

## 몰드 변압기의 절연 진단을 위한 로고우스키형 부분방전 센서의 설계 및 제작

이경렬<sup>1</sup>, 김성욱<sup>2</sup>, 길경석<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> 한국수력원자력(주) 원전수출처

<sup>2</sup> 신라대학교 스마트전기공학과

<sup>3</sup> 한국해양대학교 전기전자공학과

### Design and Fabrication of Rogowski-type Partial Discharge Sensor for Insulation Diagnosis of Cast-Resin Transformers

Gyeong-Yeol Lee<sup>1</sup>, Sung-Wook Kim<sup>2</sup>, and Gyung-Suk Kil<sup>3</sup>

<sup>1</sup> New Nuclear Business Department, Korea Hydro & Nuclear Power Co. Ltd., Gyeongju 38120, Korea

<sup>2</sup> Division of Smart Electrical & Electronic Engineering, Silla University, Busan 46958, Korea

<sup>3</sup> Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received August 25; Revised September 1, 2022; Accepted September 1, 2022)

**Abstract:** Cast-resin transformers are widely installed in various electrical power systems because of their low operating cost and low influence on external environmental factors. However, when they have an internal defect during the manufacturing process or operation, a partial discharge (PD) occurs, and eventually destroys the insulation. In this paper, a Rogowski-type PD sensor was studied to replace commercial PD sensors used for the insulation diagnosis of power apparatus. The proposed PD sensor was manufactured with four different types of PCB-based winding structures, and it was analyzed in terms of the detection characteristics for standard calibration pulses and the changes of the output voltage according to the distance. The output increased linearly in accordance with the applied discharge amount. It was confirmed that the hexagon structure sensor had the highest sensitivity, because the winding cross-sectional area of the sensor was larger than others. In addition, as the distance from the defect increased, the output voltage of the sensors decreased by 7.32% on average. It was also confirmed that the attenuation rate according to the distance decreased as the input discharge amount increased. For the application of this new type sensor, PD electrode system was designed to simulate the void defect. Waveforms and PRPD patterns measured by the proposed PD sensors at DIV and 120% of DIV were the same as the results measured by MPD 600 based on IEC 60270. The proposed PD sensors can be installed on the inner wall of the transformer tank by coating its surfaces with a non-conductive material; therefore, it is possible to detect internal defects more effectively at a closer distance from the defect than the conventional sensors.

**Keywords:** Rogowski, Partial discharge, Cast-resin, Transformer, Internal defect

---

✉ Gyung-Suk Kil; [kilgs@kmou.ac.kr](mailto:kilgs@kmou.ac.kr)

Copyright ©2022 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.

### 1. 서론

전력용 변압기는 전력을 수용가에 안정적으로 공급하기 위해 사용되는 필수적인 설비이다. 특히, 몰드 변압기는 간단한 설치와 저렴한 유지비용, 습기, 분진 등 외부 환경요소에 크게 영향을 받지 않아 철도시설, 아파트, 공장 등과 같은 중전압수용가의 전력 계통에 많이 설치되고 있다 [1,2].

산업통상자원부 발표자료에 따르면 매년 변압기 사고 발생 건수가 매년 증가하고 있으며, 내부 부품 또는 재료의 열화로 인해 절연성능이 저하됨으로써 발생한다. 변압기 내부 절연열화는 절연파괴로 이어지기 때문에 정전사고는 물론 막대한 인명·재산피해를 발생시킬 수 있다 [3-6]. 몰드 변압기의 내부절연열화는 대부분 초기단계에 부분방전(partial discharge, PD)을 수반하기 때문에 PD 신호를 검출함으로써 절연파괴 사고를 예방할 수 있다. 이러한 PD 신호는 커플링 커패시터, 음향 방출(acoustic emission, AE) 센서, 고주파 변류(high-frequency current transformer, HFCT) 센서, 초고주파(ultra-high frequency, UHF) 센서 등으로 측정할 수 있으며, 측정 대상에 따라 적절한 방법을 적용할 수 있다 [7-9]. 커플링 커패시터를 이용한 PD 측정은 몰드 변압기의 전원부에 직접 설치하여 신호를 검출하는 방식으로써 비교적 낮은 크기의 방전펄스까지 측정가능하다는 장점이 있다. 그러나 정격 전압이 높은 몰드 변압기를 진단하기 위해서는 커플링 커패시터의 절연 내력도 높아져야 하고 활선 진단이 불가능하다는 단점이 있다 [10,11]. AE 센서를 이용한 PD 측정은 유입변압기의 온라인 진단에 많이 적용되고 있지만, 몰드 변압기의 절연물에 설치하기 어려운 한계가 있다 [12-14]. HFCT 센서는 접지선 설치하여 대지로 흐르는 PD 펄스를 측정하는 방식이지만 외부 노이즈 제거를 위한 별도 신호처리 회로기술이 필요하다 [15,16]. UHF 센서는 300 M ~ 3 GHz의 높은 주파수 대역을 검출할 수 있기에 외부잡음에 대한 적은 영향을 가지고 있으며, 활선진단(on-line)이 가능하여 다양한 전력기기에 설치되고 있다. 하지만, 변압기의 복잡한 구조와 두꺼운 철제 외함으로 인해 PD 신호가 감쇠 및 반사되어 정확한 측정이 어렵다는 단점이 있다 [15,17-19]. 특히, AE 센서는 측정감도가 낮아 결함초기단계의 낮은 PD신호를 검출하기 어렵고 UHF 센서는 고가의 제품 가격으로 인해 수용가에서는 적극적인 설치가 어렵다는 한계가 있다.

