

고온초전도 케이블의 절연설계를 위한 적층효과

Multi-layered Effect for the Insulation Design of a HTS Cable

곽동순¹, 천현권¹, 김해종², 조전욱², 정순용³, 김상현^{1,a}

(Dong-Soon Kwag¹, Hyeon-Gweon Cheon¹, Hae-Jong Kim², Jeon-Wook Cho², Soon-Yong Chung³, and Sang-Hyun Kim^{1,a})

Abstract

For the insulation design of a high temperature superconducting(HTS) cable, three kinds of design method were proposed, which used AC and impulse withstand voltage and partial discharge inception strength. However, the designed insulation thickness by AC and impulse could not be applied to cable fabrication process due to much low electrical breakdown strength. The effect of the multi-layered insulation paper was not considered on the previous insulation design and the insulation thickness by partial discharge inception strength could be applied only. In this paper, the electrical breakdown characteristic, which considered the effect of multi-layered of LPP, was investigated to design the insulation thickness.

Key Words : HTS cable, Insulation design, Multi-layered effect, Electrical breakdown

1. 서 론

초전도 선재기술의 발달로 인하여 최근의 고온 초전도 케이블은 액체질소(LN₂) 온도인 77 K에서 약 50~100 A/mm²의 전류를 흘릴 수 있어 기존의 전력케이블과 비교해 볼 때 동일 전압으로 대용량 송전이 가능하기 때문에 전력케이블의 소형화 및 대용량화가 가능하여 전력 수요의 증가에 따른 기술적 한계를 극복할 수 있다. 또한 고온초전도 케이블은 송전에너지 손실이 적어 송전 비용절감 효과도 가져올 수 있기 때문에 차세대 전력송전 시스템용으로서 그 활용가치가 높을 것으로 기대되

고 있다. 현재 미국, 일본, 유럽 등에서는 고온초전도 케이블의 개발과 실용화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며[1,2], 한국에서도 2001년부터 과학기술부가 주관하는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 한국전기연구원과 LS전선 등이 참여하여 고온초전도 전력케이블 개발이 진행 중에 있다[3].

현재 국내에서 개발 중인 22.9 kV급 고온초전도 케이블의 절연재료로서는 LPP(laminated polypropylene paper)를 사용하고 있으며, 이미 LPP를 이용한 22.9 kV급 고온초전도 케이블의 절연두께 설계는 여러 학술지를 통해 보고 된바 있다[4]. 그러나 기존의 설계방식에서는 3매의 LPP sheet 시료의 AC 및 임펄스 내전압과 부분방전 개시전계 등의 세 가지 방식을 통한 절연설계가 이루어 졌거나 부분방전 개시전계를 이용하여 설계한 케이블만이 한전표준구메시방서의 시험 규정을 만족할 수 있었으며, AC와 임펄스 내전압을 통해 설계한 케이블들은 절연강도가 낮아 시험 규정에 못 미치는 결과를 얻었다. 이러한 결과는 절연지의 적층에 따른 두께효과가 고려되지 않았기 때문으로 사료

1. 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원
(경남 진주시 가좌동 900)
2. 한국전기연구원 초전도응용연구그룹
3. 부산정보대학 전기자동화과
a. Corresponding Author : shkim@gsnu.ac.kr
접수일자 : 2005. 6. 3
1차 심사 : 2005. 6. 21
2차 심사 : 2005. 7. 19
3차 심사 : 2005. 9. 6
심사완료 : 2005. 9. 7

되며, 본 논문에서는 LPP sheet 샘플과 미니모델 (mini-model) 케이블을 제작하여 절연과피 특성에 영향을 미치는 적층효과에 대해 연구하였다.

