

적외선 열화상의 원리 및 기기 구성

Principles and System Configuration of Infrared Thermography

김원태

Wontae Kim

1. 적외선열화상 원리

1.1. 열화상 원리

우주에 존재하는 모든 물체는 모두 절대온도 영 K(-273 ℃)이상의 온도를 갖고 있으며, 이러한 물체에서는 그 온도에 대응하는 열에너지(적외선)를 방사하고 있다.

예) 드라이아이스 195K, 인체 310K, 용해철 1800K, 태양표면 6000K 등

1800년에 William Herschell경이 가시스펙트럼의 끝인 파장 측으로부터 열 효과가 큰 부분이 있음을 발견하고, 1835년에 A. Amphere가 이것이

가시광선과 같은 광파로 되어 있음을 발표하여 현재의 적외선에 대한 기초를 구축하게 되었다. 적외선열화상(infrared thermography; IR) 카메라는 비디오 카메라처럼 작동하지만 Fig. 1에서 보여진 바와 같이 영상이 일반적인 "light"가 아닌 "infrared energy(heat)"를 검출하는 것이 일반 카메라나 비디오 카메라와 다른 점이다[1,2].

○ 열화상 특징

- ① Infrared energy는 imager의 광학렌즈를 통과한다.
- ② Energy는 imager의 sensor에 모아진다.
- ③ Sensor는 infrared energy를 electronic signal

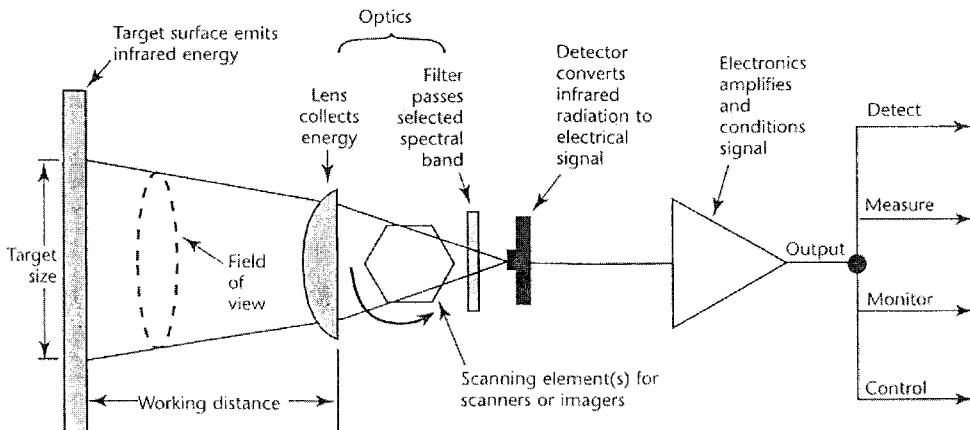


Fig. 1 IR camera with addition of scanning element for infrared imaging

변환한다.

- ④ 따라서 열영상은 물체 표면의 온도를 수천 개의 점으로 높낮이에 따라 표현한다.

적외선 열화상시스템은 이 적외선열화상을 컬러 모니터 상에 대상 물체의 온도분포 상태를 열화상으로 나타내는 장비이다. Fig. 1에서처럼 가시광에서 보이는 영상은 광(光)에 의한 반사광을 촬상관이나 CCD에서 전기신호로 변환하여 영상화한 것인 반면, 적외선열화상은 물체 자체가 발하는 광(적외선)을 적외선 감지기에 의해 전기신호로 변환시켜 영상화한 것이다. 적외선 열화상시스템은 보통 적외선 카메라(스캐너라고도 불림)와 적외선 카메라에서 나오는 신호를 처리하여 열화상으로 나타내는 신호처리부(PC같은 구성을 가짐)로 구성된다. 최근에는 카메라와 신호처리부를 하나로 한 형태(캠코더와 비슷한 모습)가 판매되고 있으며, 센서와 신호처리기술의 발달로 소형 경량화가 이루어졌다. 분리형 제품은 단일 초점형 센서를 이용하여 대상 물체의 한 부분에 대하여 초점을 맞춘 후, 수평/수직축으로 주사(scanning)하는 방식인 반면, 최근 일체형은 평면배열형(focal plane array) 센서를 활용하였기 때문에 단일 초점형이 가지는 단점인 센서 냉각장치와 주사장치를 없앴으로써 소형경량화를 이루었을 뿐만 아니라 가격이 대폭적으로 떨어져 향후 많은 보급 및 활용이 예상된다[3].

