

## 초음파-적외선 열화상 기법에 의한 피로균열 검출에 있어 발열 메커니즘 분석

### Analysis of Heat Generation Mechanism in Ultrasound Infrared Thermography

최만용\*, 이승석\*, 박정학\*, 김원태\*\*, 강기수\*†

Manyong Choi\*, Seungseok Lee\*, Jeonghak Park\*, Wontae Kim\*\* and Kisoo Kang\*†

**초 록** 초음파 적외선 비파괴 열화상 검사기술의 발열 메커니즘은 정확히 규명되지 않았으나, 열-기계 연성 효과와 결합 계면 사이의 마찰효과가 주요한 원인인 것으로 추정되고 있다. 본 논문에서는 피로균열을 갖는 알루미늄 합금 시험편에서 결함을 검출하고, 실험조건으로부터 각각의 메커니즘에 따라 온도 변화를 수치 예측하였다. 시험결과와 수치예측 결과로부터 발열의 주요한 원인이 마찰이라는 것을 밝혔다.

**주요어:** 초음파 적외선 열화상, 발열메커니즘, 열-기계 연성효과, 마찰, 피로결함

**Abstract** Heat generation mechanism of ultrasound infrared thermography is still not well understood, yet and there are two reliable assumptions of heat generation, friction and thermo-mechanical effect. This paper investigates the principal cause of heat generation at fatigue crack with experimental and numerical approach. Our results show most of heat generation is contributed by friction between crack interface and thermo-mechanical effect is a negligible quantity.

**Keywords:** Ultrasound Infrared Thermography, Heat Generation Mechanism, Thermo-Mechanical Coupling Effect, Friction, Fatigue Crack

#### 1. 서 론

초음파 적외선 열화상 기술(ultrasound infrared thermography)은 Fig. 1과 같이 물체에 20~30 kHz 대역의 초음파를 입사하면 결합부에서 발열이 되고, 이 열원을 적외선 카메라로 측정함으로써 결함을 검출하는 기술이다[1,2]. 이 기술은 넓은 면적을 동시에 검사할 수 있고, 크랙 또는 박리와 같은 결함을 실시간으로 검출할 수 있어 자동차산업, 우주항공 산업에서 차세대 비파괴검

사기술로 주목 받고 있다. 초음파 가진에 의한 발열 메커니즘은 정확히 규명되지 않았으나, 열-기계 연성효과(thermo-mechanical coupling effect)와 결합계면사이의 마찰효과(surface friction or internal friction)가 주요한 원인인 것으로 추정되고 있다[3,4]. 본 연구에서는 이러한 발열 메커니즘을 규명하기 위해 초음파 가진에 따른 열-기계 연성효과와 마찰효과에 의한 온도변화의 수치예측과 실험을 통하여 마찰효과가 주요한 영향임을 밝혀내었다.

2. 시험장치 구성

초음파-적외선 열화상검사 장치는 초음파 가진장치와 적외선 열화상 카메라로 구성되며, 시험중 시험편과 외부열원과의 열교환을 최소화하기 위해 Fig. 2와 같이 단열챔버 내부에 시험장치를 구성하였다. 초음파 가진장치는 출력 400 W, 주파수 30 kHz이며, 적외선 카메라는 프랑스 Cedip의 silver 480 m 모델(NEDT: 25 mK)을 사용하였다. 시험편은 알루미늄 합금(Al7075-T6) CT 시험편을 피로시험하여 균열(precrack)을 제작하였다. 초음파 발진기는 가진면(exciting area)에 강력하게 압착이 된 상태로 가진하게 되며, 가진면과 검사면이 같은 방향이다.

