

## 철도 레일의 결함 검출을 위한 비파괴탐상 기술

### Review of Non-Destructive Evaluation Technologies for Rail Inspection

한순우\*<sup>†</sup>, 조승현\*\*

Soon-Woo Han\*<sup>†</sup> and Seung-Hyun Cho\*\*

초 록 철도 레일의 주기적인 탐상은 레일 결함으로 인해 발생할 수 있는 철도 중대사고를 미연에 방지할 수 있는, 철도 안전 유지의 중요한 요소 중 하나이다. 본 논문은 현재 철도 레일 탐상에 적용되고 있거나, 적용을 위해 연구 중인 비파괴탐상 기법들에 관해 기술하였다. 레일에 발생하는 결함 유형에 대해 우선 언급하였고, 레일 탐상에 가장 많이 적용되고 있는 압전형 탐촉자 기반의 초음파탐상 기술에 대해 정리하였다. 접촉식 초음파 레일 탐상 기술에 대한 대안으로서 연구 중이거나 시험 중인 비파괴탐상 기법들에 대해 기술하고, 각 기법 별로 레일의 표면 및 내부 결함 검출 가능 여부에 대해 살펴보았으며 여러 탐상 기법들에 대한 비교를 통해 향후 레일 탐상 기술 개발에 활용하고자 하였다.

주요용어: 레일 결함, 비파괴검사, 비접촉 탐상

**Abstract** For railway safety, it is very important to detect damages of rails at their early stage because any undetected damage in a rail can break the rail and cause a serious railway accident. In this paper, several NDT applicable to rail inspections are described. Major damage types in rails are discussed first and the rail inspection technology using conventional piezoelectric ultrasonic transducers, which is widely adopted for damage detection of rails, is explained. Other NDT being researched or tested for rail inspection are also discussed as complementary technologies to the concurrent contact type ultrasonic inspection. Characteristics of each rail inspection technologies are evaluated in order to provide requirements for future development of a new rail inspection method.

**Keywords:** Rail Damage, Nondestructive Evaluation, Noncontact Detection

#### 1. 서 론

철도 레일은 열차가 탈선되지 않고 주행할 수 있도록 안내하며 열차의 하중을 지지하고 지반으로 분포시키는 철도 시설의 핵심 요소이다. 레일에는 열차운행에 따라 높은 하중이 반복적으로 가해지므로, 레일에 발생한 결함은 매우 빠르게 진전되어 레일 파손으로 이어질 수 있다. 따라서 레일 결함을 조기에 검출하지 못하면 레일 파손에 따른 열차 탈선 사고가 발생할 가능성이 높

다. 2000년 이후 레일 결함이 1차 원인이 되어 발생한 국외의 열차 탈선사고를 Table 1에 정리하였는데, 매우 큰 인명 및 재산 손실을 초래하였다[1-4].

미국에서 1975년 - 2006년 사이에 궤도의 여러 결함에 의해 발생한 열차 탈선사고 중 레일 자체의 결함에 기인한 사고는 전체의 27%로서 높은 비율을 차지하고 있다[5]. 또한 1998년 - 2008년 사이에 미국에서 레일 두부 결함 등으로 인해 1200 여건의 크고 작은 탈선 사고가 발생하였으

며 이로 인한 총 피해 금액은 약 3억 달러에 이른다는 분석이 있다[6]. 이에 해외 철도 선진 운영국에서는 높은 신뢰성과 탐상 속도를 가진 레일 결함 검출 시스템을 구축하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

현재 레일 결함 검출을 위해서는 압전 소자 기반의 접촉식 초음파 탐상 기법이 보편적으로 적용되고 있으며 상용화의 역사가 긴 만큼 탐상의 신뢰도가 높다고 평가되고 있다. 그러나 이 기법은 탐촉자와 레일의 물리적 접촉으로 인한 여러 문제점을 갖고 있어서 국외의 여러 연구기관에서는 이를 개선하기 위해 다양한 방식의 비접촉 레일 탐상 기법에 대해 연구하고 있으며 일부 결과는 실용화되어 있다. 또한 탐상 효율을 높이기 위해 탐상 속도의 고속화 및 유도 초음파 기반의 장거리 레일 탐상 등에 대해서도 여러 연구가 진행되고 있다.

국내에서는 철도사고 관련 규정인 국토해양부의 '철도사고 등의 보고에 관한 지침' 등을 통해 레일 파손을 증대한 사고 원인으로 분류하여 관리하고 있으며, 레일 파손에 의한 탈선 사고는 아직 발생된 바 없다. 그러나 레일 파손으로 인한 운행 장애<sup>1)</sup>가 계속 발생하고 있으며(2003년 - 2008년 사이 총 20건<sup>2)</sup>) 2005년 - 2007년 3개년간 코레일의 일반 철도 구간에서는 다수의 레일 파손 사례가 보고된 바 있다[7]. 이러한 점을 고려하면 국내에서도 레일 파손에 의한 열차 탈선 사고의 가능성이 상존함을 알 수 있다. 또한 국내 철도 총 연장의 증가, KTX 등으로 대표되는 철도의 고속화 및 고유가로 인한 철도 운송 수요 증대 등의 철도 운영 환경 변화는 레일 결함의 발생 및 진전 가능성을 증대시키는 요인이 되고 있다.

레일 결함 탐상 또는 레일 파손 개소 확인을 위해 국내에서는 레일 탐상차 운행, 위험 지점에 대한 수동 탐상, 선로 순회 시 육안 탐상 및 신호 장애 검지 등의 방법을 주로 사용하고 있다. 그러나 육안 탐상 또는 신호 장애 검지 등을 통해서 레일의 미세한 결함을 초기에 검출하기

어려우며, 레일 탐상차의 경우 탐상 효율성의 증대에 대한 개선 요구가 제기되어 왔다. 그러나 레일 탐상 기법의 고도화를 위한 국외의 시도와는 달리 국내에서는 해외의 탐상 장비 및 기술에 의존하고 있으며 자체적인 연구개발이 아직 미흡한 상태이다. 그러나 전술한 철도 운영 환경의 변화와 고속 철도 자체 개발국의 위상을 고려하면 철도 안전에 직결되는 레일 결함 탐상 기술에 대한 국내의 연구개발 움직임이 본격화되어야 할 시점이라 판단된다.

이에 본 논문에서는 현재 철도 레일의 결함 검출에 적용되고 있거나 적용하기 위해 해외에서 연구개발 중인 비파괴 탐상 기술을 살펴보고 이의 장단점을 정리하여 향후 레일 탐상 기술의 자체적인 연구 개발에 활용하고자 하였다.

## 2. 철도 레일의 결함 유형

철도 레일은 통과하는 열차의 종류 및 속도에 맞추어 몇 가지의 규격화된 단위 길이 당 중량 및 단면 형상을 갖지만 공통적으로는 Fig. 1(a)와 같이 두부(head), 복부(web), 저부(foot)의 세 부분으로 나눌 수 있다. 결함은 레일의 모든 부위에서 다양한 양상으로 발생할 수 있는데, 결함 양

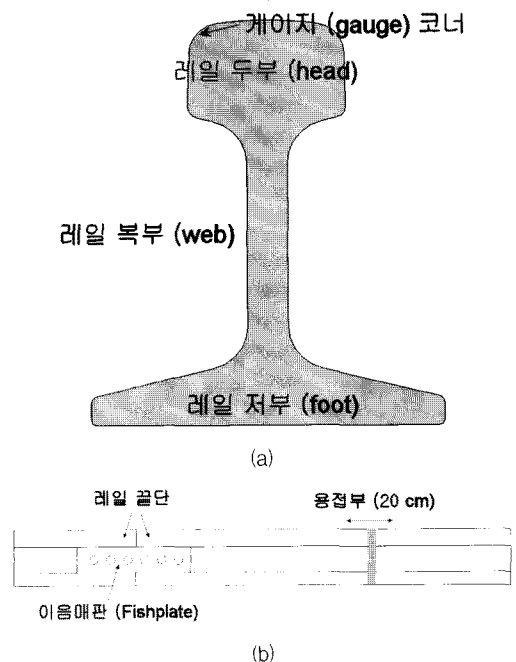


Fig. 1 Shape and name of part of a common rail: (a) Cross sectional view and (b) Side view

1) '철도사고 등의 보고에 관한 지침'의 정의를 따르면 운행 장애는 고속열차 및 전동열차의 경우 10분, 일반 여객열차의 경우 20분, 화물열차 및 기타열차는 40분 이상 지연 운행하는 것을 의미한다.

