

초음파 서모그라피를 이용한 실시간 결함 검출에 대한 연구

A Study on Real-Time Defect Detection Using Ultrasound Excited Thermography

조제완*[†], 서용칠*, 정승호*, 정현규*, 김승호*

Jai Wan Cho*[†], Yong Chil Seo*, Seung Ho Jung*, Hyun Kyu Jung* and Seungho Kim*

초 록 초음파 서모그라피는 초음파 진동 에너지 여기에 의한 물체의 표면 및 표면 아래에 존재하는 결함부위의 선택적 발열 특성을 적외선 열영상 카메라로 관측하는 것이다. 결함(균열, 박리, 공극 등) 이 존재하는 구조물에 초음파 진동 에너지를 입사시킬 경우 결함 부근에서의 국부적인 발열로 인해 건전 부위와의 급격한 온도차를 드러내는 핫 스팟이 관측된다. 초음파 진동 에너지 여기에 의한 핫 스팟 관측 및 분석을 통해 결함을 진단하는 것이 초음파 서모그라피를 이용한 비파괴 결함 진단 방법이다. 이를 이용한 결함 검출을 위해서는 초음파의 진동에너지를 검사 구조물에 효율적으로 전달하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 초음파 서모그라피를 이용한 실시간 결함 검출에 대해 기술한다. 초음파 진동에너지의 입사 방향에 따른 결함 검출 특성을 평가하기 위해 진동에너지의 전달 방향을 시편과 수직 또는 수평방향으로 각각 입사시켰다. 각각의 입사 방향에 따른 초음파 트랜스듀서 양단에 인가되는 전압을 디지털 오실로스코프로 계측 비교하였다. 결함 검출에 사용한 시편은 14 mm 두께의 SUS 균열 (crack) 시편, PCB 기판(1.8 mm), 인코넬 600 판(1.0 mm) 및 CFRP 판(3.0 mm)의 4종류이다. 4종류의 시편에 대해 280 ms 펄스폭의 초음파에너지를 수직 수평으로 각각 입사시켰다. 4종류 모두 수직방향으로 초음파 진동에너지를 입사시켰을 때 수평방향에 비해 전달 손실이 적었다. 복합재료인 PCB, CFRP 판은 수직방향으로 초음파 진동에너지를 입사시켰을 때 수평방향에 비해 결함 위치에서 열이 크게 발생하였으며 선택적 발열 현상도 3배 이상 지속되었다. 금속재료인 인코넬 600판과 SUS 시편은 수평방향이 수직방향보다 핫 스팟이 빨리 관측되었다.

주요용어: 초음파, 서모그라피, 균열, 결함 검출, 적외선 열영상, 비파괴 진단

Abstract The UET(ultrasound excited thermography) for the real-time diagnostics of the object employs an infrared camera to image defects of the surface and subsurface which are locally heated using high-frequency pulsed ultrasonic excitation. The dissipation of high-power ultrasonic energy around the faces of the defects causes an increase in temperature. The defect's image appears as a hot spot (bright IR source) within a dark background field. The UET for nondestructive diagnostic and evaluation is based on the image analysis of the hot spot as a local response to ultrasonic excited heat deposition. In this paper the applicability of UET for fast imaging of defect is described. The ultrasonic energy is injected into the sample through a transducer in the vertical and horizontal directions respectively. The voltage applied to the transducer is measured by digital oscilloscope, and the waveform are compared. Measurements were performed on four kinds of materials: SUS fatigue crack specimen(thickness 14 mm), PCB plate(1.8 mm), CFRP plate(3 mm) and Inconel 600 plate (1 mm). A high power ultrasonic energy with pulse durations of 280 ms is injected into the samples in the horizontal and vertical directions respectively. The obtained experimental result reveals that the dissipation loss of the ultrasonic energy in the vertical injection is less than that in the horizontal direction. In the case of PCB, CFRP, the size of hot spot in the vertical injection is larger than that in horizontal direction. Duration time of the hot spot in the vertical direction is three times as long as that in the horizontal direction. In the case of Inconel 600 plate and SUS sample, the hot spot in the horizontal injection was detected faster than that in the vertical direction

Keywords: Ultrasound, Thermography, Crack, Defect Detection, Thermal Infrared Image, Nondestructive Test

1. 서론

능동 서모그래피(active thermography)는 원격 비파괴 진단용도로 오래전부터 사용되어 왔다[1,2]. 이의 간단한 원리는 검사하고자 하는 시편, 구조물에 인공적인 열을 가함으로써 표면에 입사된 열파(thermal wave)는 구조물에 전파되어 결함이 있는 위치에서 반사되고 계속되는 열파의 전파 및 반사의 반복되는 과정에서 균열, 박리 등의 결함위치의 열적 특성이 건전 부위와 온도 차이를 적외선 열영상 카메라로 관측하여 결함위치를 찾아내는 방식이다. 구조물에 인공적인 열을 가하는 열원으로는 할로겐 램프, 마이크로 웨이브, 와전류, 초음파 등 다양하게 사용되고 있다[3-6]. 특히, 인공적인 열원으로 초음파를 사용하여 결함부위로부터의 열적 특이성을 적외선 열영상 카메라로 진단하는 방식을 초음파 서모그래피로 정의한다[7]. 초음파 여기 탄성파가 구조물에 전달될 때 결함 부위에서만 선택적으로 발열현상이 야기되므로 결함을 신속 정확하게 측정할 수 있다. 초음파 서모그래피를 이용한 비파괴 측정기술은 주로 항공기, 자동차 등의 복합재료 등의 결함검출에 주로 사용되고 있다[8,9].

