

로그스키 코일과 초음파 센서를 이용한 변압기내 부분방전 탐지 및 위치검출

작 회 로* 김 제 철② 김 응 상* 한 민 구** 권 태 원*** 윤 용 범***

* 숭실대 ** 서울대 *** 한국전력 기술연구원

Detection and Location of Partial discharge in Transformers
Using Logoski coil and Ultrasonic senser

Hee-Ro Kwak Jae-chul Kim Eung-Sang Kim(Soong Sil UNIV.) Min-Koo Han(Seoul Nat.UNIV.)

Tae-Won Kwan Young-Beum Yoon(Research Center KEPCO)

ABSTRACT

This paper describes an nstrument for the detection and geometric location of partial discharge(PD) sources in transformers. This instrument measures electric current pulses and ultrasonic pulses simultaneously, counts the number of electrical pulse and determines the geometric location of PD in transformers. It was found that there is a relationship between partial discharge magnitude and pulse repetition rate when the applied test voltage and oil temperature were varied. Through the laboratory test using model transformer, it was clarified that this detector could be used, satisfactory for detecting and locating of PD in the transformer.

1. 서 론

최근 전력용 변압기 전력 수요의 증가에 따라 초고압화 대응방화 추세와 더불어 다량 설치되고 있다. 이러한 전력용 변압기의 사고시는 정전 범위가 넓어지고 막대한 경제적 손실을 가져다 주며 사고 복구를 위한 장시간 휴전에 따른 사회에 미치는 심리적 영향 또한 막대하기 때문에 이러한 사고를 미연에 방지하기 위한 고신뢰도 운전이 요구되고 있다. 따라서 고신뢰도 운전을 위한 전력용 변압기 예방진단기법은 더욱더 중요한 위치를 점하게 되었으며 세계각국에서 지속적인 연구와 관련 진단기기 개발이 진행되고 있다.

운전중인 전력용 변압기의 예방진단 기법은 부분방전 측정법, 유증가스 분석법, 절연유 역률 및 수분 측정법 및 저압서어지 시험법등이 있으나 현장 적용시 신뢰성을 높이기 위해서는 이들 방법을 종합하고 분석하는 상시감시 진단장치의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 상시감시 진단장치 개발의 일부로 그중 변압기내 부분방전의 위치 탐지와 그 발생빈도를 측정하는 기기를 연구 개발하였다. 이와 관련된 부분방전 특성 및 위치측정법은 1956년 J.G.Anderson[1]에 의해 본격적으로 연구가 시작되었으며 J.H.Carpenter, J.P.Vora, M.Train[2]등의 연구에 의하여 음향 측정법으로 부분방전의 측정 및 위치판별이 가능함을 보여 주었다. R.Bartnikas, Sulaiman[3]은 유중에서의 코로나 개시전압 및 오염된 변압기유에서의 부분방전을 검출하여 이들의 변화특성을 연구 하였다.

그리고 E.Howells [4], R.T.Harrorid 는 기름 속에서의 부분방전의 특성, 음속에 대한 관련이론 연구 및 외부 잡음에 대하여 연구를 행하였고, E.Hironniemi, H.Kawada [5]에 의하여 부분방전의 자동 감시 기록장치가 개발되어 변압기 예방진단에 상당한 공헌을 하였다. 그러나 이들 장치도 감도가 낮고 외부에서 발생하는 충격파 잡음 구별의 곤란 등 아직 실제 적용에는 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 감도가 높고 정확한 부분방전 위치와 발생빈도를 측정하기 위하여 자체 제작한 부분방전 위치 측정기, 부분방전 계수기와 Hipotronics사의 부분방전방 측정장치를 결합하여 모형 변압기 내에서 부분방전의 위치, 발생빈도와 방전량을 측정하였고 정확한 결과 분석을 위하여 메모리스코프, 신호분석기와 X-Y기록기를 사용하였다.[6]

또한 방전량의 크기와 발생빈도의 관계를 측정하기 위하여 샘플유와 실제 운전중인 변압기에서 기름을 채워하여 인가전압과 기름의 온도를 변화시켜가며 변압기 예방진단의 기초자료를 작성하였다.[7]

2. 실험장치 구성

2-1) 측정원리

운전중인 변압기 내부에서 부분방전의 발생은 여러가지 화학적반응과 고 에너지의 전자와 이온의 계속적인 충돌에 의하여 절연물의 수명을 단축시키므로 부분방전의 초기발전 및 그 진행상태와 위치를 찾는것이 중요하다. 부분방전의 진전상황을 판단함으로써 변압기 예방진단의 자료를 사용할 수 있으며 그 발생위치를 탐지함으로써 부분방전의 상태의 심각성을 알수 있다.

