

초음파 열화상 검사를 이용한 박판 용접시편의 결함 검출

A Defect Detection of Thin Welded Plate using an Ultrasonic Infrared Imaging

조재완*, 정진만, 최영수, 정승호, 정현규

(Jai Wan Cho, Chin Man Chung, Young Soo Choi, Seung Ho Jung, and Hyun Kyu Jung)

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 efficiently. In this paper a detection of the welding defect of thin SUS 304 plates using the UIR (ultrasonic infrared imaging) technology is described. A low frequency (20kHz) ultrasonic transducer was used to infuse the welded thin SUS 304 plates with a short pulse of sound for 280ms. The ultrasonic source has a maximum power of 2kW. The surface temperature of the area under inspection is imaged by a thermal infrared camera that is coupled to a fast frame grabber in a computer. The hot spots, which are a small area around the defect tip and heated up highly, are observed. From the sequence of the thermosonic images, the location of defective or inhomogeneous regions in the welded thin SUS 304 plates can be detected easily.

Keywords : ultrasound excitation, infrared image, welding, nondestructive test, defect detection

I. 서론

균열 또는 접합면의 결함 등이 존재하는 물체에 고에너지 (2kW) 초음파(20kHz)를 입사시키면 균열, 결함부위의 표면에서 국부적인 열이 발생 된다[1-3]. 이는 고에너지 초음파 여기 탄성파가 물체의 균열, 박리(delamination) 등의 결함 부위를 통과할 때 서로 맞닿은 결함 면이 균일하게 진동하지 않고 결함 면 사이의 마찰, 문지름 또는 부딪침(clapping) 등에 의해 탄성파의 일부가 열로 변환되기 때문이다. 결함이 있는 구조물에 초음파 펄스를 인가한 후 구조물 표면을 적외선 열화상 카메라로 관측하면 구조물의 건전 부위는 휘도가 낮은 검은 배경으로 보이게 되고, 균열 등의 결함 부위는 휘도가 높은 밝은 영역(hot spot)으로 보이게 된다. 전체적으로 어두운 배경에서 결함 위치만 밝은 영역으로 뚜렷이 대비되므로 구조물의 결함을 신속하게 검출할 수 있다. 물체에 고에너지 초음파 펄스를 인가하여 결함부위에서 국부적으로 발생하는 열을 적외선 열화상 카메라로 관측하여 결함을 검출하는 것이 초음파 열화상 검사이다[4]. 초음파 열화상 검사는 주로 항공기, 자동차 등의 복합 재료의 결함 검출에 사용되고 있다[5,6].

본 논문에서는 초음파 열화상 검사를 이용한 SUS 304 박판의 용접 결함 검출에 대해 기술한다. 2kW의 전력과 20kHz 대역의 가진 주파수를 갖는 초음파 펄스를 280ms 기간 동안 SUS 304의 용접 박판에 입사시켰다. 고에너지 초음파 펄스 입사에 따른 SUS 304 박판 용접 심(seam) 라인의 국부적인 발열(핫 스팟)을 적외선 열화상 카메라로 관측하여 결함을 검출하였다. 열 전도율이 높은 SUS 304의 경우 초음파 펄스

인가 기간에는 결함부위에서 발생한 열이 증가한다. 초음파 펄스 인가 이후에는 발생한 열이 높은 열전도 특성 때문에 열 확산에 의해 주변과의 열 평형상태를 이룬다. 초음파 펄스 인가에 의해 결함 부위에서 발생하는 열은 시간이 경과함에 따라 재료의 열전도율과 주변의 온도차에 따른 고유의 특성 곡선을 갖는다. 이와 같은 고유의 발열 특성 곡선을 이용하여 SUS 304 박판의 용접 결함을 높은 신뢰도로 검출할 수 있다. 일반적으로 첫 번째 초음파 펄스를 시편에 인가할 경우에는 초음파 펄스 공급원인 초음파 트랜스듀서, 검사 시편 및 지지구조물과의 결함이 과도 상태에 있으므로 시편의 뒤틀림 또는 미끄러짐이 발생된다. 초음파 펄스를 계속 인가할 경우 초음파 트랜스듀서, 시편 및 지지 구조물간의 적절한 접촉 힘의 상태에 따라 안정화 상태로 접어들거나 시편이 완전히 이탈하여 검사 불능 상태에 이른다. 또한 주변 대기 복사열의 반사, 초음파 가진 시 시편의 미세한 진동 등이 관측된 초음파 열화상에 잡음으로 나타난다. 이러한 잡음 성분은 규칙성이 없는 특성을 가지기 때문에 결함에서 발생하는 열의 특성 곡선과 대비를 이룬다. 초음파 열화상에 나타나는 핫 스팟들의 시간 경과에 따른 열 분포 특성 곡선 들의 상관을 계산함으로써 결함을 강건하게 추출할 수 있다.

II. 초음파 열화상 검사

1. 초음파 열화상 검사의 원리

그림 1은 초음파 열화상 검사의 원리를 나타내고 있다. 초음파 여기를 이용한 서모그래피 기법의 비파괴 검사에서는 아주 짧은 고에너지 초음파 펄스 (폭: 50~300ms, 주파수: 20~40kHz, 진폭: 2kV)를 검사 시편에 인가하여 결함 부위에서 국부적인 열이 발생되도록 한다. 적외선 열화상 카메라는 초음파 펄스 인가 전, 후의 시간 경과에 따른 결함 부위의 발열 현상의 진행 상태를 기록 저장한다. 초음파 펄스 인가 전, 후의 관측된 열화상을 디지털 영상 처리하여 검사 시편의 결함을 찾아낸다. 초음파 펄스 입사에 의한 탄성파가 결

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 12. 23., 채택확정 : 2007. 7. 6.

