

## 환경적 요인에 의한 노후 가공송전선의 특성변화

### Change of Properties by Environment Conditions in Aged ACSR Overhead Conductor

김상수<sup>1,a</sup>, 김병걸<sup>1</sup>, 장태인<sup>2</sup>, 강지원<sup>2</sup>, 이동일<sup>2</sup>, 민병욱<sup>3</sup>

(Shang-Shu Kim<sup>1,a</sup>, Byung-Geol Kim<sup>1</sup>, Tae-In Jang<sup>2</sup>, Ji-Won Kang<sup>2</sup>, Dong-Il Lee<sup>2</sup>, and Byung-Uk Min<sup>3</sup>)

#### Abstract

This paper describes mechanical and electric properties of ACSR 410 mm<sup>2</sup> conductor from many of older overhead conductor. Samples of conductors itemized two division according to operation sector, green area, salt and pollution area. Samples of conductors operated various environment conditions have undergone laboratory metallurgical investigation and tensile strength torsional ductility and electrical performance. The steel core were found to have retained their original properties to a large degree in both tensile strength and the number of turns to failure. On the other hand the aluminum conductor showed reductions in tensile strength. To determine the remaining useful life of aged conductor, an unacceptable deterioration level has to established for each diagnostic procedure.

**Key Words** : ACSR, Aging of overhead conductor, Tensile load of overhead conductor, Corrosion of overhead conductor

#### 1. 서 론

가공송전선의 수명은 가설 후 경과된 기간(약 36년) 또는 알루미늄 도체의 인장강도가 10 % 감소하는 것으로 수명을 결정하는 것이 일반적이다. 그러나 가공송전선은 가설 지역의 환경적 요인이나 전선의 재질상의 특성, 전력공급량 등에 의하여 열화상태가 다양하게 진행된다. 현재와 같이 모든 전선에 대하여 일정기간으로 정해진 교체 시기는 현실적이지 못하다. 실제로 전선의 단선사고는 경년과 같은 전선의 이력보다는 부식 환경에 노출된 전선의 취약성으로 인하여 초래되는 경우가 많다. 정확한 전선의 수명을 진단하기 위해서는 가공송

전선이 노출되어 있는 환경 하에서 경년에 따른 기계적, 전기적 특성의 변화를 조사하여 복합적 인자들을 정량적으로 처리하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 전선의 노출환경이 서로 다른 지역(청정지역, 염공해지역)에서 가설되어 사용 중인 시료를 수집하여 인장, 비틀림수, 도전을 등의 기계적 특성과 전기저항과 같은 전기적 특성을 분석하였다. 또한 환경적인 인자에 의한 전선의 특성변화와 전선수명과의 상관관계를 규명하고 이를 수명시스템에 반영하고자 한다.

#### 2. 실험

##### 2.1 실험방법

본 연구에 사용된 ACSR 410 mm<sup>2</sup> 전선은 실제 각 선로에 가설되어 사용 중인 전선을 경년시간에 따라 채취하였다. 선로환경은 청정지역(G)과 염공해지역(S)으로 구분하였으며 선로의 공칭전압은 154 kV이며 경간의 중앙에서 시험편을 회수하여 분석하였다.

1. 한국전기연구원 신소재응용연구그룹 (경남 창원시 성주동 28-1)  
2. 한국전력공사 전력연구원  
3. 한국전력공사 송변전처 송변전건설팀  
a. Corresponding Author : shangshu@keri.re.kr  
접수일자 : 2005. 9. 7  
1차 심사 : 2006. 2. 3  
심사완료 : 2006. 2. 7

인장시험은 JIS Z 2201 9A 시험편으로 Zwick사의 전선 전용 인장시험기를 이용하였으며 약 300 mm의 시험편에 100 mm의 신율계를 부착하여 10 mm/min의 속도로 인장시험을 실시하였다[1,2].

