

중용량저이도송전선(STACIR/AW)용 인바강선의 피로특성에 미치는 경년열화의 효과

김상수, 김병걸, 박수동, 이회웅, 신구용*, 이동일*, 민병욱**
한국전기연구원 신소재응용연구그룹, 한전전력연구원*, 한국전력공사**

The Effect of Heat Exposure on Fatigue Properties of INVAR Steel Core for STACIR/AW Conductor

Shang-Shu Kim, Byung-Geol Kim, Su-Dong Park, Hee-Woong Lee, Goo-Yong Sin*, Dong-Il Lee*, and
Byung-Uk Min**
KERI, KEPRI*, KEPCO**

Abstract

최근 에너지 소비구조의 선진화에 따라 전력수요는 매년 10%이상 증가하고 있지만 첩탑부지확보 및 환경 문제 등에 의해 신규 송전선의 건설은 점차 어려워지고 있다. 이에 대한 대책으로 첩탑의 교체 없이 송전선의 전류용량을 증가시키는 방안이 우선적으로 고려되어 적용되고 있다. 이미 국내에서도 기존 송전선인 ACSR 전선을 중용량 저이도의 특성을 가진 STACIR/AW(Super Thermal-resistant Aluminum alloy Conductors, aluminum-clad Invar-Reinforced)송전선으로 교체하여 전력 수송량을 증가시키고 있다. STACIR/AW전선은 도체의 내열성을 향상시켜 연속허용온도(210℃)를 높임으로 전류용량을 증가시키고, ACSR에 사용되는 강심재료인 고탄소강선을 선팅창계수가 낮은 인바강선(INVAR)으로 대체함으로써 고온환경에 따른 이도증가를 방지하고 있다.

그러나 STACIR/AW 송전선은 ACSR 송전선에 비하여 연속허용온도가 높고 경간의 거리가 멀기 때문에 열화에 의한 피로특성의 변화 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 중용량저이도전선의 강심소재인 INVAR/AW강선을 소정의 온도에서 경년 열화하고, 열화시간에 따른 강도와 피로특성의 변화를 조사하여, STACIR/AW전선의 안정적 운전을 위한 재료물성적 관리인자를 도출하고자 하였다.

Key Words : STACIR/AW Conductor, INVAR/AW, Fatigue, Strand wire

1. 서론

1980년대 이후 국내에서는 전력 수요의 증가와 더불어 전선의 이도를 억제하기 위하여 기존의 송전선인 ACSR 대신에 STACIR/AW전선을 가설하였다. STACIR/AW 410mm²의 전선은 허용전류용량이 1,581A로 ACSR의 848A보다 두 배 가까이 높다 이때 전선의 온도는 210℃로 ACSR의 90℃에 비해 매우 높으므로 고온강도와 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 2.6×10^{-6} 정도로 아연도금강선의 약 1/5정도로 전선의 처짐 현상이 매우 적다. 그러나 전선의 사용온도가 높고 경간의 거리가 멀

리 때문에 전선에서 발생할 수 있는 문제점인 크립과 바람에 의한 진동피로파괴, 장시간 사용에 의한 강도의 저하가 우려되고 있다. 송전선의 피로파괴는 주로 바람과 전선의 자중에 의해 발생되고 있으며 이를 구분하면 바람과 자중에 의한 인장-인장피로파괴와 굽힘피로파괴가 있다. 인장-인장피로는 전선의 장력과 전선자중 등의 영향으로 길이방향으로 발생되며 굽힘피로는 전선 또는 전선과 연결되는 부속 금구류에서 바람에 의한 진동으로 굽힘하중을 받게 되고 이로 인해서 강선 내부에서 굽힘피로파괴가 발생된다.

본 연구에서 STACIR/AW410mm²전선용 강심소재로 사용되고 있는 직경 3.5mm의 INVAR/AW강선을 이용하여 400℃에서 최대 10,000시간 동안 가속 열화 한 후 강도의 변화와 경년열화가 피로에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험

2.1 실험방법

본 연구에 사용된 인바(INVAR)합금은 Fe-35Ni의 오스테나이트상으로 4.3mm에 알루미늄을 피복하는 알루미늄클래딩(Al cladding) 공정과 신선공정을 거쳐 최종적으로 3.5mm 직경으로 제조되고 있다. 이때 알루미늄층의 두께는 0.189mm이다. 실질적으로 장시간 사용된 전선을 확보하는 것은 거의 불가능하므로 본 연구에서는 실제 열화된 전선과 거의 유사한 특성을 나타내도록 하기위하여 인위적으로 실사용온도 210℃보다 높은 400℃에서 등온처리를 하였다.

