

배관 결함부 원거리장 와전류 신호 정량화 연구

Quantitative Evaluation of Remote Field Eddy Current Defect Signals

정진오, 이재경, 김형진

Jin-Oh Jeong, Jae-Kyung Yi and Hyoung-Jean Kim

초 록 다양한 기계가공 결함을 유기한 공칭 외경 100mm의 덕타일 주철관을 대상으로 원거리장 와전류 검사를 수행하였다. 상수도 배수관으로 사용되는 주철관은 제조 단계의 큰 허용 오차 때문에 두께가 일정하지 않고 단면이 비대칭적인 특징을 지니므로, 원거리장 와전류 탐상 신호에는 배관 축방향에 걸친 장범위 잡음이 존재하게 된다. 본 논문에서는 장범위에 걸친 배경잡음을 효과적으로 제거하기 위하여 이동구간 평균법을 응용하였고, 결함의 깊이와 원주방향 정도를 정량적으로 평가하기 위하여 voltage plane 극좌표 (VPPP) 방법을 활용하였다. 이동구간 평균처리로서 신호비를 일차적으로 향상시킨 다음 VPPP 기법을 이용하여 결함신호를 얻은 결과, 결함신호가 VPPP상의 기준점에서 x 축과 이루는 각이 결함 깊이와 직선적인 상관 관계가 있음을 확인하였다. 따라서 배관과 동축으로 놓인 탐촉코일을 이용한 원거리장 와전류 검사로서 매설 상수도 배관 내·외부에 존재하는 부식결함을 비파괴 정량평가할 수 있는 기반을 구축하였다.

주요용어: 원거리장 와전류, 이동구간 평균법, voltage plane 극좌표

Abstract The remote field eddy current (RFEC) inspection was performed on the ductile cast iron pipes with nominal outer diameter of 100mm, which were machined with various shapes and sizes of defects. Ductile cast iron pipes which are used as water supply pipe have the non-uniform thickness and asymmetric cross section due to relatively high degree of allowable errors during the manufacturing processes. These characteristics of ductile cast iron pipes cause the long range background noises in RFEC signals along the pipe. In this study, the machined defects in pipes were effectively classified by the moving window average (MWA) method which eliminated the long-range noise. The voltage plane polar plots (VPPP) method was used to quantitatively evaluate the depth and circumferential degree of defects. The VPPP signatures showed that the angle between defect signature and the normalized in-phase component on the VPPP is linear to the depth of defects. The nondestructive RFEC technique proved to be capable of quantitatively evaluating the machined defects of underground water supply pipe.

Keywords: remote field eddy current (RFEC), moving window average (MWA), voltage plane polar plots (VPPP)

1. 서론

금속 배관체에 코일을 넣고 저주파 교류 전류를 인가하면 코일에서 일정거리 떨어진 원거리장 영역에서도 자기장이 형성된다. 이 영역에서 배관 내부에 탐촉코일을 두고 전도성 배관의 내·외부 결함

및 두께 변화를 비파괴 평가할 수 있는데 이를 원거리장 와전류 (remote field eddy current, RFEC) 기술이라 한다. 유정관의 외부 부식을 평가하기 위한 도구를 연구하던 과정에서 그 응용 가능성을 확인한 후, 이론적 연구를 통한 개념정립을 거쳐서 열교환기 세관이나 송유관, 원자력 발전소 등 다양

한 분야에 적용되고 있다 [1,2]. 최근 상수도 관을 대상으로 응용 연구가 진행되고 있는데, 이는 초음파 탐상이나 자속 누설법과 같은 기존의 방법과 달리 RFEC를 이용한 비파괴 탐상법은 비접촉식이므로 부식생성물이나 시멘트 몰탈 라이닝을 가진 상수도용 주철관에 적용 가능성이 크기 때문이다[3,4].

