도달하는 온도도 높은 것으로 나타나 열 소산효과가 우수한 것으로 나타났다. 또한 다른 지점에서도 개발된 되메움재가 다른 재료보다 온도가 높아 열 소산효과가 우수한 것으로 나타났다. 또한 함수비의 변화에도 열 소산효과가 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다.

Keywords : Backfill material, Thermal resistivity, Heat dissipation, Underground power cable, Yielding temperature

1. 서 론

경제성장과 더불어 전력수요가 매년 급증함에 따라 대도시를 기반으로 한 전력송전선로의 지중화가 활발하게 진행되고 있다. 이와 같은 전력수요의 과밀화에 대처하기 위해서는 지중송전관로의 확대와 더불어 송전케이블의 송

Received 14 Mar. 2013, Revised 25 Mar. 2013, Accepted 25 Mar. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-63-270-2420; Fax: +82-63-270-2421

E-mail address: sculptart@jbnu.ac.kr (D. S. Cho)

전용량 증대 또한 시급한 실정이다. 지중송전관로의 대용량화, 폭주화 및 기타 열 수송관로 등 여타 열원으로부터의 열적간섭도 증대되고 있어 지중 환경을 고려한 지중송전관로의 설계 및 시공이 송전관로의 송전능력 증대를 위해 절실히 요구되고 있다. 지중송전관로의 송전용량 증대를 위해서는 전압 및 전류를 증가시켜야하나, 이들의 증가는 관로내의 열 발생의 증가를 초래하며 이는 열 폭주현상을 유발하여 송전케이블의 절연파괴를 일으키거나 송전효율을 저하시키는 요인이 된다(KEPRI, 2003). 따라서 지중송전관로 주변의 되메움재는 관로로부터 발생된 열을 신속하게 소산시킬 수 있는 재료, 그리고 열 저항률에 큰 영향을 미치는 함수비의 변화에 따라 열 저항률의 변화가 작은 재료(습윤 시 열 저항률(ρ) 50°C-cm/Watt, 건조 시 열 저항률(ρ) 100°C-cm/Watt 이하)의 사용이 요구된다.

현재 지중 송전관로의 되메움재로 가장 많이 사용되고 있는 강모래의 경우 습윤 시 일반적으로 150°C-cm/Watt의 열 저항률을 나타내며, 건조 시에는 이보다 2배 이상의 값을 나타낸다. 연구결과에 따르면 모래의 경우 건조 시 100°C-cm/Watt이하의 열 저항률 값을 얻기 위해서는 간극률이 25%이하가 되어야 하는 것으로 나타났으나, 균등한 강모래의 경우 35%이하의 간극률을 얻기가 곤란하고 투수계수가 커 상대적으로 건조 측으로 변화하기 쉽다(Imajo, 1976). 이와 같은 문제점을 개선하기 위해 강모래와 화강풍화토, 재생모래, 쇄석, 석분과 같은 다양한 재료에 대해 열 저항률을 측정하고 열저항특성을 비교분석한 결과 최대밀도를 얻을 수 있도록 입도분포가 개선된 혼합재료의 열 저항률은 원재료에 비해 크게 낮아지는 것으로 나타났다(Kim et al., 2011a). 또한 최적함수비상태에서 가장 낮은 열 저항률을 나타낸 쇄석의 입도분포 개선을 위해

평균입경이 작은 재생모래와 석분, 슬래그 및 플록을 혼합한 결과, 최적함수비에서 50°C-cm/Watt이하의 열 저항률을 얻을 수 있었고, 최적함수비 상태 후 건조 시에도 열 저항률의 증가가 일어나지 않는 재료를 개발하였다(Kim et al., 2011b). 본 연구에서는 기존의 연구결과를 토대로 원지반토와 강모래, 개발된 되메움재를 사용하여 지중송전관로를 매설하고 관로내에 열을 발생시켜 매설관 주변의 온도를 측정함으로써 되메움재의 종류에 따른 열 소산 효과를 비교분석 하였다.

