

액체질소 중 열기포 형상 및 절연 특성

백승명¹, 김해종^{2,a}

¹ 창원문성대학 소방안전공학과

² 한국전기연구원 HVDC 연구본부

Shape and Dielectric Strength of Thermal Bubbles in Liquid Nitrogen

Seung-Myeong Baek¹ and Hae-Jong Kim^{2,a}

¹ Department of Fire Safety Engineering, Changwon Moonsung University, Changwon 664-771, Korea

² Korea Electrotechnology Research Institute, HVDC Research Division, Changwon 642-120, Korea

(Received April 20, 2015; Revised April 24, 2015; Accepted April 24, 2015)

Abstract: In this paper, we study the insulating properties of the liquid nitrogen(LN2) including the thermal bubbles. The shape of the thermal bubbles in accordance with the current change was observed in the 77 K and 65 K LN2. According to the temperature of liquid nitrogen, bubbles were generated differently. The round shape of the bubble is occurred in 77 K LN2. But the layer shape of bubble is occurred in 65 K LN2. When the bubbles present, the dielectric strength of liquid nitrogen is low. However, the breakdown patterns were different according to the electrode arrangement. AC breakdown voltage(BDV) was lower than the DC BDV due to the influence of bubbles. Therefore, the design of a high-voltage superconducting equipments should consider the bubbles.

Keywords: Thermal bubbles, Temperature, Liquid nitrogen, LN2, AC breakdown voltage, DC BDV

1. 서론

전기의 수송, 변환, 저장 등에서 초전도 기술은 활용도가 높아 전력계통 분야에 있어 HVDC 기술과 미래 전력 기술로 관심을 받고 있다. 초전도 케이블은 저손실 대용량 전력 전송이 가능해 여러 나라에서 상용화를 위한 개발 연구가 진행되고 있다 [1-3]. 더욱 높은 경쟁력 확보를 위하여 고온 초전도 기기의 사용 전압은 더욱 높아지고 있으며 [4] 또한, 고온 초전도 기기의 컴팩터화 및 전기적 안정성 확보를 위하여 운전 온

도를 77 K 액체질소에서 65 K(과냉각) 액체질소에서 운전을 연구하고 있다 [5]. 그리고 최적의 절연 설계를 위하여 실제 운전을 모델링하여 다양한 절연 특성을 연구하였다 [6,7]. 하지만, 대전류를 공급하는 계통에 응용되는 고온 초전도 기기의 절연설계를 위한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대전류 고온 초전도 기기에서 발생하는 열기포를 고려하여 77 K와 65 K 액체질소에서 발생하는 열기포의 형상과 열기포가 액체질소의 절연 내력에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

a. Corresponding author; hjkim@keri.re.kr

2. 실험 방법

열기포 발생용 전극계를 평판전극과 열선을 이용하

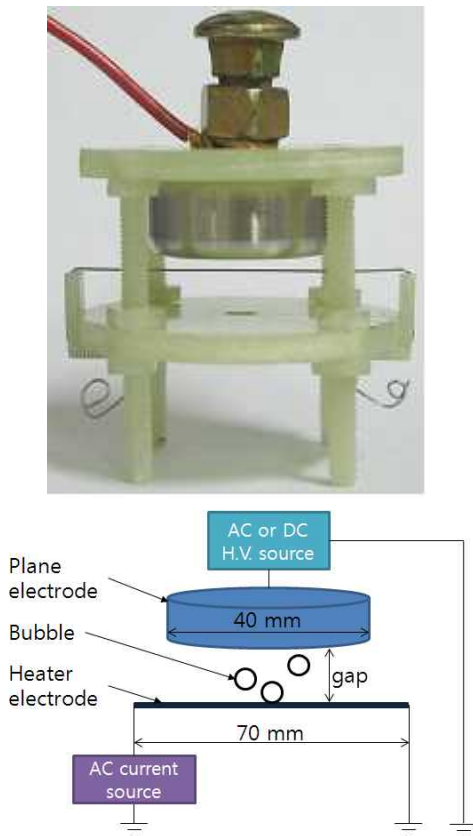


Fig. 1. Photo of electrodes and diagram of power source connection.

