

지중관로에서의 실제 허용전류 산출을 위한 도체온도 계산 알고리즘 개선에 관한 연구

Improvement of the Conductor Temperature Calculation Algorithm for Calculating the Allowable Current in the Underground Channel

이 향 범[†] · 이 병 철* · 김 정 훈** · 남 용 현** · 강 지 원***

(Hyang-Beom Lee · Byung-Chul Lee · Jung-Hoon Kim · Yong-Hyun Nam · Ji-Won Kang)

Abstract - In this paper, the improvement of the conductor temperature calculation algorithm is studied. The allowable current of the underground transmission line is determined by the conductor temperature limit. Usually to calculate the allowable current limit, the conductor temperature is assumed in the most worst environment condition. It is possible to increase the transmission capacity if the actual burial environment is considered. Therefore, in this paper an algorithm is proposed to calculate the conductor temperature by distinguishing two area of a underground transmission line condition - the manhole where the temperature sensor can be installed and the underground transmission line in which the temperature sensor can not be installed easily. When calculating the conductor temperature by the underground line in the pipeline, the existing standard describes each environment as a single soil heat resistance and one ambient temperature. In order to compensate this situation, thermal resistance model that can take into consideration the ground surface temperature and under ground temperature is proposed. It is shown that the accuracy of the proposed model is increased compared with the existing standard calculation result.

Key Words : Underground transmission line, Thermal resistance model, DTS, DRS, Calculation of allowable current

1. 서 론

기술발전으로 인하여 다양한 용도로 전기를 사용하고 있으며, 인구 밀집으로 인해 도시에 전력수요는 증가하고 있으며, 도시미관 등 여러 요소로 인해 지중송전선로의 건설수요가 증대하고 있다. 이에 따라 지중송전선로의 송전능력 및 송전용량 증대에 관한 연구의 중요성이 부각되고 있다.

지중송전선로의 송전용량은 도체 최고 허용온도에 가장 취약하며, 이로 인해 송전용량이 결정된다. IEC, JCS, IEEE 등 국제 규격에서 도체온도를 이용하여 송전용량을 산출할 때, 가장 가혹한 주변환경을 가정하여 산출하고 있다. 실제 환경을 고려한다면, 기존에 산정되었던 송전용량보다 일반적으로 더 높은 값을 갖게 된다[1]. 지중송전선로 매립 환경이 고려된 송전용량을 산출하기 위해 전력구에서는 DTS(Distributed Temperature Sensor)을 설치한 DRS(Dynamic Rating System)을 이용하여 도체온도를 산

출하여, 송전용량을 증대하고 있다[2-5]. 하지만 우리나라 대부분에 설치된 관로식 지중선로나 직매식 지중선로에 DRS를 이용하기 위해서는 기존 선로를 들어내는 재공사나 DTS가 설치된 케이블로 교체공사를 해야 하는 어려움이 있어, 기존 방법으로는 실시간 송전용량을 산정할 수 없다.

본 논문에서는 기존의 설치되어 있는 관로식 지중선로와 직매식 지중선로의 실제 허용전류를 구하기 위하여 도체온도 산출 알고리즘을 개선하여 주변 온도, 토양의 열저항 등의 외부 정보와 관로식의 맨홀, 직매식의 접속부에서만 DTS 설치로 얻을 수 있는 정보를 갖고 유한요소법(FEM)을 이용하여 4방향 토양 열저항을 도입하는 방법으로 도체온도를 산출하는 방법을 제시한다. 이 방법을 지중관로에 적용하여 그 효용성을 보였다.

2. 기존 방법 적용 시의 문제점 및 분석

한전 규격인 DS 6210에서는 열 저항모델을 이용하여 지중송전선로의 도체온도를 산출하고 있다. [표 1]은 한전 규격 내에서의 매설 방식에 따른 도체온도를 산출하는 열 저항 모델을 나타내고 있다. W_c 는 도체손실, W_a 는 유전체 손실, W_s 는 시스손실, W_a 는 아모아 손실, θ_c 는 도체온도, θ_a 는 주변온도를 나타낸다[6]. T_1 은 절연체 열 저항, T_2 는 시스-아모아 사이의 열 저항, T_3 는

[†] Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea.

