

## 경년열화가 가공송전선(STACIR/AW)용 강심소재 Al Clad Invar강선의 피로에 미치는 영향 ( I )

### Effect of Aging on Fatigue of Al Clad INVAR Core Wire for High Capacity and Low Sag(STACIR/AW) Conductor ( I )

김상수<sup>1,a</sup>, 김병걸<sup>1</sup>, 현석규<sup>1</sup>, 신구용<sup>2</sup>, 이동일<sup>2</sup>, 민병욱<sup>3</sup>

(Shang-Shu Kim<sup>1,a</sup>, Byung-Geol Kim<sup>1</sup>, Suk-Kyu Hyun<sup>1</sup>, Goo-Yong Sin<sup>2</sup>, Dong-Il Lee<sup>2</sup>, and Byung-Uk Min<sup>3</sup>)

#### Abstract

Fatigue properties of INVAR/AW wires have been investigated under the heat exposure in order to ensure stable operation and to estimate life span of their power line. In the case of heat exposure for 10000 hr, fatigue life and limit increased. For further heat exposure, fatigue limit decreased due to the decrease in yield strength. The variation fatigue of strand wire was strongly dependent on its amplitude. Also, cracks in wires of 7 strands were caused by stress concentration at the outer surface and fretting between each wire during vibration.

**Key Words** : STACIR/AW conductor, Al clad invar, Fatigue, Strand wire

#### 1. 서 론

1980년대 이후 국내에서는 전력 수요의 증가와 더불어 전선의 이도를 억제하기 위하여 기존의 송전선인 ACSR 대신에 증용량 저이도 전선인 STACIR/AW 전선을 가설하기 시작하였다. 증용량 저이도 전선의 대표적인 STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup> 전선은 허용전류용량이 1,581 A로 ACSR의 848 A보다 두 배 가까이 높다 이때 전선의 온도는 210 °C로 ACSR의 90 °C에 비해 매우 높으므로 고온강도와 전선의 처짐 현상을 방지하기 위하여 아연도금강선 대신에 인바(INVAR)합금에 알루미늄으로 피막을 입힌 Al clad invar(INVAR/AW)강선을 강심소재로 사용하고 있다.

Fe-35Ni계의 인바합금은 상온에서 오스테나이트

단상으로 열팽창계수( $\alpha$ )가  $2.6 \times 10^{-6}$  m/m°C 정도로 아연도금강선의 약 1/5정도로 전선의 처짐 현상(이도)이 매우 적다. 이도가 억제되므로 인해 전선간의 경간을 증가시켜 경제적으로 첩탑건설비의 절감과 더불어 첩탑건설로 인한 산림훼손과 같은 환경문제 등을 어느 정도 완화가 가능하다. 그러나 전선의 사용온도가 높고 경간의 거리가 멀리 때문에 전선에서 여러 문제점이 발생할 소지가 있다. 대표적인 문제점으로는 (i) 고온환경 하에서 장시간 노출로 인한 전선의 크립현상 (ii) 경간거리가 증가되므로 인하여 바람 등에 의해 진동피로파괴의 증가, (iii) 고온환경 하에서의 장시간 사용으로 인한 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 전선길이방향에서 발생되며, 굽힘피로는 전선 또는 전선과 연결되는 부속 금구류에서 바람에 의한 진동으로 굽힘하중을 받게 되고 이로 인해서 강선 내부에서 굽힘피로파괴가 발생된다.

본 연구에서 STACIR/AW410 mm<sup>2</sup>전선용 강심

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. 5  
 1차 심사 : 2005. 10. 11  
 심사완료 : 2005. 10. 20

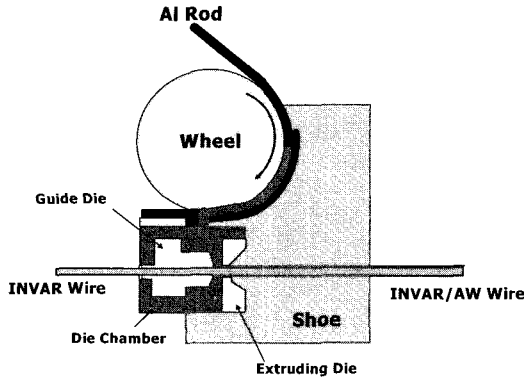


그림 1(a). 인바와 알루미늄의 크래딩공정.  
Fig. 1(a). Cladding process of invar and aluminum alloy.

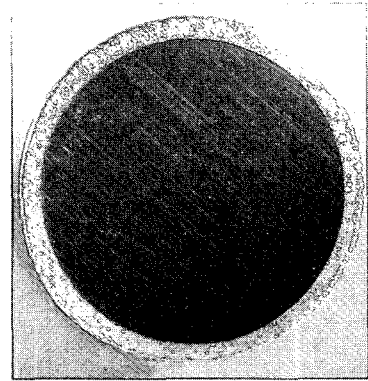


그림 1(b). 직경 3.5 mm Al clad invar강선.  
Fig. 1(b). Al clad invar wire of 3.5 mm diameter.

