

## 고온초전도 변압기용 극저온 절연기술

### Cryogenic Insulation Technique for HTS Transformer

김상현\*, 천현권\*\*

Sang-Hyun Kim\*, Hyeon-Gweon Cheon\*\*

**Abstract:** In the response to the demand for electrical energy, much effort was given to develop and commercialize high temperature superconducting (HTS) power equipments has been made around the world. Especially, HTS transformer is one of the most promising devices, but the cryogenic insulation technology should be established during development. Hence many types of dielectric tests should be carried out to understand the dielectric phenomena at cryogenic temperature and to gather various dielectric data. Among the many types dielectric tests, the characteristic of barrier effect were conducted using simulated electrode after analysing the insulating configuration of HTS transformer main winding. The influence of a barrier on the dielectric strength was measured according to the position of the barrier, the number of the barrier and thickness of the barrier. It was shown that the effectiveness, namely the ratio of the breakdown voltage in presence of barrier to the voltage without barrier, is highest when the barrier is placed at the needle electrode side. On the contrary, in the case of having the barrier between the electrodes, the barrier was placed between the electrodes, the characteristic was even improved slightly.

**Key Words:** barrier, HTS Transformer.

### 1. 서 론

고온초전도변압기가 개발되기 위해서는 성능이 우수한 초전도선재의 제작, 초전도선재의 특성해석, 효율적인 냉각시스템설계, 초전도 권선 및 마그넷 제작 기술 등과 극저온에서의 절연설계가 이루어져야한다[1-4.] 특히 극저온에서의 절연설계는 변압기의 소형화, 안정성, 전력공급에 대한 신뢰성 확보를 위한 핵심기술이라 할 수 있다.

고온초전도변압기의 구조는 기존 유압변압기와 유사하여 크게 권선부, 철심부, 극저온용기(cryostat)로 이루어져 있고, 절연구성으로는 고압-저압 권선부의 주 절연, 권선에서 턴간 및 층간 절연, 권선부와 접지부간 절연으로 구분할 수 있다.

특히 주 절연부인 고압-저압 권선 간은 전계가 가장

강하게 작용하는 부분이므로 특히 절연합리화를 할 필요가 있으며 더구나 충분한 절연 신뢰성을 갖지 않으면 안된다. 그를 위해서는 액체 갭 부분의 전계집중을 어떻게 해서 없애야 하는지, 혹은 높은 절연내력을 갖는 구조로 하기 위해서는 어떻게 해야 하는지가 중요한 과제이다. 이를 위해서 기체 및 유중에서 행한 배리어(barrier) 효과를 초전도 변압기에 응용하는 방식을 연구하였다. 복합 유전체를 사용한 기본적인 절연구성의 하나로 봉 혹은 침-평판 전극과 같은 불평등성이 강한 전극갭의 평판전극과 평행으로 얇은 절연물이 삽입되고 있는 경우가 많지만 이때 삽입되는 절연물의 위치를 변화시키면 절연과피 전압이 현저하게 변화하는 현상이 오래전부터 알려지고 배리어 효과 또는 격벽 효과라고 불리고 있다. 이 배리어 효과의 연구는 1930년에 Marx Roser에 의해 보고된 이래 최근에는 기중, 유중 그리고 고체에서의 수많은 실험 및 해석이 행해지고 기기의 소형화와 경량화 등의 응용이 꾀해 지고 있다[5]. 이와 같이 전극 사이에 얇은 절연물을 삽입함으로써 절연과피 전압을 개선하는 배리어 효과가 있어 기존의 기기에 응용되고 있다.

그러나 이 배리어 효과의 실험은 대부분이 종이와 기중의 조합이 대부분이고 액체의 배리어 효과에 대한 보고는 적다. 더욱이 초전도 기기에 사용되는 극저온 액체 중에서의 종이 대신 플라스틱을 사용한 연구는 거의 행해지지 있지 않는 것이 현재의 실정이다.

