

논문 19-5-14

장력과 풍속이 ACSR가공송전선의 온도에 미치는 영향

Effect of Tension and Wind Velocity on Temperature of ACSR Overhead Conductor

김상수^{1,a}, 김병걸¹, 이동일², 민병욱³
(Shang-Shu Kim^{1,a}, Byung-Geol Kim¹, Dong-Il Lee², and Byung-Uk Min³)

Abstract

A research was undertaken on the thermal properties and behavior of the conductors in a controlled chamber, which was designed to implement the outdoor air temperature, heat and wind conditions. With ACSR 410 mm² overhead conductors, we measured the maximum temperature of the conductors and the temperature gradient from the core to the surface regions as a function of current, tension, wind velocity and outdoor air temperature. This test also provided a comparative analysis between the measured temperature values of conductors in the controlled chamber and the theoretical calculations of ANSI/IEEE at normal condition. There was not much influence of tension on the conductor temperature. However, the compactness of conductor wires increased with an increase in tension, which eventually increased the coefficient of effective thermal conductivity and, accordingly the conductor temperature was reduced more or less.

Key Words : ACSR conductor, Conductor temperature, Conductor temperature gradient

1. 서론

송전선로의 경과지 확보의 어려움, 환경 문제 및 민원증가로 인하여 송전선로 건설이 용이하지 않게 됨에 따라 기존 선로의 전력공급량을 증대시키는 방안의 하나로서 송전선의 허용용량을 합리적 재산정이 필요하게 되었다. 특히 선로의 기상조건, 계절별로 다르게 나타나는 전선의 최대온도를 정밀하게 평가하면 추가적인 선로건설 없이 허용용량 증대가 가능하다.

초기전류모델은 전류와 전선온도간의 관계에서 전선내의 방사 변수들을 무시하였다. 이러한 가정은 전선이 상대적으로 직경이 작고 아주 높은 열

전도성을 가지고 있다는 이유로 쉽게 인정되었다. 그 결과 전선내의 온도구배는 거의 무시되었다. 그러나 실제로는 전선내의 온도구배는 5 ~ 15 °C로 상당한 차이를 나타내었다. 이러한 온도구배는 풍속과 전류 및 외기온도, 전선의 장력 등의 외기환경에 따라 달라진다.

이 논문은 ACSR 410 mm²전선에 대하여 전선의 전류용량과 직접적인 관련이 있는 정상상태 전선온도, core/도체표면간의 온도기울기에 대하여 조사하였으며 장력 및 풍속 등의 외기변수에 대한 전선온도의 변화를 환경챔버에서 직접적으로 실측하였다.

1. 한국전기연구원 재료응용연구단 신소재응용연구그룹 (경남 창원시 성주동 28-1)
 2. 한국전력공사 전력연구원
 3. 한국전력공사 송변전처 송변전건설팀
- a. Corresponding Author : shangshu@keri.re.kr
 접수일자 : 2005. 12. 23
 1차 심사 : 2006. 2. 28
 심사완료 : 2006. 3. 29

2. 실험

풍속, 장력 등이 전선온도와 전선내의 온도기울기에 미치는 영향을 조사하기위하여 사용된 전선은 ACSR 410 mm²전선이며 기본적인 특성은 표 1에 나타내었다[1]. 시험은 환경챔버에서 실시하였

표 1. ACSR 410 mm² 전선의 기본 물성.

Table 1. Basic properties of ACSR 410 mm² conductor.

type	strands, diameter	tensile load kgf	overall diameter mm	전기저항 Ω/km
ACSR 410 mm ²	26/7, 4.5/3.5	13,890	28.8	0.066

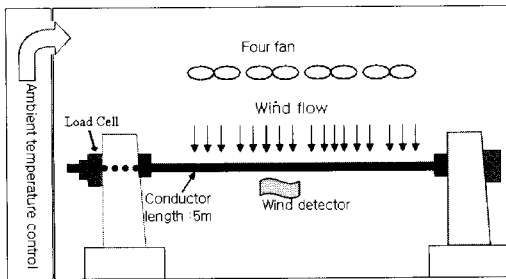


그림 1. 환경챔버 개략도.

