

<연구논문>

격납건물 라이너 플레이트 감육 검사를 위한 전자기 초음파 트랜스듀서의 설계 및 성능 평가

한순우[†] · 조승현* · 강토** · 문성인**

Design and Test of ElectroMagnetic Acoustic Transducer applicable to Wall-Thinning Inspection of Containment Liner Plates

Soon Woo Han[†], Seung Hyun Cho*, To Kang** and Seong In Moon**

(Received 25 April 2019, Revised 13 May 2019, Accepted 10 June 2019)

ABSTRACT

This work proposes a noncontact ultrasonic transducer for detecting wall-thinning of containment liner plates of nuclear power plants by measuring their thickness without physical contact. Because the containment liner plate is designed to prevent atmospheric leakage of radioactive substances under severe nuclear accident, its wall-thinning inspection is important for safety of nuclear power plants. Wall-thinning investigation of containment liner plates have been carried out by measuring their thickness with contact-type ultrasonic thickness gauge by inspectors and needs a lot of time and cost. As an alternative, an electromagnetic acoustic transducer measuring precisely thickness of containment liner plates without any physical contact or couplant was suggested in this research. A transducer generating and measuring shear ultrasonic waves in thickness direction was designed and wave field produced by the transducer was analyzed to verify the design. The working performance of the suggested transducer was tested with carbon steel plate specimens with various thicknesses. The test result shows that the proposed transducer can measure thickness of the specimens precisely without any couplant and implies that swift scanning of wall-thinning of containment liner plates will be possible with the proposed transducer.

Key Words : Containment liner plate (격납건물 라이너 플레이트), Electromagnetic Acoustic Transducer (전자기 초음파변환기), Noncontact (비접촉), Thickness measurement (두께 측정)

1. 서 론

원전 격납건물 라이너 플레이트(Containment Liner Plate, CLP)는 격납건물의 내벽을 구성하며 사고 발생 시 방사능의 대기 누출을 최종적으로 방지하는 구조물 중 하나이다. 최근 일부 국내 원전에서 CLP 이면의 감육(wall-thinning) 사례가 발견되어 이의 건

전성 검사에 관한 관심이 고조되고 있다⁽¹⁾.

CLP의 감육, 즉 두께 감소는 이면부의 수분, 이물질, CLP 자체 또는 콘크리트의 결함 등에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다⁽²⁾. 현재 CLP 감육 검사는 휴대용 초음파 두께 측정기를 이용하여 기준치 이하로 두께가 감소한 부위를 찾아내는 방식으로 수행되고 있다. 이러한 방식은 검사자의 숙련도에 따라 검사 정확도가 달라질 수 있고, 고소(high) 지역을 검사하기 위해서는 비계(scaffolding) 등을 설치해야 한다는 단점이 있다. 또한 현재의 초음파 두께 검사는 물 등의 접촉매질(couplant)이 필요한 압전형(piezoelectric) 초음파 트

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원 안전재료기술개발부

E-mail : swhan@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2881 FAX : (042)866-6539

* 한국표준과학연구원 안전측정센터

** 한국원자력연구원 안전재료기술개발부

랜스듀서를 사용하고 있는데, 측정 전에 접촉매질을 도포하고 측정 후에 이를 제거하는 공정이 필요해 검사 시간 및 비용이 증가한다.

검사자에 의한 수동식 감속 검사 방식의 단점, 즉 낮은 검사 속도 및 고소 지역 난접근성을 개선하기 위해 로봇 기반의 CLP 두께 검사 자동화 시스템이 현재 연구되고 있다. 그러나 이 시스템에서도 압전형 초음파 트랜스듀서가 사용되고 있어 접촉매질 공급 및 회수 장치가 부가적으로 필요하다. 또한 CLP 두께 스캐닝 중에는 트랜스듀서가 접촉 상태를 유지해야 하므로 CLP 표면 상태, 도장층에 따라 신호가 변화하거나 트랜스듀서에 마모, 파손 등의 물리적 충격이 가해질 수도 있다.

