Regular Paper
J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 28, No. 10, pp. 630-635 October 2015
DOI: http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.10.630
ISSN 1226-7945 (Print), 2288-3258 (Online)

기능성 경사 재료의 적용을 통한 진공 인터럽터의 삼중점 전계 완화

최승길[1], 구치욱[2], 주흥진[2,a]
[1] 신안산대학교 전기과
[2] 비츠로테크 기술연구소

Reduction of the Electric Field Concentration at the Triple Junction of the Vacuum Interrupter by Using the Application of Functionally Graded Material

Seung-Kil Choi[1], Chi-Wuk Gu[2], and Heung-Jin Ju[2,a]
[1] Department of Electrical Engineering, Shin Ansan University, Ansan 425-792, Korea
[2] R&D Center, Vitzrotech Co., Ltd., Ansan 425-833, Korea

(Received September 14, 2015; Revised September 18, 2015; Accepted September 18, 2015)

Abstract: A vacuum Interrupter (VI), a core part that composes the breaking part of medium-voltage vacuum circuit breaker (VCB), has the excellent insulation performance and arc-extinguishing capability. SF_6 gas had been used for the external insulation of VIs since the dielectric strength of SF_6 gas is superior to that of other insulation gases. However, because of environmental problems related with global warming, a solid-insulated technology was recently researched. The functionally graded material (FGM), as changing spatially the distribution of the relative permittivity inside an insulator, can reduce the electric field stress at the specific region. Especially, the external insulation performance of the VI with the molded FGM insulator is greatly improved as compared with that of the existing VI or the VI with a new external shield. In this paper, the effectiveness of this FGM insulator is verified by the numerical simulation.

Keywords: Vacuum interrupter, External insulation, Functionally graded material, Numerical simulation

1. 서 론

산업의 급격한 발전과 더불어 전력수요의 지속적인 증가로 인한 전력계통 부하의 급증으로 전력기기들은 대용량화, 고전압화, 소형화되어 가고 있는 추세이며, 이와 더불어 국제적으로 강화되는 환경규제에 따라 전력기기 분야에서의 친환경화 노력은 필수가 되고 있다.

개폐장치 분야에서의 친환경 기술의 핵심은 절연 매질로 사용되고 있는 SF_6 가스의 사용 억제에 관한 기술에 초점이 맞추어져 있다. 가스절연 개폐장치에 절연매질로 사용되는 SF_6 가스는 절연 및 소호성능이 우수하고, 회복 특성이 빠르기 때문에 초고압기기의 절연매체로 널리 이용되고 있다 [1]. 그러나 SF_6 가스의 온난화 계수는 CO_2의 약 23,900배에 달할 정도로 매우 높아 온실효과를 야기시킬 수 있다. 따라서 환경오염을 규제하는 국제적 흐름에 따라 신개념의 절연 개폐장치의 개발이 요구되고 있다. 현재 중전기 업체에서는

a. Corresponding author; hjju@vitzrotech.com

Copyright ©2015 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

SF_6 가스의 대체 물질로 가압 건조 공기 (dry air), 질소 또는 고체 절연물을 이용한 절연 기술을 적용하고 있다 [2]. 그러나 건조 공기나 질소의 절연 내력은 SF_6 가스에 비해 1/3 수준으로 동일한 절연성능을 확보하기 위해서는 압력의 증대로 인한 2차 보호장치가 필요하고, 외함의 크기가 기존 스위치기어에 비해 증대되며, 가스 회수 및 수집장치를 위한 별도의 설비가 요구된다. 또한 높은 절연 내력과 기계적 강도 및 열 저항의 특성을 가지고 있으며, 높은 유동적 특징을 가지고 있으므로 단시간 내 성형이 가능한 에폭시를 이용한 고체절연방식이 많이 연구되고 있으나, 에폭시 내부의 void 및 부분방전에 의한 절연 내력 감소, 절연물의 열적 열화 신뢰성 문제가 아직 해결되지 못해 상용화에 어려움이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해 최근 다양한 소재 및 부품 산업에 적용되는 새로운 개념의 설계기술인 경사기능성 재료(functionally graded material, FGM)의 개념을 도입하고자 한다. FGM은 이종(異種)의 전기/기계적 특성을 가지는 재료를 접합하는 기술로서, 두 가지 또는 그 이상의 구성성분의 농도를 연속적 또는 불연속적으로 제어하여 성질을 경사화한 것이다 [3]. 절연 소재로 FGM을 사용하는 것은 절연물질의 유전율 분포를 공간적으로 변화시킨 것으로, FGM 절연물질을 전계가 집중되는 부분에 적용할 경우, 절연 성능을 크게 개선시킬 수 있다 [4-6]. 또한, 경사함수의 변화를 통한 전기 재료의 방향비를 제어한다면 기계적인 강도나 열적 내구도 또한 매우 뛰어난 성능을 지닐 수 있다. 이러한 FGM이 진공 인터럽터(vacuum interrupter, VI)에 적용될 경우, 효율적으로 삼중점 전계를 완화시킬 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 FGM 절연물의 유효성 검증을 통해 VI의 외부 절연 성능에 대한 효율적인 개선 가능성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 진공인터럽터의 구조

