

전력케이블의 가교폴리에틸렌과 반도체 재료의 전기적 특성

이주홍¹, 김향곤²¹동신대학교, ²전기안전연구원

Electrical properties of XLPE and Semiconductor Materials for Power Cable

Ju-Hong Lee¹, Hyang-Kon Kim²¹Dongshin University, ²Electrical Safety Research Institute

Abstract - In this paper, we researched the dielectric properties and voltage dependence on slice XLPE sheet from 22[kV] and 154[kV] power cable. We studied effects for impurities and water for semiconductor shield through a dielectric properties experiment to estimate performance of insulating materials in power cable. Capacitance and $\tan\delta$ of 22[kV], 154[kV] were 53/43[pF] and 7.4×10^{-4} , 2.1510^{-4} . In these results, the trend was increased with the increase of temperature. The $\tan\delta$ of XLPE/ semiconductor layer was increased as compared with that of XLPE. Dielectric properties reliability of $\tan\delta$ was small. Also, To improve mean-life and reliability of power cable in this study, we have investigated chemical properties showing by changing the content of carbon black that is semiconductive additives for underground power transmission. Specimens were made of sheet form with the three of existing resins and the nine of specimens for measurement. Chemical properties of specimens was measured by FT-ATR (Fourier Transform Attenuated Total Reflectance). The condition of specimens was a solid sheet. We could observe functional group (C=O, carbonyl group) of specimens through FT-ATR. From these experimental result, the concentration of functional group (C=O) was high according to increasing the content of carbon black. We could know EEA was excellent more than other specimens from above experimental results.

8 ~ 12년 정도에서 사고가 빈번하게 발생하고 있으며 이러한 사고는 계속적으로 증가하는 추세이다. 전력케이블의 절연은 고분자 화학의 발전과 함께 절연성능, 내열성이 우수한 가교 폴리에틸렌을 사용하여, 이것은 절연체로 사용한 CV (혹은 XLPE) 케이블(Cross-linked Polyethylene polyvinyl Chloride Sheath Cable)이 개발되어졌다 [4]. 이 XLPE 전력케이블은 포설, 접속, 보수 등이 용이하여 수요가 급격히 증가하고 있으며, 배전만이 아니고, 송전용 케이블로서 이용되고 있다. XLPE 전력케이블은 안정된 절연특성과 함께 많이 포설되어 왔으나, 고분자 재료의 열화 현상이 문제가 되고 있다.

XLPE 전력케이블은 수트리의 발생으로 전기적인 특성이 급격하게 저하되는 것으로 판명되고, 절연두께가 얇은 전력케이블에서는 현저하게 나타나며, 심각한 문제로 되어 왔으나, 수트리 문제가 표면화되어져 있다. 따라서 본 논문은 계면을 갖는 XLPE 시트의 유전 특성에 대하여 각각 평가하였다. 본 논문에서는 22[kV], 154[kV] XLPE 전력케이블의 폴리에틸렌과 반도체층을 각각 시이트로 제작하고, 계면을 갖는 구조를 XLPE/반도체층, XLPE/수분/반도체층으로 준비하였다. 또한 시료의 유전특성과 전압의존성등을 각각 고찰하고, XLPE내의 유전손실에 의한 손실전력을 각각 계산하였다. 또한, 전력케이블의 수명연장 및 신뢰성을 확보하기 위해 반도체 재료로 사용 중인 시편과 측정용 시편을 제작하여 FT-ATR 실험을 통해 화학적 특성을 측정하여 신뢰성 확보를 검토하였다.

1. 서 론

최근 전력수요의 증가와 함께 전력설비의 초고압화와 대용량화가 진행되고 있으며, 전력수송을 위한 송배전에 있어서 전력케이블의 수요가 급격하게 확대되고 있다. 특히, 대도시에 있어서 송배전의 지중화는 필수적으로 전력 케이블의 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 전력케이블은 지금까지 도시내에서 배전급에 많이 사용되어 왔으나, 과밀도시의 전력수요를 공급하기 위하여 송전을 지중으로 전력케이블을 포설하고 있다 [1-3].

국내의 경우 케이블의 예상수명 보다 못 미치는

2. 실험 방법

2.1 시편 제작

22[kV], 154[kV] XLPE 전력케이블을 준비하고, 케이블로부터 두께 0.4 ~ 1.2[mm]의 범위로 XLPE와 반도체층 시이트를 각각 제작하였다. XLPE 시이트의 유전특성은 유전특성 측정 장치 (Tettex 2882)를 사용하였고, 전극구조는 평판전극의 주 전극/접지전극/하부전극으로 구성되어져 있으며, 시료의 가열은 주 전극 내의 히터를 사용하였다. 측정조건으로 압력은 3N/cm²인가 전압은 250, 500, 750, 1000[V]의 범위로 하였다.

