

초음파 서모그래피를 이용한 개방 균열의 크기 측정

A Measurement of Size of the Open Crack using Ultrasound Thermography

조재완*, 서용철, 정승호, 정현규, 김승호
(Jai Wan Cho, Yong Chil Seo, Seung Ho Jung, Hyun Kyu Jung, and Seungho Kim)

Abstract : The dissipation of high-power ultrasonic energy at the faces of the defect causes an increase in temperature. It is resulted from localized selective heating in the vicinity of cracks because of the friction effect. In this paper the measurement of size and direction of crack using UET(Ultrasound Excitation Thermography) is described. The ultrasonic pulse energy is injected into the sample in one side. The hot spot, which is a small area around the crack tip and heated up highly, is observed. The hot spot, which is estimated as the starting point of the crack, is seen in the nearest position from the ultrasonic excitation point. Another ultrasonic pulse energy is injected into the sample in the opposite side. The hot spot, the ending point of the crack, is seen in the closest distance from the injection point also. From the calculation of the coordinates of both the first hot spot and the second hot spot observed, the size and slope of the crack is estimated. In the experiment of STS fatigue crack specimen(thickness 14mm), the size and the direction of the crack was measured.

Keywords : ultrasound excitation thermography, crack, fatigue, hot spot, size measurement

I. 서론

능동 서모그래피(active thermography)는 원격 비파괴 진단용으로 오래전부터 사용되어 왔다[1,2]. 이의 간단한 원리는 검사하고자 하는 시편, 구조물에 인공적인 열을 가함으로 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 결함부위로 부터의 열적 특이성을 적외선 열영상 카메라로 진단하는 방식을 초음파 서모그래피로 정의한다[7]. 초음파 여기 탄성파가 구조물에 전달될 때 결합 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]. 균열이 있는 물체에 초음파 진동에너지를 입사하면 균열이 시작되는 지점에서 열이 발생한다. 이는 초음파 진동에너지가 구조물의 균열이 시작되는 지점에서 마찰을 야기시켜 열을 발생시키기 때문이다. 균열의 종류는 폐쇄균열(closed crack)과 개방균열(open crack)로 분류할 수 있다[10]. 폐쇄 균열의 경우에는 균열의 폭이 초음파 진동폭 보다 작아서 균열의 전체 길이에 걸쳐 열이 발생한다. 개방 균열은 균열의 폭이 입사되는 초음파 진동에너지 폭보다 넓어서 균열의 선단(tip)에서 열이 발생한다.

본 논문에서는 초음파 서모그래피를 이용하여 개방 균열의 크기 및 방향을 측정하고자 한다. 균열이 있는 물체의 한 지점에 초음파 진동 에너지를 입사시킨다. 초음파가 입사된 지점으로부터 가장 가까운 위치에 있는 균열의 시작점으로부터 핫 스팟이 관측된다. 초음파가 입사된 초기 위치의 반대 되는 지점에 초음파 진동에너지를 입사시킨다. 그러면 균열이 끝나는 지점으로 추정되는 위치에서 핫 스팟이 관측된다. 관측된 2개의 핫 스팟의 위치를 계산하여 물체의 형태와 비교하면 개방 균열의 크기, 진행 방향 등을 알아 낼 수 있다. 14mm 두께의 SUS 재질의 피로 균열 시편에 대한 실험을 통해 균열의 크기 및 방향을 측정하였다.

