

열화상 비파괴 검사법을 이용한 도로포장 결함 검출

심준기¹ · 김기현²

한국건설기술연구원 구조융합연구소 박사후연구원¹, 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원²,

Detecting of the defects of pavement of a road by using infrared thermography

Sim, Jun-Gi¹ · Kim, Ki-Hyun²

¹Post-Doctoral Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

²Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

Abstract: The purpose of this paper is to find an limitation to detect the defect of damaged asphalt pavement structures for infrared thermography. We use heat source of a natural light to detect the defect efficiently. The heat source was applied to the asphalt specimens. Four asphalt specimens were used: one was the asphalt containing depth of 1cm internal timber, two was the asphalt containing depth of 2cm internal void, Three was the asphalt containing depth of 3cm internal timber and four was not the asphalt containing internal timber. It was found that the depth of 3cm internal timber could be detected by this method. In addition, we used the image processing to make the damage zone displayed clear in the image obtained from the thermographic operation.

Key Words: theromgraphy, non-destructive method, asphalt, void, defect

1. 서 론

1800년대 영국의 William Herschel이 적외선 스펙트럼을 발견한 후, 여러 연구자들의 연구를 토대로 재료가 방출하는 열에너지의 분포를 시각화 할 수 있는 열화상 기법의 기반이 완성되었다(Meola et al., 2006).

이 열화상 기법의 국내외 주요 연구 동향을 살펴보면, Stanley 등은 콘크리트 빌딩 표면의 잠재적인 결함을 열화상 기법으로 검출하였다(Stanley et al., 1994).

Moropoulou 등은 Avio Tvs 2000 Mk II LW 장비를 사용하여 공항 활주로의 표면결함을 열화상 기법으로 점검하였다(Moropoulou et al., 2001). 공항 활주로의 표면결함은 사고의 원인이 되기 때문에 이를 막기 위

한 포장에 대한 품질 조사가 반드시 요구된다. 이러한 조사에 비용대비 효율적인 방법으로 열화상 기법이 제안된 바 있다(Moropoulou et al., 2001; Jeff et al., 2003). 열화상 기법이 적용된 계류장은 포장용 재료로 쇄석을 사용하였고 공항에서 가장 오래된 부분 중에 하나였다. 아스팔트로 포장된 Bravo 계류장과 약 30mm 두께의 아스팔트로 채포장된 활주로도 조사되었다. 그 결과, 결함의 검출을 위해 파괴시험을 이용한 기존의 방법에 비하여 열화상 기법은 아스팔트 도로나 공항 활주로와 같이 넓은 면적의 표면을 빠르게 검사하는 것이 가능하였다. 그러나 열화상 기법에 의한 비파괴 검사법은 실험 현장에서, 구름의 두께나 표면 습도, 태양열 방출, 표면 재질에 따른 방사율의 변화로 인하여 결함부위의 정확한 깊이나 두께 등을 알기는 어려웠다. 따라서 결함에 대한 보장자료나 정밀 결함 진단

주요어: 서모그래피, 비파괴 검사법, 아스팔트, 목재, 결함

Corresponding author: Sim, Jun-Gi

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
Tel: +82-31-9100-395, Fax: +82-31-9100-121, E-mail: sjk0605@kict.re.kr

Received September 4, 2015 / Revised September 10, 2015 / Accepted September 14, 2015

이 가능한 비파괴 검사법의 접목이 요구된 바 있다 (Moropoulou et al., 2001).

Brown 등은 FRP시트의 결함을 열화상 기법으로 검출하였다(Jeff et al., 2003). Gailius 등은 손상과 열화상의 정량적인 관계에 관한 연구를 수행하여 기계적인 손상과 열전달 계수간의 상관관계를 발견하였다 (Gailius et al., 2003). 그 후, 손상 확인 감도 증진을 위해 Weritz 등은 PPT를 이용하여 콘크리트 구조물에 대하여 연구하였다(Weritz et al., 2005). Sim 등은 이러한 열화상 기법의 기본 원리, 활용 예, 제한 사항 등에 대해서 상세한 조사 연구를 수행한 바 있다(Sim et al., 2008). 또한, Sim 등은 열화상 기법 적용 시 인위적인 열원으로 할로겐램프보다 원적외선램프가 효율적임을 제안하고 결함의 손상영역에 대하여 가우스 필터와 프리윗 마스크 화상처리기법을 혼합한 알고리즘을 적용할 것을 제안한 바 있다(Sim et al., 2009). 최근 Kim 등은 영상으로부터 기하학적 정보의 정확성을 높이기 위한 비전 검사 기술 분야에서 유효요소 열전달 해석을 이용하여 적외선 열화상카메라에 적용 가능한 카메라 영상 캘리브레이션 타겟을 제안한 바 있다(Kim et al., 2014). 이와 별도로 복합재료 시편에 대한 면적 측정을 위해서 이미지 처리를 활용한 연구도 있다(Son et al., 2015).

