

STACIR/AW 410mm² 송전선의 이도거동

박수동, 김병걸, 김상수, 이희웅, 장태인*, 강지원*, 이동일*, 민병욱*
한국전기연구원 신소재응용연구그룹, 한전전력연구원*, 한국전력공사**

The Sag Behavior of STACIR/AW 410mm² Power Line

Su-Dong Park, Byung-Geol Kim, Shang-Shu Kim, Hee-Woong Lee, Tae-In Jang*, Ji-Won Kang*, Dong-Il Lee*, and Byung-Uk Min**
KERI, KEPRI*, KEPCO**

Abstract

송전용량 증가를 위해 개발되어 최근 본격적으로 사용되고 있는 STACIR/AW 송전선은 송전용량의 증가에 따라 그 운전환경도 변화하여 연속사용온도의 경우, 기존 ACSR 전선의 90℃에 비해 높은 210℃로 규정되어 있을 만큼 고온에서 운전되고 있다. 따라서 STACIR/AW 송전선은 이도설계와 그 운용에 있어서 운전 온도 상승에 따른 각별한 주의관리가 필요하다. 실제 STACIR/AW 송전선은 그 설계단계에서도 이와 같은 고온운전 환경을 고려하여 고온에서도 소정강도를 유지하는 내열 AI도체와 이도제어를 위한 낮은 열팽창 특성의 INVAR합금(Fe-35Ni계 합금)을 강선으로 하는 특화된 재료로 구성되어 있다. 그러나 이와 같은 재료 설계적 보완책에도 불구하고 실제 송전선은 전선의 자중, 철탑 간에 형성된 가설장력과 같은 다양한 응력이 고온환경에서 부하되는 복합 열화 상태에 노출되어 있고, 이것은 재료학적인 관점에서 크립 변형 발생의 가능성을 높이고 있으나 이것에 대한 연구 또는 실험결과가 크게 미미한 실정이다.

본 연구에서는 STACIR/AW 410mm² 송전선과 그 구성소재를 대상으로 200℃, 300℃에서 장시간 열화한 후, 구성소재의 탄성계수, 열팽창계수 및 STACIR/AW 전선의 크립변형 거동을 조사하여 열화에 노출된 STACIR/AW 송전선의 이도변화 거동을 규명하고자 하였다.

Key Words : STACIR/AW Conductor, INVAR/AW, Creep, thermal expansion coefficient, Sag

1. 서 론

1980년대 이후 국내에서는 전력 수요의 증가와 더불어 증용량 저이도 전선인 STACIR/AW 전선을 가설하기 시작하였다. STACIR/AW 전선은 증용량을 위하여 알루미늄에 지르코늄을 첨가한 STAI도체를 이용하였으며 지지선은 열팽창계수가 극히 낮은 인바강선에 알루미늄으로 클래딩한 INVAR/AW 강선을 사용하였다. 이러한 STACIR/AW 전선은 허용전류용량이 1,584A로 ACSR의 848A보다 두 배 가까이 높다. 이때의 전선의 온도는 210℃로 ACSR의 90℃에 비해 고온이므로 장시간 노출될 경우 재료 역학적 인자들의 열화로 인해 상당한 문제점을 유발할 소지가 있다. 경년열화로 인하여 전선을 구성하고 있는 소재의 물성이 열화되어 전선의 실장이 변화하고 이로 인하여 전선의 이도는 증가하게 된다. 전선의 이도는 식 1에 나타난 바와 같이 전선의 실장에 의해 영향을 받는다. 경년열화에 의한 전선실장에 영향을 미치는 인자로는 식에서 나타난 바와 같이 전선의 강도와 탄성계수의 열화, 그리고 열팽창계수의 열화 및 전선의 크립변형 인자가 있다.

$$\begin{aligned} \text{Conductor Length } (L) &= 2P \left[\sinh \left(\frac{S}{2P} \right) \right] \\ &= S + \frac{8D^2}{3S} \end{aligned} \quad 1)$$

$$\Delta L = \frac{T(t)}{EA} + a(\theta(t) - \theta(0)) + \epsilon_c(t)$$

여기서 P = T/W, S는 경간, T는 장력, W 전선무게, D는 이도이다.

