

고온초전도 케이블의 응용을 위한 PPLP의 절연파괴 특성연구

곽동순, 김영석, 김해중*, 김상현

경상대학교 전기공학과 및 공학연구원, 한국전기연구원 초전도 응용그룹.

Study on the Breakdown Performance of Synthetic Polypropylene Laminated Paper for Application of a HTS Cable

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

Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University and Engineering Research Institute.

Applied Superconducting Lab, KERI.

Abstract

In this paper, we researched breakdown characteristics of paper/liquid nitrogen composite insulation system for application of a high temperature superconducting cable. And, we have studied the AC breakdown performance of paper/ice composite insulating system immersed in liquid nitrogen. The electric strength in this paper/ice composite system is higher than that of paper/liquid nitrogen system. Furthermore this system shows a self-healing type breakdown behavior. Among the many kinds of liquid to be immersed and frozen to the ice, deionized water gives the highest electric breakdown strength. The paper/ice composite insulation system is thought to be one of good candidate for the electrical insulating system at cryogenic temperature.

Key Words : Ice-Paper, Dry paper, HTS cable insulation, Breakdown stress, PPLP

1. 서 론

최근에 임계전류가 높고 기계적 특성이 크게 개선된 고온초전도 선재가 개발되고 있음에 따라 이를 응용한 고온초전도 케이블의 개발연구가 활발히 진행되고 있다. 한국에서도 21세기 프론티어 사업의 일환으로 KERI와 LG전선 등에서 22.9kV급 고온초전도 케이블 개발에 참여하고 있다[1-2].

고온초전도 케이블 시스템은 크게 도체부와 냉각부, 전기 절연부로 구성되어지며, 초전도 전력케이블은 고전압이 인가되고 또한 극저온에서 운전되기 때문에, 개발에 있어서 절연을 연구하는 것은 매우 중요한 부분을 차지한다. 현재 국내에서 개발 중인 고온초전도 케이블은 절연재료로 반합성지인 PPLP(Polypropylene Laminated Paper)를 채택하였고, 절연방식은 액체질소와 PPLP로 구성된 복합절연방식을 채택하였다. 이 절연방식은 도체를 여러 장의 얇은 고분자 절연지로 적층하여

절연을 하기 때문에 냉각에 의한 수축 및 열적인 손실을 줄일 수 있고, 기존 OF-케이블의 절연방식을 응용할 수 있기 때문에 현재 기술상으로 적용 가능성이 가장 높은 절연방식이라 할 수 있겠다 [3-4].

그러나, 이러한 절연지와 액체질소의 복합절연방식에서는 절연지에 존재하는 미세한 결함들과 Butt-gap과 같은 void가 케이블 절연 내부에 존재하게 되며, 이러한 void들은 부분방전이 쉽게 발생하게 하는 원인이 될 수 있다[5]. 그러므로, 본 연구에서는 케이블 절연재료인 PPLP의 건조된 시료(Dry paper)의 액체질소 중에서 전기적 절연파괴 특성을 알아보았고, 이와 같은 절연방식에서 생기게 되는 문제들을 해결하기 위한 연구로써 절연지 결함 부분과 Butt-gap 사이에 얼음을 채운 복합절연층(Ice-Paper)을 만들어서 그 절연내력을 건조된 시료의 절연내력과 비교해 보았다.

2. 실험

2.1 Sample

본 실험에 사용된 PPLP는 두 장의 서로 다른 두께를 가진 Cellulose paper와 한 장의 Polypropylene film을 Thermal calendering 공정을 통해 압착하여 제작된 반합성지이다. PPLP의 기본적인 특성들은 표 1에 잘 나타나 있다.

표 1. Basic properties of the PPLP.

밀도	0.89 g/cm
인장강도	
-machine direction	7.42 kN/m
-cross direction	4.45 kN/m
Polypropylene 비율	57 %
tanδ (100℃ 진공건조)	0.055 %
두께	120.8 μm (nominal : 119 μm)

시료의 크기는 연면에 의한 방전을 막기 위하여 50 mmφ 이상의 원형으로 잘랐으며, 전극은 상부 30 mmφ, 하부 40 mmφ의 SUS 평판전극을 사용하였다. 시료는 Butt-gap이 있는 경우와 없는 경우의 두 가지 형태로 적층하여 실험하였으며, Butt-gap이 있는 경우는 인위적으로 시료의 중앙에 6 mmφ의 둥근 hole을 만들어서 upper / middle / no hole의 세 가지 형태로 적층하였다.

