

위상잠금 열화상 기법의 최적 실험 조건 탐색 연구

An Exploratory Study on the Optimized Test Conditions of the Lock-in Thermography Technique

조용진

Yong-Jin Cho

초 록 위상잠금 적외선 열화상(lock-in infrared thermography) 기법의 조선해양공학 분야에 적용 가능성을 검토하였다. 이를 위해 실험계획법에 의해 향상된 결합부와 건전부의 위상차 대비영상을 얻기 위한 탐색 연구를 수행하였다. 위상차 대비영상의 평가를 정량화하기 위하여 대비 기준표와 홀 크기에 가중치를 주는 방법을 적용하여 유용한 판별기준임을 입증하였다. 그리고 표면에 광 조사 세기는 중간이나 낮은 조사량이 좋은 결과를 보여주고, 높은 조사는 유용한 결과를 주지 못했다. 위상잠금 주파수는 가진 광원의 세기에 비례하여 좋은 결과를 획득할 수 있었고, 열화상 카메라의 노출시간(integration time)은 조사 광원의 세기와 반비례하여 실험을 수행하는 것이 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 시험편(specimen)의 차이는 약간의 편향된 결과를 얻었지만 유의하지는 못했다.

주요용어: 위상잠금 열화상 기법, 실험계획법, 영상 대비 기준표, 위상잠금 주파수, 노출시간, 열화상 카메라

Abstract This work is devoted to the technique application of lock-in infrared thermography in the shipbuilding and ocean engineering industry. For this purpose, an exploratory study to find the optimized test conditions is carried out by the design of experiments. It has been confirmed to be useful method that the phase contrast images were quantified by a reference image and weighted by defect hole size. Illuminated optical intensity of lower or medium strength give a good result for getting a phase contrast image. In order to get a good phase contrast image, lock-in frequency factors should be high in proportion to the illuminated optical intensity. The integration time of infrared camera should have been inversely proportional to the optical intensity. The other hand, the difference of specimen materials gave a slightly biased results not being discriminative reasoning.

Keywords: Lock-in IR Thermography, Design of Experiments, Reference of Image Contrast, Lock-in Frequency, Integration Time, Infrared Camera

1. 서 론

적외선은 1800년에 발견되었으며 그 역사는 이미 200년이나 된다. 적외선은 파장대역에서 보면 가시광선과 전파 사이에 있는 전자파인데, 적외선보다 훨씬 뒤늦게 1888년에 발견된 전파에 비해, 그 응용의 정도는 아직까지 극히 한정되어

있다. 지구상에는 주야를 불문하고 적외선을 매체로 하는 정보가 흘러넘치고 있으며, 과학·기술, 산업, 교통, 통신의 발전과 더불어 이들 정보를 활용하고자 하는 바람이 간절하지만, 생각대로 적외선을 처리할 수가 없어 비약적인 발전을 이룬 전파에 비해 뒤쳐져 있었다[1,2].

개발이 늦은 주된 이유로는 적외선이 대기중의

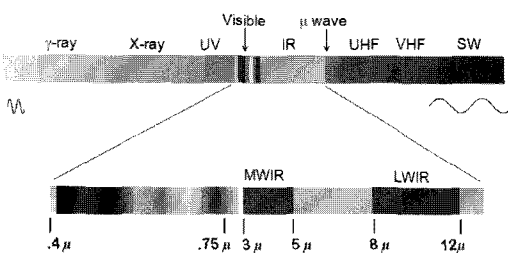


Fig. 1 Infrared in the electromagnetic spectrum

수분과 탄산가스 등에 의한 산란과 흡수로 인해 유효 거리가 짧고, 적외선 센서의 개발이 늦은 점도 간과할 수 없다. 개발된 적외선 장치도 매우 고가로 우주와 군용에 이용되는 특수한 기술 분야로 간주되는 경향이 있었다.

그러나 냉전시대가 끝나며 군사분야 활용의 제약이 감소하고 반도체 제조와 동일한 기술을 이용해 고성능의 센서가 개발되어 가격이 저렴해지며 활용의 무게중심이 군사 및 우주분야에서 민수분야로 급격하게 넘어오고 있다[3,4].

민수분야에서 주된 활용은 건물의 열손실 방지 분야, 발전소의 감시기술 분야, 피부온도를 관찰하는 생물학적 또는 의학적인 분야 등에서 활용되고 있다. 이런 민수분야 활용에는 정상상태(steady-state) 온도차가 영상화되기 때문에 이런 활용을 전통적인 정상상태 열화상이라 부른다.