E-mail: hyang@ssu.ac.kr

* School of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea.

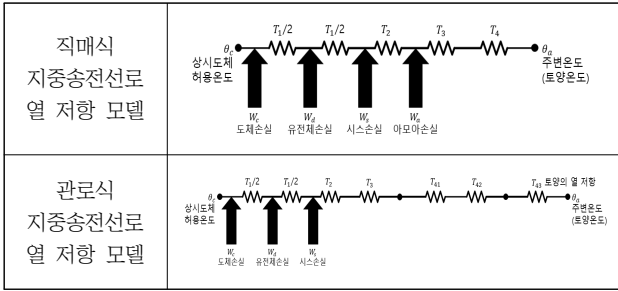
** School of Electrical Engineering, Hongik University, Seoul, Korea.

***Dept. of Power Transmission Laboratory, KEPRI, Korea.

Received : January 30, 2018; Accepted : February 8, 2018

표 1 매설 방식에 따른 열 저항 모델

Table 1 Thermal resistance model according to burial method



방식층 열 저항, T_4 는 토양 열 저항을 의미한다. 관로식 지중송전선로에서는 T_4 는 3개로 구별되며, T_{41} 은 관로 내 열 저항, T_{42} 는 관로의 열 저항 T_{43} 은 토양 열 저항을 의미한다,

DS 6210에서는 주변환경을 가혹한 환경조건을 가정하여 도체온도를 산출한다. 한전에서는 토양 열 저항(T_4)을 실측하지 못한 경우, 배전선로의 경우 $1.2 [K \cdot m/W]$, 송전선로의 경우, $0.9 [K \cdot m/K]$ 로 산정하여 도체온도를 산출한다[7]. 이러한 방식으로 지중송전선로의 허용전류를 산출할 경우, 동일한 환경조건과 동일한 토양 열 저항(T_4) 값으로 인해 대부분의 지중송전선로의 송전용량은 동일하게 산출된다. 따라서, 지중송전선로의 효율적인 운용을 위해서는 실제 환경이 고려될 수 있는 지중송전선로 도체 온도 산출 알고리즘이 필요하다.

3. 지중송전선로 도체온도 추정 알고리즘 제안

3.1. 온도센서를 이용한 지중송전선로의 도체온도 산출

전력구에서는 DTS(Distributed Temperature Sensor)를 이용하여 지중송전선로의 도체온도를 산출하고 있다. DTS에서 측정된 지중선로 표면온도를 이용하여 도체온도를 산출하였을 때, 토양 열 저항(T_4)과 주변온도(지중온도, 지면온도)를 고려하지 않고 도체온도를 산출할 수 있는 장점이 있다. 하지만 DTS가 설치되지 않은 기존에 매설된 관로식 지중송전선로의 경우, DTS를 설치하기 위해서는 선로 공사를 다시 해야 한다. 이에 따른 건설비용과 공사기간 중에 선로운용 불가 등 여러 가지 요소를 고려하였을 때, 경제성이 없다. 따라서, 온도센서 설치가 용이한 맨홀부에 위치한 지중선로 표면온도를 이용하여 도체온도를 산출하고자 한다.

[그림 1]은 관로식 지중송전선로에서 온도센서 설치 가능한 위치를 나타낸다. 관로식 송전선로의 경우, 400~600 [m]마다 맨홀을 설치해야하며, 맨홀에서 측정된 온도센서를 이용하여 도체온도를 산출하고자 한다. 직매식의 경우에도 400~600 [m]마다 접속부를 설치해야하며, 온도센서를 이용하여 즉 케이블 표면온도만 이용하여 도체온도 산출 시, 토양 열 저항(T_4)과 대기온도를 고려하지 않아도 되기 때문에 관로식 지중송전선로와 동일한 열 저항 모델을 이용하여서 산출할 수 있다.

