

## 기계적 응력상태에서 절연지 및 케이블의 전기절연 특성

### The Characteristics of Electrical Breakdown of Dielectric Paper and Cable under mechanical stress

김영석\*, 광동순\*, 김해중\*\*, 김상현\*

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 electrical and mechanical properties of dielectric paper and cable at cryogenic temperature have been investigated to optimum insulating design of high-Tc superconducting(HTS) cable. From the results, 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 because PPLP was degraded. According as bending radius multiple is decrease, breakdown voltage decreased sharply. And bending radius multiple is thought that more than about 25 is suitable.

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

#### 1. 서론

세계 각국의 고온 초전도 케이블 개발속에 우리나라에서도 21세기 프론티어 사업의 일환으로 22.9kV 급 고온 초전도 케이블을 개발 중에 있다[1-3]. 고온 초전도 케이블은 전류용량의 증대, 저 손실 그리고 소형화를 할 수 있어, 대 도시 전력수송의 유력한 대안으로 떠오르고 있다.

고온 초전도 케이블은 도체, 냉각 그리고 전기절연으로 구성되어 있으나, 본 논문에서는 케이블의 절연에 중점을 두었다. 케이블의 전기절연은 일반적으로 절연지 및 냉각부로 구성된 복합절연 방식을 채택하고 있으며, 고온 초전도 케이블의 제작과 포설 및 운전시에서는 케이블에 기계적 응력이 가해진다. 이때 케이블을 구성하고 있는 초전도체 및 절연물에는 임계전류의 열화 및 절연물의 열화가 발생하기 때문에 안전한 케이블 시스템 구성을 위해서는 고온 초전도 케이블의 기계적 특성을 파악할 필요가 있다. 또한 운반을 위한 케이블 보빈의 곡률 반경

설계 시에도 케이블의 기계적 특성은 필수적으로 연구되어야 한다[4][5].

하지만, 고온 초전도 케이블의 운전환경은 극저온의 액체 질소중에서 구동되며, 극저온 냉각에 따른 절연물의 특성은 실온과 다른 특성을 가지게 된다. 극저온에서 PPLP와 같은 절연재료는 실온에서보다 기계적 인장강도는 증가하지만, 탄성력이 저하되고 열 수축이 발생한다. 그러므로 케이블 실용화시에는 성형, bending, 열 수축 등이 발생하여 기계적으로 취약하게 되고 성형에 따른 전기적 절연의 저하도 뒤따를 것으로 생각된다[6].

따라서, 본 논문에서는 극저온 환경에서 절연재료에 관한 기계적 응력 특성 및 전기적 특성을 조사하고 실제의 mini-model 케이블을 제작하여 기계적 응력에 따른 전기적 절연특성의 변화를 연구하였다.

#### 2. 시료 및 mini-model 케이블 제작

실험에 사용된 PPLP는 두께 0.119mm, 밀도 0.89g/cm<sup>3</sup>의 핀란드에서 제조된 것으로, 실험에 사용된 시료는 폭 30mm, 길이 130mm, gauge 길이는

\* : 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

\*\* : 한국전기연구원 초전도 응용그룹

70mm로 하였다. 또한 가장자리는 치구(jig)가 물리는 부분의 파단을 방지하기 위해 보강재를 사용하였으며, 제작된 시료는 수분의 영향을 제거하기 위해 100℃로 4시간 정도 건조시켜 사용하였다. 그림 1에 기계적 인장응력 특성에 사용된 시료 및 전극계 형상을 나타낸다.

