

## SF<sub>6</sub> 가스 중 HVDC에서 금속 파티클의 부분방전 특성

김선재, 조향은, 왕국명, 윤민영, 길경석<sup>a</sup>

한국해양대학교 전기전자공학과

### Partial Discharge Characteristics of Metallic Particles Under HVDC in SF<sub>6</sub> Gas

Sun-Jae Kim, Hyang-Eun Jo, Guoming Wang, Min-Young Yun, and Gyung-Suk Kil<sup>a</sup>

Department of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

(Received October 26, 2015; Revised November 17, 2015; Accepted November 19, 2015)

**Abstract:** This paper dealt with the PD (partial discharge) characteristics produced by metallic particles presented in a gas insulated switchgear. Four types of metallic particles such as a ball, a trapezoid, a rectangle, and a twist were fabricated and placed in a PD cell filled with SF<sub>6</sub> gas. PD pulses were detected through a 50 Ω non-inductive resistor. Calibration was carried out according to IEC 60270 and the sensitivity was calculated as 4 mV/pC. Apparent charge, pulse count, DIV (discharge inception voltage), DEV (discharge extinction voltage), and TRPD (time resolved partial discharge) were analyzed. Among the metallic particle types, the twist frequently occurred PD pulse at the lowest DIV, while the rectangle showed the highest. DEV of the twist was about 2 times lower than that for the rectangle. Kurtosis of ball clustered at high value, and skewness of other three metallic particles distributed at low value. TRPD showed different distribution by metallic particle types.

**Keywords:** Metallic particles, PD, DIV, DEV, TRPD

#### 1. 서 론

전력설비는 전기를 공급 및 분배하는 변전설비로 변압기, 정류기 및 차단기 등 다양한 설비로 구성되어 있다. 시스템의 대형화 및 운영환경으로 인하여 전력설비의 안정성 및 신뢰성이 요구된다. 또한 전 세계적으로 HVDC (high voltage direct current) 송전에 대한 상용화가 활발히 진행되고 있지만, 효율적 전력전송의 관점에서 이루어 질 뿐, 안정적 전력공급을 위한 상태 진단기술에 대해서는 연구개발이 극히 미흡하고 초보

적 단계이다. 전력설비 중 개폐장치는 선로의 분기와 연계로 구성이 복잡한 부하설비에서 계통을 구성, 분리 및 변경을 목적으로 사용된다.

그 중에서도 높은 절연성을 갖는 큐비클형 가스절연 개폐장치 (cubicle-gas insulated switchgear, C-GIS)가 많이 사용되고 있다. 공기절연 방식은 부피가 크고 넓은 설치 공간이 필요하지만, C-GIS는 SF<sub>6</sub> 가스를 절연매질로 사용하기 때문에 협소한 장소에도 설치가 가능하다. 공기 대비 절연내력이 1기압에서 2.5 ~ 3.5 배 크기 때문에 소형화가 가능하며, 높은 신뢰성을 갖는다 [1,2]. 그러나 C-GIS 내부에 금속 파티클이 유입 되면 전계가 집중되어 부분방전이 발생된다. 전력설비의 고장을 예방하기 위하여 상태 진단기술 (condition based maintenance, CBM)이 적용되고 있다. 이 기술은 전원이 인가된 환경에서 대상설비의 고장 여부 및

a. Corresponding author; [kilgs@kmou.ac.kr](mailto:kilgs@kmou.ac.kr)

징후를 사전에 검출하는 것으로 전력시스템의 유지 보수에 적합하다 [3-5].

따라서 본 논문에서는 SF<sub>6</sub> 가스를 사용하는 전력설비에 금속 파티클 유입 시, 위험성을 분석하기 위하여 금속 파티클 형태에 따른 부분방전의 특성에 관하여 연구하였다. 제작 과정, 운반, 설치 및 운전 시 유입 가능한 4종류의 금속 파티클을 제작하고, 방전 전하량 ( $q$ ), 펄스의 수 ( $n$ ), 방전개시전압(DIV), 방전소멸전압(DEV) 및 TRPD를 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 PD cell 및 금속 파티클

실험용 전극계를 그림 1과 같이 제작하였으며, 외함은 지름 144 mm, 높이 131 mm이며, 투명 실린더의 내경은 80 mm이다.

