

전력케이블용 XLPE/반도체층의 유전 특성

Dielectric Properties of XLPE/Semiconductor Sheet in Power Cables

이관우^{1,a}, 이경용¹, 최용성¹, 박대희¹

(Kwan-Woo Lee^{1,a}, Kyoung Yong Lee¹, Yong-Sung Choi¹, and Dae-Hee Park¹)

Abstract

We studied the dielectric properties and voltage dependence on slice XLPE sheet from 22 kV and 154 kV power cables. Interface structures are XLPE/semiconductor and XLPE/water/semiconductor capacitance and $\tan\delta$ of 22 kV, 154 kV were 52/42 pF and 7.4×10^{-4} , 2.15×10^{-4} , respectively in these results, the trend was increased with the increase of temperature the $\tan\delta$ of XLPE/semiconductive layer and XLPE/water/ semiconductive layer were increased as compared with that of XLPE Temperature reliability of $\tan\delta$ was small.

Key Words : XLPE sheet, Semiconductor sheet, Dielectric properties, Capacitance, $\tan\delta$

1. 서론

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

전력 케이블의 절연은 고분자 화학의 발전과 함께 절연성능, 내열성이 우수한 가교 폴리에틸렌을 사용하여, 이것을 절연체로 사용한 CV (혹은 XLPE) 케이블 (Cross-linked Polyethylene Polyvinyl Chloride Sheath Cable)이 개발되어졌다. 이 XLPE 전력 케이블은 포설, 접속, 보수 등이 용이하여 수요가 급격하게 증가하고 있으며, 배전만

이 아니고, 송전용 케이블로서 이용되고 있다.

XLPE 전력케이블은 안정된 절연특성과 함께 많은 포설되어 있으나, 고분자 재료의 열화 현상이 문제가 되고 있다. 초기의 XLPE 전력케이블에는 비교적 큰 보이드, 이물, 돌기 등의 결함이 존재하였으며[4,5], 이것이 결함부로 나타나는 부분방전 열화, 트리 열화가 큰 문제로 되어 있었다. 이와 같은 열화 현상에 대하여, 현상의 규명과 함께 결함을 보다 작고, 적게 하기 위한 재료, 제조 기술 면에서의 개선·개량이 진행되어져 있다[6]. 그 결과, XLPE 전력 케이블의 전기적인 특성은 대폭적으로 향상되고, 보다 높은 전압에서 케이블을 사용하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다[7]. 실 케이블의 유전 특성의 비교는 케이블 신뢰성 및 절연특성 비교 데이터로서 중요함에도 불구하고 실 케이블에서 제작이 어려워 아직 고전압 케이블에서 비교한 보고는 없다. 또한 hot press에 의한 PE 시이트 제작은 이물이 많이 포함되며 케이블 제조 조건과 상이하여 실 케이블과는 유전 특성에 차이가 있다[8]. 그러므로 실 케이블의 유전 특성 시험은 hot press에 의하여 제작된 시이트 시료보다 더 정확한 평가를 내릴 수 있게 된다. XLPE 전력 케이블에서 수트리가 발생하면 그 절연 특성이 급격하게 저하된다[9].

1. 원광대학교 재료공학과

(전북 익산시 신용동 344-2)

a. Corresponding Author : ygu0000@wonkwang.ac.kr

접수일자 : 2004. 2. 3

1차 심사 : 2004. 4. 7

심사완료 : 2004. 7. 19

특히, 절연두께가 얇은 전력 케이블에서는 수트리가 현저하게 나타나며, 또한 정격전압보다 낮은 전압에서도 발생하는 것으로 알려져 심각한 문제로 되고 있다. 지금까지 XLPE 전력 케이블은 흡수량이 작아 내수성이 우수하다고 생각되어 왔으나, 수트리는 흡습이 낮은 상태에서도 대부분 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히 반도체층은 그 성분내에 탄소가 흡습을 일으키는 것으로 알려져 있다. 뿐만 아니라, XLPE 전력케이블의 사용전압이 높아짐에 따라서 반도체층과 XLPE간의 계면에서 일어나는 절연사고의 빈도가 높아지고 개선이 요구되고 있다[10,11]. 예를 들면, 전력케이블에 있어서 절연층/반도체층, 흡습후 절연성능의 저하문제, 최적 설계를 위한 절연두께의 저감책, 접속자재에 있어서 에폭시/고무의 계면 등이 있다. 최근에는 전력케이블의 접속자재의 Prefab/Compact화를 위한 과정으로서 본 연구가 집중적으로 필요한 것으로 사료된다. 전력케이블에 있어서 계면의 문제를 개선하기 위한 제조공정으로서 3중 압출방법이 사용되고 있고, 반도체층내의 이물 및 수분은 고전계하에서 트리의 진전을 가속시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

