

솔레노이드형 고온초전도코일 모의전극계에서 부분 및 완전파괴전압특성 연구

A Study of PBD and BD Voltage Characteristics in the Simulated Electrode System of Solenoid Type High Temperature Superconducting Coils

석복렬*

Bok-Yeol Seok*

Abstract: The partial breakdown (PBD) and complete breakdown (BD) voltage characteristics in a composite insulation system of glass fiber reinforced plastics (GFRP) and liquid nitrogen are investigated to find the PBD and BD characteristics in solenoid type high temperature superconducting (HTS) coils at quench. The electrode system used is made from a coaxial spiral coil-to-cylindrical electrode with an insulation barrier and spacers, and is immersed in liquid nitrogen. A heater is mounted inside the coil electrode to generate boiling which occurs on quenched superconducting coils. The experimental results show that: (1) breakdown voltages are affected severely by the risetime of the applied voltage and the PBD inception voltage, (2) two kinds of BD mechanisms are found depending on the shape of the spacer, length of cooling channel and heater power.

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

1. 서 론

고온초전도체의 발견으로 고온초전도 전력기기의 개발에 대한 지대한 관심이 집중되었다. 초전도체의 성공적인 이용을 위해서는 초전도 전력기기의 전기절연적 신뢰성을 확보하는 것이 무엇보다도 우선되어야 한다. 그러나, 초전도 전력기기의 시험 중에 많은 사고가 전기절연의 실패로 인하여 발생하고 있다.

초전도 기기의 켄치상태 하에서의 전기절연에 관한 연구에 대해서는, 기본적인 전극계에 있어서의 액체질소 내부의 기포거동 및 전기절연문제에 관하여 많은 연구들이 이미 진행되어 있다[1-2]. 그러나 초전도 변압기 및 초전도 환류기에서 많이 볼 수 있는 원통형 FRP프레임에 초전도 코일이 감겨진 솔레노이드형 코일구조에서의 연구는 거의 없다[3-4].

위의 결과로부터, 이전의 발표논문에서는 그 첫 단계로서 절연장벽과 스페이서(Spacer)가 설치된 동심스파이럴형 코일과 원통전극으로 구성된 솔레노이드형 고온초전도 코일의 켄치상황을 모의한 전극계에서 기

포거동에 관한 연구결과를 발표하였다[5].

본 연구에서는 솔레노이드형 고온초전도 코일을 모의한 동일 전극계에서 액체질소 내부에서 발생하는 PBD 및 BD전압특성에 관하여 연구하였다.

2. 전극 및 실험장치

본 연구에서 사용한 솔레노이드형 고온초전도 코일 모의 전극계는 전편[5]에서 보고한 바와 같이, 다층의 동심원통형 구조로 되어 있다. 외부의 코일층 또는 금속형 크라이오스탯(Cryostat)을 모의하기 위하여 외부로부터의 기포의 거동과 부분방전 시의 발광특성의 관측이 가능한 투명전극인 ITO(indium tin oxide)막을 원통형 유리에 증착한 전극을 외부전극으로 이용하였다. PBD 및 BD의 전압특성 및 전류파형특성을 관측하기 위해서는 원통형 FRP에 동 테이프를 접착한 전극을 ITO전극 대용으로 사용하였다. 그리고, 냉각통로의 폭(l_c)을 고정하기 위하여 2종류의 스페이스, (1) 코일전극과 스페이스 사이에 전혀 공극을 가지지 않는 스페이스 형상 : 스페이스1, (2) 코일간에 공극이 존재하는 직선형상의 스페이스 : 스페이스2,를 사용하였다. 그리고, 고온초전도 코일의 켄치 시에 발생하는 저항을 모의하기 위하여 동 파이프 전극내부에는 망가닌선(저항 $0.106\Omega/cm$)을 내장하여 에폭시 수지로 고정시켰다. 코일전극에 주입된 히터파워는 단

