

## 액체질소의 절연파괴특성

## Characteristics of Dielectric Breakdown in Liquid Nitrogen

秋 榮 培\*·柳 旻 佑\*·柳 康 植\*\*·金 相 賢§

(Young-Bae Choo, Kyung-Woo Ryu, Kang-Sik Ryu, Sang-Hyun Kim)

## 요 약

극저온 및 초전도현상을 응용하는 전기기기의 개발에 있어 그 기기의 신뢰성이나 장시간 수명등을 확보하기 위해서는 극저온에서의 절연성능이 확립되어야 하는데 냉각매체로 사용되는 극저온액체를 전기적 절연재로서도 이용한다는 것은 설계상 혹은 경제적인 이유로 매우 바람직하다. 본 연구에서는 액체질소에 대하여 방형파펄스전압에 의한 절연파괴의 압력특성 및 그 시간지연특성 그리고 전극간의 거리에 대한 특성 등을 조사하고 그 결과를 검토하였다.

**Abstract**-During the past few years, a great deal of attention has been directed to the application of superconductivity to the electrical systems such as superconducting power transmission lines, superconducting magnet energy storage and so on. Yet in order to develop the practical model of these electrical equipments utilizing superconductivity and other phenomena at cryogenic temperature, it is necessary to know the dielectric behaviour of insulating materials at cryogenic temperature in view of reliability, safety and economy of these machines. Investigation of dielectric properties of cryogenic liquids is very important due to the dual role of those as the dielectric and cooling medium.

In this study, we investigated results measured over several kinds of dielectric characteristics of liquid nitrogen taking into consideration for application of high Tc superconductor. Dependence of breakdown voltage on gap width, polarity and pressure is reported in this paper and time delay characteristics of breakdown is also the subject of this discussion.

## 1. 서 론

최근 고온초전도체의 출현과 함께 초전도응용에 보다 많은 관심이 집중되고 있지만 실제로 초전도 현상을 응용하는 기기의 개발을 위해서는 기기의 신뢰성이나 안정성 그리고 장시간수명등을 보장할

수 있는 극저온에서의 절연성능이 확립되어야 한다.

극저온액체를 냉매로서뿐 아니라 절연재로도 이용한다는 것은 설계상으로는 경제성에 입각하여 매우 바람직할 뿐 아니라 사실상 극저온기기의 절연 방식에서도 고체절연재료를 냉매에 함침시키는 방법이 가장 유력시 됨으로서 액체헬륨(4.2°K)이나 액체질소(77°K)와 같은 극저온액체의 전기전도 혹은 절연파괴특성에 대한 연구는 초전도케이블을 비롯한 각종 극저온기기의 개발에 매우 중요한 의미를 갖는다.

\*正 會 員 : 韓國電氣研究所 研究員

\*\*正 會 員 : 韓國電氣研究所 先任研究員·工博

§正 會 員 : 韓國電氣研究所 責任研究員·工博

接受日字 : 1988年 3月 9日

1次修正 : 1888年 10月 30日

극저온액체는 그 분자구조가 아주 단순하기 때문에 이론적인 해석이 용이하다는 관점에서 물리적인 흥미와 함께 보다 순수한 조건하에서 실험할 수 있는 하나의 모델물질로서 그 전기적특성에 관한 연구가 주로 저온물리학자들에 의해서 시도된적이 있지만<sup>1-3</sup> 그 전기적응용을 염두에 둔 본격적인 연구는 Mathes의<sup>4)</sup> 논문(1967)이 효시라고 볼 수 있으므로 일반 유기절연액체에 비하여 아직 그 역사가 짧다.

그후 Gerhold에 의한 저온액체의 유전특성 및 파괴기구에 관한 물리적 해석<sup>5</sup> 등 극저온액체의 일반론에 대한 연구가 시도되어 왔고 각각의 액체에 대해서는 현재까지 실용화된 초전도선재의 냉매가 임계온도상 액체헬륨이라는 사실에서 주로 액체헬륨의 절연특성과 그 파괴기구에 대한 연구결과가 일부분을 중심으로 상당히 많이 보고된 바<sup>6-8</sup> 있지만 아직까지도 파괴근처에서의 고전계 전기전도 혹은 절연파괴로 진전하는 기구를 물성론적인 견지에서 고찰한 기초적연구는 부족한 실정이다.

