

SF₆-N₂ 혼합가스 중 돌출 결함의 부분방전 특성

조향은, 왕국명, 김선재, 박경수, 길경석^a

한국해양대학교 전기전자공학과

Partial Discharge Characteristics on Protrusion Defects in SF₆-N₂ Mixture Gases

Hyang-Eun Jo, Guoming Wang, Sun-Jae Kim, Kyoung-Soo Park, and Gyung-Suk Kil^a

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

(Received November 18, 2015; Revised December 1, 2015; Accepted December 4, 2015)

Abstract: Studies on a SF₆-mixture and -alternative gas has been in progress to reduce the use of SF₆ gas as an insulation material of GIS (gas insulated switchgears). In this paper, we dealt with PD (partial discharge) characteristics in pure SF₆ and N₂, and their mixtures on aspects of insulation design and risk assessment for GIS. A POC (protrusion on conductor) and a POE (protrusion on enclosure) as the major defects were fabricated to simulate PD. We analyzed the DIV (discharge inception voltage), DEV (discharge extinction voltage), pulse magnitude, counts and phase distribution of PD pulse in SF₆-N₂ mixtures (SF₆ 100%, SF₆ 80%-N₂ 20%, SF₆ 50%-N₂ 50%, SF₆ 20%-N₂ 80%, and N₂ 100%) according to the IEC60270. The DIV, DEV as well as magnitude of PD pulse decreased on the POC as increase of N₂ ratio. For the POE, the DIV and DEV in N₂ ratio below 50% were the same voltages as those in SF₆ 100%. In this experiment, SF₆ 80%-N₂ 20% mixture could be considered with the equivalent insulation performance to a GIS.

Keywords: SF₆, Mixture gases, PD, DIV, DEV

1. 서 론

육불화황 (sulphur hexafluoride, SF₆) 가스는 높은 절연내력과 뛰어난 아크소호 능력으로 전력설비의 절연매체로 많이 사용되고 있다 [1-3]. 1966년, 프랑스의 EDF 변전소에서 SF₆를 절연매체로 하는 가스절연개폐장치 (gas insulated switchgear, GIS)가 최초로 사용되었으며, 이는 변전소의 면적 축소 및 유지보

수 비용이 절감되었다 [4]. 그러나 SF₆는 CO₂, CH₄, N₂O, HFCs 및 PFCs와 더불어 6대 온실가스 중 하나로 환경문제의 원인이 된다. 특히, 1994년 IPCC (intergovernmental panel on climate change)에서 지구온난화 지수 (global warning potential, GWP)가 가장 높은 가스로 발표되면서 사용량이 규제되고 있다. 이러한 이유로 SF₆의 대체매질에 대한 연구가 오래전부터 진행되고 있지만, SF₆의 물리·화학적 특성을 완전히 충족시키는 순수기체를 찾지 못했다.

SF₆의 사용량을 최소화하는 방향으로 혼합기체에 대한 연구가 많이 수행되고 있으며, 여러 가지 기체 중 N₂, CO₂, N₂O 및 dry air가 많이 사용되고 있다. 특히 N₂는 친환경적이고 가격이 저렴하며, 화학적으로

^a Corresponding author; kilgs@kmou.ac.kr

안정적이기 때문에 혼합가스로 각광받고 있다 [5,6]. 그러나 대부분의 연구는 가스 혼합비율에 따른 평등·불평등 전계에서 뇌임펄스와 교류전압에서 절연파괴전압에 관한 것이며 절연열화에 관한 것은 미흡한 실정이다 [7-11]. 부분방전과 관련한 DIV와 DEV는 낮은 인가전압에서도 알 수 있기 때문에 열화메커니즘을 분석하고 절연설계에 적용할 수 있다.

본 논문에서는 SF₆ 가스 사용량을 줄이기 위한 연구로 SF₆-N₂ 가스의 혼합비율에 따른 결함별 부분방전 특성에 대해서 연구하였다. 분석파라미터는 DIV, DEV, 펄스 크기 및 위상분포이다.

