

# 고온 초전도 케이블 절연을 위한 절연지의 인장응력 및 절연파괴 특성

김영석\*, 곽동순\*, 김해중\*\*, 김상현\*

경상대학교 전기공학과 및 공학연구원\*, 한국전기연구원 초전도 응용그룹\*\*

## The Characteristics of Electrical Breakdown and Tensile Stress of Dielectric Paper for Insulation of HTS Cable

Young-Seok Kim\*, Dong-Soon Kwag\*, Hae-Jong Kim\*\* and Sang-Hyun Kim\*

Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang Natl Univ and Engineering Research Institute\*

Applied Superconductivity Lab, Korea Electrotechnology Research Institute\*\*

### Abstract

The degradation of the dielectric properties of insulating papers that were used under loaded conditions at cryogenic temperature was paid attention. Electrical and tensile stress properties of dielectric paper at cryogenic temperature have been investigated to optimum insulating design of high-Tc superconducting(HTS) cable. Tensile strength of PPLP in liquid nitrogen was high more than that of air, but tensile strain could know that decrease sharply. According as tensile strength increases, the breakdown stress of PPLP in liquid nitrogen was decreased.

**Key Words** : Tensile strength, Tensile strain, HTS cable, Breakdown stress

### 1. 서 론

고온 초전도체를 이용하여 전력 기기에 응용하려는 연구가 폭넓게 진행되고 있다. 특히 고온 초전도 케이블은 유럽, 일본 그리고 미국에서 시제품이 제작되어 실증시험을 하고 있으며, 우리나라에서도 21세기 프론티어 사업의 일환으로 22.9kV급 고온 초전도 케이블을 개발 중에 있다[1-4]. 고온 초전도 케이블은 도체, 냉각 그리고 절연으로 구성되어 있고 특히, 도체를 둘러싸고 있는 절연은 케이블 개발에 있어서 중요한 과제 중에 하나이다. 또한 초전도 케이블이 실제 운전되는 극저온 환경에서의 전기절연 설계 및 절연재료의 평가 및 선정도 중요하며, 절연재료로는 두께 0.119mm인 반합성의 PPLP(Polypropylene laminated paper)가 사용되고 있다[5][6].

하지만, 극저온 환경 하에서 냉각에 의해 절연재료는 실온보다 기계적으로 인장강도는 증가하지만,

탄성력이 저하되고 열 수축 등으로 인해 전기적 열화가 문제시된다. 이것은 고온 초전도 케이블의 실용화 시에는 케이블의 성형, bending, 열 수축 등이 발생하여 기계적으로 취약한 문제점을 야기한다[7][8]. 또한, 케이블의 성형에 따른 전기적 절연의 저하도 뒤따를 것으로 생각된다. 따라서, 극저온에서 절연재료가 갖는 기계적 인장응력 특성에 관한 연구가 불가피하다.

이와 같은 관점에서 극저온 환경에서 절연재료에 관한 기계적 응력 특성과 기계적 응력에 따른 전기적 성질의 변화는 고온 초전도 케이블의 최적 절연설계를 위해 연구가 중요하다.

### 2. 실험장치 및 방법

그림 1에 기계적 인장응력 특성에 사용된 시료 및 전극계 형상을 나타내며, 사용된 PPLP는 두께 0.119mm, 밀도 0.89g/cm<sup>3</sup>의 핀란드에서 제조된 것

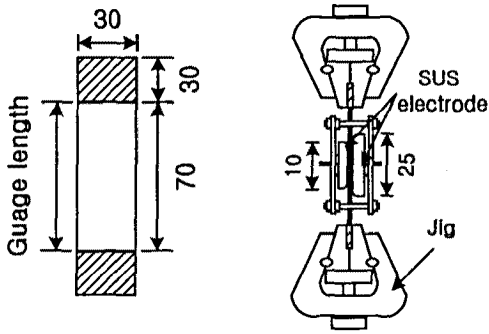
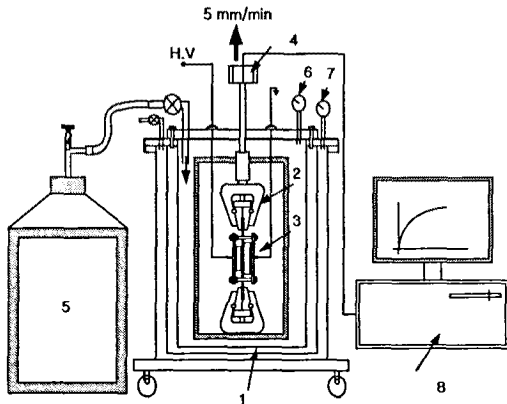


