# 몰드변압기의 부분방전 측정 시스템

강동식* · 선종호* · 임태훈* · 황돈하* · 김용주* · 권동진** · 어수영***
*한국전기연구원, **전력연구원, ***(주)태광이엔시

# Partial Discharge Measuring System of Mold Transformer

Dong-Sik Kang* · Jong-Ho Sun* · Tae-Hoon Lim* · Don-Ha Hwang* · Yong-Joo Kim* · Dong-Jin Kweon** · Soo-Young Oeu***
*KERI, **KEPRI, ***Taegwang E&C

**Abstract** - In order to development of diagnosis system for mold transformer, partial discharge measurement technique is recommended the best effective method for the evaluation of insulation condition. However, this technique was not applied to mold transformer yet.

The purpose of this paper is to describe the method of partial discharge measurement for mold transformer. As we reviewed on-line test technique, sensor, transducer of pulse signal processing, set-up of test circuit for loading back device and now testing.

## 1. 서 론

몰드변압기는 유입식 변압기가 지니는 주요 단점인 사고시 화재 및 폭발의 위험성에서 벗어나고자 주로 내열성 에폭시 레진을 몰딩하여 제작하는 기법으로 개발되어 소방설비가 고려되어지는 옥내형 수배전설비에 사용이 증가되고 있다. 그러나, 유입식 변압기에서는 절연유 분석방법을 이용한 진단기법이 개발되어 주요 변압기에 적용되어 열화진전에 대한 상태감시가 가능하지만, 몰드변압기의 경우는 현재까지 현장진단기법이 개발되지 못하여, 설비의 확대 보급에 제약을 받고있는 실정이다. 몰드변압기는 절연물 몰딩제조공정에서 필히 수반되는 void 또는 이물질 부위 등에서 장기간 사용후 열화가 진행되면 절연파괴 사고로 진전되게 된다.

국내의 경우 몰드 변압기의 수명상태를 정확히 판단하지 못한 상태에서 실제적으로 장시간 운전되는 경우가 대부분이므로, 제조불량 및 장기 사용시 발생되는 부분방전 현상에 따른 절연파괴 가능성이 높다. 그러므로 최적 측정감도를 지닌 부분방전 센서, 방전펄스를 신호처리하는 측정 transducer, 현장조건을 고려한 잡음제거기법 및 진단알고리즘을 지닌 측정시스템을 on-line으로 구축하여 절연파괴 사고전 예지하고자 초기 부분방전 측정시스템을 구성하였다.

## 2. 몰드 변압기의 절연열화 특성

몰드변압기의 성능은 권선 절연시스템의 특성에 의하여 결정되어진다. 이 권선 절연시스템의 주성분은 난연 및 내열성을 지닌 에폭시 레진으로 주로 고진공 상태에서 몰딩하여 제조된다. 절연물 몰딩제조공정에서 void 또는 이물질이 적은 양이지만 포함되어지며, 운전 중 부하변동에 의한 heat cycle 발생으로 도체부와 에폭시 절연부의 열팽창 차이로 절연물에 crack 발생이 촉진된다. 장시간 운전 시 이러한 결점 부위에서 부분방전이 발생 진전되면서 절연재료의 열화가 촉진되어 절연성능이 떨어지고 궁극적으로 절연파괴 사고로 진전될 위성성이 증대되게 된다.

몰드식변압기는 운전 상태에서 전압, 열, 기계력 및 환경적 열화요인을 단독 및 복합으로 받고 있다. 일반적으로 변압기 권선은 사용 중에 상시 운전시의 전압과 뇌 전압, 침입서지 등 전기적 스트레스를 받는다. 또한 절연시스템은 전기절연 외에 기계적 구조물의 기능도 지니므로, 기계적 지지에 단락시의 전자력 및 온도변화에 의한 열응력 등의 기계적 스트레스를 받는다. 또한 습기, 오염, 약품 등 주위 조건에 따라 여러 가지 환경적 열화가 수반된다.

