

액체질소 중에서 기계적 응력에 따른 mini-model 케이블의 전기적 특성

The Electrical Properties of Mini-model Cable under mechanical stress in Liquid Nitrogen

김영석*, 광동순*, 한철수*, 김해중**, 성기철**, 김상현*

Y.S. Kim*, D.S. Kwag**, C.S. Han*, H.J. Kim***, K.C. Seong***, S.H. Kim*

Abstract: It is important to mechanical properties of dielectric paper and cable to optimum electrical insulation design of HTS cable, because the cable has experience of mechanical stress, such as tensile stress, bending stress. Also, it is operated at cryogenic temperature. From the results, it was observed that the tensile strength of PPLP in liquid nitrogen was high more than that of air, but tensile strain decrease sharply. According as tensile strength increases, the breakdown stress of PPLP in liquid nitrogen is decreased. Because PPLP was deteriorated by microcrack and tensile strain. According as bending radius multiple is decrease, the ac and impulse breakdown stress of mini-model cable is sharply decreased.

Key Words: tensile stress, bending stress mini-model cable, breakdown stress

1. 서 론

저전압, 대전류 통전과 교류손실이 작고 소형화 할 수 있는 고온 초전도 케이블은 지중으로 대 도시의 전력수송으로 적합한 이점을 갖고 있다. 이에 미국, 유럽 및 일본에서는 케이블을 개발하여 시험중이며, 우리 나라에서도 21세기 프론티어 사업의 일환으로 22.9kV급 고온 초전도 케이블을 한국전기연구원과 LG 전선이 공동으로 개발 중에 있다[1-4].

고온 초전도 케이블 시스템은 도체부, 냉각부 그리고 절연부 등 크게 3가지로 구성되어 있다. 고온 초전도 케이블의 절연은 절연지와 냉매로 구성된 복합절연 방식이 유력하게 채택되고 있으며, 도체를 둘러싸고 있는 절연지로는 반 합성지인 PPLP(Polypropylene laminated paper)와 냉매로서는 액체 헬륨(4.2K)에 비해 취급하기 용이하고 가격이 저렴한 액체 질소

(77K)의 사용이 검토되고 있다[5][6]. 그러므로, 지금까지 필자는 액체질소 상태에서 PPLP의 교류절연 파괴, 임펄스 절연파괴 그리고 부분방전에 관해 조사하여 22.9kV급 고온 초전도 케이블의 절연설계에 관해 연구하였다[7]. 고온 초전도 케이블은 액체질소의 극저온 환경에서 운전되기 때문에 기존의 OF(Oil filled)케이블에서 사용되고 있는 절연재료의 기계적 특성과 그에 따른 전기적 특성은 많은 차이를 보인다. 일반적으로 절연재료는 온도가 낮아짐에 따라 절연재료 고유의 탄성은 줄어들고, 온도차, 열 수축차이에 의해 열 충격 및 열 변형이 일어난다[8][9]. 고온 초전도 케이블은 제작과정에서 절연지로 도체 주위를 둘러싸게 되므로 절연지에는 인장력이 가해지고, 운반 및 포설 시에는 굽힘력 등이 가해지게 된다. 이때 케이블의 절연지는 기계적 응력에 따른 변형이 발생하고 기계적 힘이 가해지지 않은 상태보다 전기적으로 절연 성능이 저하할 것으로 사료된다. 하지만, 이에 관한 국내외의 연구는 미비한 실정이며, 기계적 응력에서 절연지 및 케이블의 기계적 특성과 그에 따른 전기적 특성을 파악할 필요가 있다.

또한, 제작되는 고온 초전도 케이블의 길이는 수 m 이상으로써, 실 계통 및 현장에 포설하기 위해서는 기존의 케이블 드럼과 같은 것을 이용하여 운반해야 한다. 하지만, 고온 초전도 케이블을 구성하고 있는 고온 초전도체는 산화물로 굽힘에 따른 임계전류의 저하와 절연지의 전기적 열화가 유발될 수 있기 때문에 운반을 위한 케이블 드럼의 곡률 반경 설계도 필수적으로 고려되어야 한다[10].

