

전력 케이블용 접속 슬리브의 구조 및 접속 방법에 따른 특성 연구

김영범\*, 한봉수\*\*, 류정현\*\*  
 일진전기(주) 전선기술연구소\*

A study on thermal and mechanical properties according to the structures of conductor sleeve and the method of connection for EHV Cables

Young-Bum Kim\*, Bong-Soo Han\*\*, Jeong-Hyun Ryu\*\*  
 ILJIN ELECTRIC Co., LTD.,\*, ILJIN ELECTRIC Co., LTD.,\*\*

**Abstract** - 초고압 전력 케이블용 도체 접속을 위한 접속방법으로 압축형(compressing type), 용접형(welding type), 압축-용접형(CW type; compressing-welding type)의 슬리브는 물론 동과 알루미늄의 이종(nonidentical materials) 접속을 위한 슬리브를 개발 하였으며, 전기적, 기계적으로 검증된 제품 개발을 위하여, 슬리브의 구조 변경과 접속 방법의 차이뿐 아니라 접속 전후의 응력 평가를 위해 슬리브 시편의 인장 시험(tensile strength) 결과에 따른 슬리브 제작 및 시험을 진행하였다. 신뢰성 있는 제품 개발과 데이터를 얻기 위하여 초고압용 지중 고압 케이블 시험 시료로 적용하여 시험 선로(test loop)를 구성하였으며, 이를 통하여 구조와 재질에 따른 접속 방법, 이상 온도 상승 또는 국부적인 고온 부위 발생 여부 등의 전기 시험 및 열사이클 전압 시험(heating cycle voltage test) 조건을 설정하여 시험 전후의 열신축 등 전기적, 기계적 특성을 평가하였다. 접속 슬리브의 구조 및 재질에 따른 위치별 발열 양상을 체크하였으며, X-ray 장비를 이용하여 슬리브 내부의 압축 및 충전 정도를 점검함으로써 기존 접속 슬리브 보와는 물론 개발된 접속 슬리브의 설계 기준 및 안전율을 설정 할 수 있었다.

1. 서 론

오늘날의 사회 기반 시설의 대도시 집중화 구조에 따라, 필연적으로 전력 공급과 그 수요의 대응량과 및 초고압화로 진행됨으로써 전력 공급의 안정성과 신뢰성이 중요한 요소로 작용하고 있으며, 도시 기능적인 요소로 인한 전력 공급의 지중화로, XLPE(Cross-linked Polyethylene)을 절연재료로 사용하고 있는 대부분의 지중 고압 케이블의 특성은 물론 전계가 집중되는 종단부(termination)나 중간(joint)부분에서의 초고압용 전력 케이블 연결을 위한 접속재의 안정성 역시 크게 요구 되고 있다.

최근 친환경화 및 전력 케이블의 수명 증가로 인하여 기존 매설되어 있던 알루미늄 케이블과 동 케이블간의 접속 기술 역시 요구 되고 있으며, 일반적으로 도선율이 높은 Cu-Cu 케이블 접속시에는 압축타입의 슬리브 기술을, Al-Al 케이블의 접속시에는 용접시 과도한 열전달의 누적을 방지하기 위한 용접 지그와 MIG 용접기를 사용한 welding type의 접속 기술을 적용하고 있다. 따라서 Cu-Al 케이블의 접속을 위해 두가지 기술을 접목한 용접과 압축 타입 슬리브 방식의 접속 슬리브를 제작하여 전기적, 기계적 시험을 하였으며, Al 슬리브 접속시 단락의 위험요소를 방지하기 위해 기계적인 보장을 할 수 있는 구조로 설계하였다. 본 논문에서 확인하고자 하는 것은 초고압용 도체 케이블의 도체 접속을 위해 사용되는 압축 슬리브의 그 구조 및 재질에 따른 도체의 접속 방법과 지그를 제작하여 알루미늄 도체간의 용접을 이용한 접속 방법 그리고 이종(nonidentical materials)재질의 슬리브를 이용한 이종 재료간의 접속 방법 등 최종적으로는 고유 물성값이 다른 이종 슬리브의 접속 기준 확립 및 설계 기준을 설정하기 위함이며, 두 도체를 연결하는 conductor sleeve의 구조 및 접속 방법에 따른 발열 특성과 기계적인 특성 확인을 통해 확보된 기술적 데이터에 안전율을 적용하여 보다 안정적이고 효율적인 접속 슬리브를 제작, 적용 방안을 연구하였다.

