

폴리테트라 후로루에치렌의 열 일렉트레트

論 文
33~9~2

Thermal Electret of Polytetrafluoroethylene

李 準 雄* · 洪 眞 雄**
(Joon-Ung Lee · Jin-Woong Hong)

Abstract

Thermally stimulated currents have been measured from polytetrafluoroethylene(PTFE) Electret, in the temperature range 293° K-403° K.

The main spectrum appearing at 373° K is associated with orientation of the dipoles "COOH" and "SO₃H".

The activation energy for the spectra has been concluded to be in the range of 0.6-0.73[eV] at 373° K by means of several different methods, and mobilities observed at 373° K are about 3×10⁻¹⁴ [m²/V. S.].

를 선정하여 온도 293°K ~ 403°K 사이의 TSC 스펙트럼을 측정하여 분석한 결과를 소개한다.

1. 서 론

1920년 Eguchi¹⁾에 의해 WAXES에서 처음 발견된 일렉트레트는 그후 많은 재료로 연구되어 왔으나 근래에는 합성고분자물질이 일렉트레트재료로 대단히 우수함을 인정받고 있다.

반도체, 유전체 및 절연체의 물성연구수단으로 유용완화현상²⁾³⁾과 같이 열일렉트레트의 TSC 스펙트럼을 측정하여 분석하는 방법도 대단히 중요한 방법⁴⁾⁷⁾인데, 열일렉트레트의 실용적인 면으로는 미국의 항공우주국에서 프라스틱로켓트 추진용의 고전압 전원용으로 개발한 일렉트레트 정전발전기⁸⁾나 일본의 쓰니사에서 개발한 일렉트레트 마이크로폰⁹⁾을 들 수 있으며 앞으로는 생체의용 재료^{21)~24)}로도 고분자 일렉트레트가 이용될 전망이다. 이와 같이 일렉트레트에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나 고분자 유전체의 복잡한 화학식, 미세구조 및 불순물과 측정조건 등에 따라 그결과는 상이하며, 본 연구에서는 고분자유전체중 고유저항이 대단히 큰 폴리테트라 후로루에치렌(Polytetrafluoroethylene; 이하 PTFE 라 한다.)의 능동소자나 변환기로서의 응용가능한 기초자료를 얻기 위하여 두께 82 (um)의 PTFE 필

2. 사용시료와 실험장치

2-1 사용시료

본 실험에 사용된 시료는 미국에서 군사목적으로 개발된 재료로 내열성, 내약품성 그리고 내식성이 대단히 우수하며 특히 전기적(내수성, 내습성 및 고주파) 특성이 가장 우수한 재료로 알려져 있고, 화학적 성질, 물리적 기계적 성질의 변화가 거의 없어 우주항공에서 부터 가전제품에 이르기까지 널리 이용되고 있다. 구조식은 그림 1에 나타낸 것과 같이 선상유기물인데 시료는 주로 압축성형으로 가공되며 결정도는 소결조건, 냉각속도에 크게 의존하며 화학적 성질은 주로 C-F 결합의 불활성에 기인되며 고분자물질중에서 가장 안정한 선상유기 중합체이다.

본 연구에 사용된 시료는 두께 82 (um)의 PTFE 필름(상품명 TEFLON, Du Pont 社製)으로 직경

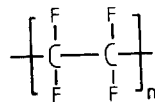


그림 1. PTFE의 구조식
Fig. 1. Structural formula of PTFE

*正 會 員 : 光云大學 電氣工學科 教授 · 工博
**正 會 員 : 光云大學 大學院 電氣工學科 博士課程
接受日字 : 1984年 7月 3日

44 (mm) Silver Paste전극을 부착하여 TSC스펙트럼을 측정하였다.

2-2 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치의 블록선도는 그림 2와 같고 TSC는 전위계(KEITHLEY ELECTROMETER, 610C)와 기록계(J.J. Lloyd Instrument Ltd. Recorder CR 503)를 사용하여 측정하였고, 실험장치는 사진 1과 같다.

