

능동 적외선 열화상 기법에 의한 SM45C 이면결함 검출 열영상에 관한 연구

Thermal Imaging for Detection of SM45C Subsurface Defects Using Active Infrared Thermography Techniques

정윤재*, Shrestha Ranjit*, 김원태**†

Yoonjae Chung*, Shrestha Ranjit* and Wontae Kim**†

초 록 능동적 열화상 기법은 넓은 면적을 동시에 검사할 수 있으며, 결함부와 건전부 사이의 위상차로부터 결함의 유무를 판단할 수 있다. 지금까지 다양한 재료와 시험편을 가지고 결함 검출 기법에 대한 발전이 이루어졌다. 본 논문에서는 위상잠금 열화상 기법을 적용하여 각각 다른 결함의 크기와 깊이의 인공결함을 갖는 SM45C 시험편을 가지고 제안된 기법을 검증하였으며, 결론으로서 결함의 크기, 깊이에 따른 위상 이미지와 진폭 이미지 검사 결과를 비교하여 결함 검출능을 평가할 수 있었다.

주요용어: 위상잠금, 적외선 열화상, 결함 검출, 데이터 처리, 열영상

Abstract Active thermography techniques have the capability of inspecting a broad range simultaneously. By evaluating the phase difference between the defected area and the healthy area, the technique indicates the qualitative location and size of the defect. Previously, the development of the defect detection method used a variety of materials and the test specimen was done. In this study, the proposed technique of lock-in is verified with artificial specimens that have different size and depth of subsurface defects. Finally, the defect detection capability was evaluated using comparisons of the phase image and the amplitude image according to the size and depth of defects.

Keywords: Lock-in, Infrared Thermography, Defects Detection, Data Processing, Thermal Imaging

1. 서 론

비파괴검사(NDT)는 결함 및 손상을 감지하고 상품의 품질을 확인하는데 가장 중요한 방법 중 하나이다. 기계나, 손상이 있는 제품들은 비정상적인 온도 분포가 발생한다. 적외선열화상에서 결함 검출 원리는 재료 및 결함영역 사이에서 재료의 고유한 열적상태량에 따른 열적 특성에 차이가 있다는 사실에 근거한다[1-4].

적외선열화상 기술(infrared thermography)은 대상의 표면 복사에너지를 검출하고 이를 온도로 환산하여 실시간으로 영상을 제공함으로써 재료

의 열적특성 평가, 전력시설물 열화진단, 복합재료 결함 검사, 건축물 단열 평가, 체열 측정을 통한 의료진단 등의 분야에 활용되고 있다[5-7]. 예전의 적외선열화상 기술은 표면에 근접한 내부결함만을 검출한다는 단점이 있었으며, 또한 대상체 표면 방사율의 불균일성이 검사 결과에 영향을 미치게 된다. 적외선열화상 기술의 결함 검출능은 위상잠금(lock-in)기법을 적용하면서 획기적으로 개선되었다. 위상잠금을 사용하여 위상 변화를 추출함으로써 낮은 샘플링에서도 표면의 미세한 변화를 감지할 수 있으며, 불균일한 표면 방사율의 영향을 적게 받게 된다[8,9].

[Received: May 12, 2015, Revised: June 16, 2015, Accepted: June 17, 2015] *공주대학교 대학원 기계공학과, **공주대학교 공과대학 기계자동차공학부, †Corresponding Author: Div. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan, Chungnam, 331-717, Korea (E-mail: kwt@kongju.ac.kr)

재료는 열적 물성치가 각각 달라 각 재료마다 결함 크기 및 깊이를 측정하는데 최적의 주파수가 다르다. 본 연구에서는 기존에 연구에 사용되었던 STS304가 아닌 내마모성, 내피로성이 우수해 자동차 항공 등 여러 산업분야에서 사용되고 있는 SM45C 금속의 결함 깊이 및 크기가 각각 다른 시험편을 제작하여 이면결함에 대하여 위상 잠금 적외선열화상 기법으로 촬영하고, MATLAB 소프트웨어로 데이터영상 처리를 하여 제안기법의 유효성을 검증하였으며, 향후에 최적의 결함 검출 기법을 개발하는데 기초자료가 되도록 하였다.

