

강 슬리브 파단 직선 슬리브의 장력 및 열적 특성 분석 연구

Study on Tension and Thermal Properties of Corrosive-fractured Steel Sleeve

안상현^{1,a}, 김병걸¹, 김상수¹, 손홍관¹, 박인표¹, 김성규²

(Sang-Hyun Ahn^{1,a}, Byung-geol Kim¹, Sang-Shu Kim¹, Hong-Kwan Sohn¹, In-Pyo Kim¹, and Sung-Kyu Kim²)

Abstract

According to previous report, aged sleeves of old transmission line showed several defaulted installation patterns, which was biased or corrosive-fractured of steel sleeve installed cases. These defects can cause serious accidents such as rapid increasing of sag or falling out of overhead conductor from sleeves. Consequently, the defects lead to the major power outage. Corrosion of steel sleeve is a typical defect by aging of sleeves. And it occupied almost 25 percent of investigated aged sleeves. This paper studied thermal properties and tension for ACSR conductor in case of fractured steel sleeve model by corrosion. The temperature distribution within overhead conductor has a specific gradient. Thermal properties of splice connectors(sleeve and clamp) showed normal behavior. However, mechanical properties were worse than normal sleeves. The detailed results were presented in the text.

Key Words : Corrosive-fracture, Steel sleeve, Thermal properties, Tension

1. 서론

현재 건설한 지 오래된 노후선로의 경우 선로 중간에 접속개소(슬리브, 압축인류클램프, 점퍼소켓 등)의 취약점이 노출되고 있다. 전력소비의 증가에 따라 발전력의 증대 및 송전능력의 확대가 절실히 요구되고 있으나 이들 취약개소에 의해 송전용량이 제약을 받고 있는 실정이다. 현재 운영 중인 송전선로의 송전능력은 아직 여유가 있는 상태이지만 일부 선로의 경우 부하가 증가하여 1회선 사고 시 안정성의 확보가 어려운 상태에 도달하고 있고, 이와 같은 선로는 앞으로 더욱 늘어날 것으로 예상되고 있다.

선로의 노후화로 인해 발생하는 대표적인 문제점은 강 슬리브의 부식이다. 전선이 가열되어 장시

간 고온에서 사용되면 슬리브 내부의 윤활제가 소실되며 비와 눈 등에 의한 습기로 메워질 가능성이 크다. 이러한 경우 강 슬리브의 부식은 급격하게 진행되며 심지어 강 슬리브가 파단되는 현상이 나타나기도 한다[1]. 강 슬리브의 파단은 이도 증가 및 전선의 탈락 등 심각한 잠재적 위험을 야기하므로 이에 대한 조사와 대책이 필요하다.

본 연구에서는 접속개소의 가설이력을 조사한 앞선 발표에 이어 내부 부식이 발생한 접속개소의 열적 특성 및 장력 특성을 조사하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

접속개소(슬리브, 압축인류클램프)와 가공송전선에 대한 열적, 기계적 특성 시험은 ACSR 410 mm² 가공송전선으로 실시하였다. 시험전선의 길이는 약 10 m이며 장력 및 전류 인가를 위하여 양 끝에 압축인류클램프를 가설하였다. 직선 슬리브는 전선의 정중앙에 가설하였으며 강 슬리브의 파단

1. 한국전기연구원 재료응용연구단
(경남 창원시 성주동 28-1)
2. 부경대학교 소재프로세스공학파
a. Corresponding Author : ansang24@keri.re.kr
접수일자 : 2008. 10. 1
1차 심사 : 2008. 10. 22
심사완료 : 2008. 10. 24

을 모의하기 위하여 임의로 강 슬리브의 증앙을 절단하였다.

가공송전선의 열적 특성은 초기장력 3,100 kgf에서 연속 및 장시간, 단시간허용전류를 인가하여 온도 및 장력의 거동 변화를 토대로 평가하였다. 온도 측정은 열전대를 사용하였으며 도체 및 접속개소 내부로 약 15 mm 삽입된 지점과 표면부에 대하여 측정을 실시하였다. 온도 및 장력은 HP 34970A와 수평인장시험기에 의해 30초 간격으로 수집되어 컴퓨터에 자동 저장되었다.

