


프랙탈 차원을 이용한 가공 배전 절연체의 내트래킹 성능 평가

허지혁¹, 박건희², 임문섭², 서예슬², 김가현², 임장섭² 

¹ 대한전선 기술연구소

² 국립목포해양대학교 해양전자통신컴퓨터공학과

Tracking Resistance Evaluation of Polypropylene Insulating Materials for Overhead Power Lines Using Fractal Dimension Analysis

Jee-Hyeok Heo¹, Keon-Hee Park², Mun-Seop Lim², Ye-Seul Seo², Ga-Hyun Kim², and Jang-Seob Lim²

¹ Taihan Cable & Solution Co., Ltd., Dangjin 31792, Korea

² Department of Marine Electronics and Computer Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

(Received January 23, 2026; Revised January 30, 2026; Accepted January 31, 2026)

Abstract: The potential of replacing crosslinked polyethylene (XLPE) with an eco-friendly alternative, polypropylene (PP), as insulating material is investigated for overhead power distribution lines. Although XLPE exhibits excellent electrical and mechanical properties, the byproducts generated during crosslinking pose environmental challenges. PP is a viable alternative because of recyclability and absence of byproducts during crosslinking. This study evaluated alternating current (AC) breakdown strength, contact angle, and tracking resistance of two commercially available XLPE samples and three types of PP (PP1, PP2, PP3) with varying additive content. AC breakdown strength, analyzed using the Weibull distribution, facilitated relative comparison of insulation performance. PP2 exhibited scale parameters comparable to or exceeding those of XLPE. Contact angles exceeding 90° displayed hydrophobicity across all samples. To address pass/fail evaluation limitations, arcing images from tracking tests were analyzed using the box-counting method for fractal dimension analysis. Fractal dimensions increased with arcing extent, and complexity increased with test duration. Tracking resistance performance order was PP3, PP1, CC, PP2, OC which was attributed to enhanced heat dissipation properties of filler additives. The proposed quantitative method for comparing tracking resistance through fractal dimension analysis, explored the feasibility of using PP insulating materials in overhead power distribution lines.

Keywords: Polypropylene (PP), Breakdown strength, Contact angle, Tracking test, IEC 60112, Tracking resistance, Fractal dimension

1. 서론

✉ Jang-Seob Lim; janylim@mmu.ac.kr

Copyright ©2026 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.

전력의 전달은 지중케이블과 가공케이블을 통해 고전압으로 전송된다. 전력 시스템은 많은 양의 에너지를 전달하

기 때문에 높은 신뢰성이 요구된다 [1]. 전력 시스템에서 케이블의 신뢰성은 고장이 발생하지 않고, 안정적으로 운용될 수 있는 능력을 말한다. 신뢰성이 낮은 전력 케이블은 시스템의 유지보수 비용이 증가하고, 고장이 발생할 경우 수리가 어려운 손상이 발생할 가능성이 높다. 전력 케이블의 신뢰성을 평가하기 위한 요소로는 케이블의 설계, 전압 스트레스, 케이블의 설치 환경, 케이블의 연령, 절연 성능, 외부 기계적 손상 등이 있다 [2]. 케이블의 절연 성능은 케이블의 절연체가 도체와 외부환경 사이의 전류누설을 방지하거나 차단하는 능력을 말한다. 케이블의 절연 성능은 절연 저항, 부분방전 저항, 절연 내력, 내환경성 등으로 구성된다. 특히 가공 케이블은 외부 환경에서 사용되기 때문에 내환경성이 중요하다.

전력케이블의 절연체로 XLPE (crosslinked polyethylene)가 주로 사용된다. XLPE는 PE (polyethylene)를 화학적으로 가교 처리하여 만들며 기계적 성능과 전기적 성능이 뛰어난 절연 소재로 알려져있다 [3]. XLPE는 가교 공정에서 물, 아세트페논, 메탄과 같은 가교부산물 발생하여 탄소를 생성한다. 최근 다양한 환경 규제가 실시됨에 따라 XLPE를 대체하기 위한 소재를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행중이다 [4].

PP (polypropylene)는 XLPE를 대체하기 위한 절연소재 중 하나이다. PP는 XLPE와 달리 가교 공정을 거치지 않아 가교 중 생성되는 탄소의 발생우려가 없고 가교를 위해 소모되는 에너지가 감소한다. 열경화성 소재인 XLPE와 달리 PP는 열가소성 소재로 열을 가했을 때 녹고, 냉각하면 굳는 성질을 가지고 있다. 따라서 PP 절연 재료는 사용 후 열을 이용하여 쉽게 성형하고 재활용할 수 있다 [5]. 열경화성 절연재료는 열이 가해졌을 때 소재가 화학적으로 경화되어 재사용이 불가능하다는 특징을 가지고 있다 [6].

PP 절연소재는 강성이 크기 때문에 케이블의 적용을 위해서는 적절한 유연성을 확보해야 한다. 유연성 확보를 위해 첨가제를 이용한다. PP 케이블에 주로 첨가되는 첨가제는 기계적 유연성을 확보하기 위한 copolymer와 elastomer, 그리고 열적 안정성을 확보하기 위한 열방산 filler, 산화방지제(antioxidant) 등이 있다 [7].

XLPE를 절연체로 사용하는 MV (medium voltage) 급 가공 케이블은 절연층의 구조에 따라 크게 두 종류로 나눌 수 있다. ACSR (aluminum conductor steel reinforced)-OC(outdoor XLPE insulated) 케이블은 절연층이 한 층으로 이루어져 있다. ACSR-CC (covered conductor) 케이블은 절연층이 주 절연층과 피복절연층 2개 층으로 이루어져 있다. 주 절연층의 기능은 케이블의 절연 내력을 확보하기 위함이고, 피복 절연층은 외부에서 발생

할 수 있는 전기적, 환경적 스트레스에 대한 내력을 확보하기 위함이다 [8].

절연내력은 전력케이블의 장기적인 안정성과 신뢰성을 위해 절연재료의 중요한 특성 중 하나이다. 절연내력은 전극 형상, 전압 상승률, 온도 등의 다양한 요인으로 영향을 받는다 [9].