일반 전기절연물과 동일하게 몰드변압기의 절연시스템이 운전 중 과부하 등으로 열스트레스를 받게 되면 절연재료가 열열화를 일으킨다. 이는 열에 의하여 절연재료의 분자 level 구조에 불가역적인 화학적 또는 물리적 변화가 일어나 특성이 나빠지는 것으로 열분해반응과 산화반응으로 진행되며, 기계적 강도 저하 및 절연표면에서의 흡습성 증대 현상 등이 나타난다. 이러한 절연물의 열적 열화 가속수명 모형은 화학반응속도 특성으로 표현되어지며, 운전 온도보다 높은 3 가지 온도로 가속열화 시험 결과로 나타난 아레니우스 수명곡선을 이용하면 운전조건을 고려한 평균수명시간(MTTF)인 $L_e$ 시간의 계산이 가능하게 된다.

몰드변압기의 절연시스템이 전자력 및 열응력에 의한 기계적 스트레스를 받게 되면, 절연물에 크랙과 박리 현상이 생성 또는 성장하게 되어 궁극적으로 구조물의 기능을 잃게 된다. 이러한 크랙과 박리의 크기가 적은 경우에도 부분방전 발생전압보다 높은 운전전계가 인가되면 전압열화의 하나인 부분방전이 생성되어 진전되게 된다. 이러한 부분방전 현상은 기계적 스트레스가 적은 경우에도 절연물 제조과정 중 생성된 void, 이물 및 돌기 등이 열화의 발생지점에 국부 고전계부가 인가됨으로 발생하여 수지상으로 진전되는 열화 형태를 지닌다. 이러한 국부 결함지점에서 발생하는 부분방전은 인가전압이 낮아도 발생하게 되어 열화의 원인을 제공하므로, 절연물 몰딩 시 특별한 주의가 요구된다.

몰드변압기의 절연시스템에 영향을 주는 환경적 요인인 습기 및 오염 등이 전기적 스트레스와 병행되면 복합열화인 트래킹 열화의 발생이 일어난다. 이 열화현상은 오손물의 부착 및 흡습으로 절연저항이 낮아지게 되고 누설전류는 증대되어 불꽃방전이 일어나 트래킹 현상으로 진전되는 열화형태이다. 이 열화현상은 내트래킹성이 우수한 절연재료 사용, 열악한 환경조건의 개선 및 충분한 연면거리확보로 억제시킬 수 있다.

## 3. 몰드변압기 분분방전 측정 시스템

### 3.1 열화진단 방법 검토

몰드변압기는 유입식변압기의 단점인 사고시 화재 및 폭발의 위험성을 최소화하고자 개발되어 사용이 증대되고 있는 제품이나, 절연유 분석방법을 비롯한 여러 가지 진단기법이 개발되어 절연상태의 감시가 가능한 유입식변압기와는 달리 몰드변압기는 현재까지 확실한 현장진단기법

이 개발되지 못한 실정이다. 그러나 최근 들어 도심지 또는 산업체의 주 에너지 공급원으로서 기능 및 정보통신의 확대 등으로 고장없는 제품에 대한 요구가 증대되고 있다. 따라서 정전없이 변압기가 운전 중인 상태에서 절연상태 또는 수명을 진단하는 것이 가장 바람직하나 세계적으로 몰드변압기에 적용 가능한 진단기법이 현재까지 개발되어 있지 않은 실정이다.

이러한 몰드변압기의 열화상태를 진단하는 방법은 크게 전기적 측정법과 비전기적 측정법으로 대별된다. 전기적 측정법으로는 직류고전압을 인가하여 표면오손 및 흡습상태를 평가하는 절연저항 및 누설전류 측정법, 절연체의 손실율을 종합적으로 측정하여 재료의 특성 변화를 판단하는 유전정접 측정법, 국부결함지점에서 발생되는 방전펄스를 측정하는 부분방전 측정법 등이 있다. 비전기적 측정법으로는 crack과 구조적 변형 및 권선 진동을 측정하는 진동검출법, 방전시 발생되는 초음파를 분석하는 초음파 측정법 등이 있다.