본 연구에 앞서 “STACIR/AW 송전선의 장시간 운전에 따른 기계적 물성 변화” “증용량저이도송전선(STACIR/AW)용 인바강선의 피로특성에 미치는 경년열화의 효과” 연구에서 경년열화에 따른 전선의 강도와 탄성계수의 변화와 피로특성에 대하여 조사한 바가 있다. 본 연구에서는 STACIR/AW 전선과 그 구성소재인 INVAR/AW 강선과 STAI 소선에 대하여 200℃와 300℃의 장시간 열화에 따른 추가적인 물성을 조사하여 이도변화거동을 살펴보고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험방법

본 연구에 사용된 STACIR/AW 전선의 지지선인

인 인바(INVAR)합금은 직경 3.12mm에 알루미늄이 약 0.189mm 두께로 클래딩(cladding)되어 있다. 경년열화에 따른 전선의 이도변화를 조사하기 위하여 200℃와 300℃에서 장시간 등온처리를 하였다. 소선에 대한 열팽창계수는 Du pont사의 TMA2940 열분석기를 이용하여 상온에서부터 5℃/min속도로 승온하면서 변위량을 측정하였다. 전선에 대한 열팽창계수는 각 소선에서 시험적으로 측정된 결과에 대하여 다음 식으로 계산하였다.

$$\alpha = \frac{m \alpha_a E_a + \alpha_s E_s}{m E_a + E_s} \quad 2)$$

여기서 α_a, α_s : STAI과 INVAR/AW의 열팽창계수
 E_a, E_s : STAI과 INVAR/AW의 탄성계수
 m : A_a / A_s

STACIR/AW 410mm²전선의 크립시험은 IEC 61395규정에 의하여 그림 1에 나타난 바와 같이 시험편길이를 약 15m로 하였다. 시험하중은 전선의 인장하중의 약 20%인 2544kgf에서 약 1000동안 유지하면서 변위를 측정하였다. 시험온도는 상온과 연속허용온도인 210℃를 유지하였다.

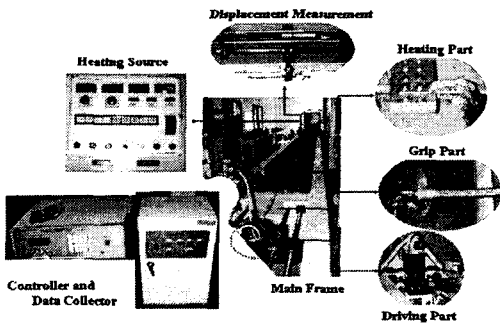


그림 1. 전선의 creep시험 장치.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장강도의 변화

그림 2는 STACIR/AW 410mm²전선에 대하여 200℃와 300℃에서 장시간 등온열처리 후 상온인장하중을 나타낸 그림이다. as-drawing상태의 인장하중은 13,667kgf로 인바와 STAI의 하중분담율은 약 52%와 48%이다. 200℃열화에서 전선의 인장하중은 열화 초기 약 1000시간까지는 INVAR/AW강선의 신장과정 중에 도입된 잔류응력이 열화하는 과정에서 소멸됨으로 인해 하중이 500kgf 정도 감소하였다. 1000시간 이후의 열화에서는 인장하중은 거의 변화를 나타내지 않고 일정한 하중을 유지하였다. 반면에 300℃열화에서는 열화초기의 인바의 하중감소와 STAI도체의 열화로 인하여 급격한 감소기울

기를 나타낸 다음 1000시간 이후에는 인바의 열화에 의한 하중감소는 거의 일어나지 않고 STAI의 열화에 의한 하중감소로 전체적인 전선의 하중감소가 나타났다.

