[논 문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 24, No. 5 (2004. 10)

적외선 열화상을 이용한 비파괴시험 활용 및 결함 진단

The Utilization of Nondestructive Testing and Defects Diagnosis using Infrared Thermography

최만용*†, 김원태**

Man-Yong Choi*† and Won-Tae Kim**

초 록 본 고는 적외선 열화상의 개념과 적외선열화상 측정원리 및 카메라 셋팅을 기술하고 적외선열화상(IRT)에 의한 비파괴검사(NDT)의 활용 및 비파괴검사의 진단에 대하여 살펴보았다. 적외선 열화상은 주어진 표면을 따라 온도에 관련된 열패턴의 평가를 통한 정기적인 비접촉, 비파괴 시험의 수행으로 초기에 장비 고장의 예방이 가능하다. 진단 활용으로서, 열적으로 가열된 내부결함이 있는 블록에 대하여 적외선열화상을 이용한 열화상 패턴을 비파괴 기법으로 평가하고, 결함과 열화상패턴간의 특성을 분석하여 열화상 평가 기법에 대하여 논하였다..

주요용어: 적외선열화상, 열화상, 내부결함, 온도분포

Abstract In this paper, the concept of infrared thermography(IRT), the principle of measurement of IRT and how to set up the IR camera for the nondestructive testing are described in detail. Also, its utilization and non-destructive testing(NDT) diagnosis are reviewed. By performing the periodic non-touched NDT through the estimation of thermal patterns related with the temperature for the surface targeted, IRT can be applied to the early prevention of the device failure. For the diagnosis utilization, thermal imaging patterns obtained from IRT for heated blocks with internal defects were estimated through the non-destructive method and discussed the way of IRT estimation from the analysis of characteristics between material defects and thermal imaging patterns.

Keywords: infrared thermography(IRT), thermal imaging, internal defects, temperature distribution

1. 서론

적외선 열화상(Infrared Thermography)은 열복사로 방사되는 보이지 않는 적외선 광선을 열영상 카메라를 통해 가시적인 화상으로 만들어 주는 기술이다. 가장 전형적인 열영상 카메라는 캠코더와 유사하고 열복사 동영상을 만든다. 좀더 정교한 카메라는 실제로 어떤 물체의 온도 혹은 화상 안에 있는 표면의 온도를 측정할 수 있고 쉽게 열 패턴을 해석할 수 있는 칼라영상을 만들어 낼 수 있다.

1.1. 적외선이란

적외선에너지는 전자기적 스펙트럼의 일부로서 가시광선과 유사하게 거동하며 광속으로 우주공간을 달리고 반사, 굴절, 흡수, 방사될 수 있다. 적외선

(접수일: 2004. 7. 13, 심사완료일: 2004. 9. 2) * 한국표준과학연구원 생활계측그룹, ** 공주대학교 생물산업기계공학과, † Corresponding author: Life Measurement Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, 305-600 (E-mail: mychoi@kriss.re.kr)

에너지의 파장은 가시광선보다 더 긴 0.7 ~ 1000 μm 구간이다[1,2].

1.2. 적외선 열화상의 전자기파 영역

Fig. 1에서처럼 적외선은 가시광선보다 파장이 긴 전자기적 복사의 한 형태이며. 기타 전자기적 복사파로는 x선, 자외선, 라디오 파 등이 있다. 전자기적 복사는 주파수 혹은 파장에 의해 범위가 정해진다. 적외선 감지기 혹은 시스템은 그들의 파장에 의해 범위가 정해진다. 8 ~ 12 μm 대역에서 복사가 검출될 수 있는 시스템을 일반적으로 "장파장"이라고 부른다. 3 ~ 5 μm 대역에서 복사가 검출될 수 있는 것을 "단파장 "이라고 부른다. 전자기적 스펙트럼으로부터 가시영역은 0.4 ~ 0.75 μm 이다[3].

