

배관결합 검출을 위한 EMAT 시스템 개발

Development of an EMAT System for Detecting Flaws in Pipeline

안봉영*[†], 김영주*, 김영길*, 이승석*

Bong Young Ahn*[†], Young Joo Kim*, Young Gil Kim* and Seung Seok Lee*

초 록 EMAT(electromagnetic-acoustic transducer)는 비접촉식 초음파 탐촉자이므로 초음파의 송수신을 위하여 접촉매질이 필요하지 않기 때문에 탐촉자를 시험 대상체의 표면을 따라 움직이면서 결함 검출이 가능하며, 코일의 설계와 배열에 따라 표면파와 판파 등 원하는 모드의 유도초음파를 손쉽게 송수신할 수 있기 때문에 두께가 얇은 배관의 탐상에 알맞는 초음파 탐촉자이다. 본 논문에서는 표면초음파 발생을 위한 EMAT와 A_1 모드의 판파, S_1 모드의 판파를 선택적으로 발생시키기 위한 EMAT를 설계·제작하였다. 1.5MHz의 표면초음파는 분산이 없어서 신호 왜곡 없이 높은 신호 대 잡음비로 배관을 진행함을 보였다. 반면에 800kHz의 S_1 모드의 판파와 940 kHz의 A_1 모드의 판파는 분산 특성이 있어서 배관을 따라 진행하면서 신호 왜곡이 생김을 확인할 수 있었으며, EMAT에 공급하는 펄스의 폭을 넓히면 판파의 모드 선택성이 향상되었다. 내경 256mm, 두께 5.5mm인 강관에 가공된 인공결함에 대한 각 모드의 결함 검출능을 서로 비교하였다.

주요용어: EMAT, 배관, 유도초음파, 표면파, 판파

Abstract It is possible to detect flaws in pipelines without interruption using an EMAT transducer because it is a non-contact transducer which can transmit ultrasonic waves into specimens without couplant. And it can easily generate guided waves desired in each specific problem by altering the design of coil and magnet. In the present work, EMAT systems have been fabricated to generate surface waves, and selectively the plate wave of A_1 or S_1 mode. The surface wave of 1.5 MHz showed a good signal-to-noise ratio without distortion in its propagation along a pipeline, while the S_1 mode of 800 kHz and the A_1 mode of 940 kHz were distorted according to their dispersive properties. The wider the excitation pulse becomes, the better the mode selectivity of the plate waves becomes. A pipe of 256 mm inner diameter and 5.5 mm thickness with 5 flaws was used for comparing the flaw detectability among the modes under consideration.

Keywords: EMAT, pipeline, guided wave, surface wave, plate wave

1. 서 론

초음파를 이용한 배관 결함의 탐상은 배관의 두께 방향으로 진행하는 초음파를 이용하여 부식 결

함을 평가하는 방법과 배관의 원주 방향으로 진행하는 유도초음파를 이용하여 결함을 탐상하는 방법 [1,2] 등이 있다. 지하매설 배관의 결함 검출에는 pig라 불리는 탐상 시스템이 이용되고 있는데, 이

