

액체질소 중에서의 연면방전 특성

Characteristics of Surface Flashover in LN₂

정종만, 백승명, 김상현

(Jong-Man Joung, Seung-Myeong Baek, and Sang-Hyun Kim)

Abstract

For the development of superconducting power apparatus, it is necessary to establish the dielectric technology in coolant like LN₂. Therefore in this paper we conducted experiment of surface flashover that could occur in the windings of HTS transformer which will be developed in the pancake coil type. First, we distinguished two types of surface flashover by electrode alignment, such as parallel and vertical, and then compared with each characteristics of surface flashover. The flashover voltage was more affected by thickness of spacer than by surface length when the thickness of spacer is over 1 mm. And the surface flashover with metallic particle attached on the spacer was tested, it was affected by the particle position. The more close to the electrodes, the worse the characteristics. Also the experiment was conducted when the electrode was immersed in liquid nitrogen(LN₂) partially. The surface flashover characteristics of spacer was, when immersed partially in 50%, rapidly decreased.

Key Words : Surface flashover, Liquid nitrogen, Spacer, HTS transformer

1. 서론

고온초전도체가 발견된 이후 응용을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다[1-4]. 최근 높은 임계전류 값을 가지는 수백 m급의 고온초전도선재가 개발되고[5], 또한 기계적 특성도 상당히 보완되어 초전도 응용기기의 실현 가능성이 매우 높아졌다. 현재, 국내에서는 21세기 프론티어 연구개발사업 중 차세대초전도응용기술개발사업을 통해 케이블, 변압기, 한류기 및 전자소자 등 고온초전도 응용기기가 연구 개발되고 있다.

초전도응용기기가 개발되기 위해서는 냉매인 액

체질소 온도(77 K)에서 각종 재료가 가지는 절연 특성에 관한 연구와 액체질소의 절연파괴기구에 대한 연구가 선행되어야만 한다. 하지만 초전도 응용기기를 설계하기 위한 극저온 액체질소에 대한 절연 데이터 확보가 부족한 상태이며 절연파괴 메카니즘에 대한 이해가 미흡한 상태이다.

기포 발생이 없는 안정된 액체질소의 경우 평등 전계에서 절연파괴전계가 수백 kV/cm로 양질의 절연특성을 가지고 있다[6]. 그러나 액체질소는 증발잠열이 작아 이상전압의 침입으로 인한 퀘칭(quench)나 부분방전으로 인해 쉽게 기포를 발생 할 수 있어, 액체에 비해 절연강도가 낮은 기체질소 즉 기포의 영향 및 기포의 거동 메카니즘에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[7]. 또한 초전도응용기기가 제작되기 위해서는 구조물을 지지하거나, 냉매가 통과할 수 있는 냉각 통로를 확보하기 위해 스페이서(spacer)를 사용하여야 하는데 이와 같은 스페이서가 코일 사이에 있게되면 전기충전 부를 서로 연결하는 상태로 스페이서 표면을

경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

(진주시 가좌동 900,

Fax : 055-759-2723,

Corresponding Author : shkim@nongae.gsnu.ac.kr)

2002년 6월 11일 접수, 2002년 7월 3일 1차 심사완료,

2002년 9월 25일 최종 심사완료

통한 연면방전이 발생하기 쉽다. 이러한 연면방전 특성은 스페이서가 없을 시 액체질소 자체만의 절연강도에 비해 절연강도가 현저히 낮아 절연 상 큰 문제를 야기하게 된다. 또한 충분한 절연강도를 가지는 고체절연물로 전극을 격리하더라도 충분한 연면거리를 확보하지 못하면 안되므로 액체질소의 연면방전 특성에 대한 연구가 필요하다.

연면방전 특성은 전원의 종류나 액체질소에 함유된 불순물, 전극의 형상이나 표면상태 등에 의해 특성을 달리하게 되는데[8] 먼저 응용기기의 절연환경에 대한 분석을 통해 액체질소의 연면방전 특성을 살펴보았다.

