

超電導 機器의 電氣絶緣

Electrical Insulation for Superconducting Apparatus

郭 東 周

韓國電氣研究所 電氣材料研究部 超電導研究室

Abstract

Some experimental studies on the dielectric strength characteristics of organic material under compressive stress associated with high magnetic fields and of liquid coolant in the presence of thermally induced bubbles, which might be generated at unexpected quench of immersed-cooling superconducting devices, was performed to obtain the basic data on the electrical insulation design for superconducting apparatus. PET and liquid nitrogen were used as test mediums.

1. 서론

초전도 마그네트 및 초전도 응용 기기의 실현을 위해서는 고성능 초전도 선재의 개발 및 냉각방식의 확립과 더불어 극저온에서의 전기적 절연기술의 확립이 해결되지 않으면 안될 연구 과제로서 강하게 지적되어 오고 있다. 특히, 전기절연은 최근 마그네트의 대형화 및 펄스화에 따른 고전압화로 그 중요성이 크게 대두되고 있다.

한편 초전도 기기의 절연계를 구성하는 요소로는 진공을 비롯해 극저온 기체, 극저온 액체 및

고체 등을 들 수 있지만 어느 경우이든, 종래의 일반 상전도 기기의 절연물에 비해 매우 독특한 조건하에 사용되고 있다. 즉, 핵융합용 대형 초전도 마그네트의 고체 절연물은 초전도 현상을 나타내기 위한 어떤 임계온도이하에서 사용되며, D-T 반응로의 경우 14MeV 정도의 초고속 중성자 및 다른 고에너지 입자의 照射를 입을 가능성이 있다. 또한 Oak Ridge National Lab.의 연구에 의하면 마그네트의 자장발생시 코일층간에 인가되는 압축응력은 Tokamak용에서는 34.5MPa, Theta Pinch 등의 고자장발생용에서는 690MPa에 달한다[1]. 더우기 마그네트의 켄치시, 냉매액체에 열적 기포의 생성과 함께 코일층간에 발생하는 이상전압은 펄스 운전용에서 약 2000V 이상에 달하며, 코일과 접지 물체간에는 이보다 높은, 특수한 파형을 가진 이상 전압의 출현이 예상되는 등 신뢰성있는 초전도 기기의 절연설계를 위해서는 절연물의 동작환경에 대한 이해와 이에대한 절연물의 절연특성에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다. 본 보고는 이상의 관점하에서 연구된 압축응력하에서의 고체절연물의 절연 특성 및 기포발생에 의한 냉매 액체의 절연파괴 등에 대한 실험 연구 결과를 요약하고 있다.

2. 유기 고분자 재료의 절연파괴 특성

초전도 기기에서 예상되는 전압으로서는
 앞에서 언급한 바와 같이 초전도 기기의
 이상시, 예를들면 초전도 코일내에서 권치가
 일어난 경우 발생하는 내부 이상전압, 전력계통에
 있어서 계통상의 고장등으로 인해 상전도 기기
 에서 발생되어 초전도 기기로 침입 되는 외부
 이상전압 및 상규전압이 있다. 즉, 초전도
 기기의 고체절연재료는 거대한 압축응력하에서
 각종 이상전압에 견디지 않으면 안된다. 초전도
 기기용 고체절연물로서는 그 기계적 특성 및
 재료자체의 물성이 비교적 잘 알려져 있는 PET가
 잘 사용되고 있다.

그림 1은 압축응력하에서의 PET의 직류절연
 강도를 나타내고 있다. 수십 MPa 정도의 두께를
 가진 PET의 직류절연강도는 압축응력이 증가함에
 따라 처음부터 증가하여 어떤 임계압축응력하에서
 최대치를 보이며, 그 이후 급히 저하한다. 이러한
 절연강도의 압축응력의존성은 연신 및 열처리에
 의한 결정화도를 바꾸어도 같은 경향을 보이며
 최대절연강도를 보이는 응력은 그 시료의 기계적
 항복 응력에 거의 일치한다 [2].

