Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 21, No. 10, p. 954, October 2008.

논 문 21-10-16

가공전선의 이도거동에서 탄성계수와 선팽창계수의 영향

The Effects of Elastic Modulus Coefficient and Linear Expansion Coefficient of Overhead Conductor on Sag Behavior

김병걸[1], 김상수[1,a], 왕윤찬[2]
(Byung-geol Kim[1], Shang-shu Kim[1,a], and Yun-chan Wang[2])

Abstract

The effects of elastic modulus coefficient and linear expansion coefficient of overhead distribution power line(ACSR 58 mm^2) on sag behavior in distribution line have been investigated to clarify the difference between specification and experimental level. The elastic modulus coefficients of Al wire and steel wire were 5,182.6 kgf/mm^2, 18,348.8 kgf/mm^2, respectively. Therefore, the computational composition elastic modulus coefficient of the power line was 7,063.5 kgf/mm^2, while that of experimentally measured was 7681.1 kgf/mm^2. As a result, we found that elastic modulus coefficient which was experimentally measured was higher than that of computational by 8.7 %. However, when planner designs the sag of distribution line, the elastic modulus coefficient of power line 8,400 kgf/mm^2 should be generally adopted. These two different using values lead to the sag difference of 0.62 m. The other results will be discussed.

Key Words : Sag, Modulus coefficient, Thermal expansion coefficient, Overhead conductor

1. 서 론

가공선로에 설치된 전선의 이도는 전선의 허용장력, 자중, 풍압하중 등 여러 요인에 의해 좌우되며, 탄성계수, 선팽창계수, 전선의 실장 또한 중요한 요인 중의 하나이다. 특히 선로의 길이는 송전중 전선의 온도가 상승함에 따라 전선 자체의 물성의 변화로 길이가 증가하게 되는데 이에 대한 고려가 이도설계시 충분히 반영되어야 한다. 그러나 현재 한전에서 규정화하고 있는 값은 전선 구성소재들의 상온 특성을 수치적으로 계산하여 도출한 상수를 사용하고 있기 때문에, 정확한 이도설계와 선로의 장기신뢰성을 위해서는 현재 적용되고 있는 계산치와 실제 전선을 이용하여 측정한 실측치와는 어떠한 차이가 있는가에 대한 조사와 검증이 필요한 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 현재 국내의 선로에 적용되고 있는 전선에 대해 전선자체의 탄성계수와 선팽창계수를 실측하여 그 값을 얻고자 한다. 또한 실험에 의해 나타난 탄성계수와 선팽창계수를 이용한 전선의 이도와 이론적인 값을 이용한 전선이도와 차이를 규명하고자 한다.

1. 한국전기연구원 재료응용연구단
(경남 창원시 성주동 28-1)
2. 한국전력공사 중앙교육원
a. Corresponding Author : shangshu@hanmail.net
접수일자 : 2008. 8. 29
1차 심사 : 2008. 9. 19
심사완료 : 2008. 9. 23

2. 실 험

이도에 영향을 미치는 물리적인 정수인 전선의 탄성계수와 선팽창계수 측정방법에는 두 가지 방법이 있다. 첫째, 전선을 구성하고 있는 각 소선의 탄성계수와 선팽창계수를 측정하여 식 (1)과 식 (2)에 의해 이론적으로 도출하는 방법으로 이는 기존에 주로 이용되고 있는 방법이다. 둘째, 실 전선으로 탄성계수와 선팽창계수를 측정하는 방법이다.

각 소선에 의한 탄성계수 도출은 전선을 구성하고 있는 소선에 대하여 인장시험을 실시하여 탄성계수를 도출하여 식 (1)에 의해 계산하는 방법으로 시험은 IEC 60888에 의해 실시하였다. 시험편 길이 약 300 ㎜에 대하여 100 ㎜ strain gauge를 부착하여 Cross Head Speed를 10 ㎜/min하였다. 탄성계수는 인장하중의 10 %에서 40 % 이내의 기울기로부터 도출 또는 초기 직선구간을 선정하여 계산하였다.