Fig. 1. Outline of controlled chamber.

으며 개략도를 그림 1에 나타내었다. 사용된 전선의 길이는 최대 5 m이며, 전선 2개를 평행하게 설치하고 양끝을 압축 clamp에 고정하여 장력기에 가설하였다. 이때 장력기와 전선 간에는 절연처리를 하였다. 전선의 온도는 약 50 cm 간격으로 3지점에서 측정하였으며 한 지점에서 3개의 열전대를 이용하여 core, 내층 알루미늄도체, 표면온도를 측정하였다. 전선에 약 0.5 mm의 구멍을 내고 T-type 열전대를 부착한 다음 도전성 에폭시로 막았다. 전선에서 열전대의 위치는 그림 2에 나타내었다.

풍속은 무풍에서 최대 20 m/s까지 변화시켰으며 전선의 위치에서 풍속계에 의하여 기록되었다. 풍향은 전선과 수직을 이루고 있다.

Data는 HP 34970A에 의해 기록되었다. 측정간격은 약 10초에서 5분 간격으로 T-type 열전대를 사용하여 컴퓨터에 자동 저장되었다.

시험변수는 풍속(무풍에서 최대 20 m/s), 장력(무부하에서 20 %TS)이다.

시험목표는 a) 전선온도에 미치는 풍속 영향 b) 이론적으로 계산된 전선온도와 실제 측정된 전선온도와의 비교 c) 전선온도에 미치는 장력의 영향 d) 전선 내에서의 온도기울기를 조사하는 것이다.

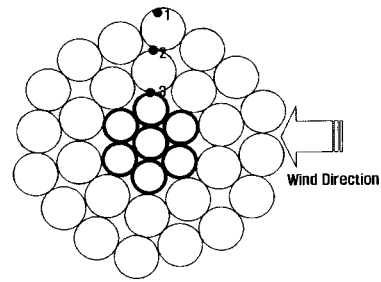


그림 2. 전선내의 열전대 위치.

Fig. 2. Location of thermocouples in conductor.

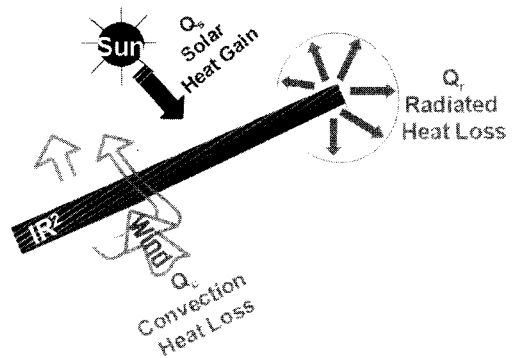


그림 3. 가공송전선과 열적환경.

Fig. 3. Conductor and its thermal environments.

3. 결과 및 고찰

3.1 ACSR 가공송전선의 이론적 열적모델

정상상태에서 전선의 온도는 그림 3에 나타난 바와 같이 에너지 보존법칙이 성립된다. 즉, 도체 저항에 의한 주울열과 태양에 의해 흡수되는 열(Q_s)의 합이 대류에 의한 열손실(Q_c)과 방사에 의한 열손실(Q_r)의 합이 같아지는 온도가 전선의 정상상태 온도이다. 에너지보존의 법칙이 성립하는 전선온도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

ANSI/IEEE에 의하면 대류에 의한 열방산은 풍속과 풍향각(K_θ), 외기온도 및 도체의 온도에 의해 영향을 받으며 저풍속 영역(Q_{CF1})과 고풍속 영역(Q_{CF2}) 및 자연대류(Q_{CN})로 구분된다.

