



탄소강 선재 표면균열의 능동형 유도 적외선 열화상 검사

김노유^{a*}, 양승용^b

Inspection of Surface-Breaking Cracks on Steel Wire Rods Using Active Induction Infrared Thermography

Nohyu Kim^{a*}, Seung-Yong Yang^b^a The School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education^b The School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 November 2021
Revised 7 December 2021
Accepted 17 December 2021

Keywords:

Steel wire rod
Surface crack
Active infrared thermography
Pulsed induction heating

ABSTRACT

In this study, an active induction infrared thermography is developed and applied to detect surface-breaking cracks on steel wire rods, which are frequently made by the rolling process in the manufacturing factory, using the thermal response of surface cracks to an impulsive excitation of electromagnetic induction. Artificial cracks, 20 μm wide and 10 mm long along the axial direction with nine different depths ranging from 20 μm to 100 μm by increments of 10 μm , are machined by laser on two types of steel wire rods ($\phi 5.5$ mm and $\phi 13$ mm) to investigate the detection capability of the induction infrared thermography equipment. All artificial cracks are successfully detected from thermal images, and it is concluded that the active induction thermography is a fast and low-cost method to inspect the surface micro-cracks of steel wire rods that could not be detected and visualized by other nondestructive methods.

1. 서론

압연공정과 같은 생산제조 과정에서 탄소강 선재(steel wire rod)에 빈번하게 발생하는 미세 표면균열은 최종 생산품의 파손을 일으키는 원인이 되어 고장이나 심각한 위험을 초래할 수 있다. 이와 같은 탄소강 선재 표면에 발생하는 표면 균열과 조직사진을 Fig. 1의 (a)와 (b)에서 보여주고 있는데 이러한 균열을 검사하기 위해서 생산업체에서는 무작위로 추출된 선재의 일부분을 작은 원기둥 형태로 절취한 다음 축방향으로 소성 압축시킨 후 파단면을 육안이나 현미경으로 검사하는 파괴적인 방법(destructive test)을 사용하고 있다. 하지만, 이러한 방법은 검사시간이 길어서 전수 검사를 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 이를 개선하

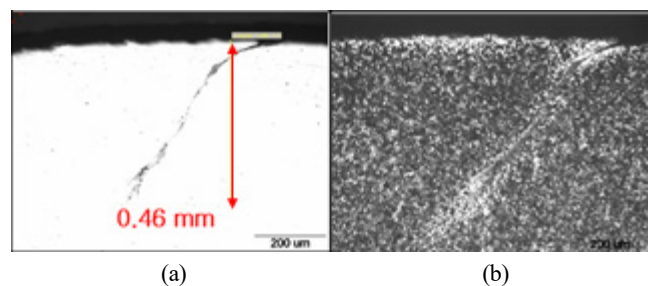


Fig. 1 A surface-breaking crack of steel wire rod

기 위한 효과적인 비접촉식 검사 방법이 필요한 실정이다.

이러한 표면 균열의 비파괴적인 검사방법으로는 전통적으로 초음파 검사나 와전류 탐상 검사기법이 사용되어 왔으나 검사체

* Corresponding author. Tel.: +82-41-560-1126

E-mail address: nykim@koreatech.ac.kr (Nohyu Kim).

에 센서를 접촉하거나 일정한 거리로 근접시켜야하기 때문에 3차원 원기둥 형태의 탄소강 선재를 검사하는 것은 불가능하며 실시간 전수검사도 가능하지 않다. 반면에 적외선 검사방법은 검사체가 방출하는 볼츠만 복사열을 적외선의 형태로 측정하여 표면 결함을 영상화 할 수 있는 비접촉식 실시간 검사 기술로서 대면적 실시간 검사가 가능하여 널리 활용되고 있다^[1-3]. 하지만 종래의 적외선 검사방법으로도 표면에서 발생하여 내부로 진행되는 미세 균열(surface-breaking crack)은 검출하기 어려운데 그 이유는 균열이 작아지면 균열부와 정상부의 온도 차가 거의 나타나지 않기 때문이다^[4,5].

본 연구에서는 이러한 탄소강 선재에 발생하는 미세 표면균열을 검출하기 위하여 모재와 균열부의 방사열의 차이를 극대화할 수 있는 전자기 유도 가열방식의 적외선 열영상 기법과 장치(active infrared thermography)를 개발하였다. 이 방법에서는 외부에서 별도의 에너지를 능동적으로 사용하여 시험체에 펄스형태의 에너지를 가진 후 선재 시편에서 발생하는 열적 응답(thermal response)을 적외선으로 감지하여 미세 균열을 영상화하였다.

