

비접촉 초음파 방식의 철도레일 내부결함 검출에 관한 연구

Research on the Non-Contact Detection of Internal Defects in a Rail using Ultrasonic Waves

한순우† · 조승현* · 김준우* · 허태훈*

Soon Woo Han, Seung Hyun Cho, Joon Woo Kim and Tae Hoon Heo

Key Words : Rail (철도 레일), Damage Detection (결함 검출), Internal crack (내부 결함), Non-contact (비접촉), Ultrasonics (초음파)

ABSTRACT

Non-contact detection of internal defects in a rail using ultrasonic waves is discussed in this paper. Cracks in a rail may be a cause of a serious railway accident such as derailment if left undetected. Concurrent rail inspection method based on ultrasonic testing using piezoelectric transducers has several limitations as it should keep physical contact with the rail. This work suggests a non-contact detection of internal defects in a rail using ElectroMagnetic Acoustic Transducers (EMAT) which can produce and measure ultrasonic waves in a rail without any couplant. The EMATs for rail inspection are designed and fabricated and their working performance is verified through a series of experiments on various types of internal defects in test rails. The effect of lift-off between the transducers and the rail on the generated signals is also discussed.

1. 서 론

철도 레일은 열차의 주행을 안내하고 운행 하중을 지지하며 지반으로 분포시키는, 철도의 핵심 요소이다. 레일에는 열차 통과 시 높은 하중이 지속적으로 가해지므로, 만일 그 내부에 결함이 발생하면 빠른 속도로 진전되어 레일을 파손시킬 수 있다. 따라서 레일의 결함을 적시에 검출하지 못한다면 레일이 파손되어 열차 탈선 등의 중대사고로 이어질 수 있다. 이러한 사고의 예로서는 2000 년에 영국 Hatfield 에서 발생한 열차 탈선사고를 들 수 있는데, 레일에 발생한 결함이 검출되지 않은 채로 진전되어 레일을 파손시키고 이에 따라 열차가 탈선된 경우로서 4 명이 사망하고 70 명이 부상하였다⁽¹⁾. 또한 통계에 따르면 1998 년 - 2008 년 사이에 미국

에서는 레일 두부(head) 등의 결함으로 인해 1200 여건의 크고 작은 탈선 사고가 발생하였으며 누적 피해 금액은 3 억 달러에 이른다⁽²⁾.

레일 결함이 철도 안전에 미치는 영향을 감안하여 전 세계의 철도 운영기관은 노선의 종류별로 일정 주기마다 탐상을 수행하고 있다. 또한 탐상의 효율성을 높이기 위해 산업계 및 학계와 함께 많은 연구를 수행하고 있다.

현재 가장 많이 사용되는 탐상 방식은 압전형 초음파 탐촉자를 적용한 레일 탐상차량 또는 수동탐상기를 이용하는 것이다. 이 장비들은 1960 년대부터 연구되어 현재 해외의 많은 업체들이 제작 및 판매 중이다. 통상의 압전 소자형 탐촉자와 마찬가지로 레일 탐상차량 및 탐상기의 경우에도 탐촉 유닛과 레일이 물리적으로 접촉해야 하며, 물 등의 접촉 매질(couplant)을 사용해야 한다. 이에 따라 탐촉자의 마모에 따른 주기적인 교환, 탐촉자 및 탐상 장치의 파손 가능성 상존, 레일 표면 상태에 따른 탐상 결과 변화 등 여러 문제가 제기되어 왔으며⁽³⁾, 탐상 속도에도 한계가 존재하고 있다.

† 교신저자; 정회원, 한국철도기술연구원

E-mail : scarus@krii.re.kr

Tel : 031-460-5537,

* 한국표준과학연구원

해외의 철도 운영기관, 시설 관리기관, 탐상 업체 및 학계 등에서는 압전 소자 기반 탐상 방식의 문제점을 극복하기 위해 비접촉 레일 결함 탐상에 대한 연구를 진행하고 있다. 현재 와전류(eddy current) 탐상, 누설 자속 탐상, 교류장(AC field) 탐상 및 고속 카메라 탐상 방식 등이 적용된 레일 탐상차량 또는 수동 탐상장치가 개발되어 레일의 표면 결함 검출에 적용되고 있다⁽⁴⁾. 그러나 이 방식들은 레일 표면 또는 표면 직하층(near surface)에 존재하는 결함만을 검출할 수 있다. 이동 중에 레일 내부의 결함을 검출하기 위해서는 초음파 탐상 기법을 적용하는 것이 필요하며, 비접촉 초음파 발생 가능성을 고려할 때 적용 가능한 대표적인 기법으로는 레이저 기반 초음파와 전자기 음향 변환기 기반의 초음파 발생을 들 수 있다. 레이저 초음파 기반의 레일 탐상에 관해서는 현재 미국에서 주도적으로 연구를 수행하고 있는데⁽⁵⁾, 레이저를 이용하여 초음파를 발생시키고 공기 결합(air-coupled) 탐촉자를 이용하여 신호를 측정한다. 이 방식은 레이저의 특성상 레일과 수 십 mm의 간격을 유지한 상태에서 비접촉으로 초음파를 발생시킬 수 있다. 그러나 신호 측정과 관련되어 지속적으로 연구되어야 할 부분이 있으며, 아직까지는 탐상 속도를 높이지는 못하고 있다.

전자기 음향 변환기(Electromagnetic Acoustic Transducer: EMAT)는 로렌츠(Lorentz) 힘 원리 또는 자기 변형(magnetostriction) 현상에 의해 금속체에 비접촉으로 초음파를 발생시키고 측정할 수 있다⁽⁶⁾. 따라서 고온체 또는 이동 중인 물체 등 비접촉으로 비파괴 탐상이 필요한 분야에 적용되고 있으며⁽⁷⁾, 영국에서는 이를 이용한 레일 표면 결함 탐상을 연구한 바 있다⁽⁸⁾.

