

고온초전도코일 모의전극계에서 기포거동 및 부분방전개시전압의 추정

석복렬* 최명준 김용한 김진수 김종구
현대중공업(주) 기전연구소

Estimation of Bubble Behavior and PD Initiation Voltage in the Simulated Electrode System of High Temperature Superconducting Coils

Bok-Yeol SEOK,* Myung-Joon CHOI Yong-Han KIM Jin-Soo KIM Jong-Koo KIM
Electro-Mechanical Reserch Institute, HyunDai Heavy Industries CO., LTD.

Abstract - This paper deals with the numerical estimation of the bubble behavior and the partial discharge(PD) initiation voltage based of electric field calculation with the coaxial coil layer-to-cylindrical electrode system for the simulation of high temperature superconducting coils. The theoretical results of bubble behavior and the PD initiation voltages showed fairly good agreements with the experimental results.

1. 서 론

고온초전도체의 전력기기분야에의 응용은 기기효율, 사용부지문제, 환경문제 등의 면에서 상전도 전력기기의 문제를 타개할 기술로서 기대되고 있다. 그 중에서도, 변압기, 한류기 등은 전력기기의 적용에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔으며, 실용화가 근 시일 내에 이루어질 것으로 예상되고 있다.

이러한 초전도 기기의 전력계통에의 적용은 켄치에 의한 기포의 발생, 계통의 상규전압 및 각종 이상전압의 발생으로 인한 전계스트레스 등에 대한 전기절연기술의 확립이 요구되고 있다. 따라서, 초전도 변압기 및 한류기의 구조에서 많이 이용되는 동심원통코일형 고온초전도 전력기기의 고전압 절연대책을 확립하기 위해서는 냉매인 액체질소의 기포거동 및 절연파괴특성에 대한 명확한 이해가 선행되어야할 것으로 사료된다.^{1, 2)}

본 연구에서는 지금까지의 고온초전도 변압기 및 한류기용 고온초전도코일에 대한 고전압 절연연구를 경험으로 동심원통형 고온초전도 코일을 모의한 전극계 내부의 액체질소 중에 발생한 기포의 거동메커니즘 및 부분방전개시전압을 수치적 계산을 이용하여 추정하였다.

2. 고온초전도코일을 모의한 전극계

현재 제작·시험 중에 있는 대부분의 고온초전도변압기 및 한류기용 코일은, 원통형 고체절연체에 패인 홈을 따라 초전도선을 감은 다층의 원통형 구조를 이루고 있으며, 고체절연체로는 주로 FRP를 이용하고 있다.^{3, 4)} 본 연구에서는 그림 1에서 볼 수 있는바와 같이 FRP로 만들어진 원통형의 표면에 패인 홈을 따라 동 파이프를 고정한 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. 그리고 코일의 선단으로부터 ITO전극의 내부표면까지의 거리를 냉각통로의 폭(l_c)으로 정의하였으며, 수회에 걸친 예비실험에 의한 기포직경(약 1mm)을 고려

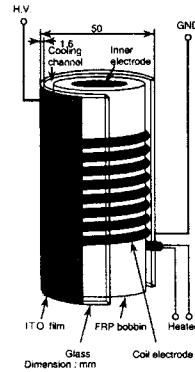


그림 1. 고온초전도코일을 모의한 전극계.

하여 $l_c=1.9$ mm로 하였다.

3. 전계계산 및 그래디언트력

고립기포에 작용하는 그래디언트력(Gradient force) 및 PD개시전압을 추정하기 위해서는 전계분포를 사전에 구하여야 한다.

3.1 전계계산을 위한 전극의 모델링

본 전극계에서는 전계를 해석적으로 도출하는 것이 어렵기 때문에 수치계산에 의해 전계분포를 구하고 그 결과를 기본으로 그래디언트력을 계산하였다.