본 논문에서는 EVA (Ethylene Vinyl Acetate, 현대석유화학), EEA (Ethylene Ethyl Acrylate, ATOFINA) 및 EBA (Ethylene Butyl Acrylate, Mitsui Dupont)를 기본재료로 사용하였는데 이들 재료의 조성비는 표 1과 같다. 표 1에서 보는 바와 같이 본 연구에서는 도전성 카본블랙의 함량을 변수로 하였으며 그 함량은 각각 20%, 30%, 40%이었다. 그리고 편의상 측정용 시료를 #숫자, 기저수치를 A숫자로 명명하였다.

2.2 실험 방법

시편들의 카본블랙의 함량에 따른 작용기 (C=O, 카보닐기) 검출은 표면반사 적외선분광기 (FTATR, SensIR Technologies)에 의해 진행되었다. FTATR은 고분자의 표면이나 접착제 종류 또는 스폰지 재료와 같이 dispersive IR에서는 처리하기 힘든 시료의 측정에 매우 유용하다.

원리를 간단히 살펴보면, Interferometer로부터 나온 IR beam은 KRS5나 ZnSe, Ge과 같이 굴절율이 큰 crystal에 투과된다. Crystal은 양면에 접촉시킨 시료에 비해 굴절율이 크므로 시료와의 경계면에서 내부반사를 일으키며 진행한다. 이때 반사는 시료와 Crystal의 경계면에서 일어나는 것이 아니라, 입사파장의 약 1/4만큼 투과된 상태에서 일어나기 때문에 이로 인해, 시료와 입사 및 복사전간의 상호 작용에 따른 파장의 흡수를 일으킨다. 일반 transmission spectra는 빛이 시료와 한번 접촉하는데 반해 ATR법은 여러번 내부반사를 일으키므로, 감도가 좋은 spectrum을 얻을 수 있다.

3. 결과 및 검토

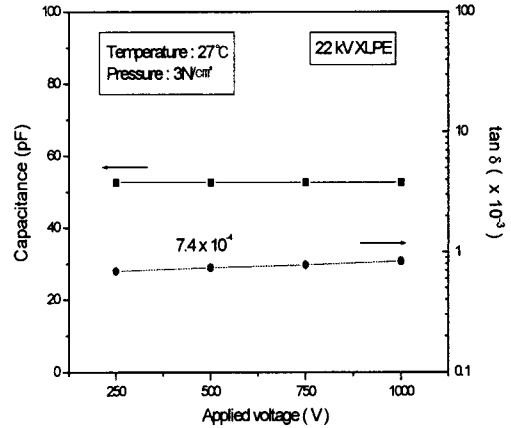
3.1 22[kV] XLPE 시이트의 유전특성

절연재료의 전기적인 특성은 절연특성, 유전특성, 파괴특성으로 구분되어서 각각 평가에 응용되고 있으며, 열화 및 전기특성 평가에 있어서는 유전특성이 응용되고 있다. 유전특성은 $\tan\delta$ 와 온도 의존성 등이 요구되고 있다. 본 논문에서는 22[kV]급과 154[kV]급의 XLPE의 유전특성을 평가하였다.

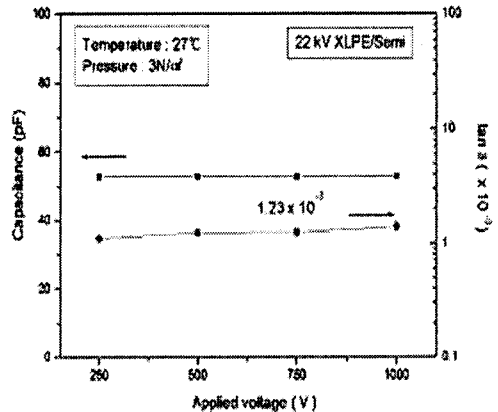
그림 1은 압력 3[N/cm²]와 온도 27[°C]에서 유전특성의 전압의존성을 나타내고 있다. 유전특성은 $\tan\delta$ 와 정전용량을 측정하였다. 그림 1에서 알 수 있듯이 500[V]에서 $\tan\delta$ 는 7.4×10^{-4} 를 나타내고, 정전용량은 52.7[pF], 유전율은 2.23으로 각각 측정되었다. 이같이 유전특성의 영향을 미치는 것은 전압보다 온도의 영향이 크게 미친다는 것을 볼 수 있다.