소재로 사용되고 있는 직경 3.5 mm의 Al clad invar강선을 이용하여 400 °C에서 최대 10,000시간 동안 가속열화시켜서 경년열화에 의한 강도변화와 피로특성의 변화를 조사하고 그 연관성을 규명하고자 한다.

약 500~600 °C이며 Al clad invar 내의 알루미늄 두께는 약 0.189 mm이다[그림 1(b)]. Al clad invar강선에서 알루미늄은 주로 전기전도도의 향상과 부식을 억제하는 역할을 수행한다.

## 2. 실험

### 2.1 제조공정

본 연구에 사용된 인바(INVAR)합금은 Fe-35Ni의 오스테나이트 단일상으로 인바합금에 알루미늄을 피복하는 크래딩(Al cladding) 공정과 신선공정을 거쳐 제조되고 있다.

크래딩공정은 용도가 다른 이종 소재를 복합적으로 이용하기 위하여 용점이하의 온도에서 압력을 가하여 이종 소재간 접합시키는 공정이다. 그림 1은 인바합금과 알루미늄합금의 크래딩(cladding) 과정을 나타낸 모식도[그림 1(a)]와 Al clad invar강선의 최종 제품[그림 1(b)]을 나타낸 것으로 직경 4.3 mm 인바합금이 가이드 다이(Guide Die)를 통해 공급되며, 알루미늄 로드(Al Rod)는 휠 글루부(Wheel Groove)에 의해 이송될 때의 마찰열과 Die내의 고압으로 발생된 열로 인해 알루미늄은 연화되어서 chamber내로 충전되고 최종적으로 신선 다이(Extruding Die)를 통해 인바합금과 함께 압출된다.

알루미늄과 인바합금의 크래딩작업시의 온도는

### 2.2 실험방법

실질적으로 장시간 사용된 전선을 확보하는 것은 거의 불가능하므로 본 연구에서는 실제 경년열화된 전선과 거의 유사한 특성을 나타내도록 하기 위하여 인위적으로 실사용온도 210 °C보다 높은 400 °C에서 등온처리를 하였다. 최대 10,000시간 까지 지속하면서 경년열화시간에 대한 강선의 특성변화를 조사하였다.

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.

소선에 대한 진동피로시험은 선재의 피로시험이 가능하도록 고안된 나카무라식 피로(NAKAMURA's fatigue)시험기(그림 2)를 이용하였다[1]. 시험에 이용된 시험편의 길이는 약 800 mm이며 선재에 4점 굽힘모멘트를 가한 상태에서 5 Hz의 주파수로 회전시키면서 인장과 압축을 동시에 가하여 시험하는 장비로서 바람에 의한 진동으로 선재에 굽힘응력이 작용한 경우와 유사하다. 시험편의 중심부에 가해지는 최대 응력의 크기는 식 (1)과 같다. 피로강도는 약  $10^7$  cycle 까지 파단되지 않은 응력으로 정하였다.

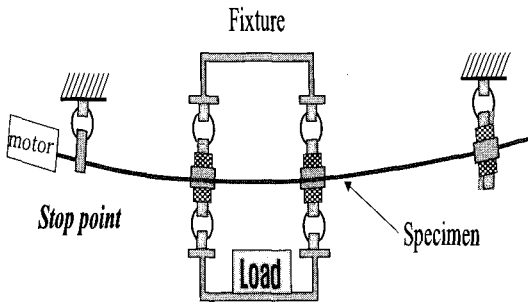


그림 2. 진동피로시험기의 모식도.  
Fig. 2. Schematic drawing of vibration fatigue test system for single wire.

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

여기서  $W$  : 수직하중(kg)  
 $\sigma$  : 최대응력(kg/mm<sup>2</sup>)  
 $l$  : Gauge 거리(mm)  
 $d$  : 시험편의 직경(mm)

직경 3.5 mm의 7가닥 소선을 연선했던 연선회 (3.5/7)에 대한 진동피로시험은 본 연구원에서 특별히 제작, 고안한 진동피로시험기에서 시험하였다. 그림 3은 본 연구원에서 고안한 진동피로시험기의 모식도로 전체 시험편의 길이는 시험편 직경의 약 200배인 2100 mm이며, 진동피로가 발생하는 균일구간은 전선직경의 100배인 1050 mm이다. 피로시험은 변위진폭 10 mm에서 30 mm까지 변화시키면서 실시하였으며, 각 변위진폭에서 시험하중에 따른 피로특성을 조사하기 위하여 시험편에 인장강도의 약 60 %의 하중을 인가하였다. 하중을 점차적으로 감소시키면서 최종적으로 피로에 의해 전선이 파단이 발생되지 않는 피로강도를 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Al clad invar 강선의 미세조직

