

고온초전도 DC 케이블 시스템용 PPLP 및 GFRP의 절연 특성

Dielectric Breakdown Characteristics of PPLP and GFRP for HTS DC Cable System

김상현^{1*}, 최재형², 김우진³, 장현만⁴, 이수길⁴

S.H. Kim^{1*}, J.H. Choi², W.J. Kim³, H.M. Jang⁴, S.K. Lee⁴

Abstract: DC high-temperature superconducting(HTS) cable system has attracted a great deal of interest from the view point of low loss, dense structure and large capacity. A HTS cable system is made of cable and termination. The insulating materials and insulation technology must be solved for the long life, reliability and compact of cable system.

In this paper, we will report on the dielectric breakdown characteristics of insulating materials for HTS cable and termination. The AC, DC and lightning impulse breakdown strength of laminated polypropylene paper(PPLP) and glass fiber reinforced plastic(GFRP) have been measured under nitrogen pressures in the range of 0.1-0.4MPa. PPLP and GFRP are found to have a significantly higher DC breakdown strength. Also, DC surface flashover voltage of negative polarity is slightly higher than that of positive polarity in GFRP.

Key Words: HTS DC cable and termination, Dielectric breakdown characteristics, PPLP and GFRP.

1. 서 론

최근, 고온초전도 기술은 에너지 관점에서 큰 관심을 모으고 있다. 특히, 초전도 케이블은 가장 적용 가능성이 높다고 평가를 받고 있어 미국, 일본, 한국을 중심으로 세계 각국에서 연구개발이 활발히 진행되고 있다[1,2].

지금까지는 주로 고온초전도 AC 케이블을 연구개발의 목표로 했으나 최근은 고효율로 장거리의 대용량 전력수송 문제로 고온초전도 DC 케이블을 목표로 연구를 행하고 있다. 즉 고온초전도 AC 케이블에서 발생하는 히스테리시스손실과 와전류손실 등의 교류손실과 유전손실이 없기 때문에 이론적으로는 손실이 완전제로인 직류송전이 가능하다.

고온초전도 케이블 시스템은 케이블과 단말(termination)로 구성된다. 이들 시스템은 도체, 냉각 시스템 및 전기절연으로 구성된다. 고온초전도 케이블 시스템을 개발하기 위해서는 전류용량과 도체의 저손실 뿐만 아니라 극저온에서의 최적절연을 파악하는 것이 중요하다. 특히, 고온초전도 케이블의 절연재료기술과 극저온 절연기술은 케이블의 장수명, 신뢰도 향상 및 컴팩트화를 위해 꼭 확립해야 할 기술이다.

고온초전도 케이블의 절연시스템은 액체질소 냉매 및 고분자 필름의 복합절연계로서 개발되고 있다. 이 형태에서는 열손실과 냉각에 의한 열수축을 막기 위하여 다층 절연 테이프도 도체를 감고 있다. PPLP는 고온초전도 AC 케이블용 절연재료로서 널리 사용되어 왔으며 이미 고온초전도 케이블 절연으로 적용되고 있다[3]. 그러나 액체질소 중에서 PPLP의 DC 절연파괴 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 적층절연방식이 채용되고 있다. 초전도 DC 케이블에 있어서도 안정성, 신뢰성으로부터 액체질소 함침적층 절연방식이 유력한 후보라고 생각된다. 이 절연방식은 초전도 AC 케이블에서는 수많은 실험예가 있으며 교류파괴시험, 부분방전시험, 임펄스 파괴시험의 데이터가 얻어지고 있다. 일반적으로 단말의 절연구조는 공기, 오일/SF6, 극저온 기체질소와 액체질소, 고분자 절연재료의 복합절연계로서 개발되고 있다. 단말 개발을 위해서는 수많은 열적, 기계적 및 전기적인 문제들을 해결해야만 한다.

필자들은 지금까지 국가주도형 21세기 프론티어 사업의 일환으로 고온 초전도 케이블, 변압기, 한류기 등 응용기기의 개발 및 전기절연 특성 연구에 주력하여 왔다[4-5]. 그러나 아직 기기의 운전상의 안정성 확보를 위해서는 여러 가지 형태의 기기 개발과 더불어 재료 연구 및 열화, 절연 특성 등의 전기적 특성 연구 등의 연구가 반드시 필요하다.

