

## 고분자절연체의 내부전하분포

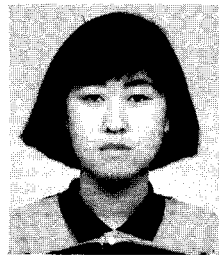
김 은 주 · 서 광 석

### 서 론

공간전하(space charge)는 절연체가 높은 전기장 내에 있을 때 주로 전극으로부터 주입된 전하에 의하여 형성되며, 이 공간전하가 절연체 내에 장기간 동안 축적되면 절연재료의 수명에 심각한 영향을 미칠 수 있다는 사실은 널리 알려져 있다. 특히 고전압용 전선의 절연에 있어서 이러한 공간전하의 역할은 매우 중요한데, dc의 경우 절연체의 내부에 축적된 전하가 번개(lightning strike) 또는 반복적인 스위치 조작(switching surge) 등으로 인하여 발생하는 순간적인 극성전환(polarity reversal)에 의하여 절연과파(dielectric failure)를 일으킬 수 있다. 또한 ac인 경우 돌출물, 기공, 또는 불순물 주위에 축적된 공간전하에 의하여 트리가 발생하므로 dc에서와 마찬가지로 공간전하의 영향을 크게 받는다고 할 수 있다. 이때 극성의 반복적인 변화에 의하여 전자는 매우 높은 에너지를 얻어 소위 hot electron이 되며, 이 hot electron에 의하여 절연체의 열화가 촉진되기도 한다. 따라서 절연재료의 절연수명을 연장하여 절연재료로서의 신뢰도를 향상시키기 위하여는 공간전하의 축적을 방지하여야 하며 또한 공간전하의 거동에 대한 깊은 이해가 있어야 한다.

유기절연체, 특히 전선의 절연에 가장 많이 쓰여지고 있는 폴리에틸렌에서의 공간전하의 거동을 연

구하기 위한 노력은 오랜동안 지속되어, 전기전도, 전하의 축적 및 완화(charge storage and decay), 또는 내부전하분포 등에 대한 연구는 이미 많은 성과를 얻었다. 전기전도에 관한 연구는 간단한 실험장치를 이용하여 절연체 내로 주입되는 전하의 종류(type of charge) 또는 형성된 전하의 이동경로(conduction mechanism) 등에 관한 정보를 제공한다. 한편, 전하의 축적 및 완화에 대한 연구는 절연체에 형성된 전하가 어떤 경로에 의하여 저장 또는 완화



김은주  
1988 고려대 재료공학과 (공학사)  
1988~ 럭키중앙연구소, 연구원  
1990  
1990~ 고려대 재료공학과  
현재 대학원생(석사과정)



서광석  
1982 고려대 재료공학과 (공학석사)  
1987 미국 코네티컷 주립대학 고분자(공학박사)  
1987~ 미국 MIT, 고전압연구소  
1988 Post-Doctoral Associate  
1989~ 고려대 재료공학과  
현재 조교수

### Internal Charge Distribution in Polymeric Insulators

고려대학교 재료공학과(Eun Joo Kim and Kwang S. Suh, Dept. of Materials Science, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

되는 지 등에 관한 많은 정보를 제공해 주며, 또한 내부전하분포에 대한 연구는 어떤 극성의 전하가 시료의 어느 부분에 얼마나 존재하는지를 직접적으로 알려 준다. 이들 중에서 내부전하분포 및 전하량에 대한 정보는 절연체 내에 공간전하가 실제로 어떻게 분포되어 있는가를 알려주므로 절연체의 절연수명에 대한 연구에 있어서 매우 중요한 역할을 할 것으로 보인다. 절연체 내에 존재하는 전체 공간전하량은 열자격전류(TSC; thermally stimulated current) 방법에 의해서도 측정이 가능하기는 하지만, 이 방법은 절연체에서의 공간전하의 거동을 직접 측정하는 것이 아니라 외부회로(external circuit)에서 측정된 전류로부터 절연체내의 공간전하의 특성을 추측하는 방법이므로 절연체 내에 존재하는 전하의 분포 상태를 직접적으로 측정하기에는 부적당한 방법이다.

절연체 내부에 존재하는 공간전하의 극성 및 분포를 직접 측정하는 방법은 sectioning 방법과 probe를 사용하는 방법들이 있다. Sectioning 방법은 시료를 얇은 조각으로 잘라 각 조각의 전하량을 측정하는 방법인데 이 방법은 시료를 파괴시킨다는 단점 때문에 거의 사용되지 않고 있다. 반면에 probing 방법은 압력이나 전기적인 형태의 자극을 probe로 이용하여 시료내부를 scan하는 방법으로 비파괴적인 방법이다.<sup>6,8-10</sup> Probing 방법은 실제의 전선시료에 응용하기는 아직 이른 것으로 보이나 실험실적인 시료에 대하여는 성공적인 연구결과를 보이고 있는데, 앞으로 이에 대한 많은 연구가 이루어져 머지 않은 장래에 전선시료에 응용될 수 있으리라고 생각 된다. 특히 이 방법은 전선에 전압이 걸려 있는 상태에서 전선의 열화정도를 예측하는 소위 활선진단(live-line test) 방법에 이용될 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본고에서는 내부전하분포를 직접적으로 측정할 수 있는 probing 방법에 대한 측정원리, 측정장치 그리고 실제응용에 등에 대하여 고찰하고자 한다.

### 측정원리

내부전하분포를 측정하는 방법들의 기본원리는 다

양한 소스로 부터 절연체에 가해진 자극에 의해 공간전하에서 발생한 전기적인 신호를 측정하여 절연체 내부에 존재하는 공간전하의 분포를 알아 내는 방법이다.<sup>7,8</sup> 시료에 가해지는 자극으로는 압력과와 전기파가 가장 많이 사용되고 있으며 측정하는 전기신호는 전압 또는 전류이다. 절연체내의 공간전하의 극성과 분포를 측정하는 방법은 시료에 가해지는 자극과 그 자극의 발생 방법에 따라 여러가지 명칭으로 불리우는데, 이들이 Fig. 1에 나와 있다. 시료에 가해지는 자극이 전기펄스인 경우가 전기음향펄스 방법(Electro-Acoustic Pulse Method)으로서 시료에 가해진 전기펄스가 시료 내부에 존재하는 전하에 의해 음향파(acoustic wave)로 바뀌어지고 압전소자를 이용하여 이 음향파를 전기신호로 전환하여 측정하는 방법이다. 시료에 가해지는 자극이 압력파일 경우 압력파전파방법(PWP 방법: Pressure Wave Propagation Method)이라고 불리우며 압력파의 발생방법에 따라 레이저유도 압력파방법(LIPP 방법: Laser Induced Pressure Pulse Method), 압전펄스방법(Piezoelectrically Generated Pressure Pulse Method) 등으로 나뉘어진다. 레이저유도 압력파방법은 시료표면에 있는 타겟에 에너지가 매우 높은 레이저 펄스를 조사하여 순간적으로 타겟이 가열될 때 발생하는 열팽창을 이용하여 압력파를 발생시키는 방법으로서, 이 방법이 압력파전파방법을 대표하고 있다.<sup>6-8,11</sup> 압전펄스방법에서는 시료표면에 압전소자를 부착시킨 다음 이 압전소자에 전기파를 가하여 발생시킨 압력파를 시료표면에 가한다.<sup>8,13</sup> 이때 스텝형태 또는 펄스형태의 압력파를 사용하여 전류 또는 전압을 측정하는데, 폐회로(short circuit)에서는 전류를 그리고 개회로(open circuit)에서는 전압을 측정한다.<sup>6,8</sup>

