

STACIR/AW 송전선의 장시간 운전에 따른 기계적 물성 변화

이성두, 신구용, 이동일, 장태인, 김병걸*, 박수동*, 김상수*
한전전력연구원, 한국전기연구원*

Changes of Mechanical Properties by a Long Term Operation in STACIR/AW Conductor

Sung-Doo Lee, Goo-Yong Sin, Dong-Il Lee, Tae-In Jang*, Byung-Geol Kim*, Su-Dong Park*, Shang-Shu Kim*
KEPRI, KEPRI*

Abstract

ACSR전력선의 송전용량 증가를 위해 개발된 증용량저이도 송전선인 STACIR/AW(Super Thermal-resistant Aluminum alloy Conductors, aluminum-clad Invar-Reinforced)전선은 초내열 Al도체 및 인바강선의 사용으로 비교적 고온에서의 안정적 운전이 가능하다. 그러나 고온 환경에서 장시간 노출된 STACIR/AW전선의 안정적 관리를 위해서는, 열화 된 STACIR/AW 전선의 인장강도, 각 구성소재의 탄성계수, 비틀림 계수 등과 같은 기계적 물성이 장기 운전 모의를 위해 설정된 열화온도, 열화시간 등에 대해 종합적으로 평가될 필요가 있다. 또한 크립 등과 같이 고온응력 부하상태에서의 변형거동과 탄성계수 및 선팽창계수의 온도의존성 등은 전선의 이도관리와 예측을 위해서도 명확히 규명되어야 할 중요한 관리 인자이다. 그러나 현재까지는 이들에 대해 수행한 어떠한 연구결과들도 보고 되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 STACIR/AW 410mm² 송전선을 장시간 운전의 모의를 위해 가속열화 시키고 가속열화에 따른 STACIR/AW전선 및 그 구성소재의 강도, 비틀림 특성의 변화를 조사하여 장시간 운전에 따른 STACIR/AW전선의 안정성을 평가하여 보고하고자 하였다.

Key Words : STACIR/AW Conductor, INVAR/AW, elastic modulus, thermal expansion coefficient, strand wire

1. 서론

1980년대 이후 국내에서는 전력 수요의 증가와 더불어 전선의 이도를 억제하기 위하여 기존의 송전선인 ACSR 대신에 STACIR/AW전선을 가설하기 시작하였다. STACIR/AW 410mm²의 전선은 그림 1에 나타난 바와 같이 외층의 알루미늄합금도체와 내층의 지지선인 인바강선으로 구성되어 있다. 전선의 전류용량을 증가시키기 위하여 알루미늄에 지르코늄(AI-Zr)을 첨가한 STA1합금을 이용하여 허용전류용량을 ACSR의 848A보다 두 배 가까이 높은 1,584A로 증가 시켰다. 이때 전선의 온도는 210℃로 ACSR의 90℃에 비해 고온이므로 전선의 처짐 현상을 방지하기 위하여 아연도금 강선 대신에 인바(INVAR)합금에 알루미늄으로 피막을 입힌

INVAR/AW강선을 강심소재로 사용하고 있다. Fe-35Ni계의 인바합금은 상온에서 오스테나이트 단상으로 열팽창계수(α)가 약 $2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 아연도금강선의 약 1/5정도로 전선의 처짐 현상이 매우 적다. 그러나 사용온도가 고온이므로 장시간 노출될 경우 재료 역학적 인자들의 열화로 인해 상당한 문제점을 유발할 소지가 있다. 즉 고온에서의 장시간 노출은 역학적인자 중 강도특성과 탄성계수의 저하로 STACIR/AW전선의 특징인 저이도 특성의 악화가 발생할 소지가 있다. 그러나 국내에서는 현재까지 전선의 생산에만 집중하고 있는 실정으로 경년열화에 대한 기초 연구는 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 STACIR/AW전선과 그 구성소재인 INVAR/AW강선과 STA1 소선에 대하여 장기적인 신뢰성을 확보를 위하여 강

도와 탄성계수의 변화, 비틀림특성의 변화를 조사하였다.