이와 같은 점에 주목하여 초전도 변압기 주절연부의 형태를 모의한 침-평판 전극계에 교류(ac) 및 임펄스(impulse) 전압을 인가한 경우 절연과피 특성에 미치는 배리어 두께, 위치 및 개수에 대한 의존성을 연구하였다.

### 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치 개략도를 나타낸다. 실험장치는 크게 극저온용기, 전원부, 고속카메라 및 전극계로 구성된다. 극저온 용기는 Pyrex 유리로 제작되었으며 열 침입을 막기 위해 이중 진공층과 이중 액체질소(LN<sub>2</sub>)층으로 구성되어 있다. 용기의 제일 안쪽은 직경 80mm 원통형으로 되어 있으며 여기에 전극계를 배치한다. 전극계의 개략적인 구성을 Fig. 2에 나타낸다. 전극계는 크게 평판전극, 침전극, 전극홀더(electrode holder), 그리고 배리어(barrier)로 구성된다. 평판전극은 직경 30mm의 SUS 전극을 사용하였으며, 전계 집중부를 모의하기 위하여 선단반경 17 $\mu$ m, 선단각도 18°인 침전극인 불평등 전계시스템을 사용하였다. 평판전극과 침전극은 전극홀더에 부착하였고, 전극홀더는 Fiber Reinforced Plastic(FRP)로 제작하였다. 전극과 배리어가 부착된 홀더는 배리어의 위치 변화 및 수평을 유지하도록 제작되었다. 배리어는 두께 0.5~3mm의 원형 FRP를 사

\* 정 회 원 : 경상대 공대 전기공학과 교수

\*\* 학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과 박사과정

원고접수 : 2006년 2월 3일

심사완료 : 2006년 3월 20일

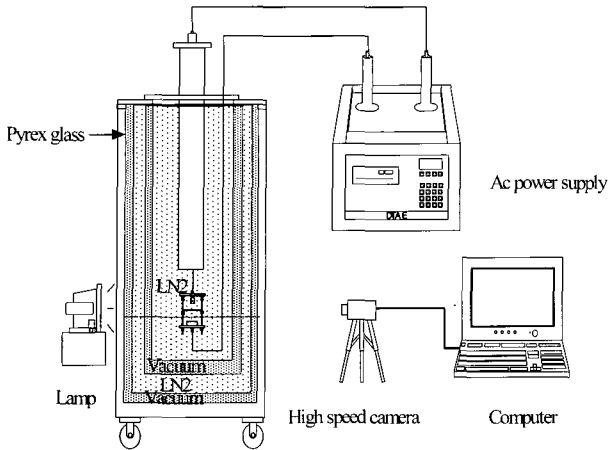


Fig. 1. Experimental set-up.

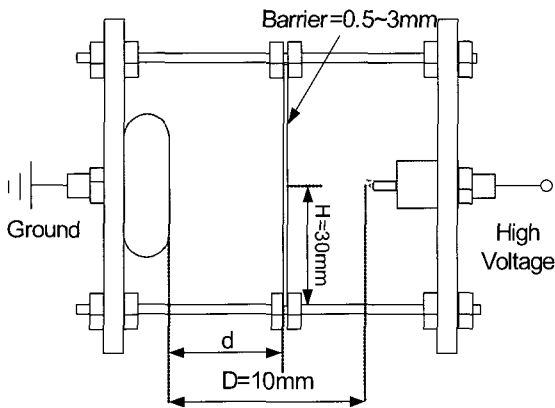


Fig. 2. Electrode system.