2.2 실험장치 및 방법

그림 1은 PPLP의 절연특성 실험을 위한 전극 구성도이다. 시료가 세팅된 전극계는 Cryostat의 상부 플랜지에 부착하여 액체질소에 침적시킨 후 절연내력을 측정하였다. 실험에 사용된 Stainless steel cryostat은 외부에 이중 진공층이 있어 액체질소의 열적인 안정성을 줄 수 있고 압력을 가할 수 있는 구조로 되어 있으며, 실험은 0~4 kgf/cm² 이내에서 이루어졌다.

실험에 사용된 시료 중 Dry paper의 경우 'NREL Standard Procedures(#001)' 수분측정법에 따라 건조기에 넣은 후 약 105 ℃에서 4시간 건조하여 절연지의 수분을 완전히 제거하였으며, Ice-Paper의 경우는 절연지를 탈이온수에 침적

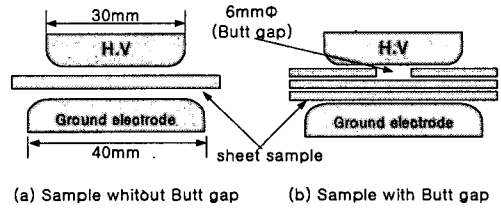


그림 1. Electrode systems.

시킨 후 진공 챔버 속에서 진공을 빼면서 절연지 내부의 미세한 결함들과 void들을 제거하고 그 속을 탈이온수로 채워질 수 있도록 하였다. Butt-gap에 대한 Ice-Paper의 영향을 보기 실험도 위와 같은 방법으로 Butt-gap 속에 충분히 탈이온수가 스며들게 한 다음 액체질소에 침적시켜 절연 파괴 실험을 하였으며 그림 1(b)의 전극계를 사용하였다. 또한, 탈이온수 이외에도 수도물(tap water)과 실리콘유(silicon oil) 등의 서로 다른 액체에 적신 후 액체질소에 침적시켜서 그 절연내력을 건조된 시료와 비교하기도 하였다.

그리고 sheet 실험을 통한 결과를 실제 케이블과 비교해 보기 위하여 전체길이 500 mm, 유효길이 100 mm, PPLP 절연두께 1 mm의 mini-model 케이블을 제작하였으며, mini-model 케이블도 탈이온수에 적신 경우와 건조시킨 경우의 절연내력을 비교하였다. 모든 실험은 액체질소에 침적하여 충분히 냉각된 상태에서 이루어졌다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 Dry paper와 탈이온수에 적셔진 Ice-Paper의 액체질소 중에서 절연파괴 전압의 압력 의존성을 나타낸다. 그림에서 (●, □)는 10회의 절연파괴 실험에 대한 평균치이고, 최대값과 최소값은 error bar로 표시하였다. 그리고 두 개의 곡선은 Ice-Paper와 Dry paper의 평균 절연파괴 전압값에 대한 추세선을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 압력은 실험장치의 한계 때문에 0~4 kgf/cm² 까지 측정하였지만, 어느 경우에서나 압력이 증가함에 따라서 절연내력은 조금씩 상승하고, 뿐만 아니라 탈이온수에 적셔진 Ice-Paper의 절연내력이 Dry paper의 경우보다 상당히 높은 것을 알 수 있다.

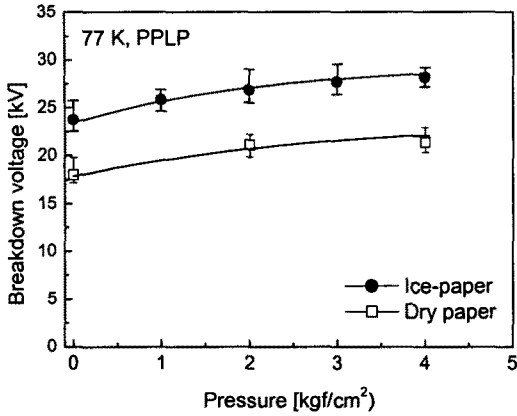


그림 2. Breakdown voltage of Ice-Paper and Dry paper by various pressure.