본 논문에서는 지금까지 연구에서 미비했던 절연재료 연구, 부싱/단말 연구와 더불어 DC 케이블의 절연 및 연면방전 특성에 대하여 연구하였다. 주로 DC 케이블의 기초절연설계를 위하여 단말에서의 절연파괴 특성에 대하여 연구하였다.

2. 실험방법

2.1. 시료

케이블 절연재료로 사용된 시료는 PPLP이다. 미니 모델 AC 케이블과 유사하게 제작된 고온초전도 미니

¹정 회원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 교수

²학생회원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 박사과정

³학생회원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 석사과정

⁴정 회원 : LS전선(주) 전력연구소

*교신저자 : shkim@gnu.ac.kr

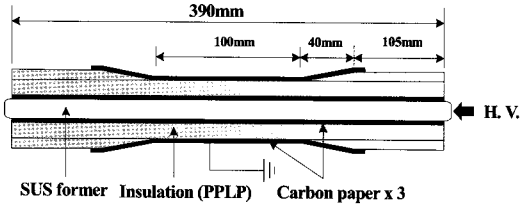
원고접수 : 2011년 08월 29일

심사완료 : 2011년 09월 26일

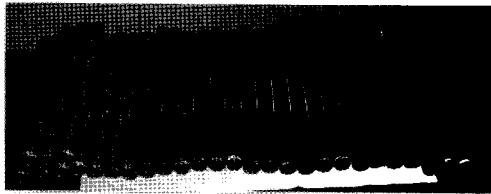
게재확정 : 2011년 09월 27일

모델 DC 케이블을 그림 1에 나타낸다.

스테인레스강(stainless steel) 포머에 2장의 카본지를 감아 내부 전극으로 하였으며, 외부전극도 PPLP 절연층 위에 내부전극과 같은 방식으로 감았다. 절연층은 버트 갭을 갖는 PPLP를 30% 중첩율로 감아 사용했다.



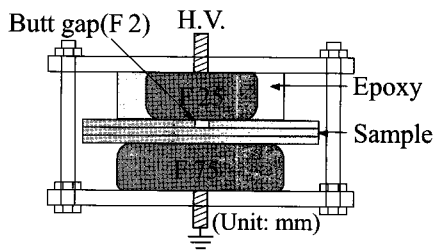
(a) Structure of mini-model DC Cable



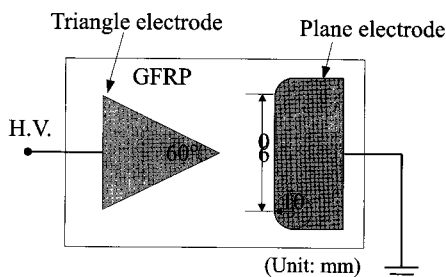
(b) Manufactured mini-model DC cable

Fig. 1. Mini-model DC cable.

최종적으로 제작된 미니 모델 케이블은 길이 400mm, 두께 1mm이며, 유효길이는 50mm이다. 케이블의 단부는 연면방전이 발생하지 않도록 PPLP로 스트레스콘이 제작되었다. PPLP 시트는 상형(upper hole)로 3층 구조이며, 버트갭은 시료의 중앙에 직경 2mm의 구멍을 뚫어 인위적으로 만들었다.



(a) Breakdown



(b) Surface discharge

Fig. 2. Electrode system for surface discharge and breakdown.

PPLP 시트는 GFRP 샘플 홀더에 고정되었으며, 직경 25mm의 상부 평판전극과 직경 75mm의 하부평판전극 사이에 설치되었다. 단말 절연체로 사용된 시료는 GFRP이다. 그림 2에 연면방전 및 관통파괴 측정용 전극계를 나타낸다. 전극계는 스테인레스강 삼각형전극(침 선단각도: 60도)과 평판전극이다. 연면방전거리는 각각 5, 10 및 15mm이다. 전극이 설치된 시료는 습기를 제거하기 위하여 에틸알콜로 세척하고, 건조기에서 건조시킨 후 GFRP 홀더에 고정시켰다. 극저온 액체로서는 액체질소(77K) 및 액체알곤(87K)을 사용하였다.