본 논문에서는 몰드 변압기의 절연 진단을 위한 PCB 타입의 로고우스키형 PD센서를 제안하였다. PD 전극계를 제작하여 표준 펄스에 대한 권선 구조별 로고우스키형 PD센

서의 감도를 확인하였으며, 전용받침대를 사용하여 거리별 PD센서의 출력 전압의 변화를 분석하였다. 제안된 PD 센서를 실제 보이드 결함에 적용하여 고압 인가 시 발생하는 PD 신호를 측정하여 검출특성을 평가하였다.

### 2. 로고우스키형 부분방전 센서의 원리

로고우스키형 PD센서는 공심 코어에 권선을 감은 형태이며, 검출 원리를 그림 1(a)에 나타내었다 [14]. 몰드 변압기의 내부결함에서 PD가 발생하면 결함 내의 미소공간에서 PD전류가 흐르고, 이때 암페어의 법칙에 따라 주위에 자기장이 형성된다. 로고우스키형 PD센서에 쇄교되어 페러데이 법칙에 따라 유기된 전압으로 측정함으로써 신호를 검출할 수 있다 [22]. 로고우스키 구조를 이용한 PD센서는 내부 결함에서 발생된 PD전류에 의한 고주파수 대역의 자기장(magnetic field)을 검출할 수 있는 것이 확인되

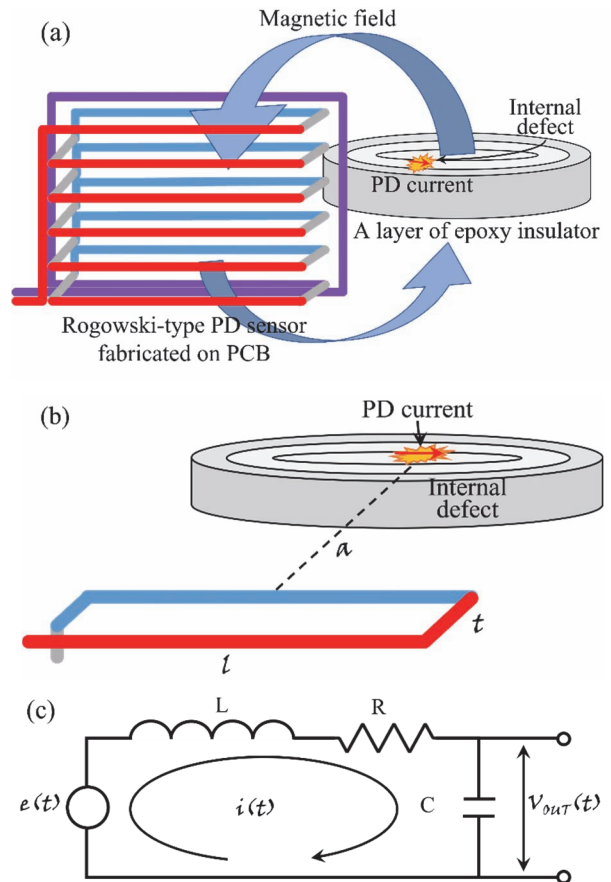


Fig. 1. Rogowski-type PD sensor. (a) schematic diagram, (b) geometry configuration of single coil, and (c) equivalent circuit.

었다 [20,21]. 로고우스키 권선에 쇄교된 자기장에 의해 유기된 전압을 측정함으로써 전력기기의 상태를 감시할 수 있다.

그림 1(a)는 에폭시 보이드 결합에서 발생된 PD 신호의 검출원리를 나타낸 것이다. 결합 부위의 방전 전하량이  $Q$  일 때 PD전류  $I_{PD}(t)$ 는 식 (1)과 같다. PD센서의 권선구조에 쇄교되는 자속  $\varphi$ 는 식 (2)로 계산된다. 이때  $a$ 는 결합과 센서 권선 간의 거리,  $l$ 은 권선구조의 가로길이,  $t$ 는 PCB 두께이다.

$$\varphi = \int_a^{a+t} \left[ \left( \frac{\mu_0 \mu_r I_{PD}(t)}{2\pi x} \right) dx \right] \times l = \frac{\mu_0 \mu_r I_{PD}(t) l}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{t}{a} \right) \quad (1)$$

$$e(t) = N \frac{d\varphi}{dt} = N \frac{\mu l}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{t}{a} \right) \frac{dI_{PD}(t)}{dt} \quad (2)$$

따라서 PD센서에 유도된 전압  $e(t)$ 는 식 (3)과 같으며 [23,24], 여기서  $\varphi$ 은 권선수이다.

$$V_{out}(t) = e(t) - L \frac{di(t)}{dt} - Ri(t) \quad (3)$$

PD센서에 유도된 전압은 권선수가 많을수록, 권선구조의 가로길이와 두께가 커질수록, 결합과 센서 간 거리가 가까울수록 커지는 것을 알 수 있다.

