

적외선 열화상기법을 이용한 균열 깊이에 따른 온도특성에 관한 연구

정주영¹, 윤혁진^{1*}, 조현우², 양희승³

¹한국철도기술연구원

²과학기술연합대학원대학교 로봇틱스 및 가상공학

³인하대학교 조선해양공학과

A Study on Temperature Characteristics of Various Depth using Infrared Thermography

Ju-Yeong Jung¹, Hyuk-Jin Yoon^{1*}, Hyun-Woo Cho², Hui-Seung Yang³

¹Korea Railroad Research Institute

²Division of Robotics and virtual engineering, University of Science & Technology

³Naval Architecture & Ocean Engineering, INHA University

요약 구조물의 강도 저하를 유발하는 균열의 조기 탐지 및 보수는 인적, 사회적 손실을 예방할 수 있는 중요한 부분이다. 이 논문에서는 균열 탐지를 위하여 적외선 열화상 기법 중 광-적외선 열화상 기술을 이용하여 콘크리트 시편의 균열 깊이에 따른 온도 특성을 분석하였다. 시멘트 반죽을 이용하여 0, 10, 20, 40, 80 mm의 인공 균열이 있는 시편을 제작하였으며, 인공 균열 부분은 깊이를 제외한 모든 부분을 같게 생성하였다. 실험은 시편의 온도 특성을 파악하기 위하여 열원을 통해 시편을 가열한 후 균열부의 최저 온도를 비교하였다. 시편의 균열 여부에 따라 시편 표면 온도 분포가 입사 에너지의 단일, 다중 반사 때문에 다르게 변화한다는 것을 확인하였으며, 시편의 온도 분포가 정상상태에 다다를수록 균열 깊이에 따른 온도가 감소하는 경향이 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있었다. 정규화된 온도 데이터를 통하여 이 실험에 사용된 시편은 10분 후 정상 상태에 근접하였으며, 10분 이후의 온도 데이터를 선형 회귀 분석한 선형 방정식 기술기의 표준편차는 0.0005, y 절편 표준편차는 0.0038이다. 이때 정규화된 온도데이터의 표준편차는 0.01 이하로 매우 정합하며 균열 깊이에 따라 온도가 선형적으로 감소하고 있다. 이러한 결과는 균열부의 다중 반사가 발생하는 면적과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되며, 다양한 시편을 통해 균열부 면적과 입사 에너지의 상관관계를 분석한다면 무작위성이 높은 빛의 난반사 거동 모사에도 적용할 수 있을 것이다.

Abstract The thermal characteristics of concrete specimens were analyzed using cement paste specimens with artificial cracks. In order to understand the temperature characteristics of the specimen depending on the crack depth, the specimen was heated and the minimum temperatures of the specimens at which cracks appear were investigated according to the crack depth. It was confirmed that the surface temperature distribution of the specimen varies depending on whether the specimen is cracked or not, because of the single and multiple reflections of the incident energy. Furthermore, as the temperature distribution of the specimen reaches a steady state, the temperature data tends to decrease with the crack depth. Through the observation of the normalized temperatures, it was found that the temperature of the specimens obtained from this experiment reached a steady state after 10 minutes. At this time, the standard deviation of the normalized temperature is around 0.01 or less, and the temperature decreases linearly with increasing crack depth. This result is considered to be closely related to the area where multiple reflections occur in the cracked region. If the correlation between the crack region and the incident energy is analyzed for various specimens, it can be applied to the diffuse reflection of the light.