진공 차단기(vacuum circuit breaker, VCB)는 진공의 우수한 절연 능력 및 아크 소호 능력을 이용한 차단기로서, 전류 차단 시 발생한 아크 플라즈마를 진공 중으로 급속히 확산시켜 전극에 주입되는 에너지를 최소화하여 아크를 소호시키는 구조를 가진다. 특히 정격 전압 25.8 kV급의 진공차단기에서 고장전류를 차단하는 역할을 하는 전류 차단부에는 고속 개폐가 가능하며, 차단 및 소호 성능이 우수한 VI가 적용된다 [7,8].

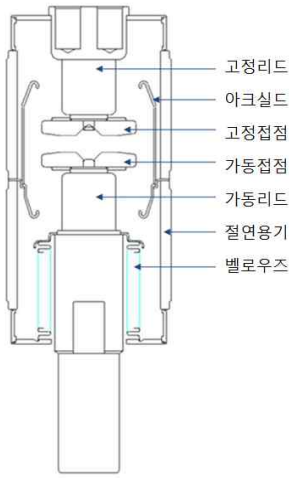

Fig. 1. Configuration of vacuum interrupter.

Table 1. Specifications of vacuum interrupter.

Rated Voltage	25.8 kV, rms
Rated Current	2,000 A
Rated Short Circuit Breaking Current	25 kA, rms
Rated Frequency	60 Hz
Power Frequency Withstand Voltage	60 kV, rms
Impulse Withstand Voltage	150 kV crest
Stroke	16 ± 1 mm

VI는 그림 1과 같이 가스가 배제되어진 진공용기 내에 접점, 리드, 아크실드(arc shield) 등으로 구성된다. 용기는 원통형 세라믹으로 이루어져 있고 절연내력을 가지며, 내부는 고진공으로서 10^{-6} Torr 이하의 압력이 유지되도록 되어있다. 본 연구에서 이용된 VI 모델은 Vitzrotech사의 VI 모델로서, 기본 정격을 표 1에 나타내었다.

VI의 세라믹 양단부는 세라믹, 도체 및 절연 가스의 서로 다른 물리적 특성을 갖는 3종의 물질이 접하는 부분이 되어 전계 집중에 의한 절연 성능의 저하를 야기시킨다. 따라서 이 부분의 전계 집중을 완화시킬 수 있는 기초 설계기술의 확보가 요구된다.

본 논문에서는 삼중점 부근의 전계 완화를 통해 차단기의 전기적 절연성능 향상을 도모하기 위해 고정측 세라믹 상단부 외부에 FGM을 도입하였다.

2.2 해석 모델

2.2.1 수치해석 모델

본 연구에서는 차단 성능에 영향을 미칠 수 있는 VI 자체의 내부 구조에 대한 변경은 고려하지 않았고, 다만 외부에 완화 쉴드를 설치하거나, 절연물을 적용하는 등 외부 절연성능 관점에서 연구가 진행되었다.

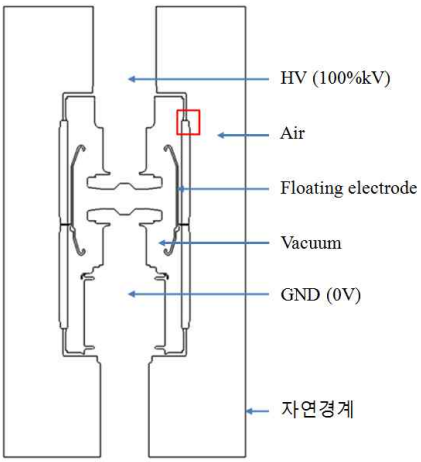

Fig. 2. Numerical analysis model.

