

# 부분방전 측정용 비접촉식 HFCT 센서개발 및 특성평가에 관한 연구

## A Study on the Development and Characteristics Evaluation of Non-Contact HFCT Sensor for Partial Discharge Measurement

한 상 보

Sang-Bo Han

### Abstract

In this study, the sensor such as current transformer type was developed for measuring non-contact partial discharge in power electrical facilities, and the results of the characteristic evaluation were discussed. The frequency response characteristics of the HFCT sensor were shown to be measurable from 20 [kHz] to 20 [MHz]. The average sensitivity for the positive direction was 0.308 [mV/pC], and the negative direction was 0.459 [mV/pC]. Which showed that the sensitivity for the negative direction was better than that for the positive direction. The developed HFCT sensor is possible to measure very small partial discharge pulse signals and can be measured various types of partial discharge that may occur at power electrical facilities.

### 요 약

본 연구에서는 전력설비의 전력선에 탈부착이 용이하도록 전류계(CT) 방식의 비접촉식 부분방전 측정용 센서를 자체 개발하고, 그 특성평가 결과에 대하여 논하였다. 자체 제작한 HFCT센서의 주파수 응답특성이 20[kHz]에서 20[MHz]까지 측정 가능함을 보였으며, 정극성 방향으로 배치한 경우의 평균감도가 0.308[mV/pC], 부극성 방향으로 배치한 경우는 0.459[mV/pC]로서 부극성으로 배치한 경우가 정극성으로 배치한 경우보다 감도특성이 우수함을 보였다. 실제 부분방전 발생 및 특성측정 실험을 통하여 침전극 끝단에서 매우 미소한 코로나 기중방전이 시작되는 펄스 신호를 측정하는 것이 가능하므로 전력설비에서 발생할 수 있는 다양한 형태의 부분방전을 충분히 측정가능할 것으로 판단된다.

*Key words : current transformer, partial discharge, pulse, sensor, sensitivity*

\* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University  
(hansangbo@uok.ac.kr, 055-249-2635)

※ Acknowledgements

This results was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the Natinal Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (MOE)(2021RIS-003)

Manuscript received Apr. 4, 2024; revised Apr. 18, 2024; accepted Apr. 23, 2024.

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

사회가 발전됨에 따라서 산업, 상업 및 공공부문을 비롯한 다양한 분야에서 대규모 전력이 요구되고 있으며, 이러한 전력을 효율적으로 공급하고 안전성을 확보하기 위해서는 전력설비의 사고를 사전에 방지하는 것은 매우 중요하다. 특히, 전력설비 내부의 금속 및 절연재료는 제작 초기의 상태와 비교하여 시간이 흐름에 따라 열적, 기계적, 전기적으로 열화되어 초기의 성능에 미치지 못하는 경우가 있으므로 이에 대한 철저한 관리가 필요하다 [1-3]. 2022년 국내에서 발생한 총화재 4만 114건 중 전기화재는 8,802건으로 전체 화재의 21.9%를 차지한

다고 보도되었다(한국전기안전공사 전기재해통계)[4]. 노후화된 전력설비의 정전사고에 의한 경제적 손실을 최소화하기 위해서는 고장원인을 사전에 파악하여 예방하는 것이 매우 중요하다고 볼 수 있다.

전력설비의 주요한 고장은 전기적, 기계적, 열적결함 등 복합적 요소들이 결합되어 발생될 수 있다. 전기적 고장원인에 있어서 부분방전은 전력설비의 절연체 열화 및 절연파괴의 원인으로서 부분방전에 대한 초기 검출을 위한 기술개발이 필요하다. 또한, 현장 노이즈의 간섭을 최소화하여 정확한 부분방전 측정 및 진단기술 개발이 필요하며, 측정된 데이터를 활용하여 전력설비 내부의 부분방전 결함의 종류 및 위험도를 판별하는 것이 중요하다[5-6].

