

고온초전도 케이블의 절연강도에 미치는 butt gap 의 영향

곽동순*, 김영석*, 뤼엔반동*, 김해종**, 김상현*

*경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

**한국전기연구원 초전도응용그룹

The Effect of Butt Gap in Insulation Properties for a HTS Cable

D.S.Kwag*, Y.S.Kim*, N.V.Dung*, H.J.Kim**, S.H.Kim*

*Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University
and Engineering Research Institute

**Applied Superconducting Lab, KERI

kds3868@empal.com

Abstract - In this paper, we studied electric insulation characteristics of synthetic Laminated Polypropylene Paper (LPP) in liquid nitrogen (LN₂) for the application to high temperature super-conducting (HTS) cable. And, we selected the insulation paper/LN₂ composite insulation type for the electric insulation design of a HTS cable. Furthermore, we compared the breakdown characteristics of the butt gap and bended mini-model cable that comes into being in this kind of cryogenic insulation type. It is necessary to understand the winding parameter of insulation paper/LN₂ composite insulation.

1. 서 론

고온초전도 케이블의 전기절연 방식은 크게 복합절연방식과 Solid 절연방식이 있으며, 본 연구에서 개발 중인 고온초전도 케이블의 절연은 복합절연방식을 따랐으며, 교류 케이블에서는 유전손실이 문제가 되므로 유전상수(Dielectric constant) 및 손실인자(Dissipation factor)가 작은 polypropylene(PP)과 kraft의 반합성지인 laminated polypropylene paper(LPP)를 채택하였다. 그러나 이러한 절연지와 액체질소의 복합절연방식에서는 케이블 구조상 절연 내부에 butt-gap과 같은 결함이 존재하게 되며, 이 같은 결함들은 고온초전도 케이블 절연에 있어서 많은 문제점들을 유발하는 것으로 알려져 있다[1-3].

또한, 고온초전도 케이블은 유연성에 따라 케이블코아와 극저온관로가 유연성이 없는 파이프 형태의 Rigid형 케이블과 유연성을 부여하여 굽힘을 줄 수 있는 Flexible형 케이블로 분류될 수 있다. 현재 세계적으로 Flexible형 케이블이 주로 검토되고 있는 실정이며[4-5], 본 개발 연구에서도 Flexible형을 채택하였다. Flexible형

케이블의 경우 단열관로 및 케이블 코아를 일괄적으로 공장에서 제작하여 품질신뢰성을 향상시킬 수 있고 Rigid형에 비해 장척의 케이블을 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 케이블 포설시 및 운반을 위해 대형 보빈에 감기 위해서는 일정한 곡률반경에 대해 견뎌야 하며, 이를 위한 최적의 곡률반경이 결정되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 케이블 절연부에 존재하게 되는 butt gap의 간격을 결정하여 미니모델 케이블을 제작한 후, 다양한 곡률반경에 따른 AC 및 임펄스, 부분방전 등의 전기적 절연 특성들을 연구하여 고온초전도 케이블 절연에 있어서의 가장 적합한 곡률반경을 결정하였다.

2. 실 험

2.1 시료 및 전극계 구성

실험에 사용된 시료인 LPP는 두께가 각각 25 μ m인 두장의 kraft지 사이에 두께 69 μ m의 polypropylene을 thermal calendering 공정을 통해 압착하여 제작된 반합성지이다. 본 연구에서 케이블 절연재료로 사용된 LPP는 핀란드 제품이며, 밀도가 0.89g/cm³, 100 $^{\circ}$ C 진공건조시의 $\tan\delta$ 는 0.055%, polypropylene 비율 57%의 기본적인 특성들을 가진다.

