

적외선 열화상법을 이용한 이상 진단 기술



| 강 부 병 |
한국철도기술연구원
초고속열차연구실
선임연구원



| 조 용 현 |
한국철도기술연구원
전철전력연구실
책임연구원



| 최 경 윤 |
한국철도기술연구원
시험인증센터장
수석연구원

1. 서론

철도의 고속화 기술은 결국 안전 기술과 경제적 고속 운행을 가능하게 하는 유지보수 비용 저감 기술의 개발이라 할 수 있다. 특히 고속 주행시에도 안전운행을 보장할 수 있는 기술은 매우 중요하다. 이러한 가운데 철도의 고속화를 추진하면서 고속주행을 가능하게 하는 주행 안전성 평가 기술 및 안전을 보장하기 위한 건전성 평가 기술도 함께 발전해 왔다. 역사적으로 보면 비파괴검사 기술 연구가 철도분야에서 시작되었다는 사실도 당연한 것이다. 공학 분야의 오랜 역사와 전통을 가지고 있는 선진국들은 과학기술 발전과 함께 발전해온 비파괴검사(NDE, Non-Destructive Evaluation) 기술에 대한 연구와 투자의 역사도 매우 길다. 이런 NDE 분야의 오랜 연구 전통과 발전 역사는 거의 모든 선진국에서 살펴볼 수 있다. 비파괴 검사는 일반적으로 재료나 제품의 원형과 기능에 변화를 주지 않는 검사를 말하지만, 좀 더 확대하면 재료나 제품에 물리적 현상을 이용한 특수한 방법으로 제품을 분해하거나, 파괴하지 않고, 즉 대상물의 원형과 기능을 전

혀 변화시키지 않고, 그것의 성질, 상태, 내부구조 등을 알아내는 모든 검사방법을 말한다.

철도 분야에서도 비파괴적 검사 방법들이 유지보수 분야에서 다양하게 적용되어져 왔고 신기술들이 개발되면서 지속적으로 신기술의 적용을 위한 연구들이 진행되고 있다. 철도 현장에서 요구되는 기술이 가져야 할 가장 중요한 특성은 열차의 운행에 지장을 주지 않아야 된다는 점이다. 철도 현장에서 이루어지는 모든 진단 및 검사의 중요한 제약 조건은 제한된 시간 안에 모든 작업을 마쳐야 한다는 점이다. 이러한 상황 때문에 대부분의 작업은 야간에 이루어지고 있다. 이런 점에서 철도분야에서는 철도의 운행에 지장을 주지 않는 신속하고 경제적인 검사방법이 요구되고 있다. 이런 요구사항은 결국 여러 다양한 비파괴 검사방법 중에서 철도현장에서 요구되는 특성을 만족시킬 수 있는 적절한 방법을 찾아내어 타당성 및 신뢰성을 평가하는 단계가 필요함을 보여준다.

본고에서는 선진국에서 활발히 연구중인 적외선 열화상 기술(Infrared Thermography)의 연구 동향에 대하여 소개하고 철도 분야의 적용 사례 및 가

능성에 대하여 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 적외선 열화상 기술의 검사방법 분류

적외선 열화상법은 적외선 카메라를 적용하여 얻어진 온도장 이미지를 활용하여 구조물의 이상을 진단하는 비파괴검사방법이다. 가진 방법에 따라서도 나눌 수 있는데 복사열을 이용한 방법(적외선, 마이크로웨이브, 유도 가열), 음파 또는 초음파 등 기계적 가진을 이용한 방법, 전기장치를 이용한 가열 방법 등이 알려져 있다. 시험중에 발생하는 온도 신호를 활용하여 결함, 크랙, 열화 상태, 전기선 연결 상태, 접합부 계면 분리 등 다양한 상태를 분석 평가할 수 있다. 또한 시험 대상 물체의 열적 특성도 분석할 수 있다. 결국 내부의 이상이 표면 온도 분포의 불균일로 이어져 표면 및 내부의 이상을 검출할 수 있다.

