

Defect Detection of Ceramic Heating Plate Using Ultrasound Pulse Thermography

JaiWan Cho,[†] Yong Chil Seo, Seung Ho Jung, Seung Ho Kim, and Hyunkyu Jung

Nuclear Robotics Lab., Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

(Received January 9, 2006; Accepted March 14, 2006)

초음파 펄스 서모그라피를 이용한 세라믹 전열 판의 결함 검출

조재완[†] · 서용철 · 정승호 · 김승호 · 정현규

한국원자력연구소 원자력 로봇 Lab.

(2006년 1월 9일 접수; 2006년 3월 14일 승인)

ABSTRACT

The applicability of UPT (Ultrasound Pulse Thermography) for real-time defect detection of the ceramic heating plate is described. The ceramic heating plate with superior insulation and high radiation is used to control the water temperature in underwater environment. The underwater temperature control system can be damaged owing to the short circuit, which resulted from the defect of the ceramic heating plate. A high power ultrasonic energy with pulse duration of 280 ms was injected into the ceramic heating plate in the vertical direction. The ultrasound excited vibration energy sent into the component propagate inside the sample until they were converted to the heat in the vicinity of the defect. Therefore, an injection of the ultrasound pulse wave which results in heat generation, turns the defect into a local thermal wave transmitter. Its local emission is monitored and recorded via the thermal infrared camera at the surface which is processed by image recording system. Measurements were performed on 4 kinds of samples, composed of 3 intact plates and the defect plate. The observed thermal image revealed two area of crack in the defective ceramic heating plate.

Key words : Ultrasound pulse thermography, Ceramic, Defect detection, Infrared camera

1. 서 론

능동 서모그라피(active thermography)는 원격 비파괴 진단용으로 오래전부터 사용되어 왔다.^{1,2)} 이의 간단한 원리는 검사하고자 하는 시편, 구조물에 인공적인 열을 가한다. 검사 시편의 표면에 입사된 열파(thermal wave)는 구조물에 전파되어 결함이 있는 위치에서 반사된다. 계속되는 열파의 전파 및 반사의 반복되는 과정에서 균열, 박리 등의 결함위치의 열적 특성이 건전 부위와 온도 차이를 이루게 된다. 이러한 온도 차이를 적외선 열 영상 카메라로 관측하여 결함위치를 찾아내는 방식이다. 구조물에 인공적인 열을 가하는 열원으로는 할로겐 램프, 마이크로웨이브, 탄성파 등 다양하게 사용되고 있다. 인공적인 열원으로 초음파를 사용하여 결함부위에 전달되는 열적 특이성을 적외선 열 영상 카메라로 진단하는 방식을 초음파 서모그라피로 정의한다.³⁾ 초음파 여기 탄성파가 구조물에 전달될 때 결함 부위에서만 선택적으로 발열현상이 야기되므로 결함을 신속 정확하게 측정할 수 있다. 초음파 서모그라피를 이용한 비파괴 결함진단은 주로 항

공기, 자동차 등의 복합재료의 결함검출에 사용되고 있다.^{4,5)}

세라믹 전열 판은 우수한 절연성과 방열 특성으로 인해 수중에서 수온을 일정하게 유지하는데 사용되고 있다. 세라믹 전열 판은 일정한 형태로 배열되어 있는 전열선의 양면을 세라믹으로 차폐한 구조이다. 따라서 전열선을 차폐하고 있는 세라믹 판에 균열 등의 결함이 있으면 물이 침투하여 전열선을 단락시켜 공정 전체에 커다란 손상을 줄 수 있다. 세라믹 판의 미세 균열을 확인하기 위해서는 광학 현미경에 의한 육안 검사가 있으나 이는 집중력을 요하고 많은 검사 시간이 소요된다. 또한 검사자의 경험에 의존하므로 정량적인 결함 측정이 어렵다. 이에 비해 초음파 펄스 서모그라피를 이용할 경우 세라믹 전열 판의 결함을 실시간으로 측정할 수 있다. 초음파 여기 진동 에너지가 세라믹 판에 입사되면 균열이 있는 부위에서만 마찰에 의해 열이 발생한다. 균열의 폭이 입사되는 초음파 여기 진동에너지에 의한 마찰을 야기시키지 않을 만큼 클 경우에는 균열의 시작점에서 열이 발생한다. 진동에너지에 의한 마찰이 야기될 정도로 균열의 폭이 작을 경우에는 전체 균열 영역에서 열이 발생한다.⁶⁾

