

SF₆계 혼합가스의 뇌임펄스 절연파괴특성

Lightning Impulse Breakdown Characteristics of SF₆-based Mixture Gases

서호준^{1,a}, 이동희¹

(Ho-Joon Seo^{1,a} and Dong-Hee Rhie¹)

Abstract

SF₆ is widely used as gas insulation medium because of having excellent dielectric and arc-quenching properties. However the use of it is getting to be suppressed from the viewpoint of mitigating global warming. For the development of environmentally-benign electric power equipment and system, novel gases or mixture gases are strongly required as the substitute of SF₆ gas. In this study the authors constructed an experimental system to investigate insulation properties of the mixed gases composed of negative gas(SF₆) and electron deceleration gases(N₂ and CO₂). Breakdown and prebreakdown characteristics of SF₆/N₂/CO₂ mixture gases were investigated using the above mentioned system for different rates and gas pressures.

Key Words : SF₆, Mixture gases, Lightning impulse, Breakdown, Prebreakdown characteristics

1. 서론

인간 활동의 환경에 대한 영향은 최근에 이르러 전세계적으로 커다란 관심의 대상이 되어 있으며, 특히 대기 중의 온실가스 농도의 증가에 기인하는 잠재적인 기후변화효과가 지구환경 측면에서 크게 주목받고 있다[1]. 이들 가스 중의 하나가 전력산업 분야에서 주로 사용되고 있는 SF₆ 가스이다. SF₆는 특히 10.5 μm 대역의 적외선 복사성분에 대한 유효한 흡수체이다[2]. 일반적으로 온실가스에 의한 적외선복사의 실질적인 흡수와 지구로의 재방출은 지구 대기권의 평균적인 온도 상승을 초래하게 되며 이 효과를 “온실효과”라 한다. 온실효과에 대한 인공물질의 기여 효과는 지구 대류권 최상층부에서 일어나는 복사에너지의 입수와 방출간의 균형을 온실가스가 존재하는 대기권으로 진이시켜 “지구온난화”를 야기시키는데 있다. 더욱이

자연적으로 발생하는 대부분의 여타 온실가스(CO₂, CF₄ 등)와 달리 SF₆는 화학적 및 광분해 열화 면역성이 있어 지구온난화에 대한 그 기여효과는 누적적이고 실제로는 항구적이다. SF₆의 경우, 현재까지 지배적인 분해기구가 명확하지 않은 관계로 그 수명(대기 중으로 배출된 SF₆가 자연적인 과정을 통해 초기량의 약 37 %로 감소되는데 소요되는 시간)을 결정하기에 어려움이 있으나 현재 가장 3200년 정도로 추정되고 있다[3].

상술한 두 요소, 즉 강한 적외선 흡수력과 장수명에 의해 SF₆는 지구온난화에 대한 고도의 잠재성을 가진 것으로 평가받게 되어 현재 이 가스의 주된 사용자인 전기회사는 SF₆ 가스의 사용에 대한 정당성과, 동시에 환경에 대한 보존성을 제시할 수 있어야 하게 되었다[4]. 이에 따라 현재 및 장래에 있어 가스절연은 환경적으로 수용 가능하여야 한다. 따라서 지구온난화에 대한 SF₆의 가능한 영향을 줄이는 최상의 대책은 SF₆의 배출을 방지하는 것이며, 이를 위한 가장 효율적인 방법은 SF₆를 전혀 사용하지 않는 것이다. 이와 같은 주장이 환경 측면에서는 유혹적일 수 있으나 가까운 장래에 SF₆ 사용을 완전히 배제하기는 산업적 및 사회

1. 수원대학교 전기공학과

(경기도 화성시 봉담읍 와우리 산 2-2)

a. Corresponding Author : hojoon@suwon.ac.kr

접수일자 : 2005. 5. 28

1차 심사 : 2005. 5. 31

심사완료 : 2005. 6. 7

적 관점에서 예상하기 어렵다. 그러나 이와 같은 주장에 따라 대체가스에 대한 조사와 아울러 고전압 절연용 대체기술에 대한 필요성이 증가되고 있다. 이와 같은 과정에서 최근 SF₆/완충기체에 의한 혼합가스는, SF₆ 가스의 사용량 삭감에 효과적인 대책으로서 주목받고 있다. SF₆ 가스를 포함한 이들 혼합가스의 큰 이점은 절연성능에서 정(正)의 상승효과가 나타나는 점이다[5,16-18].

