

컴퓨터 시스템에 의한 大氣壓下에서 액체질소(LN₂)의 放電特性測定

주 재현*, 이 영근, 김 상구, 전영주, 이 광식, 이 동인
영남대학교

Measurement of the discharge characteristics of liquid nitrogen at atmospheric pressure by personal computer system

Jae-Hyun Ju, Yeung-Gun Lee, Sang-Ku Kim, Yeung-Ju Jeon, Kwang-Sik Lee, Dong-In Lee
Yeungnam University

Abstract

This paper describes the discharge characteristics of liquid nitrogen for plane-plane, needle-plane electrode at variation of gap spacing at atmospheric pressure.

The important results obtained from this study are as follows.

① Breakdown voltage of LN₂ for needle-plane electrode is higher than that of for plane-plane electrode and discharge duration time is longer with increase of gap spacing at atmospheric pressure.

② The formation of bubbles by evaporation is observed in spite of non-applying source at atmospheric pressure and the creation of corona confirmed for plane-plane electrode results from the bubbles.

③ The applied voltage-discharge magnitude(V-Q) characteristics of LN₂ showed hysteresis and the discharge magnitude decreasing and corona voltage increasing proportional to the pulse per second at atmospheric pressure.

1. 序 論

증대하는 전기에너지의 수요에 따라 大電力分野에 超傳導 케이블, 超傳導 變壓器, 超傳導 發電機 및 에너지 저장은 물론 火石燃料의 枯渴을 고려하여 核融合發電 등 超傳導應用分野에 대한 관심이 고조되고 있으며 선진국을 중심으로 超傳導 및 極低溫의 應用에 대한 연구 및 설비부자가 증대되고 있다.⁽¹⁾

그러나 국내에서는 연구비의 문제, 실험의 어려움 및 실험장치 구성의 문제 등으로 인하여 이 분야의 연구는 아직 미흡한 상태이다.

이러한 超傳導 및 極低溫應用分野의 研究에는 極低溫冷媒에 대한 電氣的 絶緣破壊에 대한 연구가 필수적이다. 극저온 액체는 냉매로서 뿐만 아니라 절연재료로서도 성능이 우수하며 일반적으로 고체절연재료와 극저온 액체로 구성되는 극저온 기기의 절연성능을 확립하기 위해 극저온 액체의 절연특성 외에도 고체절연재료의 극저온에서의 절연특성 및 저온열화, 복합절연구조시의 열변방전, 부분방전특성의 연구가 중요하다.⁽²⁾ 이러한 극저온상태에서 극저온 액체의 전기적 특성에 관한 연구는 1911년 K. Onnes가 최초로 超傳導현상을 발견한 이래 1967년 K. Mathes 등에 의하여 극저온상태 하의 냉매에 대한 전기적 특성에 관한 연구가 본격적으로 진행되었으며,⁽³⁾ 超傳導體의 應用은 液體 He(LHe) 온도를 염두에 두고 많은 연구를 수행해 왔으나 1986년경 부터 고온 초전도체의 개발이 진전 됨에 따라 초전도를 나타내는 임계온도가 125[K]로 높아지게 되어서 액체He(LHe)보다는 가격이 싸며 고순도를 얻기가 쉬우며 취급이 간편한 액체질소(LN₂)를 냉매로 사용할 가능성이 점차로 높아지고 있다.⁽⁴⁾ 이런 상황에 따라 냉매로서의 액체질소(77[K])에 대한 放電特性的 연구는 큰 진전을 보고 있다.

각종 기기에 사용되는 액체냉매는 장시간 사용하지나 외부로부터의 기계적충격 등으로 인하여 그 기밀성 및 절연성이 떨어지므로 大氣壓狀態로 될 우려성이 있다. 대기압 상태로 되면 액

체냉매가 기화하여 냉매증 기포가 발생되어 그 절연성을 저하게 된다. 따라서 본 연구에서는 大氣壓狀態下에서 정극성 직류 고전압을 인가할 때 액체질소의 절연파괴특성 및 부분방전특성을 컴퓨터 시스템 및 코로나 측정기 등을 이용하여 측정 및 연구하였다.

