

고온초전도 직류 케이블용 절연재료인 PPLP의 직류 및 임펄스 절연 특성

김우진¹, 방만식¹, 김해종², 조전욱², 김상현^{1,a}

¹ 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

² 한국전기연구원 초전도연구센터

DC and Impulse Insulation Characteristics of PPLP for HTS DC Cable

Woo-Jin Kim¹, Man-Sik Pang¹, Hae-Jong Kim², Jeon-Wook Cho², and Sang-Hyun Kim^{1,a}

¹ Department of Electrical Engineering, Gyeongsang National University and ERI, Jinju 660-300, Korea

² Korea Electrotechnology Research Institute, Superconductivity Center, Changwon 641-120, Korea

(Received June 11, 2013; Revised June 12, 2013; Accepted June 14, 2013)

Abstract: To realize the high-T_c superconducting (HTS) DC cable system, it is important to study not only high current capacity and low loss of conductor but also optimum electrical insulation at cryogenic temperature. A model HTS DC cable system consists of a HTS conductor, semi-conductor, cooling system and insulating materials. Polypropylene laminated paper (PPLP) has been widely adopted as insulating material for HTS machines. However, the fundamental insulation characteristics of PPLP for the development of HTS DC cable have not been revealed satisfactorily until now. In this paper, we will discuss mainly on the breakdown characteristics of 3 sheets PPLP in liquid nitrogen (LN₂). The characteristics of the diameter, location of butt-gap, distance between butt-gap length, pressure effect, polarity effect under DC and impulse voltage were studied. Also, the DC polarity reversal breakdown voltage of mini-model cable was measured in LN₂ under 0.4 MPa.

Keywords: HTS DC cable, Breakdown characteristics, PPLP, DC polarity reversal

1. 서론

최근 고온초전도 기술은 에너지 관점에서 큰 관심을 모으고 있다. 고온초전도 기술을 응용한 전력기기에는 초전도 케이블, 변압기, 한류기, 에너지저장장치(SMES), 발전기 등 폭넓은 범위에 걸쳐 있다 [1-3].

특히, 초전도 케이블은 가장 적용 가능성이 높다고 평가를 받고 있어 미국, 일본, 한국을 중심으로 세계 각국에서 연구개발이 활발히 진행되고 있다 [4,5]. 지금까지는 주로 고온초전도 AC 케이블을 연구개발의 목표로 했으나 최근에는 고효율로 장거리의 대용량 전력수송 문제로 고온초전도 DC 케이블을 목표로 연구를 수행하고 있다. 고온초전도 DC 케이블은 AC 케이블에서 발생하는 히스테리시스 손실과 와전류 손실 등의 교류 손실과 유전 손실이 없기 때문에 이론적으로는 손실이 완전 제로인 직류송전이 가능하다. 즉, 고온초전도 DC 케이블은 AC 케이블에 비해 낮은 손

a. Corresponding author: shkim@gnu.ac.kr

실, 조밀한 구조, 대용량화 등의 장점을 가지고 있기 때문에 송전선로의 장거리화가 가능하고 국제 규모의 광역연계가 가능하다.

고온초전도 케이블의 절연시스템은 액체질소 냉매 및 고분자 필름의 복합절연계로서 개발되고 있다. 이 형태에서는 열손실과 냉각에 의한 열수축을 막기 위하여 다층 절연 테이프를 도체를 감고 있다. PPLP는 고온초전도 AC 케이블용 절연재료로서 널리 사용되어 왔으며 이미 고온초전도 케이블 절연으로 적용되고 있다 [6]. 그러나 액체질소 중에서 PPLP의 DC 절연과파 특성은 지금까지 만족스럽게 보고되고 있지 않아, 케이블의 절연설계에는 매우 어려운 실정이다.