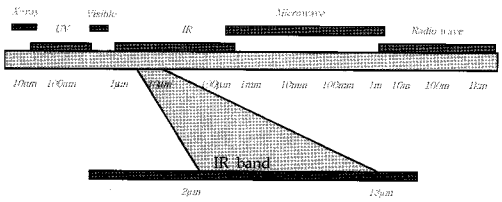


Fig. 1 Infrared band in electromagnetic spectrum of light

2. 적외선 열화상 측정원리

적외선 열화상 측정 원리는 Fig. 2에서처럼 물체 표면에서 방출되는 적외선을 검출하여 그 물체의 온도분포가 높은 곳은 장파장의 적색으로, 낮은 곳은 단파장의 청색으로 나타낸 열화상이다. 따라서 열적으로 가열된 재료를 적외선 카메라를 통해 구조물의 표면온도 분포를 화상으로 알 수 있을 뿐 아니라 물체의 각 지점에 대한 온도분포까지 측정할 수 있다[1].

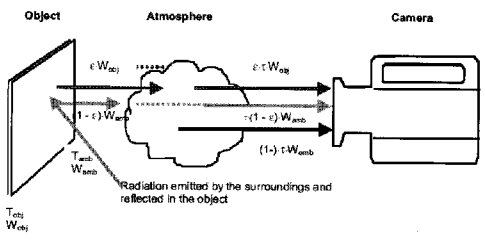


Fig. 2 Principle of Infrared Thergraphy in surroundings

2.1. 복사열 측정 원리

Fig. 2의 물체에 입사한 복사에너지는 빛의 성질에 의해 물체로부터 3가지 형태로 나타난다. 조사된 복사열은 일부 흡수가 될 수 있고, 일부는 물체에 의해 반사되고, 일부는 물체를 투과할 수 도 있다. 이로부터 다음과 같은 식이 유도된다.

$$W = \alpha W + \rho W + \tau W \quad (1)$$

$$즉,\ 1 = \alpha + \rho + \tau \quad (2)$$

여기서, α, ρ, τ는 각각 흡수율(absorptivity), 반사율(reflectivity), 투과율(transmissivity)이며 식 (2)는 복사에 대한 키르히호프 법칙이다

2.2. 방사율(Emissivity)

복사열이 완전히 흡수되는 흑체(black body)의 복사강도를 기술한 플랑크(Planck)법칙에 의해 물체로부터 방출되는 전체에너지는 스테판 볼츠만 법칙으로 다음과 같다.

$$흑체에\ 대해,\ W = \sigma T^4 \quad W/m^2 \quad (3)$$

식 (3)에서, σ는 스테판 볼츠만(Steffan-Boltz man) 상수 $(5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^2)$이다. 흑체로부터 방사된 에너지는 W_{bb}이고 이상적인 흑체 방사체라는 것은 실제적으로 존재하지 않으며, 실제 방사된 에너지가 W_{obj}이면, 물체의 방사율 ε는 다음과 같다[4].

$$\varepsilon = \frac{W_{obj}}{W_{bb}},\ 여기서\ 0 \le \varepsilon \le 1 \quad (4)$$

식 (4)로부터, 적외선 열화상에 적용되는 방사율은 적외선 카메라에 의해 사용되어지는 적외선 파장간격에서 발생하는 ε_λ의 평균값으로 Fig. 3에서처럼 서로 다른 물체의 온도에 따라 적절한 방사율의 예측이 매우 중요함을 알 수 있다.

3. 적외선 열화상 시험

3.1. 적외선 열화상 기법

적외선 열화상 기법은 크게 수동적(passive) 및 능동적(active) 두 가지 기법으로 분류된다. 주로 생산 모니터링 및 on-process의 Preventive Maintenance 시스템에 적용되는 수동적 기법은 외

