

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/288684466>

Study on MFL Technology for Defect Detection of Railroad Track Under Speed-up Condition

Article in Journal of the Korean society for railway · October 2015

DOI: 10.7782/JKSR.2015.18.5.401

CITATIONS

3

READS

1,120

4 authors, including:



Donghoon Kang

Korea Railroad Research Institute

83 PUBLICATIONS 1,002 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Jitaek Oh

Korea Railroad Research Institute

3 PUBLICATIONS 80 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Seunghee Park

Sungkyunkwan University

182 PUBLICATIONS 2,805 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Development of Advanced Sensing Technology for Enhancing Maintainability of Railway Systems [View project](#)



AI in NDT [View project](#)

증속에 따른 누설자속기반 철도레일 결함탐상 기술 적용성 검토

Study on MFL Technology for Defect Detection of Railroad Track Under Speed-up Condition

강동훈* · 오지택 · 김주원 · 박승희

Donghoon Kang · Ji-Taek Oh · Ju-Won Kim · Seunghee Park

Abstract Defects generated in a railroad track that guides the railroad vehicle have the characteristic of growing fast; as such, the detection technology for railroad track defects is very important because defects can eventually cause mass disasters like derailments. In this study, a speed-up test facility was fabricated to investigate the feasibility of using magnetic flux leakage (MFL) technology for defect detection in a railroad track under speed-up condition; a test was conducted using a railroad track specimen with defects. For this purpose, an MFL sensor head dedicated to the configuration of the railroad was designed and test specimens with artificial defects on their surfaces were manufactured. Using the test facility, a speed-up test ranging from 4km/h to 12km/h was performed and defects including locations were successfully detected from MFL signals induced by defects with enhanced visibility by differentiating raw MFL signals. In the future, it should be possible to apply this system to a high-speed railroad inspection car by improving the lift-off stability that is necessary for speed-up of the developed MFL sensor system.

Keywords : Railroad track, Defect detection, Magnetic flux leakage, Speed-up test

초 록 철도에서 차량의 가이드 역할을 하는 레일에 결함이 발생할 경우 빠르게 진전하는 특성이 있으며 차량의 탈선과 같은 대형사고로 이어질 수 있어 레일 결함 탐상 기술은 매우 중요하다. 본 연구에서는 증속에 따른 누설자속기반 철도레일 결함탐상 기술의 적용성 검토를 위해 증속이 가능한 레일 탐상 장치 제작 및 결함 레일 시편에 대한 탐상시험을 수행하였다. 이를 위해, 철도레일 형상에 맞는 센서부 및 자화부를 설계하였고 인공결함을 갖는 결함 레일 시편을 제작하였다. 제작된 시험 장치를 이용해 4km/h에서 12km/h까지 속도를 증가시키며 결함에 의해 생성되는 누설자속을 측정하였고 원 신호의 미분을 통한 가시성 향상으로 결함 판별 및 결함 위치를 성공적으로 확인하였다. 향후 리프트 오프 유지 등 고속화에 필요한 점을 보완할 경우 고속 검출차에도 적용가능 할 것으로 생각된다.

주요어 : 철도레일, 결함탐상, 누설자속, 증속시험

1. 서 론

철도에서 차량의 가이드 역할을 하는 레일의 경우 고탄성강을 사용하여 중량의 차량하중을 극히 작은 접촉면적으로 지지하기 때문에 타 교통수단에 비해 진동저항이 낮은 장점이 있는 반면, 작은 접촉면적으로 높은 응력($1,000\text{kN/mm}^2$ 이상)이 발생하며 이는 차륜과 레일의 소성변형(plastic deformation)으로 이어져 결과적으로 다양한 형태의 결함을 유발한다.

또한, 레일에 발생되는 결함은 매우 빠르게 진전되는 특성이 있으며, 심할 경우 차량의 탈선이라는 극단적인 대형사고를 유발하게 되므로 레일 결함에 대한 신속하고 정밀한 검출은 안전한 철도운영을 위한 레일의 유지보수 측면에서 매우 중요하다.

레일관련 연구는 훨-레일 접촉 문제[1]나 피로수명 평가[2]와 같은 전통적인 연구 주제에서 2004년 최고속도 300km/h의 고속철도 KTX가 본격적으로 상용화되면서 운행속도가 크게 증가하였고, 이로 인해 훨-레일 인터페이스에서 충격량이 지수(exponential) 함수적으로 증가해 결함의 크기를 증폭시키고 결함의 발생 주기를 단축시키게 되면서 레일 결함 관련 연구의 중요성이 증가하고 있다.

레일의 결함 단계는 손상 레일, 균열 레일, 파괴 레일의 세 가지로 구분되며 일반적으로 결함이라 함은 균열 단계, 즉 레일 전체 길이의 어느 위치에서든 단면의 위치와 상관없이 균열이 있는 레일을 말하는데 특별히 정해진 패턴은 없으며, 외관상 보일 수도,

*Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5760, E-mail : dhkang@krri.re.kr.

© 2015 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JCSR.2015.18.5.401>

보이지 않을 수도 있는 상태를 의미한다. 한편, 레일의 손상유형은 Fig. 1과 같이 구름접촉피로(rolling contact fatigue), 두부 표면의 경화(shelling), 표면상의 미세균열(head check) 및 작은 금속조각의 형태로 표면이 떨어지게 되는 스팔링(spalling)이나 심한 경우 압좌(squats) 등이 있다. 뿐만 아니라, 차륜 및 레일 화손(wheel & rail burns)이나 레일 표면의 단파장 결함(short wave defect)에 해당하는 파상마모(corrugation)나 레일 용접부 등에 발생하는 손상을 비롯하여 자갈 비산에 의한 표면 손상, 주로 곡선부 외측 레일에 나타나는 마모(wear), 부식(corrosion) 등 매우 다양하다.