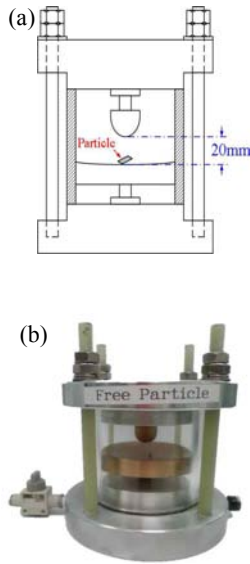


Fig. 1. PD cell (a) drawing, (b) photograph.

평판전극은 지름 65 mm, 두께 20 mm이며, 가장자리를 둥글게 설계하여 전계가 집중되는 것을 방지하였다. 상·하부 전극 간격은 3 mm이며, 전압 인가 시 금속 파티클이 전극계 내부를 부유하도록 제작하였다. SF<sub>6</sub>가스는 0.5 MPa로 충전하였다.

GIS는 부분방전이 발생되지 않는 충분한 전계강도로 제작된다. 그러나 현장 조립, 연마 작업, 금속 가공, 운반,

Table 1. Types of metallic particles.

Name	W×L [mm]	Weight [mg]	Remark
Ball	-	34.3	Diameter 3 mm
Trapezoid	7×5	59.7	Lower base 5.5 mm
Rectangle	15×5	141	-
Twist	10×4	113.7	-

설비 운전 및 가스 주입 시 스페이서의 크랙, 도체에서의 돌기 및 금속 파티클 등이 발생할 수 있다. 전계가 균일화된 GIS에 금속 파티클로 인하여 국부적인 전계 집중현상이 나타나면 부분방전이 발생하여 절연파괴가 된다. 전력설비에 유입 가능한 금속 파티클을 알루미늄으로 제작하였으며, 사양을 표 1에 나타내었다. 알루미늄을 사용한 이유는 GIS에서 운전 중 발생하는 금속 파티클과 동일한 재료를 사용했기 때문이다 [6-8].

### 2.2 분석 파라미터

TRPD는 방전 크기 ( $q_i$ )와 방전 발생시간 ( $t_i$ )을 분석하는 것으로서 그림 2에 나타내었다.

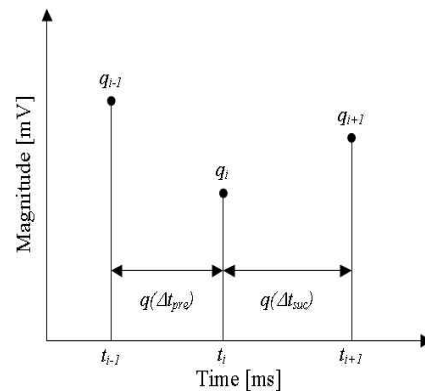


Fig. 2. TRPD sequence.

직류 전압은 교류에서와 달리 위상이 없기 때문에 PRPD (phase resolved partial discharge) 방법을 적용할 수 없다. TRPD는 PD펄스의 여러 가지 파라미터로부터 결함의 종류를 판별할 수 있는 특징이 있다. 두 번째 측정된 부분방전 펄스를 기준으로 첫 번째, 세 번째 등 연속적으로 발생하는 펄스의 시간 차( $\Delta t$ )를 분석하였다.  $q(\Delta t_{pre}) = t_i - t_{i-1}$ ,  $q(\Delta t_{suc}) = t_{i+1} - t_i$ 로 정의하였다.  $H(q)$ 와  $H(\Delta t)$ 는 방전 크기와 시간차에 대한 밀도를 나타낸다 [9]. TRPD에서 측정된 자료를 첨도 (Kurtosis)와 왜도 (Skewness)의 클러스터로 분석하였다. 첨도는 펄스에서 중앙부분의 첨예(尖銳)한 정도를 나타내는 것으로서, 그 값이 양수일 경우에는 급첨(Leptokurtic), 음수일 경우에는 평첨(Platykurtic)이라고 한다. 만약 0일 경우에는 정규분포를 이루며 중첨(Mesokurtic)이라고 한다.  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 으로부터 평균을  $\mu$ , 표본분산을  $\sigma^2$ 이라할 때 첨도는 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$K = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(x_i - \mu)^4}{(n-1) \cdot \sigma^4} \right] - 3 \quad (1)$$

