

적외선 카메라에 의한 연강의 비파괴 평가에 대한 연구

한정섭* · 박진환**

*동아대학교 신소재공학과

**부경대학교 응용화학공학부

The Study of Infrared Thermography of a Mild Steel for Nondestructive Evaluation

JEONG-SEB HAN* AND JIN-HWAN PARK**

*Dept. of Materials Science and Engineering, DongA Univ., Busan, Korea

**Division of Chemical Engineering, PuKyong Univ., Busan, Korea

KEY WORDS: Infrared thermography 적외선 열화상, Defect size 결함의 크기, Non-destructive testing 비파괴시험, The full width at half of the maximum contrast 반치폭, Mild steel 연강

ABSTRACT: The application of infrared thermography for detecting defects under the surface of a material was studied. Defects in a specimen were made by back-drilled circular holes. To get a large temperature difference at the surface, a halogen lamp was used for surface heating. We confirmed that the defect location had a good relationship with the maximum temperature difference. The sizes of the defects could be calculated by means of the FWHM. The value of the FWHM of a temperature difference decreased with time. Therefore in an extremely short time after the heating, the true defect size could be measured.

1. 서 론

모든 재료는 자체적으로 복사 에너지를 방출하는데, 그때의 복사 에너지는 물체의 온도와 관련이 있기 때문에 복사 에너지를 측정하면 그 물체의 온도를 알 수 있다. 열화상기술(Infrared thermography)은 물체의 복사 에너지를 측정한 뒤 온도로 환산하여 영상(image)으로 보여준다. 이러한 적외선 열화상 기술을 비파괴 시험(NDT: Non-destructive testing)에 사용하게 된 것은 1980년대부터로 국외에서는 연구가 활발히 진행되고 있지만(Saintey and Almond, 1995; 1997; Maldague, 2000; 2001; Ibarra-Castanedo et al., 2004) 장비가 고가인 문제로 국내에서는 연구가 매우 미흡한 실정이다(Han and Park, 2006; 정란과 백인관, 2004). 적외선 열화상 기술은 여러 분야에 사용되고 있지만 이 기술을 이용하여 재료 표면 아래에 있는 결함을 찾아내는 데에도 사용되고 있다.

여러 가지 결함 중에서도 부식으로 말미암은 결함은 해양재료에서 가장 일반적으로 일어나는 결함이라 하겠다(김성종 등, 2000). 재료의 표면보다 재료내부에서 생기는 부식으로 말미암은 결함은 외부에서 관찰하기 매우 어렵다. 재료내부에서 부식으로 생기는 결함도 재료 표면 아래에 있는 결함의 일종이므로

적외선 열화상 기술을 응용할 수 있는 분야이다. 열화상 기술로 재료 내부에 일어나는 부식현상을 조사하기 위해서 일반적으로는 외부에서 열원을 이용하여 인위적으로 재료의 표면에 열을 가하는 능동적인 방법을 많이 사용하게 된다. 재료의 외부에서 인위적으로 재료의 표면에 열을 가하게 되면 그열은 재료 내부로 전달되는데, 표면 아래에 결함이 있는 경우에는 재료 내부의 건전부와 결함부의 열 흐름은 시간에 따라 다르게 변화하게 된다. 그 결과 온도가 균일하던 재료 표면에 시간이 흐름에 따라 온도차(Thermal contrast)가 발생하게 되어 표면 온도가 불균일하게 된다. 시간에 따른 재료의 모든 표면 온도변화를 적외선 카메라를 이용하여 기록한 뒤, 분석을 통해 표면 아래의 결함에 대한 정보를 얻게 된다. 재료표면의 온도차는 재료의 열전도율, 결함의 크기, 결함의 위치, 시간 등에 의해서 변하게 된다. 특히 재료의 열전도율(Thermal conductivity)에 따라서 재료표면의 온도변화는 매우 다르게 나타난다. 플라스틱 재료와는 반대로 연강(Mild steel)과 같이 열전도율이 큰 것은 결함으로 말미암은 재료 표면의 불균일한 온도는 매우 빠른 시간 내에 다시 균일한 온도로 바뀌기 때문에 열화상 기술을 이용하는 데는 많은 연구가 필요한 실정이다.

그러므로 본 논문에서는 열전도율이 높아 표면 온도차가 적어서 실험에 어려움은 있지만 실제로 많이 사용되는 연강을 이용하여 결함의 크기와 결함의 깊이에 따른 변화를 관찰하기 위한 기초적인 연구를 행하였다.

교신저자 한정섭: 부산광역시 사하구 하단동 840

051-200-7791 jshan@dau.ac.kr

2. 측정원리 및 실험방법

2.1 적외선 카메라의 원리

모든 물체는 그 표면으로부터 적외선을 방출하고 있다. 그 방출량은 물체의 온도와 관계가 있기 때문에 물체로부터 방출되는 적외선량을 측정함으로써 그 물체의 온도를 알 수 있다. 적외선은 0.8~1000 μ m 범위의 파장을 갖고 있는 전자파이다. 물체에서 나오는 적외선은 한 개의 파장만 있는 것이 아니라 어떤 범위에 걸친 파장을 갖고 있다. 흑체(Black body)는 가장 이상적인 방사체이다. 흑체에서 나오는 한 개의 파장이 갖는 방사력(Emissive power)을 분광 방사 발산도 (W_λ)로 나타내면 다음과 같은 Plank 식으로 나타낼 수 있다.

$$W_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} \quad (1)$$

- λ : 방사된 적외선 파장(μ m)
- T : 물체의 절대온도(K)
- C_1 : $3.7402 \times 10^{-12} (W \cdot cm^2)$
- C_2 : $1.4388 (cm^2 \cdot K)$

흑체에서 나오는 적외선은 한 개의 파장만 나오는 것이 아니라 어떤 범위에 걸친 파장이 나온다. 그러므로 흑체의 단위 면적 당 나오는 적외선 에너지량(W)을 구하기 위해서는 (1)식을 적분해야한다.

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda d\lambda = \sigma T^5 \quad (2)$$

σ : Stefan-Boltzman 의 정수

(2)식은 스테판 볼츠만의 식으로 알려져 있다. 이 식은 흑체에서 방사되는 적외선 에너지량을 구한 것이다. 물체의 방사율(Emissivity)은 같은 온도에서의 흑체의 방사력과 비교해서 정해진다. 그러므로 흑체의 방사율은 1 이 된다. 그러므로 물체에서 나오는 단위 면적 당 적외선 에너지량(W)은 다음과 같이 표현된다.

$$W = \epsilon \sigma T^5 \quad (3)$$

그러므로 물체에서 나오는 적외선 파장들을 적외선 카메라로 검출하고 그 물체의 방사율을 안다면 물체의 온도를 알 수 있게 된다.

