

초고압 프리몰드형 접속함 개발 (I)

이수길* 고의곤 김영호 백승엽 김광수 허근도 박완기
LG전선(주) 전력연구소

Development of Pre-Mold Joints for High Voltage Cable System (I)

S.K.Lee* E.K.Ko Y.H.Kim S.Y.Baik K.S.Kim G.D.Huh W.K.Park
Electric Power Research & Technology Center, LG Cable Ltd.

Abstract - The performance of cable joints for extra high voltage XLPE cable system is rapidly advancing combined with the development of insulation materials. The current trend of joints is in the direction of requiring less jointing techniques and installation time. This paper describes the performance of currently used joints regarding to their practical aspects and analyses design and manufacturing techniques for Pre-Mold Joint and Pre-fabricated Joint Box. Especially, basic tests and their results to obtain the design parameter of PMJ are introduced.

1. 서 론

초고압 XLPE케이블용 접속함은 케이블의 초고압화와 고분자 절연재료의 발전과 함께 지속적으로 발전해 왔으며, 최근에는 시공성의 편리함을 주목적으로 하는 조립형 접속함의 개발이 지속적으로 이루어져 왔다.

초고압 XLPE 케이블용 접속함은 크게, 현장에서 절연부품을 성형하여 시공하는 방식인 Tape Molded Joint Box (이하 TMJ)와 공장에서 성형, 검사된 부품을 현장에서 조립하는 접속함인 Pre-fabricated Joint box (이하 PJB)와 Pre-Mold Joint(이하 PMJ)로 나눌 수 있다.

TMJ는 뛰어난 신뢰성에도 불구하고 현장 성형방식으로 시공되기 때문에 고도의 조립기술이 요구되고 시공시간이 과다하게 소요되는 단점이 있다. 이 때문에 1990년대부터 케이블 접속함은 현장조립이 간편한 조립형 접속함(PJB, PMJ)으로 전환되고 있는 추세이다.

조립형 접속함의 설계 및 제조에는 전기적설계, 고분자 절연재료 처방, 열적/기계적 응력해석기술 등이 복합적으로 요구되기 때문에 세계적으로 초고압 XLPE 케이블용 접속함의 독자적인 설계/제조 능력을 가진 업체는 10여개사에 불과하다.

본 논문에서는 LG Cable(주)의 독자적 설계/제조 기술을 바탕으로 세계적으로 판매되고 있는 접속함의 Type별 시공성에 대해서 비교 평가하고 조립형 접속함(PJB, PMJ)의 설계/제조기술에 대해서 분석하였으며, 특히 PMJ 설계기술 데이터 확보를 위한 모델시험과정과 그 결과에 대해서 기술하였다.

2. 본 론

2.1 XLPE 케이블용 접속함 Type의 변천

초고압 케이블은 생산길이의 유한성과 보관, 운송의

제한성, 그리고 케이블 차폐층의 유기전압 제어등의 필요성 때문에 일정한 길이마다 접속함을 사용한 전기적/기계적 연결이 필요하다.

XLPE 케이블은 도체온도의 변화에 따른 케이블 절연체의 열적 수축/팽창율이 비플라스틱 계열의 케이블에 비하여 크며, 이에 따른 도체 접속부와 케이블 차폐층 끝단의 전계 완화를 목적으로 보강되어지는 절연체의 형상 및 절연 성능의 변화가 중요한 과제로 나타나게 된다. XLPE 케이블 접속부에는 물리적, 화학적으로 불완전하게 결합되는 계면이 존재하게 되며 계면에서의 절연 특성이 접속함의 절연성능을 결정짓는 중요한 요소라는 것은 널리 알려진 바 있다.

XLPE 케이블이 사용되기 시작한 초기에는, 계면 절연 성능을 만족시키기 위하여 XLPE 케이블과 유사한 화학적 구조를 가지는 미가교 LDPE를 특수하게 설계된 Taping기를 사용하여 케이블 접속부에 Taping한 후 고

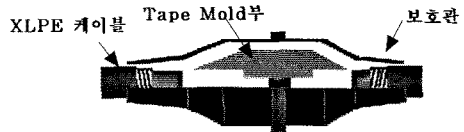


그림 1. TMJ의 구조

온가압하여 케이블을 접속하였다(TMJ). 미가교 LDPE는 고온가압시에 케이블 절연체 표면의 미 반응기와 반응하므로 케이블과 접속함 사이의 계면이 비교적 안정적이다. 이러한 특성 때문에 TMJ는 높은 계면 신뢰성을 가지고 있으며 XLPE케이블의 발전과 함께 광범위하게 사용되어 왔다.