2. 본 론

2.1 도체 접속 기술

일반적으로 알려져 있는 초고압 케이블용 동 도체 접속 방법은 종단 접속재에서나 중간 접속재에서나 압축 공구를 이용하여 압축과 다듬질을 완료한 슬리브의 단면적을 도체 단면적의 최소 100% 이상이 되도록 설계 하고, 압축 타입의 슬리브 방법을 채택하고 있으며, 점차적으로 전선 케이블의 수명이 증가됨에 따라 기존 매설되었던 알루미늄 케이블의 선로 작업을 위한 접속 방법 역시 적용, 소개 되고 있다.

현재 당사의 해외 프로젝트 등 초고압 케이블의 접속 방법으로 볼트 타입은 물론 열적 안정성과 anti-corrosion 등 알루미늄 케이블과의 안정적인 접속을 위한 모제를 선정하여 용접하는 접속 방법 역시 적용 중

에 있다. 이번 논문에서는 중간 접속재 중 테이핑 조인트(TJ, Taping type Insulation Straight Through Joint) 개발 중 검토되었던, 슬리브의 접속 구조 변경 후의 시험결과와 이종 재질의 슬리브를 통하여, 열사이클 시험을 통한 슬리브의 구조별, 접속 위치별 발열 특성 확인 결과 등 시험 전후의 기계적, 전기적 특성을 보완할 수 있는 구조로 제작하였다.

2.1.1 슬리브 설계(compressing type)

일반적인 슬리브의 치수 설계는 다음과 같은 이론치를 응용하여 기본 슬리브를 제작하였으며, 최소두께는 다듬질 되는 두께를 포함하여 3mm로 하며, 다듬질되는 두께는 직경으로 1mm로 제작한다[1].

a) 원형-육각-원형 방식 (보강강심이 들어가는 경우)

$$d_0 = (1 + 0.03)dc + \alpha \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

$$D_0 = 1.303 \sqrt{2A + \frac{\pi}{4} D_0^2} + 1 \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

$d_0$ : 슬리브 내경[mm],  $dc$ : 케이블 도체의외경[mm],  $\alpha$ : 도체삽입을 위한 여유치[mm], 도체의외경  $\phi 4$ 미만:0.1[mm],  $\phi 4 \sim 16$ :0.2[mm],  $\phi 16 \sim 63$ :0.3[mm],  $D_0$ : 압축전 슬리브 최소 외경[mm],  $A$ : 케이블도체단면적[mm<sup>2</sup>],  $D_1$ : 보강강심 최대외경[mm]

b) 타원형-원형 방식 (보강강심이 없는 경우)

$$d_0 = (1 + 0.03)dc + \alpha \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

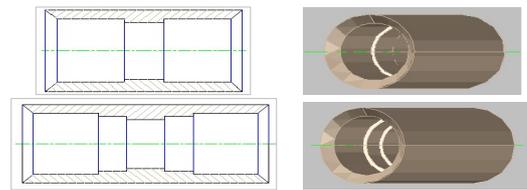
$$C_0 = 2 \sqrt{\frac{2A}{\pi}} + 1 \dots\dots\dots \text{식(4)}$$

$$D_0 = C_0 - \beta = 2 \sqrt{\frac{2A}{\pi}} + 1 - \beta \dots\dots\dots \text{식(5)}$$

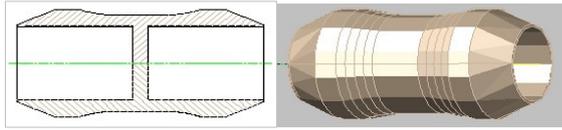
$$a_0 = D_0 + e = D_0 + \frac{1}{D_0} \left[ \frac{\pi}{4} \{ 1.06 (C_0 + \gamma) + (d_0 + \delta) - D_0^2 \} - A \right] \dots\dots\dots \text{식(6)}$$

$D_0$ : 압축전 슬리브의 최소단외경[mm],  $a_0$ : 압축전 슬리브의 최소장외경[mm],  $e$ : 압축전 슬리브 장경측 최소직선길이[mm],  $C_0$ : 압축후 슬리브 외경[mm],  $\beta$ : 150mm<sup>2</sup>이하는 0.5, 200~400mm<sup>2</sup>는 1.0,  $\gamma$ : 압축다이스의 제작치수 허용차,  $\delta$ :  $d_0$ 의 제작치수 허용차