선팽창계수는 각 소선에서 도출된 탄성계수와 선팽창계수를 이용하여 계산하는 방식이 적용되고 있다. 소선의 선팽창계수는 TA사의 thermal mechanical analyzer를 이용하여 측정하였다. 시험편은 양 끝단은 정밀연마 하였다. 시험편 온도변화에 따른 길이변화는 센서를 통하여 컴퓨터에 자동적으로 저장되었다. 선팽창계수는 50 ℃와 150 ℃의 온도구간에서 시험편길이 변화의 기울기로부터 도출하였다.

$$E = \frac{mE_a + E_s}{m+1} \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{m\alpha_a E_a + \alpha_s E_s}{mE_a + E_s} \tag{2}$$

E_a, E_s : 알루미늄 및 강심의 탄성계수 [kgf/㎟]
α_a, α_s : 알루미늄 및 강심의 선팽창계수 [1/℃]
m : A_a/A_s
Aa, As : 알루미늄 및 강심의단면적[㎟]

실 전선에 의한 탄성계수는 미국의 알루미늄 전선 및 ACSR의 하중-신율 시험법과 일본의 전기협동 시험법에 준하여 실시하였다. 전선의 선팽창계수는 일본의 전기협동연구의 시험법에 준하였다[1]. 기본적으로 실전선에 의한 탄성계수 및 선팽창계수에 이용된 시험편은 최소 10 m 이상이며 중심부에 약 3 m ~ 4 m의 신율계를 부착하였다. 실 전선의 탄성계수 및 선팽창계수 측정에 이용된 시험방법의 개략도와 시험전경을 그림 1에 나타내었다.

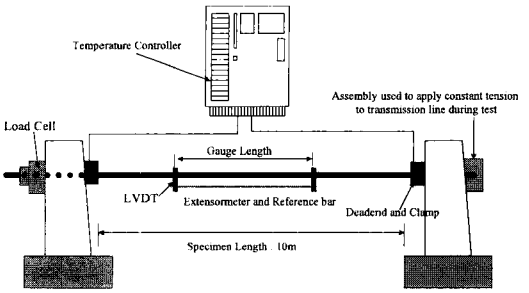

그림 1a). 가공송전선의 탄성계수와 선팽창계수를 측정하기 위한 개략도.
Fig. 1a). Schematic diagram of machine for E modulus and thermal expansion coefficient.

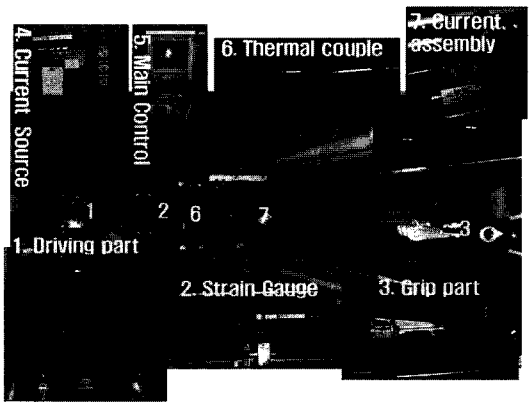

그림 1b). 가공전선의 탄성계수와 선팽창계수 측정.
Fig. 1b). Test of thermal expansion coefficient for overhead conductor.

3. 결과 및 고찰

3.1 가공전선의 이도

가공전선은 주위온도의 변화에 따라 팽창과 수축을 일으키고 또 전선에 가해지는 하중의 변화(풍압하중, 피빙하중)에 따라서도 탄성적인 신축을 일으킨다. 이들 신축은 전선실장 자체로는 높은 비율은 아니지만 그에 따른 전선의 장력과 이도변화는 매우 크기 때문에 이도계산이 전선의 장력설계에 중요한 계산이다. 전선의 이도는 식 (3)과 같다.

$$L = S + \frac{8D^2}{3S} \tag{3}$$

전선의 이도는 전선 실장과 경간에 의존하며 전선 온도에 따라 그 길이가 변화하고 또 장력을 받는 경우에 전선고유의 탄성에 따라 신축을 한다. 이러한 관계는 식 (4)와 같다.

$$\Delta L = \frac{\Delta T}{AE} + \alpha(t_2 - t_1) \quad (4)$$

식 (4)에서 전선 실장의 변화는 식 (3)의 전선 이도에 직접적으로 영향을 나타낸다. 또한 식 (4)에서 전선 이도에 직접적으로 영향을 미치는 물성은 탄성계수와 선팽창계수이다. 이와 같이 전선의 탄성계수와 선팽창계수의 오류는 전선 이도에 직접적인 영향을 나타내어 송배전의 운영에 막대한 악영향을 초래한다.

