

◆ 특집 ◆ 철도차량 주행장치 성능향상을 위한 평가 기술

## 적외선 서모그래피를 이용한 대차 용접시편의 결함 평가

### Defect Evaluation for Weld Specimen of Bogie Using Infrared Thermography

권석진<sup>1,✉</sup>, 서정원<sup>1</sup>, 김재철<sup>2</sup>, 전현규<sup>1</sup>  
Seok Jin Kwon<sup>1,✉</sup>, Jung Won Seo<sup>1</sup>, Jae Chul Kim<sup>2</sup>, and Hyun Kyu Jun<sup>1</sup>

1 한국철도기술연구원 신교통연구본부 (New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)  
2 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)  
✉ Corresponding author: sjkwon@krri.re.kr, Tel: +82-31-460-5249

Manuscript received: 2015.5.28. / Revised: 2015.6.22. / Accepted: 2015.6.23.

*There is a large interest to find reliable and automatic methods for crack detection and quantification in the railway bogie frame. The non-destructive inspection of railway bogie frame has been performed by ultrasonic and magnetic particle testing in general inspection. The magnetic particle method has been utilized in the defect inspection of the bogie frame but the grinding process is required before inspection and the dust is developed resulting from the processing. The objective of this paper is to apply the inspection method of bogie frame using infra-red thermography. The infra-red thermography system using the excitation of eddy current was performed for the defect evaluation of weld specimen inserted artificial defects. The result shows that the infra-red thermography method can detect the surface and inner defects in weld specimen for bogie frame.*

KEYWORDS: Infra-Red thermography (적외선 서모그래피), Railway bogie frame (철도 대차 프레임), Crack detection (균열 검출)

#### 기호설명

$q$  = rate of energy emission (W)

$A$  = area of emitting surface ( $m^2$ )

$T$  = absolute temperature (K)

$r$  = Stefan Boltzmann's constant ( $Wm^{-2} K^{-4}$ )

$e$  = emissivity (dimensionless)

#### 1. 서론

구동, 감속, 제동 등의 핵심장치가 부착 구성되어 있는 대차(bogie)는 철도차량의 안전 주행에 있어 핵심적인 장치이다. 철도대차의 구조가 복잡하고 구동장치와 제동장치와의 연결부가 많은 방식에서는 연결부 브라켓을 용접가공한다. 이러한 연결부에서 용접가공 중에 발생하는 핀홀(Pin hole)의 용접결함과 응력집중부에 장기간 누적 피로손상에 의한 피로균열(Fatigue crack)이 발생하고 있다.<sup>1</sup>

Fig. 1은 대차 프레임의 자분탐상법에 의한 비



Fig. 1 Fatigue crack in bogie frame

파괴검사시 결함검출을 나타낸 것이다. 주로 25년 이상 장기간 운행하는 대차에 하중이 많이 작용하는 브라켓 연결부위와 용접부에서 결함이 검출되고 있다. 균열길이 3mm~10mm의 피로균열이 검출되고 있으며 미세한 용접결함도 동반하여 발생하고 있다.<sup>1</sup>

일반적으로 대차 프레임의 비파괴 결함검사는 도장 또는 이물질 제거하는 전처리 작업을 실시 이후 진단을 실시하는 자분탐상법(Magnetic particle testing, MT)을 사용하며 많은 분진이 발생하는 검사 방법이다. 이러한 자분검사 시간은 검사인원 4명이 투입되어 1대의 대차당 2시간 이상이 소요된다. 검사시간은 전처리 작업이 많은 부분을 차지하고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 일본에서는 교류전위차법을 이용한 검출시스템을 개발하였으며 대차프레임의 비파괴 결함검사에 와전류탐상 시스템을 적용하기 위한 연구를 수행하였다.<sup>2</sup>

현재 현장에서 MT와 UT(Ultrasonic testing)가 적용되고 있으나 작업 환경과 검사 시간의 소요 등의 문제점이 발생한다.<sup>3</sup> 본 논문에서는 결함 검사 시간을 단축하고 높은 정밀도로 결함을 탐상할 수 있는 능동적외선 서모그래피법을 적용하였으며 적외선 서모그래피와 인덕션 가진을 이용하여 대차프레임에 발생하는 피로결함을 대상으로 용접시편을 제작하여 결함 검출평가에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 적외선 서모그래피의 이론 및 시험방법

