

액체 질소의 절연특성에 미치는 전극효과에 관한 연구

The Effect of Electrode on the Dielectric Breakdown Properties in Liquid Nitrogen

김상현*, 김정호*, 윤문수**, 권영한***

(Sang-Hyun Kim, Jeung-Ho Kim, Mun-Su Yun, Young-Han Kwon)

요 약

본 논문에서는 최근의 고온초전도체 재료의 개발에 주목하여 액체 질소(Liquid N₂, 77K)의 절연 파괴특성에 전극이 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

액체 질소의 극성효과는 액체 헬륨과는 달리 전극간 거리에 따라 다르며 단 간격에서의 파괴전압은 평등전계가 가장 높고 정침, 부침의 순서이며 장 간격에서는 역전한다. 그리고 conditioning효과, 불순물효과, 피복효과, 압력의존성 등의 실험으로부터 액체 질소의 파괴기구는 정침에서는 정 스트리머(streamer), 부침에서는 기포파괴의 가능성이 높은 것으로 생각된다.

또한 극저온 절연 설계에서는 전극을 절연물로 피복하고, 고순도 액체 질소보다는 불순물이 혼입된 액체 질소, 즉 상용 액체 질소를 냉각 및 절연재료로 사용하면 유리하다.

ABSTRACT

As high T_c superconductor is developed recently, the effect of electrode on the dielectric breakdown characteristics of liquid N₂ is studied in the thesis.

The polarity effect of liquid N₂ is different from that of liquid He.

Its polarity effect depends on the electrode distance. In a short gap, the breakdown voltage is highest for uniform field and becomes lower for positive needed and lowest for negative needle. In a long gap, however, the order is reversed.

From the results it may be concluded that the breakdown mechanism of liquid N₂ is the positive streamer breakdown for positive needle and the bubble breakdown for negative needle.

This conclusion can be supported from several other experiments concernign conditioning effect, pressure dependence, and so on.

In the design of cryogenic insulation it is recommended to coat an electrode with insulating material (SiO₂), and to use commercial liquid N₂ rather than highly purified liquid N.

*경상대학교 전기공학과

**한국전기연구소 전기재료연구부

***효성중공업 중전기사업부

1. 서 론

최근 에너지 문제가 심각하게 대두되면서 초전도 케이블을 비롯한 초전도 응용기기¹⁻³⁾를 적극적으로 개발하여 그 문제를 해결하고자 시도하고 있다.

그러나 초전도 응용기기에 있어서는 용량증대와 비용절감, 그리고 운전상의 안전성과 수명을 위해서는 구조중에서 가장 약점인 전기절연, 특히 Quench가 발생한 경우 예상외의 고전압이 발생하므로 극저온 전기절연 기술의 확립과 극저온 재료의 개발이 시급히 요구되고 있다.

한편 지금까지 실용화되고 있는 초전도 응용기기에서는 임계온도(T_c)의 문제로 Nb-Ti, Nb₃Sn 등의 저온 초전도 재료를 사용하고 있어 액체 헬륨(이하 He라 함)(비등점: 4.2K)만이 유일한 냉각 및 절연재료로 사용되고 있으나 He기체는 공기중에 3ppm정도밖에 포함되어 있지 않기 때문에 자원이 제약되고 가격이 비싸 초전도의 응용에는 한계성이 있다. 그러나 1986년 Bednorz와 Muller의 산화물계 고온 초전도체의 개발⁴⁾을 발단으로 BCS이론의 장벽이라는 $T_c=23K$ 는 무너지고, 최근에는 상온 초전도재료⁵⁾까지 보고되고 있으나 임계전류밀도(J_c), 임계자장(H_c)의 문제로 실용화까지는 이르지 못하고 있다. 그러나 가까운 장래에는 첫단계로 액체 He 대신에 값싸고 취급이 용이한 액체 N₂(비등점: 77K), 액체 Ar(비등점: 87K) 등의 극저온 액체가 냉각 및 절연재료로서 적극적으로 활용되는 새로운 초전도 시대에 접근하게 될 것이다.

