

다중 진단센서를 이용한 몰드변압기 무정전진단 판정기법 개발 연구

배석명¹, 장용무^{1,2} , 김호진¹

¹ 한국에너지기술연구조합

² 가천대학교 전기공학과

A Study on the Development of an Uninterruptible Diagnosis Determination Method for Molded Transformers Using Multiple Diagnosis Sensors

Seok Myung Bae¹, Yong Moo Chang^{1,2}, and Hyo Jin Kim¹

¹ Korea Energy Technology Research Association, Seoul 05707, Korea

² Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

(Received April 29, 2025; Revised May 13, 2025; Accepted May 14, 2025)

Abstract: With the rapid development of digital technologies such as IoT, AI, and big data, electrical energy consumption is rapidly increasing. Electrical facilities that supply electrical energy are operated with high reliability and stability for end-of-life time. In addition, depending on the type of electrical load that consumes electrical energy in various forms, electrical insulation systems deteriorate due to electrical and thermal stress, which reduces electrical and mechanical insulation strength. Due to such continuous stress and electrical transient phenomena, electrical facilities may experience electrical accidents due to electrical insulation breakdown before the expected design lifetime. In addition, periodic inspections according to related regulations must be conducted to prevent unexpected electrical accidents, but this leads to problems in which the electrical facilities cannot be turned off. Therefore, it is believed that an uninterruptible diagnostic judgment technique that determines compliance with related regulations such as electrical facility technology standards, internal wiring regulations, and inspection regulations without turning off the electrical facilities and at the same time detects abnormal conditions of the facilities early, it is possible to prevent electrical accidents and improve the efficiency of electrical facilities. In this paper, we propose an uninterruptible power diagnosis judgment technique that can prevent or reduce electrical accidents in cast-iron transformers by applying judgment criteria of diagnostic sensors for various types of measurement parameters that can diagnose and evaluate the presence or absence of abnormalities in electrical equipment, including partial discharge, and AI algorithms learned from data of diagnostic sensors.

Keywords: Diagnosis, Uninterruptible, On-line monitoring, Molded transformer, Multiple diagnostic sensor

IoT, AI, 빅데이터와 같은 디지털 기술의 급속한 발전에 따라 전기에너지 소비는 점점 급증하고 있다. 전기에너지를 공급하는 전기설비는 장시간의 수명기간동안 높은 신

뢰성과 안정성으로 운전되고 있다. 그리고 다양한 형태로 전기 에너지를 소비하는 전기부하의 종류에 따라 전력설비에 전기적 스트레스와 열적 스트레스로 인한 전기적 절연 시스템의 열화가 발생하면서 전기적·기계적 절연강도가 감소한다. 이러한 지속적인 스트레스와 전기적인 과도 현상 등으로 인하여 전력설비는 예상되는 설계수명 이전에 전기적 절연파괴에 의한 전기사고가 발생할 수 있다. 그

✉ Yong Moo Chang; changym9166@gmail.com

Copyright ©2025 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.

리고 예상할 수 없는 전기사고를 방지하기 위하여 관련 규정에 따른 주기적인 점검을 실시해야 하지만, 이때는 전기설비를 정전할 수밖에 없는 문제가 발생된다. 그렇기 때문에 전기설비를 정전하지 않고 전기설비기술기준, 내선규정 및 검사규정 등의 관련 규정에 적합 여부를 판단함과 동시에 설비의 이상 상태를 조기에 발견하는 무정전진단 판정기법을 적용하여, 전기사고를 예방하고 전기설비의 효율성을 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 부분방전을 비롯하여 전기설비의 이상유무를 진단, 평가할 수 있는 여러 종류의 측정 파라미터에 대한 다양한 진단용 센서들의 판정기준과 진단 센서들의 데이터로 학습된 AI 알고리즘을 적용하여 몰드변압기 전기사고를 예방하거나 감소시킬 수 있는 무정전진단 판정기법을 제시하였다.