2.2 실험방법

실험에 사용된 시편들을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 시편 1은 서로 다른 크기의 구멍을 시편 뒤에서 일정 깊이까지 뚫었고 시편 2는 구멍의 크기는 같으나 깊이가 서로 다른 구멍을 뚫었다. 그 구멍의 위치를 Fig. 1에 나타내고, 구멍의

크기와 깊이

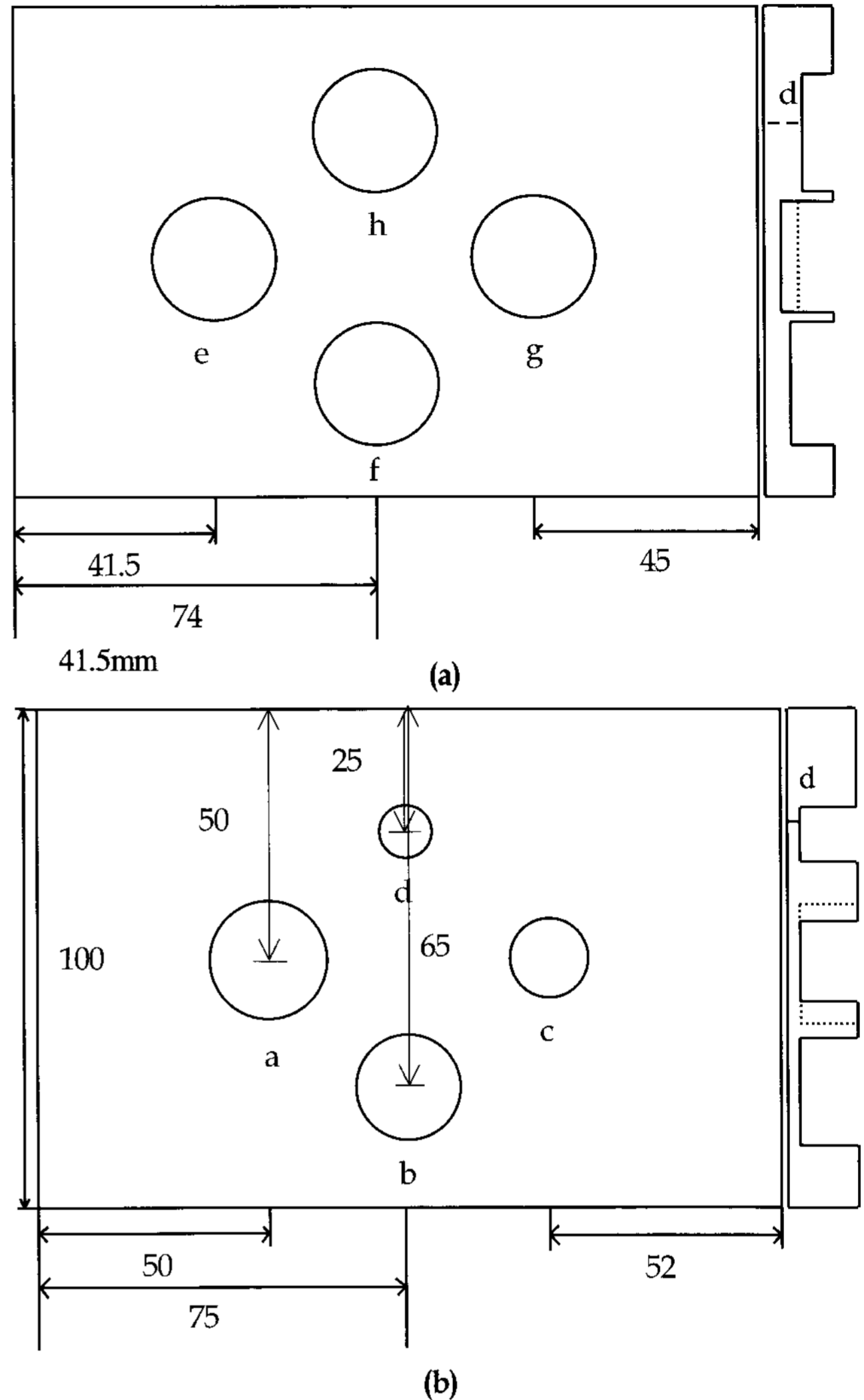


Fig. 1 Geometry of specimens(unit: mm): (a) specimen I, (b) specimen II

Table 1 The hole size and depth of specimens I and II

No.	Diameter [mm]	Depth [mm]	No.	Diameter [mm]	Depth [mm]
a	25	1	e	25	1
b	20	1.5	f	25	2
c	16	1	g	25	2.5
d	10	1	h	25	3.5

이는 Table 1에 나타내었다. 깊이(Depth)는 시편의 표면에서 결합까지의 거리이다.

흑체(Black body)에 가까운 표면을 만들기 위해서 시편은 무광택 페인트를 사용하여 처리하였다. 실험장치의 개략적인 모양을 Fig. 2에 나타내었다. 열원으로는 1 KW의 할로젠 램프를 사용하였고 시편의 전면을 10초간 가열하였다. 사용된

