

광학가진의 반복 정합에 의한 위상잠금 열화상 개선 효과

Improvement Effects on Lock-in Thermography by Iterative Adaption in Optical Excitation

김원태(공주대학교 기계자동차공학부)

Won Tae Kim (E-mail: kwt@kongju.ac.kr)

요 약 위상잠금 열화상에서는 일반적으로 변조된 주파수의 광램프를 쓰고 있다. 하지만 램프의 광도 분포는 입력신호가 평단(flat)특성임에 불구하고 심지어 불균일하여 검사 시편내에 측면 열유동을 만들어낸다. 이러한 열유동은 원치 않는 효과로서 측면의 분해능을 감소시키는 등과 같이 관심 결함구조의 영상에 부정적인 영향을 미친다. 본 고에서 검토되는 방식은 열원으로 LCD 프로젝터와 같은 것을 이용하여 각 가진픽셀에 개별적으로 진동진폭, 광도 오프셋, 위상지연 등을 할당하는 방법에 대한 접근기술이다. 이러한 반복적인 자체학습 과정에 의한 조명 패턴을 통하여 측면 열유동이 제거되고 분해능이 향상되도록 제공하는 것이다.

1. 서 론

종래의 위상잠금 열화상에서, 인위적인 외적 가진을 위해 사용된 램프는 똑같은 시간에 시편의 종류에 관계없이 각 표면요소에 열을 주사하는 것이다. 이로부터 취득된 위상 영상은 램프의 강도에 대한 온도 변조의 국부적인 지연을 보여준다. 따라서, 위상 영상은 시편의 역동적인 반응을 디스플레이 하고 관찰된 위상 왜곡으로부터 열적 특성을 보이게 된다. 게다가, 비균질의 조명 광흡수율이나 방사계수의 국부적인 변동으로 측면 열유동을 만들어낼 수 있다. 특히, 위상잠금 주파수가 낮은 경우에 더욱 영향을 미치게 되어 흐릿한 위상영상을 초래하는 반면에 주파수가 높아지면 그 영향은 감소하게 되나 깊이 영역에 대한 영상이 미흡하게 된다[1]. 결과적으로, 종래의 램프를 가지고는 측면 열유동을 억제할 수가 없다.

본 고에서 고려되고 있는 LCD 프로젝터는 개개의 픽셀 레벨에 광학적 가진을 시간 및 공간적인 조작을 하는 넓은 유연성을 갖는 현대적인 광원이다. 선형패턴 또는 이차원에 대응하는 정합에 의해 조명에지를 유도하고 표면 방향을 따라 열방산 조명에 응답하는 국부적인 측면 열유동을 만들어 낼 수가 있다[2]. 또한, 측면 열유동을 발생시키기 위한 패턴을 정합하는 대신에 이를 억

제하는 패턴을 설계할 수도 있다. 본 고에서의 핵심기술은 2장에서 언급된 응용에 대한 것이 주요한 점이다.

2. 이론적 배경

2.1. 광학적 가진에 의한 위상잠금 열화상

Fig. 1에서 보이는 것처럼, 광학적으로 가진된 위상잠금 열화상(optically excited lock-in thermography; OLT [3-6])은 비파괴 평가에 유용한 도구이다. 비교적 짧은 시간에 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP)내의 박리와 같은 결함은 원격으로 검출이 가능하다[7], 광학 가진에 의해 트리거된 열파동이 시편 내부로 전파하고 열파동은 재료 이면 경계 조건에 따라 부분적으로 반사되어지고 부수적인 파동으로 간섭한다. 열적 시편 구조에 따라 온도 변조에 영향을 주어 적외선(infrared; IR) 카메라에 의해 기록이 된다. 얻어진 적외선 시퀀스의 올라인 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform; DFT)은 국부 온도 발전의 위상과 진폭을 제공한다. 위상과 진폭은 모두가 재료의 불균질성의 깊이에 민감하나, 위상의 깊이 범위는 진폭의 깊이에 약 두 배가 된다[1]. 진폭의 열적 깊이 범위는 열방산 길이 μ 에 의해 식(1)로 주어진다[8].

