

전극금속재질에 따른 XLPE Film의 전기전도특성

이홍규, 박영국, 신태수, 임기조, 김용주*
 충북대학교 공대 전기공학과, *충주대학교 제2공학부 전기공학과

Electrical Conduction Characteristics of XLPE Film
 According to Electrode Metals

H.G.Lee, Y.G. Park, T.S. Shin, K.J.Lim, Y.J.Kim

Dept. of Electrical Eng. Chungbuk Nat'l Univ., *Dept. of Electrical Eng. Chungju Nat'l Univ.

Abstract - Many kind of factors have influence on the electrical properties of polymer such as mechanical stress, impurity, additives, chemical blend, interfacial phenomena and so on. In this study, we lay emphasis on interfacial phenomena which is important part in insulating design of power cable.

The electrical conduction characteristics of XLPE film are investigated as a function of different electrode materials in MIM Interfaces.

1. 서 론

최근들어 송전전압의 초고압화, 전력설비의 대용량화로 송배전계통의 절연재의 성능향상이 요구되고 있는바 이에 따른 고분자재료의 전기적 물성을 검토하는 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다. 그중에서 가교폴리에틸렌은 양호한 유전특성, 내트리성, 기계적 특성등을 갖고 있어 배전용 케이블의 절연재료로서 널리 상용화되어 있다. 그럼에도 불구하고 고분자특유의 결정부와 비정질부가 공존하는등 복잡한 구조를 갖고 있고 제조과정에서 혼입되는 불순물이나 첨가제, 화학적 불렌드, 다양한 계면구성, 기계적 응력등에 의해 절연성능에 큰 영향을 미치고 있는 실정이다[1][2][3]. 그러므로 그 이용의 확대를 위해 각각의 요인에 따른 분리 고찰이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 전력용 케이블의 주절연재료로 상용화되어 있는 가교폴리에틸렌에 대해 절연설계시 중요한 부분인 MIM(Metal-Insulator-Metal)계면현상에 중점을 두어 먼저 실험에 사용된 XLPE Film의 결정구조 및 결정화도를 분석하기 위해 X선회절분석을 하였고 또한 금속재질이 상이한 전극구조하에서 금속재질이 전기전도에 미치는 영향을 검토한후 주전도메카니즘을 규명하였다.

2. 시편제작 및 실험방법

실험에 사용된 시편은 금도교역에서 수입한 펠렛상의 Siloxene XLPE를 유압식 Hot press를 사용하여 190°C, 250kgf/cm²의 압력으로 5분간 가열가압하여 두께 100~130μm의 Film으로 제작한후 진공증착장치를 사용하여 Film의 상, 하부에 Al, Cu, Ag의 3종류의 금속을 진공증착하여 Table 1과 같이 5종류의 시편을 제작하였고 연면방전에 따른 측정결과와 왜곡을 방지하기 위해 가드링 전극법을 채용하여 Fig.1과 같이 MIM형태로 제작하였다.

또한 시편의 결정구조 및 결정화도를 알아보기 위해 X선 회절분석을 하였으며 주파수 변화에 따른 XLPE의 비유전율을 알아보기 위해 Impedance Gain/Phase Analyzer(HP4194A)를 이용하여 시편의 비유전율을 측정하였다. 그리고 전극재질이 다른 위의 5종류의 시편을 실리콘유(100Cst)중에 넣고 직류전압을 인가한후 10분후의 전류값을 미소전류계(Keithley 617)로 측정

하였으며 전기오븐을 사용하여 25°C, 50°C, 70°C, 90°C로 온도를 가변시키고 전계상승에 따른 전기전도특성을 검토하였다.

Table 1. 제작된 시편의 종류

Metal ₁	Insulator	Metal ₂
Counter Electrode	XLPE Film	Measuring Electrode & Guardring Electrode
Al		Al
Al		Cu
Al		Ag
Cu		Al
Ag		Al