본 논문에서는 초음파 서모그래피를 이용한 결함 검출에 대해 기술한다. 초음파 진동 에너지의 전달 방향을 시편과 수직 또는 수평방향으로 입사시켰을 때 초음파 트랜스듀서 양단에 인가되는 전압을 디지털 오실로스코프로 측정 비교 분석하였다. 재료에 따른 초음파 서모그래피 특성을 고찰하고자 14 mm 두께의 SUS 균열(crack) 시편, PCB 기판(1.8 mm), 인코넬 600판(1.0 mm) 및 CFRP판(3.0 mm)의 4종류 시편을 사용하였다. 4종류의 시편에 대해 280 ms 펄스폭의 초음파에너지를 수직 또는 수평으로 각각 입사시켰다. 이때의 결함 검출 특성을 비교 분석하였다.

2. 초음파 서모그래피 시스템

2.1. 초음파 서모그래피의 원리

Fig. 1은 초음파 서모그래피의 원리를 나타내고 있다. 결함이 있는 구조물에 짧은 펄스의 초음파 에너지를 가하면 균열, 박리(delamination) 등의 결함 부위에서 미세한 움직임이 야기된다. 이러한 움직임은 마찰 또는 히스테리시스에 의한 것으로 볼 수

있으며 이에 의해 결함부위에서만 국부적으로 열이 발생한다. 결함 부위의 선택적인 발열현상을 적외선 열 영상 카메라로 관측하면 전체적으로 어두운 배경에서 밝은(휘도가 높은) 패턴으로 보이게 된다.

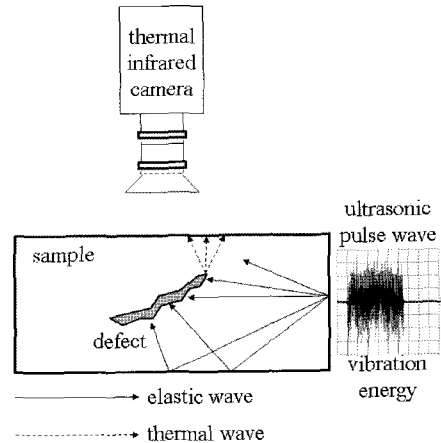


Fig. 1 Principle of ultrasound thermography

따라서 결함만을 선택적으로 관측할 수 있다[10]. 초음파 입사에 의한 탄성파가 결함 부위에 도달함과 동시에 발열현상이 나타나므로 이를 열 영상 카메라로 관측하면 초음파 에너지를 구조물에 인가한 후 수 ms 이내에 밝은 패턴이 관측된다. 30 Hz 주사율(frame rate)를 갖는 열 영상 카메라로 결함의 국부적인 발열패턴을 검출할 경우 프레임 사이의 간격인 33 ms 이내에 결함을 관측하기 위해서는 결함에 인가되는 초음파 에너지 펄스폭이 33 ms 이상이어야 함을 의미한다.

2.2. 초음파 서모그래피 시스템 구성

Fig. 2에 초음파 서모그래피 시스템 구성도를 보이고 있다. 초음파 서모그래피에 사용되는 초음파 여기 주파수는 15 kHz ~ 40 kHz 범위에 이르며 일반적으로 20 kHz 대역이 널리 사용된다. 본 논문에서 사용한 초음파 트랜스듀서는 플라스틱 용접 등에 사용하는 초음파 용접기용 트랜스듀서이다. 저용접을 갖는 폴리스티렌과 같은 비정질 플라스틱의 용접에 사용되는 초음파 트랜스듀서는 변환기(converter), 증폭기(booster), 공구(tool)의 세 부분으로 구성되어 있다. 이를 Fig. 3에 나타내었다. 변환기는 전기적인 신호로 가해지는 고주파 발진신호를

고주파의 기계적인 진동으로 변환한다. 전기적인 발진신호를 기계적인 진동으로 변환하는 소자는 압전(piezoelectric)이나 전기팽창(electro-strictive) 원리를 이용한다. 본 논문에서는 변환기로 용착기용 진동자 ULW6520B 모델을 사용하였다. ULW6520B 모델은 압전 세라믹 6개가 적층으로 되어 있으며 ± 전극이 교대로 연결되어 있고 20 kHz의 진동주파수를 가진다. 고출력 고주파 발생 전원장치에서 20 kHz, 2 kW의 전력을 압전소자에 공급한다. 압전소자의 전극에 인가된 고전압에 의해 압전소자의 길이가 변화한다. 전극에 인가되는 고전압을 고주파수로 발진시키면 발진 주파수에 대응하여 압전소자의 길이가 변화하므로 기계적인 진동이 여기된다. 증폭기는 변환기의 기계적인 진동을 증폭한다. 증폭비율 (booster ratio)은 Fig. 3에 나타낸바와 입력(변환기)와 출력(공구) 측에 연결되는 증폭기 기기의 직경비로 결정된다. 본 연구에 사용된 증폭기의 입력단의 직경 D_1 은 52 mm 이고 출력단의 직경 D_2 는 37 mm 이므로 증폭비는 1.4이다. 공구는 증폭기의 출력 단에 부착된다. 초음파 진동에너지가 시편에 전달한다. 초음파 진동에너지의 여기에 따른 결합부위에서의 선택적 발열현상을 미쯔비시사의 IR-M500 적외선 열영상 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 μm 이다. IR-M500 적외선 열영상 카메라 신호는 NTSC 타입의 아날로그이므로 이를 디지털화하여 컴퓨터에 동영상으로 기록 저장한다. Table. 1에 IR-M500 열영상 카메라의 제원을 나타내고 있다. 영상 기록 장치 (image recording system)은 NTSC 타입의 아날로그신호를 Video-to-1394 converter를 통해 640×480 크기의 32bit RGB 신호로 변환하여 동영상 압축 코덱을 통해 동영상으로 저장을 하고 컴퓨터 모니터에 디스플레이한다. 저장된 동영상은 DirectShow SDK와 OPENCV를 이용하여 처리하였다.