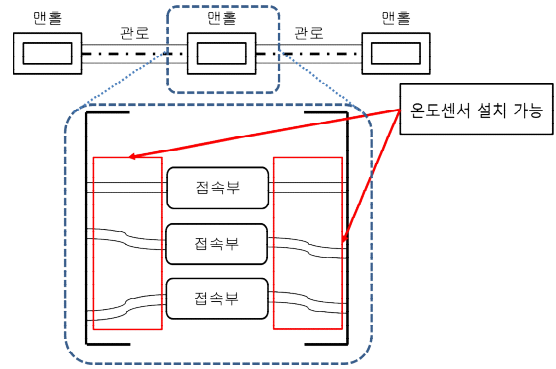


그림 1 관로식 지중송전선로의 온도센서 설치 위치

Fig. 1 Thermal sensor installation position in the underground transmission line

표 2 DS 6210와 DTS를 이용한 지중송전선로 도체온도 산출 열 저항모델 비교

Table 2 Comparison of thermal resistance model-DS 6210 and DTS

DS 6210 내에서의 열 저항모델	
열 저항모델	
허용전류 산출 공식	$I_a = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d(0.5T_1 + T_3 + T_4)}{RT_1 + R(1 + \lambda_1)(T_3 + T_4)}}$
DTS를 이용한 열 저항 모델	
열 저항모델	
허용전류 산출 공식	$I_a = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d(0.5T_1 + T_3)}{RT_1 + RT_3(1 + \lambda_1)}}$

한전에서는 지중송전선로를 설치규격인 DS 6210에서 요구하는 열 저항 모델과 DTS를 이용한 열 저항 모델은 DTS에 의하여 외부 조건이 모두 고려된 온도가 측정되기 때문에 서로 차이가 있으며, 이러한 차이는 [표 2]를 통해 나타내고 있다. I_a 는 허용 전류, $\Delta\theta$ 는 토양/대지온도와 도체온도와의 온도 차, λ_1 는 시스템 손실률, R은 선로의 교류저항을 나타낸다. 지중송전선로의 표면온도 측정이 가능한 경우, 즉, DTS를 이용 가능한 경우, 토양 열 저항과 주변 온도(지중온도, 지면온도)를 고려하지 않고 지중송전선로의 도체온도 산출이 가능하다. 하지만 DTS의 사용이 어려운 경우 DS 6210의 계산 방법을 사용하여야 한다.

3.2. 지중관로 내의 지중송전선로 도체온도 산출 방법

기존에 설치된 관로 내의 지중송전선로 표면에 온도센서를 설치하는 것은 송전선로 재설치 등 다양한 이유로 매우 어렵다. 온도센서를 이용하여 관로 내의 지중송전선로 도체온도를 산출하는 것은 불가능하다. 따라서, 관로내의 지중송전선로 도체온도 산출하기 위해서는 주변 환경조건(주변온도(지중온도, 지면온도), 토양 재질)을 이용하여야 한다..

한전 규격에서 도체온도를 산출하는 열 저항모델은 하나의 토양 열 저항(T_4)과 하나의 주변온도를 이용하여 도체온도를 산출하고 있다. 이러한 열 저항 모델은 케이블 매설환경을 하나의 열 저항과 하나의 주변온도로 표현해야한다는 문제점이 있다. 실제 지중선로의 주변환경 고려하여 도체온도를 산출하기 위해서는 열 방사 방향을 고려하여 토양 열 저항을 구성해야 하며, 지중선로에 영향을 주는 지면온도와 지중온도를 구별하여 구성해야 한다. [그림 2]은 본 논문에서 제안하고자 하는 열저항 모델이다. 지면

온도와 지중온도를 고려하기 위해서는 열 방사방향을 고려하여 총 4개의 토양의 열 저항으로 구성하여, 기존의 모델에 비해 개선된 결과를 얻을 수 있도록 제안하였다.

