

경제성을 고려한 고온초전도 케이블의 복합절연 특성

곽동순, 김해중, 조전욱, 김해준, 김상현*
 한국전기연구원 초전도응용연구그룹, *경상대학교 전기공학과

**Composite Insulation Properties of a HTS Cable
 in Consideration of Economical Efficiency**

Dong-Soon Kwag, Hae-Jong Kim, Jeon-Wook Cho, Hae-Joon Kim and Sang-Hyun Kim*
 Applied Superconductivity Group, KERI, *Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National Univ,

Abstract - 현재 국내에서 개발중인 고온초전도 케이블은 폴리프로필렌의 반 합성지인 LPP(laminated polypropylene paper)를 절연재료로 사용한 저온절연방식을 채택하였다. LPP는 타 절연지에 비해 절연과파 강도가 우수하며 유전손실도 낮아 고온초전도 케이블의 절연재료로써 가장 유력시되고 있지만, 기존 유입케이블(oil-field cable)의 절연재료로 널리 사용되어온 크라프트지에 비해 6-8배 정도의 높은 가격에 유통되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 고온초전도 케이블의 경제성 확보를 위하여 LPP와 크라프트지를 혼합한 복합 절연재료를 제안하였으며, 각각의 절연특성 시험을 통해 경제성과 전기적 절연강도를 만족하는 두 절연지의 혼합비율을 결정하고 그에 따라 22.9kV급 고온초전도 케이블의 복합절연 설계를 하였다.

용화를 위해서는 반드시 연구되어야 할 항목이라 할 수 있겠다.

따라서 본 논문에서는 크라프트지와 LPP 각각의 전기절연 특성을 분석하여 절연성능뿐만 아니라 경제성을 감안한 최적의 혼합 비율과 배치를 결정하고, AC 및 임펄스(impulse) 전원과 부분방전 개시전계 등을 이용하여 22.9kV급 고온초전도 케이블의 최적 절연설계를 하였다.

2. 실 험

2.1 시료 및 전극계 구성

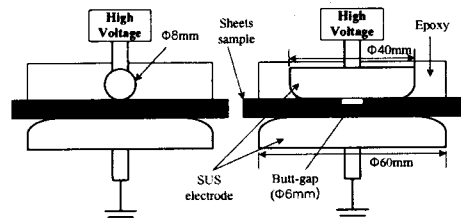
그림 1은 시료의 절연과파 전압 및 부분방전 개시 전하량을 측정하기 위한 전극계의 구성도를 나타낸다. 전극의 재질은 스테인리스강(SUS)을 사용하였으며, 상부의 평판전극은 직경 8mm, 평판전극은 40mm ϕ , 하부의 평판전극은 60mm ϕ 의 크기를 갖는다. 그리고 고전압 측의 상부전극은 전극의 edge 효과를 피하기 위하여 예폭시 수지로 몰딩 하였다. 각 시료의 절연과파 전압을 측정하기 위하여 그림 1 (a)의 구-평판 전극계를 사용하였으며, 그림 1 (b)의 평판-평판 전극계를 사용하여 22.9kV급 고온초전도 케이블의 절연설계를 위한 실험으로 6mm ϕ 의 butt-gap을 포함한 시료의 AC 및 임펄스 파괴전압과 부분방전 개시전계를 측정하였다. 시료의 크기는 연면에 의한 방전을 막기 위하여 90mm ϕ 이상으로 하였으며, LPP와 크라프트지의 두께는 실험의 공정

1. 서 론

초전도 선재기술의 발달로 인하여 최근의 고온초전도 케이블은 액체질소 온도(77K)에서 약 50-100A/mm²의 전류를 흘릴 수 있어 기존의 전력케이블과 비교해 볼 때 동일 전압으로 대용량 송전이 가능하기 때문에 전력케이블의 소형화 및 대용량화가 가능하여 전력 수요의 증가에 따른 기술적 한계를 극복할 수 있다. 또한 고온초전도 케이블은 송전에너지 손실이 적어 송전 비용절감 효과도 가져올 수 있기 때문에 차세대 전력송전 시스템 용으로서 그 활용가치가 높을 것으로 기대되고 있다. 현재 미국, 일본, 유럽 등에서는 고온초전도 케이블의 개발과 실용화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 [1][2], 한국에서도 2001년부터 과학기술부가 주관하는 21C 프론티어 연구개발사업의 일환으로 한국전기연구원과 LG전선 등이 참여하여 22.9kV급 고온초전도 전력케이블 개발이 진행 중이다[3].

