

초고압 케이블 중간 접속함용 실리콘 고무의 특성 고찰

고이곤, 신두성, 지용서, 윤승훈  
LG 전선 (주)

Characteristics of Silicone Rubber for EHV Cable Accessories

Euigon Ko, Doosung Shin, Eungseo Ji, Seunghoon Yoon  
LG Cable Ltd

**Abstract** - 초고압 지중 케이블을 전기적, 기계적으로 연결하는 역할을 하는 중간 접속함은 미가교 폴리에틸렌을 사용하여 현장에서 가교시키는 TMJ(tape molded Joint), 에폭시와 EPDM고무의 복합 절연구조를 가지고 있는 PJ(Prefabricated Joint), 그리고 EPDM또는 실리콘 고무를 단독으로 사용하는 PMJ(Premolded Joint)로 대표된다. 그러나 TMJ는 현장에서 가교하는 방식으로 조립 후 품질을 파악하기가 쉽지 않으며 PJ는 공장에서 미리 성형한 제품을 현장에서 조립만 하면 되는 구조이나 그 부품의 수가 많고, 이종 계면을 가지고 있는 복합 절연구조를 가지고 있어 최근에는 부품의 수도 적고 조립이 간편하며 이종 계면의 수를 최소화하여 전기적 안정성을 높인 조립형 접속함인 PMJ를 선호하는 경향을 보이고 있다. 본 논문에서는 PMJ용으로 사용되는 실리콘 고무의 절연과 반도체 계면에서의 접착력과 전기적 파괴 특성간의 상관 관계를 규명하였고 또한 실리콘 고무의 상온 및 고온에서의 AC 및 Impulse 전압의 특성 변화와 Impulse 전압의 극성효과에 대해 규명하였다.

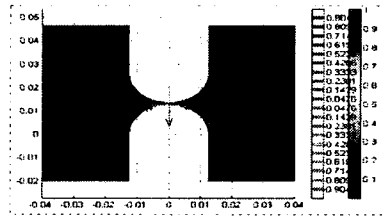


그림 1. 등전위 분포

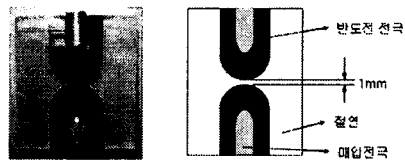


그림 2. 시편 전극 구조

1. 서 론

초고압 지중선로 접속을 위한 중간 및 종단 접속함의 재료로 사용되는 실리콘 고무는 상온 경화형과 고온 경화형으로 구분할 수가 있다. 그러나 상온 경화형 실리콘은 짧은 pot life로 인하여 품질의 산포성이 존재하는 등 제조 공정상에서의 어려움을 가지고 있고 또한 반도체 전극과의 이종성으로 인하여 점차적으로 고온 경화형으로 전환되는 추세이다.

제품의 신뢰성을 30년간 보장해야 하는 초고압 접속함의 경우 개발 초기에 재질의 선택시 그 재질의 고유 성질뿐만 아니라 이종 재질간의 결합으로부터 발생하는 여러 가지 factor들을 고려하여 설계를 할 필요가 있다. 본 논문에서는 이러한 특성들을 가장 제품에 근사한 시편을 설계, 제조하여 반도체 전극과 절연간의 계면 접착력과 전기적 성능과의 관계를 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 시편의 설계

시험을 위한 시편은 실 제품과 근접한 효과를 얻기 위하여 기존에 슈트상에서 전기적 시험을 진행했던 것과는 달리 반도체 전극이 절연부에 매입된 형태의 시편을 구성하였다. 또한 최대 전계가 전극의 선단부에 걸리도록 구형 전극을 설계하여 전극의 edge 효과 제거를 제거하여 편차가 적은 결과를 얻었으며 시편의 반도체 전극간의 간격을 일정히 유지하기 위하여 반도체 전극 내부에 매입 볼트를 삽입하여 금형에 고정된 후 사출하였다. 아래의 그림 1은 시편의 전체해석을 한 그림이며 그림2는 시편의 전극 구조를 나타내었다.

2.2 시편의 제조

시편의 제조를 위해서는 사출 설비로부터 정확히 개량하여 혼련된 주재 및 경화제를 transfer molding 방식으로 금형에 주입한 후 hot press(Toyoseiki社)를 이용하여 제조 하였다. 이러한 제조 방식은 반도체 전극의 제조에도 동일하게 적용되며 반도체 전극의 경우 전극간의 거리 유지를 위한 매입 볼트를 먼저 금형에 장착한 후 반도체 컴파운드를 사출하여 제조하였다. 또한 시편은 1차 가교 후 후가교(post curing) 조건을 적용하여 제조 하였는데 그 이유는 액상 실리콘 반도체 및 절연의 가교제에는 특정 제품의 경우 제조공정에서 hydrogen function 성분을 주재에 비해 과량으로 첨가하므로 후가교시 추가적인 가교반응도 가능하다고 알려져 있기 때문이다.

