

진공증착법으로 제조된 β -PVDF 박막의 유전 특성에 미치는 이온의 영향

11-11-10

The Effect of Ion Contribution to the Dielectric Properties of β -PVDF Thin Film Fabricated by Vapor Deposition Method

박수홍*, 김종택*, 이덕출*

(Su-Hong Park, Jong-Tack Kim, Duck-Chool Lee)

Abstract

In this paper, the dielectric properties of fabricated Polyvinylidene fluoride(PVDF, PVF₂) thin film with substrate temperature from 30 to 80°C at vapor deposition. The dielectric properties of PVDF thin film had been studied in the frequency range from 10Hz to 4MHz at measuring temperature between 20 and 100°C. The anomalous increasing in dielectric constant and dielectric loss at low frequencies and high temperature was described for PVDF thin film containing ion impurities. In particularly, ion mobility of fabricated PVDF thin film at substrate temperature at 30°C decrease from 2×10^{-5} to $3.07 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. On the other hand, ion density increase abruptly from 1.49×10^{13} to $1.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. In spite of decreasing of ion mobility, dielectric constants and dielectric loss for PVDF thin film increase rapidly with decreasing frequency and high temperature. It was concluded that the dielectric constants and dielectric loss was related to ion density than to ion mobility at low frequency and high temperatures.

Key word(중요단어) : dielectric constant (비유전율), dielectric loss(유전 손실), mobilities(이동도), α -relaxation (α -완화), relaxation time(완화 시간)

1. 서 론

지금까지 기능성 고분자 재료로 널리 알려져 있는 PVDF(Polyvinylidene fluoride)는 $(-\text{CH}_2-\text{CF}_2)_n$ 를 반복 단위로 하는 선상 고분자로서 기계적·화학적 성질이 우수하며, 또한 분자쇄내에 존재하는 C-F 쌍극자기에 의해 고분자 재료중 가장 큰 비유전율을 갖는 재료이다. 특히 1969년 PVDF 필름에서 발견된 압전 특성(Piezoelectric)은 세라믹 재료에 비해 유연성, 가공성, 경량성이 우수함으로 최근 전자 부품의 소형화, 경량화 추세에 부합될 수 있다는 측면에서 종래의 세

라믹 재료 중심의 센서 재료 개발을 고분자 재료로 확대 시키는 계기가 되었다.^{1,2)}

현재까지 PVDF의 결정 형태는 α , β , γ , δ 형의 4종이 발견되었으며, 이들 중에서 가장 큰 압전 특성과 초전 특성을 갖는 β -PVDF의 결정 형태를 얻기 위한 기존의 일렉트렛(Electret) 제조 방법들은 고전계하에서 분극을 시키거나 4배 이상의 연신을 행하는 방법들이 주로 사용되고 있다.³⁾ 그러나 이러한 방법들은 고전계하에서 필름 표면으로 흐르는 과전류에 의한 절연 파괴와 분자쇄가 필름 표면에 거칠게 배향되는 경향을 지니고 있으므로 고분자 압전 센서 재료로서의 응용을 위한 센서재료 개발 공정에 그 한계가 지적되고 있는 방법들이다.⁴⁾ 또한 일반적으로 고분자의 압전 특성의 경우 결정 영역 안의 쌍극자 배향에 의한 것으로 고분자 박막에서의 높은 압전 특성을 기대하기가 어렵기 때문

* : 인하대학교 공대 전기공학과
(인천시 남구 용현동 253, Fax: 032-863-5822
E-mail : g1982550@inhavision.inha.ac.kr)
1998년 6월 28일 접수, 1998년 9월 29일 심사완료

에 분극이나 연신의 공정을 거친 후에 압전 특성과 초전 특성을 향상시키기 위해서 고온 열처리 단계가 필수적이다. 그러나 이러한 복잡한 공정은 시간적인 측면에서 비경제적일 뿐만 아니라 공정시 고분자 표면에 불순물이 흡착될 가능성이 있음으로 고분자 일렉트렛트의 물성에 치명적인 영향을 미칠 수 있는 방법들이다.^{5),6)}

이에 본 연구실에서는 종래의 일렉트렛트 제조 방법의 단점을 극복하고자 새로운 방법의 하나로 진공 증착시 전계 인가법이라는 개념을 도입하여 고분자 일렉트렛트 박막을 제조하였으며, 결정화도를 증가시킬 목적으로 박막 제조시에 기판의 온도를 30~80°C로 변화시켜가며 β -PVDF 박막을 제조함으로써 기존의 다단계 공정을 하나의 공정으로 단축시키고자 하였다.

