

Mini-model 초전도 케이블의 유전손실 특성

The Dielectric loss Properties of Mini-model Superconducting Cable

김영석^{*}, 광동순^{*}, 한철수^{*}, 김해종^{***}, 김동욱^{***}, 김상현^{*}

(Young-Seok Kim^{*}, Dong-Soon Kwag^{*}, Chul-Su Han^{*}, Hae-Jong Kim^{***},
Dong-Uk Kim^{***}, and Sang-Hyun Kim^{*})

Abstract

A high-Tc superconducting cable(HTS cable) is expected as an underground power line supplying the electrical power the densely populated city in future. The electrical insulation is very important for develop HTS cable system because it is operated a high voltage and in cryogenic temperature. We manufactured a mini-model cable and measured a $\tan\delta$ of cable using schering bridge. The $\tan\delta$ of PPLP was lower than that of Tyvek and Kraft at a given temperature, the $\tan\delta$ of PPLP was 1.16×10^{-3} . According to the increase of electric stress the $\tan\delta$ increased because partial discharge occurred inside butt gap of mini-model cable. However, the $\tan\delta$ decreased by increase of liquid nitrogen pressure. This reason is thought by decrease of part discharge between butt gap by increase of liquid nitrogen pressure.

Key Words : HTS cable, Dielectric loss, PPLP

1. 서 론

미래 대도시의 전력수송은 기존 전력 케이블의 증설보다는 지전압에서 대전류 통전이 가능하고 소형화 된 고온 초전도 케이블이 유력한 대안으로 떠오르고 있으며, 각국에서 케이블의 실용화를 향해 연구 개발 중이다. 특히, 미국, 일본에서는 수십 m의 모델 케이블을 제작하여 시험운전하고 있으며, 우리 나라에서도 21세기 프론티어 사업의 일환으로 22.9kV 배전급 고온 초전도 케이블을 개발 중에 있다[1-5]. 고온 초전도 케이블의 시스템은 도체부, 절연부 그리고 액체 질소의 냉각부로 구성되어 있으며, 높은 전류용량화, 냉각시스템 구축

뿐만 아니라, 극저온에서 케이블을 구성하는 전기 절연 특성에 관한 데이터의 확보도 필수적이라 할 수 있다.

일반적으로 고온 초전도 케이블에 대한 절연구성은 액체질소와 적층 테이프의 복합절연계가 유력하다[6,7]. 적층 테이프로는 전기절연 내력 특성과 가공성이 우수한 반 합성의 PPLP(Poly Propylene Laminated Paper) 절연지가 널리 사용되어지고 있다. 따라서 고온 초전도 케이블을 상정한 PPLP 절연지의 절연과괴 현상, 부분방전 개시 특성, 유전특성에 관한 연구가 절연설계상 중요하다. 특히, 절연물의 유전특성에 관한 연구는 상대적으로 도체부분에서 발생하는 Joule 손실에 비해 연구 결과가 미비한 실정이다[8].

지금까지 유전손실($\tan\delta$)에 관한 것은 고분자 필름, 절연지 등을 예폭시 물당한 sheet상에 대해 저전계 영역에서 연구되어 왔으며, 배후 고전압 전극, 주(main) 전극 및 가드(guard) 전극으로 구성된 3단자 법으로 $\tan\delta$ 를 측정하였다[9]. 또한 기존 전극계의 $\tan\delta$ 측정시 예폭시 물당에 의해 순수한

* : 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원
(경남 진주시 가좌동 900번지,
Fax: 055-759-2723

Corresponding Author : shkim@nongae.gsnu.ac.kr)