그림 1은 butt gap 간격을 결정하기 위하여 구성된 전극계를 나타낸다. 시료의 크기는 연면에 의한 방전을 막기 위하여 ϕ 90mm 이상의 원형으로 잘랐으며, 시료는 3장의 LPP 중에서 고전압측의 첫 번째와 두 번째 시료에 각각 ϕ 6mm의 구멍을 뚫어서 그 거리를 변화시키면서 실험하였다. 실험에 사용된 모든 시료는 『NREL Standard Procedures(#001)』의 수분측정법에 따라 건조기에 넣은 후 약 105 $^{\circ}$ C에서 4시간 건조하여 절연지의 수분을 완전히 제거하였다. 또한 실험용 전극은 상부 ϕ 40mm, 하부 ϕ 60 mm의 SUS 평판전극을 사용하였으며, 상부 고전압측 전극의 가장자리(edge)는 전계집

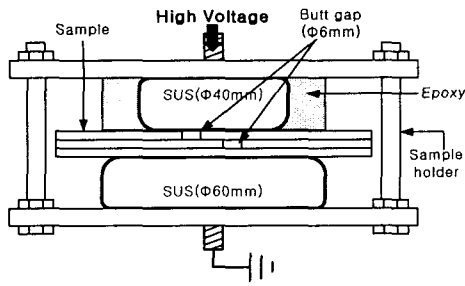
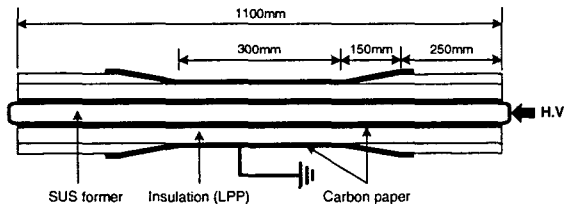


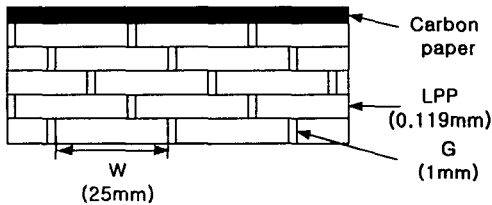
Fig.1. Electrode system

중의 영향을 막기 위하여 epoxy 수지로 몰딩 하였다. Sample holder는 극저온 특성과 내구성이 뛰어난 Fiberglass Reinforced Plastic (FRP)을 사용하였다.

그림 2는 실제 케이블에 적용할 수 있는 절연 데이터를 확보하기 위하여 제작한 미니모델 케이블의 구성도이다. 그림 2(a)는 제작된 미니모델 케이블의 전체 단면도를 나타내며, 그림 2(b)와 같은 절연 구성을 하고 있다. 고전압을 인가하기 위한 내부 전극은 SUS 포머 위에 반도체성 카본지 2겹을 감았으며, 외부 전극은 카본지 2겹을 감은 후 구리테이프를 구성하였다. 절연 구성은 폭 25mm로 절단한 LPP를 각 층별로 절연 지간 1mm의 butt gap을 주어 상하층간에 약 30%씩 중첩(overlap)하여 두께 1mm로 절연하였다. 이렇게 제작된 미니모델 케이블의 반경은 15mm이다. 케이블 단부의 전계 완화를 위하여 내부 전극에는 스트레스콘을 만들었으며, 외부 전극에는 보강절연을 하였다.



(a) Schematic of mini-model cable

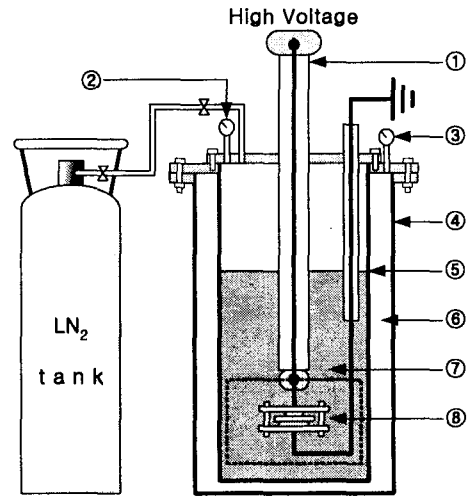


(b) Insulation composition

Fig.2. Mini-model cable for bending and insulation composition

2.2 실험장치 및 방법

그림 3은 실험장치의 개략도를 나타내며, 주요부분은 전극계와 고전압 인가부, 열절연부로 구성된다. 시료의 절연내력을 측정하기 위해 전극계를 cryostat의 상부 플렌지에 부착하고 액체질소에 침적시킨 후 그 절연파괴 전압을 기록



