

콘크리트 구조물의 상태 평가를 위한 열화상 기법

Infrared Thermography method for Assessment of Concrete Structure



조 영 상^{1)*}

Cho, Young Sang

1. 서론

건설 분야에서는 1994년 10월의 성수대교 붕괴 사고, 1995년 6월 삼풍백화점 붕괴 사고 전까지는 진단 및 비파괴 검사에 대하여는 법제도나 비파괴 검사기술에 대한 연구 개발이 부진한 실정이었다. 성수대교 붕괴이후 시설물의 안전관리에 관한 특별법이 1995년 1월 5일에 제정되었고, 동법시행령이 1995년 4월 20일에 제정되었으며 동법에 관한 시행규칙이 1995년 6월 3일에 제정 되었다. 그 후 건설교통부 산하 한국시설안전공단에서 안전점검 및 정밀안전진단에 관한 세부지침이 발간되어 실무에 적용되어 왔다. 관련법의 정비와 더불어 비파괴 검사 및 계측에 관한 연구 및 실무적용이 학계와 산업체에서 활발하게 진행되어 오고 있다.

최근에 와서 기존 콘크리트 구조물의 노후화와 각종 기능저하현상이 증대됨에 따라 건물의 생애주기 동안 유지관리 과정에서, 콘크리트에 대한 신뢰도, 안정성, 내구성 향상과 품질관리에 대한 문제들을 해결해 나가야 함에 따라, 이에 대한 종합적인 안전진단 품질평가의 중요성이 요구되고 있다. 그러나 콘크리트는 물리적 성질이 매우 다른 이질성 재료이면서 비균질성 복합재료로 구성되며, 배합, 타설 및 양생조건에 따른 특성의 차이와 구조물 축조 후

현장여건의 변화 등 변수인자가 많다.

콘크리트 구조물의 노후화에 따른 구조진단의 매개 변수는 압축, 인장, 휨 강도, 탄성계수, 두께, 변위, 변형, 강성, 균열위치, 균열깊이, 균열 폭, 결함, 공극, 콘크리트 온도, 수분, 철근의 위치와 직경, 피복두께 등이 있다.

이런 구조진단의 매개 변수를 검사하기 위한 비파괴 검사법으로는 슈미트 해머(Schmidt Hammer), 코어 테스트, 윈저 프로브(Winsor probe), 인발법, 공진 주파수 법, 초음파 속도법, 충격반향기법, 표면파 기법, 펄스반향기법(Pulse echo test), 임펄스 응답기법(Impulse response method), 토모그래피(Tomography), 크로스 홀 기법(Cross hole method), 전자파 기법(GPR), 방사선, 적외선, 음향 방출법(Acoustic emission method), 초음파법, 열화상기법, 자장/전기법, 에디커런트(Eddy current method), 콘크리트 피복두께 측정, 철근위치 추정(Ferro Scan), 철근부식 및 중성화 추정, MT, UT 및 기타 방법들이 쓰이고 있다. 향시감시 계측 분야에서도 연구와 산업체 적용이 활발히 진행되고 있다. 광섬유센서와 형상메모리 합금 센서 등 스마트 센서에 관한 연구와 산업체 적용도 활발히 진행되고 있다. 본 기사에서는 열화상 기법을 이용한 건설구조물의 결함추정의 가능성에 대한 기초적 소견을 기술하고자 한다.

1) 한양대학교 건축학부 교수

* E-mail : ycho@hanyang.ac.kr

2. 적외선 열화상 카메라의 활용

사람의 눈으로 볼 수 없는 적외선 영역은 열을 가진 모든 물체들이 방출하는 전자기파이다. 절대온도 이상의 온도를 지니는 모든 물체는 적외선 영역의 전자기파를 방출한다. 이는 온도 차이에 의해 방출되는 적외선의 양이 달라진다. Fig. 1은 전자기파의 종류와 범위를 나타낸 것이다.

전자기파 스펙트럼적외선 열화상 카메라는 물체들이 가지고 있는 적외선을 사람의 눈으로 볼 수 있게 만든 장치이다. 적외선 온도계처럼 비접촉 방식으로 온도를 측정할 수 있다. 국부적인 부분을 측정하는 적외선 온도계와는 달리 적외선 카메라는 대상 물체 전체의 온도를 측정하는 데 유리하다. 열화상 디텍터(적외선 센서)와 온도를 계산할 수 있도록 하는 소프트웨어에 의해 대상의 전체 및 부분의 온도를 계산 할 수 있다. 적외선 열화상 카메라에서 사용되는 적외선의 종류는 다음 Table 1과 같다.