가공 케이블은 외부 환경과 노출되어 있기 때문에 절연 성능 평가에서 충분한 절연내력과 내환경성(내후성)이 필수적이다. 절연내력은 절연소재의 파괴가 발생하는 전압을 의미한다. 내환경성은 가공 케이블이 눈이나 비, 염분, 기온의 변화 등에도 안정적으로 케이블의 성능이 유지되는 특성을 말한다. 내환경성이 우수한 케이블은 운전 중의 외부환경 변화에도 케이블을 안정적으로 운전할 수 있다 [10]. 내 환경성을 평가하는 방법으로는 케이블 절연체의 접촉각 측정을 통한 케이블 습윤성을 확인하는 방법과 트레이킹 시험을 통해 내트레이킹 특성을 확인하는 방법 등이 있다.

절연체의 표면 특성은 습윤성 평가를 통해 파악할 수 있다. 습윤성은 피복 절연체의 표면을 친수성과 소수성으로 구분한다. 친수성은 표면이 물과 잘 상호 작용하는 특성을 말한다. 친수성을 띠는 절연체의 표면에서는 물이 퍼지게 된다. 소수성은 물 분자와 물체 표면이 약한 상호작용을 하고, 케이블 표면과 물방울이 서로 밀어내 물방울 형상이 뾰족하게 된다. 가공 케이블의 경우 외부 환경에 영향을 받기 때문에 피복 절연체가 소수성 특성을 가지고 있어야 한다. 접촉각은 고체표면 위에 액체 방울을 떨어뜨리고 그 액체 방울과 고체 표면 사이 각을 통해 케이블의 표면의 특성을 평가할 수 있다. 케이블의 접촉각이 90° 이하이면 친수성, 물방울과 절연체 표면이 이루는 각이 90° 이상이면 소수성을 갖는다 [11,12].

트레이킹은 케이블의 외피에 먼지나 수분, 염분으로 인해 케이블 표면에 누설전류가 발생하고, 누설전류가 발생한 지점인 dry band에서 arcing이 발생해 표면이 침식되고, 누설전류가 지속적으로 발생하는 도전성 경로가 형성되는 현상을 말한다. 트레이킹 현상이 발생하면 케이블의 절연 성능이 감소한다. 소수성이 확보되지 않은 케이블은 외부 요인에 의해 쉽게 열화 될 수 있기 때문에 케이블의 내트레이킹 특성이 감소할 수 있다 [13].

트레이킹 특성을 평가하기 위한 방법으로는 IEC 60587에서 제시되는 IPT (inclined plate test)와 IEC 60112에서 제시되는 CTI (comparative tracking Index)를 사용하는 방법이 있다. 두 방법 모두 시편을 전극 사이에 두고 시편에 오손액(NH_4Cl)을 적하시킨 뒤 전압을 인가하여 시편의 손상을 검사하고, 이를 통해 내트레이킹 특성을 확인한다.

IPT는 경사면에서 시험이 수행되고, IEC 60112에서 제시하는 실험방법은 평평한 판 위에서 실험이 수행된다. 인가전압은 IPT의 경우 3~ 5kV의 고전압을 인가하고, IEC 60112 방법은 200 ~ 600 V를 인가한다 [14,15].

트래킹은 절연재료 표면의 균열을 동반한다. 이를 분석하기 위해 프랙탈 차원 개념을 이용하여 균열을 정량화할 수 있다. 프랙탈 이론은 비선형 과학의 한 분야로, 자연계에서 발생할 수 있는 복잡한 모양을 분석할 수 있다 [16]. 표면 아킹의 패턴의 프랙탈 특성 연구를 통해 표면의 균열 특성을 더 잘 이해할 수 있는 정량적인 정보를 얻을 수 있다 [17]. 트래킹 시험 시간이 경과할수록, 인가된 전압이 증가할수록 아킹의 모양이 복잡하고 넓은 범위에 분포함으로써 인해 프랙탈 차원이 증가한다고 알려져 있다.

본 논문에서는 ACSR에 사용되는 XLPE 절연체가 PP 절연체로의 대체 가능성을 검토하기 위해 AC 절연내력, 접촉각, 내트래킹 특성 시험을 진행하였다. 평가 대상은 상용 XLPE 2종과 개발한 PP 절연재료 3종이다. AC 절연내력은 IEC 60243-1에서 제시하는 실험을 통해 확인했다. PP 절연체의 blending 함량별 전기적 특성의 변화를 관찰하기 위해, 첨가물의 종류와 비율을 달리하여 샘플을 제작하였다. 내후성을 검토하기 위해 각 절연소재의 내트래킹 특성을 IEC 60112의 전극 구성을 참조하여 평가를 진행하였다. 이때, 경제성의 이유와 전압 인가 장비의 한계 등과 같은 이유로 제한된 자원에서 효율적으로 분석할 수 있는 연구방법으로 표 1과 같이 변경하였다. 내트래킹 특성의 평가 결과를 기반으로 프랙탈 차원을 산출하여 절연소재별 내트래킹 특성을 상대비교 하였다.

본 연구는 기존의 XLPE 절연소재를 친환경성 절연소재인 PP로 변경하기 위해 IEC 60112의 실험 구성을 이용하여 평가하고 이를 이용하여 프랙탈 차원 값으로 내트래킹 특성을 상대비교를 할 수 있다는 점에서 독창성을 가진다. 시험 중 아킹의 발생을 영상 분석함으로써 트래킹 진전에 대한 이해를 증진할 수 있다. 이를 통해 동일 시험 조건에서 pass/fail의 평가 결과의 한계점을 정량적인 지표로 비교 가능한 방법을 이용할 수 있다는 점에서 의의를 갖는다.

본 논문의 구성은 아래와 같다. 2장은 실험의 구성을 설명한다. 실험은 XLPE를 절연체로 사용하는 ACSR-OC, ACSR-CC와 이를 대체하고자 개발한 PP 소재 3종을 대상으로 한다. 절연체의 특성 실험은 절연내력, 접촉각, 트래킹 시험을 이용하였다. 3장은 실험의 결과를 나타낸다. 4장은 트래킹 시험 중 취득한 이미지를 이용하여 프랙탈 차원으로 분석을 진행한다. 5장에서는 실험 결과의 종합과 이에 대한 의논으로 구성되어 있다. 6장은 본 논문의 결론을 나타낸다.