2. 능동형 전자기 유도 적외선 검사의 원리

현재의 적외선 열화상기술은 검사대상체가 자체적으로 생성하는 복사열(thermal radiation)을 적외선 센서로 영상화하는 수동적인 측정 방법(passive method)으로서 간편하고 대면적을 실시간으로 검사할 수 있어서 널리 이용되고 있으나 탄소강 선재와 같이 가늘고 긴 원통형 3차원 부재에 발생하는 미세 표면 균열은 검출하기 어렵다. 따라서 기존의 수동적인 적외선 기술과는 달리 별도의 에너지를 사용하여 외부에서 시험체에 펄스나 변조파 형태의 파동 에너지를 가진 후 시험체에서 발생하는 열적 응답 특성을 적외선으로 감지하여 결함을 영상화하는 능동형 적외선 열화상 기술(active IR thermography)이 개발되었는데, 감도가 우수하여 미세한 표면결함의 분포를 정확하고 빠르게 검사할 수 있어서 최근 그 활용도와 적용범위가 확대되고 있다^[6-8]. 이 방법들 중에서 외부의 에너지원으로 전자기 유도 가열방식을 사용하는 전자기 유도 적외선 열화상 기술은 Fig. 2(a)에서 보여주는 것과 같이 전도성 시험체에 특정방향으로 전자기장을 만들어 주는 유도 코일을 근거리 위치시키고, Fig. 2(b)와 같은 펄스형태의 교류 전류를 인가해 재료내에 순간적으로 높은 와전류(eddy-current)가 발생되면 표면 균열과 같이 저항 손실이 큰 부분에서는 다른 부분과 차별화된 주울 열(Joule heat)이 발생하는데(Fig. 2(c) 참조) 이 온도분포를 적외선 카메라를 이용하여 결함(균열)을 영상화하는 기술이다. 본 연구에서는 지름이 작은 원통형 강철 선재에 펄스형태의 에너지를 발생시켜 비접촉식으로 신속하게 미세 균열을 가시화할 수 있는

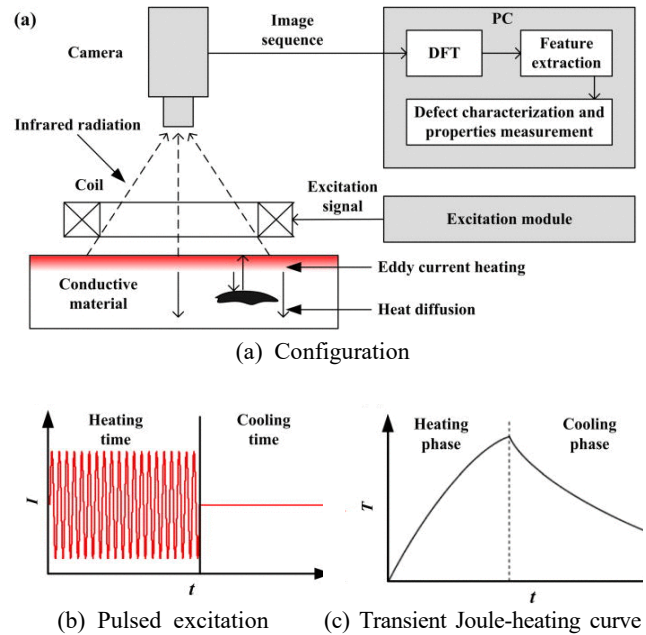


Fig. 2 Principle of induction thermography

전자기 유도 방식의 적외선 열화상 장치를 개발하였다.

3. 유도 코일의 가진 주파수 설계

전자기 유도 방식의 적외선 열화상 기술에서 가장 중요한 설계 변수는 유도 코일의 가진 주파수인데 그 이유는 전자기 유도(induction)에 의해 선재 표면부근에 만들어지는 와전류의 크기와 침투깊이가 교류 전류의 주파수에 의해 결정되며 와전류의 침투깊이가 전자기 유도 방식의 적외선 열화상 기술의 균열 검출 민감도를 결정하는 인자이기 때문이다. 교류전류가 인가된 코일이 Fig. 3(a)와 같이 이상적인 반무한 평면 위에 설치되었을 때 내부에 유도되는 와전류(eddy-current)는 Fig. 3(a)와 같이 재료 표면에 원주방향으로 생성되는데 이 와전류 $E(\vec{r}, t)$ 는 Maxwell 방정식으로부터 깊이 \vec{r} 와 시간 t 에서 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$E(\vec{r}, t) = E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} = E_0 e^{i(\omega t - \alpha \vec{r})} e^{-\beta \vec{r}} \quad (1)$$