2. 위상잠금 광-적외선열화상

위상잠금 적외선열화상 기법(lock-in infrared thermography: lock-in IRT)은 자극원을 조화함수로 하여 대상에 입사하고 이때 대상의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 본 연구에서는 결함 검출을 위해 자극원을 광으로 하는 위상잠금 광-적외선열화상 기법을 사용하였다[10-12].

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

여기에서, T 는 온도, t 는 시간, k 는 열전도계수, ρ 는 밀도, c_p 는 비열, x 는 열유동 방향으로의 거리이다. 조화함수로 가열된 식(1)의 해는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기에서, μ 는 열확산길이(thermal diffusion length)를 말한다.

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (3)$$

여기에서, α 는 열확산계수(thermal diffusivity)를 말한다.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (4)$$

위상잠금 기법에서는 식(2)에서 측정 결과로부터 위상을 추출함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있으며, 표면 방사율의 불균일성에 의한 결함 검출 오류를 최소화할 수 있다.

$$z = C_1 \mu = C_1 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_b}} \quad (5)$$

여기서, z 는 결함 깊이, f_b 는 검출되는 상 또는 진폭이 대비되어 결함이 제공하는 주파수이며, C_1 은 실험적인 상수이며 진폭 데이터에선 1과 같으며 위상 데이터에선 1.5-2 사이에 있다. 본 연구에서는 $C_1=1.82$ 값에 대해서만 고려하였다.

$$\Phi = \frac{z}{\mu} \quad (6)$$

여기에서, Φ 는 위상(phase)을 말하며 식(2)에서 얻을 수 있다. 위상잠금 적외선열화상 기법에서는 외부 사인파로 시험편을 가열한 후, 표면에 생성된 온도 분포는 고정적으로 관찰되고 대응하는 데이터를 실시간으로 기록된다. 4점법은 위상 및 진폭 데이터를 결정하기 위해 사용된다. Fig.1에 보이는 것과 같이, S1, S2, S3 및 S4 4개의 일정한 거리의 온도 데이터 포인트가 있는 경우, 위상(Φ) 및 진폭(A)는 다음과 같이 얻어진다 [13-16].

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4} \right) \quad (7)$$

$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2} \quad (8)$$

결함 영역과 비결함 영역의 위상차는, 다음 식으로 정의된다.

$$\Delta \Phi = \Phi_d - \Phi_s \quad (9)$$

여기에서, Φ_d 는 결함 영역의 픽셀의 위상이고, Φ_s 는 건전부 영역 픽셀의 위상을 말한다.

Fig. 1은 위상잠금 열화상 기법을 이용하여 위상 및 진폭 이미지를 계산해내는 원리는 개략적으로 보여준다. 본 연구에서는 각 지점의 온도 데이터를 추출하여 MATLAB을 이용하여 위의 식을 따라 데이터 영상처리를 하였다.

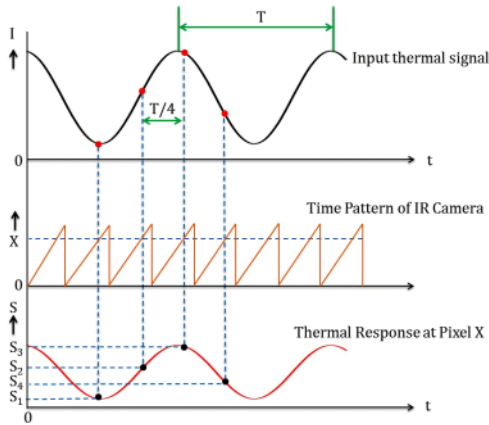


Fig. 1 Principle of computation of thermal, amplitude and phase images in lock-in thermography

3. 시험편 및 장치 구성

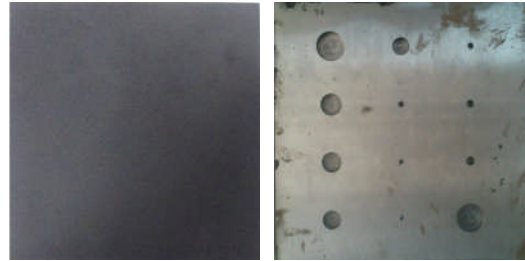
시험편은 SM45C으로 열적 물성치는 Table 1에 나타내었다. 결함은 시험편 후면에 가공하였으며, Fig. 2은 사용할 시험편의 형상을 보여준다. 일반적으로 시험편들은 일정한 규칙성을 가지고 만드나, 이번에 제작한 시험편은 규칙성을 없애고 랜덤하게 결함 깊이와 크기를 갖는 이면결함을 제작하였다. 시험편 표면은 흑색 방사페인트로 도포하여 표면 방사율을 0.95로 유지하였다. 위상 잠금 적외선열화상 시스템 구성은 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3은 시험편 및 결함의 기하학적 형상을 개략적으로 보여준다. 상단의 1~3은 각 열의 홀번호수를 말하며, 각각의 홀 위의 숫자는 좌측에 보이는 것과 같이 시험편 뒷면과 결함과의 거리를 말한다. Table 2는 각각의 결함에 대한 크기와 깊이에 대한 정보를 보여준다.

