

열처리된 저밀도폴리에틸렌의 절연파괴특성에 관한 연구

A Study on the Electrical Breakdown Characteristics of Thermal Treated Low Density Polyethylene Film

홍진웅*, 鈴置 保雄**, 水谷 照吉**

Jin-Woong Hong*, Y. Suzuoki**, T. Mizutani**

요 약

고체구조와 절연파괴의 관계를 확실하게 알아보기 위하여 온도 100[°C]의 실리콘유 내에서 1시간 열처리한 시료에 대해서 직류(DC)와 임펄스(imp.) 절연파괴특성을 검토했다.

시료의 결정화도는 적외선 흡수와 X선 회절실험 측정방법으로 평가했으며, 그리고 시료의 결정립 크기와 분산은 시차주사 열량측정을 이용하였다.

실험결과 결정화도의 크기는 서냉, 수냉, 원시료 그리고 급냉시료 순으로 적어짐을 확인하였고, 각각 70.23[%], 61.6[%], 56.75[%], 및 34.7[%]를 얻었다.

온도 30, 50[°C]에서 임펄스 절연파괴특성은 결정화도의 감소에 따라 높아지는데, 이것은 전자열적파괴를 시사하고 있다. 그리고 온도의 증가에 따라 임펄스 절연파괴강도는 감소되는데, 이것은 Fröhlich-type의 파괴이론을 제시한다.

또한 직류절연파괴는 저온영역에서 결정화도에 거의 의존하지 않지만, 그러나 고온영역에서는 약간 의존한다.

Abstract

In order to clarify the effects of morphological changes on electrical breakdown, we studied direct current(DC) and impulse(imp.) breakdown phenomena of LDPE films annealed at 100[°C] for 1 [H] in silicone oil and subsequently cooling to various ways.

The degree of crystallinity was estimated by the infra red absorption and X-ray diffraction measurements for the specimens of slowly cooled, cooled in water, original, and cooled in liquid nitrogen gas.

As the result, we obtained that the first, second, third, and fourth was slowly cooled of 70.23[%], cooled in water of 61.6[%], original specimen of 56.75[%], and cooled in liquid nitrogen gas of 34.7[%] respectively.

The crystalline size and distribution of specimens were researched by Differential scanning calorimeter measurements.

The imp. breakdown strength at 30 and 50[°C] increased with decreasing crystallinity, suggesting the thermal electronic breakdown process.

The Imp. breakdown strength decreased with increasing temperature which suggested the Fröhlich-type breakdown theory. The DC breakdown strength hardly depended on the crystallinity at low temperature region, but depended on at high temperature region.

* : 광운대학교 공과대학 전기공학과

** : 名古屋대학 공학부 전기학과

接受日字: 1993年 3月 15日

1. 서론

가장 단순한 구조를 하고 있는 저밀도폴리에틸렌은 가공성과 연신특성이 우수하기 때문에 여러분야에서 사용되고, 특히 전기 절연 및 유전특성이 우수하여 초고압케이블용 절연재료로 많이 사용되고 있다.

그러나 절연재료는 오랜 가압시간으로 인하여 사용초기의 전기적 절연특성 등 제물성은 사용시간의 경과에 따라 크게 저하한다⁽¹⁾.

현재 케이블의 사용온도범위는 실온이상 90[°C] 범위에서 사용되고 있는데, 이 온도 범위에서 케이블을 계속 사용하면 고체구조가 변화하기때문에 이것이 전기적특성과의 관계를 연구하는 것은 매우 중요한 것으로 사료된다.

