

# 절연계의 결함별 부분방전 패턴분석

## Analysis of PD Patterns Depending on Defect Types in Insulation System

박찬용\*                      김황국\*                      김성욱\*                      지홍근\*                      길경석†  
Chan-Yong Park              Hwang-Kuk Kim              Sung-Wook Kim              Hong-Keun Ji              Gyung-Suk Kil

### ABSTRACT

In this paper, we carried out a comparative analysis of partial discharge(PD) patterns caused by deterioration of cast-resin and oil insulation systems. Various electrode systems were fabricated such as needle-needle, needle-plane and plane-plane to simulate defects that may exist in the insulation system of transformers. A low-noise amplifier which has a gain of 40 dB and a frequency bandwidth of 500 kHz ~ 30 MHz (-3 dB) was designed to detect small PD signals. From the analysis of acquired PD signals, we could find that a unique PD pattern is formed according to types of defect. These data will be applied usefully to diagnose insulation condition of transformers.

### 1. 서론

전력계통에는 전압변환장치로 유입변압기가 널리 사용되고 있다. 이와 함께 몰드변압기 또한 유지보수 비용이 저렴하고 운용이 용이한 이점으로 그 수요가 증가하고 있는 추세이다[1]. 그러나 전력소비 증가와 함께 매년 변압기 사고의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 이러한 변압기 사고의 원인은 대부분 변압기 절연물의 열화에 의해 발생한다[2-4]. 이러한 절연열화는 열적, 전기적, 화학적 및 환경적인 요인의 복합적인 스트레스에 의해 발생하며, 대부분의 경우 초기단계에 부분방전을 수반한다. 이는 부분방전과 절연이 밀접한 관계가 있음을 의미하며, 따라서 부분방전신호를 검출함으로써 절연열화에 의한 사고를 미연에 방지할 수 있으며, 변압기의 절연설계와 평가 시에도 유용하게 적용될 수 있다[5].

본 논문에서는 몰드 및 유입변압기에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 cast-resin과 유절연지(프레스보드지)를 이용한 모의전극(침-침, 침-평판, 평판-평판)을 제작하였으며, 결함종류에 따른 부분방전 신호를 검출하였다. 부분방전신호를 검출하기 위하여 저잡음 증폭회로를 설계·제작하였으며, NI사의 가상계측기(Virtual Instrument, VI)를 이용한 분석알고리즘을 통하여 결함에 따른 위상분포, 방전전하량, 발생횟수를 측정·분석하였다.

### 2. 실험계의 구성

실험계의 구성은 그림 1과 같다. 시험용 전원으로 정현파 (60 Hz, Max 5 kVrms)를 사용하였으며, 전원 인입단에 NCT (Noise Cut Transformer)를 연결하여 전원에서부터 유입되는 전도노이즈의 영향을 제거하였다. 또한 외부로부터의 방사노이즈에 대한 영향을 최소화하기 위해 차폐함 내에 실험계를 구성하였다. 인가전압은 고전압프로브 (P6015A, 75 MHz, 20 kVDC)에 의해 측정되며, PD신호는 2 kHz ~ 30 MHz의 측정범위를 가지는 HFCT (High Frequency Current Transformer)에 의해 검출된다. 검출된 PD신호는 대역통과필터와 증폭회로를 거쳐 가상계측기로 전송된다.

† 책임저자 : 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 교수  
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr  
TEL : (051)410-4414 FAX : (051)403-1127  
\* 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 석사과정

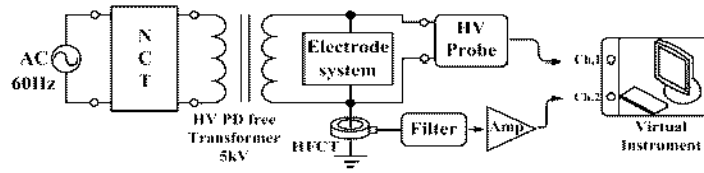


그림 1. 실험계의 구성

변압기 내부에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위해 침-침, 침-평판, 평판-평판 전극을 제작하였으며, 두 전극사이에 cast-resin 및 유절연지를 삽입하였다. 또한 전극별 방전전하량을 비교하기 위하여 전극사이의 거리를 cast-resin의 경우 1 mm, 유절연지의 경우 2 mm로 일정한 비율로 유지하였다.