pig에는 많은 수의 센서를 원주를 따라 장착하고 두께 방향으로 진행하는 초음파를 송수신하여 배관의 부식 두께를 평가하고 있다[3]. 반면에 원주 또는 축 방향으로 진행하는 유도초음파를 이용하게 되면 적은 수의 센서만을 이용하여 전체 배관을 검사할 수 있다[4,5]. 유도 초음파는 사용되는 초음파의 파장에 비하여 배관의 두께가 얇을 경우에 발생하는 판파를 말하며, 유도초음파를 발생시키는 방법으로는 접촉식 초음파탐촉자를 이용하는 방법과 비접촉식 초음파 탐촉자인 EMAT (electromagnetic acoustic transducer)를 이용하는 방법 등이 있다. 우선 접촉식 초음파 탐촉자를 이용하여 유도초음파를 발생시키기 위해서는 탐촉자의 전단에 썬기를 부착하여 배관 표면에 대한 초음파의 입사각을 조절하여야 하며, 초음파의 전달을 위하여 접촉매질을 연속적으로 공급해야 한다. 그러나 배관과 같은 형상의 시험체에서 탐촉자를 이동하면서 접촉매질을 연속적으로 공급하는 것은 매우 어렵고 번거로운 문제이기 때문에 접촉식 탐촉자를 움직이면서 배관 결함을 탐상하는 것은 적당하지 않다. 또한 발생시키고자 하는 유도초음파의 모드에 따라 각기 다른 썬기를 사용하여야 하는 번거로움이 있다. 반면 EMAT는 비접촉으로 초음파를 발생시킬 수 있어서 초음파의 전달을 위한 접촉매질이 필요하지 않기 때문에 근본적으로 센서를 움직이면서 연속적으로 결함을 탐상하는 데 전혀 문제가 없다. 또한 EMAT는 코일과 자석으로 구성되는데 코일을 지그재그 형태로 제작하고 일정주파수의 교류전류를 흘리면 코일의 주기와 사용주파수와의 관계에 따라 입사각이 조절되므로 원하는 모드의 유도초음파를 쉽게 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 배관의 축을 따라 탐촉자를 움직이면서 원주 방향으로 진행하는 유도초음파를 발생시키기 위한 EMAT 시스템을 제작하였다. EMAT 제작에 사용되는 코일의 주기와 사용주파수에 따라 각기 다른 모드의 초음파를 발생시킬 수 있음을 확인하였으며, 각 모드의 초음파로부터 얻어진 결함 신호를 화상 처리한 결과로부터 각 모드의 결함 검출 특성을 상호 비교하였다.

2. 유도초음파 발생용 EMAT의 구조

Fig. 1의 Lorentz 힘을 이용하는 EMAT는 금속 재료 표면에 와전류를 형성하기 위한 코일과 정자

기장을 부가하기 위한 자석으로 구성되어 있다. 표면 근처에 놓인 코일에 교류전류를 흘려주면 재료 표면에는 와전류 J 가 유도되며, 여기에 정자기장 B 를 가하면 재료 표면의 입자들은 Lorentz 힘 F 를 받는다.

$$F = J \times B \quad (1)$$

코일에 흘려주는 전류가 교류이므로 표면에 유도되는 와전류는 시간에 따라 방향이 바뀌고 이에 따라 힘의 방향도 시간에 따라 바뀐다. 이와 같이 시간에 따라 바뀌는 힘에 의해서 표면의 입자들은 진동하게 되며 이 힘이 초음파를 발생시킨다. 와전류와 정자기장이 벡터 양이기 때문에 힘의 방향은 항상 와전류와 정자기장에 상호수직되는 방향이다.

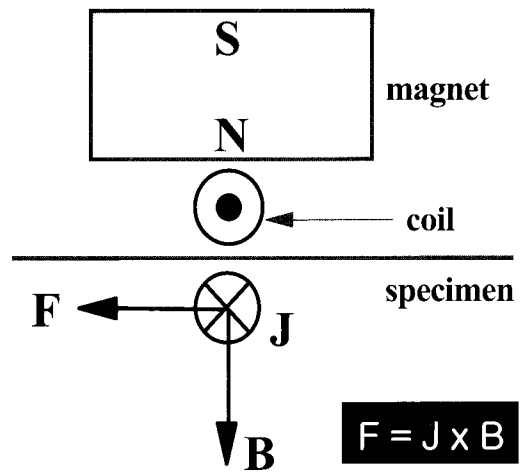


Fig. 1 Wave generation mechanism of the EMAT

표면과 및 판파의 발생을 위해서는 Fig. 2의 구조를 갖는 EMAT가 필요하다. 그림에서 자석은 아래 방향으로 자화되어 있어서 시험편의 표면에 수직인 방향의 정자기장을 공급하며, meander-type의 코일은 동자기장을 공급하는데 이용된다. 그림에서와 같이 자석의 극(polarization)은 일정한 반면 meander-type 코일을 흐르는 전류는 서로 방향이 반대이므로 Lorentz 힘의 방향은 서로 반대이다. 그러므로 만약 전류의 극성에 따라 첫 번째 코일 아래 부분에 압축 응력이 유도된다면, 두 번째 코일의 밑 부분에는 인장응력이 유도되고, 세 번째 코일 아래 부분에는 다시 압축 응력이 유도된다.