RFEC 방법을 상수도용 배관에 적용하여 획득한 신호를 바탕으로, 본 논문에서는 장범위 잡음 제거 및 결함의 정량 평가 방법을 연구하였다. 적용 대상은 공경 외경 100mm의 덕타일 주철관이며 배관과 동축으로 놓인 탐지기를 사용하여 신호를 획득하였다. 상수도관으로 사용되는 덕타일 주철 배관은 제작 단계의 큰 허용오차 때문에 두께가 배관축의 위치에 따라 변할 뿐만 아니라, 특정 위치에서도 단면이 비대칭으로 존재하는 경우가 많다. 이러한 특성은 RFEC 신호에서 서서히 변하는 배경잡음으로 나타나기 때문에 이를 제거하기 위해서 이동평균법을 사용하였다[5]. 또한 결함의 형상정보 및 정량화를 위하여 voltage plane 극좌표 방법을 사용하여 획득 신호를 처리했다[6].

2. 이론적 배경

2.1. 원거리장 와전류 이론

RFEC 기술은 배관 형상의 피검체에 있어서 여자기에서 유기된 전자기 에너지가 관벽을 투과한 후 외벽을 따라 일정거리를 흐르다가 다시 관 내부로 유입되는 관벽 투과(through-wall transmission) 특성을 이용하는 전자기 응용 비파괴 검사법의 일종이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 전도성 배관 내부에서 배관과 동일 축을 가진 여자코일에 저주파 교류 전류를 통과시키면 자기장이 형성된다. 이 자기장은 배관 축을 따라 두 가지 방법으로 흐르게 된다. 첫 번째는 여자기에 의해 생성된 직접 자기장(direct magnetic field)이다. 그러나 직접 자기장은 여자기 부근의 전도성 배관과 상호 작용하면서 배관 벽체 내에서 생성된 와전류의 작용으로 배관 축을 따라 급속히 감쇠 된다. 한편 여자기 부근 배관 벽체의 표피 효과(skin effect)를 극복하고 배관 벽을 투과하여 배관 외부에 도달한 자기장은 별 어려움 없이 배관 외부로 따라 축 방향으로 흐르게 된다. 축 방향으로 일정 거리를 지난 지점에서는 외부 자기장이 급속히 감쇠된 내부의 직접 자기장보다 그 크기가 크기 때문에 배관 내부로 다시 투과하여 들어와서 간접자기장(indirect magnetic field)을

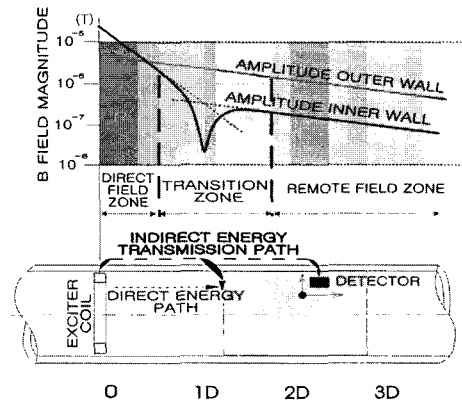


Fig. 1 Magnetic field density distribution along inner and outer sides of a conductive pipe by a pipe-inside exciter

형성하게 된다. 이 영역을 원거리장(remote field)이라 한다. 원거리장 부근의 배관 내부에 탐지코일을 두고서 간접 자기장이 벽체를 지날 때 표피 효과에 의해 나타나는 자기장의 세기와 위상의 변화를 측정하는 비파괴평가법을 원거리장 와전류법이라 한다. 피검체를 투과할 때의 자기장 크기와 위상 변화는 식(1)과 같은 1차원 skin depth 모델로서 모사 할 수 있다[7].

$$B = B_0 e^{-\frac{d}{\delta}} e^{j(2\pi ft - \frac{d}{\delta})}, \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{j\pi\mu\sigma}} \quad (1)$$

여기서 B는 자기장 세기, B_0 는 표면에서 자기장 세기, d는 투과두께, δ 은 침투 깊이, f는 주파수, μ 는 투자율, 그리고 σ 는 전기 전도도이다. 이와 같은 모델로부터 다음과 같은 RFEC 특성을 유추할 수 있다. 먼저 주파수가 커지면 탐지되는 신호의 세기가 작아지고, 같은 두께를 투과할 경우 위상의 변화가 커진다. 따라서 높은 주파수를 사용할 경우에는 분해능은 좋아지나 검출되는 신호의 절대값이 작아서 신호의 탐지가 어려워진다. RFEC 신호를 탐지하기 위해서는 적정의 주파수를 선택해야 하는데 배관 두께인 d와 침투 깊이인 δ 의 비(d/ δ)가 π 정도 되는 것이 적당하다.

