

전력용 고온초전도 코일 모의전극계에서의 기포거동에 관한 연구

Study on Bubble Behavior with the Simulated Electrode System of High Temperature Superconducting Coils for Electric Power System

석복렬*, 김종구*

Bok-Yeol Seok*, Jong-Koo Kim*

Abstract : Bubble behavior is studied with an electrode system which consists of coaxial spiral coil-to-cylindrical electrode with an insulation barrier and spacers, and is immersed in liquid nitrogen for simulation of insulation environments in high temperature superconducting(HTS) coils. The results show that the bubble behavior is affected severely by electric field: (1) under low applied voltage bubbles rise by buoyancy, but at higher applied voltage they are trapped in a lower electric field region below the coil electrode, and (2) the trapped bubble flows along the downside of coil electrode if no obstruction is in a groove between coil turns, but it splashes out of the groove after its growing if the obstruction such as spacer exists.

Key Words : HTS coil, transformer, fault current limiter, electrical insulation, bubble behavior, liquid nitrogen

1. 서 론

1980년대 중반 고온초전도체의 개발로 초전도에 대한 관심이 고조되고 초전도체의 전력기계에의 응용에 관한 연구가 미국, 일본 및 유럽의 선진 중전기 제조회사뿐만 아니라 국내에서도 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 초전도 변압기 및 한류기의 경우는 그 진전속도가 빨라 대부분의 선진 중전기 제조회사들이 2005년까지 상용화를 목표로 연구가 활발히 진행 중에 있다[1-2]. 그러나, 고전압 전력계통에 연결되어질 초전도 변압기 및 한류기의 실용화를 위해서는, 개발이 진행중인 초전도 기기의 구조 및 극저온 환경에 대한 고전압 절연기술의 확립이 무엇보다도 시급한 과제로 지적되고 있다[3-4]. 특히, 초전도 한류기의 경우는 초전도 고유의 특성인 켄치현상을 적극적으로 이용하는 기기로서 동작 시에는 계통의 고전압 및 과도서지전압의 유기와 더불어 주울 열의 발생으로 인하여 다량의 기포가 발생하게 되므로 전기절연 관점에서 매우 위험한 환경이 초래될 것으로 예상된다. 따라서, 초전도 변압기 및 한류기의 구조에서 많이 이용되는

코일형 고온초전도 전력기기의 고전압 절연대책을 확립하기 위해서는 냉매인 액체질소의 비등특성 및 기포의 거동에 대한 명확한 이해가 선행되어야 할 것으로 사료된다.

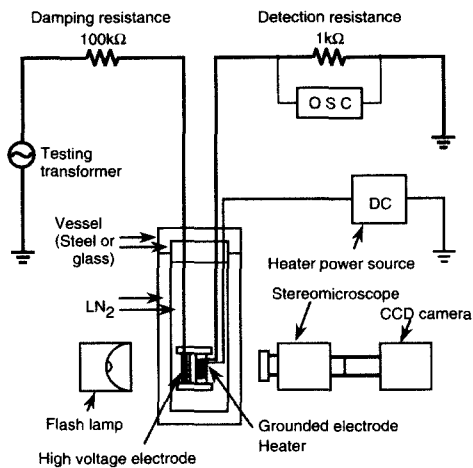
본 연구에서는 고온초전도 변압기 및 한류기용 고온초전도 코일에 대한 고전압 절연대책의 일환으로 동심원통형 고온초전도 코일을 모의한 전극계 내부의 액체질소 중에 발생한 기포의 거동에 관한 연구를 실험을 통하여 수행하였다.

