

배관결함 검출을 위한 자왜형 초음파 센서의 특성

Characteristics of Magnetostrictive Sensor for Detecting the Flaws in Pipe

안봉영*, 김영주*, 김영길*, 이승석*

Bongyoung Ahn*, Young Joo Kim*, Young Gil Kim* and Seung Seok Lee*

초 록 석유화학 설비 등과 같은 노출 배관의 결함을 검출하는데 효율적으로 이용될 수 있는 자왜형 초음파 센서를 제작하였다. 최대의 초음파 발생 효율을 얻기 위한 최적 조건을 설정하였으며, 실험에 사용된 배관의 경우 250~350Oe의 자기장장이 최적이었으며, 180kHz의 주파수를 갖는 초음파를 발생시키기 위해서는 15mm 폭의 코일을 사용하는 것이 가장 좋았다. 최적의 조건에서 발생된 초음파는 50m 이상을 충분히 진행할 수 있으며, 결함의 단면적이 증가함에 따라 수신된 결함 신호는 직선적으로 증가함을 확인하였다.

주요용어 : 자왜, 초음파, 센서, 배관

Abstract Magnetostrictive sensors which can be used effectively to detect flaws in pipe were fabricated. The optimal conditions to obtain the maximum generation efficiency of the ultrasonic wave were established. In case of the used steel pipe the optimal magnetic field was 250~350Oe and the coil width of 15mm showed the best efficiency for generating a wave with the frequency of 180 kHz. In the best condition, the wave can propagate further than 50m without serious attenuation. The amplitude of the ultrasonic wave reflected from artificial flaw had a good linear relationship to the cross-sectional area of the flaw.

Keywords: magnetostriction, ultrasonic wave, sensor, pipe

1. 서 론

국내에는 가스 및 유류 배관을 비롯하여 석유화학플랜트와 발전설비 등에 각종 배관이 수없이 많이 설치되어 있다. 일부 배관은 설치 후 이미 오랜 시간이 경과되어 부식이나 결함 발생의 위험에 노출되어 있기 때문에 국내에서도 최근에는 배관의 안전진단 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 가스나 유류배관의 경우에는 대부분의 배관이 지하에 매설되어 있기 때문에 결함의 탐상은 배관 내부에서 이루어져야 하며, 이를 위하여 배관 내부의 유류의 흐름을 동력으로 이용하여 움직이면서 결함을 탐상하는 지능형 PIG가 개발되어 자속누출탐지법과 초음파탐상법이 적용되어 오고 있다[1,2]. 발

전설비의 열교환기 튜브 등은 매설배관은 아니지만 여러 개의 배관이 하나의 다발로 묶여있기 때문에 역시 내부에서의 탐상이 필요하며 주로 내삽형 탐촉자를 이용한 와전류법[3]이 이용되어 오고 있다. 지상에 노출되어 있는 배관의 탐상은 외부에서의 접근이 가능하기 때문에 매설배관의 경우 보다 접근성에 있어서 유리하다. 그렇지만 대부분의 석유화학플랜트 배관들은 열 보호재(thermal insulator)로 싸여져 있기 때문에 일반적인 초음파나 와전류 시험법 등을 직접 적용할 수는 없다. 그러므로 대부분의 연구는 열 보호재의 제거 없이 탐상을 수행하는 방법 또는 일부분의 열 보호재만을 제거하여 넓은 부위의 결함을 탐상하는 방법 등에 집중되고 있다. 열 보호재의 제거 없이 탐상이 가능한

방법으로는 배관을 따라가면서 방사선 투과 영상을 얻는 기술(4)과 펄스형 와전류 탐상법(PEC : pulsed eddy current method)(5)이 있으며, 일부분의 열 보호재를 제거하고 탐상을 수행하는 방법으로는 자왜형 센서(Magnetostrictive sensor)(6) 또는 초음파 탐촉자를 사용하여 판파를 송수신 하는 방법(7) 등이 연구되고 있다. 본 논문에서는 여러 가지 배관결합 검사 기술 중 자왜형 초음파 센서 이용기술에 대한 연구결과를 기술하고자 한다.