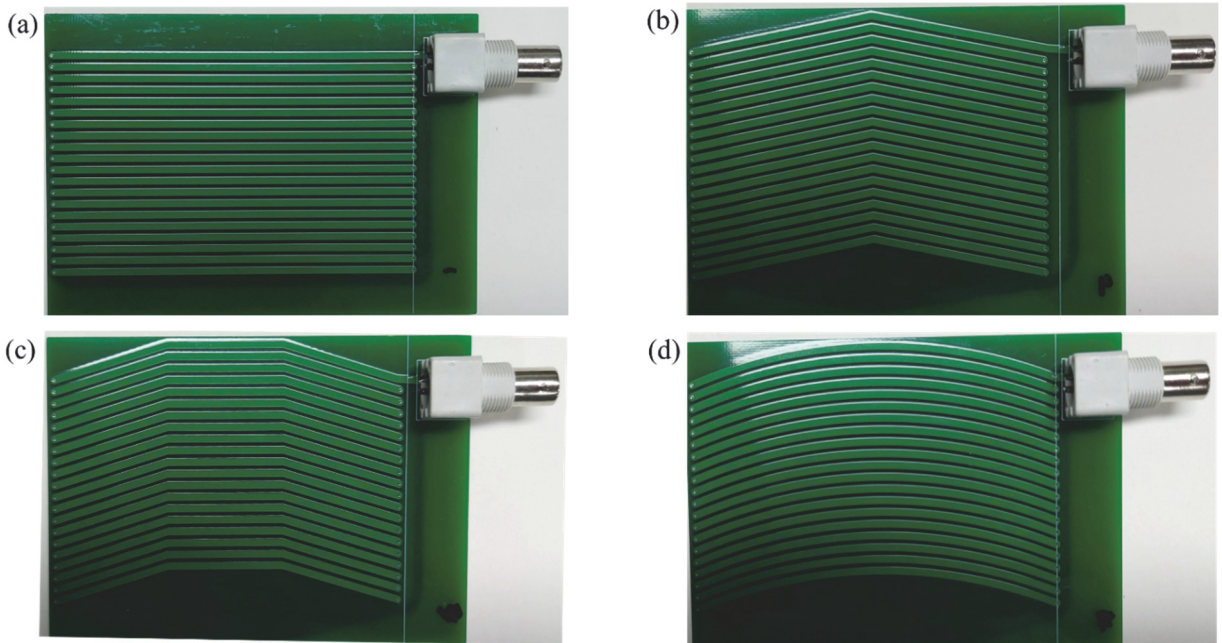
PD센서의 출력전압  $V_{out}(t)$ 는 그림 1(c)에 나타난 로고우스키형 PD센서의 등가 회로와 같이 권선에 유도된 전압

$e(t)$ 에서 권선의 저항  $R$ 과 인덕턴스  $L$ 에 의한 전압강하가 되며, 식 (3)과 같다 [25].

### 3. 설계 및 제작

#### 3.1 로고우스키형 부분방전센서

기존 상용 중인 몰드 변압기의 PD 검출 센서를 대체하기 위해 PCB 기반의 로고우스키형 PD센서를 제안하였다. 제안된 PD센서는 일반적인 로고우스키형의 측정 대상을 감싸는 형태가 아닌 일정 거리에서 PD전류에 의해 유기된 방사 전자파를 측정하는 새로운 방식을 적용하였다. 또한, 기존 센서에 비해 낮은 생산 단가, 좋은 선형성, 높은 감도를 가지고 있으며, 비전도성 물질이 코팅된 PCB로 제작되었기에 변압기 외함의 안쪽에 설치할 수 있어 에폭시 절연 물로부터 인접한 거리에서 절연 진단이 가능하다. 그림 1(a)에서 보라색 권선은 리턴 코일(Return Coil)로, 센서에 수평방향으로 쇄교되는 자기장과 외부 자계 노이즈의 영향을 줄이기 위해 설계되었다. 권선구조별 측정감도를 분석하기 위해 그림 2와 같이 Rectangle, Diamond, Hexagon, Ellipse 등 4가지 권선구조로 제작하였으며, 권선의 총 길이, 굵기, 간격 및 PCB 크기, 두께는 모두 동일하게 제작하였으며 설계요소는 표 1에 나타내었다. 로고우스키형 PD



**Fig. 2.** Four different Rogowski-type PD sensors. (a) rectangle, (b) diamond, (c) hexagon, and (d) ellipse.

**Table 1.** Geometrical parameters of four different Rogowski-type PD sensors.

| Geometrical parameters      | Value        |
|-----------------------------|--------------|
| Number of turns             | 20 turns     |
| Width of conductor line     | 2 mm         |
| Distance between conductors | 1 mm         |
| Size of PCB (W×H)           | 120 mm×80 mm |
| Thickness of PCB            | 1.6 mm       |

센서의 출력단자에는 50 Ω의 BNC를 설치하여 동축케이블을 연결할 수 있도록 하였다.

### 3.2 실험계

PD 센서의 유효성 검증의 수단으로, 몰드 변압기에서 발생하는 PD를 모의하기 위해 보이드 결합의 전극계를 제작하고, PD 측정시스템을 구축하였다. 보이드(void) 시편은 에폭시 제작과정에서 주사기를 이용한 공기주입 방식으로 제작하였으며, 직경은 5.2 mm이다. 또한, PD 전극계는 텅스텐-구리 합금(tungsten-copper alloy) 재질의 지름 35 mm, 두께 20 mm 평판-평판 전극으로 제작하였으며, 고압 인가부에 전계 집중현상을 방지하기 위한 직경 25 mm의 황동 금구를 설치하였다. 로고우스키형 PD센서의 측정 감도와 거리에 대한 의존성을 분석하기 위해 결합원으로 부터 100 ~ 200 mm까지 20 mm 간격으로 PD센서를 설치할 수 있는 전용받침대를 제작하였다. 에폭시 보이드 결합 시편과 PD 전극계, 전용받침대를 그림 3에 각각 나타내었다.

