

## 극저온에서의 절연재료의 기계적·전기적 성질



### Mechanical and Electrical Properties of Insulating Materials at Cryogenic Temperature

김상현\*, 마대영\*, 김현희\*, 정순용\*, 김영석\*

( Sang-Hyun Kim, Tae-Young Ma, Hyun-Hee Kim, Shun-Yong Jung, Young-Seok Kim )

#### Abstract

Electrical and mechanical properties of polymer sheet at cryogenic temperature have been investigated. Tensile stress (and strain at break) in liquid nitrogen (77K) of 79.7MPa (1.2%) and 117.4MPa (2.05%) are evaluated for films of Polypropylene (PP) and Kapton, respectively.

Dielectric loss tangent ( $\tan \delta$ ) of PP and Kapton films is almost independent of the frequency and tensile stress. Also, field strength of PP film at 77K decreases with increasing the tensile stress.

**Key words(중요용어) :** Tensile stress(인장강도), Tensile strain(인장율), Dielectric loss (유전손실)

#### 1. 서 론

최근 에너지 산업의 새로운 방향으로서 초전도를 중심으로 한 극저온의 응용이 폭넓게 진행되고 있다. 특히, 초전도 발전기, 초전도 에너지 저장코일, 핵융합로용 초전도 magnet 등의 초전도 기기의 개발이 활발히 진행되고 있다. 이들의 초전도 기기를 개발하는 데 있어서 중요한 과제중의 하나로서 전기절연이 있다. 초전도 기기의 compact화, 고신뢰도를 피하고 기기의 최적설계를 위해서는 초전도 기기가 실제로 사용되는 환경 특히, 극저온 환경에 적합할 수 있도록 절연재료가 평가, 선정되고 또한 실증되는 것이 중요하다.

이와같은 극저온 조건하에서 사용되는 절연재료에 있어서는 기계적이나 전기적으로 해결해야 하는 많은 문제가 산적해 있다.<sup>1)~3)</sup> 예를들면 초전도 발전기의 경우 동작중의 초전도상태가 상전도 상태로 전이 할 때 정상전압은 5kV정도에 도달하기 때문에 극저온에서의 전기절연특성의 연구는 지극히 중요한 과제가 되고 있다. 또한, 극저온하에서는 일반적으로 고체절연재료의 취성이 증가하기 때문에 실온과 극저온간의 온도차, 열수축의 차이에 의한 열왜형, 열충격은 큰 문제이며, 더욱이 대형 핵융합로에서 사용되는 초전도 magnet 코일의

절연재료는 정상상태의 경우 최대 400MPa의 큰 전자기력의 영향으로<sup>4)</sup> 기계적특성의 파악과 개량도 중요하다.

절연재료로서는 극저온에서의 기체, 액체, 고체 그리고 이들의 계면이 문제가 되지만 특히, 구조 지지물로서도 유효하게 사용되는 고체절연재료는 저온에서의 기계적 성질의 열화, 즉 저온취성과 각종 원인에 의한 기계적인 반복 응력이 크고 더구나 전기적 응력의 복합 열화요인이 공존하기 때문에 지극히 중요한 문제이다. 예를 들면 극저온 액체의 절연파괴<sup>5)</sup>, 극저온에서의 기체-액체의 절연파괴<sup>6)</sup>, 극저온에서의 고체-액체표면에서의 연면방전<sup>7)</sup>, 극저온에서의 고체의 기계적파괴<sup>8)</sup> 등에 대하여 그들의 파괴특성 및 기구가 검토되기 시작되고 있다. 또한 극저온 기체 He중에서의 연면방전특성 등에 대하여도 보고 되고 있다<sup>9)</sup>.

본 연구에서는 최근 고온초전도체의 출현으로 가까운 장래에 초전도 기기의 냉각재로서 적극 활용될 액체 N<sub>2</sub>(77K)중에 고분자 절연재료를 함침하고 기계적 및 전기적인 성질을 연구하였다. 고분자의 박판상 시료편에 일축연신을 가하고 인장강도 및 연신율의 온도의존성을 조사하고 극저온하에서의 파괴거동을 검토했다. 또한 전기적 성질로서는 일축연신이 유전체손(tanδ) 및 파괴전압에 주는 영향등을 조사하였다.

