

SF₆-N₂ 혼합가스에서 뇌충격전압에 의한 50[%] Flash over 전압 및 V-t 특성

(V-t Characteristics and 50% Flash-over Voltage of
SF₆-N₂ Mixtures for Lightning Impulse Voltage)

김정달* · 송원표** · 김동의***

(Jung-Dal Kim · Won-Pyo Song · Dong-Yui Kim)

요 약

본 연구는 전력계통의 절연에 가장 가혹한 영향을 미치는 뇌충격 전압에 대한 50% FOV와 V-t 특성 및 코로나 진전 과정을 불평등 전계중에서 순수 SF₆, N₂, SF₆-N₂ 혼합가스 분위기에서 연구하여 SF₆-N₂ 혼합가스의 파괴과정과 경제적 실용 가능성에 대해서 검토하였다.

실험결과 SF₆ 50%-N₂ 50% 혼합가스의 50% FOV는 순수 SF₆의 80%보다 높다. 또 V-t 특성의 측정치와 등면적 법칙으로 계산된 곡선은 각 경우에 일치했다. 따라서 순수 SF₆에 대한 경제적 대체가스로서 SF₆ 50%-N₂ 50% 혼합가스가 사용되어질 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 방전 도형을 이용한 코로나 진전과정 분석으로 이를 입증했다.

Abstract

In this paper, we studied the 50% flashover voltage of lightning impulse which affect the most serious damages on the insulation of the electric power network system. Also its V-t characteristics and corona process phenomena of pure SF₆, N₂, SF₆-N₂ mixtures under the circumstances of nonuniform field gap are researched. Comparing the characteristics of pure SF₆ with that of SF₆-N₂ mixtures, we discussed that breakdown processes and SF₆-N₂ mixture's application to economics.

As a results, 50% flashover voltage of SF₆ 50% -N₂ 50% for impulse voltage is higher then that of 80% of pure SF₆, measured data and calculated data by equal area law are almost equal from the points of view of V-t characteristics. Therefore, it has been known that SF₆ 50% -N₂ 50% mixtures can be used as an economic constitution gas of pure SF₆, it is verified that corona processes from Lichtenberg figure.

*正會員：慶南大學校 電氣工學科 教授 · 工博

**正會員：曉星重工業(株) 技術研究所 課長

***正會員：慶南大學校 電氣工學科 博士課程

接受日字：1992年 7月 27日

“이 논문은 1991년도 교육부 지원 한국 학술진흥재단의 자유공모(지방대학육성)과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었음”

1. 서 론

고전압 전력 기기의 중요 절연매체로써 널리 사용되고 있는 SF₆ 가스는 높은 절연내력과 뛰어난 아크소호특성, 무독성 및 안정된 화학적 물리적 특성을 가지고 있다. SF₆의 절연내력은 평등전계인 경우 공기의 2~3배 정도로 약3기압 게이지에서서는 절연유 보다 크기 때문에 기존 공기절연형 개폐기를 대신하는 가스절연 개폐장치(Gas Insulated Switchgear : GIS), 가스절연송전선로(Gas Insulated Transmission Line : GIL), 가스절연 변압기 등을 실현할 수 있게 함으로써 변전소의 축소화 및 복합화를 가능하게 하였다.

그러나, 전기적 부성기체인 SF₆ 가스는 가격이 다른 가스에 비해 비싸며 저온 및 고압력하에서 액화되기 쉽고, 특히 불평등전계가 형성되는 경우에는 절연내력이 현저히 낮아지는 단점이 있다.

또, 각종 전기기기가 실계통에서 응용되어지고 있는 경우를 보면 계통이 더욱 복잡해지고 고전압 대용량화 됨에 따라 계통에서 발생할 수 있는 과전압도 더욱 가혹해지고 있다. 특히, 과전압 중에서도 뇌충격 전압에 의한 것이 가혹하다. 이러한 관점에서 최근에는 SF₆가스와 가격이 싼 다른가스(N₂, Air, H₂, CO₂, N₂O 등)와 혼합가스에 대한 연구가 E. Kuffel과 A. Yializis^{1), 4)} 그리고 N.H.Malik와 A.H.Qureshi^{2), 3), 4)} 등에 의해 연구되어지고 있으나 실계통에서 일어날 수 있는 불평등 전계에서 과전압 중 뇌충격전압 절연파괴 특성⁵⁾에 대한 연구는 매우 중요하나 아직 불충분한 점이 많다.