강자성재료가 자기장 하에 놓이면 자기장의 방향에 따라 재료의 치수가 변형되는 현상이 1847년 Joule에 의해 발견되었으며 이를 자왜현상(Magnetostrictive effect)이라고 한다. 역으로 강자성 재료의 변형은 자기적 상태의 변화를 일으키게 되는데 1864년 Villari에 의해서 발견된 이 현상을 역자왜현상(Inverse magnetostrictive effect)이라고 한다. (8) 위의 효과들을 이용한 자왜형 센서는 1920년대까지는 이론적인 관심을 모으며 고주파수 진동을 조절하기 위한 자왜형 막대의 이용, 가스/액체/고체내에 초음파를 발생시키기 위한 연구 등 여러 분야에 적용되어 왔지만, 1960년대 압전 재료의 응용성이 확대되면서 자왜형 센서의 이용은 극히 제한적으로 이루어져 왔다. 1990년대에 접어들어 미국 SwRI(Southwest Research Institute)에서는 현수교 등의 강선 또는 wire rope의 부식 및 결합 탐상에 자왜형 센서를 이용하려는 시도가 이루어졌으며, 열 보호재로 싸여있는 노출 배관의 부식 및 결합의 탐상에도 자왜형 센서를 적용하고 있다. 노출배관의 탐상에 자왜형 센서를 이용하고자 하는 시도는 이 기술이 비접촉적인 방법이면서 일부분의 보호재 제거로 한번에 약 30m의 긴 배관 부분을 탐상할 수 있다는 장점 때문에 이루어졌다. 또한 역시 비접촉으로 초음파를 송수신 할 수 있는 EMAT에 비하여 센서 코일과 배관 사이의 거리로 정의되는 lift-off의 영향을 덜 받기 때문에 열 보호재의 두께가 얇은 경우 보호재의 제거 없이도 초음파를 송수신 할 수 있는 특징을 갖는다. 자왜형 센서는 구조적으로 코일을 이용하기 때문에 연속적으로 연결되어 있는 배관에 적용을 위해서는 새로운 개념의 코일제작 기술이 필요하며, 사용 주파수가 수백 kHz 이내이므로 작은 결합의 검출에는 한계를 갖지만 넓은 부위의 부식 및 결합 등의 검출에는 매우 효과적인 방법이다.

본 논문에서는 자왜형 센서의 설계·제작을 위한 기준을 설정하기 위하여 코일의 감은 수와 정자기장의 세

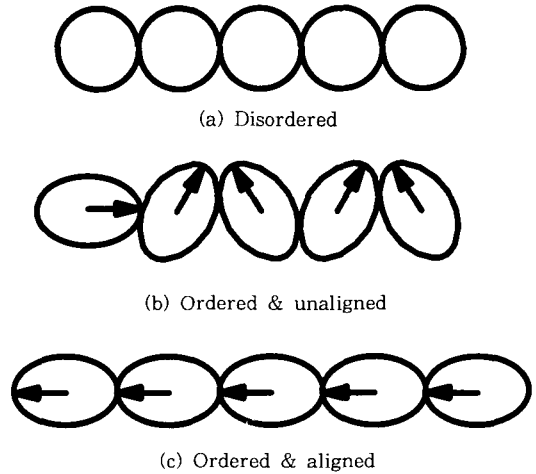


Fig. 1 Mechanism of magnetostriction

기, 그리고 코일 폭에 따른 초음파발생효율을 측정하며, 제작된 센서로 발생시킨 초음파의 진행 거리, 그리고 인공적으로 가공한 결합의 검출능을 평가하고자 한다.

2. 자왜형 센서의 초음파 송수신 원리

강자성 재료가 자기장 하에 놓일 때의 부분적인 길이 변화로 정의되는 자왜는 식 (1)로 표시된다.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \dots\dots\dots (1)$$

자왜는 자발적 자왜(spontaneous magnetostriction)와 외부 자기장 부가에 의한 자왜(field-induced magnetostriction)로 나눈다. 식에서 λ 는 자왜, l 과 Δl 은 각각 변형전의 길이와 변형에 의한 길이의 변화이다. 강자성 재료는 큐리 온도를 통과하면서 자구가 형성되는데 이때 일어나는 자기변형을 자발적 자왜라고 하며, 자구가 생성되어 있는 재료에 외부에서 자기장을 가하면 자구의 재배열이 일어나면서 자기변형이 생기는데 이를 외부 자기장 부가에 의한 자왜라고 한다. 이를 그림으로 설명하면 Fig. 1과 같다. 즉, 그림에서(a)는 큐리온도 보다 높은 온도에서의 강자성 재료의 원자배열 상태이며, 이 재료의 온도를 큐리온도 이하로 낮추면 자발적 자화에 의해서(b)와 같이 자기변형이 일어난다. 여기에 외부에서 자기장을 부가하면(c)와 같이 자구내의 원자들의 자기적 모멘트가 한쪽 방향으로 정렬