국내에서는 철도 운영기관 별로 해외의 레일 탐상차량 및 수동 탐상기를 도입하여 자체적인 레일 관리 지침에 따라 주기적으로 레일의 상태를 점검하고 있으나, 레일 탐상 기법 자체에 대해서는 본격적인 연구개발은 이루어진 바 없다. 그러나 국내에서도 철도 운송 수요 및 철도 총 연장의 증가, 차량의 고속화 등 레일의 결함 발생 요소가 늘어나고 있어서 이에 대한 대책 마련이 필요한 시점이다. 또한 효과적인 레일 탐상 기법을 마련하기 위해 해외의 동향을 반영하여 비접촉식 탐상 기법에 대한 연구를 본격적으로 수행할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 EMAT을 이용한 철도 레일 내부 결함의 비접촉 검출에 대해 다루었다. 우선 EMAT을 이용한 초음파의 비접촉 발생 원리에 대해 기술

하였고, 레일 내부의 결함 탐상을 위해 제작한 EMAT에 대해 설명하였다. 이를 이용하여 인공 내부 결함을 가공한 레일 시편에 대해 실험을 수행하여 비접촉 결함 탐상 성능을 검증하였고, 레일과 EMAT 간 탐상 간극이 신호에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보았다.

2. 철도 레일 결함 검출용 EMAT

본 절에서는 레일에서의 비접촉 초음파 측정 및 발생을 위해 적용한 EMAT의 신호 발생 원리에 대해 기술하고, 레일 비접촉 탐상을 위해 본 연구에서 제작한 EMAT에 대해 기술하였다.

2.1 EMAT의 비접촉 초음파 발생 원리

Fig. 1(a)와 같이 전도체 표면에 코일을 근접시키고 교류를 흘려주면 전도체에는 와전류(eddy current) i 가 유도된다. 이에 더하여 영구자석 등에 의해 전도체에 수직 방향으로 향하는 자기장 \mathbf{B} 가 형성되어 있을 때 로렌츠 힘 원리에 의해 전기 전도체에 변형력 \mathbf{F} 가 발생한다⁽⁹⁾.

$$\mathbf{F} = i \times \mathbf{B} \quad (1)$$

그림에서와 같이 미앤더(meander) 코일을 사용하면 전기 전도체에는 교번하는 와전류가 발생하며 이에 따라 변형력의 방향 또한 주기적으로 바뀌게 된다. 이 경우 전도체 표면으로는 레일리(Rayleigh) 파가, 내부로는 체적파(bulk wave)인 종파와 수직 횡파(SV파)가 발생된다⁽¹⁰⁾.

발생되는 체적파의 전파 각도는 코일 간격 및 코일에 흐르는 교류 주파수에 의해 결정할 수 있는데 이는 EMAT의 장점 중 하나이다. 코일 간격을 d , 초음파의 파장을 λ 라 할 때 수직방향에 대한 초음파의 전파 각도 θ_0 (Fig. 1(b) 참조)는

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2d} \right) \quad (2)$$

와 같이 결정되는데⁽¹¹⁾ 교류의 주파수를 f , 체적파의 전파 속도를 c 라 하면 $\lambda = c/f$ 이므로 θ_0 는

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{c}{2df} \right) \quad (3)$$

와 같이 교류 주파수 및 코일 간격을 통해 조절할 수 있다.

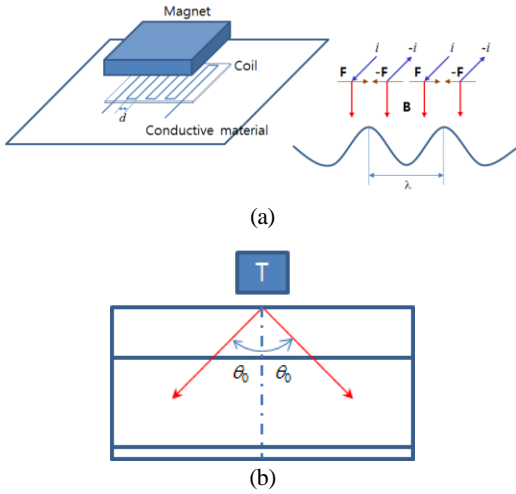


Fig. 1 Wave generation by an EMAT; (a) The working principle of an EMAT and (b) propagation angle θ_0 of bulk waves

전도체와 코일 간에 어느 정도 간극이 존재해도 전도체에는 와전류가 유도되므로 EMAT은 비접촉으로 초음파를 발생시킬 수 있다. 이를 이용하여 기존 압전 소자 기반의 레일 초음파 탐상과는 달리 레일 내부 결함을 비접촉으로 검출할 수 있는 것이다. 접촉식 레일 초음파 탐상에서는 탐촉자에서 초음파가 발생된 후 레일 내에 일정 각도로 회절되면서 침투하므로, 탐촉자가 이동 중 진동, 충격 등에 의해 조금이라도 움직이면 입사각이 변하여 레일 내에서의 전파 각도가 크게 변할 수 있다. 그러나 EMAT은 탐촉자가 레일에 접촉하지 않은 상태에서 레일 표면의 전도체 입자에 변형력을 전달하므로 초음파의 전파 각도를 항상 일정하게 유지할 수 있다.⁽¹²⁾⁽¹³⁾

2.2 레일 내부 결함에 의한 초음파의 반사 양상

내부에 결함이 존재하는 레일의 상부에서 θ_0 의 각도로 입사된 체적파는 Fig. 2에서와 같이 결함에 의해 반사되어 레일 상부로 다시 향하게 된다. 따라서 이 지점에 EMAT을 위치시켜 결함 신호를 검출할 수 있으며 본 연구는 이에 기초하여 레일 내부의 결함을 탐상하고자 하였다.