Fig. 4에 초음파 발생 전원장치의 고전압 출력과 초음파 트랜스듀서 양단에 인가되는 입력 특성을 Tektronix 100X 고전압 프로브로 측정한 파형을 보이고 있다. Fig. 4(b)는 무부하 상태에서 초음파 트

랜스듀서에 인가되는 전압 파형이고, 4(c)는 부하가 걸린 상태에서의 초음파 트랜스듀서 양단의 전압을 보이고 있다. 여기서 부하라 함은 초음파 트랜스듀서와 시편간의 진동에너지의 결합효율을 높이고 또한, 진동에 의해 시편이 미끄러져 이탈하는 것을 방지하기 위해 일정한 힘 또는 응력이 가해진 상태로 정의한다. Fig. 4로부터 파형의 첨두치 전압을 비교하면 무부하시에는 70%, 부하 시에는 50%의 에너지가 전달됨을 대략적으로 알 수 있다. Fig. 4의 (a)와 (c)를 비교하면 부하가 걸렸을때의 트랜스듀서의 전압파형의 펄스폭(duration)이 전원장치 출력전압파형의 펄스폭과 일치함을 알 수 있다. 이는 초음파 진동 에너지를 효율적으로 시편에 전달하기 위해서는 초음파 트랜스듀서와 시편 사이에 일정한 압력이 걸려 있어야 함을 뜻한다. 트랜스듀서와 시편 사이에 인가되는 힘이 과도하면 세라믹과 같은 부서지기 쉬운 물질의 경우 파단의 위험성이 있다.