$$Q_{cF1} = [1.01 + 0.372 \left(\frac{D \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \right)^{0.52}] \cdot k_f(T_c - T_a) [W/m] \quad (2)$$

$$Q_{cF2} = 0.0119 \left(\frac{D \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \cdot k_f(T_c - T_a) [W/m] \quad (3)$$

$$Q_{cN} = 0.0205 \cdot \rho_f^{0.5} \cdot D^{0.75} \cdot (T_c - T_a)^{1.25} [W/m] \quad (4)$$

$$K_s = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 \cdot \cos(2\phi) + 0.368 \cdot \sin(2\phi) \quad (5)$$

방사에 의한 열방산(Q_r)은 전선과 대기와의 온도차와 방사계수에 의해 도출되며 식 (6)과 같다.

$$Q_r = 0.0178 \cdot D \cdot \epsilon \cdot \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] [W/m] \quad (6)$$

도체가 태양으로부터 흡수되는 열은 태양의 경사각, 위도등에 따라 달라지며 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_s = \alpha q_s (\sin\theta) A' [W/m] \quad (7)$$

전선의 주열은 전류에 대한 도체의 저항으로 발생하는 열이며 온도에 대한 전선의 저항은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{dc}(T_c) = R_{dc}(20) [1 + \alpha_{20}(T_c - 20)] \quad (8)$$

결과 식을 단순화하기 위하여 정상상태에서의 열평형 방정식은 다음과 같은 가정을 하였다. 전선 재료의 열전달은 일정하며 연선재는 각 소선들 간에 우수한 열접촉성이 있다. 전선의 전기저항은 온도에 따라 선형적으로 증가하며, I^2R 열은 전선내 각 재료를 통하여 일정하게 발생된다는 가정을 하였다[2,3]. 식 (2) ~ 식 (8)로 부터 열 방산(Q_c , Q_r)과 열 흡수(Q_s , R_{dc})의 평행방정식에서 구한 전선의 연속허용온도 90 °C에 대한 허용전류는 약 848 A이다. 이때 외기온도는 40 °C이며 풍속은 0.5 m/s로 전선과 수직방향이다.

3.2 환경챔버와 field

풍속 및 전류, 외기온도에 대한 환경챔버의 타당성을 살펴보기 위하여 동일한 조건에서 field 시험과 환경챔버 시험을 실시하였다. 그림 4는 환경챔버와 filed에서 풍속변화에 대한 전선의 평균온도를 나타낸 것이다. 이용된 전선은 STACIR/AW

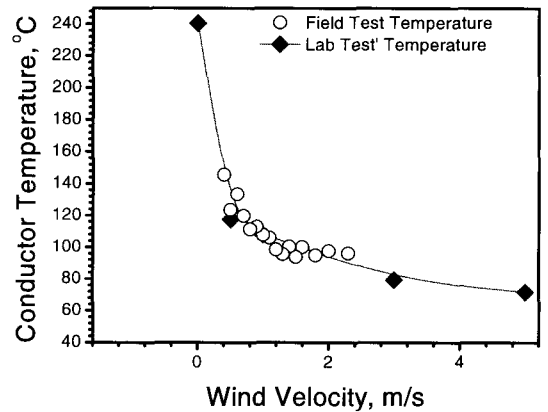


그림 4. Field 시험과 lab시험 비교.

Fig. 4. The comparison between lab test and field test.

표 2. STACIR/AW 410 mm²전선의 기본 물성.
Table 2. Basic properties of STACIR/AW 410 mm² conductor.

type	strands Al/core	tensile load kgf	overall diameter mm	전기저항 Ω/km
STACIR/AW 410 mm ²	26/7	12,720	28.8	0.0686

410 mm² 전선으로 기본적인 특성은 표 2에 나타내었다. Field 시험 경간은 350 m이며 경간의 중심에서 전선온도를 측정하였다. 전선온도는 core부와 표면부에서 T-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 풍향, 풍속계를 철탑에 설치하여 실시간으로 data를 저장하였다. 환경챔버에서는 태양에 의한 열흡수가 구현되지 않은 반면에 field data는 태양에 의한 열흡수분이 포함되어 있다. 태양에 의한 전선온도변화는 열적모델에 의하면 최대 10 °C 내외로 나타났다[2]. 환경챔버에서 시험한 STACIR/AW 전선온도는 동일한 조건에서 시험한 야외시험 결과와 거의 일치하였다. 두 결과 모두 풍속에 대하여 전선온도는 지수 함수적으로 감소하였다. 야외시험의 풍속변화는 약 0.4 m/s ~ 2.3 m/s로 변화하였으며 이때 전선온도는 약 145 °C ~ 90 °C로 나타났다. 야외시험과 동일 조건에서 시험한 환경챔버내 전선온도는 140 °C ~ 80 °C로 태양에 의한 열흡수를 고려하면 거의 동일한 결과를 나타내었다.