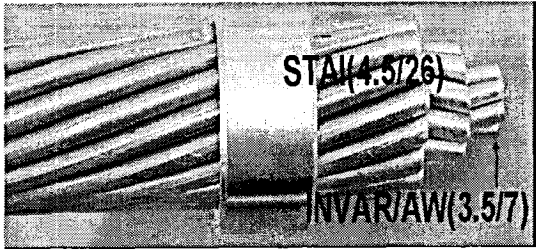


그림 93. STACIR/AW 410mm²전선의 외관.

2. 실험

2.1 실험방법

본 연구에 사용된 STACIR/AW 410mm²전선의 구성 소재인 인바(INVAR)합금의 조성은 Fe-35Ni의 오스테나이트상으로 직경 3.12mm에 알루미늄이 약 0.189mm 두께로 클래딩(cladding)되어 있다. 실질적으로 장시간 열화 된 전선으로 평가하는 것은 거의 불가능하므로 본 연구에서는 실제 열화와 거의 유사한 특성을 나타내도록 하기 위하여 인위적으로 200, 300℃와 400℃에서 등온처리를 하였다. 장시간 등온처리 시험편에 대하여 다음과 같이 시험을 실시하였다. 소선에 대한 인장시험과 탄성계수는 JIS Z 2201 9A 시험편에 대하여 Zwick사의 전선 전용 인장시험기를 이용하였으며 약 300mm의 시험편에 100mm의 신율계를 부착하여 10mm/min의 속도로 인장시험을 실시하였다.

송전선의 인장강도와 탄성계수는 각 소선에서 시험적으로 측정된 결과에 대하여 다음 식으로 계산하였다.

$$T = 0.9 (T_a A_a N_a + T_s A_s N_s) \quad (1)$$

$$E = \frac{(m E_a + E_s)}{(m + 1)} \quad (2)$$

여기서 Ta, Ts : STAI과 INVAR/AW의 인장강도
 Aa, As : STAI과 INVAR/AW의 단면적
 Na, Ns : STAI과 INVAR/AW의 소선수
 Ea, Es : STAI과 INVAR/AW의 탄성계수
 m : Aa / As

비틀림시험은 IEC 1232시험규정에 따라 직경의 100배인 350mm의 시험편 10cycle/min 속도로 회전하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강도변화

그림 2는 STACIR/AW전선을 구성하고 있는 INVAR/AW와 STAI에 대하여 고온인장강도를 나타낸 그림이다. as-drawing상태의 INVAR/AW와 STAI선재에 대한 상온인장강도는 115.7kgf/mm²와 17.9kgf/mm²로 한전시험규정인 110kgf/mm²과 16.0kgf/mm²을 만족하였다. 온도에 대한 인장강도는 직선적으로 감소하고 있으며 전선의 단시간 허용온도인 240℃에서의 인장강도는 상온인장강도의 약 90%와 40%를 유지하였다. 오스테나이트상 구조인 INVAR/AW강선의 고온강도는 고용체강화효과에 의한 가공경화현상과 연화단계인 동적회복현상이 균형에 의해 결정되어 진다. 오스테나이트상은 유용한 슬립계가 적고 조밀충진구조인 fcc기 때문에 bcc인 페라이트에 비해 자기확산속도가 1/400정도로 낮고 또한 적층결합에너지가 낮기 때문에 야결정립 크기를 작게하여 전위소멸속도를 늦추어서 우수한 고온특성을 나타낸다[1~3].

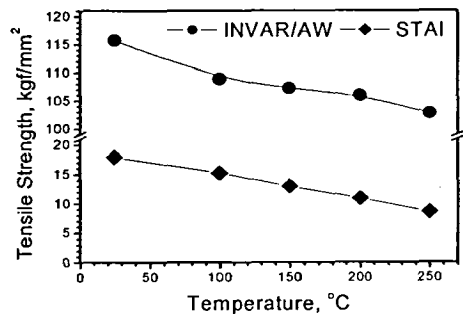


그림 94. INVAR/AW와 STAI의 고온인장강도

그림 3은 각 온도에서 INVAR/AW와 STAI을 장시간동안 열화한 시험편에 대하여 상온인장강도의 변화를 나타낸 그림이다.

