

온도저하에 따른 SF₆의 상전이 및 절연특성

(The Phase Transition and Breakdown Characteristics of SF₆ in a Temperature Decline)

김종환* · 최은혁 · 박광서 · 윤대희 · 김이국 · 이광식

(Jong-Whan Kim · Eun-Hyuck Choi · Kwang-Seo Park · Dae-Hee Yoon · Lee-Kook Kim · Kwang-Sik Lee)

요 약

고본 연구는 모의 GIS내 절연특성을 SF₆ Gas의 온도의 변화(+30~-40[°C])에 따른 절연특성을 구명하였다. 절연 특성은 기체상태의 Paschen's law 적용구간, 기체와 액체 공존상태의 절연파괴전압이 대세적으로 높고, 편차가 심한 구간과 챔버 내부가 저밀도 SF₆와 잔류공기의 혼합체로 이루어지는 극히 낮은 압력상태로 되어 절연파괴 전압이 크게 낮아지는 구간으로 구분되었다. 또한 본 실험에서 액체 SF₆가 기체 SF₆보다 절연특성이 우수함을 확인하였다. 상전이와 절연특성을 구명함으로써 각종 고온초전도 및 극저온 응용 설비의 절연설계의 기초 자료로 제공하고자 한다.

Abstract

In this paper, insulations characteristics by temperature changes(+30~-40[°C]) of SF₆ gas in the experimental chamber were studied. From this result, The breakdown characteristics classify the vapor stage of SF₆ according the Paschen's law, the gas & liquid coexisted stage of voltage value increases & much deviation and the VB low stage as the interior of chamber gets filled with mixture of SF₆ that are not liquefacted and remaining air which couldn't be ventilated. In addition the ability of insulation of liquid SF₆ was higher than that of the highly pressurized SF₆ gas. In this research, we want to provide the base data on designing insulation of high-temperature superconductor and the cryogenic equipments by investigating the insulation characteristics of SF₆.

Key Words : SF₆, GIS, Phase transition

1. 서 론

산업사회의 발달과 더불어 신뢰성 높은 양질의 전

기에너지와 운전 및 보수의 간편화, 계통 운용의 신뢰성, 안전성 확보가 요구되고 있다. 이에 따라 절연 특성이 매우 우수한 고압의 SF₆가스를 절연재료로 사용하는 변전기기의 사용이 증가되고 있는 실정이며, 국·내외에서 건설, 운전 중이다.

하지만 현대사회가 첨단과학의 이기를 갈망함에 따라 현재보다 더 많은 전력에너지를 필요함과 동시에 도시의 공간 활용의 효율성 측면에서 전력기기를

* 주저자 : 영남대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 053-810-3953, Fax : 053-810-4629

E-mail : sanaikjh@yahoo.co.kr

접수일자 : 2005년 10월 25일

1차심사 : 2005년 10월 31일

심사완료 : 2005년 11월 8일

의 소형화 및 고 신뢰화가 시도되고 있다. 또한 SF₆ 가스 적용 변전기기는 공급범위가 확대되어, 혹한 지역에도 설치가 되고 있는데, 이 경우 온도 저하에 따라 액화현상으로 절연특성이 큰 변화를 가져옴으로서 오동작 현상이 큰 문제점으로 지적되고 있다. 현재 국내·외에서 진행되고 있는 연구는 SF₆ gas 을 이용한 전력기기의 가스누출의 검출, 부분방전에 수반되는 전자파 신호 검출, 초음파 센서를 이용한 초음파 신호의 검출과 같은 가스상태에서 발생하는 문제점에 대하여 이루어지고 있다. 따라서 혹한지역의 온도 저하에 의해 발생하는 기체와 액체의 공존 상태와 절연재로 사용이 가능한 액체 SF₆(LSF₆)를 앞으로 다가올 초고압시대에 맞추어 연구 및 개발의 필요성이 있다고 사료된다[7,9].

