

## 대기압하의 액체질소중 부분방전과 방사전자파의 상호관계

박광서, 신호영, 김충년, 김기채, 박원주, 이광식, 이동인,  
영남대학교 전기전자 공학부.

### A Relationship between Partial Discharge and Radiated Electromagnetic Waves in Liquid Nitrogen

Kwang-Seo Park, Ho-Young Shin, Chung-Nying Kim, Ki-chai Kim,  
Won-Zoo Park, Kwang-Sik Lee, Dong-In Lee.

**Abstract** - In this study, a relationship between partial discharge and the radiated electromagnetic waves is investigated by measuring electromagnetic waves using a biconical antenna and a spectrum analyzer.

The patterns of frequency spectrum of radiated electromagnetic waves measured at the atmospheric pressure in Liquid Nitrogen( $\text{LN}_2$ ) during the partial discharges in nonuniform electric field depend on positive DC power.

From these points of view, it is considered that these results obtained from this investigation may be used as fundamental data for diagnosis and prediction of insulation on the equipments of superconducting and cryogenic applications.

### 1. 서 론

산업 및 경제가 발전함에 따라 전기에너지의 수요는 매년 급격하게 증가하고 있는 추세에 있다. 이러한 전기에너지를 원활하게 공급하기 위하여 전력시스템은 초고압으로 전압의 상승이 필요하다. 그러나 이에 따른 여러 가지 문제점이 발생됨으로 선진국에서는 대전류 송전을 위한 초전도 및 극저온 응용 기기의 이용에 대하여 많은 연구를 하고 있다. 이러한 초전도 및 극저온 응용분야의 연구에는 극저온 냉매의 전기적 절연에 대한 연구가 필수적이다.

장래에 실용화 단계에 접근할 수 있는 고온초전도체를 개발함으로서 극저온 냉매가 사용될 것에 착안하여 본 연구에서는 가격이 싸고 고순도를 얻기가 쉽고 취급이 간편한 액체질소에 대하여 부분방전을 모의하여 방전특성을 연구하였다. 또한 전력수요의 급증으로 전력의 안정적 공급이 필수적이고 사고의 미연 방지를 위한 절연진단 기술이 더욱더 중요한 위치를 차지하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 전력설비나 전기 기기에 전기적 이상 발생 중 하나인 절연파괴의 전구현상인 부분방전시 발생하는 방사전자파를 비접촉센서인 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용하여 액체질소중의 방전진전에 따른 방사전자파의 주파수스펙트럼 분포를 연구하였다.

이러한 자료는 향후 실용화될 초전도 극저온 응용 기기 등의 절연진단 및 예측의 중요한 기초자료가 되리라 사료된다.

### 2. 본 론

#### 2.1 실험장치 및 방법

그림 1은 액체질소에 전극을 함침시키는 visual type cryostate를 나타내며 재질은 급격한 온도변화에 의한 균열을 방지할 목적으로 내열성이 강한 Pylex glass를 사용했으며 열차폐를 목적으로 외조와 내조 사이를  $10^{-3}$ [torr]까지 진공을 유지시킨 2중 원통구조이다.

그림 2. 온 본 실험의 회로도를 나타내며 전원장치는 정극성 직류고전압 발생장치(입력전압:  $1\phi 220V$ , 출력 전압:  $200kV$ , 출력전류:  $5mA$ , Pulse Electronics Co. Ltd.)이다. 또한 출력되는 전압을 측정하기 위하여 high voltage divider( $R_3 : R_4 = 5000 : 1$ )를 사용하였다.

회로도에서  $R_1(30 k\Omega)$ 은 절연파괴 전류를 제한하기 위한 damping용 저항이며, 저항  $R_2(50\Omega)$ 은 임피던스 정합 및 전류측정용 무유도 저항이다. 그리고 절연파괴 전압-전류 과정의 측정은 digital storage type oscilloscope(Lecroy 9350AL, 500[MHz])를 사용하였다. 그리고 방사되는 전자파를 측정하기 위하여 biconical antenna ( $30 \sim 300[\text{MHz}]$ , EMC model 3110) 및 Spectrum analyzer (Advantest R4131D)를 이용하여 방사 전자파의 주파수 스펙트럼 분포를 관측하였다.