하지만, TMJ는 높은 계면 신뢰성에도 불구하고 시공시간이 길고, 무겁고 고가인 특수한 장비(Taping기, Mold)가 필요하며 시공 현장에서 성형해야 하고 조립의 품질을 검사하기 어렵다. 이 때문에 시공 및 품질검사에 비교적 많은 비용이 소요되는 단점을 가지고 있다.

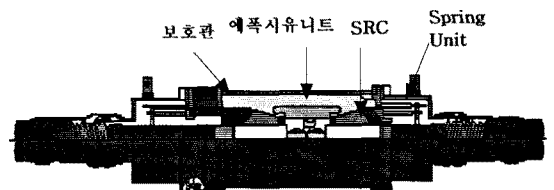


그림 2. PJB형 접속함

고분자 성형기술의 발전에 따라서 공장에서 성형, 검사한 부품을 현장에서 조립, 시공하는 조립형 접속함이 개발되었다. 조립형 접속함은 금속전극이 매입된 에폭시 절연체를 도체 접속부에 장치하고 양쪽에서 케이블 차폐층 끝단 전계를 완화하는 고무부품인 Stress Relief Cone(이하 SRC)을 삽입, 스프링 유니트로 계면의 절연 성능을 유지시켜주는 PJB와 고압부 전계완화와 케이블 차폐층 끝단 전계완화를 위한 반도전 부품을 매입된 대

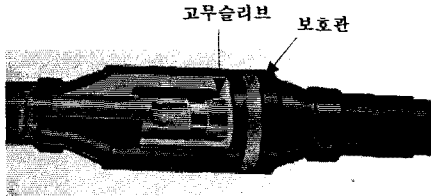


그림 3. PMJ형 접속함

형 고무 슬리브를 고무의 탄성력을 이용하여 케이블에 삽입, 계면의 절연 성능을 유지시켜주는 PMJ로 크게 늘 수 있다.

PJB는 장기적 신뢰성을 설계철학으로 하는 일본업체에서 고안된 구조로, 높은 설계 마진을 확보하고 있고 계면에서의 신뢰성을 스프링의 압축력으로 보강하는 구조를 가지고 있다. 그러나 작은 부품을 다수 제작하여 조립하기 때문에 현장에서 조립해야 하는 부품수가 비교적 많고 작업자가 다루기 힘든 중량의 에폭시 유니트 때문에 조립이 비교적 어렵다.

PMJ는 실용성을 중요시하고 설계품질을 요구성능에 최적화시키는 유럽에서 고안된 구조로, PJB에 비해 낮은 설계 마진을 가지고 있으나 산포가 고른 성능을 나타내는 특징이 있다. 또한, 고무 슬리브의 장기적인 탄성력 유지를 위하여 높은 수준의 고무재료 처방/성형 기술을 보유해야 개발 가능하다. 이와 더불어, PJB에 비해 주요 부품의 수가 1/3 수준으로 적고 비교적 경량인 고무 슬리브를 주 부품으로 사용하기 때문에 작업자가 다루기 쉽고 현장에서의 시공이 편리한 장점이 있다. 현재, PJB는 일본 및 동아시아 지역에서 사용되고 있고, 동남아시아, 중동, 미국, 유럽에서는 PMJ를 주로 사용하고 있으며 일본의 일부 업체에서도 PMJ의 개발을 추진중인 것으로 알려져 있다.

2.2 접속함 Type별 시공성 비교

초고압 케이블 접속함은 시공 후 30년간의 수명을 보장하는 고 신뢰성을 요구하기 때문에 접속함 Type별로

표 1. 접속함 종류별 시공성 비교 (3상기준)

Type	TMJ	PJB	PMJ
제품중량	60~80 kg	70~120kg	60~70kg
시공장비	Taping기, Mold	SRC삽입기	Sleeve삽입기
장비중량	50~80 kg	30~40 kg	15~40kg
M/D	24~26	18~22	6~12
종합평가	C	B	A

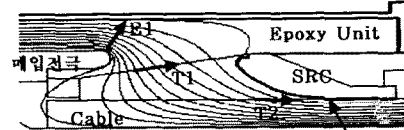
신뢰성을 유지시켜줄 수 있는 시공법을 개발하여 사용하고 있다. 시공성은 3상 조립에 소요되는 작업시간과 시

공인원을 종합한 지표인 Man/Day(1일 8시간 작업기준; 이하 M/D)로 나타낸다. 표 1에 접속함별 중량과 시공장비 그리고 M/D를 나타내었다.

