

大氣壓下에서 액체질소(LN₂)의 放電特性에 關한 연구

A study on the discharge characteristics of liquid nitrogen at atmospheric pressure

이 영근, 주 재현*, 김 상구, 이 광식, 이 동인

(嶺南大學校)

Yeung-Geun Lee, Jae-Hyun Ju*, Sang-Ku Kim, Kwang-Sik Lee, Dong-In Lee

(Yeung Nam University)

Abstract

This paper shows the discharge characteristics of liquid nitrogen under plane to plane electrode, needle to plane electrode, inserting teflon insulator in plane to plane electrode at atmospheric pressure.

The main experimental device of this paper is cryostat. The important results obtained from this study are as follows.

① Breakdown voltage of LN₂ under N-P electrode is higher than that of under P-P electrode at atmospheric pressure.

② Breakdown duration time is longer with increase of electrode gap under the P-P, N-P electrodes.

③ The formation of bubbles by evaporation is observed in spite of non-applying source at atmospheric pressure and the creation of corona confirmed.

④ Breakdown voltage and breakdown duration time are in proportion to increase of diameter in case of inserting teflon insulator.

⑤ Partial discharge characteristics of thickness 0.5[mm] is that corona character of teflon insulator rose with increase of diameter in each [pps].

1. 序 論

증대하는 전기에너지의 수요에 따라 大電力分野에 超傳導cable, 超傳導 變壓器, 超傳導 發電機 및 에너지 저장은 물론 火石燃料의 枯竭을 고려하여 核融合發電 超傳導應用分野에 대한 관심이 고조되고 있다.

이러한 超傳導應用分野의 연구에는 極低溫의 냉매에 대한 電氣的 絕緣破壞에 대한 연구가 필수적임은 주지의 사실이다. 1911년 K.Onnes가 최초로 超傳導현상을 발견한이래 1967년 K.N.Mathes 등에 의하여 극저온상태 하의 냉매에 대한 전기적 특성에 관한 연구가 본격적으로 진행되었으며⁽¹⁾, 超傳導體의 應用은 液體He 온도를 얻두에 두고 많은 연구를 수행해 왔으나 1986년경 부터

고온 초전도체의 개발이 진전되어 초전도를 나타내는 임계온도가 125[K]로 높아지게 되었다.

액체He(LHe)에 비교하여 액체질소(LN₂)에 의한 냉각은 용이하며 냉각비용도 낮다⁽²⁾. 이런 상황에 따라 냉매로서의 액체질소(77[K])에 대한 放電特性的 연구는 큰 진전을 보고 있다. 각종 기기에 사용되는 액체냉매는 장시간 사용하거나 외부로 부터 기계적충격 등으로 인하여 그 기밀성 및 절연성이 떨어지므로 大氣壓狀態로 될 우려성이 있다. 대기압 상태로 되면 액체냉매가 기화하여 냉매중 기포가 발생되어 그 절연성을 저하게 된다. 따라서 본 연구에서는 大氣壓狀態下에서 정(+)극성 직류 고전압을 인가할 때 액체질소의 절연파괴 특성 및 부분방전특성을 조사하였으며, 초전도코일의 전기절연은 일반적으로 지지체로써 spacer와 같은 고체 절연물과 냉매의 복합유전체로 구성되어 있는데 이때의 spacer표면에서 발생하는 연면방전이 절연능력의 저하에 큰 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다.

이러한 관점에서 냉매로서 액체질소(LN₂)를 이용하여 전극사이에 板型 teflon을 삽입하였을 때의 절연파괴기구를 연구 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 회로도

본 연구에서는 액체질소의 放電特性을 연구할 목적으로 그림 2.1과 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, 빛에 의한 열침입을 막기위해 내면은 은(silver)으로 coating되어 있으며 측면의 전도에 의한 열차폐를 목적으로 한 眞空槽이다. 내부의 온도를 정확하게 측정하기 위하여 크롬-니켈 열전대를 장착하여 -200[℃]까지 측정이 가능한 digital thermometer를 이용하여 고순도 액체질소의 온도변화를 측정하였다.