** : 한국전기연구원 초전도 응용그룹

*** : LG 전선 전력연구소

2003년 1월 9일 접수, 2003년 5월 27일 1차 심사완료,
2003년 6월16일 2차 심사완료, 2003년 7월 3일 최종 심사완료

고분자 필름의 측정이 문제시되었으며, 이를 보완한 새로운 전극계가 제안되었다[10]. 또한 유한요소법을 이용하여 두 전극계에 대한 전기력선의 분포를 해석하고 주 전극에서의 전기력선 분포가 $\tan\delta$ 측정에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 따라서, 고온 초전도 케이블의 실용화를 위해서는 비교적 고 전계상태와 절연지가 적층된 버트 갭(butt gap) 형태로 절연 설계된 케이블의 유전특성에 관한 연구가 불가피하다. 또한 필자는 이미 보고한 논문에서 고온 초전도 케이블의 버트 갭 절연설계에 관한 절연과피 특성을 조사하였으며, 버트 갭 사이의 공간에 발생하기 쉬운 부분방전의 영향에 대해 보고하였다[11]. 이에 교류 고전계하에서 $\tan\delta$ 측정시, 버트 갭 사이의 공간의 부분방전과 유전손실과의 관계도 검토할 필요가 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 고온 초전도 케이블을 모의한 mini-model 케이블을 제작하였으며, 케이블의 운전상에서 나타날 수 있는 여러 조건하에서 mini-model 케이블의 유전 손실 특성에 관해 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

유전손실의 측정을 위한 전극계 및 PPLP로 제작된 mini-model 케이블을 그림 1에 나타낸다. 케이블의 제작은 순차적으로 스테인레스 포머 상에 반 도전층인 카본지(carbon paper, 두께 0.27mm)를 2 겹으로 감은 후, PPLP(두께 0.12mm) 절연지를 감아서 두께 0.24mm, 0.48, 1mm의 케이블로 제작

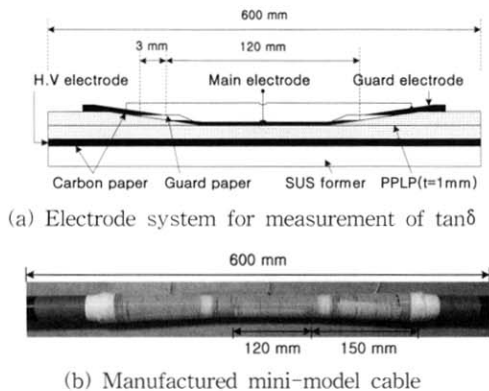


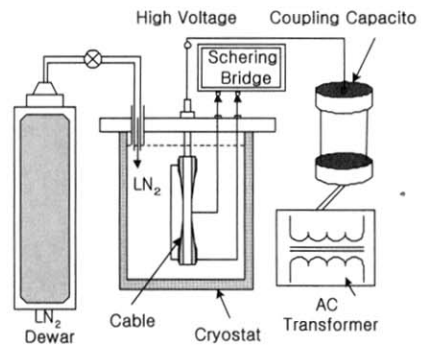
그림 1. 유전손실 측정 전극계 및 mini-model 케이블.

Fig. 1. The electrode system for measurement of $\tan\delta$ and mini-model cable.

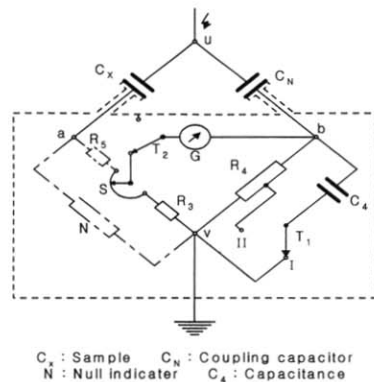
하였다. 사용된 PPLP는 밀도 0.89g/cm³의 핀란드에서 제조된 것이며, PPLP와의 비교를 위해 같은 방법으로 크라프트지(Kraft지) 및 타이벡(Tyvek)으로 1mm 케이블을 제작하였다. $\tan\delta$ 측정을 위해 일반적인 3단자법 전극계로 해서 주(main) 전극, 가드(guard) 전극 및 배후 고전압전극 형태로 하였으며, 제안된 새로운 전극계 형태로 제작하였다.

먼저, 주 전극으로는 카본지를 한 장 감고 구리 테이프로 고정하였으며, 주 전극 위에 가드 PPLP를 1회 감은 후 가드 전극으로 카본지로 1회 감고 구리 테이프로 고정하였다. 전극의 제작 시, 주 전극과 guard 전극간의 거리는 통상 2~3mm 정도로 하였다. 제작된 시료는 건조기에 약 100°C에서 6시간 건조하여 PPLP의 수분을 완전히 제거하였다.

