

## 용액법에 의해 성장된 저밀도 폴리에틸렌 박막의 결정화도 및 전기적 특성

윤 중 략 · 이 현 용  
명지대학교 전기전자공학부

### The Degree of Crystallinity and Electrical Characteristics of Low Density Polyethylene Thin Films Grown by Solution Method

Jung-Rag Yoon and Heun-Yong Lee

Dept. of Electrical and Electronic Eng. of Myongji Unive., YongIn 449-728

(1997년 6월 27일 받음, 1997년 8월 26일 최종수정본 받음.)

초 록 본 논문은 용액법으로 성장시킨 저밀도 폴리에틸렌 박막의 냉각 조건에 따른 결정화도의 관계와 냉각 조건에 따른 전기전도현상, 유전특성 및 절연파괴에 관한 연구로서 박막은 140[°C]에서 2시간 유지후 냉각 조건을 달리하여 제작하였다. 결정화도는 XRD를 이용하여 측정하였으며 냉각 속도가 빠를수록 결정화도가 감소함을 볼 수 있었다. 전기전도현상은 냉각 조건에 무관하게 저전계에서는 이온전도특성이 나타나고 고전계에서는 공간전하제한전류이론이 지배적이다. 절연파괴전계는 냉각속도가 증가할수록 증가하고 self-healing 절연파괴 방법에서는 시험회수가 증가할수록 증가하였다.

**Abstract** The relation between crystallinity and cooling condition in low density polyethylene thin films and their effect on electric conduction phenomena and dielectric characteristics and breakdown strength was studied. The low density polyethylene thin films obtained by the solution method heat-treated at 140[°C] for 2h and subsequently cooling to various ways. The degree of crystallinity was estimated by the X-ray diffraction measurement for the specimen of slowly cooling, ICE quenching and liquid nitrogen quenching. The result shows that the degree of crystallinity decreases as the cooling speed increased, and that electric conduction phenomenon is governed by the ionic conduction in the low field and by the space charge limited current theory in the high field. It was found that dielectric breakdown field increases with an increase in cooling speed and test number in self-healing breakdown method.

### 1. 서 론

대표적인 고분자재료인 폴리에틸렌은 분자구조가 간단하고 전기적 특성이 양호하며 극성기를 함유하지 않는 무극성으로서 유전율 및 유전손실이 적기 때문에 통신용 절연재료로서 사용하고 있으며 전기 절연성이 우수하여 각종 전기기기 및 전력 케이블등의 절연 기술향상에 많은 공헌을 하고 있는 유기고분자 재료이다. 폴리에틸렌이 발견된 이래 오늘날까지 고분자 절연물은 분자 운동과 역학적, 유전적 특성과의 관계등 물리, 화학적 성질은 이론적으로나마 확립되어 있고 또한 전기전도 및 절연파괴기구도 많은 연구 결과에 의해 차츰 명백히 규명되고 있다<sup>1-3)</sup>. 그러나 폴리에틸렌의 분자구조는 간단하지만 복합적인 고체구조로서 결정영역과 비결정영역이 혼합되어 있어 전기전도 및 절연파괴 특성에 미치는 고차구조의 영향에 관해서는 아직 불명확점이 많이 있다<sup>3-5)</sup>. 저밀도 폴리에틸렌의 결정화도와 전기적 특성의 연구는 완화 특성에서 관찰되는  $\alpha$  피크와 결정화도와와의 관계를 연구한 바 있으며<sup>6)</sup> 열처리 효과에 대한 연구로는 저밀도 폴리에틸렌과 고밀도 폴리에틸렌에서의 가열 및 급랭에 따른  $\alpha, \beta$  피크의 변화 양상에 대한 연구가 있다<sup>7)</sup>. 한편 폴리에틸렌은 결정화도가 낮을수록 온도 의존성의 경사가

급준하며, 저온측에서 직류 절연파괴전계가 높고 결정성의 저하는 불순물의 준위 폭의 증가를 초래하며 절연파괴 특성에 변화를 가져온다고 하였다<sup>8)</sup>. 그러나 전술한 연구에 사용된 폴리에틸렌 필름은 결정영역과 비결정영역의 복잡한 결합으로 구성되어 있고 또한 결정영역에서도 다수의 결정이 한 점에서 방사상으로 배열된 구상의 다결정인 구정(Spherulite)이 3차원 배열로서 전극간에 구정과 관계가 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 고분자를 용액상태로부터 결정화시키면 구정이 생성됨을 이용하여 용액 성장법(solution growth method)에 의해 제작한 폴리에틸렌 박막을 열처리함으로써 전극간에 2차원 구정 구조의 박막을 형성하여 전기적 특성을 연구하고자한다. 또한 박막 제작시 폴리에틸렌의 냉각 조건을 달리함으로써 결정화도를 변화시키고 XRD를 이용하여 결정화를 측정하였으며 결정화도는 Natta 방법으로 측정하였다<sup>9)</sup>. 결정화도의 변화가 고체구조, 전기전도기구, 온도 및 주파수에 따른 유전특성에 미치는 영향 및 self-healing 절연파괴현상과 관련하여 절연파괴특성을 연구하였다.