2. 實驗裝置 및 方法

2.1. 실험장치 및 회로도

본 연구에서는 액체질소의 放電特性을 연구할 목적으로 그림 1과 같은 cryostat를 제작하였다. 제작한 cryostat는 내경:170[mm], 외경:210[mm] 및 내높이:170[mm]의 척도를 가진 cryostat를 나타낸다. cryostat의 재질은 급격한 온도변화에 의한 균열방지를 위해 내열성이 강한 pyrex glass를 사용하였으며, 외부로부터 열침입을 막기 위해 내면은 은(silver)으로 coating되어 있으며, 측면의 전도에 의한 열차폐를 목적으로 한 真空槽이다. 내부의 온도를 측정하기 위하여 크롬-니켈 열전대를 장착하여 -200[°C]까지 측정이 가능한 digital thermometer를 이용하여 고순도 액체질소의 온도(T)변화를 측정하였다.

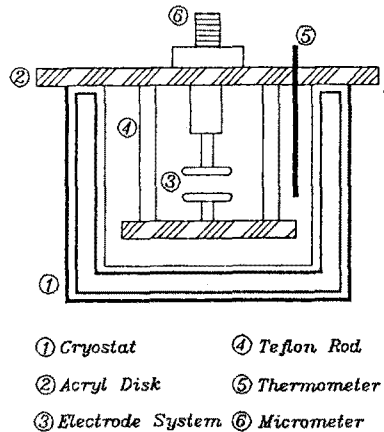


그림 1 저온유지장치

Fig. 1 Schematic diagram of cryostat

그리고 그림 2는 전극계를 나타내는데 전극은 침전극(곡률 반경:0.02[mm], 예각:30도)과 평판전극(직경:40[mm])을 사용하였으며 전극의 재질은 stainless steel을 사용하였으며, 전극간 조절은 전극부 상부에 설치한 micrometer로서 0.01[mm]까지 조절가능한 구조이다.

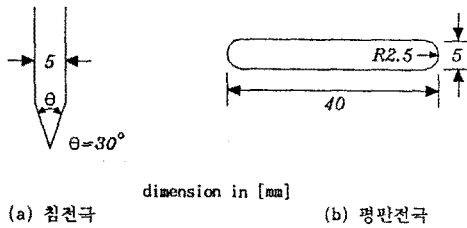


그림 2 전극부 개략도
Fig. 2 Schematic diagram of electrodes

그림 3은 본 실험의 회로도로서 실험에 사용되는 전원으로서 정극성 직류 고전압 발생장치를 사용하고, 회로도에서 R_1 (20 [k Ω])은 전로파괴시 전류제한용 뎀핑저항이고, R_2 는 전류를 측정하기 위한 무유도 저항(35.1 [Q])이다.
neon lamp는 oscilloscope 보호용으로 사용되었으며, 전압-전류 파형 및 절연파괴전압(V_B)을 측정 및 기록하기 위하여 high voltage probe로 분압하여 IEEE488 GP-IB interface card를 이용하여 축적형 오실로스코프, P.C 및 Printer를 사용하여 측정 시스템을 구성하였다. 그리고 부분방전 측정은 인가전압-최대방전전하($V-Q$) 특성이 X-Y recorder에 의하여 자동적으로 기록되는 corona detecting apparatus system(이하 CDAS라고 칭함. PCD-3CF, Pultec Electronics Co., Ltd)을 이용하여 실험을 행하였다.

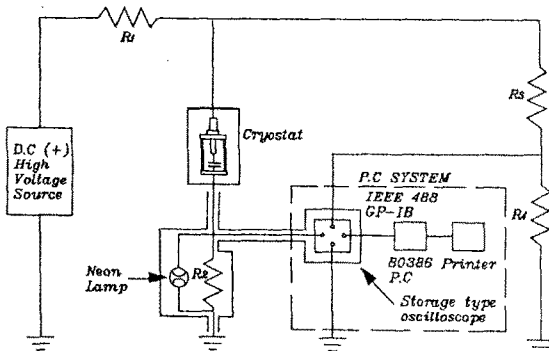


그림 3 실험 회로도
Fig. 3 Experimental circuit

2.2. 실험방법

2.2.1 액체질소의 절연파괴특성

액체질소(LN₂)의 절연파괴특성을 관찰하기 위해 대기압상태에서 평동전계 형성전극인 평판대 평판(P-P)전극과 불평동전계 형성전극인 침대 평판(N-P)전극의 전극간 거리($d=0.5 \sim 2$ [mm])를 변화시키면서 정극성 직류 절연파괴전압(V_B) 및 그때의 전압-전류파형을 축적형 오실로스코프, P.C 및 Printer로 측정 및 그래픽 하였다. V_B 는 정극성 직류 고전압을 3[kV/s]로 상승시켜갈 때 전로파괴가 일어나 전압이 급격하게 저하하기 직전에 축적형 오실로스코프를 이용하여 측정된 전압이며 그 파형을 컴퓨터 시스템을 이용하여 그래픽 하였다. 그 전형적인 파형은 그림 4와 같다.