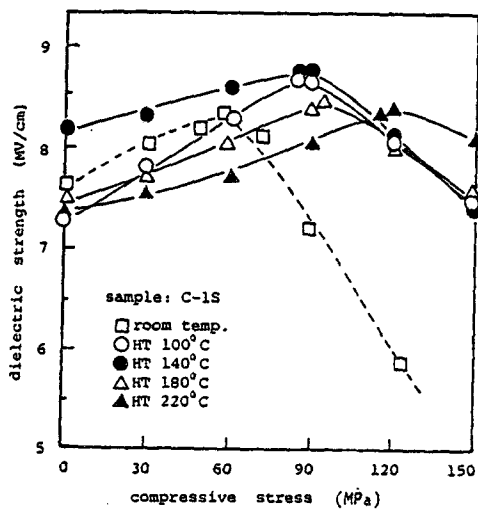


Fig.1. Dielectric strength vs. compressive stress for PET

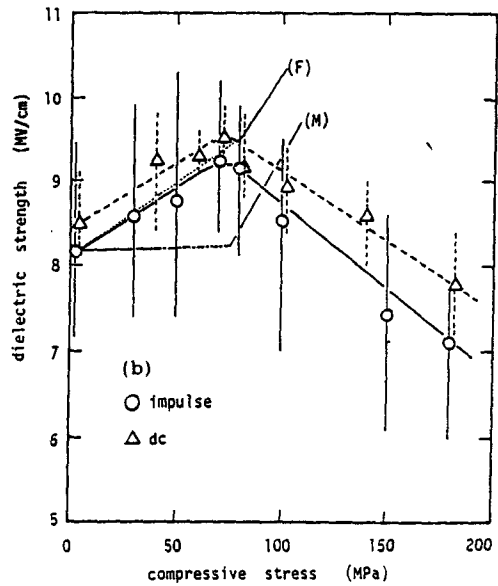
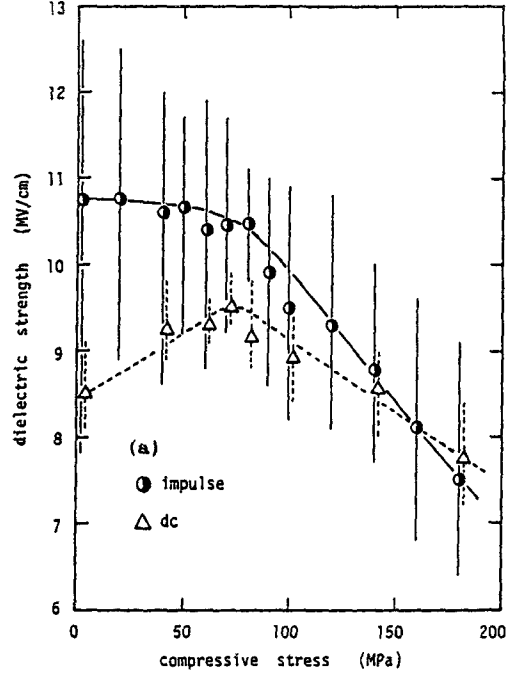


Fig.2. Impulse dielectric strength vs. compressive stress

한편 임펄스 전압을 인가한 경우는, 예비
 과전압(Prestress Voltage)을 인가하여 재료표면
 및 내부에 공간전하가 형성되면 그림 2(a)처럼

임펄스 절연강도는 응력의 증가와 함께 저하하지만 예비과전압의 영향을 제거, 저음부터 높은 전압을 인가하여 파괴시킨 경우에는 그림 2(b)처럼 압축응력에 대하여 직류의 경우와 같은 특성을 가진다. 탄성변형 영역에서의 절연강도 특성은 압축응력의 증가에 의한 자유체적의 변화를 고려하여 다음과 같이 추정된다.

$$E_a = E_{a0}(1 + b)$$

단, E_{a0} : 응력이 없을 경우의 절연강도, b : 자유체적분율에 관한 정수, ϵ : 압축응력

그림 2(b)의 직선 F는 윗식에 의한, M은 자유체적을 고려하지 않은 경우의 이론치이다. F가 실험치와 일치하고 있다 [3].

3. 극저온 냉매액체의 절연파괴 특성

최근 고온초전도체의 개발과 함께 장래의 초전도 기기의 주냉매로서 액체질소의 이용이 기대되고 있다. 액체질소는 아주 우수한 절연내력을 갖지만, 마그네트의 퀘치시 도체상에 형성되는 극소적인 hot spot와 극저온 냉매의 낮은 잠열이 기포생성의 원인이 되어 액체의 절연상의 최대의 약점부가 된다 [4]. 그림 3은 이러한 퀘치의 상태를 모의한 냉각 channel내의 열적 기포의 거동을 나타낸 것으로, 전국내에 내장시킨 히터로 퀘치시의 hot spot을 만들어 내고 있다.

액체질소의 비등현상(boiling phenomena)은 전계가 존재하지 않을 경우, 핵비등(nucleate boiling) 상태의 기포가 직류전계의 인가에 의해 절연면에 고정되어 막비등(film boiling)으로 전이하여 전계의 상승과 함께 성장한다.

직류전계의 기포는 전계의 인가에 의해 안정하게 성장하여 어떤 임계전압하에서는 전국간을 로크(lock) 한다. 이에 대하여 교류전계하에서의 기포의 형상은 인가전압의 위상각의 변화에 크게 의존하는 한편 심한 진동현상을 나타낸다.

