

이축 연신 폴리프로필렌 필름의 전도특성에 관한 연구

A Study on the Conduction Characteristics of Oriented Polypropylene Film

金 貴 烈* · 尹 文 洙** · 李 準 雄***
(Gwi-Yeol Kim · Mun-Soo Yun · Joon-Ung Lee)

요 약

본 논문에서는 이축 연신 폴리프로필렌 필름의 전도특성을 고찰하기 위하여 온도 5~25(°C)와 전계 10~300(MV/m)범위에서 온도와 전계에 의존하는 전기전도 현상을 관측하였다. 온도 15(°C)일 때, 관측된 전체특성은 전계의 증가에 따라 5가지 영역, 즉 전계 40(MV/m)이하의 영역에서는 이온 캐리어로 인하여 오음형 전도가 존재하는 영역, 전계 40~70(MV/m)사이에서는 전도기구가 Poole-Frenkel효과에 의한 영역, 전계 70~82(MV/m)에서는 부정저항특성이 관측되는 영역, 그 다음에 전계 82~240(MV/m)범위에서는 Schottky효과가 기여하는 영역 그리고 마지막으로 전계 240(MV/m)에서 절연파괴까지는 전도기구가 Fowler-Nordheim이론에 기초를 둔 영역으로 구분된다.

Abstract- In order to investigate the conduction characteristics of the biaxially oriented polypropylene film, several measurements have been carried out in the range of temperature between 5[°C] and 25[°C] as well as the field intensity between 10[MV/m] and 300[MV/m]. The whole range of the characteristics observed at 15[°C] appears to be divided into five regions; the Ohmic conduction region due to ionic carrier below 40[MV/m], the region from 40[MV/m] to 70[MV/m] in which the conduction mechanism is attributed to Poole-Frenkel effect, the region from 70[MV/m] to 82[MV/m] in which the negative resistance characteristics are observed, then the region from 82[MV/m] which is dominated by Schottky effect and finally, the region from 240[MV/m] up to the point where dielectric breakdown occurs in which the mechanism is based on Fowler-Nordheim theory.

1. 서 론

오늘날 사회적 요청에 따른 산업구조의 비약적 발전은 더 많은 전력의 소모 기술과 정치(精緻)한 제어기술의 발달을 필연적으로 요구하며 이러한 요구의 달성은 더 가혹(苛酷)한 사용조건에서도

안정된 특성을 가진 전기·전자재료나 또는 새로운 기능을 갖는 신소재의 개발에 의존되는 바가 크다. 그 중에서도 특히 절연재료에 대한 신뢰성 및 안정도의 향상은 중요한 과제중의 하나이다.

[1-4]

한편 그동안 개발된 고분자는 높은 절연파괴 전

압과 고저항의 고유성질을 갖고 있으며, 또한 가공이 용이하고 가격이 저렴하다는 장점때문에 시대적 요청에 적절한 절연재료로서 많이 이용되어 오고 있다. [5]

현재로서 전기·전자기기 부품에 실제로 사용되고 있는 고분자 수지의 종류는 이 외에도 다른 기능을 가지고, 특수용도에 사용되는 것들이 있으며, 적극적인 의미에서 기능성 고분자 재료라고 부르기도 한다. [6-7]

이 기능성 재료들은 실제로 광전도성을 이용한 전자복사, 고분자의 압전성을 이용한 음향재료, 도전성 고분자, 내열성 및 내약품성 재료 등으로 개발되어 이용되고 있으며, 앞으로도 다방면에서 연구개발되어 적극적으로 활용될 것이란 사실에는 의심의 여지가 없다.

그러나 고분자재료의 전기적성질을 물성론적 견지에서 연구함에 있어 분자구조, 조직양상이 매우 복잡할 뿐만 아니라 제조과정에서 많은 불순물들을 포함하게 됨으로서 내재적인 본래의 특성을 구명(究明)한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 특히 전기전도특성을 구명할 때에는 체적저항율이 크고, 캐리어 밀도가 작으므로 재료내에서 일어나는 그 과정을 고찰하는 데는 더 한층 많은 어려움이 뒤따른다. [8]

본 논문에서는 전기·전자기기의 구조재의 일부로서 사용될 뿐만 아니라, 근간 절연 및 유전재료로서도 점차 관심이 높아지고 있는 폴리프로필렌에 대하여 전기전도특성의 연구를 목적으로 하였다.

그동안 폴리프로필렌에 대한 물성구명에 대한 연구는 1971년 K. Sakaoku[9]가 전자 현미경사진을 통한 조직양상의 연구, 1981년 K. Ikezaki[10]가 전기전도에 대한 결정화도의 영향을 연구한 보고 등이 있다.

