

# 열화상기술을 이용한 모멘트 변화에 따른 피로균열진전 연구

김경석<sup>+</sup>, 정현철<sup>+</sup>, 박찬주<sup>++</sup>, 정덕운<sup>+++</sup>, 장호섭<sup>++++</sup>

(논문접수일 2010. 02. 23, 심사완료일 2010. 03. 24)

## A Study of the Fatigue Crack Propagation Behavior According to the Moment Change using Infrared Thermography

Kyeongsuk Kim<sup>+</sup>, Hyunchul Jung<sup>+</sup>, Chanjoo Pack<sup>++</sup>, Dukwoon Jung<sup>+++</sup>, Hosub Chang<sup>++++</sup>

### Abstract

The objective of this study is to propose an effective method for measurement and analysis of fatigue crack. A technique that can measure the statue of fatigue crack propagation fast and correctly for enhancing safety of constructions and securing reliability is necessary. Moreover, the crack propagation behavior characteristics evaluation technique has to be developed using this technique.

In this paper, fatigue crack was caused via the fatigue experiment with repeated load on the CT specimen that is made up of STS304. Fatigue crack propagation was measured by tracing the position of the maximum temperature according to the cycles using infrared thermography. The crack growth characteristics was evaluated by applying the moment values on the measuring area to the measured value. As a result of this study, the possibility that the infrared thermography could be applied to measure the fatigue crack was identified. Moreover, it was identified that fatigue crack propagation have a relationship with the moment value of construction.

**Key Words** : Infrared thermography(적외선 열화상), Fatigue(피로), Fatigue Crack Propagation(피로균열진전), Moment(우력)

## 1. 서론

기계부품 및 구조물들은 항상 외부의 반복적 하중의 영

향을 받는다. 이들의 돌발적 파괴는 엄청난 인적, 물리적 피해를 초래할 수 있다. 이러한 파괴의 주요원인으로 피로(Fatigue)를 들 수 있으며, 기계구조물의 역학적 원인에 의

+ 조선대학교 기계설계공학과  
++ 조선대학교 기계설계공학과 대학원  
+++ 조선대학교 첨단부품소재공학과 대학원  
++++ 교신저자, 조선대학 레이저응용 신기술개발 연구센터 (hschang@chosun.ac.kr)  
주소: 501-759 광주광역시 농구 서석동 375번지

해 발생하는 전체 파괴의 약 90%를 차지한다고 보고되고 있다<sup>(1,2)</sup>.

특히 부재 내의 노치나 균열이 존재할 수 있고, 외부의 피로하중에 의하여 취약부에서 발생한 균열이 진전하여 전체 구조물의 피로파손(Fatigue failure)을 야기시킬 수 있다. 구조물의 안전성을 높이고, 신뢰성을 확보하기 위해서 이미 손상된 부재에서 피로균열진전(Fatigue Crack Propagation: F.C.P.) 상태를 계측할 수 있는 방법이 확립되어야 하며, 이를 이용한 사용재의 균열진전거동특성 평가 기술이 개발되어야 한다<sup>(3-4)</sup>.

균열길이의 측정방법은 지금까지 많은 연구자들에 의하여 개발되어져 왔다. 크게 광학현미경을 이용하여 육안으로 직접 균열길이를 측정하는 방법과 컴플라이언스, 초음파, AE, 또는 전기적 신호를 통하여 얻어진 결과로부터 균열길이로 환산하는 간접적인 방법으로 대별된다. 이러한 균열길이의 측정방법은 대부분 많은 수작업이 요구되고, 미세한 균열진전량을 측정하는데 어려움이 따르고 있다. 이에 대해서 적외선 열화상기술(Infrared thermography: IRT)의 적용은 피로균열측정의 새로운 방법이 될 수 있다.