레일 두부 내부에 발생하는 결함은 횡방향 결함(transverse fissure) 또는 표면 바리에 의한 세부 균열(detail fracture) 등의 발생 빈도가 높는데⁽¹⁴⁾ 레일의 길이 방향을 x 라 할 때 이 결함에 의해 생성되는 불연속면은 $y-z$ 평면에 근접하여 전개한다

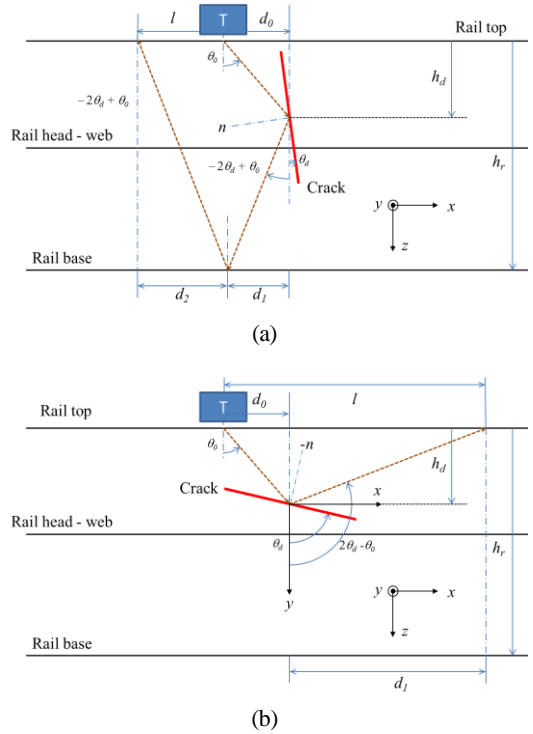


Fig. 2 Wave reflection by (a) a transverse crack and (b) a horizontal crack

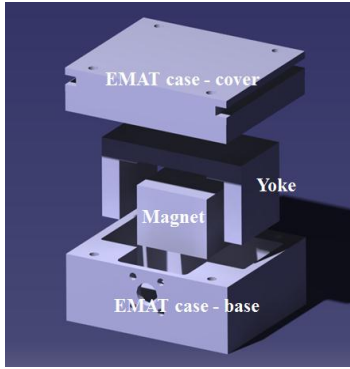
(Fig. 2(a) 참조). 이 경우 탐촉자 T에 의해 발생된 초음파가 결함에 의해 반사되어 레일 상부로 돌아오는 지점은 다음과 같이 계산할 수 있다. 결함의 주된 진전 방향이 수직(z 축)과 이루는 각도를 θ_d , 레일 상면에서 결함 중심까지의 깊이를 h_d , 레일의 높이를 h_r 이라 하면 T에 의해 발생하는 초음파의 전파각도 θ_0 가 $-\frac{1}{4}\theta_0 \leq \theta_d \leq \frac{1}{4}\theta_0$ 인 경우 기하학적 전개에 의해

$$\begin{aligned} d_0 &= h_d \tan \theta_0 \\ d_1 &= (h_r - h_d) \tan(-2\theta_d + \theta_0) \\ d_2 &= h_r \tan(-2\theta_d + \theta_0) \end{aligned}$$

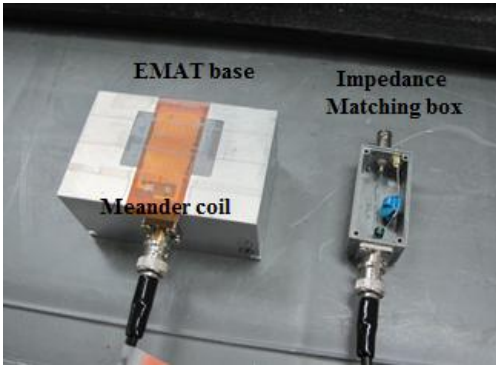
(d_0, d_1, d_2 에 대해서는 Fig. 2 참조)임을 알 수 있으며 반사파가 레일 상부에 도달하는 지점과 T 간 거리 l 은

$$\begin{aligned} l &= d_1 + d_2 - d_0 \\ &= -(2h_r - h_d) \tan(2\theta_d - \theta_0) - h_d \tan \theta_0 \end{aligned} \quad (4)$$

와 같이 계산할 수 있다. 따라서 이 지점에 탐촉자를 위치시켜 결함 신호를 검출할 수 있다.



(a) The illustration of the EMAT



(b) The coil and the impedance matching box

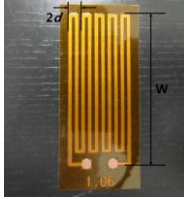
Fig. 3 The EMAT fabricated in the work

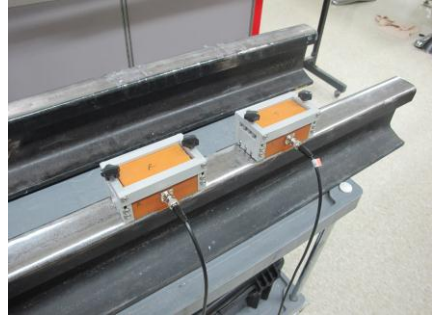
다른 내부 결함 유형 중 하나로 결함에 의한 불연속면이 수평으로 진전되는 수평 결함(horizontal crack)을 생각할 수 있다(Fig.2(b)참조). 횡방향 결함에 비해서는 발생 빈도가 낮으나 레일 두부 내부, 두부-복부 연결부 또는 복부(web)-저부(foot) 연결부 등 레일의 전 부위에 발생할 수 있고 결함이 커지면 레일의 각 부위가 분리되면서 레일이 파손될 우려가 있다⁽¹⁴⁾. 이 때 반사파의 진행 거리 l 은 $l = h_d \tan \theta_0 - h_d \tan(2\theta_d - \theta_0)$ 로 계산된다.

