

배전선로의 이도설계 및 시공에 대한 실증연구

Empirical Study on the Dip Design and Installation of Distribution Line Conductors

안인석^{1*}

Ihn-Seok Ahn^{1*}

〈Abstract〉

In this study, the comparative analysis, among the design standard value of distribution power, the calculated value from the measurement data of strand and the empirical data of the distribution line itself, have been performed for the elastic coefficients and linear expansion coefficients of distribution line conductors. The empirical values of elastic coefficients were lower about 10.6%(892kgf/mm²) than those of the design standard value of the distribution power and there were a little difference between the empirical values of linear expansion coefficients and the design standard value of the distribution power. From the above results, it could be concluded that the empirical values of conductor characteristics should be used in the dip design and installation of distribution line.

Keywords : elastic coefficient, linear expansion coefficient, distribution line conductor, empirical value, dip design

^{1*} 정회원, 위덕대학교 에너지전기공학부 교수, 공학박사 ^{1*} Prof., Division of Energy and Electrical Engineering, Uiduk University, Ph.D.
E-mail : isahn@uu.ac.kr

1. 서론

전선의 길이는 온도 및 장력의 변화에 따라 변하며, 전선의 길이변화는 전선의 이도 및 장력에 영향을 미친다. 탄성계수는 장력의 변화에 따른 전선의 수축 및 팽창과 관련된 계수이며, 선팽창계수는 온도의 변화에 따른 전선의 수축 및 팽창과 관련된 계수이다. 따라서 전선 이도는 이들 탄성계수와 선팽창계수와 밀접한 관계가 있으며, 정확한 이도설계를 위해서는 현장에서 사용되고 있는 전선의 정확한 탄성계수와 선팽창계수 값이 필요하다. 그러나 현재 배전설계기준 또는 배전규정의 경우 전선 구성소재들의 상온 특성을 수치적으로 계산하여 도출한 상수를 사용하고 있기 때문에, 정확한 이도설계와 선로의 장기신뢰성을 높이기 위해서는 현재 적용되고 있는 계산치와 실제 전선을 이용하여 측정된 실측치와는 어떠한 차이가 있는가에 대한 조사와 검증이 필요한 것으로 사료된다.[1][2] 배전설계 기준치는 현장에서 실제 사용 중인 배전선의 각 소선에 대한 실측치로부터 도출된 계산치와 전선자체의 실측치와는 차이를 나타낼 것으로 예상되며 아직 국내에서는 이러한 차이에 관하여 실질적인 연구가 이루어진 바가 없고, 해외의 경우 탄성계수와 관련한 규정과 시험방법은 선례가 있으나 선팽창계수 관련 규정과 시험방법은 거의 전무한 상태다.

본 연구에서는 보다 정확한 이도설계 및 시공을 위해 현재 국내의 배전선로에 적용되고 있는 ACSR 58mm 전선을 대상으로 전선을 구성하고 있는 각 소선의 탄성계수 실측을 통해 전선의 탄성계수 및 선팽창계수 계산치를 도출하고 배전선자체의 탄성계수와 선팽창계수를 실측하여 배전규정 또는 배전설계기준치 등과의 비교연구를 통해, 이도설계 및 시공시 계산값과 실측치 사용 기준을 제시하고자 한다.

2. 시험

2.1 소선 실측

소선에 의한 배전선의 탄성계수 측정법은 기존의 탄성계수 측정방식으로 전선의 탄성계수 측정을 위하여 배전선을 구성하고 있는 소선에 대하여 인장시험을 실시한 후 각 소선의 탄성계수를 도출한 다음 식(1)을 이용하여 전선의 탄성계수를 구하는 방법을 이용하였다.[3][4]

$$E = \frac{mE_a + E_s}{m+1} \quad (1)$$

E_a, E_s : 알루미늄, 강심의 탄성계수 [kgf/mm²]

m : A_a/A_s

A_a, A_s : 알루미늄 및 강심의 단면적[mm²]