이처럼 열화상 기법이 기술적으로 발전하고 다양한 분야에서 활용도가 높아지고 있지만 도로포장에서는 기존의 자연광을 이용한 일반적인 표면 결함 검출은 있으나 포장체 내부에 매몰된 목재와 같은 결함에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한, 자연광을 이용한 검사 방법을 적용하였기 때문에 외부 영향에 민감하여 결함 검출이 어려운 점이 있었다. 이에, 본 연구에서는 자연광을 열원으로 사용 시 주변 온도의 변화에도 온도 변화 상태를 확인할 수 있는 무차원 온도 분석법과 프리윗 마스크 화상 처리 기법을 적용한 열화상 기법을 이용하여 도로포장 안쪽의 깊은 곳에 발생한 결함을 검출할 수 있는 방법을 제안하고자 한다 (Sim et al., 2008; Sim et al., 2009).

2. 열화상 기법 기본

2.1 기본 원리

Planck는 식(1)과 같이 흑체에 대한 방사 강도를 적외선 스펙트럼 분포로 묘사하였다(Meola et al., 2004).

$$E_{\lambda b} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (1)$$

여기서, $E_{\lambda b}$: 흑체의 방사 강도

C_1, C_2 : 일종의 재료 상수인 방사 상수

λ : 적외선의 파장(Wave length)

T : 절대 온도(K)

적외선은 파장에 따라 근적외선(0.75~3 μ m), 중간적외선(3~6 μ m), 원적외선(6~15 μ m) 그리고 극 적외선(15~1000 μ m) 밴드로 구분된다. 적외선 파장은 식(2)로 Planck의 미분법칙과 최대 방사 강도를 나타내는 Wien의 거리 법칙에 의해 도출된다(Meola et al., 2004; Maldague et al., 1996).

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (2)$$

식(3)은 Planck의 미분법칙을 전체 스펙트럼($\lambda = 0 \sim \infty$)에 대해서 통합한 전체 방사 강도이다.

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

여기서, σ : Stefan-Boltzmann 상수(Meola et al., 2006)

실제의 방사 강도는 식(4)와 같이 식(1)의 이론값과의 차이를 반영한 스펙트럼 방출 계수로 정의된다.

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda b}} \quad (4)$$

여기서, ϵ_{λ} 는 스펙트럼 방출 계수

따라서, 식(5)는 방출 계수와 환경적인 요인을 고려한 방사 에너지이다.

$$E = \epsilon \frac{A}{e^{B/T} - C} \quad (5)$$

여기서, A, B, C: 보정된 Planck의 상수

즉, 열화상은 절대온도와 Planck에 의해 유도된 흑체에 대한 방사 강도를 통한 적외선을 파장에 따라 적외선 밴드로 구분한 그래프이다.

2.2 열화상 기법 적용 방법

열화상 기법의 열원은 자연 상태의 열과 인위적으로 열이 있다. 자연 상태의 태양열은 외부 환경 요건

에 따라 적외선 방출량에 많은 차이를 보인다(Bennett et al., 1982).