실제의 경우에는 결함의 진전 각도를 미리 알 수 없으므로 l 을 정확히 정할 수는 없지만, EMAT이 발생하는 초음파는 어느 정도의 폭을 갖고 전파하므로 그 일부는 예측 지점에 도달하게 된다⁽¹⁵⁾. 또한 코일 감김(turn) 수를 늘려 수신부 EMAT의 폭을 증대시키거나 다수의 EMAT을 수신부에 배열하여 결함에 의한 반사파의 수신 감도를 증대시키는 방안도 현실적으로 적용할 수 있다.

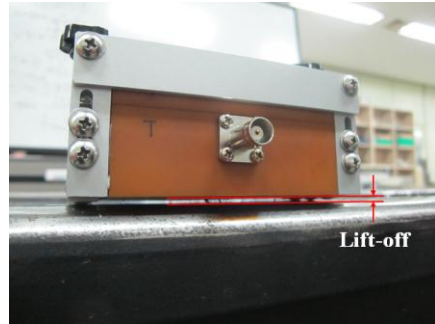
뒤에 논의하겠지만 EMAT을 이용한 레일 내부 결함 검출 실험을 위해 횡방향 결함과 수평 결함을 모사한 두 개의 시편을 제작하여 실험하였다.

Table 1 The coil of the suggested EMAT

Coil shape	Dimensions
	d (Coil pitch) : 1.06 mm N (No. of turn) : 4 w (Total width) : 50 mm



(a)



(b)

Fig. 4 The EMAT installed on the rail; (a) The EMATs mounted in the jig, (b) The lift-off between the EMAT and the rail

2.3 레일 탐상용 EMAT의 설계 및 제작

레일 내부 결함의 비접촉 탐상을 위해 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 EMAT을 제작하였다. 자기장 발생을 위해 크기 32×30×25 mm의 네오디뮴 자석을 적용하였고, 수직 방향의 자기장 크기를 최대화하고 가능한 한 코일에 균일한 자기장이 걸리도록 순철 재질의 C자형 요크(yoke)를 제작하여 삽입하였다. 유한 요소 해석을 수행한 결과 동일한 비접촉 간극에서 요크가 존재할 경우 코일에 걸리는

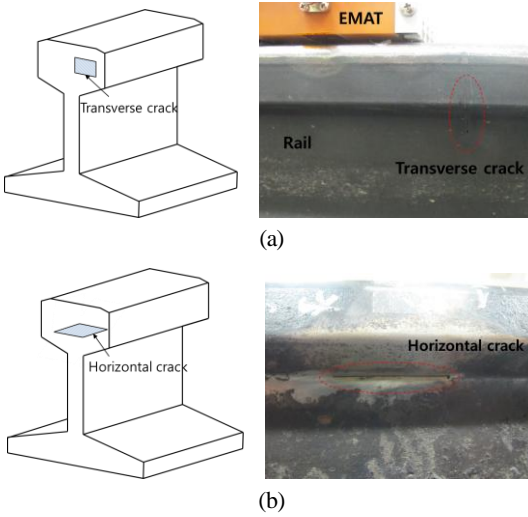


Fig. 5 Artificial rail cracks (a) The transverse crack and (b) The horizontal crack

자기장의 크기가 약 1.6배 커지는 것을 확인하였다.

EMAT의 아래 부분에는 레일에 와전류를 유도하기 위해 연성 회로기판(FPC) 형태로 제작된 미앤더 코일을 부착하였다. 2.1절에서 언급한 바와 같이 EMAT의 다른 구성은 변경하지 않고 패턴만 다른 코일을 부착하면 발생 또는 측정 초음파의 주파수, 발생 각도 및 모드 등을 사용자가 의도하는 대로 조절할 수 있으며, 이는 레일 결함 탐상에 EMAT을 사용할 경우의 장점 중 하나이다. 본 실험에서의 EMAT은 중심주파수 $f = 1$ MHz의 신호를 이용하여 $\theta_0 = 45^\circ$ 로 진행되는 수직 체적 회파를 발생시키도록 설계하였다. 이를 위해 Table 1과 같은 사양의 미앤더 코일을 제작하였다.

EMAT과 레일 간 비접촉 상태를 유지하면서 간극(lift-off)을 용이하게 조절할 수 있게 별도의 지그를 제작하여 레일 탐상용 EMAT을 장착하였다(Fig. 4). 이러한 구성은 개발된 트랜스듀서의 비접촉 결함 탐상 성능을 연구실 차원에서 평가하기 위한 것으로서, 궁극적으로는 탐상 간극 제어 장치 등과 연동된 결함 검출 시스템으로 제작할 예정이다.