그림 2는 XLPE에 반도체층을 접친 XLPE/반도체층의 시이트에 대하여 $\tan\delta$ 와 정전용량의 전압의존성을 나타내고 있다. 이결과로부터 XLPE에 비해서 $\tan\delta$ 는 증가된 1.23×10^{-3} 를 나타내며, 정전용량은 XLPE와 동일한 52.7[pF]로 얻어졌다. 이때의 복합 유전율은 2.24로 계산되었으며, 반도체층은 절연물

의 $\tan\delta$ 를 다소 저감시키는 역할을 하고 있는 것을 알 수 있다.



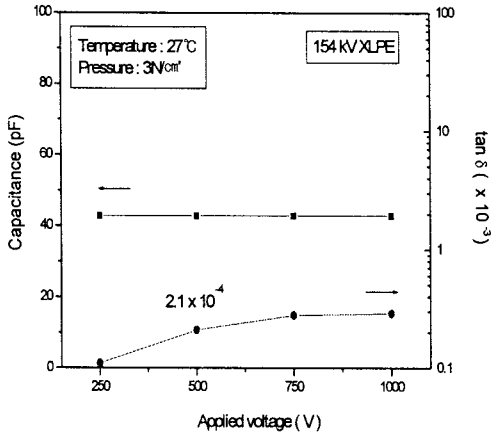
<그림 1> 22[kV]급 XLPE에서 유전특성의 전압의존성



<그림 2> 22 [kV]급 XLPE/반도체층에서 전압의존성

3.2 154[kV]급 XLPE 시이트의 유전특성

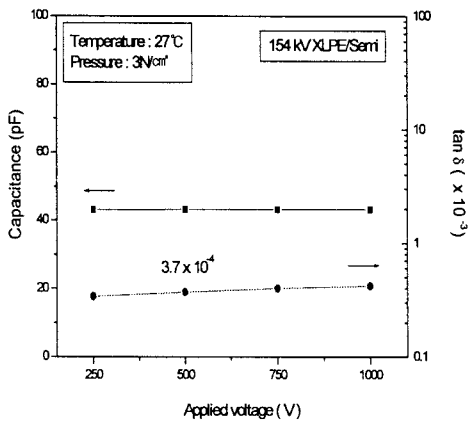
154[kV]급 XLPE는 기존의 XLPE에 비하여 이물질의 혼입이 없이 진공으로 보관되어져 사용되고 있다. 본 논문에서는 케이블의 절연체로부터 시이트를 제작하여 유전특성을 조사하고, 반도체층 및 물을 도포하였을 경우의 전기적 특성을 각각 비교 검토하고자 한다. 그림 3은 154[kV]급 XLPE의 유전특성과 전압의존성을 나타내고 있다. 이 경우의 측정조건은 22[kV]급 XLPE와 동일하다. 500 [V]에서의 $\tan\delta$ 와 정전용량은 2.15×10^{-4} 과 43 [pF]이다. 또한 인가전압의 증가와 함께 $\tan\delta$ 는 다소 증가를 보이나, 정전용량은 일정하고, 유전율은 2.24로 계산되었다. 154[kV] XLPE의 유전특성은 22 [kV]급에 비해서 $\tan\delta$ 는 낮으나, 유전율은 거의 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다.



〈그림 3〉 154[kV]급 XLPE에서 유전특성의 전압의존성

그림 4는 XLPE/반도전층의 유전특성과 전압의존성을 나타내고 있다. $\tan\delta$ 와 정전용량은 1.2×10^{-3} 과 43[pF]로 얻어지고, 유전율은 2.25로 계산되었다. 이 결과로부터 154[kV]급 XLPE의 경우에도 반도체층의 삽입으로 $\tan\delta$ 가 5배 정도 증가를 보이며, 유전율은 다소 증가를 나타내었다. 그러나 인가전압의 증가와 함께 $\tan\delta$ 와 정전용량은 XLPE와 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

이상과 같은 결과로부터 XLPE의 $\tan\delta$ 는 $10^{-3} \sim 10^{-4}$, 유전율은 2.2 ~ 2.5 범위에 있음을 확인하였다. 또한 계면과 물의 도포가 절연체에 존재해도 유전특성은 큰 증가를 보이지 않고 있음을 알았다.