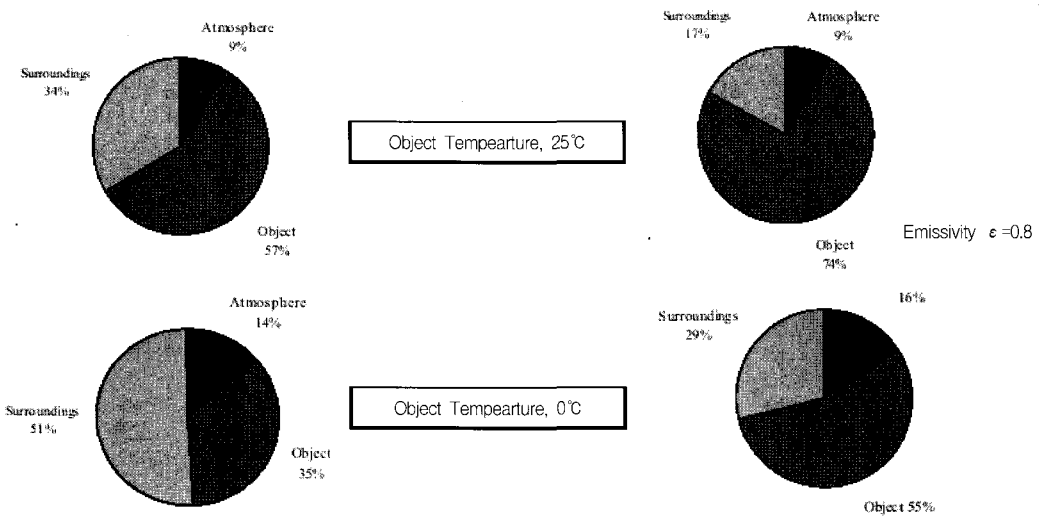


Fig. 3 Parameters effected to temperature on emissivity

부 가열이나 냉각이 없이 평가 구조물 내에 발생하는 온도차 혹은 물체와 물체주위 사이의 유용한 온도 형태들이 나타난다. 능동적 열화상 기법은 구조물에 외부 가열이나 냉각에 의한 열유동이 행하여지는 예방유지관리(preventive maintenance)의 대표적인 방법이다. 이 열유동이 교란되어 표면하부의 결함이 과도적이거나 영구적인 자극영역 하에서 발생하여 측정 가능한 표면 열형상(thermal pattern)들로 나타내어 질 수 있다[5].

3.2. 적외선 카메라 셋팅

열화상 장치는 피사체로부터 방사하는 적외선 에너지만을 측정하는 것이 아니라 피사체 주변으로부터 반사된 에너지와 대기로부터의 적외선 에너지도 함께 측정된다.

Fig. 3에서처럼 대상체의 재질에 대한 방사율의 선정에 따라 온도값이 달라질 뿐만 아니라 시험 환경에 미치는 요소인 카메라의 민감도 및 주변 환경 또한 주요한 요소임을 알 수 있다. 따라서 현장 측정 시에는 이러한 항들을 고려하여 방사율, 주변의 온도 등을 정확히 입력하여야 정확한 온도를 측정하여 진단을 바르게 할 수 있다[6].

3.3. 적외선 열화상 검사 계통도

적외선 열화상(IR thermography)을 이용한 진단을 위해서는 우선 기준(reference)에 의거한 체계적인 설정이 필요하다. Fig. 4는 이에 대한 대표적인 flowchart이다. 한 예로 설비의 작동 상태의 온도를 미리 점검하여 이를 기준으로 삼거나, 배전 설비의 경우 D/L별로 점검한다거나, 계절별 온도 기준을 달리 하여 점검, 판정하여야 한다. 이러한 체계적인 접근 방식을 가지고 설비의 적외선 열화상 진단을 한다고 하였을 때 설비들이 서로 중복 되거나 또는 결함이 있는 설비를 그냥 지나치지 않을 뿐더러 각각의 설비들에 걸린 부하가 각각일 수 있기 때문에 부하에 따른 온도 차이를 쉽게 파악하는 것이 가능하게 될 것이다

