

고온초전도 DC케이블용 LPP의 액체질소 중 DC 및 임펄스 절연파괴 특성

DC and impulse electrical breakdown characteristics of LPP in liquid nitrogen for a HTS DC cable

곽동순¹, 천현권¹, 최재형¹, 민치현¹, 김해종², 조전욱², 김상현^{3,*}

Dong-Soon Kwag¹, Hyeon-Gweon Cheon¹, Jae-Hyeong Choi¹, Chi-Hyun Min¹, Hae-Jong Kim², Jeon-Wook Cho², Sang-Hyun Kim^{3,*}

Abstract: A high temperature superconducting (HTS) DC cable is ideal for transmitting large blocks of electrical power over a long distance. However, it must be designed to operate reliably within the constraints of the electrical systems. Therefore, a study of the electrical insulation is important to develop a HTS DC cable because it is operated in a cryogenic high voltage environment. This paper discusses the dielectric constructions of the cable and summarizes the experimental results on the DC and impulse dielectric characteristics of the insulation material, in sheet form and mini-model cable configuration. This shows how to design such insulation to be operated reliably. These studies are essential for the insulation design of a HTS DC cable operated in cryogenic environment.

Key Words: Breakdown, Cryogenics, Electrical insulation, HTS DC cable.

고성능화, 저가격화에 의한 응용효과는 교류 케이블 이상이 될 것이다. 고온초전도 DC케이블은 궁극적으로 교류케이블에 비해 낮은 손실, 조밀한 구조, 대용량화 등의 장점을 가지고 있다. 특히 DC전압은 교류전압 최고값의 $2/\pi$ 에 불과하여 선로의 절연계급이 낮아 케이블 절연 상 유리해지므로 우수한 경제성을 얻을 수 있다[2-4].

고온초전도 케이블의 절연은 지(紙)절연 방식을 사용하고 있으며, 이는 도체를 여러 장의 얇은 고분자 절연테이프로 적층하여 절연을 하기 때문에 냉각에 의한 수축 및 열적인 손실을 줄일 수 있고, 기존 유입(oil-filled)케이블의 절연방식을 응용할 수 있기 때문에 현재 기술상으로 적용 가능성이 가장 높은 절연방식이라 할 수 있겠다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 지(紙)절연 방식의 고온초전도 DC케이블의 절연강도에 미치는 인자는 8가지 정도로 요약되어질 수 있다.

따라서 본 연구에서는 저온절연(cold dielectric)방식의 고온초전도 DC케이블의 절연설계를 위한 기초 단계로써, 케이블 절연강도에 영향을 미치는 인자들에 기인하여 laminated polypropylene paper(LPP) 절연재료의 DC 및 임펄스 절연파괴 특성들에 대해 조사하였다.

1. 서 론

고온초전도 케이블은 기존 전력케이블에 비하여 높은 전류밀도 및 낮은 송전손실 등의 특징을 가진다. 현재 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 에너지 및 자원 절약, 외부 전자장이 없는 고온초전도 케이블을 전력케이블로 적용하려는 실증용 프로젝트가 계획되어 진행 중에 있다[1].

고온초전도 교류 케이블의 경우, 교류 송전에 의한 전기손실 발생 및 임계전류밀도, 단락전류 등의 문제가 잔존해 있으며, 향후 성능향상 및 저가화 등을 통한 고온초전도 전력케이블의 더 높은 실용화 대책이 필요하다.

한편 고온초전도 DC케이블은 초전도의 특징을 유효하게 활용할 수 있는 케이블로써 교류/직류 변환기의

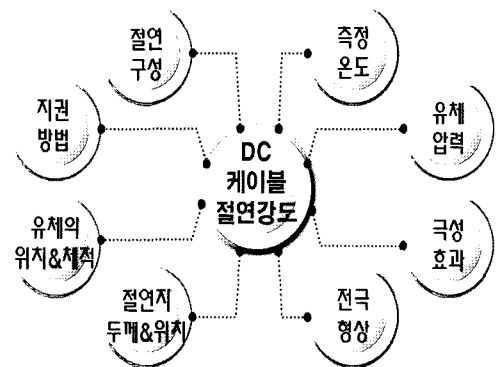


Fig. 1. Factors affecting insulating strength of HTS DC cable of a paper insulation type.