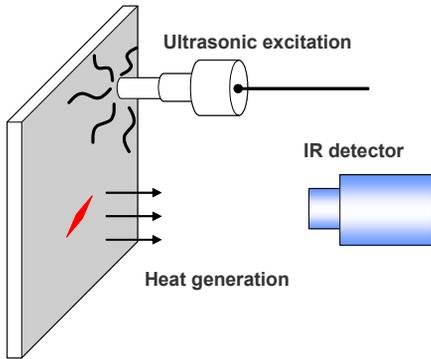


Fig. 1 Ultrasound Infrared thermography

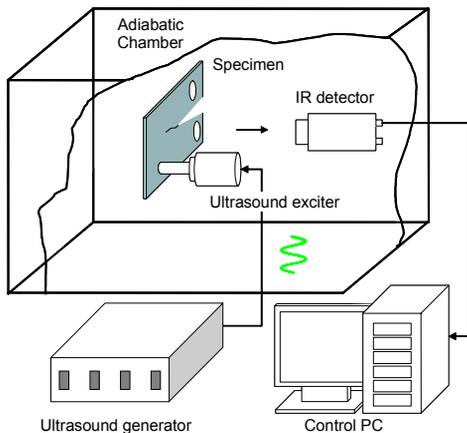


Fig. 2 Experimental configuration

3. 시험결과

피로시험에 의해 길이 17 mm, 균열 폭(crack opening displacement, COD)은 시작점에서 10.9  $\mu\text{m}$  첨단부에서 2.1  $\mu\text{m}$ 로 분포된 균열을 제작하였으며, 균열의 길이와 폭은 광학현미경으로 측정하였다. 광학현미경 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

초음파 가진은 10초 동안 시험편 표면에 연속 가진을 하고 동시에 적외선 열화상 카메라에 의해 온도변화가 60 Hz frame rate으로 기록된다. Fig. 4의 (a)와 (b)는 초음파 가진 전 열화상 이미지와 가진 후 온도변화가 최대일 때의 열화상 이미지를 보여

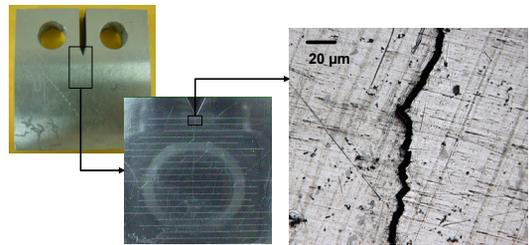


Fig. 3 Microscopic images of fatigue crack

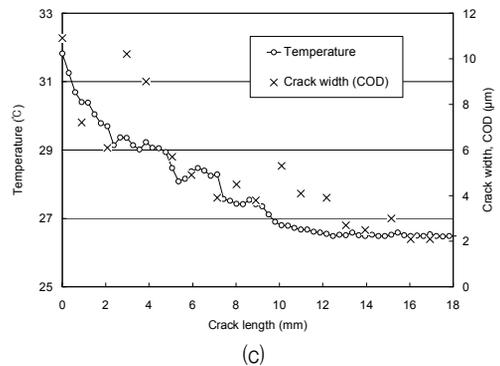
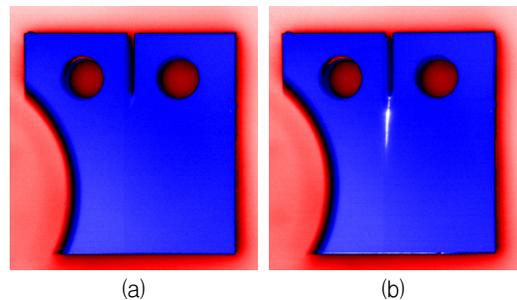


Fig. 4 Fatigue crack inspection results (a) before inspection, (b) maximum heat generation, (c) temperature and crack width along crack length

주고 있다. Fig. 4(c)는 결함의 길이방향의 위치에 따른 온도와 각 위치에서 결함폭을 비교한 결과이다. 시험결과에서 결함이 없는 부분과 최대 온도변화가 일어나는 곳과의 온도차가 5.1 °C이었으며, 균열길이 전체에서 발열이 되는 것으로 나타났다. 또한, 이 시험결과에서 만약 탄성효과가 주요한 원인이라면 결함의 첨단부에서 최대 발열이 일어나야 하나, 결함의 첨단부 보다는 결함 폭이 가장 넓은 지점에서 발열이 가장 많이 일어나고 있다. 시험결과로부터 발열의 주요한 인자가 마찰이라는 것을 추측할 수 있다. Fig. 4(b)의 검사 이미지로부터 결함의 길이는 11 mm로 실제 결함 크기(17 mm)보다 작게 평가되었는데, 그 원인은 결함 폭이 4  $\mu\text{m}$  이하의 경우에는 결함폭이 좁아 입사된 초음파가 대부분 투과되어 발열현상이 나타나지 않은 것으로 추정된다.