2. 실험

2.1 시료

절연과피 실험에 사용된 LPP는 2장의 크라프트지(kraft paper)와 1장의 폴리프로필렌(polypropylene) 필름을 thermal calendring 공정을 통해 압착하여 제작된 반합성지이다. LPP의 기본적인 특성을 표 1에 나타낸다. 적층효과를 조사하기 위하여 LPP sheet 시료의 크기는 연면에 의한 방전을 막기 위하여 200×200 mm 이상으로 하였으며, 적층 수는 전원의 최대용량의 문제로 3~15장으로 하였다. 적층된 시료에는 3장마다 중앙에 인위적으로 $\phi 6$ mm의 구멍을 만들어 실제 지(紙)절연 케이블의 butt-gap의 형상을 모의하여 제작하였다. 또한 실험에 사용된 모든 LPP 시료는 『NREL Standard Procedures (#001)』의 수분측정법에 따라 건조기에 넣은 후 약 105 °C에서 4시간 이상 건조하여 절연지의 수분을 완전히 제거하여 사용하였다.

표 1. LPP의 기본 특성.

Table 1. The basic properties of LPP.

Density	0.89 g/cm ³
Tensile strength	
-machine direction	7.42 kN/m
-cross direction	4.45 kN/m
Polypropylene ratio	57 %
tan δ (100 °C vacuum dry)	0.055 %
Thickness	120.8 μ m (nominal : 119 μ m)

2.2 실험장치 및 방법

Sheet 시료와 미니모델 케이블의 LPP 적층에 따른 절연강도의 영향을 조사하기 위하여 그림 1과 같은 스테인리스 극저온용기(이하 cryostat)를 사용하였다. 주요부분은 크게 전극계와 고전압 인가부, 열절연부로 구성된다. Cryostat은 액체질소를 담을 수 있는 내조와 액체질소의 열적인 안정을 주기위해 2중 진공 층의 외조로 구성되어 있으며, 1~5 bar의 압력을 가할 수 있는 구조로 되어있다.

LPP sheet 시료의 적층효과에 따른 절연과피 특성을 조사하기 위하여 그림 2와 같이 극저온 특

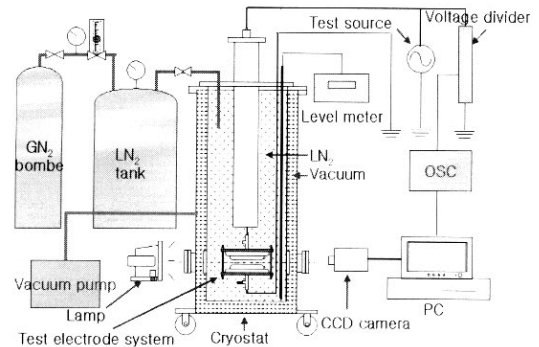


그림 1. 실험장치의 구성도.

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

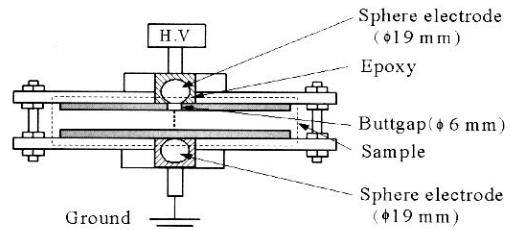


그림 2. 전극계.

Fig. 2. Electrode system.

성과 내구성이 뛰어난 GFRP(glass fiber reinforced plastics) 홀더의 두 전극 사이에 LPP sheet 시료를 적층하여 삽입하였으며, 상부와 하부 전극은 각각 직경 19 mm의 SUS 구전극을 사용하였다. 일반적인 경우 sheet 상 고체 절연물의 절연특성 평가를 위하여 평판-평판 전극계를 사용하지만, 본 실험에서는 적층 수를 증가시킴에 따라 시료의 절연과피 전압이 점차 높아지면서 시료의 크기를 200×200 mm 이상으로 충분히 크게 하더라도 평판 전극 내부에서 절연과피가 일어나지 않고 시료의 표면을 따라 연면섬락이 계속 발생하여 시료 크기의 한계 때문에 불가피하게 구-구 전극계를 사용하게 되었다. 그러나 평판전극의 '난부효과(edge effect)'와는 달리 구전극에서는 시료와의 접촉면에서 발생하게 되는 '미소갭 효과(micro-gap effect)'를 줄이고 또한 butt gap을 누르는 구전극의 접촉면을 크게 하기위하여 구전극을 예폭시 수지로 몰당한 후 표면을 연마하여 그림 2와 같이 평판전극 형상으로 제작하여 실험하였다.