비틀림시험은 IEC 1232시험규정에 따라 직경의 100배인 350 mm의 시험편 10 cycle/min 속도로 회전하였다. 시험편에 인가된 하중은 인장강도의 약 2%인 21 kgf를 인가하였다[1].

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 전선의 외관

그림 1과 그림 2는 전선의 제조 시 형상과 염공해 지역에서 23년간 사용한 전선의 외관을 나타낸 것이다. 미사용 전선의 경우 전선의 표면부는 광택과 더불어 강심부에는 윤활제가 도포되어 있음을 확인할 수 있었다. 그림 2의 염공해 지역에서 23년 사용된 전선의 경우 표면부(그림의 (a)부)에는 비, 눈, 먼지 등과 염공해 지역적에서 발생하는 Cl과 SO<sub>2</sub> 등이 부착되어 전류 통전되는 동안 반응을 하여 검게 변화하였으며 내층알루미늄(그림 2의 (b))에서는 표면부와는 달리 반응한 흔적은 거의 발견되지 않았다. 강심부(그림 2의 (c))에서는 경년에 따라 윤활제의 소실과 아연도금층의 박리현상이 나타났다. 또한 부분적으로 아연도금강심부에 심각한 국부부식이 발견되었다. 가공송전선 부식에는 대기부식과 전해부식이 발생된다. 전선의 대부분은 공기 중에 노출된 상태에서 산소와 습도 등의 수분에 의해 부식이 진행되는 대기부식(Atmospheric Corrosion)이 발생된다. 대기 환경에서 금속의 부식은 청정지역에서는 산소와 습도에 의해 주로 영향을 받지만 해안지역과 공단지역과 같은 염공해 지역에서는 아황산가스(SO<sub>2</sub>), 염소이온(Cl<sup>-</sup>) 등에 의해 전선과 화학반응을 하여 황산화합물, 염화합물 등을 생성한다. ACSR전선은 알루미늄, 아연도금, 강선과 같이 서로 다른 이종 금속이 접촉되어 있다. 이러한 부분에 염분이나 아황산가스 등에 의한 부식생성물과 수분이 접촉하게 되면 전해질 용액으로 작용하게 되어 국부전지를 형성하게 된다. 따라서 이종금속간에 이온화 현상이 발생하게 되어 이온화 경향이 큰 아연(Zn), 알루미늄(Al), 강선(Fe)의 순서로 전해부식(Galvanic Corrosion)이 진행된다.

그림 1의 미사용재 강선의 아연도금층은 비교적 균일하게 도금이 되어 있으며 평균두께는 약 52.13 μm으로 내·외층이 거의 동일하였다. 각 가설지역

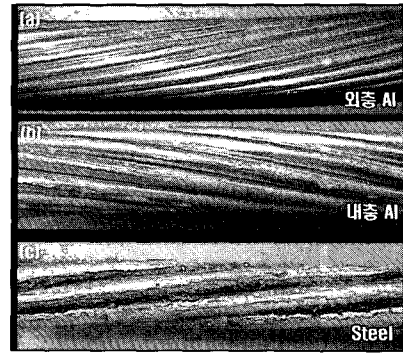


그림 1. 미사용전선.

Fig. 1. As-raw conductor.

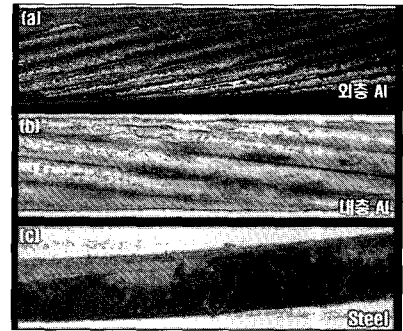


그림 2. 염공해 23년.

Fig. 2. Aged conductor.

에서 장시간 사용으로 인한 부식과 마찰 또는 마모로 인하여 아연도금층은 감소할 것이다.