2) 코레일 전산관리 시스템(KROIS) 운행 장애 자료

Table 1 Railway derailment accident due to rail defects

발생장소 (국가)	발생년도	사고 양상	피해 규모
Hatfield (영국)	2000	레일 게이지 코너부 결함에 따른 레일 파손으로 인한 탈선사고	사망 4명, 중경상 70명
Nodaway (미국)	2001	레일 내부 결함에 기인한 레일 파단	사망 1명, 중경상 96명
Possum Point (미국)	2006	분기부 레일 결함으로 인한 열차 탈선사고 발생	9명 부상
Painsville (미국)	2007	레일 결함으로 인한 화학물질 운반열차 탈선	화차 26량 파손 및 화물 소실

Table 2 UIC Code for rail defects (UIC 712R)

1자리	2자리	3자리	4자리
발생 위치	발생 부위	패턴 및 특성	부가적 특성 및 차이
1. 레일 이음매 부 2. 비 이음매 부	0. 레일 전 부위 1. 레일 두부 3. 레일 복부 5. 레일 저부	1. 횡방향 결함 2. 수평 결함 3. 종방향 수직 결함 4. 부식 5. 이음매 부 볼트 구멍 통과 결함 6. 이음매 부 볼트 구멍 비 통과 결함 9. 파임	
	2. 레일 두부 표면	0. 마모 1. 표면 결함 2. 박리(shelling) 3. 열상(crushing) 4. 국부 파손 5. 차륜 공전 7. 주행면 결함 및 국부적 침하	
3. 레일 손상에 의한 결함	발생 부위	손상의 원인	-
	0. 레일 전 부위	1. 외부 충격 2. 기계가공 오류 3. 영구 변형	
4. 용접부 및 연마부 결함	용접 방법	패턴 및 특성	부가적 특성 및 차이
	1. 플래시 버트 용접 ...	1. 횡방향 결함 2. 수평결함 또는 박리	

상별 발생 빈도에 관한 미국 연방철도국(Federal Railroad Administration: FRA)의 1998년 - 2008년 통계를 살펴보면 레일 두부의 횡방향 열개(fissure)<sup>3)</sup>, 복합 열개(fissure)<sup>4)</sup>와 세부 균열(detail fracture)<sup>5)</sup> (Fig. 2 참조)이 전체 레일 결함의 35%를 차지하여 결함 유형 중 가장 빈번하게 나타난

다[6,8]. 레일 결함을 단순히 표면 결함과 내부 결함으로 분류할 수도 있다. 표면 결함의 경우 내부 결함에 비해 상대적으로 빈번하게 발생하지만, 많은 경우 외부에 드러나 있어서 초기에 발견이 가능하고 레일의 주기적인 연마를 통해 제거하거나 그 발생을 예방할 수 있다. 이에 비해 레일 내부 결함은 레일 제조 기술이 발전하면서 발생빈도가 많이 줄어들었으나 발생할 경우 겉으로 드러나지 않아 초기에 발견하기 어렵다. 본 논문에서도 레일 결함을 크게 표면 결함과 내부 결함으로 분류하고 각각의 비파괴 탐상 기술들이 어떠한 결함을 주되게 검출할 수 있는지 정리하였다.

- 3) 레일 두부 내의 특정 결정립 중심에서 시작되어 레일 길이 방향에 수직인 면을 따라 레일 표면으로 퍼져 나간 형태의 결함
- 4) 레일 두부의 수평 결함이 발전하면서 레일 길이 방향에 수직인 면으로 전파하는 결함
- 5) 박리 등에 의해 레일 표면 또는 표면 부근에서 시작되어 레일 두부 전체로 전파하는 결함

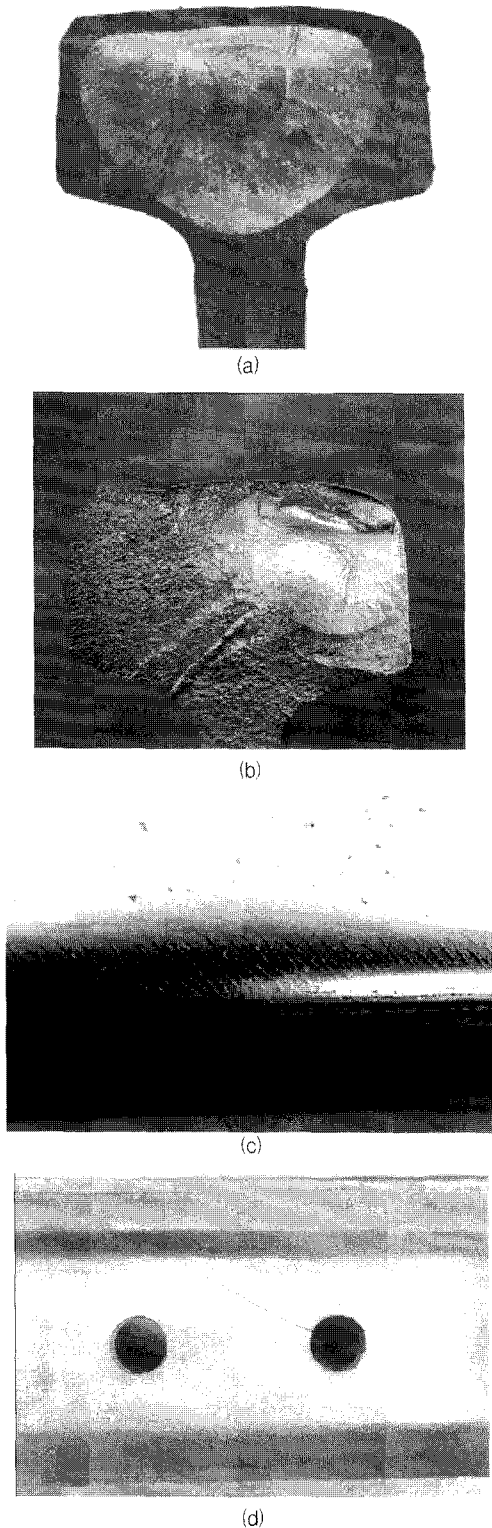


Fig. 2 Rail defects: (a) A transverse fissure, (b) A detail fracture, (c) A rail head check and (d) a web crack originated from bolt hole [9]

국제철도연맹(International Union of Railways: UIC)에서는 레일 결함에 대한 국제적 관리를 위해 결함 발생 위치, 부위, 특성 및 원인 등에 따라 4자리의 코드를 부여하였으며(Fig. 1(b) 및 Table 2 참조) 결함의 종류에 따른 대처 방안 및 관리 방법 등을 정리하였다[9].

세계 각국의 철도 운영기관 또는 시설 관리기관에서는 UIC의 기준과 유사하게 자체적인 관리 코드 및 체계를 갖고 레일 결함을 관리하고 있다. 예를 들어 호주 철도레도공사(Australian Rail Track Corp.: ARTC)에서는 레일 결함 종류 및 크기 별로 분류 코드를 할당하고 결함 유형별로 필요한 유지보수 방안을 정리한 레일 결함 관리 기준을 수립한 바 있으며[10], 국내에서는 국토해양부의 '선로정비지침'에서 레일 두부와 용접부에 발생하는 결함을 그 심각성에 따라 등급화하고 관리하기 위한 레일 검사기준을 제시하고 있다[11].

### 3. 레일 결함 검출을 위한 비파괴검사 기술 현황

레일 결함 검출을 위해서 전 세계적으로 가장 많이 사용되는 비파괴검사는 초음파 탐상 기법이다. 여러 국가의 철도 운영기관 또는 시설 관리기관에서는 압전형 초음파 탐촉자를 탑재한 레일 탐상차 및 수동형 탐상기를 운용하여 레일의 결함 유무를 정기적으로 점검하고 있다. 그러나 압전형 탐촉자를 이용한 탐상 시에 레일과의 물리적 접촉으로 인해 여러 문제가 발생하고 있어서 해외에서는 비접촉 탐상 방식을 포함한 레일 비파괴검사 기술에 대해 활발히 연구하고 있다. 비접촉 탐상의 경우 레일 표면 상태에 영향을 받지 않으며, 탐촉자가 레일과 접촉하지 않으므로 탐상 속도의 고속화가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 아직까지는 압전형 탐촉자를 이용한 기존의 접촉식 초음파 탐상 방식에 비해 신호의 출력 및 민감도(sensitivity)가 다소 미흡하여 신뢰성을 지속적으로 개선시켜야 할 필요가 있다.

본 절에서는 우선 현재 레일 탐상에 가장 많이 적용되고 있는 압전형 탐촉자 기반 초음파 탐상 기법을 소개하고, 이에 대한 보완책으로서 현재 해외에서 연구 중인 비파괴검사 기법들에 대해 기술한 후 각 방법들의 특성 및 장단점을 비교하였다.

