고압용 전선의 전기절연과 공간전하

서광석* · 박진우**
(*고려대 공대 재료공학과 조교수,
**동 전자전산공학과 조교수)

1. 서 론

고분자 재료는 우수한 전기절연성 때문에 전기 또는 전자장비의 절연용으로 많이 쓰이고 있으며, 따라서 고분자 재료의 전기절연성에 관하여 많은 연구가 이루어져 왔다[1]

고분자가 전기장내에 있게 되면 크게 두가지 현상, 즉 분극(polarization)과 전하주입(charge injection)현상이 일어난다[2, 40]. 이들은 절연체가 전기장내에서 전하(charge)를 띄게 되는 현상을 설명하는 것으로서, 분극현상이란 절연체 내부에 존재하는 전하, 즉 Dipole 등이 외부에서 가해진 전기장의 방향에 따라 배열하는 현상을 말하며, 반면에 전하주입이란 높은 전기장이 걸릴 때 전극으로 쓰이는 도체 또는 주위로 부터 절연체내로 전하가 주입되는 현상을 말한다. 이와 같은 경로를 거쳐 형성된 공간전하가 장시간에 걸쳐 고분자내에 축적되면 재료의 절연수명에 심각한 영향을 미치게 되는 데, 공간전하에 의하여 발생되는 것으로 알려져 있는 대표적인 현상으로는 전선절연에서 크게 문제가 되고 있는 트리(treeing)현상이다[3-5]. 특히 electrical tree라는 전기적인 열화(degradation)현상은 절연체와 공간전하의 작용으로 인하여 미세절연파괴가 계속 일어나 결국 전선의 절연층을 파괴시키는 것을 말한다[6, 7]. 따라서 고분자 절연물질의 절연수명을 연장시키기 위하여는 고분자 절연체에서의 공간전하의 거동에 대한 이해가 필요하다.

지금까지 고분자의 전기적인 성질에 관하여는 많은 연구가 이루어져 왔으나 대부분의 연구가 전압이 비교적 낮은 범위에서 일어나는 분극현상에 관한 것으로서 고전압 시스템에는 응용하기 어렵다. 일부 고전압 시스템에서의 전기적인 성질에 관하여도 전하저장기구, 전기전도, 또는 절연파괴 등에 관한 연구도 이루어져 왔다. 최근에 절연체의 절연수명이 공간전하와 밀접한 관계가 있다는 사실이 밝혀져 이에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으나 아직도 고분자 절연체에서의 공간전하의 거동을 설명하기에는 부족하다. 이는 본질적으로 고분자 절연체의 경우 공간전하의 정확한 측정방법의 개발 자체가 어렵기 때문인 것으로 보인다.

따라서 본고에서는 먼저 공간전하의 형성과 측정방법 등에 관하여 언급하고, 고전압용 전선의 절연에서 흔히 발생하는 문제점과 공간전하와의 관계등에 관하여 언급하기로 한다. 그리고 이를 통하여 절연체의 절연수명을 연장시키기 위한 방안에 대한 고찰을 하려고 한다.

2. 공간전하의 형성과 측정방법

앞의 서론에서도 언급한 바와 같이 공간전하는 절

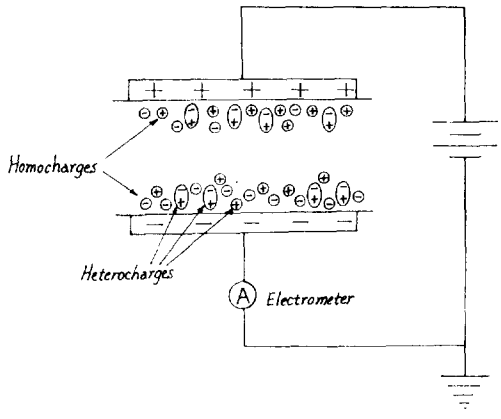


그림 1. heterocharges and homocharges

연체에 전기장이 걸릴 때 내부전하의 분극 또는 외부로부터의 전하주입에 의하여 형성된다. 전기장의 세기가 크지 않을 경우에는 dipole 등의 분극 현상만이 나타나는 반면, 전기장의 크기가 클 경우에는 분극현상 외에도 전하주입현상이 나타난다. 이때 재료의 절연수명을 결정하는 주된 요인은 분극현상에 기인하기 보다는 전하주입에 의한 공간전하의 축적인 것으로 알려져 있다. 특히 고전압 절연에 많이 쓰이고 있는 polyethylene과 같이 고분자 자체가 전기적으로 중성인 절연체에서는 전하주입현상이 더욱 중요한 역할을 한다.

전하는 크게 heterocharge와 homocharge로 구분된다[8]. heterocharge란 절연체 내부에 원래 존재하는 dipole 또는 각종의 내부전하(internal charges : 이온 또는 내부공간전하)의 배열(orientation)에 의해 형성되는 전하로서 전극의 극성과 반대의 극성을 갖는 표면전하를 말한다(그림 1). heterocharge는 전기장에 의하여 배열하는 것이기 때문에, 외부에서 가해준 전기장이 제거되면 즉시 원래 상태로 돌아가려고 하는 성질(disorientation)이있다. 따라서 heterocharge의 수명은 상당히 짧다. 반면에 homocharge는 주로 schottky emission으로 설명될 수 있는 전극으로부터의 전하주입 또는 불완전한 전극/절연체 접촉에 의해 발생되는 소위 townsend breakdown에 의한 전하주입 등에 의해 형성되는 전하로서 전극의 극성과 동일한 극성을 띄는 표면전하를 말한다. 이렇게 주입된 전하는 heterochage와는 달리 전하가 Trapping Sites라고 하는 전하저장장소에 저장되어 있기 때문에 비록 외부에서 가해주는 전기장이 제거된다고 해도 소멸되지 않으며 따라서 전하의 수명이 매우 길다는 특성이 있다.

절연물질인 유전체에서 공간전하의 특성은 전체전하량(total charge), 내부전하분포(internal charge distribution), 주요 전하운반자(charge carrier), 또는 전하이동도(charge mobility)등에 의하여 결정된다.[9, 10]. 전체전하량은 절연물질내에 존재하는 전하의 전체양을 말하며, 주요 전하운반자는 전기전도를 일으키는 주요 전하로서 이는 주요 주입전하와 같고, 그리고 전하이동도란 주요 전하운반자의 전기장과 이동속도와의 비례관계를 말한다. 외부에서 가해준 전기장이 클 경우 전하가 주입되는 데, 이때 비록 같은 극성 및 크기의 전기장이 가해진다고 해도 고분자의 종류에 따라 주입전하의 종류가 다르다. 표 1에 고분자의 종류에 따른 주요주입전하의 종류를 정리하였다. 전하이동도는 전기저항이 높은 절연체의 경우, hall효과(hall effect)로부터 전하이동도를 구하는 반도체와는 달리, transient current의 시간에 따른 감쇠현상으로부터 구한다[36]. 내부 전하분포는 공간전하가 절연체 내부에서 실제로 어떻게 분포되어 있는 상태를 나타내는 것이다. 전기저항이 매우 높은 고분자 절연체의 경우, 전하운반자의 숫자가 적을 뿐 아니라 전하이동도 또한 상당히 낮은 것이 일반적이므로 전체전하량과 함께내부의 전하분포는 절연체의 절연성을 결정하는 매우 중요한 요인이다.