Table 1. Modifications to the standard IEC 60112 test method.

Parameter	IEC 60112	Modified method
Electrode material	Platinum	Copper
Applied voltage [V]	100 – 600	220
Evaluation	Pass / Fail	Quantitative

2. 절연재료 및 실험 방법

2.1 실험 대상 절연재료

케이블의 절연체로서 PP 소재와 XLPE를 비교하기 위해 가공 케이블에 사용되는 상용 XLPE 절연체 2종인 OC (outdoor crosslinked polyethylene)와 CC (covered conductor), 이를 대체하기 위해 제작한 PP 3종을 대상으로 비교 분석 시험하였다.

시험에 사용한 PP는 Block PP에 첨가물을 조합하여 사용하였다. 첨가물은 기계적 유연성과 탄성을 확보하기 위한 POE (polyolefin based elastomer)와 케이블의 열적 안정성을 확보하기 위한 방열 filler를 사용하였다. 시험은 각 첨가물의 비율을 조합하여 POE의 비율이 높고 filler의 함량이 5wt%인 PP1, POE의 함량이 높고 filler가 들어가지 않은 PP2, POE의 함량이 낮고 filler의 함량이 3wt% PP3 총 3종의 PP를 사용했다. 표 2는 시험에 사용한 소재의 블렌딩 비율에 대해 정리하였다.

2.2 AC 절연내력 시험

절연체 시편의 전기적 성능을 확인하기 위한 시험 중 하나로 절연체의 breakdown test가 있다. 이 시험은 시트상태의 절연체에 고전압을 인가하고 절연체가 파괴되는 전압을 두께로 나눈 파괴 전계로서 절연 내력을 평가한다. 그림 1은 시험의 간단한 개략도이다.

Table 2. Specimen contents for experiments.

Material	PP	POE ratio	Filler (wt.%)
OC	XLPE, composed of a single layer		
CC	XLPE, composed of 2 layers		
PP 1	Block	High	5
PP 2	Block	High	0
PP 3	Block	Low	3

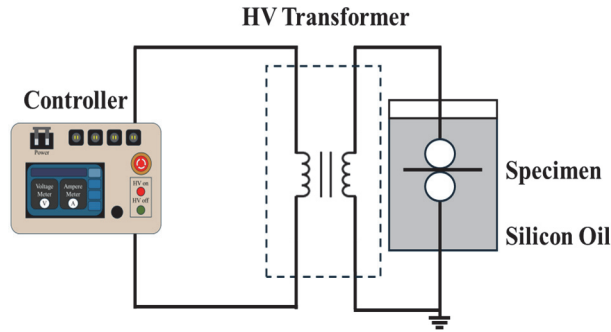


Fig. 1. AC Breakdown test set up.

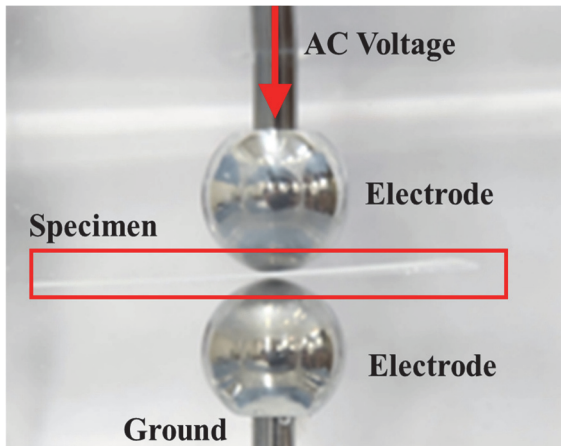


Fig. 2. Configure for breakdown test electrode.

Breakdown test는 IEC 60243-1 표준을 참조하여 수행 D조에 내에 2개의 구전극 사이에 시트를 고정하고 Controller를 통해 고전압을 인가해 파괴 전압을 확인하였다.

시험에 사용한 구전극은 지름 20 mm인 스테인리스 구전극을 사용하였다. 구대구 전극을 사용하면 구와 구 사이에 전계가 집중되어 시편의 절연 파괴 전압을 확인할 수 있다[18]. 절연파괴가 발생하는 전압을 확인하여 시편의 breakdown strength를 결정한다.

Breakdown test에 인가한 전압은 ramp형태로 AC전압을 인가했다. 전압은 1 kV/s의 속도로 전압을 상승시켰다. 시험에 사용한 시편은 두께 0.2 mm, 크기 50 × 50 mm 크기의 사각형 시트형태로 제작하였다. 시험에 사용한 Breakdown test 장비는 Phenix 사의 6CB 100/50-7.5를 사용하였으며, 표 3은 실험에 사용한 장비와 시편의 규격을 정리하였다.

Table 3. Condition for breakdown test.

Test equipment	Item	Contents
		Manufacture
	Model name	6CB 100/50-7.5
	Output voltage / current	0-100 kV / 75 mA
Specimen for BD test	Material	XLPE, PP
	Size	50 × 50 mm
	Thickness	0.2 ± 0.03 mm

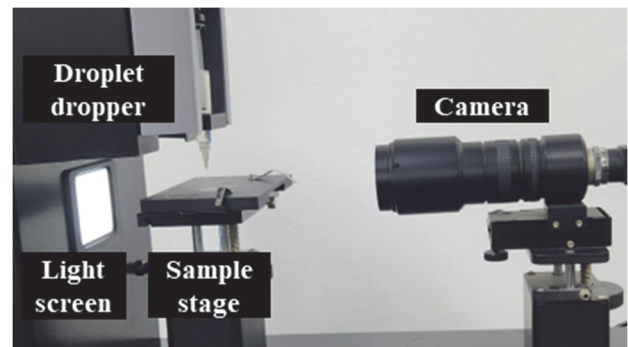


Fig. 3. Contact angle goniometer platform.

2.3 Wettability 평가

Wettability를 평가하기 위해 IEC TS 62073을 참조하여 정적 접촉각을 측정하였다. 접촉각 측정은 Phenix사의 300-touch를 사용하였으며, dropper를 통해 물을 sheet 상태의 샘플에 위치하게 한 뒤 샘플의 표면과 투과된 물방울이 이루는 각을 카메라를 통해 촬영하고, 연결된 컴퓨터의 소프트웨어를 통해 분석했다.