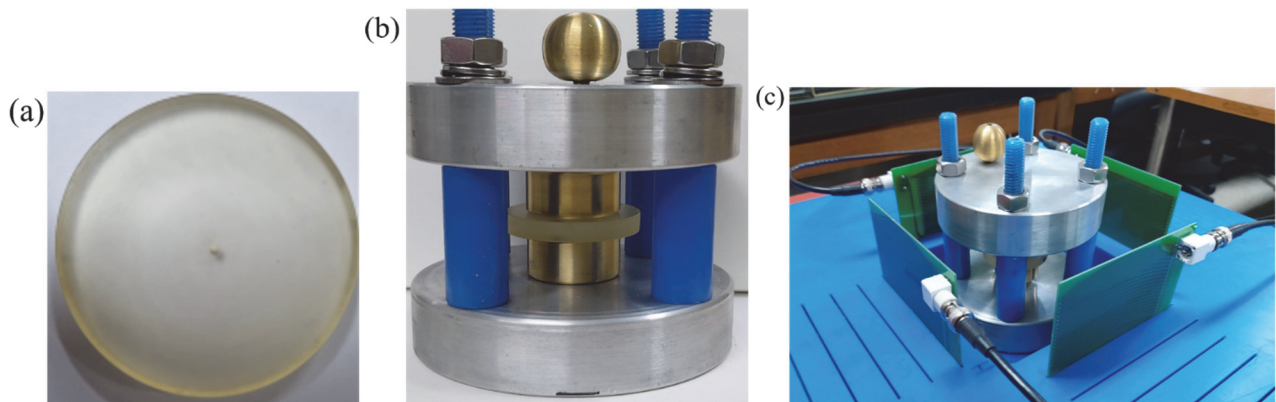
PD 신호에 대한 로고우스키형 PD센서의 권선 구조별 측정 감도와 거리에 대한 출력을 분석하기 위해 그림 4와 같은 실험계를 구성하였다. 표준 펄스 발생장치(CAL542, OMICRON, Austria)로 PD 전극계에 50 ~ 1,000 pC을 인가하여 측정하였다. 이때 권선 구조에 대한 측정 감도는 결합원에서 100 mm 거리에 로고우스키형 PD센서 4종을 설치하여 출력전압을 검출하였고, 거리에 따른 측정 감도의 변화는 20 mm씩 이동시키며 측정하였다. PD센서 출력은 10 GS/s의 샘플링 속도를 가진 디지털 오실로스코프(DSO, DPO 5204B, Tektronix, USA)로 검출하였으며, 외부 영향을 최소화시키기 위해 1분간 안정화 후 측정된 값을 사용하였다.

최대 출력전압 20 kV의 유입변압기로 고압을 인가하여 실제 보이드 시편에서 발생된 PD 신호를 로고우스키형 PD 센서로 측정하여 전압과 파형을 평가하였다. 로고우스키형 PD센서의 측정값은 방전개시전압(Discharge inception voltage, DIV)에서 2 nF의 커플링 커패시터(MCC 117-C, OMICRON, Austria)와 PD 측정프로그램(MPD 600, OMICRON, Austria)를 사용하여 IEC 60270에 따른 전기적 검출법을 기준으로 측정 및 분석하였다. 통상적으로 전압 변동률은 110~120%로, 이를 고려하여 DIV의 120%에서도 측정하였다. 실험계의 외부 노이즈는 3 pC이었다.