절연체의 절연성질과 공간전하와의 관계에 대한 연구에 있어서 공간전하의 전체전하량 또는 전하저장 mechanism등의 성질과 함께 공간전하의 내부 전하분포가 매우 중요하다. 특히 최근에 공간전하량의 측정방법 중의 하나인 TSC 방법의 보정(calibration) 및 전체전하량에 대한 연구결과의 신빙성에 관한 의문이 제기되고 있는 상황에서는 전체전하량과 더불어 정확한 전체전하량의 측정이 매우 중요한 문제이다. 예를 들어, 최근 dc용 전선의 절연에 있어서 polyethylene에 소량의 ethylene-based ionomer를 혼합하여 행한 실험에서 [38, 39], 주입되는 전하량이 증가할 수록 TSC(thermally stimulated current : 이 방법에 대하여는 뒤에서 언급할 것임) 방법에 의하여 측정된 전하량은 오히려 감소한다는 연구결과

표 1. 주요전하운반자*

Injection	Polymer
Electron	PE, PET, PEN
Hole	EVA, PPX, PVK, PTFE, FEP

*Retyped from Reference 4.

가 발표된 바 있다. 고분자 혼합물이 아닌 다른 경우에도 비슷한 연구결과가 보고된 바 있는 데 이와 같이 공간전하량이 감소하는 경우에는 절연강도 또는 임펄스강도 등이 증가한다[41, 42]. 공간전하가 감소하는 시스템의 절연강도가 증가한다는 사실은 결국 공간전하가 절연체의 절연강도를 좌우하는 중요한 요인이라는 사실을 설명하는 것이다. 일반적으로 주입전하량과 측정전하량 사이에는 차이가 나는데, 보통의 경우 주입전하량이 측정전하량보다 크며 또한 주입 되는 전하량이 많아질 수록 측정되는 전하량도 증가하다. 그렇지만 주입되는 전하량이 증가하는 데도 불구하고 측정되는 전하량이 감소하는 이유는

(1) 주입된 전하가 절연체 내에서 반대부호의 전하에 의하여 중화되는 경우.
(2) 주입된 전하가 Trap 되어 이동이 어려운 경우.
(3) 절연체의 표면에 반대부호의 전하가 형성되어 주입된 전하가 표면에서 중화되는 경우.
(4) 주입된 전하가 표면에만 축적되어 전하주입을 오히려 막는 경우,
(5) 주입된 전하가 측정시에 절연체 내부로 이동하는 경우,

등 여러가지가 있을 수 있는 데, 이를 설명하기 위하여는 TSC 방법에 의한 전하저장기구 또는 전하감쇠기구 등에 관한 연구가 아닌 전하의 주입시 또는 측정시에 전하의 공간분포가 어떻게 변화하는 지에 대한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

절연체내에 존재하는 전하, 즉 전하분포 또는 전체전하량을 탐지하는 방법에는 여러가지가 있는 데, 주로 TSC 방법과 압력파펄스(Pressure Pulse) 방법 등이 쓰이고 있다.[11, 12]. TSC 방법은 실험조건에 따라

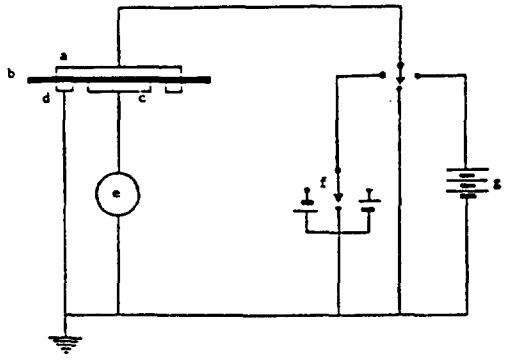
(1) TSDC(thermally stimulated depolarization current) 방법
(2) TSPC(thermally stimulated polarization current) 방법

등으로 구분되며, 압력파펄스 방법도 펄스를 발생시키는 방법에 따라

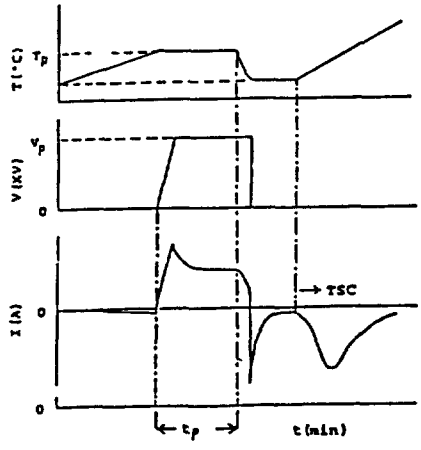
(1) PEA(Pulsed Electro-Acoustic) 방법[13-15].
(2) TP(Thermal Pulse) 방법 [16-18],
(3) LIPP(Light Induced Pressure Pulse) 방법 [19-21]
(4) PPP(Piezoelectrically Generated Pressure Pulse) 방법[22-24]
(5) 또는 다른 여러가지 이름[71]

등으로 불리우고 있다.

TSC 방법은 Frei 등에 의하여 처음 시도되었고



Wiring diagram
a : 전극 b : 시편 c : 측정전극 d : guard ring
e : 전류계 f : 역전압 g : 직류전압



온도 및 전압분포와 TSC[70]

그림 2. TSC측정을 위한 Wiring diagram과 실험과정

[25], Bucci 등에 의해 이론적인 접근이 시도되었으며, [26], 1970년도 중반부터는 반도체와 절연체의 전하저장(charge storage) 또는 전하방출(charge release) 등에 관한 기초적인 연구에 많이 응용되어 온 실험방법이다.[8] TSC란 전기적으로 배열 또는 주입된 전하가 열운동에 의해 방출되어 외부회로(external circuit)에 있는 전류계(electrometer)에서 감지되는 전류를 말한다. 그림 2에 TSC 측정을 위한 실험개략도와 Wiring Diagram이 나와 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 TSC 를 측정하기 위하여는 다음의 4가지 과정이 필요하다[37]

(1) 일정한 온도(T_P)에서 전기장(E_P)을 가하는 Poling과정 ;
(2) 전기장을 가한 상태에서 낮은 온도(T_0)까지 냉각시키는 과정 ;
(3) 전기장을 제거하고 전이전류가 소멸될 때(t_0)까지 기다리는 과정 ;
(4) 온도를 일정한 속도로 승온시키면서 전류를 측정하는 과정.

poling 과정에 의하여 전하(전자 또는 정공)들이 절연체 내부로 주입되며 이때 전기장이 가해진 상태에서 시편의 유리전이온도(glass transition temperature ; T_g)이하로 냉각되면 poling시 주입된 전하는 외부 전기장을 제거한 뒤에도 방출되지 않고 여러 trapping sitesdp 존재하여 절연체는 electret가 된다. 이때 전극에는 image 또는 compensating charge가 존재하게 된다. 다시 절연체에 온도를 가하게 되면, 고분자 사슬이 움직임에 따라 trap 되었던 전하들이 움직이게 되며 image charge도 따라서 움직이게 된다. 이 image charge의 이동이 외부회로의 전류계에 전류로서 감지되는 데, 이것이 바로 TSC이며, 이때 큰 TSC 신호는 image charge의 이동이 크다는 것을 의미한다. 그러나 주입된 전하가 모든 TSC 로서 측정되는 것이 아님을 유의해야 한다. 예를 들어, 주입된 전하가 근처에 있는 전극으로 다시 이동하여 image charge를 중화시키면서 소멸되어 TSC로서 전혀 감지되지 않을 수도 있고, 또한 동일한 숫자의 극성이 서로 반대인 전하가 두 전극을 통하여 동시에 주입되면 image charge 와의 전하중화 현상이 없다고 하여도 외부회로를 통한 전하의 이동이 없기 때문에 마찬가지로 TSC 로서 감지되지 않는다. 따라서 TSC 자체로는 절연체의 전하량 및 분포등에 관한 정보를 제공하지 못하며 시간 및 온도에 따른 TSC 곡선의 면적으로 정의되는 전하량 역시 절연물 질내에 존재하는 전체전하량(total charge)이라고 할 수도 없다[27].