각 소선의 탄성계수를 측정하기 위하여 배전선을 해체하여 한 가닥의 소선을 택하여 인장시험을 실시하였다. 시험은 Zwick사의 전선 전용 인장시험기(Zwick-Z030)를 이용하였다. 본 기종은 전선과 같은 비정상적 인장시험편을 이용하여 시험해야 하는 경우에도 재료가 파단이 가급적 시료의 중심부에서 일어나게 유도함으로써 정확한 강도와 연신율의 측정을 가능하게 한다. 인장시험은 시험편 길이 약 300mm에 대하여 100mm strain gauge를 부착하여 Cross Head Speed를 10mm/min 시험하였다. 탄성계수는 인장하중의 10%에서 40%의 기울기로부터 도출 또는 초기 직선구간을 선정하여 계산하였다.

배전선의 이론적인 선팽창계수는 각 소선에서 도출된 탄성계수와 선팽창계수를 이용하여 계산하는 방식이 적용되고 있다.[3][4] 각 소선의 선팽창계수는 TA사의 thermal mechanical analyzer를

이용하여 측정하였다. 시험에 이용된 시험편은 배전선에서 직접 채취한 시험편을 이용하였으며 시험편의 양 끝단은 정밀연마 하였다. 온도변화에 따른 시험편의 길이변화는 LVDT를 통하여 컴퓨터에 자동적으로 저장되도록 하였으며 선폽창계수는 50°C와 150°C의 온도구간에서 시험편길이 변화의 기울기로부터 식(2)에 의해 도출하였다.

$$\alpha = \frac{(\Delta L \times K)}{(\Delta T \times L)} \quad (2)$$

여기에서, L은 시험편의 높이, ΔL은 시험편의 길이 변화, ΔT는 온도 변화, K는 Y축의 보정상수를 나타낸다.

배전선의 선폽창계수는 각 소선의 선폽창계수와 탄성계수를 도출한 다음 식(3)에 의해 선폽창계수를 계산하였다.

$$\alpha = \frac{m\alpha_a E_a + \alpha_s E_s}{mE_a + E_s} \quad (3)$$

α_a, α_s : 알루미늄, 강심의 선폽창계수 [1/°C]

2.2 전선 실측

시험에 이용된 배전선의 길이는 최소 10m 이상이며 중심부에 약 3~4m의 신울계를 부착하였다. 배전선의 탄성계수는 초기 8%의 하중에서 아래와 같은 순서에 의하여 하중을 인가하여 그 기울기로부터 탄성계수를 도출하였으며 하중인가시의 탄성계수(E_i)와 하중 감소시의 탄성계수(E_f)로 구분하였다. 시험 속도는 약 500kgf/min으로 일정하게 하였다.

하중인가 방법

- 8% UTS --> 30% UTS(30분 hold) ->
- 8% UTS --> 40% UTS(1시간 hold) ->
- 8% UTS --> 50% UTS(3시간 hold) ->
- 8% UTS --> 70% UTS(3시간 hold) ->
- 8% UTS --> 최종 파단

전선자체의 선폽창계수 실측에 사용된 시험장치는 선폽창계수 측정을 위해 수평인장 시험기를 이용하여 10m이상의 전선에 3~4m 신울계를 부착하였다. 상온에서 인장하중의 20% 장력을 인가하였으며, 이때 기계적인 연선의 영향을 최소화하기 위하여 이 하중에서 최소 24시간을 유지하였다.

전선 온도는 통전에 의한 방법을 이용하여 분당 5°C씩 증가시키면서 전선의 길이 변화를 신울계로 측정하였다. 전선의 온도는 T-type 열전대를 이용하여 전선의 중심부 온도를 연속적으로 측정하였다. 열전대의 끝단은 전류에 의한 영향을 최소화하기 위하여 절연 처리하였다. 위 시험 과정의 데이터는 초당 약 5에서 10개 단위로 컴퓨터에 자동적으로 저장되도록 하였다.