Fig. 4는 실험장치 구성을 개략적으로 보여주고 있다. 실험에 사용된 램프는 할로겐램프 2개를 사용하였으며, 적외선 카메라는 스웨덴 FLIR사의 SC645 제품(640×480의 픽셀 공간분해능, 7.5-13 μm 민감도)을 사용하였으며, 또한 카메라의 시험편의 거리는 1 m를 유지하였다. 이 시스템에서는 함수 발생기에 의해 할로겐램프의 주파수를 조절하여 시험편에 열을 가해주며, 이와 동기화하여 적외선 검출 소자로부터 온도 데이터를 획득하였으며, FLIR사의 소프트웨어를 이용하였다.

Table 1 Material property in SM45C

Density(ρ)	Thermal Conductivity (k)	Specific Heat (c_p)	Thermal Diffusivity (a)
7850 kg/m ³	49.8 W/m-k	450 J/kg-k	1.41 ⁻⁵ m ² /s



(a) front (b) back

Fig. 2 SM45C model specimen

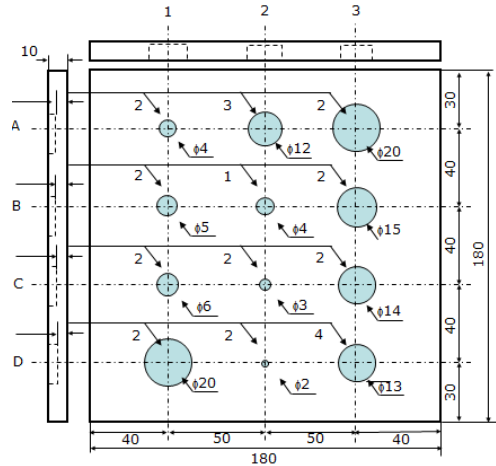


Fig. 3 Geometry of specimen with artificial subsurface defects

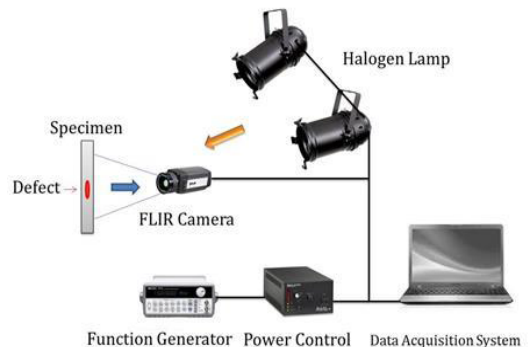


Fig. 4 Schematic of lock-in infrared thermography

Table 2 Defects size and depth in SM45C specimen

Hole	Diameter (mm)	Depth(mm)
A ₁	4	8
A ₂	12	7
A ₃	20	8
B ₁	5	8
B ₂	4	9
B ₃	15	8
C ₁	6	8
C ₂	3	8
C ₃	14	8
D ₁	20	8
D ₂	2	8
D ₃	13	6

획득한 데이터를 가지고 Matlab 프로그램을 이용하여 데이터영상 처리를 하여 위상이미지(phase image)와 진폭이미지(amplitude image)를 만들었다. 본 연구에서는 위상이미지와 진폭이미지를 이용하여 결함의 크기 및 깊이를 측정하였으며, 결함 검출능을 비교 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 10-90 mHz 주파수에 대하여 고려하였다. 실제 시험에서는 재료의 불균일성, 외부 환경 등의 영향으로 상관계수 C_1 을 고려하여 식(5)와 같이 결함의 깊이를 예측한다. 본 연구에서는 위에 명시했듯이 $C_1=1.82$ 값에 대해서만 고려하였다.

