

금속배관 건전성 감시를 위한 배열형 펄스와전류 탐촉자의 설계 및 배열신호 제안

Design and Array Signal Suggestion of Array Type Pulsed Eddy Current Probe for Health Monitoring of Metal Tubes

신영길

Young Kil Shin

초 록 본 논문에서는 외부에서의 탐촉자 스캐닝이 어려운 금속배관의 긴 축방향 결함이나 두께감육 등과 관련된 건전성을 감시하기 위하여 펄스와전류 신호의 피크치와 피크(발생)시간을 이용하는 배열형 탐촉자를 제안하였다. 탐촉자는 관을 따라 외삽형 코일들을 배열하고, 금속배관의 상태를 반영하는 자계는 와전류에 의해 생성되는 자계이므로 원천자계가 직접적으로 센서신호에 영향을 미치는 것을 막기 위하여 코일의 외부를 페라이트로 차폐하였다. 여자코일과 센서코일은 자동적으로 연속해서 위치를 이동하게 되므로 사람이 직접 탐촉자를 주사할 필요는 없다. 두 코일의 위치가 고정되어 있을 때 센서에서 감지되는 펄스와전류 신호에서 피크치와 피크시간을 추출하고, 모든 위치에서 추출되는 이 데이터들을 축적하여 배열형 피크치 신호와 배열형 피크시간 신호를 생성하였다. 수치 모사는 시간영역은 후향차분법으로, 공간은 유한요소법을 사용하여 수행되었다. 모사 결과는 결함의 깊이나 길이가 증가함에 따라 펄스와전류 신호에서 피크치가 증가하며 피크는 더 일찍 나타난다는 것을 보여 주었으며, 이를 활용하여 본 연구에서 제안한 배열신호들은 배열형 탐촉자 내부에서 결함의 깊이나 길이 변화뿐만 아니라 결함의 위치를 반영하는데에도 탁월함을 증명하였다.

주요용어: 펄스와전류, 피크치, 피크시간, 배열형 탐촉자, 건전성 감시, 금속배관

Abstract An array type probe for monitoring metal tubes is proposed in this paper which utilizes peak value and peak time of a pulsed eddy current(PEC) signal. The probe consists of an array of encircling coils along a tube and the outside of coils is shielded by ferrite to prevent source magnetic fields from directly affecting sensor signals since it is the magnetic fields produced by eddy currents that reflect the condition of metal tubes. The positions of both exciter and sensor coils are consecutively moved automatically so that manual scanning is not necessary. At one position of send-receive coils, peak value and peak time are extracted from a sensor PEC signal and these data are accumulated for all positions to form an array type peak value signal and an array type peak time signal. Numerical simulation was performed using the backward difference method in time and the finite element method for spatial analysis. Simulation results showed that peak value increases and the peak appears earlier as the defect depth or length increases. The proposed array signals are shown to be excellent in reflecting the defect location as well as variations of defect depth and length within the array probe.

Keywords: Pulsed Eddy Current, Peak Value, Peak Time, Array Type Probe, Health Monitoring, Metal Tube

1. 서 론

탐촉자의 스캐닝이 어려운 금속배관의 외부에서 배관의 벽에 축방향으로 길게 발생하는 결함

이나 두께감육 등을 검출하기 위하여 본 연구에서는 일부 취약부위에 설치할 외삽형 배열 펄스와전류 탐촉자를 설계하고, 그 효율성을 수치해석 모사를 통해 검증하였다. 펄스는 여러 개의

주파수 성분을 가지고 있으므로 일반 와전류탐상에 비해 침투깊이가 더 깊고 좀 더 다양한 정보를 제공해 줄 것으로 기대된다[1,2].

여자코일과 센서코일로 구성되어 보내고 받는 형태의 탐촉자에 외삽형 코일들이 아무 장치도 없이 사용되면, 센서코일은 유도된 와전류가 발생시키는, 결합정보를 포함한 자계뿐만 아니라 여자코일로부터의 직접적인 원천자계가 감지하게 된다. 와전류탐상법은 피검사체의 이상을 검출하기 위하여 피검사체의 상태에 따라 다르게 분포되는 와전류를 피검사체에 유도시키고, 와전류의 영향을 받은 자계를 감지하여 피검사체의 이상유무를 판단하는 검사법이다. 따라서 여자코일로부터 결합에 대한 정보도 포함하지 않고 직접 도달되는 원천자계가 센서코일에서 감지되는 것을 차단시킬 필요가 있다. 이를 위해 코일 외부를 차폐시키거나 센서코일들을 차동형으로 배치하여 공통되는 원천자계의 영향이 상쇄되도록 하는 방법을 사용할 수 있다[3-6].