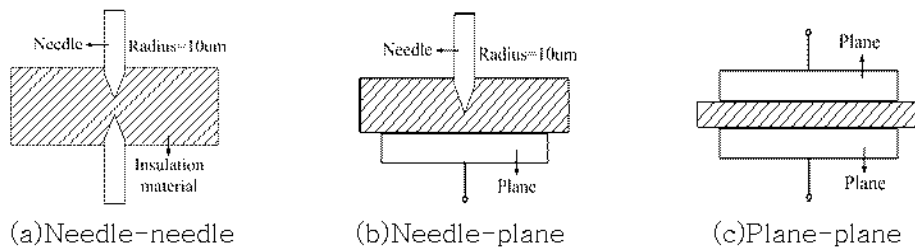
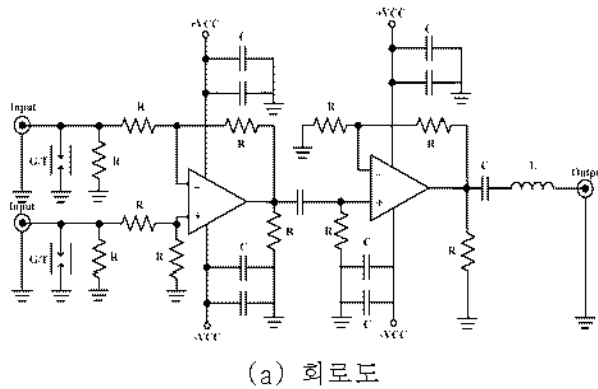


그림 2. 전극계의 구성

전극사이에서 발생하는 PD신호는 매우 미소하므로 신호검출을 위해 LNA(Low Noise Amplifier)를 설계·제작하였다. 본 연구에서 제작한 증폭회로를 그림 3에 나타내었으며, 이득 40 dB, 500 kHz ~ 30 MHz(-3 dB)의 주파수대역을 갖는다.



(a) 회로도



(b) 시제작 증폭회로

그림 3. 증폭회로

### 3. 실험결과

실험은 차폐함 내의 동일온도(12℃), 습도(42%)에서 수행되었으며, 인가전원을 변화시켜가며 방전개시전압 (Discharge Inception Voltage, DIV) 및 방전소멸전압 (Discharge Extinction Voltage, DEV)를 측정하였다. 최초 DIV를 인가하여 일정 주기 동안 발생하는 방전신호를 측정한 후, 1.1DIV, 1.2DIV로 전압을 증가시켜 동일 실험을 반복 수행하였으며, 최종적으로 가상계측기(VI)를 이용하여 결합에 따른 위상분포, 방전전하량, 발생횟수를 분석하였다.

#### 3.1 침-침 전극

Cast-resin 및 유절연지의 침-침 전극에 대한 방전신호의 분석결과를 그림 4와 그림 5에 각각 나타내었다. Cast-resin에서의 DIV과 DEV는 각각 1.62 kV, 1.59 kV로써 DEV가 DIV에 비해 비교적 작게 측정되었으며, 측정주기 동안 1DIV에서는 84회, 1.1DIV에서는 124회, 1.2DIV에서는 279회의 PD 펄스가 발생하였다. 1DIV에서는 대부분의 PD펄스가 전압 상승률이 급준한 45°~90°, 220°~270°사이에서 발생하였으나 인가전압이 1DIV에서 1.2DIV로 증가함에 따라 영점부근으로 PD 군집의 위상범위가 확대됨을 확인할 수 있다.

