<Original Paper>
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 33, No. 2: 187-192, 2013
ISSN 1225-7842 / eISSN 2287-402X http://dx.doi.org/10.7779/JKSNT.2013.33.2.187

# 접촉 열저항 효과를 이용한 피로균열의 적외선검사

# Thermographic Inspection of Fatigue Crack by Using Contact Thermal Resistance

양승용*, 김노유**†

Seungyong Yang* and Nohyu Kim**†

**초 록** 크랙 계면에서의 접촉 열저항에 의해 만들어지는 온도 강하 특성을 적외선을 이용하여 측정함으로써 피로균열을 검사하였다. 크랙과 같은 불연속면을 지나는 열 유동은 연속체에서와는 달리 접촉경계면에서 급격한 온도구배를 나타내는데 이 변화를 표면에서의 적외선 방사량으로 측정하여 피로균열의 위치를 탐지하였다. 표준 피로균열 시편의 중앙부에 노치를 생성한 후 저주기 피로균열을 노치 끝단으로부터 발생시킨 다음, 이 시편의 한쪽 끝단에 할로겐램프를 이용하여 일정한 열을 가함으로서 시편의 길이 방향으로 열 유동이 일어나도록 하면서 시편의 표면온도 분포를 적외선 실험장치로 계측하였다. 열 유동이 크랙을 지나면서 온도구배가 크게 변화하는 것을 적외선 열화상 이미지로부터 알 수 있었으며 균열 면에서의 적외선 온도 데이터로부터 크랙의 위치와 크기를 평가할 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

**주요용어:** 적외선검사, 피로균열, 열확산, 접촉 열저항

**Abstract** Fatigue crack was detected from a temperature change around surface crack using the thermographic technique. Thermal gradient across the crack decreased very much due to thermal resistance of contact surface in the crack. Heat diffusion flow passing through the discontinuity was visualized in temperature by infrared camera to find and locate the crack. A fatigue crack specimen(SM-45C), which was prepared according to KS specification and notched in its center to initiate fatigue crack from the notch tip, was heated by halogen lamp at the end of one side to generate a heat diffusion flow in lateral direction. A abrupt jump in temperature across the fatigue crack was observed in thermographic image, by which the crack could be located and sized from temperature distribution.

**Keywords:** Thermography, Fatigue Crack, Heat Diffusion, Contact Thermal Resistance

## 1. 서 론

적외선 열화상 기술(infrared thermography)은 검사 대상체의 복사에너지로부터 물체 표면의 열 패턴을 2차원 이미지로 손쉽게 생성할 수 있으며 이를 해석하여 원하는 결함부의 형상이나 위치를 영상으로 만들어 낼 수 있어서 대면적 실시간 검사가 가능하다.

하지만 이 기술은 결함이 표면에 대해 평행하게 일정한 면적을 가지는 2차원 형상을 가질 때는 효율적이지만 깊이 방향으로 생성된 표면 크랙(surface breaking crack)과 같이 깊이 방향으로 만들어진 결함을 검출하는데 어려움이 있다. 예를 들어 표면박리와 같이 표면 아래에 2차원으로 넓게 분포한 결함은 적외선검사가 용이한 반면 닫힌 수직균열의 경우에는 표면에서의 방사율 변

[접수일: 2013. 3. 29, 수정일: 2013. 4. 20, 게재확정일: 2013. 4. 22] *한국기술교육대학교 기계공학부, **한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부, †Corresponding Author: School of Mechatronics Engineering, Korean University of Technology and Education, 1600 Chungjeolno, Byeongchunmyun, Cheonan, Chungnam 330-708, Korea (E-mail: nykim@kut.ac.kr)

ⓒ 2013, Korean Society for Nondestructive Testing

화로 결함을 식별하는데 한계가 있다.