#### 2. 실험 방법

본 실험은 Instron만능시험기(6022형, 최대하중:1

\* : 경상대학교 공대 전기공학과(자동화 및 컴퓨터응용기술연구소)  
접수일자 : 1996년 7월 1일  
심사완료 : 1996년 8월 24일

ton)를 사용하여 실온과 액체N<sub>2</sub>온도(77K)에서 기계적인 응력 및 전기적인 특성 실험을 행하였으며 그림 1은 그 실험장치의 개략도이다.

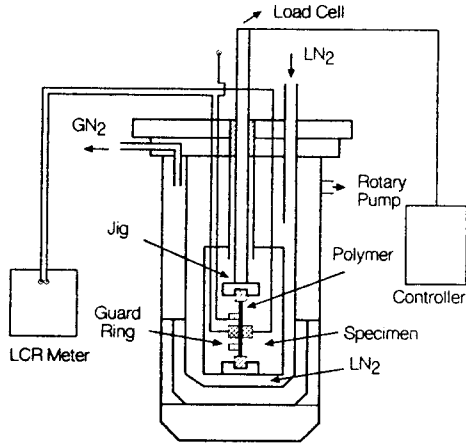


그림 1. 실험장치의 개략도  
Fig. 1. Experimental set up

사용된 시료는 Kapton(두께:100 $\mu$ m), Polypropylene(두께:40 $\mu$ m)등의 박판상의 고분자 film이다. 시료형상은 폭30(mm), 길이130(mm), span 간격은 50(mm)이다. 시료는 에탄올 중에서 5분간 초음파 세척한 후 건조한 시편을 치구(jig)가 물리는 부분의 파단을 방지하기 위하여 그림 2과 같이 빗금 친 부분에 보강재인 유리강화섬유(GFRP, 두께 1.175mm)를 접착하였다. 제작된 시료를 금속치구에 고정하고 시료의 양면에 전극을 구성하였다. 그림 2에 시료형상 및 치수를 표시하며, 그림 3에 치구 및 전극계의 외관을 나타낸다.

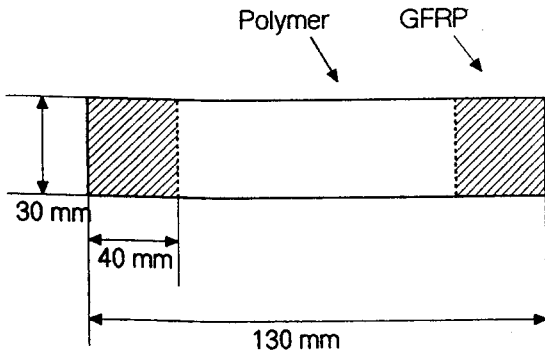


그림 2. 시료형상  
Fig. 2. Shape of sample

전극과 시료와의 밀착성이 전기적인 측정을 하는데에 충분하고 또한 인장시험에 영향을 주지 않도록 하기 위하여 각 전극 지지부에 용수철을 부착하여 각 전극이 시료에 밀착되도록 했다. 전극계는  $\tan\delta$  측정시는 스테인레스강제의 주전극(직경: 10 mm  $\phi$ ), 대향전극(직경:10 mm  $\phi$ )과 Guard전극(직경:14 mm  $\phi$ )을 그리고 절연파괴전압 측정시는 평판전극(직경:20 mm  $\phi$ )-구전극(직경:6 mm  $\phi$ )을 각각 사용하였다.

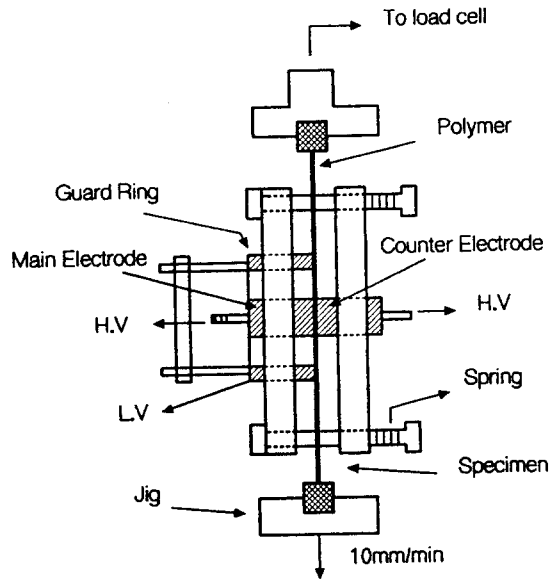


그림 3. 치구 및 전극계  
Fig. 3. Jig and electrode configuration

시료를 그림3과 같이 cryostat내에 설치하고 공기, 액체N<sub>2</sub>중에서 부하를 인가하였다. 연신은 한 쪽을 고정하고 다른 한 쪽은 전동기를 사용하여 10(mm/min.)의 일정속도로 하중을 가해 1축연신하여 기계적인 특성을 측정했다.