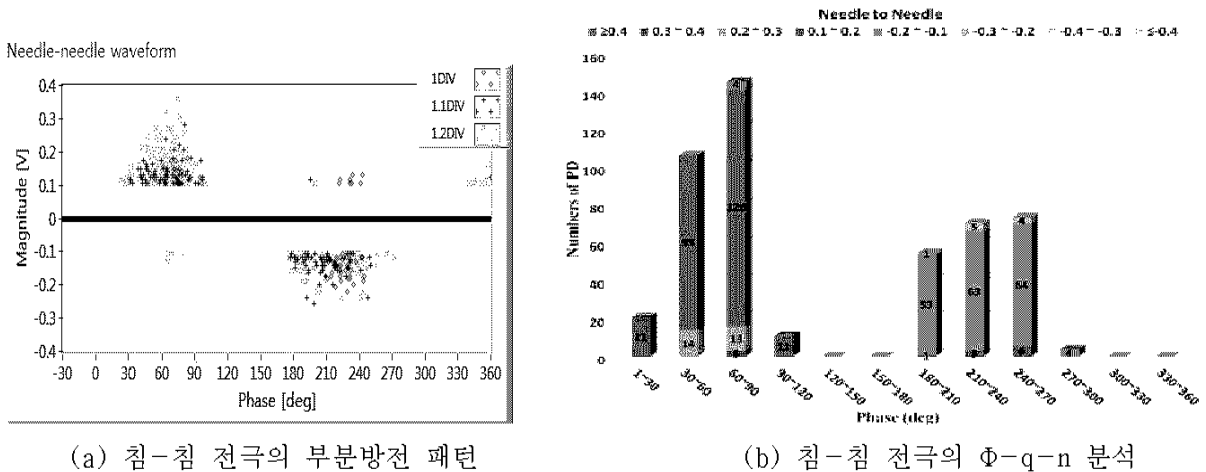


그림 4. Cast-resin의 부분방전 특성분석

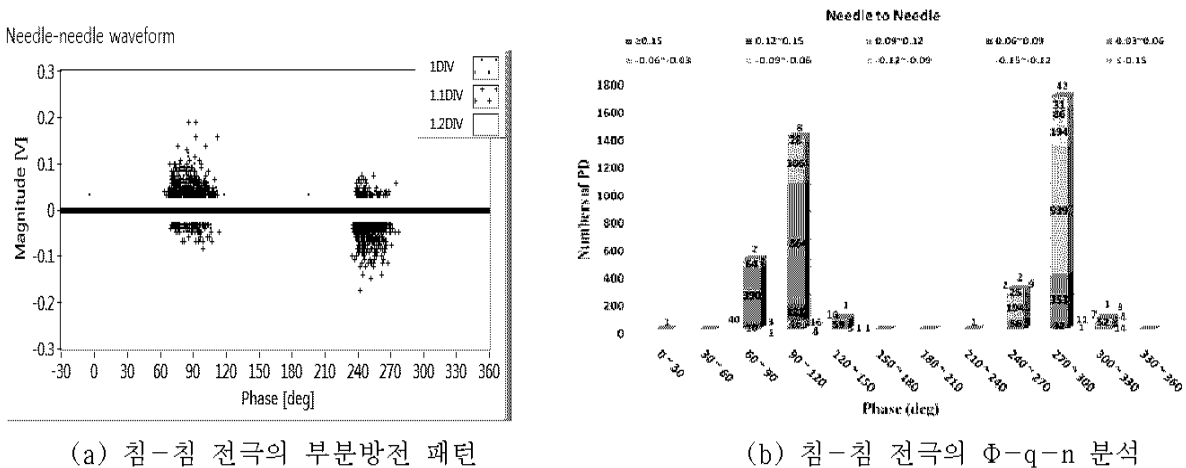


그림 5. 유절연지의 부분방전 특성분석

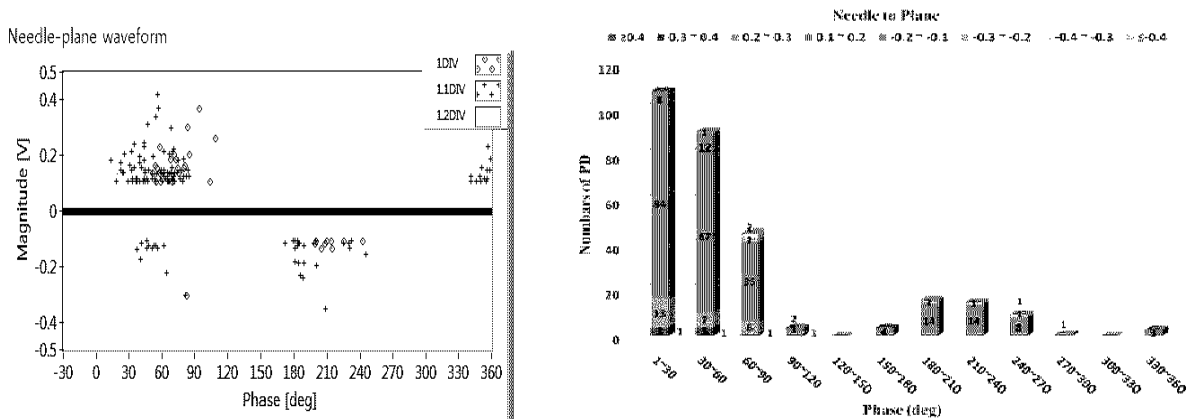
이것은 DIV의 증가에 의해 전극에 집중되는 전계의 강도가 증가하게 되고, 그로인해 전압 상승률이 비교적 작은 부분에서도 PD가 발생한 것으로 판단된다. 위상  $61^\circ \sim 90^\circ$  사이에서 가장 많은 횟수의 PD 펄스가 발생하였으며, 인가전압이 1DIV에서 1.2DIV로 증가할수록  $Q_{max}$ 는 222 mV에서 362 mV로 약 1.6배 증가하였다.