2. 실험 방법

2.1 실험계의 구성

외부 노이즈의 영향을 최소화하여 부분방전 펄스를 검출하기 위하여 차폐함에서 그림 1과 같이 실험계를 구성하였다. 최대 출력전압 50 kV, 출력전류가 30 mA 인 몰드변압기를 사용하여 전극계에 전압을 인가하였다. 고전압 인입부는 코로나를 방지하기 위하여 충분한 절연내력을 갖도록 실험계를 구성하였으며, 10,000 : 1 분압기로 인가전압을 측정하였다.

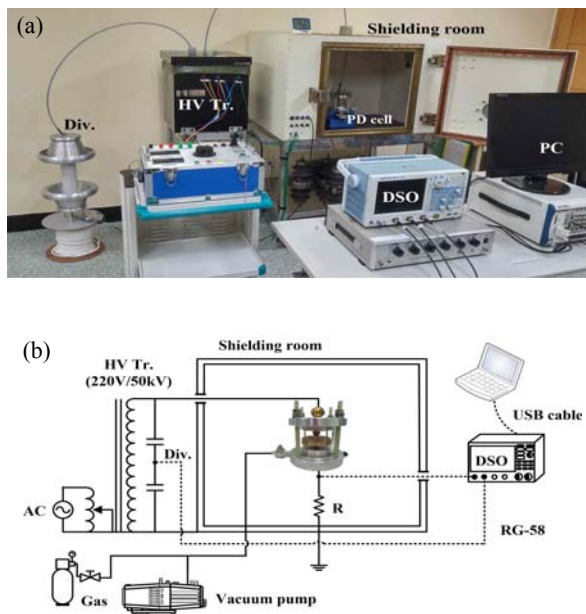


Fig. 1. Configuration of the experimental set-up. (a) Photograph and (b) circuit diagram.

전극계 내부 압력은 0.4 MPa과 0.5 MPa로 충전하였으며, 가스 주입 전에는 진공펌프 (120 l/min)를 사용하여 전극계 내부에 가스를 제거함으로써 서로 다른 혼합비율의 가스가 섞이는 것을 방지하였다. 부분방전펄스는 오실로스코프 (5 GS/s, 1 GHz)와 DAQ (250 MS/s)로 분석하였다.

2.2 전극계

가스절연 개폐장치는 제조, 운반 및 조립 시에 부주의로 인하여 여러 종류의 결함이 발생할 수 있다. 특히 금속 외함이나 도체의 스크래치 및 혼입된 이물질의 이동으로 돌출부 결함이 발생된다. 이러한 결함은 신호가 매우 작아 노이즈와 구분이 어렵기 때문에 많은 연구가 필요하다.

본 논문에서는 돌출부 결함인 도체돌출 (POC) 및 외함돌출 (POE)을 제작하고 각각의 부분방전 특성을 분석하였다. 그림 2(a)는 도체돌출, (b)는 외함돌출을 모의한 것으로 각각의 평판전극은 텅스텐-구리합금으로 지름 80 mm, 두께 10 mm이며 가장자리를 둥글게 하여 전계가 집중되지 않게 하였다. 또한 침의 곡률반경은 5 μm이며, 평판-침 간격은 3 mm이다.

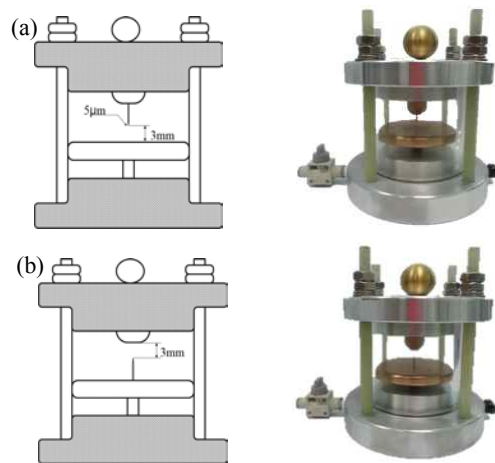


Fig. 2. Electrode systems. (a) POC and (b) POE.

