

## 지중배전케이블의 허용전류용량 증대를 위한 적정 회선배치 및 관로 이격거리 분석

(Analysis on Proper Cable Arrangement and Duct Distance to Maximize Ampacity of Underground Distribution Cable)

조아라\* · 문원식 · 이승재 · 김재철\*\*

(Ara Jo · Won-Sik Moon · Seung-Jae Lee · Jae-Chul Kim)

### Abstract

Power demand has continuously increased with technological and economical development. The load density is also growing in the center of downtown area. In particular, underground facilities have been increased on the purpose of the prevention of urban disasters and pedestrian environment improvement. Based on this situation, the underground space in urban surroundings has gradually decreased because of the limited space. The ampacity of buried cables is affected by various factors such as cable size, soil thermal resistance, burial depth and filling material. The thermal capacity of the facilities is determined by the absorb heat surrounding the cable and the soil. The maximum operating temperature of cable is the highest temperature when the insulator of cable is not damaged in the case of high enough temperature. In this paper, the most effective cabling configuration is suggested using the duct array adjustment. It was also considered to increase the number of cable line. This underground distribution system was simulated by using ETAP(Electrical Transient Analysis Program).

Key Words : Ampacity, Cable Arrangement, Current-Carrying Capacity, Underground Distribution System

### 1. 서 론

기술발전 및 경제성장에 따라 지속적으로 전력수요가 증가하고 있다. 특히, 대도시 및 주변지역에서는 인

구 과밀화 현상에 따른 전력수요의 급증으로 신뢰도 높은 전력공급이 중요하게 여겨진다. 이와 관련하여 도시의 미관, 환경적 요인에 의한 도시재해 방지, 보행 여건 향상 등 안전하고 쾌적한 주거환경을 위해 지중화율이 꾸준히 증가해 왔다. 국외 대도시 중 영국 런던과 프랑스 파리의 경우 각각 2003년, 2006년에 100%의 지중화율을 달성하였다. 국내의 경우 서울은 약 56%의 지중화율을 보이고 있으며, 거점도시를 중심으로 꾸준히 지중화율이 증가하는 추세이다[1].

지속적으로 지중화 사업의 확대가 필요한 상황에서,

\* Main author : Graduate student, Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University  
\*\* Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University  
Tel : 02-824-2416, Fax : 02-817-0780  
E-mail : jckim@ssu.ac.kr  
Received : 2015. 11. 19.  
Accepted : 2016. 1. 4.

도심지 주변의 지하 여유 공간은 점차 줄어들고 있다. 이를 극복하기 위해 기존의 지중설비를 효과적으로 활용하는 방향으로 활발한 연구가 진행되고 있으며, 케이블의 배치, 관로의 배열 등을 변경하여 허용전류 용량을 확보하는 연구가 다양하게 진행되어 왔다 [2-3].

지중에 매설된 케이블의 전류용량은 케이블의 굵기, 토양의 열저항, 케이블 매설깊이, 관로간의 이격거리, 되매움재 등 다양한 요소에 의해 영향을 받는다. 지중 케이블의 허용전류는 케이블에서 흡수하는 열과 케이블 주위를 둘러싼 토양으로 발산되는 열에 대한 설비의 열용량에 따라 결정된다. 케이블의 최대 운전 온도는 높은 온도에서 운전하게 될 경우 절연체가 손상되지 않고 견딜 수 있는 정도를 나타낸다. 허용전류는 정상상태, 과도 또는 비상조건 상태 및 단락과 같은 세 가지 상태로 규정할 수 있으며 본 논문에서는 정상상태의 허용전류만 다루도록 한다. 이때 정상상태 열적 분석이란 부하에 전력을 공급하는 케이블이 최대 한계 온도에 다다를 때 흘릴 수 있는 최대 허용전류를 산정하는 것을 의미한다[4-11].

