

## 근접한 두 신호원에 의한 와전류 신호의 간섭 효과

정 용 무

### An Interaction Effect of Eddy Current Signals Due to the Neighboring Signal Sources

Y. M. Cheong

**Abstract** The multi-frequency eddy current technique has been used for evaluation of various type of defects in tubings. However, this technique is not sufficient to detect and evaluate the defect in tubings if the defect is located in the geometrically complicated area(e. g. tube support plate, anti-vibration bar, tubesheet area) and mixing residue signal is significant to the defect signal. In order to improve the reliability of the multi-frequency eddy current technique, the effect of the interaction of mixing residue after frequency mixing with a function of distances between the defect and the tube support plate boundary has been analyzed theoretically. The experimental results have been discussed with the theoretical developments. The calculation shows the interaction between the two neighboring signal sources could be significant within the range of approximately 1.0mm with the experimental condition.

#### 1. 서 론

와전류탐상 결과에 대한 신뢰도는 신호 평가 기술, 즉 Complex Impedance Plane 상에 나타나는 Lissajous 도형을 보고 그 신호의 원인(Source)을 정성적 및 정량적으로 평가하는 기술에 크게 의존된다. 원자력발전소의 증기발생기 전열관과 같이 열교

환기의 전열관에 대한 와전류탐상 시에 결함의 발생 지역은 주로 지지판(Tube Support Plate)이나 반진동봉(Anti-Vibration Bar)와 같은 지역이며 이와같이 기하학적으로 복잡한 지역에서 결함이 존재할 경우 와전류 신호는 이러한 여러가지 요인들이 복합되어 이들의 상대적인 크기나 위치 등에 따라서 와전류 신호가 복잡한 양상으로 나타나기 때문에 신호

평가의 어려움이 존재한다. 이와같이 복합된 신호들로부터 결합에 의한 신호만을 분리해 내기 위해 다중주파수(Multi-Frequency) 방식으로 주파수 혼합에 의해 원치 않는 방해 신호를 제거하는 기술을 사용하기도 하나, 주파수 혼합 방식을 사용하더라도 주파수 혼합 후에 잔류 신호(Residue) 성분이 결합 신호에 비해 상당한 양이 존재한다면 결합 평가에 어려움을 초래할 것이다. 본 논문에서는 다중주파수 방식에 의한 주파수 혼합 후에 Mixing Residue가 존재할 경우, 결합과 방해 신호(Mixing Residue)의 근원 간의 상대적인 위치(거리)에 따른 효과를 와전류 신호의 간섭 이론을 이용하여 분석 고찰하고자 한다.

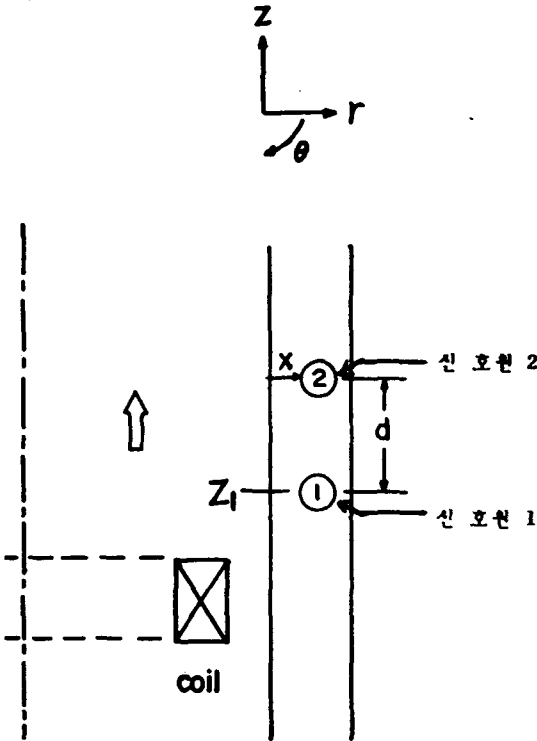


Fig. 1 A schematic drawing of the two signal sources.