부분방전을 모의하기 위해 전극의 배치는 침대 평판 전극을 사용했으며 침단 각도는  $30^\circ$ 이고 평판전극의 직경은  $60mm$ 이다. 전극의 재질은 황동이고 전극간의 거리는  $5mm$ 로 일정하게 하였다.

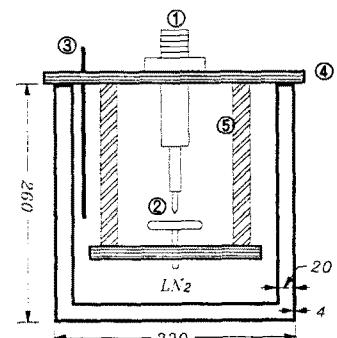


그림 1. 저온유지장치와 전극배치  
 ① Micrometer      ② Electrode system  
 ③ Thermocouple    ④ Disk type bakelite  
 ⑤ Teflon rod

그림 1. 저온유지장치와 전극배치

실험방법은 먼저 전압을  $1 [\text{kV/sec}]$ 의 속도로 상승 시켜 절연파괴전압을 10회 측정하여 평균한 값을 채택하였다. 이 때의 절연파괴전압( $V_B$ )을 침대평판 전극의 100% 절연파괴전압이라고 가정하고 부분방전을 모의하기 위해서 절연파괴전압보다 낮은 전압을 일정한 퍼센트 비율로 인가 후 안테나와 스펙트럼 분석기를 이용하여 5분간 positive peak detecting 방법으로 데이터를 측정하였다.

이때 전극중심부와 안테나의 거리는  $1m$ 로 고정하여 둔다.

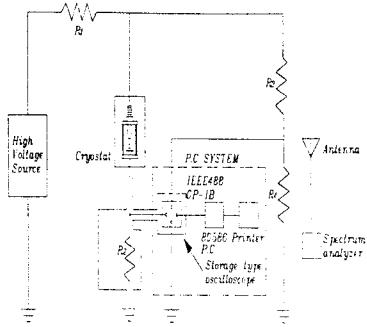


그림 2. 본 실험의 회로도

## 2.2 실험결과 및 고찰

방사전자파 측정에 의한 진단의 이론적 타당성을 검토하기 위해 기중 간극을 갖는 방전원을 길이가  $i$  인 미소 다이폴로 가정한 것이다. 이 모델은 정전기 방전의 연구에서 Wilson & Ma 아크방전시 방전극 주위에 방사전자계중 전계를 아테나로 측정함으로서 방전전류를 계산함에 의해 전계강도를 추정하였다.

그림 1은 미소다이폴의 모델 또는 NIST의 모델로 잘 알려져 있다. 이러한 미소 다이폴에 전류  $i$  가 흐를 때 시간  $t$ 에 의존하는 방사전자계는 원주 좌표계에서 각지점의 방사전자계는 다음 (1), (2) 및 (3) 식과 같다. 여기서  $R$ 은 방전원으로부터 관측점 ( $\rho, \varphi, z$ )까지의 거리이며  $R = \sqrt{z^2 + \rho^2}$ 이다.  $u = t - R/c$ 이며,  $c$ 는 광속,  $\epsilon_0$ 는 전공의 유전율을 나타낸다.

