

고온초전도 케이블의 유전 특성

Dielectric Characteristics of HTS Cable

곽동순*, 김해종**, 조전욱**, 성기철**, 김상현*

(Dong-Soon Kwag*, Hae-Jong Kim**, Jeon-Wook Cho**, Ki-Chul Seong**, Sang-Hyun Kim*)

Abstract

According to the increasing power demand for the future construction of many underground cables will be required. However, construction of new ducts for power cables will be more difficult. Therefore, research work for realizing the high temperature superconducting(HTS) cable has advanced, where the development of electrical insulating system at cryogenic temperature is one of the major researches. For an electrical insulation design of HTS cable, it is important to understand not only breakdown but also partial discharge and dielectric loss($\tan \delta$) in liquid nitrogen/paper composite insulation system.

In this paper, we investigated breakdown characteristics in liquid nitrogen/paper composite insulation system for the application to HTS cable. And, we studied the breakdown characteristics of the multi-layer and butt gap of the insulation papers in liquid nitrogen. Also, we measured dielectric loss($\tan \delta$) of the mini-model Cable made of TERLAM IPP.

Key Words : composite insulation system, Breakdown test, TERLAM IPP, dielectric loss

1. 서 론

세계의 전력수요는 지속적인 경제성장에 따라 계속 증가할 것으로 예상되고 있으며, 특히 도심에 서의 도시기능의 고도화에 따라 전력 수요가 대량 집중되는 현상이 발생하고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 방법으로 고온초전도 현상이 발견된 이래 가장 이상적인 지중 송전방식으로서, 송전 에너지의 손실이 현저하게 적고 송전에너지 밀도가 비약적으로 큰 고온초전도 전력케이블의 개발이 절실히 요구되고 있으며[1], 액체질소를 냉매로 한 고온초전도 케이블의 개발은 계속 진행되어 오고있다[1][3][4]. 그러나 고온초전도 케이블의 개발에 가장 중요한 문제로 극저온에서의 전기적 절연

이 대두되고 있는 실정이며, 이를 위하여 얇은 고분자 절연테이프를 여러 장 적층하여 냉각 시 열수축의 완화와 우수한 구조상의 장점을 가지고 있는 반합성지와 액체질소의 복합절연방식의 채택이 일반화 되어왔다[2]. 또한 이 절연방식은 기존의 QF케이블의 절연기술을 응용할 수 있기 때문에 현재 기술상으로 적용 가능성이 가장 높은 절연방식이라 할 수 있겠다[4].

본 연구에서는 모델케이블 제작을 위한 사전준비와 고온초전도 케이블 제작에 필요한 기초데이터를 확보하기 위하여 5종류의 고분자 절연재료들을 채택하여 극저온에서의 전기적 절연파괴 특성을 비교하였다. 이 결과에 따라 고온초전도 케이블용 전기절연재료로 사용될 가능성이 가장 높은 Polypropylene 과 Kraft paper의 반합성지인 TERLAM IPP를 대상으로 극저온에서의 전기적 절연파괴 특성 실험을 하였고, TERLAM IPP를 1mm 두께로 절연한 Mini-model 케이블의 유전손실($\tan \delta$)을 측정하였다.

* : 경상대학교 전기공학과
(공학연구원 자동화 컴퓨터 연구센터)
(진주시 가좌동 660-701,
Fax: 055-759-2723
E-mail : kds3868@empal.com)
** : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

2. 실험

2.1 시료의 형태

본 실험에서는 고온초전도 케이블의 절연을 위한 고분자 절연재료들의 극저온에서 전기적 절연특성을 비교하기 위하여 5종류의 시료를 채택하였으며, 각각의 두께는 Kapton 0.125mm, TERLAM IPP 0.119mm, PPLP 0.16mm, Nomex 0.07mm, Kraft 0.15mm 의 재료를 사용하였다.