본 논문에서는 물리적 접촉 또는 별도의 매질없이 초음파를 송수신하여 CLP의 두께를 측정할 수 있는 전자기 초음파 트랜스듀서(Electromagnetic Acoustic Transducer, 이하 EMAT)에 대해 연구하였다. EMAT은 전기장과 자기장의 상호 작용에 의해 금속 등의 전도체에 비접촉으로 초음파를 발생시키고 측정할 수 있어^(3,4), 고온 구조물의 초음파 결합 검사^(5,6), 배관 용접부 검사^(7,8) 및 구조물 결합 스캐닝^(9,10)에 활용되고 있다. 또한 두께가 얇아 접촉식 초음파 트랜스듀서를 적용하기 어려운 열교환기 튜브와 판 구조물의 결합 및 두께 검사에도 적용된 바 있다^(11,12). EMAT을 이동체 등에 탑재하여 CLP 두께 검사에 적용할 경우 접촉 매질 도포 및 제거 공정 또는 장치를 생략할 수 있고, 고소 지역 등을 용이하게 검사할 수 있어 검사 효율을 개선할 수 있으며, CLP 표면 상태에 영향을 받지 않고 신뢰도 있는 검사 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 우선 EMAT의 초음파 발생 원리를 간략히 정리하였으며, 제안한 트랜스듀서가 CLP와 같은 판 구조물에서 발생시키는 음장(acoustic wave field)에 대한 해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 CLP 두께 측정에 적용할 수 있는 트랜스듀서 설계를 제시하였으며, 시험품을 제작한 후 다양한 두께의 시편을 대상으로 성능 평가 시험을 수행하여 제안한 트랜스듀서의 적용 가능성을 검토하였다.

2. CLP 두께 측정을 위한 EMAT 작동 원리

2.1 EMAT의 초음파 발생 원리

금속 등 전기 전도체 표면에 근접한 코일에 교류

I 가 흐르면, 이에 인접한 전도체 표면에는 와전류(eddy current) J 가 유도된다. 영구 자석 등에 의해 J 에 수직인 방향으로 자기장 B 가 형성되어 있는 경우 식 (1)과 같은 로렌츠(Lorentz) 힘 법칙에 의해 J 와 B 모두에 직교하는 방향으로 힘 F 가 전도체에 발생하고 이에 따라 대상은 탄성 변형된다.

$$F \propto J \times B \tag{1}$$

EMAT은 이러한 원리로 초음파를 발생시키고 측정하는 트랜스듀서를 총칭하는데, 전기장과 자기장의 상호 작용을 이용하므로 물리적 접촉 또는 별도의 접촉매질이 없이도 판 구조물의 두께를 초음파로 측정할 수 있다. EMAT은 전기장을 발생시키기 위한 코일과 자기장 형성을 위한 자석으로 구성되는데, 코일의 형태 및 코일과 자석 간 배치를 바꾸어 가면서 다양한 양상의 초음파를 송수신할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 racetrack 형 코일과 자석 배치를 통하여 초음파 신호를 발생하고 측정하였다. 이러한 구성에서는 Fig. 3와 같이 구조물 내에 수직 방향(Fig.1의 z 방향)으로 전파하는 전단(shear) 초음파가 발생하며, 이 초음파의 반사 시간(t)과 탄소강(CLP재질)에서의 전단 초음파 전파 속도(v)로부터 CLP의 두께(d)를 측정할 수 있다 (식 (2)).

$$d = (v \times t) / 2 \tag{2}$$

또한 racetrack 코일에서 발생하는 초음파의 주파수는 코일 전류의 주파수에 비례하므로 매우 쉽게 조절할 수 있다. 많이 사용되는 미앤더(meander) 코일형 EMAT 또는 주기형 영구자석(Periodic Permanent Magnet, PPM) EMAT은 코일 또는 자석 간격에 따라 발생하는 초음파의 주파수가 고정되므로, 주파수를 조절하기 위해서는 코일의 설계를 바꾸어야 한다⁽¹³⁾.