2. 되메움재의 열저항특성

현장실험을 통한 열 소산 효과의 검증 이전에 선행연구(Kim et al., 2011b)에서 개발된 되메움재와 현재 지중송전관로 되메움재로 가장 사용빈도가 높은 강모래, 그리고 현장 굴착토에 대하여 실내에서 열 저항률 측정실험을 실시하였다. Table 1에는 개발된 되메움재의 물리적 성질을 나타내었고, 각 재료의 입도분포곡선을 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1. Particle size distribution of material

Table 1. Physical properties of used materials

Material	Specific gravity	Liquid limit	Plastic limit	Uniformity coefficient	Curvature coefficient	USCS
Backfill material	2,715	Non plastic	Non plastic	4,81	0,72	SP
River sand	2,646	Non plastic	Non plastic	6,28	1,14	SW
In-situ soil	2,681	32,31%	Non plastic	18,18	0,74	SC

Table 2. Thermal resistivity of materials by water content state

Material	Minimum thermal resistivity			
	Dry	$\omega = 5\%$	Optimum state	Dry after optimum
River sand	380	80	40	175
In-situ soil	220	70	60	165
Optimized backfill material	210	75	38	40

Fig. 2. Change of thermal resistivity of materials by water content state

함수비상태에 따른 열 저항률 측정결과를 Table 2와 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 강모래의 경우 최적함수비에서 다짐한 후 열 저항률을 측정한 결과 열 저항률이 $50^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{Watt}$ 이하이나, 최적함수비상태에서 건조상태로 변화하게 되면 열 저항률이 다시 증가하고, 현장 굴착토의 경우에도 이와 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 개발된 되메움재의 경우 최적함수비상태에서 강모래보다 낮은 열 저항률인 $38^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{Watt}$ 를 나타내었고, 건조상태로 변화하게 되더라도 이를 거의 유지하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 Fig. 2를 통해 설명될 수 있다. 입자에서의 열전도는 대부분 입자사이의 접촉면적에서 발생하므로 열 저항률을 낮추기 위해서는 입자간 접촉면적을 크게 하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 재료가 최대밀도를 갖도록 하는 것이 요구된다. 따라서 재료가 최대밀도를 가질 수 있도록 이론상 식을 나타낸 입도분포곡선(◀)과 재료의 입도분포곡선이 일치하여야 한다. 강모래(■)와 현장 굴착토(●)의 경우 재료가 최대밀도를 얻을 수 있는 식을 나타낸 곡선(◀)과 차이를 보이는 반면, 개발된 되메움재(▲)는 4.75mm에서 0.85mm까지 입도분포가 거의 일치하고 있고, 되메움재에 포함된 Floc이 보습효과가 있기 때문에 $50^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{Watt}$ 보다 낮은 열 저항률을 나타내고 건조 후에도 이를 유지하는 것으로 판단된다.

3. 되메움재의 현장적용 시험

3.1 되메움재의 현장시공을 위한 설계조건

한국전력공사에서는 지중송전관로의 설계기준을 Table 3

(a) Cross-Section Diagram

Burial depth	1200mm
External diameter of pipe	230mm
Margin of backfill material	100mm
Vertical space (between pipe)	100mm
Horizontal space (between pipe)	100mm
Width of backfill material	1396mm
Height of backfill material	1530mm

(b) Boundary Condition

Fig. 3. Cross-Section Diagram & Boundary Condition of Field Test

Table 3. Excavation slope of underground power cables

Burial depth(H)	Soil, Whethered rock	Bedrock
less than 2,5m	1 : 0.1	Vertical excavation
2,5m~4m	1 : 0.2 or Installation of sheet piles	Vertical excavation
more than 4m	Installation of sheet piles	Vertical excavation

과 같이 제시하고 있으며, 이를 기준으로 Fig. 3과 같이 1회선에 대한 지중송전관로 현장시험을 위한 단면을 설정하였다. 굴착저부에서 여유폭의 경우 400mm를 규정하고 있으나, KEPRI의 연구결과(2003) 되메움재의 여유폭이 100mm이상일 경우 열 저항률의 감소에 따른 허용전류의 증가량은 미비하므로 여유폭을 100mm로 설정하였다.