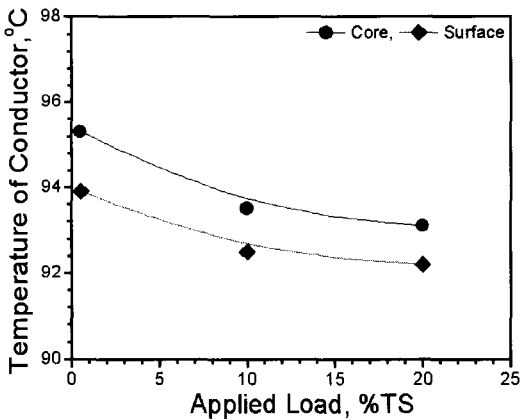


그림 5. 850 A, 무풍 상태에서 장력에 따른 전선 온도.

Fig. 5. The change of conductor temperature at 850 A and no wind.

3.3 장력의 영향

전선의 온도는 외기 온도, 풍향, 풍속, 등과 같이 대기에 의해 영향을 받지만 이외에도 전선의 장력, compactness와 같이 전선의 제조이력과 가설조건에 의해서도 다소 영향을 나타낸다.

그림 5는 ACSR 410 mm² 전선에서 인가되는 장력에 따른 전선온도를 나타낸 것이다. 무부하와 인장하중의 10%(1390 kgf), 20%(2800 kgf) 인가장력에 대하여 정상상태 전선온도를 조사하였다. 전선온도는 장력이 증가함에 따라 미미하지만 다소 감소하였다. 장력을 인장하중의 20%로 인가한 경우 전선 표면온도는 약 93.1 °C로 무부하에 비해 약 2 °C 정도 감소하였다. 또한 전선 내 온도구배($\Delta T = \text{core온도} - \text{전선표면온도}$)는 무부하 상태에서 약 1.5 °C로 나타났지만 20%TS로 인가한 장력에서는 약 1.1 °C로 다소 감소하였다. 이는 장력이 증가함에 따라 각 도체간의 compactness가 증가하여 방사열전도도가 높아지기 때문이다. 전선의 열전도는 전선의 compactness에 의존한다. 즉 전선의 compactness가 좋을수록 우수한 열전도를 나타내며 전선온도는 낮게 나타난다[2-5].

3.4 풍속의 영향

가공송전선에서 풍속과 풍향은 대류에 의한 열손실을 활발하게 진행시켜 전선온도를 감소시킨다. 대류에 의한 열손실은 ANSI/IEEE에 의하면 고풍속과 저풍속영역으로 분류되며 약 1.2 m/s이하는 저풍속 영역으로 식 (2)에 의해 계산되며 1.2 m/s

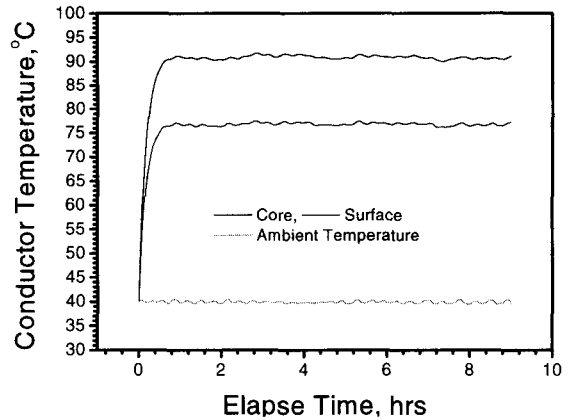


그림 6. 풍속 0.5 m/s에서 전선온도.