본 논문에서는 특히 기판의 온도를 변화시켜 제조한 β -PVDF 박막에 대한 전기적 특성 검토의 하나로 유전 특성을 주파수와 온도를 변화시켜 측정함으로써 고온, 저주파수 영역에서 나타나는 유전 특성의 이상적 거동 원인을 검토하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 실험에 사용한 진공 증착 장치는 고분자 박막을 제조하면서 일렉트렛트 공정과 열처리 공정을 동시에 수행할 수 있는 구조로 제작하였으며 크게 배기부, 검출부, 반응부로 나누어져 있으며, 전계 인가법을 이용한 PVDF 박막 제조를 위한 반응부의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

반응부는 발열원으로써 자체 제작한 크누드센 셀(Knudsen cell) 형태의 스텐레스 포트($\phi=16[\text{mm}]$, $h=40[\text{mm}]$)와 발열원과 외부와의 열차폐를 위하여 스텐레스 열차폐 장치를 사용하였으며, 기판의 온도와 발열원의 온도를 일정하게 유지시키고 증발량을 제어하기 위하여 PID(Proportional Integrational Differential) 특성을 이용한 온도 조절기인 DX4-100에 가변저항을 연결하여 사용하였다. 특히 고전계 인가를 통한 분자쇄의 배향을 위해서 스텐레스 망사($\square-0.85\mu\text{m}$)를 이용하였고, 기판은 실험 목적에 따라 글라스와 KBr(Potassium Bromide)을 사용하였다.

또한 일정한 두께의 PVDF 박막을 제조하기 위하여 수정 진동자식 막두께 측정기(Thickness

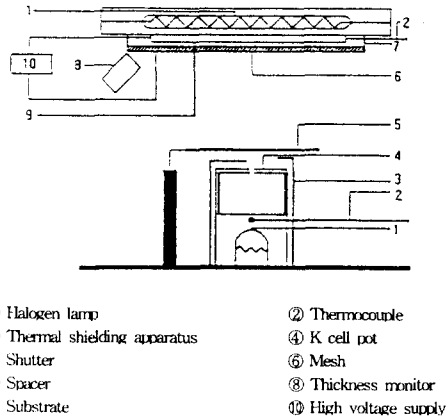


그림 1. 반응부의 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of reaction chamber apparatus

monitor, INFICON Co., ITM-180)를 기판면에 가까운 곳에 설치함으로써 막두께 제어를 보다 용이하게 함으로써 PVDF 박막 제조에 있어 막두께의 재현성을 증가시키려고 하였다.

2.2 β -PVDF 박막의 제조 공정

PVDF 박막 제조시에 기판면과 PVDF 박막의 표면 부착 특성을 향상시키기 위한 방법의 하나로 글라스 표면에 잔존하는 유기 물질의 제거가 선행되어야 한다. 이를 위해서 마이크로 용액(5%)과 증류수(95%)를 혼합하여 초음파 세척기로 20분간 세척한 후 마이크로 용액의 제거를 위해서 증류수에서 20분씩 5번의 반복세척을 거친 후에 건조시켜서 사용하였다. 또한 진공증착법으로 제조한 PVDF 박막 내에 존재하는 캐리어들이 유전 특성에 미치는 영향을 검토하고자 글라스의 한면에 알루미늄을 약 1000Å의 두께로 진공 증착시킨 후에 하부 전극의 안정화를 위해서 공기 분위기에서 400°C로 10분간 유지한 후 천천히 냉각시켜 기판으로 사용하였다.

β -PVDF 박막의 제조는 반응부의 진공도가 2.0×10^{-5} torr로 유지되었을 때 발열원의 온도를 6~8°C/min로 천천히 상승시켜 270°C가 될 때 전계를 142.8kV/cm로 인가한 후에 셔터를 열고 증착을 시행하였다. 이 때 증발량은 10.5A/min로 유지하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기판 온도에 따른 증착 특성

진공증착법을 이용한 β -PVDF 박막 제조시에 발열원의 온도와 인가 전계를 270°C, 142.8kV/cm로 각각 고정시키고, 기판의 온도를 변화시켰을 때의 증착 특성을 그림 2에 나타내었다.

