

토목 구조물의 손상 검출을 위한 적외선 열화상 기법의 적용 사례 분석

Review of the Current infrared Thermography Techniques for Detecting Defects in Civil Structures

심 준 기* 지 광 습** 박 진 형*** 조 효 남**** 이 종 세*****
Sim, Jungi Zi, Goangseup Park, Jin-Hyung Cho, Hyo-Nam Lee, Jong Seh

Abstract

In this paper, the basic principle, the application and the limitation of Infrared thermography technique to detect defects in different kinds of concrete structures are reviewed. Considered are voids beneath the concrete surface with experiments, delamination between concrete surface and fiber reinforced polymer sheet, the deterioration of steel bars in reinforced concrete, surface defects in historical buildings, pavements, bridges, and railway track graves. As a result, we conclude that infrared thermography methods are useful for fast detecting defects; however, they are influenced by environmental factors, specially temperature. Therefore it is recommended to use the infrared thermography technique with other NDT equipments to expect better result.

요 지

본 논문에서는 비접촉 손상검출기법으로 관심의 대상이 되고 있는 열화상 기법의 기본 원리, 활용 예, 제한 사항 등을 국내의 주요 연구성과를 분석하고 정리하였다. 콘크리트 구조물의 내부 결함 진단, 내부 철근 부식 측정과 콘크리트 구조물 표면과 섬유 보강 시트 사이의 비부착 검출, 포장도로의 표면 결함 검출, 오래된 건물의 표면 누수 측정, 철도 트랙 자갈의 상태 측정 등을 최근 연구결과 중심으로 광범위하게 검토하였고 최근에 보고된 실험결과도 제시하였다. 검토 결과, 열화상 기법은 광범위한 형태의 토목 구조물의 넓은 표면을 빠르게 정성적으로 검사할 수 있는 장점을 가지고 있는 것으로 확인되었다. 반면, 정량적 기법은 주변 온도 등 환경 요인에 민감하게 영향을 받는 것으로 판단되었으며, 다른 정밀계측장비와 혼용시 좋은 성과를 기대할 수 있을 것으로 예측된다.

Keywords : Concrete, Defect, Infrared Thermography, Non-destructive Method

핵심 용어 : 콘크리트, 결함, 열화상 기법, 비파괴 검사법

* 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 대학원

** 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수

*** 정회원, 한양대학교 토목공학과 대학원

**** 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

***** 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

E-mail : sjk0605@korea.ac.kr 011-9862-0605

● 본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2008년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 콘크리트 구조물에 대한 비파괴 검사법으로 열화상 기법을 활용하는 노력이 이루어지고 있다. 가장 많이 활용되는 분야는 타일의 비파괴 평가이며, 국내 한국시설안전기술공단에서도 이 장비를 도입하여 적극 활용하고 있다. 하지만 토목구조물의 유지관리를 목적으로 하는 자동화 비파괴 검사 시스템에는 아직 적용이 미진한 상황이며, 타일이나 보강 시트의 박리 등의 검출 외에는 적용되지 않아 다양한 종류의 손상에 대한 적용성 검토가 필요한 상황이다.

재료의 비파괴 검사에 사용되는 열화상 기법의 기원은 1800년대 영국의 William Herschel이 적외선 스펙트럼을 발견한 것에서 기인한다. 그 후, 여러 연구자들(Macedonio Melloni, Gustav Kirchhoff, James Clerk Maxwell, Joseph Stefan, Ludwig Boltzmann, Max Planck)의 연구를 토대로 재료가 방출하는 열에너지의 분포를 시각화 할 수 있는 기반이 완성되었다.⁽⁶³⁾

이 열화상 기법에 대한 기본 연구 이후 본격적인 활용에 대한 연구는 근래에 와서 이루어졌다. 근래의 국내외 주요 연구 동향을 살펴보면, Stanley 등(1994)⁽⁴⁸⁾은 콘크리트 빌딩 표면의 잠재적인 결함을 검출하기 위해서 열화상 기법을 활용하였다. 빌딩의 타일이나 표면의 들뜸 등을 검출하기 위해 권영진 등(1997)⁽¹⁰⁾은 적외선 탐사기를 이용하여 구조물의 노후화 평가시스템 구축을 위한 연구를 수행 했다. 콘크리트 내부 결함을 측정하기 위한 연구로는 윤영호 등(2003)⁽¹³⁾에 의한 인공공동 콘크리트 시험체의 공동 탐지에 관한 기초 연구가 있다. 박석균(2003)⁽¹²⁾은 콘크리트 시공시 발생하는 이음부의 결함을 비파괴 검사로 추정하는 연구에서 열화상 기법과 레이더를 이용한 방법을 제시하였다. Brown 등(2003)⁽⁴⁶⁾은 FRP 시트와 같은 복합재료의 결함 검출에 열화상기법을 사용한 바 있다. 손상과 열화상의 정량적인 관계에 관한 연구로서 Gailius 등(2003)⁽⁵⁵⁾이 수행한 기계적인 손상과 열전달 계수간의 상관관계가 있다. 최근에는 손상 확인 감도증진을 위해 Weritz 등(2005)⁽⁵⁶⁾에

의한 PPT(Pulse Phase Thermography)를 이용한 콘크리트 구조물에 대한 연구가 있다.

2. 열화상 기법의 기본 이론

2.1 상세 원리

식(1)은 Planck에 의해 유도된 흑체에 대한 방사 강도를 적외선 스펙트럼 분포로 묘사한 것이다.⁽⁵⁸⁾

$$E_{\lambda b} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (1)$$

$E_{\lambda b}$ 는 흑체의 방사 강도를 의미하며 C_1 과 C_2 는 일종의 재료 상수인 방사 상수를 나타내며 λ 는 적외선의 파장(wave length)을 의미하고 T 는 절대 온도(K)를 나타낸다. 적외선 밴드는 크게 4등분 되어 근적외선(0.75~3 μ m), 중간 적외선(3~6 μ m), 원적외선(6~15 μ m) 그리고 극 적외선(15~1000 μ m)으로 나타내어진다. 각각의 파장에 대한 Planck의 미분법칙과 최대 방사 강도를 나타내는 Wien의 거리 법칙에 의해 다음과 같은 식(2)를 도출한다.⁽⁵⁸⁾⁽⁵⁹⁾

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (2)$$

이는 절대 온도에 따른 적외선을 수학적으로 표현한 것이다. 태양과 같이 6000K의 절대온도일 경우 약 0.5 μ m의 파장으로 나타낸다. 300K일 경우는 약 10 μ m으로 나타내며 적외선 밴드 영역에서는 원적외선에 해당된다. Planck의 미분법칙을 전체 스펙트럼($\lambda=0\sim\infty$)에 대해서 통합하여 전체 방사 강도를 나타내면 식(3)과 같다.

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

σ 는 Stefan-Boltzmann 상수⁽⁶³⁾를 나타낸다.

실제의 방사 강도는 식(1)의 이론값과는 차이가 있

으며, 이 차이는 소위 스펙트럼 방출 계수로 정의하여 식(4)와 같이 표현된다.

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda b}} \quad (4)$$

ε_{λ} 는 스펙트럼 방출 계수이다.