① H.V Bushing	② Pressure Gauge
③ Vacuum Gauge	④ Outer Dewar
⑤ Inner Dewar	⑥ Vacuum Layer
⑦ Liquid Nitrogen	⑧ Sample

Fig.3. Schematic of experimental apparatus

하였다. 또한, 곡률반경 시험용 미니모델 케이블은 AC 및 임펄스 절연파괴 전압과 부분방전 개시·소멸 전압을 측정하였으며, 실험은 케이블의 열적인 안정을 위하여 대기압에서 액체질소에 1시간 이상 침적하여 충분히 냉각 후 이루어졌다. 모든 결과 값은 각 10회 이상의 실험을 통해 구해졌으며, 그래프에는 실험 데이터의 평균과 오차범위, 추세선을 나타내었다. 그리고 전계값은 절연파괴 전압 및 인가된 전압값에 절연 두께를 나누어 환산되어진 값이다.

고전압 인가를 위하여 교류는 최대전압 100kV의 AC 60Hz 전원을 사용하여 1kV/sec의 속도로 상승시켰으며, 임펄스전원은 최대전압 300kV의 $1.2 \times 50 \mu s$ 파형을 가지는 표준임펄스를 사용하였다. 부분방전은 일본계측기사의 IEC6027 측정기를 사용하여 방전 전하량이 5pC을 기준으로 하여 이를 초과할 때의 값을 개시전계로 하고, 그 이하로 떨어질 때의 값을 소멸전계로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Butt gap 에서의 절연파괴 특성

절연지를 이용한 복합절연에서는 일정한 폭의 절연지를 중첩하여 감는 방식이므로 케이블 제작에 있어서는 중첩율과 butt gap은 "유체(fluid)의 체적"과 직결하게 되고, 이것은 케이블의 절연강도에 영향을 미치게 되므로 절연지 상하층간의 중첩율은 매우 중요한 부분을 차지하게 된다. 따라서 중첩율은 절연지 상하층간의 겹치는 정도를 나타내며, butt gap 사이의 간격을 결정함으로써 구해질 수 있다.

그림 4는 중첩율을 결정하기 위하여 3장의 LPP 시료에 upper hole과 middle hole을 만

들어 butt gap 사이의 간격을 변화시키면서 측정한 AC 절연파괴 전압을 나타내며, 이때의 butt gap 간격에 따른 방전경로를 살펴보면 그림 5의 (a), (b)와 같이 나타났다.

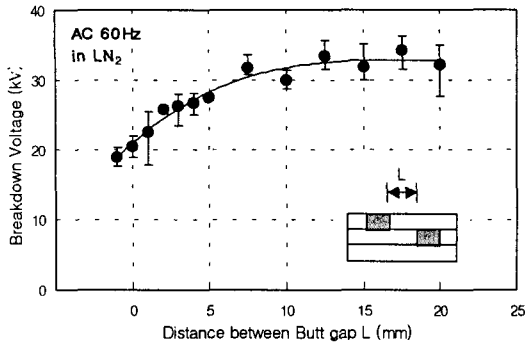


Fig.4. AC breakdown voltage by distance between butt gap

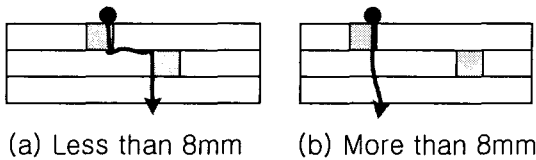


Fig.5. Breakdown channel by distance between butt gap

그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 butt gap 간격 L이 커짐에 따라서 절연파괴 전압이 상승한 후 포화하는 경향을 보이고 있다. 즉 butt gap 간격이 8mm 이하인 경우에는 그림 5(a)와 같이 upper hole과 middle hole 사이에 연면 방전이 발생하여 절연파괴가 일어나고, 이때의 절연파괴 전압은 아주 낮은 값을 보인다. 그러나 butt gap 간격이 8mm 이상인 경우에는 그림 5(b)와 같이 upper hole을 통해 절연파괴가 일어나고, 이때의 절연파괴 전압은 연면방전의 경우보다 높은 값을 보이고 있다. 그리고 butt gap 간격이 8mm 이상부터는 거의 동일한 절연파괴 전압을 보였다. 이 실험을 통해서 LPP의 액체질소 중에서 가장 적합한 butt gap 간격(L)을 8mm로 정하고 절연지폭(W) 25mm에 대한 중첩율을 다음 식에 의해,

