

## N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 혼합가스에 따른 Teflon의 절연과피특성

최은혁<sup>1\*</sup>, 최병숙<sup>2</sup>, 박승규<sup>3</sup>

<sup>1</sup>경일대학교 전기공학부, <sup>2</sup>에이스 코리아, <sup>3</sup>신덕엔지니어링

## Breakdown Characteristics of Teflon by N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Mixture gas

Eun-Hyeok Choi<sup>1\*</sup>, Byoung-Sook Choi<sup>2</sup>, Sung-Gyu Park<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Electrical Engineering, KYUNGIL University

<sup>2</sup>ACE KOREA Corporation, <sup>3</sup>Sindeok Engineering Corporation

**요약** 산업사회의 발달과 더불어 신뢰성 높은 양질의 전기에너지와 운전 및 보수의 간편화, 계통 운용의 신뢰성, 안전성 확보가 요구되고 있다. 본 논문에서는 각종 전력설비에서 SF<sub>6</sub>을 대체하여 사용되고 있는 친환경절연체 N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 혼합가스 고체 절연물의 절연과피특성과 고체절연체로 사용되고 있는 테프론의 연면절연특성을 압력에 따른 특성을 확인하였다. 대기와 비슷한 성분비 일 때 상대적으로 절연과피특성이 테프론의 연면절연특성이 안정화되며, Paschen 법칙에 의해 평등전계에 가까운 전극중의 기체의 절연과피전압은 압력에 비례하여 높아지고 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 연면절연과피전압은 압력에 따라 선형적으로 증가하였으며, 혼합가스의 O<sub>2</sub> 가스 혼합비에 따라 절연과피전압의 차이가 발생하였다. 이는 O<sub>2</sub> 가스의 전기적 부성기체의 영향과 분자 간 충돌거리에 의해 연면절연과피전압이 달라졌고, 본 연구에서 분자 간 충돌거리의 영향이 더 크게 작용하였다. 연면절연특성에 따른 테프론에 적용 가능한 절연과피전압 관계식을 산출하였다. 이러한 결과는 전력설비의 절연설계 시 기초자료로 사용될 수 있을 것이라 생각된다.

**Abstract** With the increasing development of industrial society and the availability of high quality electrical energy, the simplification of operation and maintenance procedures is required, in order to ensure the reliability and safety of electrical systems. In this paper, the dielectric breakdown characteristics of N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> mixed gas solid insulation, which is used as an alternative to SF<sub>6</sub> in various electric power facilities, are verified. When the gas mixture has a composition ratio similar to that of the atmosphere, the dielectric breakdown characteristics are relatively stabilized. It was confirmed that the breakdown voltage of the gas in the electrode near an equal electric field increased with increasing pressure according to Paschen's rule. The breakdown voltage of the surface increased linearly with increasing pressure, and the difference was caused by the mixing ratio of O<sub>2</sub> gas. This change in the surface insulation breakdown voltage was caused by the influence of the electrically negative O<sub>2</sub> gas and the intermolecular collision distance. In this study, the influence of the intermolecular impact distance was larger (than that in the absence of the electrically negative O<sub>2</sub> gas). The breakdown voltage relation applicable to Teflon according to the surface insulation characteristics was calculated. The characteristics of the surface insulation properties of Teflon, which is used as a solid insulation material, were derived as a function of pressure. It is thought that these results can be used as the basic data for the insulation design of electric power facilities.

**Keywords** : Breakdown voltage, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixtures, Teflon, Air, Solid insulation material

\*Corresponding Author : Eun-Hyeok Choi (KYUNGIL Univ.)

Tel: +82-10-9476-4724 email: choieunhyuck@hanmail.net

Received June 8, 2017

Revised (1st December 19, 2017, 2nd January 2, 2018, 3rd January 3, 2018,

Accepted January 5, 2018

4th January 4, 2018)

Published January 31, 2018

## 1. 서론

전기 에너지의 대용량화, 전력설비의 콤팩트화, 고품질, 안정성, 신뢰성 등의 공급이 가능하게 했던 것은 SF<sub>6</sub> 가스를 사용하는 GIS (Gas Insulation Switchgear) 및 전력설비이다. [1] SF<sub>6</sub> 가스는 무색, 무취, 무미의 기체이며 특히 밀도가 공기보다 대략 5배나 높아 분자간 짧은 거리와 높은 전자친화력으로 인해 뛰어난 절연내력과 우수한 아크소호능력을 가지고 있다.[2] 이러한 SF<sub>6</sub> 가스 특성은 설비의 콤팩트화로 인구밀집 지역과 혼잡한 곳의 전력 공급을 가능하게 하였고, 토지면적의 효과적인 이용을 도모하였다. 그 밖에 밀폐화, 기밀화로 주변 자연경관과 어울려 미관상 좋게 작용하고 소음방출의 감소, 입시상 불리한 여건을 개선하는 효과를 가져왔다.