따라서, 방출 계수와 환경적인 요인을 고려한 방사 에너지는 식(5)와 같다.

$$E = \varepsilon \frac{A}{e^{B/T} - C} \quad (5)$$

여기서 A, B, C는 보정된 Planck의 상수이다.

이와 같이 열화상 시스템은 절대온도와 Planck에 의해 유도된 흑체에 대한 방사 강도를 통하여 적외선을 파장에 따라 적외선 밴드로 구분하여 그래픽으로 나타낸다.

2.2 적외선을 이용한 온도 분포 검측

열화상 기법을 적용하기 위한 가열 방법에는 크게 자연 상태의 열을 이용한 방법과 인위적으로 열을 가하는 방법이 있다. 자연 상태의 태양열을 이용할 경우 외부 환경 요건에 따라 적외선 방출량에 많은 차이를 보인다.⁽²⁷⁾ 인위적으로 열을 이용한 방법에는 할로겐 램프, 열풍 장치 등이 있다. 인위적인 가열 장치를 사용한 열화상 기법에는 PT(Pulse-Thermography), LT(Lock-In Thermo-graphy), PPT(Pulse Phase Thermography) 그리고 TT(Transient Thermography) 이 있다.⁽³³⁾⁽⁶⁴⁾

PT법은 일반적으로 대상 사물에 열을 가하여 표면의 온도 차이를 측정하는 방법이다. 열을 가하는 방법에는 할로겐램프, 플래시램프, 레이저, 열풍 등이 있다. 열을 가한 물체는 자연 상태에서 식거나 임의의 냉각기에 의해 식혀서 온도차이가 발생하도록 한다. 이때, 발생하는 온도 차이는 대상물체의 상태 정보를 나타낸다.⁽²⁹⁾⁽⁴⁰⁾ 열을 가하는 방법에는 대상 사물의 반대편에서 열을 가하여 열화상 카메라를 적용하는 방

법과 대상 사물에 열을 열화상 카메라와 같은 방향에서 가하는 방법이 있다.⁽⁵⁸⁾⁽⁵⁹⁾

이러한 열화상 기법에 쓰이는 열에너지 전파는 식(6)과 같이 열전달 지배방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha \nabla^2 T = \frac{\delta T}{\delta t} \quad (6)$$

α 는 열 분산도를 나타내며 이는 $k/\rho C$ 로 나타낼 수 있으며 여기서 k 는 열전도율이며 ρ 는 밀도 C 는 특정 재료의 비열이다. T 는 절대 온도이며 t 는 시간을 의미한다. 일정한 열을 균등하게 대상 사물에 가할 경우 물체의 표면 온도는 일정하게 분포한다. 결합이 존재하는 물체일 경우 결합이 위치한 표면 온도 분포가 그렇지 않은 부위와 다르게 나타난다. 일반적으로 결합의 크기가 클수록 온도 분포 차이가 더욱 극명하게 나타나며 결합이 작을수록 온도 분포 차이가 작게 나타난다. 이밖에 결합의 깊이나 크기에 대한 정보는 후 처리과정을 통하여 구할 수 있다.⁽³⁸⁾ 그러나 온도 분포 차이는 외부 환경의 영향을 받을 수 있으므로 반복적인 계산과 경험적인 결과 자료를 통해서 열화상 정보를 분석하는 것이 바람직하다.⁽⁶³⁾

이러한 PT법은 대상물체에 균등한 열을 가하지 못할 경우 열이 가해지지 못한 지역을 결함으로 인식할 수 있다. 또한 대상 시편체에서 방사되는 에너지를 반사시키는 효과가 나타날 수도 있다. 이를 방지하기 위해 대상 표면을 반사도가 낮은 물질로 처리하는 기법이나 격자로 가열하는 기법도 제안되었다.⁽³⁴⁾⁽⁵⁸⁾

TRIR(Time-Resolved-Infrared)는 PT법을 시간에 종속적으로 나타낸 기법으로 대상 물체에 열을 가하는 단계를 시간 종속적으로 하고, 이에 해당하는 열화상의 시간 종속적 패턴을 분석하여 손상 검출도를 높일 수 있다. TRIR법에 마이크로웨이브로 열을 가하는 방법을 적용한 기법이 있다. 이 방법은 수분이 채워진 부분이나 금속 와이어 또는 섬유와 같은 마이크로웨이브에 영향을 받는 물체에 대한 내부 결함 측정 시 유용하게 쓰일 수 있다.⁽²⁵⁾⁽⁵⁸⁾

LT법은 대상 물체를 주기적으로 작동하는 램프로 가열하여 대상 물체의 결함을 검출하는 것이다. LT법

은 섬유, 항공기 금속의 탈부착에 대한 결함 검출과 같이 정밀한 결함 검출이 필요한 분야에 쓰인다.⁽⁶¹⁾ 그러나 결함이 없는 비교대상의 기준 물체가 필요하고 다소 복잡하고 시간이 오래 걸리는 알고리즘으로 데이터를 분석한다.⁽⁴²⁾⁽⁵⁷⁾ 또한 낮은 열 분산으로 인하여 두꺼운 물체를 검사하기에 부적합하며 검사 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.⁽⁵⁸⁾

PPT법은 PT법의 불균등한 가열로 인하여 생긴 오점을 퓨리에 변환을 이용하여 그래프로 보정하는 기법이다.⁽⁴¹⁾⁽⁴³⁾ 그리고 PPT법은 LT법의 단점인 검사 시간이 오래 걸리는 점을 PT법 형식을 이용하여 시간을 단축시키고 PT법의 단점인 정확성을 보완할 수 있다.⁽³²⁾⁽⁵⁹⁾

TT법은 대상 물체를 극저온에서 고온으로 이동시켜서 대상 물체의 열 변화를 분석하는 열화상 기법이다. 이 기법은 탄소 섬유 합성 항공기 구성 부품의 육안으로 보이지 않는 내부의 결함을 초음파 C-정밀 검사법에 비해 30배 빠르게 검사할 수 있다.⁽⁷⁵⁾ 그러나 와상 전류기법(Eddy-Current Non-Destructive Technique)⁽²²⁾⁽³¹⁾과 같은 TT법보다 더 정밀 검사가 가능한 기법이 있으며 대상 물체를 극저온에서 고온으로 이동시키는 문제와 기화현상을 막는 문제가 있다.⁽²⁶⁾⁽⁶⁴⁾

3. 열화상 기법을 이용한 결함 검출

3.1 콘크리트 내부 공극 검출

콘크리트의 열전달계수와 공극의 열전달계수가 상이한 점을 이용하면, 콘크리트 내부의 공극을 열화상 기법을 통해 콘크리트 표면에서 감지할 수 있다.⁽⁶⁰⁾⁽⁷⁴⁾ 감도 증진을 위해 사용되는 열원으로는 자연광, 적외선램프, 할로겐램프를 사용하는 기법이 알려져 있다. 최근에는 마이크로웨이브를 사용하는 기법도 소개된 바 있다.⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

공극 존재의 유무는 표면의 온도 차이로부터 감지된다. 공극 검출을 위한 온도 차이를 감지하기 위해 Meola와 Carlomagno가 제시한 다음과 같은 식(7)이 사용된다.

$$\bar{T} = \frac{|T_s - T_d|}{|T_s - T_r|} \quad (7)$$

T_r 은 가열 이전의 시험체의 온도이며, T_d 는 공극 위치의 온도를 나타내며 T_s 는 공극 주변의 온도를 나타낸다. $\bar{T}$ 는 상대적인 온도 변화이다.

