

가공송전선로용 나전선의 허용전류 산정에 대한 검토

손흥관\*, 이형권\*, 이은웅\*\*  
한국전기연구소\*, 충남대\*\*

Calculation of Ampacity for Bare Overhead Conductors

H. K. Sohn\*, H. K. Lee\*, E. W. Lee\*\*  
KERI\*, ChungNam Univ.\*\*

**Abstract** - Many standards have published for calculating the ampacity of bare overhead conductors. Although these standards use the same basic heat balance concept, they use different approaches to calculate ampacity ratings. This paper looks at the different approaches used to calculate individual heat balance terms, at the overall impact of these terms on the ampacity rating. And this paper is proposed to the selection of proper standard and atmospheric conditions for calculating the ampacity of bare overhead conductors.

1. 서 론

가공송전선의 전류용량은 기온, 풍속, 일사량의 기상 조건에 대해 과거의 최대치, 측정결과 등을 기초로 최악 조건을 정하고, 그 조건이 설비 사용기간 동안 전선의 열에 의한 기계적 강도의 저하율이 10%가 되는 전선의 연속허용온도로부터 전류용량을 계산하고 있다. 이것은 주로 1949년 일본의 전기협동연구회에서 제안한 방법에 기초하고 있으며, 현재까지 국내에서는 이 일본의 방식 및 조건을 대부분 그대로 적용하고 있다.

1965년 일본 전력중앙연구소의 연구결과에 의하면 기상조건을 지역별로 차이를 고려하여 설계할 것을 제안하였으나 현재까지 전류용량의 계산에는 적용되지 않고 있는 상태이다. 한편 CIGRE, IEEE, IEC 등의 규격 및 기술보고 등에서는 기상조건을 일률적으로 규정하지 않고, 지역에 따라 차이를 두어 전류용량을 계산하는 방법을 적용하고 있다.[1-4]

또한 최근에는 기온, 풍속, 풍향 등의 기상조건에 대한 발생빈도분포 및 송전선의 조류패턴으로부터 전선은 온도분포를 구하고 전류용량을 확률론적으로 검토하는 방법도 소개되고 있다.[1]

지금까지 전류용량 산정에 대한 많은 논문 및 규격이 있으나 본 연구에서는 그 중에서 대표적으로 사용되고 있는 CIGRE, IEEE, IEC 및 일본의 전류용량 산정방식 및 적용치에 대해 조사, 비교하고, 우리의 적용방식 및 적용치를 제안하고자 한다.

2. 현재의 전류용량 산정기법

2.1 개요

가공송전선의 전류용량은 전선의 발열 및 흡수열과 전선표면으로부터의 방사열이 평형을 이룰 때의 전선온도가 가열에 의한 전선재료의 조직변화 또는 인장특성이 규정치로 유지되는 온도로 될 때의 전류로 결정하고 있다. 전선의 온도계산에는 전선축의 성능 및 조건 외에 주위조건(기온, 풍속, 일사량 등)의 설정이 중요하다.

전류와 전선온도의 관계에는 내부 및 외부 흡수열과 외부로의 방사열이 평형을 이룬 정상상태에 사용하는 계산식과 열평형에 도달하기 이전의 과도상태에 대한 계산

식이 있다. 여기서는 정상상태의 전류온도특성 계산에 대해서만 검토한다.

2.2 정상상태의 전류온도계산

도체의 저항손인 발열 및 일사에 의한 흡수열과 전선표면으로부터의 방사열이 평형을 이루는 평형식에 의해 다음 식(2-1)과 같이 전류용량을 계산한다.[1]

$$I = \sqrt{\frac{K\pi d\theta}{\beta R_{dc} \times 10^{-5}}} \text{ [A]} \quad (2-1)$$

$$\text{단, } K = \left( h_r - \frac{W_s}{\pi\theta} \right) \eta + \{ h_w \text{ or } h_c \}$$

여기서 d : 전선외경 [cm]

$\theta$  : 주위온도에 대한 전선의 온도차 [°C]

$\beta$  : 교직저항비

$R_{dc}$  : 사용온도에 있어서의 직류저항 [ $\Omega$ /km]