3.2 가공전선의 탄성계수

현재 가공전선의 탄성계수는 앞서 언급한 바와 같이 전선을 구성하고 있는 알루미늄도체와 강심의 탄성계수를 각각 도출하여 식 (1)과 같이 계산한 이론적인 탄성계수를 적용하고 있다. 그림 2는 ACSR 58 mm^2가공전선을 구성하고 있는 강심과 알루미늄도체의 응력-신율 곡선을 나타낸 것이다. ACSR 58 mm^2전선은 직경 3.5 mm의 강심을 중심으로 직경 3.5 mm의 알루미늄도체 6가닥이 연선되어 있는 구조이다.

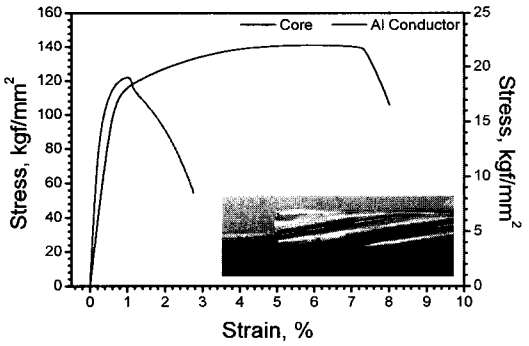

그림 2. ACSR 58 mm^2 가공송전선을 구성하는 강심과 도체의 응력-신율 곡선.

Fig. 2. Stress-Strain curve of ACSR 58 mm^2 conductor composited of Al conductor and core.

그림 2의 응력-신율 곡선은 금속재료의 전형적인 인장곡선으로 탄성영역을 지나 항복강도에서 소성변형이 시작되었으며 최대강도를 정점으로 국부적인 네킹(necking) 발생으로 인하여 최종 파단되는 형상을 나타내었다.

알루미늄 도체와 강심의 인장강도는 18.54 kgf/㎟, 140.07 kgf/㎟으로 KS C 3111과 KS C 3113의 최소인장강도 16.8 kgf/㎟과 130 kgf/㎟을 상회하는 값을 나타내었다. 그림 2의 응력-신율곡선에서 인장강도의 10 % ~ 40 % 정도의 직선구간으로부터 도출한 알루미늄 도체와 강심의 탄성계수는 각각 5182.6 kgf/mm^2, 18348.8 kgf/mm^2이다. 강심과 알루미늄도체에서 도출된 탄성계수를 식 (1)에 대입하여 ACSR 58 mm^2전선의 탄성계수를 구하면 약 7063.5 kgf/mm^2이다.

그림 3은 10 m 이상의 실 전선에 대하여 하중-신율 곡선을 나타낸 것이다. ACSR전선은 알루미늄도체와 강심의 이종금속으로 구성된 복합선재로 단선의 하중-신율곡선과는 다른 거동을 나타낸다. 그림에서 한 번의 루프(loop)에서 직선구간은 A, B, C 세 구간의 탄성영역이 나타난다.

직선 "A 구간"은 전선이 하중을 받으면 신율이 증가함에 따라 나타나는 탄성변형 구간으로 이 구간을 초과하는 하중에 의해 전선은 비탄성변형인 소성변형이 발생된다. 전선의 초기 하중 증가에 따라 나타나는 직선구간에서 초기 탄성계수(E_i)를 구할 수 있다.

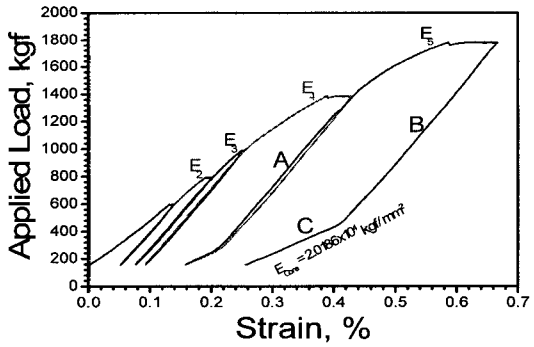

그림 3. ACSR 58 mm^2 가공송전선의 하중-신율 곡선.

Fig. 3. Load - strain curve of ACSR 58 mm^2 conductor.

