

삽입형 고무몰드접속함 개발

김화중, 강병국, 송재혁, 최만욱, 한지훈
대한전선(주) 초고압 기기개발팀

Development of Pre-Molded Joint for EHV XLPE Power Cable

H.J.Kim, B.K.Kang, J.H.Song, M.O.Choi, J.H.Han
Taihan Electric wire Co., Ltd. EHV Accessories Engineering Team

Abstract - 우리는 기존의 현장몰드방식의 TMJ(Tape Molded Joint)와 부품조립방식의 PJ(Prefabricated Joint)보다 조립시간과 숙련도가 덜 필요한 고무몰드접속함을 탄생 및 우수한 절연특성을 가진 silicone 고무를 사용하여 조립공정과 절연특성, 탄성특성, 계면특성, 열적 특성 등을 연구하여 개발에 성공하였다. 고무 몰드 접속함은 실리콘 재료의 우수한 탄성에 의해 동일 케이블의 다양한 size에 적용이 가능하다.

1. 서 론

현재 전세계적으로 초고압 지중전력케이블로 가교폴리에틸렌(XLPE) 케이블이 주종을 이루고 있다. 이러한 추세에 발맞추어 현재까지 XLPE 케이블의 중간접속함으로 TJ(Taped Joint), TMJ(Tape Molded Joint), EMJ(Extruded Mold Joint), BMJ(Block Mold Joint) 및 PJ(Prefabricated Joint) 및 PMJ(Pre-Molded Joint) 등의 여러 종류의 접속 방식을 개발되어왔다.

이중 최근에 조립공정이 간단하며, 공장제조방식으로 높은 신뢰성을 갖추면서도, 설치비가 저렴한 삽입형 고무몰드접속함(PMJ)이 전세계적으로 각광을 받고 있다.

이러한 고무몰드접속함은 고무재질의 전기적 특성, 기계적 특성, 열적 특성에 의해 그 성능이 좌우되는데, 당사에서는 이러한 특성을 만족하는 재질, 제조공정의 표준화와 동시에 간편하고 제품의 신뢰성을 유지하는 조립방법을 개발하여 현재 국내 154kV급에서 적용 중인 TMJ정도의 전기적 성능 확보를 목표로 개발을 진행하였다.

2. 본 론

2.1 PMJ의 설계

2.1.1 전기적 설계

PMJ는 고무 재질의 절연재와 반도체를 사용하여 반도체로 중앙매립전극 및 두개의 Stress Relief Cone을 별도로 성형 후 절연재로 일체형으로 성형한 접속재로 PMJ 하우징 고무재질의 자체 탄성에 의한 면압으로 케이블 절연체와의 계면 스트레스를 흡수하는 원리를 이용한 것으로, 이러한 구조의 특성상 중앙매립전극부의 반경방향 스트레스(τ_1), 중앙매립전극부의 선단의 스트레스(τ_2), 고무절연물과 XLPE 케이블 절연물간의 계면간의 연면방향 스트레스(τ_3), 반도체 입상부의 반경방향 스트레스(τ_4)가 설계에 있어서의 중요 포인트가 된다.

이를 위하여, 당사에서는 각부의 치수와 형상을 여러 조건으로 바꾸어 이에 대한 전계해석을 실시함으로써 최적의 전극 형상, 내부절연거리 및 절연두께를 결정할 수 있었다.

그림 1.은 이러한 과정을 거쳐 결정된 형상 및 등전위선의 분포를 보여준다.



그림 1. 154kV PMJ 등전위선 분포도

PMJ 하우징을 실제로 케이블에 삽입하게 되면 내경의 확장에 따라 외경의 증가 및 내부 전극 형상의 변형 등이 발생하게 되는데, 당사에서는 수치적 계산에 의해 하우징의 변형을 예측하여 전계해석을 수행하였다. 그 예상과괴전압은 다음의 표1과 같다.

표1. PMJ 각부의 예상과괴전압

부위	AC 예상과괴전압
τ_1	580kV
τ_2	520kV
τ_3	620kV
τ_4	625kV

2.1.2 계면압

고무 재질의 자체 탄성력으로 케이블과 하우징 간의 계면 절연내력을 유지하는 PMJ의 특성상 전기적 성능 확보를 위해서는 계면압의 검토가 필수적이다.

계면압은 크게 초기면압과 최종면압에 대한 검토가 이루어져야 하는데, 초기면압이란 케이블에 삽입 당시의 면압이며, 최종면압은 접속함의 수명 보증기간인 30년 사용 후의 면압이다.

당사에서 PMJ 재료로 선정된 실리콘 고무는 용력완화특성이 타 고무제품보다 우수하여 초기면압 설계시 1kg/cm² 이상을 확보할 경우 최종면압이 계면과괴전압치 이상의 절연내력을 가지는 것으로 보고되었다. 따라서 당사에서는 154kV XLPE 1200mm² ~ 154kV XLPE 2500mm² 케이블을 각각 적용시의 내경 확장율이 115%~140%의 분포를 가지도록 하우징의 내경을 설계하였으며, 최소 확장율을 가진 154kV XLPE 각 규격의 케이블 적용시 계면압 분포를 수치적으로 계산하여 설계하였다. 그 분포는 아래 그림 2와 같다.