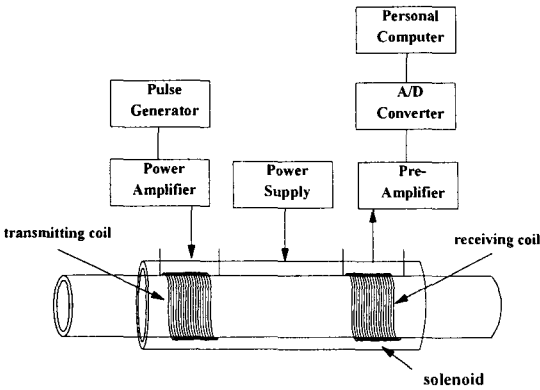


Fig. 2 Schematic diagram of the system for transmitting and receiving the ultrasonic wave in a pipe using magnetostrictive sensor

되면서 역시 자기변형이 일어난다. 비파괴적으로 이용되는 자왜형 센서는 외부 자기장 부가에 의한 자왜 특성을 이용한다. 즉, 외부자기장의 세기를 변화시킬 때 일어나는 자기변형을 초음파 발생원으로 이용하는 것이다. 자왜는 부가하는 자기장의 세기에 대하여 비선형적으로 증가하는 특성을 가지고 있기 때문에 자기장의 변화에 대하여 자기변형이 가장 큰 영역에서 초음파 송수신을 수행하여야 한다.

3. 초음파 송수신 장치의 구성

Fig. 2는 자왜형 센서를 이용한 배관 결함 검사장치의 구성도이다. 센서는 기본적으로 동자기장을 형성하기 위한 코일과 정자기장을 가하기 위한 자석으로 구성되어 있다. 동자기장은 주로 수 Hz~수백 kHz의 중심 주파수를 갖는 tone-burst pulse를 코일에 가해줌으로써 발생시킨다. 본 실험에서는 미국 RITEC사의 RAM10000을 이용하여 중심주파수 180kHz의 tone-burst 펄스를 발생시켰으며, 코일에 가한 펄스의 폭은 약 22μs이었다. 한편 수신된 신호의 증폭 및 필터링은 RAM10000에 내장된 기능을 이용하였다. 정자기장의 공급은 전자석 또는 영구자석을 사용할 수 있는데, 여기서는 자기장 변화에 따른 발생효율의 변화를 측정하기 위하여 전자석을 이용하였으며, 20A까지의 정전류를 solenoid에 공급하여 약 650Oe까지의 정자기장을 발생시켰다. 자왜형 초음파센서에서 정자기

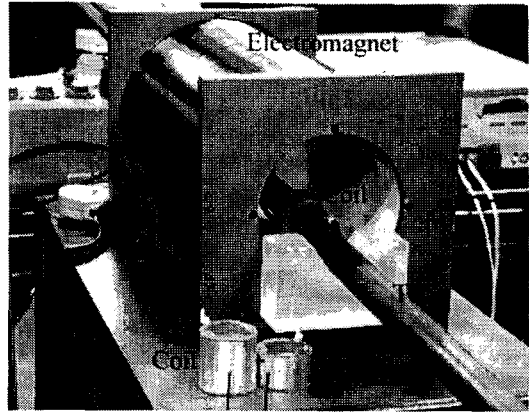


Fig. 3 Configuration of coils and a solenoid in the system

장은 초음파 발생 효율을 높이는 역할과 함께 가해주는 펄스와 발생되는 초음파의 주파수를 일치시키는 역할을 한다[9].

