

XLPE/EPDM의 유전특성과 그의 온도, 전기, 압력의존성

논문
12-3-9

Dependency on Temperature, Electric Field, Pressure and Dielectric properties of XLPE/EPDM

박대희*, 김동식*, 한상옥**

(Dae-Hee Park*, Dong-Shick Kim*, Sang-Ok Han**)

Abstract

In this paper, we evaluated the dielectric properties of XLPE, EPDM and EPDM/XLPE depened on electric field, pressure and temperature respectively. Test result presented that dielectric loss($\tan\delta$) of XLPE, EPDM and XLPE/EPDM increased with temperature. But it showed anomalous temperature characteristics for XLPE specimen. We also got the conclusion from this test that $\tan\delta$ of all specimens quite depended on temperature rather than pressure or electric field. The salient characteristic of XLPE/EPDM was that the dielectric properties was progressed, though the power loss of XLPE, EPDM was increased. With the experience result, we considered that the parameter of $\epsilon \tan\delta$ would be useful method to evaluate the dielectric properties and degradation.

Key Words(중요용어) : Dielectric properties(유전특성), XLPE, EPDM, Dielectric loss(유전손실), Capacitance(정전용량)

1. 서 론

최근 전력기기 및 전력케이블은 초고압화와 함께 장기 신뢰성과 절연성능의 향상을 위하여 이중 절연재료를 이용한 절연시스템구조가 많이 이용되고 있다. 이중 절연재료의 구조로서는 고체/고체, 액체/고체, 액체/기체등과 같은 거시적인 경우와 서로 다른 첨가제 혹은 다른 분자구조가 분산되어져 구성되는 미시적인 경우로서 구분된다¹⁾. 이와 같은 이중 절연재료를 갖는 절연시스템의 구조는 절연성능을 향상시키기 위한 목적에 있으나, 절연사고를 일으키는 취약한 부분으로 존재한다. 따라서 절연시스템의 절연사고를 방지하고, Prefab화, 합

리적인 절연설계를 위한 이중절연의 활용이 확대되고 있다^{2),3)}. 뿐만 아니라 이중 절연구조는 전력기기의 대형 절연부품이나, 전계완화를 위한 절연층/반도전층, 절연층/절연층, 절연층/금속등과 같은 형태로 적용이 되고 있으며, 예를들면, 전력케이블, 접속부, 몰드변압기라든가, 초고압애자등에 대부분 응용이 되고 있다. 특히 이중 고체절연구조는 액체나 기체 절연재료와 같이 절연파괴된 후에 자기 회복성이 없기 때문에 절연파괴에 의한 파급이 치명적으로 고체 절연층/절연층, 반도전층/절연층에 있어서 전기적인 물성에 관한 많은 연구가 진행되고 있다⁴⁾.

주로 이중절연 계면에서 절연사고는 단시간 내에 나타나는 파괴 현상과 장시간에 걸쳐서 서서히 일어나는 절연열화로 구분되어져, 이를 위한 많은 연구가 요구되고 있다. 이같은 연구들은 절연재료내에 계면이 존재하면 내부에 형성되는 공간전하의 분포등의 해석과 절연재료/절연재료와 같은 구조하에서의 절연파괴강도에 미치는 계면효과, 절연층/반도전층간의 계면에 있어서 트리진전등에 관한 보

* : 원광대학교 전기전자 공학부
(전북 익산시 신흥동 344-2, Fax : 0653-857-6890
E-mail : parkdh@wonms.wonkwang.ac.kr)

** : 충남대학교 전기전자 공학부
1998년 3월 20일 접수, 1999년 2월 25일 심사완료

고가 되어서 계면에 있어서 열화현상의 규명을 하고 있다^{5), 6), 7)}. 또한 최근에는 폴리머에자의 성능향상을 위한 에폭시/화이버간의 절연파괴 현상과 절연재료/금속 전극간에 전기전도의 현상을 미시적으로 고찰하고, 절연시스템내에서의 계면현상이 연구되고 있다^{8), 9)}. 이와 같은 연구들은 절연시스템에서의 절연사고 및 열화는 절연층/절연층 혹은 전극과의 계면의 중요성을 지적하고 있다.

