

가공송전선의 열적거동과 전류 및 외기온도의 영향

Effect of Ambient Temperature and Current on Overhead Conductor

김상수^{1,a}, 김병걸¹, 현석규¹, 이동일², 민병욱³

(Shang-Shu Kim^{1,a}, Byung-Geol Kim¹, Suk-Kyu Hyun¹, 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.

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

1. 서론

전류와 전선온도간의 관계에서 초기 전류모델은 전선을 복합도체가 아닌 단일체로 간주하였으며 전선 내에서 발생하는 방사 변수들을 무시하였다. 이러한 가정은 전선이 상대적으로 직경이 작고 아주 높은 열전도성을 가지고 있다는 이유로 쉽게 인정되었다. 그 결과 전선 내부 온도구배는 거의 무시되었다. 그러나 실제로는 전선 내에서 발생하는 온도구배는 5~15 °C(core온도-전선 표면온도)로 상당한 차이를 나타내었다. 이러한 온도구배는 풍속과 전류 및 외기온도, 전선의 장력 등의 외기 환경에 따라 달라진다.

최근 송전선로 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 허용용량 증대가 가능하다. ACSR전선류의 허용전류는 전선 온도 90 °C에 해당하는 전류로 ACSR 410 mm²의 경우 외기온도 40 °C와 풍속 0.5 m/s에서 약 848 A이다.

이 논문은 앞서 언급한 “장력과 풍속이 ACSR 가공송전의 온도에 미치는 영향”과 연결하여 전류와 외기온도가 전선의 온도와 전선 내 온도구배에 미치는 영향을 조사함과 동시에 실 선로에서 전선의 열적거동을 조사하였다.

2. 실험

전류와 외기온도가 전선온도와 전선내의 온도구배에 미치는 영향을 조사하기위하여 사용된 전선은 ACSR 410 mm²전선이며 기본적인 특성은 표 1에 나타내었다[1]. 시험은 환경챔버내에서 실시하였으며 개략도를 그림 1과 같다. 사용된 전선의 길이는 최대 5 m이며, 전선 2개를 평행하게 설치하고 양끝을 압축 clamp에 고정하여 장력기에 가설하였다. 이때 장력기와 전선 간에는 절연처리를 하였다.

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. 28

표 1. ACSR 410 mm²전선의 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

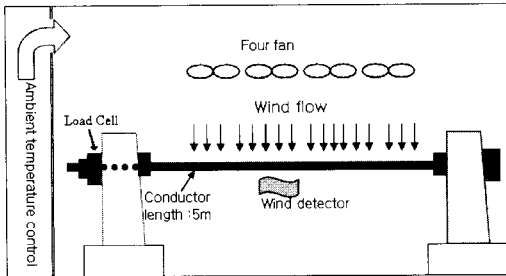


그림 1. 환경챔버 개략도.
Fig. 1. Outline of controlled chamber.

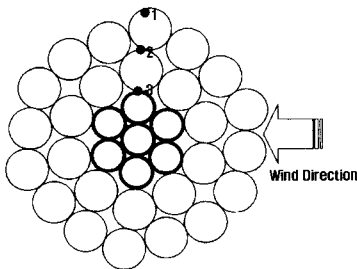


그림 2. 전선내의 열전대 위치.
Fig. 2. Location of thermocouples in conductor.

전류는 800 A에서 최대 1200 A까지 직류전원을 인가하였다.

전선의 온도는 약 50 cm 간격으로 3지점에서 측정하였으며 한 지점에서 3개의 열전대를 이용하여 core, 내층 알루미늄도체, 전선표면부의 온도를 측정하였다. 전선에 약 0.5 mm의 구멍을 내고 T-type 열전대를 부착한 다음 도전성 에폭시로 막았다. 전선에서 열전대의 위치는 그림 2에 나타내었다. 측정위치에 따른 전선온도의 변화는 약 5 °C 이내로 보고되고 있다[2,3].

외기온도는 -20 °C에서 최대 80 °C까지 조절이 가능하도록 하였으며 챔버내부의 각 지점에서 온도편차는 ±2 °C 이내를 유지하였다.

