

## Complementary Calculation of Current Carrying Capacity for Bare Overhead Conductors

孫 洪 寬\* · 李 殷 雄\*\*  
Hong-Kwan Sohn · Eun-Woong Lee

**Abstract** - Many standards have published for calculating of current carrying capacity for bare overhead conductors. Although these standards use the same basic heat balance concept, they use different approaches to calculate current carrying capacity. This paper looks at the four approaches used to calculate individual heat balance terms, at the overall impact of these terms on the current carrying capacity. And this paper is proposed to the selection of proper standard and AC resistance within a country conditions for calculating the current carrying capacity of bare overhead conductors. So current carrying capacities are proposed to some of conductors.

**Key Words** : 가공선로, 송전선로, 허용전류, 전류용량, 교류저항

### 1. 서 론

가공송전선의 허용전류는 기온, 풍속, 일사량의 기상조건에 대해 과거의 최대치, 측정결과 등을 기초로 최악조건을 정하고, 그 최악조건에서 설비를 사용하는 동안 열에 의한 전선의 기계적 강도 저하율이 10%가 되는 전선의 연속허용온도에서의 전류용량을 계산한다. 이와 같이 허용전류 용량을 구하는 방법은 1949년 일본의 전기협동연구회에서 제안한 일본 전선공업회의 규격(JCS)이 있다. 이 일본의 계산방식 및 조건이 대부분 그대로 국내에서 적용되고 있다. 그러나 각종 규격 및 기준의 국제화를 추진함에 따라 허용전류의 산정방식도 국제화해야 할 시점이라고 판단되며, 일본도 그 필요성을 인정하여 전기 관련 기준의 국제화를 검토 중에 있다[1].

1965년 일본 전력중앙연구소의 연구결과에 의하면 기상조건 지역의 지역별 차이를 고려하여 송전선로를 설계할 것을 제안하였으나 운영상의 어려움으로 적용되지는 않고 있고, 특수한 선로에만 실시간의 기상데이터를 수집하여 가공선의 허용전류를 관리하는 것이 보고되어 있다[1]. 또한 최근에는 기온, 풍속, 풍향 등의 기상조건에 대한 발생빈도분포 및 송전선의 조류패턴으로부터 전선온도분포를 구하고 전류용량을 확률론적으로 구하는 방법도 소개되고 있다.[1] 그러나 대부분의 선로에 대해서는 최악조건에서의 허용전류를 그 전선의 최대전류용량으로 설계하는 것이 일반적이기 때문에, 본 논문에서도 최악조건에서의 허용전류 계산방식과 각종 허용전류의 계산법에 대하여 검토하였다.

정상상태의 허용전류 산정에 대한 주요 규격은 다음과 같은 것들이 있다.

- JCS 제374호(일본 전선공업회 규격) [1]
- CIGRE WG 22-12 [2]
- ANSI/IEEE 738(1993) (미국) [3]
- IEC-1597 [4]

\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 先任研究員

\*\* 終身會員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 9月 12日

最終完了 : 2002年 2月 14日

그런데 국내에서 적용하고 있는 JCS방식은 지나치게 간략화 되어 있어 허용전류에 영향을 미치는 요소들을 제대로 반영하지 못하고, 또한 국내에서 사용중인 전선의 규격이 미국 및 유럽의 규격과 많은 차이가 있기 때문에 IEEE 및 IEC의 교류저항에 관한 Data를 그대로 적용할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 상기의 4가지 방식에 대한 허용전류 및 교류저항 산출방식을 비교·검토 및 보완하여, 우리나라에 가장 적합한 방식을 제시하였다. 또한 각 방식 및 제시한 안으로 계산한 결과와 한전 송전설계기준에 규정된 전선종류별 허용전류를 비교, 검토하여 제시안의 타당성을 확인하였다.

### 2. 허용전류의 계산

가공송전선의 허용전류는 그림 1과 같이 전류에 의한 전선의 발열 및 일사량에 의한 전선의 흡수열과 대류 및 복사에 의한 전선표면으로부터의 방사열이 평형을 이룰 때의 전선온도가 전선재료의 조직변화 또는 인장특성이 규정치(최고허용온도)로 될 때의 전류크기로 결정하고 있다. 전선의 온도계산에는 전선 재료의 성능 및 조건 외에 주위조건(기온, 풍속, 일사량 등)의 적정한 설정이 중요하다.

전류와 전선온도의 관계에는 내부 및 외부 흡수열과 외부로의 방사열이 평형을 이룬 정상상태에 대한 허용전류와 열평형에 도달하기 이전의 과도상태에 대한 허용전류가 있다. 본 연구에서는 정상상태의 전류온도특성에 의한 허용전류의 계산만을 검토하였다.

#### 2.1 열평형식

##### 2.1.1 JCS, IEEE, IEC

JCS, IEEE, IEC에서 채용하고 있는 전선의 온도는 전류에 의한 발열 및 일사량에 의한 흡수열과 방산되는 열의 평형식 (1)을 기본으로 하고 있다.