본 논문에서는 케이블의 허용전류에 영향을 미치는 파라미터 중 관로 내 케이블 회선 배열 및 관로 이격 거리에 따라 전류용량 변화를 분석하고자 한다. 산업 단지의 증설로 부하증가가 필요한 상황에서 한 회선씩 용량을 증가해야 하는 경우, 허용전류를 최대한 확보할 수 있는 케이블 배열을 알아보고자 한다. 특별히 최소한의 굴착만으로 관로의 이격거리를 조정하여 허용전류의 최댓값을 증가하는 방안을 제시하였다. 이를 위해 ETAP으로 지중배전계통을 모의하여 케이블 회선배치 사례를 분석하였다.

## 2. 케이블 허용전류와 회선배열

### 2.1 지중배전케이블의 허용전류 산정

지중케이블의 전류용량이라고 불리는 허용전류(Current-carrying Capacity)는 케이블 설치 및 동작 시 허용온도 이상을 넘지 않는 선에서 통전 가능한 전류량을 의미한다. 이는 대기온도 상에서 허용가능한

도체온도가 주어지는 최대 전류를 결정함으로써 계산될 수 있다[7].

기본적으로 허용전류 계산은 식 (1)과 같이 옴의 법칙과 등가화된 열적 회로를 이용하여 수행한다. 식 (2)는 전류와 AC 저항으로 표현된 도체의 손실을 나타내며, 대기온도에서의 열 저항은 도체손실과 온도상승에 관계가 있으므로 식 (3)과 같이 표현될 수 있다. 따라서 도체의 전류는 식 (4)와 같이 계산이 가능하다. 이때  $\Delta T$ 는 케이블 도체와 주위 토양의 온도 차(°C)이며,  $W_c$ 는 전력 손실(W/m),  $R_{th}$ 은 열 저항(°C/W),  $R$ 은 전기 저항( $\Omega$ ),  $I$ 는 정격전류(A)를 나타낸다[8].

$$\Delta T = W(\overline{R_{th}}) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

$$W_c = I^2 R \text{ [A}^2\Omega\text{]} \quad (2)$$

$$(T_c - T_a) = W_c R_{th} = (I^2 R_{ac}) R_{th} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3)$$

$$I = \sqrt{\frac{\Delta T}{(R)(R_{th})}} \text{ [kA]} \quad (4)$$

위와 같은 이론을 기반으로 다양한 열적 손실, 열 저항 및 파라미터를 이용하여 케이블의 허용전류를 계산할 수 있다. 허용전류를 계산하는 데 대표적으로 사용되는 방법으로는 Neher-McGrath기법[9] 및 IEC 60287이 있으며 국내에서는 IEC 표준을 택하고 있다. IEC-60287-1-1[10]에 근거한 도체 온도 변화 계산법은 식 (5)와 같다.

$$\Delta\theta = (I^2 R + \frac{1}{2} W_d) T_1 + [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 \quad (5)$$

$$+ [I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4) \text{ [K]}$$

여기서  $I$ 는 하나의 도체에 흐르는 전류(A),  $\Delta\theta$ 는 주위의 토양 온도 이상으로 상승된 도체 온도 변화(K),  $R$ 은 최대운전온도에서 도체의 단위 길이 당 AC 저항( $\Omega/m$ ),  $W_d$ 는 도체 주위의 절연체에 대한 단위 길이 당 유전체 손실(W/m)을 의미하며,  $T_1$ 은 하나의 도체와 시스 사이,  $T_2$ 는 시스와 외장 사이 층,  $T_3$ 는 케이블의 외부 서빙,  $T_4$ 는 케이블 표면과 주변 매질사이

의 단위 길이 당 열 저항(Km/W)을 나타낸다. 이때의  $n$ 은 동일한 굵기의 도체이며 동일한 부하에 공급한다고 가정한 경우에 케이블의 통전 가능한 도체의 수이고  $\lambda_1$ 은 해당 케이블 내 모든 도체의 총 손실과 금속 쉬스 손의 비율,  $\lambda_2$ 는 해당 케이블 내 모든 도체의 총 손실과 외장에서 손실의 비율이다[10].

식 (5)의 도체 온도 변화 수식을 이용하여 케이블에 흐르는 허용 가능한 전류량을 도출할 수 있다. 식 (6)은 토양이 균일한 상태라 가정한 경우 IEC 규정에 명시된 식이다[11].