그림 1. 시료형상  
Fig. 1. Shape of sample

으로, 폭 30mm, 길이 130mm, gauge 길이는 70mm로 하였다. 또한 가장자리는 치구(jig)가 물리는 부분의 파단을 방지하기 위해 보강재를 사용하여 보강하였으며, 비교하기 위해 두께 0.15mm의 Kraft도 동일한 방법으로 설정하였다. 제작된 시료는 100℃로 4시간 정도 건조시켜 사용하였다.

그림 2에 시료의 인장 응력 및 절연파괴 실험을 위한 장치를 나타낸다. 저온 용기인 cryostat에 그



1. Cryostat	2. Jig
3. Electrode system	4. Load Cell
5. LN <sub>2</sub> dewar	6. Pressure gauge
7. Vacuum gauge	8. Controller

그림 2. 실험장치의 개략도

Fig. 2. The schematic of Experimental apparatus.

림 1과 같이 시료를 상하의 치구(jig)에 설치하고 외부에서 액체 질소를 주입시켜 침적시켰다. 연신은 한쪽을 고정하고 다른 한 쪽은 만능시험기

(LLOYD, LR10K)를 이용하여 computer controller에서 제어하였으며, 5mm/min의 일정속도로 하중을 가해서 인장응력을 측정하였다. 데이터는 시료를 관측한 후, 시료의 중앙부에서 파단된 것만을 취하였으며, 연신율은 gauge length의 길이(L<sub>0</sub>), 늘어난 길이 L<sub>1</sub>라 두고, 다음과 같은 식을 이용하여 백분율로 구하였다.

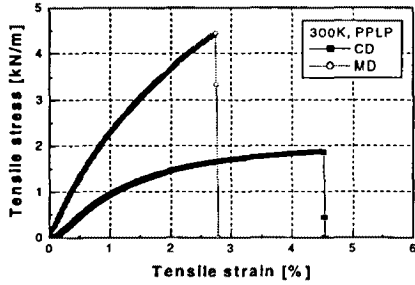
$$\frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 [\%]$$

한편, 절연파괴 특성은 일정한 인장응력을 가한 상태에서 만능시험기의 전원을 제거한 후, AC 전압(최대 100kV)을 1kV/sec의 상승속도로 인가하였으며, 전계는 절연파괴 전압을 시료의 두께로 나누어 계산하였다.