### 2.1 적외선 서모그래피의 검출 이론

적외선 서모그래피법(Infrared thermography, IRT)은 적외선 카메라에서 비접촉으로 측정된 온도 이미지를 활용하여 구조물의 이상을 진단하는 비파

괴 검사 방법이다. 적외선 서모그래피법은 다음 식(1)과 같은 Stefan-Boltzman 법칙을 이용하여 방사율의 세기에 따라 시험체의 온도를 계산하여 진단한다.<sup>4</sup>

$$q/A = \epsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

여기에서 q는 에너지 방사율(W), A는 방사표면의 면적(m<sup>2</sup>), T는 절대온도(K), σ는 Stefan-Boltzman 상수(σ=5.676\*10<sup>-8</sup> Wm<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup>), ε는 표면방사도이다.

시험 중에 발생하는 온도 신호를 활용하여 결함, 균열, 열화 상태, 전기선 연결 상태, 접합부 계면 분리 등 다양한 상태를 분석 평가할 수 있고 또한 시험 대상 물체의 열적 특성도 분석할 수 있으며 결국 내부의 이상상태가 표면 온도분포의 불균일로 이어져 표면 및 내부의 이상을 검출할 수 있는 것이다.<sup>4</sup> 적외선 서모그래피법은 대상 물체에 발생하는 적외선 에너지의 제어가능성을 기준으로 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 시험 대상체로부터 방사하는 적외선의 에너지가 제어 가능한 능동기법(Active method)과 태양광 또는 자체 작동 중 발생하는 온도장에 의한 적외선 에너지를 검출하여 평가하는 수동기법(Passive method)으로 나뉘어진다. 능동기법은 최근에 연구가 활발히 이루어지고 있는 분야로써 광원(Lamp)을 이용하는 광-적외선 서모그래피 기술(Flash thermography)과 초음파 가진을 이용하는 초음파-적외선 서모그래피 기술(Sonic IR, Thermosonics)이 대표적인 방법이다.

능동기법은 적외선 에너지를 발생시키는 방법에 있어서 어떤 방법을 쓰는가에 따라 나누어 질 뿐만 아니라 광원이나 가진시에 사용되는 입력 신호 특성에 따라서도 나누어 진다. 입력 신호에 따라 짧은 펄스파(Short pulse), 긴 펄스파(Long pulse), 그리고 위상 잠금(Lock-in) 신호로 크게 세 가지로 분류할 수 있는데 능동기법은 물체내에 존재하는 결함이나 균열 등의 검출에 주로 사용되고 있으며 복잡한 형상을 가진 부품 등의 검사를 신속하고 간편하게 할 수 있다는 장점 때문에 산업체에서 관심을 두고 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>5-7</sup> 특히, 시험체 표면에 흐르는 와전류를 유도하는 인덕션 가진 방법은 유도 와전류의 흐름 동안 Joule열로 시험체의 온도가 상승되어 결함주위의 온도분포를 명확하게 관찰할 수 있어 최근에 결함 검출능의 향상에 대한 연구가 수행되고 있다.<sup>8-10</sup>

Wallbrink 등은 적외선 lock-in 서모그래피 방법

을 이용하여 마일드강 시편에 대한 결함 깊이를 양적으로 추정하였으며 카본강 시편을 대상으로 lock-in상관계 알고리즘을 이용하여 직하 결함을 평가하였다.<sup>11</sup> Maldague 등은 펄스 위상 서모그래피 방법을 이용하여 홀(hole) 형태의 결함검출을 연구하였다.<sup>12</sup> Lahiri 등은 저주파 교류자기장을 이용한 적외선 서모그래피법에서 강자성체의 결함도 검출할 수 있음을 보고하였다.<sup>13</sup>

### 2.2 시험절차 및 방법

본 논문에서는 인덕션 가열방식을 이용한 가진 방식으로 기존 방법 대비 손상을 빠르고 효과적으로 진단할 수 있는 시스템을 제작하여 시험을 수행하였다. 적외선 와전류법의 측정 원리는 탐상물체에 와전류를 가진하면 결함이 있는 부분에서는 유도전류와 함께 와전류가 발생하여 Joule열의 차이가 발생 발생한다. 이때 적외선 열화상 카메라로 피측정체의 열분포 즉 열영상을 측정하여 결함이 있는 영역에서 차이가 나타나서 결함을 빠른 시간내 탐상할 수 있다.