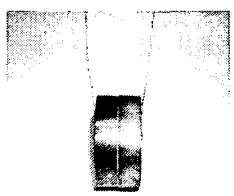
### 3.2 부분방전 측정시스템 달성 방법 선정

1차적으로 6.6kV급 몰드변압기에 대한 on-line 부분방전 측정시스템을 구축하는 것을 목표로 하여 다음과 같이 진행되었다. 첫째, 온라인 부분방전 측정방법으로 고압부 인출단에 직접 센서를 부착하는 접촉식 및 권선 탭 사이에 로고우스키 코일을 삽입하는 비접촉식을 선정하였다. 둘째, 측정용 센서의 측정 주파수 대역 선정 및 센서 설계 및 제작. 셋째, on-line 부분방전 검출시스템 설계 및 protype transducer 제작. 넷째, 6.6kV급 모의 열화 몰드 변압기 설계 제작 및 열화시험용 반환부하 설비 구축. 다섯째, 모델실험을 통한 부분방전 측정가능성 확인 및 문제점 검토 분석으로 구성하였다.

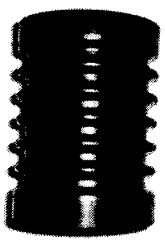
### 3.3 부분방전 접촉식 측정센서

고압부 인출단에 직접 센서를 부착하는 접촉식 센서는 다음과 같은 조건을 만족하도록 설계하여 제작되었다. 본 연구에서는 6.6kV 선로조건을 고려하여 내전압 특성은 15kV · rms 이상, 3pC의 부분방전 개시전압 8kV 이상, 5dB 기준의 측정주파수 대역은 10~50MHz로 선정하였다.

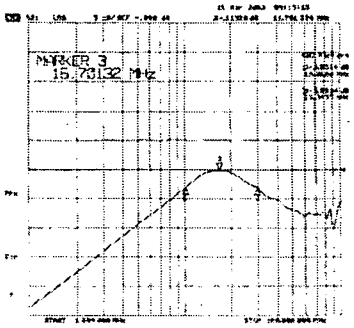
센싱부에 해당되는 소체 재질은 세라믹으로 고유전율 세라믹 컴파운드를 배합하여 소체를 성형한 후, 소체의 양쪽 전극면에 Ag으로 금속 전극층을 형성하는 구조로 하였다. 그림 1은 설계 제작된 100pF 세라믹 소체이며, 이 소체에 외부환경 조건을 고려한 에폭시 하우징을 성형하여 완성된 6.6kV급 접촉식 센서를 나타낸 것이 그림 2이다. 제작된 제품은 높이 90mm, 직경 70mm이며, 소체 외부의 연면방전 방지를 위하여 진공 속에서 에폭시로 molding하였다. 완성된 센서는 60kV 이상의 연면섬락전압, 5dB 기준의 측정주파수 대역은 9.5~110MHz, 부분방전 개시전압은 17kV로 나타났다.