한편, 최근에는 내삽형 탐촉자 표면에 여러 개의 편케익 코일을 원주를 따라 배열해 놓고 순차적으로 코일의 역할을 바꿔가면서 센서코일에 유도되는 임피던스를 신호로 가공하여 사용하는 배열탐촉자가 개발되어 증기발생기 전열관의 건전성 평가에 탁월한 성능을 보인 바 있다[7,8]. 이는 오랜 시간이 걸리는 원주방향의 기계적인 회전 스캐닝을 코일의 배열과 역할 스위칭으로 대체하고 검사속도를 높인 것인데, 본 논문에서 다루는 축방향 외삽형 배열탐촉자와는 검사 대상과 용도 면에서 차이가 있기는 하지만 외부에서의 스캐닝이 어려운 부위에 같은 원리를 적용하여 스캐닝을 대체할 수 있도록 설계에 참조하였다.

본 연구에서는 알루미늄 관의 건전성을 지속적으로 감시하기 위해 여러 개의 외삽형 코일을 관을 따라 배열하고 관의 주변을 차폐시킨 펄스와전류 탐촉자를 설계하였으며, 수치해석 모사를 통해 센서코일에 유도되는 펄스와전류 신호들을 계산하고, 이 신호들로부터 피크치와 피크(도달) 시간 정보를 추출하여 구성되는 배열형 신호들을 제안하였다.

2. 수치해석 방법

펄스와전류탐상의 지배방정식은 일반 와전류탐

상의 지배방정식과 같이 식(1)로 표현된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J}_s - \sigma \left(\nabla V + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right) \quad (1)$$

여기서 $\mu, \sigma, \bar{J}_s, \bar{A}$ 은 각각 투자율, 전도도, 코일의 전류밀도, 벡터자위를 의미한다. 다만, 일반 와전류탐상에서는 정현파를 사용하므로 페이지 표현을 사용하여 시간에 대한 미분항을 $j\omega$ 로 대치하여 계산하지만, 펄스와전류탐상에서는 변수의 시간에 따른 변화를 그대로 사용하므로 시간에 대한 미분항을 차분 형태로 계산한다. 본 연구에서는 시간에 대하여 후향차분법을 사용하였고, 공간에 대해서는 유한요소법을 사용하여 해석하였다[3-6].

식(1)의 지배방정식에 유한요소 공식화를 수행하면 다음과 같은 행렬식이 구해진다.

$$[S]\{A\} + [C]\left\{\frac{\partial A}{\partial t}\right\} = \{Q\} \quad (2)$$

여기서 각 계수행렬은 다음과 같이 표현되며,

$$[S] = \int_v \frac{1}{\mu} [\nabla N]^t [\nabla N] dv \quad (3)$$

$$[C] = \int_v \{N\} \sigma \{N\} dv \quad (4)$$

$$\{Q\} = \int_v \{N\} J_s dv \quad (5)$$

이 식들에서 사용된 $\{N\}$ 은 사변형 요소의 형태 함수를 뜻한다. 한편, 시간에 대한 후향차분법을 적용하여 시간 미분항을 표현하면 다음과 같다.

$$\left\{\frac{\partial A}{\partial t}\right\}^{n+1} = \frac{\{A\}^{n+1} - \{A\}^n}{\Delta t} \quad (6)$$

여기서 $\{A\}^n$ 은 시간 t^n 에서의 벡터자위 값이다. 식(6)을 사용하여 식(2)를 다시 쓰면 식(7)과 같은 반복계산 공식이 구해진다. 따라서, 전 시간 단계에서 구해진 벡터자위 값을 사용하여 다음 시간단계에서의 벡터자위 값을 계산해 나갈 수 있다.

$$\left[\frac{1}{\Delta t}[C] + [S]\right]\{A\}^{n+1} = \{Q\}^{n+1} + \frac{1}{\Delta t}[C]\{A\}^n \quad (7)$$

펄스와전류 신호는 센서코일에 유도되는 기전력이므로 각 시간단계에서 구해진 벡터자위 값을 사용하여 식(8)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{emf} = \frac{\{A\}^{n+1} - \{A\}^n}{\Delta t} 2\pi r_c \quad (8)$$

여기서 r_c 는 원통좌표계의 중심축으로부터 해당 사변형 요소의 중심까지의 반경을 의미한다.