Keywords : Active method, Crack, Crack depth, Infrared, Thermography, Temperature characteristics

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(피해복구를 위한 윈스톱 수변구조물 통합관리 기술개발, 17SCIP-B065985-05)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Hyuk-Jin Yoon(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5565 email: scipio@krri.re.kr

Received January 25, 2018

Revised February 13, 2018

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

1. 서론

구조물에서 발생하는 여러 가지 균열은 적절한 보수 작업이 이루어지지 않을 경우, 미관상 문제뿐만 아니라 구조물의 강도 저하를 발생시킴과 막대한 인명 및 재산 피해로 이어질 수 있다. 그렇기 때문에 구조물에 발생한 균열의 조기 탐지 및 보수는 사회적 손실을 예방할 수 있는 아주 기본적인 중요한 절차이다. 구조물의 균열 탐지에 관련된 검사 방법 중 비파괴 검사 기술은(NDT, Non-Destructive Testing) 일반적으로 재료나 제품의 원형과 기능에 변화를 주지 않는 검사를 말하며, 제품을 분해하거나 파괴하지 않고 그것의 성질, 상태, 내부구조 등을 알아내는 모든 검사방법을 말한다. 여러 가지 비파괴 기술 중 적외선 열화상 기술(Infrared thermography)을 이용한 검사방법은 적외선 카메라를 이용하여 대상물의 이상을 진단하는 비파괴 검사방법으로, 대상물의 온도 신호를 이용하여 결함, 균열 등이 대상물에 비 균일한 온도 분포를 발생시키는 특성을 이용한다[1, 2].

적외선 열화상 기법은 대상물에 인가되는 열원의 제어 가능성에 따라 크게 능동기법(Active method)과 수동기법(Passive method)으로 분류 할 수 있으며, 물체 내 존재하는 결함이나 균열 등의 검출에 주로 사용되는 능동기법은 대상물의 검사 시 신속하고 간편한 특성으로 인하여 최근에 활발한 연구가 이루어지고 있다[1]. Shrestha Ranjit et al.은 능동기법 중 lock-in thermography 방법을 이용하여 연구를 수행하였으며, 실험과 수치해석을 통해 시편의 온도 값과 위상차를 이용한 방법으로 균열 크기와 깊이를 탐지하였다[3]. Mohammed Basheer et al.은 레이저 thermography를 이용한 실험과 수치해석을 병행하였으며, 균열 탐지 및 균열 깊이와 온도변화의 상관관계에 관한 연구를 수행하였다[4]. 또한, Jinxing Qiu et al.은 레이저 thermography를 이용한 실험과 수치해석, 그리고 neural network를 이용하여 균열 깊이 측정 연구를 수행하였다[5].

선행연구들로부터 균열의 깊이가 대상물의 온도분포 형성에 영향을 미친다는 점을 확인할 수 있었으나, 표면 온도 특성을 정량적으로 분석하지는 못하였다. 또한, 대상물과 균열의 위상차를 이용한 연구들은 다양한 주파수에서의 시험이 필요하며, 레이저 thermography를 이용한 방법은 균열부 부근의 국부 가열 위치에 따라 실험 결과 차이가 발생하여 실험 대상물마다 최적 가열 위치를 찾아야 하기 때문에 실험 정확도가 낮아진다는 단점

이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 이 연구에서는 적외선 열화상 기법으로 대상물의 균열 깊이에 따른 온도특성을 분석하였다. 본 연구는 산업 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 능동기법 중 광원(Lamp)을 이용하는 광-적외선 열화상 기술(Flash thermography)을 사용하여 국부가열 실험의 단점을 해결하고자 하였다. 시멘트 페이스트를 이용하여 균열 깊이가 서로 다른 5개의 시편을 제작하였으며, 시편의 인공 균열부의 깊이에 따른 온도 특성을 정량적으로 분석하여 경향성을 확인할 수 있었다.

2. 능동 열화상기법 원리

광-적외선 열화상 기술은 광원으로부터 발생한 복사 에너지와 빛이 대상물로 입사하며, 입사된 에너지와 빛은 대상물 표면에서 반사되거나 투과하여 표면 온도를 상승시킨다. 하지만 같은 성분으로 구성된 재료일지라도 표면이나 내부에 결함 혹은 균열이 존재한다면 입사된 에너지는 Fig. 1과 같이 균열 내부에서 다중 반사되거나 흡수되어 재료의 건전부와 다른 온도분포를 형성시키게 된다.