본 논문에서는 세라믹 전열 판의 결함을 검출하기 위해서 초음파 펄스 서모그라피를 이용하였다. 고 에너지 초음파 펄스(2 kW, 20 kHz)를 세라믹 전열 판에 인가하였다. 이에 따른 세라믹 전열 판의 결함 부위에서의 국부적

[†]Corresponding author : JaiWan Cho
E-mail : jwcho@kaeri.re.kr
Tel : +82-42-868-8828 Fax : +82-42-868-2082

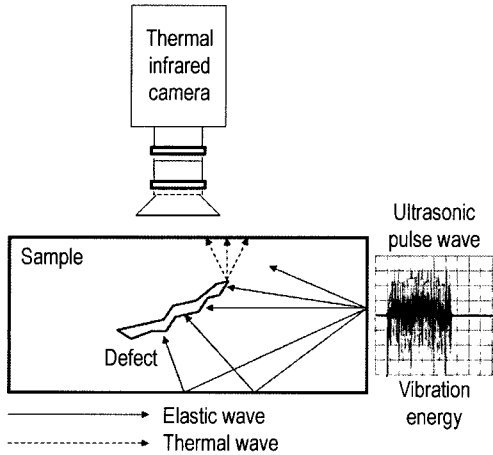


Fig. 1. Principle of ultrasound excited thermography.

인 발열(핫 스팟, hot spot) 현상을 적외선 열 영상 카메라로 관측하였다. 3개의 건전 시편과 1개의 결함 시편에 대해 초음파 펄스 인가에 따른 발열 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1. 초음파 서모그래피의 원리

Fig. 1은 초음파 서모그래피의 원리를 나타내고 있다. 결함이 있는 구조물에 짧은 펄스의 초음파 펄스 에너지를 가하면 균열, 박리(delamination), 공극(void) 부위에서 미세한 움직임이 야기된다. 이러한 움직임은 마찰 또는 히스테리시스에 의한 것으로 볼 수 있으며 이에 의해 결함부위에서만 국부적으로 열이 발생한다. 결함 부위의 국부적인 발열현상을 적외선 열 영상 카메라로 관측하면 전체적으로 어두운 배경에서 밝은(휘도가 높은) 패턴으로 보이게 된다. 따라서 결함만을 선택적으로 관측할 수 있다.⁷⁾ 초음파에 의한 탄성파가 결함 부위에 도달함과 동시에 발열현상이 나타나므로 이를 열 영상 카메라로 관측하면 초음파 에너지를 구조물에 인가한 후 수 ms 이내에 밝은 패턴이 관측된다.

2.2. 초음파 펄스 서모그래피 시스템 구성

Fig. 2에 초음파 펄스 서모그래피를 이용한 결함 검출 시스템을 보이고 있다. 초음파 서모그래피에 사용되는 초음파 여기 주파수는 15~40 kHz 범위에 이르며 일반적으로 20 kHz 대역이 널리 사용된다. 본 논문에서 사용한 초음파 트랜스듀서는 ULSSO HIGHTECH사의 용착기용 진동자 ULW6520B 모델을 사용하였다. ULW6520B 모델은 압전 세라믹 6개가 적층으로 되어 있으며 ±전극이 교대로 연결되어 있고 20 kHz의 진동주파수를 가진다. 고출력 초음파 가진 전원장치에서 20 kHz, 2 kW의 전력을 초음파 트랜스듀서에 공급한다. 초음파 트랜스듀서는 시편에

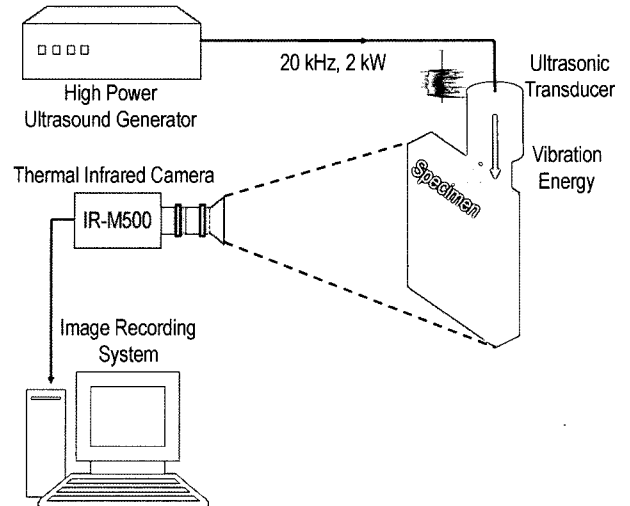


Fig. 2. Experimental configuration of ultrasound pulse thermography.