II. 초음파 서모그래피 시스템

1. 초음파 서모그래피의 원리

그림 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

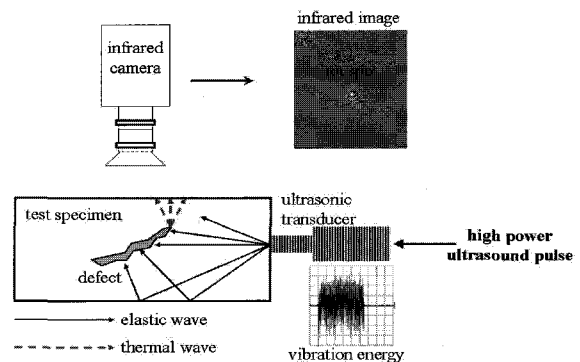


그림 1. 초음파 서모그래피의 원리.
Fig. 1. Principle of ultrasound thermography.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2005. 12. 21., 채택확정 : 2006. 12. 10.
조재완, 서용철, 정승호, 정현규, 김승호 : 한국원자력연구소 원자력 로봇LAB.
(jwcho@kaeri.re.kr/yccseo@kaeri.re.kr/shjung2@kaeri.re.kr/hkjung@kaeri.re.kr/ROBOTkim@kaeri.re.kr)
* 본 연구는 원자력 연구개발사업의 지원으로 수행되었음.

열이 발생한다. 결합 부위의 선택적인 발열 현상을 적외선 열 영상 카메라로 관측하면 전체적으로 어두운 배경에서 밝은 (휘도가 높은) 패턴으로 보이게 된다. 따라서 결합만을 선택적으로 관측할 수 있다[11]. 초음파 펄스 입사에 의한 탄성파가 결합 부위에 도달함과 동시에 발열 현상이 나타나므로 이를 열 영상 카메라로 관측하면 초음파 에너지를 구조물에 인가한 후 수 ms 이내에 밝은 패턴이 관측된다.

2. 초음파 서모그래피 시스템 구성

그림 2에 초음파 서모그래피 시스템 구성도를 보이고 있다. 초음파 서모그래피에 사용되는 초음파 여기 주파수는 15kHz-40kHz 범위에 이르며 일반적으로 20kHz 대역이 널리 사용된다. 본 논문에서 사용한 초음파 트랜스듀서는 용착기용 진동자 ULW6520B 모델을 사용하였다. ULW6520B 모델은 압전 세라믹 6개가 적층으로 되어 있으며 ± 전극이 교대로 연결되어 있고 20kHz의 진동주파수를 가진다. 고효율 초음파 발생 전원장치에서 20kHz, 2kW의 전력을 초음파 트랜스듀서에 공급한다. 초음파 트랜스듀서는 시편에 진동에너지를 전달한다. 시편과 초음파 트랜스듀서와의 경계면과 시편의 결합부위에서 선택적 발열현상에 의해 열이 발생한다. 이를 미쯔비시 IR-M500 적외선 열영상 카메라로 관측하여 기록 저장한다. IR-M500은 Stirling cooling 방식의 냉각형 열영상 카메라이고 3~5μm 파장대의 스펙트럼 특성을 갖고 있다.

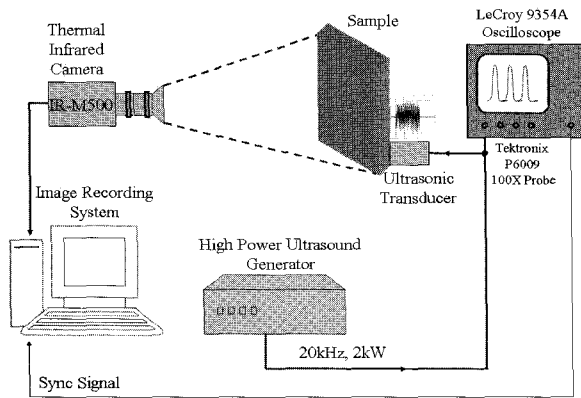


그림 2. 초음파 서모그래피 시스템 구성도
Fig. 2. Configurations of ultrasound thermography system.

표 1. IR-M500 열 영상 카메라의 제원.
Table 1. Specifications of IR-M500 infrared camera.