또한 SF₆ 가스를 절연매체로 사용하고 있는 초고압용의 설비에 주로 적용되는 GIS설비는 고전압상태에서 운전되므로 제작과정 및 운전상태에서 미세한 구조적 결함이나 이물질로 인해 기기의 오동작이나 절연파괴와 같은 사고발생시 파급효과도 크다. 이에 외부환경 및 여러 가지의 사고사항을 고려한 최적 절연설계를 통한 부분방전의 발생가능성을 최대한 줄이는 연구가 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 챔버 내에 일정 가스량 존재시의 온도와 압력의 변화에 따른 전원별 (DC(-), AC) SF₆의 절연특성을 구명함으로써 각종 고온초전도 및 극저온 응용 설비의 절연설계에 기초 자료를 제공하고 자 한다. 아울러 온도저하에 따른 상전이 특성도 연구의 대상이다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험용 모의 GIS 챔버의 외관은 사진 1과 같고 이것은 SF₆의 방전 특성을 연구하기 위해 설계·제작한 챔버이다. 전원은 DC(-)용 Pulse Electronic Eng. Tokyo ; HDV-300 KIV-N 150[kV] / 1[mA]와 AC용 DY-106, AC 300[kV] / 120[mA]을 사용하였다. 실험용 모의 GIS 챔버 내부 온도를 관측하기 위하여 온도센서(UNICON, -50~50[°C])를 실험용 모의 GIS 챔버 내부 중심부에 전극부와 평행하게 전극 수직 중심축과 8[cm] 떨어진 곳

에 설치하였다. 실험용 모의 GIS 챔버 내부압력을 측정하기 위해 압력계(WISE, 0~15기압)를 설치하였다. 실험용 모의 GIS 챔버 내부를 진공펌프(SINKU KIKO Co.Ltd, GUD-050A, pumping speed 60[l]/min)로 5×10⁻⁴[Torr]까지 진공을 유지할 수 있으며, 열 절연을 위하여 챔버 내·외부사이에 진공층을 두었다.

실험용 모의 GIS 챔버 내부에 설치된 온도센서와 전극부를 관측할 수 있는 관측창(직경 110[mm], 두께 20[mm])을 설치하였다. 이 관측창의 재질은 투명 아크릴이며, 원통형으로 제작 설치하였다.

실험용 모의 GIS 챔버의 주요 사양은 압력 변화(2~6[atm])를 위해 안전상 10기압 정도의 가압이 가능하고 압력 유지를 위해 실험용 GIS 챔버 내의 기밀성 유지가 가능하다. 또한 온도변화(50~-50[°C]) 및 유지가 가능하고 높은 절연성을 가진 SF₆ 가스의 절연내력 시험을 위해 150[kV]까지 고압인가를 할 수 있도록 절연설계가 되어있다.