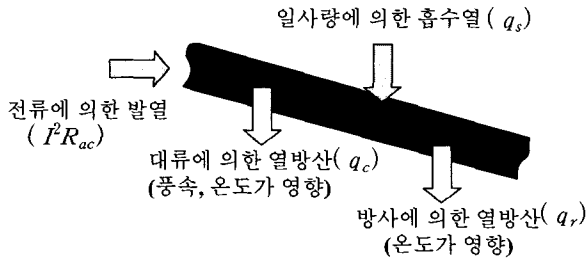


그림 1 전선에 발생하는 열의 흐름  
Fig. 1 The flow of heat in conductor

$$I^2 R_{ac} + q_s = q_r + q_c \quad (1)$$

- $I^2 R_{ac}$ : 전류에 의한 발열 [W/m]
- $R_{ac}$ : 사용온도에서 전선의 교류저항 [ $\Omega$ /m]
- $q_s$ : 일사에 의한 흡수열 [W/m]
- $q_r$ : 방사(복사)에 의한 열방산 [W/m]
- $q_c$ : 대류에 의한 열방산 [W/m]

### 2.1.2 CIGRE

식(1)의 열평형식에 코로나에 의한 발열, 증발에 의한 열방산을 고려하여 식(2)를 채용하고 있으나, 코로나에 의한 발열은 정상상태에서는 고려할 필요가 없으며, 증발에 의한 냉각은 일반적으로 허용전류의 계산에서는 고려하지 않기 때문에 열평형식은 기본적으로 타 규격과 동일하다고 볼 수 있다.

$$I^2 R_{ac} + q_s + q_f = q_r + q_c + q_w \quad (2)$$

- $q_f$ : 코로나에 의한 발열 [W/m]
- $q_w$ : 증발에 의한 열방산 [W/m]

## 2.2 일사에 의한 흡수열

### 2.2.1 JCS 및 IEC

현재 일본 및 IEC에서 적용하고 있는 일사에 의한 흡수열은 식(3)과 같다.

$$q_s = \alpha_s D W_s \quad [W/m] \quad (3)$$

- $W_s$ : 일사량 [ $W/m^2$ ]
- $D$ : 전선의 직경 [m]
- $\alpha_s$ : 흡수율

여기서 전선은 태양광선과 직각으로 놓여 있다고 가정하고 있으며, 일사량은 JCS의 경우 관측결과에 의해 일률적으로  $1,000 W/m^2$ 를 적용하고, IEC의 경우 특별히 규정하고 있지는 않지만 참고치로서  $900 W/m^2$ 를 예로 들고 있다.

### 2.2.2 CIGRE

CIGRE에서는 일사에 의한 흡수열 산출을 2가지 방식으로 제시하고 있는데, 하나는 총일사량(global solar radiation)에 의한 방법이고, 또 하나는 직접 및 산란된 일사량(direct and diffuse solar radiation)에 의한 방법이다. 총일사량에 의한 방식은 JCS 및 IEC의 적용식인 식(3)과 같으며, 직접 및 산란 일사량에 의한 방법의 특징은 다음의 2가지를 들 수 있다

① 도체가 받는 광량으로는 태양으로부터의 직접일사, 대기에 의한 산란일사 및 지표로부터의 반사광을 고려하고 있다.

② 도체가 받는 광량의 산출은 년일수, 위도, 태양 및 송전선의 방위각을 변수로 한 산출식을 제시하고 있다. 이로부터 임의의 지점 및 시각의 受光량을 구한다.

흡수열의 계산은 식(4)와 같다.[2]

$$q_s = \alpha_s D \left[ I_D \left( \sin \theta + \frac{\pi}{2} F \sin H_s \right) + B \right] \quad (4)$$

$I_D$ : 태양광선에 직각 표면에 대한 직접일사량 [ $W/m^2$ ]

$$I_D = 1280 \sin H_s / (\sin H_s + 0.314)$$

$H_s$ : 태양고도 [ $^\circ$ ]

$$H_s = \arcsin [ \sin \phi \sin \delta_s + \cos \phi \cos \delta_s \cos Z ]$$

$\phi$ : 위도 [ $^\circ$ ]

$\delta_s$ : 태양의 지축에 대한 경사각 [ $^\circ$ ]

$$\delta_s = 23.4 \sin [ 360^\circ (284 + N') / 365 ]$$

$N'$ : 년일수. (6월 10일은 161)

$Z$ : 태양의 시간각 [ $^\circ$ ], (시간당  $15^\circ$  증감)

$\theta$ : 도체의 축에 대한 태양광선의 입사각 [ $^\circ$ ]

$$\theta = \arccos [ \cos H_s \cos (\gamma_s - \gamma_c) ]$$

$\gamma_s$ : 태양의 방위각 [ $^\circ$ ]

$$\gamma_s = \arcsin [ \cos \delta_s \sin Z / \cos H_s ]$$

$\gamma_c$ : 송전선의 방위각 [ $^\circ$ ]

$F$ : 지면의 반사율 또는 반사계수

$$B = I_d (\pi/2) (1 + F)$$

$I_d$ : 수평인 평면에 대한 산란일사량 [ $W/m^2$ ]

또한 해발고도에 의한 보정계수를 별도로 고려하고 있으며, 직접일사량은 통과하는 공기의 밀도, 태양고도 및 주변의 공기상태에 따라 다르지만 정상상태의 전선온도 결정에서는 이를 무시하고 있다.

### 2.2.3 IEEE

IEEE에서 제시하고 있는 일사에 의한 흡수열 계산방식(5), (6)은 다음과 같은 특징이 있다.

$$q_s = \alpha_s W_s \sin(\theta) A' \quad (5)$$

$$\theta = \arccos [ \cos(H_s) \cos(\gamma_s - \gamma_c) ] \quad (6)$$

$A'$ : 도체의 단위길이당 투영면적 [ $m^2/m$ ]

① 송전선에의 태양광 입사각을 고려하고 있으며, 일사량의 산출에는 특정일시(6월10일)의 태양고도 및 방위각을 위도별로 표시한 표 및 수식을 사용하여 세계 각 지역의 해발에 따른 특정일시의 일사량을 계산할 수 있도록 하고 있다.