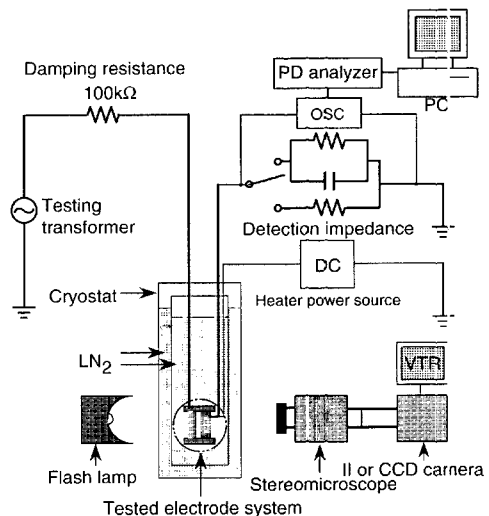


그림 1. 실험회로도.
Fig. 1. Experimental circuit.

* 정 회 원 : 현대중공업 기전연구소
원고접수 : 2002년 04월 08일
심사완료 : 2002년 05월 13일

위길이당 전력량으로 나타내고 H 로 표시하였다. 본 전극계에서는 비등개시 히터파워가 인가한 압력 P 및 냉각통로의 폭 l_c 에 따라 차이를 나타내기 때문에 비등개시 히터파워를 $H_0(p, l_c)$ 의 형태로 p 와 l_c 의 함수로 나타내었다. 본 연구에서는 $H_0(p, l_c)$ 가 열선의 매립 정도, 코일전극 표면의 상태 및 설치된 스페이서의 정도에 따라 조금씩 변화하였다. 그리고, 히터파워에 대한 특성의 상대치는 $H_r(p, l_c) = H/H_0(p, l_c)$ 로 묘사하였다. 또한, H_r 이 적은 영역에서의 상세한 특성을 불필요가 있을 경우에는 $H_r(p, l_c)$ 의 제곱근의 함수로 묘사되었다.

그림 1은 실험회로의 개략도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이 전극은 관측창이 설치되어 있는 크라이오스택에 설치되어 있고, 교류 60Hz의 고전압을 100k Ω 의 보호저항을 통하여 ITO전극 또는 Cu막전극에 인가하고 코일전극은 접지하였다. 그리고, 인가된 교류전압은 실효치로 나타내고 PBD 및 BD전압특성 측정시에는 인가전압의 상승속도를 약 1kV/s 또는 PBD 및 BD의 영향을 조사하기 위하여는 그보다 천천히 상승시켰다.

비등특성 및 기포거동은 크라이오스택의 관측창을 통하여 관측하고 CCD(Charge Coupling Device) 카메라와 Stereoscope를 통하여 비디오로 기록하였다. PBD는 50 Ω 의 측정저항을 통하여 오실로스코프(OSC)로 관측하였다. PBD의 반광특성은 image intensifier(II)의 노출정도를 6.4 $\times 10^4$ 의 노출정도로 하여 비디오 테이프에 기록하였다.

본 연구에서는 냉각통로의 직경이 발생한 기포의 직경보다 작은 경우 및 큰 경우의 대표적인 예로서 $l_c=0.25\text{mm}$ 및 1.9mm에서 PBD 및 BD전압특성을 조사하였다.

3. 전계분포

본 연구에서 사용한 절연 시스템에서 기포의 거동, 부분파괴 및 파괴특성을 이해하고 그들의 상관관계를 규명하기 위하여 전극계를 이차원으로 가정하여 전계분포를 수치해석을 이용하여 구하였다. 계산은 전하중첩법을 이용하여 행하였고, 계산시의 전극표면의 전위의 오차는 8×10^{-3} 이하로 하였다.