본논문에서는 극저온저항케이블의 냉매로서뿐 아니라 최근의 고온초전도체의 개발에 따라 그 냉매로서도 사용될 가능성이 높아진 액체질소에 대하여 방형파펄스 전압을 인가한 경우의 절연파괴 압력 특성 및 절연파괴시간지연특성 그리고 전극간의 거리에 대한 특성을 조사하고 그 실험 결과를 검토하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 본실험에 사용한 실험장치의 개략도이며 액체의 압력에 대한 절연파괴특성의 조사에는 그림 2와 같은 별도의 압력조를 이용하였다. 그림 1에서의 실험조는 측면에 진공층을 둔 일종의 대형 보온 진공병 2개를 겹친 것으로서, 내·외조사이에는 사전냉각 및 열안정용 액체가 그리고 내조에는 시료용의 액체가 각각 담겨지게 된다. 재질은 내·외의 온도 구배에 따른 균열의 방지를 위하여 내열성이 강한 pyrex 유리를 사용하였으며 빛에 의한 열침입을 막기 위해 진공내면을 은으로 코팅시켰으나 관측창으로서 폭 1cm의 slit을 수직으로 두었다. 전극간의 거리는 plange 상에 부착되어 있는 micrometer에 의하여 외부에서 조절할 수 있다. 한편 그림 2의 압력실험조는 높은 압력에서도 견딜 수 있도록 stainless steel(SUS 304)로 제작하였고 투시창으로는 석영원판을 사용하였으며, 외부로 부터

고압의 기체질소를 주입 시킴으로서 그 압력을 조절하였다.

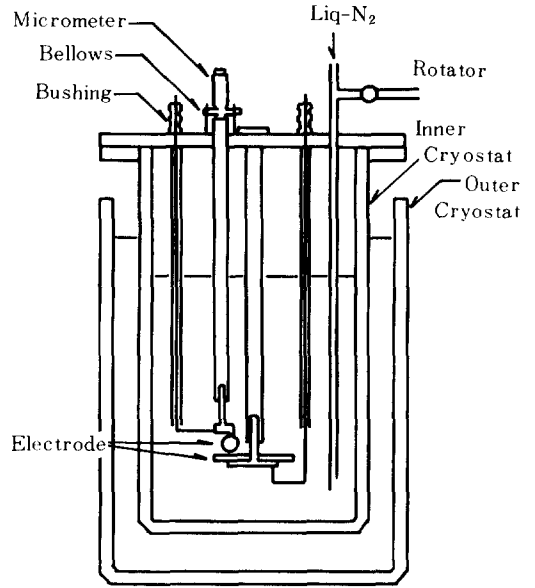


그림 1 실험 장치의 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of testing equipment.

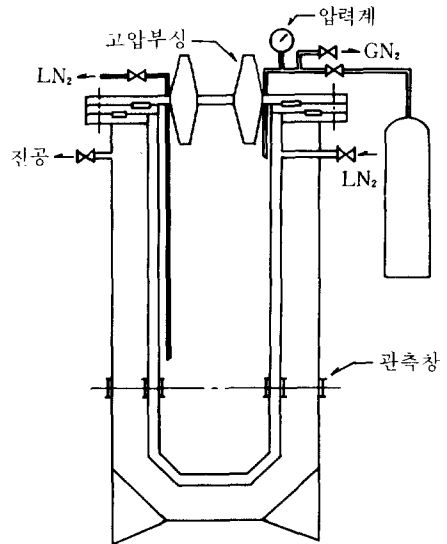


그림 2 압력조의 개략도

Fig. 2 Schematic view of pressure cryostat.

작료의 액체속에 넣어서 사용된 전극은, 먼저 균등전계용으로서 구(5mmφ)-평판전극을 그리고 불균등 전계용으로서 침(tip곡률반경 2μm)-평판전극을 각각 사용하였다. 전극의 재질은 모두 stainless steel이며 평판전극의 경우 그 표면을 입자크기가 각각 1.0μm, 0.3μm, 0.05μm인 알루미늄 분말을 이용하여 순차적으로 조심스럽게 연마하고나서 아세톤에 넣어 초음파세척한 후 사용하였는데 그림 3은 그 표면을 표면조도검사한 결과로, 표면에 있는 흠의 크기가 대체로 0.2μm이내임을 확인할 수 있다.