본 논문에서는 부분방전시 발생하는 음향신호와 전기신호를 압전소자를 이용하여 초음파 센서와 Rogowski coil를 이용하여 각각의 신호를 측정하여 이 음향신호와 전기신호의 지연시간에 음향신호의 전달속도를 곱하여 음향신호 탐속자 위치에서부터 부분방전 발생위치까지의 거리를 구할수 있다.

한편 Rogowski coil에서 측정한 전기신호의 어느정도 크기 이상의 감도를 계수하여 부분방전 측정장치(Hipotronics 사)로 측정한 부분방전방과의 상관관계를 검토 하였다.

2-2) 실험장치 구성

부분방전 위치 및 그 발생빈도를 측정하기 위한 실험장치구성은 고압발생 및 제어부, 모의변압기, 전기신호 측정장치, 음향신호 측정장치, 신호처리장치, 필스계수장치 및 기록장치로 구성되어 있으며 그 개략도는 그림 1과 같다.

- 고압발생 및 부분방전량 측정은 Hipotronics사의 부분방전 측정장치인 모델명 750-5CF와 CDD-77A1로 Corona free인 변압기로 0-50 [KV]까지 전압을 변화시킬 수 있다.
- 모의 변압기는 40(cm)×80(cm)×60(cm) 크기로 부분방전 전극이 쉽게 이동할수 있도록 제작하였으며 기름의 온도제어장치와 기름 순환장치를 부착하였다.
- 음향신호 탐속자는 공진주파수가 0.5MHz인 Vernitran사의 PZT-5A를 이용하여 변압기 외벽에 손쉽게 부착할수 있는 구조로 제작하였으며 이 음향탐속자의 등가 회로는 그림 2와 같다.

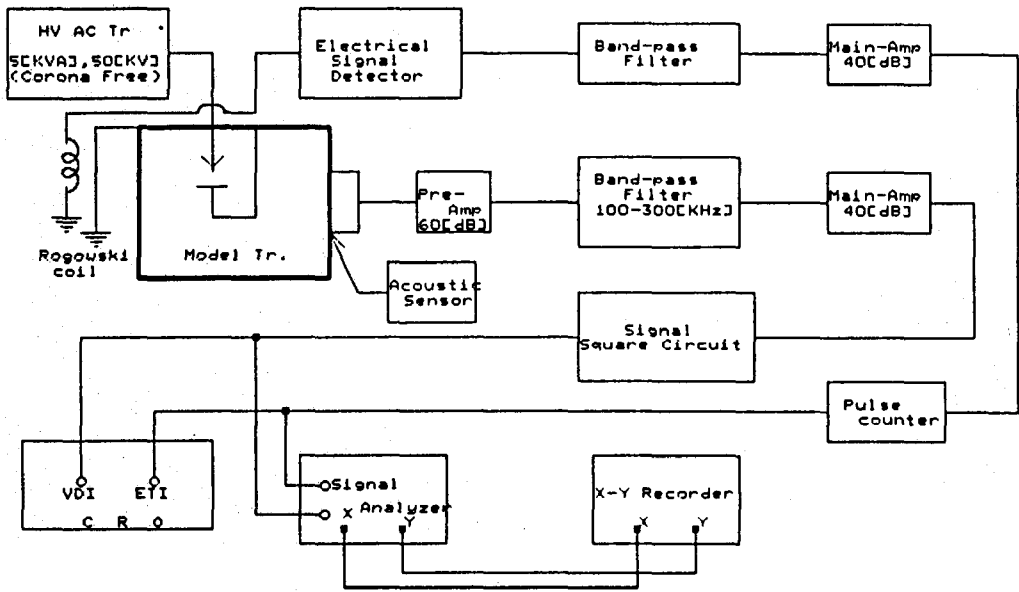


그림 1. 부분방전 탐지 및 위치 검출장치.