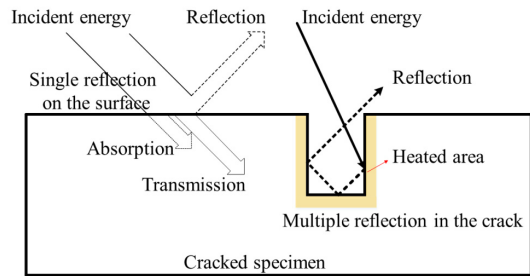


Fig. 1. Behavior of the incident thermal energy on the specimen

입사된 에너지는 대상물의 표면 거칠기, 색상, 재료의 방사율 등에 의존적인 경향이 있으며 앞서 설명한 요인들로 인한 균열부의 비 균일 온도장을 적외선 카메라로 측정하여 균열을 정량적으로 분석할 수 있다[6]. 광-적외선 열화상 기술은 식 (1), (2)와 같이 q_0 가 표면을 가열한다고 가정된 1D 분석 모델로 표현할 수 있으며, 여기서 T는 두께가 L인 대상물의 앞면과 뒷면($x=0, x=L$)에서 시간 t에 대한 온도 함수이며, α 는 열 확산율, ρ 는 밀도, c는 비열이다[7].

$$T(0, t) = \frac{q_0}{\rho c L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{L^2} \alpha t\right) \right] \quad (1)$$

$$T(L, t) = \frac{q_0}{\rho c L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{L^2} \alpha t\right) \right] \quad (2)$$

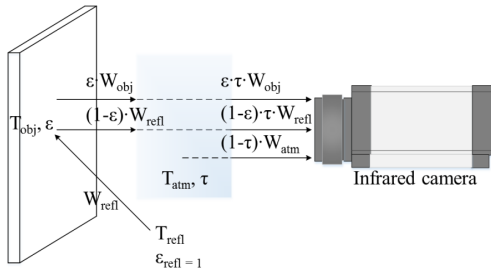


Fig. 2. Principle of the infrared camera

적외선 열화상 카메라는 대상물에서 반사된 적외선 파장을 검출하는 측정기로, Stefan-Boltzmann에 의한 온도-파장 관계식을 사용하여 대상물의 적외선 파장을 그에 맞는 온도 값으로 변환하여 나타낸다. Fig. 2는 열화상 카메라가 대상물과 주변 환경에서 발생하는 복사에너지 측정하는 원리이며, 이는 식 (3) 과 같이 표현할 수 있다.

$$W_t = W_{obj}\tau\epsilon + W_{refl}(1-\epsilon)\tau + W_{atm}(1-\tau) \quad (3)$$

여기서 W_t 는 열화상 카메라로 들어오는 총 복사에너지이며, W_{obj} , W_{refl} , W_{atm} 은 각각 대상물, 주변 환경, 대기에서 방사되는 복사에너지이다. 또한, ϵ 은 대상물의 방사율이며, τ 는 대기의 투과율을 나타낸다.

3. 실험 절차

3.1 시편 제작

균열 부분의 깊이에 따른 온도특성을 분석하기 위하여 시멘트 페이스트 시편을 제작하였다. 인위적으로 생성한 시편의 균열 부분은 깊이를 제외한 모든 부분을 같게 생성하였으며 Fig. 3과 같이 시편의 크기를 같게 제작하기 위하여 목재 거푸집을 이용하였다. 시편은 약 7일간 양생하였으며, 실험결과에 영향을 미치는 표면 거칠기를 최소화하기 위하여 완성된 시편의 균열부 면을 표면 가공하였다. Fig. 4에서 볼 수 있는 것과 같이 실험에 사용된 균열 시편의 크기는 100 x 100 x 100 mm이

며, 균열부의 크기는 길이 80 mm, 너비 2 mm, 깊이는 각각 0, 10, 20, 40, 80 mm로 제작되었다. 시편을 제작하기 위하여 일반적으로 많이 사용되는 Portland 시멘트 페이스트를 사용하였다. 시멘트와 물의 비율(W/C)은 0.4이며, 이때 시편의 열 물성값은 Table 1과 같다.