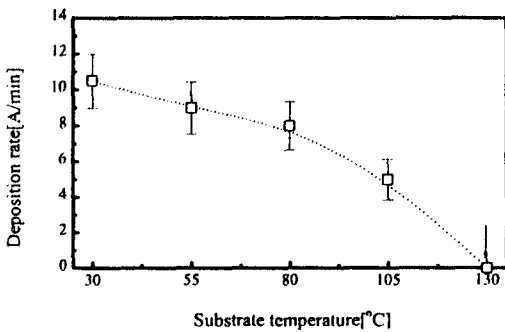


그림 2. 기판 온도에 따른 진공 증착 특성

Fig. 2. Vapor deposition characteristics with substrate temperature

그림 2의 결과를 살펴보면 기판 온도를 30~130°C로 변화시켜 제조할 경우 증착량은 10.5~0Å/min로 감소함을 알 수 있다. 특히 기판 온도가 105°C 이상에서의 증착량은 급격히 감소하여 130°C가 될 때 증착막이 거의 성장되지 않았다. 이와 같은 결과를 과포화도와 용집 에너지의 개념을 도입하여 해석하여 보면, 과포화도(단, 과포화도란 기판면에 입사하는 분자수와 재증발하는 분자수의 비)가 클 경우 즉, 기판 온도가 낮아 기판면에서 재증발하는 입자수가 적을 경우에는 기판 상에 입사된 기체 분자는 병진, 회전 운동을 할 공간적이면서 시간적인 여유가 없으므로 일정한 두께의 박막을 성장시키는 데 소요되는 시간은 감소한다. 반면에 과포화도가 작을 경우에는 기판면 상에 입사된 기체 분자가 병진, 회전 운동을 할 시간적이면서 공간적인 여유가 존재함으로 재증발할 가능성이 증가됨으로 일정한 두께의 박막을 제조하는 데 상당한 시간이 소요된다는 것이다. 본 실험에서 제조한 PVDF 박막의 경우 용해가 130°C 부근에서 시작하여 141°C에서 최대 피크값을 나타냄을 이미 보고한 바 있다.⁷⁾ 즉 용해가 시작되는 영역에서 과포화도와 용집 에너지는 최소값을 가짐으로 기판면에 입사된 대부분의 기체 분자가 재증발함으로써 박막이 거의 성장되지 않은

것으로 생각된다.

이와 같은 증착 특성 결과를 토대로 박막 성장의 경계성을 고려하여 기판 온도를 30~80°C로 변화시켜 박막을 제조하였다.

3.2 유전 특성 분석

기판의 온도를 변화시켜 제조한 시편의 유전 특성 분석은 임피던스 분석기(Impedance analyzer, Hewlett Packard Co., LF4192)와 항온조(Thermostatic oven, Ando Co., TO-19)를 이용하여 측정하였다.

먼저 PVDF 박막의 정확한 두께 산출을 위해서는 엘립소메타(Ellipsometer, PLAS MOS Co., SD2302)와 PVDF 필름이 전극으로 확산되어 들어간 깊이는 오저전자분광기(Auger Electron Spectroscopy, PerkinElmer, PHI-670)를 이용하여 측정된 결과, 순수한 PVDF 박막의 두께가 2700Å임을 알 수 있었다.

이와 같이 얻어진 PVDF 박막의 두께를 근거로 정전 용량(Capacitance)과 유전 정접(Dielectric dissipation loss factor) 데이터를 비유전율(Dielectric constant)과 유전 손실(Dielectric loss)로 변환 하였다. 기판온도를 30~80°C로 변화시켜 제조한 각각의 β -PVDF 박막에 대한 주파수 변화에 따른 비유전율과 유전 손실 특성을 그림 3에 나타내었다.