데이터는 시료를 관측한 후 시료의 중앙부에서 파단된 것 만을 취하여 산술평균하였다. 연신율은 미연신시의 길이를  $L_0$ , 연신시의 길이를  $L_1$  일 때  $((L_1 - L_0) / L_0) \times 100(\%)$  의 식에서 구했다.  $\tan\delta$ 의 측정은 RLC 미터(videobridge 2150형, 최대주파수 150KHz,ESI사)를 사용하고 3단자법에 의해 측정했으며, 응력하에서의  $\tan\delta$ 의 측정은 응력완화를 고려하여 연신후 5분이상 경과한 후 측정했다. 또한 절연파괴전압의 측정은 일정한 응력으로 연신후 만능시험기의 전원을 제거한 후 DC전압(최대전압; 30kV)을 수동으로 인가하여 행했다.

3. 실험결과 및 검토

그림4, 5에 각각 실온(300K)과 액체N<sub>2</sub>(77K)에서의 PP의 인장응력의 연신율 의존성을 나타낸다. 실온의 경우는 낮은 인장응력에서도 변형이 크게 나타나는 고무탄성과파괴를 나타내지만, 액체N<sub>2</sub>중에서는 유리 전이온도 이하이기 때문에 분자들의 열적 활성화가 대단히 작아져 연신율이 대단히 작으며 취성과파괴를 하고 있는 것을 알 수 있다.

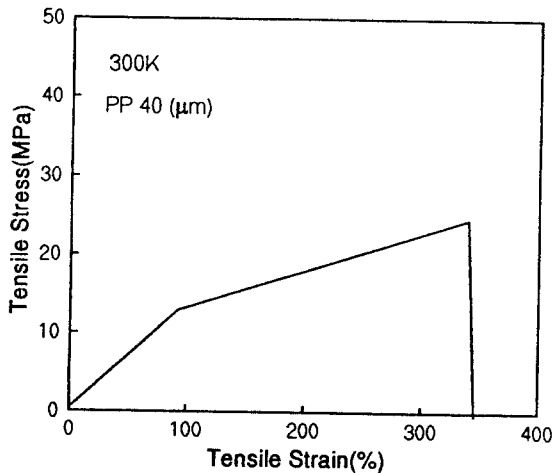


그림 4. 300K에서의 PP의 인장응력의 연신율 곡선

Fig. 4. The tensile stress-tensile strain curve of PP at 300K

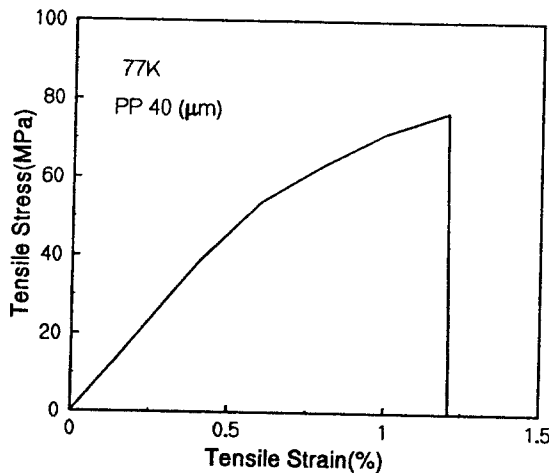


그림 5. 77K에서의 PP의 인장응력의 연신율 곡선

Fig. 5. The tensile stress-tensile strain curve of PP at 77K

또한 이와같은 경향은 그림6와 같은 Kapton의 경우에서도 나타나고 있다. 77K에서 얻어진 인장강도, 연신율 및 Young율은 PP, Kapton의 경우 각각 76.7MPa, 1.2%, 7900MPa 및 117.4MPa, 2.05%, 6300MPa이다. 파괴거동은 PP와 같은 고분자의 구조는 공간적으로 분자쇄가 규칙바르게 배열한 결정성과 규칙성이 없는 비정질으로 되어 연신에 의해 우선 결정성이 연신되지만 저온에서는 거의 동결되어 레오로지의 거동도 없게 되기 때문에 소성 변형영역이 존재하지 않고 거의 탄성영역에서 파단하는 특성이 보여진다고 생각된다.