적외선 열화상 기법은 대상 물체에 발생하는 적외선 에너지의 제어가능성을 기준으로 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 시험대상체로부터 방사하는 적외선의 에너지가 제어 가능한 능동기법(Active Method)과 태양광 또는 자체 작동 중 발생하는 온도장에 의한 적외선 에너지를 검출하여 평가하는 수동기법(Passive Method)으로 나누어진다.

2.1.1 Passive법

수동기법은 대상 물체에 외부에서 인위적인 변화를 주지 않고 태양광이나 작동중 대상 물체에 발생한 표면 온도 분포 이미지로부터 이상 유무를 판단하는 방법이다. 그림 1은 태양광에 의해 발생한 온도장을 측정하여 예로써 수동기법에 의한 결과를 보여준다. 이 방법은 최근 대형 구조물 및 빌딩 등의 외벽에서 벽면이상이나 타일의 분리등이 발생하여 태양 빛의 방사 특성이 바뀌는 현상을 이용한 구조물 이상 진단 방법으로 활용되고 있다. 콘크리트 구조물내에 이상이 없을 때에는 온도분포가 균일하지만 구조물내에 이상이 있을 때에는 자연광 아래에서 국부적으로 온도 증가가 신속하게 이뤄지고 이 상태는 열화상에서 고온영역으로 나타나게 된다. 이런 부위는 위치가 파악되어 후속 검사에서 좀 더 심도 있게 이상 유무를 검사하게 된다. 이 방법은 대형 빌딩의 검사시 신속하고 간편한 검사 방법을

제공하고 특히 고층빌딩의 경우 효과적으로 적용될 수 있다. 수동법은 현장에서 예지정비나 예방정비용으로 주로 활용되고 있다. 현장에서 주로 사용되고 있는 방법은 수동 기법으로 전력설비 열화진단, 기계설비 열화진단, 건축구조물 단열평가, 저장탱크 액위 검출, 플랜트 배관 단열평가 등에 사용되고 있다. 그림 2는 전원 공급장치 판넬 내부의 연결단자에 이상이 있어 고온부가 검지된 열화상 이미지를 보여준다. Spot1은 판넬온도이고 Spot2는 퓨즈 단자, Spot3는 필터 연결부의 온도분포를 보여준다. 수동방법을 적용하기 위해서는 대상 물체가 노출 되어 있는 환경 조건을 인지하고 이런 환경변수를 적외선 카메라의 셋팅이나 확보된 온도 영상의 분석시 적절하게 고려하여야 한다. 특히 중요한 인자는 물체표면의 방사율, 주변온도, 측정각도, 풍속, 거리, 형상 등이다. 현장 시험하기 전에 충분히 이러한 변수들의 특성을 파악하는 것이 중요하다.

2.1.2 Active법

능동기법은 최근에 연구가 활발히 이루어지고 있는 분야로써 크게 광원(Lamp)을 이용하는 광-적외선 열화상 기술(Flash Thermography)과 초음파 가진을 이용하는 초음파-적외선 열화상 기술(Sonic IR, Thermosonics)이 있다.

능동법은 적외선 에너지를 발생시키는 방법에 있어서 어떤 방법을 쓰는가에 따라 나누어 질 뿐만 아니라 광원이나 가진시에 사용되는 입력 신호 특성에 따라서도 나누어진다. 입력 신호에 따라 짧은펄스파(Short Pulse), 긴펄스파(Long Pulse), 그리고 위상 잠금(Lock-in) 신호로 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 능동법은 물체내에 존재하는 결함이나 크랙 등의 검출에 주로 사용되고 있으면 복잡한 형상을 가진 부품 등의 검사를 신속하고 간편하게 할 수 있다는 장점 때문에 산업체에서 관심을 두고 많은 연구가 진행되고 있다.

