

논문 19-1-18

# 경년열화가 증용량 저이도 송전선의 기계적특성에 미치는 영향 (II)

## Effect of Mechanical Properties by a Long Term Operation in High Capacity and Low Sag Conductor (II)

김상수<sup>1,a</sup>, 김병걸<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>, Goo-Yong Sin<sup>2</sup>, Dong-Il Lee<sup>2</sup>, and Byung-Uk Min<sup>3</sup>)

### Abstract

Today, restricted energy sources, environmental considerations and the high cost of transporting fuel have limited the number and location of available power plant sites. The pressures resulting from these conditions have tended to require the construction of long, high-capacity, high-voltage power lines. It's used to adapt to STACIR/AW(Super Thermal-resistant Aluminum alloy Conductors, aluminum-clad Invar-Reinforced) conductor for coping with these situations. STACIR/AW conductor was formed by the combination of INVAR/AW as the core for low sag and super thermal-resistant aluminum alloy conductor for current capacity increase. Increase of temperature by current capacity and long span lines make the susceptible to the deterioration of thermo-mechanical properties(conductivity, tensile strength, E-modulus and twist property et al). In the present work, changes of thermo-mechanical properties with aging have been studied in STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup> conductor with forms of single wire and strand wire.

**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 410 mm<sup>2</sup>의 전선은 그림 1에 나타난 바와 같이 외층의 알루미늄합금 도체와 내층의 지지선인 인바강선으로 구성되어 있다. 도체는 전류용량을 증가시키기 위하여 알루미늄에 지르코늄(Al-Zr)을 첨가하여 내열성을 향상시킨 초내열 알루미늄합금(STAI)을 이용하여 허용전류용량을 ACSR의 848 A보다 두 배 가까이

높은 1,584 A로 증가 시켰다. 이때 전선의 온도는 210 °C로 ACSR의 90 °C에 비해 고온이므로 전선의 처짐 현상(이도)을 방지하기 위하여 지지선으로 아연도금 강선 대신에 인바(INVAR)합금에 알루미늄으로 피막을 입힌 Al clad invar강선을 강심소재로 사용하고 있다. Fe-35Ni계의 인바합금은 상온에서 오스테나이트 단상으로 열팽창계수( $\alpha$ )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 인하여 STACIR/AW전선의 특징인 저이도 특성의 악화가 우려된다. 그러나 국내에서는 현재까지 전선의 생산에만 집중하고 있는 실정으로 경년열화에 대한 기초 연구는 거의 전무한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 STACIR/AW전선과 그 구성소재인 Al clad invar 강선과 STAI 소선에 대하여 200 °C, 300 °C, 400

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. 11. 4  
 심사완료 : 2005. 12. 5

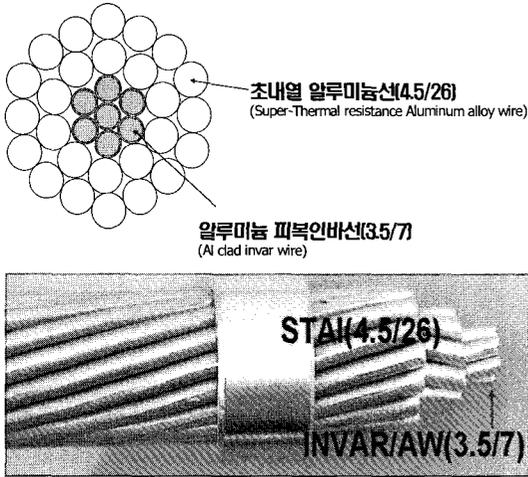


그림 1. STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup>전선의 외관.  
Fig. 1. Appearance of STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup> Conductor.