레일의 결함을 탐상하기 위한 기술[3]에는 초음파(ultrasonics), 와전류 탐상(Eddy Current Testing, ECT), 누설자속탐상(Magnetic Flux Leakage, MFL) 등 여러 가지가 있으며 레일이나 레일체결장치의 결함 탐상을 위한 다양한 선행 연구[4,5]가 수행된 바 있다. 레일 결함 탐상을 위해 국내에서는 주요 위험 지점에 대한 육안 또는 수동 탐상이나 신호 장애검지 등의 방법을 주로 이용하였으나 최근 성능이 향상된 레일 검측차(railroad inspection car) 도입을 통해 탐상 효율성을 향상시키고 있다. 현재, 고속 종합검측차(200km/h 이상)의 경우 대부분 레일의 단면형상이나 마모를 검측하기 위해 고속카메라와 레이저를 동시에 이용하는 방법을 채택하고 있다. 하지만, 고속카메라에 의한 방식은 이미지 프로세싱을 거치는 과정에서 판독률에 영향을 받으며, 많은 데이터를 후처리(post-processing)함에 따른 시간 소요 및 큰 데이터 저장용량 등이 단점으로 지적되고 있다. 이를 개선하기 위해, 레일과 같은 연속 체에 대한 고속탐상이 가능한 누설자속탐상(이후 MFL) 기술에 대한 연구[6,7]가 주목받고 있다.

MFL은 레일뿐만 아니라 가스 배관결함[8]이나 용접부 부식[9] 판정 등에도 많이 활용되는 전통적인 비파괴검사(Nondestructive Testing, NDT) 기술이다. 또한, 로봇 기술과의 접목을 통해 사장교 케이블의 결함 탐상을 위한 MFL 로봇 시스템[10]이 개발되기도 하였다. MFL 기반의 비파괴검사에 있어 센서의 이동 속도는 리프트오프와 함께 가장 중요한 변수로, 그 영향이 해석적인 방법을 통해 밝혀진 상태이다[11-14]. 따라서, 기존 연구의 경우 대부분 MFL 센서와 결함 탐상을 위한 대상체 사이의 상대속도가 매우 낮은, 즉 정적상황에서의 탐상인 데 반면, 고속 종합검측차와 같이 대상체가 빠르게 움직이는 환경에 MFL 기술을 적용하기 위해서는 속도 증기에 따른 MFL 센서 시스템의 적용성 검토가 필요하다[15,16].

따라서, 본 연구에서는 철도레일 결함탐상을 위한 MFL 기술의 적용성 검토를 위해 증속 환경 모사가 가능한 전용 시험 장치를 제작하였고, 인공결함을 모사한 레일시편에 대한 적용 시험을 통해 적용성을 검토하였다.

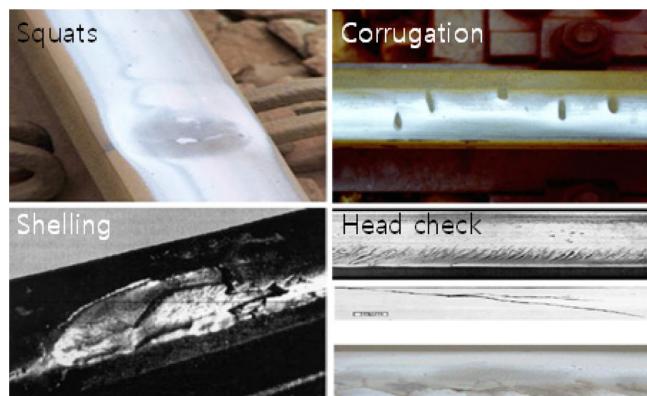
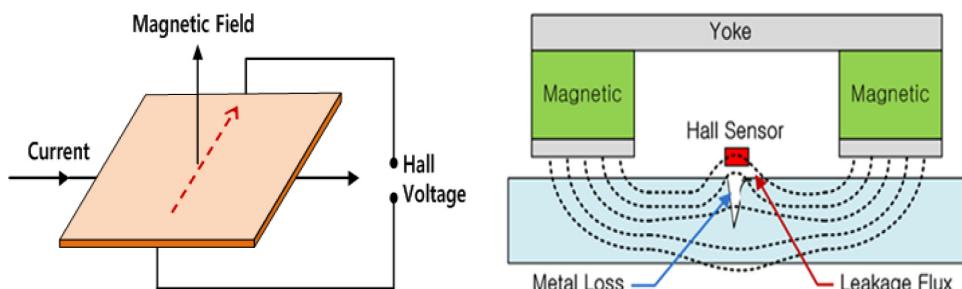


Fig. 1. Types of fault generated in railroad track.



(a) Hall effect [17] (b) Diagram of MFL method

Fig. 2. Principle of MFL technology for defect detection [7].