### 3.1. 압전형 탐촉자 기반 초음파 레일 탐상 (Ultrasonic Inspection Using Piezoelectric Transducer)

수 MHz 대역의 중심주파수를 발생시키는 압전형 초음파 탐촉자를 이용하여 레일에 초음파를 발생시켜서 레일 내부에 존재하는 결함을 주로 검출한다. 다양한 양상의 레일 결함을 검출하기 위해 경사각이 다른 초음파 탐촉자를 여러 개 사용하는 것이 보통인데, 예를 들어 경사각 0° 탐촉자를 장착하여 레일 저부 결함을 탐상하고 경사각 70° 탐촉자를 이용하여 레일 두부 결함을 탐상한다(Fig. 3(a) 참조)[12]. 압전형 탐촉자를 이용한 레일 탐상은 1949년에 처음 소개되었으며, 1960년에 탐촉자를 탑재한 레일 탐상차량이 개발되어 탐상의 자동화 및 고속화가 가능하게 되었다[13]. 레일 탐상차량이 도입된 이후 레일 결함 탐지율은 평균 50% 증가하였으며, 탐상 시간은 평균 60% 감소하여 탐상의 효율성이 획기적으로 증대되었다.

이러한 레일 탐상 차량은 여러 업체들에 의해 상용화되어[13-17] 많은 철도 운영기관 및 시설관리기관에서 레일 탐상에 사용하고 있다. 탐상차량의 사양 상 평균 탐상속도는 70 km/h 부근이지만, 실제 운용 시에는 40 km/h 정도의 속도로 탐상을 수행한다. 탐상 시 결함이 발견되면 페인트 등을 레일에 분사하여 결함 위치를 표시하거나 결함 발견 위치의 GPS 정보 및 운행 거리 정보를 연동하여 결함 위치를 기록한다. Fig. 3(b) 및 (c)는 각각 레일 탐상차량의 외관과 B 스캔 형태로 제시된 탐상 결과의 예를, Table 3에는 레일 탐상차를 이용하여 탐상 가능한 레일 결함의 예를 나타내었다[15]. 탐상차를 이용할 경우 레일 분기부, 이음매 부 등의 결함이 검출되지 않을 수 있는데, 이를 보완하기 위해 여러 탐상차량 제작 업체에서는 압전형 탐촉자를 탑재한 수동형 탐상기를 공급하고 있다. Fig. 3(d)는 수동 탐상기의 일례를 보여주고 있는데, 이 탐상기에는 중심주파수 2.25 MHz의 전단파 발생용 탐촉자가 여러 개 부착되어 있으며 탐상 결과를 A 스캔 형태로 표시한다.

압전형 탐촉자 탐상의 경우 다른 경우와 마찬가지로 레일 탐상 시에 기계적 임피던스 정합을 위해 접촉 매질(couplant)을 레일에 분사해야 하

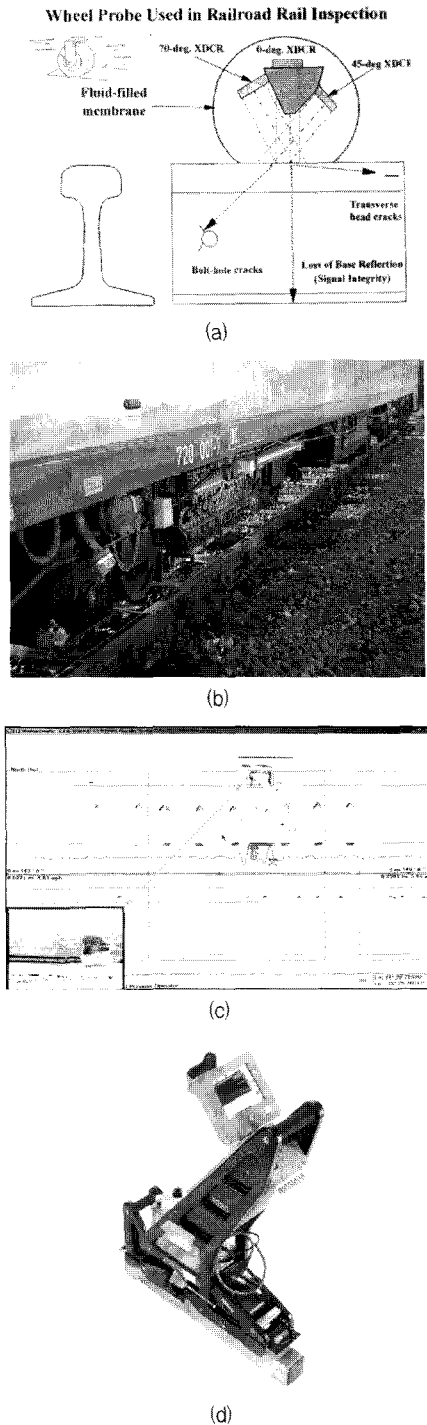


Fig. 3 Commercial ultrasonic rail inspection devices; (a) Measurement principle (www.ndt-ed.org), (b) A rail inspection car (www.evs-sm.com), (c) An example of rail defect detection by a rail inspection car (www.sperryrail.com) and (d) Manual ultrasonic rail scan device (www.sperryrail.com)

Table 3 Defects in a rail detectable by a commercial rail inspection car (case of SPENO US1-3)

결함 유형	발생 부위	탐상 가능 균열 최소 크기	탐촉자 경사각
수평결함	레일 전체	12 mm	0°
볼트구멍 결함	이음매 부 볼트구멍 주위	44 mm (볼트구멍 포함)	35°
경사균열 결함	레일 두부, 용접부	레일 단면적 대비 2% 감소 시	70°
수직 결함	레일 두부와 복부의 경계부	100 mm	55°

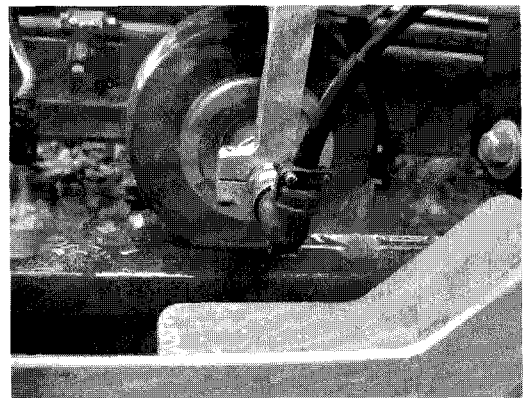
며, 탐촉자 또는 관련 유닛이 레일과 물리적으로 접촉해야 한다. 탐상차량을 오랜 기간 운용해 온 영국에서는 이로 인해 다음과 같은 문제들을 보고한 바 있다[18].

- 기온이 영하인 경우 레일 표면에 얼음이 존재하여 탐상을 방해함
- 레일 표면에 녹이 있거나 낙엽, 부엽토 등이 쌓여 있는 경우 감도가 떨어짐
- 레일과의 접촉 또는 이음매부 단차와의 충격으로 인해 탐촉자 유닛 및 탐상 시스템이 파손될 수 있음
- 탐상에 따른 탐촉자의 마모 및 정기적 교환으로 인해 부가적 비용 발생

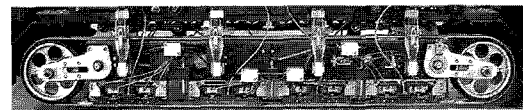
접촉 매질 사용 및 물리적 접촉 문제를 해결하기 위해 최근에 개발된 레일 탐상 차량은 속이 빈 고무 재질의 롤러 내부에 탐촉자를 배열하고 그 주변에 유체를 봉입하거나(Fig. 4(a) 참조)[13], 탐촉자와 레일 사이에 썰매(sled) 형태의 윤활판을 두어 접촉 매질을 대신하고 있다(Fig. 4(b) 참조)[16-17]. 그러나 압전형 탐촉자는 어떠한 형태로도 물리적 접촉이 필요하다는 점에서 이를 근본적으로 해결하기 위한 비접촉 탐상 방안들이 연구되고 있다.