2.4 Tracking Test

트래킹 시험은 IEC 60112 표준을 참조해 수행했다. 트래킹 시험에 대한 개략도는 그림 4와 같다. 시험 조건은 100~600 V의 전압을 인가하여 최소 20 × 20 × 3 mm의 시편으로 최대 50분의 시험을 권장한다. 4 mm 간격으로 설치된 두개의 전극에 두께 3 mm인 시편을 고정시킨다. 시편에 전압을 인가하고, NH₄Cl 0.1%가 혼합된 오손액을 2 drops/min씩 적하하여 시편의 트래킹을 발생시킨다.

시험에 사용한 전극은 구리 전극을 사용하였으며, 전압은 한국의 상용전압인 AC 220 V, 60 Hz의 전압을 인가했

다. 100방울이 적하된 후 25초가 지난 시점을 종료시점으로 설정하였다. 시험용 샘플의 크기는 40×30 mm이며 두께는 3 mm로 제작하였다. 시험 중 트래킹 영상을 카메라를 통해 30초마다 1 frame씩 촬영하여 시험영상을 확보했다.

그림 5와 그림 6은 카메라를 통해 확보한 트래킹 영상 데이터의 예시를 나타낸다. 그림 5는 트래킹 발생 전 시험 환경을 나타내고, 그림 6은 아킹이 발생한 순간을 나타낸다. 오손액이 적하한 뒤 트래킹 발생 메커니즘에 따라 아킹이 발생한 것을 확인할 수 있다.

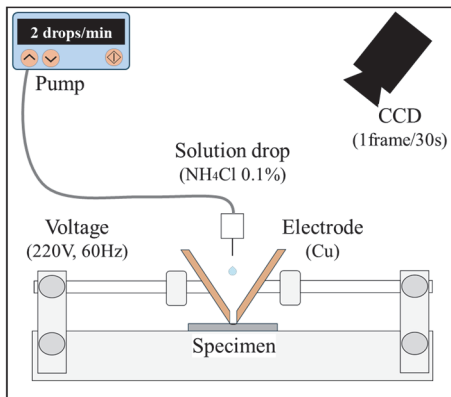


Fig. 4. Schematic diagram of tracking test.

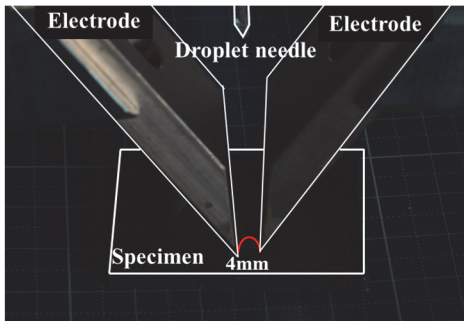


Fig. 5. Configuration for tracking test.

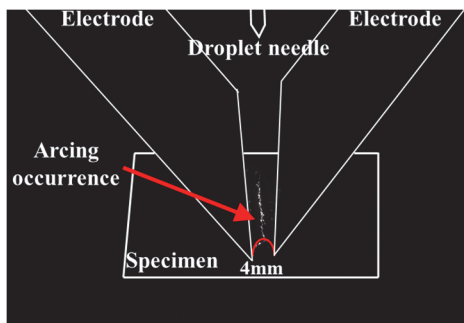


Fig. 6. Arcing occurrence during tracking test.

3. Test 결과

3.1 BD Test

AC BD Test는 실험결과와 통계적 분석을 하기 위해 절연재료 별 10종의 샘플을 제작하여 시험을 수행하였다. 시험을 통해 확보된 파괴 데이터는 IEEE 62539에 따라 분석하였으며, 그림 7, 8과 같이 Weibull distribution으로 나타냈다.

Weibull distribution은 극치분포의 한 종류로 고장 데이터를 모델링하여 기기의 수명을 예측하는데 사용되는 분포도로 형상모수와 척도모수로 구성되어 있다. 형상모수는 Weibull 분포의 모양을 결정하는 모수이다. 형상모수의 값이 클수록 취득한 데이터 그룹의 전반적인 절연내력의 데이터 변동성이 작음을 의미한다. 척도모수는 Weibull 분포의 Scale을 조절하는 모수로 통상적으로 PDF (probability density function)의 63.2%에 해당하며, 이는 고장확률의 63.2%에 도달하는 시간이나 값을 의미한다.

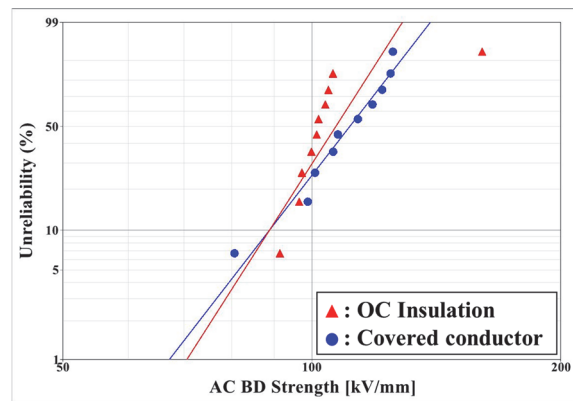


Fig. 7. Test result of AC breakdown strength for XLPE.

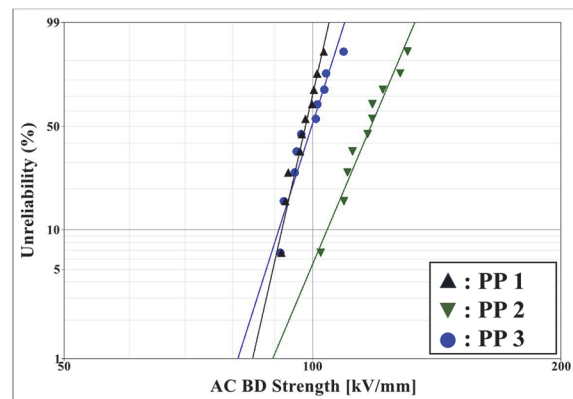


Fig. 8. Test result of AC breakdown strength for PP.

Table 4. Test result of AC breakdown strength.