고온초전도 케이블의 전기절연으로서는 초전도 AC 케이블에서는 PPLP 절연지를 다층으로 하여 이것에 액체질소를 함침시킨 액체질소 함침 적층절연 방식이 채용되고 있다. 초전도 DC케이블에 있어서도 안정성, 신뢰성으로부터 액체질소 함침적층 절연방식이 유력한 후보라고 생각된다. 그러나 액체질소 중에서 PPLP의 DC 절연과파 특성 데이터는 지금까지 만족스럽게 보고되고 있지 않아, 케이블의 절연설계에는 매우 불충분한 실정이다.

본 논문에서는 고온초전도 DC케이블 개발을 위한 첫 단계로 지금까지 연구에서 미비했던 PPLP 3장으로 적층시킨 단위계의 절연과파 특성 및 butt-gap에 따른 영향을 DC 및 임펄스 전압 하에서 연구하였다. 또한, 3장의 적층 PPLP의 절연 특성에서 얻은 결과를 바탕으로 미니 모델 케이블의 제작 및 실험 조건을 결정하고 미니 모델 케이블의 절연과파 및 DC 극성반전 특성을 연구하였다.

2. 실험 방법

고온초전도 DC 케이블용 절연재료로 사용된 PPLP는 kraft지와 polypropylene을 압착하여 제작한 반합성지이며, 시료 두께는 119 μm 이다. PPLP의 기본적인 특성을 표 1에 나타낸다.

그림 1에 PPLP 시트(sheet)의 절연과파 측정용 전극계를 나타낸다. butt-gap이 설치된 3장의 적층된 PPLP 시트 시료는 건조기에서 건조시킨 후 샘플홀더에 고정시켰다. butt-gap은 시료의 중앙에 직경 1~8 mm의 원형인 구멍(hole)을 설치하여 모의하였으며 구멍의 위치에 따라 상혈(top hole), 하혈(bottom hole), 중혈(middle hole)로 하여 구멍이 없는 경우

Table 1. Basic properties of PPLP.

Density (g/cm ²)	0.89
Polypropylene ratio (%)	57
Tan δ (100 $^{\circ}\text{C}$), %	0.055
Thickness (μm)	119

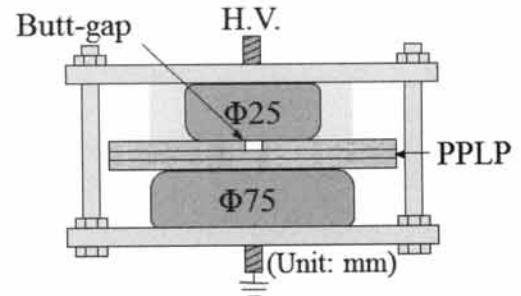


Fig. 1. Sheet sample and electrode system.

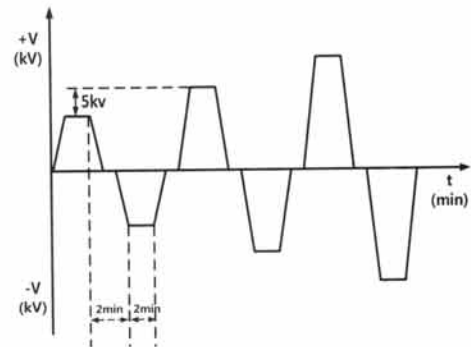


Fig. 2. DC polarity reversal profile of applied voltage.

(no hole)과 비교하였다. 전극계는 상부전극(직경: 25 mm), 하부전극(직경: 75 mm)의 스테인레스 평판전극을 사용하였으며 DC 및 임펄스전압이 인가되었다. 또한 PPLP 시트의 절연과파 특성을 바탕으로 미니 모델 케이블을 제작하였다. 절연과파 시험을 위한 유효 길이는 50 mm이며, 완성된 미니 모델 케이블의 전체 길이는 400 mm이다.