전극계가 상당히 복잡하기 때문에 계산을 간단히 하기 위하여 그림 2에서 볼 수 있는바와 같이 ITO-코일 전극계의 대칭성을 고려하여 I-II-III-IV의 영역을 도출하였으며 전하중첩법을 이용하여 전계계산을 하였다. 또한, 그림에서 보이는 바와 같이 코일전극의 중심을 좌표계의 원점으로 하였다. 본 연구에서는 전극계와 같이 코일전극의 반경은 1.5mm로 하고, 그 외의 d , l , p 는 각각 8mm, 2mm, 6mm로 하였다. 또한, 원점에서 x

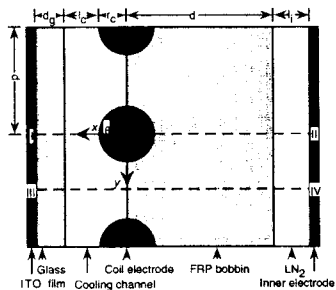


그림 2. 전계계산을 위한 전극의 모델링

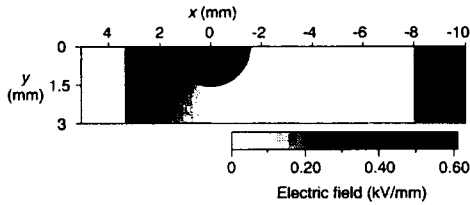


그림 3. 인가전압 1kV시의 전계분포.

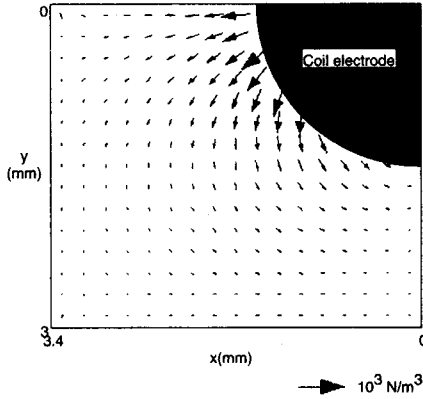


그림 4. 기포에 작용하는 그라디언트력의 분포.

축으로부터 시계방향으로 θ 를 표시하여 기포의 출발 위치를 표시하였다. 계산에서 사용한 액체질소, FRP 및 원통유리의 비유전율은 각각 1.432, 4.4, 7로 하였다.

3.2 전계분포

그림 3은 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 코일사이에 존재하는 것을 알 수 있다. 위의 계산결과로부터 발생한 기포가 코일의 선단에 침입할 경우에는 비교적 낮은 인가전압에서 절연파괴가 발생할 것으로 추정된다.

3.3 그라디언트력

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 (3-1)에 나타내는 바와 같이 그라디언트력이 작용하게 된다.

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

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

그림 4는 식(3-1)에 의하여 인가전압 1kV시에 단위 크기의 기포에 작용하는 그라디언트력의 계산결과와 상대치를 벡터형으로 나타낸 것이다. 그림 5로부터 알 수 있는바와 같이 그라디언트력은 기포를 전계가 강한 코일전극의 선단으로부터 전계가 상대적으로 약한 코일과 코일간의 영역으로 밀어내는 방향으로 작용하는 것을 알 수 있다. 그러므로, 인가전압이 높은 경우에는 그라디언트력이 강하게 작용하여 액체질소 영역에 발생하는 기포는 냉각통로를 통하여 상승하지 못하고 코일전극 사이의 전계가 약한 곳으로 모일 것으로 판단된다.

4. 기포거동의 계산

4.1 계산가정

기포거동의 계산을 간단히 하기 위하여 다음과 같은 가정을 두었다.

1. 기포는 코일전극 표면에서 발생하고 초기속도 0으로 출발한다.
2. 액체 및 기포는 대전되어 있지 않고 액체는 정지하고 있다.
3. 기포는 반경 0.5mm의 구형이다.
4. 기포가 전극에 충돌할 경우, 충돌 전·후의 속도는 $V_x^{(2)} = 0.3 V_x^{(1)}$, $V_y^{(2)} = 0.3 V_y^{(1)}$ 의 관계를 갖는다.