3. 차폐의 필요성

여자코일과 센서코일을 갖는, 보내고 받는 형태의 탐촉자에서 아무 장치도 없는 외삽형 코일들이 사용되면, 센서코일은 유도된 와전류가 발생시키는 결함정보를 포함한 자기뿐만 아니라 여자코일로부터의 원천자계도 감지하게 된다. 세기가 상대적으로 크고 결함에 대한 정보도 포함하지 않은 원천자계의 영향을 줄이기 위해, 페라이트로 차폐한 탐촉자가 연구된 바 있으며[6] 본

연구에서도 이를 확장하여 사용하였다.

여자코일에 공급된 펄스 전류밀도는 Fig. 1에 보였으며, 펄스 폭은 4 ms이다. 관 벽의 두께와 외경이 각각 1.27 mm와 22.225 mm인 알루미늄관을 대상으로 하였다. 차폐되지 않은 외삽형 여자코일을 사용하였을 때, 4 ms에서의 자속 분포를 Fig. 2에 보였으며 여자코일로부터 0.57, 1.14,

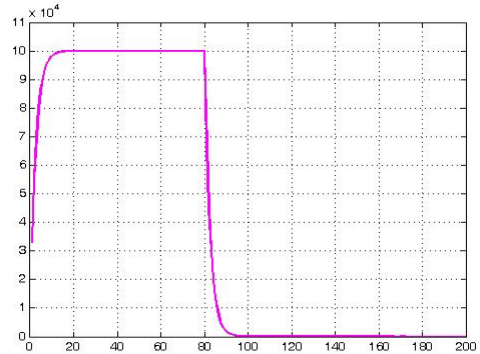


Fig. 1 Input pulse current density (1 time step = 50 μ s)

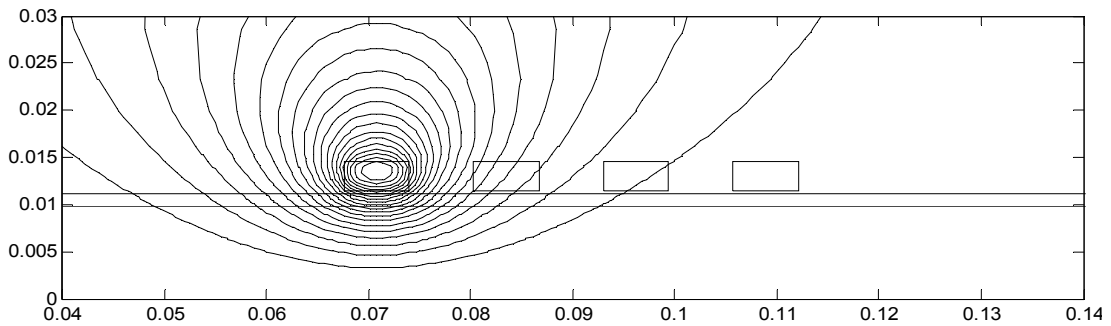
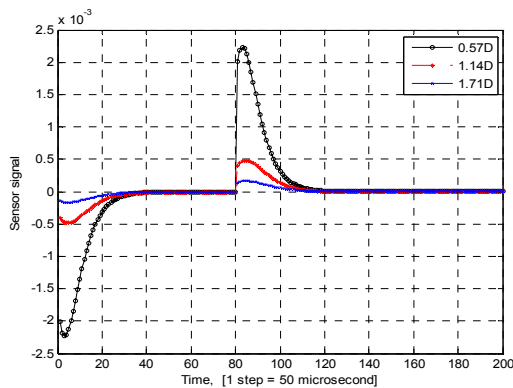
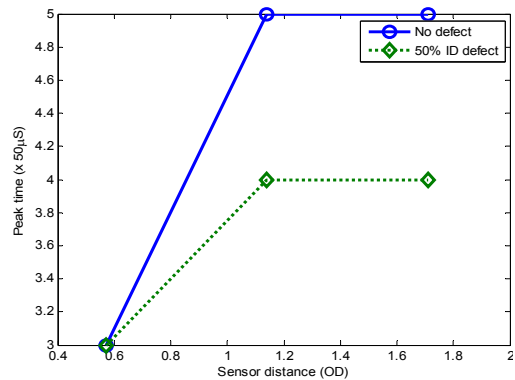