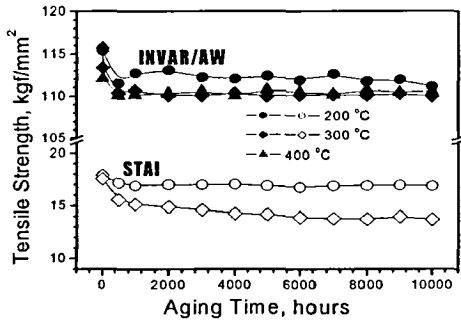


그림 95. 경년열화에 대한 상온인장강도.

경년열화로 인한 INVAR/AW의 인장강도는 열화 초기에 약 3kgf/mm² 정도 감소한 후 일정하였다. 또한 400°C에서 4000시간 이상 경년열화 되어진 시험편에서는 그림 8 a)에 나타난 것과 같이 인바 층과 알루미늄층간의 계면균열이 생성되기 시작하였다. 이는 인바(2.6×10⁻⁶/°C)와 알루미늄(26.0×10⁻⁶/°C)간의 열팽창계수의 차이로 인하여 인바에서는 인장하중이 유도되고 알루미늄에서는 압축응력이 유도된다. 이러한 열팽창계수의 차이에 의해 고온에서 장시간 열화 시에 인바와 알루미늄층간의 계면에 균열이 발생한 것으로 사료된다[4~5]. STAI의 경우 200°C에서의 인장강도는 경년열화시간에 따라 변화를 나타내지 않았다. 그러나 300°C에서의 인장강도는 열화시간에 따라 감소하였다. 그림 4는 각 온도에서 경년열화한 STACIR/AW 410mm²전선의 인장하중과 그에 따른 INVAR/AW 강선의 하중분담율을 나타낸 그림이다.

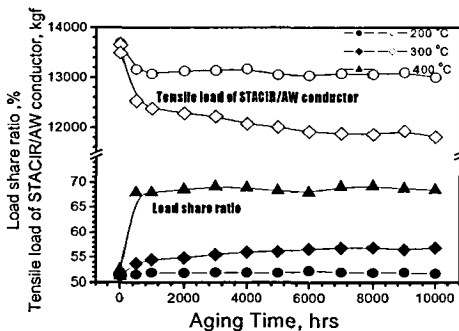


그림 96. STACIR/AW 410mm² 전선의 인장하중과 INVAR/AW강선의 하중분담율.

as-drawing 상태의 전선인장하중은 13,667kgf으로 인바 하중분담율은 약 52%이다. 200°C열화에서 전선의 인장하중은 그림 3의 인바와 같이 열화 초기에 잔류응력의 감소로 인한 하중이 500kgf 정도 감소한 후 거의 일정하였으며 하중분담율도 변화가 없이 52% 정도로 일정하게 유지되었다. 그러나 300°C경년열화에서는 전선의 인장하중은 경년열화에 의하여 하중이 감소하였으며 인바의 하중분담율 역시 경년열화시간에 따라 증가하였다. 이는 열화정도에 STAI도체가 온도에 민감하기 때문이다. 400°C에서 전선하중을 인바가 약 68%를 분담하였다. 전선의 경년열화시험에서 장시간사용 시에 하중분담율은 STAI는 점차적으로 감소하고 인바의 하중분담이 증가하게 되어 최종적으로는 약 전선전체하중의 68%까지 인바가 담당하게 될 것으로 판단된다.