2. 근접한 두 신호원간의 와전류 신호의 간섭에 관한 이론

와전류 코일이 Fig. 1과 같이 원통형 좌표계에서 Z-축 방향으로 이동하고, 와전류 신호원(결합 또는

전열관 지지판) 1, 2가 거리 d만큼 떨어져 위치하며 신호원 1(결합)은 관 내부 표면에서 거리 x만큼 떨어져 있다고 가정하고 결합이 존재치 않는 도체 내의 와전류 신호를 유발할 수 있는 전류 분포를  $\vec{J}_0$ 라 하고 신호원 1에 의한 전류의 산란을  $\vec{J}_1$ , 신호원 1에서 거리 d만큼 떨어진 신호원 2에 의한 전류의 산란을  $\vec{J}_2$ 라 하자. 한편 두 신호원이 상당히 접근되어 신호원 2가  $\vec{J}_1$ 에 영향을 미칠 경우 그 간섭에 의한 전류 분포를  $\vec{J}_{12}$ 라 하면 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$\vec{J} = \vec{J}_0 + \vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \vec{J}_{12} \dots\dots\dots (1)$$

전류밀도가  $\theta$ 축 방향 성분만이 존재한다고 가정하면 이에 상응하는 도체 표면에서의 Magnetic Vector Potential도 항상  $\theta$ 축 성분 밖에 없다고 볼 수 있다. 여기서 Magnetic Vector Potential은 일반적인 전자기학 교재에서 흔히 사용하는 개념으로  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$  ( $\vec{B}$ 는 자속밀도,  $\vec{A}$ 는 Magnetic Vector Potential)로 정의한다.<sup>1)</sup> 신호원 1을 기준하고 신호원 2가 신호원 1에 미치는 영향을 고려하여  $z_1$  위치에서의 Magnetic Vector Potential은

$$\vec{A}(z_1) = \vec{A}_1(x) + \vec{A}_2(r) \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $\vec{A}(z_1)$ :  $z_1$  위치에서의 도체 표면에서의 Magnetic Vector Potential

$\vec{A}_1(x)$ : 도체 표면에서 안쪽으로 거리 x만큼 떨어진 신호원 1에 기인한 Magnetic Vector Potential

$\vec{A}_2(r)$ : 도체 표면에서 거리 r만큼 떨어진 신호원 2에 기인한 Magnetic Vector Potential

$$r = (x^2 + d^2)^{1/2}$$

여기서 신호원(결합)의 체적  $\Delta V$ 가 충분히 작다고 ( $\Delta V \ll \delta^3$ ,  $\delta = (2/\omega\mu\sigma)^{1/2} =$  표준침투깊이,  $\omega =$  각주파수,  $\mu =$  자기투자율,  $\sigma =$  전기전도도) 가정하면  $z_1$ 에서 Magnetic Vector Potential은<sup>2)</sup>

$$\vec{A}_2(r) \approx \frac{\mu}{4\pi} \vec{J}_2 \Delta V_2 \frac{1}{r} \exp\left[-\frac{r}{\delta} (1 + j)\right] \dots\dots(3)$$

방해신호 성분의 크기는 방해신호원 2의 전류 근원, 그 신호원의 체적  $\Delta V_2$ , 거리  $r$ 에 좌우된다. 물론 전열판 내의 결함(신호원 1)과 전열판 지지판(신호원 2)의 경우 그 신호를 생성하는 데 기여하는 유효 체적이거나 또는 단위 체적에 대한 전류 밀도 크기가 같을 수는 없으나 본 경우에는 두 신호원의 근접 정도에 따른 방해 신호의 영향만을 관찰하고자 하므로 이들 인자에 의한 영향을 무시하고 단지 두 신호원 간의 거리함수만을 고려한다.

(3)식의  $\vec{A}_2(r)$ 을 다시 쓰면

$$\vec{A}_2(r) \approx \frac{\mu}{4\pi} \vec{J}_2 \Delta V_2 \frac{1}{(x^2 + d^2)^{3/2}} \exp\left[\frac{-(x^2 + d^2)^{1/2}}{\delta} (1 + j)\right] \dots\dots\dots(4)$$

여기서 두 신호원이 동일 위치에 존재한다면, 즉  $d \rightarrow 0$ 이라면 관측되는 Magnetic Vector Potential은 두 신호원의 산술적인 합에 덧붙여서 두 신호원간의 간섭 영향을 고려하여야 할 것이다. 즉 신호원 1과 신호원 2간의  $\theta$ 방향으로의 거리에 따라 간섭에 의한 영향이 Magnetic Vector Potential에 주요한 인자로 나타날 것이다. 또한 두 신호원이  $z$ 축 방향으로 떨어져 있는 경우에도 두 신호원을 따로 보았을 경우 각 경우의 산술적인 합에 덧붙여 두 신호원간 거리에 따른 간섭 항을 고려하여야 한다.