고전압 대전력 전력설비에서 부분방전이 발생되면 전자기파 및 음파 방사, 펄스상 전류 생성, 온도 상승, 가스 발생 등 다양한 물리·화학적 현상이 수반되며, 직류송전 케이블을 비롯한 다양한 전력설비별 부분방전 패턴이 매우 상이하므로 전력설비 종류에 따른 부분방전 측정기술 개발이 필요하다[7-10]. 다양한 전력설비에 범용성을 갖추고 설비의 안정적 동작에 방해되지 않도록 부분방전을 측정하기 위해서는 광학 또는 비접촉식 센서를 활용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

특히, 전류계(Current Transformer, CT) 방식의 비접촉식 부분방전 측정용 센서를 이용하여 부분방전을 측정하기 위해서는 수십 [kHz]~수백 [MHz]까지 감도가 높은 광대역 HFCT(High Frequency Current Transformer) 센서 개발이 필요하다.

본 연구에서는 전력설비의 전력선에 탈부착이 용이하도록 전류계(CT) 방식의 비접촉식 부분방전 측정용 센서를 자체 개발하고, 그 특성평가 결과에 대하여 논하였다.

## II. 본론

### 1. HFCT 센서 제작

부분방전을 측정하기 위한 광대역 CT 센서를 개발하기 위해서는 수십 나노초(ns) 영역의 빠른 펄스를 감지하는 것이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 자체 개발한 나노 자성재료(Fe계 나노합금)를 이용하여 그림 1과 같이 CT 형태로 130×180×47[mm] 크기로 제작하였으며, 측정신호의 반사 또는 왜곡을 최소화할 수 있도록 신호측정 동축케이블의 임피던스와 동일하게 출력 임피던스를 50[ohm]으로 구성하였다. 그림 2는 주파수 응답 특성을 나타낸 것으로서[11], 미소한 차이는 있지만 양방

향 모두 20[kHz]에서 20[MHz]까지 -16[dB]로서 측정 가능함을 알 수 있다.

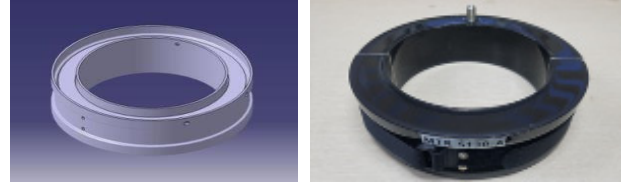


Fig. 1. Appearance of the HFCT sensor.  
그림 1. HFCT 센서의 외관

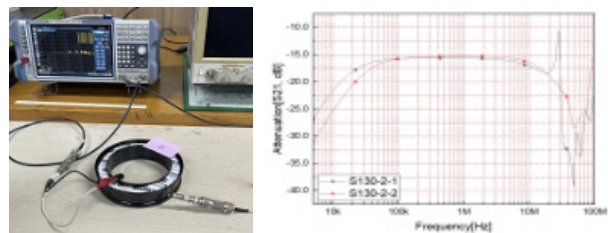


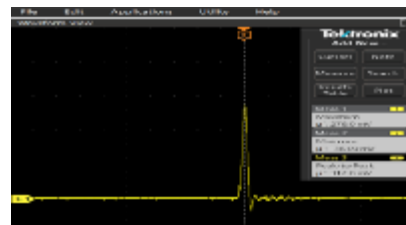
Fig. 2. Frequency response characteristics of HFCT sensor.  
그림 2. HFCT 센서의 주파수 응답특성

### 2. HFCT 센서의 감도측정

아래 그림 3은 제작된 센서의 부분방전 감도를 측정하기 위한 것으로서, IEC 60270기반 부분방전 교정펄스 발생기(Haefely AG, KAL9510)의 펄스를 이용하여 펄스 인가 방향에 따른 센서의 출력을 측정하였다.



(a) 정극성 배치 (b) 부극성 배치

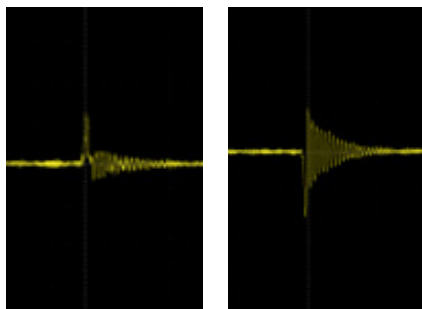


(c) 인가펄스 100pC 예시

Fig. 3. Output measurement according to the pulse applied direction and an example of an applied pulse.