그림 2는 냉각통로의 폭 $l_c=1.9\text{mm}$ 인 경우 인가전압 $V_{app}=1\text{kV}$ 시의 전계분포의 계산결과이다. 그림에서 볼

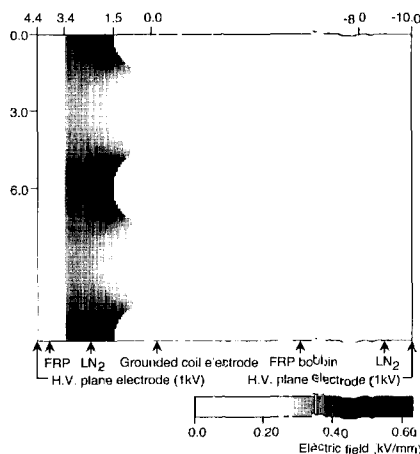


그림 2. 인가전압 1kV시의 전계분포.
Fig. 2. Electric field distribution(1kV).

수 있는바와 같이 액체질소 영역의 전계강도가 FRP영역의 전계강도보다 훨씬 강하다는 것을 알 수 있다. 그리고, 액체질소 영역 중에서 전계가 가장 강한 곳은 FRP장벽을 마주보는 코일전극 선단에 나타나는 것을 알 수 있다. 위의 전계계산 결과로부터 만약 기포가 삼중점 부근에서 발생하더라도 기포는 코일과 코일턴 사이의 전계가 약한 곳에 집성되어 전계가 강한 최단점 영역으로 침입할 수 있고 집성된 기포의 성장에 의하여 낮은 전압에서 부분파괴가 트리거 될 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 코일 구조에서 부분파괴 및 완전파괴 특성을 이해하기 위해서는 고전계 영역에서의 기포의 거동을 이해하는 것은 매우 중요하다.

4. 실험결과

4.1. 기포거동

전기절연의 관점에서 본 연구에 사용된 모의 전극계는 외부 고전압 원통전극과 내부 코일의 접지전극 고체FRP와 액체질소의 복합절연계로 구성되어 있다. 이러한 경우에는 그림 2의 전계분포에서 알 수 있는바와 같이 비유전율이 낮은 액체질소에서의 전계강도가 고체FRP 내부의 전계강도보다 훨씬 크다. 일반적으로, 절연상도 역시 고체FRP가 액체질소보다는 더 좋다. 위의 결과로부터 완전 절연파괴가 일어나기 전에 액체질소 내부의 부분파괴 현상이 먼저 발생할 수 있다. 예비실험 결과로부터 액체질소 내부의 부분파괴 및 완전파괴전압특성은 발생한 기포의 거동에 의하여 크게 영향을 받을 수 있었다. 위의 결과로부터 부분파괴 및 완전파괴의 전압특성을 이해하기 위하여 기포의 거동을 먼저 상세하게 조사하였다.

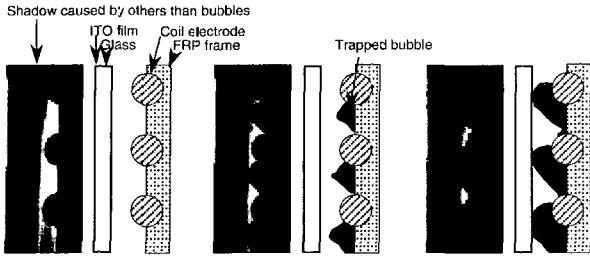
4.1.1 지금까지의 기포거동에 관한 연구결과

본 연구에 사용한 전극계와 동일한 전극계에서 ac 60Hz전원에 의한 기포거동의 연구결과를 보고하였다 [5]. 그 연구결과를 간략하게 요약하면 다음과 같다.