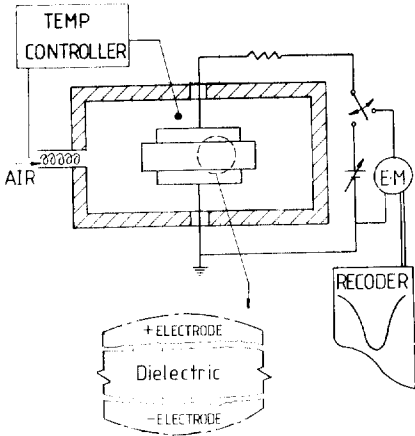


그림 2. 실험 장치
Fig. 2. Experimental device

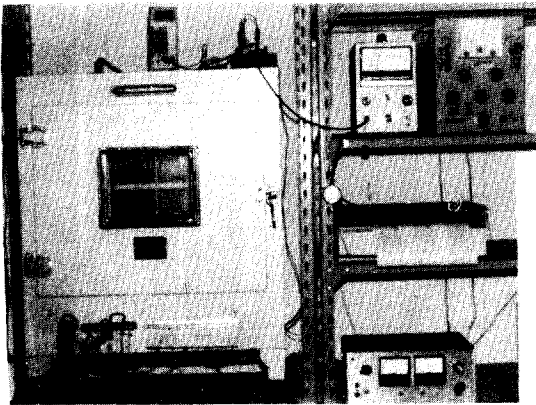


사진 1. 실험장치
Photo. 1. Experimental device

3. 실험결과

3-1 형성전계변화에 따른 열자격 전류

그림 3은 형성온도(形成溫度) 80°C일때 1~10 [MV/m] 사이의 전계를 5분간 인가하여 얻은 TSC 곡선들인데 최대온도 T_m은 형성전계가 낮은 2.9 [MV/m]이하에서는 형성전계에 의존하지 않으나 2.9 [MV/m] 이상의 전계에서는 의존함을 알 수 있다.

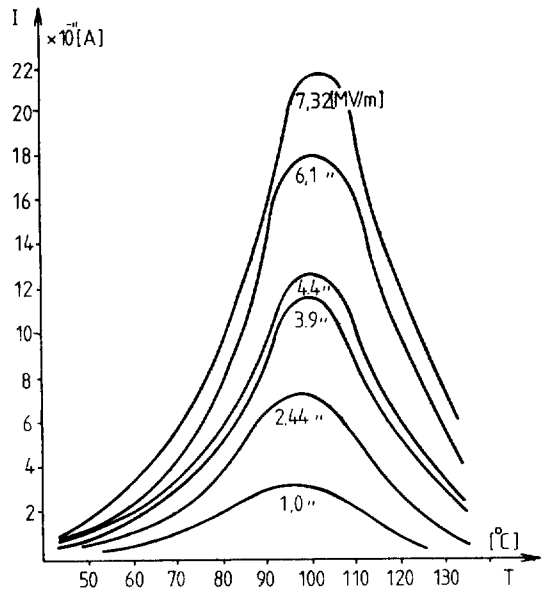


그림 3. 형성전계에 대한 열자격전류곡선
Fig. 3. TSC curve VS forming electric field T_f : 80 [°C] t_f : 5 [min] d : 82 [μm] electrode dia : 44 [mm]

또 그림 4는 그림 3을 근거로 하여 전계의 함수로 전하량을 나타낸 것인데 1~2.9 (MV/m)사이의 제 1 영역에서는 처음 2.5 (MV/m)까지는 전계에 비례하는 오유의 법칙이 성립하다가 포화되며 2.9 ~ 4.4 (MV/m) 제 2 영역에서는 전계의 자승에 비례하는 차일드(child)법칙이 성립하는데, 제 2.3 영역의 경계 전계인 4 [MV/m]에서는 전하가 급증하는 것을 알 수 있으며 4 [MV/m]이상의 제 3 영역에서는 전하는 전계의 3승에 비례하는 쇼트키 효과에 기여하는 전하가 나타나는데 이 결과는 대단히 재미있는 실험 결과로 생각되며 저밀도 폴리에치렌에서도 비슷한 결과를 얻을었는데 같은 전계에서 PTFE 시료보다 저밀도 폴리에치렌 시료보다 잔류전하가 대단히 많음을 알 수 있다.