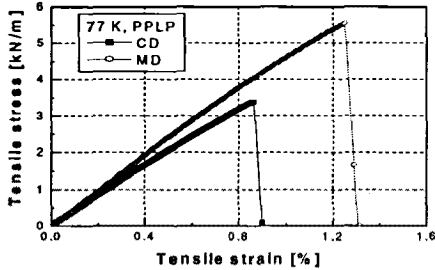
### 3. 결과 및 고찰

그림 3 a),b)에 각각 공기 중(300K) 및 액체질소(77K)에서 PPLP의 인장강도의 연신율 의존성을 나타낸다. 그림 4에 PPLP의 CD방향의 파단 흔적을 나타낸다. 여기서, MD(Machine Direction), CD(Cross Direction)는 PPLP의 재료 자체의 배열 방향을 나타낸다. 그림 3에서 공기 중 및 액체질소의 MD방향의 기계적 인장강도가 CD방향의 것 보다 큰 것을 알 수 있다. 좀더 세부적으로 살펴보면, 그림 a)의 공기 중에서는 MD 및 CD의 인장강도는 각각 4.5kN/m, 1.9kN/m 이었으며, 두 방향 모두 재료의 탄성파괴 형태의 경향을 보이고 있으나, MD의 경우는 인장강도가 높고, CD의 경우는 연신율이 큰 것을 알 수 있다. 한편, 그림 b)의 액체질소의 경우에는 두 방향 모두 재료의 취성파괴 형태를 나타내고, MD 및 CD의 인장강도는 5.6kN/mm, 3.5kN/mm로서 공기중보다 높은 인장강도를 가지지만, 연신율은 극히 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 따라서, 온도가 낮아질수록 재료의 분자들이 열 적 활성화가 작아져 인장강도는 높고 연신율은 줄어드는 것을 알 수 있다.

그림 4 a),b)의 파단흔적에서도 공기중과 액체질소에서의 파단 후 외관 사진이 약간 다른 것을 알 수 있다. 그림 a)의 공기 중에서는 인장강도에 따라 주름살 형태의 모양으로 나타났으며, 액체질소에서는 공기중과 같은 주름살 형태는 볼 수 없었으며, 파단 부위가 거칠고 매끄러운 형태를 보였



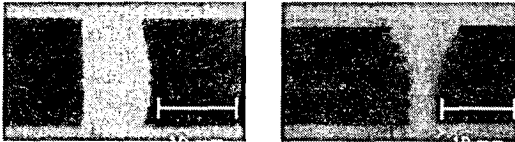
a) 공기 (300K)



b) 액체질소 (77K)

그림 3. PPLP의 인장강도의 연신율 의존성

Fig. 3. The tensile stress-tensile strain curve of PPLP



a) 공기 (300K)      b) 액체질소 (77K)

그림 4. PPLP의 CD방향의 파단 사진

Fig. 4. In case of CD, photograph of broken PPLP.

그림 5에 각각의 온도에서 kraft지의 인장강도의 연신율 의존성을 나타낸다. kraft지도 PPLP와 거의 유사한 결과 값을 가졌다. 따라서, kraft와 PP의 합성지인 PPLP의 기계적 인장특성은 거의 kraft지의 인장특성에 의존하는 것을 알 수 있으며, 두 시료의 두께의 차이에 의해 정확한 비교는 어려웠다.

그림 6에 인장응력에 따른 PPLP의 절연파괴 전

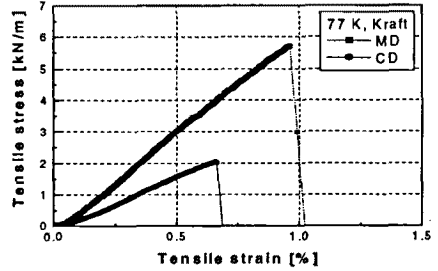


그림 5. 액체질소에서 Kraft지의 인장강도의 연신율 의존성

Fig. 5. The tensile stress-tensile strain curve of Kraft in liquid nitrogen

계를 나타낸다. 액체질소 속에서 controller를 이용하여 인장하였고 횡축은 인장응력, 종축은 절연파괴 전계를 나타내며, 각 점은 Weibull 분포를 이용

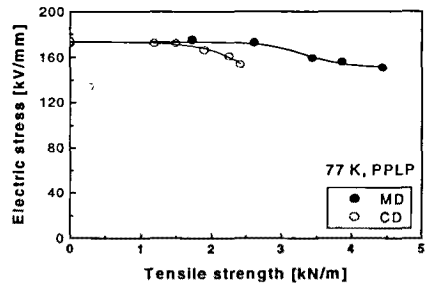


그림 6. PPLP의 절연파괴전계의 인장응력 의존성

Fig. 6. Tensile stress dependence of breakdown electric stress of PPLP.