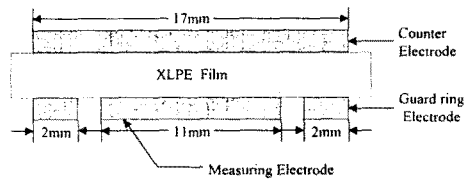


Fig.1 증착된 시편의 형태

3. 결과 및 고찰

3.1 기초물성의 검토

실험에 사용된 시료의 X선 회절분석 결과 Fig.2와 같이 주피크는 2θ가 21.7°, 24.7°였으며 결정면은 (110), (200)을 나타내고 있다. 또한 Natta의 방법을 적용하여 회절각 2θ와 회절강도 I와의 관계로부터 각각 비정질부(2θ=19.3°), 결정면 (110),(200)의 피크 면적을 구한 다음 식(1)에 의거 결정화도(ψ)를 구한 결과 시료의 결정화도는 58.5%였다.

$$\psi = \frac{I_c}{I_a + I_c} \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서, I_a : 비정질부 면적, I_c : 결정부의 면적이다.

또한, Impedance Analyzer(HP4194A)를 사용하여 상용주파수인 60Hz에서 10MHz의 주파수범위까지 가변시키면서 비유전율을 측정된 결과 2.2~2.1이었다. 따라서 가교폴리에틸렌은 넓은 주파수대역에서도 안정적인 유전특성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

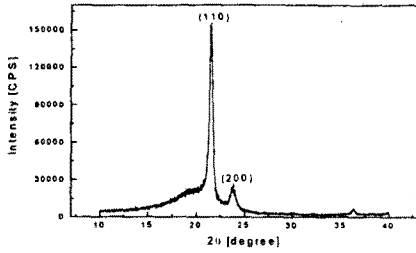


Fig.2 시편의 XRD회절패턴

3.2 XLPE의 전기전도에 미치는 전극재질의 영향

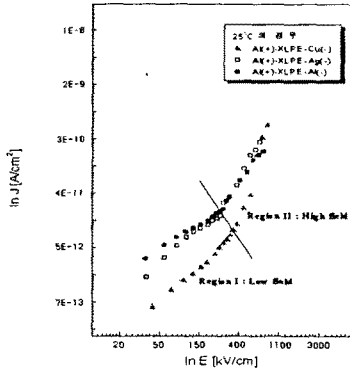


Fig.3 전극금속재질에 따른 XLPE의 lnJ : lnE 곡선

Fig.3은 전극금속재질을 Al, Ag, Cu로 달리하였을 경우의 J-E curve를 나타낸 것으로 Region I에서는 전류밀도 J가 인가전계 E에 비례하는 특성을 보이고 있는데 이것은 시료내부의 가동이온 또는 偶存電子の 기여로 Ohmic전도전류가 흐르는 것으로 생각되며 Region II에서는 일정전계이상에서 전류밀도 J가 인가전계 E의 n승에 비례하여 비선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 저전계 특성에서 고전계 특성으로 이행하는 임계전계는 음극측의 전극금속재질이 Cu > Al > Ag순으로 높음을 알 수 있었다.

3.3 XLPE의 전기전도에 미치는 온도효과

Fig.4은 Al-XLPE-Al시편의 온도변화에 따른 J-E curve를 나타낸 것으로 저전계 영역에서는 Ohmic전도 특성을 보이고 고전계로 이행함에 따라 전도전류가 비선형적으로 증가되는 경향을 보이며 저전계에서 고전계로 전이하는 임계전계가 온도증가에 따라 고전계측으로 이동하는 것을 알 수 있었다.

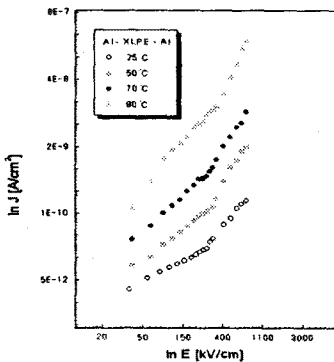


Fig.4 온도상승에 따른 Al-XLPE-Al시편의 lnJ : lnE곡선

2.4 이온성 전도에 대한 가능성 검토

이온성 전도에 대한 가능성을 검토하기 위해 식(2)의 이온성 전도전류식(4)(5)을 이용하여 Al-XLPE-Al시편의 ln J와 E를 Curve Fitting한 결과를 Fig.5에 나타내었다.

$$j = 2enave^{-U/kT} \sinh \frac{eEa}{2kT} \quad (2)$$

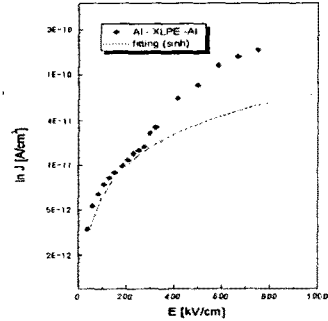


Fig.5 Al-XLPE-Al시편의 lnJ : E곡선

Fig.5에서도 알 수 있듯이 저전계 영역에서는 약간 일치하다가 고전계로 이행할수록 크게 상이함을 알 수 있다. 따라서 이온성 전도는 아닌 것으로 생각되며 Y. Inuishi[6] 또는 T. Mizutani[7]의 연구에서도 저전계 영역의 전도를 전자성 전도로 보고하고 있다.