실험에 사용된 AC 고전압 전원장치는 출력 0.1 kW, 최대전압 100 kV이며, 임펄스 전원장치는 파두장 1.2 μ s, 파미장 50 μ s의 표준 뇌임펄스(최대전압 400 kV, 저장에너지 15 kJ)이다.

LPP sheet 시료를 적층한 전극계와 미니모델 케이블을 고전압 인가부에 연결한 후 상용의 액체 질소가 들어있는 cryostat에 넣어 절연과피 값을 측정하였다. 또한 미니모델 케이블의 압력에 대한 영향을 조사하기 위해 외부에서 가체질소를 이용하여 1~5 bar로 가압하였으며, 나머지 모든 실험들은 대기압하의 액체질소 중에서 이루어졌다. 실험은 각 10회 이상 실시하였으며 절연과피 후 시료의 절연과피 흔적을 관찰하여 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 대기압하의 LPP sheet 시료에 있어서 AC 및 임펄스 절연과피 전계의 적층 수 의존성을 나타낸다. 절연과피 전계 값은 구해진 절연과피 전압에 적층된 시료의 전체 두께를 나누어서 계산되어진 값이다. 적층 수는 3~15장으로 하였으며 3장마다 중앙에 인위적으로 ϕ 6 mm의 구멍을 낸 butt-gap 구조이다. AC의 평균치 절연과피 전계는 흰 원(○)으로 임펄스의 경우는 검은 원(●)으로 나타내며 오차의 범위는 막대 표시로 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 LPP의 적층 수가 증가함에 따라서 절연과피 전계 값은 저하되고 있다. 특히 3~9장까지의 적층에서는 급격하게 저하되고 있으며, 9장 이상의 적층에서는 다소 소폭의 감소를 확인할 수 있다. 또한 감소폭은 임펄스의 경우가 AC의 경우보다 현저히 크게 나타나며 임펄스 절연과피 전계가 오차의 범위는 다소 커지만 AC 절연과피 전계보다 2배 이상 높은 것을 알 수 있다. 일반적으로 고체절연물의 절연과피 전계 값은 절연체의 두께의 증가와 함께 감소하며, 그 경향은 유전체의 종류, 전극의 구조, 측정방법 등에 따라 변화하는 경향을 보인다[5]. 또한 조건도 케이블의 절연설계[6,7]에 있어서는 butt-gap을 갖는 2~3장의 절연지 sheet 시료의 최소절연과피전계에 의한 값을 기초로 하여 설계를 하고 있다. 그러나 본 실험의 결과로부터 3장의 경우보다는 절연과피 전계의 감소폭이 비교적 완만한 9장 이상의 절연과피전계 값을 취하는 것이 보다 오차를 줄일 수 있다는 것을 시사하고 있다.

AC 절연과피 전계를 $E_{B(AC)}$ 라 하고 임펄스 절연과피 전계를 $E_{B(imp)}$ 라 했을 때 LPP의 적층 수(d)

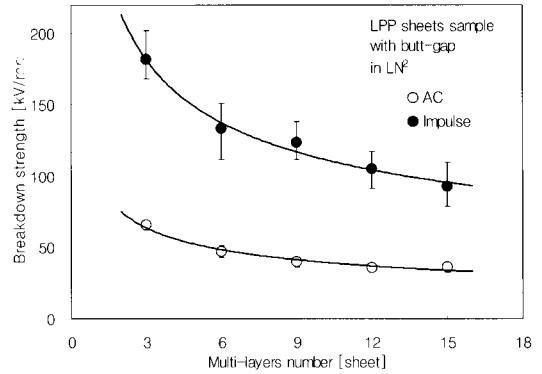
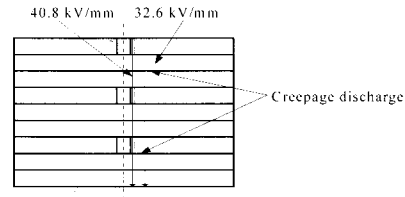
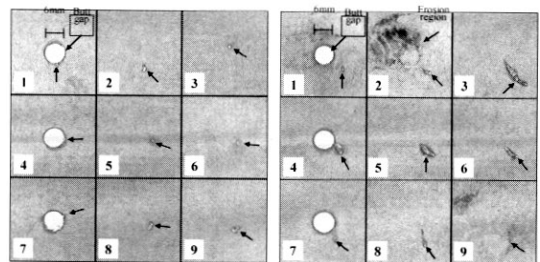