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 검출 특성

PCB 기반의 얇은 평판구조로 제작된 4가지 권선 구조의 로고우스키형 PD센서 출력 전압의 선형성을 평가하기 위



**Fig. 3.** PD electrode system. (a) void specimen, (b) electrode system, and (c) electrode system with stand.

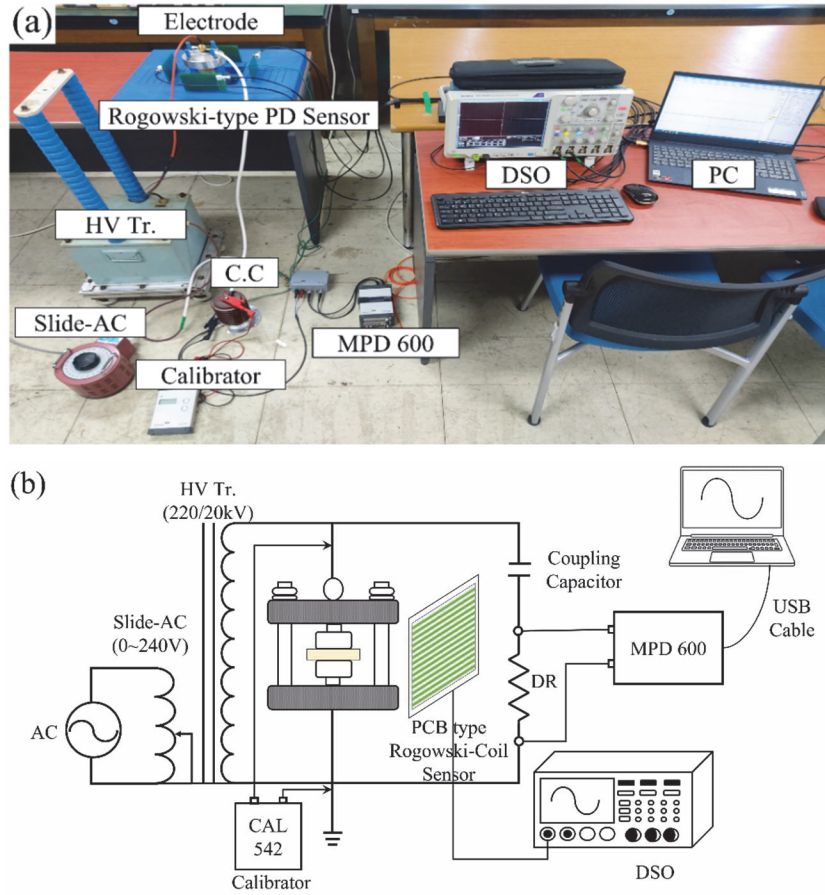


Fig. 4. Experimental setup. (a) Photograph and (b) configuration.

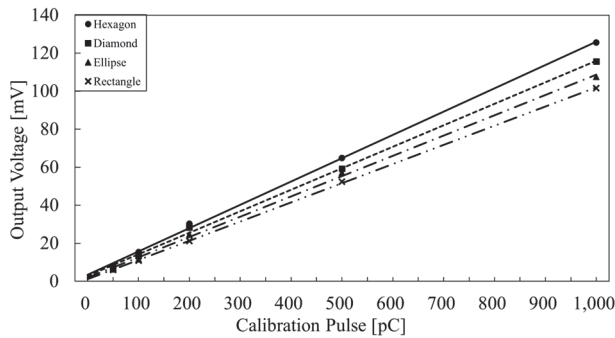


Fig. 5. The output of Rogowski-type PD sensors in accordance with PD signals.

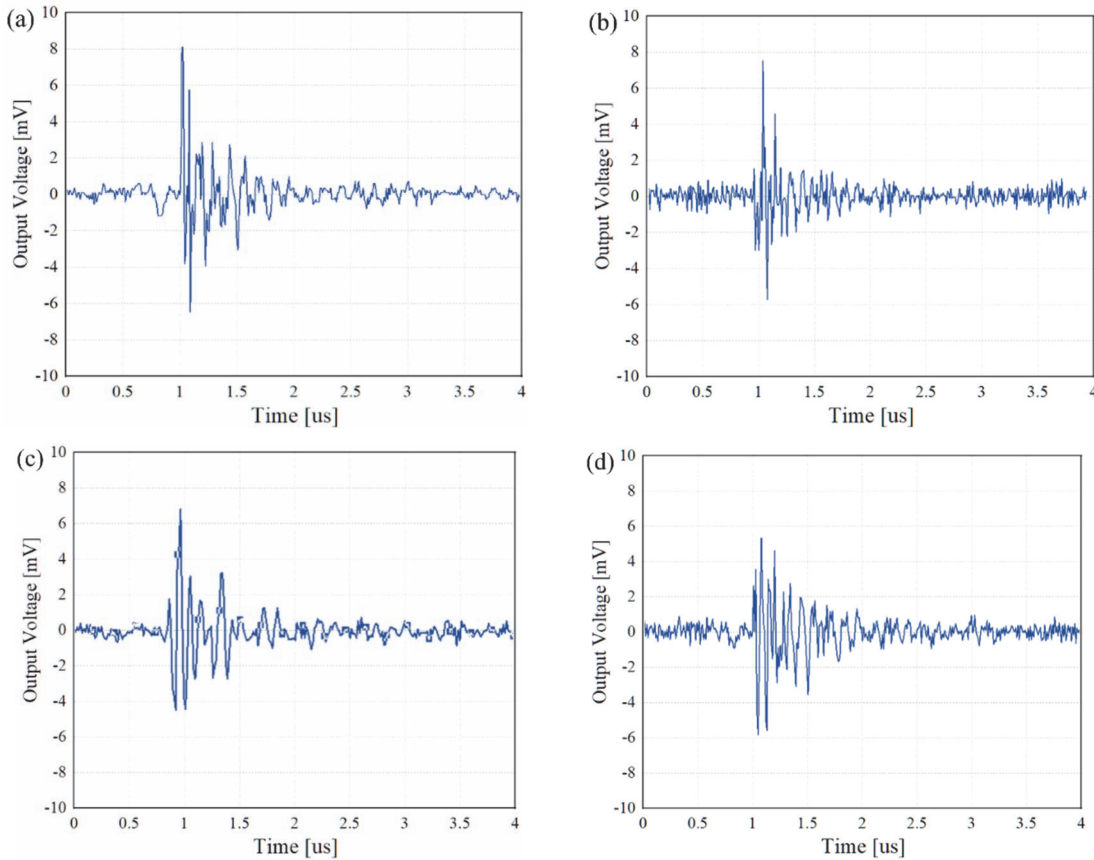
해 에폭시 보이드 시편 중앙부터 100 mm 거리에 PD센서를 설치한 후 표준 펄스를 50~1,000 pC까지 인가하였다.