고온초전도 케이블의 구성은 고온초전도 도체부와 절연층, 냉각부로 크게 나뉘어 질 수 있으며, 절연층은 냉각방식에 따라 저온절연방식(cold dielectric type)과 상온절연방식(warm dielectric type)으로 구분된다. 또한 현재 전력케이블에서 채택되고 있는 절연재료로서는 폴리머 절연(polymeric insulation)과 종이절연(paper insulation)으로 나눌 수 있으며, 고온초전도 케이블의 절연에서는 액체질소 온도인 극저온에서 운전되는 점을 미루어 볼 때 종이절연 방식이 널리 사용되고 있으며[4], 국내에서도 저온절연방식의 종이절연을 채택 하였다.

현재 한국에서 개발 중인 22.9kV급 고온초전도 케이블의 절연재료로서는 laminated polypropylene paper(LPP)를 사용하고 있으나, 이는 유입케이블(oil-filled cable)의 절연재료로 널리 사용되고 있는 크라프트지(kraft paper)에 비해 kg당 6-8배 이상 비싼 가격에 유통되고 있는 점을 미루어 볼 때 케이블 제작상의 경제성에 있어서 문제시 될 수 있으며, 차 후 실



(a) Sphere-plane (b) Plane-plane
 그림 1. 전극계 구성.

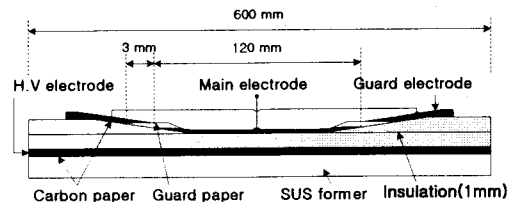


그림 2. tan δ 측정을 위한 미니모델 케이블의 구성도.

성을 기하기 위하여 각각 0.119mm와 0.12mm로 거의 유사한 두께의 시료를 사용하였다. 또한 실험에 사용된 모든 시료는 'NREL Standard Procedures (#001)'의 수분측정법에 따라 건조기에 넣은 후 약 105°C에서 4시간 건조하여 절연지의 수분을 완전히 제거하였다. 전극계 홀더는 극저온 특성과 내구성이 뛰어난 fiberglass reinforced plastic(FRP)을 사용하였다.

LPP와 크라프트지의 $\tan\delta$ 측정을 위하여 제작된 미니모델 케이블의 구성도를 그림 2에 나타낸다. 미니모델 케이블의 구성은 주(main) 전극, 가드(guard) 전극 및 배후 고전압전극 형태의 3단자법으로 제작되었으며, 절연두께는 1mm로 하였다.

2.2 실험장치 및 방법

그림 3은 실험장치의 개략도를 나타내며, 주요부분은 전극계와 고전압 인가부, 열절연부로 구성된다. 실험에 사용된 SUS cryostat은 외부에 이중 진공층이 있어 액체질소의 열적인 안정을 줄 수 있고 압력을 가할 수 있는 구조로 되어 있다.

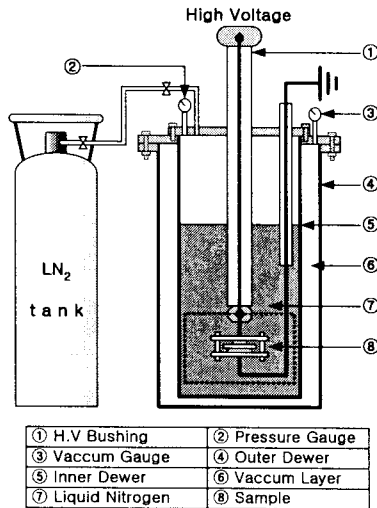


그림 3. 실험장치의 개략도.