3. 결과 및 고찰

3.1 도체돌출

가. DIV 및 DEV

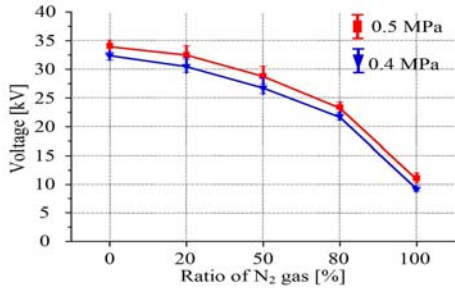


Fig. 3. DIV as a function of N₂ ratio.

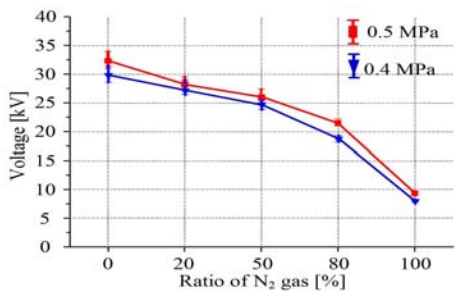


Fig. 4. DEV as a function of N₂ ratio.

그림 3과 4는 도체돌출에서 가스 혼합비율에 따른 DIV 및 DEV를 나타낸 것으로, N₂ 혼합비가 증가할수록 감소하였다. 0.4 MPa일 때 DIV는 SF₆ 100%가 제일 높은 32.4 kV이었으며, N₂의 비율이 증가할수록 각각 5.9%, 17.6%, 32.7% 및 71.6% 감소하였다. N₂ 100%는 SF₆ 100% 대비 28.4%에 불과하였다. 0.5 MPa에서 SF₆ 100% 대비 가스 혼합비율별 증가율은 0.4 MPa일 때와 비슷하였다.

나. 펄스 크기

그림 5는 DIV에서 최대 및 평균 펄스 크기를 나타낸 것이다. N₂ 비율이 증가함에 따라 크기가 감소하였으며, SF₆ 100% 대비 펄스 크기의 감소율은 0.4 MPa 보다 0.5 MPa일 때 더 크게 나타났다. 0.4 MPa일 때 평균 펄스 크기는 SF₆ 100%에서 7.7 mV로 가장 높았으며, 가장 낮은 SF₆ 20%-N₂ 80%와는 14% 차이로, 모든 혼합비에서 크기가 유사하였다. 압력이 0.5 MPa가 되자 평균 펄스 크기가 전체적으로 증가하였으며, SF₆ 100%에서 가장 크고, N₂ 100%가 가장 작았다. 이때 SF₆ 100% 대비 N₂ 100%의 감소율은 34%이다. DIV×1.25에서 펄스 크기를 측정하였으며, 결과는 그림 6과 같다. 0.4 MPa, N₂ 100%는 SF₆ 100% 대비 최대 펄스 크기가 24%였다.

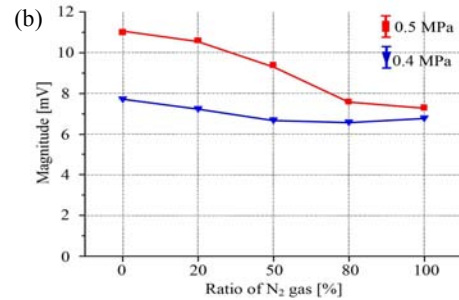
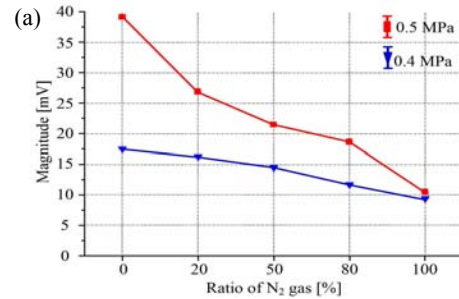


Fig. 5. Pulse magnitude at DIV. (a) Maximum and (b) average.