유절연지에서는 DIV 및 DEV는 각각 2.26 kV, 2.24 kV로 cast-resin과 유사하게 나타났다. 측정주기 동안 1DIV에서는 434회, 1.1DIV에서는 1188회, 1.2DIV에서는 2431회의 방전 펄스가 발생하였으며, 대부분의 PD펄스가 인가전압의 최고치 부근( $90^\circ$ ,  $260 \sim 270^\circ$ )에서 발생하였다. Cast-resin과 전체 방전횟수를 비교해볼 때 약 8.3배 많은 수치이다.

인가전압이 증가함에 따라 PD가 발생하는 위상범위가 확대되는 cast-resin과 달리 PD의 발생위상은 거의 동일하였으며, PD의 크기만 증가하는 경향을 나타내었다. 인가전압이 1DIV에서 1.2DIV로 증가함에 따라  $Q_{max}$ 는 124 mV에서 280 mV로 약 2.3배 증가하였으며, 정극성 펄스가 대다수인 cast-resin에 비해 많은 부극성 펄스를 확인할 수 있다. 유절연지가 cast-resin에 비해 DIV, DEV가 크게 측정되었음에도 불구하고 방전의 크기가 작은 것은 최초방전 이후 cast-resin보다 절연강도가 낮은 유절연지에 미소 공극이 다수 생성되어 방전크기가 작은 PD가 많이 발생한 것으로 판단된다.

### 3.2 침-평판 전극

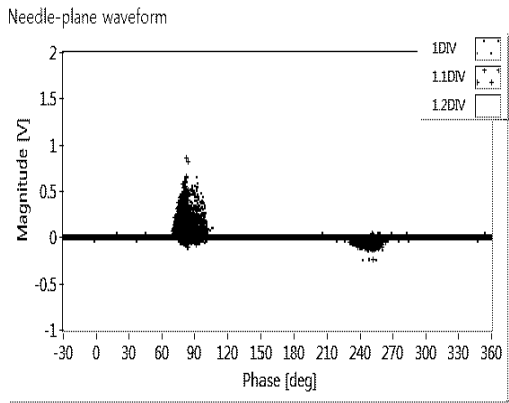
침-평판 전극에 대한 방전신호의 분석결과는 그림 6과 그림 7에 나타내었다. Cast-resin에서의 침-평판 전극은 PD 펄스의 대부분이 정극성의 반주기(half cycle)동안에 발생하였다. 이것은 불평등한 전계분포에 의한 것으로 평판전극에 비해 침전극에 전계가 집중되기 쉬우므로 침전극에 고압이 인가되는 반주기 동안에 많은 횟수의 PD가 발생한 것으로 판단된다. DIV는 1.70 kV, DEV는 1.67 kV였으며 방전횟수는 1DIV에서 34회, 1.1DIV에서 133회, 1.2DIV에서 134회로 침-침 전극에 비해 방전개시전압 및 소멸전압은 증가하였으나, 전체 방전횟수는 감소하였다. 초기 방전은  $90^\circ$  위상을 기준으로  $Q_{max}$ 가 발생하였으나 인가전압이 증가함에 따라  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ 로 기준위상이 이동함을 확인할 수 있다. 또한 DIV가 증가함에 따라 371 mV에서 404 mV로 증가하였다. 유절연지에서의 DIV와 DEV는 각각 2.69 kV, 2.50 kV로 나타났으며, 방전횟수는 1,205회(1DIV), 1,521회(1.1DIV), 5,566회(1.2DIV)로 침-침 전극에 비해 2배가량 증가하였다. 초기 방전은 cast-resin과 동일하게 인가전압의 최고치인  $90^\circ$  위상을 기준으로 대부분의 PD가 발생하였으며, 1.1DIV에서는 인가전압의 증가에 의해 전압상승률이 비교적 낮은 위상( $80^\circ$ )에서도 발생하였다. 1.2DIV에서는 유절연지의 절연이 거의 파괴되어 PD의 발생위상이 확대되고, 방전량이 큰 펄스가 다량 발생한 것으로 판단된다. 유절연지의 침-평판 전극 또한 불평등한 전계를 형성하며, cast-resin과 유사하게 정극성의 반주기에서 더 많은 PD펄스를 확인할 수 있다.  $Q_{max}$ 는 DIV가 증가함에 따라 642 mV에서 2 V로 증가하였으며, cast-resin에 큰 증가비율을 나타내었다.