Fig. 5는 주파수 변화에 따른 위상이미지 이미지 프로세싱 결과를 보여준다. 90 mHz일 때 가장 검출능이 좋았다. 결과를 살펴보면, \varnothing 6 mm 이하 및 깊이 8 mm 이상인 결함은 주파수 90 mHz 이하에서는 결함이 검출되지 않았다.

Fig. 6는 주파수 변화에 따른 진폭이미지를 이미지 프로세싱 결과를 보여준다. 위상이미지 보다 이미지 화질이 좀 더 좋았으며, 약간의 차이가 있었다. 결과를 살펴보면, \varnothing 6 mm 이하 및 깊이 8 mm 이상인 결함은 주파수 90 mHz 이하에서는 결함이 검출되지 않았다.

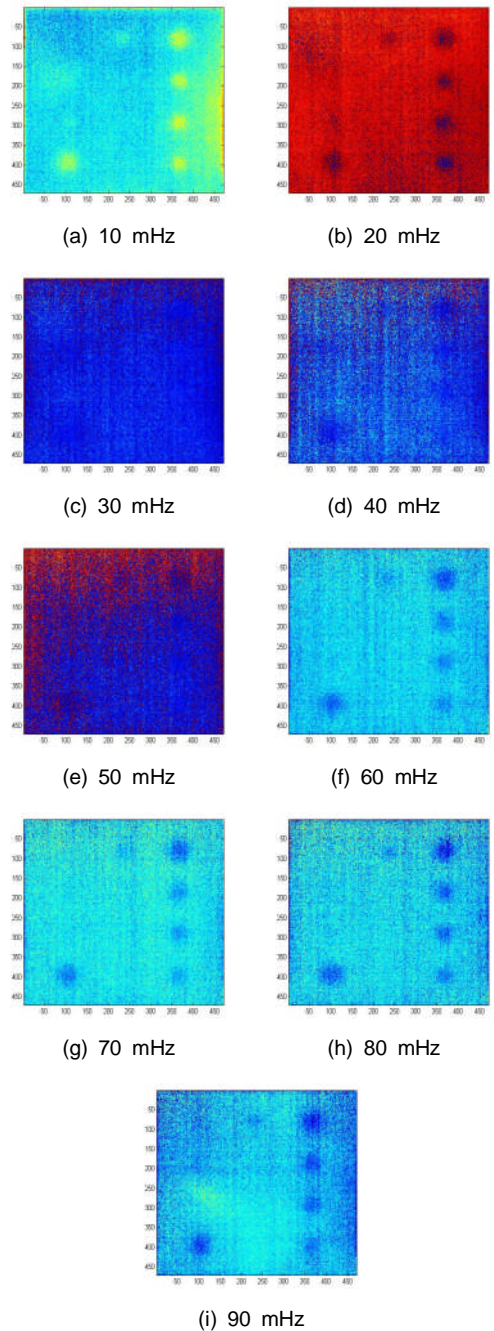


Fig. 5 Phase image

Fig. 8은 검출 주파수 90 mHz에서 위상이미지이며, 각각의 라인 프로파일을 따라 명확하게 검출된 결함에 대해서만 결함 크기를 실제 결함 크기와 비교 평가하였다. 위상이미지뿐만 아니라 진폭이미지도 비교하였다.

