〔논 문〕 - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 27, No. 5 (2007. 10)

초음파 열 영상 검사를 이용한 브레이징 접합 결함 검출

A Brazing Defect Detection Using an Ultrasonic Infrared Imaging Inspection

조재완*†, 최영수*, 정승호*, 정현규*

Jai Wan Cho*†, Young Soo Choi*, Seung Ho Jung* and Hyun Kyu Jung*

초 록 고에너지 초음파 여기 탄성파가 물체의 균열, 박리 등의 결함 부위를 통과할 때 서로 맞닿은 결함 면은 균일하게 진동하지 않는다. 초음파 입사에 따른 결함 면 사이의 마찰(friction), 문지름 (rubbing) 또는 부딪침(clapping) 에 의해 진동 에너지가 결함 부위에서 국부적인 열로 변환된다. 이를 적외선 열 영상 카메라로 관측하면 구조물의 결함을 실시간으로 검출할 수 있다. 본 논문에서는 초음파 열 영상 검사를 이용한 인코넬 합금 박판의 브레이징 접합 결함 검출에 대해 기술한다. 2 kW 의 전력과 23 kHz 대역의 가진 주파수를 갖는 초음파 펄스를 280 ms 기간 동안 인코넬 합금의 브레이징 접합 박판에 입사시켰다. 브레이징 접합부의 결함위치 부근의 인코넬 합금 박판의 양면이 맞닿은 경계선에서 아주 밝은 국부적인 발열(핫 스팟)이 적외선 열 영상 카메라에 의해 관측되었으며 브레이징 접합 결함 위치에서도 미약한 열이 관측되었다. 배경 감산 평균 및 히스토그램 평활화 처리 등의 영상처리를 통해 브레이징 접합의 결함을 확인하였다.

주요용어: 초음파, 적외선 열 영상, 브레이징 접합, 비파괴 검사, 결함 검출

Abstract When a high-energy ultrasound propagates through a solid body that contains a crack or a delamination, the two faces of the defect do not ordinarily vibrate in unison, and dissipative phenomena such as friction, rubbing and clapping between the faces will convert some of the vibrational energy to heat. By combining this heating effect with infrared imaging, one can detect a subsurface defect in material in real time. In this paper a realtime detection of the brazing defect of thin Inconel plates using the UIR (ultrasonic infrared imaging) technology is described. A low frequency (23 kHz) ultrasonic transducer was used to infuse the welded Inconel plates with a short pulse of sound for 280 ms. The ultrasonic source has a maximum power of 2 kW. The surface temperature of the area under inspection is imaged by an infrared camera that is coupled to a fast frame grabber in a computer. The hot spots, which are a small area around the bound between the two faces of the Inconel plates near the defective brazing point and heated up highly, are observed. And the weak thermal signal is observed at the defect position of brazed plate also. Using the image processing technology such as background subtraction average and image enhancement using histogram equalization, the position of defective brazing regions in the thin Inconel plates can be located certainly.

Keywords: Ultrasound Excitation, Infrared Image, Welding, Non Destructive Test, Defect Detection

1. 서 론

균열 또는 접합면의 결함 등이 존재하는 물체에 초음파를 입사시키면 균열, 결함부위의 표면에서 국부적인 열이 발생 된다[1-3]. 이는 고에너지 초음파 여기 탄성파가 물체의 균열, 박리 등의 결함 부

(접수일: 2006. 11. 10, 심사완료일: 2007. 9. 6) * 한국원자력연구원 원자력로봇Lab., † Corresponding Author: Nuclear Industry Robotics Lab., Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353 (E-mail: jwcho@kaeri.re.kr)