전력케이블의 이중 절연계면에서 전기적 현상의 고찰은 계면을 갖는 필름에서 공간 전하 현상 [12], 전력케이블의 열화후 유전특성[13,14], LDPE가 산화 열화된 후 전기전도 및 절연과피에 관한 연구가[15] 보고되고 있으나, 계면을 갖는 절연재료에 있어서 유전특성에 관한 결과는 아직 많은 보고가 없다.

따라서 본 논문은 계면을 갖는 실 케이블의 XLPE 시이트의 유전특성에 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 기계적 특성, 유전특성과 전압 의존성 등을 각각 고찰하고, XLPE내의 유전손실에 의한 손실전력을 각각 계산하였다.

2. 시료 및 측정 장치

2.1 시료

22 kV, 154 kV XLPE 전력케이블을 준비하고, 실 케이블로부터 절연체를 도체와 평행한 방향의 롤 형태로 제작하여 200 × 200 × (0.4 ~ 1.2) mm의 범위로 잘라 XLPE 시이트를 각각 제작하였다.

시이트 제작은 자동 선반을 이용하였으며, 선반 속도를 조절하여 시이트 두께를 조정하였다. 154 kV는 절연 두께가 23 mm로 여러장 제작이 가능하나, 22 kV 케이블은 절연체의 두께로 1.2 mm 이상 제작은 불가능하다. 반도체층 시이트는 롤상태로 제작된 것을 절연체와 동일한 상태로 제작하여 겹쳐서 시편을 제작하였다. 시료의 구조는 그림 1과 같은 XLPE/반도체층, XLPE/수분/반도체층의 시이트이다.

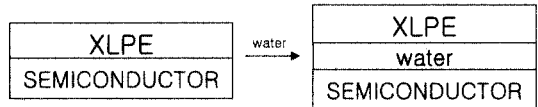


그림 1. XLPE의 계면구조.

Fig. 1. Interface structure of XLPE sheet.

2.2 측정 장치

XLPE 시이트의 유전특성은 유전특성 측정 장치 (Tettex 2882)를 사용하였고, 회로도에는 그림 2와 같다. 전극구조는 평판전극의 주 전극/접지전극/하부전극으로 구성되어져 있으며, 시료의 가열은 주 전극 내의 히터를 사용하였다.

또한 측정 조건으로서 압력은 3 N/cm² [17], 인가 전압은 250, 500, 750, 1000 V의 범위로 하였다.

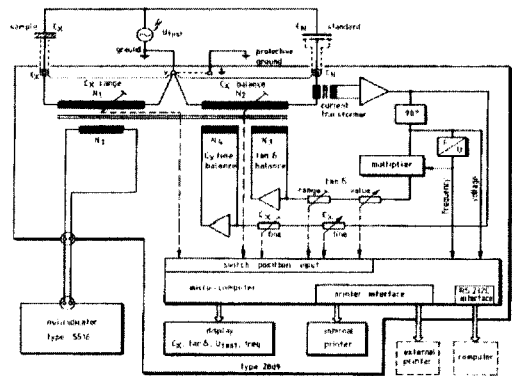


그림 2. Tettex 2882 회로도.

Fig. 2. Block diagram of tettex.