Fig. 2 Flux distribution of unshielded probe at 4 ms



(a) PEC signals from three sensor locations



(b) peak time variation due to sensor distances

Fig. 3 PEC signals and the peak value versus peak time from unshielded probe

1.71 OD(outer diameter) 만큼 떨어진 곳에 위치한 세 코일 센서도 표시하였다. 관에 결함이 없는 경우 세 센서 위치에서의 펄스와전류 신호들을 계산하여 Fig. 3(a)에 보였다. 센서 위치가 여자코일로부터 멀어질수록 신호의 피크치가 작아지는 것을 알 수 있으나, 피크치가 나타나는 시간의 변화는 명확하지 않았다. 그래서 Fig. 3(b)와 같이 결함이 없거나 50% 깊이의 내부결함을 갖고 있는 관의 세 센서 위치에서 각각 계산된 펄스와전류 신호들의 피크 발생시간을 비교해 보았다. 그 결과, 코일간의 거리가 1.14 OD 이상인 경우에는 피크시간이 변화하지 않음을 볼 수 있었다.

이는 여자코일의 자계가 센서코일에 직접 도달하였기 때문에 센서에서 생성되는 펄스와전류 신호가 관에 유도된 와전류에 의해 발생하는 자계보다 여자코일로부터의 직접적인 자계의 영향을 훨씬 더 크게 받았기 때문으로 보인다. 여자코일의 자계는 빠른 속도로 확산되는데, 여자코일 근처에서는 큰 와전류가 유도되어 유도자계를 발생시키므로 여자코일의 자계가 확산되는 것을 방해

하나, 거리가 좀 떨어진 곳에서는 유도되는 와전류가 매우 작고 따라서 방해 자계가 미미하므로, 여자코일의 자계가 코일간의 거리 증가 때문에 크기는 작아지지만 거의 동시에 센서코일에 도달하는 것이라고 판단된다.

와전류탐상에서는 피검사체내에 와전류가 유도되도록 하고 피검사체의 이상으로 인한 와전류 분포변화가 유도자계의 변화를 발생시키면 이를 센서로 감지하여 피검사체의 이상여부를 판단하는 신호로 사용하므로, 센서에서는 여자코일의 자계보다는 와전류에 의해 발생하는 결함정보를 가진 유도자계가 더 감지될 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 센서코일에 미치는 여자코일의 직접적인 자계의 영향이 최소화 되도록 모든 코일의 외부를 페라이트로 차폐하였다. 그 결과, 결함이 없는 관의 경우 Fig. 4와 같은 자속 분포와 Fig. 5(a)와 같이 세 센서 위치에서의 펄스와전류 신호들을 얻을 수 있었다. 이러한 펄스와전류 신호로부터 피크치와 피크(발생)시간을 추출하였고, 결함이 없는 관과 50%의 내부결함을 갖는 관에

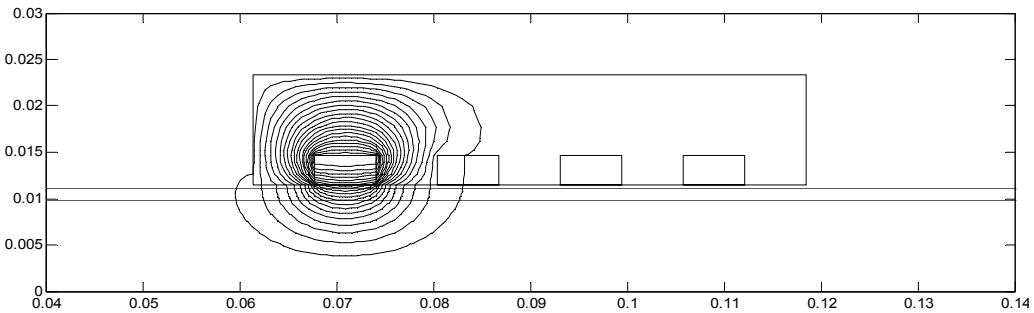
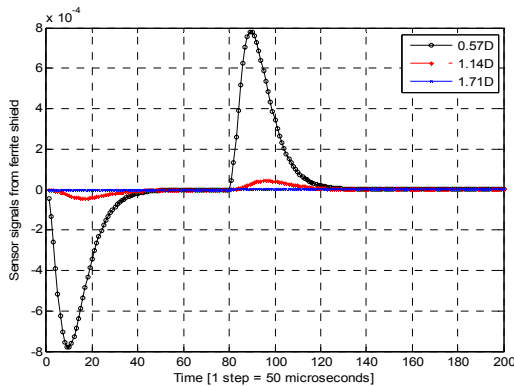
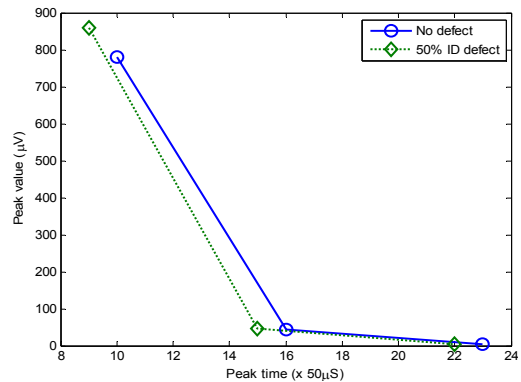