전기장에 의하여 주입된 전하는 절연체 내를 마음대로 이동하는 것이 아니라 일정한 장소에 저장된다. 주입전하를 저장하는 장소를 trapping site라고 부르는 데, 이 trap에 의하여 절연체의 전기적인 성질이 크게 좌우된다[7]. 표 2에 polyethylene 에서의 각종의 trapping site와 trap depth가 나와 있다. PE의 경우 가장 일반적이고 중요한 trapping site가 비정질과 결정질 영역과의 경계지역이다. 이들 경계지역은 구조적으로 완전하지 못하기 때문에 주입된 전하를 저장할 수 있는 가능성이 상당히 높다. 대부분의 경우 주입된 전하는 단순히 물리적으로 trap되어 있으므로 매우 높은 전기장이 걸리거나 또는 trapping site의 고분자 사슬이 움직이지 않는 한 trap된 전하는 방출되지 않는다. 그러나 절연체 시편에 열이 가해지면 사슬의 움직임이 시작되며 이때 단순히 물리적으로 trap되어 있던 전하는 방출될 수 있다. 따라서 trap 되어 있던 전하의 방출, 즉 TSC thermogram 상의 피크는 온도에 따른 고분자 사슬의 움직임, 즉 고분자의 열적전이특성(thermal transition characteristics)과 밀접한 관계가 있다. 결국 온도에 따른 TSC의 변화는 기계적 완화(dynamic mechanical relaxation) 또는 유전완화(dielectric relaxation)의 소위 tangent delta(tan δ)가 온도에 따라 보여주는 변화와 매우 유사하다. TSC 방법과 기계적완화 방법과의 차이는 등가주파수(equivalent frequency) 로서 설명할 수 있다[8, 35]. 등가주파수란 TSC 방법에 의하여 측정된 것과 동일한 피크온도(peak temperature) 를 측정하게 해주는 기계적완화측정 방법에서의 주파수를 말하는 데, PE의 경우, TSC 방법에서 승온율이 약 0.06° C/min이라고 할 때의 등가주파수는 약 10^{-3}Hz이다. 이 주파수는 기계적인 방법으로는 실험이 상당히 어려운 범위이다. 기계적완화 방법에 있어서 주파수에 따른 피크온도의 변화는 주파수가 낮아질 수록 평형전이온도(equilibrium transition temperature)에 가까워 진다는 것은 널리 알려져 있는 사실이므로 TSC 방법에 의하여 얻어진 피크온도(즉 전이온도)는 다른 방법에 의하여 얻어진 전이온도보다 훨씬

표 2. Polyethylene에서의 전하운반자 트랩*

TSC	Traps Corresponding to TSC Peaks		
Peak Temp.	Trap Depth	Region	Origin
130K	0.1-0.3eV		Defects
200(HDPE) 180(LDPE)	0.3 0.24	Lamellar Surface(HDPE) Amorphous Region(LDPE)	
250	0.8-1.0	Amorphous Region	
230-310	1.0-1.4	Amorphous-Crystalline Int.	
330	1.2-1.4	Crystalline Region	
350(HDPE)	1.7		
290(HDPE)		Amorphous	Unst. Oxidation Products
360(HDPE) 310(LDPE)	1.4	Amorphous-Crystalline Int. Amorphous	St. Oxidation Products
390(HDPE) 320(LDPE)	1.0	Amorphous	Crosslink
340-350	1.2	Amorphous	Antistatic Agents

*Retyped from Reference 4.

낮은 것이 보통이며, 따라서 고분자 사슬의 완화기구를 연구하는 데 있어서 다른 방법에 비하여 유리하다. 이와 같이 TSC 방법은 전하가 절연체 내에서의 저장기구(trapping mechanism), 온도변화에 따른 전하감소, 그리고 이와 관련된 분자완화(molecular relaxation) 또는 고분자의 사슬완화(chain relaxation) 등의 연구에 적합하다.

압력파펄스 방법은 TSC 방법과는 달리 분자 또는 고분자 사슬의 완화(relaxation) 그리고 이와관련된 전하쇠퇴에 관한 연구는 할 수 없으나 절연체 내부에 존재하는 내부전하의 분포에 따라서 전체전하량등을 직접적으로 측정할 수 있는 실험방법이다. 압력파펄스 방법중의 하나인 LIPP 방법에 대한 개략적인 실험장치가 그림 3에 나와 있다. 이 방법은 짧은 폭(약 100ns미만)의 전기적인 펄스 또는 레이저 펄스를 사용한다. 레이저펄스 방법의 경우, 절연체 표면에 강력한 에너지를 갖는 펄스형태의 레이저를 주사시키면 절연체 표면이 순간적으로 증발하게 되는데, 이때 부분압(partial pressure)으로 인하여 펄스형태의 압력파가 발생된다. 이렇게 하여 발생된 압력파 펄스는 절연체 내부전하들의 국부적인 운동(local motion)을 야기시키며 시료의 두께 방향으로 전파된다. 전파된 압력파 펄스를 반대 전극에서 압전 transducer 또는 오실로스코프(oscilloscope) 등을 사용하여 탐지한 뒤 후속신호처리(signal processing)를 하면 우리가 원하는 내부전하에 관한 정보, 즉 내부전하분포 및 전체전하량을 직접 측정할 수

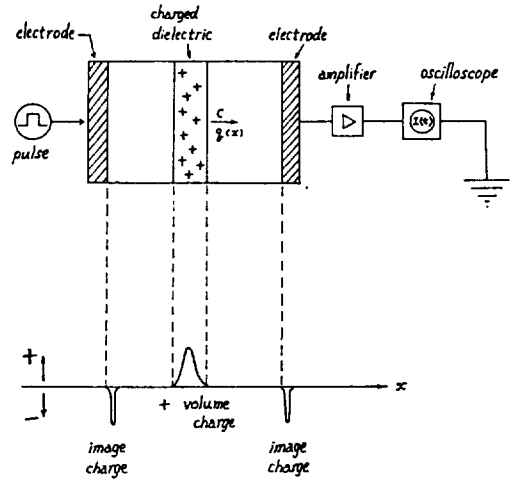


그림 3. 유전체 내의 내부전하분포측정을 위한 압력파 펄스 방법

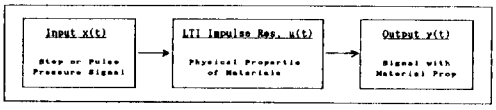


그림 4. 입력신호와 재료성질과의 관계

있다. 이때 펄스형태의 압력파 대신에 스텝함수 형태의 압력파를 시편의 표면에 입력시켜도 마찬가지의 효과를 얻을 수 있다.

