

## 몰드변압기에서 부분방전 검출방법의 비교분석

(Comparison Analysis of Partial Discharge Detection Methods in Cast Resin Dry Type Transformers)

박찬용\* · 김성욱 · 최재성 · 박대원 · 길경석

(Chan-Yong Park · Sung-Wook Kim · Jae-Sung Choi · Dae-Won Park · Gyung-Suk Kil)

### Abstract

Various sensors such as capacitive probe, high frequency current transformer (HFCT), and acoustic emission (AE) probe were applied to a cast resin dry type transformer for partial discharge detection. We designed and fabricated a wideband low-noise amplifier having a gain of 40 [dB]. From the experiment which was carried out in the same transformer, the sensitivities were 7.16 [mV/pC] for capacitive probe, 3.8 [mV/pC] for HFCT, and 17.9 [mV/pC] for AE probe.

### 1. 서론

효율적인 전력공급을 위하여 변압기는 가장 필수적인 요소로서 전력체계에 있어 널리 사용되고 있는 전력기기이다. 특히 몰드변압기는 유지보수 비용이 저렴하고 환경적인 요소에 크게 영향을 받지 않기 때문에 그 수요가 증가하고 있는 추세이다[1]. 그러나 수용가의 전력 소비 증가와 함께 매년 변압기 사고발생 빈도도 증가하고 있는 실정으로, 이러한 변압기사고의 원인은 대부분 변압기를 구성하는 재료의 열화로 인한 것으로 전기적, 열적, 화학적 스트레스로 인해 절연성능이 저하됨으로써 발생한다[2]~[4]. 변압기의 절연열화는 곧 절연파괴로 이어져 전력공급의 중단은 물론 화재나 인명사고를 발생시킬 수 있으며, 경제적으로는 막대한 손실을 유발한다. 몰드변압기의 중대사고 요인인 내부절연파괴는 대부분의 경우 초기단계에 부분방전을 수반하며, 이는 부분방전과 절연이 직접적인 상관관계를 지니고 있음을 의미한다. 따라서 변압기의 절연열화를 조기에 발견하기 위해 운전 중 발생하는 부분방전 신호검출에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 부분방전신호는 결합발생시 다른 징후보다 우선적으로 나타나므로 부분방전신호를 관측함으로써 사고를 미연에 방지할 수 있으며, 변압기의 절연설계와 평가시에도 유용하게 적용될 수 있다. 이러한 부분방전 신호는 커플링 캐패시터, UHF센서, 고주파변류기(HFCT) 및 AE(Acoustic Emission)센서 등으로 검출할 수 있으며, 피측정 대상에 따라 유효한 방법을 선택할 수 있다[5]~[7]. 그러나 이러한 센서들은 운전환경이나 피측정 대상에 따라 응답특성이 달라질 수 있으며, 특히 몰드변압기에서의 적용사례는 아

직 미흡한 실정으로 동일한 운전환경에서 각 센서들의 응답특성을 비교·분석해 볼 필요성이 있다.

본 논문에서는 용량성 프로브, 고주파 변류기 및 AE(Acoustic Emission)센서를 몰드변압기에 적용하여 각각의 출력특성을 비교·분석하였으며, 미소 방전신호를 측정하기 위한 역결합회로와 저잡음·광대역 증폭회로를 설계·제작하였다.

### 2. 부분방전 측정회로

#### 2.1 용량성 프로브에 의한 검출

부분방전 검출전극인 용량성 프로브는 변압기 외부표면에 부착되며, 전기적 절연물에 동판을 접착시킨 구조이다. 검출전극의 말단에는 특성임피던스 50 [Ω]의 BNC를 사용하여 동축케이블을 접속할 수 있도록 하였다.

