

대기압하의 액체질소중 전극배치에 따른 고체유전체 표면의 연면방전 및 Tracking현상

(The Characteristics of Tracking Phenomena and Surface Discharge Using Various Types of Electrode Arrangement in LN₂ at the Atmospheric Pressure)

박광서* · 신호영 · 최병주 · 박원주 · 이광식

(Kwang - Seo Park · Ho - Yeung Shin · Byoung - Ju Choi · Won - Ju Park · Kwang - Sik Lee)

요 약

본 논문에서는 고온 초전도체의 냉매로서 주목받고 있는 액체질소 중에서 고체절연물 표면의 연면 방전과 트래킹 현상에 관하여 연구하였다. 액체질소중 연면 방전에 많은 영향을 주는 기포 효과를 연구하기 위해 knife 형태의 전극과 평판형태의 전극을 사용하여 A-mode, B-mode, C-mode의 전극배치형태를 각각 구성하였다.

본 실험의 결과는 향후 연구되고 개발될 초전도 · 극저온 전력설비의 절연설계의 기초 데이터를 제공할 수 있다고 판단된다.

Abstract

This paper studied characteristics of surface discharge and tracking phenomena on the surface of solid insulators in Liquid Nitrogen(LN₂) noticed as a cooling medium of high temperature superconductor. In order to investigate the bubble effect which have much influence on electric surface discharge in Liquid Nitrogen, knife type electrode and plane electrode were formed oppositely with A-mode, B-mode and C-mode configuration.

It is considered that these result are fundamental data for electric insulation design of superconductor and cryogenic application machinery which will be studied and developed in the future.

Key Words : surface discharge, bubble effect, Liquid Nitrogen, superconductor, cryogenic

1. 서 론

현대 산업 문명의 급속한 발전과 경제성장의 가속화로 인하여 에너지에 대한 수요는 급격히 증가하는 추세에 있다. 이러한 전기에너지를 원활히 공급하기 위해서는 기존의 전력 시스템을 개선할 필요가 있다. 현재 널리 사용되는 가공선이나 OF 케이블 등에 의한 송전방식은 송전용량 측면에서 기술개발이 이루어진다고 하더라도 1회선당 1~2[GW]가 그

* 주저자 : 영남대학교 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 053-815-7291, Fax : 053-813-8230
E-mail : aca28@yumail.ac.kr
접수일자 : 2003년 1월28일
1차심사 : 2003년 2월13일
심사완료 : 2003년 5월 7일

한계로 될 것으로 추산되며 그 이상으로 송전용량을 증대시키기 위해서는 송전 회전수를 늘이거나 765[kV]급 이상의 UHV(Ultra High Voltage) 송전 방식을 적용해야만 가능하다.

가령 이러한 방식이 확립된다 할지라도 그 경제성 문제, 용지 확보 등의 문제가 뒤따르게 되므로, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 고밀도 대전력 수송기술 및 지중송전 등의 기술적 특징을 지닌 새로운 대용량 송전방식의 개발 필요성이 강하게 대두되고 있는 실정이다[1][2]. 이러한 문제를 해결할 수 있는 송전방식, 즉 극저온 송전으로서 극저온 저항케이블과 초전도케이블에 의한 송전이 있다[3][4].

극저온 송전케이블은 기존의 OF케이블의 구조와 유사하며 다만 냉매로서 절연유 대신 극저온 냉매를 사용하는 것이 차이점이다. 극저온 저항케이블은 기존의 액체헬륨온도(LHe : 4.2[K])에서 전기저항이 완전히 소멸되는 특징을 이용한 실용 초전도체를 기본으로 하는 초전도 케이블과는 달리, 구리, 알루미늄 등과 같은 상전도의 도체를 액체질소(LN₂ : 77[K]), 액체수소(LH₂ : 20[K]), 액체헬륨(LHe : 4.2[K])등의 극저온 냉매로 냉각시키므로, 발생되는 전기저항의 감소(상온의 약 1/10)에 의한 단위 송전용량을 증대시키는 방법이다. 선진국에서는 대전류 송전을 위한 초전도 및 극저온 응용 기기의 이용에 대하여 많은 연구를 하고 있다. 이러한 초전도 및 극저온 응용 분야의 연구에는 극저온 냉매의 전기적 절연에 대한 연구가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 장래에 실용화 단계에 접근할 수 있는 고온초전도체를 개발과 함께 액체질소가 주요 냉매로서 사용될 것을 착안하여, 기포거동의 영향을 바탕으로 대기압하의 액체질소 중에서 절연물로 사용될 고체유전체의 연면방전 특성 및 연면방전 진전에 따른 트래킹현상을 구명함으로써 각종 초전도 및 극저온 응용 기기의 절연설계에 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 기포거동 개념