식(7)은 건전부와 손상부의 온도 차이를 절대 값의 비율로서, 온도차이의 상대적인 특성은 고려하고 있지 못하다. 지광습 등(2007)⁽¹⁷⁾은 콘크리트 내부 공극 검출을 위한 새로운 열화상 분석법으로 주변 온도의 변화에도 일정한 온도 변화 상태를 판단할 수 있는 상대적인 온도를 이용한 식(8)을 제안하였다.⁽¹⁷⁾⁽⁶³⁾

$$\Delta T = \frac{T_s - T_d}{T_s} \quad (8)$$

식(8)에서 T_d 는 공극 위치의 온도를 나타내며 T_s 는 공극 주변의 온도를 나타낸다. ΔT 는 상대적인 무차원 온도 변화이다. Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3은 콘크리트 내부 공극 검출 실험에서 식(8)을 적용한 열화상 분석 결과이다.

지광습 등(2007)⁽¹⁷⁾의 실험에서 감도증진을 위해 세가지 다른 열원이 사용되었다. 자연광과 적외선램프 그리고 할로겐램프를 열원으로 사용하여 열화상 기법을 적용한 결과, 콘크리트 시험체의 공극 깊이가 3cm 이상부터 내부 공극 검출이 어려운 것으로 확인되었다.⁽¹⁷⁾⁽⁵⁴⁾ 또한 외부환경의 영향이 적은 실내 실험인

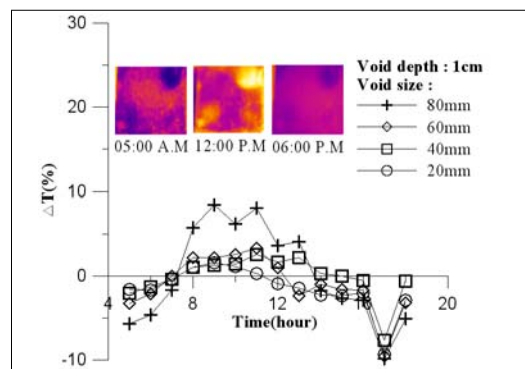


Fig. 1 자연광을 열원으로 한 공극 깊이 1cm인 콘크리트 시험체의 열화상 분석⁽¹⁷⁾

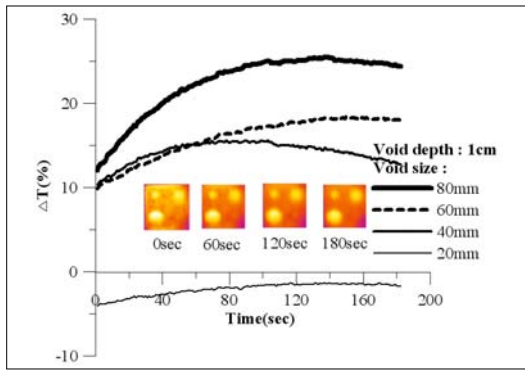


Fig. 2 적외선램프를 열원으로 한 공극 깊이 1cm인 콘크리트 시험체의 열화상 분석⁽¹⁷⁾

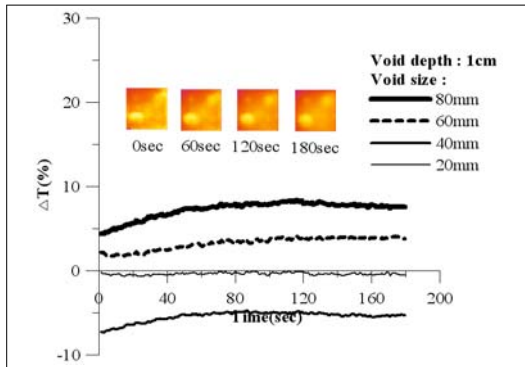


Fig. 3 할로겐램프를 열원으로 한 공극 깊이 1cm인 콘크리트 시험체의 열화상 분석⁽¹⁷⁾

적외선램프와 할로겐램프를 열원으로 사용한 것이 외부 온도 영향이 가장 큰 자연광을 열원으로 사용한 것보다 빠른 시간에 작은 결함을 검출하기에는 효율이 더 높게 나타났다.⁽¹⁾ 지광습 등(2007)⁽¹⁷⁾의 실험 결과는 Table 1과 같다.

자연광을 가열기구로 사용한 실험을 보면 오전 11시경에 공극이 가장 명확하게 나타났다. 그러나 이러한 결함 검출은 자연광이 확보되어야 하며 특정 시간 때에 검사를 실시해야하는 제약 조건으로 효율이 떨어진다.

인공 열원으로 열화상 기법을 적용한 실험은 비교적 외부 환경의 영향을 최소화하고 빠른 시간 내에 콘크리트 내부 결함을 검출할 수 있었다. 적외선램프와 할로겐램프 모두 콘크리트 표면으로부터 2cm이내에서 내부 공극이 검출되었다. 그러나 열화상 감도증진 면에서는 적외선램프를 사용한 실험에서의 Fig. 2와 할로

Table 1 가열 기법에 따른 결함 검출 여부⁽¹⁷⁾

공극 깊이 (cm)	공극 크기 (cm)	가열 기법		
		자연광	할로겐램프	적외선램프
1	2	○	×	×
	4	○	○	○
	6	○	○	○
	8	○	○	○
2	2	×	×	×
	4	×	×	○
	6	○	○	○
	8	○	○	○
3	2	×	×	×
	4	×	×	×
	6	×	×	×
	8	×	×	×

○: 검출 ×: 무검출

겐램프를 인공 열원으로 사용한 실험의 Fig. 3의 비교 결과, 열원으로 적외선램프를 사용시 열화상 감도증진이 더 높게 나왔다.

지광습 등(2007)⁽¹⁷⁾은 콘크리트 내부 공극 검출 방법으로 마이크로웨이브를 열원으로 사용하는 방법도 시도한 바 있다.⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾ 이 실험에서는 콘크리트 표면으로부터 1cm에 공극이 존재하는 시험체를 마이크로웨이브 장치로 가열하였다. 열화상 기법 적용 결과, 공극이 위치한 콘크리트 표면의 온도가 주변 온도에 비해 낮게 나타난 것으로 확인되었다.⁽¹⁴⁾⁽²³⁾ 또한 다른 열원을 사용하였을 때와 비교하여 불균등한 가열이 심하게 나타났는데 이로 인해 내부 공극 부위와 무결함 부위의 구분이 어렵게 나왔다.