Items	Specifications
Detector	PtSi Schottky-Barrier IRCS
Number of elements	512×512 pixels
Spectral wavelength	3~5 μm
Lens	50mm/f1.2
NETD	0.15°C at 300°K
Field of view	14×11°[H×V]
Field time	60Hz
Video output	RS-170A, NTSC TV(525 lines)
Sensor size	0.52×0.4"

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 25.8×19.8μm이다. IR-M500 적외선 열영상 카메라 신호는 NTSC 타입의 아날로그이므로 이를 디지털타입하여 컴퓨터에 동영상으로 기록 저장한다. 표 1에 IR-M500 열영상 카메라의 제원을 나타내고 있다. Image recording system은 NTSC 타입의 아날로그신호를 IMAGING SOURCE사의 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.

III. 실험 및 결과

1. 균열의 크기 측정

초음파 트랜스듀서와 시편간의 기하학적 입사 배치를 달리하여 균열의 크기, 방향을 찾아내기 위해 14mm 두께의 SUS 균열시편에 대해 그림 3과 같이 2가지 방향으로 초음파 진동에너지를 입사 시킨다. 그림 4에 개념도를 나타내고 있다.

그림 4의 좌측과 같이 측정 방향 1로 초음파 진동에너지를

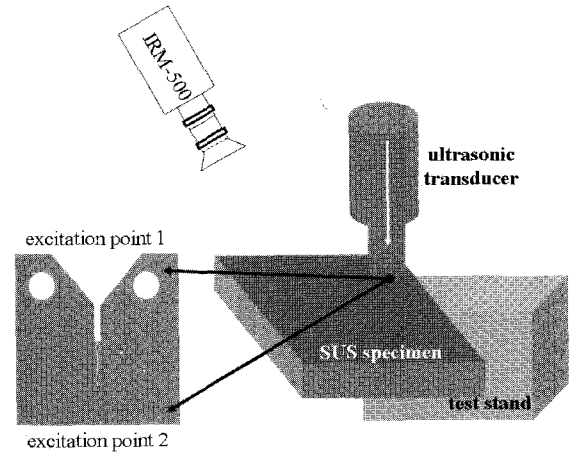


그림 3. 초음파 펄스의 입사.
Fig. 3. Ultrasound pulse injections into the sample.

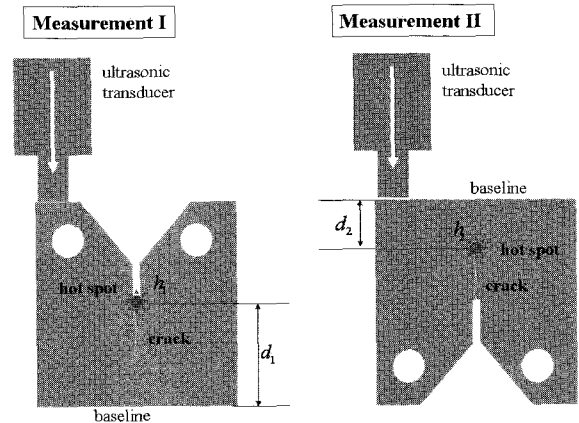


그림 4. 균열 크기 결정.
Fig. 4. Concept of crack size determination using UET.

입사하면 입사 지점에서 가장 가까운 거리에 위치한 균열의 시작점 h_1 에서 핫 스팟이 관측된다. 핫 스팟 발생 지점과 기준선(baseline) 간의 거리는 d_1 으로 정의한다.

우측 그림과 같이 측정 방향 2로 초음파 진동에너지를 입사하면 기준선으로부터 d_2 에 위치한 지점 h_2 에서 핫 스팟이 관측된다. 기준선을 기준으로 d_1 과 d_2 의 거리를 구하고 거리의 차이를 계산하면 균열의 크기 C_{size} 를 구할 수 있다. 측정 방향 1의 핫 스팟 위치 h_1 의 좌표와 측정 방향 2의 핫 스팟 위치 h_2 의 좌표를 구하여 h_1 과 h_2 를 연결하는 선의 기울기를 구하면 균열의 방향도 알아 낼 수 있다.