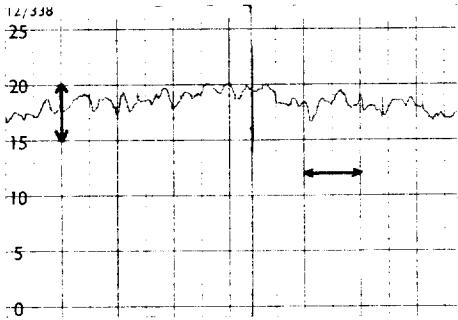


그림 3 평판전극의 표면 상태  
Fig. 3 Surface condition of plate electrode.

전원으로서는 단발발생의 방형파 pulse전압(rise time; 0.2~0.4μsec, pulse폭 가변범위; 0.2~1000 μsec, 최대출력전압; 40KV)을 이용하였다. 파괴전압의 측정은 pulse 전압 발생기에 부착된 모니터용 단자전압(인가전압의 1/1000)파형을 storage-oscilloscope (PM 3266, Philip사 제품)를 이용하여 검출하였는데 그림 4와 같이 pulse폭 내에서 전압의 drop이 생길 때 절연파괴가 일어난 것으로 간주하였다.

사용한 시료는 상업용 액체절소로서 한가지 조건에 대한 실험을 10~20회 정도 반복 측정 하였고, 방전직후 형성된 기포나 공간전하등의 영향을 배제하기 위하여 매방전 마다 1분이 경과된 다음 다시 전압을 인가하였다. 또한 본 연구에서 실시한 대부분의 실험은 평등전계와 불평등 전계, 그리고 불평등 전계는 다시 침의 극성을 정(+)으로 했을 때와 부(-)로 했을 때로 나누어 각각의 경우에 대해서 별도로 행하였는데 이하에서 불평등전계시 전자의 실험조건 및 결과를 정침조건과 정침특성, 후자의 경우는 부침조건 및 부침특성이라 각각 부르기로 한다.

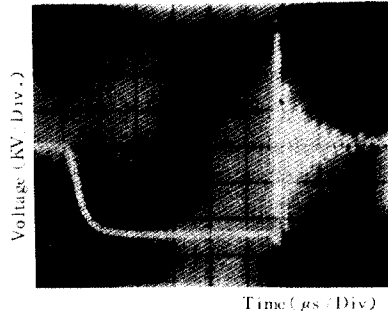


그림 4 절연파괴시의 전압 파형  
Fig. 4 Oscilloscope trace of breakdown voltage versus time.

한편 사전 실험조건 설정을 위한 예비실험으로서, 앞서의 방전에 의한 전극표면의 손상이 다음번 절연파괴 전압의 크기에 미치는 영향 즉, 전극표면의 conditioning 효과를 먼저 조사하였는데, 그것은 극저온 액체에 대한 실험준비가 매우 까다로와 한번 절연파괴가 일어날 때마다 그 전극을 교체해야 한다는 것은 여간 번거로운 일이 아니기 때문이다. 그 실험방법은 먼저 전극간의 거리를 200μm로 일정하게 유지 하면서 이 상태에서의 파괴전압을 방전횟수 즉 N=150회 까지 계속 측정한 후 그림5와 같이 방전 횟수의 증가에 대한 파괴전압의 변화를 graph로 나타내고 다시 그 경향(그림속의 직선)을 최소사승법으로 계산하였다.

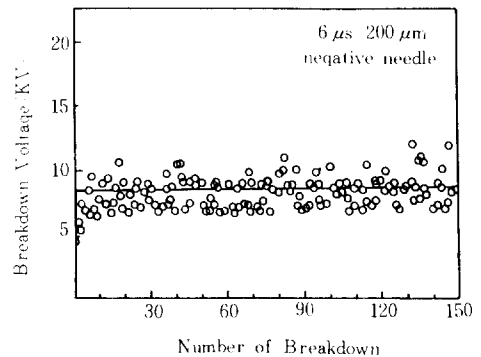


그림 5 전극표면의 conditioning 효과  
Fig. 5 Electrode surface conditioning effect.