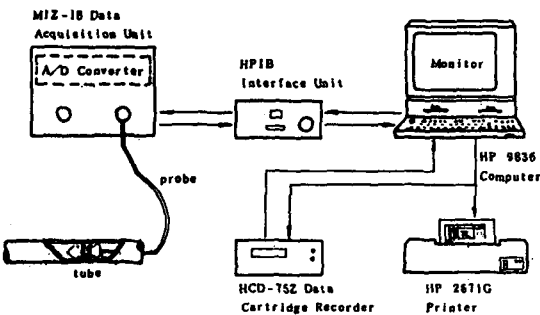


Fig. 2 Block diagram of the eddy current testing equipment.

3. 실험 방법

Inconel 600 전열판 재료에 인공 결함을 방전 가

공하였다. 인공 결함의 크기는 결함깊이는 각각 전열판 두께의 100%, 75%, 50%, 25%, 길이와 폭은 각각 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0mm로써 모든 길이, 폭, 깊이의 조합을 제작하였다. 방전가공 결과를 광학 현미경 및 Dial Gauge로 정밀 측정된 결과 최대 약 100 $\mu$ m의 오차가 발생하였으나 사용에는 적합하다고 판단되었다. 사용 전열판의 제원은 외경 7/8 inch (22.23mm), 판 두께 0.05 inch(1.27mm)이었다.

와전류 실험 장치는 미국 ZETEC사 MIZ-18 Digital Data Acquisition System과 DDA-4 Digital Data Analysis System을 사용하였다. Fig. 2에 실험 장치의 Block Diagram을 보였다. 검사용 탐촉자는 내삽형 자기비교 차동법(Inner Probe, Self-Differential Type)으로써 ZETEC사 제품 Model A-700-SF/HF를 사용하였다. 시험편 결함에 대하여 결함과 지지판 간의 거리에 따른 방해 신호 성분을 알아보기 위하여 지지판의 경계면과 결함간의 결함 거리를  $d$ 로 하고 Fig. 3과 같이  $d$ 를 +10mm에서 -10mm 까지 1mm 간격으로 변화시켜 가면서 탐지되는 신호의 전압 및 각도를 측정하였다.

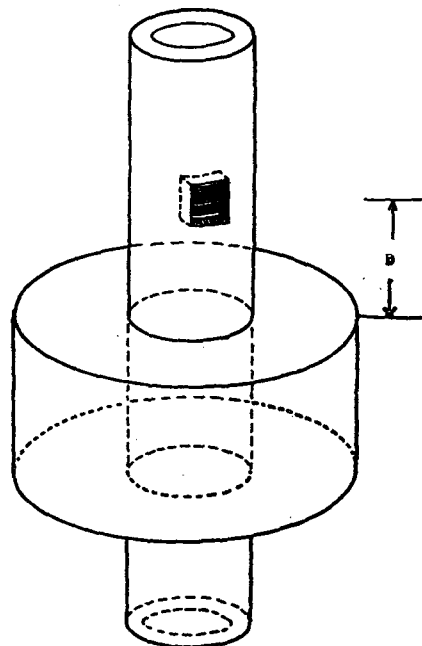


Fig. 3 A schematic view of the defect and tube support plate.