② 공기의 상태(맑은 공기, 공업지대의 공기)에 따른 일사량의 차이를 고려하고 있다.

또한 해발고도에 의한 보정계수를 식(7)과 같이 고려하며, 해발고도가 높을수록 일사량이 커지게 된다.

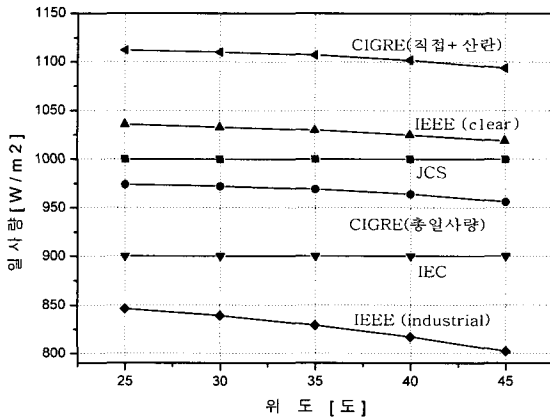
$$K_{solar} = 1 + 1.148 \times 10^{-4} H_e - 1.108 \times 10^{-8} H_e^2 \quad (7)$$

$H_e$ : 해발고도 [m]

### 2.2.4 비교·검토

JCS 및 IEC는 총일사량에 의한 방식을 사용하여 각각  $1,000 [W/m^2]$  및  $900 [W/m^2]$ 의 고정일사량을 적용하고 있으

나, CIGRE 및 IEEE는 태양고도, 위도, 입사각, 해발고도 등을 이용하여 일사량을 산출하는 방식을 채택하고 있다. 특히 CIGRE는 지표면으로부터의 산란일사량을 고려할 수 있도록 되어 있으나 공기 중의 습분에 의한 산란도 변화와 지표면의 반사계수 설정의 어려움 등으로 인해 이를 전류용량의 산정에 적용하는 데는 무리가 있다. 그림 2는 각 규격별 위도에 따른 일사량을 계산한 결과로서 위도 및 공기의 상태에 따라 일사량이 변화한다는 사실에 근거하면 JCS 및 IEC 방식보다는 CIGRE 방식 중 총일사량에 의한 방식 또는 IEEE 방식이 더 합리적이라고 판단된다.



(6월10일, 정오, 동서선로, 해발 0m, 청명, 태양광산란 무시)

그림 2 총일사량의 비교

Fig. 2 Comparison of global solar heat

### 2.3 방사에 의한 열방산

방사에 의한 열방산은 모든 규격이 표현방식만 약간 다를 뿐 Stefan-Boltzmann의 법칙에 따라 식(8)과 같이 동일한 방식을 적용하고 있다.

$$q_r = 17.8 D \epsilon \left[ \left( \frac{273 + t_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + t_a}{100} \right)^4 \right] \quad (8)$$

- $q_r$  : 단위길이당 방사에 의한 열방산량 [W/m]
- $\epsilon$  : 방사율
- $t_a$  : 주위온도 [°C]
- $t_c$  : 도체표면의 온도 [°C]

### 2.4 대류에 의한 열방산

열방산에 영향을 주는 대류에는 바람에 의한 강제대류와 바람이 없는 경우의 자연대류가 있는데, 이 2가지 대류에 의한 열방산을 산출하여 큰 값을 적용한다. 그리고 강제대류는 저풍속영역과 고풍속영역으로 구분한다.

#### 2.4.1 JCS

강제대류 및 자연대류에 의한 열방산량  $q_{cl}$  및  $q_{cn}$ 은 Rice의 실험식[1] 및 McAdams의 실험식[1]으로부터 각각 식(9) 및 (10)과 같이 산출한다.

$$q_{cl} = \frac{0.572 \pi}{\left( 273 + \frac{t_c + t_a}{2} \right)^{0.123}} \sqrt{v d} (t_c - t_a) \quad [W/m] \quad (9)$$

$v$  : 평균풍속 [m/sec]

$d$  : 전선직경 [cm]

$$q_{cn} = 0.035 \pi d^{0.75} (t_c - t_a)^{1.25} \quad [W/m] \quad (10)$$

#### 2.4.2 CIGRE

CIGRE에서 허용전류 계산에 사용되는 강제대류에 의한 열방산은 식(11)로 산출한다.

$$q_c = \pi \lambda_f Nu (t_c - t_a) \quad [W/m] \quad (11)$$

$\lambda_f$  : 공기의 열전도율 [W/m · K]

$$\lambda_f = 2.42 \times 10^{-2} + 7.2 \times 10^{-5} \times \frac{t_c + t_a}{2}$$

$Nu$  : Nusselt Number

$$Nu = B_1 (Re)^n$$

Re	표면	$B_1$	$n$
$100 \leq Re \leq 2,650$	연선전체표면	0.641	0.471
$2,650 < Re \leq 50,000$	연선 $R_f \leq 0.05$	0.178	0.633
$2,650 < Re \leq 50,000$	연선 $R_f > 0.05$	0.048	0.800

$Re$  : Reynolds number

$$Re = \rho_r v D / \nu$$

$\rho_r$  : 상대공기밀도

$$\rho_r = \rho / \rho_o = \exp(-1.16 \times 10^{-4} H_o)$$

$\rho$  : 대상 해발고도에서의 공기밀도

$\rho_o$  : 해면에서의 공기밀도

$\nu$  : 동점도

$$\nu = 1.32 \times 10^{-5} + 9.5 \times 10^{-8} \times \frac{t_c + t_a}{2}$$

$R_f$  : 전선표면조도

$$R_f = d / [2(D - 2d_1)]$$

$d_1$  : 전선의 외층소선경 [m]