Fig. 6. Conductor temperature at 0.5 m/s wind velocity.

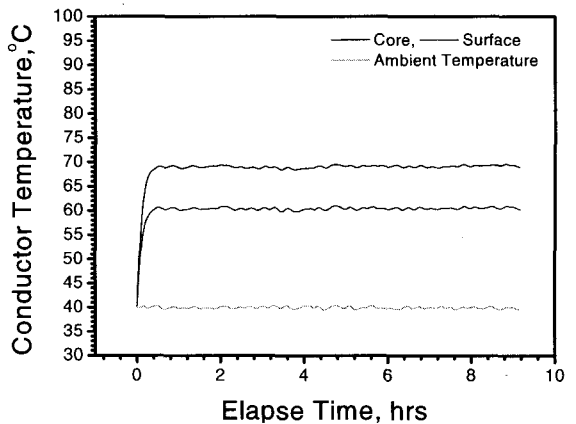


그림 7. 풍속 3.0 m/s에서 전선온도.

Fig. 7. Conductor temperature at 3.0 m/s wind velocity.

이상의 풍속에서는 식 (3)에 의해 계산된다. 풍향각에 따른 냉각은 식 (5)과 같으며 풍향각 90°와 풍향각 40° 사이에 약 10%의 냉각효율이 나타나는 것으로 보고되고 있다[2,3].

그림 6과 그림 7은 외기 온도 40 °C, 전류 1200 A에서 풍속 0.5 m/s, 3 m/s에 대한 전선온도변화를 나타낸 것이다. 풍향각은 전선과 수직이며 전선 내의 core와 표면온도를 측정하였다. 시험동안 환경챔버내 온도는 ± 1 °C 이내로 거의 일정하였다. 전선온도는 전류에 대하여 초기에는 급격하게 증

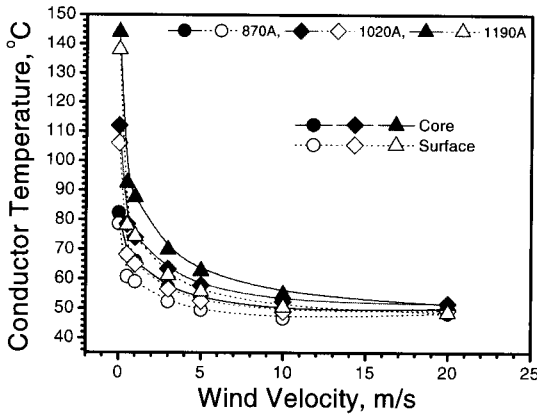


그림 8. 풍속에 따른 전선온도 변화.
 Fig. 8. Change of conductor temperature in accordance with wind velocity.

가하였으며 약 1시간 후 거의 포화되어 정상상태에 도달하였다. 0.5 m/s 풍속에서 전선 최대온도는 core와 표면에서 각각 92.3 °C와 78.1 °C를 나타내었으며 3.0 m/s 풍속에서는 각각 69.8 °C와 61.2 °C로 풍속 증가에 따라 전선온도는 감소하였다.

전류가 인가되면 전선 내 core와 표면에서 온도구배가 발생되었다. 전선내 온도구배는 풍속 0.5 m/s에서 약 14.2 °C이며 3 m/s로 풍속이 증가하면 약 8.6 °C로 감소하였다. 풍속이 증가하면 온도구배는 전선내의 열전달계수 변화로 인하여 감소하는 것으로 알려져 있다[6-8].

풍속을 무풍에서 최대 20 m/s까지 변화시키면서 그림 7과같이 시험한 후 정상상태의 전선온도를 나타낸 것이 그림 8이다. 전선온도는 풍속에 대하여 지수 함수적으로 감소하였으며 전선온도에 영향을 미치는 장력, 외기온도, 전류 등의 인자 중에서 풍속에 가장 민감한 반응을 나타내었다. 3 m/s 이하 풍속에서 전선온도는 급격히 감소하였으나 3 m/s 이상 풍속에서 전선온도 감소는 둔화되었다.