3.2 되메움재의 현장시공

현장시험을 위한 장비(발열봉, 온도계측기, 관로)는 전주시 덕진구 여의동 일원에 위치한 부지에 설치되었다. Fig. 4(a)는 지중송전관로의 송전시 발생하는 열을 재현할 수 있는 발열봉을 나타내고, Fig. 4(b)는 발열봉이 장착되고 토압으로부터 발열봉을 보호할 수 있는 보호관을 나타

(a) Thermal needle (generated thermal energy)

(b) Thermal needle installed in pipe

Fig. 4. Thermal needle & installed in pipe used in in-situ test

(a) Mixed materials by backhoes to make optimum state

(b) 1st compaction before installation of pipe

(c) Installation of pipe

(d) Installation of thermometer in materials

(e) Refill materials and 2nd compaction

(f) Check the level and installation of thermometer

(g) Fianl refill materials and final compaction

(h) Test and check the temperature

Fig. 5. Procedure of installation of in-situ test system

내었다. Fig. 5에는 굴착 후 발열봉이 장착된 보호관을 설치하고 관로를 매설하는 과정을 순서대로 나열하였다.

되메움재의 종류에 따른 열 소산 효과를 비교하기 위해 개발된 열소산 되메움재와 현재 지중송전관로 되메움재로 주로 사용되고 있는 강모래, 그리고 현장에서 굴착후 발열 봉과 보호관이 설치된 후 발생한 현장 굴착토의 3종류의 되메움재를 각각의 시험부지에 사용하였다.

4. 현장 열소산 실험결과 및 분석

4.1 현장 열소산 실험결과

일정한 열원으로부터 열 소산 효과를 알아보기 위해 발열봉에 전류를 가하여 열이 일정하게 발생하도록 한 후 Fig. 3의 ①~⑩ 위치에서 발현온도를 측정하였다. Fig. 6에 대표적으로 ①, ②, ⑥, ⑨ 위치에서의 시간에 따른 온도변화를 나타내었다. Fig. 6(a), (b)에서 알 수 있듯이 지중송전관로와 가까운 ①과 ②의 위치의 경우, 개발된 되메움재가 강모래와 현장 굴착토에 비해 짧은 시간에 열평형

이 나타났고, ①에서 재료의 초기온도 차이를 고려한다면 열평형 온도도 개발된 되메움재가 가장 높은 것으로 나타났다. Fig. 6(c)의 ⑥위치의 경우에는 평형시간이 ①, ②에 비해 상당히 장시간이 소요되나, 초기온도를 일치시키면 개발된 되메움재의 열평형온도가 가장 높은 것으로 나타나고 있다. Fig. 6(d)의 ⑨위치의 경우에는 모든 되메움재료에서 온도변화가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그 이유는 이미 이 위치의 아래에서 열평형에 도달하여 열이 소산되고 있기 때문이다. 함수비는 열저항 특성에 영향을 미치는 요소로 강우와 같은 자연적 요인에 의하여 항상 변화하며, 이와 같은 함수비의 변화에도 동일한 온도변화가 일어나는지 비교하기 위하여 강우 이후에 각 되메움재의 온도변화를 측정하였고 이를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 모든 재료가 정상 상태에 비하여 짧은 시간에 열평형 온도에 도달하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 계절의 변화에 따른 각 재료의 온도변화를 측정한 결과를 나타내었다. 그림에서 계절의 변화에 따른 열평형 온도는 개발된 되메움재, 현장 굴착토, 강모래 순서로 나타났다. 또한 여름철의 경우 3종류의 되메움재가 큰

(a) Time vs. temperature curve at no. ①

(b) Time & temperature curve at no. ②

(c) Time vs. temperature curve at no. ⑥

(d) Time vs. temperature curve at no. ⑨

Fig. 6. Time vs. temperature curve of material in various point

(a) Time vs. temperature curve of Normal condition

(b) Time vs. temperature curve of after rainfall condition

Fig. 7. Comparison of rainfall at no. ②

(a) Time vs. temperature curve in summer

(b) Time vs. temperature curve in winter

Fig. 8. Comparison of season at no. ②

차이를 보이지 않았으나 겨울철은 개발된 되메움재가 현장 굴착토와 강모래와 큰 차이를 보이고 있다. 이는 함수비를 측정한 결과 여름철의 평균 함수비는 7%로 나타나 평균 함수비가 3%로 나타난 겨울철보다 상대적으로 높은 함수비를 보이고 있고, 높은 함수비상태일수록 열 저항률 차이의 감소에 따른 열 소산 효과의 차이가 감소하는 열 저항특성 때문인 것으로 판단된다. 개발된 되메움재가 겨울철에 타 재료에 비해 우수한 열 소산 효과를 보이는 것은 흡습성의 플록(floc)을 포함한 다양한 재료의 혼합으로 입자간 접촉면적이 커 열 전달이 빠르게 이루어지기 때문이다. 이와 같은 계절의 변화에도 개발된 되메움재가 열 소산 효과가 우수한 것으로 판단된다.