광-적외선법(Flash Thermography)

가장 많이 사용되고 있는 능동법은 광-적외선법이다. 그림 3은 광-적외선 법의 한 형태인 Lock-in 광-적외선 법을 보여준다.¹⁾일반적인 광-적외선 법에서는 광원으로부터 시험 대상 물체에 수 마이크로정도의 단파장의 광파가 전달된다. 정상조건에서 광원으로부터 가열된 대상 물체내에서 열(Thermal wave)이 전달되는데 이 때 물체내의 결함이나 불균일한 지점에서 반사되어 오는 열이 물체의 표면에

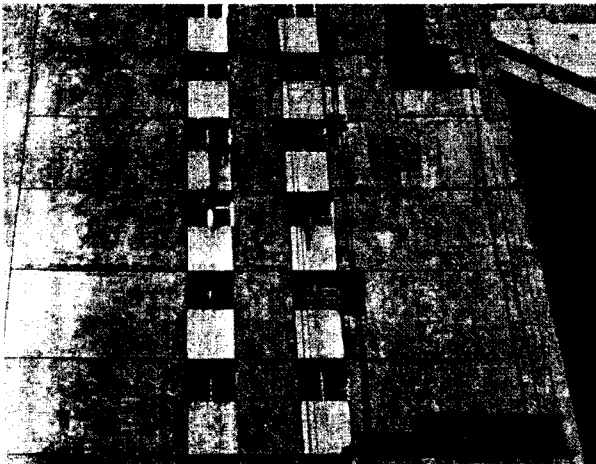


그림 1. 표면에 이상이 발생한 빌딩의 적외선 열화상(왼쪽의 밝은 부분이 이상 부위이고 오른쪽의 어두운 부분은 수리된 부분)

법은 다양한 주파수에서의 시험이 필요하며 시험결과와 처리에 시간이 소요되는 단점이 있다. 그림 4는 컬럼비아 호 사고 이후 NASA에 도입되어 운영되고 있는 열화상 검사 장비이다.²⁾³⁾⁴⁾

초음파-적외선법(Sonic IR, Thermosonics)

초음파 적외선 법에서는 대상 물체에 초음파 주파수 대역인 20kHz-100kHz 범위의 진동을 1초 이내로 발생 시키고 이때 대상 물체의 표면 온도 변화를 열화상 카메라로 측정하여 결함

부위 및 결함 부 근처의 표면온도 변화를 분석해서 결함 유무를 판단하는 방법이다.

초음파 적외선 법은 위상잠금법과 병행하여 사용함으로써 초음파 가진 위상잠금법으로도 사용될 수 있는데 이때

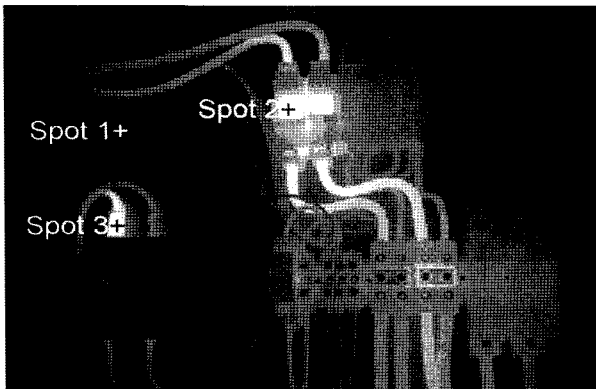


그림 2. 전원 공급장치 판별내 이상 검지(Spot1:판넬, Spot2:퓨즈 단자, Spot3:필터 연결부)