3. 철도 레일 내부 결함의 비접촉 검출 실험

제작된 EMAT을 이용하여 레일 내부의 결함을 비접촉으로 탐상하는 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 제안한 방법의 결함 검출 성능을 우선적으로 확인하기 위해 송수신 EMAT을 움직이지 않는 상태에서 실험을 수행하였다. 길이 1m의 50 kgN 표

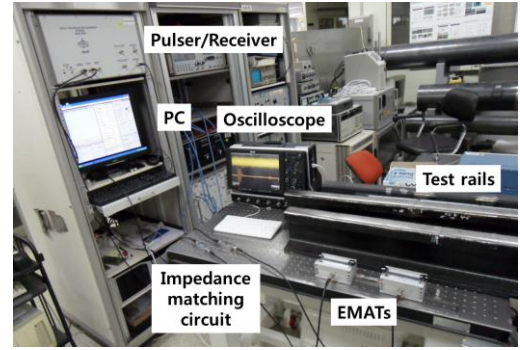


Fig. 6 The experimental setup

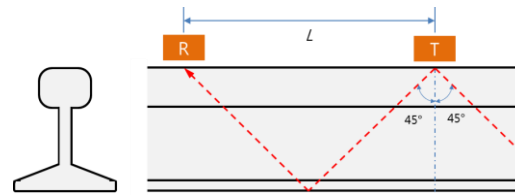


Fig. 7 Schematic diagram for bulk wave propagation in a healthy rail

준 레일 두 개를 마련하여 하나의 레일에는 두부와 복부에 걸쳐 수직 방향 길이 20 mm의 횡방향 결함을 (Fig. 5(a)), 다른 레일에는 두부와 복부 연결부에 길이 25 mm의 수평 방향 결함(Fig. 5(b))을 가공하였다. 실제의 내부 결함은 외부에서는 보이지 않으나 본 시편은 편의상 외부에서 관통하여 결함을 가공하였다.

실험 장치는 Fig. 6과 같이 구성하였다. 본 연구에서 제작한 레일 탐상용 EMAT을 임피던스 정합 회로를 거쳐 고풍력 pulser/receiver RITEC RAM-5000에 연결하고 pulser에서 생성된 10주기의 정현파 교류 신호를 EMAT에 입력하여 신호를 발생시켰다. EMAT의 송수신 신호는 오실로스코프 Lecroy 604Zi 및 PC를 통해 저장하고 분석하였다.

3.1 건전 레일에서의 비접촉 초음파 발생 및 측정

결함 레일에서의 실험에 앞서 우선 결함이 없는 건전 레일에서 EMAT을 이용하여 비접촉으로 초음파를 송수신하는 실험을 수행하였다. 이 경우 T에 의해 발생된 초음파는 Fig. 7과 같이 바닥에서 반사되어 레일 상부로 향할 경우로 예상된다. 초음파의 발생 각도를 고려하면 식 (4)에 의해 길이 방향 반사 거리 L 은 0.31 m로 계산되어, 이 위치에 수신

Table 2 Estimated arrival time of waves in a rail

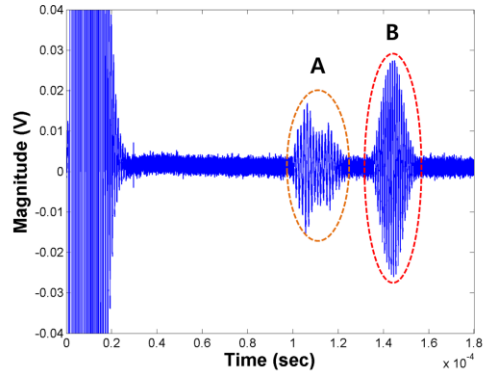
Wave mode	Wave velocity in steel (m/s)	Traveling distance (m)	Estimated arrival time
Rayleigh wave	2940	0.31	1.05×10^{-4} (s)
SV wave	3200	$0.153(\text{rail height}) \times 2 \times 1.414 = 0.433$	1.35×10^{-4} (s)

부 EMAT(Fig. 7의 R)을 설치하였다. 이 상태에서 레일과 EMAT 간 비접촉 상태를 유지하면서 신호를 발생시켜 측정하였다.

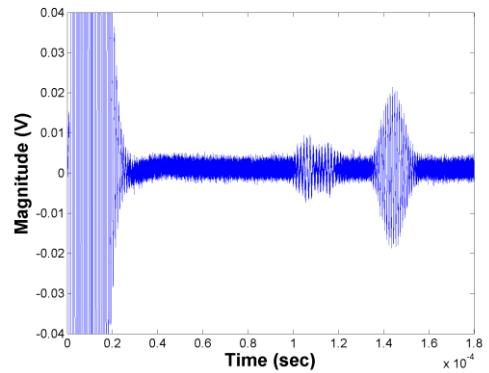
본 실험에서 사용한 EMAT은 레일 내부 45도 방향으로 수직 횡파를 발생시키도록 설계하였고 수신부 EMAT도 이 각도를 고려하여 위치시켰으므로 Fig. 7의 R에서는 수직 횡파 및 레일의 표면을 전파하는 레일리파만이 측정될 것으로 예측할 수 있다. 이 경우 각 초음파가 레일에서 진행한 거리 및 전파 속도(탄소강에서의 전파 속도 대입)를 고려하면 각 신호의 예상 도달 시간은 Table 2와 같다. 비접촉 간극 0.25 mm 상태에서의 실험 결과(Fig. 8(a))를 보면 1.0×10^{-4} (sec) 및 1.3×10^{-4} (sec)부근에 나타나는 두 개의 신호를 확인할 수 있는데 (이하 각각 신호 A 및 B) 계산 결과와 측정 결과를 비교하면 신호 A는 표면파, 신호 B는 수직 횡파임을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 탐상 간극을 1.0 mm로 늘린 후 초음파를 발생시킨 것으로서 간극 0.25 mm 인 경우에 비해 크기는 줄어들지만 양상은 유사한 신호가 측정되고 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 제안한 EMAT을 이용하여 레일에서 비접촉으로 초음파를 발생시키고 측정할 수 있었으며 비접촉 간극 1.0 mm에서도 유효한 신호를 발생시킬 수 있었다.