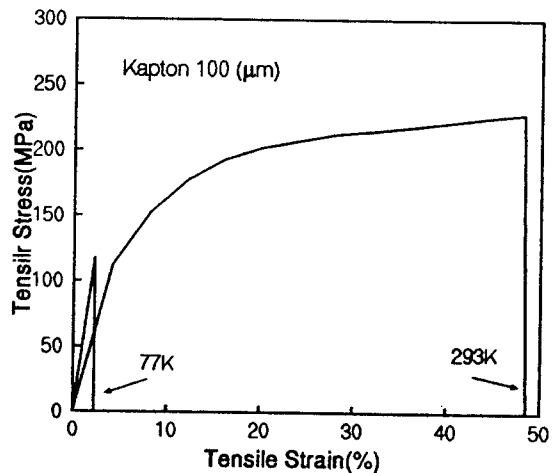
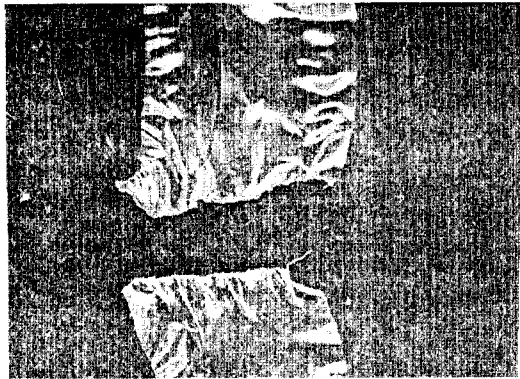


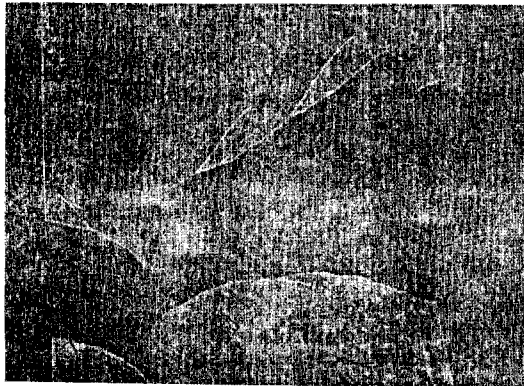
그림 6. 77K에서의 Kapton의 인장응력의 연신율 곡선

Fig. 6. The tensile stress-tensile strain of Kapton at 77K

그림 7 (a), (b)에 PP고분자재료의 실온과 액체 N<sub>2</sub>온도에서의 기계적 파단후의 외관의 사진을 나타낸다. 사진으로부터 온도에 따라 파단의 형태가 다른 것을 알 수 있다. 실온의 경우에는 인장응력 변형이 크게 나타나며, 파단의 형태가 거칠고 백화 현상이 관측됨에 비해 액체 N<sub>2</sub>의 온도에서는 인장응력 변형이 거의 없었으며, 매끄러운 파단부위를 관측할 수 있었다. 초전도기기에서 도체가 초전도 상태에 있을 때 그 주위의 절연재료의 미소한 발열은 액체He의 증발 더욱이는 상전도상태에의 전이를 초래할 가능성이 있고 또한 에너지 효율이 저하하는 등의 경제성의 면에서도 중요한 문제이기 때문에 tan δ의 측정을 행했다. 그림8에 실온 및 액체N<sub>2</sub>온도에서 인장응력에 대한 주파수-정전용량의 관계를 나타낸다. 정전용량은 각 온도에 있어서 주파수를 변화시켜도 거의 변화하지 않는 것



(a) 300K



(b) 77K

그림 7. 300K 및 77K에서 파단된 PP외관의 사진

Fig. 7. Photograph of broken external appearance of PP at 300K, 77K

을 알 수 있다. 또한 인장응력을 증가시키면 실온, 액체N<sub>2</sub>온도에서는 거의 변화하지않지만, 액체N<sub>2</sub>온도의 파단 부근에서 약간 작게 되었다.