SF₆ 대체가스의 갭간 절연특성에 관한 연구는 종래 SF₆/N₂ 혼합가스를 중심으로 활발히 진행되어 왔으나[6-11,16-18] 최근에 이르러 완충기체로서 CO₂가 상당히 적극적으로 검토되고 있다. Qiu [12] 등은 GIT에 적용하는 경우 SF₆/N₂에 비해 SF₆/CO₂의 절연특성이 우수하고, 또한 상당히 강한 불균일전계 조건에서 순 SF₆에 비해 SF₆/Air와 SF₆/CO₂ 혼합가스가 보다 높은 충격전압 최소파괴치를 보임을 보고하고 있다. 한편 Ohtsuka 등은 [13] 50%SF₆/N₂ 혼합가스에 1%의 CO₂를 부가함으로써 파괴전압최대치가 50%SF₆/N₂ 혼합가스 및 순 SF₆에 비해 각각 1.31배 및 1.15배 증가하는 것으로 보고하고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 사회적 요구에 부응하여 국내 SF₆ 대체가스 연구의 방향을 제시하기 위하여 SF₆/N₂, SF₆/N₂/CO₂의 2종 및 3종 혼합가스에 대해 그 절연특성을 조사하여 순 SF₆ 가스의 경우와 비교 검토하였다.

2. 실험 및 결과

본 연구에서는 GIS 설계에 있어 기초가 되는 준평등전계 하에서의 가스 절연특성을 검토하기 위하여 순 SF₆, SF₆/N₂ 및 SF₆/N₂/CO₂ 3종 가스에 대해 가스압력 0.6MPa 이하에서 표준뇌임펄스전압을 인가하여 실험에 의해 그 절연특성을 조사하였으며, 측정된 섬락전압은 와이불(Weibul) 분포에 따른 통계적 해석을 통해 순 SF₆ 가스와 혼합가스의 절연특성을 비교하였다. 한편 실용 전력기기의 경우 급속이불질 등의 혼입에 의해 기기 내에서 불평등전계가 형성되어 부분방전을 거쳐 절연파괴에 이르는 가능성이 있으므로 본 연구에서는 순 SF₆ 가스에 대해 불평등전계 하의 절연파괴특성도 함께 비교 검토하였다.

2.1 실험장치 및 실험

본 실험에서는 순 SF₆, 50%SF₆/50%N₂ 및 50%SF₆/49%N₂/1%CO₂ 3종류의 가스를 대상으로

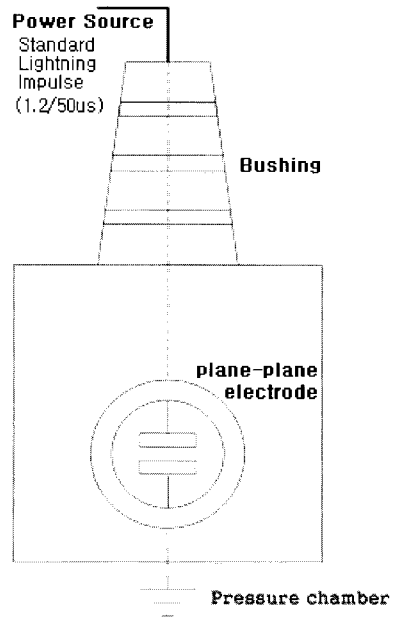


그림 1. 뇌임펄스특성 실험장치 구성.

Fig. 1. Experimental setup for lightning impulse characteristics.

가스압력을 0.6 MPa 이하에서 변화시켜 그 절연특성을 조사하였으며, 그림 1에 실험장치의 구성도를 나타내었다.

평등전계를 형성하기 위해 그림 2(a)에 나타낸 스테인레스 재질의 평판-평판전극(직경 40 mm, 곡률반경 5 mm로 단부 곡면처리, 평판부 직경 30 mm, 전극간격 10 mm)을 사용하였으며, 불평등전계에 의한 절연특성은 그림 2(b)의 침-평판 전극(침 선단 곡률반경 0.5 mm, 전극간격 10 mm)을 이용하여 실험하였다.