이와는 대조적인 다른 분야는 온도분포의 시간에 따른 변화를 탐지하여 연구 평가하는 수많은 기법이다. 이런 분야의 비정상상태(non-steady-state)나 동적인 열화상의 가장 두드러진 활용 분야는 펄스(pulse) 열화상과 위상잠금(lock-in) 열화상 활용이다[5,6].

일반적으로 위상잠금 적외선 열화상(lock-in infrared thermography) 기법은 능동의 불균일한 광열원(optical excitation)의 조사, 표면 방사율(emissivity) 그리고 주위 환경에 의한 반사의 잡음 영향을 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 조선해양 분야의 활용 현장에서 원하지 않는 환경잡음에서도 우수한 결과를 줄 수 있을 것으로 기대하였다.

본 연구는 우리나라가 세계 제1의 조선해양국가를 유지하고 발전시키기 위한 고부가가치 특수선, 해양구조물 및 첨단 기자재 개발에 활용할 수 있는 구조물 용접부위 및 주요 금속접합부의 결함을 탐지할 수 있는 위상잠금 적외선 열화상

(lock-in infrared thermography) 기법의 활용 가능성을 평가하고 생산과정에서 이용할 수 있는 최적의 진단검사의 조건을 탐색하는데 있다.

연구방법은 실험계획법(design of experiments)을 활용한 직접실험법으로 수행하였다. 위상차 대비 영상인 특성치(중속변수)에 영향을 미칠 수 있는 변수들을 문헌자료와 합정 분야의 연구경험에 의한 제어가 가능한 인자들(factors)을 선정하고, 실험환경 등의 제어가 불가능하거나 작은 영향을 미치는 변수들은 잡음으로 취급하였다.

선정된 인자는 가능한 넓은 범위의 탐색 연구가 가능하도록 넓은 수준(level)으로 모델링 하였으며, 결함의 진단은 이미 개발된 표준 시험편(specimen)을 활용하였다. 실험 결과의 분석은 도출된 결과 영상을 개발된 영상 대비 기준표와 비교하여 정량화하고 결함의 크기에 따라 가중치를 두어 특성치를 정량적인 분석방법이 가능하도록 계획하였다[7-9].

2. 위상잠금 적외선 열화상 기법

동적인 열화상을 활용하는 위상잠금 적외선 열화상(lock-in infrared thermography) 기법은 시험대상 물체에 능동열원으로서 연속적인 변조된 단순 조화함수(harmonic function)를 조사한다. 이 기법은 조화함수로 입사되는 열원(heat source)에 적외선 카메라의 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다.

식(1)로 표현되는 고체 내의 1차원 열전도방정식에서 외부 자극원으로서 할로겐램프에 의한 광열원을 조화함수($T=T_0 \cos wt$)로 표면을 가열할 때, 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함을 검출하는 방법이다[5,10-12].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서 T 는 온도, t 는 시간, k 는 열전도계수, ρ 는 밀도, C_p 는 비열, x 는 열유통 방향이다. 흡수된 열은 물체 표면으로 부터 열파동(thermal wave)을 만든다. 이 열파동은 물체 속으로 진행되어 들어가고, 물리적 열전달 특성이 변하는 빈 공간이나 갈라진 결함 층을 만나면 부분적으로 반사를 하게 된다. 진행파와 반사파의 간섭은 물체 표면에 조화진동 복사패턴의 변화를 유도하고

이를 적외선 카메라에 의하여 탐지하게 된다.

물체내부의 결함부위 표면은 결함이 없는 건전부와 비교하면 다른 위상을 나타낼 것이다. 위상잠금 시스템과 소프트웨어는 진폭과 위상의 변화를 계산하여 결함부를 확인할 수 있게 된다.

이러한 기법은 연속적인 대신 동시에 순차적인 측정값을 가지기 때문에 위상잠금 열화상 방법이라 부른다. 즉, 하나의 파동 주기 동안에 많은 점들이 동시에 관측된다. 따라서 장치는 다중측정을 수행해야 한다. 이런 열화상 측정은 위치에 따른 열파동의 변화를 진폭과 위상으로 나타낸다. 위의 Fig. 2는 위상잠금 열화상 기법의 개념을 보여준다.

만일 영상기록이 변조 주파수와 동기화되고 한 주기 동안에 4개의 영상을 얻는다면, 4개의 신호값 S_1, S_2, S_3 및 S_4 가 모든 영상 화소에서 얻어진다. 따라서 매 파동 주기 동안에 각 영상 화소는 위상이 90° 차이를 갖는 4배의 자료를 취득하게 된다. 취득된 4개의 자료로부터 특정 화소 (x, y) 의 변조가 이루어 질 수 있다.