3.5 전자성 전도에 대한 가능성 검토

앞서 Fig.3에 나타난 바와 같이 저전계영역의 전도전류는 선형적인 Ohmic특성을 보이는데 이것은 bulk내의 偶存電자가 Carrier가 되는 전자성 전도로 생각되며 수송과정으로는 에너지대 모델, 호핑모델로 설명이 가능하다.

3.6 고전계영역에서 쇼트키방출전류 검토

쇼트키 방출전류의 가능성을 검토하기 위해 식(3)을 이용하여 고전계영역에서 쇼트키 방출전류의 가능성을 검토하였는데 ln J와 \sqrt{E} plot의 기울기로부터 비유전율을 계산한 결과 Fig.6의 Al-XLPE-Al 시편의 경우 평가된 비유전율값이 1.24~5.3이었으며, Al-XLPE-Ag시편의 경우도 1.83~3.23이었다. 따라서 실제의 비유전율 2.2와는 차이가 나므로 쇼트키방출전류로 보는 것은 타당치 않다.

$$j = AT^2 e^{(\beta_s E^{1/2} - \phi_b)/kT}, \beta_s = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon}} \quad (3)$$

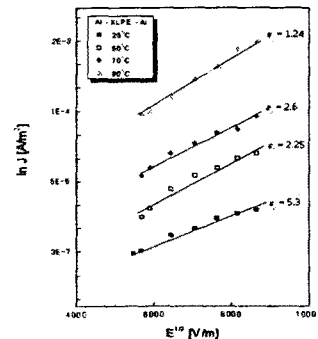


Fig.6 고전계영역에서 Al-XLPE-Al시편의 쇼트키 플롯

3.7 저전계영역에서 활성화에너지 검토

저전계영역(200kV/cm이하)에서 활성화에너지는 식(4)의 전류와 절대온도의 역수의 관계로부터 알 수 있다.

$$I \propto e^{-U_a/kT} \quad (4)$$

여기서, U_a : 활성화에너지, k : 볼츠만 상수, T : 절대온도이다.

Fig.7의 $\ln I$ 와 $1/T$ plot으로부터 기울기를 구하여 활성화 에너지를 평가한 결과 0.8~0.98eV였다.

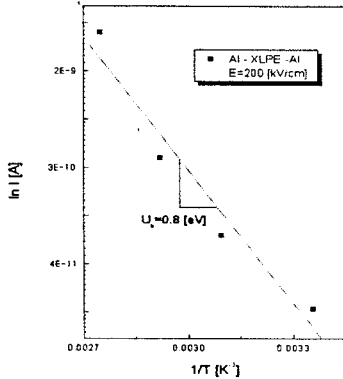


Fig.7 저전계영역에서 Al-XLPE-Al시편의 아래니우스 플롯(E=200kV/cm)

3.8 고전계영역에서 공간전하제한전류 검토

식(5)를 이용하여 고전계영역에서 공간전하제한전류의 가능성을 검토하였다.

$$J = \frac{9}{8} \epsilon_0 \epsilon_r \mu \frac{V^2}{d^3} : \text{Child's law} \quad (5)$$

여기서, ϵ_r : 비유전율, μ : 이동도, d : 두께이다. Fig.8에 나타난바와 같이 $\ln J$ 와 $\ln E$ 의 plot으로부터 구한 기울기가 Al-XLPE-Al시편의 경우 2.15~3.47의 값을 가지며 Al-XLPE-Ag시편에서는 2.56~3.25의 값을 가짐을 알 수 있는데