그 결과 그림 5에서와 같이 최초의 수회동안 상당히 낮은 파괴치를 나타내지만 어느 일정치에 도

달하고 나서는 방전횟수에 관계없이 거의 일정한 값을 갖고 있는 것으로 나타나 구태이 매 방전마다 전극을 교체할 필요가 없는 것으로 간주할 수 있었으며, 다만 초기의 낮은 파괴전압은 전극처리 과정에서 그 표면에 남아있던 미소돌기나 불순물입자 혹은 흡착가스등에 의한 것으로 생각된다.

한편, 일반적으로 절연체에 직류파괴전압보다 높은 과전압의 pulse를 인가하면 완전한 절연파괴가 일어나기 까지에는 어떤 시간지연(time lag)이 나타나는데, 본 연구에서는 액체질소의 절연파괴기구를 이 시간지연 특성으로부터 고찰해 보기 위하여 실험조건을 변화와 더불어 각각의 변화에 따른 시간지연특성을 관측하였다. 지금 전극간의 거리를 일정하게 두고 N회의 과전압을 인가했을 때 전압 인가후 시간 t에 이르기까지 파괴가 일어나지 않는 횟수를 n이라고 하면 n/N과 t와의 관계는 다음식

$$n/N = \text{expt}[-(t - T_f) / T_s] \tag{1}$$

여기서  $T_f$ 는 형성시간지연이며,  $T_s$ 는 통계적 시간지연으로서  $\log(n/N)$ 와 t의관계 (즉, Laue plot)를 실험결과로부터 얻게 되면 n/N가 1이 되는 시간에서  $T_f$ 를, 또한  $\log(n/N)$ 의 t에 대한 직선의 기울기로부터  $T_s$ 를 각각 구할수가 있는데 본 실험에서는 그 시간지연의 분포를  $\mu\text{sec}$  영역에서 조사하였다.

### 3. 시험결과 및 검토

그림 6은 액체질소의 압력을 상기압으로부터 5기압까지 증가시키면서 이때의 절연파괴 전압의 변화를 불평등전계하에서 조사한 것이다. 이 그림으로 부터, 정침조건인 경우는 압력의 증가와 더불어 별다른 변화를 보이지 않으나 부침조건에서는 압력이 증가할 수록 파괴 전압이 현저하게 상승함으로서 이 두조건사이에는 서로 다른 특성이 있음을 알 수 있다.

이러한 차이는 불평등전계에서 액체질소의 절연파괴를 주도하는 메카니즘이 전극조건(즉 정침조건 또는 부침조건)에 따라 서로 다르기 때문인 것으로 생각할수 있는데, 일반적으로 액체의 압력이 증가할 때 파괴전압이 변한다는 것은 그 파괴과정에 기포가 중요한 역할을 하는 것으로 해석된다. 같은 맥락에서 Gerhold에의하면<sup>8</sup> 극저온 액체의 증발잠열이 작다는 사실을 들어 그 절연파괴 과정을, 높은 인가전계로 부터 방출전자를 통하여 액체속에 주

입된 에너지가 전극간에 기포를 발생시키고 그 기포내의 방전에서 비롯되는 것으로 설명한 바 있다. 이와 같은 사실로부터 위의 실험결과중 부침조건인 경우는 그 절연파괴가 기포파괴 메카니즘에 의해 압력의 증가에 따라 기포의 발생이 억제되기 때문에 파괴 전압이 상승하는 것으로 이해할 수 있으며, 반면에 그러한 효과가 없는 정침조건인 경우는 기포발생에 의한 파괴가 아닌 전자적 과정에 의하여 절연파괴가 주도되는 것으로 생각해야 할 것으로 보인다.

