

초전도 케이블용 절연재료의 절연파괴특성과 기구에 관한 연구(I)

Study on the Breakdown Characteristics and Mechanisms of Insulating material for Superconducting Cable(I)

김 상 현*
(Sang-Hyung Kim)

요 약

최근, 에너지 절약면에서 초전도 케이블에 관심을 모으고 있다. 그러나 케이블의 수명과 신뢰성을 보장하기 위해서는 극저온 절연기술이 반드시 필요하다.

본 논문에서는 극저온 기체 질소의 절연파괴특성과 기구에 대해 보고한다.

극저온 기체 질소(300K~93K)의 절연파괴전압은 액체 질소(77K)의 경우의 1/4~1/6배 정도 낮으며, 온도와 기체밀도에 의존한다. 또한 비등점근처의 온도영역을 제외하고는 Paschen의 법칙이 성립한다.

ABSTRACT

Resently, superconducting cable has attracted a great deal of interest from the viewpoint of energy saving. One of the most important and difficult problems to be solved to assure the high reliability and long life of cable is breakdown at cryogenic temperatures.

In this paper, we will report on the characteristics and mechanisms of the breakdown in cryogenic gas N₂.

The breakdown voltage of cryogenic gas N₂(300K~93K) becomes 1/4~1/6 lower than that of cryogenic liquid N₂(77K). And it depends on gas temperature and density. Also it is obeyed by Paschen's law except in the range near boiling temperature.

* : 경상대학교 전기공학과

1. 서 론

최근의 지속적인 경제성과 더불어 전력 수요의 문제가 심각하게 대두되면서 UHV (Ultra High Voltage) 송전, 새로운 대용량 케이블의 기술개발등을 적극적으로 개발하여 해결하고자 시도하고 있다. 그러나 도시주변의 송전선 철탑, 발전소 용지 확보 문제, 환경문제, 경제성의 문제등으로 장래 심각성이 예상된다. 따라서 이들의 문제점을 획기적으로 해결하기 위해서는 기존의 가공송전방식 대신에 초전도 현상^{1~3)}을 이용한 초전도 케이블 송전방식의 채용이 불가피한 실정이다. 더욱이 최근의 고온 초전도체의 출현^{4~6)}으로 그 연구 개발은 더욱 가속화 되고 있다.

초전도체 개발을 위해서는 신뢰성, 안정성 및 수명을 보장할 수 있는 극저온 절연 기술의 확립이 반드시 필요하다. 한편 현재까지 초전도 케이블은 임계온도(Tc)의 문제로 액체 He만이 유일한 냉각제 및 절연재였지만 경제상의 문제로 장래 N₂를 중심으로한 초전도 케이블의 개발은 필요 불가결한 실정이다. 또한 액체 N₂는 다른 극저온 액체보다 가격이 싸고 비교적 용이하게 얻을 수 있어 복잡한 분자구조를 갖는 유기절연 액체의 전기전도 절연파괴 기구를 이해하는데 있어서의 모델 물질로서 지극히 중요하다.

그러나 극저온 액체에서의 저온 방전현상에 관한 연구^{7~8)}가 매우 적어 초전도 케이블의 기술개발은 어려운 실정이다. 위와 같은 목적에서 초전도 케이블의 절연재료로서 관점과 물성론적 관점에서 본 연구는 특히 극저온 기체 N₂를 중심으로 절연파괴

특성과 기구를 연구하였다.

즉 액체 N₂냉각에 의한 Cryostat를 제작하고, 극저온 기체에 직류, 교류전압을 인가하고 평등 전계 및 불평등 전계의 방전 특성을 조사하였다. 그 결과 극저온 기체 N₂의 파괴전압은 액체 N₂의 파괴전압 1/4 ~ 1/6배, 정도이며 온도(T)의 증가에 따라 서서 저하한다. 또한 상온에서 90K근처의 온도범위까지 Paschen의 법칙이 성립하며, 기체밀도에 따라 파괴전압이 상승하여 SF₆ 기체의 절연내력 수전에 이른다.

2. 실험장치 및 방법

그림 1은 높은 압력에서도 견딜 수 있도록 스테인레스 강(Sus 304)으로 제작된 실험 장치를 표시한다. 저온 유지 cryostat는 2중 구조로 외부 cryostat에는 사전 냉각 및 절연용 액체를 그리고 내부 cryostat에는 시료용 액체 N₂(비등점:77K)가 각각 담겨지도록 하였다. 또한 외, 내부 cryostat에는 다시 2중벽으로 구성되며 그 사이에는 진공도 10⁻³Torr로 고진공시킴으로써 측면의 전도에 의한 열전달을 막았다.