열특성 시험은 그림 1의 전선 수평 인장시험기에서 실시되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강 슬리브의 부식 파단 형태

전선이 가설되어 운영되는 과정에서 접속개소의 노후화로 인해 발생하는 강 슬리브의 부식 현상은 송전 용량의 제약 및 전선 탈락과 같은 치명적인

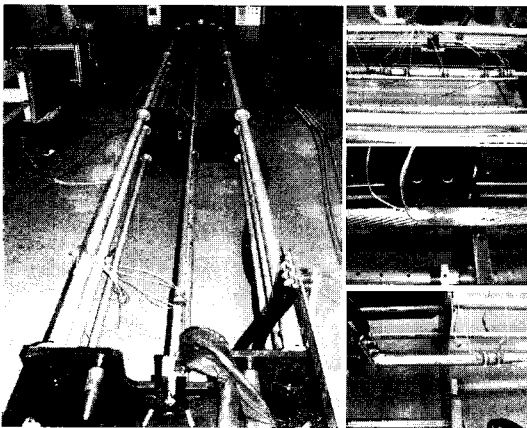


그림 1. ACSR 가공송전선의 열특성 시험 전경.
Fig. 1. Thermal characteristic test for ACSR overhead conductor.

사고의 위험을 내재하고 있다. 그럼에도 불구하고 강 슬리브의 부식 현상은 알루미늄 슬리브 내부에서 진행되기 때문에 외관상으로 판독이 불가능하다.

강 슬리브의 재질은 KS D 3752의 SM 10C에 의거하였다. 강 슬리브는 표 1에 나타낸 바와 같이 수분에 대한 내부식 특성이 취약한 저탄소강의 조성으로 구성되어 있다. 따라서 슬리브의 가설과정

에서 형성되는 알루미늄 슬리브 내부의 공극(강 슬리브와 알루미늄 슬리브 내부 공간; 이 부분은 기계적인 압착이 이루어지지 않음)에 콤파운드를 충전하여 수분에 의한 강 슬리브의 부식을 방지하게 되어있다. 그러나 방식의 목적으로 충전된 콤파운드는 전선이 장시간 사용됨에 따라 점차 소실되며 그림 2와 같은 슬리브와 알루미늄 도체 소선 간의 미세한 공극은 수분의 침투경로로 작용한다. 한 번 침투한 수분은 슬리브 내부에 계속 잔존하며 강 슬리브의 부식을 급격히 촉진한다.

그 결과 강 슬리브는 그림 3과 같이 심각한 부식현상이 발생하였으며 심지어 부식에 의해 강 슬리브가 파단되는 사례도 존재하였다. 이와 같은 강 슬리브의 부식 현상은 기 실시된 노후 슬리브 분석 연구에서 전체의 약 25 %를 차지하는 것으로 보고된 바 있다[1].

표 1. 강 슬리브의 조성.

Table 1. Composition of steel sleeve.

C	Si	Mn	P	S
0.08~0.13	0.15~0.35	0.30~0.60	0.030이하	0.035이하

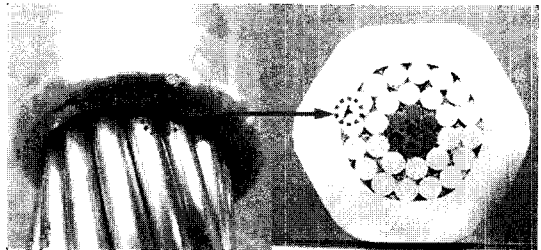


그림 2. Al 슬리브와 Al 소선 간의 공극.
Fig. 2. Gaps between Al sleeve and Al conductor.

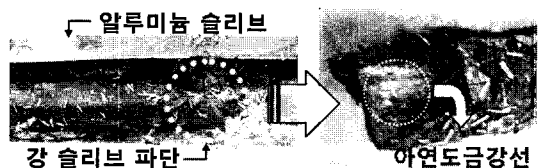


그림 3. 강 슬리브의 부식 파단.
Fig. 3. Corrosive-fracture of steel sleeve.

