영상처리에 의한 위상잠금 열화상기법의 최적화 연구

조용진* · 한송이**

*동의대학교 조선해양공학과

**동의대학교 조선해양공학과 대학원

Optimization of Lock-in Thermography Technique using Phase Image Processing

Yong-Jin Cho* and Song-I Han**

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

**Graduate School, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

KEY WORDS: Lock-in thermography 위상잠금 열화상, Image processing 영상처리, Multi-way factorial design 다원 배치법, Optical intensity 광열원 세기, Integration time 노출시간, Non-destructive test 비파괴 검사

ABSTRACT: This study examined the use of LIT (lock-in infrared thermography) to detect defects in the welded parts of ships and offshore structures. A quantitative analysis was used with the filtering and texture measurement of image processing techniques to find the optimized experimental condition. We verified the reliability of our methods by applying image processing techniques in order to normalize the evaluations of comparative images that showed a phase difference. In addition, it was found that a low to mid-range intensity of light exposure on the surface showed good results, whereas high exposure did not provide significant results. A lock-in frequency of around 0.1 Hz was satisfactory regardless of the intensity of the light source. In addition, making the integration time of the thermography camera inversely proportional to the intensity of the exposed light source during the experiment provided good results.

1. 서 론

우리 눈에 보이지 않는 적외선 신호는 파장이 가시광선 보다 는 길고 마이크로파보다는 짧은 전자기파를 총칭하는 말이다. 물체로부터 방사되는 적외선에너지는 양자역학의 원리에 따라 스테판-볼츠만 식에 의하면 물체온도의 4승에 비례하기 때문에 물체 온도에 따라 강한 열적 작용으로 나타난다. 이와 같이 방 사된 적외선 신호는 대기물질의 주요성분인 수분과 탄산가스 등과 고유진동수가 유사하여 대기 중을 통과하여 산란과 흡수 과정을 거치며 신호가 급격히 약화되어 대기 환경에 많은 영향을 받는 특징이 있다. 또한 가시광선에 비해 파장이 길어 낮은 주 파수 대역을 차지하는 적외선신호는 광자에너지가 높지 않아 검출기의 개발이 용이하지 않은 특징을 가진다(Cho et al., 2004; Kim et al., 2011; Rechard, 1969). 최근 들어 이러한 제약 조건에도 불구하고 센서개발이 활발해지면서 비파괴검사분야를 중심으로 많은 분야에 응용이 되고 있다.

기계항공 및 전자분야의 응용에 진전을 보이고 있는 능동의 광열원(Optical excitation)을 활용하는 위상잠금 열화상 기법 (LIT, Lock-in infrared thermography)은 주변 환경에 의한 반 사능의 잡음에 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서

LIT는 복잡하고 환경잡음이 많은 조선해양산업에서 양호한 비 파괴 결함검출 결과를 기대할 수 있다(Breitenstein and Langenkamp, 2003; Choi and Kim, 2004; Clarence, 1992). 그러므로 선 박해양 구조물의 용접부위의 비파괴 결함을 탐지할 수 있는 LIT 기법을 활용하기 위하여 최적의 검사조건을 찾을 필요가 있다.

본 연구에서는 일반적인 실험계획법인 다원배치법(Multi-way factorial design)에 따라 제어가 가능한 연구 인자를 선정하고, 기존에 개발된 탄소강 시험편과 알루미늄 표준 시험편을 이용 하여 실험을 수행하였다(Park, 2009). 실험결과 얻어진 적외선 위상차 열화상을 정량적 분석하기 위하여 영상처리기법의 이미 지 필터링과 질감측정방법을 이용하였으며, 이전의 육안에 의한 영상 비교에 의한 연구결과에 비해 오류를 줄일 수 있는 영상 처리에 의한 정량화방법으로 조선해양분야에서 응용할 수 있는 최적의 실험조건을 찾을 수 있음을 확인하였다.

2. 위상잠금 적외선 열화상 기법

동적인 열화상을 활용하는 LIT기법은 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 입사하고 이때 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 조화함수로 입사되는

열원(Heat source)에 적외선 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다.

운동방정식 이론에 의하면, 감쇠 시스템의 강제응답은 구동력과 같은 주파수에 다른 진폭과 위상을 갖는 조화함수 형태라는 것을 알 수 있다. 감쇠력의 영향 때문에 진폭변화와 위상차(Phase shift)가 생기게 된다(Park et al., 2010).