Sample name	OC	CC	PP 1	PP 2	PP 3	
Weibull shape parameter	10.2	8.4	28.7	15.5	20.6	
Unreliability	63.2 %	110.8	116.0	99.3	120.5	101.5
	50 %	106.9	111.1	98.0	117.6	99.7
	10 %	88.9	88.8	91.8	104.1	91.0
	1 %	70.6	67.2	84.6	89.5	81.2

다. 척도모수가 클수록 그 데이터의 전체적인 값이 크다는 것을 의미한다.

표 4는 평가대상의 절연내력을 와이블 분포함수로 분석하여 정리한 표이다. 모든 PP 절연체가 XLPE 절연체에 비해 형상모수 값이 컸으며, XLPE 절연체는 각각 10.2, 8.4 이고, PP 절연체는 28.7, 15.5, 20.6으로 관찰되었다. 와이블 척도 모수 측면에서 XLPE 절연체는 각각 110.8, 116.0 kV/mm로 관찰되었고, PP 절연체는 99.3, 120.5, 101.5 kV/mm로 관찰되었다.

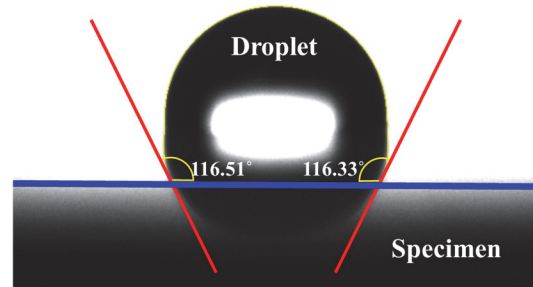
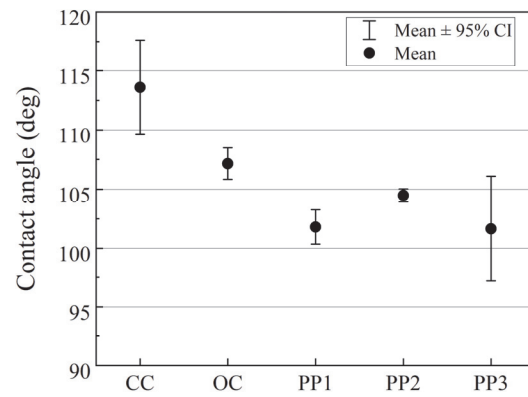
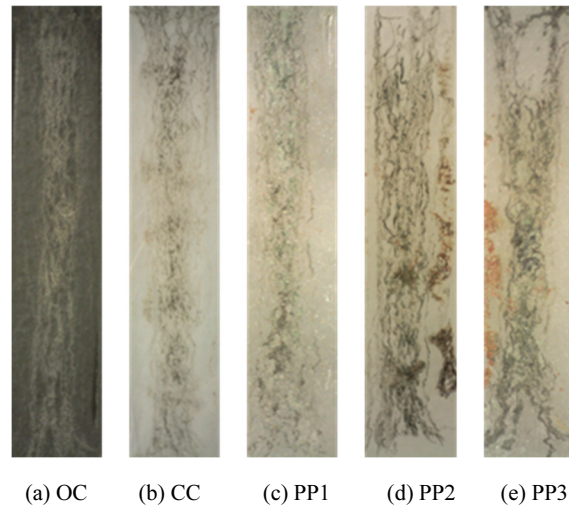
3.2 Wettability 평가

Wettability은 그림 9와 같이 droplet과 시편사이의 각을 통해서 평가하였다. 각각 절연재료 별로 10개 시편의 접촉각을 측정하였으며, 접촉각 측정 결과는 90°를 기준으로 평가하였다. 접촉각이 90°보다 크면 소수성, 90°보다 작으면 친수성을 띠는 것으로 평가했다.

접촉각 측정결과는 그림 10과 같이 박스 차트로 나타냈다. 그래프의 symbol은 접촉각의 평균값이고, 선은 각 절연재료 평균 접촉각의 95% 신뢰구간을 나타낸다. 접촉각 측정 결과 CC가 113.5°로 가장 접촉각이 컸고, PP3가 101.6°로 접촉각이 작았다. 그러나 모든 샘플의 접촉각이 90° 이상인 것으로 측정되어, 소수성을 가진 것으로 확인했다.

3.3 Tracking Test

트래킹 시험은 절연재료 별로 5개씩 테스트를 수행하였으며, pass/fail 방식으로 시편의 내트래킹 특성을 평가하였다. 시편에 오손액을 100방울 투과 후 25초가 지난 이후 별도의 과전류가 흐르거나 화재가 발생하지 않은 경우 pass로 취급하였으며, 시험 중 과전류 장치가 동작하거나 지속적인 불꽃의 발생으로 인한 화재가 발생한 경우 fail로 판정하였다.

**Fig. 9.** Example of contact angle measurement.**Fig. 10.** Results of contact angle measurement.**Fig. 11.** Visual inspection after tracking test.

시험 결과 5개 시편에서 화재나 과전류 장치가 동작하지 않아 pass로 판정되었으며, 시험영상을 확보해 모든 시편에서 발생한 트래킹 형성 과정을 확인할 수 있었다. 그림 11은 시험 종료 이후 각각의 절연재료 표면을 나타내며 모든 시편에서 트래킹이 발생한 것을 확인할 수 있다.

4. 프랙탈 차원의 분석

본 연구에서는 절연재료의 내트래킹 특성 측면에서 상대비교를 통해 개발된 PP 절연재료의 사용 가능성을 검토했다. 트래킹 시험을 진행한 결과 시험의 조건에서 모든 절연재료가 pass한 것을 확인하였다. 시험 결과가 모든 절연재료에 대해 pass로 확인되었기 때문에 내트래킹 특성의 우열을 가리기 어렵다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 프랙탈 차원 분석을 통해 내트래킹 특성을 상대비교 하고자 하였다.

본 연구에서는 트래킹 시험 중 발생한 아킹 모양을 이용하여 프랙탈 차원 분석을 수행했다. 프랙탈 차원의 계산은 box counting 방법을 이용했다. box counting을 이용한 프랙탈 차원은 0~2의 값을 가진다. 모양이 복잡하고 범위가 커질수록 더 높은 값을 가진다. 아킹의 범위가 크고 발생 빈도가 잦아지면 시험 시간에 따라 누적된 아킹 모양은 더욱 복잡 해지기 때문에 내트래킹 특성이 저하되었다고 해석할 수 있다 [19].