그림 2에 mini-model 케이블의 $\tan\delta$ 측정을 위한 실험장치 및 셰링 브리지의 회로도를 나타낸다.



(a) Experimental apparatus



(b) A circuit of schering bridge

그림 2. 실험장치 및 $\tan\delta$ 측정 개략도.

Fig. 2. The experimental apparatus and measurement schematic of $\tan\delta$.

실험은 a)와 같이 시료를 극저온 용기 내에 넣은 후, 액체 질소를 공급하였으며 1시간 정도 충분히 냉각한 후 측정하였다. 측정 장비로는 고전압 변압기(JEC2201,Tokyo trans사), 셰링 브리지(schering bridge,type 2801,TETTEX AG사)를 사용하였다.

먼저, 셰링브리지의 회로도의 C_x 에 시료를 설치하고 전압을 인가하였으며, 회로를 평형 조정하면 표준 정전용량기와 시료에 인가되는 전압이 같아지고 Null Indicator(N)는 영점으로 맞춰진다. 따라서 $G=0$, 즉 평형조정이 완료되면 측정회로도의 C4에서 구한 정전 용량 값을 다음 식에 대입하여 $\tan\delta$ 값을 구하였다.

$$\tan\delta=0.1\times C_4 \quad (1)$$

또한 압력 실험은 저온용기에 액체질소를 담은 후, 샘플을 저온용기내에 침적하여 $0\sim 4\text{kgf/cm}^2$ 로 가압하였으며, 케이블의 부분방전(partial discharge : PD) 측정은 부분방전검출기(IEC6027, 일본계측기 제작소사)를 이용하였다. 전계값은 인가된 전압값에 케이블 절연 두께를 나누어 환산하였으며, 주위 매질로서는 액체질소(77K)와 공기중(300K)에서 비교 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험에 사용된 새로운 전극계와 기존의 전극계에 대한 전계분포를 비교하기 위해 유한 요소법을 이용하여 해석한 등전위선 결과를 그림 3에 나

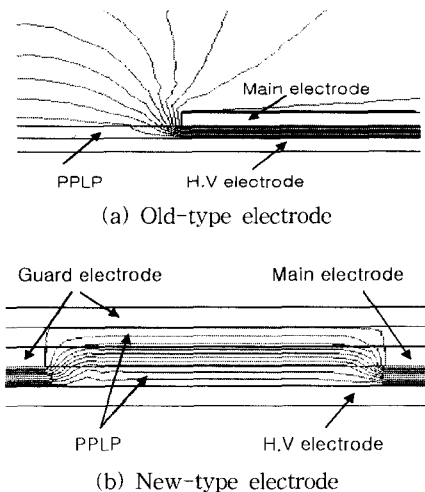


그림 3. 기존 전극계와 새로운 전극계의 등전위선.
Fig. 3. Equipotential lines of new-type electrode system and old-type electrode system.

표 1. 전계 계산에 사용한 계산 조건.

Table 1. Calculation condition applied for electric field.

전극형상	기존의 전극계	새로운 전극계
주전극의 전위	0	0
가드 전극의 전위	0	0
배후 고전압측의 전위	100	100
PPLP의 유전율	$\epsilon_p = 2.8$	$\epsilon_p = 2.8$
Epoxy의 유전율	$\epsilon_e = 4.3$	
액체 질소의 유전율	$\epsilon_L = 1.432$	$\epsilon_L = 1.432$
해석영역 : 도체 길이	300 mm	300 mm
반경 방향	12.9 mm	12.9 mm
두께 방향	0.12 mm	0.12 mm