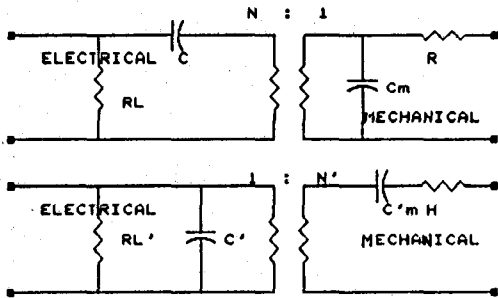


그림 2. 음향신호 탐속자 동가회로.

Pre-amp는 음향신호 탐속자에서 나온 신호가 너무 미미하기 때문에 이신호를 60 [db] 정도 증폭할수 있는 콘덴서 결합형으로 구성하였으며 각 증폭단마다 표류 용량(stray capacity)과 발진을 억제하기 위하여 동판 차폐를 하였고 신호전달 cable도 2중차폐 cable을 사용하였다. Pre-amp 회로는 그림 3과 같다.

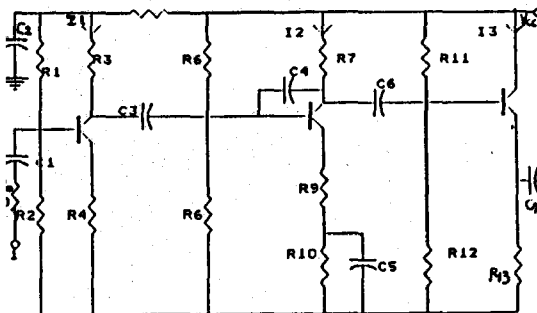


그림 3. Pre-amp 회로도.

이외에 음향신호 측정장치는 filter와 증폭기와 제조회사로 구성되어 있으며 그 장치를 자기진단할 수 있는 자기진단장치와 진단법등 이와 관련된 자세한 것은 참고문헌 [6,7] 에 기술되어 있다.

전기신호 탐속자는 부분방전시 흐르는 고조파(10KHz 이상)전류신호를 측정하기 위하여 자체 제작한 Rogowski coil을 사용하였으며 성능검증을 위하여 Hipotronics 사의 부분방전 측정장치(pd detector)로 검출한 제어 신호를 Signal analyzer로 잡아 그림 4에 그 결과를 실었다. 그림 4의 상단은 자체 제작한 Rogowski coil에서 검출한 전기신호이며 하단은 Hipotronics사의 부분방전 측정장치의 검출 신호로서 같은 시간대에서 거의 동일한 값을 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

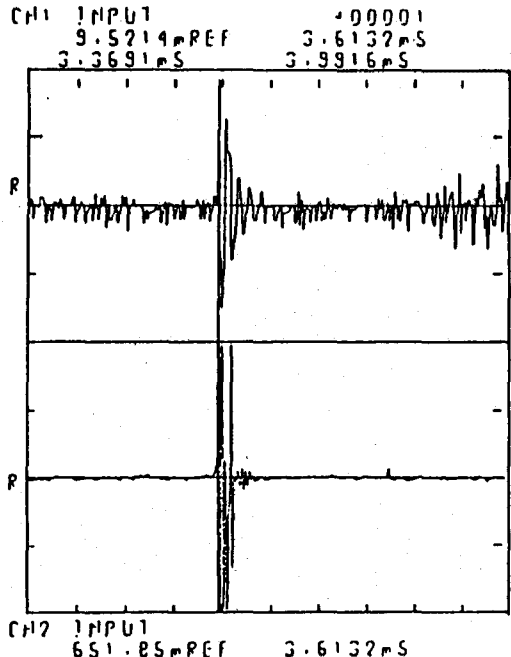


그림 4. Rogowski coil과 부분방전 측정장치에 의한 전기신호 측정결과 비교.

이 Rogowski coil에서 측정된 전기신호는 pre-amp로 증폭한후 양호한 전달특성과 안정도가 우수한 Butter worth 대역통과 필터를 통과후 계수기(Pulse counter)로 계수하였다.

3. 실험 및 결과검토

실험은 자체제작한 부분방전 탐지 및 위치검출장치를 현장 적용을 목적으로 Rogowski coil을 이용하여 전기신호를 측정후 신호처리 및 계수회로를 이용하여 부분방전량과 부분방전 발생횟수가 측정시료의 온도변화와 인가전압 변화에 따른 측정실험을 하였다. 또한 음향탐촉자와 전기신호탐촉자(Rogowski coil)를 이용한 위치검출에 대한 사례연구를 행하였다.