다음은 Cu-Cu 케이블 접속을 위해 제작 설계치에 안전율을 적용한 단심용 원형 압축 타입의 동(Cu)슬리브로서, 이론적 안전율에 2단 및 3단 구조를 갖도록 설계된 슬리브 시료 <그림1>와 이 결과 데이터에서 보다 compact화는 물론 형상에 따른 국부적인 발열 위치 및 그 양상을 확인하기 위한 목적으로 시험 시료로 제작된 슬리브 시료 <그림2>의 개략도이다. 접속부에서의 기준이상의 발열로 인한 지중송전 선로에 심각한 문제를 초래할 수 있기 때문에, 구조와 슬리브의 압축 신장을 차이로 인한 설계 데이터가 요구되었으며, 열사이클 시험을 통한 국부적인 발열 위치 및 그 양상을 점검하기 위하여 제작 검토 하였다.



<그림 1> 단심용 원형 슬리브 2단구조(상), 3단구조(하)



〈그림 2〉 압축후 눌림 효과를 보이는 구조

### 2.1.2 슬리브 설계(welding type)

알루미늄 케이블의 접속을 위해서는 용접시의 열에 의해 내재되어 있는 잔류응력분해나 급격한 온도 변화에 따른 소성 변형을 방지하기 위하여 아크 용접(Arc welding) 보다는 절단 지그(jig)와 용접 지그등을 제작하여 접속하는 MIG 용접방법의 안정성을 IEC60840규격에 준하는 열싸이클 시험을 통하여 그 결과를 확인하였다. 또한 작업시에는 표면 산소와의 산화피막을 제거하는 작업과 표면을 매끄럽게 하여 전압 인가 시에 용접부가 전극의 역할이 되지 않도록 하는 작업이 요구 되었으며, 모재와의 용접 강도와 도전율을 고려한 A4043의 재질의 용접봉을 사용하는 것이 기계적 강도를 위해서도 더 나은 결과를 확인할 수 있었다.

〈표 1〉 용접봉 Alloy 4043 물성값

녹는점(°C)	573~632.2
전도율(%)	42%(IACS)
밀도(kg/Cu-cm)	0.117
산화피막색	회색

압축타입의 슬리브의 제작과 알루미늄 케이블에서의 MIG 용접 방법을 통한 결과 데이터를 통하여, 구리와 알루미늄간의 이종 접속을 위한 슬리브 제작시 설계 기초 자료의 확보가 가능하게 되었다.

### 2.1.3 슬리브 설계(compressing-welding type)

Cu-Cu 도체 케이블의 접속을 위한 compressing type과 용접 지그를 제작하여 접속하는 MIG welding 접속 방법을 통해 확보된 기술 데이터를 통하여 이종재질의 케이블을 접속할 수 있는 시험시료를 제작하였다. 한 쪽에서는 구리 압축타입과 반대쪽 부분에서는 cutting jig를 제작하여 V-cut을 한 후 용접하는 방법으로, test loop를 구성하여 이종재질의 케이블 접속 후 열싸이클 시험을 적용하였고, 최종적으로는 〈그림3〉의 CW type I에서 작업성을 보완하고, 슬리브 자체를 cutting jig로 활용할 수 있는 방법으로 개선한 CW type II의 슬리브를 제작하여, 계면 및 국부적인 발열 양상을 체크 하였으며, 인장시험을 통한 슬리브의 기계적 특성도 확인 할 수 있었다. CW type II의 슬리브의 경우 접속시 단락의 위험성을 보완하기위해 기계적인 보강력을 추가할 수 있는 구조의 슬리브로 설계하였다.



〈그림 3〉 CW type I 슬리브

### 2.2 이종재료 용접 기술

이종 금속재료 간의 결합 방법으로 효율적이며 특성 기준에 부합하는 기술인 알루미늄 케이블과 구리 케이블의 이종 재료간의 접속을 위한 맞대기 용접법을 채택하였으며, 이 방법은 피 용접재에 회전과 가압을 통하여 발생하는 접촉면의 마찰열을 이용한 두 이종 슬리브간의 용접 방법이다. 맞대기 용접은 마찰열을 이용하여 두 재료를 접합하는 방법으로, 접촉면이 마찰열로 인하여 용융되기 전 일정한 온도에 도달하였을 때 압력을 가하면 소성변형을 일으키면서 접합되는 고상상태의 접합으로 열효율이 높고 접합강도가 크며, 용접 결합이 작기 때문에 최근 그 활용이 점차 확대되고 있으며, 예비 마찰 압력(preliminary friction pressure), 업셋압력(upset pressure), 스핀들 회전수(spindle revolution), 스핀들 회전 정지 시간(deceleration time) 등 조건에 충족하는 재료 선정 및 조건 설정을 통하여 모재의 인장강도에 부합하는 접합 특성을 적용할 수 있었다.