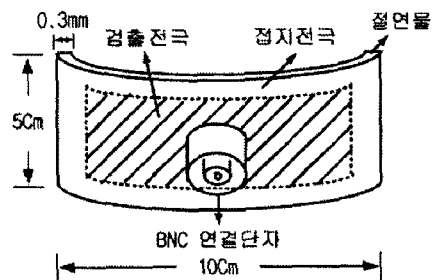


그림 1. 용량성 프로브의 구조  
Fig. 1. Structure of the capacitive probe

용량성 프로브의 동작원리는 검출전극과 고전압 도체 사이의 표류정전용량( $C_n$ )와 접지전극사이의 정전용량( $C_p$ )에 의한 분압으로 고주파 부분방전펄스를 측정하는

것으로 이는 일종의 필터에 해당하며, 주파수응답은 증폭기의 입력임피던스와 센서의 정전용량에 의하여 결정된다[8]. 신호전송에는 특성임피던스 50 [Ω]의 동축케이블(RG58A/U)을 사용하였으며, 동축케이블의 정전용량으로 인하여 나타나는 신호의 왜곡을 제거하기 위해 동축케이블의 특성임피던스와 동일한 50 [Ω]의 정합저항  $R_m$ 과 보상저항  $R_t$ 를 연결하였다.

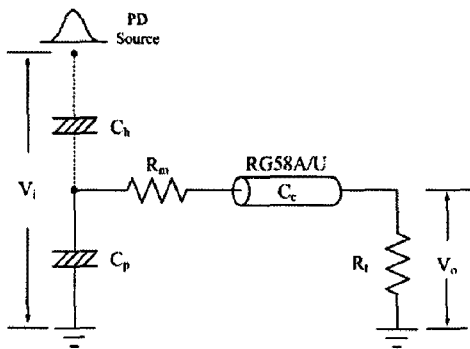
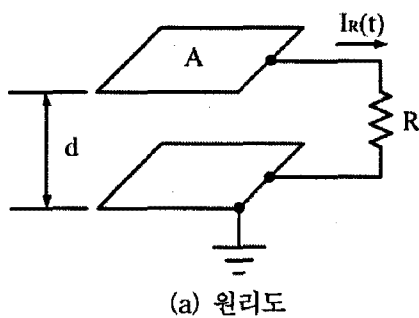


그림 2. 용량성 프로브에 의한 부분방전 검출  
Fig. 2. Partial discharge detection by a capacitive probe

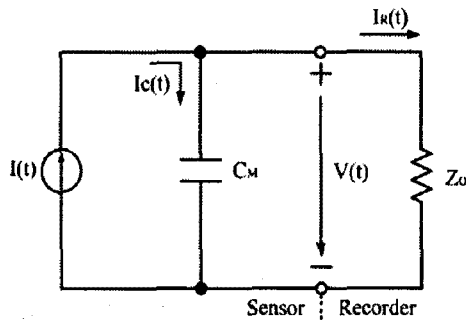
용량성 프로브의 등가회로는 그림 3과 같으며, 전체 전류  $i(t)$ 는

$$i(t) = i_C(t) + i_R(t) \quad (1)$$

로 표현된다.



(a) 원리도



(b) 노튼의 등가회로

그림 3. 용량성 프로브의 원리도와 등가회로  
Fig. 3. The principle and a equivalent circuit of the capacitive probe

식 (1)로부터

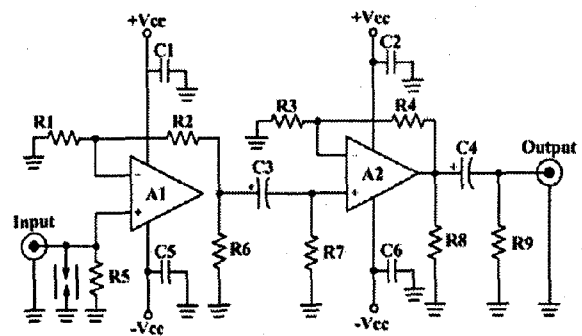
$$\epsilon \frac{dE(t)}{dt} \cdot A = C_M \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{Z_o} \quad (2)$$

의 관계가 성립하므로 식 (2)에 의해 산출되는 미지의 전압  $V(t)$ 는 다음과 같이 증폭기의 입력임피던스  $Z_o$ 의 크기에 따라 달라진다. 증폭기의 입력임피던스가 50 [Ω]이라 하면, 식 (2)에서 우변의 첫 번째 항이 두 번째 항보다 매우 미소하여 이를 무시하면 측정하고자 하는 미지의 전압  $V(t)$ 는

$$V(t) = Z_o A \cdot \frac{dD(t)}{dt} \quad (3)$$

로 근사화 시킬 수 있으며, 출력전압  $V(t)$ 의 크기는 센서의 면적  $A$ 에 의하여 결정되고 입사변위전류량에 의하여 결정된다. 이러한 경우 센서의 출력전압  $V(t)$ 는 전속밀도의 시간에 대한 미분량에 비례하게 된다.

