

400kV XLPE 삽입형 고무몰드 접속함의 개발

김화중, 김현주, 김성용, 송재혁, 김덕환
 대한전선(주) 전력기기 개발팀

Development of Pre-molded Joint for 400kV XLPE Power Cable

H. J Kim, H. J. Kim, S. Y. Kim, J. H. Song, D. H. Kim
 Taihan Electric Wire. co., Ltd. EHV Acc'y R&D Team

Abstract - 전통적으로 초고압 지중케이블 접속함으로 현장에서 절연을 형성하여 전기적 성능을 유지하는 TMJ(Tape Molded Joint), TJ(Taped Joint), EMJ(Extruded Molding Joint) 및 공장에서 절연물을 가공하여 현장에서 조립만으로 설치를 완료하게 되는 PJ(Prefabricated Joint), PMJ(Pre-Molded Joint) 등이 사용되어 왔다. 최근에 PMJ에 사용되는 재료의 발전과 PMJ의 조립시간 단축, 원가 절감 및 공장 출하시 검사에 의한 신뢰성 향상으로 지중케이블 접속함 시장에서 PMJ의 비중이 점차 확대되어가고 있다. 이에 당사는 이미 230kV급 PMJ의 개발을 완료하였으며, 이러한 기술적 배경을 바탕으로 현재 PMJ로서는 세계에서 최고 전압급에 속하는 400kV급 PMJ의 개발을 완료하게 되었다.

1. 서 론

현재 전세계적으로 초고압 지중전력케이블로 가교폴리에틸렌(XLPE) 케이블이 주종을 이루고 있으며, 최근까지 XLPE 케이블의 중간접속함으로 170kV급 이하에서는 주로 TJ(Taped Joint), TMJ(Tape Molded Joint)등이 170kV급 ~ 400kV급까지는 일본에서 주력으로 개발된 EMJ(Extruded Mold Joint), BMJ(Block Mold Joint)와 더불어 PJ(Prefabricated Joint) 및 PMJ(Pre-Molded Joint) 등의 여러 종류의 접속 방식이 개발되어왔다.

이중 최근에 고무절연체의 지속적인 성능 향상과 더불어 조립공정이 간단하며, 공장제조방식으로 공장 출하시 출하전기시험을 거쳐 높은 신뢰성을 갖추면서도, 설치비가 저렴한 삽입형 고무몰드 접속함(PMJ)이 전세계적으로 각광을 받고 있다.

삽입형 고무몰드접속함은 시장점유율 측면에서 전세계적으로 170kV급 이하에서 현재까지 절대적인 우위를 차지하고 있으며, 점차 그 영역이 230kV급 이상까지 확대되고 있는 추세이다. 이에 당사는 2006년 230kV급 PMJ의 KEMA TYPE TEST를 완료하였으며, 이러한 기술적 배경을 바탕으로 IEC62067 규격을 추종하는 성능을 가진 400kV급 PMJ 개발에 착수하여, 금년에 IEC 규격에 의거하여 KEMA TYPE TEST를 성공적으로 완수하였다.

2. 본 론

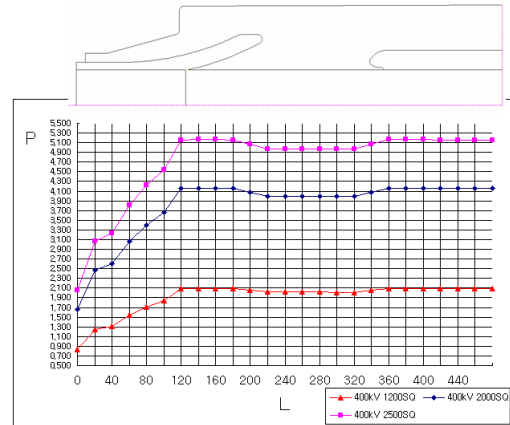
2.1 PMJ의 설계

2.1.1 계면압 설계

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

PMJ 고무유니트를 케이블에 삽입 후 환경에 의한 고무재료의 경년에 따른 탄성 저하 및 열적인 열화등의 여러 요인으로 인해 아래의 그래프와 같이 그 계면압이 감소하게 된다. 따라서, 계면압 설계시에는 크게 초기면압과 최종면압에 대한 검토가 동시에 이루어져야 하는데, 초기면압이란 케이블에 삽입 당시의 면압이며, 최종면압은 케이블에 고무유니트 삽입 후 접속함의 수명 보증기간인 30년 또는 40년 사용 후의 면압이다. PMJ의 계면 절연내력 유지를 위해서는 최소 0.5kgf/cm²을 확보하여야 하는데, 당사에서 선정된 실리콘 고무의 우수한 응력완화특성으로 인해 초기면압이 1kgf/cm² 이상인 경우 최종면압이 최소면압 이상 확보되는 것으로 보고되었다.