Fig. 4 Flux distribution of ferrite shielded probe at 4 msec



(a) PEC signals from three sensor locations



(b) peak value vs. peak time

Fig. 5 PEC sensor signals and the peak value versus peak time from ferrite shielded probe

서의 추출 결과를 비교하여 Fig. 5(b)에 보였다. 이 결과들을 Fig. 3의 차폐되지 않았을 때의 결과들과 비교해 보면, 피크치는 작아지며 피크시간은 증가함(느려짐)을 알 수 있다. 또한 차폐된 경우에는 여자코일과 센서코일 사이의 거리가 증가함에 따라 피크치는 마찬가지로 감소하지만 피크시간은 증가하는 것을 볼 수 있다. 한편, Fig. 5(b)의 비교에 의하면 결함이 있는 경우 두 코일 사이의 거리가 얼마가 되었든 피크치는 커지고 피크시간은 감소한다는 사실을 알 수 있다.

4. PEC 신호들로부터 배열신호의 추출

금속배관의 지속적인 감시를 위하여 먼저 차폐된 외삽형 코일들을 관을 따라 배열하였다. 여자코일과 센서코일의 위치는 하나의 펄스와전류 신호가 얻어지는 시간이 지난 후, Fig. 6에 보인 바와 같이 자동적으로 연속해서 오른쪽으로 이동되게 하였다. 그림에 보인 열 개의 코일 중 맨 왼쪽 코일을 1번이라 하고 오른쪽으로 차례로 번호가 증가한다고 하자. 역할 변화를 순조롭게 하기 위하여 여자코일과 센서코일 사이에 하나의 빈 코일을 두었으므로 이 경우 두 코일 사이의 간격은 1.14 OD이다. 따라서 Fig. 7에 보인 바와 같이 여자코일이 4번이면 센서코일은 6번에 위치한다.

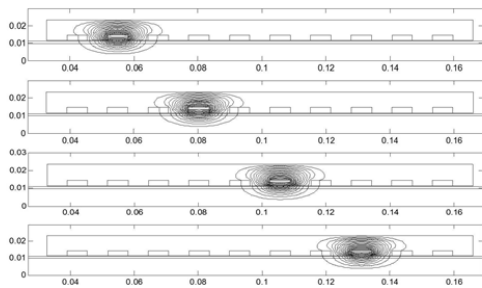


Fig. 6 Successive change of exciter coil location in a coil array

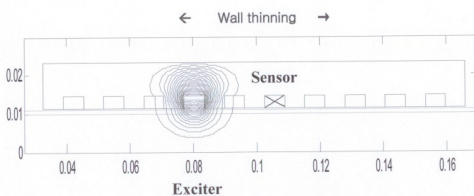


Fig. 7 Exciter and sensor coils in a coil array and wall thinning area

Table 1 Successive change of exciter and sensor coil locations

Exciter Coil No.	Sensor Coil No.
1 (outside defect)	3 (outside defect)
2 (outside defect)	4 (inside defect)
3 (outside defect)	5 (inside defect)
4 (inside defect)	6 (inside defect)
5 (inside defect)	7 (inside defect)
6 (inside defect)	8 (outside defect)
7 (inside defect)	9 (outside defect)
8 (outside defect)	10 (outside defect)