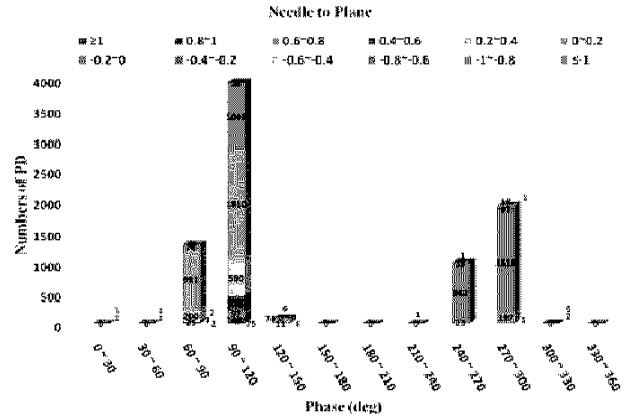
(a) 침-평판 전극의 부분방전 패턴

(b) 침-평판 전극의  $\Phi$ -q-n 분석

그림 6. Cast-resin의 부분방전 특성분석



(a) 침-평판 전극의 부분방전 패턴

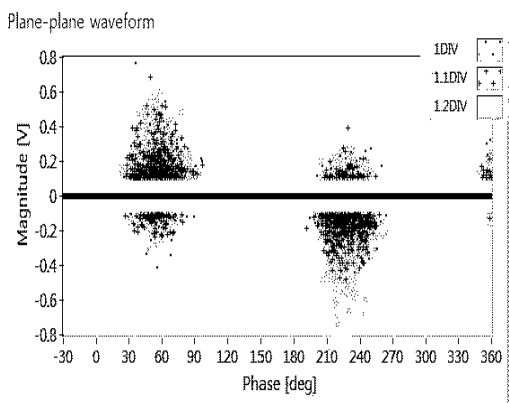


(b) 침-평판 전극의  $\Phi$ -q-n 분석

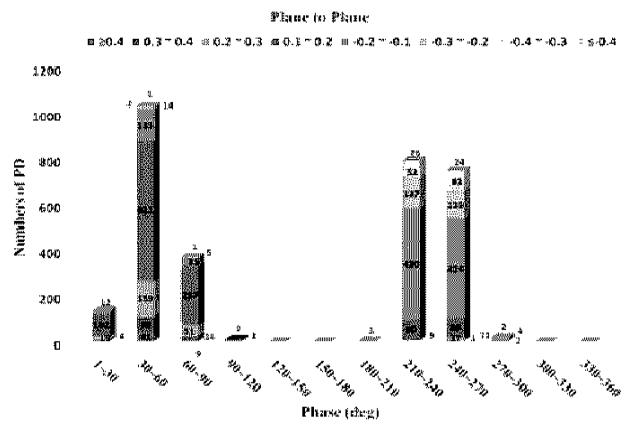
그림 7. 유절연지의 부분방전 특성분석

### 3.3 평판-평판 전극

평판-평판 전극의 측정결과는 그림 8과 그림 9와 같다. Cast-resin에서 평판-평판 전극의 DIV는 2.97 kV, DEV는 2.93 kV로써 다른 전극들에 비해 약 2배 가량 높게 측정되었다. 1DIV에서의 방전횟수는 267회, 1.1DIV에서는 888회, 1.2DIV에서는 1959회로 cast-resin의 모의전극들 중에 가장 많은 횟수의 방전이 발생하였으며,  $Q_{max}$  또한 1DIV에서 544 mV, 1.2DIV에서 741 mV로 가장 큰 값을 나타내었다. 전형적인 평판-평판 전극은 평등전계를 형성함으로써 방전횟수는 다른 전극들(침-침, 침-평판)에 비해 적고, PD 크기가 크게 측정되는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서는 첫 DIV 인가 후 절연체계가 파괴되고 도전로가 형성되어 방전횟수가 증가한 것으로 판단된다. 측정결과 대부분의 PD펄스가 최초 DIV에서부터 넓은 위상범위( $20^{\circ} \sim 90^{\circ}$ )에서 발생하였으며, cast-resin의 다른 전극과 달리 부극성에서도 많은 PD펄스를 관측할 수 있다. 위상  $45^{\circ}$ 에서 전하량이 가장 큰 PD펄스가 발생하였으며, 그림 8로부터  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$  위상에서 가장 많은 횟수의 PD펄스가 발생한 것을 확인할 수 있다. 