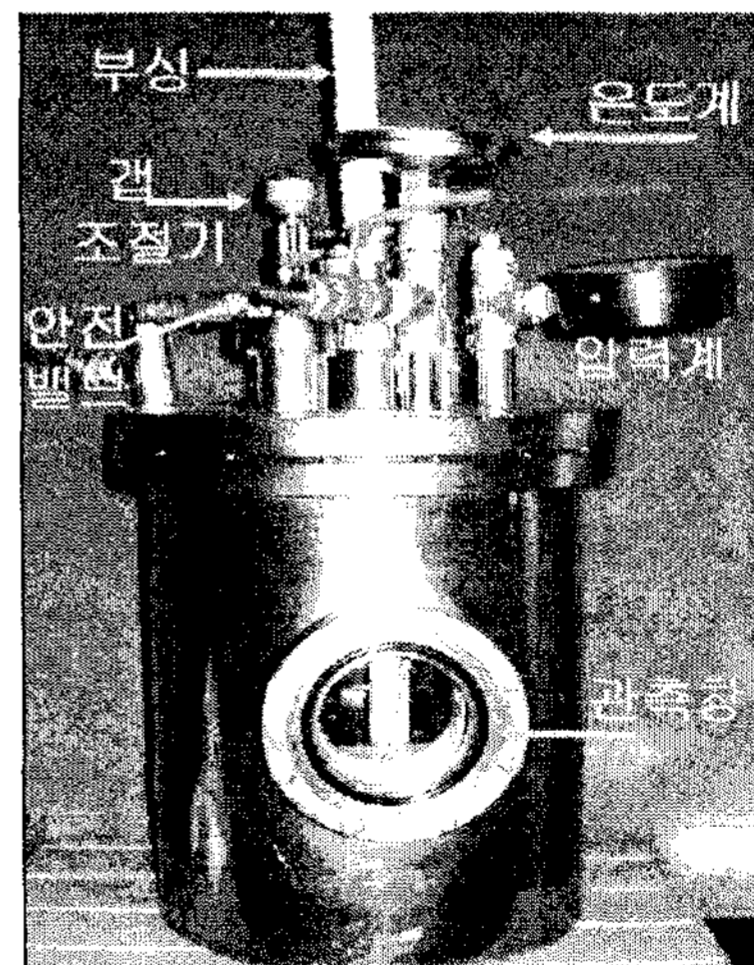


사진 1. 실험용 모의 GIS
Photo 1. The experimental imitated GIS

사용전극은 Needle-Plane전극(Needle ; 상부, Plane ; 하부, N-P), Needle ; 5[mm], 침단각도 20[°], Plane ; 직경직경 59[mm]이며 극간거리(d[mm])는 3[mm]로 하였다. SF₆을 투입하기전 챔버 내를 10⁻⁴[torr]까지 배기시킨후 상온(30[°C])하에서 4, 5 및 6[atm]까지 SF₆을 투입후 각 기압에서 온도센서

온도저하에 따른 SF₆의 상전이 및 절연특성

부의 온도를 30~-40[°C]까지 하강시켜갈 때 압력변화와 이에 따른 절연파괴전압(V_B) 특성 및 상전이 현상을 연구하였다. 절연파괴 전압은 10회 측정하여 평균한 값을 이용하였다.

절연파괴 측정시의 전압은 상승속도 1[kV/s]로 하였다. 부정현상을 없애기 위해 처음 10번 정도 방전시킨 후 절연파괴 전압값을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 일정가스량 유지시 온도 의존성, 절연특성 및 상전이 특성

3.1.1 DC(-) 전원 인가시

그림 1은 챔버내에 N-P을 설치하여 30[°C]에서 일정 SF₆ 가스량을 4, 5 및 6기압으로 유지시 온도 및 압력에 대한 V_B특성을 나타낸다. 본 실험은 혹한 지역에서의 SF₆을 이용한 전력기기들의 온도변화에 따른 내부 SF₆ 상태와 절연특성을 확인하기 위함이다.

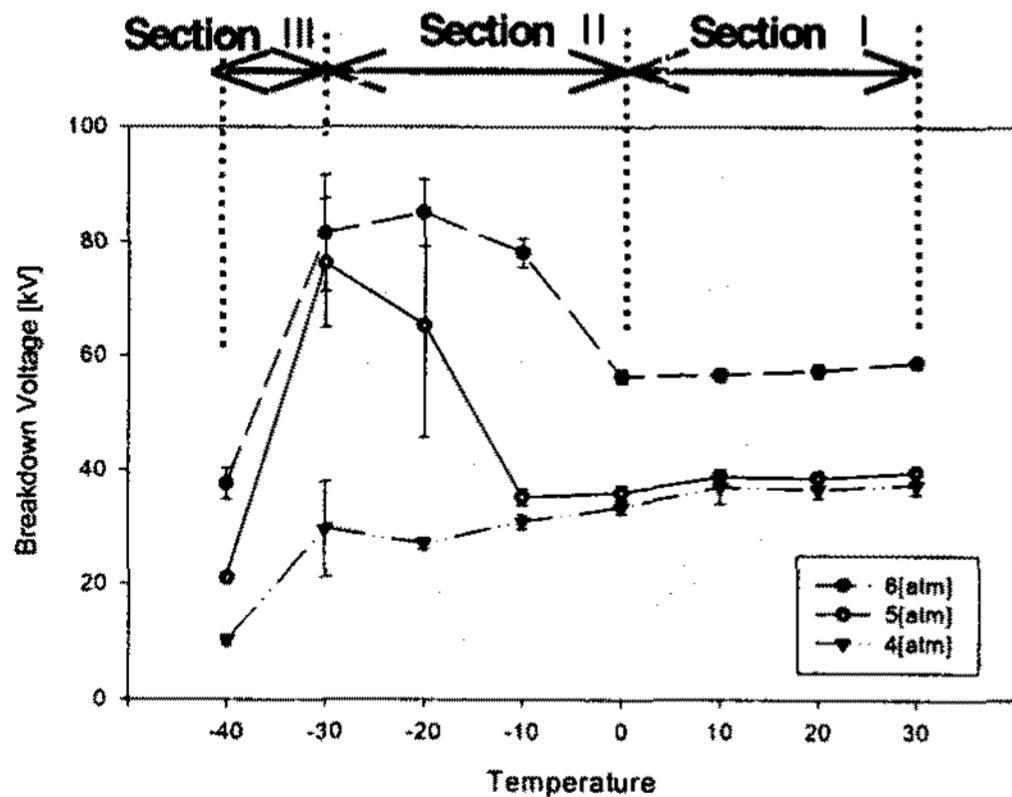


그림 1. 일정가스량 유지시 온도 및 압력에 따른 SF₆의 DC(-) 방전특성

Fig. 1. The DC(-) characteristic of breakdown on the temperature-pressure with a constant gas volume