4. 결과 및 고찰

두 신호원 예컨대 결함과 지지판에 대해 다중주파수 방식을 사용하여 지지판 신호를 제거하여 결함 신호만을 나타낼 수 있다. 이러한 주파수 혼합과정은 서로 다른 두 주파수에서 지지판 신호만을 얻은 뒤 한 신호에 대해 다른 한 신호를 위상각 이동 및 진폭 조절을 통해 일치하도록 조정된 뒤 산술적인 감산을 행한다. 이에 따라 동일한 신호원으로 부터의 다른 주파수 신호를 조절을 거쳐 빼는 과정 후에 남는 신호, 즉 Noise 신호는 이론적으로 발생할 수 없다. 그러나 실제 상황에서는 서로 다른 주파수에서의 신호 형상은 완벽하게 같지 아니하므로 위상각 및 진폭 조절을 통해 일률적으로 빼는 과정에서 약간의 Noise 성분이 남게 된다. 이러한 Noise를 Mixing Residue라고 칭하는 데 본 실험에서와 같이 원래 지지판 신호 진폭이 결함 진폭에 비해 매우 크며 (약 100배), 지지판 신호를 주파수 혼합에 의해 제거하고 결함 신호만을 나타내려고 할 때, 주파수 혼합 후에 남는 지지판 신호의 Mixing Residue 성분이 실제 결함 신호에 영향을 끼친다.

지지판과 결함이 일정한 거리 이내에 존재할 때 비록 혼합주파수(Mixed Frequency, 400kHz~220kHz)에서 지지판 신호 성분을 제거한 경우이더라도 지지판에 의한 Mixing Residue가 방해 성분으로 잔류하여 정확한 결함 평가에 영향을 끼친다. Fig. 4에 전형적인 신호 전압과 결함-지지판 거리에 따른 관계를 보였다. 여기서 신호 전압은 실제 측정된 전압에서 평균 전압을 뺀 편차를 뜻한다. 횡축은 지지판 경계면과 결함간의 거리로써 (+) 부호는 결함이 지지판 외부에, (-) 부호는 지지판 내부에 있는 경우를 뜻한다. Fig. 5에 결함과 전열관 지지판 경계면간의 상대 거리(결함 거리)에 따른 대표적인 와전류 신호 형상을 결함 거리  $d=0\text{mm}$ ,  $d=-5\text{mm}$ 에 대해 보였다.

신호전압은 결함이 지지판 경계면 근처에 있을 때 급격히 변화하며, 일정한 결함거리(예컨대 5mm 정도) 이상에서는 대체로 신호 전압이 일정하다. 만약  $V$ ,  $V(r)$ ,  $V(d)$ 를 각각 관찰된 신호 전압, 주파수 혼합 후에 순수한 지지판으로부터의 신호 전압(Mi-

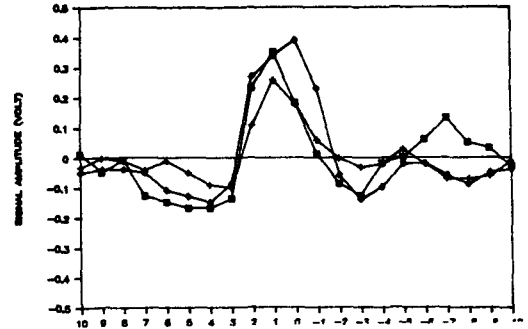


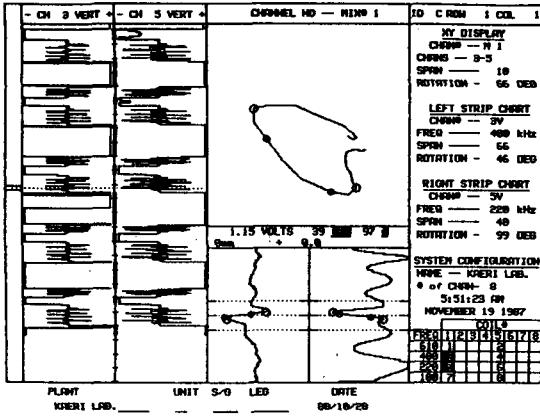
Fig. 4 Typical plot of the eddy current signal voltages vs. relative distances. (defect width=1.0mm, length=1.0mm)

xing Residue), 주파수 혼합 후에 순수한 결함으로부터의 신호 전압이라 한다면

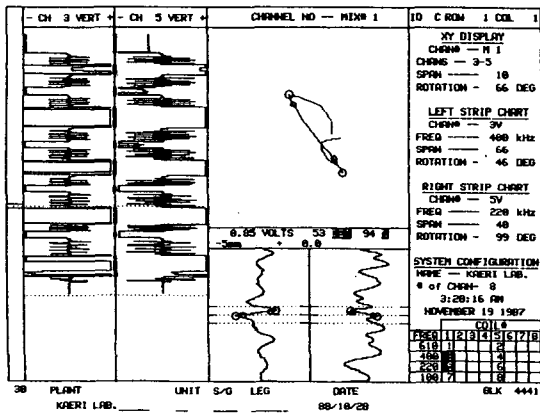
$$V = x V(r) + V(d), \quad -1 \leq x \leq 1 \dots\dots\dots (5)$$