$$C_{size} = d_1 - d_2 \tag{1}$$

측정 방향 1에서 기준선의 시작점을 기준으로 핫스팟 h_1 의 좌표를 (x_1, y_1) 이라 하고 측정 방향 2에서 기준선의 시작점을 기준으로 핫스팟 h_2 의 좌표를 (x_2, y_2) 라 하면 h_1 과 h_2 사이의 거리 d_{crack} 는 (2)와 같이 구하여 진다. 또한 h_1 과 h_2 를 연결하는 선의 방향 s_{crack} 는 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$d_{crack} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \tag{2}$$

$$s_{crack} = \arctan \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)} \tag{3}$$

2. 핫 스팟 관측

실험에 사용한 SUS 균열 시편은 가로×세로 크기가 64×61mm이고, 두께는 14mm이며, 균열을 내기 위한 홈에서부터 8mm 크기의 균열이 성장되어 있다. 초음파 진동에너지 입사 시 발생하는 균열 시작점 부근에서의 핫 스팟의 관측성능을 개선하기 위하여 금속 재질인 SUS의 표면에 검은색 잉크를 도포하였다. 이는 키르히호프의 법칙에 의하면 방사율과 반사율의 합이 1이다. SUS 재질의 표면이 매끄럽게 연마된 상태이므로 방사율이 낮다. 표면 연마가 잘된 금속의 방사율은 일반적으로 0.1 이하이다. 키르히호프 법칙에 따르면 반사율이 0.9가 된다. 따라서 실내의 환경온도(300°K)의 90%에 해당하는 24.57°C의 온도 성분이 SUS 재질의 표면에 반사되어 적외선 열영상 관측 화면에 밝은 패턴으로 디스플레이 된다. 이는 시편의 결합위치로부터 표면 방출되는 온도가 IR-M500 열영상 카메라의 NETD(0.15°C)를 고려하면 24.72°C 보다 높을 경우에 결합이 검출될 수 있다는 의미로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 방사율이 0.96~0.98인 검은색 레커를 표면 연마 상태가 좋은 SUS 균열 시편에 분사 도포하였다. 시편에서 균열이 시작되는 지점에서 표면 방출되는 열(핫 스팟)을 IR-M500 카메라로 관측하여 모니터에 디스플레이한다. 또한, NTSC 칼라 영상신호를 640×480 크기의 32비트 RGB 신호로 디지털화하여 실시간 동영상 압축 코덱을 이용하여 동영상으로 저장하고 컴퓨터 모니터에 디스플레이 하였다. 저장된 동영상을 프레임 단위의 정지 영상으로 캡춰하여 영상 처리를 수행하였다. 그림 5에는 실험 사진을 나타내었다.

그림 6은 SUS 시편에 대해 그림 4와 같이 2가지 다른 방

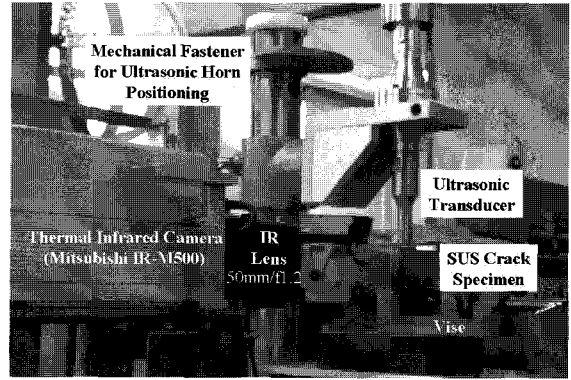


그림 5. 실험 장치 사진.
Fig. 5. Experimental setup photograph for UET.

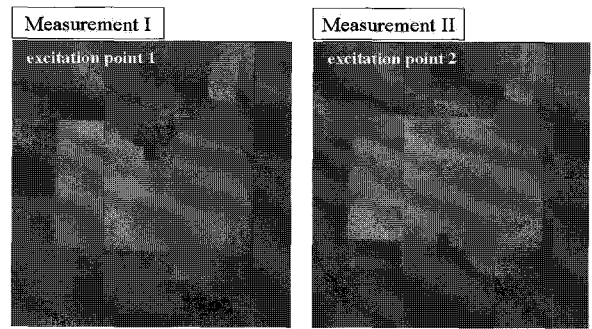


그림 6. 균열 지점에서 관측된 핫 스팟.
Fig. 6. Thermosonic images of a crack in a SUS plate (14mm thickness).