3.2 전선 및 접속개소의 열적 거동

3.2.1 도체의 온도분포

그림 4는 강 슬리브의 파단을 모의한 가공송전선에서 슬리브로부터 이격거리에 따른 도체 표면의 온도분포를 나타낸다. 전류는 ACSR 410 mm² 가공송전선의 연속 및 장시간, 단시간 허용전류인 850 A, 950 A, 1100 A가 인가되었다. 정상모델 및 강 슬리브 파단 모델에 대한 열특성 시험 당시, 동일 부하에서 두 모델의 외기온도 차이는 약 0.5 °C로 거의 유사한 환경에서 실험이 진행되었다.

슬리브에서 2000 mm 이격된 지점에서 전선 표면의 온도는 연속허용전류 850 A에서 76 °C, 장시간 허용전류 950 A에서 90 °C, 단시간허용전류 1100 A에서 114.3 °C로 정상모델의 온도 73.7 °C, 86.2 °C, 112.9 °C와 약 2~4 °C의 차이를 나타내며 거의 유사한 온도를 나타내었다.

한편, 슬리브와 가장 가까운 50 mm 지점의 전선 표면온도는 연속 및 장시간, 단시간허용전류에서 각각 58 °C, 67 °C, 84.6 °C로 2000 mm 지점의 온도와 20~30 °C의 온도차를 나타내었다. 이는 알루미늄 슬리브의 단면적은 전선 단면적의 2배 이상이므로 부하전류와 도체 교류저항에 의한 Joule 열 발생이 낮기 때문이다[3,4]. 즉, 전선의 온도는 상대적으로 낮은 온도로 발열하는 알루미늄 슬리브로 전도되었다. 그 결과, 슬리브의 영향을 받지 않는 2000 mm 지점의 온도에 비해 슬리브와 가까운 지점의 전선 온도는 상대적으로 감소하였다.

그림 4의 Open Symbol은 정상모델 도체의 온도를 나타낸다. 이들은 슬리브로부터 50 mm 이격된 지점에서 인가전류 850 A, 950 A, 1100 A에

대하여 각각 57.7 °C, 67.8 °C, 85.5 °C를 나타내며 강 슬리브 파단 모델과는 0.2~0.9 °C의 차이를 나타내었다. 또한, 2000 mm 지점의 정상모델 도체 온도는 각각 73.7 °C, 86.2 °C, 112.9 °C를 나타내며 강 슬리브 파단 모델과 1.4~3.8 °C의 차이를 나타내었다. 이는 도체 포화온도에 비하여 미미한 차이로 판단되며 강 슬리브의 파단으로 인한 도체의 열적 특성 변화는 거의 없는 것으로 사료된다.

3.2.2 접속개소의 온도분포

그림 5는 정상 슬리브 및 강 슬리브 파단을 모의한 직선 슬리브의 온도 분포를 나타낸 것이다. 온도는 끝단에서 10 mm, 150 mm, 그리고 정중앙 380 mm에 대하여 슬리브 내부 약 15 mm 지점(강 심이 위치하는 지점)을 측정하였다. 연속허용전류 850 A에서 강 슬리브 파단모델의 10 mm 지점 온도는 약 61 °C, 150 mm 지점은 56 °C, 380 mm 지점의 온도 또한 56°C를 나타내었다. 장시간허용전류 950 A에서 10 mm, 150 mm, 380 mm 지점의 온도는 71 °C, 65 °C, 64 °C를 나타내었으며 단시간허용전류 1100 A에서는 각각 88.9 °C, 81 °C, 79.9 °C를 나타내며 슬리브의 온도는 인가전류의 상승에 비례하여 상승하는 거동을 나타내었다.

10 mm 지점과 380 mm 지점의 온도는 약 5~9 °C의 차이를 나타내며 슬리브 전체적으로 완만한 온도구배를 형성하였다. 이는 상대적으로 높은 온도로 발열하는 전선으로부터 열전달에 의해 슬리브 가장자리의 온도가 상승하였기 때문인 것으로 예상된다[2].