그림 9, 10에 각각 액체N<sub>2</sub>에서의 인장응력하에서 PP 및 Kapton의 tan δ의 주파수 의존성을 나타낸다.

인장응력하에서의 tan δ의 주파수 특성은 실온에서는 주파수의 증가에 따라 상승하지만 액체N<sub>2</sub>온도에서는 주파수를 증가시켜도 거의 변화하지 않는다. 그 원인은 확실하지 않지만 이미 설명한 바와 같이 극저온에서는 분자운동이 거의 동결하고 쌍극자도 동결될 가능성이 높기 때문이라고 생각된다. 한편 초전도 교류 cable에서는 2×10<sup>-5</sup>이하의 낮은 tan δ가 필요하기 때문에<sup>10)</sup> 그러한 의미에서 본 실험에서 얻어진 바와 같이 CPP는 바람직한 재료이다.

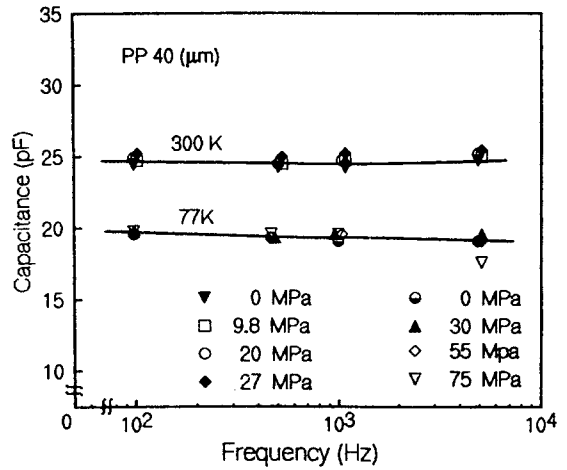


그림 8. 인장응력하에서의 주파수-정전용량의 관계

Fig. 8. Relation of frequency-capacitance of tensile stress

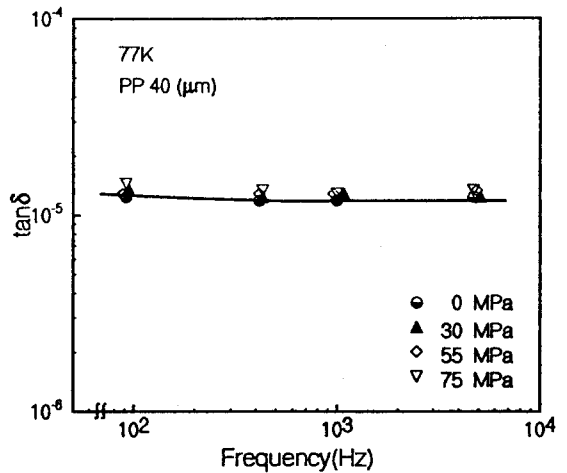


그림 9. 인장응력에 따른 PP의 tan δ의 주파수 의존성

Fig. 9. Frequency dependence of tan δ in Kapton at various tensile stress

그림 3의 실험장치를 사용하여 파괴전계의 인장응력 의존성을 조사하였다. 인가전압은 연신방향에 수직으로 인가하고 어느 인장응력까지 연신하고 그 상태를 유지하여 행했다. 또한 방전마다 새로운 시료를 교환하여 실험을 행했다. 그림 11에 PP의 파괴전계 E<sub>B</sub>의 인장응력 의존성을 표시한다. 결과는 3회의 측정치의 평균치이다.

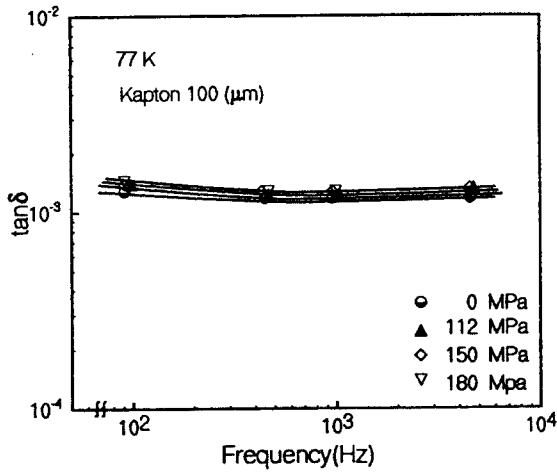


그림 10. 인장응력에 따른 Kapton의  $\tan\delta$ 의 주파수 의존성

Fig. 10. Frequency dependence of  $\tan\delta$  in Kapton at various tensile stress