진동에너지를 전달한다. 시편과 초음파 트랜스 듀서와의 경계면도 입사되는 진동에너지를 마찰에 의해 시편의 결함부위에서의 선택적 발열현상과 함께 열이 발생한다. 이를 미쯔비시사의 IR-M500 적외선 열 영상 카메라로 관측하여 기록 저장한다. IR-M500은 Stirling cooling 방식의 냉각형 열영상 카메라이고 3~5 μm 파장대의 스펙트럼 특성을 갖고 있다. 센서는 쇼트키 배리어 방식의 FPA(Focal Plane Array) PtSi(Platinum Silicide) 소자이며 512×512 크기의 픽셀수를 갖고 있다. 센서 어레이의 실제 크기는 0.52×0.4"이며 한 픽셀의 공간 분해능은 25.8×19.8 μm이다. IR-M500 적외선 열영상 카메라 신호는 NTSC 타입의 아날로그이므로 이를 디지털이정하여 컴퓨터에 동영상으로 기록 저장한다. Image recording system은 NTSC 타입의 아날로그신호를 IMAGING SOURCE사의 Video to 1394 Converter를 통해 640×480 크기의 32 bit RGB 신호로 변환하여 동영상 압축 코덱을 통해 동영상으로 저장을 하고 컴퓨터 모니터에 디스플레이한다. 저장된 동영상은 DirectShow SDK와 OPENCV를 이용하여 처리한다.

2.3. 실험

Fig. 3에 실험 장치를 보이고 있다. 세라믹 시편을 바이스에 고정하여 초음파 트랜스듀서의 가진에 의해 시편이 이탈되는 것을 방지하도록 하였다. 세라믹 전열 판은 알루미늄분말을 사용, 박판화 하여 박판위에 열선을 인쇄한 후 접합하여 1600°C 이상의 고열에서 소결한 다음 리드선을 부착하는 방식으로 제조하였다. 실험에 사용한 세라믹 전열 판은 SUN CERATECH사에 의뢰해 주문제작 한 것으로 크기가 80×47.5×1.3 mm(가로×세로×두께)이고 저항은 16~19 Ω이다.⁸⁾ Fig. 4에 세라믹 전열 판의 구조를 보이고 있다. 시편과 접촉하는 초음파 트랜스듀서의 단면

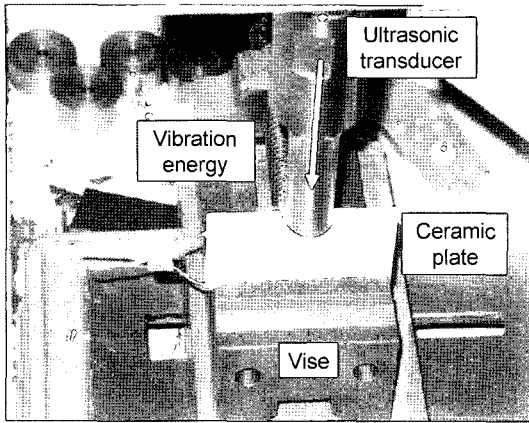


Fig. 3. Photograph of the experimental setup.

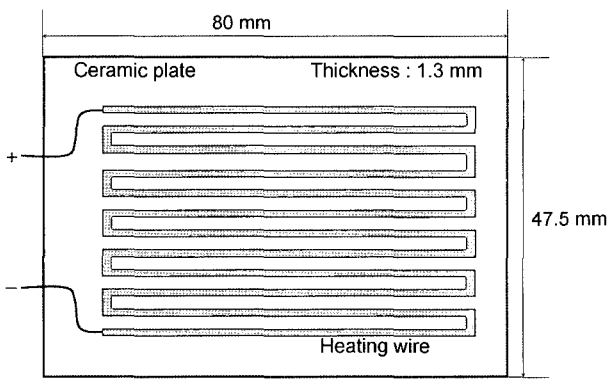


Fig. 4. Layout of the ceramic heating plate.