2. 전극계 및 실험장치

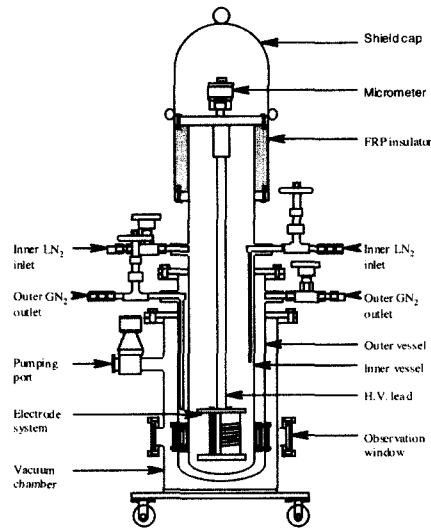
현재 제작시험 중에 있는 대부분의 고온초전도 변압기 및 한류기용 코일은, 원통형 고체절연체에 패인 홈에 초전도선을 감은 다층의 구조를 이루고 있으며, 고체절연체로는 주로 FRP를 이용하고 있다[5-6]. 본 연구에서는 그림 1에서 볼 수 있는바와 같이 FRP로 만들어진 원통형의 표면에 패인 홈을 따라 동 파이프를 고정된 코일전극으로 초전도 코일을 모의하였다. 그리고, 초전도 권선의 켄치 시에 발생하는 기포를 모의하기 위하여 동 파이프 내부에는 망가닌선(저항 0.106Ω/cm)을 내장하여 예폭시 수지로 고정시켰다. 별층의 초전도 코일을 코일전극과 유리원통(두께 1.6mm)에 투명전극(ITO)막을 증착한 ITO막전극(이하에서는 ITO전극)으로 모의하여 전극의 외부로부터 기포거동을 관측하였다. 또한, 코일의 선단으로부터 원통유리전극의 내부표면까지의 거리를 냉각통로의 폭(l_c)으로 하였다. 고체절연체에 의해 지지되는 코일층간은 스페이스에 의해 분리되는 액체질소의 유통로에 대하여 스페이스의 형상의 영향을 조사하기 위하여 그림에서 보는바와 같이 2종류의 스페이스, (1) 코일전극과 스페이스 사이에 전혀 공극을 가지지 않는 스페이스 형상 : 스페이스1, (2) 코일간에 공극이 존재하는 직선형상의 스페이스 : 스페이스2,를 사용하였다. 본 연구에서는 수회에 걸친 예비실험에 의한 기포직경(약 1mm)을 고려하여 $l_c=1.9$ mm로 하였다.

그림 2는 본 연구에서 사용한 실험회로 및 사용한 크라이오스탯의 개략도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이, 시험전극계는 액체질소를 충전한 시험조에 봉입하였다. 시험조는 그림 2(b), (c)에 나타내는 바와 같이 2종류를 이용하여, 가압실험 시에는 스테인레스 크라이오스탯(이하에서는 크라이오스탯(Cryostat))을 사용하였으며, 대기압의 실험 시에는 유리 듀어(이하에서는 유리듀어(Dewar))를 사용하여 실험을 수행하였다. 전압은 시험용 변압기(60Hz)를 이용하고 보호저항 100kΩ을 통하여 외측전극에 인가하였다. 코일전극은 검출저항 1kΩ을 통하여 접지되

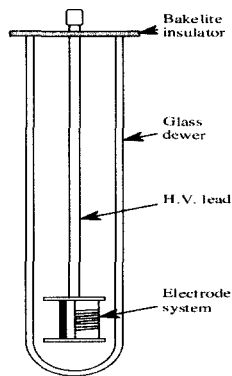
* 정 회 원 : 현대중공업주식회사 기전연구소
원고접수 : 2001년 04월 25일
심사완료 : 2001년 05월 14일



(a) 실험회로
(a) Experimental circuit



(b) 스테인레스 크라이오스탯
(b) Stainless steel cryostat



(c) 유리듀어
(c) Glass dewar

그림 2. 실험회로 및 크라이오스탯의 개략도.
Fig. 2. Experimental circuit and schematic diagrams of cryostat.

어있으며, 검출신호를 디지털 오실로스코프(OSC)에 입력하여 부분방전의 발생여부를 확인하였다. 기포

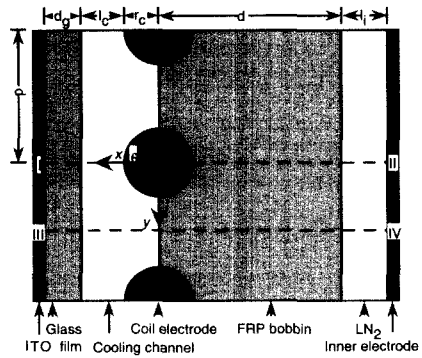


그림 3. 전계계산을 위한 전극의 모델링
Fig. 3. Modeled electrode system for electric field calculation.