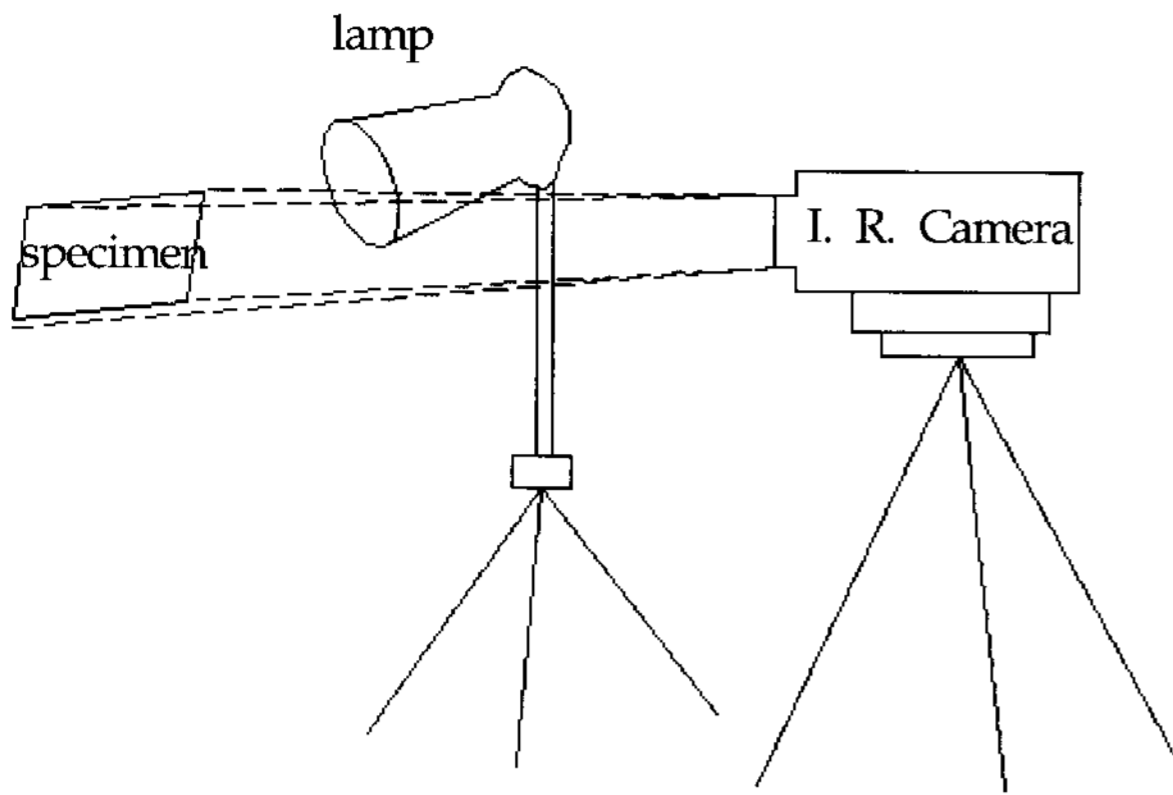


Fig. 2 Schematic experimental apparatus

Table 2 Specifications of LAIRD-S270A

Temperature measurement range	-20~250 °C
Temperature accuracy	0.2 °C
Spectral band	3~5 μm
Detector type	270,000 pixel PtSi Schotty-Barrier IR CCD
Frame rate	1/60 sec. (30 Hz)
Effective number of pixel	475(H) × 442 (V)
Shooting distance	0.5 m~∞

IR 카메라의 제원은 Table 2에 나타내었다.

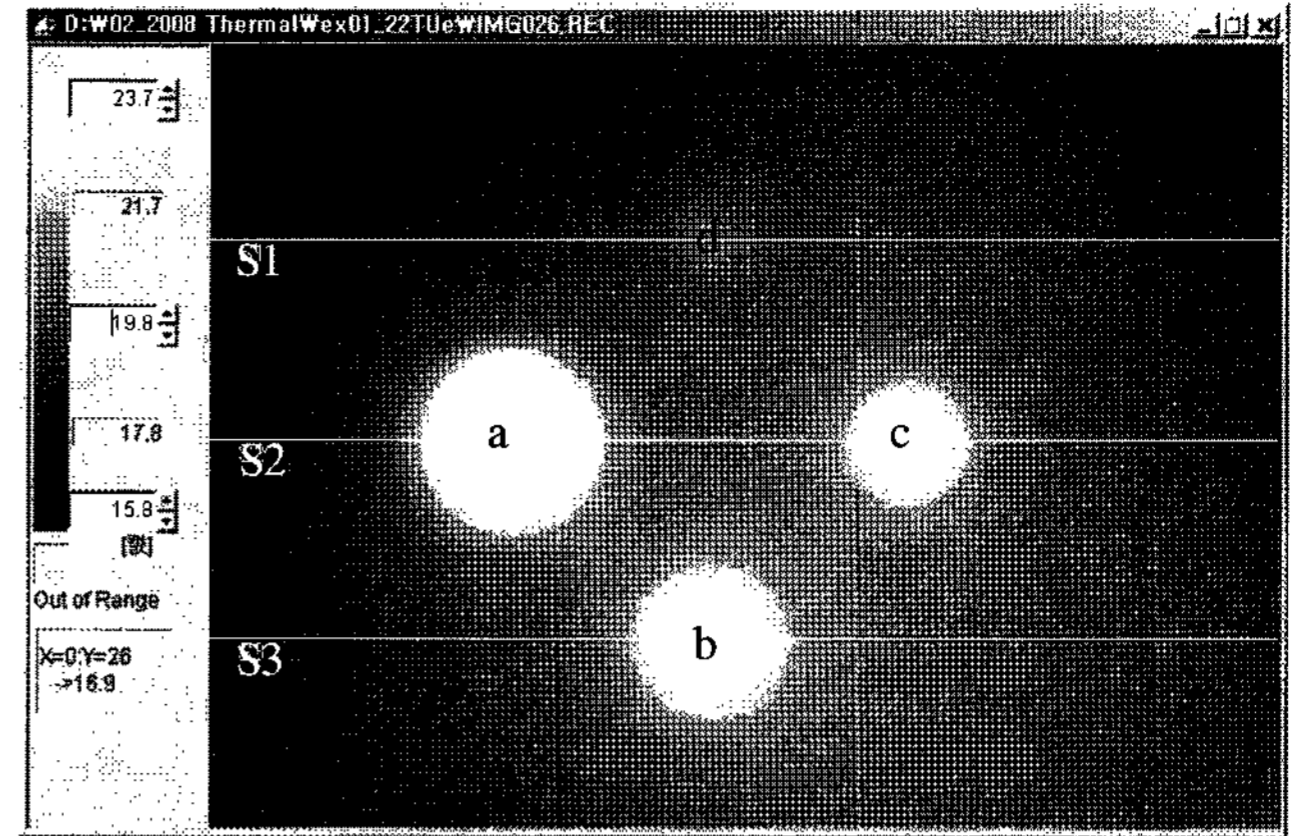
순간순간의 재료의 표면온도는 적외선 카메라의 메모리 저장카드에 기록한 후 컴퓨터에서 그 값을 읽어들이 분석하였다. 그리고 시편의 온도를 측정하기 위해 K형의 열전대를 시편의 전면, 후면, 그리고 후면의 구멍 중심에 위치하였다. 열화상 카메라에 결함의 영상이 나타나는 시간이 1초 미만이지만, 그 순간의 영상을 기록하는데 1초 이상의 시간이 걸리게 되므로 1초 이내의 영상들을 순차적으로 기록을 할 수 없어서 가열 후 카메라로 촬영을 시작하는 순간의 시간을 다르게 하여 영상들을 얻어 분석하였다.

사용된 적외선 카메라는 Nikon 회사의 LAIRD-S270A이며 그 제원은 Table 2와 같다.