조재완 : 한국원자력연구소(jwcho@kaeri.re.kr)

정진만, 최영수, 정승호, 정현규 : 한국원자력연구원 원자력 로봇 랩
(cmchung@kaeri.re.kr/yshchoi1@kaeri.re.kr/shjung2@kaeri.re.kr/hkjung@kaeri.re.kr)

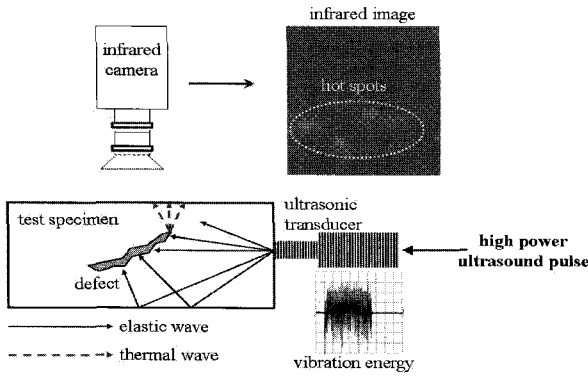


그림 1. 초음파 열화상 계측의 원리.
Fig. 1. Principle of ultrasonic IR imaging.

함 부위에 도달함과 동시에 발열 현상이 나타난다. 이를 열화상 카메라로 관측하면 영상 획득시간인 수십 ms 이내에 휘도 성분이 높은 밝은 패턴(핫 스팟)이 열화상에 나타난다. 20kHz 대역 주파수의 초음파는 수십 cm의 파장 성분을 갖는다. 또한 파장 길이보다 훨씬 먼 거리를 진행할 경우에도 초음파는 충분한 진폭 에너지를 가지면서 전파된다. 이는 재료에 손실이 없을 경우 초음파는 감쇄 없이 수 파장 길이의 거리를 전파할 수 있다는 것을 의미한다. 고체에서 음속의 속도는 수 km/s이다. 초음파 여기 펄스가 인가되는 순간에 본 논문에서 사용한 시편의 크기를 갖는 구조물의 전 검사 영역을 음장(sound field)이 완전히 투과한다. 수 kHz 대의 영상 획득시간을 갖는 초고속 적외선 열화상 카메라를 이용할 경우 수십 μ s 이내에 결함을 검출할 수 있다. 한편, 고체에서 음향 진폭 감쇄(acoustic damping)는 음파 주파수의 제곱에 비례한다. 주파수가 높을수록 초음파 여기에 의한 진동 진폭이 낮아진다. 따라서 구조물의 결함부위에서의 발열을 효과적으로 여기하기 위해 가청 주파수의 경계에 위치하는 15kHz-40kHz 대역의 여기 주파수를 사용하며 일반적으로 20kHz 대역이 널리 사용된다.

2. 결함 부위의 열 특성

상온 (T_0)에서 순간적인 초음파 펄스 여기 진동 에너지를 시편에 인가한다. 초음파 펄스 여기에 의한 결함 부위에서 발생된 열이 시편 표면으로 전도 확산되어 나타나는 현상이 관측 열화상에서는 핫 스팟으로 보이게 된다. 이러한 핫 스팟의 밝기 변화를 시간에 따라 기록하면 결함 부위의 온도 변화 (ΔT_t)를 추정할 수 있다. 여러 종류의 재료에 대한 온도 변화 곡선의 특징은 그림 2에 나타낸 것과 같다. 시편 표면 온도는 초음파 펄스 가진 기간 동안에 최고점에 도달한다. 초음파 펄스 종료 후에는 재료의 열전도도, 열확산도, 비열 등의 물리적 특성과 주변 환경 변수에 의해 표면 온도는 감소한다. 열전도도가 높은 구리($398 W/m^{\circ}C$)는 C와 같은 궤적을 보이며 상대적으로 열전도도가 낮은 SUS 304는 B와 같은 궤적을 보인다. CFRP와 같은 복합 재료의 경우에는 궤적 A와 같이 일정기간 최고점에 머무른 후 서서히 감소한다. 초음파 펄스 여기에 의해 생성된 시편 표면의 핫 스팟들의 밝기 변화를 프레임(frame)에 따라 나타내면 결함부위에서 생성된 핫 스팟은 B, C와 같은 궤적을 나타낸다.

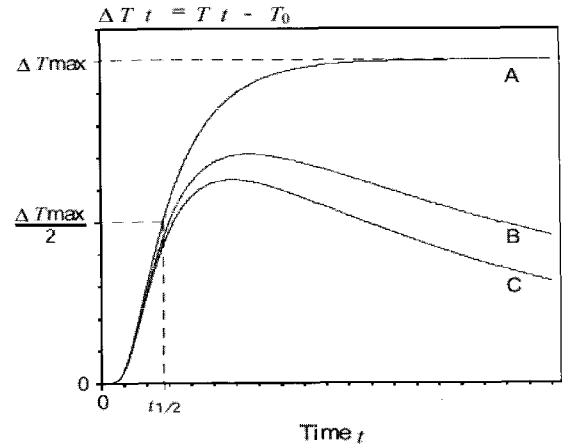


그림 2. 온도 상승 곡선.
Fig. 2. Temperature increase curve for various materials.