이와같은 문제점을 해결할 목적으로 본 연구에서는 뇌충격 전압에 대한 SF₆-N₂ 혼합가스의 Flash over 전압(이하 FOV로 표기함)과 V-t특성을 실험을 통하여 연구하고 또한, 코로나 발생과 진전에 미치는 가스의 영향을 현상적으로 해결하기 위하여 가스별 방전도형(Lichtenberg figure)⁷⁾을 작성해서 얻어진 결과로 순수SF₆와 N₂의 특성을 비교 검토하여 SF₆-N₂ 혼합가스의 실용 가능성이 있는 혼합비와

가스압력 범위에 대해서 연구 검토한 결과를 발표하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

그림1은 본 실험에서 사용한 실험장치의 구성도이다. 임펄스 출력전압은 최대 600kVp, 유효 480kVp이며, test chamber는 스테인레스로 제작된 관측용 창이 있는 원통형이다.

진공 배기장치의 배기능력은 10⁻⁴torr이며, 진공도의 측정은 Mcieod진공계를 사용하였으며, 압력계지는 Bourdon 형이다. 봉대평판 전극계의 구성은 그림2와 같고, 이때의 전계해석은 자동요소 분할 및 전계해석 프로그램(ATMSH-E, ELESTA)에 의해 구했으며 본

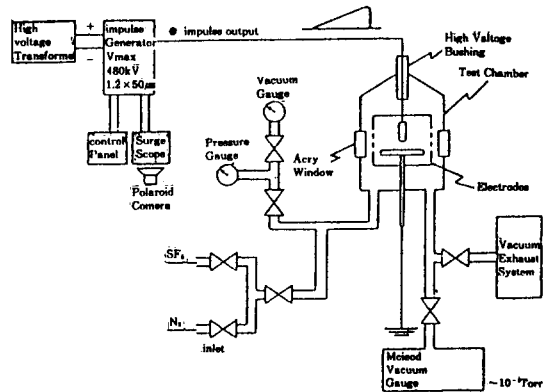


그림 1. 실험장치 블럭도

Fig. 1. Block diagram of experiment apparatus

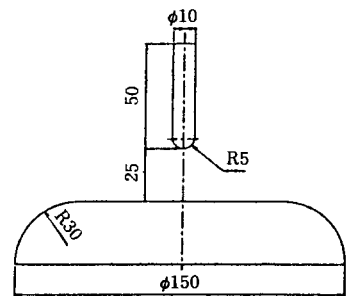


그림 2. 전극구성

Fig. 2. Construction of electrodes

실험전극 구성에서의 결과는 그림3과 같다.

2.2 실험방법

50% FOV 측정시 측정법은 승강법(up-and-down-method)을 사용하여 계산하였다. 예상 파괴전압은 4~5회의 예비실험을 통하여 구했으며, 매 조건에서의 전압인가 회수는 30회 기준으로 했고, 인가전압의 상승은 예상파괴 전압의 70%까지는 직선상승법으로 하고, 이후는 1kV/s의 계단상승법을 적용하였다. 인가전압 파형은 IEC규정 1.2×50μs의 표준파형을 사용했고, 극간 절연파괴 여부는 surge scope의 파형관측으로 확인했다. 50% FOV는 혼합가스의 혼합비율을 SF₆기준 100%, 80%, 50%, 20%, 0%로 하면서 압력은 1, 2, 3, 4 bar까지로 하였다.

V-t특성 실험에서 전압인가 회수는 매 조건에서 20회 이상으로 하였으며, 특성에 사용된 데이터는 surge scope파형을 Polaroid카메라로 촬영한 사진으로부터 얻었다.

Corona과정의 실험은 lichtenberg 도형작성을 포탄형 전극으로 교체하여 압력 1 bar에서 SF₆, Air, N₂, SF₆-N₂(50 : 50%)로 하였다.

V-t곡선을 실험식으로 구하는 방법은 많이 보고되고 있으나³⁾, 본 연구에서는 전압의 극성 효과 및 전계의 불평등 정도를 고려할 수 있는 등면적 법칙(equal-area Law)⁹⁾을 이용하여 SF₆가스에서의 상수를 적용하여 V-t특성 곡선

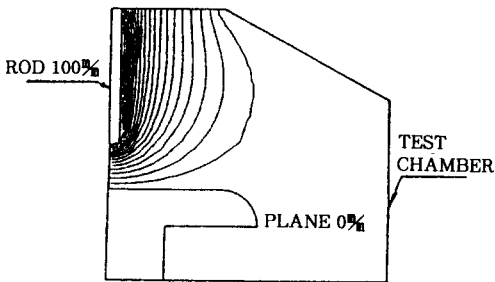


그림 3. 정전계 해석 프로그램(F E M)에 의해 계산된 25mm 봉대 평판 갭의 등전위선도
Fig. 3. Equipotential line of 25mm rod-plane gap calculated by FEM static electric field analysis program

을 도출했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 뇌 임펄스전압의 50% FOV 특성

3.1.1 정극성 뇌 임펄스전압의 50% FOV

그림4는 봉대 평판전극에서 순수가스 및 혼합가스별 정극성 FOV특성이고, 그림5는 SF₆ 혼합비율에 대한 값을 파라메타로 해서 정리한 것이다.