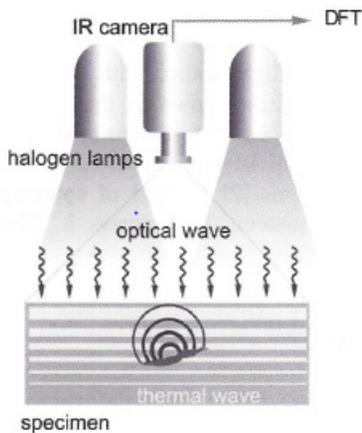


Fig. 1 Layout of OLT measurement equipment

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (1)$$

여기서, μ 는 열확산계수이고 ω 는 광학강도변조의 각주파수이다.

OLT 측정 장치에서 열원으로 사용되어온 기존의 램프는 쉽게 이송이 가능하고 동작이 간편하지만 불균일한 강도분포에 기인한 단점이 있어 일부 시편 면적에는 진폭 영상을 더 밝혀주는 것으로 나타나고 있다. 위상 영상은 국부적인 허수 및 실수의 비율(위상의 자체 정규화)에 의존하므로 불균일 가진에 상대적으로 덜 민감하다. 그러나, 가진수준 및 열적 특색의 국부적 변동에 따라 서로 간 국부 위상각에 영향을 미치게 되어 측면 열유동을 야기할 수 있다.

2.2. 광학열원의 LCD 프로젝터

상기 2.1.에서의 단점을 보완하는 방법으로 LCD 프로젝터를 사용하여 적어도 일부 결점을 줄일 수가 있다. LCD 프로젝터의 추가적인 정합에 의해 얻어지는 광분포가 균일해지게 되면 진폭영상이 개선되고 측면 열유동을 감축된다. 램프와 비교해서 LCD 프로젝터의 단점은 가진강도가 비교적 낮아지게 되어서 시편 크기와 측정 가능한 재료에 제한이 된다는 것이다. 그러나, 이러한 현대적인 광원은 시편 표면에 대하여 각 조도 픽셀이 개별적으로 제어 가능하여 새로운 종류의 위상잠금 열화상 기술을 정합케 하는 이점이 있다.

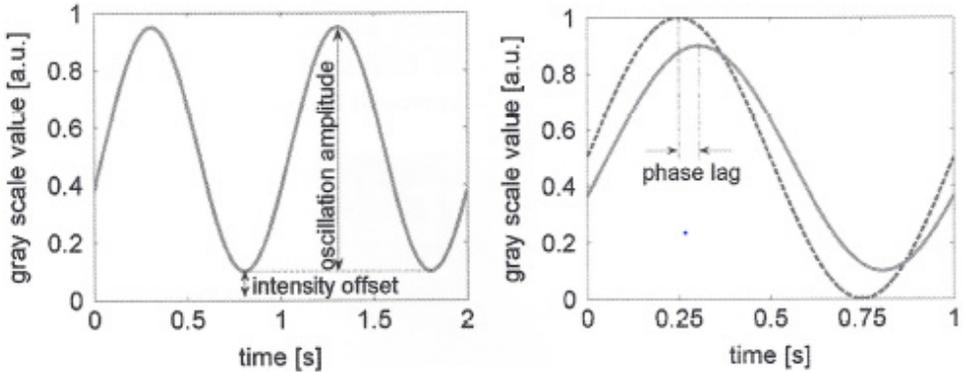
이 방법의 기본적 개념은 광학 패턴과 이 패턴의 국부시간변화(필수적으로 비디오 형태로)는 온도가 전 시편에 걸쳐 동시적으로 똑같은 방식으로 변조되는 방법으로 생성되어진다는 것이다. 따라서 여기서는 어떠한 측면 열유동도 표면에 따라 나타날 수가 없다. 이것은 개별 시편에 가진이 정합되어지는 방식이므로 시편의 위상잠금 영상은 어떠한 정보도 없는 균일하다는 것이다. 대신에 시편에 대해 얻어진 측정 결과는 시편 구조에 상관없이 진폭과 위상 모두에 대해 조도 패턴이 요구된다.

이를 위해서, 위상영상과 진폭영상을 만들어 낼 기존의 광학 가진 위상잠금 측정 장비에 추가적으로 LCD 프로젝터를 사용한다. 이렇게 하여 얻어지는 결과는 피드백을 위해 사용되어지거나 역방향으로서 가진에 의한 녹화 영상 패턴을 생성하여 시편 표면에서 온도분포에 대해 시간 및 공간 차이를 줄이고자 하는 목적으로 사용되어진다. 녹화되는 각 픽셀은 서로 다른 그레이 스케일 값 사이에서 독립적으로 사인파 천이를 디스플레이 한다. 국부적인 그레이 스케일 값이 밝아질수록 보다 많은 에너지가 시편에 증착되어진다. 그러므로 흰색 픽셀은 에너지가 최대에 도달하는 것인 반면에 검은 픽셀은 어떠한 열적 강도도 없음을 나타낸다.