1.2. 열화상 영상 획득법

어떤 물체의 형태를 인식하고자 하려면 사람의 눈을 생각하면 쉽게 이해가 된다. 눈으로 넓은 영역을 보려면 얼굴을 돌리거나 눈동자를 돌리면서 전체를 인식한다. 여기에서 눈은 적외선 센서에 해당하며, 눈동자를 돌리는 것은 적외선 광학계에 해당한다. 그리고 얼굴은 적외선 영상 시스템 전체를 의미한다. 이와 같은 원리를 응용하여 두 가지 방법의 광학계를 이용하여 영상을 획득한다.

1.2.1. 직렬주사식 영상 획득법

먼저 Fig. 2와 같은 수평, 수직 거울을 돌리면서 전체를 인식하는 주사 방법(scanning type)과 Fig. 3과 같이 수평, 수직 거울 없이 인식하는 주

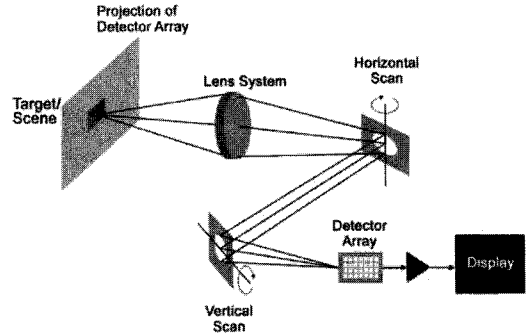


Fig. 2 Scanning type-serial scanning

시 방법(staring type)이 있다. 주사(scanning) 방법은 모니터에 나오는 물체를 실시간으로 보고자 하면 수평, 수직 거울을 고속으로 움직이도록 해야 한다. 왜냐하면 모니터의 주사선을 250선으로 보고, 영상을 무리없이 보고자 하면 초당 24 프레임은 되어야 하므로, 기본적으로 세로축으로는 24×250에 의해 초당 6000번을 움직여야 한다. 그리고 가로축도 같은 비율로 움직여야 하므로 세로축은 6000×250에 의해 약 1 MHz 이상의 주기로 움직여야 한다는 결론에 도달한다. 그러므로 거울이 이렇게 빨리 움직이려면 구동 부분이 특수 설계로 이루어져야 한다. 보통의 평면거울로는 이 속도를 도저히 낼 수 없기 때문에 8각형 또는 그 이상의 각을 이룬 거울을 사용한다.

이 방법의 장점은 주사하면서 신호를 증폭하여 신호 대 잡음비를 높일 수 있는 것과 센서의 소자 개수가 작아도 된다는 것이다. 그러나 광학계의 복잡성 때문에 시스템 자체의 크기와 무게 때문에 이 방법보다는 주시 방법으로 기술이 옮겨가고 있다[4].

1.2.2. 센서감응식 영상 획득법

주시(staring) 방법은 주사 방법과는 달리 거울이 없는 대신에 센서의 소자 하나 하나가 모니터의 한 픽셀에 해당하도록 설계되어 있다. Fig. 3에서 보이는 것처럼 센서의 소자 개수가 많으면 많을수록 화면에 나타나는 화질은 그만큼 향상되며, 복잡한 광학계가 없기 때문에 크기 및 무게에서 많은 이점을 갖고 있다.

