

송전급 HTS 케이블용 반합성지의 두께에 따른 절연특성 연구

A Study on Insulation Characteristics by Thickness of Laminated Polypropylene Paper for an HTS Transmission Cable

최진욱¹, 최재형², 김해중³, 조진욱³, 김상현^{4*}

Jin Wook Choi¹, Jae Hyeong Choi², Hae Jong Kim³, Jeon Wook Cho³, Sang Hyun Kim^{4*}

Abstract: The high temperature superconducting(HTS) power cable, as a key component of the next generation power transmission system, operates cost-effectively because of much less transmission loss. Currently, a world-wide research has been undertaken actively. In this research, we designed insulation thickness and investigated thickness effect of laminated polypropylene paper(LPP) which is insulation material of HTS cable in case of AC and impulse breakdown.

Key Words: AC breakdown, HTS cable, impulse breakdown, insulation.

1. 서 론

오늘날 지속적인 경제 성장에 따라 무공해·양질의 에너지 수요가 급격히 증가하는 추세에 있으며, 특히 에너지 중에서도 전기에너지는 다른 에너지로의 변환이 용이하고 효율적이며 미세한 제어가 가능하다는 특징 때문에 그 수요는 비약적으로 증가하고 있다. 이런 양상은 세계의 공통적 추세로써 가공선이나 유입케이블 등과 같은 기존의 송전방식에 의한 용량은 앞으로 계속적인 기술개발이 이루어진다고 하여도 한계가 있으며 송전 회선수를 늘리거나 초고압(Ultra high voltage) 송전방식을 채용하여야 가능하다. 그러나 경제성, 기술적인 문제, 환경문제, 용지확보 등의 문제가 뒤따라 향후 급증하는 전력수요에 대비한 새로운 대전력 수송방법의 개발필요성이 강하게 대두되고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 송전용량, 송전거리는 물론 송전손실, 소요면적에서도 우수한 특징을 가지는 고온초전도 케이블에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 한국에서는 2001년부터 교육과학기술부가 주관하는 DAPAS(Development of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies) 프로그램의 일환으로 22.9 kV / 50 MVA 3상 고온초전도 케이블

의 개발 및 장기 실증시험에 성공하였으며[1], 현재 154 kV / 1 GVA급 고온초전도 케이블의 개발이 진행 중에 있다.

도체부, 전기절연층, 냉각부로 구성되어진 고온초전도 케이블은 액체질소(LN₂, 77 K)에 침적 냉각하여 운전되며 초고압이 인가되기 때문에 개발에 있어서 전기절연에 관한 연구는 필수 요소이다. 절연방식은 고온초전도 shield층의 적용이 가능한 저온절연(CD: cold dielectric)방식으로 전기절연층이 극저온판로 내에 있는 구조이다. 절연지는 크라프트지(Kraft paper) 두 장 사이에 폴리프로필렌(polypropylene) 필름을 넣고 열압착공정을 통해 만들어 유전손실 적고 절연강도가 높아 현재 유입케이블의 절연재료로도 사용되고 있는 반합성지(LPP: Laminated Polypropylene Paper)를 사용하였다.

본 논문에서는 한 장의 두께가 100, 125, 170 μm인 LPP를 사용하여 각각의 미니모델 케이블을 제작하였고 AC 및 impulse 절연파괴 실험을 통해 두께효과를 조사하였다. 그리고 각 두께의 LPP를 이용하여 154kV급 고온초전도 케이블을 제작할 경우의 절연층 두께에 대하여 조사하였다.