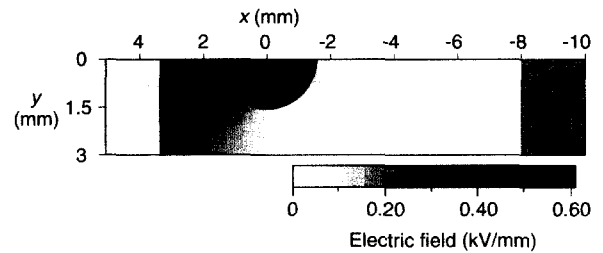


그림 4. 인가전압 1kV시의 전계분포.
Fig. 4. Distribution of electric field at $V_{app} = 1kV$

의 거동은 코일전극내의 열선에 직류전류를 흘려 기포를 발생시켜 크라이오스탯의 관측창에 설치한 실체현미경과 CCD(charge coupling device)카메라를 이용하여 관측하였다. 기포의 발생량은 열선에 흘려준 전류의 양으로 쉽게 제어가 가능하며 히터파워-H를 열선의 단위길이당의 열량으로 표시하였다.

3. 전계계산

본 연구에서 사용한 전극에서는 전계를 해석적으로 도출하는 것이 어렵기 때문에 수치계산에 의하여 전계분포를 구하고, 그 결과를 바탕으로 불균등 전계 하에서 기포에 작용하는 힘(이하에서는 그라디언트력(Gradient force))을 계산하였다.

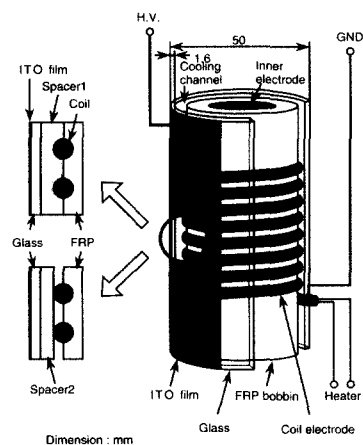


그림 1. 시험전극계.
Fig. 1. Electrode system.

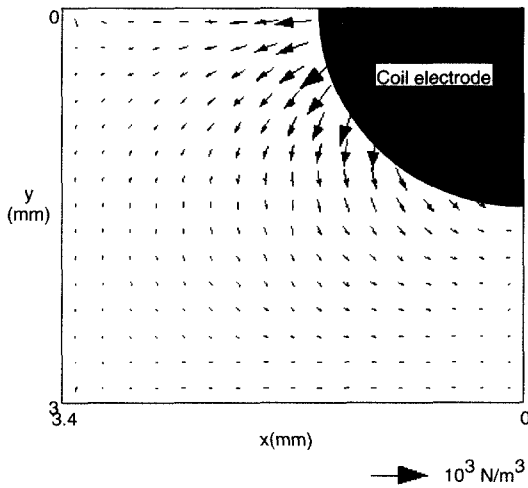


그림 5. 기포에 작용하는 그래디언트력의 분포.
Fig. 5. Distribution of gradient force acting on a suspended bubble.

3.1. 전계분포

계산을 간단히 하기 위하여 전극계를 그림 3에서 볼 수 있는바와 같이 ITO-코일 전극계의 대칭성을 고려하여 I-II-III-IV의 영역을 도출하였으며 전하중첩법을 이용하여 전계계산을 하였다. 그림 3의 계산에 사용한 좌표계에서 보이는 바와 같이 코일전극의 중심을 좌표계의 원점으로 하였다. 계산에서 사용한, 액체질소, FRP 및 원통유리의 비유전율은 각각 1.432, 4.4, 7로 하였다.