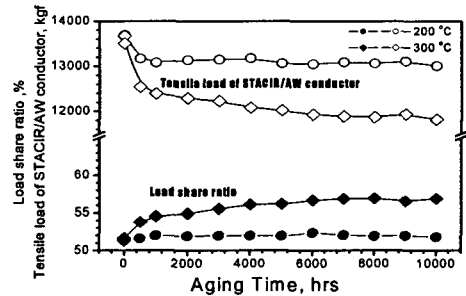


그림 2. STACIR/AW 410mm² 전선의 인장하중.

열화초기 전선의 급격한 하중감소는 잔류응력이 소멸되는 과정에서 나타나는 현상으로, 강선을 신장과정에서 생긴 공공원자, 전위와 같은 결함이 200℃ ~ 300℃의 저온에서 유지하게 되면 열역학적으로 불안정하기 때문에 원자의 열진동에너지가 증가하며 격자결합의 이동이 쉬워져 그 배열을 변화하여 상호결합 소멸된다. 그 결과 격자결합부분에 집적되어 있는 변형에너지는 점차적으로 감소하고 이에 따라 잔류응력이 감소한다.

3.2 열팽창계수의 변화

그림 3은 각 온도에서 경년열화한 INVAR/AW와 STACIR/AW 410mm²전선에 대하여 열팽창계수의 변화를 나타낸 그림이다. as-drawing상태의 INVAR/AW강선과 STAI도체 및 STACIR/AW 410mm²전선의 열팽창계수는 약 3.2μ/℃, 26.0μ/℃, 19.0μ/℃로 STAI도체의 열팽창계수는 경년열화온도와 시간에 관계없이 as-drawing 상태와 같은 26.0μ/℃로 일정하게 나타났다.

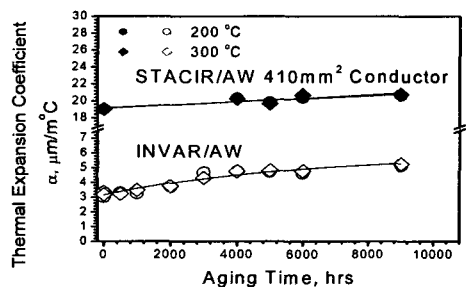


그림 3. 경년열화에 의한 열팽창계수의 변화.

반면에 INVAR/AW강선과 STACIR/AW전선의 열팽창계수는 열화온도에 의해서는 거의 영향을 받지

않았지만 열화시간에 따라 증가하다가 일정한 값으로 포화되었다. 이때 포화되는 값은 INVAR/AW강선은 약 $6.0\mu/\text{C}$, STACIR/AW 410mm²전선은 $23.0\mu/\text{C}$ 로 포화되었다. 경년열화에 의한 인바의 열팽창계수는 주로 잔류응력의 감소와 탄소의 함량에 따른 graphite의 형성에 의해 증가된다[1~3]. 이러한 선팽창계수의 증가는 전체적으로 전선의 길이를 증가시켜서 이도를 증가시킨다.

3.3 STACIR/AW 410mm²전선의 천이온도

상온에서의 전선하중은 그림 2에 나타난 바와 같이 구성소재의 인장강도와 단면적에 비례하여 인바와 STAI도체에 각각 52%와 48%의 하중이 부과되지만 전선의 온도가 증가하면 인바와 STAI의 열팽창계수의 차이에 의해 분담하중은 변화한다. 전선의 온도가 임계온도 이상이 되면 전선의 전하중은 인바가 부담하는 천이온도가 나타난다. 이 천이온도 이상이 되면 STACIR/AW전선의 특징인 저이도를 나타내게 된다. 그림 4는 STACIR/AW전선의 천이온도를 측정하기 위하여 온도에 따른 변위량을 나타내 것으로[4] 전선의 온도와 변위와의 관계에서 천이온도를 구한 결과 130°C였다. 실험적으로 구한 천이온도와 이론적으로 계산된 천이온도 107°C와는 약 23°C의 차이를 나타내었다.

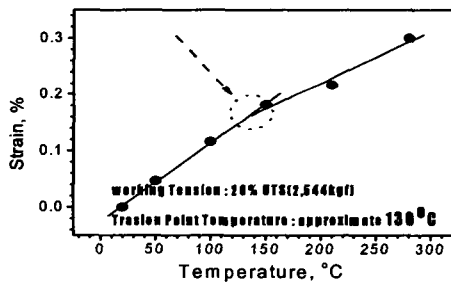


그림 4. 온도에 대한 STACIR/AW의 변위량.