주기적으로 변하는 그레이 스케일 값들로 인해, 열적 파동은 다른 열원들로 알려진 것처럼 시편 표면에서 시작된다. Fig. 2에서 보이는 것처럼 신기하게도 각 LCD 프로젝터 픽셀은 강도 오프셋, 변동 진폭, 위상지연이라는 세 개의 매개변수에 의해 특징되어지는 각자 나름의 가진을 갖는다.

오프셋 강도는 가장 작은 그레이 스케일의 값을 대변하는 것이고, 변동 진폭은 모든 값들의 범위를 표시한다. 시편상의 서로 다른 지역에 대해, 열적 파동은 이들 개개의 앞서 언급된 위상 지연과 더불어 추가적으로 개시될 수가 있다,

평균값을 수준별로 매김하는 것에 대해, 강도 오프셋의 조정은 필요하다. 시편의 보다 차가운 지역은 상응하는 가진픽셀의 보다 높은 오프셋에 의해 측정 동안에 보다 높은 에너지의 입력을 필요로 한다. 동일한 방식으로서, 얻어지는 진폭 영상은 국부적으로 조정된 변동진폭, 적절한 위상 지연을 갖는 위상영상과 같은 수준으로 될 수가 있다.



(a) Intensity offset and oscillation amplitude

(b) Phase lag enabling a temporally adapted excitation

Fig. 2 Excitation elements using LCD projector

종래의 OLT 측정의 평균 강도, 진폭과 위상영상들은 개선의 시발점을 나타낸다. 먼저, 가진강도 I_{exc} 는 가진하는 변동진폭 A_{exc} 와 강도 오프셋 Q_{exc} 으로 구성되는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$I_{exc} = \frac{A_{exc}}{2} + Q_{exc} \quad (2)$$

기존 측정 동안에 더 데워진 면적들은 수반되는 다음 단계에서 좀 더 낮은 가진 수준을 필요로 한다. 그러므로 새 가진강도는 각 픽셀에 대해 분리하여 계산된다.

$$I_{exc}^{zw} = \frac{I_{exc}^{old}}{2} \left(1 + \frac{T_{end} - T_{\infty}}{\bar{T} - T_{\infty}} \right) \quad (3)$$

여기서 T_{exc}^{old} 는 가진수준이고 \bar{T} 는 선행 측정하 온도의 평균값이다. T_{exc}^{zw} 는 마지막에 얻고자하는 균일온도이고 T_{∞} 는 주변온도이다.

결과로 얻는 진폭의 균질화를 위해서는, 변동진폭은 식(4)에서 보이는 것처럼 유사한 방법으로 맞추어져야 한다.

$$A_{exc}^{zw} = \frac{A_{exc}^{old}}{2} \cdot \min \left(\frac{2 \cdot I_{exc}^{old} \cdot \left(1 + \frac{T_{end} - T_{\infty}}{\bar{T} - T_{\infty}} \right)}{A_{exc}^{old} \cdot \left(1 + \frac{A_{exc}^{old}}{A_{res}^{old}} \right)} \right) \quad (4)$$

새로이 가진하는 변동진폭 A_{exc}^{new} 는 이전 변동진폭 A_{exc}^{old} 와 이전의 측정값들의 결과로 얻어지

는 진폭 A_{res}^{old} 에 의존한다. 여기서 A_{end} 는 각 픽셀에 대해 각각의 최종 결과로 얻는 진폭을 나타낸다. 식(4)에서 첫 부분은 효과적으로 변동진폭을 조정한다. 두 번째 부분은 변동진폭이 동일하게 되거나 새롭게 계산된 가진강도보다 조금 더 작아야 함을 고려하는 조절항이다. 상기의 식(2)에서 보이는 것처럼, I_{exc}^{new} 와 A_{exc}^{new} 를 알아야 다음 단계의 측정을 위한 강도 오프셋 Q_{exc} 에 대한 계산이 가능하다. 결정되어야 할 마지막 매개변수는 위상지연으로 간단히 다음 식(5)로 주어진다.

$$\psi_{exc}^{new} = \psi_{exc}^{old} + \psi_{res}^{new} \quad (5)$$

여기서 ψ_{exc}^{old} 는 가진위상지연이고 ψ_{res}^{old} 는 이전 측정값들에 대해 결과적으로 얻어지는 위상각이다.