3-2 형성온도 변화에 따른 열자격전류

그림 5는 형성온도를 변화시키면서 측정 한 TSC

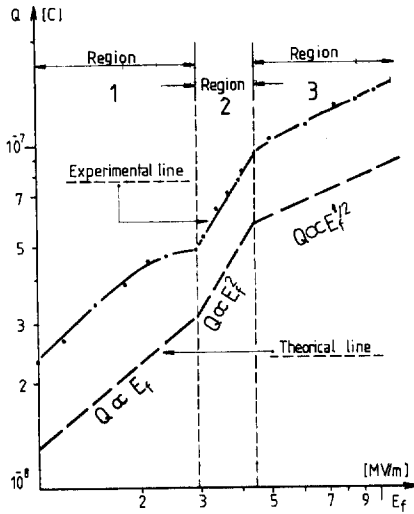


그림 4. 형성전계에 대한 전하량
Fig. 4. Charge magnitude versus forming electric field $T_f: 80^\circ\text{C}$ $t_f: 5$ (min) $d = 82$ (μm)
 electrode dia : 44 (mm)

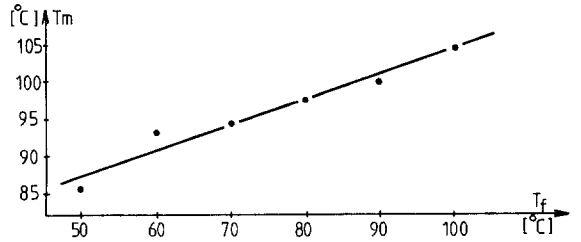


그림 6. 형성온도와 β 피크의 최대 온도 관계
Fig. 6. The relation between maximum temperature of β peak and forming temperature

4. 실험결과와 검토

4-1 β 피크의 성질

두께 82 (μm)의 PTFE 박막을 형성 온도 353°K [80 (°C)]에서 2 (MV/m)의 전계를 5분간 인가하여 제작한 열일렉트렛트를 상온 이상의 온도영역부터, 403°K [130 (°C)]까지 열차격전류를 측정할 결과 그림 7에서와 같이 최대 온도 $T_m = 371^\circ\text{K}$ [98 (°C)]에서 1개의 피크 (이하 β 피크라 한다)를 얻었다.

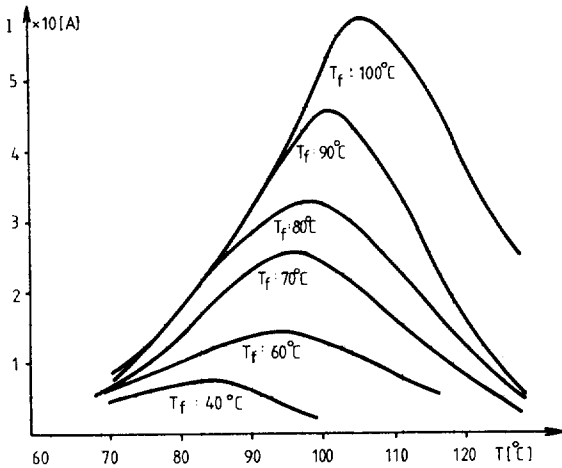


그림 5. 형성온도와 열차격전류의 관계
Fig. 5. The relation between forming temperature and TSC $V_f: 2$ (MV/m) $t_f: 5$ (min)
 $d = 82$ (mm) electrode dia : 44 (mm)

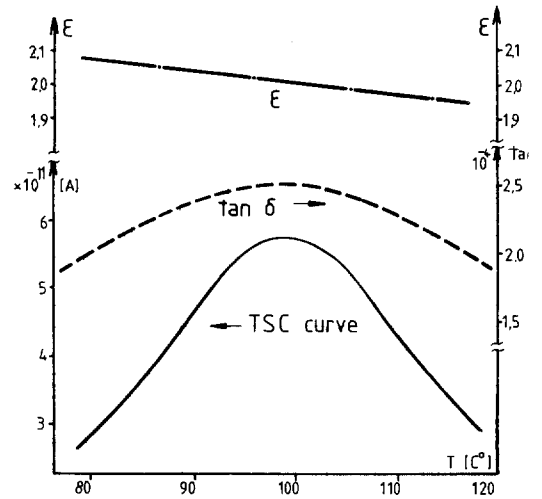


그림 7. PTFE의 열차격전류, 유전정점 그리고 유전율
Fig. 7. TSC, $\tan \delta$ and ϵ spectrum in PTFE
 $E_f: 2$ (MV/m) $T_f: 80$ (°C) $t_f: 5$ (min)
 $d: 82$ (μm) electrode dia : 44 (mm)

곡선들이다. 형성 온도 40°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C, 100°C일 때 2 (MV/m)를 5분간 인가하여 얻은 TSC 곡선이며 그림 6에서와 같이 형성 온도를 증가시키에 따라 T_m 은 고온측으로 점점 이동하고 TSC의 면적도 점점 커짐을 알 수 있다.

