

액체질소에서 절연지 및 mini-model 케이블의 전기절연 특성

곽동순*, 김영석*, 정종만*, 김해중**, 김상현*

* 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

** 한국전기연구원 초전도 응용그룹.

The Electric Insulation Characteristics of the Insulation Paper and Mini-model Cable in Liquid Nitrogen

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

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

** Applied Superconducting Lab, Korea Electrotechnology Research Institute

shkim@nongae.gsnu.ac.kr, kds3868@empal.com

Abstract - According to the increasing power demands for the power transmission of major cities, HTS power cables which have large current capacity and low power loss will be needed.

In this paper, we have studied breakdown voltage properties of paper/liquid composite insulating system for HTS cable insulation. And we measured the dielectric loss($\tan\delta$) of mini-model cable. From results, the insulation paper-ice composite insulation system is thought to be one of good candidate for the electrical insulating system at cryogenic temperature.

1. 서 론

임계전류가 높고 기계적 특성이 개선된 고온 초전도 선재의 개발과 더불어 전력 응용기기의 개발연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 응용기기의 개발을 위해서는 절연재료의 극저온 환경에서의 절연특성 연구가 선행되어야 한다. 고온 초전도 케이블의 전기절연 설계를 하기 위하여, 액체질소 중에서의 유전특성과 절연방식을 이해하는 것은 매우 중요한 일이다. 고온초전도 케이블의 전기절연 방식은 크게 두 개의 방식으로 구성되어진다[1]. 하나는 OF-케이블과 아주 유사한 구조를 가지는 액체질소와 절연지로 구성된 복합절연방식이고, 다른 하나는 XLPE 케이블과 같은 Solid 절연방식이다[1][2]. 복합절연방식은 도체를 여러 장의 얇은 고분자 절연테이프로 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]. 이러한 이유에서 현재 고온초전도 케이블의 절연재료로써 PPLP(Polypropylene

Laminated Paper)의 사용이 가장 유력시되고 있지만, 더 나은 절연특성을 보이기 위한 개선의 노력들이 절실한 상황이다. 특히, 절연물의 유전특성에 관한 연구는 상대적으로 도체부분에서 발생하는 Joule 손실에 비해 연구 결과가 미비한 실정이다.

본 연구에서는 고온초전도 케이블의 절연물인 PPLP의 전기적 절연파괴 특성을 알아보았고, 직접 mini-model 케이블을 제작하여 PPLP의 유전손실($\tan\delta$)을 측정하였다. 또한 절연지의 절연강도를 향상시키기 위한 연구로 Ice-Paper의 절연파괴 특성을 비교해 보았다[4].

2. 본 론

2.1 실험장치 및 방법

실험에 사용된 PPLP는 두 장의 서로 다른 두께를 가진 cellulose paper와 polypropylene film으로 구성되어 있으며, Thermal calendering 공정을 통하여 제작된 반합성지이다. 또한 밀도 0.89 g/cm³, 두께 0.119 mm, pp ratio 57 %, 인장강도 7.42 kN/m(MD) / 4.45 kN/m(CD)이며, alkylbenzene oil에 함침한 AC 파괴강도는 98 kV/mm(평균전극지름 50mm)의 기본적인 특성들을 가진다. 특히 polypropylene 비율이 높으면 $\epsilon \times \tan\delta$ 가 감소하지만, 합성지의 전기적 절연특성과 극저온에서의 고온초전도 케이블의 성형 등의 문제를 고려했을 때, 57 %의 polypropylene 비율이 최적의 값이라고 할 수 있겠다[5].

Fig. 1 은 절연지 sheet의 절연파괴 특성을 보기 위한 전극계의 구성도이다. 시료의 크기는 연면에 의한 방전을 막기 위하여 $\Psi 50$ mm 이상으로 하였으며, 전극은 $\Psi 30$ mm와 $\Psi 40$ mm의 SUS 전극을 사용하였다. 시료는 Bap gap이 있는 경우와 없는 경우의 두 가지 형태로 적층하여 실험하였으며, Butt gap이 있는 경우는 인위적으로 시료의 중앙에 6 mm의 hole을 만들어서 upper / middle / no hole의 세 가지 형태

로 적층하였다.

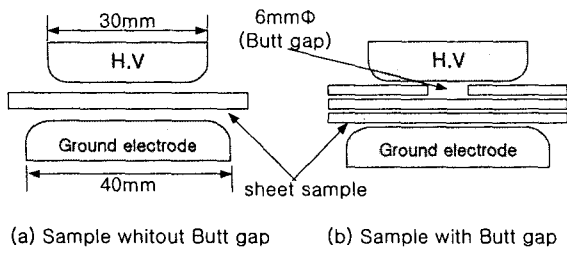


Fig. 1. The sheet sample form and the electrode system.

