

철도 시스템 건전성 평가기술 연구 동향

Progress in Health Monitoring Research on Railway System

이상중* 김정국† 김남포**
Sang-Jung Lee Jeongguk Kim Nam-Po Kim

ABSTRACT

The railway in Korea has been one of important transportation means as the introduction of high-speed train and progress in subway systems. Also, as increases in the speed of train, the guarantee of safety becomes more important, especially, in the fields of railway vehicles and/or facilities. The structural health evaluation for the prevention and diagnosis of the accidents could be conducted using several types of nondestructive evaluation techniques such as ultrasonic developed using infrared thermography or optic fiber sensors. In this paper, the recent progress in structural health evaluation for railway systems has been introduced, and the case studies have been discussed.

1. 서론

철도 산업은 고속철도의 건설과 지하철 및 경전철의 발달로 교통수단의 중심으로 자리잡았다. 지하철은 수도권 및 주요도시에서 운영되고 있으며 범위가 계속 확대되고 있다. 지하철의 하루 평균 이용객 수는 수백만 명에 달하기 때문에 결함 사고에 의한 운행 정지는 사회적으로 큰 혼란을 초래하게 된다. 또한 고속철도는 최고 시속 300 km이상으로 운행하기 때문에 작은 결함에 의한 사고도 대형 사고로 이어질 수 있으므로 사전에 철저한 관리가 요구된다.

예방진단을 위한 건전성 평가에는 비파괴 시험이 이용되고 있으며 초음파탐상시험, 방사선투과시험, 음향방출시험 등의 진단법이 많이 적용된다. 하지만 기존의 시험법은 대부분 정지 상태에서만 측정이 가능하여 실제 운행 속도에서는 결함진단이 불가능하다. 또한 방사선법의 경우는 방사선 피폭에 의한 인체 피해 위험이 있어 다른 검사법으로 대체되고 있다.

현재 이러한 문제점을 보완하기 위한 건전성 평가에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 실제 현장에서도 적용되고 있다. 최근에는 실제 운행속도에서 결함진단이 가능한 실시간 건전성 모니터링 기술의 개발을 위한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 건전성 평가의 종류와 방법에 대해 소개하고 현재 철도시스템에 적용 또는 연구개발 중인 실시간 건전성 평가기술에 대해 검토해 보았다.

2. 본론

2.1 건전성 평가기술

건전성 평가는 구조물의 유지보수 및 결함의 조기검출을 위해 실시된다. 건전성 평가에는 구조물의 상태를 변형 또는 손상 시키지 않고 결함진단이 가능한 비파괴검사가 주로 이용된다. 비파괴검사법의 종류로는 내부결함을 측정하는 방사선투과시험과 초음파탐상시험, 표면결함을 측정하는 육안시험, 자분

† 정회원, 한국철도기술연구원, 주행추진연구실, 선임연구원
E-mail : jkim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5518 FAX : (031)460-5299

* 비회원, 한국철도기술연구원, 주행추진연구실, 연구원

** 정회원, 한국철도기술연구원, 주행추진연구실, 책임연구원

탐상시험, 침투탐상시험 등 다양한 검사법이 있고, 각 시험법은 시험체의 크기나 물성에 따라 더 세분화 되기도 한다. 최근에는 비접촉 실시간 검사가 가능한 적외선열화상법이 개발되어 현장에 적용되고 있으며 광섬유 센서를 활용한 실시간 모니터링 기술의 개발도 이루어지고 있다.

2.2 비파괴 시험의 분류

2.2.1 방사선투과시험(Radiographic Testing, RT)

방사선투과시험은 X-선, 감마선 등의 방사선을 시험편에 투과시켜 투과 정도에 따라 필름에 나타나는 형상을 분석하여 내부결함을 검출하는 검사법으로 용접부나 주조품의 내부결함을 검출하는데 적용된다.

방사선투과시험은 결과가 필름에 기록되므로 영구보존이 가능하고 결과의 객관성이 확보되며 검측자에 따른 검사결과의 차이가 크지 않다. 반면에 검사절차가 까다롭고 가격이 비싸며 시험체의 형상 및 크기에 제약을 받는다는 단점이 있다. 특히 방사선 피폭에 의한 인체 피해에 대한 우려로 인해 현재는 의료 분야 이외의 산업에서는 점차 다른 검사법으로 대체되고 있다.[1]

방사선투과시험의 원리는 그림 1과 같다.