규격 내의 토양 열 저항(T_4)을 4개의 토양 열 저항으로 구별하여 나타내야 하며, 규격 내에서의 토양 열 저항(T_4)과 지면온도와 지중온도를 고려한 열 저항 모델에서의 토양 열 저항(T_{4-1} , T_{4-2} , T_{4-3} , T_{4-4})과의 관계는 (1) 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{T_4} = \frac{1}{T_{4-1}} + \frac{1}{T_{4-2}} + \frac{1}{T_{4-3}} + \frac{1}{T_{4-4}} \tag{1}$$

4개의 토양의 열 저항값이 동일하고($T_{4-1} = T_{4-2} = T_{4-3} = T_{4-4} = T_{1/4}$), 주변의 온도가 동일한 경우, 토양 열 저항은 (2)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_4 = \frac{1}{4} T_{1/4} \tag{2}$$

각 토양 열 저항에는 지면온도, 지중온도를 맞춰서 열 저항 모델을 구성하여 도체온도를 산출하고자 한다.

각 토양 열 저항은 각 변에 해당하는 온도(대지온도, 토양온도)를 입력하여 도체온도를 산출해야한다. 기존 규격에서 하나의 주변온도를 이용하여 도체온도를 산출했던 방식과 달리, 총 4개의 주변온도를 이용하여 도체온도를 산출할 수 있게 된다. θ_{4-1} 은 대지온도를 나타내며 지중송전선로가 매설되어있는 환경에서 지면온도를 나타낸다. θ_{4-2} , θ_{4-3} 은 지중송전선로가 매설되어있는 깊이에서의 지중온도를 나타낸다. θ_{4-2} 와 θ_{4-3} 은 매설환경에 따라서 달라질 수 있다. θ_{4-4} 는 지면방향으로 매설깊이만큼의 지중온도를 나타낸다.

4. 시뮬레이션을 이용한 결과 비교

DTS를 이용하여 산출한 열 저항 모델과 지중온도, 지면온도를 고려한 열 저항 모델이 기존의 열 저항모델보다 정확한 도체온도 산출가능 함을 확인하기 위해서 유한요소법(FEM)에 의한 수치해석결과를 이용하여, 기존 알고리즘과 본 논문에서 제안한 개선된 알고리즘을 이용하여 계산된 결과와 비교하였다. [그림 3]는 지

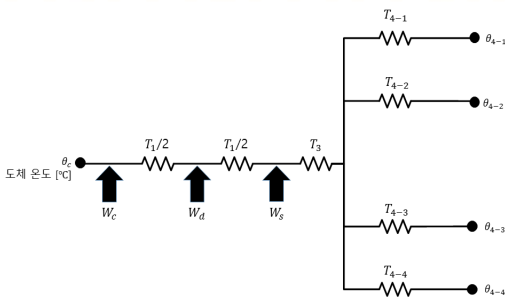
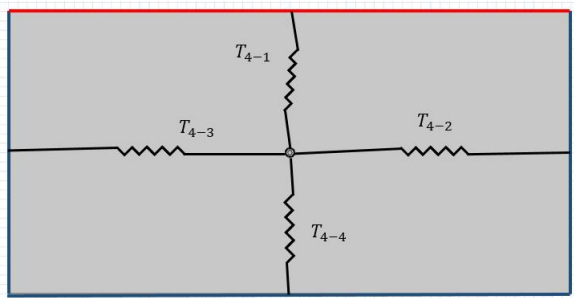


그림 2 지면온도, 지중온도를 고려한 개선된 열저항 모델
Fig. 2 Improved thermal resistance model considering the surface and underground temperature