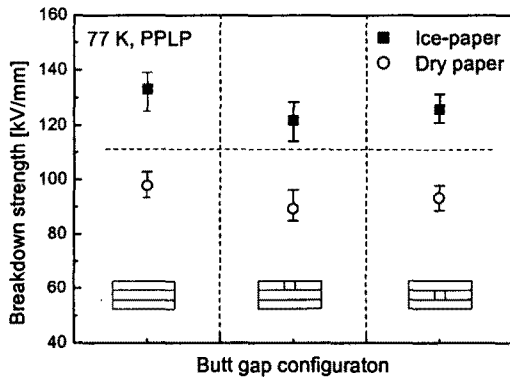


그림 3. Breakdown strength of Ice-Paper and Dry paper with Butt-gap.

그림 3은 탈이온수에 적신 Ice-Paper와 건조시킨 Dry paper를 3장씩 적층하여 upper / middle / no hole의 3가지 Butt-gap 위치에 따른 절연파괴 전계값을 나타낸다. 그림에서 (■)는 Ice-Paper를 (○)는 Dry paper를 나타내며, 절연파괴 전계값은 절연파괴 전압을 시료의 두께로 나누어 준 값을 나타낸다. 앞선 결과와 마찬가지로 Ice-Paper를 적층한 구조가 Dry paper의 경우보다 훨씬 높은 절연내력을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 Butt-gap 사이의 void가 얼음으로 채워지고 얼음의 유전율이 void의 유전율에 비해 상당히 크기 때문에 Butt-gap 내부의 전계 분담을 줄여주어 그 절연내력이 높게 나타나는 것으로 사료되며, 또한 Butt-gap 사이에 얼음이 채워짐으로 해서 부분방

전의 발생을 억제시켜 주었을 가능성도 검토 중에 있다.

그림 4는 Dry paper와 서로 다른 종류의 수돗물과 실리콘유, 탈이온수 등에 적셔진 Ice-Paper의 절연파괴 전압을 비교하여 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 어떠한 액체에 적셔진 Ice-Paper도 Dry paper의 절연내력 보다 높은 값을 보이고 있으며, 그 중에서 탈이온수에 적셔진 Ice-Paper가 다른 액체에 적셔진 경우 보다 더욱 높은 절연내력을 보이고 있다. 특히, 일반적인 수돗물의 경우 상온에서는 절연 특성을 나타내지 않지만, 액체질소 중에서는 Dry paper 보다 우수한 절연 성능을 보여 주고 있다. 이것은 극저온 전기 절연에서 발생하는 특이한 현상이라 할 수 있겠다.

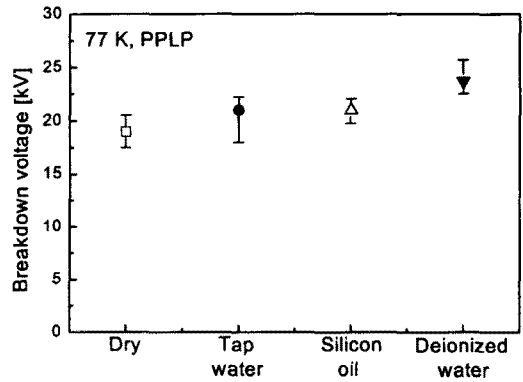


그림 4. Breakdown strength of Ice-Papers with different waters.