타낸다. 전극계 형상은 새로운 전극계의 경우 실험방법에서 제시한 형태로 하였지만, 기존의 전극계에서는 주 전극 및 가드 전극 위에 절연물이 없는 것으로 설정하였다. 유한 요소법에 의한 계산에 사용된 일련의 계산조건을 표 1에 나타낸다. 계산 조건에서 두 전극계의 규격은 모두 동일하게 하였다. 계산 결과로부터 기존의 전극계에서는 등전위선이 주 전극의 단부에 집중하고 등전위선의 일부는 PPLP 밖으로 향하는 것을 알 수 있다. 하지만, 새로운 전극계의 경우에는 가드 전극이 주 전극과 가드 전극과의 gap 위에 놓인 것에 의해 주 전극 단부 근처의 등전위선이 대폭 개선되어진 것을 알 수 있다. 따라서, 새로운 전극계로 사용한 $\tan\delta$ 측정에서는 에폭시 수지와 같은 주변의 영향을 받지 않는 PPLP 고유의 유전특성 측정이 가능하였다.

액체질소온도(77K)에서 PPLP, 크라프트지, 및 타이백으로 제작된 mini-model 케이블의 인가 전계에 대한 $\tan\delta$ 의 특성을 그림 4에 나타낸다. 본 논문에서 PPLP mini-model 케이블에 초점을 두고 유전특성을 조사하지만, 비교를 위해 크라프트지 및 타이백 mini-model 케이블을 제작하여 검토하였다. 그림 중에서 어느 시료의 경우에서도 전계가 상승함에 따라 $\tan\delta$ 값은 약간 증가하고 있으며, $\tan\delta$ 값은 PPLP, 타이백, 크라프트지의 순서로 작은 것을 알 수 있다. 또한 $\tan\delta$ 값은 Suzuki[12]씨의 논문에서 PPLP에 대한 값이 8.0×10^{-4} 정도이지만, 본 논문에서 측정한 값은 1.16×10^{-3} 정도 약간 높게 나타났다. 이것은 mini-model 케이블 제작시, 단말부의 영향의 가능성도 있으나 Suzuki의 경우는 일본에서 제작된 PPLP로서 재료에 대한 영향과 커패시턴스 브리지와 같은 측정장비의 차이

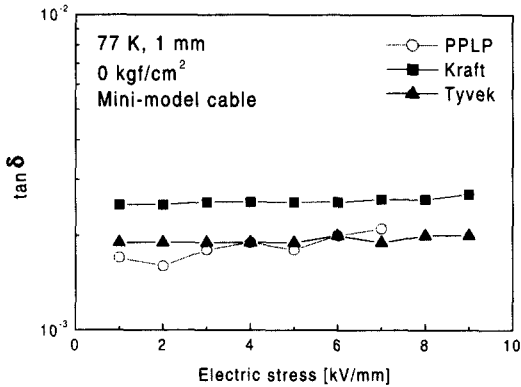


그림 4. 제작된 각 시료 케이블의 $\tan\delta$ 특성.
Fig. 4. The characteristics of $\tan\delta$ on manufactured each mini-model cable.

에 의한 것으로 생각된다. 본 논문에서 구한 PPLP의 $\tan\delta$ 값은 비교적 낮은 수치를 나타내었으며, 이하의 mini-model 케이블은 PPLP로 제작하였다.

그림 5는 제작된 1mm 두께의 PPLP mini-model 케이블에 전계 상승 시와 하강 시의 $\tan\delta$ 의 특성을 각각 ●와 ○로 나타낸다. 먼저, 전계 상승 시에서 $\tan\delta$ 값은 7 kV/mm까지 1.16×10^{-3} 정도로 일정한 값을 나타내었다. 하지만, 7 kV/mm 이상의 고전계가 되면 $\tan\delta$ 의 값은 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 점점 포화되는 경향을 나타내었다. 한편, 전계 하강 시에는 $\tan\delta$ 값은 저전계 영역에서 상승시보다 다소 높게 나타났다. 이는 전계 인가에 따른 잔류전하의 영향으로 생각되나, 이에 대한

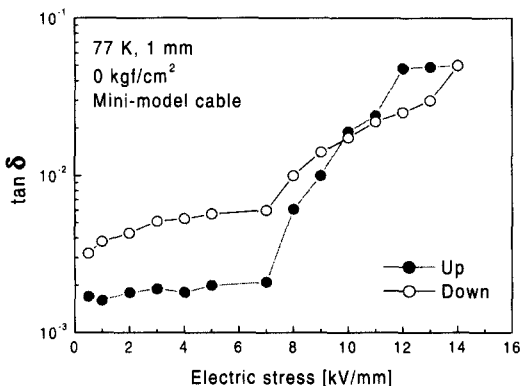


그림 5. $\tan\delta$ 의 전계 의존성.
Fig. 5. Dependence of electric stress on $\tan\delta$.