용량성 프로브에 의해 검출되는 부분방전신호는 매우 미소하므로 별도의 증폭회로가 필요하다. 따라서 저잡음·광대역 증폭회로를 설계·제작하였으며, 그림 4에 시제작 증폭기를 나타내었다.



(a) 회로도



(b) 사진

그림 4. 시제작 증폭기  
Fig. 4. The prototype amplifier

제작한 증폭기의 이득은 40 [dB]이며, 주파수 대역은 그림 5와 같이 500 [kHz]~30 [MHz](-3 [dB])로 부분방전을 측정하는데 충분한 주파수특성을 가진다.

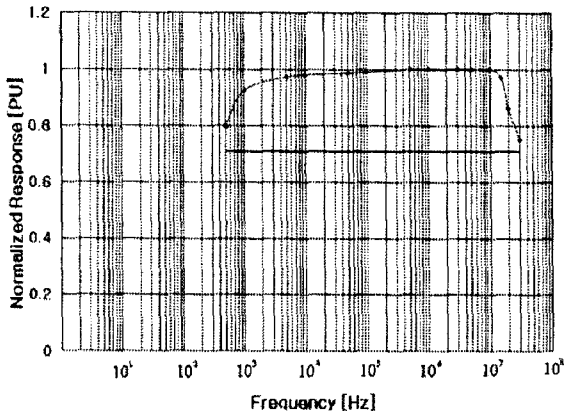


그림 5. 증폭기의 주파수특성  
Fig. 5. Frequency characteristic of the amplifier

또한, 발생되는 방전신호 전하량의 정확한 측정을 위해서는 기지의 전하량을 주입함으로써 검출회로의 감도를 산출할 필요성이 있다. 본 연구에서는 교정펄스발생기(CALIA, 1~100 [pC], Pos./Neg.)를 사용하여 그림 6과 같이 몰드변압기의 권선과 절연물사이에 교정펄스를 인가한 후 감도 [mV/pC]를 산출하였다.

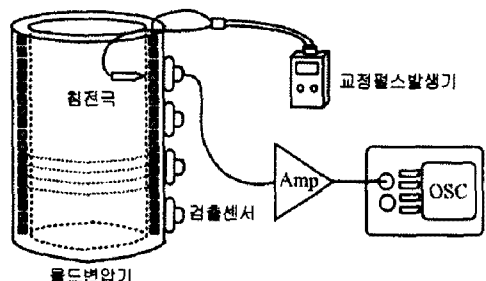


그림 6. 교정 실험계의 구성  
Fig. 6. Configuration of calibration experiment

그림 7은 20 [pC]의 정극성 펄스를 인가하였을 때, 검출된 증폭기 출력파형의 예를 나타낸 것이다. 증폭회로의 출력전압은 143.1 [mV]로써 환산감도는 7.16 [mV/pC]이다.

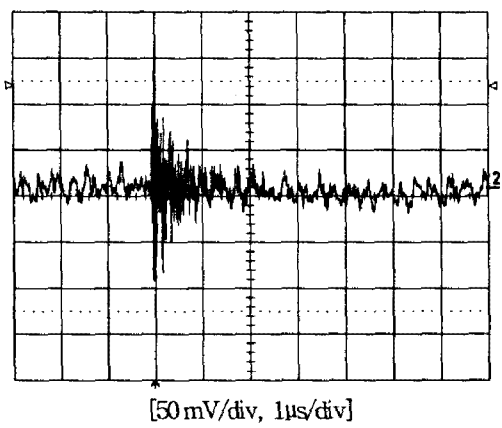


그림 7. 교정펄스에 대한 응답파형  
Fig. 7. Response waveform to calibration pulse

## 2.2 고주파 변류기 (HFCT) 에 의한 검출

변압기 내부에서 부분방전이 발생하게 되면 펄스형태의 방전전류가 접지선을 통하여 흐르게 되는데, 이와 같은 펄스전류를 검출하기 위해 그림 8과 같이 실험계를 구성하였다.

