

고온초전도 케이블의 굴곡 변화에 따른 전기절연 특성

Electrical Insulation Characteristics of HTS Cables according to Bending Strain

곽동순^{1,*}, 김상현²

Dong-Soon Kwag^{1,*}, Sang-Hyun Kim²

Abstract: Research on the mechanical properties of the dielectric paper and mini-model cable are important for optimum electrical insulation design of HTS cable, because the HTS cable experience of mechanical stress, such as tensile and bending stress. Also, it is operated at cryogenic temperature. Therefore, this paper discusses the experiment results on the AC and lightning impulse breakdown characteristics, partial discharge inception and extinction characteristics, and external shape change of the insulation layer according to bending strain of the mini-model cable.

Key Words: HTS cable, insulation, breakdown, partial discharge, bending strain.

1. 서 론

고온초전도 케이블 시스템은 비등점 77 K인 액체질소의 극저온 환경에서 운전되기 때문에 기존의 OF케이블에서 사용되고 있는 절연재료의 기계적 굴곡 특성과 그에 따른 전기적 절연특성은 많은 차이를 보일 것으로 판단된다. 일반적으로 절연재료는 온도가 낮아짐에 따라 절연재료 고유의 탄성은 감소하게 되고 열 수축률 차에 의한 열 왜형 및 충격이 문제시 될 수 있다 [1,2]. 고온초전도 케이블의 절연재료로 사용되는 LPP(Laminated Polypropylene Paper)도 극저온에서는 실온에서보다 기계적 인장강도는 증가하겠지만 탄성력이 저하되고 열 수축이 발생하게 되어 전기적 절연성능의 저하도 뒤따를 것으로 생각된다. 고온초전도 케이블의 절연을 위해 지권을 할 때에는 절연지에 인장력이 가해지고, 케이블의 운반 및 포설 시에도 절연부에는 인장력과 굽힘력 등의 기계적인 외력이 가해지게 된다. 이때 케이블의 절연물은 기계적 스트레스에 따른 변형과 절연성능의 저하가 발생할 것으로 판단되지만 이에 관한 국내·외의 연구는 미비한 실정이다. 그러므로 기계적 굴곡 변형에 따른 케이블 절연부의 전기적 특성 변화를 파악할 필요가 있다 [3]. 또한 케이블 운반을 위한 보반의 굴곡반경 설계 시에도 케이블의 기계적 특성은 필수적으로 연구되어야 한다 [4].

본 연구에서 개발 중인 고온초전도 케이블은 코어 및 극저온 관로에 모두 유연성이 부여된 flexible형 케이블로서, 절연부의 구성은 일정폭으로 절단된 절연지를 각 층별로 일정 크기의 butt-gap을 주어 절연지상·하층 간에 중첩하여 감는 방식이다. 이러한 형태의 케이블은 운반 및 포설을 위해 일정한 기계적 굴곡 스트레스에 대해 견뎌야하기 때문에 그에 따른 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 절연지의 중첩률을 30 %로 하여 제작한 미니모델 케이블을 사용하여 다양한 굴곡반경에 따른 AC 및 임펄스, 부분방전 등의 전기적 절연 특성들을 살펴보고 굴곡 시 케이블 절연부의 외형변화와 절연파괴 형상을 관찰하였다.

2. 실 험

2.1. 절연재료 및 시료의 구성

고온초전도 케이블의 절연재료로 사용된 LPP는 2장의 크라프트지(Kraft Paper)와 1장의 폴리프로필렌(Polypropylene) 필름을 thermal calendering 공정을 통해 압착하여 제작된 반합성지이다. LPP의 기본적인 특성을 표 1에 나타낸다.

Table 1. Basic properties of LPP.