많은 응용기기 중 초전도변압기의 절연구성은 그림 1과 같이 크게 전원 도입부 (power leads), 턴간 (turn-to-turn), 레이어간 (layer-to-layer), 섹션간 (section-to-section) 그리고 메인 (main) 절연으로 나눌 수 있다[9]. 전원도입부는 액체질소 온도에서 상온까지의 온도분포를 가지며, 액체와 기체가 공존하는 복합계로 액체질소에 부분 침적된 형태이다. 각 코일 내부, 레이어간이나 섹션간은 스페이서를 두께 되며 절연물의 한 표면에 두 전극이 위치하는 형태가 된다. 그리고 메인 간은 절연물을 사이로 두 전극이 마주보는 형태가 된다.

지금까지 이와 같은 관점에서 본 연구실에서는 극저온 액체에 대한 기초연구[10,11]를 해오고 있으며, 본 논문에서는 더블팬케이크 코일 형태로 권선되는 고온초전도변압기의 절연설계를 위해 위와 같이 절연구성에서 나타날 수 있는 연면방전 형태를 모의하여 실험하였다. 전극의 배치를 수평, 수직 배치로 나누고 각각의 연면방전 특성을 비교하였으며 그리고 전극 사이에 불순물이 존재할 시의 연면방전 특성과 전극이 부분침적 되었을 경우의 연면방전 특성을 연구하였다.

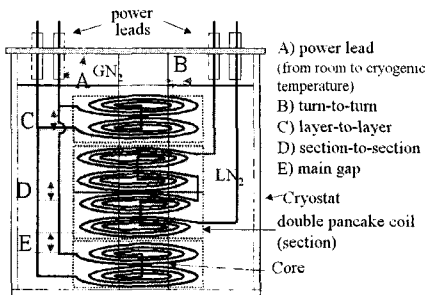


그림 1. 고온초전도변압기의 절연구성.
Fig. 1. Characteristics of Surface Flashover in LN₂.

2. 실험

실험장치의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 전극계, 액체질소를 담은 극저온용기(cryostat) 그리고 고전압 전원장치로 구성되어 있다. cryostat는 pyrex 유리로 제작된 2중 구조로 내, 외조로 구성되어 있다. 충분히 건조시킨 cryostat의 외조에 먼저 액체질소를 채운 다음 내조를 채워 내조의 열적 안정을 도모하였다. 액체질소는 상용의 액체질소를 사용하였으며 대기압 하에서 실험하였다.

그림 3은 전극계를 나타낸다. 그림 3 a)는 전극 배치에 따른 연면방전 특성과 급속성 입자가 존재할 때의 연면방전 특성을 실험하기 위한 전극계이다. FRP 스페이서의 표면에 두께 0.11 mm인 알루미늄(Al) 전극을 부착하였다. 삼각형의 전극은 끝각이 90°, 너비 48 mm이며 사각형의 전극은 너비 48 mm로 반경 10 mm로 모서리 처리하였다. 그리고 급속입자는 폭 2 mm, 너비 3 mm 두께 0.11 mm인 Al 재료이다. 그림 3 b)는 부분침적에 의한 연면방전 특성 실험을 위한 전극계이다. 직경 64 mm FRP 원통에 폭 10 mm, 두께 0.11 mm Al을

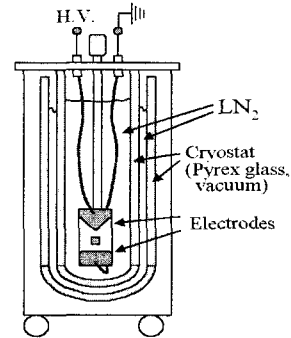


그림 2. 실험장치 개략도.
Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

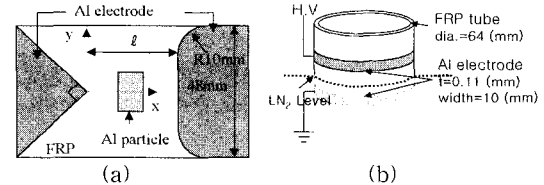


그림 3. 전극계 a) 불순물 입자 및 b) 부분 침적 영향

Fig. 3. Schematic diagram of electrode system for the effect of a) metallic particle and b) partially immersion on surface flashover.