PPLP의 온도에 따른 절연파괴 특성을 알아보기 위해서 한 장의 시료를 액체질소 온도인 77K에서부터 실리콘유를 가열하면서 440K에 이르기까지의 그 절연파괴 전압의 변화를 기록하였다.

또한 PPLP의 절연성능 향상연구로써 시료를 수돗물(tap water), 실리콘유(silicon oil), 탈이온수(deionized water) 등에 적신 후 액체질소에 침적시켜서 그 절연내력을 비교했으며, Butt gap에 대한 영향을 보기 위해서 Fig. 1(b)에 세팅된 시료를 탈이온수가 채워진 진공 chamber 속에 넣고 진공을 뽑아내어 Butt gap 속에 충분히 탈이온수가 스며들게 한 상태에서 액체질소에 침적시켜 절연파괴 실험을 하였다.

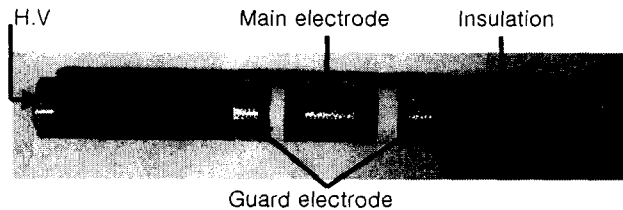


Fig. 2. The mini-model cable for the $\tan\delta$ measurement.

Fig. 2는 PPLP의 유전손실($\tan\delta$)을 측정하기 위하여 제작한 mini-model 케이블이다. mini-model 케이블은 SUS tape가 감긴 알루미늄 former 위에 반도체성 carbon paper를 2매(두께: 0.135mm×2매) 감은 후, PPLP를 1mm 두께로 절연하였다. 차폐층은 $\tan\delta$ 측정을 위해 일반적인 3단자법 전극계로 해서 주전극, guard전극 및 배후고전압전극 형태로 제작하였다. 먼저, 주전극으로는 carbon paper를 한 장 감고 구리 테이프를 고정하였으며, 주전극 위에 teflon tape로 절연한 후 carbon paper로 guard 전극을 만들어 주었다. 전극의 제작시, 주 전극과 guard 전극간의 거리는 통상 2~3mm 정도로 하였다. 절연재료로써는 PPLP와의 비교를 위하여 Kraft paper와 Tyvek을 동

일 형태로 mini-model 케이블을 제작하여 그 유전손실 값을 비교하였다. 제작된 시료는 실험에 들어가기 앞서 'NREL Standard Procedures(#001)'의 수분측정법에 따라 건조기에 넣은 후 약 105°C에서 4시간 건조하여 절연지의 수분을 완전히 제거하였으며, 실험은 케이블을 액체질소에 1시간 이상 침적하여 충분히 냉각시킨 후 이루어졌다. $\tan\delta$ 측정 장비로는 Schering Bridge(Type2801, TETTEX AG사)를 사용하였다.

2.2 결과 및 고찰

Fig. 3은 PPLP의 온도 변화에 따른 절연파괴 전압값을 보여준다. 액체질소 온도인 77K에서 약 400K까지는 거의 일정한 값을 유지하였으며, 그보다 높은 온도에서는 점점 절연내력이 급격히 감소하여 400K 이상의 온도에서는 고온에 의한 외형상의 변화를 보였다. 그러나 비교적 다른 절연지와 비교해 볼 때 고온과 극저온에서 아주 우수한 특성을 보여 주었다.

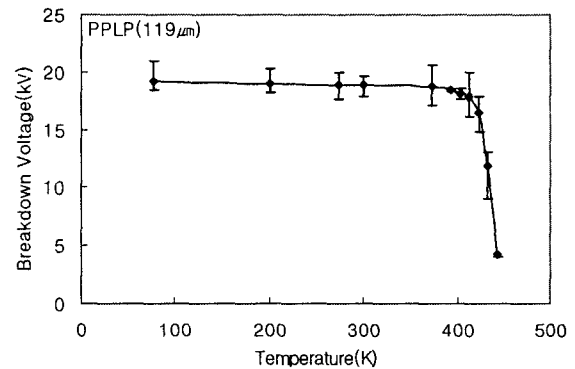


Fig. 3. AC breakdown characteristics according to the temperature of PPLP.