다음의 식 (1)은 고체 내의 1차원 열전도방정식에서 외부 자극원으로서 할로겐램프에 의한 광 열원을 가진진동수(ω)와 가진진폭(T_0)의 조화함수($T=T_0 \cos \omega t$)로 표면을 가열할 때를 나타낸다. 이는 대상체로 침투한 열원이 반사되는 과정의 변화를 관찰하여 결함을 검출하는 방법이다.

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

여기서 T 는 온도, t 는 시간, k 는 열전도계수, ρ 는 밀도, C_p 는 비열, x 는 열유동 방향이다. 조화함수로 가열된 식 (1)의 해는 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x,t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (2)$$

여기에서 $\mu = \sqrt{\alpha/\pi f}$ 는 침투깊이(Thermal diffusion length), f 는 가진주파수(Excitation frequency), $\alpha = k/\rho C_p$ 는 열확산계수(Thermal diffusivity)이다.

흡수된 열은 물체 표면으로 부터 열파동(Thermal wave)을 만든다. 이 열파동은 물체 속으로 진행되어 들어가고, 물리적 열전달 특성이 변하는 빈공간이나 구조적 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 위상과 진폭을 나타낼 것이다. 따라서 진폭과 위상의 차이를 영상화 시키면 결함부를 확인할 수 있게 된다. 이런 열화상 측정은 위치에 따른 열파동의 변화를 진폭과 위상으로 나타낸다. 다음의 Fig. 1은 위상잠금 열화상 기법의 개념을 보여준다.

만일 취득영상의 주기가 조사되는 변조 주파수와 동기화되고 한 주기 동안에 4개의 영상을 얻는다면, 매 파동주기 동안에 각

영상 화소는 위상이 90° 차이를 갖는 최소 4개의 자료인 S_1, S_2, S_3 및 S_4 를 취득하게 된다. 취득된 4개의 자료로부터 특정 화소(x, y)의 변조가 이루어 질 수 있다. 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. 결과적으로 이들 병합영상의 진폭 값과 위상각은 식 (3)과 (4)로부터 얻어진다.

$$A(x,y) = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2} \quad (3)$$

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \left(\frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2} \right) \quad (4)$$

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(Choi et al., 2007).

3. 실험연구방법

3.1 실험인자선정

실험계획법에 따라 위상잠금 적외선 열화상 기법의 특성치에 영향을 미칠 수 있는 변수들 중에서 제어가 가능한 실험인자를 선정하였다(Yeom et al., 2005). 그리고 시험과정에서 제어가 불가능하거나 영향이 작은 인자들은 잡음으로 취급하였다. 다음의 Table 1은 이와 같이 선정된 입력 실험인자들을 보여준다.

Table 1 Design factors and noise factors

	Parameters
Design factors	- Material of specimen
	- Lamp Amplitude
	- Lock-in Frequency
	- Camera's Integration Time
	- Non-homogeneous illumination
Noise factors	- Surface emissivity
	- Ambient radiation
	- Air Temperature
	- Relative Humidity
	- CO ₂ gases partial pressure
	- Wind seed/direction
	- Movement of persons

선정된 인자(변수)는 가능한 광범위한 영역을 탐색할 수 있도록 넓은 범위(Level)로 모델링 하였다. 먼저, 시험편은 알루미늄 합금과 탄소강 시험편을 사용하였다. 광 증폭 가지는 아날로그 방식의 조절을 통해 수준을 결정하였다. 최고 가진량(1 kW)에 선형적 비례를 이용하여 30 %(Q3), 50 %(Q5) 및 70 %(Q7)으로 인자의 수준을 정하였으며, 위상잠금 주파수는 0.01 Hz 부터 1.0 Hz까지 조밀한 간격을 정하여 실험을 수행하였다. 카메라 센서에 유입되는 광자의 양을 결정하는 노출시간(Integrated time)은 원적외선 카메라의 사양에 따라 400 μ s(Open), 180 μ s(Open), 280 μ s(w/filter)와 같이 수준을 정하였다. 인자들의 수준은 다음의 Table 2와 같다.

Fig. 1 Principle of lock-in thermography

Table 2 Level of design factors

Factors	Characteristics	Level
Optical excitation	- Level of optical amplifier	Q3
		Q5
		Q7
		0.01 Hz
Lock-in frequency	- Function generator (0.01Hz~1.0Hz)	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 μ s (Open)
		180 μ s (Open)
		280 μ s (w/filter)

3.2 실험장치의 구성

위상잠금 열화상 측정 실험 장치는 일련의 장비를 조합하여 Fig. 2와 같이 LIT실험 시스템을 구성하였다.