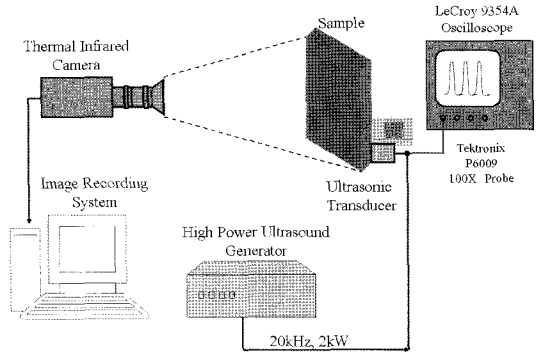


Fig. 2 Configurations of ultrasound thermography system

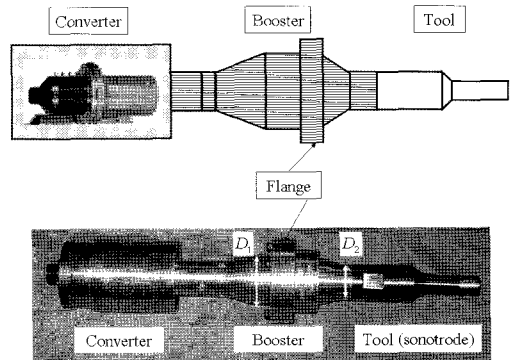


Fig. 3 Configurations of an ultrasound transducer

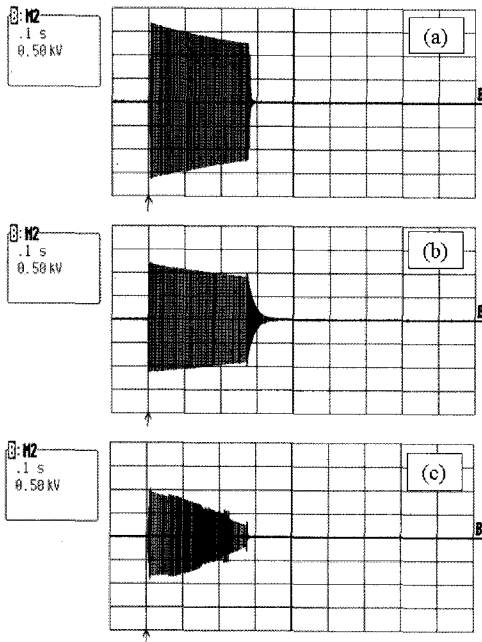


Fig. 4 Waveforms of the 20 kHz ultrasound generator and ultrasonic transducer

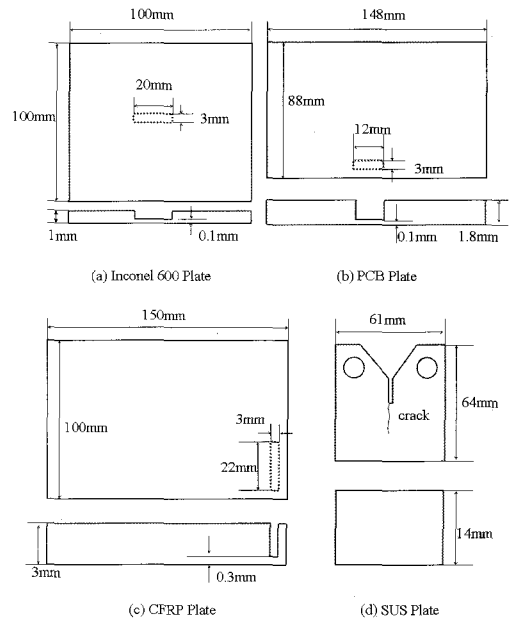


Fig. 5 Defect pattern of the specimens

Table 1 Specifications of IR-M500 infrared camera

Items	Specifications
Detector	Platinum Silicide Schottky-Barrier IRCSD
Number of elements	512 × 512 pixels
Spectral wavelength	3~5 μm
Lens	50 mm/F# 1.2
NETD	0.15°C at 300°K
Field of view	14×11° [HXV]
Field time	60 Hz
Video output	RS-170A, NTSC TV (525 lines)
Sensor size	0.52 × 0.4"

3. 실험 및 결과

초음파 트랜스듀서와 시편간의 기하학적 배치에 따른 결함 검출 특성을 비교하기 위해 원자력 재료인 인코넬 600판, 항공기 복합재료인 CFRP판, 전자 부품인 PCB 기판과 SUS 시표면에 인위적인 결함을 만들었으며, 4종류에 대해 Fig. 6과 같이 2가지 수직/수평 방향으로 측정을 하였다. Fig. 5, 6에 실험에 사용한 시편의 결함크기 및 실험 방법을 보이고 있다. 초음파 트랜스듀서의 직경이 20 mm 이므로

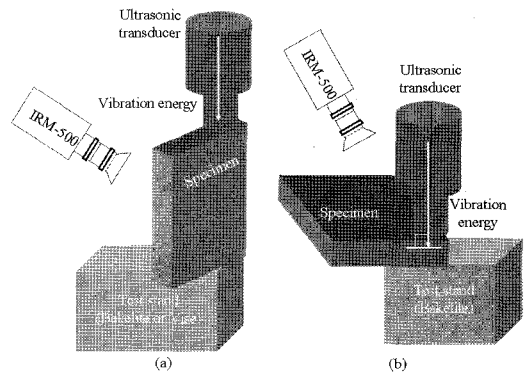


Fig. 6 Experimental setup for ultrasound excited thermography(UET)

로 Fig. 6(a)와 같이 시편의 면과 초음파 트랜스듀서의 진동방향이 일치할때에 즉, 시편을 수직으로 측정할 경우에는 트랜스듀서의 단면과 시편의 두께면과 접촉하므로 진동에너지에 의해 시편의 미끄러짐 현상이 심하다. 얇은 두께를 갖는 CFRP(3 mm), PCB(1.8 mm), Inconel 600(1 mm) 판은 바이스에 물려 고정하여 미끄러짐이 일어나지 않도록 하였다. 14 mm 두께의 SUS 균열 시편의 경우는 트랜스듀서 단면과 공유하는 면적이 크므로 미끄러짐 현상이 적어 접촉효율이 양호하였다. Fig. 6(b)와 같이 진동방향과 시편의 평면이 수직으로 교차하는 경우는 초음파 트랜스듀서의 단면과 시편과의 접촉면이

넓으므로 접촉 문제가 발생하지 않았다. Fig. 7에 실험 장치의 사진을 나타내었다. 시편과 초음파 트랜스듀서 진동에너지의 결합효율을 높이기 위해 알루미늄 접착 테이프를 시편에 부착하였다.