위상영상을 고르게 유지하기 위해서는 다음의 측정동안 ψ_{exc}^{zw} 가 가감에 의해 빠져야 한다. 이것이 첫 녹화 기록 동안에 어떻게 계산되는지에 대한 방법이다. 결과로 얻는 영상은 자체 학습의 피드백 열화상 과정으로서 반복적으로 시행될 수 있는 동일한 개선방법에 대한 시작점이다. 각 단계는 고도로 감쇠된 파동 전파내에서 목표에 이르는 편차를 줄이는 것이 목적이므로 수렴은 이러한 반복적인 순서로부터 명백히 이르게 된다.

연속적인 조정에 의해, 영상들에서 구보들은 각각 새로운 측정치들로 단계별로 층층이 쌓이게 된다. 이상적으로, 이러한 과정은 어떠한 측면 차

이와 측면 열유동도 일어나지 않게 함을 나타내어 완전히 균질의 위상과 진폭 영상을 얻게 해준다. 이러한 종류의 영상 결과들이 기존 영상 구조에 상관없이 만들어지도록 요구되는 최종 가진 패턴이다. 이 접근 방식은 전기공학과 같은 보상 기법과 닮은꼴이다.

기존 OLT 위상영상과 비슷하게 가진에 의한 국부적인 위상지연은 가시적인 하나의 영상으로서 묘사될 수 있다. 단 필수적인 차이점은 가진 위상영상은 보다 저 좋아진 분해능을 갖고 있고 희미함은 더 적게 나타난다는 것이다.

3. 실험장치 구성 방법

본 실험장치 세트는 CEDIP 적외선 카메라, OLT, 시편으로 구성되고 적외선 카메라의 셋팅은 온도분해능은 20 mK이고 적분시간은 2.5 ms, frame rate는 50 Hz이다[9]. 가진 소스인 OLT 프로젝터는 최대 220 W의 전기 입력값을 갖는 미쯔비시사의 XL5980U로 광원을 사용한다. 이것은 비교적 저전력이고 비교 가능한 측정값을 만들도록 하기 위한 것으로, 각 위상잠금 주파수에 대한 주기번호들이 계산되어 1,000초까지 시간을 변조하여 측정하도록 한다. 이러한 셋팅은 어떠한 위상, 진폭, 강도 조정이 없이 기존의 위상잠금 열화상 측정에서와 같이 처음부터 모든 반복 단계가 진행되는 동안에 동일하게 유지되도록 한다. 본 고에서, 합리적인 강도와 진폭의 수준을 찾아내는 것은 위상의 적정 수준을 설정하기 위한 처음 3-4 반복 사이클 동안에 보통 얻어진다. 반복의 알고리즘을 개선함으로써 시간은 아마도 줄어 들 수 있다.

본 고에서 측정용으로 사용된 탄소섬유강화 재료는 (첨단기술의 항공기에 매우 중요한) 높은 비강력(high specific strength)으로서 균질이면서 이방성 열전도율의 특징으로, 균질이고 등방성인 폴리머 재료와 차별화 된다. 여기에서 고려되는 기초적인 실험시편은 9 mm 두께의 CFRP 평판으로 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 편평한 바닥에 구멍이 행렬과 같이 배열되어 있고 구멍의 지름은 평면으로부터 일정한 거리로 서로 다르게 8 ~ 3 mm로 하였다. 구멍들은 표면 뒷부분에서 드릴로 가공하였고 위상잠금 열화상 실험은 편평한 전면으로부터 수행되었다. 이러한 시편은 만들기

가 쉽지가 않으며 그 이유는 섬유들이 높은 열확산계수를 가지고 있어 평판의 거시적 열확산계수가 표면에 수직인 것에 비해 수평일 경우에 더 높아지기 때문이다. 시편은 측면 열유동에 효과적하도록 알려진 기하학성으로 정밀하게 결합되어 있다.