2. 2. 실험장치 및 방법

그림 3에 DC 및 임펄스 방전시험용 실험장치를 나타낸다. 스테인레스강 용기는 액체질소를 열적으로 안정시키기 위하여 진공의 2중 구조로 되어있다. 미니 모델 케이블 또는 GFRP 홀더는 용기에 부착된 부싱의 하부에 부착되었다. 상용의 액체질소가 도입된 후, 케이블은 0.1-0.4MPa로 가압되었으며 압력변화는 자연적으로 증발된 액체질소의 증기압을 이용하였다.

시료의 적층 실험은 두께 119µm의 PPLP를 1-4장 적층하여 전극 홀더에 고정하고 전압을 인가하여 측정하였다.

시료의 전극간에 AC, DC 및 임펄스전압이 인가되었다. 케이블은 1회의 절연파괴 시험 후 새로운 것으로 교환하여 측정하였다. 절연파괴 및 연면방전시험은 주어진 조건에서 10-20회 시험을 했다.

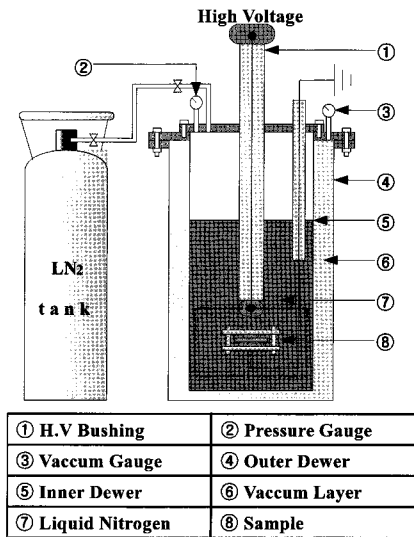


Fig. 3. Experimental apparatus.

3. 실험결과

DC 절연파괴전압의 가장 중요한 특성중의 하나는 와이블 분포의 최대 절연파괴전압과 극성효과이다. 그림 4는 대기압 액체질소 중에서 PPLP 시트 시료의 DC 절연파괴전압의 절연두께 의존성 및 극성효과를 나타낸다. (+)와 (-)전압이 상부전극(25mmΦ)에 인가되었을 때를 각각 정극성, 부극성이라고 한다. 또한 시료의 두께는 PPLP 두께(119µm)의 적층수이며, 비교를 위해 AC 전압도 표시하였다. 그림에서 알 수

있는 바와 같이, DC 절연파괴전압은 AC의 경우보다 높으며, 특히, DC의 경우 부극성이 정극성보다 다소 높음을 알 수 있다. 또한 어느 경우에도 절연파괴전압은 일반 고체 절연재료의 절연파괴전압의 경우와 같이, 적층 두께의 증가에 따라 지수함수적으로 증가하다가 포화하는 경향을 나타내며, 부극성의 DC 절연파괴전압 $V(kV)$ 는 두께 $t(\mu m)$ 의 0.68승에 비례함을 알 수 있다.

임펄스 절연파괴전압의 절연두께 의존성 및 극성효과를 그림 5에 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 임펄스 절연파괴전압은 DC의 경우와 같이, 부극성이 정극성보다 다소 높으나, DC의 절연파괴전압 결과보다는 다소 낮음을 알 수 있다. 이러한 경향은 전압의 차이는 있으나 Tsuyuki씨의 결과(6)에서도 보고되고 있다.

또한 어느 경우에도 절연파괴전압은 일반 고체 절연재료의 절연파괴전압의 경우와 같이, 적층 두께의 증가에 따라 지수함수적으로 증가하다가 포화하는 경향을 나타내며, 임펄스 절연파괴전압 $V(kV)$ 는 두께 $t(\mu m)$ 의 0.66승에 비례함을 알 수 있다. 결과적으로 PPLP는 AC는 물론 DC 케이블용 절연재료로서도 우수함을 알 수 있다.

