

XLPE 케이블 접속함에 있어서 이중계면의 절연 및 유전특성

황보 승, 전 승익, *이 광철, **오 용중, ***박 대희, 한 민구
 서울대 *금성전선(주) **대한전선(주) ***원광대

Dielectric and Breakdown Characteristics of Interfaces in XLPE Cable Accessories

S.Hwangbo, S.I.Jeon, *E.J.OH, **K.L.Lee, ***D.H.Park, and M.K.Han
 Seoul Nat'l Univ., *TAIHAN Cable Co., **GLODSTAR Cable Co., ***Wonkwang Univ.,

Abstract

XLPE cable accessories are mainly consisted by the combination of various insulating materials such as XLPE cable insulation, rubber, epoxy, etc. It is important to investigate the dielectric and breakdown characteristics of the interfaces between various insulating materials. In this paper, by testing and measuring the breakdown strength, dissipation factor, volume and surface resistance and conduction current of specimens, we report the dielectric and breakdown characteristics of interfaces between various insulating materials.

1. 서론

초고압 XLPE 케이블을 접속하는 접속함은 그림.1과 같이 주로 XLPE 케이블 절연층, epoxy 절연품, 절연 및 반도체 고무(EPR)로 이루어진 스트레스콘(stress-cone)으로 구성되어 있으며 이러한 접속함의 장기적인 절연성능을 평가하는데 있어서는 epoxy 절연품과 스트레스콘의 절연층이 이루는 이중 계면과 스트레스콘내의 반도체층이 절연층과 이루는 계면에서의 전기적 절연특성과 유전특성이 매우 중요하다.

본 연구에서는 이들 계면에서의 전기적 절연 및 유전특성을 분석하기 위하여 압력, 온도 및 전압등을 변화시켜가면서, $\tan \delta$, 체적저항, 파괴전압을 측정하였으며 또한 스트레스콘의 절연/반도체층 계면에서의 전도기구를 파악하고자 전도전류를 실시간 측정하였다.

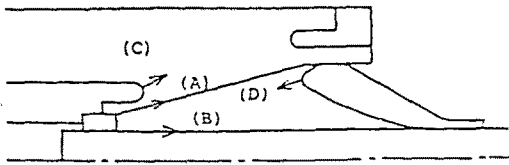


그림.1 접속함의 단면도

a : epoxy/EPR 계면, b : 케이블절연/EPR 계면
 c : Al/epoxy 계면, d : EPR(절연/반도체) 계면

2. 실험방법

본 연구에서는 절연고무와 epoxy 각각의 시편과 절연/반도체고무 및 절연고무(EPR)/epoxy의 계면을 이루어 다음의 실험을 실시하였다.

2.1 절연파괴시험

절연고무의 절연내력을 측정하기 위하여 시편의 두께를 1-3mm로 변화시켜가며 ASTM 149에 따라 교류 및 충격 파괴전압을 측정하였다. 충격전압에서는 매회 10kV로 승압하였다. epoxy의 절연내력은 전극 끝단에서의 선구파괴효과를 없애기 위해 그림.3와 같은 방법으로 전극을 삽입하고, epoxy와 전극간의 공극을 없애주기 위하여 epoxy에 silver 페인트를 칠하여 파괴전압을 측정하였다. 또한 절연고무와 epoxy 계면에서의 교류파괴전압을 Al foil(20 μ m) 침대칭 전극을 사용하여 압력과 전극간격을 변화시켜가며 실험을 실시하였다.

2.2 유전정점($\tan \delta$) 시험

케이블 접속제에 사용되는 각각의 절연부품과 이들이 계면을 이루었을때, 또한 epoxy의 filler의 변화(silica, alumina)에 따른 유전정점의 변화를 파악하기 위하여 각각 1mm 두께의 시료를 이용하여 압력(2-8N/cm²), 전압(0.25-1.5kV), 온도(상온-90 $^{\circ}$ C)를 바꾸어 가며 실험을 실시하였다.

2.3 체적저항 측정

케이블 접속제에 사용되는 절연부품중 epoxy와 절연고무의 체적 저항을 HP4321A(전극:HP16008A)를 사용하여 각각 1mm 두께의 시료를 이용하여 상온(습도:약 60%)에서 전압(0.01-1kV)을 바꾸어가며 측정(1.5,10분)을 실시하였다.