4. 센서 제작 및 특성 평가

4. 1. 센서 코일 및 solenoid 제작

Fig. 3은 측정에 사용된 전자석과 코일을 보여주고 있으며, 그림에서와 같이 제작된 두 코일을 전자석 내에 위치시킨 상태에서 초음파를 송수신 한다. 코일의 감은 수와 굵기에 따라 초음파 송수신 효율이 달라지며, 본 실험에서 제작한 코일의 사양은 Table 1과 같다. 여기서 TS는 송수신용 코일이며, RS는 수신용 코일이다. 코일 외부로부터의 잡음의 영향을 줄이기 위해서 얇은 알루미늄 판으로 코일 외부를 감싸도록 하였다. 자왜형 센서는 작은 fill-factor(fill-factor : 배관 외경 대 코일 내경의 비)의 경우에도 초음파를 송수신 할 수는 있지만 fill-factor가 높을수록 초음파 송수신이 좋다. 본 실험에서는 외경 32mm의 배관에 적용하기 위하여 제작하였으므로 코일의 내경은 35mm

Table 1 Specification of sensor coils

	wire diameter(mm)	number of turns
TS1	0.4	32
TS2	0.4	65
RS1	0.2	67
RS2	0.2	134

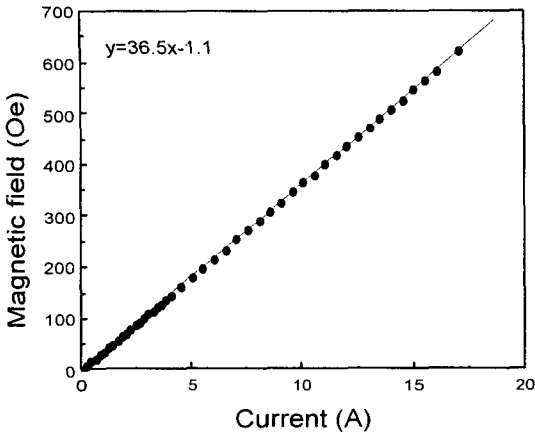


Fig. 4 Magnetic field intensity as function of the excitation current in a solenoid coil

이고, 폭은 약 15mm로 하였다. 한편 정자기장을 가하기 위한 solenoid는 직경 3mm의 코일을 약 1300번 감아서 제작하였으며, 가해진 전류에 따른 내부 자기장의 세기는 Fig. 4와 같다.

4.2. 자기장 세기에 따른 초음파 발생 효율 측정

자왜형 센서의 초음파 발생 효율은 자기장의 세기에 따라 가장 민감하게 변한다. Fig. 5는 정자기장의 세기에 따른 초음파 송수신 결과이다. 각 코일의 조합에 따라 절대 크기에는 차이가 있지만 자기장이 영에서 약 200Oe까지 증가함에 따라 수신된 초음파의 세기는 점