pressure 스텝신호나 펄스신호를 사용하여 측정물질의 전하량 또는 분포를 측정하는 방법은 신호해석적인 면에서 볼 때 스텝함수형태의 신호나 또는 펄스함수형태의 신호를 사용하여 측정 대상인 공간전하의 특성을 대표하는 임펄스 응답(impulse response)을 측정하는 과정과 같으며[28-29] 그 과정을 도시하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있는 데, 여기에서 시스템의 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$y(t)=F[x(t)]$$

여기에서 F[x(t)]는 입력과 출력의 함수적 관계를 나타낸다. 만약 입력을 이상적인 임펄스로 가정하면 결과적인 출력은 임펄스 응답이며 그 관계는 다음의 식으로 표시된다.

$$h(t)=F[\delta(t)]$$

신호해석적인 방법에서 h(t)를 구하는 방법은 다양하며, 전형적인 예로는 u(t)=y(t) 즉 스텝함수를 입력으로 사용하는 방법이다. 이때 시스템의 응답 g(t)는

$$g(t)=F[u(t)]$$

로 쓸 수 있는데, g(t)와 구하고자 하는 h(t)와의 관계는 다음과 같다.

$$h(t)=dg(t)/dt$$

정확한 시스템의 특성측정을 위하여는 이상적인 임펄스신호의 발생 또는 이상적인 스텝신호의 발생 및 미분연산과정이 필요하다. 그러나 실제의 실험에서는 이상적인 임펄스함수나 스텝함수의 발생은 거의 불가능하므로 그와 유사한 특성의 신호로 대체하여 사용하게 된다. 즉 임펄스신호 대신에 짧은 폭의 구형파 펄스를 사용하거나 스텝함수 대신에 어느 정도의 경과기(transient period)를 허용하는 신호를 발생시켜 사용하게 되는 데, 이때 나타나는 실험결과는 이상적인 출력과는 차이가 나는, 즉 왜곡을 수반하는 결과를 얻게 되므로 그 오차의 수정을 위한 후속적인 신호복구과정이 필요하다.

절연물질인 유전체의 전하분포를 측정하는 실험에서 압력파 펄스나 스텝함수를 사용함으로서 나타나는 제한점은 다음과 같다.

(1) 입력신호가 임펄스인 경우, 보다 짧은 펄스폭(보통 100ns 미만)에서 가능한 높은 출력의 에너지 집중이라는 서로 상반되는 물리적 조건,

(2) 입력신호가 스텝함수인 경우, 가능한 짧은 기간(약1 ns)의 경과기 안에 높은 출력의 단계에 도달하여야 하는 어려운 실험조건과 짧은 경과기에 따르는 경과기 전후의 신호진폭 진동현상.

(3) 절연물질인 유전체 내에서의 신호진행에 따르는 신호크기 감소현상과 표면 반사에 의한 신호약화현상, 따라서 출력신호의 낮아진 신호대 잡음비(S/N ratio),

(4) 두께가 약 100μm 정도의 얇은 시편을 사용할 경우, 얇은 실험시편에서 요구되는 높은 신호분해능(resolution capability).

위와 같은 제한점 때문에 압력파 펄스방법에 의하여 얻어진 결과의 분석 및 해석에 상당한 어려움이 있다. 그러나 간단한 경우, 즉 입력신호가 이상적인 신호에 가깝다고 가정하면, 시스템에서 요구하는 분

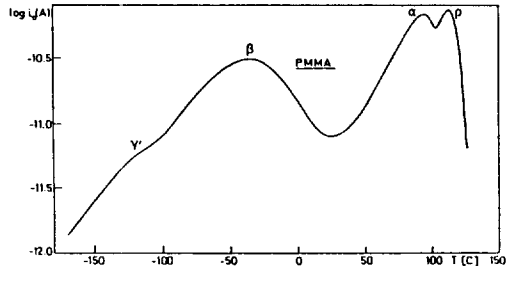


그림 5. PMMA의 TSC곡선[8]
ρ : 이온의 움직임 α : 고분자 주사슬의 움직임
β : 국부적인 dipolar의 움직임 γ : 수분

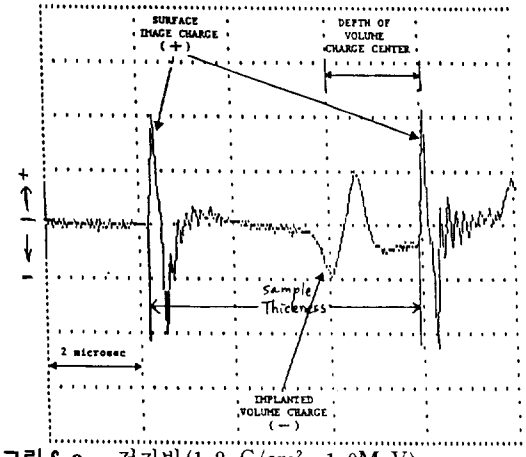


그림 6-a. 전자빔(1.2μC/cm^2, 1.0MeV) 주사뒤 23시간후의 Electro-acoustic wave 측정결과. 두께 : 7.92mm, 시료 : PMMA[33]

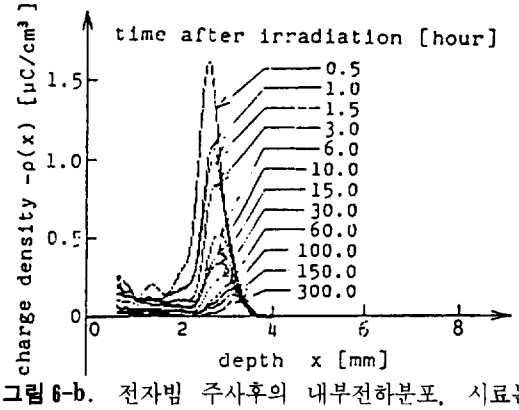


그림 6-b. 전자빔 주사후의 내부전하분포. 시료는 7.9mm 두께의 PMMA. 전자빔 에너지 : 1MeV, 주사율 : 2.5Mrad/h.

해능의 정도에 따라 필요한 출력과 신호의 폭 또는 경과기를 적절히 조정하고 결과적으로 나타나는 출력의 왜곡현상을 잡음제어필터링 과정과 deconvolution 과정에 의하여 최소화하여 절연체의 내부전하분포를 측정할 수 있다. deconvolution과정은 사용된 신호의 비이상적 특성에 의해 변화된 출력을 역변환시키는 과정으로 출력 데이타의 정확도를 증가시킬 수 있다.

고분자 특히 semi-crystalline 고분자 절연물질은 결정들에 의한 압력파의 산란등에 의한 소위 acoustic loss가 매우 크기 때문에 후속 신호처리 과정에 관한 연구가 더 이루어져야 하지만, 현재로서는 절연체 내부에 존재하는 내부전하의 분포를 직접 측정할 수 있는 유일한 방법이기 때문에 점차 널리 이용되고 있다. 이 방법은 특히 발생된 압력파로부터 force, 압력파 펄스의 전파속도, 또는 신호처리로부터 전하량을 구할 수 있기때문에, 이를 이용하여 압전재료의 압전상수(piezoelectric constant) 또는 매질을 통한 음파의 전달속도(velocity of sound)등을 구할 수 있다는 장점도 있다[20, 23, 30, 31].

