

## 고온초전도코일 모의전극계에서 기포거동 및 부분방전개시전압의 추정

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

석복렬\*, 최명준\*\*, 김용한\*\*, 김진수\*\*, 김종구\*

Bok-Yeol Seok\*, Myung-Joon Choi\*\*, Yong-Han Kim\*\*, Jin-Soo Kim\*\*, Jong-Koo Kim\*

**Abstract** : This paper deals with the numerical estimation of the bubble behavior and the partial discharge(PD) initiation voltage on the basis 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 show fairly good agreement with the experimental results.

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

#### 1. 서 론

고온초전도체의 전력기기분야에의 응용은 기기효율, 사용부지문제, 환경문제 등의 면에서 상전도 전력기기의 문제를 타개할 기술로서 기대되고 있다. 현재 고온초전도 선재를 이용한 변압기, 한류기 등의 전력기기에서의 적용에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔으며, 실용화가 근시일 내에 이루어질 것으로 예상되고 있다.

이러한 초전도 기기의 계통에의 적용은 퀘칭에 의한 기포의 발생, 계통의 상규전압 및 각종 이상전압으로 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 절연과괴특성에 대한 명확한 이해가 선행되어야 할 것으로 사료된다.<sup>[1-2]</sup>

본 연구에서는 지금까지의 고온초전도 변압기 및 한류기용 고온초전도코일에 대한 고전압 절연연구의 경험을 바탕으로, 동심원통형 고온초전도 코일을 모의한 전극계 내부의 액체질소 중에 발생한 기포거동의 메커니즘 및 유기된 기포내부에서 발생하는 부분방전(PD)의 개시전압( $V_{PD}$ )을 전계계산을 바탕으로 한 수치적 방법을 이용하여 추정하였다.

#### 2. 고온초전도코일을 모의한 전극계

현재 제작·시험 중에 있는 대부분의 고온초전도변

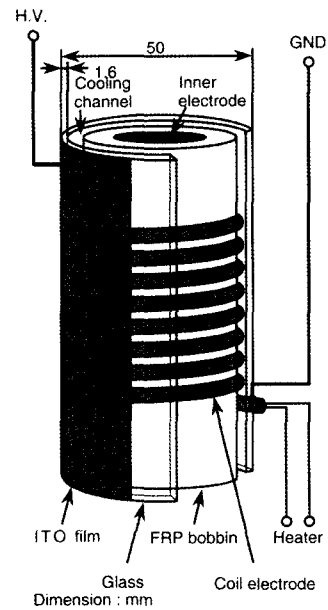


그림 1. 고온초전도코일을 모의한 전극계.  
Fig. 1. Simulated electrode system for HTS coils.

압기 및 한류기용 코일은, 원통형 고체절연체에 패인 홈을 따라 초전도선을 감은 다층의 동심원통형 구조를 이루고 있으며, 고체절연체로는 주로 FRP를 이용하고 있다<sup>[3-5]</sup>. 본 연구에서는 그림 1에서 볼 수 있는바와 같이 FRP로 만들어진 원통형의 표면에 패인 홈을 따라 동 파이프를 고정된 코일전극으로 초전도 코일을 모의하였다. 그리고, 초전도 권선에서 퀘칭 시에 발생하는 기포를 모의하기 위하여 동 파이프 내부에는 망가닌선(저항  $0.106\Omega/cm$ )을 내장하여 에폭시 수지로 고정시켰다. 별층의 초전도 코일을 코일전극과 유리원통(두께 1.6mm)에 투명전극(ITO)막을 증착한 ITO 막전극(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 고려하여  $l_c=0.25\sim 4mm$ 로 변화하면서 실험 및 계산결과를 비교하였다.