그리고 그림 2.2는 전극계를 나타내는데 전극은 침전극(곡률반경:0.02[mm], 예각:30도)과 평판전극(직경:40[mm])을 사용하였으며 전극의 재질은 stainless steel을 사용하였으며, 전극간 조절은 전극부 상부에 설치한

3. 실험결과 및 검토

3.1 極低溫下에서 액체질소의 絶緣破壊特性 및 部分放電特性

3.1.1 P-P전극과 N-P전극의 절연파괴 특성

그림 3.1은 大氣壓狀態下의 P-P, N-P전극의 극저온 하에서 LN₂의 절연파괴전압을 나타내고 있다.

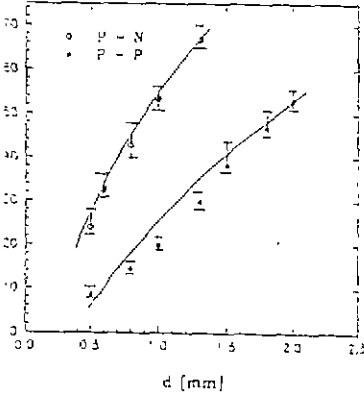


그림 3.1 大氣壓下에서 LN₂의 절연파괴특성
Fig. 3.1 Breakdown characteristics of LN₂ at atmospheric pressure

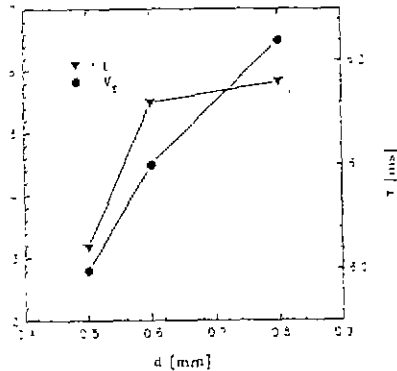


그림 3.2 d에 따른 P-P전극의 V_b, t의 관계
Fig. 3.2 Relation of V_b, t by increasing d (P-P electrode)

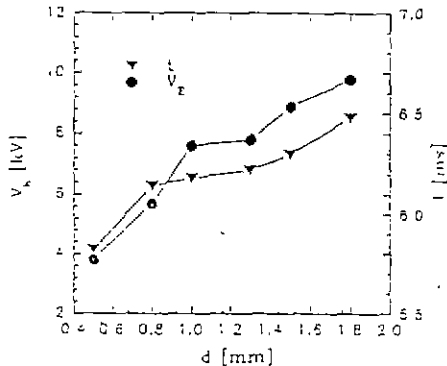


그림 3.3 d에 따른 N-P전극의 V_b, t의 관계
Fig. 3.3 Relation of V_b, t by increasing d (N-P electrode)

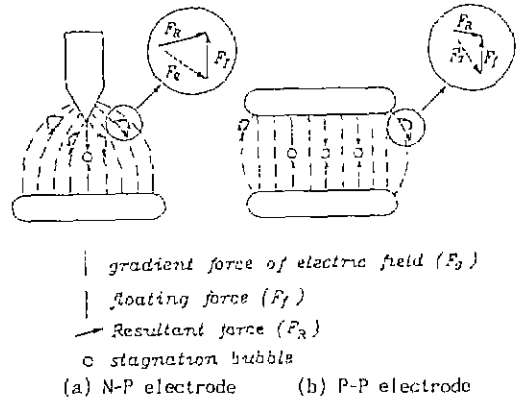


그림 3.4 기포거동의 개념도
Fig. 3.4 Concept of bubble behavior in N-P, P-P electrodes

대기압 하의 자연기포(cryostat내부의 LN₂에 특별히 heater 등을 설치하여 熱을 가하지 않더라도 발생하는 기포를 칭함)가 존재하는 LN₂의 절연파괴전압(V_b)과 전극간 거리(d)와의 관계가 그림 3.1의 같다.