그림 5와 6에 위에서 언급한 TSC 방법과 압력파 방법에 의해서 측정한 대표적인 결과를 나타냈다. 그림. 5는 소위 thermal poling에 의해 형성된 PMMA의 내부전하에 대한 TSC 이며[32]. 그림 6-a는 전자빔(electron beam)에 의하여 주입된 비정질(amorphous) PMMA의 내부전하분포를 압력파 방법에 의하여 측정한 결과 (raw data)이며 [33]. 그림. 6-b는 PMMA 에 전자를 주입한 뒤 시간에 따라 전하분포가 어떻게 변화하는 지를 보여주는 결과이다.[34]. 그림. 5에 표시된 α, β, γ 등의 기호들은 각각 고분자 사슬 또는 첨가된 불순물의 완화기구를 의미하며, 이들은 기계적 완화 또는 유전완화 등에서 보여주는 완화기구와 동일하므로 더 이상 언급하지 않기로 한다. 그림. 6-a는 두께가 7.92mm 인 비정질 PMMA 에 전자빔을 이용하여 전자를 주입한 후에 PEA 방법에 의하여 측정한 것이다. 그림에서 양쪽 끝에 있는 양의 값을 갖는 두 피크들은 절연체 표면에서 형성된 image charge를 나타내며 중간에 있는 음의 값을 갖는 피크가 전자빔에 의해 주입된 전자이다. 이것은 소위 deconvolution 이라고 하는 신호처리 과정을 거치지 않은 raw data 로서 각각의 피크들이 2차 형(second ordertype)인 것은 발생된 압력파의 속도에 비하여 detector의 탐지속도가 매우 느리기 때문이다. 그림. 6-a에서 알 수 있듯이 주입된 전하가 시료의 어느 부분에 얼마나 존재하는 지 쉽게 알 수 있다. 그림.6-b를 보면 PMMA 에 주입된 전자의 대부분은 주입된 전극방향으로 이동하여 소멸되지만 상당량의 전자는 반대쪽 전극방향(절연체 내부방향)으로 이동, 즉 이 경우에는 약 300 시간 동안에 약 1mm를 이동한다는 것을 알 수 있다. 이때 내부전하분포에서 얻은 피크의 면적은 시료의 내부에 존재하는 전체전하량을 의미하므로, 이 압력파 펄스 방법은 절연체의 내부전하분포 및 전체전하량에 대한 연구를 통한 절연체에서의 공간전하의 거동 또는 역할에 대한 연구에 매

우 적합한 실험방법이다.

3. 고압용 전선의 절연과 공간전하

고분자를 이용한 절연물질 중에서 가장 대표적인 것이 가교 polyethylene을 이용한 고전압 전선의 절연이다. 이러한 절연물질의 파괴는 가공공정상의 잘못 등으로 인하여 단기간 내에 절연파괴가 일어나는 경우도 있으나, 가장 큰 문제가 되는 것은 미세절연파괴가 장기간에 걸쳐 계속 일어나 결국 거시적인 절연파괴로 연결되는 현상이다.

가료 polyethylene을 이용한 고전압 전선의 전기적인 절연열화반응으로는 dc용 전선의 절연(이하 dc 절연)에서 문제가 되는 polarity reversal에 의한 절연파괴, 그리고 ac 용 전선의 절연(이하 ac 절연)에서 문제가 되는 소위 트리잉(treeing) 현상 등이 있다. 이들은 대부분 전기장에 의하여 절연체로 주입된 전하의 작용으로 인하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 본문에서는 이러한 문제점들과 공간전하와의 관계를 dc 절연과 ac 절연으로 나누어 언급하고자 한다.

3.1 dc 용 전선의 절연

dc 절연에서는 항상 같은 극성을 가진 전압이 걸리기 때문에 주입된 공간전하의 영향을 직접적으로 받는다. 예를 들어, 음극의 전압이 흐른다고 가정하면, 도체로 부터 전하가, 즉 이 경우 주요 주입전하 및 전하운반자는 전자, 절연층으로 주입되어 축적된다. 이러한 공간전하의 축적 때문에 다음과 같은 두 가지 문제가 발생하게 된다.

(1) 전자의 계속적인 축적으로 인하여 전기적으로 볼 때 전기장 영역의 확장으로 인한 유효절연두께(effective insulation thicknes)의 감소효과가 일어나며,

(2) 많은 전자가 축적되어 있는 상태에서 도체에 반대극성(즉 양극)을 띄는 전기가 갑자기 흐르면 갑자기 매우 큰 전기장이 형성되어 국부적인 절연파괴(micro-breakdwn) 현상이 발생한다.

이들 중에서 첫번째 문제인 유효절연두께의 감소는 절연층의 두께(insulation thickness)를 조절함으로서 충분히 방지할 수 있다. 두번째 현상이 dc 절연에 이어서 가장 중요한 것으로서, 이는 도체에 흐르는 전압의 극성이 갑자기 바뀌는 polarity reversal 현상으로부터 시작된다. 번개에 의한 lightning stricke 또는 전원스위치를 키고 끌 때 발생하는 switching surge 등에 의하여 상당히 큰 폭의 전압 또는 전류의 fluctuation이 일어나는 데 이때 순간적으로 극성이 바뀌어 국부적으로 절연체의 이론적인 절연파괴강도(dielectric breakdown strength)보다 훨씬 큰 전기장이 형성된다. 이 전기장에 의하여 절연체는 국부적으로 절연파괴가 일어나며, 이러한 미세절연파괴가 장시간에 걸쳐 반복적으로 계속되면 결국 거시적인 절연파괴를 유발하게 된다. 또는 경우에 따라서는 순간적으로 거시적인 절연체의 영구파괴(permanent failure)를 일으키기도 한다.

이러한 문제를 해결하기 위하여는 polarity reversal 현상이 일어나지 않로록 노력하는 한편, 절연체 내에 전하가 주입되는 것을 방지하거나 또는 주입된 전하가 축적되지 않도록 해야 한다. 전하주입을 방지하는 방법으로서 절연성이 좋은 플라스틱 필름으로 conductor shield를 감싸는 방법, 주절연 물질인 polyethylene에 무기질 충전제(mineral filler)를 혼합하는 방법, 또는 PE에 다른 고분자를 혼합하는 방법 등이 제안되었으나, 제작 기술상의 문제, 공간전하의 거동에 관한 정확한 mechanism의 결여, 또는 고분자 blend의 경우 상분리(phase separation)와 절연수명과의 관계 등에 대한 문제점들 때문에 실용화에 상당한 어려움이 있는 것으로 알려져 있다 [27, 38, 42, 62-65]

3.2 ac 용 전선의 절연

ac 절연에서는 양극과 음극의 전압이 항상 일정한 주기를 가지고 교대로 가해지기 때문에, 상당량의 주입전하는 뒤따라 주입되는 반대부호의 전하에 의하여 곧 소멸된다. 그러나 일부분은 주입되는 즉시 소위 deep trapping sites에 trap 되어 뒤따라 주입되는 반대부호의 전하에 의하여 소멸되지 않는다. 결국 ac 절연에서도 dc 절연과 마찬가지로 장기간에 걸친 공간전하의 축척이 이루어진다. 또한 일단 주입된 전하가 되돌아가는 과정 중에 상당한 양의 에너지를 얻는다[43]. 이러한 상태의 전자를 hot electron이라고 부른다. 따라서 ac 절연에서는 dc 절연에서 중요한 유효절연두께의 감소 또는 polarity reversal에 의한 절연파괴의 위험은 작다고 할 수 있

다. 그러나 양과 음의 전하가 공존하며 그리고 hot electron이 존재하므로 dc 절연과는 다른 문제점이 나타난다. 대표적인 현상은 고전압의 ac 절연물에서의 소위 트리잉 현상이다.