ACSR 410 mm²전선에서 외기온도 40 °C, 전류 1190 A 풍향각 90°, 풍속 1 m/s에서 실측된 전선온도는 약 87.5 °C이다. 위 조건에서 전선온도 87.5 °C를 유지하기 위한 이론적인 전류량은 1093 A로 실측치에 비하여 약 100 A(6.7 °C)정도 낮게 나타났다. 풍속 3 m 이상에서는 이론적인 전류량과 실측값 간에 거의 30 A(2 °C) 이내로 잘 일치하였다.

높은 외기온도, 고전류, 고풍속에서 이론적으로 계산된 전선온도와 실측된 전선온도는 잘 일치한

반면 저 풍속하에서는 이론적으로 계산된 전선온도가 다소 높게 나타났다.

풍속에 의한 전선 온도는 앞서 식 (2)와 식 (3)의 대류에 의한 열손실을 변화에 직접적인 영향을 받는다.

식 (3)의 높은 풍속에서 발생하는 대류 열손실에서는 대기와 전선표면간의 원활한 흐름에 의해 이론적인 온도와 실험적 전선온도간에 일치하거나 저 풍속시에는 전선 뒷 부위에서 발생하는 소용돌이로 인해 열발산이 원활하지 못한 것과 전선의 형상에 따른 표면적, 방사계수 변화, 전선온도에 기인된 것으로 사료된다[2,3,9]. 이론적인 전류모델은 앞서 언급한 바와 같이 전선을 구형으로 간주하였으나 실제 전선은 각 소선이 연선된 형태이다. 연선된 소선에서 대기와 접촉하고 있는 표면적은 구형으로 간주한 이론모델에 비해 크다.

3.5 전선 온도구배

ACSR가공송전선은 알루미늄과 강선이 다층 구조를 이루고 있다. 다층구조와 소선들에 의해 연선되어 있는 전선은 단일 금속체에 비하여 열전달이 효과적이지 못하고 또한 연선된 소선들 사이에 갇힌(trapped) 공기로 인하여 유효 열전달계수는 감소기 때문에 전선내에서 온도구배를 나타낸다[4,5].

그림 9는 전류 870 A와 1190 A에서 풍속에 따른 core와 표면 온도구배를 나타낸 것이다. 그림 9의 풍속에 대한 온도구배와 그림 5의 장력에 대한 온도구배에서 나타남과 같이 풍속과 장력이 증가하면 전선 온도구배는 감소하였다. 외기온도 40 °C, 장력 1000 kgf, 전류 870 A, 풍속 1 m/s에서 전선 core와 표면간의 온도구배는 약 6.9 °C이며 풍속 20 m/s에서는 1.6 °C로 감소하였다. 이와 같이 풍속이 증가하면 전선에서의 온도구배는 감소한다. 이는 저풍속 영역에서는 대류에 의한 열손실이 전선표면부에만 영향을 나타내지만 고풍속 영역인 경우 대류에 의한 열손실의 영향 폭이 증가하여 전선 내부 core부까지 그 영향을 미치기 때문에 전선내에서 온도구배가 감소한다. 또한 풍속이 증가하면 전선의 평균온도를 감소시킨다. 이러한 낮은 전선온도는 알루미늄의 하중분담율을 증가시켜서 전선의 compactness를 좋게 만들어 열전도율 향상시키기 때문에 전선내 core와 표면간의 온도구배를 감소시킨다[2,3,6,7].

이외에 전선의 온도구배를 증가시키는 인자로는 전선에 인가되는 장력의 감소와 외기온도의 증가 등이 있다[2].