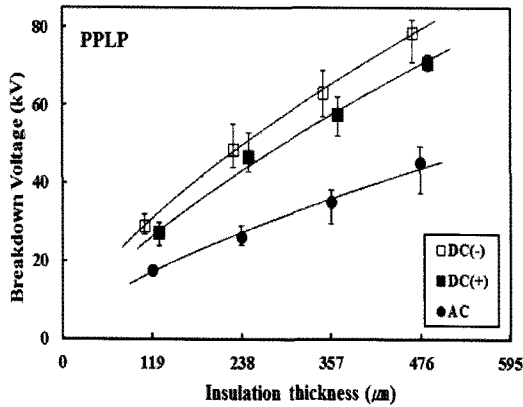


Fig. 4. Dependence of DC breakdown voltage on the insulation thickness and polarity effect.

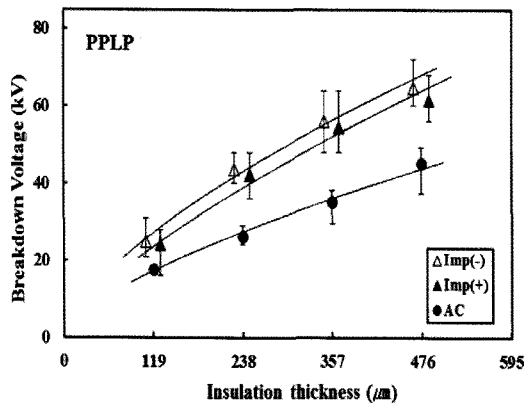


Fig. 5. Dependence of impulse breakdown voltage on the insulation thickness and polarity effect.

그림 6은 버트갯을 갖는 3장의 PPLP 시트 시료의 DC 절연파괴전압의 압력의존성을 나타낸다. 압력은 자연적으로 증발된 액체질소의 증기압을 이용하여 0.1-0.4MPa으로 가압하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 어느 경우에서나, 액체질소 압력의 증가에 따라 DC 절연파괴전압은 서서히 증가하다가 약 3기압에서 포화하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 AC의 경우에서도 나타나고 있으며, 이것은 압력의 증가에 따라 액체질소 내부의 기포(bubble) 발생이 억제되고, 부분방전의 발생을 억제하는 역할을 하기 때문이라고 생각한다. 이들 결과로부터, 고온초전도 DC 케이블의 절연설계에 있어서는 3기압의 압력에서의 절연파괴전압을 기초로 하는 것이 바람직하다.

그림 7은 3기압에서 시트와 미니 모델 케이블의 절연파괴전압의 특성 비교를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 어느 전압에서나 미니 모델 케이블은 시트 시료보다도 절연파괴전압이 낮다. 이것은 DC 절연파괴전압도 전극의 형상에 의해 영향을 받으며, 가장 약한 부분(weak spot)에서 발생하기 때문에 전극형상이 동축원통 구조이고 전극면적이 시트 시료에 비해 상대적으로 아주 큰 미니 모델 케이블의 전극내부에 약점이 존재할 확률이 증가하기 때문에 절연파괴전압이 낮아진다고 생각된다. 또한 정,부극성의 전압의 극성비의 차이가 작으나 부극성이 정극성보다 약간 높음을(표1 참조) 알 수 있다.

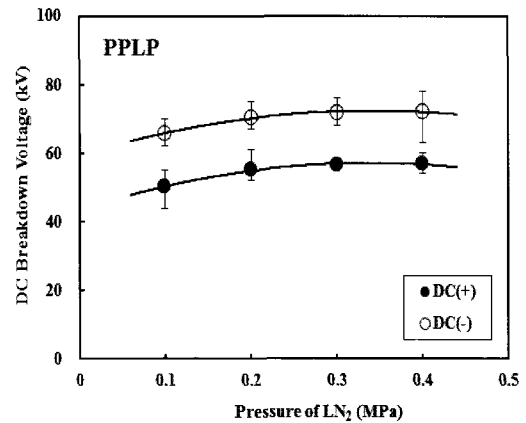


Fig. 6. Dependence of DC breakdown voltage on pressure of LN₂.

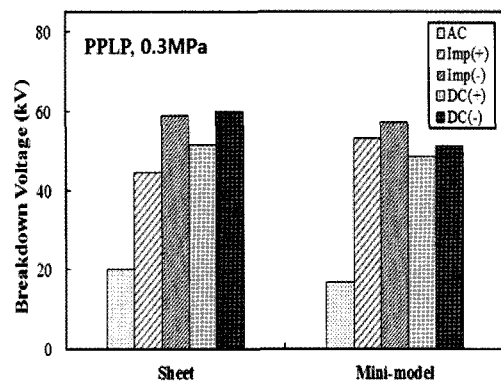


Fig. 7. Comparison of breakdown voltage of sheets and mini-model cable under 0.3MPa.

