

차륜과 레일에서의 결함 탐상기술

| 권석진 · 나성훈 · 서정원 · 이동형 |
한국철도기술연구원 차륜궤도연구실

1. 철도시스템에서 비파괴 탐상기술

차륜-레일 시스템에서의 결함을 탐지할 수 있는 비파괴 탐상기술은 손상을 조기에 발견하고 차륜-레일의 절손사고를 미연에 방지하여 안전수송에 일익을 담당하고 있는 기술 분야이며 경제적, 사회적 파장을 불러올 수 있는 치명적인 사고를 피하고 승객의 인명을 구할 수 있는 기술이다.

현재까지 철도시스템에 범용화 된 비파괴 탐상기술은 초음파 (UT, Ultrasonic Testing), 와 전 류 (ECT, Eddy Current Testing), EMAT(ElectroMagnetic Acoustic Transducer), ACFM (Alternating Current Field Measurement)의 기술이 있다. 표1에 현존하는 비파괴 탐상기술의 장단점을 요약하여 나타내었다.

전세계적으로 많은 연구자들이 비파괴 탐상기술에 대하여 연구를 진행하고 있으며 기술적 진보가 이루어지고 있다. 본 고에서는 차륜과 레일에 적용되고 있고 연구진행 중인 비파괴 탐상기술에 대하여 서술하고자 한다.

2. 차륜에 대한 결함 탐상기술

1998년 6월 3일 Eschede에서 상용 운행 중이던 독일의 ICE의 탈선사고로 인하여 사망 102명, 약 80명의 중상자를 포함하여 300여명의 인명사고가 발생하였다. 탈선사고의 원인은 각종 매스컴에서 공개된 바와 같이 시속 200km/h로 고속 운행 중에 발생한 차륜의 파괴로 밝혀졌다. 차륜은 철

표 1 비파괴 탐상기술

비파괴 기술	장점	단점	결함영역	개발 방향(연구 기관)
초음파	가장 보편화된 기술 자동화된 시스템 탐촉자의 각도제어	Noise echo 검지할수없는 결함 및 사각지대가 존재	내면결함	Long range 초음파 (Penn State) SH파 (RTRI, JR) Laser Hybrid(TTCI)
와전류	전기적 신호 기록 넓은 영역을 스캔	속련도가 필요	표면결함	저주파 와전류 (TTCI)
전자기	교류와 직류를 활용 넓은 범위를 스캔 다중 probe를 사용 결함 형상화	속련도가 필요	표면결함 내면결함	전자기 (Liazrd, JR, Rohman, Tohoku) 자기(Iowa State) ACFM(AEA, RTRI)
MPI	전통적 방법	미소결함 탐지불가	표면결함	