"B 구간"은 최대 하중에서 하중을 감소하는 경우에 나타나는 신율특성으로 알루미늄도체와 강선이 각각 탄성적으로 작용하고 있는 부위로 전선의 탄성계수(E_f)를 언급할 때 적용되는 구간이다.

"C 구간"은 AAC와 같은 단일연선에서는 나타나지 않으며 ACSR과 같은 합성연선에서 나타나는

구간으로 영구 소성변형 영역으로 알루미늄과 강선이 각각 단면적과 인장강도 비에 의해 분담하는 전선의 하중이 강선으로 천이된 영역이다. C 구간에서 측정된 강선의 탄성계수는 약 20186 kgf/mm^{2}로 그림 2의 소선에서 얻어진 탄성계수 18348.8 kgf/mm^{2}에 비해 약간 높게 나타났지만 가공에 의한 증가분을 고려하면 거의 유사하게 나타난 것으로 사료된다.

B와 C의 경계점 하중이 시험 온도에서의 천이하중이다. 천이하중은 알루미늄의 영구 소성변형량에 의존한 하중이력에 의해 나타난다.

그림 3의 하중-신율 곡선에서 나타난 실 전선의 탄성계수(E_f) 7681.1 kgf/mm^{2}이다. loop의 횟수가 거듭될수록 전선의 탄성계수는 다소 증가하였다. 이는 전선의 인가하중이 항복강도 이상으로 증가하면 알루미늄도체와 강선이 소성변형을 받게 되어 가공에 의한 탄성계수가 증가되기 때문이다.

실 전선에 의해 측정된 탄성계수(7681.1 kgf/mm^2)가 소선에 의해 계산된 탄성계수(7063.5 kgf/mm^2)에 비해 다소 높게 나타났다.

3.3 선팽창계수

재료의 온도변화에 의한 길이 및 체적의 증가는 선팽창이며 온도변화에 의한 선팽창의 증분을 선팽창율이라 한다. 전선의 경우 이와 같이 온도변화에 대하여 길이변화를 선팽창계수라 하고 가선설계상 중요한 정수이다. ACSR전선은 선팽창계수가 서로 다른 이종금속으로 구성되어 있기 때문에 온도-신율 특성은 단선 또는 AAC와 같은 단일전선과는 다른 복잡한 거동을 나타낸다.

ACSR전선을 구성하고 있는 알루미늄 선팽창계수가 강선의 선팽창계수 보다 크다. 따라서 온도상승 시에 알루미늄은 크게 팽창하지만 강선은 알루미늄에 비해 팽창 정도가 작다. 일정 장력 하에서 ACSR 온도가 t(℃)까지 상승하면 알루미늄의 장력은 감소하고 강선의 장력은 증가한다. 각각의 부위에 인가되는 장력과 신율에 따라 정리하면 식 (2)와 같이 전선의 선팽창계수가 계산된다.

그림 4에 ACSR 58 mm^{2}전선을 구성하고 있는 알루미늄 도체와 강선의 온도-신율 특성을 나타내었다. 그림에 나타난 온도-신율 곡선에의 기울기로부터 알루미늄 도체와 강선의 선팽창계수를 도출하였다. 알루미늄 도체의 선팽창계수는 약 25.73 ㎛/m℃로 KS C 3111 전기용 경알루미늄선에 규정된 23.0 ㎛/m℃과 일본의 경알루미늄선 선팽창계수 23.1 ~ 24.6 ㎛/m℃에 비해 다소 높게 나타났다. 선팽창계수에 영향을 미치는 외부요인으로 "가공"이 있다. 즉 선팽창계수는 신선이나 압연과 같은 가공에 의해 그 값이 변화한다. KS C 규정 23.0 ㎛/m℃은 전선으로 연합되기 이전의 소선에 대한 규정이며 본 시험에서 도출된 선팽창계수 25.73 ㎛/m℃은 각 소선을 연합한 전선을 다시 해체한 단선에 대하여 측정한 수치이므로 연합하는 과정에서 가공으로 인한 선팽창계수가 다소 변화한 것으로 사료된다.

아연도금강선의 선팽창계수는 약 12.855 ㎛/m℃이다. 일본의 ACSR용 아연도금강선에 관한 선팽창계수 11.5 ㎛/m℃와 거의 유사하였다.