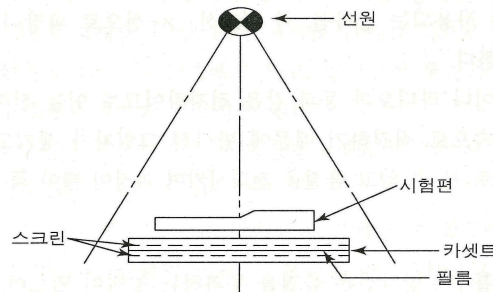


그림 1. 방사선투과시험 원리[2]

2.2.2 초음파탐상시험(Ultrasonic Testing, UT)

초음파탐상시험은 방사선법을 대체하는 시험법으로도 각광받는 검사법으로 불연속 부분에서 반사 또는 굴절되는 초음파의 성질을 이용하여 결함을 검출한다. 주로 용접부, 주조품, 아연품 등의 내부결함의 진단에 적용되며 발전설비, 석유화학 플랜트 등 대형설비의 건전성 및 신뢰성 확보와 잔존수명 예측 기술로도 범위가 확대되고 있다.[3]

초음파탐상시험의 기본 원리는 그림 2와 같으며 건전부와 결함부에서 초음파펄스가 반사되어 돌아오는 시간을 분석하여 결함의 위치 및 크기 정보를 얻을 수 있다.

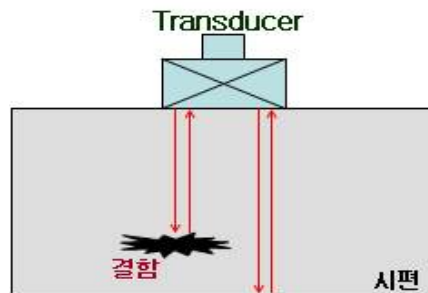


그림 2. 초음파탐상시험 기본 원리

초음파탐상시험은 검사절차를 이해하는데 폭넓은 지식이 필요하고, 불감대가 존재하며 초음파의 전달 효율을 높이기 위해 접촉매질이 필요하다. 또한 표준시험편이 필요하고 결함의 종류를 식별하기 어려운 문제가 있었지만 이러한 문제점들은 기술개발을 통해 많이 개선되었다. 초음파탐상시험의 가장 큰 장점은 인체에 피해를 주지 않는다는 것이다. 그리고 검사결과를 즉시 알 수 있고 내부결함의 위치나 크기, 방향 등에 대한 비교적 정확한 측정이 가능하며 이동성이 양호하다는 장점이 있다.[1]

2.2.3 음향방출시험(Acoustic Emission Testing, AE)

음향방출시험은 물체에 전위, 균열 등이 발생할 때 수반되는 탄성파의 진동을 포착하고 해석하여 결함을 검출하는 검사법으로, 이미 진행된 결함을 찾아내는 다른 비파괴시험들과는 차이가 있으며 결함의 발생과 진행에 대한 모니터링을 할 수 있고 동시에 광범위한 검사도 가능하다.

음향방출시험은 금속재료나 복합재료 등의 재료내부 건전성 평가나 회전체의 이상 진단, 잔여수명평가 등의 재료특성평가에 적용되고 있으나 불연속적인 정적거동에 대해서는 탐지가 불가능한 단점이 있다.[3]

음향방출시험의 원리와 획득신호의 파형은 그림 3과 같다.