열화상 카메라는 디텍터에 따라 구분이 된다. 작동 원리에 따라 크게 양자형(photon)과 열형(thermal)으로 나뉜다. 양자형은 주로 반도체 재료이며, 열형은 반도체 이외의 재료들이다. 반도체 재료들은 대부분 낮은 온도에서 작동하고 열형 재료들은 상온에서 동작하기 때문에, 작동 온도에 따라 냉각식과 비 냉각식으로 구분하기도 한다. 그래서 주로 양자형 재료들은 군수용의 목적으로, 비 냉각형인 열형 재료들은 민수용으로 사용되고 있다. 이렇게 냉각식 디텍터 방식과 비냉각식 디텍터 방식에 따라 적외선 열화상

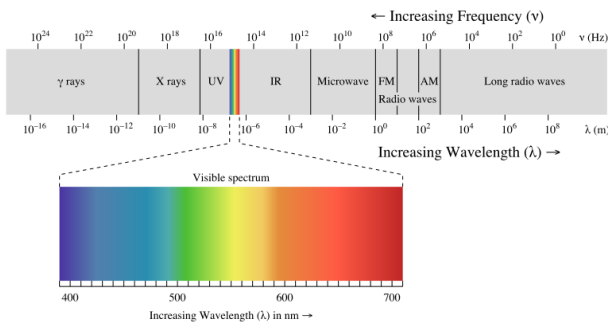


Fig. 1 전자기파의 종류 및 범위

Table 1 적외선의 종류

| | NR (Near Infrared) | SWIR (Short Wave Infrared) | MWIR (Medium Wave Infrared) | LWIR (Long Wave Infrared) |
|----|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 파장 | 0.7~1 μ m | 0.9~1.7 μ m or 0.9~2.5 μ m | 2~5 μ m | 7.5~13 μ m or 7.5~14 μ m |

Table 2 열화상 카메라 종류에 따른 용도

| 구분 | 냉각식(cooled) 카메라 | 비냉각식 카메라 |
|------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 디텍터 종류 | InSb, HgCdTe | Vox, a-Si |
| 디텍터의 동작 온도 | -197 $^{\circ}$ C | 상온 |
| 감도 | 0.015 $^{\circ}$ C ~ 0.02 $^{\circ}$ C | 0.05 $^{\circ}$ C ~ 0.1 $^{\circ}$ C |
| 온도측정범위 | -15 $^{\circ}$ C ~ 3,000 $^{\circ}$ C | -40 $^{\circ}$ C ~ 540 $^{\circ}$ C |
| 온도 정확도 | \pm 1 $^{\circ}$ C 또는 \pm 1% | \pm 2 $^{\circ}$ C 또는 \pm 2% |
| 가격 | 고가 | 저가 |
| 용도 | 비파괴 NDT 검사 고온 온도 측정 가스 누출 검사 장거리 감시 정찰 | R&D 온도 분석 화재 감시 친기설비 진단 근/중거리 보안감시 |

카메라가 분류된다. 냉각식 디텍터 방식은 적외선이 입사되었을 때 광자형 디텍터(Photon Detector type)의 PN Junction에서 전자가 나오게 되고, 전기적인 신호를 취득함으로써 적외선을 감지하는 방식이다. 영상과 온도감도가 뛰어나지만, 극저온(-197 $^{\circ}$ C)에서 동작해야 하므로 액체 질소 냉각기가 필요하며 시스템 부피가 크고 가격이 높은 단점이 있다.

비냉각식 디텍터 방식은 열형 디텍터(Thermal Detector type)의 감지물질에 적외선이 복사되면 온도변화에 의해 저항이나 전류 또는 기전력 변화가 발생하여 신호를 검출하는 방식이다. 비냉각식이기 때문에 냉각기가 필요 없고 상온에서 동작하며 시스템의 부피가 작고 전력소모가 작은 장점이 있다. 반면에 냉각식 광자형에 비해 낮은 감지도를 갖는 단점이 있다. 그에 따른 용도는 Table 2에 나타나 있다(최만용, 김순걸, 2012).

3. 열화상 비파괴 검사

적외선 열화상 비파괴(IR-NDT) 검사는 열화상을 통하여 제품 내부의 기공, 균열, 결함 등을 파악하는 검사 방식이다. 적외선 열화상 비파괴 검사는 수동적인 방법(Passive method)과 능동적인 방법(Active method)으로 크게 구분할 수 있다(이승남, 2013).

수동적인 검사방법은 제어할 수 없는 에너지(태양)와 상호작용으로 대상체가 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 기법으로 적외선을 방출하는 모든 물체에 해당하는 사항으로 그 물체가 방출하는 고유의 적외선 양을 감지하여 열화상으로 나타내는 방법이다.

