

초초고압 CV Cable用 조립형 직선 접속함에서의 Stress Relief Cone 계면압력 최적화에 관한 연구

*백주홍, 백승엽, 이수길, 허근도, 박완기
LG전선(주) 전력연구소

A Study on the Optimization of Interfacial Pressure for the Stress Relief Cone in the Ultra-High Voltage Level Prefabricated Type Joint Box

*J.H.Baek, S.Y.Baek, S.K.Lee, G.D.Huh, W.K.Park
LG Cable & Machinery Ltd. Electric Power Research & Technology Center

Abstract

Insulation performance of major components of prefabricated joint such as epoxy insulation unit and premolded rubber cone are guaranteed by material selection design and proper manufacturing. On the other hand insulation performance of the interfaces between the premolded rubber cone and the epoxy insulation unit and the cable insulation is maintained by keeping the premolded rubber cone to close contact with such insulation by spring. Electric characteristics of a interface depend on the contact pressure, but the required characteristics are assured so far as a proper contact pressure is maintained. In this report, the interfacial pressure by pressure sensors both in the early stage and after heating cycle were measured and the simulation by FEM program were presented. The comparison of these two results show that interfacial pressure could be controlled optimally by changing the spring length and lubricant state of the interface.

1. 서 론

PJB(Prefabricated Joint Box)는 테이프 가교 몰드형 접속함(TMJ)에 비하여 조립이 간편하고 시공 시간의 단축 및 품질관리가 용이한 장점을 가지고 있어서 초초고압용 접속함으로서 광범위하게 개발되고 있다. PJB는 에폭시 유니트와 고무 스트레스콘을 스프링으로 압축하여 절연을 유지하는 방식을 사용하므로 계면의 상태를 최적으로 관리하는 것이 중요하며 절연 특성의 신뢰성을 확보하기 위하여 최적의 계면압력을 설정할 필요가 있다. 또한 통전중 면압 상승에 의한 케이블의 변형, 스트레스콘의 변형이 없어야 하며 스프링 탄성의 저하 등의 약조건에서도 계면압력은 설계 범위 내에서 유지 되어야 한다.

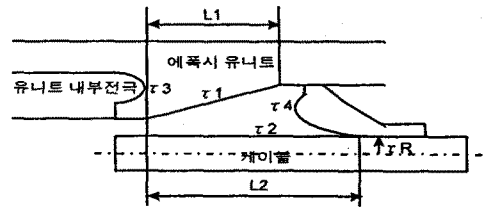
본 논문에서는 용력 해석 프로그램으로 시뮬레이션 한 계면압력과 센서를 이용하여 측정한 에폭시/고무, 고무/XLPE 계면 압력을 비교하였다. 또한 최적의 조립 조건에서 Heat Cycle 시험을 실시하여 장기간 사용에 대한 계면 압력의 적합성을 확인하였다.

2. 절연설계 및 계면압력 설계

2.1 절연설계

절연설계의 주요 관리 부위를 그림1에 표시하였다. r1은 에폭시 유니트와 스트레스콘 경계면의 전위 경도이고, r2는 스트레스콘과 케이블 경계면의 전위 경도이다. PJB의 콤팩트화를 위해 각 계면의 길이(L1, L2)를 짧게 하는 것이 바람직 하지만 r1, r2를 고려한 적절한 길이를 확보해야 한다. 따라서 r1,

r2, r3, r4, rR의 균형을 고려, 제품의 형상 및 치수가 결정된다.



<그림1> 절연설계상 주요 부위

2.2 계면압력

절연체 계면의 전기적 특성은 계면압력 P가 2.5kgf/cm² 이상에서 포화되기 시작하여 6kgf/cm² 이상에서는 포화 상태가 된다.^[2]

따라서 계면압력이 최소 2.5kgf/cm² 이상으로 유지하여야 하며 설계면압 Po는 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$\text{설계면압 } P_0 = \frac{\text{압축력}[F]}{\text{단면적}[S]} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

또한 Heat Cycle 시의 통전에 의한 온도 상승시 계면압력은 상승하고 냉각시에 초기치 이하로 저하하는 현상이 있다.

주요 계면압력 설계 기준은 다음과 같다.

- 1) 계면압력 P는 항상 2.5kgf/cm² 이상을 필요로 하지만 Heat Cycle시에 계면압력이 1/2이하로 저하하는 경우도 있으므로 설계 면압의 Po를 적절히 결정한다.
- 2) 스트레스콘/케이블의 내,외 경 차이를 1mm이상으로 설정한다.
- 3) 설계 계면압력의 상한치는 7kgf/cm²이하로 한다.