SF₆-N₂ 혼합가스의 50% FOV는 SF₆의 혼합비율이 증가함에 따라 상승하고, 압력이 클수록 50% FOV는 높으며 SF₆혼합비율이 커질수록 압력별 50% FOV의 차도 커지고 있다.

SF₆ 20% 혼합가스인 경우의 50% FOV 상승폭은 크지 않으나 SF₆ 50%, 80% 혼합가스인 경우는 상승폭이 매우 크다. 또 SF₆ 50% 혼합시 압력 3bar의 50% FOV는 2bar SF₆ 80%의 50% FOV와 그의 동등한 절연파괴 능력이 있고, SF₆ 80% 혼합시 압력 3bar의 50% FOV와 절연파괴 능력이 유사하다. 실험결과를 종합해 볼 때 모든 경우에서 SF₆ 50%-N₂ 50% 혼합가스의 절연내력은 순수 SF₆의 약80%

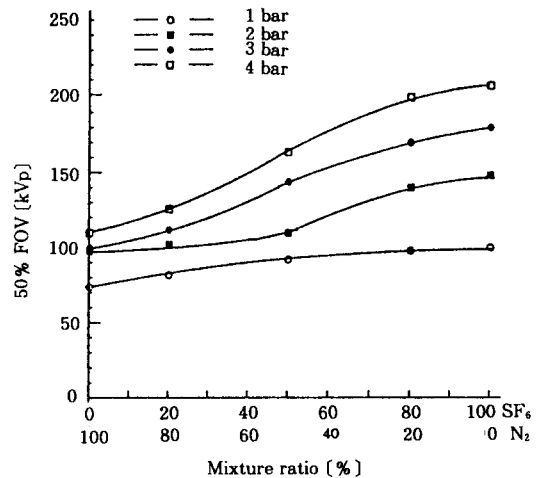


그림 4. SF₆-N₂ 혼합가스중 25mm 봉대 평판 갭에서 가스혼합별 정극성 충격파괴전압
Fig. 4. Positive impulse breakdown voltage-mixture ratio curves for SF₆-N₂ mixtures using a 25mm rod-plane gap

수준이다.

따라서 SF₆ 80% 혼합시 특성이 우수하나 경제적 혼합비로서는 오히려 SF₆-N₂(50 : 50%)가 적합하며 1~2bar 범위로 압력을 상향 조정하면 우수한 절연효과를 기대할 수 있으리라 생각한다.

3.1.2 부극성 뇌 임펄스전압의 50% FOV

그림6은 부극성 뇌 임펄스전압에 대한 SF₆-N₂혼합가스의 봉대평판 전극에서의 50% FOV

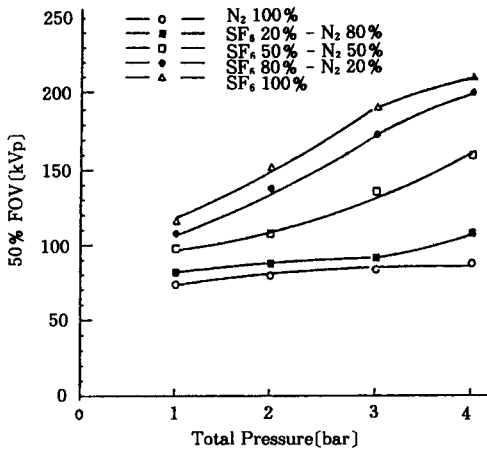


그림 5. SF₆-N₂ 혼합가스중 25mm 봉대 평판 갭에서 압력별 정극성 충격파괴전압

Fig. 5. Positive impulse breakdown voltage-mixture ratio curves for SF₆-N₂ mixtures using a 25mm rod-plane gap

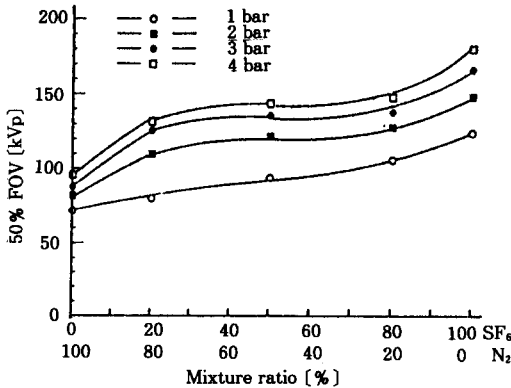


그림 6. SF₆-N₂ 혼합가스중 25mm 봉대 평판 갭에서 가스 혼합비별 부극성 충격파괴전압

Fig. 6. Negative impulse breakdown voltage-mixture ratio curves for SF₆-N₂ mixture using a 25mm rod-plane gap

이고, 그림7은 SF₆의 혼합가스비율을 파라미터로 작성된 것이다.