Product name	TERLAM IPP (made in Finland)
Given name	LPP(Laminated Polypropylene Paper)
Density	0.89 g/cm ³
Tensile strength Machine direction(MD) Cross direction(CD)	7.42 kN/m 4.45 kN/m
Polypropylene ratio	57 %
tanδ (100 °C vacuum dry)	0.055 %
Thickness	120.8 μm (nominal: 119 μm)

그림 1은 고온초전도 케이블의 굴곡 변화에 따른 전기절연 특성을 조사하기 위해 제작한 미니모델 케이블의 구성도를 보여준다. 미니모델 케이블의 구조는 주름관으로 된 직경 25mmφ의 스테인리스 포머 위에 두께 0.15 mm의 스테인리스 테이프를 한층 감아서 표면을 평활하게 하였다. 그 위에 내부 반도체층으로 두께 0.13 mm의 카본지 2매를 감고, 케이블의 절연 두께가 1mm가 되도록 LPP를 감았다. 케이블 절연을 위해 사용된 LPP는 폭 25 mm로 절단하여 각 층별로 절연지간에 1.5 mm의 butt-gap을 주어 절연지

¹정 회 원 : 경일대학교 소방방재학부 전임강사

²정 회 원 : 경상대학교 전기공학과 및 공학연구원 교수

*교신저자 : dskwag@kiu.ac.kr

원고접수 : 2009년 02월 23일

심사완료 : 2009년 03월 09일

게재확정 : 2009년 03월 09일

상·하층 간에 약 30 %씩 증첩하여 감았다. 본 실험에서는 케이블 굴곡 시 butt-gap의 간격변화를 좀 더 쉽게 관찰하기 위하여 통상의 경우인 1 mm 보다 좀 더 넓게 제작하였다. 마지막으로 절연층 위에 카본지 2매를 감아 외부 반도체층을 만들어 주었다. 이렇게 제작된 미니모델 케이블의 직경은 약 30 mmφ이며, 본 케이블은 수 제작이 곤란하여 LS전선의 OF케이블 지권장치를 이용하여 제작하였다. 또한 제작된 케이블의 절연 시험 시 케이블 단부의 전계 집중을 완화시켜 주기 위하여 동일 절연지로 보강절연을 해 주었다.

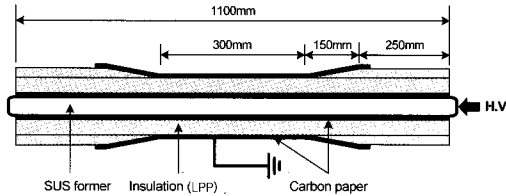


Fig. 1. Schematic diagram of the mini-model cable for bending test.

2.2. 실험방법 및 장치

고온초전도 케이블의 굴곡 특성을 조사하기 위해 다양한 직경을 갖는 드럼을 이용하여 굽힌 미니모델 케이블의 사진 및 개략도를 그림 2의 (a)와 (b)에 각각 나타낸다. 그림에서 r은 케이블 반경 15 mm로 항상 일정한 값을 가지고, R은 케이블 굴곡반경을 나타내며, θ는 하나의 절연지폭 25 mm에 대한 굴곡 각을 나타낸다. 또한 케이블 반경 r과 굴곡반경 R을 이용하여 케이블의 굴곡반경 배수 R/r을 10배, 15배, 20배, 25배, ∞(직선)의 5가지 종류의 시료를 제작하였으며, R/r이 작은 값일수록 심한 굽힘을 나타낸다.

또한 케이블 굴곡 시 코어 안쪽과 바깥쪽의 butt-gap 간격의 변화를 G라고 한다면, 케이블 바깥쪽 butt-gap 간격은 G만큼 늘어나고 케이블 안쪽 butt-gap 간격은 G만큼 줄어들게 된다.

$$W + 2G = (R + 2r)\theta \tag{1}$$

$$W = R\theta \tag{2}$$

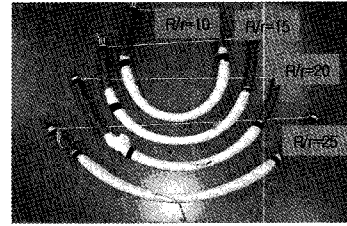
가 성립하게 되며, 이를 정리하면

$$\frac{R}{r} = \frac{W}{G} \tag{3}$$

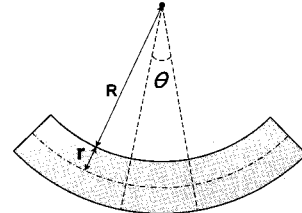
가 되는데 이것은 케이블 코어의 설계 굴곡반경에 따라 조정이 될 수 있다.