용하였다. 전극간 거리  $G$ 는 10mm로 일정하게 하고 그 사이를 일정한 간격으로 배리어를 이동시켰다. 배리어 위치  $d$ 는 평판전극에서 떨어진 거리를 나타낸다. 배리어 칼라 길이  $H=30\text{mm}$ 이며, 배리어 개수는 1 ~ 3개를 사용하였다. 배리어는 알콜 중에서 초음파 세척한 후, 건조시켜 평판전극에 평행이 되도록 전극간에 장착한 후 교류 및 임펄스 전압을 인가하였다. 또한 배리어는 조건을 변화할 때마다 눈으로 보아 트래킹(tracking)이 없는 것을 확인했다.

절연 파괴 특성평가를 위해 전극계를 구성한 후 극저온 용기에 장착하였다. 극저온 용기에  $\text{LN}_2(77\text{K})$ 를 넣은 후 절연 파괴 실험을 행하였다. 교류(ac)전압은 절연 파괴에 이르기까지 수동으로 일정한 속도로 승압하였으며, 정극성 임펄스(impulse)의 경우는  $1.2 \times 50\mu\text{s}$ 의 표준 임펄스 파형을 인가하였다. 측정치는 10 ~ 20개의 실험치의 평균치를 취하였다.

배리어 절연 파괴 현상의 관측은 관측창에 램프를 조사하고, 초당 10,000 프레임까지 촬영이 가능한 고속카메라(Relake Motionextra사, 모델 HG-100K)를 이용하여 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은  $\text{LN}_2$  중에서 배리어가 없는 경우의 전극간 거리에 따른 절연 파괴 전압 의존성을 나타낸다. 20회 이상의 절연 파괴 시험을 통해 취득된 데이터의 평균을

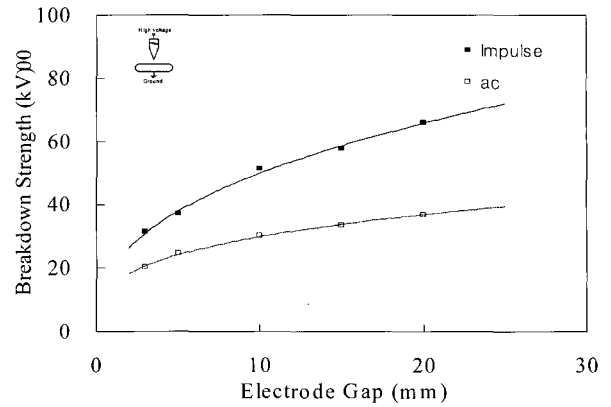


Fig. 3 Dependence of electrode gap on breakdown voltage without barrier.

그래프에 표시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 교류 및 임펄스 전압은 전극간 거리가 커짐에 따라 절연 파괴 전압은 증가하고 있으나, 장 갭에서는 전압 증가는 감소하고 있다. 침-평판 전극을 이용한  $\text{LN}_2$ 의 절연 파괴 전압  $V_{BD}$ 는 전극간 거리  $G$  대하여 교류 및 임펄스 전압에 대한  $V_{BD}=14.798 \times G \times 0.3$  및  $V_{BD}=20.03 \times G \times 0.4$ 로 각각 나타낸다.

Fig. 4는  $G=10\text{mm}$ , 칼라의 길이  $H=30\text{mm}$ 로 일정하게 하고 두께가 0.5mm인 경우 배리어 위치에 따른 교류 절연 파괴 특성 곡선을 나타낸다. 배리어가 없는 경우에 절연 파괴 전압 값은 그림 중에서 점선으로 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 배리어가 존재하는 경우의  $\text{LN}_2$ 중의 절연 파괴 특성은 이미 보고된[6-7] 기중이나 기름 중의 특성과 유사한 특성을 나타내고 있다. 즉 배리어가 평판전극 상에 위치할 경우는 배리어가 없는 경우와 유사한 절연 파괴 값을 나타내나, 배리어가 침전극부로 접근할 수록 절연 파괴 전압은 상승한다. 배리어가 침전극부에 아주 근접한 위치(침전극부에서의 약 10% 지점)인 경우는 배리어가 없는 경우의 절연 파괴 전압값의 약 2배가량 증가하였다. 그러나 배리어가 침전극에 밀착한 경우의 절연 파괴 전압값은 약간 감소하였다.