2. 실 험

2.1. 절연재료 및 시료의 구성

고온초전도 DC케이블의 절연재료로 사용되는 LPP는 kraft지와 polypropylene을 thermal calendaring 공정을 통해 압착하여 제작한 반합성지로써, LPP의 기초 특성을 Table 1에 나타낸다.

¹학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과

²정 회 원 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹

³정 회 원 : 경상대 대학원 전기공학과

*교신저자 : shkim@gsnu.ac.kr

원고접수 : 2007년 8월 8일

심사완료 : 2007년 9월 19일

Table 1. Basic specifications of LPP.

Product name	TERLAM IPP (made in Finland)
Given name	Laminated polypropylene paper (LPP)
Density	0.89 g/cm ²
Relative permittivity	2.6
Tensile strength	
- machine direction	7.42 kN/m
- cross direction	4.45 kN/m
Polypropylene ratio	57%
tanδ (100°C vacuum dry)	0.055%
Thickness	120.8 μm (nominal : 119 μm)

Fig. 2는 DC 및 임펄스 절연파괴 실험을 위해 사용된 시트샘플(sheet sample) 및 미니모델 케이블의 구성도를 보여준다. Fig. 2(a)의 시트샘플은 절연지의 두께에 따른 절연파괴 특성 실험을 위해 LPP 1~4매를 적층하였으며, 케이블 절연층에서의 butt-gap을 모의한 절연파괴 실험을 위해 LPP 3매를 적층하여 각 시료의 중앙에 인위적으로 2 mmφ의 구멍(hole)을 뚫어 상혈(上穴: upper hole), 중혈(中穴: middle hole), 하혈(下穴: lower hole)의 3가지 형태로 시료를 구성하였다. 또한 시료의 크기는 절연파괴 시험 시 연면에 의한 방전을 막기 위하여 100 mmφ 이상으로 절단하여 적층하였다. 절연파괴 실험에 사용된 전극은 상부 25 mmφ와 하부 75 mmφ의 스테인리스강(stainless steel)으로 제작된 평판전극을 사용하였으며, 전극의 edge는 반경 3 mm로 라운딩(rounding) 처리되어 전계집중을 최소화할 수 있도록 하였다[5]. 특히 고전압 인가를 위한 상부전극은 전극의 edge 효과를 줄이기 위하여 에폭시 수지로 몰딩하였다. 전극계 홀더는 극저온에서 내구성이 뛰어난 fiberglass reinforced plastic(FRP)을 사용하였다.

Fig. 2(b)의 미니모델 케이블은 고전압 인가를 위한 내부전극으로 직경이 29 mm이고 길이가 40 mm인 스테인리스강 포머(former) 위에 전계완화를 위하여 폭 25 mm로 절단된 두께 0.13mm의 반도체성 카본지 2겹을 감았으며, 그 위에 LPP 3매를 절연지간 1 mm의 butt-gap을 주면서 상하층간에 약 30%씩 중첩하여 절연하였다.

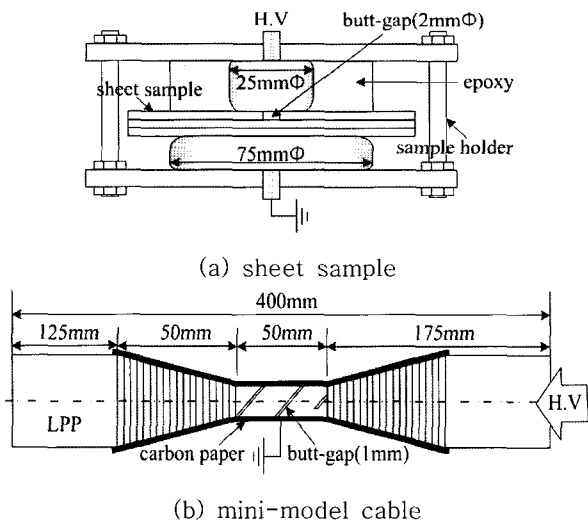


Fig. 2. Electrode systems of the sheet sample and mini-model cable for electrical breakdown test.

