

비지배 정렬 유전 알고리즘-II를 이용한 145 kV급 축소형 경사기능성 적용 스페이서의 유전을 분포 최적화 방법론

노요한^{ID}, 김승현, 정종훈, 조한구^{ID}

(주)이플전기 기술연구소

Methodology for Optimizing Permittivity Distribution of 145 kV Miniaturized Functional Graded Spacer Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II

Yo-Han Noh, Seung-Hyun Kim, Jong-Hun Cheong, and Han-Goo Cho

Institute of Research and Development, EPLUS Electric Co., Ltd., Suwon 16208, Korea

(Received December 1, 2019; Revised January 22, 2020; Accepted March 2, 2020)

Abstract: Recently, with the miniaturization of GIS, there is a need for the miniaturization of spacers as accessories. Miniaturized spacers make it difficult to secure adequate insulation distances, resulting in a more concentrated electric field at the triple junction of high-voltage (HV) conductor-insulator (spacer)-insulation gas (SF₆), which is a weakness in GIS. Therefore, by introducing a new concept design technology, functionally graded material (FGM), which is recently applied to various materials and parts industries, three-dimensional control of the dielectric constant distribution in a spacer can be expected to alleviate triple-junction electric field occupancy and improve insulation performance. In this study, we propose an optimized model using NSGA-II to optimize the permittivity distribution of FGM applied spacer.

Keywords: GIS, Spacer, FGM (functional graded material), Electric field relaxation, NSGA-II, Optimization

1. 서론

가스절연개폐장치(gas insulated switchgear, GIS)는 변전소 및 대형건물의 수배전반 계통에서 필요에 따라 전력을 공급 또는 차단하는 장치로 가스차단기, 단로기, 접지개폐기, 모선, 스페이서, 부상, 변성기 및 스페이서 등 다양한 부품으로 구성되며, 그중에서 스페이서는 금속제 외함 내에 위치하여 고압 전류가 흐르는 중심 도체가 외함의 내벽과 접촉하지 않도록 기계적으로 지지하고, 전기적으로 절연상태를 이룰 수 있게 한다 [1].

절연 스페이서의 소재는 일반적으로 알루미늄나 충전 에폭시를 주 절연재료로 사용하고 있으며, 이 에폭시 몰딩부와 가스절연개폐장치 내의 중심 도체 및 절연 가스, 절연물이 서로 접촉하는 삼중점이 존재한다. 통전 시의 전류에 의해 이 삼중점에 전계가 집중되며, 보이드(void), 크랙(crack) 등으로 절연파괴를 유발하는 문제점이 있다. 4차 산업혁명, IoT 네트워크 및 스마트 그리드 시대에 따라 송배전 설비의 축소가 요구되고 있으며, 이로 인해 절연 스페이서의 형상 또한 축소화되어 HV-GND 사이의 절연 거리가 줄어들어 삼중점에 전계가 더욱 집중되는 결과를 가져온다.

따라서 최근 다양한 소재 및 부품 산업에 적용되는 개념의 설계기술인 경사기능성재료(functional graded material, FGM)를 도입하여, 구성성분의 농도를 연속적 또는 불연속적으로 제어함으로써 절연물질의 유전을 분포를 3차원적으로 변화시킨다면 삼중점의 전계집

✉ Yo-Han Noh; typena1228@gmail.com
 Han-Goo Cho; hgcho414@naver.com

중을 완화하고 절연성능이 크게 개선할 수 있다 [2].

절연 에폭시 내에 입도 또는 종류가 다른 세라믹 필러를 혼합하고 원심 분리법을 이용해 질량차에 따라 필러의 분포를 제어하는 경사기능재료 구현 방법 등이 연구되고 있으며 [3], 이에 따라 경사기능재료 적용 축소형 스페이서의 유전을 분포 최적화 연구도 다양한 방향으로 진행되고 있다 [4].

원심 분리법을 이용한 경사기능재료 구현 방법은 에폭시 내에 유전을 분포를 선형적으로 구현이 가능하나, 정확하고 정밀한 치수의 경사기능재료 구현은 불가하며, 이는 3D 프린터 등을 통해 제작하여 정확한 치수를 갖는 구현 방법 등이 연구되고 있다 [4].

본 논문은 경사기능재료 적용 스페이서 각 layer의 유전을 값을 변화시켜 최종적으로 삼중점에 집중되는 최대 전계강도를 완화한 모델을 제시하고자 한다. 최적화 과정을 위해 그래픽 기반 코딩 프로그램인 LabView를 이용하여 직접 구현한 NSGA-II와 COMSOL의 multi-physics 전계해석을 이용하였다.