그런데 지금까지는 고밀도폴리에틸렌(이하 HDPE라 칭함)과 폴리프로필렌(이하 PP라 칭함)에 대한 물리화학적 견지에서 많은 연구가 보고 되어있으나, 그러나 실제 케이블 절연재료에 가장 많이 사용되고 있는 저밀도폴리에틸렌(이하 LDPE라 칭함)의 물성 및 구조의 변화와 절연성의 관계에 대해서는 학술적, 실제적인 측면에서 연구는 많이 진행되고 있으나, 아직도 명확히 해명되지 않은 부분이 많다.⁽²⁾⁽⁴⁾ 예를들면 HDPE나 LDPE 및 PP 등 원재료의 절연과피 특성에 대해서는 많은 연구가 보고 되고 있다. 그러나 현재 전력케이블용 절연재료인 LDPE는 온도이력(thermal history)과 최고 온도에서 사용 등에 의해 전기적 노화나 결정성 및 고체구조 등의 변화로 인하여 계통에 전기적 고장의 원인이 되고있다.⁽¹⁾

따라서 본 논문에서는 LDPE가 절연재료로 사용중 여러가지 원인에 의해 고체구조의 변화가 전기절연과피기구에 어떤 영향을 미치는가 조사하기 위하여, 온도 100[°C]에서 1시간 열처리한 후 냉각조건으로 결정도

와 결정립의 분포를 변화시켜 제작한 시료 LDPE 필름을 온도 30, 50, 및 90[°C]에서 morphology 변화에 대한 직류절연과피와 임펄스절연과피의 연구결과를 보고한다.

2. 실험방법 및 사용시료

2-1. 실험방법

인가전압은 선형으로 승압되는 ramp 직류전압과 파괴시간이 최단시간인 임펄스 전압 두종류를 이용하였다.

또한 실험은 같은조건에서 16회이상 측정했으며, 이것으로부터 평균값을 구해 절연과피 강도로 했으며, 편차는 표준편차를 사용했다.

1) 직류절연과피실험

직류전압원은 스라이더스를 이용 전동기의 입력전압을 조정하여 변압기의 1차측 교류전압을 직선적으로 상승시키고, 이것을 승압하여 정류회로와 평활회로를 통하여 선형 직류전압을 얻었다.

직류전압 상승율은 스라이더스의 전압비와 전동기의 치차비로 전압상승율 $dV/dt = 500[V]$ 의 ramp 전압을 인가했으며, 파괴시에 전압측정은 입력단 전압을 저항으로 2000:1로 분압하여 펜 기록계(National Pen Recorder VP-6533A)를 이용했으며, 기록지의 속도는 30[cm/h]로 측정하였다.

2) 임펄스절연과피실험

전압상승율 약 2.6[GV/sec]의 임펄스 전압 파두부에서 시료의 절연과피실험을 했는데, 절연과피에 이르는 시간은 수 μ -sec 정도 이었다.

한편 임펄스 전압측정은 고압 probe (SONY Telectronics R6015)와 저항을 2단으로 사용 전압을 3/10000으로 분압한후, 이것을 디지털 메모리(IWATSU ELECTRONIC Co., LTD DM-703

DIGITAL MEMORY)와 스코프(NATIONAL MONITOR SCOPE VP-3830A)를 사용하여 전압파형을 기억시키고, 피크로부터 노이즈를 제거한 후 파괴전압을 구하였다.

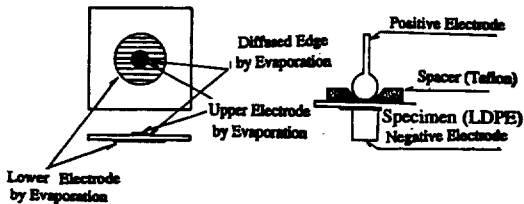
3) 전극계

절연과피용 시료의 상하전극(상부 5[mmφ], 하부 20[mmφ])은 금(Au)으로 ohmic 접합이 되도록진공도 1×10^{-5} [torr]이하에서 저항을 100[Ω]이하가 되게 진공중착했으며, 상부전극 주위는 파괴중電極端의 국부고전계의 발생을 완화시키기 위해서 확산전극으로 제작하였다.

또한 측정 전극 구조는 황동계 球-平板(12.5[mmφ]-12[mmφ])을 사용했으며, 그리고 온도의 분포를 일정하게 하기 위하여 전극장치를 실리콘유(점도 100cSt 信越化學 KF 965)내에서 측정온도 30, 50 및 90[°C]에서 약 10분 경과한 후 실험을 시작하였다.