이런 경우 여러 가지 능동형 적외선검사 기술이 개발되어 있는데 대표적인 위상잠금 적외선 열화상 기술에서는 능동적으로 외부 열원을 제어하며 입사파와 대상체의 복사에너지 변화를 동시에 측정함으로써 대상 물체의 결함 검출능력을 향상시키었다. 이러한 위상잠금 열화상 기술은 그동안 검사가 용이하지 않았던 미소결함이나 크랙, 내부박리, 부식 등의 측정에 적용이 확대되고 있으며, 특히 표면 형상이 복잡하여 초음파검사가 불가능한 2차원 혹은 3차원 복합재료나 콘크리트 구조물 등에 유용하게 활용되고 있다[1-3]. 또한 대상체에 고에너지 초음파를 가진시킨 후 균열면에서 만들어지는 마찰열을 표면에서 측정하여 온도 분포를 영상화함으로서 결함의 위치와 크기를 검사하는 초음파-적외선 융합형 능동형 적외선 기술도 최근 연구 개발이 되고 있다[4]. 그외 레이져나 마이크로파, 전자기 유도파 등을 내부에 가진하여 크랙에서의 발열을 유도함으로써 적외선 영상의 대비를 증대시키는 연구도 폭넓게 이루어지고 있다. 이러한 융합형 기술들은 기본적으로 가진시스템을 별도로 장착하여야 하고 초음파나 전자기 유도, 레이져 열원과 크랙과의 반응 메카니즘을 규명해야 하기 때문에 검사 시스템이나 해석 방법이 비교적 복잡하다. 초음파-적외선 방법에서는 초음파 가진이 용이하고 영상화도 단순한 장점이 있으나 이 역시 고에너지 초음파 가진이 필요하고 이에 따라 대상 시편의 형상이 복잡할 경우 사용하는데 한계가 있다. 또한 발열 메카니즘이 크랙 면의 마찰에 의존하는 관계로 닫혀있는 크랙의 검사는 매우 효과가 있으나 열린 크랙의 경우에는 그 효과를 기대하기 어렵다.

본 연구에서는 특별한 별개의 가진원을 조화함수나 펄스함수로 제어하지 않으면서 대상체내에 한 방향으로 동적인 열 유동을 생성함으로서 표면에 만들어진 크랙을 효과적으로 검사하는 적외선검사 방법을 제시하고자 한다. 종전의 능동형 가진에서 사용되는 열원과는 달리 특별한 제어장치가 없이 운전되며 일정한 에너지의 할로겐램프를 대상체의 일부분에 일정하게 조사하고 적외선 카메라와도 연동되어 움직이지 않는다. 기술적 이론 배경을 제시하고 이를 검증하기 위해 표준 시편에 저주기 피로균열을 만든 후 이를 검사하여 그 성능을 검증하였다.

## 2. 강제 열확산 이론( Heat Diffusion)

본 연구에서 사용하는 적외선 기술의 결함 측정 원리를 Fig. 1에서 설명하고 있는데 재료의 한쪽 표면에 일정한 외부 열원을 가해주면 열확산(thermal diffusion)에 의해 열에너지가 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르게 되는데 이때의 열에너지 이동량은 재료의 열확산계수에 비례한다. 그러나 재료 표면에 Fig. 2와 같은 결함(크랙)이 있을 경우, 크랙 내부에 존재하는 공기의 열확산계수가 금속에 비해 크게 낮기 때문에 크랙 좌우에서의 온도 구배가 크게 되며 이러한 온도 차이를 적외선 열화상에서 감지할 수 있다.