부착하였다.

전극의 수평 및 수직 배치는 그림 4에 나타내었다. 수평배치에 대한 실험은 연면거리 ℓ 을 변화시키면서 방전전압을 측정하였으며, 수직배치의 경우는 절연체의 두께가 1, 2, 5 mm일 때 그림에 나타낸 collar길이를 변화시키면서 방전전압을 측정하였다. 이때 수직배치의 경우 총 연면거리 ℓ 은 collar 길이를 두 배하고 그 값에 두께를 더한 값으로 나타내었다.

금속입자가 존재할 경우 위치에 따른 연면방전 특성실험은 그림 3 a)와 같이 x, y로 축을 구분하고 x 방향으로 세 등분하여 금속입자를 각 위치에 부착한 후 방전전압을 측정하였으며, y 축 방향으

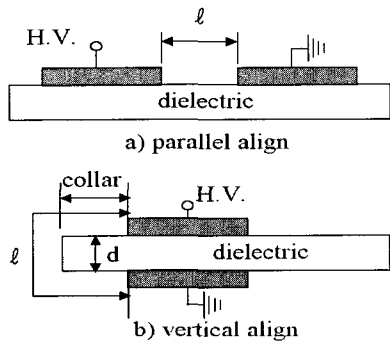


그림 4. 전극의 배치에 의해 구분된 a) 수평배치와 b) 수직배치의 연면방전을 위한 전극계.

Fig. 4. Schematic electrode system for the distinguished two types of surface flashover, a) parallel array and b) vertical array, by electrode alignment.

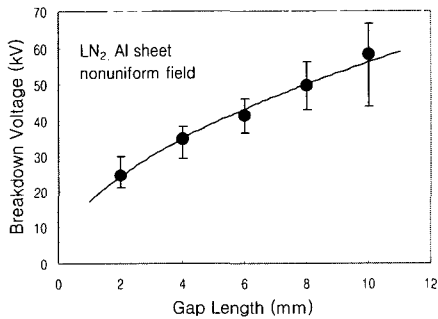


그림 5. Al sheet 전극으로 구성된 불평등 전계에서의 액체질소 절연파괴 특성

Fig. 5. Breakdown characteristics of LN₂ with nonuniform field electrode consisted of Al sheets.

로는 좌우 대칭이므로 전극의 폭 중간에서부터 위치를 변화시키면서 측정하였다.

그리고 부분 침적된 전극에 대한 실험은 그림 3 b)와 같이 전극이 액체질소에 완전히 적혀있을 때부터 액면을 각각 8, 6, 4, 2 mm로 낮추며 방전전압을 측정하였다. 전극은 수평계를 이용하여 수평을 정확하게 유지하였으며 액면은 cryostat에 눈금을 표시하고 관측 장을 통해 확인하였다.

시료는 현재 극저온에서 기계적 및 전기절연 특성이 우수하여 스페이서 재료로 유력하게 채택되어지고 있는 FRP(G10)[12]를 사용하였으며, 알코올로 초음파 세척한 후 충분히 건조시키고 실험에 사용하였다. BAUR사의 90 kV 300 VA 용량을 가지는 전원으로 상용 주파수의 교류전원을 인가하였다. 1 kV/s의 속도로 전원을 상승시키고 절연파괴 및 연면방전이 일어나는 전압을 기록하였다. 총 10~15회의 실험전압을 취해 그림에 평균값을 나타내었으며 최대 및 최소치를 표기하였다.

3. 결과 및 고찰

스페이서가 없을 때 액체질소의 절연파괴 특성을 그림 5에 나타내었다. 그림 3 a)에 표시된 전극계를 이용하여 전극면의 FRP를 제거하고 실험하였다. 절연파괴 전압은 다음과 같은 실험식 1)로 나타낼 수 있다.

$$V_B = k \ell^m \quad (1)$$

이때 V_B 는 절연파괴 전압, ℓ 은 전극간 거리, k 와 m 은 실험정수이다.

k 와 m 은 각각 17.2, 0.5의 값을 나타낸다. 다른 연구결과에서 평등전계 전극에서 $k=29$, $m=0.8$ 의 값으로 나타나는데[13], 실험에 사용되어지는 Al 전극의 불평등 정도를 짐작할 수 있을 것이다.