$$\text{중첩율}(\%) = \left(\frac{L}{W}\right) \times 100 \quad (1)$$

약 30%로 결정할 수 있었으며, 미니모델 케이블은 이 값을 적용하여 제작하였다.

3.2 미니모델 케이블의 절연파괴 특성

본 연구에서 개발 중인 고온초전도 케이블은 케이블코아 및 극저온관로에 모두 유연성이 부여된 Flexible형 케이블이므로, 케이블 포설시 및 운반을 위해 대형 보빈에 감기 위해서는 일정한 곡률반경에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 절연지의 중첩율을 30%로 하여 제작

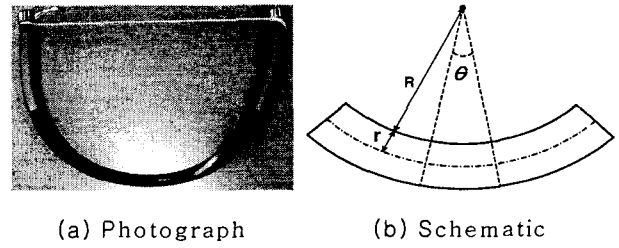


Fig.6. Schematic of bended mini-model cable

한 미니모델 케이블을 사용하여 다양한 곡률반경에 대한 전기적 절연특성들을 연구하였다.

그림 6는 고온초전도 케이블의 곡률반경을 결정하기 위하여 다양한 반경을 가지는 드럼을 이용하여 굽힌 미니모델 케이블의 사진 및 구성도를 (a), (b)에 각각 나타낸다. 그림에서 r은 케이블 반경(r=15mm)으로써 항상 일정한 값을 가지고, R은 케이블 곡률반경을 나타내며, θ 는 하나의 절연지폭(25mm)에 대한 곡률각을 나타낸다. 또한 케이블 반경 r과 곡률반경 R을 이용하여 케이블의 곡률반경 배수 R/r을 10배, 15배, 20배, 25배, straight(굽히지 않은 경우)의 5가지 경우로 하여 케이블을 제작하였으며, R/r이 작은 값일수록 심한 굽힘을 나타낸다. 또한 케이블 최대 굴곡시의 butt gap 크기를 살펴보면, 케이블 바깥쪽은 butt gap 만큼 늘어나고, 안쪽은 butt gap 만큼 줄어들게 된다.

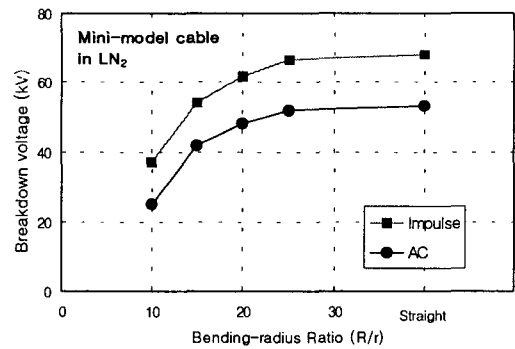


Fig.7. AC and impulse breakdown voltage by bending ratio of mini-model cable

그림 7은 제작된 곡률반경 시험용 미니모델 케이블의 곡률반경 배수에 대한 AC 및 임펄스 절연파괴 전압을 나타낸다. 그림에서 임펄스 특성이 AC의 경우보다 높은 절연파괴 특성을 나타내고 있으나, 어느 경우든지 다음과 같은 유사한 경향을 보이고 있다. 굽히지 않은 케이블과 곡률반경 배수 R/r이 25배인 케이블의 경우는 거의 비슷한 절연파괴 전압값을 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 곡률반경이 작아질수록 절연파괴 전압

이 낮아지는 이유는 절연지에 가해지는 기계적 스트레스와 인장력을 받게 되는 케이블의 바깥쪽 butt gap의 면적이 넓어지면서 더 많은 약점이 존재하게 되기 때문이라고 생각된다. 케이블 절연부의 절연파괴는 butt gap에서 항상 출발하게 되고, butt gap의 면적이 넓어지게 되면 부분방전이 일어나게 될 확률이 그 만큼 높아지게 되는 체적효과에 기인한 것이라 사료된다[6].