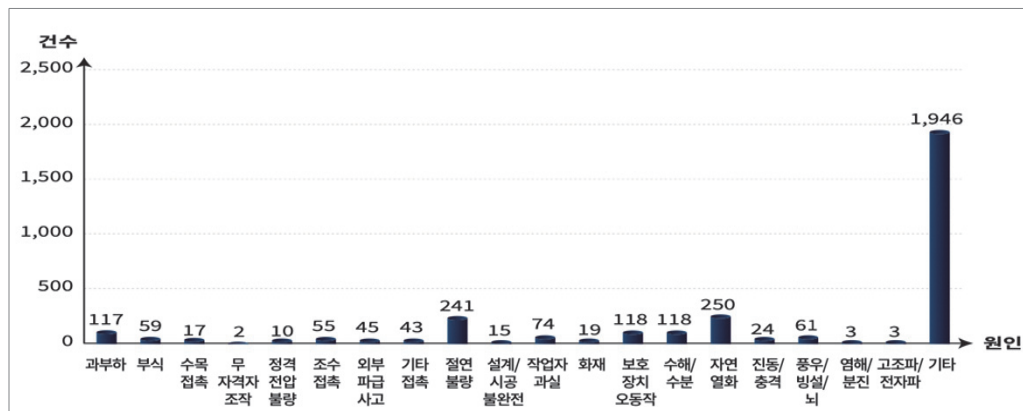
최근에 보고된 전기설비 사고 4,074건에 대하여 특고압 설비 1,630건, 고압설비 54건 저압설비 2,390건으로 분석된 기기별 설비사고에서 고압 설비는 개폐기 301건(18.5%), 변압기 218건(13.4%), 인입전선로 182건(11.2%), 변성기 162건(9.9%), 컷아웃스위치 102건(6.3%), 차단기류 100건(6.1%), 파워휴즈, 수배전반, 피뢰기 순으로 분석되고, 원인별 분석 결과는 자연열화(250건, 7.8%), 절연불량(241건, 7.5%)으로 가장 많이 나타나고 있으며, 보호장치 오작동(118건, 3.7%), 과부하(117건, 3.6%) 등이 뒤를 잇고 있다.

수용가에 전기에너지를 공급하고 있는 전력 설비인 몰드변압기는 장기간의 수명 운전 기간동안 운전전압과 여러가지 원인으로 인해 과도전압이 인가되면서 부분 방전, 절연재료 표면의 연면 방전, 서지전압 등과 같은 전기적 스트레스, 부하전류와 접점불량 등으로 인한 열적 스트레스를 비롯하여 철공진, 돌입전류 등으로 인한 기계적 스트레스와 기타 환경적인 스트레스가 가해지며 이들 스트레스

들로 인하여 절연시스템에 대한 절연 열화가 진행된다. 여러가지의 전력설비들 가운데 끊임없이 전력 에너지를 공급하면서 전기적 스트레스와 열적 스트레스를 가장 많이 받고 있는 몰드 변압기에서 발생하는 절연파괴 고장 메커니즘을 분석해 보면 수배전 계통에서 발생하는 이상전압에 의한 몰드 변압기 권선 표면의 지락으로 발생하는 절연파괴 고장, 변압기의 2차측 권선 단락으로 권선의 기계적 강도 저하, 절연물 균열 등으로 발생된 권선내 단락으로 인한 절연파괴 고장, 지속적인 과부하에 따른 변압기 권선 과열로 인한 에폭시 절연재료에 대한 보이드와 박리현상 발생 및 열적 열화, 부분방전과 권선간 단락에 의한 절연파괴 고장, 입출력 단자 또는 리드선의 표면 오손·흡습 등으로 발생하는 누전현상, 연면방전, 절연성능 저하로 발생하는 권선표면 지락현상에 의한 절연파괴 고장, 기타 단자 또는 리드선 등의 도체와 도체 사이의 접촉불량에 따른 접촉저항 상승으로 과열에 의한 도체 단선이 절연파괴 고장으로 이어지는 등과 같은 고장 메커니즘들이 있다.

이상과 같은 몰드변압기의 절연고장 원인들에 의해서 발생하는 이상현상들을 측정하는 센서들은 그림 1과 같다. 온도 측정센서는 과부하, 단락전류, 접촉불량 및 주위온도에 의해 발생하는 몰드변압기의 온도 상승을 측정, 음향 측정센서는 과전압, 접지불량, 고조파 등에 의한 철공진 현상의 이상 진동음과 외부 코로나 방전음을 측정, 진동 측정센서는 물리적 손상에 의해 발생하는 몰드변압기의 기계적 진동을 측정, 가스 측정센서는 물리적 손상, 철심 이상 및 오동작에 의해 발생하는 변압기에서 발생하는 가스를 측정, 전압 측정센서는 몰드변압기의 균열 · 방전흔적 등의 원인이 되는 개폐서지, 낙뢰서지 등과 같은 과도현상에 따른 이상 전압을 측정할 수 있다.