3. 결과 및 고찰

3.1 22 kV XLPE 시이트의 유전특성

절연재료의 전기적인 특성은 절연특성, 유전특

성, 파괴특성으로 구분되어서 각각 평가에 응용되고 있으며, 열화 및 장기특성 평가에 있어서는 유전특성이 응용되고 있다. 유전특성은 $\tan\delta$ 와 온도의존성등이 요구되고 있다. 본 논문에서는 22 kV급과 154 kV급의 XLPE의 유전특성을 평가하였다.

XLPE 시이트의 유전특성과 반도체층, 흡습 특성을 각각 측정하였다. 그림 3은 일정한 압력의 3 N/cm²와 온도 하에서 유전특성의 전압의존성을 나타내고 있다. 유전특성은 $\tan\delta$ 와 정전용량을 측정하였다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 500 V에서 $\tan\delta$ 는 7.4×10^{-4} 을 나타내고, 정전용량은 52.65 pF, 유전율은 2.23으로 각각 측정되었다. 이와 같은 유전특성의 전압의존성은 전압의 증가와 함께 $\tan\delta$ 는 다소 증가를 보이나, 정전용량은 일정한 크기를 나타내고 있다.

그림 4은 XLPE에 반도체층을 겹친 XLPE/반도체층의 시이트에 대하여의 $\tan\delta$ 와 정전용량의 전압의존성을 나타내고 있다. 이 결과로부터 XLPE에 비해서 $\tan\delta$ 는 증가된 1.23×10^{-3} 를 나타내며, 정전용량은 XLPE와 동일한 52.67 pF로 얻어졌다. 이때의 복합 유전율은 2.24로 계산되었으며, 반도체층은 절연물의 $\tan\delta$ 를 다소 저감시키는 역할을 하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 인가전압의 증가와 함께 $\tan\delta$ 는 다소 증가하나, 정전용량의 변화는 없었다.

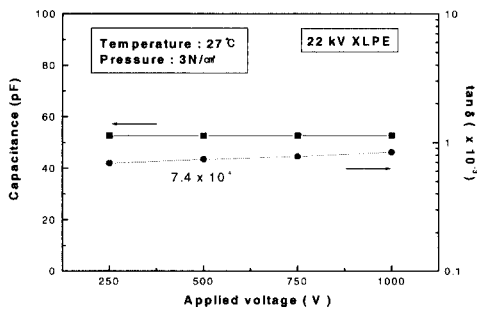


그림 3. 22 kV급 XLPE에서 유전특성의 전압의존성.

Fig. 3. Applied voltage dependence of dielectric properties in 22 kV XLPE.

그림 5는 XLPE와 반도체 층간에 물을 도포하였을 경우의 유전특성을 나타내고 있다. 물을 도포한 XLPE/반도체층의 $\tan\delta$ 는 2.15×10^{-3} , 정전용량은 54.22 pF를 나타내며, 유전율은 2.29로 계산되었다.

또한 인가전압의 증가와 함께 $\tan\delta$ 와 정전용량이 증가를 보이고 있다. 즉 케이블 절연시스템내의 흡습은 $\tan\delta$ 를 증가시키는 것을 알 수 있었으며, 이와 같은 $\tan\delta$ 의 증가는 케이블의 초기 절연 열화를 가속시킬 것으로 예측되어진다. 22 kV XLPE의 유전특성에서 유전율은 2.25이며, $\tan\delta$ 는 7.4×10^{-4} 이나, 반도체층을 갖는 경우 $\tan\delta$ 는 다소 증가하였다. XLPE/수분/반도체층일 경우 유전율은 2.3과 $\tan\delta$ 는 2.15×10^{-3} 을 나타내고 있으나 유전율은 전압의존성을 나타내지 않는다.

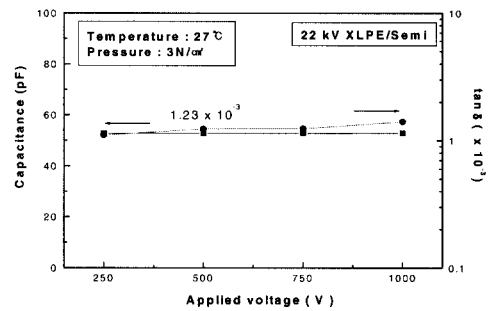


그림 4. 22 kV급 XLPE/반도체층에서 유전특성의 전압의존성.

