

전력기기용, 에폭시/마이크로 실리카 및 알루미나 복합제의 전기적 · 기계적 파괴 강도 특성

박주연¹, 박재준^{2,a}

¹ 현대일렉트릭앤에너지시스템(주)

² 중부대학교 전기전자자동차공학부

Electrical and Mechanical Strength Properties of Epoxy/Micro Silica and Alumina Composites for Power Equipment

Joo-Eon Park¹ and Jae-Jun Park^{2,a}

¹ Hyundai Electric & Energy System Co., LTD., Yongin 16891, Korea

² Department of Electrical Electronic Engineering, Joongbu University, Goyang 10279, Korea

(Received August 10, 2018; Revised September 4, 2018; Accepted September 7, 2018)

Abstract: In this study, we prepared 40, 45, 50, 55, 60, 65, and 70 wt% content composites filled in epoxy matrix for two micro silica and three micro alumina types for use as a GIS heavy electric machine. As a filler type of epoxy composite, micro silica composites showed excellent AC breakdown strength properties compared to micro alumina composites in the case of electrical properties of micro silica and alumina. The electrical breakdown properties of micro silica composites increased with increasing filler content, whereas those of micro alumina decreased with increasing filler content. In the case of mechanical properties, the micro silica composite showed improved tensile strength and flexural strength compared with the micro alumina composite. In addition, mechanical properties such as tensile strength and flexural strength of micro silica and alumina composites decreased with increasing filler content. This is probably because O-H groups are present on the surface of silica in the case of micro silica but are not present on the surface of alumina in the case of micro alumina.

Keywords: Gas insulated switchgear, Epoxy insulation, GIS Spacer, Inorganic particle reinforcement, Al₂O₃, SiO₂, Epoxy composite, Material properties

1. 서론

변전소를 구성하는 대표적인 전력기기 중 하나인 가스 절연 개폐 장치 이하 GIS (gas insulated switchgear)는 차단기와 단로기, 접지 개폐기, 계기용 변압기, 변

류기, 피뢰기, 주모선 및 분기 모선 등 다양한 구성품이 그라운드 접지된 금속 탱크에 내장되어 있는 전력기기로서 변전소의 소형화, 안전 및 신뢰성의 향상, 운전 및 점검의 용이성, 환경과의 조화 등 장점이 있는 것으로 알려져 있다 [1].

GIS 탱크에는 전류 차단 또는 사고 전류 발생 시 생성되는 고온의 아크를 신속히 소호하는 역할과 더불어 탱크 내부의 절연 성능 향상을 통한 전력기기 보호를 목적으로 상시 충전되어 있는 전기 절연성이 우수한 SF₆ (육불화황) 가스가 전반적인 설비 보호의 기능을

a. Corresponding author; jjpark@joongbu.ac.kr

수행하게 된다.

사고 전류에 의한 탱크 내부 압력이 과도하게 상승할 경우, 일정 압력이 도달할 때까지 개방되어 내부 압력을 낮추는 역할을 하도록 설계된 방압면이 GIS 탱크의 파손을 1차적으로 차단하게 된다. 그리고 방압면 개방에 의한 가스 누출과 탱크 간 내부압력 불균형에 의한 전력기기의 2차 손상 방지는 탱크 사이에 위치하며 충전 가스의 기밀, 도체 지지, 통전 및 절연의 역할을 에폭시 절연물(epoxy insulation)이 담당을 하게 된다 [2-5].

에폭시 마이크로필러 충전 복합체는 GIS 금속재 부품과 대등한 기계적 특성 그리고 열팽창계수 등 균형을 잡기 위하여 과량의 알루미나(Al_2O_3 필러)를 충전시켜 제조하게 된다 [2.6].

Al_2O_3 의 적용은 에폭시 절연물의 기계적 물성 개선과 치수 안정성 개선 등 장점이 있지만 [7-9], 최근 증가하는 인건비와 더불어 원자재 가격 상승에 의한 절연물 제조 단가의 증가는 GIS의 가격 경쟁력에도 영향을 주고 있는 실정이다.

상대적으로 인건비가 저렴한 국가로부터 절연물을 공급하는 OEM 방식을 고려해 볼 수 있으나 지속적인 인건비 상승 대비 상대적으로 낮은 기술력은 장기적인 해결책으로는 부족한 점이 많다.

근본적이며 불가역적인 문제 해결 방안의 제시를 위해서는 재료적 관점 즉, 에폭시 절연물의 사용 목적을 고려한 재료 설계 단계를 재검토해 볼 필요가 있다고 사료된다.