이와 같은 경향은 절연 파괴 전압값의 차이는 있으나 정극성의 임펄스 전압을 인가한 경우(Fig. 5 참조)에도 유사한 경향을 나타내고 있다.

배리어가 존재하는 경우의 침-평판 전극의 기포 및 절연 파괴 현상을 관찰한 일례를 Fig. 6에 표시한다.  $\text{LN}_2$  중에서의 절연 파괴 현상은 기름 중에서의 절연 파괴 현상과 유사하여 관측이 용이한 기름 중에서 고속

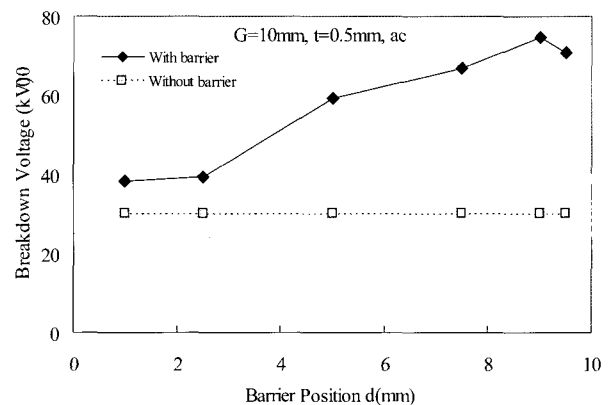


Fig. 4. Dependence of barrier position on ac breakdown voltage with barrier.

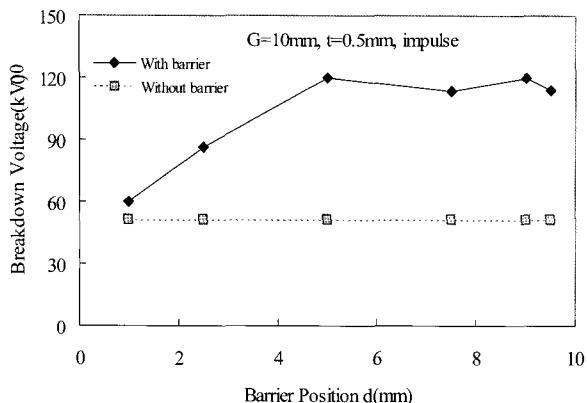
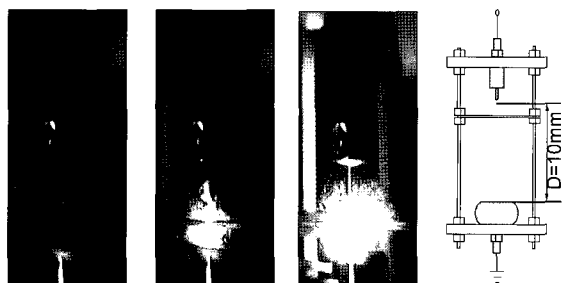


Fig. 5. Dependence of barrier position on impulse breakdown voltage with barrier.



$V_1=59.4(kV)$   $V_2=60.1(kV)$   $V_3=60.4(kV)$

Fig. 6. Observation of breakdown and bubble with barrier.

카메라로 관측하였다. 인가 전압의 상승에 따라서 절연 파괴 근처의 고전계에서 급하게 전류가 흐르기 시작함과 동시에 침전단의 발광이 일어나고 기포의 발생이 관측되었다. ( $V_2=60.1kV$ )

발광은 침전단만이 둥글게 빛나고 광의 색은 적색이었다. 또한 기포는 집단을 이루어 분수와 같이 발생하고 침전단에서 평판으로 향하는 수직을 축으로 하여 계속해서 움직이고 있다. 전류의 펄스가 보여지는 일로부터 코로나방전으로 인한 현상으로 판단된다.