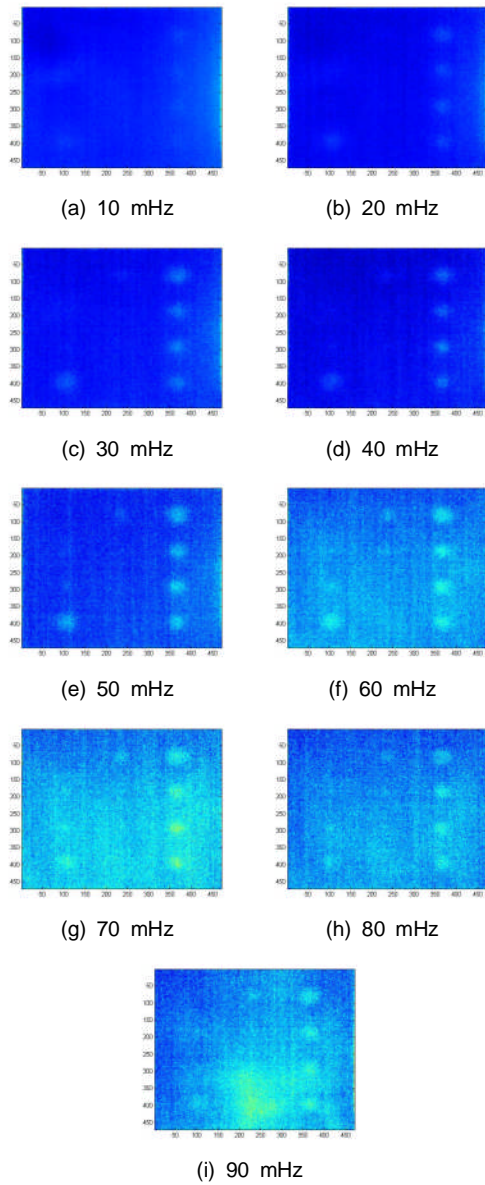


Fig. 6 Amplitude image

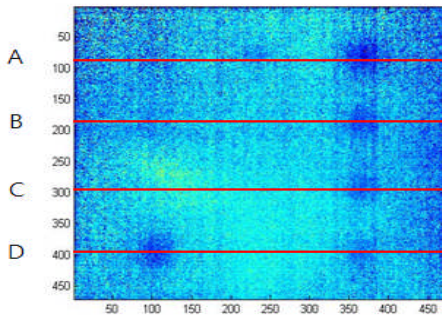
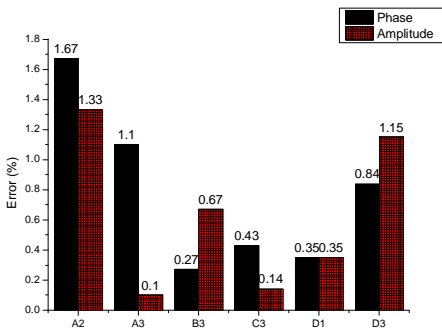


Fig. 7 Thermal phase image of 90 mHz

Table 3 Estimated defect size and depth

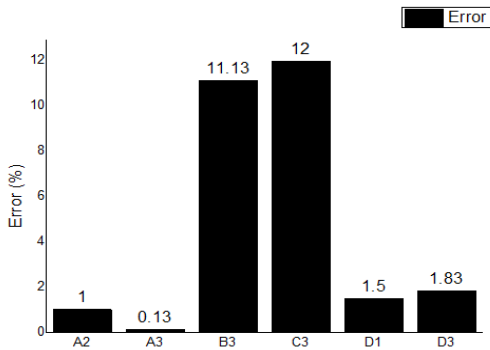
Hole	Diameter (mm)			Depth (mm)	
	actual	phase	amplitude	actual	phase
A ₁	4	-	-	8	-
A ₂	12	12.20	12.16	7	6.93
A ₃	20	20.22	19.98	8	7.99
B ₁	5	-	-	8	-
B ₂	4	-	-	9	-
B ₃	15	14.96	15.10	8	7.11
C ₁	6	-	-	8	-
C ₂	3	-	-	8	-
C ₃	14	14.06	14.02	8	7.04
D ₁	20	19.93	20.07	8	8.12
D ₂	2	-	-	8	-
D ₃	13	12.89	13.15	6	5.89

Table 3은 위상이미지 및 진폭이미지의 결합 크기 및 결합 깊이 계산 결과를 보여준다. 결합의 크기는 Fig. 7에 나와 있는 것과 같이 위상이미지 및 진폭이미지를 이용하여 평가하였다. A4 결함을 기준으로 봤을 때, 결합의 경계 구분은 위상값이 증가하는 곳을 기준으로 하여 측정하였다. 이를 위해 LABVIEW 프로그램에서 Vision이라는 특별한 도구를 사용하였다. Vision은 픽셀 단위로 측정을 변환한다. 검사는 실제 측정 단위를 변환할 수 있도록 실제 화소 단위의 공간 맵핑 교정이라는 프로세스를 이용해 수행하였다. 실제 결합 크기와는 크게 오차가 많지 않은 것을 알 수 있다. 결합 깊이는 위상이미지를 이용하여 계산하였으며, 결합 깊이를 계산하기 위해 식(11)을 사용하여 위상차를 구했으며, 식(3)의 열확산길이 μ 를 열적 특성으로 구한 후 식(5)를 이용해 주파수 90 mHz 위상이미지를 적용해 결합 깊이를 계산하였다. 실제 결합 깊이가 깊을수록 계산값의 정확도가 다소 떨어지는 것을 알 수 있었으며, 결합 크기 또한 작을수록 정확도가 다소 떨어지는 것을 알 수 있었다. Fig. 8은 결합 크기 계산 결과 오차값을 백분율로 보여준다. 최대 1.67%의 오차값을 보여줬으며, 따라서 검출된 결합 크기 정확도가 최소 98.33% 이상을 보여준다는 것을 알 수 있었다.