결과적으로 다음의 식(2)과 (3)를 이용하여 특정 화소에서 온도 변조의 진폭과 위상을 구할 수 있다.

$$A(x,y) = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2} \quad (2)$$

$$\phi(x_1) = \tan^{-1} \left(\frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2} \right) \quad (3)$$

실제적으로는 위상잠금 열화상 시스템은 온도 영상의 진폭과 위상각의 계산을 위해서 단 4장 (S_1, S_2, S_3 및 S_4)의 그림보다는 훨씬 많은 영상을 얻는다.

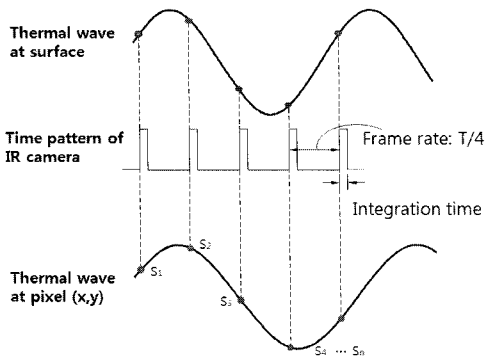


Fig. 2 Principle of lock-in thermography

몇 개의 변조주기에 거쳐서 매 주기마다 4장 이상의 영상의 평균을 구한다. 그렇지만 사인파형 변조로 인하여 모든 이미지는 결국 4개의 기본 영상(S_1, S_2, S_3 및 S_4)으로 병합된다. 이들 병합영상의 위상각과 진폭값은 앞의 식(2)과 (3)로부터 얻어진다.

위의 방정식이 (S_1 과 S_3) 및 (S_2 와 S_4)사이의 차이를 계산하기 때문에 위상잠금 기법이 불균일한 광 열원의 조사, 표면 방사율(emissivity) 그리고 주위 환경에 의한 반사의 잡음 영향을 제거할 수 있게 된다.

이런 영향들이 펄스(pulse) 열화상 기법에서 나타나면 결함 검출의 오류를 일으킬 수 있다[9].

3. 연구 방법

3.1. 실험인자(Factors) 설계

연구 방법은 넓은 인자의 수준을 탐색할 수 있는 실험계획법인 다원배치법(multi-way factorial design)을 활용하였다. 건전부와 결함부의 위상차 영상인 특성치를 잘 나타내주는 최적의 인자를 찾아내는 탐색 연구의 과정으로 수행하였다.

이러한 실험 연구 과정은 Fig. 3과 같이 전형적인 블랙박스 문제이며, 안정적인 해를 얻기 위해서는 입력변수(parameter)와 관련된 실험인자의 개발이 필요하다[2].

우선 위상잠금 적외선 열화상 기법의 특성치에 영향을 미칠 수 있는 변수들은 문헌자료의 조사와 함정 분야의 연구경험에 의한 제어가 가능한 실험인자를 선정하였다. 그리고 시험과정에서 주변 환경과 대기영향 등에 의한 제어가 불가능하거나 작은 영향을 미치는 변수들은 잡음으로 취급하였다. 아래의 Table 1은 이와 같이 선정된 입력 실험인자들을 보여준다.

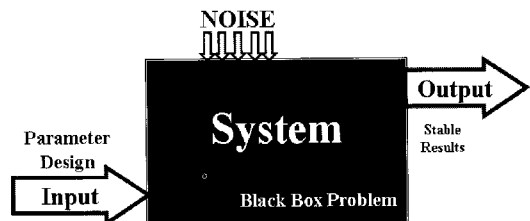


Fig. 3 Typical black-box problem

선정된 인자(변수)는 가능한 넓은 범위에 대한 탐색연구가 가능하도록 수준을 넓게 모델링 하였다. 광 증폭 가지는 아날로그 방식의 조절을 통해 수준을 결정하였다. 최고 가진량(100%)에 선형적 비례를 이용하여 30%(Q3), 50%(Q5) 및 70%(Q7)으로 인자의 수준을 정하였으며, 위상잡음 주파수는 0.01 Hz 부터 1.0 Hz까지 일정 간격을 정하여 실험을 수행하였다[8].

카메라의 노출시간(integrated time)은 원적외선 카메라의 사양에 따라 수준을 정하였다. 인자들의 수준은 다음 Table 2와 같다.

