

論 文
6-1-3

고성능 고분자 절연재료의 특성평가

-상용PET 필름의 임펄스 절연강도에 미치는 압축응력의 효과-

Development and Dielectric Strength Characteristic of High Performance Polymeric Insulating Material

-Effect of Compressive Stress on Impulse Dielectric Strength of Commercial PET Film-

곽동주*

(Dong-Joo Kwak)

요 약

초전도 기기에 사용되는 고체 절연재료는 초전도 상태에서 상전도 상태로 천이시에 발생하는 임펄스 전압의 반복과전과 대전류에 의한 전자응력하에서 그 절연 성능이 충분히 발휘되어야 한다. 본 연구에서는 초전도 기기의 절연재료로 유력시되고 있는 결정성 PET에 임펄스 전압이 연속 과전될 때, 이 재료의 압축응력하에서의 절연강도특성에 미치는 연속과전의 효과를 검토하였다.

그 결과에 의하면, PET에 호모전하가 주입되면 임펄스 절연강도가 헤테로 전하주입시 보다 약 4 MV/cm정도 높다. 한편, PET에 전하주입의 효과를 억제시킨 임펄스 진성절연강도는 압축응력의 증가와 함께 증가하여, 최대치에 도달한 후 점차 감소하며, 직류 절연강도 및 호모전하 주입시의 임펄스 절연강도보다 낮다.

Abstract

Solid dielectrics for superconducting apparatus should cope with the large mechanical stresses associated with high magnetic fields, and various anomalous voltages at quench of the apparatus. In this paper, the effect of prestress voltage on the impulse dielectric strength of PET under compressive stress is examined.

The results show that impulse dielectric strength with homo space charge is higher than that with hetero charge by about 4 MV/cm. The intrinsic impulse dielectric strength increases with compressive stress, reaches maximum value, and thereafter decreases gradually, and is lower than the dc or impulse dielectric strength with homo space charge.

* 경성대학교 전기공학과

1. 서론

PET (Polyethylene Terephthalate) 필름은

반결정성 고분자(Semicrystalline Polymer)로서 절연성능이 우수할 뿐 아니라 용점이 높고 (~264℃), 내열성이 뛰어나며 (150℃에서 연속 사용가능), 내약품성이 우수하여 전기기기의

절연 및 전선이나 케이블의 절연, 콘덴서의 유전체로써 뿐만 아니라 녹음 테이프, 진공 증착테이프, 사진 필름의 기재재료등으로 널리 사용되고 있다.

특히, 내한성이 뛰어나 초전도기기의 절연 재료로 가장 유망시되고 있으며(1), 초전도 절연재료로 사용될 경우, 절연재료로서의 구비요건은 초전도 상태에서 상전도 상태로 전환시에 반복 발생하는 임펄스 고전압과 대전류 때문에 발생하는 도체사이의 큰 전자응력을 충분히 견디어야 한다(2, 3). 그러나, 이와 같은 기계적 응력하에서의 반복되는 임펄스 고전압에 대한 평가 및 특성에 관한 연구는 거의 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 임펄스 고전압이 반복하여 가해질 경우, 연속 과전에 의해 시료 내부에 형성되는 공간전하가 임펄스 절연파괴 전압에 미치는 영향 및 압축응력하에서의 임펄스 절연파괴 특성을 고찰하였다.

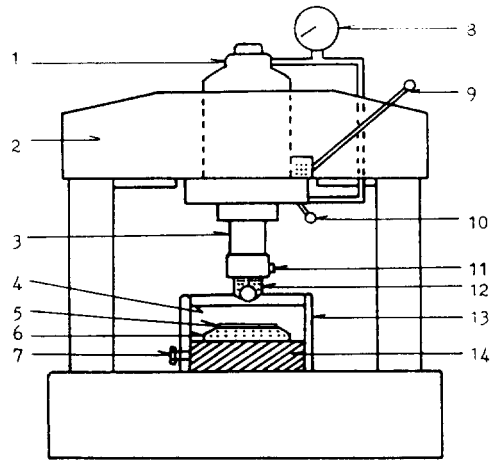
2. 실험방법

본 실험에서 압축응력하의 임펄스 절연파괴 전압 및 절연파괴 특성에 미치는 반복 과전압의 영향을 검토하기 위한 실험장치는 그림 1(a)와 같이 구성하였고, 이 그림에서 No. 9의 유압장치의 핸드펌프를 작동시켜 시료 표면에 500MPa 까지 압축응력을 가할 수 있도록 되어 있다.