주시 방법에 사용되는 적외선 센서는 256×256 이상의 이차원 배열을 갖는 소자가 필요하며, 현

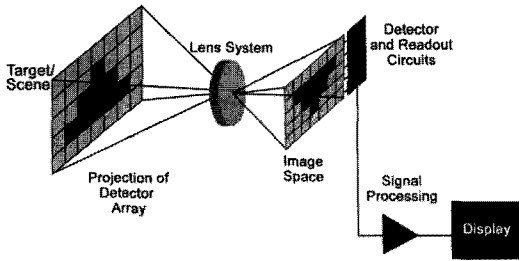


Fig. 3 Staring type of infrared sensor

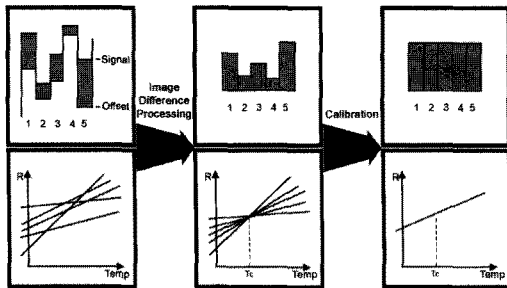


Fig. 4 Signal processor of infrared sensor

재 센서의 재료에 따라 다르지만, PtSi를 사용한 경우 1024×1024 배열을 갖는 센서가 개발되어 실용화되었으며, 가장 성능이 우수한 HgCdTe 반도체형 센서인 경우 512×512 배열까지 개발되어 있다. 주사 및 주시 방법으로 광학계에서 센서에 적외선을 집속시켜 주면 센서는 적외선과 반응하여 전압 또는 전류를 발생시킨다. 그런데 센서의 소자 개수가 많아지게 되면 소자 각각의 특성들이 일정하지 않기 때문에 신호처리기에서는 각 소자의 신호 크기를 보상해 주거나 반응을 하지 않는 소자의 신호도 보상해 주어 모니터에 깨끗한 영상이 구현되도록 해야 한다. 이러한 역할의 내용을 Fig. 4에 나타내었다[5,6].

첫 번째 그림은 각 소자의 특성들이 서로 다른 특성을 갖고 있음을 나타내고 있다. 주위 온도에 변화에 대해 반응하는 정도와 기준점인 offset이 모두 다르다. 이것을 두 번째 그림에서 기준점인 offset을 모두 맞추고, 세 번째 그림에서처럼 소자의 특성을 모두 균일하게 맞추어 주면, 온도 변화에 대한 반응 정도가 모두 동일하게 나타나게 되어 깨끗한 상을 얻을 수 있는 것이다. 적외선 열화상기술에서는 결함은 적외선 이미지에서 결함이 차지하고 있는 화소수(pixel)로 크기를 대략

적으로 추정할 수 있다. 일반적으로 결함의 크기 측정을 위해서는 먼저 지시자를 이용하여 적외선 카메라의 화각에 따라 단위 화소에 대응하는 실제 길이를 구하고, 단위 화소에 대응하는 길이를 결함이 차지하는 화소수에 곱함으로써 결함의 크기를 산정하는 방법을 사용한다. 즉, 결함의 크기(mm) D는 식(1)과 같이 표현된다.

$$D = M \times \left(\frac{L}{P} \right) \quad (1)$$

여기에서, L은 지시자(calibrator)의 길이(mm), P는 지시자의 길이에 대응하는 화소수(pixel), M은 결함이 차지하는 화소수(pixel)이다.

2. 적외선열화상 NDT 소개

2.1. 수동적 열화상 기법

Passive IR system으로서 모든 물체에서 나오는 복사에너지를 analog 파장의 형태로 검출하여 이를 온도분포 영상으로 재현해 내는 방식이다. 이 장비의 특성은 거리상의 제약이 없고 무월광시에도 정확한 영상을 구현한다. Passive IR system은 현재 5세대까지 개발된 상태이며, 이의 대략적인 내역은 아래와 같다.

2.1.1. 1세대 IR System

Scanner system으로서 camera 내부에 scanning mirror를 전기 motor로 구동하여 (수평, 수직 mirror)이를 영상으로 재현해내는 방식으로서, detector element(검출 소자)의 냉각이 필요하다 (-196 ℃). 이의 냉매로 이용된 것이 액체질소이며, 사용시간의 한계가 있다. 냉매 용기의 크기에 따라 다르나 대략 2시간 정도 액체질소를 camera 내부 냉매용기에 재충진 해주어야 한다. 장비의 대형화에 따른 사용 편의성은 고려될 수 없었던 시기이며 냉매의 충전으로 인한 사용상의 불편함 또한 감수해야 했다.