대차 프레임의 용접부의 비파괴검사시 MT는 많은 전처리 작업 시간이 소요되며 내부결함 탐상이 용이하지 않고 UT는 표면결함 탐상의 어려움이 있다. 시험에 사용된 시편은 대차프레임에 사용되는 SM490A로서 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. Table 2에 나타낸 바와 같이 두께 10mm의 시편에 인공결함길이 10mm, 결함깊이 2mm, 3mm, 5mm를 방전 가공하였다.

실제 대차프레임 브라켓에 발생하는 결함크기와 형태를 모사하여 Table 2과 같이 용접시편을 제작하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 Type (I)은 비드부(weld bead zone)의 중앙부에 인공결함을 삽입하였으며 Type (II)는 모재와 용접부 사이에서 결함이 많이 발생하기 때문에 인공결함 삽입시편을 제작하여 시험을 실시하였다. 용접비드의 길이는 7mm, 폭은 10mm이다. Type (III)는 두께 5mm의 시편에 내부결함 탐상 정밀도를 시험하기 위한 목적으로 제작하였다.

적외선 서모그래피 시스템의 구성은 Fig. 3과 같이 냉각시스템, 인덕션히터, 가진코일, 적외선 열화상 카메라로 구성된다.

적외선 와전류법 손상진단 시스템의 인덕션 가진기는 EASYHEAT 0224 시스템으로 여자전력 2.4 kW, 최대전류 400A, 주파수 범위 150~400 kHz 이다. 가진코일은 대상체에 따라 여러 가지 형상으로 제

Table 1 Material properties of weld specimen

Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
447	528	42	60

Table 2 Dimensional details of weld specimen

No.	Length (mm)	Depth (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
Type I	10	2, 3, 5	0.5	10
Type II	6, 10	2, 3, 5	0.5	10
Type III	10	3, 4.5	1.5	5

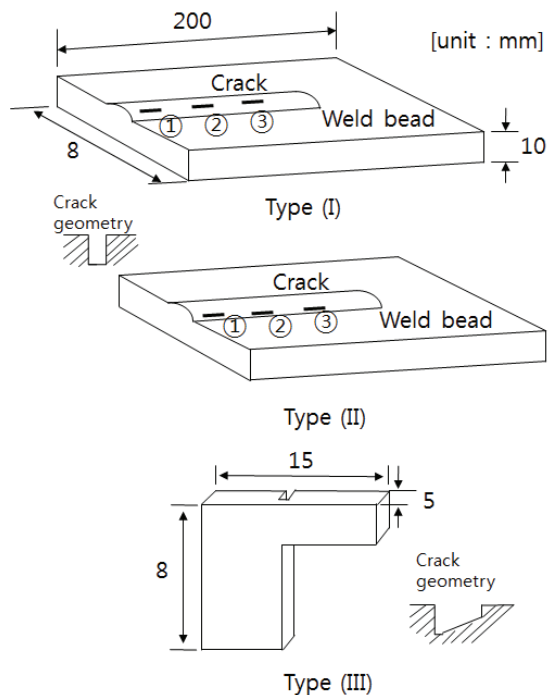


Fig. 2 Schematic of weld specimen

작할 수 있으며 용접비드에 맞추어 곡선형태의 길이 200mm, 직경 7mm로 Fig. 4같은 형상으로 제작하였다. 실험에 사용된 적외선 열화상 카메라는 FLIR SC7500(max.400℃)을 사용하였으며 열화상이미지 처리는 TheSA 프로그램을 이용하여 분석하였다. 용접시편을 대상으로 한 결함 검출시험은 결함이 위치한 좌우길이 방향으로 가진 코일을 스캐닝하면서 결함검출 능력을 측정하였다. 시험은 최적의 결함검출 조건을 찾기 위하여 가진 전류와 가진 시간을 변화시켜가면서 검출능력을 시험하였다.