로 표현할 수 있으며 여기서  $x$ 는 결함과 지지판 경계면간의 거리에 관련되는 인자이다. 결함이 지지판 경계면에서 멀리 떨어져 있다면 지지판과 결함이 아무 간섭도 일으키지 않아  $x=0$ 일 것이며 결함거리가 가까와짐에 따라  $x$ 가 증가하기 시작하여 측정된 전압의 최대치 또는 최소치가 존재할 것이며( $x=+1$  또는  $x=-1$ ) 결함 거리가 0으로 접근함에 따라 Mixing Residue  $V(r)$  성분이 다시 0으로 되며 다시 결함거리가 멀어짐에 따라 최대 또는 최소값이 나타나고 Mixing Residue의 영향이 점차 감소하여 최후에는 아무 간섭이 없는 상태( $x=0$ )가 될 것이다. 본 실험에서는 측정된 신호 전압이 지지판 경계면 근처 ( $-5\text{mm} \sim +5\text{mm}$ )에서 최대값과 최소값이 나타날 것으로 예상할 수 있으며 Fig. 4에 나타난 바와 같이 지지판 경계면 근처에 결함이 위치할 때 와전류 신호의 편차가 비교적 크게 변화하여 Mixing Residue가 결함신호에 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 Bobbin Type 와전류 코일이 전열관을 주사할 때 결함 신호와 방해 신호와의 간섭 영향에 대한 고찰은 두 신호원이 (i) 전열관의 원주 방향으로 나란히 위치할 때와 (ii) 전열관의 축방향으로 나란히 위치할 때의 두 경우로써 Magnetic Vector Potential을 이용한 이론적인 해석



a) Distance  $d=0\text{mm}$



b) Distance  $d=-5\text{mm}$

Fig. 5 Typical eddy current signal outputs for different distances between the defect and tube support plate. The defect is length of 1.0mm, width of 0.5mm, and depth of 100% of wall thickness.

은 판이하게 다르다. 즉 Bobbin Type 코일에서의 Magnetic Vector Potential의 방향 성분은 대부분 원주 방향 성분으로 구성되며 축방향의 분포는 앞에서 유도한 바와 같이 코일 위치에서 약간 벗어남에 따라  $\exp(r/\delta)/r$ 의 함수로 급격히 감소한다. (i)의 경우는 원주 방향으로 두 신호원이 존재하므로 각각의 독립된 신호원에 의해 유기된 Magnetic Vector Po-

tential의 단순한 합으로 볼 수 없으며 여기에 간섭 성분도 고려하여야 한다. 왜냐하면 원주방향의 Magnetic Vector Potential은 동시에 두 신호원에 의해서 결정되므로 이런 경우는 복합적으로 해석하여야 하며 자세한 이론은 Sager<sup>2)</sup>가 수행한 바 있다. 그러나 (ii)의 경우 즉 본 실험의 상태와 같은 경우에 각각의 신호원에 의해 발생된 Magnetic Vector Potential은 독립적으로 최종 신호에 영향을 준다. 이것은 두 신호원이 축방향으로 떨어져 있고 Magnetic Vector Potential의 방향성분이 원주 방향 성분밖에 없고 이 성분은 코일 위치에서 축방향으로 약간만 이동해도 급격히 감소하기 때문이다. 거리  $d$ 만큼 떨어진 신호원 1과 2가 모두 전열관 내부 표면에 위치하고 거리  $d$ 가 일반적으로  $x$ 에 비해 상당히 크다고 간주하여(전열관의 관두께는 1.27mm임)  $x=0$ 로 가정하면 신호원 1을 검사대상으로 할 때 신호원 2에 의해 방해받는 Magnetic Vector Potential은 단순 거리의 함수만으로 고려할 때 (4)식에 의해  $\exp[-(d/\delta)(1+j)]/d$ 에 비례할 것이다. 본 실험에서 Inconel 600 전열관에 대해 기준주파수 400kHz에서 표준침투깊이  $=0.8\text{mm}$ 이므로 이에 대한 간섭인자를 상대값 개념으로 계산하여 보면 대략 Table 1.과 같다.