레일 내부의 다른 결함과 마찬가지로 레일이 설치된 상태에서는 레일 바닥면의 결함이 육안으로 검출되지 않아, 이 또한 레일 결함 탐상 분야에서 해결되어야 할 주제 중 하나이다. 그런데 제안한 EMAT에 의해 레일 바닥면까지 전파되고 다시 상부로 반사될 수 있는 크기의 초음파를 발생시킬 수 있다는 점은 레일 바닥면의 결함을 검출하는 데 제안한 방법을 활용할 수 있음을 의미한다.

Fig. 9는 본 연구에서 제작된 EMAT과 레일 간 탐상 간극이 신호에 미치는 영향을 살펴보기 위해 탐상 간극을 0 mm에서 1.5 mm까지 0.25 mm 간격으로 증가시키면서 신호를 측정하여, 수직 횡파(Fig. 8(a)의 신호 B와 같은)의 크기를 비교한 결과이다. 탐상 간극의 증가에 따라 신호의 크기가 작아지



(a)



(b)

Fig. 8 The ultrasonic waves produced and measured by the suggested EMAT in the test rail with no artificial defect: (a) the signal when lift-off is 0.25 mm and (b) lift-off is 1.0 mm

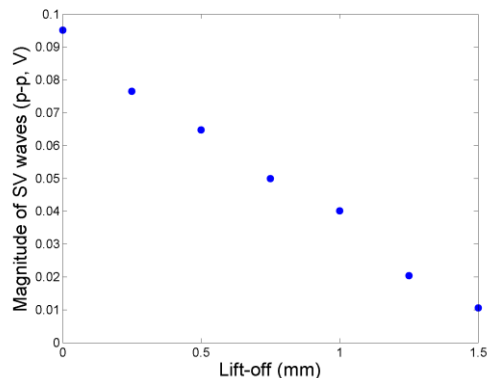


Fig. 9 Magnitude of SV waves in the healthy rail according to lift-off

는 하나 1.0 mm까지는 잡음 대 신호비가 충분히 큰 유의미한 신호를 얻을 수 있다. 본 연구에서와

같이 비접촉으로 결함을 검출하는 경우 신호의 질이 저하되지 않는 범위에서 탐상 간극을 증대시키는 것은 또 하나의 중요한 주제가 되며 이를 위한 연구를 추후 진행할 계획이다.

3.2 결함이 있는 레일에서의 비접촉 초음파 발생 및 결함 측정 실험

제작된 EMAT을 이용하여 건전 레일에서 비접촉으로 초음파를 발생시킬 수 있음을 확인한 후, 인공 결함 시편을 이용하여 레일 내부 결함의 비접촉 검출 가능성을 실험적으로 검증하였다.

(1) 횡방향 레일 결함의 비접촉 검출 실험

Fig. 5(a)의 횡방향 결함 시편에 대해 3.1 절에서와 구성을 동일하게 유지한 상태에서 실험을 수행하였다. 결함은 Fig. 10(a)에서와 같이 높이 20 mm의 크기로 횡방향으로 가공되어 있다. EMAT에 의해 발생한 초음파는 결함에 의해 반사된 후 바닥면에서 다시 반사되어 레일 상부로 향하게 된다. 결함의 중심 높이를 고려하면 이 반사파의 길이 방향 진행 거리 L 은 0.22 m로 계산되는데, 레일 내부에서 수직 횡파가 전파하는 총 거리는 3.1 절의 경우와 같으므로 결함에 의해 반사된 수직 횡파가 측정되는 시간은 앞 절에서의 수직 횡파 측정 시간과 거의 같을 것으로 판단된다. 또한 이 지점에서는 T에 의해 좌측으로 발생한 초음파는 측정되지 않을 것으로 예상할 수 있다.

횡방향 결함 레일에서 초음파를 발생시키고 측정된 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 두 개의 데이터는 모두 비접촉으로 초음파를 발생시키고 측정된 결과로서 탐상 간극은 각각 0.5 mm와 1.0 mm로 설정되어 있다. 탐상 간극 0.5 mm에서의 측정 결과(Fig. 11(a))를 3.1 절과 같이 분석해보면 0.7×10^{-4} (sec) 부근의 신호는 표면파 (0.22 (m) / 2940 (m/s) = 0.75×10^{-4} (sec))이며 뒤의 신호는 결함에 의해 반사된 수직 횡파 신호임을 알 수 있다. 탐상 간극을 1.0 mm로 증가시킨 경우에는 결함 신호의 크기가 약간 줄어들긴 하나 여전히 잡음 신호에 비해 뚜렷이 구분되는 것을 볼 수 있다(Fig. 11(b)). 결론적으로 본 연구에서 제작한 EMAT을 이용하여 레일 시편 내부의 횡방향 결함을 비접촉으로 검출할 수 있었으며, 1.0 mm의 탐상 간극에서도 유의미한 결함 신호를 검출할 수 있었다. 이는 본 시편의 결함보다 더 작은 크기의 결함도 검출할 수 있음을 보여준다.