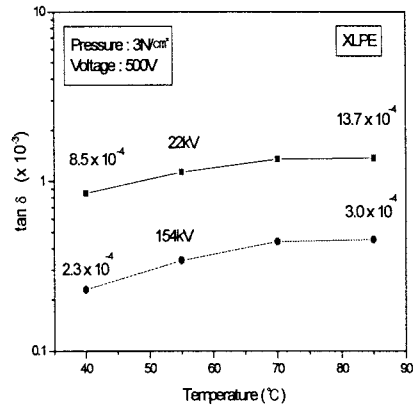
〈그림 4〉 154[kV]급 XLPE/반도전층에서 전압의존성

3.3 유전특성의 온도 의존성

그림 5는 22[kV], 154[kV] XLPE 시이트의 $\tan\delta$ 의 온도 의존성을 나타내고 있다. 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 $\tan\delta$ 는 온도의 증가와 함께 증가하는 경향을 보이고 있으며, 실온보다 높은 실제의 케이블에서 절연체의 큰 유전손실이 발생되어 절연열

화를 가속시키는 것으로 절연성능의 평가로서 중요한 결과로 사료된다. 절연재료에 있어서 $\tan\delta$ 의 의존성은 장기 신뢰성을 평가하는 항목으로 넓게 요구되며, 각 시료의 온도 의존성의 결과는 다음과 같이 얻어졌다.

22[kV]급 시이트의 $\tan\delta$ 는 40[°C]에서 8.5×10^{-4} , 70[°C]에서 1.37×10^{-3} 으로 증가를 나타내지만, 70 ~ 85[°C]내에서는 변화가 없었다. 또한 154[kV]급 시이트의 $\tan\delta$ 는 22[kV]급 보다 낮은 40[°C]에서 2.3×10^{-4} , 85[°C]에서 3.0×10^{-4} 를 나타내고, 온도의존성은 22[kV]급 보다 적은 것으로 얻어졌다.



〈그림 5〉 XLPE의 $\tan\delta$ 의 온도의존성

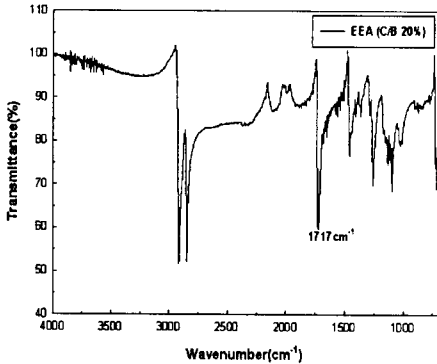
고분자 절연재료에서 가장 중요한 화학구조변화는 산화반응에 의한 구조변화이고 이 구조변화에 의해 전력케이블내 고분자는 절연열화를 쉽게 일으킨다. 이러한 산화반응은 고분자가 전력케이블의 재료로서 사용되는 동안에 높은 온도에서 운전되고 이때 주변의 산소 또는 고분자내에 들어 있는 분자 수준의 산소에 의해 시작된다. 산화가 진행되면 고분자 사슬이 짧게 끊어지는 소위 사슬절단 (chain scission) 현상이 일어나 고분자의 분자량은 줄게 되고 따라서 고분자는 극심한 열화과정을 거치게 된다. 모든 고분자의 산화는 아무곳에서나 산소만 있으면 진행되는 것이 아니라 고분자 사슬내에서 약한 부분부터 산화되기 시작한다. 예를들어 XLPE의 경우, 탄소-수소가 단일 결합을 하고 공유결합력이 매우 강하기 때문에 산화반응이 잘 안 일어난다.

또한 반도체 재료내에는 이온성 불순물과 표면에 작용기를 다량 함유한 카본블랙이 첨가되어 있기 때문에 작용기로 인한 산화반응은 더욱 가속화된다. 일단 산화반응이 일어나면 이 부분에서 계속적인 화학반응이 일어나 결국에는 사슬절단이 일어나고 이 지점은 다시 약한 부분이 된다. 이러한 과정을 반복하면서 전력케이블내 고분자들은 계속 산화에 의한 열화를 일으킨다 [12 ~ 15].

따라서 산화반응에 기여하는 작용기 (functional group)를 검출하기 위한 FTATR 분석법은 다양

한 작용기의 존재를 제공한다. 우선 반도체재료내의 카보닐기(C=O)의 존재를 확인하고 카본블랙의 함량에 따른 카보닐기의 존재량을 측정하였다. 일반적으로 카보닐기는 결합에너지가 강하고 견고하여, 결합이 신장 또는 압축될 때 더 많은 힘이 요구된다. 그래서 단일결합보다 더 높은 진동수에서 진동한다. 일반적으로 카보닐기는 그림 2와 같이 1710[cm⁻¹] 부근에서 진동수를 갖는다.

