

변압기의 전달 매질에 따른 초음파 신호의 특성 분석

진상범*, 박현수, 신동석, 곽희로, 권동진*
 숭실대학교, 전력연구원*

Analysis of ultrasonic signals through media in transformer

SangBum Chin*, HyunSoo Park, DongSeok Shin, HeeRo Kwak, DongJin Kweon*
 Soongsil Univ. KEPRI*

Abstract - This paper describes the phenomena of the refraction and reflection when the ultrasonic signals generated by PD(Partial Discharge) in a transformer propagate through the boundary between insulating oil and the tank of the transformer.

In this paper, considering the characteristic of the ultrasonic signal and the velocity of the propagation in medium, propagation time from PD source to sensor for incidence angle was calculated. As a result, it was found that the shortest time at specific angle exists. Taking into account the velocity of the propagation in medium, the shortest time with a computer was simulated. It was shown that the simulation was same as experimental result at a real PD source in the transformer.

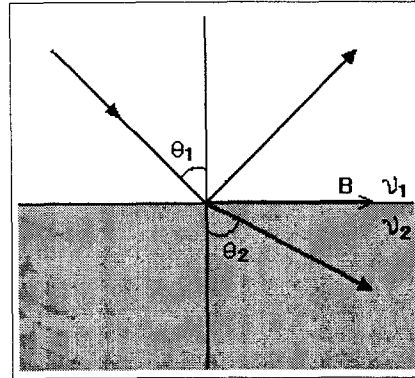


그림 1. 음(중파)의 굴절과 반사

1. 서 론

변압기 내부 이상으로 인한 부분방전의 발생은 초음파 신호를 동반한다. 변압기 내부에서 방사형으로 방출된 초음파 신호는 변압기 외함에 부착된 센서에 도달하기 까지 절연유와 철판 등의 다양한 매질을 통과하며 굴절과 반사를 일으킨다. 이러한 현상은 초음파 진단법에 있어서 부분방전의 발생 및 발생원의 위치 추정에 많은 오차를 발생시키는 요인이 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 초음파 신호의 반사와 굴절 현상을 고려하여 전파 경로에 따른 특성을 분석하였으며, 부분방전 발생원과 센서가 이루는 초음파 신호의 입사각에 따른 전달 시간의 변화를 컴퓨터 시뮬레이션한 값과 실험치를 측정 비교함으로써 초음파 신호의 최단 도달 시간에 따른 경로를 검출하여 초음파 측정에 있어서의 전달 경로의 영향을 연구하였다.

2. 본 론

2.1 초음파 신호의 굴절과 전파 경로

초음파 측정법을 이용하여 변압기의 내부 이상 발생 여부 및 이상 위치를 측정하기 위해서는, 측정되는 초음파 신호의 특성 및 전파경로에 대한 세심한 고찰을 필요로 한다.

그림 1은 입사각에 따른 음의 굴절과 반사에 대한 현상을 보여준다. 일반적으로 굴절의 법칙은 물리학자 호이겐스(Huygens)의 원리에 의해 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = n(\text{constant})$$

여기서, θ_1 은 입사각, θ_2 는 굴절각,

v_1 및 v_2 는 입사 전·후의 매질에서의 전파 속도.

초음파의 전파속도는 기체보다 액체가 더 빠르고 액

체보다 고체가 더 빠르다. 따라서 서로 다른 매질을 통과할 때 파는 굴절과 반사를 하게 된다.

그림 1에서 입사각 θ_1 을 매질들의 경계면 방향으로 서서히 기울여 가면 어떤 각도에서 입사 음파는 화살표 B의 방향으로 모두 반사되어 버리고 만다. 이 현상을 전반사라고 하고, 굴절각 θ_2 가 90° 에 도달할 때 입사각 θ_1 을 전반사의 임계각이라고 한다.