그림 3은 가설지역에서 노후화에 따른 아연도금층의 두께 변화를 나타낸 것이다. 염공해 지역이 청정지역에 비해 아연도금층의 두께 감소가 급격하게 발생되었다. 염공해 지역은 염해(Cl<sup>-</sup>), 공해(SO<sub>2</sub>)로 인하여 부식 속도가 증가하게 된다. 약 20년 노후화된 강선의 아연도금층 두께는 청정지역은 37.69 μm이며 염공해지역에서는 약 20.75 μm로 나타났다. 강심부는 강선/아연도금/알루미늄이 서로 접촉되어 있는 부위로 주로 전해부식이 발생된다. 강심부에 수분의 침투로 인하여 국부전지가 형성되어 우선적으로 아연도금층이 소실되어 최종적으로 강선이 부식된다. 염공해 지역에서 20년 이상 사용된 강심부의 아연도금층의 평균 두께는 더 이상 감소하지 않고 포화되는 경향을 나타내었다.

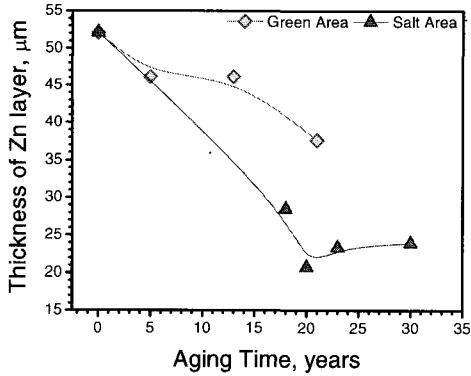


그림 3. 노후화에 따른 아연도금층의 두께.  
Fig. 3. Thickness of Zn layer in aged conductor.

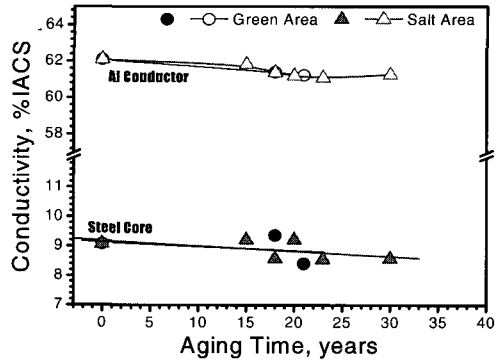


그림 4. 노후화에 따른 도전율의 변화.  
Fig. 4. Change of conductivity with aging.

### 3.2 전류용량의 변화

전선은 장시간동안 장력, 바람 등의 기후에 의한 진동과 피로 등이 부하되고 있을 뿐만 아니라 염해, 설해 등과 같은 주위환경에 직접적으로 노출되어 있다. 이것으로 인해 전선은 연화, 연신 또는 부식되어 전선의 도전율을 감소시킬 것으로 예측된다. 그림 4는 청정지역과 염공해지역에서 최대 32년 동안 가설되어 가동된 전선의 도전율(%IACS)을 나타낸 것이다. 미사용계의 Al 도체와 강심의 도전율은 각각 62.1 %IACS와 9.1 %IACS로 전선의 규정인 61 %IACS를 상회하는 우수한 특성을 나타내었다. 알루미늄도체와 코어의 도전율은 가동시간에 따라 감소하였다. 청정지역과 염공해 지역간의 전기저항은 큰 차이를 나타나지 않았다.

ACSR 410 mm<sup>2</sup> 전선의 전기저항은 초기 약 0.0689 Ω/km에서 약 30년 사용 후에는 0.07007 Ω/km로 증가하였다. 전선의 전기저항의 증가는 노후가 진행되지 않은 전선에 비해 전선온도를 증가시켜 최종적으로 전선의 수명을 단축시킬 것으로 예측된다. 노후화된 가공송전선의 용량변화를 추적하여 보면 다음과 같다. IEEE의 규정에 따라 대기온도 40 °C에서 풍속과 반사율 및 흡수율이 각각 0.5 m/s, 0.5, 0.5일 때 전선에서 발생하는 열 흐름은 아래의 식 (1)에서 식 (4)에 나타난 바와 같이 대류에 의한 열방산(Q<sub>c</sub>)과 방사에 의한 열방산(Q<sub>r</sub>)의 합이 전선의 저항에 의한 주열(Joule)과 태양에 의한 열흡수(Q<sub>s</sub>)의 합에 의해 결정되어 진다. 식 (1)에서 식 (4)에 의해 계산된 미사용 전선의 연속허용온도(90 °C)는 856 A이다[3-5]. 염공해 지