또한 외부전극으로는 카본지 2겹을 내부와 동일한 방법으로 감고 그 위에 구리테이프 1층을 감아주었다. 케이블 차폐층 단부는 전계 집중을 완화시켜주기 위하여 125mm 폭으로 절단된 LPP를 약 10매 이상 감아 보강절연을 하였다. 이렇게 제작된 미니모델 케이블의 전체길이는 400 mm이며 절연파괴 시험을 위한 유효 부분은 50 mm이다. 또한 시트샘플 및 미니모델 케이블에 사용된 모든 절연지는 건조기에 넣은 후 105°C에서 4시간 동안 건조하여 절연지의 수분을 완전히 제거하였다.

2.2. 실험 방법

Fig. 3은 가압된 액체질소($\epsilon_r=1.431$) 중에서 시트샘플 및 미니모델 케이블의 DC 및 임펄스 절연파괴 시험을 위한 실험장치의 개략도를 보여준다. 주요부분은 시료 장착부와 고전압 인가부, 열절연부로 구성된다. 스테인리스강으로 제작된 극저온용기(cryostat)는 외부에 이중 진공층이 있어 액체질소의 열적인 안정을 줄 수 있고 최대 10 kgf/cm² 이상의 압력을 가할 수 있는 구조로 되어 있으며, 본 실험에서는 상부 플렌지와 부싱의 기밀유지를 위해 5 kgf/cm² 이하에서 실시되었다. 시료는 cryostat 상부 플렌지의 부싱 하단에 부착하고 대기압 액체질소에 약 30분 이상 침적하여 시료의 열적 안정을 줄 수 있도록 충분히 냉각시켰다. 측정된 모든 결과 값은 10회 이상의 실험을 통해 구해졌으며, 그래프에는 실험 데이터의 평균과 오차범위, 추세선을 나타내었다.

고전압 인가를 위하여 DC는 최대전압 100 kV의 전원장치를 사용하여 1 kV/sec의 속도로 전압을 상승시켰으며, 임펄스는 15 kJ 용량의 최대전압 400 kV의 1.2×50 μs 파형을 갖는 표준임펄스를 사용하였다.

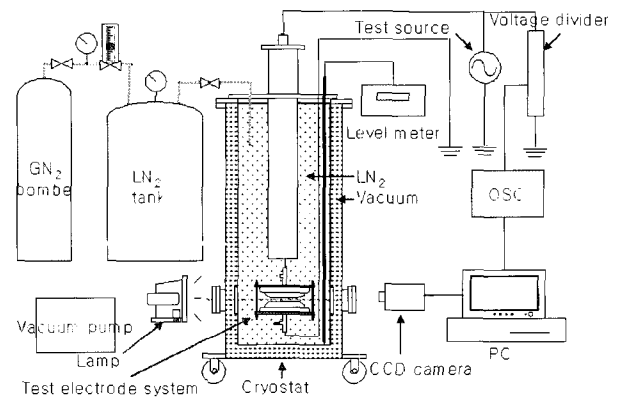


Fig. 3. Experimental setup for electrical breakdown test.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 대기압 액체질소 중에서 LPP 시트샘플의 절연두께에 따른 DC 및 임펄스 절연파괴 전압을 나타낸다. 시료의 두께는 LPP의 적층 매수에 의해 결정되며, 1~4매까지 적층하여 실험하였다. 그림에서 알 수 있듯이 DC 및 임펄스 절연파괴 전압은 적층 두께가 증가함에 따라 꾸준히 상승하고 있으며, 각각의 절연파괴 전압은 두께가 증가하면서 선형적이기 보다는 서서히 포화되어가는 경향을 보이고 있다. 일반적인 고체절연물의 경우 절연파괴 전압은 절연두께가 증가함에 따라 지수(指數) 함수적으로 증가한다는 실험식이 이미 잘 알려져 있다[6].

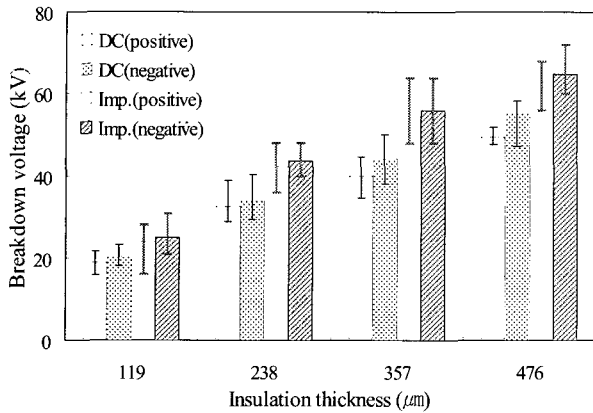


Fig. 4. DC and impulse breakdown voltage according to the insulation thickness of LPP sheet sample in the atmospheric LN₂.