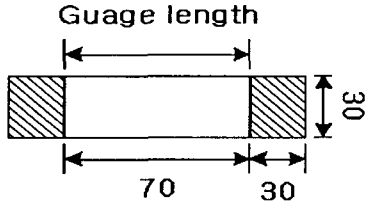


그림 1. 시료형상  
Fig. 1. Shape of sample

Mini-model 케이블의 제작은 스테인레스 포머 위에 카본지 2겹을 감은 후, PPLP로 절연하였다. 절연에 사용된 PPLP는 폭 25mm로 절단하였으며, 각 층별로 30%씩 overlap(겹친)하여 두께 1mm로 절연하였다. 이후, 다시 카본 지로 외부전극을 제작하고 제작된 케이블은 일정한 bending 반경을 가지는 드럼에서 굽혔으며, 제작한 케이블의 형상을 그림 2에 나타낸다. 케이블 굴곡 반경 배수( $R/r$ )는 10배, 15배,

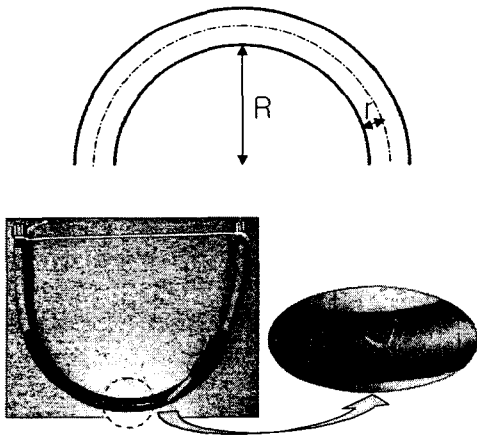


그림 2. Bending에 따른 케이블의 형상  
Fig.2. A shape of cable by bending stress.

20배, 25배, Straight의 5가지 경우로 케이블을 제작하였다. 이때,  $R$ 은 드럼의 반경,  $r$ 은 케이블 반경을 나타내며, 도체부와 절연부를 포함하여 15mm이다. 그리고 케이블의 종단부에는 연면 방전에 의한 영향과 전계집중을 완화하기 위해서 stress cone으로 보강하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

그림 3은 시료의 인장 응력 및 절연파괴 실험을 위한 장치를 나타낸다. 저온용기(Cryostat)에 그림 1과

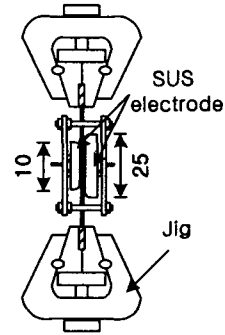


그림 3. 실험장치의 개략도  
Fig. 3. The schematic of Experimental apparatus.

같이 시료를 상하의 치구(jig)에 설치하고 외부에서 액체 질소를 주입하여 침적시켰다. 연신방법은 한쪽을 고정하고 다른 한 쪽은 만능시험기(LLOYD, LR10K)를 이용하여 컴퓨터에 부착된 제어기로 조절하였으며, 5mm/min의 일정속도로 하중을 가해서 인장응력을 측정하였다. 데이터는 시료를 관측한 후, 시료의 중앙부에서 파단된 것만을 취하였다. 연신율은 최초 gauge length의 길이( $L_0$ )와 늘어난 길이  $L_1$ 의 관계에서 다음과 같은 식을 이용하여 백분율로 구하였다.

$$\frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \quad [\%] \quad 1)$$

또한, 절연파괴 특성은 일정한 인장응력을 가한 상태에서 만능시험기의 전원을 제거한 후, AC 전압을 인가하였다. 한편, Mini-model 케이블의 bending상태에서의 절연파괴 실험은 케이블을 제작된 cryostat에 설치한 후, 대기압 액체질소에서 1시간 냉각시켰다. 교류전원으로는 최대 AC전압 100 kV, 주파수 60 Hz인 고전압 장치를 사용하였으며, 1 kV/sec의 속도로 전압을 상승시키면서 절연파괴시켰다.