실험은 전극계를 cryostat의 상부 플렌지에 부착하고 액체질소에 침적시킨 후 이루어 졌다. 또한 제시된 모든 결과 값들은 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. 각 재료의 $\tan\delta$ 측정을 위한 장비로는 고전압 변압기(JEC2201, Tokyo trans사), 셰링 브리지(Schering bridge, type 2801, TETTEX AG사)를 사용하였다. 부분방전은 일본계측기사의 IEC6027 측정기를 사용하였으며, 최초의 부분방전이 개시되는 시기의 인가된 전계값과 이때의 방전 전하량을 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 LPP와 크라프트지의 절연 특성

그림 4는 액체질소 중에서 butt-gap의 영향을 고려하지 않은 경우의 LPP와 크라프트지의 절연지 적층수에 따른 AC 절연파괴 전압값을 나타낸다. 각 측정치의 평균을 LPP는 ●, 크라프트지는 ○로 표시하고, 10~20회의 실험에 대한 결과값들을 error bar로 그림에 나타내

었다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 절연지 적층수의 증가에 따라 절연파괴 전압이 상승하고 있으며, LPP의 경우가 크라프트지보다 다소 높은 AC 절연파괴 전압을 보였다. 또한 동일한 실험의 임펄스 절연파괴 전압 특성을 그림 5에 나타낸다. 임펄스 절연파괴 특성도 AC 특성과 거의 유사한 경향을 나타내었으며, 절연파괴 전압은 다소 높은 값을 보였다.

그림 6은 액체질소 중에서 전계에 따른 LPP와 크라프트지의 유전손실($\tan\delta$) 특성을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 LPP의 $\tan\delta$ 값은 1.6×10^{-3} 정도로서 크라프트지에 비해 약 2배정도 낮은 $\tan\delta$ 값을 보여주고 있다. 이는 절연강도뿐만 아니라 유전손실 측면에서도 LPP가 우수하다는 것을 보여준다.

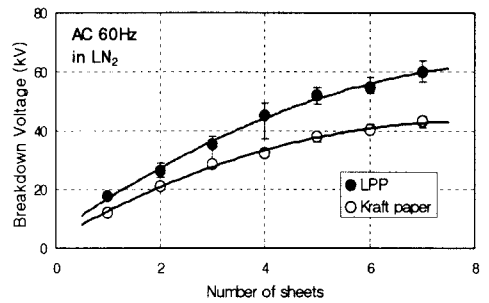


그림 4. 적층 수에 따른 LPP와 크라프트지의 AC 절연파괴 전압.

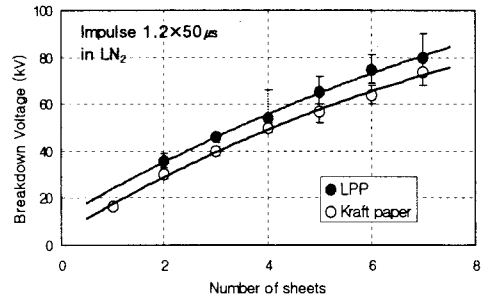


그림 5. 적층 수에 따른 LPP와 크라프트지의 임펄스 절연파괴 전압.

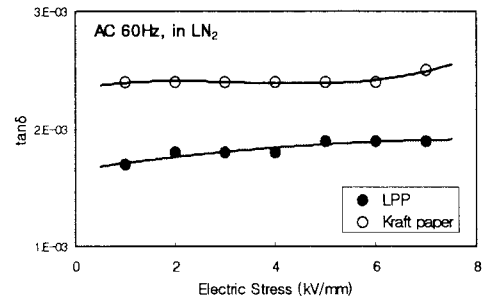


그림 6. LPP와 크라프트지의 유전손실 특성.

앞의 실험들에서 알 수 있듯이 AC와 임펄스 절연파괴, $\tan\delta$ 등 모든 절연요소에서 LPP가 크라프트지보다 우수한 절연특성을 보여주고 있다. 그러나 현재 시장에서 유통되고 있는 크라프트지와 LPP의 가격 대를 비교해 보면 LPP가 크라프트지에 비해 약 6~8배 이상의 높은 가격 대를 형성하고 있으므로, 개발된 제품이 상업성

을 얻기 위해서는 경제성이 고려되어야 할 것이다. 이는 절연특성이 우수한 LPP와 가격이 저렴한 크라프트지를 일정비율로 혼합하여 사용한다면 기술적인 문제뿐만 아니라 경제성 또한 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 그러므로 이하의 실험에서는 고온초전도 케이블의 전기적 절연성과 경제성을 확보하기 위하여 LPP와 크라프트지의 복합절연 특성을 검토하였다.