전반적으로 강 슬리브 파단모델의 온도는 정상적인 슬리브의 온도와 1~3 °C의 온도차를 나타내며 거의 유사한 열적 거동을 나타내었다.

Al 소선의 도전율을 61 %IACS로 산정하면 Al 도체의 직류저항은 식 (1)에 의해 약 0.0702 Ω/km로 계산된다. 한편, 아연도금강선의 직류저항은 Al 도체의 10배가 넘으므로 전선 직류저항 계산 시 국내 및 일본, IEC에서는 강선의 저항을 무시하고 있는 실정이며 이 같은 저항 차이에 의해 가공송전선에 흐르는 전류는 대부분이 Al 도체로 흐른다[5].

$$R_{DC} = \frac{r_{DC(Al)} \cdot (k_{Al} + 1)}{N_{Al}} + \frac{r_{DC(St)} \cdot (k_{St} + 1)}{N_{St}} \quad [\Omega/km] \quad (1)$$

이와 같은 이유로 가공송전선에 직선 슬리브가 가설되면 전류는 Al Conductor/Al Sleeve 계면을

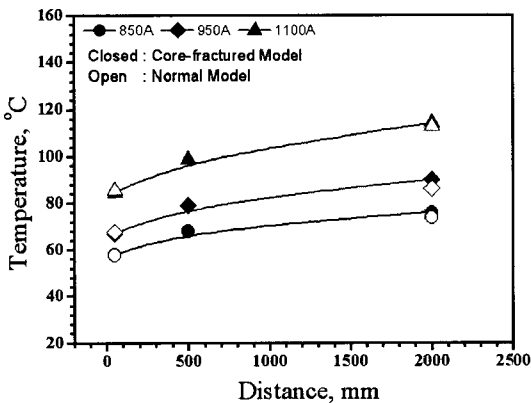


그림 4. 도체의 온도 분포.
Fig. 4. Distribution of conductor temperature.

지나 알루미늄 슬리브를 통과하여 반대편 가공송 전선으로 통전한다. 즉, 강 슬리브는 직선 슬리브에 작용하는 인장하중을 견디는 역할만을 담당하고 도체로서의 역할은 거의 하지 않는다.

접속개소의 열특성을 지배하는 것은 전선과 접속개소 간의 계면 접촉저항으로, 접속개소 내 전선의 삽입깊이와 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서 모의한 불량 모델은 강 슬리브의 파단만을 모의하였으며 전선의 삽입량은 정상 슬리브와 동일하다.

따라서 강 슬리브의 파단과 직선 슬리브의 열적 특성은 무관한 것으로 사료된다.

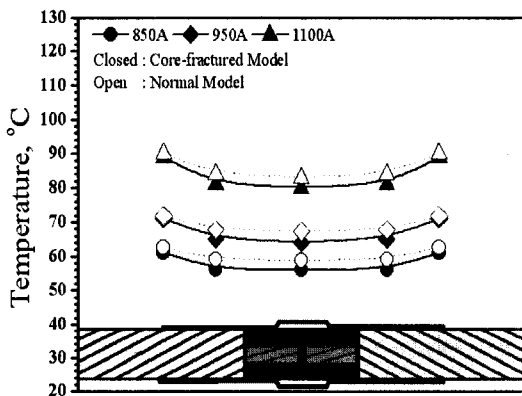


그림 5. Al 슬리브의 온도분포.
Fig. 5. Distribution of Al sleeve temperature.

3.2.3 가공송전선 전반적인 온도분포

가공송전선 및 접속개소(슬리브, 압축인류클램프)의 전반적인 온도 분포를 그림 6에 나타내었다. 슬리브의 온도는 도체 온도보다 약 30 °C 정도 낮게 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 상대적으로 전선보다 큰 단면적으로 인하여 Joule 열 발생이 낮기 때문이다.