이와같은 점을 감안할 때 기초연구로서의 액

체 N₂와 액체 He의 절연특성 및 파괴기구의 비교연구는 극저온 절연설계상 지극히 중요한 의미를 가지고 있다고 할 수 있다.

그러나 극저온 액체는 대부분의 액체와 같이 그 구조가 고체처럼 질서적이거나 기체와 같이 완전 불규칙하지 않으며, 2차인자의 영향을 받기 쉬운 절연특성 및 파괴기구가 통일적인 이론으로 정립되어 있지 않다. 더욱이 극저온이라는 특수환경이므로 측정이 어려워 물성론에 입각한 폭넓은 기초연구의 부족으로 극단인 요구에 응하는 것은 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 액체 N₂의 절연 특성에 미치는 전극효과를 액체 He의 경우와 비교 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

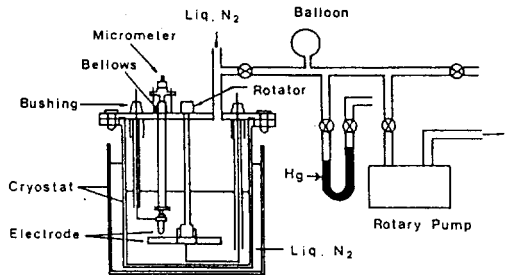


그림 1. 실험장치의 개략도

Fig.1. Schematic diagram of experimental apparatus.

그림 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 저온유지장치 Cryostat는 내부를 진공(10^{-4} Torr)으로 한 파이렉스(pyrex) 유리의 2중 장치로 외부에는 열 절연용 액체 그리고 내부 저온유지장치에는 시료용 액체가 각각 담겨지도록 하

였다. 열차폐를 위해 저온유지 장치 각각의 내면은 은으로 도금하였으나 수직으로 폭 1cm의 틈(slit)을 두어 액체의 용량과 절연파괴현상을 관찰할 수 있도록 하였다.

저온유지장치 상부의 프란지(plange)에는 전극간 거리의 조절을 위한 마이크로미터(Micro-meter)(오차: $\pm 1\mu\text{m}$ 이내)를 부착하였고 프란지증양에는 회전자를 설치하여 평판전극을 회전하여 절연파괴의 위치를 바꿀 수 있도록 하였다. 전극으로는 스테인레스 강(stainless steel)(SUS 304)의 평판-구(직경: 5mm), 평판-침(선단곡률반경: $2\mu\text{m}$) 전극을 사용하였다. 전극의 표면처리는 Al_2O_3 분말(입자크기: 1.0, 0.3, 0.05 μm)에 의해 연마한 후 아세톤에 넣어 5분간 초음파 세척한 후 건조시켜 사용하였으며 표면 거칠기는 표면조도측정기(taylor-hobson사, 0.1 $\mu\text{m}/20\text{mm}$)로 측정하였다.

전원으로는 직류전압(최대출력 직류전압: 32.5KV)을 사용하였으며 절연파괴 측정시 전압인가는 한가지 조건에 대하여 10회 반복 측정하였다. 또한 방전직후 형성된 기포, 공간전하 등의 영향을 피하기 위하여 매 방전직후마다 1분이 경과된 후 재차 전압을 인가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

상유동 액체 He(He I, 4.2K)의 절연파괴특성을 구-평판전극계의 평등전계조건, 침-평판전극계의 불평등전계조건에서 측정하고 그 결과를 그림 2에 표시한다. 그림으로부터 부침(침전극: 부극성)의 파괴전압은 낮으며, 반대로 정침(침전극: 정극성)의 파괴전압은 대단히 높아 동일한 전극간 거리의 평등전계보다도 높은 특이한 극성효과가 있음을 알 수 있다.