그림 1에서 Section I은 각 압력에 대한 기체상태에서 온도의 감소에 따라 압력이 감소하는 단계이

다. 이때는 온도가 떨어짐에 따라 압력이 서서히 감소하고, 이에 따라 V_B도 함께 서서히 떨어지는 구간. 즉 Paschen's law의 적용이 가능한 영역이다.

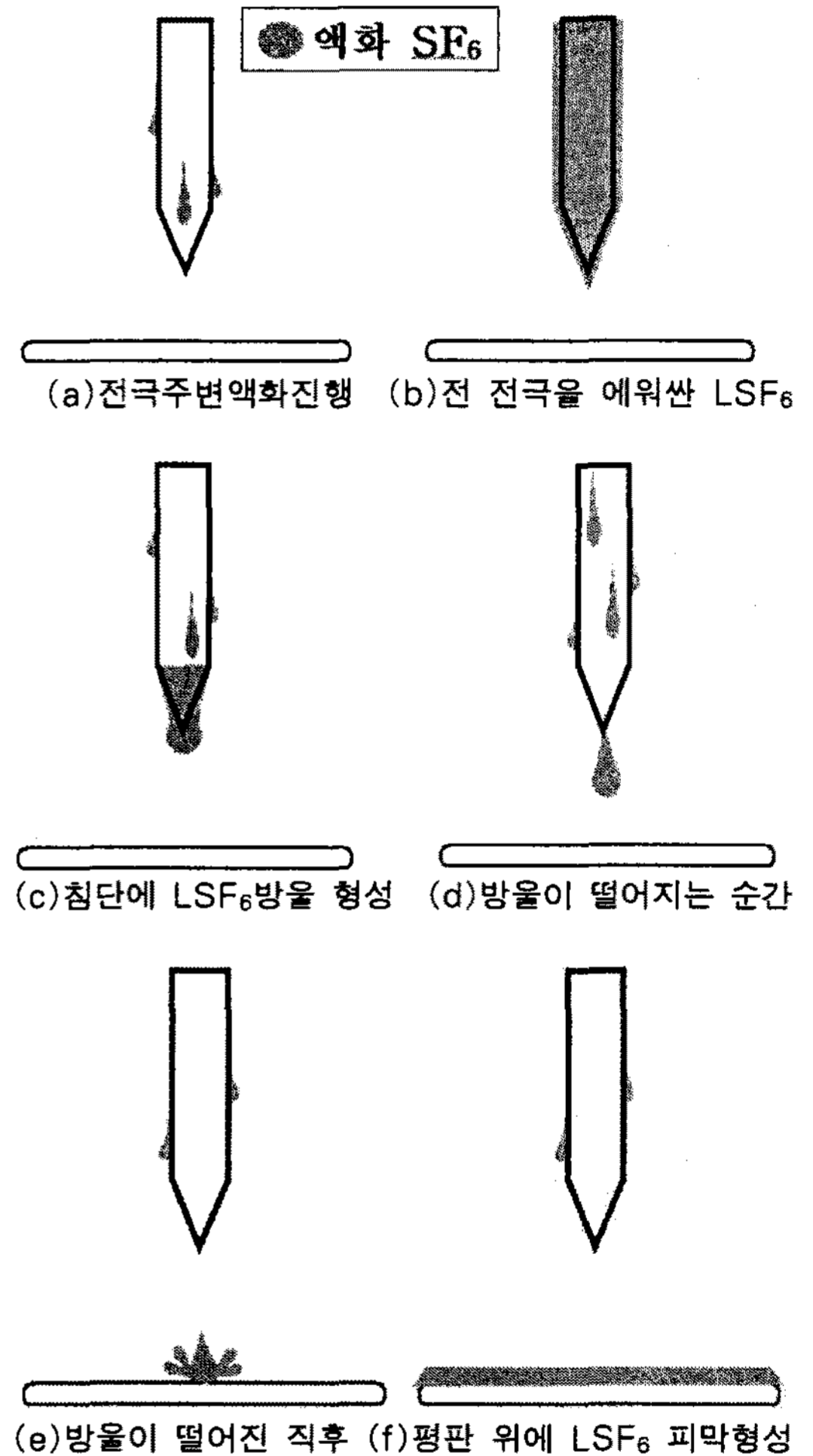


그림 2. SF₆의 액화시 침전극에 부착되어 흐르는 LSF₆의 모양

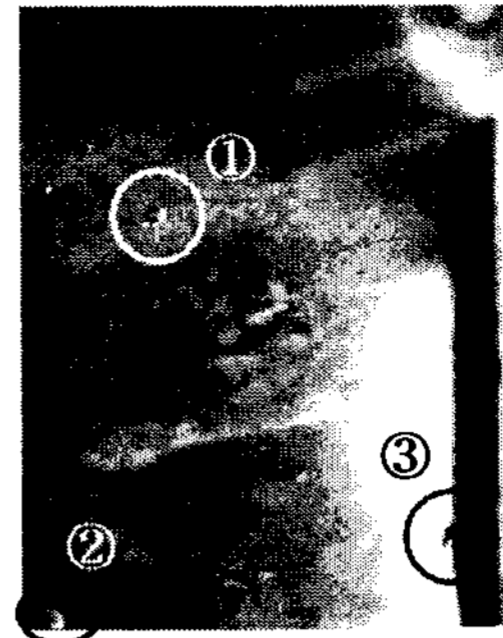
Fig. 2. The LSF₆ climbs down the electrode after the SF₆ gradually liquefacts from the needle electrode

Section II에서는 그림 2와 같이 침전극 주위 및 챔버 내벽으로부터 서서히 SF₆가 액화되는 과정으로 대체적으로 절연파괴 전압값이 상승되는 영역이다. 이때 절연파괴 전압의 값이 크게 편차가 나타남을 알 수 있는데, 이는 그림 2-(b)와 같이 SF₆가 침전극 주위를 에워싸고, 그림 2-(f)와 같이 평판전극