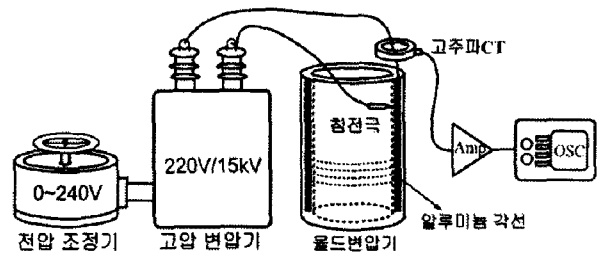


그림 8. 실험계의 구성  
Fig. 8. Configuration of experimental apparatus

접지측에 클램프 타입의 고주파 변류기를 접속하여 펄스전류를 검출하고, 검출된 신호는 증폭회로를 통해 증폭된다. 증폭회로는 저잡음 광대역(1.6 [nV/√Hz], 420 [MHz]) 연산증폭기를 2단으로 구성하였으며, 40 [dB]의 감도를 갖는다.

적용실험에 앞서 교정펄스 20 [pC]에 대한 환산감도를 산출하였으며, 출력파형의 예를 그림 9에 나타내었다. 증폭회로의 출력전압은 75.9 [mV]로서 환산감도는 3.8 [mV/pC]이다.

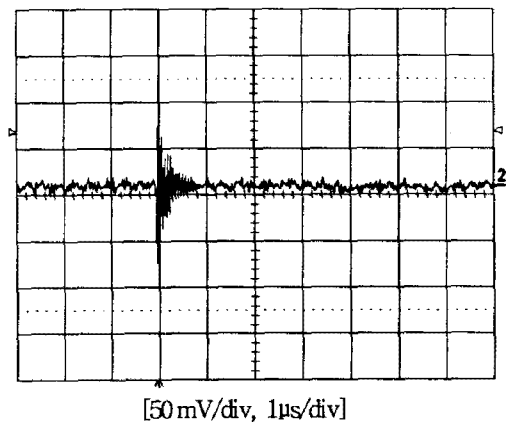


그림 9. 교정펄스에 대한 응답파형  
Fig. 9. Response waveform to calibration pulse

## 2.3 AE 센서에 의한 검출

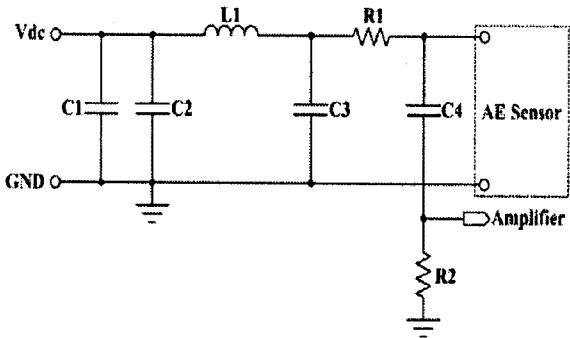
변압기 내부에서 부분방전이 발생하게 되면 변압기 구성물질의 변형 또는 균열이 나타나게 되는데, 이때 재료에 축적되었던 응력에너지가 탄성파로 방출되게 되면서, 음파의 형태로 신호가 전달되게 된다.

본 논문에서는 방출되는 음향신호를 AE센서(R-15L, PAC)로 검출하였으며, 센서의 주파수대역은 50 [kHz]~200 [kHz], 공진주파수는 150 [kHz]이다. 센서는 전치증폭기(Pre-Amplifier)를 내장하고 있으며, 전원선과 신호