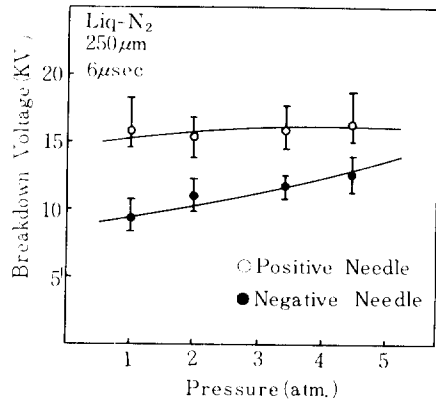


그림 6 압력의 변화에 따른 절연파괴 전압특성  
Fig. 6 Pressure dependence of the breakdown voltage.

한편 액체질소에 있어서 그 절연파괴의 시간지연 특성을 조사하기 위하여 각각의 전극조건 및 전극간의 거리에 대해서 매 20회의 방전을 실시하고 그때의 시간지연 분포에 의한 Laue plot를 작성하였다. 그림 7과 그림 8은 그 예로서 전극간의 거리를 100µm로 했을 때 불평등전계에서의 부침에 대한 각각의 Laue plot이고, 그림 9는 전극간의 거리를 200µm로 한 평등전계하에서 얻은 Laue plot이다.

우선 이들 시간지연의 분포형태를 서로 비교해 보면, 평등전계와 부침조건에서는 거의 하나의 직선으로 나타나는데 반하여 정침조건인 경우는 하나의 직선보다는 두개의 직선으로 구성되는 것을 볼 수 있다. 따라서 이들 관계에서도 전술한 바와 같은 극성효과가 분명한 나타나는데, 정침의 경우에서도 보다 고전계가 인가될때에는 하나의 직선에 가까와 지고 있음을 알 수 있다.

한편 이들 각각의 그림으로부터  $T_s$ 과  $T_f$ 를 계산 하이 볼때  $T_s$ 는 모든 경우에서 잘 나타나고 있는데 반하여  $T_f$ 의 경우는 정침조건에서는 거의 0가 되어  $\mu\text{sec}$  영역에서의 그 값을 얻기가 불가능하지

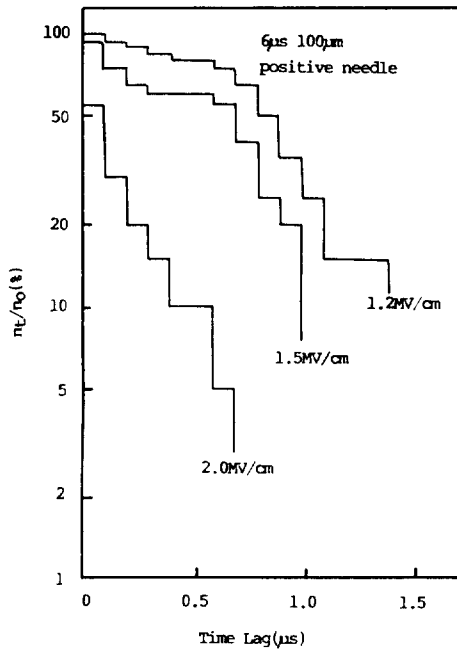


그림 7 정침조건에서 절연파괴 시간지연의 Laue plot  
 Fig. 7 Laue plots of breakdown time delay, (positive needle)

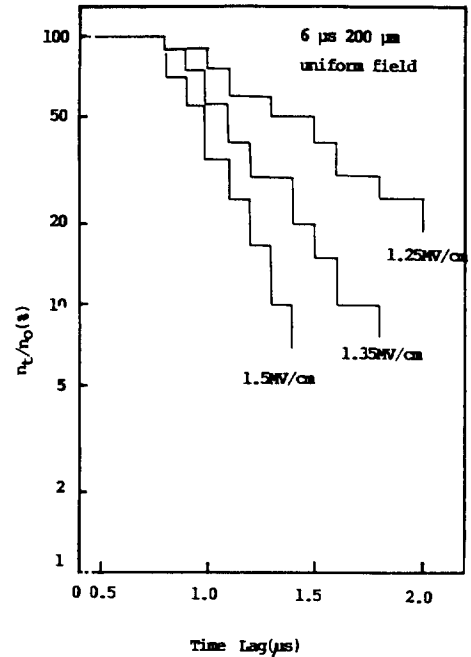


그림 9 평등전계에서 절연파괴 시간지연의 Laue plot  
 Fig. 9 Laue plots of breakdown time delay, (uniform field)