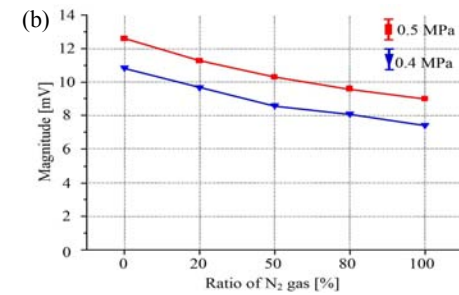
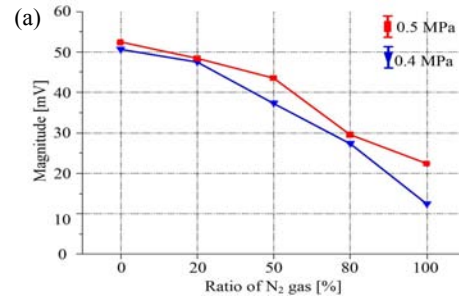


Fig. 6. Pulse magnitude at DIV×1.25. (a) Maximum and (b) average.

이는 DIV가 매우 낮아서 펄스 크기도 작은 것으로 판단된다. 0.5 MPa일 때의 평균 펄스 크기가 0.4 MPa일 때보다 높게 나타났으나, 압력에 따른 감소율은 비슷하였다. 평균 펄스 크기도 SF₆ 100%가 가장 크게 나타났으며, N₂ 100%가 가장 작았다.

다. 위상분포 및 펄스 수

가스 혼합비율에 따른 부분방전 펄스의 위상분포를 그림 7과 8에 나타내었다.

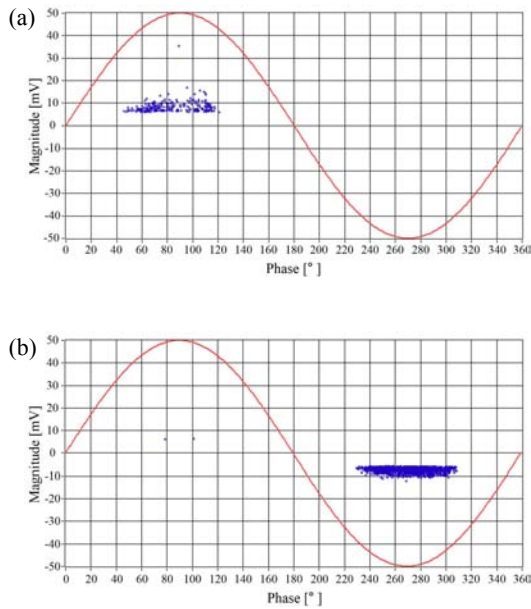


Fig. 7. Typical phase distribution at DIV. (a) SF₆ 100% at 0.4 MPa and (b) N₂ 100% at 0.5 MPa.

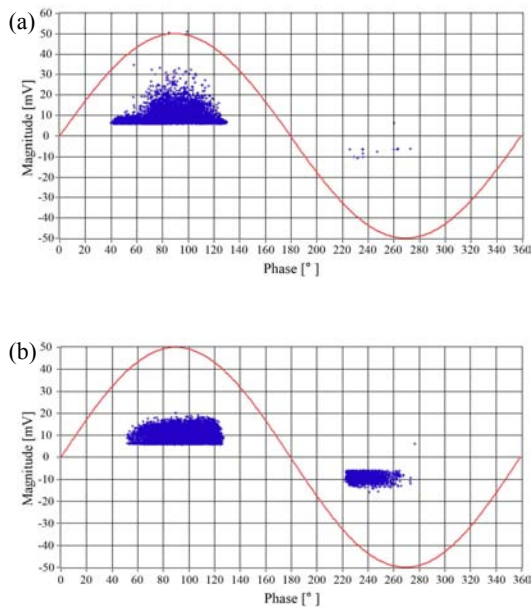


Fig. 8. Typical phase distribution at DIV×1.25. (a) SF₆ 100% at 0.4 MPa and (b) N₂ 100% at 0.5 MPa.

그림 7은 DIV일 때의 위상분포로, N₂ 100%에서는 부분방전 펄스의 95% 이상이 부극성인 230° ~ 310°에 분포하였으며, 그 외 혼합비율에서는 40° ~ 130°인 정극성에서 발생하였다. 펄스 수는 0.4 MPa에서 80 ~ 700개였고, N₂ 100%에서 최대 1,500개가 발생하였다.