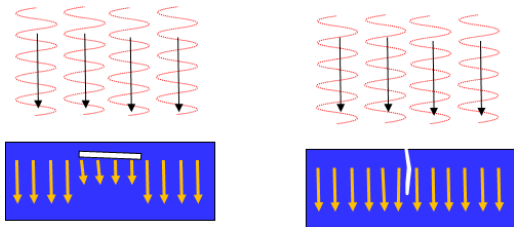


Fig. 1 Thermography for different defects (a) inclusion, (b) surface crack

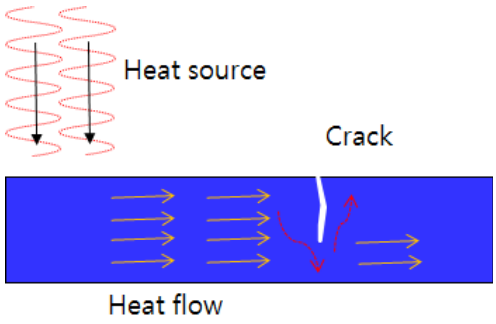



Fig. 2 Heat diffusion around crack

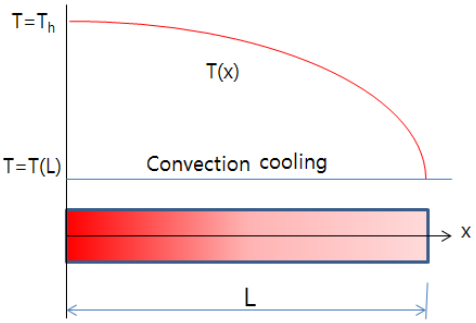



Fig. 3 Mathematical model for heat diffusion of 1-D plate

본 논문에서 관심이 있는 길이가 긴 얇은 판재에 가해진 일정 열원에 의해 만들어지는 열 유동과 온도 분포를 알아보기 위해 Fig. 3과 같은 이상적인 모델을 생각하자. 이러한 1차원 얇은 판재료에 대해 왼쪽 끝단($x=0$)의 온도가 외부 열원에 의해 일정한 온도 $T_h$로 유지된다고 할 때 외부 공기($T_0<T_h$)의 자연대류에 의해 만들어지는 재료내 위치 $x$에서의 1차원 온도 분포 $T(x)$는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\frac{T(x)}{T_h}= \frac{\cosh m(L-x)+(h/mk)\sinh m(L-x)}{\cosh mL+(h/mk)\sinh mL} \quad (1)$$

$$where,\ m^2=\frac{\zeta h}{k}$$

식(1)에서 $k$는 열전달계수, $h$는 대류 열전달계수, $\zeta$는 단면적에 관한 형상계수이다.

식(1)의 온도 분포는 Fig. 3처럼 나타나는데 개략적으로 포물선 형태의 온도 분포를 나타낸다. 즉 $x=0$에서 $T_h$인 온도가 길이에 따라 감소하는데 그 형태는 하이퍼 함수를 따라 온도가 감소한다.

그런데 이제 Fig. 3의 재료 표면에 크랙이 발생하였다고 하면, 크랙의 접촉계면에서 접촉 열저항(thermal contact resistance)이 생기기 때문에 크랙 좌우 면에서 큰 온도 강하가 일어난다. 이러한 변화를 Fig. 4에서 보여주고 있는데 재료 A와 B의 계면에서 고체 접촉을 하는 부분에서의 열유동($q_{contact}$)과 접촉하지 않는 부분에서의 열유동($q_{gap}$)은 큰 차이가 나며 이에 따라서 계면은 얇더라도 크랙에서 급격한 온도변화($\triangle T=T_A-T_B$)를 발생시키고 이것을 적외선으로 감지할 수 있다. 더구나 접촉면에서의 압축응력에 따라서도 접촉 열저항이 달라지므로 크랙면의 닫힘 정도도 평가할 수 있다.

결국 크랙이 존재하는 1차원 판재에 열원을 이용하여 열유동을 만들게 되면 판재내의 온도 분포는 기본적으로 식(1)을 따라 만들어지는데 크랙이 있는 위치에서 갑작스런 온도강하 $\Delta T$가 발생하는 것을 알 수 있으며 이러한 이 온도 변화를 적외선을 이용해 측정함으로서 크랙을 간접적으로 검출할 수 있었다.