제작된 미니모델 케이블 시료들은 굴곡반경에 따른 AC 및 임펄스 절연파괴 특성과 부분방전 개시 및 소멸 특성을 조사하였으며, 굴곡 시 케이블 절연부의 외형변화와 절연파괴 형상을 관찰하여 기록하였다. 실험은 케이블의 열적인 안정을 위하여 대기압 액체질소에 1시간 이상 침적하여 충분히 냉각시킨 후 이루어졌다. 모든 결과 값은 각 10회 이상의 실험을 통해 구해졌으며, 그래프에는 실험 데이터의 평균과 오차범위, 추세선을 나타내었다. 또한 절연파괴 및 부분방전 전계 값은 절연체에 인가된 전압을 동축원통 구조의 전계 계산식에 의해 계산되었으며, 절연파괴는 시료가 절연파괴 되는 전계 값을 기록하였고 부분방전은 교류전압을 인가하면서 방전전하량이 2 pC 이상 검출되는 지점을 기준으로 개시 및 소멸 전계 값을 기록하였다.

실험에 사용된 교류내전압 시험장치는 출력 0.1 kW, 최대전압 100 kV이며, 충격내전압 시험장치는 저장에너지 15 kJ, 최대전압 400 kV, 파두장 1.2 μs, 파미장 50 μs의 표준 뇌임펄스를 사용하였다.



(a) photograph



(b) schematic diagram

Fig. 2. Photograph and schematic diagram of the bended mini-model cable.

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 미니모델 케이블의 굴곡 변화에 따른 AC 및 임펄스 절연파괴 전계를 나타낸다. 그림에서 임펄스 특성이 AC의 경우보다 높은 절연파괴 특성을 나타내고 있으며, 어느 경우든지 다음과 같은 유사한 경향을 보이고 있다. 굽히지 않은 케이블과 굴곡반경이 25 배인 케이블의 경우는 거의 비슷한 절연파괴 전계 값을 보이고 있으나, R/r이 감소할수록 점차 낮은 값을 보이며, 약 10배인 경우에는 굽히지 않은 케이블과 비교해서 약 2배 정도로 급격하게 감소하고 있다. 이와 같이 케이블의 굴곡반경이 작아질수록 절연파괴 전계가 낮아지는 이유는 절연지에 가해지는 기계적 스트레스와 인장력을 받게 되는 케이블의 바깥쪽 butt-gap의 면적이 넓어지면서 더 많은 약점이 존재하게 되는 체적효과에 기인한 것으로 생각된다[5].

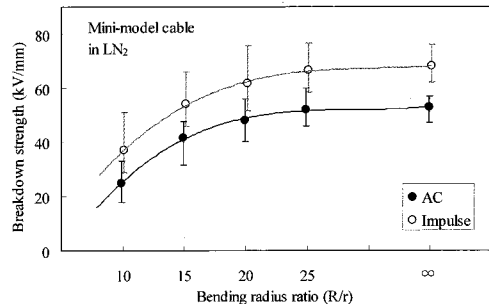


Fig. 3. AC and impulse breakdown strength of the mini-model cable in LN₂ according to bending radius ratio(R/r).

그림 4는 굴곡 시험용 미니모델 케이블의 굴곡반경에 대한 부분방전 개시 및 소멸 전계 값을 나타낸다. 미니모델 케이블의 굴곡반경에 따른 부분방전 특성도 절연파괴 특성과 유사한 경향을 나타내고 있으며, 앞

서 언급한 butt-gap의 면적에 따른 체적효과에 기인한 것으로 판단된다.

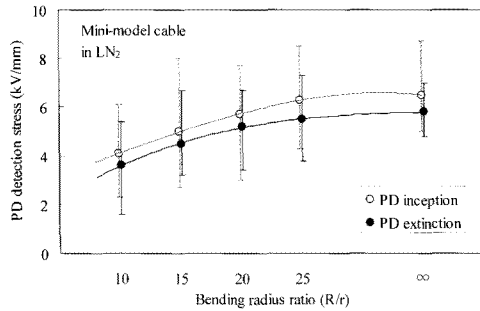


Fig. 4. Partial discharge inception and extinction stress of mini-model cable in LN₂ according to bending radius(R/r).