2. 본 론

2.1. 미니모델 제작

송전급 고온초전도 케이블용 LPP의 두께효과를 알아보기 위해 유전율은 같고 두께가 100, 125, 170 μm인 LPP를 사용하여 Fig. 1과 같이 미니모델 케이블을 제작하였다. 미니모델 케이블은 외경 27 mm의 스테인리스강 포머 위에 전계 집중을 완화시키기 위하여 두께 130 μm, 폭 25 mm로 절단된 carbon paper 2 장을 butt-gap 1 mm를 두고 상하층 50 %의 중첩으로 권선하고, 그 위에 100, 125, 170 μm 두께의 LPP를 butt-gap 1 mm로 상하층간에 약 30 %씩의 중첩으로 6 장씩을 권선하였다. Fig. 2는 LPP의 적층 모습을 보여준다. 절연층의 butt-gap의 수가 절연파괴에 영향을 끼침으로 모든 미니모델의 butt-gap 수는 같게 하였다. 그리고 케이블 단부의 전계 집중을 완화시키기 위하여 절연지로 보강절연을 한 후 외부 반도전층으로 carbon paper 2 장을 내부 반도전층과 동일한 방법으로 LPP 위에 권선하고 접지단자를 연결하였다. 이렇게 제작된 미니모델 케이블의 전체길이는 390 mm이며 유효길이는 50 mm이다. 각 미니모델의 절연층 두께는 600, 750, 1020 μm로 제작되었으며 실험에 사용된 LPP는 건조기에 넣은 후 약 105 °C에서 4 시간 동안 건조하여 절연지의 수분을 완전히 제거하였다.

¹정 회 원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 석사과정

²정 회 원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 박사과정

³정 회 원 : 한국전기연구원 초전도연구센터

⁴정 회 원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 교수

*교신저자 : shkim@gsnu.ac.kr

원고접수 : 2008년 10월 01일

심사완료 : 2009년 03월 04일

게재확정 : 2009년 03월 04일

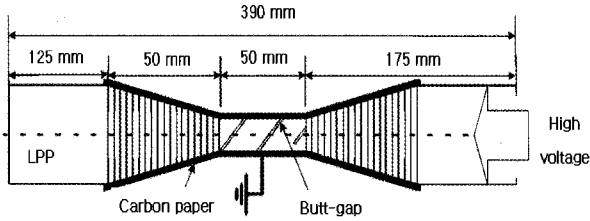


Fig. 1. Schematic of a mini-model cable.

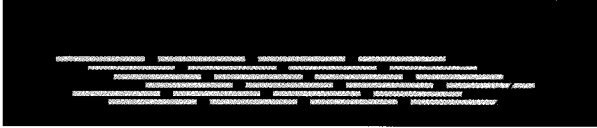


Fig. 2. Cross section of Insulation Layers.

2.2. 실험 장치 및 방법

Fig. 3은 cryostat 및 상부 플랜지의 개략도로 cryostat의 재질은 스테인리스강이며 사이에 진공층이 있는 이중 구조로 열침입을 줄여 액체질소에 안정을 줄 수 있게 되어 있다. GFRP 재질의 상부 플랜지와 cryostat는 기밀을 유지할 수 있는 구조이며 이전의 논문에서 AC 및 임펄스 절연파괴 전계가 0.3 MPa에서 포화되는 것으로 보고되어지고 있어 이번 실험에서도 게이지 압력 0.3 MPa에서 모든 절연파괴 실험을 실시하였다[2]. 제작된 미니모델 케이블은 고전압이 인가되는 부싱의 하부에 고정하고 액체질소에 완전히 잠기게 하여 충분히 냉각시켰으며, 액체질소의 자연 기화를 통해 cryostat 내부에 압력이 가해지도록 하였다. Fig. 4는 AC 및 impulse 전원의 사진으로 AC 전원은 최대 100 kV이며 1 kV/sec의 속도로 전압을 상승시켰다. Impulse 전원의 파형은 파두장파 파미장이 1.2 μs와 50 μs인 표준파형이고 극성은 절연에 있어 통상적으로 약조건인 부극성이며 최대전압은 400 kV로 4 kV씩 전압을 상승시켰다.

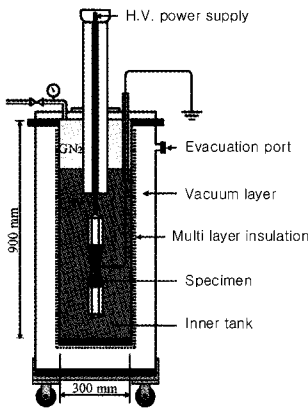


Fig. 3. Experimental apparatus.