$$E_\rho(\rho, z, t) = \frac{i}{2\pi\epsilon_0} \frac{\rho z}{R^2} \left( \frac{3i(u)}{cR} + \frac{1}{c^2R} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right) \quad (1)$$

$$E_z(\rho, z, t) = \frac{i}{2\pi\epsilon_0} \left[ \left( \frac{3z^2}{cR^2} - \frac{1}{cR^2} \right) i(u) + \left( \frac{z^2}{c^2R^3} - \frac{1}{c^2R} \right) \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right] \quad (2)$$

$$H_\varphi(\rho, z, t) = \frac{i}{2\pi} \frac{\rho}{R} \left( \frac{i(u)}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right) \quad (3)$$

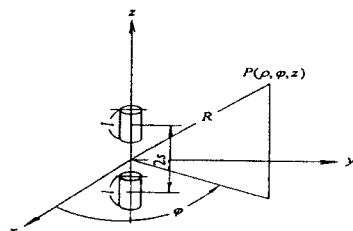


그림 3. 미소 간격 방전의 다이폴 모델

이들 3가지 식으로부터 계산한 방사전자계와 측정한 값의 관계는 거의 일치함을 본 연구자들은 이미 검증 [4]하였다. 위의 이론을 수정보완한다면 실제통에도 적용 가능하다는 판단아래 액체질소중의 방전상태와 방사전자파의 관계를 연구하므로서 절연진단의 기초 토대를 마련할 수 있다고 사료되어 액체질소중의 부분방전시 방사전자파를 측정 분석하는 본 연구를 행하였다.

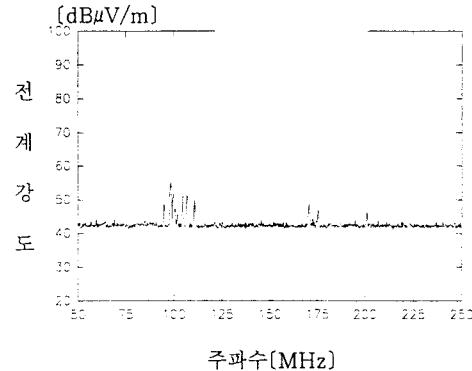


그림 4. 측정환경의 Background Noise

그림 4.는 방사전자파 측정실험 환경에서 background noise를 측정한 그림이다. 노이즈 측정시간은 배이 1:00경이며 방사전자파의 측정법은 Positive peak detecting 방법으로 5분간 데이터를 측정시켰다.

그림 4.을 관찰하면 80~110 MHz 부근은 라디오 방송주파수 대역이며 190 MHz 부근은 텔레비전 방송주파수 대역과 각종 전기·자기기에서 발생되는 것이라 추측된다. 그림에서 그외의 주파수대역의 노이즈는 측정시간(5분)동안 주변환경의 기기에서 switching 동작(on, off)이 발생되지 않으면 전계강도의 값이 45dB를 넘지 않음이 관측되었다.

이러한 점에 착안하여 전압을 서서히 상승시켜 부분방전을 모의 할 때 전계강도가 45dB 이상이 되는 데이터 수가 spectrum analyzer에서 GPIB로 다운 받은 데이터 중에서 몇 개 인자를 관찰하였다.

그리고 주파수대역에 따른 부분방전(Partial Discharge, PD) 신호의 평균전계강도와 최대전계강도를 관찰하였다.

Background noise인 경우 전계강도가 45dB 이상의 데이터가 33개이고 평균전계강도는 42.6dB이고 최대전계강도는 55.2dB이였다.

그림 5.은 대기압하의 액체질소중 부분방전을 모의한 경우 방사전자파의 주파수 스펙트럼 분포이다. 대기압하의 액체질소중에서 완전히 절연파괴가 발생되는 전압은 63.2 kV이고 이 때의 절연파괴전압( $V_B$ )을 100%(63.2 kV)라 할 때 부분방전을 모의하기 위해 절연파괴전압보다 낮은 전압을 일정한 비율로 인가하여 주파수스펙트럼을 관찰한 그림이다.

절연파괴전압의 30%(19kV) 이하의 전압을 인가하면 Background noise와 거의 유사했으며 본 시스템으로 검출이 어려웠다.