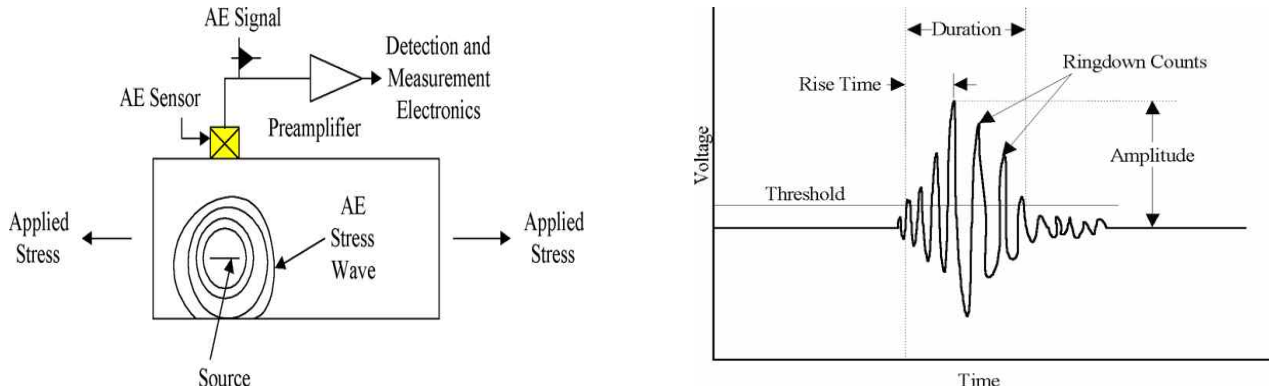


그림 3. 음향방출시험 원리(좌)와 출력파형(우)[4]

2.2.4 적외선 열화상법(Infrared Thermography, IRT)

적외선 열화상법은 적외선카메라를 이용해 물체에서 방출되는 적외선을 열화상이미지로 변환하여 나타난 온도분포를 분석함으로써 물체의 건전성을 평가하는 비파괴시험법으로, 결함부와 건전부의 온도 차이에 따라 열화상이미지의 온도패턴이 달라지는 특성을 이용하여 결함을 검출한다. 이때 열화상이미지에 표시되는 온도값은 주위환경(온도, 습도 등)이나 카메라의 성능, 물체의 방사율, 표면상태, 측정 위치 등의 변수에 따라 변하는 값으로 실제 물체의 온도와는 차이가 있다.[5]

적외선 열화상법은 비접촉 비파괴시험법으로 인체 및 시험체에 피해가 없고 촬영과 동시에 열화상이미지를 얻기 때문에 실시간 모니터링이 가능하다. 또한 물체에서 방출하는 적외선을 측정하기 때문에 야간에도 검측에 제약을 받지 않는다. 이러한 이점에 따라 현재 전기, 의료, 건설 등 모든 산업 분야에서 다양한 방법으로 적용되고 있다.

그림 4는 램프를 이용해 시험체를 가열시켜 적외선카메라로 촬영해 얻어진 온도분포를 분석해 결함을 찾아내는 위상잠금 적외선 열화상 측정 원리이다.

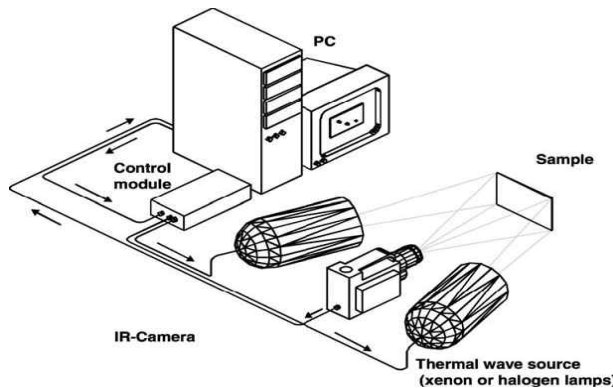


그림 4. 위상잠금 적외선 열화상 측정 원리[6]

2.2.5 광섬유센서 기술

광섬유 센서를 이용한 건전성 평가기술은 교량이나 터널, 건축물 등의 구조물에 대한 변형률 측정이나 균열 감지에 효과적인 기술로 구조물의 안전성과 잔존수명 평가에 이용된다. 광섬유를 활용한 모니터링 기술은 구조물에 따라 다양한 방법으로 적용되고 있다.

광섬유센서는 재질이 석영이므로 빛의 속도로 정보전달이 이루어지고 미세변화의 감지가 가능하며 부식이 없고 반영구적이라는 특징을 가지고 있다.[7]

2.3 철도시스템의 건전성 평가기술

철도시스템은 운행특성상 사고발생 시 인적·물적으로 막대한 피해를 가져온다. 특히 운행 중 일어나는 사고는 대형인명피해로 이어질 수 있으므로 이러한 위험을 사전에 차단하기 위한 예방진단이 반드시 필요하다. 이에 따라 운행 중 결함을 검출하기 위한 실시간 건전성 모니터링 기술의 적용 및 연구개발 현황을 조사해 보았다.