최근에는 1987년, T. Umemura[11] 등이 가열 aging에 의한 물리·화학적 특성 및 전기적 특성의 변화에 대한 연구결과의 발표가 있었고, 또 기계적 가공에 대한 연구로서는 연신된 것이 보다 더 결정화도가 높으며, 절연성이 좋아진다고 보고

가 있으나 [12-14]이후 연신한 폴리프로필렌에 대한 연구는 아직도 적은 편이며, 전기재료로서 앞으로 널리 실용화가 기대되는 이와 같이 가공된 시료에 대한 정확한 물성 및 전기전도특성을 규명하는 것은 중요한 일로 생각된다.

2. 사용시료 및 실험장치

2.1 사용시료[15]

1953년 Natta교수가 Ziegler형 촉매를 사용하여 프로필렌의 중합에 성공하였으며, 이 중합체가 입체적 규칙성인 Isotactic결정성의 고분자임을 구명하였다.

이 고분자 물질은 그로부터 4년후, 이탈리아의 Montecatini사에서 최초로 기업화되었으며, 30여년이 경과하는 동안, 폴리프로필렌의 용도에 대한 발전은 서서히 거듭되어 지금은 세계적으로 연간 약 400만 ton이상이 생산되고 있다.

전력용 콘덴서의 유전재료나 절연용 시료로 널리 사용되고 있는 폴리프로필렌은 뛰어난 전기 절연성을 가지고 있음과 동시에 비유전율과 유전손실이 적어서 고주파 특성도 양호하다.

이와같은 특징들을 이용하여 주로 통신용 전선의 피복용, 조명배선기속에서도 변형이 잘 안되는 특성을 이용하여 자동차의 엔진부위의 부품, 고압 멸균을 필요로 하는 식기, 의료기기등에 사용되고 있다.

그리고 폴리프로필렌의 단량체는 $-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}}{\text{C}}-\text{CH}_3$ 로 표시된다.

본 실험에 사용된 시료는 서통주식회사 제품으로서 텐터어 (tenter) 방법으로 온도 약 150~160(°C)에서 MD(Machine Direction) : 450(%), TD(Transverse Direction) : 800(%)로 이축 연신된 폴리프로필렌 필름(Oriented Polypropylene; OPP)이다.

본 연구를 위해서 시료의 전극구성은 주전극의 직경이 50(mm), 가드링전극의 내부직경은 70[mm], 외부직경은 90[mm]로 하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 실험장치는 그림1과 같으며, 먼저 두께 15(μm)인 OPP필름의 양면을 벤젠으로 깨끗이 닦은 다음 Al 전극을 부착 사용하였다.

다음, oven내에 설치된 파라핀 오일(Paraffin Oil)속에 장치된 전극사이에 시료를 삽입하고, 온도 0~200(°C)까지 조절 가능한 제어장치를 사용하여 원하는 온도에 조정후, 직류고전압 발생장

*正 會 員 : 韓國電氣研究所 絶緣材料研究室 先任研究員·工博

**正 會 員 : 韓國電氣研究所 電氣材料研究部 研究部長·工博

***正 會 員 : 光云大 工大 電氣工學科 教授·工博

接受日字 : 1989年 5月 29日

1次修正 : 1989年 8月 29日

2次修正 : 1989年 11月 13日

3次修正 : 1989年 12月 4日

표 1 실험장치

Table 1 Experimental apparatus.

실험기기명칭	제조회사명	모델
전위계 (Electrometer)	Keithley, U.S.A	602
직류 고전압 발생장치 (DC H.V Power Supply)	Peschel Instrument, U.S.A	#H50
온도 제어 장치 (Temperature Controller)	Shimaden, JAPAN	
자동 전압 조절기 (Automatic Volt. Regulator)	Sola Electric, U.S.A	No. 4012

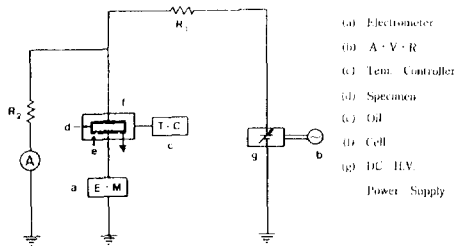


그림 1 실험장치의 블럭선도

Fig. 1 The block diagram of experimental apparatus.

치로 부터의 전계를 인가한 후 전위계 (electrometer)로서 전도전류를 관측하였다.