$h_r$  : 방사에 의한 열방산계수

$h_w$  : 바람의 강제대류에 의한 열방산계수

$h_c$  : 무풍시 자연대류에 의한 열방산계수

$W_s$  : 일사량 [W/cm<sup>2</sup>] (0.1[W/cm<sup>2</sup>]을 적용)

$\eta$  : 방사율 or 흡수율 (주로 0.9를 적용)

방사에 의한 열방산계수  $h_r$ 은 Stefan-Boltzman의 법칙에 따라 식(2-2)와 같이 구해진다.

$$h_r = 0.000567 \frac{\left( \frac{273+T+\theta}{100} \right)^4 - \left( \frac{273+T}{100} \right)^4}{\theta} \quad (2-2)$$

T : 주위온도에 대한 전선의 온도상승 [°C]

또한 강제대류 및 자연대류에 의한 열방산계수  $h_w$ ,  $h_c$ 는 Rice의 실험식 및 McAdams의 실험식으로부터 각각 식(2-3) 및 식(2-4)와 같이 구해진다.

$$h_w = \frac{0.000567}{\left( 273 + T + \frac{\theta}{2} \right)^{0.123}} \sqrt{\frac{v}{d}} \text{ [W/°C} \cdot \text{cm]} \quad (2-3)$$

v : 풍속 [m/sec]

$$h_c = 0.00035^4 \sqrt{\frac{\theta}{d}} \text{ [W/°C} \cdot \text{cm]} \quad (2-4)$$

3. 각 국의 전류용량 산정기법 비교 및 평가

전선온도계산의 기본이 되는 열평형식 및 식을 구성하고 있는 교류저항, 일사에 의한 흡수열, 방사 및 대류에 의한 열방산의 각 항목에 대해 각국의 규격을 비교하고, 계산 정수로서 기상조건에 적용치를 검토한다.

3.1 열평형식

(1) 일본, IEEE, IEC

$$I^2 R_{ac} + q_s = q_r + q_c \quad (3-1)$$

$I^2 R_{ac}$  : 전류에 의한 발열 [W/cm]

$R_{ac}$  : 사용온도에서의 교류저항 ( $\Omega/\text{km}$ )  
 $q_s$  : 일사에 의한 흡수열 ( $\text{W}/\text{cm}$ )  
 $q_r$  : 방사(복사)에 의한 열방산 ( $\text{W}/\text{cm}$ )  
 $q_c$  : 대류에 의한 열방산 ( $\text{W}/\text{cm}$ )

(2) CIGRE

식(3-1)의 평형식에 코로나에 의한 발열, 증발에 의한 열방산을 고려하여 식(3-2)를 채용하고 있다.

$$P_j + P_m + P_s + P_f = P_c + P_r + P_u \quad (3-2)$$

$P_j$  : 전류에 의한 발열  
 $P_m$  : 자기적 발열 ( $P_j + P_m = I^2 R_{ac}$ )  
 $P_s$  : 일사에 의한 흡수열 ( $= q_s$ )  
 $P_f$  : 코로나에 의한 발열  
 $P_c$  : 대류에 의한 열방산 ( $= q_c$ )  
 $P_r$  : 방사에 의한 열방산 ( $= q_r$ )  
 $P_u$  : 증발에 의한 열방산

여기서 코로나에 의한 발열은 정상상태에서는 고려할 필요가 없으며, 증발에 의한 냉각은 일반적으로 전류용량의 계산에서 고려하지 않는다.

(3) 평가

각 국에서 적용하고 있는 열평형식 중에서 CIGRE의 방식이 가장 완전한 식이지만 전류용량의 계산시 코로나에 의한 발열 및 증발에 의한 열방산은 거의 영향이 없으므로 각 국의 열평형식은 기본적으로 동일하다고 볼 수 있다.

3.2 교류저항

교류저항은 교류전류에 의한 표피효과, 강심의 철손 및 근접효과에 의해 직류저항보다 증가하게 된다. 이 중에서 근접효과는 일반적으로 무시하고, 표피효과 및 철손효과를 고려하는 것이 보통이다. [1] 각 규격에서 고려하고 있는 교류저항은 표1과 같다.