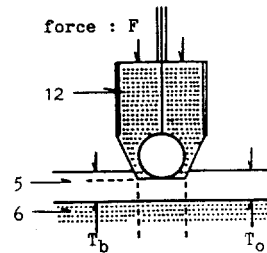
한편, 그림 1(b)의 No. 12는 시료상에 균일한 압축응력을 가할 수 있을 뿐만 아니라, 시료의 연면을 따라 발생하는 이상파괴(anomalous breakdown)를 방지하기 위하여 에폭시수지(stycast 1266)로 몰드하여 제작한 구전극의 형상을 나타내고 있다.

본 실험에서는 임펄스 고전압을 인가하여 절연파괴전압을 구하기 위하여 다음과 같은 A B의 두가지 방법을 채택하였다. 첫째, A방법은 절연파괴전압에 미치는 누적인가전압의 효과를 알아 보기 위하여 하나의 시료에, 최초 2 kV부터 전압을 인가하기 시작하여 매회 1kV씩 증가한 후 누적인가하여, 90 % 이상 절연파괴하는 전압을 파괴전압으로 하였다.

두번째, B방법은 시료에 누적인가전압효과를 없애기 위하여 1회 임펄스 전압 (1x40 μs) 인가 마다 절연파괴의 유무에 관계없이 시료를 교체하였으며, 만약 시료가 절연파괴 하지 않았을 경우는 前회의 인가전압보다 2kV의 전



(a)



(b)

1. High pressure cell
2. Framework
3. Piston
4. Transformer oil
5. Sample
6. Grounded plane electrode
7. Ground terminal
8. Pressure gauge
9. Hand pump
10. Change lever
11. Voltage source
12. Molded sphere electrode
13. Oil bath
14. Electrode bed

그림 1. 실험장치도 및 전극계

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup(a) and molded sphere electrode (b)

압을 승압한 후 인가하여 절연파괴 확률이 90 % 이상되는 전압을 파괴전압으로 하였다. 또한, 매회 오실로스코프로써 임펄스 전압의 파형관측을 하였다. 또, 직류 절연파괴전압을 구하여 임펄스 절연파괴전압과 비교 검토하였으며, 직류전압은 3kV/sec의 일정속도로 전압을 상승하여 파괴시의 전압을 절연파괴전압으로 하였다.

로 하였다. 한편, 본 실험의 임펄스 및 직류 절연파괴전압 및 파괴강도는 15회 실험치의 평균값이다.

각 시료의 압축응력하에서의 절연파괴 강도는 주어진 압축응력하에서 시료의 두께를 전극사이에 설치한 다이얼 게이지로 측정하여 파괴전압을 두께로 나누어 구하였다. 본 실험에 사용한 시료는 시판의 2축 연신 PET 필름으로 공칭 두께는 25 μ m였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. V-t 특성

그림 2는 압축응력을 20 MPa로 일정하게 유지했을 때의 시료의 v-t 특성을 나타내고 있다. 그림에서 실선은 인가된 임펄스 전압파형을 나타내며, 기호 ●는 파괴치 15kV의 전압으로부터 전압인가를 시작하여, 파괴하지 않은 경우, 파괴치를 2.3kV 씩 상승하여, 파괴가 발생할 때의 오실로스코프로 관측한 임펄스 파

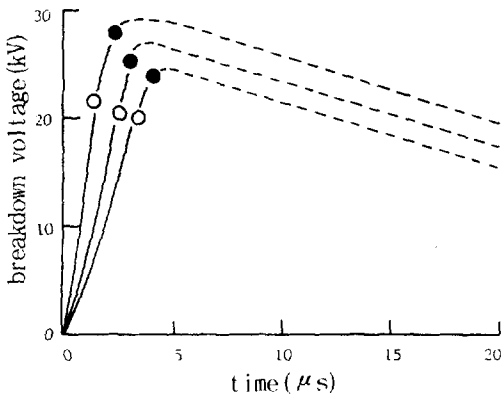


그림 2. v-t 특성에 미치는 예비과전의 효과
Fig. 2. Effect of prestress voltage on v-t characteristic

형상의 절연파괴 위치를 나타내고 있다. 이 경우, 시료에는 파괴이전에 수차례의 전압이 반복하여 인가 되며 본 연구에서는 이 전압을 예비과전전압이라 부르기로 한다. 한편, 기호 ○는 예비과전없이 시료마다 파괴치의 크기가 다른 각종의 전압을 인가하였을 때, 이 전압인가에 의해 파괴하였을 때의 파형상의 위치를 나타낸다.