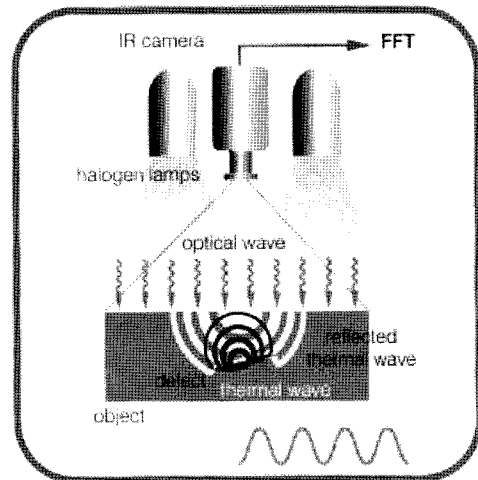


그림 3. Lock-in 광-적외선법

온도장을 형성하고 이 온도장을 적외선 카메라로 측정하여 내부의 상태를 진단 할 수 있다. 최근에는 그림 3에서와 같이 시험체에 입사되는 광원의 가열 주기와 적외선 카메라의 측정 주기를 동기화시켜 결함을 검출 하는 위상 잠금 방법(Lock-in)이 주로 사용된다. 위상 잠금 방법을 사용하여 얻어진 이미지 신호의 각 픽셀에서 얻어진 온도 신호를 FFT하여 얻어진 위상이미지를 활용하면 온도 신호의 진폭을 이용하는 것 보다 두배 깊은 곳까지 특성을 파악 할 수 있으며 표면의 불균질에서 오는 온도 분포의 불균질이나 노이즈의 영향을 받지 않고 결함부의 특성을 분석할 수 있는 효과도 있다. 최근에 이 방법은 항공기의 복합재 동체의 검사에 활용되어 좋은 결과를 얻고 있다. 그러나 이 방

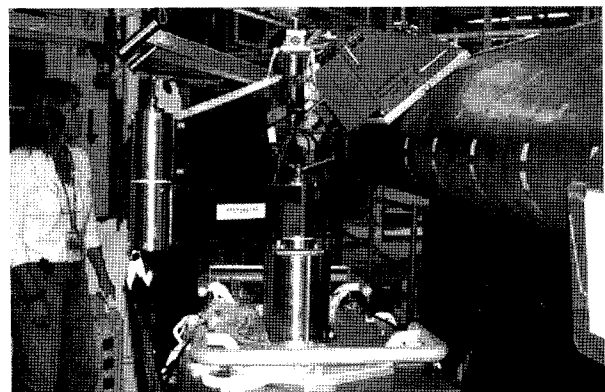


그림 4. 열화상 기법을 이용한 Space Shuttle 날개 검사

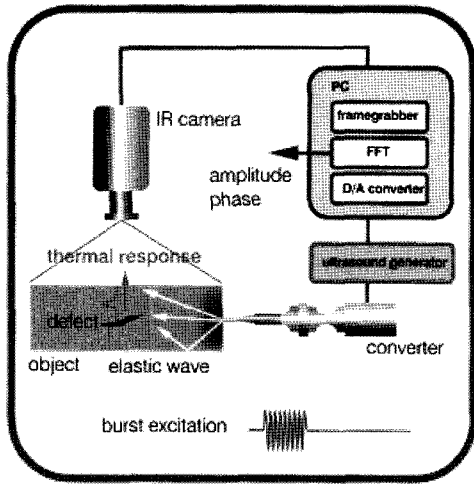


그림 5. 초음파 가진 열화상 위상법

는 Lock-in 광-적외선 법에서 얻을 수 있는 효과인 깊이 정보 효과 및 노이즈를 줄여주는 효과를 얻을 수 있다. 그림 5는 초음파 가진 열화상 위상법을 보여준다.¹⁾ 이 방법에서는 기초음파 가진시 얻어진 온도신호의 FFT 이미지를 활용하여 1초이내의 단일시험으로 짧은 시간안에 결함의 깊이 정보를 파악할 수 있는 장점이 있다. 또한 펄스의 특성상 단일 시험에서 광대역 주파수 범위의 가진에 대한 주파수 특성을 분석할 수 있어 다양한 주파수에서 사인파가진을 통해 온도정보를 얻는 기존의 위상잠금법보다 신속한 결과를 준다는 장점이 있다.