시험가스는 SF₆, SF₆의 혼합비율을 50%로 한 SF₆/N₂ 2종 혼합가스 그리고 SF₆의 혼합비율을 50%로 한 SF₆/N₂ 2종 혼합가스에 CO₂를 1% 부가한 3종 혼합가스의 3종류로 하였다. 시험가스의 혼합비는 고정도 압력센서(PTX610, Druck) 및 지시계(DPI145, Druck)를 이용하여 실온에서 각 가스의 압력비로 정하였다. 이와 같은 혼합가스의 혼합도를 확보하기 위하여 가스 혼합 후 24시간 동안 방치하여 자연확산에 의해 충분히 가스들이 혼합될 수 있도록 하였다.

평등전계 하에서의 섬락전압은 표준뇌임펄스전압(1.2/50 μs)을 인가하여 상승법(스텝 간격 2 kV)에 따라 동일 압력 조건에서 15회 측정하여 구하였다.

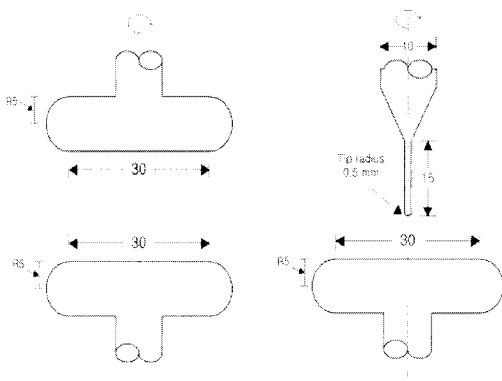


그림 2. 공시전극 구조.

Fig. 2. Tested electrode structure.

섬락이 발생되면 2.5분간의 휴지 기간을 거친 후 반복 실험을 하였다. 한편 가스압력은 일단 고기압 (0.6MPa) 상태에서 실험을 한 후 용기 내의 가스를 배기시켜 감압시키면서 설정 압력 조건에서 실험을 반복하였다. 이 측정결과를 와이불분포에 따른 통계적 해석을 통해 50 % 섬락전압을 구하였다.

불평등전계 하에서의 섬락전압은 침-평판 전극의 침전극에 표준뇌임펄스전압을 인가하여 평등전계 하에서의 섬락전압 측정 시험의 경우와 동일하게 측정하였다.

2.2 실험장치 및 실험

2.2.1 평등전계하 절연특성

SF₆, 50%SF₆/50%N₂ 및 50%SF₆/49%N₂/1%CO₂ 3종류 혼합가스의 각 가스압력에서의 섬락전압 V_{FO} 특성을 그림 3에 나타내었다. 이 결과를 와이불분포함수에 따라 계산해 보면 모든 가스의 누적 파괴확률과 절연파괴전압 V_{FO}의 관계는 선형근사 가능, 즉 V_{FO}는 와이불 분포에 따르고 있음을 알 수 있다. 와이불도표의 회귀직선의 기울기는 V_{FO}의 산포의 정도를 나타내는 형상파라미터 m에 해당되며, 회귀직선과 파괴확률 p=0.5와의 교점은 50 % 섬락전압 V₅₀ 을 나타낸다.

또한 이 그림으로부터 가스압력이 높아질수록 V₅₀은 증가하고 아울러 회귀직선의 기울기가 커지고 산포의 정도는 작아짐을 알 수 있다.

