

친환경 절연설계를 위한 N₂/O₂ 혼합가스 중 고체유전체 종류에 따른 연면방전특성

(Surface Discharge Characteristics of Solid Dielectrics in N₂/O₂ Mixture Gas for Eco-Friendly Insulation Design)

임동영* · 박혜리 · 최은혁 · 최상태 · 이광식**

(Dong-Young Lim · He-Rie Park · Eun-Hyeok Choi · Sang-Tae Choi · Kwang-Sik Lee)

Abstract

In this paper, we deal with a surface discharge that caused an aggravation of the dielectric strength in the N₂/O₂ mixture gas, When composit dielectrics were formed from the use of a solid dielectric. It was found from this study that the surface discharge voltage was deeply involved in the mixture ratio of O₂, the electrical property of the solid dielectric, kind of the solid dielectric, an electric field at the triple junction and a medium effect. These results expect basic data that will be used to transmission and distribution power system equipment using the N₂/O₂ mixture gas.

Key Words : SF₆, Surface Discharge, N₂/O₂ Mixture Gas, Solid Insulation, Medium Effect

1. 서 론

고전압 전력설비장치에서 절연성이 우수한 기체인 SF₆ 가스의 사용은 고신뢰성, 설비의 콤팩트화에 기여하였다. 하지만 교토의정서에서 온실가스로 지정되어 온 세계적으로 감축, 회수, 대체 물질 개발에 박차를 가하고 있는 실정이다. 현재 대체 물질로 각광받는 친환경 매질은 N₂/O₂ 혼합가스와 건조공기(Dry-air)로서 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.

배전급에서 N₂/O₂ 혼합비에 따른 절연특성을 구명하여 대체 가능성이 평가되어졌고[1], SF₆ 가스 중의 에폭시 수지와 친환경 매질(N₂/O₂ 혼합가스, Dry-air)의 절연성능이 연구 되어졌으며[2], 전극이 수평 배치된 경우의 테프론 수지에 대한 연면방전특성에 관한 연구도 수행된 바 있다[3].

N₂/O₂ 혼합가스와 건조공기는 친환경적이며 쉽게 제조 될 수 있고, 저렴한 비용으로 얻을 수 있는 절연 매체이다. N₂/O₂ 혼합가스는 O₂의 혼합비에 따라 코로나개시전압과 절연파괴전압이 불규칙적이며, 절연파괴전압은 SF₆ 가스의 1/3 수준 정도로 알려져 있다. 또한 건조공기는 수분 함유량에 따라 절연파괴전압이 낮아지는 등의 문제점을 가지고 있다[4]. 특히 친환경 절연매질의 절연내력이 지금까지 널리 쓰이고 있는 대표적인 전기적 부성기체인 SF₆, PFC 가스들에 비해

* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 영남대학교 전기공학과 교수
Tel : 053-815-7291, Fax : 053-810-4767
E-mail : without38@naver.com
접수일자 : 2011년 12월 2일
1차심사 : 2011년 12월 9일
심사완료 : 2012년 2월 8일

많이 낮기 때문에 절연내력을 향상시키는 방법이 매우 중요하다고 생각된다.

친환경 매질을 이용한 절연에서 절연내력을 높이는 방법은 고전압도체를 고체유전체로 코팅하는 방법, 경사기능재료(Functionally Graded Material; FGM), 나노복합체를 이용하는 방법 등이 강구되고 있다[5]. 이러한 방법들은 고체절연물을 이용한 복합절연을 형성하게 되고, 흔히 삼중점이라고 알려진 곳에서 진전되는 연면방전이 절연내력을 악화시키게 된다.

이에 본 논문은 고체유전체 사용의 증가에 대한 중요성, 연면방전에 의한 절연내력 악화에 착안하여 친환경 가스(N₂/O₂ Mixture Gas) 중 구대평판 전극구조에서 고체유전체 종류에 따른 연면방전특성을 연구하였다. 이 연구를 통해 친환경 절연매질의 절연내력 향상에 사용되는 적합한 고체절연재료의 선정 및 절연설계에 유용한 자료를 제공하고자 한다.