따라서, 본 논문에서는 22.9kV급 고온 초전도 케이블의 실현화를 위한 전 단계로서 액체질소 중에서 케이블의 절연지인 PPLP의 기계적 특성 및 전기적 특성에 관해 조사하였다. 또한, 실제 mini-model 케이블을 제작하여 굽힘 특성에 따른 교류 절연파괴, 임펄스 절연파괴 및 부분방전 특성을 조사하여 케이블 운반시의 드럼 설계에 관해 연구하였다.

2. 시료 및 mini-model 케이블 제작

실험에 사용된 절연지인 PPLP는 두께 0.119mm, 밀도 0.89g/cm³, PP의 비율은 57%의 판란드에서 제조된 것이다. 그림 1의 a), b)에 기계적 인장 특성을 위한 PPLP의 시료형상과 절연파괴를 위한 전극계를 나타낸다. 실험에 사용된 시료크기는 폭 30mm, 길이 130mm, gauge 길이는 70mm로 하였다. 또한 가장 자리는 치구(jig)가 물리는 부분의 파단을 방지하기 위해 보강재를 사용하였으며, 제작된 시료는 수분의 영향을 제거하기 위해 100°C로 4시간 정도 건조시켜

* 정 회 원 : 경상대학교 전기공학과 박사과정

** 정 회 원 : 경상대학교 전기공학과 석사과정

*** 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도 응용 그룹

* 정 회 원 : 경상대학교 전기공학과 교수 및 공학연구원

원고접수: 2003년 11월 03일

심사완료: 2004년 03월 02일

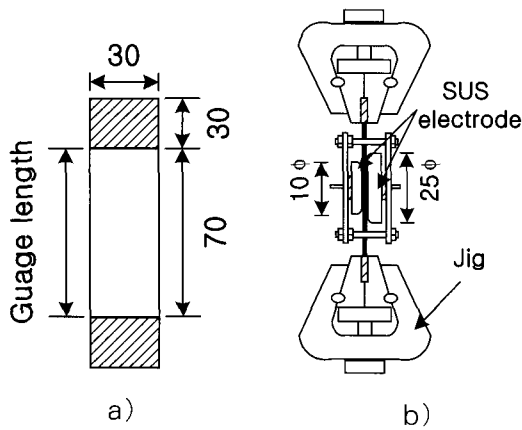


그림 1. 시료형상과 전극계.
Fig. 1. Shape of sample and electrode system.

사용하였다. 절연과피 특성을 위해서는 시료를 치구에 설치한 후, 직경10mm, 25mm의 평판 원형 전극을시료에 밀착시켜 고정하였다.

Mini-model 케이블의 제작은 스테인레스 포머 위에 카본지(Carbon paper) 2겹을 감은 후, PPLP로 절연하였다. 그림 2는 케이블의 절연 구성을 나타낸다. 절연에 사용된 PPLP는 폭 25mm로 절단하였으며, 각 층별로 30%씩 겹치게(overlap)하여 두께 1mm로 절연하였다. 외부전극은 카본 지로 하였으며, 케이블 단부의 전계 완화 및 연면 방전(surface discharge)을 억제하기 위해 스트레스콘(stress cone)을 만들었다.

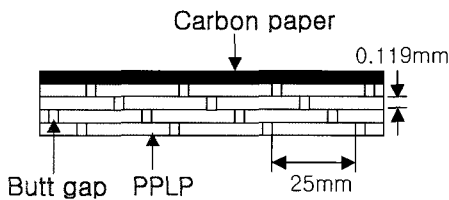


그림 2. 케이블의 절연구성.
Fig. 2. Insulation composition of cable.

제작된 케이블은 일정한 굽힘(bending) 반경을 가지는 드럼에서 굽혔으며, 제작한 케이블의 형상을 그림 3의 a), b)에 나타낸다. 케이블 굽힘 반경 배수(R/r)는 다음의 관계식을

$$W + 2G = (R + 2r)\theta \quad 1)$$

$$W = R\theta \quad 2)$$

이용하였다. 위 식의 2)식을 1)에 대입하면, $R\theta$ 는 소거되고 3)식과 같이 된다.

$$G = r\theta, \quad \theta = \frac{G}{r} \quad 3)$$

여기서, 3)식을 2)식에 대입하면 4)식이 얻어진다.

$$G = \left(\frac{r}{R}\right) \times W \quad 4)$$

이때, G 는 버트 갭 길이, W 는 PPLP의 폭, R 은 드럼의 반경, r 은 케이블 반경을 나타내며, 도체부와 절연부를 포함하여 15mm이다. 실험에 사용한 굽힘 반경 배수는 10배, 15배, 20배, 25배, Straight의 5가지 경우로 케이블을 제작하였다. 굽힘 반경 배수의 값

이 작을수록 케이블의 바깥 버트 갭은 늘어났다.