2.2. 이동구간 평균 신호처리법

특정 위치의 신호를 일정한 주변 영역의 데이터 창(window) 내부에 있는 신호의 평균값과 비교하는 신호 처리법을 이동구간 평균법(moving window average)이

라 한다. 여기서 데이터 창은 거리 혹은 데이터의 수를 의미하는데 고정된 값을 사용한다. 새로운 데이터를 얻으면 데이터 창은 전진하여 새 데이터를 포함하게 되고 가장 오래된 데이터를 버린다. 새롭게 생성된 데이터 창 내부의 데이터들로부터 평균을 다시 계산하고, 데이터 창 중간에 있는 데이터에서 평균을 뺀다. 데이터가 새로 얻어질 때마다 이와 같은 작업을 반복하면 서서히 변하는 배경신호를 제거할 수 있다. 배관에서 이와 같은 장범위 잡음 신호로 작용할 수 있는 요소는 위치에 따른 비투자율 및 전기 전도도의 변화와 제조시 두께의 불균일성 등을 들 수 있다.

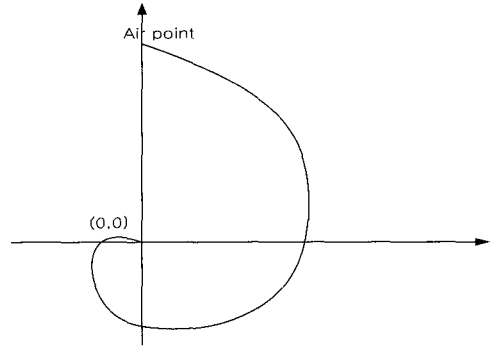


Fig. 2 Operation point movement with frequency

2.3. Voltage Plane 극좌표 신호 정량분석법

배관의 두께를 일정하게 두고 주파수를 변화시켜가면서 원거리장 와전류의 진폭 신호와 위상차 신호를 voltage plane에 표시하면 Fig. 2와 같은 나선형 궤적을 얻을 수 있다[6]. 여기서 동작 주파수를 특정 주파수로 고정한 다음, 배관의 두께 변화와 물성 값 등의 변화가 없는 상태에서 획득된 신호는 Fig. 3의 사각형으로 도시된 부분과 같이 voltage plane의 특정한 위치를 차지하게 된다. 이 점을 무결함부 작용점 (full wall operation point)이라 한다. 배관 벽체의 두께나 비투자율 및 전기전도도 등의 물성값 변화가 있는 경우에는 무결함부 작용점이 Fig. 2의 주파수 변화에 따른 작용점 (operation point) 이동 궤적을 따라 움직일 것이다. 배관에 부분적인 두께 감소가 있을 경우에는 Fig. 5와 같이 작용점이 무결함부 작용점으로 돌아오는 경로에 따라 다양한 결함신호(signature)를 나타내게 된다. 이러한 결함신호의 모양을 관찰함으로써 결함의 원주방향 범위와 깊이를 파악할 수 있다.

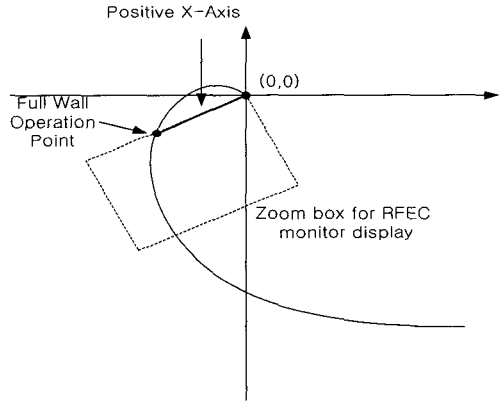


Fig. 3 Monitor display window at RFEC operating frequency

배관에서 부분적인 두께 감소가 있을 때 배관과 동축으로 위치한 탐지기가 얻게 되는 신호는, 배관 각 부분을 통과하면서 침투 깊이에 의한 효과만큼 변한 신호들의 평균으로 Maclean은 이해하였다[6]. 이는 식(2)와 같이 표현된다.