한편 표1에 사용한 실험기기를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

그림 2은 두께 15(μm)의 이축 연신 폴리프로필렌 필름을 온도 15($^{\circ}\text{C}$)와 25($^{\circ}\text{C}$), 전계 10 ~ 300(MV/m)사이에서 관측한 전도전류인데, 이때 사용된 전극면적은 19.63(cm^2)이다. 이 그림에서 보면, 전도전류는 온도에 크게 의존하고 있으며, 전계의 증가와 더불어 각각 다른 기구에 의한 특성을 갖고 5개의 영역으로 나뉘어진다.

즉 제 I 영역은 전도전류가 오믹(ohmic)의 법칙에 따르는 부분이며, 제 II 영역에서는 Poole-Frenkel 전도전류가 흐르며, 제 III 영역에서는 부정저항 특성이 나타나는 부분이고, 제 IV 영역에서는 쇼트키(Schottky) 전도전류가 흐른다고 생각된다. 또 제 V 영역에서는 파울러 노드하임(Fowler-Nordheim)의 터널전류가 흐르는 영역으로 간주된다.

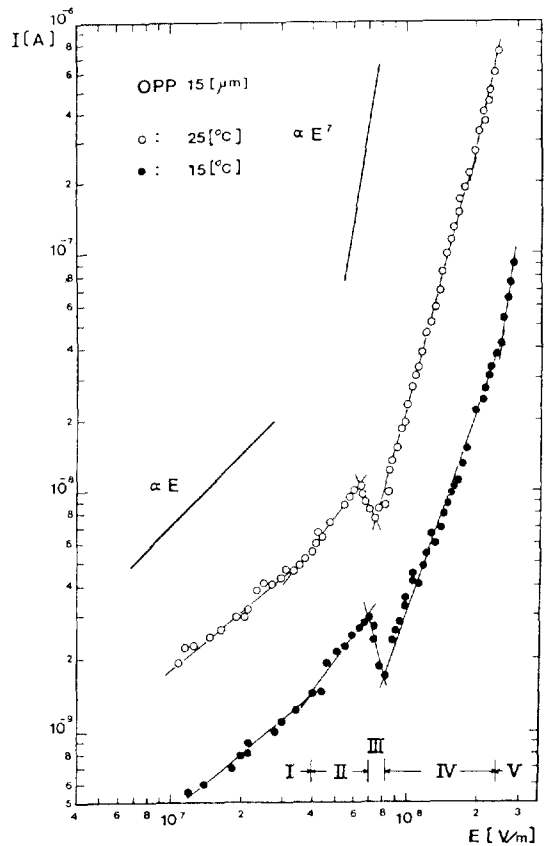


그림 2 OPP의 전도전류

Fig. 2 Conduction current of OPP.

3.2 고찰

3.2.1 제 I 영역(오믹영역)

일반적으로 절연체나 반도체에서의 전자에 의한 전도전류의 경우에는 캐리어의 전계에 의한 이동으로서 생기는 드리프트(drift)전류와 확산전류로 양분되는데, 보통 고분자 절연체내에서는 캐리어

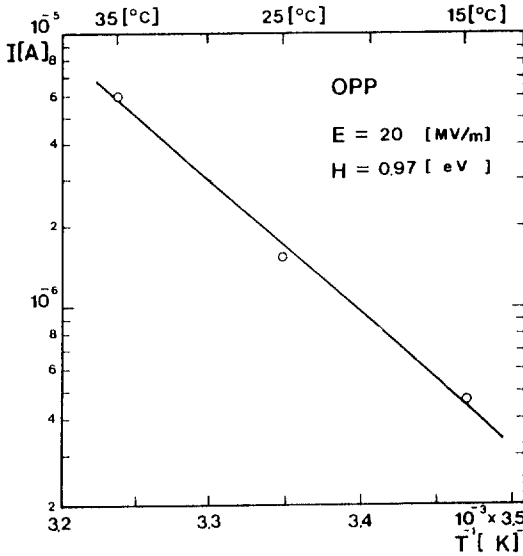


그림 3 오옴영역에서의 활성화 에너지 곡선
Fig. 3 Plot of activation energy in the ohmic region.

의 밀도가 작으므로 확산전류는 무시되는 것이 관례이다. 또 고분자 물질에서의 캐리어에 관해서는 전계가 그렇게 높지 않을때의 전기전도는 일반적으로 ion에 의한 것으로 간주되고 있다.

그림 2에서, 온도 15(°C), 전계 약 40(MV/m) 이하에서는 전자가 전극으로부터 주입되기는 어려운 것으로 알려져 있으며, 따라서 이 영역에서 전도전류에 기여하는 주된 것은 전자성이라기 보다는 이온성인 것으로 생각된다. 그림 2의, 제II영역에서 전도전류는 전계에 비례하는 오옴의 특성이 나타나고 있는데, 이와같은 사실은 측정온도에서 전계에 의한 활성화에너지(eaE)가 열에 의한 활성화에너지(kT)보다 적기 때문에 고분자 재조과정에서 들어간 여러가지 불순물에 의한 이온들이 전계인가와 더불어 이동하여 오옴형 전도전류가 흐르는 것으로 간주된다. [16]

오옴영역에서의 활성화에너지를 Arrhenius프롯한 것이 그림3이며, 여기서 얻은 활성화에너지의 값은 0.97(eV)이었다.