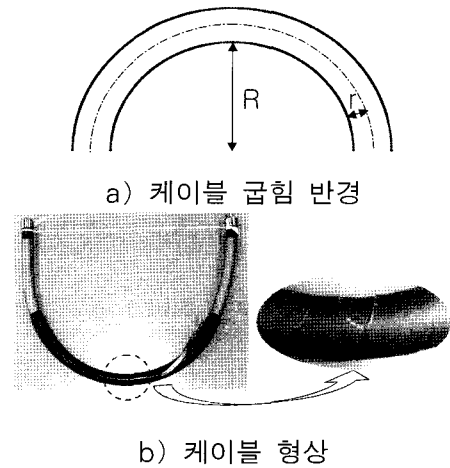
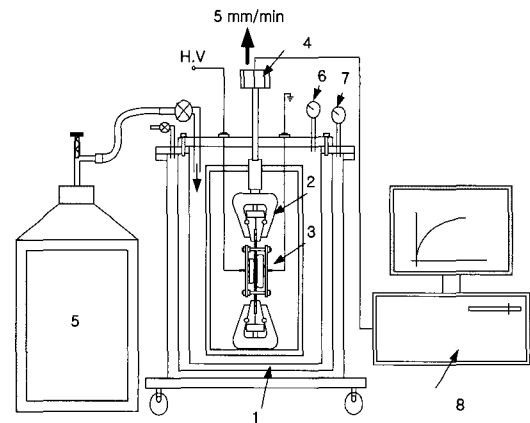


그림 3. 굽힘에 따른 케이블의 형상.
Fig. 3. A shape of cable by bending stress: a) bending radius of cable and b) shape of cable.

3. 실험방법

그림 4는 시료의 인장 실험 및 절연과피를 위한 장치의 구조를 나타낸다. 저온용기(cryostat)는 스테인레스로 만들어진 것을 사용하였으며, 진공을 시켜 외부와의 열을 차단하였다. 그림 1과 같이 시료를 상하의 치구에 설치하고 외부에서 액체 질소를 주입하여 침적시켰다.



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

그림 4. 실험장치의 개략도.
Fig. 4. The schematic of Experimental apparatus.

연신 방법은 한쪽을 고정하고 다른 한 쪽에서 만능시험기(LLOYD, LR10K)를 이용하여 컴퓨터에 부착된 제어기(controller)로 조절하였으며, 5mm/min의 일정속도로 인장하면서 시료가 파단될 때까지 측정하였다. 데이터는 시료를 관찰한 후, 시료의 중앙부에서 파단된 것만을 취하였다. 연신율은 최초 gauge length(L_0)와 늘어난 길이(L_1)의 관계에서 다음과 같

은 식을 이용하여 백분율로 구하였다.

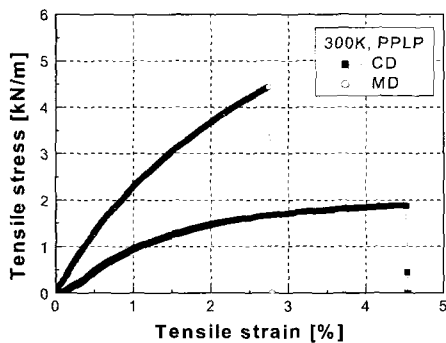
$$\frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100 \quad [\%] \quad 5)$$

또한, 절연파괴 특성은 공기중에서 시료를 인장 한 후, 액체질소에 침적시킨 것과 액체질소중에서 인장시킨 2가지 경우로 나눠 실험하였다. 교류전원으로는 최대 전압 100 kV, 주파수 60 Hz인 고전압 장치(baur사)를 사용하였으며, 만능 시험기의 전원을 제거한 후 1 kV/sec의 속도로 전압을 상승시키면서 절연파괴 시켰다.