2.1.2. 2세대 IR System

장비의 소형화와 더불어 온도분포를 data화하여 열 영상 및 온도 data를 동시에 구현해 낼 수

있다. 이 시기에 냉매 사용에 따른 불편함을 해소하기 위하여 thermo-electrical cooled detector (전자 냉각 방식 검출 소자/peltier element)가 개발되어 장비의 소형화가 가능하게 되었고 냉매 사용에 따른 사용시간의 제약에서 벗어나게 된다 (1986년). 그러나 온도 냉각의 범위가 액체 질소보다 작은 관계로(영하 75도) 상기의 1세대 시스템에 비하여 선명한 영상을 구현해 내지 못하는 단점이 있다.

2.1.3. 3세대 IR System

장비의 경량화 및 camera 본체로부터 직접 digital 방식으로 신호처리가 가능한 full digital image processing system이다. 이전 시스템은 camera로부터 오는 analog 신호를 controller에서 digital로 변환하거나, analog 신호 그대로 처리하는 방식으로서 정확한 영상을 구현하는데 제한이 있었다. 또한 상기 전자 냉각 방식의 선명한 영상을 얻지 못하는 단점을 보완하였으며 장비의 휴대성을 향상시키고 계속 유지하기 위하여 소형 헬륨 가스 용기가 내장된 냉각장치가 채택되었다 (stirling cooler). 이의 개발로 액체 질소와 같은 냉각온도를 유지하면서 장비의 소형화를 이룰 수 있었지만, 이 또한 냉장고의 프레온 가스처럼 일정시간(2000~5000시간) 사용 후 헬륨가스를 재충전해야 하는 단점이 있다.

1~3세대 시스템은 기계적으로 구동 mirror를 돌려서 영상을 얻는 관계로 motor 및 mirror의 일정시간 사용 후 교체를 해야 하는 시스템이다.

2.1.4. 4세대 IR System

냉각장치는 상기 stirling cooler를 사용하고 IC (직접 회로) 개발 기술의 발전으로 인하여 구동 motor 및 mirror가 필요 없는 IC chip 형태의 검출 소자인 focal plane array type의 시스템이다(1995년). 이 focal plane array(FPA)는 소자 재료에 따라 PtSi 혹은 InSb FPA 등이 있으며, 초기에는 거의 군용 목적으로 사용되었으나 이의 편리성으로 인해 민수용으로 광범위하게 사용되고 있다. 이 시스템에서는 선명한 영상의 구현, 휴대 용이성 및 정확한 온도분포를 구현하고 data 취득 등 여러 면에서 이전의 1~3세대 장비보다 획기적인 발전

을 이루었다고 볼 수 있다. 하지만 stirling cooler의 사용시간 제한 및 재충진 시의 비용 발생 등 사용자 입장에서 볼 때 불합리한 면이 있었다.

2.1.5. 5세대 IR System

냉매가 전혀 필요없는 비 냉각방식으로서 4세대 장비의 장점은 모두 수용하고 장비의 사용시간의 제한이 전혀 없는 새로운 FPA소자(uncooled micro-bolometer)를 채택하여 상기 단점들을 모두 보완한 system이다(1997년). 현재의 기술 발전 추세로 볼 때 상당기간 이 비 냉각방식 FPA system을 능가하는 장비는 없으리라 본다. 기계적인 작동부위 제거 및 냉매의 재충진 불필요, 이에 따른 장비의 사용시간 증대 등, 다방면으로 고려할 때 사용자의 입장에서 모든 점을 수용한 장비이다. 현재 군용 및 민수용으로 급속히 이전 세대 모델들을 대체해 나가고 있다.

상기 2에서 기술된 적외선열화상 장비에 대한 세대분류와 별도로 제조사 및 구분 방법에 따라 1,2 & 3세대 장비로 대별하는 경우도 있으며, 이 경우는 다음과 같다.