3.2 LPP와 크라프트지의 복합절연 특성

그림 7은 액체질소 중에서 LPP와 크라프트지의 배치에 따른 AC 및 임펄스 절연파괴 전압 특성을 보여준다. 그림에서 3장의 절연지 중 빗금 친 부분은 LPP를, 나머지는 크라프트지를 나타낸다. 시료의 배치에 따라 거의 비슷한 절연강도를 보여주고 있지만, LPP의 비율이 높을수록 다소 높은 절연강도를 보여주었다. 이것은 크라프트지에 비해 LPP의 절연강도가 높기 때문인 것으로 보이며, 전기적인 특성만을 고려한다면 절연파괴 강도가 우수하고 유전손실이 낮은 LPP의 비율을 최대한 많이 할수록 유리할 것으로 사료된다.

그림 8은 액체질소 중에서 LPP와 크라프트지의 혼합 비율에 따른 임펄스 절연파괴 전압 특성을 보여준다. 그림에서 세로축은 절연파괴 전계값을 나타내고, 가로축은 두 시료의 혼합 비율을 나타내며 '0'은 크라프트지, '1'은 LPP를 가리킨다. 그림에서 알 수 있듯이 LPP의 비율이 증가할수록 절연강도는 점점 증가하고 있으며, LPP와 크라프트지가 약 3:4의 비율에서 어느 정도 포화되는 값을 보이고 있다. 이 비율에서의 절연파괴 강도는 LPP만으로 절연한 것과 유사한 성능을 보이고 있으며, 경제성 또한 갖출 수 있을 것으로 사료된다. 그러므로 그림에서 포화되기 시작하는 점이 경제성과 고려되어야 할 부분인 것으로 생각되며, 절연파괴 강도와 경제성을 고려한다면 LPP의 비율이 약 30~40% 정도가 가장 적당할 것으로 사료된다.

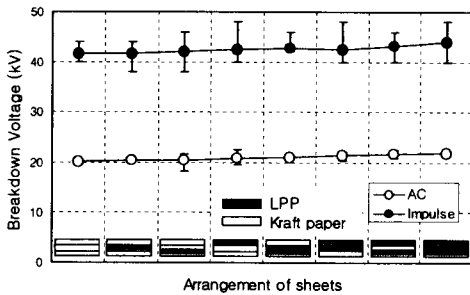


그림 7. LPP와 크라프트지의 배치에 따른 AC 및 임펄스 절연파괴 전압.

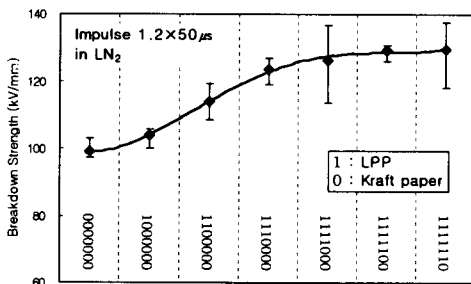


그림 8. LPP와 크라프트지의 혼합비율에 따른 임펄스 절연파괴 전압.

3.3 고온초전도 케이블의 복합절연 설계

그림 9와 그림 10은 AC 및 임펄스 전원에 대한 절연

설계를 위하여 각 절연재료에 대한 절연파괴 확률을 Weibull 분포도로 나타내었다. 가로축은 시료의 절연파괴 전계값을 나타내며, 세로축은 절연파괴가 일어날 확률을 나타낸다. 최저파괴전계(E_{max})는 절연파괴 확률이 0.1%인 지점의 전계값을 가리킨다. AC 전원의 경우, 그림 9에서 크라프트지는 약 47kV/mm, LPP는 약 52kV/mm, LPP와 크라프트지의 복합구조성은 약 50kV/mm의 최저파괴전계 값을 보여주었다. 임펄스 전원의 경우, 그림 10에서 크라프트지는 약 60kV/mm, LPP는 약 76kV/mm, LPP와 크라프트지의 복합구조성은 약 67kV/mm의 최저파괴전계 값을 보여주었다.