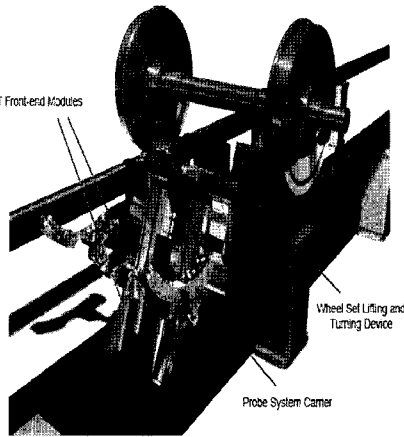
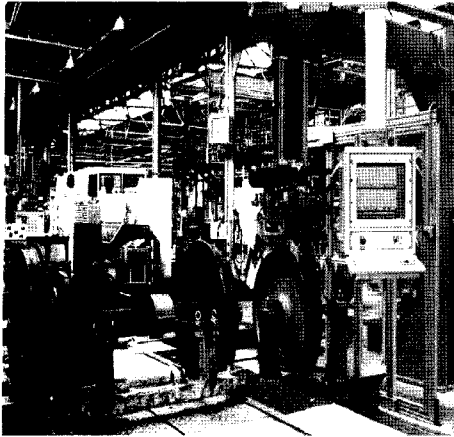
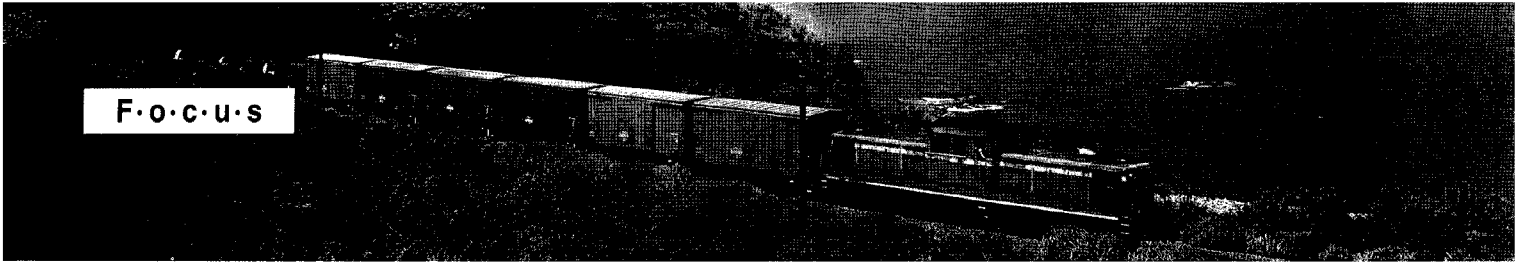
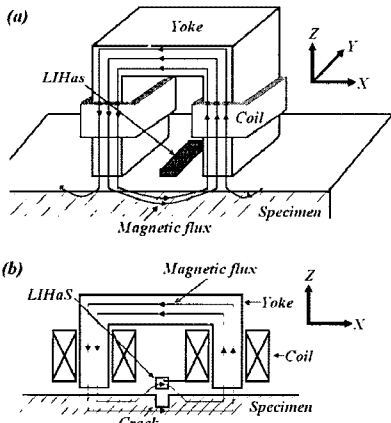
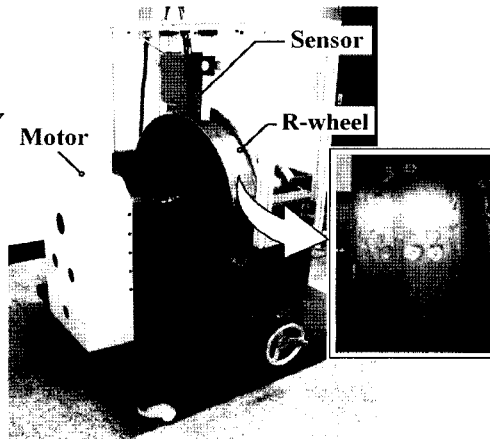


그림 1. UT에 의한 윤축 탐상시스템과 하부 모니터링 시스템(DB)

이유는 주행수가 적은 차륜의 경우, 표면의 경화에 의하여 초음파의 강도가 약해져 (1) 결함 검출능력의 저하의 원인이 되며, 또한 점검 및 정비를 위한 차내 공장의 이용시간이 60분 이내인 경우도 있어 (2) 결함탐상시간의 부족 때문이다. 더욱이 3,600 km의 검사주기도 전술한 결함 탐상시간의 부족 때문에 2,500 km로부터 변경된 것이다.



(a) 기본원리



(b) 차륜 결함 탐상시스템

그림 2. 전자기에 의한 차륜탐상 원리와 구축 시스템(KRRI)

따라서 차륜의 결함 탐상을 위하여 (1) 결함탐상시간의 고속화 및 (2) 재질에 관계없이 결함검출 능력을 고도화할 수 있는 시스템의 개발이 강력히 요구되고 있다.