3. 계면압력 Simulation

3.1 수치해석

3.1.1 해석 모델 및 방법

본 연구에서는 I-DEAS Master series 5.0을 이용하여 형상 모델링을 실행한후 비선형 FEM code인 MARC를 이용하여 기계적 특성 및 계면압력 해석을 수행하였다. 본 해석에서는 케이블과 에폭시 성형물은 모두 강체로 가정하였으며 스트레스콘이 축대칭이므로 축대칭(axisymmetric) 해석을 수행하기 위하여 4절점 4각형 링 요소(요소번호 82, 10)를 사용하여 요소분할을 하였다.

해석을 위한 조건은 스트레스콘의 내경에 비해 케이블 직경이 큰 경우를 선택하였으며 에폭시의 내면 형상을 따라 곡선을 작성한 후 강체로 가정하여 압축 급구에 의한 스프링 길이 변화에 의해 스트레스콘에 하중이 가해진다고 설정하였다.

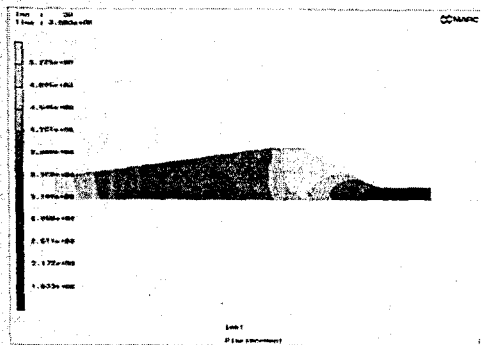
3.1.2 해석 조건

유한요소 해석을 위해 스트레스콘 자체 응력과 케이블 외경의 변화는 없다고 가정하였으며 스트레스콘의 재질 각부의 가오도는 같다는 전제하에 케이블과 에폭시 유니트는 강체 운동을 하는 것으로 설정하였다.

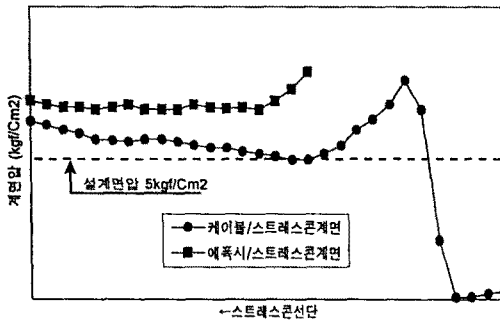
3.2. 스트레스콘 계면압력 및 응력해석 결과

스트레스콘 내부의 기계적인 스트레스 분포와 계면 압력을 그림2, 3에 각각 표시하였다. 스트레스콘과 케이블 계면의 압력 분포는 선단부에서 높은 면압이 생기고 중간부위로 갈수록 점차 감소하며 절연부와 반도전부가 만나는 부위에서 크게 증가한 후 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 에폭시/스트레스콘 계면에서는 거의 균일한 계면압력이 나타났다. 스프링 길이를 16% 변화 시켰을 때 Simulation 결과와 설계에 의한 계면압력과 거의 일치하고 있었다.

또한 계면에 실리콘오일을 도포하지 않아서 마찰력이 큰 경우를 가정하여 Simulation한 결과, 스트레스콘의 후부에 계면압력이 상당히 높게되며 선단부 쪽의 압력은 감소하였다.



〈그림2〉 스트레스콘의 스트레스분포



〈그림3〉 계면압력 분포

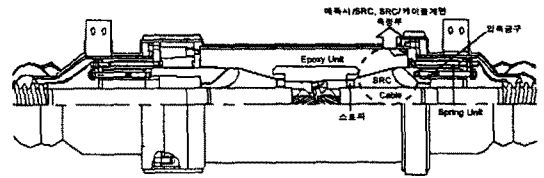
4. 계면압력 시험 및 고찰

4.1 PJB 구조 및 시험방법

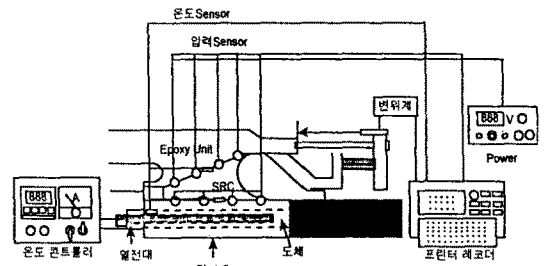
PJB구조 및 측정 시스템을 그림4, 5에 각각 나타내었다. 조립형 접속함의 기본 구조는 에폭시 절연물에 매입된 금구류의 형상을 제어하여 전계를 완화하고 절연 취약부인 에폭시 유니트/스트레스콘 계면을 스프링으로 압축하여 밀착성을 유지하는 구조이다. 본 연구에서는 조립 과정에서 나타날 수 있는 문제를 분석하고자 응력해석 및 실험결과를 비교 검증하고 초기조립 조건의 최적화를 위하여 연구하였다. 실험 장치는 스트레스콘 계면의 4부위에 각각 특별히 고안된 압력센서를 부착하였고 스프링의 변위량을 측정하기 위해 변위 센서를 사용하였으며 실사용 상태를 모의하기 위하여 도체 내에 히터를 내장, 각 계면의 온도를 측정할

수 있도록 제작하였다.