전극구성은 스테인레스강의 평판(75mm ϕ)~구(6.3mm ϕ), 평판-침(선단곡률반경: 2 μ m)전극을 사용하였다. 평판전극의 표면은 Al₂O₃분말(1.0, 0.3, 0.5 μ m), 다이아몬드 페스트(3, 1 μ m), 연마액에 의해 처리한 후 아세톤에 넣어 5분간 초음파 세척한 후 사용되었다.

전원으로는 직류전압(최대출력직류전압: 35KV)을 사용하였으며, 전압인가법은 예상되는 파괴전압의 70~80%까지는 빠른 속도로 전압을 상승시키고 그후는 0.3~3V

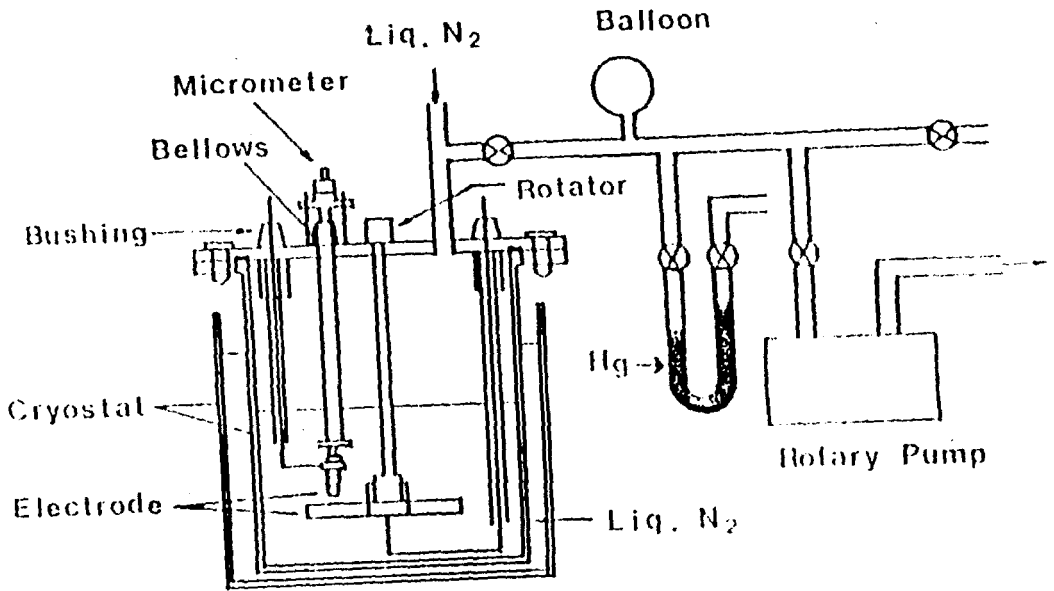


그림 1. 실험장치
Fig. 1. Experiment apparatus

/S의 전압상승 속도로 서서히 상승시키는 상승법에 의해 절연과괴 시켰다.

실험방법은 잘 처리된 전극계를 설치한 후, 내부 cryostat의 불순물을 제거하기 위하여 rotary pump로 2×10^{-2} Torr의 압력으로 배기하고 외부 cryostat는 시료용으로 각각 극저온 액체 N₂를 충전한다. 이 상태에서의 액체 N₂의 온도는 77K, 밀도는 0.881, 유전율은 2.431⁹⁾이다.

한편, 극저온 기체 N₂는 액체 N₂의 기화를 이용하였으며, 온도측정은 구리-콘스탄탄 열전대로 측정했다.

전극간격의 조정은 프란지(plange)상에 부착된 마이크로메타(micro-meter)(오차: $\pm 1\mu\text{m}$)에 의해 영점을 구한 후 전극간을 일정거리로 조정했다. 전압인가는 한 조건에 대해서 6~10회 측정하였으며 방전직후 형성된 기포, 공간전하 등의 영향을 피하기 위하여 매 방전직후 1분 이상의 경과된

후에 재차 전압을 인가했다.