초음파 가진 열화상법은 물체내에 발생한 진동의 제어가 어렵다는 단점이 있다. 이 문제는 초음파 가진기와 대상물체사이의 연결부위의 채터링(Chattering)현상 때문이다. 이 현상은 전형적인 카오스 진동 현상으로 시험시 초기조건이나 지지부의 경계조건 특성에 따라서 시험체내에 발생하는 진동의 주파수 특성이나 진동의 크기가 매시험마다 다르기 때문에 발생한다. 결국 이 문제는 매 시험시마다 진동을 모니터링하여 요구되는 수준의 진동이 발생하였는지를 확인하는 절차가 필요함을 의미한다. 이 문제를 해결하기 위하여 최근에 진동 모니터링과 보정 시험절차를 도입하여 초음파가진 열화상법의 신뢰성을 높이고자 하는 연구도 진행되고 있다.²⁾ 단순한 새로운 가진 시스템을 적용하여 원천적으로 비선형 진동의 발생을 방지하고자 하는 연구도 진행되었으나 작은 가진력이 충분한 경우에는 적용가능하나 결함 검출을 위하여 큰 에너지를 필요

로 하는 경우는 카오스 진동을 피하기 어렵다.⁶⁾⁷⁾

2.2 철도 분야 연구 동향

최근에 적외선 카메라를 이용한 검사 기술이 철도분야에도 적용되고 있고 적외선 온도 측정시스템을 활용한 연구와 검사 시스템 개발이 증가하고 있다. 유럽에서는 이미 시스템들이 90년대 초부터 현장에 적용되어져 오고 있고 현재 신뢰성과 효율성을 높이기 위한 연구 검토가 이루어지고 있다. 특히 예지정비(Predictive Maintenance) 기술 개발에 온도분포 측정 데이터가 사용되어 지기 시작하면서 이 기술의 적용 영역이 확대되고 있다.

철도분야에 적용된 적외선카메라의 현장 적용 경험과 데이터 분석 기술이 축적되면서 엔지니어링 노하우가 증가되었고 적용 효과도 증대되고 있다. 현재는 선로변 전력선, 신호선 그리고 터널구간의 시설물 검사에 가장 효과적으로 적용되고 있다. 초기에는 차량에 탑재된 적외선 카메라를 이용한 선로 검사와 전차선 검사에 대한 연구가 이루어졌다.

시험 중 카메라는 열차의 선두차량에 설치되어 상업은행 속도에서 검사가 이루어졌고 성공적인 결과를 얻었다. 일단 얻어진 온도화상 데이터는 전력선 전문가나 각 시설 전문가들에 의해 검토되었다. 특히 고전압 상태 하에 있는 시설물이나 인슐레이터 그리고 분기기 박스 등에 대해서 집중적으로 검토되었고 현재는 이런 화상들을 자동으로 분석하여 이상을 감지하는 소프트웨어를 개발중이다. 차량전문가, 궤도전문가, 전력전문가들 사이의 상호 협조를 통하여 중요한 요소들에 대한 임계온도값들이 결정되었고 이 임계값들이 각 요소들의 안전도 평가의 기준으로 활용되었다. 특히 현장 전문가들과 운영처의 요구에 의해 이러한 임계치들이 적절하게 현장에 적용 될 때에 사고 발생시 발생할 수 있는 경제적 손실을 크게 줄일 수 있다. 실제로 런던 지하철의 경우 운행지연 사고를 통해 현재 손해배상을 통해 엄청난 손실이 발생하고 있기 때문에 런던 지하철에서는 임계치를 낮추어 적용하고 있다. 따라서 적외선 검사 시스템의 효율과 신뢰성을 높이기 위해서는 선로 특성에 맞는 적절한 임계치의 결정이 중요하므로 이 분야의 연구와 시험을 통한 시스템 성능 향상 연구가 이루어져오고 있다.