은 직경이 20 mm이다. 접촉면적에서 보면 초음파 트랜스듀서 단면과 세라믹 시편의 판면을 접촉시키는 것이 효율적이다. 초음파 트랜스듀서의 진동에너지를 세라믹 전열 판면에 입사시킬 경우 판의 두께가 얇기 때문에 파단 될 가능성이 크다. 이는 세라믹 재질의 부서지기 쉬운 특성에 기인한다. 시편의 파단을 방지하기 위해 세라믹 전열 판을 수직으로 세워서 280 ms의 초음파 펄스를 입사시켰다. 미쯔비시 IR-M500 적외선 열 영상 카메라는 세라믹 전열 판의 정면에 위치하고 있다. 초음파 펄스 가진 시의 세라믹 전열 판의 열적 특성을 적외선 열 영상 카메라로 관측하고 이를 디지털화하여 동영상으로 기록, 저장하였다. 한편, 시편과 초음파 트랜스듀서의 결합효율을 높이기 위해 알루미늄 접착테이프를 시편에 부착하였다. 알루미늄 접착 테이프는 초음파 여기 진동에너지를 시편에 효율적으로 전달하는 촉매로 작용한다.

3. 결과 및 고찰

280 ms 펄스폭의 초음파 펄스를 4개의 세라믹 전열 판에 인가한 직후의 세라믹 전열 판의 열적 특성을 적외선

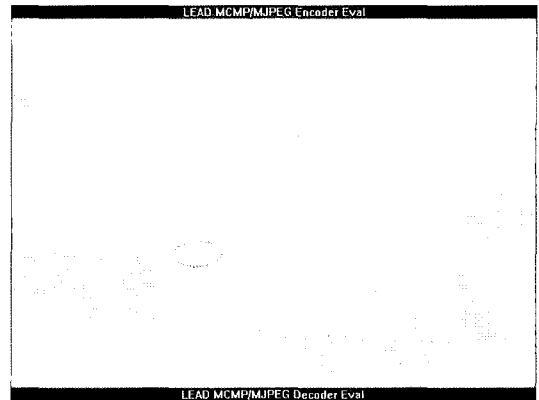


Fig. 5. Thermosonic image frame of an intact ceramic heating plate.

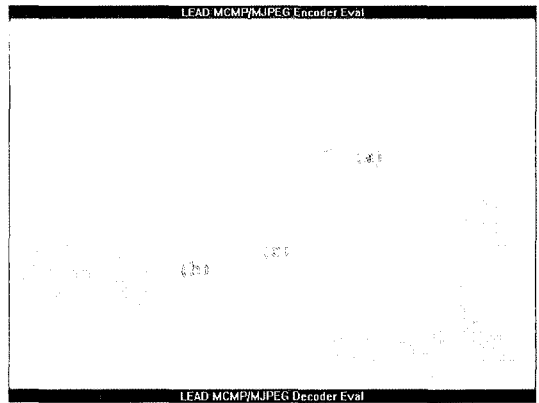


Fig. 6. Thermosonic image frame of a defective ceramic heating plate.

열 열상카메라로 관측한 결과를 Figs. 5, 6에 각각 나타내었다. Fig. 5는 건전시편이고 Fig. 6은 결함 시편이다. Figs. 5, 6에서 중간에 검게 보이는 기둥모양이 초음파 트랜스듀서이다.

Fig. 5 하단에서 타원으로 표시한 부분은 초음파 진동 에너지에 의해 세라믹 시편을 잡아주고 있는 바이스 면과 세라믹 판의 마찰에 의해 발생하는 발열 특성을 나타내고 있다. Fig. 5에 나타낸 것과 같이 건전 시편의 경우에는 열적 특이성이 나타나지 않음을 알 수 있다. Fig. 6(a)에서 실선의 타원으로 표시한 영역 내에서 밝은 라인 성분은 초음파 트랜스듀서 단면과 세라믹 시편과의 접촉면에서의 마찰에 의한 발열 특성을 나타내고 있는 것이다. Fig. 6(b), (c)에 점선의 타원으로 표시한 영역 내의 핫 스팟들은 균열 부근에서의 선택적 발열현상에 의한 마찰열을 보이고 있는 것이다. Fig. 6의 세라믹 전열 판의 경우에는 2군데에 균열이 있음을 알 수 있다. 초음파 펄스가 인가된 후의 결함 세라믹 시편의 발열 특성은 2초 이상 지속되었다. Fig. 7은 프레임 시간대별로 균열 부위에서