그림 3. LPP 시료의 적층 수에 따른 절연과피 전계.
Fig. 3. Breakdown strength of LPP sheets sample on multi-layered number.



(a) Breakdown path



(b) Discharge site at 40.8 kV/mm

(c) Discharge site at 32.6 kV/mm

그림 4. LPP 시료의 AC 절연과피 경로 및 방전 흔적.

Fig. 4. AC breakdown path and discharge site of LPP sheets sample.

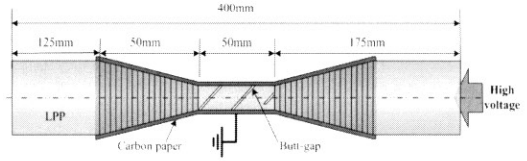
에 대한 절연과피 전계와의 관계식은 다음 실험식으로 구해지며, 이 후 미니모델 케이블과의 그 값을 비교하기 위하여 3~9매까지의 결과 값만을 이용하였다.

$$E_{B(imp)} = 281.41 d^{-0.399} [kV/mm] \quad (1)$$

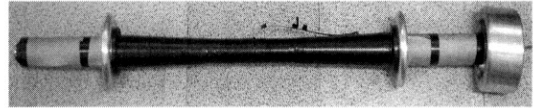
$$E_{B(AC)} = 98.419 d^{0.3954} [kV/m] \quad (2)$$

그림 4는 butt-gap을 갖는 9매의 LPP sheet 시료를 적층하고 대기압 액체질소 중에서 AC 전압을 인가하여 절연파괴 시킨 경우의 절연파괴 경로 (a)와 방전 흔적 (b), (c)를 각각 나타낸다. 그림 3의 실험결과를 통해서 알 수 있듯이 초당 1 kV의 속도로 전압을 상승시켰을 경우 이 시료의 순간 절연파괴 전계는 40.8 kV/mm의 평균값을 보였다. 또한 그림 4(b)에서 알 수 있듯이 파괴경로는 전극 바로 아래 부분인 1층 layer의 butt-gap 가장자리에서 방전이 시작되어 2층 layer의 표면을 연쇄 파괴시키고, 3층에서는 2층 layer의 방전형상에서 가장 치명적으로 전계가 높아지는 부분 직하로 파괴가 순차적으로 진전된다. 이어서 방전 경로는 다시 중간의 butt gap 가장자리로 진전되어 이 후 동일한 메커니즘으로 방전이 진전되는 과정을 보인다. 반면, 순간 절연파괴 전계의 약 80 % 값인 32.6 kV/mm를 인가한 경우 절연파괴는 한참 뒤인 약 300초 후에서 발생하였고, 그림 4(c)에서 알 수 있듯이 파괴경로는 직하로 진전되는 순간 절연파괴의 경우와는 달리 각 층의 계면에 방전이 진전되는 시간이 주어지기 때문에 부분방전이 발생하여 층간 표면을 심하게 열화 시키면서 가장 높은 전계가 형성되는 각 층의 표면을 따라 방전이 계단상으로 진전됨을 보이고 있다. 이러한 방전현상은 액체질소와 고체절연물 사이의 유전율 차이로 인하여 butt-gap 내의 액체질소에 전계가 집중되어 부분방전이 발생하고 절연지 표면을 열화 시키게 되며, 이로 인해 절연파괴 경로와 방전 형상이 결정되기 때문이다[8]. 그러므로 고전계 영역에서는 아주 짧은 순간에 절연파괴가 발생하게 되어 열화 흔적이 작고 방전경로가 직선적인 반면, 저전계 영역에서는 절연파괴가 일어나기 전까지 장시간 소요되는 만큼 전극사이의 LPP 표면이 열화되면서 절연내력이 가장 취약한 부분을 뚫고 절연파괴가 진행되고, 그 때문에 심한 열화 흔적이 생김과 동시에 계단상의 방전경로를 보이는 것으로 사료된다. 한편 임펄스 절연파괴 경로는 방전 시 충격에 의해 시료가 파손되어 방전흔적을 관찰할 수 없었다.