연구는 차후 계획 중에 있다.

그림 6은 mini-model 케이블의 온도에 따른 $\tan\delta$ 의 특성을 나타내고 있다. 1kV/mm 전계에서 측정된 $\tan\delta$ 의 값은 공기중(300K)에서는 4×10^{-3} , 액체질소에서는 1.16×10^{-3} 정도로서 액체질소에서의 $\tan\delta$ 값이 공기 중보다 대략 4배정도 값이 낮게 나타났다. 또한 액체질소에서는 7kV/mm~8kV/mm사이의 전계에서 $\tan\delta$ 값이 급격하게 상승하지만, 공기중에서는 2kV/mm 이상 전계가 인가 되면 급격하게 $\tan\delta$ 값이 상승함을 알 수 있다.

따라서, mini-model 케이블의 $\tan\delta$ 값은 주위 매질의 온도가 낮아짐으로 해서 전계에 의한 전자의 이동은 어렵게 되고 케이블 버트 갭 부분이 액체질소로 채워짐에 따라 부분방전이 억제되어 낮아지는 것으로 생각된다. 또한 $\tan\delta$ 측정 전극 모델에서 가드 전극에 의해 케이블 단부 등의 누설전류는 거의 접지 측으로 방출됨에 따라 감소되는 것으로 생각된다.

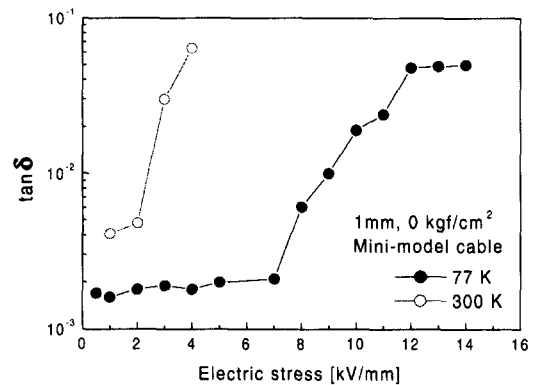


그림 6. 온도에 따른 $\tan\delta$ 의 특성.
Fig. 6. The characteristics of $\tan\delta$ at various temperature.

전계 상승에 따른 $\tan\delta$ 의 급격한 상승원인을 조사하기 위해 mini-model 케이블의 부분방전을 측정하였다. 그림 7에 그 측정값을 나타낸다. 케이블의 부분방전은 22.9kV급 동심 중선선 케이블의 한 전시방서에 의해 5pC 이상의 전하가 발생하는 부분을 부분방전 개시전압으로 정의하였다. 케이블의 부분방전의 측정결과 약 7.5~8kV/mm에서 부분방전 개시전압이 발생하였으며, 그때의 방전량은 약 5 pC를 초과하였다. 따라서, $\tan\delta$ 의 급격한 증가원인은 mini-model 케이블 사이에 존재하는 butt gap에 의한 부분방전의 발생이 가장 큰 원인인 것

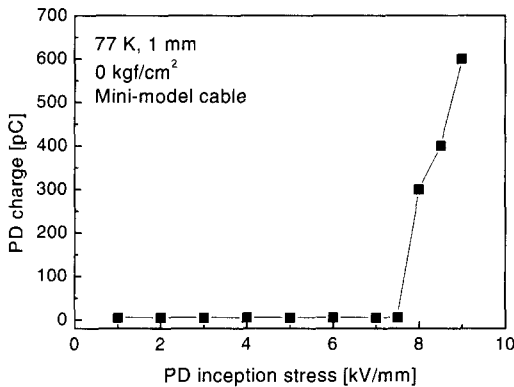


그림 7. 두께에 따른 $\tan\delta$ 의 특성.