방전지속전압(V_C)은 절연파괴 이후 3[kV/s]의 동일한 상승속도로 전압을 인가하여 갈 때 정극성 직류 고전압발생기가 자동 차단될 때에 축적형 오실로스코프를 이용하여 측정된 전압이며 그 파형을 전과 같이 컴퓨터 시스템을 이용하여 측정하였다. V_C 는 매 10회 측정시의 최대치, 최소치 및 평균치를 채택하였다.

Scope Status			
· A Time/Div (A.T)	: 2.0 MS	2.0 Ms	
· Volt Cal (V.C)	: CAL	CAL	
· Probe Factor (P.F)	: P10X	P10X	
· Volt/Div (V.D)	: 50.0 V	5.0 V	

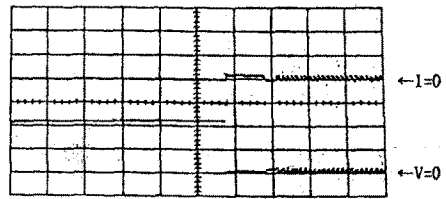


그림 4 V_B 의 측정에 (평판대 평판, $d:1$ [mm])
Fig. 4 Example of V_B measurement (P-P, $d:1$ [mm])

2.2.2 액체질소의 부분방전특성

부분방전특성을 조사하기 위해 평판대 평판전극에 CDAS를 이용하여 코로나 전압(V_C)을 측정하였다. 코로나전압을 측정하는 방법은 전극에 인가전압을 0.1[kV/s] 정도의 속도로 전압을 서서히 높여 부분방전이 발생할 때의 인가전압을 방전개시전압(V_{CO})이라 하고, 전로파괴가 일어나기 직전의 최고전압까지 상승시켰다가 상승속도와 동일한 하강속도로 낮추어 부분방전이 발생하지 않는 전압을 방전소멸전압(V_{CS})으로 하고 이를 측정하였다. 이러한 방법에 의해 V-Q특성을 X-Y recorder를 이용하여 자동기록하였다. 부분방전시험은 방전의 발생빈도를 50, 200, 500[pps]로 조정하면서 행하였으며, 이때의 측정치는 매 5회 측정하여 평균값을 채택하였다. 본 실험과 같이 대기압에서 전극계를 액체질소 내에서 실험하는 경우에는 대기와 액체질소의 온도차로 인하여 발생하는 자연기포의 영향을 최대한 억제하고자 액체질소가 가능한 한 定常狀態(약 3분)가 되기를 기다렸다가 실험을 행하였다.

또한 매회 방전 직후 형성된 기포나 공간전하 등의 영향을 배제하기 위하여 매 방전 후 20초가 경과된 후 digital thermometer를 이용하여 액체질소의 온도변화를 측정한 후 실험을 행하였다.

3. 實驗結果 및 檢討

3.1 極低溫下에서 액체질소의 絶緣破壊特性

그림 5는 대기압상태에서의 자연기포(cryostat내부의 LN₂에 특별히 heater 등을 설치하여 熱을 가하지 않더라도 발생하는 기포를 정함.)가 존재하는 액체질소에 대한 평판대 평판, 침대 평판전극의 절연파괴전압(V_B)과 전극간 거리(d)와의 관계를 나타내고 있는데 이 V_B-d 특성을 식 $V_B = ad^b$ [kV]의 식으로(d : 전극간 거리[mm]) 나타낼 수 있는데 이것은 Hara, Sekine 등이 발표한 식과 같은 형을 취한다.⁽⁵⁾ 여기서 a, b 는 상수로서 표 1과 같다.