그림 1은 대기압하의 액체질소중 Knife Type전극과 평판전극의 배치에 있어서 기포의 움직임을 예상

한 그림을 보여주고 있다. 그림 1의 (a)와 (b)는 Knife Type 전극이 (c)와 (d)는 평판전극이 고전계이다.

그림 1의 (a)의 전극계는 부력(F_f)과 gradient력(F_g)의 합성력(F_R)은 전극 축을 경계로 상부 영역에서는 기포를 전극계 밖으로 밀어내는 힘이 강하게 작용하는 반면 하부영역에서 발달한 기포는 오히려 전극 축 부근과 그 하부로 모이게 하는 힘이 강하게 작용된다. 따라서 전극 축과 그 하부에서는 이들 F_f = F_g인 어느 위치에서 정체 기포가 생성되게 되며, 결국 절연파괴는 전극 축 근처에 많은 기포를 형성시키는 경우에 용이하게 이루어지게 된다.

그림 1의 (b)의 전극계에서는 F_f 와 F_g 의 합성력 F_R 은 전극 가장자리에서는 기포를 전극계에서 멀리 하려는 방향으로 작용하는 반면 Knife Type전극 하부에서는 이들 F_f = F_g인 어느 위치에서 정체 기포가 생성될 가능성이 높게 되어 이 부분을 중심으로 절연파괴가 용이하게 이루어지게 된다.

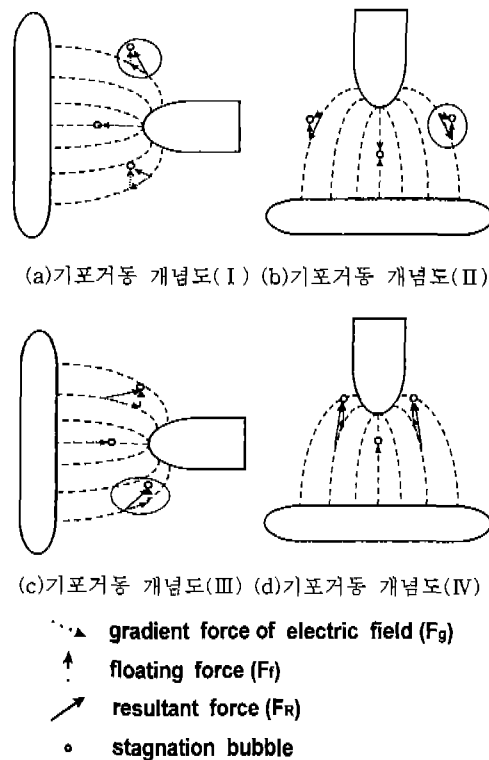
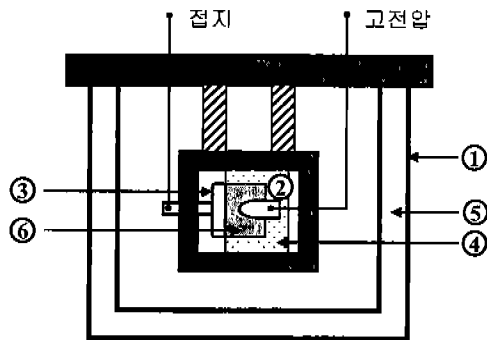