왜도는 펄스 형상의 대칭성을 분석하는 것으로서, 0보다 크면 우측으로 긴 꼬리를 갖는 양의 왜도 (positive skew), 0보다 작으면 왼쪽으로 긴 꼬리를 갖는 음의 왜도 (negative skew)가 된다. 왜도는 식 (2)로 나타낼 수 있다 [10,11].

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^3}{(n-1) \cdot \sigma^3} \quad (2)$$

### 2.3 실험계의 구성

최대 출력전압 및 출력전류가 각각 50 kV, 5 mA인 모드변압기, 100 kV 고압다이오드 및 0.5  $\mu$ F 캐패시터로 그림 3과 같이 실험계를 구성하여 직류고전압을 인가하였다. 또한 충전되어 있는 캐패시터를 일정시간 내에 방전할 수 있는 회로를 설계하였다. 고전압 인입부는 코로나를 방지하기 위하여 충분한 절연내력을 갖도록 하였다. 10,000:1의 분압기로 인가전압을 측정하였으며, 외부 노이즈의 영향을 최소화하기 위하여 차폐함 내부에서 실험을 수행하였다. 부분방전 펄스는 50  $\Omega$ 의 무유도 저항으로 검출하였으며, 5 GS/s 오실로스코프와 250 MS/s DAQ를 사용하여 펄스를 분석하였다.

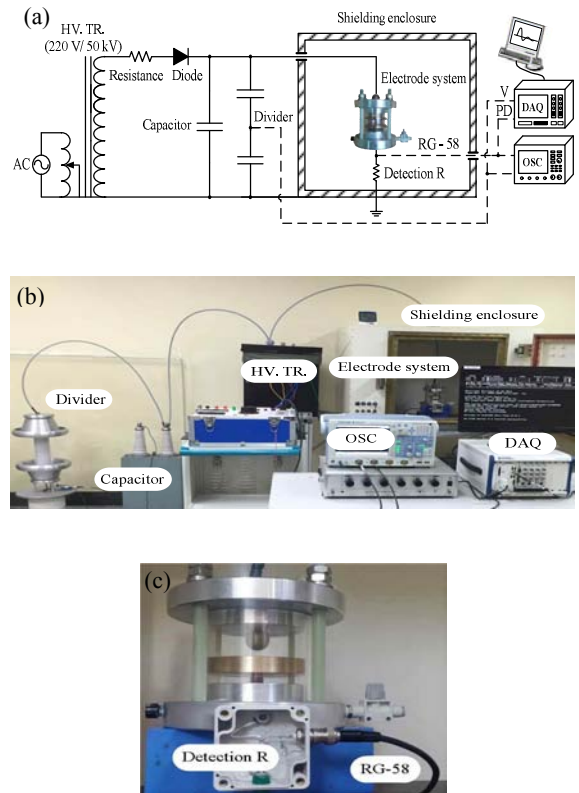


Fig. 3. Experimental system. (a) configuration, (b) photograph, and (c) detection R.