2. MFL 기반 결합탐상 원리

강한 외부자기장을 사용하여 강자성체를 자기포화 상태로 만들었을 경우, 강자성체 표면이나 내부에 국부결함이 존재한다면 Fig. 2[7]와 같이 이 결함 주변에 누설 자속이 발생하며 누설되는 자속의 세기는 홀센서를 통해 계측이 가능하다. 그림과 같이 홀센서가 자기장에 놓이면 전류와 자기장 방향에 수직한 훌 전압이 발생하는데 이를 훌 효과(Hall effect)라고 한다[17]. 이러한 훌 효과를 이용하여 누설 자속의 세기를 훌 전압으로 전환하고 이를 DAQ 장비로 획득하여 가시적으로 표현[18]하는 것이 MFL을 기반으로 한 결합탐상 원리이다.

3. 레일 맞춤형 MFL 센서헤드 제작

본 연구는 증속 환경에서 MFL 기술 기반의 레일 결합 탐상 적용성 검토를 목표로 하고 있다. 따라서, 빠른 속도로 레일을 탐상하는 과정에서 레일과 센서 헤드간 간섭이 없도록 레일의 형상을 고려한 레일 맞춤형 MFL 센서헤드 설계가 필요하다. MFL 센서 헤드는 크게 자화부(magnetization part)와 계측부(measurement part)로 구분되며, 자화부는 탐상 대상체를 자화시키는 역할을 하고 계측부는 대상체에 결함이 있을 경우 누설되는 자속을 계측하는 역할을 한다. Fig. 3은 본 연구에서 제작된 레일 맞춤형 MFL 센서 헤드를 보여주고 있다. Fig. 3에서 자화부는 레일의 형상을 고려하여 총 14개의 채널로 구성하여 탐상 대상영역을 모두 포함할 수 있도록 하였고, 센서 헤드의 프레임은 자화부에서 형성된 자기장에 영향을 주지 않는 동시에 헤드부의 경량화를 위해 알루미늄 소재를 사용하였다. MFL 센서는 시편과 센서 헤드의 홀센서 및 자화부 사이의 거리에 따라 민감도에서 큰 차이를 보이므로, 리프트 오프(lift-off) 거리를 일정하게 유지할 수 있도록 레일 두부(head) 단면과 같은 형상으로 프레임 내부 단면을 설계하였다. 또한, 이동 중 마찰에 의한 오차 등 대상체와의 충돌 위험성을 줄이고 높은 해상도를 위해 리프트 오프 거리는 일정(2mm)하게 유지하였다.

한편, 자화부의 구성은 Fig. 4와 같이 35N 등급의 영구자석(neodymium magnet, 4mm×15mm×5mm)과 이를 연결하는 말굽모양

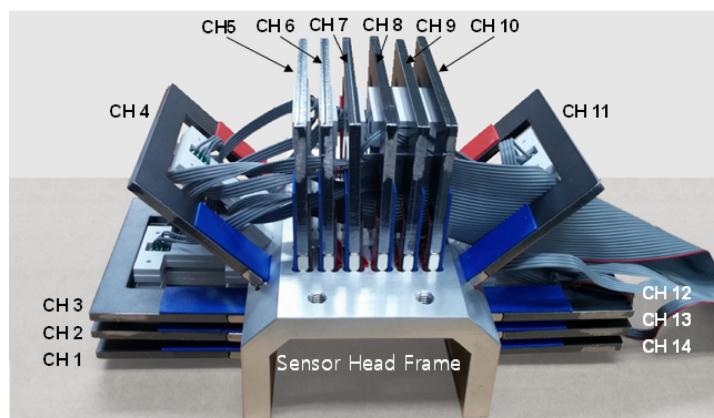


Fig. 3. Fabricated MFL sensor head.

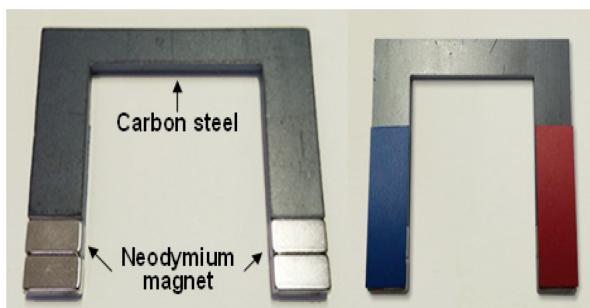


Fig. 4. Configuration of magnetization part.

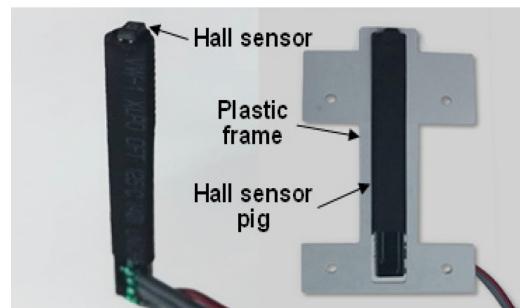


Fig. 5. Hall sensor pig with plastic packaging.

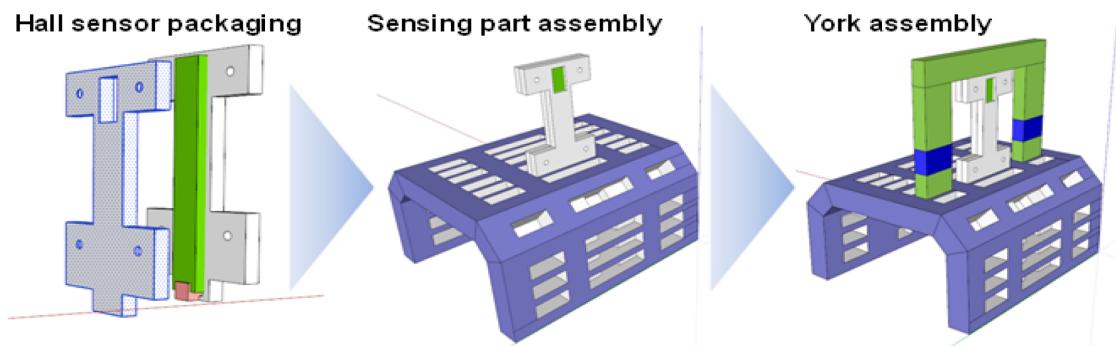


Fig. 6. Assembly procedure for sensor head fabrication.