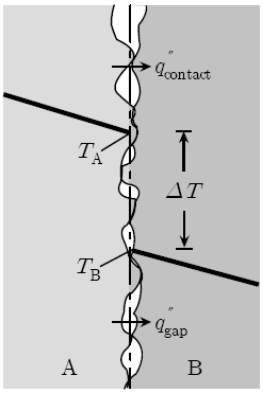



Fig. 4 Temperature across crack interface

## 3. 적외선 측정 장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 크게 세 부분으로 나뉜다[5,6]. 첫째는 적외선 열화상 카메라(FLIR사의 Thermovision A20M)이며 둘째는 대상체에 열을 가하는 할로겐램프와 할로겐램프의 에너지를 제어하는 SCR 사이리스터, 세 번째는 할로겐램프와 카메라를 제어하고 데이터를 수집하는 인터페이스 및 열화상 이미지를 생성하고 이로부터 시편의 결함을 검출해주는 소프트웨어로 나누어진다. 이 세 부분은 전체적으로 LabVIEW에서 통제되고 운영되는데 IEEE- 1394를 통하여 할로겐램프의 열에너지와 시간을 조절함과 동시에 적외선 카메라로부터 대상체의 적외선 신호를 수집함으로써 표면분포 변화를 측정하였다.

이미지는 8-bit 칼라로서 60 Hz의 실시간 이미지 획득이 가능하고 이미지 전송은 firewire/ethernet으로 이루어졌다. 그리고 카메라를 연결한 전체 시스템을 Fig. 6과 같이 구성하였다.

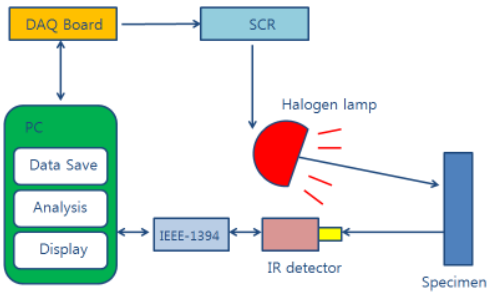



Fig. 5 Configuration of active IR thermography

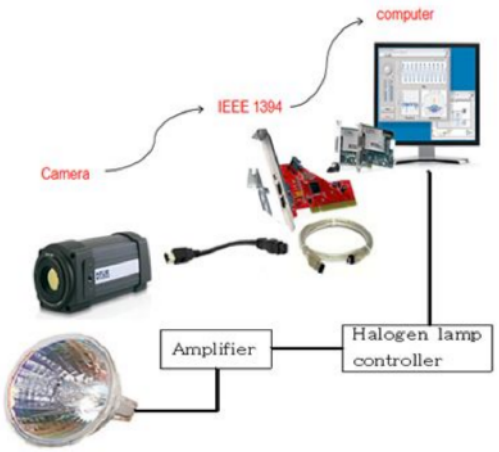



Fig. 6 Hardware system for IRT

## 4. 실험 및 결과

### 4.1. 피로균열 시편

제안된 방법을 이용하여 균열 검사를 수행하기 위해 저주기 피로균열 시편을 제작하였다. 시편의 상세는 KS규격에 따라 판형 표준 피로균열 시편(KS B0801-13A)을 제작하였는데 가공된 후의 시편의 모습을 Fig. 7에서 보여주고 있다(두께는 2 mm). 이 시편의 중앙부에 V형 노치를 방전가공으로 생성하였는데, 이는 피로균열의 시작이 노치 끝단에서부터 만들어지게 하기 위해서이다.

최종적으로 저주기 피로시험에 의해 만들어진 피로균열을 Fig. 8에서 보여주고 있는데 노치 끝단에서 아래 방향으로 약 8 mm정도 진전된 것을 확인할 수 있다.