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

3. 결과 및 고찰

3.1 외기온도의 영향

그림 3 ~ 그림 4는 전류 1020 A, 풍속 1 m/s에서 대기온도 -10 °C, 40 °C에 대한 ACSR 410 mm²전선 온도변화를 나타낸 것이다. 대기온도는 식 (1)의 대류에 의한 열손실과 식 (2)의 방사에 의한 열손실에 의하여 동일한 전류 하에서도 대기온도에 따라 전선온도는 변화한다. 전류가 인가되면 전선온도는 인가시간에 따라 급격하게 증가되며 1시간 이후에서 거의 포화되어 정상상태에 도달되었다. 외기온도 40 °C, 풍속 1 m/s에서 전선의 온도는 core에서 약 74 °C이고 표면부에서 65 °C를 나타내었으며 온도구배는 약 9 °C를 나타내었다. 외기 온도 -10 °C에서 core부 온도는 13.6 °C이고 표면부는 7.9 °C로 약 5.7 °C의 온도구배를 나타내었다.

$$Q_{conv} = 0.0119 \left(\frac{D \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \cdot k_f (T_c - T_a) [W/m] \quad (1)$$

$$Q_r = 0.0178 \cdot D \cdot \epsilon \cdot \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] [W/m] \quad (2)$$

외기온도의 증가에 따라 동일한 전류에서 전선온도는 증가함과 동시에 전선내부 온도구배도 증가하였다. 이는 전선의 온도가 증가하면 알루미늄도체의 하중분담이 감소하고 core의 하중분담이 증가한다. 이로 인하여 알루미늄도체와 core의 접촉성을 감소시켜 열전도율이 감소되어 전선내 온도구배가 발생된다[2,3,6,8].

그림 5는 풍속 1 m/s와 5 m/s, 전류 870 A와 1020 A에서 대기온도(T_a)에 대한 전선의 온도(T_c) 변화를 나타낸 것이다. 균일한 풍속과 전류 하에서 전선온도는 대기온도에 대하여 선형적인 관계를 나타내었다. 1 m/s 풍속에서 전선온도(T_a)는 외기온도(T_a)에 대하여 약 1.12 ~ 1.3 °C변화를 나타내었으며 5 m/s 풍속에서는 약 0.9 ~ 1.03 °C 변화를 나타내었다. 대기온도(ΔT_a)에 의한 전선온도(ΔT_c)는 거의 유사하였다. 풍속 1 m/s, 전류 870 A

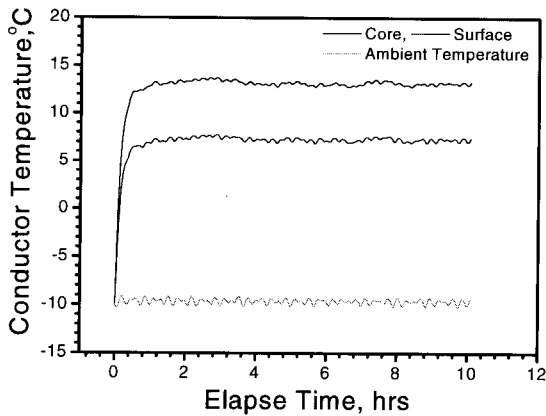


그림 3. 외기온도 -10 °C, 풍속 1 m/s하에서 전선 온도(1020 A).

Fig. 3. Temperature of conductor at -10 °C ambient temperature, 1 m/s wind velocity and 1020 A current.

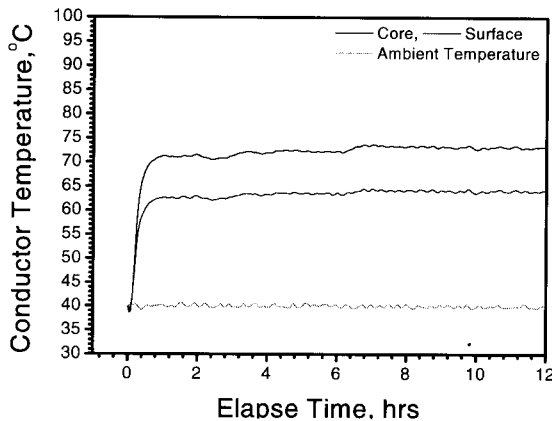


그림 4. 외기온도 40 °C, 풍속 1 m/s하에서 전선 온도변화(1020 A).