Table 1. Analysis of the causes of electrical equipment accidents.



이와 같은 다양한 몰드변압기의 고장 메카니즘, 이상현상 측정센서 등을 참고하여 무정전진단 현장실태조사표 작성하여 경기도 OO정수장 등 10개소의 무정전진단 현장을 방문하여 그림 2와 같은 부분방전 진단장치, 적외선 열화상 계측기, 정밀 전력분석계, 클램프식 접지저항계 등과 같은 무정전진단 계측기들과 측정 방법 등에 대한 현장실태 조사를 실시하였다. 또한 몰드 변압기에 대한 무정전진단

에 사용하고 있는 계측기들의 현장적용 실태를 분석해보면, 부분방전(PD) 측정은 몰드변압기 단자접속부, 지지애자 등 외부는 초고주파(UHF) 방식을 적용하고 있었으며, 기기 내부의 부분방전은 고주파 변류기(HFCT) 방식을 적용하고 있고, 판정기준은 측정장비에 따라서 패턴만으로 판정하거나, 크기와 패턴 복합으로 판정하였다. 적외선 열화상 측정은 단자 접속부, 지지애자, 기기 외함부의 온도

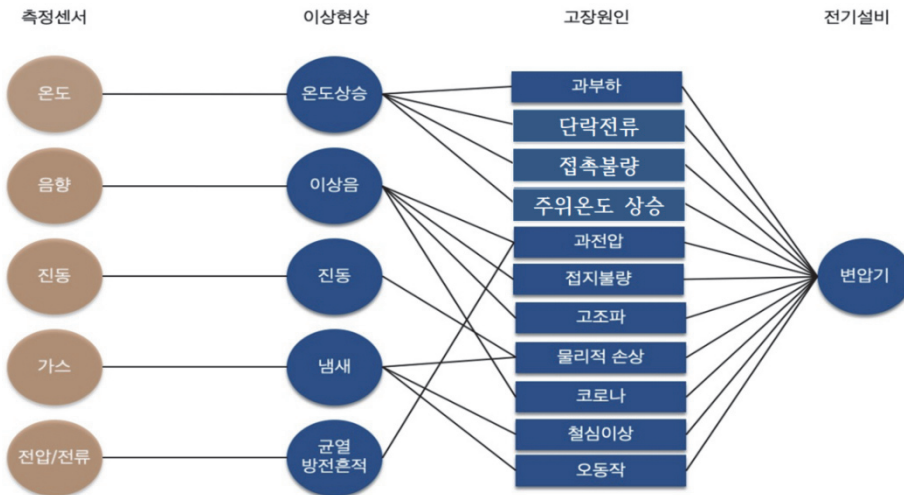


Fig. 1. Mold transformer abnormality measurement sensor.



Fig. 2. Uninterrupted diagnosis instruments.

Table 2. OO Water Purification Plant mold transformer uninterrupted diagnosis field survey form.

Diagnosis Type		Device	Method	Measuring valus	Decision criteria
Partial Discharge	UHF	PSDTech	PD quantity / PD pattern	30pC/None	100pC/PDorNo
	HFCT(earthline)	PSDTech	PD quantity / PD pattern	30pC/None	100pC/PDorNo
	TEV		PD quantity / PD pattern		
	UV		PD quantity / PD pattern		
IR Thermal Image measuring	Busbar coupler	FLUKE Ti-400	IR Thermography(°C)	2°C/30°C	3ph.relativebelow 5°C Max Temp. 60°C
	Main body		IR Thermography(°C)	2°C/30°C	3ph.relativebelow 5°C Max Temp. 60°C
Etc.		FLUKE1630-2FC	Earth ground clamp meter	0.5Ω	Less 10Ω

측정을 주로 하였으며, 판정은 측정부분의 온도(60°C 이하 적합, 60°C 초과 부적합)와 상간 온도차(5°C 이하 적합, 5°C 초과 부적합)으로 판정을 하였다. 정밀전력분석계는 고압 PT 2차측 전압, 고압 CT 2차측 전류를 측정하여 1차측으로 환산하여 다양한 값으로 변환하였으며, 3상 정밀 전압 및 전류 고정밀 측정, 고조파 분석, FFT 분석, 전압 및 전류 불균형 및 전력 및 기타 파생값을 측정하고 있었다.