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R [T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]} \right]^{0.5} [A] \quad (6)$$

위 수식을 이루는 모든 구성 요소는 식 (5)와 동일하다. IEC 60287-1-1에서 식 (6)은 주위 토양의 수분함유량 변화에 따른 도체의 온도 변화를 고려하지 않은 경우를 식으로 규정하였다. 식 (5)와 (6)에 근거하여 케이블 도체의 온도 상승을 통해 지중케이블의 허용 전류를 계산할 수 있다. ETAP은 허용전류 계산을 위해 IEC 60287 및 Neher-McGrath 방법을 적용한 NEC 계산법을 제공한다.

## 2.2 관로 내 회선배열과 허용전류

앞 절을 통해 토양 열 저항, 온도 및 매설깊이가 허용전류에 영향을 미치는 주 파라미터임을 확인하였다. 이 세 파라미터의 공통점 중 하나는 케이블의 온도와 밀접한 영향이 있다는 것이다. 즉 케이블의 온도가 높을수록 통전 가능한 허용전류의 양은 줄어든다. 다음의 그림 1은 이와 같은 케이블의 열적 상호작용을 나타낸 것이다.

9개의 관로 내에 3상 케이블 9회선이 인입되어 있는 아래의 그림을 확인해보면, 상하좌우 및 대각 방향까지 열적인 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한 케이블 내부에는 3상 케이블 간의 히스테리시스손, 주위 도체에 의한 열, 각종 손실 및 표피효과에 의한 열 및 주변 관로에 의한 열에 이르기까지 다양한 열적 영향을 주

고받게 된다. 이를 통해 관로의 배열은 열적영향과 직결되는 부분임을 알 수 있으며, 관로 내 회선 배열에 변화를 주었을 때 열적영향의 변화에 따른 허용전류량의 변화를 예측해 볼 수 있다[12].

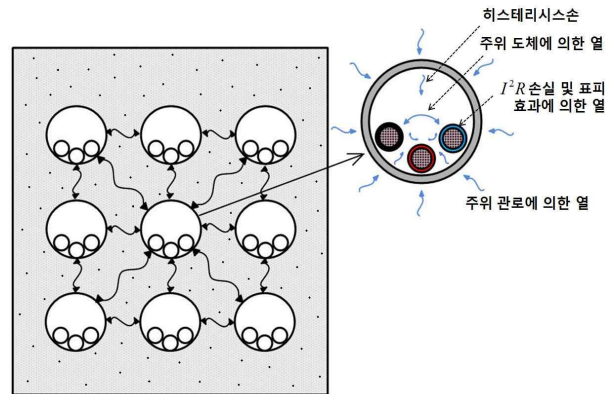


Fig. 1. Mutual heating interaction between cables

## 3. 지중케이블 회선배열 및 관로 이격 거리 조정 모델

### 3.1 지중배전시스템 상황모의

본 절에서는 산업단지가 건설 중인 상황임을 감안할 때, 추후 산업단지 부하증가에 따라 회선증설이 필요함을 가정하였다. 부하증가 시 허용전류 용량을 증가시키는 방안으로는 전압을 증가시키는 방법, 전류용량을 증대시키는 방법, 케이블 회선증가 등을 고려할 수 있지만 그 중 9관로 6회선에서 9관로 8회선까지 필요에 따라 한 회선씩 증가시키는 방안을 채택하여 사례 연구를 진행하였다.

관로포설을 위한 시공절차에 따르면 굴착을 한 후 관로를 포설하고 관 간격을 맞추어 케이블을 인입하게 된다. 회선 증설을 모의할 때에는 9개의 관로 중 6개의 관로에 먼저 6회선이 인입되는 상황을 가정한 후, 부하증가 시 한 회선씩 증설함을 모의하였다. 이를 위해 그림 2와 같이 배전계통을 구성하였다. 해당 계통은 전형적인 22.9kV 계통으로서 두 대의 변압기로 구성되어 있다. 본 계통은 표 1과 같은 상세 파라미터를 적용하였고, 부하와 연결된 지중관로시스템은 그림

3과 같이 구성하였다. 기본모델의 관로는 관 간격 유지가 용이한 PVC SCH 80 (ANSI 규격) 직관을 사용하였다. 해당 그림은 9관로 6회선에서 8회선까지 증가한 경우의 모델을 나타낸 것이다[13].