그림 2는 변압기 내부 결함에 의해 부분방전이 발생하였을 때 방사형으로 방출된 초음파 신호가 변압기 외함에 부착된 초음파 센서까지 도달하는 경로를 모의한 것이다. 이때, 초음파 신호가 θ 의 입사각으로 전파된다고 가정하면 센서까지 도달하는데 걸리는 시간은 부분방전 발생원과 센서가 이루는 입사각 θ 의 함수 $f(\theta)$ 로써 나타낼 수 있다. 이 함수 $f(\theta)$ 를 입사각 θ 에 대해서 미분한 값이 0이 되는 각도 θ 에서 함수 $f(\theta)$ 는 최소값,

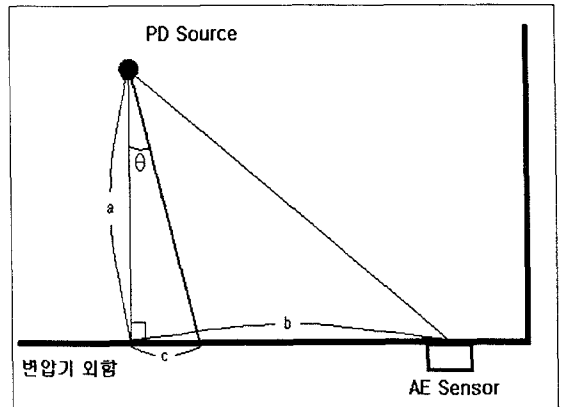


그림 2. 입사각에 따른 초음파 신호의 전달 경로

즉 PD 발생원으로부터 센서까지의 최단 도달 시간이다. 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$f(\theta) = \frac{a}{\cos \theta} \frac{1}{v_1} + (b - a \cdot \tan \theta) \frac{1}{v_2}$$

$$\frac{df(\theta)}{d\theta} = \frac{a}{v_1} (\sec \theta \cdot \tan \theta) - \frac{a}{v_2} \sec^2 \theta$$

최소값(θ_c)를 갖기 위한 조건은

$$\frac{\tan \theta_c}{v_1} - \frac{\sec \theta_c}{v_2} = 0$$

따라서

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{v_1}{v_2} \right)$$

인 각도에서 함수 $f(\theta)$ 가 최소값을 갖는다. 결과적으로 이 θ_c 는 호이겐스(Huygens)의 원리에서 증명된 임계각과 일치한다.

유입 변압기의 경우 절연유에서의 음속을 약 1400(m/s), 철판에서의 음속을 5900(m/s)라고 가정하면 θ_c 는 약 13.7°임을 알 수 있다. 따라서 온도에 따른 음속의 변화를 고려할 때, PD 발생원(source)으로부터 발생된 초음파 신호가 13~14°의 각을 이루며 전파되는 경로를 통과하여 센서에 도달할 때 최단시간이 존재함을 알 수 있다.

2.2. 전달 시간 simulation

그림 3은 부분방전 source에서 변압기 외벽에 부착된 초음파센서까지 초음파 신호가 도달할 때, 모든 경로를 고려하여 신호의 도달 시간을 나타낸 그림이다. 변압기 내부에서 발생된 초음파 신호는 방사형태로 퍼져나가 절연유와 변압기 외함을 전파하여 센서에 도달하기 때문에, 부분방전 발생원(source)에서 철판과의 법선방향에서 센서쪽으로 0.5° 씩 증가시키면서 전달 경로를 모의하였으며, 각각의 전달 경로에 대해서 센서 까지 도달하는 시간을 컴퓨터를 이용해서 시뮬레이션 한 결과를 나타낸다.

부분방전 발생원의 위치는 센서로부터 변압기 외함 방향으로 50[cm], 절연유 방향으로 10[cm]의 위치에 있을 때 계산한 결과이다. 이때 초음파 신호의 속도는 절연유와 변압기 외함(steel)에서 각각 1400(m/s)와 5900(m/s)로 계산하였다.

그림 3에서 나타난 것과 같이 입사각에 따른 전달 시간은 13.5°까지는 감소하다가 입사각이 증가하면서 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 입사된 초음파 신호가 전반사의 임계각인 13.5°에서 전반사를 이루어 입사 중파가 빠른 속도로 철판을 타고 전달되는 것으로 추정된다. 결론적으로 PD 발생원과 센서가 이루는 각이

13.5°를 이루는 경로를 통과하는 초음파 신호가 최단 전달 시간을 갖고 센서에 가장 먼저 도달하는 것을 알 수 있었다. 또한, 시뮬레이션 결과는 앞서 수식에서 증명된 최단 시간을 갖는 각 θ_c 와 거의 일치함을 보여주 고 있다.

2.3 초음파 신호의 최단 도달 시간 측정 실험

본 논문에서 사용된 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 변압기 내 두 개의 서로 다른 위치의 발생원을 설치하고 부분방전을 발생시켜 센서까지의 초음파신호의 최 단 시간을 측정하였다.