### 3.2. 와전류탐상(Eddy Current Testing: ECT)

전기 전도체에 코일을 근접시켜 교류를 흘리면 전도체 주변에 자기장이 형성되며, 전도체 내에는 자기장의 변화를 방해하는 방향으로 와전류가 유도된다. 이로 인해 공간상의 자기장 크기가 변화하면서 코일의 전기적 임피던스를 변화시킨다. 전도체 상에 결함이 존재할 경우와 그렇지 않은 경우에 임피던스 차이가 크게 나타나는데, 와전류 탐상은 이에 기반을 두어 비접촉으로 결함을 검사할 수 있다[19]. 기존에는 와전류를 발생시키기 위해 코일에 단일 파장의 전류만을 흘려주었



(a)



(b)

Fig. 4 Methods to couple piezoelectric ultrasonic transducers and rail; (a) Elastic wheel probe ([www.starmans.net](http://www.starmans.net)) and (b) Sled type sliding plate ([www.speno.ch](http://www.speno.ch))

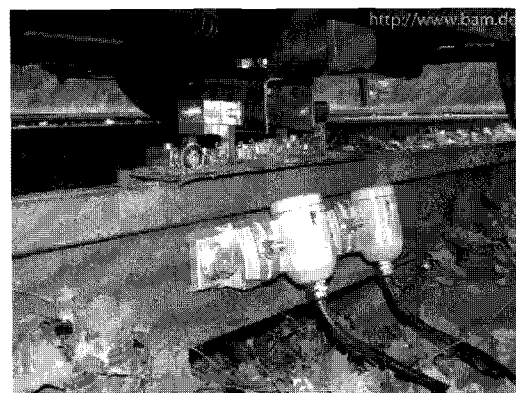


Fig. 5 Eddy current probes mounted on a test train for rail inspection ([www.bam.de](http://www.bam.de))

으나 최근에는 펄스(pulse) 형태의 전류를 입력하여 와전류의 주파수를 조절할 수 있는 펄스 와전류 검사 방법을 이용하여 결함 검출의 민감도를 높여가고 있다. ECT 기법은 레일의 용접부를 수동으로 탐상하기 위해 도입되었다가[20], 독일의 BAM(Federal Institute for Materials Research and Testing)에서 구름접촉피로(rolling contact fatigue: RCF)로 인해 레일 코너부에 발생한 표면 결함(head check 결함)을 검출하는데 응용되어 크기 10 mm의 결함을  $\pm 1$  mm의 오차로 검출할 수 있음을 보였다[21]. 이후 레일 탐상차에 탑재하여 (Fig. 5 참조) 독일과 네덜란드에서 시험 적용을 거쳐 상용화되었으며[16], 현재 최고 탐상 가능속도는 72 km/h(시험 시)이다.

ECT를 이용한 레일 탐상 시에는 레일 표면 및 표면 하층(near surface)에 존재하는 결함만을 검출할 수 있는데 이는 와전류가 전도체 표면에서 식(1)에 의해 결정되는 표준 침투 깊이(standard depth of penetration)까지만 존재하기 때문이다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (\delta: \text{표준 침투 깊이}) \quad (1)$$

여기에서  $f$ : 교류 주파수,  $\sigma$ : 측정 대상의 전도율,  $\mu$ : 투자율이다. 예를 들어 레일과 같은 강재질에 주파수 1 MHz의 교류를 흘려주면 침투 깊이는 수십  $\mu\text{m}$ 에 그치므로 이보다 더 내부에 존재하는 결함은 탐상이 어렵다. 또한 ECT는 탐촉자와 측정 대상 간의 간극(lift-off)에 따라 출력 및 측정 결과가 영향을 받으므로 이를 일정하게 유지해야 한다.

### 3.3. 누설 자속 탐상(Magnetic Flux Leakage Inspection: MFL)

MFL 기법은 석유화학산업, 금속 산업, 에너지 산업 등 여러 분야에서 비파괴 탐상을 위해 사용되어 왔으며[22], 철도 레일에서도 결함 탐상을 위해 응용되고 있다. 페라이트 코어 등에 영구자석 또는 코일을 설치하고 레일에 근접시켜 자기 회로를 형성한 후 레일을 자기 포화 상태 부근까지 자화시킨다. 검사 대상 표면 또는 표면 하층에 결함 등의 불연속 구간이 존재할 경우 자속의 연속적인 흐름을 방해하므로, 자속의 일부가 레일 밖으로 누설되어서라도 자기 회로를 유지하려

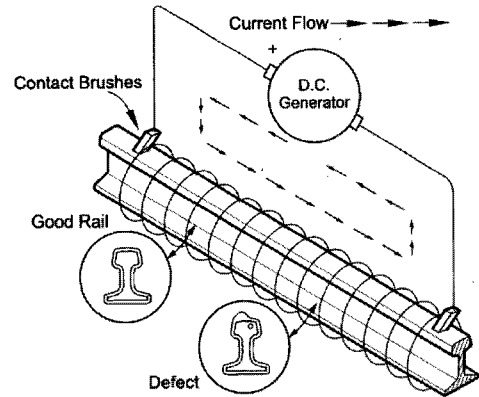
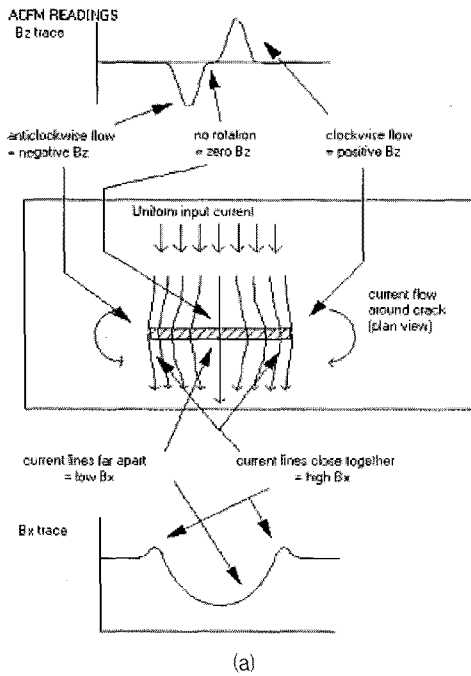


Fig. 6 Illustration of MFL method application to a rail inspection [23]

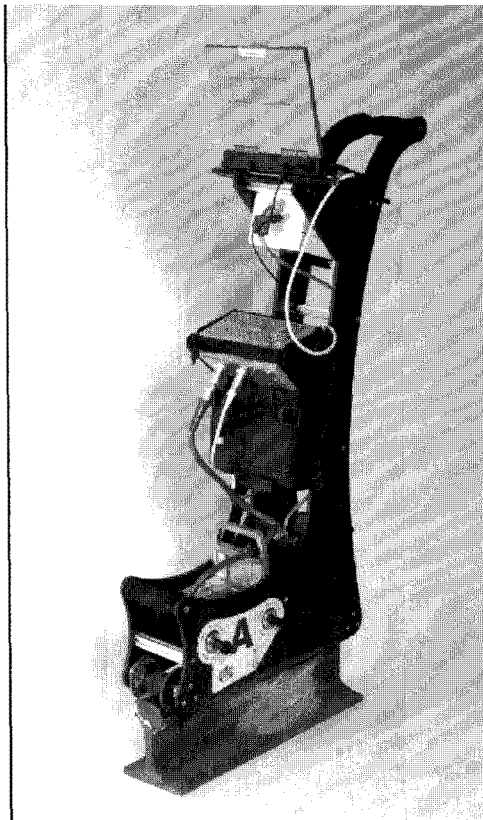
한다. 자속이 누설된 경우 별도의 코일에 의해 검출할 수 있으며 이를 통해 결함을 비접촉으로 검출할 수 있다. 미국에서는 MFL 기법과 초음파 탐상을 병용하여 레일 결함을 검출하는 시스템을 개발하였는데[13,23]. Fig. 6에 나타난 바와 같이 레일에 브러시를 접촉한 후 직류를 흘려서 자기장을 발생시킨다. 레일에 결함이 존재하면 전류의 흐름이 변화하고 이에 따른 자기장의 변동을 검지하여 결함, 그 중에서도 레일 두부 표면의 횡방향 결함을 검출할 수 있다. ECT와 마찬가지로 MFL 기법으로는 레일 내부 결함을 검출하기 어렵는데, 결함 발생 부위가 표면에서 멀어질수록 누설 자속량이 적어지기 때문이다. 또한 현재로서는 전술한 바와 같이 횡방향의 레일 결함 검출에만 적용되고 있다. 앞서 언급한 MFL 기법과 초음파 탐상을 병용하는 시스템의 레일 탐상 속도는 최대 35 km/h로 알려져 있다.