그림 5.의 측정결과로부터 대기압하의 액체질소중 불평등 전계에서 정극성 직류전압에 의한 부분방전 발생과 그의 진전과정에 따른 방사전자파의 주파수 스펙트럼 분포를 뚜렷이 알 수 있으며, 주파수 대역이 50~130(MHz) 부근에서 부분방전시 발생하는 PD신호라 생각되는 45dB 이상의 값이 가장 많이 발생됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 분석으로 부분방전의 발생유무와 그의 진전 상황의 분석이 가능할 것으로 사료된다.

즉 부분방전에 가까운 저전압(그림a) 인가의 경우 50~60MHz 주파수 대역에서 부분방전 신호가 주로 관측되고 있으며, 인가전압의 상승과 함께 45dB 이상의 PD 신호가 측정되는 주파수 대역이 넓어지는 경향을 나타내고 있다. 또한, 50~250MHz의 실현 전영역에서 PD 펄스의 수가 뚜렷한 증가를 보이고 있다. 절연파괴전압  $V_B$ 에 가까워질수록 고전계 펄스의 PD 신호의 증가 경향은 현저(그림d)하다. 이는 부분방전에서 절연파괴로의 진전을 의미한다.

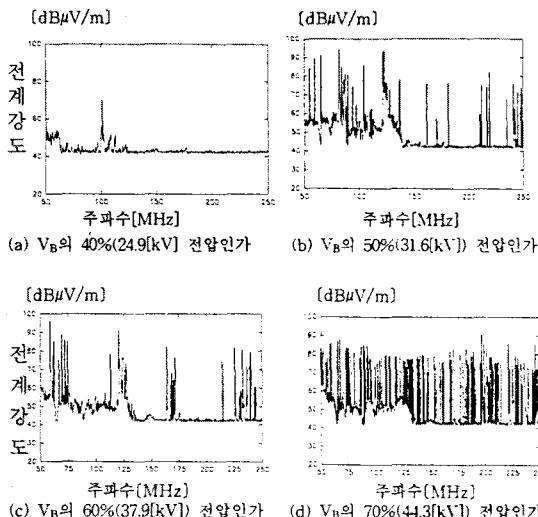


그림 6. 일정전압 인가시 주파수에 따른 방사전자파의 전계강도

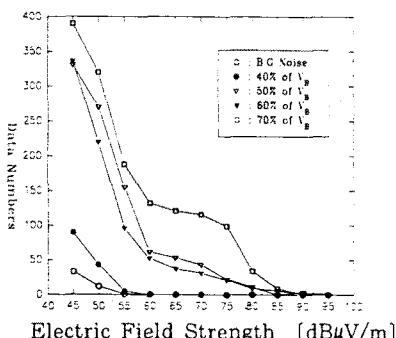


그림 7. 전압인가에 따른 임의 전계강도  
이상의 데이터 수

그림 7은 spectrum analyzer의 데이터중 임의 전계 강도 이상의 데이터 수를 나타낸다. 전압을 증가할수록 부분방전 신호라 생각되는 45dB이상의 데이터 수는 절연파괴전압의 40%전압인가 이후 급격한 증가를 나타낸다. 결론적으로 절연파괴전압의 40%전압 이상을 인가한 경우의 부분방전은 본 시스템으로 검출이 가능함을 확인했다. 최대 전계강도는 전압을 증가할수록 전체적으로 증가하는 경향을 나타낸다.

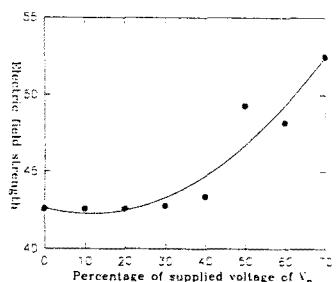
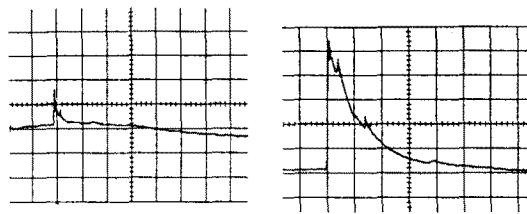


그림 8. 인가되는 전압 비율에 따른 평균전계강도

그림 8은 전압인가에 따른 평균 전계강도를 나타낸 것이다. 전압이 증가함에 따라 절연파괴전압의 40%까지는 일정하거나 미약하게 증가하나 그 이후 전압의 증가에 따라 큰 증가의 경향을 나타낸다.