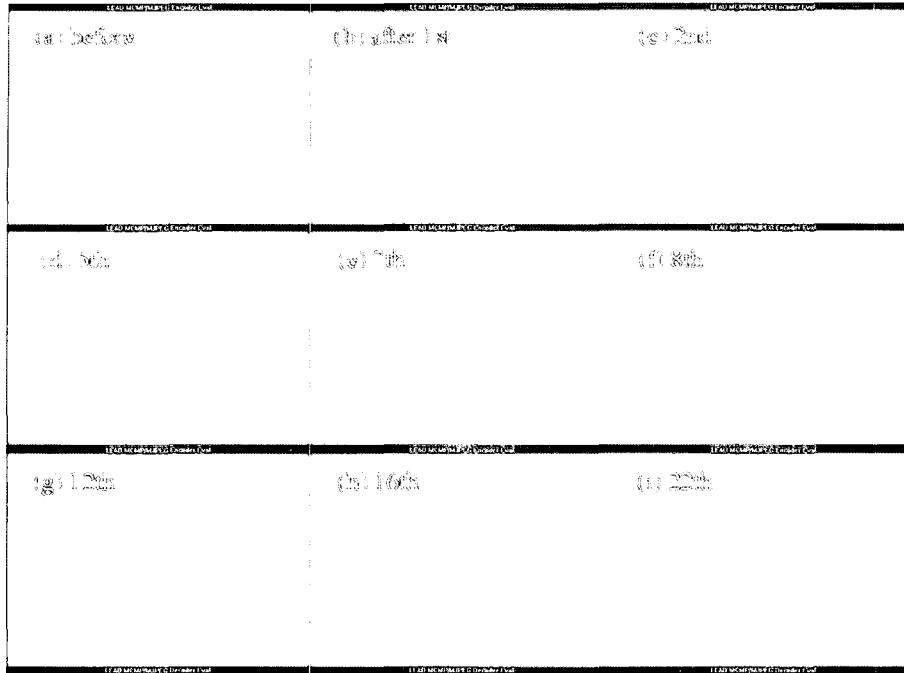


Fig. 7. Thermosonic image frame sequence of a crack in a defective ceramic heating plate.

관측된 발열 특성을 펼쳐 놓은 것이다. Fig. 7(a)는 초음파 펄스 인가전의 상태를 나타내고 있고, Fig. 7(b)는 초음파 펄스 인가 후 첫 번째 프레임에서의 관측영상이다. Fig. 7(b)를 자세히 관찰하면 균열 부위에서의 발열 징후가 3지점에서 미세하게 나타남을 알 수 있다. Fig. 7(c)는 초음파 펄스 인가후의 2번째 관측 영상이며, 균열 부위의 핫 스팟이 2지점에서 선명하게 나타나고 있음을 나타내고 있다. 최초로 균열 부위의 발열 특성이 관측된 시점에서 5~8번째 프레임(150~240 ms)이 경과한 때에 관측 열 영상의 콘트라스트가 가장 우수하였고 22번째 프레임 간

격의 시간이 경과하면서 콘트라스트가 미약해졌다. 16 번째 프레임까지는 균열이 2개로 보이지만 22번째 프레임 이후에는 균열 부위에서 발생한 열이 확산되어 균열이 하나인 것처럼 보이고 있다.

초음파 펄스 인가후의 첫 번째 프레임에서의 관측 영상(Fig. 7(b))과 배경성분인 인가전의 관측 영상(Fig. 7(a))의 차이를 계산하는 차 영상(frame difference) 기법을 이용하여 처리한 결과를 Fig. 8에 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 배경인 초음파 펄스 인가전의 관측영상이고, Fig. 8(b)는 배경인 초음파 펄스 인가후의 첫 번째 프레임에서의