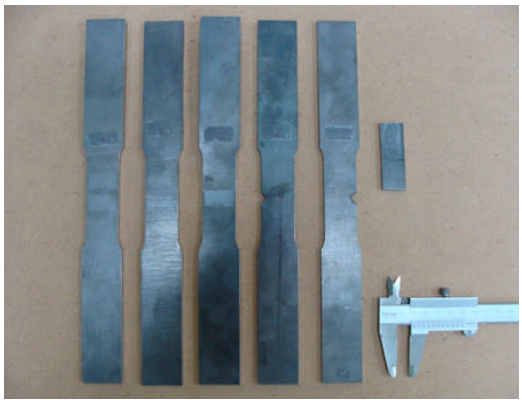


Fig. 7 Steel plate specimen with/without V-notch

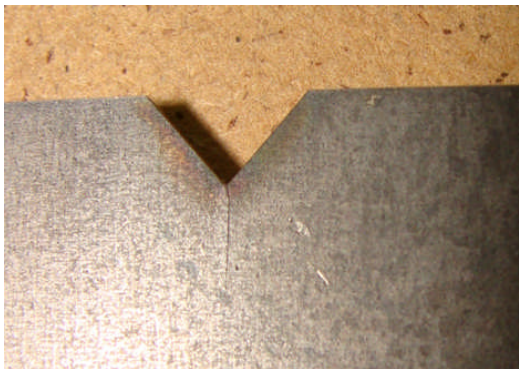
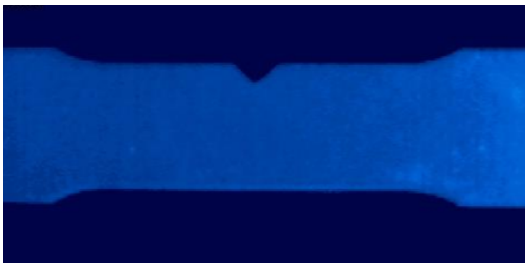


Fig. 8 Low-cycle fatigue crack at notch

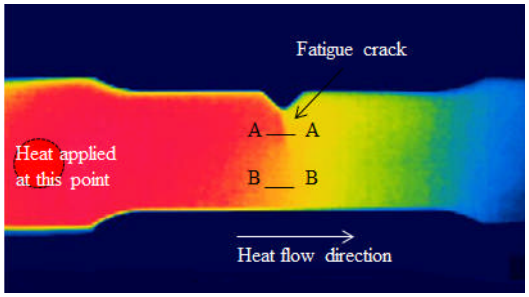
### 4.2. 적외선 열화상 측정 결과

개발된 적외선 열화상 기법의 성능을 확인하기 위하여 피로시편의 왼쪽 끝단에만 할로겐램프를 일정한 에너지로 조사하면서 열의 흐름과 온도 분포를 적외선 카메라로 측정하였다. 열이 가해지기 전 실온(17도)에서의 시편 온도는 균일하여 Fig. 9(a)에서와 같이 열 유동이 없지만, 할로겐램프에 의해 열이 가해지면 열에너지는 온도가 낮은 오른쪽 부분으로 이동하게 되는데 이때의 온도 분포는 Fig. 9(b)와 같이 구배를 가지게 된다. 즉, 적색 부분은 온도가 높은 부분이며 오른쪽의 파란색 부분은 저온부로서 온도 변화가 위치에 따라 서서히 변화하는 것을 볼 수 있다.

그런데 Fig. 9(b)에서 열에너지가 이동하는 중에 크랙을 만나면 급격한 열확산계수의 변화로 인해 크랙이 없는 부분보다 온도구배가 상대적으로 매우 크다. 이 특징은 Fig. 9(b)에서 분명히 육안으로 확인할 수 있는데 크랙의 좌우 경계면에서 온도의 변화가 큰 것을 알 수 있다(A-A 참조). 이것을 크랙이 없는 부분인 B-B부분과 크랙이 존재하는 A-A부분의 온도 그래프로 비교해보면 분명히 알 수 있다. Fig. 10(a)는 B-B 선상에 있는 점들에서 적외선에 의해 측정된 상대적인 온도 데이터를 위치(pixel)에 따라 나타낸 것이며 Fig. 10(b)는 A-A 선상에 있는 점들에서의 온도 데이터를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)을 보면 온도는 처음에는 변화가 크지 않다가 오른쪽으로 갈수록 감소하는데 이것은 정상상태의 1차원 열방정식에서 보면 거리에 따른 온도 변화가 식(1)에서 보여주는 하이퍼 함수의 형태로 변하는 것을

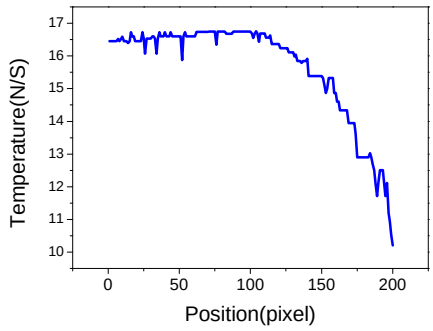


(a)