℃에서 가속열화하여 인장강도, 탄성계수, 비틀림과 같은 기계적특성의 변화를 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험방법

본 연구에 사용된 STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup>전선은 Al clad invar(INVAR/AW)강선과 STAI 소선으로 구성되어 있다. 인바합금의 조성은 Fe-35Ni의 오스테나이트(Austenite)의 단일상으로 직경 3.12 mm에 알루미늄이 약 0.189 mm 두께로 클래딩(cladding)되어 있다. 초내열 알루미늄합금도체(STAI)는 Fe-0.34Zr로 구성되어 있다.

장시간 열화된 전선의 전기적·기계적 특성의 평가를 위하여 실제선로에서 회수하여 시험하는 것이 거의 불가능하므로 본 연구에서는 실제의 경년열화조건과 거의 유사한 특성을 나타내도록하기 위하여 인위적으로 200 ℃, 300 ℃와 400 ℃에서 등온처리를 하였다. 장시간 등온처리 시험편에 대하여 다음과 같이 시험을 실시하였다. 소선에 대한 인장시험과 탄성계수는 JIS Z 2201 9 A 시험편에 대하여 Zwick사의 전선 전용 인장시험기를 이용하였으며 약 300 mm의 시험편에 100 mm의 신율계를 부착하여 10 mm/min의 속도로 인장시험을 실시하였다.

송전선의 인장강도와 탄성계수는 각 소선에서 시험적으로 측정된 결과에 대하여 식 (1)과 식 (2)로 계산하였다[2,3].

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

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

$T_a, T_s$  : STAI과 INVAR/AW의 인장강도  
 $A_a, A_s$  : STAI과 INVAR/AW의 단면적  
 $N_a, N_s$  : STAI과 INVAR/AW의 소선수  
 $E_a, E_s$  : STAI과 INVAR/AW의 탄성계수  
 $m$  :  $A_a / A_s$

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

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 전선의 구조 및 기본특성

중용량 저이도전선인 STACIR/AW송전선의 강선은 전선의 처짐현상(이도)을 억제하기위하여 선팽창계수가 매우 작은 인바선에 알루미늄을 피복하여 도전율이 약 14 %IACS 되도록 제조한 Al clad invar강선을 사용한다. 도체는 내열성 향상으로 송전용량을 증대시키기 위하여 지르코늄(Zr)을 첨가하여 도전율이 60 % 이상이 되도록 제조된 초내열 알루미늄(STAI)소선을 사용하였다. 알루미늄(Al)에 지르코늄(Zr)을 첨가하므로 인해 고용강화(Solid-solution strengthening)효과와 석출강화효과를 발생된다. 알루미늄 내에서 지르코늄은 확산속도가 느리고  $Al_3Zr$ 의 미세한 석출물이 형성되어 전위나 입계의 이동을 방해하여 내열성과 고온크립(creep)특성이 향상된다.

중용량 저이도 전선으로 가장 많이 가설되어 있는 STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup>전선의 구조와 기본적인 특성은 그림 1과 표 1에 나타내었다. 내부에는 직경 3.5 mm의 Al clad invar강선이 7가닥 2층으로 구성되어 있으며, 도전율 향상과 부식 억제를 위하여 0.189 mm 두께로 알루미늄이 피복되어 있다.

외부에는 직경 4.5 mm의 초내열 알루미늄이 26가닥 2층으로 구성되어 있다. 내층에는 10가닥의 소선이 11.5의 피치(pitch)로 연선되어 있으며 외층에는 소선 16가닥이 10.4 피치로 연선되어 있다.

표 1. ACSR과 STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup>전선의 특성.

Table 1. Properties of ACSR and STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup> conductor.

