

SF₆, g³ 및 Dry Air 절연에서 PD 특성 비교 분석

신한신¹, 김남훈¹, 김성욱², 길경석¹ 

¹ 한국해양대학교 전기전자공학과

² 신라대학교 스마트전기전자공학부

Comparative Analysis of PD Characteristics Under SF₆, g³ and Dry Air Insulation

Han-sin Shin¹, Nam-Hoon Kim¹, Sung-Wook Kim², and Gyung-Suk Kil¹

¹ Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

² Division of Smart Electrical and Electronic Engineering, Silla University, Busan 46958, Korea

(Received August 10, 2020; Revised August 21, 2020; Accepted August 27, 2020)

Abstract: Sulphur hexafluoride (SF₆) is mostly used as a current-insulating medium in gas-insulated switchgears (GIS), owing to its excellent dielectric strength and arc-extinguishing performance. The global warming potential (GWP) of SF₆, however, is 23,900 times that of CO₂, and its life time in the atmosphere is 3,200 years. For these reasons, new eco-friendly gases to replace SF₆ are required. In this study, the partial discharge (PD) characteristics of green gas for grid (g³) and dry air (N₂/O₂) were analyzed to compare with those of SF₆. A PD electrode system was designed to simulate the protrusion defect in GISs and fabricated for experimentation. To compare the PD characteristics of each gas, the discharge inception voltage (DIV), discharge extinction voltage (DEV), discharge magnitude, discharge pulse number, and phase pattern were analyzed. Results from this study are expected to provide fundamental materials for the design of eco-friendly GISs.

Keywords: Sulphur hexafluoride, Gas insulated switchgears, Eco-friendly gas, Partial discharge, Discharge inception voltage, Discharge extinction voltage

1. 서론

육불화황(sulphur hexafluoride, SF₆) 가스는 우수한 절연성능과 소호 능력으로 전력설비 절연매체로 폭넓게 이용되어 왔다 [1-3]. 그러나 IPCC (intergovernmental panel on climate change)에서 SF₆ 가스의 지구온난화 지수(global warming potential, GWP)가 CO₂가스의 23,900배로 온실가스 중 가장 높고, 대기 중 잔존

수명 또한 3,200년이라고 알려져 1990년대 말부터 전 세계적으로 점차 사용량을 규제해 왔다 [4]. 또한 2015년 파리협정을 통해 신기후협약체제가 돌입하면서 우리나라를 포함한 169개국이 온실가스 저감 의무를 지게 되었다 [5]. 이에 따라 국내에서도 SF₆ 가스를 대체할 수 있는 친환경 매질에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 대상으로 g³ (green gas for grid)와 dry air가 각광받고 있다 [6-9]. 그러나 아직까지 가스 매질의 절연파괴 특성이나 낙뢰와 같은 서지전압에 의한 절연특성 연구가 대부분 수행되고 있고, 부분방전 (partial discharge, PD)에 의한 절연특성에 관한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

본 논문은 가스절연개폐장치(gas insulated switch-

✉ Gyung-Suk Kil; kilgs@kmou.ac.kr

gear, GIS)에 적용될 친환경 가스의 PD 특성에 관한 연구로, GIS에서 발생할 수 있는 도체 돌기 (protrusion on conductor, POC) 결함을 모의하였다. 압력에 따른 기존 SF₆ 가스와 친환경 가스 (g³, dry air)의 방전개시전압(discharge inception voltage, DIV), 방전소멸전압(discharge extinction voltage, DEV), 방전 전하량, 펄스 수 및 위상 패턴을 비교 분석하여, GIS 절연 설계 자료로 활용할 수 있는 결과를 도출하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험계 구성

친환경 가스의 부분방전 특성 분석을 위한 실험계는 그림 1과 같다. 최대 출력전압 50 kV, 출력전류 30 mA인 몰드변압기를 사용하여 도체 돌기를 모의한 전극계에 전압을 인가하고, 10,000 : 1 divider (NORTH STAR, USA)를 사용하여 전압을 측정하였다. PD 신호는 IEC 60270에 따른 coupling capacitor (OMICRON, Austria)로 검출하였고, PD 패턴은 MPD-600 (OMICRON, Austria)으로 분석하였다.