$$E_R = \frac{E_0}{N} \sum_{n=1}^N \cos\left(-\frac{D_n}{\delta}\right) \exp\left(-\frac{D_n}{\delta}\right) \quad (2)$$

N은 다른 두께를 갖는 영역의 개수, D_n 은 n 번째 부분의 두께이고 δ 는 침투 깊이이다. 이와 같이 모델링 하였으나 실험을 통해 얻을 수 있는 값은 감소된 두께와 원주

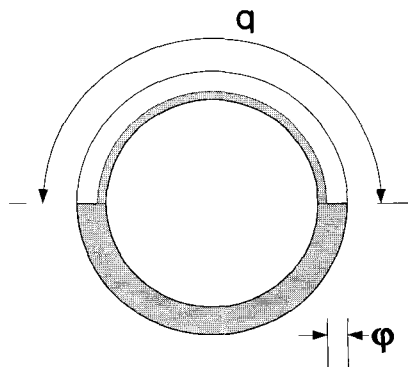


Fig. 4 Idealized defect shape of a pipe

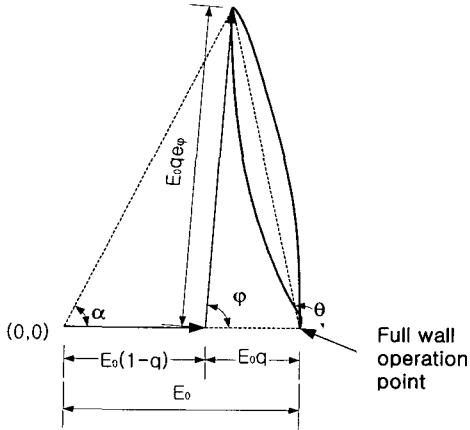


Fig. 5 RFEC signature at the voltage plane

방향의 범위 등 2개의 변수이다. 즉, Fig. 4에서 보는 것과 같은 결합이 되고 이를 위의 식에 적용하면 식(3)과 같은 결과를 얻는다.

$$E_R = E_0(1-q) \cos\left(-\frac{D_1}{\delta}\right) \exp\left(-\frac{D_1}{\delta}\right) + E_0q \cos\left(-\frac{D_2}{\delta}\right) \exp\left(-\frac{D_2}{\delta}\right) \quad (3)$$

극좌표에 식(3)을 도식하면 Fig. 5와 같이 된다. 식(3)의 D_i/δ 성분들은 모두 Fig. 2와 3의 축을 기준으로 한 것이다. 원점으로부터 작용점을 향하는 벡터를 x축이 되도록 회전이동을 한 후 각 성분으로 표현하면 식(4)와 같이 표시된다.

$$E_R = E_0(1-q) + E_0q \cos(-\varphi) \exp(-\varphi) \quad (4)$$

φ 는 감소된 두께를 통과할 경우의 위상과 손상이 없는 관벽을 통과할 때의 위상의 차이이다. 하지만, Fig. 5에서 보는 RFEC 신호의 voltage plane 표현으로는 φ 를 직접 구할 수 없다. Fig. 5의 두 개의 삼각형 중에서 우측의 삼각형을 살펴보면 φ 를 사이 각으로 하는 두 변의 비가 $1:e^\varphi$ 로서 φ 가 결정되면 이에 따라 유일하게 결정됨을 알 수 있고, 이는 삼각형의 모양이 결정됨을 의미한다. 따라서 θ 도 φ 에 의해 유일하게 결정된다. 즉 θ 와 결합의 두께와는 서로 일대일의 관계가 있음을 알 수 있다. 이렇게 두께 및 φ 가 결정되면 결합의 원주방향의 범위 q 를 Fig. 5로부터 얻을 수 있다.