그림 4는 인가전압(V_{app})이 1kV인 경우의 전계분포의 계산결과를 나타낸다. 그림에서 보는바와 같이 전계는 전체적으로 냉각통로인 액체질소 영역에 집중해 있고 코일전극의 선단이 가장 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고, 최소전계영역은 코일과 코일사이 에 존재하는 것을 알 수 있다.

3.2. 기포에 작용하는 힘

액체질소 내부에 발생하는 기포의 거동을 이해하기 위해서는 발생한 기포에 작용하는 힘의 방향을 이해하여야 한다. 본 전극계의 경우와 같이 냉각통로의 액체질소 영역이 불균등 전계 하에서 기포가 발생하는 경우에는 식(1)에 나타내는 바와 같이 그래디언트력이 작용하게 된다.

$$F_G = 2\pi a^3 \frac{\epsilon_l (\epsilon_g - \epsilon_l)}{\epsilon_g + 2\epsilon_l} \nabla E^2 \quad (1)$$

여기서 a 는 기포의 반경, ϵ_l , ϵ_g 는 각각 액체질소 및 기체질소의 유전율, E 는 전계강도이다.

그림 5는 식(1)에 의하여 인가전압 1kV시에 단위 크기의 기포에 작용하는 그래디언트력의 계산결과의 상대치를 벡터형으로 나타낸 것이다. 그림 5로부터 알 수 있는바와 같이 그래디언트력은 기포를 전계가 강한 코일전극의 선단으로부터 전계가 상대적으로 약한 코일과 코일간의 영역으로 밀어내는 방향으로 작용하는 것을 알 수 있다. 그러므로, 인가전압이 높은 경우에는 그래디언트력이 강하게 작용하여 액체질소 영역에 발생하는 기포는 냉각통로를 통하여 상승하지 못하고 코일전극 사이의 전계가 약한 곳으로 모일 것으로 판단된다.