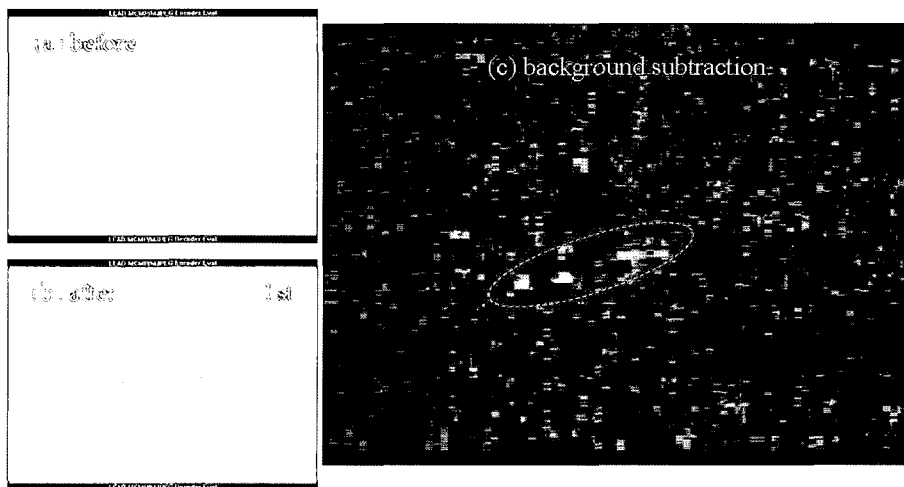


Fig. 8. Thermosonic image frame after background subtraction process.

관측영상이다. Fig. 8(b)의 타원으로 표시한 관측영상에서는 결함 징후가 미약하여 잘 보이지 않지만 식 (1)과 같은 차 영상 신호처리를 통해 3군데에 결함 징후가 나타나고 있음을 Fig. 8(c)로부터 명확히 알 수 있다.

$$|frame_i - background_i| \geq Threshold \quad (1)$$

식(1)에서 $frame_i$ 는 초음파 펄스 인가 후에 관측한 적외선 열 영상이고, $background_i$ 는 초음파 펄스 인가 전의 배경 영상이다. 초음파 펄스 인가 후의 첫 번째 프레임과 배경을 구분하기 위한 기준($threshold$) 값은 8로 주었다. 기준 값이 높을수록 배경과 균열 부근에서의 발열 징후를 명확히 구분할 수 있다. 본 실험 결과로부터 초음파 펄스 서모그라피를 이용하여 세라믹 재질과 같은 비전도성 물질의 결함을 실시간으로 검출할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 세라믹 전열 판의 결함 검출을 위해 초음파 펄스 서모그라피 기법을 적용하였다. 세라믹 전열 판 4개의 시편에 대해 280 ms의 초음파 펄스를 수직으로 각각 입사시켰다. 3개의 건전 시편에서는 어떠한 열적 특이성이 관측되지 않았고, 1개의 결함 시편에서는 2군데의 균열이 실시간으로 관측되었다. 결함 시편의 경우, 초음파 여기 진동 에너지가 전달된 후의 균열 부근에서의 선택적 발열 특성은 80여 프레임(2,400 ms) 이상 동안 관측되었다. 5~12번째 (150~360 ms) 프레임 기간에는 관측 열영상의 콘트라스트가 우수하여 균열의 형태 및 개수를 용

이하게 파악할 수 있었다. 본 실험 결과로부터 초음파 펄스 서모그라피를 이용하여 세라믹 재질과 같은 비전도성 물질의 결함을 실시간으로 검출할 수 있음을 확인하였다.

REFERENCES

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*, **19** 159-63 (1981).
2. M. Zong, J. Zhang, and Y. Zhao, "Pulse-Heating Infrared Thermography Non-Destructive Testing Technique," *Proceedings of SPIE*, **2899** 654-59 (1996).
3. G. Busse, D. Wu, and W. Karpen, "Thermal Wave Imaging with Phase Sensitive Modulated Thermography," *J. Appl. Phys.*, **71** [8] 3962-65 (1992).
4. A. Dillenz, G. Busse, and D. Wu, "Ultrasound Lockin Thermography : Feasibilities and Limitations," *Proceedings of SPIE*, **3827** 10-5 (1999).
5. T. Zweschper, G. Riegart, A. Dillenz, and G. Busse, "Ultrasound Burst Phase Thermography (UBP) for Applications in the Automotive Industry," *AIP Conference Proceedings*, **657** 531-36 (2003).
6. M. Rothenfusser and C. Homma, "Acoustic Thermography : Vibrational Modes of Cracks and the Mechanism of Heat Generation," *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, **24** 624-31 (2005).
7. G. Busse, A. Dillenz, and T. Zweschper, "Defect-Selective Imaging of Aerospace Structures with Elasticwave Activated Thermography," *Proceedings of SPIE*, **4360** 580-86 (2001).
8. <http://www.sunceratech.com/>