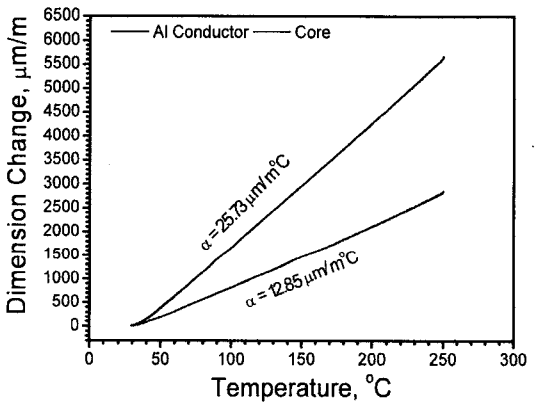

그림 4. 알루미늄도체의 온도-신율 곡선.

Fig. 4. Temperature-strain curve of Al conductor and core.

알루미늄도체와 강심으로부터 도출된 선팽창계수와 앞서 그림 2에서 측정된 탄성계수를 이용하여 식 (2)에 대입하여 구한 ACSR 58 mm^{2}전선의 선팽창계수는 약 20.95 ㎛/m℃로 나타났다.

그림 5는 ACSR 58 mm^2 실 전선의 온도-신율 곡선을 나타낸 것이다. 온도-신율 곡선상의 온도를 증가시키면서 나타난 직선 구간으로부터 얻어진 선팽창계수는 약 20.27 ㎛/m℃이며 온도를 감소시키면서 얻어진 선팽창계수 19.23 ㎛/m℃에 비하여 다소 높게 나타났다. 온도를 증가 시키면서 시험한경우의 선팽창계수가 다소 높게 나타난 것은 그림에서 시험온도를 최대 250 ℃까지 증가시켰다. 이러한 온도에서는 앞서 그림 4에서 언급한 바와 같이 알루미늄 도체 내에 신선과 같은 가공에 의해 도입된 잔류응력이나 전위 등이 소멸되는 현상

이 발생함으로 인해 온도감소시의 선팽창계수가 낮게 나타난 것으로 사료된다.

그림 4의 각 소선에 의해 도출된 전선의 선팽창계수(20.95 ㎛/m℃)와 실전선의 온도 증가 시 구한 선팽창계수(20.27 ㎛/m℃)는 거의 일치하였다.

전선의 선팽창계수에 영향을 미치는 인자로는 소선의 선팽창계수와 탄성계수, 그리고 알루미늄과 강선의 단면적 비이다. 알루미늄의 단면적이 많을수록 알루미늄의 선팽창계수의 영향으로 전선의 선팽창계수는 증가한다.

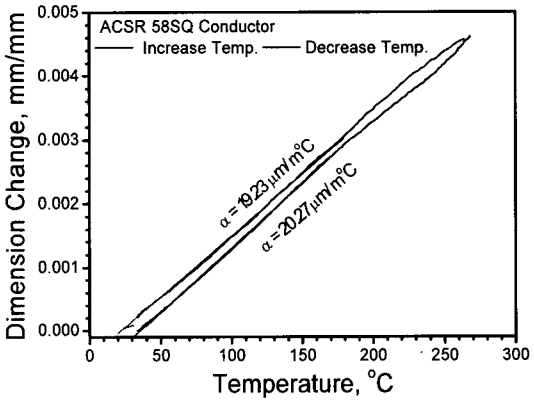

그림 5. ACSR 58 mm^2 가공송전선의 온도-신율 곡선.

Fig. 5. Temperature-strain curve of ACSR 58 mm^2 conductor.

온도에 대한 ACSR과 같은 합성연성의 탄성계수와 선팽창계수는 천이온도 전후에서 순간적으로 변화하며 소선간의 마찰이 없는 이상적인 상태에서의 변화와는 달리 실제로는 Al과 강선의 연선 상태이기 때문에 각 소선간의 마찰로 인하여 완만한 변화를 가진다.