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

피로시험은 선재의 피로시험이 가능하도록 고안된 나카무라식 피로(NAKAMURA's fatigue)시험기로 시험을 실시하였다[1]. 시험에 이용된 시험편의 길이는 약 700mm이며 선재에 4 점 굽힘모멘트를 가한 상태에서 5Hz의 주파수로 회전시키면서 인장과 압축을 동시에 가하여 시험하는 장비로서 바람에 의한 진동으로 전선에 굽힘응력이 작용한 경우와 유사하다. 시험편의 중심부에 가해지는 최대 응력의 크기는 식 1과 같다. 피로강도는 약 10^7 cycle 까지 파단되지 않은 응력으로 정하였다.

직경 3.5mm의 7가닥 소선을 연선한 연선재의 피로 시험은 진폭 10mm에서 30mm까지 변화시키면서 피로시험을 실시하였다.

$$M = \frac{W \cdot l}{2}, \quad \sigma = \frac{16 W l}{\pi d^3} \quad 1)$$

여기서 W : 수직하중(kg)

σ : 최대응력(kg/mm²)

l : 지지점과 고정구사이의 거리(200mm)

d : 시험편의 직경(mm)

3. 결과 및 고찰

3.1 강도변화

그림 1은 열화시간에 대한 항복강도(YS)와 인장강도(TS)의 변화를 나타낸 그림이다. as-drawing 상태의 인장강도(TS)와 항복강도(YS)는 115.7 kgf/mm²와 115.3 kgf/mm²이다. 경년열화로 인해 인장강도는 열화초기 약 1~2시간 이내에 약 3kgf/mm²정도 감소한 후 안정적인 값을 유지하다가 4000시간이후부터는 다시 감소하였다. 반면에 항복강도(YS)는 열화시간에 따라 연속하여 감소하였다.

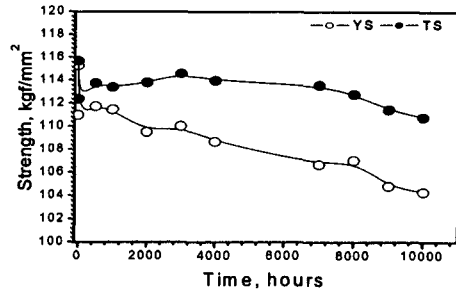


그림 1. 경년열화시간에 따른 강도 변화.

신선초기의 강도의 감소는 잔류응력과 관련이 있다. 신선하는 과정에서 다이스를 통과한 후 표면부에 인장, 중심부에 압축잔류응력이 형성된다. 이렇게 신선과정에 형성된 잔류응력은 약 200℃ ~ 400℃의 저온에서 유지하게 되면 재결정회복현상으로 인해 감소한다. 신선과정에서 생긴 공공원자, 전위와 같은 결함을 가진 상태는 열역학적으로 불안정하기 때문에 가열에 온도상승에 의해 원자의 열진동에너지가 증가하며 격자결합의 이동이 쉬워져 그 배열을 변화하여 상호결합 소멸된다. 그 결과 격자결합 부분에 집적되어 있는 변형에너지는 점차적으로 감소하고, 이에 따라 잔류응력은 감소한다. 이러한 잔류응력의 감소는 온도와 시간에 의존한다. 4000시간 이후의 인장강도 감소는 인바층에 피복되어 있는 알루미늄층과 관계가 있다.

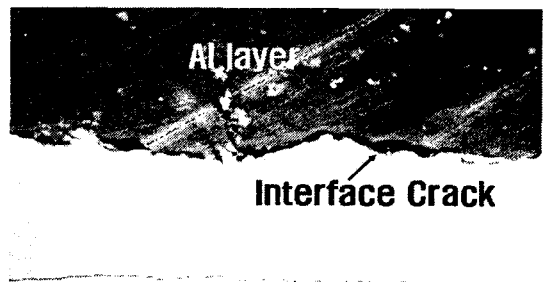


그림 2. 9000시간 경년열화에서 인바층과 알루미늄층간의 계면균열.