다시 인가 전압을 상승하여 ( $V_3=60.4kV$ ) 발광점이 크게 되고 기포가 갭 전체를 채우고 방전 전하가 평판전극에 활발하게 충돌한 후 돌연 절연 파괴 되는 현상이 발견되었다.

$LN_2$  중 배리어 효과의 두께 의존성을 Fig. 7에 나타낸다.  $G=10mm$ , 컬러의 길이  $H=30mm$ 로 일정히 하고 두께는  $0.5mm$ ,  $1mm$  및  $3mm$ 로 변화하여 측정하였다. 두께와 관계없이 어느 경우에도 절연 파괴 전압의 위치 의존성은 있으나, 두께가 두꺼워질수록 절연 파괴 전압값이 상승하고 있다. 절연 파괴는 두께가 얇은 경우는 배리어를 관통하나 두꺼운 배리어의 경우는 연면을 따라서 방전하고 있다.

Fig. 8은 하나의 배리어를 침전극계 10%인 지점에 고정시키고 다른 배리어의 위치를 변화시킨 경우의 절연 파괴 특성을 나타낸다. 전극간 거리  $G=10mm$ , 배리어 두께  $t=0.5mm$ 로 일정히 하였다. 교류 및 임펄스의 경우 변화시킨 배리어가 평판전극에 가까울수록 절연 파괴 전압값은 상승하였다.

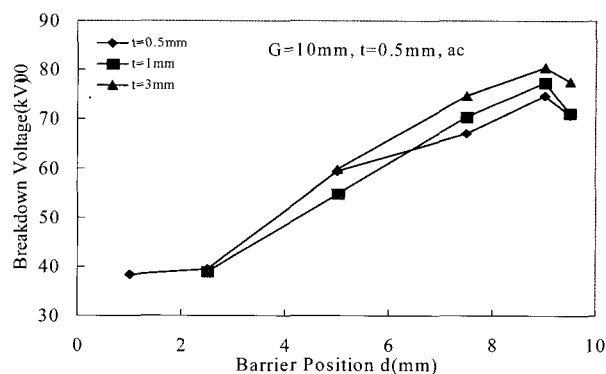


Fig. 7. Dependence of barrier thickness on ac breakdown voltage with barrier.

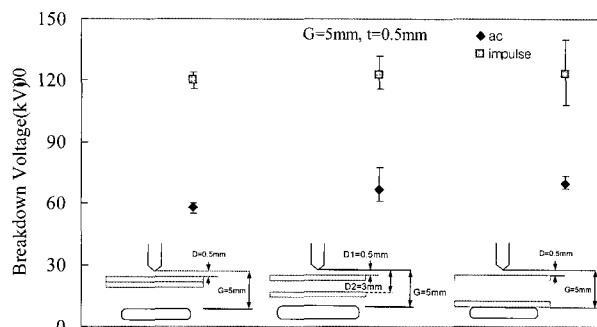


Fig. 8. Breakdown characteristics of barrier position.

Fig. 9는 전극간 거리 G에 따른 절연 파괴 특성을 나타낸다. 두께  $t=0.5mm$ 인 배리어 한개를 침전극부 10%인 지점에 고정시킨 후 침전극과 평판전극사이의 전극간 거리를 변화시키면서 절연 파괴 전압값을 측정하였다. 전극간 거리 G가 커짐에 따라 절연 파괴 전압값은 증가한다.

이상의 사실로부터 전극간 거리 G 및 배리어 위치 변화에 따라 방전 경로가 길어져서 절연 파괴 전압이 상승한 것으로 판단된다.