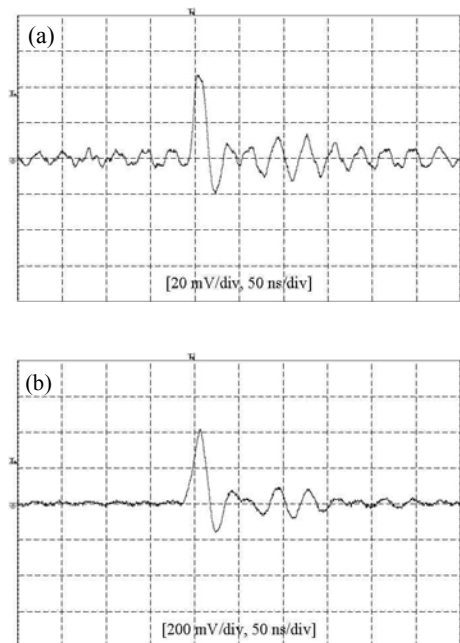


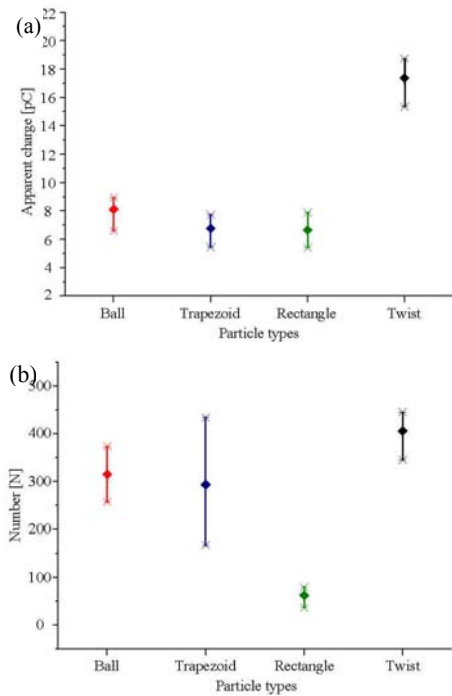
Fig. 4. PD pulse waveform. (a) 10 pC, (b) 100 pC.

방전 전하량을 산출하기 위하여 그림 3(c)에 표준 펄스 발생장치 (CAL 1A)를 사용하여 교정실험을 수행하였다. 10 pC ~ 100 pC까지의 입력펄스에 대한 시스템의 응답전압을 측정하였다. 환산 감도는 4 mV/pC이며, 측정 파형을 그림 4에 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

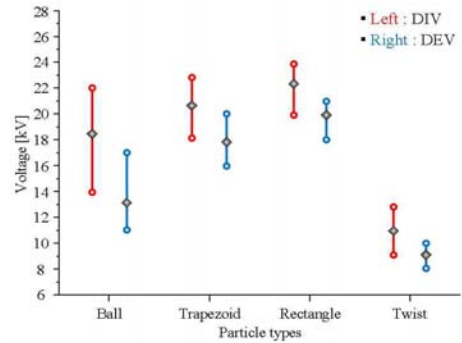
#### 3.1 $q$ - $n$ , DIV 및 DEV

4종류의 금속 파티클에 대하여 방전 전하량, 펄스의 수, 방전개시전압 및 방전소멸전압을 각각 10번씩 측정하여 최소, 최대 및 평균을 그림 5와 6에 나타내었다.



**Fig. 5.** Apparent charge and pulse count. (a) apparent charge, (b) pulse count.

평균 방전 전하량은 볼 8.12 pC, 사다리꼴 6.76 pC, 직사각형 6.64 pC 및 Twist 17.37 pC으로 산출하였다. Twist가 3종류의 금속 파티클보다 약 2.1 ~ 2.6배 높게 분석되었으며, 사다리꼴과 직사각형의 평균 방전 전하량은 유사하였다. 동일한 실험 조건에서 펄스의 수를



**Fig. 6.** Comparison of DIV and DEV.

분석하기 위하여 방전개시전압이 가장 높은 직사각형의 평균값보다 0.6 kV 높은 23 kV를 인가하여 약 5초 동안 부분방전을 측정하였다. 펄스의 수는 볼 314개, 사다리꼴 293개, 직사각형 62개 및 Twist 456개로 분석되었다. Twist는 가장 작게 검출된 직사각형보다 펄스의 수가 7.3배 많았다. 평균 방전개시전압은 볼 18.5 kV, 사다리꼴 20.7 kV, 직사각형 22.4 kV 및 Twist 11 kV이다. 직사각형의 평균 방전개시전압은 Twist보다 약 2배 높았다. 평균 방전소멸전압은 볼 13.3 kV, 사다리꼴 17.9 kV, 직사각형 19.7 kV 및 Twist 9.1 kV이다. 평균 방전개시전압과 동일한 경향으로서 직사각형이 가장 높게, Twist가 가장 낮게 분석되었다.