3.2 콘크리트 보강용 FRP시트의 박리

근래에 보수·보강 재료로 섬유시트에 대한 관심이 많아지고 있다.⁽⁴⁾⁽⁷⁾ 섬유시트로써는 탄소섬유시트, 유리섬유시트, 아라미드 섬유시트로 인장 성능을 보강하기 위해 널리 쓰인다.⁽⁶⁾ 최근에는 유리 및 탄소 단섬유와 에폭시 및 비닐에스테르 수지를 조합하여 분사형 섬유강화플라스틱으로 콘크리트를 보강하는 기법도 개발되었다.⁽⁵⁾ 이러한 섬유시트를 이용하여 콘크리트를 보강할 경우 가장 문제시 되는 부분은 보강용 섬유시트가 콘크리트 표면으로부터 박리되는 것이다. 이러한 콘크

리트와 섬유시트 사이의 박리 부위를 확인하는 효과적인 방법으로 열화상 기법이 검토되고 있다.⁽²⁰⁾⁽³⁵⁾

Kundu 등(1999)⁽⁷²⁾은 유리섬유시트로 콘크리트의 인장력을 보강시 생길 수 있는 섬유시트와 콘크리트 사이의 비부착 결함을 램프파동(Lamp Wave)를 이용한 초음파 탐지로 검출한 바 있다. 그러나 이 시험법은 정확한 시험을 위해서 매체 물질로 물이 필요하며 결함의 크기 측정시 자주 분석이 불가능한 경우가 발생하는 단점을 지니고 있다.⁽²⁴⁾⁽⁶²⁾⁽⁶⁸⁾ 이외에도 콘크리트와 섬유시트 사이의 비부착 부위에 대한 결함을 검출하는 기법으로 ESPI(Lockin Electronic Speckle Pattern Interferometry)⁽³⁰⁾⁽⁶⁶⁾와 같은 최신 기법이 있다. 이 기법은 열화상 기법보다 정밀한 분석이 가능하지만 열화상 기법과 비교하여 결함 진단 속도가 느리고 좁은 영역에 대한 검사만 가능한 단점이 있다.⁽³⁸⁾⁽⁴⁸⁾

Balageas 등(1986)⁽⁶⁹⁾은 탄소섬유시트/에폭시 복합재료의 층간 박리 결함 검출을 위한 열화상 분석 기법을 제시하고 플래시램프를 열원으로 한 실험 결과와 비교한 바 있다. 이후, Meola 등(2002)⁽⁷¹⁾은 현재 복합재료로 널리 쓰이는 탄소섬유시트/에폭시 그리고 유리섬유시트/에폭시에 LT법을 적용하여 충격 손상, 박리, 용접 결함 검출한 바 있다.⁽²¹⁾ 이 실험의 결과로, LT법을 사용하여 결함의 크기와 깊이에 대한 정량적인 분석이 가능한 것으로 나타났다. 비교적 결함의 깊이가 깊지 않은 경우는 PT법이 LT법보다 유리한 것으로 보고되었다.⁽⁶⁷⁾

Starnes 등(2005)⁽⁶⁵⁾은 콘크리트 보강을 위해 탄소섬유시트의 비부착 부위를 열화상 기법으로 검출하였다. 이 실험에서 얻은 결론은 콘크리트 표면과 탄소섬유시트 사이가 공기로 비부착된 결함을 정량적으로 검출하기 위해선 방사율(Emissivity)에 대한 측정이 중요하다는 점이다.⁽³³⁾ 여기서 방사율은 대상 물체와 일정한 온도로 유지되는 검은 구멍과 같은 흑체의 방사율도의 비로 정의된다.⁽⁷⁰⁾ 이러한 콘크리트 보강 섬유시트의 방사율에 대한 연구로 최근 지광습 등(2007)⁽¹⁷⁾의 연구가 있다. 그 결과, Fig. 4, Fig. 5는 유리섬유시트 보강 콘크리트에 상대적인 무차원 온도 변화를 나타낸 것으로 Fig. 4는 자연광을 열원으로

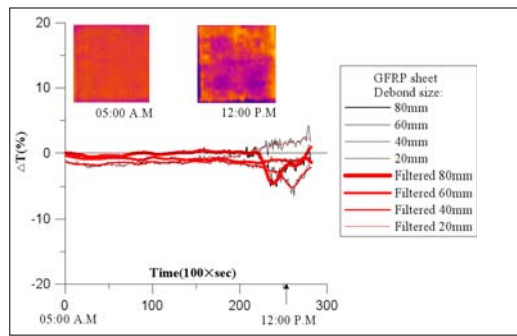


Fig. 4 유리섬유시트 보강 콘크리트, 자연광 오전 온도 변화⁽¹⁷⁾

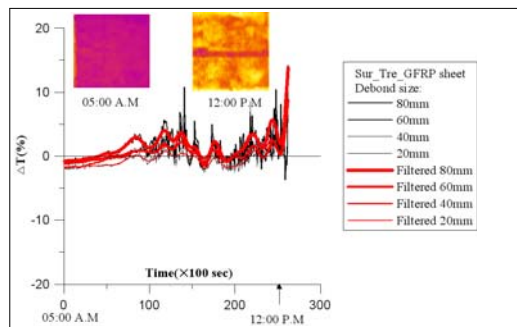


Fig. 5 표면처리 유리섬유시트 보강 콘크리트, 자연광 오전 온도 변화⁽¹⁷⁾

비부착 결함을 지닌 유리섬유시트에 열화상 기법을 적용한 것이며 Fig. 5는 같은 유리섬유시트 표면에 검정 락커로 표면처리한 후 열화상 기법을 적용한 것이다. Fig. 5에서와 같이 방사율이 높은 검정 락커로 유리섬유시트의 표면을 칠한 경우가 Fig. 4의 보통 유리섬유시트보다 비부착 부위 검출도가 높았다.

Monica 등(2005)⁽⁷⁰⁾은 탄소섬유 부착 시험체에 대한 비부착 결함을 측정하였다. 실험 방법은 콘크리트 시험체 표면에 127mm 간격으로 가로 25mm에 세로 25mm인 정사각형 모양인 탄소섬유시트를 부착하고 비부착 여부를 열화상 기법으로 검출하는 것이다.

Monica 등(2005)⁽⁷⁰⁾의 연구에 따르면 콘크리트 표면과 탄소섬유 사이에 열전도율이 낮은 섬유로 비부착시킨 부위는 선명하게 비부착 부위가 나타났으나, 공기로 비부착된 부분은 선명한 모양을 나타내지 못했다. 하지만 후자의 경우에도 비부착면의 크기를 온도 차로부터 무리 없이 결정할 수 있었다. 비부착 부위의

Table 2 Monica 등(2005)⁽⁷⁰⁾의 실제와 예측된 비부착 크기 비교

구 분	수평선(mm)	수직선(mm)	대각선(mm)
실제 너비	17	17	31
추정 너비	17	16	28

온도분포를 가로, 세로, 대각선 방향으로 분석하여 비부착 크기를 결정하였다. Table 2는 열화상 기법으로 예측한 비부착 크기와 실제 비부착 크기를 비교하여 나타낸 것이다.

Wu 등(1998)⁽³⁷⁾은 탄소섬유시트와 유리섬유시트의 비부착 결함을 열화상 기법으로 검출한 바 있다. 이 연구에 따르면 열화상 기법으로 검출이 가능한 섬유시트 두께를 최대 5mm로 제시하였다. 그러나 최근 비부착 크기 및 섬유시트의 두께에 따른 연구가 Jeff 등(2007)⁽⁴⁵⁾에 의해 기존 선행 연구에 비해서 보다 정밀하게 수행된 바 있다. Jeff 등(2007)⁽⁴⁵⁾은 탄소섬유시트의 두께별 비부착 결함 검출은 수행한 결과, 탄소섬유시트의 두께가 4mm일 때, 비부착 부위의 크기가 2.0cm²까지 검출되는 것으로 제시하였다.