### 3.4. 교류장탐상(AC Field Measurement: ACFM)

전기 전도체의 표면에 교류가 흐르면 공기 중에 자기장이 발생하는데, 전도체 표면에 아무런 결함이 없으면 균일한 자기장이 형성되나 결함이 존재하는 경우에는 자기장이 변화하며 그 양상은 결함의 형태와 직접적으로 연관되어 있다. 예를 들어 결함의 좌측으로 통과한 교류에 의해 형성되는 자기장은 표면으로 수직인 방향으로 최대값을 갖게 되며 교류와 직교하는 방향으로 자기장의 변화율이 최대가 된다(Fig. 7(a) 참조). 따라서 자기장을 검출하고 그 양상을 관찰하여 레일



(a)



(b)

Fig. 7 ACFM for rail inspection; (a) Principles of ACFM and (b) ACFM device for rail inspection [25]

결함의 존재 유무 및 크기 정보를 비접촉으로 파악할 수 있다[24]. 영국에서는 ACFM 방식의 수동 레일 탐상기를 개발하였는데(Fig. 7(b)참조), 레일 게이지 코너부(Fig. 1(a) 참조)의 결함을 포함한 레일 표면 결함 검출에 적용하고 있다[25]. 이 기법은 와전류 탐상 기법에 비해 탐촉자와 레일 사이의 lift-off를 2배 이상 넓힐 수 있다(최대 5 mm). Papaalias 등은 배열(array)형 ACFM를 이용하여 최대 120 km/h에서 깊이 2 mm와 4 mm의 인공 표면 결함을 검출할 수 있음을 실험실 차원에서 입증하여 향후 고속 레일 탐상에도 적용 가능함을 보였다[26]. 그러나 ACFM은 레일 표면 결함 검출에만 적용 가능하며 결함 검출 감도를 높이기 위해서는 결함의 방향을 사전에 예측하여 전류 흐름 및 자기장 검출 방향을 최적화할 필요가 있다.

### 3.5. 유도 초음파 탐상(Guided Wave Inspection)

유도 초음파 탐상은 파이프 등의 길이가 긴 구조물에서 초음파가 크게 감쇠되지 않고 장거리에 걸쳐 전파가 가능하다는 것을 이용하여 송유관, 가스관, 열교환기 배관 등을 넓은 영역에 걸쳐 진단하는 것을 말한다[27-31]. 도유관(wave guide) 내에서 전파하는 초음파는 결함이나 부식 등에 의해 단면적이 변화된 부분에서 전체 또는 일부가 반사되거나 모드가 변화하게 된다[32]. 따라서 유도 초음파를 수신하여 초음파의 크기, 시간 정보 또는 파형을 분석하면 결함의 존재 여부, 위치 및 크기 등을 파악할 수 있다. 이 기법을 이용할 경우 하나의 탐촉자로 최대 수백 m까지의 장거리에 걸쳐 탐상할 수 있는 잠재력이 있어 여러 기관에 의해 레일 탐상에 적용하기 위한 연구가 수행되고 있다[33-36]. 미국에서는 레일 횡방향 결함을 검출할 수 있는 유도 초음파 응용 레일 탐상 차량을 상용화하였는데(Fig. 8 참조)[37] 현재로서는 레일의 단면적이 최소 5% 이상 감소한 부분을 검출할 수 있다.

유도 초음파는 구조물에서 전파하면서 형상 또는 모드(mode)가 변화하는 분산(dispersion) 현상을 필연적으로 겪게 되는데[38-40], 이로 인해 측정 신호의 직접적인 해석이 어려워 시간-주파수 분석 기법 등의 신호처리를 부가적으로 수행해야 하는 경우가 많다[41]. 또한 결함의 크기가 작아



서 단면적의 변화가 작은 경우에는 신호의 민감도가 떨어질 가능성도 있으며 여러 요인에 의해 유도 초음파의 전파 거리가 수 m에 그칠 수도 있다.

### 3.6. 레이저 초음파 탐상(Laser Ultrasonics Inspection)

시험편에 일정 에너지 레벨 이상의 레이저를 펄스(pulse) 형태로 가하면 시험편에는 열응력 또는 용발(ablation)에 의해 초음파가 발생한다[42]. 이와 반대로 적응형 간섭계(adaptive interferometer) 등을 이용하면 시험편에서 진행하여 표면에 이른 초음파를 비접촉으로 측정할 수도 있다[43]. 레이저는 광 종류 중에서 가장 직진성 및 응집성 유지력이 뛰어나므로 레이저 초음파 탐상을 이용하면 시험편과 상당한 거리를 두고도 초음파를 발생시키고 측정할 수 있다는 장점이 있다.

레일 탐상용 레이저 초음파 시스템에 관한 연구개발은 미국이 주도하고 있는데 2007년에 미국 수송기술센터(Transportation Technology Center Inc.: TTCI)에서 최초로 레이저 초음파 기반 레일 탐상 시스템을 개발하였으며 예비 시험을 통해 레일 두부, 복부 및 저부 등 레일 전체를 탐상할 수 있음을 입증하였다[44]. 또한 미국 UCSD 대학 연구진이 미국 FRA의 지원 하에 개발한 레이저 초음파 시스템(Fig. 9 참조)은 16 km/h의 탐상 속도에서 레일 두부 내부 결함 (단면적 변화율 3.5%), 두부 표면 결함 (단면적 변화율 2%) 및 두부 표면 경사 결함(단면적 변화율 3.5%)을 최소 75%의 확률로 탐지할 수 있음을 보였다[45]. 또한 2010년에 시험선에서의 블라인드 테스트를 통하여 최대 92%의 확률로 결함을 탐지할 수 있음을 보였다[46]. 이 시스템은 최대 탐상속도 64 km/h를 목표로 지속적인 연구 중에 있다.

### 3.7. 위상배열 초음파 탐상(Ultrasonic Phased Array)

여러 개의 초음파 탐촉자를 배열한 후 탐촉자별 초음파 발생 시간을 조절하여 초음파를 집중시켜 에너지 밀도를 높이는 탐상 기법이다. 이를 이용하면 초음파의 조사 각도를 원하는 대로 바꾸어 가며 넓은 면적을 탐상할 수 있어 탐상의 정확도



Fig. 8 Guided wave based rail inspection car (www.wavesinsolids.com)



Fig. 9 Rail inspection system using laser ultrasonics [45]

를 높이고 탐상 속도를 줄여 고속 탐상을 구현할 수 있다. 미국 TTCI와 Iowa 대학교, 프랑스 등에서 이를 이용한 레일 탐상법을 개발 중이다. 특히 프랑스(Socomate 사)에서는 스캔 각도 고속 자동화 기술(fast automated angle scan technique: FFAST)이라는 기법을 개발하였는데 이 시스템은 128채널의 탐촉자를 이용하여 최대 탐상 속도 100 km/h 및 탐상 간격 4 mm 구현을 목표로 하고 있다[47]. 프랑스 국유철도(SNCF)에서는 이를 이용하여 고속철도 레일의 용접부를 탐상하는 시스템을 개발하여 시험 운영 중에 있다.

### 3.8. 전자기 음향 변환기(Electromagnetic Acoustic Transducer: EMAT)

전기 전도체의 표면에 코일을 근접시키고 교류를 흘려주면 전도체 표면에 와전류가 발생되고 이에 직교하는 방향으로 정적 자기장을 인가하면

로렌츠(Lorentz) 힘 법칙에 의해 와전류와 정적 자기장의 외적(outer product) 방향으로 힘이 발생하며 이에 따라 전도체에 탄성파가 발생한다. 대상이 강자성체인 경우에는 코일에 흐르는 교류가 발생시키는 동적 자기장과 정적 바이어스(bias) 자기장에 의한 자기변형(magnetostriction) 효과를 통해 탄성파가 발생한다[48]. 이 두 가지 효과에 기반을 두어 탄성파를 발생시키고 측정하는 변환기를 EMAT이라 하는데, 어떠한 경우에도 전자기적 원리에 의해 신호를 발생시키므로 비접촉 탐상이 가능하여[49,50] 별도의 접촉 매질이 필요하지 않으며, 레일 표면 상태에 영향을 받지 않는다. 따라서 탐상 속도를 고속화할 수 있는 잠재력이 있다.

EMAT의 또 다른 특징 중 하나는 정적 자기장의 방향과 코일의 방향을 조절하여 다양한 초음파 모드를 선택적으로 발생시키고 측정할 수 있다는 점이다. 이러한 특성을 이용하면 체적파(bulk wave) 또는 표면파(surface wave) 모두를 발생시키고 측정할 수 있어서 레일의 표면 결함과 내부 결함 모두를 단일한 시스템으로 검출하는 것이 가능하다. 또한 압전형 초음파 탐촉자와 마찬가지로 여러 개의 EMAT을 배열하여 초음파 에너지 밀도를 높일 수도 있다[51].

EMAT 기반 초음파 탐상 시에는 발생 신호의 주파수 대역과 lift-off가 반비례하게 된다. 중심 주파수 2.4 MHz의 신호를 보내어 레일 탐상을 시도할 경우 0.2 mm 정도의 lift-off를 유지해야 하는데[52], 이를 해결하기 위해 기준 신호의 주파수 대역을 낮추거나 전자기장을 최적화하는 연구가 진행되고 있다.