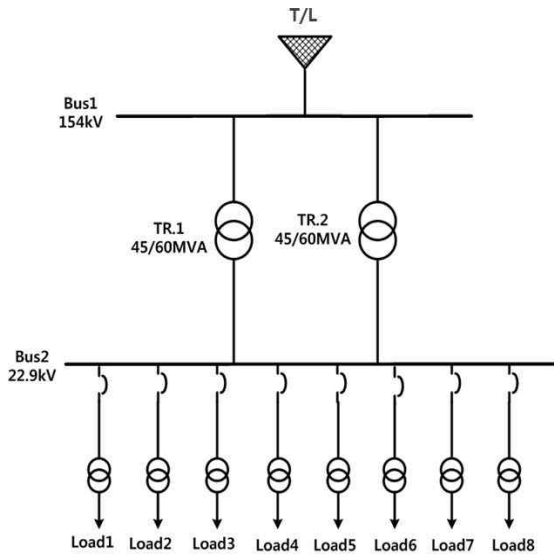


Fig. 2. 22.9kV distribution system schematic

Table 1. Distribution system model parameters

전 원	
영상 임피던스 (%)	0.257 + j1.336
정상, 역상 임피던스 (%)	0.072 + j0.757
공급전압 (kV)	154
배전용 변전소 주변압기	
정격용량 (MVA)	45/60
누설 임피던스 (%)	j11
케 이 블	
케이블 용량 (kV)	25
절연강도 (%)	133
케이블 굵기 (mm <sup>2</sup> )	325

내선규정 저압전기설비 제 5-52부 배선설비의 허용전류 규격에 따르면, 정상상태에서 도체에 흐르는 전류가 절연물의 온도상승한도를 넘지 않아야 한다. 최

고사용온도는 절연 형태에 따라 달라지며, 가교 폴리 에틸렌(XLPE)과 같은 열경화성 물질 또는 에틸렌프 로필렌 고무 혼합물(EPR)의 경우 도체의 온도를 90℃로 규정하고 있다. 이 규정에 의거하여 본 시뮬레이션에서도 주위온도가 30℃인 경우 최대 도체 온도를 90℃로 설정하여 허용전류를 산정하였다. 이때의 허용전류는 장시간에 걸쳐 통전할 수 있는 전류로 주위 조건이 완전히 포화 안정된 상태에서 케이블이 허용하는 전류를 나타내는 값이다[14].

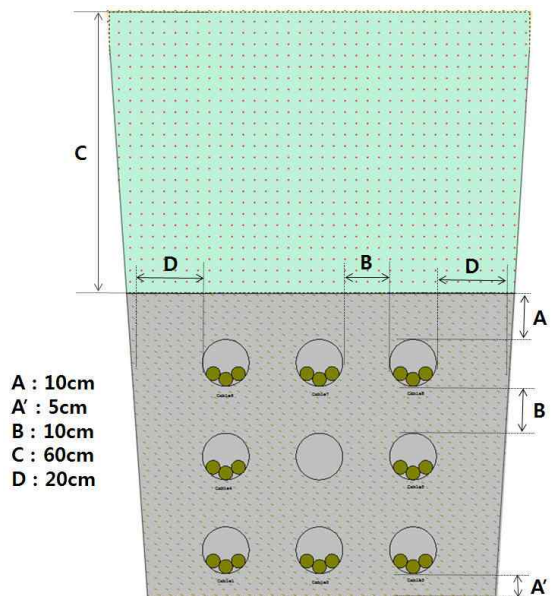


Fig. 3. Basic model (8 lines of 9 ducts)