또한 절연과피시 옆면방전을 최소화하기 위하여 두께 1.5[mm]의 테프론판으로 spacer를 자체제작 하여 시료를 덮고 전압을 인가하였다.

한편 시료의 단면과 전극 구성은 그림 1의 (a), (b)와 같다.



(a) 시료의 단면 (b) 전극구성

그림 1 시료의 단면과 전극구성

Fig. 1 The cross section and electrode structure of specimen

2-2. 사용시료

시료는 두께 30[μm]의 LDPE(三菱油化 LK-30)필름으로 첨가제는 일체 포함시키지 않았다. 그리고 시료를 제작시 공기및 외부의 영향을 최소화 하고, 온도의 분포를 일정하게 하기 위해 실리콘유(점도 100cSt 信越化學 KF 965)내에서 행하였다.

한편 온도설정에 정확성을 갖기 위하여 디지털 프로그램 조절계(MODEL KP-31 CHINO Co.)를 이용, 온도 100[°C]에서 1시간 열처리한 후, 공기중에서 서서히 냉각한 서냉시료(SC), 물로서 냉각한 수냉시료(WC) 및 액체질소로 급냉한 급냉시료(LN₂)을 각각 제작하였다.

특히 시료제작시 표면의 변형을 최소화하고 열전도 및 일정한 온도분포를 유지하기 위하여 두께 1.45[mm]동판과 표면이 정밀한 두께 0.35[mm]의 hard chromic ferrot-type plate를 동시에 사용 하였다.

그리고 제작된 시료의 결정성 평가는 적외선흡수(이하 IR라 칭함), X선회절(이하 XRD라 칭함)방법을 이용했으며, 결과는 그림 2, 3과 같다.

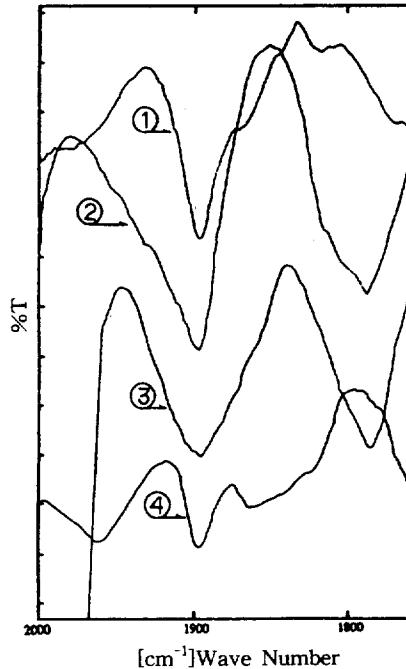


그림 2 적외선 흡수

Fig. 2 Infra-red absorption

(①원시료 ②서냉 ③수냉 ④급냉)

또한 결정립의 크기와 분포는 시차 주사 열량(이하 DSC라 칭함) 측정법으로 조사하였는데 정리하면 그림 4와 같다.

3. 실험결과 및 검토

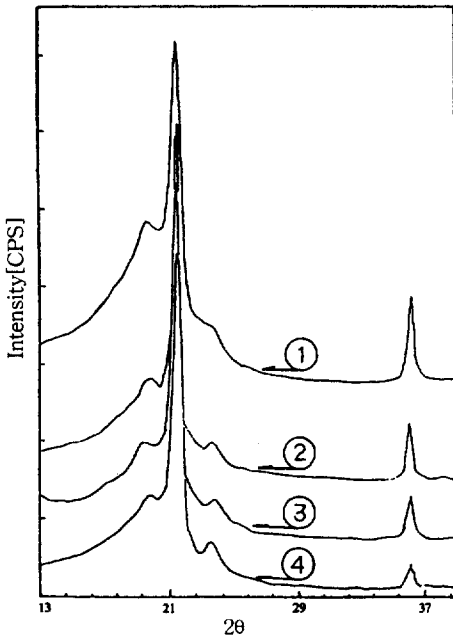


그림 3 X선회절
Fig. 3 X-ray diffraction
(①원시료 ②서냉 ③수냉 ④급냉)