<그림 1> 접촉식 센서 소체



<그림 2> 접촉식 센서 외관

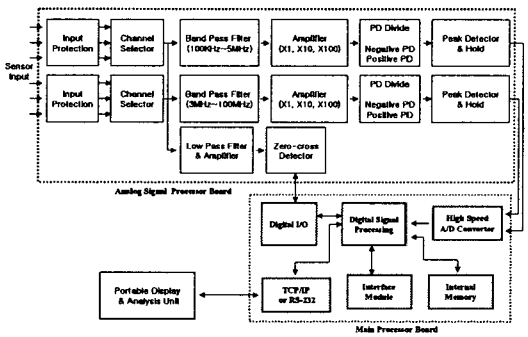



<그림 3> 접촉식 센서의 주파수 응답 전달특성

### 3.4 on-line 부분방전 측정용 transducer 설계 제작

몰드변압기용 부분방전 측정 transducer는 potable 시스템으로 현장에서 간편하게 부분방전 신호를 측정할 수 있도록 한 것으로, 부분방전 전체 시스템의 설치 및 활용이 어려운 현장에서 사용 가능하도록 검토하였다. 센서로부터 센싱된 부분방전 펄스 신호의 계측 및 분석 시스템으로, 전체 구성은 그림 4와 같이 아날로그 방전 신호를 처리하는 analog signal processor board와 디지털 ddta를 처리하기 위한 main processor board 및 potable display & analysis unit으로 구성하였다.

Analog signal processor board는 서로 다른 특성을 가지는 접촉식 및 비접촉식 센서로부터 모두 6 channel의 입력을 on-line으로 받을 수 있도록 구성하였다. 그리고 각 상별 신호 처리를 위한 channel selector와 외부 잡음 제거를 위한 두 종류의 band pass filter가 있으며, 각 상별 위상을 검출하기 위한 zero-cross detector가 내장 되어 있다. 앰프는 x1, x10, x100의 세 종류의 배율로 조정이 가능하며, 원하는 부분방전 신호의 입력 range에 따라 적절히 선택하여 사용할 수 있도록 하였다. 부분방전 신호는 negative 펄스와 positive 펄스로 분리하여 peak detector & hold에서 부분 방전 신호를 검출한다. 이때 60Hz 한주기 동안 3,600개의 Data를 취득할 수 있으며, peak detector & hold는 4.6us내에서 동작하게 된다.



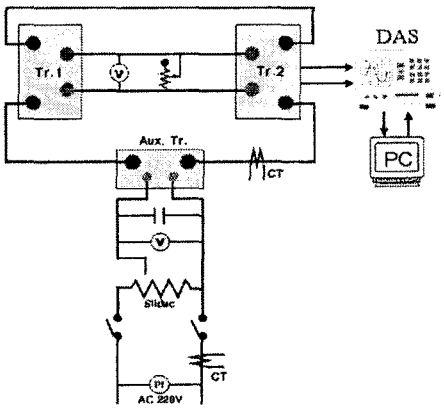

<그림 4> 부분방전 측정용 transducer 전체 구성도

Main processor board는 고속 A/D 컨버터를 이용하여 부분방전 신호를 디지털 data로 변환하고 이를 내부 메모리에 저장한다. 이때 총 120주기 동안의 부분방전 신호를 측정하여 저장(120주기 x 3,600points x 8bits = 432,000bytes)하도록 구성하였으며, 이를 TCP/IP 또는 RS-232 등의 통신 프로토콜을 사용하여 notebook으로 전송한다. 부분방전 신호 처리 및 분석을 위한 S/W

로 측정된 부분방전 신호를 2D/3D graph로 나타내며, 각종 방전 측정인자를 시간별 trend 변화 추이로 보여주며, 모든 data를 database화 할 수 있도록 구성한다.

### 3.5 반환부하 설비 setting 및 실험회로 구성

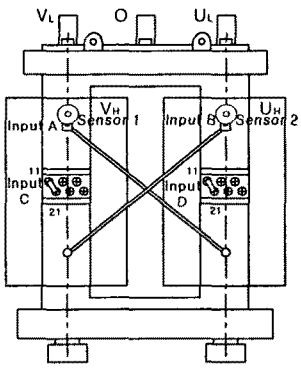
몰드변압기 시료의 열화시간에 따른 발생 부분방전의 측정 정도 및 변화추이를 분석하고 개발된 센서의 장기안정성 특성을 파악하기 위하여 그림 5와 같은 반환부하법을 이용한 회로를 구성하기로 선정하고, 단상 6.6 kV 50kVA급과 향후 실험할 단상 22.9kV 50kVA급에 맞는 설비의 설계와 제작을 실시하고 시료용 모델 몰드변압기와 함께 장기 부분방전 실험회로를 구성하였다.