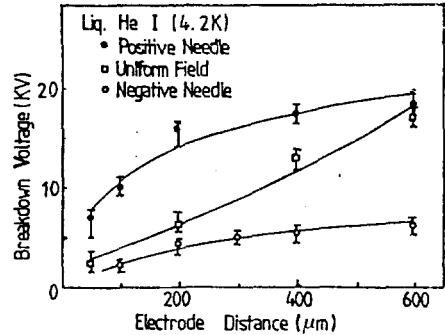


그림 2. 액체 He I 절연파괴전압의 전극간 거리의존성

Fig.2. Dependence of electrode distance in Liq. He I.

또한 초유동 He(He II, 2.1K)의 파괴전압의 전극간 거리의존성 및 극성효과를 그림 3에 표시한다. He II의 절연파괴특성은 He I의 경우와 비슷한 사실로부터 절연파괴과정이 He I과 He II가 같은 것을 의미하는 것으로 이해된다. 특히 He II의 초유동 상태에서는 열전도가 지극히 크기 때문에 열에 의한 기포파괴로는 생각하지 어렵고 앞에서 설명한 음극표면에서의 전자주입에 의한 절연파괴라고 생각된다.

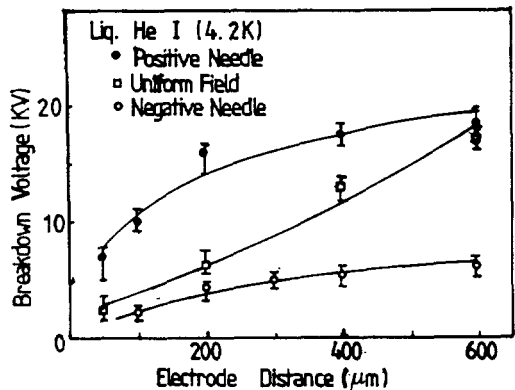


그림 3. 액체 He II 절연파괴전압의 전극간 거리의존성

Fig.3. Dependence of electrode distance in Liq. He II

일반적으로 액체유전체의 절연파괴특성은 불평등전계에서 정침의 파괴전압이 부침의 경우보다 낮으며 정 스트리머파괴로 설명되고 있다. 일반의 액체유전체에서는 전자의 이동도가 정이온의 이동도에 비해 대단히 크지만 액체 He에서는 전자, 정이온의 이동도의 차가 대단히 적으며 더욱이 정이온의 이동도가 큰 사실⁶⁾로부터 정스트리머를 발생시킬 조건이 성립되지 않는다.

따라서 액체 He의 파괴기구는 정 스트리머나 기포파괴로는 설명할 수 없으며 음극에서의 전자주입에 의한 절연파괴의 가능성이 높다.

즉 부침의 전계강도가 정침의 경우보다 높아 전자주입이 용이하기 때문에 부침의 파괴전압이 정침보다 낮다고 생각된다. 또한 정침의 파괴전압이 평등전계의 경우보다 높은 결과는 R. Coelho⁷⁾에 의한 식에서 이해된다.

$$\frac{E^{NU}(d)}{E^U(d)} = \frac{a d}{d(2a-d) + (a-d)r} \frac{1}{\ln[2(a/r)^{2a}]}$$

단, r는 침선단의 곡률반경, d는 전극간 거리, a는 $d+r/2$, $E^{BU}(d)$ 는 정침의 중심축에서 x만큼 떨어진 점의 전계강도, $E^U(d)$ 는 평등전계에서의 전계강도(=V/d)이다.

$E^{BU}(d)/E^U(d)$ 는 r가 작아짐에 따라 감소하기 때문에 정침의 경우 음극표면에서의 평등전계강도와 같은 전계강도를 얻기 위해서는 보다 높은 전압이 인가되어야 하기 때문에 정침의 파괴전압이 평등전계의 경우보다 높다고 생각된다.