Conductor model		ACSR	STACIR/AW
Item	Conductor	HAI	STAI
	core	Steel	INVAR/AW
Stranding (Number/Diameter)	Conductor	26/4.5	26/4.5
	Core	7/3.5	7/3.5
Weight (kg/km)	Conductor	42.93	42.93
	Core	75.04	68.31
Tension (kgf)	Conductor	250	258
	Core	1,250	1,060
Electrical resistance (Ω/km)		0.00702	0.0686
Modulus of elasticity (kgf/mm <sup>2</sup> )	Total	8,360	7,730
	Core	21,00	15,500
Coefficient of linear expansion (×10 <sup>-6</sup> /°C)	RT ~ Trans. temp.	11.5	17.48
	Over Trans. temp.	11.5	3.7
operating temperature (°C)	Continuous	90	210
	short term	100	240
Current capacity (A)	Continuous	848	1,81
	short term	939	1,706

3.2 인장강도의 변화

그림 2는 STACIR/AW전선을 구성하고 있는 INVAR/AW강선과 STAI도체에 대하여 고온인장강도를 나타낸 것이다. INVAR/AW강선과 STAI도체에 대한 상온인장강도는 115.7 kgf/mm<sup>2</sup>와 17.9 kgf/mm<sup>2</sup>로 한국전력의 시험규정인 110 kgf/mm<sup>2</sup>과 16.0 kgf/mm<sup>2</sup>을 만족하였다. 인장강도의 온도 의존성은 직선적이며 전선의 단시간 허용온도인

240 °C에서의 인장강도는 103.0 kgf/mm<sup>2</sup>과 9.0 kgf/mm<sup>2</sup>으로 상온인장강도의 약 90 %와 40 %로 우수하게 나타났다. 오스테나이트상 구조인 INVAR/AW강선의 고온강도는 고용체강화효과에 의한 가공경화현상과 연화단계인 동적회복현상의 균형에 의해 결정되어 진다. 오스테나이트상은 유용한 슬립계가 적고 조밀충진구조인 fcc기 때문에 bcc인 페라이트에 비해 자기확산속도가 1/400정도로 낮고 또한 적층결합에너지가 낮기 때문에 아결정립(Sub-grain)크기를 작게하여 전위소멸속도를 늦추어서 우수한 고온특성을 나타낸다[1-3].

그림 3은 INVAR/AW소선과 STAI소선에 대하여 200 °C, 300 °C와 400 °C의 각 온도에서 최대 10,000시간동안 등온경년열화 후 인장강도의 변화를 나타낸 것이다. 경년열화로 인한 INVAR/AW의 인장강도는 각 온도에서 열화 초기 1000시간 까지 약 3~8 kgf/mm<sup>2</sup>정도 감소한 후 경년시간에 관계없이 거의 일정한 강도를 유지하였다. 400 °C에서 4000시간 이상 경년열화 되어진 시험편에서는 그림 7(a)에 나타난 것과 같이 인바층과 알루미늄층간의 계면균열이 생성되기 시작하였다. 이는 인바(2.6×10<sup>-6</sup> /°C)와 알루미늄(26.0×10<sup>-6</sup> /°C)간의 열팽창계수의 차이로 인하여 인바에서는 인장하중이 유도되고 알루미늄에서는 압축응력이 선재의 길이

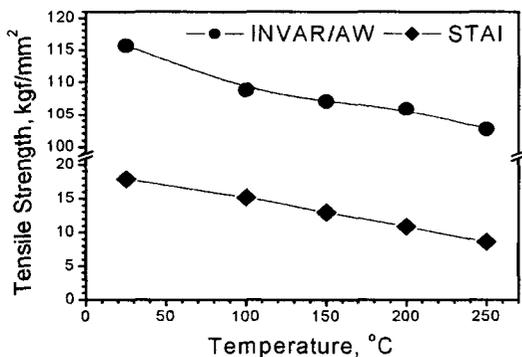


그림 2. INVAR/AW와 STAI의 고온인장강도.  
Fig. 2. High temperature tensile strengths of INVAR/AW wire and STAI wire.