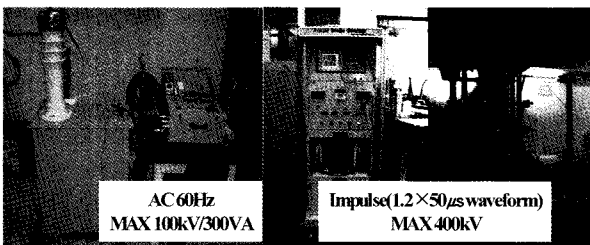


Fig. 4. Photograph of power source.

3. 절연파괴 실험결과 및 절연설계

3.1. 절연파괴 실험결과

송전급 고온초전도 케이블용 LPP의 두께효과를 알아보기 위해 100, 125, 170 μm 두께의 LPP로 각각 30개의 미니모델을 제작하여 AC 및 impulse로 나누어 15개씩 절연파괴 실험을 하였다.

실험결과는 식 (1)의 동축원통 전계 계산식에 의해서 전계로 나타냈다.

$$E = \frac{V}{x \ln \frac{r_o}{r_c}} \tag{1}$$

식 (1)에서 V는 절연파괴 전압이며 r_c는 포머와 내부 반도체층의 반경으로 13.76 mm이고, r_o는 r_c에 LPP 6장의 두께를 더한 값이다. 그리고 케이블에서 최대전계가 발생하는 지점은 도체표면임으로 x는 r_o와 같은 13.76 mm이다.

각 두께의 LPP로 제작된 미니모델 케이블의 AC 평균절연파괴 전계는 67.2, 60.4, 54.3 kV/mm로 나타났다. Fig. 5는 각 두께의 LPP로 제작된 미니모델 케이블의 AC 절연파괴 실험결과를 weibull 확률분포로 나타낸 것이다. 100 μm LPP로 제작한 미니모델 케이블의 경우 weibull 0.1% 파괴 확률의 전계가 52 kV/mm로 가장 높게 나타났고 125 μm LPP로 제작한 미니모델 케이블은 47.5 kV/mm이고 170 μm LPP로 제작한 미니모델 케이블은 39.6 kV/mm로 가장 낮게 나타나다. 이 결과들을 AC 절연설계에 있어 절연재료의 최대절연파괴 전계 E_{max}로 이용될 것이다[3].

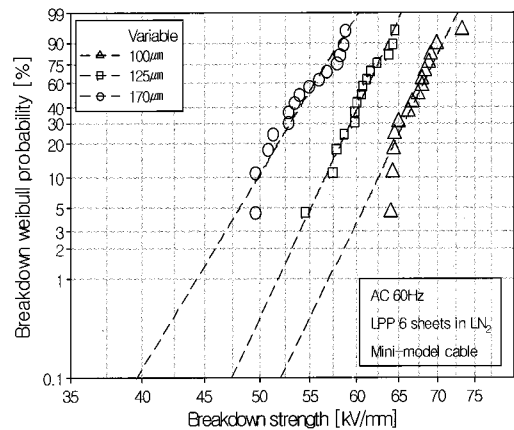


Fig. 5. Weibull distribution of AC breakdown strength of mini-model cables.

Impulse 절연파괴 실험은 부극성으로 40 kV에서부터 절연파괴가 일어 날 때까지 4 kV씩 전압을 상승시켰다. 100, 125, 170 μm 두께의 LPP로 제작된 미니모델 케이블의 impulse 평균절연파괴 전계는 116.7, 107.7, 98.1 kV/mm로 AC 절연파괴 전계보다 약 1.8 배 높게 나타났다. Fig. 6은 각 두께의 LPP로 제작된 미니모델 케이블의 impulse 절연파괴 결과를 weibull 확률분포로 나타낸 것이다. 100 μm LPP로 제작한 미니모델 케이블의 경우 weibull 0.1% 파괴 확률의 전계가 78.5 kV/mm로 가장 높게 나타났고 125 μm LPP로 제작한 미니모델 케이블은 74.6 kV/mm이고 170 μm LPP로 제작한 미니모델 케이블은 68.2 kV/mm로 가장 낮

게 나타나다. 이렇게 나타난 weibull 0.1% 파괴 확률의 전계를 impulse 절연설계에 이용하였다.