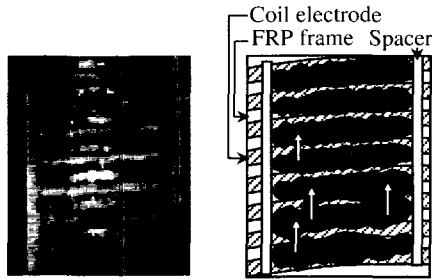
- (1) 기포는 파괴발생 전에 전계의 구배에 의해 저전계 영역으로 구동된다.
- (2) 코일과 코일 사이에 트랩된 기포는 부력에 의해 스파이럴상의 코일을 따라 이동한다.
- (3) 냉각통로의 폭이 기포의 직경보다도 크고, 코일간이 스페이서 등에 의해 막혀 있는 경우에는 기포는 성장하여 어느 일정크기가 되면 일시에 위쪽으로 분출한다.
- (4) 스페이서에 공극이 있는 경우에는 트랩된 기포는 그 공극을 통과하여 스파이럴상으로 이동한다.
- (5) 냉각통로의 폭이 기포직경보다 작은 경우에는 전압이 인가되지 않은 경우에도 표면장력에 의해 트랩된다. 트랩된 기포는 코일간에 공극이 있는 경우에는 스파이럴 코일을 따라 이동한다.
- (6) 공극을 가지지 않는 스페이서가 존재하는 경우에는 도량이 기포로 채워지고 고전압 인가시에는 기포표면에 EHD불안정현상이 여기된다. 이때 기포는 부력과 EHD불안정 현상에 의하여 여러곳에서 최단점을 부분적으로 교락하면서 부상한다.

4.1.2 PBD개시전압 부근에서의 기포거동

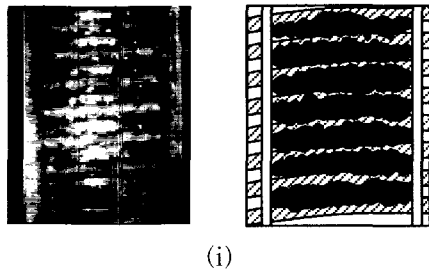
전편 [5]의 논문에서 발표한 바와 같이 PBD는 기포 트랩 개시전압보다도 상당히 높은 전압에서 발생하는 것을 알 수 있다. 그러므로, 실제로 기포의 생성으로 인한 PBD 발생기구를 명확히 이해하기 위해서는



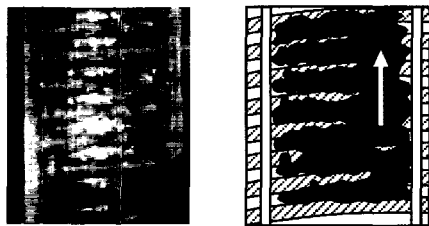
(a) 0W/cm (b) 0.66W/cm (c) 2.15W/cm
 그림 3. 스페이서가 없는 경우의 PBD개시전압 부근에서의 기포거동의 측면사진 ($V_{app}=20kV$).
 Fig. 3. Side view of trapped bubble at different heater power ($V_{app}=20kV$).



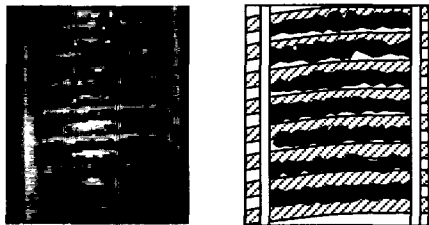
(a) $l_c=0.25mm$



(i)



(ii)



(iii)

(b) $l_c=1.9mm$

그림 4. 스페이서1에서의 PBD개시전압 부근의 기포거동의 정면관측 사진.

Fig. 4. Front view of trapped bubble around the PBD inception voltage with Spacer1.

PBD가 발생하는 V_{PBD} 전압 부근에서의 기포거동을 명

확히 이해할 필요가 있다.