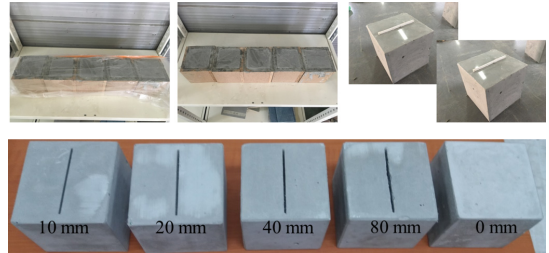


Fig. 3. Production process of the specimens

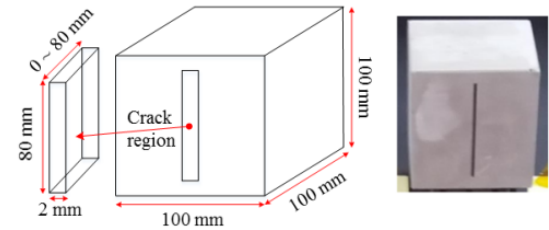


Fig. 4. Schematic diagram of the specimen

Table 1. Thermal properties of the specimen

Thermal diffusivity (mm ² /s)	Specific heat capacity (J/g/K)	Density (g/cm ³)	Thermal conductivity (W/m/K)
0.53	0.703	1.71	0.63

3.2 실험 방법

시편은 2개의 할로겐램프를 사용하여 가열하였으며, Fig. 5와 같이 열화상 카메라를 시편 정면에 위치시켜 온도분포를 확인하였다. 사용된 열화상 카메라는 FLIR의 A35SC모델이며, 할로겐램프의 최대 전력은 1000 W/s이다. 균열부 깊이에 따른 온도특성을 파악하기 위하여 시편을 30분 동안 가열하였으며, 열화상 온도 분석 프로그램인 Research IR을 사용하여 시편의 시간에 따른 온도 데이터를 획득하였다. 데이터 획득 방법은 Fig. 6과 같이 프로그램 내 ROI(Region on interest)의 좌표 값을 일정하게 설정하여 시편 중앙부에 가상의 선을 생성하였으며, 시편의 x 방향 픽셀값에 대응되는 온도 데이터를 획득하였다. 실험의 온도 데이터는 시편 당 3번

씩 측정 되었으며, 측정된 결과의 평균으로 균열 깊이에 따른 온도 특성을 분석하였다.

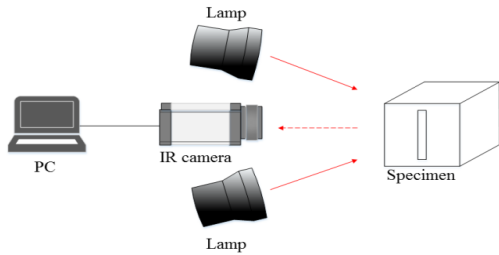


Fig. 5. Schematic diagram of the experimental setup

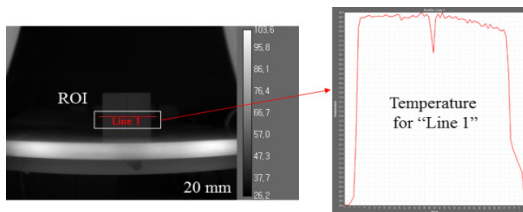


Fig. 6. Acquired temperature data by infrared camera

4. 실험 결과

제작된 시편을 이용하여 균열 깊이에 따른 온도 특성을 분석하였다. 균열 주변부의 온도분포는 일정한 경향성을 찾아보기 힘들지만, 균열부에서는 균열의 깊이가 깊어질수록 균열부 온도가 낮아지는 경향을 보였다. 각 시편에 따른 표면 온도 데이터는 Fig. 7과 같으며, 비균열 시편의 균열부 주변 온도는 균열부의 부재로 인해 시편 표면에서 단일 반사가 발생하므로 다른 시편에 비해 낮은 온도분포가 형성되었다.