#### 4. 발열 메커니즘 분석

초음파 적외선 열화상 기술에서 초음파 가진장치로 1 kW 이상의 출력을 갖는 20~30 kHz 대역의 단일 주파수를 사용하고 있다. 최근에는 검출능 개선을 위해 다중주파수(multi-frequencies)를 사용하기도 하나[5], 본 연구에서는 단일 주파수만을 고려하여 발열 메커니즘을 분석하였다. 물체에 입사된 고출력의 초음파는 균열부에서 Fig. 5와 같이 3개의 모드형태로 나타나는 것으로 예측할 수 있다. 이를 발열 메커니즘 측면에서 살펴보면, 모드 I는 개구형 모드로서 균열 첨단부에서 응력집중이 발생하고 발열은 열-기계 연성효과가 주요한 원인이라 예측할 수 있다. 또한, 모드 II(면내 전단형)와 모드 III(면외 전단형)은 균열 첨단부에서 응력집중 보다는 계면 사이의 마찰이 주요한 원인이라 가정할 수 있다.

두 가지의 발열 메커니즘을 바탕으로 초음파 가진에 의한 균열부에서 온도변화를 식 (1)과 같이 세울 수 있다. 여기에서 외부 열교환과 전도와 대류에 의한 손실을 무시하였다.

$$\Delta T = T_M + T_F \quad (1)$$

여기에서,  $\Delta T$ 는 균열부의 온도변화,  $T_M$ 는 열-기계 연성효과에 의한 온도변화,  $T_F$ 는 마찰에 의한 온도변화이다.

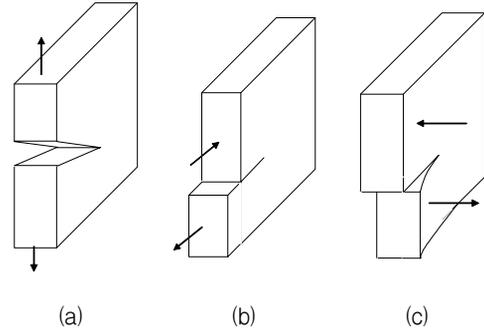


Fig. 5 Vibration mode at crack (a) mode I, (b) mode II, (c) mode III

#### 4.1. 열-기계 연성효과

열-기계 연성효과에 의한 온도변화( $T_M$ )는 다시 탄성영역 내에서 온도변화( $T_E$ )와 소성영역에서 온도변화( $T_P$ )로 나누어 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$T_M = T_E + T_P \quad (2)$$

실험에 사용되는 초음파 출력이 400 W, 초음파 가진흔의 끝단의 단면적을 314 mm<sup>2</sup>, 균열부분까지 전달효율을 100%라고 가정할 경우, 초음파 가진장치에 음향강도(sound intensity),  $I$ 는 12.7 W/mm<sup>2</sup>이다. 또한 식 (3)를 이용하여 음향강도를 응력(응압),  $P$ 으로 환산할 경우 0.02 MPa에 해당한다. 이 값은 금속재료의 탄성한도에 비해 매우 작은 값이므로 식 (2)에서 소성영역의 발열 효과가 없는 것으로 간주할 수 있다.

$$10 \log_{10} \left[ \frac{I}{I_0} \right] = 20 \log_{20} \left[ \frac{P}{P_0} \right] \quad (3)$$

여기에서  $P_0$ 는  $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ 이고  $I_0$ 는  $1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 이다.

또한 열탄성효과로 알려져 있는 탄성영역 내에서 온도변화( $T_E$ )는 식 (3)으로 알려져 있다[6].

$$T_E = -K_m \cdot T_a \cdot \Delta \sigma \quad (4)$$

여기에서,  $K_m$ 은 열확산 계수,  $T_a$ 는 주변 온도,  $\Delta \sigma$ 는 3축 응력합의 변화이다. 초음파 가진에 의한 발열은 응력변화( $\Delta \sigma$ )가 조화함수의 가진 형태

( $\Delta\sigma \cos \omega t$ )된다면, 식 (5)와 같이 가역과정으로 나타낼 수 있다. 여기에서  $\tau$ 는 초음파 가진시간이다.

$$T_E = -K_m \cdot T_a \cdot \int_0^\tau \Delta\sigma \cos \omega t dt \quad (5)$$

그러나 실제 재료에서는 감쇠계수로 인하여 응력-변형을 관계에서 히스테리시스가 나타나며, 누적된 변형에너지가 열에너지로 변환되는 비가역 과정이므로 식 (6)와 같이 쓸 수 있다.

$$T_E = -K_m \cdot T_a \cdot \int_0^\tau f \cdot \eta \cdot \left( \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} E d\epsilon - \int_{\epsilon_2}^{\epsilon_1} E d\epsilon \right) dt \quad (6)$$