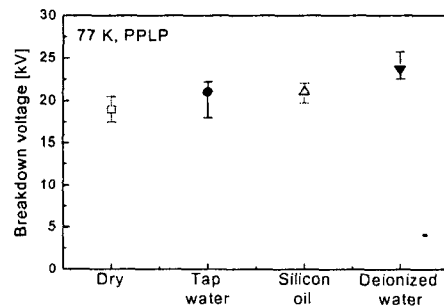


Fig. 4. Electric breakdown of frozen paper with different waters.

Fig. 4는 ice-paper 복합절연 시스템의 서로 다른 액체에 따른 절연파괴 전압값을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 어떠한 액체에 적셔진 것도 건조된 절연지의 파괴전압보다 높은 값을 보임을 알 수 있다. 특히 탈이온수에 적셔진 ice-paper가 가장 높은 절연파괴 전압값을

나타내었다.

Fig. 5는 탈이온수에 적신 ice-paper 복합절연시스템과 건조된 절연체의 절연파괴 전계값을 Butt gap의 위치에 따라 비교하였다. 그림에서 $\blacktriangle, \blacksquare, \bullet$ 는 ice-paper를 $\triangle, \square, \circ$ 는 Dry paper를 나타낸다. 앞선 결과와 마찬가지로 ice-paper 복합절연시스템이 훨씬 높은 절연 특성을 나타냈으며, 이는 Butt gap 사이의 void가 얼음으로 채워지면서 부분방전의 발생을 억제시켜 주었기 때문이라고 사료된다.

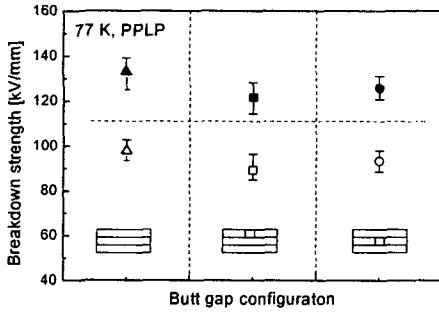


Fig. 5. Breakdown strength of ice-paper composite insulation system with Butt gap.

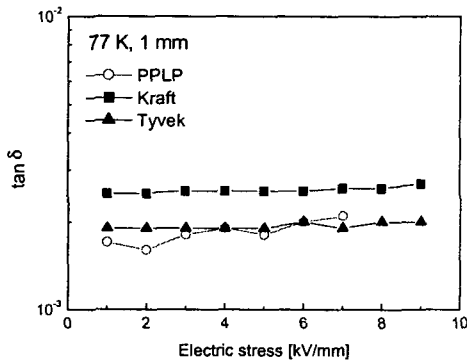


Fig. 6. $\tan\delta$ according to the electrical stress.

Fig. 6은 액체질소 중에서 PPLP, Kraft, 및 Tyvek으로 절연된 mini-model 케이블의 인가 전계에 따른 $\tan\delta$ 의 특성을 나타낸다. 본 실험에서는 PPLP 절연물을 중점으로 유전특성을 조사하였지만, Kraft paper 및 Tyvek 등으로 절연한 mini-model 케이블도 비교하여 검토하였다. 비교 결과를 보면 어떤 시료의 경우에서도 전계가 상승함에 따라 $\tan\delta$ 값은 약간씩 증가하고 있으며, $\tan\delta$ 값은 PPLP, Tyvek, Kraft의 순서로 작은 것을 알 수 있다.

모든 고전압 케이블은 고전압에서 장시간 운전되기 때문에, 이것을 모의한 Fig. 7은 mini-model 케이블의 전계 인가시간에 따른 $\tan\delta$ 의 특성을 나타내었다. 2 kV/mm로 인가된 전계

를 일정하게 유지하면서, 공기중과 액체질소에서 $\tan\delta$ 값을 비교 검토하였다. 결과값에서 알 수 있듯이 액체질소에 침적된 경우는 전계 인가 시간에 따른 $\tan\delta$ 값이 거의 일정하게 나타나지만, 공기중의 경우에는 인가시간이 증가함에 따라 급격하게 $\tan\delta$ 값이 급격하게 상승하고 있다. 이것은 공기중에서 전계 인가시간에 따른 부분방전의 증가와 함께 공간전하에 의한 도전율의 증가 등에 의한 원인으로 $\tan\delta$ 값이 상승하게 되는 것으로 사료된다.