따라서, voltage plane상에서 원점과 작용점을 잇는 선분을 x 축이 되도록 회전 이동하여 결합 신호를 도식함

으로서 결합의 깊이와 결합의 원주방향 정도를 결정할 수 있다. 즉, voltage plane 상의 결합신호가 x 축과 이루는 각도에 의해서 결합 신호의 깊이를 알 수 있고, 결합 신호의 무결합 작용점에서 거리를 통해서 원주 방향의 범위를 알 수 있다. RFEC 신호로서 voltage plane 극좌표를 구현하기 위해서는, 회전 이동한 좌표계의 (1,0)에 무결합 작용점이 위치하도록 식(5)와 식(6)을 사용하여 정규화 한다.

Normalized in-phase component :

$$\text{Re}(\mathbf{E}) = \frac{E_{local}}{E_{full-wall}} \cos(\varphi_{local} - \varphi_{full-wall}) \quad (5)$$

Normalized quadrature component :

$$\text{Im}(\mathbf{E}) = \frac{E_{local}}{E_{full-wall}} \sin(\varphi_{local} - \varphi_{full-wall}) \quad (6)$$

E 와 φ 는 RFEC 탐지기로부터 얻는 신호의 크기와 위상 값이다. local이라는 첨자는 임의 지점에서 값을 의미하고 full wall은 손상이 없는 위치, 즉 무결합 부위의 값을 의미한다.

만일 무결합부 두께가 균일하고 오차가 적은 배관을 대상으로 하는 계측의 경우에는 E 와 φ 의 full wall 값을 계측 전에 알 수 있으나, 그렇지 않은 배관들의 경우에는 E 와 φ 의 full wall 값을 다른 방법으로 얻어야 한다. 이와 같은 경우에 적합한 방법이 2.2절에서 설명한 이동구간 평균법으로서, 일정 영역의 평균값을 E 와 φ 의 full wall 값으로 사용하는 것이다. 계측이 배관 축방향으로 진행되어 감에 따라 데이터 창도 전진하여 계측되는 영역 주변의 평균값을 항상 갖고 있으므로 배관 국부 손상에 대해서도 적용할 수 있다. 그러나 두께 손상 영역이 탐지기와 여자기의 거리보다(inter-coil distance) 큰 배관 감육의 경우에는 데이터 창의 크기를 결정하는데 주의해야 한다.

3. 실험방법

기계 가공 결합을 지닌 3개의 배관에 대하여 RFEC 탐상 실험을 실시하였다. 배관의 길이는 모두 2.5m로 일정하고, 배관에 가공된 결합의 형상, 위치 및 개수는 각각 Table 1에 표시되어 있다. 피검 배관에 대하여 외경 90mm, 80mm 그리고 70mm의 여자기와 탐지기를 사용하여 200Hz, 250Hz, 280Hz의 주파수로 시험하였다. 여자

Table 1 Machined defects on ductile cast iron pipes

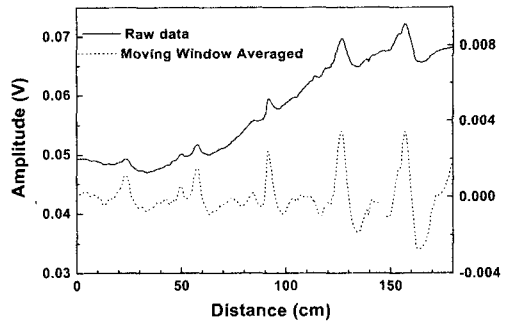
시험 번호	결함 위치	결함 길이	결함 깊이	결함종류
No.1	520	20	2.04	flat-milled
	835	20	4.08	
	1160	20	5.44	
	1485	40	2.04	
	1825	40	4.08	
No.2	510	5	2.04	360° 결함 (길이변화)
	920	10		
	1330	20		
	1760	40		
No.3	460	20	2.5	45°
	810			90°
	1150			180°
	1500			270°
	1810			360°

기는 직경 0.4mm인 코일을 400회 감아 제작하였으며, 여자기에 흐르는 전류는 212mA로 일정하게 유지하였다. 탐지코일은 배관과 동축으로써 0.2mm 직경의 코일을 400회 감았고 축 방향 길이는 5.0mm이다. RFEC 측정 신호의 크기 및 위상차와 축 방향 이동 위치 데이터는 100msec (3.5mm) 마다 얻어지도록 데이터 획득 프로그램을 작성하였다.