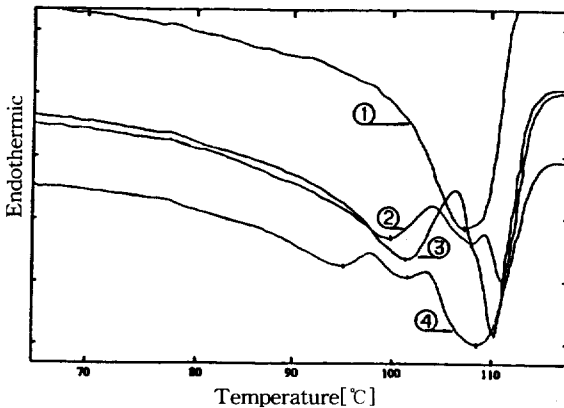


그림 4 시차 주사 열량
Fig. 4 Differential scanning calorimeter
(①원시료 ②서냉 ③수냉 ④급냉)

3-1. 시료의 물성

열처리된 시료의 물성중에서 결정화도는 IR(JAPAN Spectroscopic Co. LTD., IR-700) 및 XRD(RIGAKU DENKI Co. LTD., RAD-11C) 실험으로 부터 구했다.

LDPE의 IR특성도중 파수 1901[cm⁻¹]에서 결정성 밴드(base line 1910-1890[cm⁻¹]) 와 1303[cm⁻¹]에서 비정질 밴드(base line

1370-1290[cm⁻¹])의 피크가 나타나는데, 이들중 결정성 밴드의 흡광도를 측정하여 식(1)로 부터 결정화도를 구하였다.⁽⁵⁾

$$\chi[\%] = 18.9 A_{1901}/d \quad (1)$$

단, A₁₉₀₁ : 파수 1901의 흡광도, d : 시료의 두께[cm]이다.

XRD도에서 LDPE의 특징은 2θ = 19.5[°]에서 비정질의 피크가 나타나고, 결정질의 피크는 2θ = 21.4[°]에서 결정(110)와 2θ = 23.6[°]에서 결정(200)의 기여로 나타나는데, 이들은 중복되어 나타나며, 또한 2θ = 36[°]에서는 결정(020)의 기여에 의한 피크가 나타난다.

특히 원시료의 경우는 비정질의 면적이 크게 나타나는 반면, 열처리된 시료에서는 (200)결정의 피크가 증가하며, (020)결정의 피크는 열처리 속도의 증가에 따라 줄어듦을 확인할 수 있다. 한편 XRD로 부터 결정화도를 계산시 background은 2θ = 10와 27[°]에서 scanner를 사용 구한 면적을 식(2)에 대입하여 결정화도 χ[%]를 구하였다.

$$\chi[\%] = I_c / (I_a + I_c) \quad (2)$$

$$\text{단, } I_a = 0.75S_a, I_c = S_{110} + 1.46 S_{200}$$

S_a는 비정질면적,

S₁₁₀과 S₂₀₀은 결정질 면적이다.

이상 두가지 방법으로 구한 결정화도의 크기는 서냉, 수냉, 원시료 및 급냉시료 순으로 적어짐을 확인했으며, 여기서 얻은 결정화도의 크기를 확인하기 위하여 원시료를 밀도측정법으로 결정화도를 구해 비교하였는데 거의 크기가 같았으며, 결정화도는 70.23, 61.6, 56.75 및 34.7[%]를 각각 얻었다.

또한 結晶粒의 크기와 분산은 DSC(DAINI SEIKOHA SSC/560 Thermal Programmer)를 이용하였는데⁽⁶⁾, DSC의 흡수피크는 결정 라멜라가 온도 상승에 따라 크기가 작은 것부터 용해되어 나타나는 것으로, 조사결과 원시료(①)에서는 피크 1개가 온도 106.5[°C]에서 나타난다.