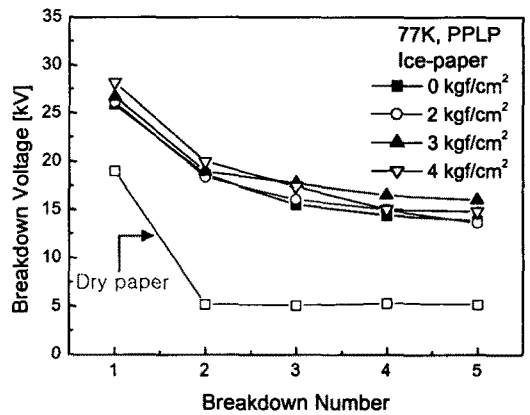


그림 5. Self-healing properties of Ice-Paper and Dry paper.

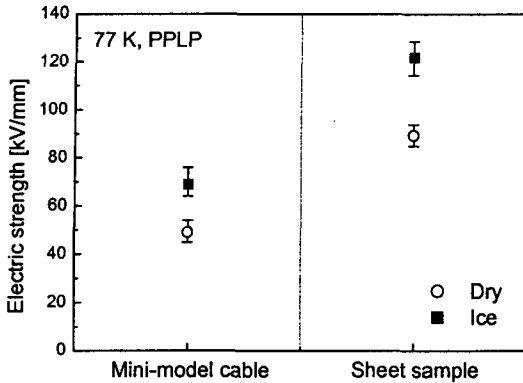


그림 6. Breakdown strength comparison of mini-model cable and sheet sample.

그림 5는 이미 절연파괴가 일어난 시료의 절연내력을 시험하여 탈이온수에 적셔진 Ice-Paper와 건조된 Dry paper의 절연내력을 비교하여 나타내었다. 두 번째부터 절연파괴값은 첫 번째 경우보다 현저히 낮아졌으며, 그 이후부터는 거의 일정한 값을 보이고 있다. 그러나 Ice-Paper의 두 번째 절연파괴 전압값을 보면 Dry paper의 첫 번째 절연파괴값과 비슷한 결과를 보이고 있으며, 이는 한번 절연파괴가 일어난 Ice-Paper의 파괴 경로가 다시 얼음으로 채워지면서 어느 정도의 절연 성능을 회복하기 때문이라고 사료된다.

그림 6은 절연지 sheet와 mini-model 케이블의 절연파괴 전계값을 비교하여 나타내었다. 그림에서 (■)는 탈이온수에 적신 경우이고 (○)는 건조시킨 것이다. 절연지 sheet의 실험 결과와 마찬가지로 mini-model 케이블도 탈이온수에 적신 경우가 건조시킨 것 보다 높은 절연내력을 보였다. 이 또한 탈이온수에 적신 후 액체질소에 침적시키게 되면 케이블의 Butt-gap 사이에 얼음으로 채워지게 되어 더욱 높은 절연내력을 보이게 된 것이라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 건조시킨 Dry paper와 탈이온수에 적신 Ice-Paper의 액체질소 중에서 AC 절연파괴 특성을 비교하였다.

절연지가 액체질소 중에 침적되었을 때 절연지 속에는 많은 미세한 void들이 존재하게 되고, 이를 얼음으로 채움으로써 해서 그 절연내력을 향상시킬

수 있었다. 특히, 일반적인 수돗물의 경우 상온에서는 전기적으로 절연성을 가지지 않지만, 액체질소 중에서는 건조된 시료보다 우수한 절연 성능을 나타내어 극저온 전기 절연에서 특이한 현상을 보여주었다. 뿐만 아니라, Ice-Paper의 경우 한번 절연파괴가 일어난 뒤에도 일반적인 Dry paper의 경우와 비교해서 우수한 절연성능을 보이고 있어, 앞으로 고온초전도 케이블의 절연 성능 향상에 기여할 수 있을 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Seog-Whan.Kim et al, "Effect of Winding Direction on 4-layer HTS Power Transmission Cable", Korea-japan joint Workshop 2002 on Applied Superconductivity and Cryogenics, pp. 35, 2002.
- [2] 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.
- [3] M.Hazeyama et al, "V-t characteristics for partial discharge inception of high temperature superconducting power cable", Physica C 372-376, pp.1551-1554, 2002.
- [4] 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.
- [5] Masayuki.NAGAO et al, "Breakdown Strength of Ice-Paper Composite Insulation in Liquid Nitrogen", Proceeding of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 21-26, 2000.