본 연구에서는 필러 종류 및 함량 비율의 변화가 기존 전력기기용 에폭시 절연물의 재료 물성에 어떤 영향을 미치는지 평가하였고, 전력기기용 에폭시 절연물의 제조를 위해 충전함량 비율이 적절한지 검토하였다.

2. 실험 방법

GIS용 에폭시 절연물 제조에 사용되는 비스페놀 A형 에폭시(B41, Huntman사), 산무수물계 경화제(HT903, Huntman사)를 기본으로 사용하고 필러에 대한 에폭시 절연물의 전기/기계적 특성 변화의 검토를 위하여 필러 종류는 표 1과 같이 구분하였으며 SEM 관찰(그림 1)을 통하여 필러 형상 및 평균 입경(μm) 등을 측정하였다. 필러 종류/함량별 기초 시험편은 표 2와 같이 기존 에폭시 절연물 제조용 필러 함량 즉, 70 wt%를 목표로 40 wt%에서 5 wt%씩 증가하여 샘플을 그림 2의 경우와 같이 제조하였다.

Table 1. Classification of inorganic particle reinforcement.

Type	Classification	Average filler size (μm)	Shape
Al_2O_3	A-1	10	Irregular
	A-2	12	Irregular
	A-3	9	Spherical
SiO_2	S-1	10	Spherical
	S-2	9	Irregular

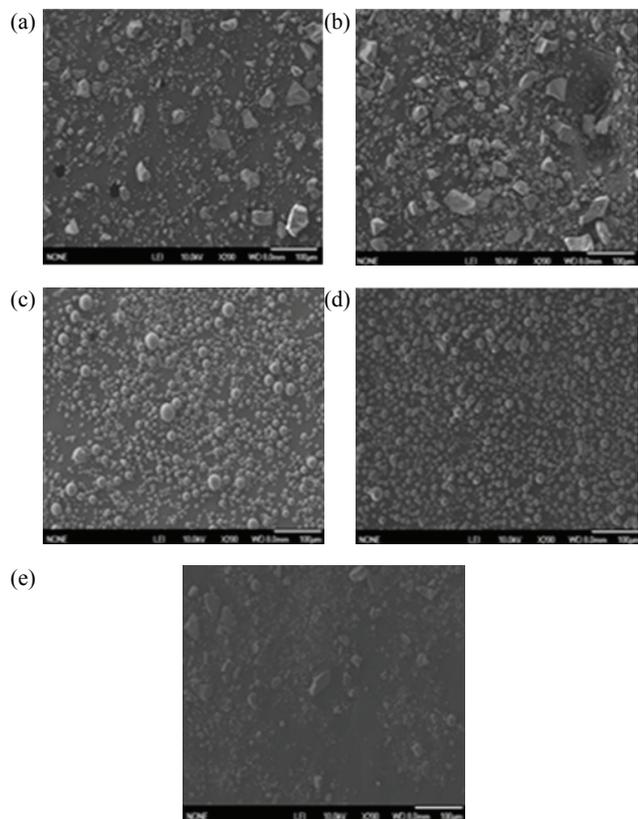


Fig. 1. SEM image of inorganic particles. (a) A-1, (b) A-2, (c) A-3, (d) S-1, and (e) S-2.

전기적특성 평가는 필러 종류 및 함량 조건별로 제조된 에폭시 복합체의 절연 파괴 시험을 실시하였다. 사용된 고전압 발생장치는 10 kVA / 60 Hz이었고 전극 구성은 구 대 구 조건으로 하였으며, 구전극의 반경 7.4 mm 스테인리스 재질을 사용하였다. 시험편의 두께는 동일하게 2 mm로 하였고, 실험 환경조건은 상온 상태에서 연면방전을 피하기 위하여 절연 내에서 승압 속도 1 kV/s로 일정하게 승압하여 관통 파괴에 이를

Table 2. Specimen for Al₂O₃ & SiO₂ filler contents.