의 탄소강(carbon steel)을 이용해 요크(york) 형태로 제작하였다. 또한, 영구자석을 탄소강 양단에 각각 두 개씩 부착하여 말굽자석처럼 요크를 제작해 시편이 위치하게 될 요크 하단으로 자기장이 형성되게 하였다.

따라서, 자화부 내 총 14개의 요크는 레일의 단면 방향으로 일정한 간격으로 같은 극성끼리 배치되어 센서 헤드가 하나의 큰 자석형태와 같이 시편에 고르게 자기장을 형성하게 된다. 또한, 자화부는 안정적으로 일정한 자기장 형성이 가능하도록 영구자석을 사용하였고, 이로 인해 전자석과 달리 자화를 위한 별도의 전력선이 불필요해 간단한 형상으로 경량화된 시스템 구성이 가능하였다.

계측부의 경우 Fig. 5와 같이 홀센서(KSY10, Siemens)를 끝단에 부착한 홀센서 피그 형태로 제작한 후 플라스틱 소재로 패키징하였다. 총 14개의 홀센서 패키징을 레일의 표면을 따라 일정한 간격의 배열 구조로 구성하였다. 마그네틱 센서의 경우 자기장의 세기가 대상체와 센서 간 거리에 따라 민감도에 큰 차이를 보이므로 홀센서 패키징 하부에 홀센서를 인접시켜 리프트 오프 거리를 최소화하였다. Fig. 6은 홀센서 패키징 및 요크와의 결합 후 프레임에 조립하여 센서 헤드부를 완성하는 일련의 과정을 보여주고 있다.

한편, 누설자속의 측정은 우선 터미널 보드의 SMPS(Switching Mode Power Supply)를 이용해 각 홀센서로 안정적인 전류(DC)를 흘려주고 각 홀센서에서 계측된 신호는 14채널의 터미널 보드 및 DAQ를 통해 디지털 신호로 수집한 후 TCP/IP 통신을 통해 컴퓨터로 전송하였다. 본 제작 장비의 구동 및 제어를 위한 UI(user interface)는 LabVIEW® 프로그램을 이용하여 직접 제작하였다.

4. 레일 결함탐상 증속 시험 장치

증속 환경에서의 MFL 기반 레일 결함 탐상 기술 적용성 확인을 위해 Fig. 7과 같이 레일 탐상 증속 시험 장치를 제작하였다.

본 시험 장치는 향후 고속 검출차량 등에 대한 탑재를 염두에 두고 같은 환경에서 레일결함 탐상 적용성을 확인하기 위한 목적으로 고안되었으며, 이를 위해 MFL 센서 헤드가 레일과 일정한 리프트 오프를 유지하면서 레일 위를 일정한 속도로 이동하며 스캐닝할 수 있게 제작되었다. 이를 위해 시험장치는 직선형 직교 로봇 모듈, 직선형 모터 드라이버, PLC(programmable logic controller) 및 시험장비 몸체 구조로 구성되었다.



Fig. 7. Experimental setup for rail defect detection.

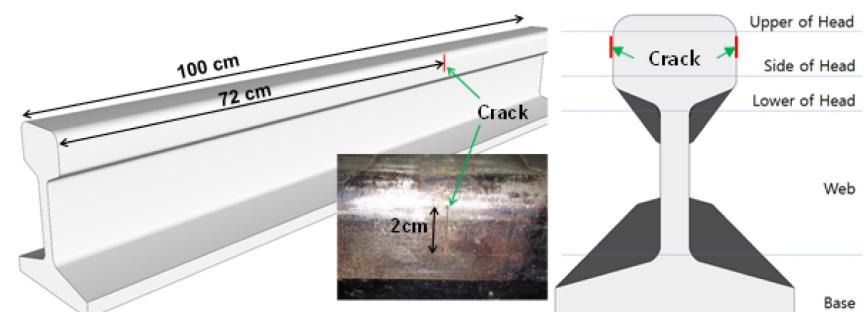
시험 장치 몸체의 테이블 위에 결합 레일을 위치시킨 후 MFL 센서 헤드가 조립된 블록의 고속 직선 반복운동을 통해 철도 검측 차량의 주행 중 레일 두부 표면 검사를 모사하는 방식이며 스트로크는 최대 960mm, 최고 속도는 12km/h (3.3m/s)로 3단 조절이 가능하며 PLC를 통해 N회 연속 반복측정이 가능하도록 하였다.