그림 3. 펄스 인가방향에 따른 출력 측정방법 및 인가 펄스 예시

HFCT 센서로의 펄스 인가방향을 (a)좌측에서 우측으로 (b)우측에서 좌측으로 변경시킴에 따라서 센서의 출력신호가 서로 상이함을 보였다. 이것은 HFCT 센서를 구성하고 있는 자성재료의 자기모멘트의 크기가 펄스전류 인가방향에 따라 상이하여 방향성을 나타내고 있는 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 아래 그림 4에 서와 같이 출력 신호가 처음 상승하는 부분이 +방향으로 상승하면 정극성 배치, -방향으로 내려가면 부극성 배치로 구분하였다.



(a) 정극성 배치(Peak-Peak: 33.60mV)  
(b) 부극성 배치(Peak-Peak: 52.80mV)

Fig. 4. Output characteristics of HFCT sensor according to pulse applied direction.

그림 4. 펄스 인가방향에 따른 HFCT 센서의 출력특성

Table 1. Sensitivity according to pulse applied direction and magnitude.

표 1. 펄스 인가방향 및 크기에 따른 감도

Direction	Pulse [pC] (A)	Measurement [mV] (B)			Sensitivity [mV/pC] (= B/A)		
		Max	Min	Pk-Pk	Max	Min	Pk-Pk
Positive	0 (noise)	12.80	-12.80	25.60	-	-	-
	50	17.60	-10.40	28.00	0.352	0.208	0.56
	100	26.40	-8.00	34.40	0.264	0.08	0.344
	average				0.308	0.144	0.452
	0 (noise)	12.00	-10.40	22.40	-	-	-
Negative	20	12.00	-11.20	23.20	0.6	0.56	1.16
	50	26.40	-26.40	52.80	0.528	0.528	1.056
	100	24.80	-36.80	61.60	0.248	0.368	0.616
	average				0.459	0.486	0.944
	0 (noise)	12.00	-10.40	22.40	-	-	-

정극성 방향으로 배치한 경우에는 최대치에 대한 감도가 0.264~0.352[mV/pC]이며, 평균치는 0.308[mV/pC]에 해당하였으며, 부극성 방향으로 배치한 경우는 최대치에 대한 감도가 0.248~0.6[mV/pC] 사이로서 평균치

0.459[mV/pC]를 나타내었다. 따라서, 부극성으로 배치한 경우가 정극성으로 배치한 경우보다 감도특성이 우수함을 알 수 있었다.

또한, 실험실에 존재하는 노이즈에 대해서는 양극성, 부극성 배치 어느 경우에 대해서도 동일한 특성을 보였다.

### 3. 센서의 부분방전 신호 측정

제작된 HFCT센서의 실제 부분방전의 신호를 측정하기 위하여 그림 5와 같이 슬라이더스를 이용하여 고압용 변압기(max. 15kV)에 인가되는 교류전압을 가변시켜 교류 고전압을 기준 침-평판전극(간극 10mm)에 인가되도록 구성하였다. 이때, 고전압 라인의 중간에 자체개발한 HFCT 센서를 부극성 배치하고, 접지 전단에 상용 CT 센서를 고정시켜 측정하였다.

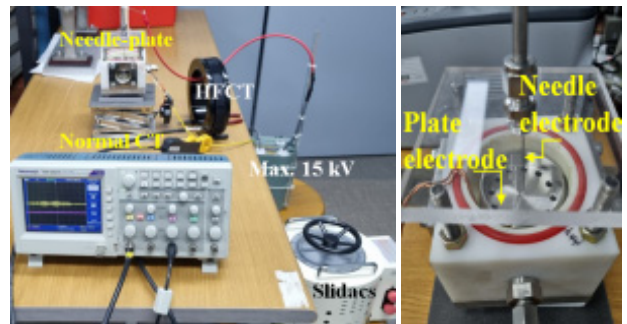


Fig. 5. Partial discharge measurement experimental set-up for HFCT sensor in Airborne needle-plate electrode structure.