여기서, \vec{k} 는 전파벡터(propagation vector)로서 $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$ (λ 는 파장)이며 감쇄가 있는 등방성 재료에서 $\vec{k} = \alpha - i\beta$ 로 표현한다 면 식 (1)의 $e^{i(\omega t - \alpha \vec{r})}$ 는 주파수 ω 를 가지는 1차원 전자기파를 나타내며 $e^{-\beta \vec{r}}$ 는 위치(깊이)에 따라 감소하는 에너지 감쇠를 나타내는 항이다. 이 감쇠항의 β 는 재료와 가진 주파수에 따라 변하는 물성 값인데 이 값의 역수를 와전류의 침투깊이(skin depth) δ 라고 정의하며 표면에서의 전자기파 에너지가 $0.37(=1/e)$ 배로

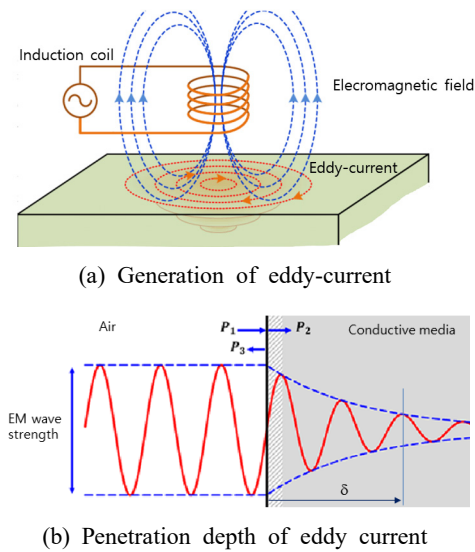


Fig. 3 Eddy current induced by electromagnetic wave

감소하는 깊이를 나타낸다. β 가 클수록 유도되는 와전류의 밀도가 재료내부로 갈수록 급격히 작아져서 표피에만 와전류가 유도되며 β 가 작은 재료의 경우에는 재료 내부에도 와전류가 잘 만들어진 다. β 의 특성은 구체적으로 다음 식 (2)와 같이 재료의 전자기적 특성과 주파수에 의해 결정된다^[9-11].

$$\beta = \sqrt{\pi f \mu \sigma} = \frac{1}{\delta} \quad (2)$$

여기서, f 는 가진 주파수(Hz), μ 는 검사체의 유전율(permeability, Henry/m), σ 는 전도도(conductivity, Siemens)를 나타낸다. 생산 현장에서 문제가 되고 있는 표면 균열은 대략 $100 \mu\text{m}$ (깊이) 이하의 크기로 알려져 있는데 이러한 크기의 균열을 선택적으로 가열하기 위해서는 전자기 유도에 의한 와전류의 침투 깊이 δ 가 균열 깊이(최대 $100 \mu\text{m}$)보다 작아야 하므로 이 조건을 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} < 100 \mu\text{m} \quad (3)$$

식 (3)의 조건으로부터 전자기 유도 가진 주파수 f 를 결정할 수 있는데 탄소강 선재는 전기 전도도가 약 1.7 MS/m 이며 유전율은 $1.26 \times 10^{-4} \text{ H/m}$ 이므로 필요한 가진 주파수는 식 (3)으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$f \geq \frac{10^8}{\pi \mu \sigma} \approx 150 \times 10^3 \text{ Hz} \quad (4)$$

식 (4)로부터 탄소강 선재의 표면 균열을 효과적으로 가진하기

위해서는 대략 150 kHz 이상의 교류전류가 필요함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 150 kHz~400 kHz의 가진 주파수 범위를 가지는 유도가열 장치(EASY HEAT-1.2 kW, 영국 Ambrell사)를 사용하였고 LabView 프로그램을 이용하여 외부에서 컴퓨터로 유도코일의 주파수와 에너지를 제어하였다.

능동형 적외선 시험에서 가진 코일의 주파수 외에도 가진 에너지(전류)의 크기도 중요한데 유도가진 장치의 출력은 제어가 용이하기 때문에 실험대상인 선재의 지름과 크기, 코일과의 거리 등에 따라 다양한 에너지로 시험체를 가진하면서 최적의 적외선 이미지를 제공하는 에너지를 실험적으로 결정하여 사용하였다.

4. 유도 적외선 열화상 시스템

본 연구에서 개발한 전자기 유도 적외선 열화상 실험 장치의 구성도를 Fig. 4에 나타내었는데 크게 다섯 부분으로 구성된다. 첫째로는 검사대상체로부터 방사되는 열에너지를 감지하여 열화상 이미지를 획득하는 적외선 열화상 카메라이며, 둘째는 검사 대상체에 전자기 유도를 이용하여 와전류를 발생시키는 유도 코일, 세 번째는 유도코일에 대전류 교류 전력을 공급하고 증폭/제어하는 전력제어장치, 네 번째는 열원(유도코일)과 적외선 카메라를 제어하고 데이터를 수집하는 인터페이스 장치, 그리고 마지막으로 열화상 이미지 신호로부터 위상신호(phase)나 정보를 추출하고 이로부터 균열 결함을 검출하는 Labview기반의 운영 소프트웨어부로 나누어진다.