그림 3의 결과를 살펴보면 측정 주파수의 증가에 따라 각각의 PVDF 박막의 비유전율이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 PVDF 박막 내의 쌍극자가 주위의 매질이나 다른 쌍극자들로부터 속박을 받고 있기 때문에 외부 교번 전계의 극성 변화에 빨리 대응하지 못하기 때문에 발생하는 이상 분산(Anomalous dispersion)의 형태를 띠고 있음을 나타내어 주는 결과라 하겠다.⁸⁾ 측정 주파수 1kHz, 측정 온도 20°C에서 기판의 온도를 30~80°C 변화시켜서 제조한 β -PVDF 박막의 경우 비유전율이 8.7에서 13.3로 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 기판의 온도가 증가됨에 따라서 전체 결정 형태 중에서 β -PVDF의 함유 비율이 72~95%로 증가되기 때문인 것으로 생각된다.⁹⁾ 이러한 β -PVDF의 결정 함유 비율의 증가는 분자쇄의 형태 변화를 의미한다. 즉, α -PVDF의 분자쇄 형태가 TG⁺ (Trans-Gauche-Trans-Gauche⁺)형에서 β -PVDF의 분자쇄 형태인 TT(Trans-Trans)형으로 변화함에 따라 나타나는 결과로써 이들 분자쇄의 결합각을 살펴보면 TT형에 비해 TG⁺형의 결합각

이 작기 때문에 분자간력과 분자내력이 증가함으로써 쌍극자가 외부 극성 변화에 빨리 대응하지 못하기 때문에 나타나는 현상이라고 생각된다.

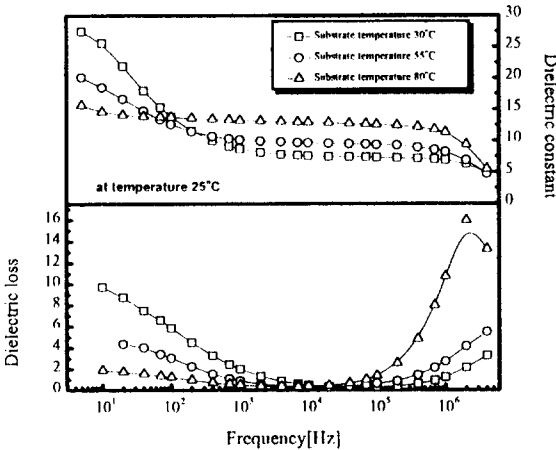


그림 3. 주파수에 대한 PVDF 박막의 비유전율과 유전 손실
Fig. 3. Dielectric constants and dielectric loss of PVDF thin films as a function of frequency

또한 100Hz와 1MHz 부근에서 두개의 주파수 유전 흡수(Frequency dielectric absorption)가 발생되고 있다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 유전 흡수가 발생하는 원인은 이상 분산이 발생하는 원인과 같은 쌍극자들이 빠른 교번 전계의 변화에 대응하지 못하기 때문에 나타나는 현상으로써 100Hz와 1MHz 부근에서 나타나는 유전 흡수를 α 완화와 β 완화라 각각 칭하면, α 완화는 고분자 결정 중의 주쇄의 큰 회전에 의한 것으로 고분자 결정은 고온에서 부드럽고 약한 결정으로 분절(Segments)들이 움직이게 되는데, 하나의 주쇄가 점성 매체 중에서 큰 폭의 열운동을 하기 때문에 저주파수 영역에서 완화의 형태로 나타나는 것이다. 또한 β 완화는 일반적인 고분자 주분산의 형태로 쌍극자 배향 분극에 의한 유전 흡수 현상과 일치함을 알 수 있다.¹⁰⁾

특히 고온 영역과 저주파수 영역에서 살펴보면 주파수 감소에 따라 기판의 온도를 저온으로 유지시켜 제조한 시편일수록 비유전율과 유전 손실이 급격히 증가함을 그림 4에 나타내었다.

이와 같은 결과는 일반적인 쌍극자 배향 분극과 일치하지 않는 특성으로써 특히 기판의 온도를 30°C로 유지시켜 제조한 시편의 경우 비유전율과 유전 손실이

급격한 기울기를 가지며 증가하는 것을 알 수 있다.

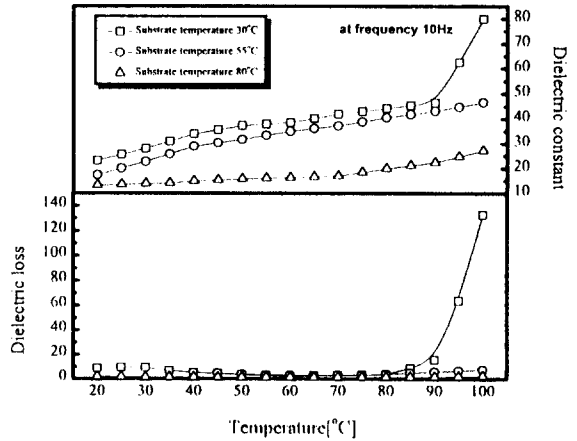


그림 4. 온도에 대한 PVDF 박막의 비유전율과 유전 손실
Fig. 4. Dielectric constants and dielectric loss of PVDF thin films as a function of temperature