다음의 그림1은 컴퓨터 프로그램에 의해 계산된 케이블 삽입 후 고무유니트와 케이블간의 계면압의 길이방향 추이를 나타내었다. 이때 참조되는 계수로는 Young's Modulus, Poisson's Ratio 및 케이블 및 고무유니트의 치수 등이다.



〈그림 1〉 PMJ의 경년에 따른 계면압 저하 추이

상기의 그래프에서 보는 바와 같이 400kV XLPE 1200mm²의 경우 최소면압이 약 1.3kgf/cm²으로, 당사에서는 400kV XLPE 1200mm² ~ 400kV XLPE 2500mm² 케이블을 각각 적용시의 내경 확장율이 115%~140%의 분포를 가지도록 고무유니트의 내경을 설계하였으며, 본 고무유니트로 여러 사이즈의 케이블에 적용이 가능함을 확인하였다.

2.1.2 전기적 설계

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

$$\begin{aligned} \text{AC 내전압} &= (V_m) \times k_1 \times k_2 \times k_3 \\ &= 736kV \end{aligned}$$

여기서, V_m ; 계통최고전압

$$k_1 ; \text{ 열화계수} = \sqrt[12]{\frac{365 \text{ days} \times 24 \text{ hours} \times 30 \text{ years}}{12 \text{ hour}}}$$

$$k_2 ; \text{ 온도계수} (=1.2)$$

$$k_3 ; \text{ 불확정 요소} (=1.1)$$

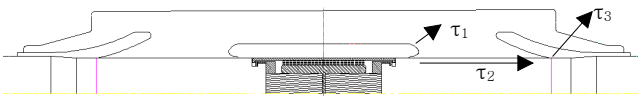
$$\begin{aligned} \text{뇌Imp. 내전압} &= BIL \times k_1 \times k_2 \times k_3 \\ &= 1,897kV \end{aligned}$$

$$k_1 ; \text{ 온도계수} (=1.1)$$

$$k_2 ; \text{ 반복에 의한 열화계수} (=1.1)$$

$$k_3 ; \text{ 불확정 요소} (=1.1)$$

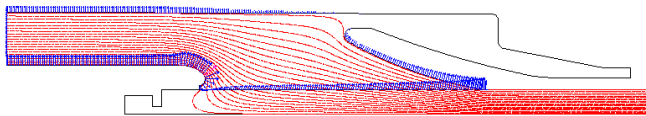
PMJ는 고무 재질의 절연체와 반도체로 구성되며, 반도체 재료 중앙매립전극 및 두개의 Deflector를 별도로 성형한 후 절연체로 일체형으로 성형한 접속재료 PMJ 고무유니트 고무재질의 자체 탄성에 의한 면압으로 케이블 절연체와의 계면의 전기적 스트레스를 흡수하는 원리를 이용한다. 이러한 구조의 특성상 중앙매립전극부의 선단의 스트레스(τ₁), 고무절연체와 XLPE 케이블 절연물 계면간의 연면방향 스트레스(τ₂) 및 반도체 Deflector 입상부의 반경방향 스트레스(τ₃)가 설계에 있어서 중요 관리 포인트가 되며 중요 관리 부위를 아래 그림4에서 나타내었다.



〈그림 2〉 PMJ의 전기적 설계시 주요 관리부

실제로, PMJ 고무유니트를 케이블에 삽입하게 되면 내경의 확장에 따라 외경의 증가 및 내부 전극 형상의 변형 등이 발생하게 되는데, 이에 따라 의도했던 전기적 성능 이하로 전기적 특성의 저하가 발생하게 된다. 따라서, 수치적 계산에 의해 케이블 삽입 후의 고무유니트의 변형을 예측하여 전개해석을 수행하면서, 전극 형상 및 내부구조를 역변환하는 방법으로 설계를 진행하였다.

아래는 이러한 방법으로 수행한 전개해석 결과를 보여주며, 각 관리부의 예상과피전압은 아래의 표1.과 같다.