프랑스의 SNCF에서도 적외선 카메라를 활용한 검사 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁸⁾ SNCF는 우선 선

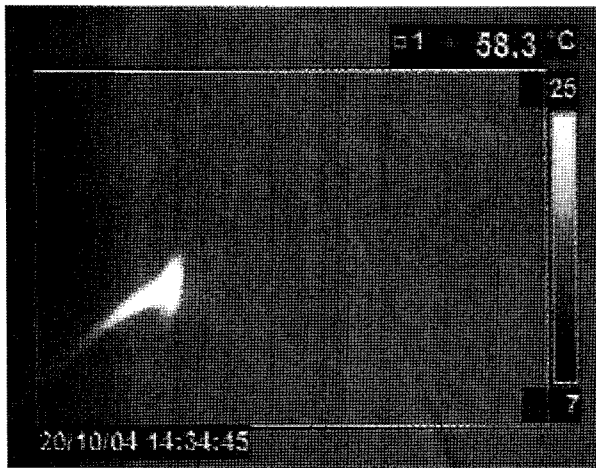


그림 6. 적외선 카메라로 발견된 선로변 전력 케이블 이상 지점 열화상 이미지

호장치 판넬 및 전력설비 검사에 활용을 시작한 후 효용성을 인정하여 광범위하게 철도분야 적용성을 검토하기 시작하였다. 이후 전차선의 이상 진단에 활용되었다. 그림 7은 시험차량에 설치된 적외선 카메라를 보여 주고 있고 그림 8은 시험중 확보된 열화상 이미지이다. 이 시스템의 도입으로 전차선과 조가선의 연결부위의 이상을 조기에 발견 할 수 있어 전차선의 처짐으로 발생할 수 있는 사고를 방지하는 효과를 가져왔다. 프랑스의 연구 결과 향후에는 이상 부위의 잔존 수명과 관련하여 유지보수가 필요한 임계 온도 설정에 대한 연구가 필요하다는 결론을 얻었다. 또한 현재 500km 검사후 얻어지는 이미지 데이터의 양이 DVD 21개 분량으로 이런 대용량 데이터를 신속하게 처리할 수 있는 자동화 시스템의 구축 연구가 필요하다는 결론

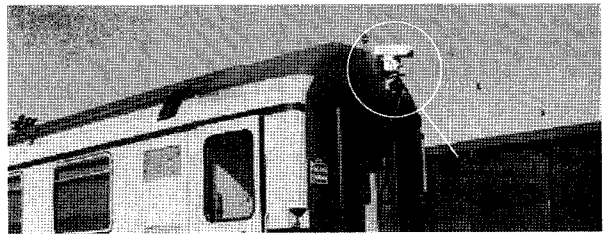


그림 7. 시험차량 위에 설치된 적외선 카메라

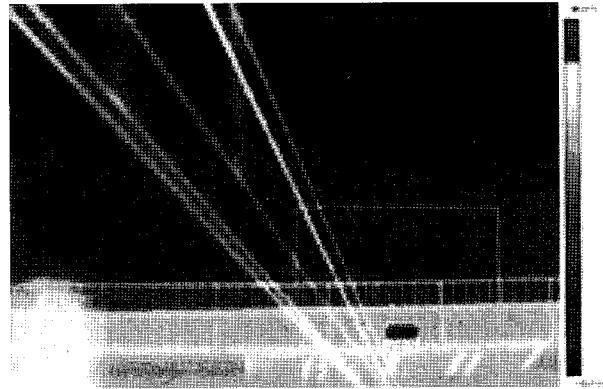


그림 8. 전차선 열화상 이미지

을 얻었다.

철도변 시설뿐만 아니라 적외선 카메라를 이용한 차량의 이상 감지를 위한 연구도 진행중이다. 현장의 선로 변에 카메라를 설치해 차량의 하부 주요장치의 검사 및 차량 내부의 주요 전기장치 및 기계장치의 검사에 적외선 카메라를 적용하는 기술들이 연구되고 있다. 실제로 지상에 설치되어 운행되는 적외선 검사 시스템의 경우 차량의 운행에 방해가 되지 않고 정상 운행상태에서 측정되기 때문에 적용성도 높다.