온도를 가지고 있는 모든 물체는 그 온도에 대응하는 복사 에너지를 방출하게 되며, 적외선 열화상기술은 방출된 복사 에너지량을 검출소자에 의해 측정하고 검출된 량과 온도의 상관관계로부터 물체의 온도 화상을 제공한다<sup>(5-6)</sup>. 초창기에는 열화상에 의한 비파괴 검사는 대상체 자체에서 발산하는 복사에너지를 검출하여 건전성을 평가하는 수동형 검사기법(Passive technique)이 주를 이루었으나 현재는 외부에서 대상체를 자극하고 그 응답특성을 평가하는 능동형 검사기법(Active technique)이 발전하고 있다. 능동형 검사기법 중 하나인 IRT를 이용한 피로균열측정은 대상물 표면에 발생하는 열변화량을 적외선 열화상 카메라로 측정하여, 열탄성 효과(Thermoelastic effect)의 원리로부터 피로균열 선단의 변화를 2차원으로 화상화하여 확인할 수 있다. 즉, 하중을 받는 물체는 변형과 함께 일부의 에너지를 적외선(열)에너지로 방사하고, 방사된 적외선은 이에 상응하는 응력으로 환산 가능하다는 이론적인 내용의 역발상을 토대로 한다. 이는 하중 하에서 부재의 응력이 가장 높은 부분 즉 노치나 크랙의 선단이 가장 고온의 온도값을 나타내고 이 최고 온도점의 이동을 확인함으로써 비파괴적으로 피로균열의 진전을 측정하는 기술이다. 이 기술은 동적거동을 하는 구조물에서 피로균열의 진전을 실시간으로 측정 전·후의 별도의 작업없이 해석이 가능하여 기존 측정방법 등의 단점 등을 보완할 수 있으며, 현장 적용에서 환경 제약요소들이 적어 산업적 활용

이 높은 기술로 평가받고 있다.

이에 본 논문에서는 적외선 열화상 기술을 이용하여 반복 하중을 받는 STS304 소재의 CT시험편의 피로균열진전을 측정하였으며, 측정값에 측정부의 모멘트값을 적용하여 균열진전특성을 평가하고자 하였다.

## 2. 이론

### 2.1 적외선 열화상의 원리

모든 물체는 온도를 가지고 있으며, 이 온도에 대응하는 적외선 파장대역에서 적외선 에너지를 방출하게 된다.

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1)$$

Planck's constant  $h=6.6256 \times 10^{-34}$  J-s,

Boltzmann's constant  $k= 1.38054 \times 10^{-23}$ ,

Speed of light  $c=2.998 \times 10^8$  ms-1

Temperature of surface of targets T

Wave length  $\lambda$

위의 식 (1)은 Planck의 흑체복사이론으로 흑체복사의 성질(에너지의 크기, 파장)과 흑체의 온도사이에 간단한 관계가 성립하고, 흑체복사체에서 단위시간에 방출되는 파장의 복사량은 온도에 의해서만 결정된다는 흑체복사의 성질로부터 흑체의 온도를 구할 수 있다. 열화상기술(Infrared thermography technique)은 방출된 에너지량을 측정하여 검출에너지량과 온도의 상관관계를 이용하여 온도영상을 제공하게 된다.

$$\int \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} R_i = \sigma T^4 \quad (2)$$

식 (2)는 Stefan-Boltzmann's law로 흑체의 단위표면적으로부터 단위시간에 방사되는 전방사 에너지는 절대온도 T의 4승에 비례한다는 이론이다. 위에서 서술한 식 (1) Planck's law와 식 (2) Stefan-Boltzmann's law을 이용하여 열화상 카메라를 통한 온도 측정이 가능하게 된다.

### 2.2 열탄성 효과

고체 내의 전도 방정식에 대한 열기계연성효과(Thermo-mechani coupling effect)을 식 (3)과 같이 쓸 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$\rho c \frac{\partial U}{\partial t} - k \nabla^2 U = R_{tmc} + D + R_e \quad (3)$$

여기에서,  $\rho$ 는 밀도,  $c$ 는 비열,  $t$ 는 시간,  $U$ 는 외부열원,  $k$ 는 재료의 열전도 계수,  $R_{tmc}$ 는 열기계효과에 의한 내부발산열,  $D$ 는 내재분산 에너지(Intrinsic dissipation),  $R_e$ 는 외부 물체와 열교환이다. 하지만 실험은 탄성영역에서 이루어지는 가역 단열 과정으로 외부와의 열교환이 없다는 가정으로부터 열탄성 방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial U}{\partial t} = R_{tmc} \quad (4)$$