PPLP 시트의 샘플홀더 및 미니 모델 케이블은 용기(cryostat)에 부착된 고압부싱의 하부에 부착되었다. 상용의 액체질소가 도입된 후, 0.1~0.4 MPa 기압 하에서 시료의 전극 간에 DC, 임펄스전압 및 DC 극성반전전압이 인가되었다. 고전압 인가를 위하여 DC

는 최대 전압 100 kV의 전원장치를 사용하여 2 kV/sec의 속도로 전압을 상승시켰으며, 임펄스는 15 KJ 용량의 최대 전압 400 kV의 $1.2 \times 50 \mu s$ 파형을 갖는 표준 임펄스를 사용하였다.

한편 DC 극성반전 전압은 그림 2와 같은 전압인가 방법으로 행했다. 처음은 DC 절연파괴전압의 60% 전압을 인가하였으며 극성반전 시간은 2분, 전압 상승은 5 kV이며, 일정전압 인가 시간도 2분을 유지하였다. 일정전압의 +, - 극성반전을 한 주기로 하여, 전압을 계속 상승시키다가 절연파괴가 일어날 때의 절연파괴값을 DC 극성반전 절연파괴전압으로 하였다. 절연파괴전압은 주어진 조건에서 10~15회 시험을 했다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 액체질소 중에서 butt-gap을 갖는 시트는 PPLP의 DC와 임펄스 전압의 극성 효과를 나타낸다.

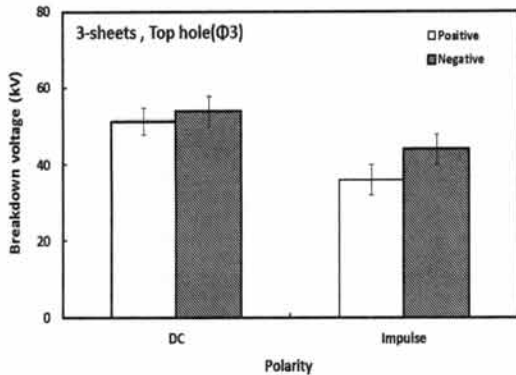


Fig. 3. Polarity effect of 3 sheets PPLP with butt-gap under DC and impulse voltage in LN₂.

Butt-gap의 직경은 3 mm이며, 그 위치는 top이다. 그림에서, DC의 절연파괴 전압이 임펄스의 경우보다 더 높으며, DC 및 임펄스전압의 어느 경우에서나 부극성 (-)이 정극성 (+)의 경우보다 높음을 알 수 있다. 또한, +/- 임펄스 전압의 비율은 1.05이다. 이하의 실험에서는 고온초전도 케이블 설계를 위하여 전압이 낮은 +전압에서의 절연파괴 실험만을 수행하였다.

그림 4는 액체질소 중에서 butt-gap 직경에 따른 DC (+) 및 Imp (+)의 절연파괴전압을 나타낸다. 원형의 butt-gap의 직경은 1, 2, 3, 4 및 8 mm이다. 그림

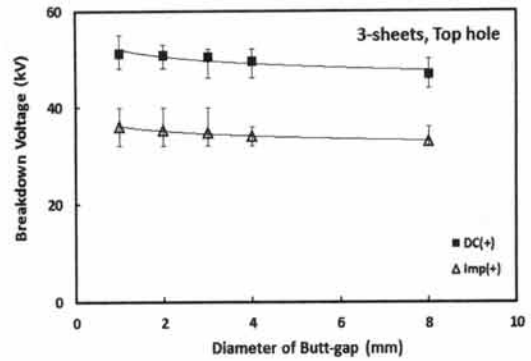


Fig. 4. Dependence of DC and impuls breakdown voltage on the diameter of butt-gap in LN₂.