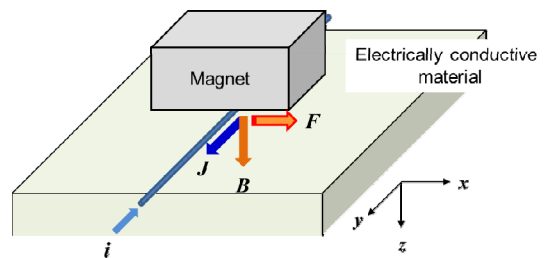


Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic signal generation by an EMAT using Lorentz force mechanism

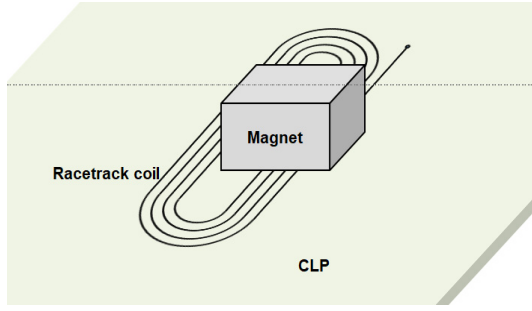


Fig. 2 The proposed configuration of coil and magnet for measuring CLP thickness

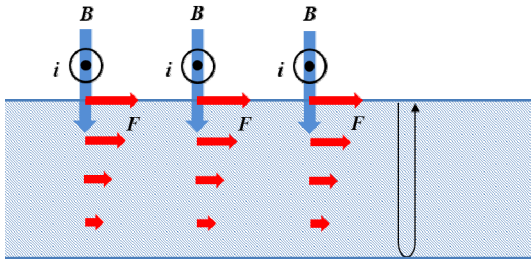


Fig. 3 Shear wave generation and propagation by a racetrack coil

2.2 판 두께 측정을 위한 EMAT 음장 해석

EMAT을 제작하기에 앞서 Fig. 3과 같은 racetrack 코일에 의해 판에 발생하는 음장을 해석하였다. 총 감김(turn)수가 N 인 코일의 한쪽 중앙부를 원점 O 라 할 때, O 에서 x 축 방향으로 x_n 만큼 떨어져 있는 음원(wave source) S_n 에 의해 $z > 0$ 인 매질 내에 형성되는 음장 A_n 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_n \approx A_0 \sqrt{\frac{2}{\pi k d_n}} e^{i(kd_n - \omega t + \frac{\pi}{r})} \quad (3)$$

여기에서 $\omega (= 2\pi f)$ 는 음장의 각주파수(angular frequency), k 는 파수(wavenumber)이며 d_n 은 음원 S_n 으로부터의 거리로서 $d_n = \sqrt{(d \sin \alpha)^2 + (d \cos \alpha - x_n)^2}$ 이다(Fig. 4 참조). A_0 는 음원의 크기인데 racetrack 코일은 인접한 코일 간 전류 크기 및 방향이 동일하므로 모든 음원(S_n)의 크기는 A_0 로 동일하다고 가정하였다. 매질 상의 지점 P 에 형성되는 음장 A_p 는 N 개 음원에 의한 음장을 모두 더하여 구할 수 있다.

$$A_p = \sum_{n=0}^{(N-1)/2} A_0 \sqrt{\frac{2}{\pi k d_n}} e^{i(kd_n - \omega t + \frac{\pi}{4})} \quad (N: \text{홀수}) \quad (4)$$

$$A_p = \sum_{n=1}^{N/2} A_0 \sqrt{\frac{2}{\pi k d_n}} e^{i(kd_n - \omega t + \frac{\pi}{4})} \quad (N: \text{짝수}) \quad (5)$$

본 연구에서는 주파수 $f = 2$ MHz인 전단 초음파를 이용하여 CLP의 두께를 측정하고자 하였는데, 탄소강에서의 전단 초음파 전파 속도인 3200 (m/s)를 대입하면 이 초음파의 파장 $\lambda (= v/f)$ 는 1.6 mm으로 계산된다. 발생하는 초음파의 파장이 CLP의 정상 두께(6 mm)에 비해 충분히 짧으므로 CLP 두께 측정에 적용할 수 있다.