전선에서의 트리현상은 1970년도 초반에 지하에 매설된 후 절연파괴를 일으킨 전선의 절연층에 대한 파괴원인 조사를 하던 중에 발견된 현상으로서, 이는 미세절연파괴가 계속 일어나 광학 현미경(optical microscope)으로 관찰하면 마치 나무가지 형태로 절연파괴가 생김이 관찰되기 때문에 붙혀진 이름이다[44-46]. 그 후 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 지금까지의 연구를 토대로 하여 트리의 전파를 상당량 억제시킬 수 있는 가교 polyethylene도 판매되고 있다[46-49]

3.2.1 Water Tree

water tree는 절연체내에 존재하는 수분과 전기장과의 작용에 의하여 형성되는 트리이다. water tree의 생성과정은 절연체 내에서 각종 반응에 의하여 수분이 생기거나 또는 외부로부터 수분이 유입되어 drop의 형태로 존재하게 되는 과정을 말하며, water tree의 전파과정은 수분이 전기장과의 작용에 의하여 절연체 내부로 성장하는 과정을 말한다. 다시 말하면, 절연체 내에 수분이 생기는 과정 자체가 water tree의생성과정이므로 절연체에 수분이 존재하는 한 water tree의 발생 가능성을 배제할 수 없다. 절연체 내의 수분으로는 대략 화학 가교제의 반응에 의하여 생기는 수분, 스팀 가교시에 유입되는 수분, 또는 전선이 매설된 후 장시간에 걸쳐서 외부피복층(jacket) 또는 연결부위(termination) 등을 통하여 유입되는 수분 등이 있다[50, 51]. 이들 중에서 세 번째 경우에 해당하는 수분이 가장 중요한 데, 이와 같은 수분은 시간이 지남에 따라 지속적으로 유입되어 경우에 따라서는 수 % 정도까지 될 수도 있다. 일단 수분이 절연체 내에 생기면 이를 제거하기가 매우 어렵기 때문에 water tree를 억제 또는 방지하기 위하여는 전선절연체 내부에 수분이 형성되지 않도록 하여야 한다.

이렇게 유입된 수분은 전기장의 영향으로 계속 다른 부위로 전파되어 나가는 데, 이 전파과정에서 공간전하의 역할은 크지 않은 것으로 보인다. 이는 기공이 수분으로 차 있을 경우에 부분방전이 일어나기 시작하는 전압(partial discharge inception voltage), 또는 절연파괴전압 등이 오히려 높다는 사실[52, 53]에 비추어 볼 때 타당성이 있는 것으로 보인다. 따라서 water tree의 발생 및 성장은 공간전하의 역할 보다는 오히려 전압의 반복적인 극성변화로 인하여 국부적으로 기계적인 파괴가 일어나는 소위 미세피로파괴(micro-fatigue fracture)에 의한 전파가 더욱 중요한 것으로 보인다[54, 55]. 일반적으로 dc에서는 극성의 반복적인 변화에 의한 영향이 없는 관계로 tree가 형성되는 빈도가 ac 에 비하여 상당히 낮다는 사실로부터 미세피로파괴에 의한 tree의 전파기구를 확인할 수 있다.

대부분의 오래된 고전압 전선들은 절연층 내부에 많은 water tree를 가지고 있지만 실제로는 절연파괴가 일어나지 않고 잘 작동되고 있다[61]. 즉 water tree 자체는 절연수명에 직접적인 영향을 미치지 않는다. 그러나 water tree 가 많이 있는 부분의 절연파괴강도가 그렇치 않은 부분에 비하여 월등히 낮다는 결과가 발표된 바 있는데 [59, 60]. 이는 water tree 가 일어남으로서 절연물질의 장기간에 걸친 열화반응(degradation)이 촉진되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 water tree의 말단부분에서 electrical tree가 발생하기도 한다[46, 56-58]

3.2.2 Electrical Tree

electrical tree는 전기장과 절연체에 함유되어 있는 기체와의 작용, 즉 부분방전에 의하여 생성되고 전파된다.

부분방전(partial discharge) 또는 코로나(corona)라고 불리우는 현상은 원래 기체상태에서 발생하는 현상으로서, 이는 기체가 매우 높은 에너지를 받아 이온화(ionization)되는 현상을 말한다. 따라서 polyethylene과 같은 고체상의 절연체 또는 변압기(transformer)등의 절연에 쓰이는 액체상의 절연체에서 부분방전이 발견되는 이유는 이들 절연체 중에 기체가 기공(void)의 형태로 존재하기 때문이다. 부분방전에 의한 고분자 절연체의 damage는 화학적인 것과 물리적인 것이 있는데, 화학적인 damage는 고분자에서의 산화반응이 chain degradation 반응으로 연결되어 고분자의 물성을 변화시키는 것이며 [66] 물리적인 damage 란 부분방전에 의하여 고분자 절연체의 일부분이 순식간에 용융되어 증

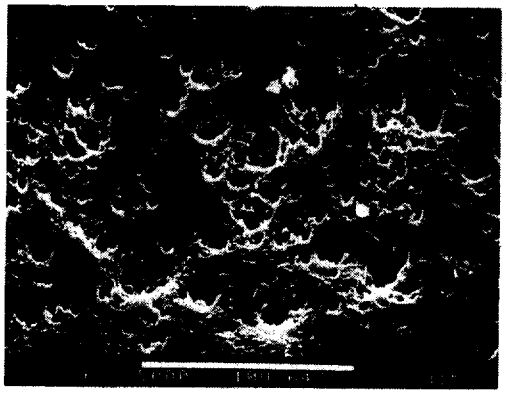


그림 7. 교류전압을 가한 뒤의 Polypropylene필름의 표면상태. 필름두께 : 6μm, 전압 : 700 Vrms, 시간 : 60분, 환경 : 1ab air

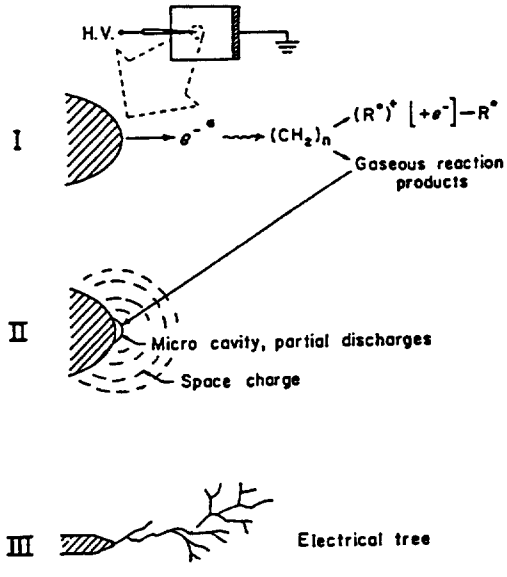


그림 8. Electrical tree형성의 3단계[72]