일반적으로 오옴영역의 한계전계는 연구자나 사용시료에 따라 각각 다르게 발표되어 있지만, 한 예로서 상온일때 T. Hino는 XLPE에서 10(MV/m)이하의 전계를, Lampert는 Polyethylene에서 60(MV/m)이하의 전계를 각각 오옴전도의 한계영역으로 보고 있으며, 본 실험에서는 40(MV/m)인 것으로 생각되고 있다. [17, 18]

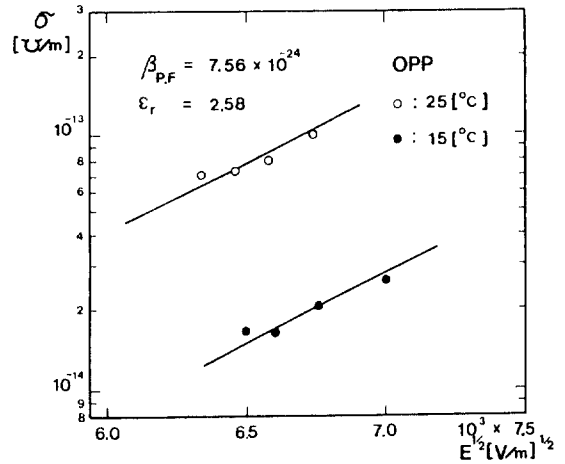


그림 4 풀-프렌켈 영역에서 $\ln \sigma \sim E^{1/2}$ 의 곡선
Fig. 4 Plot of $\ln \sigma \sim E^{1/2}$ In the Poole-Frenkel region.

3.2.2 제II영역(Poole-Frenkel 전류영역)

그림 4는 그림 2의 제II영역을 $E^{1/2}$ 에 대한 $\ln \sigma$ 를 나타낸 것이다. 도전율의 직선적 관계로부터 이 영역은 풀-프렌켈 효과에 의한 전도전류가 흐르는 것으로 생각된다. 이 효과는 절연체중에서 전자포획중심의 쿨롱(Coulomb)장벽이 전계 인가 때문에 감소하여, 포획된 전자의 방출확율이 증대한다고 하는 소위 내부 Schottky효과를 말한다. [19]

다만 이 경우, 쇼트키 효과와 다른 것은 영상력이 존재하지 않기 때문에 전위장벽의 감소하는 정도가 다를 뿐이다. 지금 식(2)을 이용

$$j = j_0 \exp(\beta_{PF} E^{1/2} / 2kT) \tag{1}$$

$$\sigma_{PF} = \sigma_0 \exp(\beta_{PF} E^{1/2} / 2kT) \tag{2}$$

$$\text{단, } \beta_{PF} = (e^3 / \pi \epsilon)^{1/2} = 2\beta_s$$

하여 그림 4의 직선기울기로부터 $\beta_{PF} = 7.56 \times 10^{-24}$ 와 유전율 $\epsilon_r = 2.58$ 을 얻었으며, 문헌에 알려진 수치와 잘 일치한다. [20] 또 식(1)로부터, 그림 5는 전계 44(MV/m)의 전계에서 $\ln J_{PF} \sim 1/T$ 의 특성을 나타낸 것이고, 이 기울기로부터 전위장벽의 높이는 $\phi_D = 3.03$ (eV)와 전위장벽의 감소($\Delta\phi = \beta_{PF} E^{1/2}$), $\Delta\phi = 0.31$ (eV)를 얻었다.

Tourelle세등은 제II영역을 Schottky전류영역으로 설명하고 있으나, 이영역을 정확히 구분하기란 대단히 어려운 것으로 알려져 있다. 그러나 그림 4의 기울기에서 구한 β_{PF} 는 그림 7의 기울기에서 구한 β_s 와의 관계 즉 $\beta_{PF} = 2\beta_s$ 인 이론적인 사실과