2.2.2 불평등전계하 SF₆ 가스 절연특성

그림 4에 갭간격을 10 mm로 하여 침-평판전극을 이용하여 구한 불평등전계 하에서의 SF₆ 가스

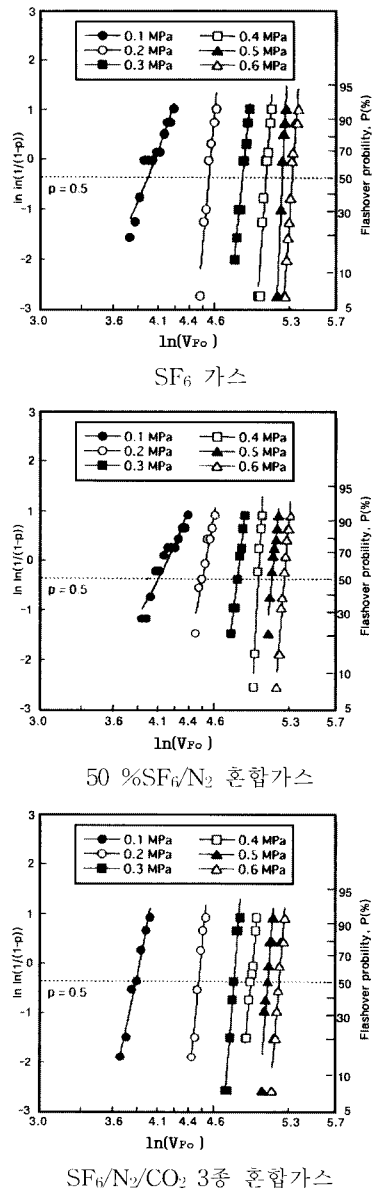
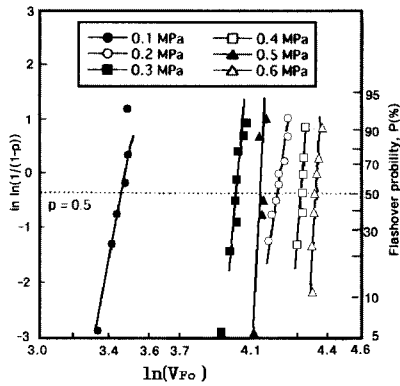


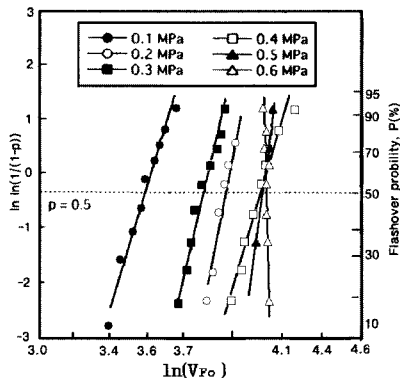
그림 3. 각 시험가스에 대한 섬락전압의 와이불 플롯.

Fig. 3. Weibull plot of flashover voltage for each tested gases.

에 대한 정극성 및 부극성 표준뇌임펄스전압 인가시의 절연파괴전압의 누적파괴확률을 와이불도표로 나타내었다. 이 그림으로부터 불평등전계 하에서도 평등전계의 경우와 동일하게 누적파괴확률이 와이불분포에 따르고 있음을 알 수 있다.



(a) 정극성(Positive lightning impulse)



(b) 부극성(Negative lightning impulse)

그림 4. 불평등전계 하에서의 인가전압 극성에 따른 순 SF₆ 가스 심락전압의 와이블 플롯.

Fig. 4. Weibull plot of flashover voltage of pure SF₆ gas for lightning impulse under non-uniform field.

그림 4로부터 정극성 뇌임펄스전압을 인가한 경우 각 가스압력에서의 파괴전압의 산포가 크며, 부극성의 경우에는 정극성의 경우에 비해 산포가 작음을 알 수 있다.

3. 실험결과 고찰

3.1 평등전계하 절연특성

기체 중에서의 절연파괴는 약점파괴에 기인하는 것으로 그 현상은 와이블 분포에 따르는 것으로 이해되고 있다. 본 연구에서는 뇌임펄스전압 인가 시 50% 절연파괴전압을 구하기 위해 와이블 분포

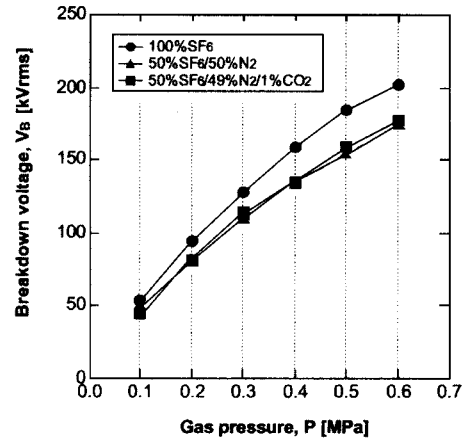


그림 5. 평등전계 하에서의 순 SF₆ 가스, 50%SF₆/N₂ 혼합가스 및 SF₆/N₂/CO₂ 혼합가스의 V₅₀ 특성.