그림 5는 각 권선 구조의 표준 펄스에 대한 PD센서의 출력전압을 나타낸 그래프이며, 그림 6은 표준 펄스 50 pC를 인가하였을 때 권선 구조별 PD센서의 출력 파형 예시

이다. PD센서의 출력은 4가지 권선구조 모두 인가된 펄스가 커질수록 검출되는 전압이 선형적으로 증가하였으며, Hexagon 권선구조가 가장 우수한 출력감도를 가진 것이 확인되었다. 그 이유는 식 (2)과 (3)에 따라 권선구조 단면적이 넓을수록 PD센서에 채교 자속이 많아져 PD센서에 유기된 전압이 커지기 때문으로 사료된다. 다만 Hexagon 구조의 단면적이 Diamond, Ellipse, Rectangle 보다 각각 약 1.34배, 1.67배, 3.86배로 넓지만, 실제 출력은 표준 펄스 50 pC기준으로 1.14배, 1.24배, 1.30배로 검출되었는데, 이는 PD센서의 권선 인덕턴스와 저항의 영향으로 분석된다.

#### 4.2 거리 의존성

몰드 변압기의 정밀진단을 위해서는 센서를 측정 대상에 인접하게 설치해야 하나, 절연 문제로 인해 권선과 철심 등으로부터 일정 거리에 설치되고 있다. 따라서 로고우스



**Fig. 6.** Examples of output waveform of 50 pC. (a) hexagon, (b) diamond, (c) ellipse, and (d) rectangle.

기형 PD센서의 거리에 따른 출력 변화를 확인하기 위해 100~200 mm에서의 표준 펄스 50~1,000 pC에 대한 출력 전압을 확인하였다.

그림 7은 50 pC, 200 pC, 500 pC, 1,000 pC을 인가하였을 때 거리별 출력전압을 나타낸 그래프이다. 표준 펄스 50 pC 인가 기준으로, PD센서의 출력전압이 30% 이상 감소된 거리는 hexagon과 rectangle 구조는 180 mm, diamond와 ellipse 구조는 약 190 mm였다. 또한 각 권선 구조의 100 mm에서의 전압 대비 200 mm에서의 전압 감소율은 hexagon, diamond, ellipse, rectangle 순서로 각각 33.1%, 31.4%, 30.4%, 29.8%로 확인되었다. 반면, 방전 전하량의 크기가 클수록 거리에 따른 출력 전압의 감소율이 낮아지는 것으로 확인되었다.

### 4.3 적용 평가

시제작한 로고우스키형 PD센서의 성능을 평가하기 위하여 그림 4와 같은 실험계를 구축하였으며, 실제 고압을 인가하였을 때 에폭시 보이드 결함에서 발생하는 실제 PD

신호의 방전 전하량과 패턴을 IEC 60270 기반 MPD 600으로 검출된 결과를 기준으로 비교하였다. PD 신호는 커플링 커패시터와 로고우스키형 PD센서를 사용하여 1분 동안 동시에 측정하였으며, DIV와 계통의 전압변동률을 고려한 DIV의 1.2배에서도 방전 전하량과 phase resolved partial discharge (PRPD) 패턴을 측정하여 비교하였다. PD센서는 높은 측정 감도를 가진 Hexagon 구조를 사용하였으며, 보이드 결함으로부터 100 mm에 설치하여 센서의 출력과 패턴을 확인하였다.

보이드 결함의 DIV는 8.5 kV이었으며, 이때 커플링 커패시터로 측정된 평균 방전 전하량은 49 pC, 로고우스키형 PD센서에서 검출된 평균 전압은 8.4 mV이었다. DSO로 검출된 PRPD pattern은 정극성에서 14°~88°, 부극성에서 191°~286°로 MPD600의 측정 결과와 유사한 범위에서 검출되었다. 또한 DIV의 1.2배에서는 평균 방전 전하량이 76 pC, 평균 전압은 12.6 mV로 확인되었다. 그림 8과 9는 각각 보이드 시편의 DIV와 DIV의 1.2배에서 MPD 600와 DSO로 검출한 PRPD 패턴이다.