제안한 트랜스듀서가 CLP와 같은 두께 6 mm의 탄소강 판 내에 발생시키는 2차원 음장을 식 (4), (5)를 이용하여 코일 감김 수에 따라 계산한 후 Fig. 5에 비교하였다. 의도하는 바와 같이 코일 하부의 수직 방향(z 방향)으로 전파하는 음장이 발생하는 것을 확인할 수 있고, 이는 제안한 racetrack 코일을 이용하면 CLP 두께 측정에 적합한 초음파를 발생시킬 수 있다는 것을 의미한다. 코일 감김 수가 증가하면 음장 분포 영역도 넓어지는 경향도 Fig. 5에서 볼 수 있다. 음장이 확대될수록 한번에 검사할 수 있는 영역이 넓어져 검사 속도를 향상시킬 수 있지만,

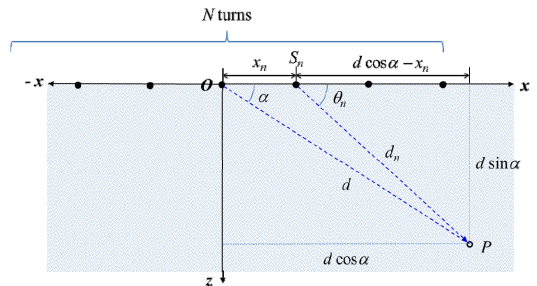


Fig. 4 Analysis of ultrasonic wave field at point P generated by a racetrack coil

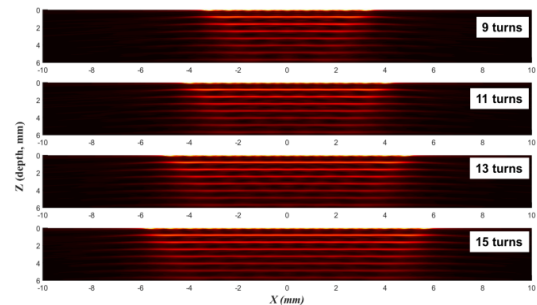


Fig. 5 The wave field analysis results of the proposed transducer according to coil turns

코일과 자석의 크기도 증가하여 트랜스듀서의 크기 및 무게도 증대될 수 있다. 본 연구에서는 사용하는 자석의 크기(폭 20 mm), 트랜스듀서의 전체적인 크기 및 음장 분포 영역을 정성적으로 고려하여 감김수가 13회인 코일을 설계하였다. 추후 실제 검사에 적용할 경우 검사 속도 및 영역을 고려하여 코일 감김 수를 최적화할 필요가 있다.

3. CLP 두께 검사용 트랜스듀서 제작

CLP 두께 방향으로 전파하는 전단 초음파를 만들기 위해 앞서의 해석 결과를 고려하여 Fig. 6(a)와 같은 코일을 설계하고, 유연회로기판(flexible PCB) 기법으로 이중층의 racetrack 코일을 제작하였다. 초음파 송신부와 수신부를 분리하여 신호를 측정하는 피치-캐치(pitch-catch) 방식을 적용하기 위해 동일한 사양의 racetrack 코일을 두 개 배치하였는데, Fig. 7에서와 같이 각 코일의 한쪽 부분은 서로 중첩시켰다. 코일 중첩부의 위에 30 × 20 × 15 (mm) 의 네오디뮴(NdFeB) 자석을 배치하여 상하 방향으로 정적(static) 자기장을 형성하였다. 이러한 배치에서는 하나의 자석으로 송신부 코일과 수신부 코일 모두에 자기장을 가할 수 있어 트랜스듀서의 구성을 단순화할 수 있다.

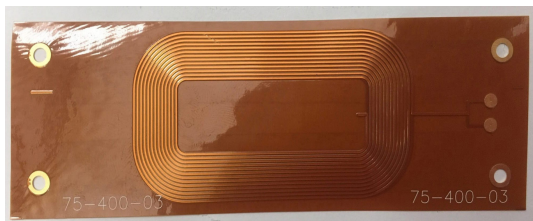
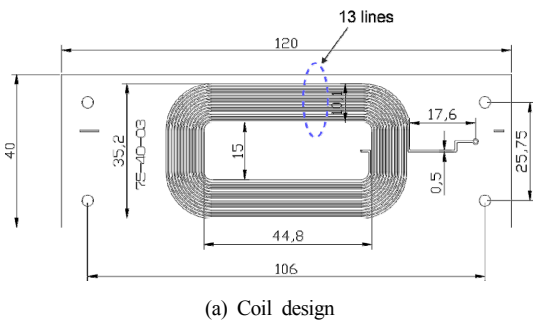