#### 3.2 TRPD

Twist의 TRPD 예를 그림 7에 나타내었다. 5초 동안 측정된 부분방전의 크기와 펄스들 간에 발생하는 시간 차를 4가지 형태로 분석하였다.

TRPD를 통한 클러스터를 그림 8에 나타내었다.  $H(q)$ 에서 볼은 첨도 값이 60 이상으로 높았으며, 3종류의 금속 파티클은 왜도가 낮은 값에서 클러스터가 형성되었다. 볼은  $H(q)$ ,  $H(\Delta t)$ ,  $q(\Delta t_{pre})$  및  $q(\Delta t_{suc})$ 의 TRPD 특성에서 3종류의 전극계보다 상대적으로 peak 값이 높은 곳에서 발생하였다.

사다리꼴의 클러스터 분포는 전반적으로 넓게 분석되었다. 직사각형은  $H(q)$ 와  $q(\Delta t_{suc})$ 에서 클러스터가 넓게 분포하였지만,  $H(\Delta t)$  및  $q(\Delta t_{pre})$ 에서는 좁게 형성되었다.

또한 직사각형의 클러스터는 상대적으로 왜도가 낮은 곳에서 많이 발생하였다. Twist는 3종류의 금속 파티클보다 클러스터가 조밀하게 형성되었으며, 왜도가 낮은 지역에서 나타났다.

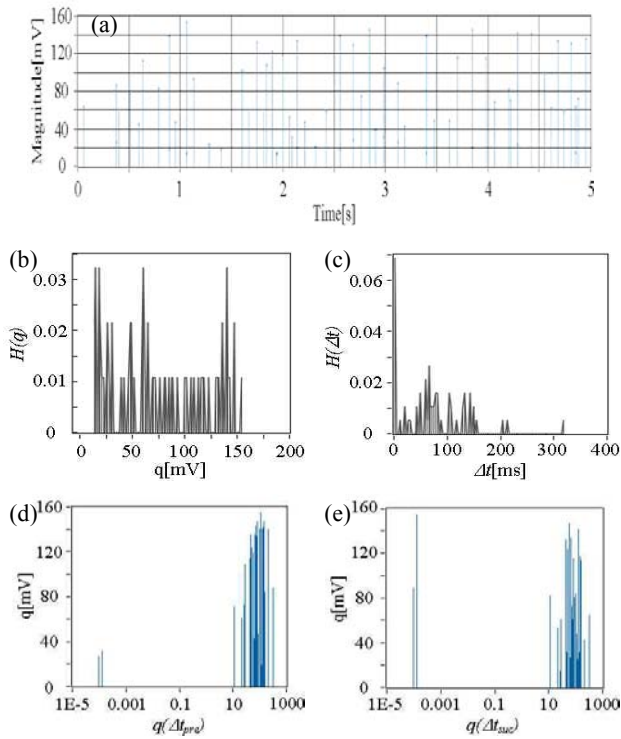


Fig. 7. Twist TRPD. (a) magnitude-time, (b)  $H(q)$ , (c)  $H(\Delta t)$ , (d)  $q(\Delta t_{pre})$ , and (e)  $q(\Delta t_{suc})$ .