유절연지의 DIV와 DEV는 3.01 kV, 2.98 kV로써 다른 전극들에 비해 가장 높게 측정되었으며, 방전횟수 또한 2,413회(1DIV), 2,360회(1.1DIV), 8,883회(1.2DIV)로 가장 많은 횟수를 나타내었다. 그러나  $Q_{max}$ 는 1DIV에서 362 mV로 가장 큰 PD펄스가 발생한 후 1.1DIV에서는 231 mV로 감소하고, 1.2DIV에서 다시 272 mV로 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 첫 DIV 인가 후 미소공극 내부표면에 도전로가 형성되어 내부전하가 공극표면을 따라 누설되어 방전크기가 작은 PD가 다량 발생한 것으로 추측되며, 1.2DIV인가 시 미소공극의 절연이 파괴될 정도의 높은 전계가 인가됨으로써 방전이 재시작되고 전하량이 비교적 큰 방전펄스가 발생된 것으로 판단된다.

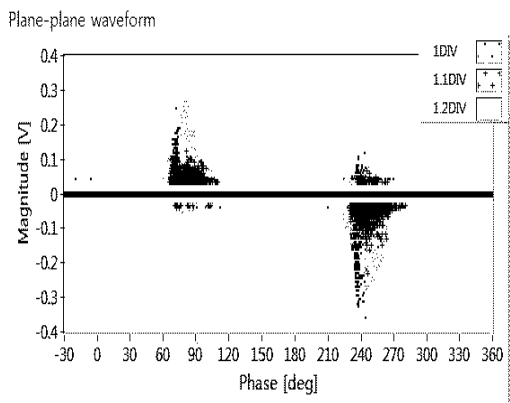


(a) 평판-평판 전극의 부분방전 패턴

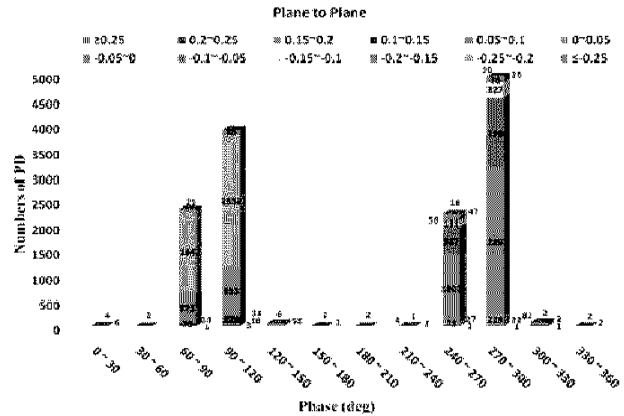


(b) 평판-평판 전극의  $\Phi$ -q-n 분석

그림 8. Cast\_resin의 부분방전 특성분석



(a) 평판-평판 전극의 부분방전 패턴



(b) 평판-평판 전극의  $\Phi$ -q-n 분석

그림 9. 유절연지의 부분방전 특성분석

#### 4. 결론

본 논문에서는 유입 및 몰드변압기에서 발생 가능한 결함을 모의하기 위하여 유절연지(프레스보드지)와 cast resin를 이용한 모의 전극(침-침, 침-평판, 평판-평판)을 제작하였으며, 결함종류에 따른 부분방전 신호를 검출하였다. 미소한 방전신호를 검출하기 위하여 저노이즈의 증폭회로를 설계·제작 하였으며, NI사의 가상계측기(VI)를 이용한 분석알고리즘을 통하여 결함에 따른 부분방전펄스의 위상분포, 방전전하량, 발생횟수를 비교하였다. 각 전극으로부터 측정된 데이터를 비교·분석한 결과, 결함에 따른 특성을 분류할 수 있었으며, 결과는 다음과 같다.