상부에 LSF₆ 피막이 형성 될 때 절연파괴 되는 순간에는 그 값이 높게 나타나며, 그림 2-(d)와 같이 침전극 주위에 에워싸고 있던 액체 SF₆(LSF₆)가 하부로 떨어져 버린 직후(그림 2-(e)) 및 그림 2-(a)의 경우에 측정된 값은 낮게 나타남에 기인한다. 이때는 액화가 진행되고 있는 단계로서 N-P간의 절연매체는 SF₆와 LSF₆가 공존하는 영역의 절연특성이라 볼 수 있다. Section II의 경우 액화되는 온도는 온도측정부의 온도이며, 실제로 액화되는 지점은 챔버 상부측 냉매인 드라이아이스가 접촉된 곳이며 이곳에서 먼저 액화가 진행되어 전극 및 챔버 내벽으로 흘러내리게 된다. 또 압력이 낮을수록 더 낮은 온도에서 액화가 진행됨을 알 수 있다. 특히 액화가 시작되는 Section II의 0~20[°C]미만에서는 평판에 떨어진 LSF₆는 챔버의 상부보다 상대적으로 온도가 높은 평판에 닿는 순간 기화된다. 하지만, Section II의 V_B가 최대치를 나타내는 6기압의 -20[°C], 4, 5기압의 -30[°C]에서는 사진 2-(b)와 같이 침전극에서 떨어진 LSF₆가 평판 위에 모여 액체상의 피막을 형성하여 그 LSF₆ 피막이 절연성을 높여주므로 V_B가 침전극에만 에워싸는 경우의 값보다 더 높게 된다.