3.3 콘크리트 내부철근의 부식도 측정

염화물의 침투로 인한 철근 콘크리트 교량의 안정성 검토는 중요시 되고 있다.⁽⁹⁾⁽⁵¹⁾ 염해나 산성비로 인한 라멘 구조물의 안전성을 체크하기 위해선 비파괴적인 콘크리트 내부 철근 부식도 측정 방법이 필요하다. 비파괴 검사법으로 초음파 정밀 검사⁽⁶⁶⁾와 같은 경우, 이미지 처리나 퍼지 기반 신경망 알고리즘과 같은 후처리가 필요하다.⁽⁴⁴⁾⁽⁷⁶⁾ 기존 방법에 비해서 빠르고 정밀한 비파괴적인 방법으로 콘크리트 내부 철근의 부식도 측정을 위한 열화상 기법 적용에 대한 검토가 필요하다.⁽³⁶⁾⁽⁵⁰⁾

Chung 등(2004)⁽⁶⁰⁾에 의해 수행된 콘크리트 내부 철근의 부식도 측정 실험은 RC구조물의 철근을 양단에 노출시켜 철근을 전기 장치로 가열하면서 부식도에 따른 열화상 정보를 추출했다. 이 실험의 결과로 철근 부식도가 높을수록 열화상 감도가 높게 나타났다. 그러나 실험 주변 온도의 영향으로 각 부식도별 열화상

온도 분포 양상은 일정하였으나 정량적인 온도는 달라 나왔다. 따라서 정량적인 철근 부식도를 측정할 수 있는 마이크로웨이브 장치와 혼용이 요구된다.

지광습 등(2007)⁽¹⁷⁾은 RC구조물 표면에 여러 열원을 가하여 내부 철근의 부식도를 열화상 기법으로 측정하는 실험을 하였다. 그 결과, 할로겐램프, 적외선램프 뿐 아니라 RC구조물 내부의 철근 부식도 측정에서 콘크리트 내부를 깊이 투과하여 강재와 콘크리트의 뚜렷한 대조를 나타내는⁽⁴⁷⁾⁽⁵²⁾마이크로웨이브를 사용해도 콘크리트 내부 철근의 부식도 검출은 어려운 것으로 나타났다.

3.4 포장도로의 표면 결함

공항 활주로의 표면결함은 사고를 유발하기 때문에, 포장에 대한 품질 조사가 반드시 필요하다. 이러한 조사에 비용-효율적인 방법으로 열화상 카메라를 이용한 기법이 제시된 바 있다.⁽⁷⁸⁾⁽²⁸⁾

Moropoulou 등(2001)⁽⁷⁸⁾은 Avio Tvs 2000 Mk II LW 장비를 사용하여 공항 활주로의 표면결함을 수동열화상법(Passive Infrared Thermography)으로 점검하였다. 첫 번째로 촬영한 장소는 소형비행기나 헬리콥터를 계류하기 위해 실제로 사용 중인 계류장을 조사하였다. 이 부분은 포장용 재료로 쇠석을 사용하였고 공항에서 가장 오래된 부분 중에 하나이다. 두 번째로는 최근에 아스팔트로 포장된 Bravo 계류장을 조사하였고 마지막으로 대략 30mm 두께의 아스팔트로 재포장된 활주로를 조사하였다. 그 결과 공항 계류장 및 활주로 표면의 정상적인 부분과 0.5℃이상의 온도차를 가지는 결함이 나타났다.

파괴시험 방법에 비하여 이러한 열화상 카메라를 이용한 비파괴 검사 방법의 장점으로는 아스팔트 도로나 공항 활주로와 같이 넓은 면적의 표면을 빠르게 검사할 수 있다는 점이다. 이로 인해 시간, 사람, 작업량, 그리고 장비사용 등에 있어서 많은 부분이 절약될 수 있다. 하지만, 열화상 카메라에 의한 비파괴 방법은 실험 현장에서, 구름의 두께나 표면 습도, 태양열 방출, 표면 재질에 따른 방사율의 변화로 인하여 결함부위의 정확한 깊이나 두께 등을 알기는 힘들다는 단점

을 가지고 있다. 따라서 촬영결과에 의한 결함에 대한 보장자료나 정밀 결함 진단이 가능한 비파괴 검사법을 접목하여 공항 포장상태에 대한 평가의 효율성을 높일 수 있을 것으로 제시되었다.⁽⁷⁸⁾

3.5 오래된 건물의 표면 누수

Tavukc 등(2005)⁽⁷⁷⁾은 습기문제를 겪고 있는 터키의 13세기경의 건물에 대해서 비파괴 연구를 수행하였고 열화상 카메라와 레벨측량(Levelling Survey) 모두를 사용하여 표면누수시스템이 잘 운영되고 있고 어떠한 문제점을 가지고 있는지 조사하였다.

건물벽면 등에 습기가 차는 현상은 지하로부터 물이 공급되기 때문인데, 이는 열화상 기법 적용시 물과 건물벽면이 서로 다른 온도 반응을 하므로 열화상 카메라를 이용하여 찾아낼 수 있다. 따라서 열화상 카메라와 레벨측량의 결합은 하부표면과 표면누수시스템을 조사하는데 정확성과 효율성을 겸비한 좋은 방법으로 제안되었다.⁽⁷⁷⁾

지광습 등(2007)⁽¹⁷⁾의 섬유시트의 표면 누수 실험 결과에서도 열화상 기법 적용시 물과 섬유시트가 서로 상이한 온도 반응을 일으켜 열화상 검출 결과가 우수하였다. 이렇듯, 열화상 카메라를 광범위하게 활용하면 그 사용가능범위가 내부 공극 등의 검출뿐만 아니라, 표면누수시스템, 석조건축물, 그리고 지하층의 조사에까지 적용 가능할 것으로 제시되었다.⁽⁷⁷⁾

3.6 기타 결함 검출

열화상 카메라를 이용한 결함 검출 방법은 물체의 표면온도를 정량적인 방법으로 나타내는 훌륭한 기법이지만, 야외에서 열화상 카메라를 사용할 경우 많은 변수⁽³⁾⁽¹⁹⁾들에 의해서 물체의 표면온도가 다르게 나타나기 때문에 반복 촬영을 통한 보정이 필요하다.⁽¹⁵⁾ 이에 Clark 등(2003)⁽⁵³⁾은 기존의 탭 테스트(Tap Testing)에서는 검출이 되지 않았던 교량하부의 박리 결함을 열화상 카메라를 이용해서 현장조사 하였다. 그 결과 조건이 열악한 상태에서도 결함을 규명해낼 수 있었다. 그리고 점검자가 접근하기 힘든 교량하부

의 슬래브 가장자리도 근접 촬영을 통하여 박리 결함 검출이 가능한 것으로 나타났다. 또한 결함이 진행되고 있는 부분과 그렇지 않은 부분의 온도 차이는 대략 0.2~0.3℃정도로 제시되었다.⁽⁵³⁾

Clark 등(2002)⁽⁷⁹⁾은 열화상 카메라를 이용한 방법이 철도 궤도 자갈 도상의 상태를 확인할 수 있는 적합한 방법인지에 대한 이론적인 연구를 수행하였다.