Table 1. Ratio of DC(-)/DC(+) in sheets and mini-model cable.

		Sheet	Mini-model cable
Pressure		0.3MPa	
DC breakdown voltage (kV)	-	59.9	51.3
	+	51.6	48.6
Ratio of DC-/DC+		1.16	1.06

따라서 DC 케이블의 절연설계를 위해서는 가능한 미니모델케이블을 제작하여 측정하고, 부극성보다는 정극성의 절연과피전압치를 적용하는 것이 바람직하다.

그림 8과 9는 각각 대기압에서 DC 및 임펄스 절연과피전압의 GFRP 연면방전거리 의존성을 나타낸다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 어느 경우에도 연면방전전압은 연면거리에 따라 선형적으로 증가하며, 부극성의 연면방전전압은 정극성의 경우보다 약간 높음을 알 수 있다. 또한 임펄스의 경우 부극성/정극성의 방전전압의 비율은 1.1이다.

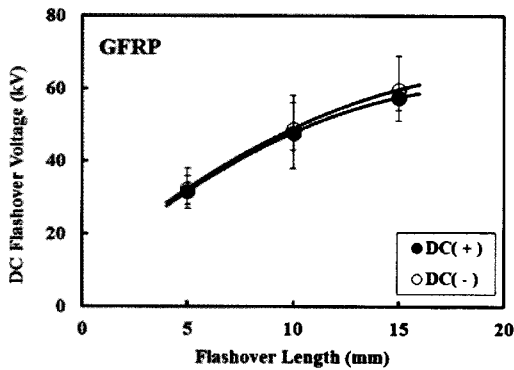


Fig. 8. DC surface flashover characteristics of GFRP.

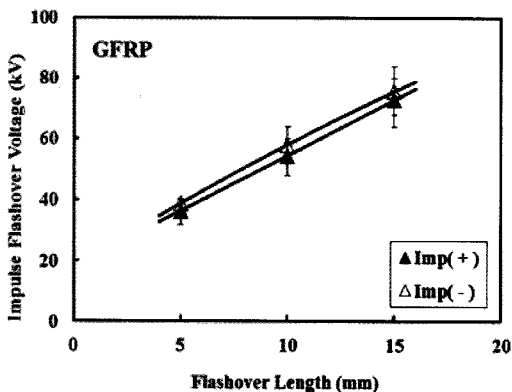


Fig. 9. Impulse surface flashover characteristics of GFRP.

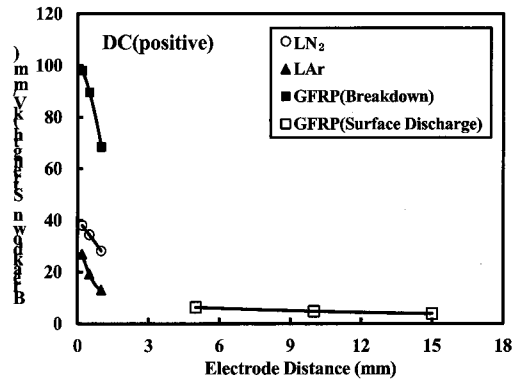


Fig. 10. Breakdown strengths of LAr, LN₂, GFRP and surface flashover field strength in LN₂.

그림 10에 정극성인 DC 전압하에서, 극저온 액체인 액체질소 및 액체알곤, 액체질소 중에서의 GFRP의 관통과피 및 액체질소 중에서의 GFRP의 연면방전 특성을 나타낸다. 관통과피전계, 연면방전전계 측정은 앞의 그림 2와 같은 전극계를 사용하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 액체질소 중에서 GFRP의 DC 관통과피전계(68-98kV/mm)는 액체질소, 액체알곤의 경우보다도 높다.