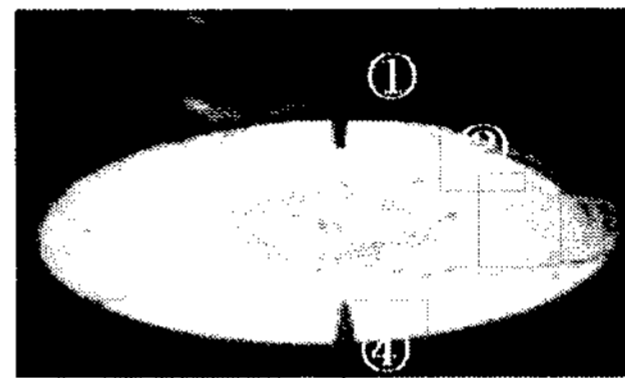
사진 2는 챔버 내부에서 SF₆가 액화되는 과정을 보여주고 있다. 냉매인 드라이아이스가 접촉되어 있는 상부부터 액화되어 사진 2-(a)와 같이 LSF₆가 상부에서 떨어지는 방울(2-(a)-①), 챔버 내부를 타고 내려오는 방울(2-(a)-②) 및 침전극을 타고 내려오는 방울(2-(a)-③)을 볼 수 있다. 또한 액화가 진행됨에 따라 그림 2와 같은 과정을 거쳐 평판전극위로 LSF₆ 방울이 떨어지게 된다. 하지만 0~-20[°C]미만에서는 떨어진 LSF₆는 상대적으로 높은 온도를 가지고 있는 평판전극에 닿는 순간 기화하게 되고 약 -20[°C]이상에서는 사진 2-(b)-③과 같이 LSF₆가 평판 위에 모여 액체상의 피막을 형성함을 보여주고 있다.

Section III은 챔버 내부의 대부분의 SF₆가 거의 모두 액화 되어 모의 GIS 하부에 LSF₆가 모이게 되고 전극 주변에는 액화되지 않은 극히 저밀도의 SF₆가스와 배기되지 못한 잔류 공기의 혼합체로 채워진 극히 낮은 압력상태로 되어 V_B가 크게 낮아지는 단계이다.



← 침전극
 ① 상부에서 떨어지는 LSF₆
 ② 챔버 내벽을 타고 내려오는 LSF₆
 ③ 침전극을 타고 내려오는 LSF₆

(a) 침전극 주위의 LSF₆, 내벽에서 형성된 LSF₆ 및 상부에서 떨어지는 LSF₆ 방울



① 침전극
 ② 평판전극
 ③ 피막을 형성한 LSF₆
 ④ 침전극이 반사된 영상

(b) 평판전극 상부에 형성된 LSF₆ 피막

사진 2. 챔버내 LSF₆ 형성과정의 사진
 Photo.2. A process where the SF₆ is being liquefacted in the chamber

Boyle-Charles's Law에 의해 6, 5 및 4기압으로 일정한 압력을 유지하면 압력이 클수록 온도저하에 따른 액화점이 높게 나타난다. 그림 2에서 6기압에서와 같이 30~0[°C]까지는 SF₆가 기체로 존재하며, 온도가 전극부 온도가 0[°C]이하로 저하할 경우 챔버 내에서 가장 온도가 낮은 상부부터 액화가 시작되어 전극부 온도가 -20[°C]에서 가장 활발히 액화가 됨을 확인하였다. 또한 5기압과 4기압에서도 -10~-20[°C]와 -20~-30[°C]에서 액화가 시작됨을 확인하였다. 챔버의 온도센서는 챔버 내부 바닥으로부터 위로 15[cm], 전극부의 중심과 평행하게 전극 수직 중심축으로부터 8[cm] 떨어진 곳에 설치하였다. 따라서 실제 액화점은 더 낮은 온도에서 될 것으로 생각된다.

3.1.2 AC 전원 인가시

그림 3은 3.1.1과 같은 동일한 조건에서 AC 전원을 인가시 일정가스량 유지시 온도 및 압력에 대한 V_B특성을 나타낸다.

DC(-) 전원을 인가하였을 경우와 같이 그림 3에

온도저하에 따른 SF₆의 상전이 및 절연특성

서 Section I은 Paschen's law의 적용이 가능한 영역이다. Section II는 챔버 내의 SF₆의 온도가 감소됨에 따라 챔버 내의 상부로부터 액화되어 챔버 내벽, 침전극 주위로 서서히 액화가 진행됨을 확인하였다. V_B는 LSF₆가 그림 2-(b)와 같이 침전극 주위를 에워싸고, 그림 2-(f)와 같이 평판전극 상부에 LSF₆ 피막을 형성할 때 가장 높은 값을 가지며, 그림 2-(d)와 같이 침전극 주위에 에워싸고 있던 LSF₆가 하부로 떨어져 버린 직후(그림 2-(e)) 및 그림 2-(a)의 경우에 측정된 값이 가장 낮은 값으로 측정되었다. 또한 Section III은 전극 주변에는 액화되지 않고 잔류하고 있는 극히 저밀도의 SF₆ 가스와 배기되지 못한 잔류 공기의 혼합체로 채워진 극히 낮은 압력 상태로 되어 V_B가 크게 낮아지는 단계이다.