## 2. 실험 방법

### 2-1. 시료제작

본 연구에 사용된 시료는 한양화학에서 제작된 저밀도 폴리에틸렌으로서 밀도는  $0.922\text{g}/\text{mm}^2$ 이고 용융지수  $0.25(\text{g}/10\text{min})$ 이다. 펠렛상의 저밀도 폴리에틸렌을 기본 원료로 용액 성장법에 의해 다음과 같이 글라스 기판위에 제작하였으며 박막의 제작에 앞서 불순물에 의한 전기적 특성을 배제하기 위하여 크실렌을 용매로 하여  $140^\circ\text{C}$ 에서 용액으로 만든 다음 진공으로 강제 여과시킴으로서 산화 방지제나 계면활성제등 각종 첨가제와 분자량이 낮은 저분자량 성분들이 제거된 저밀도 폴리에틸렌을 얻었다. 불순물이 제거된 폴리에틸렌을 1wt% 농도로  $140^\circ\text{C}$ 로 수침분 용해시켜 슬라이드 글라스에 폭 2mm의 Al 하부 전극을 증착하여 준비한 전극위에 수회 적하하여 막을 제작하였다. 막 제작시 열처리하는 막을  $140^\circ\text{C}$ 로 올린후 2시간 정도 유지시킨 다음 시편의 냉각 조건을  $0.1^\circ\text{C}/\text{min}$ (Slow 1),  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ (Slow 2)로 서냉하고 얼음 및 액체 질소를 이용하여 급랭시켜 결정화도를 변화시켰다. 제작된 박막의 두께는 적하량 및 적하온도에 따라  $0.77\sim 1.83\mu\text{m}$ 의 두께를 나타냈으며 MIM (Metal-Insulator-Metal)구조를 만들기 위하여 하부전극은  $1000\sim 2000\text{\AA}$  정도의 두께로 증착하였으며 상부전극은 self-healing 절연특성을 얻기 위하여  $500\sim 700\text{\AA}$  정도로 얇게 증착하였다. 제작된 시편이 구조는 그림 1과 같다.

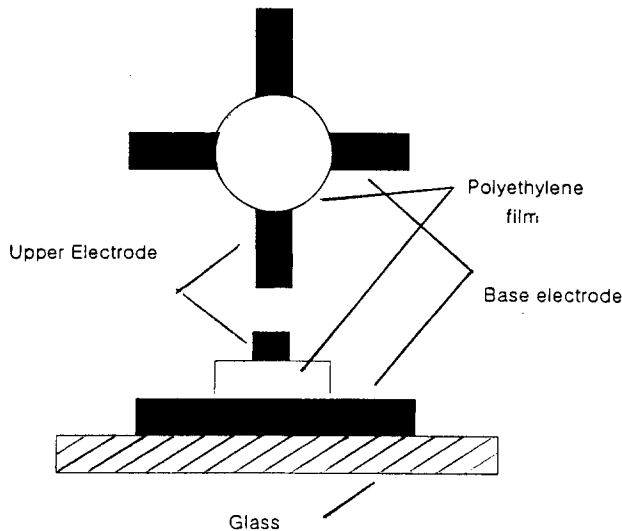


Fig. 1. Structure of fabricated specimens

### 2-2 실험방법

본 연구에서 사용된 시료의 경우 얇은 막이므로 두께 측정이 용이하지 않아 1MHz에서의 정전 용량을 측정후 저밀도 폴리에틸렌의 유전율을 2.28로 하여 두께를 계산하였다. 열처리 조건에 따른 결정화도 및 결정영역과 비결정영역의 구조를 확인 위하여 XRD 및 광학 현미경을 이용하였다. 결정화도는 결정 부분의 면적  $I_c$ 과 비 결정 부분의 면적  $I_a$ 를 구하여 다음식으로 계산한다.

$$C = \frac{I_c}{I_a + I_c} \times 100[\%]$$

전기 전도는 인가전원으로서 직류를 사용하였고 전류는 미소전류계 (Keithley, 610C)로 측정 하였으며 전류치는 전압 인가후 10분후의 값을 취하였다. 유전 특성은 HP 4149A 임피던스 어넬라이저를 이용하였으며 측정주파수 및 측정온도는  $1\text{KHz}\sim 10\text{MHz}$ ,  $-30\sim 120^\circ\text{C}$ 였다. 절연 파괴 특성은 동일 시료에 대해 다수의 시험을 행할 수 있고 약점(weak spot)이 제거된 저밀도 폴리에틸렌의 고유특성과 관련된 파괴 특성을 추구할 수 있는 self-healing 절연 파괴 방법을 행하였으며 상부전극에 (+)전압을 하부 전극에 (-)전압을 인가하고  $10[\text{V}/\text{sec}]$ 의 ramp voltage을 인가하여 전류가  $10[\text{mA}]$ 일때 회로를 차단하게 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2는 용액법에 의해 성장하지 않은 원시료와 용액법으로 성장시킨 시료의 냉각조건에 따른 XRD 회절 결과로서  $2\theta = 21.4^\circ$ 에서 결정 (110) 피크와  $2\theta = 23.6^\circ$ 에서 결정 (200) 피크가 나타나는 것을 알 수 있으며 냉각 속도가 빠를수록 결정 피크가 감소함을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 냉각 속도가 증가할 수록 분자쇄의 배열이 순조롭지 못하고 무질서한 운동이 급히 동결되므로 비정질 부분이 증가하여 나타나는 결과이다.

그림 3은 XRD 회절 결과로부터 계산한 결정화도로서 원시료의 경우 결정화도가 57%로서 기존에 보고된 저밀도 폴리에틸렌의 결정화도와 유사하고 냉각 속도가 증가할수록 결정화도가 감소함을 볼 수 있다.