하지만, SF<sub>6</sub> 가스는 방전 중 S<sub>2</sub>F<sub>10</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>2</sub>F<sub>10</sub> 고독성의 분해생성물이 형성되고 고기압과 저온에서 액화하기 쉬우며, 또 적외선 흡수능력이 크고 대기 중으로 방출되었을 때, 화학적 악화에 영향을 받지 않아 확실한 파괴 메커니즘을 알 수 없어 신속하게 제거되지 못하는데 기인하여 온실가스로 알려지게 되었다.[3]

교토의정서에서 배출규제 가스를 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub> 의 6개의 기체로 정하여 감축을 요구하고 있다. SF<sub>6</sub> 가스의 경우 타 가스들에 비해 배출량이 지극히 적지만 온실효과의 지표인 GWP(Global Warming Potential) 수치가 CO<sub>2</sub>의 23,900배로 보고되어 있다.[4]

1993년 SF<sub>6</sub>의 생산량은 세계적으로 7,000[t]이었으며, 앞으로 산업활동과 전력산업에 2010년 약11,000[t] 사용되었으며, 1982년 이후 대기 중에 SF<sub>6</sub> 가스의 양이 매년 8.7[%] 정도 증가 할 것이라 예상된다.[3] 그리고 현재 전력설비에 밀폐 되어있는 SF<sub>6</sub> 가스까지 흡산하면 대기 중으로 방출되거나 파괴 시켜야 할 SF<sub>6</sub> 가스는 엄청난 양이라는 것과 그로인한 온실효과를 짐작 할 수 있다. 따라서 친환경적인 측면과 SF<sub>6</sub> 가스의 감축, 회수, 처리 측면, SF<sub>6</sub> 가스의 사용제한으로 인한 경제적인 측면을 고려한 대체 물질의 개발이 절실한 상황이다.

친환경 절연체로 건조공기와 제조공기가 적용되어 상품화 되고 있으나, 건조공기와 제조공기의 특성상 SF<sub>6</sub>의 30%의 절연내력이 있다. 따라서 기존의 전력설비의 크기로 생산하기 위해서 설비내부에 고체절연체의 사용이 증가 되었다. 하지만 초기단계인 친환경 절연체를 이용한 전력설비에 대한 고장 및 절연파괴에 관한 대책이나

예방보전을 위한 방법에 대해서는 미비한 단계이다. 따라서 본 논문에서는 고체절연체로 널리 사용되고 있는 테프론을 향후 전력설비에 적용될 친환경절연체 N<sub>2</sub>와 O<sub>2</sub> 혼합가스하에서 기초적인 절연특성을 구명(究明)하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 논문에서 사용된 실험용 모의 GIS의 내부압력을 측정하기 위한 압력계(WISE, 0~15기압)를 설치하였다. 실험용 모의 GIS 내부에 설치된 전극배치와 고체절연물, 방전로를 관측할 수 있는 아크릴 재질의 관측창(직경 110[mm], 두께 20[mm])을 원통형으로 제작하여 설치하였다.

모의 GIS는 실험을 위한 압력 변화(2~6[atm])를 위해 안전상 10 기압 정도의 가압이 가능하고 압력 유지를 위해 실험용 모의 GIS내의 기밀성 유지가 가능하다. 높은 절연내력을 가진 절연체들의 절연내력 측정과 진단을 위해 150[kV]까지의 고압을 예폭시 주형물 부상을 통해 인가 될 수 있도록 절연설계가 되어있다. 모의 GIS 챔버 내 진공을 유지하기 위해 진공펌프(SINKU KIKO Co.LTD, Gud-050A, Pumping seed 60[l/min])을 이용하였다.