여 제작하였다. 평판 전극의 직경은 40 mm이고, 두께는 10 mm이며, 열선의 두께는 0.6 mm이고, 저항률이 $2.3 \times 10^{-7} (\Omega \cdot m)$ 이다. 전극 배치는 기포가 발생하는 위치에 따른 절연내력 특성을 고찰하기 위한 것으로서 기포가 하부에서 발생하는 Type A와 상부에서 발생하는 Type B, 기포가 옆에서 수직되게 발생하는 Type C와 옆에서 수평이 되게 발생하는 Type D 네 가지 형태로 배치하였다.

그림 1 실험에 사용한 전극계와 전극배치를 나타낸다. 열기포를 발생시키기 위해서 열선에 AC 전류를 인가하였다. 77 K 액체질소에서 0~8 A까지 전류를 인가하여 열기포의 형상을 관찰하였으며, 65 K 액체질소에서는 0에서 15 A까지 전류를 인가하여 열기포를 관찰하였다. 고전압 전원은 AC와 DC를 각각 사용하여 평판전극에 고전압을 인가하였다. 절연파괴 전압은 77 K 액체질소 중 전류를 0~8 A까지 2 A씩 증가시키며 AC 및 DC 고전압을 인가하여 측정하였다. 각 전류마다

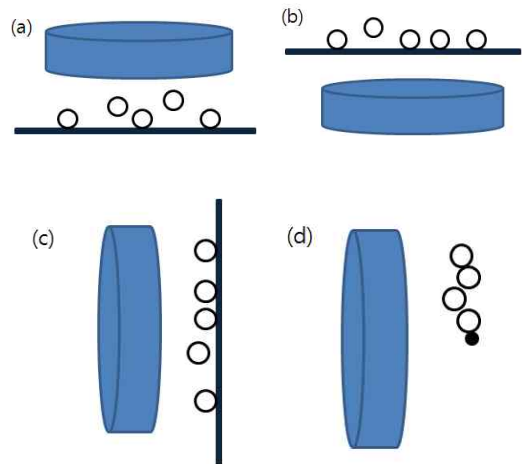


Fig. 2. Arrangement of electrodes. (a) Type A, (b) Type B, (c) Type C, and (d) Type D.

전압상승 속도 1 kV/s로 서서히 상승시켜 절연 파괴시켰으며 동일 조건에서 10회씩 절연 파괴되는 전압을 측정하였다. 그리고 공간전하의 영향을 고려하여 방전 직후 1분이 경과한 후 재차 전압을 인가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열기포 형상

퀵치나 접합저항 등에서 발생하는 기포가 존재하는 액체질소의 절연내력을 고찰하기 전에 열선에서 발생하는 기포를 관찰하였다. 액체질소의 온도는 77 K와 65 K의 온도에서 열기포를 관찰하였다. 그림 3에 77 K 액체질소 내에서 인가 전류에 따른 열선에 발생하는 기포의 형상을 나타낸다. 전류가 2 A에서는 열기포가 발생하지 않았고, 3 A일 때 열선의 일부분에서 기포가 발생하며 둥근 모양의 형상으로 직경은 ~0.5 mm 이내이다. 4 A일 때 열선의 상부의 절반 이상의 영역에서 기포가 발생하며 둥근 모양의 형상으로 직경은 1 mm 이내 다양한 크기의 기포가 존재한다. 열선의 하부 쪽에는 매우 적은 양의 기포가 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 5 A일 때 기포의 직경 더욱 커져 최대 2.8 mm의 기포가 관찰 되고 1 mm 이하의 기포가 열선의 하부에 붙어 있는 것을 알 수 있다. 이때 기포가 둥근 모양에서 다원형과 일그러진 형태로 형상의 변형이 관찰되었다. 6 A일 때 기포는 5 A까지와는 다른