〈그림 3〉 400kV급 PMJ 등전위선 분포도

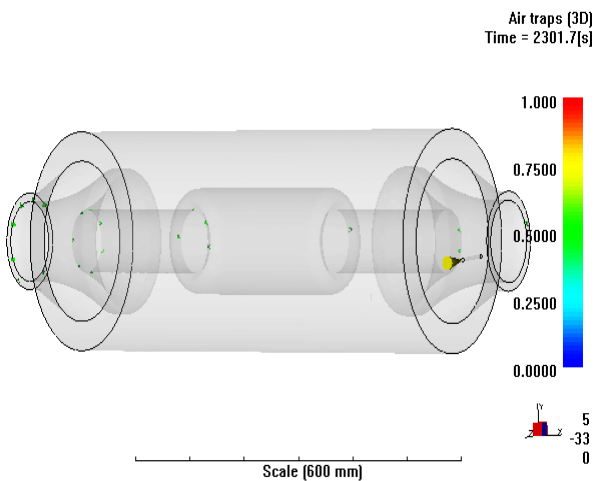
〈표 1〉 PMJ 각부의 예상과피전압

부위	AC 예상과피전압	뇌충격 예상과피전압
τ_1	925kV	1910kV
τ_2	905kV	2005kV
τ_3	940kV	1970kV

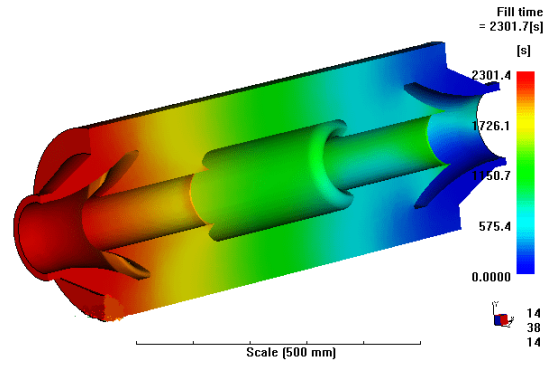
2.2 사출경화 해석

PMJ 고무유니트의 사출성형시 사출량, 사출압력, 사출속도, 컴파운드 주입구 및 Overflow부 최적의 위치 및 적절한 경화시간 및 경화온도를 결정하고 사출 경화 후 발생될 제품 결함 예측을 위하여 당사에서는 사출경화해석 컴퓨터 프로그램을 통하여 당제품의 설계안에 대한 사출경화해석을 실시하였다. 사출시 내부 Air trap의 발생 위치를 예측하고 이에 대한 대책 수립이 아주 중요하다. 이는 사출속도의 조절 및 적절한 배출구 위치 선정을 통해 가능한 것으로, 본 사출경화해석을 통하여 당사에서는 배출구를 3군데 선정하여 최소의 Air trap이 발생하도록 하였다.

경화시간 및 온도는 gel time 및 고무유니트의 절연성능에 큰 영향을 끼치는 요소로 사출경화해석을 통하여 적절한 경화시간 및 온도를 선정하여 실제 제품 성형에 적용하였다. 다음의 그림 4 및 그림 5는 400kV급 PMJ용 고무유니트에 대한 사출경화해석의 결과를 보여준다.



〈그림 4〉 고무유니트 설계안에 대한 Air trap 발생 예상 감소



〈그림 5〉 컴파운드 Fill Time 해석에 대한 결과

2.3 전기적 성능 시험

2.3.1 성능 확인 시험

당사가 개발한 400kV PMJ의 전기적 성능 확인을 위하여 4000kV XLPE 2500mm² 케이블에 접속하여 시험하였다. 시험결과 설계목표치 이상의 성능을 보였다. 그 시험결과를 다음의 표 2.에 정리하였다.

〈표 2〉 230kV PMJ 전기시험 결과

구분	시험전압	B/D전압수준
AC내전압시험	650kV/12.6시간 후 30kV/30분씩 승압	910kV ~ 960kV
Imp.내전압시험	±1425kV/10회 후 -30kV/3회씩 승압	-1880kV ~ -1950kV

2.4 KEMA Type Test

당사는 2005년에 이미 400kV XLPE 2500mm² 케이블 및 EB-A, EB-G 및 PJ에 대한 Type test를 완료하였으며, 400kV PMJ의 Type Test를 위하여 IEC62067 규격에 준하여 EB-A 2상과 PMIJ, PMNJ로 시험선로를 구성한 후, 다음의 표 3.과 같은 과정으로 KEMA 입회하에 TYPE TEST를 수행하여 성공적으로 완료하였다.

〈표 3〉 4000kV PMJ Type Test 결과

항목	기준	결과
1. PD Test	330kV/5pC ↓ (상온)	pass
2. Heat Cycle Test	440kV/20cycle	pass
3. PD Test	330kV/5pC ↓ (고온, 상온)	pass
4. 뇌임펄스내전압시험	±1425kV/10회	pass
5. 개폐충격내전압시험	±1050kV/10회	pass
6. AC Voltage Test	440kV/15분	pass
7. Outer Protection test	20 Heating Cycle 시행 후 양단간 Imp.±125kV/10회 인가	pass

3. 결 론

현재 초고압 케이블 부속제 설계기술력의 척도가 되고 있는 PMJ 개발에 있어서, 금번에 400kV급의 성공적인 KEMA type test의 수행으로 인해 당사의 기술력이 세계 유수의 선진업체와 동등함을 증명하는 계기가 되었다.

또한, 이번 400kV급 PMJ의 개발로 기술적 우위를 점하게 되었으며, 이는 당사 제품의 신뢰성 향상에 큰 영향을 끼치게 될 것으로, 이를 계기로 해외시장 점유율 향상이 기대된다.

[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)