전기음향펄스방법의 측정원리는 다음과 같이 설명된다.<sup>9,12</sup> 공간전하가 존재하는 시료에 전기펄스가 가해지면  $F=qE$ 의 관계식에 따라 공간전하는 가해진 전기펄스에 의해 전기력(Electric force)을 받게 된다. 전기력을 받은 공간전하는 비록 미세하기는 하지만 움직이게 되어 압력파가 발생하는데, 이것을

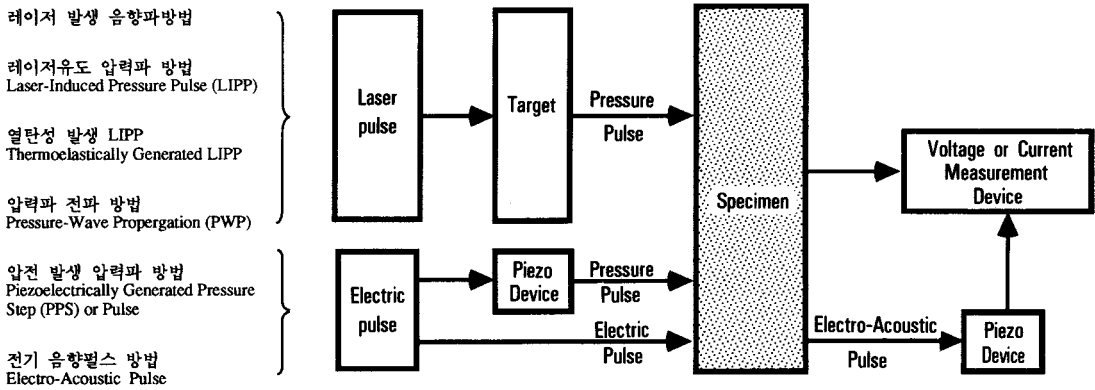


Fig. 1. 자극의 종류 및 시스템의 구조에 따른 명칭

소위 전기음향펄스라고 한다. 이렇게 발생된 전기음향펄스는 압전소자에 의해 전기신호로 전환되어 오실로스코프로 측정된다.

시료에 존재하는 공간전하와 그에 따라 발생한 음향펄스 및 압전소자에 의해 전환된 전기 신호와의 관계는 Fig. 2와 같다.<sup>9,12</sup> Fig. 2의 (a)에 나와있는 바와 같이 펄스형태의 전기장이 가해지는 순간 전하  $q_1, q_2, q_3$ 에 전기장이 동시에 가해진다. Fig. 2의 (b)는 전하가 있는 위치를 나타낸다. 전하가 있는 위치에서 전기음향펄스인 압력과  $P(x)$ 가 발생하는데, Fig. 2의 (c)에서 알 수 있듯이 이들 압력파의 위치는 전하의 위치와 같고 각각의 형태는 펄스형태이며 amplitude는 각 위치에 있는 전하의 양에 비례한다. 전기장에 의해 모든 전하에서 동시에 발생한 전기음향펄스는 압전소자에서 가까운 위치에서 발생한 전기음향펄스부터 먼저 압전소자에 도달하여 전기신호로 전환된다. 공간전하의 위치에 따라 발생한 전기음향펄스가 압전소자에 도달하는 시간이 각각 다르게 되며 이로부터 공간전하의 위치를 알 수 있다. Fig. 2의 (d)는 시료내에 있는 전하의 위치와 압전소자를 거친 후 탐지된 전기신호의 피크이다. 여기에서 전기신호  $v_s(t)$ 는 실제 공간전하분포를 나타내고 있는 Fig. 2의 (b) 또는 Fig. 2의 (c), 즉 전하에 의해서 발생된 전기음향펄스  $p(t)$ 와 그 형태가 일치하지 않는다. 다시 말하면 실제 공간전하분포로부터 약간 변형되어 있다. 이것은 압전소자가

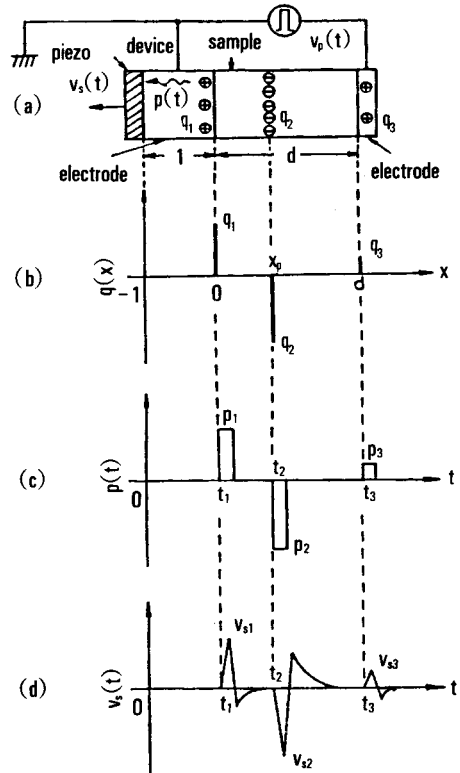


Fig. 2. 전기음향펄스방법 기본원리 : (a) 압전소자, 전극, 시료 및 전극의 배열, (b)  $q(x)$ : 시료 내에 분포되어 있는 전하, (c)  $p(t)$ : 시간의 함수로 나타나는 전기음향펄스(electro-acoustic pressure wave), (d)  $v_s(t)$ : 압전소자로부터 출력되는 전압신호

전기음향펄스  $p(t)$ 를 전기신호  $v_s(t)$ 로 전환시키는 과정에서 압전소자의 주파수에 따른 반응(frequency response)이 일률적이지 못하기 때문이다. 따라서 시료내의 전하분포를 정확히 구하기 위하여 탐지된 전기신호  $v_s(t)$ 를 deconvolution하여 변형되지 않은 실제의 공간전하분포를 나타내도록 하여야 한다.