위를 통과할 때 서로 맞닿은 결함 면이 균일하게 진동하지 않고 결함 면 사이의 마찰(friction), 문지름(rubbing) 또는 부딪침(clapping) 현상에 의해 탄성파의 일부가 열로 변환되기 때문이다. 이러한 열을 적외선 열 영상 카메라로 관측하면 물체 내에 존재하는 결함을 신속하게 검출할 수 있다. 물체에 고에너지 초음파 펄스를 인가하여 결함부위에서 국부적으로 발생되는 열을 적외선 열 영상 카메라로 관측하여 결함을 검출하는 것을 초음파 열 영상 검사기법으로 정의 한다[4]. 초음파 여기 탄성파가 구조물에 전달될 때 결함 부위에서만 선택적으로 발열현상이 나타난다. 이를 적외선 열 영상 카메라로 관측하면 구조물의 건전 부위는 휘도가 낮은 검은 배경으로 보이게 되고, 균열 등의 결함 부위는 휘도가 높은 밝은 영역으로 보이게 된다. 이러한 휘도(그레이 레벨) 가 높은 밝은 지점을 핫 스폿(hot spot) 으로 부르고 있다. 결함이 있는 구조물의 적외선 열 영상에서는 전체적으로 어두운 배경에서 결함 위치만 밝은 영역으로 뚜렷이 대비되므로 용이하게 핫 스폿을 관측할 수 있으며 이를 처리하여 구조물의 결함 위치를 신속 정확하게 검출할 수 있다. 초음파 열 영상 검사를 이용한 비파괴 검사는 주로 항공기, 자동차 등의 복합재료의 결함검출에 사용되고 있다[5,6].

인코넬 합금은 고온에서 우수한 기계적 특성을 갖기 때문에 원자력 발전소의 증기발생기 전열관 재료로 널리 사용되고 있으며 또한 인코넬 합금의 박판은 전투기의 엔진 블록의 구성 부품으로 사용되고 있다.

본 논문에서는 초음파 열 영상 검사기법을 이용한 인코넬 합금 박판의 브레이징 접합 결함 검출에 대해 기술한다. 2 kW의 전력과 23 kHz 주파수 대역의 가진 주파수를 갖는 초음파 펄스를 280 ms 기간 동안 인코넬 합금의 브레이징 접합 박판의 밑면에 입사시켰다. 브레이징 접합부의 결함위치 부근의 인코넬 합금 박판의 양면이 맞닿은 경계선에서 가장 밝은 국부적인 발열(핫 스팟)이 적외선 열 영상 카메라에 의해 관측되었으며 브레이징 접합 결함 위치에서도 상대적으로 미약한 열이 관측되었다. 이러한 미약한 열 성분이 포함된 관측 영상에 대해 배경 감산 평균 및 히스토그램 평활화 기법 등의 디지털 영상처리기법을 적용하여 브레이징 접합 결함을 찾고자 하였다.

2. 초음파 열 영상 검사 시스템

2.1. 초음파 열 영상 검사의 원리

초음파가 물체의 결함 부위를 통과할 때 서로 맞닿은 두 결함 면은 균일하게 진동하지 않는다. 결함 면 사이의 마찰이 탄성파의 일부를 열로 변환시킨다. 이러한 발열현상을 적외선 열 영상 카메라로 관측하면 구조물의 균열과 같은 결함을 효율적으로 검출할 수 있다. 고에너지 초음파 펄스(폭: 50~300 ms, 주파수: 20~40 kHz, 진폭: 2 kV)를 검사 시편에 인가하여 결함 부위에서 국부적인 열이 발생되도록 한다. 적외선 열 영상 카메라를 이용하여 초음파 펄스 인가 전후의 시간 경과에 따른 결함 부위의 발열 현상을 관측한다. 20 kHz 대역 주파수의 초음파는 수십 cm의 파장 성분을 갖는다. 또한 파장 길이보다 훨씬 먼 거리를 진행할 경우에도 초음파는 충분한 진폭 에너지를 가지면서 전파된다. 재료에 손실이 없을 경우 초음파는 감쇠 없이 수 파장 이상의 거리를 전파할 수 있다. 일반적으로 고체에서 음파의 속도는 수 km/s 이다. 초음파 여기 펄스가 인가되는 순간에 1 m^2 이내의 크기를 갖는 구조물의 전 검사 영역을 음장(sound field)이 완전히 투과한다. 수 kHz 대의 영상 획득시간을 갖는 초고속 적외선 열 영상 카메라를 이용할 경우 수십 μs 이내에 결함을 검출할 수 있다. 따라서 구조물의 결함부위에서의 발열을 효과적으로 여기하기 위해 가청 주파수의 경계에 위치하는 15 kHz~40 kHz 대역의 여기 주파수를 사용하며 일반적으로 20 kHz 대역이 널리 사용된다.