그림 8은 DIV×1.25에서 위상분포를 나타낸 것이다. 모든 혼합비율에서 부분방전펄스의 90% 이상이 정극성에서 분포하였다.

3.2 외함돌출

가. DIV 및 DEV

SF₆ 100%, SF₆ 80%-N₂ 20% 및 SF₆ 50%-N₂ 50%에서의 DIV 및 DEV는 그림 9와 같이 거의 동일하였으나, SF₆ 20%-N₂ 80%부터 급격하게 감소하였다. N₂ 100%의 DIV는 0.4 MPa와 0.5 MPa에서 각각 SF₆ 100% 대비 32%와 37%에 불과하였다. 압력별 가스 혼합비율에 따른 DIV 및 DEV의 감소율은 거의 동일하였다.

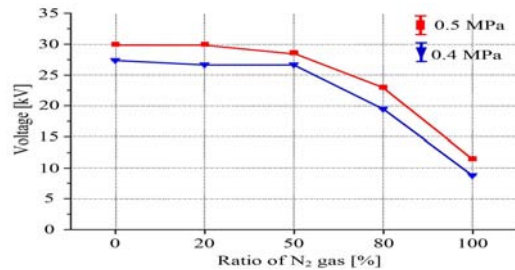


Fig. 9. DIV as a function of N₂ ratio.

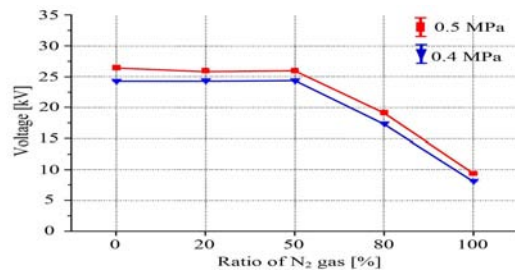


Fig. 10. DEV as a function of N₂ ratio.

나. 펄스 크기

DIV에서의 펄스 크기는 그림 11과 같으며, 압력이 높을수록 최대 및 평균 펄스 크기가 크게 나타났다.

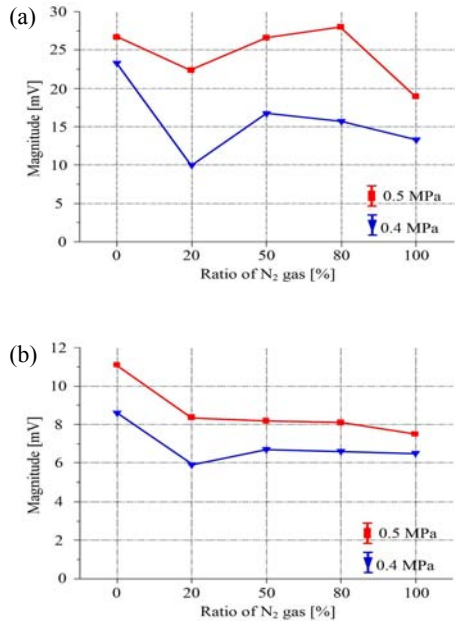


Fig. 11. Pulse magnitude at DIV. (a) Maximum and (b) average.

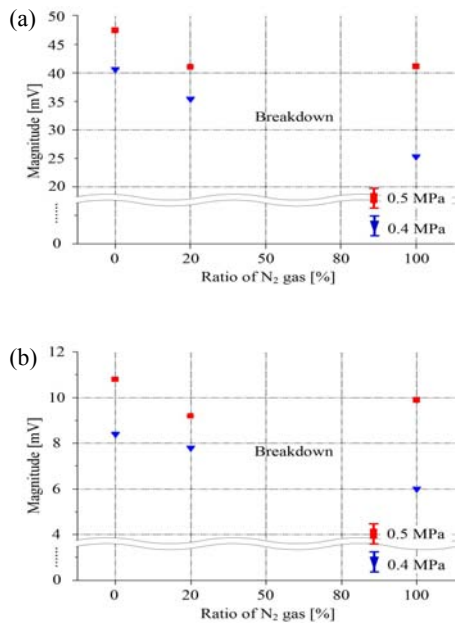


Fig. 12. Pulse magnitude at DIVx1.25. (a) Maximum and (b) average.