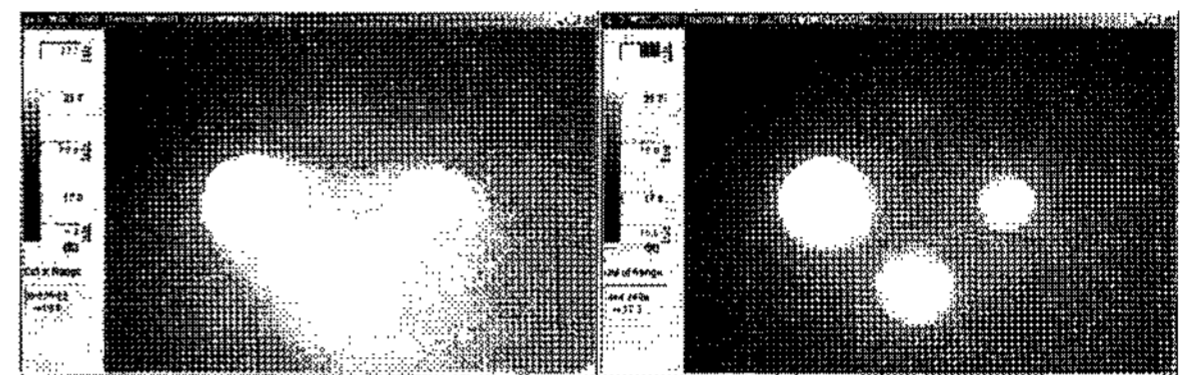
3. 결과 및 해석

3.1 결함의 위치

Fig. 3에 서로 다른 크기의 구멍을 가진 시편의 영상을 시간적으로 배열해 놓았다. 가열 직후의 이미지를 나타내는 Fig. 3의 (a)가 가장 선명하여 결함이 모두 나타나고 시간이 지남에 따라 열전달이 일어나서 결함의 크기가 줄어드는 것처럼 보이며 육안으로 보기에는 점점 결함의 위치나 크기를 구별하기 어려워지는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3의 (a)의 시편

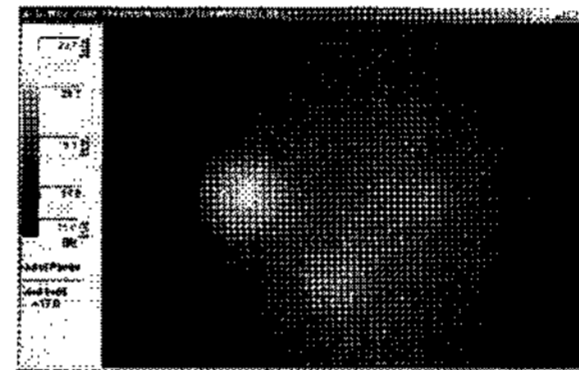


(a)



(b)

(c)



(d)

Fig. 3 Transient thermography of mild steel with various sizes of defects (the sequence of alphabet is that of time after heating)

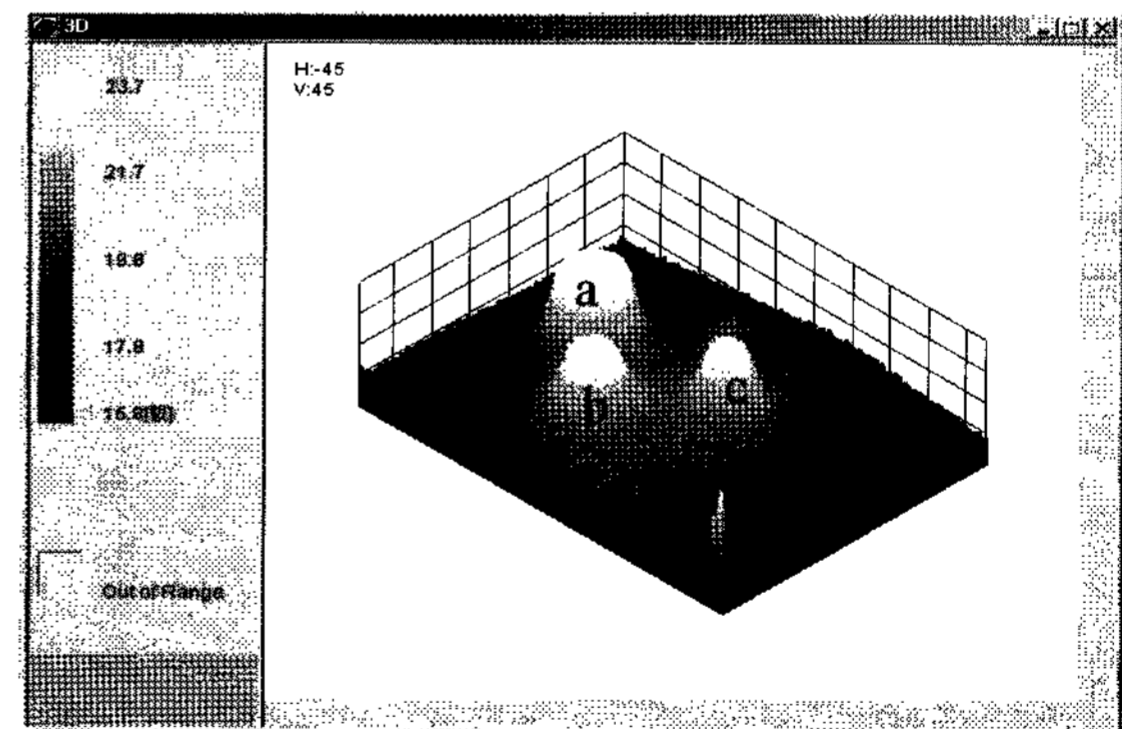


Fig. 4 Three dimensional analysis of temperature of specimen

온도를 3차원적으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 결함이 있는 곳은 다른 주위보다 온도가 높은 것을 쉽게 알 수 있다. Fig. 4에서 날카롭게 올라간 것은 페인트가 긁혀 재료 표면이 노출된 곳으로 결함처럼 나타나는 것을 알 수 있다. 결함의 위치를 정확하게 파악하기 위해 세 개의 직선상(Fig. 3의 (a)의 s1, s2, s3)에 나타난 온도를 Fig. 5에 나타내었다.