단, V_x 는 x 방향의 속도성분이고, V_y 는 y 방향의 속도성분이다. 첨자(1),(2)는 각각 충돌 전·후의 값을 나타낸다. 또한 기포의 반경과 충돌계수는 수회에 걸친 예비실험에 의해 결정하였다.

4.2 기초방정식

상기의 가정을 고려하면 고압기포의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$M_{eff} \frac{dV}{dt} = F_v + F_b + F_g \quad (3-2)$$

$$M_{eff} = \frac{2}{3} \pi a^3 (\rho_g + \frac{1}{2} \rho_l) \quad (3-3)$$

여기서, M_{eff} 는 기포의 실효질량, V 는 기포의 속도 벡터, F_v 는 점성력, F_b 는 부력, F_g 는 (3-1)식에 의해 나타나는 그라디언트력, ρ_g 는 기포의 밀도, ρ_l 은 액체질소의 밀도이다.

4.3 기포거동의 계산결과

본 연구에서는 기포의 반경을 0.5mm로 가정하였으며 기포거동의 궤적은 전극계 및 FRP, 유리벽으로부터 0.5mm이상의 거리를 갖는다.

그림 5는 본 연구에서 사용한 전극계에서 코일전극 상단부의 $\theta = 15^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ 와 하단부 $\theta = -15^\circ, -45^\circ, -75^\circ$ 에서 출발한 경우의 인가전압에 의한 기포거동의 변화를 나타낸 것이다.

그림 5에서 볼 수 있는바와 같이 인가전압이 0kV의 경우는 부력만이 작용하기 때문에 발생한 기포는 코일전극 표면이나 유리벽에 충돌하면서 냉각통로를 그대로 부상한다. 그러나, 인가전압이 상승함에 따라 그라디언트력이 증가하여 기포는 그 궤도가 변화하면서 부상한다. 인가전압이 5kV이상으로 되면, 국부적으로 그라디언트력이 부력보다 강하게 되는 곳이 생기고, $|\theta| \geq 75^\circ$ 의 전계가 약한 곳에서 발생한 기포는 코일전극의 하부에 트랩되어 냉각통로를 부상할 수 없게 된다. 전체적으로 그라디언트력이 약한 FRP원통 부근에서 발생한 기포는 전계가 약한 코일전극 사이에 빠르게 트랩된다. 그러나, 코일전극의 선단부에서 발생한 기포는 코일전극으로부터 멀어져 유리벽을 따라 상승한다. 한층 인가전압을 상승시키면 트랩된 기포의 양은 점점 증가하게 되고 인가전압이 7kV이상으로 되면 발생한 기포의 대부분이 트랩되고 냉각통로를 통하여 부상하는 기포는 거의 없게 된다. 위의 기포거동 시뮬레이션 결과 및 그림 6에 표시된 냉각통로의 폭(l_c)에 따른 기포의 트랩개시전압($V_{trap-init}$)은 이미 발표한 동일 전극에서 관찰한 기포거동의 실험결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있었다^[5]. 위의 결과로부터 본 연구에서 도입한 운동방정식을 이용한 기포거동 및 트랩개시전압의 추정법이 유효하다는 것을 알 수 있다.

5. 부분방전개시전압

5.1 부분방전개시전압 추정방정식

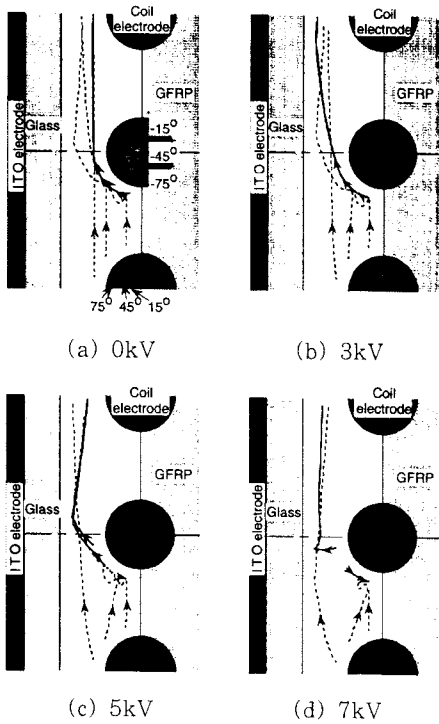


그림 5. 기포거동의 계산결과

불평등 전계에 있어서 기포내부에 발생하는 부분방전개시전압은 스트리머이론을 이용한 다음의 식으로 계산이 가능하다.^[6]