Fig. 4. Temperature of conductor at 40 °C ambient temperature, 1 m/s wind velocity and 1020 A current.

에서 대기온도 -10 °C에서 전선 온도는 약 5.0 °C 이고 대기온도 40 °C에서 전선온도는 65.9 °C로 대기온도차 50 °C에 대하여 전선온도차는 약 60 °C로 유사하였다.

3.2 전류의 영향

전류를 인가하면 전선 자체의 저항에 의하여 발생하여 전선온도는 증가한다. 각 풍속과 대기온도에

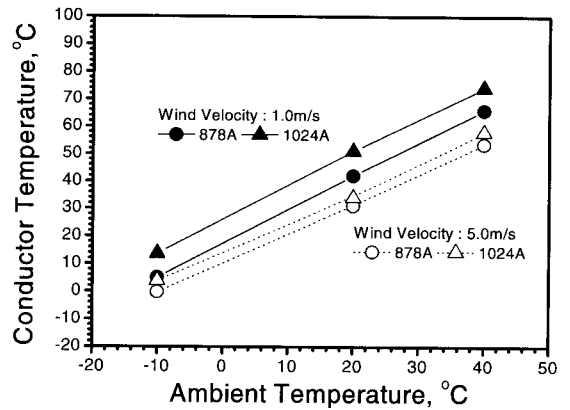


그림 5. 외기온도변화에 따른 전선 core온도.

Fig. 5. Temperature of conductor in accordance with ambient temperature.

서 전류를 변화시키면 그림 3과 같이 인가시간에 따라 전선온도는 증가한다. 그림 3과 같이 시험하여 포화온도인 정상상태에서 전선온도를 나타낸 것이 그림 6이다. 그림 6은 대기온도 40 °C와 20 °C와 풍속 1 m/s로 일정하게 유지하고 전류를 가변하여 전선온도를 측정하는 것이다. 대기온도 40 °C와 풍속 1 m/s, 전류 870 A에서 전선의 온도는 core에서 약 65.9 °C이며 전류 증가에 따라 전선의 온도는 증가하였다. 전류에 대한 core온도는 약 “0.07 °C×A”의 기울기를 가지며, 외기온도 20 °C, 풍속 1 m/s에서의 core온도는 전류에 대하여 “0.06 °C×A”로 외기온도가 감소할수록 전류에 대한 온도 기울기는 감소하였다. 실험적으로 인가된 전류 870 A에서 측정된 온도를 나타내기 위한 ANSI/IEEE의 이론적인 전류 830 A와는 약 40 A(3.0 °C)의 차이를 나타내었다. 이론적으로 계산된 전선온도가 실측된 전선온도에 비하여 약 3 °C정도 높게 나타났지만 거의 일치 하였다. 이론적으로 계산된 전선온도는 전선 core실측온도와 거의 일치하였지만 전선 표면온도에 비하여는 약 12 °C ~ 15 °C정도의 차를 나타내었다. 그러나 전류가 증가할수록 이론적으로 계산된 전선온도와 실험적으로 측정된 전선온도는 거의 일치하고 있음을 확인하였다. 고전류, 고풍속, 고장력하일수록 이론적 전선온도와 실측된 전선온도는 일치하는 경향을 나타낸다[2-8].

저전류, 저풍속에서 이론적 전선온도와 실측 전선온도 차는 대기 흐름에 의한 난류, 전선내 방사 계수의 변화 등이 주요 원인 중의 하나로 고려된다[6,7].