잡음 성분의 핫 스팟의 밝기 변화는 일관된 규칙성이 없다. 따라서 B궤적과 핫 스팟들의 궤적에 대해 상관을 구하면 결함은 상관 지수가 아주 높고 잡음은 상관지수가 낮다. 시편의 뒤틀림 또는 미끄러짐이 발생할 가능성이 높은 첫 번째 초음파 펄스를 인가할 경우에도 잡음 성분이 많이 포함된 핫 스팟 들로부터 결함에 기인한 핫 스팟을 신뢰성 있게 추출할 수 있다.

III. 실험 및 결과

그림 3에 실험 장면을 보이고 있다. 본 논문에서 사용한 초음파 트랜스듀서는 플라스틱 용접에 사용되는 초음파 용착기용 진동자 ULW6520B 모델을 사용하였다. 이 모델은 압전 세라믹 6개가 적층으로 되어 있으며 \pm 전극이 교대로 연결되어 있고 20kHz의 진동 주파수를 가진다. 사용된 적외선 열화상 카메라(IR-M500)은 stirling cooling 방식의 냉각형 열화상 카메라이고 3-5 μ m 파장대의 스펙트럼 특성을 갖고 있다. 센서는 쇼트키 배리어 방식의 FPA(Focal Plane Array) PtSi (Platinum Silicide) 소자이며 512 \times 512 크기의 화소 수를 갖고 있다. 센서 어레이의 실제 크기는 0.52 " \times 0.4"이며 한 화소의 공간 분해능은 25.8 \times 19.8 μ m이다.

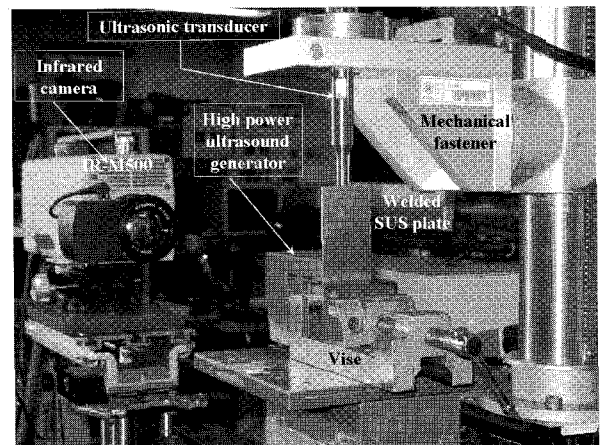


그림 3. 실험 장치 구성.
Fig. 3. Photograph of an experimental setup.

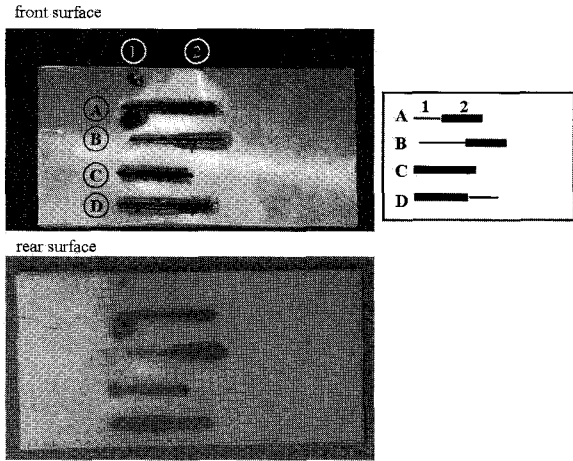


그림 4. SUS 304 용접시편의 외관.
Fig. 4. Layout diagram of a SUS 304 specimen.

그림 4에 실험에 사용한 SUS 304 박판 용접 시편의 크기를 나타내고 있다. 100×50×1.0mm(가로×세로×두께) 크기의 SUS 304의 박판 2개를 1.2kW Nd:YAG 펄스 레이저로 겹치기 용접 (lap joint welding) 하였다. 그림 4의 상단의 오른쪽 번호 ①이 용접의 시작 지점이며 ②번이 용접이 끝나는 지점이다. 초점거리 20mm인 광섬유를 통해 보호가스 환경에서 용접을 하였으며 광섬유를 통해 전송된 고출력 레이저빔의 스폿(직경) 크기는 1.8mm이며 레이저 출력은 150W 이다. 레이저 펄스의 반복 륜(repetition rate)은 10Hz이고 용접속도는 200mm/min이다. 표 1에 그림 4에서 표시된 4개의 용접 심 라인에 대한 용입깊이, 레이저 출력등의 용접 특성을 나타내었다. 그림 4의 하단 그림(rear surface)이 적외선 열화상 카메라에 의해 관측되는 표면이다. 2kW의 전력과 20kHz 대역의 가진 주파수를 갖는 초음파 펄스를 280ms 기간 동안 SUS 304의 용접 박판 단면에 입사시켰다. 한편, 시편과 초음파 트랜스듀서의 결합 효율을 높이고 초음파 펄스 가진 시 초음파 트랜스듀서 단면과 시편 단면과의 마찰에 의해 시편이 손상되는 것을 방지하기 위한 접촉 매질(couplant)로 알루미늄 테이프를 사용하였다.