Fig. 2 System configuration of lock-in thermography

할로겐램프의 광 증폭 가진장치에 의한 위상잠금 적외선 열화상 검출장치는 광 조사장비, 위상 잠금 제어장치, 열화상 카메라 및 시험편으로 구성된다(Wong et al.,1999). 안정적인 실험을 위해서 흑색으로 도색된 알루미늄 정반에 실험장비 들을 설치하고 청결하게 밀폐된 실험실에서 연구를 수행하여 외란의 영향을 최소화하였다. 위상잠금 적외선 열화상 기법의 열원은 2개의 할로겐램프(1 Kw×2 ea)를 이용하였으며 실험결과 열원의 강도는 충분한 것으로 나타났다. 적외선 카메라는 열 분해능과 최단의 노출시간으로 LIT 기술에 최고 성능을 발휘할 수 있는 것으로 알려져 있다(Breitenstein and Langenkamp, 2003). 따라서 위상잠금 열화상 시스템 구성의 핵심장비인 적외선 카메라

는 극저온 냉각방식의 장비(JADE LWIR MCT Camera 및 관련 운용부품)를 임차하여 사용하였다.

마지막으로 시험편은 일반적으로 조선해양을 포함한 기계분야에 널리 활용되고 있는 알루미늄 합금과 탄소강 표준시험편을 한국표준과학연구원으로부터 구매하여 사용하였다. 알루미늄 합금(Al6061-T6) 결함 시험편은 위의 Fig. 3(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. 3(b)와 같이 시험편의 뒷면에 결함 홀을 가공한 표준 시험편을 활용하였다. 시험편은 모두 열방사율을 높이기 위하여 흑색(black color) 계열의 도료를 도포하였다.

3.3 특성치(영상대비)

최적화연구는 실험인자의 수준변화에 따른 특성치인 결함부

(a) Al6061-T6 **(b)** SM45C**Fig. 3** Specimens with in-planted defects

Fig. 4 Algorithm scheme of Image processing

와 건전부의 위상차 영상을 정량적으로 판별할 수 있도록 영상 처리를 통한 수치화의 과정이다. 실험결과 얻어진 위상차 대비 영상을 정량화할 수 있도록 Fig. 4와 같이 알고리즘으로 MATLAB을 이용하여 프로그래밍 하였다.

우선 국부적인 잡음을 제거하기 위해 점 잡음 제거가 탁월하고, 원 신호의 에지들을 좀 더 상세하게 보존할 수 있는 적응 중간값 필터를 활용하였다. 위상차 대비영상의 정량화는 영상 처리에 의해 질감(Texture)내용을 수치화 하는 방법을 사용하였다. 영역의 질감을 묘사하기 위해서 영상처리에서 사용되는 방법에는 통계적, 구조적, 그리고 분광적인 방법이 있는데, 본 연구에서는 영상 또는 영역의 밝기 히스토그램에 대한 통계적 속성에 기반을 두는 통계적 방법을 사용하였다(You and Kim, 2004). 히스토그램의 모양을 기술하는 주요 방법 중의 하나는 아래의 식 (5)과 같이 정의되는 중앙적률(Central moments)에 의한 것으로 평균에 관한 n 차 적률에 대한 표현식은 다음과 같다.

$$\mu_n = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^n p(z_i) \quad (5)$$

여기서 z_i 는 밝기를 나타내는 랜덤 변수, $p(z)$ 는 영역의 밝기 레벨의 히스토그램, L 은 가능한 밝기 레벨의 개수, m 은 z 의 평균값(평균 밝기)을 나타낸다. 히스토그램은 정규화된 것으로 가정하므로, 모든 성분의 합은 1이다. 식(5)로부터 $\mu_0=1$ 이고 $\mu_1=0$ 이다. 2차 적률분산($\sigma^2(z)=\mu_2(z)$)은 z 의 평균값을 중심으로 곡선의 퍼진 정도를 나타낸다.

$$\mu_2 = \sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 p(z_i) \quad (6)$$

위의 식 (6)은 분산을 나타낸 것으로 상대적 부드러움을 묘사하는데 사용될 수 있는 밝기 콘트라스트의 척도이다. 위상차 대비영상에서 건전부와 결합부위의 대비가 크면 다음의 Fig. 5의 비교와 같이 히스토그램의 분산이 크게 되어 영상대비(Image contrast)의 정량화가 가능하게 되어 실험결과에 대한 정량적 분석이 가능하게 된다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험결과