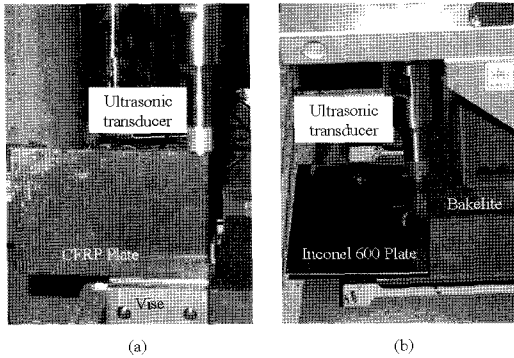


Fig. 7 Experimental setup photographs for UET

Fig. 7(b)는 적외선 열영상 카메라의 관측성을 개선하기 위하여 금속재질인 Inconel 600의 표면 방사율을 균일하게 하기 위하여 검은색 잉크를 도포하였다. 이는 키르히호프의 법칙에 의하면 방사율과 반사율의 합이 1이다. Inconel 600과 SUS 시편 표면은 매끄럽게 연마된 상태이므로 방사율이 낮다. 표면 연마가 잘된 금속의 방사율은 일반적으로 0.1 이하이므로 키르히호프 법칙에 의해 반사율이 0.9가 된다. 따라서 실내의 환경온도(300°K)의 90%에 해당하는 24.57°C의 온도 성분이 Inconel 600과 SUS 시편 표면에 반사되어 적외선 열 영상 관측 화면에 밝은 패턴으로 표시된다. 이는 시편의 결합위치로부터 표면 방출되는 온도가 IR-M500 열 영상 카메라의 NETD(noise equivalent temperature difference) 0.15°C를 고려하면 24.72°C 보다 높을 경우에 결함이 검출될 수 있다는 의미로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 방사율이 0.96~0.98인 검은색 래커를 표면 연마 상태가 좋은 SUS 균열 시편과 인코넬 600 판에 분사 도포하였다. 시편의 표면 아래에 감추어져 있는 결함부위에서 표면 방출되는 열을 IR-M500 카메라로 관측하여 모니터에 디스플레이하고, 동시에 아날로그 타입의 NTSC 칼라 영상신호를 디지털화하여 640×480 크기의 32bit RGB 신호로 변환하여 실시간 동영상 압축 코덱을 이용하여 동영상으로 저장하고 컴퓨터 모니터에 디스플레이 하였다. 저장된 동영상을 프레임 단위의 정지영상으로 수집하여 영상처리를 수행하였다.

Fig. 8은 Inconel 600 판에 대한 결함 검출 영상을 보이고 있다. Fig. 8(a)(c)는 인코넬 600 판을 수직으로 세워서 계속하였을 경우의 초음파 트랜스듀서 양단에 걸리는 전압파형과 결함 관측 영상을 보이고 있다. Fig. 8(b)(d)는 수평으로 눕혀서 초음파 진동 에너지를 입사시켰을 경우의 트랜스듀서 양단에 걸리는 전압과 관측 영상을 보이고 있다. Fig. 8(c)(d)의 우측상단에 밝은 패턴은 트랜스듀서와 시편의 경계면에서 트랜스듀서의 초음파 진동에너지 전달에 의한 마찰에 의한 발열현상을 보이고 있는 것이다. Fig. 8(c)(d)의 좌측 하단의 밝은 패턴은 초음파에너지에 의해 결함 부위에서 선택적 발열 현상을 나타내고 있다. Fig. 8(a)(b)의 좌우측 그림을 비교해보면 수직으로 세웠을 경우에 초음파의 에너지가 훨씬 더 많이 전달되고 있음을 알 수 있으며, Fig. 8(c)(d)를 비교하면 Fig. 8(c)가 Fig. 4의 인코넬 600판의 결함패턴과 비슷한 형태를 지니고 있음을 알 수 있다.

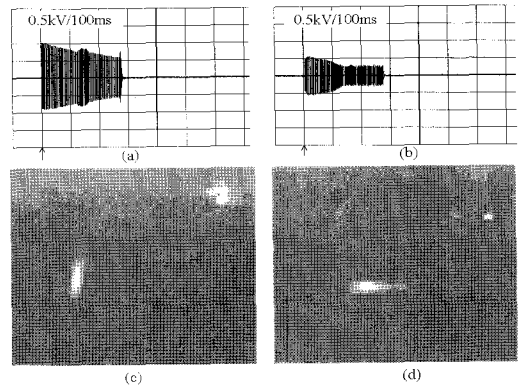


Fig. 8 Waveforms and thermosonic images of a defect in an Inconel 600 plate (1.0 mm thickness)

Fig. 9는 인코넬 600판에 수직 및 수평방향으로 초음파 에너지를 입사시켰을때의 결함 위치에서의 발열과정을 프레임 단위로 펼쳐 놓은 것이다. Fig. 9의 상단 9(a)는 Fig. 6(b)처럼 수평방향으로 초음파와 진동에너지를 여기시켰을때이고 하단 9(b)는 Fig. 6(a)와 같이 수직 방향으로 진동 에너지를 입사시켰을 때의 발열 형태를 보이고 있다. Fig. 9로부터 수평방향에 비해 수직방향이 인코넬 600판에 생성된 결함의 패턴을 보다 잘 드러내고 있음을 알 수 있다.

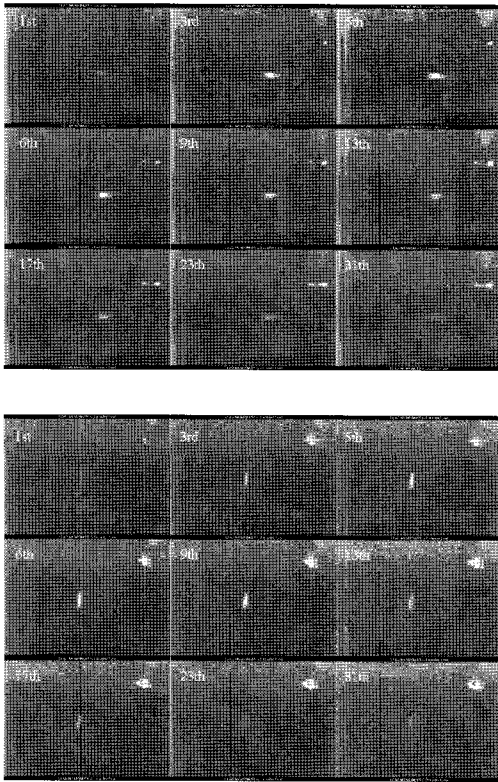


Fig. 9 Thermosonic image frame sequences of a defect in an Inconel 600 plate (1.0 mm thickness)