열화상 기법에 쓰이는 열에너지 전파는 식(6)과 같이 열전달 지배방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha \nabla^2 T = \frac{\delta T}{\delta t} \quad (6)$$

여기서, α : 열 분산도
 T : 절대 온도
 t : 시간

α 는 $k/\rho C$ 로 나타낼 수 있다. 이때, k 는 열전도율이며 ρ 는 밀도 C 는 특정 재료의 비열이다. α 와 비례하는 k 는 결함이 존재하는 물체에서 물체의 결함이 위치한 표면 온도와 그렇지 않은 부위의 표면 온도를 구분해 주는 주요 인자이다. 본 연구의 대상인 아스팔트 계 도로포장의 k 는 상온(20℃)에서 0.33이며 본 연구에서 내부 결함으로 쓰이는 목재의 k 는 상온(20℃)에서 0.14~0.19 W/mk이다(Ministry of Transportation, 2015). 이처럼 서로 상이한 k 로 인하여 결함이 식별되며 일반적으로 k 의 차이가 클수록 온도 분포 차이가 크다. 이밖에 결함의 깊이나 크기에 대한 정보는 후 처리과정으로 얻을 수 있다(Lugin et al., 2005). 그러나 온도 분포 차이는 외부 환경의 영향을 받는다(Meola et al., 2006).

결함 존재의 유무는 표면의 온도 차이로부터 감지된다. 결함 검출을 위한 온도 차이는 Meola와 Carlomagno가 제시한 다음의 식(7)을 사용하여 계산한다.

$$\bar{T} = \frac{|T_s - T_d|}{|T_s - T_r|} \quad (7)$$

여기서 T_r : 가열 이전의 실험체의 온도
 T_d : 결함 위치의 온도
 T_s : 결함 주변의 온도
 \bar{T} : 상대적인 온도 변화

식(7)은 건전부와 손상부의 온도 차이를 절대 값의 비율로 나타낸 것으로, 온도차이의 상대적인 특성은 고려하고 있지 않다. 지광습 등은 콘크리트 내부 결함 검출을 위한 새로운 열화상 분석법으로 주변 온도의 변화에도 일정한 온도 변화 상태를 판단할 수 있는 상대적인 온도를 이용한 식(8)을 제안하여 외부환경의 영향을 최소화하였다(Sim et al., 2008).

$$\Delta T = \frac{T_s - T_d}{T_s} \quad (8)$$

따라서, 도로포장의 내부 결함 검출을 위한 표면 온도 분석 시 식(8)을 이용하여 자연광을 열원으로 사용시 발생하는 단점을 최소화한다. 또한, 심준기 등이 제안한 프리윗 마스크 화상 처리 기법을 이용하여 불균등한 표면에 발생하는 오점을 그래픽으로 보정한다.

본 논문의 열화상 실험을 위해 사용된 열화상 카메라(NEC사의 TH7800N)는 상온 30℃에서 0.1℃의 온도 차이를 구분할 수 있는 높은 온도 민감도를 갖고 있으며 320×240 픽셀의 해상도로 미세한 픽셀 단위의 분석이 가능하다. 사용된 열화상 카메라의 기본 사양은 Table 1과 같다.

열원은 열화상 기법을 이용한 도로포장의 결함 검출에서 일반적으로 사용되는 자연광(Natural light)을 사용하였다. 도로포장 내부 결함의 효율적인 검출을 위해 수직으로 30cm 거리에서 아스팔트 실험체에 오전 10시40분부터 오후 2시30분까지 10분단위로 열화상 촬영을 수행하였다.

Table 1. Specifications of infrared camera

Field of view (mrad)	Temperature sensitivity (℃)	Spectral range (μm)	Image frequency (Hz)
1.5	0.1(at 30℃)	8~14	60

3. 도로포장 열화상 기법 적용

3.1 도로포장의 결함 종류

내부 결함 검출을 위한 실험체는 Fig. 1과 같이 200×200mm 크기의 틀 안쪽에 표면으로부터 10mm, 20mm, 30mm 깊이별로 20mm, 40mm, 60mm, 80mm의 정사각형 목재로 구성된 결함을 갖도록 제작하였다. Fig. 2는 목재로 제작된 틀이다. Fig. 3은 아스팔트 혼합물을 타설한 후 완성된 실험체이다. Fig. 4는 자연광을 이용한 열화상 기법 적용 실험 전경으로 열화상 카메라와 실험체와의 거리는 약 2.0m이다. Table 2는 내부 목재 실험체의 요약이다.