실험의 수행은 설계인자인 시험편의 종류에 따라, (1) 광량 증폭 강도, (2) 위상잠금 주파수 및 (3) 카메라 노출시간을 변화시

Fig. 5 Phase image and histogram of sample test results

키면서 3인자 다원배치법(Multi-way factorial design)으로 실험을 수행하였다. 다음의 Fig. 6은 알루미늄 시험편(Al6061)에 대한 광조사의 세기와 위상잠금 주파를 변화시켜 얻은 위상차 대비영상의 실험결과예를 보여준다. 카메라의 노출시간이 400 μs(open)일 때, 광조사의 세기와 위상잠금 주파수의 두 가지 인자 변화에 의해서도 위상차 대비영상의 대비가 차이가 나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6 Phase images of defects test (Al6061 specimen)

그리고 Fig. 7은 탄소강 시험편(SM45C)에 대한 카메라의 노출시간이 180 μs(open)일 때, 광원의 세기변화와 위상잠금 주파수의 변화에 따른 위상차 대비영상의 실험수행 결과예이다.

Fig. 7 Phase images of defects test (SM45C specimen)

알루미늄 시험편의 실험결과와 유사하게 인자변화에 따라 건전부와 결함부의 위상변화의 차이가 나타나고 있음을 열화상을 통해 알 수 있다. 다음의 그림 Fig. 8은 알루미늄 시험편과 탄소강 시험편에 대하여 적외선 카메라 센서의 불균일성에 따른 잡음을 제거한 위상차 영상과 정량적 영상분석을 위한 히스토그램의 그래프를 각각 보여주고 있다.

Fig. 8 Histogram for image processing

4.2 실험결과와 분석

실험계획법에 따라 수행된 실험결과인 위상차 대비영상에 대하여 MATLAB을 이용하여 정량적 분석을 수행하였고, 영상대비의 크기에 따라 자동적으로 최적의 실험조건을 찾을 수 있었다. 본연구의 영상분석에 의한 정량화 연구결과는 이전의 영상기준표(Reference table)를 개발하여 육안에 의한 판별법을 통한 탐색연구 결과와 비교하였다(Cho, 2011).

다음의 Fig. 9는 정량화된 특성치의 값을 실험인자에 따라 비교하기 쉽도록 알루미늄 시험편에 대하여 도식화(막대그래프)하여 나타내었고, 영상기준표를 사용하여 탐색한 것은 꺾은선 그래프로 나타내었다. 실험의 분석결과 광원의 가진세기는 가시성이 있는 중간정도(Q5)의 광 조사에서 가장 좋은 특성치를 보여주고 있다. 위상잠금 주파수는 낮은(Q3) 광 조사에서는 0.02 Hz에서 0.1 Hz사이의 낮은 주파수에서 좋은 결과를 보여주고, 중간정도(Q5)의 광 조사에서는 0.07 Hz에서 0.1 Hz부근에서 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 높은(Q7) 광 조사에서는 시험편에 조사되는 열량이 많아서 표면이 쉽게 포화되어 결함검출이 불가능 하였다. 쉽게 시험편이 고온에 도달하여 표면을 강제냉각하거나 상온이 되도록 기다리는 시간이 필요하고 실험의 정도가 떨어져 낮은 위상잠금 주파수에서는 실험을 생략하였다. 알루미늄 시험편 실험에서는 영상기준표를 사용한 연구와 비슷한 경향이 나타났다.

위의 Fig. 10과 같이 탄소강 시험편의 분석결과는 알루미늄과 경향은 유사하나 특성치의 값의 차이와 주파수에 따라 다른 경향을 보여주고 있다. 광원의 가진세기는 낮은(Q3) 세기에서는 0.1 Hz 부근에서 결과가 좋은 편이나 특성치는 비교적 낮게

Fig. 9 Comparative analysis of the results of specimen (AL6061)

Fig. 10 Comparative analysis of the results of specimen (SM45C)

나타났고, 중간정도(Q5)의 광 조사에서는 0.07 Hz 정도에서 양호한 결과를 보여주었다. 그리고 높은(Q7) 광 조사에서는 알루미늄 시험편과 같이 표면이 쉽게 포화되어 결함검출이 불가능하였다. 따라서 알루미늄 시험편과 마찬가지로 실험의 어려움으로 인해 낮은 위상잡음 주파수에서는 실험을 생략하였다. 탄소강 시험편에서는 영상기준표를 사용한 연구와 편향부분에서 차이가 났지만 결과적으로는 비슷한 결과를 보였다. 적외선 카메라의 노출시간 인자는 고온탐지를 위해 필터를 채용한 경우에는 잡음이 심하게 발생하는 특성으로 인하여 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 분석결과는 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.