이것에 비해 서냉시료(②)는 3개의 피크가 나타나는데, 그중 2개(110.5, 108[°C])는 원시료보다 고온측에서 하나는 저온측(100[°C])에서 존재한다.

따라서 서냉시료는 열처리로 인하여 비정질영역에서 chain쇄가 재배열이 발생되므로 결정이 크게 성장하여 결정립의 크기가 커지고, 또한 작은 결정립도 생성될 것이다. 따라서 서냉시료의 결정도가 가장 크다.⁽⁷⁾

그리고 수냉시료(③)은 2개의 크기가 나타나는데, 하나는 원시료보다 고온(110[°C])에서 다른 하나는 저온(102[°C])에서 나타나므로, 따라서 서냉시료보다 결정립의 분포가 적고 결정도도 적어질 것으로 사료된다.

한편 액체질소에서 냉각한 급냉 시료(④)는 3개의 피크중 2개는 원시료보다 낮은 온도영역(103, 96[°C])에서 다른 하나는 원시료 약간고온 109[°C]에서 나타나는데, 이 결과로부터 작은결정은 열처리중 용해된후 급냉으로 인하여 결정성장이 되지않고 또한 자유체적도 급냉으로 동결되어 결정화도는 크게 저하될 것으로 사료된다.⁽⁷⁾

3-2. 절연파괴의 온도의존성

LDPE의 열적특성중 온도와 비용적의 관계에서 물성의 변화가 심한 부분의 온도는 60[°C]정도이다.⁽²⁾ 그런데 연구자들마다 온도영역구분시 조금씩은 다르나 일반적으로 실온이상 약 70[°C]까지를 저온영역으로 보고하고 있다.

또한 폴리에틸렌에서 결정 용해온도보다 높으면 유동성을 갖게 되는데, 이같은 온도영역을 고온영역이라 하며, 보통 80[°C]이상의 온도영역을 칭한다.

그런데 폴리에틸렌의 절연파괴 연구에서 온도영역의 구분은 연구자마다 차이는 있지만, 절연파괴강도(F_b)와 온도의존성에서 F_b 가 온도에 의존하지 않는 저온영역과 온도의 상승에 따라 감소하는 고온영역으로 구분하고 있다.

따라서 본 연구에서는 측정온도 30, 50 [°C]를 고온영역이라 칭하였다.

1) 직류 절연파괴의 온도의존성

그림 5는 직류 절연 파괴특성의 온도의존성으로 저온영역(30, 50[°C])에서는 거의 일정한 파괴전압을 나타내고 있다.

그러나 고온영역(90[°C])에서 파괴전압은 저온영역보다 매우 낮아짐을 알수

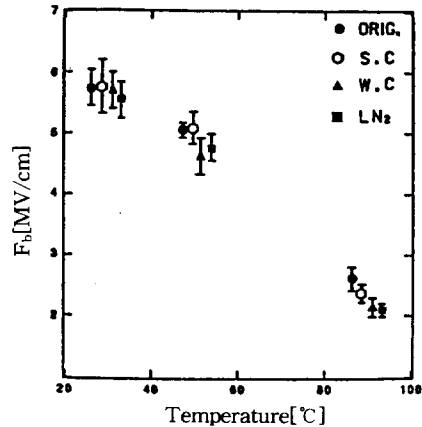


그림 5 직류절연파괴강도의 온도의존성
Fig. 5 The temperature dependence of DC breakdown strength

있고, 또한 냉각속도의 가속도가 증가할수록 파괴전압은 약간 낮아짐을 알 수 있다.

이것은 직류절연 파괴시 직류전압 인가 후 파괴시간이 수십초 걸리므로 인하여 시료내부에 공간전하가 형성되고 이것이 절연파괴에 기여하기 때문이다.

이상의 결과에서 morphology와 절연파괴의 상관관계를 알아보기 위하여 결정화도의 직류절연파괴강도의존성을 그림 6에 도시하였는데, 저온영역에서 파괴전압은 결정화도에 거의 의존하지 않고 있으나, 고온영역에서는 결정화도의 증가에 따라 약간 증가하는 것을 확인할 수 있다.