1세대는 기계적인 scanning을 하여 영상을 구현해내는 장비를 총칭하며,

2세대는 linear focal plane array를 이용한 장비를 말한다.(Linear Array)

3세대는 stirling focal plane array를 이용한 장비를 말한다.(Matrix Array)

일례로, FSI사의 Thermovision 1,000 model은 stirling cooled 냉각방식을 채택한 3세대 시스템으로 이 장비의 냉각장치의 MTBF는 5,000~8,000시간으로, 현재 실 사용한 예로 볼 때 5,500~5,800시간 사용 후 냉매를 재충진 해주어야 한다. Thermovision sentry model은 5세대 장비로서 타 장비와 달리 camera와 pan/tilt가 일체형인 시스템으로서 별도의 pan/tilt head가 필요 없으며, camera 자체에 digital micro-processor가 내장되어 별도의 controller가 필요 없이 joystick으로 모든 조정이 가능하다. 또한, 영상의 구현 방법에 있어서 다양한 mode로 선택이 가능하다(color/rainbow, ironbow & B/W(흑/백), etc.). 또한, option의 선택에 따라 auto-tracking, GPS interface, CCD/CCTV

camera 등을 camera 본체에 취부할 수 있다. 최근에는, 카메라의 개발속도를 간략히 살펴보면 화소수(pixel)에 분류에 따라, 상용 제품의 경우 1024×1024 화소에서 초 당 132 장을 촬영할 수 있으며, 화소수를 640×512로 감소할 경우 초 당 750 장을 촬영할 수도 있다.

2.2. 능동적 적외선열화상 방법

적외선열화상은 기본적인 펄스(pulse) 적외선열화상, pulse-phase 적외선열화상, lock-in 적외선열화상이 있다. 이 중에서 펄스열화상은 적외선열화상에 있어서 가장 보편적인 열자극 방법 중 하나로 짧은 열자극 펄스에 의한 시험의 신속성 때문이며 신속한 열자극은 재료의 손상을 방지한다.

2.2.1. 펄스열화상(Pulse Thermography)

펄스열화상은 적외선열화상에 있어서 가장 보편적인 열자극 방법 중 하나로 램프나 초음파 가진기 등을 활용한다. 광원을 이용할 경우 매우 짧은 시간에 제논(Xnon) 램프 등을 통해 20 kJ 정도의 열원을 신호발생기(function generator)를 이용하여 pulse 신호로 가열하는 방법이다.

Fig. 5에 도시된 이 방법은 일정한 시간동안 균일한 가열 온도가 입사되어야 하며, 입사시간에 따른 결과값을 실시간으로 확인하여야 하는

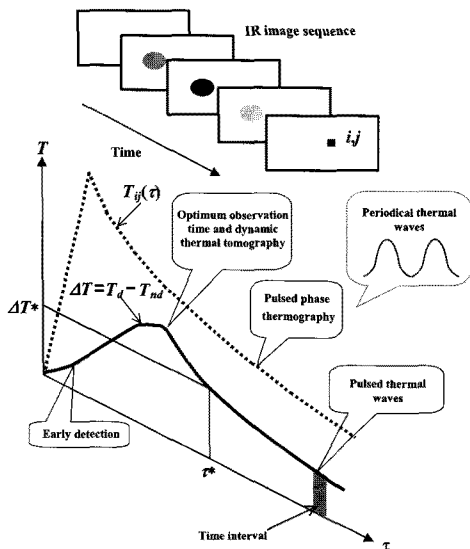


Fig. 5 Basic temperature functions in PT and PPT

어려움이 있으며 이를 저장할 경우에도 검출 민감도가 떨어지는 편이다. 선호되는 이유는 높은 열전도도의 금속 시험에 대해서는 약 3 ms 정도, 플라스틱과 흑연이 적층된 낮은 열전도의 시편에 대해서는 약 4 ms의 기간을 가지고 짧은 열자극 펄스에 의한 시험의 신속성 때문이다.

2.2.2. 펄스 페이즈 적외선 열화상(Pulse Phase Thermography: PPT)

Fig. 6에 도시된 PPT는 펄스적외선열화상(PT)와 다른 점은 펄스적외선열화상(PT)보다 검사체에 더 오랜 시간 에너지를 입사하고 푸리에(Fourier) 변환을 통하여 데이터를 분석한다.