그림 4는 Al clad invar강선의 종단면과 횡단면의 미세조직을 나타낸 것이다. 그림 4(a)의 종단면에서는 신선재 특유의 미세조직이 잘 발달되어 있음을 확인할 수 있었다. 즉 결정립이 가공방향으로 길게 연속적으로 연신되어 있는 형상을 나타내고

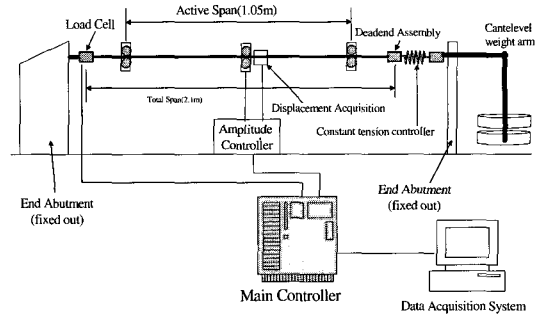
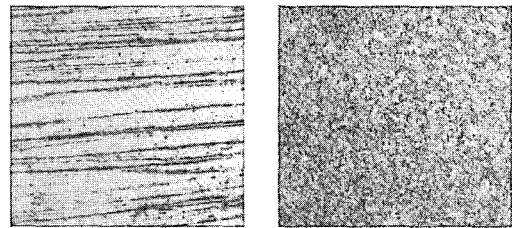


그림 3. 연선회의 진동피로시험 모식도.  
Fig. 3. Schematic drawing of vibration fatigue test system for strand wire.



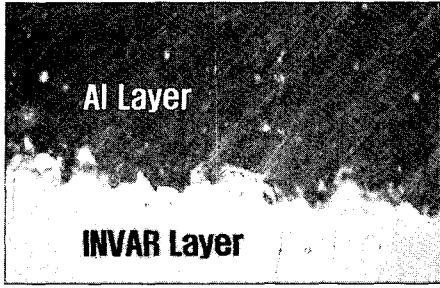
(a) Longitudinal Plane (b) Vertical Plane

그림 4. 인바강선의 미세조직.  
Fig. 4. Microstructures of invar alloy.

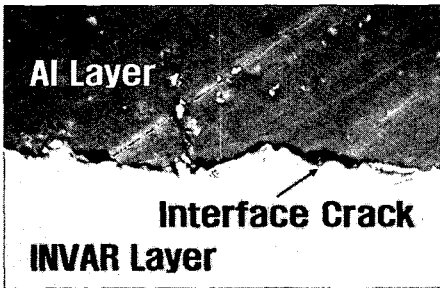
있으며, 그림 4(b)의 횡단면에서는 결정립의 미세화가 잘 이루어져 있었다. 이러한 결정립의 미세화와 방향성배열은 전위이동의 장애물로 작용하여 균질화 처리된 선재에 비하여 피로강도와 피로수명을 증가시키는 역할을 함과 동시에 기계적 강도를 증가시킨다.

본 연구에 이용된 Fe-35Ni조성의 인바합금은 전체적으로 면심입방구조(FCC)인 오스테나이트(Austenite) 단일상을 이루고 있다. Fe-Ni 합금강은 Ni의 함량에 따라 상이 변화하는 것으로 알려져 있다. Ni의 함량이 증가함에 따라  $\alpha$ (BCC)  $\rightarrow$   $\gamma$ (FCC)변태는 낮은 온도로 이행하여 상온에서도 Ni의 함량이 30 % 이상이 되면  $\gamma$ 상이 나타난다. 즉 Ni의 함량이 30 % 이하에서는 체심입방구조인  $\alpha$  조직이 안정하며, 그 이상에서는 면심입방구조인 오스테나이트 단상이 나타난다.

그림 5는 as-drawing상태와 4000시간 경년열화한 Al clad invar강선의 알루미늄과 인바합금간의



(a) As-drawing 상태



(b) 4000시간 열화제내의 인바와 알루미늄간의 계면

그림 5. Al clad invar강선의 경년에 따른 인바와 알루미늄간의 계면상태.

Fig. 5. Interface crack between invar and aluminum layer with aging.