압전소자로 부터 나온 전압신호를 deconvolution하여 전하분포를 얻는 과정을 Fig. 3과 함께 설명하면 다음과 같다. 시료내에  $\rho(x)$ 의 전하밀도로 존재하는 전하의 양은  $\rho(x) \cdot \Delta x$ 이다. 이때 전기펄스에 의해 가해지는 전기장을  $e(t)$ 라고 하면 전하에 가해지는 전기력과 전하의 관계는 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta f(x, t) = \rho(x) \cdot \Delta x \cdot e(t) \quad (1)$$

식 (1)에서의 전기력은 곧 전하에 의해 발생하는 전기음향펄스를 의미하는 것이므로 압전소자에 도달하는 전기음향펄스와 시료내에 존재하는 전하와의 관계는 다시 구해 질 수 있다. 그런데 압전소자에 도달하는 순간의 전기음향펄스는 전극과 시료를 통과하므로 전하에서 전기음향펄스가 발생한 후 ( $\ell/v_{el}$

$+x/v_s$ )시간 후에 압전소자에 도달한다. 여기에서  $v_{el}$ 는 전극에서의 음속,  $v_s$ 는 시료에서의 음속,  $\ell$ 은 전극의 두께이다. 따라서 시간이  $t$ 인 순간에 압전소자에 달하는 전기음향펄스는 시간이  $(t-\ell/v_{el}-x/v_s)$ 일 때 발생한 것이므로 식 (2)와 같이 된다. 이때  $K$ 는 상수이다.

$$\begin{aligned} \Delta p(x, t - \ell/v_{el} - x/v_s) \\ = K \cdot \rho(x) \cdot e(t - \ell/v_{el} - x/v_s) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)는 압전소자에 도달한 전기음향펄스와 시료내의 미소전하와의 관계이므로 시간이  $t$ 인 순간에 압전소자가 전환하는 전기음향펄스  $p(t)$ 는 식 (3)으로 표현될 수 있다.

$$p(t) = K \int \rho(x) \cdot e(x, t - \ell/v_{el} - x/v_s) dx \quad (3)$$

여기에서 전극의 두께는 일정하므로  $\ell/v_s$ 는 상수이다. 한편 전하에서 발생한 전기음향펄스가 압전소자에 도달하기까지의 지연시간(delay time)을  $\tau$ 라고 하면  $\tau = x/v_s$ 이며 위치에 따른 전하밀도  $\rho(x)$ 를 지연시간의 함수로 나타내면  $r(\tau)$ 로 표현된다. 따라서 식 (3)은 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$p(t) = K \cdot v_s \int r(\tau) \cdot e(x, t - \ell/v_{el} - \tau) dt \quad (4)$$

그런데 식(4)는 함수  $r(\tau)$ 와 함수  $e(t)$ 의 convolution 형태이므로, 식 (4)를 푸리에 변환(Fourier transformation)하여 주파수의 함수로 바꾸면 식 (5)로 표현될 수 있다.

$$P(f) = K \cdot v_s \cdot R(f) \cdot E(f) \cdot \exp(-i2\pi f \cdot \ell/v_{el}) \quad (5)$$

식 (5)에서  $P(f)$ ,  $E(f)$ ,  $R(f)$ 는 푸리에 변환을 이용하여  $p(t)$ ,  $e(t)$ ,  $r(t)$ 를 주파수의 함수로 나타낸 것이다. 주파수의 함수형태로 표현하는 이유는 시간의 함수로 표현된 식을 deconvolution 하는 것보다 주파수의 함수로 표현된 식을 deconvolution 하는 것이 쉽기 때문이다. 압전소자에 의해 전기음향펄스  $p(t)$ 가 전압신호  $v_s(t)$ 로 바뀔 때의 관계를 주파수의 함수로 나타내면 다음과 같다.

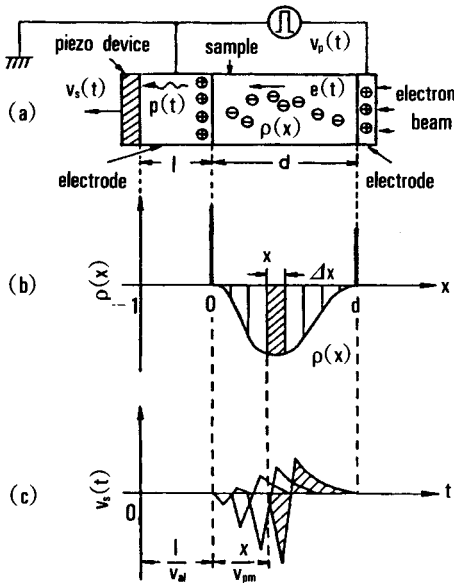


Fig. 3. 분포된 전하의 밀도  $\rho(x)$ 와 압전소자에서 출력된 전압신호  $v_s(t)$ 와의 관계

$$V_s(f) = H(f) \cdot P(f) \quad (6)$$

여기서  $V_s(f)$ 와  $P(f)$ 는  $v_s(t)$ 와  $p(t)$ 를 푸리에 변환을 이용하여 전환시킨 주파수의 함수들이며,  $H(f)$ 는 주파수의 함수로 나타낸 압전소자의 변환특성 (transfer characteristics)이다. 실제로 측정기기를 이용하여 측정하는 결과는  $v_s(t)$ 이므로 시료내의 전하분포  $\rho(x)$ 를 알기 위해서는  $\rho(x)$ 를 포함하는 함수  $p(t)$ 를 분석해 내어야 하는데,  $p(t)$ 는 압전소자에 의해 변형된 신호  $v_s(t)$ 로부터 deconvolution 과정을 통해 알게 된다. 주파수 함수의 형태인  $V_s(f)$ 로부터 deconvolution되어 구해진  $P(f)$ 는 역푸리에 변환 (inverse Fourier transformation)을 이용하면 쉽게  $p(t)$ 로 변환되는데, 이 때  $V_s(f)$ 로부터  $P(f)$ 를 구하기 위해서는 압전소자의 특성함수인  $H(f)$ 를 구해야 한다.  $H(f)$ 는 impulse를 이용하여 구하는데, 전극표면에만 전하가 존재하는 시료에 전기 impulse를 가하면 전극의 표면전하에 impulse 형태의 전기장  $e_\ell(t)$ 에 의해 impulse 형태의 음향파  $p_\ell(t)$ 가 발생된다. 이것은 앞에서 설명한 바 있는 전기장에 의해서 전기음향펄스가 발생하는 원리와 마찬가지로이다. 다른 점은 음향파가 시료 전체에 분포되어 있는 전하에 의해 발생하는 것이 아니라 시료표면에 있는 sheet 형태의 전하에 의해서 발생하기 때문에 impulse 형태의 음향파가 발생하는 점이다. 주파수의 함수형태로 나타낸 음향파와 전기장의 관계는 식 (7)과 같다.