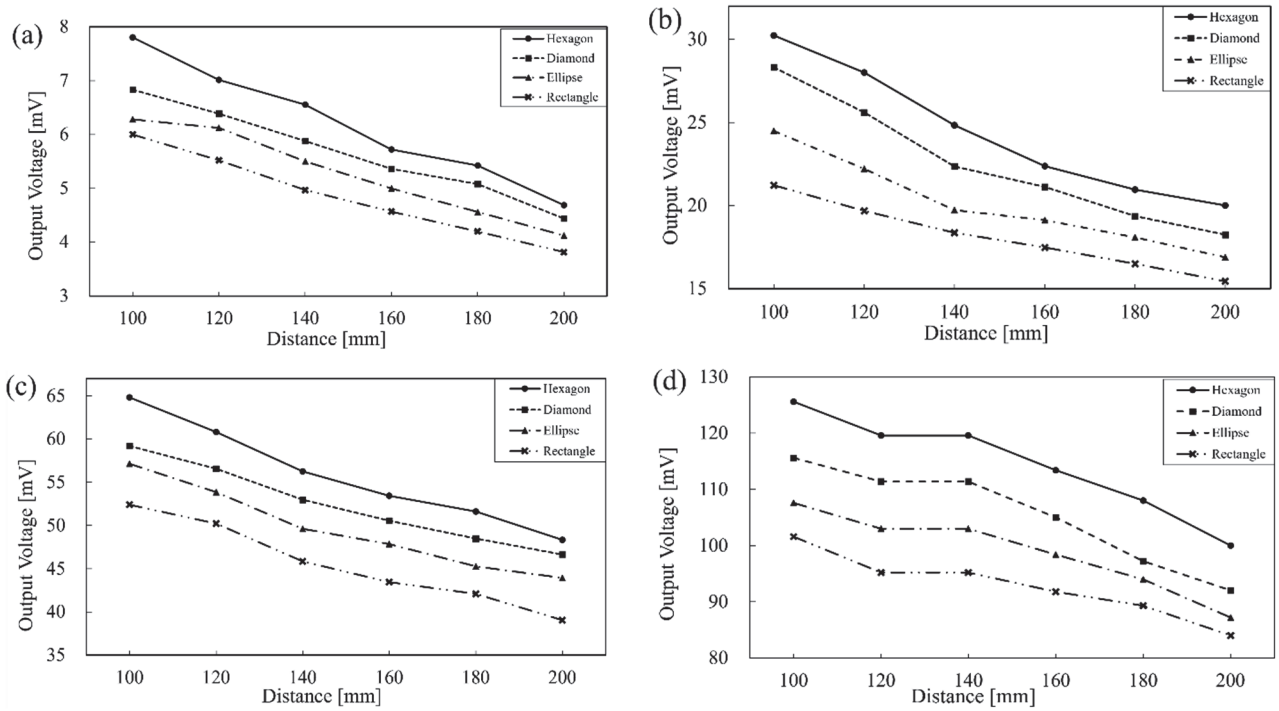


Fig. 7. Distance dependence of Rogowski-type PD sensors at (a) 50 pC, (b) 200 pC, (c) 500 pC, and (d) 1,000 pC.

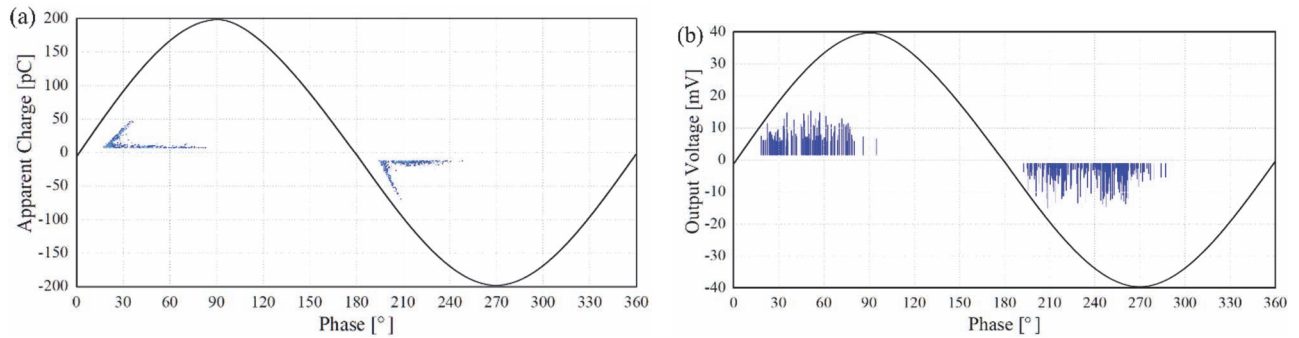


Fig. 8. PRPD patterns at DIV (a) MPD 600 and (b) DSO.

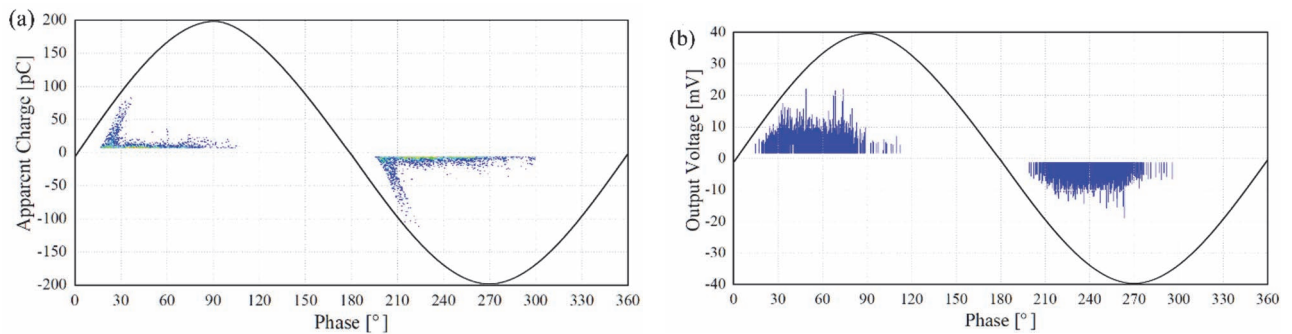


Fig. 9. PRPD patterns at 120% of DIV (a) MPD 600 and (b) DSO.

### 5. 결론

본 논문에서는 기존 몰드 변압기용 PD센서를 대체하기 위해 PCB 기반의 로고우스키형 PD센서에 대한 연구를 수행하였다. Hexagon 권선 구조는 표준 펄스에 대한 출력 전압의 비율이 Diamond, Ellipse, Rectangle 구조보다 각각 10.89%, 10.02%, 8.37% 높게 검출되어 가장 우수한 측정감도를 보였다. 이는 센서의 권선 단면적이 넓어지면 권선 구조에 쇄교되는 PD전류에 의한 자속이 증가하여 센서에 더 큰 전압이 유기되기 때문이다. 또한 PD센서가 결함원으로부터 20 mm씩 멀어질 때마다 출력전압은 평균적으로 7.32%씩 감소하였는데 결함원과 센서 간의 간격이 멀어질수록 권선에 쇄교되는 자속이 줄어들어 출력 전압이 낮아진 것으로 분석된다. 또한, 인가된 전하량이 증가할수록 거리에 따른 감쇄율이 낮아지는 것을 확인하였다. 제안된 PD센서로 실제 에폭시 보이드 결함 시편에 고압을 인가하여 DIV와 DIV의 120%에서 측정된 센서 전압은 표준 펄스를 이용한 측정 결과와 유사하였으며, 이때의 PRPD 패턴은 각각 IEC 60270법으로 측정된 결과와 동일하였다.