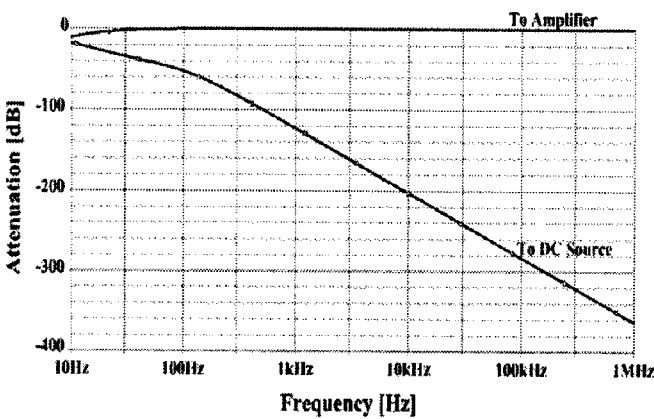
선을 동일하게 사용하기 때문에 역결합회로(Decoupler)가 필요하다. 따라서, AE센서의 전원공급과 음향신호의 검출을 위하여 고역통과필터 특성의 역결합회로를 설계하였으며 음향신호를 증폭하기 위한 저잡음 증폭회로를 설계·제작하였다.

그림 10에 직류전원의 공급과 음향신호의 검출을 위한 역결합회로를 나타내었다. 직류전원은 L을 통해서 고주파성분은 차단되고 직류성분만을 AE센서로 공급하며, AE센서에서 검출한 음향신호는 L에 의해 차단되고 C3과 R2를 통해 증폭회로로 전달된다.

역결합회로의 주파수 응답을 그림 10(b)에 나타내었으며, AE센서의 10 [kHz]이상의 주파수성분은 120 [dB] 이하로 감쇄시켜 전원측에 영향을 주지 않으며, 100 [Hz]이상의 신호는 감쇄없이 증폭회로로 전달하는 특성이 있다.



(a) 역결합회로



(b) 주파수 응답

그림 10. 역결합회로 및 주파수 응답  
Fig. 10. Decoupler circuit and its frequency response

부분방전측정에 있어서 음향검출법의 단점인 감도개선을 위하여 그림 11과 같이 저잡음 증폭회로를 설계하였다. 증폭회로는 계측기용 연산증폭기(DC~70 [MHz], LH0032)를 사용하여 이득 40 [dB]로 제작하였으며, 역결합회로를 포함한 증폭기의 주파수 대역은 1.6 [kHz]~1.8 [MHz]로써 부분방전에 의해 발생하는 음향신호를 측정하는데 충분한 특성을 가진다.

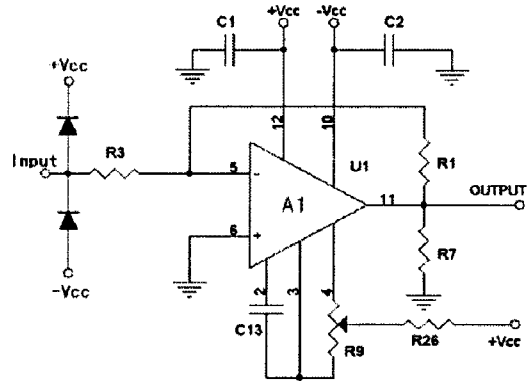
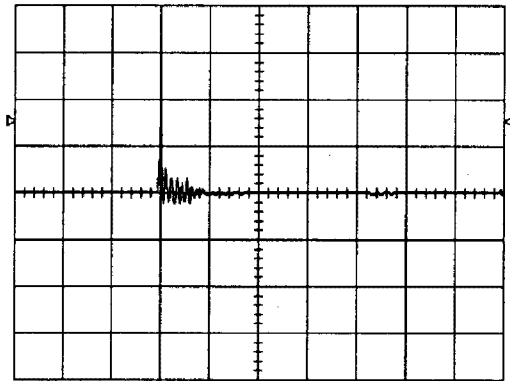
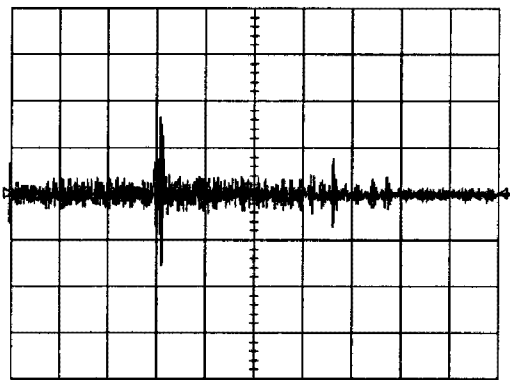