이와같은 가능성은 액체 He의 시간지연(Time Lag)의 실험⁸⁾에서도 지지되고 있으나 그 가능성을 더욱 확증하기 위하여 커디션닝(Con-

ditioning) 효과를 조사하였다.

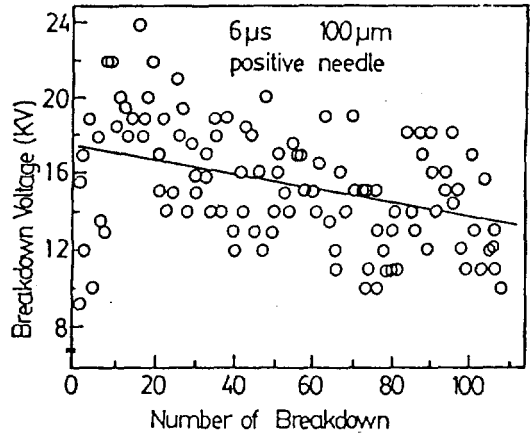


그림 4. 액체 He의 Conditioning효과(정침)
Fig.4. Conditioning effect in Liq.He(Positive Needle).

그림 4는 정침전계에서 전극간 거리가 100 µm인 액체 He I의 절연파괴의 커디션닝(conditioning) 효과를 표시한다. 그림 중의 직선은 실험치를 최소사승법으로 계산한 결과이다. 그림에서 파괴시험횟수(N)의 증가에 의한 파괴전압은 크게 저하하며 N=90회 부터는 거의 일정치에 도달함을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 음극에서의 전자주입에 의한 절연파괴로 생각된다.

즉 정침의 경우에는 음극인 평판전극으로부터 전자주입에 의해 진전되지만, 방전횟수의 증가와 더불어 He⁺이온의 평판음극의 충돌에 의해 음극표면의 조도가 커져 전자주입이 용이하게 되어 파괴전압이 저하한다고 생각된다. 이와같은 경향은 평등전계에서도 나타나고 있다.

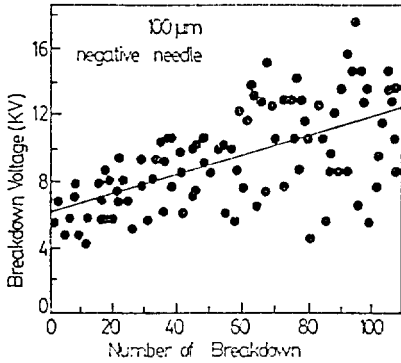


그림 5. 액체 He의 Conditioning효과(부침)
 Fig.5. Conditioning effect in Liq.He(Negative Needle).

그러나 동일조건에서 부침의 경우를 조사하면 그림 5와 같이 방전회수의 증가와 더불어 파괴전압은 증가하나 정침이나 평등전계의 경우와 정반대인 경향을 표시한다. 이 경우는 전자주입이 침전극에 일어나지만 방전횟수와 더불어 He⁻이온의 충격에 의해 침의, 곡률반경이 커져 전자주입이 억제되기 때문으로 생각되며 앞에서 설명한 He의 파괴기구의 가능성에 위반하지 않음을 알 수 있다.

한편 최근의 산화물계 고온초전도체의 개발과 더불어 관심이 높아지고있는 액체 N₂(77K)의 직류파괴전압의 극성효과를 평등전계하에서 측정하고 그 결과를 그림 6에 나타낸다.

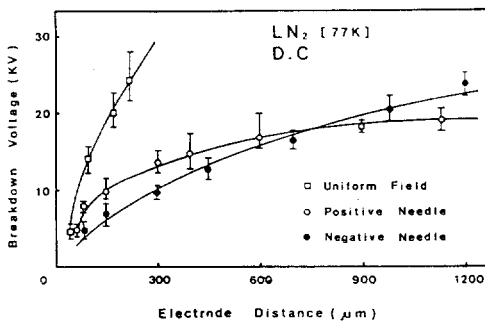


그림 6. 액체 N₂의 절연파괴전압의 극성별 전극간 거리의존성
 Fig.6. Dependence of electrode distance in Liq.N₂.