즉 탄성고체의 응력변화와 온도변화의 관계는 식 (5)으로 표현 될수 있다.

$$R_{tmc} = -\alpha T \Delta \sigma_{1,2,3} - \frac{3E}{1-2\nu} \alpha^2 T \frac{\partial U}{\partial t} \quad (5)$$

여기에서,  $\alpha$ 는 열팽창계수,  $T$ 는 절대 온도,  $E$ 는 탄성계수,  $\nu$ 는 포와송 비,  $\Delta \sigma_{1,2,3}$ 는 물체의 응력 변화이다. 식 (5)를 식 (4)와 함께 정리 하면,

$$-\alpha T \Delta \sigma_{1,2,3} = (\rho c + \frac{3E}{1-2\nu} \alpha^2 T) \frac{\partial U}{\partial t} \quad (6)$$

식 (6)이 되며, 상온에서  $3E\alpha^2 T / \rho c(1-2\nu)$ 는 무시할 정도로 작은 값이다. 따라서 탄성영역에서 내부응력변화에 따른 온도변화는 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta T = -K_m \cdot T \cdot \Delta \sigma_{1,2,3} \quad (7)$$

여기에서,  $\Delta T$ 는 물체의 온도변화,  $K_m (= \alpha / \rho c)$ 는 열탄성 계수이다. 즉 식 (7)에서 온도 변화를 적외선 열화상 카메라를 이용하여 측정함으로써 물체의 응력 변화를 계속할 수 있는 것이다<sup>(8)</sup>.

### 3. 실험

#### 3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 오스테나이트 계열의 STS304이며, 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1 및 Table 2에 나타났다.

Table 1 Chemical compositions of specimen (%)

C	Si	Mn	Ni
0.04	0.52	1.04	8.31
Cr	Mo	Fe	Cu
18.56	0.13	bal.	0.15

Table 2 Mechanical properties of specimen

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
530	220	45

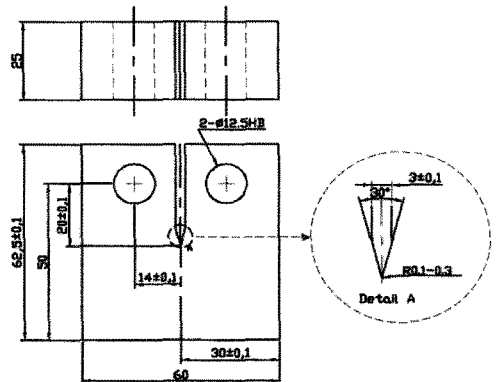


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

시험편은 ASTM standard E647-93에 준하여 CT시험편으로 Fig. 1과 같이 제작하였다.

#### 3.2 시험방법

피로하중에 의한 피로균열발생은 전기유압식으로 작동하는 MTS사의 피로시험기(모델명:MTS 793 series)를 사용하여 하중제어에 의한 정현파형의 반복하중을 사용하였고 피로하중은 20(kN)에서 40(kN)까지 10(kN)씩 3구간으로 나누어 실험하였다. 피로실험은 실온에서 일정 응력비(R=0.1)와 주파수(30Hz)로 실시하였다. CT시험편에 하중을 인가하기 위하여 고정용 지그를 설계하였으며, 이는 피로시험기의 그립(Grip)을 고려하여 제작하였다. 또 피로균열진전을 확인하기 위하여 적외선 열화상 카메라를 이용하여 피로하중을 받는 시험편의 표면온도의 변화를 측정하였다. 시험편 표면에는 흑체에 가까운 무광택 스프레이( $\epsilon=0.95$ )를 도포하여 방사율을 일정하게 유지하였으며, 적외선 열화상카메라는