표 1. 각 규격의 교류저항 고려방법

	일본	CIGRE	IEEE, IEC
표피효과	고려	고려	고려
철손효과	흡수열의 ACSR만 고려	불명확	1.3층 ACSR만 고려, 단 표시된 수치는 고려되어 있지 않음
근접효과	무시	무시	무시

(1) 일본의 적용방식

교류저항은 식(3-3)으로 표현된다.

$$R_{ac} = \beta_1 \beta_2 \beta_3 R_{dc} (1 + \alpha(t - 20)) \quad (3-3)$$

여기서  $\beta_1$  : 표피효과계수

$\beta_2$  : 철손계수

$\beta_3$  : 근접효과계수

$R_{dc}$  : 20°C에 있어서의 직류저항 ( $\Omega/\text{km}$ )

$\alpha$  : 정질량 저항온도계수 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t$  : 전선의 온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]

표피효과는 ACSR을 원통도체로 가정하여 이론적인 계산을 실시하고 있으며, H.B.Dweight가 제안하고, W.A.Lewis 및 P.D.Tuttle가 그래프로 표현하고 있다. 이 이론에 근거하여 일본에서 적용하고 있는 표피효과계수의 근사식은 식(3-4)와 같다.

$$\beta_1 = 0.99609 + 0.018578x - 0.030263x^2 + 0.020735x^3 \quad (3-4)$$

$$x = \frac{D+2d}{D+d} \times 0.01 \times \sqrt{\frac{8\pi f(D-d)}{R_{dc}(D+d)}}$$

$D$  : 도체의외경 [mm],  $d$  : 도체의내경 [mm]

강심의 철손에 대해서는 AI층이 흡수인 ACSR은 철손의 영향이 크므로 고려할 필요가 있으나 이론적 검토는 어려우므로 실험치와 잘 일치하는 근사식에 의한 방법으로 Canada ALCAN사의 데이터를 사용하고 있다.

$$\beta_2 = 0.99947 + 0.028895x - 0.0059348x^2 + 0.00042259x^3 \quad (3-5)$$

$$x = I_{ac}/S, \quad S : \text{단면적}[\text{mm}^2]$$

(2) 평가

일본과 CIGRE 방식에 의한 교류저항비의 비교결과 거의 일치하는 것으로 보아 CIGRE에 표현은 없으나 철손효과가 고려된 것으로 보인다. 또한 IEEE 및 IEC에서는 철손효과(참고치 ALCAN사의 data)를 고려하도록 하고 있으나 "Aluminium Electrical Conductor Handbook"의 data에는 표피효과만이 고려되어 있어서 실질적으로는 약 1%정도 더 작게 나타나 있다. 따라서 교류저항은 일본 방식처럼 근사식에 의한 표피효과와 ALCAN사의 철손계수에 대한 근사식을 적용하는 것이 간단성, 명료성, 일의성면에서 타당하다고 사료된다.

3.3 일사에 의한 흡수열

(1) 일본 : 전선은 태양광선과 직각으로 가정하여 식(3-6)으로 표현하며, 총일사량은 0.1(W/cm<sup>2</sup>), 흡수율은 0.9를 적용하고 있다.

$$q_s = W_s d \eta \quad (3-6)$$

(2) CIGRE : 총일사량에 의한 방법과 직접일사 및 산란일사량에 의한 방법이 제시되어 있다. 전자의 방법은 일본과 동일하고, 후자의 방법은 전선의 방위각, 태양고도, 입사각, 위도 등을 변수로 하고 있으며 다음의 특징이 있다.

① 도체가 받는 일사량으로서 태양에서 직접 받는 직접일사, 대기에 의한 산란일사 및 지표로부터의 반사광을 고려하고 있다.

② 도체가 받는 일사량 산출시 위도, 태양과 송전선의 방위각을 변수로 한 산출식을 제시하고 있어서 입의 지점 및 일시의 일사량을 구할 수 있다.

(3) IEEE : IEEE 방식의 특징은 다음과 같다.

① 송전선에 대한 태양광의 입사각을 고려하고 있고 일사량의 산출에는 특정일시(6월10일, 7월3일)의 태양고도 및 방위각을 위도별로 표시한 표를 사용한다.

② 공기의 상태(Clear, Industrial) 및 해발고도에 따라 일사량을 변화시키고 있다.