3. 실험결과 및 검토

본 실험은 극저온 기체 N₂에 초점을 두고 있으나 비교검토를 위하여 최근의 산화물계 고온 초전도체의 개발과 더불어 관심이 높아지고 있는 액체 N₂(77K, 1기압)의 절연과괴특성을 구-평판 전극 구성의 평등전계조건, 침-평판 전극구성의 불평등전계에서의 결과를 그림 2에 표시한다.

이 그림으로 부터, 전극 간격이 짧은 경우에는 파괴전압이 평등전계>정침>부침의 순성이나 전극간격이 긴 경우에는 평등전계>부침>정침의 순으로 역전됨을 알 수 있다. 동일한 결과¹⁰⁾는 이미 보고한 바 있으며 정 streamer와 기포파괴설로 설명되고 있다.

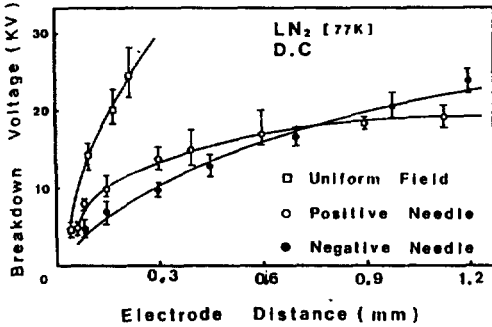


그림 2. 액체 N₂ 파괴전압의 극성
Fig. 2. Polarity effect of breakdown voltage in LN₂

한편 본 실험에서 사용된 직류전원의 한계(최대전압:35KV)때문에 전극간격(d)을 0.4(mm)로 일정히 하였으며, 평등전계에서 비등점 77K인 액체 N₂에서 기체 N₂로 상변화(액체-기체)에 따른 직류파괴전압의 온도(T)의존성을 그림 3에 표시하였다.

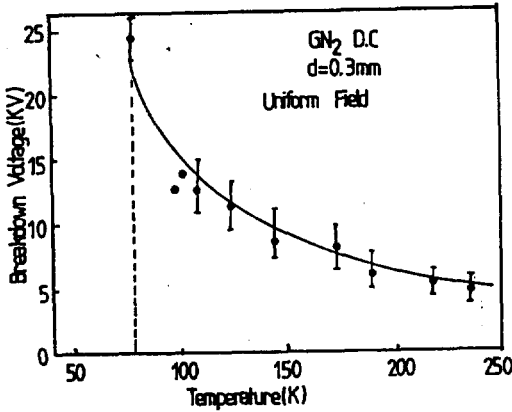


그림 3. 액체-기체 N₂의 파괴전압의 온도 의존성
Fig. 3. Temperature dependence of breakdown voltage in LN₂-GN₂

그림에서 error bar의 상·하는 각각 측정치의 최대 및 최소치, 흑점(●)은 평균치를 나타낸다. error bar를 비교해 보면 상

은 근처의 고온영역에서는 2~3KV정도인데 비해 저온영역에서는 5~8KV로 크다. 이 원인은 확실치 않지만 cryostat내부의 온도분포가 극저온인 경우 일정하지 않고 기체밀도가 시간과 더불어 변동하기 때문이라 생각된다.

野口의 논문¹¹⁾에서는 이러한 점을 검토하고 구전극에 자외선을 조사하여 초기전자를 공급하고 error bar를 적게하는 보고도 하고 있으나 현단계에서는 명확하지 않다. 그러나 그림에서 나타난 바와 같이 기체 N₂의 파괴전압은 비등점 근처의 상변화 영역에서는 온도변화가 심하여 측정할 수 없겠지만 온도의 증가에 따라 서서히 저하하며 액체 N₂의 경우(그림 2)와 비교하면 거의 1/4~1/6배 정도로 절연내력이 매우 낮아 실용상의 케이블에서는 특히 극저온 기체의 절연 설계에 주의 해야 함을 알 수 있다.

한편 극저온 기체의 온도를 일정하게 하고(T=160K) 파괴전압의 극성효과를 조사하면 그림 4와 같다. 동일한 온도에서 극저온 기체의 절연파괴특성 평등전계>정침>부침의 파괴전압의 순서로 일반기체의 경우와 유사함을 알 수 있다.