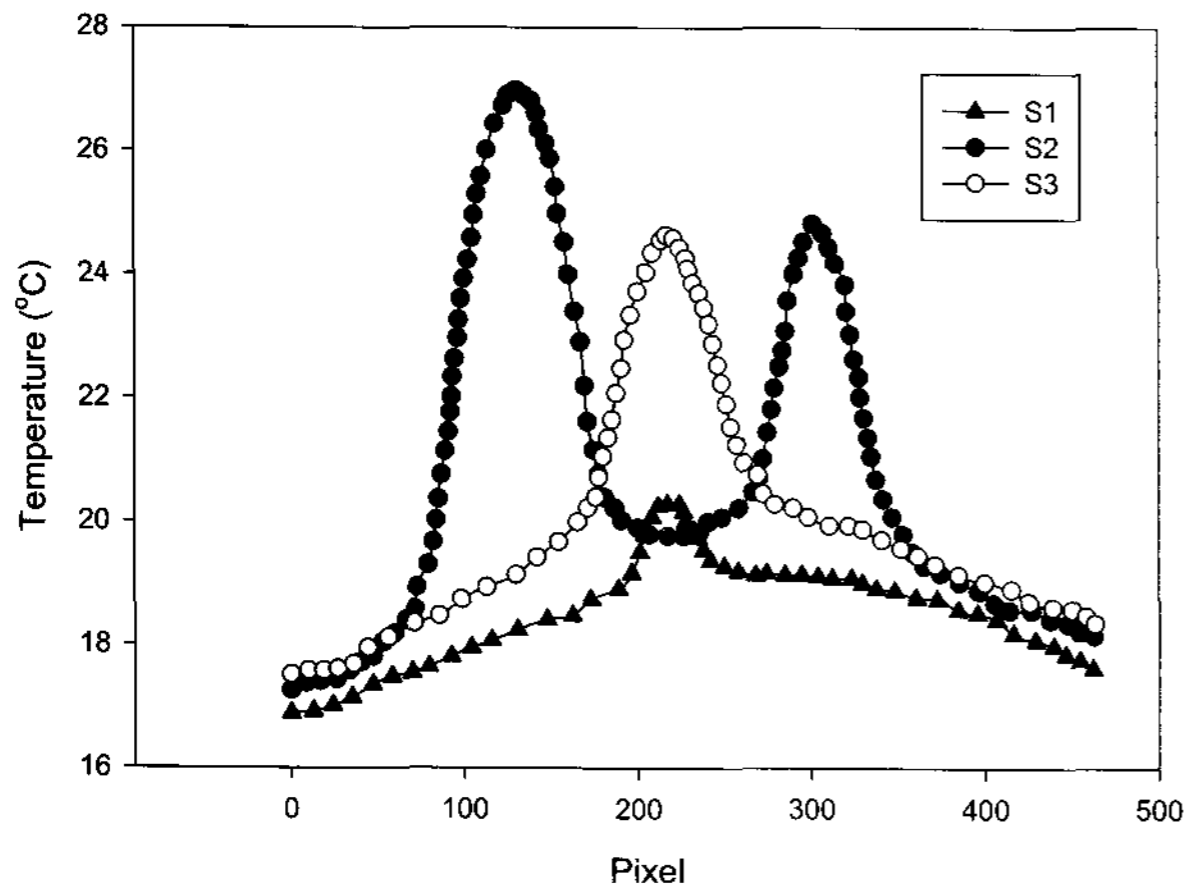


Fig. 5 Temperature profiles for s1, s2 and s3 as indicated Fig. 3 (a)

s2 직선상에서 온도가 가장 높은 곳은 134, 308픽셀에서 27.0과 24.8°C였다. 온도가 가장 높은 두 위치 사이의 거리는 164 픽셀로 mm로 변환한 결과 49.4mm로 원래 두 중심 사이의 거리 50mm와 거의 일치하였다. 그러므로 온도가 가장 높은 곳의 위치가 결함의 중심인 것을 알 수 있었다.

3.2 결함의 크기

Fig. 3에서 알 수 있듯이 가열 직후가 결함이 가장 분명하게 드러나고 시간이 지남에 따라 온도차(Temperature contrast)가 적어져서 Fig. 3의 (d)에서는 위쪽결함, 즉 결함의 크기가 가장 작은 10mm인 것은 육안으로 보이지 않는 것을 알 수 있다. 결함의 실제 크기에 가장 근접한 가열 직후의 영상인 Fig. 3의 (a)에서 각 결함의 중심을 원점으로 하여 반경 방향으로 거리에 따른 온도차를 조사한 결과를 Fig. 6에 대표적으로 나타내었다. Fig. 3의 (a)와 Fig. 6를 비교해 볼 때 결함 중심과 근처의 온도차가 큰 결함(25mm)일수록 영상이 분명하고 결함중심의 온도와 근처의 온도의 차이가 적은 결함(10mm)일수록 영상이 불분명함을 알 수 있다. 그러나 육안으로 보기에 결함의 크기는 정확히 알 수 없기 때문에 결함의

크기를 알기 위해서 Sainty 와 Almond가 제안한 반치폭 (FWHM: the full width at half of the maximum contrast)(Sainty and Almond, 1995)방법을 사용하였다.

반치폭을 계산하는 전형적인 예를 Fig. 7에 나타내었다. 이러한 방법으로 Fig. 5의 모든 결함에 대해 FWHM을 계산하여 그 계산 결과를 Table 3에 나타내었다.