SF₆ 가스의 대체를 위한 절연 매질로 g³와 dry

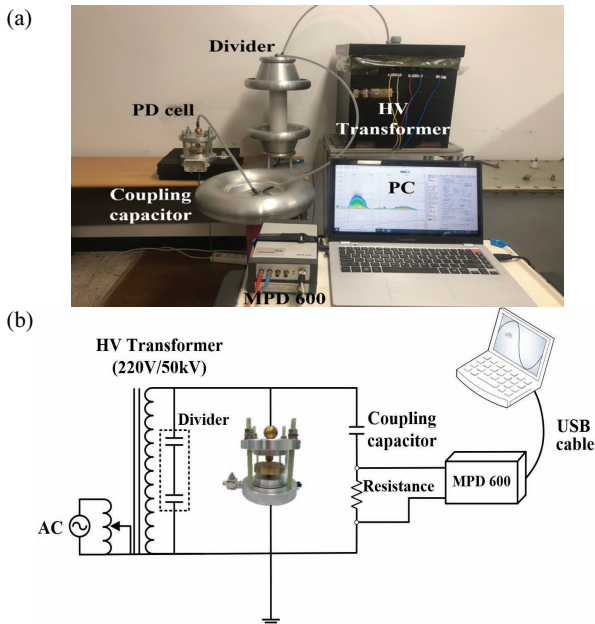


Fig. 1. Experimental setup. (a) Photograph and (b) circuit diagram.

Table 1. Characteristics of insulated gases.

Gas	SF ₆	g ³	Dry air
GWP	23,900	327	0
Dielectric strength	1*	0.87	0.43
Boiling point [°C]	-64	-25	< -183
Life time [year]	3,200	35	-

* Relative dielectric strength, normalized to SF₆ (=1)

air를 사용하였다. 각 매질의 절연특성을 표 1에 나타내었다. g³는 Novec™ 4710과 CO₂로 구성된 혼합 가스로 절연 내력이 우수하고 GWP가 낮은 친환경적인 가스이다. Dry air는 N₂와 O₂로 혼합된 건조 공기로 절연성능은 SF₆나 g³에 비해 상대적으로 미흡하지만 GWP는 0인 친환경 매질이다 [10,11].

2.2 전극계

가스절연구조는 전력계통에서 고장 없이 운전 가능한 신뢰성이 높은 전력기기의 구조이지만 제작, 운반, 설치 및 운전 시에 외함이나 도체의 돌출부 결함이 발생할 수 있다. 이러한 결함은 대부분 설비 내부에서 나타나기 때문에 육안으로의 검사가 힘들고 신호 또한 미소하여 노이즈와의 구분이 어렵기 때문에 다양한 측면에서의 분석이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 가스절연구조에서 발생 가능한 결함 중 하나인 도체 돌기를 모의한 전극계를 그림 2와 같이 제작하여 부분방전을 모의하였다. 전극계는 지름 144 mm, 높이 131 mm의 밀폐형 구조이며 평판전극은 텅스텐-구리합금으로 지름 80 mm, 두께 10 mm이다. 또한 침의 곡률반경은 5 μm이고 침-평판의 간격은 1.4 mm로 설정하였다. 전극계 내부 압력은 최대 0.6 MPa까지 유지 가능하며, 0.1 MPa, 0.3 MPa

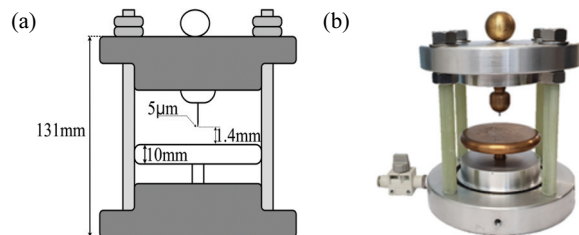


Fig. 2. Electrode systems. (a) Design drawing and (b) photograph.

및 0.5 MPa로 충전하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 DIV 및 DEV

DIV 및 DEV는 부분 방전 발생 시 설비의 절연열화 상태를 나타내는 중요한 지표 중 하나이다 [12]. POC에서 각 매질의 압력에 따른 DIV 및 DEV를 그림 3과 4에 나타내었다.

DIV는 인가 전압을 1 kV씩 증가시킨 후 1분 동안 측정하는 것을 반복하여 최초 방전이 10 pC 이상 발생하는 전압을 확인하였고, DEV도 인가 전압을 1 kV씩 감소시킨 후 1분 동안 측정하는 것을 반복하여 방전이 소멸되는 최소 전압을 확인하였다.

측정 결과로부터 DIV는 모든 압력에서 SF₆가 가장 높은 값으로 측정되었고 g³, dry air 순으로 낮아졌다. 내부 압력이 0.1 MPa일 때 dry air의 DIV는 SF₆의 67%로 나타났고 0.3 MPa에서 57%, 0.5 MPa에서

53%로 압력이 증가할수록 SF₆의 DIV보다 증가율이 감소하였다. g³의 DIV는 0.1 MPa일 때 SF₆의 89%, 0.3 MPa에서 86%, 0.5 MPa에서 84%로 dry air와 같이 압력이 증가할수록 DIV의 증가율이 감소하지만 선형적으로 증가하였다.