한편 일반적으로 알려진 사실과 같이 임펄스의 절연 파괴 전압은 DC의 경우보다 높게 나타났다. 특히 절연 파괴에 있어서는 부극성이 정극성에 비해 다소 높은 값을 보였다. 절연파괴 시험 시 평등전계를 형성하기는 쉽지 않으며, 불평등전계의 섬락특성은 코로나의 공간전하에 의한 영향을 받는다. 대표적인 불평등전계인 침-평판 전극배치에서 코로나 개시전압은 침이 부(負)일 때가 낮으며, 섬락전압은 갭 길이 수 mm이하인 경우를 제외하고는 침이 정(正)일 때가 낮는데, 이것은 정극성 코로나의 진전이 용이하기 때문이다. 따라서 본 실험의 결과에서도 부극성이 정극성에 비해 높은 값을 보인 원인이라 할 수 있겠다.

Fig. 5는 대기압 액체질소 중에서 3매로 적층된 LPP 시트샘플의 butt-gap 위치에 따른 DC 및 임펄스 절연 파괴 전압을 나타낸다. 지(紙)절연 방식의 고온초전도 케이블에서는 절연층 내부에 butt-gap이 반드시 존재하게 되며, 이는 절연지와 액체질소의 복합절연 형태를 보인다. 이러한 butt-gap은 고온초전도 케이블의 절연에 있어서 절연내력의 저하 등과 같은 결함으로 존재하게 된다[7,8]. 따라서 본 실험에서는 butt-gap의 배치에 따른 절연파괴 특성을 조사하기 위하여 butt-gap이 없는 경우와 상형, 중형, 하형인 경우들에 대해 각각의 절연파괴 전압을 조사하였다. 그래프에서 x축은 4가지 경우의 butt-gap 배치를 나타내며, y축은 절연파괴 전압을 나타낸다. 각 측정치의 평균을 DC 정극성을 ▲, 부극성을 ●, 임펄스 정극성을 △, 부극성을 ○로 각각 표시하고, 10회의 유효실험에 대한 결과 값을 error bar로 그림에 나타내었다. 실험결과로써, butt-gap이 존재할 경우 존재하지 않는 경우에 비해 절연파괴 전압은 낮게 나타났으며, 특히 butt-gap을 갖는 시료들 중에서도 upper hole의 경우 가장 낮은 절연파괴 전압을 보이고 있다. 위와 같은 결과는 butt-gap을 포함한 시료가 액체질소 중에 침적되면 미소 갭 내부의 공간에 액체질소의 침투가 쉽게 이루어지지 않아 butt-gap 내부에 액체질소와 미세한 보이드(void)로 채워지게 되는데, 이들은 절연지보다 유전율이 현저히 낮기 때문에 전계부담이 가중되어 쉽게 절연파괴가 발생하는 것으로 판단된다. 또한 butt-gap과 전극이 접하고 있는 부분에서는 다른 부분에서보다 초기 전자의 방출이 쉽게 일어나고, 이로 인해 부분방전이 발생하여 빨리 절연파괴에 이르게 되는 것으로 판단된다. 본 실험결과는 고전압이 인가되는 케이블 절연층의 내부에 존재하는 butt-gap이 전체 케이블 절연에 있어서 매우 취약한 부분임을 시사해주고 있다.

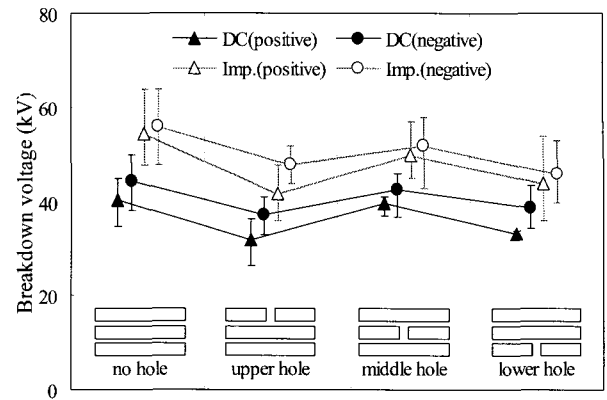


Fig. 5. DC and impulse breakdown voltage according to the butt-gap location of three-layered LPP sheet sample in the atmospheric pressure LN₂.