실험에 사용된 전원장치는 교류용 DY-106 (AC 300[kV]/120[MA])이며, 사용된 전극은 스테인레스 재질인 평판 전극(직경 59[mm]), 구(직경 41[mm])를 사용하였다. 고체유전체로 사용한 테프론은 지름은 70[mm] 두께는 1[mm] 사용하였다.

가스는 고순도의 N<sub>2</sub> 가스, O<sub>2</sub> 가스를 압력에 의한 분압법칙으로 N<sub>2</sub> : O<sub>2</sub>의 비율 10:0, 8:2, 6:4, 4:6의 비율로 혼합한 혼합가스가 사용 되었다.

실험에서 연면절연과피전압(V<sub>s</sub>)을 측정하기 위해 사용된 회로도를 Fig.1에 나타내었다. R<sub>1</sub>의 저항은 모의 GIS와 회로 내 대전류를 제한하기 위한 저항이고, R<sub>2</sub>와 R<sub>3</sub> 저항은 모의 GIS에 인가되는 전압을 측정하기 위해 3000:1 분압기의 역할을 한다. 그리고 R<sub>4</sub>의 저항은 연면 방전이 발생하였을 때, 모의 GIS 챔버에서 접지로 흐르는 전류의 파형을 측정하기 위해 사용된 저항이다.

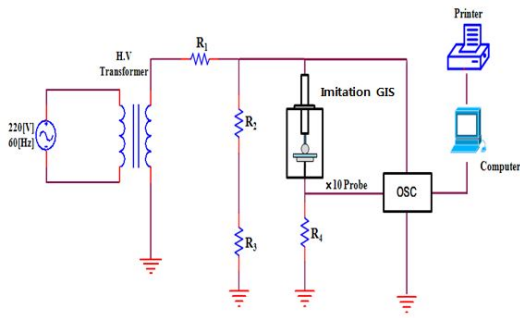


Fig. 1. Measuring circuit

### 3. 본론

#### 3.1 공기의 절연파괴특성

Fig.2는 공기의 기압 2~7[atm]에서 구(지름 41mm, 스틸재질) 대 구 전극의 절연파괴특성을 보여주고 있다. 공기의 압력에 따른 V<sub>B</sub>를 확인한 결과 갭이 작을 때는 전극의 갭의 길이(d)가 V<sub>B</sub>의 주요원인이 되어 V<sub>B</sub>이 결정되고 갭의 증가시 Schumann의 불꽃방전조건식에 의하여 d가 증가함에 따라 전자의 충돌전리계수가 감소되어 전계가 작아도 방전할 수 있는 그림과 같은 곡선의 형태를 보여준다.

다시 Schumann의 방전조건식 식(3-1)에 의해 해석하면,

$$1 - \gamma(\epsilon^{ad} - 1) = 0 \quad (3-1)$$

식(3-1)에서  $\epsilon_d \gg 1$ 인 경우가 일반적인 경우이므로 식 (3-1)은 식 (3-2)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} d &= \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{\gamma} \\ &= \frac{1}{\alpha} \ln K \end{aligned} \quad (3-2)$$

위식에서  $\alpha$ 는 Townsend의 제1충돌전리계수,  $\tau$ 는 제2차 전리계수이며  $\frac{1}{\gamma}$ 을 K로 표현하였다.

가스의 종류, 전극의 종류 및 기타 챔버 내의 환경이 결정된 경우에는, 제2차 전리계수인  $\gamma$ 가 일정하게 되어  $\frac{1}{\gamma} = K$ 로 일정한 값이 된다.

식(3-2)에서 d와  $\alpha$ 는 반비례 관계이므로, d가 커지게 되면  $\alpha$ 는 적어져야 한다는 것인데 이는, d가 증가할수록 인가전계가 낮아져도 쉽게 방전이 일어난다는 뜻을 알 수 있다.

이 결과 d-V<sub>B</sub>특성에서 어느 d까지는 V<sub>B</sub>가 직선적으로 상승하다가 서서히 포화되는 경향으로 나타나게 되는 것이다. 이렇게 V<sub>B</sub>의 증가율이 낮아지게 된다는 것은 전극 주위를 둘러싸고 있는 매질의 절연파괴전압의 증가율이 낮아진다는 의미이다. 결국 전극주위 매질의 절연파괴전압의 증가율이 낮아지게 되면 매질효과에 의하여 연면절연파괴전압의 증가율도 낮아지게 되어 포화하는 형태로 나타난다고 일반적으로 알려져 있다.