그림 6은 수평, 수직배치의 전극에서 연면거리를 증가시키며 방전전압을 측정한 결과이다. 수직배치에서 연면방전 전압은 연면거리보다 스페이서의 두께 d 가 증가함에 따라 더 크게 증가하고 있다. 또한 수직 및 수평배치의 연면방전 경향을 비교하면 수직배치에서 두께 d 가 2 mm인 경우 거의 같은 경향을 나타낸다. 그리고 두께 2 mm를 경계로 두께가 얇을 경우에는 증가 추세가 약하고 두꺼울 경우에는 증가 추세가 크게 나타나고 있다. 따라서 수직배치의 연면방전에 있어서는 연면거리

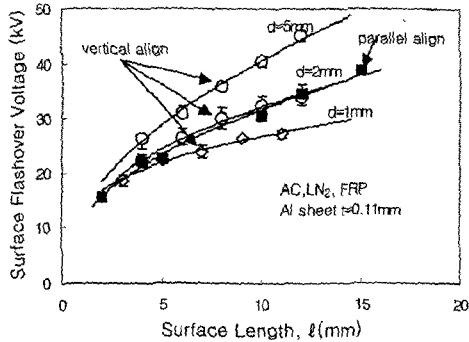


그림 6. 수평, 수직 배치 전극계의 연면방전 특성.
 Fig. 6. The surface flashover characteristics of electrode alignment, parallel and vertical.

표 1. 그림 6에 대한 실험실식의 k 및 m 값.
 Table 1. k and m value of the experiment equation of figure 6.

d (mm)		k	m
vertical	1	13.73	0.29
	2	11.54	0.43
	5	13.07	0.49
parallel		12.8	0.4

혹은 collar보다 절연물의 두께효과가 더 큼을 알 수 있으며, 스페이서의 두께 효과를 얻기 위해서는 적절한 두께이상이 되어야 함을 나타낸다.

표 1에 수직, 수평배치에 대한 실험식에서 k와 m값을 나타내었다. 증가추세를 나타내는 m값이 두께 d가 2일 때 0.43으로 수평배치의 값 0.4와 거의 같게 나타나며 d=2 mm를 경계로 얇을 경우 0.29, 두꺼울 경우 0.49를 나타낸다. 그림 7은 위와 같은 m값의 변화를 그림으로 나타내었다. 표와 그림에서와 같이 전극의 수직배치에서 스페이서의 두께효과를 더욱더 명확히 확인 할 수 있다. 이상적으로 스페이스의 면이 전기력선과 평행하고 결합이 없다면 연면방전 전압은 매질 자체의 절연과 과 전압과 같게 나타난다. 하지만 일반적으로 전극, 스페이서 그리고 매질 세 부분이 만나는 삼중점에서 방전이 쉽게 개시되어 연면을 따라 진전하게 되며 스페이서에 부착된 불순물의 영향을 받게 된다. 이때 수평으로 전극이 배치된 경우, 방전이 진전하는 방향인 스페이서와 액체절소의 경계면은

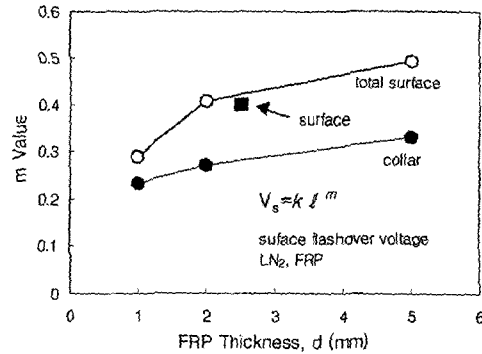


그림 7. 실험식 (1)에서의 m 값 변화.
 Fig. 7. The changing of m value in the experimental equation (1).