$$P_\ell(f) = A \cdot E(f) \cdot \exp(-i2\pi f \cdot \ell/v_{e\ell}) \quad (7)$$

음향파가 압전소자에 의해 전압신호로 변환되었을 때의 관계를 주파수의 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$V_{s\ell}(f) = H(f) \cdot P_\ell(f) \quad (8)$$

$V_{s\ell}(f)$ 은 impulse를 가하였을 때 탐지된 전압신호의 주파수 함수형태이며,  $P_\ell(f)$ 은 그 때 전하에서 발생한 음향파를 주파수의 함수형태로 나타낸 것이고  $H(f)$ 은 압전소자의 특성함수이다. 그런데 실제로 impulse 형태인  $P_\ell(t)$ 를 주파수의 함수로 변환시키면  $P_\ell(f)$ 는 전 주파수 영역에서 일정한 크기(ampli-

tude)를 갖는 함수이므로 압전소자의 특성함수  $H(f)$ 는 impulse를 가할 때 탐지된 전압신호  $V_{s\ell}(f)$ 와 같은 형태이다. 한편 전하밀도를 구하기 위해 식 (3)으로부터  $r(\tau)$ 의 주파수 함수형태를 구해 보면

$$R(f) = A \cdot V_s(f)/K \cdot v_s \cdot v_{s\ell}(f) \quad (9)$$

이때 상수  $A$ 는 전체 전하량을 구하는 과정인 전하밀도의 적분조건에 따라 결정되는 상수이다.  $R(f)$ 를 구하면 역푸리에 변환을 이용하여  $r(\tau)$ 로 변환한 후 시료내에서의 음속을 고려하여 계산함으로써 전하밀도를 알아낼 수 있다.

지금까지 설명한 deconvolution 과정이 실제 실험에서 이용된 예를 Fig. 4와 함께 설명하면 다음과 같다. Fig. 4에서 (a)는 시료전체에 분포된 공간전하에 의해 탐지된 전압신호  $v(t)$ 이며 (b)는 (a)를 주파수의 함수로 나타낸  $V(f)$ 이다. (c)는 시료에 impulse를 가했을 때 시료표면의 sheet 전하에 의해 탐지된 전압신호  $v_\ell(t)$ 이며 (d)는 (c)를 주파수의 함수로 나타낸  $V_\ell(f)$ 이다. (e)는 (d)를 이용하여 (b)를 deconvolution한 후 시료의 음속을 고려하여 구한 시료의 전하분포  $\rho(x)$ 이다. (d)는 impulse 형태의 음향파에 의해 탐지된 전압신호  $V_{s\ell}(f)$ 이므로 앞에서 설명한 바와 같이 압전소자의 특성함수  $H(f)$ 와 같다. 따라서 실험에서 탐지된 전압신호(b)를 (d)로 나누면 변형되지 않은 음향파  $P(f)$ 를 구할 수 있으므로 이것으로부터  $\rho(x)$ 를 구한다.  $v_\ell(t)$ 로부터  $\rho(x)$ 를 구하기까지 푸리에 변환과 역푸리에 변환을 비롯한 모든 과정은 일반적으로 컴퓨터로 처리된다.

압력파전파방법의 원리는 다음과 같다.<sup>6</sup> 공간전하가 존재하는 시료에 압력파가 가해지면, 가해진 압력파에 의해 재료의 격자(lattice)가 움직일 때(일반적으로 격자의 압축이 일어난다) 시료내에 존재하는 공간전하가 원자격자를 따라 이동하는 효과와 그 효과로 인하여 쌍극자(dipole) 또는 전하의 밀도가 국부적으로 변화하여 비유전율(relative permittivity)  $\epsilon_r$ 이 변화하는 효과가 일어난다. 이 두가지 효과는 전극에 존재하는 영상전하(image charge)를 변화시

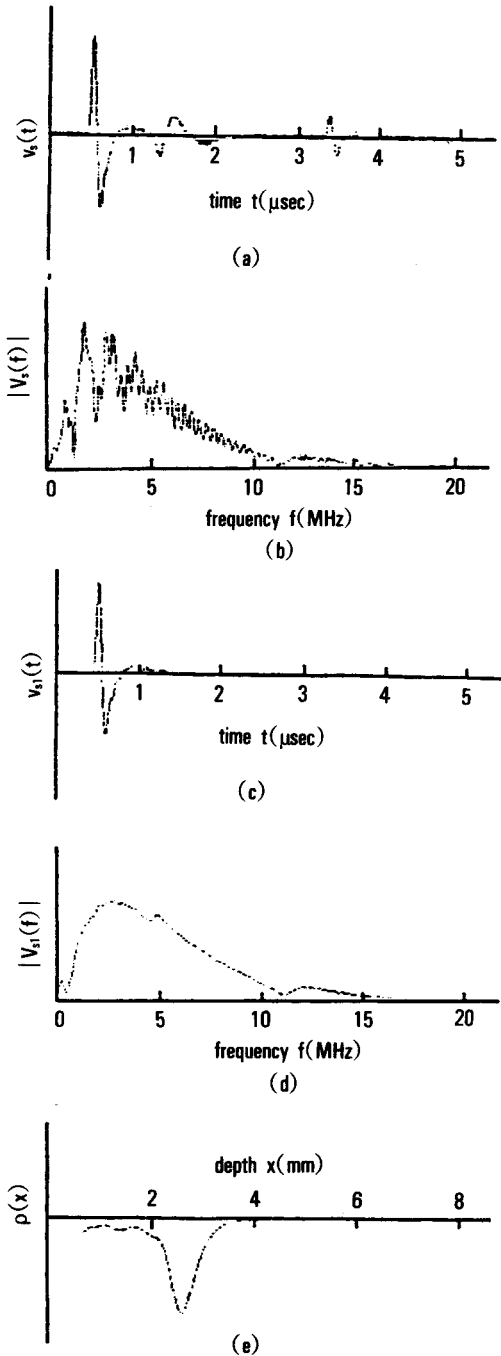


Fig. 4. (a) 탐지된 전압신호  $V_s(t)$ , (b),  $V_s(f)$  : 주파수의 함수로 나타낸  $v_s(t)$ , (c) 임펄스를 가했을 때 탐지된 전압신호  $v_{st}(t)$ , (d)  $V_{st}(f)$  : 주파수의 함수로 표현한  $v_{st}(t)$ , (e) deconvolution 처리하여 구한 결과