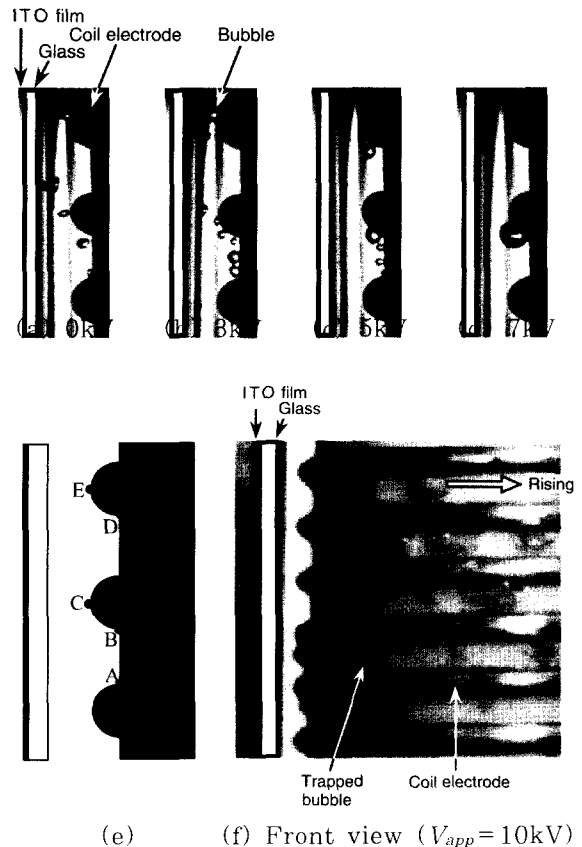


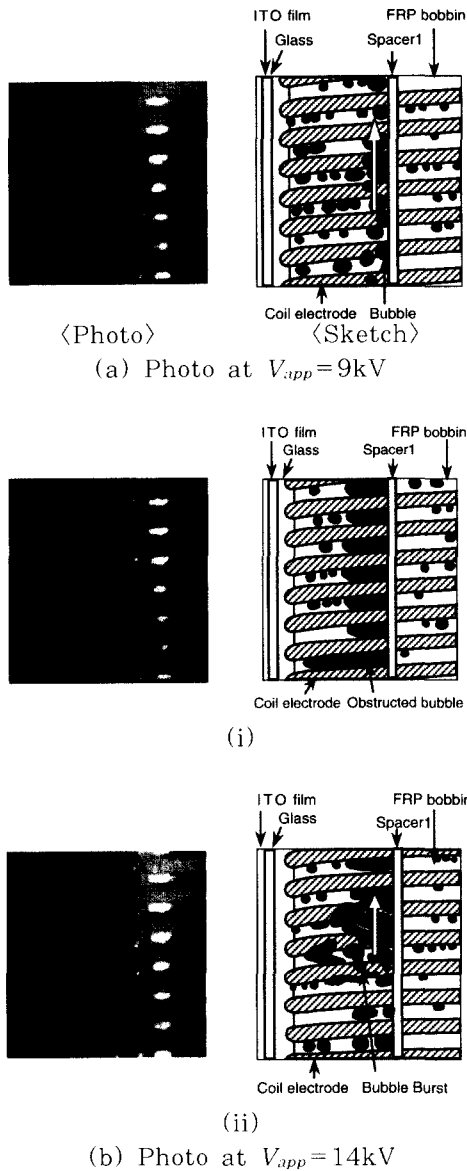
그림 6. 대기압 하에서의 기포거동사진.
Fig. 6. Photos of bubble behavior at 0.1MPa.

4. 실험결과

4.1. 인가전압에 의한 기포거동의 변화

본 전극계에서 히터파워- H 가 0.008W/cm에서 코일전극 주변의 액체질소와 FRP원통 및 코일전극의 삼중점에서 기포가 불규칙적으로 발생하기 시작하고, H 가 증가함에 따라 기포는 코일전극 표면의 전 영역에서 왕성하게 발생하는 것이 관측되었다. 그림 6은 액체질소의 비등이 시작된 시점의 기포거동을 나타낸다. 그림 6(a)~(d)는 크라이오스탯의 관측창을 통하여 옆면에서 관측한 사진이고($H=0.008$ W/cm), (e)는 기포의 이동을 알기 쉽게 설명하기 위하여 전극계 내에서의 위치를 나타내는 기호이다. 또한, 그림 6(f)은 트랩된 기포의 거동을 명확하게 관찰하기 위하여 유리듀어를 이용하여 전극 전체를 관측한 사진이다 ($H= 0.02$ W/cm).

전압이 인가되지 않은 경우에는 그림 6(a)에서 보는바와 같이 기포는 코일전극 상단부의 A점 부근에서 발생하고 부력에 의해 A→B→C→E로 변화하면서 상승한다. 전압을 3kV까지 상승 시켰을 경우에는 이 기포의 상승궤도에는 큰 변화가 없지만, 충돌 후에는 코일전극의 표면 B→C, D→E로 이동하는 속도가 확연히 저하하는 것이 관측되었다. 이것은 인가전압이 증가함에 따라 그래디언트력이 점점 증가하게 되고, 기포거동에 큰 영향을 미치게 되어 비교적 장시간 코일전극 표면에 기포가 머물게 되는 것으로 사료된다. 인가전압이 5kV로 되면, 그림 6(c)에 나타내는 바와 같이 기포는 코일전극하부 B, D에 트랩되기 시작하여, A→B, C→D로 부상하는 기포와 합체되어, 다시 위쪽



(a) Photo at $V_{app}=9kV$

(b) Photo at $V_{app}=14kV$

그림 7. 대기압 하에서 스페이스1이 존재하는 경우의 기포거동($H=0.02W/cm$).
Fig. 7. Bubble behavior in case of spacer1 at 0.1MPa, $H=0.02W/cm$.

으로 부상하는 것이 관측되었다. 인가전압이 7kV로 되면 기포의 크기는 최대로 되고 기포는 냉각통로를 통하여 더 이상 상승하지 못하는 것이 관측되었다(그림 6(d)).

전압을 더욱 상승시키면 기포는 발생점 A의 바로 위의 코일전극의 하부 B점 부분에서 일단 합체되며, 그 후 그림 6(f)에서 보는바와 같이 B지점을 출발하여 코일전극 피치의 구배에 의해 부력으로 인하여 스파이럴상으로 상승하게 된다.