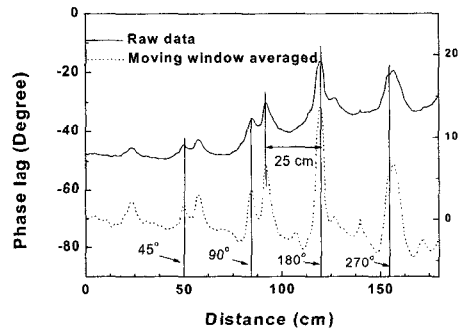
4. 결과 및 토의

4.1. 장범위 잡음 제거

결함 신호를 정확하게 판별하기 위해서는 배경 잡음을 제거해야 한다. 본 실험에 있어서 배경잡음의 요인은 배관 자체의 재료 물성치 불균일, 배관 제작단계의 길이에 따른 배관 두께의 불균일 그리고 배관 단면의 축 비대칭성 존재에 따른 코일단면적 대 관단면적 비의 변화 등을 생각할 수 있다. 이러한 배경잡음에 기인한 신호는 비교적 완만하고 배관 축방향을 따라서 서서히 변하는 특징이 있으므로 이를 제거하기 위하여 이동구간 평균법을 사용하였다. 이동구간 평균법을 사용할 때 주요한 파라미터는 데이터 창 의 크기 혹은 영역이다. 데이터 창 의 크기는 검사 대상 결함의 크기가 최대 40mm인 것을 고려하여 60mm로 결정하였다. Fig. 6은 Table 1의 3번 시험편으로 얻은 가공전 신호와 이동구간 평균법으로 처리한 신호를 비교한 것이다. 처리된 신호를 이용하면 결함이



(a)



(b)

Fig. 6 RFEC raw signals and moving window averaged results on the sample No. 3, (a) RFEC amplitude, (b) RFEC phase-lag

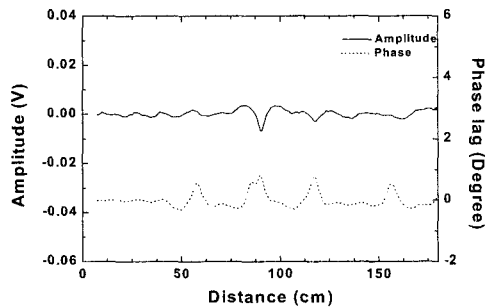


Fig. 7 Moving window averaged result on the sample No. 1

위치한 곳에서 발생하는 신호의 크기를 상대 비교할 수 있어 결함 정도를 평가하는데 도움이 된다. 3번 시험편에 가공된 결함은 길이와 깊이가 일정하고 원주방향의 가공 정도가 각각 45°, 90°, 180°, 270° 및 360°로 되어 있다.

Fig. 6에 보인 바와 같이 45° 결함에 대한 RFEC 신호가 가장 작고 원주방향의 범위가 커질수록 신호의 크기가 커진다. 이동구간 평균법을 이용하여 RFEC 신호를 처리하면 재질 물성 변화 및 배관 제작 단계의 오차에 기인한 배관 길이 방향의 장범위에 잡음 신호를 효과적으로 제거할 수 있음을 Fig. 6은 보여주고 있다. Fig. 7은 부분 결함의 경우로서 Table 1의 1번 시험편에 이동구간 평균법을 적용한 결과이다. 원거리장 와전류법을 이용한 결함 분별에는 위상차 신호가 진폭 신호보다 민감도가 뛰어난 것을 Fig. 7에서 알 수 있다.

4.2. 결함신호 정량해석

Voltage plane 극좌표(VPPP)는 RFEC 시험에서 배관과 동축으로 놓인 탐지기로 결함신호를 정량적으로 평가하고자 개발된 방법이다. 이는 lock-in amplifier에서 탐지되는 진폭 신호와 위상차 신호를 voltage plane 상에 표현하는 방법으로서, 결함 신호로 구성되는 궤적으로부터 결함의 깊이와 원주방향의 범위 등을 판단할 수 있다.