부극성의 경우 1bar의 경우는 정극성과 거의 동일한 50% FOV이나, 압력증가에 따른 상승 폭이 정극성에 비해서 매우 낮게 나타나며, SF₆ 20% 혼합가스에서는 급격히 상승하나, 그 이상의 범위에서는 서서히 상승하는 특성을 보이고 있다. 또 2bar 이상에서 SF₆혼합비율 20-80%에서는 매우 작은 값의 증가만 보이고 있다. 또 SF₆가스 50%의 3bar에서 50% FOV는 순수 SF₆ 2bar의 경우보다도 낮고 1bar의 경우보다는 높은 값을 보이고 있어 정극성의 경우와는 다소 차이가 있다.

이상 정·부극성의 50% FOV 실험결과로부터 SF₆-N₂혼합가스가 절연내력에 미치는 영향은 N₂가스의 화학적인 안전성과 전기적 부성 기체인 SF₆가스가 코로나 진전을 억제하는 능력이 우수하기 때문이라 사료되며, 이러한 결과를 후절에 기술한 방전도형으로 부터 알 수 있다.

3.2 SF₆-N₂ 혼합가스의 V-t특성

그림 8, 9, 10은 SF₆, N₂ SF₆-N₂ 혼합가스를 봉대평판 전극에서 압력별 정·부극성 뇌 임펄스전압의 V-t특성을 측정치와 V-t특성 계산결

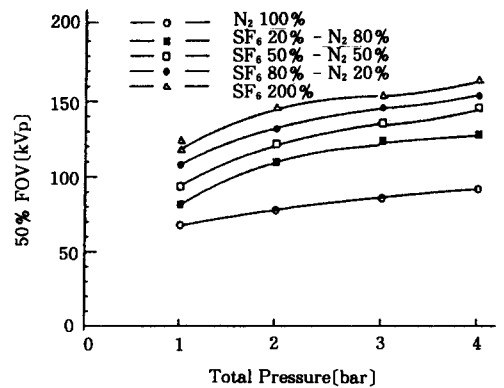


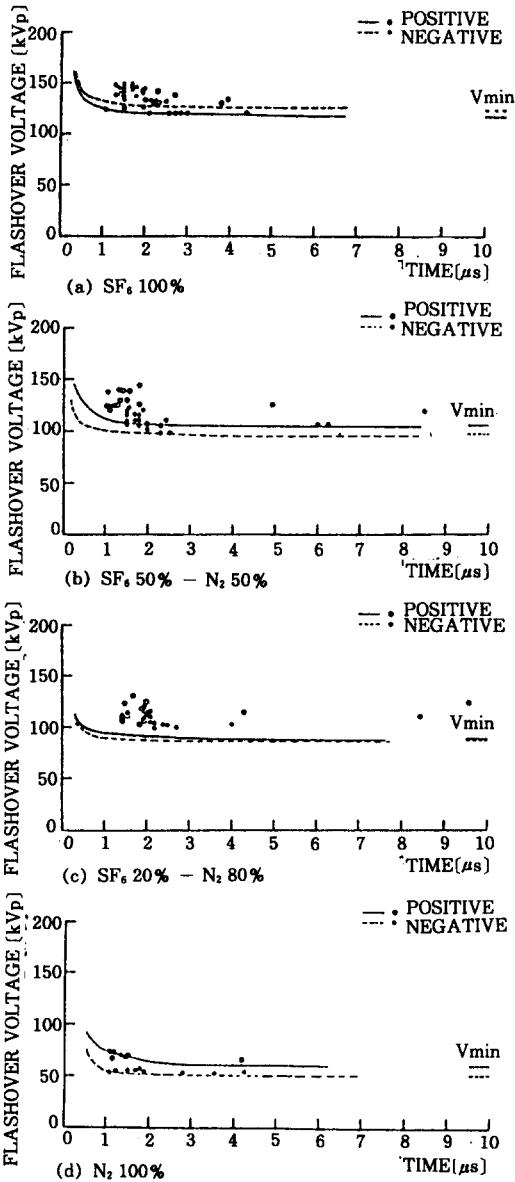
그림 7. SF₆-N₂ 혼합가스중 25mm 봉대 평판 갭에서 압력별 부극성 충격파괴전압

Fig. 7. Negative impulse breakdown voltage-mixture ratio curves for SF₆-N₂ mixture using a 25mm rod-plane gap