Uemura는 고온, 저주파수 영역에서의 유전 특성의 이상적 거동을 이온 불순물들에 의한 영향이라고 주장하였다.¹¹⁾ 즉, 이온 불순물들의 경우 저온, 고주파수 영역에서는 제자리에서 진동하는 형태를 유지함으로 유전 특성에 큰 영향을 미치지 않지만 고온, 저주파수 영역에서는 주변 점성저항의 감소에 따라 외부 교번전계의 변화에 빨리 대응 함으로써 이온의 이동이 용이 하기 때문에 쌍극자 배향 분극에 비해 고온, 저주파수 영역에서 유전 특성에 더 큰 영향을 미친다는 것이다. 고온, 저주파수 영역에서 이온 불순물들의 이동도(Mobility), 확산 계수(Diffusion coefficient), 밀도(Density of ion)를 구함으로써 유전 특성에 미치는 이온 불순물들의 영향을 검토할 수 있으며, 다음 식에 의해서 도출할 수 있다.¹¹⁾

$$\epsilon_r = \frac{2\nu q^2}{kT} \cdot \left(\frac{D}{f}\right) \quad (1)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r} = l \sqrt{\frac{\pi f}{D}} \quad (2)$$

여기서 l : 전극간 거리(cm), D : 확산 계수(cm^2/s), k : 볼츠만 상수($1.38 \times 10^{-16} \text{erg/K}$), q : 전하량($4.8 \times 10^{-10} \text{esu}$), T : 절대 온도(K), μ : 이동도($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$)이다. (단, 확산 계수 D 는 전극간 거리보다 작아야 한다.)

위의 식(1)을 살펴보면 이온 불순물이 유전 특성에 영향을 미칠 경우 ϵ_r 은 f^{-1} 에 비례적이다. 이러한 이론식을 측정 결과와 비교하기 위해서 온도 100°C에서 ϵ_r 의 주파수 의존성을 그림 5에 나타내었다.

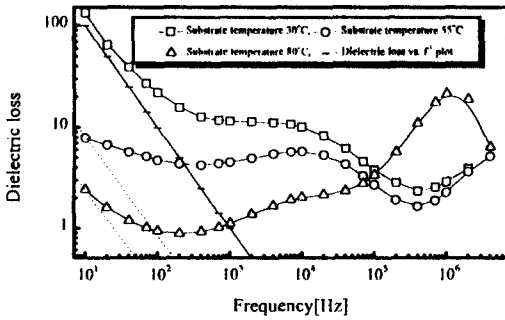


그림 5. 주파수에 대한 PVDF 박막의 유전 손실
Fig. 5. Dielectric constants and dielectric loss of PVDF thin films as a function of frequency (at temperature 100°C)

그림 5의 결과에서 기판의 온도를 30°C로 고정시켜 제조한 PVDF 박막의 유전 손실과 일치함을 알 수 있었다. 이러한 이온불순물들에 의한 유전 특성의 이상적 거동을 정량적으로 분석하기 위해서 위의 식을 이용하여 이동도와 확산 계수를 그림 6에, 이온의 밀도와 고분자 절연체에 있어서 전기적 물성에 영향을 미치는 이동도와 이온 밀도의 곱을 그림 7에 나타내었다.

그림 6의 결과를 살펴볼 때 이온의 이동도와 확산 계수는 온도의 증가에 따라 각각의 시편에 대해서 감소함을 알 수 있다. 특히 기판의 온도를 30°C로 고정시켜 제조한 시편의 경우 이동도는 온도의 증가에 따라 $2 \times 10^{-5} \sim 3.07 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 확산 계수는 $6.86 \times 10^{-7} \sim 9.87 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$ 로 감소하였다. 이상의 결과만을 고찰하여 보면 비유전율은 높은 영역으로 갈수록 이온의 영향을 작게 받기 때문에 감소되어야 하나 반대로 증가하는 특성을 나타내고 있음을 그림 3를 통해서 알 수 있었다.