2.3 기술 개발 현황

적외선 카메라의 성능 향상과 측정된 온도 신호의 처리 기술의 발전 및 시험중 발생되는 물리적 현상들에 대한 이해가 증진되면서 열화상법의 성능 및 신뢰성이 향상 되었다. 가격도 낮아져서 경제적 부담도 줄어들고 있고 앞으로 더욱 낮아질 가능성이 많다. 이와 함께 자동화 시스템의 도입은 작업자에 대한 의존성을 더욱 줄이고 있다. 정성적인 분석을 넘어서 정량적인 분석이 가능해지면서 새로운 차원의 연구들이 진행되고 있다. 결함의 깊이, 내부 공동의 크기 및 두께 측정, 열확산 계수(thermal diffusivity) 측정 등

에서 기존의 측정 방법들과 대등한 정밀도를 보이고 있다. 이러한 발전은 계속해서 열화상법의 적용 및 관련 기기 개발의 가속화를 가져올 것이다.

비파괴검사 분야에서 열화상법의 중요도가 높아지면서 표준화 및 교육 인증에 대한 요구도 증대하고 있다. 현재 열화상관련한 표준화가 ISO를 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 특히 ISO 18436-7은 적외선 열화상 기술자의 자격 부여와 평가에 대한 규격을 정하고 있고 국내에도 이 기준에 따라 교육 및 인증을 부여하는 제도가 ISO 인증기관인 한국설비진단자격인증원에서 2010년에 시작될 계획이다. 이 인증프로그램이 시작되면 산업체의 열화상 기술 교육 및 기술자 품질 관리에 기여 할 것이다.

3. 결론

적외선 열화상법의 기술은 지속적으로 발전해 왔으며 현재 신뢰성이 향상 되어 다양한 분야에 적용되고 있다. 열화상 이미지 처리 기술의 발달과 자동화의 영향으로 사용자가 손쉽게 사용할 수 있는 시스템들이 등장하고 있으며 기존의 검사 방법의 보조 역할을 수행하던 시절을 지나 다양한 재료내의 결함을 검출하는 기술로 발전해 가고 있다. 철도 분야에서도 신속하게 비접촉식 검사 방법을 제공하는 열화상 기법들이 적용되기 시작하고 있으며 현장 시험을 통하여 철도 현장에 맞는 다양한 시스템들의 개발이 이루

어지고 있다.

향후 적외선 열화상법이 국내 현장에 효과적으로 적용되기 위해서는 국내 환경에 맞는 시스템의 개발이 필요하고 기존의 비파괴 검사 방법과 같이 교육 및 인증 프로그램들이 개발되어 현장 기술자들이 손쉽게 개발된 기술들을 적용할 수 있도록 지원하는 프로그램도 필요하다. S

♣ 참고 문헌

1. <http://www.edevis.de/thermography/>
2. Shepard, S(2006), "Understanding Flash Thermography," Materials Evaluation, May, pp. 460-464.
3. Shepard, S(2007), "Thermography of Composites," Materials Evaluation, July, pp. 680-696.
4. "Case Study: NASA Return to Flight Program," Thermal Wave Imaging, Inc, 2006.
5. M. Morbidini, B.Kang and P. Cawley(2009), "Improved Reliability of Sonic Infrared Testing," Materials Evaluation, Vol 67, No 10.
6. B. Kang and P. Cawley, "Low power PZT exciter for thermosonics," in Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 26A, Vol. 820 of AIP Conference Proceedings, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti(American Institute of Physics, Melville, NY, 2006), pp. 484-491.
7. X. Y. Han, Z. Zeng, W. Li, M. S. Islam, J. P. Lu, V. Loggins, E. Yita-mben, L. D. Favro, G. Newaz, and R. L. Thomas.(2004) "Acoustic chaos for enhanced detectability of cracks by sonic infrared imaging," Journal of Applied Physics, 95(7), pp. 3792-3797.
8. <http://www.ilir.com/>