계면을 나타낸 것이다. As-drawing상태에서 인바와 알루미늄의 계면접합상태는 아주 양호하였으나 4000시간 열화제에서는 알루미늄과 인바의 계면에서 균열이 발생되어 있는 것을 확인할 수 있다. Al clad invar강선을 400 °C에서 장시간 유지하게 되면 인바( $2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )와 알루미늄( $26.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )간의 열팽창계수가 차이로 인해 약 4000시간 열화제에서 인바와 알루미늄층간의 계면에 균열이 발생하기 시작하였다. 이러한 계면균열은 열화시간이 증가할수록 발생하는 빈도와 그 크기도 증가하였다. 인바와 알루미늄층간의 계면균열은 뒤에서 언급될 피로특성에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

### 3.2 강도변화

그림 6은 400 °C에서 최대 10,000시간동안 열화 처리한 Al clad invar강선의 열화시간에 대한 인장강도와 항복강도의 변화를 나타낸 것이다. 열처리 이전 as-drawing제의 인장강도(TS)와 항복강도(YS)는  $115.7 \text{ kgf/mm}^2$ 와  $115.3 \text{ kgf/mm}^2$ 으로 가공

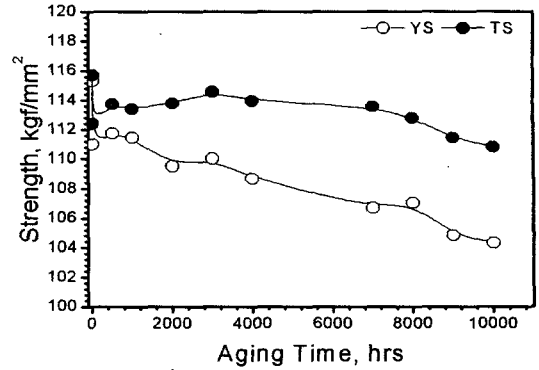


그림 6. 경년열화시간에 따른 강도 변화.

Fig. 6. The change of strength with aging.

송전선의 강심으로 사용되기 위한 평균인장강도  $110 \text{ kgf/mm}^2$ 과 비교하여 약간 높게 나타났다. 경년열화시간과 인장강도와 관계에서 열화 초기 약 1 ~ 2시간 이내에 약  $3 \text{ kgf/mm}^2$  정도 감소하였으며 이후 안정적인 강도를 유지하다가 4000시간의 열화제에서 다시 인장강도는 감소하기 시작하였다. 반면에 항복강도(YS)는 열화시간에 따라 연속하여 감소하였다.

열화초기 인장강도와 항복강도의 순간적인 감소 현상은 신선과정 중에 도입된 잔류응력과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 일반적으로 신선공정에 의해 제조된 강선은 인장, 압축, 전단변형과 같은 응력을 동시에 받게 된다. 이러한 신선과정의 특징으로 인해 강선의 표면부에는 인장, 중심부에는 압축잔류응력이 형성된다. 신선공정에 의해 형성된 잔류응력과 400 °C 경년열화에서 소멸되는 잔류응력의 양을 조사하기 위하여 그림 7에 열화처리하기 이전 as-drawing제와 400 °C에서 1000시간과 9000시간 열화한 열화제에 대한 잔류응력의 변화를 측정하였다. 신선공정에 의해 강선내에 형성된 잔류응력은 약  $4.2 \text{ kgf/mm}^2$ 으로 400 °C에서 1000시간 동안 열화한 열화제에 대한 잔류응력은 약  $0.6 \text{ kgf/mm}^2$ 으로 신선공정에 의해 형성된 잔류응력은 거의 소멸되었다. 이는 경년열화로 인하여 잔류응력의 감소값(약  $3.5 \text{ kgf/mm}^2$ )과 그림 6의 열화초기 인장강도와 항복강도의 감소값( $3.0 \text{ kgf/mm}^2$ )과 거의 유사하였다.

신선과정에서 형성된 잔류응력은 약 400 °C의 저온에서 유지하게 되면 재결정회복현상으로 인해 감소한다. 즉 신선공정과 같은 가공으로 인해 생성

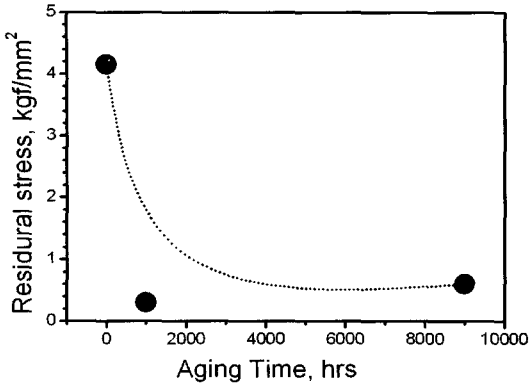


그림 7. 경년열화시간에 대한 Al clad invar강선의 잔류응력변화.

Fig. 7. The change of residual stress in Al clad invar wire with aging.