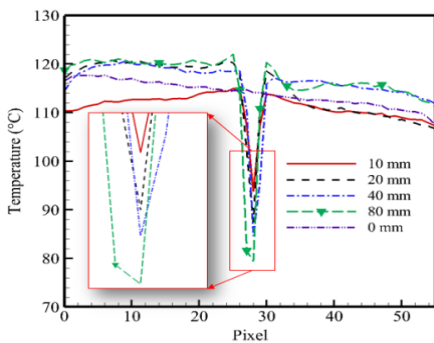


Fig. 7. Temperature results on the surface of each specimen according to the crack depth

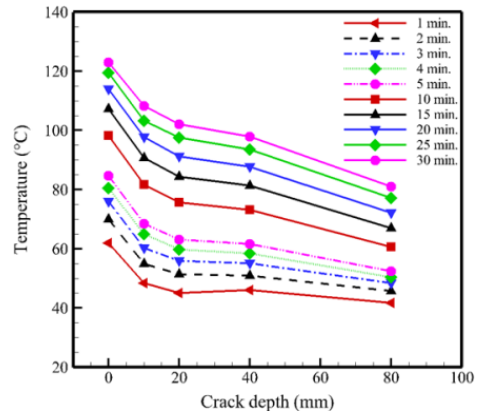


Fig. 8-(a). Minimum temperature results of each specimen

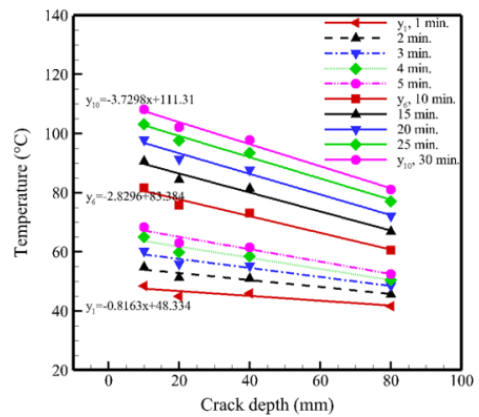


Fig. 8-(b). Linear regression of the minimum temperature results

균열부 깊이와 온도의 관계를 파악하기 위해서는 균열부의 최저온도 비교가 필요하며, Fig. 8-(a) 와 같이 각 시편의 균열부 온도 데이터를 가열 시간에 따라 비교하였다. 비균열 시편 온도는 다른 균열 시편의 균열부 픽셀 위치에서 획득한 데이터이며, 시간에 따른 균열부 온도 그래프의 경향이 모두 비슷하다는 것을 확인하였다. 하지만 비균열 시편 표면의 단일 반사에 의한 온도분포와 균열 시편 균열부의 다중 반사에 의한 온도분포 차이로 인해 비균열 시편과 10 mm 균열 시편 사이에 급격한 온도구배가 보인다. 이러한 결과는 비균열 시편과 균열 시편에 입사되는 에너지의 거동이 다를 것을 의미하며, 균열 깊이에 따른 정확한 온도특성 분석을 위하여 Fig. 8-(b) 에 나타난 것처럼 비균열 시편의 온도 결과를 제외한 후 온도 특성을 분석하였다. 그 결과, 10 ~ 80 mm 깊이의 균열부 온도특성은 식 (4) 와 같이 선형적으로 표현할

수 있으며, 가열 시간이 증가함에 따라 추세선의 기울기가 일정해지는 경향을 보인다.

$$f(x) = ax + b \quad (4)$$

이러한 결과는 시편이 가열되어 온도분포가 정상상태에 다다를수록 균열 깊이에 따른 온도분포의 상관관계가 더욱 명확해 짐을 의미한다.