2.3 시편의 평가

2.3.1 전기적 특성과 계면 접착력과의 관계

일반적으로 PMJ는 절연과 반도체 전극간의 계면에서의 접착력이 전기적 특성을 결정짓는데 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 전기적 성능과 계면에서의 접착력의 상관관계를 규명하기 위하여 상기의 방법으로 제조된 시편을 AC 및 Impulse와 같은 전기적 시험이 끝난 후 그림 4에서 보는바와 같이 시편을 분취하여 시편의 인장력을 측정 하였다. 인장 시편은 반도체 전극과 절연부에서 파단이 일어날 수 있도록 그 부위가 가장 취약하도록 설계 되었으며 인장시편은 한 개의 전기적 시편당 4개를 얻어 그 평균값을 취하였다.

전기적 시험 조건 및 인장 시험 조건은 아래와 같으며 그림 3은 AC BDV 시험 장면을 나타내었고 그림 4는 인장 시험 장면 및 시편의 분취 위치를 표시 하였다.

□ 전기적 시험

- AC Breakdown test :0.5kV/sec의 속도로 파괴 시 까지 승압 후 측정 (유효 시료수 : 24)
- Impulse Breakdown test :105kV에서 시작하여 5kV씩 승압, 각 전압에서 3회 인가 (유효 시료수 :24)
- 전기적 시험 끝난 시편 HIROX社 현미경 (표준보정, 50배)으로 전극간 거리 측정)

□ 인장시험

시편이 작아 표준 아령형을 사용하지는 못하였으나 시험은 기본적으로 KS M6518의 인장시험의 조건을 사용하였음

- 인장 시험기 : 독일 ZWICK社
- 인장속도 : 500mm/min
- Grip to grip separation : 10mm
- 아령형 시편 두께 : 2mm (폭은 2mm로 고정, 두께는 매 시편마다 측정)

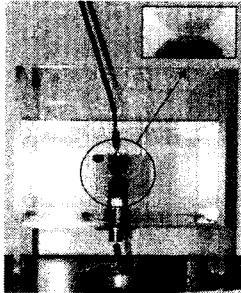


그림 3. AC BDV 시험

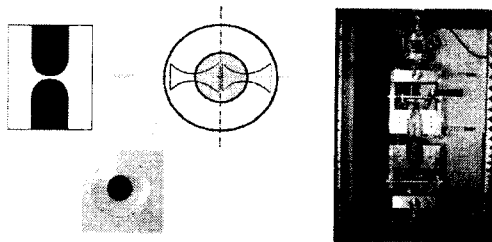


그림 4. 인장 시험

AC 및 Impulse 시험의 결과를 표 1 그리고 전기적 시험 결과와 접착력간의 상관관계를 표 2에 나타내었다.

표 1. 전기적 시험의 결과

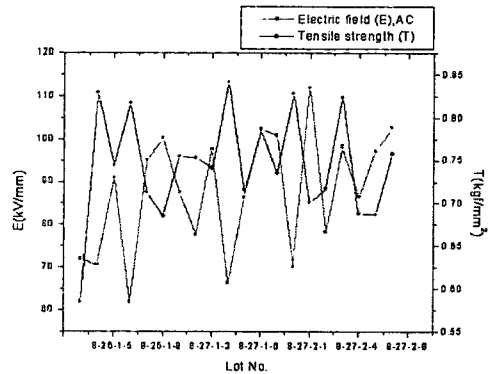
	평균(kV/mm)	표준편차
AC	87.3	13.6
Impulse	189.4	23.0

표 2 상관관계 분석

	상관계수(correlation)	P-value
AC	-0.314	0.166
Impulse	0.299	0.165

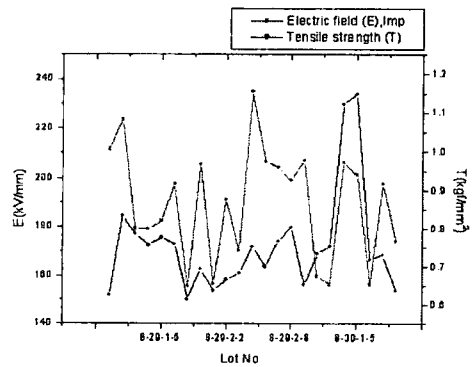
- ▶ P-value < 0.05를 상관성 유의 검증에 사용  
가설 : H<sub>0</sub> = 상관계수는 0이다  
H<sub>1</sub> = 상관계수는 0이 아니다

표 2에서 보는 바와 같이 인장강도와 전기적 성능과의 상관관계를 신뢰도 95% 구간에서 분석한 결과 예상과는 달리 파괴전계와 접착력의 상관관계는 AC 와 Impulse 두 가지 경우 모두 다 나타나지 않았다. 그림 5와 6에서 전기적 시험 결과 및 접착력 결과를 나타내었다.



▶ Pearson correlation of E and T = -0.314  
P-Value = 0.166

그림 5. 전기적 시험(AC) 및 접착력 결과



▶ Pearson correlation of E and T = 0.299  
P-Value = 0.165

그림 6. 전기적 시험(Impulse) 및 접착력 결과

하지만 위의 결과만을 보아 절연부와 반도체 전극간의 접착력과 전기적 특성간의 관계가 없다고 할 수는 없으며 그 상관관계가 나타나지 않은 것은 시편이 일정 수준 이상의 접착력을 가지고 있어 전기적 특성의 차이가 접착력이 아닌 다른 원인에 의해 기인한다고 생각할 수 있겠다.

