Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 18, No. 7, p. 675, July 2005.

논 문 18-7-16

SF_6계 혼합가스의 뇌임펄스 절연파괴특성

Lightning Impulse Breakdown Characteristics of SF_6-based Mixture Gases

서호준[1,a], 이동희[1]
(Ho-Joon Seo[1,a] and Dong-Hee Rhie[1])

Abstract

SF_6 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 SF_6 gas. In this study the authors constructed an experimental system to investigate insulation properties of the mixed gases composed of negative gas(SF_6) and electron deceleration gases(N_2 and CO_2). Breakdown and prebreakdown characteristics of $SF_6/N_2/CO_2$ mixture gases were investigated using the above mentioned system for different rates and gas pressures.

Key Words : SF_6, Mixture gases, Lightning impulse, Breakdown, Prebreakdown characteristics

1. 서 론

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 SF_6 가스이다. SF_6는 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 전이시켜 "지구온난화"를 야기시키는데 있다. 더욱이 자연적으로 발생되는 대부분의 여타 온실가스(CO_2, CF_4 등)와 달리 SF_6는 화학적 및 광분해 열화 면역성이 있어 지구온난화에 대한 그 기여효과는 누적적이고 실제로는 항구적이다. SF_6의 경우, 현재까지 지배적인 분해기구가 명확하지 않은 관계로 그 수명(대기 중으로 배출된 SF_6가 자연적인 과정을 통해 초기량의 약 37 %로 감소되는데 소요되는 시간)을 결정하기에 어려움이 있으나 현재 최장 3200년 정도로 추정되고 있다[3].

상술한 두 요소, 즉 강한 적외선 흡수력과 장수명에 의해 SF_6는 지구온난화에 대한 고도의 잠재성을 가진 것으로 평가받게 되어 현재 이 가스의 주된 사용자인 전기회사는 SF_6 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 SF_6의 가능한 영향을 줄이는 최상의 대책은 SF_6의 배출을 방지하는 것이며, 이를 위한 가장 효율적인 방법은 SF_6를 전혀 사용하지 않는 것이다. 이와 같은 주장이 환경 측면에서는 유혹적일 수 있으나 가까운 장래에 SF_6 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 고전압절연용 대체기술에 대한 필요성이 증가되고 있다. 이와 같은 과정에서 최근 SF_6/완충기체에 의한 혼합가스는, SF_6 가스의 사용량 삭감에 효과적인 대책으로서 주목받고 있다. SF_6 가스를 포함한 이들 혼합가스의 큰 이점은 절연성능에서 정(正)의 상승효과가 나타나는 점이다[5,16-18].

SF_6 대체가스의 갭간 절연특성에 관한 연구는 종래 SF_6/N_2 혼합가스를 중심으로 활발히 진행되어 왔으나[6-11,16-18] 최근에 이르러 완충기체로서 CO_2가 상당히 적극적으로 검토되고 있다. Qiu [12] 등은 GIT에 적용하는 경우 SF_6/N_2에 비해 SF_6/CO_2의 절연특성이 우수하고, 또한 상당히 강한 불균일전계 조건에서 순 SF_6에 비해 SF_6/Air와 SF_6/CO_2 혼합가스가 보다 높은 충격전압 최소파괴치를 보임을 보고하고 있다. 한편 Ohtsuka 등은 [13] 50 %SF_6/N_2 혼합가스에 1 %의 CO_2를 부가함으로써 파괴전압최대치가 50 %SF_6/N_2 혼합가스 및 순 SF_6에 비해 각각 1.31배 및 1.15배 증가하는 것으로 보고하고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 사회적 요구에 부응하여 국내 SF_6 대체가스 연구의 방향을 제시하기 위하여 SF_6/N_2, $SF_6/N_2/CO_2$의 2종 및 3종 혼합가스에 대해 그 절연특성을 조사하여 순 SF_6 가스의 경우와 비교 검토하였다.