그림 4는 냉각조건에 따른 저밀도 폴리에틸렌의 광학 현미경사진으로서 용액법을 이용하여 성장시키지 않은 시료의 경우 결정영역과 비결정영역을 구분할 수 없는 무질서한 구조이다. 용액법을 이용한 박막의 경우 결정이 두께 방향으로 성장하지 못하고 방사상의 면 방향으로 결정이 형성됨으로서 대면적의 결정이 형성되었으며 성장된 결정들이 만나 이루어진 영역이 명확하게 관측되었다. 결정의 형성은

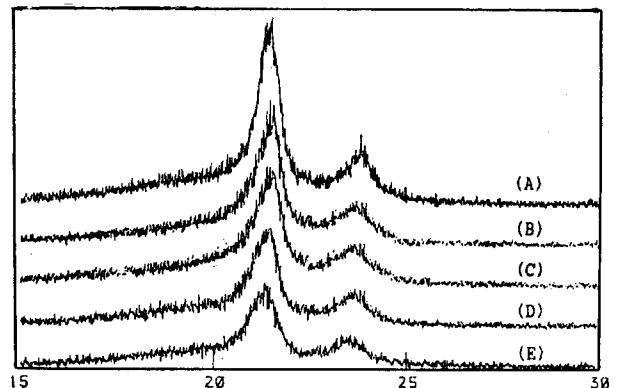


Fig. 2. The XRD results of low-density polyethylene as a function of cooling and quenching condition (A) NITROGEN QUENCHING (B) ICE QUENCHING (C) SLOW[1] (D) SLOW[2] (E) VIRGIN

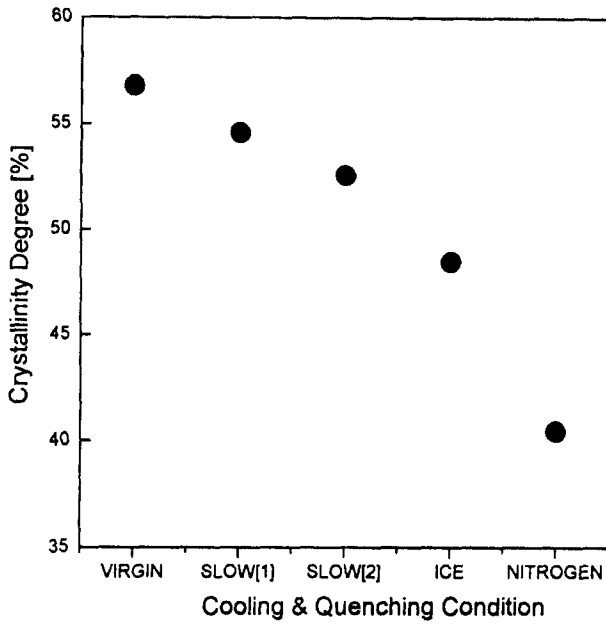


Fig. 3. The crystallinity of low-density polyethylene as a function of cooling and quenching condition

결정의 중심에 위치하고 있는 결정의 핵에서부터 출발하여 방사상으로 진행하며, 급랭의 경우 결정간의 영역 확장이 제한되어 결정의 크기가 작으나 서냉의 경우 결정의 성장에 제약을 덜 받기 때문에 보다 큰 결정이 형성되며 결정의 직경이 150~200 $\mu\text{m}$ 로 매우 큰 결정이 형성됨을 관측할 수 있었다. 이와 같이 결정이 크게 형성됨에 따라 광학 현미경으로도 충분히 관측할 수 있었으며 냉각 속도가 증가할수록 결정영역보다 분자량이 작은 섬유상의 분자쇄편인 비결정 증가하며 급랭에 따른 결정화도의 감소는 비정질부분에 해당하는 결정 경계면을 증가시키는 역할을 함을 볼 수 있다.

그림 5는 냉각조건에 따른 전류-전압 특성으로 냉각 속도가 증가할수록 전도전류가 증가함을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 결정영역에 비하여 비결정영역이 비중이 작고 구조적 결함이 작으므로 주입된 캐리어들의 평균자유행정이 결정영역보다 길어 결국 이동도나 캐리어수가 증가되기 때문이다. 저밀도 폴리에틸렌 필름의 전기전도에 관해서는 각종 이론이 제시되었으나 측정결과 냉각조건에 무관하게 다음과 같이 고찰할 수 있었다<sup>8)</sup>.  $3 \times 10^5$  [V/cm] 이하인 저전계에서의 전도전류는 캐리어의 거시적인 변위로서 생기는 드리프트 전류와 확산 전류를 의미하는 데 고분자 절연체에서는 캐리어 밀도가 작으므로 드리프트 전류에 비하여 확산 전류가 무시된다. 따라서 전도전류에 기여하는 것은 전자성 이라기보다는 이온성인 것으로 생각된다. 또한 저전계 영역에서는 냉각조건에 상관없이 전계에 비례하는 오옴 특성이 나타나는 데 이와 같은 결과는 25 $^{\circ}\text{C}$ 에서 측정의 경우 전계에 의한 활성화에너지가 열에 의한 활성화 에너지보다 크지 않기 때문에 고분자 제조과정에서 들어간 여러가지 불순물에 의해서 생긴 이온들이 전계 인가시 서서히 이동하여 오옴전류가 흐르는 것으로 예상된다.  $3 \times 10^5$  [V/cm] 이상의

고전계영역에서는 식 (1)과 같이 전압-전류특성이 2승 법칙을 만족하고 있어 이 시료의 전기전도기구는 냉각조건에 무관하게 고분자 물질의 전기전도기구로서 가장 유력시되는 공간전하제한전류(Space charge limited current) 이론에 지배되는 것 같다<sup>10)</sup>.

$$J = \frac{9}{8} \mu \epsilon \epsilon_r \epsilon_0 \frac{V^2}{L^3} = \frac{9}{8} \mu \epsilon \epsilon_r \epsilon_0 \frac{E^2}{L} \quad (1)$$

$J$ : 전류밀도,  $\mu$ : 캐리어 이동도,  $\epsilon_0$ : 진공의 유전율  
 $\epsilon_r$ : 비유전율,  $V$ : 인가전압,  $L$ : 시료의 두께

공간제한전류영역에서 냉각조건에 따른  $\log J - 1000/T$ 의 관계를 그림 6에 나타내었다.