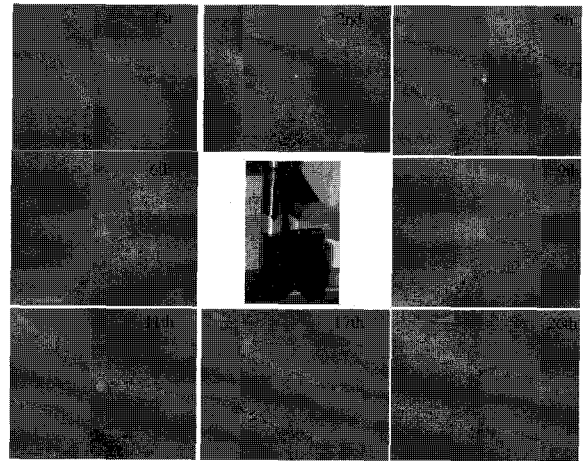


그림 7. 핫 스팟의 시간 경과에 따른 변화.
Fig. 7. Thermosonic image sequence of a crack in a SUS sample.

향으로 초음파 진동 에너지를 입사시켰을 때 균열의 시작점에서 발생한 핫 스팟을 적외선 열상 카메라로 관측한 것이다. 초음파 진동에너지가 입사된 후 5, 6 번째 프레임(~150ms 경과)에서 핫 스팟의 밝기(휘도)가 가장 높았다. 그림 6의 왼쪽 그림은 측정 방향 1에서의 핫 스팟을 관측한 것이고 오른쪽 그림은 측정 방향 2에서의 핫 스팟을 관측한 것이다. 그림 6의 좌 우측 그림의 중앙에 밝은 점(핫 스팟)이 균열 시작점

으로 추정되는 위치에서 초음파 진동에너지를 입사에 따른 마찰에 의해 열이 발생한 것을 적외선 열영상 카메라로 획득한 것이다. 그림 4에 표시한 시편의 기준선을 중심으로 하였을 때 좌우측 2 그림의 핫 스팟 위치가 차이 남을 알 수 있다. 그림 7은 정중앙 사진과 같이 수직으로 초음파 진동 에너지를 입사시켰을 때 균열이 시작되는 지점에서의 발열 특성을 프레임(~30ms) 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(hot spot)가 인근 부위로 확산 전도되면서 열을 발산하는 것으로 추정된다.

3. 핫 스팟 위치 추출

3.1 수평 입사

그림 4에 표시한 동일한 기준선에 대해 그림 6의 좌우측의 핫 스팟의 상대적인 위치를 구할 필요가 있다. 먼저, 배경으로부터 SUS 시편 영역을 분리해낸다. 2 진화 처리를 통해 배경과 시편영역을 분리한다. 2진화 영상을 이용하여 직사각형 형태의 SUS 시편의 4변의 (*opleft*, *opright*, *bottomright*, *bottomleft*) 을 구하고 에지 처리를 통해 윤곽선을 추출한다. 2진화 처리만으로 SUS 시편 영역을 배경과 정확히 분리할 수 없다. 따라서, 2진화 영상으로 구한 4변의 꼭지점을 연결하여서는 SUS 시편의 직사각형 구조를 정확하게 표현하지 못한다. 이를 보완하기 위해서 추출한 윤곽선을 사각형을 표시하는 4개의 선분으로 구분하였다. 각각의 선분에 해당하는 윤곽선에 가장 근사한 선분을 최소 자승법으로 유도하였다. 예를 들면, *opleft* 와 *opright* 를 연결하는 직선에 가장 근접한 윤곽선의 좌표들만 처리하여 직사각형의 상변 선분을 유도한다. 마찬가지로 *bottomleft* 와 *bottomright* 를 연결하는 직선에 가장 근접한 윤곽선의 좌표들을 피팅하여 하변의 선분을 구한다. (*opleft - bottomleft*), (*opright - bottomright*) 에 근접한 윤곽선 좌표들을 이용하여 좌변과 우변의 선분을 유도한다. 4개의 선분이 만나는 교차점을 SUS 시편의 직사각형 구조를 표현하는 4변의 꼭지점으로 새롭게 정의한다.