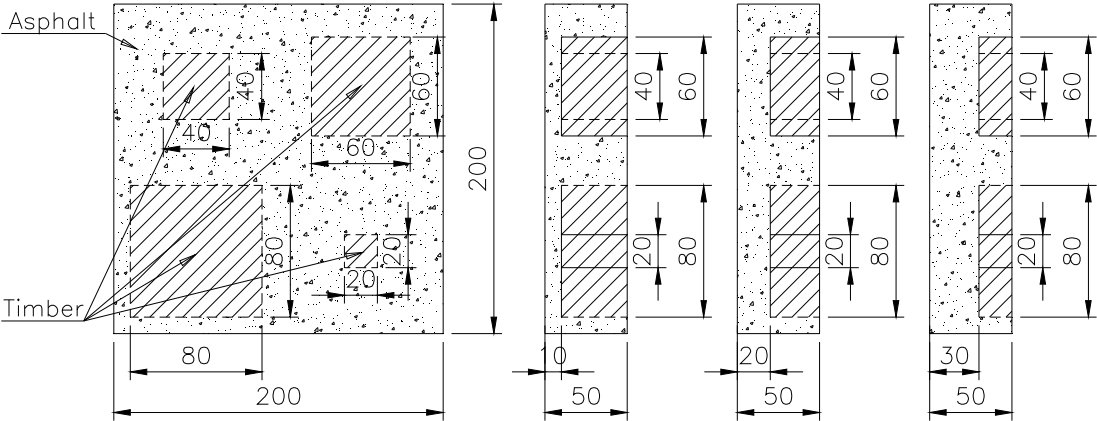


Fig. 1 Pavement specimen fabrication drawings



Fig. 2 Pavement specimen production without the asphalt

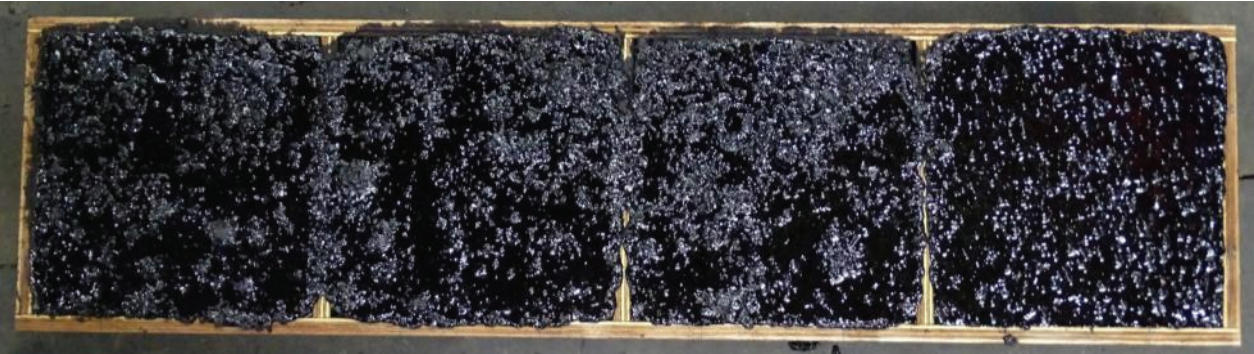


Fig. 3 Pavement specimen production with the asphalt



Fig. 4 Thermal imaging techniques applied by using natural light

Table 2. Pavement internal defect specimen summary

NO.	Depth(mm)	Size of the internal defect(mm)
S01-01-04	10	40 X 40
S02-01-06	10	60 X 60
S03-01-08	10	80 X 80
S04-01-02	10	20 X 20
S05-02-02	20	40 X 40
S06-02-04	20	60 X 60
S07-02-06	20	80 X 80
S08-02-08	20	20 X 20
S09-03-02	30	40 X 40
S10-03-04	30	60 X 60
S11-03-06	30	80 X 80
S12-03-08	30	20 X 20
S13-REF.	-	-

상기 시편명에서 S○○-△△-□□의 S는 Specimen의 약자이며 ○○은 시편의 총 개수를 나타내기 위한 숫자이고 △△는 시편 표면으로부터 목재가 위치한 깊이이며 □□는 정사각형인 목재의 가로와 세로의 크기를 의미한다.

시험체의 제작에 사용된 재료는 구스 아스팔트 혼합물로 수밀성 및 변형에 대한 추종성이 뛰어나 교면 포장에 주로 사용되는 도로포장용 재료이다. 재료의 특성상 다짐 공정이 필요하지 않고, 성형 틀의 형상에 따라 흘러들어 공극 없이 성형이 가능하기 때문에 본 연구에 적용하였다.