표 3 재질 정보 및 모델링 정보

Table 3 Material and modeling information

명칭	재질	두께 (반지름) [mm]	비열 $\frac{J}{kg \cdot K}$	밀도 kg/m^3	열전도도 $\frac{W}{m \cdot K}$
도체	구리	11.7	385	8933	402
절연체	XLPE	8.18	2976	806	0.28
중성선 (시스)	구리	2.56	385	8933	402
외장	PVC	3.33	1080	1574	0.15
토양	-	-	800	1515	1.3

중송전선로와 토양을 모델링을 나타낸다. 정 중앙에 지중송전선로가 위치하고 있다. 열 저항 모델에 대한 비교를 위해 이용한 모델이며, 하나의 지중송전선로와 토양을 이용하였다. [표 3]는 각각의 재질정보 및 모델링 정보를 나타낸다. [그림 4]은 시뮬레이션의 요소망을 나타낸 그림이다. [그림 5]는 지중송전선로를 확대하여 나타내었다. 지중송전선로는 도체, 절연체, 중선선, 외장으로 구성되어 모델링하였다[8]. [그림 6]는 지중송전선로의 요소망(Mesh) 형상을 나타낸다.

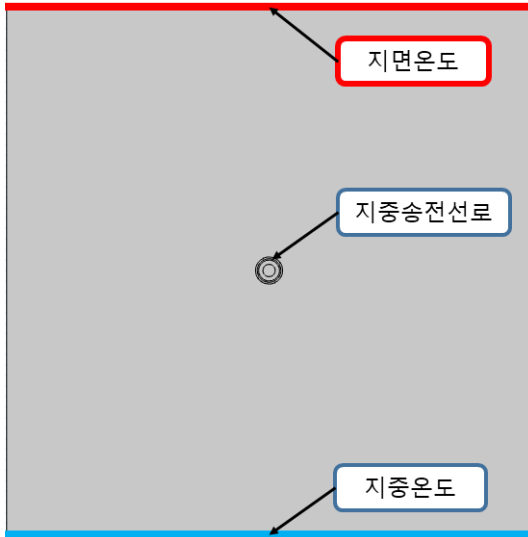


그림 3 도체온도 산출을 위한 시뮬레이션 모델
Fig. 3 Simulation model for temperature calculation

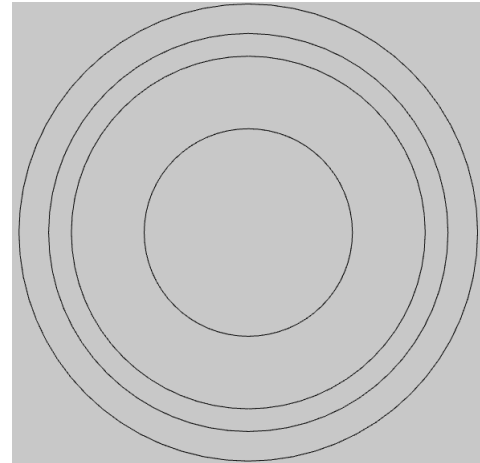


그림 5 지중송전선로 모델링
Fig. 5 Cable Model

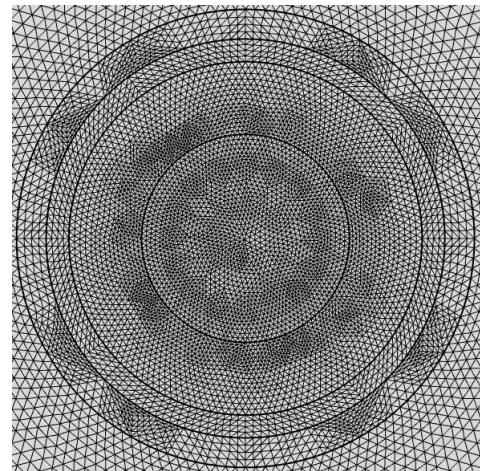


그림 6 지중송전선로 요소망
Fig. 6 Mesh for Cable

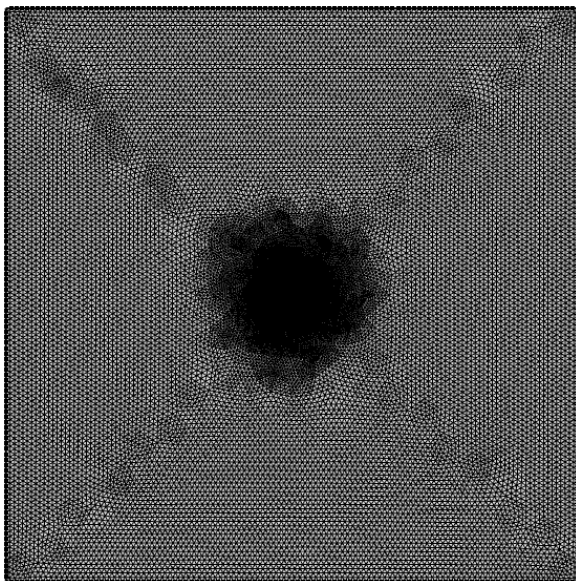


그림 4 도체온도 산출을 위한 유한요소망
Fig. 4 FEM Mesh for temperature calculation