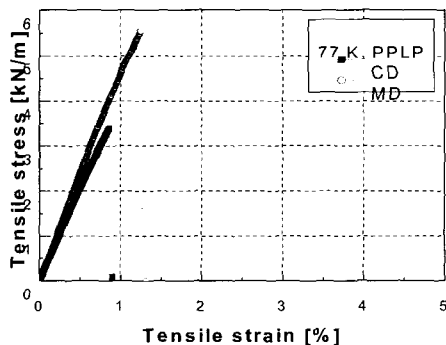
한편, Mini-model 케이블의 굽힘 상태에서의 절연파괴 실험은 케이블을 제작된 저온용기에 설치한 후, 대기압 상태에서 액체질소에 침적하여 1시간정도 충분히 냉각시켰다. 교류전원의 인가는 기계적 인장하에서의 절연파괴 실험과 동일하게 하였으며, 임펄스는 1.2×50μs 파형을 가지는 표준 뇌 임펄스를 케이블에 인가하여 절연파괴 시켰다. 마지막으로 부분방전 특성은 부분방전 측정기(IEC6027, 일본계측기사)를 이용하여 기준 방전량 5pC를 초과할 때의 값을 부분방전 개시 전계로 하고 방전량이 소멸될 때의 값을 소멸 전계로 하였다. 전계값은 인가된 전압값에 케이블 절연 두께를 나누어 환산하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 5 a),b)에 각각 공기 중(300K) 및 액체질소(77K)중에서 PPLP의 인장강도의 연신을 곡선을 나



a) 300K



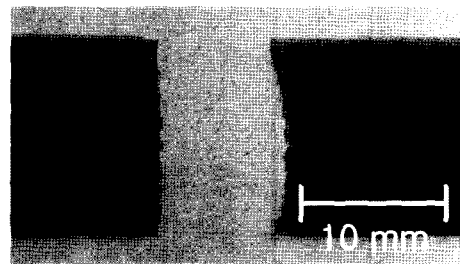
b) 77K

그림 5. 서로 다른 온도에서 PPLP의 인장강도 및 연신을 곡선.

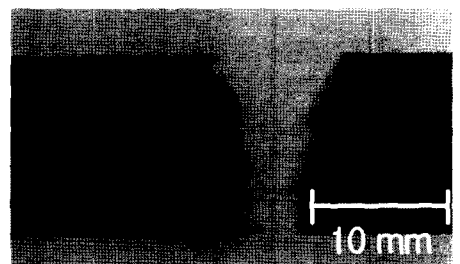
Fig. 5. The tensile stress-strain curve of PPLP at different temperature: a) in air and

b) in liquid nitrogen. 타낸다. 여기서, PPLP의 제작 공정에 따른 재료 자체의 배열방향으로서, 종 방향의 것을 MD(Machine Direction) 및 횡 방향의 것을 CD(Cross Direction)로 나타낸다. 그림에서 공기 중 및 액체질소의 MD방향의 기계적 인장강도가 CD방향의 것 보다 큰 것을 알 수 있다. 그림 a)의 공기 중에서는 MD 및 CD의 인장강도는 각각 4.5kN/m, 1.9kN/m이었으며, 두 방향 모두 재료의 연성파괴 형태의 경향을 보이고 있으나, MD의 경우는 인장강도가 높고, CD의 경우는 연신율이 큰 것을 알 수 있다. 한편, 그림 b)의 액체질소의 경우에서는 두 방향 모두 재료의 취성 파괴 형태를 나타내고, MD 및 CD의 인장강도는 5.6kN/mm, 3.5kN/mm로서 공기 중보다 높은 인장강도를 가지지만, 연신율은 극히 줄어드는 경향을 나타내고 있다. 따라서, 온도가 낮아질수록 재료의 분자들이 열적 활성화가 작아져 인장강도는 높고 연신율은 줄어드는 것을 알 수 있다.

그림 6의 a),b)에 공기 중 및 액체질소중의 PPLP의 CD방향의 파단 양상을 나타낸다. 그림 5 a),b)의 파단 흔적에서도 공기중과 액체질소에서의 파단 후 외관 사진이 약간 다른 것을 알 수 있다. 그림 a)의 공기 중에서는 인장강도에 따른 연신에 의해 주름살 형태로 늘어나면서 파괴된 형태가 나타났으나, 액체질소 중에서는 공기중과 같은 주름살 형태는 볼 수 없었으며, 파단 부위가 날카롭고 매끄러운 형태를 보였다.



a) 300K



b) 77K

그림 6. PPLP의 CD방향의 파단 사진. Fig. 6. Photograph of broken PPLP in the direction of CD: a) in air and b) in liquid nitrogen.