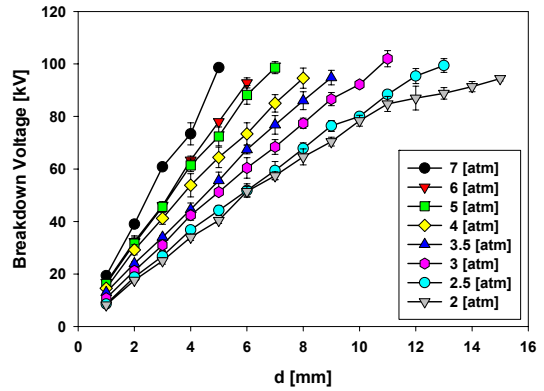


Fig. 2. Breakdown voltage as a pressure of Air

또한 Fig.3 동일한 기압(4 atm)일 때 공기의 성분비 (100:0(N<sub>2</sub>), 80:20(MA<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=8:2), 60:40(MA<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=6:4), 40:60(MA<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=4:6))에 따른 V<sub>B</sub>의 특성을 보면 V<sub>B</sub>는 공기(MA<sub>1</sub>)에 가까울수록 절연내력이 증가함을 확인하였다.

O<sub>2</sub> 가스 및 N<sub>2</sub> 가스의 절연파괴전압은 분자량은 큰 순수 O<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub> 가스의 순으로 인가전압이 증가됨에 따라 절연파괴가 발생된 것으로 나타났다. 이는 분자량이 증가됨에 따라 분자들의 거리가 짧아지므로 인하여 가스의 방전이 가속화되는 것이라고 판단된다. 따라서 Fig. 2에서 N<sub>2</sub> 가스의 비율 높은 MA<sub>1</sub> 혼합비의 평균 V<sub>B</sub>가 가장 높게 확인되었다. 대기와 비슷한 성분비 MA<sub>1</sub>일 때 상대적으로 절연파괴특성이 안정화되며, Paschen 법칙에 의해 평등전계에 가까운 전극중의 기체의 파괴전압은 압력에 비례하여 높아지고 있음을 확인하였다.

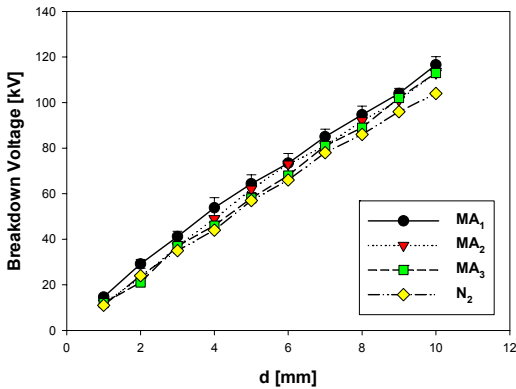


Fig. 3. Breakdown voltage as a 4[atm] pressure of N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixtures

### 3.2 테프론의 연면 절연파괴특성

Fig.4는 챔버 내에 전극을 구-평판(Sphere-Plane ; S-P) 형태로 설치하고 고체절연물을 두께 1[mm], 지름 70[mm]의 Teflon가 사용 되었을 경우 매질(N<sub>2</sub>, MA<sub>1</sub>, MA<sub>2</sub>, MA<sub>3</sub>)에 따른 연면코로나전압(V<sub>sc</sub>)과 연면절연파괴전압(V<sub>s</sub>)의 특성을 보여주는 그림이다.

V<sub>sc</sub>와 V<sub>s</sub> 모두 파센에 법칙에 따라 압력의 함수로 상승하는 결과를 보이고 있으며, 모든 혼합가스들의 압력에 따른 평균 상승률은 V<sub>sc</sub>는 1.04[%], 1.04[%], 로 압력에 의한 연면절연성은 크게 상승하지 않음을 알 수 있다.

Teflon이 부분방전에서 연면절연파괴로 전환될 때의 전압 상승률 1.087배로 V<sub>sc</sub>와 V<sub>s</sub>의 차이가 적다는 것을 확인 하였으며 이는 부분방전이 발생하면 연면방전은 쉽게 진전됨을 의미한다.

연면방전은 전극과 고체절연물, 절연기체가 접하는 부분에서 개시되며 전극과 고체절연물이 결정되면 방전 개시에는 고체절연물 주위의 매질인 제조공기의 절연내력이 가장 큰 영향을 미치는데, 본 연면방전 실험에서도 공기와 유사한 MA<sub>1</sub> 가스가 가장 높게 나타났다.