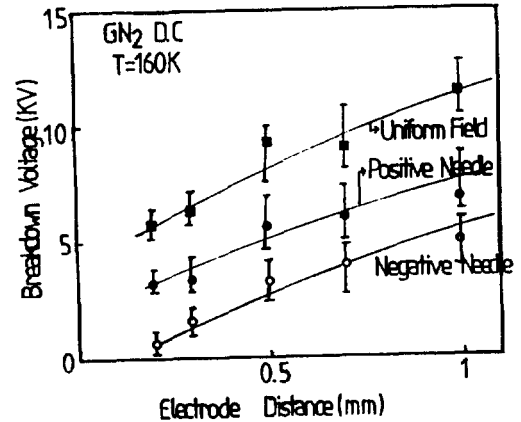


그림 4. 기체 N₂의 파괴전압의 극성효과

Fig. 4. Polarity effect of breakdown voltage in GN_2

즉 극저온 기체의 절연파괴는 일반기체의 경우와 같이 정 streamer와 같은 전자적 과정에 의한 절연파괴기구의 가능성이 높은 것으로 간주된다. 따라서 극저온 기체에서도 일반 기체에서 적용되는 Paschen 법칙이 성립되는 가를 검토하기 위하여 평등전계에서 조사하였다.

직류파괴전압의 온도특성을 전극간격 d 를 변화시키면서 조사하고 그 결과를 그림 5에 표시한다.

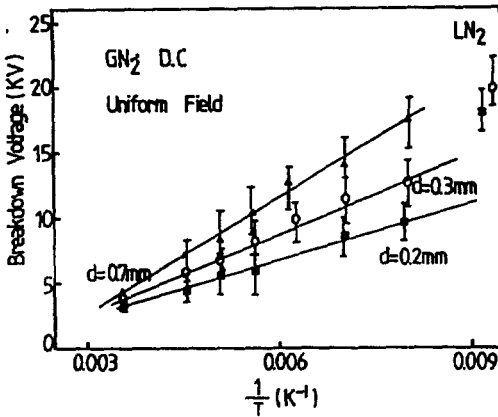


그림 5. 액체-기체 N_2 의 파괴전압의 $1/T$ 온도의존성

Fig. 5. $1/T$ dependence of breakdown voltage in $\text{LN}_2\text{-GN}_2$

직류파괴전압은 상변화가 일어나는 경계 영역(77K~90K)을 제외하고는 어느 경우나 동일한 전극간격에서 온도의 역수($1/T$)에 비례하고 있음을 알 수 있다. 극저온 기체 N_2 의 경우와 유사한 결과는 전극간격이 긴 경우의 극저온 기체 He (6K~240K)에서도 나타나고 있다.¹²⁾ 이것은 밀도가 온도의 역수($1/T$)와 관련 됨으로 밀도에 따른 carrier의 평균자유해정의 변화로 생각

되는데 이것을 다시 온도의 역수와 전극간격의 곱인 d/T 를 횡축으로 취하고 plot하면 그림 6과 같다.

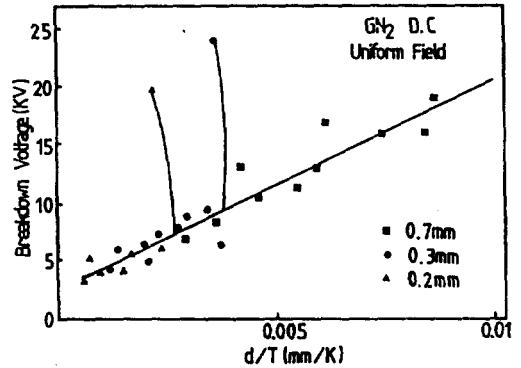


그림 6. 액체-기체 N_2 의 파괴전압의 전극간거리/온도의존성

Fig. 6. d/T dependence of breakdown voltage in $\text{LN}_2\text{-GN}_2$

그림에서 비등점 근처인 상변화가 일어나는 영역을 제외하고는 극저온 기체에서도 일반기체와 같은 Paschen의 법칙이 성립함을 알 수 있다. 또한 동일한 실험을 불평등 전계의 조건에서 하면 극성효과는 보이고 있지만 앞에서 설명한 Paschen법칙에서 약간 벗어남을 알 수 있다. 이것은 전계가 평등하지 않기 때문이라 생각되며 실용상에서는 더욱 검토가 필요한 부분이다.