5. 레일 결함탐상 시험

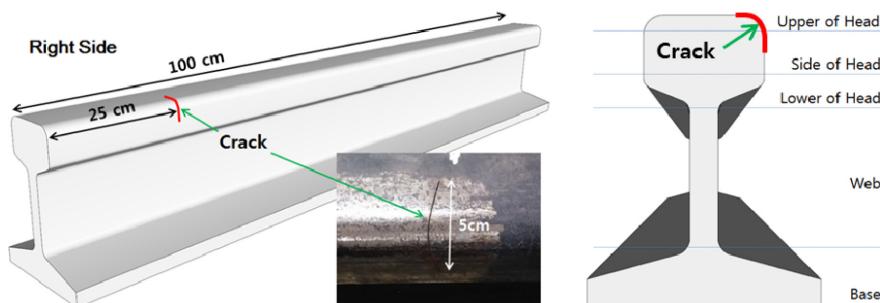
제작된 시험 장치를 이용하여 이동 환경하에서 MFL 기술의 적용성 검토를 위해 인공결함이 존재하는 레일 시편에 대한 결함 탐상 시험을 실시하였다. 총 2개의 시편으로 실험을 수행하였으며, 1번 시편의 경우 인공결함을 Fig. 8(a)과 같이 1m 길이의 레일 좌, 우 두부 측면(side head) 끝단으로부터 72cm 지점에 각각 2cm의 노치(notch) 형태로 제작하였다. 결함의 위치는 제작된 센서 헤드 채널 중 좌측은 2, 3번 채널, 우측은 12, 13번 채널과 가장 근접한 것으로 확인되었다. Fig. 8(b)에 나타낸 2번 시편의 경우 시편은 끝단으로부터 25cm 지점에 두부 우측의 상·측면에 걸친 길이 5cm의 노치를 발생시켰고, 좌측에는 손상이 존재하지 않는다. 이때 노치손상의 위치는 센싱채널 9-13번에 해당된다. 센서 헤드의 이동 속도는 1단계(4km/h)로 설정하였고, 자속신호는 14채널의 센서 헤드를 통해 500Hz의 샘플링속도로 동시에 측정하였다.

Fig. 9(a)에서 위와 같이 계측된 원 자속 신호(raw signal of magnetic flux)의 경우 상하로 랜덤하게 움직이게 되는데 이는 센서 헤드의 이동속도, 대상체의 자기분포, 리프트 오프 등 다양한 요인에 의한 노이즈 영향 때문이며 결함 탐상의 방해요인으로 작용한다. 따라서, 노이즈의 영향을 배제하고 MFL 신호에 대한 가시성 향상을 위해 Fig. 9(b)와 같이 원 신호를 미분해 순간 변화량을 신호처리에 활용하였다[16]. 이처럼 순간변화량을 이용하는 신호처리의 경우 본 연구의 탐색 대상인 노치와 같이 좁은 폭을 가지는 갑작스러운 단면변화에서 가장 효과적이지만, 누설자속신호의 형태에서 살펴보면 자계가 전환되는 부분에서 급격한 자속의 변화가 발생하기 때문에 다른 유형의 손상검색에 있어서도 누설자속기법에 효과적인 신호처리 기법으로 판단된다.

Fig. 10의 결함 시편에 대한 탐상 결과를 보면 원 신호의 경우 다른 몇몇 채널의 신호를 볼 때 실제 결함 위치인 채널 2, 3 및 채널 12, 13만으로 결함 위치를 한정하기는 쉽지 않다. 반면, 원 신호를 미분해 누설자속의 순간 변화량을 나타낸 결과를 보면 시편의 좌측면 상부에 해당하는 채널 2, 3과 우측면 상부에 해당하는 채널 12, 13만을 결함으로 한정해도 될 만큼 가시성이 향상된 것



(a) Rail specimen #1



(b) Rail specimen #2

Fig. 8. Configuration of test specimen and defect location.

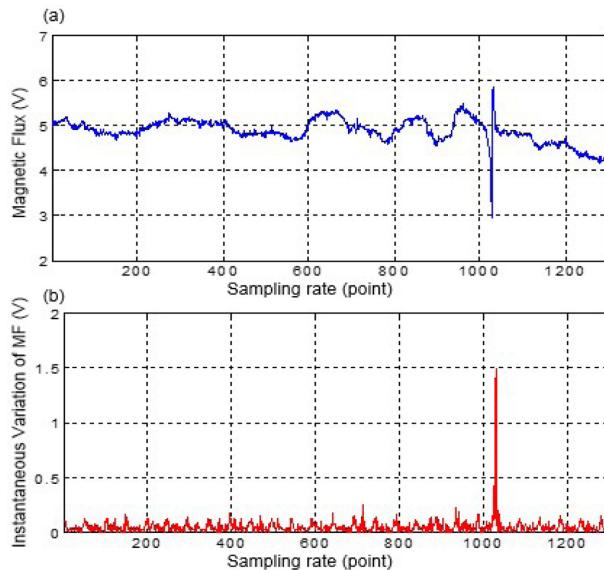


Fig. 9. Magnetic flux signal (a) Raw, (b) Differentiated.