그림 1에 독일 DB에서 2004년에 구축하여 적용하고 있는 ICE의 탐상시스템을 보여준다. ICE 차륜립부를 대상으로 초음파와 와전류방식을 혼합한 시스템이며 초음파 16채널과 와전류 8채널까지 탐상정보

를 스캐닝할 수 있다. 또한, 차량 입고시 하부 모니터링 시스템을 이용하여 차륜에 발생하는 결함을 탐상할 수 있다.

도 차량의 중량을 지지하고, 레일과의 반복적인 구름접촉을 하며 이동하는 핵심 구조부품이다. 특히, 레일과의 미소 접촉부에서 발생하는 높은 수직 응력, 답면 제동시 제륜자가 접촉하여 발생하는 마찰열에 의한 열응력, 제조과정에서 발생하는 비금속 개재물의 원인에 의하여 발생하는 차륜의 손상은 차량의 주행 안전성에 영향을 미친다.

그림 2는 국내 기술에 의해 개발된 전자기 방식의 차륜 결함 탐상기술을 나타낸 것이다. 웨이퍼상에 선형으로 배열한 홀센서 (LIHaS, linearly integrated Hall sensor array) 및 소형 요크식 전자석을 적용한 전자기 원리를 이용, 결함의 존재에 의한 자기장 분포의 변화를 검토하고, 보다 고속으로 탐상할 수 있는 시스템을 개발하였다. 배열된 64개의 홀센서 LIHaS를 이용하면 보다 고공간 분해능의 결함 크기를, 센서간 리프트 오프의 차이가 없이 보다 빠른 속도로 취득할 수 있다.

이에 따라 차륜에 대한 상시 비파괴 검사는 매우 중요하며, 독일 ICE의 경우에도 사고 하루 전에 차륜답면 탐상을 위하여 3,600 km마다 실시되는 정기검사를 실시하였다. 그러나 ICE 차량을 약 1.5km/h로 이동시켜 레이저에 의한 차륜의 윤곽 및 초음파를 이용한 균열검사를 수행하였지만 차륜답면 균열검사는 실제로는 이루어지지 않았다. 그

또한, 그림 3와 같이 실제 차륜을 30 km/h의 속도에서

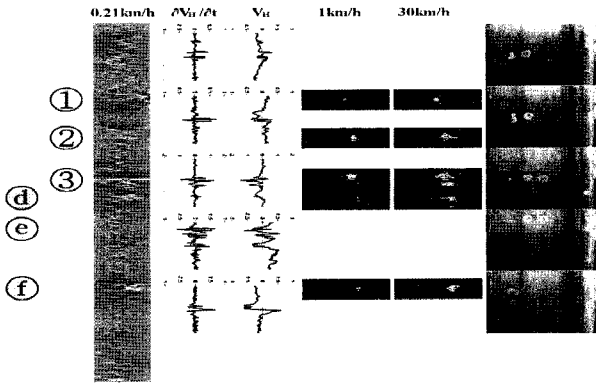


그림 3. 실제 차륜을 이용한 결함탐상 결과

0.5 mm 이상의 균열을 탐상할 수 있음이 확인되었다. 실험을 위해 삽입된 인공결함(①,②,③)과 실제 운행 중에 발생된 자연결함(④,⑤,⑥)에 대하여 명확하게 결함의 크기와 형상을 탐상할 수 있다.

3. 레일에 대한 결함 탐상기술

레일 탐상 기술은 최근에 매우 각광받고 있는 분야이다. 2000년 10월 영국 Hatfield에서 발생한 레일결함으로 인한 탈선사고가 발생하여 이 사고 이후 레일 탐상 기술 발전에 주요한 역할을 하게 되었다.