2. 연구 방법

2.1 NSGA-II

FGM 스페이서의 유전을 분포 최적화를 위해 다목적 최적화 알고리즘인 NSGA-II를 적용하였다. NSGA-II는 다른 유전알고리즘(GA)보다 다목적 최적화 문제에 많이 사용되고 있으며, 염색체 및 유전자로 불리는 무작위로 선택된 각 모델의 전계해석을 진행하여 얻은 최대 전계 강도, 전계 강도 그래프의 표준편차를 알고리즘의 목적함수로 두고 그 값들이 최소화되는 염색체 및 유전자를 탐색하는 알고리즘을 수행한다. NSGA-II에서 다음 세대 선택을 위한 유전자 개체 정렬에 있어 비지배 정렬(non-dominated sorting)과 밀집 거리(crowding distance)를 이용하여 각 개체별로 순위를 할당하여 연고자 하는 이상적인 최적해에 가까운 개체들을 선택하게 된다. 본 연구에서는 그래픽 기반 코딩 프로그램인 LabView를 이용하여 NSGA-II를 목적에 맞게 구현 및 수정을 진행했다.

2.2 비지배 정렬(non-dominated sorting)

목적함수에 대해 최소화 알고리즘을 진행한다고 가정하고, 아래의 두 조건을 모두 만족하면 개체 x_i 는 또

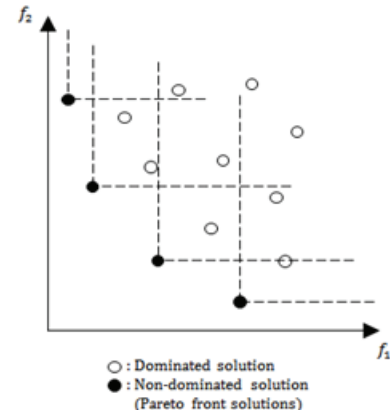


Fig. 1. Concept for non-dominated sorting.

다른 개체 y_i 를 지배(dominate)한다고 하며 그 관계를 $x_i < y_i$ 로 표기한다.

- ① 모든 목적함수들에 대해 $f_j(x_i) \leq f_j(y_i)$
- ② 최소한 한 개의 목적함수에 대하여 $f_j(x_i) < f_j(y_i)$

그림 1에서 집합 내의 어떤 개체들에 대해서도 지배당하지 않는 개체를 비지배 해(non-dominated solution)라 하고 이들의 집합을 비지배 집합(non-dominated set)이라 한다. 그리고 주어진 개체들의 집합이 전체 탐색의 영역과 같을 때의 비지배 집합을 파레토 최적 집합(pareto-optimal set) 또는 파레토 최전선 해(pareto front solutions)라 한다.

2.3 밀집 거리(crowding distance) 계산

비지배 해 정렬이 끝난 개체들은 동일한 파레토 프론트에 있을 때, 서로 지배 관계가 되지 않는다. 동일한 파레토 프론트 내의 개체들은 밀집 거리(crowding distance)를 할당하여 다음 세대의 개체 선택 시 우선순위를 결정한다. 밀집 거리가 큰 개체를 우선 선택하여 단일 해로의 조기 수렴을 방지하고 이는 다목적 최적화의 목적 중 하나인 해 개체의 다양성을 증진시키는 데 목적이 있다 [5].

그림 2에서 개체 i 의 밀집 거리는 바로 양옆의 개체 $i-1$ 과 $i+1$ 사이의 평균 거리를 의미하며 이는 아래 식으로 계산한다.

$$d(m[j]) = \sum_{m=1}^K \frac{f_m(m[j+1]) - f_m(m[j-1])}{f_{m,\max} - f_{m,\min}}$$

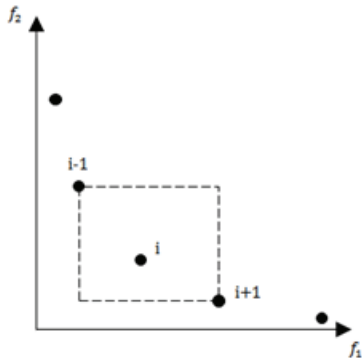


Fig. 2. Concept for crowding distance.