Unit	Classification for filler content						
wt%	40	45	50	55	60	65	70

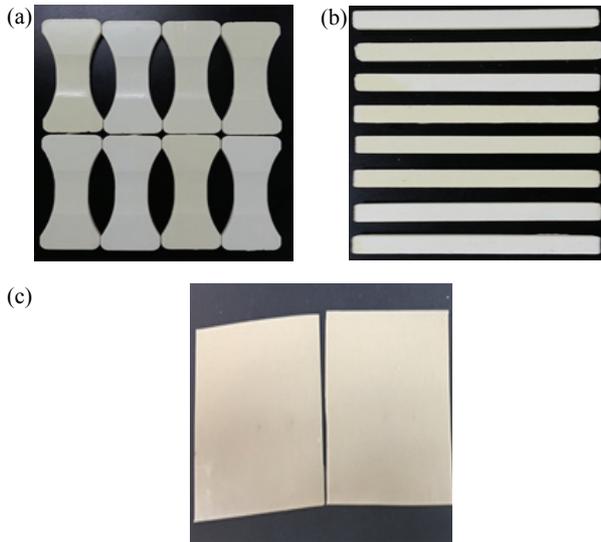


Fig. 2. Various kinds of measurement samples. (a) Tensile, (b) bending, and (c) breakdown.

때까지 승압하였다.

기계적 특성(인장강도, 굴곡강도)을 평가하기 위하여, 인장강도는 JIS B7502 규정에 의거 만능시험기(SHM-C-500, Shamhan Tech)를 이용하여 cross-head speed 10 mm/min의 일정한 속도로 인장하여 시험편 파단 시 하중을 측정하였고 그리고 굴강도(휨 강도) 시험은 JIS B7507 시험 규격에 의거 제작된 굴곡강도 샘플을 3중점 휨(three-point bending) 시험법으로 측정하여 굴곡강도를 측정 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기적 특성 변화

그림 3(a)와 (b)에는 필러 종류 및 함량별 에폭시 절연물의 절연 파괴 강도 변화율을 나타낸 그래프이다. 그림 3(a)는 현재 GIS용 에폭시 절연물에 사용되고 있는 A-1 필러의 함량별 절연 파괴 강도를 나타낸 것으로 필러 함량 50 wt%를 기점으로 절연 파괴 강도는

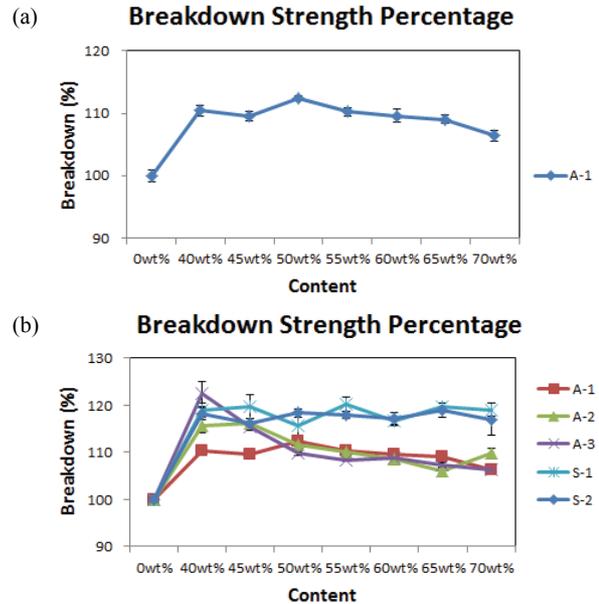


Fig. 3. Electrical strength behavior by filler type and content.

점차 감소하는 경향을 보였다.

그림 3(b)는 본 연구에서 후보로 선정된 Al₂O₃와 SiO₂ 필러 5종에 대한 절연 파괴 시험 결과를 취합하여 나타낸 그래프이다. Al₂O₃에 해당하는 A-1~3의 경우 특정 함량(wt%)을 기점으로 절연 파괴 강도가 감소하는 경향을 보였다. 반면, SiO₂를 나타내는 S-1~2의 경우 필러 함량에 크게 영향을 받지 않는 것으로 확인되었으며, Al₂O₃ 필러 대비 절연내력이 10% 이상 증가한 경향을 시험을 통하여 알 수 있었다. 이와 같이 필러 종류에 대한 절연 파괴 강도의 거동 차이는 입자성 강화 복합재료의 일종인 에폭시 절연물의 에폭시 수지와 필러의 계면 접착 결정 인자 즉, 계면의 수소결합의 정도를 우선 고려해 볼 수 있다 [2,4,5].