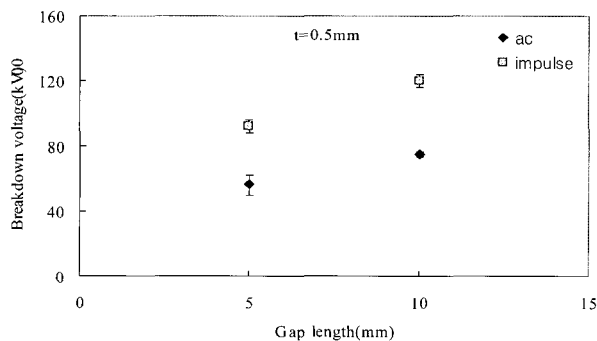


Fig. 9. Breakdown characteristics of electrode gap length.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초전도 변압기 주절연부의 형태를 모의한 침-평판 전극계에 교류 및 임펄스 전압을 인가한 경우 절연파괴 특성에 미치는 배리어 위치, 두께 및 전극간 거리에 대한 의존성을 고찰하였다.

배리어가 존재하지 않는 경우는 절연파괴 전압은 전극간 거리가 커짐에 따라 절연파괴전압은 증가하고 있으나, 장갑에서는 전압 증가율은 감소한다.

배리어 위치에 따른 절연파괴 특성은 배리어가 침전극부에 아주 근접한 위치(침전극부에서의 약 10% 지점)인 경우는 배리어가 없는 경우의 절연파괴 전압값의 약 2배가량 증가하며 배리어가 침전극에 밀착한 경우의 절연파괴 전압값은 배리어가 침전극부에 근접한 위치에 비해 약간 감소하였다. 그리고 두께와 관계없이 어느 경우에도 절연파괴 전압의 위치 의존성은 있으나, 두께가 커질수록 절연파괴 전압값이 상승하였다. 절연파괴는 두께가 얇은 경우는 배리어를 관통하나 두꺼운 배리어의 경우는 연면을 따라서 방전하고 있다.

본 연구를 통하여 송전급 고온초전도 변압기의 고-저압간의 절연설계 및 기기의 compact화에 기여할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 2004년도 경상대학교 발전기금재단 학술 연구조성비에 의하여 연구되었습니다.

#### 참 고 문 헌

[1] S.W. Schwenterly and S.P. Mehta, M.S. Walker, R.H. Jones, "Development of HTS Power Transformers for the 21st Century: Waukesa Electric Systems/IGC-SuperPower/RG&E/ORNL SPI collaboration," *Physica C: Superconductivity*, Vol.382, pp.1-6, 2002.

[2] Sung-Hoon Kim, Woo-Seok Kim, Kyeong-Dal Choi, Hyeong-Gil Joo, Gye-Won Hong, Jin-Ho Han, Hee-Gyoun Lee, Jung-Ho Park, Hee-Suck Song and Song-yop Hahn "Characteristic tests of a 1 MVA single phase HTS transformer with concentricly arranged windings," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, pp. 2214-2217, 2005.

[3] L.Masur et al, "Long length manufacturing of high performance BSCCO-2223 tape for the Detroit Edison Power Cable Project," *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, Vol. 11, pp. 3256-3260, 2001.

[4] Ho-Myung Chang, Yeon Suk Choi, Van Sciver, S.W and Baldwin, TL, "Cryogenic cooling temperature of HTS transformers for compactness and efficiency", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 13, No. 2, pp. 2298-2301, 2003.

[5] O.S. Gefie and S.M. Lebedev, "Barrier effect in solid dielectrics", 9th Int. Symp. on High Voltage Engineering, paper 10. 70, raz(Austria), 1999

[6] A.Beroual and A.Boubaker, "Influence of barriers on the lighting and switching impulse strength of mean air gap in point/plane arrangements", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, Vol.26, No. 6, pp.1130-1139, 1991

[7] A. Zouaghi and A. Beroual, "Barrier effect on the time lag to breakdown of transformer oil gap under lightning impulse voltage", *Conf. on Electr. Insul Diel. Phen.*, Atlanta, pp.640-643, 1997

#### 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, 1989년~현재 경상대 공대 전기공학과 교수.



**천현권(千賢權)**

1978년 6월 2일생, 2004년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.