상기의 결과로부터, 인가전압이 7kV까지는, 기포가 합체되어 커지더라도 냉각통로를 통하여 부상하는 것이 가능하지만, 7kV 이상이 되면 코일전극으로부터 발생한 기포는 냉각통로를 통하여 상승할 수 없고, 코일간의 홈을 따라 스파이럴상으로 상승하면서 외부로 배출되는 것을 알 수 있었다.

4.2. 기포거동에 미치는 스페이스 형상의 영향

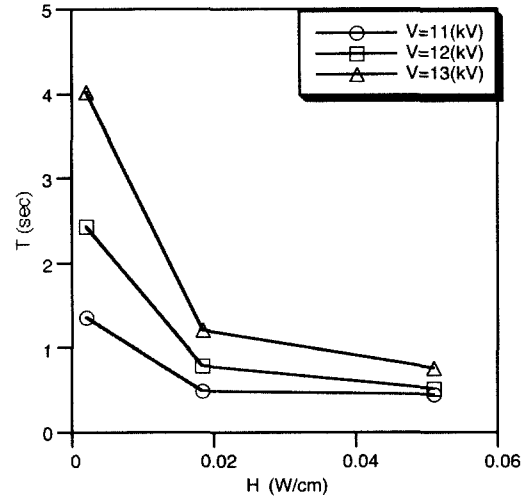


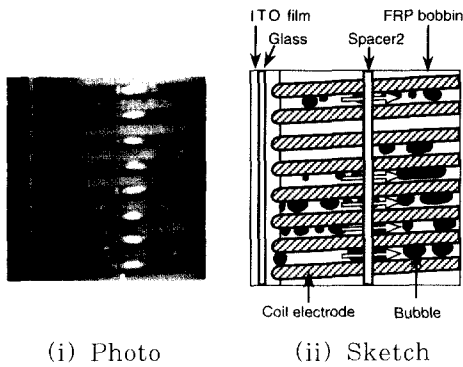
그림 8. 버블버스트의 시간간격
Fig. 8. Time interval between bubble bursts as a function of heater power.

다음은 전극간에 스페이스를 삽입하여 기포거동의 변화를 조사하였다. 스페이스1,2 어느 경우에도 기포가 합체되기 시작하는 $V_{app}=7kV$ 까지는 <4.1>절에서 보여준 기포의 거동과 같은 형상으로 움직였다. 그러나 그 후의 전압상승에 따른 기포거동에는 전극간에 존재하는 스페이스의 형상에 따라서 크게 달라지는 것을 알 수 있었다.

그림 7은 스페이스1이 존재하는 경우의 기포거동의 관측사진이다. 그림에서는 대기압 하에서 $H=0.02 W/cm$ 인가한 경우의 인가전압에 따른 기포거동을 관측한 사진으로, 이해를 돕기 위하여 기포거동의 스케치를 같이 나타내었다. 그림에서 화살표는 기포의 운동방향을 나타내고 있다. 인가전압이 $7kV < V_{app} < 10kV$ 인 경우에는 그림 7(a)에 나타내는 바와 같이 부력에 의해 코일전극 하부를 스파이럴상으로 이동한 기포가 스페이스에 충돌하여 스페이스를 따라 부상하였다. 그러나, 인가전압이 10kV 이상이 되면 기포는 스페이스에 충돌하여 부상하는 것이 아니라 그대로 체류하여 그림 7(b-i)에서 보는바와 같이 차례차례 상승하여 오는 기포와 코일턴 간에 FRP원통을 휘감듯이 하방으로 향하여 합체되어 성장한 후 분출하는 것이 관측되었다(그림 7(b-ii)). 상기와 같이, 기포가 코일 턴간에 합체되어 분출하는 현상을 이후에서는 간단히 버블버스트(bubble burst)라 부르기로 한다.