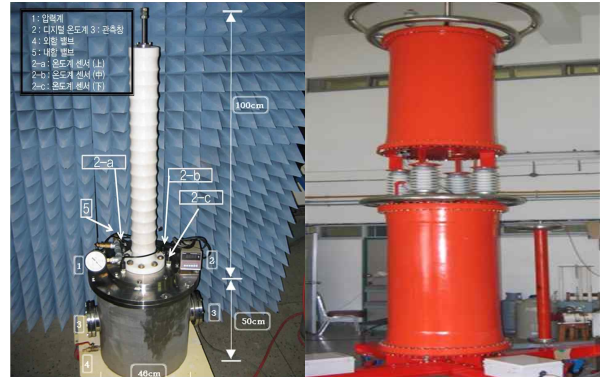
2. 실험장치 및 방법

사진 1은 본 연구에 사용된 모의 GIS 챔버와 교류전원공급장치(60[Hz])의 외관을 보여주고 있다.

모의챔버는 SF₆ 가스와 친환경 가스들의 방전특성을 연구하기 위해 제작된 것으로, 모의챔버 내부압력을 측정하기 위한 압력계(WISE, 0~15 기압)가 설치되어져 있다. 본 실험을 위한 압력범위(1~6[atm])를 위해 10기압까지 가압 가능하며 이 압력은 압력계 게이지 압력을 기준으로 한다.

액체 절연체의 높은 절연내력을 측정하기 위해 전압은 300[kV]까지, 온도변화는 -90~100[°C]까지 유지가 가능하다. 그리고 모의챔버 내부에 설치된 전극배치와 고체절연물, 방전 시의 방전로를 관찰할 수 있도록 아크릴 재질의 관측창(직경 110[mm], 두께 20[mm])이 설치되어져 있다.

연면방전특성을 연구하기 위한 전원장치는 교류 60[Hz] DY-106(AC 300[kV]/120[mA])를 사용하여 고전압을 인가하였다. 연면방전은 고체절연물 표면에 전기력선의 수직성분이 존재하면 연면방전을 용이하게 발생시킬 수 있기 때문에 수직배치로 실험을 진행하였다.



(a) 실험용 모의챔버 (b) 교류전원공급장치

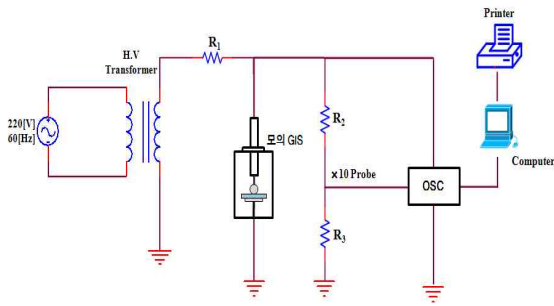
사진 1. 실험용 모의챔버와 교류전원공급장치
Photo 1. The Experimental chamber and AC power supply

친환경 가스의 절연내력 향상에 사용될 고체절연재료는 절연과피강도, 전기적 특성이 우수해야하고 그 응용분야도 넓어야 한다고 생각한다. 따라서 절연과피강도 측면에서 Teflon(TE), Polyethylene(PE)을 응용측면에서 Bakelite(BE)를 실험에 사용하였다. 고체절연물의 크기는 모두 두께 1[mm], 지름 70[mm]이다.