풍향각을 고려하는 경우에는 식(12) 또는 (13)을 이용하여 열방산량을 구한다. 이때 풍향각  $\theta$ 는 전선에 대해 직각방향을  $0^\circ$ 로 한다.

$$Nu = Nu_{\theta=0} [0.42 + 0.58 (\cos \theta)^{0.90}] \quad (12)$$

$(0^\circ \leq \theta \leq 66^\circ)$

$$Nu = Nu_{\theta=0} [0.42 + 0.68 (\cos \theta)^{1.08}] \quad (13)$$

$(66^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$

또한 저풍속 (0.5 m/sec 미만)의 경우에는 다음에 의한 3개의  $Nu$ 를 계산하여 가장 큰 값을 선택하여 적용한다.

① 우세풍향이 없는 경우  $45^\circ$ 의 풍향각을 가정

$$Nu = Nu_{\theta=0} [0.42 + 0.58 (\cos 45^\circ)^{0.90}] = 0.846 Nu_{\theta=0}$$

② 보정 Nusselt Number  $Nu_{cor}$ 을 사용

$$Nu = Nu_{cor} = 0.55 Nu_{\theta=0}$$

③ 자연대류에 대한  $Nu$ 를 사용

$$Nu = A_2 (G_r \cdot P_r)^{m_2} \quad (14)$$

$G_r$  : Grashof Number

$$G_r = D^3 (t_c - t_a) g / [(t_c + t_a)/2 + 273] v^2$$

$g$  : 중력가속도, 9.807 [m/sec<sup>2</sup>]

$P_r$  : Prandtl Number

$$P_r = c\mu/\lambda_f = 0.7154 - 2.5 \times 10^{-4} \times \frac{t_c + t_a}{2}$$

c : 일정 압력에서 공기의 고유열용량 [J/kg·K]  
 μ : 공기의 動粘性率 [kg/m·sec]

Reynolds number $G_r \cdot P_r$	$A_2$	$m_2$
$100 \leq G_r \cdot P_r < 10,000$	0.850	0.188
$10,000 \leq G_r \cdot P_r < 1,000,000$	0.480	0.250

### 2.4.3 IEEE

IEEE에서는 강제대류에 대해서 McAdams의 실험식에 의해 저풍속영역에서의 열방산량  $q_{cl1}$ 은 식(15)로, 고풍속영역에서의 열방산량  $q_{cl2}$ 는 식(16)으로 계산하고, 자연대류에 의한 열방산량  $q_{cl}$ 은 ALCAN 연구소의 실험식 (17)로 계산하여 이들 중 가장 큰 값을 적용한다.

$$q_{cl1} = \left[ 1.01 + 0.0372 \left( \frac{D_1 \rho_f v}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] \cdot k_f \cdot (t_c - t_a) \quad (15)$$

$$q_{cl2} = 0.0119 \left( \frac{D_1 \rho_f v}{\mu_f} \right)^{0.6} \cdot k_f \cdot (t_c - t_a) \quad [W/m] \quad (16)$$

$$q_{cl} = 0.0205 \cdot \rho^{0.5} \cdot D_1^{0.75} \cdot (t_c - t_a)^{1.25} \quad [W/m] \quad (17)$$

$D_1$  : 전선직경 [mm]  
 $\rho_f$  : 공기밀도 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\mu_f$  : 공기의 절대점도 [N·m·sec]  
 $k_f$  : 공기의 열전도율 [W/m·°C]

풍향각  $\phi$  (전선에 대해 직각방향이 0°)를 고려할 경우에는 식(15) 및 (16)에 식(18)의 풍향각 보정계수를 곱해줌으로써 구할 수 있다. 또한 해발고도에 의한 보정은 식(7)에 의해 고려하고 있다.

$$k_\phi = 1.194 - \sin\phi - 0.194 \cos(2\phi) + 0.368 \sin(2\phi) \quad (18)$$

### 2.4.4 IEC

IEC에서는 강제대류에 의한 열방산을 식(19)로 산출한다. 이 식(19)는 CIGRE의 계산방식 중 일부의 변수를 정수로 하여 간소화한 것이고, 자연대류와 풍향 및 난류에 의한 영향은 고려하지 않았다.

$$q_c = \pi \lambda_f Nu (t_c - t_a) \quad [W/m] \quad (19)$$

$$\lambda_f = 0.02585 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$Nu = 0.65 Re^{0.2} + 0.23 Re^{0.61}$$

$$Re = 1.644 \times 10^9 \nu D [273 + 0.5(t_c + t_a)]^{-1.78}$$

### 2.4.5 비교 및 평가

JCS에서는 1923년 AIEE에 발표된 Rice의 논문의 원통형 물체의 열방산식에 기초하고 있으나, CIGRE, IEEE, IEC에서는 그 후에 발표된 많은 연구결과를 반영하여 물체로부터의 열방산을 Reynolds수 Re와 Nusselt수 Nu를 이용하여 계산하는 방식을 적용하고 있다. 즉 JCS방식보다는 CIGRE 등의 방식이 전선표면의 상태, 공기밀도 및 점도, 해발고도, 풍향각 등의 많은 요소를 고려하고 있으므로 허용전류의 계산에 더

합리적인 방식으로 평가된다.