초기 조립조건의 최적화를 위해 스프링의 길이변화와 실리콘 오일 도포 유, 무에 따르는 계면압력 변화를 관찰하였다.



〈그림4〉 PJB 구조



〈그림5〉 계면압력 측정 시스템

4.2 초기 조립 특성

스프링길이 15, 17% 변화에 따른 계면압력 분포를 그림6에 표시했다.

스프링 길이변화에 따른 계면압력 Simulation 결과를 참고하여 스프링 길이를 15, 16, 17%로 변화를 주었으며 계면압력 변화폭의 크기는 다소 차이가 있었으나 스트레스콘 길이방향에 대한 분포는 스프링 길이 변화량만큼 증가하며 그 패턴은 서로 비슷하였다.

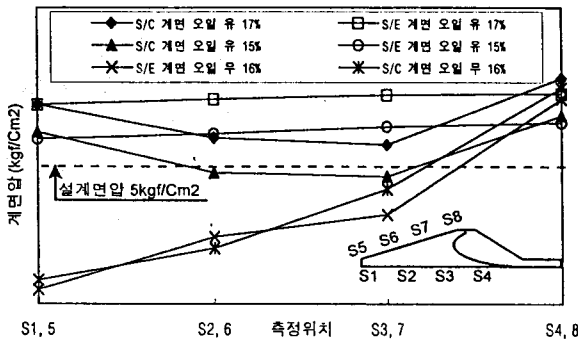
스트레스콘의 표면 윤활 상태에 따른 계면압력 분포를 그림6에 나타내었다. 표면 윤활 상태에 따르는 계면압력 분포 변화를 알아내기 위해서 실리콘 오일을 적정량 도포한 경우와 도포하지 않은 경우에 대해서 계면압력을 측정하여 최적의 초기조립조건을 얻을 수 있었다.

스트레스콘/케이블 계면에 실리콘 오일을 적정량 도포한 경우에 스트레스콘 후부 측, 스트레스콘의 절연부와 반도전부가 만나는 부위에서 가장 높은 계면압력이 발생되었다. 스트레스콘의 선단부와 후부의 중간 계면(S2, S3)의 압력은 다소 떨어지나 절연면압 이상 수준으로 유지되며 선단부에서 압력이 증가하는 것으로 나타났다. 선단부에서 압력이 높은 것은 스토파에서 척력이 작용하기 때문으로 유추할 수 있으며 스트레스콘 선단부를 S1이라고 하고 후부를 S4라고 할 때 결론적으로 케이블/스트레스콘 계면에서의 계면압력은 S1) S2) S3) S4와 같은 분포를 나타내었다. 또한 에폭시/스트레스콘 계면압력은 설계치 보다 다소 높지만 면압이 고르게 작용하여 위치별 분포가 안정한 형태로 나타났다.

실리콘 오일을 도포하지 않은 경우에 대해서 스트레스콘 선단에서는 거의 면압이 발생하지 않고 후부 쪽으로 갈수록 계면압력이 크게 증가하였다. 이와 같은 양상은 스트레스콘 표면에 마찰력이 작용하여 스트레스콘이 전진하지 못하는 경우이다.

이상의 실험을 통하여 얻어진 최적의 조건으로 조립한 후 1시간 간격으로 72시간 동안 면압 추이를 관찰하였다. 조립 후 시간이 경과함에 따라 각 계면의 압력이 24시간까지는 Stress Cone의 이동으로 생각되는 면압의 증감이 미소하게 발생되나 24간 이후부터는 거의 안정화되는 것을 확인 할 수 있었다.

이는 초기에 불안정한 Setting 위치의 Stress Cone 이 시간이 지남에 따라 안정되어 24시간 이후에는 거의 정상 상태에 도달하는 것으로 해석된다.



〈그림6〉 스프링길이 변화 및 표면윤활 상태에 따른 계면압력 분포 비교 그래프

4.3 Heat Cycle 시험

Simulation 결과와 초기조립특성시험 결과에서 얻어진 최적의 조건으로 조립, Heat Cycle시의 각 계면의 온도 변화 및 계면압력 추이를 그림7, 8에 각각 나타내었다. 그리고 스프링의 변위량과 케이블 및 스트레스콘의 변형을 조사하였다.

Heat Cycle의 조건은 다음과 같다.