DEV에서도 DIV와 같이 SF₆가 가장 높은 값으로 측정되었고, 0.1 MPa에서 dry air의 DEV는 SF₆의 63%, 0.3 MPa에서 50%, 0.5 MPa에서 50%로 나타났다. g³의 DEV는 0.1 MPa에서 SF₆의 88%, 0.3 MPa에서 92%, 0.5 MPa에서 82%로 나타났다.

위 결과로부터 0.5 MPa에서의 SF₆와 같은 절연성능을 가지기 위한 친환경 가스의 내부 압력을 추산하였다. g³의 경우 SF₆ 대비 1.3배, dry air는 2.8배로 충전시킬 경우 SF₆와 유사한 절연 내력의 DIV를 가질 것으로 판단된다. DEV는 g³의 경우 0.5 MPa의 SF₆ 대비 1.3배, dry air는 3.1배로 압력을 증가시켜야 SF₆와 같은 크기를 가질 수 있을 것으로 추정된다.

3.2 방전 전하량

그림 5는 내부 압력 0.5 MPa에서 각 매질의 인가 전압에 따른 방전 전하량의 평균 크기를 나타낸 것이다.

DIV에서의 방전 전하량의 크기는 SF₆의 경우 5 pC로 가장 낮게 나타났으며, g³는 9 pC, dry air는 14 pC으로 가장 높게 측정되었다. 인가 전압 19 kV, 20 kV에서 SF₆의 방전 전하량의 크기는 각각 5 pC, 8 pC으로 측정되었고, 같은 전압에서 dry air의 방전 전하량의 크기는 41 pC, 50 pC으로 SF₆의 약 8.2배, 6.3배로 나타났다. 또한 g³의 방전 전하량은 각각 29 pC, 39 pC으로 측정되었고 SF₆의 5.8배, 4.9배로 나타났다.

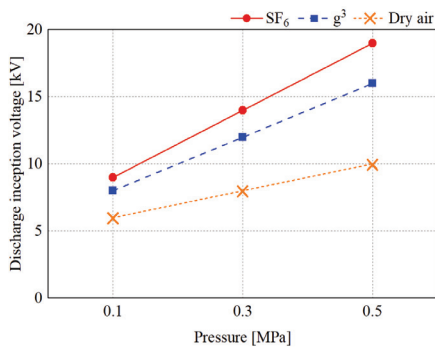


Fig. 3. DIV as a function of pressure.

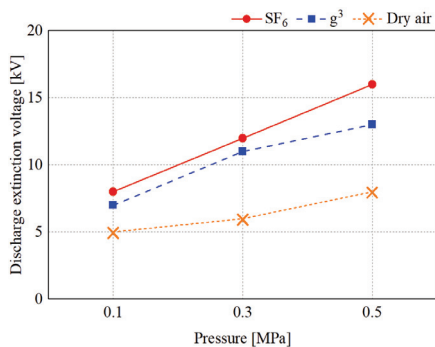


Fig. 4. DEV as a function of pressure.

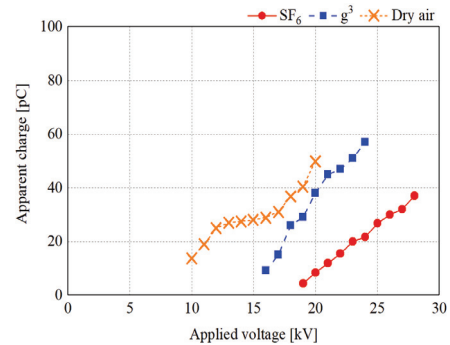


Fig. 5. Magnitude of apparent charge as a function of the applied voltage at 0.5 MPa.

위 결과로부터 0.5 MPa에서 동일 전압인 19 kV, 20 kV 기준일 때, g^3 대비 dry air의 방전량이 1.4배, 1.3배만큼 더 크게 나타난 것을 확인하였다.

3.3 펄스 수

내부압력 0.5 MPa에서 각 매질의 인가 전압에 따른 초당 펄스 수는 그림 6에 나타내었다. DIV에서의 펄스 수는 SF₆에서 157개로 측정되었고 g^3 에서 200개로 SF₆에 비해 27% 증가되었다, 또한 dry air의 DIV 펄스 수는 237개로 SF₆에 비해 51% 증가되었다. 인가 전압 19 kV, 20 kV에서의 펄스 수는 SF₆의 경우 각각 157개, 1,186개로 나타났고, g^3 에서 9,542개, 10,501개, dry air에서 16,280개, 19,625개로 나타났다.