결함으로는 관 외벽의 두께 감소가 사용되었는데 깊이는 관 두께의 75%이고 길이는 50.8 mm로 코일번호 3.5에서 7.5 사이에 위치시켰다. 여자코일과 센서코일이 연속적으로 오른쪽으로 옮겨감에 따라 결함부위와 코일들의 상대적인 위치를 Table 1에 정리하였다. 앞서의 결과에서 결함이 있는 경우 피크치는 커지고 피크시간은 감소한다는 것을 상기하면, Fig. 7에 보인 바와 같이 두 코일이 모두 결함부위 내에 들어가 있는 경우 6번 센서코일에 나타나는 펄스와전류 신호는 가장 큰 피크치와 가장 작은(빠른) 피크시간을 갖게 될 것이다. 반면에 8번 코일이 여자코일의 역할을 하게 된다면 두 코일 모두 결함부위 밖에 위치하게 되므로 10번 센서코일에 나타나는 펄스와전류 신호는 가장 작은 피크치와 가장 큰(느린) 피크시간을 갖게 될 것이다. 두 코일이 오른쪽으로 위치를 이동해 갈 때 각각의 센서코일에 나타나는 펄스와전류 신호들을 계산하여 Fig. 8에 보였다. 이 펄스와전류 신호들로부터 각각의 피크치와 피크(발생)시간을 추출하여 배열형 피크치 신호와 배열형 피크시간 신호들을 생성하고 Fig. 9에 보였다. 두 코일의 위치가 결함부위를 지나 이동해감에 따라 배열형 피크치 신호는 신호의 세기가 커졌다가 작아지며, 반대로 배열형 피크시간 신호는 신호의 세기가 작아졌다가 커지는 형태로 나타난다는 것을 알 수 있다.

5. 배열신호의 특성

배열신호들의 특성을 파악하기 위하여, 결함의 깊이와 길이, 위치를 변화시켜 가며 배열신호들에 나타나는 변화를 조사하였다.

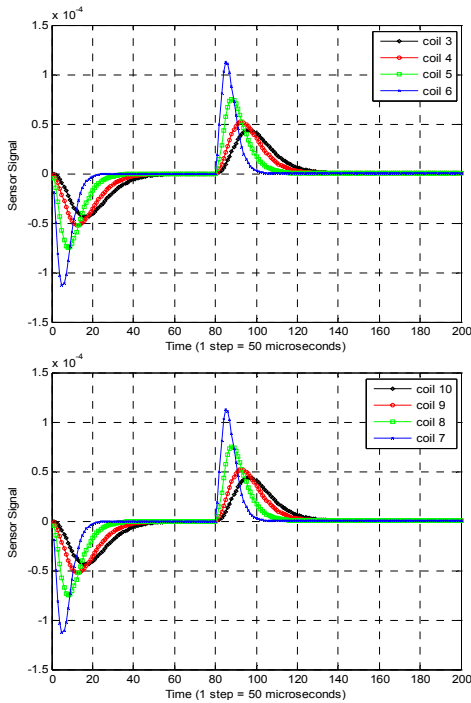
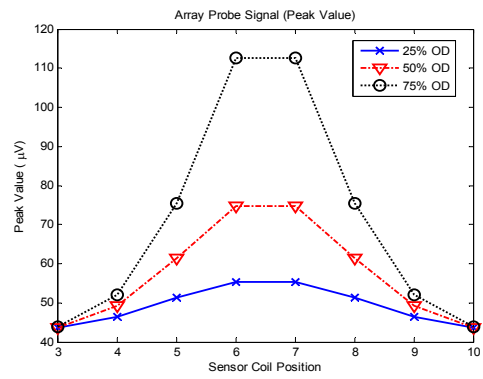
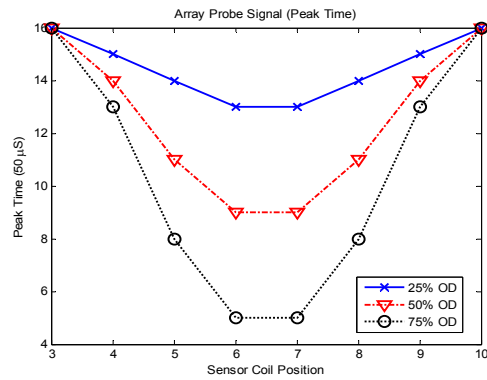