0.4 MPa일 때, SF₆ 80%-N₂ 20%에서 최대 및 평균 펄스 크기가 가장 작았으며, 0.5 MPa일 때는 N₂ 100%

에서 최솟값이 나타났다. 대체적으로 SF₆ 100%에서 최댓값이 나타났다.

DIVx1.25일 때 최대 및 평균 펄스 크기는 그림 12와 같으며, SF₆ 50%-N₂ 50%와 SF₆ 20%-N₂ 80%에서 절연파괴가 발생하였다. 0.4 MPa에서 SF₆ 80%-N₂ 20%와 N₂ 100%는 SF₆ 100% 대비 최대 펄스 크기가 각각 13%, 38%씩 감소하였다. SF₆ 50%-N₂ 50%와 SF₆ 20%-N₂ 80%의 경우 절연이 파괴되기 전 최대 펄스 크기가 100 mV를 넘었다. 압력이 높아짐에 따라 최대펄스 크기는 N₂ 100%에서 62%로 가장 큰 증가율을 보였으며, 0.5 MPa일 때 최대펄스 크기가 SF₆ 100%와 유사하였다.

다. 위상분포 및 펄스 수

DIV일 때 위상분포 예는 그림 13과 같다. N₂ 100%에서 부분방전펄스의 95% 이상이 정극성에서 발생하였으며, 이때의 위상은 60° ~ 120°이다. SF₆ 혼합비가 20% 이상이 되면 부극성인 230° ~ 300°에서 부분방전펄스의 95% 이상이 분포하였다. 이는 압력에 관계없이 동일한 경향을 나타내었다. 이때의 펄스 수는 70 ~ 500개 정도였으며, N₂ 혼합비율이 증가할수록 많은 수의 펄스가 발생하였다.

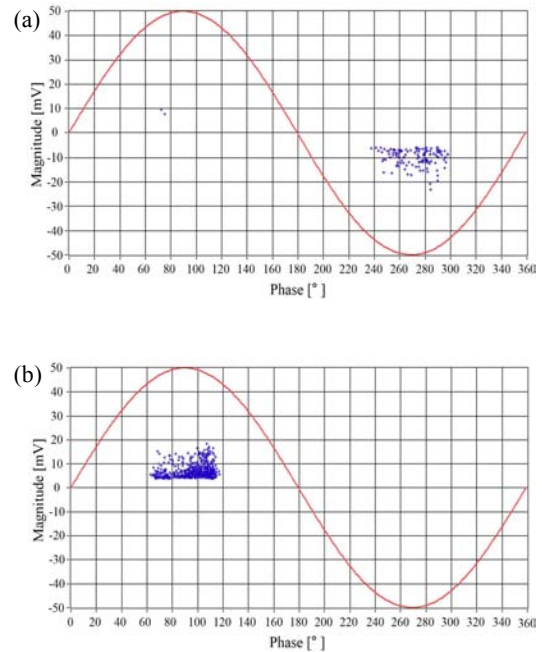


Fig. 13. Typical phase distribution at DIV. (a) SF₆ 100% at 0.4 MPa and (b) N₂ 100% at 0.5 MPa.