표 1은 ACSR Drake 및 Rail 전선에 대한 열방산의 계산 결과를 비교한 것으로, 현재 국내에서 적용하고 있는 JCS방식을 기준으로 하면 CIGRE방식은 약 24%, IEEE 및 IEC방식은 약 19%정도 열방산이 크게 나타났다. 즉 지금까지 국내에서 사용하고 있는 JCS방식은 타 방식에 비해 열방산을 적게 고려하기 때문에 그만큼 전선의 허용전류가 적게 적용되었다.

표 1 강제대류에 의한 열방산의 비교

Table 1 Comparison of forced convection heat loss

(단위 : W/m<sup>2</sup>)

전선종류	JCS	CIGRE	IEEE	IEC
ACSR Drake 26/7, 4.442/3.470 d=28.143mm	52.075 (100%)	64.737 (124%)	61.860 (119%)	61.935 (119%)
ACSR Rail 45/7, 3.698/2.466 d=29.591mm	53.400 (100%)	66.285 (124%)	63.459 (119%)	63.653 (119%)
[조건] 주위온도: 40°C, 전선온도: 90°C, 방사계수: 0.5 풍속: 0.5m/sec, 해발: 0m, 풍향각: 0°				

### 2.5 허용전류 계산방식의 제안

지금까지 검토한 규격별 허용전류의 계산방식을 비교하여 표 2에 나타냈다. 국내에서 사용중인 JCS방식은 일사량과 대류에 의한 열방산 등에서 지나치게 간략화함으로써 풍향각, 해발고도, 공기의 상태 등을 제대로 반영하지 못하고 있다. 그래서 일본에서도 JCS방식에 CIGRE의 방식 일부를 접목시키는 쪽으로 개정 중에 있다. 그래서 이 비교 연구를 통해서 국내에서도 JCS방식보다 합리적으로 판단되는 CIGRE방식과 IEEE방식의 적용을 권하고자 한다. 그러나 이미 국내의 765kV 송전선로의 설계시 적용한 실적이 있고, 최근에 적용 범위를 전 세계권으로 확대시킨 IEEE방식을 국내 사용전선에 대한 허용전류 계산방식으로 사용할 것을 제안한다.

표 2 계산방식별 비교

Table 2 Comparison of calculating methods

구분	JCS	CIGRE	IEEE	IEC
열평형식	동일한 열평형식을 사용			
	○	○	○	○
일사에 의한 흡수열	일정 일사량을 사용 1,000 W/m <sup>2</sup>	태양고도, 방위각, 위도, 공기상태, 입사각, 해발고도 등에 따라 지역별 일사량을 계산		일정 일사량을 사용 900 W/m <sup>2</sup>
	△	○	○	△
방사에 의한 열방산	동일한 열방산식을 사용			
	○	○	○	○
대류에 의한 열방산	풍속에 따른 실험식	풍속, 공기상태, 풍향각, 해발고도 등 사용		CIGRE 간략식 사용
	△	○	○	△
평가	△	○	○	△

[주] ○(합리적), △(간략화)

### 3. 교류저항의 계산방법 분석

가공송전용 나전선의 저항은 허용전류에 가장 크게 영향을 주는 요소 중의 하나이다. 전선의 제원에서 저항을 표시할 경우 일반적으로 20°C에서의 직류저항만으로 나타내는 것이 대부분

이지만 합성연선의 저항은 교류에 의한 표피효과와 철손효과, 근접효과에 의해 직류저항보다 커지기 때문에 교류저항으로 고려해야 한다.

국내에서 사용하고 있는 전선은 주로 일본과 같은 구성을 하고 있지만, 일부 전선은 IEEE의 규격을 도입하고 있다. 전선의 최고허용온도도 IEEE 및 IEC 지역권과는 달리 일본과 같은 값을 적용하고 있기 때문에 IEEE 및 IEC의 전선제원과는 다소 차이가 있음을 고려할 필요가 있다고 판단된다.

도체에 교류전류가 흐를 때 도체 내부로 갈수록 쇠교자속이 증가하여 표면보다 내부의 임피던스가 높게 되므로 전류밀도가 도체의 표면에 가까울수록 크게 되는 표피효과를 발생한다. 이로 인한 표면저항손실이 증대한다. 그리고 전류가 강심 외부의 Al소선을 따라 나선형으로 흐름으로서 발생하는 자속이 강심의 히스테리시스손 및 와류손을 발생시킨다. 강심에 발생하는 철손은 Al층이 홀수층인 경우 그 영향이 크게 되지만 짝수층인 경우에는 소선의 연선을 층별로 반대방향으로 하기 때문에 발생된 자계가 서로 상쇄되어 그 영향이 거의 없다. 2개의 도체가 접근하여 평행하게 배치된 경우 서로 마주보는 면의 전류밀도는 감소하고, 반대측은 증가되는 근접효과가 나타나지만 일반적으로 허용전류의 계산에서는 무시한다.