커 폐회로(short circuit)일 경우에는 전류를, 개회로(open circuit)일 경우에는 전압을 측정할 수 있게 한다. 시료내를 이동하던 압력파가 공간전하가 있는 위치에 도달하면 앞에서 설명한 바와 같이 영상전하의 fluctuation을 야기시키게 되며, 이 fluctuation이 피크로서 탐지된다. 이때 압력파는 일정한 속도로 시료내를 이동하므로 영상전하의 fluctuation이 언제 일어나느냐는 공간전하와 압력파가 언제 만나느냐를 결정한다. 이로부터 공간전하의 위치를 알 수 있으며, fluctuation이 일어나는 정도는 결국 그 위치에 존재하는 전하량과 직접적인 연관을 가지고 있다. 따라서 이 방법을 이용하여 공간전하의 분포 및 양을 측정할 수 있는 것이다. 외부회로에서 측정된 전압 또는 전류와 내부전하에 의한 전기장의 관계는 식 (10)과 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$V(t) = \chi G(\epsilon_r) \int E(z, 0) P(z, t) dz \quad (10)$$

$$I(t) = \chi C_0 G(\epsilon_r) \int E(z, 0) \partial P(z, t) / \partial t dz \quad (11)$$

여기서  $\chi$ 는 재료의 압축율,  $G(\epsilon_r)$ 은 압력에 따른 시편의 유전특성을 나타내는 비유전율의 함수이고,  $E(z, 0)$ 은 공간전하에 의해 형성된 시료내의 전기장의 분포이며,  $P(z, t)$ 는 가한 압력파의 형태(profile)이고,  $C_0$ 는 압축되지 않은 재료의 capacitance이다.  $V(t)$ 와  $I(t)$ 는 측정되는 값이고 재료내부의 전하밀도  $\rho(z)$ 는  $\rho(z) = \epsilon_r \partial E / \partial z$ 이므로 가한 압력파의 형태  $P(z, t)$ 를 알면 전하분포를 결정할 수 있다.  $V(t)$ 와  $I(t)$ 로부터  $\rho(z)$ 가 구해지는 산술적인 과정은 매우 복잡하고 또 많은 논문에서 이미 언급되어 있으므로 본고에서는 언급하지 않기로 한다.<sup>1,2,6</sup>

### 측정장치

공간전하분포를 측정하는 장치는 크게 시료에 자극을 가하는 부분, 전극, power supply, detector로 구성되어 있다. 시료에 가하는 자극은 전기파일 때와 압력파일 때 모두 펄스 또는 스텝형태이다. 펄스형태에서는 펄스의 폭과 rising time이, 그리고 스텝형태에서는 rising time이 측정된 공간 전하분포의 분

해능(resolution)을 좌우하는 가장 큰 요인이다. 레이저를 이용한 압력파전파방법에 있어서 펄스의 폭이 작을수록 그리고 rising time이 짧을수록 분해능이 우수하다. 그러나 펄스의 폭과 rising time이 너무 짧으면 고주파수 성분이 많아지고 이들이 시료내에서 감쇄(attenuation)되어 탐지된 피크가 크게 변형될 우려가 있다. 따라서 펄스의 폭과 rising time은 분해능과 감쇠효과를 동시에 고려하여 시료의 두께에 적당하게 결정되어야 한다. 폴리에틸렌의 경우 재료내의 음속은 2000 m/s 정도이므로 압력파가 2 mm 두께의 시료를 통과하는데에 1/ℓsec 정도의 시간이 걸린다.<sup>5,6</sup> 보통 폭이 3~10 n sec 정도이고 rising time이 4 n sec 정도인 pulse를 사용하거나, rising time이 1 n sec인 스템을 사용하여 좋은 결과를 얻고 있다.

Fig. 5는 전기음향펄스의 측정장치로서 본 연구팀이 이용하고 있는 장치의 개략도이다. 전압을 계속 가하면서 실험할 수 있도록 high voltage power supplier가 시료가 놓인 전극에 연결되어 있다. 시료에 자극을 가하는 장치로는 pulse generator가 이용되고 있으며 시료내에서 발생한 음향파는 압전소자에 의해 전기신호로 전환된다. 전기신호를 오실로스코프로 탐지한 후 컴퓨터로 받아들여서 신호처리과정을 거친 후에 결과를 출력한다. Detector로 쓰이고 있는 압전소자로는 Quartz, LiNbO<sub>3</sub> 또는 고분자 압전소자인 PVDF 등이 이용되고 있는데, 각 재료들은 고유의 특성을 가지고 있다. 특히 PVDF를 사용하면 고분자 재료와의 impedance match가 뛰어나기 때문에 많이 사용되고 있다.

Fig. 6은 압력파전파방법을 대표하는 레이저유도

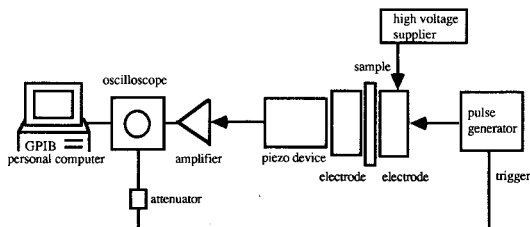


Fig. 5. 전기음향펄스방법의 장치

압력파방법의 실험장치이다. 레이저 발생장치와 타겟이 시료에 자극을 가하는 부분에 해당한다. 펄스 형태의 레이저를 타겟에 가하면 순간적으로 타겟이 가열되며 열팽창에 의해 펄스형태의 압력파가 발생된다. 이 압력파의 측정원리는 이미 앞에서 언급한 바 있다. 레이저유도 압력파방법에서는 레이저의 선택에는 두 가지 조건이 고려되어야 하는데 레이저 펄스의 균질성(homogeneity)과 폭(width)이다. 균질한 레이저 펄스의 발생은 균질한 압력파를 시료에 가하기 위한 필수 조건으로서 보통 높은 에너지를 낼 수 있는 Nd-Yag 레이저가 많이 사용되고 있다.<sup>5,6</sup> 레이저 펄스의 폭은 시료에 가해지는 압력파의 폭과 일치하게 되므로 앞에서 설명한 바와 같이 시료의 두께를 고려하여 결정되어야 한다. 타겟으로는 레이저가 발생하는 파장에서의 흡수계수가 크고 열전도도가 작으며 열에 의한 증발이 작은 재료가 이용되어야 한다. 일반적으로 실제전선의 구조와 같은 실험조건을 위하여 전선의 도체차폐층(conductor strand shield)로 이용되고 있는 polymer/carbon black composite film을 타겟으로 사용하고 있다.