절연시스템내에 있어서 유전특성은 장기간의 절연열화 현상을 직접적으로 평가할 수 있는 것으로, 주변의 전계, 온도, 압력등에 의해 큰 영향을 받으며, 초고압화됨에 따라서 중요성이 높아지고 있다. 따라서 이중 절연구조에 있어서 유전특성에 관한 검토가 요구되고 있으나, 아직은 미흡한 수준에 있다.

이와 같은 관점에서 본 연구는 전력케이블 및 접속부에 많이 사용되어지는 Cross-linked Polyethylene(이하 XLPE)과 Ethylene Propylene Diene Monomer(이하 EPDM), XLPE/EPDM의 이중절연재료의 유전특성을 중심으로 평가하고, 전계, 온도, 압력의존성등을 각각 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 시험에 사용한 시료는 전력케이블용 폴리에틸렌(NUC 4201, density : 0.92 g/cm³)으로 180℃에서 15분간 가교시킨 1.24mm두께를 갖는 XLPE와 EPDM(Ethylene Propylene Diene Monomer, Dupont사, Nordel 1040)이다. EPDM은 소량의 오일, 왁스, zinc stearate등의 가스제와 경화촉진제를 넣고, 주 첨가제인 alumina trihydrate(ATH)를 100phr 첨가하여 dicumyl peroxide(DCP)로 170℃에서 10분간 가교시킨 1.18mm 두께를 갖는 시이트이다. 각 시료는 에탄올에 초음파 세척한후에 건조기에서 건조시켜 잔사가스를 제거하였다. 시료는 계면간에 접착제는 사용하지 않고 XLPE와EPDM을 4(N/cm²)의 압력하에서 측정하였다.

시료의 정전용량과 tanδ는 유전특성 측정시스템(Tettex instruments사, Type 2822)을 이용하였다. 본 시스템의 측정범위는 정전용량 : 9 ~ 10000pF, tanδ : 1×10⁻⁵ ~ 10(1000%)이며, 인가교류전압은 2kV까지 인가할 수 있다. 전극 시스템(Tettex instruments사, Type 2904)은 49mmφ의 주전극과 79.1mmφ의 접지전극의 상부전극과

100.4mmφ의 하부 평판전극으로 각각 구성되어 있다.

또한 각 시료들의 온도, 전계, 압력의존성은 전극을 실온에서 100℃까지 각각 가열하였으며, 압력은 상부전극을 이동시켜 2 ~ 6(N/cm²)로 가압하고, 전계는 3(kV/cm), 7(kV/cm), 10(kV/cm)로 인가하였다. 각각의 조건하에서 시료의 갯수는 5개이며, 측정값은 평균값으로 나타냈다.

3. 실험 결과 및 고찰

절연재료의 유전손실은 tanδ에 비례하며, 전압 및 주파수에 의해서 의존되어지고, $W = \omega CV^2 \tan \delta$ (W : 유전손실, C : 정전용량, V : 인가전압)로 나타낸다. 인가 전압에 의해서 유전손실은 크게 증가 되는 것으로 초고압화됨에 따라서 성능을 좌우하는 중요한 특성이다. tanδ는 절연재료의 고유성질을 나타내는 것으로 절연저항과 함께 사용되어지고 있으며, 절연재료에 흐르는 누설전류가 증가하면, tanδ가 커지고, 인가전압의 증가와 함께 내부의 온도상승을 일으키며, 전압에 의해서 절연파괴 강도를 저하시킨다. 이와 같이 유전손실의 증가는 장기적으로 절연파괴를 일으키는 원인이 되고, 또한 흡습에 의해서 급격하게 증가되어진다. 따라서 유전손실혹은 tanδ의 변화량은 절연열화를 진단하는 방법으로도 이용되고 있다.

본 연구에서는 XLPE/EPDM 시이트의 유전특성과 함께 각각의 전압, 온도 및 압력하에서의 의존성을 각각 평가하였다.