혼합가스가 순수 N<sub>2</sub> 가스에 비해 높은 연면절연내력을 가지는 것은 전기적부성기체인 O<sub>2</sub> 가스의 영향인 것으로 생각되고, N<sub>2</sub> 가스에 O<sub>2</sub> 가스를 혼합하게 되면 O<sub>2</sub> 가스의 분자량이 더 크기 때문에 분자간 충돌거리가 순수 N<sub>2</sub> 가스일 때 보다 더 짧아지게 된다. 이로 인해 분자간 충돌횟수와 충돌확률이 높아져 방전이 쉽게 발생하게 된다. 따라서, 전기적 부성기체인 O<sub>2</sub> 가스가 적절히 혼합되고 분자들간의 충돌거리가 충분히 긴 MA<sub>1</sub> 가스의 절연내력이 가장 높게 나타난다고 판단된다.

O<sub>2</sub> 가스의 혼합비를 증가시킬수록 전기적 부성기체의 효과로 더 좋은 절연내력을 가질 것 같지만, 본 실험에서는 방전에 미치는 결정적인 요인은 전기적 부성기체의 효과 보다는 분자간 충돌거리가 더 큰 요인이 된다고 사료된다. 이러한 효과는 예전부터 연구된 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 가스의 혼합가스에서 SF<sub>6</sub> 가스의 혼합비가 50[%]를 초과하면 포화하는 경향을 보이는 것처럼, 혼합가스에서 전기적 부성기체 효과로 절연내력을 상승 시키는데 한계가 있다는 것을 보여주고 있다.

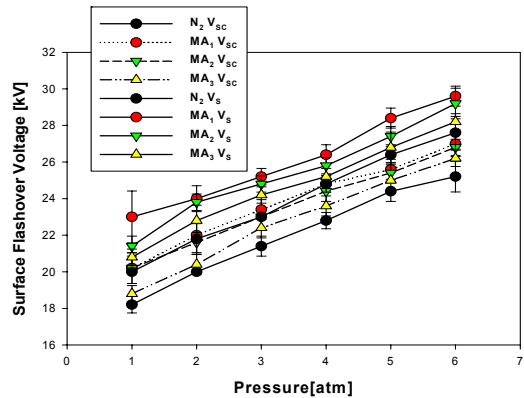


Fig. 4. Characteristics Teflon of Surface discharge as a pressure of N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixtures

### 3.3 테프론의 매질에 따른 Vs-압력 특성

MA<sub>1</sub> 가스가 가장 높은 연면절연성을 보여주고 있고, 혼합가스별 압력의 상승에 따라 연면절연파괴전압(V<sub>s</sub>)도 상승함을 확인 하였다.

실험에 사용된 테프론의 전기적 특성을 Table 1에 나타내었고, 정전용량 C는 식 3-3을 사용하여 단위면적당 정전용량을 확인하였다.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} \quad (3-3)$$

여기서  $\epsilon$  : 고체절연물의 유전율,  $\epsilon_0$  : 진공중의 유전율,  
 $d$  : 사용된 고체절연물의 두께 (Table 1에서 1mm로 계산)

Table 1. Electrical characteristic of solid insulator

Insulating material	Teflon
Volume resistivity [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	1018
Arc - resistivity [sec]	>300
Dielectric constant	2
Capacitance [ $\text{nF/m}^2$ ]	17.81
Breakdown voltage [kV/mm]	50

Table 1에 나타난 테프론의 절연파괴전압은 주변 매질에 따른 매질효과와 절연내력 측정 방법에 따라 고체 고유의 진성파괴치의 값이 상이함을 고려하면 Table 1에 나타난 절연파괴전압과 다름을 확인 하였다.

이러한 점에서 고체절연물 종류에 따라 V<sub>S</sub>는 절연물 별 전기적 특성보다는 복합절연에 의해 구성되는 복합적인 환경으로 인한 삼중점의 매질효과가 큰 차이를 발생시킨다고 생각되며 향후 연구를 통하여 검증이 필요하다.

실험에 의한 압력별로 V<sub>S</sub>를 정할 경우 삼중점의 고전계와 방전이 개시될 때 방전로의 영향에 의한 고체절연물이 열화의 영향으로 압력 상승에 따른 V<sub>S</sub>의 상승률을 하강시킨다고 생각된다.