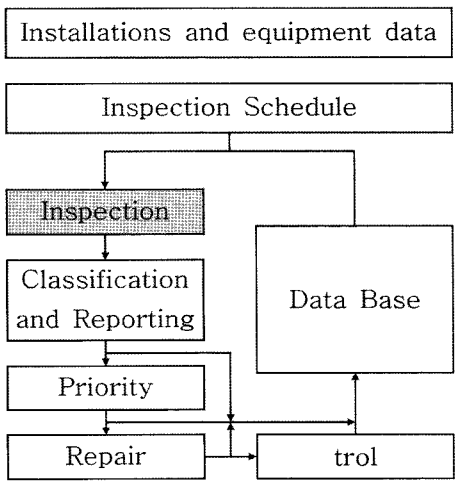


Fig. 4 Flow chart for diagnosis of IRT

3.4. 적외선 열화상의 활용

적외선 열화상은 대상으로부터 방사하는 열에너지원을 감지하여 촬영되므로 무해성, 신속성, 다중, broad-scanning 등 이점이 다양하며 이에 따른 활용 역시 광범위하다[4.5].

○ 이점
- 갑작스런 동력중단 사태를 막을 수 있다.
- 동작 중단 없이 신속히 문제를 찾아낸다.
- 정확한 거동에 대한 우선 순위 매김
- 유지보수와 고장수리에 대한 최소의 예방.
- 생산자 보증 하에 결함 장치의 확인

○ 활용 분야

▷ 전기 배전 시스템
· 발전기 검사
· 변전소 검사, 변압기, 콘덴서 평가
· 여분의 분배기 검사/ 전기 모터 검사

▷ 기밀용기와 구조체 제작
· 빌딩, 공장, 시설물, 정련소 열손실 검사
· 빌딩, 콘도의 기계설비에 대한 습기 검사
· 콘크리트 무결점 검사
· 누설과 온도 분포에 대한 가열층 콘크리트

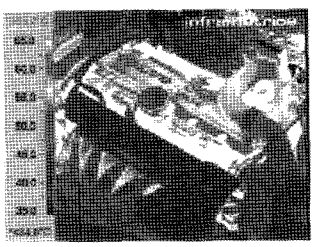
▷ 방수시험
· 잘못된 위치 혹은 단열재 손상 탐지
· 공기누설 에너지 손실 확인
· 장치 개장의 열성능 평가
· 복사열선 혹은 파이프의 위치
· 콘크리트 다리 상판의 적층박리 검사

▷ 지붕(roofing) 시스템
· 빌딩, 공장, 시설물의 평판 지붕 누설 검사
· 빠르고 정확한 지붕의 누수확인
· 좋은 상태의 지붕의 노후 진단
· 사실에 근거한 정확한 예산 세우기
· 보증/계약만료 전에 문제를 문서화 하기

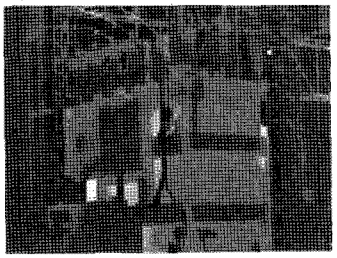
▷ 기계 시스템 (보일러 예)
· 버너유지와 화염 충돌에 대한 버너시험
· 연료의 연소형태 및 불완전 연소 관측
· 보일러 대기상태, 운영 시 관 온도 감지
· 습기기 없는 보일러 부분의 온도 스캔
· refectory 손상 가능성 있는 온열부 위치,
. refectory 손상에 대한 보일러 외부 온도
· 발전소 보일러 굴뚝에서 연소가스 감지
· 기계 베어링 검사 및 냉장고 냉각 손실
· 열 배출 공기조화 및 냉난방 장치 평가
· 냉각 장치에서 단열재 손실 탐지

▷ 석유 화학 적용
· 정련과정 라인의 단열손실 혹은 누설 탐지
· 정련 과정 및 열교환기 질과 효율 평가
· 노 내화물질 및 내부 화염평가와 관 검사
· 화염 전파 폭발 해석