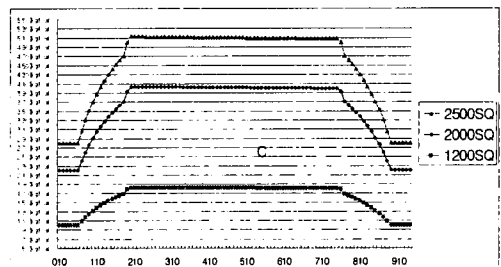


그림 2. 154kV XLPE 케이블 삽입시 면압분포

2.1.3 재료의 선정

현재 초고압 케이블에 대한 PMJ의 고무재료로는 EPDM과 Silicone 고무가 주종을 이루고 있다. 당사에서는 기계적, 열적 특성이 우수한 것으로 알려진 액상실리콘고무(LSR)를 주절연물 및 반도체재료로 선정하여, 여러 Silicone 고무 재질의 전기적 성능, 기계적 성능 및 열적 성능 등의 물성과 성형성 등을 비교하여 그 재료를 선정하였다.

표2. 실리콘고무의 물성

No.	항목	절연재	반도체재
1	인장강도 [N/mm ²]	4.0	6.0
2	경도 [Shore A]	40	40
3	인열시 신율 [%]	500	650
4	인열강도 [N/mm ²]	25	12
5	절연내력 [kV/mm]	25	-

PMJ 하우징의 삽입시 또는 케이블의 열신축 거동시 내부 반도체 전극 형상의 변형에 의해 반도체 전극과 절연재간의 박리가 발생하여 전기적 열화의 직접적인 원인이 되기도 하는데, 당사에서 선정된 절연재와 반도체재간의 접착성을 시료상태에서 시험한 결과, 아래의 그림과 같이 접착 계면이 아닌 절연재에서 파단됨을 확인하였으며, LSR로 제작된 실제품에서도 이와 유사한 시험을 통해 접착성의 우수함을 확인할 수 있었다.

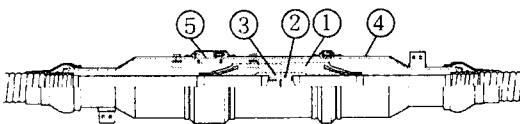


그림 3. 절연재와 반도체재간의 접착성 시험 결과

2.1.4 열특성

고온에 의한 Silicone 고무의 기계적 특성의 저하 정도의 확인을 위하여 고온에서의 Silicone 고무의 인장력 시험을 실시하였다. 시험 결과 Silicone 고무의 인장력은 PMJ 하우징 자체의 온도가 높아질수록 비례적으로 감소하는 것으로 확인되었다.

따라서, 케이블 도체에 고온 발생시 PMJ 하우징 내부의 국부적인 과열을 방지하기 위하여 당사에서는 코로나 쉴드와 케이블 도체 사이에 열전도율이 높은 금속 ADAPTOR를 밀착시켜 케이블 도체에서 발생한 고열이 효율적으로 분산되도록 설계하였다. 다음의 그림4는 그 구조를 나타내었다.



- ① PMJ 하우징 ② 도체접속슬리브 ③ 코로나쉴드
- ④ 보호관 ⑤ 절연통

그림 4. 154kV CV PMJ 구조

2.2 조립 공정 수립

현재 PMJ의 조립 방법으로는 크게 PMJ 하우징의 슬라이딩 방식과 확정 방식으로 나눌 수 있다. 여기서, 슬라이딩 방식은 현장에서 삽입지그를 통해 케이블에 직접 삽입하여 조립하는 방식이고, 확정 방식은 공장에서 PMJ 하우징을 적절한 내부 코어를 삽입해 확정한 후 현장에서 조립하는 공장확정방식과 현장에서 적절한 내부 코어에 삽입한 후 조립하는 현장확정방식이 있다.

당사에서는 이들 모두 적용가능함을 확인하였으며, 이들 중 조립시간의 단축 및 제품 신뢰성 확보면에서 우수한 현장확정방식을 채택하여 적용하였다. 현장확정방식의 장점으로서는 단기간의 훈련을 통해 조립이 가능할 정도로 기존의 접속방식에 비해 숙련된 기술이 필요하지 않으며, 조립시간이 슬라이딩 방식보다 짧으며, 공장확정방식이 가진 경년에 따른 면압저하로 인한 보관기간의 제약이 없다는 것이다.

다음의 그림5에 조립방법의 개략도를 나타내었다.