Fig. 8 Change of PEC sensor signals due to wall thinning

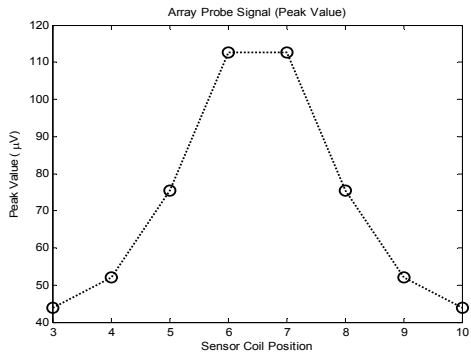


(a) array type peak value signal

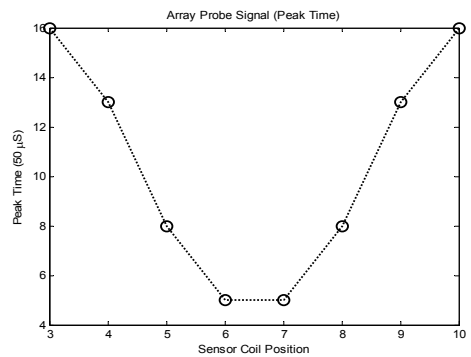


(b) array type peak time signal

Fig. 10 Array type signals from 3 different depths



(a) array type peak value signal



(b) array type peak time signal

Fig. 9 Array type signal display

관 외벽의 두께 감소가 정상 두께의 25%, 50%, 75%로 증가하면서 관의 두께가 얇아짐에 따라 배열형 피크치 신호와 배열형 피크시간 신호에 어떤 변화가 발생하는지를 Fig. 10에 보였다. 이 경우, 관 벽의 두께 감소는 축방향으로 길이 50.8 mm에 걸쳐 발생하였으며 코일번호 3.5에서 7.5 사이에 위치하는 것으로 모사하였다. 두께 감소가 증가함에 따라(즉, 관의 두께가 얇아짐에 따라) 배열형 피크치 신호의 세기는 더 커지며, 배열형 피크시간 신호의 세기는 더 작아지는 형태로 나타난다는 것을 알 수 있다. 관 외벽의 두께 감소가 정상 두께의 50%인 경우에 결함의 축방향 길이가 12.7 mm, 19.05 mm, 50.8 mm로 변할 때 배열신호들에 나타나는 변화를 Fig. 11에 보였다. 결함의 길이는 코일번호 3.5 위치에서 시작하여 오른쪽으로 증가시켜 가며 모사하였으므로 결함은 배열형 탐촉자 내부에서 왼쪽에 위치한다. 결함의 길이 변화에 따른 배열신호들의 차이