이 V_b-d 특성을 식 V_b=Ad^B [kV]의 식으로(단, d[mm]: 전극간 거리) 나타낼 수있는데 이것은 Hara, Sekine 등이 발표한 식과 같은 형을 취한다^[3]. 여기서 A, B는 상수로서 표3.1와 같다.

표 3.1 상수 A, B
Table 3.1 Constant A, B

상수	A	B
전극모양		
P-P	20.8498	1.3606
N-P	52.5632	1.0416

이 식의 오차는 1[%]로서 공학적으로 가치있는 식으로 사료된다.

또한 이 특성으로 부터 표 3.2와 같은 각 d에서 N-P전극과 P-P전극의 V_b를 비교해 보면 N-P전극이 P-P전극의 경우보다 평균 28.35[kV] 높은 것으로 나타났다.

표 3.2 大氣壓下에서 LN₂의 절연파괴전압
Table 3.2 Breakdown voltage LN₂ at atmospheric pressure

전극	d	0.5	0.8	1	1.3	총평균
P - P		8.6	14.4	19.8	29.8	
N - P		24	41.5	53.8	66.7	
(N-P)-(P-P)		15.4	27.1	34	36.9	28.35

그림 3.1과 같이 大氣壓狀態下의 LN₂에서는 大氣中과 는 정반대로 N-P전극인 경우가 P-P전극인 경우보다 V_b

micrometer로서 0.01[mm]까지 조절가능한 구조이다.

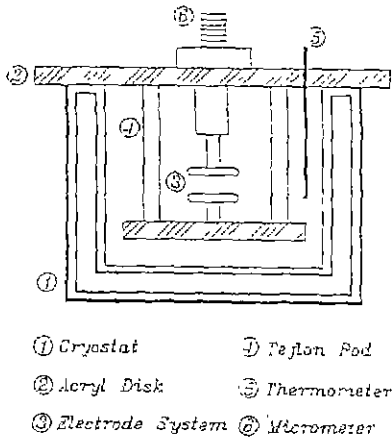


그림 2.1 지온유지장치와 전극
Fig. 2.1 Cryostat and electrode

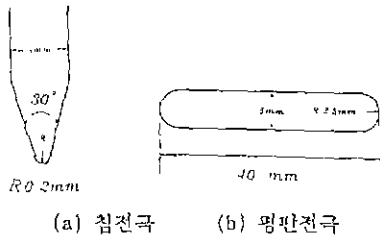


그림 2.2 전극부 개략도

Fig. 2.2 Schematic diagram of electrodes

그림 2.3은 본 실험의 회로도로서 실험에 사용되는 전원으로서 정극성 직류 고전압 발생장치를 사용하고, 회로도에서 $R_1(20[k\Omega])$ 은 전로파괴시 전류제한용 덤핑저항이고, R_2 는 전류를 측정하기위한 무유도저항(35.1[Ω])이다. neon lamp는 oscilloscope보호용으로 사용되었으며 전압-전류 파형 및 절연파괴전압(V_b) 측정 및 기록하기위하여 high voltage probe로 분압하여 P.C 및 Printer를 이용하였다.

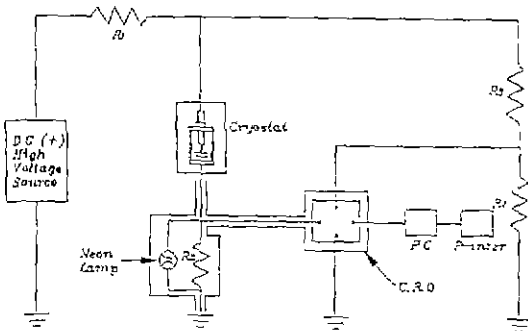


그림 2.3 실험 회로도

Fig. 2.3 Experimental circuit

그리고 부분방전 측정은 corona detecting apparatus system(이하 CDAS라고 칭함)을 이용하여 최대방전전하-인가전압(Q-V)을 측정하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1 액체질소의 절연파괴 특성