2. 실험 및 결과

본 연구에서는 GIS 설계에 있어 기초가 되는 준평등전계 하에서의 가스 절연특성을 검토하기 위하여 순 SF_6, SF_6/N_2 및 $SF_6/N_2/CO_2$ 3종 가스에 대해 가스압력 0.6MPa 이하에서 표준뇌임펄스전압을 인가하여 실험에 의해 그 절연특성을 조사하였으며, 측정된 섬락전압은 와이불(Weibul) 분포에 따른 통계적 해석을 통해 순 SF_6 가스와 혼합가스의 절연특성을 비교하였다. 한편 실용 전력기기의 경우 금속이물질 등의 혼입에 의해 기기 내에서 불평등전계가 형성되어 부분방전을 거쳐 절연파괴에 이르는 가능성이 있으므로 본 연구에서는 순 SF_6 가스에 대해 불평등전계 하의 절연파괴특성도 함께 비교 검토하였다.

2.1 실험장치 및 실험

본 실험에서는 순 SF_6, 50 %SF_6/50 %N_2 및 50 %SF_6/49 %N_2/1 %CO_2 3종류의 가스를 대상으로

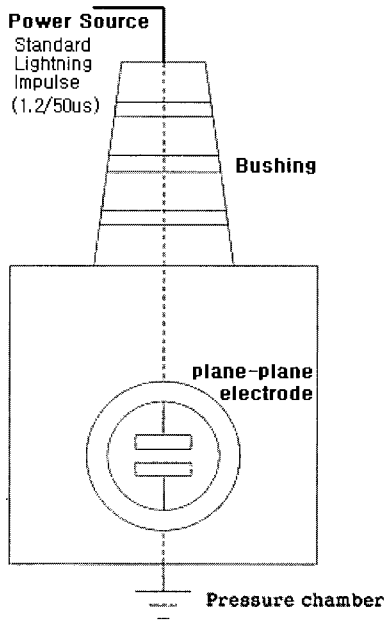


그림 1. 뇌임펄스특성 실험장치 구성.

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, 평탄부 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 SF_6, SF_6의 혼합비율을 50 %로 한 SF_6/N_2 2종 혼합가스 그리고 SF_6의 혼합비율을 50 %로 한 SF_6/N_2 2종 혼합가스에 CO_2를 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.

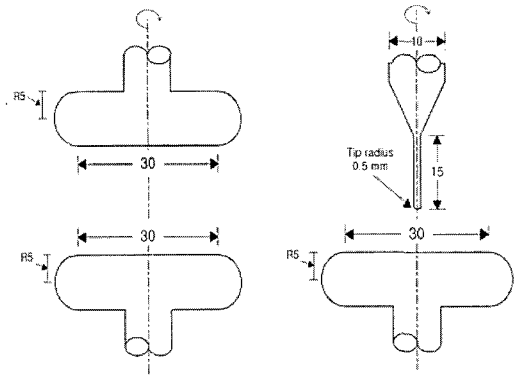


그림 2. 공시전극 구조.
Fig. 2. Tested electrode structure.