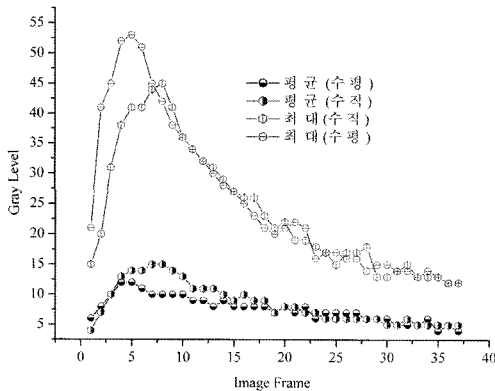


Fig. 10 Temperature characteristics of hot spot in the image frames of a defect in a Inconel 600 plate(1 mm thickness)

초음파 진동 에너지를 입사시켰을 때 결함위치에서 발열이 발생한 순간부터 발열이 종료될때까지의 이미지 프레임들을 각각 영상 처리하여 핫 스팟(발열 영역)을 추출해내고 핫 스팟 영역 내의 최대 온도, 평균 온도를 구하였다. 이를 Fig. 10에 나타내고

있다. Fig. 10에서 가로 축은 이미지 프레임을 나타내고 프레임 간격이 30 ms이므로 수평입사의 경우 150 ms, 수직입사의 경우 210 ms의 시간이 경과한 후에 결합지점의 발열 온도가 가장 높다는 의미이다. Y축은 그레이 레벨이며 그레이 레벨이 높을 수록 온도가 높다는 것을 나타낸다. Fig. 10의 상단의 두 그래프는 최대값을 나타내고 하단의 두 그래프는 평균값을 나타낸다. X축은 이미지 프레임을 나타내고 프레임 간격은 대략 30 ms이다. Y축은 관측 영상의 밝기(휘도) 성분을 나타내고 그레이 레벨로 표시한다. 그레이 레벨값이 높을 수록 온도가 높음을 의미한다. Fig. 10으로부터 인코넬 600판의 경우 수평방향 입사가 수직 방향에 비해 핫스팟의 최대 온도가 높지만 열 확산이 빨리 되어 빨리 식어버림을 알 수 있다. 이에 비해 수직 입사의 경우 결합 부위의 발열 온도를 수평보다 오래 지속되고 있음을 보이고 있다.

Fig. 11 하단에는 PCB기판의 결합 검출영상을 보이고 있다. Fig. 8, 9와 마찬가지로 초음파 에너지를 수직, 수평으로 입사시킨 후 결합에서의 발열 특성이 가장 크게 나타나는 5번째 관측 프레임을 나타내고 있다. Fig. 12는 PCB 결합의 핫 스팟 특성을 나타내고 있다.

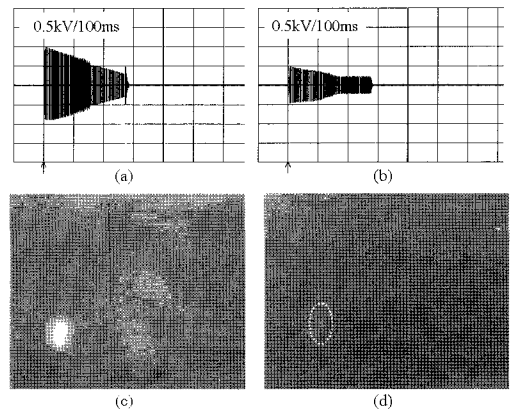


Fig. 11 Waveforms and thermosonic images of a defect in a PCB plate(1.8 mm thickness)

Fig. 11(a)(c) 에서도 초음파 트랜스 듀서의 진동 방향과 같은 축으로 PCB 기판을 세웠을 경우에는 진동에너지의 전달이 잘되며 결합의 패턴도 선명하다. Fig. 11(b)(d)에 나타난 것처럼 PCB 기판을 수평으로 눕혔을 경우에는 초음파 트랜스듀서의 진동 에너지 진폭이 세웠을 경우에 비해 약 50% 정도

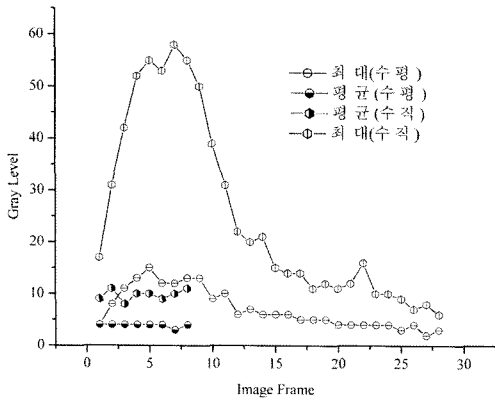


Fig. 12 Temperature characteristics of hot spot in the image frames of a crack in a PCB plate (1.8 mm thickness)

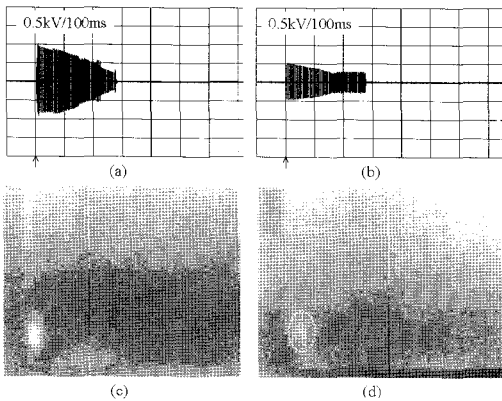


Fig. 13 Waveforms and thermosonic images of a defect in a CFRP plate (3 mm thickness)