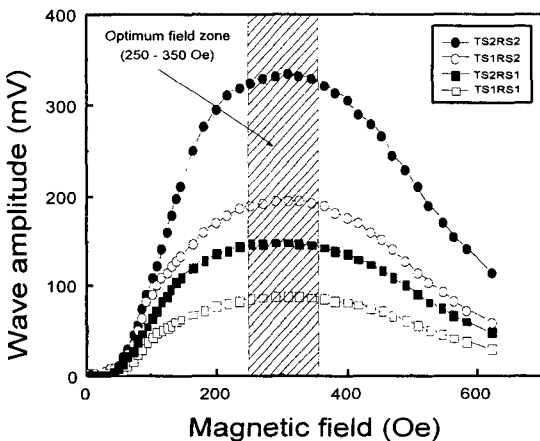


Fig. 5 Wave amplitude as function of magnetic field intensity in a steel pipe

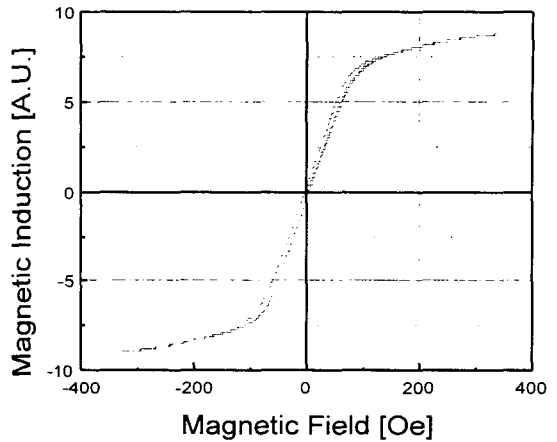


Fig. 6 Hysteresis curve of a steel pipe

차 증가하고, 250~350Oe에서는 거의 일정한 세기를 보이며, 그 후 점차 감소하여 다시 영에 근접하는 양상을 보인다. 또한 초음파 송수신 시험은 solenoid 밖까지 노출되어 있는 긴 배관에 대하여 측정된 것이므로 배관을 따라 자속의 누출이 생긴다. 그러므로 Fig. 5는 재료의 자왜와 깊은 관계가 있지만 직접적으로 재료의 자왜를 나타내는 것은 아니다. 결국 Fig. 5로부터는 약 250Oe~350Oe의 자기장이 초음파 송수신에 가장 효율적인 자기장의 세기임을 확인할 수 있다. 강자성 재료가 자화되는 과정은 180°자구의 이동과 90°자구의 회전으로 나뉘어지며, 자왜 현상은 주로 90°자구의 회전에 의해서 일어난다. 즉, 초기 자화 상태에서는 주로 180°자구의 이동이, 그 후 재료의 자기포화까지는 90°자구의 회전이 일어난다. 그러므로 자왜형 센서의 경우 낮은 자기장의 세기에서는 초음파발생 효율이 극히 낮고, 자기장의 세기가 커지면 90°자구 회전의 영향으로 점차 발생 효율이 증가한다. 그리고 완전히 자기 포화된 후에는 단 자구의 상태가 되기 때문에 변형이 거의 일어나지 않는다. 물론 자기 포화이후에도 체적 변화에 의한 강제 자기변형(forced magnetostriction)이 일어나지만 미미하므로 여기서 고려하지는 않는다. Fig. 6은 동일한 배관에서 측정된 자기력곡선이다. 자기력곡선으로부터 자왜 계수를 직접 알 수는 없지만 100Oe 부근에서 90°자구의 회전이 많이 일어나며 350Oe 이상에서 자기포화가 일어남을 알 수 있다. 초음파의 발생 효율은 자왜계수의 절대적 크기에 의존하는 것이 아니고 이의 국부적 변화에 의존하므로 자기이

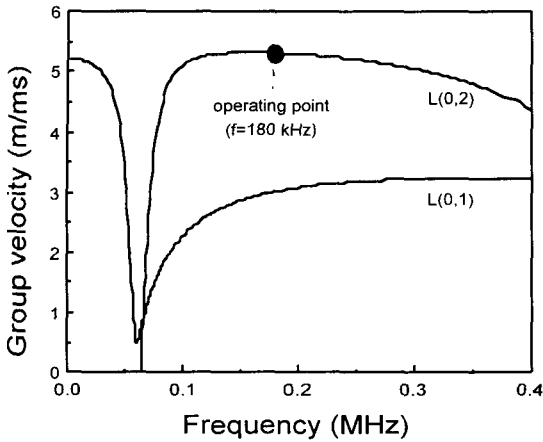


Fig. 7 Dispersion curve of steel pipe

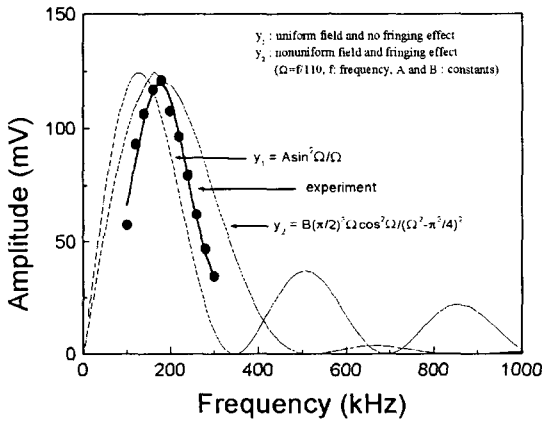


Fig. 8 Frequency dependency of the detected wave amplitude

력곡선으로부터 초음파 발생 효율을 예측할 수는 없다.

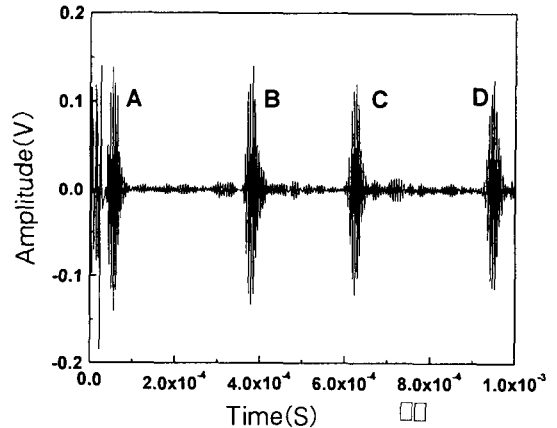
4.3. 주파수 변화에 따른 초음파 발생 효율 측정

배관을 따라 진행하는 초음파는 파장에 비하여 배관의 두께가 얇을 경우, 유도초음파(guided wave)의 형태로 진행한다. 유도초음파는 경계효과에 따라 분산(dispersion) 특성을 보이므로 초음파 발생을 위해서는 적당한 초음파 모우드의 선택이 필요하다. Fig. 7은 'disperse'라는 상용의 소프트웨어를 이용하여 계산한 분산곡선이다. 본 실험에서는 점 A를 선택하였으며 이