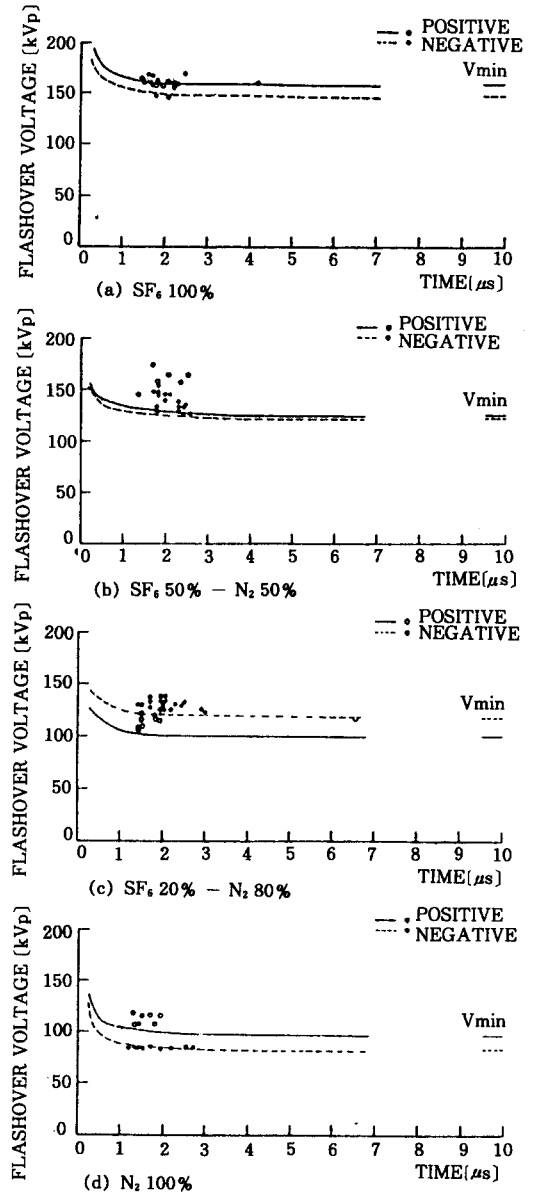
SF₆-N₂ 혼합가스에서 뇌충격 전압에 의한 50(%) Flash Over 전압 및 V-t 특성

과치와의 관계를 나타낸 것이다. 각 조건에서 측정데이터는 파괴시간이 짧을수록 파괴전압이 높아지는 좌상향특성을 보이고 있으며, 실험식

으로부터 계산된 V-t곡선은 측정데이터의 하한치와 잘 일치하고 있으나 SF₆의 혼합비율이 감소할수록 측정데이터의 하한치와 실험식에서



그린 8. 25mm 봉대 평판 갭 1기압에서 SF₆, N₂, SF₆-N₂ 혼합가스의 1.2×50µs 뇌 충격전압의 V-t 특성.
Fig. 8. V-t characteristics of 1.2×50µs Lightning Impulse for SF₆, N₂, SF₆-N₂, 1bar using a 25mm rod-plane gap.



그린 9. 25mm 봉대 평판 갭 2기압에서 SF₆, N₂, SF₆-N₂ 혼합가스의 1.2×50µs 뇌 충격전압의 V-t 특성.
Fig. 9. V-t characteristics of 1.2×50µs Lightning Impulse for SF₆, N₂, SF₆-N₂, 2bar using a 25mm rod-plane gap.

구한 V-t곡선의 차가 다소 커지고 있는데 이것은 실험식에 적용한 계수를 순수 SF₆의 계수를 적용한 때문이라고 생각된다. 그리고 1μs이

하의 경우는 측정데이터가 적어 확실하지 않다.

순수 SF₆인 경우 대체로 정극성인 경우가 파괴시간 지연이 크고 부극성인 경우는 파괴지연이 짧아 파괴치쪽에 집중되고 있으나, 순수 N₂인 경우에는 정·부극성 공히 파괴시간이 넓게 산포되고 있다. 혼합가스인 경우의 분포는 순수 SF₆인 경우와 순수 N₂인 경우의 중간특성을 나타내고 있으며 정·부극성 모두 파괴시간의 산포 정도는 SF₆의 혼합비율이 증가할수록 넓게 되어 긴시간 범위까지 파괴시간이 존재하고 있으므로 V-t 곡선의 평탄화가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 압력이 높아질수록 V-t 특성 데이터의 산포는 크게 되지만 시간 늦음이 단축되어 파괴치에서 파괴가 이루어진다.

본 실험에서 얻어진 V-t곡선에 적용한 계산치는 순수 SF₆의 계수를 적용하였으나 혼합가스에서도 거의 일치하는 것으로 부터 SF₆-N₂ 혼합가스의 전기적 절연특성은 N₂보다 SF₆에 의해 지배된다는 것을 예측할 수 있었다.