그림 6은 카본블랙이 20[%] 첨가된 EEA의 스펙트럼을 나타낸 것으로서, 1717[cm⁻¹] 에서 고유의 진동수를 갖는 카보닐기를 확인하고 앞으로 이 영역에서의 특성만을 검토할 것이다.



〈그림 6〉 EEA의 FTATR spectrum.

4. 결 론

본 논문에서는 계면을 갖는 XLPE 시이트의 전기적 특성을 평가하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 22[kV]와 154[kV]의 XLPE 유전율은 2.2 정도로 계산되었고, $\tan\delta$ 는 2.2×10^{-4} 로 측정되었으며, 154[kV]의 $\tan\delta$ 는 22[kV]에 비하여 다소 낮다. 또한, XLPE/반도체층의 $\tan\delta$ 는 XLPE에 비하여 증가하며, 154[kV]보다 22[kV]에서 유전특성이 크게 증가를 보이고 있다.
2. 22[kV], 154[kV]의 XLPE, XLPE/반도체층의 $\tan\delta$ 는 인가전압의 증가와 함께 다소 증가하는 경향을 보였다.
3. 22[kV] 및 154[kV]의 XLPE의 $\tan\delta$ 는 상온에서 각각 8.5×10^{-4} , 2.3×10^{-4} 이고, 85[°C]에서 1.37×10^{-3} , 3.0×10^{-4} 을 나타내었으며, XLPE의 $\tan\delta$ 는 온도의 증가와 함께 증가하였다.
4. 전력 케이블의 XLPE가 갖는 누설전류 (I_l), 충전전류 (I_c) 그리고 유전손실에 의한 손실전력 (P)을 각각 계산할 수 있었다.

[참고 문헌]

[1] T. Mohatai et al., "Reliability and Transmission Capacity in XLPE Cable",

Fujikura Giho, Oct, 1, 1995.
 [2] Devaux, A, Oudib, J.M. Rerolle, Y., Jocteur, R. Noirclerc, and A. Osty, "Reliability and Develop towards High Voltage of Synthetic Insulated Cables", CIGRE, 2, Paris, 1968.
 [3] W. Tiller Shugg, "Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials", Van Nostrand Reinhold, NY. 310, 1986.
 [4] Metra, P., Occhini, E., and Portinari, G., "High voltage Cables with extruded insulation and statistical controls and reliability evaluation", IEEE Trans. Power Appr. Syst., 94(3), 967, 1975.
 [5] S. Mahdvis, et al., "Direct Measurement of Space Charge in Synthetic Cables by the Pressure Wave Method", Proc.JICABLE, 520, 1991.
 [6] "Morphology of Extruded Dielectric Cable Insulation" EPRI EL-5921 Project 7891 Report July, 1988.
 [7] 藤井 他, "154 kV CV케이블용 Prefab접속函의開發", 古河電工時報, 第84号, 19, 1995.
 [8] "Morphology of Extruded Dielectric Cable Insulation" EPRI EL-5921 Project 7891 Report July, 1988.
 [9] H. Craig Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE Trans. Elec. Insul. Vol. 24, No. 5, 765, 1989.
 [10] T. Okamoto et al., "Breakdown Strength Affected by the Interface Roughness at the Semiconducting Layer in XLPE Power Cables", ICPADM 92, 127, 1991.
 [11] Robert Ross, "Dealing with Interface Problems in Polymer Cable Termination", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 15, No.4, July/August, 5, 1999.
 [12] 김중은, 고정우, 서광석, "지중배전 케이블의 특성분석 -화학구조결합, 불순물, 가교도, 수축율-", 한국전기전자재료학회춘계학술대회 논문집, 1997.
 [13] 이경용, 양중석, 최용성, 박대회, "반도체재료의 불순물 측정 및 물성에 관한 연구", 전기학회 논문지, Vol. 53C, No. 9, 2004.
 [13] 박수진, 조기숙, M. Zaborski, L. Slusarki, "충전제-탄성체 상호작용. 6. 산소 플라즈마 처리가 카본블랙 표면특성에 미치는 영향", Elastomer, Vol.37, No.2, pp.99-106, 2002.
 [14] 김성철 외, 고분자공학, 회중당, 1994, Chapter 1-14.