4.2 유한요소해석결과 및 분석

4.2.1 되메움재의 종류에 대한 해석결과

현장시험결과와의 비교검토를 위하여 유한요소해석 프

로그래를 사용한 수치해석을 실시하였다(Geostudio 2012). 해석에서는 현장에 시공된 발열봉과 보호관의 존재, 보호관 내부의 공기 등을 고려하여야 하나, 해석의 편의상, 보호관에 발열봉으로부터 전달된 열이 45°C의 온도로 일정하게 작용한다고 가정하였다. 해석에 사용된 단면은 현장 시험을 위해 설치된 단면과 동일한 Fig. 9와 같은 단면을 사용하였고, Fig. 10~Fig. 14에는 되메움재의 종류에 따른 해석결과를 나타내었다.

그림에서 동일한 함수비상태에 동일한 시간동안 열 공급이 이루어질 경우 열 저항률이 낮은, 개발된 되메움재의 열 소산이 강모래와 현장 굴착토에 비해 빨리 이루어지고 있고, 함수비가 증가하면 열 소산의 효과가 커지는 것으로 나타나고 있다. 이와 같은 해석결과는 전체적으로 현장시험결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 현장시험시의 온도 측정 지점과 동일한 지점에서의 시간에 따른 온도변화를 Fig. 15에 나타내었다. 그림에서 열이 공급되는 위치와 가까운 위치인 ①과 ②의 경우, 열 저항률이 낮은 되메움재가

Fig. 9. Cross-section in numerical program

Fig. 12. Contour of heat transmission (in-situ soil, $\omega=3\%$, 24hr)

Fig. 10. Contour of heat transmission (backfill material, $\omega=3\%$, 24hr)

Fig. 13. Contour of heat transmission (backfill material, $\omega=5\%$, 24hr)

Fig. 11. Contour of heat transmission (river sand, $\omega=3\%$, 24hr)

Fig. 14. Contour of heat transmission (backfill material, $\omega=7\%$, 24hr)

강모래와 현장 굴착토에 비해 열평형이 이루어지는 최대 곡률반경까지 보다 짧은 시간에 열이 상승하였고, 열평형이 이루어지는 온도도 낮은 것으로 나타났다. 또한 공급되

는 열을 외부로 전달되는 지점인 ⑥과 ⑨에서도 되메움재의 온도가 강모래와 현장 굴착토에 비해 높은 온도를 나타내고 있어 열 소산이 잘 이루어지는 것으로 나타나고 있다.

(a) Yielding temperature & time at no. ①

(b) Yielding temperature & time at no. ②

(c) Comparison of temperature at no. ⑥

(d) Comparison of temperature at no. ⑨

Fig. 15. Comparison of numerical analysis and field test

(a) Time vs. temperature curve of backfill material

(b) Time vs. temperature curve of river sand

(c) Time vs. temperature of in-situ soil

(d) Comparison of materials

Fig. 16. Comparison of numerical analysis and field test

4.2.2 함수비의 영향에 대한 해석결과

열 저항률에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 함수비인 것으로 조사되고 있다. 함수비가 증가하게 되면 열 저항률은 감소하나, 현장에서의 함수비는 일정하게 유지되지 않고 기후의 영향을 받아 변화하므로, 현장에서의 함수비 변화의 영향을 검증하기 위해 유한요소해석을 수행하였고, Fig. 16에 결과를 나타내었다. 그림에서 모든 재료에서 함수비의 증가에 따라 열평형에 도달하는 시간이 빨라지는 것으로 나타났고, 그 차이는 함수비 증가에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 간극사이에서의 수분은 표면장력으로 인하여 흙 입자간 접촉면적의 증가를 유도하며, 이는 2~3% 이하의 함수비에서는 함수비 증가에 따른 열 저항률의 감소를 통한 열 소산 효과를 크게 증가시킬 수 있으나, 이보다 높은 함수비에서는 함수비의 증가에 따른 열 저항률의 감소폭이 점차 줄어들어 열 소산 효과의 증가를 기대하기 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 또한 열평형에 도달하는 시간과 온도를 비교한 결과, 함수비 3%의 상태에서는 개발된 되메움재가 가장 먼저 열평형상태에 도달하였고 도달한 온도도 가장 높은 것으로 나