이 다섯 부분은 전체적으로 컴퓨터에서 통제되고 운영되는데 IEEE-1394를 통하여 가진원(유도 코일)의 가진 주기와 에너지를 조절함과 동시에 적외선 카메라의 영상취득 타이밍(frame grabbing)을 동기시켜 대상체로부터의 신호를 수집하도록 설계/제작되었다^[12]. Fig. 4의 유도코일은 Labview에서 생성된 조화함수 형태의 AC 전압에 따라 유도 코일로 입력되는 전류가 제어되는

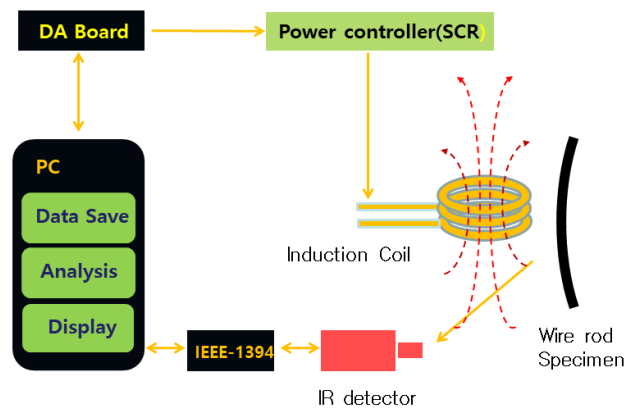


Fig. 4 Schematic of induction thermography

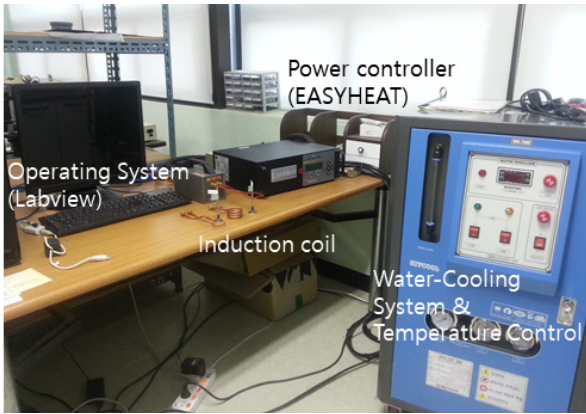


Fig. 5 Induction infrared thermography system

데 디지털 전력제어장치(power controller)에서 열원을 위상 제어할 수 있도록 Labview 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서는 유도코일에 펄스형태의 가진 에너지를 공급하면서 이 에너지 신호와 동기되어 적외선 카메라로부터 열화상을 취득하였다.

실험에서 사용된 적외선 카메라는 FLIR사의 Thermovision A20인데 micro-bolometer 타입의 검출기(FPA)로서 스펙트럼 범위가 7.5~13 μm 이며 분해능(FOV)이 2.1 mrad인 렌즈가 장착되어 0.1°C의 온도 민감도와 160×120 pixel의 공간 해상도를 가진다. 컴퓨터와 Labview로 연동되어 적외선 열화상 이미지를 16-bit 색으로 표시하면서 60 Hz의 실시간 이미지 획득이 가능하고 이미지 전송은 firewire/ethernet으로 이루어지는데 IEEE 1394를 이용하여 PC와 통신이 가능해서 digital input/output 단자를 통해 기능을 제어하거나 이미지를 실시간으로 전송받을 수 있다. 특별히 본 연구에서는 지름이 작은 탄소강 선재 표면의 미세 균열을 검출하기 위하여 적외선 카메라에 게르마늄 재질의 적외선 근접 렌즈를 부가적으로 장착하여 수십 마이크로 크기의 열화상 변화를 감지하도록 하였다. 실험에서 사용한 유도코일의 전력제어 장치는 영국 Ambrell사의 EASYHEAT 시스템인데 수냉식 1.2 kW용량으로서 주파수는 150 kHz-400 kHz의 범위로 동작하며 컴퓨터와 통신을 통해 자동제어와 데이터 영상처리가 가능하도록 Labview 프로그램을 자체적으로 개발하여 사용하였다. 전체적으로 제작된 유도 적외선 열화상 장치를 Fig. 5에서 보여주고 있다.