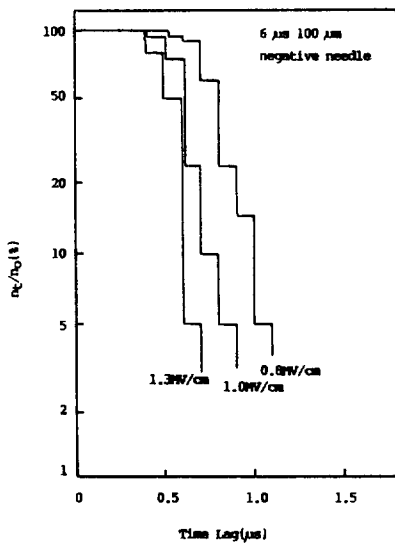


그림 8 부침조건에서 절연파괴 시간지연의 Laue plot  
 Fig. 8 Laue plots of breakdown time delay, (negative needle)

만, 부침조건과 평등전계의 결과에서는 각각의 전극간의거리가  $100 \mu m$ 와  $200 \mu m$  이상이 되면서  $T_s$ 의 경우와 마찬가지로 분명하게 형성되었다. 이와 같은 관계는 그림 10, 그림 11, 그림 12에 잘 나타나고 있는데, 그림 10은 불평등전계에서의 인가전계에 대한  $T_s$ 의 변화이고 그림 11은 부침조건에서 전극간의 거리가 각각  $100 \mu m$ ,  $300 \mu m$ 인 경우에서의 인가전계의 증가에 대한  $T_s$ 의 특성이며, 그림 12는 평등전계인 경우에서의  $T_s$ 와  $T_r$ 를 계산한 결과이다.

이들 결과로 부터 어느 경우에서나 인가전계가 증가할수록  $T_s$ 와  $T_r$ 가 모두 감소는 하고 있지만  $T_s$ 의 경우는 크게 변화하고 있는데 반하여  $T_r$ 는  $T_s$ 에 비해 거의 인가전계의 크기와 관계없이 일정하다고 볼 수 있다. 이와 같은 관계는 어느 전극조건 및 극성에서나 액체질소의 절연파괴 총시간 지연은 주로  $T_s$ 에 의하여 결정되고 있음을 의미하는 것으로서, 이러한 사실은 정침조건에서의 절연파괴의 원인이 전자에 의한 액체분자의 충돌전리 즉 전사사태(electron avalanhe)만에 의한다기보다는

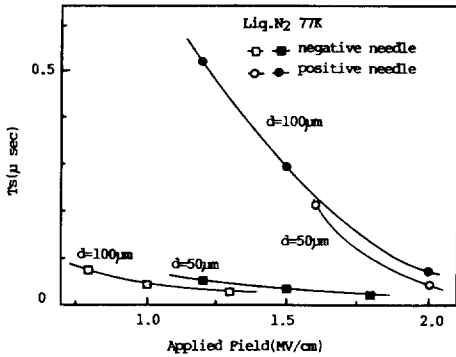


그림 10 통계적 시간지연( $T_s$ )의 인가전계에 대한 특성(불평등 전계)  
 Fig. 10 Dependence of the statistical time lag on the electrical field.(non-uniform field)

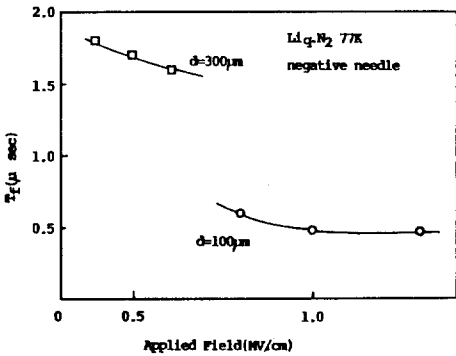


그림 11 형성지연시간( $T_f$ )의 인가전계에 대한 특성(부침조건)  
 Fig. 11 Dependence of the formative time lag on the electrical field(negative needle).