레일 탐상은 미국의 철도산업에서 1920년대 후반부터 시작되었으며 1950년대에 초음파를 이용한 연구가 전세계적으로 실시되었다. 미국에서는 보완적인 기술로서 발전되게 되었으며 러시아에서는 자기 유도기술이 적용되었다. 초음파 기술은 기본적으로 초음파를 레일에 보내어 그 반사되는 파형으로 레일결함을 탐지하는 기술이다. 변환

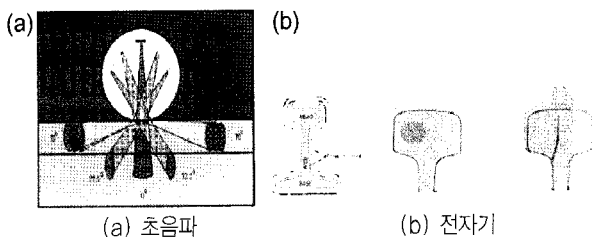


그림 4. 레일에 적용되는 초음파와 전자기 방식

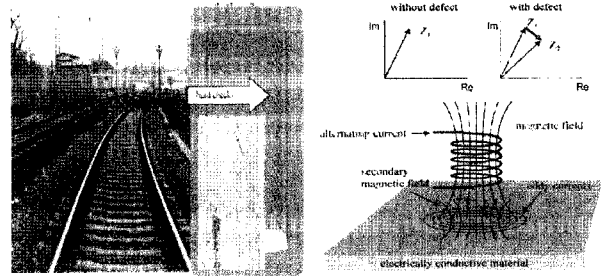


그림 5. 레일결함(head check)과 와전류 탐상의 원리

기에 따라 각도 조절에 의해 어떤 파형의 진폭은 레일의 건전성을 알려줄 수 있지만 레일에 존재하는 결함을 전부 감지할 수 없다.

그림 4(a)에 나타낸 바와 같이 초음파 탐측각은 $0^\circ, 37^\circ, 45^\circ, 70^\circ$ 가 사용되고 있다. 전자기 유도장치의 경우 높은 전류량을 레일에 보내어 만약 전류가 결함과 만나게 되면 그 전류를 결함주위에 맴돌게 된다. 그림 4(b)와 같이 전류흐름의 변형에 의하여 자기장의 형성으로 결함을 검출할 수 있는 기본 원리이다.

과거에는 레일에 대하여 초음파 기술만이 적용되어져 왔다. 레일의 전단방향과 길이 방향으로 검사할 수 있었다. 그러나 표면과 표면적하 결함의 증가는 head check과 같은 결함을 기존의 검사기술만으로는 그 요구에 부응할 수 없고 과거의 적용 기술보다 발생되고 있는 결함을 보다 정확하고 형상을 알 수 있는 기술이 필요하게 되었다. 또한 검사차량의 속도 또한 주요한 고려 대상되었다. 그러한 해결책에 상당히 접근되어 있는 기술이 와전류를 이용한 탐상 기술이다. 초음파 기술과는 달리 와전류 방식은 표면검사 기술이다. 그림 5에서 나타낸 바와 같이 독일 DB에서는 레일 gage corner에 발생되고 있는 head check 결함을 와전류

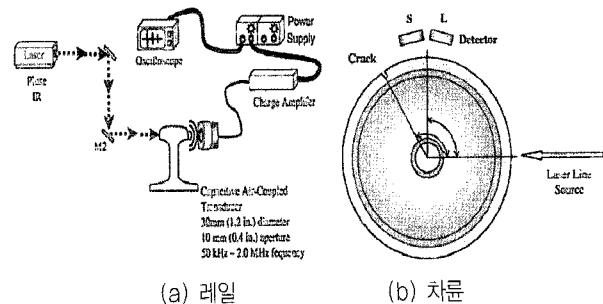


그림 6. UT와 Laser를 혼합한 hybrid 탐상방식

를 이용하여 탐상속도 76 km/h에서 탐상하고 있다.