그림 3은 냉각통로의 폭 $l_c=1.9mm$, $V_{app}=20kV$ 에서 스페이서가 존재하지 않는 경우의 PBD개시전압 부근의 기포거동을 전극의 옆면으로부터 관측한 사진이다. 이 경우 히터파워- H 가 일정한 조건하에서는 트랩된 기포의 양은 현저한 변화가 없었다. 그림으로부터 알 수 있는바와 같이 기포는 연속적으로 전계가 약한 코일하부를 따라 흐르고 있지만 히터파워- H 의 증가와 더불어 기포의 양이 증대하여 전계가 강한 영역으로까지 침입하는 것을 볼 수 있다. 상기의 결과로부터 히터파워- H 에 대한 위의 경향은 스페이서2의 기포거동에 의해서도 같은 결과를 나타내었다. 이것으로부터 기포의 발생량이 많은 경우에는 코일하부를 따라 이동하고 있는 기포일지라도 PBD 및 BD의 발생에 영향을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

스페이서1이 존재하는 경우에는 코일하부를 이동하여 온 기포가 스페이서에 의해 이동이 방해되고, 트랩된 기포는 그림 4에 나타낸 것처럼 코일턴 간에 어느 일정크기까지 성장한 후 상방으로 분출하였다. 분출하는 기포거동은 냉각통로의 폭에 따라 그 형태가 조금씩 다른 것을 알 수 있었다.

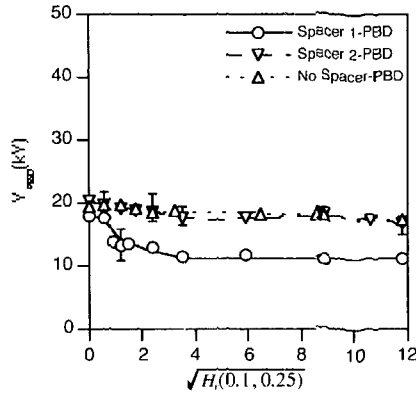
냉각통로의 폭이 짧은 $l_c=0.25mm$ 의 경우에는 액상과 기상의 경계면에 EHD불안정현상이 여기되고 액상이 과도처럼 상·하로 진동하여 최단궤의 영역을 침입할 때 기포가 부상하는 것이 관측되었다(그림 4(a)). 여기서 냉각통로의 폭이 좁은 경우는 넓은 경우와 비교하여 한번에 위쪽으로 분출하는 기포의 양이 극히 적어서 인가전압과 히터파워가 일정하다면 EHD불안정현상의 상태가 연속적으로 유지되는 것을 알 수 있었다. 한편, 냉각통로의 폭이 넓은 $l_c=1.9mm$ 인 경우에는 분출하는 과정이 약간 차이가 있는 것이 관측되었다. 그림 4(b-(i-iii))는 PBD개시전압 부근의 전압 $V_{app}=20kV$ 에서의 기포의 분출과정을 나타낸 기포거동의 사진과 사진의 스케치를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 처음에는 EHD불안정현상이 냉각통로의 폭이 좁은 $l_c=0.25mm$ 의 경우와 유사한 형태로 여기되고(그림 4(b-i), 그 후 일시에 기포는 위쪽으로 분출하는 것이 관측되었다(그림 4(b-ii). 또한, 이때에 부상하는 기포의 양은 l_c 가 짧은 경우에 비해서 훨씬 많고 부상 후에는 액상과 기상의 경계면이 전계가 약한 코일턴 간까지 후퇴하는 것이 관측되었다(그림 4(b-i.i)). 상기의 일련의 과정은 반복해서 발생하고 그 시간간격은 기 발표논문에서 서술한 것과 같이 히터파워와 인가전압에 크게 의존한다[5].

4.2. PBD개시 및 BD 전압특성

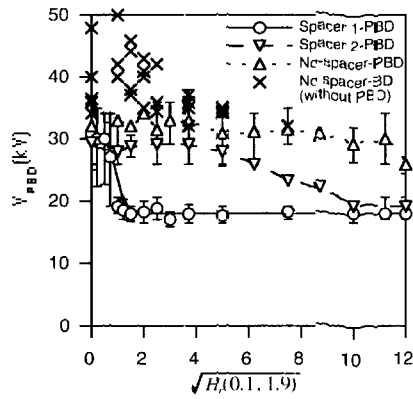
PBD개시전압 (V_{PBD}) 및 BD전압 (V_{BD})을 히터파워의 함수로서 나타내는 경우 낮은 히터파워 영역을 상세하게 볼 수 있도록 이하에서는 히터파워를 $\sqrt{H/H_0(0.1, l_c)}$ 의 형태로 표현한다. 본 실험에서는 $H_0(0.1, 0.25)$ 와 $H_0(0.1, 1.9)$ 는 각각 $0.00424W/cm$ 및 $0.017W/cm$ 이다.