특히, 액체질소 중에서의 GFRP의 연면방전전계(4-6kV/mm)는 매우 낮아 절연설계상 주의할 필요가 있음을 알 수 있다. 따라서 실용상 고온초전도 단말을 개발하기 위해서는 먼저 액체질소 중에서 고체절연재료의 연면방전특성을 파악하는 것이 가장 중요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온초전도 DC 케이블의 절연설계를 위한 기초연구로서 PPLP의 AC, DC 및 임펄스 절연과피 특성을 연구하였다. 또한 단말의 후보 절연재료인 GFRP를 대상으로 DC 및 임펄스 연면방전 특성을 연구하였다. 이들의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 액체질소 중에서 PPLP의 적층수가 증가함에 따라 DC 및 임펄스 절연과피전압은 증가하다가 서서히 포화하는 경향을 나타낸다. 임펄스전압보다는 DC의 경우가 다소 높으며 부극성이 정극성보다 다소 높다.
- (2) 액체질소의 압력 증가에 따라 PPLP의 절연과피전압은 상승하나 0.3MPa 이상에서는 포화하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 경향은 미니 모델의 경우에서도 유사한 경향이 나타나나 절연과피전압은 다소 낮은 값을 갖는다.
- (3) PPLP는 AC 뿐만 아니라 DC 고온 초전도 케이블에서도 바람직한 절연재료이다.
- (4) 미니 모델 케이블은 시트 시료보다도 DC 절연과피전압이 낮으며, 정부극성의 전압의 극성비의 차이가 작은 것을 알 수 있다. 절연설계를 위해서는 시트 시료보다는 미니 모델 케이블을 제작하여 측정하고, 부극성보다는 정극성의 절연과피전압치를 적용하는 것이 바람직하다.
- (5) GFRP의 부극성 연면방전전압은 정극성의 경우보다 약간 높다. 또한 임펄스의 경우 부극성/정극성의 방전전압의 비율은 1.1이다.
- (6) GFRP의 정극성의 DC 관통과피전계(68-98kV/mm)

는 액체질소, 액체알곤 등의 극저온 액체보다도 높다. 그러나 액체질소 중에서의 GFRP의 연면방 전전계(4-6kV/mm)는 매우 낮아 절연설계상 특히 주의할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0013667).

참 고 문 헌

- [1] T. Masuda, H. Yumura, M. Ohya, Y. Ashibe, M. Watanabe, T. Minamino, H. Ito, S. Honjo, T. Mimura, Y. Kitoh, and Y. Noguchi, "Test Results of a 30m HTS Cable for Yokohama Project", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 3, pp. 1030-1033, June, 2011.
- [2] K.S. Ryu, "Overview of the DAPAS Program in Korea", In EUCAS 2005 Plenary Lectures, Sep. 2005.
- [3] H. Suzuki, K. Ishihara, S. Akita, "Dielectric Insulation Characteristics of Liquid - Nitrogen - Impregnated Laminated Paper-Insulated Cable", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, no. 4, pp.1677-1680, October, 1992.
- [4] 박동순, 천현권, 최재형, 김해중, 조전욱, 김상현, "고온초전도 케이블의 전기절연 설계 및 시험평가", 대한전기학회논문지, 55B권, 12호, pp. 640-645, 2006년 12월.
- [5] 최진욱, 최재형, 김해중, 조전욱, 김상현, "송전급 HTS 케이블용 반합성지의 두께에 따른 절연 특성 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, 11권, 1호, pp. 35-38, 2009년 3월.
- [6] K. Tsuyuki, S. Washida, O. Tanda, T. Masuda, K. Kato, T. Nakajima, and S. Mukoyama, "Study on the Electrical Insulation of High-Tc Superconducting DC Power Cable", Cryogenic Engineering of Japan, vol. 35, no. 7, pp. 350-356, 2000.



최재형(崔在亨)
1979년 6월 3일생, 2005년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



김우진(金宇鎭)
1987년 2월 1일생, 2011년 경상대 공대 전자공학과 졸업, 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.



장현만(張鉉萬)
1971년 5월 21일생, 1997년 경상대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2002년 9월 Kyoto대학 전기공학과 Post Doc, 현재 LS전선(주) 전력연구소 수석연구원.



이수길(李秀吉)
1970년 2월 2일생, 1992년 광운대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 공학박사 수료, 현재 LS전선(주) 전력연구소 수석연구원.

저 자 소 개



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, 현재 경상대 공대 전기공학과 교수. 현재 한국초전도·저온공학회 명예회장.