3-1) 부분방전량과 부분방전 발생횟수 측정실험

일반적으로 부분방전량의 정확한 측정은 현장에서는 거의 불가능 할 뿐만 아니라 장치 또한 매우 복잡하다. 그러나 어느 레벨이상의 부분방전 발생횟수는 Rogowski coil을 이용하여 전기신호를 측정후 신호처리 및 계수장치로 현장에서 측정이 용이하다. 본 논문에서는 침대 평판 전극(침의 곡률반경 7mm, 침대평판간격 1cm)에 현재 운전중인 변압기(양지 #3MTR, 외 8개소)의 기름을 채취하여 인가전압 변화에 따른 방전량(그림5-a) 및 펄스수(그림 5-b)와 온도변화에 따른 방전량 및 펄스수의 관계를 매 1개월마다 6개월(1989년 2월-1989년 7월)동안 조사하여 그 관계성을 비교 검토하였다.

Voltage Dependence of Partial Discharge

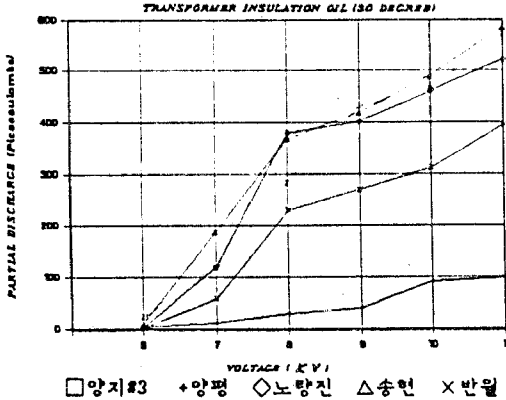


그림 5-a. 인가전압 변화에 따른 방전량 비교.

(1989년 2월 25일 채취, 측정시 온도 30도)

Voltage Dependence of Pulse Count Rate

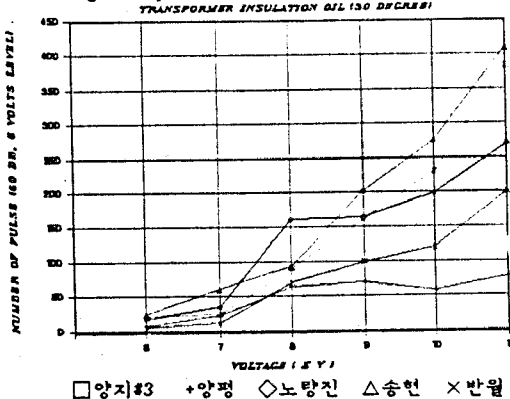


그림 5-b. 인가전압 변화에 따른 펄스수 비교.

(1989년 2월 25일 채취, 측정시 온도 30도)

그림 5-a와 그림 5-b에서 볼 수 있듯이 방전량과 부분방전 발생횟수는 상당히 유사한 관계를 보여주고 있다. 또한 온도를 30°C, 50°C, 70°C, 90°C로 변화시켰을때도 이들 관계는 역시 상당히 유사성을 갖고 있어 변압기에 방전단 목적에서 볼때 현장적용에 어려운 값비싼 부분방전 장치보다는 부분방전 계수장치로써 부분방전의 탐지 및 진행상황을 감지 할 수 있으리라 생각된다.

3-2) 부분방전 위치검출에 대한 사례연구

3-2-1) 측정이론

부분방전시 발생되는 충격파는 기름속에서 전파되어 일부는 변압기 외벽에 전달되고 일부는 반사된다. 따라서 변압기 외벽에서 초음파 신호를 압전소자로 검출하고 동시에 부분방전의 전기신호를 Rogowski coil로 검출하여 그 시간차에 유중에서 초음파의 전달속도를 곱하면 음향탐촉자 위치에서 부터 부분방전 발생위치까지의 직선거리가 되며 아래와 같은 식으로 표현될수있다.

$$D(m) = V(m/s) \times [Ta - Te](s) \quad (1)$$

여기서,

- D : 부분방전 발생점에서 음향 탐촉자까지의 거리(m)
- V : 변압기유에서 초음파속도(m/s)
- Ta : 음향신호 도달시간(sec)
- Te : 전기신호 도달시간(sec)