SUS 304 박판에 대한 관측 열화상에서 나타나는 핫 스폿들의 영역을 추출하기 위해서 (1)과 같은 배경 감산 평균 처리를 하였다. IR 센서 및 주변 구조물의 반사에 의한 잡음의 영향으로 배경으로부터 핫 스폿 영역을 추출하는 것이 용이하지 않다. 배경과 초음파 펄스 인가에 의해 생성되는 핫 스폿의 밝기차이가 미약하기 때문이다. 결합에서 발생하는 미약한 신호는 누적 합산되어 증폭되고 임의의 위치에서 랜덤하게 생성되는 백색 잡음(white noise) 성분은 서로 상쇄되어 사라지기 때문에 배경 감산 평균처리는 유효한 신호처리 기법이다. (1)에서 I_b 는 초음파 펄스 인가 전의 배경 영상이고 I_i 는 초음파 펄스 인가 후의 관측 영상이다. n 은 전체 관측 영상 프레임의 개수로 본 실험에서는 30개를 취하였다. 1~9번째 프레임(~270ms) 기간은 초음파 펄스가 인가되는 주기이고 10~30번째 프레임은 초음파 펄스 인가에 의해 결합 부위에서 발생된 열이 SUS 304 금속 주변으로 확산되어 소멸되는 시기이다. n 은 재료의 열전도율 특성, 주변 환경에

표 1. SUS 304 시편의 용접 변수.

Table 1. Welding parameters of a SUS 304 plate.

Welding seam line	Beginning point ①		End point ②	
	Welding penetration (mm)	Laser power (W)	Welding penetration (mm)	Laser Power (W)
A	1.3	200	1.4	270
B	1.2	170	1.8	340
C	1.4**	280	-	-
D	1.7	320	1~1.1*	150

* Boundary condition of laser welding

** No shielding gas condition

따라 좌우된다. 또한, 초음파 펄스를 시편에 인가할 경우 시편과 초음파 트랜스듀서 단면과의 접촉 경계면에서 미세한 변위가 발생하며 이것이 관측 열화상의 변위로 이어져 가상의 핫 스폿이 나타나게 된다. 결합에 의한 진성 핫 스폿과 관측 열화상의 변위로 인한 가상 핫 스폿을 구분하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 이를 위해 그림 2에 나타낸 재료의 열전도 특성 곡선을 이용하였다.

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

그림 5는 초음파 펄스를 SUS 304 박판의 평균 오른쪽에 입사시켰을 때의 관측 열화상이다. 그림 5(a)는 (1)과 같은 배경 감산 평균처리를 한 영상이다. 그림 5(b)는 그림 5(a)의 영상을 2 진화 처리를 한 후 추출한 핫 스폿의 둘레를 관측 영상에 중첩한 것이다. 그림 5(b)에서 C, D는 표 1에 나타낸 용접 심 C, D 라인의 용접이 끝나는 지점의 결합에서 발생한 핫 스폿이다. E는 초음파 펄스 가진 시의 초음파 트랜스듀서와 시편과의 접촉면에서 발생한 마찰열이다. J는 SUS 304 박판의 끝단에서 관측된 핫 스폿이다. 그림 6은 그림 5(b)에서 추출한 핫 스폿들의 둘레 영역의 시간 경과에 따른 온도 변화를 나타내고 있다. 그림 7은 그림 6의 각각의 궤적

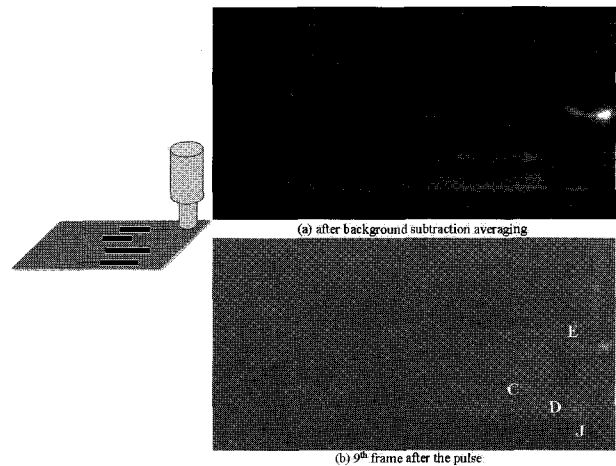


그림 5. SUS 304 시편의 관측 열화상 (표면 입사 I).
Fig. 5. Thermosonic images of a SUS 304 plate (surface injection I).

에 대해 정규화 한 곡선이다. 그림 7에서 X축은 이미지 프레임 번호이고 Y축은 정규화한 그레이 레벨이다. Y축의 그레이 레벨은 그림 5(b)의 핫 스팟 둘레 영역내의 밝기가 배경(문턱치) 보다 큰 경우의 모든 값들을 합산한 것이다. 그림 6과 7로부터 C, D의 궤적이 그림 2에 나타난 결합의 궤적 B 또는 C와 유사함을 알 수 있다. 이로부터 그림 5(b)의 C, D에 보이는 핫 스팟은 결합에 의한 것임을 추정할 수 있다. 시편과 초음파 트랜스듀서의 접촉면에서 발생한 마찰열은 일부는 SUS 304 박판으로 확산되고 나머지는 열전도 특성이 다른 초음파 트랜스듀서를 통해 확산되어 소멸되기 때문에 그림 6과 7에 나타난 E 궤적은 결합의 열 궤적과는 다른 특성을 보인다. 그림 6의 J도 결합의 궤적과 다른 특성을 보이고 있다. 시간 경과에 따라 E와 비슷한 궤적을 보이는 것으로 보아 시편과 초음파 트랜스듀서의 접촉면에서 발생한 마찰열이 SUS 304 박판의 표면에 반사되어 나타난 것으로 추정된다.