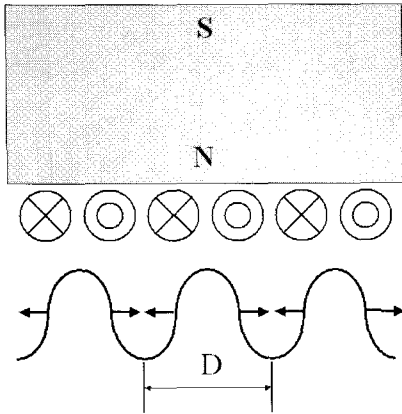


Fig. 2 A schematic representation of EMAT for guided wave generation

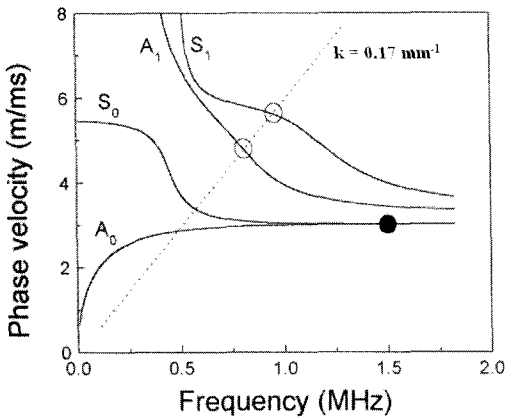


Fig. 3 Dispersion curves for a 5.5 mm thick steel plate

이렇게 유도된 응력에 의해서 발생된 초음파의 진행방향은 코일의 주기 D와 발생된 초음파의 파장 λ 에 의해 결정되며 그 관계는 식 (2)와 같다.

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

식에서 θ 는 표면에 수직한 면으로부터의 각도이며, λ 는 발생된 초음파의 주기(파장)이며, D는 코일의 주기(피치)이다. 초음파의 주기와 코일의 주기가 같은 경우, 즉 $D = \lambda$ 인 경우, $\theta = 90^\circ$ 이므로 표면을 따라 진행되는 초음파가 발생되며, 두 주기의 크기 비에 따라 θ 가 결정된다. 그렇지만 판재의 경우에는 두 주기의 모든 비에 해당하는 판파가 존재하는 것은 아니며, 특정한 λ/D 에 해당하는 특정

모드의 판파만이 존재한다. 그러므로 판파에서 존재하는 특정 모드의 판파를 선택하기 위해서는 분산곡선을 계산하여 이용하여야 하며, 실험에 사용된 내경 254 mm, 두께 5.5 mm 강관의 분산곡선은 Fig. 3과 같다. 그림에서 실선은 계산된 분산곡선이고, 점선은 6 mm 코일 주기에 해당하는 파수선이다. 한편 속이 찬 원은 주기 2mm인 코일로 발생시킨 1.5 MHz의 표면 초음파이며, 속이 빈 두개의 원은 코일 주기 6mm에 해당하는 A_1 과 S_1 모드의 판파이다. 이로부터 사용주파수는 각각 0.80 MHz와 0.94 MHz임을 알 수 있다.