지면온도와 지중온도를 고려한 열 저항 모델을 이용하여 도체 온도를 추정하기 위해서는 각 변의 토양 열 저항(T_{4-1} , T_{4-2} , T_{4-3} , T_{4-4})의 값을 알아야 하며, 토양 열 저항을 구하기 위해서 유한요소법을 이용한 열 해석 결과를 바탕으로 합성 토양 열 저항을 구한 다음, 각 변의 토양 열 저항을 산출하였다. 그 결과는 [표 4]와 같다.

토양 열 저항(T_4)을 산출하기 위해서 도체온도, 대지온도를 이용하여 산출하였다. (3)식은 토양 열 저항(T_4)을 산출하는 공식이다. θ_c 는 도체온도, θ_a 는 지중/지면온도, W_c 는 도체온도, W_s 는 시스온도, T_1 는 절연체 열 저항, T_2 는 방식층 열 저항을 나타낸다.

$$T_4 = \frac{(\theta_c - \theta_a) - (W_c(T_1 + T_2) + W_s T_2)}{W_c + W_s} \quad (3)$$

토양 열 저항(T_4)는 0.372435 [K/W]로 산출이 되었으며 이

표 4 지면온도와 지중온도가 일치할 때의 유한요소법 열 해석 결과

Table 4 FEM result when surface and underground temperature is same

지면 온도	지중 온도	도체 손실 [W/m]	시스 손실 [W/m]	도체 온도 [°C]	시스 온도 [°C]	케이블 표면 온도 [°C]
20°C	20°C	20	2	37.45	31.421	28.191
		30	3	46.176	37.132	32.287
		40	4	54.901	42.843	36.382
		50	5	63.626	48.553	40.478
		60	6	72.351	54.264	44.573
		70	7	81.077	59.975	48.669

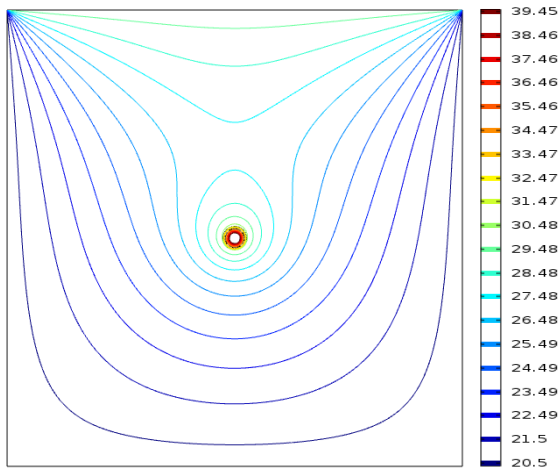


그림 7 지면온도 30°C, 도체손실 20W일 때의 온도 분포
Fig. 7 Temperature distribution (surface temperature 30°C, conductor loss 20W)