그림 7에 액체질소 중에서 연신 시킨 후, 인장강도에 따른 PPLP의 절연파괴 전계를 나타낸다. 그림에서 횡축은 인장강도, 종축은 절연파괴 전계를 나타내며, Weibull 분포를 이용하여 50%되는 절연파괴 값으로 데이터를 취하였다. 그림으로부터 PPLP는 인장강도가 증가함에 따라 MD, CD방향의 PPLP의 절연

파괴 전계는 거의 변화가 없으나, 파단 직전에서 절연

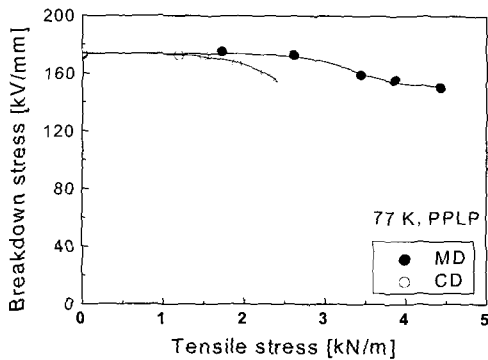
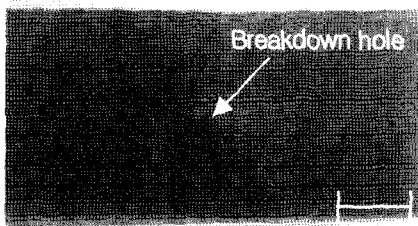


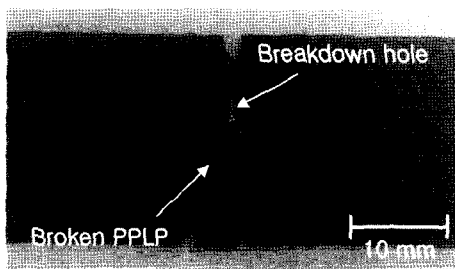
그림 7. PPLP의 절연파괴 전계의 인장강도 의존성.
Fig. 7. Tensile stress dependence of breakdown electric stress of PPLP.

파괴 전계가 약간 낮아지고 있다. 이는 그림 5의 b)에서 나타난 것과 같이 액체질소에서는 MD, CD 모두 연신율의 차이는 크게 나타나지 않으며, 연신율이 절연파괴값에 크게 영향을 주지 않은 것으로 사료된다.

기계적 응력이 가해지지 않은 상태와 높은 인장강도 (4.2kN/m)가 가해진 상태에서의 절연파괴 사진을 그림 8에 나타낸다. 기계적 응력이 가해지지 않은 경우,



a) 0 kN/m



a) 4.2 kN/m

그림 8. PPLP의 절연파괴 사진.
Fig. 8. Photograph of breakdown of PPLP.

절연파괴는 관통파괴 형태를 나타내고 있지만, 높은 인장강도 하에서는 microcrack, 백화현상 등의 약점 부위가 노출되고 절연파괴시의 충격과 동시에 PPLP가 파단되는 것을 알 수 있다. 이상의 결과에서 파단 직전이 되면 microcrack등과 같은 PPLP에 약점 부위에 의해 절연파괴가 발생되어 동시에 시료가 파단 된다고 생각된다.

그림 9는 PPLP를 공기 중에서 연신 시킨 후, 액체

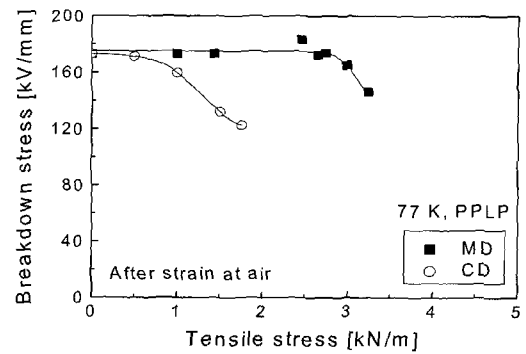


그림 9. 공기 중에서 인장 후, PPLP의 절연 파괴전계.
Fig. 9. After tensile stress at the air, breakdown electric stress of PPLP.