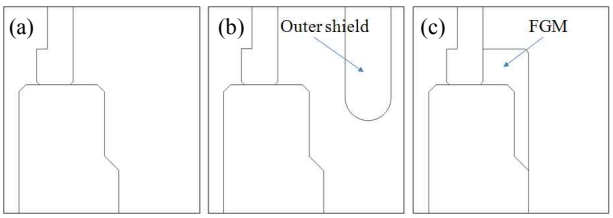

Fig. 3. Expanded triple junction area at various VI configurations. (a) basic model, (b) shield model, and (c) FGM model.

그림 2는 수치해석을 위한 모델로서, 시험전압으로 정격 임펄스 전압 100%kV을 인가하였다. 또한 전류 차단 시 발생하는 금속증기가 절연 용기에 부착되어 절연 성능이 저하되는 것을 방지하기 위해 설치된 아크실드는 전기적으로 부유 상태로 해석하였다. 전계 계산은 축대칭 3차원 유한요소해석을 이용하여 각각의 모델에서 수행되었으며, 해석에 사용된 알루미나 세라믹, 진공, 공기의 비유전율은 각각 9.1, 1.0, 1.0이다.

그림 3은 특히 전계집중이 발생되는 삼중점 부근(그림 2의 붉은색 박스 부분)을 확대한 것으로서, 삼중점에서의 전계완화 정도를 비교하기 위해 세라믹 양단부 삼중점 외부에 완화 실드를 설치한 VI 구조(그림 3(b))를 추가하였으며, FGM 절연물을 적용한 구조(그림 3(c))와 그 값을 비교하였다.

2.3 FGM 절연물의 유전율 분포

세라믹 상단부의 외부 삼중점에 적용된 FGM 절연물의 경우, 그림 4처럼 에폭시 수지 ($\epsilon_r = 3.5$)에 충전제로 이산화티타늄 (TiO_2, $\epsilon_r = 114$)을 사용하여 절연물 내부의 유전율이 9.0 (삼중점 접촉부)에서 3.5 (외부 공기 접촉부)까지 연속적으로 변화된다고 가정하였다. 특히, 절연물 내부에서 공간적인 유전율의 변화는 단방향(방사방향)으로만 변하는 것으로 설정하였다.

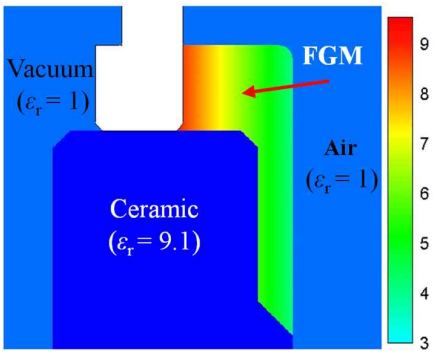

Fig. 4. Spatial distribution of dielectric permittivity within the FGM insulator.

3. 결과 및 고찰

3.1 FGM 절연물의 유효성

FGM 절연물의 유효성을 검토하기 위해 기본 VI 모델, 외부 완화 실드가 설치된 모델 및 FGM 절연물이 적용된 모델에 대해 비교해석을 수행하였다.

그림 5는 비교분석을 위한 여러 가지 형태의 VI 구조에서의 전계 분포를 나타낸 것이다. VI 내부의 아크실드에는 정전 용량 분배에 의해 일정한 값의 전위가 유기되어 VI 내부의 전위 및 전계에 영향을 미친다.