시험에 사용된 전선은 ACSR 58mm²전선이며 ACSR 58mm²전선은 직경 3.5mm의 강심과 직경 3.5mm의 알루미늄 6가닥이 연선되어 있는 구조이다. 도체는 전기용 경알루미늄선으로 KS C 3111에 적합하여야 하며, 강선은 아연도금강선으로 KS D 3559에 적합한 재료로서 신선한 강선에 아연도금하여야 한다. 아연도금은 용융아연도금 또는 전기도금을 시행하도록 되어있다.[6][7]

3. 시험 결과

3.1 소선 실측

ACSR 58mm²전선의 탄성계수계산을 위하여 알루미늄도체와 강심 코어(Core)를 해체하여 각각의 소선에 대하여 응력-신율시험을 실시하였다. Fig. 1에 나타난 알루미늄도체의 응력-신율곡선은 금속재료의 전형적인 인장곡선으로 항복강도 약 17.07 kgf/mm²에서 소성변형이 시작되었으며 최대 강도 18.54kgf/mm²에서 국부적인 necking으로 연신율은 2.6%에서 최종 파단 되었다. 알루미늄 도체의 인장강도는 18.54kgf/mm²으로 KS C 3111의 전기용경알루미늄선의 최소인장강도16.8kgf/mm²를 상회하는 값을 나타내었다. 응력-신율곡선의 기울기로부터 측정된 알루미늄 소선의 탄성계수는 약 5182.6kgf/mm² 이다. 알루미늄 소선의 측정결과는 배전규정의 6,300kgf/mm²보다 약1,117kgf/mm²정도 낮게 나타났으며, 배전설계기준의 8,400kgf/mm²보다는 3,217kgf/mm²정도 낮게 나타났다.

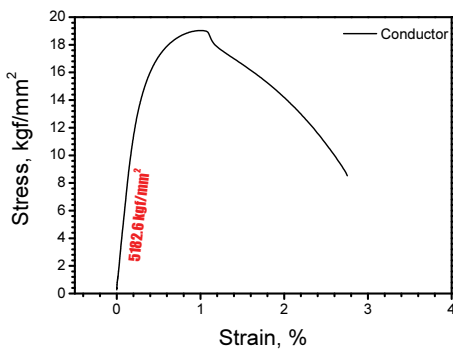


Fig. 1 Elastic coefficient of Al conductor

Fig. 2는 강심코어의 응력-신율곡선이다. 알루미늄도체와 동일한 방식에 의해 측정된 탄성계수는 18348.8kgf/mm²이다. 이 결과는 배전규정의

21,000kgf/mm²보다 2,651kgf/mm²정도로 매우 낮게 나타났다. 직경 3.5mm의 강심 코어 인장강도와 연신율은 약 140.07kgf/mm²과 7.95%로 KS C 3113 아연도금강선의 최소인장강도 130kgf/mm², 연신율 4.5%를 상회하는 우수한 특성을 나타내었다.

각 소선의 인장시험에서 구한 탄성계수를 식(1)에 적용하여 ACSR 58mm²전선의 탄성계수를 도출하면 7063.48kgf/mm²이며, 인장하중은 2417.89kgf으로 나타났다. 시험결과 도출된 인장하중은 한전 표준구매시방서에 제시된 강심알루미늄연선의 최소인장하중 1,980kgf보다 420kgf을 상회하는 결과를 나타냈다.[5]

일정 압력 하에서 단선의 온도가 T₀에서 T₁까지 변화할 때 단선의 길이가 L₀에서 L₁까지 변화하면 길이 변화량(L₀-L₁)을 온도신율이라 하고 열팽창율은 식(4)와 같다. 온도변화 1℃에 해당하는 열팽창율을 선팽창계수라 하고 식(5)와 같이 표현한다. 선팽창계수는 내부 열변화에 대해서 단선의 내부길이가 변화하는 것을 나타낸 계수로 금속재료의 고유한 값이다.

$$\epsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{\epsilon}{T_1 - T_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0(T_1 - T_0)} \tag{5}$$