위 결과로부터 0.5 MPa에서 동일 전압인 19 kV, 20 kV 기준일 때, dry air가 g^3 에 비해 약 1.7배, 1.9배만큼 펄스가 더 빈번하게 발생한 것을 알 수 있었다.

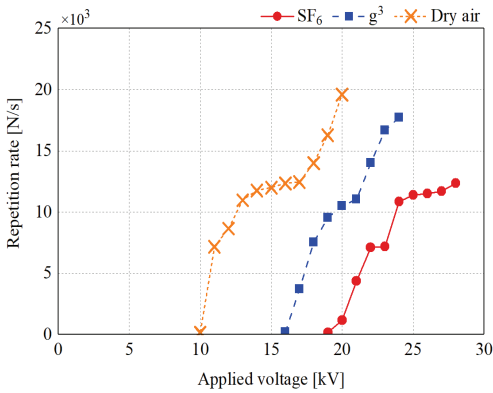


Fig. 6. Number of pulses as a function of applied voltage at 0.5 Mpa.

3.4 위상분포

내부 압력 0.5 MPa에서 DIV의 절연매질에 따른 분당 부분방전 펄스 위상분포를 그림 7에 나타내었다.

SF₆는 정극성인 65~115°에서 부분방전 펄스가 분포하였고 펄스 수는 10,537개 발생하였다. g^3 에서는 정극성인 62~128°에서 부분방전 펄스가 분포하였고 펄스 수는 13,424개로 나타났다. Dry air에서는 정극성인 67~126°와 부극성인 244~321°에서 부분방전 펄스가 분포하였고 부극성에서 최댓값이 형성되었다. 펄스 수는 정극성에서 5,830개, 부극성에서 8,390개 발생하였다.

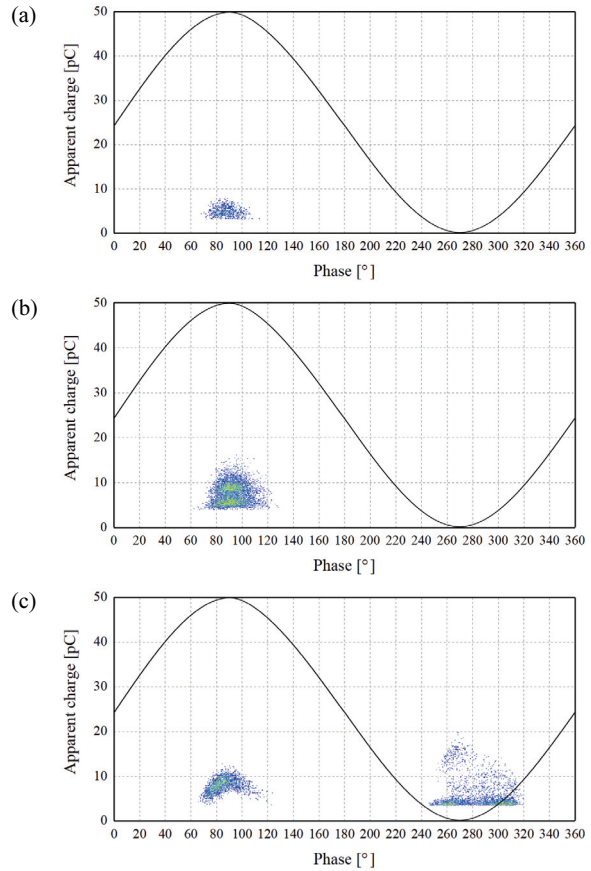


Fig. 7. Phase distribution at DIV. (a) SF₆ at 0.5 MPa, (b) g^3 at 0.5 MPa, and (c) dry air at 0.5 MPa.

위 결과로부터 0.5 MPa에서 SF₆와 g^3 는 유사한 위상 범위에서 PD 패턴이 나타났으며, dry air의 경우 정극성에서 41%, 부극성에서 59% 발생된 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 가스절연구조에서 발생하는 도체 돌기(POC) 결함을 제작하고, SF₆와 비교하여 g^3 및 dry air의 부분방전 특성에 대해서 연구하였다. 0.5 MPa에서 각 매질의 DIV 및 DEV 크기, DIV의 방전 전하량 크기, 펄스 수 및 위상분포를 표 2에 나타내었다.

- 1) DIV 및 DEV의 크기는 SF₆, g^3 , dry air 순으로 감소하였으며 압력의 증가에 따른 DIV 및 DEV의 증가율은 SF₆와 g^3 가 비슷한 추세를 보였고,

Table 2. Average value of parameter characteristics for insulated gases at 0.5 MPa.