여기에서  $\eta$ 는 에너지 변환 효율,  $f$ 는 초음파 주파수,  $E$ 는 탄성계수,  $\epsilon$ 은 변형률이다. 또한 변형에너지 누적량이 탄성계수와 변형률 사이의 위상지연이 최대라고 가정하면  $\int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} E d\epsilon - \int_{\epsilon_2}^{\epsilon_1} E d\epsilon = E\epsilon^2$ 이라 할 수 있다. 따라서 식 (6)은 식 (7)로 재정리할 수 있다.

$$T_E = -\eta \cdot K_m \cdot T_a \cdot f \cdot \int_0^\tau E \cdot \epsilon(t)^2 dt \quad (7)$$

식 (7)를 이용하여 Table 1의 주어진 조건으로 온도변화를 예측하면  $7.3 \times 10^{-7}$  K으로 매우 미약하다. 여기에서 예측조건은 시험조건과 같은 가진초음파 주파수,  $f$ 는 30 kHz, 가진시간,  $\tau$ 는 10 sec, 전달효율,  $\eta$ 는 100%, 주변온도,  $T_a$ 는 300 K를 사용하였다. 응력변화,  $\Delta\sigma$ 는 초음파 가진에 의한 응력(0.02 MPa)이 결합의 침단부에 전달될 때, 시험편의 침단부의 단면적( $12.5 \times 1 \text{ mm}^2$ )에 대해 250 Pa의 응력이 작용하는 것으로 환산하였다.

예측결과는 응력집중계수를 고려한다 할지라도 열탄성효과에 의한 온도변화는 무시할 정도로 작다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 식 (1)의 열-기계 연성효과는 결합부에서 발열에 기여하지 못하는 것으로 판단할 수 있다.

#### 4.2. 균열 계면 사이의 마찰효과

결합에서 발열이 열-기계 연성효과가 기여하지 못하고 계면 사이의 마찰이 주요한 원인으로 보았을 때, 상대운동을 하는 계면 사이의 마찰에 의한 순간 최대 온도변화는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다[7].

Table 1 Numerical assumption of temperature evolution by thermoelasticity

Material	$K_m$ (Pa <sup>-1</sup> )	$E$ (GPa)	$\Delta\epsilon^2$	$\Delta T$ (K)
Al7075-T6	$9.3 \times 10^{-12}$	72	$1.2 \times 10^{-17}$	$7.3 \times 10^{-10}$

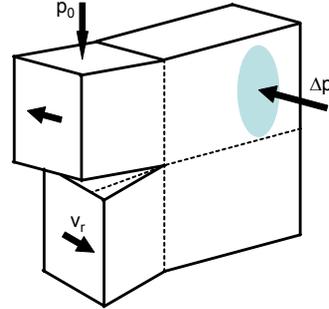


Fig. 6 Schematic of contact pressures

$$T_F = \frac{C\mu p |\sqrt{v_r}|}{\sqrt{b} \sqrt{k\rho c_p}} \quad (8)$$

여기에서  $C$ 는 마찰면의 형상계수,  $\mu$ 는 마찰계수,  $p$ 는 단위길이 당 접촉력(N/m),  $v_r$ 는 상대속도,  $b$ 는 접촉길이,  $k$ 는 열전도계수,  $\rho$ 는 밀도,  $c_p$ 는 정압 비열이다. 식 (8)은 1회 마찰에 따른 온도변화를 나타낸 방정식으로 초음파 가진의 경우에는 반복회수,  $n$  ( $= f \cdot \tau$ )를 고려하여야 할 것이다. 두 계면 사이의 상대속도,  $v_r$ 은 초음파발전자의 최대 진폭을  $a$ 라 할 때, 상대속도는 식 (9)과 같이 쓸 수 있다.

$$v_r = a \cdot 2\pi \cdot f \quad (9)$$

또한, 단위길이 당 접촉력(선접촉력),  $p$ 는 Fig. 6과 같이 결합면의 수직으로 작용하는 초기 선접촉력,  $p_0$ 와 초음파 가진에 의해 조화함수 형태로 변하는 선접촉력,  $\Delta p$ 가 작용하는 것으로 볼 수 있으며, 식 (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$p = p_0 + \Delta p \cos \omega t \quad (10)$$

여기에서  $\Delta p$ 의 방향은 균열 계면과 수직방향이므로 실질적으로 선접촉력으로서 100% 기여를 하지 못하고 입사된 초음파의 일부만이 선접촉력으로서 기여하게 된다.  $\Delta p$ 의 성분 중 온도변화에 기여할