프랑스 FLIR systems사의 silver480 모델을 사용하였다. 피로균열의 진전을 확인하기 위하여 열화상 카메라의 촬영 프레임수와 피로시험기의 사이클을 동기화하였으며, 균열길이의 측정은 피로시험 중인 시험편의 표면온도를 나타내는 열화상 이미지를 이용하여 일정 사이클에서의 시험편 노치 부터 가로 축 선상의 최대 온도점까지의 pixel 수를 측정하여 상당 길이를 계산하였다. Fig. 2에 피로균열측정장치를 나타내었으며, Fig. 3은 시험편의 온도 측정 부위, 측정온도와 균열길이의 관계를 나타낸다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 열화상 기술을 이용한 피로균열 측정

피로실험 중 피로균열의 측정은 균열의 선단이 가장 많은 응력집중의 영향을 받으며 이 응력집중 부위인 균열선단이

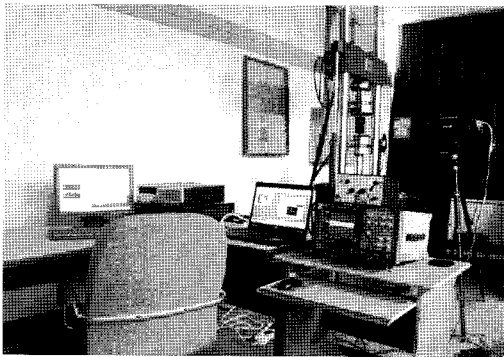


Fig. 2 Set-up of fatigue test and Infrared camera

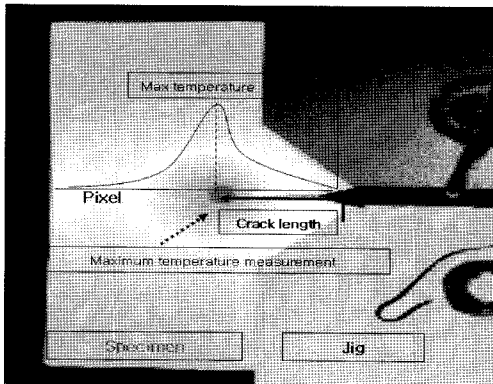


Fig. 3 Measurement of the fatigue crack using Infrared thermography

가장 높은 온도를 나타냄을 확인하고, 최고 온도점의 이동을 열화상 카메라로 확인함으로써 비파괴적으로 피로균열의 진전을 측정하였다. Fig. 4는 피로시험 중 측정된 시험편의 열화상 이미지이다. Fig. 4를 통하여 반복 사이클의 증가에 따라 시험편의 표면 온도가 증가하며 특히 최고 온도 점의 온도값과 위치가 변함을 확인할 수 있다. Fig. 4의 열화상 이미지에서 최고 온도점의 위치를 측정하여 노치부로부터 발생한 균열의 길이값을 측정 할 수 있다.

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7은 각기 다른 하중을 부여한 시험편의 반복하중 횟수에 따른 최고온도점의 위치와 온도를 나타낸 그래프이다. 그래프의 X축은 시험편의 노치로부터 가로 축 방향으로 떨어진 거리를 Y축은 온도를 나타낸다. 그리고 각 선도는 특정 사이클에서의 가로축 선상의 7mm 구간의 온도 분포이다. 사이클 횟수가 증가 할수록 최고 온도점의 온도가 증가하며 노치로부터의 거리도 멀어짐을 확인할 수 있다. 즉 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7의 각 선도의 최고 온도점의 추적을 통하여 반복횟수에 따른 균열의 성장 정도를 확인할 수 있다.