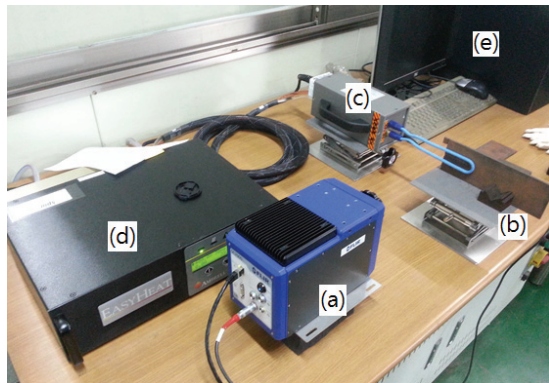


Fig. 3 Experimental set up; (a) Infrared camera (b) Weld specimen (c) Induction coil (d) Induction heater (e) Personal computer



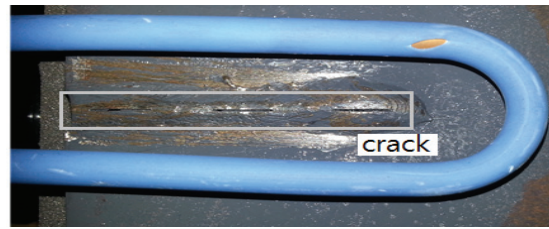
Fig. 4 Induction coil and specimens

시험방법은 인덕션히터에 의해 가진된 코일을 결함이 있는 시편에 가열시키면서 결함주위의 온도분포를 적외선 서모그래피 기법을 이용하여 검출하는 것이다. 가진코일의 형상과 시편에서 떨어진 거리에 따라 영향을 받기 때문에 가진 코일은 시험편에서 5mm 떨어진 위치에서 측정하였으며 결함이 있는 주변 온도변화에 따라 결함여부를 진단할 수 있다. Fig. 4는 용접부 결함을 검출하는 시가진코일의 형상을 나타내며 인공결함 삽입된 용접 시험편 Type (I), (II), (III)의 실제 형상을 보여준다.

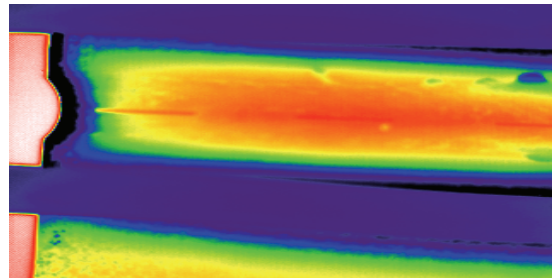
### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 표면 결함

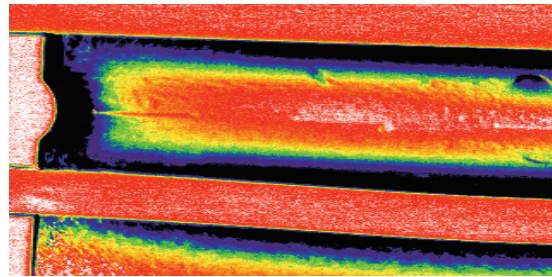
표면결함이 삽입된 용접부 시편에 유도가열 가진 방식의 적외선 서모그래피법으로 시험을 수행하였으며 가진 방식은 300A에서 100~300ms의 가



(a) Real image



(b) Temperature image



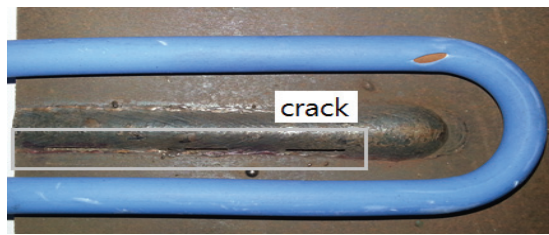
(c) Amplitude image

Fig. 5 Thermal images of Type (I)

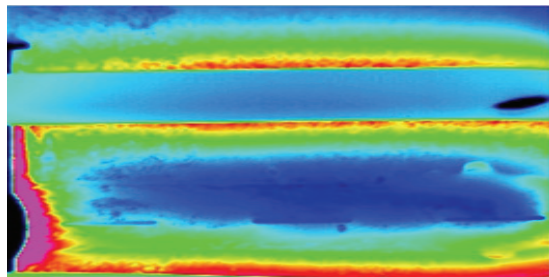
진 시간으로 가진 주파수는 380kHz 로 시편을 가진 하여 시험하였다.