(4) IEC : 일사에 의한 흡수열 산출식은 일본 및 CIGRE의 총일사량에 의한 방법과 동일하다.

(5) 비교 및 평가

이상과 같은 일사량 산출 방법에 의해 현실적으로 각 국에서 채택하고 있는 일사량의 값에 대한 CIGRE의 조사결과는 표2와 같고, 각 방식의 같은 조건에 대한 일사량의 계산결과는 표3과 같다.

표 2. 각 국 일사량 적용치(CIGRE SC31 WG-02)

국명	일사량의 적용치
영국	0.067(冬), 0.087(春,秋), 0.099(夏)
벨기에	0.100
헝가리	0.100
네덜란드	0.100
프랑스	0.090
남아프리카	0.110

우리나라에 대해 표3의 조건에서 대기조건을 청명시 IEEE방식으로 계산하면 일사량은 0.101~0.102정도 되며, 일사량이 전류용량에 미치는 영향이 크지 않으므로 일본과 같이 0.1로 적용해도 크게 차이가 발생하지 않는다.

표 3. 각 방식별 일사량의 계산 ( $W/cm^2$ )  
(시간:정오, 선로:동서방향, 대기:공업지대, 해발:0m)

위도	일본	CIGRE		IEEE	IEC
		직접일사	직접+산란		
30	0.1	0.097	0.120	0.081	0.09
35	0.1	0.097	0.120	0.080	0.09
40	0.1	0.096	0.118	0.079	0.09
45	0.1	0.096	0.116	0.077	0.09

### 3.4 방사에 의한 열방산

방사(복사)에 의한 열방산은 모든 규격이 Stefan-Boltzman의 법칙에 따라 적용하고 있으며, 다만 방사 계수의 적용이 나라별로 다소 차이가 있다.

새 전선과 경년된 전선에 대해 일본은 0.08~0.9, CIGRE는 0.27~0.95(대표치 0.5), IEEE는 0.23~0.91(불명확한 경우 0.5)의 범위로 규정하고 있으나 과전후 약 5년이 지나면 0.7~0.8정도로 되고, 최종적으로는 최대치로 접근하게 된다.

### 3.5 대류에 의한 열방산

바람에 의한 대기의 강제대류 및 자연대류가 있는 경우 전선의 열이 외부로 방출되고 이 영향이 전류용량을 결정하는데 큰 비중을 차지하고 있다.

일본의 경우 강제대류에 대해 Rice의 실험식을 적용하고 있으나, CIGRE, IEEE, IEC에서는 일본과는 다른 방식을 제시하여 풍향, 연선의 영향을 고려하도록 하고 있다. 특히 IEC의 적용식은 CIGRE의 식과 동일한 것임을 명시하고 있으며, IEEE의 적용식도 CIGRE의 식을 변형시킨 것이다. 따라서 IEEE 규격도 1999년 개정판에서 CIGRE 방식을 채용하고 있다.

CIGRE에서는 풍향 및 표면상태의 영향을 Morgan 식으로 적용하고 있는데 풍향각에 따른 열방산 및 전류용량의 영향정도를 검토한 결과 풍속 0.5m/sec에서 풍향각이 0° (선로와 직각)시의 열방산을 1.0으로 볼 때, 풍향각 45° 에서는 0.88, 풍향각 90° (선로방향) 에서는 0.45정도로 감소하며, 전류용량에 대한 영향은 풍향각 45° 에서 0.95, 풍향각 90° 에서 0.81 정도까지 감소하는 것으로 보고되고 있다.

따라서 전류용량 산정시에는 어떠한 형태로든 풍향각을 적용할 필요가 있다고 판단된다.

### 3.6 기상조건 및 방사율에 대한 계산정수

전류용량을 계산하기 위해서는 기상조건(기온, 풍속, 일사량), 방사율과 같은 변동요소에 대한 적용범위를 어느 정도 결정할 필요가 있다.

#### 3.6.1 기상조건

##### (1) 기온

기온은 나라별로 다르기 때문에 우리나라의 누적된 기상데이터를 조사하여 결정하는 것이 타당하지만 우리의 기후조건이 일본과 비슷하고, 각종 규격 및 송전관련 기준에서 40℃를 최고온도로 적용하고 있으므로 일본과 같은 40℃로 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다.