3. EMAT 제작 및 측정 장치 구성

EMAT 제작에 사용되는 코일은 일정한 주기를 가지는 meanderline 코일이다. Meanderline 코일을 제작하는 방법은 일정한 주기를 갖는 틀(bobbin)에 일반 에나멜이 코팅된 구리선을 감아 사용하는 방법과 인쇄회로 기판에 pattern을 인쇄하여 사용하는 방법이 있다. 본 실험에서는 배관이 곡률을 갖기 때문에 코일과 배관 사이의 거리 즉, lift-off를 일정하게 유지하기 위하여 인쇄회로 기판에 일정한 주기의 pattern을 인쇄하여 제작한 코일을 사용하였다. 또한 앞에서 설명한 바와 같이 EMAT는 코일과 함께 정자기장의 부가를 위하여 강력한 영구자석이 필요하며, 본 연구에서는 약 0.8 T의 정자기장을 부가할 수 있는 NdFeB 영구자석을 사용하여 배관 표면에 수직으로 자기장을 부가하도록 하였다. Fig. 4는 제작된 EMAT의 사진이다. 하나의 EMAT에서 송신된 초음파는 배관을 따라 진행하여 수신용 EMAT에서 검출된다. 제작된 EMAT는 10"의 배관의 탐상에 알맞도록 제작되었지만 배관 곡률에 따라 두 센서 사이의 각도를 조절할 수 있도록 설계되어 있기 때문에 배관의 크기가 달라져도 적용 가능하다. 또한 센서의 밑면은 코일이 배관의 곡률과 일치하여 부착되도록 함으로써 최대한 lift-off를 일정하게 유지하도록 하였다. 그리고 코일 바로 위에는 직사각형의 NdFeB 영구자석이 배치되어 있는데, 영구자석의 자력이 워낙 강력하여 센서의 밑면과 배관이 부착되면 배관을 따라가며 움직일 수 없다. 그러므로 lift-off를 최대한 작게 유지하면서 쉽게 움직일 수 있도록 하기 위하여 lift-off 미세 조절 장치와 함께 이동용 바퀴를 부착하였다.

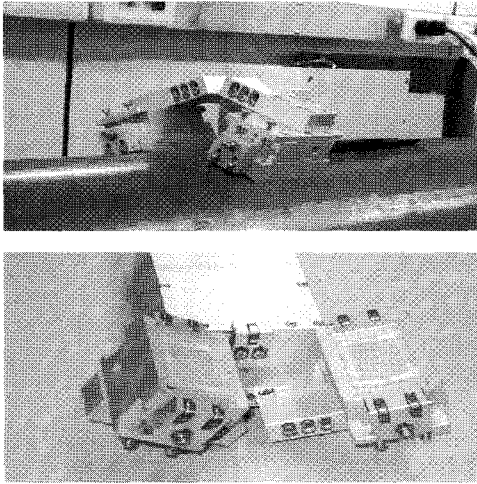


Fig. 4 An EMAT fabricated with printed circuit coils and NdFeB magnets

Fig. 5는 실험에 사용된 장비의 개략도이다. 실험에 사용된 펄스 공급장치는 미국 Ritec사의 RAM10000 시스템으로 약 2 kW의 순간 파워를 갖는 tone-burst 펄스를 송신용 EMAT 코일에 공급할 수 있다. RAM10000 시스템의 출력임피던스는 50 ohm인 반면 EMAT 코일의 임피던스는 수 ohm에 불과하므로 펄서의 출력을 EMAT 코일에 가장 효율적으로 공급하기 위하여 수동 소자를 이용한 임피던스 정합회로가 구성되었다. 수신용 코일도 동일한 방법으로 제작된 임피던스 정합회로가 필요하며 RAM10000 시스템의 수신회로를 사용하여 신호를 증폭하였다. EMAT는 구조상 접촉식 초음파 탐촉자에 비하여 전기에너지를 역학적 진동에너지로