캐나다(Tektrend사, 현재 NDT Olympus사)에서는 EMAT를 이용한 레일 내부 결함 탐상 차량을 개발하여 몬트리올의 시험선에서 검증한 바 있다(Fig. 11(a) 참조)[53]. 또한 영국 Warwick 대의 연구진은 Network Rail의 지원 하에 EMAT을 이용하여 저주파수의 Rayleigh파를 발생시켜 레일의 표면 결함을 운행 중에 검출하는 연구를 수행하고 있다(Fig. 11(b) 참조)[52]. 이밖에도 영국 Birmingham대, Bristol대의 공동 연구진도 EMAT를 이용한 레일 탐상 장비에 대해 연구 중이며[54], 러시아 VIGOR 핵발전소 연구팀에서도 유사한 연구를 수행한 바 있다[55].

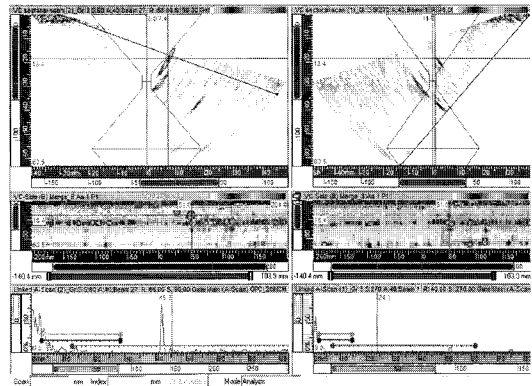
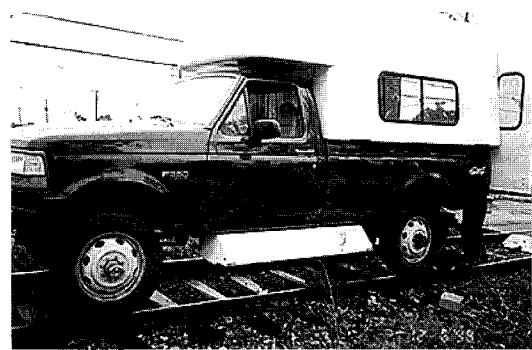
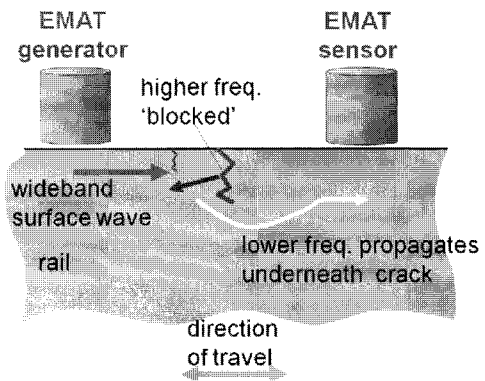


Fig. 10 Example of a structural health monitoring using ultrasonic phased array system



(a)

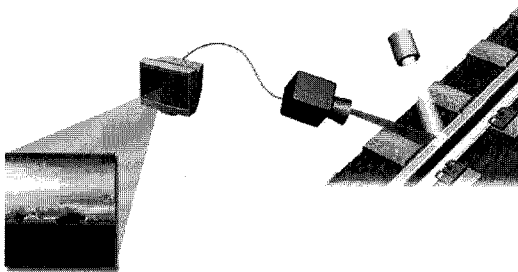


(b)

Fig. 11 Rail inspection system using EMAT; (a) Rail inspection car using EMAT (www.tc.gc.ca), and (b) Schematic diagram of a rail inspection using Rayleigh wave generated by EMAT [52]

### 3.9. 자동 카메라 육안 탐상 (Visual Inspection Using Automated Camera)

선로 점검 인원에 의한 육안 탐상(visual inspection)은 레일의 결함 탐상을 위해 사용된 가장 오래된 방법으로 속도가 느리고 검사자의 숙련도 및 주관적 판단이 개입하여 정확도가 떨어질 가능성이 높다. 이러한 점을 보완하기 위해 최근에는 고속, 고해상도의 카메라 및 영상 처리 기법에 기반한 육안 탐상 기법이 개발되어 사용되고 있다. 카메라를 이용한 자동 탐상의 기본 개념은, 선로의 영상 및 사진 정보를 촬영하고 저장할 수 있는 고속 카메라를 열차에 장착하여 열차가 이동할 때 선로의 건전성을 파악하는 것이다[56]. 촬영한 영상을 영상 처리 프로그램을 이용하여 분석함으로써 결함의 존재 유무 및 결함의 형태를 파악할 수 있으며 프로그램의 분석 속도를 높여 실시간 탐상을 구현할 수도 있다[57]. 프랑스 국영철도(SNCF)는 궤도 변형(궤도의 뒤틀림), 급전선 검측, 신호 및 통신 측정 등 선



(a)



(b)

Fig. 12 Rail inspection using high-speed camera; a) Schematic diagram of high-speed visual inspection for rail ([www.railway-technology.com](http://www.railway-technology.com)) and (b) Rail inspection car IRIS320 (SNCF, France)

로구조물의 건전성을 검사할 수 있는 종합 검측차(IRIS320)를 제작하여 운영하고 있는데(Fig. 12(b) 참조), 이 시스템에는 레일 표면에 발생하는 구름 접촉 피로, 파상마모 등의 결함을 검출할 수 있는 고속 카메라 기반 레일 탐상 시스템이 설치되어 있으며, 검측 가능 속도는 60 - 320 km/h로 알려져 있다. 기존의 초음파 탐상 차량에 비해 빠르게 탐상할 수 있으므로 다른 열차의 운행을 방해하지 않으면서 주간에도 탐상을 수행할 수 있으며 현재 레일을 포함한 선로 검측에 이용 중이다. 또한 독일과 이탈리아에서도 고속 카메라 등을 이용하여 레일 표면 결함 검출을 포함한 종합 검측차를 상용화하였다[58,59].

고속 카메라 기반의 육안 탐상은 고속 탐상이 가능하고 결함의 존재 유무를 측정자에게 쉽게 알려줄 수 있으나, 근본적으로 레일 표면 결함만을 탐상할 수 있으므로 종합적인 레일 결함 탐상을 위해서는 다른 방법을 병용해야 한다. 또한 보다 정확한 결함 정보를 얻기 위해 고해상도의 카메라를 이용하는 경우 데이터 처리량이 증가하여 분석 속도가 떨어질 수도 있다.

### 3.10. 공기결합 초음파 탐촉자(Air-Coupled Transducer)

공기결합 트랜스듀서는 접촉식 초음파 탐상 시 필요한 커플런트를 적용할 수 없거나 사용에 따른 부작용을 감수해야 하는 특수한 재질의 시편, 생산 공정 중의 검사 및 동절기 실외 검사 등의 경우를 위해 비접촉 초음파 발생 및 측정을 위해 개발되었다[60]. 공기 결합 트랜스듀서는 압전소자를 이용하여 초음파를 발생시키는 점에서는 기존의 초음파 변환기와 유사하지만 별도의 접촉 매질을 사용하지 않고 비접촉 상태를 유지한다는 것이 다르다[61]. 공기와 측정대상의 기계적 임피던스 차이(보통 수만 배) 및 공기 중의 초음파 감쇠 효과 등의 문제를 극복하는 것이 필요한데 공기 결합 트랜스듀서는 이를 위해 고감도의 수신부 설계, 임피던스 정합(matching)층 설치 및 운용 주파수 최적화 등과 같은 방법을 이용한다. 공기결합 초음파 탐촉자는 초음파의 비접촉 발생 및 측정이 가능하기 때문에 레일 탐상에 응용될 경우 많은 장점을 갖게 되나 현재로서는 연구실 차원에서 기본적인 실험이 진행되고 있는 단계이

다. 미국의 Pennsylvania 주립대학에서는 공기결합 초음파 탐촉자를 이용하여 레일에서 전파하는 유도초음파를 검출한 바 있으며(Fig. 13 참조)[33], 미국 UCSD에서도 공기결합 초음파 탐촉자를 이용하여 레일 내부 상태를 진단한 바 있다[62].