그림 8과 9는 초음파 펄스를 SUS 304 박판의 평판 왼쪽에 입사시켰을 때의 관측 열화상과 시간 경과에 따른 열 특성

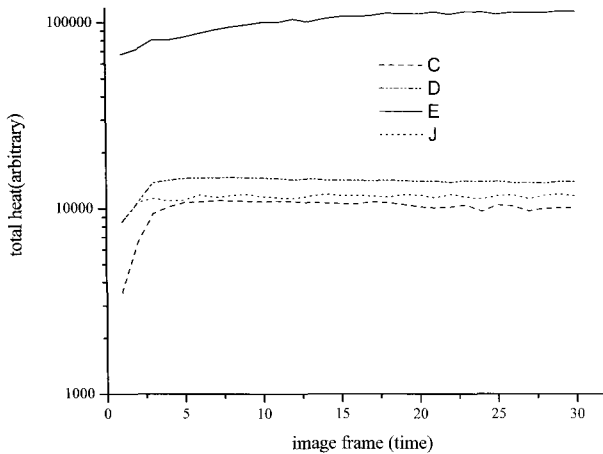


그림 6. 핫 스팟영역의 발열신호의 세기 변화.
Fig. 6. IR signal change with frame time at the hot spots in the image of Fig. 5.

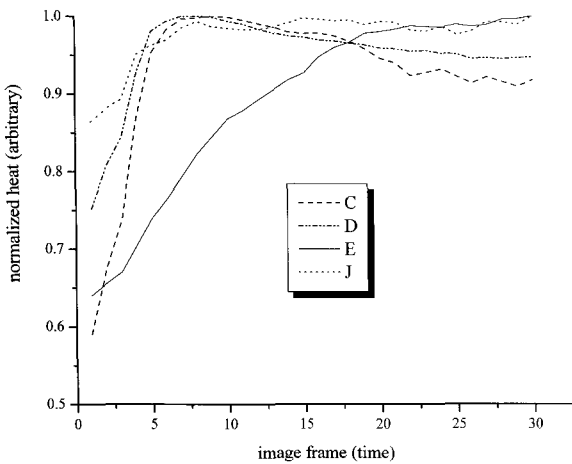


그림 7. 핫 스팟영역의 발열신호의 세기 변화 (정규화).
Fig. 7. IR signal change with frame time at the hot spots indicated in the image of Fig. 5 (normalization).

변화를 나타낸 것이다. 그림 8에 나타난 바와 같이 초음파 가진 에너지의 대부분이 시편과 초음파 트랜스듀서의 접촉면에서의 마찰열로 소모되었지만 A,C에서 미약한 핫 스팟이 관측되었다. 그림 9의 A,C의 열 특성 궤적으로부터 결합을 추정할 수 있으며 레이저 용접이 시작되는 지점에서도 결합이 존재함을 알 수 있다. 90X 광학 현미경에 의한 육안검사 결과 용접 심 A의 시작지점에서 균열(hair crack)이 있음을 관측하였다.

그림 10은 SUS 304 시편의 단면에 초음파 가진 펄스를 입사하였을 경우의 관측 열화상이다. 그림 10에서 E는 시편과 초음파 트랜스듀서의 접촉면에서의 마찰열이고, K는 시편과 지지 구조물과의 접촉면에서의 마찰열을 나타내고 있다. D는 용접 심 D의 레이저 용접의 종료지점의 결합으로 인하여 생성된 핫 스팟이다. 그림 11에 그림 10에서 보이는 4개의 핫 스팟들에 대한 열 특성 궤적을 나타내고 있다. 그림 11의 D는 초음파 펄스 인가 기간인 9번째 프레임까지는 열이 증가하고 10번째 프레임 이후부터 서서히 감소하는 패턴을 보이고 있다.

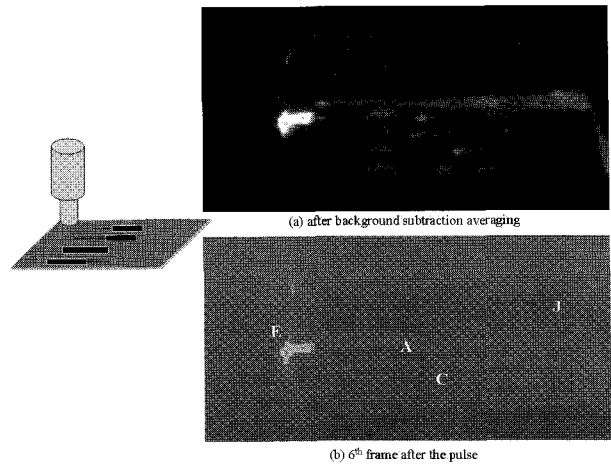


그림 8. SUS 304 시편의 관측 열화상 (표면 입사 II).
Fig. 8. Thermosonic images of SUS 304 plate (surface injection II).