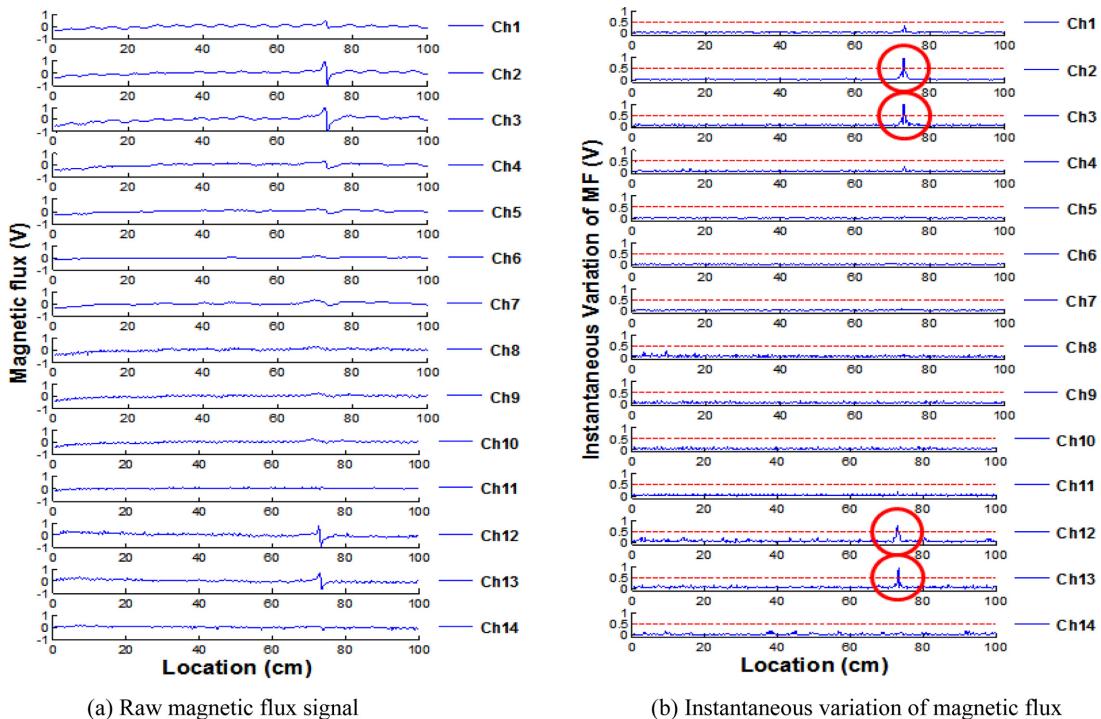


Fig. 10. Results for test specimen #1 at speed of 4km/h.

을 알 수 있다. 그리고, 본 진단 시스템을 통해 유추된 축 방향의 결함 위치 추정 값이 실제 결함의 위치와 정확하게 일치함을 확인할 수 있었다.

손상이 우측 상-측면에만 존재하였던 2번 시편의 탐상결과를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 시편의 좌측에 해당하는 1-7번 채널에서는 자속누설신호가 나타나지 않아 정상상태로 판단되었고, 우측의 경우 약 23cm 지점의 9~13번 채널에 걸쳐 넓은 범위에서 자속 누설이 발생함을 확인할 수 있어 이를 통해 2번 시편 우측상부의 손상을 판단할 수 있었다. 이는 실제 손상 발생위치와 일치하였고, 손상의 축방향 위치는 2cm 정도의 오차가 있었지만 이는 센서헤드의 가속/감속에 따른 오차로 추후 연구를 통해 해결 가능한 것으로 판단된다.

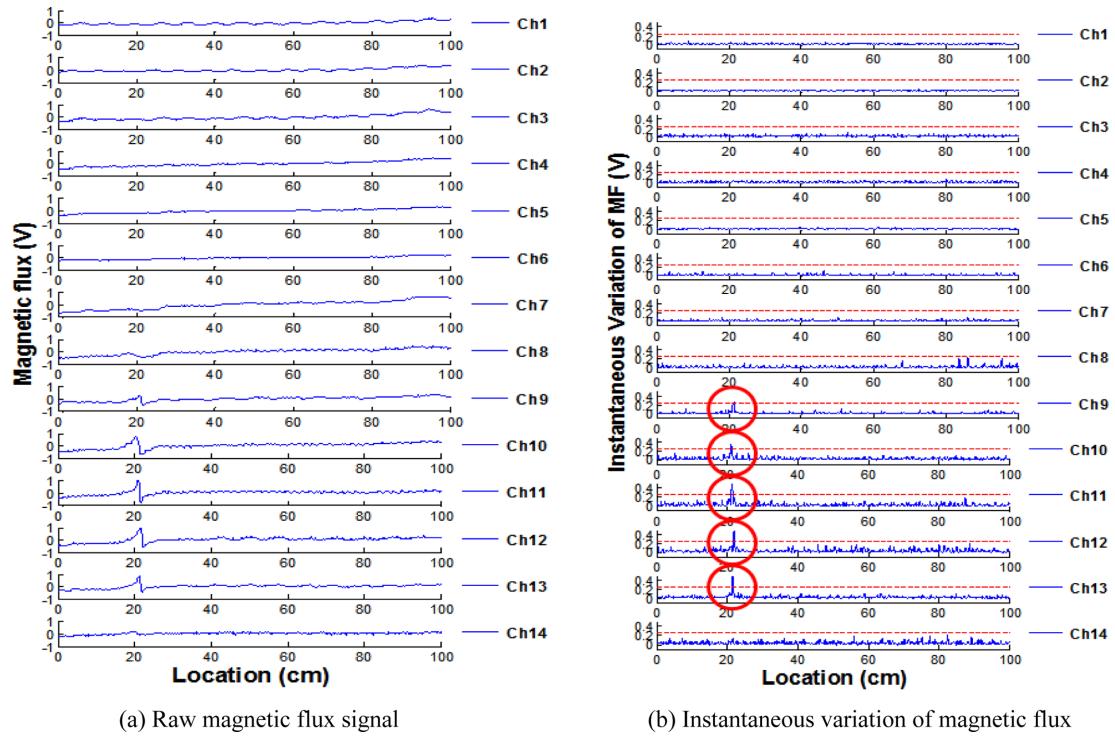


Fig. 11. Results for test specimen #2 at speed of 4km/h.