5. 탄소강 선재 시편의 인공 균열 가공

POSCO 생산 공장에서 직접 $\phi 5.5\text{ mm}$ 와 $\phi 13\text{ mm}$ 의 두 가지 강철 선재(wire rod)를 곡률 1 m의 굽어진 롤(roll) 상태로 추출하였다. 실제 현장에서는 선재를 롤(roll)에 감아서 보관과 이동을 하기 때문에 이러한 상황을 그대로 재현하기 위해 선재를 곡률이 있는 그대로의 상태에서 선별하였으며 선별된 선재 시편들($\phi 5.5\text{ mm}$)

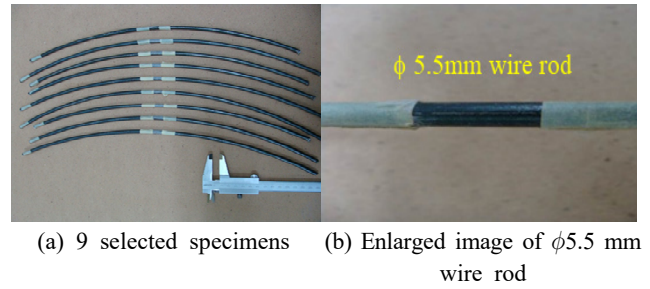


Fig. 6 Photo-image of wire rods

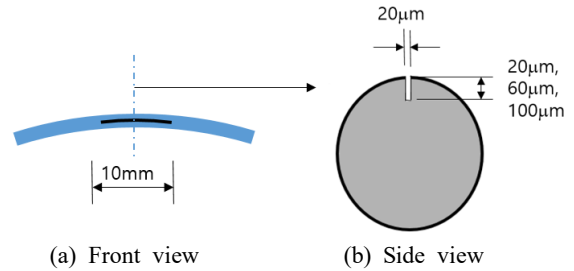


Fig. 7 Size and location of artificial crack

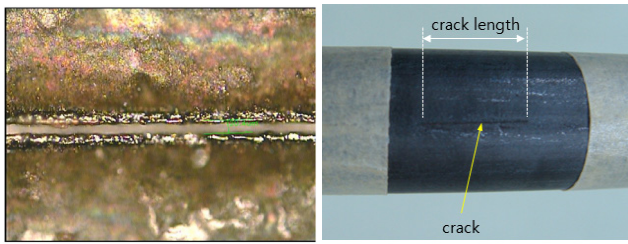
의 모습을 Fig. 6에서 보여주고 있다. 이 시편들의 중앙부 원주면에 길이(축)방향으로 길이 10 mm, 폭 약 20 μm 를 가진 인공 균열을 9종류의 깊이(20 μm 에서 100 μm 까지 10 μm 간격으로 증가)로 설계하여 총 18개의 인공시편을 마이크로 레이저로 가공하였는데 제작된 인공균열의 크기와 형태를 Fig. 7에서 도식적으로 보여주고 있다.

또한 시험이나 이송 중에 표면에 흠이 발생하지 않도록 인공 균열의 좌우 원주면에 종이 테이프를 부착하여 보호하였다.

가공된 시편을 균열 깊이에 따라 A, B, C에서 H, I까지 9단계로 분류(labeling)한 후 각 시편의 실제 가공깊이를 실측하여 그 결과를 Table 1에 정리하여 나타내었다. 가공된 인공 균열은 육안으로 확인하거나 크기를 구별할 수 없지만 현미경 측정결과 원하고자 하는 크기로 적절하게 제작되었음을 확인할 수 있었으며 그 중 지름 $\phi 13\text{ mm}$ 시편에 만들어진 인공 균열(시편 A)의 현미경 사진을

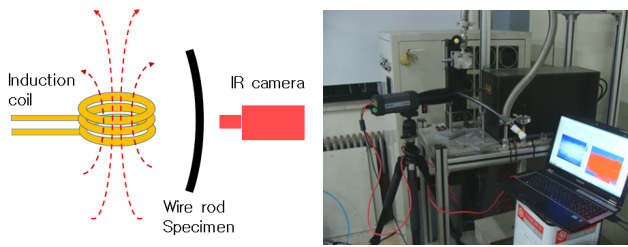
Table 1 Artificial cracks on steel wire rods

Rod label	Crack depth (μm)	
	$\phi 5.5\text{ mm rod}$	$\phi 13\text{ mm rod}$
A	19	18
B	28	30
C	43	43
D	52	50
E	64	60
F	73	70
G	84	82
H	94	91
I	101	98



(a) Microscopic image (b) Photo-image

Fig. 8 Artificial crack on specimen "A"



(a) Schematic diagram (b) Experimental setup

Fig. 9 Arrangement of induction coil and infrared camera

Fig. 8에서 보여주고 있다.