그림에서 전류밀도  $J$ 는

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $U$ 는 활성화에너지로 실험 결과로부터 활성화에너지는 0.66[eV]에서 0.74[eV]의 값을 가지고 급냉 시료의 활성화 에너지의 분포가 서냉 시료에 비해 작게 나타남을 볼 수 있다. 일반적으로 활성화에너지는 트랩 위치의 깊이에 관계되는 데 비결정영역이 증가하면 캐리어의 쉽게 트랩됨으로서 전도전류가 증가하는것과 같이 활성화 에너지도 증가되는 것으로 예상된다.

고전계 영역에서의 활성화에너지와는 달리 저전계 영역에서의 활성화에너지는 냉각 조건에 따라 0.34~0.36[eV]로서 큰 차이를 보이지 않았으며 기존 보고<sup>10)</sup>와 유사한 결과를 보였다. 그림 7은 1KHz에서 측정된 온도 변화에 따른 저밀도 폴리에틸렌의 유전 손실로서 액체 질소로 냉각한 경우  $\beta$ 피이크의 크기가 증가하지만  $\alpha$ 피이크는 급격히 감소함을 볼 수 있으며 얼음으로 냉각한 경우는  $\beta$ 피이크의 크기가 액체 질소의 경우 보다 작게 나타나고  $\beta$ 피이크는 미세하게 나타났다. 그러나 가열 서냉시킨 경우 서냉 조건에 관계 없이  $\alpha$ 피이크가 관찰되고  $\beta$ 피이크의 크기가 액체 질소, 얼음 냉각의 경우보다 저온쪽으로 치우치고  $\alpha$ 피이크의 크기가 감소함을 볼 수 있다. 액체 질소 및 얼음으로 냉각한 경우  $\beta$ 피이크의 크기가 증가하고  $\alpha$ 피이크가 급격히 감소하는 것은 급냉으로 인하여 비결정영역의 증가로 비결정영역내의 측쇄(side chain)의 운동이 활발해지는 반면 결정영역이 상대적으로 감소함으로써 결정 영역내의 메틸유니트(CH<sub>2</sub> Unit)의 거동이 활발하지 않으므로 나타나는 결과로 예상된다. 이와달리 가열 서냉한 시료는 재결정으로 인하여 결정영역이 증가되면서 메틸유니트등의 완화가 증대되므로서  $\alpha$ 피이크가 크게 나타나는 것으로 예상된다.

그림 8은 주파수에 따른 유전율의 변화로서 주파수가 증가할수록 유전율이 약간 감소하며 급냉시료에서 더 높은 유전율이 나타난다. 주파수 증가에따라 유전율이 감소하는 것은 박막내에 존재하는 쌍극자의 재배열이 주파수를 따라가지 못하는 유전분산 현상 때문이라고 예상되며 급냉시료에