현장 실태조사 분석 결과에 따라 몰드변압기 무정전진단 현장실태조사 결과로 무정전진단 판정기준에 적용할 항목으로 부분방전, 적외선열화상, 1차측 전압 및 전류, 2차측 전압 및 전류 등이 필요한 것으로 판단하였다. 이상과 같은 몰드변압기의 고장메카니즘, 이상현상 측정 센서 파악 및 무정전진단 현장실태조사 분석결과 등을 바탕으로 무정전진단 센서 종류 및 판정기준 초안을 작성하여 전문가(5명) 자문을 받아서 몰드변압기 무정전진단 판정기법에 활용할 수 있는 무정전 진단센서 선정기준과 판정기준을 수립하였다. 선정된 몰드변압기 무정전진단센서의 종류는 그림 3과 같으며 진단 범위는 부분방전(UHF PD) 센서가 접속단자·몰드권선 표면 부분방전 측정, 부분방전(HFCT PD) 센서는 기기 내부 부분방전 측정, 적외선열화상(IR CAM)센서는 접속단자·몰드권선 온도 측정, 권선온도 측정 센서는 기기 내부 온도 측정, 1차 및 2차측 전압·전류는 이상전압과 과부하 등 측정, 진동센서는 기기의 이상 진동을 측정한다. 그리고 몰드변압기 무정전진단 센서 선정을 바탕으로 전기설비기술기준, 내선규정 및 검사규정 등의 관련 규정을 참고하여 아래 표 3과 같이 판정기준을 수립하였다.

몰드변압기 무정전 진단센서들의 측정 결과들을 AI 알고리즘으로 분석하기 위한 무정전진단 AI 알고리즘의 단계별 항목은 1) 전기설비의 안전점검 데이터를 기반으로

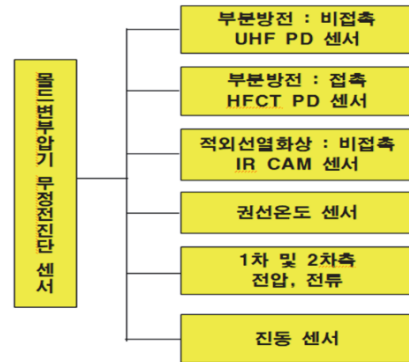


Fig. 3. Mold transformer uninterrupted diagnosis sensor.

전기설비의 이력(제조, 설치, 운영 등)을 파악하는 자료, 2) 무정전 진단을 위한 다수의 센서, 3) 설비별 고장 메커니즘 분석을 통해 설비에 나타나는 이상현상과 고장원인을 비교, 검토 자료, 4) 고장 메커니즘 분석을 통해 센서에서 나타나는 이상현상에 대한 설비점검 알림, 고장 원인 규명을 위한 고장 알고리즘 분석, AI 학습/진단/예측을 위한 알고리즘 및 전기 설비별 무정전진단 판정기준 자료와 같이 설정한다.

다음으로 무정전진단 AI 알고리즘에 대한 방법은 1) 분류된 비정상 개체의 특성에 따라 절연체 이상, 부유전극 이상, 자유도체 이상, 노이즈 등의 상세 분류하여 전기설비의 이상현상과 비정상 개체의 관계를 정의하고, 2) 동일 이상 현상에서 비슷한 속성값은 비슷한 의미를 갖는 분포 가설(distribution hypothesis)이라는 가정하에 비정형 공간에서 비정상 개체의 속성값을 분산표현(distributed representation)하는 알고리즘 적용(그림 4 참조)과 자료 개체가 갖는 속성의 분산표현을 통해 이상현상과의 상관

Table 3. Example of mold transformer uninterrupted diagnosis judgment criteria.