3.11. 적외선 열화상기법(Infrared Thermography)

절대 온도 0K 이상의 모든 물체는 흑체 복사 원리에 따라 그 표면에서 적외선을 방출하며 이 적외선 에너지의 양은 물체의 온도에 비례하므로 적외선 카메라를 이용하여 방출되는 적외선을 검출하면 물체의 온도 분포를 가시화할 수 있다. 결합이 있는 구조물에 빛, 열 등의 인공적인 열원 또는 짧은 펄스의 초음파를 가하면 구조물 내에 열 또는 초음파 에너지가 전파하다가 결합에서 반사되면서 결합이 존재하는 부위와 그렇지 않은 부위의 온도가 달라지는데, 이를 열화상(thermography)으로 재구성해 비접촉으로 결합을

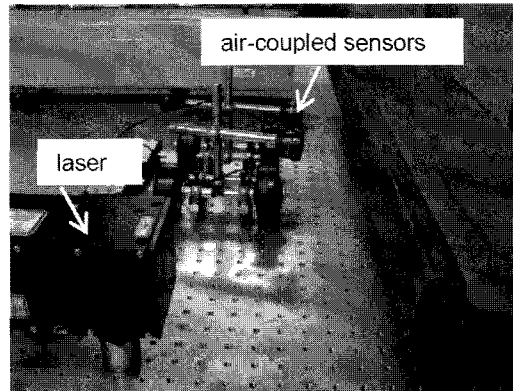


Fig. 13 Laboratory test on detection of ultrasonics propagating on a rail using air-coupled transducers

검출할 수 있다[63-65]. 철도 분야에서는 차량의 주요 부위의 건전성 평가[66-68] 및 레일의 온도 검출 연구[69]에 적외선 열화상 기법이 적용된 바 있다. Greene 등은 적외선 열화상 기법을 이용하여 레일 시편의 결합을 검출하는 연구[70]를

Table 4 Summary of rail inspection technologies

탐상기법	특징	탐상 속도	검출 결합
압전형 초음파 탐상	- 가장 오래된 레일 탐상 기법 - 가장 널리 사용되고 있음 - 접촉식 탐상	~ 70 km/h (사양상)	내부 결합 및 표면 결합 일부
압전형 초음파 탐상 + 접촉 매질 대체제 사용	- 접촉 매질 불필요 - 탐촉자와 레일 간 물리적 접촉은 유지됨	~ 100 km/h	
와전류 탐상 (ECT)	- 비접촉 탐상 가능 - 검출의 고속화 가능 - lift-off에 영향받음 - 초음파 탐상과 병용	~ 72 km/h	표면 결합
누설자속 탐상 (MFL)	- 비접촉 탐상 가능 - 초음파 탐상과 병용	~ 35 km/h	표면 결합
교류장 탐상 (ACFM)	- 비접촉 탐상 가능 - ECT에 비해 큰 lift-off 가능	수동 탐상	표면 결합
유도 초음파 탐상	- 장거리 탐상이 가능 - 단면적 변화가 상대적으로 클 경우에 검출 가능		내부 결합
레이저 초음파 탐상	- Lift-off가 큰 비접촉 탐상 가능 - 장거리 결합 탐상 가능 - 현재 시험 운영 단계	~ 64 km/h (목표)	내부 및 표면 결합
위상배열 초음파 탐상	- 탐상 고속화 가능 - 레일 용접부 탐상 시스템 시험 운영 단계	~ 100 km/h (목표)	내부 및 표면 결합
전자기 음향 변환기 (EMAT)	- 비접촉 탐상 가능 - 레일 표면 및 내부 결합 동시 탐상 가능 - 현재 시험 운영 및 연구 단계	~ 60 km/h (목표)	내부 및 표면 결합
고속 카메라 탐상	- 고속 탐상 구현 가능 - 현재 상용화	60 ~ 320 km/h	표면 결합

수행하여 레일 결함 검출에의 적용 가능성을 타진하였다. 그러나 적외선 열화상 기법을 이용할 경우 레일 내부의 결함 검출 해상도가 떨어질 수 있으며 탐상 속도를 높이기 힘들다는 한계점이 존재한다.

이상에서 살펴 본 레일 탐상 기법들의 특징을 Table 4와 같이 정리하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 현재 레일 탐상을 위해 사용되고 있거나 적용을 위해 연구 중인 비파괴 탐상 기술에 대해 살펴보았다. 현재 세계적으로는 압전형 초음파 탐촉자에 기반을 둔 레일 탐상 기법이 오랜 기간 사용되어 왔으나, 탐상 시 레일과 탐촉자 간의 물리적 접촉 및 접촉 매질 사용 등으로 인한 문제점 또한 상존하고 있다. 해외의 탐상 전문 업체 및 연구기관들은 이를 해결하기 위해 접촉 매질 사용에 대한 대안을 제시하거나, 비접촉으로 레일 표면 또는 내부의 결함을 검출할 수 있는 여러 비파괴 탐상 기법에 대해 소기의 연구 성과를 제시하여 상용화하거나 현장 적용성을 평가하고 있다. 이러한 성과들을 통해 기존 레일 탐상의 근본적인 문제점을 해결하고 레일 탐상 속도를 현재보다 고속화하여 탐상 효율을 향상시킬 수 있으리라 전망하고 있다. 그 중에서도 전자기장 및 레이저 기반의 비접촉식 레일 탐상 기법은 향후 전자 소자 및 관련 기기의 지속적 발전에 따라 탐상 입출력 신호의 증대, 시스템의 소형화 및 신호 처리의 고속화 등이 가능해지면 높은 실용성을 가질 것으로 예상된다. 또한, 고속 카메라를 이용한 레일 표면 결함 검출 시스템도 그 활용 빈도가 높아질 것으로 판단되며, 유도 초음파 등을 이용한 장거리 레일 탐상 기법 또한 탐상의 효율성 극대화 측면에서 지속적으로 관심을 기울일 필요가 있다고 본다.

레일 결함의 조기 발견은 철도 안전 유지의 필수적인 요소 중 하나이다. 현재 한국의 철도 기술 수준은 고속철도 시스템을 독자적으로 개발하고 철도 기술의 해외 진출을 본격적으로 추진하는 단계에 이르렀으나, 레일 탐상에 관해서는 해외의 기술 및 장비를 도입하여 사용하고 있으며 자체적인 연구 개발이 미흡한 것이 현실이다. 그러나 철도의 운송량 증대, 고속화 및 선로 증설

등에 따라 레일의 결함 발생 가능성이 증대하고, 기후 변화 등에 따라 레일 운영 환경이 현재와는 달라질 수 있음을 고려하여 자체적인 레일 탐상 기술을 확보할 필요가 있다고 판단된다. 이에 덧붙여 현재 사용 중이거나 개발되고 있는 방식으로서 탐상이 쉽지 않은 부분(예를 들어 레일 저부 등)의 결함을 검출할 수 있는 레일 탐상 기술에 대해서도 지속적인 연구개발이 필요하다.

#### 참고문헌

- [1] Office of Rail Regulator, "Trail derailment at Hatfield," Report of the Independent Investigation Board of UK (2006)
- [2] Homeland Security, "Amtrack Train Derailment," US Fire Administration/Technical Report (2001)
- [3] National Transportation Safety Board, "Railroad Accident Brief: Accident No. DCA-06-FR-003," NTSB report (2006)
- [4] cs.trains.com
- [5] 임남형 외, "궤도 결함에 기인한 국외의 철도사고 분석", 한국방재학회논문집, 제8권 1호, pp. 23-29 (2008)
- [6] safetydata.fra.dot.gov
- [7] 이승렬, "국내 레일 질손 현황과 해외 질손 탐지 시스템 연구개발 현황", 한국철도기술, 제19호, pp. 76-79 (2009)
- [8] Department of Transportation, "49C.F.R. §213.113, Defective Rails," Code of Federal Regulations, (2011)
- [9] International Union of Railways, "UIC Code 712R - Rail Defect," (2002)
- [10] Australian Rail Track Cooperation Ltd., "Rail Defect Standards," (2009)
- [11] 국토해양부, "선로정비지침" (2007)
- [12] NDT Resource Center website; www.ndt-ed.org
- [13] Sperry Rail Services website; www.sperryrail.com
- [14] Tokyo Keiki Inc website; www.tokyo-keiki.co.jp
- [15] Speno International Sa.website; www.speno.ch
- [16] Eurailscout Co. website; www.eurailscout.com
- [17] ScanMaster Systems Ltd. website; www.scanmaster-irt.com