3.4 이도변화

가공전선의 이도는 설치지역의 고온계 및 저온계 최악조건에서 단선이 되지 않도록 최대사용장력이 전선의 안전율을 초과하지 않도록 시설하여야 한다. 전선의 이도는 지지물의 길이, 강도, 선간간격의 결정에 직접적인 영향이 있다. 가공전선의 피해방지와 고장의 예방을 위하여 기계적 설계부분에서 전선이도 및 장력이 가장 우선적으로 고려되어야 한다. 앞서 식 (4)에 언급한 바와 같이 전선의 이도는 전선길이변화에 의해 결정되며 이러한 선간길이는 전선과 구성소재의 탄성계수와 선팽창계수에 의존한다. 본 연구에서는 이론적인 규정값과 실험적으로 도출한 탄성계수와 선팽창계수를 이용하여 이도의 오차를 규명하고자 한다. 표 1과 표 2에 ACSR 58 mm^{2}가공전선의 규격과 이도조건을 나타내었다.

간략하게 ACSR 58 mm^{2}전선의 이도 결정하면 다음과 같다. 식 (5)의 15 ℃ 무풍 무설 상태에서의 최대사용장력을 구한다. 이때 풍압하중을 28 kgf/mm^{2}으로 하였다.

$$T_{01}^3 + \{\frac{q_1^2 W^2 S^2 EA}{24 T_1^2} - T_1 + \alpha(t_{01} - t_1)EA\} T_{01}^2 = \frac{W^2 S^2 EA}{24} \quad (5)$$

전선의 규정치에 의해 도출된 전선의 최대사용장력(T_{01})은 약 501.94 kgf이다.

식 (5)에 의해 도출된 장력을 이용하여 식 (6)과 식 (7)에 대입하여 전선의 천이점장력(T_c)과 천이점온도(t_c)를 구한다.

$$(\frac{T_c}{T_{01}})^3 + (\frac{T_c}{T_{01}})^2 (M-1)\frac{(\alpha_a - \alpha)}{\alpha_a} = \frac{(\alpha_a - \alpha)}{\alpha_a} M \quad (6)$$

단 여기서 $M = \dfrac{W^2 S^2 EA}{24 T_{01}^3}$

$$t_c = t_0 + \frac{T_c}{E_s A_s (\alpha_a - \alpha_s)} \quad (7)$$

규정 값을 적용한 천이점장력(T_c)과 천이점온도(t_c)는 164.6 kgf와 85.8 ℃이다. 그러나 앞서 그림 2와 그림 4에서 구한 실험적 탄성계수와 선팽창계수를 대입하여 구한 천이점장력(T_c)과 천이점온도(t_c)는 129.0 kgf와 71.8 ℃로 규정 치와는 다소 오차를 나타내었다.

임의의 온도에서 이도를 구하기 위하여 먼저 임의 온도(t_2)에서 장력(T_2)을 구한다. 이때 임의 온도(t_2)가 천이점 온도(t_c) 이하인 경우는 식 (8)에 의해 구하고 임의 온도(t_2)가 천이점온도(t_c) 이상인 경우는 식 (9)를 따른다.

$$T_2^3 + \{\frac{q_1^2 W^2 S^2 EA}{24 T_1^2} - T_1 + \alpha(t_2 - t_1)EA\} T_2^2 = \frac{W^2 S^2 EA}{24} \quad (8)$$

$$T_2^3 + \{\frac{q_1^2 W^2 S^2 E_s A_s}{24 T_c^2} - T_c + \alpha_s(t_2 - t_c)E_s A_s\} T_2^2 = \frac{W^2 S^2 E_s A_s}{24} \quad (9)$$

표 1. ACSR 58 mm^2 가공송전선의 규격.
Table 1. Standard of ACSR 58 mm^2 conductor.

전선규격		㎟	58
도체 계산 단면적	AL	㎟	57.7
	ST	㎟	9.6
	계	㎟	67.3
도체외경		㎜	10.5
완성품 외경		㎜	10.5
개산중량		kg/㎞	233.1
도체인장하중		kg	1980
최대상정장력		kg	792.0
EDS 장력		kg	297.0

표 2. 가공송전선의 물성치와 이도.
Table 2. Standard of sag.