6. 유도 적외선 열화상 시험

적외선 검사는 인공균열 이외에 어떠한 종류의 표면 가공이나 페인트 도장, 후처리를 하지 않고 생산품 그대로의 상태에서 시행되었는데 탄소강 선재의 형태와 균열방향을 고려하여 적외선 카메라와 유도코일, 시편의 위치를 Fig. 9의 왼쪽그림과 같이 배치하고 적외선 시험을 수행하였다. 유도 코일 동작조건은 150 kHz의 가진 주파수를 사용하였는데 시편의 지름이 작고 긴 부재인 관계로 열침투 깊이가 상대적으로 커서 시편 검사부위 전체에서 발열이 발생하였다. 고주파 유도 가열시간은 약 0.1초에서 2초 사이에서 최적의 열화상 이미지를 얻을 수 있도록 가진 조건을 사전에 조사하였는데, 그 결과로서 코일을 시험체 중심부에서 약 20 mm 정도 위치시킨 상태에서 1초간 펄스형태로 30 A의 전류를 인가하여 적외선 시험을 수행하였다. 이러한 조건에서 선재시편의 균열부 주변에 발생하는 온도변화를 6 Hz의 샘플링 속도로 적외선 센서를 이용하여 영상화하였는데, 균열 부분에서는 내부가 비어있는 상태이기 때문에 상대적으로 낮은 온도를 나타내었고 모재 부분에서는 상대적으로 높은 온도를 나타내었다. 이것은 정상 모재에서는 전자기 유도에 의한 발열로 온도가 증가하는 반면에 균열부에서는 발열매질이 없고 방사율이 정상부위와 다르기 때문에 온도가 증가하지 못한 결과이다. 따라서 순간적인 가열과정과 냉각과정에서 균열부와 모재의 발열차이로 발생하는 선명한 적외선 열화상을 얻

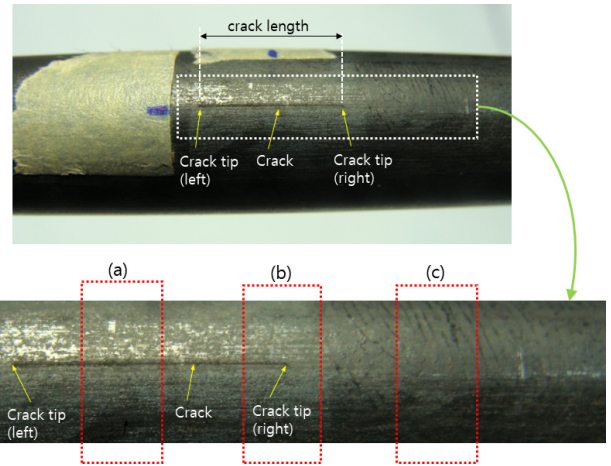


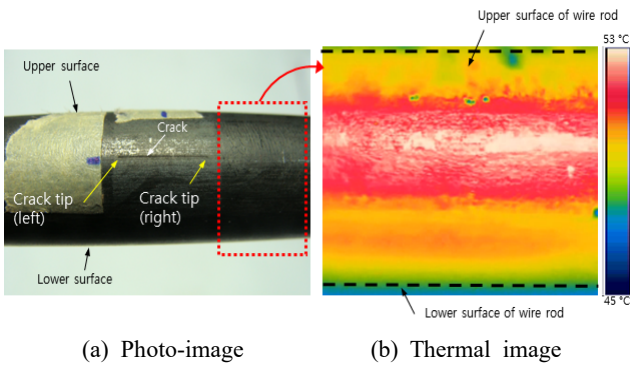
Fig. 10 Inspection area of the surface of wire rod by thermal imaging

을 수 있었으며 전체적으로 모든 인공균열을 모두 성공적으로 검출할 수 있었다.

7. 시험결과 및 고찰

Table 1에 나타난 것과 같이 9단계 깊이로 제작된 인공 균열들을 유도 적외선 열화상 실험 장치를 이용하여 검사하였다. 각 시편의 적외선 검사는 균열을 기준으로 3부분으로 나누어 수행하였는데 Fig. 10에 나타난 것처럼 균열이 없는 부위(c)와 균열 끝부분이 포함된 부위(b), 그리고 균열 중앙부(a)에 대해 적외선 검사를 시행하였다.