#### 3. 전계계산 및 그래디언트력

불평등 전계하에서의 발생된 기포에 작용하는 힘(이하에서는 그래디언트력(Gradient Force))과 전계에 의하여 트랩된 기포내부에서 발생하는 PD개시전압을 구하기 위해서는 식(1)과 식(7)에서 볼 수 있는바와

\* 정 회 원 : 현대중공업주식회사 기전연구소

\*\* 비 회 원 : 현대중공업주식회사 기전연구소

원고접수 : 2001년 10월 10일

심사완료 : 2001년 11월 14일

같이, 실험전극계에서의 전계분포의 계산이 선행되어야 한다. 본 전극계에서는 전계를 해석적으로 도출하는 것이 불가능하기 때문에 수치적 방법(전하중첩법)을 이용하여 전계분포를 구하고, 그 결과를 바탕으로 불평등 전계 하에서 기포거동의 계산(식(4-1)참조)에 필요한 그래디언트력의 분포를 계산하였다.

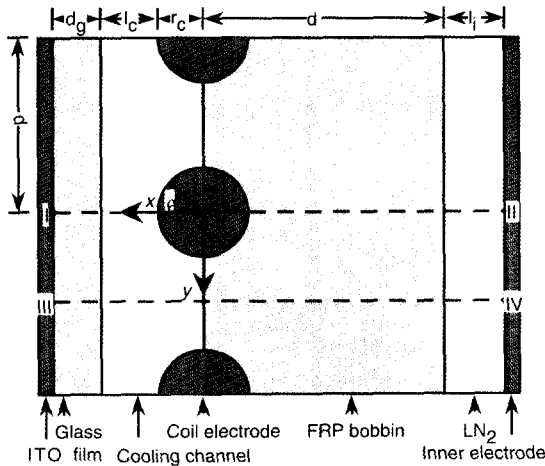


그림 2. 전계계산을 위한 전극의 모델링.  
Fig. 2. Modeled electrode system for electric field calculation.

3.1. 전계계산을 위한 전극의 모델링

본 연구에서는, 전극계가 상당히 복잡하기 때문에 계산을 간단히 하기 위하여, 그림 2에서 볼 수 있는바와 같이 ITO-코일 전극계의 대칭성을 고려하여 I-II-III-IV의 영역을 2차원적으로 도출하였으며 전하중첩법을 이용하여 전계계산을 하였다. 또한, 그림에 나타나 있는 바와 같이 코일전극의 중심을 좌표계의 원점으로 하였다. 본 연구에서는, 전극계와 같이 코일전극의 반경은 1.5mm로 하고, 그 외의  $d, l_i, p$ 는 각각 8mm, 2mm, 6mm로 하였다. 또한, 원점에서  $x$ 축으로부터 시계방향으로  $\theta$ 를 표시하여 기포의 출발위치를 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 보는 바와 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 절연과피가 발생할 것으로 추정된다.

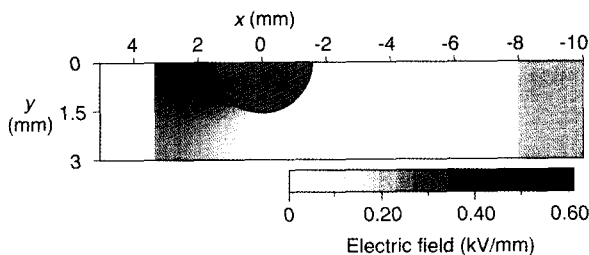


그림 3. 인가전압 1kV시의 전계분포.  
Fig. 3. Electric field distribution(1kV).

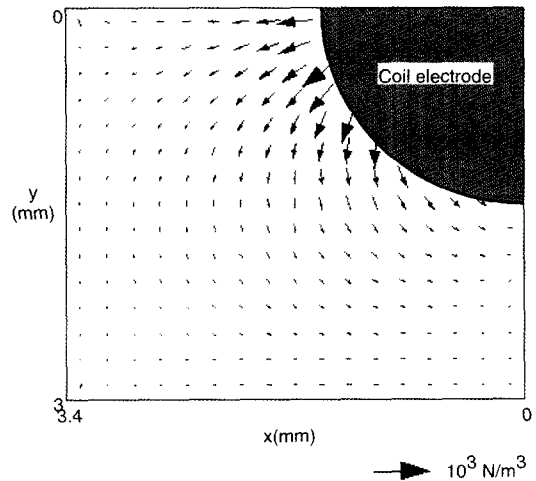


그림 4. 기포에 작용하는 그래디언트력의 분포.  
Fig. 4. Distribution of gradient force acting on a suspended bubble

3.3. 그래디언트력

액체질소 내부에 발생하는 기포의 거동을 이해하기 위해서는 발생된 기포에 작용하는 힘의 방향을 이해하여야 한다. 본 전극계의 경우와 같이 냉각통로의 액체질소 영역이 불평등 전계 하에서 기포가 발생하는 경우에는 다음의 식(3-1)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,  $\epsilon_l, \epsilon_g$ 는 각각 액체질소 및 기체질소의 유전율,  $E$ 는 전계장도이다.