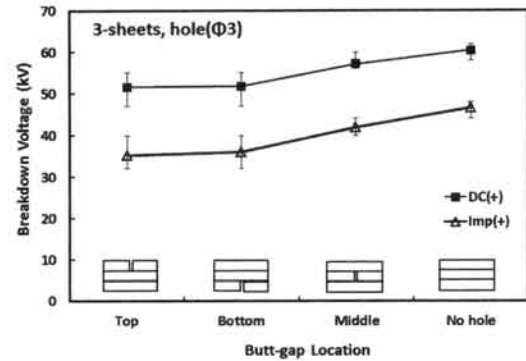


Fig. 5. DC(+) and imp(+) breakdown voltage according to the butt-gap location in LN₂.

에서, butt-gap 직경이 커짐에 따라 절연파괴 전압은 변화가 매우 작으나 약간 낮아짐을 알 수 있다. 이것은 butt-gap의 존재가 케이블 절연에 있어서 약점으로 작용함을 알 수 있다. 이하의 미니 모델 DC 케이블을 제작에서는 1 mm의 butt-gap을 설치하였다.

액체질소 중에서 PPLP 시트 시료의 butt-gap 위치에 따른 DC(+) 및 Imp(+)의 절연파괴전압 특성을 그림 5에 나타낸다. 그림에서, butt-gap이 존재하면 절연파괴전압이 저하하나, butt-gap의 위치에 따라 다른 특성을 나타냄을 알 수 있다. 즉, DC(+) 및 Imp(+) 전압의 경우, 상월과 하월 위치에 고전압을 인가한 경우가 중월의 경우보다 절연파괴전압이 낮음을 나타내고 있다. 이것은, DC의 경우도 AC의 경우와 같이 액체질소에 침적된 시료의 butt-gap에 약점 및 부분방전으로 인해 전계부담이 가중되어 쉽게 절

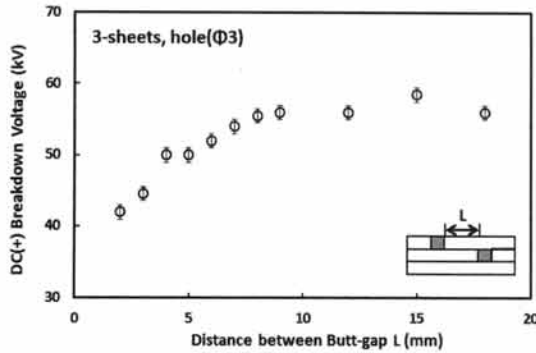


Fig. 6. DC(+) breakdown voltage according to distance between butt-gap length.

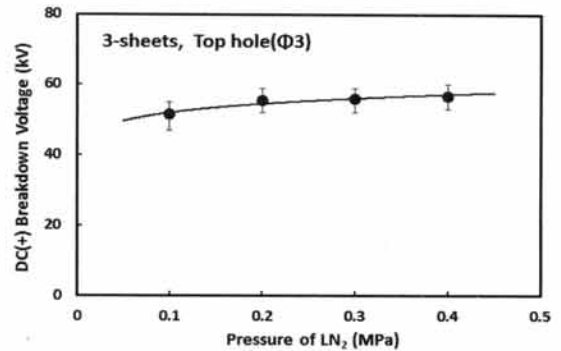


Fig. 8. Dependence of DC(+) breakdown voltage on pressure of LN₂.

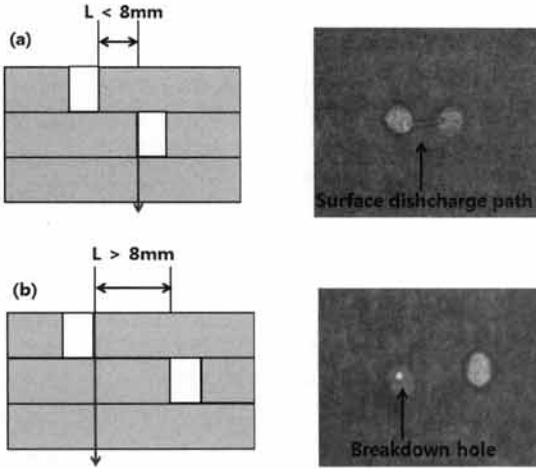


Fig. 7. Breakdown channel. (a) less than 8 mm, (b) more than 8 mm.