Table 3과 같은 입도의 골재를 사용하였으며, 도로포장용 일반 AP-5 아스팔트 바인더를 중량비로 9.3% 혼합하여 220℃ 이상의 온도로 가열하여 시험체를 제작하였다.

Table 3. Asphalt Specifications

Aggregate size	Weight ratio(%)
13mm	35
Aggregate	34.5
Filler	30.5

3.2 도로포장의 목재 결함 검출 결과

Fig. 5는 S03-01-08, S07-02-08, S11-03-08, S13-REF.의 표면으로부터 10, 20, 30mm 깊이별 결함부의 표면 온도 분포도이다. 결함의 깊이가 깊어질수록 결함부의 표면온도가 낮게 나오며 오후 1시에 해당하는 140분 지점부터는 반대로 결함의 깊이가 깊어질수록 결함부의 표면온도가 높게 나왔다. Fig. 6은 S02-01-06, S06-02-06, S10-03-06, S13-REF.의 표면으로부터 10, 20, 30mm 깊이별 결함부의 표면 온도 분포도이다. 결함

의 깊이가 깊어질수록 결함부의 표면온도가 낮게 나오며 오후 1시에 해당하는 140분 지점부터는 반대로 결함의 깊이가 깊어질수록 결함부의 표면온도가 높게 나왔다. 그러나 결함크기가 80X80mm인 결함부 표면 온도 분포보다 그 표면 온도 분포 차이가 1℃ 정도 적게 나타났다. Fig. 7은 S01-01-04, S05-02-04, S09-03-04, S13-REF.의 표면으로부터 10, 20, 30mm 깊이별 결함부의 표면 온도 분포도이다. 표면 온도 차이로는 결함을 구분하기 어렵게 나타났다. 그러나 오후 2시에 해당하는 200분 지점에서 결함부가 클수록 표면 온도가 낮게 나오는 상태로 식별되었다. Fig. 8은 S04-01-02, S08-02-02, S12-03-02, S13-REF.의 표면으로부터 10, 20, 30mm 깊이별 결함부의 표면 온도 분포도이다. 이 역시 표면 온도 차이로는 결함을 구분하기 어렵게 나타났다. 즉, 결함크기가 작고 결함깊이가 깊을수록 표면 온도 분포로 결함검출이 어려웠다. 표면 온도가 높게 나오는 상태 비교로 결함깊이 20mm에 결함크기 60X60mm까지로 확인되었으며 반대로 결함이 클수록 표면 온도가 낮게 나오는 상태 비교를 포함해서는 결함깊이 20mm에 결함크기 40X40mm까지로 확인되었다.

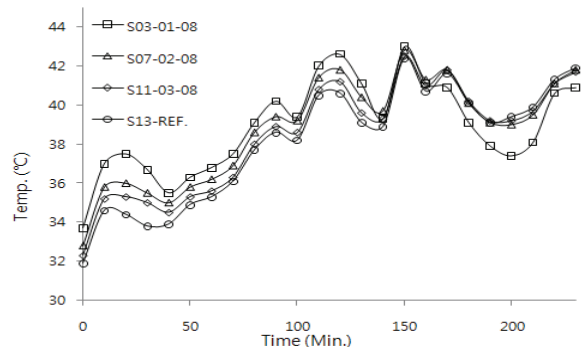


Fig. 5 The surface temperature distribution of defect size (80 X 80mm)

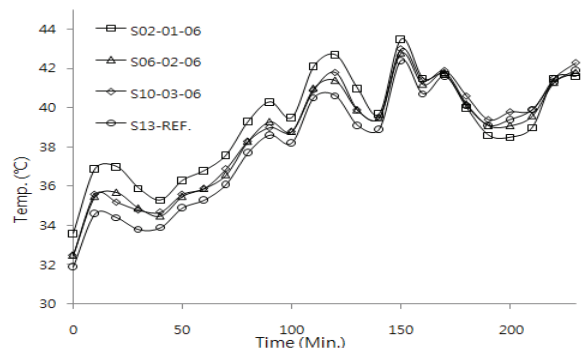


Fig. 6 The surface temperature distribution of defect size (60 X 60mm)