$$\int_0^{l_c} \alpha dx = K \quad (5-1)$$

여기서, α 는 Townsend 제1전리계수, l_c 는 냉각통로의 폭, K 는 이온화 상수이다. 상온 기체질소에서의 타운젠드 제1전리계수 α 는 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{\alpha}{P} = A \exp\left[-\frac{BP}{E}\right] \quad (5-2)$$

여기서, $A = 6.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, $B = 2.15 \times 10^4 \text{ VPa}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, P 는 가스압력이고 E 는 전계강도이다. (5-2)식은 질소의 온도 및 압력에 따른 상전이특성곡선에 따라 다음의 식을 이용하여 극저온에서도 응용이 가능하다.

$$P_E = \frac{293P}{T} \quad (5-3)$$

여기서 기체질소 P_E 는 상온에서의 가스압력, P 는 기포발생시의 압력, T 는 기포발생시의 온도이다.

5.2 부분방전개시전압 계산결과

그림 6은 <5.1>절에서 설명한 스트리머이론을 이용하여 계산한 부분방전개시전압의 계산결과 값과 계산의 유효성을 입증하기 위하여 기포가 부분방전개시에 직접적으로 관여한 경우의 부분방전개시전압의 실험결과를 나타낸 그래프이다.

그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 부분방전개시전압의 계산결과와 실험결과와의 값이 상당히 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고, 부분방전개시전압은 동일 l_c 에서 기포가 트랩되기 시작하는 전압보다 한층 높다는 것을 알 수 있다.

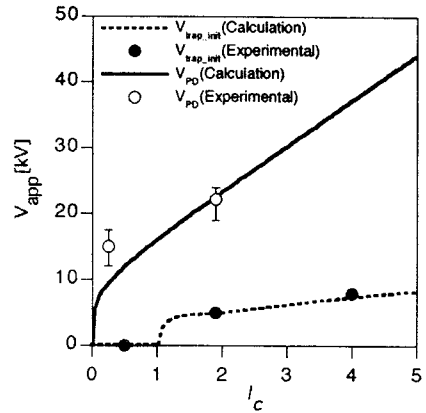


그림 6. l_c 에 따른 기포의 트랩개시전압 및 부분방전개시전압특성

6. 결 론

본 연구에서는 고온초전도코일을 모의한 전극계에서 기포의 거동메커니즘과 부분방전개시전압특성에 대하여 전계계산을 기본으로 한 수치적 방법을 통하여 추정하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 액체질소 내부에 발생된 기포는 전계의 영향으로 거동을 변화하고 최종적으로는 전계가 약한 곳으로 모인다.
- (2) 부분방전개시전압은 기포가 트랩되는 전압보다 훨씬 높은 전압에서 발생한다.
- (3) 본 연구에서 사용한 기포의 거동특성 및 스트리머이론에 의하여 추정된 부분방전개시전압이 실험결과와 상당히 일치하였다. 위의 결과로부터 본 연구에서 사용한 추정방법이 타당하다는 것이 입증되었다.

(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 Cryogenics", Handbook of Applied Superconductivity (Edited by B. Seeber), IOP Publishing Ltd., 1998
- [3] S. P. Mehta, N. Aversa and M. S. Walker, "Transforming transformers", IEEE Spectrum, Vol. 34, No. 7, pp. 43-49, 1997
- [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. 985 - 988, 1997
- [5] 석복렬, 김중구, "전력용 고온초전도코일 모의전극계에서의 기포거동에 관한 연구", 한국초전도·저온공학회논문지, Vol. 3, No.1, 2001
- [6] A. Pedersen, "Calculation of spark breakdown or corona starting voltage in nonuniform fields", IEEE Trans. PAS., Vol.86, pp.200-206, 1967