연파괴가 일어나게 된다고 생각된다 [7].

그림 6은 butt-gap 간격 사이의 거리에 따른 DC(+) 절연파괴전압을 나타낸다. PPLP 시트의 상층과 중간층의 butt-gap 사이의 간격 (L)을 변화시키면서 DC(+) 절연파괴 전압을 측정하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, L이 커짐에 따라 절연파괴 전압이 상승한 후 8 mm 이상에서 포화하는 경향을 보이고 있다. 또한, L이 8 mm 이하와 이상인 경우의 절연파괴 경로를 살펴보면 그림 7(a) 및 (b)와 같다. L이 8 mm 이하인 경우에는 그림 (a)와 같이 상층과 중간 층 butt-gap 사이의 연면방전이 발생하여 절연파괴가 일어나, L이 8 mm 이상인 경우에는 그림 (b)와 같이 상층의 butt-gap을 통해 바로 수직으로

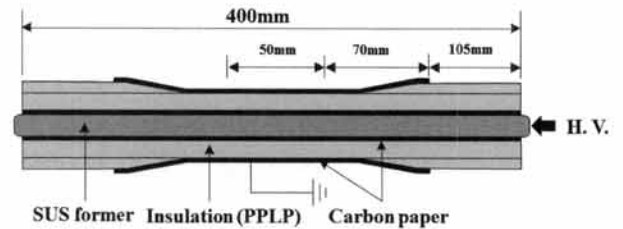


Fig. 9. Schematic diagram of mini-model cable.

절연파괴가 발생하였다. 이 실험을 통해서 미니 모델 DC 케이블은 PPLP의 butt-gap간 간격을 8 mm로 정하고, 절연지폭 25 mm에 대하여 중첩율을 30%로 제작하였다.

그림 8은 액체질소 중에서 압력에 따른 DC(+) 절연파괴 전압을 나타낸다. PPLP의 상층 시료에 DC(+) 전압을 인가하였다. 그림에서, DC(+)의 절연파괴 전압은 압력이 증가함에 따라 서서히 증가하다가 0.3~0.4 MPa에서 포화가 일어남을 알 수 있다. DC에서의 압력 포화 특성은 AC의 경우와 유사함을 알 수 있었다 [8]. 이들의 압력 시험을 통하여 미니 모델 DC케이블의 절연파괴 시험 조건은 액체질소 압력을 0.4 MPa로 하여 측정하였다.

그림 9에 PPLP 시트의 절연파괴 특성을 바탕으로 제작된 미니 모델 케이블의 구성도를 나타낸다. 직경 27 mm의 스테인레스 파이프 포머상에 내·외부 반도체 전층을 감고 반도체층 사이의 절연층은 PPLP로 3장 적층하여 절연하였다. 1 mm의 butt-gap을 설치하고 각 층마다 30%씩 중첩하여 감았다. 절연파괴 시험을 위한 유효 길이는 50 mm이며, 전계 완화와 연면 거리

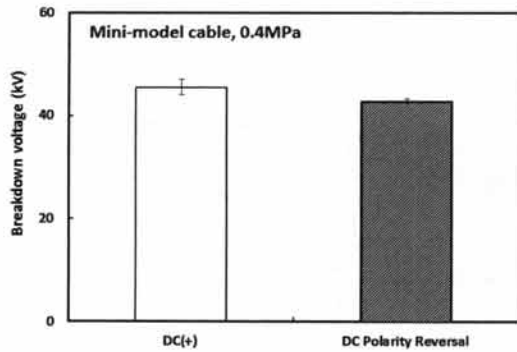


Fig. 10. The DC(+) and DC polarity reversal breakdown voltage of mini-model cable in LN₂ under 0.4 MPa.