기존의 자갈 도상상태에 대한 평가방법은 마이크로파 레이더나 초음파를 이용하여 궤도를 따라 일정한 간격으로 자갈 도상을 검사하는 것이었다.⁽⁸⁾⁽¹⁸⁾ 이러한 기존 방법은 느리며 철도네트워크의 운영에 잦은 지장을 초래하였다.⁽⁷³⁾⁽⁷⁹⁾

이러한 요구에 맞는 자갈 도상 검사를 위한 새로운 접근 방법으로 Clark 등(2002)⁽⁷⁹⁾은 열화상 카메라를 이용한 비파괴검사법을 제시하였다. 철도 자갈 도상에 열화상 기법 적용시 기존 자갈은 신규 자갈보다 낮은 열분포를 보이는데 이는 자갈 도상 내부의 공극이 많을수록 자갈 도상 속의 미세한 입자들은 공기의 영향으로 온도가 감소되기 때문이다. 이러한 원리를 바탕으로 기존 자갈 도상 방법에 비해 빠르며 자갈 도상 손상 상태를 정확히 검사할 수 있는 방법을 제시하였다.

열화상 기법은 서로 다른 기법과 혼용이 가능하다. Gilles 등(2003)⁽⁸¹⁾은 RC구조물의 균열, 박리와 같은 손상을 열화상 기법 이외에 다양한 기법을 혼용하여 검출한 바 있다. RC구조물의 내부 철근의 위치는 레이더⁽²⁾를 이용하고 축전기법⁽¹⁶⁾으로 콘크리트 수분함량을 측정하고 초음파 표면 파동법⁽⁷³⁾으로 코팅 부위를 검출하였다. 그리고 열화상 기법으로 내부 공극과 균열, 박리를 검출하였다.⁽⁴⁹⁾ 이러한 각 기법의 장점을 이용한 결과, 손상 검출의 정밀도 뿐 아니라 빠른 비파괴 검사가 가능하다.

4. 결 론

열화상 기법을 이용한 토목 구조물의 손상 검출에 관한 최근 80여편의 논문을 분석한 결과, 열화상 기법은 토목 구조물의 넓은 표면을 빠르고 정성적으로 검사할 수 있는 장점을 가지고 있는 것으로 확인되었다.

반면, 주변 온도 등 환경 요인에 민감하게 영향을 받는 것으로 판단되었으며, 다른 정밀계측장비와 혼용시 좋은 성과를 기대할 수 있을 것으로 예측된다.

콘크리트 내부 결함을 검출시 자연광을 열원으로 사용하는 것은 날씨의 영향을 받으며 시간적 제한을 받는다. 이러한 단점을 보완하기 위해선 인공 가열 방법의 혼용이 필요하며 열화상 감도 증진이 높은 적외선 램프를 사용하는 것이 바람직하다.

열화상 기법을 이용한 탄소섬유시트 비부착 검출 실험에서는 비부착 부위의 매체가 공기일 경우, 탄소섬유시트의 두께가 4mm일 때, 비부착 부위의 크기가 2.0 cm²까지 검출되는 것으로 나타났다.

철근 부식도 측정 실험에서는 RC구조물의 내부 철근을 가열하여 철근 부식도를 열화상 기법으로 측정할 수 있었다. 그러나 실험 주변 온도의 영향으로 각 부식도별 열화상 온도 분포 양상은 일정하였으나 정량적인 온도는 달리 나왔다.

포장도로의 표면 결함 측정 실험에서는 파괴시험 방법에 비하여 열화상 기법을 사용 시 넓은 면적의 표면을 빠르게 검사가 가능한 것으로 나타났다. 그러나 정밀한 표면 결함 측정을 위해선 표면 결함을 초음파 장비를 이용하여 재측정이 필요하다.

노후된 건물의 표면 누수에서는 열화상 기법 적용시 물과 건물벽면의 온도차를 이용하여 교량 구조물의 결함을 검출할 수 있었다. 그 밖에 철도 궤도 자갈 도상의 상태측정에서도 열화상 기법은 빠르게 자갈 도상 손상 상태를 정확히 검사할 수 있는 방법으로 제시되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단융합건설기술개발사업 “레이더와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트 비파괴시스템 개발”(과제번호: 05 첨단융합 B01) 및 05 건설핵심 D11의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 깊은 감사의 말씀 올립니다.

참고문헌

1. 심형섭, 강보순, “구조물 진단에 있어 비파괴 시험법의 성능평가,” 한국구조물진단학회 논문집, 제11권 3호, 2007, 5월, pp. 167-175.
2. 박석균, “저주파수 레이더(GPR)에 의한 콘크리트 상판 및 터널 라이닝 배면 공동의 크기 및 두께 추정에 관한 실험 연구,” 한국구조물진단학회 논문집, 제10권 6호, 2006, pp. 95-104.
3. 신창건, 이송, 안상로, “적외선 열화상을 이용한 스틱리트 보강사면의 비파괴점검,” 한국구조물진단학회 논문집, 제11권 1호, 2007, pp. 95-101.
4. 장희석, 김희성, “탄소섬유 보강 중에 반복하중을 받은 RC보의 보강효과에 관한 실험적 연구,” 한국구조물진단학회 논문집, 제10권 1호, 2006, 1월, pp. 183-189.
5. 이강석, 변인희, 이문성, “Sprayed FRP로 보강된 철근 콘크리트 전단기둥의 보강성능 평가,” 한국구조물진단학회 논문집, 제11권 3호, 2007, 5월, pp. 132-142.
6. 김성도, “섬유시트로 보강된 RC 보의 해석기법 연구,” 한국구조물진단학회 논문집, 제10권 6호, 2006, 11월, pp. 154-162.
7. 한상훈, 홍기남, “탄소섬유시트로 구속된 원형 RC기둥의 일축압축 거동,” 한국구조물진단학회 논문집, 제11권 2호, 2007, 3월, pp. 125-133.
8. 장석재, “철도 레일 용접부 초음파 탐상의 문제점 및 개선방안,” 한국구조물진단학회 논문집, 제8권 4호, 2004, 10월, pp. 123-133.
9. 차철준, 박미연, 조효남, “염해 손상을 받는 RC 교량 바닥판의 강도 신뢰성 지수와 철근 부식도 등급과의 관계 연구,” 한국구조물진단학회 논문집, 제9권 2호, 2005, 4월, pp. 121-128.
10. 권영진, 김철호, 이병훈, 박득곤, 김무한, “적외선 탐사기를 사용한 구조물 노후화 평가시스템의 구축,” 한국구조물진단학회 1997년도 가을학술발표회 논문집, 1997, pp. 83-90.
11. 박진형, 심준기, 지광습, “열화상카메라와 시뮬레이션 기법을 이용한 콘크리트 내부결함 검출,” 한국구조물진단학회 봄 학술발표회, 제11권 1호, 2007, 5월, pp. 95-98.
12. 박석균, “레이더법과 적외선법을 이용한 콘크리트 시공 이음부 공극의 비파괴검사,” 한국콘크리트학회 논문집, 제15권 3호, 2003, pp. 425-432.
13. 윤영호, 전명훈, 박지영, 이정민, 정란, “인공공동 시험체를 이용한 적외선 열화상법에 의한 콘크리트 공동 탐지에 관한 기초연구,” 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제15권 1호, 2003, pp. 169-174.