그림 11은 인가 전계에 따른 각 절연재료의 부분방전 개시 전하량을 보여준다. 가로축은 인가된 전계값을 나타내며, 세로축은 부분방전 개시 전하량을 나타낸다. LPP와 복합절연의 경우 부분방전의 개시가 시작되면

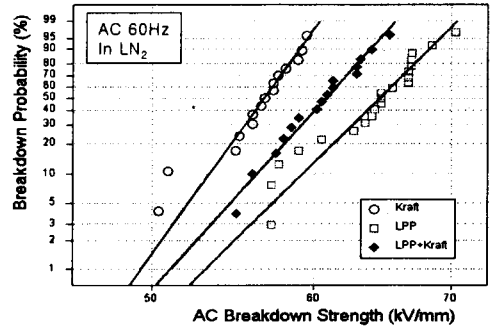


그림 9. AC 절연파괴 전계에 대한 Weibull 분포도.

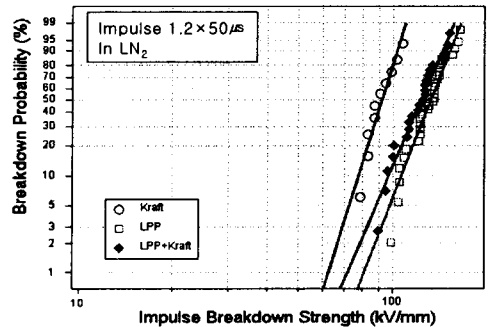


그림 10. 임펄스 절연파괴 전계에 대한 Weibull 분포도.

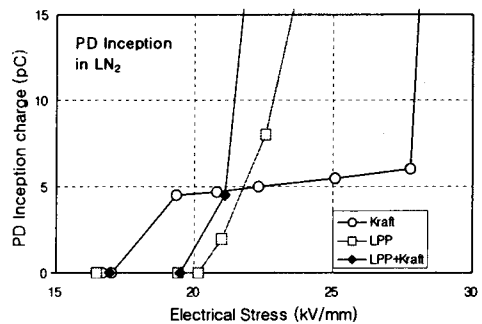


그림 11. 인가된 전계에 따른 부분방전 개시 전하량.

급격하게 방전량이 증가하게 되고 전자사태에 도달하게 되며, 크라프트지의 경우 좀 더 낮은 전계에서 부분방전이 개시되고 일정한 방전량을 유지하다가 급격히 전자사태에 도달하는 특성을 보였다. 그리고 각각의 부분방전

의 개시 전계값은 크라프트지가 약 17kV/mm, LPP가 약 20kV/mm, LPP와 크라프트지의 복합구성은 약 19kV/mm에서 부분방전이 일어나기 시작하였다. 한편, 고온초전도 케이블의 절연설계를 위하여 AC 및 임펄스 절연파괴강도와 부분방전 개시전계 등을 고려한 3가지 방법이 제시되었다[5][6]. 「한전표준구매시방서」를 참조하면 한국에서 22.9kV급 전력케이블의 절연시험 기준은 AC내전압은 80kV이고 임펄스 내전압은 BIL 150kV이며, 부분방전은 AC 23kV에서 방전량이 5pC 미만이어야 한다[7]. AC 및 임펄스 절연 설계 법에서 절연두께는 목표파괴전압에 실험을 통해 구해진 시료의 최저파괴전계를 나누어 구할 수 있다.

첫 번째, AC 목표파괴 전압은 식 (1)에 의해 계산되어진다. AC 내전압 V 는 80 kV이며, 열화계수 $K1$ 은 '1.59', 온도계수 $K2$ 는 '1.0', 설계마진 $K3$ 는 '1.1'의 값을 가진다. 그리고 '1.32'의 여유치 M 을 두었다.

$$V_{AC} = \frac{V}{\sqrt{3}} \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times M \quad (1)$$


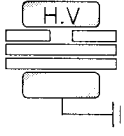
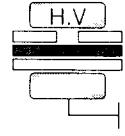
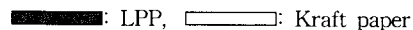
두 번째, 임펄스 목표파괴 전압은 식 (2)에 의해 계산되어진다. 임펄스 내전압 BIL(basic insulation level)은 150kV이며, '1.32'의 여유치 M 을 두었다.