### 3.2 관로 내 회선배치와 허용전류

지중케이블의 회선배치에 따른 변화를 보기 위해 지중관로의 굴착이 이미 완료된 상황을 가정한다. 국내 시공표준에 따라 9개의 관로를 매설 완료한 상태에서 3상 케이블 6회선을 인입하는 상황을 기준으로 한다. 이때 관로 내에 인입되는 3상(A, B, C상) 케이블을 한 회선으로 취급하여 회선을 배치한다. 회선의 배열이 변경될 때 A, B, C상이 한 관로에 인입되는 것은 변경하지 않으며 각 관로에 3상 케이블의 인입 여부만을 변경하여 사례연구를 수행한다. 즉 지중케이블의 종류, 지중관로 굴착규모, 회선 수 등 모든 파라미터는

동일하되 지중케이블의 회선 배치만 달리하여 허용전류 변화를 살펴본다.

그림 4는 9관로 6회선의 허용전류를 분석한 예이다. 그림 4의 오른쪽 전류량 중 401A, 330A, 359A와 같이 숫자로 표기된 부분은 3상 케이블에 흐를 수 있는 최대 용량을 의미하며, 중앙에 Empty로 표기된 부분은 케이블이 인입되지 않은 빈 관로를 의미한다. 회선의 배열만을 달리하여 6관로의 총 허용전류 합을 구해본 결과를 식 (3-1)에 나타내었다.

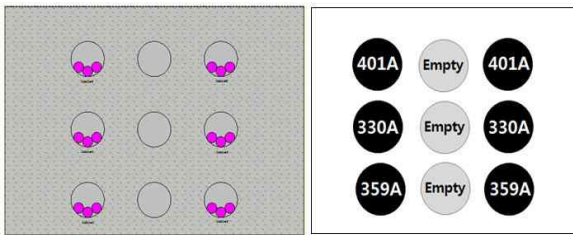


Fig. 4. Ampacity analysis example

$$I_{total, d=10} = \sum_{i=1}^6 I_{i, 3\phi} = 2180 [A] \quad (3-1)$$

여기서  $I_{total, d=10}$ 는 관로 간격이 10cm인 케이블의 총 허용전류(A)이고,  $I_{i, 3\phi}$ 는 i번째 3상 케이블의 허용전류(A)를 정의한다. 이와 같이 케이블 배치에 따라 허용전류의 변화를 분석하여 동일한 조건 내 최대 허용전류 용량을 확보할 수 있는 배치를 찾고자 한다.

## 4. 사례연구

### 4.1 9관로 6회선 회선배열

일반적으로 관로와 관로 사이의 간격은 10cm를 사용한다. 그림 5는 일반적인 지중배전선로 매설 시 관로 굴착 단면도를 나타낸 것이다. 회선배치별 사례 구분을 위해 그림 5의 관로 번호를 이용하여 서술하였다. 9관로 6회선 배열 시, 6회선 모델의 최적 배치를 선정하기 위해 9공 정방 배열 모델에서 두 개의 관로를 순서대로 제외하면서 사례를 구분하면 가능한 모

든 사례를 고려할 수 있다.

5번 관로가 비어있는 상태에서 1, 2회선 제거, 1, 3회선 제거, 1, 4회선 제거, 1, 5회선 제거의 순서로 케이블의 회선 배열을 나누어 보면 총 28가지의 Case를 얻을 수 있다. 이때 회선배치에 따른 관로별 허용전류를 살펴봤을 때 1열에 위치한 1번, 4번, 7번 관로의 경우 3번, 6번, 9번 관로와 대칭적이다. 따라서 28가지 사례 중 좌우가 대칭인 경우의 허용전류는 같은 값으로 취급할 수 있다.

표 2는 좌우대칭인 사례를 하나로 간주하여 9관로 6회선의 케이블 회선 배열을 나타낸 것이다. 총 28가지의 사례 중 좌우가 대칭인 12가지 경우를 제외한 16가지의 사례를 그림으로 나타내었다. 관로 내에 'Empty'로 표기된 관로가 케이블을 인입하지 않은 여유관로를 의미하고, 그 외의 관로는 3상 케이블이 포설된 관로를 뜻한다.