그림 4는 변압기 내부 각각의 부분방전 발생원들의 위치와 센서의 위치를 나타낸다. 이때 사용된 시험용 변 압기의 크기는 150[cm]×150[cm]의 크기이고, 부분 방전 발생원으로서 사용된 칩-평판 전극의 갭 간격은 20[mm]이다. 또한 초음파 측정 센서로는 공진주파수 150[kHz]를 갖는 R15센서를 이용하였다. 두 번의 실험 모두 인가전압은 18[kV]로 일정하게 유지시켜 안정 적인 부분방전의 발생을 유도하였다. 첫 번째 실험의 경 우 발생원1의 위치는 센서로부터 철판중으로 71[cm], 절연유중으로 65[cm]의 위치에 존재하고, 두 번째 실험의 경우 발생원2의 위치는 센서로부터 철판중으로 50[cm], 절연유중으로 50[cm]의 거리에 두어 센서로 부터 발생원들의 위치를 다르게 하여 초음파 신호의 전 달경로가 다를 때 각각의 최단 전달 시간을 측정하였다.

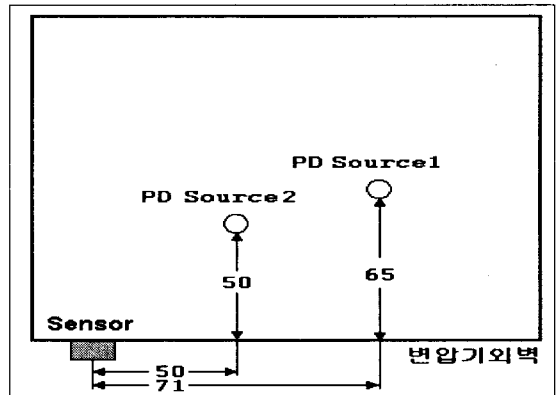


그림 4. 변압기 내 PD 발생원들과 초음파 센서의 위치

그림 5는 발생원1과 발생원2에서 부분방전을 각각 발 생시켰을 때 센서에서 측정한 초음파 파형을 나타낸다.

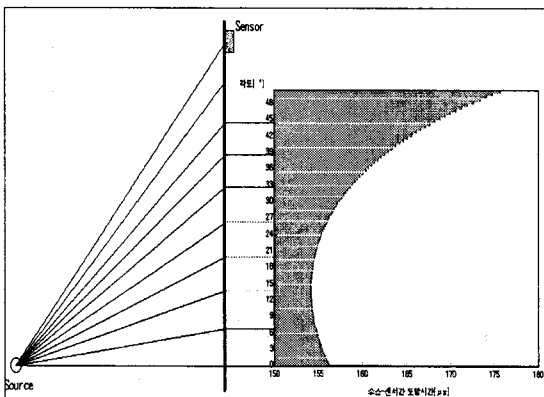


그림 3. 전달 경로에 따른 전달시간 simulation

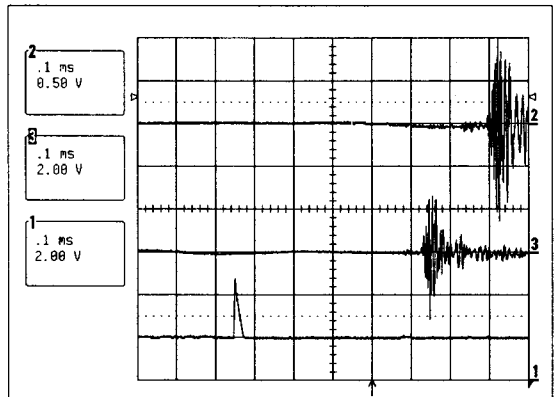


그림 5. 부분방전의 발생에 따른 초음파 파형

상단의 파형(2)는 발생원1(71×65)[cm]에 의해 발생된 초음파 신호를 측정된 파형이고, 가운데 파형(3)은 발생원2(50×50)에 의해 발생된 초음파 신호를 측정된 파형이다. 그리고 하단의 파형(1)은 부분방전이 발생할 때 집지선을 타고 흐르는 누설전류 파형을 보여준다.

각각의 파형은 전달 경로가 다르므로 파형이 시간간연되어 나타난다. 또한 철판의 영향으로 인하여 파형의 최고값은 파형의 맨 앞부분에 나타나지 않고 조금 뒤쳐져서 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 방사형으로 방출된 초음파가 직접 절연유만을 통해 센서에 도달하기 전에 절연유와 철판을 통과한 경로를 따라 센서에 먼저 도달하는 최고값 앞부분의 파두부분을 측정함으로써 최단 도달 시간을 검출할 수 있다.