Table 2는 Fig. 8의 시간에 따른 온도 결과이다. Fig. 9는 10 mm 균열 시편의 균열부 온도를 기준으로 시간별 온도데이터를 정규화한 그래프이며, 식 (4)의 기울기 값 (a) 변동 폭이 줄어드는 10분 이후의 온도데이터가 균열 깊이에 따라 선형적으로 감소하는 균열부의 온도특성을 더욱 분명하게 나타내고 있다. 10분 이후의 균열부 온도 데이터를 비교하기 위하여 같은 방법으로 정규화된 Fig. 10에 각 온도 데이터를 선형 회귀분석 후 비교하였으며, 이때 시간별 선형방정식 기울기의 표준편차는 0.0005, y 절편의 표준편차는 0.0038이었다.

Table 2. Temperature results of all specimens

Heating time (min.)	Temperature (°C)				
	0 mm	10 mm	20 mm	40 mm	80 mm
1	61.9	48.4	45.0	46.0	41.6
2	70.0	54.9	51.4	51.0	45.7
3	76.0	60.2	55.9	55.1	48.4
4	80.6	65.0	59.8	58.5	50.5
5	84.7	68.5	63.1	61.6	52.5
10	98.2	81.7	75.7	73.2	60.6
15	107.2	90.7	84.4	81.4	66.9
20	114.0	97.8	91.3	87.7	72.1
25	119.5	103.2	97.7	93.5	77.2
30	123.0	108.2	102.2	97.9	81.1

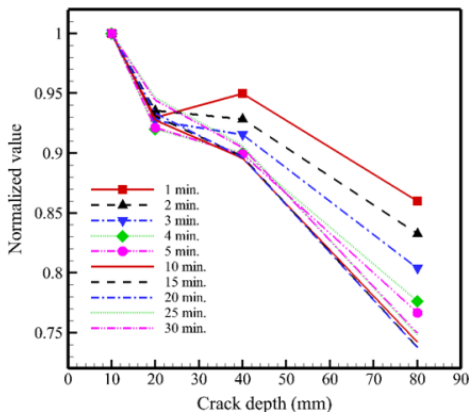


Fig. 9. Normalized results of each specimen

Table 3은 Fig. 10의 정규화된 온도 결과를 보여주고 있으며, 균열 깊이별 표준편차는 0.01 이하로 매우 정합하다고 할 수 있다.

Table 3. Normalized results after 10 minute heating

Heating time (min.)	Normalized value			
	10 mm	20 mm	40 mm	80 mm
10	1	0.9273	0.8959	0.7418
15	1	0.9308	0.8970	0.7378
20	1	0.9333	0.8962	0.7374
25	1	0.9463	0.9064	0.7476
30	1	0.9441	0.9045	0.7494
Standard deviation	0	0.0084	0.0051	0.0055

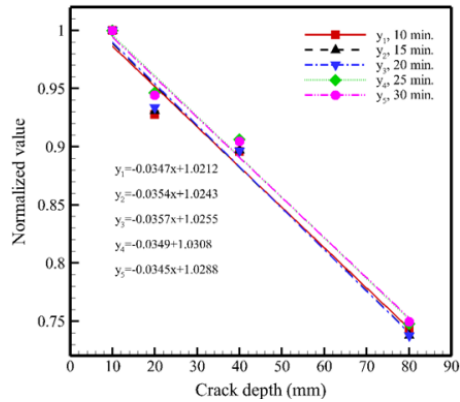


Fig. 10. Linear regression of the normalized results after 10 minute heating

5. 결론 및 요약

광원을 이용하는 광-적외선 열화상 기술을 사용하여 균열 깊이에 따른 온도특성 분석 연구를 수행하였다. 시멘트 페이스트를 이용하여 균열 깊이가 서로 다른 5개의 시편을 제작하였으며, 일련의 실험과정과 분석된 인공 균열부의 깊이에 따른 온도특성 결과는 다음과 같다.