그림 4는 식(1)에 의하여 인가전압 1kV시에 단위 크기의 기포에 작용하는 그래디언트력의 계산결과를 상대치를 벡터형으로 나타낸 것이다. 그림 4로부터 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.

4. 기포거동의 계산

4.1. 계산을 위한 가정

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,

$$V_x^{(2)} = 0.3 V_x^{(1)}, \quad V_y^{(2)} = 0.3 V_y^{(1)}$$

의 관계를 갖는다.

표 1. 계산에 사용한 질소의 물성치

	$\rho_l(\text{kg/m}^3)$	$\rho_g(\text{kg/m}^3)$	$\epsilon_l/\epsilon_0$	$\epsilon_g/\epsilon_0-1$	$\mu(\mu\text{Pa}\cdot\text{s})$
질소	824	0.421	1.432	$5.87 \times 10^{-1}$	217

단,  $V_x$ 는  $x$ 방향의 속도성분이고,  $V_y$ 는  $y$ 방향의 속도성분이며, 여기서 속도의 단위는 mm/sec이다. 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 고립기포의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

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

$$M_{eff} = \frac{4}{3} \pi a^3 (\rho_g + \frac{1}{2} \rho_l) \quad (3)$$

$$F_v = -4 \pi a \mu V \quad (4)$$

$$F_b = \frac{4}{3} \pi a^3 (\rho_l - \rho_g) G \quad (5)$$

여기서,  $M_{eff}$ 는 기포의 실효질량,  $V$ 는 기포의 속도 벡터,  $F_v$ 는 점성력,  $F_b$ 는 부력,  $F_g$ 는 (1)식에 의해 나타나는 그라디엔트력,  $\mu$ 는 액체질소의 점성력,  $\rho_g$ 는 기포의 밀도,  $\rho_l$ 은 액체질소의 밀도,  $G$ 는 중력가속도이다.

계산에 사용한 액체질소의 물성치는 표 1과 같다.

4.3. 기포거동의 계산결과

본 연구에서는 기포의 반경을 0.5mm로 가정하였으므로 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 기포 거동의 변화를 나타낸 것이다.

그림 5에서 볼 수 있는바와 같이 인가전압이 0kV의 경우는 부력만이 작용하기 때문에 발생한 기포는 코일전극 표면이나 유리벽에 충돌하면서 냉각통로를 따라 그대로 부상한다(그림 5(a)). 그러나, 인가전압이 상승함에 따라 그라디엔트력은 수식(1)에서 볼 수 있는바와 같이 전계의 구배에 제공으로 증가하기 때문에 그라디엔트력의 영향으로 기포는 그 궤도가 변화하면서 부상한다(그림 5(b)). 인가전압이 5kV이상으로 되면, 국부적으로 그라디엔트력이 부력보다 강하게 되는 곳이 생기고,  $|\theta| \geq 75^\circ$ 의 전계가 약한 곳(코일의 하부)에서 발생한 기포는 코일전극의 하부에 트랩되어 냉각통로를 따라서 부상할 수 없게 된다(그림 5(c)). 전체적으로 인가전압이 상승됨에 따라 그라디엔트력이 약한 FRP원통 부근에서 발생한 기포는 전계가 약한 코일전극 사이에 빠르게 트랩된다. 그러나, 코일전극의 선단부에서 발생한 기포는 코일전극으로부터 멀어져 유리벽을 따라 상승한다. 한층 인가전압을 상승시키면 전압의 증가에 제공으로 증가하는 그라디엔트력이 부력보다 강하게 되는 영역이 점점 증가하게 되고 기포가 트랩되는 영역 또한 점점 증가하게 된다. 인가전압이 7kV이상으로 되면 발생한 기포의 대부분이 트랩되고 냉각통로를 통하여 부상하는 기포는 거의 없게 된다(그림 5(d)). 위의 기포거동 시뮬레이션 결과 그림 6에 표시된 냉각통로의 폭( $l_c$ )에 따른 기포의 트랩 개시전압( $V_{trap-init}$ )은 이미 발표한 동일 전극에서 관찰한 기포거동의 실험결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있었다<sup>[6]</sup>. 그림 6의  $l_c < 1\text{mm}$  이하에서의 이론적인 추정값 및 실험 값이 0가 되는 것은 <4.1>절의 가정 3)에서 기포의 반경을 0.5mm로 가정하였으므로 냉각통로의 폭  $l_c$ 가 기포의 직경보다 좁은 경우는 기포의 표면장력으로 인하여 기포가 냉각통로를 통과하지 못하게 되기 때문이다. 위의 결과는 이미 보고한 논문에서도 명기하였듯이 수 차례의 기포거동에 관한 실험을 통하여 그 재현성이 입증되었다.