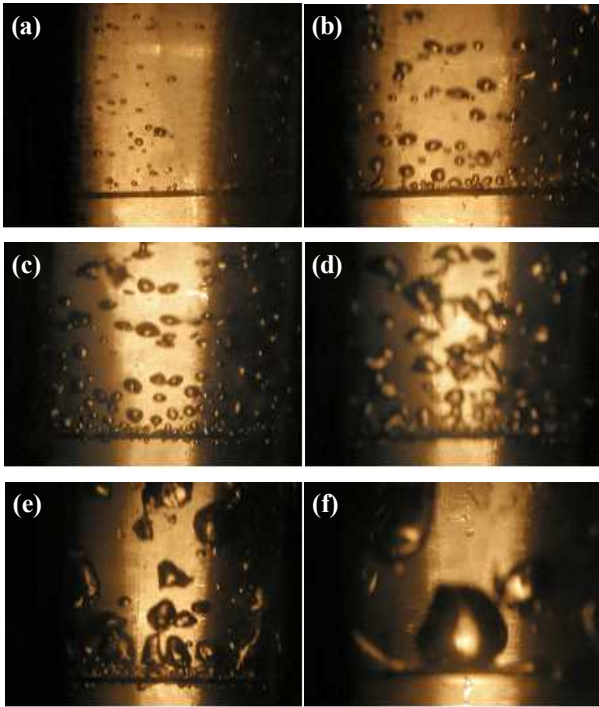


Fig. 3. Shape of thermal bubbles in 77 K LN2. (a) 3 A, (b) 4 A, (c) 5 A, (d) 6 A, (e) 7 A, and (f) 8 A.

형상을 나타낸다. 즉, 5 A까지는 열선에서 발생하는 기포의 형상이 구형과 타원형이었으나 6 A에서는 기포가 상호 결합하여 불규칙하면서 더욱 큰 형상을 나타낸다. 열선의 대부분의 영역에서 기포가 발생하여 상승하기 전 기포끼리 합쳐져 거대 기포를 형성하여 상승함을 알 수 있다. 기포의 크기는 3~4 mm의 크기를 나타내고 열선의 표면에 기포 막을 형성하기 시작하였다. 7 A일 때 기포의 불규칙한 형상이 더욱 심하게 나타나며 기포의 크기는 크지는 반면 기포의 개수는 줄어드는 현상을 나타낸다. 열선의 표면에는 미소 기포가 거대 기포와 함께 존재하고 있다. 8 A일 때 열선에서 발생한 기포는 하나의 기포 층을 형성하고 열선의 표면에는 미소기포가 거의 존재하지 않는다. 열선의 표면에 형성한 기포 층이 거대 기포로 상승하게 되어 기포의 개수는 수 개 정도로 매우 작다. 8 A일 때 열선과 액체질소와 사이에 완전한 기포 막이 형성되어 완전한 기포 층이 됨을 알 수 있다.

그림 4에 65 K의 액체질소에서 기포의 형상을 나타낸다. 65 K일 때는 77 K일 때와 다르게 기포가 발생됨이 관찰되었다. 65 K의 액체질소에서는 둥근 모양의