### 대표적인 측정결과

먼저 Fig. 7에 나와 있는 deconvolution하지 않은 개략적인 공간전하분포도를 이용하여 본 결과를 해석하는 방법을 설명하면 다음과 같다. Fig. 7을 보면 x축은 시간을 나타내며 y축은 detector에서 탐지된 신호의 크기를 나타낸다. 이 y축의 크기를 전류 또는 전류밀도(current density)의 형태로 보정해 주어야 한다. Fig. 7에는 1과 2로 표시된 두 개의 큰 피크가 있으며 1번 피크의 한쪽에 shoulder 형상의 조그만

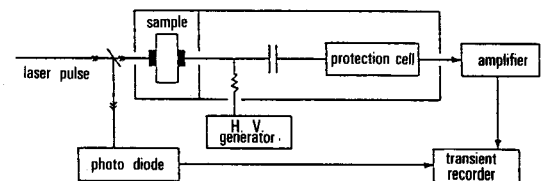


Fig. 6. LIPP방법의 장치 개요도

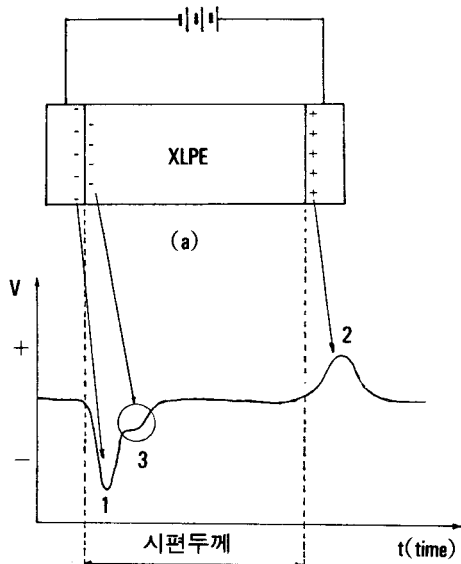


Fig. 7. 전기음향펄스방법으로 측정된 결과의 해석방법

피크 (피크번호 3번)가 있다. 또한 1번 피크는 음극의 극성을 갖고 2번 피크는 양극을 띠고 있으며 3번 피크의 극성은 음극임을 알 수 있다. 한쪽 전극에 양극의 전압을 가하여 양전하가 생기면 반대편 전극에는 음전하가 유도된다. 따라서 이 두 전하의 극성은 언제나 서로 반대로 나타난다. 먼저 시편의 정확한 두께는 이 두 피크간의 거리와 압력파가 고분자 내에서 전파되는 속도로서 알 수 있으며 이로부터 전하의 위치를 알 수 있다. 또한 전극표면에 형성된 전하의 양은 보정을 통하여 알 수 있으므로 그 amplitude를 이용하여 시료내에 분포하고 있는 전하의 양을 계산할 수 있다. Fig. 7에서 두 개의 큰 피크 (1번과 2번 피크)들은 전극에 존재하는 전하를 의미하며, 1번 피크의 한쪽에 있는 조그만 피크, 즉 3번 피크가 바로 절연체 내부에 존재하는 내부전하를 의미한다. 여기에서 3번 피크의 극성과 1번 피크의 극성이 동일하므로 이를 homocharge라고 부른다. 반대의 경우, 즉 내부전하의 극성과 전극에 위치한 전하의 극성이 서로 다를 경우도 있을 수 있는데 이러한 내부전하를 heterocharge라고 부른다. 따라서 내부전하는 homocharge 또는 heterocharge를 가지는

것이 일반적이거나 경우에 따라서는 두 종류의 전하를 모두 갖는 경우도 있다. 이것은 각 종류의 전하가 절연체 내부에 존재하므로서 상대방 전하를 유발하였다고 한다. 즉, homocharge가 존재할 경우에는 이 homocharge에 의하여 heterocharge가 유도되었거나 또는 heterocharge가 존재하므로서 그 주변에 homocharge가 유도되었다고 한다. Fig. 7의 경우에는 절연체에 가해진 전압에 의하여 절연체 표면에 homocharge가 축적되었고 이 homocharge에 의하여 그 주변에 heterocharge가 유도된 경우를 보여주고 있다. 이와 같은 공간전하의 축적은 시료의 전기장 분포를 변형시키는데 이종전하의 축적과 동종전하의 축적이 시료의 전기장분포에 미치는 영향은 각각 다르다. 시료표면에 이종전하가 축적될 경우 시료 전체에 걸리는 전기장은 외부전압에 의한 전기장에 비해 감소하고 전극과 시료 계면에서의 전기장이 증가하여 전극으로부터 전하주입을 쉽게한다. 반면에 동종전하가 축적될 경우 시료와 전극의 계면에 걸리는 전기장이 감소하여 전하주입이 억제되기는 하지만 시료 전체에 걸리는 전기장은 외부전압에 의한 전기장보다 증가한다. 이러한 시료의 전기장변화에 의해 표면에 축적된 공간전하는 그 양과 위치에 있어 일정한 평형상태에 도달하게 된다. 이미 발표된 실험결과에 의하면 전압을 가한 후 시료내의 공간전하가 축적, 이동하여 일정한 분포에 도달하기까지는 시료의 종류 및 온도에 따라 수 십에서 수 백시간이 걸리는 것으로 알려져 있다.<sup>7</sup>

최근 고분자절연체에 있어서 공간전하의 중요성이 대두되면서 절연체의 내부전하분포에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재까지 발표된 대부분의 연구는 주로 PMMA, PVDF 및 PE를 대상으로 하고 있다. PMMA에 전자를 주입한 경우의 내부전하분포가 Fig. 8에 나와 있다. 이 그림은 electron beam 발생기를 사용하여 PMMA에 전자를 주입하는 동안에 (a) 그리고 전자를 주입한 후 시간에 따른 전하 분포의 변화 (b) 등을 보여준다. 이 실험에 사용된 electron beam의 에너지는 0.5 MeV이고 조사율은 25 kGy/h이며 PMMA의 두께는 5mm이다. 그림에서