Table 2. Cable line placement of 6 lines 9 ducts

9관로 6회선 CASE 분류			
Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
Case 9	Case 10	Case 11	Case 12
Case 13	Case 14	Case 15	Case 16

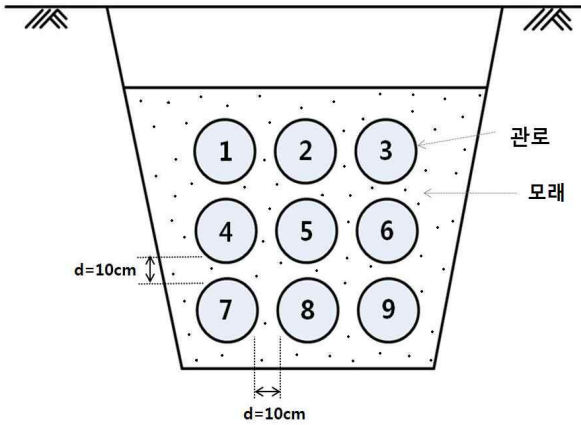


Fig. 5. Duct cross section of 9 lines

위의 케이블 회선배치를 바탕으로, 3장에서 의 계통 모델을 이용한 지중배전시스템 분석을 통해 회선배치 별 허용전류를 산정하였다.

허용전류 산정 결과를 살펴보면, 4번, 5번, 8번 관로를 비운 Case 13의 경우 2184A로 가장 높은 허용전류 총합을 나타내었다. 가장 낮은 허용전류 총합을 갖는 배열은 1번, 3번, 5번 관로를 비운 Case 2의 경우로 최댓값과 80A의 차이를 보였다. 즉 모든 조건이 동일한 경우에 회선 배치만 달리하였을 때 허용전류 총합이 약 3.8% 상승됨을 확인할 수 있다.

각 관로별 허용전류량을 비교하여 1공에 해당하는 최댓값을 산정한 결과, 2번, 4번, 5번 관로를 비운 Case 8의 경우 7번 관로의 최대 허용전류가 424A로 가장 높은 값을 보였다. 반면, 5번, 7번, 9번 관로를 비운 Case 16의 경우 6번과 8번 관로에 각각 382A로 가장 높은 값을 보였다. 이는 Case 8과 비교해 볼 때 약 11% 정도 감소된 값이다. 즉 동일한 상황에서 회선의 배치만 변경하였을 때, 케이블 회선의 인입 위치에 따라 관로별 최대허용전류량이 상당한 폭으로 차이가 남을 알 수 있다.

#### 4.2 회선증설에 따른 적정 회선배치

본 절에서는 부하증가로 인해 해당관로의 용량 증대가 요구될 경우, 9관로 7회선 및 9관로 8회선 증설에 따른 적정 회선배치를 분석하고자 한다.

Table 3. The line increase of Case 13

6회선	7회선	8회선

Table 4. The line increase of Case 8

6회선	7회선	8회선

9관로 6회선을 사용할 경우 41절의 사례분석을 통해 얻은 결과를 사용하면 동일한 조건 내에 최대의 허용전류를 확보할 수 있다. 표 3은 9관로 6회선 모델 중 허용전류 총합이 최대인 경우인 Case 13에 대하여 한 회선씩 증가할 때 가능한 사례를 나타낸 것이다. 표 4는 한 관로에 흐르는 전류가 최대인 경우인 Case 8에 대하여 회선증가에 따른 배치를 나타내었다. 이때 (a) 또는 (b) 중 한 배열을 택하여 8회선을 구성하게 된다.

시뮬레이션 결과 Case 13에서는 7회선 (a)의 총 허용전류가 2358A, (b)가 2375A로 (b)의 전류용량이 더 큰 것을 확인할 수 있었다. Case 8에서는 7회선 (a)의 총 허용전류가 2375A, (b)가 2360A로 (a)의 회선구성이 유리함을 알 수 있다. 이때 Case 13의 (b)와 Case 8의 (a)는 같은 구성이므로, 9관로 6회선에서 7회선, 8회선으로 한 회선씩 증가 할 때 가장 효율적인 구성은 4번, 5번 관로를 비운 배열임을 알 수 있다.