Fig. 6은 3매 상형로 적층된 LPP 시트샘플의 액체질소 압력 증가에 따른 DC 및 임펄스 절연파괴 전계를 보여준다. 상·하부 평판전극을 사용한 시트샘플의 전계는 다음 식 (1)과 같이 절연파괴 전압을 절연두께로 나누어서 계산되어진다. 여기서 V_{BD}는 절연파괴전압, t는 절연두께(0.357mm)를 각각 나타낸다.

$$E = \frac{V_{BD}}{t} \text{ [kV/mm]} \quad (1)$$

실험결과로써, 압력의 증가에 따라 절연파괴 전계는 점차 상승하였으며, 대기압에서부터 3 kgf/cm²의 압력 사이에서는 급격하게 상승하다가 그 이상에서는 점차 포화되는 경향을 보였다. 이는 압력이 증가함에 따라 액체질소 내부의 기포 발생이 억제되고, 시트샘플의 butt-gap이 액체질소로 채워지게 됨으로써 전계집중을 완화시켜줄 뿐만 아니라 부분방전의 발생을 억제하는 역할을 하기 때문으로 판단된다. 또한 시료의 절연 파괴 된 흔적을 살펴보았을 때 압력이 증가하면서 고전압 측에서 발생하는 부분방전의 흔적이 현저히 줄어들었으며, 이는 절연파괴가 일어나기 이전의 부분방전 발생이 절연재료의 수명이나 전기적 절연특성에 상당한 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 본 실험을 통해 향후 고온초전도 케이블은 최소 3 kgf/cm² 이상의 압력에서 운전되어야 할 것으로 판단된다.

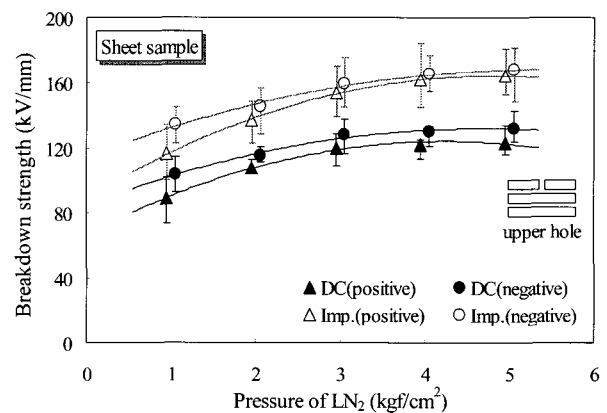


Fig. 6. DC and impulse breakdown strength according to the LN₂ pressure increase of LPP sheet sample which has upper hole and three multi-layers.

Fig. 7은 LPP 3매로 절연한 미니모델 케이블의 액체 질소 압력 증가에 따른 DC 및 임펄스 절연파괴 전계를 보여준다. 미니모델 케이블의 전계는 다음 식 (2)와 같이 동축원통 전극배치인 경우의 전계 계산 방법을 이용하여 계산하였다. 여기서, V_{BD} 는 절연파괴전압, r_1 은 내도체 반경($r_1=14.76\text{mm}$), r_2 는 절연층 반경($r_2=15.117\text{mm}$)을 각각 나타낸다.

$$E = \frac{V_{BD}}{r_1 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \text{ [kV/mm]} \quad (2)$$

미니모델 케이블 역시 시트샘플의 실험결과와 유사하게 압력이 증가함에 따라 절연파괴 전압이 상승하는 것으로 조사되었으며, 절연파괴 전계 값은 시트샘플에 비해 다소 낮은 값을 보이고 있다. 이는 절연파괴가 전극의 형상에 의해 영향을 받고 전극간의 가장 약한 부분에서 발생하기 때문에, 전극형상이 동축원통 구조이고 전극면적이 시트샘플에 비해 상대적으로 아주 큰 미니모델 케이블의 전극내부에 약점이 존재할 확률이 증가하여 절연파괴 전압이 낮아지게 되는 'Weak spot theory'에 기인한 현상으로 생각된다.