3-1. EPDM과 XLPE의 유전특성

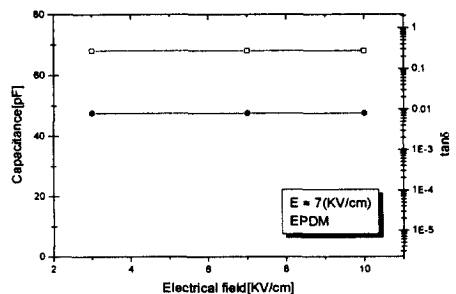


그림 1. EPDM의 유전특성의 전계의존성
Fig. 1. Electric field dependency of dielectric properties of EPDM

그림 1은 4(N/cm²)의 압력에서 EPDM의 유전특성의 전계의존성을 나타냈다. 시료의 tanδ와 정전용량은 3(kV/cm)전계하에서 8.6×10⁻³, 68[pF]를 나타냈으며, 7(kV/cm), 10(kV/cm)로 각각 상승시켜도 일정한 값을 나타냈다. EPDM의 유전특성은 ~10(kV/cm)내의 전계에서는 의존하지 않는 결과가 얻어졌으며, 이와같이 측정되어진 EPDM의 정전용량[C = εA/t (C : 정전용량(pF), ε : 유전율, A : 단면적, t : 시료의 두께)]으로부터 유전상수를 계산한 결과 3.2가 얻어지고, 인가전계에 의존성을 나타내지 않았다. 또한, 전력케이블에 많이 사용되는 EPR(Ethylene propylene rubber, ε = 3.3, tanδ = 6.8×10⁻³)과 거의 비슷한 유전특성을 지니는 것을 확인 할 수 있었다.

XLPE는 극성기를 지니지 않은 고분자로서 유전특성이 매우 안정되어 있으나, EPDM과의 유전특성을 비교하기 위하여 일정압력 하에서 XLPE의 유전특성의 전계의존성을 각각 평가하였다.

그림 2는 일정압력 4(N/cm²)하에서 XLPE의 유전특성을 3~10(kV/cm)의 전계 내에서 나타냈다. 정전용량은 31.7(pF), tanδ는 이미 보고되어진 XLPE의 2.3×10⁻⁴보다 약간 작은 값을 나타내고 있다. XLPE의 유전율은 EPDM보다는 작은 2.3으로 계산되었으며, 이미 보고되어진 PE과 동일한 값을 나타냈다¹⁰⁾. 또한 EPDM과 XLPE의 tanδ는 매우 안정적인 것을 확인 할 수 있었으며, 3~10(kV/cm)의 범위내에서 전계의존성을 보이지 않았다. 이 같은 유전특성은 고분자내의 극성기에 의한 분극현상에 의해서 나타나는 것으로 폴리에틸렌은 무극성으로서 전계에 큰 의존성을 보이지 않고 있음을 알 수 있다.

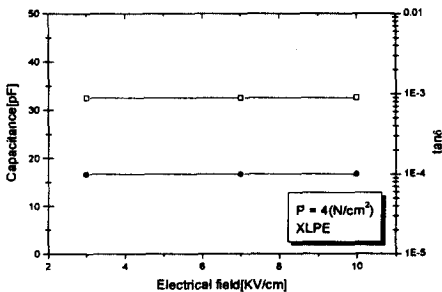


그림 2. XLPE의 유전특성의 전계의존성
Fig. 2. Electric field dependency of dielectric properties of XLPE

그림 3은 일정전계 7(kV/cm)하에서 EPDM의 유전특성의 압력의존성을 나타냈다. 정전용량과 tanδ는 2 ~ 6(N/cm²)의 범위내에서 거의 의존하지 않는 일정한 8.6×10⁻³와 69[pF]로 얻어졌다.

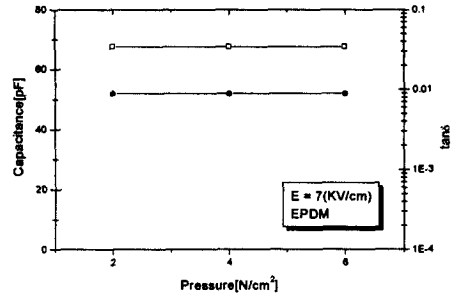


그림 3. EPDM의 유전특성의 압력의존성
Fig. 3. Pressure dependency of dielectric properties of EPDM

EPDM의 유전특성은 인가압력의 증가와 함께 변화를 보이지 않고 있으며, 이 같은 유전특성의 압력의존성은 3차원의 응집·망상구조에 의한 고무의 분자운동과 분극효과가 억제됨으로 나타나는 것으로 추측된다.