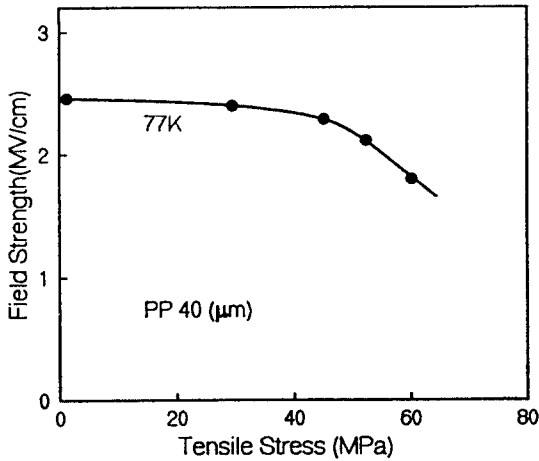
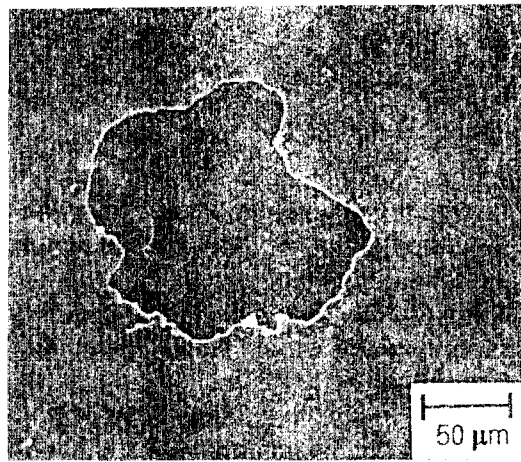


그림 11. PP의 파괴전계  $E_B$ 의 stress 의존성

Fig. 11. Stress dependence of breakdown electric field  $E_B$  of PP

그림으로부터 PP는 인장응력의 증가에 따라 파괴전계  $E_B$ 는 파단에 이르기 까지 점차로 감소하는 것을 알 수 있다. 특히, 파단직전에서 저하는 현저하다. 박씨<sup>11)</sup>는 PET의 경우에 압축응력을 걸어 실험을 행했지만 역시 파단 직전에서는 저하한다는 결과가 얻어지는 결과를 보고하고 이것을 Griffith 씨<sup>12)</sup>의 미소 crack와 관련하여 설명하고 있다. 즉 극저온에서는 분자쇄 전체의 이동을 동반하는 microbrown운동과 segment만의 macrobrown운동

이 정지되고 측쇄의 국부적인 운동만이 가능하게 되기 때문에 연신에 의한 배향변화등은 그리 크게 일어나지 않는다. 즉 Artbauer씨의 자유체적 파괴 이론<sup>13)</sup>으로 설명하는 것은 조금 무리라고 생각된다. 따라서 오히려 파괴직전이 되면 microcrack 등이 발생하고 절연재료로서는 약점이 생겼기 때문에 microcrack중 혹은 그 표면에 연하여 파괴의 개시 진전이 일어난다고 생각된다. 한편, 기계적 응력하에서의 고분자 재료의 절연파괴공(구멍)을 살펴보면 실온에서는 그림 12과 같이 직경 수  $\mu\text{m}$ 의 절연파괴 구멍이 관찰되나, 액체  $\text{N}_2$ 중에서는 절연파괴와 동시에 시료가 파열되어 절연파괴 구멍을 관측할 수 없었다.



인장응력 15 MPa  
파괴전계 1.1 MV/cm

그림 12. 기계적 응력하에서의 PP의 절연파괴 hole

Fig. 12. Breakdown hole of mechanical stress of PP

#### 4. 결 론

본 연구에서는 향후 초전도 기기의 절연재료로 사용될 고분자를 중심으로 시료에 일축연신을 가하여 기계적 응력과 전기적 성질 등을 조사하였다. 따라서 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본실험에서 사용된 PP와 Kapton의 경우, 실온에서는 낮은 응력에서도 변형이 크게 나타나는 고무탄성파괴를 나타내고, 액체  $\text{N}_2$ 중에서는 연신율이 대단히 작아 거의 취성파괴를 나타낸다.