PTFE¹¹⁾는 원래 무극성이며, 결정도는 다른 고분자 물질에 비해서 대단히 높은 것으로 알려져 있으며, 또 주쇄 (主鎖)의 말단에 카복실기 (Carboxylic基)

와 설펜산기(Sulfonic 酸基) 또는 고온에서 소성된 PTFE는 $CF=CF_2$ 基를 함유하는데 이들이 극성으로 나타난다.

또, PTFE도 다른 고분자물질에서와 같이 두개의 전이온도가 있는 것으로 알려져 있다. 즉, 1차전이온도¹²⁾는 300°K 부근으로 2차전이온도¹³⁾(二次轉移溫度)는 363°K로 알려져 있다.

F. Krum et F. H. Muller¹⁴⁾씨는 PTFE의 점탄성(粘彈性)과 유전분산(誘電分散)에 대하여 또 N.G. McCrum¹⁵⁾씨는 PTFE의 점탄성에 대해 연구하였는데 McCrum씨는 결정도(48%, 64%, 76%, 92%)가 서로 다른 PTFE를 온도범위 4.2°K ~ 600°K 사이에서 내부마찰실험(內部摩擦實驗)을 한 결과 400°K에서 α 분산(分散), 323°K 부터 363°K 사이에서 β 분산, 176°K에서 γ 분산을 각각 얻었는데, α 분산은 결정도가 높아짐에 따라 분산은 점점 적어지는데, 이 현상에 대해 McCrum씨는 비정질 영역내에 있는 비교적 긴 주쇄가 이차전이온도 부근에서 마이크로브라운 운동으로 나타난다고 하였고, Krum씨와 Muller씨는 파라(Para)결정상이 2차전이온도 영역에서 2차원적인 마이크로 브라운 운동에 기인하여 α 분산이 나타난다고 보고하였다.

또, β 분산은 실온전이분산온도와 연관되는 분산으로 α 분산과는 반대로 결정도가 증가되면 진폭은 커지는데 Muller씨는 상온부근의 제 1차 전이온도에서 주쇄의 진동으로 β 분산이 나타나며 γ 분산은 결정도가 높아지면 분산은 점점 적어지는데, 이것은 짧은 쇠편(鎖片)의 진동으로 나타난다고 보고 하였다.

본 실험에서 PTFE를 여러가지 파라메타를 변화시켜 분석한 결과 β 피크는 쇠편의 COOH기($CF_2-C(=O)OH$), SO_3H 가 ($-OSO_3^-$)가 제 2차전이온도영역 363°K 부근에서 배향하기 때문에 나타나는 것 같다. 또 여러 연구자들은 TSC스펙트럼의 T_m 은 $\tan\delta$ 스펙트럼 T_m 과 일치한다고 보고 하였는데 그림 7의 $\tan\delta$ 스펙트럼은 Krum et Muller씨¹⁴⁾가 측정된 곡선이며 이는 TSC의 최대온도 T_m 과 잘 일치한다.

쌍극자들은 형성전계 E_f 를 인가할때 분극되며 TSC는 이 분극이 이탈되는 전류인데 분극과 탈분극의 완화시간은 같다. 고분자 물질의 연구자들은 쌍극자 배향에 의한 TSC는 형성전계에 비례하여 증가하며, T_m 은 형성전계에 의존하지 않는다고 보고하고 있다.

그림 4는 형성전계 E_f 변화에 따른 분극량 Q 의 변화모양인데 전계가 2.9 [MV/m] 이하인 제 1영역에서 Q 는 E_f 에 비례하여 증가하는 오옴의 법칙이 성

립하다가 2.5 [MV/m] 이상의 전계에서는 포화하며, 2.9 [MV/m] 이상의 제 2영역에서는 공간전하가 작용하여 오옴의 법칙으로부터 벗어나 Q 는 E_f^2 에 비례하는 차일드법칙이 적용되며, 4.4 [MV/m] 이상의 제 3영역에서 Q 는 \sqrt{E} 에 비례하는 쇼트키 효과가 성립한다.