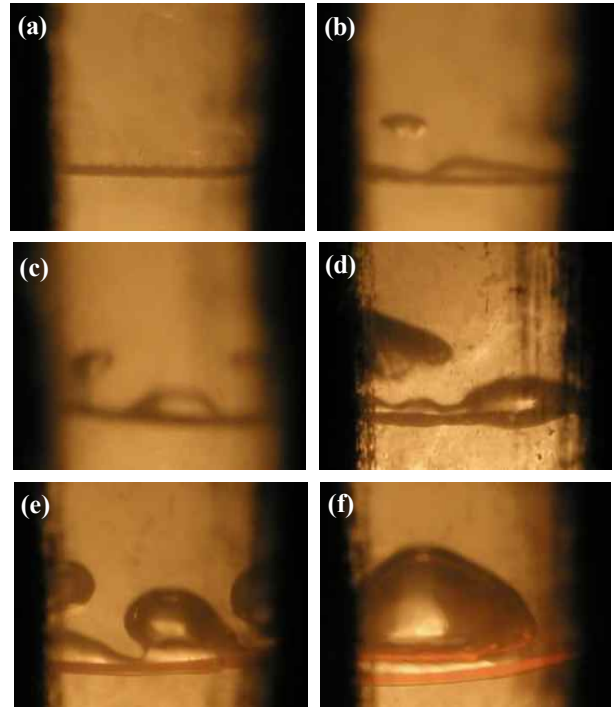


Fig. 4. Shape of thermal bubbles in 65 K LN2. (a) 10 A, (b) 11 A, (c) 12 A, (d) 13 A, (e) 14 A, and (f) 15 A.

기포가 발생하지 않고 열선 주위에 기포 막의 형태로 비등하고 기포의 크기는 매우 크고, 개수는 매우 적은 특성을 나타내었다. 즉, 10 A까지 기포가 발생되지 않았으며, 11 A에서 열선의 절반 부분에 기포 막이 얇게 형성되었으며, 12 A에서는 기포 막의 두께가 두껍게 형성되었다. 13 A 이후에는 기포 막이 매우 커졌고, 기포의 형상도 다양하지만 3 mm 이상의 큰 단일 기포로 발생하였다.

3.2 절연 특성 분석

그림 5에 평판-열선 전극계를 이용하여 AC와 DC 고전압을 인가한 경우 액체질소의 평균 절연파괴 전압을 각각 나타낸다. 그림에서 보이듯이 전극의 간격이 증가함에 따라 절연파괴 전압은 증가하는 경향을 나타냈으며 식 (1)과 (2)와 같이 나타냈다.

$$AC\ BDV = 17.049g^{0.2909} \quad (1)$$

$$DC\ BDV = 30.248g^{0.3209} \quad (2)$$

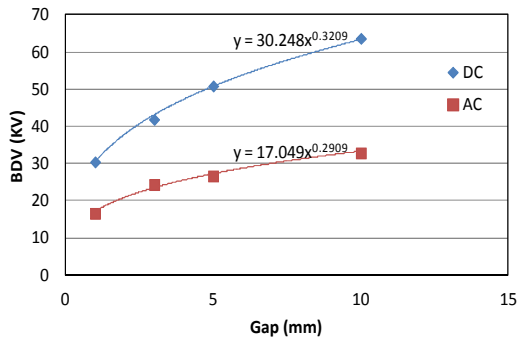


Fig. 5. AC and DC BDV of LN2 according to the gap length.

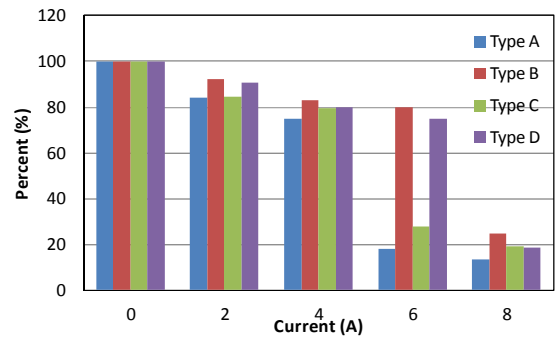


Fig. 8. Comparison of AC BDV of LN2 including the thermal bubbles.

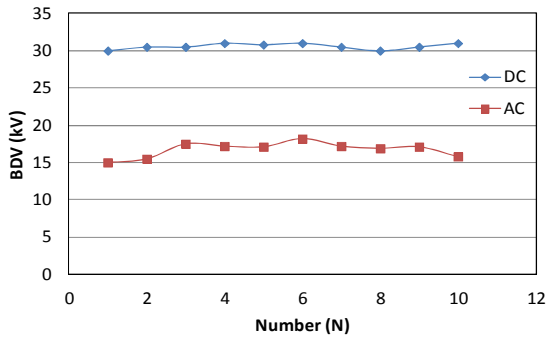


Fig. 6. AC and DC BDV of LN2 without interval time in gap length 1 mm.