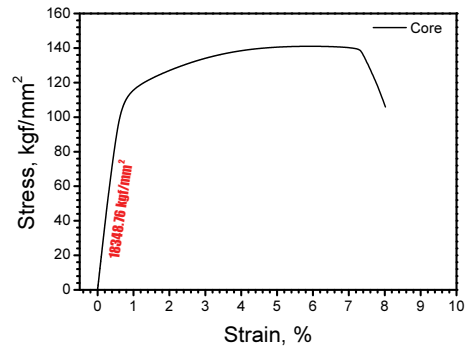


Fig. 2 Elastic coefficient of Steel core

Fig. 3과 Fig. 4는 ACSR 58mm²전선을 구성하고 있는 알루미늄도체와 강선 각 소선에 대한 온도-신율특성을 나타낸다. 그림에 나타난 온도-신율곡선에서 식(5)를 이용하여 알루미늄도체와 강선의 선팽창계수를 도출하였다. 도출된 알루미늄도체의 선팽창계수는 약 25.73 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 이며, KS C 3111 전기용 경알루미늄선에 규정된 23.0 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 보다 다소 높게 나타났다.

선팽창계수에 영향을 미치는 외부요인으로 “가공”이 있다. 즉 선팽창계수는 압연과 같은 가공에 의해 그 값이 변화를 나타낸다. KS C 규정치 23.0 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 은 전선으로 연합되기 이전의 소선에 대한 규정이며 본 시험에서 도출된 선팽창계수 25.73 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 은 각 소선을 연합한 전선을 다시 해체한 단선에 대하여 측정된 수치이므로 연합하는

과정에서 가공으로 인한 선팽창계수가 다소 상승한 것으로 사료된다.

알루미늄 도체에서 시험한 방법과 동일한 방법으로 도출한 아연도금강선의 선팽창계수는 약 12.85 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 이다. 국내에서는 아연도금강선에 관한 선팽창계수 규정은 확립되어 있지 않고 일본의 ACSR용 아연도금강선에 관한 선팽창계수는 약 11.5 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 로 본 시험에 의해 도출된 선팽창계수와 거의 유사하였다. 앞서 알루미늄도체에서 언급한 가공에 의한 선팽창계수의 증가와 아연도금의 부착량에 따라서도 선팽창계수는 다소 변화한다.

이상으로 알루미늄 도체와 강선의 각 소선에서 측정된 선팽창계수와 탄성계수로부터 식 (3)을 이용한 ACSR 58mm²전선의 선팽창계수는 20.95 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 로 도출되었다. 이는 배전설계기준의 ACSR 58mm²전선에 관한 선팽창계수 18.9 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 보다 약 2.05 $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ 높은 수치이다.

3.2 전선 실측

ACSR전선은 알루미늄 소선과 강선으로 구성되어 있기 때문에 응력-신율거동이 앞서 알루미늄 도체와 강선의 응력-신율거동과는 달리 특이한 거동을 나타낸다. Fig. 5는 ACSR 58mm²전선의 응력-신율곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 한번의 loop에서 직선구간은 A, B, C 세 구간에서 나타난다. 직선 “A 구간”은 전선이 하중을 받으면 신율이 증가함에 따라 나타나는 탄성변형이 나타나는 구간으로 이 구간을 초과하는 하중에 의해 전선은 비탄성변형인 소성변형이 발생된다. 전선의 초기 하중 증가에 따라 나타나는 직선구간에서 초기 탄성계수(E)를 구할 수 있다.