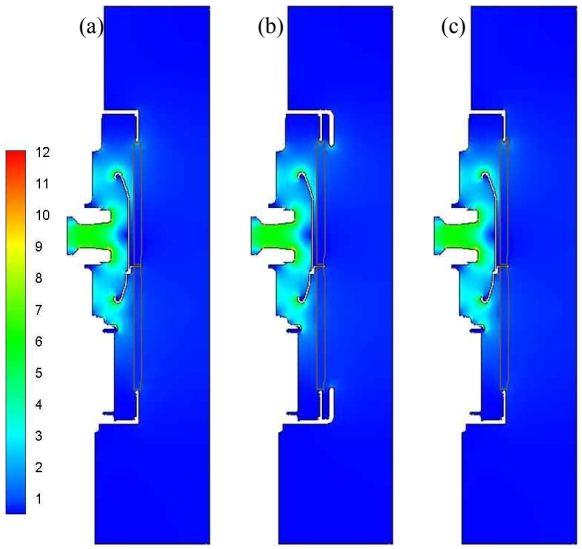

Fig. 5. Electric field distributions of various VIs. (a) basic model, (b) shield model, and (c) FGM model.

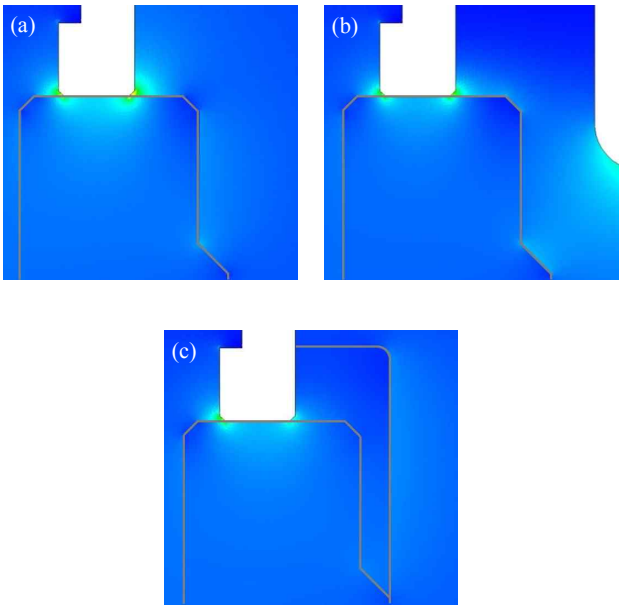

Fig. 6. Electric field distributions expanding near the triple junction at various VIs. (a) basic model, (b) shield model, and (c) FGM model.

각 구조에서 계산된 아크실드 전위는 각각 52.50, 53.08 52.74%kV로 외부 구조에 상관없이 거의 일정한 전위가 유기된다. 또한 VI 내부의 접점에서 발생되는 최대 전계도 거의 일정하여 각각 11.709, 11.783, 11.723%kV/mm 값을 가지며, 진공에서의 절연 파괴 강도가 20 kV/mm 정도이므로 이를 정격 전압을 이용하여 환산했을 때에도 내부 전계는 고려할 필요가 없다.

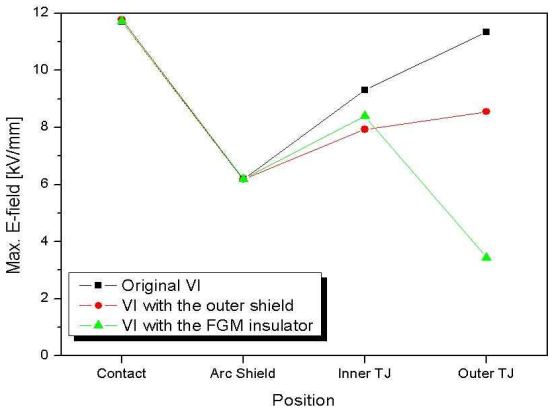

Fig. 7. Comparison of the electric field

그림 6은 삼중점 부근을 확대해서 보인 전계의 공간적인 분포를 보인 것이다. 각 구조에서 삼중점의 최대전계는 각각 (a) 11.341%kV/mm, (b) 8.557%kV/mm, (c) 3.436%kV/mm이다. 외부 완화 실드가 설치된 VI 구조에서는 완화 실드가 삼중점을 감싸는 구조로 형성되어 등전위선을 삼중점 밖으로 밀어내는 효과에 의해 전계 완화가 발생된 것으로 사료된다. 특히 FGM 절연물이 적용된 경우에는 삼중점 부근의 고유전율을 갖는 유전체에 의해 전계집중이 크게 감소되며, 기본 모델에 비해 70% 정도 최대전계를 저감시키므로 FGM 절연물의 적용이 차단부의 외부 절연성능을 크게 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 7은 VI의 주요 지점에서 계산된 최대전계 세기를 비교한 것이다. 접점 및 아크실드에서의 최대 전계는 VI 구조에 상관없이 거의 일정하나, 외부 삼중점 전계는 FGM 절연물이 적용된 구조에서 크게 완화되는 것을 확인할 수 있다.