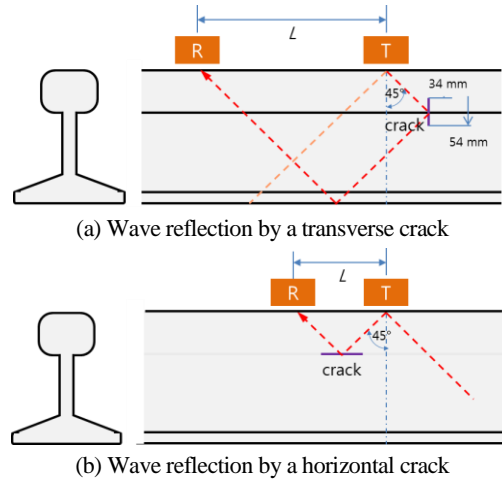


Fig. 10 Schematic diagram of the propagation of SV waves in the experiments

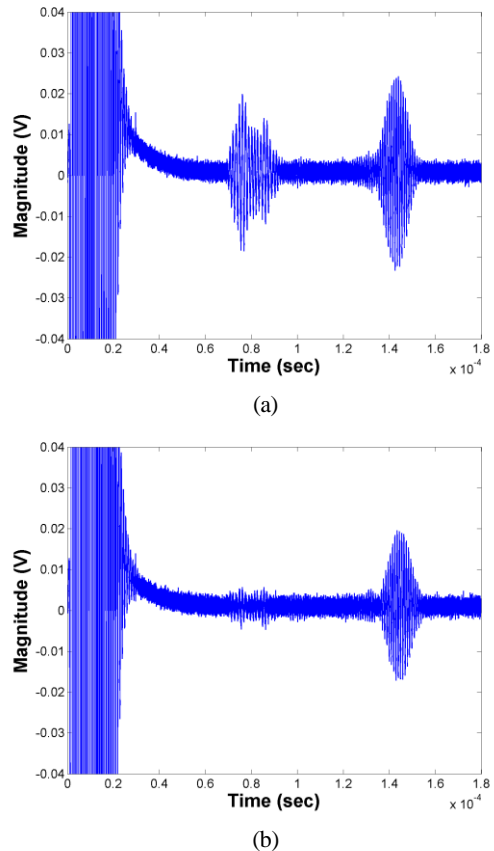
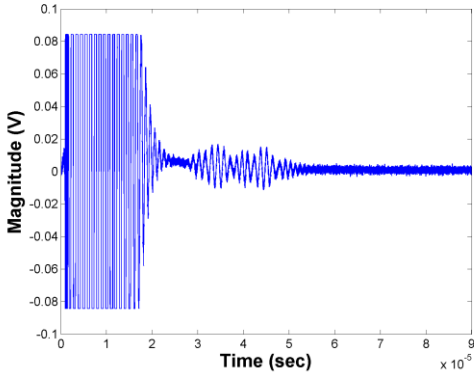
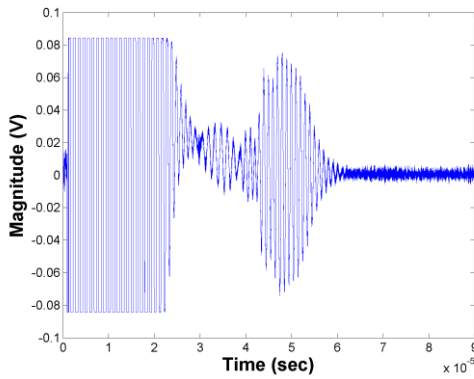


Fig. 11 The ultrasonic waves measured in the rail with the artificial transverse crack when (a) lift-off is 0.5 mm and (b) lift-off is 1.0 mm



(a)

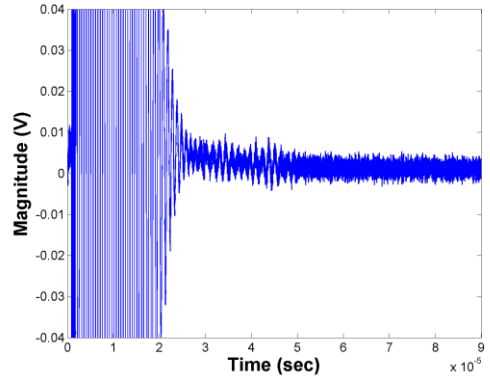


(b)

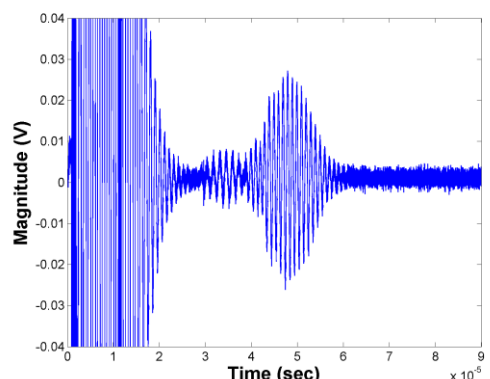
Fig. 12 The ultrasonic waves measured at $L = 0.1$ m in Fig. 10(b) when lift-off is 0.5 mm (a) The signal measured in the healthy rail (b) The signal in the rail with the horizontal crack

(2) 수평 방향 레일 결함의 비접촉 검출

결함에 의한 불연속면을 수평으로 가공한 레일 시편(Fig. 5(b))에 대해 비접촉으로 결함 검출 시험을 수행하였다. 앞 절에서와 동일하게 중심주파수 $f = 1$ MHz의 체적 수직 횡파를 45° 로 발생시켰으며 이때의 초음파는 Fig. 10(b)와 같이 전파할 것으로 예상할 수 있다. 레일 두부와 복부 사이에 결함을 가공하였으므로 레일 두부의 높이를 고려하면 결함에 의해 반사된 초음파의 길이 방향 전파 거리 L 은 0.1 m로 계산된다. Fig. 12는 탐상 간극 0.5 mm인 비접촉 상태에서 초음파를 발생시킨 결과를 결함 유무에 따라 비교한 것이다. 표면파의 경우 레일 내부의 결함 여부에 관계없이 전파하며 Fig. 12(a) 및 (b) 모두 3×10^{-5} (sec) 부근에서 측정되고 있다(표면파의 예측 도달 시간은 3.4×10^{-5} (sec)). 초음파의 전파 면적이 변하는 레일의 두부와 복부 경계부에



(a)



(b)

Fig. 13 The ultrasonic waves measured at $L = 0.1$ m in Fig. 10(b) when lift-off is 1.0 mm (a) The signal measured in the healthy rail (b) The signal in the rail with the horizontal crack

서는 건전한 레일의 경우에도 체적파의 일부가 반사될 수 있는데 체적 수직 횡파의 도달 예측 시간(4.4×10^{-5} (sec))과 실험에서의 도달 시간(4×10^{-5} (sec))을 비교하면 이러한 예상이 타당함을 알 수 있다.