그림 7, 그림 8은 각각 $d=1(\text{mm})$ 로 일정하고 극저온 기체 N_2 의 파괴전압의 압력의존성을 가압(그림 7)과 감압(그림 8)상태에서 행한 결과를 표시한다.

가압상태의 경우는 cryostat의 문제로 대기압에서 5기압까지 측정하였지만, 파괴전압을 비교하며 가압상태의 경우는 압력상승과 더불어 상승하나 감압상태의 경우는 오히려 감소하여 실용상의 초전도 케이블에서는 고압력의 극저온 기체의 사용이 절

연상 유리함을 알 수 있다.

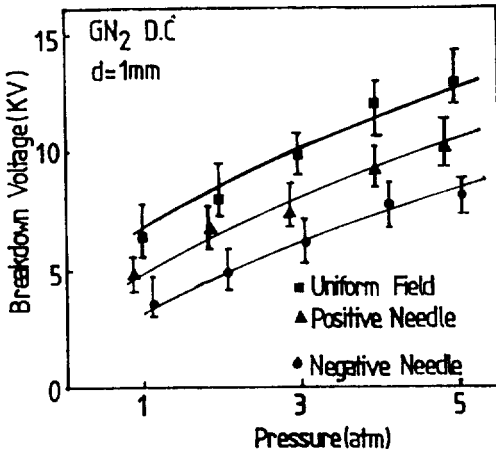


그림 7. 기체 N₂의 파괴전압의 압력의존성
Fig. 7. Pressure dependence of breakdown voltage in GN₂

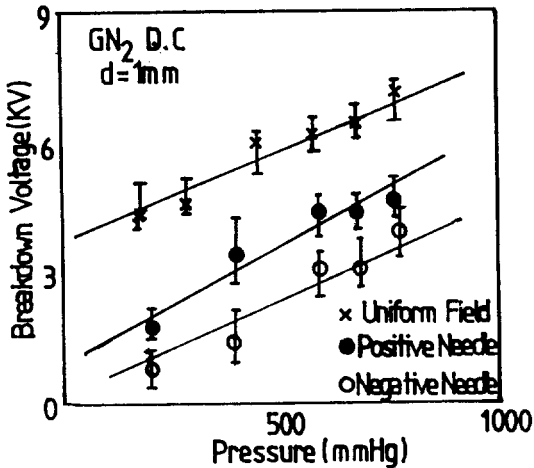


그림 8. 기체 N₂의 파괴전압의 압력의존성
Fig. 8. Pressure dependence of breakdown voltage in GN₂

이것은 압력증가에 따라 기체밀도가 높아진다고 생각되고 이에 따라 전자의 평균 자유행정의 감소로 인해 절연파괴전압이 높아진다고 생각된다. 이 점을 명확히 하기 위하여 압력(P)와 전극간격(d)의 곱

Pd를 횡축으로, 파괴전압을 종축으로 취하고 plot하면 실험상 Pd(5(기압·mm))의 범위로 한정되지만 극저온 고밀도 상태에서도 Paschen의 법칙이 성립되고 있다. 그러므로 실용상의 케이블의 절연설계에 있어서는 극저온 상태의 측정이 곤란하기 때문에 측정이 쉬운 상온에서의 절연파괴 특성만을 파악하여 두면 극저온의 절연파괴 특성도 알 수가 있으므로 대단히 편리하다. 그러나 불평등 전계에서는 압력에 따른 corona 안정성의 문제도 검토가 필요하다.¹³⁾

한편 현재의 관로기중선로나 차단기등의 응용기에 가장 많이 사용되는 부성기체인 SF₆와 극저온 기체와의 절연내력을 비교한 것을 그림 9에 표시한다. 동일한 압력에서 비교하면 극저온 기체를 절연재료로 사용하면 SF₆에 상당하는 절연구성이 가능함을 알 수 있다. 동일한 실험결과는 松本¹⁴⁾에 의해서도 얻어지고 있다.