Fig. 5. V₅₀ characteristics of pure SF₆ gas, 50%SF₆/N₂ and SF₆/N₂/CO₂ gas mixtures under uniform field.

함수를 이용하였다. 와이블 분포함수는 다음 식과 같이 주어진다.

$$p = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{V_0}\right)^m\right) \quad (1)$$

여기서, p는 누적파괴확률, V는 절연파괴전압, V₀는 척도파라미터(scale parameter), m은 형상파라미터(shape parameter)이다.

따라서 50% 파괴전압 V₅₀은 위 식에 p=0.5를 대입함으로써 구해지며 다음 식과 같이 표시된다.

$$V_{50} = V_0 \times 0.693^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

그림 5에, 식 (2)를 이용하여 구한, 평등전계 하에서의 순 SF₆ 가스와 50%SF₆/N₂ 혼합가스 및 SF₆/N₂/CO₂ 혼합가스 중에서의 뇌임펄스전압 인가 시의 정극성 V₅₀의 가스압력 의존성을 나타내었다. 각 가스에서 V₅₀은 가스압력이 상승함에 따라 단조 상승함을 알 수 있으며, 고가스압력 영역에서는 포화경향이 나타남을 알 수 있다. 여기서 순 SF₆ 가스의 V₅₀이 가장 높고 2종 및 3종 혼합가스의 특성은 거의 일치하는 것으로 보이며 교류전압 인

가시 불평등전계 하에서 보이는 3종 혼합가스의 절연내력 상승효과는 나타나지 않음을 알 수 있다.

그림 5에서 특히 주목할 만한 결과는 SF₆ 가스를 거의 동일한 비율로 혼합한 경우에 CO₂ 가스의 혼합 유무에 따른(즉 2종 및 3종 혼합가스) V₅₀ 특성이다. 처음에 그림의 결과를 언뜻 보면 2종 및 3종 혼합가스 간에 V₅₀의 현저한 차이를 확인하기 어려우나, 자세히 살펴보면 3종 혼합가스의 V₅₀이 2종 혼합가스의 값보다 0.1MPa의 압력 조건을 제외한 모든 압력 범위에서 약 5% 정도 높음을 알 수 있다.

3.2 불평등전계 하 SF₆ 가스 절연특성

그림 6에 침-평판전극을 이용한 불평등전계 하에서의 순 SF₆ 가스에 대한 정극성 및 부극성 뇌임펄스전압 인가시의 V₅₀의 가스압력 의존성을 나타내었다.

이 결과에서 가스압력 0.1MPa의 경우에는 양극성 모두 50% 파괴확률전압 V₅₀은 거의 같은 값을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 가스압력이 증가함에 따라 부극성의 경우에는 단조증가하나, 정극성의 경우에는 0.3MPa 이상의 가스압력에서 포화하는 경향을 보이고 있다.

한편, 그림 7에 불평등전계 하에서의 순 SF₆ 가스의 교류절연파괴전압(BDV) 및 부분방전개시전압(PDIV)의 가스압력 의존성을 나타내었다[14]. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SF₆ 가스에서는 절연파괴전압의 가스의존특성에서는 극대치가 나타나며 가스압력을 더욱 높이면 절연파괴전압은 일단 저하한 후 다시 상승하는 양상이 나타난다.

이와 같은 현상은 일반적으로 N-특성으로 알려져 있으며, 이 현상은 방전에 의해 만들어진 공간전하에 의해 침전극 선단의 전계가 완화되어 일어나는 것으로 코로나안정화작용이라 불리고 있다[15]. 따라서 가스압력이 낮은 범위에서는 부분방전이 발생하면 이 코로나안정화작용에 의해 전계가 완화되어 절연파괴전압이 높아지나, 가스압력이 높은 범위에서는 큰 부분방전이 발생되면 그대로 절연파괴에 이르게 되므로 고가스압력 측에서는 그림에서와 같이 절연파괴전압과 정극성 부분방전개시전압이 일치하게 된다.