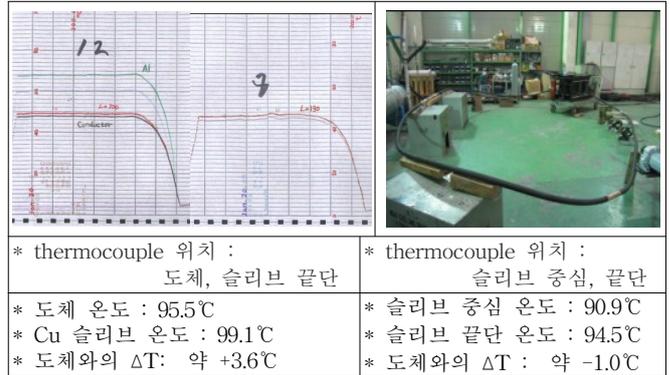


〈그림 4〉 시험 선로용 이종 슬리브 시료

### 2.3 시험 결과

#### 2.3.1 슬리브 전기적 시험 결과

〈표 2〉 온도 그래프 [참고:IEC60840] -Recorder Range: 0~200°C

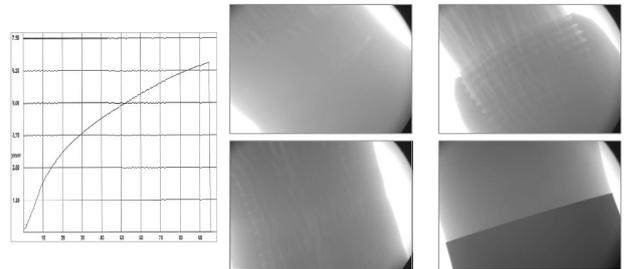


#### 2.3.2 인장 시험 결과 및 X-ray 결과

접속 슬리브의 인장 조건 및 접속면 경계부의 파단 상태를 확인하기 위하여 CW type의 시료 경계면을 R2의 노치로 선반 가공 후 인장시험을 진행하였으며, 아래 〈표3〉와 같은 결과 데이터를 확보함으로써 슬리브 요구 기준 이상의 안정적인 결과를 확인할 수 있었다.

〈표 3〉 인장 시험 결과 (Tensile Strength result)

Wall Thickness, mm	1.395
Ultimate, kg	13390
Ultimate, kg/mm <sup>2</sup>	6.55
Yield, N	39200
Yield, N/mm <sup>2</sup>	19.19



〈그림 5〉 압축 후 위치별 X-ray 결과

알루미늄 도체의 주 용접(main welding)을 진행하기 전에 예비용접(buttering welding)이 선행 되어야 하는데, 이는 알루미늄 용접시 소선 케이블이 일대일로 용접이 가능하게 하기 위한 절단면 표면 용접방법으로, 용접부 기포 발생을 최소화 하기위한 선행 기술이다. 위〈그림5〉는 CW type 슬리브의 접속 후 인장 강도와 X-ray(0.400mA, 120kV)결과로 공극(void), 이물(particle) 및 압축 정도를 위치별로 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

초고압용 도체 접속을 위한 슬리브의 구조 및 접속 방법에 따른 데이터 결과를 통해, 신뢰성 있는 슬리브를 설계하였으며, 알루미늄 케이블의 MIG 용접과 용접 지그 제작을 통한 접속방법과의 기술 접목을 통하여 도전율 및 고유 물성치가 다른 Cu도체와 Al도체의 이종재질의 도체 슬리브를 제작할 수 있었다. IEC규격에 준하는 열싸이클 및 기계적 시험결과 자료를 기반으로 슬리브 제작을 위한 설계 기준 자료의 확보를 통해, 최종적으로 안정적인 접속 슬리브 제작 기술을 확인할 수 있었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 심순보의 12명, "지중송전 케이블시스템", 한국전력공사, p164~169, 2002.12.
- [2] IEC60840, Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30kV(Um=36kV) up to 150kV(Um=170kV) - Test methods and requirements, 2004.