이온 밀도와 비유전율과의 관계를 고찰하기 위한 이온의 밀도 그리고 이동도와 이온 밀도의 곱을 나타낸 그림 7의 결과를 살펴보면 측정 온도의 증가에 따라 이들값도 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 이상의 결과에서 30°C로 고정시켜 제조한 시편의

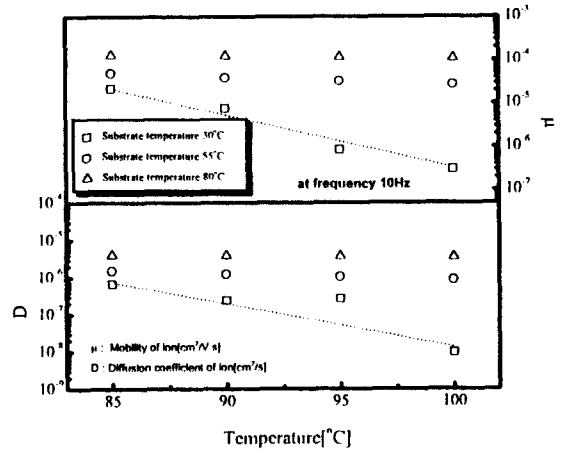


그림 6. 온도에 대한 PVDF 박막의 이온 이동도와 확산 계수
Fig. 6. Ion mobility and diffusion coefficient of PVDF thin films as a function of temperature

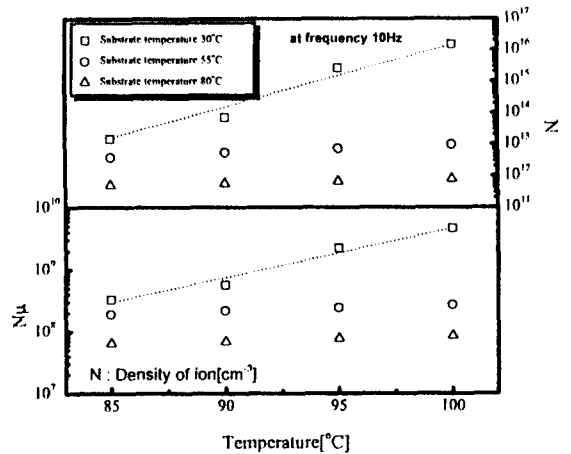


그림 7. 온도에 대한 PVDF 박막의 이온 밀도와 이동도, 이온 밀도의 곱
Fig. 7. Ion density and mobility cross density of PVDF thin films as a function of temperature

경우 이동도와 이온 밀도의 곱은 $3.3 \times 10^8 \sim 4.6 \times 10^9 \text{V}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 급격히 증가하였는데, 이러한 결과는 고온 저주파수 영역에서의 유전 특성의 이상적 거동은 이동도에 의한 영향보다는 이온 밀도에 의한 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. 이상의 고온, 저주파수 영역에서의 유전 특성 분석 결과는 PVDF 기체 분자가 증발하여 기판면에 성장할 때

기판의 온도가 높아질수록 열해리에 의해 발생하는 이온 불순물들은 기판면에 입사된 기체 분자 상호간의 응집 에너지가 작아짐으로써 박막으로 성장되기보다는 재증발 하기 때문에 나타나는 결과라고 생각된다.

온도의 변화에 따른 비유전율과 유전 손실 특성을 그림 8에 나타내었다.

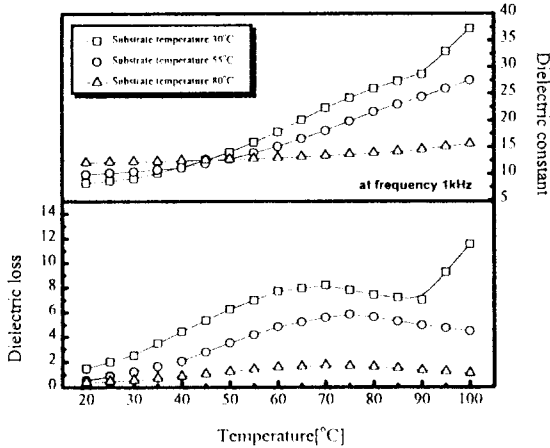


그림 8. 온도에 대한 PVDF 박막의 비유전율과 유전 손실
Fig. 8. Dielectric constant and dielectric loss of PVDF thin films as a function of temperature