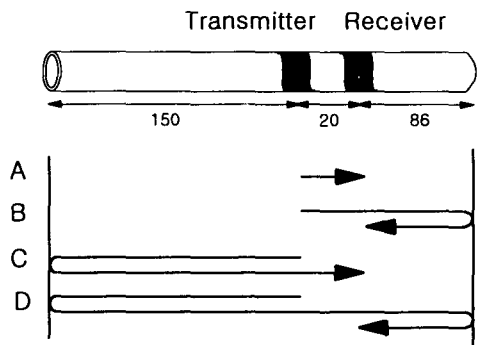
때의 모우드는 L(0,2)이고, 주파수는 약 180kHz, 그리고 군속도(group velocity)는 약 5200m/s이다. Fig. 8은 제작된 코일(sender 코일 : TS2, receiver 코일 : RS2)을 사용하여 최적 정착기장 하에서 송수신한 초음파의 주파수에 따른 변화를 보여주고 있다. 그림에서 점과 굵은 선은 측정결과이고, 곡선 y1과 y2는 Williams(10)에 의해서 계산된 결과로 식 (2)와 식 (3)과 같다.

$$U = A \frac{\sin 2\Omega}{\Omega} \dots\dots\dots (2)$$

$$U = B \left(\frac{\pi}{2}\right)^3 \Omega \frac{\cos^2 \Omega}{\left(\Omega^2 - \frac{\pi^2}{4}\right)^2} \dots\dots\dots (3)$$



(a)



(b)

Fig. 9 Shape and path of the detected waves

식에서 U 는 초음파의 세기이고, A 와 B 는 임의의 계수이다. 그리고 Ω 는 $\pi fl/c$ 이며, f 는 주파수, l 은 코일의 폭, c 는 속도이다. 그림에서 y_1 은 코일에 의해 발생된 자기장의 fringe 효과를 고려하지 않고, 균일한 자기장이 분포되는 경우의 결과이며, y_2 는 fringe 효과를 고려하고, 또한 자기장의 세기도 일정하지 않은 보다 실질적인 경우의 계산결과이다. y_2 의 결과는 y_1 의 결과와 비교하여 주파수 대역에서 더 넓은 폭을 가지며, 높은 주파수에서의 응답특성이 크게 줄어들음을 볼 수 있다. 그리고 중심주파수의 선택을 위해서는 y_2 의 결과가 실험결과와 더 잘 일치하고 있다. 이 계산결과는 코일 제작시 코일의 폭 결정에 직접 이용될 수 있는 중요한 결과이다.

5. 초음파 진행 특성 및 결함 검출 시험

Fig. 9는 길이 2,560mm, 외경 32mm, 두께 5mm의 배관에서 측정된 초음파 송수신 결과이다. 송신용 코일로부터 좌우로 진행하여 수신된 신호가 연속적으로 보이며 큰 감쇠 없이 2m 이상을 진행하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 10은 발생된 초음파의 진행거리를 확인하기 위한 실험결과로 T점까지의 진행 시간이 10ms이므로 속도를 5,200m/s라 하면 약 52m의 거리에 해당한다. 실험에 사용한 배관이 결함을 포함하고 있지 않은 깨끗한 배관이므로 초음파에너지의 감소가 크게 일어나지 않을 것임을 고려하더라도, 자왜형 센서로는 수십 m의 배관을 한번에 탐상 할 수 있다는 것을 보여준다. 결국 배관을 싸고 있는 열 보호재를 수십 m 간

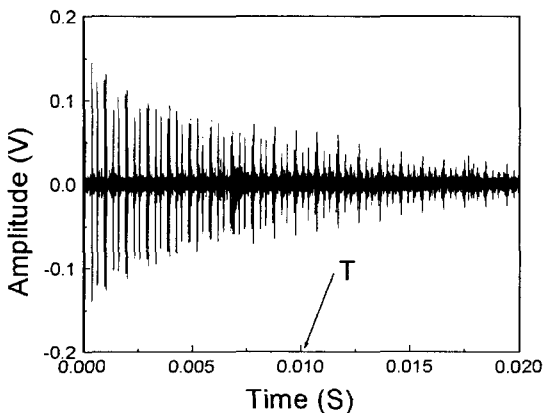


Fig. 10 Measurement of the propagation distance in a steel pipe



Fig. 11 Shape of artificial defects

격으로 국부적으로 제거한 후 센서를 설치함으로써 넓은 부위의 결함 유무를 평가할 수 있음을 의미한다.