Figs. 5와 6은 Type (I)의 결함시편에 대한 인공 결함 검출을 수행한 결과를 보여준다. Figs. 5와 6에서 보여준 바와 같이 용접비드의 중앙부와 모재부 사이의 결함을 확연히 검출할 수 있었다. Fig. 5에서 Type (I) 결함시편에 대한 온도이미지와 진폭 이미지를 나타낸 것으로 용접비드 중앙부 결함을 명확하게 검출되는 것을 볼 수 있다

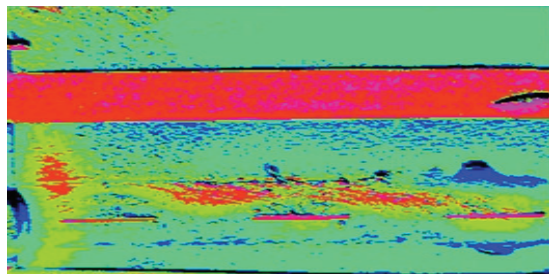
이미지 처리방식에 따라 검출이미지의 선명도가 다르게 나타나지만 슬릿 형태의 결함형상을 분명하게 볼 수 있다. Fig. 6은 Type (II) 결함시편에 대한 온도 이미지와 진폭 이미지를 나타낸 것으로 용접비드와 모재부 사이에서의 이미지 처리된 결함을 구별할 수 있다. 적외선 서모그래피 방법은 열화상이미지를 온도, 위상, 진폭 이미지로 구분하여 결함 분석을 할 수 있다.



(a) Real image



(b) Temperature image



(c) Amplitude image

Fig. 6 Thermal images of Type (II)

Figs. 7과 8은 결함 분포에 따른 온도변화를 나타낸 그래프이며 결함형태에 따른 결함검출 이미지를 나타낸 것으로 결함형태와 위치에 따라서도 검출할 수 있음을 보여준다.

Fig. 7의 그래프에서 x축은 시편의 결함위치에 대하여 세로방향 위치를 나타내며 y축은 측정된 온도를 나타낸다. Fig. 7에서 ①은 결함깊이 2mm, ②은 결함깊이 5mm, ③은 결함깊이 3mm를 나타낸다. Fig. 7에서 전체적인 온도는 30°C 이내로 분포하고 있으며 가진코일 주변의 온도가 높게 나고 있다. Fig. 7에서 ①번 결함주위의 온도 23.8°C, 결함없는 주위의 온도는 25°C로서 온도차이는 약 2°C정도 차이가 발생한다. ②번과 ③번 결함의 경우에도 볼 수 있듯이 결함과 결함 없는 부분에서의 온도차이가 발생하여 결함여부를 구분할 수 있다. 그래프에서 보여준 바와 같이 결함 깊이가 작을수록 열전도도가 빠

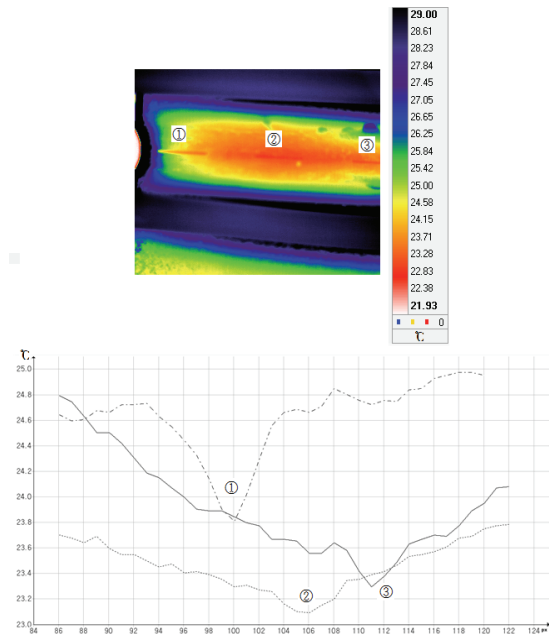


Fig. 7 Transient thermal behavior for Type I

르게 나타나 온도특성이 높게 나타나며 결함깊이 5mm 경우에는 결함깊이 2mm 경우보다 낮게 나타나고 있다. 시험편에 교류전류를 인가하면, 결함이 없는 부분에서는 유도전류가 발생하지만, 결함이 있는 부분에서는 유도전류와 함께 와전류가 발생하여 Joule열의 차이가 발생하고, 결과적으로 결함 유무에 따른 온도차이로 이러한 특성에 따라 결함 깊이를 정량적으로 평가할 수 있다.