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

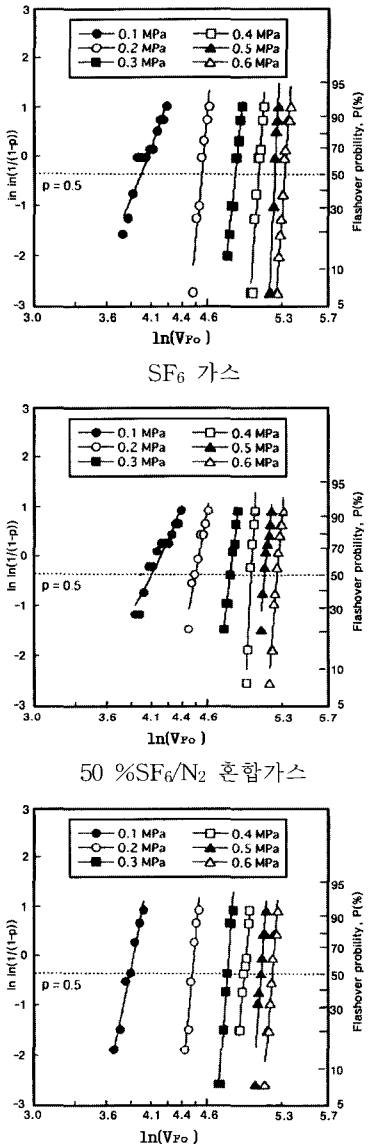
2.2.1 평등전계하 절연특성

SF_6, 50 %SF_6/50 %N_2 및 50 %SF_6/49 %N_2/1 %CO_2 3종류 혼합가스의 각 가스압력에서의 섬락전압 V_{FO} 특성을 그림 3에 나타내었다. 이 결과를 와이불분포함수에 따라 계산해 보면 모든 가스의 누적파괴확률과 절연파괴전압 V_{FO}의 관계는 선형근사가능, 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 V_{50} 을 나타낸다.

또한 이 그림으로부터 가스압력이 높아질수록 V_{50}은 증가하고 아울러 회귀직선의 기울기가 커지고 산포의 정도는 작아짐을 알 수 있다.

2.2.2 불평등전계하 SF_6 가스 절연특성

그림 4에 갭간격을 10 mm로 하여 침-평판전극을 이용하여 구한 불평등전계 하에서의 SF_6 가스



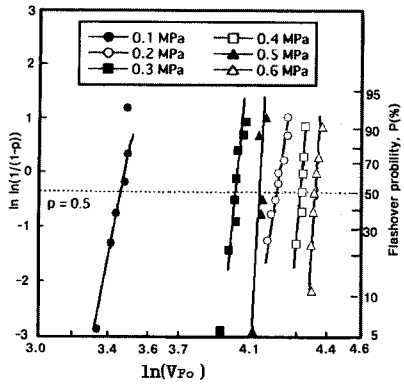
SF_6 가스

50 %SF_6/N_2 혼합가스

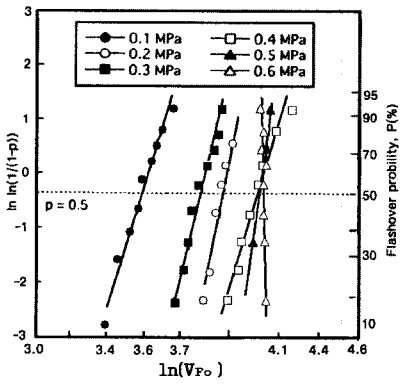
SF_6/N_2/CO_2 3종 혼합가스

그림 3. 각 시험가스에 대한 섬락전압의 와이불 플롯.
Fig. 3. Weibul 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 SF_6 가스 섬락전압의 와이불 플롯.

Fig. 4. Weibul plot of flashover voltage of pure SF_6 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 와이불 분포에 따르는 것으로 이해되고 있다. 본 연구에서는 뇌임펄스전압 인가시 50 % 절연파괴전압을 구하기 위해 와이불 분포

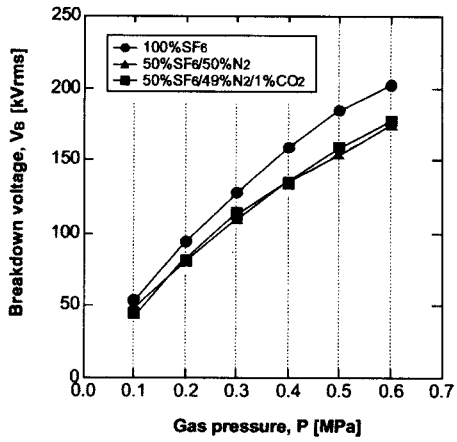


그림 5. 평등전계 하에서의 순 SF_6 가스, 50 %SF_6/N_2 혼합가스 및 $SF_6/N_2/CO_2$ 혼합가스의 V_{50} 특성.