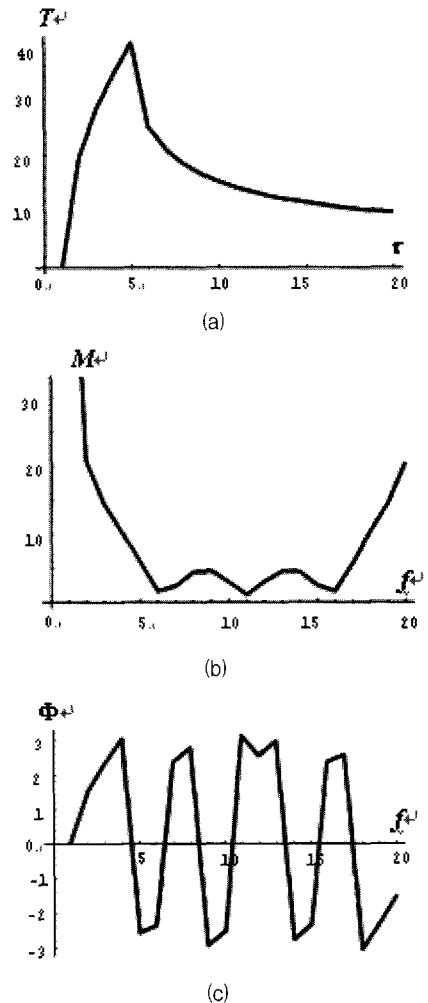


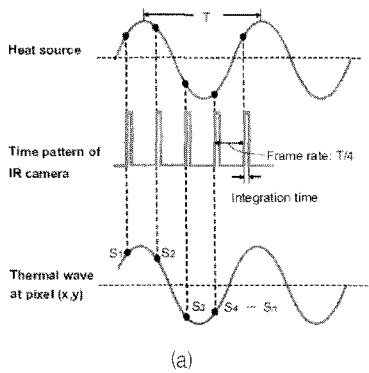
Fig. 6 Typical surface temperature evolution at Pulse phase thermography (a) Fourier transform parameters, (b) Module, (c) Phase

$$\begin{aligned}
 Fourier_s &= \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N T_n e^{2\pi j(n-1)(f-1)/N} = R(f) + jI(f), \\
 M(f) &= \sqrt{R(f)^2 + I(f)^2}, \\
 \Phi(f) &= ArcTan\left[\frac{I(f)}{R(f)}\right],
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

PPT의 장점은 결합한계 평가 한계를 정의하는 열확산길이 $\mu = \sqrt{\alpha/\pi f}$ 를 조사하는 에너지량에 따라 조정하여 균일한 온도에서 독립적으로 위상을 처리할 수 있어 검출 민감도를 높일 수 있어 PT방법에서 검출이 어려웠던 검사체의 검사가 용이하다. 하지만 모든 주파수에서 에너지가 방출되고 실시간 검출이 불가능해 푸리에 변환을 통한 데이터 분석 시 PT방법에 비하여 시간이 오래 걸리며, 적외선 입사 램프가 제한적이다. 하지만 신호/노이즈(S/N) 비가 PT에 비하여 뛰어나 R&D 분야에서 이러한 제어방법을 사용하고 있다.

2.2.3. 위상잠금 적외선 열화상(Lock-in Pulse Thermography: LIT 또는 LPT))

Fig. 7에서 나타난 바와 같이 위상잠금 적외선



열화상은 결합탐지 대상체를 자극하는 열원을 조화함수로 변조하여 입사하고 이 조화함수에 검출 소자를 동기화시켜 조화 함수의 위상변화를 복조하는 것이다.

$$T(x,t) = T_0 e^{-\frac{x}{\mu}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\mu}\right)
 \tag{3}$$

여기서 $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ 로 열확산계수(thermal diffusivity)이다. 위상잠금 기법에서는 식(3)에서 측정결과로부터 위상을 추출함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있으며, 표면 방사율의 불균일성에 의한 결합 검출 오류를 최소화할 수 있다.