하여 50%되는 값으로 선택하였다. 그림으로부터 PPLP는 인장응력이 증가함에 따라 MD, CD 모두 그림 3 b)의 파단 직전에서 절연파괴 전계가 약간 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 파괴직전이 되면 microcrack등과 같은 PPLP에 약점 부위가 생기게 되어 절연파괴 전계를 저하시키는 것으로 사료되며, 이와 같은 결과는 그림 7에 나타낸 인장응력 상태에서의 절연파괴 홀(hole) 및 파단된 PPLP를 보면 알 수 있다. 결국, 절연파괴에 동시

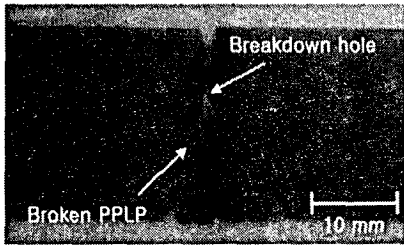


그림 7. 인장응력이 가해진 상태에서의 PPLP의 절연 파괴 사진

Fig. 7. Photograph of breakdown under tensile stress.

에 시료가 파단되는 것을 알 수 있다.

그림 8은 PPLP를 공기중에서 인장 시킨 후, 액체질소 속에서 절연 파괴 시킨 결과를 나타낸다. 두 방향 모두 파단 직전에서 절연 파괴 전계가 낮아지는 것을 알 수 있으며, 그림 6의 경우보다 약간 낮은 값을 나타내었다. 이는 공기 중에서 인장 한 경우, 상대적으로 액체질소의 것 보다 연신율이 크고 미세 crack이 더욱 많이 나타난 것으로 사료되어 파괴 전계가 낮아지는 것으로 생각된다.

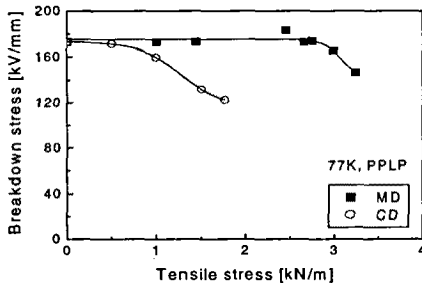


그림 8. 공기 중에서 인장 후, PPLP의 절연 파괴 전계

Fig. 8. After tensile stress at the air, breakdown electric stress of PPLP.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고온 초전도 케이블의 절연을 위한 절연지의 인장 응력 특성과 인장 응력에 따른 전기적 성질에 관해 조사하였다. PPLP의 경우, 공기 중에서는 인장 응력은 낮지만, 연신율은 크게 되는 고무탄성 파괴 형태가 나타났으며, 액체질소

에서는 연신율은 작지만, 인장 응력은 높은 취성 파괴의 형태를 보였다. 또한 인장응력상태에서 전기 절연파괴는 microcrack등과 같은 PPLP에 약점 부위가 생기게 되어 절연파괴 전계를 저하시켰으며, 파단 직전의 인장응력에서는 절연파괴와 동시에 PPLP가 파단되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] C.Ramussen et al, "Design of a termination for a high temperature superconducting power cable", IEEE Trans. Appl.Supercond. Vol.9, No.2 pp.1273-1276, 1999.
- [2] 本庄昇一ら, "100m 超電導ケーブル實用性検証試験の概要", 低温工学 36 pp. 242-248, 2001
- [3] M.Nassi, "HTS prototype for power transmission cables: recent results and future programmes", Supercond. Sci. Technol : 13 (2000)
- [4] 성기철 외, "배전급 초전도 전력케이블 개발", 차세대 초전도 응용기술개발 사업단 연차 보고서, 2002.
- [5] S.H. Kim et al, "Dielectric Characteristics of Insulating papers for HTS Cable", Korea-japan joint Workshop 2002 on Applied Superconductivity and Cryogenics, pp. 9,2002.
- [6] H.Suzuki et al, "Dielectric Insulation Characteristics of Liquid-Nitrogen-Impregnated Laminated Paper-Insulated Cable", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No.4, pp.1677-1680, 1992.
- [7] S.Nishijima and M.Hara, "Mechanical influence on long-term dielectric performance of insulants", Cryogenics 38, pp. 1105-1113, 1998. .
- [8] 김상현 et al, "극저온에서의 절연재료의 기계적·전기적 성질", 전기전자재료학회지, Vol.9, No. 10, pp.1033-1039, 1996.