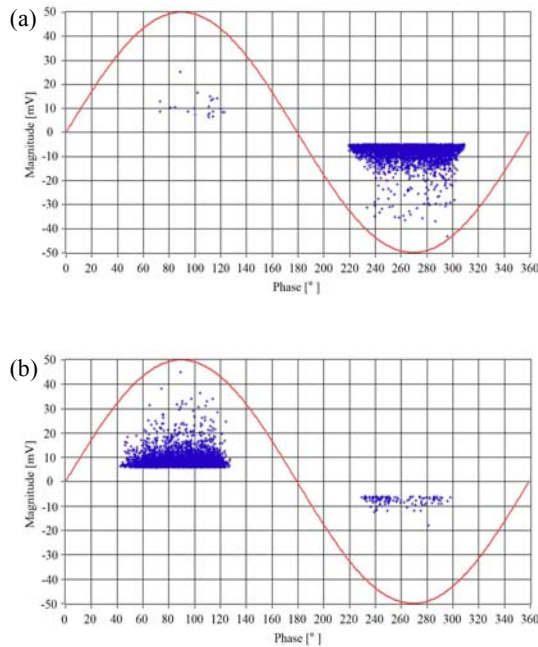


Fig. 14. Typical phase distribution at DIV×1.25. (a) SF₆ 100% at 0.4 MPa and (b) N₂ 100% at 0.5 MPa.

DIV×1.25에서 측정한 결과, 위상분포는 그림 14와 같으며, DIV일 때와 유사한 경향이였다. N₂ 100%에서의 부분방전펄스는 40° ~ 130°에서 90% 이상이 분포하였으며, 그 외에 혼합비에서는 220° ~ 300° 위상인 부극성에서 발생하였다. 펄스 수는 SF₆ 100%에서 200개, N₂ 100%에서 최대 190,000개까지 측정되었다. 절연파괴가 발생하기 전 SF₆ 50%-N₂ 50%, SF₆ 20%-N₂ 80%에서는 펄스 수가 최대 80,000개까지 발생하였다.

4. 결론

본 논문에서는 GIS에서 발생하는 도체돌출 및 외함 돌출 결함을 모의하고, SF₆-N₂ 혼합가스 중에서 부분방전 특성에 관하여 연구하였다.

도체돌출 결함에 있어 DIV, DEV 및 방전펄스의 크기는 N₂ 가스의 비율 증가에 따라 감소하였다. DIV에서 방전펄스의 위상은 N₂ 100%일 때를 제외하고 모두 정극성에 분포하였으나, DIV×1.25에서는 모든 혼합비에서 방전펄스의 95% 이상이 정극성에 분포하였다.

외함돌출 결함에 있어 DIV 및 DEV는 N₂ 혼합비 50% 이하에서는 동일하게 나타났으나, 80% 이상에서

는 급격히 감소하였다. 방전펄스의 평균값은 SF₆ 100%에서 가장 높았으며, 그 외의 혼합비에서는 거의 동일하게 나타났다. 이와 같이 본 논문에서는 그동안 전력기기의 절연성능을 절연파괴 전압(breakdown voltage)으로만 평가해오던 것과는 달리, SF₆가스의 사용량 감소를 위한 N₂의 혼합과 부분방전의 관점에서 연구함으로써 전력설비의 설계와 운영에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] 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).
- [2] S. Okabe, J. Wada, and G. Ueta, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **22**, 2108 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2015.005040>]
- [3] H. E. Jo, S. J. Kim, G. W. Jeong, and G. S. Kil, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 320 (2015).
- [4] 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).
- [5] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High Voltage Engineering 4th ed.* (McGraw · Hill Companies, India, 2009) p. 56.
- [6] H. E. Jo, S. J. Kim, G. W. Jeong, and G. S. Kil, and Y. M. Kim, *CMD2014*, 569.
- [7] N. Hayakawa, Y. Sugimori, and H. Okubo, *Proc. of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials*, 812. [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISEIM.2005.193500>]
- [8] W. B. Suh, J. Y. Yim, K. D. Song, Y. M. Chang, and D. H. Bae, *1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology* (Electric Power Equipment - Switching Technology, ICEPE-ST, Xi'an, China, 2011) p. 366. [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICEPE-ST.2011.6123009>]
- [9] Y. Yoshitake, N. Hayakawa, T. Ueda, and H. Okubo, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 793 (2002). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CEIDP.2002.1048915>]
- [10] T. Yamada, T. Ishida, N. Hayakawa, and H. Okubo, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **8**, 137 (2001). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/94.910436>]
- [11] S. S. Tezcan, M. S. Dincer, and H. R. Hiziroglu, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference, Kansas City, USA, 2006) p. 222. [DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CEIDP.2006.312101>]