그림 12는 해당연구에서 프랙탈 차원 산출을 위한 과정을 순서도로 나타낸다. 순서도의 과정은 하나의 샘플을 대상으로 약 50분의 트래킹 시험으로부터 취득된 100장의 트래킹 images를 이용한다. 먼저, 취득된 100장의 영상을 입력한 뒤 분석할 영역을 선택하기 위해 트래킹이 누적된 images의 아킹 모양을 누적한다. RGB scale로 구성된 영상을 0 ~ 255로 이루어진 8bit gray scale로 변환한다. Gray scale에서 0은 가장 어두운 픽셀을 의미하고, 255는 가장 밝은 픽셀을 의미한다. 트래킹이 누적된 image 분석 영역의 픽셀분포를 확인하고 적당한 임계 값을 선정한다. 취득된 영상을 하나씩 누적하여 10의 배수가 될 때 마다 단위로 프랙탈 차원 분석을 진행하여 5분 마다 프랙탈 차원의 변화를 확인한다. 다음으로 선정된 임계값을 이용하여 10의 배수마다 누적된 이미지들의 픽셀을 0 혹은 1로 이진화 한다. 해당 연구에서는 아킹 모양이 존재하는 경우를 0, 반대의 경우 1로 이진화를 하였다. 이진화 과정을 거친 이미지를 box counting 방법을 이용하여 프랙탈 차원을 산출한다. Box counting 방법에서는 누적된 이미지를 2의 제곱수의 길이를 갖는 box로 나누어 해당영역에 아킹 모양의 존재여부를 확인한다. 다음 2의 제곱수에서도 이와 같은 과정을 진행하며 2의 제곱수가 image의 가로, 세로 중 어느 초과하기 전까지 진행한다. 이러한 값을 log-log 평면으로 옮겨 선형 추세선을 나타냈을 때의 기울기를 프랙탈 차원으로 산출할 수 있다. 식 (1)은 프랙탈 차원 산출식을 나타낸다.

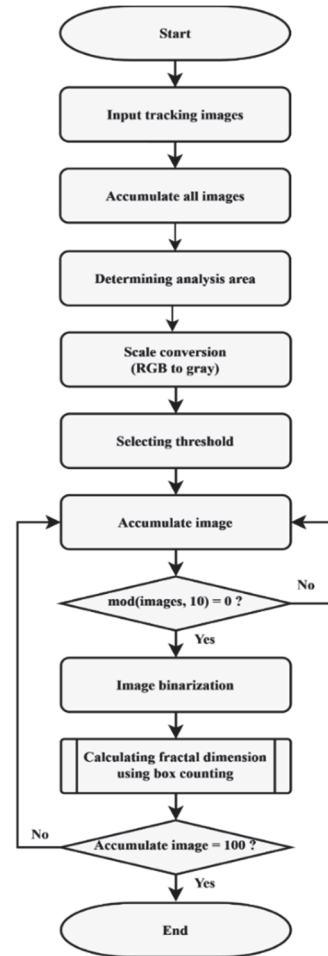


Fig. 12. Flowchart for calculating the fractal dimension of arcing patterns during tracking test using the box-counting method.

$$FD = -\frac{\log(N(r))}{\log(r)} \quad (1)$$

여기서 FD는 프랙탈 차원을 나타낸다. r은 image를 나누는 box의 길이로 2의 제곱수이다. N(r)은 아킹 모양을 포함한 box의 개수를 나타낸다. 100개의 이미지 분석이 완료되면 과정을 종료한다.

그림 13은 트래킹 시험 중 취득된 영상의 프랙탈 차원 산출 예시를 나타내었다. 그림 13(a)는 1샘플에 대해 트래킹 시험 중 30초 간격으로 누적된 아킹 images를 나타낸다. 그림 13(b)는 모든 아킹을 누적한 image에서 분석에 필요한 영역의 선정을 나타낸다. 영역을 선정할 때는 전극에 반사되는 빛을 포함하지 않도록 주의해야한다. 그림 13(c)는 모든 아킹을 누적한 image를 gray scale로 변환한 뒤 픽셀 값을 히스토그램으로 나타내었다. 히스토그램을 통해

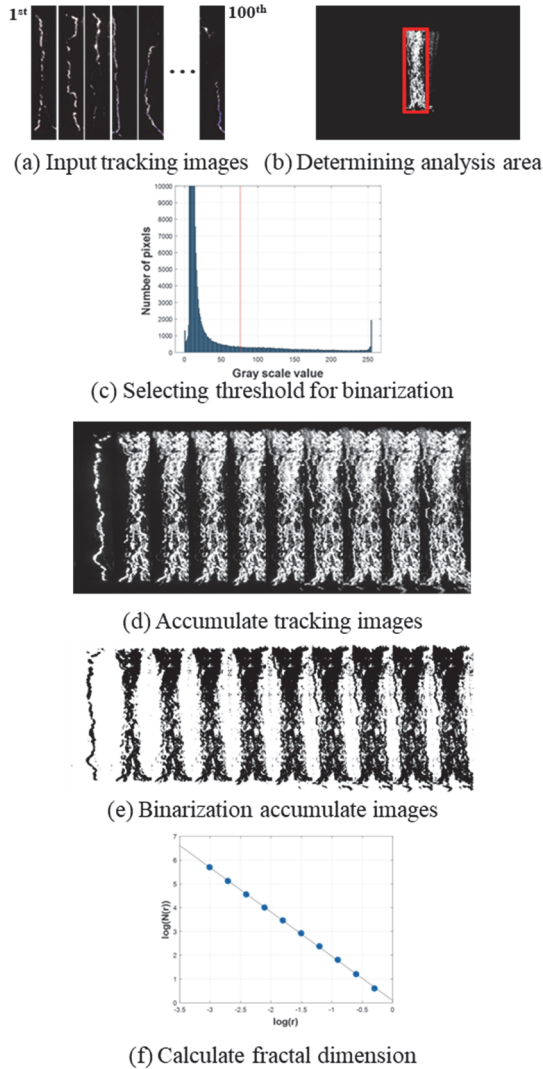


Fig. 13. Example of fractal dimension calculation for accumulated tracking images.