Al₂O₃의 경우 화학적·전기적·기계적 특성이 우수하여 다양한 분야에 사용되고 있으나, 필러 제조 공정의 특성상 필러 표면의 OH가 SiO₂에 비해 상대적으로 적게 되고 그 결과 계면결합 강도를 결정하는 수소 결합력의 저하가 최종적으로 절연 파괴 강도의 감소로 이어진 것으로 판단된다 [6,9]. 반면, SiO₂ 필러 2종은 모두 초기 40 wt%부터 70 wt%까지 일정한 절연 파괴 강도를 나타내었는데 이는 수지와 필러의 계면 접착의 정도를 결정하는 수소결합이 SiO₂ 표면의 OH에 의해 초기 40~50 wt% 수준에서 이미 포화되어 필러 함량의 증가는 에폭시 절연물의 절연 파괴 특성에 크게 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

에폭시 절연물의 절연 파괴 강도에 영향을 미치는 또 다른 요인으로는 에폭시 수지와 혼합된 필러의 분산성(균질성)이다. 박재준 교수 연구팀 [2,4,5,6]은 마이크로 크기의 Al₂O₃ 필러의 에폭시 수지 내 함량 40 wt% 이후 절연 파괴 강도의 감소 경향을 통하여 확인하였으며 또한 나노와 마이크로 입자의 혼합에 의하여 조직의 강화 즉, 나노입자의 경우 마이크로입자의 사이로 충전분산되어 전하의 거동을 어렵게 하는 저항성 역할로 작용되고, 나노입자와 에폭시 수지 간 계면 강화로 절연내력의 향상을 가져왔다 [4,5,6]. 또한 Wang Qi 연구팀은 필러 함량의 증가가 에폭시 수지와 필러의 계면 접촉력을 약화시키는 요인으로 작용하였다고 언급하였다 [2-3].

절연 파괴 강도에 영향을 미치는 두 가지 인자에 대한 근거를 그림 3(b)의 A-3, S-1, S-2 그래프 거동에서 확인할 수 있다. A-3 필러의 경우 구형으로서 분산성이 좋은 조건임에도 OH의 부족으로 낮은 절연 파괴 거동을 보였다. S-2의 경우 불규칙한 형상이기는 하나 에폭시 수지와 수소결합이 충분하여 계면 접촉이 강하게 이루어졌기 때문에 높은 절연 파괴 강도를 나타내는 것으로 판단된다 [4]. S-1의 경우, S-2 대비 소폭 개선된 경향을 보였다. 이는 수소결합에 구형 필러의 분산 효과가 보태어진 결과로 생각된다. 시험 결과를 바탕으로 에폭시 절연물의 절연 파괴 강도의 증감은 수소결합, 입자 형상 인자의 순서로 영향을 받는 것으로 판단된다 [5].

3.2 기계적 특성 변화

그림 4(a)~(c)는 필러 종류 및 함량별 인장 및 굽힘 강도의 변화율을 나타낸 그래프이다. 그림 4(a)는 GIS용 절연물에 사용되는 필러 A-1의 함량별 평균 인장 강도의 거동을 나타내고 있다.

그래프에 잘 나타나 있는 바와 같이 순수 에폭시 조건인 필러 0 wt%와 비교하여 초기 40 wt%에서 현저한 강도의 저하가 발생하였으며 이후 필러 함량의 증가와 함께 에폭시 절연물의 기계적 특성은 서서히 회복되는 경향을 보였다. 그림 4(b)는 필러의 종류 및 함량에 대한 인장강도의 변화를 나타낸 그래프이다.

필러 종류 및 함량에 대한 인장강도의 거동은 그림 5와 같이 크게 4영역으로 구분될 수 있다.