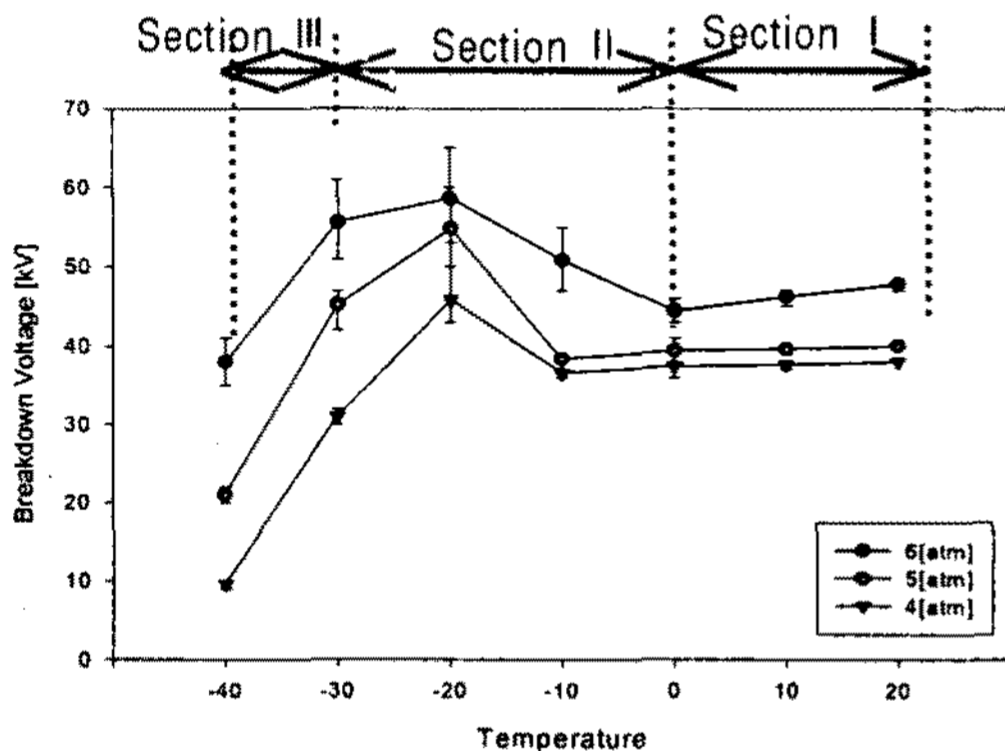


그림 3. 일정가스량 유지시 온도 및 압력에 따른 SF₆의 AC 방전특성

Fig. 3. The AC characteristic of breakdown on the temperature-pressure with a constant gas volume

4. 결 론

본 논문은 DC(-)/AC 고전압을 사용하여 SF₆의 상전이특성, 온도-압력특성, 온도-절연파괴특성에 관한 연구로 요약 기술하면 다음과 같다.

- 1) 각 압력에 따른 SF₆의 기체 단계에서는 Paschen's Law에 따른 특성을 확인하였다(Section I).
- 2) SF₆의 액화가 진행됨에 따라 절연파괴 전압은 크게 상승하며 이때는 최대 및 최소 절연파괴전압의 차이가 크게 나타난다(Section II). 이러한 현상은

침전극 주위 및 챔버 내벽으로부터 서서히 SF₆가 액화되어 LSF₆가 전극부를 타고 내려오면서 LSF₆가 침전극 주위를 에워싸고 있을 때 절연파괴 되는 순간에는 그 값이 높게 나타나며 침전극 주위에 에워싸고 있던 LSF₆가 하부로 떨어져 버린 직후에 측정된 값은 낮게 나타남에 기인한다. 또한 절연파괴전압이 가장 높게 나타나는 6기압의 -20[°C], 4, 5기압의 -30[°C]이상에서는 침전극에서 떨어진 LSF₆가 평판전극 상부에 피막이 형성되어 더 높은 절연파괴전압이 나타난다.

3) SF₆의 액화가 더욱더 진행될 경우 챔버 내부에는 액화되지 않은 저밀도 SF₆ 가스와 잔류공기로 채워지게 되며 압력 또한 극히 낮은 상태로 되기 때문에 절연파괴 전압이 크게 낮아지게 된다(Section III).