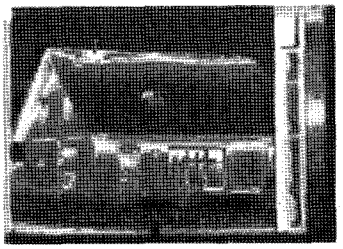
▷ 전자 장비, 자동차 및 항공기 응용
· 프린트 회로 기판 평가와 고장수리
· 반도체 장비 서비스의 열 매핑
· 회로 기판 부품 평가
· 결합구조의 production-type 검사
· 혼성 미소회로, 납땜부 검사
· 경기용차 완충기와 타이어 접촉 진단
· 제동장치 성능과 냉각 효율 및 엔진 평가
· 연료분사 노즐 결함 찾기
· 항공기의 제어 표면과 레이더부 누수
· 타이어와 제동장치의 진단
· 방풍유리와 날개 표면 방빙 시스템 진단
· 피로 균열과 부식 확인과 위치
· 제트와 로켓 엔진 및 목표 신호 해석
· 복합재료 적층박리와 결함 부분의 위치



a) Thermal profile of Engine



b) Electrical Systems



c) Heat Loss in Structures

Fig. 5 Typical utilizations of IR Thermography

▷ 의료/ 수의과에 대한 적용
- 체열, 충격, 척추 손상, 의료 상해 시험
- 질병 평가-유방암, 관절통 등
- 치과 implanting, 치열 기능 장애 등
- 운동 상해 평가, 통증부위 치료과정
- 말 상처 시험, 피로 파괴, 다리 저는 것

▷ 대중 수송에 관한 적용
- 파이프라인 누설 피로 부식 균열 검사
- 환경 검사, 오염물 투기, 오수의 열적 투기
- 송전선에 대한 고전압 공중선 검사
- 검색과 구조/· 보호소 감시

▷ 펄프와 종이
- pulp roller 증기 상자 균일 열분포 감지
- 종이질의 불균일성, 젖은 부분 확인
- 기본 중량확인 size press 성능 모니터
- 건조기안 온도 불균일성해석
- paper 공정 장비의 비정상 roller 해석
. hot spot 지점에 대한 chip files 검사

▷ 증기 터빈과 수력 발전소 발전기
- 고정자 코어내 내부판 손상 위치 탐지
- 손상된 지역 효과적 수리를 위한 모니터링
- 고정자 코어를 수리하는 동안
- 수리용 고정자 코어의 열화상 모니터링

4. 비파괴검사(NDT) 진단

4.1. 국내외 연구동향

적외선 열화상 기술은 유망한 비접촉 비파괴기술의 하나로써, 선진국에서는 지난 수십 년에 걸쳐 발전설비, 안전진단, 건축물 열관리, 콘크리트 교량 상판 결함탐지, 지하가스배관의 누설 등 산업전반에 걸쳐 활용되고 있으나 국내는 최근 의료 진단, 전자냉각, 전기설비, 콘크리트 구조물의 결함탐지 등의 필요성으로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[6,7]. 본 고에서는 대표적인 활용 사례들을 살펴보도록 한다.

4.2. 내부 결함을 갖는 재료의 IRT 평가

대형 구조물 사고의 원인이 될 수 있는 사회 간접망에 대한 안전도 관심이 점차 증가함에 따라 각종 구조물의 재료에 대한 적외선 열화상을 이용한 비파괴검사는 NDT의 broad-point 방식의 scanning 검사를 가능케 하였다.

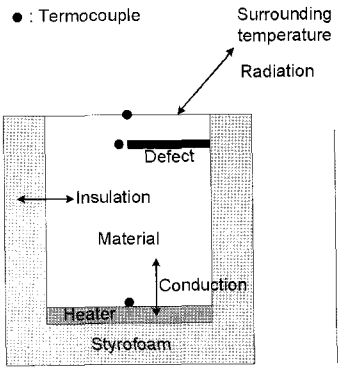


Fig. 6 Specimen with internal defect

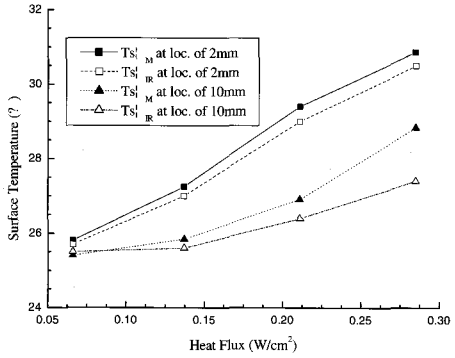
Table 1 Property and dimension of experiment