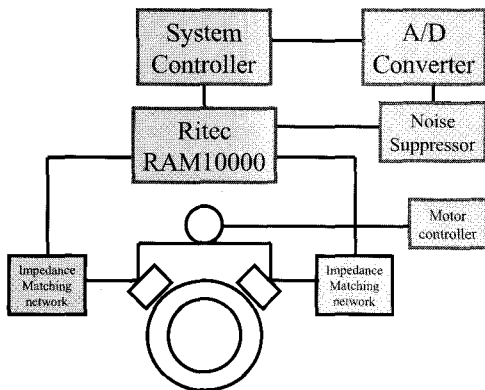
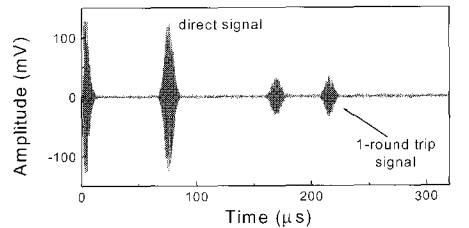


Fig. 5 Experimental set-up for pipeline inspection with EMAT

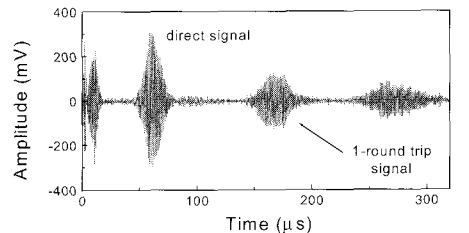
바꾸어주는 전환효율이 매우 낮아 높은 증폭율이 요구되며 이로 인해 신호 대 잡음비가 상대적으로 낮아지기 때문에 신호 대 잡음비의 향상을 위하여 단일 주파수 성분만을 여과(filtering)하거나 증폭할 수 있는 'Noise suppressor'를 사용하였다. 수신된 초음파 신호의 획득에는 일반적인 oscilloscope가 이용될 수 있지만 앞으로의 현장적용을 고려하여 컴퓨터에 내장되는 미국 GaGe사의 CompuScope225 Data acquisition A/D board를 이용하였다.

4. EMAT에 의한 초음파 발생

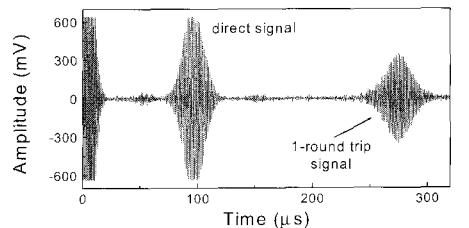
Fig. 6은 송신용 EMAT에서 발생된 초음파가 배관의 원주 방향으로 진행한 후 수신용 EMAT에서 검출된 신호 모양이다. 그림에서 (a)는 1.5 MHz의 중심주파수를 갖는 표면 초음파이다. 사용한 배관의 두께는 5.5 mm인 반면 초음파의 파장은 1.5 MHz에서 약 2mm이므로 재료의 두께와는 관계없는 표면 초음파의 영역에 해당한다. 표면 초음파는



(a) Rayleigh wave (1.5 MHz)



(b) Lamb wave (S_1 mode : 0.94 MHz)



(c) Lamb wave (A_1 mode : 0.80 MHz)