아킹 모양을 선택할 수 있는 적당한 threshold를 결정한다. 그림 13(d)는 image를 10의 배수 마다 누적된 images를 나타낸다. 트래킹 시험 시간이 경과할수록 아킹의 범위가 넓어지고 복잡해지는 것을 시각적으로 확인할 수 있다. 그림 13(e)는 선정된 threshold를 이용해 이진화 한 누적 아킹 images를 나타낸다. 아킹의 모양과 배경이 threshold를 기준으로 구분된 것을 확인할 수 있다. 그림 13(f)는 box counting 방법을 통해 프랙탈 차원을 산출한 예시를 나타낸다. 프랙탈 차원은 10의 배수 마다 누적된 아킹 images 10개를 대상으로 각각 진행하였다. 모든 트래킹 시험 대상의 프랙탈 분석 결과는 아래 표 5와 같다. 표의 값은 절연재료마다 5개의 샘플 평균 값을 나타내었다.

Table 5. Fractal dimension calculation results for accumulated images from the tracking test.

Accumulated images (test time)	Fractal dimension				
	OC	CC	PP1	PP2	PP3
10 (5 min)	1.558	1.587	1.186	1.204	1.413
20 (10 min)	1.722	1.744	1.631	1.710	1.559
30 (15 min)	1.778	1.786	1.723	1.767	1.662
40 (20 min)	1.811	1.809	1.769	1.798	1.721
50 (25 min)	1.835	1.825	1.793	1.819	1.762
60 (30 min)	1.851	1.834	1.811	1.834	1.801
70 (35 min)	1.861	1.841	1.825	1.843	1.825
80 (40 min)	1.869	1.850	1.838	1.851	1.838
90 (45 min)	1.874	1.859	1.846	1.862	1.846
100 (50 min)	1.876	1.861	1.847	1.864	1.846

트래킹 시험시간이 경과되어 아킹의 범위가 넓어지고 복잡해짐에 따라 프랙탈 차원 값이 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

5. 의견

AC 전압을 인가하여 진행한 절연내력 평가의 결과는 와이블 분포 함수를 기반으로 분석하였다. 와이블 형상 모수를 통해 절연내력이 절연체 전체에 걸쳐 얼마나 균질한지 확인할 수 있다. 형상 모수 측면에서 XLPE보다 PP의 균질한 구조를 가졌다고 추정된다. PP 절연체는 elastomer 종류 및 블렌딩 비율에 따라 절연내력에 미치는 영향이 크기 때문에 같은 PP 절연체라도 절연내력 특성의 큰 변화를 확인할 수 있다.

접촉각의 측정은 절연재료 표면의 wettability를 확인하기 위함이다. 접촉각 측정결과 소수성, 친수성의 분류기준인 90°를 실험 대상인 5종 재료 모두 초과하여 소수성을 가진다는 것을 확인했다. 접촉각의 측정은 표면의 상태에 따라 변화하여 측정값의 분산이 커질 수 있다. 그러나 측정값의 분산을 고려하여도 여전히 소수성의 특징을 갖는 것을 확인할 수 있다.

트래킹 시험은 IEC 60587과 IEC 60112의 시험 특징을 비교 후 IEC 60112를 선택하였다. IEC 60587의 경우, 시험에 사용되는 전압의 범위는 2.5 ~ 4.5 kV로 고전압이 사용되고, 시험에 사용되는 시편의 크기가 50 × 120 mm이

고, 두께 6 mm 시편이 사용된다. 시험 시간은 최대 360분이 소요된다. 이는 IEC 60112에 비해 고전압이 사용되고, 시편제작시 많은 양의 컴파운드가 소모되며 시험시간이 길게 소요된다.

IEC 60112 방법은 저 전압에서 트래킹 시험을 진행할 수 있으며, IEC 60587의 방법과 비교하여 시험시간이 약 1/7로 단축될 수 있고 샘플을 제작하기 위한 컴파운드를 1/30로 감소할 수 있다 [20]. 이러한 접근법은 트래킹 시험을 위한 자원이 제한될 때 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 트래킹 시험결과 시험 전압 220 V에서 약 50분 동안 100번의 오손액 적하에서 모든 실험 대상이 통과하는 것을 확인하였다. 실험이 종료된 이후 트래킹 현상으로 인해 절연체 표면에 발생한 탄화 경로를 확인하였다. 위의 실험 결과는 단순히 이분법적인 pass/fail로 구분한다는 한계점을 가진다. 트래킹 시험의 대상이 모두 pass의 결과를 갖는 경우 실험 대상 중 어떤 절연소재가 내트래킹 특성이 우수한 소재를 선정하기 어렵다.

트래킹 시험의 한계점을 극복하기 위해 트래킹 시험 중 아킹을 취득하여 프랙탈 차원을 이용하여 분석하였다. 이러한 분석은 시험 중의 트래킹 현상을 정확히 관찰할 수 있기 때문에 구역별 트래킹 발생 빈도, 트래킹의 진전 경로 등을 분석할 수 있다는 이점이 있다. 분석 결과 시험 시간이 경과할수록 아킹의 범위가 커지고 모양이 복잡해져 프랙탈 차원이 증가함을 확인하였다. 따라서 동일 시험 시간에서 프랙탈 차원이 크다는 것은 내트래킹 특성이 낮은 절연소재로 판단할 수 있다. 프랙탈 차원 분석을 통해 내트래킹 특성은 PP3, PP1, CC, PP2, OC 순으로 우수한 것을 확인하였다. 내트래킹 특성은 소재의 방열특성에 영향을 미친다 [21]. 방열 특성을 개선하기 위해 필러를 처방한 PP3, PP1 소재의 내트래킹 특성이 향상됨을 확인할 수 있다. 실험의 결과에 따르면 AC 절연내력 시험, 트래킹 시험 결과를 종합했을 때 PP 절연소재는 AC 절연내력과 내트래킹 특성은 trade off 관계를 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서 진행한 아킹 모양을 누적하여 분석하는 프랙탈 분석은 시험 시간이 경과할수록 프랙탈 차원의 변화가 감소하여 점점 포화된다는 단점을 가지고 있다. 프랙탈 차원의 포화는 절연소재간 내트래킹 특성의 비교의 어려움을 야기할 수 있다. 트래킹 시험 중 아킹을 취득하여 프랙탈 차원을 분석하는 방법은 트래킹 시험 중 일정 간격으로 아킹을 이미지를 취득해야 한다는 번거로움을 갖는다. 시험 환경 구축을 위한 source에 대한 한계점으로 인해 더 높은 시험 전압을 인가하지 못했다는 점과 전극을 백금이 아닌 구리로 사용했다는 점이 본 논문의 한계점으로 남는다.