2.2. 초음파 열 영상 검사 시스템 구성

Fig. 1에 초음파 열 영상 검사 시스템 구성도를 보이고 있다. 고출력 초음파 발생 전원장치에서 23 kHz, 2 kHz의 전력을 초음파 트랜스듀서에 공급한다. 본 논문에서 사용한 초음파 트랜스듀서는 플라스틱 용접에 사용되는 초음파 용착기용 진동자를 사용하였다. 용착기용 진동자는 다수의 압전 세라믹이 적층으로 되어 있으며 ± 전극이 교대로 연결되어 있다. 압전 소자의 전극에 인가된 고전압에 의해 압전 소자의 길이가 변화 한다. 전극에 인가되는 고전압을 23 kHz의 초음파 주파수로 발진시키면 발진 주파수에 대응하여 압전 소자의 길이가

변화하므로 초음파 트랜스듀서에 의해 기계적인 진동이 여기 된다. 초음파 진동 에너지 입사에 따른 결함 부위에서의 선택적 발열 현상을 미쯔비시 IR-M500 적외선 열 영상 카메라로 관측한다. IR-M500은 stirling cooling 방식의 냉각형 열 영상 카메라이고 3~5 μm 파장대의 스펙트럼 특성을 갖고 있다. 센서는 쇼트키 배리어 방식의 FPA(focal plane array) PtSi(platinum silicide) 소자이며 512×512 크기의 화소 수를 갖고 있다. 센서 어레이의 실제 크기는 0.52"×0.4" 이며 한 화소의 공간 분해능은 25.8×19.8 μm이다. IR-M500 적외선 열 영상 카메라 신호를 영상처리 시스템으로 처리하여 구조물의 결함 위치를 추출한다.

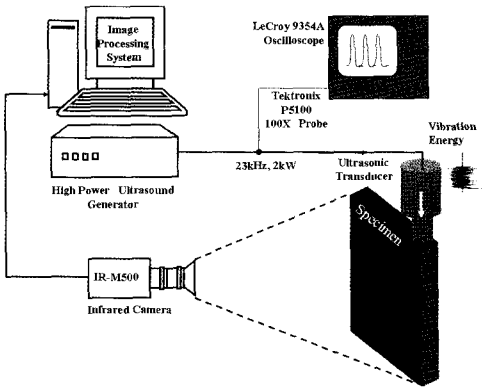

Fig. 1 Configurations of ultrasound infrared imaging system

3. 실험 및 결과

Fig. 2에 실험 장면을 보이고 있다. 검사 시편과 접촉하는 초음파 트랜스듀서의 밑면은 직경이 10 mm 이다. 접촉 면적에서 보면 초음파 트랜스듀서 밑면과 브레이징 접합 시편의 판면을 접촉시키는 것이 효율적이다. 그러나 초음파 트랜스듀서의 기둥 부분이 적외선 열 영상 카메라의 관측 시야(field of view)를 제한하므로 브레이징 접합 판면의 전체를 관측할 수 없다. 초음파 열 영상 검사에서는 초음파 트랜스듀서와 시편과의 접촉 면적의 크기 보다는 시편과 초음파 트랜스듀서사이에 인가되는 적절한 접촉 힘이 결함 관측의 효율을 증대시키는 것으로 알려져 있다[7]. 접촉 힘이 약하면 초음파 펄스 인가 시 검사 시편의 미끄러짐(slippage) 현상이 발생하여 진동 에너지가 효율적으로 전달되지 않는다. 또한, 접촉 힘이 너무 세면 초음파 여기 탄성파의 대부분을 지지대가 흡수한다. 따라서 결함 부위에서의 핫 스폿이 관측되지 않는다. 적절한 접촉 힘에서 비선형 음향 혼돈이 발생하고 결함 부위에서 나타나는 핫 스폿의 밝기가 가장 세므로 효율적으로 결함위치를 검출할 수 있다[8-10]. 적절한 접촉 힘의 세기는 경험(empirical rule) 에 의존하고 있다. 초음파 열 영상 검사에 의한 비파괴 검사를 산업 전 분야에 확산시키기 위해서는 접촉 힘의 정량화가 필요하며 이를 위한 많은 시도가 연구 되고 있다[11,12]. 본 논문에서는 검사 시편의 전체 면을 관측하기 위해서 시편의 밑면(두께 1 mm)과 초음파 트랜스듀서 밑면을 접촉시켰다. 초음파 펄스 가진 시 초음파 트랜스듀서와 시편간의 미끄러짐을 방지하기 위해 바이스로 검사 시편을 고정하였다. Fig. 3에 실험에 사용한 인코넬 합금 박판 브레이징 접합 시편의 크기를 나타내고 있다. 70×24×1.0 mm(가로×세로×두께) 크기의 인코넬 합금의 박판 2개를 겹쳐 3 군데 브레이징 접합하였