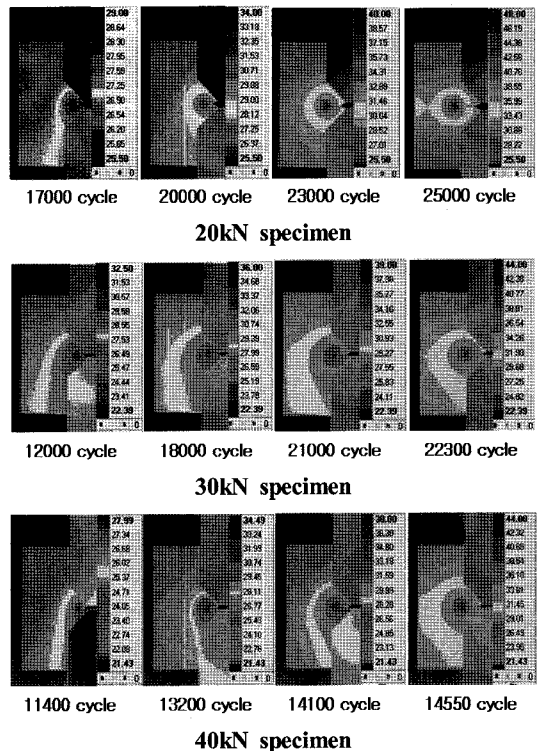


Fig. 4 thermography image of each specimen

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7의 결과를 이용하여 Fig. 8의 각 시험편의 사이클에 따른 균열길이 선도(a-N Curve)를 나타내었다.

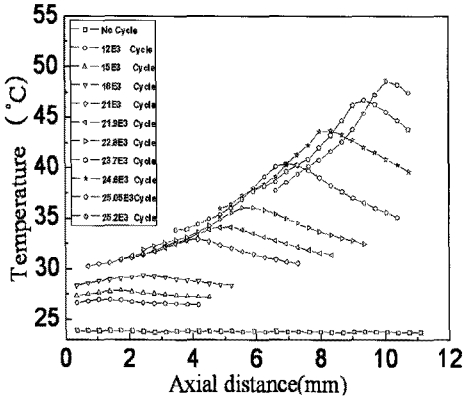


Fig. 5 Temperature curve at each cycle of 20kN specimen

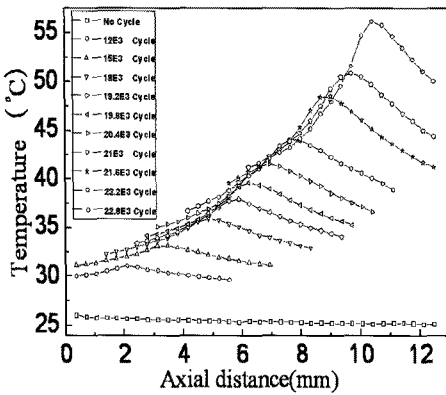


Fig. 6 Temperature curve at each cycle of 30kN specimen

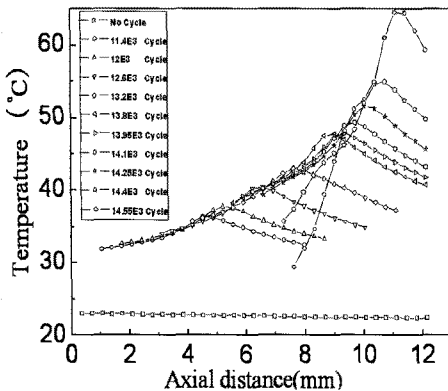


Fig. 7 Temperature curve at each cycle of 40kN specimen

Fig. 8의 a-N Curve를 통하여 열화상 기술을 이용한 피로 균열의 진전을 확인 할 수 있으며 정확한 값의 균열길이의 측정이 가능함을 확인하였다.

#### 4.2 모멘트를 고려한 피로균열진전평가

본 연구에서는 균열선단에 작용하는 모멘트값과 균열의 성장률의 관계를 평가함으로써 피로균열진전을 예측할 수 있음을 확인하였다. 모멘트의 변화에 따른 균열성장률의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 X축은 균열길이의 증가에 따른 균열 선단의 모멘트값의 증가량을 Y축은 반복하중 횟수에 따른 균열길이의 증가율을 나타내었다. Fig. 9의 결과를 통하여 균열부에 작용하는 모멘트값의 증가량과 균열의 성장률은 선형임을 확인할 수 있다. 이를 통하여 부재에 작용하는 모멘트값을 통한 피로균열진전속도와 균열길이의 예측이 가능하다.