6. 결론

본 논문에서는 가공 배전선로의 피복절연으로 사용되는 XLPE 절연체를 PP 절연체로 대체하고자 하는 연구를 진행했다. 연구 대상은 상용 케이블인 OC, CC에서 사용되는 XLPE 절연소재 2종과 개발한 절연소재 PP 3종이다. PP 절연소재의 feasibility를 검토하기 위해서 AC 절연내력, wettability, 내트래킹 측면의 특성을 검토하였다.

AC 절연내력 시험 결과 와이블 형상 모수를 통해 XLPE 보다 PP 소재의 균질성이 우수함을 확인하였다. 와이블 척도 모수 측면에서는 상용 XLPE의 성능 이상인 소재는 PP2 소재로 확인하였다. Wettability 평가의 경우 모든 평가대상의 접촉각이 90°를 초과하여 소수성을 가지는 것을 확인하였다. 트래킹 시험의 경우 IEC 60112에서 권장하는 전극모양을 이용하였다. 시험 결과 모든 소재가 220 V에서 100번의 오손액 적하에서 pass 결과를 보이는 것을 확인하였다. 내트래킹 특성의 상대비교를 위해 프랙탈 차원을 이용하여 트래킹 시험 중의 방전을 분석했으며, 분석 결과 PP3, PP1, CC, PP2, OC순으로 내트래킹 특성이 우수함을 확인하였다.

트래킹 시험 중의 아킹 형태의 취득은 트래킹의 진전정도, 발생빈도 등을 단계별로 분석할 수 있으며 이를 통해 트래킹 현상의 이해를 증진할 수 있다. 아킹 모양을 프랙탈 차원을 분석함으로써 복잡도를 정량화하여 내트래킹 성능을 평가할 수 있다. 이를 통해 pass, fail의 이분법적 분류가 아닌 정량적인 수치를 통해 내트래킹 특성의 상대비교가 가능하다.

ORCID

Jang-Seob Lim

<https://orcid.org/0000-0001-9685-5609>

감사의 글

이 논문은 2025년도 국립목포해양대학교의 국립대학육성사업단의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] M. A. Afifi, A. H. Gad, and S. M. Elkhodary, *Proc. International Middle East Power Systems Conference (IEEE, Cairo, Egypt, 2019)*, pp. 1053–1056.
doi: <https://doi.org/10.1109/mepcon47431.2019.9008215>

- [2] Y. Damchi and J. Sadeh, *Proc. 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)* (IEEE, Shah Alam, Malaysia, 2010), pp. 59–63.
doi: <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2010.5559223>
- [3] B. Eliana, D. Ratri, S. H. O, Y. H. Park, and H. Kang, *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, **34**, 37 (2020).
doi: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2020.37.12.037>
- [4] Y. Zhou, S. Hu, C. Yuan, J. Hu, Q. Li, and J. He, *CSEE J. Power Energy Syst.*, **10**, 2208 (2024).
doi: <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.04740>
- [5] H. G. Karian, (Ed.), *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites, Revised and Expanded*, 2nd edn. (CRC Press, Boca Raton, USA, 2003).
doi: <https://doi.org/10.1201/9780203911808>
- [6] Wiley-Blackwell. *Electric Cables Handbook* (Wiley-Blackwell, Oxford, UK, 2008).
- [7] C. D. Green, A. S. Vaughan, G. C. Stevens, A. Pye, S. J. Sutton, T. Geussens, and M. J. Fairhurst, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **22**, 639 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2015.7076758>
- [8] J. B. Wareing, *Covered Conductor Systems for Distribution* (EATL Report, 2005), pp. 24–36.
- [9] M. Camalov, A. Orucov, A. Hashimov, O. Arian, and F. Akin, *Electr. Power Syst. Res.*, **223**, 109703 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109703>
- [10] T. Tanaka, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **9**, 704 (2002).
doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2002.1038658>
- [11] R. Förch, H. Schönherr, and A.T.A. Jenkins (Eds.), *Surface Design: Applications in Bioscience and Nanotechnology* (John Wiley & Sons, Germany, 2009).
doi: <https://doi.org/10.1002/9783527627240>
- [12] X. Zhang, F. Shi, J. Niu, Y. Jiang, and Z. Wang, *J. Mater. Chem.*, **18**, 621 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1039/b711226b>
- [13] M. T. Nazir, A. Khalid, S. Akram, P. Mishra, I. I. Kabir, G. H. Yeoh, B. T. Phung, and K. L. Wong, *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, **156**, 100757 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100757>
- [14] IEC 60587, *Electrical Insulating Materials Used under Severe Ambient Conditions—Test Methods for Evaluating Resistance to Tracking and Erosion*, 4th ed. (IEC, Geneva, Switzerland, 2022).
- [15] IEC 6011, *Method for the Determination of the Proof and the Comparative Tracking Indices of Solid Insulating Materials*, 5th ed. (IEC, Geneva, Switzerland, 2020).
- [16] Y. Liu, D. Zhang, H. Xu, S. M. Ale-emran, and B. X. Du, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **23**, 2102 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.7556484>
- [17] V. Rajini and K. Udaya Kumar, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, 3695 (2006).
doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/16/026>
- [18] B. X. Du and L. Gu, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **17**, 1922 (2010).
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5658247>
- [19] F. Atalar, *Electrica*, **23**, 666 (2023).
doi: <https://doi.org/10.5152/electrica.2023.23067>
- [20] H. Silau, N. B. Stabell, F. R. Petersen, M. Pham, L. Yu, and A. L. Skov, *Adv. Eng. Mater.*, **20**, 1800241 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adem.201800241>
- [21] M. T. Nazir, B. T. Phung, S. Li, S. Akram, M. A. Mehmood, G. H. Yeoh, and S. Hussain, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **30**, 14061 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01771-6>