그림 5. 기준 침-평판 전극 구조에서 HFCT 센서에 대한 부분방전 측정 실험장치

고전압 인가 선로를 접지 및 타 선로와의 혼촉을 방지하기 위해 절연성 아크릴 봉으로 고전압 선로를 고정하였으며, 전원 차단 후 방전공간에 남아있는 충전 전하를 방전시키기 위해 실험 종료시에는 반드시 접지봉을 이용하여 방전을 실시하였다. 교류 인가전압을 상승시킴에 따라 코로나 초기증상인 기준 부분방전이 시작되는 단계에서부터 더욱 인가전압을 상승시켰을 때 스트리머까지 발생하는 것을 확인한 후, 인가전압을 가변시킴에 따라 HFCT 센서의 출력신호를 측정하였다.

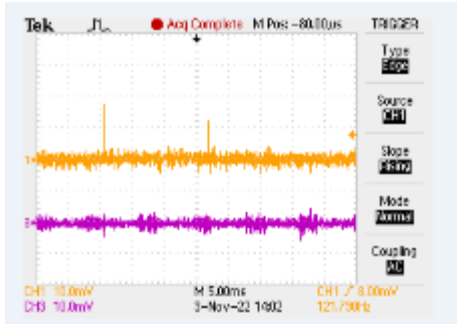
그림 6은 오실로스코프 측정파형을 나타낸 것으로서, CH1은 고전압 인가단에 설치된 HFCT 센서의 출력신호, CH3는 접지 전단에 설치된 일반 CT의 출력신호에 해당된다. 그림 6(a)(b)는 침전극 끝단에서 매우 미소한 코로나 기준방전이 발생되기 시작되는 3[kV] 인가한 경우를 보인 것이다. 코로나 펄스가 일반 CT에서는 거의

측정되지 않고, HFCT센서에서는 간헐적인 부분방전 펄스가 측정됨을 확인할 수 있다. 또한, HFCT센서의 부극

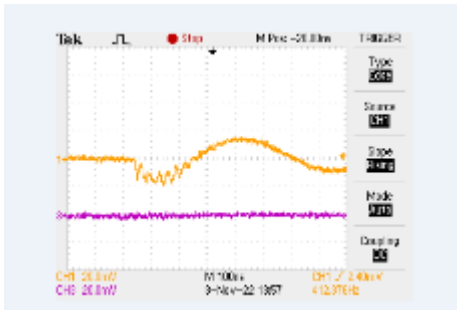
성 배치에 의하여 측정된 부분방전 펄스가 초기에는 음의 방향으로 감소되었다가 양의 방향으로 증가됨을 알 수 있다.

부분방전이 더욱 활발히 발생되도록 전압을 7[kV]로 높인 그림 6(c)(d)에서도 마찬가지로 HFCT센서에서 부분방전 펄스들을 쉽게 측정 가능함을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서 개발한 HFCT센서는 코로나 기증 부분방전이 시작되는 매우 미소한 펄스 신호를 측정하는 것이 가능하므로 전력설비에서 발생될 수 있는 다양한 형태의 부분방전을 충분히 측정가능할 것으로 판단된다.



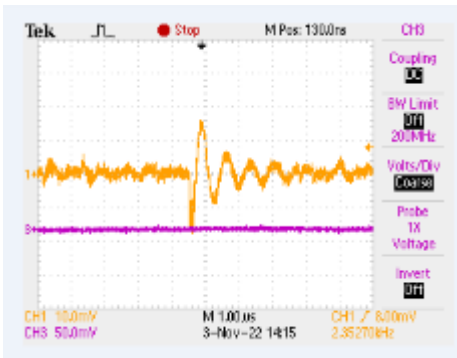
(a) 인가전압 3kV



(b) 임의 부분방전 신호파형 (인가전압 3kV)



(c) 인가전압 7kV



(d) 임의 부분방전 신호파형 (인가전압 7kV)

Fig. 6. Partial discharge pulse measurement result of HFCT sensor according to the change of the applied electric voltage.

그림 6. 인가전압 변화에 따른 HFCT센서의 부분방전 펄스 측정 결과

### III. 결론

본 연구에서는 전력설비의 주요한 전기적 고장원인인 부분방전을 측정하기 위하여 HFCT 센서를 자체 제작하고, 특성평가를 진행하였다. 주요한 결과는 다음과 같다.