Fig. 8-9는 Table 1의 기계가공 결함을 대상으로 얻은 RFEC 신호를 VPPP 처리한 결과이다. Fig. 8의 VPPP상의 결함신호(signature)는 무결함 배관 두께를 6.8mm로 하여 Table 1의 1번 시험편에 가공된 결함의 깊이를 백분율 깊이(percent depth)로 환산하여 도시한 것이다. 결함의 깊이가 깊어짐에 따라 결함 signature와 x축과의 각이 커지는 것을 볼 수 있다. Fig. 9는 Table 1의 3번 시험편의 결함 signature로서 원주방향의 결함 범위가 커짐에 따라 신호의 크기가 커지는 것을 보여 준다.

Fig. 10은 VPPP 상의 작용점에서 결함 signature가 x축과 이루는 각과 percent로 나타낸 결함의 깊이 사이의 상관 정도를 그래프를 통해서 알아본 것이다. 상기 그래프는 공칭 외경 100mm 인 덕타일 주철관에 대한 그래프로서, VPPP상의 signature가 x축과 이루는 각으로부터 결함 깊이를 알 수 있게 해 준다. 여자기 및 탐지기의 충전율(fill factor)에 따른 측정 신호의 변화를 확인하기 위하여, Fig. 10은 Table 1의 2번과 3번 시험편의 기계가공 결함을 다양한 외경의 여자기와 탐지기로 측정된 결과를 종합한 것이다. 코일의 충전율, 즉 탐지 코일과 피검체 사이의 거리가 변화더라도, 결함 signature의 각도는 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에 있는 일부 측정치의 분산요인으로서 배관 두께의 불균일성과 기계 가공된 결함의 가공 오차를 들

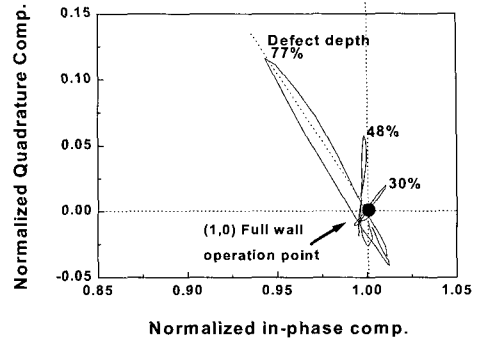


Fig. 8 VPPP signatures of full circumferential defects with percent depth (Axial length is constant)

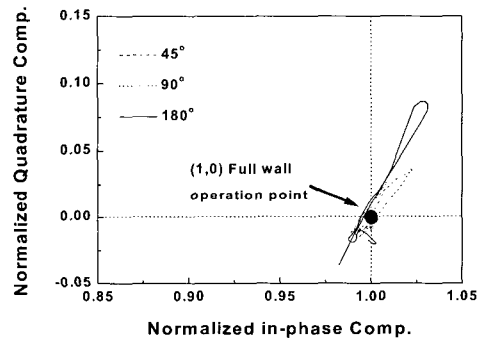


Fig. 9 VPPP signatures of defects with circumferential variations (Depth is constant of 2.5mm and axial length constant, too)

수 있다. Fig. 11은 초음파 두께 측정기를 이용하여 Table 1의 2번 시험편이 가공된 배관의 두께를 측정된 결과이다. 측정 결과 무결함부에서도 최대 1mm 이상의 두께 차이가 나며, 가공 결함도 0.25mm 가공오차를 보이고 있었다. 배관 사양서에 따른 기준 두께가 6.8mm인 점을 고려하면 약 15%의 두께 오차가 존재한다. 따라서, Fig. 10의 결함 percent depth와 orientation angle 사이의 상관식에 존재하는 오차는 상기 오차 범위에 포함되는 것으로 판단된다. Fig. 10에서 데이터의 편차가 심한 percent depth 36%인 지점의 데이터는 Table 1의 3번 시험편에 가공된 결함으로부터 검출된 데이터이다. 즉, Fig. 6에서 보는 바와 같이 배관에 가공된 결함사이의 거리(300mm)가 RFEC의 코일간 거리(250mm)와 유사하여, 탐지기가 피검 결함을 지나면서 취득한 신호에 여자기