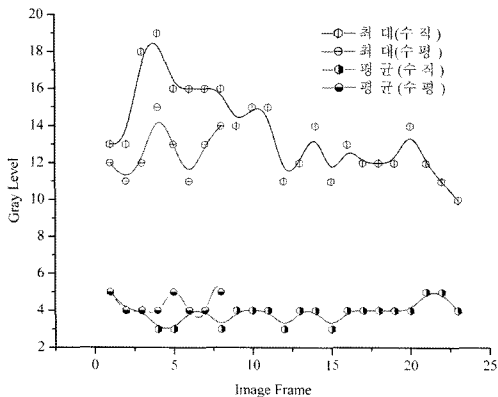


Fig. 14 Temperature characteristics of hot spot in the image frames of a defect in a CFRP (3 mm thickness)

약하며 결함의 징후도 뚜렷하지 않다. 수평으로 넓혀서 초음파 진동 에너지를 입사시킬 경우 두께 1 mm의 인코넬 600판에 비해 1.8 mm 두께의 PCB 기판의 결함 특성이 아주 미약함을 나타내고 있다. Fig. 11(d)를 보면 수평방향으로 초음파 에너지를 입사시켰을때 결함 부위의 발열현상이 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. PCB와 같은 복합재료의 결함 검출을 위해서는 수직방향으로 초음파 진동 에너지를 입사시켜야 함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 두께 3 mm의 CFRP 판에 대해서도 동일하였다. 이를 Fig. 13, 14에 나타내었다. Fig. 5(c)에 나타낸 바와 같이 CFRP판은 표면으로부터 0.3 mm 깊이에 결함이 위치하고 있다. CFRP판의 결함 위치에서 가장 멀리 떨어진 지점에 초음파 진동 에너지를 입사하였다. 수직 입사의 경우에는 미약하게나마 결함패턴을 수집할 수 있었다. 수평 입사의 경우에는 관측 모니터에서 육안으로 관측이 되었으나 영상 파일로 수집할 수 없었다. 이는 아날로그 신호를 디지털화 하는 과정의 양자화 에러로 인해 미세한 신호가 사라진 것으로 추정된다. PCB기판 표면 바로 아래 결함의 발열처럼 높은 온도를 나타내고 있지 않지만 수직입사의 경우에는 발열 현상이 수평입사에 비해 오래 지속되고 있음을 알 수 있다. 이는 초음파 진동자와 시편이 수평으로 접촉하는 경우에는 진동에너지 자체가 접촉면에 빨리 흡수되어 시편에 전달되는 것이 적은 것으로 추정된다. 이러한 현상은 금속재료인 인코넬 600판이나 SUS 재질보다는 복합재료에 더욱더 두드러지는 것으로 보인다. Fig. 15는 14 mm 두께의 SUS 시편에 대한 균열 검출 영상을 보이고 있다. 그림 상단의 파형에서 보듯이 수직, 수평에 대한 초음파 진동에너지의 입사 특성이 큰 차이가 없음을 나타내고 있다. 수직 입사의 경우 기울기가 완만한데 비해 수평 입사의 경우에는 기울기가 가파르게 감소함을 보이고 있다. Fig. 15 하단의 관측 영상에서도 균열 영상의 선명도도 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 초음파 진동 에너지가 재료에 입사되면 균열의 시작점에서 마찰에 의한 발열이 일어난다고 알려져 있다[11]. Fig. 15 하단의 좌우 영상의 중앙에 위치한 밝은 점이 SUS 재질의 균열이 시작되는 지점으로 추정할 수 있다. Fig. 16은 Fig. 15의 수직, 수평 입사에 대한 균열이 시작되는 지점에서의 발열 특성을 그래프로 나타낸 것이다. SUS 균열 시편의 두께가 14 mm로 초음파 트랜스듀서의 단면과 시편과의 접

측면은 큰 차이가 없다. 수평 입사보다는 수직 입사의 경우가 초음파 진동에너지에 대한 결합에서의 발열 특성이 높음을 나타내고 있다. 최대 온도에 도달하는 시간은 수평입사가 빠르지만 발열 지속 시간은 수직입사가 더 길게 유지되고 있음을 보이고 있다.

Fig. 17은 정 중앙 사진과 같이 수직으로 초음파 진동 에너지를 입사 시켰을 때 균열이 시작되는 지점에서의 발열 특성을 프레임(~30 ms) 단위로 획득한 화면을 보이고 있다. 초음파 진동에너지가 SUS 균열 시편에 전달되고 난후 5, 6번째 프레임에서 발열특성의 세기가 가장 크고 발열 포인트의 둘레도 가장 작음을 알 수 있다. 이는 5, 6번째 프레임에서 결합부위와 건전부위와의 온도차이가 가장 큼을 의미한다. 9번째 프레임 이후에는 균열 지점의 높은 온도(핫 스팟)가 인근 부위로 확산 전도되면서 열을 발산하는 것으로 추정된다.