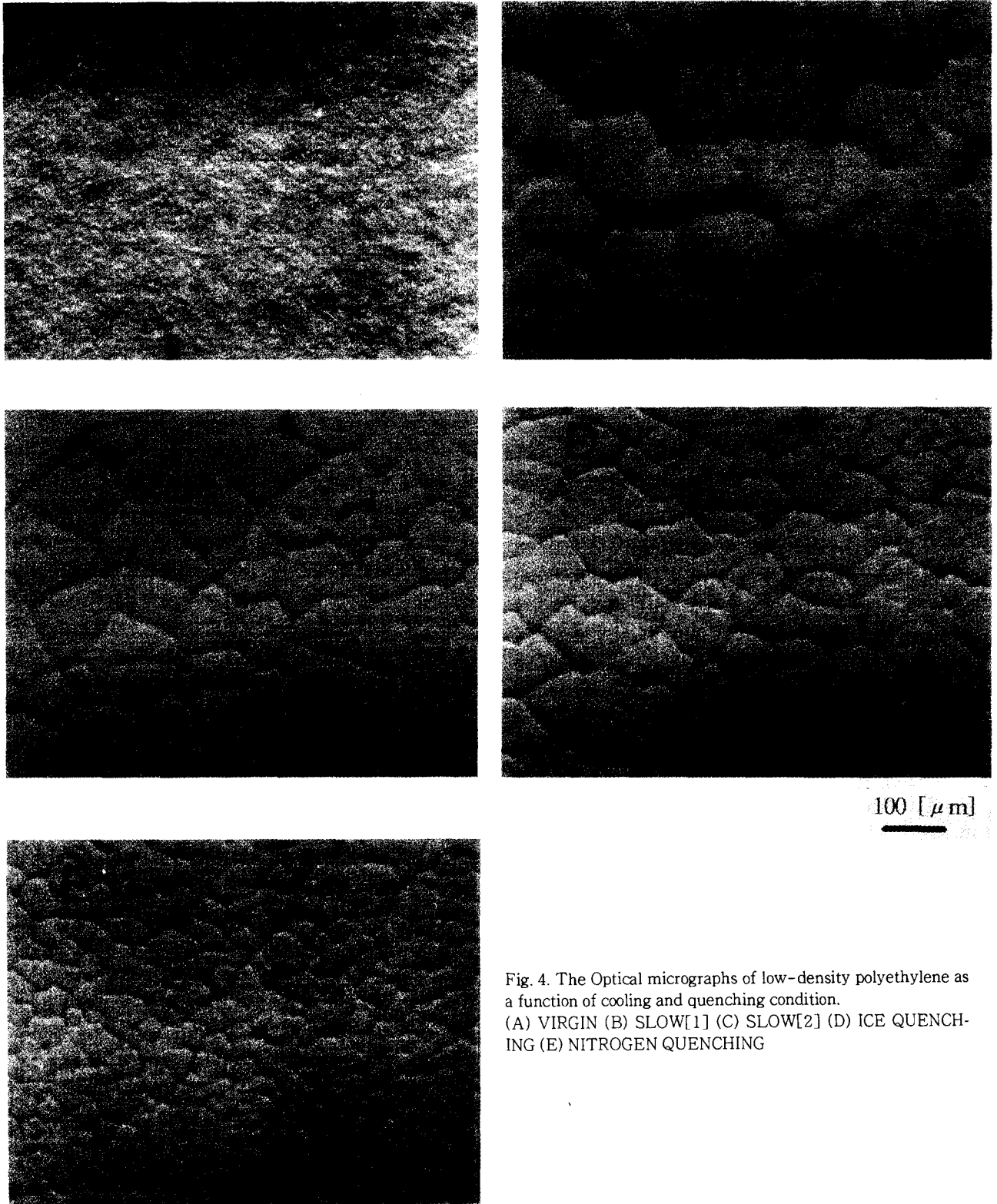


Fig. 4. The Optical micrographs of low-density polyethylene as a function of cooling and quenching condition.

(A) VIRGIN (B) SLOW[1] (C) SLOW[2] (D) ICE QUENCHING (E) NITROGEN QUENCHING

서 유전율이 크게 나타나는 것은 비정질 부분에 형성된 카아보닐기(C=O)에 의해 분자쇄편 사이의 가교 활동이 증가하면서 유전율이 증가된 것으로 예상된다.

그림 9는 냉각 조건을 달리한 시편의 주파수 변화에 따른 유전 손실로서 45KHz와 5MHz 부근에 두 분산 영역이 있

음을 알 수 있으며 이와 같은 결과는 비교적 긴 완화시간을 가지는 분자쇄편의 쌍극자와 비교적 짧은 완화시간을 가지는 분자쇄편의 쌍극자 분포가 분산되어 존재함을 보여주고 있다. 완화시간이 짧은 분자쇄의 배향 분극에 기인하는 5MHz 부근에 완화강도는 서냉 시료보다 급냉 시료에서 매

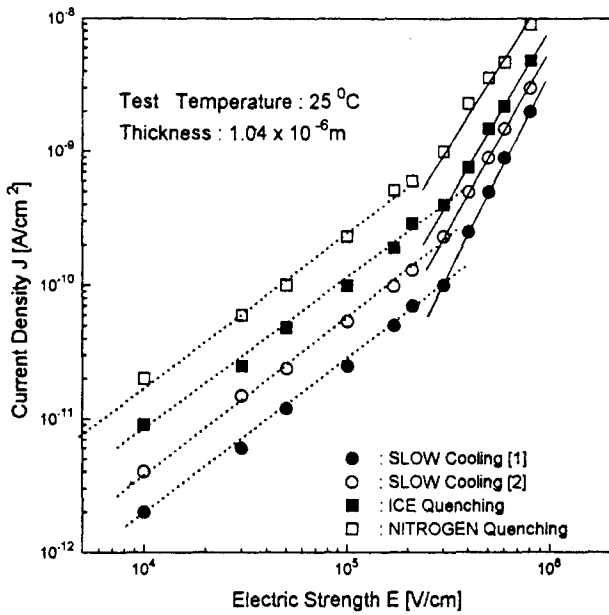


Fig. 5. The V-I characteristics of low-density polyethylene as a function of cooling and quenching condition

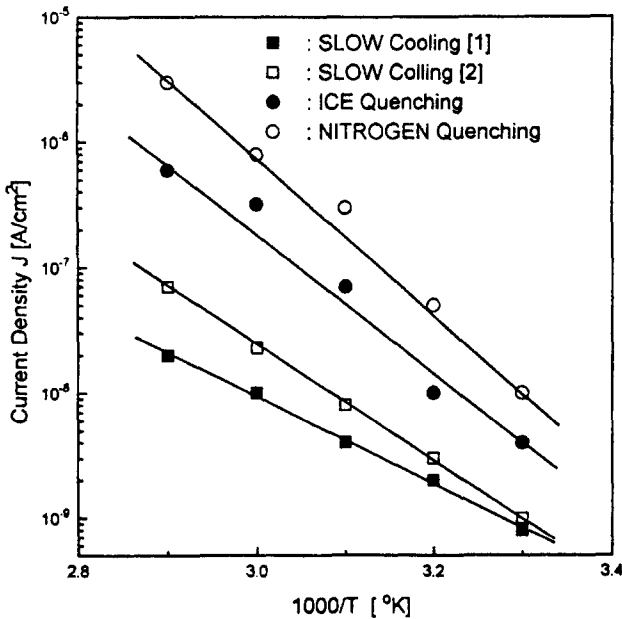


Fig. 6. The logJ-1000/T characteristics of low-density polyethylene as a function of cooling and quenching condition

우 크게 나타나며 완화시간이 더 큰 긴 분자쇄의 배향 분극에 의한 45KHz 부근의 완화강도는 서냉시료나 얼음으로 냉각한 시료에서는 비슷한 값을 보이고 액체 질소로 냉각한 경우 다소 큰 값을 보여주고 있다.