액체질소(LN₂)의 절연파괴특성을 관찰하기 위해 大氣 壓狀態에서 ① 평등전계 형성전극인 평판대 평판(P-P) 전극과 불평등전계 형성전극인 침대 평판(N-P)전극의 전극간 거리(d)를 변화(0.5~2[mm])시키면서 정극성 직류 절연파괴전압(V_b) 및 그때의 전압, 전류파형을 측정형 O.S.C, P.C 및 Printer로 측정 및 그래픽하였다.

② 평판대평판 전극에 삽입한 고체절연물(teflon)의 두께(T)가 0.5, 1[mm]일 때, 각각 고체절연물의 직경(D)을 21~60[mm]로 변화시키면서 ①과 같은 방법으로 실험을 행하였다. 이 경우 micrometer로 teflon의 두께와 같도록 평판의 d를 각각 0.5, 1[mm]로 고정된 후 teflon을 삽입하여 실험을 행하였다.

V_b 는 정극성 직류고전압을 3[kV/s]로 상승시켜갈 때 전로파괴가 일어나 전압이 급격하게 저하하기 直前에 측정형 O.S.C를 이용하여 측정된 전압이며 그 파형을 P.C와 Printer로 출력하였다. 그 전형적인 파형은 그림 2.4과 같다. 방전지속전압(V_c)은 절연파괴 이후 3[kV/s]의 동일한 상승속도로 전압을 인가하여 갈때 정극성 직류 고전압발생기가 자동차단될 때에 측정형 O.S.C를 이용하여 측정된 전압이며 그 파형을 P.C와 Printer로 출력하였다.

V_b 는 每 10회 측정시의 최대치, 최소치 및 평균치를 채택하였다.

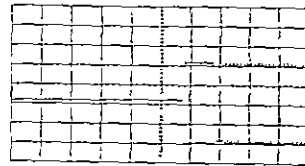


그림 2.4 V_b 의 측정에 (P-P, d:2[mm])

Fig. 2.4 Example of V_b measurement (P-P, d:2[mm])

2.2.2 부분방전특성

부분방전특성을 조사하기 위해 P-P전극에 삽입한 teflon의 두께(T)가 0.5[mm]일 때, D를 21~46[mm]로 변화시키면서 CDAS를 이용하여 코로나 전압(V_c)을 측정하였다. V_c 를 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 상승속도가 동일한 하강속도로 낮추어 부분방전이 발생하지 않는 전압을 방전소멸전압(V_{cs})이라 한다.

이러한 조작에 의해 V-Q특성을 X-Y recorder를 이용하여 자동기록하였다. 부분방전시험은 각 D에서 방전의 발생빈도를 50, 200[pps]로 조정하면서 행하였으며, 이때의 측정치는 每 5회 측정하여 평균값을 채택하였다. 본 실험과 같이 대기압 하에서 전극계를 액체질소에 함침시키는 경우는 대기중과 액체질소의 온도차로 인하여 발생하는 자연기포의 영향을 최대한 억제하고자 액체질소가 가능한 한 定常狀態가 되기(약 3분)를 기다렸다가 실험을 행하였다.

가 높게 나타났다. 즉 본 실험은 大氣壓狀態下에서 행하였으므로 전압을 인가하지 않은 상태에서도 액체의 낮은 잠열에 의해 自然氣泡가 발생한다. 이들 기포가 P-P 전극인 경우가 N-P 전극인 경우보다 전극하부에 존재할 확률이 높기때문에 P-P 전극인 경우가 N-P 전극의 경우보다 V_B 가 낮게 나타난다⁽⁴⁾. 또한 기포가 고체 유전체중에 보이드가 존재시의 특성과 유사한 특성이 형성되게 되는데 먼저 자연기포중의 취약기포에서 corona가 일어나고 이 corona에 의하여 새로운 기포가 형성되어 기포의 누적이 중첩된 결과 전극내에서 기포의 크기가 증대되어 결국 全路破壞로 전전하는 것으로 사료된다⁽⁵⁾.