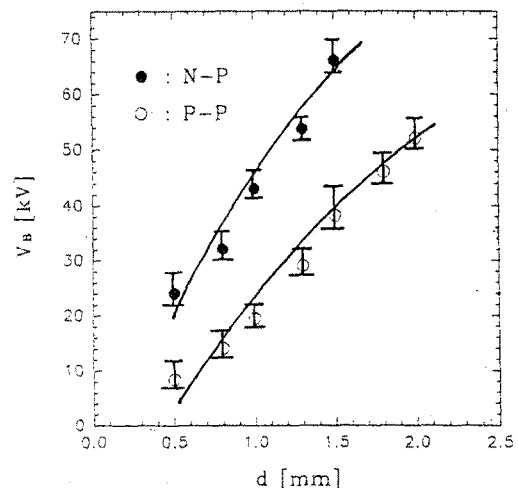


그림 5 대기압下에서 LN₂의 절연파괴특성
Fig. 5 Breakdown characteristics of LN₂ at atmospheric pressure

표 1 상수 α , β
Table 1 Constant α , β

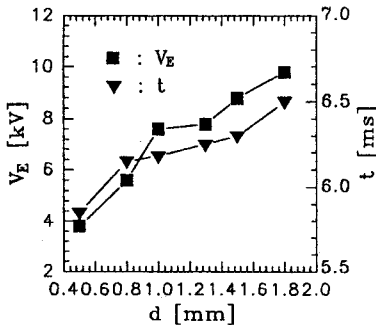
전극형상	상수	α	β
P-P		20.8498	1.3606
N-P		52.5632	1.0416

또한 이 특성으로부터 표 2와 같은 각 d에서 침대 평판전극과 평판대 평판전극의 V_0 를 비교해 보면 침대 평판전극이 평판대 평판전극의 경우보다 평균 28.35[kV] 높은 것으로 나타났다.

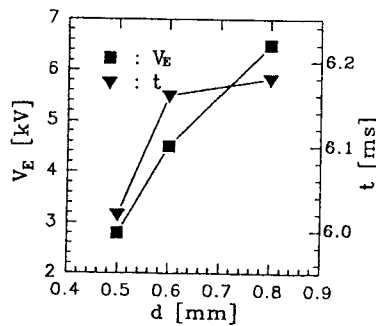
표 2 대기압에서 LN₂의 절연파괴전압
Table 2 Breakdown voltage LN₂ at atmospheric pressure

전극간 거리	0.5[mm]	0.8[mm]	1.0[mm]	1.3[mm]	총평균
P - P	8.6[kV]	14.4[kV]	19.8[kV]	29.8[kV]	
N - P	24.0[kV]	41.5[kV]	53.8[kV]	66.7[kV]	
(N-P)-(P-P)	15.4[kV]	27.1[kV]	34.0[kV]	36.9[kV]	28.35[kV]

그림 5와 같이 대기압상태에서의 LN₂에서는 대기중과는 정반대로 침대 평판전극인 경우가 평판대 평판전극인 경우보다 V_0 가 높게 나타났다. 즉 본 실험은 대기압상태에서 행하였으므로 전압을 인가하지 않은 상태에서도 LN₂는 비등점(77K)이 낮기 때문에 자연기포가 발생한다. 이들 기포가 평판대 평판전극인 경우 침대 평판전극인 경우보다 전극하부에 존재할 확률이 큰 결과 평판대 평판전극인 경우가 침대 평판전극의 경우보다 V_0 가 낮게 나타난다.⁽⁶⁾ 이렇게 P-P전극인 경우가 N-P전극인 경우보다 전극내에 정체기포가 존재할 확률이 큰 이유는 그림 8로 부터 설명되어 진다. 이 관계는 그림 8에서 구체적으로 설명하기로 하며, P-P전극에서도 코로나가 발생하는데 그 특성을 그림 7에 나타내었다. 또한 LN₂의 기포가 고체 유전체중에 보이드가 존재시의 방전기구와 같이 먼저 자연기포중의 취약기포에서 corona가 일어나고 이 corona에 의하여 새로운 기포가 형성되어 기포의 두께가 증진된 결과 전극내에서 기포의 크기가 증대되어 결국 金路破壞로 진전하는 것으로 사료된다.⁽⁷⁾ 그리고 그림 6은 실험장치 및 방법에서 기술한 바와 같이 컴퓨터 시스템을 이용하여 평판대 평판 및 침대 평판 전극의 전극간 거리에 따라서 측정된 전압-전류 파형으로부터 관측한 방전지속전압(V_E)과 방전지속시간(t)을 나타내는데 d가 커질 수록 평판대 평판 및 침대 평판전극에서의 V_E 가 커지며 t도 길어짐을 알 수가 있다.