파괴전압은 전극간 거리의 증가와 함께 높아지는 경향을 알 수 있으며 동일한 전극간 거리에서 액체 He와 비교하면 액체 N₂의 파괴전압이 높아 절연 설계상 유리한 것을 알 수 있다. 또한 액체 N₂에서는 액체 He의 경우와는 달리 전극간 거리가 짧은 경우에는 『평등전계』정침>부침』의 순서이나 800µm이상의 전극간 거리가 긴 경우에서는 『평등전계』부침>정침』의 순서이다.

이러한 결과는 유기액체에서도 보고된⁹⁾ 바 있는데 앞서 조사한 액체 He과 액체 N₂의 파괴기구가 서로 다른 것으로 생각된다. 액체 He의 파괴기구가 앞서 설명한대로 음극으로부터의 전자방출에 의한 파괴 가능성이 높은 것으로 간주되는 반면 액체 N₂의 파괴기구는 정 스트리머의 용이성으로 이해된다. 즉 액체 N₂의 경우에는 전극간 거리가 긴 경우에는 정 스트리머의 진전이 용이하지만 전극간 거리가 짧은 경우에는 정 스트리머가 억제되는 것으로 생각된다.

그림 7은 전극간 거리로 100µm로 일정하게 두고 정침조건에서의 액체 N₂의 파괴전압의 전극 컨디션닝(conditioning)효과를 나타낸다.

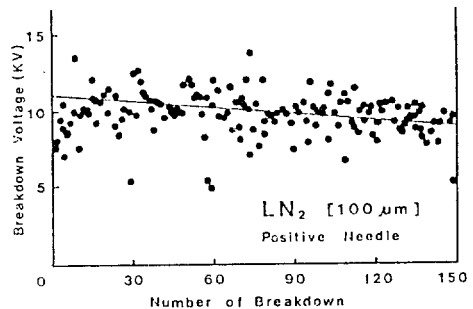


그림 7. 액체 N₂ 절연파괴의 Conditioning효과
 Fig.7. Conditioning effect in Liq.N₂.

그림에서 나타난 바와 같이 액체 N₂에서는 파괴시험횟수(N)의 증가에 의한 파괴전압의 큰 변화는 보이지 않고 미소한 감소만이 있는 것을 알 수 있다. 이와 유사한 결과는 부침, 평등전계 및 전극간 거리가 긴 경우에서도 실험을 통해 확인할 수 있었는데 Maksiejewski¹⁰⁾는 동일한 실험을 Ag, Cr전극을 사용하여 유기액체에서 조사하고 동일한 결과를 얻고 있다. 이러한 실험결과는 앞에서 설명한 정스트리머(streamer) 진전의 파괴과정에 의한 것으로 생각되나 파괴 시험 후 전극표면의 관찰로부터 기포파괴 과정의 가능성도 높다고 생각되어진다.

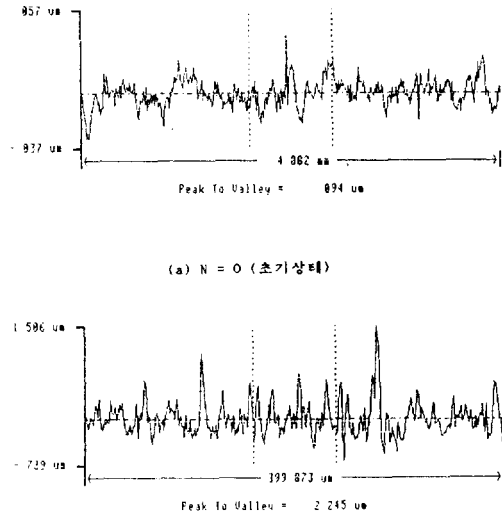


그림 8. 전극의 표면조도 측정결과
Fig.8. Surface roughness of electrode.