타났으나, 함수비 5% 이상에서는 열 소산 되메움재와 강모래가 비슷한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

4.2.3 열평형 상태

Fig. 16(a), (b), (c)에서 측정시간이 무한대가 되면 각 되메움 재료에서 발휘되는 온도는 같아질 것으로 판단된다. 이 동일온도를 나타내는 지점은 의미가 없으므로 이 연구에서는 Fig. 17과 같이 최대곡률반경을 나타내는 지점에 의미를 부여, 열평형상태 도달시간 및 온도로 정의하여 데이터를 분석하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 지중송전관로 설치 시 요구되는 습윤 시 $50^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/Watt}$, 건조 시 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm/Watt}$ 이하의 열 저항률을 갖는 되메움재의 조건을 만족하도록 선행연구에서 개발된 되메움재와 강모래, 현장 굴착토를 되메움재로 하여 현장검증 실험을 실시하고, 유한요소해석과의 비교분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(a) Time vs. temperature curve of backfill material at no. ①

(b) Time vs. temperature curve of backfill material at no. ②

Fig. 17. Yielding time & yielding temperature

- (1) 동일 함수비상태에서 열평형에 도달하는 시간은 개발된 되메움재, 현장 굴착토, 강모래 순으로 나타났고, 열평형에 도달한 온도도 같은 순서로 높아 개발된 되메움재의 열 소산 효과가 우수한 것으로 나타났다.
- (2) 함수비 5%이상에서는 강모래와 열 소산 되메움재가 유사한 열 소산 효과를 보이거나 강모래의 경우 함수비가 변화함에 따라 열평형에 도달하는 시간 및 온도가 크게 변화하여 열에 의한 수분이동이 재료 내에 발생 시 일정한 열 소산 효과를 얻기 어려울 것으로 판단된다.
- (3) 되메움재 내 지중송전 관로와 가까운 위치에서의 열전달은 열평형온도 및 열평형 도달시간의 분명한 차이가 있으나, 먼 거리의 위치(no. ⑥)에서는 개발된 되메움재에서만 열전달이 발생하는 경향이 나타났고, ⑨위치에서는 일정한 온도를 보여 ⑥과 ⑨위치 중간에서 열전달 및 열 소산 경계를 보이는 것으로 나타났다.
- (4) 함수비가 증가할수록 개발된 되메움재와 강모래, 현장 굴착토 모두 열평형에 도달하는 시간과 온도는 증가하고, 열 소산 효과가 상승하는 것으로 나타났으나, 개발된 되메움재는 수분을 유지할 수 있는 특성이 있어 열 소산 효과가 다른 재료에 비해 뚜렷한 것으로 확인되었다.

Acknowledgement

This work was supported by the Power Generation and Electricity Delivery of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Knowledge Economy (No. 20101020200330)

References

1. Korea Electric Power Research Institute (2003), *Development of Backfill Materials for the Increase of Power Transmission Capacity of Underground Cables*, Technical Report No. T.R.00PJ10.
2. Imajo, T. (1976), *Development of Backfill Soils for Underground Cable(2) - Study on the Optimum Grading Distribution*, CRIEPI-72061, 175063
3. Kim, Y. S., Cho, D. S., Park, Y. J. (2011a), "Optimization of the Backfill Materials for Underground Power Cables considering Thermal Resistivity Characteristics(I)", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.10, No.4, pp.113-121.
4. Kim, Y. S., Cho, D. S., Park, Y. J. (2011b), "Optimization of the Backfill Materials for Underground Power Cables considering Thermal Resistivity Characteristics(II)", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.10, No.4, pp.113-121.