Fig. 6 The racetrack coil for CLP thickness measurement transducer

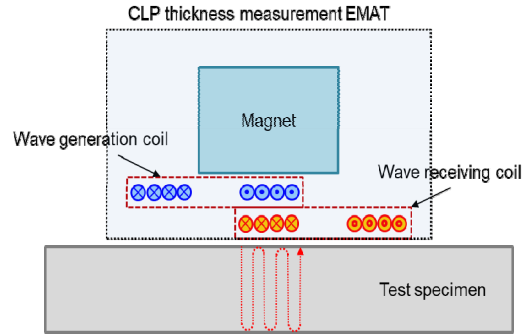


Fig. 7 Configuration of coils and a magnet of the proposed transducer

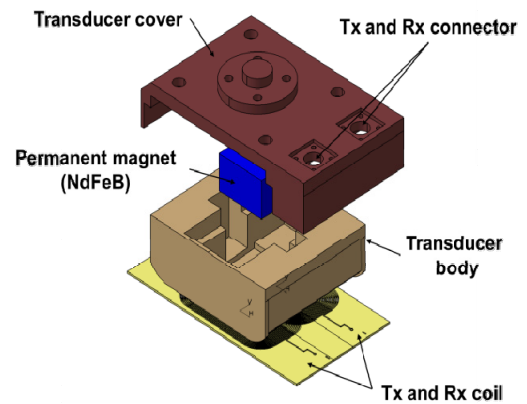


Fig. 8 The exploded illustration of the proposed transducer

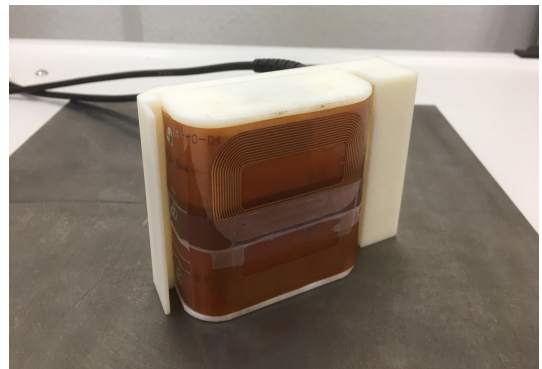


Fig. 9 The developed CLP thickness noncontact measurement transducer

EMAT은 전기장과 자기장을 이용하기 때문에 그 하우징은 비금속 재질로 제작하는 것이 보통이며, 제안한 트랜스듀서에서도 3D 프린터를 이용하여 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 소재로 제작하였다.

4. CLP 두께 검사 트랜스듀서 성능 시험

제작된 트랜스듀서의 성능을 확인하기 위해 우선 Fig. 10과 같이 실험 장치를 구성하였다. 신호 발생을 위해 RITEC 사의 RPR-4000 pulser를 송신부 코일에 연결하고 중심 주파수 2 MHz의 1주기(cycle) 정현파(sine wave) 전류를 초당 10회 보내어 전단 초음파를 발생시켰으며, 수신부 코일에는 RITEC 사의 고주파 신호 앰프인 BR-640 receiver를 연결하여 신호를 측정하고 오실로스코프 및 MATLAB을 이용하여 신호를 저장하고 분석하였다. 신호의 송수신 효율을 확보하기 위해 pulser와 송신부 코일, receiver와 신호 측정 코일 사이마다 임피던스(impedance) 정합 회로를 삽입하였다. 제안한 트랜스듀서를 이용한 CLP 두께 검사 이동체 시스템을 설계할 경우, 이동체에는 트랜스듀서만 탑재하고 pulser, receiver 및 기타 시스템은 지상에 설치하여 트랜스듀서에 연결하는 방식으로 이동체의 하중을 줄이는 것이 합리적인 방안으로 판단된다.