Fig. 6 Signal shapes of ultrasonic wave of 3 different modes

주파수에 관계없이 속도가 일정하기 때문에 그림에서와 같이 초음파가 진행함에 따라라도 신호의 모양이 항상 일정하여 결함 검출에 매우 유리하다. 그러나 표면 초음파는 배관의 외벽에 있는 결함에는 민감하지만 내벽에 있는 결함은 검출하지 못하는 약점이 있다. 반면 (b)는 S_1 모드의 판파이고 (c)는 A_1 모드의 판파이다. S_1 모드와 A_1 모드는 주기 6 mm의 동일한 코일에 공급하는 펄스의 주파수만 변화시키면 선택적으로 발생된다. 즉 S_1 모드의 초음파는 940 kHz의 펄스를 공급하면 발생되고, A_1 모드의 초음파는 800 kHz의 펄스를 공급하면 발생된다. 그렇지만 두 모드 발생을 위한 펄스의 주파수가 불과 140kHz의 차이만 있기 때문에 공급하는 펄스의 주파수 대역이 겹쳐질 수 있으며, 실제 수신되는 신호를 여과하지 않으면 두 모드의 신호가 같이 발생되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 7은 두 모드의 초음파가 동시에 발생하는 것을 확인하기 위하여 900 kHz의 펄스로 여기 시킨 후 검출한 신호이다. 예상했던 바와 같이 두 가지 모드가 동시에 발생되어 있음을 볼 수 있다. 초음파 센서를 결함 탐상에 이용할 경우, 두 가지 모드의 초음파가 동시에 발생되면 결함에 의한 신호가 다른 모드들로 인해 혼돈이 발생할 수 있기 때문에 가급적이면 단일 모드의 초음파가 발생될 수 있도록 조건을 설정하는 것이 중요하다. 이를 위해 두 가지 방법이 사용될 수 있는데 하나는 수신된 신호를 적당한 주파수 대역을 갖는 여과기로 여과하는 방법이고, 다른 하나는 초음파 발생 시 공급하는 펄스의 주파수 대역에서의 폭을 좁혀주는 것이다. 주파수 대역의 폭을 좁히기 위해서는 시간 대역에서의 펄스 폭을 늘려주어야 하므로 공급하는 펄스의 수를 증가시키면 된다. Fig. 8은 A_1 모드의 초음파 발생을 위한 조건에서 펄스의 수를 2개, 4개, 6개로 변화시키면서 측정한 결과이다. 펄스의 수가 2개인 경우에는 A_1 모드 뿐 아니라 S_1 모드도 발생되고 있지만 펄스의 수를 6개로 늘리면 S_1 모드는 거의 발생되지 않음을 확인할 수 있다. 한편 본 실험에서 발생시킨 판파는 표면초음파와는 달리 분산 특성이 있어서 시간이 경과함에 따라 신호의 모양이 변하는 것을 볼 수 있다. 초음파가 진행하면서 신호 모양이 바뀌면 결함 탐상에는 상대적으로 불리하다. 그렇지만 판파는 배관 전 단면에 걸쳐 진동하므로 표면 초음파와는 달리 내외부 양쪽 모두에 존재하는 결함도 검출할 수 있는 장점도 있다.

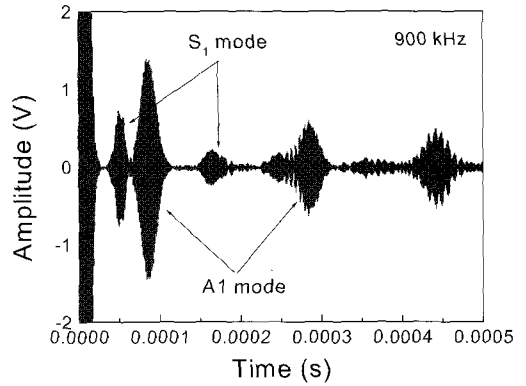


Fig. 7 Simultaneous generation of two modes

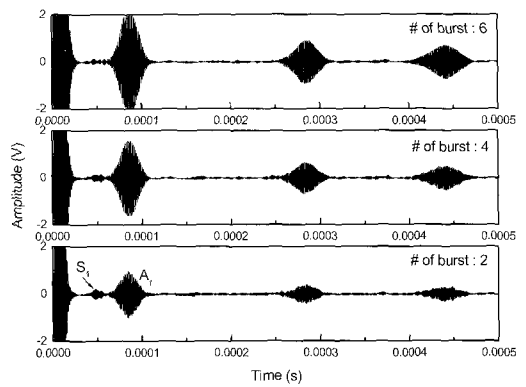


Fig. 8 Enhancement of mode selectivity by the increase of pulse width

5. EMAT에 의한 결함 검출

실험에 사용된 배관은 국내 가스 수송용 배관으로 사용되는 내경 254 mm, 두께 5.5 mm의 일반 탄소강이다. 그리고 결함 검출 실험을 위해서 Fig. 9와 같이 축 방향 노치와 드릴 구멍을 가공하여 사용하였으며, 축 방향 노치의 폭은 모두 2mm이다.