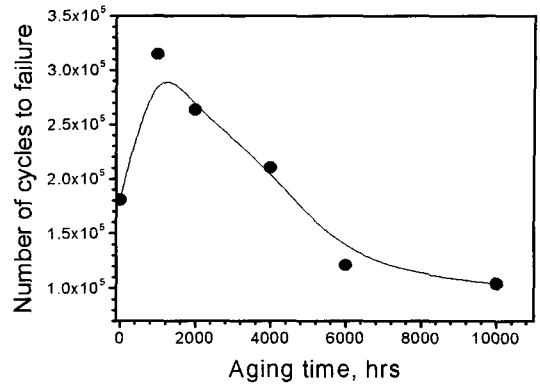


그림 8(b). 26 kgf/mm²에서 경년열화시간에 대한 피로수명.

Fig. 8(b). Fatigue life with aging at 26 kgf/mm².

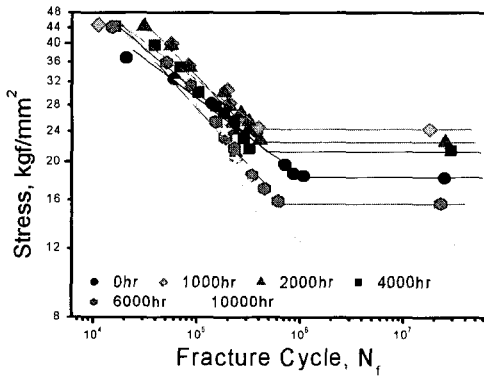


그림 8(a). 경년열화 시간에 대한 S-N 곡선.

Fig. 8(a). S-N curve with aging.

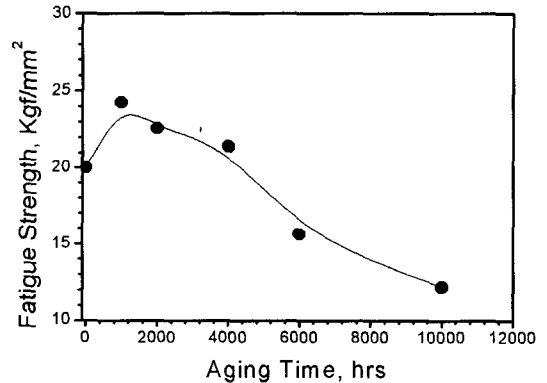


그림 8(c). 경년열화시간에 대한 피로강도.

Fig. 8(c). Fatigue strength with aging.

된 공공원자, 전위와 같은 결함을 가진 상태는 열역학적으로 불안정하기 때문에 가열에 의한 온도 상승으로 원자의 열진동에너지가 증가하며 격자결합의 이동이 쉬워져 그 배열을 변화하여 상호결합 소멸된다. 그 결과 격자결합부분에 집적되어 있는 변형에너지는 점차적으로 감소하고, 이에 따라 잔류응력은 감소한다. 이러한 잔류응력의 감소는 온도와 시간에 의존하게 되며 앞서 나타난 인바합금과 알루미늄층간의 계면균열과 더불어 뒤에서 언급될 피로에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

### 3.2 소선의 피로특성

Al clad invar강선의 경년열화에 따른 진동피로의 변화를 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 식

(1)에 의해 계산되어진 응력과 파단까지의 피로사이클을 나타내는 Stress-Fracture cycle(S-N)곡선을 나타낸 것이다. 그림 8(b)는 응력 26.0 kgf/mm²에서의 피로수명을 나타낸 것이며, 그림 8(c)는 400 °C에서의 경년열화에서 각 열화시간에 따라 진동피로에 의해 파단이 발생하지 않는 응력인 피로강도를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 피로수명은 경년열화가 진행됨에 따라 as-drawing에 비하여 증가하다가 약 1,000시간의 열화제에서 최대 피로수명을 나타낸 후 감소하였다. 그림 8(c)의 as-drawing상태에서 약 20 kgf/mm²이던 피로강도는 경년열화로 인해 증가하다가 1000시간에서 24.3 kgf/mm²으로 최대 피로강도를 나타낸 후 급격히 감소하였다. 1000

시간 열화로 인하여 피로강도는 열화이전에 비하여 약 4.3 kgf/mm<sup>2</sup> 정도 증가하였다. 이는 그림 7의 잔류응력의 감소분과 거의 유사하다. 10,000시간의 경년열화에서는 약 12.16 kgf/mm<sup>2</sup>으로 as-drawing재에 비교하여 약 50 %정도 감소하였다.

본 연구에서 400 °C 경년열화로 인하여 Al clad invar강선의 진동피로에 영향을 미치는 인자는 다음과 같이 구분할 수 있다.

(i) 경년열화시간에 의한 기계적 성질의 저하.

(ii) 신선공정과 같은 가공에 의해 형성된 잔류응력의 소멸.

(iii) 알루미늄과 인바합금간의 선팽창계수 차이에 의한 계면균열의 생성.