전극표면의 관찰 결과 N=150회 파괴시험 후의 전극표면은 많은 분화구와 요철(凹凸)부가 형성되어 있으며, 표면조도는 그림 8과 같이 초기 N=0회 때에는 진동폭(Peak to Valley)=0.094 μm였으나 N=150회 파괴시험 후는 진동폭(Peak to Valley)=2.245μm로 되어 전극표면이

상당히 거칠어져 있음을 알 수 있어 Kao¹¹⁾의 전극표면의 요철(凹凸)부에 의한 기포발생 기구설과도 관련지어 생각되어진다. 그러나 파괴전압의 절대적인 영향을 미치는 효과는 적으나 전극표면의 손상에 의해 정스트리머(streamer)나 기포파괴과정의 발달을 약간 조정하여 미소한 감소가 나타나는 것으로 생각할 수 있다.

한편 이상의 컨디션닝(conditioning)효과 실험에서 초기 몇회는 낮은 파괴전압치를 보이고 있는데 이는 실험전에 기체중에서 미리 글로우(Glow)방전을 행하면 없어지는 사실로 미루어 보아 초기의 전극표면의 흡착가스, 불순물, 미소돌기 등의 영향에 기인된다고 생각된다.

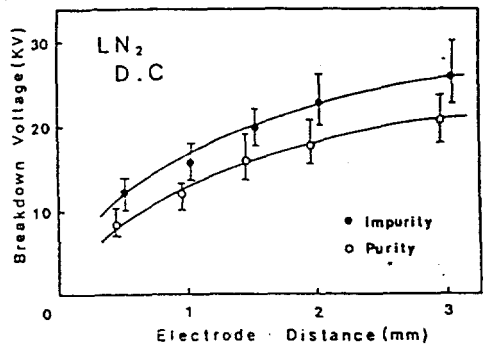


그림 9. 액체 N₂파괴특성의 불순물효과
Fig.9. Breakdown voltage vs. electrode distance on the purity & impurity in Liq. N₂.

그림 9는 초고순도 액체 N₂(99.999%)와 이를 공기중에서 2분간 노출시킨 경우의 정침조건에서 파괴전압의 전극간 거리의존성을 표시한다. 초고순도 액체 N₂의 파괴전압보다 불순물이 혼입된 액체 N₂의 파괴전압보다 높은 것을 알 수 있다.

이러한 결과 유기액체에서 동일한 실험을 한 Sletten¹²⁾의 실험결과와 같이 액체N₂에서는 산소의 영향과 앞에서 설명한 액체 N₂의 파괴기

구로 생각한다. 즉 공기중에 노출된 액체 N₂중에는 불순물, 특히 산소가 많은데 이러한 산소는 부성기체로 강한 전자부착성이 있으므로 액체 중의 자유전자를 포획하여 파괴의 α계수를 억제하기 때문이라고 생각된다.

따라서 실용의 초전도 응용기기를 고려해 볼 때 액체 N₂는 액체 He에 비해 경제성은 물론 극저온절연설계상 매우 유리한 것임을 알 수 있다.

이상의 극저온 액체 N₂에서의 파괴전압의 전극효과를 고려해 볼 때 실용상의 초전도 기기의 설계에는 전극피복 효과가 유효하다고 생각된다. 따라서 Al전극을 사용하여 전극 전체를 Rf-Sputtering법에 의해 SiO₂(6000 Å)로 피복시키고 불평등전계(정침)에서 액체 N₂의 절연 파괴특성을 조사하여 그 결과를 그림 10에 표시한다.

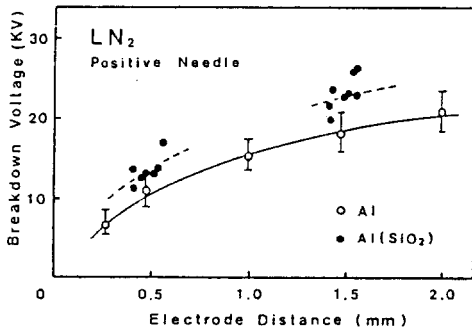


그림 10. 액체 N₂파괴특성의 전극피복효과
Fig.10. Coating effect of electrode in Liq. N₂.