본 연구에서는 결함 검출에 두 가지 방법을 적용하였다. 송신용 EMAT에서 발생된 초음파가 배관의 원주 방향을 따라 진행하다가 결함을 만나면 반사하게 되고 이 신호를 검출하여 화상으로 나타내는 직접반사법과 원주방향으로 진행하던 초음파가 결함 부위를 통과하면 신호 도달 시간과 신호 크기에 변화가 생기므로 이로부터 결함의 존재 유무를 판별하는 투과법을 적용하였다.

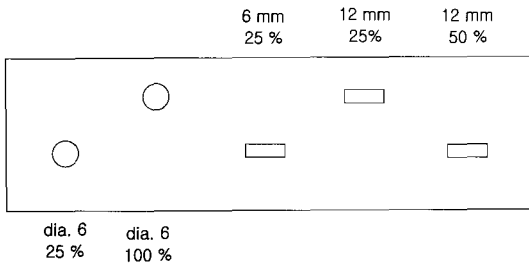


Fig. 9 Flaw shape and size

Fig. 10은 결함으로부터 직접 반사된 신호로부터 얻어진 화상이다. 표면초음파와 A₁ 모드의 판파는 5개 결함을 모두 구별할 수 있지만, S₁ 모드의 판파는 큰 결함 두 개만을 구별할 수 있다. S₁ 모드의 판파는 초기 발생 효율이 A₁ 모드 보다 낮았고, 진행하면서 분산이 상대적으로 커서 결함 검출능이 낮은 것으로 판단된다. 표면초음파와 A₁ 모드 판파를 비교하면 표면초음파의 중심주파수가 1.5MHz로 A₁ 모드의 0.8MHz 보다 높아서 시간 축에서의 폭이 좁을 뿐 아니라 분산이 없기 때문에 신호가 늘어나는 현상이 없으므로 가장 깨끗한 화상을 얻을 수 있다. 반사법은 수신용 EMAT에 검출되는 전체 신호 중에서 미리 설정해둔 문턱값 이상의 신호를 화상처리하여 결함을 검출하는 방법이다. 즉 초음파가 배관의 원주를 완전하게 한바퀴 회전하는데 걸리는 시간 동안 계속 추적하면서 문턱값 보다 큰 신호를 검출하여야 하므로 화상 처리에 많은 시간이 소요된다. 두 번째 결함 검출법은 투과법으로 결함을 검출하는 방법이다. 투과법에서는 송신용 센서에서 발생한 초음파 신호가 결함 부위를 투과하기 전 직접 수신용 센서에 도달한 신호 (Fig. 6의 'direct signal')와 배관을 한바퀴 진행한 후 수신용 센서에 도달한 신호 (Fig. 6의 '1-round-trip signal')의 차이를 비교한다. 신호 차이와 도달 시간의 차이를 수식으로 표시하면 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$\Delta\alpha = 10 \log \frac{A_1(0)/A_2(0)}{A_1(t)/A_2(t)} \quad (3)$$

$$\Delta t = \frac{\{\Phi_{n2}(t) - \Phi_{n1}(t)\} - \{\Phi_{n2}(0) - \Phi_{n1}(0)\}}{2\pi F} \quad (4)$$

식에서 A₁과 Φ_{n1}은 수신용 센서에 직접 도달한 신호의 세기와 위상이며, A₂와 Φ_{n2}는 배관을 한바퀴 통과한 신호의 세기와 위상이다.