용액성장법에 의해 작성한 폴리에틸렌 박막을 이용한 절연과피시험은 폴리에틸렌의 고체구조와 절연과피특성과의 관련성에 대한 기초자료를 제공하는 외에 고분자의 절연과피연구에 있어서 다음과 같은 잇점이 있다<sup>11,12)</sup>. 첫째, Self-healing 절연과피를 이용함으로써 동일시료에 대해 다수회의 시험을 행할 수 있고, 또한 약점(weak spot)이 제거

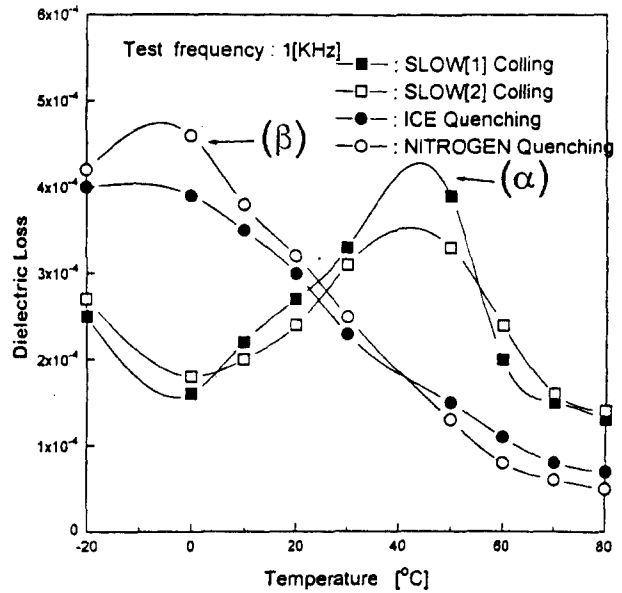


Fig. 7. The dielectric loss of low-density polyethylene at various temperature.

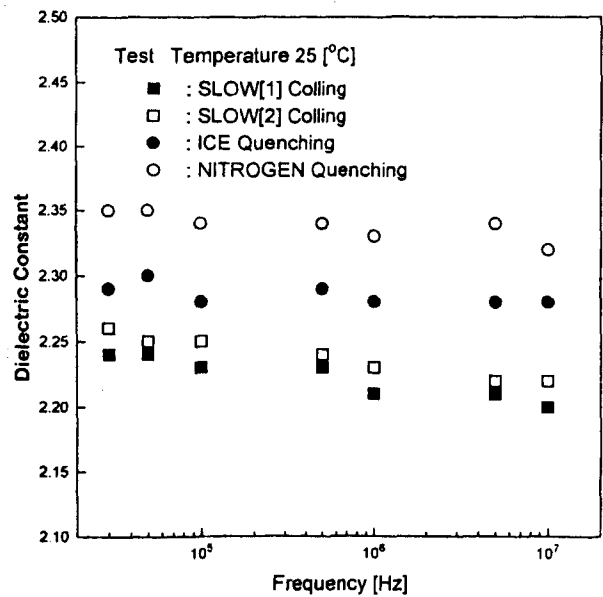


Fig. 8. The dielectric constant of low-density polyethylene at various frequency

되므로 폴리에틸렌 고유특성과 관련된 절연과피특성을 추구할 수 있다. 둘째, 동일시료에 대해 시험 조건을 변화하여 시험을 행할 수 있다. 특히, 고분자의 고체구조는 시료 작성시의 제조조건에 많은 영향을 받으므로 일정한 고체구조를 가진 다수의 시료를 준비한다는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 데이터 처리에 있어 통계적수법이 채용되거나 self-healing 절연과피를 이용하면 이러한 난점을 어느정도 해결할 수 있다. 특히, 박막형의 절연막에서는 매우 작은 불순물에 의해서도 절연특성에 많은 영향을 받게 되며 박막 고유의 절연내력에 미치는 영향을 제거하여야만 막자체의 순수 절연과피 강도를 구할 수 있다. 이와 같이 막 두께가 매우 얇은 박막형 절연재료의 경우 절연과피는 self-healing 절연과피를 이용하면 보다 정확한 파괴전계를 구

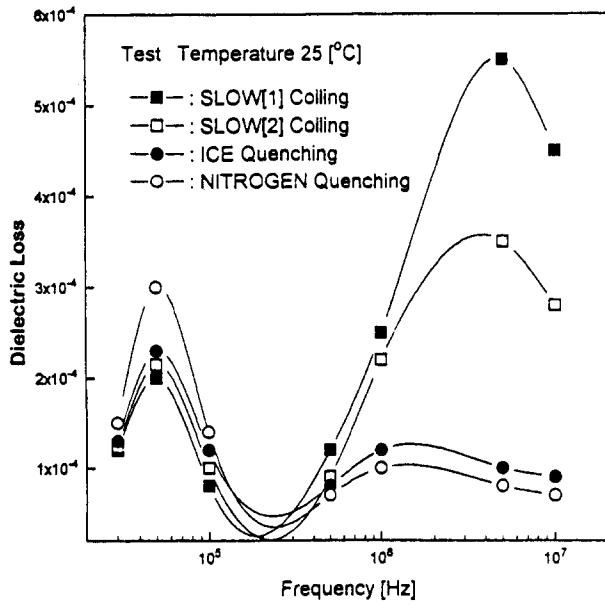


Fig. 9. The dielectric loss of low-density polyethylene at various frequency.