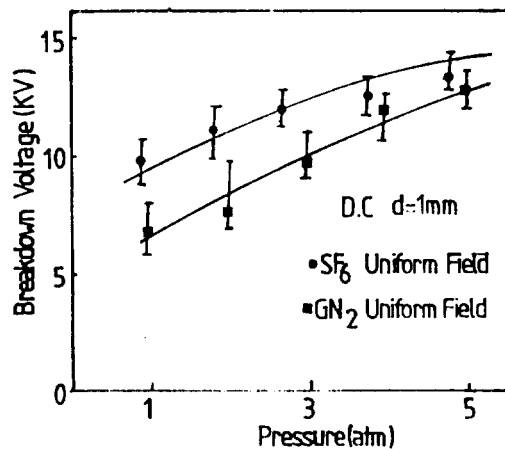


그림 9. SF₆기체와 기체 N₂의 절연파괴 특성
Fig. 9. Breakdown characteristics of SF₆ and N₂

지금까지는 관통파괴특성만을 조사하였으나 극저온 기체중에서의 연면방전특성만을 조사하였으나 극저온 기체중에서의 연

면방전특성을 파악하기 위하여 그림 10과 같은 전극계를 사용하여 측정하였다.

즉 1(mm) poly proylene(PP)절연판에 Al foil을 접착하여 전극으로 사용하였으며 단부의 영향을 피하기 위하여 곡면이 되도록 하였다. 또한 전극간 d와의 혼동을 피하기 위하여 g로 한다.

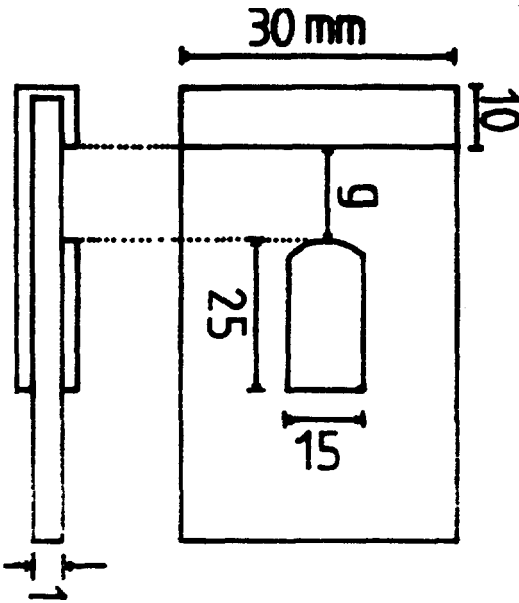


그림 10. 연면절연파괴용 전극계

Fig. 10. Electrode system for creeping breakdown

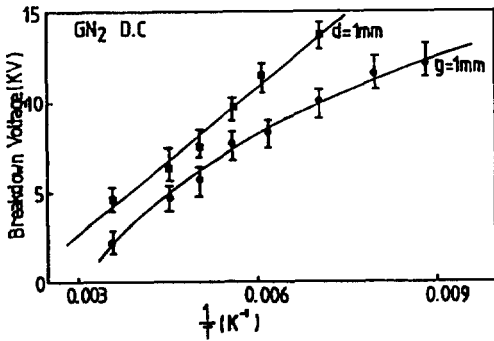


그림 11. 기체 N₂의 연면파괴전압의 1/T온도의존성

Fig. 11. 1/T dependence of creeping breakdown in GN₂

그림 11은 그림 10과 같은 전극계를 사용하여 직류파괴전압의 1/T특성 $g=1$ 로서 측정하고 $d=1$ (mm)의 경우와 비교한 결과를 표시한다. 전극형상이 다르기 때문에 단순히 비교할 수 없지만 그 특성은 판통파괴의 경우는 파괴전압이 1/T에 직선적으로 비례함에 따라 연면방전의 경우는 1/T이 적은 고온영역에서의 파괴전압이 약간 직선에서 벗어나 낮아짐을 알 수 있다.

그림 12는 $g=1$ (mm)로 일정히 하고 300K와 160K의 온도에서 각각 V-I특성을 조사한 것이다.