#### 4.3 이격거리 조정에 따른 허용전류 분석

본 절에서는 9관로 8회선의 이격거리를 조정하여 새로운 관로배열을 제안한다. 이 경우 여유 관로가 중앙의 5번 관로뿐이기 때문에 추후 부하증가에 따른 관로 증설에 위험 요건을 갖게 된다. 따라서 굴착 구간을 최소한으로 하면서 관로 간 이격거리만을 조정하여 관로의 최댓값을 상향하는 방안을 제시하였다. 그림 6은 그림 5와 비교하여 관로 상단부의 이격거리를 조정한 것이다.

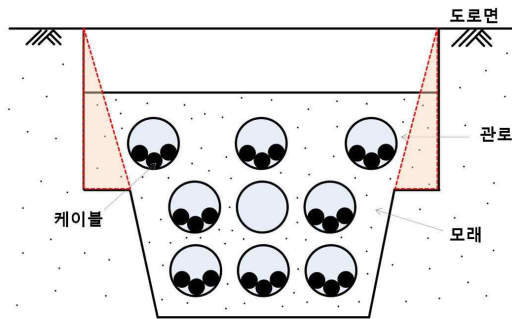


Fig. 6. Comparison of the digging area between previous and suggested duct

Table 5. Ampacity analysis depending on duct distance of upper row both sides

	이격거리 10cm	이격거리 30cm
관로 별 허용 전류		
총합	2559A	2641A
최댓값	366A	417A
	이격거리 20cm	이격거리 40cm
관로 별 허용 전류		
총합	2598A	2685A
최댓값	394A	437A

표 5는 상단 양측 관로의 이격거리를 10cm씩 조정하여 허용전류의 8관로 총합 및 단일 관로 최댓값을 나타낸 것이다. 앞 장의 상세관로 허용전류 분석 사례를 통해 상단에 위치한 관로가 하단에 위치한 관로 대비 허용전류 값이 큰 것을 알 수 있다. 이는 허용전류가 토양의 도전성에 비례하는 특성과 관계된다. 도전성이 높으면 더 많은 열을 발산하게 되므로 케이블의 허용전류 값이 증가하게 된다[15]. 즉 토양의 매설 깊

이가 깊어질수록 도전성이 감소하므로 열 발산을 덜 하게 되어 허용전류는 상단에 위치한 관로보다 더 낮아진다. 따라서 관로 최댓값을 상향하기 위해서는 상단부에 위치한 관로의 이격거리를 조정하는 것이 유리하며, 이는 굴착영역 최소화에도 유리한 조건이다.

## 5. 결 론

본 논문은 지중관로 시스템 내에서 지중배전 케이블의 허용전류 용량을 증대하는 방안에 관해 연구를 진행하였다. 지중 케이블의 특성 상 주위 관로의 영향과 되메움재 및 토양의 열 저항 등에 통전 가능한 전류량이 영향을 받게 된다. 이 파라미터 중 케이블 회선배열에 따른 영향을 분석하기 위해, 지중관로 내 회선을 조정하여 9관로 6회선의 적정 회선 배치를 알아보고, 부하 증가에 따라 9관로 7회선 및 9관로 8회선으로 증가해야 하는 경우 효율적인 배치를 알아보기 위해 사례분석을 하였다. 이를 통해 9관로 6회선에서 총 허용전류량이 가장 큰 배열과 한 관로에 흐르는 전류량이 최대인 배열을 각각 확인하였고, 각각 한 회선씩 회선증가가 필요한 경우 총 허용전류 합이 최대인 배열을 확인하였다. 또한 관로 최댓값을 상향하기 위해 관로의 이격거리를 조정하여 허용전류 변화를 분석하였다. 이격거리를 10cm에서 40cm까지 변화시켜 본 결과 허용전류 최댓값이 366A에서 437A로 약 19% 상향됨을 알 수 있었다. 이 결과는 향후 허용전류 상향 적용이 필요한 경우 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2015 추계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

### 감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 20134010200570)이며, 서울 데이터 시스템의 지원으로 ETAP 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였습니다.