2.3.1 적외선 열화상 기술

현재 적외선 열화상 기술은 선로변 전력선, 신호선, 터널구간의 시설물 검사 등에 적용되고 있다. 특히 전차선 및 선로에 대한 검사는 운행 중인 열차의 전방 또는 후방에 적외선 카메라를 설치하여 선로의 이상고온이나 전차선의 접촉 불량 등의 문제를 파악하는데 효과적이다. 그리고 열화상 카메라 기술의 발달로 디스플레이 장치에 연결하면 실시간 모니터링도 가능하다.[5]

그림 5는 운행 중 촬영한 선로의 이상고온 지점을 나타낸다.

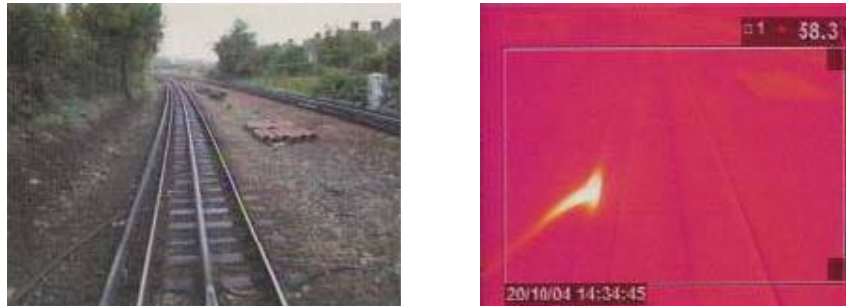


그림 5. 선로의 이상고온지점 열화상 이미지[8]

최근에는 제동디스크의 결함진단을 위한 연구가 진행되고 있다. 제동디스크는 제동 시 라이닝과의 마찰에 의한 열피로에 의해 결함이 발생한다. 제동 시 급격한 온도상승에 의해 핫스팟이나 열밴드가 생성되고 이것은 열화상 카메라를 이용해 확인할 수 있다.[5] 이 핫스팟이나 열밴드의 분석을 통해 열피로의 발생과 피로균열로의 진전을 예측할 수가 있다. 이 기술은 현재 연구단계에 있으며 실차에 적용하기 위해서는 카메라의 소형화 등의 기계적인 부분에 대한 개발도 필요하다.

그림 6은 열화상 카메라로 촬영한 제동디스크의 열화상 이미지이다.

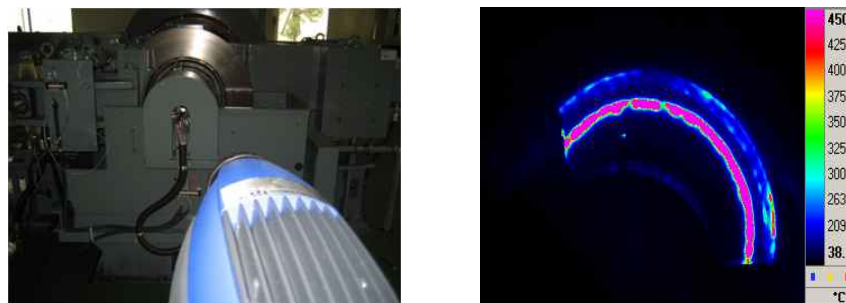


그림 6. 제동디스크 열화상 이미지[9]

2.3.2 광섬유센서 기술

터널의 안전성 확보를 위한 모니터링 기술의 개발에 적용된 광섬유센서 기술로 광통신용 측정장비인 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)을 이용한 광섬유 단락 감지법이 있다. 이는 터널 벽면에 광섬유를 부착하여 균열에 의해 발생하는 광섬유의 단선을 감지하는 기술로 실제 경부선의 노후화된 터널에 대한 적용성 실험을 통해 시스템 개발의 유효성을 확인하였다.[10]

그림 7은 OTDR 장치와 광섬유의 물리적 변화에 따른 광세기의 변화를 나타낸다.