(a) 평판대 평판전극



(b) 침대 평판전극

그림 6에 따른 V_E , t의 관계

Fig. 6 Relation of V_E , t by increasing d

3.2 極低溫下의 액체질소의 부분방전특성

평판대 평판전극에서도 corona가 발생되는가를 알아보기 위하여 전압을 상승시켜 갈 때 인가전압-최대방전전하(V-Q)특성이 자동적으로 기록되는 CDAS를 이용하여 측정된 전형적인 예가 그림 7이다.

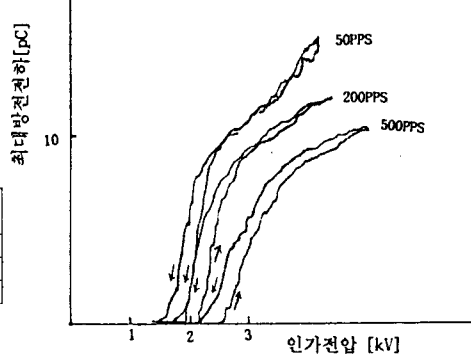


그림 7 평판대 평판전극에서 LN₂의 V-Q특성
Fig. 7 V-Q characteristics of LN₂ in P-P electrode

전극계에서 기포의 운동에 관한 주된 힘은 浮力과 gradient力이며, 전극축이 중력방향과 일치하는 경우의 기포의 거동을 고찰하면 축주변 이외에는 이 두개의 힘의 합성력은 기포를 전극계에서 밀리하려는 방향으로 작용하며 축 근처에서는 전극 중앙부 어느 곳에서 이 두 힘이 일치함으로써 기포가 전극사이에 정체되어 기포의 크기가 증대된다. 이 기포에서 corona가 생성되고, 전압을 더욱 상승시키면 결국에는 절연파괴가 일어난다.

4. 結 論

대기압에서 액체질소에 정극성 직류 고전압을 인가할 때, 평판대 평판전극 및 침대 평판전극의 전극간 거리(d=0.5~2[mm])를 변화시켰을 때의 방전특성과 평판대 평판전극에 CDAS를 이용하여 부분방전특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 대기압에서의 액체질소에서는 氣中과는 반대로 침대 평판전극이 평판대 평판전극 보다 절연파괴전압이 높게 나타났다.
- ② 평판대 평판, 침대 평판전극에서 전극간 거리가 증가할 수록 방전지속시간이 길어진다.
- ③ 본 연구의 실험조건인 대기압에서의 액체질소는 전원을 인가하지 않아도 기화로 인한 기포(自然氣泡)가 발생하는 것을 확인하였다. 이 기포가 원인이 되어 평판대 평판전극에서도 코로나가 형성되는 것을 확인하였다.
- ④ 본 연구의 전극형상은 浮力과 Gradient력이 전극내에 정체하는 기포를 만드는 데 관건이 되며 평판대 평판전극이 침대 평판전극 보다 이 정체기포의 형성이 용이하므로 절연파괴전압이 낮아진다.
- ⑤ 대기압에서의 액체질소에서 인가전압-최대방전전하 특성은 hysteresis 이력현상이 나타났으며 펄스발생빈도가 클 수록 방전 전하량은 저하하였으며 코로나전압은 증가하였다.

參考文獻

- 1) 電氣學會超傳導マグネット調査専門委員會：“超傳導電力機器의開發動向”，電氣學會技術報告(II部)，第192戶(昭60-7)
- 2) K.Yoshino：“Electrical and Mechanical Properties of Highly Elongated High Density Polyethylene as Cryogenic Insulation Materials”，T.IEE Japan, Vol.109-A, No.3, [1989]
- 3) K.N. Mathes：“Dielectric properties of Cryogenic liquid”，IEEE Trans, Electrical Insulation EI-2, No.24, [1967]
- 4) 松本, 河野：“極低溫高密度窒素gasの交流およびimpulse flash-over電壓特性”，電氣學會論文誌, 102-B, No.12 (昭和57)
- 5) 坂本英二：“液體窒素の絶緣破壞電壓に及ぼす電極配置の影響”，平成5年電氣學會全國大會, pp.2~37, [1993]
- 6) M.Hara, K.Saita：“Analysis of bubble behavior in cryogenic liquids under non-uniform electric fields”，電學論A, 113卷, 4號, (平成5年)
- 7) 花岡, 石橋：“液體窒素中の氣泡發生と絶緣破壞電壓”，DEI-91-69, pp.11~17, [1991]