슬리브의 온도는 가장자리에서 높게 발열하였고 중심부에서 가장 낮게 나타났다. 이에 대한 원인은 다음과 같다. 슬리브 끝단은 단차 가공된 부분이 존재하며 이 부분은 충분한 압착력을 가지지 못한다. 따라서 전선과 슬리브의 불완전한 압착은 접촉 저항의 상승을 야기하고 결과적으로 접속부의 발열로 이어진다. 단면적이 큰 슬리브 중심부는 보다 낮은 온도로 발열하여 슬리브는 전체적으로 완만한 온도구배를 형성하였다. 이와 동일한 이유로 슬리브와 가까운 쪽 도체의 온도는 슬리브의 영향을 받지 않은 2000 mm 지점의 온도에 비해 약 20~

30 °C 낮게 나타났다. 도체의 온도는 접속개소에 가까울수록 감소하는 경향을 보이다가 약 2000 mm 이상 이격된 지점에서는 일정하게 유지되었다.

그림 7은 강 슬리브 파단 모델 및 정상 모델에 대하여 인가전류에 따른 전선 및 접속개소 각 지점의 최대 온도를 나타낸 것이다. 정상모델 도체의 온도는 연속 및 장시간, 단시간허용전류 하에서 83 °C, 98 °C, 126 °C를 나타내었으며 슬리브와 클램프는 각각 62.6 °C, 71.9 °C, 90.0 °C와 54.4 °C, 62.7 °C, 76.0 °C로 나타났다. 강 슬리브 파단 모델 도체의 최대 온도는 연속허용전류 850 A에서 약 83 °C, 슬

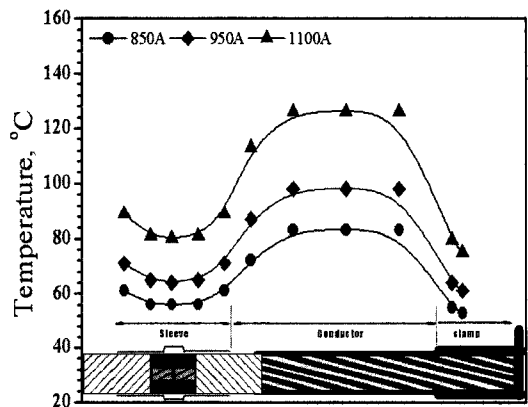


그림 6. 가공송전선의 온도분포.
Fig. 6. Distribution of overhead conductor.

리브와 클램프는 61 °C와 55 °C로 나타났다. 단시간 허용전류 1,100 A가 인가되면 도체의 온도는 약 126 °C까지 상승하며 슬리브와 클램프의 온도는 각각 89 °C와 79.4 °C까지 상승하였으며 슬리브와 전선 간의 온도차는 전류가 상승할수록 커지는 것으로 나타났다.

전반적으로 강 슬리브 파단 모델과 정상모델의 온도는 1.0 °C에서 최대 4.5 °C의 차이를 나타내었다. 인가전류에 따른 온도 변화 거동은 두 모델 모두 전류 상승분에 대하여 선형적으로 증가하는 경향을 나타내며 정상모델과 강 슬리브 파단 모델은 거의 유사한 열적 거동을 나타내었다.

직선 슬리브의 열적 거동은 통전으로 인한 I²R에 의한 Joule 열에 의해 좌우된다. 즉, 직선 슬리브 내에 작용하는 접촉저항이 문제가 되는데 강 슬리브는 외부 인장하중만을 담당하고 강 슬리브로의 통전은 거의 이루어지지 않기 때문에 강 슬리브의 파단은 직선 슬리브의 열적 특성과는 무관한 것으로 사료된다.