3.1 JCS

교류저항은 표피효과 및 강심의 철손을 고려하여 식(20)과 같이 구하는데, 원통도체에 대한 표피효과와 이론 근사식(21)과 캐나다의 ALCAN사에서 제시한 강심에 대한 철손의 근사식(22)으로 구하고 있다.

$$R_{ac}(t_c) = \beta_1 \beta_2 R_{dc}(20) [1 + \alpha_{20}(t_c - 20)] \quad [\Omega/\text{km}] \quad (20)$$

- $\beta_1$  : 표피효과계수
- $R_{dc}(20)$  : 20°C에서의 직류저항 [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $\alpha_{20}$  : 20°C에서 Al의 저항온도계수

$$\beta_1 = 0.99609 + 0.018578x - 0.030263x^2 + 0.020735x^3 \quad (21)$$

$$x = 0.01 \cdot \frac{d_1 + 2d_2}{d_1 + d_2} \cdot \sqrt{\frac{8\pi f(d_1 - d_2)}{(d_1 + d_2)R_{dc}}}$$

$d_1, d_2$  : 도체의외경[cm] 및 강심의외경[cm]

$f$  : 주파수(60Hz)

$\beta_2$  : 철손계수

$$\beta_2 = 1 \quad (\text{Al 짝수층})$$

$$\beta_2 = 0.99947 + 0.028895y - 0.0059348y^2 + 0.00042259y^3 \quad (\text{Al 홀수층}) \quad (22)$$

$y = I/A$

$I$  : 통전전류 [A]

$A$  : Al 부분 단면적 [ $\text{mm}^2$ ]

3.2 CIGRE

동일한 평균온도에서는 교류 및 직류전류에 대한 도체의 전력입력은 같다는 이론에 의해 교·직저항비를 계산하고 있다. 즉 특정 온도에 도달하는 직류전류를 계산하고, 이를 경험식에 의해 교류전류로 변환하는 방식을 적용한다.

(1) Al층이 3층인 경우의 교직저항비

$$R_{ac}/R_{dc} = 1.0123 + 2.36 \cdot 10^{-5} \times I_{ac} \quad (23)$$

(2) 공칭단면적  $A=175\text{mm}^2$ 이상의 Al층이 1 또는 2층의 경우

$$R_{ac}/R_{dc} = 1.0045 + 0.09 \cdot 10^{-6} \times I_{ac} \quad (24)$$

3.3 IEEE

IEEE에서는 미국 Al협회에서 발행한 문헌[8]에서 제시한 25°C 및 75°C의 교류저항 값으로 직선근사하여 임의 온도에서의 교류저항을 산출한다. 그러나 제시된 Handbook의 교류저항은 표피효과만이 고려되고 철손효과가 고려되지 않은 값이다. 다만 Al층이 3층인 일부 도체의 철손효과에 대해서는 전류밀도별 철손계수를 그래프로 제시하였으며, 고려여부는 설계자가 판단하도록 하였다. 이것은 전류의 크기에 따라 철손효과가 다른 것을 표로서 제시하는 데 한계가 있기 때문이다.

3.4 IEC

IEC에서는 IEEE와 같이 철손효과를 무시하고 표피효과만을 고려하여 문헌[8]을 참조하여 IEC-1597의 규격에 20°C, 50°C, 80°C, 100°C에서의 교류저항을 도체별로 제시하였다. 이는 ACSR의 최고허용온도를 유럽에서는 80°C 또는 100°C를 사용하기 때문이며, 우리나라와 같이 90°C를 사용하거나 내열전선을 사용하는 경우에는 이 방식의 적용이 곤란하다.

3.5 비교 및 평가

JCS 및 CIGRE의 방식은 전선의 구성 및 특성에 의해 모든 전선에 적용할 수 있는 방식인 반면, IEEE 및 IEC는 문헌[8]에 있는 전선에 대해서만 적용이 가능하다. 특히 국내에서 사용되고 있는 전선의 대부분은 IEEE 및 IEC의 특성과 일치하지 않기 때문에 이 규정을 적용하는 것은 무리가 있다. 또한 CIGRE 방식은 교직저항비에 대한 출처가 명확하지 않으나 JCS방식은 이론적 해석에 기초하며 일본 및 캐나다에서의 실험결과와 잘 일치하는 것으로 보고되었다.[1]

각 규격별 교류저항의 고려방법을 비교하면 표 3과 같으며, 표피효과는 산출방법상 약간의 차이는 있으나 모든 규격에서 고려하고 있다. 그러나 철손효과는 규격별로 차이가 있고, 근접효과는 모든 규격에서 고려하지 않고 있다.

또한 전선의 허용전류는 설계자에 관계없이 일정한 값을 제시할 필요가 있으며, 국내에서 적용하는 전선의 특성에 적합해야 한다. 따라서 가공송전선의 허용전류 계산에서 교류저항은 JCS방식에 따라 계산하는 것이 가장 합리적이라고 판단된다.

표 3 교류저항의 고려요

Table 3 Consideration factor of AC resistance

	JCS	CIGRE	IEEE IEC
표피효과	고려	고려	고려
철손효과	홀수층의 ACSR에 대해 고려	불분명하지만 고려된 것으로 추정됨	1,3층 ACSR에 고려, 단 제시된 수치에는 고려되어 있지 않음
근접효과	무시	무시	무시

규격별 교류저항의 계산결과를 비교하기 위하여 Al 소선이 2층인 전선과 3층인 전선 중에서 IEEE와 우리나라에서 채택하고 있는 표4의 ACSR Drake 및 Rail 전선의 교류저항을 계산한 결과 표5와 같다. 이 표5를 분석하면 표피효과에 의한 교류저항은 거의 차이가 없고, 통전전류가 커질수록 철손효과에 의한 차이가 커지는 것으로 나타났다.