##### 1) 침-침 전극

전극들 중 가장 작은 크기의 DIV, DEV가 측정되었으며, 초기방전은 cast-resin의 경우 대부분 전압상승률이 급준한  $45^\circ \sim 90^\circ$ ,  $220^\circ \sim 270^\circ$  사이에서 발생하였다. 유절연지의 경우 인가전압의 최고치 부근( $90^\circ$ ,  $260^\circ \sim 270^\circ$ )에서 초기방전이 발생하였으며, 정극성 펄스가 대다수인 cast-resin에 비해 많은 부극성 펄스를 확인할 수 있다. 또한 DIV가 증가함에 따라 cast-resin에서는 PD발생 위상이 전범위로 확대되었으며,  $60^\circ$ 위상에서 가장 큰 크기의 PD가 발생하였다. 반면 유절연지의 경우 PD의 발생위상은 거의 동일하였으며, 방전크기만 증가하는 경향을 나타내었다.

##### 2) 침-평판 전극

Cast-resin의 경우 대부분의 PD가 정극성의 반주기(half cycle)동안 측정되었으며, 초기방전 대부분은  $45^\circ \sim 90^\circ$ 사이에서 발생하였다. 또한 DIV가 증가함에 따라  $Q_{max}$ 의 발생위상이  $90^\circ$ 에서  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ 로 이동하는 특성을 나타내었다. 반면 유절연지의 경우 인가전압의 한 주기 동안 정극성 뿐만 아니라 부극성에서도 비교적 많은 PD펄스를 관측할 수 있었으며, cast-resin과 달리  $Q_{max}$ 의 위상이동 범위는 매우 근소하였다. 또한 cast-resin에 비해 유절연지에서 훨씬 더 많은 방전횟수를 확인할 수 있었다.

##### 3) 평판-평판 전극

모의전극들 중 가장 높은 DIV와 DEV가 측정되었으며, 가장 빈번한 횟수의 방전펄스가 발생하였다. Cast-resin의 경우 초기 방전 시 가장 넓은 위상범위( $0^\circ \sim 90^\circ$ )에서 PD신호가 측정되었으며,  $45^\circ$ 위상에서  $Q_{max}$ 가 발생하였다. 유절연지의 경우 초기에는  $60^\circ$ 와  $230^\circ$ 부근에서  $Q_{max}$  및 대부분의 PD가 발생하였으나 인가전압이 증가함에 따라  $90^\circ$ 와  $240^\circ$ 부근으로 PD의 분포위상이 이동하였다. Cast-resin에 비해 초기 DIV에서부터 방전전하량이 큰 펄스가 다수 발생하였으며, 인가전압을 증가시키기에 따라 오히려  $Q_{max}$ 가 감소하는 경

향이 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

### 참고문헌

- [1] P. Werle, V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach, "Comparison of Different Partial Discharge Measurement Methods on Dry Type Transformers in Operation", 2nd International Conference on Dielectrics and Insulation (ICDI), Stara Lesna, CZ, June 2000.
- [2] L. E. Lundgarrrd et. al., "Partial Discharge-Part XIV : Acoustic Partial Discharge Detection Practical Application" IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol.8, No.5, pp.34~43, 1992
- [3] Hu Xiaoyun et. al., "PD detection and localization by acoustic measurement in an oil-filled transformer" IEEE Pro.-Sic. Meas. technol., Vol. 147, No.2, pp.81~85, 2000
- [4] P. D. Agoris, S. Meijer and J. J. Smit, "Evaluation of On-Line Insulation Condition Assessment Techniques for power transformers", International Symposium on High-Voltage Engineering(ISH), Beijing, China, 2005.
- [5] S. Tenbohlen et al., "Enhanced Diagnosis of Power Transformers using On and Off-line Methods: Results, Examples and Future Trends", CIGRE Paris, paper 12-204, 2000.