또한, 제안된 PD센서는 비전도성물질로 코팅되어, 변압기 금속 외함의 내벽에 설치 가능하여 기존의 센서 보다 결함원으로부터 인접한 거리에서 내부 결함을 효과적으로 검출이 가능하여 전력 기기의 활선(on-line) 상태 진단에 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

#### ORCID

Gyung-Suk Kil

<https://orcid.org/0000-0002-1672-2812>

### 감사의 글

본 논문은 2022년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022R1G1A1011043).

### REFERENCES

[1] S. J. Park, S. C. Hwang, G. Wang, and G. S. Kil, *J. Korean Soc. Railw.*, **20**, 203 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2017.20.2.203>]  
 [2] G. Wang, S. C. Hwang, W. H. Kim, and G. S. Kil, *2017 Spring Conference of the Korea Society for Railway*, (Hoengseong, Korea, 2017) pp. 421-422.

[3] L. E. Lundgarrd, *IEEE Electr. Insul. M.*, **8**, 34 (1992). [DOI: <https://doi.org/10.1109/57.156943>]  
 [4] Y. Lu, X. Tan, and X. Hu, *IEEE Pro. Sic. Meas. Technol.*, **147**, 81 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-smt:20000223>]  
 [5] G. Wang, H. E. Jo, S. J. Kim, S. W. Kim, and G. S. Kil, *Measurement*, **91**, 351 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.033>]  
 [6] G. Wang, S. J. Kim, G. S. Kil, and S. W. Kim, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **24**, 200 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005969>]  
 [7] P. D. Agoris, S. Meijer, J. J. Smit, *International Symposium on High-Voltage Engineering(ISH)*, (Beijing, China, 1 2004).  
 [8] G. S. Kil, D. W. Park, I. K. Kim, S. Y. Choi, and C. Y. Park, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **20**, 907 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2007.20.10.907>]  
 [9] S. Tenbohlen, H. Boris, P. Werle, U. Sundermann, and H. Matthes, *CIGRE* (Paris, France, 12 2000).  
 [10] J. Y. Song, H. D. Seo, D. W. Park, G. S. Kil, M. S. Han, and D. W. Jang, *2005 Spring Conference of the Korea Society for Railway*, 190 (2005). pp. 867-872.  
 [11] F. H. Kreuger, *Butterworth-Heinemann* (1989).  
 [12] M. Mondal and G. B. Kumbhar, *IETE Tech. Rev.*, **34**, 504 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1080/02564602.2016.1209436>]  
 [13] M. Mondal and G. B. Kumbhar, *IEEE T. Dielect. El. In.*, **23**, 2908 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.7736852>]  
 [14] S. Sharifinia, M. Allahbakhshi, T. Ghanbari, A. Akbari, and H. R. Mirzaei, *IEEE Sens. J.*, **21**, 10743 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3062770>]  
 [15] F. Álvarez, F. Garnacho, J. Ortego, and M. Á. Sánchez-Urán, *Sensors*, **15**, 7360 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.3390/s150407360>]  
 [16] H. Mirzaei, A. Akbari, E. Gockenbach, and K. Miralikhani, *IEEE T. Dielect. El. In.*, **22**, 448 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2014.004249>]  
 [17] S. J. Kim, G. Wang, S. J. Park, G. S. Kil, and C. H. An, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 429 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.7.429>]  
 [18] C. Y. Park, S. W. Kim, J. S. Choi, D. W. Park, and G. S. Kil, *KIIEE Spring Annual Conference & General Meeting 2008*, (Hoengseong, Korea, 301 2008) pp. 301-306.  
 [19] E. T. Ryu, K. R. Hwang, J. R. Jung, and H. J. Yang, *KIEE Summer Conference*, 42nd edn. (Pyeongchang, Korea, 2011) pp. 1556.  
 [20] M. H. Samimi, A. Mahari, M. A. Farahnakian, and H. Mohseni, *IEEE Sens. J.*, **15**, 651 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2362940>]  
 [21] M. Shafiq, K. Kauhaniemi, G. Robles, M. Isa, and L. Kumpulainen, *Electr. Power Syst. Res.*, **167**, 150 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.038>]  
 [22] U. J. Kim, M. S. Song, and R. Y. Kim, *Energies*, **13**, 5161 (2020).

- [DOI: <https://doi.org/10.3390/en13195161>]
- [23] F. Naseri, E. Farjah, and T. Ghanbari, *IEEE Sensors J.*, **19**, 6675 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2912947>]
- [24] T. Tao, Z. Zhao, W. Ma, Q. Pan, and A. Hu, *IEEE T. Electromagn C.*, **58**, 344 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TEM.2013.2252906>]
- [25] D. H. Ahn, D. E. Kim, N. H. Kim, S. H. Lim, and G. S. Kil, *J. Korean Soc. Railw.*, **25**, 255 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2022.25.4.255>]