$$V_{IMP} = BIL(150kV) \times M \quad (2)$$

마지막으로 부분방전 개시 전계값에 의한 절연설계는 식 (3)에 의해 계산되어지며, 절연층을 포함한 외부반경 r_2 에서 내도체부 반경 r_1 을 뺀 값이 절연두께이다. 내도체부는 고온초전도 선재뿐만 아니라 내부 반도체층까지 포함한 값이며, E_{max} 는 실험에 의해 구해진 부분방전이 개시되기 시작하는 전계값을 나타내며 목표전압 V 는 80kV, 내도체부 반경 r_1 은 14.5mm의 값을 가진다.

$$E_{max} = \frac{V}{r_1 \times \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3)$$

표 1. 재료별 22.9kV급 고온초전도 케이블의 절연두께

	LPP	Kraft paper	LPP + Kraft paper
AC	2.1mm ($E_{max}=52kV/mm$)	2.3mm ($E_{max}=47kV/mm$)	2.2mm ($E_{max}=50kV/mm$)
Impulse	2.4mm ($E_{max}=76kV/mm$)	3.3mm ($E_{max}=60kV/mm$)	3.0mm ($E_{max}=67kV/mm$)
Partial discharge	4.6mm ($E_{max}=20kV/mm$)	5.6mm ($E_{max}=17kV/mm$)	4.9mm ($E_{max}=19kV/mm$)
Electrode system			
			

위의 식 (1), (2), (3)을 이용하여 재료별 AC 및 임펄스, 부분방전에 따른 22.9kV급 고온초전도 케이블의 절연 설계치를 표 1에 나타내었다.

표 1에서 구해진 각 재료별 절연두께를 보면, LPP가

4.6mm, 크라프트지가 5.6mm, LPP와 크라프트지 복합절연이 4.9mm로 결정되었으며, 이것은 부분방전 개시전계에 의해 구해진 설계치이다. LPP와 크라프트지의 복합절연의 경우 LPP에 비해 절연두께가 0.3mm 정도의 아주 미세한 차이로 증가하지만, 케이블 제작에 소요되는 절연재료의 가격은 LPP만으로 절연했을 경우 보다 약 2배 이상 저감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 22.9kV급 고온초전도 케이블의 최적 절연설계를 위하여 각 절연구성별 전기적 특성을 조사하고, AC 및 임펄스, 부분방전에 의한 각각의 절연두께를 설계하였다.

(1) LPP와 크라프트지의 전기적 절연특성은 LPP의 경우가 다소 우수한 성능을 보여주었으며, 절연성능뿐만 아니라 경제성을 고려했을 때 두 재료의 복합절연이 유리할 것으로 사료되며, 실험을 통해 LPP의 비율은 약 30~40%로 결정되었다.

(2) 각 재료별 부분방전 개시전계에 의해 계산되어진 절연두께는 LPP가 4.6mm, 크라프트지가 5.6mm, 그리고 LPP와 크라프트지의 복합절연이 4.9mm로 결정되었다.

(3) LPP와 크라프트지의 복합절연의 경우 LPP 절연에 비해 절연두께는 아주 미세한 차이로 증가하지만 케이블의 절연에 소요되는 비용은 약 2배 이상 저감시킬 수 있을 것으로 보이며, 고온초전도 케이블의 절연에 있어서 상당한 경제성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] N. Steve and N. Kelley, "High temperature superconducting cable field demonstration at Detroit Edison", Physica C 354, pp. 49-53, 2001.
- [2] S. Mukoyama et al, "Development of important elementary technologies for a 66 kV class three phase HTS power cable", Physica C 378-381, pp. 1181-1184, 2002.
- [3] J. W. Cho et al, "Insulation Test for the 22.9kV Class HTS Power Transmission Cable", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 5, No. 3, pp. 48-51, 2003.
- [4] Young-Seok Kim et al, "Dielectric Properties of 22.9kV Class Prototype High-TC Superconducting Cable", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 42 (2003), Part 1, No. 11, pp. 6960-6963, 2003.
- [5] M. Hazeyama et al, "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, pp. 939-944, 2002.
- [6] 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, 2001.
- [7] 한전표준구매시방서, "22.9kV 동심중성선 전력케이블 (ES126-650*664)", 2001.11.09 개정.