그림 8은 미니모델 케이블의 곡률반경 배수에 대한 부분방전 개시 및 소멸 전계를 나타낸다. 그림에서 굽히지 않은 케이블의 경우 곡률반경 배수 R/r이 25배인 경우의 부분방전 개시전계와 거의 비슷한 값을 보이고 있으며, R/r이 25배 미만인 경우에는 곡률반경이 감소할수록 부분방전 개시 전계값도 점차 낮아지고 있다. 따라서 고온초전도 케이블의 곡률반경에 따른 부분방전 특성도 절연파괴 특성과 유사한 경향을 나타내고 있으며, 앞에서 언급한 butt gap 면적에 따른 체적효과에 기인한 것으로 사료된다.

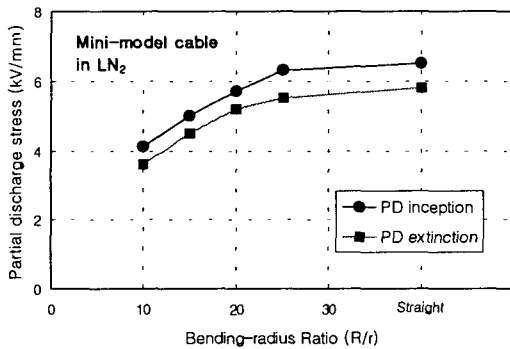


Fig.8. Partial discharge by bending ratio of mini-model cable

본 실험에 사용된 곡률반경 시험용 미니모델 케이블의 LPP 절연지폭(W)은 25mm, butt gap 크기(G)는 1mm로 제작 되었으므로, 그림 6(b)를 참고하여 케이블의 최대 곡률반경 배수 R/r는 다음 식으로 구할 수 있다.

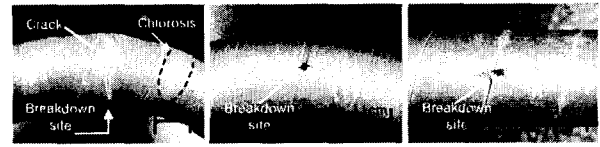
$$W + 2G = (R + 2r)\theta \quad (2)$$

$$W = R\theta \quad (3)$$

$$\frac{R}{r} = \frac{W}{G} \quad (4)$$

이 경우의 식(4)를 이용한 최적 곡률반경 배수 R/r을 구하면 약 25배이며, 이는 미니모델 케이블의 곡률반경에 따른 AC 및 임펄스, 부분방전 실험 결과와 비교해 볼 때 거의 유사한 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터, 실용상의 고온초전도 케이블의 포설 및 운반을 위한 곡률반경 배수 R/r은 25배 이상으로 하는 것이 케이블 전체의 열화에 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다. 또한, 고온초전도 케이블은 극저온 환경에서 운전되기 때문에 상온 전력케이블에 비해 기계적 스트레스를 더 받게 되므로 여유치를 고려할 필요



(a) R/r=straight (b) R/r=20 (c) R/r=10

Fig.9. Breakdown site by bending ratio of mini-model cable

가 있을 것이다.