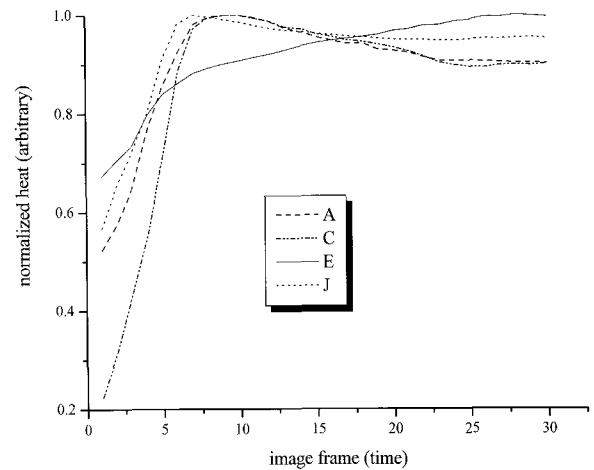


그림 9. 핫 스팟영역의 발열신호의 세기 변화 (정규화).
Fig. 9. IR signal change with frame time at the hot spots indicated in the image of Fig. 8 (normalization).

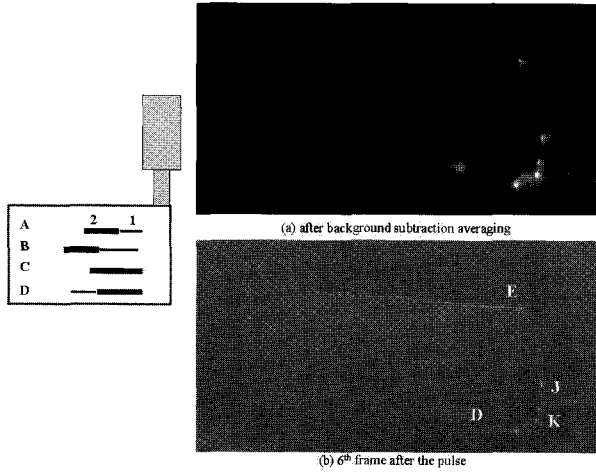


그림 10. SUS 304 시편의 관측 열화상 (수직단면 입사).
Fig. 10. Thermosonic images of SUS 304 plate (cross-section injection I).

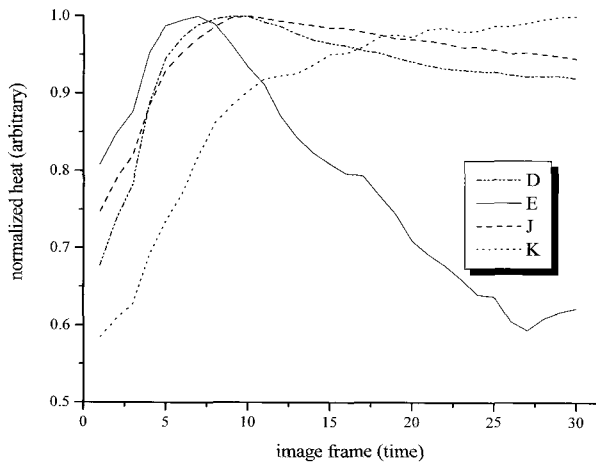


그림 11. 핫 스폿영역의 발열신호의 세기변화.
Fig. 11. IR signal change with frame time at the hot spots indicated in the image of Fig. 10.

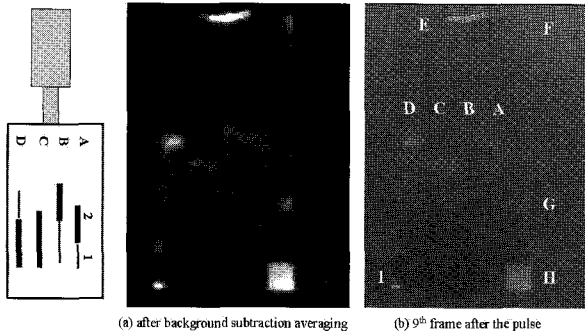


그림 12. SUS 304 시편의 관측 열화상 (수직단면 입사II).
Fig. 12. Thermosonic images of a SUS 304 plate (cross-section injection II).

그림 12는 시편을 수직으로 세워 단면에 초음파 펄스를 인가하였을 때의 관측 열화상을 나타내고 있다. 6개 이상의 많은 핫 스폿들이 보이고 있다. 그림 12에서 H는 그림 5의 측

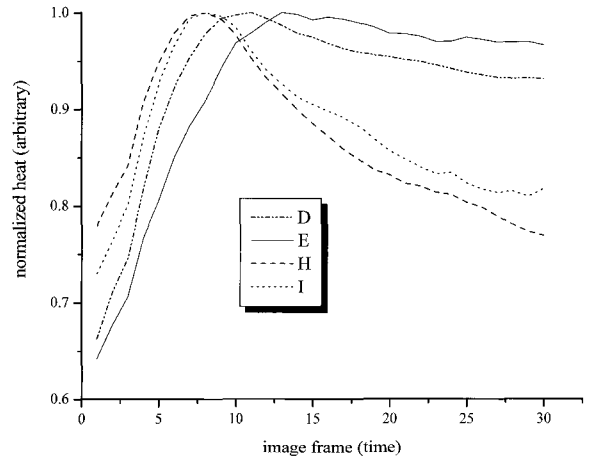


그림 13. 핫 스폿영역의 발열신호의 세기변화.
Fig. 13. IR signal change with frame time at the hot spots indicated in the image of Fig. 12.