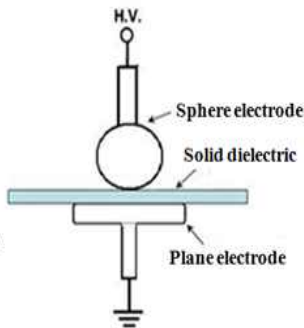
그림 1의 (a)는 연면절연과피전압을 측정하기 위한 회로도를 보여준다. 전원(220[V], 60[Hz])은 고전압 변압기를 통해 모의챔버에 인가된다. 저항 R₁은 모의챔버와 회로에 대전류를 제한하기 위함이고 R₂, R₃는 모의챔버에 인가되는 전압을 측정하기 위해 사용된 고전압분압기(High Voltage Probe EP-100K, 3000 : 1)이다. 전극은 그림 1-(b)와 같이 수직배치하고 상부 전극인 구전극(Sphere electrode)은 지름이 41[mm]이며 하부전극인 원형평판전극(Circular type plane electrode)의 지름은 59[mm]이다. 이 전극을 S-P 전극으로 칭하기로 한다. 전극의 재질은 스테인레스 스틸 재료 제작되었다.

실험방법은 모의챔버 내부에 전극을 그림 1의 (b)와 같이 S-P를 수직배치 하고 그 사이에 고체절연물을 삽입한다. 순수한 성분의 가스를 주입하기 위해 진공펌프(SINKU KIKO Co.LTd, Gud-050A, Pumping seed 60[ℓ/min])로 모의챔버 내부를 진공(5×10⁻⁴ [Torr]) 상태로 만든 후 N₂/O₂ 혼합가스를 가압(1~6[atm])하였다. N₂/O₂ 혼합가스의 압력비를 100 : 0,

80 : 20, 60 : 40 및 40 : 60[%]로 하였으며, 이들을 각각 N_2 , MA_1 , MA_2 , 및 MA_3 로 명명하였다. 가스의 혼합비는 압력계의 게이지를 기준으로 분압법칙을 적용시켰으며, 혼합순서는 혼합비를 고려하여 N_2 를 주입하고 나머지 압력을 O_2 로 챔버에 가압하였다.



(a) 실험회로



(b) 전극배치도

그림 1. 실험회로와 전극의 수직배치
Fig. 1. Experimental circuit and Vertical arrangement of electrode

모의 챔버에 3.15[kV/sec]의 상승속도로 고압이 인가되면 부분방전과 트래킹에 의해 고체절연물이 열화가 되므로, 그 영향을 최대한 억제하기 위해 고체절연물의 재사용은 하지 않았다. 고압 인가 후, 부분방전이 발생하는 연면방전개시전압(V_{SC})과 연면절연과괴전압(V_S)을 각 압력별로 5번씩 측정하여 그 평균값을 실험데이터로 활용하였다. 혼합가스가 안정화된 상태에서 V_{SC} , V_S 를 측정하기 위하여 혼합가스의 가압과 방전 직후에는 20~30초의 시간적 여유를 두고 전압을 다시 인가 하였다. 각 실험이 끝나면 고체절연물을 교체하여 반복실험을 수행하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 N_2/O_2 혼합비에 따른 연면방전특성

그림 2는 TE, PE의 고체절연물에서 N_2/O_2 혼합가스의 혼합비에 따른 V_{SC} 를, 그림 3은 V_S 특성을 나타낸다. 그림 2, 3에서 확인할 수 있는 것과 같이, 각 압력에서 V_{SC} 와 V_S 의 차이(V_S/V_{SC})가 평균적으로 Teflon은 1.087, PE는 1.094로 작다는 것을 확인할 수 있다. V_S/V_{SC} 가 낮다는 것은 부분방전이 개시되면 연면방전으로 쉽게 진전됨을 의미하므로, 연면방전은 부분방전을 억제하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

그림 2와 3에서, O_2 의 혼합비에 따라, V_S 가 상이하다는 것을 알 수 있다. O_2 는 전기적 부성기체로 전자 부착작용(η)을 고려하면, O_2 혼합량의 증가는 절연내력의 증가를 예상할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 O_2 의 혼합비가 20[%]를 초과하는 혼합비에서는 오히려 V_S 가 감소하여 MA_1 , MA_2 , MA_3 , N_2 의 순서로 실험결과를 보인다(그림 2, 3). 이러한 실험결과는 Boylett와 Looms[6]의 결과와 잘 일치한다. 그들은 평등전계 중 N_2/O_2 혼합가스에서 O_2 의 함유량이 많아지면 절연과괴전압이 감소한다고 보고하였고, 낮은 O_2 의 혼합(1[%])은 N_2 의 절연과괴전압보다 5[%] 낮다고 보고된 바 있다[4].