Fig. 4. Applied voltage dependence of dielectric properties in 22 kV XLPE/semiconductor.

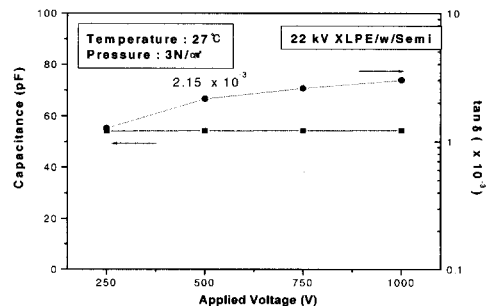


그림 5. 22 kV급 XLPE/수분/반도체층에서 유전특성의 전압의존성.

Fig. 5. Applied voltage dependence of dielectric properties in 22 kV XLPE/water/semiconductor.

3.2 154 kV급 XLPE 시이트의 유전특성

154 kV급 XLPE는 기존의 XLPE에 비하여 이

물질의 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 6는 154 kV급 XLPE의 유전특성과 전압의 존성을 나타내고 있다. 이 경우의 측정조건은 22 kV급 XLPE와 동일하다. 500 V에서의 $\tan\delta$ 와 정전용량은 2.15×10^{-4} 과 42.91 pF이다. 또한 인가전압의 증가와 함께 $\tan\delta$ 는 다소 증가를 보이나, 정전용량은 일정하고, 유전율은 2.24로 계산되었다. 154 kV XLPE의 유전특성은 22 kV급에 비해서 $\tan\delta$ 는 낮으나, 유전율은 거의 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

그림 7은 XLPE/반도체층의 유전특성과 전압의 존성을 나타내고 있다. $\tan\delta$ 와 정전용량은 1.2×10^{-3} 과 43.29 pF로 얻어지고, 유전율은 2.25로 계산되었다. 이 결과로 부터 154 kV급 XLPE의 경우에도 반도체 층의 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.

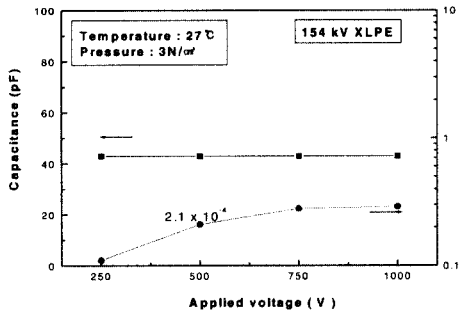


그림 6. 154 kV급 XLPE에서 유전특성의 전압의 존성.

Fig. 6. Applied voltage dependence of dielectric properties in 154 kV XLPE.

다음에는 XLPE와 반도체층간에 물을 도포하였을 경우 유전특성을 평가하였다. 그림 7은 154 kV급 XLPE/수분/반도체층의 유전특성과 전압의존성의 결과이다. 물을 도포한 경우의 $\tan\delta$ 는 2.1×10^{-3} 으로 XLPE에 비하여 증가를 보이며, 인가전압의 증가와 함께 1000 V에서는 3.0×10^{-3} 을 나타내고 있다. 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. 154 kV XLPE의 유전특성은 유전율은 2.24이며, $\tan\delta$ 는 2.15×10^{-4} 이나, 반도체층을 갖는 경우 $\tan\delta$ 는 증가하였다. XLPE/수분/반도체층일 경우 유전율은 2.33과 $\tan\delta$ 는 3.3×10^{-4} 를 나타내고 있으나 $\tan\delta$ 는 XLPE와 유사하게 약간 증가하였다.

그림 7은 154 kV급 XLPE/반도체층에서 유전특성의 전압의존성. The graph shows Capacitance (pF) on the left y-axis (0 to 100) and tanδ (x 10^-4) on the right y-axis (0.1 to 10) versus Applied voltage (V) on the x-axis (250 to 1000). Capacitance is constant at approximately 43 pF. tanδ increases from 3.7 x 10^-4 at 250V to 3.3 x 10^-4 at 500V and remains constant thereafter. Conditions: Temperature: 27°C, Pressure: 3N/cm².