(i) 소재의 기계적 성질 중 피로에 영향을 미치는 인자로는 항복강도, 인장강도와 연신율 등이 있다. 본 시험에 이용된 경년열화 Al clad invar강선의 피로에서는 항복강도에 크게 의존하였다. 그림 9는 항복강도와 피로강도의 관계를 재구성한 것으로 동일 인장강도 수준에서 항복강도가 높은 소재의 피로수명과 피로강도가 우수하게 나타났다. 이는 피로파괴가 소재의 슬립(slip)에 의해 표면이 균열이 생성되고 이의 성장에 의해 일어나므로 항복강도가 높을수록 피로균열의 생성이 어렵게 되어 피로강도는 증가되며, 특히 본 연구에서와 같이 피로수명이 긴 고주기 피로에서는 피로균열의 생성이 피로수명의 대부분을 차지하게 되므로 항복강도의 의존성은 더욱 크지게 된다고 볼 수 있다 [2,3]. 항복강도와 피로강도(FS)은 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있었다.

$$FS(\text{kgf/mm}^2) = -69.9 + 0.82 \times YS \quad (2)$$

(ii) 항복강도 이외에도 Al clad invar강선의 피로수명과 피로강도에 영향을 미치는 것으로는 잔류응력의 변화를 들 수 있다. 그림 6의 1000시간 열화에서 항복강도는 열화이전 as-drawing재에 비해 감소하였으나 피로강도와 피로수명이 정점을 나타내고 있는 것은 잔류응력과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. 보고에 의하면 가공으로 인해 재료에 도입된 인장잔류응력은 피로강도와 피로수명을 감소시키는 것으로 알려져 있다[4,5]. 인장잔류응력의 감소 또는 소멸시킴으로써 피로특성을 향상시킬 수 있다. 그림 7의 신선 중 도입된 잔류응력은 400 °C에서 1,000시간에서 거의 소멸되었다. 그 결과 그림 8의 1,000시간 열화재에 대한 진동피로에서 최대피로강도와 피로수명을 나타내는

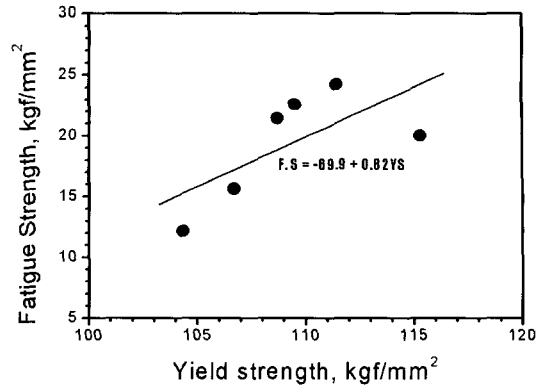


그림 9. 항복강도와 피로강도와와의 관계.

Fig. 9. The relationship of fatigue strength and yield strength.

것으로 판단된다. 잔류응력의 완화는 시간과 온도에 의해 결정되는 것으로 보고에 의하면 연강의 잔류응력에 미치는 온도와 시간의 관계는 400 °C에서 약 300분 동안 열처리하면 잔류응력의 60 % 이상이 사라지고 이 이하의 온도에서는 시간이 길어질수록 잔류응력이 점진적으로 감소한다고 보고되고 있다[6,7].

(iii) 400 °C에서 장시간 열화로 인하여 인바와 알루미늄 계면에서 균열이 발생되어 피로파괴의 우선사이트를 제공하여 피로수명과 피로강도가 저하된 것으로 판단된다. 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 인바와 알루미늄층간의 계면균열은 주로 인바와 알루미늄의 열팽창계수 차이(인바:  $2.6 \times 10^{-6}$  /°C, 알루미늄:  $26.0 \times 10^{-6}$  /°C)에 의해 계면결합력이 약화되어 발생되었었다[8,9].

### 3.3 연선재의 피로특성

송전선에서 바람에 의한 진동으로 피로가 발생할 수 있는 주파수는 Strouhal수로 표현될 수 있다 [10].

$$S = \frac{fd}{V} \quad (3)$$

$f$  = 주파수,  $d$  = 전선의 직경,  $V$  = 풍속

식 (3)에 대하여 Bate와 Callow는 송전선에서 Strouhal수를 0.185로 보고함에 따라 식 (3)은 다음과 표현될 수 있다[11].