2.4 전도전류 측정

EPR 절연고무와 반도체층 계면의 전도전류 특성과 전도기구를 파악하기 위하여 30%의 습도에서 전압(0.1-1kV)과 온도(상온-70 $^{\circ}$ C)를 바꾸어가며 0-10분동안 전도전류의 변화를 실시간 계속하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 절연파괴전압 특성

그림.2은 절연고무의 두께변화에 따른 교류 및 충격파괴 전계를 나타낸 것으로 모두 절연두께의 증가에 따라 체적 효과에 의해 파괴전계가 감소함을 나타내고 있다. 이때 반도전층이 있는 경우는 교류 및 충격내전압 모두 약간씩 감소하는 것이 나타났으며 이는 전극표면의 거칠기 또는 계면에서의 공극에 의한 것보다는 반도전층에서의 전하주입이 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 그림.3은 epoxy의 교류파괴전계를 전극구성과 파괴부위를 함께 나타낸 것으로 파괴부위가 고무 분포한 것으로보아 전극의 형상설계가 적합함을 알 수 있으며, 또한 epoxy의 교류파괴전계는 EPR 보다 높은 것으로 보아 상대적으로 절연특성이 좋음을 알 수 있다.

그림.4는 Al foil(20 μ m)의 칩대칩 전극을 사용했을때, 일정 압력(0.1N/cm²)에서 전극간격(5-30mm)의 변화에 따른 EPR/epoxy 계면에서의 교류파괴전계의 변화를 나타낸 것으로 처음 5-15mm사이에서는 파괴전계가 감소하였으나 그 이상이 되면 거의 일정한 값(약 1 kV/mm)을 나타내었다. 그림.5는 10mm의 전극간격에서 압력에 따른 파괴전계를 나타낸 것으로 1.5N/cm²까지는 압력의 증가에 따라 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 이것으로부터 계면에서의 전기적 파괴특성은 압력에 거의 비례함을 알 수 있다.

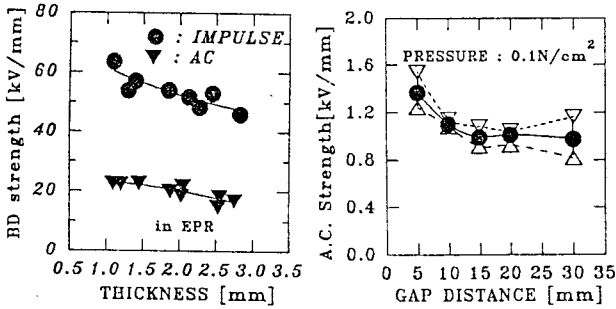


그림.2 EPR의 파괴전계 그림.4 epoxy/EPR에서의 교류파괴전계

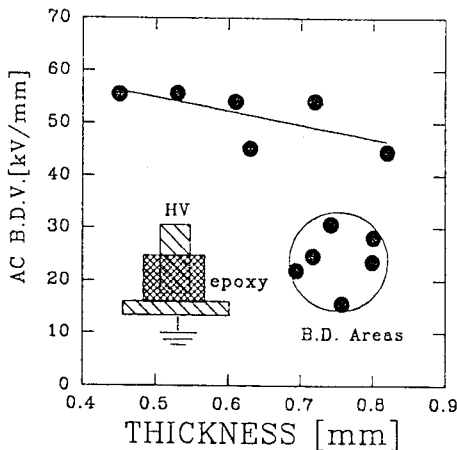


그림.3 epoxy의 교류파괴전계

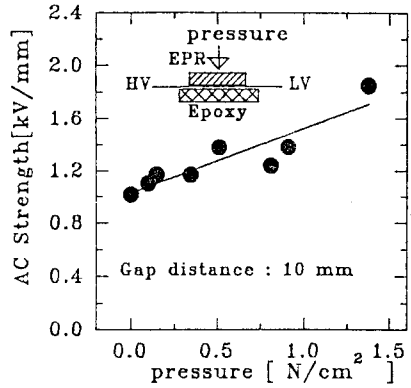


그림.5 epoxy/EPR 교류파괴전계

3.2 유전정접(tan δ) 특성

그림.6의 a,b,c는 EPR의 절연/반도전층에서 유전정접의 압력, 전압 및 온도 의존성을 나타낸 것으로 모든 경우에 있어서 tan δ 는 반도전층이 있을때 상대적으로 컷으며 전압, 온도 및 압력의 증가에 따라 반도전층의 유무에 관계없이 그 변화비율이 비슷하였으나 초기 압력의 증가에 따라서는 상대적으로 큼을 알 수 있다. 이것으로부터 절연층에 반도전층이 있을경우, 약 4N/cm²이상의 계면압력이 필요함을 알 수 있다.