그림 1. 기포거동 개념도
Fig. 1. Concept of bubble behavior

그림1의 (C)의 전극계에서는 전극 축 하부에서는 F_f 와 F_g 의 합성력 F_R 이 기포를 Knife Type전극 쪽으로 밀어내는 작용을 하게 되며, 또한 전극 축 상부에서도 합성력 F_R 이 기포의 상승을 억제하는 방향으로 작용하게 되어 전극축은 물론 전극축의 상·하부 모든 부분에서 정체기포가 생성될 확률이 높게 되어 이러한 부분을 중심으로 절연파괴가 용이하게 이루어지게 되어 동일한 전극배치를 하고 있는 기포거동의 개념도 (I)의 전극계와 비교해 보았을 때, 상대적으로 낮은 전압값에서 절연파괴가 일어날 가능성이 높게된다.

그림 1의 (d)에서는 합성력 F_R 이 전극 축 부근에서는 물론 전극 가장자리에서도 합성력이 기포를 Knife Type전극 쪽으로 밀어내는 작용을 하게 되어 결국 이러한 전극계에서는 Knife Type전극 근처에 많은 기포를 형성시키게 되어 동일한 전극배치를 가지는 기포거동의 개념도 (II)의 전극계와 비교해 보았을 때, 상대적으로 낮은 전압 값에서 절연파괴가 일어날 가능성이 높게 된다.

3. 실험 장치 및 방법



① Pyrex glass ② Knife type 전극 ③ 평판전극
④ 전극 지지판 ⑤ 진공 ⑥ 고체 절연재료

그림 2. A-mode의 저온유지 장치
Fig. 2. Cryostat in case of A-mode configuration

그림 2는 대기압하에 있어서 연면방전 특성 및 연면방전 진전에 따른 트래킹현상을 연구할 목적으로 사용된 Visual Type Cryostat를 나타내며, 내경 180[mm], 외경 220[mm], 내높이 240[mm]의 척도를

가지고 있다. 재질은 급격한 온도변화에 의한 균열을 방지할 목적으로 내열성이 강한 Pylex glass를 사용했으며 열차폐를 목적으로 외조와 내조 사이를 10^{-3} [Torr]까지 진공을 유지시킨 2중 원통구조이다.

실험에 사용된 전극은 Knife Type전극(재질 : 스테인레스 스틸, 길이 38[mm], 직경 10[mm], 두께 2[mm], 곡률반경 5[mm], 칩단각도 45°) 과 평판전극 (재질 : 황동, 직경 : 60[mm], 두께 : 5[mm])을 서로 대칭 배치하였으며, 전극지지판 위에는 각각의 절연물이 전극의 하부에 구성되어 있다. 각 절연물의 규격은 두께 2[mm], 가로 60[mm], 세로 30[mm]로 일정하게 하였다. 전원장치로는 정극성 직류고전압 발생장치(입력전압 : 1 Φ 220[V], 출력전압 : 200 [kV], 출력전류 : 5 [mA], Pulse Electronics Co. Ltd.) 및 부극성 직류고전압 발생장치(입력전압 : 1 Φ 110[V], 출력전압 : 300 [kV], 출력전류 : 1[mA], Pulse Electronics Engineering Co. Ltd.)를 사용하였다. 그림 1의 기포거동 개념도에 따른 트래킹 현상과 기포 거동을 실험적으로 확인하기 위해 A-mode(그림 1의 (a)와 (c)에 해당), B-mode(그림 1의 (b)와 (d)에 해당), C-mode(A-mode에서 평판에 전압인가)로 각각 전극계를 구성하여 실험을 하였다. 전압 인가 속도는 1.0[kV/Sec] 의 전압 상승속도를 유지하여, 동일 절연물에 대해 연속하여 15회의 연면파괴전압을 측정하여 앞선 부정현상 방지를 위해 5회의 값을 제외한 10회의 값의 평균을 취하였다

4. 실험결과 및 고찰

4.1 전극계 A-mode 배치로 한 경우

그림 3은 평판전극과 Knife Type전극을 A-mode 배치(전극계를 중력방향에 대하여 수직으로 배치시킨 후, Knife Type전극에 전원을 인가한 경우)시킨 후, 정·부극성직류 고전압을 인가한 경우의 연면방전전압을 나타내고 있다.