본 실험 결과 그림 6에서 보이는 바와 같이 뇌임펄스전압 인가시 순 SF₆ 가스의 절연파괴특성에서는 교류절연특성에서와 같은 N-특성이 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 뇌임펄스전압이 인가되는 경우 상기 코로나안정화작용이 미약하기 때문으로 생각된다.

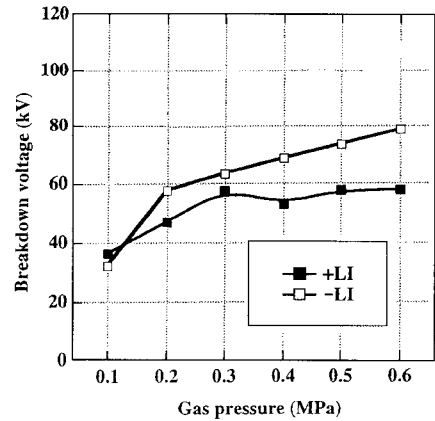


그림 6. 불평등전계 하에서의 순 SF₆ 가스의 뇌임펄스 절연파괴전압의 가스압력 의존성.

Fig. 6. Lightning impulse breakdown characteristic of SF₆ gas as a function of gas pressure under non-uniform field.

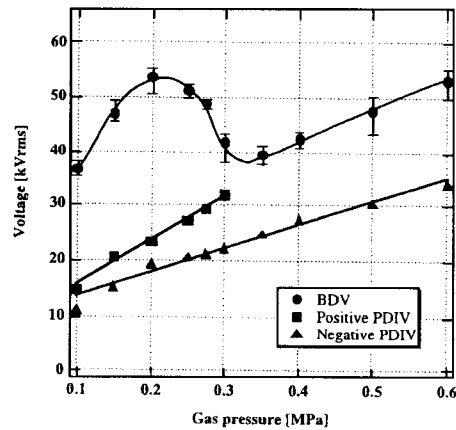


그림 7. 불평등전계 하에서의 순 SF₆ 가스의 교류절연파괴전압(BDV) 및 부분방전개시전압(PDIV)의 가스압력 의존성[14].

Fig. 7. AC BDV and PDIV characteristics of SF₆ gas as a function of gas pressure under non-uniform field[14].

한편 그림 6과 그림 7을 비교해 보면, 교류전압 인가시의 정극성 부분방전개시전압과 절연파괴전압이 일치하여 부분방전의 발생과 동시에 직접 절연파괴에 이르는 영역에서는 뇌임펄스전압의 정극

성 V_{50} 이 교류절연과피전압보다 높음을 알 수 있다. 일반적으로 임펄스과피전압과 교류과피전압을 비교해 보면, V-t 곡선특성으로부터 임펄스과피전압의 경우가 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 순 SF₆ 가스의 경우 고가스압력 영역에서 정극성 임펄스과피전압 V_{50} 이 교류절연과피전압보다 높은 것은 이 V-t 특성에 기인하는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 현재 온실효과를 일으키는 가스로 지정되어 배출규제 대상으로 되어 있는 SF₆ 가스를 대체하기 위한 새로운 절연매체를 개발하고자 하는 목적으로 50%SF₆/N₂ 2종 혼합가스와 50%SF₆/49%N₂/1%CO₂의 3종 혼합가스를 대상으로 GIS 설계의 기본이 되는 평등전계 조건에서의 임펄스전압 과피특성을 조사하여 순 SF₆ 가스의 절연과피특성과 비교 검토해 보았다. 아울러 불평등전계 조건에서의 순 SF₆ 가스의 임펄스전압 절연과피특성도 조사하여 교류과피특성과 비교해 보았다. 이로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 3종류의 시험가스 모두 평등전계 및 불평등전계 조건에서의 임펄스 절연과피특성은 와이불확률분포에 따름을 알 수 있었다.

(2) 뇌임펄스전압 인가시 평등전계 조건에서 3종 혼합가스의 V_{50} 이 2종 혼합가스의 경우에 비해 0.1MPa의 압력 조건을 제외한 모든 압력 범위에서 약 5% 정도 높음을 알 수 있었다. 그러나 순 SF₆ 가스의 경우에 비해서는 전 압력범위에서 약 10~15% 정도 낮은 값을 보였다.