- [18] R. Clark, "Rail flaw detection: overview and needs for future developments," *NDT&E International*, Vol. 37, pp. 111-118 (2004)
- [19] 이용, "와류탐상검사", 제2판, pp. 38-58, 세진사, 서울 (2001)
- [20] Krautkramer Australia website; [www.krautkramer.com.au](http://www.krautkramer.com.au)
- [21] R. Pohl, A. Erhard, H.-J. Montag, H.-M. Thomas and H. Wustenber, "NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection," *NDT&E International*, Vol. 37, pp. 89-94 (2004)
- [22] J. Blitz, "Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing," pp. 44-78, Adam Hilger, Bristol (1991)
- [23] R. Clark, J. L. Boyle, D. T. Main and B. W. LaMacchia, "Hi-Rail Vehicle Based Rail Inspection System," US Patent No. 6600999, (2003)
- [24] A. M. Lewis, D. H. Michael, M. C. Lugg and R. Collins, "Thin-skin electromagnetic fields around surface-breaking cracks in metals," *J. Appl. Phys.*, Vol. 64, No. 8, pp. 3777-3784 (1988)
- [25] D. Topp and M. Smith, "Application of the ACFM inspection method to rail and rail vehicles," *Insight*, Vol. 47, No. 6, pp. 354-357 (2005)
- [26] M. Ph. Papaalias, "High-speed inspection of rails using ACFM techniques," *NDT&E International*, Vol. 42, pp. 328-335 (2009)
- [27] H. Kwun and K. A. Bartels, "Magnetostrictive sensor technology and its applications," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 171-178 (1997)
- [28] 신현재, 송성진, "유도 초음파를 이용한 열교환기 튜브 결함 탐상", *한국비파괴검사학회지*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-9 (2000)
- [29] 조운호, "유도 초음파에 대한 이해와 응용", *한국비파괴검사학회지*, Vol. 21, No. 4, pp. 446-460 (2001)
- [30] J. L. Rose, "A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential," *J. of Pressure Vessel Tech.*, Vol. 124, pp. 273-282 (2002)
- [31] T. Kang, D. H. Lee, S. J. Song, H. K. Kim, Y. D. Jo and H. J. Cho, "Enhancement of detecting defects in pipes with focusing techniques," *NDT& E International*, Vol. 44, No. 2, pp. 178-187 (2011)
- [32] Y. Cho, "Estimation of ultrasonic guided wave mode conversion in a plate with thickness variation," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 47, No. 3, pp. 591-603 (2000)
- [33] J. L. Rose, M. J. Avioli, P. Mudge and R. Sanderson, "Guided wave inspection potential of defects in rail," *NDT&E International*, Vol. 37, pp. 153-161 (2004)
- [34] J. L. Rose, C. M. Lee and Y. Cho "A feasibility study of guided wave technique for rail monitoring," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 26, No. 6, pp. 411-416 (2006)
- [35] D. Hesse and P. Cawley, "Defect detection in rails using ultrasonic surface waves," *Insight*, Vol. 49, No.6, pp. 318-326 (2007)
- [36] C. M. Lee, J. L. Rose and Y. Cho "A guided wave approach to defect detection under shelling in rail," *NDT&E International*, Vol. 42, pp. 174-180 (2009)
- [37] Waves in Solids LLC. website; [www.wavesinsolids.com](http://www.wavesinsolids.com)
- [38] J. L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media," Cambridge University Press, Cambridge, (1999)
- [39] S. Coccia, I. Bartoli, A. Marzani, F. L. di Scalea, S. Salamone and M. Fateh, "Numerical and experimental study of guided waves for detection of defects in the rail head," *NDT&E International*, Vol. 44, pp. 93-100 (2011)
- [40] 강부영, "레일 초음파의 분산 특성 해석", *대한기계학회 논문집 A권*, 게재 예정, (2011)
- [41] Y. H. Cho, Y. K. Kim and I. K. Park, "Time frequency domain analysis of the dispersion of guided wave modes," *Proc. of ASME/JSME 2004 Pressure Vessels and Piping Conference*, pp. 7-11 (2004)
- [42] C. B. Scruby and L. E. Drain, "Laser

- Ultrasonics Techniques and Applications," Adam Hilger, Bristol, (1990)
- [43] R. J. Dewhurst and Q. Shan, "Optical remote measurement of ultrasound," *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 10, No. 11, pp. R139-168 (1999)
- [44] Federal Railroad Administration, "Research results RR05-07: On-line high-speed rail defect detection-Phase III," Research Report of FRA, (2005)
- [45] Federal Railroad Administration, "Research results RR08-25: On-line high-speed rail defect detection," Research Report of FRA, (2008)
- [46] S. Coccia, R. Philips, I. Bartoli, S. Salamone, F. L. di Scalea, M. Fateh and G. Carr, "UCSD/FRA non-contact ultrasonic guided wave system for rail defect detection: an update," *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems 2011, Proc. of SPIE*, Vol. 7981, pp. 798113-798116 (2011)
- [47] P. Coperet, "FAAST: Fast automated angle scan technique," *Proc. of 17th World Congress on Nondestructive Testing*, (2008)
- [48] H. Kwun, S. Y. Kim and G. M. Light, "The magnetostrictive sensor technology for long range guided wave testing and monitoring of structures," *Material Evaluation*, Vol. 61, pp. 80-84 (2003)
- [49] M. Hirao and H. Ogi, "EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements," Kluwer, Boston, (2003)
- [50] 조승현, 박재하, 권휴상, 안봉영, 이승석, "판형 구조물 유도초음파 검사를 위한 SH파 자기변형 트랜스듀서 모듈 개발," *비파괴검사학회지*, Vol. 29, No. 2, pp. 122-129 (2009)
- [51] P. Wilcox, M. Lowe and P. Cawley, "Omnidirectional guided wave inspection of large metallic plate structures using an EMAT array," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 52, No. 4, pp. 653-665 (2005)
- [52] [http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/ultra/research/rail\\_inspection/](http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/physics/research/ultra/research/rail_inspection/)
- [53] A. Chahbaz, "Mobile inspection system for rail integrity assessment," *Proceedings of 15th World Congress on Non-destructive Testing*, (2000)
- [54] R. S. Edwards, S. Dixona and X. Jian, "Characterization of defects in the railhead using ultrasonic surface waves," *NDT&E International*, Vol. 39, No. 6, pp. 468-475 (2006)
- [55] V. P. Sebko, "Ultrasonic testing of railheads using the electromagnetic acoustic method," *Russian Journal of Non-Destructive Testing*, Vol. 40, No. 7, pp. 442-448 (2004)
- [56] P. De Ruvo, G. De Ruvo, A. Distanto, M. Nitti, E. Stella and F. Marino, "A visual inspection system for rail detection and tracking in real time railway maintenance," *The Open Cybernetics and Systemics Journal*, Vol. 2, pp. 57-67, (2008)
- [57] University of Central Florida, "Final Report of FDOT Project No. BD550-08: Automated Visual Inspection/Detection of Railroad Track," Florida Dept. of Transportation, (2010)
- [58] Bildverarbeitungssysteme GmbH website; [www.bvsys.de](http://www.bvsys.de)
- [59] Mermec Group Track Inspection Part website. [www.mermecgroup.com/diagnostics/track-inspection/62/1/track-surface-inspection.php](http://www.mermecgroup.com/diagnostics/track-inspection/62/1/track-surface-inspection.php)
- [60] W. A. Grandia, "NDE applications of air-coupled ultrasonic transducers," *Proceedings of 1995 IEEE Ultrasonic Symposium*, pp. 697-709 (1995)
- [61] A. Gachagan, G. Hayward, S. P. Kelly and W. Galbraith, "Characterization of air-coupled transducers," *IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 43, No. 4, pp. 678-689 (2002)
- [62] F. L. di Scalea and J. McNamara, "Ultrasonic NDE of railroad tracks: air-coupled cross-sectional inspection and long-range inspection," *Insight*, Vol. 45, pp. 394-401 (2003)
- [63] 조재완, 서용철, 정승호, 정현규, 김승호, "초음파 서모그라피를 이용한 실시간 결함 검출에 대한 연구", *한국비파괴검사학회지*,

- Vol. 26, No. 4, pp. 211-219 (2006)
- [64] 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, 김경석, "위상잠금 광-적외선 열화상 기술을 이용한 내부결함의 위치 및 크기 평가", Vol. 27, No. 4, pp. 321-327 (2007)
- [65] 최만용, 이승석, 박정학, 김원태, 강기수, "초음파-적외선 열화상 기법에 의한 피로균열 검출에 있어 발열 매커니즘 분석", Vol. 29, No. 1, pp. 10-14 (2009)
- [66] J. G. Kim, B. C. Goo, S. C. Yoon and S. T. Kwon, "Thermographic investigation of hot spots in railway brake discs," *Key Engineering Materials*, Vol. 385-387, pp. 669-672 (2008)
- [67] 김정국, "철도차량 차축 재료의 파괴특성 적외선 열화상 모니터링", *한국비파괴검사학회지*, Vol. 30, No. 2, pp. 116-120 (2010)
- [68] 김정국, "적외선 열화상 기술을 이용한 철도차량 대차 건전성 평가", *한국비파괴검사학회지*, Vol. 31, No. 2, pp. 144-149 (2011)
- [69] RSSB Research Programme, "Engineering: Rail Temperature Study," Railway Safety and Standards Board, UK, (2005)
- [70] R. J. Greene, J. R. Yates and E. A. Patterson, "Rail crack detection: an infrared approach to in-service track monitoring," *Experimental and Applied Mechanics*, pp. 246-243 (2006)