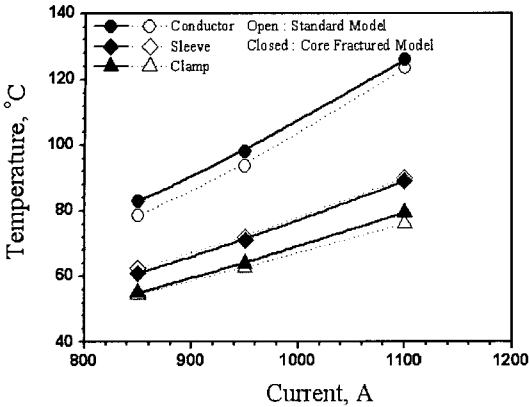


그림 7. 전류에 따른 전선 및 접속개소의 온도변화.
Fig. 7. Change of overhead conductor temperature with current.

3.3 장력 거동

3.3.1 강 슬리브 파단모델과 정상모델의 장력거동

그림 8은 인가전류에 대한 강 슬리브 파단모델 및 정상모델 가공송전선의 장력거동을 나타낸 것이다. 무부하에서 초기장력은 3,100 kgf를 인가했으며 차후 인가되는 전류에 따라 장력은 감소하였다. 정상 모델의 장력은 연속 및 장시간, 단시간 허용전류에서 1020 kgf, 790 kgf, 482 kgf를 나타내며 직선적인 감소거동을 나타내었다. 반면에 강 슬리브 파단 모델의 장력은 연속허용전류 및 장시간허용전류가 인가되면 장력은 364 kgf, 238 kgf까지 감소하고 단시간허용전류 1100 A에서는 50 kgf로

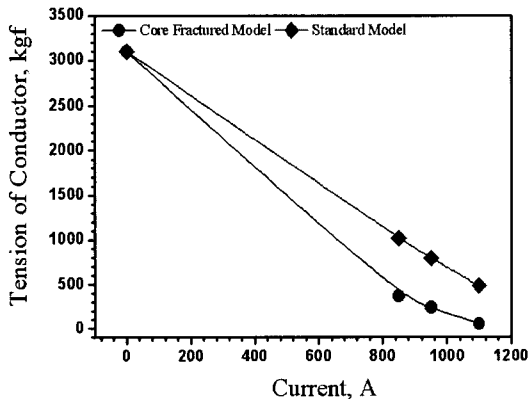


그림 8. 전류에 대한 전선의 장력 변화 거동.
Fig. 8. Change of tension with current.

감소하여 거의 zero에 가까운 급격한 장력 감소 거동을 나타내었다. 이처럼 급격하게 장력이 감소하는 원인은 다음과 같은 가공송전선 하중 분담 기구에서 유추할 수 있다.

3.3.2 가공송전선의 하중 분담 기구

가공송전선을 구성하는 알루미늄 도체와 아연도금강선은 서로 다른 선행창계수를 가진다. 알루미늄 도체의 선행창계수는 약 25.0 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 인 반면, 아연도금강선의 선행창계수는 약 11.5 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 로 온도 상승에 대한 도체의 길이 변화율은 알루미늄 도체가 두 배 이상 크다.

또한 가공송전선의 최소인장하중 계산식 (2)에 의하면 ACSR 410 mm² 가공송전선의 인장하중은 알루미늄 도체가 담당하는 하중 5,600 kgf와 아연도금강심이 담당하는 하중 8,600 kgf의 합인 약 14,200 kgf로 나타나며 Al : Steel의 하중분담률은 약 43:57의 비율을 나타낸다[6].

$$T = 0.9(T_a \cdot A_a \cdot N_a + T_s \cdot A_s \cdot N_s) [\text{kgf}] \quad (2)$$

그러나 전선의 온도가 상승하면 알루미늄과 아연도금강선의 선행창계수 차이에 의하여 하중 분담율에 변화가 발생한다. 전선의 온도가 상승하면 각자의 선행창계수에 의한 길이 증가로 전선 장력이 감소한다. 정상 모델의 경우, 전선 온도가 천이 온도에 가까워질수록 알루미늄이 담당하는 하중분담율은 점차 감소하며 천이온도 이상이 되면 알루미늄 도체의 선행창 길이가 아연도금강선의 선행창을 훨씬 뛰어넘게 된다. 그 결과 Al 도체는 더 이상 하중분담의 역할을 하지 못하고 아연도금강선이 모든 하중을 담당하는 거동이 나타난다.