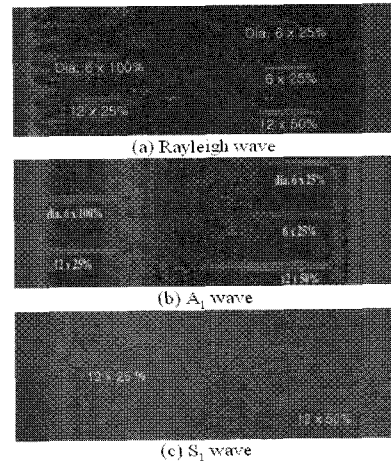


Fig. 10 Flaw images obtained by 3 different wave modes

Fig. 11는 1.5 MHz의 표면초음파를 이용한 측정 결과이며, (a)는 식 (3)의 결함 부위를 통과한 신호 크기에 대한 결함 부위를 통과하지 않은 신호 크기의 비이며, (b)는 식 (4)의 두 'gate'내의 신호의 위상으로부터 계산된 도달 시간의 변화이다. 감쇠 측정결과와 도달 시간 변화 측정결과로부터 결함의 유무를 알 수 있지만, 감쇠 측정결과가 결함의 유무를 더 잘 보여주고 있다. 이 방법은 측정 시 계속 추적해야 하는 'gate'의 폭이 훨씬 좁을 뿐 아니라 위치가 고정되기 때문에 직접 반사법과 비교하여 빠른 시간에 결함의 유무를 판단할 수 있다.

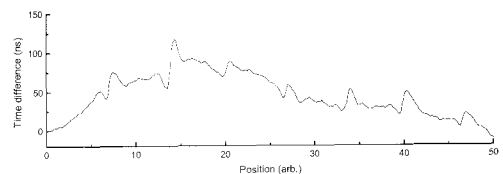
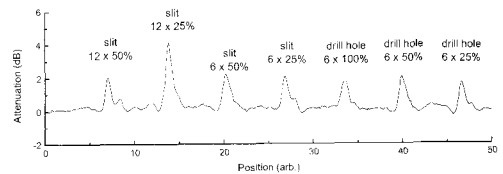


Fig. 11 Changes in attenuation and arrival time measured by a through-transmission method

앞에서 설명한 EMAT 시스템은 자체 구동력을 가지고 배관의 외벽을 따라 움직이면서 결함을 탐상하지만, 필요에 따라서는 센서 코일의 곡률 등 간단한 설계의 변경만으로 배관 내벽을 따라 움직이면서 결함을 검사하는 시스템으로 변화시킬 수 있어서 보다 폭 넓은 분야에의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결 론

배관의 축 방향으로 움직이면서 연속적으로 결함의 존재 유무를 판별하기 위한 초음파 탐상 시스템을 제작하고 그 특성을 분석하였다. 센서로는 비접촉식 초음파 탐촉자인 EMAT를 이용하였으며, 가급적 lift-off를 작게 유지하면서도 원활하게 이동할 수 있도록 설계하였다. EMAT는 코일의 주기와 사용주파수의 비에 따라 표면파 및 판파 중 원하는 모드를 선택적으로 발생시킬 수 있으며, 본 연구에서는 1.5 MHz의 표면파와 0.80 MHz의 A1 모드 판파, 그리고 0.94 MHz의 S1 모드의 판파를 발생시켰다. 5.5 mm 두께의 배관에 축방향 노치와 드릴 구멍을 가공하여 각 모드의 결함 검출능을 평가하였다. 길이가 긴 배관의 신속한 결함 탐상에는 결함 부위를 통과한 신호의 크기 변화와 위상 차를 측정하는 투과법이 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 판단한다.

참고문헌

- [1] R. B. Thompson, G. A. Alers, and M. A. Tennison, "Application of direct electromagnetic Lamb wave generation to gas pipeline inspection," Proceedings of Ultrasonic Symposium, pp. 91-94 (1972)
- [2] K. Morimoto, N. Arioka, S. Fukui, and Y. Watanabe, "Development of electro-magnetic acoustic transducer for heat exchanger tubes," The Nondestructive Testing Journal, Japan, Vol. 2(2), pp. 89-95 (1984)
- [3] 산업설비안전진단연구회, '배관안전진단기술', 도서출판 창조, 2000
- [4] R. B. Thompson, "Experiences in the use of guided ultrasonic waves to scan structures," in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 16A, Eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, pp. 121-128 (1997)
- [5] M. Hirao and H. Ogi, "An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection," NDT&E Int. Vol. 32(3), pp. 127-132 (1999)