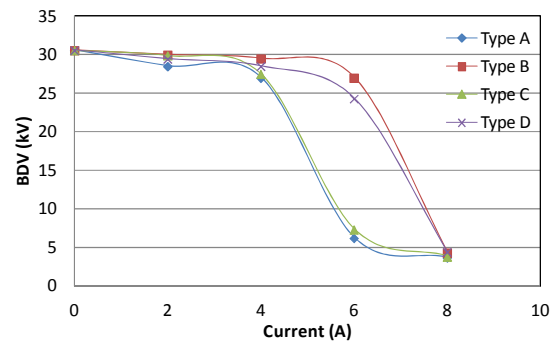


Fig. 9. DC BDV of LN2 including the thermal bubbles.

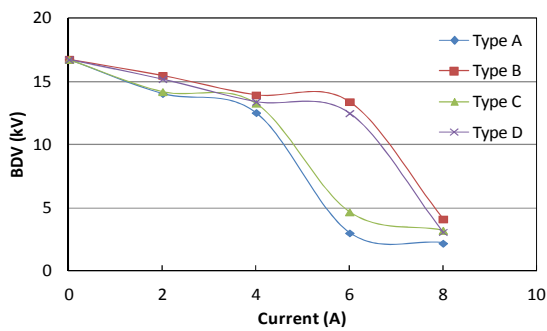


Fig. 7. AC BDV of LN2 including the thermal bubbles.

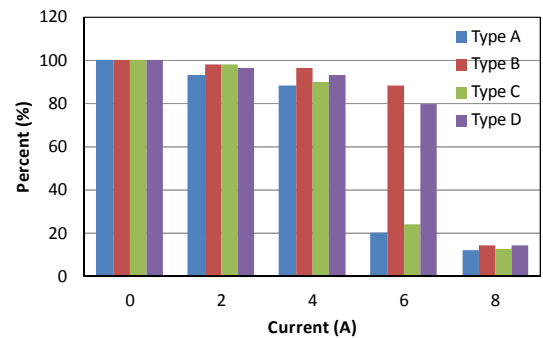


Fig. 10. Comparison of DC BDV of LN2 including thermal bubbles.

여기서, BDV는 절연파괴 전압, g는 전극 간격을 나타낸다. DC 절연파괴 전압은 AC 절연파괴 전압보다 약 2배 높은 값을 나타내었다. 그림 6은 전류 0 A, 전극간격 1 mm에서 파괴 횟수에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. AC의 경우 평균 절연파괴 전압 16.75 kV, 최고 절연파괴 전압 18.2 kV, 최저 15kV를 나타내었다.

DC의 경우 평균 절연파괴 전압 30.58 kV, 최고 절연파괴 전압 31 kV, 최저 30 kV를 나타내었다. AC의 경우 전압 변동폭이 DC보다 크게 나타났으며, AC와 DC 모두 액체질소의 절연파괴 성능은 회복되는 것으로 나타났다.

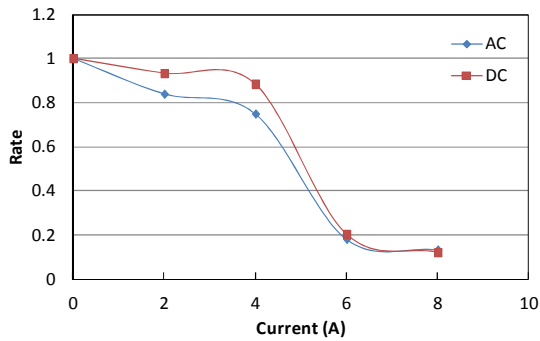


Fig. 11. In the type A electrode system, comparison of AC and DC BDV.