### 4. 실험결과 및 고찰

그림 4에 액체질소(77K)중에서 PPLP의 인장강도에 따른 연신율 의존성을 나타낸다. 그림에서 MD (Machine Direction), CD(Cross Direction)는 PPLP의 재료 자체의 배열방향을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 PPLP의 인장강도가 MD방향이 CD방향 보다 큰 것을 알 수 있다. 액체질소에서는 두 방향 모두

재료의 취성파괴 형태를 나타내고, MD 및 CD의

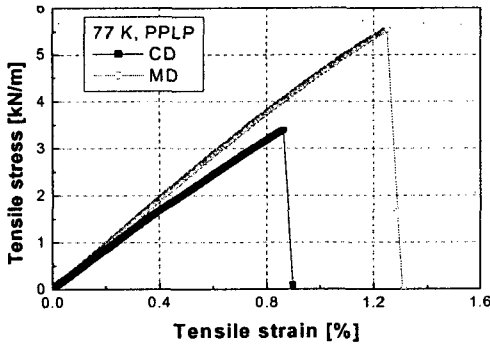


그림 4. PPLP의 인장강도의 연신율 의존성

Fig. 4. The tensile stress-tensile strain curve of PPLP

인장강도는 각각 5.6kN/mm, 3.5kN/mm의 값을 가지지만, 연신율은 극히 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 따라서, 온도가 낮아질수록 재료의 분자들이 열적 활성화가 작아져 인장강도는 높고 연신율은 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 액체질소중에서 파단 흔적은 파단 부위가 거칠고 매끄러운 형태를 보였다.

그림 5에 인장응력에 따른 PPLP의 절연파괴 전계를 나타낸다. 액체질소 속에서 controller를 이용하여 인장하였고 횡축은 인장응력, 종축은 절연파괴 전계를 나타내며, 각 점은 Weibull 분포를 이용하여 50% 되는 값으로 선택하였다. 그림으로부터 PPLP는 인장응력이 증가함에 따라 MD, CD 모두 그림 4의 파단 직전에서 절연파괴 전계가 약간 낮아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 파괴직전이 되면 microcrack등과 같이 PPLP에 약점이 노출되어 절연파괴 전계를 저하시키는 것으로 사료된다.

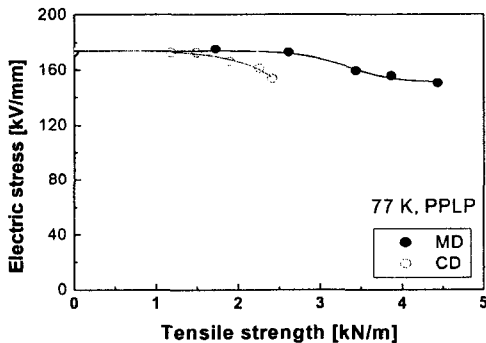


그림 5. PPLP의 절연파괴전계의 인장응력 의존성

Fig. 5. Tensile stress dependence of breakdown electric stress of PPLP.

그림 6은 PPLP를 공기중에서 인장 시킨 후, 액체

질소 속에서 절연파괴 시킨 결과를 나타낸다. 두 방향 모두 파단 직전에서 절연 파괴 전계가 낮아지는

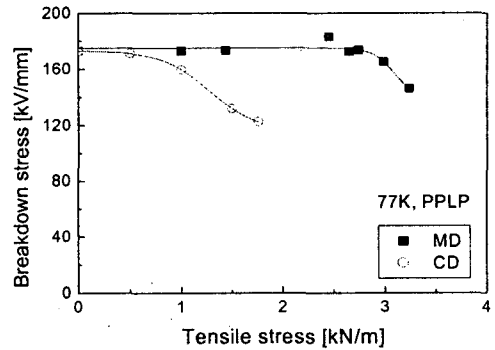


그림 6. 공기 중에서 인장 후, PPLP의 절연 파괴 전계

Fig. 6. After tensile stress at the air, breakdown electric stress of PPLP.

것을 알 수 있으며, 그림 5의 경우보다 약간 낮은 값을 나타내었다. 이는 공기 중에서 인장 한 경우, 상대적으로 액체질소의 것 보다 연신율이 크고 microcrack이 더욱 많이 생김으로써 파괴 전계가 낮아지는 것으로 생각된다.