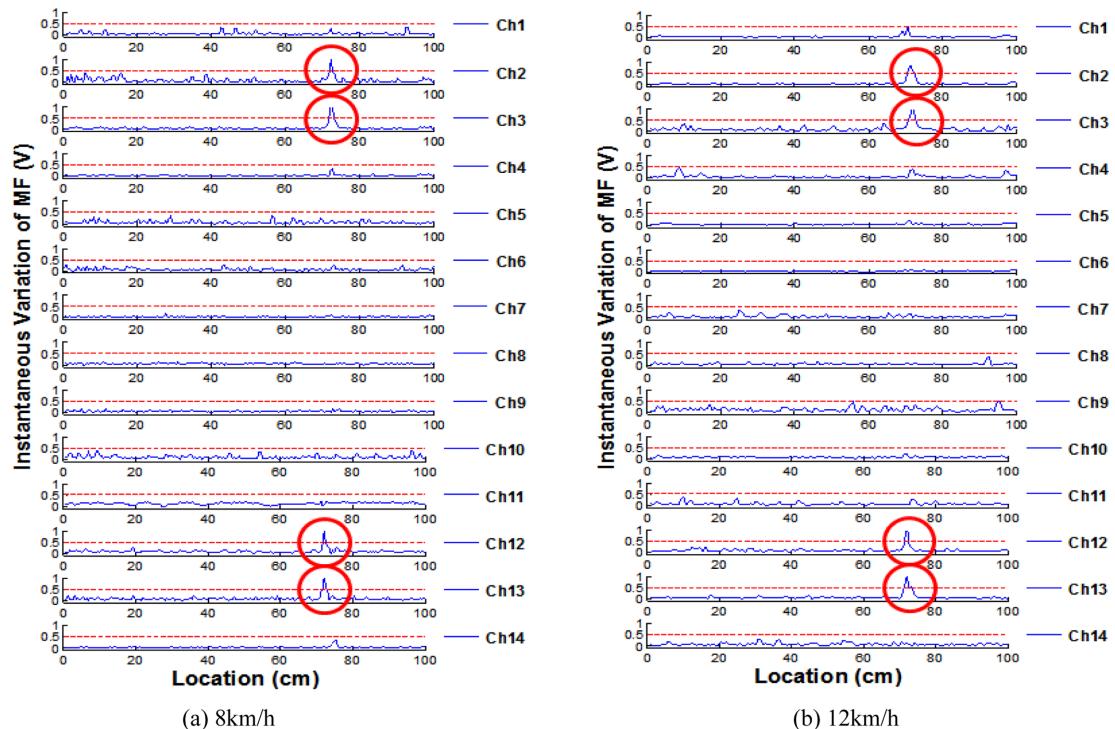


Fig. 12. Results for test specimen at speeds of (a) 8km/h and (b) 12km/h.

이와 같은 일련의 실험을 통해 철도레일의 결함이 누설자속기법을 이용하여 충분히 진단 가능하며 결함의 축방향 위치뿐만 아니라, 홀센서의 원주방향 어레이 배치를 통해 채널별로 탐지되는 신호를 분석함으로써 손상의 형상까지 추정 가능함을 확인할 수 있었다.

한편, 센서 헤드의 이동속도 증가에 따른 영향을 확인하기 위해 1번 시편을 대상으로 속도를 2단계(8km/h), 3단계(12km/h)로 증가시키며 시험을 수행하였다. Fig. 12의 결과에서 이동 속도가 8km/h, 12km/h로 증가되더라도 MFL 신호로부터 유추된 결함 위치는 실제 결함 위치와 잘 일치하였다. 한편, 속도가 증가할수록 MFL 신호의 폭이 상대적으로 넓어지는 모습을 보였는데 이는 기존 속도영향에 의한 MFL 신호변화 연구의 시뮬레이션 결과와 유사한 패턴을 보였으며[12,13], 샘플링이 500Hz로 고정되어 해상도 부족으로 인해 더욱 그 폭이 크게 표현된 것으로 판단된다. 이는 고속 탐상 시 속도증가에 따라 샘플링도 함께 증가시켜준다면 해결이 가능하다. 하지만, 속도 증가에 따라 기저(baseline)에 형성되는 노이즈 레벨이 상대적으로 조금씩 증가하는 것은 앞서 말한 것처럼 속도 증가에 따라 리프트오프 유지가 상대적으로 어려워지기 때문이며 향후 고속 검측차 적용을 위해서는 센서헤드의 기계적 개선이 필요할 것으로 생각된다.

6. 결 론

본 연구에서는 중속 환경에서의 MFL 기반 레일 결함 탐상 기술의 적용성 검토를 위해 레일맞춤형 누설자속 센서헤드 및 중속 시험 장치를 제작하였으며, 이를 활용하여 인공적인 결함을 발생시킨 레일 시편을 대상으로 탐상 시험을 수행하였다. 이러한 연구를 통해 얻어진 결론은 아래와 같다.