(3) 뇌임펄스전압 인가시 전계의 평등성 유무에 무관하게 교류전압 인가시 불평등전계 조건에서 나타난다고 하는 50%SF₆/49%N₂/1%CO₂의 3종 혼합가스의 절연과피전압의 상승효과는 나타나지 않았다.

(4) 뇌임펄스전압 인가시 불평등전계 조건에서의 순 SF₆ 가스의 과피전압은 가스압력이 증가함에 따라 부극성의 경우에는 단조 증가하는데 반해 정극성의 경우에는 0.3 MPa 이상의 압력범위에서 포화하는 경향을 보였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(02-007)주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] NEDO 調査報告書, "代替フロンでの地球温暖化対策 動向調査", p. 69, 2002.
- [2] D. Edilson and K. B. McAffe, "Notes on the infrared spectrum of SF₆", J. Chem. Phys., Vol. 19, p. 1311, 1951.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "Radiative Forcing of Climate Change", The 1994 Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC, p. 33, 1994.
- [4] N. Bernard, S. Theoleyre, and G. Valentin, "How to use a greenhouse effect gas while being environmentally friendly: SF₆ case in medium voltage distribution", CIRED2001, IEE Conference Publication, p. 18, 2001.
- [5] S. R. Hunter, and L. G. Christophorou, "Pressure-dependent Electron Attachment and Breakdown Strength of Unitary Gases, and Synergism of Binary Gas Mixture: A Relationship", Gaseous Dielectrics IV, p. 115, 1984.
- [6] Electric Power Research Institute : Gases Superior to SF₆ for Insulation and Interruption : Report EPRI EL-2620, 1982.
- [7] S. A. Boggs, F. Y. Chu, and N. Fujimoto (eds), Gas- Insulated substations, Pergamon Press, New York, 1986.
- [8] L. G. Christophorou and R. J. Van Brunt, "SF₆/N₂ mixtures, basic and HV insulation properties", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, p. 952, 1995.
- [9] D. Zheng, P. Zhang, G. Gong, and Z. Wen, "Study about the electrical behaviour of the binary gaseous mixtures of SF₆", Proc. of 1998 Intern. Symp. on Elect. Insul. Mater., Toyohashi, Japan, 27-30, p. 437, 1998.
- [10] 山田達司, 高橋俊裕, 戸田恒雄, 大久保仁, "各種ガスとSF₆による混合ガス中における部分放電の発生メカニズム", 電気学会論文誌 B, 118巻, 7/8号, p. 837, 1998.
- [11] 이복희, 이경옥, "SF₆-N₂ 혼합가스에서 과도 임펄스전압에 대한 V-t 특성", 전기학회논문지, 50C권, 9호, p. 456, 2001.
- [12] Y. Qiu and E. Kuffel, "Comparison of

- SF₆/N₂ and SF₆/CO₂ gas mixtures as alternatives to SF₆ gas", IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul., Vol. 6, No. 6, p. 892, 1999.
- [13] 大塚信也, 永良俊治, 高村正樹, 橋本洋助, 中村道昭, 匹田政幸, "不平等電界下における CO₂/N₂/50%SF₆ 混合ガスの絶縁特性", 電気學會論文誌 B, 121 卷, 7 号, p. 830, 2001.
- [14] 永良, 田志, 匹田, "SF₆ 가스および混合가스中における部分放電特性の検討", 電気學會研究會資料, ED-98-178, p. 79, 1998.
- [15] M. Zou and J. P. Reynders, "Synergy between SF₆ and other gases to enhance dielectric strength", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, p. 251, 1997.
- [16] 이복희, 이경옥, 이창준, 백승권, "불평등전계중에서 임펄스전압에 대한 SF₆ 기체의 전구방전과정의 분석", 전기전자재료학회논문지, 13권, 1호, p. 85, 2000.
- [17] 박명진, 김대연, 전병훈, 하성철, "SF₆를 포함하는 혼합가스의 절연특성에 관한 연구", 전기전자재료학회 '99 추계학술대회논문집, p. 165, 1999.
- [18] 이복희, 전덕규, 이경옥, 안창환, 이창준, "불평등전계중에서 SF₆ 가스의 절연특성", 전기전자재료학회 '97 추계학술대회논문집, p. 334, 1997.