Region 1: 인장강도 감소 영역이다. 이러한 거동은 저항량 필러의 에폭시 수지 내 분산에 의한 수지-필러

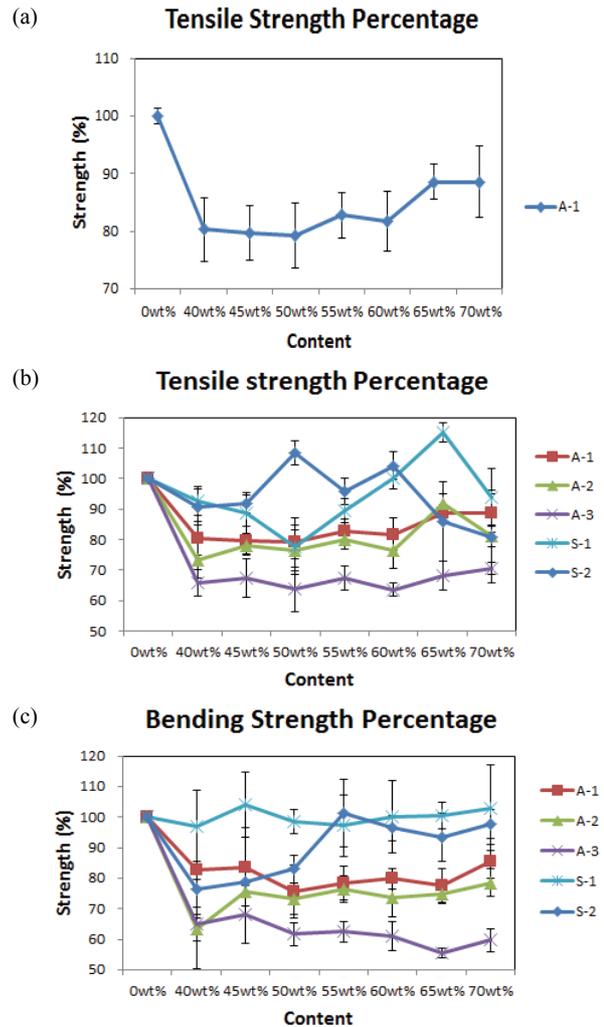


Fig. 4. Mechanical strength behavior by filler type and contents. (a) Tensile strength to fill content of A-1, (b) tensile strength for various types of samples, and (c) Flexural strength for various types of samples.

계면부 특성 즉, 필러의 순기능보다 불순물로서의 역기능을 초래하여 크랙과 같은 기계적 결함의 발생 원인으로 생각할 수 있다 [7].

Region 2: 필러 함량 증가에 따른 에폭시 복합재의 강성 회복 영역이다. 즉, 필러 함량의 증가는 분산된 필러의 간격을 조밀하게 하여 크랙 발생 및 성장 시 우회로 역할을 하게 되므로 크랙 진전 경로가 상대적으로 연장되어 재료 인성(toughness)의 개선 효과가 나타나는 영역이다 [8].

Region 3: 필러 포화 구간으로서 보이드 및 크랙 발생의 원인이 되는 필러 뭉침 현상의 발생이 증가하며 수지-필러 간 미접촉 계면부의 증가로 강화재로서

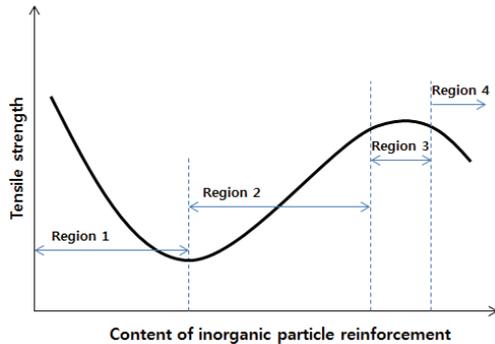


Fig. 5. Schematic of tensile strength-filler content relations.

Table 3. Density and volume for Al_2O_3 & SiO_2 filler.

	Unit	Al_2O_3	SiO_2
Density	g/Cm^3	3.96	2.6
Volume	ratio	1	1.52

의 필러 기능의 상실이 발현되는 영역이다 [7-8].

Region 4: 에폭시 내 필러의 포화 단계를 넘어 모재 역할을 하는 수지의 체적이 필러보다 적게 됨으로써 무기 입자 강화 복합재의 에폭시 수지의 접착성에 기인한 기본 구조 시스템인 수지-필러 접착 구조 즉, 모재와 강화재의 역할 상실로 외력에 대한 소재의 저항력이 약화되는 구조 붕괴 영역으로 이해할 수 있다 [9-10].

이러한 구조 붕괴 현상은 S-1과 2의 60~70 wt%에서 잘 나타나고 있으며, 이는 Al_2O_3 와 SiO_2 의 필러의 상호 다른 밀도에 의한 체적의 차이로 해석될 수 있다. 표 3에 나타나 있는 바와 같이 Al_2O_3 와 SiO_2 의 밀도 차이는 에폭시에 투입되는 동일 필러 하중에 대하여 SiO_2 의 체적이 Al_2O_3 대비 50% 증가되는 결과로써, 그림 4의 인장강도와 필러 함량 관계에서 마지막 단계인 구조 붕괴가 발생할 가능성이 높아지는 원인으로 예측될 수 있다.