그림에서 나타난 바와 같이 SiO₂로 피복시킨 전극의 파괴전압이 높게 측정되었으나 상승폭은 현저하지 않음을 알 수 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 전극 표면조도의 상승 영향, 즉 SiO₂피복에 의하여 전극표면의 요철부가 피복되기 때문에 정 스트리머(streamer)나 기포 파괴의 가능성은 배제할 수 없다고 생각된다.

그러나 파괴전압의 상승폭이 현저하지 않는 것은 유중(油中)에서 실험한 Zaky⁽¹³⁾의 보고와 같이 공간저하의 가능성도 생각된다.

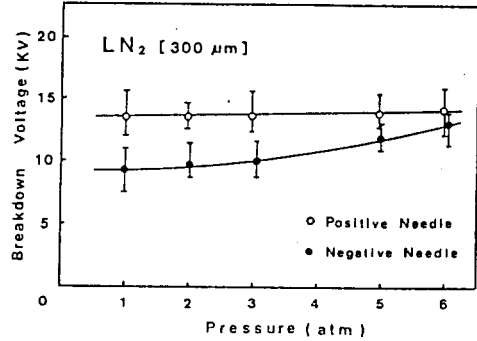


그림 11. 액체 N₂파괴전압의 압력의존성
Fig.11. Dependence of pressure in liq. N₂.

그림 11은 전극간 거리를 300μm로 일정하게 두고 불평등전계에서의 액체 N₂의 파괴전압의 압력의존성을 표시한다. 저온유지장치의 문제로 6기압까지 측정하였지만, 정침의 경우는 압력에 무관하나 부침의 경우에는 압력과 더불어 파괴전압이 상승함을 알 수 있다.

이러한 결과는 압력의 증가와 더불어 기포의 발생이 억제됨으로서 부침의 경우 파괴전압이 상승하는 것으로 이해된다.

따라서 정침의 경우에는 기포파괴가 아닌 전자적 과정인 정 스트리머(streamer)에 의해, 또한 부침의 경우에는 기포파괴의 가능성이 높은 것으로 생각된다.

이상의 절연파괴 전압의 전극간 거리의존성, 전극 컨디션닝(conditioning)효과, 불순물 효과, 전극피복효과, 압력의존성등의 절연파괴특성 실험을 통해 액체 N₂에서는 기포파괴나 정 스트리머(streamer)가 절연파괴의 중요한 역할을 할 가능성을 제시하였다.

즉 전극간 거리가 짧은 경우에는 액체 N₂의

코로나(Corona)개시전압¹⁴⁾은 『정침>부침』의 순서이다. 따라서 정침의 정 스트리머(streamer)의 진전보다는 부침에서의 침전극의 음극에서 전계방출된 전자가 Joule열에 의해 기포가 발생되고 이 기포가 진전하여 전극간에 브리지를 형성함으로써 기포파괴 될 가능성이 높아 파괴전압이 『정침>부침』의 순서라고 생각된다. 이와같은 가능성은 충격(Pulse)전압을 사용한 지연시간(Time Lag)의 측정¹⁵⁾에서도 지지되고 있다.

그러나 전극간 거리가 긴 경우에는 앞에서와 같이 전자는 침전극에서 전자방출되어 기포가 발생하지만 전극간 거리가 길어 기포가 진전하여 전극간에 브리지를 형성하는데 높은 인가전압이 필요하기 때문에 정스트리머(streamer)의 진전에 의한 파괴가 부침의 기포파괴보다 효과적인 것으로 생각된다. 즉 정침에서의 전계강도가 낮은 이유로 정침의 경우에서 정스트리머(streamer)의 진전에 의한 파괴가 부침의 기포파괴보다 효과적인 것으로 생각된다. 즉 정침에서의 전계강도가 낮은 이유로 정침의 경우에서 정스트리머(streamer)의 진전이 용이하여 파괴전압이 『부침>정침』의 순서라 생각된다.