##### (2) 풍속

최소풍속으로는 미국의 시가지에서 측정결과가 0.6 m/sec로 보고되었고, 일본의 측정결과는 설계풍속인 0.5 m/sec보다 낮은 풍속이 20%정도 되는 것으로 보고되었다. CIGRE, IEEE, IEC에서는 명확히 규정되어 있지는 않으나 계산예로서 CIGRE는 0.5m/s, IEEE는 0.62 m/s, IEC는 1.0 m/s를 적용하고 있다. 따라서 현재 적용하고 있는 0.5 m/s는 안전한 값은 아니지만 기온, 풍속, 일사량의 기상조건이 모두 동시에 발생할 가능성은 작기 때문에 큰 영향은 없다고 보고되고는 있다. 따라서 우리나라 도시지역의 최소풍속에 대

한 충분한 조사를 통한 적용이 필요하다고 판단된다.

##### (3) 일사량

일사량은 각 규격에서 제시한 방식에 의해 계산할 경우 추정이 가능한 범위내에서는 전류용량에 미치는 영향이 그다지 크지 않다. 따라서 일본처럼 0.1( $W/cm^2$ )를 적용하거나 다른 규격에 의해 산출된 값을 사용해도 크게 문제되지 않는다고 판단된다.

### 3.7 흡수율과 방사율

각 규격에 제시되어 있는 흡수율, 방사율을 정리하면 표4와 같고, 안전측으로 적용하기 위해서는 흡수율과 방사율을 모두 0.5로 적용하는 것이 바람직하다고 본다.

표 4. 각 규격의 흡수율과 방사율의 적용

	일본	CIGRE	IEEE	IEC
적용범위	0.08~0.9	0.27~0.95	0.23~0.91	-
대표치 (참고예)	0.9	0.5	0.5 또는 흡수율0.9 방사율0.7	흡수율0.5 방사율0.6

## 4. 결 론

이상의 검토결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

① 열평형식은 각 규격 모두 동일한 개념을 기본으로 하고 있다.

② 교류저항은 일본의 적용방식이 일괄적인 적용과 명확한 계산이 가능하다는 측면에서 가장 합리적이다.

③ 일사에 의한 흡수율의 산출은 각 규격이 동일하며, 일사량의 적용은 0.1( $W/cm^2$ )를 적용하거나 계산식을 적용해도 크게 차이가 발생하지 않는다.

④ 방사에 의한 열방산은 각 규격 모두 동일하다.

⑤ 대류에 의한 열방산은 각 규격별로 다소 차이가 있으나 CIGRE의 방식으로 통일되고 있는 추세로서 풍향각을 고려한 CIGRE 방식이 가장 합리적이다.

⑥ 기상조건 적용은 기온 40℃, 풍속 0.5m/sec를 적용하는 것으로 하되 향후 우리나라의 기상정보를 분석하여 결정할 필요가 있다고 사료된다.

⑦ 도체의 태양광선 흡수율과 표면으로부터의 방사율은 건설초기에 과부하가 걸리지 않는다는 가정하에서는 0.9를 적용해도 되지만 안전측으로 적용하기 위해서는 0.5를 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

따라서 이를 종합하면 전선의 전류용량 산출방식에 대해서 각 규격을 검토한 결과 CIGRE 또는 IEEE의 방식에 따르되 교류전류의 계산은 일본의 방식을 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다.

또한 송전선로의 부하를 실시간으로 감시하여 가능한 최대의 전력을 송전하기 위해서는 확률론적인 전류용량의 산출기법의 개발과 국내의 기상조건에 대한 면밀한 분석이 필요하다고 사료된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 일본 전기학회 전력기술위원회, "가공송전선의 전류용량", 전기학회기술보고, 제660호, 1997년 12월
- [2] CIGRE WG22-12, "The Thermal Behaviour of Overhead Conductors", ELECTRA, No.144, 1992.8
- [3] IEEE, "IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors", IEEE Std 738-1993
- [4] IEC, "Overhead electrical conductors-Calculation methods for stranded bare conductors", IEC-1597, 1995
- [5] N.P.Schmidt, "Comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards", IEEE Power Delivery, Vol.32, 1988.4, pp.789-800