Fig. 8에 절연파괴 실험 전·후의 미니모델 케이블 및 압력에 따른 절연파괴 시험장면을 보여주고 있으며, Fig. 9는 LPP 3매로 절연하여 제작된 미니모델 케이블의 2 kgf/cm^2 로 가압된 액체질소 중에서 DC 절연파괴 흔적을 보여준다. Fig. 8(a)는 미니모델 케이블 절연부의 내도체 직하(直下)층, (b)는 두 번째 층, (c)는 세 번째 층으로써 절연 최외각 층을 나타내며, 각 절연층에서의 절연파괴 흔적을 보여주고 있다. 한편 임펄스의 절연파괴 흔적은 방전 충격에 의해 시료가 파손되어 절연파괴 흔적을 관찰할 수 없었다. 그럼에서 알 수 있듯이 대부분의 미니모델 케이블의 절연파괴는 내도체 직하층의 butt-gap에서 시작되었으며, 이후 두 번째 및 세 번째 층의 표면을 연쇄 파괴시키면서 순차적으로 진전됨을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 Fig. 5의 시트샘플 시료에서도 확인할 수 있었다.

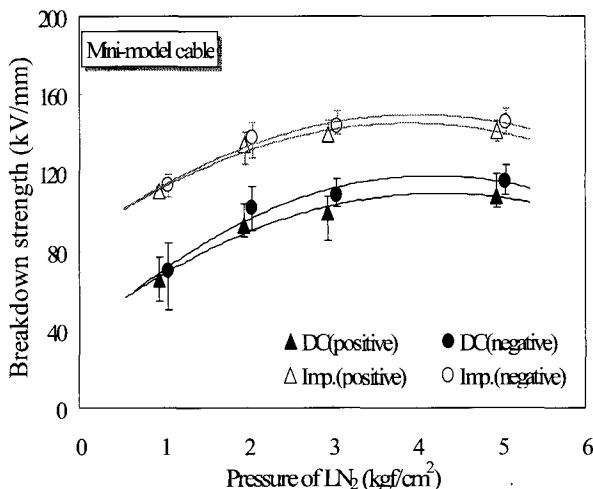
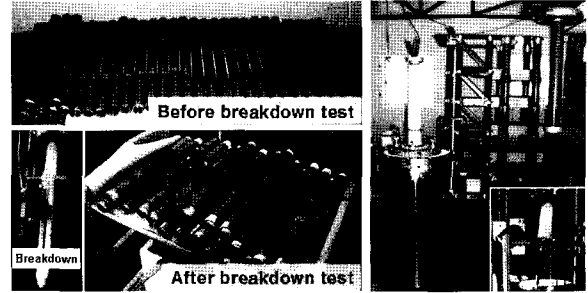
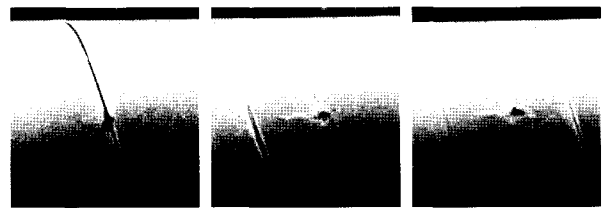


Fig. 7. DC and impulse breakdown strength according to the LN_2 pressure increase of the mini-model cable insulated with three pieces of LPP.



(a) mini-model cable (b) testing site

Fig. 8. Mini-model cable before and after breakdown test and the impulse breakdown test site.



(a) 1st layer (b) 2nd layer (c) 3rd layer

Fig. 9. DC breakdown trace of mini-model cable with three multi-layers of LPP in pressured LN_2 as much as 2 kgf/cm^2 .

4. 결 론

본 연구에서는 고온초전도 DC케이블의 절연설계를 위한 기초 단계로써, LPP의 DC 및 임펄스 절연파괴 특성에 대해 조사하였다. 연구결과로써 다음과 같은 결론을 얻었으며, 차후 본 실험결과와 현재 진행 중인 절연설계에 필요한 factor 값들을 결정하기 위한 실험을 통하여 고온초전도 DC케이블의 절연설계를 행할 계획이다.