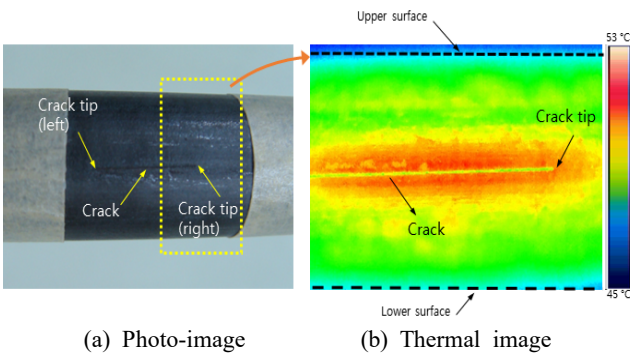
Fig. 11은 Table 1에 나타난 시편($\phi 13$ mm) 중에서 인공균열의 깊이가 제일 작은 시편 A의 정상부위(균열이 없는 부분)에 대한 적외선 열화상을 보여주고 있는데 적외선 영상의 좌우는 선재의 길이 방향이며 상하는 선재의 두께방향이다. Fig. 11의 적외선 영상을 보면 선재시편의 중심축에서 흰색과 붉은색으로 나타나며 중심축에서 멀어질수록 주황색과 초록색으로 변하여서 마치 중심부에서는 가장 온도가 가장 높고 주변부로 갈수록 온도가 낮아지는 것처럼 나타나는데 이것은 실제 표면의 온도를 나타내는 것은 아니다. 이것은 시편이 이상적인 흑체(black body)가 아니기 때문인데 흑체는 동일한 온도에서 모든 방향으로 동일한 열에너지를 방출하는 등방특성이 있는 반면에 일반 물체는 방사각도에 따라 열에너지가 달라지는 이방특성을 가진다. 따라서 선재의 원주면에 따라 방사각도가 달라지면 열에너지의 방사율(emissivity)이 변하기 때문에 선재의 길이 방향 중심선에서는 적외선 에너지가 높게 나타나고 중심선에서 멀어질수록 적외선 에너지가 낮게 나타나는 경향을 보이게 된다. Fig. 11은 균열이 없는 정상부위를 검사한 결과이기 때문에 균열이 나타나지 않았지만 국부적으로는 흠이나



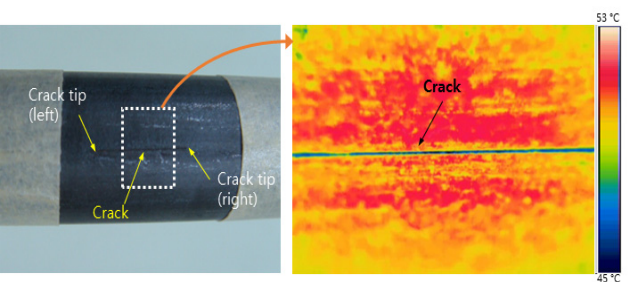
(a) Photo-image (b) Thermal image
Fig. 11 Photo and thermal image of wire rod without crack

가공흔적을 관찰할 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 11과 동일한 시편의 인공 균열 선단 부분에서 측정된 적외선 열영상인데 Fig. 11과는 다르게 수평 중심축 부근에서 균열과 균열선단(tip)이 관찰되는 것을 확인할 수 있다. 이 경우 균열은 모재에 비해 온도(적외선 방사 에너지)가 상대적으로 낮아 노란색으로 표시되는 것을 볼 수 있으며 균열의 폭과 길이가 선명하게 나타나고 있다. 다음으로 검사 영역을 인공균열의 중심부(Fig. 10의 (a)부분)에 위치시켜서 균열을 검사하였는데 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13의 적외선 영상에서는 Fig. 12와는 다르게 수평방향의 중심축 부근에서 전체 이미지를 길게 관통하는 균열을 확인할 수 있으며 이 균열의 상하 주변은 균열 부분보다 온도



(a) Photo-image (b) Thermal image
Fig. 12 Photo and thermal image of the crack tip



(a) Photo-image (b) Thermal image
Fig. 13 Photo and thermal image at the center of crack

Table 2 Thermal image of artificial cracks

$\phi 5.5$ mm specimen		$\phi 13$ mm specimen	
Crack depth	Thermal image	Crack depth	Thermal image
A (19 μm)		A (18 μm)	
B (28 μm)		B (30 μm)	
C (43 μm)		C (43 μm)	
D (52 μm)		D (50 μm)	
E (64 μm)		E (60 μm)	
F (73 μm)		F (70 μm)	
G (84 μm)		G (82 μm)	
H (94 μm)		H (91 μm)	
I (101 μm)		I (98 μm)	

(적외선 에너지)가 높아서 붉은 색으로 나타나는 것을 알 수 있다.

같은 방법으로 깊이가 다른 인공균열 시편들에 대해서 측정된 적외선 시험 결과(적외선 이미지)를 Table 2에 요약하여 정리하였는데 모든 크기의 균열을 성공적으로 검출할 수 있었다. 이상의 실험결과로부터 능동형 적외선 열영상 기술을 이용하여 강철 선재의 표면균열의 존재 유무는 물론 크랙의 위치나 크기를 2차원 영상을 통해 손쉽게 결정할 수 있음을 확인하였다.