(1) 자체 제작한 HFCT센서의 주파수 응답특성이 20 [kHz]에서 20[MHz]까지 측정 가능함을 보였으며, 이는 광대역에 걸쳐 넓게 분포하고 있는 부분방전의 파형을 측정가능함을 보인 것이다.

(2) HFCT센서를 정극성 방향으로 배치한 경우의 평균 감도가 0.308[mV/pC], 부극성 방향으로 배치한 경우는 0.459[mV/pC]에 해당되었다. 이를 통해 부극성으로 배치한 경우가 정극성으로 배치한 경우보다 감도특성이 우수함을 보였다.

(3) 실제 부분방전 발생 및 특성측정 실험을 통하여 침전극 끝단에서 매우 미소한 코로나 기증방전이 시작되는 펄스 신호를 측정하는 것이 가능하므로 전력설비에서 발생될 수 있는 다양한 형태의 부분방전을 충분히 측정가능할 것으로 판단된다.

### References

[1] G. C. Stone, "Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol.12, no.5, pp.891-903, 2005.  
DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522184

[2] M. Hikita, S. Ohtsuka and S. Matsumoto, "Recent Trend of the Partial Discharge Measurement Technique Using the UHF Electromagnetic Wave Detection Method," *The Transactions of the Institute*

*of Electrical Engineers of Japan*, Vol.2, pp.504-509,  
2007. DOI: 10.1002/tee.20201

[3] E. Gulski and F.H Kreuger. "Computer aided  
recognition of discharge sources," *IEEE Trans. on  
Elect. Insul.*, Vol.27, pp.82-92, 1992.

DOI: 10.1109/14.123443

[4] Report of the electrical disaster statistics in  
2022, <https://www.kesco.or.kr/bbs/selectBbs.do>

[5] C. Mayoux and C. Laurent, "Contribution of  
Partial Discharges to Electrical Breakdown of  
Solid Insulating Material," *IEEE Transaction of  
Dielectrics and electrical Insulation*, Vol.2, no.4,  
pp.641-652, 1999. DOI: 10.1109/94.407028

[6] C. Cachin, H. J. Wiesmann, "PD Recognition  
with Knowledge-based Pre-processing and Neural  
Networks," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*,  
Vol.2, pp.578-589, 1995. DOI: 10.1109/94.407023

[7] Man-gil Jung, Sang-Bo Han et. al, "Development  
of the Preventive Diagnosis Algorithm on the  
Partial Discharges Using Current and Ultrasonic  
Sensors," *Trans. KIEE*, Vol.30, no.6, pp.58-66,  
2016.

[8] Kang-Won Lee, Sung-Hwa Kang et. al, "Dis-  
crimination of Air PD Sources Using Time-  
Frequency Distributions of PD Pulse Waveform,"  
*Trans. KIEE*, vol.54, no.7, pp.332-338, 2005.

[9] MinSeok Seo, et. al, Discrimination of Air PD  
Sources Using Time-Frequency Distributions of  
PD Pulse Waveform," *KIEE*, vol.37, no.3, pp.62-68,  
2023.

[10] Seonmin Hong, Wooyoung Son, et. al, "Detection  
and localization of partial discharge in high-voltage  
direct current cables using a high-frequency  
current transformer," *J. Sensor Science and  
Technology*, vol.30, no.2, pp.105-108, 2021.

DOI: 10.46670/JSST.2021.30.2.105

[11] Dong-Hoon Kim, Min-Woo Jin, Sung-Man  
Jung, Young-Sung Lee, "Development of HFCT  
Sensor for Partial Discharge Measurement of  
Power Cable Terminal Connections," *Korean  
Electrical Association Summer Conference Paper*,  
15-17, 2021.

## BIOGRAPHY

### Sang-Bo Han (Member)



1998 : BS degree in Electrical  
Engineering, Kyungnam University.  
2000 : MS degree in Electrical  
Engineering, Kyungnam University.  
2004 : PhD degree in Electronic  
Engineering, University of Tokyo.  
2015.2~2016.2 : Visiting scholar,  
University of California at San Diego,  
USA