1) 제 1 영역

그림 4에서 형성전계 2.5 [MV/m] 이하에서는 분극량 Q 는 E_f 에 비례하여 증가하는 오옴의 법칙이 성립하다가 곧 포화하는데 이 전계영역에서는 시료내에 존재하는 쌍극자가 서서히 배향하기 시작하여 2.5 [MV/m]의 전계에서는 배향이 완료되어 2.9 [MV/m]까지는 포화하는 것 같은데, 이 영역에서는 이들 쌍극자의 배향에 의해 β 피크가 나타나는 것 같다.

이 영역은 그림 8과 같이 Jonsher 씨¹⁶⁾가 제안한 투사이트형(Two Site Type)에 의한 호핑과정 즉 $Q = 2qNoSa \int_0^1 z \tanh\left(\frac{qaz}{KT} E_f\right) dz$ 로 설명할 수 있다. (2a: 캐리어 한쌍의 두위치 사이 거리(m), q: 캐리어의 전하량, S: 포획된 유효단면적, $z = \cos\theta$: θ 는 전계와 두 위치를 연결한 직선과 이루는 각.) 여기서 $No = 10^{23}/m^3$ 일때, 컴퓨터에 의해 계산된 캐리어의 호핑거리 2a는 약 300 [Å], 포획된 전체의 캐리어수 $N = 2No = 2 \times 10^{23}/m^3$ 을 얻었다.

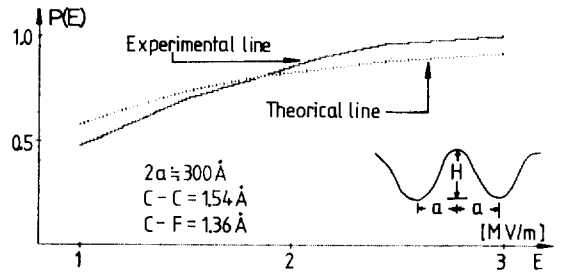


그림 8. 투 사이트형에 의한 호핑모델
Fig. 8. Hopping model by two site type

한편 제 1영역에서 형성전계를 변화시켜 얻은 TSC 곡선의 최대온도 T_m 은 E_f 에 의존하지 않으며, 이는

$$\alpha\tau = \frac{KT_m^2}{H}$$

식 $\alpha\tau = \frac{KT_m^2}{H}$ 과 잘 일치함을 보여주고 있다.^{14,17)} (여기서 α 는 승온속도, τ 는 완화시간, H는 활성화 에너지, K는 볼츠만의 상수, T_m 는 최대온도를 나타낸다.)

2) 제 2 영역

2.9 [MV/m] 이상으로 형성전계가 높아지면 전도대로 부터 낮은곳에 있는 모든 결함에 캐리어들이 트랩되므로 전류는 오음의 범칙을 벗어난다. 즉, 전계가 높아지면 해방될 캐리어 확률은 풀-프렌켈 효과에 의해 증가하며 깊게 포획된 캐리어도 해방될 것이며, 해방된 캐리어들은 헤테로 공간전하가 되어 점점 전극 가까이에는 고전계가 형성되리라 생각되나, 제 2영역에서 전하는 전계의 자승에 비례하므로 풀-프렌켈 효과 (Pool - Frenkel Effet) 보다는 차일드 법칙에 의한 공간전하제한 전류 (Space Charge Limited Current)가 흐르는것 같다.

Bashara 와 Doty¹⁷⁾씨는 230 [Å]의 폴리부타디엔 박막에서 4.3 [MV/m]의 전계에서 공간전하제한 전류를 얻었는데 이 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 이영역에서는 쌍극자 분극에 의한 전류 보다는 공간전하에 의한 전류로 생각되며 이 영역에서는 제 1 영역과는 달리 형성전계가 높아지면 T_m 은 고온측으로 서서히 이동함을 확인하였는데 이 실험결과를 이를 잘 뒷받침하고 있다.