유전율의 변화에 의해 전계가 집중되는데 이는 연면 방전의 진전을 용이하게 한다. 반면, 전극이 수직으로 배치된 경우는 일반적으로 스페이서가 두께만큼 절연내력을 가지고 collar 길이가 충분하지 않다면 연면으로 방전이 발생하게 된다. 이때 스페이서의 두께가 두꺼울수록 전기력선 방향과 평행한 성분이 많아지기 때문에 collar 길이보다는 두께가 전기절연 구성에 더 효과적이라고 사료된다.

연면 방전 전압은 전극사이에 불순물 입자에 의해서도 영향을 받게 되는데 그림 8과 9는 불순물이 그림 3의 a)와 같이 중간에 크기가 2×3 mm² 이고 두께가 1 mm인 Al 입자가 있을 때 연면 방전 특성을 나타낸 그림이다. 입자의 위치는 (x, y) 좌표계로 나타냈으며 x, y값은 다음 식 2)와 같이 일반화하여 나타내었다.

$$y = y_p / (w_c - w_p) \times 100 (\%) \quad (2)$$

이때 y_p는 입자의 y값, w_c는 전극의 폭, w_p는 입자의 폭을 나타낸다. x 또는 y 값이 50%이면 전극의 x, y 방향에서 중간에 위치할 때이다.

그림 8은 급속 입자의 위치 x에 대한 연면방전 특성을 나타낸다. x가 50%일 경우 액체절소 및 공기의 방전전압이 최고 값을 가지며 전극에 가까울수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 그림 9는 급속 입자의 위치 y에 대하여 연면방전 전압을 나타내는데 y 값 55% 정도에서 연면 방전전압이 절소와 공기가 최저치를 나타내고 있으며 y 값이 더욱 증가함에 따라 다시 증가하고 있다. 급속입자가 존재할 때의 연면방전 특성은 다음

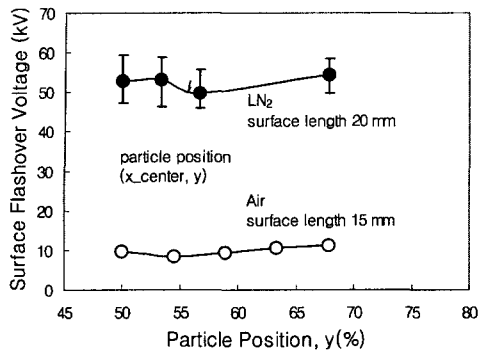


그림 8. 금속입자의 위치 y에 따른 연면방전 특성.
 Fig. 8. The characteristics of surface flashover as a function of position y of metallic particle.

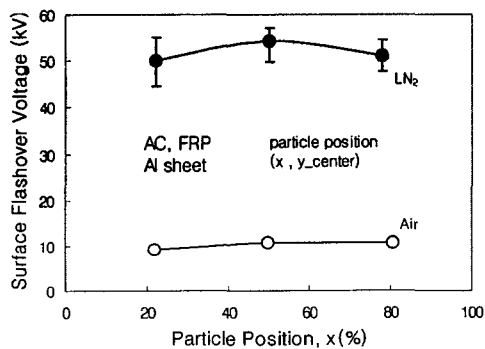


그림 9. 금속입자의 위치 x에 따른 연면방전 특성.
 Fig. 9. The characteristics of surface flashover as a function of position x of metallic particle.

과 같은 사항을 고려할 수 있다. 금속입자의 두께 만큼 전극간 거리가 감소한 효과, 또한 금속입자가 가장자리에 전계가 집중되어 발생하는 특성, 금속입자를 통한 방전경로 형성에 의한 특성 그리고 금속입자에 의한 방전의 유도 등으로 생각 할 수 있는데 아래 그림 9, 10, 11의 특성에서 고찰할 수 있다.