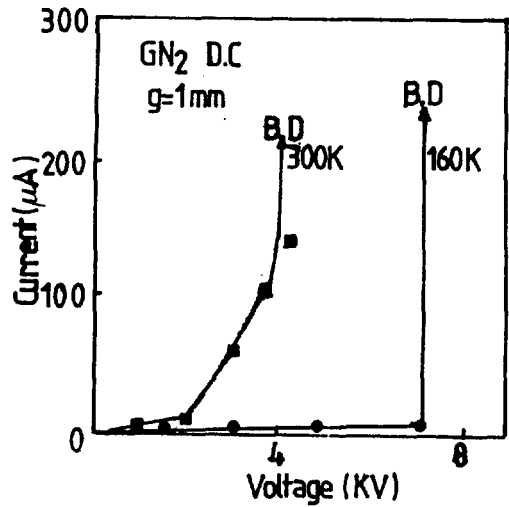


그림 12. 연면방전의 전압-전류특성

Fig. 12. V-I characteristics of creeping discharge

그림에 나타난 바와 같이 300K 온도에서는 미소한 방전을 동반하고 전압상승과 더불어 전류가 서서히 증가하여 연면절연파괴에 이르나 160K의 저온에서는 전압상승에 따른 전류의 변화는 거의 나타나지 않고 그대로 연면 절연파괴에 이르고 있다. 이것은 그림 11의 특성과 관련이 있다고 추정된다. 즉 고온영역인 300K온도에서

는 미소한 방전과 더불어 PP절연파괴에 이르고 있어 전류전하의 영향이 적기 때문이라 생각된다.

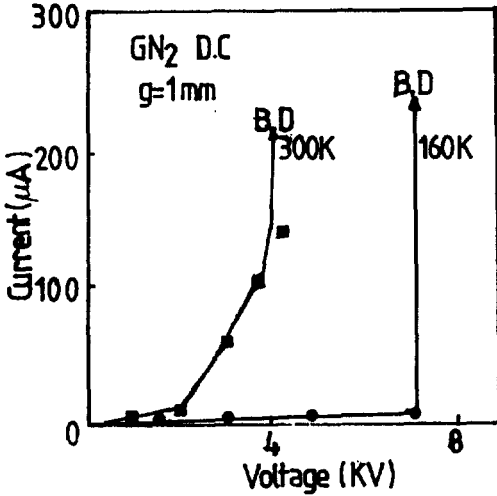


그림 13. 파괴전압-전압인가시간 특성
Fig. 13. Breakdown-time characteristics

그림 13에 두께 0.5mm의 poly-ethylene (PE) film에 양면을 Al증착하여 전극으로 사용한 경우의 V-t특성을 300K 기체 N₂중에서 V-t특성을 구한 결과를

- O System" *Z. Phys. B* 64 pp. 189~193, 1986.
- 5) H. Maeda, T. Tanaka, M. Fukuto-mi :
 "A New High Tc Oxide Superconductivity with a Rare Earth Elements", *Jpn. J. App. Phys.*, pp. 209~210, 1988.
- 6) Z. Z. Sheng, A. M. Hermann : "Bulk Superconductivity at 120K in the Tl-Ca-Ba-Cu-O System", *nature*, Vol. 332, No. 6160, pp. 138~139, 1988.
- 7) J. Gerhold : "Dielectric Breakdown of Cryogenic Gases and Liquids", *Cryogenis*, Vol. 19, pp. 571~584, 1979.
- 8) K. N. Mathes : "Dielectric Properties of Cryogenic Liquids", *IEEE Trans. EI-2*, pp. 24~32, 1967.
- 9) 저온공학협회 : 저온공학 핸드북(저온공학협회), 1982.
- 10) 김상현, 김정호, 윤문수, 권영한 : "액체 질소의 절연특성에 미치는 전극효과에 관한 연구", *전기전자재료학회지*, Vol. 4, pp. 114~122, 1991.
- 11) 野口, 河野, 風 : "저온 영역에서의 공기와 질소의 Flashover 특성", *日本電氣學會 論文志 A*. Vol. 92-A, pp. 129-135, 1972.
- 12) J. Thoris, B. Leon, A. Dubois : "Basic Physics of Gaseous Dielectrics", *IEEE Trans. EI-25*, pp. 55~74, 1990.
- 13) M. Hara, J. suehiro, H. Matsumo-to : "Breakdown Characteristics of Cryogenic Gasous Nitrogen and Estimation of its Electrical Insulation Properties", *IEE, EI-24*, pp. 609-617, 1989.
- 14) 松本, 藏田, 河野 : "극저온 고밀도 질소가스의 교류 및 임펄스 Flashover 전압특성", *日本電氣學會 論文志 B*. Vol. 102-B, pp. 49~56, 1982.
- (1991년 10월 28일 접수)



김상현

1950년2월7일생. 1974년2월 인하대학 전기공학과 졸업. 1979년2월 인하대학전기공학과 석사. 1986년3월 일본 오사카대학 전기공학과(공학박사). 1988년2월 한국전기연구소 책임연구원. 1992년 현재 경상대학 전기공학과 조교수.