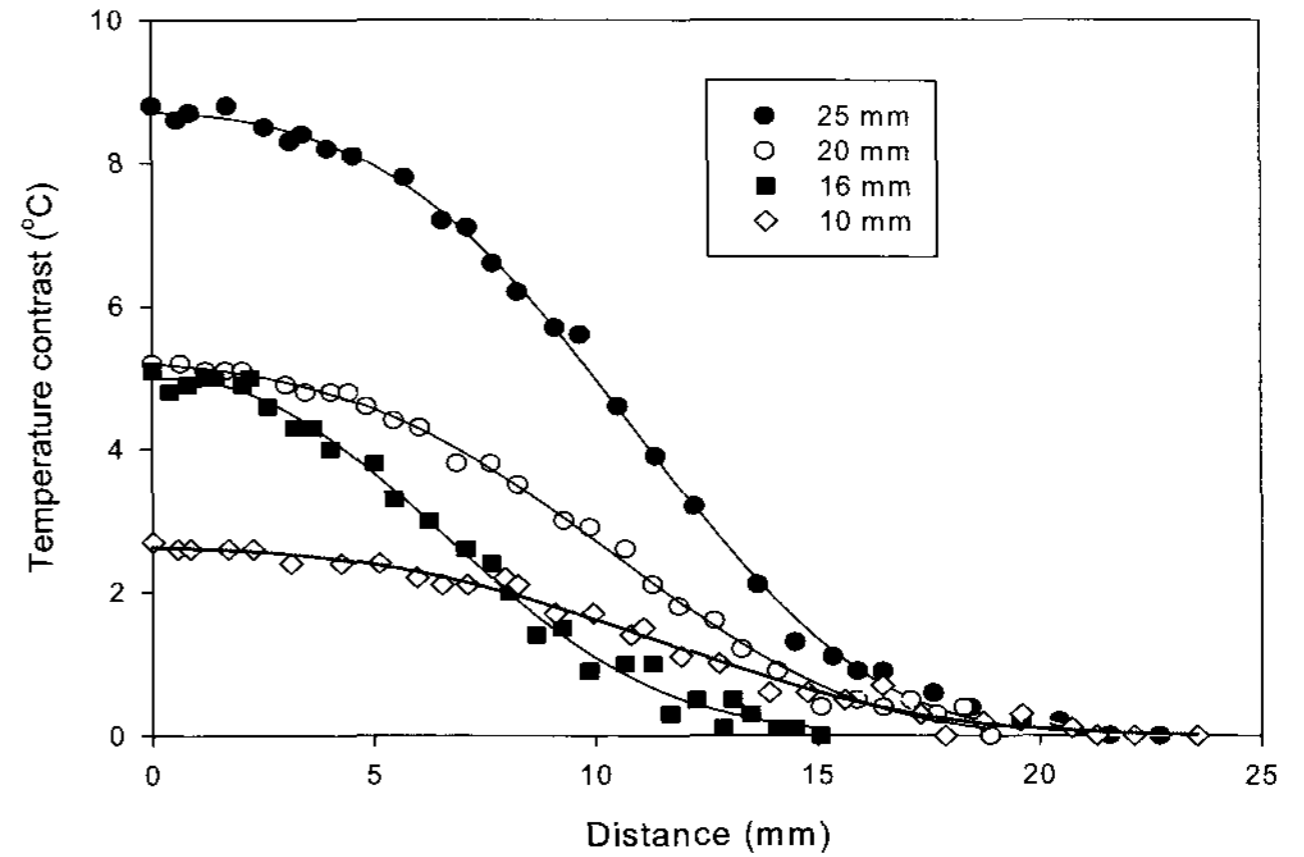


Fig. 6 Radial temperature profiles for the various defect size

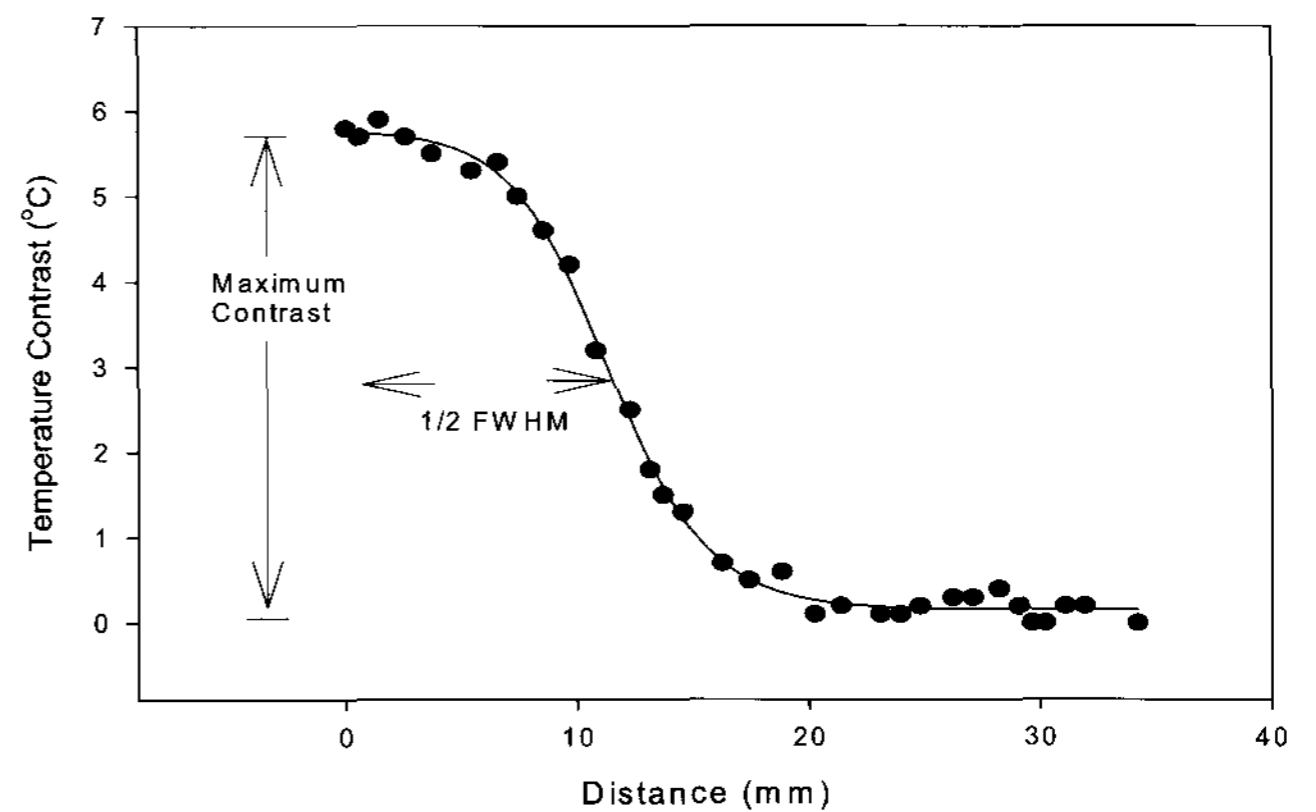


Fig. 7. Typical Radial temperature contrast profiles

Table 3 The Calculated FWHM and the temperature difference of specimen I

Experiment	a		b		c		d	
	FWHM	ΔT	FWHM	ΔT	FWHM	ΔT	FWHM	ΔT
(a)	21.00	8.8	18.88	5.2	15.06	5.1	11.07	1.6
(b)	19.44	9.7	18.15	4.5	14.26	3.7	10.50	1.3
(c)	18.45	6.9	17.15	4.1	13.92	2.4		
(a)	15.61	3.6	13.91	1.7	8.30	0.7		

Table 3에서 알 수 있듯이 할로젠 램프로 가열한 직후의 열화상 이미지에 나타난 결함의 크기가 실제에 가장 가까운 것을 알 수 있다. $t=0$ 때의 FWHM 값이 가장 실제 결함의 크기에 가깝다 하겠다. 가열 이후의 영상을 찍은 시간이 불분명하여 외삽(Extrapolation)하여 유추하기도 어려운 실정이나 $t=0$ 에 가장 가까운 영상인 Fig. 3의 (a)의 계산 결과, 나타난 결함의 크기는 $a=21, b=18.88, c=16.06, d=11.07\text{mm}$ 이었다.

그러므로 FWHM 방법으로 구한 결함의 크기는 결함이 적으면 실제보다 계산결과 조금 크게 평가되고, 큰 결함(25 mm)일수록 실제보다 계산결과 조금 작게 평가됨을 알 수 있다. 그리고 각 결함에 나타난 ΔT 값은 결함의 크기가 클수록 큰 것을 알 수 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 열화상 영상이 희미하다고 해서 결함의 크기가 적다고 말할 수 없다는 것을 알 수 있다. 다만 온도차가 적을 뿐임을 알 수 있다. 그리고 가열 후 시간이 지남에 따라 각 결함의 중심과 근처의 온도차는 점점 적어지고 있는 것을 알 수 있다.

3.3 결함의 깊이

결함의 깊이에 따른 표면 온도의 영향을 조사하기 위해 결함의 크기는 25mm로 일정하나 깊이는 다르게 한 시편 2를 조사한 영상을 Fig. 8에 나타내었다.