결과는 지면온도와 지중온도를 고려한 열 저항회로일 때의 각 변에 대한 토양 열 저항(T_{4-1} , T_{4-2} , T_{4-3} , T_{4-4})의 합과 같다. 지면온도를 25, 30, 35 [°C], 각각의 도체손실은 30, 50, 70 [W], 시스 손실은 도체손실의 10 [%]로 설정하여 해석을 진행하였다. [그림 7]과 [그림 8]은 각 조건에 해당하는 온도분포를 나타낸다.

수치해석을 통해 얻어진 도체온도를 바탕으로 DS 6210에서의 열 저항모델과 지중온도와 지면온도를 고려한 열 저항 모델로 산출한 도체온도를 비교하였다. [표 5]는 각각의 열 해석결과에 수치해석을 통해 얻어진 도체온도와 오차율을 나타낸다. DS6210을 모델의 결과보다 본 논문에서 제안한 방법의 결과가 유한요소법의 결과에 더 가까운 것을 알 수 있다.

DS6210 규격의 열 저항모델은 도체온도를 산출하기 위한 모델이 아닌 허용전류를 산정하기 위한 모델이기 때문에 실제 도체보다 높은 온도로 산출되는 것을 확인할 수 있었다. 실제 송전선로의 효율적인 허용전류 산정을 위해서는 정확한 도체온도를 산

표 5 지중 송전선로 열 해석 결과

Table 5 Comparison of temperature analysis results

지면 온도	도체 손실 [W]	도체 온도 [°C] (FEM)	도체 온도 [°C] (DS 6210)	오차 [%]	도체온도 [°C] (제안모델)	오차 [%]
25°C	30	47.426	51.175	7.9%	47.425	0.002%
	50	64.876	68.625	5.8%	64.875	0.002%
	70	82.327	86.075	4.6%	82.325	0.002%
30°C	30	48.676	56.175	15.4%	48.675	0.002%
	50	66.126	73.625	11.3%	66.125	0.002%
	70	83.577	91.075	9.0%	83.575	0.002%
35°C	30	49.926	61.175	22.5%	49.925	0.002%
	50	67.376	78.625	16.7%	67.375	0.001%
	70	84.827	96.075	13.3%	84.825	0.002%

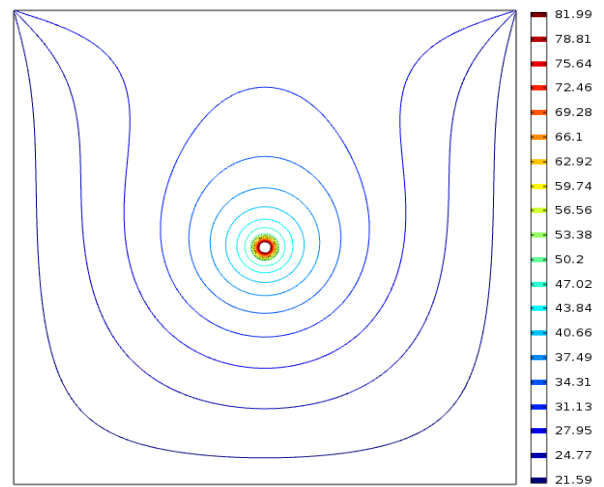


그림 8 지면온도 30°C, 도체손실 70W일 때의 온도 분포
Fig. 8 Temperature distribution (surface temperature 30°C, conductor loss 70W)