Table 1. Interaction factors with the function of axial distance.

$d(\text{mm})$	$\exp[-(d/\delta)(1+j)]/d(\text{임의단위})$
0.1	8.38
0.2	3.51
0.5	0.83
1.0	0.17
2.0	$1.5 \times 10^{-2}$
5.0	$2.9 \times 10^{-5}$

본 계산은 검사 탐촉자의 크기는 무시된 채로 두 신호원간의 거리에 따른 방해 신호의 영향 정도를 알아본 것으로 축방향 영향 인자는 근접 거리 약 1.0mm까지 영향을 끼치며 그 이상의 거리에서는 무시해도 좋다고 판단된다. 그러나 실제로 사용되는

탐촉자는 차동형으로 코일 1의 쪽, 코일 2의 쪽, 및 두 코일 간격은 실제로 각각 약 1.5mm씩이므로 신호원의 크기를 무시하더라도 탐촉자가 약 4.5mm는 이동하여야 완전한 하나의 Lissajous 도형을 그리게 된다. 따라서 실제 실험 조건에서는 위의 방해 신호 성분간의 거리에 따른 영향에다 탐촉자 크기를 고려하여야 한다. 즉 본 실험의 결합평가 또는 신호 전압에 영향을 끼치는 인자는 간섭에 의한 영향을 덧붙여 Mixing Residue와 결합 신호의 상대적인 크기, 탐촉자의 제원, 전열관의 물리적 특성 및 제원, 기하학적인 검사 조건 등도 영향을 끼침을 알 수 있다. 대체로 관측된 신호 전압이 클 경우에는 Mixing Residue가 잡음 성분과 같이 묻혀버리므로 결합 평가에 영향을 주지 않는다. 그러나 결합 신호의 크기가 작고 덧붙여 결합 위치가 탐촉자의 축방향 길이 + Magnetic Vector Potential의 영향 범위 즉 본 실험 조건의 경우 결합거리가 대략  $4.5\text{mm} + 1.0\text{mm} = 5.5\text{mm}$ 이내인 경우 신호 평가에 Error를 유발시키는 원인이 됨을 알 수 있다.

## 5. 결 론

다양한 크기의 인공 결합을 방전가공한 시편에 대해 단순한 형태의 결합 신호가 지지판과 같은 방해 신호에 대해 결합 거리에 따른 결합 평가의 영향을 조사하였다. 본 연구에서 개발한 이론에 따른 계산

결과, 본 실험 조건에서 근접한 두 신호원간의 간섭 효과는 대체로 근접거리 약 1.0mm 정도까지 영향을 미치며 여기에 와전류 탐촉자의 기하학적인 형상 및 크기를 감안하면, 결합이 지지판 경계면에서 약  $\pm 5\text{mm}$ 이내에 위치할 때 결합 신호가 지지판 신호에 의해 영향 받음을 알 수 있다. 그러나 결합과 지지판간의 거리의 함수로 관측되는 신호 전압을 측정할 결과 두 신호원에 의한 서로간의 간섭 효과라기 보다는 주파수 혼합 후에 Mixing Residue와 결합 신호의 상대적인 크기가 본 경우에 주된 영향인자로 판정되었다. 또한 원주 방향의 Magnetic Vector Potential이 축방향으로 미치는 영향은 상대적인 탐촉자의 축방향 길이와 비교하여 크지 않으며 따라서 탐촉자의 축방향 길이가 결합을 부정확하게 평가할 수 있는 영역과 관련이 깊다고 판단된다.

## References

1. H. Libby, "Introduction to Electromagnetic Non-destructive Test Methods", Wiley Interscience, New York(1971) pp. 214~257.
2. A. Sager, in "Eddy Current Characterization of Materials and Structures", ASTM STP 722, G. Birnbaum and G. Free Eds., ASTM, (1981) pp. 269~297.