부극성 직류 고전압을 인가한 경우보다 높게 나타나고 있으며, 연면거리가 길어질수록 파괴전압은 거의 직선적으로 상승하는 경향을 보이고 있다.

기포거동의 관점에서 보았을 때에는 A-mode배치에서 정극성 전원을 인가한 경우에는 기포거동의

개념도 (I)에서 설명된 경우로 전극 축과 그 하부에 서만 정체기포가 생성될 확률이 높은 반면 부극성 전원을 인가한 경우에는 기포거동의 개념도 (III)에서 설명된 경우로 전극 축과 그 하부는 물론 상부에서도 다량의 기포가 존재할 확률이 높기 때문에 상대적으로 절연파괴가 용이하게 일어나게 된다. 또한 연면거리가 길어짐에 따라 그 만큼 절연내력이 증가하게 되므로 절연파괴전압은 상승하게 된다.

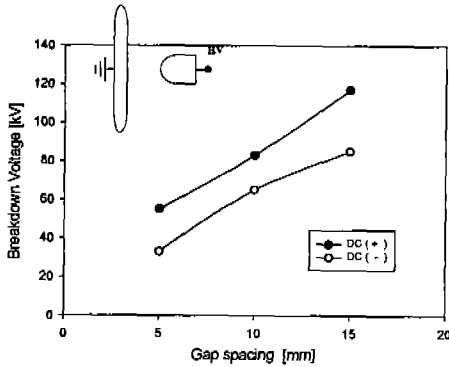
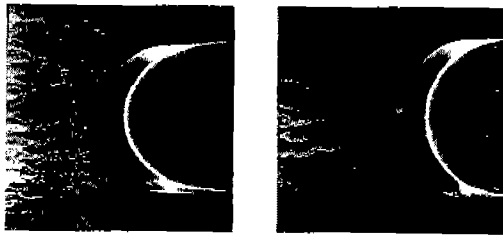


그림 3. 액체질소중 연면절연 파괴전압(A-mode)
Fig. 3. Surface Flashover Voltage in LN₂ (A-mode)



(a) DC(+), 10[mm] (b) DC(-), 10[mm]

그림 4. 액체질소중 절연물 표면의 트래킹(A-mode)
Fig. 4. Tracking on the test insulator in LN₂ (A-mode, 10[mm])

그림 4는 A-mode 배치시에 정·부극성 연면방전 후 시료들은 에너지 주입에 의한 트래킹 현상이 나타나고 있다. 정극성의 경우 전극 축을 중심으로 뚜렷하게 나타나는 형상을 보이고 있지만, 부극성의 경우 전극 축 하부에 나타나고 있다. 이러한 현상은 앞에서 설명한 기포거동의 개념도에서 충분히 설명

되어질 수 있으며 5[mm], 15[mm] Gap에서도 비슷한 경향을 나타내었다.

4.2 전극계를 B-mode 배치로 한 경우

그림 5는 전극계를 B-mode배치(전극계를 중력방향에 대하여 수평으로 배치시킨 후, Knife Type전극에 전원을 인가한 경우)시킨 후, 정·부극성직류 고전압을 인가한 경우의 연면방전전압을 나타내고 있다. A-mode의 경우와 마찬가지로 정극성 직류 고전압을 인가한 경우가 부극성 직류 고전압을 인가한 경우 보다 높게 나타나고 있는데 이러한 원인으로서는 기포거동 개념도에서 설명된 기포거동의 관점에서 보았을 때에는 B-mode배치에서 정극성 전원을 인가한 경우에는 기포거동의 개념도 (II)에서 설명된 경우로 전극 축에서는 합성력 F_R 에 의해 정체기포가 생성될 확률이 높게 되지만, 전극 가장자리에서는 전극계 외부로 방출하는 작용을 한다.