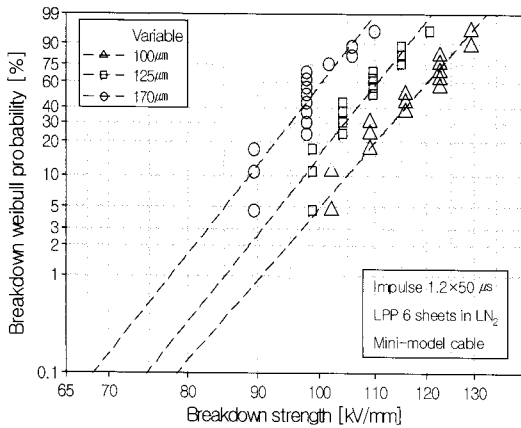


Fig. 6. Weibull distribution of impulse breakdown strength of mini-model cables.

3.2. 절연설계

고온초전도 케이블의 절연설계는 AC 및 impulse 최대절연파괴전계로 설계하는 방법과 부분방전개시전계를 이용한 방법이 있다[4]. 본 논문에서는 한 장의 두께가 100, 125, 170 μm인 LPP를 이용하여 절연을 할 때 송전급 고온초전도 케이블의 절연두께가 각각 어느 정도인지를 조사하였다.

$$t = r_c \left[\exp \frac{V_{(AC, imp)}}{E_{(AC, imp)} \times r_c} - 1 \right] \quad (2).$$

식 (2)에서 r_c 는 케이블 former, 고온초전도 선재, 내부반도전층의 두께로 15.2 mm로 정하였다. V 는 AC 및 impulse의 목표내전압이고 E 는 AC 및 impulse의 최대절연파괴전계이다.

먼저 AC 절연설계 방법에서 목표내전압 V_{AC} 는 초전도 케이블에 대한 AC 내전압 시험 규정이 없으므로 절연방법에 있어 유사한 154 kV급 유입 케이블의 AC 내전압 시험 전압에 여유치 1.2를 곱하여 360 kV로 정하였다[5]. 그리고 최대절연파괴전계 E_{max} 는 AC 절연 파괴 실험을 통해 얻은 weibull 확률분포에서 0.1% 파괴 확률의 전계로 각 두께에 대해 52, 47.5, 39.6 kV/mm이다. Impulse 절연설계 방법에서는 목표내전압 V_{imp} 는 154 kV 시스템의 BIL인 750 kV에 열화계수, 온도계수, 여유치 1.2를 곱하여 900 kV로 정하였다. 기존의 논문들에서 열화계수는 전압인가 횟수가 많아져도 거의 열화 되지 않는 것으로 보고되어 있음으로 1로 정하였고[6], 온도 계수는 고온초전도 케이블이 극저온에서 운전됨으로 1로 정하였다. 그리고 최대절연파괴전계 E_{max} 는 impulse 절연파괴 실험을 통해 얻은 weibull 확률분포에서 0.1% 파괴 확률의 전계로 각 두께에 대해 78.5, 74.6, 68.2 kV/mm이다.

Table 1은 각 두께에 대한 AC 및 impulse 절연설계 방법을 통해 계산한 송전급 고온초전도 케이블의 절연 두께이다. 가장 얇은 100 μm LPP를 사용하여 절연을 할 경우 AC 및 impulse 절연설계 방법에 의해 8.8, 17.1 mm로 나왔고, 125 μm LPP는 9.8, 18.4 mm, 170 μm LPP는 12.4, 21.0 mm로 나왔다. 고온초전도 케이블은 AC와 impulse 전압 모두에 대해서 절연파괴가 일어나지 않아야 함으로 절연두께는 17.1, 18.4, 21.0 mm

로 해야 할 것이다. Fig. 7은 LPP 한 장의 두께와 설계된 고온초전도 케이블의 AC 및 impulse 절연두께의 관계를 보여주는 것으로 두께효과가 있음을 나타낸다.

Table 1. Insulation design of 154 kV-class HTS cable.