그림 4(c)는 굽힘 강도에 대한 시험 결과이다. 인장강도와 유사하게 40 wt%에서 강도 저하가 발생하고 이후 회복하는 경향을 보였다. SiO_2 의 경우 필러 함량 60~70 wt%에서의 인장과 다르게 지속적인 강도 증가가 보였는데 이는 수지와 필러 계면의 관점에서 인장의 경우, 작용 하중에 대한 저항이 시험편의 파단면을 구성하는 수지-필러 계면 접착력 및 면적에 의존인 반면 굽힘의 경우, 시험편의 중립면을 중심으로 재료 내

부에서 발생하는 인장, 압축 및 전단과 같은 다양한 응력의 조합이 재료 파손에 필요한 에너지를 더 많이 소모하도록 유도한 결과로 이해할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 무기 입자 강화 에폭시 복합재료 즉, GIS용 에폭시 절연물의 새로운 필러 배합 조건의 적용 검증을 위하여 후보 필러 5종에 대한 재료 물성 변화가 시험을 통해 평가되었다.

필러 종류별 시험 결과 기존 70 wt%에서 S-1 적용에 대한 재료 물성은 A-1 대비 절연 파괴 강도 12%, 인장 강도 5.8%, 굽힘 강도 20.5%의 개선이 가능함을 확인하였다.

또한 필러 함량 변화에 대한 재료 물성 평가에서 Al_2O_3 계열의 전기/기계적 특성은 전반적으로 상호 역관계 즉, 필러 함량 증가에 따라 전기적 절연 특성은 감소하고 기계적 특성은 증가하는 경향을 보였다. 반면 SiO_2 의 경우 절연 파괴 강도는 초기 40 wt%부터 70 wt%까지 큰 변화 없이 일정한 수준 유지, 인장강도의 경우는 60~70 wt%에서 강도 저하 발생, 굽힘 강도는 증가 추세를 나타내었다. SiO_2 적용에 대한 급격한 인장강도의 저하는 Al_2O_3 대비 낮은 밀도에 기인한 상대적 체적비의 증가로 복합재료의 재료 물성에 지배적인 에폭시-필러 계면 접착 시스템이 정상적으로 작용하지 못한 것으로 판단된다.

최종적으로 기존 A-1 필러의 70 wt%는 에폭시 절연물의 기계적 성능에 높은 안전율을 부여하는 반면 전기 절연성은 저하시키는 요인으로 작용함을 알 수 있었고 재료 설계적 관점에서 필러 종류 및 함량의 조절을 통하여 기계적 안전율 및 전기 절연성의 밸런스 조절이 가능함을 확인하였다.

GIS용 에폭시 절연물로의 적용을 위해서는 기본적인 원료 배합 조건의 개선 이외에도 고온에 의해 분해되는 SF_6 가스와의 화학적 반응 등도 함께 검토되어야 하므로 향후 다양한 시험 검증을 진행하고자 한다.

REFERENCES

- [1] Z. Li, K. Okamoto, Y. Ohki, and T. Tanaka, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **17**, 653 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5492235>]

- [2] J. J. Park, S. S. Shin, C. Y. Yoon, J. Y. Lee, and J. E. Park, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **16**, 260 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2015.16.5.260>]
- [3] T. Imai, F. Sawa, T. Nakano, T. Ozaki, T. Shimizu, M. Kozako, and T. Tanaka, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **13**, 319 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.4313/10.1109/TDEI.2006.1624276>]
- [4] J. J. Park, J. Y. Lee, and H. K. Lee, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **17**, 7598 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2017.14790>]
- [5] J. J. Park, C. H. Lee, J. Y. Lee, and H. D. Kim, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **18**, 667 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5931051>]
- [6] J. J. Park and J. Y. Lee, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **24**, 3794 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006609>]
- [7] Q. Wang, Z. Li, J. Wu, and Y. Yin, *Proc. 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis* (IEEE, Bali, Indonesia, 2012) p. 1110.
- [8] R. Kochetov, T. Andritsch, P.H.F. Morshuis, and J. J. Smit, *Proc. 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* (IEEE, San Diego, USA, 2010) p. 1.
- [9] J. Guo, Y. Chen, Z. Jia, T. Tanaka, J. Wu, and Y. Cheng, *Proc. Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials* (IEEE, Niigata, Japan, 2014) p. 441. [DOI: <https://doi.org/10.1109/iseim.2014.6870813>]
- [10] Z. Farhadinejad, M. Ehsani, S. Moemenbellah, S.M.B. Alavi, M. M. Saei-Shirazi, and H. Borsi, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, **11**, 957 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TNANO.2012.2209458>]