Hole	A ₂	A ₃	B ₃	C ₃	D ₁	D ₃
Radius	12	20	15	14	20	13

Fig. 8 Error(%) as a function of defect size of 90 mHz



Hole	A ₂	A ₃	B ₃	C ₃	D ₁	D ₃
Radius	7	8	8	8	8	6

Fig. 9 Error(%) as a function of defect depth of 90 mHz

Fig. 9는 결함 깊이 계산 결과 오차값을 백분율로 보여준다. 그림으로부터 최대 12%의 오차값을 보여줬다. 결함 크기 측정보다는 정확도가 다소 떨어지는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 SM45C 시험편의 이면결함을 검출하기 위해 위상잠금 광-적외선열화상 기법을 제안하고, 이미지 프로세싱을 하여 인공으로 가공된 결함에 대해 적용 가능성을 검증하였다. 결함의 크기, 깊이에 따른 위상이미지, 진폭이미지 검사 결과를 비교하여 결함 검출능을 평가할 수

있었다. 결함의 크기 측정은 정확도가 매우 높았으나, 깊이는 다소 정확도가 떨어지는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 적용한 주파수는 넓은 범위는 아니었으며, 결함 형상이 원통형 결함으로 적용이 용이하였다. 향후 보다 복잡한 형상과 넓은 주파수 영역을 적용하여 적용 가능성을 좀 더 자세하게 평가할 필요가 있으며 결함 깊이 측정에 대하여 집중적으로 연구할 필요가 있다.

후 기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (NRF-2014R1A1A2054595).

참고문헌

- [1] M. Y. Choi and K. S. Kang, "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)
- [2] 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)
- [3] G. R. Stockton and W. M. Road, "Infrared application everywhere," *Inframation 2002 Proceeding*, pp. 149-154 (2002)
- [4] ASNT, "Infrared and Thermal Testing," pp. 125-178 (2001)
- [5] G. Gausorgurs, "Infrared Thermography," Translated by Edited S. Chomet, Chapman & Hall, London, pp. 414-452 (1994)
- [6] X. P. V. Maldague, "Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection," Rastogi P. K, Inaudi D, Editors, pp. 591-633, Elsevier Science, Witzerland, (2000)
- [7] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *J. Appl. Phys.*, Vol 71, No. 8 pp. 1962-1965 (1992)

- [8] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Rev. Gen. Therm.*, Vol. 37, pp. 693-703 (1998)
- [9] D. P. Almond, and S. K. Lau, "Defect sizing by transient thermography. I: an analytical treatment," *J. Phys. D; appl. Phys.*, Vol. 27, pp. 1063-1069 (1994)
- [10] M. B. Saintey and D. P. Almond, "An artificial neural network interpreter for transient thermography image data," *NDT & E International*, Vol. 30, No. 5, pp. 291-295 (1997)
- [11] V. P. Vavilov, "Infrared and thermal testing: heat transfer," *Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed)*, X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed. pp. 54-86, ASNT, Columbus, USA, (2001)
- [12] G. Busse, "Infrared and thermal testing: technique of infrared thermography," *Nondestructive Testing Handbook Series III(3rd Ed)*, X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed. pp. 318-328, ASNT, Columbus, USA, (2001)
- [13] G. Busse and A. Rosencwaig, "Subsurface imaging with photoacoustics," *Appl. Phys. Lett.*, Vol 36, No. 10, pp. 815-816 (1980)
- [14] K. S. Kang, M. Y. Choi, J. H. Park, W. T. Kim, K. S. Kim and S. M. Yang, "Determining size and location of subsurface defects of steel plate by lock-in thermography," 12th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Test, pp. 49 (2006)
- [15] S. Ranjit and W. Kim, "Detection of subsurface defects in metal materials using infrared thermography; image processing and finite element modeling," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 34, No. 2, pp. 128-134 (2014)
- [16] S. Ranjit, W. Kim and J. Park, "Numerical simulation for quantitative characterization of defects in metal by using infrared thermography," *IJAER*, Vol. 9, No. 24, pp. 29939-29948 (2014)