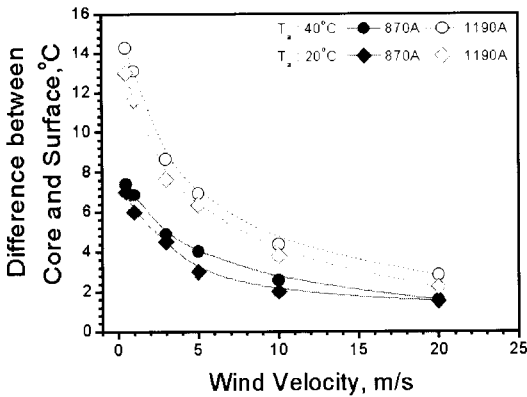


그림 9. 풍속에 따른 전선내 온도구배.
 Fig. 9. Temperature gradient in conductor in accordance with wind velocity.

ACSR전선에서 compactness는 전선 직경과 알루미늄의 응력분담율에 의존한다. 즉 전선내에서 알루미늄에 인가되는 응력이 클수록 각 연선간의 접촉은 더 많아지고 전선은 팽팽하게 조여지기 때문에 compactness는 증가한다.

또한 전선의 온도에 의해서도 전선내 온도구배가 발생한다. ACSR전선의 하중천이온도는 약 90°C로 이 온도이상에서는 선팽창계수의 차이에 의하여 알루미늄은 거의 하중을 분담하지 않고 강심이 전선하중을 담당하게 된다. 하중천이온도 이상에서는 전선에 birdcaging이 발생되어 소선들의 접촉성은 감소되고 이로 인하여 열전도율이 감소된다. birdcaging 발생온도는 전선을 가설할 때 이도를 맞추기 위한 pretension과 각 소선의 creep, 각 소선의 열팽창계수 등에 의해 영향을 받는다[8].

4. 결 론

ACSR 410 mm²전선에서 장력, 풍속이 전선의 열적거동에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과 다음과 같이 정리하였다.

1. 전선의 온도에서 장력은 큰 영향을 나타내지는 않지만 장력의 증가에 따라 전선내 소선의 밀착성증가로 유효열전달계수가 증가되어 전선온도가 다소 감소하였으며 전선내 온도구배도 감소하였다.

2. 풍속은 전선온도에 지수 함수적으로 영향을 나타내며 특히 3 m/s이하 저풍속 영역에서 전선온도는 풍속에 급격한 감소를 나타내었다. 이론적으로 계산된 전선온도와 실측된 전선온도는 3 m 이상의 풍속에서는 2 °C 이내로 거의 일치하였지만 저풍속에서는 이론적으로 계산된 전선온도가 다소 높게 나타났다.
3. 전선내의 온도구배는 풍속 및 장력이 증가할수록 감소하였다. 전선온도가 증가하면 전선에서 birdcaging 발생과 compactness 감소로 인하여 유효열전달계수가 감소하기 때문이다.

참고 문헌

- [1] 김병걸, 김상수, "ACSR가공송전선의 기계적 및 전기적 특성변화", 한국전기전자재료학회 2005학계학술대회논문집, 6권, p. 619, 2005.
- [2] W. Z. Black, S. S. Collins, and J. F. Hall, "Theoretical model for temperature gradients within bare overhead conductors", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, p. 707, 1988.
- [3] J. F. Hall, A. K. Deb, and J. Savoullis, "Wind tunnel studies of transmission line conductor temperature", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, p. 801, 1988.
- [4] House, H. E. and Tuttle, P. D., "Current carrying capacity of ACSR", AIEE Trans. PAS, Vol. 78, Part III, p. 1169, 1959.
- [5] National Electrical Safety Code, 1984 Edition.
- [6] P. Hautefeuille, "Etude sur l'échauffement desconducteurs bimallique en cas decourt-circuit", bull. Soc. Franc. Elect., 1964.
- [7] V. T. Morgan, "Electrical characteristics of steel-cored aluminum conductors", Proc. IEE, Vol. 112, No. 2, p. 325, 1965.
- [8] Douglass, D. A., "Radial and axial temperature gradients in bare stranded conductor", 85 SM 402-3.
- [9] V. T. Morgan, "The thermal rating of overhead-line conductors Part II, A sensitivity anlysis of the parameters in the steady-state thermal model", Electric Power Systems Research, Vol. 6, No. 4, p. 287, 1983.