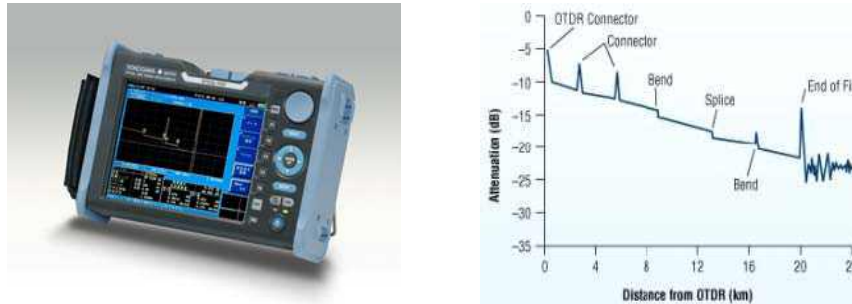


그림 7. OTDR 장치(좌)와 광세기의 변화(우)[10]

레일의 균열을 사전에 감지하여 안전성을 확보하기 위해 열차하중 작용 시 레일 전 구간의 변형률 모니터링이 가능한 브릴루앙(Brillouin) 산란을 이용한 광섬유 시스템이 개발되었다. 변형률의 분포를 측정하기 위해 BOCDA(Brillouin Optical Correlation Domain Analysis) 시스템을 구성하였고 측정결과 변형률의 분포가 좌우대칭임을 확인하였다. 따라서 변형률 분포의 대칭·비대칭으로 레일의 이상 진단이 가능할 것으로 판단하고 추가적인 연구를 진행하고 있다.[11]

그림 8은 BODCA 시스템의 구성도를 보여준다.

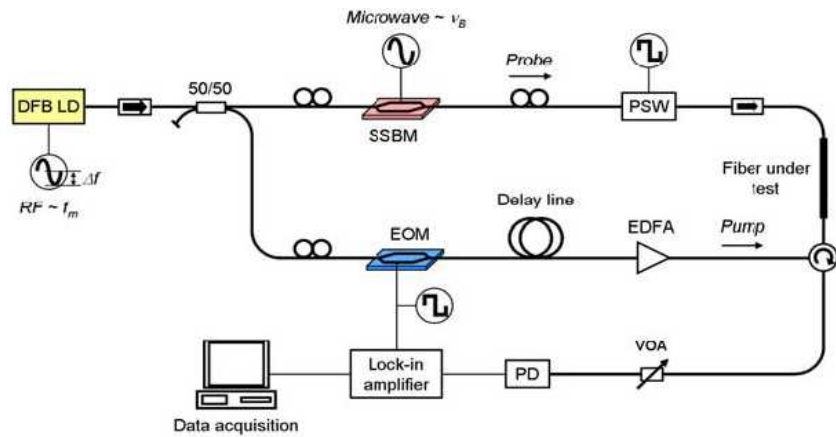


그림 8. BODCA 시스템 구성도[11]

2.3.3 그 밖의 적용 기술

안성혁 등은 레일의 마모도 측정을 위해 라인레이저와 고속카메라를 이용한 영상평가 시스템을 구축하고, 촬영영상에 대해 정량적으로 분석함으로써 정량적 평가지표로 활용할 수 있는 방안을 연구하였다. 실험장치의 구성과 정량적 분석의 절차는 그림 9와 같다. 실험결과 레일의 보정 및 수리의 시기를 결정하기 위한 기준으로 활용 될 수 있을 것으로 예상하였다.[12]

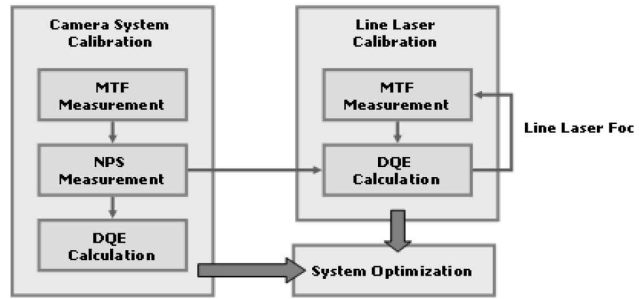


그림 9. 실험장치 구성(좌)과 분석 절차(우)[12]

이태형 등은 GIS(Geographic Information System)를 이용해 고속열차의 주행 정보를 파악하고 원격 모니터링을 하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 이를 통해 열차의 속도와 주행위치 등의 정보를 실시간으로 파악해 선로구축물에 이상이 발생했을 때 미리 조치를 취함으로써 사고를 예방하고 승객의 안전을 확보할 수 있다.[13]

이진이 등은 초고속 스캔형 자기카메라를 이용한 고속열차 차륜 탐상 기술의 개발에 대한 연구를 하였으며[14], 고한석 등은 유도초음파 기술을 응용한 구조손상 탐지기술에 대한 가능성 연구를 진행하였다.[15]

3. 결론

기존의 건전성 평가기술은 주기적인 진단을 통해 사고를 예방하는 것이 전부였다. 하지만 정기적인 진단으로 사고를 미연에 방지하는데 한계가 있고 노후화된 구조물의 경우에는 사고 예방이 더욱 힘들다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 개발된 진단법이 실시간 건전성 평가기술이다. 실시간 건전성 평가기술은 구조물에 설치되어 24시간 감시가 가능한 시스템으로 구조물의 이상 징후나 잔존 수명 등을 미리 예측하여 대형 사고를 예방할 수 있다.