질소 속에서 절연파괴 시킨 결과를 나타낸다. 두 방향 모두 액체질소의 경우와 같이 파단 직전에서 절연 파괴 전계가 낮아지고 있으나, 그림 7의 MD와 CD의 절연파괴 값 보다 낮아진 것을 알 수 있다. 이는 공기 중에서 인장 한 경우, 상대적으로 액체질소의 것 보다 연신율이 크고 microcrack 및 주름살의 crack(백화 현상)등의 약점 부위가 많이 노출되며, 파괴 전계가 낮아지는 것으로 생각된다. 이는 보고한 PP의 인장강도-연신율 특성에서 파단시에 파단면이 거칠고 백화현상이 많이 관측되어 PPLP를 구성하고 있는 kraft지보다는 PP의 연신에 따른 결점부위의 증가로 파괴전계가 낮아지는 것으로 사료된다[8]. 따라서, 고온 초전도 케이블에서 절연물의 제작 시 1 kN/m 이하의 인장강도로 작업하는 것이 절연물에 영향을 미치지 않는 것으로 판단되며, 비교를 위해 공기 중에서의 절연 파괴 특성에 관한 연구도 보완되어야 할 것으로 사료된다.

한편, 고온 초전도 케이블의 포설 및 케이블 드럼에 감아 운반시의 문제도 굽힘 특성의 파악은 필수적이다. 따라서 굽힘에 따른 절연파괴 특성을 검토하였다. 그림 10에 대기압, 액체질소 속에서 케이블의 굽힘 반경 배수에 따른 교류 절연파괴 전압을 나타낸다. 여기

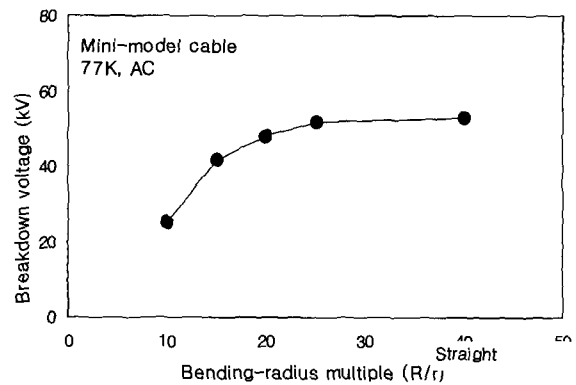
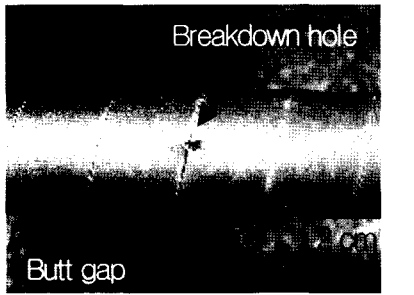


그림 10. 굽힘 반경 배수에 따른 mini-model 케이블의 교류 절연 파괴.
Fig. 10. AC breakdown of mini-model cable by bending radius multiple.

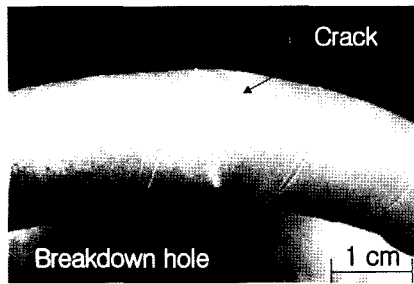
서, 굽힘 반경 배수(R/r)가 작을수록 심한 굽힘을 나

타내고 straight는 굽힘을 가하지 않은 케이블을 나타내며, 절연파괴 값은 평균값을 취하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 굽힘 반경 배수가 감소할수록 절연파괴 값이 낮아지는 것을 알 수 있으며, 굽힘 반경배수가 약 25 이상으로 되면 파괴값이 포화되는 경향을 나타내었다. 좀 더 세부적으로 straight인 경우, 절연파괴 값은 약 53kV 정도이지만, R/r값이 10인 경우는 절연파괴 값이 28kV로서 약 50%정도로 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 11의 a),b)에 straight인 케이블 및 굽힘 반경배수인 R/r가 10인 경우의 mini-model 케이블의 절연파괴 흔적을 각각 나타낸다. 그림 a)의 사진에 나



a) straight



b) R/r = 10

그림 11. mini-model 케이블의 절연파괴 사진.
Fig. 11. Photograph of breakdown of mini-model cable: a) straight cable and b) In case of R/r=10.