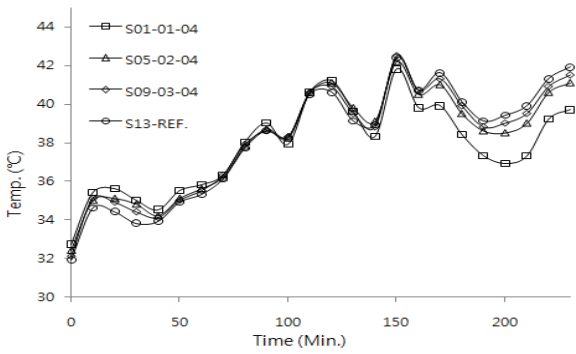


Fig. 7 The surface temperature distribution of defect size (40 X 40mm)

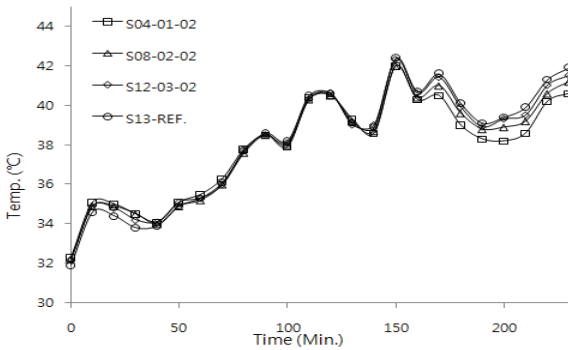


Fig. 8 The surface temperature distribution of defect size (20 X 20mm)

이처럼 자연광을 이용한 일반적인 표면온도 분포차이로는 결함 식별시 오전에는 결함부가 클수록 표면온도가 높게 나오고 오후에는 반대로 결함부가 클수록 표면온도가 낮게 나오는 경우가 있어 상대적인 온도 차이의 구분이 어렵다. 이에, 상기 제한한 상대적인 온도를 이용한 방법으로 외부환경의 영향을 최소화 하였다.

Fig. 9는 S03-01-08, S07-02-08, S11-03-08의 표면으로부터 10, 20, 30mm 깊이별 결함부의 상대적인 표면온도 분포도이다. 결함의 깊이가 깊어질수록 결함부의 상대적인 표면온도 차이가 높게 나타나며 오후 1시에 해당하는 140분 지점부터도 상대적인 표면온도 차이가 크게 나타났다. Fig. 10은 S02-01-06, S06-02-06, S10-03-06의 표면으로부터 10, 20, 30mm 깊이별 결함부의 표면온도 분포도이다. 결함의 깊이가 깊어질수록 결함부의 상대적인 표면온도 차이가 크게 나타나며 오후 1시에 해당하는 140분 지점부터도 상대적인 온도 차이가 높게 나타났다. 이 역시 결함크기가 80 X 80 mm인 결함부의 상대적인 표면온도보다 0.02정도 작게 나타났다. Fig. 11은 S01-01-04, S05-02-04, S09-03-04의 표면으로부터 10, 20, 30mm 깊이별 결함부의 상대적인 표면온도 분포도이다. 결함부가 오후 1시에 해당하는 140분 지점에서부터 상대적인 표면온도로 식별

되었다. Fig. 12는 S04-01-02, S08-02-02, S12-03-02의 표면으로부터 10, 20, 30mm 깊이별 결함부의 상대적인 표면온도 분포도이다. 이 역시 결함부가 오후 1시에 해당하는 140분 지점에서부터 상대적인 표면온도로 식별되었다. 즉 상대적인 표면온도 분포를 이용하면 일반적인 표면온도로 식별이 어려웠던 것과 달리 오전, 오후의 태양광 양상의 변화를 이용하여 결함깊이 30mm에 결함크기 20 X 20mm까지 결함을 식별할 수 있는 것으로 확인되었다.