결함 검출능의 평가를 위해서 Fig. 11에 나타난 형상의 인공결함을 EDM법으로 가공하였다. 결함은 모두 12개이며, 크기는 배관 단면적의 3~64%에 해당된다. Fig. 12는 결함 신호 측정결과의 예이다. 'direct signal'은 송신용 코일에서 발생된 초음파를 수신용 코일에서 직접 검출한 것이고, 'flaw'는 결함으로부터 반사되어 수신된 신호이다. 64%의 결함은 직접 전달된 신호와 거의 비슷한 크기를 보이며, 3%의 작은 결함 신호도 뚜렷이 구별할 수 있다. Fig. 13은 가공한 결함의 단면적 변화에 따른 수신된 신호의 신호 크기이다. 여기서 수신된 신호는 직접 전달된 'direct signal'로 나누어서 규격화 한 것이다. 약간의 어긋남은 있으나 단면적에 비례하여[11] 결함 신호가 커지고 있음을 볼 수 있으므로 신호로부터 결함의 크기를 평가하는 기준으로 사용될 수 있을 것이다.

실제 배관은 길게 연결되어 있기 때문에 본 실험에서 사용한 전자석이나 코일을 사용할 수는 없다. 그러므로 현장에서 동자기장의 형성을 위해서는 리본 타입의 코일을 이용해야 하며, 정자기장은 전자석 대신에 영구자석을 사용해서 발생시켜야 한다. 또한 실제 배관에는 부식결함이 많이 발생하므로 결함 형상에 따른 분석기술이 필요하며, 용접부와 플랜지의 영향도 앞으로 고찰되어야 할 것이다.

6. 결 론

제작된 자왜형 초음파 센서로 발생시킨 초음파는 큰 신호 감쇠 없이 수십 m 이상을 진행할 수 있었으므로, 수십 m의 간격마다 국부적으로 열 보호재를 제거하면 전체 배관의 결함 탐상을 수행할 수 있다. 그리고 결함으로부터 반사된 초음파 신호는 결함의 단면적에 비례함을 확인하였으므로 수신되는 신호로부터 결함의 크기