### 2.3.2 열 정수 및 Impulse 전압의 극성 효과

일반적으로 XLPE의 경우 AC 및 Impulse의 온도계수는 약 1.2를 가진다고 알려져 있어 접속함의 설계시 이를 반영하여 설계하였으나 실리콘의 경우 열적인 안정성이 XLPE보다 우수하여 과 설계된 측면이 없지 않았다. 또한 AC전압의 경우와는 달리 impulse 전압의 경우 설계시 정극성과 부극성에 따른 설계를 하지 않고 있기 때문에 좀더 명확한 설계 data를 확보하는 차원에서 시험이 필요하게 되었다. 먼저 실리콘의 열적 특성이 전기적 성능에 미치는 영향성을 파악하기 위하여 시편을 oven에 넣어 온도를 상승 시킨 후 드릴로 시편에 작은 구멍을 뚫어 열전대를 직접 삽입하여 실제 시편의 온도를 측정한 후 전기적 시험을 진행 하였다. 결과의 정확성을 위하여 통계 처리 시 파괴 전계의 최대값 과 최소값을 제외 하였고 또한 두께의 영향성을 배제하기 위하여 두께 평균에 근접한 5개의 시편만을 선택하였다. 그 결과는 아래의 그림 7과 8에 나타내었다.

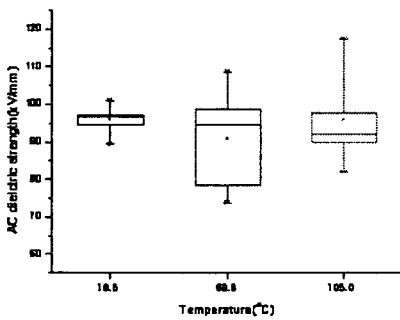


그림 7. AC 파괴 전계의 온도에 따른 특성

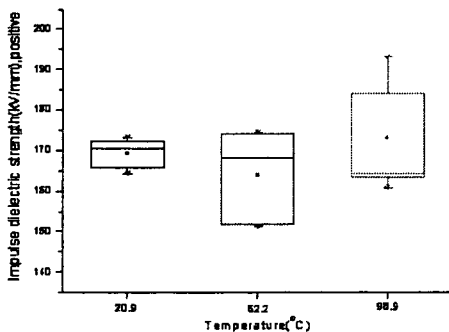
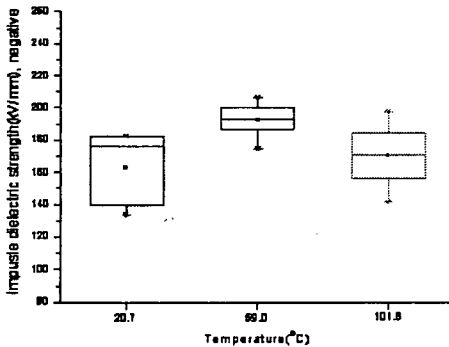


그림 8. Impulse 파괴 전계의 온도에 따른 특성

위의 결과로 미루어 AC 및 Impulse 전압에 대한 온도의 의존성은 시험 온도 범위(105°)내에서는 거의 없는 것으로 보이며 impulse 전압의 정극성(positive) 및 부극성(negative)에 대한 전기적 특성의 차이도 나타나지 않았다.

### 3. 결 론

PMJ용으로 사용되는 실리콘 고무의 절연과 반도체 계면에서의 접착력과 전기적 파괴 특성간의 상관관계 및 실리콘 고무의 상온 및 고온에서의 AC 및 Impulse 전압의 특성 변화와 Impulse 전압의 극성효과에 대해 규명한 결과 절연과 반도체 전극의 접착력과 전기적 특성과의 상관 관계는 나타나지 않았다. 이는 시편이 일정 수준 이상의 접착력을 가지고 있어 전기적 특성의 편차가 다른 원인에 의해 일어난 것으로 보인다. 또한 온도에 따른 전기적 성능의 의존성 및 Impulse 전압의 극성에 따른 전기적 성능의 차이도 거의 나타나지 않았다. 이런 결과를 바탕으로 초고압 접속함의 최적 설계가 가능하게 되었으며, 명확한 성능 예측이 가능하게 되었다.

### [참 고 문 헌]

- [1]Anil K.Bhowmick "Rubber products manufacturing technology" Marcel Dekker,Inc. 347-350, 1985
- [2]W. Lynch, "Handbook of Silicone Rubber Fabrication" Ch.2, p.23, 1978.
- [3]D. Wrobel, "Structure and Properties of Hot-Vulcanized Silicone Rubbers" in Silicones Chemistry and Technology, p.64, 1989.
- [4]S.H.Yoon "Adhesion properties and Breakdown behaviors of LSR Interface", 재료학회, 2002
- [5]E.S.JI "Breakdown properties in relation with adhesion force for polymeric material of the high voltage cable joints", 전기학회, 2002