(1) DC 및 임펄스 절연파괴 전압은 적층 두께가 증가함에 따라 꾸준히 상승하면서, 선형적이기 보다는 서서히 포화되어가는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 알려진 사실과 같이 임펄스의 절연파괴 전압이 DC의 경우보다 높게 나타났다. 반면 절연파괴 값에 있어서 부극성이 정극성에 비해 다소 높은 값을 보여주었으며, 이는 불평등 전계의 전극배치에서 나타날 수 있는 현상이라 할 수 있다.

(2) Butt-gap을 모의한 실험에서 butt-gap이 존재할 경우 존재하지 않는 경우에 비해 절연파괴 전압은 낮게 나타났으며, 특히 상형의 경우 가장 낮은 절연파괴 전압을 보인다. 미니모델 케이블의 절연파괴 흔적에서도 대부분의 절연파괴가 내도체 직하층의 butt-gap에서 시작됨을 알 수 있었으며, 고전압이 인가되는 케이블 내도체 직하층의 butt-gap이 전체 케이블 절연에 있어서 가장 취약한 부분임을 시사해주고 있다.

(3) 압력 증가에 따라 절연파괴 전압은 점차 상승하였으며, 대기압에서 3 kgf/cm^2 의 압력 사이에서는 급격하게 상승하다가 그 이상에서는 점차 포화되는 경향을 보였다. 미니모델 케이블 역시 시트샘플과 유사한 결과를 보였으며, 절연파괴 전압 값은 시트샘플에 비해 다소 낮은 값을 보이고 있다. 본 실험을 통한 결과는 향후 고온초전도 케이블의 운전압력을 결정함에 있어서 반드시 고려되어야 할 사항으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] Jeonwook Cho, Joon-Han Bae, Hae-Jong Kim, Ki-Deok Sim, Seokho Kim, Hyun-Man Jang, Chang-Young Lee, Dong-Wook Kim, "Development of a single-phase 30 m HTS power cable," Cryogenics, Vol. 46, No. 5, pp. 333-337, May 2006.
- [2] P. Chowdhuri, "Electrical characteristics of a dc superconducting cable," Cryogenics, Vol. 22, No. 4, pp. 171-180, Apr. 1982.
- [3] Pritindra Chowdhuri, Chandralekha Pallem, Jonathan A Demko, and Michael J Gouge, "Feasibility of Electric Power Transmission by DC Superconducting Cables," IEEE Trans. on Appl. Supercond. Vol. 15, No. 4, pp. 3917-3926, Dec. 2005.
- [4] P. Chowdhuri, C. Pallem, J. A. Demko, and M. J. Gouge, "Analysis on the Transient Voltage Performance of a DC Superconducting Cables," IEEE Trans. on Appl. Supercond. Vol. 16, No. 1, pp. 31-37, Mar. 2006.
- [5] IEC 60243-1 Ed. 2.0 b, "Electrical strength of insulating materials - Test methods - Part 1: Tests at power frequencies," 1998.
- [6] 곽동순, 천현권, 김해중, 조전욱, 정순용, 김상현, "고온초전도 케이블의 절연설계를 위한 적층효과," 한국전기전자재료학회 논문지, 18권, 10호, pp. 950-955, 2005.
- [7] H. Okubo, M. Hazeyama, N. Hayakawa, S. Honjo, and T. Masuda, "V-t characteristics of partial discharge inception in liquid nitrogen/PPLP[®] composite insulation system for HTS cable," IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 6, p. 945, 2002.
- [8] M. Hazeyama, T. Kobayashi, N. Hayakawa, S. Honjo, T. Masuda, and H. Okubo, "Partial discharge inception characteristics under butt gap condition in liquid nitrogen/PPLP[®] composite insulation system for high temperature superconducting Cable," IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 6, p. 939, 2002.

저자 소개



곽동순(郭東洵)

1975년 9월 3일생, 2002년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



천현권(千賢權)

1978년 6월 2일생, 2004년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



최재형(崔在亨)

1979년 6월 3일생, 2005년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.



김해중(金海鍾)

1965년 11월 25일생, 1993년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년~현재 한국전기연구원 초전도 기기연구그룹 선임연구원.



조전욱(趙全旭)

1960년 3월 2일생, 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도 기기연구그룹 책임연구원.



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 오사카대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년~1989년 한국전기연구원 초전도연구실 실장, 1999년~2001년 경상대학교 공과대학 학장, 2000년~2002년 한국초전도·저온공학회 회장, 1989년~현재 경상대 공대 전기공학과 교수.