확보를 위하여 케이블 단부는 보강 절연하였다. 완성된 미니 모델 케이블의 전체길이는 400 mm이다.

고온초전도 DC 케이블의 운전 상태에 있어서는 DC 극성반전전압에 의한 PPLP에 축적된 공간전하(space charge)로 인해 고전계가 형성된다. 따라서 DC 케이블 설계에 있어서 DC 극성반전의 절연 특성에 관한 연구가 반드시 필요하다.

그림 10은 0.4 MPa 기압에서의 미니 모델 케이블의 DC(+) 및 DC 극성반전 절연파괴전압을 비교한 결과를 나타낸다. 그림에서, DC(+)에 비해 DC 극성반전 절연파괴전압이 낮음을 알 수 있다. 이것은 DC 극성반전에 의한 액체질소 중의 PPLP에 축적된 이중공간전하의 전계에 의하여 고전계가 형성되게 되고, 이로 인하여 낮은 전압에서 절연파괴가 일어난다고 생각된다 [9].

4. 결론

본 논문에서는 초전도 DC케이블의 절연설계를 위하여 액체질소 중에서 PPLP 시트 및 미니 모델 케이블을 이용하여 절연파괴 및 극성반전 시험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) DC 및 임펄스전압의 어느 경우에서나 정극성(+)의 값이 부극성(-)의 경우보다 높으며, -/+ 전압의 비율은 1.05이다.
- (2) PPLP 시트에 butt-gap이 상혈과 하혈에 존재하는 경우가 중혈의 경우보다 절연파괴전압이 낮다. 또한, butt-gap 직경이 커짐에 따라 절연

파괴전압은 약간 저하한다. 이것은 액체질소에 침적된 시료의 butt-gap에 약점 및 부분방전에 기인하는 것으로 생각된다.

- (3) DC(+)의 절연파괴 전압은 압력이 증가함에 따라 서서히 증가하다가 0.3~0.4 MPa에서 포화되었다.
- (4) DC 극성반전에 의한 공간전하의 영향으로 DC(+)에 비해 DC 극성반전 절연파괴전압이 낮다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국전기연구원의 지원을 받아 수행된 연구사업임.

REFERENCES

- [1] A. Badel, P. Tixador, and P. Dedie, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 21, 1375 (2011).
- [2] J. Kozak, M. Majka, S. Kozak, and T. Janowski, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 22, 5601804 (2012).
- [3] A. Laphorn, P. S. Bodger, and W. Enright, *IEEE Trans. Power Del.*, 28, 253 (2013).
- [4] S. Mukoyama, M. Yagi, T. Yonemura, T. Nomura, N. Fujiwara, Y. Ichikawa, Y. Aoki, T. Saitoh, N. Amemiya, A. Ishiyama, and N. Hayakawa, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 21, 976 (2011).
- [5] J. F. Maguire, J. Yuan, W. Romanosky, F. Schmidt, R. Soika, S. Bratt, F. Durand, C. King, J. McNamara, and T. E. Welsh, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 21, 961 (2011).
- [6] M. Nagao, M. Kurimoto, R. Takahashi, T. Kawashima, Y. Murakami, T. Nishimura, Y. Ashibe, and T. Masuda, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Annual Report* (IEEE, Cancun, Mexico, 2011) p. 419.
- [7] M. Hazeyama, T. Kobayashi, N. Hayakawa, S. Honjo, T. Masuda, and H. Okubo, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 9, 6 939 (2002).
- [8] K. Tsuyuki, S. Washida, O. Tanda, T. Masuda, K. Kato, T. Nakajima, and S. Mukoyama, *Cryogenic Engineering of Japan*, 35, 350 (2000).
- [9] W. J. Kim, H. J. Kim, J. W. Cho, S. Hwangbo, and S. H. Kim, *Superconductivity and Cryogenics*, 14, 32 (2012).