5. 결 론

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

- (1) 결함부와 건전부의 위상차 영상을 새로 개발해낸 알고리즘을 이용하여 특성치를 정량화 시키는 방법이 최적조건을 찾는 탐색연구의 신뢰성 있는 방법이 될 수 있음을 확인하였다.
 - (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) 위상잡음 최적 주파수는 가진 광원의 세기에 상관없이 0.1 Hz부근에서 양호한 위상대비영상을 얻을 수 있었다.
 - (4) 열화상 카메라의 필터의 사용은 좋은 결과를 기대할 수 없고, 노출시간은 조사 광원의 세기와 반비례하여 실험을 수행하는 것이 좋은 결과를 얻을 수 있다.
 - (5) 마지막으로 시험편(Specimen)의 열물성치에 따른 특성치는 주파수에 따른 약간의 편향결과만을 보여주었고, 육안에 의한 정성적인 검사는 검사자의 시각적 차이에 의한 오류를 반드시 포함하게 되는 반면, 영상처리에 의한 정량적인 평가를 함으로써 오류를 배제시킬 수 있었다.
- 육안에 의한 검사 시에는 검사자간의 오차가 일어나게 되는 오류가 생기게 되는 반면 영상처리에 의한 정량적인 평가로 개선이 이루어 졌다. 이상의 연구결과 위상잡음 적외선 열화상기법의 최적실험조건을 얻기 위해 영상처리에 의한 정량화 방법을 개발하여 유의한 방법임을 확인하였다. 향후 실험결과의 통

계적 분산분석에 의한 민감도를 분석하여 최적 실험조건에 대한 현성과 정밀성을 높이는 추가연구과정을 수행예정이다.

참 고 문 헌

- Cho, Y.J. (2011), "An Exploratory Study on the Optimized Test Conditions of the Lock-in Thermography Technique", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testion, Vol 31, No 2, pp 00-00.
- Cho, Y.J., et al (2004), "A Prediction of IR Signature Characteristics According to the Meteorological Environment", ROK Navesea Technical Report, pp 1-47
- Choi, M.Y., Kang, K.S., Park, J.H., Kim, W.T. and Kim, K.S. (2007), "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.
- Choi, M.Y. and Kim, W.T. (2004), "The Utilization of Non-destructive Testing and Defects Diagnosis using Infrared Thermography", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol 24, No 5, pp 525-531.
- Clarence E. Heerema (1992), "State-of-The-Art Report on Infrared Technology".
- Kim, C.M., Lee, C.W., Cho, Y.J. and You, Y.S. (2011), "A Study on Possibility of Non-destructive Flaw Detection Steel Sheet Metal using a Phase-locked Infrared Thermography Technique", The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, pp 1205-1210.
- Breitenstein, O. and Langenkamp M. (2003), "Lock-in Thermography", Springer, Germany, pp 1-38.
- Park, J.H., Choi, M.Y. and Kim, W.T. (2010), "Shering Phase Lock-in Infrared Thermography for Defects Evaluation of Metallic Specimen", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testion, Vol 30, No 2, pp 00-00.
- Park, S.H. (2009), "Modern Design of Experiments using MINITAB", Minyoungsa, pp 1-52 & 159-190.
- Rechard D. Hudson (1969), "Infrared System Engineering", John Wiley & Sons, pp 3-109.
- Wong, B.S., Tui, C.G., Bai, W., Tan, P.H., Low, B.S. and Tan, K.S. (1999), "Thermographic Evaluation of Defects in Composite Materials", Insight, pp 504-509.
- Yeom, B.J., Seu, S.G., Lee, S.H. and Kim, S.J. (2005), "Design and Analysis of Experiments : Taguchi Methods and Orthogonal Arrays", KAIST, pp 1-44.
- You, H.J. and Kim, T.W. (2004), "Digital Image Processing using MATLAB", JinSammedia, pp 174-176 & 507-512.

2012년 5월 21일 원고 접수

2012년 8월 17일 심사 완료

2012년 10월 25일 게재 확정