Table 1 Design factors and noise factors

	Parameters
Design factors	<ul style="list-style-type: none"> - Material of specimen - Lamp. Amplitude - Lock-in Frequency - Camera's Integration Time
Noise factors	<ul style="list-style-type: none"> - Non-homogeneous illumination - Surface emissivity - Ambient radiation - Air Temperature - Relative Humidity - CO₂ gases partial pressure - Wind seed/direction - Movement of persons

Table 2 Level of design factors

Factors	Characteristics	Level
Specimen	- Material spec.	AL6061 SM45C
Optical excitation	- Level of optical amplifier	Q3 Q5 Q7
Lock-in frequency	- Function generator (0.01Hz~1.0Hz)	0.01 Hz 0.02 Hz 0.03 Hz 0.05 Hz 0.07 Hz 0.1 Hz 0.2 Hz 0.3 Hz 0.5 Hz 0.7 Hz 1.0 Hz
Integrated time	-IR camera spec.	400 μs (open) 180 μs (open) 280 μs (w/filter)

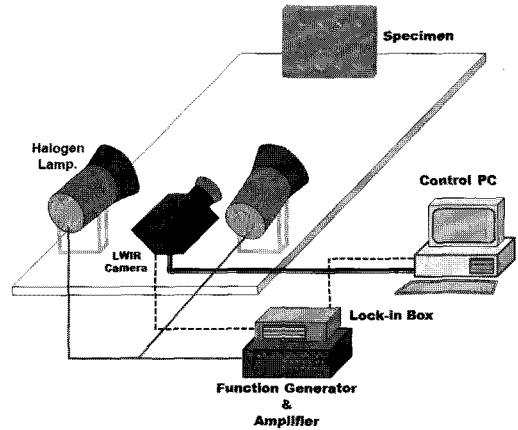


Fig. 4 System configuration of lock-in thermography

3.2. 실험장치의 구성

위상잡음 열화상 측정 장치의 구현은 적절한 일련의 장비의 조합으로 신뢰성 있는 시스템을 구성하여 측정기법을 확보하였다. 그리고 넓은 영역의 탐색 실험연구를 수행하여 최적의 실험조건을 획득하고 기술적 한계를 규명하여 적용가능성을 평가하였다.

할로겐램프의 광 증폭 가진장치에 의한 위상잡음 적외선 열화상 검출장치는 광 조사장비, 위상잡음 제어장치, 열화상 카메라 및 시험편으로 구성된다[10,11].

안정적인 실험을 위해서 흑색의 알루미늄 평판으로 제작된 정반에 실험장비 들을 설치하고 청결하게 밀폐된 실험실에서 연구를 수행하여 외란의 영향을 최소화하려고 하였다.

위상잡음 적외선 열화상 기법의 열원은 2개의 할로겐램프(1 Kw×2ca)를 이용하였으며 실험결과 열원의 강도는 충분한 것으로 나타났다.

함수 발생기(function generator)로부터 앰프를 통해 증폭된 전원이 할로겐램프를 가진하여 능동 열원으로 사용되는 개념이다.

위상 잡음 제어장치는 최근 들어 적외선 카메라에 내장되어 활용되나 구성된 원적외선(LWIR) 카메라의 경우 내장되어 있지 않아 별도로 구매하여 시스템을 구성하였다.

적외선 카메라의 경우는 열 분해능과 최단의 노출시간으로 최고 성능을 발휘할 수 있는 MCT FPA 적외선 카메라의 사용을 권고하고 있다[5].

따라서 위상잠금 열화상 시스템 구성의 핵심장비인 적외선 카메라는 Fig. 5와 같이 극저온 냉각방식의 장비(JADE LWIR MCT camera 및 관련 운용부품)를 사용하였다.