- K : 목적함수의 개수
- $f_m()$: 개체의 m 번째 목적함수의 값
- $m[j]$: m 번째 목적함수의 값을 기준으로 정렬한 뒤 j 번째 개체

2.4 기타 알고리즘 연산자

이후 NSGA-II의 진행은 교배연산 및 돌연변이 연산을 통해 다음 세대가 생성된다. 본 논문에서의 교배 연산은 실수코딩으로 구현된 경우 가장 직관적인 교배 연산은 부모 개체들을 나타내는 두 점의 중점 혹은 내분점을 자식 개체로 삼는 것이다. 교배 연산자 중 BLX- α 를 사용한다. 이 교배연산에서는 두 변수의 내분점 외에도 α 만큼의 외분점도 고려 대상이 된다. 두 부모 개체의 i 번째 변수가 각각 x_i, y_i 라 할 때, 분할 비율 β 가 $[-\alpha, 1+\alpha]$ 의 범위 내에서 무작위로 선택된다. 자식 개체의 i 번째 변수는 $x_i + \beta + y_i(1-\beta)$ 의 값을 갖는다. β 가 0보다 작은 경우에는 쪽의 외분점이 선택되고, β 가 0보다 클 경우에는 쪽의 외분점이 선택된다. α 의 값은 문제의 특성에 따라 다양하게 선택될 수 있으며, 일반적으로는 0.25의 값을 많이 사용한다. 0을 사용하는 경우는 내분점만을 고려하고자 할 때 사용한다.

돌연변이 연산자는 부모세대에서 최적 유전자를 물려받은 자식 세대에서도 돌연변이를 통해 새로운 영역으로의 최적해를 탐색 가능하게 해주는 연산자다. 일반적으로 한 개체 x_i 에 변이를 가할 때에 화이트 가우시안 노이즈(white-gaussian noise)를 발생시켜 개체 x_i 에 더한 값으로 대체한다. 평균이 0이고 표준편차가 σ_i 인 가우시안 분포 $N(0, \sigma_i)$ 를 따르는 난수를 발생시키며, 표준편차는 $(\max_i - \min_i)/4$ 의 값을 일반적으로 사용한다.

2.5 Spacer 기본 해석 모델

본 논문에서 유전을 분포 최적화를 진행할 절연 스페이스의 기본 2D 구성을 그림 3과 같이 설정한다. 그림 3(b)의 스페이스 형상은 실제 사용 중인 145 kV급 단상 스페이스 형상 중 하나를 지정하여 도식화했다.

위의 해석 모델은 왼쪽의 HV 축을 중심으로 회전되어 3D의 해석 모델이 완성되며 COMSOL multi-physics를 이용하여 전계해석이 진행된다. 표 1은 위 해석 모델에 사용된 유전 상수의 값이며, 각 layer의 유전 상수를 변수로 두어 최적화를 진행한다. 즉, 각 layer에 어떤 유전율 값을 들어갔을 때 삼중점에 집중되는 전계 강도가 가장 잘 완화됐는가를 탐색하는 형태의 최적화 메커니즘이다.

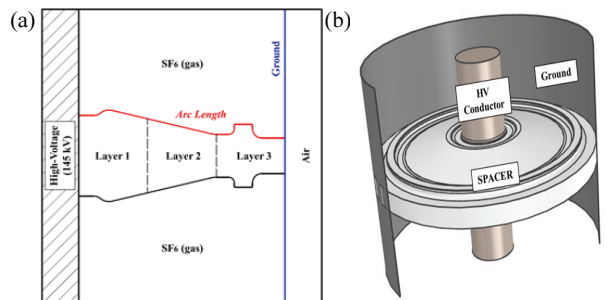


Fig. 3. Spacer configuration calculation model. (a) Rotating cross section and (b) rotated 3D model.

Table 1. Dielectric constant of each part.

Domains	Dielectric constant
High-voltage (145 kV)	1
Layer 1	Random variable (4~20)
Layer 2	Random variable (4~20)
Layer 3	Random variable (4~20)
SF6 (gas)	1.015
Air	1.006

2.6 유전을 범위 설정

추후 유전을 분포가 최적화된 스페이스의 실제 제작을 위해 유전율의 범위를 스페이스 제작 시 에폭시에 첨가할 필러들의 종류에 따라 유전율 범위를 설정하였다. 표 2는 여러 종류의 필러만의 유전율 값을 나타내었다.

Table 2. Theoretical permittivity of each fillers.