표 4 교류저항 계산에 사용된 전선의 제원  
Table 4 Conductor data for calculating of AC resistance

AI층수		2층	3층
구분	전선종류	ACSR Drake	ACSR Rail
	소선구성(AI/St)	26/7	45/7
	소선직경(mm)	4.442/3.470	3.698/2.466
	전선단면적(mm <sup>2</sup> )	402.84	483.32
	전선의 직경(mm)	28.143	29.591
	20℃ 직류저항(Ω/km)	0.0702	0.0592
교류저항 (Ω/km)	25℃	0.0727	0.0618
	75℃	0.0864	0.0733

표 5 교류저항 계산결과  
Table 5 Calculation results of AC resistance

단위 : Ω/km

구분		규격	JCS	CIGRE	IEEE, IEC
ACSR Drake	표피효과		0.09058 (100%)	0.09026 (99.6%)	0.09051 (99.9%)
	표피+철손		0.07693 (100%)	0.07671 (99.7%)	0.07675 (99.8%)
ACSR Rail (800A)	표피효과		0.07946 (100%)	0.07814 (98.3%)	0.07712 (97.1%)
	표피+철손				

[주]  $t_c$ : 90℃,  $f$ : 60Hz,  $\alpha_{20}$ : 0.004

#### 4. 허용전류의 비교 및 계산

##### 4.1 허용전류의 비교

이상에서 가공송전용 나전선의 허용전류 계산방식은 IEEE 방식을 사용하고, 교류저항의 계산은 JCS방식에 따르는 것을 제안하였다. 다음은 각 방식으로 표5의 2층류 전선의 허용전류를 계산하여, 한전에서 송전선로 설계시 사용하고 있는 설계기준의 허용전류 및 제안한 안과 비교해 보고자 한다.

각 방식에 의한 허용전류 계산에 사용된 계수는 표 6과 같다. 여기서 방사 및 흡수율은 비교를 위해서 한전 설계기준의 적용치인 0.9를 적용하였다.

허용전류의 계산결과는 표7과 같으며, JCS방식에 의한 결과를 기준으로 볼 때 다른 방식에 의한 결과는 약 8~12%정도 크게 계산되었다. 이와 같은 결과는 JCS방식이 주로 강제

표 6 허용전류 계산조건  
Table 6 Calculation condition of current carrying capacity

항목	JCS	CIGRE	IEEE	IEC
전선온도 $t_c$ (℃)	90	90	90	90
주위온도 $t_a$ (℃)	40	40	40	40
풍속 $v$ (m/sec)	0.5	0.5	0.5	0.5
주파수 $f$ (Hz)	60	60	60	60
방사/흡수율 $\alpha_s, \epsilon$	0.9	0.9	0.9	0.9
일사량 $W_s$ (W/m <sup>2</sup> )	1,000	위 도:35 연일수:161 시 각:13시 선 로:동서 공 기:도시 해 발: 0m 태양광산란:없음 (969 W/m <sup>2</sup> )	위 도:35 연일수:161 시 각:13시 선 로:동서 공 기:청명 해 발: 0m 태양광산란:없음 (1,021W/m <sup>2</sup> )	900

대류에 의한 열방산량을 작게 고려하기 때문이고, 또 AI층이 3층이상인 경우에는 철손효과에 의한 교류저항 때문에 그 차이가 커지기 때문이다. 하지만 설계기준의 허용전류는 JCS방식에 의한 것으로 실제 전선이 표5의 전선제원과 다소 차이가 있고, 계수의 적용이 불분명하기 때문에 그 차이를 정확히 알 수 없다.

본 연구의 제시안에 의한 허용전류 계산결과는 JCS방식보다는 약 8%정도 증가되고, CIGRE 및 IEC방식보다는 약 3%정도 작게 나타났다. 또한 IEEE방식과 비교하면 철손의 영향이 없는 AI층이 2층이하에서는 동일하지만 철손영향이 있는 AI 3층에서는 약 2%정도 작다.

표 7 허용전류 계산결과  
Table 7 Calculation results of current carrying capacity

	설계기준	JCS	CIGRE	IEEE	IEC	개선안
Drake	835 (101%)	826 (100%)	913 (111%)	890 (108%)	905 (110%)	890 (108%)
Rail	917 (103%)	894 (100%)	993 (111%)	981 (110%)	999 (112%)	962 (108%)

##### 4.2 전선의 허용전류

현재 우리나라에서 사용되고 있는 가공송전용 전선은 대부분 ACSR 전선이고, 부식방지용 전선(AW), 고강도전선(HACSR, HTACSR), 용량증대전선(TACSR, HTACSR, STACIR) 등의 사용이 증가되는 추세에 있다.

본 연구에서 제시한 추천안에 의해 ACSR, ACSR/AW, TACSR, TACSR/AW 전선에 대한 연속허용전류를 계산하였다. 제시한 연속허용전류는 전선의 표면온도가 ACSR 및 ACSR/AW 전선의 경우에는 연속허용온도 90℃, TACSR 및 TACSR/AW 전선의 경우에는 연속허용온도 150℃가 되는 전류를 말한다.

전선의 허용전류 계산에 필요한 전선의 구성은 표8과 같고, 20℃에서의 직류저항은 표 9와 같다.