3-2-2) 위치측정 사례연구

모의 변압기내에 침대 평판전극을 설치하고 변압기 외벽 다섯군데에서 그 음향신호를 측정하였다. 첫번째 음향신호탐촉자 AS1의 위치는 모의 변압기 좌측면 가로 0(Cm), 세로 20(Cm), 높이 15(Cm) (0 x 20 x 15)이고 음향 탐촉자 AS2의 위치는 우측면 가로 80(Cm), 세로 20(Cm), 높이 15(Cm) (80x 20 x 15), 음향탐촉자 AS3의 위치는 모의 변압기 후면 40(Cm) x 20(Cm) x 15(Cm) 이고, AS4의 위치는 우측면 80(Cm) x 5(Cm) x 15(Cm)이며 AS5의 위치는 모의 변압기 앞면 6(Cm) x 0(Cm) x 15(Cm)였다. 그리고 전기신호는 Rogowski Coil을 이용하여 전극의 집지부분에서 측정하였으며 부분방전의 위치는 (pd1) 가로 39(Cm), 세로 20(Cm), 높이 15(Cm) (39 x 20 x 15)에 놓았다. 그림 6은 부분방전 위치와 음향신호탐촉자 위치들을 보여주고 있다. 이 사례연구시 변압기유의 온도는 15(°C)였으며 이 유온의 음속은 음속 측정 결과 V=1450(m/s)였다.

이 실험에서 가한 전압은 AC 11(kv)였으며 부분방전을 일으킨 침대 평판 전극의 곡률반경은 0.01(mm)이고 간격은 1(Cm)였다.

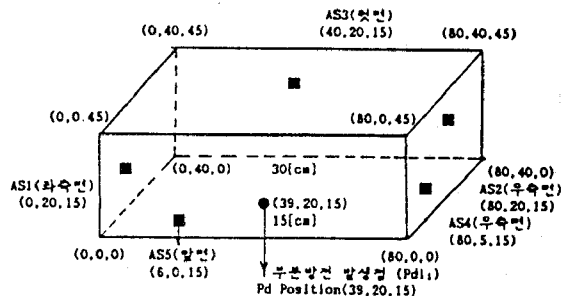


그림 6. 모의 변압기내에서 부분방전 위치 및 음향측정자 위치.

위와 같은 사례연구 조건하에서 전기신호 탐속자가 잡은 전기신호(그림 7-a)와 음향신호 탐속자 ASI의 음향신호(그림 7-b)를 동시에 잡아 X-Y plotter로 그린것이 그림 7이다. 그림 7-a의 상단 무속 2.0874(ms)는 전기신호 측정시간(T_e)이며 그림 7-b의 하단무속 2.3632(ms)는 음향신호의 측정시간(T_a)을 나타낸다. 따라서 두 신호지연 시간은

$$T_{a1}-T_e=2.3632-2.0874=0.2754(\text{ms})$$

이다. 따라서 15(°C)의 초음파의 유속 1450(m/s)을 고려하여 식(1)에 넣어 계산하면

$$D=(T_{a1}-T_e) \times V = 0.2754(\text{ms}) \times 145 (\text{Cm/ms}) = 40(\text{Cm})$$

이다. 따라서 실제거리리는 39(Cm) 이므로 상대오차는 2.54(X) 정도이다. 이와 같은 방법으로 각 음향속정자에 잡은 음향속정 신호시간을 이용하면 표 1과 같은 결과를 얻었다. 표1의 결과를 보면 평균 상대오차는 4-5(X) 정도 지나지 않으므로 상당히 정확하게 부분방전 발생 위치를 찾을 수 있다.

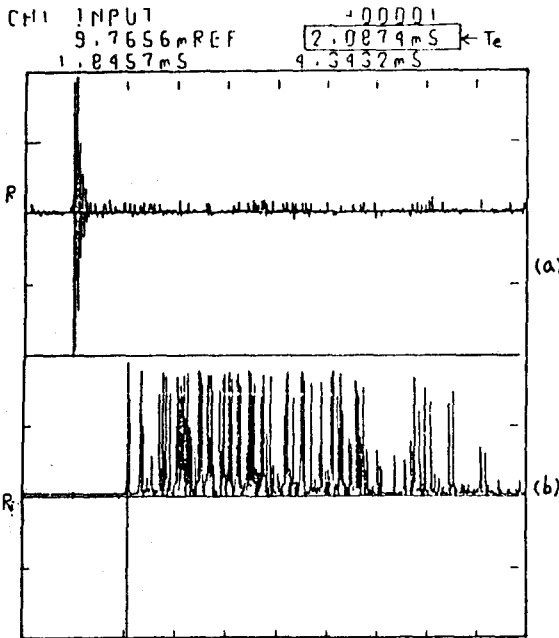


그림 7. 사례연구1(pd11)의 전기신호와 음향신호 비교.