Filler	Permittivity
Al ₂ O ₃	9
Yb ₂ O ₃	11
Y ₂ O ₃	15
ZrO ₂	22
La ₂ O ₃	27

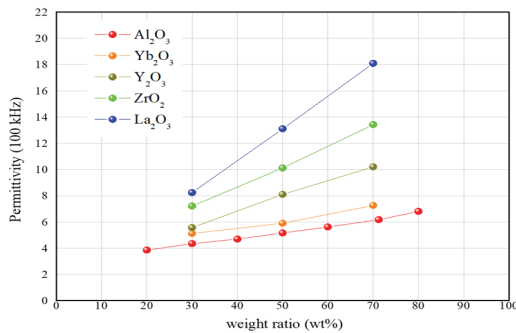


Fig. 4. Permittivity measurement according to the wt% of each filler.

그림 4는 절연 스페이서에 사용되는 에폭시에 각각의 필러들의 무게 비율에 따른 유전율 변화를 나타내었다. 표 2와 그림 4의 자료를 바탕으로 최적화하고자 하는 유전율 분포의 범위를 4~20으로 설정하였다.

2.7 해석 결과의 목적함수 도출

그림 5는 COMSOL multi-physics 전계 해석을 이용하여 그림 3에 명시된 arc length에 걸리는 전계강도 그래프의 예시이다. 그림 5의 예시 그래프에서 arc length = 0 (mm)인 지점이 스페이서 기본 해석 모델의 도체-절연물-절연 가스가 만나는 삼중점(triple junction)이며, 실제 GIS 내부의 스페이서의 취약점이기도 하다. FGM을 적용함으로써 이 삼중점에 걸리는 전계 강도를

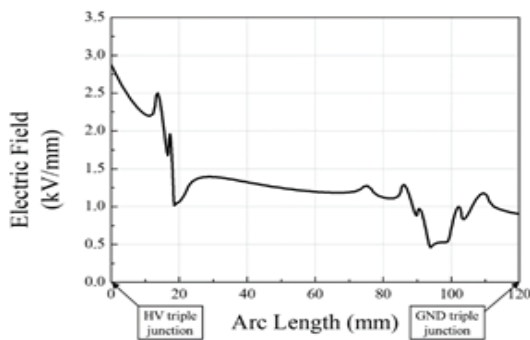


Fig. 5. Example graph of electric field analysis.

완화하고자 현재 NSGA- II의 목적함수는 아래와 같이 설정한다.

- ① 그래프의 최대 전계 강도
- ② 그래프 Y축(electric field)의 표준편차

위 목적함수들을 NSGA- II의 적합도 함수로 사용하여 최소화되는 최적화를 진행하게 된다.

2.8 최적화 메커니즘

각 layer를 x_1, x_2, x_3 로 두고, 랜덤 변수의 범위가 4~20을 갖는 난수를 발생하여 population size(개체 수)가 100인 1세대를 생성한다.

COMSOL multi-physics를 이용하여 그림 3의 기본 해석모델에 난수로 발생된 각 layer의 유전율 값을 적용하고 전계해석 후 그림 5의 그래프를 얻어낸다. 그래프의 최대 전계강도 및 그래프 Y축의 표준편차를 구하여 NSGA- II의 목적함수, 적합도 함수로 사용한다. 함수를 이용하여 비지배 정렬 및 토너먼트 선택을 통하여 100개의 개체를 선택 후 교배 연산자를 수행한다. 지역 해의 조기 수렴 방지를 위해 가우시안 노이즈를 이용한 돌연변이 연산자를 수행한다. 새로 생성된 2세대(자식 세대)의 전계해석을 진행하여 1세대와의 목

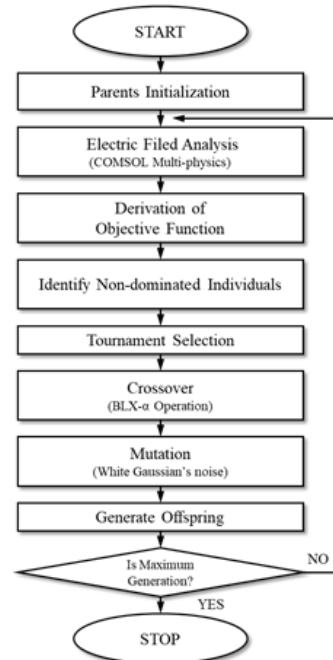


Fig. 6. Flowchart of NSGA- II in this study.