그림 2에 나타난바와 같이 INVAR/AW강선을 400℃에서 장시간 유지하게 되면 인바($2.6 \times 10^{-6}/\text{℃}$)와 알루미늄($26.0 \times 10^{-6}/\text{℃}$)간의 열팽창계수가 차이로 인해 인바와 알루미늄층간의 계면에 균열이 발생하기 시작하였다. 이러한 균열은 열화시간이 증가할수록

발생되는 빈도와 그 크기도 증가하였다. 이러한 인바와 알루미늄층간의 계면균열은 뒤에서 언급될 피로특성에도 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

3.2 소선의 피로특성

식 (1)에 의해 계산되어진 최대응력 26.0kgf/mm^2 을 시험편에 인가한 후 파단에 이르는 사이클 수와 피로강도를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 피로수명과 피로강도는 경년열화가 진행됨에 따라 as-drawing에 비하여 증가하다가 1,000시간을 정점으로 급격히 감소하기 시작하였다. as-drawing상태에서 약 20kgf/mm^2 이던 피로강도는 경년열화로 인해 증가하다가 1000시간에서 24.3kgf/mm^2 으로 최대 피로강도를 나타낸 후 급격히 감소하였다. 10,000시간의 경년열화제에 대한 피로강도는 약 12kgf/mm^2 으로 경년열화이전에 비해 약 50%정도의 피로강도가 감소하였다.

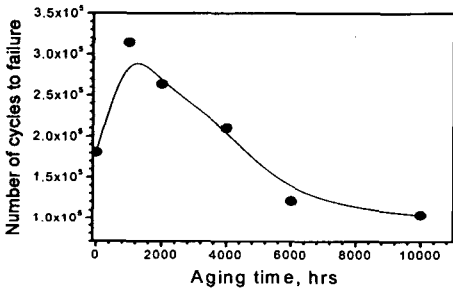


그림 3. 26kgf/mm^2 의 응력에서 피로수명과 경년시간에 대한 피로강도.

소재의 기계적 성질 중 피로에 영향을 미치는 인자로는 항복강도, 인장강도와 연신을 등이 있다. 본 시험에 이용된 경년열화제 INVAR/AW강선의 피로에서는 그림 4에 나타난 바와 같이 소재의 특성 중 항복강도에 크게 의존하였다. 동일 인장강도 수준에서 항복강도가 높은 소재의 피로수명이 우수하게 나타났다. 이는 피로파괴가 소재의 슬립(slip)에 의해 표면에 균열이 생성되고 이의 성장에 의해 일어나므로 항복강도가 높을수록 피로균열의 생성이 어렵게 되므로 피로강도는 증가되며, 특히 피로수명이 긴 고주기 피로에서는 피로균열의 생성이 피로수명의 대부분을 차지하게 되므로 항복강도의 의존성은 더욱 크게 된다고 볼 수 있다[2~3].

항복강도 이외에도 피로수명과 피로강도에 영향을 미치는 것으로는 잔류응력의 변화, 인바와 알루미늄층간의 계면결합력이 있다. 열화 초기 약 1000시간의 항복강도는 열화이전의 as-drawing재 비해 작

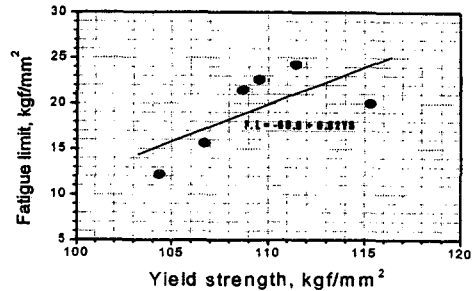


그림 4. 항복강도와 피로강도와의 관계.

으나 피로특성이 정점을 나타내고 있는 것은 잔류응력과 관련이 있다. 일반적으로 인장잔류응력의 발생은 피로강도와 피로수명을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 본 재료의 제조과정인 신선 중에 도입된 인장잔류응력이 400°C 에서 1,000시간동안 유지하는 동안 거의 사라지므로 인해 그림 3에서 나타난 바와 같이 1,000시간에서 최대피로강도와 피로수명을 나타내는 것으로 판단된다. 잔류응력의 완화는 시간과 온도에 의해 결정되는 것으로 보고에 의하면 연강의 잔류응력에 미치는 온도와 시간의 관계를 조사한 결과 400°C 에서 약 300분 동안 열처리하면 잔류응력의 60% 이상이 사라지고 이 이하의 온도에서는 시간이 길어질수록 잔류응력이 점진적으로 감소한다[4~5]. 이 후의 열화시간에서는 그림 2에 나타난 바와 같이 인바와 알루미늄층간의 열팽창계수 차이에 의한 계면결합력이 약화되어 계면균열발생과 더불어 항복강도의 감소 등에 의해 피로강도와 피로수명이 감소하는 것으로 판단된다[6~7].