식(3)에서 위상은 외부 자극원과 적외선 검출 소자를 동기시켜 자극원의 주기 간격으로 연속하는 적외선 검출신호 I1, I2, I3, I4를 식(4)와 같이 획득하고, 식(4)를 사용하여 추출할 수 있다. 위상잠금을 사용하여 위상변화를 추출함으로써 낮은 샘플링에서도 표면의 미세한 변화를 감지할 수 있으며, 불균일한 표면 방사율의 영향을 적게 받게 된다.

$$I_1 = T_0 e^{-\frac{x}{\mu}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\mu}\right)
 \tag{4}$$

$$I_2 = T_0 e^{-\frac{x}{\mu}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\mu} - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$I_3 = T_0 e^{-\frac{x}{\mu}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\mu} - \pi\right)$$

$$I_4 = T_0 e^{-\frac{x}{\mu}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\mu} - \frac{3\pi}{2}\right)$$

Fig. 7 Lock-in signal modulation: (a) Modulated sinusoidal function, (b) Signal modulation on quarter phase

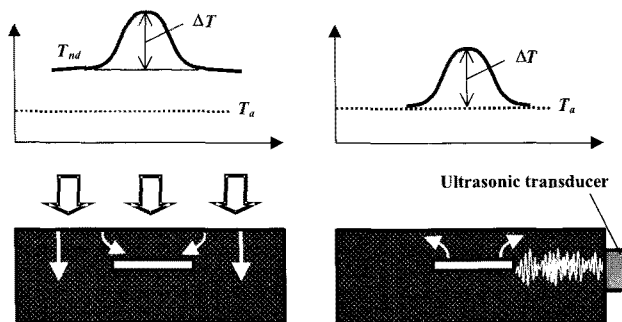


Fig. 8 Thermal wave IR thermography (optical and ultrasonic stimulation)

LIT는 안정된 상태의 에너지를 입사할 때 각각의 프레임을 축적시켜 S/N 비가 향상되는 방법으로 하나의 주파수 신호에 에너지가 집중되며, 실시간으로 측정이 가능하다. 또한 균일한 가열과 온도로부터 독립된 상태로 위상 측정이 가능하여 초음파, 마이크로웨이브, 광학적 가열에 모두 사용하고 있는 기술로 증폭을 통하여 깊은 침투깊이를 얻을 수 있어 Fig. 8은 광 및 초음파 자극에 의한 온도분포를 나타낸 것으로 상기 PT, PPT 및 LIT와 결합하여 NDT가 가능하며 이와 같은 결합탐지 방법을 통하여 NDT 품질관리, 균열 탐지, R&D와 정비 등 활용될 수 있다.

3. 적외선열화상 시스템 구성

열화상 비파괴평가는 능동적인 것과 수동적인 두 가지 방법을 사용하여 수행된다.

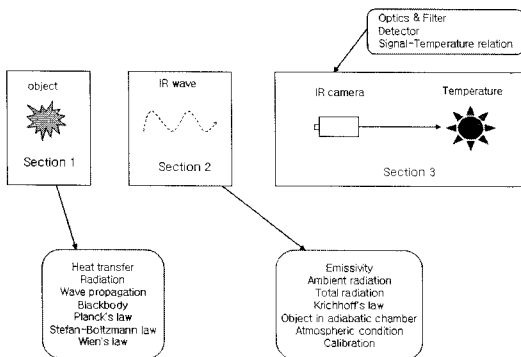


Fig. 9 NDT evaluation method in infrared thermography

3.1. 적외선열화상 가열 시험

능동적 열화상 경우에 있어서는 여러 가지 실험 설정이 가능하다. Active IR system으로서 이 장비는 별도의 광원이나 별빛 또는 달빛 등의 light source가 필요하다. 일명 starlight scope라고 하며 이의 수명시간은 detector element(검출소자)의 재질에 따라 상이하하며, 고배율의 렌즈를 장착하더라도 검출거리상의 제약이 있다.(약 200~300 미터 이내)[7,8]

3.1.1. Point 시험

레이저로 가열하거나 광선을 집중시키는 것이

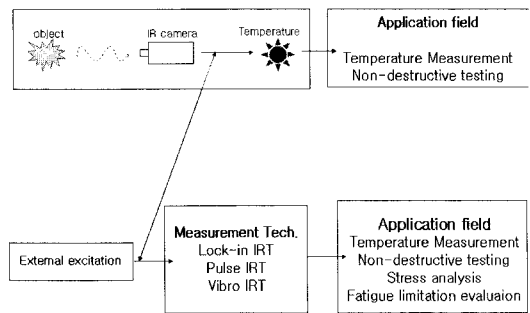


Fig. 10 Thermography application for each testing method

다. 이것의 장점은 균일하고 반복 가열을 할 수 있다는 것이다. 단점은 완벽한 표면 검사를 위해서 시험 head를 움직여야 한다는 것이다. 그것은 시험기간을 지연시킨다.