3.2 탄성계수의 변화

그림 5는 각 온도에서 경년열화한 시험편에 대하여 탄성계수의 변화를 나타낸 그림이다. as-drawing재 INVAR/AW, STAI 및 STACIR/AW 410mm²전선에 대한 탄성계수는 약 162.7GPa, 62.44GPa과 76.48GPa이다. 이러한 탄성계수는 경년열화가 진행됨에 따라 INVAR/AW강선은 인장강도와 유사하게 경년열화초기에 잔류응력의 완화로 인해 15GPa 정도 감소한 후 일정한 값을 유지하였다. 반면에 STAI과 STACIR/AW전선은 경년열화시간에 따라 감소하였다. 이때 각 온도에서 경년열화시간에 따른 STACIR/AW전선의 탄성계수는 다음의 식으로 표현될 수 있었다.

$$E = 74.19 - 2.95E-4Time(hr) \text{ at } 200^{\circ}C$$

$$E = 74.88 - 7.89E-4Time(hr) \text{ at } 300^{\circ}C$$

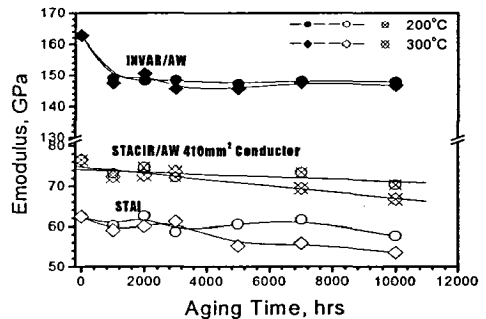


그림 97. 각 온도에서의 탄성계수 변화.

경년열화에 의한 탄성계수의 감소는 전반적으로 전선의 열팽창계수를 증가시키게 되고 이러한 열팽창계수의 증가는 최종적으로 이도의 증가를 초래할 것이다.

3.3 INVAR/AW의 비틀림특성

그림 6은 as-drawing 상태에서 INVAR/AW의 비틀림곡선을 나타낸 것이다.

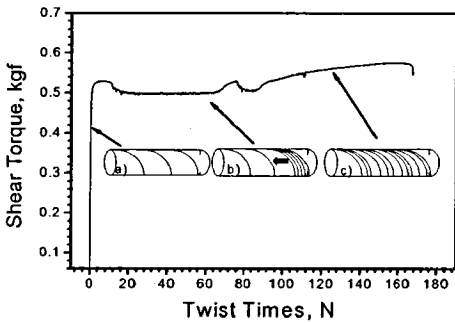


그림 98. INVAR/AW의 비틀림곡선.

INVAR/AW의 비틀림 특성은 초기에는 a)와 같이 균일변형(Uniform deformation)이 진행되고, 그 다음 단계로 b)와 같이 일정한 비틀림 하중 하에서 국부적인 비틀림 변형(local deformation)이 형성되었다. 국부적인 비틀림 변형이 시험편 전체로 진행하면 c)와 같이 다시 비틀림 하중이 증가하면서 균일변형이 형성되다가 최종적으로 파단되었다. 그림 7은 경년열화에 대한 전단계수와 전단강도 및 비틀림회수를 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 전단강도는 약 55kgf/mm²으로 경년열화에 따라 거의 변화가 없었다. 전단 탄성계수는 as-drawing 상태에서는 약 364MPa에서 경년열화가 진행됨에 따라 탄성계수와는 반대로 초기에 다소 증가한 후 거의 일정한 값을 유지하였다.

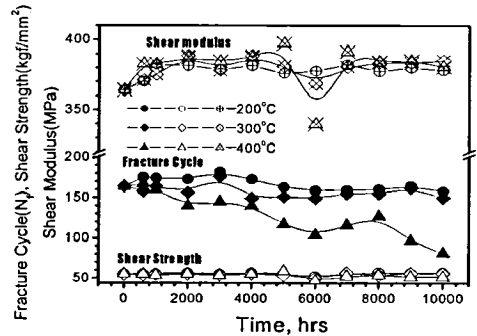
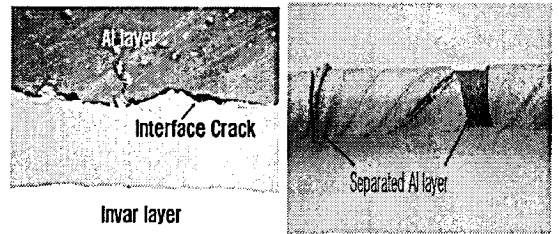


그림 99. 경년열화에 대한 전단강도와 전단계수 및 비틀림회수의 변화.