그림.7의 a,b는 Epoxy(silica)만 있을 때와 EPR과 계면을 이루었을때의 일정압력(4N/cm²)에서 유전정접의 전압 및 온도 의존성을 나타낸 것으로 EPR의 존재에 의하여 tan δ 는 2배정도 증가하였으며 전압의 증가에 따라서는 변화가 거의 없었으나 온도의 증가에 따라서는 모두 지수함수적으로 증가하였다.

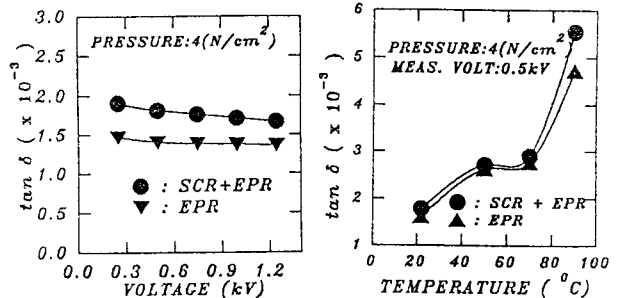
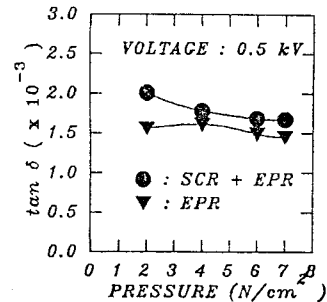


그림.6 EPR(절연/반도전) 계면에서의 tan δ
(a : 압력, b : 전압, c : 온도)

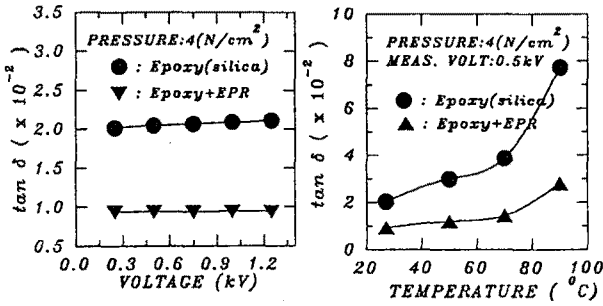


그림.7 epoxy/EPR 계면에서의 tan δ (a : 전압, b : 온도)

3.3 체적저항 특성

그림.8은 전압과 측정시간의 변화에 따른 EPR과 epoxy의 체적 저항을 나타낸 것으로 낮은전압에서는 체적저항이 낮아짐을 나타내고 있는데 이는 측정전류치가 너무 작아 정확한 측정이 힘든 것으로 누설되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 epoxy의 경우에 있어서는 1분에 측정한 값과 5분 이상에서 측정한 값과의 차이가 많이 발생하는 것을 알 수 있는데 이는 epoxy인 경우, 측정시점이 1분인때에는 충전전류가 상대적으로 많이 흐르기때문인 것으로 생각된다. 10분에서의 체적저항은 epoxy가 EPR보다 약 10배정도 큰 값을 갖는 것을 나타내고 있다. 일반적으로 재료의 시정수 τ 는 $\epsilon \times \rho$ (유전률 \times 체적저항률)에 비례하기 때문에 위 측정결과로 보아 epoxy의 시정수가 EPR의 보다 훨씬 크기 때문에 1분에서 측정할 경우 epoxy에는 충전전류가 많이 흐르기 때문에 저항값이 작게 측정됨을 확인할 수 있다.

3.4 전기전도 특성

EPR의 절연/반도전 계면에서의 전기전도기구를 파악하기 위하여 전도전류의 측정을 행하였다. 그림.9는 0.5kV의 인가전압에서 온도의 변화(상온, 50°C, 70°C)에 따른 전도전류의 변화를 나타낸 것으로 반도체가 있는 경우에 전도전류가 컸으며, 측정시간의 증가에 따라 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 정확한 전도전류의 측정을 위해서는 어느정도의 이상의 안정화 시간(약 200초)이 필요함을 알 수 있다.