타난 바와 같이 straight 케이블의 경우는 버트 겹을 절연파괴의 출발점으로 하고 있다. 이것은 교류전압을 인가한 경우, 액체질소 및 PPLP의 각 부분에 걸리는 전압이 용량분담이 되고 유전율이 작은 액체질소($\epsilon = 1.432$)의 부분이 고전계가 되어 먼저 절연파괴가 발생하기 때문에 버트 겹의 절연파괴의 출발점이 된다고 생각된다. 그러나 그림 b)와 같이 굽힘이 있는 케이블의 경우는 굽힘 반경 배수가 작을수록 케이블 바깥쪽 곡률의 버트 겹은 더욱 늘어나고 PPLP의 CD방향의 백화현상과 crack이 발생하고 케이블 안쪽의 버트 겹은 겹쳐진다. 이 경우의 케이블의 굽힘 시, PPLP는 CD 방향으로 늘어나고 케이블 버트 겹의 구조 변형에 따른 약점인 crack에서 절연파괴의 출발점이 되고 있다. 따라서, 그림 10의 경우 굽힘 반경배수가 작아질수록 절연파괴 전압이 낮아진다고 생각된다.

그림 12에 대기압에서의 케이블 굽힘 반경 배수에 따른 임펄스 절연파괴를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 교류 절연 파괴와 동일하게 굽힘 반경 배수가

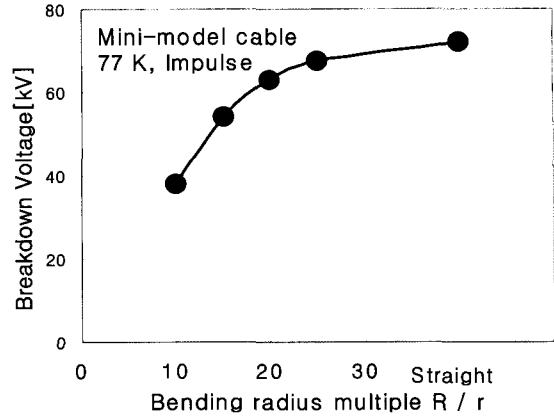


그림 12. 굽힘 반경 배수에 따른 mini-model 케이블의 임펄스 절연 파괴.

Fig. 12. Impulse breakdown of mini-model cable by bending radius multiple.

감소할수록 절연파괴 값이 낮아지는 것을 알 수 있다. 임펄스도 교류 절연파괴와 동일하게 굽힘에 따른 PPLP의 열화에 의해 파괴 값이 낮아지는 것으로 사료된다.

그림 13에 대기압에서 mini-model 케이블 굽힘 반경 배수에 따른 부분방전 개시 및 소멸 전계를 나타낸다. 굽힘 반경배수가 작아짐에 따라 부분방전 개시 전

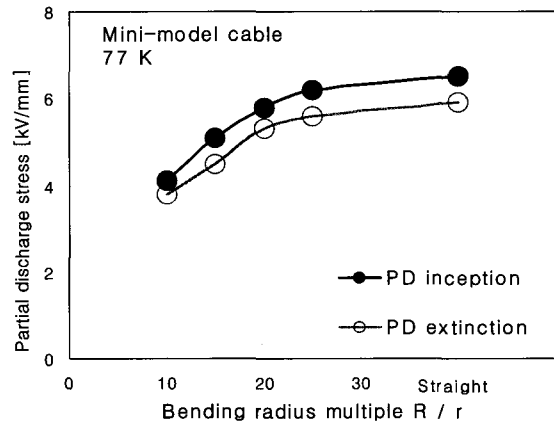


그림 13. 굽힘 반경 배수에 따른 mini-model 케이블의 부분방전.

Fig. 13. Partial discharge of mini-model cable by bending radius multiple.