윤곽선 내부에서 그레이 레벨이 가장 높은 값인 핫 스팟의 좌표를 추출한다. 추출한 핫 스팟의 좌표를 지나가는 상하/좌우의 2 선분을 그린다. 핫 스팟 좌표를 지나가는 상하/좌우의 2 선분과 새롭게 구한 4변의 꼭지점을 지나가는 상하/좌우 4개의 선분과의 교차점을 구한다. SUS 균열 시편의 직사각형을 구성하는 각각의 꼭지점을 기준으로 핫 스팟의 상대적인 좌표를 계산할 (2), (3)에 대입하면 균열의 길이(크기) 및 진행 방향 등을 계산할 수 있다. 측정 방향 1과 2의 핫 스팟 간격은 (2)로부터 구하면 약 10.9 픽셀이다. 상하의 2기준선의 픽셀 차이가 201 픽셀이고, 이는 SUS 시편의 실제길이 64mm에 해당한다. 픽셀차이를 균열의 크기로 환산하면 3.46~3.54mm임을 알 수 있다. 육안으로 관측한 균열의 크기(~8mm)와는 오차를 보이고 있다. 이는 3.46~3.54mm 구간을 벗어난 나머지 균열 구간은 초음파 진동에너지에 의한 마찰열이 발생하지 않을 정도로 균열의 폭이 넓은 것으로 추정된다.

3.2 수직 입사

관측 카메라와 바이스를 고정하고 시편의 자세를 상하로 번갈아 가면서 진동 초음파를 입사시켰다. 적외선 열영상 카메라의 FOV 면에서 보면 시편의 외형적 크기에 대한 변화는 없다. 그림 4의 정면도와 같이 적외선 열영상 카메라가 시편을 바라보는 FOV와 시편의 위치는 고정되어 있고 자세만 상하로 바뀌었기 때문이다. 그림 8에 관측된 상하 2방향에서의 핫 스팟의 중심좌표를 나타내었다. 그림에서 점선으로 표시한 부분이 Y축의 기준점이 된다. 측정 방향 1의 Y축 기준점에 대한 핫 스팟의 Y축 변위는 픽셀이고, 측정 방향 2에서의 Y축 기준점에 대한 Y축 변위는 193.96 픽셀이다. 측정 방향 1과 2의 Y축 편차는 13.59 픽셀이다. 이를 균열 크기로 환산하면 대략 2.34mm 이다.

4. 결과 및 고찰

균열의 시작점과 끝점의 2 지점에서 관측된 핫 스팟의 간격이 10~13 픽셀 정도 차이가 나고 있다. 이를 균열의 크기로 환산하면 2.34~3.54mm의 크기를 갖는 것으로 추정된다. 이는 육안 관측한 균열의 실제 크기 8mm에 비해 큰 차이를 보이고 있다. 초음파 진동에너지 입사에 의해 균열 시작점에서 발생한 열이 적외선 열 영상 카메라의 영상획득 주기 (frame rate)인 33ms 동안 확산되어 핫 스팟의 위치를 정확하게 추정할 수 없는 것도 하나의 원인으로 생각할 수 있다. 본 논문에서는 핫 스팟 둘레 내부의 가장 밝은 점을 균열 시작점으로 추정하였다. 초음파 진동 에너지 입사에 의해 발생한 열이 등방성으로 확산된다고 가정하면 핫 스팟의 정확한 위치를 구하기 위해서는 열 확산 모델을 응용한 위치 추정 알고리즘을 비롯한 다양한 위치 추정 기법에 대한 연구가 필요하다.