4) 기체 SF₆가 LSF₆로 되는 온도는 압력에 따라 다르나 초기 투입 SF₆ 가스압이 6기압일 때는 전극부 온도가 약 0~-10[°C] 일 때 액화가 이루어진다. 실제 액화지점은 챔버 상부, 즉 냉매인 드라이아이스가 접촉된 곳이므로 액화온도는 이 온도보다 더 낮음을 알 수 있다.

5) Boyle-Charles's Law에 의해 6, 5및 4기압으로 일정한 압력을 유지하면 압력이 클수록 온도저하에 따른 액화점이 높게 나타나며, 실제 SF₆의 액화점은 측정된 온도보다 더 낮은 온도에서 결정된다.

6) AC 전원을 인가시 일정가스량 유지시 온도 및 압력에 대한 절연파괴특성도 DC(-)인가시와 같이 Paschen's Law 적용 단계(Section I), SF₆가 액화되는 과정으로 전압 값이 크게 편차를 보이면서 대체적으로 상승되는 영역(Section II)과 전극주변에 저밀도 SF₆와 잔류 공기로 채워진 극히 낮은 압력상태로 되어 절연파괴전압이 크게 낮아지는 단계(Section III)로 구분되었다.

앞으로 LSF₆와 고체 SF₆에 관한 연구를 보완하고 장래에 이 연구 결과를 응용하면 각종 고온 초전도 및 극저온 응용설비의 절연설계에 기초자료, 대체 절연물로 사용이 기대된다.

References

- [1] Landry, M. et al. "Dielectric withstand and breaking capacity of SF₆ circuit breakers at low temperatures" Power Delivery, IEEE Transactions on, pp. 1029~1035, July 1988.
- [2] Gong Guoli et al, "The influence of SF₆ and SF₆/N₂ dissociating products on the electrical performance of several insulating varnishes", Electrical Insulating Materials, pp. 495~497, 1995.
- [3] T.Ueda et al, "Discrimination of Partial Discharge Electromagnetic Signal in SF₆ Gas from External Noise Using Phase Gate Control Method", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 117~120, 1996.
- [4] Kwang-Sik Lee, "A Study on the discharge characteristics of liquid nitrogen at atmospheric pressure", KIEE Vol 45 No 7, 1996.7.
- [5] C.Beyer et al. "Influence Reactive SFX Gases on Electrode Surfaces after Electrical Discharge under SF₆ Atmosphere", IEEE Trans, pp. 234~240, 2000.
- [6] Kwang-Sik Lee, "A Study on the Discharge Characteristics of Liquid Nitrogen and Gases at Very Low Temperature", KEPCO, 1993.8.
- [7] Kyeung-Tae Park, "The Characteristics of Discharge and Radiated Electromagnetic Waves with a Variation of Temperature in SF₆", Yeungnam Univ. , 2002.12.
- [8] Kwang-Sik Lee, "The Characteristics of Insulation with Temperature Variations of SF₆" KIEE Vol 52C No 8, 2003.8.
- [9] Kwang-Sik Lee, Eun-Hyuck Choi, "The Positive Effect and the Breakdown Characteristics in SF₆ and LN₂", KIEE Vol 54C No 8, 2005.8.

◇ 저자소개 ◇

김종환 (金鍾煥)

1959년 9월 19일생. 1984년 영남대 전기공학과 졸업. 2002년 영남대 산업대학원 전기공학과 졸업. 2004년 영남대 일반대학원 전기공학과 박사과정수료. 현재 경북교육청 재직.

최은혁 (崔殷赫)

1977년 2월 19일생. 2003년 경일대 전기공학과 졸업. 영남대 대학원 전기공학과 석사. 현재 동대학원 박사과정.

박광서 (朴光緒)

1970년 3월 23일생. 1997년 영남대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 졸업(박사). 현재 경일대학교 전기공학과 전임강사.

윤대희 (尹大熙)

1971년 3월 1일생. 1997년 영남대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기공학과 박사과정.

김이국 (金利國)

1946년 9월 30일생. 1969년 영남대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 졸업(석사). 2002년 동 대학원 졸업(박사). 현재 경일대학교 전기공학과 교수.

이광식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전고전압연구회 간사장 역임. 한국조명전기설비학회 편수위원장·부회장 역임. 영남대학교 산업대학원 원장 역임. 현재 영남대학교 전기공학과 교수.