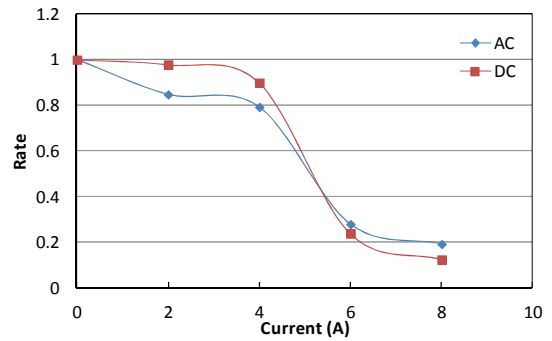


Fig. 13. In the type C electrode system, comparison of AC and DC BDV.

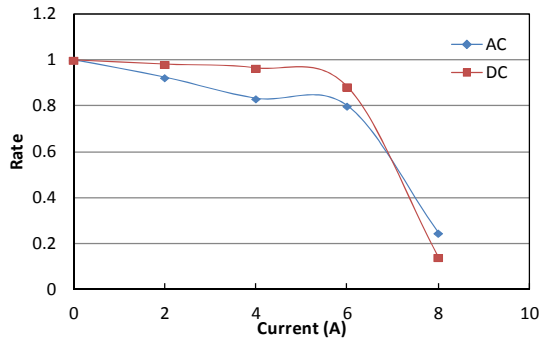


Fig. 12. In the type B electrode system, comparison of AC and DC BDV.

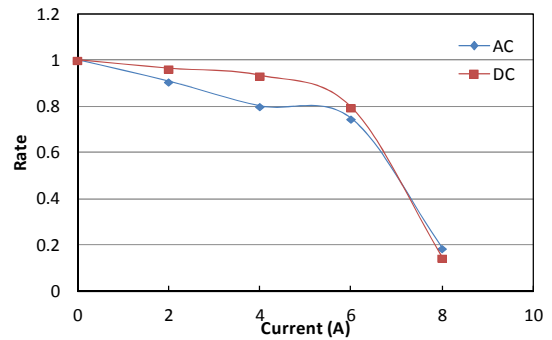


Fig. 14. In the type B electrode system, comparison of AC and DC BDV.

그림 7은 열기포 발생 전류값 상승에 따른 전극 배치 별 AC 절연파괴 전압을 나타내고 그림 8은 기포 발생 시 절연파괴 전압 값의 변화를 명확하게 파악하기 위해 기포 발생이 없는 경우의 전압을 기준으로 백분율로 나타낸 것이다. 기포가 발생함에 따라 AC 절연파괴 전압은 점점 감소하다가 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 전극배치 Type A와 C는 4 A 이후 급격하게 감소하였으며, Type B와 D는 6 A 이후 급격하게 감소하였다. 이는 기포가 발생하여 고전압 전극에 다량으로 접하는 형태인 Type A와 C에서 기포의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 8에서와 같이 기포가 발생하지 않는 경우 절연파괴 전압과 기포 발생시 절연파괴 전압을 백분율로 나타낸 결과 Type A에서 2 A일 때 83%, 4 A일 때 75%, 6 A일 때 18%, 8 A일 때 13%로 낮게 절연파괴 전압을 나타내었다.

그림 9와 10은 DC 절연파괴 전압을 나타낸다. 기포가

발생함에 따라 DC 절연파괴 전압은 거의 일정하게 유지하다가 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다.

그림 9에 나타난 바와 같이 DC 절연파괴 전압은 서서히 감소하다 급격히 감소하는 AC 절연파괴 전압과 다른 형태를 나타냄을 알 수 있다. 이는 미소 기포가 영향을 받는 힘은 크게 정전력, 부력, 점성력 3가지로 분류되는데 DC 고전압을 인가한 경우 보다 AC 고전압을 인가한 경우에 정전력의 영향을 크게 받아 기포가 고전계 쪽으로 많이 이동하여 절연파괴 전압이 낮아지는 것으로 판단된다. 그림 10에서와 같이 기포가 발생하지 않는 경우 절연파괴 전압과 기포 발생 시 절연파괴 전압을 백분율로 나타낸 결과 Type A에서 2 A일 때 93%, 4 A일 때 88%, 6 A일 때 20%, 8 A일 때 12%로 낮게 절연파괴 전압을 나타내었다.