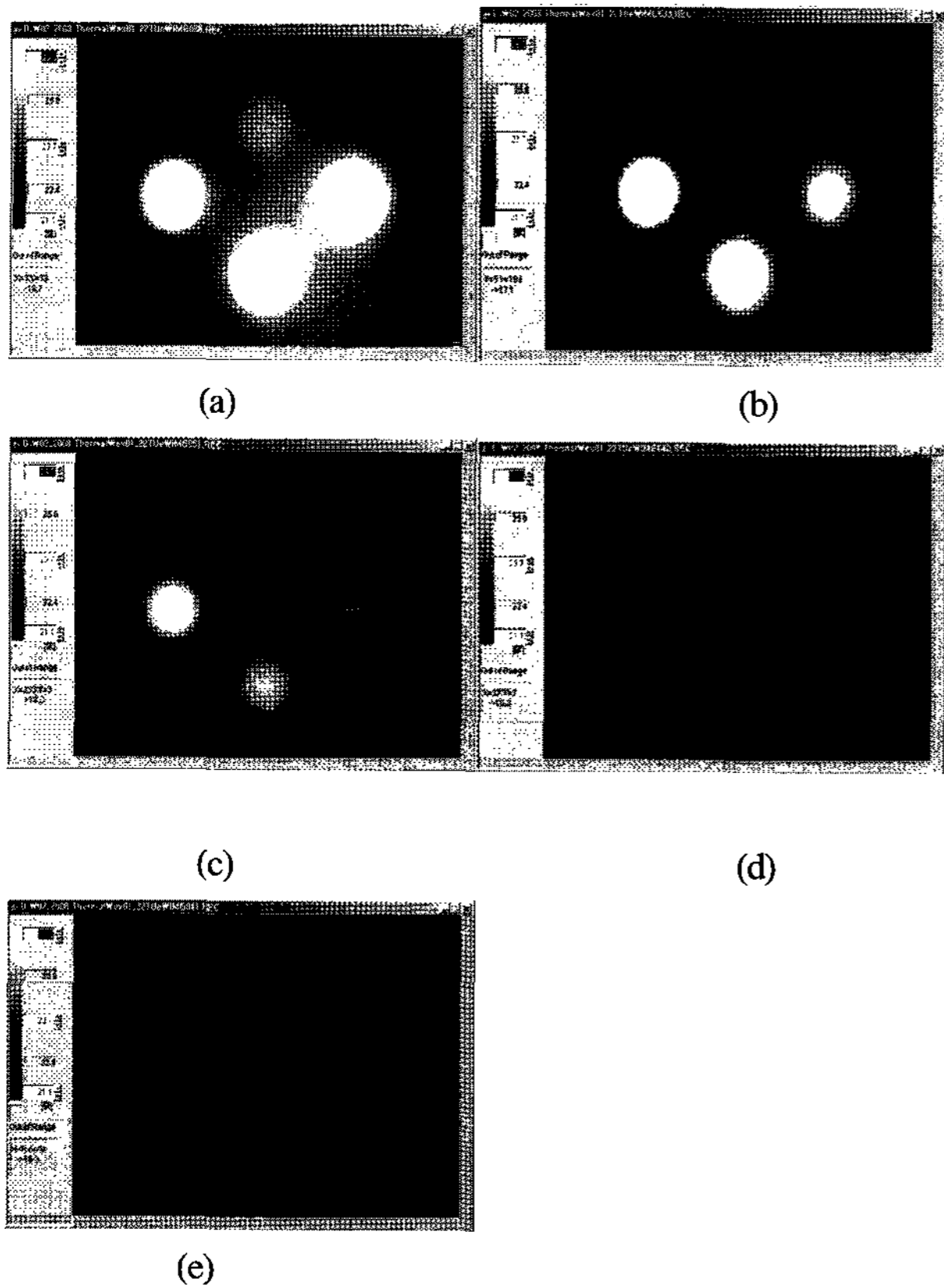


Fig. 8 Transient thermography of mild steel with various depths of defects (the sequence of alphabet is that of time after heating)

앞에서 설명한 대로 가열한 직후의 영상은 매우 선명하여 결함의 크기를 잘 나타내고 있지만 시간이 지남에 따라 결함의 깊이의 영향으로 열화상 영상이 희미해지는 것을 알 수 있다. 결함의 크기는 가열한 직후의 결함의 크기가 실제의 결함의 크기에 가깝지만 결함의 깊이는 그와 같이 단순하지 않다. 왜냐하면 결함의 크기는 그와 같이 단독으로 알 수 있지만 결함의 깊이는 단독으로 나타나지 않고 시간이 지남에 따라 결함의 크기와 더불어 나타나 시편표면의 온도를 변화시키기 때문이다.

가열 직후의 영상인 Fig. 8의 (a)에서 각 결함의 중심을 원점으로 하여 반경방향으로 거리에 따른 온도차를 조사한 결과를 Fig. 9에 대표적으로 나타내었다. 결함깊이의 영향을 조사하기 위해 Fig. 8의 모든 결함에 대해 FWHM과 ΔT 값을 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 알 수 있듯이 각 결함의 중심과 근처의 온도차를 나타내는 ΔT 값은 시간이 지남에 따라 점차 적어지지만 FWHM 값은 시간에 따라 적어지다가 다시 값이 커지는 경향들을 모두 보이고 있음을 알 수 있다. 그것도 결함의 깊이가 깊을수록 FWHM 값이 증가하는 시간이 빨라지는 것을 알 수 있다. 이것은 다른 연구자(Saintey and Almond, 1995)의 실험에서도 동일한 결과를 얻었다. 깊이를 정확하게 계산하기 위해서는 결함의 크기와 깊이와 시간의 상관관계를 분명히 밝혀서 컴퓨터 프로그램을 통하여 밝혀야 하지만 앞에서 밝힌 대로 장치의 한계로 말미암아 1 초 내에 이루어지는 반응으로 말미암아 정확한 영상측정 시간을 알 수 없어서 정확하게 분석을 할 수가 없었고 경향만을 알 수 있었다. 차후 장비의 보완과 인공지능 등의 프로그램을 통해서 결함의 깊이까지도 계산하는 것이 앞으로의 연구 과제라 하겠다.