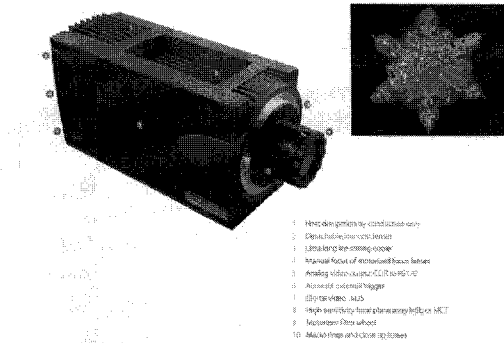
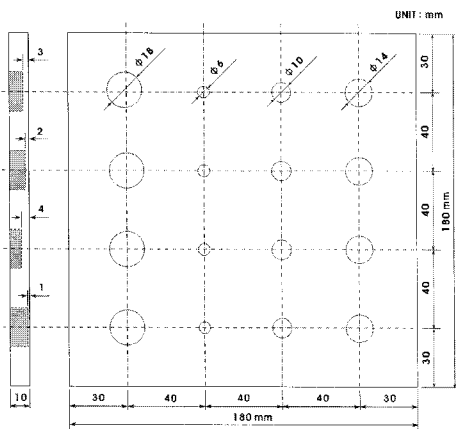
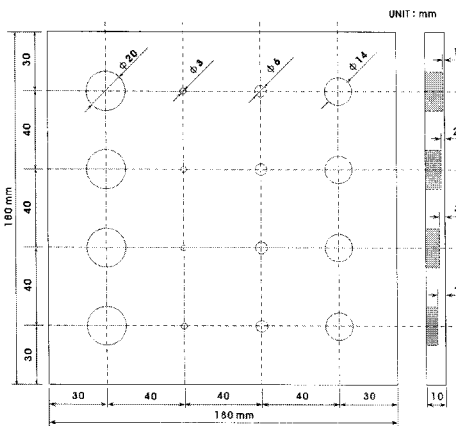


Fig. 5 JADE LWIR MCT IR camera(320×240)



(a) Al6061-T6



(b) SM45C

Fig. 6 Specimens with in-planted defects

마지막으로 시험편은 일반적으로 조선해양을 포함한 기계분야에 널리 활용되고 있는 알루미늄 합금과 탄소강 시험편을 사용하였다.

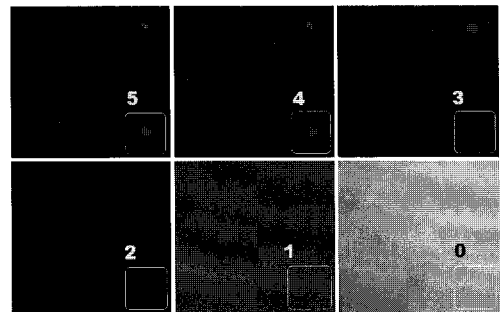
알루미늄 합금(Al6061-T6) 결함 시험편은 위의 Fig. 6(a)와 같이 180 mm의 정방형 시험편의 뒷면에 홀 가공을 함으로써 결함의 검출을 할 수 있도록 계획된 표준 시험편을 도입하여 시험에 활용하였다. 그리고 탄소강(SM45C) 결함 시험편 또한 Fig. 6(b)와 같이 시험편의 뒷면에 결함 홀을 가공한 표준 시험편을 활용하였다.

두 시험편 모두 열방사율을 높이기 위하여 흑색(black color) 계열의 도료를 도포하여 검출성을 높일 수 있도록 하였다.

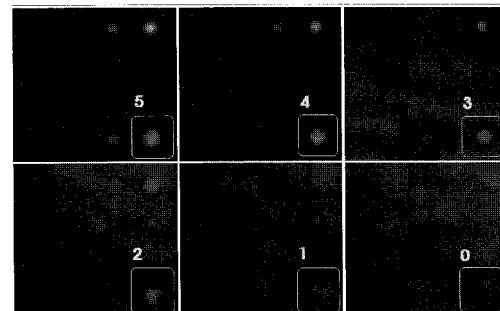
3.3. 특성치(종속변수)

탐색 연구는 실험인자의 수준 변화에 따른 특성치인 결함부와 건전부의 위상차 영상을 정량적으로 판별할 수 있도록 수치화의 과정이다.

건전부와 결함부의 위상각의 차이를 분석하기 위해서는 실험 결과 얻어진 대비영상을 활용하여 정량적으로 판별하면 좋겠지만 현재 국내의 판별 소프트웨어는 개발되어 있지는 않다.



(a) Al6061-T6



(b) SM45C

Fig. 7 Reference table for the quantitative image analysis

따라서 본 연구에서는 실험 결과 얻어진 특성치를 정량화 할 수 있도록 결함부와 건전부를 수치화하기 위하여 최고와 최악의 위상차 대비영상을 6단계로 구분하여 영상 기준표(reference table)를 Fig. 7과 같이 시험편 재질에 따라서 각각 개발하였다.

결함의 검출은 홀 깊이가 같을 경우 결함 직경의 크기와 상관관계를 가지고 있다고 알려져 있다. 따라서 결함 홀의 크기에 따라 가중치를 주어 보정할 수 있도록 계획하였다.