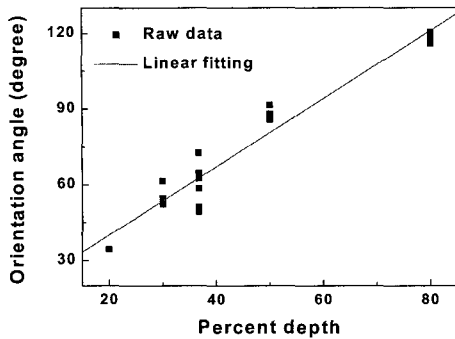


Fig. 10 Quantitative evaluation of defect depth

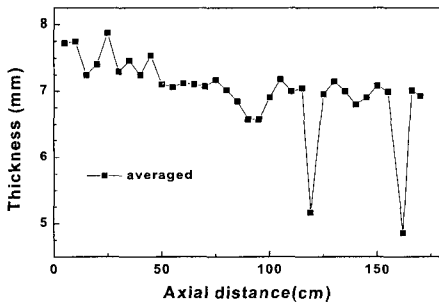


Fig. 11 Thickness profile of sample No. 2 measured by an ultrasonic thickness gauge

이때 탐지기가 통과한 인근 결함의 영향을 받은 결과이다. 이에 따라 전체 취득신호에 중첩 효과를 일으켰기 때문으로 판단된다.

5. 결론 및 향후계획

다양한 기계가공 결함을 가진 공칭 외경 100mm의 덕타일 주철관으로써 원거리장 와전류 검사를 수행하였다. 여기서 취득한 신호를 대상으로 원거리장 와전류 신호의 잡음대비 신호비(S/N) 향상 및 결함 정량평가 방법을 연구하였다. 먼저, 이동구간 평균법으로 장범위에 걸친 배경잡음을 제거한 후, 결함의 깊이와 원주방향 정도를 정량적으로 평가하기 위하여 voltage plane 극좌표 방법을 활용하였다. 이에 따라 결함 깊이와 VPPP상의 signature orientation과의 상관 관계를 도출하여 원거리장와전류 기술을 이용한 비파괴 결함 정량평가 기반을 구축하였다. 깊이가 일정한 결함의 원주 방향 손상정도에 대해서는

VPPP를 활용하여 정량화가 가능했으나, 밀링 작업에 의해서 평탄하게 가공된 부분 결함의 경우에는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

후 기

본 연구는 환경부 '98환경기술연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] T. R. Schmidt, "The remote field eddy current inspection technique", *Materials Evaluation*, Vol. 42, No. 2, pp. 225-230, (1984)
- [2] P. Rodriguez, "Development of in-service inspection techniques for nuclear power plants in India", *Int. J. Pres. Ves. & Pipings*, Vol. 73, pp. 59-68, (1997)
- [3] S. Chifa and A. Andreescu, "Transducer for establishing the integrity of influent water pipes", *Sensors and Actuators A*, Vol. 59, pp. 208-212, (1997)
- [4] R. Grimberg, S. Chifan, L. Lancu and O. Mihalache, "RFEC nondestructive evaluation of steel pipes for influent water conduct", *Proceedings of the 4th International Conference of the Slovenian Society for Nondestructive Testing*, April 24-25, 1997, Ljubljana, Slovenia, pp. 379
- [5] D. L. Atherton and E. Quek, "Distinction between near and far-side corrosion pit signals using magnetic leakage flux detectors", *Can. Elec. Eng. J.*, Vol. 13, No. 1, pp. 27-31, (1988)
- [6] D. D. Mackintosh, D. L. Atherton and S. P. Sullivan, "Remote field eddy current signal analysis in small bore ferromagnetic tubes", *Materials Evaluation*, Vol. 51, pp. 492-495, (1993)
- [7] T. R. Schmidt, D. L. Atherton and S. Sullivan, "Use of one-dimensional skin-effect equations for predicting remote-field characteristics, including wall-thickness versus frequency requirements", *Materials Evaluation*, Vol. 47, pp. 76-79, (1989)