그림 7에 대기압에서 케이블의 굴곡 반경 배수에 따른 교류 절연파괴전압을 나타낸다. 여기서, 굴곡 반경 배수(R/r)가 작을수록 심한 굴곡을 나타내며, 실험한 데이터의 값이 많지 않은 관계로 절연파괴 값은 평균값을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 굴곡 반경 배수가 감소할수록 절연파괴 값이 낮아지는

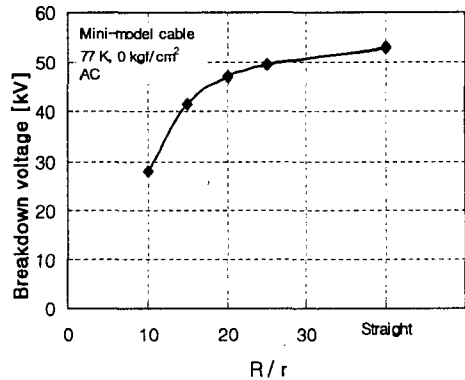


그림 7. 굴곡 반경 배수에 따른 mini-model 케이블의 교류 절연 파괴

Fig. 7. AC breakdown of mini-model cable by bends radius multiple

것을 알 수 있으며, 반경배수가 약 25 이상으로 되

면 파괴값이 포화되는 경향을 나타내었다. 좀 더 세부적으로 straight인 경우, 절연파괴 값은 약 53kV 정도이지만, R/r값이 10인 경우는 절연파괴 값이 28kV로서 약 50%정도 파괴값이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 그림 8에 나타난 절연파괴된 케이블의 형상으로 확인 할 수 있다. 굽힘 반경 배수가 작을수록 케이블 바깥쪽 곡률의 버트 캡의 간격은 더욱 늘어나고 PPLP의 CD방향으로 기계적 인장력과 안쪽 곡률 버트 캡의 접침에 의해 절연파괴 값이 급격하게 낮아지는 것을 확인 할 수 있었다.

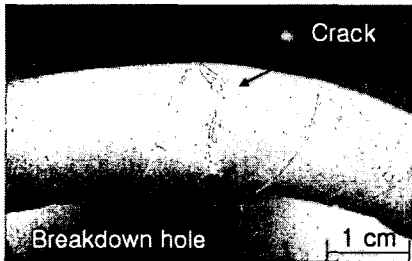


그림 8. R/r=10인 경우, 절연파괴된 mini-model 케이블.

Fig. 8. In case of R/r=10, breakdown of mini-model cable.

## 5. 결론

본 연구에서는 고온 초전도 케이블의 절연을 위한 절연지의 기계적·전기적 특성과 이를 이용한 mini-model 케이블의 전기적 성질에 관해 조사하였다. 액체질소에서 PPLP는 연신율은 작지만, 인장 강도는 높은 취성파괴의 형태를 보였으며, 파단 부위는 약간 날카롭고 매끄러운 형태를 나타내었다. 인장 응력상태에서 전기절연파괴는 microcrack등과 같은 PPLP에 약점 부위가 발생하여 절연파괴 전계를 저하시켰으며, 파단 직전의 인장응력에서는 절연파괴와 동시에 PPLP가 파단되었다.

굽힘반경 배수에 따른 mini-model 케이블의 절연 파괴는 굽힘반경 배수가 작아짐에 따라 급격하게 낮아지는 것을 알 수 있었으며, R/r=25이상으로 케이블을 설계하는 것이 좋은 것으로 사료된다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

[1] 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

- [2] M.Nassi, "HTS prototype for power transmission cables: recent results and future programmes", Supercond. Sci. Technol. : 13 (2000)
- [3] 성기철 외, "배전급 초전도 전력케이블 개발", 차세대 초전도 응용기술개발 사업단 연차 보고서, 2002.
- [4] 김상현 et al, "극저온에서의 절연재료의 기계적·전기적 성질", 전기전자재료학회지, Vol.9, No. 10, pp. 1033-1039, 1996.
- [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] S.Nishijima and M.Hara, "Mechanical influence on long-term dielectric performance of insulants", Cryogenics 38, pp. 1105-1113, 1998.