실험으로부터 얻어진 열화상의 분석은;

첫째, 결함부와 건전부의 위상차를 구별할 수 있는 대비선명도에 대한 기준표를 개발하여 정량화하였고,

둘째, 결함이 작은 홀에 높은 가중치를 부여하여 특성치에 결함의 크기에 따른 보정이 가능하도록 하였다.

특성치의 정량화 과정에서 기준표의 단계별 차이와 홀 크기 가중치의 차이를 수치 변환으로 모사실험하여 민감도를 검토하였다. 모사실험 결과 특성치의 절대값 차이는 있으나 특성치의 상대우열 변화는 없음을 확인할 수 있었다.

따라서 결함부와 건전부의 위상차 대비선명도를 기준표와 홀 크기에 따라 정량화 시키는 방법이 위상잠금 광-열화상기법의 활용에 최적 인자 수준을 탐색하는 유용한 판별기준이 될 수 있음을 확인하였다.

4. 실험 결과 및 분석

탐색연구의 실험과정은 설계인자인 시험편의 종류, 광 증폭 강도, 위상잠금 주파수 및 카메라 노출시간을 변화시켜가며 실험을 수행하는 인자가 4개인 다원배치법(multi-way factorial design)으로 수행하였다. 이렇게 함으로써 양호한 특성치(위상차 대비영상)를 보여주는 실험조건을 탐색하여 실험인자별로 최적의 실험수준을 찾도록 계획하였다.

다음의 Fig. 8은 알루미늄 시험편의 열원 변화와 위상잠금 주파수의 변화에 따른 특성치(위상차 대비영상)의 주요 예를 보여주고 있다. 광 조사의 세기와 위상잠금 주파수의 두 가지 인자의 변화에 의해서도 위상차 대비영상이 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

실험결과인 위상차 대비 영상의 선명도를 나타내는 특성치의 비교를 위해서 앞의 3.3절과 같은 방법으로 정량화를 하였다. 그리고 정량화된 특성치의 값을 실험인자에 따라 비교하기 쉽도록 알루미늄 시험편에 대하여 Fig. 9와 같이 도식(그래프)화하여 나타내었다.

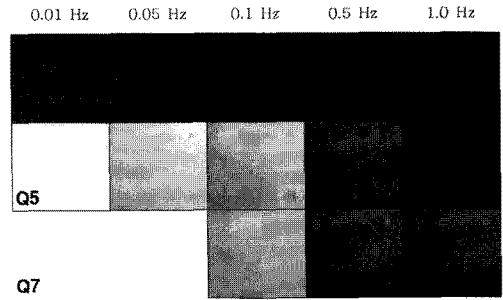


Fig. 8 Phase images of defects test(Al6061 specimen)

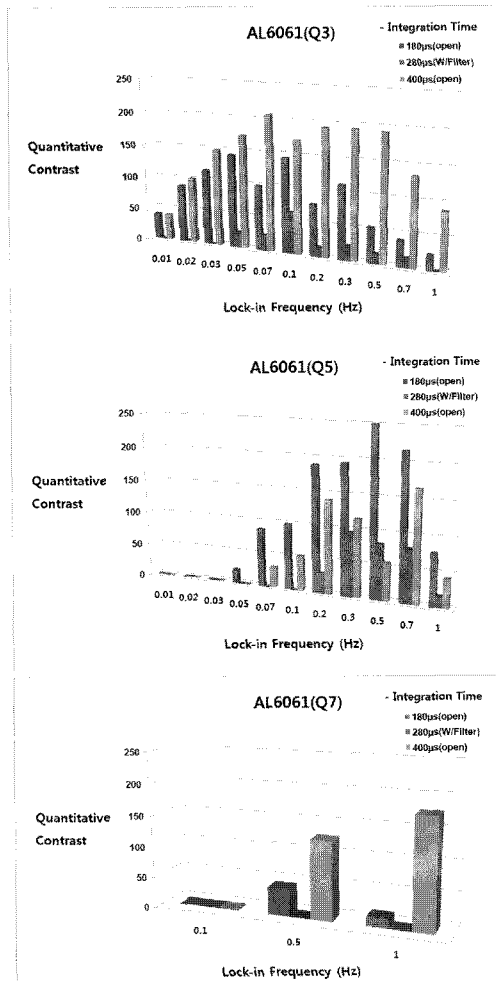


Fig. 9 Analysis results of specimen(Al6061)

실험의 분석 결과 광원의 가진 세기는 가시성이 있는 중간정도(Q5)의 광 조사에서 가장 좋은 특성치를 보여주고 있다.