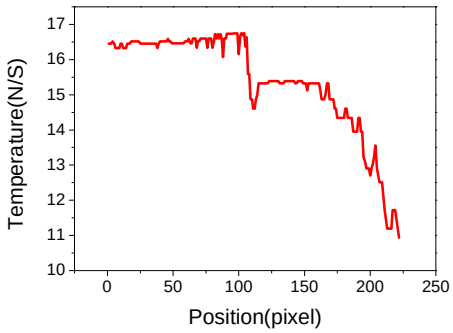



(b)

Fig. 9 Temperature distribution in fatigue crack specimen, (a) no heat applied, (b) heat applied at the left end




(a)




(b)

Fig. 10 Temperature variation, (a) B-B section, (b) A-A section

생각할 때 타당하다. 그런데 크랙을 관통하는 A-A 부분 상에 있는 점들의 온도 변화를 보면 크랙을 지나면서 온도 변화가 갑자기 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 크랙 내부에 존재하는 접촉면을 열에너지가 통과할 때 열저항(thermal resistance)이 커서 나타나는 현상이며 이러한 온도구배의 갑작스런 변화 지점을 통해 크랙의 위치를 평가할 수 있었다.

## 5. 결 론

평판형 피로시험편 내에 단방향의 열 유동을 만들어서 피로균열을 탐지하는 능동형 적외선 열화상 기술을 제시하였다. 피로균열의 열 저항으로 인해 크랙 주변에 발생하는 급격한 온도 변화를 적외선으로 영상화함으로써 크랙을 검사할 수 있음을 확인하였으며 이를 구체적인 온도 변화 데이터로 검증하였다. 이 방법은 가진열원의 제어가 단순하고 용이하며 특별한 영상처리 기술이 필요치 않은 간단한 장점이 있다. 하지만 본 논문에서 조사한 표준시편의 피로균열은 두께가 얇은 판재의 두께 방향으로 균열이 관통하여 발생한 경우를 대상으로 하였기 때문에 판의 두께가 증가하고 결함 깊이가 작은 경우에는 그 효과가 상대적으로 작아질 것으로 예상된다. 또한 크랙의 위치나 크기를 정확히 영상화하기 위해서는 불필요한 온도구배를 제거하는 열전달 모델과 이미지 프로세스 기술이 더 필요할 것으로 판단된다.

## 후기

이 논문은 한국기술교육대학교의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

[1] O. Breitenstein and M. Langenkamp, "Lock-in Thermography: Basics and Use for Functional Diagnostics of Electric Components," Springer, ISBN 3-540-43439-9, pp. 18-23 (2003)

[2] S. Huth, O. Breitenstein, A. Huber, D. Dantz, U. Lambert and F. Altmann, "Lock-in IR-hermography - A novel tool for material and

device characterization," *Solid State Phenomena*, Vol. 82-84, pp. 741-746 (2002)

[3] M. Y. Choi, K. S. Kang, J. H. Park, W. T. Kim and K. S. Kim "Lock-in infrared thermography, defect sizing, defect location, shearing phase technique," *JKSNT*, Vol. 27, No. 4, pp. 322-327 (2007)

[4] M. Y. Choi, H. S. Park, J. H. Park and K. S. Kang, "Defects evaluation at lap joint friction stir welding by lock-in ultrasound infrared thermography," *JKSNT*, Vol. 30, No. 2, pp. 104-109 (2010)

[5] T. H. Min, H. C. Na and N. Kim, "Development of LabVIEW program for lock-in infrared thermography," *JKSNT*, Vol. 31, No. 2, pp. 127-133 (2011)

[6] T. J. Lee, S. H. Kim, T. H. Min and N. Kim, "Thermographic detection of fatigue crack," *Proceedings of 2011 Annual Fall Conference of KSNT*, pp. 241-246 (2011)