철도레일 형상을 고려한 센서부 및 자화부 설계를 통해 레일 맞춤형 MFL 결함 탐상 시스템의 구축이 가능하였고, 이는 실제 레일구조물을 대상으로 수행한 실험에서 효과적으로 활용되었다. 누설자속 기법을 활용하여 철도레일의 결함을 탐상한 결과 누설자속신호의 발생지점과 실제 결함의 위치가 일치함을 확인 하여, 본 기법을 이용한 철도레일 결함의 탐상이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 결함의 축방향 위치뿐만 아니라, 훌센서의 원주방향 어레이 배치를 통해 채널별로 탐지되는 신호를 분석함으로써 손상의 형상까지 추정 가능함을 확인하였다. 또한 본 연구에서 적용된 누설자속 원 신호에 대한 미분을 통해 결함 판별 및 위치 확인을 위한 가시성 향상이 가능함을 확인하였다. 마지막으로 결함 탐상 중속 시험을 통해 본 연구의 최고 속도인 12km/h(3.3m/s)에서도 2cm의 레일 결함에 대한 정확한 판별 및 위치확인이 가능함을 확인하였고 이를 통해 본 기법의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

향후 리프트 오프 유지 장치 개선 및 내구성 확보 등의 고속화에 필요한 점들을 보완한다면 최종 목표로 하고 있는 고속 검측차에의 적용도 충분히 가능하리라 생각한다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 자체사업 및 국토교통부의 U-City 인력양성사업의 연구비 지원에 의해 수행되었고, 이에 감사드립니다.

References

- [1] K.S. Song, S.H. Han, Y.S. Choi (2014) Wheel/rail contact analysis with consideration of friction and torque, *Journal of the Korean Society for Railway*, 17(1), pp. 14-18.
- [2] S.Y. Kong, D.Y. Sung (2014) The fatigue life evaluation of continuous welded rail on a concrete track in an urban railway, *Journal of the Korean Society for Railway*, 17(3), pp. 193-200.
- [3] S.W. Han, S.H. Cho (2011) Review of non-destructive evaluation technologies for rail inspection, *Journal of the Korean Society for Non-destructive Testing*, 31(4), pp. 398-413.
- [4] S.W. Han, S.H. Cho, J.W. Kim, T.H. Heo (2012) Research on the non-contact detection of internal defects in a rail using ultrasonic waves, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 22(10), pp. 1010-1019.
- [5] J. Park, J. Park (2014) Identification of structural defects in rail fastening systems using flexural wave propagation, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 34(1), pp. 38-43.
- [6] S. Park (2013) Nondestructive evaluation technique for continuum structures using non-contact magnetic flux leakage(MFL) measurement, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 33(1), pp. 96-101.
- [7] D. Kang, S. Park, J. W. Kim, S. Y. Park (2014) Non-contact local fault detection of railroad track using MFL technology, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 14(5), pp. 275-282.
- [8] M.H. Kim, Y. W. Rho, D. H. Choi (2010) Pipeline defects detection using MFL signals and Self Quotient Image, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 30(4), pp. 311-316.
- [9] H.W. Jeong, K. Seo, S. Park (2005) Research of corrosion decision on a region weld in MFL system, *Proceedings of the Summer Conference*

ence of the Korean Institute of Electrical Engineers, Phoenix resort, Pyeong Chang, pp. 978-980.

- [10] J.W. Kim, J.S. Choi, E.C. Lee, S.H. Park (2014) Field application of a cable NDT system for cable-stayed bridge using MFL sensors integrated climbing robot, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 34(1), pp. 60-67.
- [11] Y.K. Shin, W. Lord (1993) Numerical modeling of moving probe effects for electromagnetic NDE, *IEEE Transaction on Magnetics*, 29(2), pp. 1865-1868.
- [12] Y.K. Shin (1997) Numerical Prediction of Operating Conditions for Magnetic Flux Leakage Inspection of Moving Steel Sheets, *IEEE Transaction on Magnetics*, 33(2), pp. 2127-2130.
- [13] Y.S. Sun, W. Lord, G. Katragadda, Y.K. Shin (1994) Influences of velocity on signal responses of magnetostatic non-destructive testing tools: a prediction from finite element analysis, *IEEE Transaction on Magnetics*, 30(5), pp. 3308-3311.
- [14] Z. Chen, J. Xuan, P. Wang, H Wang (2011) Simulation on high speed rail magnetic flux leakage inspection, *Proceedings of the Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 1-5.
- [15] P. Wang, Y. Gao, G.Y. Tian, H. Wang (2014) Velocity effect analysis of dynamic magnetization in high speed magnetic flux leakage inspection, *NDT & E International*, 64(1), pp. 7-12.
- [16] J. Jun, M. Choi, J. Lee, J. Seo, et al. (2011) Nondestructive testing of express train wheel using the linearly integrated Hall sensors array on a curved surface, *NDT & E International*, 44(5), pp. 449-455.
- [17] D.R. Son (1997) Principles and applications of magnetic sensor, *Journal of the Korean Magnetics Society*, 7(6), pp. 334-339.
- [18] E. Ramsden (2006) Hall-effect sensors : theory and application, *Newnes*, Oxford, U.K., pp. 1-272.

(Received 24 April 2015; Revised 22 June 2015; Accepted 12 August 2015)

Donghoon Kang : dhkang@krri.re.kr

Advanced Materials Research Team, Korea Railroad Research Institute, #176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Ji-Taek Oh : jtoh@krri.re.kr

Global Marketing Division, Korea Railroad Research Institute, #176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea

Ju-Won Kim : malsi@nate.com

Department of Convergence Engineering for Future City, Sungkyunkwan University, #2066, Seobu-ro, Suwon-si, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

Seunghee Park : shparkpc@skku.edu

School of Architectural, Civil & Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, #2066, Seobu-ro, Suwon, Gyeonggi-do, 440-746, Korea