한편 전극 피복효과에서 공간전하의 영향도 배제할 수 없어 절연파괴의 최종단계에서는 전자과정과 공간전하과정의 변환과정, 더욱이 기체와의 상전이가 복합된 현상이라 생각된다.

4. 결 론

고온초전도체의 개발과 더불어 장래 초전도 응용 기기의 냉각 및 절연재료 사용될 액체 N₂의 절연파괴현상과 파괴기구에 대하여 전극효과를

중심으로 액체 He과 비교하여 연구하였다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 액체 N₂에서 직류 파괴전압은 전극간 거리의 증가와 함께 파괴전압이 상승하였고 액체 He의 파괴전압보다 높다.
- 2) 액체 N₂에서의 파괴전압의 극성효과는 전극간 거리에 따라 다르며 단 간격(Gap)에서는 파괴전압이 『평등전계>정침>부침』의 순서이나 장 간격에서는 역전한다.
- 3) 전극의 컨디션닝(conditioning)효과를 실험한 결과 방전횟수의 증가에 따른 파괴전압은 미소한 감소만을 나타내었다.
- 4) 액체 N₂에서 불순물이 혼입된 액체 N₂가 초고순도 액체 N₂보다 파괴전압이 높아 액체 He보다 실용상 유리한다.
- 5) Al전극위에 SiO₂로 피복하면 파괴전압이 상승하나 공간전하의 가능성도 있다.
- 6) 압력의 증가에 따라 정침의 파괴전압은 무관하나 부침의 파괴전압은 상승한다. 이상의 실험결과로 부터 액체 N₂의 파괴기구는 정침의 경우는 정스트리머(streamer), 부침의 경우는 기포파괴의 가능성이 생각된다.

이 논문은 1989년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 신진교수 학술연구조성비에 의하여 연구되었다. 이 연구에 협조를 아끼지 않으신 한국전기연구소 초전도 연구실의 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) B.B. Forsyth : *Cryogenics*, 17, 3~7(1977)

- 2) S. Foner and B.B.Schwartz : *Plenum Press*, (1973)
- 3) 日本電氣學會：初傳導 電力機器의 開發動向, 電氣學會技術報告 I 部, 192號,(1985)
- 4) J.G. Bednorz and K.A. Muller : *Z.Physics B-Condensed Material*, 64, (2), 189~193 (1986)
- 5) 關根松夫：日本電氣學會誌. 100, 401~405 (1990)
- 6) L. Meyer and F. Reif : *Physical Review*, 110, 279~280 (1958)
- 7) R. Coelho and J. Debeau : *Journal of Applied Physics*, 4, 1266(1971)
- 8) K. Yoshino, H. Fujii, R. Takahashi, Y. Inuishi : *Journal of Electrostatics*. 7, 103~112(1979)
- 9) 日本電氣學會編：“放電ハント”フック”, 558(1982)
- 10) J.L. Maksiejewski and H.Tropper : *Measurement Section Paper*, No.1642, 183~190, (1953)
- 11) K.C. Kao and M.M. Rashwan : *Proc. IEEE*, 62, 856~858(1974)
- 12) A.M. Sletten : *Nature*, 183, 311(1959)
- 13) A.A. Zky, M.E. Zein and R. Hawley : *Journal of Applied Physics*, 16, 437~440(1965)
- 14) Y. Takahashi and K.Ohtsuka : *Journal of Applied Physics*, 8, 165~169(1975)
- 15) Y.B. Choo, K.W. Ryu, K.S. Kim : *IEE of Korea Trans. on Electrical Insulation*, 37, 1(12) 872~878(1988)
(1991년 2월 7일 접수)