3.1.2. Line 시험

Line 전등, 가열선, 스캐닝 레이저, 공기 제트의 line(cool or hot)로 가열하는 것이다. 장점은 빠른 시험 속도($1m^2 \cdot s^{-1}$ 까지)와 측면운동 덕분에 균일성이 있다는 것이다. 단점은 온도이력곡선의 일부만 유용하다. 그것은 시험의 측면운동과 열자극과 온도신호 검출간의 고정된 거리 때문이다. 일련의 line 가열선 투사는 균열을 탐지하기 위해 시도하기도 한다.

3.1.3. 표면(Surface)시험:

전등, 플래시, 스캐닝 레이저로 가열한다. 장점은 현상을 전체 온도이력곡선이 기록되기 때문에 완벽하게 해석할 수 있다는 것이다. 단점은 비등방적으로 가열된다는 것이다.

3.2. 실험법에 따른 특징

능동적 열화상에서 열 흐름은 구조물의 외부적인 가열이나 냉각에 의한 방식으로 행하여진다. 그런 열 흐름을 교란함으로써, 표면 하부의 결함은 과도적이거나 영구적인 자극 지역 하에서 발생하여 측정할 수 있는 표면 온도 형상들이 나타날 수도 있다. 반면에 수동기술은 외부 가열이나 냉각이 시행되지 않는다. 대신에 평가된 구조물

내에 발생하는 온도차 혹은 물체와 물체 주위 사이에 유용한 온도 형태들이 나타난다.

수동적 열화상은 기본적 온도 형태로 나타나며 공업적 과정 혹은 생산단계 모니터링을 하거나 평가를 할 때 주로 사용된다. 수동적 열화상은 단순하고 engineering 장비의 최적 운용을 보장하는 경제적인 방법이다. 결점은 쉽게 찾아 수정할 수 있고 예방 유지보수 계획에 근거한 적절한 상황을 통해 비효율적인 운용을 막을 수 있다. 이 기술은 어떤 수리나 유지보수 시 성공 혹은 실패를 정하기 위해 다시 적용될 수 있다. 비록 열화상 장비가 일반적으로 사용하기 쉬울지라도 적절한 결과의 해석은 많은 경험이 필요하다. 작동자는 시험 구조물에 대한 지식을 많이 알아야하고 열화상처리에 대한 적절한 훈련을 받아야 한다.

4. 맺음말

1990년대 이후 어레이 센서의 화소수도 증가하고, 소자로부터의 신호를 전자 주사하는 기술이 진보했기 때문에, 동시성이 우수한 정밀한 온도 분포 화상을 고속, 고분해능으로 연속 계측하면서 적외선열화상을 적용한 NDT를 포함한 기술 역시 빠른 속도로 진화하고 있어 본 고에서 살펴본 적외선열화상 원리를 이해하여 향후 이에 대한 활용도 역시 빠르게 증가하기를 기대한다.

참고문헌

- [1] V. P. Vavilov, "Infrared and thermal testing: heat transfer," *Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed)*, X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., ASNT, Columbus, USA, pp. 54-86, (2001)
- [2] P. E. Mix, *Introduction to Nondestructive Testing; A Training Guide*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 407-456 (2005)
- [3] M. J. Riedl, *Optical design fundamentals for infrared systems*, SPIE PRESS, Washington (2001)
- [4] R. G. Driggers, P. Cox, and T. Edwards, "Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems", Artech House (1999)
- [5] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 7th Ed., John Wiley & Sons (2008)
- [6] A. C. Luther, "Video Camera Technology," Artech House (1998)
- [7] G. Gaussorgues and S. Chomet, "Infrared Thermography," Chapman & Hall (1994)
- [8] J. C. Russ, "The Image Processing Handbook", 2nd Ed., CRC Press, (1995)