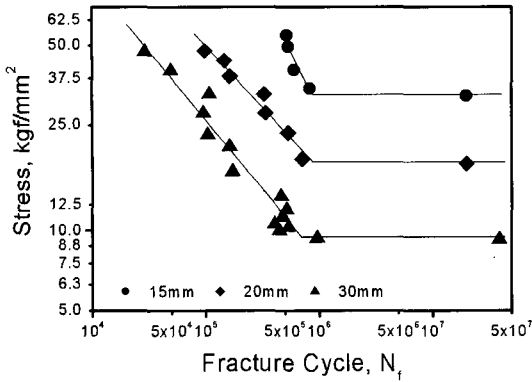


그림 10. 연선재의 응력에 따른 파단수명.  
Fig. 10. S-N curve with displace amplitude.

$$f = \frac{0.185XV}{d} \quad (4)$$

식 (4)에서 본 연구에 사용된 연선재(3.5/7)의 직경 10.5 mm와 풍속 1 m/sec에 대하여 진동피로가 발생할 수 있는 주파수는 약 17 Hz이다. 식 (4)에 의해 계산되어진 주파수 17 Hz와 10 ~ 30 mm의 변위진폭 하에서 인장강도의 약 60 % 하중으로부터 점차적으로 하중을 감소시키면서 피로시험한 결과를 그림 10에 나타내었다. 그림에서 변위진폭이 증가함에 따라 피로수명과 피로강도는 급격히 감소하였다. 15 mm 진폭에서의 피로강도는 인장강도의 약 49.6 %인 32.2 kgf/mm<sup>2</sup>이었으며 30 mm 진폭에서는 인장강도의 약 9.5 %인 9.2 kgf/mm<sup>2</sup>로 감소하였다. 각 진폭에서 피로수명과 응력과의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$15 \text{ mm 진폭, } \log a = 6.8 - 0.89 \log Nf, \quad (5)$$

$$30 \text{ mm 진폭, } \log a = 4.02 - 0.52 \log Nf \quad (6)$$

그림 11은 각 변위진폭에서 연선재의 피로강도를 나타낸 것으로 보고에 의하면 바람에 의해 유도되어진 연선재의 진동피로 발생은 전선직경의 2 배를 넘지 않는다고 하였다. 연선재 직경 10.5 mm에 대한 진동피로의 발생조건은 약 21 mm이며, 이때의 피로강도는 연선재 인장강도의 16.1 %인 18.4 kgf/mm<sup>2</sup>이다.

그림 12는 변위진폭을 30 mm로 하여 시험한 연선재의 피로파면을 나타낸 것으로 전형적인 입내파면을 나타내고 있으며 균열은 주로 인바와 알루미늄

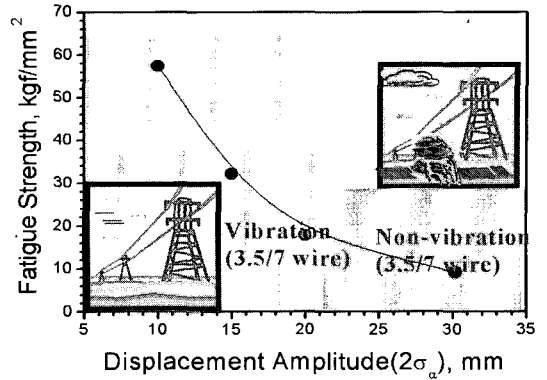
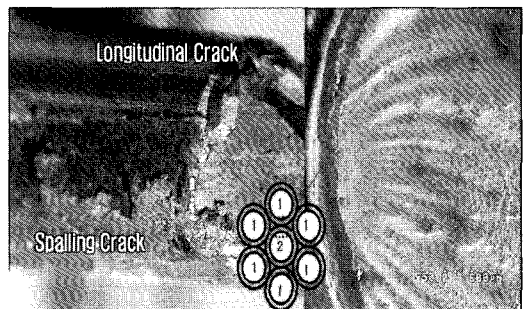


그림 11. 변위진폭에 대한 피로강도의 변화.  
Fig. 11. The change of fatigue strength with displace amplitude.



(a) 응력 집중부의 피로파면 (30 mm, 40.0 kgf/mm<sup>2</sup>)



(b) 마찰부의 피로파면 (30 mm, 10.0 kgf/mm<sup>2</sup>)

그림 12. 연선재의 피로파면.  
Fig. 12. The fatigue fracture surface of strand wire.

미늄의 계면에서 발생되었다. 연선재의 피로파단은 일반적으로 구성하고 있는 소선들 사이의 마찰 또는 마모에 의해 균열이 발생되어 내부로 성장하여

최종적으로 파단된다. 본 시험에서 연선재의 피로 파단은 다음과 같이 두 가지 양상으로 구별될 수 있었다.

첫째, 그림 12(a)는 바와 같이 연선재의 외층 표면부의 응력집중부에서 피로파단이 발생된 경우이다. 이는 소선의 피로파단과 동일한 경우로 응력이 집중된 표면부에서 균열이 생성되어 내부로 성장하여 최종파단이 발생하였다.

둘째, 그림 12(b)에 나타난 바와 같이 연선재를 이루고 있는 각 소선 1번층과 중심부인 2번층간의 마찰에 의해 피로균열이 발생되어 내부로 성장하였다[12].