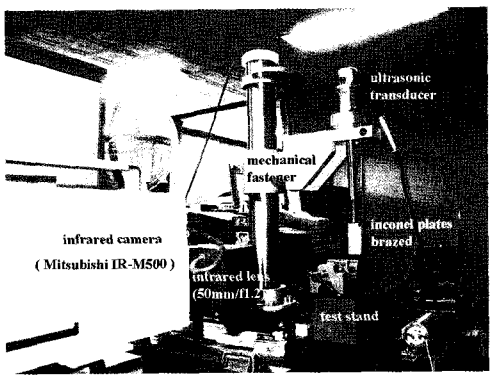

Fig. 2 Photograph of an experimental setup

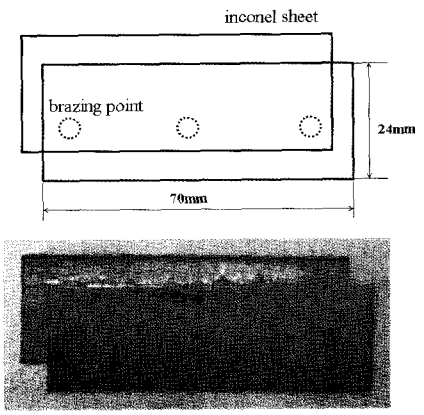

Fig. 3 Layout diagram of a test specimen

다. Fig. 3에서 원형으로 표시한 것이 브레이징 접합 지점을 나타내고 있다. 인코넬 합금 박판 전체 면의 브레이징 접합 결함을 관측하기 위해서 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 시편의 밑면(두께 1 mm)과 초음파 트랜스듀서 밑면을 접촉시켰다. 이 경우에는 선 접촉이 된다. 미쯔비시 IR-M500 적외선 열 영상 카메라는 브레이징 접합 판면의 정면에 위치하고 있으므로 초음파 펄스 가진 시의 인코넬 합금 박판의 브레이징 접합 판면 전체의 열적 특성을 관측할 수 있다. 2 kW 의 전력과 23 kHz 대역의 가진 주파수를 갖는 초음파 펄스를 280 ms 기간 동안 인코넬 합금의 브레이징 접합 박판 밑면에 입사시켰다. 인코넬 합금 박판의 브레이징 접합 결함 부위에서 발생하는 핫 스폿들을 적외선 열 영상 카메라로 관측하고 이를 영상 처리하여 결함위치를 검출하였다.

인코넬 합금 박판의 방향, 위치를 변화 시켜가면서 4 가지 방법으로 측정하였다. 이를 Fig. 4에 나타내고 있다. Fig. 4에서 숫자로 표시한 것은 브레이징 접합의 위치를 나타낸다.