전선규격		규정치	실험값
탄성계수 kgf/mm^2	Al	6300	5182.6
	ST	21000	18348.8
	계	8400	7063.5
선팽창계수 μm/m℃	Al	23.0	25.73
	ST	11.5	12.86
	계	18.9	20.95
경간(m)		100	100
초기 상태(℃)		15	15
최악 상태(℃)		-15	-15

식 (8)과 식 (9)에 의해 도출된 임의 온도에서의 장력을 식 (10)에 대입하여 임의 온도에서 전선 이도가 결정된다.

$$d = \frac{W \times S^2}{8T_2} \tag{10}$$

초기 가설상태(15 ℃)에서 경간 100 m에 대한 전선 이도는 약 0.56 m이다. 전선온도 90 ℃에 대하여 기존 전선에 적용하고 있는 탄성계수와 선팽창계수를 식 (9)와 식 (10)에 대입하여 구한 전선 이도와 실험적으로 구한 탄성계수와 선팽창계수를 대입하여 구한 전선이도는 상당한 차이를 나타내었다.

전선온도 90 ℃의 전선이도는 규정치를 적용한 경우가 약 1.79 m이고 실험적으로 도출한 탄성계수와 선팽창계수를 적용한 경우가 2.47 m로 약 0.62 m의 이도차를 나타내었다. 전선이도에 영향을 미치는 인자로는 탄성계수, 선팽창계수, 강도의 재료 물성과 이외의 재료 외적인 인자인 전선의 장력, 경간, 천이온도, 알루미늄과 강심의 면적비 등이 있다.

4. 결 론

가공전선의 탄성계수와 선팽창계수의 변화가 전선의 이도에 미치는 영향과 시험치와 규정치의 오차를 ACSR 58 mm^2가공전선을 이용하여 조사한 결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. ACSR 58 mm^2가공전선을 구성하고 있는 직경 3.5 mm 알루미늄도체와 강심의 탄성계수는 각각 5182.6 kgf/mm^2, 18348.8 kgf/mm^2이다. 이를 이용한 전선의 탄성계수는 약 7063.5 kgf/mm^2이며 실 전선을 이용한 탄성계수는 7681.1 kgf/mm^2이다. 이는 ACSR 58 mm^2전선의 이도계산에 적용되고 있는 탄성계수 8400 kgf/mm^2에 비교하여 낮게 나타났다.

2. ACSR 58 mm^2가공전선의 선팽창계수는 알루미늄도체와 강심이 각각 25.73 μm/m℃, 12.86 μm/m℃이며 이를 이용한 전선의 선팽창계수는 20.95 μm/m℃이다. 실전선의 선팽창계수는 20.27 μm/m℃이다.

3. 시험적으로 도출된 탄성계수와 선팽창계수와 적용치를 이용한 전선 온도 90 ℃에 대한 이도는 1.79 m와 2.47 m로 약 0.62 m의 오차를 나타내었다.

참고 문헌

[1] 緖 方 淸 -, "架空送電線 機械的 特性", 第471號, p. 3, 1993.
[2] W. J. McG. Tegart and A. Giffins, "The Hot Deformation of Austenite", John B. Ballance (Ed) 3rd, AIME, New York, p. 1, 1977.
[3] 심응보, 우정욱, 최종기, "송전설계기준 제·개정 및 보완연구", 한국전력공사 전력연구원 기술보고서, 제5장, p. 192, 2001.
[4] 심응보, 우정욱, 최종기, "송전설계기준 제·개정 및 보완연구", 한국전력공사 전력연구원 기술보고서, 제5장, p. 198, 2001.

[5] M. B. Adeyemi, R. A. Stark, and G. F. Modlen, "Heat Treatment 79", Society, p. 122, 1980.
[6] J. M. potter and R. A. Millard, "Advance in X-Ray Analysis", V20, ed., H. McMurdie, Plenum Press, p. 309, 1977.
[7] 김상수, 김병걸, 박수동, "중용량저이도 송전선(STACIR/AW)용 인바강선의 피로특성에 미치는 경년열화의 효과", 한국전기전자재료학회 2004하계학술대회논문집, p. 1274, 2004.
[8] S. Sasaki, T. Takebe, K. Miyazaki, M. Yokota, K. Sato, and S. Yoshida, "ZTACIR-new extra-heat resistant galvanized invar-reinforced aluminum alloy conductor", Sumitomo Electric Technical Review, No. 22, p. 46, 1983.
[9] 박수동, 김병걸, 김상수, "STACIR/AW 410 mm^2 송전선의 이도거동", 한국전기전자재료학회 2004하계학술대회논문집, p. 1262, 2004.