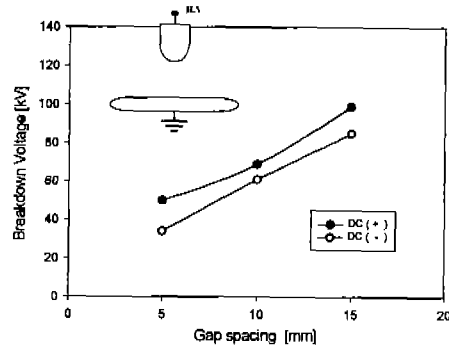


그림 5. 액체질소중 연면파괴전압 (B-mode)
Fig. 5. Surface Flashover Voltage in LN₂(B-mode)



(a) DC(+), 10[mm] (b) DC(-), 10[mm]

그림 6. 액체질소중 절연물의 트래킹(B-mode)
Fig. 6. Tracking on the test insulator in LN₂

그러나 부극성 전원을 인가한 경우에는 기포거동의 개념도 (IV)에서 설명된 경우로 전극 측은 물론 전극 가장자리에서도 다량의 기포가 존재할 확률이 높게되어 상대적으로 낮은 전압 값에서 절연파괴가 일어나게 된다. 또한 연면거리가 길어짐에 따라 그만큼 절연내력이 증가하게되므로 절연파괴전압은 상승하게 된다.

그림 6은 B-mode 배치시 10[mm]간극의 경우에 정·부극성 연면방전후의 트래킹 형상으로 정·부극성의 경우 모두 전극 축을 중심으로 뚜렷하게 나타나는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상은 B-mode 배치와 같은 전극계는 2장에서 설명된 기포거동의 개념도 (II)에서와 같은 구성을 가지고 있는 전극계로서 이러한 전극계에서는 합성력(F_R)은 전극 가장자리에서는 기포를 전극계에서 멀리하려는 방향으로 작용하는 반면 전극 축인 Knife Type 전극 하부에서는 이들 $F_f = F_g$ 인 어느 위치에서 정체 기포가 생성될 가능성이 높게 되어 이 부분을 중심으로 절연 파괴가 용이하게 이루어지게 되기 때문이다.

4.3 전극계를 C-mode 배치로 한 경우

그림 7은 전극계를 C-mode배치(전극계를 중력방향에 대하여 수직으로 배치시킨 후, 평판전극에 전원을 인가한 경우)시킨 후, 정·부극성직류 고전압을 인가한 경우의 연면방전전압을 나타내고 있다.

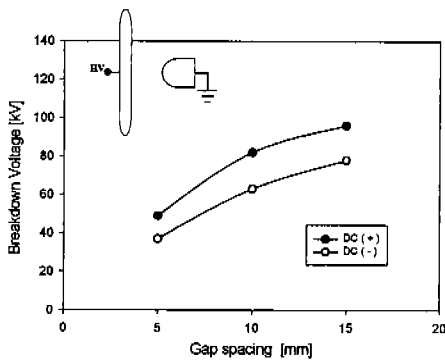
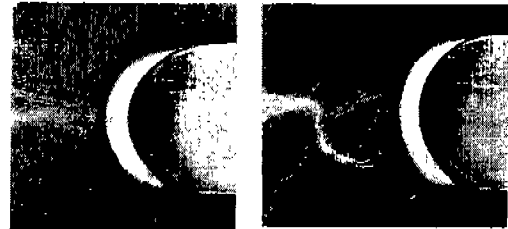


그림 7. 액체질소중 연면파괴전압 (C-mode)
Fig. 7. Surface Flashover Voltage in LN₂ (C-mode)



(a) DC(+), 10[mm] (b) DC(+), 15[mm]

그림 8. 액체질소중 절연물의 트래킹(C-mode)
Fig. 8. Tracking on the test insulator in LN₂ (C-mode)

A-mode, B-mode의 경우와 마찬가지로 정극성 직류 고전압을 인가한 경우가 부극성 직류 고전압을 인가한 경우보다 높게 나타나고 있으며, 연면거리가 길어질수록 파괴전압은 상승하는 경향을 보이고 있으나 A-mode, B-mode의 경우와는 달리 연면방전 전압 값은 간극이 길어질수록 상승하는 경향이 두드러지지 않고 어느 정도 포화하는 경향을 보이고 있다. 또한 A-mode배치의 경우와 비교해 보면, 정·부극성의 모두 10[kV]~20[kV]정도 낮은 전압 값에서 연면방전이 일어나고 있다.