그림 4는 7(kV/cm)의 전계하에서 XLPE의 유전특성의 압력의존성을 나타냈다. 정전용량은 일정한 31.7(pF)를 나타내고 있으나, tanδ는 압력의 증가와 함께 다소 증가되는 경향을 나타내고 있으며, 일정 압력하에서 EPDM의 유전특성은 XLPE에 비해서 안정된 물성을 지니는 것으로

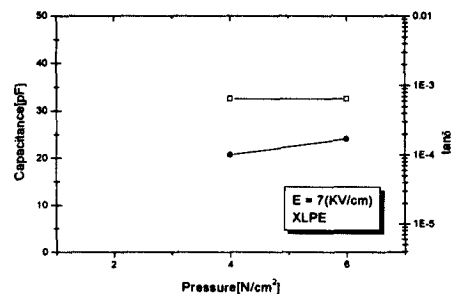


그림 4. XLPE의 유전특성의 압력의존성
Fig. 4. Pressure dependency of dielectric properties of XLPE

EPDM과 동일 결과를 나타낸다. 이같은 XLPE, EPDM의 유전특성은 압력과 전계에 큰 의존성을 나타내지 않고 있음을 확인하였다.

전력기기는 부하의 증감에 따라서 절연재료에 Heat cycle이 가해져 열화진전 및 절연성능이 저하된다.

따라서 다음에는 유전특성의 온도의존성을 각각 측정하였다. 그림 5는 4(N/m²), 7(kV/cm)의 조건하에서 EPDM의 유전특성의 온도의존성을 나타낸 결과이다. 실온에서 tanδ는 8.6×10⁻³과 정전용량은 69(pF)를 나타내고 있으나, 온도의 증가와 함께 85℃부터 각각 증가하는 경향을 보이며, 100℃에서는 72(pF), 5.07×10⁻²로서 실온에 비해서 다소 증가를 나타낸다. 이와 같은 유전특성의 온도의존성의 결과로부터 tanδ는 정전용량에 비해서 온도증가와 함께 큰 증가를 나타내고 있다. 이같은 결과는 분자쇄의 열운동에 의한 것과 전도(누설)전류성분의 증가에 의해서 얻어지는 결과로 판단된다. 또한 유전율은 온도의 증가와 함께 약간 증가된 3.38을 나타냈으며, tanδ는 유전율보다 큰 증가를 나타냈다.

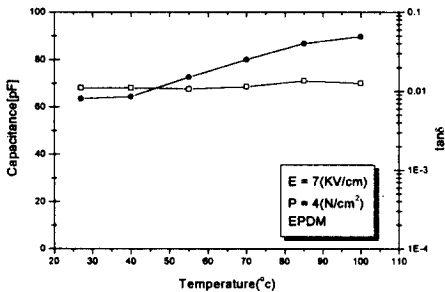


그림 5. EPDM의 유전특성의 온도의존성
Fig. 5. Temperature dependency of dielectric properties of EPDM

그림 6은 4(N/cm²), 7(kV/cm)의 조건하에서 XLPE의 유전특성의 온도의존성을 나타낸 결과이다. XLPE의 tanδ는 온도증가와 함께 다소 증가하고, 100℃부근에서 감소하는 경향을 나타내며, 이 같은 현상은 이미 보고되어진 tanδ의 온도특성과 일치하고 있다¹¹⁾. XLPE의 tanδ는 온도증가와 함께 비결정 영역에서 분자쇄의 운동에 의한 분극 현상이 발생됨으로 관측되는 것으로 추측되며, 유

전율도 약간 감소를 나타낸다.

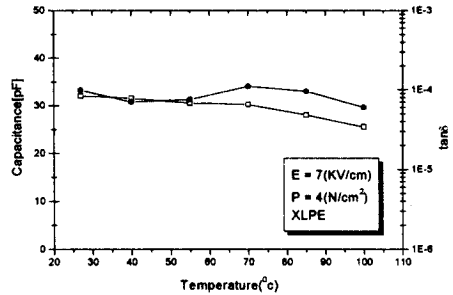


그림 6. XLPE의 유전특성 온도의존성
Fig. 6. Temperature dependency of dielectric properties of XLPE

XLPE는 EPDM과 달리 감소하는 경향은 분자쇄의 운동에 의해서 나타내며, EPDM의 tanδ는 많은 충전제에 의해서 가려져서, XLPE보다 전기쌍극자의 분극효과가 지배적으로 tanδ가 크며, 따라서 교류누설전류도 증가되는 것으로 예측된다.