그림 10은 금속입자가 전극계의 중앙에 있을 경우 연면방전 전압을 금속입자가 없는 경우와 금속입자의 폭만큼 연면거리가 작은 경우를 비교한 그림이다. 여전히 금속입자가 있을 경우가 금속입자의 폭만큼 연면거리가 작은 경우보다 연면전압이 낮게 나타나고 있다. 또한 x 방향에서 금속입자가 전극에 가까울수록 침전극 선단의 전계집중을 완

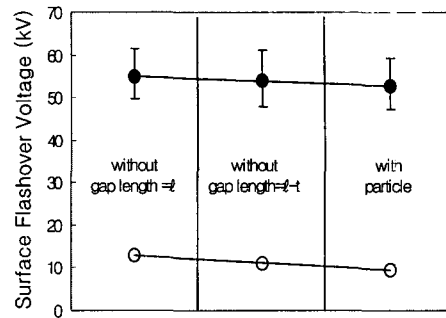


그림 10. 금속입자의 유무에 따른 방전전압 비교.
 Fig. 10. The comparison of surface flashover voltage between with particle and without particle.

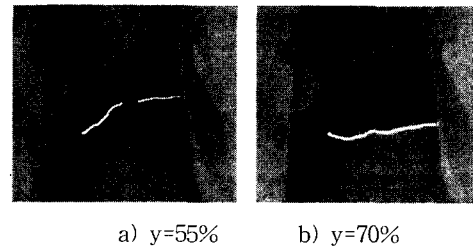


그림 11. 공기 중 불순물 입자에 의한 방전.
 Fig. 11. Surface flashover with particle when the position y is a) 55% and b) 70% in Air.

화시키고 있으나 금속입자의 가장자리에 전계집중이 강해지고 전극간의 전계집중 영역이 넓어짐을 전계해석을 통해 알 수 있었다. 그리고 y축 변화에 의한 전계분포에서는 일정거리 이상 중심에서 벗어나면 금속입자의 영향이 나타나지 않음을 알 수 있었다.

그림 11는 연면방전이 금속입자를 통하여 일어나고 있는 현상을 나타내는 사진이다. 공기 중에서의 연면방전 현상을 나타내지만, 그림 8, 9, 10에서 공기는 액체질소와 같은 경향을 나타내고 있어 액체질소의 연면방전도 금속입자에 의해 방전 경로가 왜곡되리라 예상할 수 있으며 실험에서 관찰할 수 있었다. 따라서 이상과 같은 금속입자에 의한 특성은 금속입자가 전극에 가까울수록 금속입자에 전계가 집중되고 또한 전극간의 전계집중 영역이 넓어져 방전특성이 저하된다고 사료된다. 특히 y축 변화에 의한 특성은 y축 위치 55%에서 최저치를 나타내는데 이것은 금속입자의 모서리가 전극의

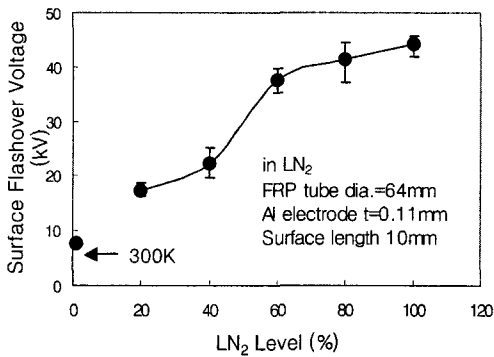


그림 12. 액체질소의 액면에 따른 연면방전 특성
 Fig. 12. The characteristics of surface flashover depending on LN₂ level.

중양에 가까워져서 나타나고 점점 멀어질수록 영향이 줄어드는 현상으로 사료된다.

그림 12는 전극이 액체질소에 그림 3의 b)와 같이 부분적으로 침적되었을 경우 연면방전 특성을 나타낸다. 액면이 전극의 50%일 때 급격한 특성저하를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 액체질소의 표면장력과 전계력에 의한 액체질소의 climb현상[14]에 의한 것으로 사료된다. 이러한 현상은 이상전압의 침입으로 인해 심한 켄치가 발생하게 되면 전원 도입부의 액체질소 액면이 변할 수 있는데, 액면에 따른 연면방전 특성 변화 추이를 고려해야 할 것이다. 그리고 전원 리드 부의 길이가 길게 되면 온도 분포도 크게되어 상당한 영향을 주게 되는데 앞으로 보다 자세한 연구가 필요할 것이다.