Fig. 8은 결함시편 Type II의 결함 깊이에 따른 온도 특성을 나타낸 것이며 ①은 결함깊이 2mm, ②은 결함깊이 3mm, ③은 결함깊이 5mm를 나타낸다. Fig. 8에서도 결함이 없는 부위에서는 온도특성이 높게 나타나지만 결함이 있는 부위에서는 온도 특성이 보다 낮게 나타나고 있어 결함이 존재한다는 것을 알 수 있다.

시편의 전체적인 온도는 Fig. 7의 시편온도와 같이 30°C 이내로 분포하고 있으며 Fig. 8의 ①번 결함주위의 온도 29°C, 결함 없는 주위의 온도는 31°C로서 온도차이는 약 2°C정도 차이가 발생한다. Figs. 7과 8에서 볼 수 있듯이 결함 깊이에 따른 온도 분포 특성이 다르게 나타난다. 결함 깊이는 2mm, 3mm, 5mm이며 결함이 깊을수록 온도차이가 낮게 나타나고 있다.

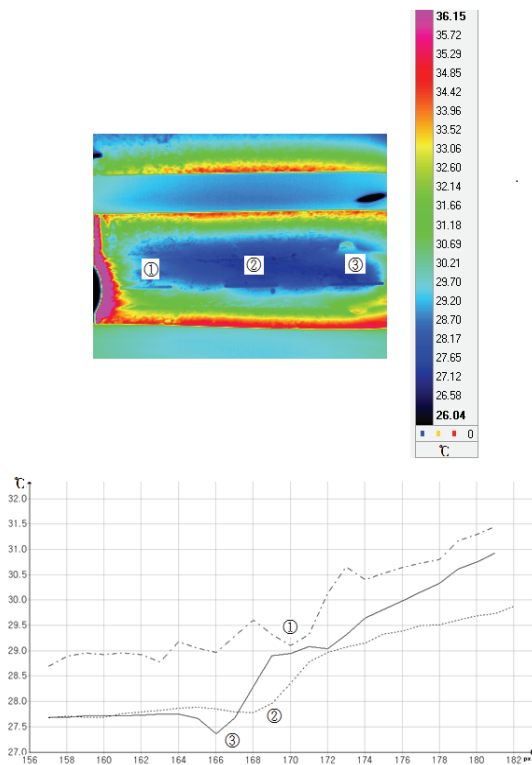
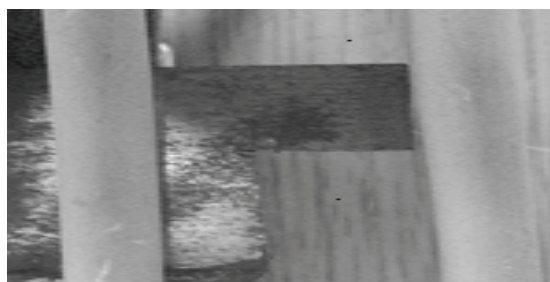
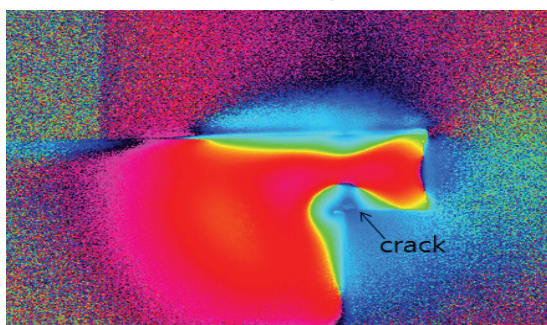


Fig. 8 Transient thermal behavior for Type II



(a) Real image



(b) Temperature image

Fig. 9 Thermal images of Type III

### 3.2 내부결함

능동가진 방식의 적외선 서모그래피 방법으로 내부결함 탐상여부를 측정하였다. Fig. 2의 Type (III) 시편을 적용하여 삽입된 결함의 뒷면에서 탐상시험을 실시하였다. 삽입된 결함시편은 1.5mm의 결함 폭과 결함깊이는 3~4.5mm의 테이퍼 형태로 가공되어 있다. 즉 내부결함 깊이는 0.5~2mm를 탐상 대상으로 하였다. Fig. 9의 열화상 이미지에서 볼 수 있듯이 내부결함이 검출 가능함을 알 수 있다. Fig. 9에서 결함이 있는 부분을 crack으로 표시하였다. 표면에서 0.5mm 떨어진 위치에 존재하는 내부 결함은 명확하게 검출되고 있음을 볼 수 있으며 표면에서 2mm 떨어진 위치에서의 내부결함도 검출 가능함을 알 수 있다. 내부결함 0.5mm~2mm까지 검출 가능함을 본 연구에서 알 수 있었으며 향후 가진 조건의 변화에 따라 2mm 이상의 내부결함의 검출한계를 연구할 필요가 있다.