3-2. EPDM/XLPE의 유전특성

XLPE/EPDM은 케이블의 접속부에 많이 응용되고 있으며, 운전전압이 높아지고, 조립을 용이하게 하기 위하여 이중의 절연구조가 많이 응용되고 있다. 따라서 이중절연구조에서의 유전특성의 압력, 전계와 온도의존성을 각각 평가하였다.

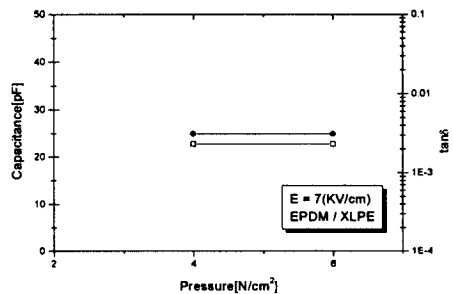


그림 7. EPDM/XLPE의 유전특성의 온도의존성
Fig. 7. Pressure dependency of dielectric properties of EPDM/XLPE

그림 7은 7(kV/cm)하에서 EPDM/XLPE의 유전특성의 압력의존성을 나타냈다. 각 압력 하에 정전용량은 21(pF), $\tan\delta$ 는 3.16×10^{-3} 를 나타내고 있다. EPDM/XLPE의 정전용량은 XLPE, EPDM보다 작아지고, $\tan\delta$ 는 XLPE보다는 증가하나, EPDM보다는 작아진다. 또한 이때의 증가 유전율은 2.58로서 XLPE보다는 크지만 EPDM보다는 낮다. 이중 절연구조에 있어서 유전특성의 압력의존성은 나타나지 않고 있으나, 계면분극에 의한 흡수현상과 내부 불균형 전위분포가 유전·절연열화를 일으키는 것으로 예측된다.

그림 8은 4(N/cm²), 7(kV/cm)하에서 EPDM/XLPE의 유전특성의 온도의존성 나타냈다. 본 시료의 $\tan\delta$ 는 실온에서 3.16×10^{-3} , 40℃~100℃에서는 1.45×10^{-2} 로 5배정도로 크게 증가하며, 정전용량은 온도상승과 함께 다소 저하하는 20(pF)를 나타낸다.

이와 같은 EPDM/XLPE의 $\tan\delta$ 는 EPDM의 온도의존성을 나타내고 있으며, 유전특성은 온도에 크게 의존되고 있음을 확인하였다.

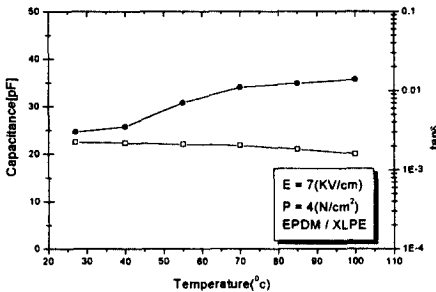


그림 8. EPDM/XLPE의 유전특성의 온도의존성
Fig. 8. Temperature dependency of dielectric properties of EPDM/XLPE

이와 같은 유전특성의 측정결과로부터 시료의 누설전류 [I_l], 충전전류 [I_c], 절연체내에서의 소비전력 [P]을 각각 계산하는 식은 다음과 같으며, 각 시료들의 결과를 표 1에 나타냈다.

$$I_l = I_c \tan\delta \text{ (A)} \quad (1)$$

$$I_c = \omega CV \text{ (A)} \quad (2)$$

$$P = 5/9 \cdot f \cdot \epsilon \cdot \tan\delta \cdot E^2 \times 10^{-12} \text{ (W/cm}^2\text{)} \quad (3)$$

f : 측정주파수(Hz), ϵ : 유전율

$\tan\delta$: 유전손율, E : 인가전계(kV/cm)

XLPE의 누설전류, 충전전류, 소비전력은 가장 작으며, EPDM은 XLPE/EPDM보다 큰 값을 나타내고 있는 결과를 얻을 수 있었다.

이중 절연구조는 단일절연보다 우수한 절연성능보다는 절연재료의 조립성을 고려한 효과가 큰 것으로 판단된다. 절연재료의 ϵ 과 고전계하에서 얻어지는 $\tan\delta$ 는 절연상태에 따라서 크게 의존되는 유전특성으로 $\epsilon \tan\delta$ 를 절연판정에 응용 가능할 것으로 판단되며, 본 측정결과 표 1에서도 절연상태의 구분을 확인할 수 있다.