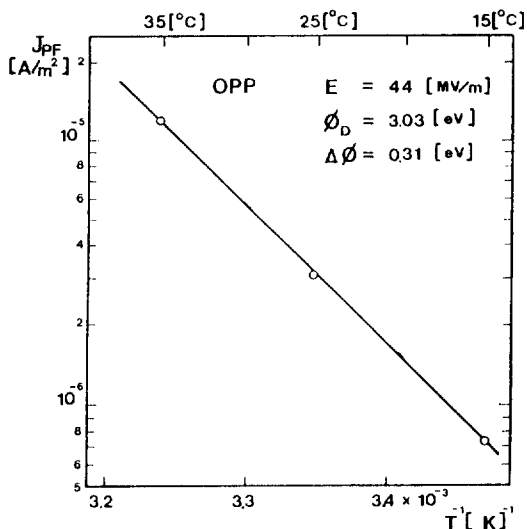


그림 5 폴-프렌켈 영역에서 $\ln J_{PF} \sim 1/T$ 의 곡선
 Fig. 5 Plot of $\ln J_{PF} \sim 1/T$ in the Poole-Frenkel region.

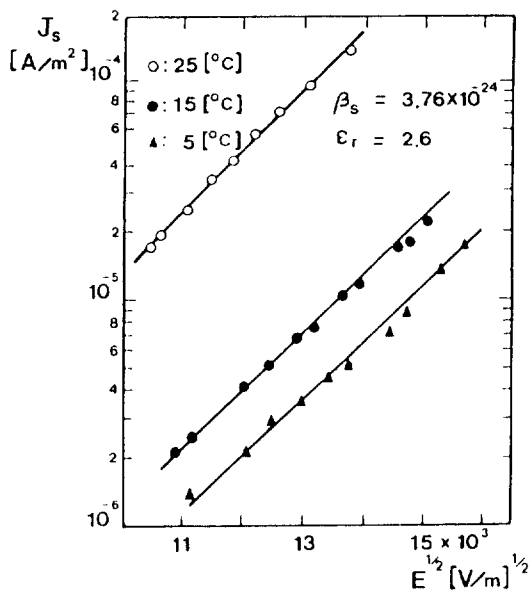


그림 7 쇼트키 영역에서 $\ln J_s \sim E^{1/2}$ 의 곡선
 Fig. 7 Plot of $\ln J_s \sim E^{1/2}$ in Schottky region

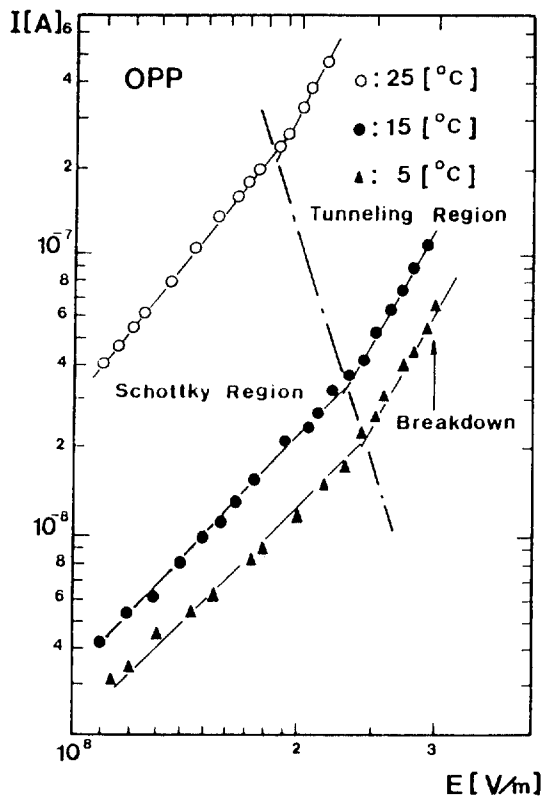


그림 6 전계 100(MV/m)이상에서 전도전류
 Fig. 6 Conduction current at high electric field of 100(MV/m)

잘 부합되므로, 폴-프렌켈 전류영역인 제II영역이 지나고 난후 쇼트키 전류가 흐르는 제IV영역이 나타난 것이 명백한 것으로 생각된다.

3.2.3 제III영역(부성저항 특성영역)

그림 2의 제III영역에서는 온도 15(°C), 전계 70(MV/m)에서 부성저항특성이 나타나고 있으며, 이와같은 현상은 주지하는 바와 같이 tunnel 다이오드, Gunn 다이오드와 같은 반도체 소자에서도 관측되며, 이특성은 바로 고속스위칭, 초고주파 발전등에 이용될 수 있는 중요한 현상이다. [21]

고분자 재료에서의 부성저항특성연구는 Toureille씨를 비롯한 학자들에의해서 Polymethylmethacrylate(PMMA), Polyethylene(PE), Polystyrene(PS)등과 같은 재료에서 연구되어 그 결과들이 보고되고 있다. [22]

한편 Toureille씨는 다음과 같은 원인으로 인해 부성저항이 나타난다고 설명하고 있다. 즉 MIM(Metal-Insulator-Metal) 구조의 유전체에 인가전압이 높아짐에 따라 전극에서의 접촉주입전류가 시료내의 벌크전류보다 많으면, 다시 말해서 음극으로부터 시료내로 전자의 주입이 과대할때는 음극부근의 공간전하 밀도가 증가하므로 전도전류는 공간전하제한전류로 되어, 이때의 전류치는 트랩의 존재에 민감한 영향을 받기 때문에 결과적으로

전계의 증가와 더불어 전류값은 줄어들게 되어 부정저항 특성이 나타난다고 보고하고 있다.