저온영역에서 열에너지는 전계 에너지보다 적고, 이 온도에서는 시료에 영향이 미약하므로 열처리조건에 무관하고 파괴전압은 일정할 것으로 사료된다.

그러나 온도가 90[°C]정도 되면 비정질영역과 작은 결정립등의 용해등 물성변화가 활발해지기 때문에 냉각의 가속도가 증가 할수록 즉, 결정화도가 낮을수록 파괴전압은 약간 낮아지는데, 이것은 시료내에서 공간전하가 형성될 때 결정질보다는 비정질 영역에서 형성이 용이하므로 따라서 결정화도가 높을수록 상대적으로 비정질영역이 적으

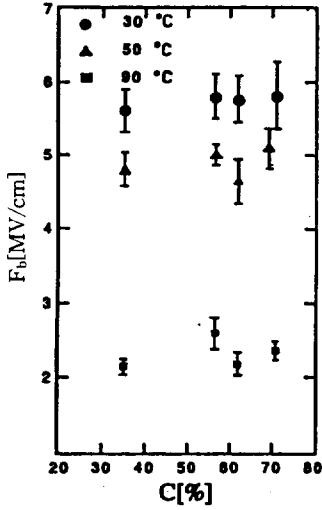


그림 6 직류절연파괴강도의 결정화도의 의존성
 Fig. 6 The crystallinity dependence of DC breakdown strength

므로 파괴전압은 높아질 것으로 사료된다.

그리고 측정온도가 높아지면 파괴전압은 낮아지는데, 이것은 온도가 높아지면 전극으로부터 전자주입이 한층 용이해지기 때문에 주입된 전자가 헤테로성 공간전하와 줄열가열파괴기수 등의 기여로 사료된다.

2) 임펄스 절연파괴의 온도의존성

그림 7은 임펄스 절연파괴 특성의 온도의존성으로 시료의 종류에 따라 파괴전압은 크게 변화함을 알 수 있다. 저온영역에서는 급냉시료의 파괴전압이 서냉시료의 파괴전압이 서냉시료의 파괴전압보다 높고, 즉 결정화도가 낮을수록 파괴전압은 높음을 확인할 수 있으며, 분산의 폭도 일정함을 알 수 있다.

그러나 고온영역(90[°C])에서 파괴전압은 저온영역과 반대의 현상이 나타나고 분산의 폭도 넓어짐을 알 수 있다.

그리고 절연파괴강도의 결정화도의존성을 그림 8에 도시하였는데 저온영역에서는 결정도가 증가함에 따라 파괴전압은 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

이같은 현상은 전자열적 파괴기구를

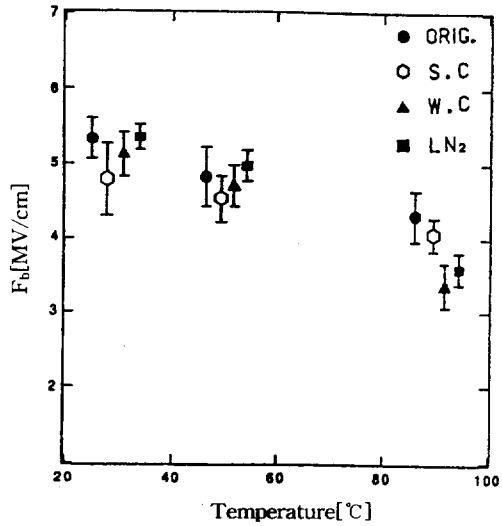


그림 7 임펄스절연파괴강도의 온도 의존성
 Fig. 7 The temperature dependence of Imp. breakdown strength