Fig. 5. V_{50} characteristics of pure SF_6 gas, 50 %SF_6/N_2 and $SF_6/N_2/CO_2$ gas mixtures under uniform field.

함수를 이용하였다. 와이불 분포함수는 다음 식과 같이 주어진다.

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

여기서, p는 누적파괴확률, V는 절연파괴전압, V_0는 척도파라미터(scale parameter), m은 형상파라미터(shape parameter)이다.

따라서 50 % 파괴전압 V_{50}은 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 SF_6 가스와 50 %SF_6/N_2 혼합가스 및 $SF_6/N_2/CO_2$ 혼합가스 중에서의 뇌임펄스전압 인가시의 정극성 V_{50}의 가스압력 의존성을 나타내었다. 각 가스에서 V_{50}은 가스압력이 상승함에 따라 단조 상승함을 알 수 있으며, 고가스압력 영역에서는 포화경향이 나타남을 알 수 있다. 여기서 순 SF_6 가스의 V_{50}이 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 SF_6 가스를 거의 동일한 비율로 혼합한 경우에 CO_2 가스의 혼합 유무에 따른(즉 2종 및 3종 혼합가스) V_{50} 특성이다. 처음에 그림의 결과를 언뜻 보면 2종 및 3종 혼합가스 간에 V_{50} 의 현저한 차이를 확인하기 어려우나, 자세히 살펴보면 3종 혼합가스의 V_{50} 이 2종 혼합가스의 값보다 0.1MPa의 압력 조건을 제외한 모든 압력 범위에서 약 5% 정도 높음을 알 수 있다.

3.2 불평등전계하 SF_6 가스 절연특성

그림 6에 침-평판전극을 이용한 불평등전계 하에서의 순 SF_6 가스에 대한 정극성 및 부극성 뇌임펄스전압 인가시의 V_{50}의 가스압력 의존성을 나타내었다.

이 결과에서 가스압력 0.1MPa의 경우에는 양극성 모두 50 % 파괴확률전압 V_{50}은 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 SF_6 가스의 교류절연파괴전압(BDV) 및 부분방전개시전압(PDIV)의 가스압력 의존성을 나타내었다[14]. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 SF_6 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 SF_6 가스의 절연파괴특성에서는 교류절연특성에서와 같은 N-특성이 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 뇌임펄스전압이 인가되는 경우 상기 코로나안정화작용이 미약하기 때문으로 생각된다.

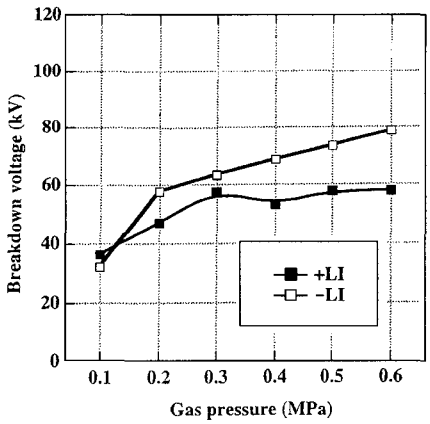


그림 6. 불평등전계 하에서의 순 SF_6 가스의 뇌임펄스 절연파괴전압의 가스압력 의존성.

Fig. 6. Lightning impulse breakdown characteristic of SF_6 gas as a function of gas pressure under non-uniform field.

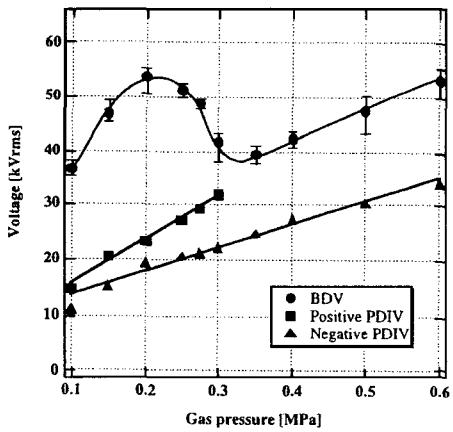


그림 7. 불평등전계 하에서의 순 SF_6 가스의 교류절연파괴전압(BDV) 및 부분방전개시전압(PDIV)의 가스압력 의존성[14].