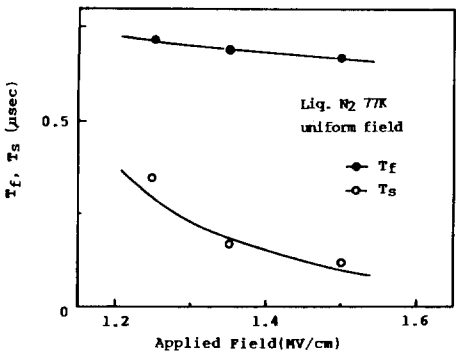


그림 12  $T_s$  및  $T_f$ 의 인가전계에 대한 특성 (평등 전계)  
 Fig. 12 Dependence of  $T_s$  and  $T_f$  on the electrical field.(uniform field).

충돌전리에 의해 생긴 양이온의 음극면에서의 공간 전하 형성 즉, 스트리머의진전에 의한 파괴일 가능성을 암시하는 것으로 생각된다.

여기서 참고로 그 절연파괴과정을 단일전자에 의한 전자사태로 가정했을 때 위에서와 같이 얻어진 시간지연으로 부터 절연파괴 전계강도·부근에서의 액체질소의 전자이동도를 계산해보면  $T_f$ 는 전자의 주행시간으로 분수 있으므로 다음식이 성립한다.

$$T_f = d/\mu E$$

단 여기서  $\mu$ 는 전자이동도이고 E는 인가전계강도 그리고 d는 전극간의 거리이다. 그림 12의  $T_f$ 를 이 식에 대입하면  $\mu$ 는 대략  $2.0 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{V.S}$ 가 되는데 이 값은 Loveland가 전자선 pulse에 의한 Time of Flight법을 이용하여 0.1MV/cm 이하의 저전계에서 액체질소에 대하여 얻은  $10^{-3} \text{cm}^2/\text{V.S}$ 보다 약 1 order 정도 높은 값이다.

한편 그림 13은 각각의 전극조건에 대하여 전극간의 거리를 50 $\mu\text{m}$ 로 부터 500 $\mu\text{m}$ 까지 증가시키면서 그 절연파괴전압의 변화를 조사한 실험결과이다.

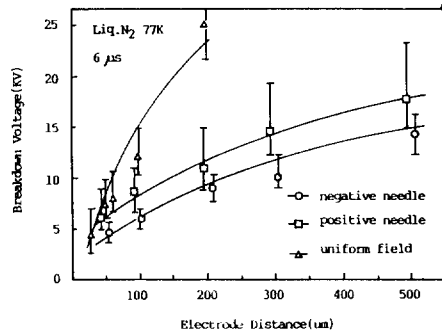


그림 13 전극간의 거리와 전극조건에 대한 파괴전압의 특성

Fig. 13 Gap dependence of the breakdown voltage at various electrode condition.

이로부터 어느 경우에 있어서나 전극간의 거리가 증가함에 따라 파괴전압은 상승하며, 특히, 평등전계에서 급격히 상승하고 있지만 차츰 비례관계를 벗어나 포함되는 경향을 나타냄으로서 절연파괴 전계강도는 전극간의 거리가 커질수록 감소한다는 것을 알 수있다. 또 같은 전극간 거리에서 전극조건에 따른 파괴전압의 절대치를 서로 비교하면 우선

평등전계에서의 값이 불평등전계의 경우 보다 높고, 또 불평등전계중에서도 정침조건에서의 파괴전압이 부침조건에서의 값보다 높다. 이것은 본 실험에서의 실험범위가  $500\mu\text{m}$  이내이기 때문에 이와 같은 미소 전극간 거리에서는 기포발생에 의한 전극간 방전로의 형성이 스트리머의 진전에 의한 것보다는 더욱 용이하기 때문으로 생각된다.

그림 14는 pulse폭을 변화시키면서 그 파괴전압을 조사한 결과인데 pulse폭이  $1000\mu\text{sec}$ 에서  $1\mu\text{sec}$ 에 이르기까지는 파괴전압이 pulse폭과 관계없이 일정하지만  $1\mu\text{sec}$  이내가 되면서 본 실험에 사용한 전원으로서는 측정이 불가능할 정도로 급상승 하였다. 이러한 현상은 절연파괴에 필요한 전기적 에너지가 pulse폭이  $1\mu\text{sec}$ 일 때 그 임계치를 가지기 때문으로 생각되나 본 실험의 결과만으로는 더이상의 해석이 불가능 하지만 보다 정략적인 해석을 위한 실험이 추가될 필요가 있으며, 이점에 대한 검토는 추후에 할 예정이다.