천이온도는 인바의 단면적에 의존한다. 즉 인바의 단면적이 증가함에 따라 천이온도는 감소하고 인바의 단면적이 감소하면 천이온도는 증가하는 역비례 관계이다. 국내에서 사용되고 있는 송전선과 그대의 천이온도와의 관계를 그림 5에 나타내었다. 단면적과 천이온도는 역비례하며 410mm²전선의 경우 단면적점유율이 14%로 천이온도는 107°C로 계산되었다. 그러나 410mm²전선을 구성하는 인바의 직경 3.5mm에는 알루미늄이 클레딩되어 있으므로 순수한 인바의 단면적으로 천이온도를 계산하여야 한다. 직경 3.5mm의 INVAR/AW강선내의 알루미늄의 두께는 약 0.36mm로 순수한 인바의 직경은 약 3.14mm로 이때의 인바의 단면적점유율은 14%가 아니라 약 11%이다. 그림 5에 나타난 바와 같이 인바의 단면적점유율이 11%에서의 이론적 천이온도

는 107°C가 아니라 약 130°C로 실험적으로 구한 천이온도와 일치하였다.

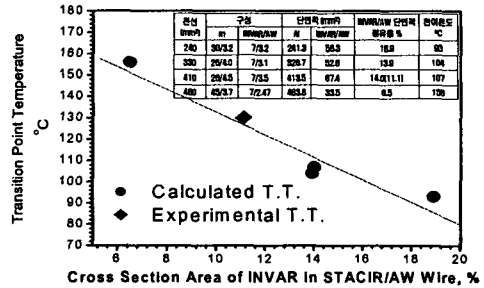


그림 5. INVAR/AW내에서 인바의 단면적점유율과 천이온도와의 관계.

3.4. STACIR/AW 410mm²전선의 Creep변형

1970년에 John Harvey 와 Bob Larson은 전선의 고온 크립변형 측정과 이도와 관계를 조사한 이래 많은 연구가 진행되고 있지 않은 실정으로 국내에서는 전선의 크립특성에 관한 연구는 전무한 상태이다. 그림 6은 하중을 인장하중의 약 20%로 인가한 후 상온과 단시간허용온도인 210°C에서 크립시험한 결과이다. 참고로 일본의 강심알루미늄전선의 크립변형량을 함께 나타내었다. 전체적인 상온에서의 크립변형량은 ACSR에 비하여 낮게 나타났으며 크립속는 0.24정도로 ACSR과 거의 유사하였다. STACIR/AW 410mm²전선에서 크립변형량은 상온에 비하여 온도가 증가함에 따라 크게 나타났지만 크립변형속도는 온도증가에 약 0.022로 감소하였다. 이는 전선은 알루미늄도체와 강선으로 이루어진 복합소재이므로 상온에서는 인바와 STAI가 각각의 하중분담율에 따라 크립이 발생되지만 온도가 증가하면 구성소재의 열팽창계수의 차이에 의하여 하중의 분담율이 변화하고 또한 천이온도 이상에 되게 되면 전선의 하중은 강선이 모든 하중을 담당하게 된다.

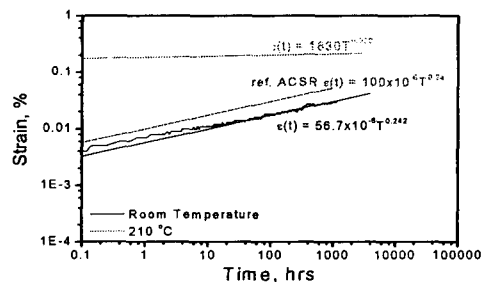


그림 6. STACIR/AW 410mm² 전선의 크립변형.

따라서 천이온도이상인 210℃에서의 크립변형은 전선의 강심인 INVAR/AW에 의하여 지배가 되기 때문에 온도가 증가할수록 크립의 변형량은 증가하지만 크립속도는 감소하였다[5].