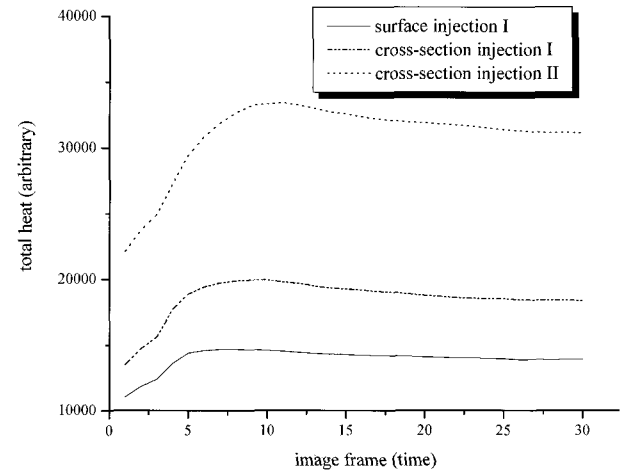


그림 14. 초음파 에너지 입사 방법에 따른 핫 스폿 D의 관측 열신호 세기 변화.
Fig. 14. IR signal change with frame time at the hot spot (D) indicated in the images of Figs. 5, 10 and 12.

정에서 시편과 초음파 트랜스듀서 사이의 접촉 매질로 사용한 알루미늄 테이프 부착 지점에서의 핫 스폿이다. 알루미늄은 열전도 특성이 우수하다. 알루미늄 테이프가 부착된 지점이 지지 구조물과 접촉하고 있고 초음파 가진에 따른 마찰열이 알루미늄 테이프 표면으로 전도되어 급격하게 열이 상승하고 있음을 나타내고 있다. 또한, 초음파 펄스의 종료 후에는 표면 온도가 급격히 감소하고 있다. 그림 13의 H 궤적이 이를 나타내고 있다. 그림 12의 D는 용접 심 D의 레이저 용접 시작점에서의 결함으로 인해 발생한 핫 스폿이다. 그림 13에 보이고 있는 D의 열 특성곡선은 그림 6, 9, 11에서 보이고 있는 결함의 열 궤적과 비슷한 패턴을 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 14는 시편에 초음파 펄스를 인가하였을 때 용접 심 D의 레이저 용접 시작 및 종료 점에서 관측된 핫 스폿의 열 특성 곡선을 나타내고 있다. 초음파 펄스의 가진 위치, 세기 및 방법에 관계없이 그림 2의 B와 유사한 궤적을 보이고 있

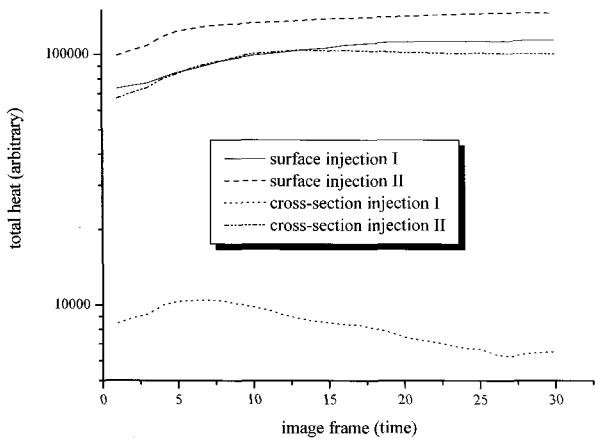


그림 15. 초음파 에너지 입사 방법에 따른 핫 스팟 E의 관측 열신호 세기 변화.

Fig. 15. IR signal change with frame time at the ultrasonic excitation point (E) indicated in the images of Figs. 5, 8, 10 and 12.

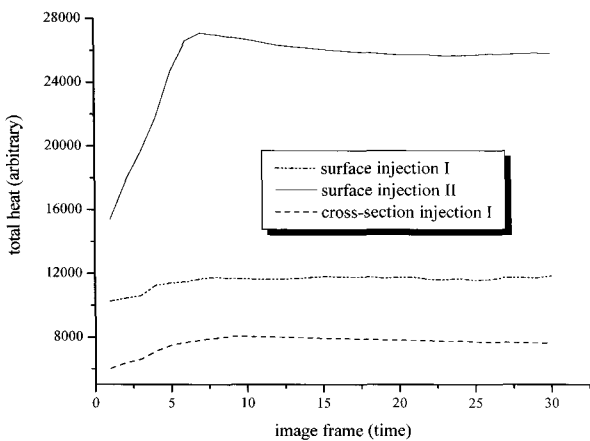


그림 16. 초음파 에너지 입사 방법에 따른 핫 스팟 J의 관측 열신호 세기 변화.

Fig. 16. IR signal change with frame time at the hot spot (J) indicated in the images of Figs. 5, 8 and 10.

으므로 결함에 의한 것임을 알 수 있다. 그림 15에 나타내고 있는 시편과 초음파 트랜스듀서의 접촉면에서 보이고 있는 마찰열의 특성곡선은 초음파 펄스의 가진위치, 세기 및 방법에 따라 모두 다름을 알 수 있다.