표 1에 나타난 바와 같이 TMJ는 비교적 경량인 반면 특수하고 무거운 시공장비인 Taping기와 Mold가 필요하여 작업성이 낮은 것으로 분석되었다. 이와 반면에 PJB와 PMJ는 비교적 시공장비가 가볍고 M/D가 낮아 시공성이 높은 것으로 분석되었다.

2.3 조립형 접속함의 설계 / 제조기술

(1) 조립형 접속함의 설계 기술



(1) PJB의 등전위 분포



(2) PMJ의 등전위 분포

그림 4. 전기적 설계 Point의 예

조립형 접속함의 설계는 전계제어, 계면절연, 열계 및 응력해석의 복합적 기술에 의해서 가능해진다. 그림 4에 전기적 설계 Point의 예를 나타내었다.

PJB의 설계 Point는 E1, T1, T2이다. E1은 에폭시 유니트의 두께와 매입전극의 형상에 따라서 결정되며 에폭시 제조기술과 밀접한 관계가 있다. T1은 에폭시 유니트 표면의 상태, SRC의 경도 및 조립시의 형상, 그리고 SRC 삽입공법에 따라서 그 성능이 결정되며 T2는 SRC 삼중점의 조립시 변형된 형태가 고려되어 설계되어야 한다. PMJ는 고무 슬리브 확관시에 절연고무의 Tension에 따른 절연내력의 변화와 제조수준, 그리고 매입 전극의 저항율에 따라서 E'1의 설계 기준 전계가 결정된다. T'1은 매입전극의 외경이 PJB에 비해서 작기 때문에 전계가 집중되는 중요한 관리 포인트이다. T'2는 성형기술의 수준에 따라서 삼중점의 처리 상태를 반영하는 설계 기준을 세워야 한다. 조립형 접속함은 케이블 절연체와 현장에서 조립하는 부품간의 계면 절연 성능이 주요 관리 Point이다. 이 때문에, 조립 전후 및 실사용 중에 나타나는 형상의 변화와 이에 따른 정전계 분포의 변화, 응력의 집중 및 완화에 따른 절연성능의 차이, 그리고 열적 과도 상태에 따른 기계적인 특성 등을 고려한 설계를 해야 한다.



그림 5. PJB의 에폭시 유니트에 대한 열응력 해석

그림 5와 그림 6에 PJB와 PMJ에 대한 응력 분포 해석 예를 나타내었다.



그림 6. PMJ 조립시의 응력 분포 해석

특히, PMJ에 대한 응력 해석 기술은 PJB의 스프링 유니트 Setting 기술과 유사하며 케이블 절연체와 삽입 부품간의 계면압력을 설정하는데 매우 중요한 인자이다. 표 2에 PJB와 PMJ의 주요 설계 기술을 비교하였다.

표 2. PJB와 PMJ의 주요 설계 기술

Type	전기	응력	열계
PJB	등전위(변형고려)	Spring Unit 셋팅	열변형
PMJ	등전위(변형고려)	슬리브 확관율	열분포

(2) 조립형 접속함의 제조 기술

PJB는 에폭시 유니트와 EPR(Ethylene-Prophylene Rubber)로 제조된 SRC로, PMJ는 대형 고무 슬리브로 구성되어 있어서 초고압용 제품의 제조 기술에는 필연적으로 대형 고분자 부품 성형기술이 필요하다. PJB는 대형 절연 부품을 정밀하게 조립해야만 설계된 절연성능을 얻을 수 있기 때문에 부품의 허용 공차 범위를 매우 작게 하고 현장에서의 악조건에서도 조립이 원활하게 이루어질 수 있도록 관리해야 한다. 하지만 고분자 절연 부품을 정밀하게 성형하는 기술은 부품의 위치에 따른 균질성의 확보 및 부위별 수축율을 고려한 금형 설계, 그리고 탈형 및 후가공 등의 제조 공정이 일관되게 관리되어야 한다.