역에서 약 23년 동안 사용된 전선의 경우 연속허용전류는 849 A로 다소 감소하였다. 특정부위에서는 국부부식으로 인하여 연속허용전류가 829 A까지 감소하는 현상이 나타났다. 전선의 국부부식이 발생되지 않는 경우를 제외하고는 가설지역에 무관하게 연속허용전류의 변화는 미미하였지만 그림 2에 나타난 바와 같이 전선 내에서 Cl<sup>-</sup>나 SO<sub>2</sub>에 의한 국부 부식이 발생한 경우 전선의 온도는 국부 부식이 발생한 지점에서 급격하게 상승하고 바람에 의한 진동 등과 연합하여 전선의 파단을 초래하게 된다.

$$I^2 R_{ac} + Q_s = Q_r + Q_c \quad (1)$$

$$Q_c = [1.01 + 0.0372 \left( \frac{D \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \right)^{0.52}] \cdot \kappa_f (T_c - T_a) \quad (2)$$

$$Q_r = 0.0178 \cdot D \cdot \epsilon \cdot \left[ \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (3)$$

$$Q_s = a \cdot q_s (\sin \theta) A \quad (4)$$

### 3.3 기계적 특성의 변화

가공송전선에 전류를 인가하면 도체의 저항과 지지선의 자체저항으로 인하여 연속허용전류에서 90 °C 이상의 열이 전선에서 발생된다. 고온에서 전선이 장시간 사용되면 전선강도 저하가 우려된다. 또한 가설지역의 여건에 따라 염공해 지역에서는 환경적 인자인 Cl<sup>-</sup>와 SO<sub>2</sub>에 의한 부식으로 인한 강도 저하가 발생할 것이다. 전선의 노후화 측

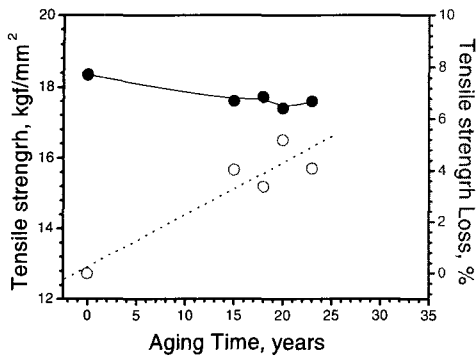


그림 5. 염공해 지역 Al도체의 노후도에 따른 강도와 강도손실율.

Fig. 5. The tensile strength and percent of tensile strength loss with aging in Al conductor.

도로 가장 널리 이용되고 있는 기계적 인자로는 도체와 강심의 인장강도변화와 강심의 비틀림 회수의 변화를 조사하는 것이다. 그림 5와 그림 6은 청정지역과 염공해 지역에서 장시간 동안 가동된 전선의 알루미늄도체와 강심 코어의 인장강도변화를 나타낸 것이다.

미사용제 ACSR 410 mm<sup>2</sup>전선의 도체와 코어의 인장강도는 약 17.5 kgf/mm<sup>2</sup> 와 143.0 kgf/mm<sup>2</sup>이며 전선의 인장하중은 17017.4 kgf이다. 이는 ACSR 전선의 사용규정인 13890 kgf보다 약 300 kgf높게 나타났다. 코어가 전체전선의 약 56.5 %의 하중을 부담하며 Al도체가 약 43.5 %를 부담하게 된다.