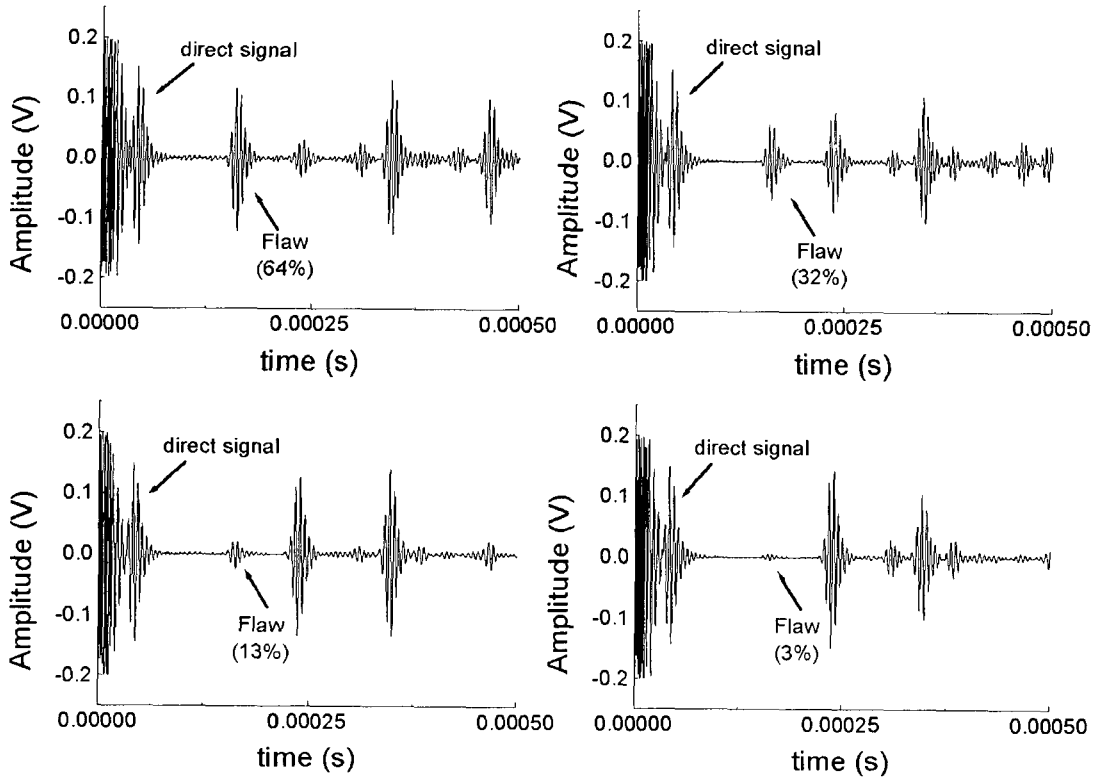


Fig. 12 Oscillograms of signal reflected from artificial flaws

를 판단할 수 있다. 아울러 본 연구에서는 최대의 초음파 송수신 효율을 얻을 수 있는 정자기장의 세기와 코일 설계 기준을 설정하였다.

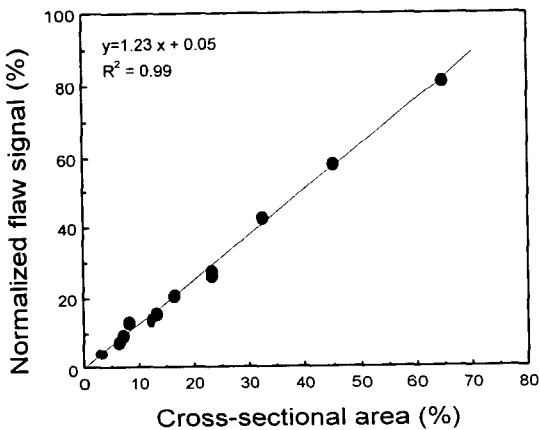


Fig. 13 Relationship between cross-sectional area and normalized flaw signal

참고문헌

- [1] D. L. Atherton, "Stress-shadow magnetic inspection technique for far-side anomalies in steel pipe", NDT International, Vol. 16, No. 3, pp. 145-149, (1983)
- [2] H. Willems, O. A. Barbian, H. Stript, and H. Gemmeke, "UltraScan CD - A new tool for crack detection in pipelines", 7th International pipeline monitoring & rehabilitation seminar, Feb. 6-9, Huston, TX, USA, (1995)
- [3] D. L. Atherton, D. D. Mackintosh, S. P. Sullivan, J. M. S. Dubois, and T. R. Schmidt, "Remote field Eddy current signal representation", Materials Evaluation, Vol. 51, No. 7, pp. 782-789, (1993)
- [4] J. A. Raad, "Novel techniques for out-

- side inspection of plant pipework", IN-SIGHT, Vol. 37, No. 6, pp. 409-412, (1995)
- [5] C. R. Brett and J. A. Raad, "Validation of a pulsed eddy current system for measuring wall thinning through insulation", SPIE, Vol. 2947, pp. 211-222, (1996)
- [6] H. Kwun and K.A. Bartels, "Magnetostrictive sensor technology and its applications", Ultrasonics, Vol. 36, pp. 171-178, (1998)
- [7] S.M. Walker, J.L. Landrum, and D.E. MacDonald, "US12 current 'state of the art' piping examination technology", Electronic J. NDT, Vol. 4, No. 10(1999)
- [8] B.D. Cullity, "Introduction to magnetic materials", Chap. 8, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, USA, (1972)
- [9] J. Krautkraemer and H. Krautkraemer, "Ultrasonic testing of materials", Second edition, pp. 162-165, Springer-Verlag, Berlin, Germany, (1977)
- [10] R.C. Williams, "Theory of magnetostrictive delay lines for pulse and continuous wave transmission", IEEE Transactions on Ultrasonics Engineering, Vol. EU-7, pp. 16-38, (1959)
- [11] D. N. Alleyne, A. M. Lank, P. J. Mudge, M. J. S. Lowe, and P. Cawley, "Guided wave inspection of chemical plant pipework", SPIE, Vol. 2947, pp. 177-188, (1996)