8. 결 론

탄소강 선재(steel wire rod)에 발생하는 미세 표면균열을 검사하기 위하여 시험체에 순간적으로 강한 전자기장을 인가한 후 균열부와 정상부의 발열차이를 적외선으로 영상화하여 결함을 검사하는 유도 적외선 열화상 시스템을 개발하였다. 생산 공정 중 주로 발생하는 미세균열을 모사하기 위해 직경이 다른 두 종류의

선재($\phi 5.5$ mm와 $\phi 13$ mm) 표면에 축 방향으로 인공균열을 20 μm 에서 100 μm 까지 9단계의 깊이로 가공/제작하고 개발된 유도 적외선 열화상 기술을 이용하여 인공균열을 검사하였다. 적외선 시험을 통해 모든 인공균열을 성공적으로 검출할 수 있었으며 균열의 유무는 물론 균열의 위치와 크기(폭과 길이)를 2차원 적외선 열화상으로부터 신속하게 확인할 수 있었다. 탄소강 선재에 발생하는 표면 균열에 대한 불량유무를 판정하기 위해서는 균열의 유무와 크기도 중요하지만 균열 깊이에 대한 측정결과도 필요하기 때문에 향후에는 균열부에서 발생하는 주울(Joule) 열과 적외선 열방사에 대한 이론/수치 모델을 개발하여 인공결함과 비교한다면 표면 균열의 정량적인 깊이에 대한 정량적인 평가도 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2021M2E6A1084689)과 2020년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥과제 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Choi, M., Kim, W., 2004, The Utilization of Nondestructive Testing and Defect Diagnosis using Infrared Thermography, *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, 24:5 525-531.
- [2] Carlomagno, G. M., Meola, C., 2013, Infrared Thermography in Materials Inspection and Thermo-fluid Dynamics, *Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas.*, 1:2 173-198, <https://doi.org/10.2495/CMEM-V1-N2-173-198>.
- [3] Chung, Y., Shrestha, R., Lee, S., Kim, W., 2020, Thermographic Inspection of Internal Defects in Steel Structures: Analysis of Signal Processing Techniques in Pulsed Thermography, *Sensors*, 20:21 6015, <https://doi.org/10.3390/s20216015>.
- [4] Kang, H., Kim, C., Cho, Y., 2018, Quantitative Evaluation Method of Material Defects in Component Parts Using Infrared Thermal Imaging, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 27:6 557-563, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.6.557>.
- [5] Netzelmann, U., Walle, G., Lugin, S., Ehlen, A., Bessert, S., Valeske, B., 2016, Induction Thermography: Principle, Applications and First Steps towards Standardization, *Quant. Infrared Thermogr. J.*, 13:2 170-181, <https://doi.org/10.1080/17686733.2016.1145842>.
- [6] Gernot, R., Zweschper, T., Busse, G., 2004, Lock-in Thermography with Eddy Current Excitation, *Quant. Infrared Thermogr. J.*, 1:1 21-32, <https://doi.org/10.3166/qirt.1.21-32>.
- [7] Oswald-Tranta, B., 2004, Thermoinductive Investigations of Magnetic Materials for Surface Cracks, *Quant. Infrared Thermogr. J.*, 1:1 33-46, <https://doi.org/10.3166/qirt.1.33-46>.
- [8] Walle, G., Netzelmann, U., 2006, Thermographic Crack Detection in Ferritic Steel Components using Inductive Heating, *Proc. 9th European Conference on Non Destructive Testing (ECNDT)*.
- [9] Oswald-Tranta, B., 2018, Induction Thermography for Surface Crack Detection and Depth Determination, *Appl. Sci.-Basel*, 8:2 257, <https://doi.org/10.3390/app8020257>.
- [10] Choi, M., Park, H., Park, J., Kang, K., 2010, Defects Evaluation at Lap Joint Friction Stir Welding by Lock-in Ultrasound Infrared Thermography, *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, 30:2 104-109.
- [11] Choi, M., Park, J., Kang, K., Kim, W., Kim, K., 2007, Defect Sizing and Location by Lock-in Photo-infrared Thermography, *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, 27:4 321-327.
- [12] Min, T., Na, H., Kim, N., 2011, Development of LabVIEW Program for Lock-in infrared Thermography, *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, 31:2 127-133.



Nohyu Kim

Professor in the School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education.

His research interest is Nondestructive Evaluation and Elastic Wave Propagation.

E-mail: nykim@koreatech.ac.kr



Seung-Yong Yang

Professor in the School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education.

His research interest is Plasticity and Finite Element Analysis.

E-mail: ysy@koreatech.ac.kr