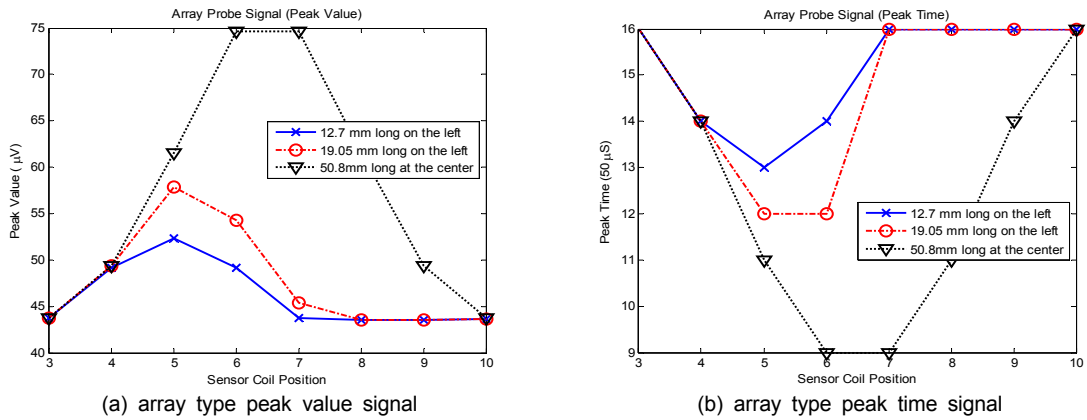


Fig. 11 Array type signals from different lengths

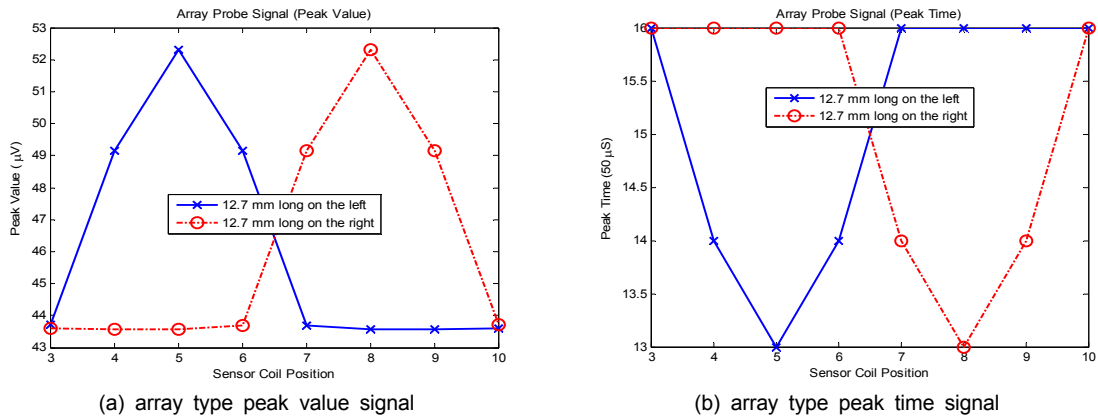


Fig. 12 Array type signals from different locations

를 명확하게 볼 수 있으므로 결함의 깊이를 쉽게 판단할 수 있을 것이다. Fig. 12는 배열형 탐촉자 내에서 결함이 왼쪽에 치우쳐 있는 경우와 오른쪽에 치우쳐 있는 경우에 나타나는 배열신호들을 보인 것이다. 배열신호들은 결함의 위치도 쉽게 추정할 수 있게 해준다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과들을 종합해 볼 때 배열신호들은 결함에 대한 정보를 매우 잘 반영하고 있으며, 결함신호의 해석도 무척 간편하고 쉽다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

내부에서는 접근하기 어려운 금속배관의 건전성을 지속적으로 감시하기 위하여 차폐된 외삽형, 보내고 받는 형태의 펄스와전류 배열형 탐촉자를 설계하고, 수치해석 방법을 사용하여 펄스와전류 신호들을 계산하였으며 이들로부터 배열

형 피크치 신호와 배열형 피크시간 신호들을 작성하였다. 탐촉자는 배관을 따라 외삽형 코일들을 등간격으로 배열하고, 코일들의 외부는 페라이트로 차폐하는 형태로 설계되었다. 여자코일과 센서코일간의 간격은 1.14 OD로 하였고, 이들은 동시에 연속적으로 위치가 이동되도록 하였다. 위치 이동 중 한 위치에서 센서코일에 유도되는 펄스와전류 신호를 구하여 피크치와 피크시간 정보를 추출하고, 이들을 모든 센서코일 위치에서 수집하여 배열형 피크치 신호와 배열형 피크시간 신호로 개발하였다. 수치 모사를 통해 제한된 배열신호들의 특성을 조사해 본 결과, 배열신호들은 결함의 깊이나 길이 변화뿐만 아니라 결함의 위치를 반영하는데도 매우 탁월하다는 것을 알 수 있었다. 이러한 배열신호들은 결함에 대한 정보를 매우 잘 반영하고, 결함신호의 해석도 무척 간편하고 쉬우며, 또한 신호들을 채취하기 위해

사람이 직접 탐촉자를 주사할 필요도 없어, 지속적으로 금속배관의 건전성을 감시하는데 매우 유용할 것이다.

참고문헌

- [1] J. Blitz, "Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing," Bristol: Adam Hilger (1991)
- [2] C. J. Renken, "The use of a personal computer to extract information from pulsed eddy current," *Materials Evaluation*, Vol. 59, No. 3, pp. 356-360 (2001)
- [3] Y. K. Shin and D. M. Choi, "Design of a shielded reflection type pulsed eddy current probe for the evaluation of thickness," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 5, pp. 398-408 (2007)
- [4] Y. K. Shin, D. M. Choi and H. S. Jung, "Comparison of simulated PEC probe performance for detecting wall thickness reduction," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 6, pp. 563-569 (2009)
- [5] Y. K. Shin, D. M. Choi, Y. J. Kim and S. S. Lee, "Signal characteristics of differential pulsed eddy current sensors in the evaluation of plate thickness," *NDT&E International*, Vol. 42, No. 3, pp. 215-221 (2009)
- [6] Y. K. Shin, "Design of shielded encircling send-receive type pulsed eddy current probe using numerical analysis method," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 33, No. 6, pp. 505-510 (2013)
- [7] L. S. Obrutsky, N. J. Watson, C. H. Fogal, M. Cantin, V. S. Cecco, J. R. Lakhan and S. P. Sullivan, "Experiences and applications of the X-probe for CANDU steam generators," Presented at the 20th EPRI Steam Generator NDE Workshop (2001)
- [8] H. Huang, N. Sakurai, T. Takagi and T. Uchimoto, "Design of an eddy-current array probe for crack sizing in steam generator tubes," *NDT&E International*, Vol. 36, No. 7, pp. 515-522 (2003)