수평 방향 결함이 존재하는 레일에서는 결함에 의한 반사파의 크기가 매우 커지는 것을 알 수 있다(Fig. 12(b)). 결함이 없는 경우에는 표면파와 경계부에 의한 수직 횡파의 반사파의 크기가 비슷하지만 결함이 존재하면 반사된 수직 횡파의 크기가 커지는데, 탐상 간극 1.0 mm에서 측정된 신호(Fig. 13)에서도 같은 양상을 관찰할 수 있다. 결론적으로 제안된 방식을 이용하여 레일 내부의 수평 방향 결함을 비접촉으로 검출할 수 있음을 확인하였다.

이상의 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 방식과 제작된 EMAT을 이용하여 레일 내부의 결함을

비접촉으로 탐상할 수 있음을 보였다. 또한 탐상 간극 1.0 mm에서도 결함을 유의미하게 검출할 수 있음을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 압전형 초음파 소자를 이용한 철도 레일의 결함 검출 시 물리적 접촉으로 인해 발생하는 문제를 극복하기 위해 비접촉 초음파 방식을 적용한 레일 내부 결함 탐상 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해 레일 내부에 비접촉으로 초음파를 발생시키고 측정할 수 있는 전자기 음향 변환기를 설계 및 제작하였고, 레일 내부의 결함에 따른 초음파의 반사 위치를 계산하였다. 레일 내부 결함 중 위험도가 높은 결함을 모사한 2종의 레일 시편을 가공하여, 제작된 비접촉 초음파 변환기를 이용하여 레일 내부 결함 시편을 검출하고자 하였다. 실험 결과 결함이 없는 레일에서 바닥면까지 진행되고 반사되는 내부 체적 초음파를 비접촉으로 발생시킬 수 있음을 확인하였고, 비접촉 간극이 초음파 신호에 미치는 영향을 살펴보았다. 제안한 방식을 이용하여 레일 시편 내부의 결함을 비접촉으로 탐상할 수 있었고, 탐상 간극 1.0 mm에서도 유효한 결함 신호를 검출할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 탐촉자가 정지한 상태에서 실험을 수행하였지만, 제안한 방식을 이용하여 이동 중에도 결함 검출이 충분히 가능하리라 판단되며 현재 이를 비롯하여 탐촉자의 성능을 추가적으로 개선하는 연구를 진행 중으로서 이른 시일 내에 본 연구 성과를 레일 탐상 현장에서 실용화할 수 있으리라 전망한다.

참 고 문 헌

(1) Office of Rail Regulator, 2006, Train derailment at Hatfield, Report of the Independent Investigation Board of UK.
 (2) <http://safetydata.fra.dot.gov>
 (3) Clark, R., 2004, Rail Flaw Detection: Overview and Needs for Future Developments, NDT&E International, Vol. 37, pp. 111-118.
 (4) Han, S. W. and Cho, S. H., 2011, Review of Non-destructive Evaluation Technologies for Rail Inspection, Journal of KSNT, Vol. 31, No.4, pp. 398-413.
 (5) Coccia, S., Bartoli, I., Marzani, A., di Scalea, F.

L., Salamone, S. and Fateh, M., 2011, Numerical and Experimental Study of Guided Waves for Detection of Defects in the Rail Head, NDT&E International, Vol. 44, pp. 93-100.

(6) Hirao, M. and Ogi, H., 1999, An SH-Wave EMAT technique for gas pipeline inspection, NDT&E International, Vol. 32, No. 3, pp. 127-132.

(7) Cho, S. H., Park, J. H., Kwon, H. S., Ahn, B. and Lee, S. S., 2009, Development of an SH Wave Magnetostrictive Transducer Module for Guided Wave Testing of Plate Structures, Journal of KSNT, Vol. 29, No.2, pp. 122-129.

(8) http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/ultra/research/rail_inspection

(9) Hirao, M. and Ogi, H., 2003, EMATs for Science and Industry, Kluwer, Boston.

(10) Ogi, H., Hirao, M. and Ohtani, H., 1998, Line-Focusing of Ultrasonic SV Wave by Electromagnetic Acoustic Transducer, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 103, pp. 2411-2415.

(11) Thomson, R. B., 1990, Measurement with EMAT Transducer, Physical Acoustics, Vol. XIX, Academic Press Inc., New York.

(12) Lee, H. and Kim, H., 2009, Effect of Biasing Magnetic Fields on the Patch-type Magnetostrictive Transducers, Journal of KSNVE, Vol. 19, No. 11, pp. 1177 – 1183.

(13) Lee, J. K., Kim, H. W., Lee, H. and Kim, Y. Y., 2011, Basic Experiment for Lamb Wave Focusing by Phased Magnetostrictive Transducers in a Plate, Journal of KSNVE, Vol. 21, No. 3, pp. 227-233.

(14) International Union of Railways, 2002, UIC Code 712R – Rail Defect, UIC, Paris.

(15) Workman, G. L., Kishoni, D. and Moore, P. O., 2007, Nondestructive Testing Handbook Vol. 7 - Ultrasonic Testing, American Society for Nondestructive Testing, Columbus.