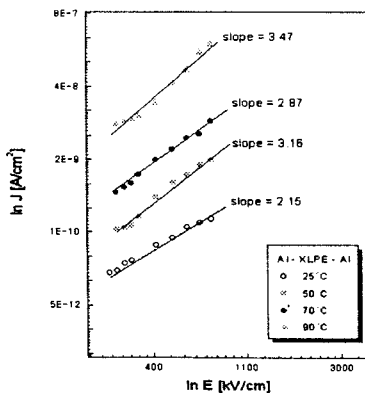


Fig.8 고전계 영역에서 Al-XLPE-Al시편의 $\ln J : \ln E$ 곡선

이것은 트랩의 분포 및 주입캐리어의 종류(전자, 정공)에 따라 이론 기울기 2보다 커질 수 있는 점을 감안하

다면 고전계 영역의 전기전도기구는 공간전하 제한전류로 생각되며 전기전도특성에 미치는 온도효과 실험결과에서 보듯이 저전계특성에서 고전계특성으로 전이되는 임계전계가 온도의 증가에 따라 증대되고 있는데, 이 임계전계는 V_{TFL} (Trap Filled Voltage)로 생각되며 온도가 증가할수록 트랩에서 여기되는 전자가 많기 때문에 트랩이 완전히 충전되는 전압은 높아질 것으로 생각되며, Fig.3에서 볼 수 있듯이 $V_{TFL}/Cu > V_{TFL}/Al > V_{TFL}/Ag$ 순으로 금속의 일함수가 낮을수록 전극으로부터 전자방출이 용이해져 트랩을 충전시킬 수 있는 전압이 낮아지는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실록산 가교 폴리에틸렌 필름의 기초물성 및 전기전도특성과 전극금속재질이 전기전도에 미치는 영향등을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) X선 회절분석결과 주피크는 결정면 (110), (200)이고 결정화도는 58.5[%]였으며, 시료의 비유전율은 2.2~2.1이었다.
- 2) 전극금속재질이 다른 Al, Ag, Cu에 대한 전기전도를 알아본 결과 저전계 영역에서는 금속재질에 영향을 받기보다는 시료내부의 偶存電子的 기여로 Ohmic전도전류가 흐름을 확인할 수 있었고 수송과정은 에너지대 모델 또는 호핑모델로 설명이 가능함을 알 수 있었다.
- 3) 저전계 영역에서 평가된 활성화에너지는 0.8~0.98eV였다.
- 4) 일정전계이상에서 전도전류는 E의 n승에 비례함을 보였고 n=2.15~3.47의 범위로서 주전도메카니즘이 공간전하 제한전류임을 확인할 수 있었다.
- 5) 전도전류의 온도효과 실험결과 저전계특성에서 고전계 특성으로 이행하는 임계전계가 온도가 상승할수록 증가하였는데 이 임계전계는 트랩충만전압으로 보여지며 이 전압은 온도가 상승할수록 증가하였는바 고전계 전도기구가 공간전하 제한전류임을 뒷받침하는 근거이다.
- 6) 음극측 전극금속 재질을 Al, Ag, Cu로 바꿔 전기전도에 미치는 영향을 고찰한 결과 $V_{TFL}/Cu > V_{TFL}/Al > V_{TFL}/Ag$ 순으로 금속의 일함수가 낮을수록 전극으로부터 전자방출이 용이해짐에 따라 트랩충만전압이 낮아지는 것으로 이해할 수 있었다.

References

- [1] S. Yoda et al, S. Shimizu, K. Miyairi, "Effect of Electrode Metals on Electrical Conduction in Polyimide Thin Film Prepared by Vapor Deposition Polymerization", International symposium on Electrical Insulating Materials, 1995.
- [2] M. Ieda, "Electrical Conduction and Carrier Traps in Polymeric Materials", IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. 19, No.3, 1984.
- [3] K. Miyairi et al, "Influence of Electrode Materials on Electrical Conduction in Polyphenylene Sulfide Film in the High Temperature Region", T. IEEJ Vol.114-A, No.12, 1994
- [4] 家田正之 外3, "誘電體現象論", 昭和48年
- [5] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, "Electrical Degradation and Breakdown in Polymer", P-P, 1992.
- [6] Y. Inuishi, "High Field Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics", IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol.15, No.3, 1980.
- [7] T. Mizutani, "High Field Conduction and Breakdown in Insulating polymers", T. IEE Japan, Vol.112-A, No.3, 1992.