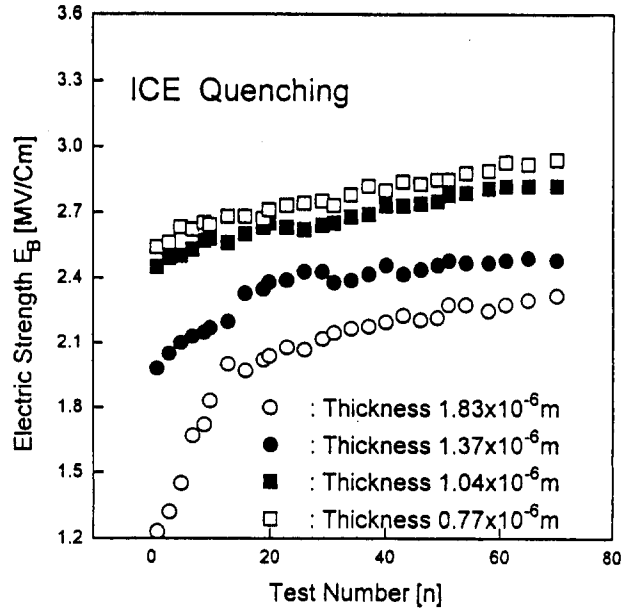


Fig. 11. The dielectric breakdown field properties of low-density polyethylene film as a function of thickness

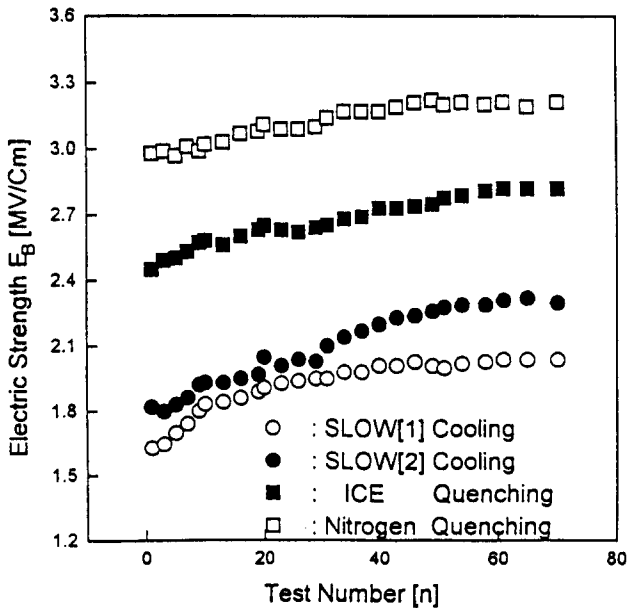


Fig. 10. The dielectric breakdown field properties of low-density polyethylene on the number of breakdown test

할 수 있다. self-healing 절연파괴법은 동일한 시료에 전압을 서서히 증가시키면 불순물 혼입에 의한 절연의 약점부에서 저전압에서도 상하 전극간에 방전이 발생하며, 방전시 발생하는 열로 방전을 일으킨 지점을 중심으로 높은 열이 발생하게 된다. 이때 방전이 발생하는 순간 전류를 신속히 차단하면 높은 열은 방전부분에만 국한 되고 넓은 범위로 확산되지 않고 방전부분만 국소적으로 전극이 용융, 기화됨으로서 그 부분의 전극이 자동적으로 제거되도록 하는 방법이다. 이와 같은 방법에 의해 절연이 취약한 부분만의 전극을 제거한 후 동일한 시료에 다시 인가전압을 저전압으로 점차 증가시켜 가면 이전에 전극이 제거된 절연 약점부는 다음번 파괴시 작용을 하지 못하게 되며, 다른 불순물 입자에 의한 새로운 절연 약점부에서 방전이 발생하고 그 부분