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

Specimens	I_c (A)	I_l (A)	P (W/cm ²)	$\epsilon \times \tan\delta$
XLPE	1.03×10^4	2.3×10^9	2.79×10^4	5.29×10^4
EPDM	2.1×10^4	1.8×10^7	1.45×10^4	2.75×10^2
XLPE/EPDM	1.3×10^5	4.2×10^9	4.31×10^5	8.15×10^3

4. 결 론

XLPE, EPDM과 EPDM/XLPE의 유전특성과 전계, 압력, 온도등의 의존성을 통하여 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

- 1) XLPE, EPDM의 정전용량과 $\tan\delta$ 는 31.7(pF), 68(pF)와 2.3×10^{-4} , 8.6×10^{-3} 로 측정되었으며, 각각 유전율은 2.3과 3.32로 계산되었다.
- 2) XLPE, EPDM의 유전특성은 전계나 압력보다 온도의존성을 나타내며, EPDM의 $\tan\delta$ 는 온도상승과 함께 증가하나 XLPE는 감소한다. 유전특성은 온도에 크게 의존성을 나타내는 것을 알 수 있었다.
- 3) EPDM/XLPE의 정전용량과 $\tan\delta$ 는 21.0(pF), 3.16×10^{-3} 로 측정되었으며, 유전율은 2.58로 계산되었고, $\tan\delta$ 는 온도상승과 함께 증가하고, 정전용량은 감소한다. $\epsilon \tan\delta$ 는 절연열화를 판단하는 유전특성으로 응용할 수 있을 것으로 사료된다.
- 4) 각 시료들의 일정조건하에서 계산된 누설전류, 충전전류 및 전력손실은 XLPE,

XLPE/EPDM, EPDM순으로 나타낸다.

- 5) EPDM의 충전전류, 누설전류, 전력손실등은 XLPE, XLPE/EPDM보다도 큰 값을 나타내며, 이중 절연구조화 시킴으로 EPDM보다는 우수한 절연특성을 나타내는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 1995년 기초전력공동연구소의 중기과제(95-지-7)의 지원에 의해서 수행되었으며, 시료를 제작하여 주신 평일산업, LG전선에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 固體絶緣材料の界面 果調査専門委員會, “固體絶緣材料の界面 果” 日本電氣 學會技術報告, 第488號, pp. 3~4, 1994年 4月.
- 2) K. Yokosuka, et al., “Development of Dry Type Transition Straight Joint for CV Cable vs. SL Cable,” Furukawa Electric Review, No. 99, Dec., pp. 59-64, 1996.
- 3) C. Dang, et al., “Dielectric Performance of Interfaces in Premolded Cable Joint” IEEE Trans. Pow. Del., Vol. 12, No. 1, Jan., pp. 29-32, 1997.
- 4) 岡本 外: “超高壓CV Cableの 半導電層界面の 改良” 電力中央研究 報告書 No. W86013, 1986.
- 5) T. Tanaka, et al., “Characteristics of

Space Charge Formed in a Laminated LDPE/EVA Dielectric Under DC Stress” Conf. Record 1966 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vol. 1, pp. 184~187, June 16-19, 1996.

- 6) S. Han, et al., “Breakdown Characteristics of XLPE/EPDM on the Treatment Condition of the Interfacial Layer” Proc. 5th ICPADAM., Vol. 1, pp. 345~348, May 25-30, 1997.
- 7) S. Bamji, et al., “Degration Mechanism at XLPE/semicon Interface Subheded to High Electrical Stress” IEEE Trans. EI., Vol. 26, No. 2, pp. 278~283, 1991.
- 8) H. C. Karner., “Technical Aspects of Interfacial Phenomena in Solid Insulating System” Proc. 3th ICPADM., Vol 1, pp. 592~607, July 8-12, 1991.
- 9) M. Ieda, et al., “Study of Space Charge Effects in Polyethylene by Thermalpulse Current Technique”, IEEE. Trans on El., Vol. 25, pp. 509-514, 1990.
- 10) W. Tillar Shugg “Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials” Van Nostrand Reinhold, pp. 122-151, 1986.
- 11) 日本電氣協同研究會: “特高Cable의 導體許容溫度” 第40卷 第 1號, pp. 87-89, 6月 1984年.