Fig. 7. The characteristics of partial discharge of mini-model cable.

으로 생각되며, 일반 시트(sheet) 및 OF 케이블 중에서 알려져 있는 결과와 같이 초전도 케이블에서도 유사한 결과가 나타났다. 고온 초전도 케이블의 절연설계는 PPLP의 부분방전 결과 값에 의해 설계되며, 제작된 케이블의 시험조건 또한 부분방전 시험을 만족해야 한다. 따라서, 고온 초전도 케이블의 개발을 위해서는 케이블의 부분방전을 억제하는 것이 무엇보다 중요하다 하겠다.

그림 8에 부분방전의 억제방안으로 액체질소에서 mini-model 케이블의 압력 하에서의 $\tan\delta$ 특성을 나타낸다. 저전계 영역인 1kV/mm의 경우에서 압력이 증가함에 따라 $\tan\delta$ 값은 $1.1 \sim 1.3 \times 10^{-3}$ 정도로 큰 변화는 나타나지 않았다. 하지만, 고전계 영역의 8kV/mm의 경우는 압력이 증가함에 따라 $\tan$

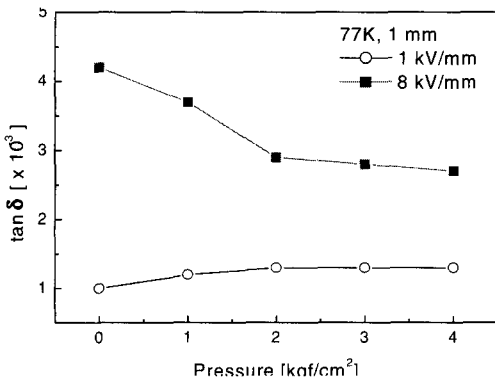


그림 8. 압력에 따른 $\tan\delta$ 특성.

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

δ 값은 4.2×10^{-3} 에서 2.7×10^{-3} 정도로 낮아지는 경향을 나타내었다. 이것은 압력이 증가에 의해 버트갭 사이의 공간은 액체 질소로 채워지게 되고 이에 따라 부분방전이 억제되어 $\tan\delta$ 값이 낮아지는 것으로 생각된다. 이와 같은 결과에서 복합 절연방식이 유력한 고온 초전도 케이블의 절연에서 절연물인 PPLP의 유전특성은 일정한 압력이 가해진 상태에서 양호한 것으로 판단되며, 실제 케이블이 3~5기압에서 운전되므로 유전손실에 의한 냉매손실은 상당히 작을 것으로 판단된다.

고온 초전도 케이블은 비교적 높은 고전압에서 장시간 과전하여 운용되기 때문에 이것을 모의하여 mini-model 케이블의 전계 인가시간에 따른 $\tan\delta$ 의 특성을 그림 9에 나타낸다. 전계의 인가는

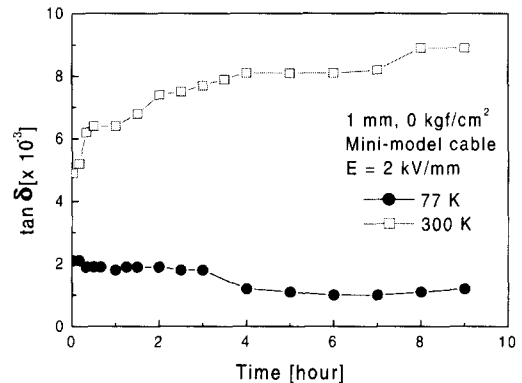


그림 9. 전계 인가 시간에 따른 $\tan\delta$ 의 특성.

Fig. 9. The characteristics of $\tan\delta$ as applied time of electric stress.