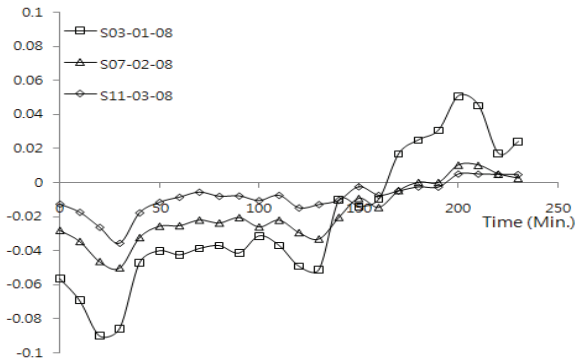


Fig. 9 The surface temperature distribution of defect size (80 X 80mm)

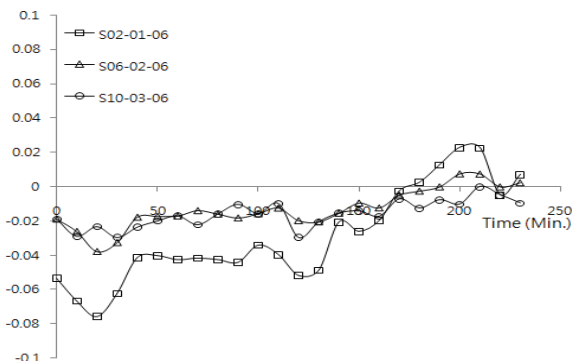


Fig. 10 The surface temperature distribution of defect size (60 X 60mm)

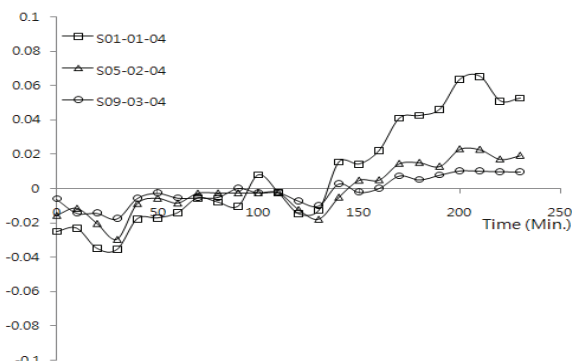


Fig. 11 The surface temperature distribution of defect size (40 X 40mm)

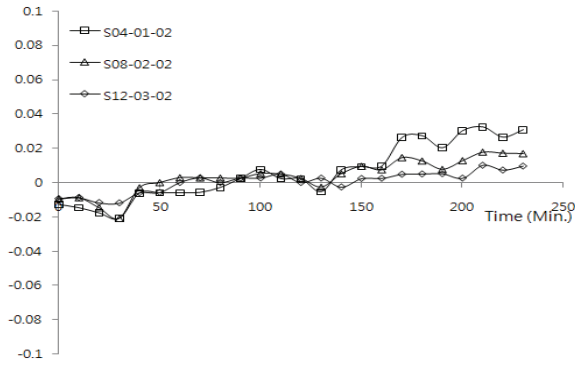


Fig. 12 The surface temperature distribution of defect size (20X20mm)

이러한 표면온도를 이용한 결함 식별과 함께 프리윗 마스크 화상 처리 기법을 이용하여 불균등한 표면에 발생하는 오점을 그래픽으로 보정하여 육안으로 보이지 않는 내부 결함을 열화상 이미지 처리를 이용하여 확인할 수 있도록 하였다.

Fig.13은 10시 40분에 촬영한 열화상 이미지 원본과 프리윗 마스크로 화상 처리한 결과이다. 그 결과, S01-01-04, S02-01-06까지 열화상 이미지 처리로 결함 부를 명확히 할 수 있었으나 나머지에 대해서는 이미지 처리로 결함부 식별이 어려웠다. 즉, 제안 프리윗 마스크 화상 처리 기법으로는 결함깊이 10mm에 결함크기 40X40mm까지 결함을 명확히 하여 식별할 수 있는 것으로 확인되었다.

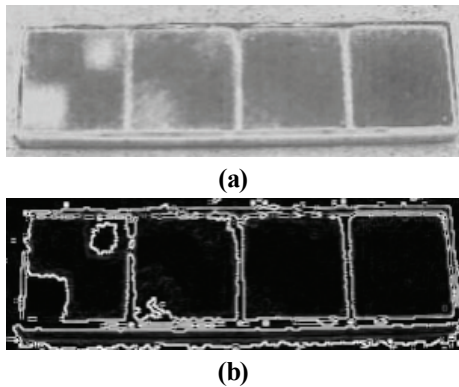


Fig. 13 Result of Prewitt mask (a)Before image processing (b)After image processing(AM 10:40)

4. 결론

도로포장의 깊은 곳에 위치한 목재 결함 검출을 위한 열화상 기법 적용 결과는 다음과 같다.