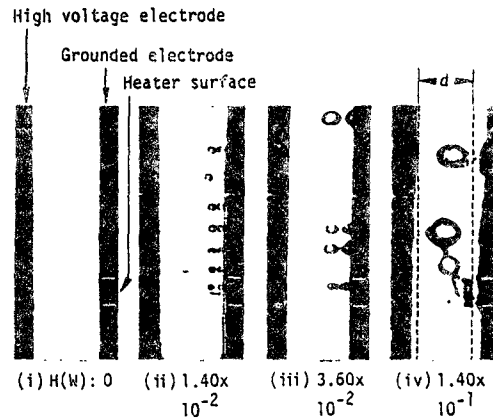


Fig.3. Boiling phenomenon in LN₂ at no applied voltage

한편 표준비 임펄스전압($1 \times 40 \mu s$)을 인가한 경우, 전압인가에 의한 기포의 변형 및 성장은 나타나지 않아, 액체질소의 비등현상은 $1/40 \mu s$ 의 단시간의 전계인가에 의한 맥스웰(Maxwell) 응력에는 영향받지 않는다. 따라서 액체질소중에 비등현상이 일어나면 직류 및 교류전계하에서는 고락된 기포중에서 절연파괴가 일어나지만 임펄스의 경우 구상의 기포와 주위의 액체로 이루어지는 복합절연계에서 파괴가 일어난다. 그림 4 및 5에 절연특성의 결과를 나타낸다. 교류전압에 의한 열적기포파괴특성은 직류의 경우와 거의 같으며 절연파괴는 고락된 기포를 경유하여 일어나므로 절연강도는 기체의 깊이까지 저하한다. 이에 대하여 임펄스의 경우, 기포발생에 의한 파괴치의 저하율은 교류에 비해 작다.

4. 결론

이상 간단히 고체고분자 및 액체질소의 절연특성에 대하여 고찰하였다. 신뢰성있는 초전도 기기의 설계를 위하여는 절연물에 인가되는 응력이 그 시료의 항복응력 이하가 되도록 고려할 필요가 있다.

또한 극저온액체에 있어서 피할 수 없는

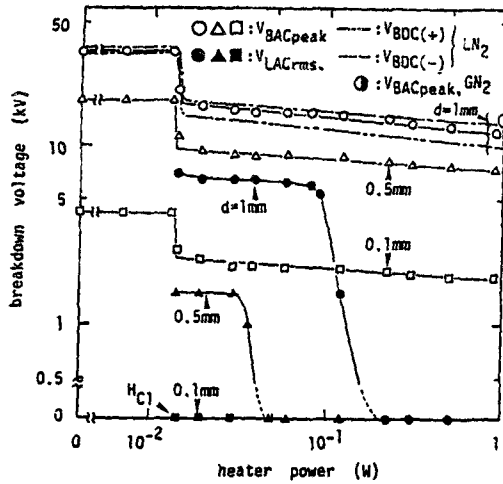


Fig. 4. V_B -H characteristics under ac and dc electric fields

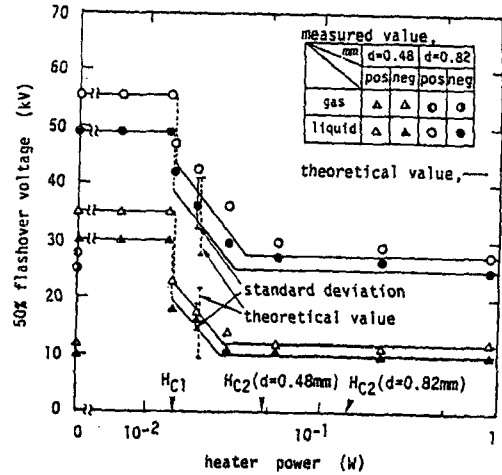


Fig. 5. Impulse flashover voltage characteristics to heater power

기포의 발생에 의한 기포의 토르를 억제할 필요가 있으며 여기에는 과냉각 또는 초임계 액체에 의한 절연이 유효하다고 하겠다.

(참고문헌)

1. R.D.Hay and E.J.Rapperport : Electrical Insulation in Magnets for Fusion Reactors, Proc. of 6th Symposium, San Diego Call 1130 (1975).
2. C.H.Park, D.J.Kwak and M.Hara : Some Dielectric and Mechanical Properties of Heat Treated Biaxially Drawn PET Films, IEEE EI-20, 567, (1985).
3. M.Hara, D.J.Kwak and M.Akazaki : Impulse Dielectric Strength of Biaxially Drawn PET Film under Compressive Stress, Trans. IEEE of Japan, Vol.107-A, 467, (1987).
4. M.Hara, D.J.Kwak, M.Kubuki and M.Akazaki : Impulse and Ac Breakdowns of LN₂ in the Presence of Thermally Induced Bubbles, Proc. of 21st Sym. on Elec. Insul. Materials, 83 (1988).