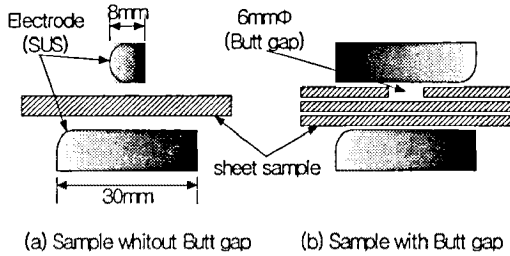
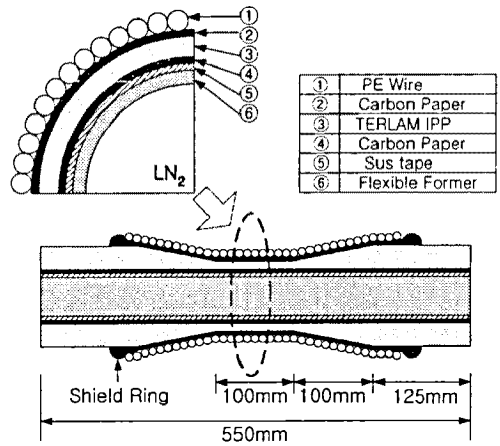


그림 1. 절연지 시료의 형태.

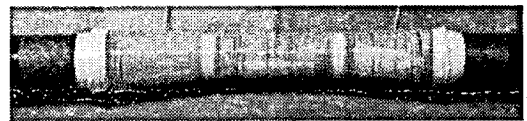
Fig. 1. Sheet Sample Form.

그림 1은 고온초전도 케이블용 전기절연재료들의 실험용 sheet의 전극계 형상이다. 각 절연재료들의 절연파괴 전압을 측정하기 위하여 시료의 크기는 지름 45mm로 하였으며, Butt gap이 있는 경우와 없는 경우의 두 가지 형태로 적층하여 실험을 하였다. 그리고 Butt gap의 경우 인위적으로 시료의 중앙에 6mm의 hole을 만들어서 upper hole 형태로 적층하여 실험하였다. 실험에 사용된 전극계는 지름 8mm의 구전극과 $\phi 30$ mm의 평판전극을 사용하였으며, 전극의 재료로 SUS를 사용하였다.

그림 2는 본 연구에서 개발하고자 하는 고온초전도 케이블에 적용할 수 있는 절연데이터를 확보하기 위하여 TERLAM IPP로 절연한 Mini-model 케이블의 구조도 및 사진이다. 반경 12.75mm의 Flexible former 위에 두께 0.15mm의 SUS 테이프를 감은 다음 내부반도전층으로 두께 0.13mm의 Carbon paper를 2회 감아서 내도체부를 만들었고, 그 위에 TERLAM IPP로 1mm 절연하였다. 외부반도전층으로 0.13mm Carbon paper를 2회 감았으며, 구리 테이프를 차폐층을 만들고, 그 위를 PE wire를 감아서 절연부와 도체부가 서로 밀착될 수 있도록 하였다.



(a) Schematic diagram



(b) Picture

그림 2. Mini-model 케이블의 구조도 및 사진.

Fig. 2. Schematic diagram and picture of Mini-model Cable.

케이블의 실험을 위한 유효길이는 100mm이며, 종단부를 합쳐서 전체길이 550mm로 제작되었다. 그리고 케이블의 종단부에는 $\tan \delta$ 측정 시 연면 방전에 의한 영향을 없애기 위하여 guard ring을 두어 3단자 전극 구조로 구성하였다[5]. 또한, Mini-model 케이블 제작 시 사용된 TERLAM IPP는 110°C 내외에서 수분함량 0.1% 이하로 건조하여 8회 감았다.