3.2 다양한 유전율 분포를 갖는 FGM 절연물에서 절연성능 비교

다음으로 FGM 내부의 유전율 분포를 다르게 하여 그 영향을 확인하였다.

그림 8은 4가지 경우의 FGM 절연물의 유전율 분포를 보인 것이다. 4가지 경우 모두 단방향으로만 유전

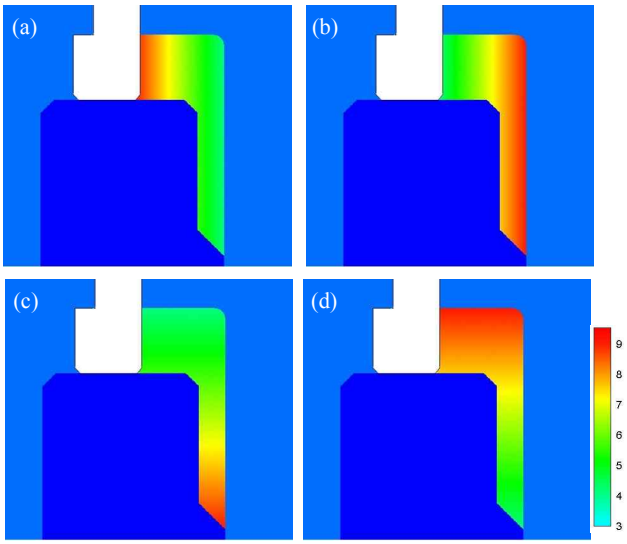

Fig. 8. Distributions of dielectric permittivity within the FGM insulator. (a) forward r-FGM insulator, (b) reverse r-FGM insulator, (c) forward z-FGM insulator, and (d) reverse z-FGM insulator.

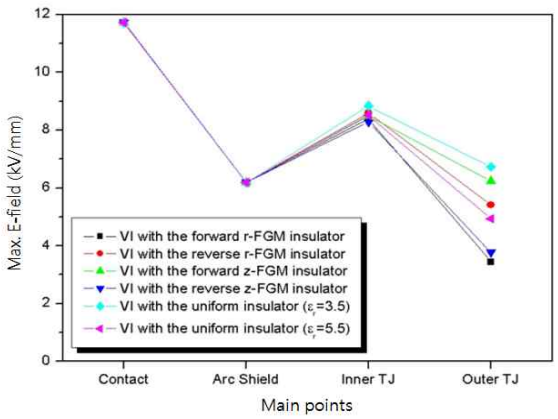

Fig. 9. Comparison of the electric field at various insulators.

율 분포가 변한다고 가정하였으며, 각 FGM 절연물에서 계산된 주요 지점에서의 최대 전계 세기를 그림 9에 나타내었다. 그림을 통해 알 수 있듯이 단일 절연물로 성형한 VI 구조에 비해 FGM 절연물이 적용된 구조에서 삼중점 전계가 크게 완화됨을 확인할 수 있다. 이는 FGM의 경우 삼중점에 고유전율을 가진 절연물이 몰딩된 것과 같은 영향 때문이며, 이를 통해 에폭시만으로 성형한 VI에 비해 절연성능 개선에 더 효과적임을 암시한다.

3.3 연면 전계 완화

외부 삼중점에서의 전계집중에 의해 세라믹의 표면을 따라 발생하는 연면 방전(surface flashover) 가능성에 대해 다양한 조건 하에서 검토하였다.

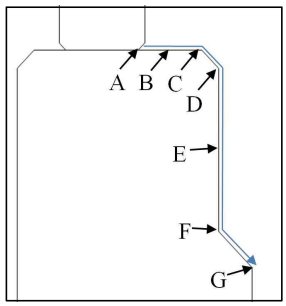

Fig. 10. Measuring position of the surface electric field.