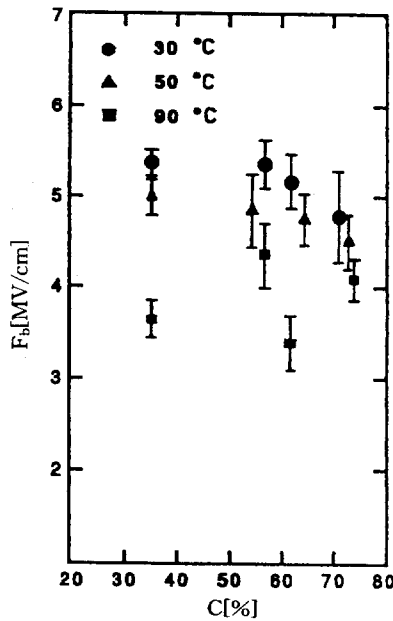


그림 8 임펄스절연파괴강도의 결정화도의존성
 Fig. 8 The crystallinity dependence of Imp. breakdown strength

시사하고 있는 것으로, 시료내 전자가 외부 전계에너지로부터 에너지를 얻어 이동할 때 결정질보다 비정질내에서 가

속화되기가 어렵기 때문이다.

그런데 자유체적(free volume)은 열처리 가혹도에 따라 증가되기 때문에 비탄성 충돌간에 평균 자유행정 λ 은 결정도가 낮으면 감소하게 된다.

따라서 간단한 HIPPEL의 이론식⁽⁸⁾에서 절연파괴강도는 λ 에 반비례 하므로 결정화도가 낮을수록, 즉 급냉시료의 파괴전압이 수냉시료보다 높음을 알 수 있고 이것은 전자적파괴기구로 이해된다.

또한 측정온도가 높아지면 높아질수록 파괴전압은 낮아지는데 이것은 식(3)으로부터 이해할 수가 있다.

그리고 고온영역에서 결정화도가 증가하면 파괴전압은 저온영역과 반대로 높아지는데, 이것은 Fröhlich type의 전자열파괴이론⁽⁹⁾ 식(3)에 적용하여 해석할 수 있다.

$$\ln F_b = \ln F_0 + \Delta V / kT \quad (3)$$

여기서 ΔV : 비정질내 트랩준위, k : 볼츠만상수, T : 절대온도, F_0 : 정수 특히 고온영역에서 급냉시료의 파괴전압이 수냉시료의 파괴전압보다 큰데 이것은 시료의 DSC곡선에서 결정립의 분포로부터 해석할 수가 있다.

수냉시료는 급냉시료보다 결정립이 크기 때문에 결정화도는 크나 분포밀도는 낮다. 따라서 결정내를 전자가 이동시 쉽게 이동하므로 속도가 빨라 절연파괴 강도는 낮게 된다.

그러나 급냉시료는 수냉시료보다 결정화도도 낮고, 결정립의 크기도 작으나 분포밀도는 높다. 그러므로 결정과 비정질 부분의 인터페이스와 급냉으로 생긴 자유체적이 많아서 전자가 이동시 이들 영역에서 속도가 늦기 때문에 절연파괴강도는 높게 될 것으로 사료된다.⁽⁶⁾

3) 직류와 임펄스절연파괴의 비교

그림 6과 8에서 저온영역에서는 직류절연파괴전압이 임펄스절연파괴전압보다 높는데, 온도가 높아지면 반대가 되는 것을 알 수 있다.

이것은 저온영역에서 임펄스 절연파

괴 측정시 파괴시간은 매우 짧아 보통 수 μsec 정도이다. 직류절연파괴시는 수십초 걸리므로 인하여 인가전압에 의한 시료내 주입된 전하가 전극앞에 호모성 공간전하를 형성하여 전계를 완화시키기 때문에 직류파괴전압이 임펄스전압보다 높게 된다.