Table 2. The constant of V<sub>S</sub> and error

Insulating material	P [atm]	a	b	c	Error rate [%]
Teflon	1	20.5409	-0.5409	3.7×10 <sup>-8</sup>	1.8×10 <sup>-8</sup>
	2	20.9141	0.005	3.7574	0.21
	3	23.5409	-0.5409	2.12×10 <sup>-8</sup>	1.03×10 <sup>-8</sup>
	4	25.5409	-0.5409	3.22×10 <sup>-16</sup>	1.02×10 <sup>-8</sup>
	5	25.9141	0.005	3.7574	0.2089
	6	26.9141	0.005	3.7574	0.2089

절연설계 시 특정 조건에 따른 V<sub>S</sub>의 식이 있으면, 연면절연내력이 추정 가능하여 계획적이고 효과적인 절연설계가 가능하다. 각 압력하의 V<sub>S</sub>는 Sigma plot의 Equation category-power 3parameter 함수를 이용하여 구한 결과, 식 3-4의 수식으로 나타 낼 수 있다.

$$V_S = a + bP^c [kV] \quad (3-4)$$

이에 관한 각 압력별 상수(a, b, c) 및 오차는 Table 2와 같다.

### 3. 결론

연면절연파괴전압은 압력에 따라 선형적으로 증가하였으며, O<sub>2</sub> 가스의 혼합비에 따라 그 차이가 발생하였다. 이는 O<sub>2</sub> 가스의 전기적 부성기체의 영향과 분자 간 충돌 거리에 의해 연면절연파괴전압이 달라졌고, 본 연구에서는 분자 간 충돌거리의 영향이 더 크게 작용하였다.

방전로가 형성되는 위치에 영향을 주는 요인으로는 고체절연물의 유전율, 매질효과, 삼중점의 고전계가 있음을 확인 하였고, 매질효과와 영향이 지배적이었다.

향후 이종 고체절연물에 대한 연면절연파괴특성을 연구를 통하여 연면절연파괴 식의 검증과 이종 고체절연물에 따른 절연파괴특성을 구분함으로써 향후 전력설비의 설계시 고체절연물의 적용에 본 논문이 기초자료가 될 것으로 생각된다.

### References

- [1] Maller, Naidu, "Advances in high voltage insulation and Arc interruption in SF6 and Vacuum", Pergamon Press.
- [2] Boylett, F.D.A., 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, pp. 2292-2296, 1963. DOI: <https://doi.org/10.1049/piee.1963.0329>
- [3] L. G. Christophorou, R. J. Van Brunt, "SF6/N2 Mixtures Basic and HV Insulation Properties", 1995 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no. 5, October pp. 952-1003, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1109/94.469988>
- [4] D. -Y. Lim, G. -J. Min, H. Park, E. -H. Choi, S. -T. Choi, S. Bae, S. -B. Rhee, W. -Z. Park and K. -S. Lee, "Analysis of Medium Effect by Gas Pressure and Gap at Surface Discharge of Dry Air", J Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng., vol. 27, no. 10, pp. 86-92, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2013.27.10.086>

최은혁(Eun-Hyeok Choi)

[정회원]



- 2003년 2월 : 경일대학교 전기공학과 (공학사)
- 2005년 8월 : 영남대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 영남대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2012년 8월 ~ 2017년 2월 : 한국폴리텍대학 조교수
- 2017년 9월 ~ 현재 : 경일대학교 전기공학부 조교수
- 2017년 12월 ~ 현재 : 하이볼트 대표 (교수창업기업)

<관심분야>

고전압, 절연진단, 전력설비

**최 병 속**(Byoung Sook Choi)

[정회원]



- 1984년 2월 : 경일대학교 전기공학과 (공학사)
- 1986년 8월 : 경일대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 홍익 대학교 전기제어정보공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 홍익대학교 전기설비연구센터 책임연구원

• 2009년 4월 ~ 현재 : 에이스 코리아 대표

<관심분야>

전기설비, 송배전

---

**박 승 규**(Sung-Gyu Park)

[정회원]



- 2002년 2월 : 영남대학교 전기공학과 (공학사)
- 2008년 2월 : 영남대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2012년 7월 : 영남대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2010년 8월 ~ 현재 : 신덕엔지니어링 대표이사

<관심분야>

고전압, 전기/소방설비