4. 결 론

열화상기술을 재료 표면 아래에 있는 결함의 크기와 깊이를 측정하는데 적용하기 위해 연장을 사용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

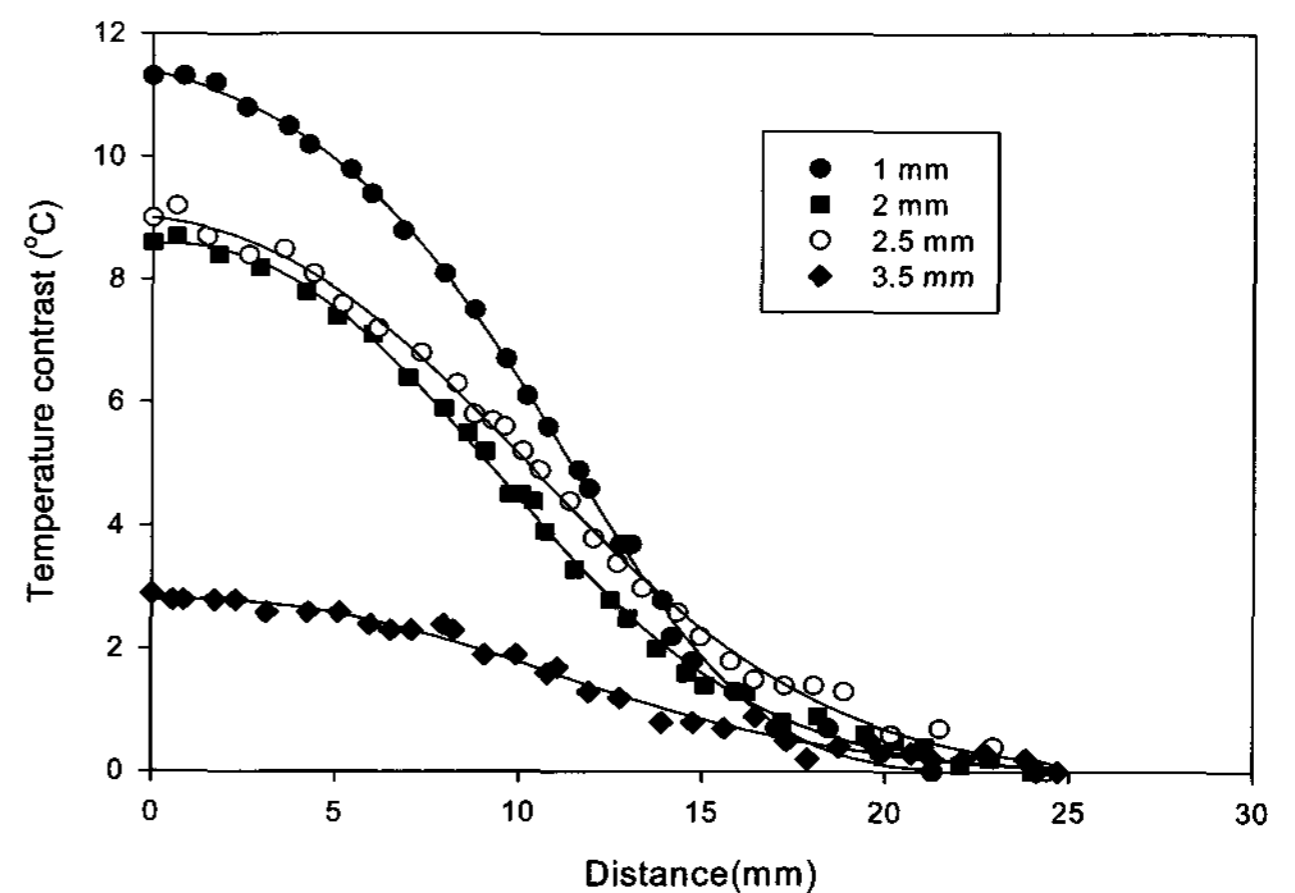


Fig. 9 Radial temperature profiles for the various defect size

Table 4 FWHM and temperature difference of specimen

Experiment	e		f		g		h	
	FWHM	ΔT	FWHM	ΔT	FWHM	ΔT	FWHM	ΔT
(a)	21.28	11.3	23.99	8.6	24.39	9	25.44	4
(b)	16.17	11.3	22.38	8.3	19.41	5.3	24.12	2.9
(c)	15.36	8.9	21.28	5.5	17.42	4	21.57	2.2
(d)	16.27	5.3	19.05	3.9	17.51	3	17.65	1.9
(e)	16.27	3.2	19.90	3.1	18.25	2.7	20.40	1.2

(1) 재료 표면을 가열한 직후의 영상에서 FWHM을 이용하여 결함의 크기를 계산한 결과, 실제 결함의 크기가 10mm인 결함은 11.07mm로 실제보다 크게 계산되었고, 실제 결함이 16, 20, 25mm인 결함은 15.06, 18.88, 21.00mm로 실제 결함보다 계산된 값이 적었다.

(2) 재료 표면을 가열한 직후의 영상에서 주위의 온도보다 높게 나타나는 부분이 결함부가 있는 곳이며 결함부중 가장 온도가 높은 곳이 결함의 중심위치가 되는 것을 알 수 있었다.

(3) 결함의 깊이의 영향으로 결함부와 건전부의 온도차(ΔT)는 시간이 지남에 따라 처음부터 끝까지 감소하지만, FWHM 값은 시간이 지남에 따라 처음에는 감소하지만 다시 값이 커지는 경향을 보였다.

장비의 업그레이드와 인공지능 등의 프로그램을 통해서 결함의 깊이까지도 계산하는 것이 앞으로의 연구 과제라 하겠다.

후 기

이 연구는 2006 학년도 동아대학교 학술연구비(공모과제)지원에 의해 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

정란, 백인관 (2004). 적외선 열화상 데이터를 이용한 비파괴 방식의 철근 부식 정도 측정 방법, 대한민국 특허, 공개번호 10-2004-0041243.

김성중, 김도형, 이명훈, 김기준, 문경만 (2000). "해양환경 변화가 알루미늄합금 희생양극의 효율에 미치는 영향에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제14권, 제2호, pp 106-111.

Ibarra-Castaneda, C., Gonzalez, D., Klein, M., Pilla, M., Vallerand, S. and Maldague, XPV. (2004). "Infrared image processing and data analysis", Infrared Phys. Technol., Vol 46, pp 33-40.

Han, J.S. and Park, J.H. (2006). "Detection of corrosion steel under an organic coating by infrared photography", Corrosion Science, Vol 46, pp 787-793.

Maldague, XPV. (2000). Application of infrared thermography on nondestructive evaluation, Rastogi PK, Inaudi, D., editors, Trends in optical nondestructive testing and inspection, New York, Elsevier Science.

Maldague, XPV. (2001). Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, New York, Wiley.

Saintey, M.B. and Almond, D.P. (1995). "Defect sizing by transient thermography II: a numerical treatment", J. Phys. D. Appl. Phys., Vol 28, pp 2546.

Saintey, M.B. and Almond, D.P. (1997). "An artificial neural network interpreter for transient thermography image data", NDT&E Int., Vol 30, No 5, pp 291-295.

2008년 2월 11일 원고 접수

2008년 4월 4일 최종 수정본 채택