허용전류 계산에 필요한 각종 계수는 표10과 같이 적용하였으며, 이 중에서 방사 및 흡수계수( $\alpha_s, \epsilon$ )는 건설된 전선의 환경에 따라 0.2~0.9의 범위에서 선정되지만 CIGRE 및

표 8 전선의 구성  
Table 8 Conductor data

공칭 단면적 [mm <sup>2</sup> ]	연선구성 소선수/소선경 [가닥/mm]		계산단면적 [mm <sup>2</sup> ]		외경[mm]	
	Al	St	Al	St	Al	St
240	30/3.2	7/3.20	241.3	56.29	22.40	9.60
330	26/4.0	7/3.10	326.8	52.84	25.30	9.30
410	26/4.5	7/3.50	413.4	67.35	28.50	10.50
480R	45/3.7	7/2.47	483.84	33.54	29.61	7.41
480C	54/3.38	7/3.38	484.5	62.81	30.42	10.14

표 9 전선의 직류저항  
Table 9 DC resistance of conductors

공칭 단면적 [mm <sup>2</sup> ]	직류저항 [Ω/km]			
	ACSR	ACSR/AW	TACSR	TACSR/AW
240	0.1200	0.1114	0.1222	0.1131
330	0.0888	0.0842	0.0904	0.0856
410	0.0702	0.0666	0.0714	0.0676
480R	0.05994	0.0586	0.0609	0.0595
480C	0.0599	0.0574	0.0609	0.0583

IEEE의 추천치인 0.5를 적용하였고, 해발고도( $H_e$ )는 국내의 송전선로가 대부분 산악지를 경과하고 있기 때문에 500[m]를 적용하였다. 또한 도체와 바람의 각도는 기존 선로의 설계치 등을 고려하여 90°(풍향각 0°)로 적용하였다.

이상과 같은 조건에 의해 가공송전용 전선의 연속허용전류를 계산한 결과를 설계기준(ACSR)과 비교하기 위해 표11에 나타냈다. ACSR은 AI층이 2층인 경우 허용전류가 약간 증가되었지만 AI층이 3층인 경우에는 설계기준보다 다소 적음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 교류저항에 철손효과를 고려하고 해발고도( $H_e$ ) 500m를 적용하였기 때문이다.

표 10 허용전류 계산용 계수

Table 10 Coefficient for calculating of current carrying capacity

항 목	적용치	비 고
주위온도 $t_a$ (°C)	40	
풍속 $v$ (m/sec)	0.5	
도체와 바람의 각도(도)	90	선로직각방향(풍향각 0°)
방사, 흡수계수( $\alpha_s, \epsilon$ )	0.5	기존 적용은 0.9
해발고도 $H_e$ (m)	500	
선로의 방위각 $\gamma_c$ (도)	90	동서방향 선로
위도 $\phi$ (도)	35	남한: 33° ~ 38°
연일수 ( $N'$ )	161	
태양시간	13:00	
대기상태	청명	

표 11 전선의 연속허용전류

Table 11 Maximum allowable current of conductors

단위 : A

공칭 단면적 [mm <sup>2</sup> ]	설계기준 (ACSR)	ACSR	ACSR/AW	TACSR	TACSR/AW
240	595	610	633	899	935
330	720	731	751	1,085	1,114
410	835	848	871	1,265	1,300
480R	917	909	918	1,354	1,370
480C	-	917	936	1,367	1,396

### 5. 결 론

본 연구에서는

- (1) 가공송전용 나전선의 허용전류 산정에 지금까지 사용한 JCS방식보다는 더 여러 조건을 고려하는 IEEE방식의 적용을 제안하였다.
- (2) 교류저항 산출에는 표피효과는 물론 철손효과를 정량적으로 산출하는 JCS방식의 적용을 제안하였다.
- (3) 제안한 방식으로 계산한 허용전류는 설계기준에 비해 AI층이 2층 이하의 전선은 증가하고, 3층 이상의 전선은 감소함을 확인했다.
- (4) 앞으로 허용전류 계산에 사용되는 각종 계수의 적정한 선정에 관한 연구가 필요하고, 송전선로를 효율적으로 운용하기 위해서는 최악조건에서의 전선 허용전류에 의한 관리보다는 계절별 허용전류 또는 실시간 데이터에 의한 허용전류의 관리방안에 대한 연구가 계속적으로 필요하다.

### 참 고 문 헌

- [1] 日本 電氣學會, “架空送電線の 電流容量”, 電氣學會技術報告 第660號, 1997.12
- [2] CIGRE WG 22.12, “The thermal behaviour of overhead conductors : mathematical model for evaluation of conductor temperature in the steady state and the application thereof”, ELECTRA No.144, Oct., 1992
- [3] IEEE, “Standard for calculating the current - temperature relationship of bare overhead conductors”, IEEE Std P738-1999 Draft No.1
- [4] IEC, “Overhead electrical conductors - calculation methods for stranded bare conductors”, IEC-1597, 1995
- [5] “IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors”, IEEE Std 738-1993
- [6] N. P. Schmidt, “Comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards”, IEEE PWRD, Vol.14, No.4, pp.1555~1559, Oct. 1999
- [7] EPRI, “Transmission Line Reference Book”, 1979
- [8] The Aluminium Association, “Aluminium Electrical Conductor Handbook”, 3rd edition, 1989
- [9] Southwire, “Overhead Conductor Manual”, 1st edition, Southwire Company, 1994

### 저 자 소 개



#### 손 홍 관 (孫 洪 寬)

1962년 3월 21일생. 1985년 충남대 전기공학과 졸업. 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 충남대 대학원 박사과정, 1987년~현재 한국전기연구원 전력연구단 전기환경·송전연구그룹 선임연구원.

Tel: 0551-280 1341

E mail: hksohn@keri.re.kr



#### 이 은 응 (李 殷 雄)

1944년 8월 14일 생. 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1982년~83년, 1984년~85년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987년~현재 당학회 평의원. 1995년 당학회 편집위원장 및 전기기연구회 간사장. 1995년~1997년 충남대 공대 학장, 산업대학원장('96~97), 1997년~2000년 당학회 부회장. 현재 충남대 전기공학과 교수

Tel : 042-821 5652

E-mail : ewlee@cnu.ac.kr