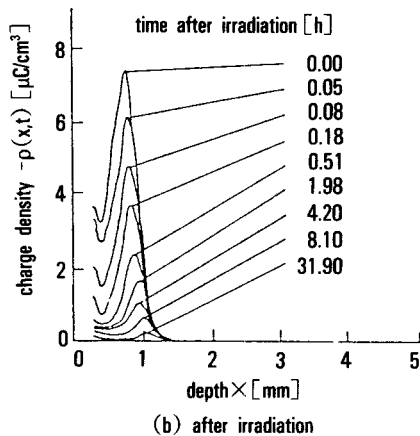
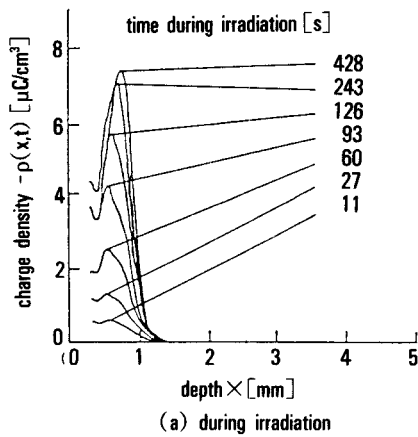


Fig. 8. (a) Electron beam 조사시간에 따른 PMMA의 내부전하밀도분포 : Electron beam 에너지 : 0.5 MeV, 조사율 : 25 kGy/h, (b) : Electron beam 조사 후 시간에 따른 전하밀도의 변화

볼 수 있는 바와 같이, electron beam 조사시간이 길수록 많은 양의 전자가 시료의 내부쪽에 축적된다는 사실을 알 수 있다. Fig. 8의 (b)는 electron beam 조사 후에 축적되었던 전자가 어떻게 감소되는지를 잘 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 electron beam 조사 후 수시간내에 상당량의 전하는 소멸되지만 일부분은 시료의 내부쪽으로 이동한다는 사실을 보여준다. Fig. 9는 electron beam 에너지가 클수록 더 많은 양의 전하가 더 깊은 내부로 축적되는 현상을 잘 보여주고 있다.

전선용 절연체재료로 이용되고 있는 폴리에틸렌의

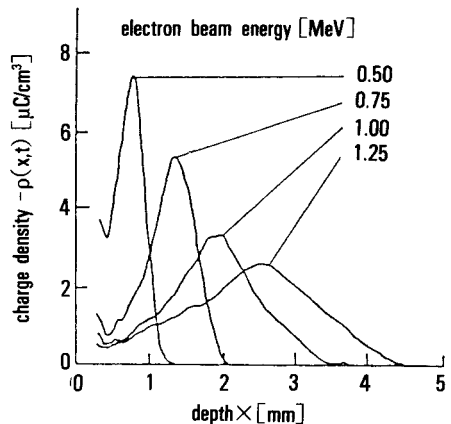
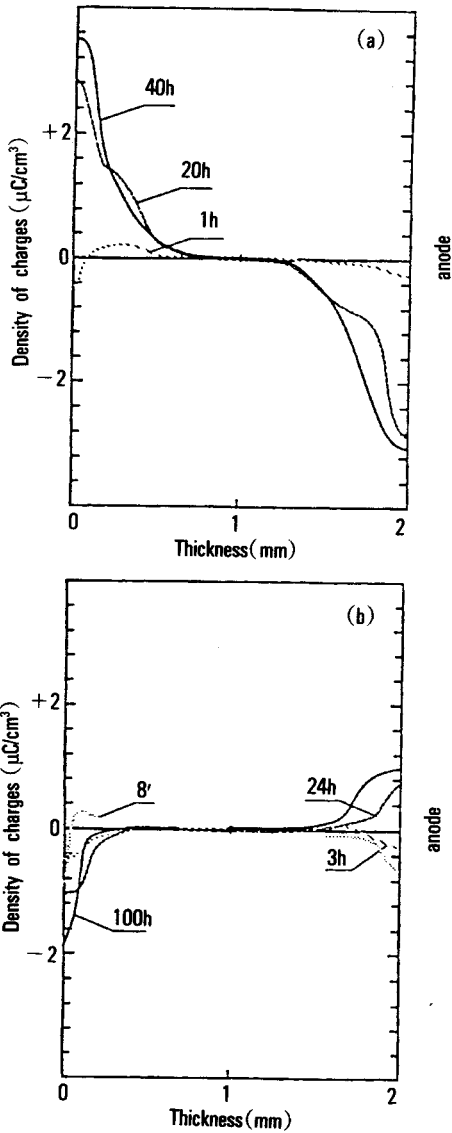


Fig. 9. 각 electron beam 에너지에서의 전하밀도분포 : 시료 : PMMA

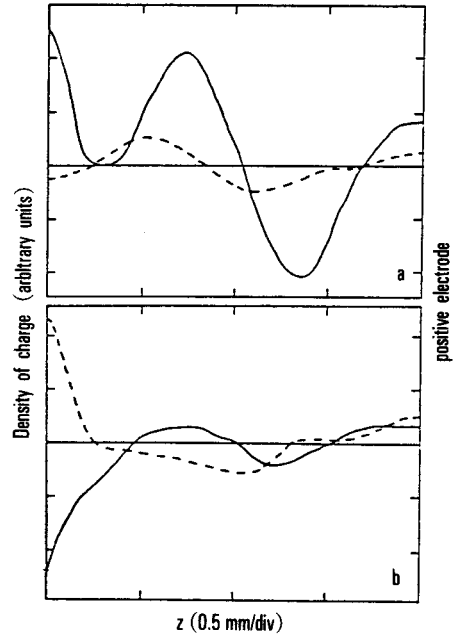
공간전하분포는 수지의 종류, 첨가제의 종류 및 유무 등에 따라 큰 변화가 있는데 그 중의 몇 경우를 소개하고자 한다. Fig. 10은 50°C에서 30 kV/mm의 전기장을 가했을 때의 두 종류의 폴리에틸렌이 보여주는 공간전하분포이다.<sup>10</sup> 전압이 계속 가해지면 축적되는 공간전하의 양은 계속 증가하면서 시료표면에 축적되며 시간이 흐름에 따라 공간전하는 시료내부로 이동한다. 이 그림에서 보여주는 중요한 사실은 동일한 저밀도 폴리에틸렌이라 할지라도 경우에 따라서는 정반대의 공간전하분포를 가질 수 있다는 것이다. 예를 들어, Fig. 10의 (a)에서는 주로 hetero-charge가 축적되었으며 (b)에서는 주로 homo-charge가 축적되었다는 것을 알 수 있다. 폴리에틸렌의 첨가물이 공간전하분포에 미치는 영향으로는 첨가제로 흔히 쓰이고 있는 DPPD(diphenyl paraphenylene diamine)의 영향이 발표된 바 있다(Fig. 11). Fig. 11을 보면 순수한 폴리에틸렌과 DPPD가 첨가된 폴리에틸렌의 공간전하분포가 매우 다르다는 것을 알 수 있다.<sup>7</sup> DPPD가 첨가된 경우 축적된 공간전하의 양은 순수한 폴리에틸렌보다 훨씬 적게 나타났다. 이 결과로 미루어 보아 첨가제가 경우에 따라서 폴리에틸렌에서의 공간전하축적을 현저하게 억제한다는 사실을 알 수 있다.