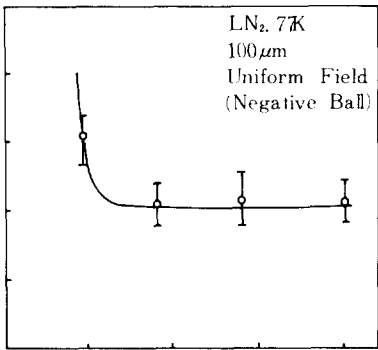


그림 14 Pulse 폭의 변화에 대한 파괴전압의 특성  
 Fig. 14 Pulse width dependence of the breakdown voltage.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상압용 액체질소의 절연파괴 특성을 방형과 pulse전압을 이용, 전극간의 거리가  $50\sim 500\mu\text{m}$ 인 영역에 대하여 조사하였다. 그결과 우선 액체의 압력이 증가함에 따라 부침조건에서의 파괴전압이 현격하게 상승한다는 사실로부터 그 파괴과정이 기포의 발생과 그 기포에서의 방전에 의하여 주도되는 것으로 추정할 수 있었으며, 반면에, 정침조건인 경우는 압력에 의한 영향이 별로 없었고 시간지연특성에서 총시간지연이 형성시간지연이 아닌 통계적 시간지연의 함수가 됨으로서 스트리머의

진전에 의하여 절연파괴가 일어나는 것으로 생각된다. 또한 부침조건에서의 파괴전압이 정침조건인 경우보다 낮았는데 그것은 본 실험에서 조사한 전극간거리가 아주 짧기 때문에 스트리머의 진전에 의해서보다는 기포에 의한 전극간 방전로의 형성이 보다 용이했기 때문으로 보인다.

#### 참 고 문 헌

- 1) J.C. Mclennan, R. C. Jacobsen, and J.O. Wilhelm "Dielectric constant of Liquified Gases" Trans. Roy. Soc. vol.24, no.3, pp.37-46, 1930.
- 2) D.W. Swan and T.J. Lewis, "Influence of Electrode Surface Condition on the Electrical Strength of Liquified Gases", Journal of the Electrochemical Society, vol. 107, no. 3, pp.180-185, 1960.
- 3) C. Blank and M.H. Edwards, "Dielectric Breakdown in Liquid Helium," Phys. Rev., vol. 119, pp.50-52, 1960.
- 4) Kenneth N. Mathes, "Dielectric Properties of Cryogenic Liquids" IEEE Trans. of Electrical Insulation, vol. EI-2, no.1, pp.24-32, 1967
- 5) J. Gerhold, "Dielectric Breakdown of Cryogenic Gases and Liquids" Cryogenics pp.571-584, October 1979.
- 6) K. Yoshino, S.H. Kim, K. Kaneto and Y. Inuishi, "Dielectric Breakdown of Liquid Helium and Influence of Electrode coating", IEEE Trans, Electrical Insulation, vol. EI-20, pp. 327-332, 1985
- 7) 藤井治久, "液體ヘリウムのインパルス 破壊 及 絶縁破壊遅延 特性" 日本電氣學會論文誌 vol. 100-A, no. 1, 1980.
- 8) 石井格, 野口卓池, "液體ヘリウムの 絶縁破壊 電壓のばらつき" 日本電氣學會誌 vol. 98, no. 12, pp.24-30, 1978
- 9) 太石憲雄外 2人, 誘電體現象論, 日本電氣學會 (1980), pp.306.
- 10) Meek and Craggs, Electrical Breakdown of Gases, John Willy Sons(1978), pp.655-688
- 11) R.J. Loveland, P.G. Le Comber and W.E. Spear, "Charge Transport in the Diatomic Molecular Solids and Liquids :  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  and Co.", ibid, 6-B 3121, 1972.