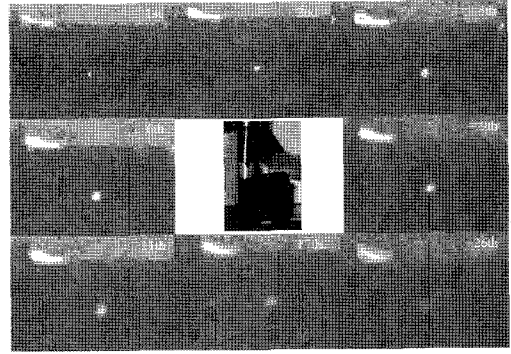


Fig. 17 Thermosonic image frame sequence of a crack in a SUS sample(14 mm thickness)

4. 결 론

본 논문에서는 초음파 서모그래피를 이용한 결합 검출에 대해 기술하였다. 280 ms 펄스폭의 초음파 진동 에너지를 검사시편과 수직 및 수평방향으로 입사시켰을때 초음파 트랜스듀서 양단에 인가되는 전압파형을 디지털 오실로스코프로 계측하였다. 실험에 사용된 검사 시편은 14T 두께의 SUS 재질의 피로 파괴 균열시편, PCB 기판(1.8 mm), 인코넬 600판(1.0 mm) 및 CFRP 판(3 mm)의 4 종류이다. 전압 파형을 분석한 결과 4 종류 시편 모두 수직 방향으로 초음파진동 에너지를 입사시켰을때 수평 방향에 비해 결합 손실이 적었다. 또한, 관측 열영상에서도 결합 부위의 선택적 발열 형태로 나타나는 핫 스팟의 형태가 수평 방향에 비해 보다 선명하였다. 복합재료인 PCB, CFRP판은 수직방향으로 초음파 진동에너지를 입사시켰을 때 수평방향에 비해 결합 위치에서 열이 크게 발생하였으며 선택적 발열 현상도 3배 이상 지속되었다. 본 실험 결과로부터 CFRP 판과 같은 두께가 얇은 구조물 검사에 초음파 트랜스듀서와 검사 시편을 정렬할 경우에 보다 효율적인 비파괴 진단 평가를 할 수 있음을 확인하였다.

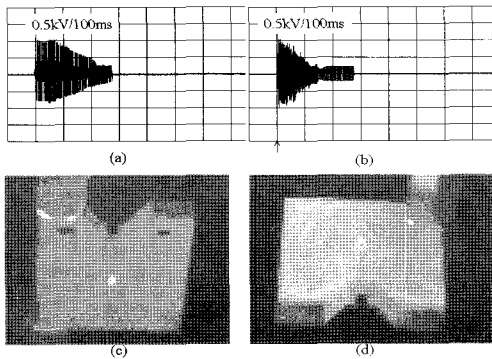


Fig. 15 Waveforms and thermosonic images of a crack in a SUS sample(14 mm thickness)

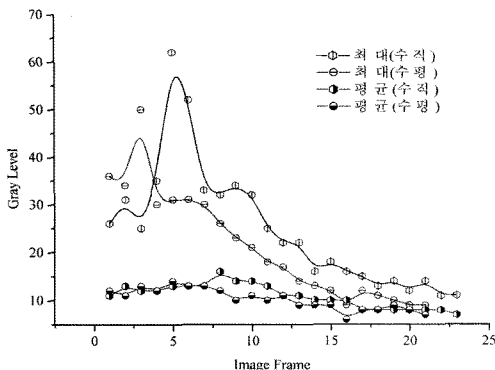


Fig. 16 Temperature characteristics of hot spot in the image frames of a defect in a SUS sample(14 mm thickness)

참고문헌

[1] R. B. Mignogna, et al, "Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials," Ultrasonics, Vol. 19, pp. 159-163, (1981)

- [2] Mingcheng Zong, Jianxin Zhang and Yan Zhao, "Pulse-heating infrared thermography non-destructive testing technique," SPIE, Vol. 2899, pp. 654-659, (1996)
- [3] Takahide Sakagami and Shiro Kubo "Development of a new non-destructive testing technique for quantitative evaluations of delaminations defects in concrete structures based on phase delay measurements using lock-in thermography," Infrared Physics and Technology Vol. 43, pp. 311-316, (2002)
- [4] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," J. Appl. Phys. Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965(1992)
- [5] M. Rafet, et al, "Assessment of testicular core temperatures using microwave thermography," Human Reproduction, Vol. 15, No. 8, pp. 1723-1726, (2000)
- [6] G. Riegart, Th. Zweschper and G. Busse, "Eddy-current lock-in thermography: method and its potential," J. Phys. IV France, Vol. 125, pp. 587-591, (2005)
- [7] A. Dillenz, G. Busse and D. Wu, "Ultrasound lockin thermography: feasibilities and limitations," SPIE Vol. 3827, pp. 10-15, (1999)
- [8] T. Zweschper, et al, "Ultrasound burst phase thermography (UBP) for applications in the automotive industry," AIP Conference Proceedings, Vol. 657, pp. 531-536, (2003)
- [9] Th. Zweschper, et al, "Ultrasound excited thermography using frequency modulated elastic waves," Insight, Vol. 45, No. 3, pp. 1-5, (2003)
- [10] 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)
- [11] M. Rothenfusser and C. Homma, "Acoustic thermography: Vibrational modes of cracks and the mechanism of heat generation," Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 24, pp. 624-631(2005)