진단 종류	진단 내용		위험 순위	기준값	측정값	판정	비고
	진단 항목	측정 부위					
무정전 진단	Partial Discharges (UHF, VHF, AE 중 선택) 비접촉 [KESC I 440.1 참조]	단자 접속부, 에폭시, 애자 표면	3	100pC	120pC 이상	부적합	
					120pC 미만 100pC 이상	부적합 (요주의)	
					100pC 미만	적합	
					2회 이상 발생/1H	부적합	
					1회 발생/1H	요주의	
					2회 이상 발생/1H	부적합	
	부분방전 (HFCT) 접촉 [KESC I 440.1 참조]	내부 권선 및 절연물	1	100pC	120pC 이상	부적합	
					120pC 미만 100pC 이상	부적합 (요주의)	
					100pC 미만	적합	
					2회 이상 발생/1H	부적합	
					1회 발생/1H	요주의	
					2회 이상 발생/1H	부적합	
					1회 발생/1H	요주의	
					2회 이상 발생/1H	부적합	
					1회 발생/1H	요주의	
					2회 이상 발생/1H	부적합	
					1회 발생/1H	요주의	
					2회 이상 발생/1H	부적합	
					1회 발생/1H	요주의	
				적외선열화상 (IR) 비접촉 [전기안전관리자 직무제3조참조]	철심부	2	100°C 미만
	본체 (에폭시)	120°C 미만 100°C 이상	부적합 (요주의)				
100°C 미만		적합					
70°C 미만 (표면)		80°C 이상	부적합				
	80°C 미만 70°C 이상	부적합 (요주의)					
	70°C 미만	적합					
5°C 이하 (3상 비교)	5°C 초과	부적합					
	5°C 이하	적합					
진동	본체	7		있음	부적합 (요주의)		
				없음	적합		
1차, 2차 전압 [전기안전관리자 직무제3조참조]	변압기 1차 및 2차 전압	5	±10%	±10% 이상	부적합 (요주의)		
				±10% 미만	적합		
1차, 2차 전류 [전기안전관리자 직무제3조참조]	변압기 용량	6	80%	100% 이상	부적합		
				100% 미만 80% 이상	요주의		
				80% 미만	적합		

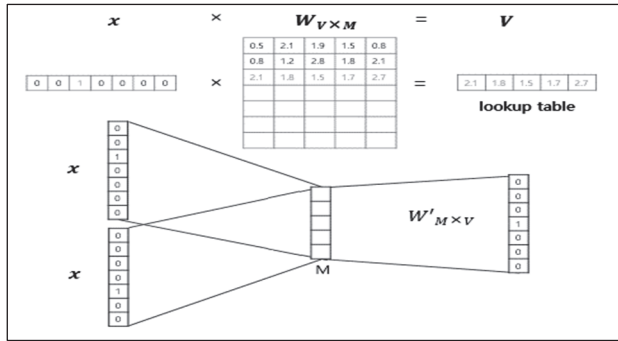


Fig. 4. Distributed expression example.

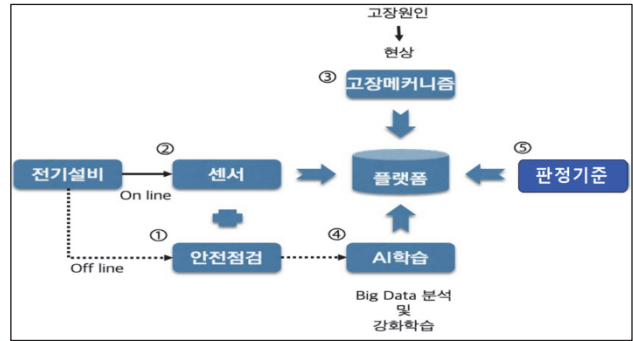


Fig. 6. Mold transformer uninterrupted diagnosis judgment technique.