4.2.1 PBD개시전압특성

그림 5는 $l_c=0.25, 1.9mm$ 의 각각에 있어서 각 스페이서에 대한 PBD개시전압을 측정된 결과를 나타낸다. 본 실험에서 액체질소 영역에서 PBD가 발생한 후 BD에 이르는 경우와 PBD를 거치지 않고 BD에 직접 이르는 두가지의 파괴기구로 크게 분류가 되었다. 이후에는 전자를 파괴기구A, 후자를 파괴기구B라 부르기



(a) $l_c=0.25\text{mm}$



(b) $l_c=1.9\text{mm}$

그림 5. 스페이서의 형상에 따른 V_{PBD} - heater power 전압특성.

Fig. 5. V_{PBD} - heater power voltage characteristics with different spacers.

로 한다. 그리고, 이러한 파괴기구의 출현은 이하에서 서술하는 것처럼 스페이서의 형상, 히터파워 및 냉각통로의 폭 l_c 에 의존하는 것을 알 수 있었다.

먼저, 그림 5(a)의 그래프에서 볼 수 있는바와 같이 $l_c=0.25\text{mm}$ 의 경우는 모든 파괴가 파괴기구A에 의해서 일어난다는 것을 알 수 있었다. 각 스페이서의 형상에 따른 특성을 보면, 먼저 스페이서1의 경우는 비등개시의 히터파워 즉 $\sqrt{H/H_0(0.1, 0.25)}=1$ 부근에서 PBD개시전압이 현저히 저하하는데 비하여 스페이스가 설치되지 않은 경우나 스페이서2의 경우는 비등개시에서는 거의 영향을 받지 않고 히터파워가 증가함에 따라서 조금씩 저하하는 것을 알 수 있다.

그림 5(b)는 $l_c=1.9\text{mm}$ 인 경우의 히터파워에 대한 PBD개시전압 및 BD전압특성을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이 $l_c=1.9\text{mm}$ 인 경우에는 위에서 정의한 두가지 파괴기구 모두 관측되고, 히터파워 및 스페이서의 형상에 대한 PBD개시전압 및 BD전압특성이 $l_c=0.25\text{mm}$ 인 경우에 비하여 훨씬 복잡한 형태를 나타내었다. 먼저 스페이서1, 2의 경우는 대부분의 파괴가 파괴기구A에 의해서 발생하고 그 PBD개시전압의 경향은 $l_c=0.25\text{mm}$ 인 경우와 거의 동일한 형태를 나타낸다. 특히, 스페이서2의 경우는 $\sqrt{H/H_0(0.1, 1.9)}=4$ 정도에서부터 PBD개시전압이 서서히 감소하기 시작하여 최종적으로는 스페이서1이 존재하는 경우의 PBD개시전압 부근까지 감소하는 것을 볼 수 있다. 한편, 스페이서가 존재하지 않는 경우

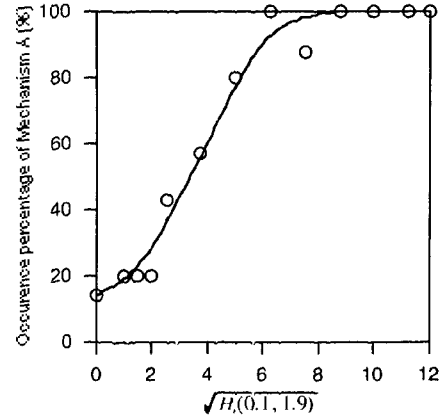


그림 6. 스페이스가 없는 경우의 l_c 에 따른 Mechanism A의 발생빈도.