이러한 현상은 A-mode의 경우와 비교해 보면 기포거동의 측면에서 같은 메카니즘을 가지고 있지만, 평판전극에 전원을 인가할 경우 Knife Type 전극에 전원을 인가할 경우보다 전극, 고체절연물, 액체질소의 접촉부, 즉 삼중점을 형성하여 전계의 집중을 일으켜 연면방전전압을 저하시키는 역할을 하여 약점으로 존재할 수 있는 부분이 상대적으로 많아진 원인과 함께 파괴직전에 열적으로 유기되어 전극표면에서 방출되는 열기포의 영향이 상대적으로 면적이 넓은 평판전극에서 우세하기 때문이라 할 수 있다.

그림 8은 C-mode배치시 정극성 연면방전 후의 트래킹 형상으로 전극 축을 중심으로 뚜렷하게 나타나는 현상을 보이고 있지만, 15[mm]간극의 경우 전극 축을 따라 진전하다가 Knife Type 전극하부로 이동하는 현상을 보이고 있다.

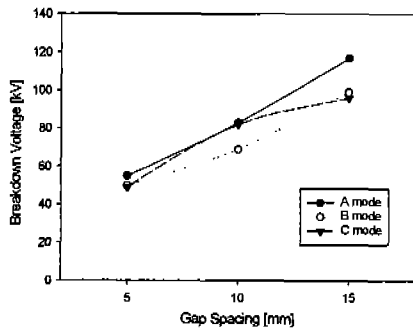
이러한 현상은 2장에서 설명된 기포거동의 개념도 (III)에서와 같은 구성을 가지고 있는 전극계로서 이러한 전극계에서는 전극축 하부에서는 합성력(F_R)이 기포를 Knife Type 전극 쪽으로 밀어내는 작용을

하게되며, 이러한 기포들이 Knife Type전극하부에서 상승을 억제 받아 정체하게 되어, 연면방전이 최단간극을 따라 진전하다가 상대적으로 절연내력이 약한 정체기포 쪽으로 이동하게 되어 이와 같은 현상이 나타나게 된다고 판단된다.

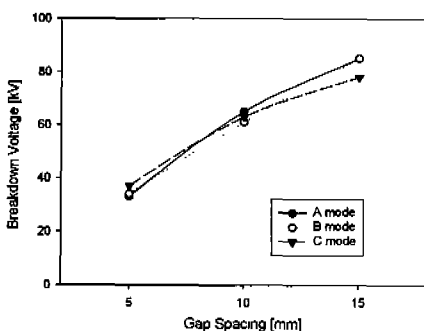
그림 9는 대기압하의 액체질소중 연면거리에 따른 정극성 및 부극성 연면방전을 나타내고 있다. 정극성의 경우 5[mm], 10[mm]간극까지는 A-mode, C-mode, B-mode의 순으로 높은 값에서 연면절연 파괴가 일어나지만, 15[mm]간극 이상이 되면 B-mode와 C-mode의 연면방전전압이 역전되는 경향을 보이고 있다. 즉 A-mode일 경우가 기포의 존재 가능성과 열기포의 발생 확률이 상대적으로 낮으므로 절연설계시 A-mode 형태가 가장 절연성능이 높다고 판단된다.

15[mm]이상의 간극에서 B, C-mode의 역전현상은 절연파괴 직전에 전원이 인가되는 전극 표면으로부터 방출되는 열기포에 의한 것으로 C-mode의 경우 15[mm]간극이 되면 전극계 전체가 열기포에 의해 덮여 포화가스의 형태로 나타나는 반면 B-mode의 경우는 상대적으로 열기포의 방출면적이 작은 Knife Type전극에서 방출되므로 포화하는 경향은 보이지 않기 때문이다.