강 슬리브 파단 모델 전선은 가공송전선 강 슬리브가 하중분담의 역할을 하지 못하고 알루미늄 도체가 전 하중을 담당하는 구조로 되어 있다. 이와 같은 구조에서 가공송전선은 전적으로 알루미늄 도체의 최소인장하중에 의존하게 되며 정상 모델 가공송전선이 견딜 수 있는 인장하중의 절반에도 못 미치는 장력 특성이 나타난다. 또한, 통전으로 인하여 전선의 온도가 상승하게 되면 전선은 알루미늄 도체의 선행창계수에 지배를 받게 되며 그 결과, 장력은 Zero에 가깝게 급격히 감소하는 거동이 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서 강 슬리브 파단 모델 직선 슬리브의 열적 특성 및 장력 변화 거동을 연구한 결과는

다음과 같다.

1) 정상 모델과 비교하여 불 때, 전선 및 접속개소의 온도는 연속 및 장시간, 단시간 허용전류 하에서 최대 4.5 °C 미만의 온도차를 나타내었다. 또한 각 지점의 온도는 부하전류의 증가에 대하여 선형적인 상승거동을 나타내면서 정상모델과 강슬리브 파단 모델은 거의 유사한 열적 거동을 나타내었다. 즉, 전선 및 접속개소의 열적 특성은 강슬리브의 파단과는 무관한 것으로 나타났다.

2) 전반적으로 강 슬리브 파단 모델의 장력은 정상모델에 비해 낮은 값을 나타내었다. 특히, 인가 전류가 상승할수록(전선 온도가 상승할수록) 급격한 장력 감소를 나타내었다. 이와 같은 장력 감소는 강 슬리브 파단 모델의 내부 구조상 알루미늄 도체가 모든 하중을 담당해야하기 때문에 정상 모델 보다 낮은 장력이 나타나며 통전에 의해 전선의 온도가 상승하면 알루미늄 도체의 선팽창계수에 따라 전선의 장력은 Zero에 가깝게 급격히 감소하는 거동이 나타났다.

이와 같은 전선의 급격한 장력감소는 결과적으로 전선의 이도 증가를 야기할 수 있으며 심지어 전선의 탈락 사고로 이어질 가능성이 농후하다.

따라서 알루미늄 슬리브 내의 수분침투를 방지하기 위한 기술적인 방법과 슬리브 내부의 상황을 예측하기 위한 후속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 지식경제부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 김병걸, 김상수, 손홍관, 박인표, 장태인, 김진환, “노후 송전선로의 가공송전선 직선 슬리브 분석 연구”, 한국전기전자재료학회 2007하계학술대회논문집, p. 538, 2007.
- [2] 김병걸, 김상수, 안상현, 손홍관, 박인표, 이동일, 장태인, “정상 시공된 가공송전선 접속개소에서 전류에 따른 온도변화 거동”, 한국전기전자재료학회 2007추계학술대회논문집, p. 518, 2007.
- [3] 김병걸, 박수동, 김상수, “STACIR/AW 송전선의 장시간 운전에 따른 기계적 물성 변화”, 한국전기전자재료학회 2004하계학술대회논문집, p. 1258, 2004.
- [4] 김상수, 김병걸, 장태인, 강지원, 이동일, 민병욱, “환경적 요인에 의한 노후 가공송전선의 특성 변화”, 전기전자재료학회논문지, 19권, 3호, p. 287, 2006.
- [5] Overhead Electrical Conductors-Calculation Methods for Stranded Bare Conductors, IEC Standard 1597.
- [6] 심용보 외, “송전 설계기준 제·개정 및 보완연구”, 한국전력공사 전력연구원, p. 191, 2001.
- [7] P. H. Schwabe and D. Pike, “The Measurement of Corrosion in Overhead Power Lines”, ANTI-Corrosion, 1988.
- [8] Persson, “Corrosion attack in midspan joints in ACSR transmission conductors”, L.I. Electricity Distribution, 10th International Conference, Vol. 3, p. 259, 1989.