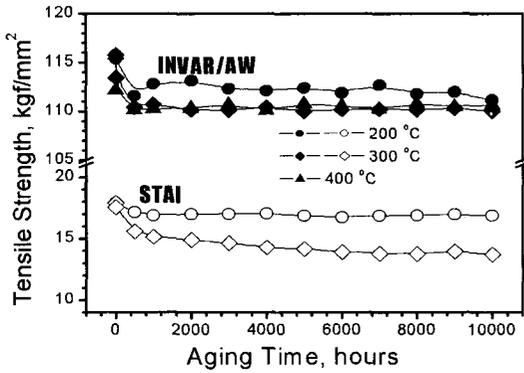


그림 3. 경년열화에 대한 상온인장강도.  
Fig. 3. The change of tensile strength with aging.

방향으로 유도된다. 열팽창계수의 차이에 의해 고온에서 장시간 유지될 경우 인바와 알루미늄층간의 계면에 미소균열이 발생하여 성장한다[4,5].

인바층과 알루미늄클레딩층 사이의 계면균열은 INVAR/AW강선의 인장강도에는 영향을 미치지 않지만 표면부에 민감하게 반응하는 비틀림강도와 피로에는 큰 영향을 미쳐 피로수명과 피로강도를 급격하게 감소시켰다[6].

STAI의 경우 200 °C에서의 인장강도는 경년열화시간에 따라 변화를 나타내지 않았다. 그러나 300 °C에서의 인장강도는 열화시간에 따라 감소하였으며 10,000시간의 경년에서 인장강도는 약 13.7 kgf/mm<sup>2</sup>으로 23 %정도 감소하였다. 그러나 ACSR 전선의 도체로 사용되고 있는 HAI도체의 300 °C, 1시간의 유지 후 약 45 %의 인장강도 감소에 비하여 우수한 내열특성을 나타내었다[7]. 이는 앞서서도 언급한 바와 같이 Al-Zr합금인 STAI도체 경우, Al내에서 Zr의 확산속도가 느리고 미세한 Al<sub>3</sub>Zr이 석출되어 전위나 입계의 이동을 방해하여 내열성을 향상시키기 때문이다. STAI도체의 재결정온도는 약 380 °C로 HAI의 270 °C에 비하여 약 110 °C 정도 높다.

그림 4는 각 온도에서 경년열화한 STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup>전선의 인장하중과 그에 따른 INVAR/AW강선의 하중분담율을 나타낸 그림이다.

전선의 상온인장하중은 약 13,667 kgf로 강선(INVAR/AW)과 도체(STAI)에서 각각 52 %와 48 %의 하중을 분담하였다. 200 °C 열화에서 전선의 인장하중은 초기 약 1000시간 까지 약 600 kgf 정도의 하중감소를 나타내었다. 이는 그림 3에서

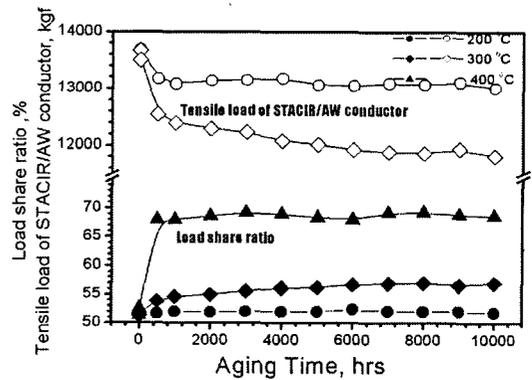


그림 4. STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup> 전선의 인장하중과 INVAR/AW강선의 하중분담율.  
Fig. 4. The change of tensile strength of STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup> conductor and load ratio of INVAR/AW wire.