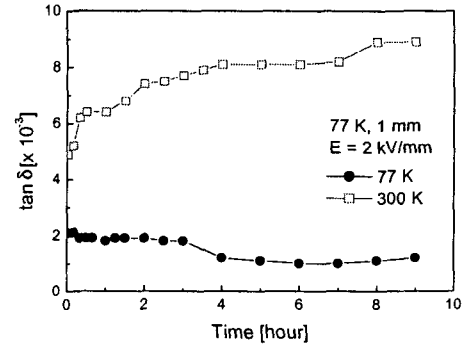


Fig. 7. The characteristics of $\tan\delta$ as applied time of electric stress.

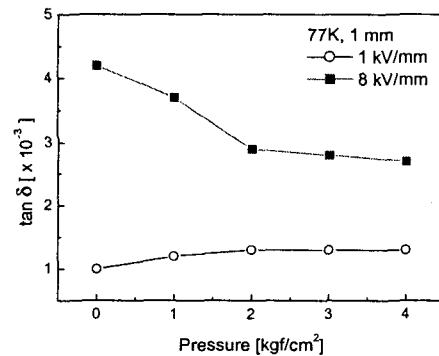


Fig. 8. The characteristics of $\tan\delta$ as pressure.

Fig. 8은 mini-model 케이블을 액체질소에 침적한 상태에서 압력을 가하면서 $\tan\delta$ 값의 변화를 측정한 결과이다. 저전계 영역인 1kV/mm의 경우에는 압력이 증가함에 따라 $\tan\delta$ 값은 $1.1 \times 10^{-3} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ 정도로 큰 변화는 나타나지 않았다. 하지만, 고전계 영역인 8kV/mm의 경우, 압력의 증가에 따라 $\tan\delta$ 값은 4.2×10^{-3} 에서 2.7×10^{-3} 정도로 낮아지는 경향을 보였다. 이것은 압력의 증가에 따라 Butt.gap에서의 void가 액체질소로 채워지게 되고 이에 따라 부분방전이 억제되어 $\tan\delta$ 값이 낮아지는 것으로 사료된다. 이와 같은 결과를 미루어 볼 때 고온초전도 케이블은 일정한 압력

이 가해진 상태에서 운용되어야만 더욱 절연성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 고온초전도 케이블의 절연설계를 위하여 PPLP sheet 절연물의 AC 절연파괴 특성과 mini-model 케이블을 제작하여 PPLP의 유전 특성을 조사하였다. 실험을 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) PPLP는 극저온에서만뿐만 아니라 400K 정도의 고온에서도 그 절연내력을 유지할 만큼 아주 뛰어난 온도특성을 보여주었다.

2) ice-paper 복합절연 시스템의 경우, 건조된 절연지의 액체질소 중에서의 절연파괴 전압보다 훨씬 높은 값을 보여주었으며, 탈이온수에 의한 ice-paper가 가장 높은 값을 보였다. Butt gap이 있는 경우에는 절연지 사이의 Butt gap이 얼음으로 채워지면서 부분방전을 억제시켜주는 역할을 해 주어서 보다 높은 절연내력을 보여주었다.

3) mini-model 케이블로 제작된 PPLP의 $\tan\delta$ 값은 1.16×10^{-3} 정도로 측정되었으며, 전계가 상승함에 따라 부분방전의 원인으로 $\tan\delta$ 값은 점점 증가하였다.

4) 압력을 가해줌으로써 저전계의 경우 $\tan\delta$ 값의 변화는 거의 나타나지 않았지만, 고전계의 경우에는 압력이 증가함에 따라 부분방전이 억제되면서 $\tan\delta$ 값은 낮아지는 경향을 나타냈다.

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

(참 고 문 헌)

- [1] T.Shibata, et al, "Development of High Temperature Superconducting Power Cable Prototype System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, pp182-187, January 1999.
- [2] K.Miyoshi, et al, "Design and Production of High-Tc Superconducting power Transmission Cable", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp.2363-2366, March 2001.
- [3] 한국전력공사, "超傳導케이블 및 送電시스템 開發研究(1次年度中間報告書)", KEPRI-93S-J03, pp.45-113, 1995
- [4] M.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, Xi'an, China, pp.67-70, June 2000.
- [5] 안드레프, et al, "액체질소에서의 반합성지 AC 파괴 강도에 미치는 부분 방전의 영향", 한국 초전도·저온공학회논문지, Vol. 1, No. 4, May 2002. 되면서 $\tan\delta$ 값은 낮아지는 경향을 나타냈다.