능동적인 검사기법은 수동적 검사기법과 달리 검사체 고유의 적외선 양에 의존하지 않고 제어 가능한 에너지를 입

사하고 그 반응으로 검사체가 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 기법이다. 이러한 검사기법은 물체표면 방사율, 주변온도, 측정각도, 풍속, 거리, 형상에 따른 영향을 제어하여 검사자가 얻고자 하는 결과를 정밀하게 얻을 수 있는 장점이 있다. 열 발생 시뮬레이터를 구성하여 검사 대상 제품에서 미량의 열이 발생하도록 한 다음, 제품의 결함과 열탄성 효과를 이용한 응력해석, 피로(Fatigue), 한계치 분석 등을 시행한다. 능동적 검사기법의 대표적 가진 소스로는 광적외선, 진동, 마이크로 웨이브, 초음파, 와전류 등 에너지의 입사 종류에 따른 분류와 Pulse, Lock-in 등의 제어 방법에 따른 분류로 나뉠 수 있는데, 이러한 검사 기법을 통하여 대상체로부터 얻을 수 있는 결과값이 더욱 정밀해지는 효과가 있다. 대상체의 표면 온도가 매우 미소한 경우, 외부로부터 열을 가함으로써 측정 대상물의 표면의 미세 결함이나 내부 결함을 온도 분포로서 부상시켜 검출하는 방식이다(이승남, 2013).

시험체 내부에 열원을 심어 가열한 다음 나타나는 온도 변화에 관한 실험체의 3D 모델링과 실험체 사진, 그리고 균열의 시간에 따른 온도 변화 측정 사진인 다음 Fig. 2, 3, 4에서 보여진다.

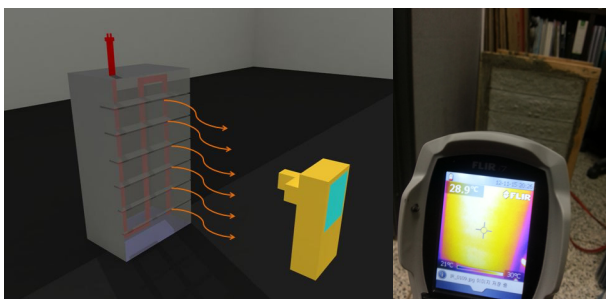
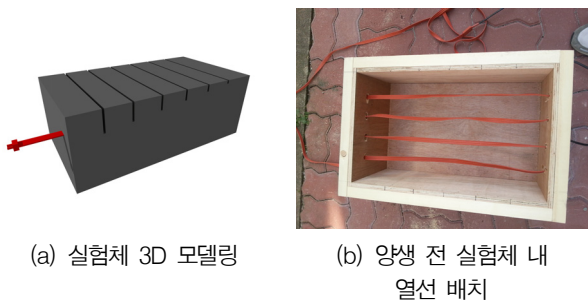


Fig. 2 실험 방법의 3D 모델링 및 실험체의 온도 변화를 측정하는 사진



(a) 실험체 3D 모델링 (b) 양생 전 실험체 내 열선 배치

Fig. 3 실험체 모델링 및 사진

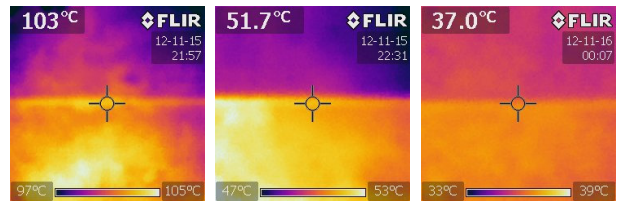


Fig. 4 시간에 따라 변하는 균열과 외부 온도

4. 열화상 기법의 연구 및 적용 현황

미국, 캐나다, 일본 등 선진국에서 열화상 기술은 발전 설비, 안전 진단, 건축물 열관리, 콘크리트 교량상판 결함 탐지, 지하가스 배관의 누설 등 산업 전반에 걸쳐 활용하고 있다. 재료 피로 실험 시에 열응력을 측정하여 강재의 피로한도를 계산해내는 측정기술을 연구 중에 있으며 일본 오사카대학이나 동경공업대학에서는 FEM 해석과 열화상 실험 결과를 비교하여 응력을 측정하는 기술 등에 대하여 연구 중에 있다. 미국, 유럽 등에서는 비파괴 검사 개념에 입각한 R&D 계획, 투자 및 전문 연구소를 설립하는 등 국가적 차원의 지원을 확대하고 있다. I/UCRP Program, NDE Center(미국), 전문비파괴연구소(독일), RCNDE(영국), NDE Group(프랑스) 등 독자적으로 규격개발을 통해 정부적 차원의 지원이 진행됨을 엿볼 수 있다.