연선재의 각 소선은 꼬여 있다 이 경우 소선의 접촉부위(내층과 외층소선)에서는 인가하중과 피로 시험과정에서 작용하는 굽힘하중 등에 의해 인접 소선을 따라 미세하게 움직임이 형성된다. 소선들 사이의 미세한 움직임에 의해 trellis가 생성된다. 강선의 표면에 결함이 존재하는 경우 피로의 최대 굽힘하중이 작용하는 지점에서 trellis와 소선의 움직임에 의해 강선의 표면근처에 spalling crack, Longitudinal crack(그림 12(b))이 형성된다. 이 spalling crack은 연선재내에 작용하는 굽힘응력 하에서는 균열성장의 우선사이트가 된다.

연선재내에서의 응력분포는 아주 복잡하다. 특히 Spalling crack과 같은 표면결함주위의 미소응력(micro-stress)은 시험편 전체에 작용하고 있는 응력(macro-stress)에 비해 응력이 집중되기 때문에 아주 높게 형성된다. 특히 높은 마찰력의 작용은 연선재의 피로특성을 더욱 저하시키는 역할을 한다.

마찰력에 영향을 미치는 인자들로 강선의 표면거칠기, 소선의 접촉하중, 접촉하고 있는 소선들 사이에 발생하는 상대적인 움직임속도 등이 있다.

위의 피로균열의 발생에서 전자의 경우 피로응력이 높은 고응력하에서 주로 발생하였으며 후자의 경우 피로강도근처의 응력에서 발생되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 증용량 저이도 송전선으로 사용되고 있는 STACIR/AW전선의 강심소재인 Al clad invar강선에 대하여 400 °C 경년열화에 대해서 진동피로 특성과 연선재에 대하여 진동피로특성을 평가하고 이를 분석하였다.

1. 400 °C 열화에서 경년열화에 따른 피로수명과 피로강도는 1000시간의 경년열화에서 최대을

나타낸 후 감소하였다. As-drawing된 Al clad invar강선의 피로강도는 약 20.0 kgf/mm<sup>2</sup>이며 1000시간 경년열화에서의 피로강도는 인장강도의 약 21 %인 24.3 kgf/mm<sup>2</sup>이다.

2. 피로강도와 피로수명에 영향을 미치는 인자로는 항복강도, 열팽창계수의 차이에 의한 알루미늄과 인바강선 사이에서 발생하는 계면균열, 가공시에 형성된 잔류응력변화 등이 있다.

3. 소선을 연선한 7연선재에 대한 진동피로특성은 주로 변위진폭에 큰 영향을 받으며 바람에 의해 발생하는 최대 변위진폭은 전선 직경의 2배이다. 최대 변위진폭(21 mm)에서의 피로강도는 인장강도의 16.1 %인 18.4 kgf/mm<sup>2</sup>이다.

4. 연선재의 진동피로파단은 2가지의 형태를 나타내었다. 고응력 하에서는 소선에서와 동일하게 주로 표면부의 응력집중부에서 균열이 발생되어 내부로 성장하여 파단 되었다. 반면에 저응력하에서는 피로 중에 각 소선간의 이동 등에 의한 층간 마찰로 인하여 마찰부에서 균열이 발생되어 내부로 성장하였다.

#### 참고 문헌

- [1] 김병길, 김상수, "냉간선선된 고탄소강선의 굽힘피로특성", 대한금속·재료학회지, 39권, 11호, p. 1212, 2001.
- [2] 長江 定康, 加藤 昭所, 鐵と鋼, No. 68, p. 1430, 1982.
- [3] A. M. Sherman and R. G. Davies, Metall. Trans., A, 10A, p. 929, 1979.
- [4] M. Dollar, I. M. Bernstein, and A. W. Tomson, Acta Metall., 36, Vol. 8, No. 2, p. 311, 1988.
- [5] H. Sunwoo, M. E. Fine, M. Meshii, and D. H. Stone, Met. Trans., 13A, p. 2035, 1982.
- [6] M. B. Adeyemi, R. A. Stark, and G. F. Modlen, "Heat Treatment 79", Society, 122, 1980.
- [7] J. M. potter and R. A. Millard, "Advance in X-Ray Analysis", V20, ed., H.McMurdie, Plenum Press, p. 309, 1977.
- [8] A. Kawasaki, R. Watanabe, M. Yuki, Y. Nakanishi, and H. Onabe, Trans. JIM 37, p.788, 1996.
- [9] R. A. Miller and C. E. Lowell, Thin Solid Films 95, p. 265, 1982.



- [10] Y. N. Chen, Transactions ASME Journal of Engineering for Industry, 1972.
- [11] E. Bate and J. R. Callow, Transactions Institution of Engineers (Australia), Vol. 15,

- No. 5, p. 149, 1934.
- [12] H. J. Grover, S. A. Gordon, and L. R. Jackson, NAVWEPS 00-25-534, Department of the Navy, 1960.