위의 결과로부터 본 연구에서 도입한 기포의 운동방정식을 이용한 기포거동 및 트랩개시전압의 추정방법이 유효하다는 것을 알 수 있다.

5. 부분방전개시전압

5.1. 부분방전개시전압 추정방정식

고온초전도 전력기기의 냉매이자 절연매질로 사용되는 액체질소 내부에 발생하는 부분방전 전하량은, 동일 전극형상에서의 대기압 공기중의 부분방전 전하량

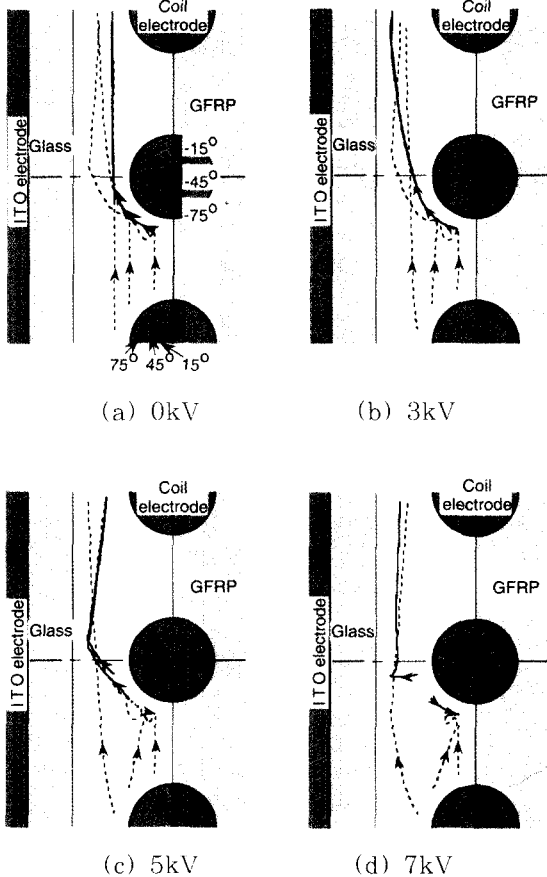


그림 5. 기포거동의 계산결과.  
Fig. 5. Simulation results of bubble behavior.

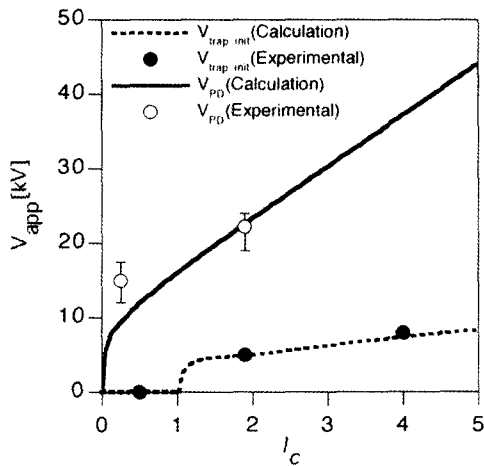


그림 6.  $I_c$ 에 따른 기포의 트랩개시전압 및 부분방전개시전압특성.