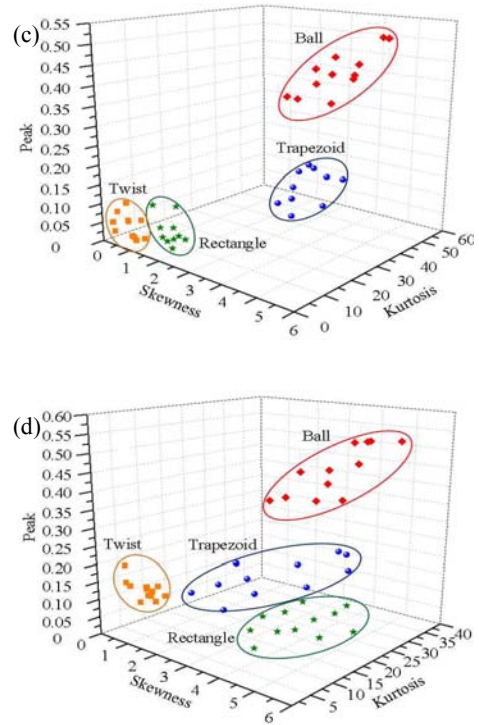


Fig. 8. TRPD. (a)  $H(q)$ , (b)  $H(\Delta t)$ , (c)  $q(\Delta t_{pre})$ , and (d)  $q(\Delta t_{suc})$ .

#### 4. 결론

SF<sub>6</sub> 가스가 사용되는 전력설비에 금속 파티클 유입 시, 위험성을 분석하기 위하여 형태에 따른 부분방전의 특성을 기술하였다.

4종류의 금속 파티클 중 Twist의 방전 전하량 및 펄스의 수가 가장 많았다. 방전개시전압과 방전소멸전압은 각각 11 kV, 9.1 kV로서 가장 낮게 측정되었다. 볼의 평균 방전개시전압은 18.5 kV로서, 구(球) 형태이기 때문에 전계집중이 낮은 것으로 판단된다. 또한 사다리꼴 및 직사각형은 각각 20.7 kV, 22.4 kV로서, 두께가 1 mm에 형태가 납작하기 때문에 Twist의 평균 방전개시전압 보다 약 2배 높은 것으로 분석된다. 그러나 Twist는 두께가 3 mm이며, 회전되는 마디의 간격에서 전계 집중이 높기 때문에 낮은 인가전압에서 방전이 발생하는 것으로 판단된다. TRPD는 금속 파티클의 형태에 따라 클러스터가 상이하게 분포하였고, 그 중 Twist는 3종류의 전극계 대비 가장 조밀하게 분포하였다.

향후 금속 파티클의 형태가 동일한 조건에서 크기 및 질량 등을 분석함으로써, 결함의 위험성을 예측하는데 도움이 될 것이다.

## REFERENCES

- [1] H. E. Jo, S. J. Kim, G. M. Wang, and G. S. Kil, *2015 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, p. 25(1)-25(5).
- [2] S. J. Kim, H. E. Jo, G. W. Jeong, G. S. Kil, and S. W. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 40 (2015).
- [3] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, the 1st ed.* (Butterworth-Heinemann, United Kingdom, 1989) p. 135.
- [4] M. S. Naidu and V. Kamaraju, *High Voltage Engineering, 4th ed.* (McGraw-Hill, India, 2009) p. 364.
- [5] N. C. Sahoo, M.M.A. Salama, and R. Bartnikas, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **12**, 248 (2005).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2005.1430395>]
- [6] H. E. Jo, S. J. Kim, G. W. Jeong, and G. S. Kil, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 320 (2015).
- [7] K. H. Kim, D. Z. Lee, and H. R. Kwak, *J. Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, **14**, 67 (2000).
- [8] F. N. Budiman, Y. Khan, N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, and A. Beroual, *IEEE Dielectrics and Electrical Insulation*, **20**, 2143 (2013).  
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2013.6678863>]
- [9] G. M. Wang, *M. E. Thesis*, p. 16, 17, Korea Maritime and Ocean University, Busan (2015).
- [10] H. S. Herman, B. T. Phung, and R. B. Trevor, *The Institution of Engineering and Technology*, **8**, 160 (2014).
- [11] G. M. Wang, S. J. Kim, H. E. Jo, G. W. Jeong, and G. S. Kil, *19<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering*, p. 165(1)-165(5).