그러나 부정저항이 나타나는 원인에 대하여 다른 이론을 생각해 볼 수도 있다. 즉 부정저항 특성이 나타난다는 것은 인가 전압에 의해 제어될 도전율의 감소를 의미하며, 또한 도전율 $\sigma (=en\mu)$ 에서 공간전하전류라 하더라도 전하의 밀도 n 의 값이 일정하다면 결과적으로는 이동도 μ 의 감소로 설명되어야 한다. 따라서 μ 의 감소가 크게 일어날 때에는 그 정도에 따라 부정저항도 나타날 수 있다고 생각된다. 지금 이와같은 견해에 따르면 그림 2의 부정저항 특성은 이동도 μ 의 급격한 감소를 의미한다고 생각할 수 있다. 이 부정저항 특성 및 부수적으로 나타나는 발진현상에 대하여는 추후에 상세히 발표할 예정이다.

3.2.4 제 IV영역(쇼트키 전류영역)

그림 2의 전계 100(MV/m)이상의 고전계영역에서 전도기구를 명확히 알아보기 위해서, 온도 5~25(°C), 전계 100(MV/m)에서 절연과괴까지의 전도전류를 그림 6에 나타내었다.

이 그림으로 부터 온도 25(°C), 전계 190(MV/m)이하의 영역에서는 Schottky 전도전류가 흐르고, 또 190(MV/m)이상의 전계 영역에서는 Fowler-Nordheim의 전류가 흐름을 확인하였다.

그리고 온도가 상승함에 따라 Schottky 전류영역에서 Fowler-Nordheim 전류 영역으로 이동은 저전계측으로 이동함을 알 수 있으며, 절연과괴전압은 온도에 의존하여 낮아짐을 알 수 있다.

그림 2의 제IV영역은, 금속전극에 고전계가 인가되면 전위장벽이 저하되어 금속전극으로부터 고분자 물질내로 많은 수의 전자가 주입되어 전도전류는 증가하며, 쇼트키 전류가 흐르는 영역으로 생각된다.

쇼트키전도전류 J_s 는

$$J_s = AT^2 \exp \frac{B_s E^{1/2} - \phi_0}{kT} \tag{3}$$

단, $B_s = \sqrt{\frac{e^3}{4\pi\epsilon}}$

으로 나타낼 수 있는데, 이로 부터 $\ln J_s \sim E^{1/2}$ 을 프롯트하면 그림 7를 얻을 수 있다. 이 기울기로 부터 $B_s = 3.76 \times 10^{-21}$, 비유전율 $\epsilon_r = 2.6$ 을 얻었다.

금속의 유전체에 대한 실효 일함수 ϕ_0 를 구하기 위하여 170(MV/m)의 전계일때 $\ln(J_s/T^2) \sim 1/T$ 를 프롯트한 것이 그림 8인데, 이 기울기로 부터 $\phi_0 = 1.37$ (eV)를 얻었고, 또 170(MV/m)의 전계

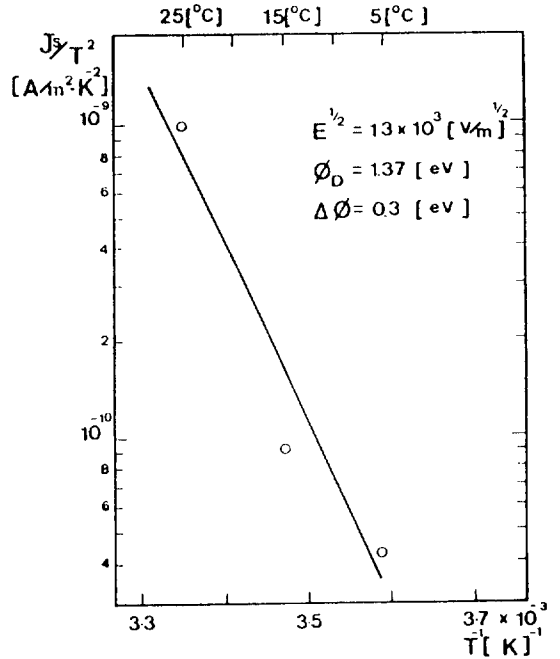


그림 8 쇼트키 영역에서 $\ln J_s/T^2 \sim 1/T$ 의 곡선
Fig. 8 Plot of $\ln J_s/T^2 \sim 1/T$ in Schottky region.