PMJ는 부위별 계면압력의 관리를 위해서 고무 슬리브의 균일한 제조기술이 필수적이다. PMJ는 에폭시 유니트와 케이블 절연체 간의 배공간에 SRC를 정밀하게 삽입해야 하는 PJB에 비해서 부품 허용 공차 범위를 정밀하게 관리할 필요가 적은 장점이 있으나 Spring Unit의 정밀도 수준으로 정밀한 탄성력을 확보해야만 계면압력의 산포도를 일정하게 관리 할 수 있다.

2.4 PMJ 모델 시험 및 결과

PMJ 설계를 위한 요소 기술인 부위별 기준 전계, 확관율에 따른 계면압력, 그리고 과통전시에 나타나는 계면압력의 변화 양상을 얻기 위하여 Silicone 재질의 모델 제품을 제작/시험하였다.

실리콘 재질의 PMJ는 EPDM 재질의 PJB용 SRC에 비하여 표면 경도가 낮아 케이블 표면의 Scratch나 굴곡부위에 밀착하는 특성이 좋다. 이 때문에 계면압력에 대한 절연파괴 특성이 PJB의 경우 4~5kgf/cm²에서 포화되는 양상을 나타내는 것과 달리 2kgf/cm²에서 포화되는 양상을 나타낸다. 이와 더불어 고무 슬리브의 내경을

케이블 절연체 외경보다 작게 제작하여 고무 슬리브를 케이블 절연체에 확관하여 조립, 고무 슬리브의 탄성력

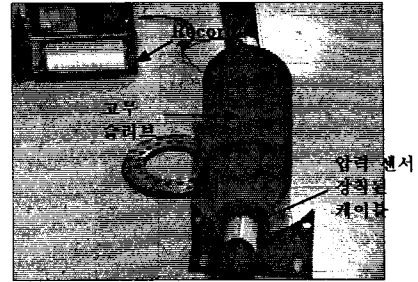


그림 7. 계면압력 측정 장치

에 의해서 계면압력이 유지되는 구조를 가지고 있기 때문에 고무 슬리브의 확관율에 따른 계면압력의 변화를 측정하는 것이 매우 중요하다. 그림 7에 확관율에 따른 계면 압력 변화 측정 장치를 나타내었다. 실험 결과, 확관율에 따른 계면압력의 변화는 직선에 가까운 선형성을 나타내었고 온도에 따라서는 0.5kgf/cm²의 변화를 나타내었으며 절연체 두께에 따른 변화는 거의 없었다. 실 제품에 대한 설계 기준치를 얻기 위하여 모형제품을 제

표 3. 부위별 기준전계(PJB/PMJ)(단위:kV/mm at Uo)

구분	PJB	PMJ
E1 / E'1	4.0 ~ 8.0	3.5 ~ 5.5
T1 / T'1	1.5 ~ 2.1	1.1 ~ 1.6
T2 / T'2	1.2 ~ 1.5	0.8 ~ 1.3

작하여 내전압 시험을 실시한 결과, 실리콘 절연재료의 내전압 특성을 고려한 기준 전계값(E'1)을 얻을 수 있었다. 또한, 계면압력을 1~2kgf/cm²로 설정한 후 실시한 절연파괴 시험 결과, 표 3과 같은 계면에서의 기준 전계치를 얻을 수 있었다. 여기서, E'1의 전계는 수명지수 n=15로 30년간의 수명을 고려하여 환산한 값이다.

3. 결 론

초고압 XLPE 케이블 접속함에 대한 LG Cable(주)의 독자적 설계/제조 기술을 바탕으로 세계적으로 생산/판매되는 접속함의 특성과 조립형 접속함(PJB, PMJ)의 시공성, 설계/제조 기술에 대해서 분석하고 PMJ의 설계 Parameter를 얻기 위한 모델 시험 결과,

(1) 조립형 접속함인 PJB와 PMJ는 각각 일본과 유럽에서 개발된 타입으로 PJB는 신뢰성 중심(Margin 高), PMJ는 실용성 중심(최적설계)으로 설계되었고 현장성형식인 TMJ에 비해서 시공성이 우수한 것으로 나타났다.

(2) PMJ 고무슬리브의 확관율과 계면압력은 선형적인 관계를 가지고 있었으며 Silicone 재질의 고무슬리브 E'1 설계 기준 전계로서 3.5~5.5(AC, 30년 수명기준)를 얻을 수 있었다.

(3) PMJ의 전기적인 설계 기준을 얻기 위한 기초시험 결과, 계면압력을 1~2kgf/cm²로 관리할 경우, 계면의 설계 전계는 AC Uo인가시 0.8~1.6 kV/mm로 나타났다.