그러나 고온영역에서는 반대로 임펄스파괴전압이 직류파괴전압보다 높는데 이것은 직류의 경우 온도가 높아지면 전극으로부터 쉽게 주입된 전하가 헤테로성 공간전하로 작용하기 때문에 파괴전압은 낮아지고 그리고 이미 여러 연구자가 보고한 줄열 파괴와 기계적 파괴 기구 등이 동시에 기여하기 때문으로 사료된다.⁽²⁾⁽³⁾⁽¹⁰⁾

4. 결론

저밀도폴리에틸렌의 morphology가 절연파괴에 미치는 영향을 조사하기 위하여 열처리된 시료의 직류절연파괴와 임펄스절연파괴 특성을 연구한 결과

1. 열처리된 시료의 결정화도 및 결정립의 크기와 분포는 냉각의 속도가 빠를수록 작아짐을 확인하였고,
2. 직류절연파괴에서 절연파괴전압은 저온영역의 경우 결정화도의 증가에 무관하나 고온영역은 약간 증가함을 알 수 있다.
3. 임펄스절연파괴특성중 저온영역에서는 결정화도의 증가에 따라 파괴전압은 감소하고, 고온영역에서는 증가함을 확인했으며 특히 급냉시료는 수냉시료보다 결정화도도 낮고, 결정립의 크기도 작으나 분포밀도가 높아 인터페이스와 자유체적이 많기 때문에 절연파괴강도는 높게 될 것으로 사료된다.
4. 저온영역에서 직류절연파괴전압은 호모성 공간전하의 기여로 임펄스파괴전압보다 높음을 확인하였으며, 고온영역에서는 반대현상이 나타나는데 이것은 헤테로성 공간전하의 기여와 줄

열과파괴 및 기계적 파괴기구가 동시에 기여할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1). K. YAHAGI, S.KATAKAI; Electrical Breakdown in Polymer and its Morphology, 應用物理, 52, 6, pp 493-497 (1983)
- 2). K.AMAKAWA, T.MORIUCH, T.YOSHIDA, Y.INUIISH; Electrical Conduction and Dielectric Breakdown of Polyethylene film, J. I.E.E J., 39, 6,pp 129-135(1964)
- 3). K.KITAGAWA,G.SAWA and M.IEDA ; Observation of Dielectric Breakdown Sites in Polyethylene films,Jpn. J. Appl.Phys.,19,2,pp389-390(1980)
- 4). M.Kawahigashi, Y.Miyashita and H. Kato; The Importance of Morphology on Electrical Strength of LDPE/XLPE Insulations,IEEE 1992 Annual Report, pp561-566(1992)
- 5). 寺西 清, 菅原 浩二;赤外線吸收によるポリエチレンの分枝と結晶性に關する檢討, 高分子化學,23, 255, pp512-520 (1966)
- 6). 帆足 興次, 望月 隆仁; ポリエチレンの等温結晶化過程の DTAおよびX線回折, 高分子化學,24,267,pp452-458(1967)
- 7). L.A.Dissado and J.C.Fothergill; "ELECTRICAL DEGRADATION AND BREAKDOWN IN POLYMER" , Peter Peregrinus Ltd.,London, United Kingdom,pp155-185(1992)
- 8). A.Von HIPPEL and R.S.ALGER; Breakdown of Ionic Crystal by Electron Avalanches, Phys.Rev., 76, 1,pp127-133(1949)
- 9). H.FRÖHLICH;On the theory of dielectric breakdown in solids, Proc. Roy. Soc., A188,pp521-541(1946)
- 10). M.Nagao, T.Kimura, Y.Mizuno, M. Kosaki and M.Ieda; Detection of Joule Heating before Dielectric Breakdown in Polyethylene films, IEEE. Trans., 25, 4, pp715-722(1990)

著者紹介



홍진용

1955년 2월 23일생. 1982년 2월 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 2월 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 8월 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년 7월-1993년 7월 일본 나고야대학 전기학과 객원연구원. 현재 광운대학교 공대 전기공학과 부교수.



鈴木 保雄

1950년 5월 26일생. 1978년 3월 나고야대학 대학원 박사과정 전기공학전공 수료. 1979년 10월-1981년 9월 미국 노스웨스턴대학 객원연구원. 현재 나고야대학 공학부 전기학과 조교수(공박).



水谷 照吉

1941년 5월 9일생. 1969년 3월 나고야대학 대학원 박사과정 전자공학전공 수료. 1973년 6월-1974년 9월 캐나다 라발대학 객원연구원. 현재 나고야대학 공학부 전기학과 교수(공박).