	Dimension (L×W×H, mm)	Thermal conductivity (k, W/mK)
Polystyrene	70×70×80	0.15
Plaster		0.5
Paper(defect)	35×35×2 10×10×2	0.025

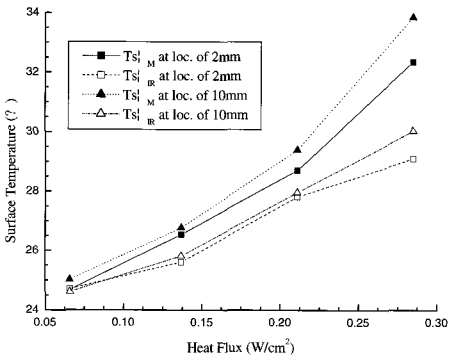
Fig. 7은 Table 1의 실험조건에서 결함의 재료가 종이이고 크기가 10 x 10이며, 표면으로부터 각각 2 mm와 10 mm에 위치한 경우 FLIR사의 열화상 카메라 AGEMA 900으로 측정한 온도 $T_{s|IR}$과 열전대(J-type)로 측정한 온도 $T_{s|M}$의 관계를 도시한 것이다. 열유속이 증가함에 따라 표면온도 역시 상승하였고, 결함이 2 mm 아래 위치해 있는 경우가 10 mm 에 위치한 경우에 비해 온도가 높음을 알 수 있는데 이는 재료가 갖는 열용량에 의함이다. 열유속이 증가함에 따라 IR에 의해 측정한 온도와 열전대에 의해 측정한 온도간의 오차는 ±2 %로 거의 유사한 경향을 보였고 석고의 표면온도가 폴리스틸렌의 것보다 높은 것은 석고가 열전도율이 더 커서 더 많은 열전도에 의한 것이다.

Fig. 8은 폴리스틸렌 시편의 바닥 열유속이 0.211 W/cm^{2}일 때 Data Logger로 바닥의 온도(T_d)가 80 ℃가 된 시점에서, 결함의 위치가 각각 표면으로부터 2 mm, 6 mm, 10 mm인 경우 IR 카메라를 이용해 측정한 Thermal pattern이다. IR 카메라로 측정한 spot 표면의 온도는 각각 29.2℃, 27.9℃, 26.5℃로 결함이 깊어질수록 온도가 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 결함이 상부에 있을 때 그만큼 충분히 시편이 열전도가 잘 되어 있는 반면 결함이 하

부에 위치한 경우에는 상부에 결함이 위치한 경우에 비해 열전도에 의한 열전달량을 차단하므로 표면의 온도가 낮다. 따라서 재료에 결함이 없는 경우의 열화상을 기준(reference)으로 하고 결함이 내부에 있는 경우의 열화상을 얻어 이를 같은 온도 index를 통해 열화상 패턴을 비교해보면 결함이 어느 위치에 있는지를 파악할 수 있음을 알 수 있다. 이를 기준 열화상에 의한 비파괴검사(reference IRT) 내부결함 탐지라 할 수 있다[8].



a) polystyrene



b) plaster

Fig. 7 Surface temperature of thermocouples and IR camera for 10 x 10 defect size

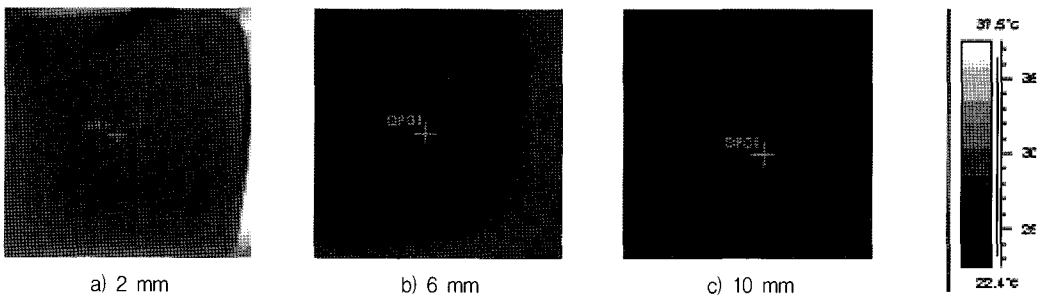
Table 2는 Table 1의 실험조건인 결함재료, 결함위치 및 시편 하부에 가해진 열유속에 따라 결함부위에서 IR 열화상으로부터 얻어진 온도를 나타낸 것이다.