Fig. 7. AC BDV and PDIV characteristics of SF_6 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 교류절연파괴전압보다 높음을 알 수 있다. 일반적으로 임펄스파괴전압과 교류파괴전압을 비교해 보면, V-t 곡선특성으로부터 임펄스파괴전압의 경우가 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 순 SF_6 가스의 경우 고가스압력 영역에서 정극성 임펄스파괴전압 V_{50}이 교류절연파괴전압보다 높은 것은 이 V-t 특성에 기인하는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 현재 온실효과를 일으키는 가스로 지정되어 배출규제 대상으로 되어 있는 SF_6 가스를 대체하기 위한 새로운 절연매체를 개발하고자 하는 목적으로 50 %SF_6/N_2 2종 혼합가스와 50 %SF_6/49 %N_2/1 %CO_2의 3종 혼합가스를 대상으로 GIS 설계의 기본이 되는 평등전계 조건에서의 임펄스전압 파괴특성을 조사하여 순 SF_6 가스의 절연파괴특성과 비교 검토해 보았다. 아울러 불평등전계 조건에서의 순 SF_6 가스의 임펄스전압 절연파괴특성도 조사하여 교류파괴특성과 비교해 보았다. 이로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 3종류의 시험가스 모두 평등전계 및 불평등전계 조건에서의 임펄스 절연파괴특성은 와이불 확률분포에 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 SF_6 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 %SF_6/49 %N_2/1 %CO_2 의 3종 혼합가스의 절연파괴전압의 상승효과는 나타나지 않았다.

(4) 뇌임펄스전압 인가시 불평등전계 조건에서의 순 SF_6 가스의 파괴전압은 가스압력이 증가됨에 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, "代替フロンの地球溫暖化對策 動向調査", p. 69, 2002.

[2] D. Edilson and K. B. McAffe, "Notes on the infrared spectrum of SF_6", 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: SF_6 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 Instiute : Gases Superior to SF_6 for Insulation and Interruption : Report EPRI EL-2620, 1982.

[7] S. A. Boggs, F. Y. Chu, and N. Fujimto (eds), Gas- Insulated substations, Pergamon Press, New York, 1986.

[8] L. G. Christophorou and R. J. Van Brunt, "SF_6/N_2 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 SF_6", 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, 戶田恒雄, 大久保仁, "各種ガスとSF_6による混合ガス中における部分放電の發生メカニズム", 電氣學會論文誌 B, 118卷, 7/8 号, p. 837, 1998.

[11] 이복희, 이경옥, "SF_6-N_2 혼합가스에서 과도임펄스전압에 대한 V-t 특성", 전기학회논문지, 50C권, 9호, p. 456, 2001.

[12] Y. Qiu and E. Kuffel, "Comparison of

SF_6/N_2 and SF_6/CO_2 gas mixtures as alternatives to SF_6 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 CO_2/N_2/50 %SF_6 混合ガスの絶縁特性", 電氣學會論文誌 B, 121 卷, 7 号, p. 830, 2001.

[14] 永良, 田志, 匹田, "SF_6 ガスおよび混合ガス中に おける部分放電特性の檢討", 電氣學會研究會資料, ED-98-178, p. 79, 1998.

[15] M. Zou and J. P. Reynders, "Synergy between SF_6 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 SF_6 기체의 전구방전과정의 분석", 전기전자재료학회논문지, 13권, 1호, p. 85, 2000.

[17] 박명진, 김대연, 전병훈, 하성철, "SF_6를 포함하는 혼합가스의 절연특성에 관한 연구", 전기전자재료학회 '99 추계학술대회논문집, p. 165, 1999.

[18] 이복희, 전덕규, 이경옥, 안창환, 이창준, "불평등전계중에서 SF_6 가스의 절연특성", 전기전자재료학회 '97 춘계학술대회논문집, p. 334, 1997.