그림 11. 음향신호 증폭기  
Fig. 11. Acoustic signal amplifying circuit

AE센서에서는 직접적으로 감도를 환산하기가 어려우므로 감도를 알고 있는 HFCT의 출력전압과 비교하여 AE센서의 감도를 간접적으로 산출하였으며 측정파형의 예를 그림 12에 나타내었다. HFCT와 AE센서의 비교측정결과, HFCT의 출력전압은 700 [mV]로 측정되어 184 [pC]의 부분방전 전하량이 검출되었으며 이때 AE센서의 출력전압은 3.31 [V]로서 환산감도는 17.9 [pC]으로 계산되었다.



[0.5 V/div, 0.5 μs/div]  
(a) HFCT 출력파형



[2 V/div, 2 ms/div]  
(b) AE센서 출력파형

그림 12. 교정실험파형의 예  
Fig. 12. Typical waveform of calibration experiment

### 3. 부분방전의 측정

제작한 부분방전 검출장치를 이용하여 실제 몰드변압 도체에 부분방전이 발생하도록 변압기 상부에서부터기에 적용실험을 수행하였다. 몰드변압기의 내부 권선 15 [cm] 아래의 절연물 내부에 침전극을 설치하고, 용량성 프로브와 AE센서는 침전극으로부터 5 [cm] 떨어진 위치에 부착하였다. 접지선에 고주파 변류기를 설치하였으며, 전압조정기와 고압변압기 (AC 220 [V]/15 [kV])를 사용하여 부분방전을 모의하였다.

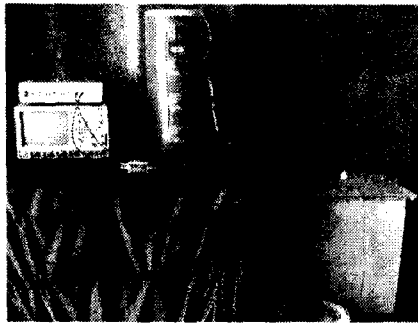
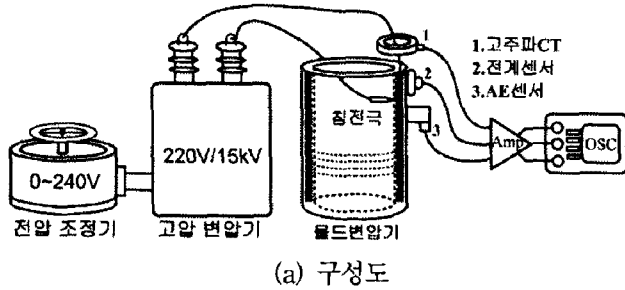
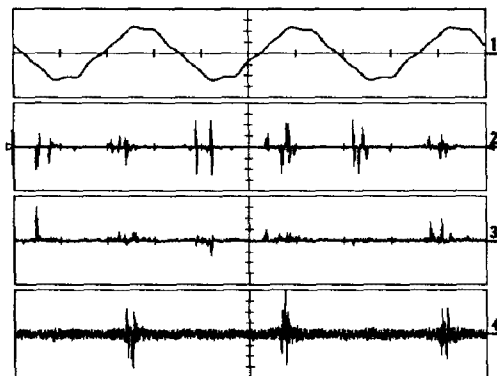


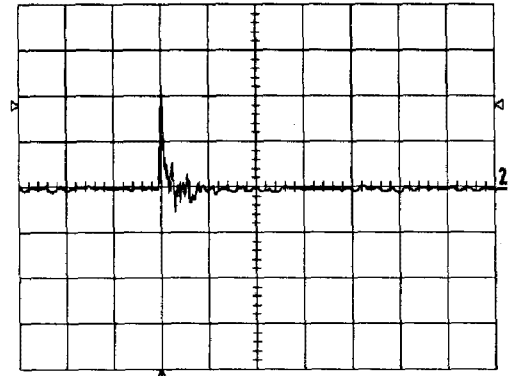
그림 13. 실험계의 구성  
Fig. 13. Configuration of the experiment system

그림 14에 용량성 프로브, 고주파 변류기 및 AE센서에 의해 검출된 부분방전펄스의 예를 나타내었으며, 전원전압과 부분방전펄스의 위상관계 및 방전신호의 크기를 알 수 있다.