시료와 전극과의 접촉관계를 구해보면 $V/d = 4$ [MV/m]일때, 전공간전하량 $Q = 8 \times 10^{-8}$ [C], 접촉전하량 $Q_c = 5.2 \times 10^{-8}$ [C]에서 $\epsilon = 2\epsilon_0$ 라 하면

식 $E(O) = \frac{V}{d} + \frac{qnu}{\epsilon} = \frac{V}{d} + \frac{Qc}{\epsilon s}$ 에 의하여 접촉전계¹⁸⁾ E_c 는 5.88 (MV/m)로 차일드의 효과에 의해 나타나는 접촉전계는 인가전계 4 (MV/m)의 약 1.5 배이며 전극가까이에서 국부적으로 나타나는 것이 명백한 것으로 생각된다. 또 제 2영역에서는 차일드 법칙이 성립하므로 그림 9와 같이 $J \propto E^2$ 을 플롯트하여 그 기울기로부터 이동도 μ 를 구하면 $\mu = 3 \times 10^{14}$ [$m^2/V \cdot S$]로 이수치는 다른 고분자물질에서 얻은 것과 잘 일치한다.^{10), 18), 19)}

3) 제 3 영역

이 영역에서 전하의 기울기는 제 2영역보다 감소하는데 이는 전계의 증가로 시료로 전하의 주입이 생기기 때문이라 사료되며, 이 영역에서의 전하는 형성전계의 상승에 비례하는 쇼트키 효과에 의한 주입이 생김을 암시하여 준다. 이같이 새로운 주입으로 생긴 호모전하는 시료내의 헤테로 전하와 재결합하므로 전하는 감소하며 형성온도 80°C때 인가전계 4.4 [MV/m]이상이 되면 충분히 음극으로부터 전자 주입이 이루어지리라 생각된다. 또 이영역에서도 제 2영역에서와 같이 T_m 은 E_f 에 의존하였으나, 이는 형성전계가 높아지면, 전자의 주입이 생겨 이들 공간전하들이 β 피이크에 기여하는것 같다.

4-2 형성온도 변화에 대한 β 피이크

형성온도 T_f 를 변화시키면서 β 피이크를 측정하여 얻은 것이 그림 10이다.

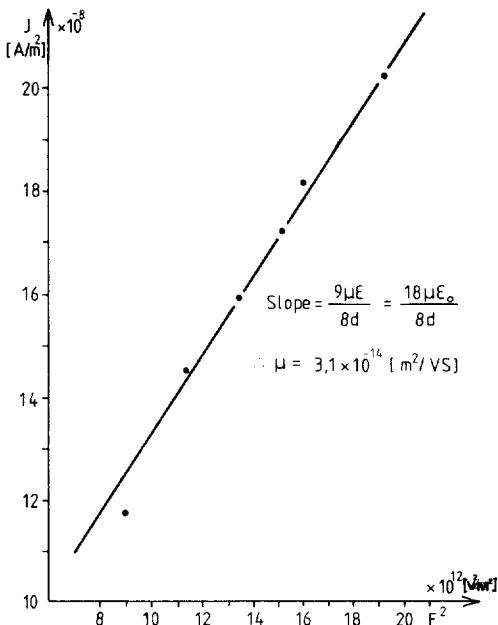


그림 9. 제 2영역에서 전계 자승에 대한 전류밀도
Fig. 9. Current density (J_{child}) VS electric field square (E^2) in the 2nd region

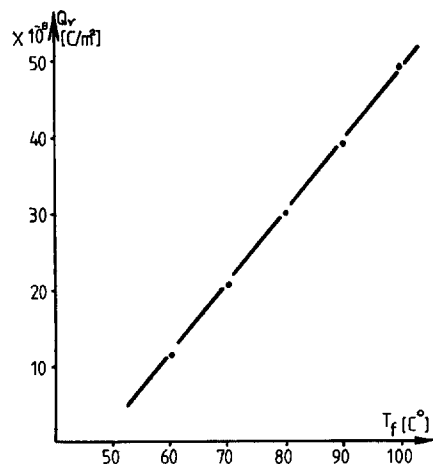


그림 10. 형성온도 변화에 대한 전하의 밀도
Fig. 10. the Density of charge VS forming temperature

이 그림에서 보면 T_f 의 증가에 따라 Q 도 증가하며 T_m 도 고온측으로 서서히 이동한다. 그런데 그림10에서 T_f 의 증가에 따라 Q 는 증가하는데 식 $P_0 = \frac{n\mu_0^2}{3K T_f} E_f$ 을 만족하지 못한다.²¹⁾ 이에 대해서는 다음과 같이 생각할 수 있다. 즉, 식 $P_0 = \frac{n\mu_0^2}{3K T_f} E_f$ 은 T_f 에서 분극된 후 바로 쌍극자 배향이 동결(凍結)한 경우이다. 그러나 실제로는 시료를 냉각하는 시간이 필요하고 또 실제상 T_f 는 냉각과정 완화시간의 온도의존성으로 결정되는데, 이 온도는 본 실험에서 전부 일정하며, 또 가열온도의 증가에 의해 시료의 산화가 증가되기 때문에 T_f 의 증가에 따라 β 피이크의 면적도 점점 커지는 것으로 생각된다.