그림 5는 고온초전도 케이블의 절연설계를 위한 기초 데이터 확보를 위하여 제작된 미니모델 케이블의 구성도(a)와 사진(b)을 나타낸다. 고전압 인가를 위하여 직경 ϕ 28 mm의 SUS 파이프 포머를



(a) Schematic diagram



(b) Photograph

그림 5. 절연파괴 시험용 미니모델 케이블.

Fig. 5. Mini-model cable for an electrical breakdown test.

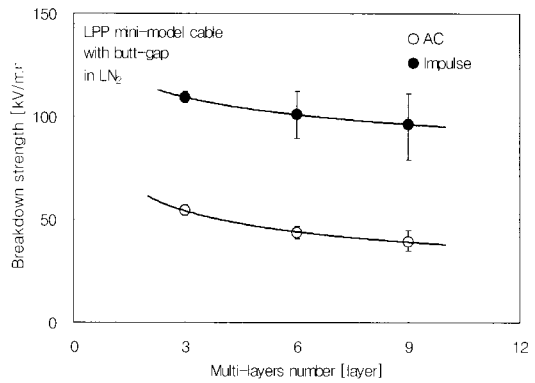


그림 6. 미니모델 케이블의 적층 수에 따른 절연 파괴 전계.

Fig. 6. Breakdown strength of the mini-model cables on multi layered number.

사용하였으며, 내·외부 반도체층으로 두께 0.13 mm의 카본지 2매를 감았다. 반도체층 사이의 절연층은 LPP로 3, 6, 9장씩 감아 절연하였으며, 절연지 사이에는 1 mm의 butt-gap을 두면서 각 층마다 30 % 씩 증첩하여 감았다. 절연파괴 시험을 위한 케이블의 유효길이는 50 mm이며, 전계완화와 연면방전 거리를 확보하기 위하여 케이블 단부에는 보강절연을 하였다. 완성된 미니모델 케이블은 유효부분과 보강절연 부분을 합쳐서 전체 길이 400 mm로 제작하였다.

그림 6은 3, 6, 9장의 LPP로 절연된 미니모델 케이블의 대기압 액체질소 중 AC 및 임펄스 절연 파괴 전계 값을 나타낸다. AC 및 임펄스 파괴 전계의 경우 모두 LPP sheet 시료의 절연 파괴 특성과 유사한 경향을 나타내고 있으나 절연 파괴 전계 값에 있어서 미니모델 케이블의 경우 다소 낮은 값을 보인다. 이는 절연 파괴가 전극간의 가장 약한 부분에서 발생하게 되므로 전극면적이 커질수록 전극 내부에 약점이 존재할 확률이 증가하여 절연 파괴 전압이 낮아지게 되는 'Weak spot theory'에 기인한 현상이라 할 수 있으며[8], 미니모델 케이블의 전극 면적이 sheet 시료의 전극 면적에 비해 상대적으로 아주 크기 때문에 좀더 낮은 절연 파괴 전계 값을 보인 것으로 사료된다. 한편 미니모델 케이블의 절연 층수에 대한 절연 파괴 전계와의 관계는 다음 실험식으로 구해진다.

$$E_{B(imp)} = 123.47 d^{0.112} [kV/mm] \quad (3)$$

$$E_{B(AC)} = 73.992 d^{-0.284} [kV/mm] \quad (4)$$

여기서, $E_{B(imp)}$ 와 $E_{B(AC)}$ 는 미니모델 케이블의 임펄스 및 AC 절연 파괴 전계 값을 각각 나타내며, d 는 미니모델 케이블의 LPP 절연 층수를 가리킨다.