관련 해외 논문을 살펴보면 「콘크리트 벽돌 시스템에 작용하는 반복 하중 평가를 위해 음향 및 열화상에 기초한 NDT 방법」이 연구되었다(Fuad Khan 외 6명, 2014). 국부적이거나 세부적인 NDT 방법의 단점을 보완하기 위해 신뢰수준을 높이기 방법으로 Acoustics와 함께 열화상 기법을 함께 사용하였다. 점진적으로 작용하는 하중에 의해 약화되는 상황을 적절한 시간간격에 맞춰서 시각화 하기 위해 열화상 기법을 활용하였다. Acoustics와의 교차 검증을 통해 상호보완 하여 테스트 결과의 신뢰성을 높였다. 그 외에는 「마이크로파 적외선 열화상에 의해 철근콘크리트 벽의 철근 탐지」가 연구되었다(Sam Ang Keo 외 3명, 2013). 거대한 토목 구조물을 가열하기 위한 새로운 방법으로 마이크로 웨이브를 이용하였다. 마이크로파의 영향으로 실험체의 중간부분의 온도가 증가하고 콘크리트 내에 3.8cm에 있는 주근의 위치, 간격을 파악하는데 유용하였음을 보여준다. 콘크리트 내 철근을 탐지하는 새로운 하나의 방법으로 활용될 가능성을 제시한다.

국내 논문을 살펴보면 「비파괴기법을 이용한 철근 콘크리트 벽체 철근의 부식률 예측 기법」이 연구되었다(노영

속, 2011). 철근이 부식됨에 따른 단면적의 감소로 인해 철근에 전류를 가했을 때 철근의 저항값이 달라지며 또한 콘크리트 표면의 발열량이 달라진다는 점을 착안하여 진행한 연구이다. 피복두께, 부식률을 변수로 하였고, 철근 양단에 전기가열기를 이용하여 전류를 가하였으며, 온도 센서를 내부 철근에 설치하여 온도 변화를 측정하였다. 「적외선열화상을 이용한 감육직관의 결함두께 측정」에 관한 연구가 수행되었다(나성원 외 5명, 2009). 위상잠금 광·적외선 열화상기법을 이용하여 결함의 크기별로 가공된 시험편의 검출한계 주파수를 알아내고 이를 이론과 실제 결함크기와 비교하여 상수값을 결정 한 후 감육 결함을 가지는 직관에 적용하여 결함의 두께를 측정하였다.

5. 맺음말

열화상 기법은 사전유지보수, 열적 물리적 성질의 비파괴 검사, 건축공학, 군사경계임무, 군사무기유도, 의학영상, 기상관측, 환경과학 등 온도가 중요한 매개변수인 산업체 및 연구 분야에서 활발히 탐구되고 있는 비파괴 검사기법이다. 열화상 기법의 장점을 살려 구조물의 결함 중 균열, 박리, 부식, 공동, 응력, 누수 탐사 등의 측정에 사용 될 수 있도록 심도 있는 연구 및 적용이 필요한 실정이다.

참고문헌

1. 이승남, “적외선 열화상 카메라를 이용한 비파괴 검사기술”, 월간 계장기술, 2013.
2. 최만용, 김순걸, “적외선 열화상 시장 동향과 전망”, 월간 제어계측, 2012.
3. Sam Ang Keo, Franck Brachelet, Florin Breaban, Didier Defer, “Steel detection in reinforced concrete wall by microwave infrared thermography”, NDT&E International, 2013.
4. Fuad Khan, Ivan Bartoli, Satish Rajaram, Prashanth A. Vanniamparambil, Antonios Kontsos, Mohammad Bolhassani, Ahmad Hamid, “Acoustics and temperature based NDT for damage assessment of concrete masonry system subjected to cyclic loading”, Nondestructive Characterization for Composite Materials, 2014.
5. 노영숙, “비파괴기법을 이용한 철근 콘크리트 벽체 철근의 부식률 예측 기법”, 비파괴검사학회지, 2011.
6. 나성원, 김경석, 김경수, 최태호, 기창두, 장호섭, “적외선열화상을 이용한 감육직관의 결함두께 측정”, 한국정밀공학회, 2009.
7. <http://ko.wikipedia.org/wiki/전자기파>.

담당 편집위원: 홍성욱
 (한밭대학교 건축공학과 연구교수)
 suhong7@hanbat.ac.kr