4-3 각 영역에서의 활성화 에너지와 완화시간

그림 11은 각 영역에서 샘플링한 TSC스펙트럼인데 이들로부터 초기상승법, 전면적 방법 및 GROSS-WEINER 방법으로 얻은 활성화에너지와 완화시간을 표 1에 나타냈는데 일반적으로 고분자내의 완화시간과 비교하면 수광할 수 있는 수치로 다른 연구자들이 얻은 값과 거의 같다.^{20),22),23)}

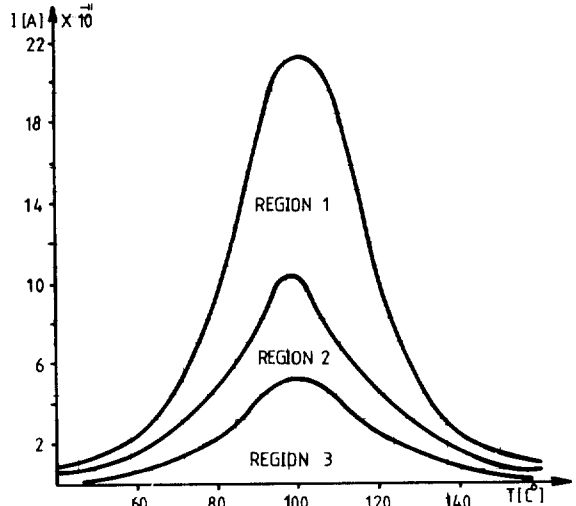


그림 11. 제 1, 2, 3 영역에서 열자적 전류 곡선
 Fig. 11. TSC curve in the 1, 2 and 3 region
 $T_f : 80 [^{\circ}C]$ $t_f : 5 [min]$ $d : 82 [\mu m]$
 electrode dia : 44 [mm]

표 1. 활성화 에너지와 완화시간의 비교

Table 1. Comparison of the activation energy and relaxation time field phenomena the density

	제 1 영역	제 2 영역	제 3 영역
초기 상승법	0.6 [eV] $\tau_0 = 7.5 \times 10^{-7} [s]$ $= 8.7 \times 10^{-12} [day]$	0.6 [eV] $\tau_0 = 7.5 \times 10^{-7} [s]$ $= 8.7 \times 10^{-12} [day]$	0.6 [eV] $\tau_0 = 7.5 \times 10^{-7} [s]$ $= 8.7 \times 10^{-12} [day]$
전면적 방법	0.73 [eV] $\tau_0 = 1.1 \times 10^{-8} [sec]$ $= 1.3 \times 10^{-13} [day]$		
GROSSWEINER 방법	0.67 [eV] $\tau_0 = 7.6 \times 10^{-8} [sec]$ $= 8.8 \times 10^{-13} [day]$	0.69 [eV] $\tau_0 = 3.98 \times 10^{-8} [sec]$ $= 4.6 \times 10^{-13} [day]$	0.68 [eV] $\tau_0 = 5.5 \times 10^{-8} [sec]$ $= 6.4 \times 10^{-13} [day]$

5. 결 론

두께 82(μm)의 PTFE 박막으로 TSC를 측정할 결과 약 373°K 전후에서 1개의 β 피이크를 얻었는데

1) β 피이크는 2.9(MV/m) 이하의 저전계에서는 2차전이온도 부근에서 쇠단의 카르복실기(COOH基; $-C \equiv \underset{OH}{O}$)와 설펜산기(SO₃H基; $-SO_3^-$)의 배향에 의해 생기는데 같다.

2) 2.9(MV/m)~ 4.4(MV/m)의 전계 영역에서는 차일드의 법칙에 의한 공간전하의 기여로 β 피이크가 생기는것 같고 4.4(MV/m) 이상의 전계에서는 전자주입이 생겨 β 피이크의 전하량 기증기는 다시 감소함을 확인하였다.