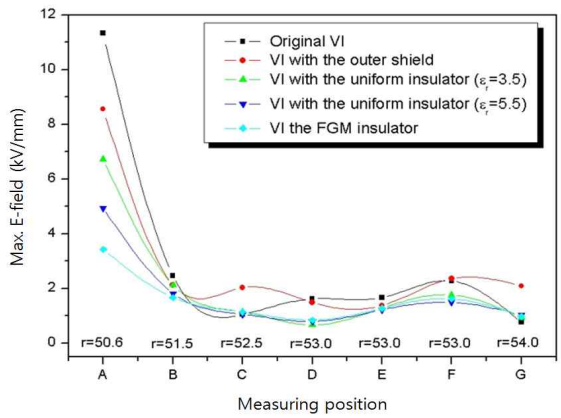

Fig. 11. Maximum electric field at each measuring position.

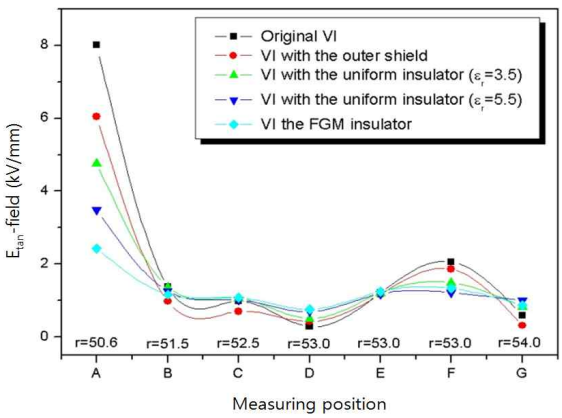

Fig. 12. Tan-electric field at each measuring position.

그림 10은 VI의 삼중점 부근에서부터 세라믹을 따라 연면전계를 계산한 위치를 나타낸 것으로 특히, 그림 10의 화살표 경로를 따라 연면방전이 발생될 확률이 높다.

그림 11~12는 세라믹 연면의 각 측정 위치에서의 최대전계(그림 11) 및 tan-전계(그림 12)를 나타낸 것으로서, FGM 절연물이 적용된 VI 구조에서 연면을 따라 계산된 전계가 더 균일하고 낮은 값을 가지며, 이는 FGM 절연물을 적용할 때, 삼중점에서 연면방전의 발생 가능성을 낮출 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

VI에 FGM 절연물을 적용하면 효율적으로 삼중점 전계를 완화시킬 수 있으며, 세라믹 표면을 따라 발생되는 연면방전의 가능성을 낮출 수 있으므로 VI의 외부 절연성능 개선 및 제품의 콤팩트한 설계가 가능하다.

비록 FGM이 고체 절연물로서 상용화되지 않고 있으며, 현재까지 FGM 절연물의 제작 기술과 계면처리 기술에 큰 어려움이 있지만, FGM 절연물은 추후 전력기기의 절연성능 향상에 큰 기여를 할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 신안산대학교 학술연구비 지원 사업에 의해 수행된 연구과제 결과의 일부로 이에 감사드립니다.

REFERENCES

[1] T. Shioiri, J. Sato, T. Ozaki, O. Sakaguchi, T. Kamikawaji, M. Miyagawa, M. Homma, and K. Suzuki, *Conf. on Electr. Insul. and Dielec. Phen.* (Albuquerque, USA, 2003) p. 341.

[2] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, F. Endo, and T. Oomori, *IEE Japan,* **125**, 619 (2005).

[3] Y. Miyamoto, W. A. Kaysser, B. H. Rabin, A. Kawasaki, and R. G. Ford, *Functionally Graded Materials: Design, Processing and Applications* (Kluwer Academic Publishers, Norwell, 1999)
[DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-5301-4]

[4] K. Kato, M. Kurimoto, H. Shumiya, H. Adachi, S. Sakuma, and H. Okubo, *IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul.*, **13**, 362 (2006).
[DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2006.1624281]

[5] H. J. Ju, K. C. Ko, and S. K. Choi, *J. of Korean Phys. Soc.,* **55**, 1803 (2009).
[DOI: http://dx.doi.org/10.3938/jkps.55.1803]

[6] H. J. Ju, D. K. Kim, and K. C. Ko, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.,* **25**, 467 (2012).

[7] P. G. Slade, *The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application* (CRC Press, New York, 2008)

[8] M. S. Agarwal, *Proc. of 26th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)* (Mumbai, India, 2014) p. 437.