그리고 그림 3.2와 3.3은 d 에 따른 V_B , t 의 관계를 나타내는데 d 가 커질 수록 V_B 및 t 가 증대하는 것으로 나타났다.

3.1.2 극저온 하의 액체질소의 부분방전 특성

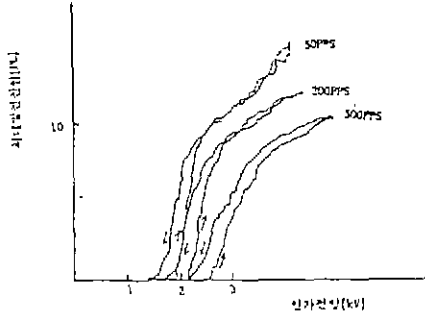


그림 3.5 P-P전극에서 LN₂의 V-Q 특성
Fig. 3.5 V-Q characteristics of LN₂ in P-P electrode

P-P전극에서도 corona가 발생되는가를 알아보기 위하여 자동적으로 최대방전전하-인가전압(Q-V)특성이 기록되는 CDAS를 이용하여 측정된 것이 그림 3.5이다. P-P 전극인 경우이지만 LN₂내의 자연기포로 인하여 corona가 발생하고 일반 고체유전체와 같이 [pps]가 높을수록 corona전압이 높고 hysteresis 이력현상이 일어난다. 결국 P-P전극에서 corona가 일어난다는 것은 고체유전체에서 void로 인하여 먼저 코로나가 발생하고 나아가 전로파괴가 일어나는 것과 같이 액체질소중 P-P전극에서도 자연기포때문에 corona가 발생하고 이 코로나로 인하여 더욱 기포가 증식된다. 이에 관한 구체적인 설명은 그림 3.4이다.

그림 3.4를 보면 기포의 운동에 관한 주된 힘은 浮力와 gradient力이며, 전극축이 중력방향과 일치하는 경우의 기포의 운동을 고찰하면 축주변 이외에는 이 두개의 힘의 합성력은 기포를 전극계에서 멀리하려는 방향으로 작용하며 축 근처에서는 P-P전극 중앙부 어느 곳에서 이 두 힘이 일치함으로써 기포가 전극사이에 정체가 되어 기포의 크기가 증대된 결과 이 기포에서 corona가 생성되고 그 결과 전압을 더욱 상승시키면 결국에는 절연파괴가 일어난다. 그러나 N-P전극에서는 축근처에서 일치하는 두힘이 전극사이에 정체하여 기포의 크기가 증대되는 확률이 P-P전극보다 상대적으로 적으므로 기포에 의한 절연파괴전압이 P-P전극의 경우보다 높게 나타난다. 결국 대기압 하의 P-P전극에서 LN₂의 절연파괴 특성은 自然氣泡로 인해 코로나가 발생하며 이 자연기

포와 코로나발생으로 인한 기포가 서로 어울려져 P-P전극내에서 기포의 크기가 증대되어 결국 전로파괴로 전전된다. 그러나 N-P전극은 기포가 전극사이에 정체하여 기포의 크기가 증대되는 확률이 P-P보다 작으므로 V_B 가 높다⁽⁴⁾. 이 결과로 부터 우리는 고체 절연물 중의 보이드가 존재할 때 코로나가 발생하는 것의 유사하게 액체 질소 중에서도 자연 기포가 존재하므로 P-P전극 축 주변전계 형성전극을 사용할 때도 N-P전극인 경우와 함께 이 자연 기포가 원인이 되어 corona가 발생한다고 판단된다.