그림 9는 곡률반경 배수 R/r=straight, R/r=20, R/r=10 인 경우에 대해 절연파괴가 일어난 미니모델 케이블의 방전 흔적을 (a), (b), (c)에 각각 나타낸다. 그림 9(a)의 사진에 나타난 것과 같이 굽히지 않은 케이블의 경우는 butt gap을 절연파괴의 출발점으로 하고 있다. 이것은 앞서서 언급했듯이 교류전압을 인가한 경우, LPP와 butt gap 내부 액체질소의 전계 분담이 다르게 되고, LPP($\epsilon_r \approx 2.7$)보다 유전율이 낮은 액체질소($\epsilon_r \approx 1.42$)에서 방전이 시작되는 것으로 생각된다. 그러나 그림 9(b)의 곡률반경 배수가 20배인 케이블의 경우는 케이블의 굽힘에 따른 기계적 스트레스에 의해 표면에 약간의 백화현상이 보이지만 절연파괴는 butt gap에서 발생하였다. 곡률반경이 작아지면서 케이블 바깥쪽 butt gap의 면적은 넓어지고 안쪽은 좁아져서 결함이 발생함과 동시에 체적효과의 영향을 받을 것으로 생각된다. 또한 그림 9(c)의 곡률반경 배수가 10배인 경우는 표면에 백화현상과 crack이 발생하고 케이블 안쪽의 butt gap은 서로 심하게 겹쳐져 있다. 이 경우의 절연파괴는 butt gap이 아닌 불균일하게 찢어진 crack에서 방전이 시작되었으며, 이것이 곡률반경 배수가 10배일 때 절연파괴 전압이 급격하게 낮아지는 이유라고 볼 수 있겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온 초전도 케이블의 최적 절연설계를 위하여 LPP 절연지와 액체질소로 구성된 복합절연 방식에서 butt gap이 절연에 미치는 영향을 조사하였으며, 절연지의 중첩율과 butt gap 간격을 결정한 후 일정한 곡률반경을 가지는 미니모델 케이블을 제작하여, AC 및 임펄스, 부분방전 특성들을 측정하였다.

Butt gap 사이의 연면방전 실험을 통하여 절연지 상하층간의 중첩율을 30%로 결정하였으며, 곡률반경 실험을 위해 절연지폭 25mm, butt gap 1mm로 하여 일정한 곡률반경을 가지는 미니모델 케이블을 제작하였다. 미니모델 케이블에서는 곡률반경 배수가 작아짐에 따라 케이블 바깥쪽의 절연층에서는 인장력이 작용하여 찢어져 crack이 생기거나 백화현상이 발생하였고, 안쪽은 수축력이 작용하여 서로 겹치거나 구김이 생겼다. 이에 따라 곡률반경이 작은 케이블일수록 낮은 절연내력을 보였으며, 곡률반경 배수가

약 25배 이상이 되면 직선의 케이블과 거의 유사한 값을 나타내었다. 또한 케이블의 곡률반경을 너무 작게 하면 표면에 백화현상과 crack이 발생하여 케이블의 절연강도를 급격히 저하시켰다.

따라서 실용상의 초전도 케이블의 제작과 운반 및 포설시에 이러한 것에 대한 주의가 요구되며, 특히 극저온에서 운전되기 때문에 상온 전력 케이블에 비해 기계적 스트레스를 더 받게 될 것이므로 여유치를 두어 전기절연을 고려한 케이블의 곡률반경 배수는 반드시 25배 이상으로 하는 것이 케이블 전체의 열화에 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

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

[참고 문헌]

- [1] S.H. Kim et al, "Dielectric Characteristics of Insulating papers for HTS Cable", Korea-japan joint Workshop 2002 on Applied Superconductivity and Cryogenics, pp. 9, 2002.
- [2] Alexander Bulinski et al, "High Voltage Insulation for Power Cables Utilizing High Temperature Superconductivity", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 15, No. 2, pp.14-22, March/April 1999.
- [3] H. Okubo et al, "V-t Characteristics of Partial Discharge Inception in Liquid Nitrogen/PPLP® Composite Insulation System for HTS Cable", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 6, pp.945-951, December 2002.
- [4] K.Miyoshi, et al, "Design and Production of High-Tc Superconducting power Transmission Cable", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp.2363-2366, March 2001.
- [5] M. Leghissa et al, "Development of HTS Power Transmission Cables", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 406-410, June 1999.
- [6] H. Okubo et al, "Partial Discharge Inception Characteristics under Butt Gap Condition in Liquid Nitrogen/PPLP® Composite Insulation System for High Temperature Superconducting Cable", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 6, pp.939-944, December 2002.