Table 2 Temperature, TIR, for exp. condition

Material	Defect Size (mm)	Defect Loc. (mm)	Exp case	Heat Flux (W/cm²) 0.066	0.137	0.211	0.285
				1	2	3	4
Poly-styrene	10×10	2	A	25.7	27.0	29	30.5
		6	B	26.2	26.8	28	29.8
		10	C	25.5	25.6	26.4	27.4
	35×35	2	D	25.1	25.6	26.9	28.2
		6	E	24.5	25.5	26.2	26.9
		10	F	24.5	25.8	27.6	29.9
Plaster	10×10	2	G	24.7	25.6	27.8	29.1
		6	H	26.9	27.1	28.9	30.8
		10	I	24.6	27.0	27.7	29.0
	35×35	2	J	25.3	26.6	27.7	29.7
		6	K	25.6	27.3	28.1	28.8
		10	L	25.5	26.88	28.8	32.7

5. 결 론

적외선 열화상 기법은 최근 수요가 증가하면서 예측적 공장보수, 과정 모니터링연구와 비파괴검사 측면에서 광범위하게 쓰이는 가장 유용한 도구중의 하나이다. 초기단계뿐만 아니라 on-process에서 과부하나 결함이 있는 부위를 적외선 열화상에 의한 broad-scanning 기록을 통해 진단이 가능하다. 특히 건전한 상태에서의 표준에 근거한 기준(reference) 열화상 패턴과 고장(fault) 혹은 결함(defect)이 있는 부위의 진단을 통해 사전에 고장을 방지하도록 프로그램을 작성 또는 수정/보완하여 작동정지를 미연에 방지할 수 있다(preventive and predictive



a) 2 mm b) 6 mm c) 10 mm

Fig. 8 Thermal patterns by IR camera at the defect size of 35 x 35

maintenance). 또한, 적외선 열화상에 의한 비파괴 검사(IRT)는 주어진 표면을 따라 온도에 관련된 열 패턴의 평가를 통한 정기적인 비접촉, 비파괴 시험의 수행으로 초기에 장비의 고장 예방이 가능하다.

참고문헌

[1] G. R. Stockton and W. M. Road, "Infrared applications everywhere," Inframation 2002 Proceeding, pp. 149-154, (2002)

[2] ASNT, "Infrared and Thermal Testing," pp. 125-178, (2001)

[3] P. O. Moore, "Nondestructive Testing Handbook," Infrared and Thermal Testing, Vol. 3, 3rd ed., ASTM, pp. 223-246, (2001)

[4] N. K. D. Grande and P. F. Durbin, "Using emissivity-corrected thermal maps to locate deep structural defects in concrete bridge decks," SPIE Symposium Report, pp. 124-137, (1995)

[5] V. M. Malhotra and N. J. Carino, "Non-destructive Testing of Concrete," 2nd ed., CRC press, pp. 15-1 - 15-14, (2004)

[6] 김원태, 최만용, 박해원, 한용기, "내부결함을 갖는 블록의 열화상 패턴 및 온도 프로파일 해석," 한국비파괴검사학회 2004 춘계학술대회 논문집, pp. 164-169, (2004)

[7] 최만용, 김원태, 박정학, 김영길, "적외선열화상을 이용한 콘크리트 비파괴계측연구," 한국비파괴검사학회 2002 춘계학술대회 논문집, pp. 167-172, (2002)

[8] X. Maldague, "Application of infrared thermography in nondestructive evaluation in Roasting," Optical Non- destructive Testing, pp. 591-609, (2000)