- (a) 균열부 깊이와 온도의 관계를 파악하기 위하여 균열부의 최저온도를 비교하였다.
- (b) 각 시편의 같은 좌표에서 온도데이터를 획득하였으며, 선형회귀분석을 통하여 온도특성을 확인하였다.
- (c) 실험결과, 시편의 균열 여부에 따라 시편 표면 온도분포가 입사 에너지의 단일, 다중 반사 때문에 다르게 변화함을 확인하였으며, 입사에너지의 거

동 차이로 인하여 선형회귀분석 시 0 mm 시편의 온도데이터는 제외하였다.

- (d) 정규화된 시편의 온도데이터를 이용한 선형 회귀 모델의 기울기 표준편차는 0.0005, y 절편의 표준 편차는 0.0038이며, 이때 정규화된 온도데이터들의 표준편차는 0.01 이하로 매우 정합하였고 균열 깊이에 따라 온도가 선형적으로 감소하고 있음을 확인하였다.
- (e) 균열 시편의 온도특성은 시편의 온도분포가 정상 상태에 다다를수록 균열 깊이에 따른 온도데이터가 선형적으로 감소하는 경향이 뚜렷해졌다.

마지막으로 이러한 결과는 무작위로 다중반사가 발생하는 균열 내부에서 입사에너지의 감소량이 균열부 면적과 비례함 암시하며, 다양한 시편으로 균열부 면적과 입사 에너지의 상관관계를 분석한다면 흑체 공동(black cavity)이라고 볼 수 있는 균열부와 빛의 밀접한 관계 때문에 무작위성(randomness)이 높은 빛의 난반사 거동 모사에도 적용할 수 있을 것이다.

References

- [1] B. B. Kang, Y. H. Cho, K. Y. Choe, "Abnormal Diagnosis Technology Using Infrared Deterioration Method," *Railway journal*, pp. 51-56, December, 2009.
- [2] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, and T. Jayakumar, "Infrared thermography for condition monitoring - a review," *Infrared Physics & Technology*, pp. 35-55, march, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- [3] S. Ranjit, K. S. Kang, and W. T. Kim, "Investigation of lock-in infrared thermography for evaluation of subsurface defects size and depth," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, pp. 2255-2264, October, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0290-z>
- [4] M. Basheer, P. Ravindran, and K. Balasubramaniam, "A thermographic approach for surface crack depth evaluation through 3D finite element modeling," *In AIP Conference Proceedings*, pp. 1782-1789, march, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4914802>
- [5] J. Qiu, C. Pei, H. Liu, and Z. Chen, "Quantitative evaluation of surface crack depth with laser spot thermography," *International Journal of Fatigue*, pp. 80-85, February, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.02.027>
- [6] F. C. Sham, N. Chen, and L. Long, "Surface crack detection by flash thermography on concrete surface," *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, pp. 240-243, May, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.1784/insi.2008.50.5.240>

- [7] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, and G. L. Abbott, "Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity," *Journal of applied physics*, pp. 1679-1684, 1961.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1728417>

정 주 영(Ju-Yeong Jung)

[정회원]



- 2013년 2월 : 한밭대학교 기계설계 공학과(학사)
- 2016년 8월 : 한밭대학교 기계설계 공학과(공학석사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 연구원

<관심분야>

(전산) 유체역학, 열전달, UAV, 균열

윤 혁 진(Hyuk-Jin Yoon)

[정회원]



- 2002년 2월 : KAIST 항공우주공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : KAIST 항공우주공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : UST 철도시스템공학과 부교수
- 2006년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

건전성 모니터링, 광섬유 센서, UAV

조 현 우(Hyun-Woo Cho)

[정회원]



- 2010년 8월 : 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 (학사)
- 2012년 2월 : 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 과학기술연합대학원대학교 로보틱스 및 가상공학(박사과정)

<관심분야>

영상처리

양 희 승(Hui-Seung Yang)

[준회원]



• 2018년 2월 : 인하대학교 조선해양
공학과(학사)

<관심분야>

열전달, 냉동공조, 기계설계