고온초전도 케이블의 절연설계 시 절연 파괴 전계의 감소폭이 비교적 완만한 9장 이상의 절연 파괴 전계 값을 취하는 것이 보다 오차를 줄일 수 있다고 시사한 만큼, 그림 7에 미니모델 케이블의 AC 및 임펄스 절연 파괴 전계에 대한 절연 파괴 확률을 와이불 분포도(weibull plot)로 나타낸다. 절연 파괴 실험을 통해 얻어진 실험 데이터는 일반적으로 평균값으로 대표하여 나타내지만 절연 파괴 전압은 일정한 값으로 나타나지 않고 산만하게 분포되어 있다. 이러한 절연 파괴 데이터는 와이불 분포가 가장 많이 적용되고 있으며 평균값은 50 % 이상의 절연 파괴 확률을 가진다. 따라서 장시간 절연 신뢰성을 확보하기 위해서는 절연 파괴 확률이 충분히 낮은 지점의 절연 파괴 전계값을 절연설계에 반영하여야 할 것이다. 그림에서 가로축은 절연 파괴 전계값, 세로축은 절연 파괴 확률을 백분율(%)로 나타내고 있으며, 절연 파괴 확률이 0.1 %인 지점의 절연 파괴 전계값을 최저파괴전계(E_{max})라 하고 케이블의 절연두께를 결정하기 위한 실험치로 사용된다. 그림 7의 와이불 분포도에서 AC 및 임펄스 전원의 최저파괴전계는 각각 27 kV/mm 와 46 kV/mm의 값을 얻었다. 차후 본 실험결과와

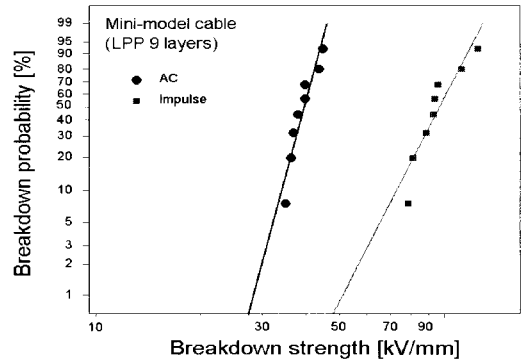


그림 7. 미니모델 케이블의 AC 및 임펄스 절연 파괴 전계의 와이불 분포도.

Fig. 7. Weibull plot on AC and impulse breakdown strength of the mini-model cables.

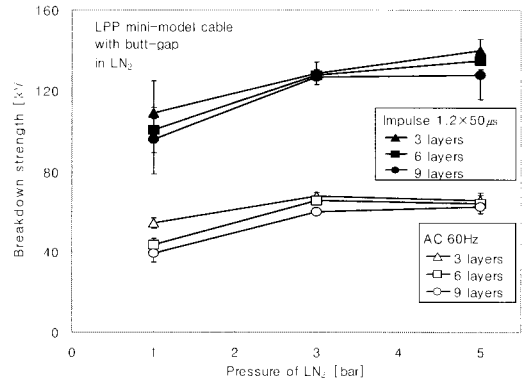


그림 8. 미니모델 케이블의 압력에 따른 AC 및 임펄스 절연 파괴 전계.

Fig. 8. AC and impulse breakdown strength on various pressure of mini-model cable.

현재 진행 중인 고온초전도 케이블의 절연설계에 필요한 factor 등을 결정하기 위한 실험을 통하여 고온초전도 케이블의 절연설계를 행할 계획이다. 한편, 고온초전도 케이블은 냉매로써 액체질소를 사용하며 냉매의 순환과 기포발생의 억제를 통한 절연 성능을 향상시키기 위하여 수 bar의 압력이 가해진 상태에서 운전하게 되므로, 전기절연 연구에 있어서도 압력에 따른 절연특성에 관한 연구는 아주 중요한 항목 중의 하나가 될 것이다. 그러므로 압력의 증가에 따른 LPP의 절연 파괴에 미치는

영향을 살펴보고자 1~5 bar 사이의 압력에 대한 절연특성 실험을 행하였다.