그림으로부터 예비과전전압을 가진 기호 ●의 시료가 예비과전이 없는 ○의 시료에 비해 파괴까지의 지연시간이 길고, 파괴전압도 높음을 알 수 있다.

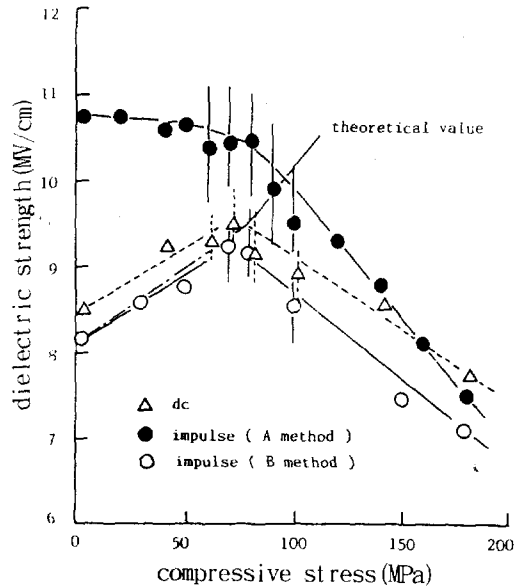


그림 3. 정극성 임펄스 절연강도-압축응력 특성

Fig. 3. Impulse Dielectric strength vs. compressive stress characteristic with positive sphere electrode

3-2. 임펄스 절연강도에 미치는 압축응력 및 공간전하의 효과

그림 3은 A 및 B 방법에 의한 정극성 임펄스 절연강도-압축응력 ($E_B-\sigma$) 특성을 나타내고 있다. 그림에서 실선은 임펄스 전압에 의한 $E_B-\sigma$ 특성을 나타내며, 비교를 위해 정극성 직류에 의한 결과도 파선으로 첨가하였다. 한편, 그림 4는 A 및 B 방법에 의한 부극성 임펄스 $E_B-\sigma$ 특성과 부극성 직류 $E_B-\sigma$ 특성을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 인가전압의 극성에 관계없이 직류 절연강도는 압축응력의 증가와 함께 처음에는 증가하여 최대치에 달한 후 서서히 감소한다. 그러나 A법에 의한 임펄스 절연강도는 정극성 및 부극성, 어느 경우에 있어서도 압축응력이 증가하면 처음부터 감소하고 있으며, 0~70MPa의 응력 범위에서 직류 절연강도보다 높은 값을 나타낼 수 있다. 그러나 B법에 의한 압축응력하의 임펄스 절연강도는 직류와 같은 압축응력 의존성을 나타내고 있으며 그 평균치가 직류에 의한 절연파괴강도보다 약 0.5~1 MV/cm 정도 낮다. 이와 같이 임펄스 절연강도의 경우, 파괴이전에 인가된 예비과전전압의 유무에 따라 $E_B-\sigma$ 특성이

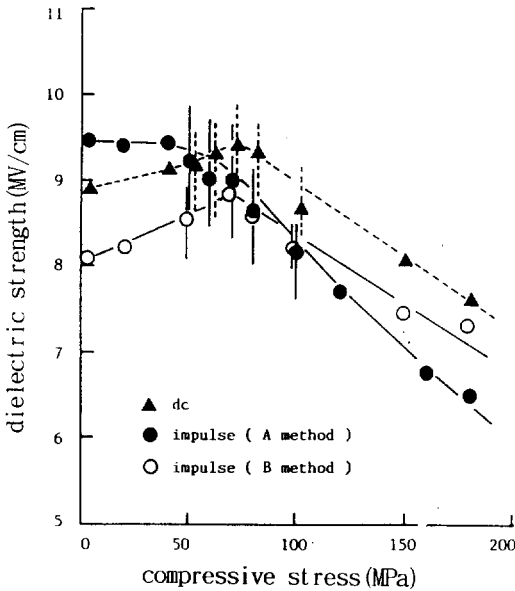


그림 4. 부극성 임펄스 절연강도-압축응력 특성

Fig. 4. Impulse Dielectric strength vs. compressive stress characteristic with negative sphere electrode

현저한 차를 나타내고 있다. 즉, A방법에 의한 $E_b-\sigma$ 특성의 경우, 파괴이전에 수차례의 예비파전이 있어, 예비파전중에 전극에서 시료쪽으로 인가전압과 동일 극성의 전하인 호모성의 공간전하가 형성되고, 이것에 의해 계속되는 캐리어의 주입이 방해되어 압축응력 0~70MPa의 범위에 있어 예비파전의 효과를 제거한 B방법의 경우에 비해 절연강도가 상승한 것으로 생각된다.