Fig. 6. Occurrence percentage of mechanism A in total BD as a function of heater power without spacer ($l_c=1.9\text{mm}$).

에는 해칭된 히터파워가 작은 영역에서는 파괴기구B가 발생하지만 히터파워의 증가에 따라 서서히 파괴기구B의 발생비율은 감소하여 $\sqrt{H/H_0(0.1, 1.9)}>9$ 에서는 모든 파괴가 파괴기구A에 의해서 발생하였다. 상기의 파괴기구의 변화는 그림 4에서 나타낸 것과 같이 히터파워에 따른 냉각통로를 흐르는 기포의 거동에 의해 유추가 가능하다. 즉, 히터파워가 적은 경우에는 트랩된 기포는 전계가 약한 코일하부를 이용하여 PBD 및 BD의 발생에 크게 영향을 미치지 못하지만 히터파워가 큰 영역에서는 기포의 발생량이 많아져서 최단점 부근까지 침입하기 때문에 PBD의 발생에 영향을 미치기 쉽게 되기 때문인 것으로 사료된다.

이상의 결과로부터 PBD개시전압특성은 기포거동과 밀접하게 관련하고 있고 기포가 최단점 부근에 존재하는 경우에는 PBD개시전압은 현저하게 감소한다. 또한, 파괴기구B의 발생은 냉각통로가 넓고 기포의 존재가 경우에 발생하기 쉽다는 것을 알 수 있었다.

4.2.2 BD전압특성

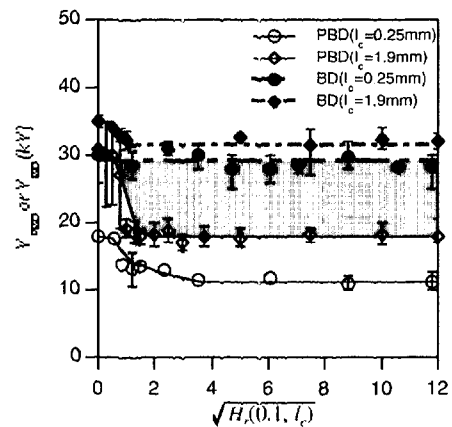


그림 7. Spacer 1에서의 V_{BD} - heater power 특성.

Fig. 7. V_{BD} - heater power characteristics with Spacer 1.

그림 7은 스페이서1이 존재하는 전극계에서 히터파

위에 대한 $l_c=0.25, 1.9\text{mm}$ 인 경우의 BD전압을 측정 한 결과이다. 그림에서는 PBD개시전압을 동시에 표시함 으로서 BD전압과의 차를 명시했다. 그리고, 양자의 차 를 해칭으로 표시하고, 그 영역에서는 각각의 l_c 에서 PBD가 연속적으로 발생하고 있음을 의미한다. 그림 7 에서 해칭된 영역은 $l_c=0.25\text{mm}$ 의 경우가 1.9mm 의 경 우보다 넓고 BD전압은 기포발생후의 히터과위가 $1 < \sqrt{H/H_0(0.1, 1.9)} < 12$ 에 대해서 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이것은 액체질소와 FRP의 복합절연계 에서는 PBD가 기포내부에서 발생할 경우에는 BD전압 은 FRP의 절연내력에 의해 결정되기 때문인 것으로 사료된다.

그림 7의 결과로부터 PBD가 장시간 복합절연계의 냉매 중에 발생하는 경우에는 고체절연물의 열화에 의 해 절연내력이 저하할 것으로 예상된다. 여기서, 부분 방전에 의해 발생하는 고체절연물의 열화속도를 명확 하게 규명하기 위하여 인가전압의 상승속도를 $1\text{kV}/\text{s} \sim 1\text{kV}/\text{h}$ 의 범위에서 변화시켜 BD전압을 측정하였다.