지금까지 몇가지 경우를 통하여 알아본 바와 같이 공간전하분포는 절연체 내부에 축적되어 있는 전하



**Fig. 10.** 두가지 LDPE의 공간전하분포 실험온도 : 50 °C, 시편두께 : 2mm, 가해준 전기장 : 30kV/mm, 전극 : 두께 1mm의 PE/Carbon Black Composite, 측정 방법 : PWP방법

의 양 및 위치를 알려주므로 절연체에서 공간전하의 거동에 대한 연구에 매우 유용하다. 또한 내부전하의 분포에 따라 외부전기장이 변형되기 때문에 공간전하의 내부분포에 대한 정보는 고분자절연체의 절연성질을 연구하는데 있어서 필수적이라 할 수 있다.



**Fig. 11.** 순수한 LDPE(실선)와 DPPD 0.06wt% 첨가된 LDPE(점선)의 공간전하분포. 시편두께 : 2mm, 가해준 전기장 : 45 kV/mm, Positive Electrode : PE/Carbon Black, Negative Electrode : Conductive Silicone Oil Composite, 측정방법 : PWP방법 ; (a) 16h at 70°C, (b) 72h at 20°C

특히 기계적 성질 상의 차이가 거의 없는 두 종류의 폴리에틸렌이 서로 반대의 공간전하분포를 보여준다는 사실은 절연체료를 연구하는 모든 연구자들에게 매우 중요한 의미를 시사한다고 할 수 있다. 최근 전선용 절연체료로 이용되고 있는 폴리에틸렌의 공간전하분포를 측정하기 위한 노력이 활발히 진행되고 있으나 폴리에틸렌은 비정질인 PMMA와는 달리 내부에 산재해 있는 결정들에 의하여 압력과의 감쇄(attenuation)가 심하기 때문에 출력신호의 탐지자체가 어렵다는 단점이 있다. 이는 실험에 사용되는 각종 부품의 보완 및 신호처리 기술의 향상 등으로 점차로 극복되고 있으므로 머지 않은 장래에 좋은 성과가 있을 것으로 생각된다.

## 요 약

본고에서는 고분자절연체의 내부전하분포 측정을 위한 측정원리, 측정장치 및 실제측정에 등에 대하여 언급하였다. 이 방법은 고분자내에 존재하는 전하의 종류, 위치 및 전하량에 대한 정보를 얻을 수 있으므로 고분자의 절연성질을 이해하는데 도움을 줄 것으로 생각한다. 특히 폴리에틸렌의 경우 여러가지 요인, 즉 수지의 종류 또는 첨가제의 유무 등에 의해 각기 다른 내부전하분포를 갖는다는 사실이 밝혀졌다. 이와 같은 사실은 고분자 내부에 존재하는 공간 전하 때문에 외부전압에 의한 전기장이 변형되고 이에 따라 고분자의 절연성질이 변형될 수 있다는 점을 생각할 때 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 따라서 고분자의 절연성질에 대한 이해를 높이기 위하여는 절연성질과 내부전하분포와의 관계에 대한 보다 깊은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. P. Lausenceau, G. Dreyfus, and J. Lewiner, "New Principle for the Determination of Potential Distributions in Dielectrics", *Phys. Rev. Lett.*, **38**, 46 (1977).
2. C. Aliquie, G. Dreyfus, and J. Lewiner, "Stress-Wave Probing of Electric Field Distributions in Dielectrics", *Phys. Rev. Lett.*, **47**, 1483 (1981).
3. G. H. Sessler, J. E. West, R. G. Mulhaupt, and H. Segger, "Nondestructive Laser Method for Measuring Charge Profile in Irradiated Polymer Films", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-29**, 1644 (1982).
4. W. Eisenmenger and M. Haardt, "Observation of Charge Compensated Polarization Zones in Polyvinyliden Fluoride(PVDF) Films by Piezoelectric Acoustic Step-Wave Response", *Solid State Communications*, **41**, 917 (1982).
5. C. Aliquie, J. Lewiner, and G. Dreyfus, "Analysis of Laser Induced Acoustic Pulse Probing of Charge Distributions in Dielectrics", *J. Phys. Lett.*, **44**, 171 (1983).
6. J. Lewiner, "Evolution of Experimental Technique for the Study of the Electrical Properties of Insulating Materials", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-21**, 351 (1986).
7. F. Chapeau, C. Aliquie and J. Lewiner, "The Pressure Wave Propagation Method for the Analysis of Insulating Materials: Application to LDPE Used in HV Cables", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-22**, 405 (1986).
8. R. Gehart-Mulhaupt, "Electrets: Dielectrics with Quasi-Permanent Charge or Polarization", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-22**, 531 (1987).
9. T. Maeno, T. Futami, H. Kusibe, and T. Takada, "Measurement of Spatial Charge Distribution in Thick Dielectrics Using the Pulsed Electroacoustic Method", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-23**, 433 (1988).
10. T. Ditchi, C. Aliquie, J. Lewiner, E. Favrie, and R. Jocteur, "Electrical Properties of Electrode/Polyethylene/Electrode Structures", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-24**, 403 (1989).
11. M. P. Cals, J. P. Marque, and C. Aliquie, "The Pressure Pulse Method for Measuring Space Charge Distribution in Irradiated Insulators", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **EI-24**, 999 (1989).
12. T. Maeno, T. Futami, H. Kusibe, and T. Takada, "Measurement and Simulation of the Spatial Charge distribution in Electron-Beam Irradiated Polymers", *J. Appl. Phys.*, **65**, 1147 (1989).
13. T. Takada, K. Soda, and K. Goto, "Determination of Spatial Electric Field/Charge/Potential Distributions in Polymer Film Using an Acoustic Step-wave Probing Technique", *Japanese J. Appl. Phys.*, **29**, 1198 (1990).