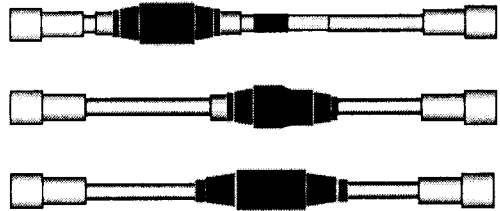


그림 5. PMJ 조립 공정

2.3 전기적 성능 시험

2.3.1 시험전압

당사의 성능 목표 전압은 아래와 같이 Silicone 고무의 수명지수(n)를 12로 하고, 온도계수, 열화계수, 불확정계수 등을 감안하여 산출하였다.

$$AC \text{ 내전압} = (V_m/\sqrt{3}) * K_1 * K_2 * K_3 = 367kV$$

여기서, V_m : 계통최고전압

K_1 : 열화계수(=2.83)

열화계수= $n\sqrt{(30*365*24/1)}$

n 은 수명지수(=12)

K_2 : 온도계수(=1.2)

K_3 : 불확정 요소(=1.1)

$$Imp. \text{ 내전압} = BIL * K'1 * K'2 * K'3 = 1135kV$$

$K'1$: 온도계수(=1.25)

$K'2$: 반복에 의한 열화계수(=1.1)

$K'3$: 불확정 요소(=1.1)

2.3.2 성능 확인 시험

당사가 개발한 154kV PMJ의 전기적 성능 확인을 위하여 154kV XLPE 2000mm² 케이블 및 2500mm에 각각 접속하여 시험하였다. 시험결과 케이블 규격에 관계없이 모두 목표치 이상의 성능을 보였다. 그 시험결과를 다음의 표 3에 정리하였다.

표3. 154kV PMJ 전기시험 결과

구분	시험전압	B/D전압수준
AC내전압시험	① 295kV/1시간	470kV ~ 550kV
	② 367kV/1시간	
Imp.내전압시험	① ±750kV/10회	-1200kV ~ -1400kV
	② -1135kV/3회	

2.3.3 열싸이클 전압 시험

IEC60840에 규정된 XLPE케이블의 열싸이클 시험을 위해 시험단말로 154kV XLPE EB-A를 사용하였다. 인가전압 2U₀(=174kV)을 인가한 상태에서 8시간동안 케이블을 고온으로 유지하고, 16시간은 상온상태로 총20싸이클의 시험을 실시하였다. 시험결과는 시험규격에 만족하였으며, 추가로 AC 파괴 시험을 실시하였다. 그 결과는 아래의 표 4와 같다.

표4. PMJ 열싸이클 전압시험 결과

항목	기준	결과
열싸이클 시험	174kV/20싸이클	이상없음
AC 파괴시험 (열싸이클시험후)	50kV/30분씩 승압	AC 400kV 시험단말 F/O

2.3 TYPE TEST

154kV XLPE 2500mm² 광복합 케이블에 대한 한전구매 규격을 기준으로 폴리머에관형 EB-A 2상, EB-G 2상, PMJ, PMNJ로 시험선로를 구성한 후, 다음의 표 5와 같은 과정으로 TYPE TEST를 수행하여 성공적으로 완료하였다.

표5. TYPE TEST 시험 규격 및 결과

항목	기준	결과
광손실 측정	접속개소당 0.3dB이하	이상없음
부분방전시험	1.5U ₀ 5pC이하(상온)	5pC ↓
열싸이클 시험	174kV/20싸이클	이상없음
부분방전시험	1.5U ₀ 5pC이하 (고온 및 상온)	상온 : 5pC ↓ 고온 : 5pC ↓
광손실 측정	접속개소당 0.3dB이하	이상없음
AC내전압시험	2.5U ₀ /15분	이상없음
IMP.내전압시험	IMP.±750/10회(고온)	이상없음

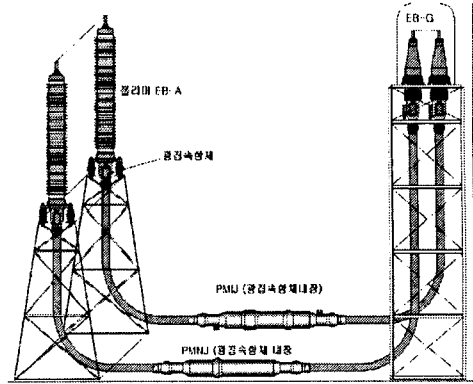


그림 6. TYPE TEST 선로 구성

3. 결 론

숙련된 기술이 필요하지 않을 정도로 조립이 간편한 삽입형 고무몰드접속함은 현재 200kV급 이하에서는 전 세계 중간접속함의 주류를 이루고 있다. 급변에 당사에서 154kV XLPE 삽입형 고무몰드접속함(PMJ)의 개발로 국내의 신규 시장에 진출할 수 있는 계기를 마련하였다. 또한, 이번 PMJ의 개발로 얻어진 기술력을 바탕으로 230kV급과 345kV/400kV급 개발에 박차를 가할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Development of Cold-Shrinkable Joints with silicone rubber sleeve for 110-230kV XLPE cables : VISCAS (2002)
- [2] Single-piece Joint for 230kV XLPE Cable : Fujikura Technical Review(2001)
- [3] Development of Cold-Shrinkable Joint for 110kV XLPE Cables : Furukawa Review(2000)