Fig. 6.  $V_{trap,init}$  and  $V_{PD}$  vs.  $I_c$  characteristics.

에 비하여 훨씬 크기 때문에 부분방전 발생 자체가 기기의 고장에 심각한 영향을 초래할 수 있다. 그러므로 부분방전개시전압을 정확하게 추정하는 것이 무엇보다도 중요하다.

본 연구에서 사용된 전극계와 같이, 불평등 전계에 있어서 트랩된 기포내부에 발생하는 부분방전개시전압은 스트리머 이론을 이용한 다음의 식으로 계산이 가능할 것으로 사료된다<sup>(7)</sup>.

$$\int_0^{l_c} \alpha dx = K \quad (6)$$

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

$$\frac{\alpha}{P} = A \exp\left[-\frac{BP}{E}\right] \quad (7)$$

여기서,  $A = 6.6 \times 10^{-3} \text{ Pa}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ,  $B = 2.15 \times 10^{-1} \text{ VPa}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ,  $P$ 는 가스압력이고,  $E$ 는 전계강도이다. (7)식은 질소의 온도 및 압력에 따른 상전이 특성곡선에 따라 다음의 식을 이용하여 극저온에서도 응용이 가능하다<sup>(8)</sup>.

$$P_E = \frac{293P}{T} \quad (8)$$

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 스트리머의 이론을 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 부분방전개시전압

의 계산결과와 실험결과 값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고, 기포내부의 부분방전개시전압보다 훨씬 낮은 전압에서부터 기포는 전계가 약한 곳으로 트랩된다는 것을 알 수 있었다. 위의 결과로부터, 초전도 전력기기의 설계 시에는 기포의 발생으로 인한 전력기기의 절연저하를 방지하기 위해서는, 발생된 기포가 인가된 전압으로 인하여 트랩된 후 기기의 외부로 배출될 수 있도록 설계상의 주의가 요구된다.

본 연구에서는, 부분방전개시전압의 추정법을 규명하는데 연구의 목적이 있으므로 실험결과에 대한 설명이 부족한 점이 있으나, 부분방전개시전압의 실험결과 및 이론적 추정법에 의한 추정치와의 자세한 비교는 향후 본 논문을 통하여 보고하기로 한다.

## 6. 결 론

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

1) 전계계산을 바탕으로 한 기포의 운동방정식에 따른 기포의 거동특성 및 트랩개시전압의 추정결과가 실험결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 이것으로 본 연구에서 사용한 기포거동의 추정법을 이용한 기포의 거동특성 규명이 가능할 것으로 생각된다.

2) 극저온 액체질소 내부에 유기된 기포로 인하여 부분방전이 발생하는 경우에는 기존의 스트리머 이론을 이용하여 부분방전개시전압의 추정이 가능하다는 것을 확인하였다.

3) 기포의 트랩개시전압은 기포내부의 부분방전개시전압보다 훨씬 낮은 전압에서 전계가 약한 곳으로 트랩된다는 것을 알 수 있었다. 그러므로, 고온초전도코일형 전력기기의 설계시에는 트랩된 기포의 흐름을 방해하지 않고 기기 외부로 배출할 수 있는 구조가 되도록 설계초기부터 고려하여야 한다.

## 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] 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)
- [5] 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

- [6] 석복렬, 김중구, "전력용 고온초전도코일 모의전극계에서의 기포거동에 관한 연구", 한국초전도·저온 공학회논문지, Vol.3, No.1, pp.16-21, 2001
- [7] A. Pedersen, "Calculation of spark breakdown or corona starting voltage in nonuniform fields", IEEE Trans. PAS., Vol.86, pp.200-206, 1967
- [8] S. Uchida, VDI: Handbook of Cryogenic Engineering, (Co) Uchida Roukakuho Publishing Co., LTD



**김중구(金鍾九)**

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

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



**최명준(崔名俊)**

1969년 11월 28일생, 1995년 숭실대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 (주)현대중공업 기전연구소 연구원



**김용한(金容漢)**

1971년 4월 29일생, 1995년 광운대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 현대중공업주식회사 기전연구소 연구원



**김진수(金鎭洙)**

1974년 12월 24일생, 1998년 한양대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 현대중공업주식회사 기전연구소 근무