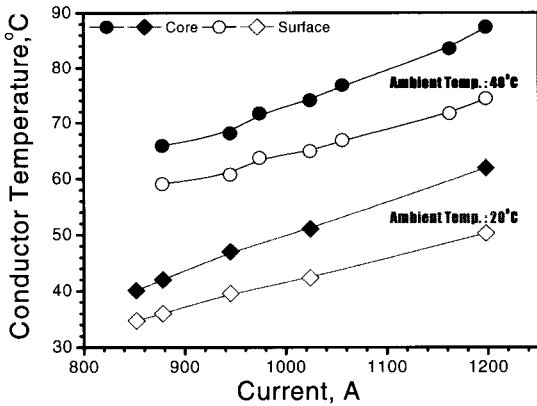


그림 6. 풍속 1 m/s에서 전류에 따른 전선온도.
Fig. 6. Temperature of conductor in accordance with current at 1 m/s wind velocity.

외기온도에 의한 전선내 온도구배 발생과 동일하게 전류변화에서도 전선내 온도구배가 발생되었다. 전류 증가에 따라 전선내 온도구배는 증가하였다. 풍속 1 m/s, 외기온도 40 °C에서 전류 870 A에서 전선 내 core와 surface간의 온도차는 약 6.8 °C이지만 1198 A에서는 약 13.1 °C로 증가하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 전선온도가 증가하면 알루미늄도체와 core의 선행창계수의 차이로 인하여 하중분담이 변화한다. 이로 인하여 전선내 birdcaging 이 발생되어 전선내 소선들의 열접촉성이 감소하여 유효열전도율이 나빠지기 때문이다.

3.3 Field에서 전선온도

풍속 및 전류, 대기온도 등의 변수들이 야외에서 미치는 영향을 조사하기 위하여 한국전력의 고창시험소에서 현장시험을 실시하였다. 사용된 전선은 STACIR/AW 410 mm²이며 기본적인 특성은 표 2에 나타내었다. 경간은 약 350 m이며 전선온도와 장력은 환경챔버에서와 동일한 방법으로 T-type 열전대를 부착하였으며 장력은 전선 끝단에서 측정하였다. 시험은 7월 8일 하계조건 맑은 날씨에서 하였으며 인가된 전류는 1700 A이다.

그림 7은 전류 1700 A에 대한 전선온도와 장력 변화를 나타낸 것이다. 일정한 전류에서 전선의 온도는 대기기온과 풍속변화에 따라 전선온도와 장력은 변화하였다. 전선의 온도를 결정하는 요소들은 대기온도뿐만 아니라 풍속과 일사량에 주로 영향을 받는다. 측정온도는 core에서 가장 높게 나타났으며 표면부에서 가장 낮게 나타났다. 도체와 표

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

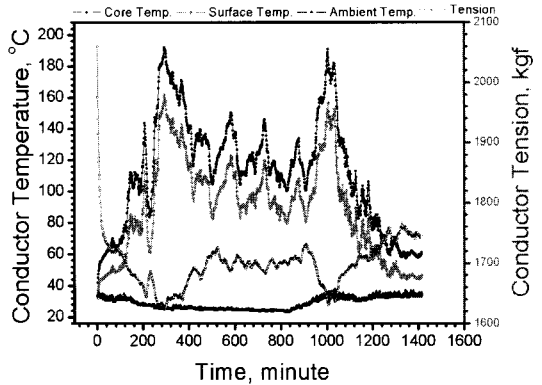


그림 7. 하계에서 STACIR/AW전선의 온도, 장력 곡선.
Fig. 7. Temperature and tension curve of conductor at summer.

면간의 온도차는 대략 10 °C정도이며 경우에 따라 20 °C 이상이 되기도 하였다.

전선온도가 높으며 도체가 받는 장력은 감소하는 반비례하는 특성을 나타내었다.

그림 8은 동일한 풍속과 대기온도에 대하여 풍향각에 따른 전선온도를 나타낸 것이다. 풍향이 전선에 미치는 영향은 식 (3)과 같으며 이는 식 (1)의 대류에 의한 열방산에 직접적인 영향을 나타낸다. 전선과 수직방향(90°)으로 바람이 인가 전선온도가 가장 낮으며 평행(0°)할 때 전선온도는 가장 높게 나타났다. 전선내의 온도측정 위치와 풍속의 방향에 따라 다소의 차이를 나타내었지만 전반적으로 약 19.1°의 풍향에서 core온도는 약 151.1 °C이며 90.7°의 풍향에서 온도는 119.6 °C로 전선의 수직방향에서 최소의 전선온도이며 20 %의 냉각효율을 나타내었다. 풍향에 따른 냉각은 풍향 0°와 풍향 90° 사이에 약 40 %의 냉각효율이 나타나는 것으로 보고되고 있다[2,3].