균열의 제원(크기, 방향) 등을 측정하는 비파괴 검사 기법으로는 방사성 동위원소에서 방출되는 X선, 감마선을 이용한 방사선 투과 시험(RT), 초음파 탐상 시험(UT), 육안 검사(VT) 등이 있다. RT는 10mm 이하의 파장을 갖는 X선, 감마선을 이용하므로 측정 분해능이 가장 우수하지만 검사 절차가 복잡하고 피 검사 구조물의 두께가 수 mm 이하의 박판일 경우에는 적용할 수 없는 단점도 있다. UT는 RT에 비해 분해능이 떨어지지만 비교적 정확하다. 신호 해석이 복잡하여 신호 분석 전문가의 경험에 따라 검사 결과에 대한 편차

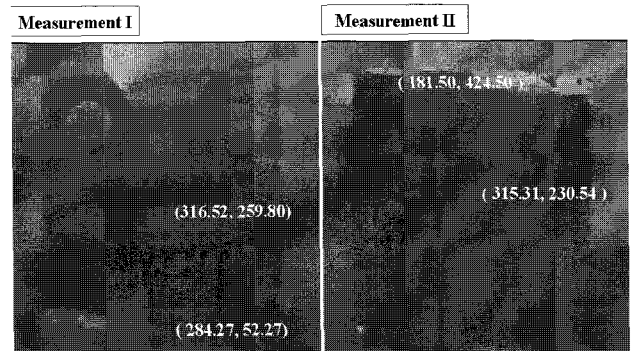


그림 8. 핫 스팟 위치 추정.

Fig. 8. Hot spot position estimation of thermosonic images of a crack in a SUS plate.

가 크다. VT는 균열과 긁힘(scratch) 등의 경계가 모호하여 전문가의 경험에 따라 측정 정밀도가 좌우된다. 이에 비해 본 논문에서 제시한 초음파 서모그래피 검사 기법은 시스템의 구성이 간단하여 현장 적용성이 우수하며 금속 뿐만 아니라 FRP와 같은 복합재료의 검사에도 유용하다. 측정 정밀도는 RT, UT, VT에 비해 개선의 여지가 필요하다. 현재 고속(frame rate $\geq 240\text{Hz}$), 고 분해능 (NETD $\leq 0.01^\circ\text{C}$)인 소형 경량의 적외선 열 영상카메라가 상용화 되고 있으며, 초 고속(frame rate \geq 수 kHz)의 적외선 열 영상 카메라가 개발되고 있음에 따라 측정 정밀도는 더욱더 향상될 수 있을 것으로 기대된다. 향후, 영상 획득속도가 수 kHz 이상인 초 고속, NETD가 1mK 이하인 고 분해능의 적외선 열 영상 카메라의 상용화가 될 경우 초음파 진동 에너지 입사 후 수백 μs 이내에 균열 지점에서 발생한 핫 스폿의 위치를 보다 정밀하게 찾아낼 수 있기 때문에 균열의 크기 및 방향의 측정 정밀도도 크게 향상될 것이다.