수 있는 접촉력 성분( $p_0$ 와 같은 방향)만을  $\Delta p_e$ 라고 하면, 가진시간과 반복회수를 고려하여 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$T_F = n \cdot \frac{C \mu b |\sqrt{v_r}|}{\sqrt{b} \sqrt{k \rho c_p}} \cdot \int_0^\tau p_0 + \Delta p_e \cos \omega t \, dt \quad (11)$$

식 (11)를 이용하여 Table 2의 조건으로 온도변화를 예측하였다. Table 2에서  $n$ 은 실험에서 최대온도까지 걸린 시간(0.05 sec)과 주파수의 곱이며,  $C$ 는 평판의 경우 1.11로 주어진 상수이며[6], 마찰계수는 거친 알루미늄 금속면의 경우 1.4로 주어진다.  $v_r$ 는 초음파 발진자의 진폭인  $30 \mu\text{m}$ 를 속도로 환산하였으며,  $b$ 는 결함의 길이,  $k$ ,  $\rho$ ,  $c_p$ 는 시험편의 물성이다. 또한, 실험에서  $p_0$ 가 없는 상태로 가진을 하였으므로 선접촉력 변화는 초음파 가진에만 의존하게 된다. 그러나  $\Delta p_e$ 를 현실적으로 측정이 어려워 단위 선접촉력  $\left(\int_0^\tau \Delta p_e \cos \omega t \, dt = 1\right)$ 으로 취급하여 선접촉력 당 온도변화  $\left(\frac{T_F}{p}\right)$ 로 예측하였다. 수치 해석 결과로부터 단위 선접촉력 (1 N/m)에 대해 2.8 K이 상승하는 것으로 예측할 수 있다. 이 온도 변화는 열탄성효과의 발열에 비해 매우 큰 값으로 피로 균열에서 발열이 대부분 마찰효과에 의존한다는 것을 알 수 있다.

Table 2 Numerical assumption of temperature evolution by friction

$n$	$C$	$\mu$	$\Delta p_e$	$v_r$
1500	1.11	1.4	1	5.7
$b$	$k$	$\rho$	$c_p$	$T'_F$
0.011	130	2810	960	2.8

## 5. 결론

본 논문에서는 초음파 적외선 열화상 비파괴 검사기법의 발열 메커니즘을 규명하기 위해 열-기계 연성효과와 마찰효과를 고려하였으며, 마찰효과가 발열에 주요하게 기여한다는 것을 밝혔다. 피로결함 검출 실험에서는 결함쪽에 의존하여 발열 특성이 변화하게 되며, 결함첨단부에서 열탄성효과에 의한 발열은 관찰되지 않았다. 또한, 본 연구에서 주장하는 바와 같이 마찰에 의한 발열이 주요한 원

인이라면 입사되는 초음파의 모드에 따라 발열 특성이 현저히 개선될 수 있을 것으로 예측된다. 그러나 입사된 초음파의 어떠한 성분이 접촉력으로서 기여를 하는지는 명확히 밝혀지지 않았으며 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 후 기

이 논문은 2007년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-00467)

## 참고문헌

- [1] A. Dillenz, A. Salerno, D. Wu, J. Rantala and G. Busse, "Progress in ultrasonic lockin thermography," QIRT 98, pp. 154-160, (1998)
- [2] 조재완, 서용철, 정승호, 정현규, 김승호, "초음파 서모그라피를 이용한 실시간 결함 검출에 대한 연구", 비파괴검사학회지, 26권, 4호, pp. 211-219, (2006)
- [3] C. Homma, M. Rothenfusser, J. Baumann and R. Shannon, "Study of the heat generation mechanism in acoustic thermography," Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 25, pp. 566-573, (2006)
- [4] N. G. H. Meyendorf, H. Rosner, V. Krumb and S. Sathish, "Thermo-acoustic fatigue characterization," Ultrasonics, Vol. 40, pp. 427-434, (2002)
- [5] Xiaoyan Han, Zhi Zeng, Wei Li, Md. Sawar Islam, Jianping Lu, and Vera Loggins, E. Yitamben, L. D. Favro and G. Newaz, R. L. Thomas, "Acoustic chaos for enhanced detectability of cracks by sonic infrared imaging," Journal of Applied Physics, Vol. 95, No. 7, pp. 3792-3797, (2004)
- [6] W. Thomson(Lord Kelvin), "On the dynamical theory of heat," Trans. Roy. Soc. Edimbourg, Vol. 20. (1853)
- [7] M. Taburdagitan and M. Akkok, "Determination of surface temperature rise with thermoelastic analysis of spur gears," Wear, Vol. 261, pp. 656 - 665, (2006)