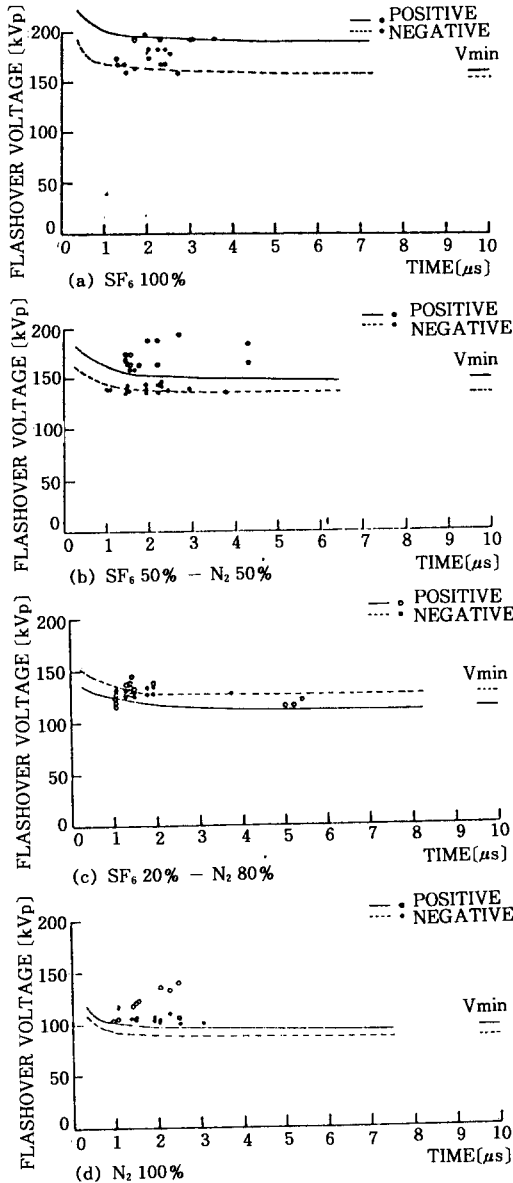


그림 10. 봉25mm 봉대 평판 갭 3기압에서 SF₆, N₂, SF₆-N₂ 혼합가스의 1.2×50μs 뇌 충격전압의 V-t 특성.

Fig. 10. V-t characteristics of 1.2×50μs Lightning Impulse for SF₆, N₂, SF₆-N₂, 3bar using a 25mm rod-plane gap.

3.3 코로나 발생과 진전에 미치는 가스의 영향

Air, SF₆, N₂, SF₆-N₂(50 : 50%)의 가스중에서 코로나 발생을 현상적으로 알아보기 위해 1bar에서 기체별 Lichtenberg도형을 정·부극성에 대해 작성한 결과를 사진1에 나타낸다.

사진중 좌측은 정극성 코로나에 의해서 발생된 전압 4kV의 방전도형이다. (a)는 Air에서의 방전도형으로 polbüschel에서 gelbüschel로의 이행이 확실하며 스트리머 코로나의 성장이 용이함을 보여준다. (b)는 N₂의 경우로 도형의 크기는 Air과 비슷하나 스트리머 코로나의 신장력이 약함을 보여준다. 이와같은 현상은 N₂ 가스의 영향이라 생각된다. (c)는 SF₆의 도형으로 도형의 크기는 Air, N₂에 비해 매우 작고 코로나 성장을 억제하는 능력이 매우 크다는 것을 알 수 있다. (d)는 SF₆-N₂(50 : 50%)인 경우로서 매우 특이한 모양을 보여준다. 도형의 크기는 SF₆보다 크게 나타났으나, 코로나의 성장이 매우 약화되었음을 알 수 있다.