14. 심준기, 박진형, 지광습, "마이크로웨이브와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트 내부 결함 검출 비파괴 검사법 연구," 한국콘크리트학회 봄 학술발표회, 제19권 1호, 2007, 5월, pp. 317-320.
15. 지광습, 정진규, 김병민, 황윤국, 이영호, "GFRP 바닥판의 약축방향 피로거동 특성," 한국전산구조공학회 정기 학술대회 논문집, 제20권 1호, 2007, pp. 393-398.
16. 조재완, 서용철, 정승호, 김승호, 정현규, "초음파 펄스 서모그래피를 이용한 세라믹 전열 판의 결함 검출," 한국세라믹학회 논문집, 제43권 4호, 2006, pp. 259-263.
17. 지광습, "레이더와 열화상 카메라를 이용한 콘크리트 비파괴 검사 시스템 개발," 교량검사로봇개발사업단 2차년도 연구보고서, 2007.
18. Yaoita A, Adachi T & Yamaji A, "Determination of elastic moduli for a spherical specimen by resonant ultrasound spectroscopy," NDT & E International, Vol. 38, No. 7, October 2005, pp. 554-560.
19. Wang LM, Zhao YL & Han Y, "The restoration of radiograph with an improved power spectrum equalizer," NDT & E International, Vol. 38, No. 6, September 2005, pp. 497-500.
20. Bhalla S, Soh CK & Liu ZX, "Wave propagation approach for NDE using surface bonded piezoceramics," NDT & E International, Vol. 38, No. 2, March 2005, pp. 143-150.
21. da Silva RR, Siqueira MHS, de Souza MPV, Rebello JMA & Caloba LP, "Estimated accuracy of classification of defects detected in welded joints by radiographic tests," NDT & E International, Vol. 38, No. 5, July 2005, pp. 335-343.
22. Janousek L, Chen ZM, Yusa N & Miya K, "Excitation with phase shifted fields-enhancing evaluation of deep cracks in eddy-current testing," NDT & E International, Vol. 38, No. 6, September 2005, pp. 508-515.
23. Kitazawa S, Abe Y & Satoh K, "Simulations of MeV energy computed tomography," NDT & E International, Vol. 38, No. 4, June 2005, pp. 275-282.
24. Bettayeb F, Haciane S & Aoudia S, "Improving the time resolution and signal noise ratio of ultrasonic testing of welds by the wavelet packet," NDT & E International, Vol. 38, No. 6, September 2005, pp. 478-484.
25. Aamodt LC, Maclachlan Spicer & Murphy JC, "Analysis of characteristic thermal transit times for time-resolved infrared radiometry studies of multilayered coating," Journal of Applied Phys., Vol. 68, No. 12, December 1990, pp. 6087-6098.
26. Andreopoulos J, "Heat transfer measurements in a heated jet-pipe flow issuing into a cold cross stream," Physics of Fluids, Vol. 26, No. 11, November 1983, pp. 3201-3210.
27. Bennett CA, Jr & Patty RR, "Thermal wave interferometry: a potential application of the photoacoustic effect," Journal of Applied Optics, Vol. 21, No. 1, January 1982, pp. 49-54.
28. Madruga FJ, Gonzalez DA, Mirapeix JM & Higuera JML, "Application of infrared thermography to the fabrication process of nuclear fuel containers," NDT & E International, Vol. 38, No. 5, July 2005, pp. 397-401.
29. Joshi A & Kumar S, "Variation of dielectric strength of a insulation paper with thermal aging," NDT & E International, Vol. 38, No. 6, September 2005, pp. 459-461.
30. Tian GY & Sophian A, "Reduction of lift-off effects for pulsed eddy current NDT," NDT & E International, Vol. 38, No. 4, June 2005, pp. 319-324.
31. Ditchburn RJ & Burke SK, "Planar rectangular spiral coils in eddy-current non-destructive inspection," NDT & E International, Vol. 38, No. 8, December 2005, pp. 690-700.
32. Gonzalez DA, Madruga FJ, Quintela MA & Lopez-Higuera JM, "Defect assessment on radiant heaters using infrared thermography," NDT & E International, Vol. 38, No. 6, September 2005, pp. 428-432.
33. Moysan J, Durocher A, Gueudre C, & Corneloup G, "Improvement of the non-destructive evaluation of plasma facing components by data combination of infrared thermal images," NDT & E International, Vol. 40, No. 6, September 2007, pp. 478-485.
34. Lugin S & Netzelmann U, "A defect shape reconstruction algorithm for pulsed thermog-

- raphy," NDT & E International, Vol. 40, No. 3, April 2007, pp. 220-228.
35. Alfano M & Pagnotta L, "A non-destructive technique for the elastic characterization of thin isotropic plates," NDT & E International, Vol. 40, No. 2, March 2007, pp. 112-120.
 36. Mercier D, Lesage J, Decoopman X & Chicot D, "Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing," NDT & E International, Vol. 39, No. 8, December 2006, pp. 652-660.
 37. Wu D, Zweschper Th, Salerno A & Busse G, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of aerospace structures," NDT.net, Vol. 3, No. 9, September 1998.
 38. D'Orazio T, Guaragnella C, Leo M & Spagnolo P, "Defect detection in aircraft composites by using a neural approach in the analysis of thermographic images," NDT & E International, Vol. 38, No. 8, December 2005, pp. 665-673.
 39. Lugin S & Netzelmann U, "An effective compression algorithm for pulsed thermography data," NDT & E International, Vol. 38, No. 6, September 2005, pp. 485-490.
 40. Marinetti S, Finesso L & Marsillo E, "Matrix factorization methods: Application to thermal NDT/E," NDT & E International, Vol. 39, No. 8, December 2006, pp. 611-616.
 41. Yu Hua Cheng, Zhao Fei Zhou and Gui Yun Tian, "Enhanced magneto-optic imaging system for nondestructive evaluation," NDT & E International, Vol. 40, No. 5, July 2007, pp. 374-377.
 42. Traxler & Schuler P, "Pulsed thermography inspection of the target elements for the W7-X divertor," Physica Scripta, Vol. T128, No. 242, March 2007, pp. 242-245.
 43. Toshihiko Kiwa, Tomoaki Kawata, Hironobu Yamada & Keiji Tsukada, "Fourier-transformed eddy current technique to visualize cross-sections of conductive materials," NDT & E International, Vol. 40, No. 5, July 2007, pp. 363-367.
 44. Adachi T, Kondo Y, Yamaji A, Yang SH & Yang IY, "Nondestructive evaluation of micro-cracks in a ceramic ferrule by resonant ultrasound spectroscopy," NDT & E International, Vol. 38, No. 7, October 2005, pp. 548-553.
 45. Jeff R. Brown, H. R. Hamilton, "Heating Method and Detection Limits for infrared Thermography Inspection of Fiber-Reinforced Polymer Composites," Vol. 104, No. 5, September-October 2007, pp. 481-490.
 46. Jeff R. Brown & Hamilton III, "NDE of Reinforced Concrete Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Composite using Infrared Thermography," InfraMation the thermographer's conference 2003.
 47. Massa A, Donelli M & Rosani A, "Microwave imaging for nondestructive evaluation of civil structures," 16th WCNDT 2004.
 48. Stanley Christopher C & Balendran RV, "Developments in Assessing the Structural Integrity of Applied Surfaces to Concrete Buildings," Structural Survey, Vol. 12, No. 4, 1994, pp. 4-9.
 49. Barrile V & Pucinotti R, "Application of radar technology to reinforced concrete structures: a case study," NDT & E International, Vol. 38, No. 7, October 2005, pp. 596-604.
 50. Assouli B, Simescu F, Debicki G & Idrissi H, "Detection and identification of concrete cracking during corrosion of reinforced concrete by acoustic emission coupled to the electrochemical techniques," NDT & E International, Vol. 38, No. 8, December 2005, pp. 682-689.
 51. Torigoe I, Mori K & Spagnoli A, "Signal processing procedure for non-destructive test of concrete structure integrity," NDT & E International, Vol. 38, No. 7, October 2005, pp. 575-581.
 52. Arunachalam K, Melapudi VR, Udpa L & Udpa SS, "Microwave NDT of cement-based materials using far-field reflection coefficients," NDT & E International, Vol. 39, No. 7, October 2006, pp. 585-593.
 53. Clark MR, McCann DM & Forde MC, "Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges," NDT & E International,