비틀림회수는 200°C와 300°C에서는 거의 일정한 150회를 유지하고 있으나 400°C의 경우 경년열화에 따라 감소하는 경향성을 나타내었다. 이는 앞의 400°C 경년열화제에 대한 인장강도에서 언급한 바와 같이 그림 8 a)에 나타난 인바와 알루미늄층간의 계면균열이 그 원인이 되어 그림 8 b)에 나타난 바와 같이 비틀림 회수가 약 1 ~ 3회 정도에서부터 박리가 발생되기 시작하였다.



a) 400°C에서 인바와 알루미늄층간의 계면균열 인바와 알루미늄의 분리
그림 8. 인바와 알루미늄층간의 계면균열

4000시간 이후의 경년열화에서 인바와 알루미늄클레딩층 사이에 미세한 계면균열이 발생되기 시작한 다음 점차적으로 경년시간이 증가함에 따라 계면균열도 증가하였다. 이러한 계면균열의 크기와 발생빈도가 임계크기 이상이 되면 비틀림 시에 그림 8 b)와 같이 인바와 알루미늄클레딩층이 완전히 분리가 되었다. 이러한 현상은 인바와 알루미늄의 열팽창계수가 약 2.6μ/°C과 26μ/°C로 10배 정도의 차이를 나타내는 것이 원인이다. 경년열화가 진

행됨에 따라 층간계면결합력이 약화되어 계면균열 발생이 발생되었고 이의 영향으로 비틀림회수가 감소한 것으로 사료된다[6~7]

4. 결론

중용량 저이도전선인 STACIR/AW 410mm²전선과 그 구성소재인 STAI도체와 INVAR/AW강선에 대하여 200℃ ~ 400℃ 등온에서의 경년에 따른 강도와 탄성계수 및 비틀림특성 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결과를 구하였다.

1. as-drawing상태에서 INVAR/AW강선과 STAI의 상온인장강도는 115.7kgf/mm²과 17.9kgf/mm²이다. 단시간허용온도인 240℃에서 INVAR/AW강선의 고온인장은 상온의 90%정도인 103.0kgf/mm²으로 우수한 고온강도특성을 나타내었다.
2. 경년열화시간과 온도가 전선의 인장하중에 미치는 영향은 열화초기에 잔류응력의 감소로 약간의 저하가 일어나지만 200℃는 영향을 거의 받지 않지만 300℃에서는 열화시간에 따라 강도가 감소하였다.
3. 각 온도에서의 경년열화에 따른 STACIR/AW 전선의 탄성계수는 시간에 따라 감소하였다. 이는 전선을 구성하고 있는 STAI도체의 탄성계수가 감소의 영향 때문이다.
4. 400℃경년열화에서 INVAR/AW의 경년시간에 따른 비틀림회수는 점차적으로 감소하였다. 특히 약 4000시간 이 후에 인바층과 알루미늄층간의 열팽창계수차이에 의해 계면균열이 발생되어 비틀림시 층간분리가 발생되었다.

참고문헌

[1] W. J. McG. Tegart and A. Giffins, "The Hot Deformation of Austenite", John B. Ballance (Ed) 3rd, AIME, New York, p1, 1977

[2] J. L. Robbins, O. C. Shepard and O. D. Sherby, " Trans. Am. Soc. Met., 60, p205, 1967

[3] J. L. Robbins, H. Wagenaar, O. C. Shepard and O. D. Serby, J. Met., 2, p217, 1967

[4] M. B. Adeyemi, R. A. Stark, G. F. Modlen, "Heat Treatment 79", Society, 122, 1980

[5] J. M. potter, R. A. Millard, "Advance in X-Ray Analysis", V20, ed., H.McMurdie, Plenum

Press, 309, 1977

[6] A. Kawasaki, R. Watanabe, M. Yuki, Y. Nakanishi and H. Onabe, Trans. JIM 37, 788, 1996

[7] R. A. Miller and C. E. Lowell, Thin Solid Films 95, 265, 1982