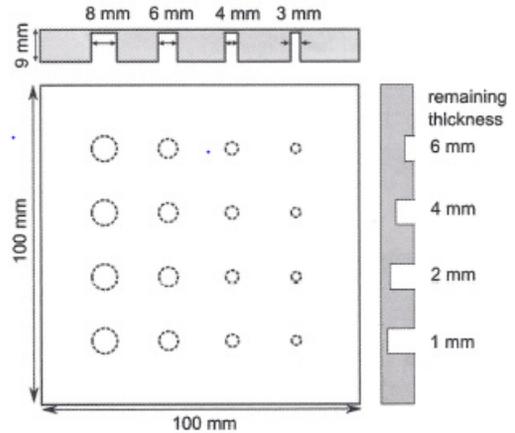


Fig. 3 Specimen of CFRP plate with flat bottom holes

4. CFRP 측정 결과

Fig. 4는 기존의 위상잠금 열화상에 의한 위상 영상(Fig. 4(a))과 LCD 프로젝터에 의해 필요한 위상지연을 반복적으로 수행하여 측면 열유동을 전체적으로 고르게 분포시켜 얻은 위상영상(Fig. 4(b))을 비교한 그림으로 실험에서의 변조주파수는 모두 0.025 Hz로 하였다.

주관적으로 말하자면, 조정된 가진에서 결함 대비 관점에서 보다 좋은 결과를 얻음을 확인할 수 있다. 보다 근접하고 보다 정량적인 시험을 위해 서로 다른 지름이 있는 바닥의 구멍 종축에 가로질러 (구멍간 일정한 등간격에 따라 표면에 모두 더 근접한 경우) 수평선을 따라 위상 프로파일이 추출되어진다. 이에 대한 그림이 Fig. 5의 (a)에 도시되어 있다. Fig. 5의 (b)는 전면으로부터 서로 다른 위치에 놓여 있는 두 개의 가장 큰 구멍을 따라 수직으로 같은 구멍에 대한 위상영상을 도시한 것이다. Fig. 5의 (a)-(b)로부터 조정된 자체학습 잠금위상 열화상으로 얻어진 결과들이 종래의 광 잠금위상 열화상으로 얻은 것들보다 상당히 더욱 좋음을 명백히 알 수 있다. 영상 대비에서 이득은 매우 강력해서 구멍들은 이전

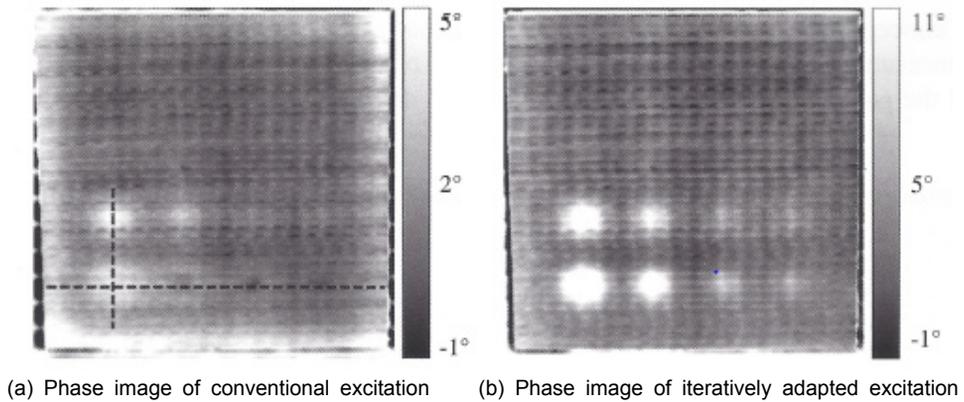
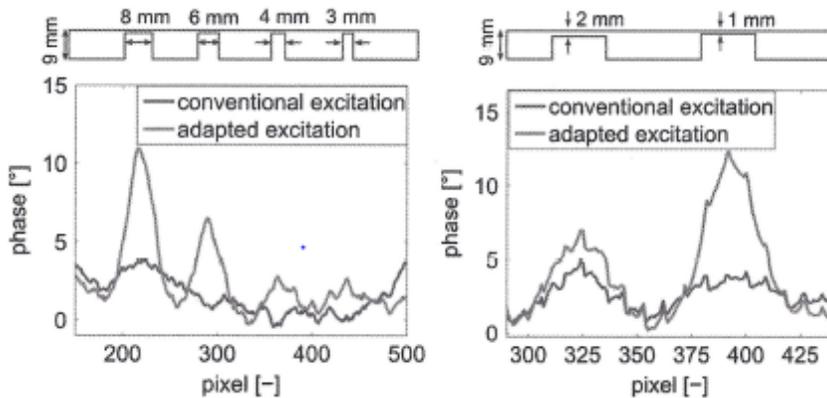