- Vol. 36, No. 4, June 2003, pp. 265-275.
54. Kamoi A, Okamoto Y & Vavilov V, "Study on Detection Limit of Buried Defects in Concrete," *Advances in Nondestructive Evaluation, Part 1-3 Key Engineering Materials* 270-273, 2004, pp. 1549-1555.
55. Gailius A & Zukauskas D, "Determination of Concrete Structural Defects by Infrared Spectrum Analysis," *ISSN 1392-1320 Materials Science (Medziagotyra)*, Vol. 9, No. 1, 2003, pp. 106-110.
56. Weritz F, Arndt R, Rolig M, Maierhofer C & Wigganhauser H, "Investigation of concrete structures with Pulse Phase Thermography," *Materials and Structures*, Vol. 38, No.283, November 2005, pp. 843-849.
57. Busse G, Wu D & Karpen W, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *Journal of Applied phys.*, Vol. 71, No. 8, April 15 1992, pp. 3962-3965.
58. Meola C & Carlomagno GM, "Recent advances in the use of infrared thermography," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 15, No. 6, September 2004, pp. R27-R58
59. Maldague X & Marinetti S, "Pulse phase infrared thermography," *NDT & E International*, Vol. 29, No. 6, December 1996, pp. 391-400.
60. Inagaki T, Ishii T & Iwamoto T, "On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography," *NDT & E International*, Vol. 32, No. 5, July 1999, pp. 247-257.
61. Meola C, Carlomagno GM & Giorleo L, "Non-destructive evaluation of bonded structures with lock-in thermography," *Journal of Adhesion science and Technol.*, Vol. 17, No. 9, 2003, pp. 1207-1222.
62. Gros XE, Bousigue J & Takahashi K, "NDT data fusion at pixel level," *NDT & E International*, Vol. 32, No. 5, July 1999, pp. 283-292.
63. Meola C & Carlomagno GM, "Application of infrared thermography to adhesion science," *Journal of Adhesion science and Technol.*, Vol. 20, No. 7, 2006, pp. 589-632.
64. Bates D, Smith G, Lu D & Hewitt J, "Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components," *Composites Part B-Engineering*, Vol. 31, No. 3, 2000, pp. 175-185.
65. Gerhard H & Busse G, "Lockin-ESPI interferometric imaging for remote non-destructive testing," *NDT & E International*, Vol. 39, No. 8, December 2006, pp. 627-635.
66. Gex D, Berthelot YH & Lynch CS, "Low frequency bending piezoelectric actuator with integrated ultrasonic NDE functionality," *NDT & E International*, Vol. 38, No. 7, October 2005, pp. 582-588.
67. Giorleo G & Meola C, "Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates," *NDT & E International*, Vol. 35, No. 5, July 2002, pp. 287-292.
68. Godin N, Huguet S & Gaertner R, "Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites," *NDT & E International*, Vol. 38, No. 4, June 2005, pp. 299-309.
69. Balageas DL, Krapez JC & Cielo P, "Pulsed photothermal modeling of layered materials," *Journal of Applied phys.*, Vol. 59, No.2, January 1986, pp. 348-357.
70. Starnes MA & Carino NJ, "Active infrared thermography for NDT of concrete structures strengthened with fiber reinforced polymer," *Materials Evaluation*, Vol. 63, No.1, January 2005, pp. 56-63.
71. Meola C, Carlomagno GM, Squillace A & Giorleo G, "Non-destructive control of industrial materials by means of lock-in thermography," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 13, No. 10, October 2002, pp. 1583-1590.
72. Kundu T, Ehsani M, Maslov KI & Guo D, "C-scan and L-scan generated images of the concrete/GFRP composite interface," *NDT & E International*, Vol. 32, No. 2, March 1999, pp. 61-69.
73. Bartoli I, di Scalea FL, Fateh M & Viola E, "Modeling guided wave propagation with application to the long-range defect detection in railroad tracks," *NDT & E International*, Vol. 38, No. 5, July 2005, pp. 325-334.

-
74. Antczak E, Defer D, Elaoami M, Chauchois A & Duthoit B, "Monitoring and thermal characterisation of cement matrix materials using non-destructive testing," NDT & E International, Vol. 40, No. 6, September 2007, pp. 428-438.
75. Caroline Holmes, Bruce W. Drinkwater & Paul D. Wilcox, "Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit - receive array data for non-destructive evaluation," NDT & E International, Vol. 38, No. 8, December 2005, pp. 701-711.
76. Genevieve F, Pla-Rucki & Marc O. Eberhard, "Imaging of Reinforced Concrete: State-of-the-Art Review," Journal of Infrastructure Systems, Vol. 1, No. 2, June 1995.
77. Tavukcuoglu A, Duzgunes A, Caner-Saltik EN & Demirci S, "Use of IR thermography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building, Agzikarahan (Aksaray), Turkey," NDT & E International, Vol. 38, No. 5, July 2005, pp. 402-410.
78. Moropoulou A, Avdelidis NP, Koui M & Kakaras K, "An application of thermography for detection of delaminations in airport pavements," NDT & E International, Vol. 34, No. 5, July 2001, pp. 329-335.
79. Clark M, McCann DM & Forde MC, "Infrared thermographic investigation of railway track ballast," NDT & E International, Vol. 35, No. 2, March 2002, pp. 83-94.
80. Chung L, Paik IK, Cho SH & Roh YS, "Infrared thermographic technique to measure corrosion in reinforcing bar," Advanced Nondestructive Evaluation I, Part 1 and 2, Proceedings Key Engineering Materials 321-323, 2006, pp. 821-824.
81. Gilles Klysz & Jean-Paul Balayssac, "Evaluation of cover concrete by coupling some non-destructive techniques Contribution of in-situ measurements," International Symposium(NDT-CE 2003).

(접수일자 : 2007년 9월 3일)