각각의 PVDF 박막의 경우 측정 온도의 증가에 따라 비유전율이 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 무극성, 무결정성 고분자에서는 상반되는 경향으로써 일반적인 해석적 근거로 사용하고 있는 Clausius-Mossotti 방정식으로는 설명이 불가능하다. 이에 Kirkwood 방정식을 이용하여 해석하여 보면 분자간과 분자내의 상호작용이 온도가 높아지면 쌍극자의 방향을 불규칙하게 하려는 열에너지보다 더 크기 때문에 나타나는 현상이라고 추정되며 결정성 고분자와 유극성 고분자에서 흔히 볼 수 있는 결과라 하겠다.¹²⁾

그림 8에서 살펴보면 기판의 온도를 고온으로 유지시켜 제조한 시편일수록 α 완화가 작아짐을 알 수 있다. 일반적으로 α 완화의 발생 원인은 결정 영역 안에서 분자 운동의 진동과 재배향에 의한 것으로 Yano는 α 완화의 크기는 일반적으로 결정성 영역 안의 라멜라의 두께에 반비례하는 특성을 지니고 있으며, 이에 따라 활성화 에너지

와 완화 시간이 증가한다고 밝힌바 있다.¹³⁾ 이와 같은 이론을 토대로 볼 때 기판의 온도를 고온으로 유지시켜 제조한 시편의 결정화도가 저온으로 유지시켜 제조한 시편에 비해 증가되었다는 것을 간접적으로 추론할 수 있었다.

이온 불순물들의 혼입량에 따른 완화 시간을 분석하기 위해서 절대 온도와 유전 흡수의 최대치를 구하여 그림 9에 나타내었다.

위의 결과는 다음식에 의해서 얻을 수 있다.¹⁴⁾

$$\tau = \frac{1}{2\pi f m_i} \quad (4)$$

여기서 τ 는 완화 시간(Relaxation time)이며 $f m_i$ 는 유전 정점의 최대 주파수이다. 그림 8의 결과를 살펴볼 때 유전 정점의 최대치는 온도의 증가에 따라 고주파쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있었으며, 이러한 특성은 측정 온도의 증가에 따라 PVDF 박막 내의 쌍극자와 주변 매질과의 점성 저항이 감소함으로써 영구 쌍극자의 완화 시간을 짧아지게 하기 때문인 것으로 생각할 수 있다. 특히 고온에서 제조한 시편일수록 완화 시간이 길어진다는 것을 알 수 있는데 이와같은 결과는 일반적인 고분자적 완화 특성이라고 할 수 있다.

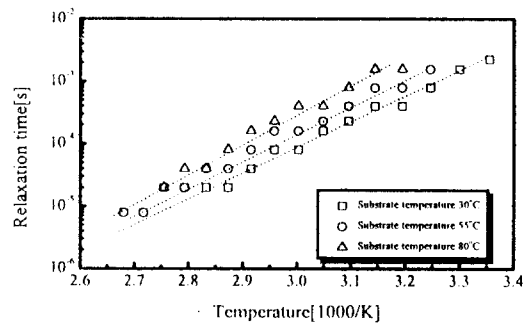


그림 9. PVDF 박막의 완화 시간
Fig. 9. Relaxation time of PVDF thin films

기판 온도를 변화시켜 제조한 시편의 측정 온도에 따른 활성화 에너지는 그림 10에 나타내었다.

활성화 에너지는 전기 절연 특성을 나타내는 한 요소로써 그림 10의 결과를 살펴보면 활성화 에너지는 기판의 온도를 고온으로 유지시켜 제조할 경우 0.76~0.91eV로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 결정성 고분자의 열처리 효과와 일치하는 특성으로써¹⁵⁾ 고온으로 유지시켜 박막을 제조할 경우 전기 절연 특성의 증가와 더불어 결정

부분의 증가에 따른 압전 특성의 증가를 기대할 수 있을 것이라고 사료된다.

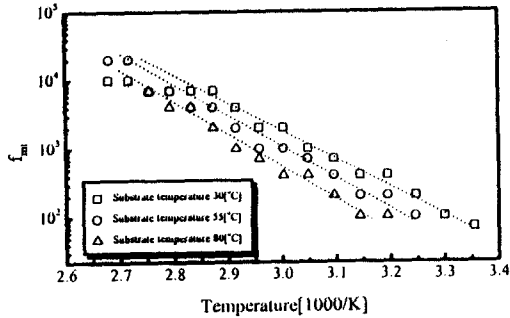


그림 10. PVDF 박막의 활성화 에너지
Fig. 10. Activation energy of PVDF thin films

4. 결 론

PVDF 일렉트렛 박막을 전계 142.8kV/cm로 유지하고 기판의 온도를 30~80℃로 변화시켜 각각 제조한 시편에 대한 유전 특성 분석을 요약하면 다음과 같다.