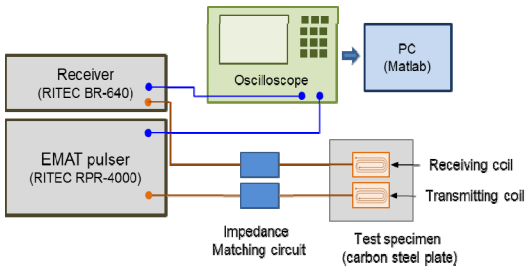


Fig. 10 Schematic diagram of the experimental setup

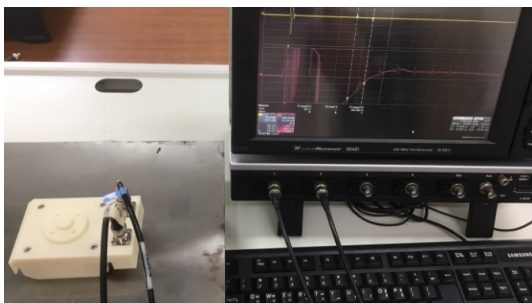


Fig. 11 Plate thickness measurement by using the proposed transducer

제안한 트랜스듀서를 이용하여 우선 두께 6.0 mm, 단면적 300 mm × 300 mm인 탄소강 판에서 별도의 접촉매질없이 신호를 발생시키고 측정하여 Fig. 12에 나타내었다. 0 ~ 1 × 10⁻⁵ (s) 에 나타나는 신호는 송수신 코일 간의 상호 유도(induction)에 의해 발생하는 전기적 신호로 EMAT에서는 불가피하게 발생한다. 실제의 초음파 신호는 1 × 10⁻⁵ (s) 이후에 반복적으로 측정되는데 이는 발생된 초음파가 시편의 두께 방향 상하부 경계에서 지속적으로 반사되면서 측정되기 때문이다. 초음파 신호의 인접한 피크 간 시간 간격과 초음파 속도로부터 판 구조물의 두께를 추정하는데, 그림과 같은 신호에서는 시간 간격을 여러 차례 측정할 수 있으므로 그 평균값을 이용하여 두께 측정치의 정밀도를 높일 수 있다. Fig. 12의 신호에 대해 인접 피크 간 시간 간격별로 추정한 두께 및 그의 평균값을 Table 1에 정리하였다. 평균 두께 추정치는 6.02 mm로 나타나 시편의 실제 두께를 매우 낮은 오차로 측정하는 것을 볼 수 있다.

제작된 두께 검사 트랜스듀서의 성능을 보다 엄밀하게 검증하기 위해 두께가 다양한 시편을 제작하였다. 운전 중인 원전의 CLP 두께와 관련하여 전력산업기술기준(KEPIC)⁽¹⁴⁾에서는 5.4 mm(정상값의 90%), 검사 현장에서는 5.6 mm를 최소 허용치로 규정하고 있다. 이러한 점을 고려하여 두께 5.0 mm에서 6.0 mm까지 0.1 mm 단위로 두께가 다른 11개의

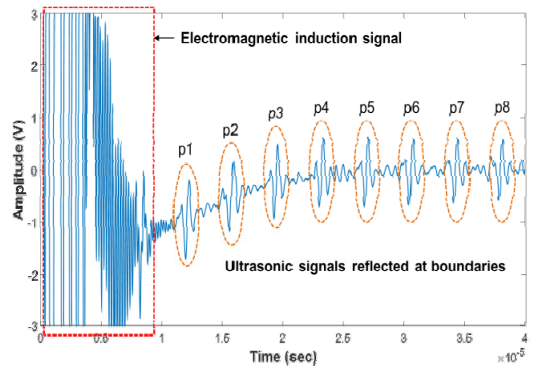


Fig. 12 The signal generated at the steel plate of 300 × 300 × 6 mm by the transducer

Table 1 Thickness of the plate in Fig. 11 measured by the suggested transducer

p1-p2	p2-p3	p3-p4	p4-p5	p5-p6	p6-p7	p7-p8	Avg.
6.04	5.97	6.03	6.05	6.02	6.01	6.04	6.02

시편을 만들었다(Fig. 13). 시험의 편의를 위해 각 시편의 단면적의 크기는 100 mm × 100 mm로 제작하였다. 트랜스듀서를 이용하여 시편에서 발생 및 측정된 신호의 일부를 Fig. 14에 나타내었다. 신호의 크기에는 큰 변화가 없으나 두께가 얇은 시편에서는 신호가 반사되는 시간 간격이 짧아지면서 같은 시간 구간 내에서는 더 많은 반사파가 수신되는 것을 볼 수 있다. 시편별로 측정된 신호의 반사파간 평균 시간 간격으로부터 두께를 추정하여 실제 시편 두께와 비교하였는데(Table 2), 매우 낮은 오차로 시편별의 실제 두께를 측정함을 확인하였다.