2.2 실험장치 및 방법

그림 3은 sheet상의 시료를 장착하여 압력을 가하면서 절연파괴가 일어나는 전압을 측정하는 실험 개략도를 나타낸다. 실험에 사용된 용기는 외부에 이중 진공층이 있어 액체질소의 열적인 안정을 줄 수 있는 구조이고 압력을 가할 수 있는 Stainless steel Cryostat을 사용하였다. 내조에는 극저온 실험을 위한 액체질소를 담아서 전극계를 구성할 수 있는 내경 10cm의 공간이 있다. 그리고 외부의 이중 진공층에는 진공 gauge가 부착되어 있으며, 내조에는 압력을 측정할 수 있는 압력 gauge가 부착되어 있다. 본 실험은 0~4 kgf/cm² 압력에서 행하여졌다. Cryostat에 침적된 sheet상의 시료에는 압력을 변화시키면서 AC 60 Hz의 전원을 1 kV/sec의 속도로 상승시키면서 그때의 절연파괴 전압을 기록하였다. 고전압 인가장비로는 90 kV / 300 VA 용량의 BAUR DTS AC 전원장

비를 사용하였다.

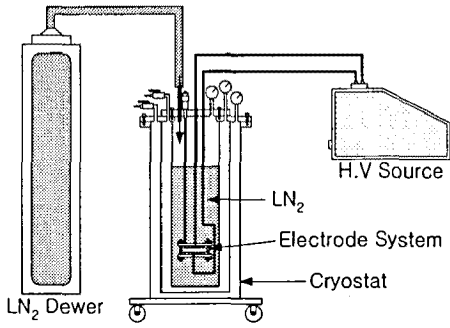


그림 3. 절연파괴용 실험장치의 개략도.
Fig. 3. Schematic of breakdown experimental apparatus.

Mini-model 케이블의 $\tan \delta$ 측정을 위하여 Schering Bridge Type 2801 장비를 사용하였으며, 측정 시 Mini-model 케이블은 대기압하에서 액체 질소에 장시간 침적한 후 충분히 냉각된 상태에서 전압을 1kV 단위로 상승시키면서 그때의 $\tan \delta$ 값을 기록하였다. 고전압 인가장비로는 60Hz, 50 kV / 5 kVA 용량의 Insulation Testing Equipment를 사용하였으며, 정전용량이 100pF이고 정확도 $\pm 0.1\%$ 내외의 Type 3380/100/100 Compressed Gas Capacitor를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 각 절연재료의 압력에 따른 절연파괴 특성

그림 4는 고분자 절연재료의 극저온에서 압력에 따른, 절연파괴 전계값을 나타내고 있다. 그림 4에서 보면 모든 절연재료들이 압력이 높아짐으로 해서 절연파괴 전계값이 조금씩 상승하고 있음을 알 수 있다. 시료의 절연파괴 된 흔적을 보면 압력이 증가하면서 고전압측에서 발생하는 부분방전의 흔적이 현저히 줄어들었으며, 이는 절연파괴가 일어나기 전에 발생하는 부분방전이 모든 절연재료의 수명이나 전기적 절연특성에 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

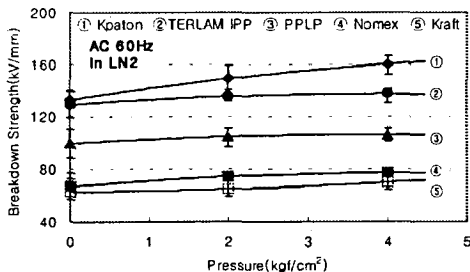


그림 4. 절연지 sheet의 절연파괴 전계.
Fig. 4. Breakdown Strength of Insulation Paper.

본 실험에서 알 수 있듯이 각 절연재료의 절연 내력을 비교해 보면 Kapton이 가장 높고 그 다음이 TERLAM IPP, 그리고 PPLP, Nomex, Kraft 등의 순이다. 그러나 실제 극저온에서 케이블 성형 등의 문제를 고려해 볼 때, 고온초전도 케이블의 절연재료로서는 TERLAM IPP가 Kapton 보다 더욱 우수할 것으로 사료된다. 한편, 본 실험은 절연지 1장에 대한 결과이므로 실제로 고온초전도 케이블에 적용되기 위해서는 얇은 절연지를 적층하여 절연하는 복합절연방식의 연구가 필요할 것이다.