를 인가했을때, 전위 장벽의 감소($\Delta\phi = \beta_s E^{1/2}$)는 0.3(eV)이었다. 따라서, 전자가 전극으로 부터 쉽게 주입되는 것 같다.

3.2.5 제V영역(Fowler-Nordheim 전류영역)

그림 6의 전도전류 곡선으로 부터, 온도 25(°C)일때 전계 약 190(MV/m)이상의 영역에서 절연과괴까지 전계의 세기가 크게 되면 전위장벽의 실질적인 두께가 얇아지고, 전극으로 부터 절연물내로 터널효과로 전자의 주입이 일어나는 것으로 생각된다.

즉 전극부에서 전도대로 직접 터널 하든지 혹은 금지대내의 포획중심인 불순물준위로 터널되었다가 열여기로 다시 천이하여 전도전류에 기여하게 되는 간접터널 효과로 구분된다.

Fowler-Nordheim의 터널링 전류 J_{FN} 는

$$J_{FN} = AE^2 \exp(-B/E) \tag{4}$$

(여기서, $B = 8\pi(2m)^{1/2}/3he \cdot \phi_0^{3/2}$)로 표시되는데, 이 식으로 $\ln(J_{FN}/E^2) \sim 1/E$ 의 관계를 polt한 그림 9로 부터 전위장벽 높이 ϕ_0 를 구하면 약 0.3(eV)를 얻었다.

터널전류는 고전계에서 강한 전계의존성을 갖지만, 원래 온도 의존성을 거의 표시하지 않는 것이

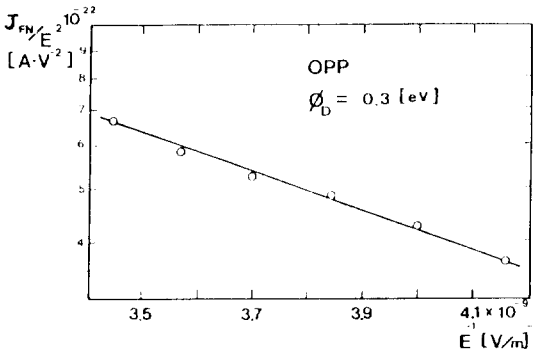


그림 9 Fowler-Nordheim 전류영역에서 $\ln J_{FN}/E^2 \sim 1/E$ 의 곡선

Fig. 9 Plot of $\ln J_{FN} \sim E^2 \sim 1/E$ in the Fowler-Nordheim current region.

특징이다.

그러나 그림 6으로부터 온도가 5[°C]에서 25[°C]로 상승함에 따라 쇼트키 전류영역에서 터널 전류영역으로 이동하는 전계는 온도 5[°C]일 때 약 240(MV/m)에서 25[°C]일때는 약 190(MV/m)로 감소하여 온도의존성을 나타냄을 알 수 있는데, 이는 특수한 경우로 가령 먼저 전극에서 트랩으로 터널하고, 다음에 열적여기 과정에서 전도대로 상승하는 간접터널형은 트랩 깊이에 상당한 온도 의존을 표시하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

두께 15(μm)의 이축 연신 폴리프로필렌 필름을 시료로 선정하여 온도 5~25(°C), 전계 10~300(MV/m)사이에서 측정된 전도전류로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 온도 15(°C), 전계 40(MV/m)이하의 영역에서는 전계에 비례하는 오음형 이온전도전류가 흘렀으며, 전계 20(MV/m)일때 전위장벽의 높이는 0.97(eV)이었다.

2) 온도 15(°C), 전계 40~70(MV/m)사이의 전계에서 폴-프렌켈 전도전류의 흐름을 확인하였으며, 전위장벽의 높이는 인가전계로 인해 3.03(eV)에서 2.72(eV)로 감소하였고 β_{pr}는 7.56 × 10⁻²⁴이다.

3) 온도 15(°C), 전계 70~82(MV/m)에서 부정 저항의 특성이 확인되었고, 부정 저항은 온도가 상승함에 따라 저전계로 이동하였으며, 그 폭도 감소하였다.

4) 온도 15(°C), 전계 82~240(MV/m)에서는

전극으로부터 주입되는 쇼트키 주입 전류가 관측되었고, 이때 전위장벽은 1.07(eV)로 감소하였다.