(a)  $33 \mu\text{A}/\text{div}$ ,  $2 \mu\text{s}/\text{div}$ , (b)  $33 \mu\text{A}/\text{div}$ ,  $0.5 \mu\text{s}/\text{div}$   
인가전압: 20kV 인가전압 : 25 kV

그림 9. 부분방전시 방전전류 파형

그림 9는 부분방전시  $\mu\text{A}$  대의 미약한 방전 전류를 측정하기 위해 Active Probe( Bandwidth : DC~1 [GHz], Input R :  $1 \pm 1\% [\text{M}\Omega]$ , Input C :  $1.8 \pm 0.2 [\text{pF}]$ , Lecroy AP020)를 이용하였다.

실험결과는 20[kV] 미만의 전압을 인가하면 부분방전시 전류파형은 나타나지 않으나 20[kV] 이상을 인가하면 그림 9의 (a) 그림과 같이 미세한 전류펄스가 관측된다.

이러한 결과는 안테나에 의한 부분방전이 검출되는 40%(24.9(kV))의 전압인가의 경우가 Active Probe에 의해 관측되는 부분방전 개시전압 20(kV)와 근접하므로 안테나에 의한 부분방전 발생검출 실험의 타당성을 검증하였다.

### 3. 결 론

액체질소중 침대평판전극에서  $V_B$ 의 값보다 낮은 정극성 전압을 인가해서 부분방전 발생시킨 경우 본 실험의 시스템으로 방사전자파의 주파수스펙트럼을 관찰한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

① 액체질소중 부분방전이 발생될 때 비접촉 센서인 안테나와 spectrum analyzer를 이용하는 본 연구의 시스템으로 부분방전을 검출 할 수 있음을 확인했다.

② 45dB 이상의 데이터수가 Background noise 보다 갑자기 증가하기 시작하는  $V_B$ 의 40% 이상의 전압이 인가될 때 부분방전의 발생을 검출할 수 있고 평균 전계강도도 0.8dB가 증가됨을 알 수 있다.

③ 전압을 증가함에 따라 45dB 이상의 데이터수가 증가하는 경향을 알 수 있다.

④ 부분 방전 발생 초기에는 50~60MHz 대역에서 PD 신호가 관측되며 전압을 증가함에 따라 50~130MHz 부근에서 부분방전의 PD신호가 가장 많이 발생됨을 알 수 있다.

⑤ 주파수에 따른 평균전계강도는 전압증가에 따라 증가하는 경향을 나타낸다.

이러한 결과는 장래 실용화될 초전도·극저온 응용 전기기의 절연진단 및 예측 시스템의 구축에 중요한 기초자료가 되리라고 생각된다.

### 참 고 문 헌

- [1] Matumura et.al., "Method of diagnostic detection by radiated magnetic fields", Tech. Report of IEE Japan, HV83-52, 1983
- [2] G.Bahder, et.al., "Bulk solid dielectric for cryogenic cable", Cryogenics, vol.23, No.95, 1983
- [3] P.F.Wilson and M.T.Ma, "Field radiated by Electrostatic Discharges", IEEE Trans. magnetic Compatibility, vol.33, No.1, pp.10-18, Feb.1991
- [4] 김기재 외 2인, "안테나 법에 의한 미소 간극의 방전 전류파형 추정", 韓國電磁波學會論文集 第 9 卷 第 4 號, pp.499-504, 1998(1)