위상잠금 주파수는 낮은(Q3) 광 조사에서는 0.01 Hz에서 0.1 Hz사이의 낮은 주파수에서 좋은 결과를 보여주고, 중간정도(Q5)의 광 조사에는 좀 더 높은 위상잠금 주파수인 0.5 Hz 부근에서 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

그리고 높은(Q7) 광 조사에서는 시험편에 조사 되는 열량이 많아서 표면이 쉽게 포화되어 결합 검출이 불가능 하였다. 쉽게 시험편이 고온에 도달하여 표면을 강제 냉각하거나 상온이 되도록 기다리는 시간이 필요하고 실험의 정도가 떨어져 낮은 위상잠금 주파수에서는 실험을 생략하였다.

다음의 Fig. 10은 탄소강 시험편의 광원 세기 변화와 위상잠금 주파수의 변화에 따른 특성치의 주요 예를 보여준다.

탄소강 시험편의 분석 결과 알루미늄과 경향은 유사하나 특성치의 값의 차이와 약간의 편향결과를 보여주고 있다. 광원의 가진 세기는 낮은(Q3) 세기에서는 0.07 Hz 부근에서 양호한 결과를 보여주었고, 중간정도(Q5)의 광 조사에서는 0.07 Hz 정도의 결과가 좋은 편이나 특성치는 비교적 낮게 나타났다.

그리고 높은(Q7) 광 조사에서는 알루미늄 시험편과 같이 표면이 쉽게 포화되어 결합검출이 불가능 하였다. 따라서 알루미늄 시험편과 마찬가지로 실험의 어려움으로 인해 낮은 위상잠금 주파수에서는 실험을 생략하였다.

적외선 카메라의 노출시간 인자는 고온탐지를 위해 필터를 채용한 경우에는 모든 영역에서 좋지 못한 결과를 보여주었다.

필터 없이 노출시간을 변화시키는 경우 알루미늄 시험편의 경우에 광 조사의 세기와 상관관계를 갖는 것으로 나타났다. 즉 중간정도(Q5)의 광 조사에서는 적외선 카메라의 노출시간을 줄이는 것이 좋고, 반대로 낮은(Q3) 광 조사에서는 노출시간을 늘려주면 개선된 결과를 얻을 수 있다. 그러나 탄소강 시험편의 분석 결과는 상관성이 분명히 드러나지는 않았다.

마지막으로 열물성치인 전도율이 다른 두 시험편의 차이는 최적의 특성치를 나타내는 주파수는 열전도가 높은 알루미늄 시험편이 좀 더 낮은 주파수로 편향된 대역에서 양호한 결과를 보여줌을

확인하였다. 그러나 광 조사세기와와의 관계는 두 시험편에서 교호작용이 일어나 유의한 결과를 얻을 수 없었다.

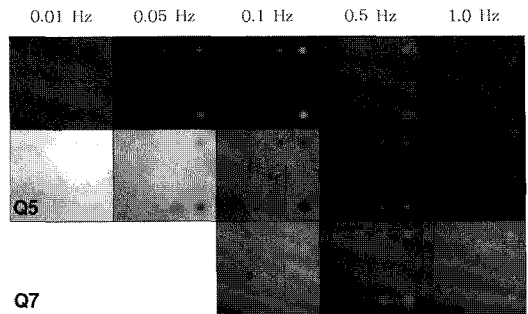


Fig. 10 Phase images of defects test(SM45C specimen)

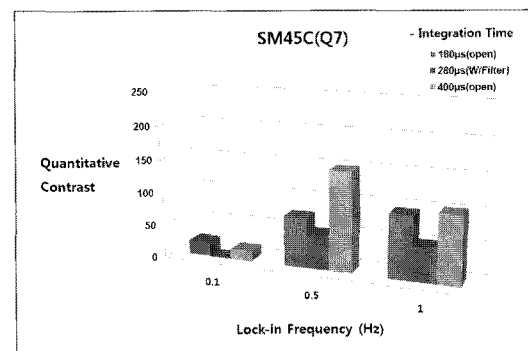
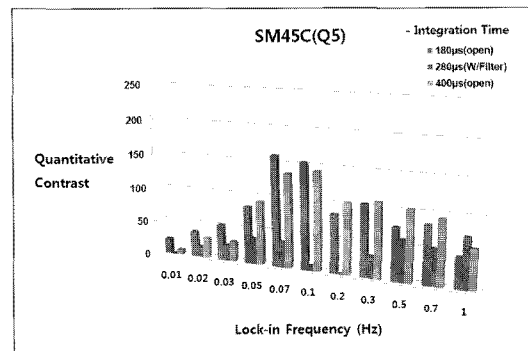
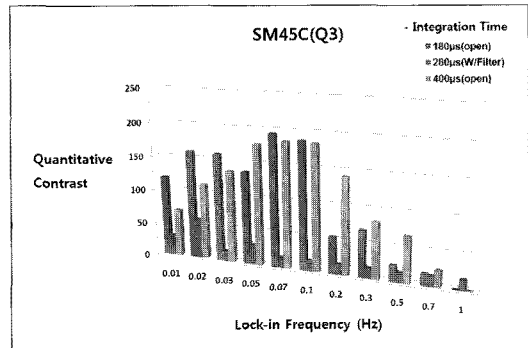