SF₆-N₂ 혼합가스에서 뇌충격 전압에 의한 50[%] Flash Over 전압 및 V-t 특성

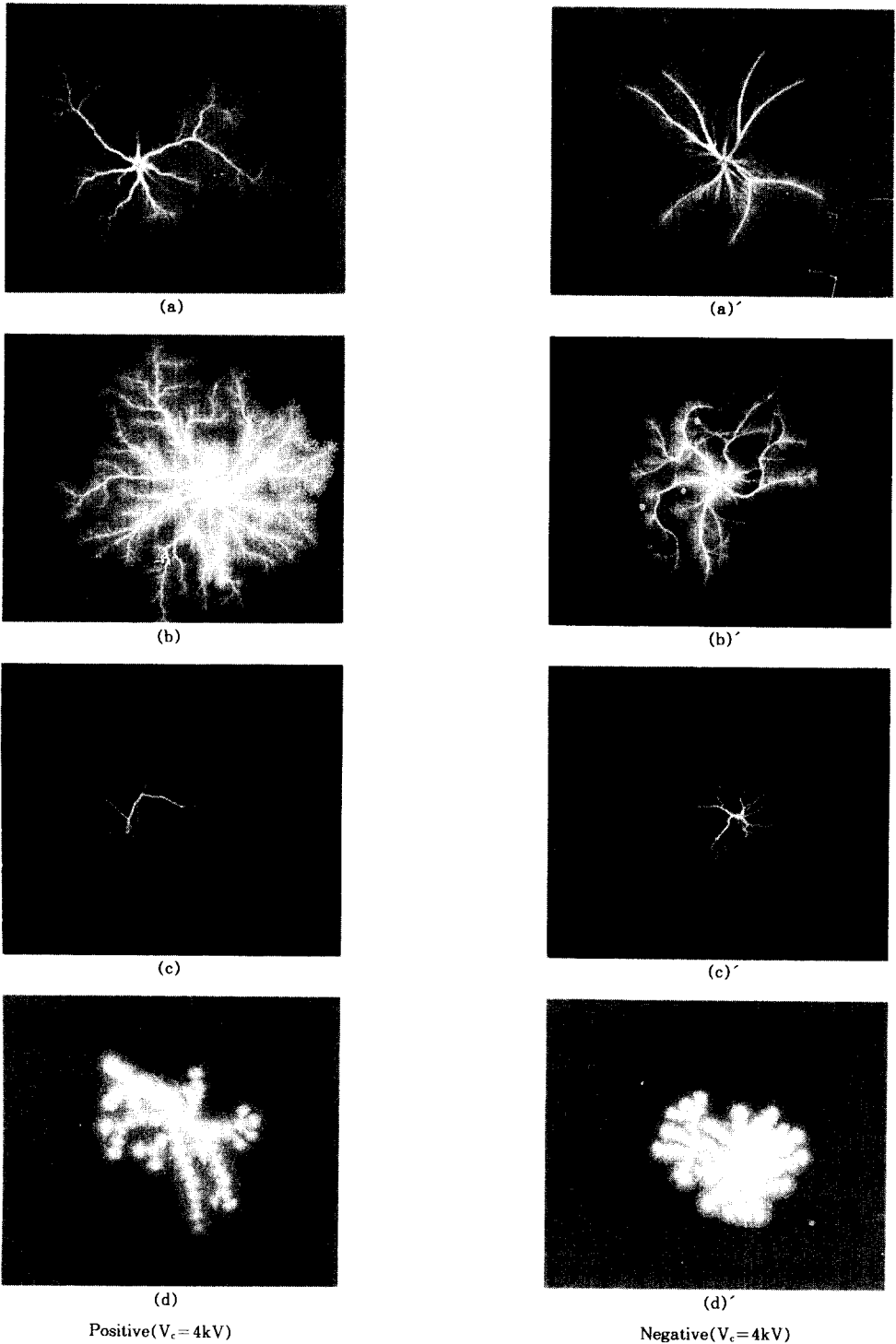


사진 1. Air, N₂, SF₆, SF₆-N₂ (50% : 50%) 혼합가스의 정·부극성 방전도형
 Photo. 1. Lichtenberg figure of positive and negative polarity on Air, N₂, SF₆, SF₆-N₂ (50 : 50%)

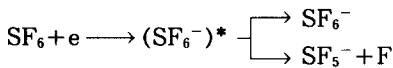
사진중 우측(a)는 부극성 Air에서의 도형으로 정극성인 경우보다 코로나 성장이 약화하여 극성효과를 알 수 있다. (b)는 N₂인 경우이며 공기중인 경우보다는 코로나 진전이 축소된 경향을 보이고, 그림(c)는 SF₆인 경우이며 정극성인 것과 비교해 볼 때 코로나 성장이 매우 적으며 미약하지만 극성효과가 나타난다. 그림(d)는 SF₆-N₂(50 : 50%)의 경우의 도형으로 정극성인 경우보다 코로나 성장이 약하다. 순수 SF₆나 SF₆-N₂(50 : 50%) 혼합가스인 경우는 도형의 형태는 다소 유사하나 정극성인 경우가 신장이 용이함을 보여 주고 있다.

이와같은 현상은 정·부극성의 극성효과에 기인되며 혼합가스인 경우 코로나 진전이 매우 둔화되어 있음을 볼 수 있다. 이와같은 현상으로 보아 혼합가스인 경우 SF₆가스의 특성에 많은 영향이 있음을 알 수 있다.

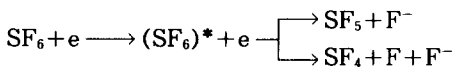
또한 본 실험에서 공기에서 실험된 정·부극성 방전도형의 코로나 선단에 특이한 깃털모양의 선조가 형성되었다. 이와 같은 현상은 습도 80%이상의 대기중에서 실시된 것이므로 습도의 영향이라 생각되며 향후 연구할 과제이다.