부극성의 경우도 정극성의 경우와 마찬가지로의 경향을 보이고 있으며, 전극의 배치에 따라 기포의 거동이 달라지는 원인으로 인하여 다양한 양상을 보이고 있다. 또한 연면방전진전에 따른 트래킹형상을 보면, 전극의 배치 및 인가전원의 극성에 따라서 다양한 형상을 보이고 있으며, 이러한 형상들은 기포 거동에 따른 정체기포의 형성위치와 비교해 보았을 때, 상당한 부분이 일치하고 있음을 알 수 있다



(a) 정극성 연면방전 전압



(b) 부극성 연면방전 전압

그림 9. 연면절연 파괴 전압(A, B, C-mode)
Fig. 9. Surface Flashover Voltage in LN₂
(A, B, C-mode)

5. 결론

- ① 대기압하에서 액체질소중 Knife Type전극과 평판전극을 이용한 전극계에서 전극의 배치에 따른 절연파괴전압은 10[mm]간극까지는 A-mode > C-mode > B-mode 순으로 나타나고 있으며 15[mm]간극의 경우 B-mode와 C-mode의 절연파괴전압값이 역전되는 경향을 보인다.
- ② 동일한 전극배치에 있어서 연면방전전압은 상대적으로 정체기포가 생성될 확률이 낮은 정극성 전원을 인가한 경우가 부극성 전원을 인가한 경우보다 높게 나타나고 있다.
- ③ 연면방전 후 모든 절연물의 표면에 다소의 트래킹 흔적이 확인되었으며, 절연물의 트래킹 강도는 상대적으로 기포의 영향을 적게 받는 정극성 전원을 인가한 경우가 부극성 전원을 인가한 경우보다 크게 나타났다.
- ④ A-mode의 트래킹 형상은 최단 간극인 전극 축과 아래에 정체된 기포의 영향으로 전극 축과 그 하부를 중심으로 일어나고 있으며, 15[mm]간극에서부터 서서히 전극 축 상부로 이동하는 경향을 보이고 있다.

⑤ B-mode의 트래킹 형상은 정체기포가 생성될 확률이 가장 높고 전계의 집중이 가장 강한 전극 축을 통하여 일어나고 있다.

⑥ C-mode의 트래킹 형상은 최단 간극인 전극 축을 중심으로 일어나고 있으며, 15[mm]간극의 경우 하부로 이동하는 경향을 보이고 있다.

본 연구의 주요한 결과는 향후 연구·개발되어질 초전도 및 극저온 응용기기 등의 전기적 절연설계를 위한 기초자료로서 사용이 가능하다고 판단된다.

References

- [1] Toshio Suzuki, "Future Power System and Challenges in Electric Power Engineering", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, Yokohama, Japan, August 23~27, 1993.
- [2] 土森紀之, 長澤隆士, "21世紀の電力エネルギーと輸送技術III - 系統構成・運用の高速化", 電學誌, vol. 112, no. 8, pp. 592-596, 1992.
- [3] S. H. Minnich et al, "Crogenic power transmission", Cryogenics, pp. 165-176, 1969.
- [4] J. Wankowicz, "Cryogenics", vol. 23, 1983.
- [5] 주재현, "液體窒素中の放電形式과 放射電磁波의 特性에 관한 研究" 영남대 박사학위 논문, pp. 93-108. 1997.
- [6] 原 雅則 外3人, "液體窒素中の氣泡存在下の絶縁破壊に對するFRPスペーサの影響", IEE Japan, vol. 118-A, no. 6, 1998.

◇저 자 소 개◇

박광서(朴光緒)

1970년 3월 23일 생. 1997년 영남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(석사). 2000년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

신오영(辛吳映)

1971년 4월 22일 생. 1996년 영남대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 졸업(석사). 현재 LG 전선 전력기술팀 대리.

최병주(崔炳柱)

1958년 12월 12일생. 1981년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과(석사). 1986년~1997년 한국전기연구소 전력기기연구부 선임연구원. 1996년 일본 큐슈대학 대학원(박사). 1997년~현재 서라벌 대학 전기과 조교수.

박원주(朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1982년 일본 큐우슈우 대학 대학원 졸업(박사), 현재 영남대학교 전자정보 공학부 교수, 영남대학교 교수협의회 회장.

이광식(李廣植)

1948년 10월 20일 생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 현재 한국조명·전기설비학회 부회장. 현재 영남대학교 전자정보공학부 교수, 산업대학원 원장.