3.2 teflon삽입시의 放電特性

3.2.1 teflon을 평판대평판 전극에 挿入時的 절연파괴특성

그림 3.6은 P-P전극에 두께가 0.5, 1[mm]인 teflon을 삽입한 경우의 절연파괴전압(V_B)특성을 나타낸 것이다.

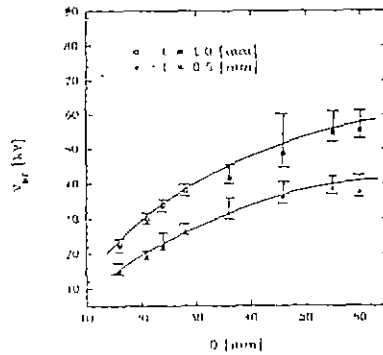


그림 3.6 teflon 삽입시 D에 따른 V_B -D 특성 (T=0.5, 1[mm])

Fig. 3.6 V_B -D characteristics of inserting teflon insulator (T=0.5, 1[mm])

그림 3.6에서 D가 증가할수록 V_B 가 상승하다가 포화하는 경향을 나타낸다. teflon의 직경이 16~36[mm]일 때(D가 평판전극보다 작은 경우) D가 증가할수록 V_B 가 상승하는 것을 알 수 있으며⁽⁶⁾ 일반적으로 평행평판 전극에 teflon을 삽입하면 D가 증가할수록 V_B 가 저하하는 것으로 알려져 있으나, 본 실험과 같이 평행평판 전극간의 d 가 대단히 짧은 경우에는 전계의 평등성이 유지되어 teflon의 연면방전에 의한 것보다는 액체질소중에서의 파괴가 선행하여 D가 클수록 평판전극내의 기포가 차지하는 확률이 저하하게된 결과 절연파괴전압의 상승을 초래하는 것으로 사료된다. 그리고 teflon의 직경이 46~60[mm]일 때(D가 평판전극 보다 큰 경우) D가 증가할 수록 V_B 가 거의 포화하는 경향을 나타내며 평판전극 부근에서 관중현상이 나타났다.

그림3.7은 그림 3.6의 축척형 0.S.C를 이용하여 측정 한 전압파형을 teflon의 D에 따른 V_B , t 의 관계로 나타내었다.

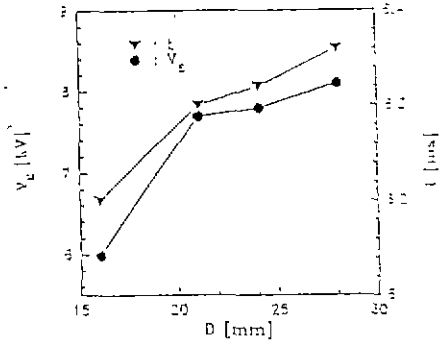
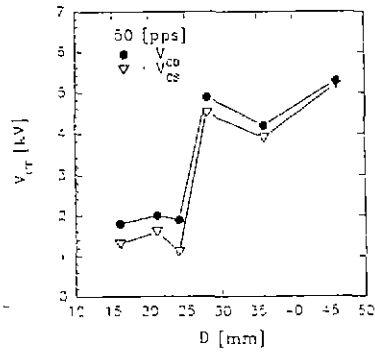


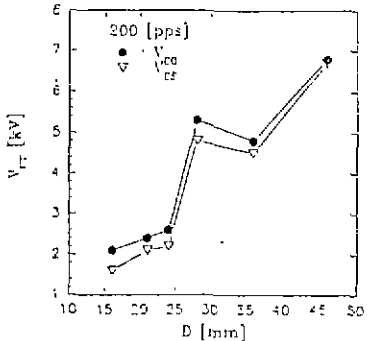
그림 3.7 D에 따른 V_c, t 관계 (T=0.5[mm])
Fig. 3.7 Relation of V_c, t by increasing diameter (T=0.5[mm])

3.2.2 극저온하에서 板狀 teflon 삽입시의 부분방전특성

그림 3.8은 teflon 두께가 0.5[mm]인 경우 방전발생 빈도가 50, 200[pps]에서의 코로나전압(V_{cr})특성을 나타낸 것이다.