2kV/mm로 일정하게 두고, 공기중과 액체질소에서 비교 검토하였다. 그림에서 액체질소의 경우는 전계 인가시간에 따른 $\tan\delta$ 의 변화가 현저하게 보이지 않지만, 공기중의 경우에는 인가시간이 증가함에 따라 급격하게 $\tan\delta$ 값이 올라간 후 포화되는 경향을 나타내었다. 이것은 앞의 그림 6에서 나타난 것과 같이 공기중에서 전계 2kV/mm의 경우는 $\tan\delta$ 의 값이 급격하게 증가하는 경계점으로 해서 전계 인가시간에 따른 부분방전의 증가에 의한 $\tan\delta$ 값의 상승으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 mini-model 케이블을 제작하여

액체질소온도에서 유전손실 특성에 관해 조사하였다. 액체질소 온도에서 PPLP로 제작된 mini-model 케이블의 $\tan\delta$ 값은 1.16×10^{-3} 정도였으며, 크라프트지, 타이백으로 제작된 케이블의 $\tan\delta$ 값보다 낮았다. 또한 전계가 상승에 따른 케이블의 $\tan\delta$ 와 부분방전을 측정할 결과, 버트 갭 사이의 부분방전의 발생과 함께 $\tan\delta$ 값은 급격하게 증가하는 것을 확인하였다. 액체질소의 압력을 가한 상태에서의 케이블에 저전계로 인가한 경우 $\tan\delta$ 값은 변화는 거의 나타나지 않았지만, 고전계의 경우에는 액체 질소의 압력이 증가함에 따라 $\tan\delta$ 값이 감소하는 경향이 나타났다.

따라서, 고온 초전도 케이블 시스템 개발에 있어서는 3~10기압 사이의 압력 하에서 운전하는 것이 케이블 버트 갭 사이의 부분방전을 억제하여 유전특성이 좋아지는 것을 알 수 있었다. 또한 액체질소 및 비교적 높은 전압에서 운전되는 케이블은 일정 전계의 시간에 따른 $\tan\delta$ 특성이 거의 변화 없이 일정한 $\tan\delta$ 값을 가지지만, 공기중에서는 급격하게 $\tan\delta$ 값이 상승한 후 포화되었다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] 小庄昇一ら, "100m 超電導ケーブル實用性検証試験の概要", 低温工学 36, p. 242, 2001.
- [2] 김상현, "초전도 케이블용 절연재료의 절연 파괴 특성과 기구에 관한 연구 (II)", 전기전자재료학회논문지, 5권, 3호, p. 303, 1992.
- [3] 김영석, 이병성, 광민환, 장현만, 김상현, "Bi-2223계 Prototype 고온 초전도 케이블의 전류 통전 특성", 전기전자재료학회논문지, 13권, 7호, p. 630, 2000.
- [4] N. Steve et al, "High temperature superconducting cable field demonstration at Detroit Edison", Physica C 354, p. 49, 2001.
- [5] 성기철 외, "배전급 초전도 전력케이블 개발", 차세대 초전도 응용기술개발 사업단 연차 보고서, 2002.
- [6] M. Hazeyama, N. Hayakawa, S. Honjo, T. Masuda, and H. Okubo, "Partial discharge inception V-t characteristics for pressurized liquid nitrogen/PPLP composite insulation system", Proc. 14th ICDL 2002, p. 123, 2002.
- [7] 原雅則ら, "液體窒素中の複合絶縁系部分放電開始特性に及ぼす熱気泡と壓力の影響", 電気論 A, 119卷3号, 1999.
- [8] 石原ら, "液體窒素含浸絶縁紙の電壓壽命特性試験法の検討", 電力中央研究所報告, 1988.
- [9] 김상현, 마대영, 김현희, 정순용, 김영석, "극저온에서의 절연재료의 기계적 전기적 성질", 한국전기전자재료학회, Vol. 9, No. 10, p. 1033, 1996.
- [10] 遠山和之ら, "高温領域における無極成高分子フィルムの高電界誘電特性測定用新電極系の開発", 電気論 A, 109卷, 7号, 1989.
- [11] D. S. Kwag, "Study on the electrical characteristics of the liquid nitrogen/paper composite insulation system for a HTS cable", 2002 joint Conference of ACED & K-J Symposium on ED and HVE, p. 336, 2002.
- [12] H. Suzuki, K. Ishihara, and S. Akita, "Dielectric insulation characteristics of liquid nitrogen impregnated laminated paper insulated cable", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, p. 1677, 1992.