[1] 기판 온도를 30~130℃로 변화시켜 제조할 경우 증착량은 10.5~0A/min로 감소함을 알 수 있다. 특히 기판 온도가 105℃ 이상에서의 증착량은 급격히 감소하여 130℃가 될 때 증착막이 거의 성장되지 않았다. 이와 같은 결과는 기판의 온도가 증가함에 따라 과포화도와 응집 에너지의 감소에 따른 기체 분자의 재증발에 의한 원인이라고 생각된다.

[2] 기판의 온도를 고온으로 유지시켜 제조한 시편의 경우, 이온 분출물들의 혼입이 다른 시편에 비해 적었으며, 특히 기판의 온도를 30℃로 유지시켜 제조한 시편의 경우 고온, 저주파수 영역에서 이온의 이동도와 확산 계수는 $2 \times 10^{-5} \sim 3.07 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $6.86 \times 10^{-7} \sim 9.87 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$ 로 급격히 감소한 반면 이온의 밀도는 1.49×10^{13} 에서 $1.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 로 급격히 증가하였다. 이와 같은 결과는 저주파수와 고온 영역에서의 비유전율과 유전 손실의 이상적 거동은 이온의 이동도에 의한 것보다는 이온의 밀도와 깊은 관계가 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 丸山 統雄, “機能性高分子 エレクトレット(とくに

PVD系)の新しい電界”, 静電気學會誌, Vol. 11, No. 6, pp. 422~439, (1987)
 2. H. Kawai, “The Piezoelectricity of Poly(vinylidene fluoride)”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 8, No. 6, pp. 975~976, (1969)
 3. T. T. Wang, J. E. West, “Polarization of Poly(vinylidene fluoride) by Application of Break-down Field”, J. Appl. Phys., Vol. 53, No. 10, pp. 6552~6556, (1982)
 4. A. J. Lovinger, “Ferroelectric Polymer”, Science, Vol. 22, pp. 1115~1121, (1983)
 5. W. M. Prest, Jr. and D. J. Luca, “The formation of the γ phase from the α and β polymorphs of Polyvinylidene fluoride”, J. Appl. Phys., Vol. 49, No. 10, pp. 5042~5049, (1978)
 6. K. Tashiro and M. Kobayashi, “Structure and Piezoelectricity of Poly(vinylidene fluoride)”, Ferro- electric, Vol. 32, pp. 167~175, (1981)
 7. 이덕출, 박수홍, 임용춘, 최충석, “진공증착법을 이용한 PVDF 박막의 제조와 유전특성”, 대한전기학회, Vol. 45, No. 11, pp. 1573~1578, (1996)
 8. 姜衡富, “電氣·電子材料”, 清文閣, pp. 316~376, (1986)
 9. 이덕출, 박수홍, “진공증착법을 이용한 β -Polyvinylidene Fluoride 박막의 제조와 압전특성”, 대한전기학회, Vol. 47, No. 1, pp. 56~61, (1998)
 10. 和田八三久, “高分子の電氣物性”, 裳華房, pp. 29~63, (1987)
 11. S. Uemura, “Low-Frequency Dielectric Behavior of Poly(vinylidene Fluoride)”, J. Polymer. Sci. : Polymer physics edition, Vol. 12, pp. 1177~1188, (1974)
 12. Chen C. Ku and Raimond Liepins, “Electrical Properties of Polymers”, Hanser Publishers, pp. 54~55, (1987)
 13. S. Yano, “Dielectric Relaxation and Molecular Motion in Poly(vinylidene Fluoride)”, J. Polymer. Sci. : Part A-2, Vol. 3, pp. 1057~1072, (1970)
 14. T. Furukawa, M. Ohuchi, A. Chiba, and M. Date, “Dielectric Relaxation and Molecular Motion in Homopolymers and Copolymers of Vinylidene Fluoride and Trifluoroethylene”, Macromolecules, Vol. 17, pp. 1384~1390, (1984)
 15. 김성철, “고분자공학 I”, 회중당, pp. 181~228, (1994)