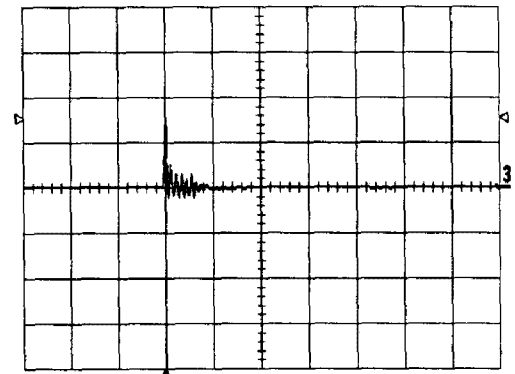
Ch.1 : 인가전압 [5 kV/div, 5 ms/div]  
Ch.2 : 용량성 프로브 [1 V/div, 5 ms/div]  
Ch.3 : HFCT [100 mV/div, 5 ms/div]  
Ch.4 : AE센서 [200 mV/div, 5 ms/div]

(a) 위상과 방전신호



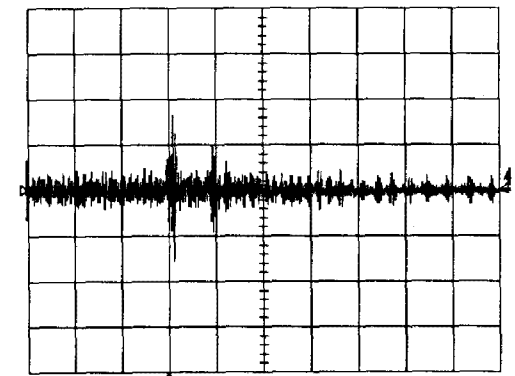
[1V/div, 0.5 μs/div]

(b) 용량성 프로브



[1V/div, 0.5 μs/div]

(c) 고주파 변류기



[2 V/div, 2 ms/div]

(d) AE 센서

그림 14. 부분방전파형의 예  
Fig. 14. Typical waveform of partial discharges

### 4. 결론

본 논문에서는 전력용 몰드변압기 진단을 위한 기초 연구로 변압기 내부에서 발생하는 부분방전의 검출방법에 대해 연구하였다. 부분방전 신호의 검출에는 용량성 프로브, 고주파 변류기 및 AE센서를 적용하였으며, 각각의 검출방식에 적합한 역결합회로와 저잡음·광대역 증폭회로를 설계·제작하였다. 교정실험으로부터 용량성 프로브와 고주파 변류기의 환산감도는 각각 7.16 [mV/pC]와 3.8 [mV/pC]로 나타났으며, AE센서의 환산

감도는 17.9[pC]로 계산되었다. 적용실험을 통하여 몰드 변압기의 절연물내부에서 발생하는 방전신호를 검출할 수 있었다. 실험실내에서 이들 방식은 부분방전신호를 고감도로 검출할 수 있었으나, 현장 측정에 있어서는 변압기 인가전원과 외부에서 유입되는 노이즈로 인해 방전신호의 정확한 측정은 어려울 것으로 판단된다. 그러나 저잡음 증폭기와 가변대역필터를 적용하여 노이즈의 영향을 최소화고 내부에서 발생하는 방전신호만을 측정한다면 대용량 변압기에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- (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. Lundgard 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) 유호근외 4명, "저손실형 복합절연주상변압기 개발 및 단락특성에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 (B), pp.607~612, 2002.
- (5) 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.
- (6) 길경석, 박대원, 김일권, 최수연, 박찬용, "부분방전에 의한 음향신호의 검출과 위치추정에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 논문지 제20권 제10호, pp.907~911, 2007.
- (7) S. Terbohlen at al., "Enhanced Diagnosis of Power Transformers using On and Off-line Methods:Results, Examples and Future Trends", CIGRE Paris, paper 12~204, 2000.
- (8) 길경석, 송재용, 박대원, "용량성 프로브와 광전송회로를 이용한 광대역 전압측정장치", 한국센서학회지 제13권 제5호, pp.363~368, 2004.