- 도체온도 : 상온 ~ 95℃
- Cycle 패턴 : 8시간 on / 16시간 off
- 사이클 수 : 30회

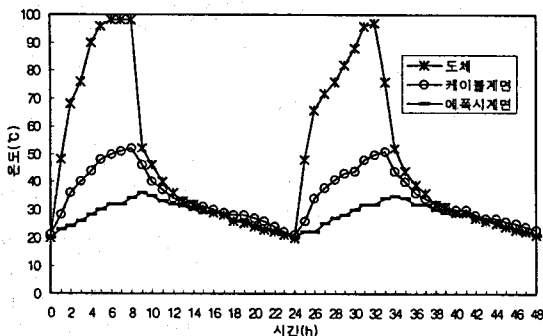
Heat Cycle시 온도가 상승하면 계면압도 증가하고 냉각되면 계면압도 감소하는^[2]상관관계를 알아보기 위하여 각 계면에 온도 센서를 설치하고 PJB 계면의 열적 거동을 조사하였다.

Heat Cycle시 도체 온도가 95℃로 상승하였을 때 케이블/스트레스콘의 계면온도는 50℃, 에폭시 유니트/스트레스콘 계면은 30℃ 정도의 온도 분포를 나타내었다.

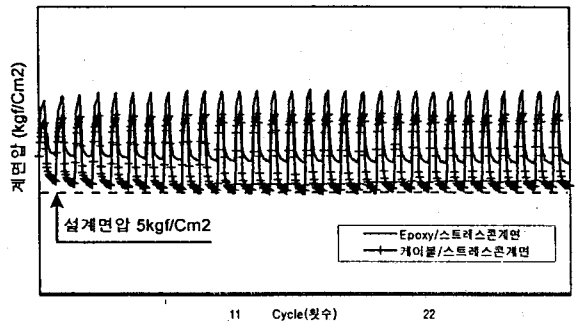
또한 도체온도 변화에 따라서 약 ±1kgf/cm²의 계면압력 변화가 나타났다. Cycle 경과에 따라 최대, 최소 계면압력도 미소한 증감은 있으나, 충분한 계면압력을 나타내고 있으며 케이블 변형량도 미소하여 절연체 계면의 상태가 안정된 것을 확인 할 수 있었다.

스프링 길이변화, 도체온도가 95℃로 상승 할 때는 약1.95% 줄어들었으며 냉각 시에는 0.65% 팽창하여 최대 2.58%의 길이 변화를 보였다.

계면압력 추이는 초기조립 스프링력 및 표면 윤활 상태에 대한 의존성이 크지만 Heat Cycle 시험에서는 초기조립특성과, 도체의 온도특성에 스프링 변화량과 면압이 상당히 영향을 받고 있음이 확인되었다.



〈그림7〉 계면 온도 특성



〈그림8〉 Heat Cycle 경과에 따른 계면압력

5. 결 론

- 1) PJB의 계면압력 설계는 전기적 특성을 고려하여 최소 2.5kgf/cm² 이상이 되어야 소정의 전기적 특성을 얻을 수 있으며 6kgf/cm² 이상은 포화 상태에 도달하기 때문에 초기면압 Po는 4 ~ 7kgf/cm²가 적당하다.^[2]
- 2) 설계 구조에 대해서 적용하는 조립 조건에 대한 Simulation 결과, 최적의 Spring력을 얻을 수 있었으며 실험을 통하여 Simulation 결과를 검증 할 수 있었다. 이와 더불어 실리콘 오일의 도포 조건에 따라서 서로 다른 계면압력 추이를 확인하였다. 조립 후 24시간까지는 스트레스콘의 자리 이동으로 보이는 미소 계면압력 변화가 있으며 24시간 이후에는 거의 압력 변화가 없음을 알 수 있었다.
- 3) Heat Cycle 시험에서 도체 온도의 변화에 따라 약 ±1kgf/cm²의 계면압력 변화가 확인되었다. 최초 1Cycle에서 스트레스콘의 자리이동에 의한 면압 변화가 다소 있었으나 2Cycle 이후부터 점차 변화가 줄어 5Cycle 이후부터는 안정되었다.
- 4) 초초고압 CV Cable용 조립형 직선 접속함의 Stress Relief Cone 계면압력 Simulation과 초기 조립특성시험 및 Heat Cycle 시험을 실시한 결과, 충분한 계면의 절연 성능을 확인 할 수 있는 최적의 압축장치 조건을 설정 할 수 있었다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] 永田, 相島. CV케이블용 플레하브接續箱의開發研究. 電氣學會全國大會. pp.7-225~6. 1996.
- [2] 勝井正規 外. 154kV CV 케이블용 플레하브接續箱의開發. 古河電氣時報. 第84号. pp.19~30. 1989.
- [3] (주)카스 편집부. 스트레인게이지식 로드셀의 원리와 응용. 계측정보. pp.1~58. 95.12.
- [4] 中西 禮, 勝森 明, 外. 275kV CV 케이블용 플레하브接續箱의開發. 電氣學會電力·에너지-部門大會. pp.223 ~228. 1995.