Fig. 4 의 4 가지 방법으로 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내고 있다. Fig. 5(a),(b),(c) 의 측정 결과로부터 3번 위치의 브레이징 접합 지점의 접합 불량으로 두 판면의 결합이 느슨하여 초음파 펄스 인가에 따른 진동에 의해 두 박판이 마찰되거나 부딪침에 의하여 인코넬 합금 박판의 양면이 겹쳐지는 경계선에서 열이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 고에너지 초음파 펄스를 첫 번째 시편인 인코넬 합금 박판의 밑면에 인가하였을 때 인코넬 합금 박판의 전체 면에서 관측된 적외선 열 영상을 나타내고 있다. Fig. 6 의 왼쪽 그림은 초음파 펄스를 인가하기 전의 모습이다. 가운데 그림은 초음파 펄스가 인가된 직후의 첫 번째(30 ms) 관측 열 영상 프레임이다. 그림 중앙에 보이는 밝은 점은 초음파 트랜스듀서와 시편과의 접촉면에서 초음파 펄스 인가 시 가진되는 진동에너지 여기에 의한 마찰열을 나타내고 있다. Fig. 6의 오른쪽 Fig.은 초음파 펄스 인가 후 9번째 관측 프레임(~ 270 ms)이다. 9번째 관측 프레임에서 오른쪽 편의 밝은 영역은 브레이징 접합 지점에서 관측된 미약한 열이다. 이로부터 시편 1의 3'번 위치의 브레이징 접합이 불량임을 알 수 있다. Fig. 6에서 인코넬 합금 시편의 왼쪽이 어두운 것은 대기 중의 복사열이 주변 구조물에 의해 반사되어 검사 시편의 왼쪽 표면에 나타난 것이다. 이는 왼쪽 표면에 나타난 반사열의 세기가 강하여 관측 적외선 열 영상 카메라의 감도가 포화하여 검게 나타난 것으로 추정된다. 시편 왼쪽에 나타나는 검은 영역의 형태가 초음파 펄스 입사 전후에 차이를 보이는 것은 초음파 펄스 인가에 따른 진동으로 검사 시편과 지지대(바이스)의 상태가 미세하게 변화하여 적외선 카메라의 관측 시야(FOV, field-of-view) 에 영향을 끼친 것으로 추정된다. Fig. 6(c) 의 관측 영상의 오른쪽에 나타나는

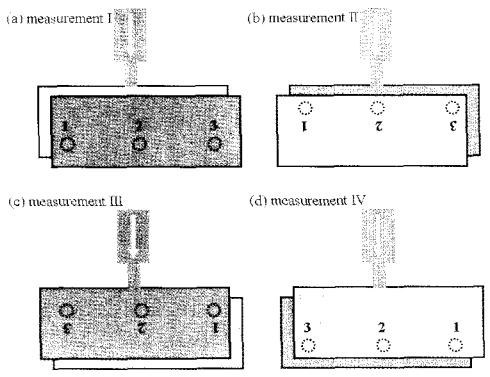

Fig. 4 Layout diagrams of measurements of sample 1

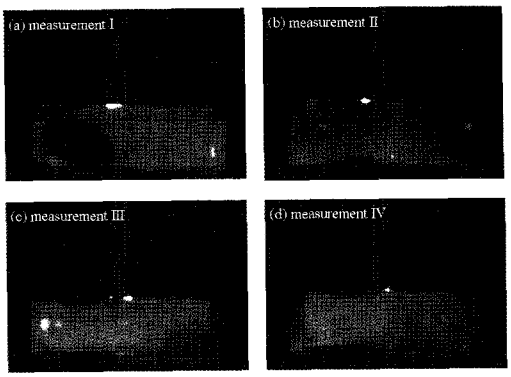

Fig. 5 Thermosonic images of a brazed inconel plate

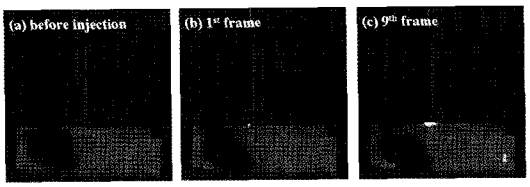

Fig. 6 Thermosonic images of a brazed inconel plate (1st sample)

핫 스폿 특성을 자세히 분석하기 위해서 식 (1) 과 같은 배경 감산 평균처리와 히스토그램 평활화 처리를 하였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타내고 있다. 식 (1)에서 I_b 는 초음파 펄스 인가 전의 배경 영상으로 Fig. 6(a) 영상이다. I_i 는 초음파 펄스 인가 후의 관측 영상이다. n 은 전체 관측 영상 프레임의 개수로 본 실험에서는 30 개를 취하였다. 1st~9th 프레임(~270 ms) 기간은 초음파 진동 펄스가 인가되는 주기이고 10th ~ 30th 프레임은 초음파 펄스 인가에 의해 발생된 열이 인코넬 합금 금속 주변으로 확산되어 소멸되는 시기이다.

$$I_{avg} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(I_i - I_b) \tag{1}$$

Fig. 7의 오른쪽에 브레이징 접합의 결함으로 추정되는 핫 스폿이 선명하게 관측되고 있음을 알 수 있다.