N_2/O_2 의 혼합가스가 N_2 보다 더 높은 절연내력을 나타내는 이유는 전기적 부성기체인 O_2 의 영향인데, N_2/O_2 혼합가스의 실효전리계수 ($\alpha - \eta$)가 O_2 의 전자 부착작용으로 인해 감소되기 때문이라 생각된다.

N_2/SF_6 혼합가스의 절연특성은 SF_6 가스의 혼합비가 50[%]를 초과하면 포화하는 특성이 나타난다. 이러한 절연특성과 본 실험의 결과를 비추어 볼 때 혼합가스에서 절연내력이 우수한 전기적 부성기체의 효과는 그 한계가 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 N_2/O_2 혼합가스를 친환경 절연설계에 적용, 응용하기 위해서는 혼합가스에서의 복잡한 방전거동을 구명하여야 한다. 위에서 언급한 사항들 외에 혼합비에 따라 달라지는 분자간 거리와 관련된 충돌단면적, 평균자유행정에 대한 연구, 검토가 필요하다고 생각된다.

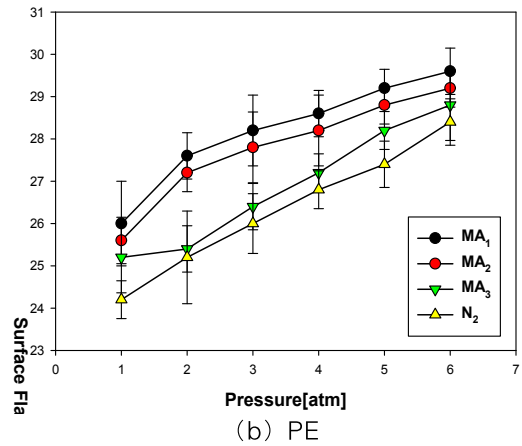
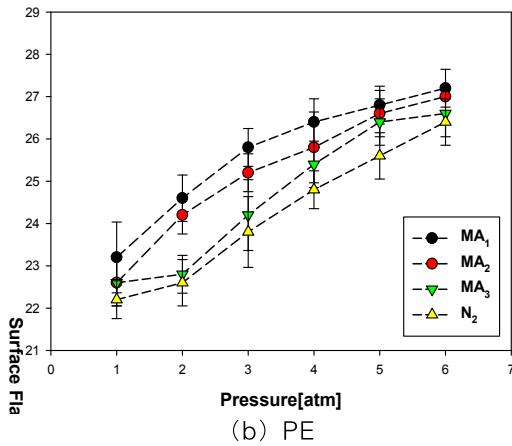
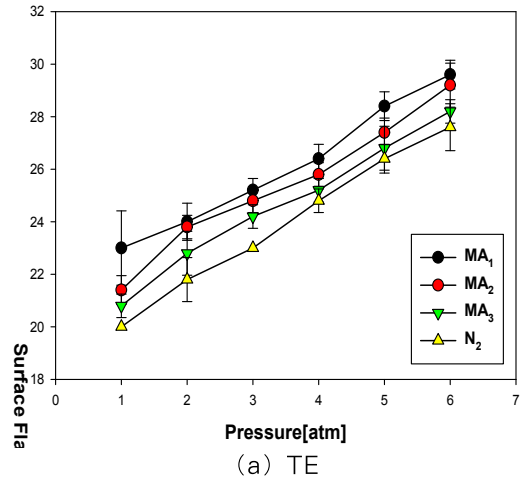
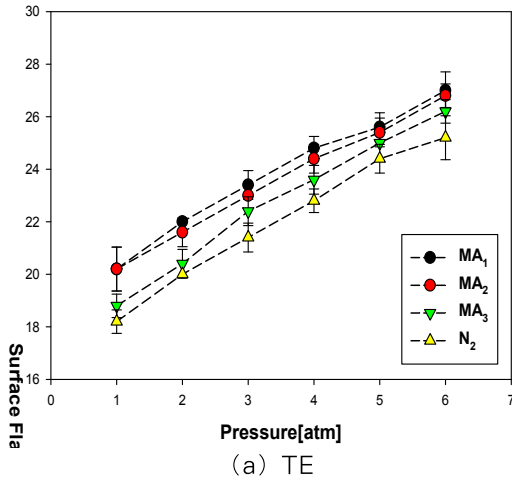