SF₆-N₂ 혼합가스에서 SF₆의 혼합량이 증가할수록 50% FOV가 증가하는 것은 SF₆가스의 물리적, 화학적특성에 크게 의존되며 전자부착효과가 커져서 전자사태의 발생이 억제된 결과라고 생각된다. 코로나의 발생과 억제는 전자발생에 지배되며 SF₆에서 전자의 발생과 부이온 생성에 의한 소멸에는 다음과 같은 과정이 있다.⁹⁾

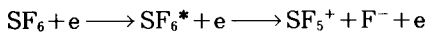
a) Resonance capture



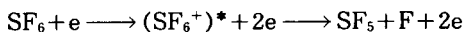
b) Excitation and dissociation



c) Positive and negative ion formation



d) Electron multiplication



코로나 사태의 성장은 d)의 경우이나 이때에

도 SF₆가스의 전자친화력에 의한 2차 포획으로 다른가스에 비해 늦어진다.

사진1의 Lichtenberg도형에서 전자부착에 의한 음이온 형성으로 코로나 발생이 억제되고 있음을 확인할 수 있으며 혼합가스인 경우에도 성장이 억제되고 있음을 볼 수 있다. 특히 SF₆가스의 방전도형으로 부터 Leader개시과정의 Stem Mechanism과 precursor mechanism을 분명히 알 수 있다. 이상의 실험결과를 종합적으로 검토해 볼 때 SF₆-N₂(80 : 20%) 혼합가스인 경우 절연내력은 높으나 혼합가스의 경제적 측면으로 볼 때 SF₆-N₂(50 : 50%)의 경우가 대체가스로써 유리할 것으로 본다. 또 1bar~2bar정도의 범위에서 압력을 높여주면 순수 SF₆의 절연과피치와 같게되므로 SF₆-N₂(50 : 50%) 혼합가스에 압력을 적당히 조절한다면 실용면에서 유효할 것으로 사료된다.

4. 결 론

불형등전계인 봉대 평판전극구조에서 뇌충격 전압을 순수 SF₆, 순수 N₂, SF₆-N₂혼합가스에 인가하여 50% FOV와 V-t특성에 대해서 연구했다. 또 현상검토를 위하여 가스별 방전도형을 작성하여 본 결과는 다음과 같다.

① 순수 SF₆에 대한 SF₆ 50%-N₂ 50% 혼합가스의 파괴능력은 평균 80% 수준이므로 경제적 대체 이용은 SF₆-N₂(50 : 50%)이 적당하며 압력을 순수 SF₆보다 1~2bar정도 높게 조정하면 순수 SF₆와 동일한 절연효과를 얻을 수 있다.

② V-t특성실험에서의 측정결과는 SF₆가스의 계수를 적용한 등면적법칙에 의해 구한 V-t곡선과 거의 일치한다. 따라서 SF₆-N₂혼합가스의 절연내력은 N₂보다 SF₆의 특성에 지배됨을 예측할 수 있다.

③ 방전도형으로부터 SF₆가스의 높은 전자부착능력과 코로나 진전과정을 확인하였다.

참 고 문 헌

1) E. Kuffel, A. Yializis, "Impulse breakdown of positive

- and negative rod-plane gaps in SF₆-N₂ Mixtures", IEEE Trans. PAS-97, No. 6, pp.2359-2366, Nov/Dec. 1987.
- 2) N. H. Malik, A.H.Qureshi, "A review of electrical breakdown in mixtures of SF₆ and other gases", IEE Trans. EI-14, No 1, pp.1-13, Feb. 1979.
 - 3) N. H. Malik, A. H. Qureshi and G. D. Theophilus, "Static filed breakdown of SF₆-N₂ mixtures in rod-plane gaps", IEEE Trans. EI-14 No.2,pp.61-69 April, 1979.
 - 4) A. Yializis, N. H. Malik, A. H. Qureshi, E. Kuffel, "Impulse breakdown and corona characteristics for rod-plane gaps in mixtures for SF₆ and nitrogen with lese than 1% of SF₆ content", IEEE Trans. PAS-98, No. 5, pp. 1832-1840, Sept/Oct. 1979.
 - 5) N. H. Malik, A. H. Qureshi, "The influence of voltage polarity and field non-uniformity on the breakdown behavoir of rod-plane gaps field with SF₆", IEEE Trans. EI-14, No. 6, pp.327-333, Dec.1979.
 - 6) Y. A. Safar, N. H. Malik, "Impulse breakdown behavior of negative rod-plane gaps in SF₆-N₂, SF₆-Air and SF₆-CO₂ mixture", IEEE Trans., Ei.17, No.5, Oct.1982.
 - 7) L. Niemeyer, L.Ullrich, N. Wiegart, "The mechanism of leader breakdown in electro negative gases", IEEE Trans. EI-24, No. 2, 99.309-324, April 1989.
 - 8) E. Kuffel, "Time lag and breakdown and corona characteristics in sulphur hexafluoride", PROC, IEEE, Vol 113, No.11,November, 1986.
 - 9) 日本電氣學會, "SF₆ガスのV-t特性". 電氣學會技術報告(Ⅱ部) 第206號, 1986.