5) 온도 15(°C), 전계 240(MV/m)에서 절연과괴까지는 터널효과로 인해 Fowler-Nordheim 전도 전류가 흘렀으며, 전위장벽의 높이는 0.3(eV)였다.

6) 측정온도를 5(°C)에서 25(°C)로 증가함에 따라 절연과괴전압이 온도에 의존하여 상당히 감소함을 확인했다.

참 고 문 헌

- [1] P.S. Sharp et al, "Thermally Stimulated Currents in Mylar, High-Field Low-Temperature Case". J. Appl. Phys., vol. 41, No. 5, May, 1970.
- [2] S. Nakamura et al, "Electrical Conduction of Polypyromellitimide Films at Temperatures of 120~180(°C)", Jap. J. Appl. Phys., vol. 19, No. 3, pp. 453~458, March, 1980.
- [3] J. Lowell, "Surface Conduction and Absorption Currents in Polymers" J. Phys. D:Appl. Phys., vol. 15, pp. 109~117, 1982.
- [4] S. Maeta and K. Sakaguchi, "A New Method for Determining the Trap Depth from Thermally Stimulated Current," J. Appl. Phys., vol. 1, No. 4, pp. 587~606, 1980.
- [5] T.J. Lewis, "The role of Electrode in Conduction and Breakdown Phenomena in Solid Dielectrics," IEEE Tran. on Elect. Insul., vol. EI-19, No. 3, June, 1984.
- [6] K. Yoshino et al, "Electrical Transport and Breakdown of Poly-P-Phenylensulfide J.J. Appl. Phys., vol. 22, No. 10, October, pp. 1510~1514, July, 1983.
- [7] F. S. Smith and C. Scott, "The Electrical Conductivity of Polyethylene Terephthalate in the Temperature Range 180-290(°C)", Brit. J. Appl. Phys., vol. 17, pp. 1149~1154, 1966.
- [8] Y. Inuishi et al, "Electrical Conduction in Polymers", Jap. J. Appl. Phys, vol. 49, No. 3, pp. 212~227, 1980.
- [9] K. Sakaoku et al, "Electron Microscopy of Drawn Polypropylene". J. Polym. Scie.:Part A-2, vol. 9, pp. 895~915, 1971.
- [10] K. Ikezaki et al, "Effect of Crystallinity on

- Electrical Conduction in Polypropylene”, Jap. J. Appl. Phys. 20.3, 1981.
- [11] K. Abe et al, “Thermal-Aging Behavior of BO-PP Films” IEEE Trans. on Elect. Insul., vol. EI-22, No. 6, pp. 735~743, December, 1987.
- [12] M. Hara et al, “Effects of Heat Treatment and Mechanical Stresses on the Dielectric Strength of Uniaxially Drawn PET Film”, IEEE. Trans. Elec. Insul. vol. EI-19, pp. 273~280, 1984.
- [13] J-U. Lee et al, “A Study on the Negative Resistance Characteristics of Polypropylene Films” KIEE, vol. 36, No. 6, pp. 38~43, June 1987.
- [14] J-U. Lee et al, “Electrical Conduction Properties of Uniaxially Drawn Polypropylene Film” KIEE, vol. 36, No. 10, pp. 38~46, October, 1987.
- [15] M. Mucha and M. Kryszewski, “The Effect of Morphology on Thermal Stability of Isotactic Polypropylene in Air”, Colloid & Polymer Sci., vol. 258, pp. 743~752, 1980.
- [16] G. Sawa et al, “Electrical Conduction of Polymers”, J. I. E. E. J, vol. 89., No. 5, pp. 28~41, May, 1969.
- [17] T. Hino et al, “Determination of Charged Particle and their Polarity in XLPE by temperature Gradient Thermally Stimulated Surface Potential Measurement” I. E. E. Jap., 105-a. 5, pp. 255~262, 1985.
- [18] M. A. Lampert, “Current Injection in Solids”, Academic Press, pp. 15~80, 1970.
- [19] J. R. Taylor, “The Poole-Frenkel Effect with Compensation Present”, J. Appl. Phys., vol. 39, No. 12, November, 1968.
- [20] J. Brandrup and E.H. Immergut, “Polymer Handbook”, Wiley-Interscience Press, pp. V23~V28, 1975.
- [21] T. W. Hickmott, “Electron Emission, Electroluminescence, and Voltage Controlled Negative-Resistance in Al—Al₂O₃—Au Diodes”, J. Appl. Phys., vol. 36, No. 6, pp. 1885~1896, June, 1965.
- [22] Alain Tourelle, “High-Field Conduction and Oscillations in Polymers”, J. Appl. Phys., vol. 47, pp. 2961~2965, July, 1976.