의 전극에 제거된다. 이와 같은 동작을 수십회 이상 반복해 가면 불순물이 자리한 부분이 순차적으로 제거되어 절연과 괴를 일으키는 전압은 점차 상승하게 되고 파괴전압은 더 이상 증가하지 않고 포화되게 되며 이때 순수한 폴리에틸렌만의 파괴전계를 얻을수 있다. 이때 자기절연회복 파괴는 상하부 전극의 두께와 전류 및 전류의 차단시간에 영향을 받게 되어 전극의 두께가 너무 두꺼울 경우에는 전극이 제거되지 못하는 결과를 가져 오게 된다. 그림 10은 두께가 1.37 $\mu$ m인 시료에 대해 전압상승율 10[V/sec]로 하여 냉각 조건을 달리한 시편의 절연파괴전계  $E_B$ 와 시험횟수 N과의 관계를 나타낸 측정 결과로서 냉각속도가 증가할 수록 절연 파괴전계가 증가하고 있으며 증가폭은 적게 나타난다. 급냉 조건이 빠를수록 즉, 결정화도가 낮을수록 절연파괴전계가 높아지고 있는 데 이와 같은 결과는 결정성의 저하는 불순물 준위쪽의 증가를 초래하고 이에따라 에너지 변환 과정에서 비결정부에 존재하는 불순물 준위에 트랩된 전자와 전도 전자 사이의 상호작용에 의해 에너지를 잃게 되어 전자가 속이 활발히 진행되지 못하므로서 나타나는 결과로 예상된다<sup>13)</sup>. 또한 시험 횟수가 증가함에 따라 절연파괴전계가 증가함을 볼 수 있으며 대략 30여회 이상 반복하면 파괴전계가 거의 포화되어 일정한 값을 나타낸다. 절연파괴 곡선이 포화된 상태에서의 파괴전계가 불순물의 영향이 개입되지 않은 순수한 저밀도 폴리에틸렌의 절연파괴전계를 나타낸다. 이때 파괴전계가 포화되는 횟수는 시료에 따라 다소 편차를 보이는데 이와 같은 결과 시료의 제작시 혼입되는 불순물의 농도에 따라 달라지는 것으로 볼 수 있다. 또한 포화 구간에서의 절연파괴전계의 상승은 고전계 인가에 의해 전기전도현상에서 고찰한 바와 같이 전극 바로 앞에 동전하가 축적된 공간전하의 형성에 의해 캐리어의 주입이 억제되고 전극간의 전계가 완화되므로서 나타나는 결과로 예상된다.

그림 11은 얼음 냉각한 시료의 두께에 따른 절연과괴전계 의존성을 나타낸 것으로 시료의 두께가 클수록 절연과괴전계는 얇은 쪽의 시료에 비해 낮게 나타났으며 시험 횟수가 증가함에 따라 절연과괴 강도가 급격히 증가함을 볼 수 있다. 절연과괴 방전로의 형성은 전계 및 열에너지에 의한 전자들간의 상호작용과 전자와 물질 격자 및 결합들과의 상호작용 증가로 인한 캐리어 수의 급증에 따라 발생하는 데 절연체의 두께가 증가할수록 결정 영역과 비결정 계면의 특성 변화와 같은 고분자 구조상의 변화로 인하여 계면에 존재하는 결합등이 증가하여 절연과괴전계가 감소하는 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

용액 성장법에 의해 작성한 저밀도 폴리에틸렌 박막의 냉각속도에 따른 결정화도, 전기전도기구, 유전특성 및 절연과괴특성으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 냉각조건에 따른 XRD 및 광학 현미경 사진으로부터 결정화도를 구한 결과 냉각속도가 증가할수록 감소하고 비결정 부분이 증가함을 볼 수 있다.

2) 저전계 영역에서의 냉각조건에 따른 전기전도기구는 오옴의 법칙을 따르며 활성화에너지는 냉각 조건에 따라 큰 차이를 보이지 않고 냉각 속도가 증가할수록 전도 전류가 증가함을 볼 수 있다.

3) 고전계 영역에서는 냉각조건에 따른 전기전도기구는 공간제한전류특성을 보이며 활성화 에너지는 냉각 속도가 증가할수록 0.66[eV]에서 0.74[eV]로 증가함을 볼 수 있다.

4) 온도변화에 따른 유전손실 특성의 경우 냉각 속도가 증가할수록  $\beta$ 피크가 증가하지만  $\alpha$ 피크가 급격히 감소하며 주파수에 따른 유전 손실특성 측정 결과 45[KHz] 부근과 5[MHz] 부근에서 최대값을 보이며 특히 5[MHz]에서는 서냉 시료보다는 급냉시료에서 더 큰 값을 나타낸다.

5) self-healing 절연과괴시험 결과 시험 횟수가 증가할수록 절연과괴전계가 증가하여 점점 포화되는 경향을 나타

냈으며 냉각 속도 증가할수록 증가하고 두께가 두꺼울수록 감소한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관(과제번호 : 95-33)으로 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

1. D.K. Das Gupta and M.K.Barbarez, J.Appl.Phys., (6), 867-872, (1973).
2. C.G.Garton and N Parkman, PROC. IEE, 123(3), 271-276, (1976).
3. D.M Taylor and T.J. Lewis, J.Appl.Phys., (4), 1346-1350 (1971).
4. Kazuo Iida, Jong Suk Kim, IEEE Trans. Electr. Insul,27(2) ,391-398, (1992)
5. Masayuki Nagao, Takashi Kimura, IEEE Trans. Electr. Insul, 25(4). 715-723, (1991).
6. K.Miyairi and T. Yamada, J.J.Appl.Phys., 16(8), 1449-1256, (1977).
7. A.Bradwell, R.Cooper and B.Varlow, PROC. IEE, 118(1), 247-249 (1971).
8. M. Nagao, G.Gawa and M.Ieda, IEEE Trans. Electr. Insul, 96-A(12), .605-610 (1976).
9. S.L.Aggarwal and G.P.Tilley, J.Polymer Sci., (18), 17-26, (1955)
10. Nath, T.Kaura and M.M Perlman, IEEE Trans. Electr. Insul., 24(5), 419-425, (1990)
11. Keiichi Kitagawa, Goro Sawa and Masayuki Idea, Jpn. J.Appl. Phys. 19(2), 389-196,(1980)
12. Keiichi Kitagawa and Masayuki Idea, Jpn.J.Appl. Phys.,21,(8) ,1117-1121,(1982)
13. Yasuhiro Tanaka and Norihro, IEEE Trans. Electr. Insul, 26(2). 258-266, (1991).