그림 2. TE와 PE의 V_{SC}-P 특성
Fig. 2. V_{SC}-P characteristics of TE and PE

그림 3. TE와 PE의 V_S-P 특성
Fig. 3. V_S-P characteristics of TE and PE

그림 4는 혼합가스 중 절연특성이 가장 좋은 MA₁을 사용하였을 때 V_{SC}와 V_S의 압력특성을 나타내었다. TE와 PE 중 V_{SC}, V_S는 압력이 증대함에 따라 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 각각의 고체절연물에서 V_{SC}와 V_S가 유사한 증가 특성을 보여주고 있다. PE의 경우, 압력의 증대에 따라 V_S가 포화하는 경향으로 나타나고, TE의 V_S는 포화하지 않는 특성을 보인다. 포화하는 것은 고체절연물이 열화를 일으키기 때문인데, 실험방법에서 고체절연물의 열화를 최대한 배제하였지만 연속적인 V_S의 측정으로 발생하는 고전압 스트레스가 고체절연물의 열화를 초래한다. 압력이 증가

할수록 V_S는 더 높아지기 때문에, 열화 현상은 고기압에서 현저할 것으로 생각된다. 그리고 본 실험조건에서 PE가 이러한 열화현상에 더 지배적인 것은 고체절연물의 열특성과 방전 시 형성되는 아크로 설명할 수 있다.

고체절연물은 특정 온도 범위를 초과하면 물성이 변하여 나타나는 열변형 특성이 있다. 그 온도 범위는 TE(약 260[°C]), PE(약 40~70[°C]), BE(약 130~200[°C])이고, PE는 열과 빛으로 인해 열화하기 쉬운 특성이 있다. 연면방전이 발생하면 높은 온도와 빛을 동반하는 아크가 형성되고 V_S를 반복 측정할 때마다 아

크의 영향이 가중된다. 따라서 가중된 아크, PE의 열 특성, 열화특성으로 인해 PE가 더 심한 열화를 발생하게 되고 압력에 따라 PE의 V_S 는 포화하게 된다.

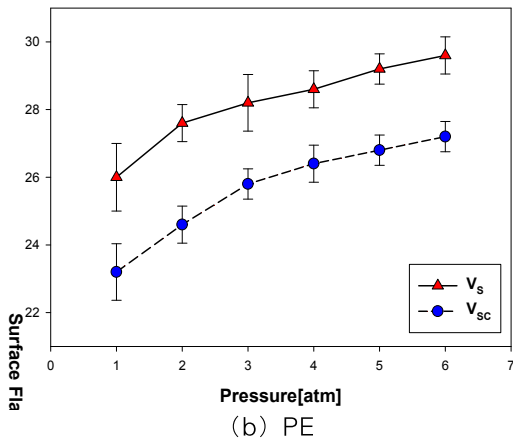
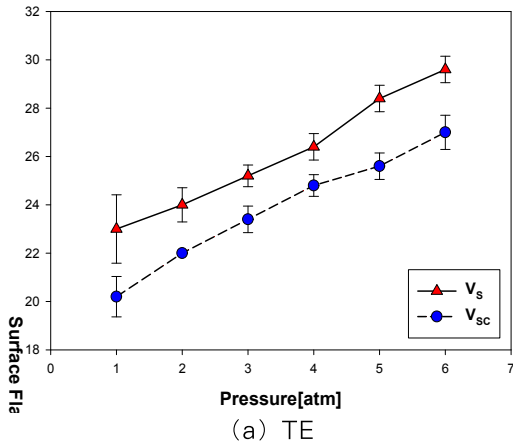