Fig. 11 Analysis results of specimen(SM45C)

5. 결 론

위상잠금 적외선 열화상(lock-in infrared thermography) 기법으로 결함 부위의 최적의 위상차 대조영상을 얻기 위하여 실험인자를 선정하고 실험계획법에 의해 탐색연구를 수행하였으며, 정량화된 대비영상 특성치를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 결함부와 건전부의 위상차 영상을 대비선명도 기준표와 홀 크기 가중치를 이용하여 특성치를 정량화 시키는 방법이 최적조건을 찾는 탐색연구의 유용한 방법이 될 수 있다.
- 2) 광 조사의 세기는 낮은(Q3)나 중간(Q5) 광 증폭 조사가 상대적으로 좋은 결과를 주었고, 높은 광 조사는 열포화 상태의 도달로 좋은 결과를 주지 못한다.
- 3) 위상잠금 주파수는 가진 광원의 세기에 비례하여 좋은 영상을 획득할 수 있다. 즉 낮은 광원은 낮은 주파수(0.05 Hz) 부근에서 중간 광원은 중간 주파수(0.1 Hz) 이상의 대역에서 개선된 영상을 얻을 수 있었다.
- 4) 열화상 카메라의 필터 사용은 좋은 결과를 기대할 수 없고, 노출시간은 조사 광원의 세기와 반비례하여 실험을 수행하는 것이 좋은 결과를 얻을 수 있다.
- 5) 마지막으로 시험편(specimen)의 열 물성치에 따른 특성치는 주파수에 따른 약간의 편향 결과만을 보여주었다.

이상의 연구 결과는 위상잠금 적외선 열화상 기법의 결함 검출 실험에서 최적의 결과를 얻기 위한 실험인자를 설계하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 그리고 향후 잠음인자의 제거, 실험 수행의 랜덤화 및 실험 재현성을 높이는 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 久野治義, "赤外線工學", (社)電子情報通信學會編 (1994)
- [2] 조용진, 문일성, 김상현, 이영연, 박병재, 배진주, "해양 환경 변화에 따른 적외선 신호 특성 예측 연구," 해군조함단 기술용역보고서, pp. 1-47 (2004)
- [3] C. E. Heerema, "State-of-the-art report on infrared technology," ERIM (1992)
- [4] R. D. Hudson, "Infrared system engineering," John Wiley&Sons, pp. 3-109 (1969)
- [5] O. Breitenstein and M. Langenkamp, "Lock-in thermography," Springer, Germany, pp. 1-38 (2003)
- [6] M. Y. Choi and W. T. Kim, "The utilization of nondestructive testing and defects diagnosis using infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 5, pp. 525-531 (2004)
- [7] 박성현, "현대 실험계획법(개정판)," 민영사, pp. 1-52 & 159-190 (2009)
- [8] 염봉진, 서순근, 이승훈, 김성준, "실험계획 및 분석 : 다구치 방법과 직교표의 활용," 한국과학기술원, pp. 1-44 (2005)
- [9] 홍종선, "통계적 확률분포," 자유아카데미, pp. 47-84 (2000)
- [10] B. S. Wong, C. G. Tui, W. Bai, P. H. Tan, B. S. Low and K. S. Tan, "Thermographic evaluation of defects in composite materials"
- [11] J. H. Park, M. Y. Choi and W. T. Kim, "Shearing phase lock-in infrared thermography for defects evaluation of metallic specimen," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 2, pp. 91-97 (2010)
- [12] M. Y. Choi, K. S. Kang, J. H. Park, W. T. Kim and K. S. Kim, "Defect sizing and location by lock-in photo-infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 4, pp. 321-327 (2007)

[1] 久野治義, "赤外線工學", (社)電子情報通信學