- 2) PP, Kapton의 경우 77K에서 얻어진 인장강도, 연신율 및 Young율은 각각 76.7MPa, 1.2%, 7900MPa 및 117.4MPa, 2.05%, 6300MPa이다.
- 3) 인장응력하에서의  $\tan \delta$ 의 주파수 특성은 실온에서는 주파수의 증가에 따라 상승하지만 액체 N<sub>2</sub> 온도에서는 주파수를 증가시켜도 거의 변화하지 않는다.
- 4) PP에서 stress의 증가에 따른 파괴전계 E<sub>B</sub>는 파단에 이르기까지 점차로 감소하며, 특히 파단 직전에서 저하는 현저하다.

과제 번호: 94-지-05

※ 본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

#### 참 고 문 헌

1. R.W.Boom, "Wisconsin Superconductive Energy Storage Project", Univ. of Wisconsin, Vol.1, Chap.VII, 1974.
2. Haruyuki, "Electrical insulation technology for superconducting device in Japan", IEEE Trns. Vol.EI-6, pp. 7-15, 1990.
3. R.J.Meats, "Pressuried-Helium Breakdown at very Low Temperatures", Prooc. IEEE, Vol.119, pp.760-766, 1972.
4. Tokai, "Design Study of Superconducting Toroidal Field Magnet for Tokamak Fusion Power Reator", Technical Report of Japan Atomic Energy Research Institute, M6921, 1977.
5. M.J.Jefferes, "Dielectric Loss and Voltage Breakdown in Liquid Nitrogen and Hydrogen", IEEE Trans. on Elect. Insulation, Vol. EI-5, No.3, pp. 83-91, 1970.
6. S.H. Kim, D.Y.Ma, H.H. Kim and K.S.Ryu, "Electrical Breakdown Properties in Liquid-Gas Composite N<sub>2</sub>", Jpn.J.Appl. Phys Vol. 33, pp. 4662-4665, 1994.
7. H.C.Miller, "Surface Flashover of Insulators", IEEE Trans. on Elect. Insulation, Vol. 24, No. 5, 1989.
8. K.Kadotani, "Mechanical Properties of Plastic Composite under Low Temperature Conditions.", Cryogenics, Vol.10, pp.13-18, 1975.
9. 堀井 河野, "極低溫液體の沿面放電", 日本電氣學會 絶縁材料研究會資料, pp.22-35, 1978.
10. G.Bonger and P.Penczynski, ibid. 16, pp.355, 1976.
11. M.Hara, C.H.Park and M.Akazaki, "The Dielectric Breakdown Strength of PET and FRP", IEEE Trans. Elect. Insulation, Vol. EI-17, No.3, pp.233-240, 1982.
12. A.A. Griffith, Phil. Trans. Roy. Soc. A221, pp.163, 1921.
13. J. Artbauer, ACTA Tech. CSAV, No.3, pp. 416, 1966.

**저자소개**

**김상현**



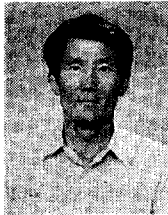
1950년 2월 7일생. 1974년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 2월 인하대 전기공학과 석사. 1986년 3월 일본 오오사카대학 전기공학과(공학). 1989년 2월 한국전기연구소 극저온재료실장. 1995년 현재 경상대 전기공학과 부교수.

**정순용**



1947년 7월 11일생. 1974년 3월 인하대학교 전기과 졸업. 1983년 2월 인하대학교 대학원 석사. 현재 경상대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 부산전문대학 전기공학과 부교수.

**마대영**



1956년 12월 2일생. 1980년 2월 경북대 전자공학과 졸업. 19982년 2월 경북대 전자공학과 석사. 1985년 8월 경북대 전자공학과(공학). 1987년 3월 한국전자통신연구소 선임연구원. 1990년 9월 Carnegie-Mellon대학 방문연구. 현재 경상대 전기공학과 교수.

**김영석**



1974년 4월 6일생. 1996년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 현재 경상대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

**김현희**



1966년 9월 5일생. 1990년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1994년 2월 경상대학교 대학원 전기전자공학과 석사. 현재 경상대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 진주전문대학 소방안전관리과 전임강사.