그림 7. 154 kV급 XLPE/반도체층에서 유전특성의 전압의존성.

Fig. 7. Applied voltage dependence of dielectric properties in 154 kV XLPE/semiconductor.

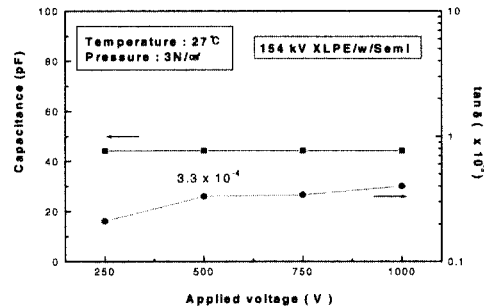


그림 8. 154 kV급 XLPE/수분/반도체층에서 유전특성의 전압의존성.

Fig. 8. Applied voltage dependence of dielectric properties in 154 kV XLPE/water/semiconductor.

3.3 유전 특성의 온도 의존성

그림 9은 22, 154 kV XLPE 시이트의 $\tan\delta$ 의 온도의존성을 나타내고 있다. 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이, $\tan\delta$ 는 온도의 증가와 함께 증가하는 경향을 보이고 있으며, 실온보다 높은 실제의

케이블에서는 절연체에 큰 유전손실이 발생되어, 절연열화를 가속시키는 것으로 절연능력의 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 kV급 시이트의 $\tan\delta$ 는 40 °C에서 8.5×10^{-4} , 70 °C에서 1.37×10^{-3} 으로 증가를 나타내지만, 70~85 °C내에서는 변화가 없었다. 또한 154 kV급 시이트의 $\tan\delta$ 는 22 kV급 보다 낮은 40 °C에서 2.3×10^{-4} , 85 °C에서 3.0×10^{-4} 를 나타내고, 온도의존성은 22 kV급 보다 적은 것으로 얻어졌다. 그러나 $\tan\delta$ 는 온도의 증가에 따라 점차 증가하게 되는 데 이는 유전 손실이 분자고리의 국소 운동에 의한 마이크로 브라운 운동의 영향이다. 또한 154 kV의 경우는 22 kV 케이블에 비하여 매우 낮은 $\tan\delta$ 를 보이고 있는 것은 그만큼 제조 과정에서 크린 상태를 유지한 결과이다.

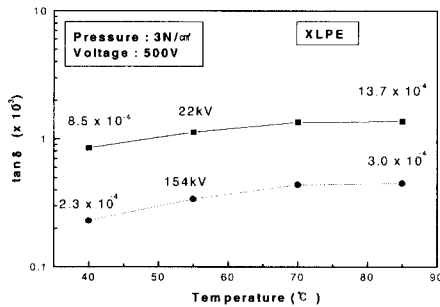


그림 9. XLPE의 $\tan\delta$ 의 온도의존성.
Fig. 9. Temperature dependence of $\tan\delta$ in XLPE.

표 1. 시료의 충전전류, 누설전류와 전력손실.
Table 1. Charge current, leakage current and power loss of specimens.

시 료	Ic(μA)	Ii(nA)	P (pW/m ²)	ε x Tanδ
XLPE	9.92	7.3	0.925	1.65
XLPE/ 반도전층	9.95	12.2	1.543	2.76
XLPE/수분/ 반도전층	10.22	21.9	2.770	4.95

이와 같은 유전특성의 결과로부터 전력 케이블의 절연체가 지나는 누설전류 (Ii), 충전전류 (Ic)와

유전손실에 의한 소비전력 (P) 등을 각각 비교하면 표 1과 같이 얻어졌다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 각각의 값들은 반도체층, 물이 도포됨에 따라서 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 값들은 절연층의 열화상태를 확인하고, 진단할 수 있는 결과로서 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 뿐만 아니라, 절연열화를 가속시킨 후에 절연능력의 상대 비교평가의 data로서 중요한 결과로 판단된다.