3) 3가지 방법(초기상승법, 전면적방법, GROSS-WEINER 방법)을 이용하여 얻은 활성화 에너지는 0.6~0.73(eV)이다.

- 4) 완화시간 τ_0 는 $\tau_0 \approx 1 \times 10^{-13}$ [day]이다.
- 5) 제 2 영역에서 이동도 $\mu = 3.1 \times 10^{-14}$ [$\text{mf}^2/\text{V}\cdot\text{S}$]를 얻었다.
- 6) 동일전계에서 저밀도 폴리에치렌 일렉트레트보다 PTFE 일렉트레트내의 잔류전하가 대단히 크므로 일렉트레트의 실용적인 면에서는 불소계 화합물이 우수함을 확인하였다.

参 考 文 献

- 1) M. Eguchi ; phil. Mag., 49, 178 (1925)
- 2) H. SASABE et al ; "Effect of catalyts on dielectric properties and D·C conduction in polyethylene terephthalate polym", J., vol. 2, No. 4, pp. 518 - 529 (1971)
- 3) 이준웅, 연대홍 ; "천연고무의 유전특성에 미치는 가황의 영향", 대한전기학회, 33, 3, pp. 112-117 (1984)
- 4) J. Von Turnhout ; "Thermally stimulated discharge of polymer electrets", Elsevier Sci. Pub. Com. Ans., (1975)
- 5) J. T. Randall et M. G. F. Wilkins ; "The phosphorescence of various solids", Proc. Roy. Soc (London) vol. 184A, No. 6, pp. 347-407 (1945)
- 6) C. Bucci, R. Fieshi et G. Guidi ; "Ionic thermocurrents in dielectrics", Phys. Rev 148, pp. 816-823 (1966)
- 7) R. A. Cresswell et M. M. Perlman ; "Thermal current from corona charged mylar", J. Appl. Phys., 41, pp. 2365-2375 (1970)
- 8) R. E. Matthew ; Electrical Eng., 81, 850 (1960)
- 9) G. M. Sessler ; J. Acoust. Soc. Amer., 35, 1354 (1963)
- 10) 이준웅 ; "LDPE 일렉트레트에 있어서 캐리어의 성질과 트랩깊이 해석", 대한전기학회, 29, 511 (1980)

- 11) 里川孝臣外 ; "ふっ素樹脂", 日刊工業新聞社, PP5 - 49 (1969)
- 12) F. A. Quinn, D. E. Roberts et D. N. Work ; J. Appl. Phys., 22, 1085 (1951)
- 13) 荒木 ; J. Appl. polymer Sci., 11, 953 (1967)
- 14) F. Krum et F. H. Muller ; Kolloid - z, 164, 81 (1951)
- 15) N. G. McCrum ; J. Polymer Sci., 34, 355 (1959)
- 16) A. Servini et A. K. Jonscher ; "Electrical conduction in evaporated scilicon oxide films, Thin Solid Film, 3, 341 (1969)
- 17) N. M. Bashara et C. T. Doty ; Electrical conduction in very thin polybutadiene films formed in a glow discharge", J. Appl. Phys., 35, pp. 3498-3507 (1964)
- 18) A. Toureille et J. P. REBOUL ; "High - field conduction phenomena in polymers", Ann. Soc. Sci., Bruxelles. 89, 190 (1975)
- 19) L. Brehmer, M. PINNOW ; "Estimation of the charge carrier mobility in low density polyethylene by means of current oscillations", Phys. Stat. Sol., (a) 56, K239, (1978)
- 20) 高松俊昭 ; "ポリ四フッ化エチレン及びポリフッ化ビニリデンエレクトレットの熱刺激電流", 高分子, 23, 273 (1974)
- 21) 이준웅외 ; "초저주파를 검출하는 변환기의 개발", 한국통신학회, 6, 2 pp. 45-50 (1981)
- 22) 이준웅외 ; "폴리에치렌 테레프탈레이트의 활성화 에너지와 쌍극자 모우먼트의 평가", 대한전기학회, 31, 9, pp. 61-68 (1982)
- 23) 이준웅외 ; "코로나 대전된 폴리에치렌 일렉트레트의 열자격전류", 대한전기학회, 32, 7, pp. 13-20 (1983)
- 24) 高松俊昭 ; "エレクトレットについて", 静電気学会誌, 1, 3, pp. 167-174 (1977)