4. 결론

변압기의 운전상태에서 부분방전 위치와 그 진행상태를 파악 할 수 있는 부분방전 탐지 및 위치측정장치를 모의 변압기를 통한 사례연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PZT-5A를 사용한 음향탐속자와 음향신호 처리회로를 이용하여 정확하게 음향신호를 측정 할수 있었다.
- (2) 자체제작한 Rogowski coil과 전기신호 처리회로로써 부분방전 측정장치의 도움없이 전기신호를 검출함으로써 현장적용을 가능케 하였다.
- (3) 측정장치에 계수기 (pulse counter)를 부착함으로써 부분방전의 유무와 그 정도를 파악할수 있으며 연속적으로 측정기록을 감시하면 부분방전 진행상태를 쉽게 판별 가능하게 되어 변압기 예방진단의 한 factor로 이용 가능하다.

- (4) 제작한 측정장치는 자기진단법과 5052PR(pulse and Receiver)과 Hipotronics사의 부분방전 측정장치들을 이용하여 성능 test와 사례연구를 통하여 거의 4-5(X) 이내로 정확한 위치탐지가 가능하였다.

차후 연구과제는 본 연구에서의 결과는 실험실에서 모델변압기를 통하여 얻은 결과이므로 우선 실험실에서 실변압기의 실증실험을 통하여 현장적용 시험으로 이어야 한다. 또한 현재의 analog 신호처리를 digital화 하여 상시 감시 진단장치의 형태로 발전되어야 할것이다.

표 1. 부분방전 위치 pd11일때

실험결과(39×20×15)

음향 탐속정자	부분방전 발생결과에 따른 실제거리 D(Cm)	측정한 결과에 의한 실제거리		PD방 [FC]	Pulse 수		
		시간 T _e (μs)	거리 D/V (Cm)				
ASI	39	268.97	275.8	33.99	2.54	(101+95 +71+61 +74)	(2+3 +4)
AS2	41	282.76	292.9	42.47	3.59		
AS3	20	137.93	144	20.88	4.40		
AS4	43.6	300.69	305	43.94	0.78		
AS5	36.6	252.41	271	39.30	7.38		

*1 AS(Acoustic Sensor)의 위치번호

*2 V는 유속 음속이므로 011의 온도가 15(°C)일때 1450(m/s)

*3 X = (측정거리 - 실제거리) / 실제거리

*4 PD방은 실제 측정된 결과의 평균값 (주의: 이 값이 비음5를 공한 값이 실제 값임)

*5 Pulse 수는 3회 측정된 결과의 평균값(입정 레벨이상)×100

참고 문헌

- [1] J.G.Anderson "Ultrasonic Detection and Location of Electric Discharge in Insulation Structures" AIEE TRANS., VOL.75 No.3 pp.1193-1198, December 1956.
- [2] J.H.Carpenter, J.S.Kresge,C.B.Musick "Ultrasonic Corona Detector in Transformer" IEEE on Power Apparatus and System Vol. PAS-84, pp.647-651 August 1965.
- [3] A.A.EI-Sulaiman and M.I.Quresh "Quasi-steady and Burst Current in Aged Transformer oil under high direct Field" IEEE Trans. Elect. Vol EI-16, No5 PP 435-457 October 1981
- [4] E.Howells, E.T.Norton "Location of Partial Discharge sites in Online Transformers" IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No.1, PP 158-161 January 1981.
- [5] H. Kawada, M.Honda, T. Inoue, T. Amemiya "Partial Discharge Automatic Monitor for Oil-Filled Power Transformer" IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, No.2, February 1984.
- [6] 권태원, 광희로, 김제철 외 "계산된 초음파 방법에 의한 변압기내 부분방전 위치검출" 1988년도 대한 전기학회 추계종합 학술발표 논문집, 88-E-11 PP 252-257 1988.11.
- [7] 권태원, 윤용범, 김제철, 광희로, 한민구 외 "전력 기기 예방진단 기술연구" 1989.12. 한국 전력 기술 연구원.