그림 8은 3, 6, 9장의 LPP로 절연된 미니모델 케이블의 가압된 액체질소 중에서 AC 및 임펄스 절연파괴 전계를 나타낸다. 어느 경우이나 압력이 증가함에 따라 절연파괴 전계 값은 상승하고 있으며, 1 bar에서 3 bar까지는 아주 급격하게 증가하는 반면 그 이상의 압력에서는 완만하게 포화되고 있음을 알 수 있다. 이는 압력의 증가로 인해 액체질소 내에서 부분방전 발생의 원인이 될 수 있는 기포의 발생을 억제하여[9,10] 절연파괴 전계 값을 상승시킬 수 있었던 것으로 사료된다. 본 실험 결과는 추후 고온초전도 케이블의 최소 운전압력을 결정함에 있어서 반드시 고려되어야 할 사항으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 LPP sheet 샘플과 미니모델 케이블을 제작하여 적층 수에 따른 AC 및 임펄스 절연파괴 전계를 조사하여 고온초전도 케이블의 절연설계에 있어서 고려되어야 할 LPP 절연물의 적층효과에 대해 연구하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

고체 절연물의 두께효과에 기인하여 LPP의 적층 수가 증가함에 따라 AC 및 임펄스 절연파괴 전계 값은 꾸준히 감소하지만, 선형적으로 감소하지는 않고 3~6매까지는 급격하게 감소하다가 9매 이상의 적층에서는 소폭의 감소를 보였다. 실험의 결과로부터 고온초전도 케이블의 절연 설계 시 3장의 경우보다는 절연파괴 전계의 감소폭이 비교적 완만한 9장 이상의 절연파괴 전계 값을 취하는 것이 고온초전도 케이블의 절연설계에 대한 오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다. 또한 절연파괴 전계의 압력에 대한 영향은 1 bar에서 3 bar까지는 아주 급격하게 증가하는 반면 그 이상의 압력에서는 완만하게 포화되는 경향을 보이고 있어 고온초전도 케이블의 최소 운전압력을 결정함에 있어서 고려되어야 할 사항이라 할 수 있겠다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] N. Steve and N. Kelley, "High temperature superconducting cable field demonstration at Detroit Edison", *Physica C*, Vol. 354, No. 1-4, p. 49, 2001.
- [2] S. Mukoyama, "Development of important elementary technologies for a 66 kV-class three-phase HTS power cable", *Physica C*, Vol. 378-381, No. 2, p. 1181, 2002.
- [3] 조전욱, "고온초전도 전력기기의 연구개발 동향", *전기전자재료학회지*, 17권, 10호, p. 14, 2004.
- [4] Y. S. Kim, D. S. Kwag, H. J. Kim, J. W. Cho, K. C. Seong, and S. H. Kim, "Research on insulation design of 22.9-kV high-Tc superconducting cable in Korea", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, p. 554, 2005.
- [5] 相木一男, "誘電体現象論", *日本電氣學會通信教育會*, p. 260, 1953.
- [6] K. Miyoshi, S. Mukoyama, H. Tsubouchi, A. Takagi, S. Meguro, K. Matsuo, S. Honjo, T. Mimura, and Y. Takahashi, "Design and production of high- T_c superconducting power transmission cable", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 11, No. 1, p. 2363, 2001.
- [7] Eric B. Forsyth, "The dielectric insulation of superconducting power cables", *Proceeding of the IEEE*, Vol. 79, No. 1, p. 31, 1991.
- [8] 광동순, 김영식, 김해중, 조전욱, 김상현, "고온초전도 케이블의 절연파괴 특성에 미치는 Butt-gap의 영향", *전기전자재료학회논문지*, 17권, 3호, p. 333, 2004.
- [9] B. Y. Seok, N. Tamuro, and M. Hara, "A study of thermal bubble behavior in the simulated electrode system of HT superconducting coils", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6, No. 1, p. 109, 1999.
- [10] 백승명, 정종만, 김상현, "고온초전도 기기응용을 위한 모의 권치 환경에서 액체질소의 절연파괴 특성", *전기전자재료학회논문지*, 15권, 11호, p. 985, 2002.