Power source \ Thickness of LPP	100 μm	125 μm	170 μm
AC voltage	8.8 mm	9.8 mm	12.4 mm
Impulse voltage	17.1 mm	18.4 mm	21.0 mm

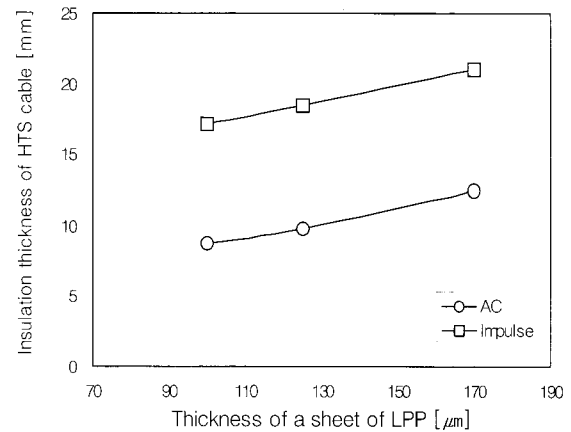


Fig. 7. Insulation thickness of HTS cable by thickness of a sheet of LPP.

4. 결 론

21세기 프론티어 연구개발 사업의 일환으로 개발 중인 154kV / 1GVA급 고온초전도 케이블은 코어 설계에 있어서는 대용량의 도체설계와 함께 전기 절연설계 역시 매우 중요한 요소 기술이라 할 수 있다.

본 연구에서는 고온초전도 케이블의 절연재료로 사용되는 LPP의 두께에 따른 절연특성을 조사하였고 100, 125, 170 μm LPP를 사용 할 경우의 고온초전도 케이블의 절연두께를 각각 17.1, 18.4, 21.0 mm로 설계하였다. 이처럼 두께효과가 있음으로 기계적 응력을 견딜 수 있는 범위 내에서 얇은 LPP를 이용하는 것이 절연층의 두께를 최소화 할 수 있다. 이런 두께효과가 나타나는 원인은 얇은 LPP를 권선하는 것이 두꺼운 LPP를 권선하는 것에 비하여 상대적으로 절연에 취약한 액체질소 층을 세분화하고 대부분의 절연파괴가 일어나는 butt-gap의 깊이도 축소 할 수 있어 절연내력이 향상되는 것으로 사료된다. 현재 개발 중인 154 kV급 HTS 케이블에서는 22.9 kV 초전도 케이블 개발에 사용된 119 μm에 대해 적용 검토 하였고 본 실험에 사용된 100, 125, 170 μm의 적용을 검토하고 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] H. J. Kim, D. S. Kwag, S. H. Kim, J. W. Cho, and K. C. Seong, "Electrical Insulation Design and Experimental Results of a High-Temperature Superconducting Cable", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, pp. 1743-1747, 2007.
- [2] 박동순, 천현권, 김해중, 조전욱, 정순용, 김상현, "고온초전도 케이블의 절연설계를 위한 적층효과", 한국전기전자재료학회지, 18권 10호, pp.950-955, 2005년 10월.
- [3] J. W. Choi, H. G. Cheon, H. J. Kim, J. W. Cho, S. H. Kim, "The Manufacture and Insulating Test of Mini-model for 154kV-Class HTS Cable", Proceeding of Applied Superconductivity Conference, pp.143, 2008.
- [4] 박동순, 천현권, 최재형, 김해중, 조전욱, 김상현, "고온초전도 케이블의 전기절연 설계 및 시험평가", 대한전기학회논문지, 55B권, 12호, pp.640-645, 2006년 12월.
- [5] "154kV 알루미늄과 유입케이블 및 부속제", 한전구 매시방서, 2001.01 개정.
- [6] Hiroshi Suzuki, Toshihiro Takahashi, Tatsuki Okamoto, Noboru Ishii, Shin-ichi Mukoyama, and Akio Kimura, "Verification Tests and Insulation Design Method of Cold Dielectric Superconducting Cable", IEEJ Trans. PE, Vol. 126, No. 4, pp. 441-451, 2006.



최재형(崔在亨)

1979년 6월 3일생, 2005년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



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 연구센터 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 연구센터 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.

저 자 소 개



최진욱(崔眞郁)

1982년 12월 29일생, 2007년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.