INVAR/AW강선의 열화초기 인장강도감소로 인하여 나타난 것으로 이 후 열화시간에 따라서는 거의 일정한 인장하중을 나타내었으며 하중분담율도 변화가 없이 52 %정도로 일정하게 유지되었다. 그러나 300 °C경년열화에서는 전선의 인장하중은 경년열화에 의하여 감소하였으며 INVAR/AW강선에 부하되는 하중분담도 점차적으로 증가되었다. 이는 경년열화에 의한 전선의 노화 정도가 STAI도체에 의하여 지배되기 때문이다. 400 °C에서 경년열화에서 전선인장하중을 INVAR/AW강선이 약 68 %를 분담하는데 이는 전선이 가설되어 장시간 노출될 경우 도체의 하중분담율은 점차적으로 감소하고 강선의 하중분담이 증가하게 되어 최종적으로는 약 전선전체하중의 68 %까지 INVAR/AW강선이 담당하게 될 것으로 판단된다.

### 3.3 탄성계수의 변화

그림 5는 각 온도에서 경년열화에 의한 탄성계수 변화를 나타낸 것이다. 초기 INVAR/AW강선, STAI도체 및 STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup>전선의 탄성계수는 약 162.7 GPa, 62.44 GPa과 76.48 GPa이다. 경년열화에 의하여 INVAR/AW강선의 탄성계수는 인장강도와 유사하게 열화초기에 잔류응력의 완화로 인해 15 GPa 정도 감소한 후 일정한 값을 유지하였다. 반면에 STAI과 STACIR/AW전선은 경년열화시간에 증가함에 따라 탄성계수는 감소하였다. 각 온도에서 경년열화시간과 STACIR/AW 410

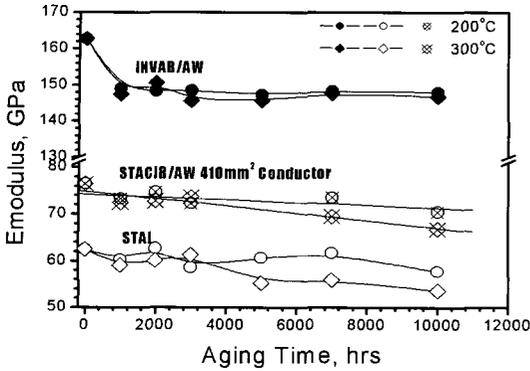


그림 5. 각 온도에서의 탄성계수 변화.  
 Fig. 5. The change of elastic modulus in accordance with aging at various temperature.

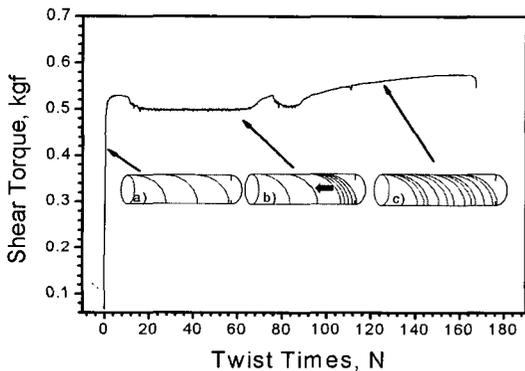


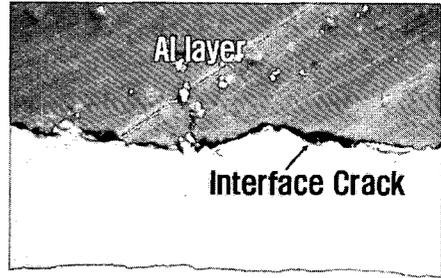
그림 6. INVAR/AW의 비틀림 곡선.  
 Fig. 6. Twist times - Shear torque curve of INVAR/AW wire.

mm<sup>2</sup>전선의 탄성계수와와의 관계는 다음의 실험식으로 표현될 수 있다.

$$E = 74.19 - 2.95 \times 10^{-4} \times T \quad (3)$$

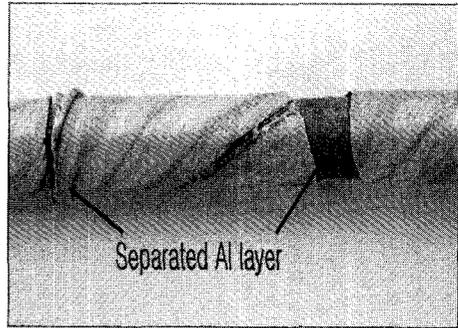
$$E = 74.88 - 7.89 \times 10^{-4} \times T \quad (4)$$