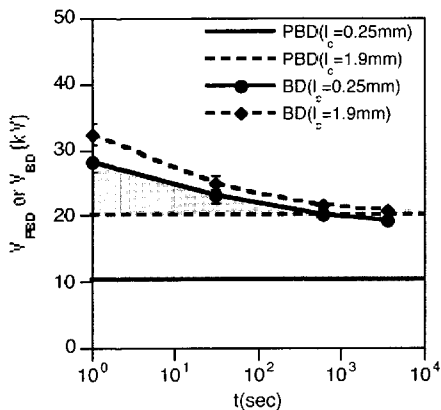


그림 8. Spacer 1에서 전압상승속도에 따른 V_{BD} vs. breakdown time 특성.

Fig. 8. V_{BD} vs. breakdown time measured with different raising rates of applied voltage with Spacer 1.

그림 8은 스페이스1에서의 비등개시 후의 $\sqrt{H/H_0(0.1, l_c)} = 10$ 에서 BD전압을 측정 한 결과이다. 여기서 PBD개시 후에 시간간격 t 로 전압을 1kV 씩 상승시켰기 때문에 횡축 t 가 클수록 FRP가 장시간 PBD에 의해 열화된 것을 나타낸다. 그림 8에서 볼 수 있는바와 같이 PBD의 발생시간이 길어질수록 BD 전압은 저하하고 있는 것을 알 수 있고, 특히 $l_c=1.9\text{mm}$ 의 경우는 PBD개시전압까지 저하하고 있 음을 볼 수 있다. BD전압이 PBD개시전압까지 저하 하는 속도를 비교하면 l_c 가 넓은 경우가 좁은 경우보다 빠른 것을 알 수 있다. 즉, PBD개시전압이 높을수록 전하량의 증대로 인하여 고체절연물의 열화진행이 빠 르게 되기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 솔레노이드형 고온초전도 전력기기를 모의한 전극계에서 액체질소 내부의 PBD 및 BD전압 특성에 관하여 조사하였다. 연구결과를 정리하면 다음 과 같다.

1) BD의 발생기구는 냉각통로의 폭, 스페이스의 형 상 및 히터과위에 의하여 두 가지로 대별된다. 먼저, 트랩된 기포가 최단값 내부에 존재하는 경우에는 PBD가 발생한 후에 BD가 일어나기 쉽고 또한 PBD 개시전압은 현저히 저하하였다. 그러나, 냉각통로의 폭이 넓은 경우에서 기포가 발생되지 않은 경우에는 액체질소 영역에서의 PBD는 발생하지 않고 바로 FRP를 관통하는 BD가 발생하였다.

2) BD전압은 냉각통로인 액체질소 및 기체질소 영 역에서 발생한 PBD에 의한 열화의 영향으로 인가전압 의 상승시간 및 발생한 PBD의 개시전압에 크게 영향 을 받는다. BD전압은 인가전압의 상승시간이 길수록, PBD개시전압이 높을수록 급격히 감소하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. Hara and J. Gerhold, "Electrical Insulation Specification and Design Method for Superconducting Power Equipment", Cryogenics, Vol. 38, No. 11, pp.1053-1061, 1998
- [2] J. Gerhold, "Dielectric Properties of Cryogenes", Handbook of Applied Superconductivity (Edited by B. Seeber), IOP Publishing LTd, 1998
- [3] K. Funaki, et al, "Development of 22kV/6.9kV Single-Phase Model for a 3MVA HTS Power Transformer", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 1578-1581, March 2001(Fig.1 참조)
- [4] 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.935 - 988, 1997
- [5] B.YSeok, N.Tamuro, M.Hara, "A Study of Thermal Bubble Behavior in the Simulated Electrode System of HT Superconducting Coils", IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.6, No.1, pp.109-116, 1999

저 자 소 개



석복렬(石福烈)

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