“B 구간”은 최대 하중에서 하중을 감소하는 경우에 나타나는 신율특성으로 알루미늄도체와 강선이 각각 탄성적으로 작용하고 있는 부위로 전선

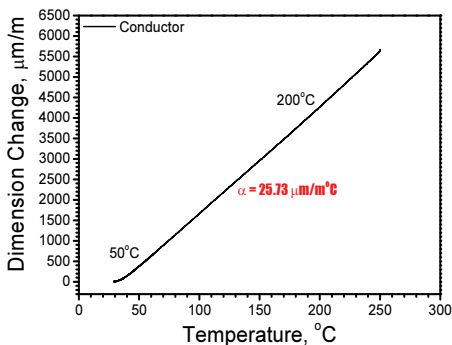


Fig. 3 Linear expansion coefficient of Al conductor

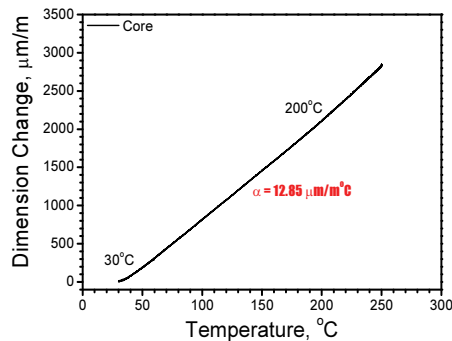


Fig. 4 Linear expansion coefficient of steel core

의 탄성계수(E_t)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 인장강도의 비에 의해 부담하는 전선의 하중이 강선으로 천이된 영역이다. B와 C의 경계점 하중이 시험 온도에서의 천이 하중이다. 천이하중은 알루미늄의 영구 소성 변형량에 의존한 하중이력에 의해 나타난다.

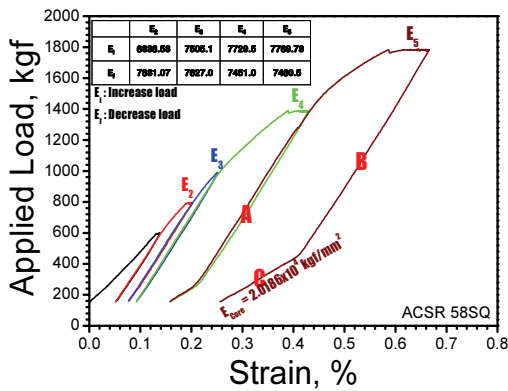


Fig. 5 Applied load vs. strain characteristics of ACSR 58mm²

Fig. 5의 응력-신율 곡선에서 하중의 증가에 따라 측정되는 탄성계수(E_t)는 6836.58kgf/mm²에서 7769.78kgf/mm²을 나타내었다. 각각의 loop에 따라 다소 차이를 나타내었으며 loop의 횟수가 증가할수록 탄성계수는 증가하였다. 이는 전선의 인가하중이 항복강도 이상으로 증가하면 알루미늄도체와 강선이 소성변형을 받게 되어 가공에 의한 강도 증가와 더불어 탄성계수가 증가되기 때문이다. 하중 감소 시에 나타나는 탄성계수(E_t)는 각각의 loop에 따라 7681.07kgf/mm²에서 7451.0kgf/mm²으로 나타났다. Fig. 5의 B와 C 구간의 경계점에서 전선의 하중을 강선이 전적으로 부담하는 경우 알루미늄의 탄성계수는 “ $E_a = 0$ ”이 된다. 이 영역에

서 나타난 강선의 탄성계수는 20,186kgf/mm²으로 강선에서 측정된 18348.8kgf/mm²과 약 8.8% (1,838kgf/mm²)의 차이를 나타내었다.

이상의 시험 결과 실제 ACSR 58mm²전선을 대상으로 실측한 탄성계수의 평균치는 7508kgf/mm²로 각각의 알루미늄도체와 강 소선의 실측치로부터 구한 계산치 7068.48mm²보다 6.2% (440kgf/mm²) 정도 큰 값이며 배전설계기준의 8,400kgf/mm²에 비해 10.6%(892kgf/mm²) 정도 작은 값이다.