계 및 소멸전계는 낮아지고 있으며, 굽힘 반경배수가 10인 경우의 부분방전 개시 전계는 4kV/mm를 나타냈다. 따라서, 실용상의 고온 초전도 케이블 제작, 운반 및 포설 시의 주의가 요구되며, 케이블의 드럼 설계 및 포설 시에 굽힘 반경 배수는 25이상으로 하는 것이 케이블 전체의 열화에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 고온 초전도 케이블의 최적 절연설계를 위한 PPLP의 기계적·전기적 특성과 이를 이용한 mini-model 케이블의 전기적 절연파괴에 관해 연구하였다. 액체질소에서 PPLP는 연신율은 작지만, 인

장 강도는 높은 취성 파괴의 형태를 보였으며, 파단 부위는 약간 날카롭고 매끄러운 형태를 나타내었다. 액체질소 중에서 인장에 따른 절연파괴는 PPLP의 파단 직전에 microcrack등과 같은 약점 부위의 발생과 연신에 의해 절연파괴 전계를 저하시켰다. 또한 공기 중에서 인장 후, 액체질소 중에서의 절연파괴 전계도 PPLP의 파단 직전

에 절연파괴 되었으며, 액체질소에서 인장 시킨 것 보다 약간 절연파괴 전계가 낮아지는 것을 알 수 있다.

한편, mini-model 케이블에서 굽힘 반경 배수가 작아짐에 따라 CD방향으로 PPLP의 백화현상과 crack이 많이 발생하였다. 이에 따라 교류 및 임펄스 절연 파괴값은 굽힘 반경 배수가 작아짐에 따라 급격하게 낮아졌으며, 교류 절연파괴에서는 R/r=25 이상에서 포화되는 경향을 나타내었다. 부분방전 개시 및 소멸 전계도 교류 및 임펄스와 같은 경향을 나타내었다. 이상의 결과는 기계적 응력에 따른 22.9kV급 고온 초전도 케이블의 절연설계에 기본 자료를 활용하며, 고온 초전도 케이블 드럼 설계 시 및 포설 시에 R/r=25 이상의 굽힘 반경으로 설계하는 것이 좋은 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] N.Steve et al, "High temperature superconducting cable field demonstration at Detroit Edison", Physica C 354, p. 49, 2001.
- [2] M.Nassi, "HTS prototype for power transmission cables: recent results and future programmes", Supercond. Sci. Technol: 13 (2000)
- [3] 本庄昇一ら, "100m 超電導ケーブル實用性檢証試験の概要", 低温工学 36 pp. 242-248, 2001
- [4] 성기철 외, "배전급 초전도 전력케이블 개발", 차세대 초전도 응용기술개발 사업단 연차 보고서, 2002.
- [5] Okubo, H et al, "Partial discharge inception V-t characteristics for pressurized liquid nitrogen/PPLP composite insulation system", Dielectric Liquids, ICDL, Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on, p. 123, 2002.
- [6] H.Suzuki et al, "Dielectric Insulation Characteristics of Liquid Nitrogen Impregnated Laminated Paper Insulated Cable", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.7, No.4, p. 1677, 1992.
- [7] 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.

- [8] 김상현 et al, "극저온에서의 절연재료의 기계적·전기적 성질", 전기전자재료학회지, Vol.9, No. 10, pp.1033-1039, 1996.
- [9] S.Nishijima and M.Hara, "Mechanical influence on long-term dielectric performance of insulants", Cryogenics 38, pp. 1105-1113, 1998.
- [10] S.Mukoyama et al, "Design and Production of High-Tc Superconducting Power Transmission Cable", IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.11, No. 1, 2001.

저자 소개

김영석 ((金榮錫))



1974년 4월 27일생, 1996년 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2001년 일본 야마구치 대학 외국인 연구자.

곽동순 (郭東洵)



1975년 9월 8일생, 2002년 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 2003년 8월~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

한철수 (韓哲洙)



1947년 10월 18일생, 1973년 단국대학교 졸업. 1987년 울산대학교 대학원 졸업(석사). 2001년~현재 경상대학교 대학원 박사과정, 울산공고 교감

김해중 (金海鍾)



1965년 00월 00일생, 1993년 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 8월~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1996년~현재 한국전기연구원 초전도 응용 그룹 선임연구원.

성기철 (成耆哲)



1956년 00월 00일생, 1980년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~현재 한국전기연구원 초전도 응용 그룹 책임연구원

김상현 (金相賢)



1950년 2월 7일생. 1974년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 오사카대학 전기공학과 졸업(공학박사). 2001년~2003년 한국 초전도·저온공학회 회장. 1989년~현재 경상대학교 전기공학과 교수.