3.5 이도

전선의 이도는 식 1에 나타난 바와 같이 하중과 탄성계수에 의한 전선실장과 열팽창계수의 변화에 의한 실장변화 그리고 그림변형에 의한 실장변화에 의해 변화된다. 앞서 경년에 따른 전선의 탄성계수와 인장하중, 열팽창계수, 크립변형에 근거하여 경간 350m에 대하여 전선장력 4800kgf로 가설하였을 때의 상온이도는 그림 7에 나타난 바와 같이 약 5.18m이다

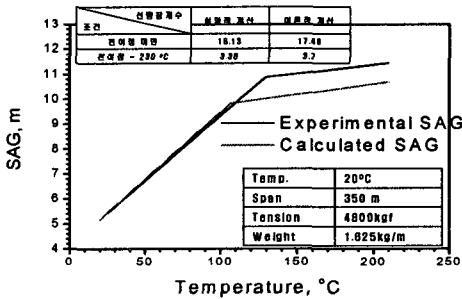


그림 7. 이론적이도와 실험적 이도간의 관계.

전선의 온도가 증가함에 따라 그림에서와 같이 이도는 증가 하였으며 천이온도 107℃와 130℃를 기점으로 하여 전선의 이도증가는 급격히 감소하였으며 연속허용온도인 210℃에서의 이론적 이도와 실험적 이도는 약 10.69m와 11.44로 약 0.75m의 차이를 나타내었다. 이러한 이론적 이도와 실험적 이도간의 차이는 천이온도를 107℃와 130℃에서 나타나는 차이이다. 앞서 각 온도에서의 경년열화에 따른 물성의 변화로 인해 연속허용온도인 210℃에서 36년간 사용한 한 전선에 대한 이도변화를 조사하여 보면 다음과 같다. 우선 강도와 탄성계수의 열화와 열팽창계수의 열화로 인하여 초기가설 이도 약 11.44m는 약 36년 후에는 2.2m가 증가되고 크립신장으로 인하여 이도는 1.2m가 증가될 것으로 판단된다.

4. 결론

중용량 저이도전선인 STACIR/AW 410mm²전선에 대하여 경년열화가 이도변화에 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같다.

1. STACIR/AW 410mm²전선의 열팽창계수는 온도에 의한 영향은 나타나지 않았지만 열화시간에 의존하여 증가하였으며 약 23.0μ/℃로 포화되었다.

2. 전선의 온도가 증가함에 따라 구성소재의 열팽창계수의 차이에 의한 각 소재의 응력분담이 변화로 천이온도가 나타난다.

STACIR/AW410mm²전선의 천이온도는 약 130℃이다.

3. STACIR/AW전선의 creep속도는 상온에 비하여 온도가 증가할수록 감소한다. 이는 전선의 온도가 증가할수록 INVAR/AW강선에 의해 크립이 지배되기 때문이다.
4. STACIR/AW 410mm²전선의 이도는 초기가설이도 11.44m로 210℃에서 36년 동안 사용하였을 경우 이도의 증가는 물성의 변화에 의한 이도증가와 크립변형에 의한 이도증가에 의해 전체 이도는 약 14.84m가 될 것이다.

참고 문헌

- [1] E. E. Guillaume, "Transitory and Permanent Changes of Nickel Steels", C. R. Acad. Sci., Paris, Vol. 136, P.356, 1903
- [2] H. Scott, "Expansion Characteristics of Low Expansion Nickel Steels", Transactions, American Society for Steel Treating, Vol. 13, p. 829, 1928
- [3] T. F. Russell, "Low Expansion Nickel Steel", Engineering, London, Vol. 128, P. 400, 1929
- [4] S. Sakabe, "Development of Extremely - low - sag Invar Reinforced ACSR", IEEE Transactions on Power Apparatus and System", DAS-100, 4, p. 1,505, 1981
- [5] M. Yokota, "Development of High Strength Invar Alloy", Japan Journal of Institute of Metallurgy, 21, 4, p. 260, 1982