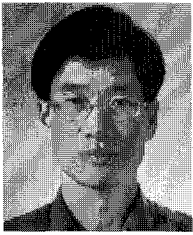
IV. 결론

본 논문에서는 초음파 서모그래피를 이용한 균열의 크기 및 방향 검출에 대해 기술하였다. 균열이 있는 물체에 초음파 진동에너지를 입사하면 균열이 시작되는 지점에서 열이 발생한다. 이는 초음파 진동에너지가 구조물의 균열이 시작되는 지점에서 마찰을 야기시켜 열을 발생시키기 때문이다. 이러한 마찰열을 적외선 열영상 카메라로 관측하면 구조물의 균열 위치를 실시간으로 찾아낼 수 있다. 균열이 있는 물체의 한 지점에 280ms 펄스폭의 초음파 진동 에너지를 입사시켰을 때 초음파가 입사된 지점으로부터 가장 가까운 거리에 있는 균열의 시작점으로부터 핫 스폿을 관측하였다. 초음파가 입사된 초기 위치의 반대 되는 지점에 같은 펄스폭의 초음파 진동에너지를 입사시켰을 때 균열이 끝나는 지점으로 추정되는 위치에서 핫 스폿이 관측되었다. 영상처리를 통해 추출된 2개의 핫 스폿의 상대적인 위치를 추출 하였다. 균열의 시작점과 끝점의 2 지점에서 관측된 핫 스폿의 간격이 10~13 픽셀 정도 차이가 났으며 2.34~3.54mm의 크기를 갖는 것으로 추정되었다. 이는 육안 관측의 균열 크기 8mm에 비해 차이를 보였다. 이는 향후, 영상 획득속도가 수 kHz 이상인 초 고속, NETD가 1mK 이하인 고 분해능의 적외선 열 영상 카메라의 상용화가 될 경우 초음파 진동 에너지 입사 후 수백 μs 이내에 균열 지점에서 발생한 핫 스폿의 위치를 보다 정밀하게 찾아낼 수 있기 때문에 균열의 크기 및 방

향의 측정 정밀도도 크게 향상될 것으로 기대된다. 본 논문에서 제시한 초음파 서모그래피를 이용한 균열 측정기법은 RT(방사선 투과시험), UT(초음파 탐상시험)에 비해 정교한 해석 기법을 필요로 하지 않으며 RT, UT 적용이 어려운 박판이나 UT 적용이 어려운 복합 재료(에폭시, 세라믹, 석영, CFRP 등)의 비파괴 균열 검사에 적용될 수 있다.

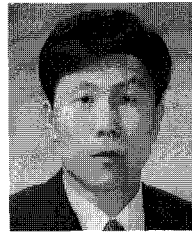
참고문헌

- [1] R. B. Mignogna, et al, "Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials," *Ultrasonics*, vol. 19, pp. 159-163, 1981.
- [2] M. Zong, J. Zhang, and Y. Zhao, "Pulse-heating infrared thermography non-destructive testing technique," *SPIE*, vol. 2899, pp. 654-659, 1996.
- [3] T. Sakagami and S. 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] 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.
- [11] 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.



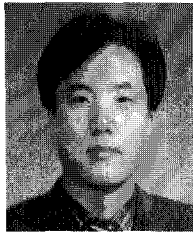
조재완

1984년 경북대학교 전자공학과 석사. 1987년~현재 한국원자력연구소 원자력 로봇 랩 책임연구원. 관심분야는 로봇 비전, 적외선 영상 신호처리.



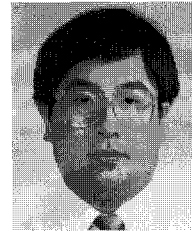
서용철

1992년 대전 공업대 금속공학과 졸업. 1984년~현재 한국 원자력연구소 원자력 로봇 랩 책임기술원. 관심분야는 기계 설계.



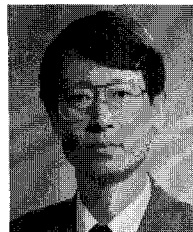
정승호

1992년 연세대 기계공학 박사. 1992년~현재 한국 원자력연구소 원자력 로봇 랩 책임연구원. 관심분야는 신호처리, 로봇설계, 로봇 및 카메라 캘리브레이션.



정현규

2000년 KAIST 재료공학 박사. 1983년~현재 한국 원자력연구소 원자력 로봇 랩 책임연구원. 관심분야는 초음파신호 처리.



김승호

1988년 연세대 로봇공학 박사. 1980년~현재 한국 원자력연구소 원자력 로봇 랩 책임연구원. 관심분야는 극한 로봇.