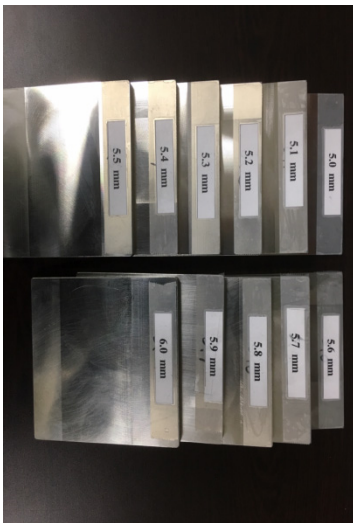
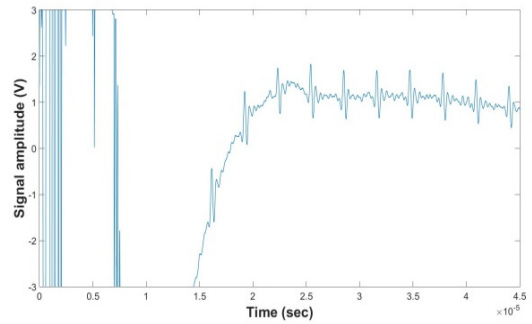


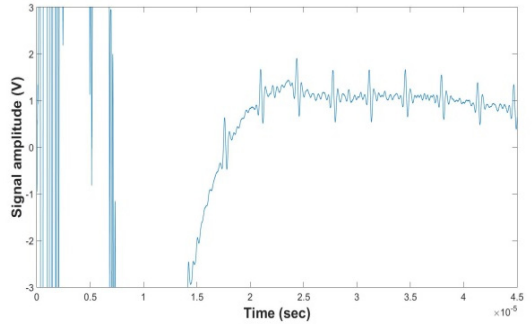
Fig. 13 Test specimens for the verification of working performance of the developed transducer

Table 2. Thickness of the specimens in Fig. 13 measured by the proposed transducer

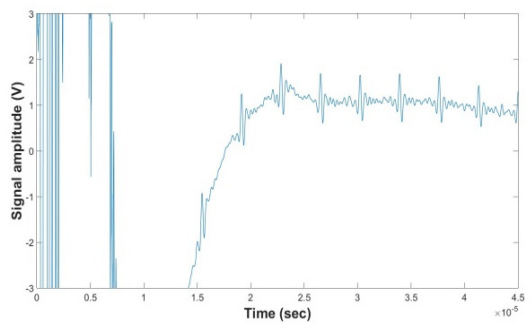
Thickness (mm)		Error (%)
Real (A)	Measured (B)	
5.00	5.02	0.40
5.10	5.09	0.20
5.20	5.20	0.00
5.30	5.30	0.06
5.40	5.39	0.08
5.50	5.50	0.00
5.60	5.61	0.00
5.70	5.72	0.37
5.80	5.81	0.13
5.90	5.92	0.34
6.00	6.00	0.00
Absolute error (average, %)		0.18



(a) d = 5.0 mm



(b) d = 5.5 mm



(c) d = 6.0 mm

Fig. 14 Signal generated by the proposed transducer at the test specimens in Fig. 13 (d : thickness of a test specimen)

결론적으로 CLP와 같은 판 구조물의 두께를 접촉 매질없이 측정할 수 있는 트랜스듀서를 설계하고 제작하여 다양한 두께의 탄소강 시편을 대상으로 시험을 수행하고 그 성능을 확인하였다. 추후에 제안한 트랜스듀서를 실제 적용하기 위해서는 표면 상태 및 두께 변화 양상이 다양한 시편에 대한 추가 시험을 수행하여 개선점을 찾고, 검사 요구 조건에 최적화된 코일의 설계 프로세스 등을 확립할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결 론