적함수 값을 비교한다. 목적함수의 감소폭이 매우 적어 지는 지점에서 NSGA-II를 중지한다. 그림 6은 상기 과정의 흐름도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 진행 세대별 최전선 해

그림 7, 8은 NSGA-II를 진행하면서 얻은 각 세대별 목적함수의 값을 그래프로 나타냈다. 1st 세대의 경우

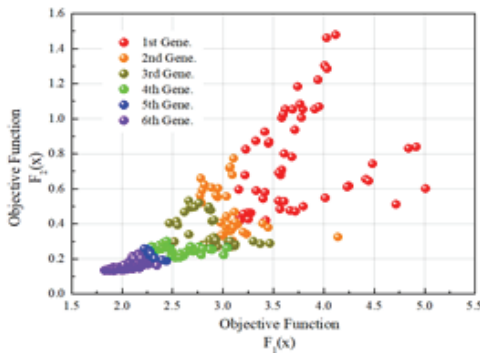


Fig. 7. Pareto front of all generations (1~6th).

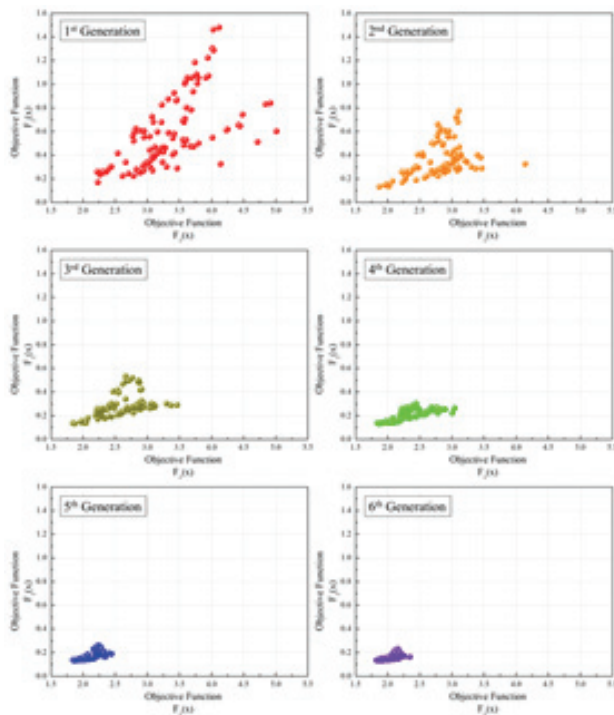


Fig. 8. Pareto front of each generations.

목적함수 전역에서 넓게 분포해 있는 형태로 전계 해석이 완료되었으며 이후, 세대를 거듭할수록 각 개체들의 최소화 지점인 이상적인 해로 수렴함을 볼 수 있다. 이미 3rd 세대의 개체에서 GIS의 삼중점에서 전계 완화율이 가장 높은 개체가 나왔으며 이는 축소형 스페이스 모델 내 각 layer의 유전율 값을 4~20으로 난수를 발생시킨 1st 세대의 자식 세대로 표현된다.

3.2 최적화 모델 제안

NSGA-II를 진행하여 3개 layer를 갖는 경사기능재료 적용 축소형 스페이스의 유전율 분포 최적화 모델을 경사기능재료가 적용되지 않은 균일한 유전율 분포를 가지는 기존의 스페이스 모델과 전계강도 그래프를 그림 9와 같이 표현하였다. 그림 9의 결과는 해석 모델 스페이스의 형상은 통제 변인이며, 각 layer의 유전율 분포의 변화로만 해석하여 얻은 결과이다. 알고리즘 수행 초기에 무작위로 선택된 모델과 3세대 수행 후 얻은 최적화 모델의 각 전계강도 그래프를 스페이스 전체의 유전율이 일정한 모델과 비교하였다.

NSGA-II 최적화의 결과로 얻은 최적화 모델의 각 layer의 유전율 값은 layer 1 = 13, layer 2 = 7, layer 3 = 8이며 도체부의 삼중점에 걸리는 전계강도가 최적화 모델의 경우 기존 모델보다 크게 완화됨을 보인다. Layer 1에서 layer 2로 넘어가는 지점(arc length = 40 mm)에서 전계강도의 값이 증가한다. 이는 유전율이 낮은 layer의 변화에 따른 결과물이며, layer 2에서 layer 3으로 넘어가는 지점(arc length = 80 mm)의 전계 변화는 크지 않다. 표 3은 두 모델의 각 삼중점에 걸린 전계강도의 값을 나타냈다. HV 삼중점에서 최적화