출해내야 하며, 이를 위해서는 지면온도와 지중온도 모두 고려한 열 저항 모델을 이용하여 산출하여야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 DTS(Distributed Temperature Sensor) 설치가 어려운 관로식 지중송전선로나 직매식 지중송전선로에서 도체온도를 산출하는 방법에 대해서 연구하였다. 규격 내에서의 허용전류를 산출하기 위해서는 가장 가혹한 조건하에서 도체온도를 산출하고 있으며, 실제 현장에서는 이러한 환경이 조성되는 것은 매우 드문 일이다. 따라서 실제 환경에 고려하여 도체온도를 산

출해야 하며, 산출하기 위해서는 맨홀 내에서는 온도센서를 활용하여 도체온도를 산출하는 방법과 관로 내의 지중송전선로의 도체온도 산출하기 위한 4개의 토양 열 저항이 사용될 열 저항 모델을 제시하였다. 이를 검증하기 위해서 수치해석결과와 비교를 하였으며, 실제 도체온도와 유사한 도체온도 산출하는 것이 가능하다는 것을 보였다. 실제 상황에 맞는 허용전류 산출을 위해서는 정확한 도체온도를 산출하는 것이 중요하며, 실제상황을 고려한 허용전류는 송전용량 증대를 할 수 있으며, 불필요한 선로건설비를 절감해 줄 수 있다.

향후 과도현상을 고려하면 더 큰 송전용량을 순간적으로 얻을 수 있으므로 동적 도체온도 산정방법과 이를 단순하게 표현할 수 있는 DRS 시스템 개발이 요청된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것입니다[과제번호 : R15XA03-36].

References

[1] J.B. Lee, and D.K. Kim, "Research Trend : Thermal Characteristics of Soil for Constructing the Underground Transmission System," World of Electricity, Vol. 37, No. 10, pp. 18-24, 1988, 10.

[2] S.H. Jeong, D.K. Kim, S.B. Choi, et al. , "Development of the Permissible Current-Carrying Capability Calculation Program for Transmission Power Cables in Ducts," KIEE Conference, pp. 340-342, 2001, 7.

[3] <http://www.lscns.co.kr/>

[4] J. H. Lee, C. M. Son, Y. J. Myung, and J. H. Kim, "Dynamic Rating System Development for Underground Transmission Cable Based on Scenario," KIEE Conference, pp. 441-442, 2017, 7.

[5] J. H. Kim, C. M. Son, J. H. Lee, W. K. Ham, J. H. Yeon, and Y. H. Nam, "Study on Developing a New Practical Dynamic Rating System Based on Permissible Current Formula of IEC 60287," KIEE Conference, pp. 227-228, 2017, 7.

[6] Korea Electric Power Corporation, "DS-6210", 2009

[7] J. C. Lee, K. H. Kim, and Y. C. Lee, "Study on the Applying to Soil Thermal Resistivity of Low-Voltage Underground Power Cables," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 26, No. 5, pp. 65-70, 2012, 5.

[8] Y. W. Kang, M. J. Kim, T. I. Jang, J. W. Park, H. S. Park, and J. W. Kang, "A Review Method of Calculation

Results on Cable Ampacity Using the Transformation to Electric Equivalent Circuit from Cable Thermal Circuit," The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 65, No. 5, pp. 738-744, 2016, 5.

저 자 소 개



이 향 범 (Hyang-beom Lee)

1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1998년~현재 송실대학교 전기공학부 교수



이 병 철 (Byung-Chul Lee)

2016년 송실대학교 전기공학부 졸업. 2018년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).



김 정 훈 (Jung-Hoon Kim)

1955년 9월 13일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업(박사). 1981년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수.
Tel : 02-320-1621
E-mail : kimjh@hongik.ac.kr



남 용 현 (Yong-Hyun Nam)

1994년 1월 29일생. 2018년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업. 2018년 동 대학원 전자전기공학과 입학(석사과정)



강 지 원 (Ji-Won Kang)

1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 기전공학과 졸업(공학박사). 1993년~현재 한국전력공사 전력연구원