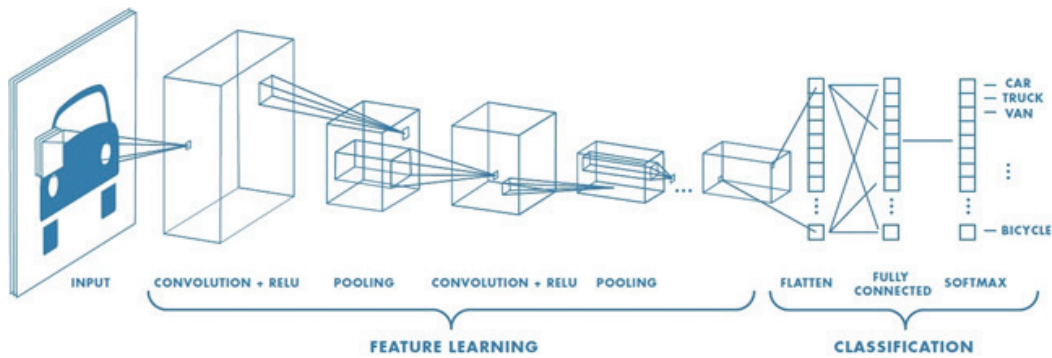


Fig. 5. Convolutional neural network example.

여부를 모델링한 다음에, 3) 이상현상과 강한 상관관계를 보이는 특성 속성에 대하여 고장의 원인이 되는 의미를 정의하고, 해당 속성을 지속적 감시를 통해 설비를 실시간으로 진단 분석을 정의한다.

마지막으로 몰드변압기 무정전진단 모델링 분석은 1) 변압기 고장예측을 위해 변압기의 운영조건, 사용 가능한 데이터, 예측 성능의 요구수준 등을 고려하며, 장단기 메모리(Long Short-Term Memory) 알고리즘 사용을 고려하고 2) LSTM은 순환신경망(RNN)의 한 종류(그림 5 참조)로, 시계열 데이터의 장기적인 의존성을 학습하고 기억하는 능력이 강화된 알고리즘 구성하여, 3) 변압기의 운영데이터나 센서 데이터와 같은 시계열 데이터의 패턴을 학습하여 고장예측에 활용하고, 4) 학습 및 역전파 알고리즘은 컨볼루션 신경망에 적용하여 학습하며, 학습 데이터와 정답을 사용하여 손실함수를 최소화하는 방향으로 가중치와 편향을 조정한다.

결론적으로 본 논문에서 제안하는 몰드변압기 무정전진단 판정기법은 다수의 무정전진단 센서(부분방전(UHF), 부분방전(HFCT), 적외선 열화상, 권선온도, 1차 및 2차측

전압, 전류 등)를 이용하여 실시간 측정된 값을 그림 6의 플랫폼에 전달하여 고장 메커니즘, 다수 센서의 판정기준 및 학습된 AI 알고리즘에 따른 분석 결과들을 복합적으로 비교 분석하여 적합, 주의, 부적합으로 이상유무를 판정하는 기법(그림 6 참조)이다. 예를 들면 정상 측정값은 AI 알고리즘으로 전기설비별 특성 경향 분석을 한 후 통합서버에 저장하고, 무정전 진단센서 한 개에서 부적합 값이 측정되어 플랫폼에 전달되면 다른 무정전 진단센서의 경향 분석데이터와 복합적으로 비교 분석하여 순간적인 발생 값인지 또는 고장으로 진단되는 값인지를 정확히 판정할 수 있는 판정기법으로 현재 여러 대용량 수용가에서 현장설치된 무정전 진단 시스템의 진단 센서들의 측정 결과들이 수립되고 있고 있기 때문에 이들에 대한 판정기법 적용 결과 또한 발표될 예정이다.

ORCID

Yong Moo Chang

<https://orcid.org/0009-0008-1231-5866>

감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 지원(과제번호 20125910100080)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] J. Y. Lee, I. R. Noh, and I. M. Lee, *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, **36**, 36 (2022).
doi: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2022.36.6.036>
- [2] J. Lee, G. S. Choi, and E. S. Lee, *Proc. Fall Conf. for Society C in KIEE* (1999), pp. 1048–1050.
- [3] Y. G. Jeon and J. H. Sun, *Proceedings of KIEE*, **38**, 21 (1989).
- [4] J. Y. Shin and J. W. Hong, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 85 (2015).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.2.85>
- [5] J. J. Park, M. H. Woo, J. Y. Lee, and D. H. Hwang, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **17**, 297 (2016).
doi: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2016.17.5.297>
- [6] G. Y. Lee, S. W. Kim, and G. S. Kil, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 594 (2022).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.6.8>
- [7] S. W. Lee, J. W. Choe, I. S. Kwon, D. E. Kim, and H. J. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 286 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.3.7>
- [8] C. Y. Lee, H. G. Choe, and J. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 56 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.1.7>