그림 4. MA₁ 중 TE와 PE의 V_{SC} -P, V_S -P 특성
Fig. 4. V_{SC} -P, V_S -P characteristics of TE and PE in MA₁

3.2 고체절연물 종류에 따른 연면방전특성

본 연구처럼 전극 사이에 고체절연물을 배치하였을 경우 절연과피는 고체절연물을 관통하여 발생하기 보다는 고체절연물 표면과 기체의 접합면을 따라 발생하는데 이를 연면방전이라 한다[7]. 이는 절연내력이 높은 고체보다는 더 낮은 기체를 통한 방전의 진전이

더 용이할 뿐만 아니라, 전극의 침단에 전계가 집중되어 삼중점(전극, 고체절연물, 가스가 접하는 지점)에서 기체를 통한 부분방전이 먼저 발생되어 진전되기 때문에 연면방전이 먼저 발생하게 된다.

이러한 연면방전은 전극의 형상과 치수, 고체절연물의 종류와 표면저항, 표면 거칠름 및 절연과피강도 그 외 연면거리, 주위매질에 영향을 받는다. 상기의 요소들 중 고체절연물의 종류, 주위매질이 연면방전에 미치는 영향을 알아보기 위해 그림 5에서는 고체유전체를 에워싸고 있는 친환경 가스 중 가장 절연성이 양호한 MA₁ 중에서 PE, TE 및 BE의 P 증가에 대한 V_S 의 측정결과를 나타내었다. 그림 중 실선은 실측값이고, 점선은 3.3 항에서 기술하게 될 식 (1)에 의한 결과이다.

고체절연물에 따라 전기적 특성이 다르기 때문에 종류별 V_S 가 PE-TE-BE 순으로 나타남을 확인할 수 있다.

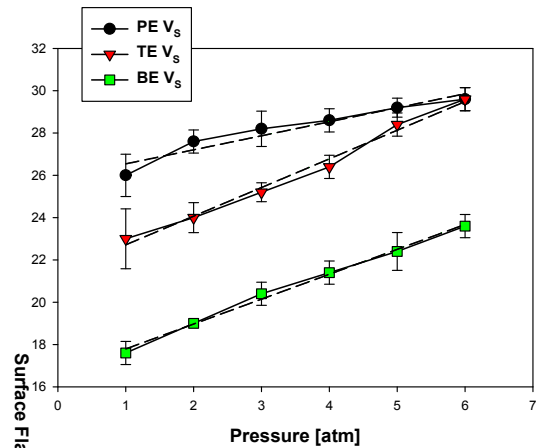


그림 5. MA₁ 중의 V_S -P 특성
Fig. 5. V_S -P characteristics in MA₁

일반적인 전기적인 특성과 단위길이당 절연과피강도는 TE가 PE보다 더 우수하다고 알려져 있지만 본 연구에서는 PE의 V_S 가 더 높게 나타났다. 이는 위에서 언급한 사항과 같이 고체절연물의 관통과피가 발생하기 전에 삼중점에서 연면방전이 발생하기 때문이다. 연면방전의 영향을 최소화 하여 고체절연물의 절연내력을 측정하여야만 하는데 일반적으로, 상용주파

수에서 고체절연재료의 절연내력 측정은 제한적인 주위매질에서 이루어진다. 대부분의 고체절연체 절연내력측정 시험에 가장 적합한 주위매질로 트랜스포머 오일을 사용한다[8]. 즉 고체절연물을 에워싸는 주위매질이 본 실험의 주위매질과 상이하므로 매질효과에 의해 그 결과가 다르게 나타남을 알 수 있다.