본 실험에 사용된 굴곡 시험용 미니모델 케이블의 절연지폭 W는 25 mm이고, butt-gap의 크기 G는 1 mm로 제작 되었으므로, 식 (3)에 의해 케이블의 최대 굴곡반경은 약 25배이다. 이는 미니모델 케이블의 굴곡반경에 따른 AC 및 임펄스, 부분방전 실험결과와 비교해 볼 때 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

표 2는 미니모델 케이블의 굴곡반경 변화에 따른 LPP 절연층의 최내측 및 최외측에서의 butt-gap의 크기 변화를 관찰하여 보여준다. 굴곡반경이 25배인 경우에는 절연 내측의 butt-gap은 응력을 받아 크기가 점차 줄어들기 시작하였으며, 외측부에서는 장력으로 인해 butt-gap 크기가 점차 커지기 시작하였다. R/r이 15배인 경우에는 절연층 내측의 butt-gap에서 응력 때문에 발생한 습곡현상의 자국이 최초로 발견되었고, 외측의 절연지 표면에는 희미한 백화현상이 발견되었다. R/r이 10배의 경우에는 내측에 더욱더 뚜렷한 습곡현상이 2겹으로 나타났으며, 외측의 절연지 표면에는 백화현상이 더욱 두드러졌다.

Table 2. Photograph and butt-gap size of inside and outside of insulation layer according to cable bending radius ratio(R/r).

R/r	Insulation layer of cable		Butt-gap(G)	
	Inside	Outside	Inside (mm)	Outside (mm)
∞			1.5	1.5
25			0.8	1.8
20			0.7	2.4
15			0.6	3.0
10			0	3.9

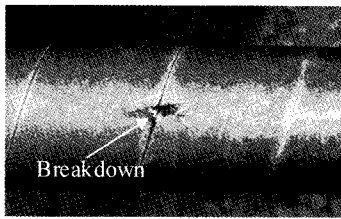
표 3은 미니모델 케이블에서 내도체 직상층에서의 굴곡 변화에 따른 LPP와 카본지의 외형변화를 관찰하여 나타낸다. 표의 사진에서 알 수 있듯이 굽히지 않은 직선 케이블과 R/r이 25배인 경우에는 LPP와 카본지의 외형상 변형이 전혀 일어나지 않았으며, 단지 케이블 내도체에 의해 눌린 자국이 미세하게 관찰되었다. R/r이 20배인 경우에는 부분적으로 butt-gap에서의 일그러짐 현상이 나타났으며, R/r이 15배의 경우에는 일그러짐이 매우 뚜렷이 관찰되었을 뿐만 아니라 내부 반도체층의 카본지에서는 부분적으로 종이 찢어져 크랙이 발생하였으며, 이는 케이블의 절연내력을 저하시키는 중요한 요인으로 작용하였을 것으로 판단된다.

Table 3. Photograph of insulation layer and inner screen according to cable bending radius ratio(R/r).

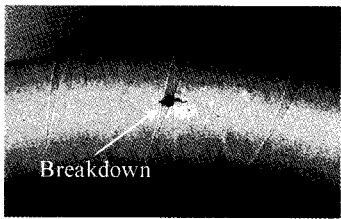
R/r	Insulation layer and inner screen	
	LPP (1st layer)	Carbon paper (inner screen)
∞		
25		
20		
15		

그림 5는 굴곡반경이 직선인 경우와 20배, 10배인 경우에 대해 절연파괴가 일어난 미니모델 케이블의 방전 흔적을 (a), (b), (c)에 각각 나타낸다. 그림 (a)에서와 같이 굽히지 않은 케이블의 경우는 butt-gap을 절연파괴의 출발점으로 하고 있다. 이것은 앞서 언급했듯이 복합절연물에 교류전압을 인가한 경우, 비유전율 차에 의해 LPP와 butt-gap 내부 액체절소의 전계 분담이 다르게 되고, 비유전율(ϵ_r)이 2.7인 LPP보다 1.42인 액체절소에서 상대적으로 방전이 먼저 시작되는 것으로 생각된다. 그러나 그림 (b)의 굴곡반경이 20배인 케이블의 경우는 케이블의 굽힘에 따른 기계적 스트레스에 의해 표면에 약간의 백화현상이 보이지만 절연파괴는 butt-gap에서 발생하였다. 굴곡반경이 작아지면서 케이블 바깥쪽 butt-gap의 면적은 넓어지고 안쪽은 겹치게 되어 결함이 발생함과 동시에 체적효과와 영향을 받은 것으로 생각된다. 또한 그림 (c)의 굴곡반경 10배인 경우는 표면에 백화현상과 크랙이 심하게 발생하였고 케이블 안쪽의 butt-gap은 서로 겹쳐져 있음을 확인할 수 있었다. 이 경우의 절