기포의 버블버스트현상은 그라디언트력과 스페이스의 존재에 의해 기포가 체류, 합체, 부상하는 현상이기 때문에 인가전압이 일정한 경우에는 합체되는 기포의 크기는 거의 일정하다는 것이 관측되었다. 따라서 히터파워가 일정하다면 버블버스트가 발생하는 시간간격은 일정하게 되고, 히터파워를 크게 하면 기포의 발생량이 증가하기 때문에 시간간격은 단축될 것으로 판단된다. 그림 8은 히터파워를 변화시켜서 인가전압이 일정한 경우의 버블버스트의 시간간격-T를 측정된 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 히터파워가 증가할수록 T는 감소하고 있다. 또한, 인가전압이 증가할수록 기포를 코일전극 하부로 향하게 하는 아랫방향 성분의 그라디언트력도 증가하게 되고, 뒤에서 설명하는 것처럼 전계에 의해 냉각이 촉진되기 때문에 T는 증가하고 있다고 생각된다.

스페이스2가 삽입되어 있는 경우에는, 전압이 낮은



(i) Photo (ii) Sketch

그림 9. 스페이스2가 존재하는 경우의 기포거동.
Fig. 9. Bubble behavior in case of spacer2 at 0.1MPa, $H=0.02W/cm$, $V_{app}=14kV$.

경우($7kV < V_{app} < 10kV$)는 스페이스1과 같이 스파이럴 상으로 상승하여 오던 기포가 스페이스와 충돌하여 스페이스를 따라 수직방향으로 부상하였다. 그러나 인가 전압을 더욱 상승시켜주면 그림 9(ii)에서 화살표로 나타내는 바와 같이 기포가 전극과 스페이스 간의 공극을 통과하여 다시 전극하부를 스파이럴상으로 상승하였다. 이것은 액상과 기상의 표면에 작용하는 맥스웰스트레스(Maxwell Stress)가 전압의 증가와 더불어 증가하게 되어 스페이스 하부를 잠수하여 코일전극 하부를 따라 흘러가는데 충분한 크기로 되었기 때문인 것으로 사료된다. 그림 9는 대기압, $H=0.02 W/cm$, $V_{app}=11kV$ 인 경우의 기포가 스페이스를 통과하는 모습을 관측한 것이다.

본 연구에서 실험을 통하여 관측한 기포거동의 모습은 동일구조의 전극에서 기포의 발생량 및 발생한 기포의 크기가 일정하다면 동일한 형태의 움직임을 나타내는 것이 수차의 재현실험을 통하여 확인되었다

4.3. 압력의 영향

크라이오스탯으로 액체질소에 압력을 인가하여 기포의 거동을 관측한 결과 기포의 크기가 같다면 기포의 거동은 대기압의 경우와 비교하여 거의 변화가 없었다. 그러나 본 실험장치에서는 냉매의 액체질소가 외층의 액체질소에 의해 77.3K로 유지된 과냉각(Sub-cooling)상태로 되도록 하였기 때문에 전압이 인가되지 않아도 기포는 냉각통로를 부상 중에 다시 냉각되어 소멸하였다. 또한, 대기압에서는 전압을 5~7kV로 변화시키면, 코일 하부에서 합체되어 기포가 성장하여 크게 되지만 압력을 인가하면, 기포는 일정 크기 이상으로 성장하지 못 하였다. 이는 기포에 주입되는 열과 과냉각된 액체질소에 의한 냉각이 어느 일정한 크기의 기포에서 같아졌기 때문이라고 판단된다. 인가전압을 더욱 상승시키면 코일전극간에 존재하는 기포가 소멸되고 액체질소 중에는 기포가 전혀 관측되지 않는 상태가 되었다. 이 원인의 하나로서는 Rutkowski의 연구결과로부터 액체질소 중의 기포발생 전극에 전계가 인가되면, 전극주변에 대류가 활발하게 되어 냉각이 촉진되는 현상과 기포표면의 액상으로부터 기상으로 작용하는 맥스웰스테레스가 작용하여 기포를 압축하기 때문인 것으로 사료된다[7]. 위의 결과로부터 액체질소를 가압하는 것은 기포의 발생을 억제하는데 매우 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 사용한 크라이오스탯에서는 압력효과에 대하여 정량적으로 실험을 행하기 어려운 면이 있어서 압력효과에 대하여는 차후 별도의 보고서를 통하여 상

세하게 소개하기로 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 고온초전도 변압기 및 한류기의 구조를 모의한 동심원통형 코일 전극에서 교류전압을 인가하여 전계, 스페이스의 형상, 압력, 히터파워에 의한 기포거동의 변화를 조사하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같이 요약된다.