그림 5와 그림 6에서 나타난 바와 같이 전선을 구성하고 있는 도체와 강심의 인장강도는 경년에 따라 가설지역에 무관하게 선형적으로 감소하였다. 염공해지역에 가설되어 사용된 전선이 청정지역에 비하여 강도의 감소 폭이 높게 나타났다. 염공해 지역에서 약 23년 사용된 알루미늄도체의 강도는 17.6 kgf/mm<sup>2</sup>으로 강도손실은 약 0.74 kgf/mm<sup>2</sup>이 발생되었으며 손실율은 약 4.1 %가 발생되었다. 염공해 지역에서 노후화에 대한 강도손실율은 식 (5)의 관계를 나타내었다

$$\text{강도손실율}[\%] = 0.257 + 0.203 \times \text{사용년수} \quad (5)$$

전선의 수명은 일본의 전기협동연구에 의하면 Al도체의 인장강도 손실율에 의해 결정되어진다[6].

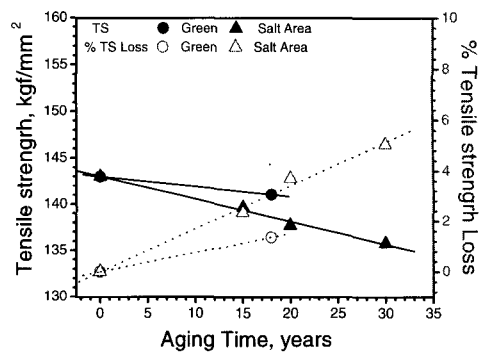


그림 6. 강심의 노후도에 따른 강도와 강도손실율.

Fig. 6. The tensile strength and percent of tensile strength loss with aging in steel core.

표 1. 노후화에 따른 강도와 강도손실율 변화.

Table 1. The change of tensile strength and percent of tensile strength loss with aging.

가설 지역	강도 변화 (kgf/mm <sup>2</sup> )	손실율 (%)
청정	143.03-0.108×년수	0+0.076×년수
염공해	143.05-0.245×년수	-0.011+0.171×년수

알루미늄도체의 강도 손실이 10 % 발생되는 지점을 전선의 수명으로 규정하고 있다. 염공해 지역에서의 10 % 강도 손실이 발생되는 기간은 약 48년으로 국내에서 전선 교체 시기인 36년에 비해 상당히 수명연장이 가능하다.

그림 6은 가설 지역과 노후도에 따른 강심의 강도와 강도 손실율을 나타낸 것이다. 청정지역에서의 강도특성이 가장 우수하였으며 염공해 지역에서 강도 손실이 가장 급격하게 발생되었다. 염공해 지역에서 약 30년간 사용된 전선의 경우 135.5 kgf/mm<sup>2</sup>으로 초기 미사용제의 강도 143.03 kgf/mm<sup>2</sup>에 비해 약 7 kgf/mm<sup>2</sup>의 강도손실이 발생되었으며 이는 초기 인장강도에 비해 5.1 %의 저하하였다. 반면에 청정지역에서는 약 30년 사용될 경우 139.8 kgf/mm<sup>2</sup>으로 약 2.28 %의 강도 손실이 발생될 것으로 예상된다.

표 1에 나타난 바와 같이 청정지역에서는 연간 강도손실율이 약 0.076 %/년 로 발생되며 염공해

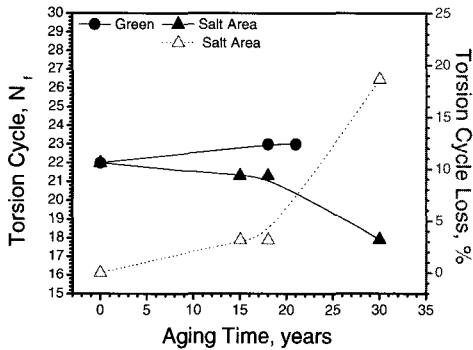


그림 7. 노후전선의 비틀림회수와 손실율변화.  
Fig. 7. The change of torsion cycle and percent of torsion cycle loss with aging.

지역에서는 약 0.171 %/년이 발생된다.