ACSR 58mm²전선의 열팽창율-온도 거동을 살펴 보면, 50°C와 100°C구간에서 전선온도를 증가시키면서 전선의 길이변화를 측정할 경우에 측정된 전선의 선팽창계수 20.27 μ m/m°C와 온도를 감소시키면서 측정된 전선의 선팽창계수는 19.23 μ m/m°C로 시험방식에 따라 약 1.0 μ m/m°C의 차이를 나타내었다. 온도를 증가시키면서 측정한 경우가 온도를 감소시키면서 측정한 경우보다 좀더 높게 나타난 이유는 전선의 온도를 증가시켰다가 감소시킬 때 가공에 의해 도입된 잔류응력이나 전위 등이 소멸되어 annealing현상이 발생되기 때문이다. 온도를 감소시키면서 측정한 전선의 선팽창계수 (19.23 μ m/m°C)는 국내 배전설계기준 및 외국 규격 IEC, BS, JCS 등에 나타난 ACSR 58mm²전선의 선팽창계수 18.9~19.3 μ m/m°C과 거의 차이가 없다.

각 소선에서 측정된 선팽창계수와 탄성계수를 식(3)에 대입하여 계산된 전선의 선팽창계수 20.95 μ m/m°C는 전선온도를 증가 시키면서 측정한 선팽창계수 20.27 μ m/m°C와 거의 일치하였다. 전선의 실측 선팽창계수가 각 소선의 실측치로부터 계산된 선팽창계수 보다 낮은 수치를 나타낸다. 그 이유는 온도 상승에 따라 각 소선의 길이 팽창 과정에서 알루미늄과 강선의 마찰로 인하여 팽창이 다소 억제되기 때문이라 사료된다.

4. 결론

실제 ACSR 58mm²전선을 대상으로 실측한 탄성계수의 평균치는 7508kgf/mm²로 각각의 알루미늄도체와 강 소선의 실측 후 탄성계수 계산식을 이용하여 구한 계산치 7068.48mm² 보다 6.2%(440kgf/mm²) 정도 큰 값이며 배전설계기준의 8,400kgf/mm²에 비해 10.6%(892kgf/mm²) 정도 작게 나타났다. 각 소선에서 측정된 선펡창계수와 탄성계수를 이용하여 계산된 전선의 선펡창계수 20.95 μ m/m²는 전선온도를 증가 시키면서 실 측정한 선펡창계수 20.27 μ m/m²와 유사하나 온도를 감소시키면서 실 측정한 측정값 19.23 μ m/m², 배전설계기준 및 배전규정에 의거 계산한 값 18.9 μ m/m²와 비교하여 보면 전반적으로 1 μ m/m²정도 높은 값을 나타내고 있다. 따라서 선펡창계수 측정방법은 온도를 감소시키면서 측정하는 것이 타당하다고 생각된다.

결론적으로 배전선을 실측정한 탄성계수 값이 배전설계기준치에 비하여 10.6% 정도 작게 나타나는 바 이론값과 실 측정값에는 상당한 차이가 있으며, 배전선을 실측정한 선펡창계수 값이 배전설계기준치에 의거 계산한 값과 비교하여 다소의

차이를 나타내었다. 따라서 배전선로의 이도설계 및 시공시에는 실 측정값을 사용하는 것이 적절함을 확인하였다. 이러한 결과를 토대로 이러한 결과를 토대로, 도체 단면적이 상이한 ACSR 전선류와 나경동선 등에서도 이도설계 및 시공시 실 측정값을 사용하는 것이 타당하다고 사료된다.

참고문헌

- [1] 대한전기협회, 배전규정, 1998
- [2] 한국전력 배전분야 설계기준 DS-4902 부록2, 선의 이도계산, 2008.2 개정
- [3] 송전공학, 백용현 이광우 공저, 형설출판사, 1970.
- [4] KSC 3002, 전기용 동선 및 알루미늄선 시험방법
- [5] 한전표준구매시방서(ES), ES 121-113~160, 2003.4
- [6] 국립기술품질원, KS D 3552 철선, 한국표준협회, 1997.
- [7] 기술표준원, KS D 7007 아연도강연선, 한국표준협회, 2002.

(접수: 2021.04.23. 수정: 2021.06.08. 게재확정: 2021.06.09.)