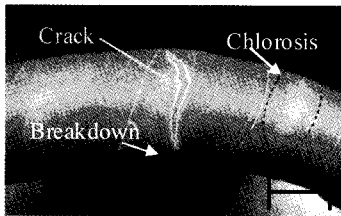
연파괴는 butt-gap이 아닌 불균일하게 찢어진 크랙에서 방전이 시작되었으며, 이것이 굴곡반경 10배일 때 절연파괴 전압이 급격하게 낮아지는 이유라고 볼 수 있겠다.



(a) $R/r = \infty$



(b) $R/r = 20$



(c) $R/r = 10$

Fig. 5. Electrical breakdown traces of mini-model cable according to variation of cable bending ratio(R/r).

이상의 결과들로부터, 실용상의 고온초전도 케이블의 포설 및 운반을 위한 굴곡반경은 25배 이상으로 하는 것이 케이블 전체의 전기적 열화에 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다. 또한 고온초전도 케이블은 극저온 환경에서 운전되기 때문에 상온 전력케이블에 비해 기계적 스트레스를 더 받게 되므로 여유치를 고려할 필요가 있다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 미니모델 케이블을 사용하여 굴곡 변형에 따른 극저온에서의 전기적 절연특성을 조사하고 굴곡 시 케이블 절연부의 외형변화와 절연파괴 형상을 관찰하였다.

케이블 굴곡 실험에서 굴곡반경이 작아짐에 따라 케이블 바깥쪽의 절연층에서는 인장력이 작용하여 절연지가 찢어져 크랙이 생기거나 백화현상이 발생하였고, 안쪽은 수축력이 작용하여 서로 겹치거나 구김이 생겼다. 이에 따라 굴곡반경이 작은 케이블일수록 낮은 절연내력을 보였으며, 굴곡반경이 약 25배 이상이면 직선의 케이블과 거의 유사한 값을 나타내었다. 또한 케이블의 굴곡반경을 너무 작게 하면 표면에 백화현상과 크랙이 발생하여 케이블의 절연강도를 급격히 저하시켰다. 따라서 실용상의 초전도 케이블의 제작과 운반 및 포설 시에 이러한 것에 대한 주의가 요구된다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 지정 경일대학교 자동차부품시험지역혁신센터의 지원 및 경일대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] S. Nishijima, and M. Hara, "Mechanical influence on long-term dielectric performance of insulates", *Cryogenics*, Vol. 38, No. 11, pp. 1105-1113, 1998.
- [2] 김영석, 광동순, 한철수, 김해중, 성기철, 김상현, "액체질소 중에서 기계적 응력에 따른 mini-model 케이블의 전기적 특성", 한국초전도저온공학회 논문지, 6권, 1호, pp. 22-27, 2004.
- [3] M. J. Jefferes, "Dielectric Loss and Voltage Breakdown in Liquid Nitrogen and Hydrogen", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, Vol. 5, No. 3, pp. 83-91, 1970.
- [4] S. Mukoyama, "Design and Production of High-Tc Superconducting Power Transmission Cable", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 11, No. 1, pp. 43-46, 2001.
- [5] H. Okubo, "Partial Discharge Inception Characteristics under Butt Gap Condition in Liquid Nitrogen/PPLP Composite Insulation System for High Temperature Superconducting Cable", *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 9, No. 6, pp. 939-944, 2002.

저 자 소 개



광동순(郭東洵)

1975년 9월 3일생, 2002년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2008년~현재 경일대학교 소방방재학부 전임강사.



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 경상대학교 공대 전기공학과 교수.