위의 결과를 비추어 볼 때 연면절연설계는 고체절연물을 에워싼 매질효과를 억제하여야 하며, 그 방법으로는 주위매질(N₂/O₂ Mixture Gas)의 압력을 증대시켜야 한다. 하지만 이것은 PE의 V_S를 포화시킨다. TE, BE의 연면방전에 지배적인 요소는 압력이고, PE는 열화가 지배적인 요소로 되기 때문이다. 따라서 매질효과, V_S 모두를 개선시키기 위해서는 주위매질의 압력뿐만 아니라 방전에 지배적인 요소도 반드시 고려되어야 한다.

3.3 Sigma plot 기법을 이용한 V_S식

본 항에서는 고전압 전력장치의 절연설계를 위해 특정 조건의 수많은 실험과 이론적 연구에 소요되는 인력, 예산낭비를 방지하고, 효과적으로 높은 신뢰성을 얻고자 본 실험조건 하에서 V_S의 식을 얻고자 한다.

3.2항의 실험결과와 고찰로부터 V_S는 고체절연물의 종류, 압력, 열화에 영향이 있음을 확인 하였다. 특히 압력상승에 따른 PE의 V_S는 고체절연물의 열화와 방전 시 아크로 인해 포화현상이 현저하다. 따라서 V_S의 식은 위의 요인들을 고려한 후 Sigma plot 기법을 이용해 다음과 같이 얻었다.

$$V_S = s + dP [kV] \quad (1)$$

여기서 *s*는 고체절연물 종류에 관한 상수로 측정된 V_S가 높을수록 크다. *P*는 압력 [atm]이며 *d*는 열화에 관한 상수이다. 고체절연물의 열화가 나타나면 V_S의 상승률은 감소하므로(포화) *d*는 열화가 발생하면 그 값이 작아진다. 즉 열화 현상이 현저한 PE의 *d*가 가장 낮다. 반면에 4[atm]에서 V_S의 상승률이 증가한 TE의 *d*가 가장 크다. 오차는 각 압력별 측정 V_S값과 식(1)로 계산된 압력별 V_S값의 평균값

으로 나타내었다.

이들 상수의 크기는 표 1에 나타낸 바와 같으며, 식(1)에 의한 곡선은 그림 5의 점선으로 보여준다.

표 1. V_S에 관한 상수와 오차
Table 1. Error and constant about V_S

고체절연물	P [atm]	s	d	오차 [%]
TE	1~6	21.36	1.3543	0.86
PE	1~6	25.88	0.6629	0.97
BE	1~6	16.5	1.2	0.65

4. 결 론

본 연구는 친환경 가스(N₂/O₂ mixture gas) 중에서 고체절연물의 종류, 친환경가스의 압력 변화에 따른 연면방전특성을 연구한 논문으로 아래와 같은 중요한 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) N₂/O₂ 혼합가스 중의 연면절연과괴전압은 O₂의 혼합으로 전자부착계수(η)를 증가시켜 충돌전리계수(α)를 감소시킨다. 전자부착작용을 고려한 실효전리계수는 ($\alpha - \eta$)이 되어 순수한 N₂의 연면절연과괴전압보다 더 높아지게 된다. O₂의 혼합비가 증가할수록 연면절연과괴전압이 감소하고, N₂/O₂의 혼합비가 대기 중 공기의 비율과 유사한 8 : 2일 때 연면절연내력이 가장 좋은 것을 확인하였다.
- 2) 고체절연물에 따른 연면방전개시전압과 연면절연과괴전압은 매질효과와 열화현상이 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 일반적으로 Teflon의 절연과괴강도는 Polyethylene 보다 높게 보고되고 있으나, 본 연구에서 연면절연과괴전압은 오히려 Polyethylene이 Teflon보다 높은 결과가 나타났다. 이것은 연면방전이 고체절연물을 둘러싼 매질효과의 영향을 크게 받기 때문이라 사료된다. 그리고 PE의 연면절연과괴전압은 압력이 상승함에 따라 포화하는 특성을 보이는데, 온도와 빛에 열화하기 쉬운 PE가 방전 시 아크로 인한 열화의 영향이 더 현저하기 때문이다.
- 3) 본 연구에서 친환경 가스의 압력, 고체유전체 중