그림 6은 TTCI와 Johns Hopkins 대학이 공동으로 연구한 UT와 Laser를 혼합한 hybrid 탐상 방식인 이른 바 LAHUT(Laser-Air Hybrid UT)를 레일과 차륜에 적용한 것을 나타낸다. 이 방식은 기존 초음파가 수분 또는 오일에 의해 접촉식으로 결함을 탐상하는 방식대신에 비접촉식으로 결함을 탐상하는 방식이다.

현재 레일의 탐상은 레일탐상차를 이용하여 결함을 조기에 발견하고 발견된 결함에 대해서는 연마를 실시하고 있다. 일반적으로 레일 탐상방식은 초음파를 이용하여 레일의 결함을 발견하는 시스템으로 구성되어 있으며 내부 균열 탐상을 목적으로 도입되고 있다. 이러한 레일 탐상차의 주요 특징으로서는 초음파 시스템을 가동하여 초음파를 발생 탐촉자(probe)로 레일두부에 수평으로 이동하면서 얻은 정보를 모니터를 통해서 확인 기록 유지하며 균열 개소를 페인트로 표시를 하여준다. 또한, 탐촉자는 0°, 35°, 70°의 3종류로 되어 있고 레일의 두부, 복부, 저부의 일정부분에 대하여 결함을 탐지하고 있다. 그러나 초음파를 이용한 레일 탐상에 있어 탐상이 불가능한 수직균열 등의 경우가 있으며 탐촉자를 피검체에 접촉시킬때 야기되는 문제점이 있다.

4. 향후 과제

지금까지 연구되고 있는 비파괴 탐상기술은 기존의 비파괴 탐상기술과 다른 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- ① 균열깊이 2 mm 이상의 균열 검출은 약 100%이다
- ② 표면 코팅 10 mm 두께의 제거 없이 균열을 검출할 수 있다.
- ③ 실제 균열 길이와 깊이를 형상화할 수 있다
- ④ 이러한 DB의 축적으로 검사방법과 주기를 결정할 수 있다.

비파괴 탐상기술 분야에서도 많은 연구와 노력이 더해져 기술이 점점 진보되어 가고 있지만 아직까지 차륜-레

일 시스템에 있어 해결되어야 하는 다음과 같은 문제점이 있다.

1) 탐상영역

접촉방식 탐촉자의 경우 레일의 두부에서 저부까지 레일 중심축을 중심으로 10mm 범위의 결함을 탐상하고 있어, 특정부분의 결함을 탐상할 수 없는 사각지대가 있다.

2) 검출 불가능 결함용접부에 있는 용접재의 용입 부족 등의 용접결함은 결함의 면이 평평하고 수직이기 때문에 반사된 초음파가 탐촉자의 반향으로 돌아오지 못해 결함을 검출할 수 없다

3) 탐상속도

탐상속도와 탐상의 정확도를 향상시켜야 한다.

4) 탐촉자의 위치제어

탐촉자가 레일의 중심에서 벗어나거나 접촉각도의 경사에 의해 레일의 저부에 초음파가 입사되지 않는 경우, 결함을 검출할 수 없다

5) 검출위치 정도

검출위치 정보는 엔코더 차륜의 회전수와 지상자의 신호검지에 의해 보정되어 산출되지만 운전조건에 의해 빠르게 차륜회전수에서 얻어지지 않거나 지상자 신호의 오작동에 의해 큰 오차가 발생할 가능성이 있다.

향후에는 복합화된 측정시스템을 차량에 간소화 및 최적화하여 탑재하는 방식으로 차륜-레일의 유지보수에 사용되는 시간을 최소화하는 노력이 필요하다. ♪

♣ 참고 문헌

1. Wolfgang Kappes, ECNDT 2006-Th 1.4.1
2. Robin Clark, NDT&E International, 2004, 37, 111-118
3. Rainer Pohl, NDT&E International, 2004, 37, 89-94
4. Robert E, Ultrasonics, 2004, 42, 9-16
5. 철도차량 탈선 안전성능 평가 및 사고방지기술개발 보고서, 2008, 국토해양부