Gas	SF ₆	g ³	Dry air
DIV [kV]	19	16	10
DEV [kV]	16	13	8
Apparent charge [pC]	5	9	14
Repetition rate [N/s]	157	200	237
Phase distribution [°]	65~115	62~128	67~126 244~321

각 압력에서 SF₆와 g³의 DIV 및 DEV의 크기 차이는 20% 미만으로 나타났다. SF₆와 dry air의 DIV 및 DEV는 압력이 높아질수록 더욱 큰 차이를 보였으며, 압력의 증가에 따른 DIV 및 DEV의 증가율이 SF₆에 비해 dry air에서 더욱 낮은 것으로 나타났다. Dry air가 SF₆와 비슷한 절연특성을 가지기 위해서는 내부 압력을 SF₆ 대비 약 300% 이상으로 증가시켜야 할 것으로 추산되었으며, g³의 경우 약 130%만큼 증가시켜야 할 것으로 판단된다.

- 방전 전하량의 크기는 내부압력 0.5 MPa에서 동일 전압인 19 kV, 20 kV 기준일 때, SF₆보다 g³와 dry air에서 더욱 증가된 수치가 나타났다. g³의 방전 전하량은 각각 dry air의 72%, 77%로 두 매질을 비교했을 때 g³가 더 낮은 크기로 나타남을 확인하였다.
- 펄스 수는 SF₆에 비해 g³와 dry air에서 수치가 증가됨을 확인하였다. 동일 전압인 19 kV, 20 kV 기준일 때, g³의 펄스 수는 각각 dry air의 59%, 54%로 dry air가 PD 발생이 더욱 빈번하게 일어남을 확인하였다.
- DIV에서의 방전펄스 위상은 SF₆와 g³에서 정극성에 분포하였으나, dry air에서는 59%가 부극성에 분포하였으며 최댓값 또한 부극성에 형성되었다.

GIS에서 SF₆를 대체할 친환경가스의 적용을 위한 연구로, 그동안 절연파괴 특성이나 낙뢰 시험에 관한 연구만 이뤄지던 것과는 달리, 본 논문에서는 SF₆ 가스와 비교하여 g³와 dry air의 부분 방전 특성에 대해 연구하였다. 실험 결과, SF₆의 절연특성이 가장 우수하지만 g³의 경우 SF₆의 약 80%의 절연 성능을 보여 주었다. 이와 같이 본 실험에서 비교한 DIV, DEV 및 방전 전하량 등 파라미터 값을 GIS 절연 설계에 반영한다면 운영과 진단의 신뢰성도 향상될 것으로 기대한다.

ORCID

Gyung-Suk Kil

<https://orcid.org/0000-0002-1672-2812>**감사의 글**

본 연구는 2020년도 산업통상자원부(MOTIE) 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구입니다(No.20010965).

REFERENCES

- S. J. Kim, H. E. Jo, G. W. Jeong, G. S. Kil, and S. W. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 40 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.1.40>]
- S. Okabe, J. Wada, and G. Ueta, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **22**, 2108 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005040>]
- H. E. Jo, S. J. Kim, G. W. Jeong, and G. S. Kil, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 320 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.5.320>]
- Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) WG, Fifth Assessment Report: The Physical Science Basis, Climate Change (2013).
- N. H. Kim, G. S. Kil, and S. W. Kim, *Journal of the Korean Society for Railway*, **22**, 374 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2019.22.5.374>]
- Y. Wang, D. Huang, J. Liu, Y. Zhang, and L. Zeng, *Processes*, **7**, 216 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7040216>]
- H. Saitoh, K. Morita, T. Kikkawa, N. Hayakawa, and H. Okubo, *Electr. Eng. Jpn.*, **148**, 36 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1002/eej.10277>]
- G. Wang, W. H. Kim, J. B. Kong, G. S. Kil, and H. K. Ji, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **19**, 195 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-018-0037-5>]
- CIGRE JWG 33/23.12, Insulation co-ordination of GIS: Return of experience on site Tests and diagnostic techniques, Electra (1998).
- G. Wang, H. E. Jo, S. J. Kim, S. W. Kim, and G. S. Kil, *Measurement*, **91**, 351 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.033>]
- M. S. Kim, S. J. Kim, G. W. Jeong, H. E. Jo, and G. S. Kil, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 238 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2014.27.4.238>]
- M. Pompili, C. Mazzetti, M. Libotte, and E. O. Forster, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, **28**, 1002 (1993). [DOI: <https://doi.org/10.1109/14.249373>]