4. 결 론

고온초전도 변압기의 절연환경에 따른 연면방전 특성을 살펴보았다. 연면방전의 형태를 변압기 코일 내부에 스페이서가 놓이는 형태에 따라 전극의 수평배치 그리고 수직배치로 구분하고 연면방전 특성을 살펴보았다. 그리고 스페이서의 표면에 금속입자가 부착 되었을 경우와 스페이서가 부분침적 되었을 경우의 특성을 연구하였다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 절연물을 사이에 두고 전극이 마주보는 전극의 수직 배치에서 연면방전 전압은 절연물의 두께 1 mm보다 두꺼운 경우 총 연면 길이 또는 collar길이보다 절연물의 두께에 더 크게 의존

하였으며, 두께 1 mm보다 얇은 경우에는 collar 길이에 더 의존하였다.

2. 절연물 표면에 두 전극이 위치하는 전극의 수평배치에서 금속 불순물 입자가 존재하면 연면방전 특성이 저하하게 되는데 특히 불순물 입자가 전극에 가까울수록 특성이 더욱 나쁘게 나타났다. 또한 방전경로가 금속 입자 표면에서 전계가 집중된 부분을 통해 왜곡됨을 관찰할 수 있었다.
3. 전극의 부분침적에 의한 연면방전특성은 50%의 부분침적에서 연면방전 전압이 크게 저하됨을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Nathan Kelley, Marco Nassi, and Lawrence Masur "Application of HTS wire and cables to power transmission: state of the art and opportunities", Power Engineering Society Winter Meeting 2001 IEEE, Vol. 2, p. 448, 2001.
- [2] G. Donnier-Valentin, P. Tixador, and E. Vinot, "Consideration about HTS superconducting transformers," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, p. 1498, 2001.
- [3] M. Polak, P. Usak, J. Pitel, L. Jansak, Z. Timorasky, F. Zizek, and H. Piel, "Comparison of solenoidal and pancake model windings for a superconducting transformer", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, p. 1478, 2001.
- [4] M. Yamamoto, M. Yamaguchi, and K. Kaiho, "Superconducting transformer", IEEE trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, p. 599, 2000.
- [5] M. D. Bentzon and P. Vase, "Critical current measurement on long BSCCO tapes

- using a contact-free method," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, p. 1594, 1999.
- [6] J. Gerhold, "Cryogenic Liquids -A Prospective Insulation Basic for Future Power Equipment", IEEE trans. on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 1, p. 68, 2002.
- [7] B. Y Seok, N. Tamuro, and M. Hara, "A study of thermal bubble behavior in the simulation electrode system of HT superconducting coils," IEEE trans. on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 6, No. 1, p. 109, 1999.
- [8] Carig Miller, "Surface flashover of insulations", IEEE trans. on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, p. 765, 1989.
- [9] M. Hara and J. Gerhold, "Electrical insulation specification and design method for superconducting power equipment," Cryogenics, Vol. 38, p. 1053, 1998.
- [10] 김상현, 김현희, 김영석, 정종만, 정순용, "극저온 액체의 동적절연과파 특성", 전기전자재료학회논문지, 11권, 4호, p. 321, 1998.
- [11] 김상현, "초전도 케이블용 절연재료의 절연과파특성과 기구에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 5권, 3호, p. 303, 1992.
- [12] S. Usami, T. Suzuki, H. Ejima, and K. Asano, "Thermo-mechanical properties of epoxy GFRPs used in superconducting magnet winding", Cryogenics, Vol. 39, p. 905, 1999.
- [13] 日本電氣學會, "超傳導應用器機の電氣絶縁技術," 電氣學會技術報告, Vol. 528, p. 16, 1995.
- [14] 김영석, 이병성, 백승명, 정종만, 정순용, 김상현, "액체질소 중에서 spacer의 부분적 침적에 대한 연면 방전특성", 전기전자재료학회논문지, 13권, 2호, p. 177, 2000.