발하는 현상을 말한다. 여기서 물리적인 damage 가 매우 중요한 데, 이는 이온화된 입자들이 높은 전기장에 의해 가속되어 이동하다가 고분자와 충돌할 때 일부분의 고분자를 순간적으로 증발시켜 가연가스(combustible gases)로 가득찬 기공을 형성한다[67, 그림 7]. 또한 이 기공으로 부터 부분방전이 계속 일어난다. 이와 같이 연속적인 기공의 형성과 부분방전으로 인하여 절연체 내에는 소위 기공의 channel이 형성되는 데, 이것이 electrical tree이다.

electrical tree는 기공에서 높은 에너지를 갖는 공간전하의 축적으로 인하여 발생하는 부분방전에 의해 생성되고 계속적인 부분방전에 의해 전파된다. 전극 또는 도체로부터 주입된 전하는 전기장 내에서 이동하는 데, 이때 상당히 높은 에너지를 얻게 된다[2] 이 전하가 이동중에 기공을 만나면 기공과 절연물질의 유전상수(dielectric constant)차이 때문에 기공 주위의 축적된다. 이와 같이 축적된 전하에 의하여 기공 주위의 전기장의 분포를 국부적으로 변형시키는 데, 이 국부적인 전기장의 변형으로 인하여 기공 주위에는 다른 지역보다 훨씬 큰 전기장이 걸리게 된다. 이런 현상은 전선의 경우 도체에 가까울수록 심하다. 이렇게 형성된 높은 전기장 때문에 기공내의 기체는 이온화(부분방전)하거나 또는 전기장의 크기에 따라서는 기체의 절연파괴(spark)도 일어날 수 있다[68]. 일단 기공이 형성되면 이 지역에서 계속적인 화학 및 물리적인 damage가 계속 일어나 electrical tree가 전선의 중심부에 외부피복층 쪽으로 성장한다.

절연체내에 기공이 형성되는 과정은 전선의 제조시 가공공정으로부터 생기는 경우와 절연체내에서 전기장의 영향으로 생기는 경우가 있다. 가공공정으로부터 발생되는 기공은 전선의 제조공정의 엄격한 규제와 가공성의 향상 등에 의하여 많이 제거될 수 있는 것으로서, 완전한 제거는 거의 불가능하지만 과거에 비하여 많이 향상되고 있다. 그러나 많은 경우에는 절연체 자체에서 기공이 발생되며 실제로 이러한 기공이 electrical tree의 주된 요인이다. 그림 8에 보여준 바와 같이 곡율반경이 매우 작은 돌출물(protrusion)이 주절연층과 conductor shield 사이에 존재한다고 하면 전기집중(electric stress enhancement) 현상에 의하여 이 돌출물 끝의 전기장은 다른 부위에 비하여 상당히 높다. 관계식 [69]을 이용하면 1cm의 절연두께, 5 μm의 돌출물의 곡율반경, 그리고 30kV의 전압이 흐른다고 가정할 때 돌출물 끝에서의 전기장은 약 13.5MV/cm에 이른다. 이런 크기의 전기장은 XLPE의 절연파괴강도 보다도 훨씬 큰 전기장으로 이 돌출물끝에서 국부적으로 절연파괴가 발생하여 이온화된 탄화수소 계통의 가연가스(combustible gases)들로 채워진 기공을 형성한다. 이 기공 안에 있는 가연가스들의 계속적인 부분방전에 의하여 electrical tree는 계속 성장하게 된다.

지금까지 본 절에서는 고압용 전선의 절연에 있어서 공간전하와 절연수명과의 관계에 대하여 언급하였다. 즉 dc 용 전선의 절연에서는 공간전하의 축적으로 인하여 도체 부근에서의 연속적인 미세절연파괴 또는 거시적인 절연파괴 등이 일어날 수 있으며, 그리고 ac용 전선의 절연에서도 공간전하에 기인하는 트리잉 현상(특히 electrical tree)이라는 전기적인 열화반응을 통하여 절연체의 수명이 급격히 저하된다. 따라서 절연체의 절연체명을 연장시키기 위하여는 도체로부터 전하가 주입되지 않도록 해야 한다. 그러나 실제에 있어서 도체로부터의 전하주입을 완전히 방지하기는 거의 불가능하므로 주입된 전하가 단기 또는 장기적인 열화반응에 관여하지 못하도록 해야 한다. 이를 위하여 전기적인 측면에서는 공간전하의 축적을 줄이도록 노력해야 하며 고분자 측면에서는 고분자 자체의 개량을 통하여 고압에서도 견딜 수 있도록 해야 한다.

4. 결 론

고분자는 전기장 내에 놓이게 되면 분극현상과 전하주입현상이 일어나며 절연체의 절연수명은 분극현상보다 전하주입에 의해 형성된 공간전하에 의하여 크게 좌우된다.

공간전하에 관한 연구에 있어서 공간전하의 정확한 측정 자체도 어려운 문제인 데, 최근에 개발된 방법인 압력펄스파 방법이 있다. 이 방법은 매우 짧은 폭의 펄스가 절연체를 통과하면서 얻은 공간전하에 관한 정보를 de convolution에 의한 후속신호처리하면 절연체내에 존재하는 전하의 공간분포에 따라서 전체전하량 등을 구할 수 있다.

고전압용 전선에 쓰이는 절연물질에서는 사용되는 전압의 종류에 따라 다른 형태의 문제점이 발견된다. dc 절연에 있어서는 전압의 극성이 갑자기 바뀌는 polarity reversal 에 의한 절연파괴가, 그리고 ac 절연에서는 소위 트리잉 현상이라고 불리우는 전기적인 열화반응에 의한 절연체의 파괴 현상이 중요시되고 있다. 이들 모두 공간전하의 축적과 밀접한 관련이 있는 현상으로서 공간전하의 축적이 심할 수록, 그리고 기공 또는 그밖에 전기집중현상을 일으킬 수 있는 요인이 많을 수록 절연체의 절연수명을 급격히 감소한다. 따라서 절연수명을 향상시키기 위하여는 공간전하의 축적을 방지해야 하는 데, 여기에는 전기적인 측면에서의 노력과 아울러 고분자 자체의 개량등의 노력도 함께 있어야 한다.

참 고 문 헌

[1] IEEE Transaction on Electrical Insulation이 전기절연에 관한 연구 결과가 실리는 대표적인 잡지이며 전기절연에 관한 대표적인 학술회의 로는 CEIDP (Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena)가 있다

[2] Ku, C.C. and Liepins R., Electrical Properties of Polyumers: Chemical Principles Hanser Publishers, Munich, 1987.

[3] Eichhorn, R. M., IEEE Trans. Electr, Insul., EI-12, pp. 2, 1977.

[4] Shaw, M. T. and Shaw, S.H., IEEE Trans. Electr, Insul., EI-19, pp. 419, 1984.

[5] Nunes, S. L. and Shaw. M. T., IEEE Trans. Electr, Insul., EI-15, pp. 437, 1980.

[6] Mason, J. H., Proc. IEEE, 128, Part A, (3), pp. 193, 1982.

[7] Andrianjohaninarivo, J., et al., IEEE Trans. Electr, Insul., EI-22, pp. 709, 1987.

[8] Braunlich, P,. Edt., Thermally Stimulated Relaxation in Solids, Topics in Appl. Phy7s., Chapter 4, Springer-Verlag, Berlin, 1979.