류, 열화에 따른 연면절연과괴전압에 관한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = s + dP [kV]$$

위 식에서 각 기호의 의미는 본문에서 기술한 바와 같으며, 이 식은 이 분야 연구 및 설계에 유용한 자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] 도영희, 최은혁, 이장욱, 박광서, 김이국, 이광식, “배전급 전력설비를 위한 제조공기의 절연성 평가”, 한국조명·전기설비학회 논문지 Vol.22, No.2, pp.114~119, 2008.
- [2] 박혜리, 최은혁, 김이국, 이광식, “Dry-Air 중의 전극형상 및 에폭시수지의 크기변화에 따른 연면방전특성 연구”, 한국조명·전기설비학회 논문지 Vol.23, No.2, pp.154~160, 2009.
- [3] 이정환, 박혜리, 최은혁, 장승호, 이광식, “친환경 절연가스 중 Teflon 수지의 연면방전특성”, 한국조명·전기설비학회, Vol.23, No.10, pp.121~127, 2009.
- [4] J.H.Mason, “Discharge”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.E-13, No.4, pp211~238, 1978.
- [5] Hitoshi Okubo, Abderrahmane Beroual, “Recent Trend and Future Perspectives in Electrical Insulation Techniques in Relation to Sulfur Hexafluoride (SF₆) Substitutes for High Voltage Electric Power Equipment”, IEEE Electrical Insulation Magazine March/April-Vol.27, No.2, pp34~42, 2011.
- [6] Boylett, F.D.A. and J.S.T. Looms, “Effect of discharge products upon corona discharge and spark breakdown voltage”, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol.110, No.12, pp2292~2296, 1963..
- [7] 電氣學會放電專門委員會編, “放電ハンドブック”, 電氣學會, 1998.
- [8] 한국산업규격(KS), “절연 재료의 절연내력-시험방법-제1부 : 상용주파수 시험”, KS C IEC 60243-1”.

◇ 저자소개 ◇



임동영 (林東永)

1983년 4월 12일생. 2009년 2월 경주대학교 컴퓨터정보시스템공학부 졸업. 2011년 8월 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



박혜리 (朴惠利)

1984년 8월 14일생. 2006년 프랑스 Cergy-Pontoise 대학교 전기공학과 졸업. 2007년 영남대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 및 프랑스 Cergy-Pontoise 대학교 전기공학과 공동학위과정(박사).



최은혁 (崔殷赫)

1977년 2월 19일생. 2003년 경일대 전기공학과 졸업. 2005년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 영남대학교 전기공학과 겸임교수.



최상태 (崔相泰)

1957년 8월 8일생. 1984년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1992년 독일 Ruhr Bochum 대학교 전기공학부 석사과정 졸업(Dipl. Ing.). 1997년 동 대학원 박사과정 졸업(Dr. Ing.). 1998년~현재 경주대학교 전기에너지전자공학과 부교수.



이광식 (李廣植)

1948년 10월 25일생. 1971년 2월 영남대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 대한전기학회 방전 고전압 연구회 간사장 역임. 현재 본 학회 명예회장. 영남대학교 전기공학과 교수.