그림 6은 변압기 내부 PD 발생원에 대하여 변압기 외벽에 부착한 센서까지의 초음파 신호 도달 시간을 시뮬레이션한 그림이다. 실험과 비교·검증하기 위하여 그림 4에서와 같은 PD 발생원의 위치 데이터를 입력하였다. 그림 6에서 상단의 곡선은 발생원2(50×50)의 위치에 대한 그래프이며, 하단의 곡선은 발생원1(71×65)에 대한 그래프이다. 앞에서 논의한 바와 같이 각각의 발생원에 대하여 약 13.5°에서 최소 시간을 갖는 것을 알 수 있다.

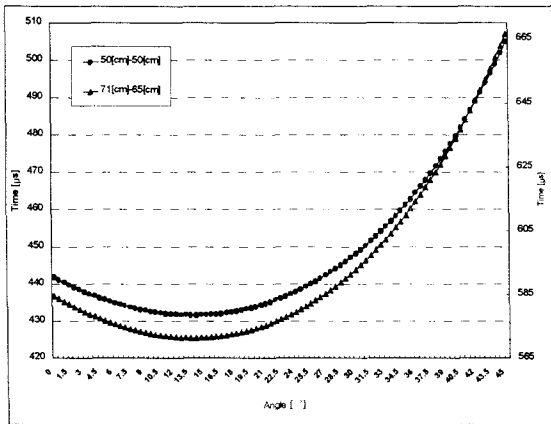


그림 6. 각 위치에 따른 도달 시간 곡선

표 1은 각각의 PD 발생원에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험에 의한 최단 시간의 측정값을 나타낸다. 시뮬레이션에 의한 입사각-도달시간 곡선의 결과 약 13.5°에서 발생원1은 571.37[μs], 발생원2는 431.69[μs]의 최소 시간을 갖는다. 또한 변압기 내부에서 침-평판 전극을 이용하여 부분방전을 발생시켰을 때 측정된 파형을 분석한 결과, 변압기 외벽에 부착된 초음파 센서에 가장 먼저 도달한 초음파신호의 시간은 각각의 발생원들에 대하여 570.31[μs]와 430.00[μs]가 측정되었다. 따라서

표 1 시뮬레이션결과와 실험에 의한 최단도달시간 비교

측정조건	전달경로	
	Steel[cm] × Oil[cm]	
	71×65	50×50
시뮬레이션 결과[μs]	571.37	431.69
실험 결과[μs]	570.31	430.00
오차[%]	0.18	0.39

오차는 약 0.4[%]이내이므로 시뮬레이션의 결과와 실험 측정치가 거의 일치함을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 초음파의 특성과 굴절현상을 고려한 전파 경로에 따른 도달 시간에 대하여 논의하였다.

PD 발생원의 위치에 상관없이 초음파 신호는 센서까지의 특정한 단 하나의 최단 시간 경로가 존재하고 이 경로는 이론 수식의 계산 결과 전반사의 임계각과 일치하는 입사각임을 알 수 있었다. 또한 PD 발생원에서 센서까지의 각각의 도달시간을 계산하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션의 결과, 이 곡선이 나타내는 최단 시간 위치의 각도는 전반사의 임계각인 약 13.5°임을 알 수 있었다. 이것은 모의 변압기를 이용하여 실제 부분방전을 발생시키고 검증한 결과 PD 발생원에서 변압기 외함에 약 13.5°의 각도로 입사하는 전파경로를 갖는 파가 가장 먼저 센서에 도달하는 측정값과 거의 일치하였다. 결론적으로 이것은 입사 종파의 전반사의 영향으로 고려되며 이 현상을 이용하여 변압기 내부 이상 위치를 추정함에 있어서 더 많은 정보를 제공할 수 있을 것이라 사려된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Tatsuya Sakada, Tomokazu Arita and Hiroshi Nieda, "Basic studies of acoustic emissions caused by the partial discharge in an oil-tank", Korea-Japan Joint Symposium on ED and HVE, pp. 16~19, 1998.
- [2] D. W. Auckland et al., "The ultrasonic location of discharge in transformer - A new approach", IEEE International Insulation, Pittsburgh, PA USA, pp. 77~78, 1994.
- [3] Robert Meunier, Georges H. Vaillancourt, "Propagation behaviour of acoustic partial discharge signals in a oil-filled transformer", International Conference on Conduction and breakdown in Dielectric Liquids, pp. 401~404, 1996.