3.2 TERLAM IPP의 전기적 절연특성

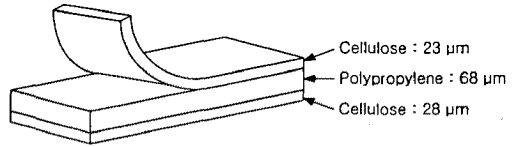


그림 5. TERLAM IPP의 구조.
Fig. 2. Construction of the TERLAM IPP.

현재 본 연구에서 개발중인 22.9kV급 고온초전도 케이블의 절연재료로서 사용이 유력시 되고있는 TERLAM IPP의 구조를 살펴보면 그림 5와 같다. TERLAM IPP는 두 장의 서로 다른 두께를 가진 cellulose paper와 polypropylene film으로 구성되어 있으며, Thermal calendering 공정을 통하여 제작된 합성지이다. TERLAM IPP는 밀도 0.89 g/cm³, pp ratio 57 %, 인장강도 7.42 kN/m(MD) / 4.45 kN/m(CD)이며, AC 파괴강도는 98kV/mm (평균전극지름 50mm, alkylbenzene oil 함침)의 기본적인 특성을 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[2].

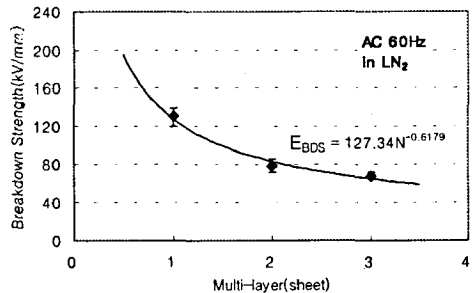


그림 6. 적층 시 절연파괴 전계.
Fig. 6. Breakdown Strength of Multi-layers.

그림 6은 TERLAM IPP의 적층에 따른 AC 절연파괴전계 값을 나타낸다. 이미 알려진 바와 같이 두께에 따른 절연내력이 선형적이기보다는 포화하는 경향을 보이고 있으며, 적층되는 횟수가 증가함에 따라 절연파괴 전계값은 식(1)과 같이 줄어든다.

$$E_{BDS} = 127.34 N^{-0.6179} [kV/mm] \quad (1)$$

그림 7은 3장의 TERLAM IPP를 적층한 후 상부 한 장의 시료에 인위적으로 직경 6mm의 hole을 만들어서 압력에 따른 절연파괴전계값을 나타내었으며, 본 실험은 케이블 절연지 wrapping 시 생기는 Butt gap의 영향을 보기 위한 실험이다. 그래프에서 압력을 증가시킬수록 절연파괴 전계값이 점점 높게 나타남을 알 수 있다. 압력이 가해지지 않은 0 kg/cm² 상태에서는 Butt gap에 액체질소의 침투가 일어나지 않아 보이드(Void)가 존재하고 있을 가능성 등의 원인으로 그 절연파괴 전계값은 현저히 낮게 나타났으며, 압력을 가했을 경우에는 서서히 Butt gap에 액체질소의 침투가 이루어짐으로 해서 절연지와 액체질소와의 복합절연층이 형성되어 그 절연파괴 전계값이 높아지는 것으로 사료된다. 실험 결과값에 의하면 거의 2~3 kg/cm²의 압력에서 포화됨을 알 수 있다.

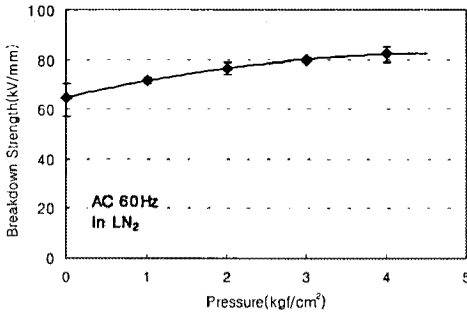


그림 7. Butt gap의 압력에 따른 절연파괴전계.
Fig. 7. Breakdown Strength of Pressure on Butt gap.

3.3 Mini-model 케이블의 tan δ 특성

그림 8은 TERLAM IPP로 절연두께 1mm로 절연한 Mini-model 케이블의 액체질소 중에서 유전손실인자(tan δ)와 인가한 전계강도 사이의 관계를 나타내고 있다.