### 4. 결론

본 논문에서 능동형 가진 방식의 적외선 서모그래피법을 이용하여 대차 프레임의 용접부 결함 모사 시편을 대상으로 균열을 검출할 수 있는 시스템을 제작하여 그 적용성을 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 와전류 가진방식의 적외선 서모그래피법을 이용한 시스템을 구성하였으며 300A, 300ms 가진 조건에 따라 용접부의 내외부 결함을 탐상할 수 있고 결함을 영상 이미지화하여 검사자가 판단할 수 있다.

(2) 본 연구의 가진방식 결함탐상 시스템으로 폭 0.5mm, 길이 10mm, 깊이 2~5mm의 용접부 표면결함 검출이 가능하며, 표면에서 0.5~2mm 떨어진 위치에 존재하는 내부결함도 탐상할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업으로 지원되어 수행되었습니다.

### REFERENCES

1. Lee, D. H., Seo, J. W., Jun, H. K., Kwon, S. J., and Kim, J. C., "Safety Evaluation and Diagnosis for Urban Train," KRRI Report, 2012.

2. Daikoku, K., Fujiwara, M., Sasahara, T., Yohso, J., Ohtsuyama, S., et al., "Development on Inspection Technology of Bogie Frame Using ACFM," IIC Review, Vol. 35, pp. 33-38, 2006.
3. Kwon, S. J., Lee, D. H., Seo, J. W., and Kim, J. C., "Evaluation of Non Destructive Inspection Interval for Running Safety of Railway Axle," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 3, pp. 777-782, 2014.
4. Liu, J., Yang, W., and Dai, J., "Research on Thermal Wave Processing of Lock-in Thermography Based on Analyzing Image Sequences for NDT," Infrared Physics & Technology, Vol. 53, No. 5, pp. 348-357, 2010.
5. He, Y., Tian, G., Pan, M., and Chen, D., "Eddy Current Pulsed Phase Thermography and Feature Extraction," Applied Physics Letters, Vol. 103, No. 8, Paper No. 084104, 2013.
6. Zenzinger, G., Bamberg, J., Satzger, W., and Carl, V., "Thermographic Crack Detection by Eddy Current Excitation," Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 22, No. 2-3, pp. 101-111, 2007.
7. Jäckel, P. and Netzelmann, U., "The Influence of External Magnetic Fields on Crack Contrast in Magnetic Steel Detected by Induction Thermography," Quantitative InfraRed Thermography Journal, Vol. 10, No. 2, pp. 237-247, 2013.
8. Nothen, M., Jia, Y., and Meyendorf, N., "Simulation of the Surface Crack Detection Using Inductive Heated Thermography," Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 27, No. 2, pp. 139-149, 2012.
9. Weekes, B., Almond, D. P., Cawley, P., and Barden, T., "Eddy-Current Induced Thermography-Probability of Detection Study of Small Fatigue Cracks in Steel, Titanium and Nickel-Based Superalloy," NDT & E International, Vol. 49, pp. 47-56, 2012.
10. Abidin, I. Z., Tian, G. Y., Wilson, J., Yang, S., and Almond, D., "Quantitative Evaluation of Angular Defects by Pulsed Eddy Current Thermography," NDT & E International, Vol. 43, No. 7, pp. 537-546, 2010.
11. Wallbrink, C., Wade, S., and Jones, R., "The Effect of Size on the Quantitative Estimation of Defect Depth in Steel Structures Using Lock-in Thermography," Journal of Applied Physics, Vol. 101, No. 10, Paper No. 104907, 2007.
12. Maldague, X., Galmiche, F., and Ziadi, A., "Advances in Pulsed Phase Thermography," Infrared Physics & Technology, Vol. 43, No. 3, pp. 175-181, 2002.
13. Lahiri, B., Bagavathiappan, S., Soumya, C., Mahendran, V., Pillai, V., et al., "Infrared Thermography Based Defect Detection in Ferromagnetic Specimens Using a Low Frequency Alternating Magnetic Field," Infrared Physics & Technology, Vol. 64, pp. 125-133, 2014.