(1) 기존 문헌에서 자연광을 열원으로 사용하여 열화상 기법 적용 시 효율적인 표면 온도 분석방법으로

제안한 상대적인 표면 온도 분석법을 이용하여 아스팔트 내부의 목재를 검출한 결과, 일반적인 표면온도 분석으로 식별이 어려웠던 결함깊이 30mm에 결함크기 20X20mm까지 결함을 식별할 수 있는 것으로 확인되었다.

(2) 기존 문헌에서 제시한 프리윗 마스크 화상 처리 기법을 이용하여 결함깊이 10mm에 결함크기 40X40mm까지 아스팔트 내부의 목재의 형상을 명확하게 확인할 수 있었다. 추후 이미지 처리 기법을 향상시킨다면 현재보다 결함깊이가 깊고 결함크기가 작은 결함도 식별이 가능할 것으로 판단된다.

(3) 열화상 기법의 열원으로 외부 환경에 민감한 자연광을 사용할 경우 본 논문에서 제안한 상대적인 표면온도 분석법을 적용하면 현재보다 결함깊이가 깊고 결함크기가 작은 아스팔트의 내부 목재 결함 검출이 가능할 것으로 판단된다.

References

- Bennett, C.A., Jr. and Patty, R.R.(1982) "Thermal wave interferometry: a potential application of the photoacoustic effect." *Journal of Applied Optics*, 21(1), pp.49-54.
- Gailius, A. and Zukauskas, D. (2003) "Determination of Concrete Structural Defects by Infrared Spectrum Analysis." *ISSN 1392-1320 Materials Science (Medziagotyra)*, 9(1), pp.106-110.
- Jeff, R.. Brown and Hamilton III (2003) "NDE of Reinforced Concrete Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Composite using Infrared Thermography." *InfraMation the thermographer's conference 2003*.
- Kim, S., Choi, M., Park, J., Shin, K. and Lee, E. (2014) "Development of Calibration Target for Infrared Thermal Imaging Camera." *Journal of the Korean society for nondestructive testing*, 34(3), pp.248-253.(in Korean)
- Lugin, S. and Netzelmann, U. (2005) "An effective compression algorithm for pulsed thermography data." *NDT & E International*, 38(6), pp.485-490.
- Maldague, X. and Marinetti, S. (1996), "Pulse phase infrared thermography." *NDT & E International*, 29(6), pp.391-400.
- Meola, C. and Carlomagno, G.M. (2004) "Recent advances in the use of infrared thermography." *Meas. Sci. Technol.*, 15(6), pp.R27-R58
- Meola, C. and Carlomagno, G.M. (2006) "Application of infrared thermography to adhesion science." *Journal*

- of Adhesion science and Technol., 20(7), pp.589-632.
- Ministry of Transportation (2015) "Building energy-saving design standards handbook", p.150.(in Korean)
- Moropoulou, A., Avdelidis, N.P., Koui, M. and Kakaras, K. (2001) "An application of thermography for detection of delaminations in airport pavements." NDT & E International, 34(5), pp.329-335.
- Sim, J., Moon, D., Chung, L., Lee, J., and Zi, G. (2009) "The Efficiency of External Heat Sources for Infrared Thermography Applied Concrete Structures and the Improvement of the Defect-identification." Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 13(5), pp.169-179. (in Korean)
- Sim, J., Zi, G., Park, J., Cho, H., and Lee, J. (2008) "Review of the Current infrared Thermography Techniques for Detecting Defects in Civil Structures." Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 12(3), pp.71-83. (in Korean)
- Son, Byung Jik1 · Lee, Kyu Hwan1 (2015) "The Area Measurement of Composite Specimen using Digital Image Processing." J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc., 6(2), pp.17-22.(in Korean)
- Stanley, Christopher C. and Balendran, R.V. (1994) "Developments in Assessing the Structural Integrity of Applied Surfaces to Concrete Buildings." Structural Survey, 12(4), pp.4-9.
- Weritz, F., Arndt, R., Rollig, M., Maierhofer, C. and Wiggerhauser, H. (2005) "Investigation of concrete structures with Pulse Phase Thermography." Materials and Structures, 38(283), pp.843-849.