Fig. 4 Phase images in CFRP at 0.025 Hz of modulation frequency



(a) Horizontal profiles of conventional excitation (b) Vertical profiles of adapted excitation

Fig. 5 Profiles of lock-in thermography phase angle

잡음으로 숨겨진 것들을 가시화되어진다. 따라서 이러한 장치의 개념이 실험적으로 유효하다는 것을 증명한다.

5. 결론

본 고에서는 LCD 프로젝터가 광학적으로 자체 정합된 피드백 위상잠금 열화상에 대한 다용도의 열원으로서 사용된다면 어떻게 OLT가 개선되는가를 고려하였다. 가진 시편 표면위에 조사되는 녹화 패턴으로 구성된다. 그렇게 함으로써 각 가진 픽셀은 주기적으로 세 개의 조절 가능한 매개변수인 변동진폭, 강도 오프셋, 위상 지연에 의해 정의된 그레이 척도 값을 바꾸게 된다. 반복적으로 자체학습 과정을 정합함으로써 이들 세 개의 매개변수들은 최종 가진패턴이 시편 전체에

걸쳐 평균온도, 진폭, 위상을 일정하게 되도록 하는 방식으로 반복적으로 조절된다. 이렇게 하여, 표면상에서 측면 열유동은 보상에 의해 약해진다. 이 측정 방식은 검사 시편의 기존 OLT 영상이 그 자체 정보를 모두 잃고 수준이 고르게 되는 가진패턴이 상당히 개선된 측면의 분해능을 갖는 최종적인 시편의 영상 결과가 될 때 종료된다.

이 기법은 표면에 근접한 측면 열유동에만 작용한다. 시편내에 더 깊은 곳에 있는 열유동의 측면 성분들에 의해 야기되는 영상이 흐려지는 것은 이 방법으로 제거될 수가 없다. 즉, 픽셀방향으로 프로그래밍이 가능한 광포텐셜 에너지를 탐색하는 첫 단계로서 고려된 방식이다. 향후 보다 개선책들은 국부적인 변조주파수와 이들의 시간 종속성과 관련될 수 있겠다. 이러한 절차에는 상응하는 새로운 종류의 데이터 분석의 개발이 요구된다.

후 기

"이 원고는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0015969)."

참고문헌

- [1] G. Busse, "Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal," *Applied Physics letters*, Vol. 15, No. 10, pp. 759-760 (1979)
- [2] J. Rantala, "A measurement method for the determination of anisotropy ratio of thermal conductivity of plastic foils," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 63, No. 11, pp. 5472-5474 (1992)
- [3] G. M. Carlomagno and P. G. Berardi, "Unsteady thermography in non-destructive testing," edited by C. Warren, *Proceeding of 3rd Biannual Information Exchange*, St. Louis, USA, Aug. 24-26, pp. 33-39 (1976)
- [4] J. L. Beaudoin, E. Merienne, R. Danjoux and M. Egee, "Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry," *SPIE proc.*, Vol. 590, pp. 287-292 (1985)
- [5] P. K. Kuo, Z. J. Feng, T. Ahmed, L. D. Favro, R. L. Thomas and J. Hartikainen, "Parallel thermal wave imaging using a vector lock-in video technique," *Photoacoustic and Photothermal Phenomena*, Heidelberg, Springer, pp. 415-418 (1987)
- [6] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, No. 8, pp. 415-418 (1987)
- [7] Ch. Maierhofer, R. Arndt, M. Rolling, R. Helmerich, A. Walther, B. Hilemeier and C. Rieck, "Quantification of voids and delamination in real concrete and masonry structures with active thermography," *QIRT Conf.*, Paper 2006-049, (2006)
- [8] A. Rosencwaig and A. Gersho, "Theory of photoacoustic effect with solids," *Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 1, pp. 64-69, (1976)
- [9] N. Holtmann, K. Artzt, A. Gleiter, H. P. Strunk and G. Busse, "Iterative improvement of lockin-thermography results by temporal and spatial adaption of optical excitation," *Quantitative Infrared Thermography*, Vol. 9, No. 2, pp. 167-176 (2012)