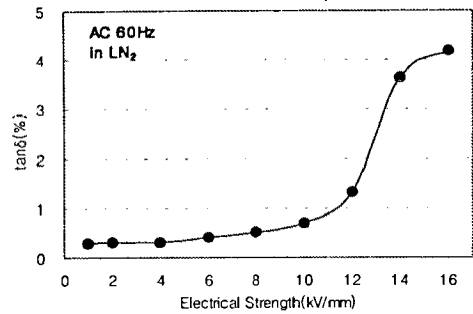


그림 8. Mini-model 케이블의 tan δ.

Fig. 8. tan δ of Mini-model Cable.

측정된 tan δ의 결과값을 보면 약 8 kV/mm 이하에서는 tan δ 값이 0.3~0.5 % 사이로 유지되다가 약 10 kV/mm 정도에서부터 급격히 상승하였다. 이는 전계강도의 증가에 따라 Butt gap 내에서의 액체질소의 부분방전 결과에 기인하는 것으로 사료되며, 이에 따른 발열은 냉동기 효율상의 문제를 야기할 뿐만 아니라 케이블 수명에도 상당한 영향을 줄 것으로 사료된다[4].

4. 결론

고온초전도 케이블의 절연설계를 위하여 각종 절연재료들의 절연파괴특성을 비교 분석하였고, 고온초전도 케이블의 절연재료로 사용이 가장 유력 시되고 있는 TERLAM IPP의 적층 및 Butt gap에서의 절연특성을 연구하였다. 그리고 Mini-model 케이블의 tan δ를 측정하였다.

액체질소 중에서의 각종 절연지 sheet의 절연파괴전계값을 비교한 결과, 극저온에서의 절연내력과 케이블 성형 등의 문제를 고려해 볼 때 polypropylene 합성지인 TERLAM IPP가 고온초전도 케이블의 절연재료로서 가장 적합할 것으로 판단된다.

TERLAM IPP 시료를 1~3장까지 적층하여 액체질소 중에서의 AC 절연파괴전압을 측정된 결과 적층되는 횟수가 증가함에 따라 그 절연파괴전계값($E_{BDS} = 127.34 N^{-0.6179} [kV/mm]$)은 현저히 줄어들었다.

복합절연방식으로 고온초전도 케이블의 절연을 할 때 생기는 Butt gap의 특성실험에서는 압력을 증가시킴으로 해서 부분방전의 흔적이 현저히 줄어들었고 Butt gap 내부에 존재하던 void가 액체질소로 채워지면서 그 절연내력도 증가하였다.

Mini-model 케이블을 액체질소에 함침 시켰을 경우 이의 유전손실 인자(tan δ)는 전계강도의 증가와 함께 점점 증가하는 값을 보여주었다. 이는 전계강도의 증가에 따라 Butt gap 내에서의 액체질소의 부분방전 결과에 기인하는 것으로 사료된다

다[5]. 실제 극저온 케이블에 있어서는 케이블 자체가 액체질소 중에 함침 될 뿐만 아니라 고전압이 인가된 상태에서 운전되고 있기 때문에 이러한 상황에서 유전특성의 연구는 대단히 중요할 것으로 생각되며, 이에 대한 연구가 더욱 필요할 것이다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] T.Shibata, et. al, "Development of High Temperature Superconducting Power Cable Prototype System" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January 1999.
- [2] 안드레프, 김수연, 이인호, 김도운, 신두성, 김상현, "액체질소에서의 반합성지 AC 파괴 강도에 미치는 부분 방전의 영향", 한국초전도·저온공학회 논문지, Vol. 1, No. 4, May 2002
- [3] Hiroshi Suzuki, et. al "Dielectric Insulation Characteristics of Liquid-Nitrogen-Impregnated Laminated Paper-Insulated Cable", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, October 1992.
- [4] 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, pp45-113, 1995
- [5] 과학기술처, "극저온 저항 케이블 개발연구", pp72-78, 1989