그림 11에서 그림 14까지 전극 배치에 따른 인가전압의 영향을 고찰 한 것이다. DC 절연파괴 전압이 AC 절연파괴 전압보다 약 2배 높게 나타나서 절대적인 비

교가 어려우므로 기포가 발생하지 않는 전압을 기준으로 비율로서 DC 절연파괴 전압이 AC 절연파괴 전압의 영향을 비교하였다.

모든 전극의 배치에서 AC 절연파괴 전압이 DC 절연파괴 전압보다 낮게 나타났다. 기포가 발생함에 따라 AC 절연파괴 전압이 낮게 나타났으며 이후 기포막이 형성됨에 따라 AC와 DC 절연파괴 전압은 매우 낮은 값에서 비슷하게 나타났다.

4. 결론

액체질소 내에서 열기포의 형상과 열기포를 포함한 경우 절연내력 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 77 K 액체질소에서 열기포는 둥근 모양이 작은 기포가 발생하였다. 전류가 증가함에 따라 기포는 둥근 모양이 커지다가 전류 6 A에서 기포는 서로 결합하여 일정한 형상 없이 일그러졌다. 이때 기포의 개수는 줄어들고, 크기는 더욱 커졌으며 열선 주위에 기포막을 형성하기 시작하였다. 6 A 이후 기포는 더욱 커지고 열선 전체에 기포 막을 형성하였다. 65 K 액체질소 내에서 열기포는 77 K 액체질소 내에서 발생하는 열기포의 형상과 다르게 나타났다. 65 K 액체질소 내에서는 둥근 모양으로 발생하는 것이 아니라 열선 주위에 막의 형태로 기포가 발생하였다.

기포 발생에 따른 절연 특성을 4개의 전극배치에서 관찰한 결과 열선이 아래 있거나 세로로 있는 경우 절연파괴 전압이 낮게 나타났으며, AC 절연파괴 전압은 서서히 감소하다 급격히 감소하는 경향을 나타내었

고, DC 절연파괴 전압은 거의 일정하게 유지하다가 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 기포가 발생하는 경우 모든 전극배치에서 AC 절연파괴 전압이 DC보다 낮게 나타났다.

고온 초전도 기기의 절연설계에서 기포의 영향을 고려하여 전기절연 설계를 하여야 할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] O. Maruyama, T. Ohkuma, T. Masuda, M. Ohya, S. Mukoyama, M. Yagi, T. Saitoh, N. Aoki, N. Amemiya, A. Ishiyama, and N. Hayakawa, *Physica Procedia*, **36**, 1153 (2012).
- [2] S. H. Sohn, J. H. Lim, B. M. Yang, S. K. Lee, H. M. Jang, Y. H. Kim, H. S. Yang, D. L. Kim, H. R. Kim, S. W. Yim, Y. J. Won, and S. D. Hwang, *Physica C: Superconductivity*, **470**, 1567 (2010).
- [3] E. P. Volkov, V. S. Vysotsky, and V. P. Firsov, *Physica C: Superconductivity*, **482**, 87 (2012).
- [4] S. Mukoyama, M. Yagi, T. Okuma, O. Maruyama, Y. Shiohara, N. Hayakawa, and T. Mizutani, *Physica Procedia*, **58**, 310 (2014).
- [5] Y. F. Fan, L. H. Gong, X. D. Xu, L. F. Li, L. Zhang, and L. Y. Xiao, *Cryogenics*, **45**, 272 (2005).
- [6] W. J. Kim, H. J. Kim, J. W. Cho, and S. H. Kim, *Physica C: Superconductivity*, **504**, 172 (2014).
- [7] W. J. Kim, M. S. Pang, H. J. Kim, J. W. Cho, and S. H. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 545 (2013).