이 현상을 좀 더 자세히 고찰하기 위하여 압축응력을 20MPa로 일정하게 하고 예비파전전압과 다른 극성의 전압으로 시료를 파괴시킨 경우의 PET의 v-t 특성에 관한 실험을 행하여, 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 기호△는 인가전압의 극성과는 반대되는 극성의 헤테로 공간전하 (hetero space charge)를 충분히 축적시키기 위하여 예비파전전압으로서 -20kV를 인가한 후, 90% 이상의 절연파괴 전압인 +29kV의 인가전압으로 절연파괴한 경우의 파괴전압 및 지연시간을 나타내며, 기호▲는 -20kV로 헤테로 공간전하를 축적하고, +20kV를 인가하여 헤테로 공간전하를 중화시킨 후, +29kV의 전압인가에 의해 시료가 절연파괴했을 때의 v-t 특성의 결과를 나타낸다. 그림으로부터

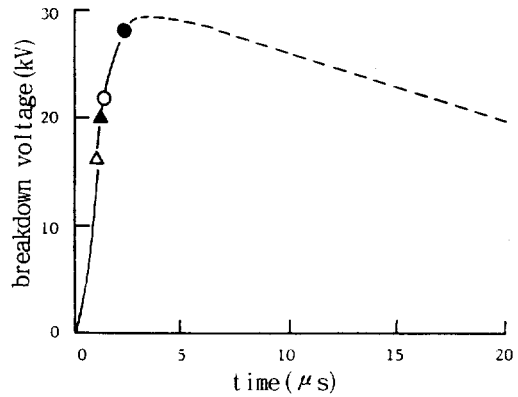


그림 5. v-t 특성에 미치는 헤테로 전하의 효과

Fig. 5. Effect of hetero space charge on v-t characteristic

헤테로 전하 주입시, 파괴전압 및 지연시간은 호모 전하 주입시의 파괴전압 및 지연시간에 비해 감소하고 있음을 알 수 있다.

즉, A방법에 의한 임펄스 절연강도가 직류 절연강도보다 높은 것은 예비파전에 의한 전극과 동일한 극성의 호모 공간전하(homo space charge)의 형성에 기인한 것으로 생각된다. 이상의 실험결과에서 B방법에 의한 임펄스 절연강도를 임펄스 진성절연강도로 볼 수 있다.

한편, 본 실험에 있어 $\sigma=70\text{MPa}$ 의 경우, 동 극성 예비파전전압이 약 12kV 정도가 되었을 때 예비파전의 효과가 나타나며, 따라서 호모공간전하 형성전계는 평균전계로 약 4.8MV/cm 정도가 될것으로 추정된다. 이 값은 그림 3의 A법에 의한 $E_b-\sigma$ 특성에 있어 $\sigma=70\text{MPa}$ 에 대한 최소전계강도 9.6MV/cm 보다 약 50% 정도 낮은 값이다.

3-3. 압축응력하의 진성절연강도의 이론적 고찰

압축응력 0~70MPa의 영역에 있어, 그림 3 및 그림 4에서와 같이 압축응력의 증가와 함께 임펄스 진성절연강도의 값이 상승하는 원인에 대해서는 다음과 같이 이론식을 적용할 수 있다.

PET와 같은 결정성 고분자는 고분자쇄(chain) 간에 자유체적이 존재하며, 이 자유체적에 의한 절연파괴강도는 다음과 같이 주어진다(4).

$$E_b = (W_2 - W_1 + Fdl) / el_x \quad (1)$$

단, W_1 은 전자가 자유체적내에서 거리 ℓ 만큼 운동시 전계로부터 얻은 에너지, W_2 는 격자의 전리에너지, ℓ_x 는 ℓ 의 x 방향 전계방향성분, F 는 기체입자와 충돌등의 전자운동을 방해하는 힘, e 는 전자의 전하량을 나타낸다. 여기서 자유체적내의 전자의 에너지 손실이 $W_2 - W_1$ 에 비해 무시할 수 있다고 가정하면 식(1)은 다음과 같다.

$$E_B = k/\ell_x \quad (2)$$

단, $k = (W_2 - W_1) / e =$ 일정.