- (1) ITO-코일 전극계에서는 전압의 상승에 동반하여 기포는 (i)부상의 궤도를 변화, (ii)전극하부에서 체류, 합체되어 재부상, (iii)전극하부를 스파이럴상으로 상승, 하는 순으로 거동을 변화하였다.
- (2) ITO-코일 전극간에 스페이스가 존재하는 경우에는, 스파이럴상으로 상승하여 온 기포는 스페이스에 충돌하여 부상한다. 그러나 스페이스와 코일전극 간에 공극이 존재하지 않는 경우에는 기포가 권선 간에 합체되어 분출하는 버블버스트현상이 발생하였다. 버블버스트의 시간간격은 히터파워의 상승과 함께 단축된다. 한편, 공극이 존재하는 경우에는 스페이스와의 충돌 시에 기포가 변형되어 공극을 통과하도록 되었다. 따라서 기포배출을 원만히 하기 위해서는 기포의 유통로가 될 수 있는 공극을 만들어 두어야 할 필요가 있으며 이 유통로의 사이즈는 기포의 크기와 유통로 중의 그라디언트력의 분포를 고려하여 결정하여야 한다.
- (3) 약 0.15MPa로 가압된 액체질소 중의 전극계 전압을 인가하면, 전계에 의한 압력상승효과와 냉각속진효과에 의해 기포는 소멸한다.

참 고 문 헌

- [1] L. R. Lawrence, C. Cox, D. Broman, High Temperature Superconductivity: The Product and Their Benefits - 2000 Edition, ORNL/Sub/45000069, 2000
- [2] 김익모, 김중구, 최영찬, 송태현, "초전도응용 전력기기 사업타당성 조사", 현대중공업 주식회사 기술개발본부 기전연구소, 2000
- [3] M. Hara and J. Gerhold, "Electrical Insulation Specification and Design Method for Superconducting Power Equipment", Cryogenics, Vol. 38, No. 11, pp.1053-1061, 1998
- [4] J. Gerhold, "Dielectric Properties of Cryogenics", Handbook of Applied Superconductivity (Edited by B. Seeber), IOP Publishing Ltd., 1998
- [5] S. P. Mehta, N. Aversa and M. S. Walker, "Transforming transformers", IEEE Spectrum, Vol. 34, No. 7, pp. 43-49, 1997
- [6] E. M. Leung, A. Rodriguez, G. W. Albert, B. Burley, M. Dew, P. Gurrola, D. Madura, G. Miyata, K. Muehleman, L. Nguyen, S. Pidcoe, S. Ahmed, G. Dishaw, C. Nieto, I. Kersenbaum, B. Gamble, C. Russo, H. Boenig, D. Peterson, L. Motowildo and P. Haldar, "High Temperature Superconducting Fault Current Limiter Development", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp. 985 - 988, 1997

- [7] J.Rutkowski, "The Influence of Electric Field on Heat Transfer in Boiling", Cryogenics, pp.242-243, 1977

저자 소개



석복렬(石福烈)

1971년 2월 16일생, 1994년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 3월 일본 큐슈대학 시스템정보과학연구과 졸업(공학박사), 2000년 4월~2001년 3월 일본 통산성 공업기술원 특별연구원(AIST fellow), 현재 현대중공업주식회사 기전연구소 선임연구원



김종구(金鍾九)

1948년 6월 3일생, 1973년 한양대학교 대학원 졸업(공학석사), 1997년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1975년~1983년 전주공업전문대학교 조교수, 현재 현대중공업주식회사 기전연구소 전력기술연구실장