<그림 5> 반환부하 실험 회로도

반환부하 설비를 구성하기 위하여 시료용 몰드변압기 외에 보조 변압기로 단상 70 kVA 220V/2800 V 유입자냉식 변압기, 동손 가변장치로 단상 20kVA 0-240V 공냉식 슬라이닥, 철손 가변장치로 단상 5kVA 0-240V 공냉식 슬라이닥 및 역률보상장치 단상 220V 1600uF를 이용하여 설치하였다.

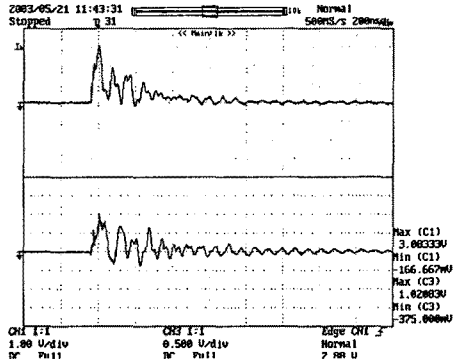
### 3.6 방전특성 가능성 확인 기초실험



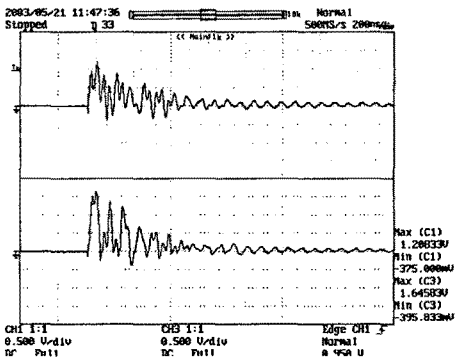

<그림 6> 몰드변압기에서의 센서 부착위치 및 입력지점

그림 6과 같이 시료용 몰드변압기의 고압측 인출단 양단에 접촉식 센서를 부착하고 부분방전 측정 가능성을 파악하기 위하여 NPG-2(Nihon) calibrator로 고압출력단 및 탭부위에 2,000pC을 인가한 상태에서 측정한 파형을 나타낸 것이 그림 7이다.

V상 고압측(A 지점)에 입력된 펄스는 1번 위치의 센서가 2번 위치의 센서보다 3배 크기로 측정되었으며, V상 탭부위(C 지점)에 입력된 펄스는 1번 위치의 센서가 2번 위치의 센서에 비하여 75% 크기로 측정되었다. 이는 권선 길이 및 펄스 인가지점에 따른 방전펄스의 크기감쇠를 나타낸 것으로, 향후 권선 길이에 따른 방전크기의 감쇠율 및 전송특성을 파악하는데 활용할 예정이다.




(a) A 지점입력




(b) C 지점입력

위 파형: sensor 1(V상 출력부)
아래 파형: sensor 2(U상 출력부)
<그림 7> 입력지점에 따른 교정용 펄스의 출력파형

## 4. 결론

본 연구는 몰드변압기의 장시간 운전시 예상되는 발생 부분방전 현상을 측정하여 설비의 사고를 예지하고자 on-line 부분방전 측정방법 선정, 최적 측정감도를 지닌 접촉식 부분방전 센서의 설계 및 제작, 센싱된 방전펄스를 신호 처리하는 측정 transducer의 설계 및 prototype 제작, 운전조건에서의 센서 측정감도 및 안정성 평가를 위한 반환부하 실험회로를 설치, 접촉식 센서의 부분방전 측정 가능성을 확인하였다.

이렇게 구성된 실험장치, 부분방전 센서 및 측정시스템은 향후 진단알고리즘을 지닌 몰드변압기용 on-line 부분방전 측정시스템 개발에 기여할 것으로 예상된다.

### <참고문헌>

[1] "몰드변압기의 방재 및 진단용 Monitoring System 개발에 관한 연구", 한국소방안전 협회, 1997.12.
[2] IEC 60905, "Loading guide for dry type power transformers"
[3] IEC 60726, "Dry type power transformer"