한편, 자유체적 f , 압력 P , 그리고 주변온도 T 사이에는 다음의 관계가 있다(5).

$$f = [f_g + \alpha (T - T_g)] / (1 + bP) \quad (3)$$

여기서 b 는 상수(무정형 및 결정 영역에서 각각 1/120, 1/490이다), T_g , f_g , α 는 각각 그래스 전이온도, T_g 에서의 자유체적분율 및 자유체적의 열팽창계수를 나타낸다(6). 그런데, 압축응력하에서는 자유체적 분율이 변화하며, 또 ℓ_x 는 자유체적분율 f 에 비례하므로 자유체적내의 x 방향으로의 이동거리 ℓ_x 와 압축응력 σ 사이는 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$\ell_x = K / (1 + b\sigma) \quad (4)$$

단, K 는 주변온도에 의존하는 상수이다. 식(4)를 식(3)에 대입하면

$$E_B = k (1 + b\sigma) / K = E_{B0} (1 + b\sigma) \quad (5)$$

여기서 $E_{B0} = k/K$ 는 무압축응력하의 절연강도이다. b 의 값과 식(5)에 의해 $E_B - \sigma$ 특성에 대한 이론치를 구하여 보면 그림 3의 점선으로 나타낼 수 있어, 압축응력 0-70MPa의 영역에서의 실험치와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 0-70MPa의 응력범위에서 압축응력의 증가에 따른 PET의 절연강도의 상승은, 응력이 증가함에 따라 고분자내의 자유체적이 감소하여 절연강도가 증가하는 자유체적내의 가속전자에 의한 전자적 파괴에 기인한 것으로 생각된다. 그러나, 인가된 압축응력이 최대 절연강도를 나타내는 압축응력보다 큰경우에 절연강도가 감소하는 것은, 시료에 마이크로크랙등의 내부결함이 발생한 때문으로 생각된다(3).

4. 결론

압축응력하의 2축연신 PET 필름의 임펄스 절연특성을 조사하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 절연파괴 이전에 예비과전이 있으면, 없는 경우에 비해 파괴까지의 지연시간이 길고 파괴전압도 높다. 이것은 예비과전전압에 의해 발생한 호모공간전하의 영향에 의한 것으로 생각된다.
- (2) 예비과전이 있을 경우의 압축응력하의 임펄스 절연강도 특성은 $0 < \sigma < 70$ MPa의 압축응력하에서 임펄스 절연강도는 직류전압에 의한 절연강도보다 높으며, 임펄스 전압에 의한 $E_B(\sigma)$ 는 단조감소함수로 되어 있다. 그러나 예비과전의 영향을 배제한 경우의 임펄스 절연강도는 압축응력의 증가와 함께 처음에는 증가하여 최대치에 도달한 후 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 임펄스 절연강도의 평균치는 압축응력 값의 전 범위에 걸쳐 직류 절연강도의 평균치보다 낮다.
- (3) 압축응력 0-70MPa의 영역에서 압축응력에 대한 PET 필름의 임펄스 절연강도의 변화는 자유체적내에서의 전자적 파괴기구에 의한 이론적 절연강도와 잘 일치 하였다.

본 연구는 1991년도 "학술진흥재단 연구과제" 연구비 지원으로 수행한 것임.

참고문헌

1. F. Markley, A. McKamey and J. Biggs: Adhesive And Insulating Systems For Cryogenic And Superconducting Coils. IEEE Trans. on Nuc. Sci., NS-16, pp. 734
2. R. D. Hay and E. J. Rapperport: Electrical Insulation in Magnets for Fusion Reactors. Proc. of 6th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, San Diego Call pp. 1130, 1975.
3. C. H. Park, T. Kaneko, M. Hara and M. Akazaki: Effects of Mechanical Stresses on the Dielectric Breakdown Strength of PET and FRP. IEEE Trans. on Electr. Insul., EI-17, pp. 234, 1982.

4. J. Artbauer: Elektrische Festigkeit von Polymeren, Kolloid Z. und Z. Polymere, 202, pp. 15, 1965.
5. J. M. O'Reilly: The Effect of Pressure on Glass Temperature and Dielectric Relaxation Time of Polyvinyl Acetate, J. Polymer Sci., 57, pp. 429, 1962.
6. S. Saito, H. Sasabe, T. Nakajima and K. Yada : Dielectric Relaxation and Electrical Conduction of Polymers as a Function of Pressure and Temperature, J. Polymer Sci., Part A-2, 6, pp. 1297, 1968.
(1992년 7월 20일 접수)



곽동주

1958년 6월 20일생. 1983년 2월 건국대 전기공학과 졸업. 1985년 2월 건국대 전기공학과 석사. 1989년 3월 일본 Kyushu 대학 전기공학과(공박). 1993년 현재 경성대 전기공학과 조교수.