3.3 연선의 피로특성

송전선에서 바람에 의한 진동으로 피로가 발생할 수 있는 주파수는 Strouhal수로 표현될 수 있다[8].

$$S = \frac{fd}{V} \quad (2)$$

f = 주파수, d = 전선의 직경, V = 풍속

식 2)에 대하여 Bate와 Callow는 송전선에서 Strouhal수를 0.185로 보고함에 따라 식 2)는 다음과 표현될 수 있다[9].

$$f = \frac{0.185XV}{d} \quad (3)$$

식 3)의 조건에서 연선재(3.5/7)의 직경 10.5mm와 풍속 1m/sec에 대한 진동피로에 대한 주파수는 17Hz이다. 결정되어진 주파수와 10 ~ 30mm의 진폭에서 인장강도의 약 60% 하중으로부터 점차적으로 하중을 감소시키면서 피로시험한 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 진폭이 증가함에 따라 피

로수명과 피로강도는 급격히 감소하였다. 15mm 진폭에서의 피로강도는 인장강도의 약 49.6%인 32.2kgf/mm²이었으며 30mm 진폭에서는 인장강도의 약 9.5%인 9.2kgf/mm²로 감소하였다. 각 진폭에서 피로수명과 응력과의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

15mm 진폭에서 $\log a = 6.8 - 0.89 \log N_f$,
 30mm 진폭에서 $\log a = 4.02 - 0.52 \log N_f$

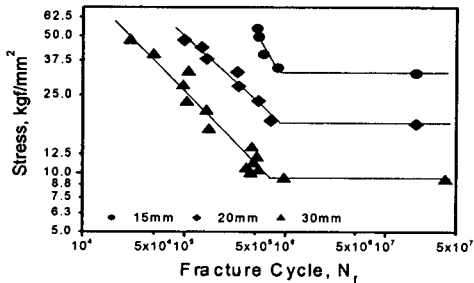
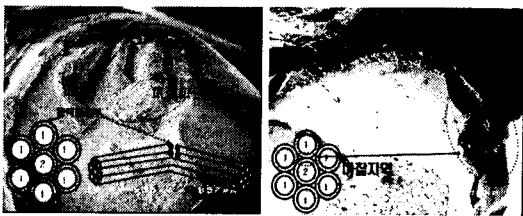


그림 5. 연선재의 응력에 따른 파단수명.

연선재의 피로파단은 일반적으로 구성하고 있는 각 소선간의 마찰에 의해 균열이 발생되어 내부로 성장하여 최종적으로 파단된다. 본 재료에서 연선재의 피로균열 발생지점은 다음과 같이 두 가지 양상으로 구별될 수 있다.



a) 응력집중부의 피로파면 b) 마찰부의 피로파면
 그림 6. 연선재의 피로파면.

첫째, 그림 6 a)에 나타난 바와 같이 소선의 피로균열발생과 동일한 경우로 외층인바합금의 최대응력이 발생하는 지점인 응력집중부에서 균열이 발생되어 내부로 성장하여 최종파단이 발생하는 경우이다. 둘째, 그림 b)에 나타난 바와 같이 연선재를 이루고 있는 각 소선 1번층과 중심부인 2번층간의 마찰에 의해 피로균열이 발생되어 내부로 성장하였다[10]. 이러한 균열의 발생은 전자의 경우 피로응력이 높은 고응력하에서 주로 발생하였으며 후자의 경우 피로강도근처의 응력에서 발생되었다.

4. 결론

- 400℃ 경년열화에 대한 피로시험과 연선재에 대한 피로시험으로 다음과 같은 결과를 구하였다.
- 400℃의 등온열화시험에서 경년에 따른 피로수명과 피로강도는 1000시간의 열화시간에서 최대값을 나타낸 후 감소하였다.
 - 피로강도에 영향을 미치는 강도학적인 인자 중 INVAR/AW강선은 항복강도에 의해 지배되어진다.
 - INVAR/AW강선의 경년열화에 대한 피로특성에 영향을 미치는 인자는 열화초기에는 잔류응력이며 4000시간 이후에는 항복강도, 인바와 알루미늄층간의 계면균열에 의해 지배된다.
 - 연선재의 피로에서 피로균열의 발생은 고응력하에서는 응력집중부인 외층의 표면부에서 균열이 발생하지만 저응력하에서는 각 소선간의 이동에 의한 층간마찰로 마찰부에서 균열이 발생된다.

참고 문헌

- [1] 김병걸, 김상수, 대한금속·재료학회지, 39권, 11호, p. 1212, 2001
- [2] 長江 定康, 加藤 昭所 外4, 鐵と鋼, 68, p 1430, 1982
- [3] A. M. Sherman R. G. Davies, Metall. Trans., A, 10A, p 929, 1979
- [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
- [8] Y. N. Chen, Transactions ASME Journal of Engineering for Industry,, 1972
- [9] E. Bate and J. R. Callow, Transactions Institution of Engineers(Australia), Vol. 15, No. 5, 149, 1934
- [10] H. J. Grover, S. A. Gordon and L. R. Jackson, NAVWEPS 00-25-534, Department of the Navy, 1960