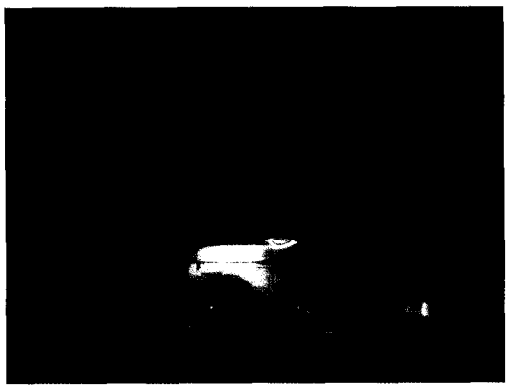

Fig. 7 Thermosonic image after background subtraction average and histogram equalization process

4. 결 론

본 논문에서는 초음파 열 영상 검사기법을 이용한 인코넬 합금 박판의 브레이징 접합 결함 검출에 대해 기술하였다. 2 kW의 전력과 23 kHz 대역의 가진 주파수를 갖는 초음파 펄스를 280 ms 기간 동안 인코넬 합금의 브레이징 접합 박판에 입사시켰다. 브레이징 접합이 느슨한 결함 위치 인근의 인코넬 합금 박판의 양면이 맞닿은 경계선에서 가장 밝은 핫 스폿이 초음파 펄스 인가 후 9~10 번째 프레임(~300 ms) 경과 후에 관측 되었다. 결함이 있는 브레이징 접합 위치에서도 미약한 열이 관측되었다. 배경 감산 평균 및 히스토그램 평활화 기법에 의한 영상 처리를 통하여 미약한 열 영상을 개선하였다. 이를 통해 브레이징 접합의 결함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] R. B. Mignogna, R. E. Green Jr., J. C. Duke Jr., E. G. Henneke II and K. L. Reifsnider, "Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials," Ultrasonics, Vol. 19, pp. 159-163, (1981)

[2] L. D. Favro, R. L. Thomas, X. Han, Z. Ouyang, G. Newaz and D. Gentile, "Sonic infrared imaging of fatigue cracks," Int. Journal of Fatigue, Vol. 23, pp. 5471-5476, (2001)

[3] L. D. Favro, X. Han, Z. Ouyang, G. Sun, H. Sui and R. L. Thomas, "Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse," Rev. Sci. Instrum., Vol. 71, pp. 2418-2421, (2000)

[4] X. Han, L. D. Favro and R. L. Thomas, "Recent developments in sonic IR imaging," Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 22, pp. 500-504, (2003)

[5] T. Zweschper, G. Riegert, A. Dillenz and G. Busse, "Ultrasound burst phase thermography (UBP) for applications in the automotive industry," AIP Conference Proceedings, Vol. 657, pp. 531-536, (2003)

[6] G. Busse, A. Dillenz, and T. Zweschper, "Defect-selective imaging of aerospace structures with elastic-wave-activated thermography," SPIE, Vol. 4360, pp. 580-586, (2001)

[7] J. C. Chen, J. Kephart and W. T. Riddell, "A parametric study of crack propagation during sonic IR inspection," Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 25. pp. 1577-1584, (2006)

[8] X. Han, V. Loggins, Zhi Zeng, L. D. Favro and R. L. Thomas, "Mechanical model for the generation of acoustic chaos in sonic infrared imaging," Appl. Phys. Lett., Vol. 85,

No. 8, pp. 1332-1334, (2004)

[9] X. Han, Z. Zeng, W. Li, S. Islam. J. Lu, V. Loggins, E. Yitamben, L. D. Favro, G. Newaz and R. L. Thomas, "Acoustic chaos for enhanced detectability of cracks by sonic infrared imaging," J. Appl. Phys., Vol. 95, No.7, pp. 3792-3797, (2004)

[10] X. Han, Z. Zeng, W. Li, S. Islam, J. Lu, V. Loggins, L. D. Favro, G. M. Newaz and R. L. Thomas, "Importance of acoustic chaos in sonic IR imaging NDE," Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 23. pp. 496-500, (2004)

[11] X. Han, Md. Sawar Islam, L. D. Favro, G. M. Newaz and R. L. Thomas, "Simulation of sonic IR imaging of cracks in metals with finite element models," Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 25. pp. 544-549, (2006)

[12] M. Morbidini, P. Cawley, T. J. Barden, D. P. Almondi and P. Duffour, "A new approach for the prediction of the thermosonic signal from vibration records," Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 25. pp. 558-565, (2006)