발생 위치는 다르지만 시편의 끝단에서 관측된 핫 스팟 J의 열 특성 곡선도 초음파 펄스의 가진위치, 세기 및 방법에 따라 상관성이 적음을 알 수 있다. 이를 그림 16에 나타내고 있다. 초음파 펄스 가진에 의해 관측되는 핫 스팟들의 열 특성 곡선들을 그림 2의 B에 나타낸 펄스열의 열 특성 곡선과의 상관을 (2)와 같이 계산하면 결함은 상관 지수 r 이 높고 센서 잡음 및 반사에 의한 핫 스팟은 상관 지수가 낮으므로 결함에 기인한 핫 스팟을 신뢰성 있게 추출할 수 있다. (2)에서 m_x, m_y 는 열 특성 곡선 $x(i), y(i)$ 의 평균값이다. $x(i), y(i)$ 는 이미지 프레임 번호에서의 열의 세기이다. 그림 14에 나타낸 결함 D의 열 특성 곡선 3개를 평균한 궤적을 그림 2B와 유사한 열 특성 곡선으로 가정하였다. 결함 열 특성 곡

표 2. 핫 스팟의 상관 계수.

Table 2. Correlation coefficients of hot spots.

Ultrasound pulse injection	Defect			I*	Hot spot			
	A	C	D	E	H	I	J	K
Surface I	-	0.94	0.91	0.67	-	-	0.82	-
Surface II	0.99	0.91	-	0.82	-	-	0.93	-
Cross section I	-	-	0.94	0.15	-	-	0.97	0.79
Cross section II	-	-	0.99	0.89	0.55	0.77	-	-

I* : excitation (contact) point

선과 초음파 펄스 인가 시에 관측된 핫 스팟 (D, E, J)들의 열 특성 곡선에 대해 상관 계수를 구한 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2로부터 초음파 펄스의 가진 위치, 세기 및 방법에 관계없이 결함에서 생성된 핫 스팟들의 상관계수는 0.9 이상으로 높음을 알 수 있다.

$$r = \frac{\sum_i [(x(i) - m_x) \times (y(i) - m_y)]}{\sqrt{\sum_i (x(i) - m_x)^2} \sqrt{\sum_i (y(i) - m_y)^2}} \quad (2)$$

IV. 결론

본 논문에서는 초음파 열화상 계측기법을 이용한 SUS 304 박판의 용접 결함 검출에 관한 연구를 수행하였다. 2kW의 전력과 20kHz 대역의 가진 주파수를 갖는 초음파 펄스를 280ms 기간 동안 SUS 304 재질의 용접 박판에 입사시켰다. 주요 결론은 다음과 같다. 1) 초음파 펄스 인가 후 9~10번째 관측 프레임(~300ms) 경과 후에 결함 부위에서 생성되는 핫 스팟의 밝기가 가장 높았다. 2) 열화상으로부터 핫 스팟 영역을 효율적으로 추출하기 위해서 배경 감산 평균치리의 영상 처리 알고리즘을 적용하였다. 3) 초음파 펄스 인가에 따른 결함 부위의 발열 특성은 재료의 열전도율, 비열, 열확산도 및 주변 환경에 따라 고유의 온도변화 곡선을 갖는다. 4) 이와 같은 고유의 온도변화 곡선과 초음파 펄스 인가에 의해 생성된 핫 스팟 등의 열 변화 특성곡선의 상관계수를 구함으로써 결함에 의한 핫 스팟을 신뢰성 있게 검출할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

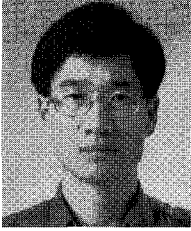
- [1] R. B. Mignogna, R. E. Green Jr, J. C. Duke Jr, E. G. Henneke II and K.L. Reifsnider, "Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials," *Ultrasonics*, vol. 19, pp. 159-163, 1981.
- [2] L. D. Favro, R. L. Thomas, X. Han, Z. Ouyang, G. Newaz, and D. Gentile, "Sonic infrared 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, et al, "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

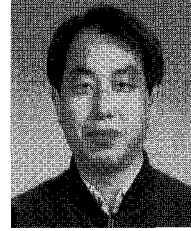
thermography," *SPIE* vol. 4360, pp. 580-586, 2001.

- [7] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Theory of Elasticity(3rd Edition)*, Butterworth Heinemann, p. 137, 1997.



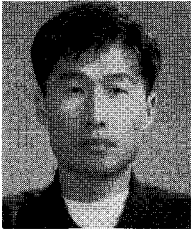
조재완

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



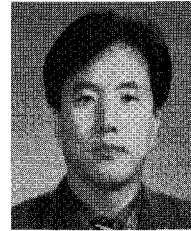
정진만

1978년 인하대학교 기계공학과 졸업. 1986년~현재 한국원자력연구원 양자광 학기술개발부 책임 기술원. 관심분야는 용접공정 및 레이저용접 개발.



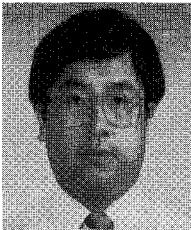
최영수

1986년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1993년~현재 한국원자력연구원 원자력 로봇랩 선임 연구원. 관심분야는 로봇 비전 기술 개발.



정승호

1992년 연세대 기계공학 박사. 1999년~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.