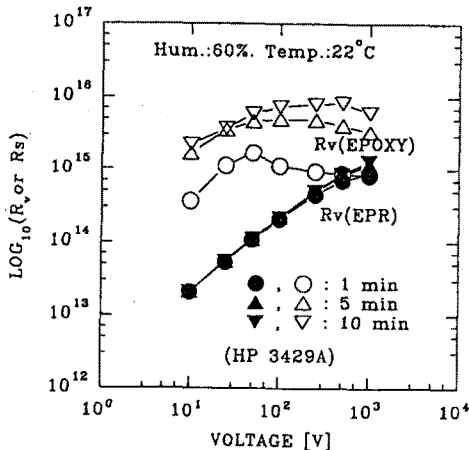


그림.8 EPR과 epoxy의 체적저항

이러한 전도전류 측정값으로부터 전도기구를 파악하기 위하여 전류밀도 J 와 절대온도 T 와의 관계로 다시 나타낸 것이 그림.9로서 J/T^2 와 $1/T$ 는 선형관계를 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 관계식은 표.1에 나열한 전기전도기구중 Schottky emission current의 관계식을 만족시키는 것으로서, EPR의 절연/반도전 계면에서의 전기전도는 계면에서의 공간전하에 의한 효과보다는 절연고무만 있는 경우와 마찬가지로 온도가 증가함에 따른 금속전극과 유전체 사이의 열적전자 방출에 지배되는 전극효과에 기인한 것임을 알 수 있다. 그러나 이와같은 현상은 그림.10과 같이 재료자체의 물성변화, 또는 재료자체에 결함이 있는 경우에는 성립하지 않으며 이때는 반도체층에 의한 전하의 주입이 증가하여 전도전류가 증가하는 것으로 생각할 수 있다.

전도기구	Field Dependence
Schottky	$J = AT^2 \exp\left[-\frac{\phi}{KT}\right] \exp\left[\beta \cdot \frac{\sqrt{E}}{KT}\right]$
Tunneling	$J = AE^2 \exp(-B/E)$
Poole-Frenkel	$J = AT^2 \exp\left[-\frac{\phi}{KT}\right] \exp\left[\frac{\beta_{PF}\sqrt{E}}{KT}\right]$
SCLC	$J = \frac{9\epsilon_r \epsilon_0 q n^2 V^2}{8L^3}$
전자사태	$J = J_0 \exp(aT)$
Hopping	$J = J_0 \sinh(eEa/2KT)$

표.1 전기전도기구의 종류 및 관계식

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 절연고무(EPR)과 epoxy의 계면에서의 연면파괴전압은 약 1kV/mm이었으나 압력이 증가함에 따라 직선적으로 증가하는 특성을 나타내었다.
- 2) EPR 절연층을 반도체층과 결합함에 의해 tan δ, 전도전류는 증가하였으나 파괴전압, 체적저항은 감소하였다. 또한 전류밀도(J/T^2)와 절대온도($1/T$)의 관계는 직선적이었으나 온도의 증가(70°C이상)에 따라 불안정한 특성을 나타내기도 하였다.
- 3) epoxy의 유전정점은 전압 및 온도의존성은 거의 없었으나 온도에 따라서는 지수함수적으로 증가하는 특성을 나타내었으며 EPR 절연층과 결합하였을때도 비슷한 특성을 나타내었다.

참고문헌

1. Matsuo et al, Showa Electric Wire and Cable review, Vol.31, No.2, 1981.
2. Suzuki et al, 1992 National Convention Record I.E.E.Japan, 1458, 12-89, 1992.

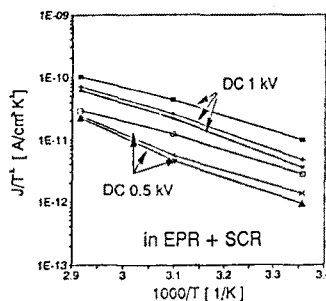


그림.9 그림.10 EPR(절연/반도전)에서 전류밀도와 온도의 관계