경년열화에 의한 탄성계수의 감소는 전반적으로 전선의 열팽창계수를 증가시키게 되고 이러한 열팽창계수의 증가는 최종적으로 이도의 증가를 초



Invar layer

(a) 400 °C에서 인바와 알루미늄층간의 계면균열  
 (a) Interface crack between invar layer and aluminum layer at 400 °C 9000 hour aging.



(b) 비틀림에서 인바와 알루미늄클레이딩층의 분리  
 (b) Interface fracture between invar layer and aluminum layer after twist test.

그림 7. 인바와 알루미늄층간의 계면균열.  
 Fig. 7. Interface crack between invar layer and aluminum layer.

래할 것이다. 탄성계수와 선팽창계수가 이도에 미치는 영향은 “STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup> 송전선의 이도거동”에서 보고한 바가 있다[8].

### 3.4 INVAR/AW강선의 비틀림 특성

그림 6은 INVAR/AW강선의 비틀림회수에 대한 비틀림강도를 나타낸 것이다.

비틀림곡선 상에서 비틀림 초기에는 그림 6(a)와 같이 비틀림하중이 증가하면서 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)에서처럼 하중은 다시 증가하였으며 변형은 시험편전체

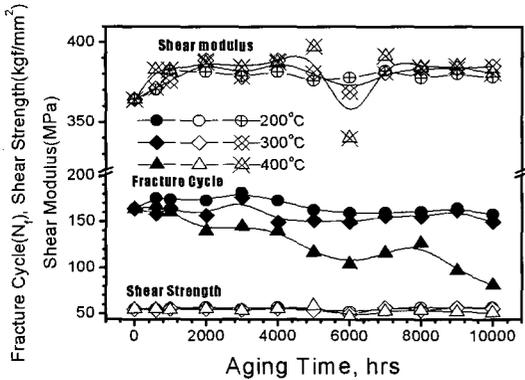


그림 8. 경년열화에 대한 전단강도와 전단계수 및 비틀림회수의 변화.  
 Fig. 8. Changes of twist times, twist strength and G-modulus in accordance with aging.

에서 발생하는 균일변형이 발생하다가 최종 파단이 일어났다. 그림 8은 경년열화에 대한 전단계수와 전단강도 및 비틀림회수를 나타내었다. 그림 8에서 나타난 바와 같이 전단강도는 약 55 kgf/mm<sup>2</sup>으로 경년열화에 따라 거의 변화가 없었다. 전단 탄성계수는 as-drawing 상태에서는 약 364 MPa에서 경년열화가 진행됨에 따라 탄성계수와는 반대로 초기에 다소 증가한 후 거의 일정한 값을 유지하였다.

200 °C와 300 °C의 경년열화에서는 비틀림특성의 변화는 거의 나타나지 않았으며 비틀림회수도 150회를 유지하고 있으나 400 °C 경년열화에서는 비틀림 시간에 따라 비틀림회수는 감소하였다. 이는 그림 7(a)에 나타난 인바와 알루미늄클레이딩층간의 계면균열이 그 원인이 되어 비틀림시험 시에 회수가 약 1 ~ 3회 정도에서부터 그림 7(b)와 같이 박리가 발생되어 비틀림회수가 급격히 감소하였다.

400 °C 경년열화, 4000시간 이후 인바층과 알루미늄클레이딩층 사이에 미세한 계면균열이 발생되기 시작한 다음 점차적으로 경년시간이 증가함에 따라 계면균열도 증가하였다. 이러한 계면균열의 크기와 발생빈도가 임계크기 이상이 되면 비틀림 시험에 그림 7(b)와 같이 인바와 알루미늄클레이딩층이 완전히 분리가 되었다. 이러한 현상은 인바와 알루미늄의 열팽창계수가 약 2.6 μ/°C과 26 μ/°C로 10배 정도의 차이를 나타내는 것이 원인이다. 경년열화가 진행됨에 따라 층간계면결합력이 약화되어

계면균열발생이 발생되었고 이의 영향으로 비틀림회수가 급격히 감소하는 것으로 사료된다[9,10].