[9] Sessler, G. M., Edt., Electrets, Topics in Applied Physics, Springer-Verlag, 1980.

[10] Ieda, M., IEEE Trans. Electr. Insul., EI-20, pp. 17, 1985.

[11] Reference 4, Chapter 1.

[12] Hino, T., IEEE Trans, Electr, Insul., EI-15, (3), pp. 301, 1980.

[13] Maeno, T., et al., IEEE Annu, Report of CEIDP, pp. 389, 1985.

[14] Cooke, C. M., and Wright, K. A., IEEE Annu, Report of CEIDP, Claymont, DE, USA, pp. 444, 1986.

[15] Futami, T., et al., Toyohashi Conf. on Ultrasonic Tech., pp. 169, 1987.

[16] Collins, R.E., J. Appl. Phys., 51, pp 2973, 1980

[17] Mopsik, F. I. and DeRoggi, A. S., J. Appl. Phys., 53, pp. 4333, 1982

[18] DeRoggi, A. S., et al., IEEE Annu, Report of CEIDP, Gaithersburg, MD, USA, pp. 307, 1987

[19] Sessler, G. M., et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS

-29, pp. 1644, 1982
[20] Sessler, G. M. and Gerhard-M., R., IEEE Trans. Electr, Insul., EI-21, pp. 411, 1986
[21] Sessler, G. M., et al., J. Appl Phys., 58, pp. 119, 1985.
[22] Gerhard-M., R., Phys. Rev. B, 27, pp. 2494, 1983.
[23] Gerhard-M., R., et al., J. Phys. D: Appl., 16, pp. 2247, 1983.
[24] Gerhard-M., R., et al., J. Appl. Phys., 55, pp. 2769, 1984
[25] Frei, H. and Groetzinger, G., Phys. Z., 37 pp. 720, 1936
[26] Bucci, C. and Fieschi, R., Phys. Rev. Lett., 12, pp. 16. 1964
[27] Tanaka, J., et al., ERRI Project, USA, RP 7897-9, 1986.
[28] Oppenheim, A. V., Application of Digital Signal Processing, Prentice-Hall Inc., New Jersey 1978.
[29] Silvia, M. T., "Deconvolution", Handbook of Digital Signal Processing, Edt. Elliot, D. F., Academic Press Inc., New York, 1987.
[30] Sessler, G. M. and Berraissoul, A., IEEE Annu. Report of CEIDP, Gaithersburg, MD, pp.319, 1987
[31] Matsuzawa, K., et al., J. Acoust. Soc. Am., 81, pp. 947, 1987.
[32] Reference 4, Page. 85.
[33] Private communication. Dr. Cooke, C. M., High Voltage Res, Lab., MIT, Cambridge, MA, USA.
[34] Futami, T., et al., IEEE Annu. Report of CEIDP, Gaithersburg, MD, pp. 285, 1987
[35] Abkowitz, M., et al., Proc, Piezoelectr. and Pyroelectr, Symp. Workshop, pp. 96, 1975.
[36] Lampert. M. A. and Mark, P., Charge Injection in Solids, Academic Press, New York, 1970
[37] Hashimoto, T., et al., J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed., 13, pp.2401, 1975.
[38] Suh, K. S., Ph. D Dissertation, University of Connecticut, 1987.
[39] Suh, K. S., et al., Proc. 5th Int. Conf. Dielectr. Materials, Measurement and Applic., Kenterbury, UK, 1988.
[40] Blythe, A. R. Electrical properties of Polymers, Cambridge University Press, 1980
[41] Shiono, T., et al., 昭和電線電纜レヒュー, 34, (2), pp. 59, 1984.
[42] Furukawa, H. and Tasuo, Y., Comm. BIII-2, J' Cable 84, Mar., pp. 283, 1984
[43] Chapiro, A., Radiation Chemistry of Polymeric Systems, Interscience, New York. 1962
[44] Miyashita. T., IEEE Trans. Electr, Insul., EI-6, pp. 129. 1971
[45] Vahlstrom, W., IEEE Trans. Power Appa. Syst., PAS-91, pp. 1023, 1972
[46] Tabata, T., et al., IEEE Trans. Power Appa. Syst., PAS-91, pp. 1361, 1972
[47] Union Carbide Co., XLPE, Grade HFDA-4202, Sales Brochure.
[48] British Petroleum XLPE, Grade BPH-356, Sales Brochure.
[49] Shmitomo, XLPE, Grade 108-Y, Sales Brochure.
[50] Miyashita, Y., et al., IEEE Conf. Prop. Appl. Dielectr, Mater., pp. 670. 1975
[51] Drumpt, J. V., ANTEC '88, pp. 738, 1988.
[52] Starr, W. T. and Steffen, H. G. IEEE Electr, Insul. Magazine, 4, (3), pp. 41, 1988.
[53] Garton, A., et al., IEEE Trans, Electr, Insul., EI -22, pp. 405, 1987.
[54] Tanaka, T. and Fukuda, T., IEEE Annu. Report of CEIDP, NBS, Washington, DC, pp. 239, 1975
[55] Tanake, T., et al., IEEE Trans. Power Appa. Syst., PAS-95, pp. 1892, 1976
[56] Kalkner, W., et al., Int'l Conf. Large High Volt. Syst., CIGRE, Paper No 21-07, pp. 12, 1982
[57] Naybour, R. D., IEEE Annu. Report of CEIDP. PP. 620, 1982.
[58] Bulinski,. A. T., et al., IEEE Int'l Symp. Electr. Insul., Boston, Ma, USA, pp. 327, 1988.
[59] Bernstein. B. S., IEEE Annu. Report of CEIDP, pp. 296. 1978.
[60] Bulinski. A. and Densley. R. J., IEEE Trans. Electr. Insul., EI-16, pp. 319, 1981
[61] CIGRE Topics Spark Global Interest, Electrical World, 194 (8), pp. 97, 1980-
[62] Tanaka, T., IEEE PES Summer Meeting, July. 1976.
[63] Bruhin, A., IEEE Int'l Symp. Electr. Insul., 1978.
[64] Ikeda, M, and Ohki, Y., 2nd Int'l Conf. Cond. Breakdown in Solid Dielectr., Erlangen, Germany. pp. 71, 1986.
[65] Ishino, I., et al., 2nd Int'l Conf. Breakdown in Solid Dielectr., Erlangen, Germany. pp. 76. 1986.
[66] Kircher, K., Chemical Reactions in Plastic Process-

ing, Hanser publishers, Munich Vienna, New York, 1987.

[67] Suh, K. S. and Cook, C. M., Final Report to RTE/ Aerovox, 1988.

[68] Gas의 절연파괴는 Paschen 의 법칙을 따른다. See Papoular, R., Electrical Phenomena in Gases, Iliffe Books Ltd., London, 1965.

[69] Mason, J. H., in Progress in Dielectrics, Vol. 1, Ed. Birks, J. S., Schulman, J. H., Heywood & Co. Ltd., London, 1959.

[70] Nawata, M., et al., IEEE Trans. Electr, Insul.,EI -20. pp. 88, 1985

[71] Gerhard-M., R., IEEE Trans. Electr, Insul., EI-22 pp. 531, 1987.

[72] Ashcraft, A, C., et al., IEEE Int'l Symp. Electr. Insul., Conf. Record, Montreal, pp. 231, 1976.