많은 사람들이 이용하는 철도 차량 및 교량, 역사 등의 구조물의 탈선 또는 붕괴에 의한 사고는 대형 인명피해를 가져오기 때문에 이를 예방하기 위한 실시간 건전성 평가기술은 철도시스템에서 꼭 필요한 기술이다. 현재 기술 개발을 위한 연구가 이루어지고 있지만 현장에 적용된 사례는 많지 않다.

철도시설물이 고도화되고 철도차량의 운행 속도가 고속화 되면서 안전성의 확보가 더욱 중요해지고 있다. 이에 따라 국내에서는 물론 세계적으로도 실시간 모니터링 기술에 대한 관심이 높아지고 있으며 끊임없이 새로운 기술개발을 위해 노력하고 있다. 실시간 건전성 평가기술의 적용은 안전과 직결되는 사항이므로 기술개발 뿐만아니라 선진 기술의 도입 등 가능한 모든 방법을 활용하여 신속히 현장에 적용될 수 있도록 힘써야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 박일부, 박래운 “비파괴검사 문제와 해설” 대광서림, 2000.
2. 신병철 “비파괴검사공학” 대웅, 2000.
3. 박은수, 박익근, 송선진 “비파괴평가공학” 학연사, 2009.
4. Jeongguk Kim, Peter K. Liaw "The Nondestructive Evaluation of Advanced Ceramics and Ceramic-Matrix Composites" TMS, JOM NOVEMBER 1998, Vol.50, No.11, 1998.
5. 이상중, 김정국, 김남포 “적외선 열화상 기법의 철도분야 적용 및 사례연구” 한국철도학회, 한국철도학회 2009년도 추계학술대회논문집, pp.3320 ~ 3325, 2009.
6. Henrik Berglund, Alexander Dillenz "Detecting glue deficiency in laminated wood—a thermography method comparison" NDT & E International, Vol.26, No.4, pp.189-193, 2003.
7. 오상덕 “‘광섬유센서 이용’ 교량 안전점검” 건설기술신문, 2008. 10. 07.

8. 강부병 “ 철도구조물 비파괴검사 기술동향” 한국철도학회, 한국철도학회지 v.11 no.4, pp.55-62, 2008.
9. 김정국, 구병춘, 권성태, “적외선카메라를 이용한 제동 디스크 열크랙 분석” 한국철도학회, 한국철도학회 2008년도 춘계학술대회논문집, pp.950-954, 2008.
10. 이수형, 신민호, 김현기, 송명근 “광섬유를 이용한 철도터널 균열 검지” 한국철도학회, 한국철도학회 2009년도 추계학술대회 특별세미나·특별세션, pp.109 ~ 116, 2009.
11. 윤혁진, 송광용, 김대상 등 “광섬유센서를 이용한 열차하중 작용시 레일의 변형을 모니터링” 한국철도학회, 한국철도학회 2009년도 춘계학술대회논문집, pp.1514 ~ 1518, 2009.
12. 안성혁, 김만철 “고해상도 레일 마모도 측정을 위한 영상 평가” 한국철도학회, 한국철도학회 논문집 제12권 제6호, pp.887 ~ 894, 2009.
13. 이태형, 한영재, 박춘수 “GIS를 이용한 고속열차 원격모니터링 시스템 개발” 대한전기학회, 2007 CICS 정보 및 제어 학술대회 논문집, pp.353 ~ 354, 2007.
14. 이진이, 황지성, 권석진 등 “초고속 스캔형 자기카메라에 의한 고속열차 차륜 탐상” 대한기계학회, 대한기계학회논문집 A권 제32권 제11호, pp.943 ~ 950, 2008.
15. 고한석, 이우식 “구조물의 건진성 모니터링을 위한 유도초음파 응용 구조손상 탐지기법” 한국철도학회, 한국철도학회 논문집 제12권 제3호, pp.412 ~ 419, 2009.