#### 4. 결론

증용량 저이도전선인 STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup>전선과 그 구성소재인 STAI도체와 INVAR/AW강선에 대하여 200 °C ~ 400 °C 등온에서의 경년에 따른 강도와 탄성계수 및 비틀림특성 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결과를 구하였다.

1. 열화 이전의 INVAR/AW강선과 STAI도체의 상온인장강도는 115.7 kgf/mm<sup>2</sup>과 17.9 kgf/mm<sup>2</sup>이다. 단시간허용온도인 240 °C에서 INVAR/AW강선의 고온인장은 상온의 90 %정도인 103.0 kgf/mm<sup>2</sup>으로 우수한 고온강도특성을 나타내었다.
2. 경년열화시간과 온도가 전선의 인장하중에 미치는 영향은 200 °C의 경년열화에서는 거의 영향을 받지 않지만 300 °C와 400 °C의 열화에서는 STAI도체의 열화로 인하여 열화시간이 증가함에 따라 전선의 인장하중은 감소하며, INVAR/AW강선의 하중분담율은 증가하여 최종적으로 전선인장하중의 약 68 % 까지 분담하게 될 것이다.
3. 각 온도에서의 경년열화에 따른 STACIR/AW전선의 탄성계수는 시간에 따라 감소하였다. 이는 전선을 구성하고 있는 STAI도체가 경년으로 인하여 열화됨으로 인하여 탄성계수에 감소하기 때문이다.
4. 400 °C경년열화에서 INVAR/AW의 경년시간에 따른 비틀림회수는 점차적으로 감소하였다. 특히 약 4000시간 이후에 인바층과 알루미늄층간의 열팽창계수차이에 의한 계면균열이 생성, 성장으로 인하여 비틀림시험 인바와 알루미늄클레이딩층간의 계면분리가 발생되었다.

#### 참고 문헌

[1] W. J. McG. Tegart and A. Giffins, "The Hot Deformation of Austenite", John B. Ballance (Ed) 3rd, AIME, New York, p. 1, 1977.  
 [2] 심용보, 우정욱, 최종기, "송전설계기준 제·개정 및 보완연구", 한국전력공사 전력연구원 기술보고서, 제5장, p. 192, 2001.

- [3] 심응보, 우정욱, 최종기, “송전설계기준 제·개정 및 보완연구”, 한국전력공사 전력연구원 기술보고서, 제5장, p. 198, 2001.
- [4] M. B. Adeyemi, R. A. Stark, and G. F. Modlen, “Heat Treatment 79”, Society, p. 122, 1980.
- [5] J. M. potter and R. A. Millard, “Advance in X-Ray Analysis”, V20, ed., H. McMurdie, Plenum Press, p. 309, 1977.
- [6] 김상수, 김병걸, 박수동, “증용량저이도 송전선(STACIR/AW)용 인바강선의 피로특성에 미치는 경년열화의 효과”, 한국전기전자재료학회 2004하계학술대회논문집, p. 1274, 2004.
- [7] S. Sasaki, T. Takebe, K. Miyazaki, M. Yokota, K. Sato, and S. Yoshida, “ZTACIR-new extra-heat resistant galvanized invar-reinforced aluminum alloy conductor”, Sumitomo Electric Technical Review, No. 22, p. 46, 1983.
- [8] 박수동, 김병걸, 김상수, “STACIR/AW 410 mm<sup>2</sup> 송전선의 이도거동”, 한국전기전자재료학회 2004하계학술대회논문집, p. 1262, 2004.