a) 50[pps]일 때



b) 200[pps]일 때

그림 3.8 D에 따른 V_{cr} (T=0.5[mm])

Fig. 3.8 Relations of D and V_{cr} (T=0.5[mm])

그림 3.6과 같이 D가 커질수록 corona 전압이 높다. 이 특성은 CDAS를 이용하여 측정하였는데 각 [pps]

마다 V_{co}보다 V_{cr}가 낮게 나타났는데 이것은 전술한 LN₂의 코로나특성과 같이 hysteresis 이력현상이 발생하였으며 [pps]가 커질수록 V_{cr}가 높게 관측되었다.

이렇게 D가 증가할수록 V_{cr}가 증가하는 것은 D가 증가할수록 V_{cr}가 증가하는 기구와 같이 설명된다. 즉 D가 증가할수록 P-P전극내의 기포의 존재영역이 감소하기 때문이다.

4. 결 론

대기압상태에서 LN₂에 정극성 직류 고전압을 인가할 때, d를 변화시키 가면서 P-P전극, N-P전극에서의 절연 파괴특성과 CDAS를 이용하여 부분방전특성을 해석하였으며, 또한 평판대 평판전극에 고체절연체(teflon)를 삽입시 시료의 직경(D)을 변화시켜갈 때의 절연파괴특성과 부분방전특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 대기압상태하의 LN₂에서는 氣中과는 반대로 평판대 침(N-P)전극이 평판대 평판(P-P)전극 보다 V_{cr}가 높게 나타났다.

② P-P, N-P전극에서 전극간 거리(d)가 증가할수록 절연파괴지속시간(t)이 길어진다.

③ 본 연구의 실험조건인 대기압상태하의 LN₂는 전원을 인가하지 않아도 기포로 인한 기포(自然氣泡)가 발생하는 것을 확인하였다. 이 기포가 원인이 되어 평판대 평판전극에서도 코로나가 형성되는 것을 확인하였다.

④ teflon을 삽입하였을 때 teflon의 직경(D)의 증가에 따라 V_{cr}가 상승하였으며 t도 증가하였다.

⑤ 삽입 teflon의 직경이 평판전극의 직경정도 이상(46[mm])일 때 관통현상이 일어났다.

⑥ 평판대 평판 전극에 teflon을 삽입한 경우의 부분방전 특성은 teflon의 두께가 0.5[mm]일 때 각 [pps]에서 D가 커질수록 코로나전압(V_{cr})이 높게 나타났다.

⑦ 본 연구의 전극형상에는 浮力와 Gradient력이 전극내에 정체하는 기포를 만드는 데 관건이 되며 P-P전극이 N-P전극 보다 이 정체기포의 형성이 용이하므로 절연파괴전압이 낮아진다.

⑧ 대기압상태하의 LN₂에서 V-Q특성은 hysteresis 이력현상이 나타났다.

⑨ 대기압상태하의 LN₂에서 V-Q특성은 펄스발생빈도가 클수록 방전전하량(Q)는 저하하였다.

⑩ 대기압상태하의 LN₂에서 V-Q특성은 펄스발생빈도가 클수록 코로나전압은 증가하였다.

參考文獻

1. K. N. Mathes: "Dielectric properties of cryogenic liquid", IEEE Trans, Electrical Insulation EI-2, No. 24, 1967
2. 松本, 河野: "極低溫高密度窒素gasの交流およびimpulse flashover電壓特性", 電氣學會論文集, 102-B, No. 12 (昭和57)
3. 坂本英二: "液體窒素の絶緣破壊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
4. 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
5. 花岡, 石橋: "液體窒素中の氣泡發生と絶緣破壊電壓", DEI-91-69, pp. 11-17, 1991
6. 古川, 小崎: "液體窒素中における薄いspacerを介した破壊電壓に關する基礎實驗", 平成5年電氣學會全國大會