## References

- [1] A study of promoting reasonable underground projects of overhead lines, Korea Industrial Development Institute, Ministry of Knowledge Economy, pp. 3-18, Aug. 2011.
- [2] Fabio Freschi and M. Tartaglia, "Power Lines made of Many Parallel Sing-Core Cables: A Case Study", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 49, No. 4, July/August. 2013.
- [3] Davoud A. Zarchi, B. Vahidi and M. M. Haji, "Optimal configuration of underground cables to maximise total ampacity considering current harmonics", IET Generation, Transmission & Distribution, May. 2013.
- [4] Francisco de Leon, "Major Factors Affecting Cable Ampacity", Power Engineering Society General Meeting, IEEE, Montreal, Que., June. 2006.
- [5] Y. Wang, R. Chen, J. Li, S. Gzybowski and T. Jiang, "Analysis of Influential Factors on the Underground Cable Ampacity", Electrical Insulation Conference, IEEE, Maryland, June. 2011.
- [6] A. E-Faraskoury, S. Ghoneim, A. K. Alaboudy, R. Salem and S. A. Ward, "Practical and Theoretical Investigation of Current Carrying Capacity of Underground Cables", AEES, Vol. 1, No. 3, 2012.
- [7] Ramasamy Natarajan, Computer-Aided Power System Analysis, Ch. 11 Cable Ampacity Analysis, Marcel Dekker Inc. 2002.
- [8] J. Williams, Deep Cable Ampacity : Guidelines for Calculating Ampacities of Cables Installed by Guided Boring, EPRI, 3-1, Dec. 1997.
- [9] J. H. Neher and M. H. McGrath, "The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable System", AIEE Trans., Part III, Vol. 76, pp. 752-772, 1957.
- [10] IEC 60287-1-1 ed2.0: Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses - General. Copyright ©International Electrotechnical Commission (IEC) Geneva, Switzerland, www.iec.ch, 2006.
- [11] Ludvig Lindstrom, "Evaluating Impact on Ampacity according to IEC-60287 regarding Thermally Unfavorable Placement of Power Cables", Master's thesis report of Royal Institute of Technology, Stockholm, 2011.
- [12] Wael Moutassem, "Configuration Optimization of Underground Cables inside a Large Magnetic Steel Casing for Best Ampacity", Doctor's thesis of Toronto University, 2010.
- [13] Joon-Ho Choi, K. S. Ro and J. C. Kim, "The Online Protective Coordination Schemes of the Distribution Systems with Distributed Generation", Journal of KIIEE, Vol. 21, No. 3, pp. 132-141, Mar. 2007.
- [14] Extention regulation, low voltage electrical equipment-Part 5-52, KS C IEC 60364-5-52, Ministry of Knowledge Economy, Korean Agency for Technology and Standards, www.kats.go.kr, 2012.
- [15] A. Mahmoudi, S. Kahourzade and R. K. Lalwani, "Computation of Cable Ampacity by Finite Element Method under Voluntary Conditions," Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol. 5, No. 5, pp. 135-146, 2011.

## ◇ 저자소개 ◇



### 조아라(趙아라)

1987년 5월 9일생. 2014년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

E-mail : arajo@ssu.ac.kr



### 문원식(文原植)

1982년 2월 15일생. 2009년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 2011년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

E-mail : chriswsmoon@ssu.ac.kr



### 이승재(李承宰)

1975년 9월 30일생. 2002년 광운대학교 전기공학과 졸업. 현재 숭실대학교 전기공학부 석사과정. 조엔지니어링 계통기술팀 근무. 발송배전기술사.

E-mail : mail@joeng.co.kr



### 김재철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2015년 한국조명·전기설비학회 회장. 현재 숭실대학교 부총장, 전기공학부 교수.

E-mail : jckim@ssu.ac.kr