4. 결론

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

- 22 kV와 154 kV의 XLPE 유전율은 2.2 정도로 계산되었고, $\tan\delta$ 는 2.2×10^{-4} 로 측정되었으며, 154 kV의 $\tan\delta$ 는 22 kV에 비하여 다소 낮다. 또한, XLPE/반도전층과 XLPE/수분/반도전층의 $\tan\delta$ 는 XLPE에 비하여 증가하며, 154 kV보다 22 kV에서 유전특성이 크게 증가를 보이고 있다.
- 22kV, 154 kV의 XLPE, XLPE/반도전층, XLPE/수분/반도전층의 $\tan\delta$ 는 인가전압의 증가와 함께 다소 증가하는 경향을 보였다.
- 22 kV 및 154 kV의 XLPE의 $\tan\delta$ 는 상온에서 각각 8.5×10^{-4} , 2.3×10^{-4} 이고, 85 °C에서 1.37×10^{-3} , 3.0×10^{-4} 을 나타내었으며, XLPE의 $\tan\delta$ 는 온도의 증가와 함께 증가하였다.
- 전력 케이블의 XLPE가 갖는 누설전류 (Ii), 충전전류 (Ic) 그리고 유전손실에 의한 손실전력 (P)을 각각 계산할 수 있었다.

이상의 결과로부터, 22 kV 케이블과 154 kV 케이블의 절연특성을 판단할 수 있는 유전특성을 검토하여 상대적으로 154 kV 케이블의 전기적 특성이 우수함을 확인할 수 있었다. 또한, 절연재료의 상대적인 평가를 위한 기초 자료로서 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] T. Mohatai , "Reliability and Transmission Capacity in XLPE Cable", Fujikura Giho, Oct, p. 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. p. 310, 1986.
- [4] S. Mahdvis., “Direct Measurement of Space Charge in Synthetic Cables by the Pressure Wave Method”, Proc.JICABLE, p. 520, 1991.
- [5] 藤井 他, “154 kV CV케이블용 Prefab接續函の開発”, 古河電工時報, 第84号, p. 19, 1995.
- [6] H. Craig Miller, “Surface Flashover of Insulators”, IEEE Trans. Elec. Insul. Vol. 24, No. 5, p. 765, 1989.
- [7] T. Okamoto, “Breakdown Strength Affected by the Interface Roughness at the Semiconducting Layer in XLPE Power Cables”, ICPADM 92, p. 127, 1991.
- [8] C. S. Jung, W. S. Lee, and J. H. Han, “Characterization of failed underground distribution Cables”, J. of KIEEME, Vol. 12, No. 5, p. 423, 1999.
- [9] K. S. Suh, J. E. Kim, J. Lee, Y. H. Kim, and J. S. Jung, “Comparison of characteristics of XLPE for distribution power cables”, J. of KIEEME, Vol. 11, No. 9, p. 671, 1998.
- [10] H. C.Kaerner and M. Ieda, “Technical Aspects of Interfacial Phenomena in Solid Insulating Systems”, 3rd ICPADAM, July 8-12, p. 598, 1991.
- [11] S. M. Lebedev, O. S. Gefle, Yu. P. Pokholkov, and V. I. Chichikin, “The breakdown strength of two-layer dielectrics”, Eleventh International Symposium on High-Voltage Engineering, IEE, Conference Publication 467, Vol. 4, No. 22-27. p. 304, 1999.
- [12] T. Tanaka, M. Uchiumi, “Two kinds of decay time constants for interfacial space charge in polyethylene-laminated dielectrics”, Annual Report of the 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE Publication 99CH36319-2, p. 472, 1999.
- [13] D. H. Park, D. S. Kim, and S. O. Han, “Dependency on Temperature, Electric Field, Pressure and Dielectric Properties of XLPE/EPDM”, J. of KIEEME” Vol. 12, No. 3, p. 248, 1999.
- [14] T. Brincourt, B. Pinel, R. M. Morra and J. M. Braun, “Thermal Ageing in Polymer Cables: Effect of Interfaces on Dielectric Properties”, Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA, June 5-8, p. 461, 1994.
- [15] T. Okamoto, “Dielectrical breakdown strength affected by the lamellar configuration in XLPE insulation at a semiconducting interface”, IEEE Trans.Elec. Ins., Vol. 24, p. 599, 1989.