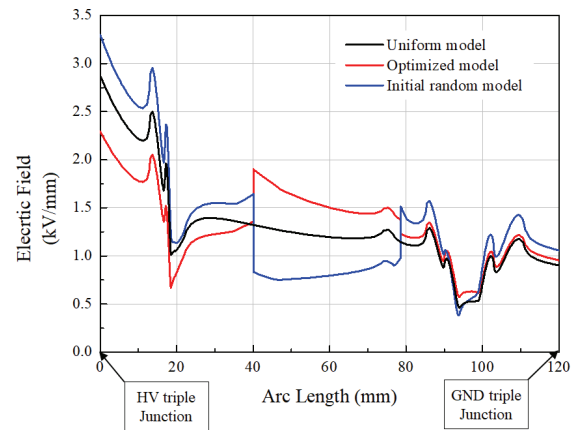


Fig. 9. Electric field strength graph over arc length of models.

Table 3. Compare results from each model.

Model	HV triple junction	GND triple junction
Uniform model	2.87	0.88
Optimized model	2.29 (20.20% decreased)	0.92 (4.55% increased)
Initial random model	3.30 (14.98% increased)	1.03 (17.05% increased)

모델의 전계강도는 기존 모델보다 수치상으로 20.2% 완화되었으며, 이는 절연 스페이서의 섬락전압을 향상시킬 수 있는 등 수명 향상에도 효과가 있다 [3].

NSGA-II의 초기 부모세대에서 무작위로 생성된 initial random model의 경우, 각 layer의 유전율 값은 layer 1 = 7, layer 2 = 15, layer 3 = 8이며, HV 삼중점과 GND 삼중점 두 군데 모두 전계 강도가 높게 걸리는 버려지는 해로 알고리즘에 사용되었다. 그림 7의 각 개체는 목적함수 x, y축이 최솟값을 갖는 최적해 탐색 경로로 볼 수 있으며, 이의 초기 무작위 모델의 경우에도 유전율이 균일한 모델과의 목적함수 비교를 통해 알고리즘에 학습된다.

4. 결론

본 논문에서는 경사기능재료 적용 축소형 스페이서의 유전율 분포 최적화 방법론과 그 결과에 대하여 서술하였다. 다른 최적화 방법과는 다르게 LabView로 구현된 NSGA-II 및 ComSol multi-physics 전계 해석을 이용하여 스페이서 연면거리 그래프 값을 목적함수로 두고 그 값이 최소화가 진행되는 전역 탐색을 실시한 최적화를 진행하며 얻은 결과는 아래와 같다.

- 1) NSGA-II를 이용하여 유전율 분포 최적화를 총 6세대까지 진행하였으나, 이미 3세대 개체 내에서 최적화 모델이 발현되어 빠른 결과 도출이 가능하였으며 이는 본 연구의 문제영역에서 NSGA-II가 잘 적용된 결과로 볼 수 있었다.

- 2) 실사용 중인 145 kV급 단상 스페이서 모델의 형상은 통제 변인으로 두고 유전율 분포 제어만으로 최적화 모델의 삼중점에서의 전계강도가 균일한 유전율의 분포를 가지는 기존 모델 대비 20.20% 완화되는 결과를 도출하였다.

- 3) 기존 사용 에폭시에 필러를 혼합하여 제작한 샘플의 유전율을 측정하고 실제 제작 가능한 유전율 범위를 설정하였다. 경사기능재료 적용 축소형 스페이서의 제작을 위해 3D 적층 제조를 활용하고 있으며, layer의 수를 늘리기 위한 장비의 연구가 진행 중에 있다.

ORCID

Yo-Han Noh
Han-Goo Cho

<https://orcid.org/0000-0003-4534-9153>
<https://orcid.org/0000-0003-0884-7655>

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIC)와 산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다 (산업소재핵심기술개발-세라믹/No.20001530).

REFERENCES

- [1] J. Tang, D. Wang, L. Fan, R. Zhuo, and X. Zhang, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **22**, 3037 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.004556>]
- [2] H. J. Ju, B. Kim, and K. C. Ko, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **18**, 1268 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5976126>]
- [3] M. Kurimoto, K. Kato, M. Hanai, Y. Hoshina, M. Takei, and H. Okubo, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **17**, 256 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5412025>]
- [4] M. Talaat, A. El-Zein, and M. Amin, *Electr. Power Syst. Res.*, **163**, 754 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.07.002>]
- [5] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, **6**, 182 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1109/4235.996017>]