비틀림 회수는 강도특성과 더불어 강심의 물성을 나타내는 대표적인 특성으로 노후화와 부식에 의해 비틀림 특성은 감소할 것이다. 비틀림 시험은 IEC 60889 시험규정을 준하였다.

그림 7은 각 지역에서 노후화에 따른 비틀림 회수의 변화를 나타낸 것으로 미사용재의 비틀림 회수는 약 22회로 나타났다. 각 지역에서 노후화된 강선의 비틀림 회수는 초기에는 약간 상승하였다가 다시 감소하는 포물선의 형태를 나타내었다. 염공해 지역에서 감소하는 경향성이 가장 크게 나타났으며 청정지역에서 가장 우수한 비틀림 특성을 나타내었다. 청정지역은 비틀림 회수의 감소가 전혀 발생되지 않았으며 가설 후 약 23년간 노후화된 시험편에서조차 미사용재와 거의 동일한 비틀림 회수를 나타내었다. 비틀림 회수는 국부 부식 등의 강심 표면상태와 열화에 의존하기 때문이다. 청정지역에서는 약 15년 까지 윤활재 등이 존재하였으며 부식 징후가 크게 발견되지 않았다.

염공해 지역 강심의 비틀림 회수는 경년에 대해 감소가 뚜렷하게 나타났다. 약 30년간 사용된 강선의 비틀림 회수는 약 18회로 초기에 비해 18 %정도 감소하였다. 가설지역에 대한 강심의 노후인자 도출에서 강도와 탄성계수 등의 여러 인자 중에서 비틀림 회수에 의한 노후 인자도출이 가장 민감하게 나타났다.

염공해 지역에서 비틀림 회수와 노후화의 관계는 식 (6)의 관계를 나타내었다.

$$\text{비틀림 회수 감소율(\%)} = -0.21 + 0.381 \times \exp(\text{사용년수}/7.691) \quad (6)$$

#### 4. 결과

청정지역, 염공해지역과 같이 노출환경이 서로 다른 가공송전선에 대하여 경년과 전선의 강도, 비틀림 및 전기적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 구하였다.

1. 각 지역(청정, 염공해)에서 장시간 가동된 전선의 외관을 조사한 결과 표면부는 비, 눈, 먼지 등의 지역적 특성으로 인하여 통전 시 반응을 하여 겉게 변화하였으며 내부는 윤활재 등의 소실이 발생하였다. 특히 염공해 지역의 강심에서는 아연 도금층의 소실이 청정지역에 비해 크게 발생되었으며 부분적으로 국부부식이 발생되었다.

2. 염공해 지역 전선의 전기저항은 가설 초기 0.0689 Ω/km에서 약 30년 전류통전 후에는 0.07007 Ω/km로 증가하였다. 또한 Cl<sup>-</sup>나 SO<sub>2</sub>에 의한 국부 부식이 발생한 경우 국부 부식 발생지점의 전기 저항이 증가하여 전선파단을 초래할 가능성이 높았다.

3. 미사용재 전선의 도체와 코어의 인장강도는 약 17.5 kgf/mm<sup>2</sup> 와 143.0 kgf/mm<sup>2</sup>으로 나타났으며 염공해 지역에서 30년 사용한 전선의 인장하중은 5 % 정도 감소하였다.

4. 염공해 지역에서 약 30년간 사용된 강선의 비틀림회수는 약 18회로 초기에 비해 18 %정도 감소하였다. 가공송전선의 노후인자 도출에서 비틀림회수의 변화는 가설지역의 환경적 요인에 민감하게 반응하였다.

#### 참고 문헌

- [1] IEC 60889, "Hard-drawn aluminum wire for overhead line conductors", 1987.
- [2] JIS Z 2201, "Test pieces for tensile test for metallic materials", 1992.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] House, H. E. and Tuttle, P. D., "Current carrying capacity of ACSR", AIEE Trans. PAS, Vol. 78, Part III, p. 1169, 1959.
- [6] "가공송전선의 전류용량", 일본전기학회기술보고, 660호, 1997.