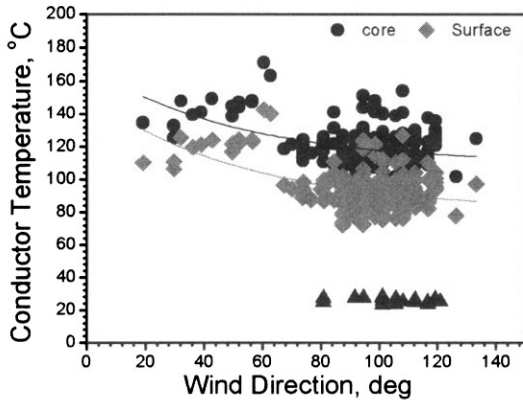


그림 8. 풍속 1.1 m/s에서 풍향에 따른 전선온도.
 Fig. 8. Temperature of conductor in accordance with wind direction at 1.1 m/s wind velocity.

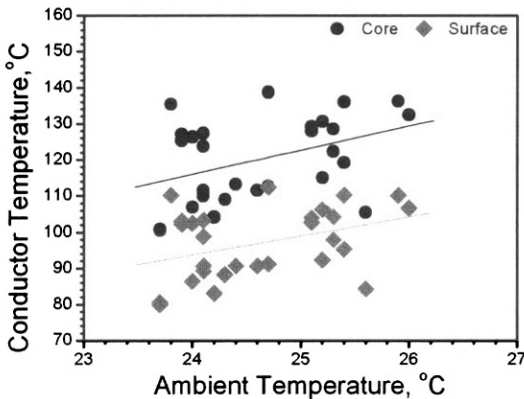


그림 9. 풍속 1.1 m/s, 대기온도에 따른 전선온도.
 Fig. 9. Temperature of conductor in accordance with ambient temperature at 1.1 m/s wind velocity.

$$K_p = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 \cdot \cos(2\phi) + 0.368 \cdot \sin(2\phi) \quad (3)$$

그림 9는 풍속 1.1 m/s에서 대기온도에 따른 전선온도를 나타낸 것으로 앞서 환경챔버에서 나타낸 그림 5의 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 즉 대기온도가 증가할수록 전선온도는 증가하였다. 또한 외기온도 증가에 따라 전선내 온도구배도 증가하였다. 외기온도 증가하면 전선온도가 증가하여 전선내 알루미늄도체간의 열접촉성이 감소와 방사계수의 감소로 인하여 온도구배는 증가한다[9].

4. 결론

전류, 외기온도 등의 환경적 인자가 전선온도에 미치는 영향을 환경챔버와 실 선로의 현장 조사한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 외기온도는 전선온도에 선형적 관계를 유지하였다. 외기온도 증가분과 유사한 전선온도 증가 기울기가 나타났다.
2. 전류는 ACSR 410 mm²전선 온도와 비례관계를 나타내었으며 0.9 ~ 1.3 °C 온도 기울기를 나타내었다.
3. 전선내의 온도구배는 외기온도의 증가와 전류의 증가에 따라 증가하였다. 이는 전선온도가 증가하면 전선을 구성하고 있는 알루미늄도체와 강심의 선팽창계수의 차이로 인하여 하중분담이 변화하므로 인하여 열접촉성이 감소하기 때문이다.
4. 실 선로에서 조사한 STACIR/AW 410 mm²가 공송전선의 열적거동은 환경챔버내에서 시험한 결과와 거의 동일한 결과가 도출되었다.

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 des conducteurs bimétalliques en cas de court-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

analysis of the parameters in the steady-state thermal model", Electric Power Systems Research, Vol. 6, No. 4, p. 287, 1983.