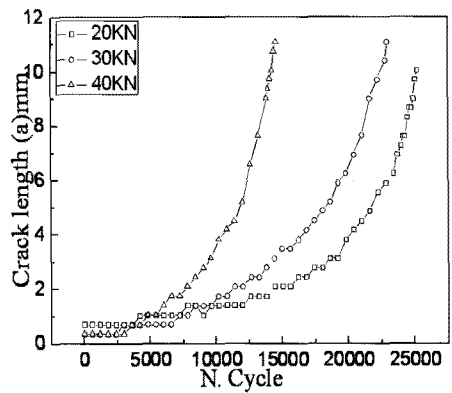


Fig. 8 a-N curve of each specimen by IRT

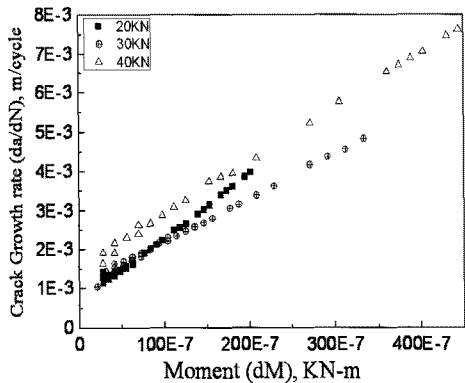


Fig. 9 da/aN-dM Curve of each specimen

## 5. 결론

본 연구에서는 열화상기술을 이용하여 피로하중을 받는 STS 304 시험편의 피로균열을 측정하였으며, 측정 결과를 이용하여 피로균열진전 특성을 평가하였다. 실험결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열화상기술을 이용한 피로균열의 측정은 최고온도점의 추적을 통하여 가능하며, 시험편에 별도의 조각이나 후처리 없이 실시간으로 확인 할 수 있다.
- (2) 열화상기술을 이용한 피로균열의 측정은 특정 시점의 균열길이와 온도의 확인이 가능하며, 정확한 a-N 선도를 만들 수 있다.
- (3) 피로균열의 진전은 균열 선단에 작용하는 모멘트값을 이용하여 평가 할 수 있으며, 모멘트 값에 따른 균열성장률의 관계는 선형이다.
- (4) 자동으로 최고온도를 기록하는 프로그램의 개발을 통하여 열화상기술을 이용한 피로균열 측정법의 측정 성능 향상과 응용분야 확대에 기여할 것이다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## 참 고 문 헌

- (1) Dieter, G. E., 1990, *Mechanical Metallurgy*, Third Edition, McGraw-hill, New York, pp. 375~431.
- (2) Kim, C. J., Lim, B. S., and Kim, H. C., 1994, "Oxidation and Fatigue Crack Propagation Behavior by Temperature Variation of STS 316 Stainless Steel," *Transactions of the KSAE*, Vol. 1, No. 2, pp. 399~404.
- (3) Han, S. H., 1997, "Crack Length Measurement Method for Evaluation of Fatigue Crack Propagation Behavior : Direct Current Potential Drop Method," *Transactions of the KSME*, Vol. 37, No. 10, pp. 41~46.
- (4) An, C. B. and Choi, B. G., 1999, "Influence of Evaluation Methods for Fatigue crack Growth Process," *J of Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 1, pp. 119~125.
- (5) Kim, J. Y., Shim, J. G, Yang, D. J., and Yu, S., 2000, "Heat Analysis of Welding-bead using Infrared Thermoimage Camera," *J of Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol.1, pp. 57~62.
- (6) Gaussorgurs, G., 1994, *Infrared themography*, translated by Chomet, S., Champman & Hall, London, pp. 375~431.
- (7) Bremond, P. and Potet, P., 2001, *Lock-in Thermography: A tool to analyse and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures*, *Thermosense XXII*, New York, pp. 4360~4376.
- (8) Kim, W. T., Kang K. S., Choi, M. Y., Park, J. H., and Huh, Y. H., 2006, "Stress Analysis and Fatigue Limit Evaluation of Plate with Notch by Lock In Thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 26, No. 5, pp. 315~320.

(1) Dieter, G. E., 1990, *Mechanical Metallurgy*, Third