원전 격납건물 라이너 플레이트의 감육 여부 비 접촉 검사에 적용할 수 있는 전자기 음향 변환기 방식의 초음파 두께 측정 트랜스듀서를 제안하였다. 라이너 플레이트와 같이 얇은 판 구조물의 두께 측정에 적합한 형태의 음장을 발생하고 측정할 수 있도록 트랜스듀서의 핵심 요소를 설계하고 구성하였다. 제안한 설계안을 바탕으로 시험품을 제작하여 탄소강 시편의 두께를 접촉매질없이 정밀하게 측정할 수 있음을 확인하였다. 추후에는 보다 다양한 조건의 시편에 대한 시험을 수행하여 트랜스듀서를 개선하고, 이 트랜스듀서를 탑재한 이동체 기반의 검사 자동화 시스템을 제안할 계획이다. 향후 지속적인 연구를 통해 현재의 격납건물 라이너 플레이트 검사 효율을 증대시킬 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 출연금으로 지원을 받아 수행된 한국원자력연구원 주요사업의 성과임.

참고문헌

- (1) Paek, Y., Kim, S., Yoon, E. and Cha, H., 2018, "Introduction of Containment Liner Plate (CLP) Corrosion," *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, Jeju, Korea, May 17-18, pp. 189-190.
- (2) Petti, J. P., Naus, D., Sagues, A., Weyers, R. E., Erler, B. A. and Berke, N. S., 2011, "Nuclear Containment Steel Liner Corrosion Workshop: Final Summary and Recommendation Report," Sandia National Lab., Albuquerque, NM, SAND2010-8718.
- (3) Thompson, R. B., 1990, *Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers - Ultrasonic Measurement Methods*, 1st ed., Academic Press, Boston.
- (4) Hirao, H. and Ogi, H., 2017, *Electromagnetic Acoustic Transducers - Noncontacting Ultrasonic Measurement using EMATs*, 2nd ed., Springer Japan, Tokyo.
- (5) Hernandez-Valle, F. and Dixon, S., 2009, "Pulsed Electromagnet EMAT for High Temperature," *Proc. of 36th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Kingston, RI, Apr. 26-31, pp. 1135-1141.
- (6) Zheng, Y., Li, S., J. and Zheng, H., 2015, "The Study on EMAT Applied in Nondestructive Testing of Elevated Temperature Material," *Appl. Mech. Mater.*, Vol. 750, pp. 261-265.
- (7) Hirao, M. and Ogi, H., 1999, "An SH-wave EMAT Technique for Gas Pipeline Inspection," *NDT&E Int.*, Vol. 32, pp. 127-132.
- (8) Gao, H. and Lopez, B., 2010, "Development of Single Channel and Phased Array Electromagnetic Acoustic Transducers for Austenitic Weld Testing," *Mater. Eval.*, Vol. 68, No. 7, pp. 821-827.
- (9) Lunn, N., Dixon, S. and Potter, M. D. G., 2017, "High Temperature EMAT Design for Scanning or Fixed Point Operation on Magnetite Coated Steel," *NDT&E Int.*, Vol. 89, pp. 74-80.
- (10) Han, S., W., Cho, S., H., Jang, G., W. and Park, J., H., 2016, "Non-contact inspection of rail surface and internal defects based on electromagnetic ultrasonic transducers," *J. Intel. Mat. Syst. Str.*, Vol. 27, No. 3, pp. 427-434.
- (11) Bergander, M., J., 2003, "EMAT Thickness Measurement for Tubes in Coal-Fired Boilers," *Appl. Energ.*, Vol. 74, No. 3, pp. 439-444.
- (12) Park, J., H., Cho, S., H. and Ji, B., 2018, "Guided Wave Focusing Electromagnetic Acoustic Transducer for Flaw Detection of Laser Welding in Thin Metallic Sheets," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 38, No. 3, pp. 182-189.
- (13) Dixon, S., Petcher, P., A., Fan, Y., Maisey, D. and Nickolds, P., 2013, "Ultrasonic Metal Sheet Thickness Measurement without Prior Wave Speed Calibration," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, Vol. 46, 445502.
- (14) KEPIC MIE, 2015, "Class MC and Metallic Liners Components," Korea Electric Association, Seoul.