

모델링 및 시뮬레이션 기법을 이용한 적외선 영상 생성 연구

송용승¹ · 권재성² · 최성웅³ · 양정현[†]

(Received October 15, 2019 ; Revised October 31, 2019 ; Accepted November 14, 2019)

Study of infrared image generation by using the modeling and simulation technique

Yongseung Song¹ · Jaesung Kwon² · Sungwoong Choi³ · Jeonghyeon Yang[†]

요약: 본 논문은 모델링 및 시뮬레이션(Modeling & Simulation, M&S) 기법을 이용하여 생성한 적외선 영상과 실제 적외선 카메라를 이용하여 측정된 영상 비교 분석 및 상용 소프트웨어(software, SW)와 비교를 통해 연구 결과를 검증하는데 목적이 있다. 실제 적외선 영상과 비교는 FLIR사의 적외선 카메라를 이용하여 흑체(black body)를 촬영한 결과와 본 연구 결과를 비교하였다. 또한, 상용 SW와 비교는 흑체와 방사율을 알고 있는 알루미늄과 자갈에 대해 자체방사 에너지를 비교하였다. M&S 기법을 이용하여 측정한 결과, 적외선 카메라를 이용하여 측정한 결과와 유사한 값을 나타내었으며, 상용 SW 비교시에도 동일한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

주제어: 모델링 및 시뮬레이션, 적외선 영상, 흑체, 자체 방사 에너지

Abstract: The purpose of this study is to verify the viability of the modeling and simulation (M & S) technique for generating infrared images. An infrared image generated using the M & S technique was compared to one generated using an actual infrared camera and a commercial software. The actual infrared image was also, compared with the that obtained from black body imaging using forward-looking infrared camera. In addition, the commercial software was used to compare the self-radiation energy for the black body as well as aluminum and gravel with known emissivity values. The image generated using the M & S method, was sufficiently similar to those obtained using the infrared camera and the commercial software.

Keywords: Modeling & Simulation, Infrared image, Black body, Self-radiation energy

1. 서 론

적외선 영상은 가시광선보다 파장이 긴 $0.7 \sim 1000\mu\text{m}$ 범위의 전자기파를 이용하여 물체에서 방사되는 에너지를 측정하여 가시화시킨 영상이다. 이러한 적외선 영상은 야간 감시용 CCTV를 비롯한 각종 산업분야 및 국방 분야의 유도탄 미사일의 탐색기와 같은 군사용으로 적용되어 표적을 탐지 및 식별하는데 많이 사용되고 있다[1]-[6].

적외선 신호의 경우, 카메라를 이용하여 직접 측정하는 방법이 가장 정확하지만, 촬영 환경 조건 및 비용 등의 문제로 많은 어려움이 발생하고 있다[4].

특히 군사용으로 사용되는 유도탄 탐색기의 경우, 고정밀도가 요구되는 고가의 장비이기 때문에 개발 이전에 다양한 환경과 조건에서 모델링 및 시뮬레이션(Modeling & Simulation, M&S) 기법을 이용하여 검증을 실시하고 있다[1][2].

1970년대부터 적외선 영상을 생성하는 TAIThermIR(미

국) 및 Oktal SE(프랑스) 등의 다양한 상용 소프트웨어(software, SW)가 개발되어 사용되고 있지만, 사용자의 요구 조건에 맞게 사용하기 위해서는 기능상의 제약으로 인해 어려움을 겪고 있다[3][4].

본 연구에서 사용자 환경에 맞게 적용 가능 하도록 실제 적외선 센서에 입사되는 성분을 수학적 모델링을 통해 적외선 영상을 생성하는 프로그램을 개발하였으며, 흑체와 같이 기본적인 방사물체를 비롯한 다양한 물체에 적용하여 M&S한 결과와 적외선 카메라 측정을 통해 비교하였으며, Oktal SE에서 개발한 상용 SW인 SE-RAY-IR와 연구 결과를 비교 분석하였다.

2. 이론적 배경

M&S 기법을 이용하여 적외선 영상을 생성하기 위해서 실제 센서에 입사되는 에너지 성분을 식 (1)과 같이 나타내었다.

[†] Corresponding Author (ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6700-6234>): Assistant Professor, Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, 2, Tongyeonghaean-ro, Tongyeong, Gyeongnam, 53064, Korea, E-mail: jh.yagi@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9107

1 Ph.D. Candidate, Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, E-mail: vmsongys@naver.com

2 Associate Professor, Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, E-mail: jkwon@gnu.ac.kr

3 Associate Professor, Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, E-mail: younhulje@gnu.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$$L_{sensor} = L_{thermal} + L_{solar}^R + L_{skyline}^R + L_{path} [W/m^2sr] \quad (1)$$

물체 자체에서 방사하는 Thermal emission 성분($L_{thermal}$)은 태양과 같은 광원에서 복사 에너지가 물체에 반사되어 입사되는 Solar irradiance 성분(L_{solar}^R), 광원의 에너지가 대기의 산란에 의해서 물체에 반사되어 입사되는 Skyshine irradiance 성분($L_{skyline}^R$), 물체에 도달하지 않고 센서로 직접 들어오는 Path radiance 성분(L_{path})의 합으로 계산된다.

센서에 입사되는 에너지 성분을 모델링하기 위해 물체 자체에서 방사하는 Thermal emission 항목은 플랑크의 복사 법칙을 이용하여 계산하였다. 플랑크 복사 법칙은 온도 T 의 흑체로부터 나오는 표면의 단위면적당 단위 입체각 당 단위 주파수당 방출되는 힘을 나타낸 것으로 Thermal emission은 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$L_{thermal} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{\lambda} L_{\lambda}^{bb} \epsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda \quad (2)$$

L_{λ}^{bb} 는 물체에서 방사되는 에너지로써 온도에 따라 방출되는 에너지를 플랑크 복사법칙을 이용하여 계산하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, $L_{thermal}$ 은 물체 자체에서 방사하는 에너지는 플랑크 방정식과 물체 고유의 특성인 파장별 방사율 ϵ_{λ} 에 의해서 크게 결정되는 것을 확인할 수 있다.

$$L_{\lambda}^{bb} = \frac{C_1}{\pi \lambda^5 (e^{C_2/\lambda T_s} - 1)} \quad (3)$$

$$C_1 = 3.7418 \times 10^8,$$

$$C_2 = 1.438769 \times 10^4$$

빛이 물체에 도달하게 되면 투과(τ), 흡수(α), 반사(ρ) 세 가지 물리적 특성으로 나타낼 수 있으며, Figure 1에는 파장대에 따른 에너지 방사율을 비교한 그림이다. 불투명한 물체는 약간의 반사가 있더라도 투과를 하지 못하는데 이 경우 $\tau = 0$, $\alpha + \rho = 1$ 로 표현되며 투명한 물체는 $\tau = 1$, $\alpha = \rho = 0$ 으로 표현할 수 있다. 백색체(White Body)는 입사하는 빛을 모든 방향으로 반사하는 것으로 $\tau = 0$, $\alpha = 0$, $\rho = 1$ 이며 흑체(Black Body)는 $\tau = 0$, $\alpha = 1$, $\rho = 0$ 으로 정의할 수 있다. Kirchhoff의 법칙에 따라 흑체의 방사율은 1.0으로 정의할 수 있다.

일반적인 물체의 방사율 ϵ_{λ} 은 식 (4)와 같이 주어진 온도에서 흑체에서 나오는 방사율과 물체에서 나오는 방사율의 비율로 정의되어 진다.

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)_{source}}{M(\lambda, T)_{BlackBody}} \quad (4)$$

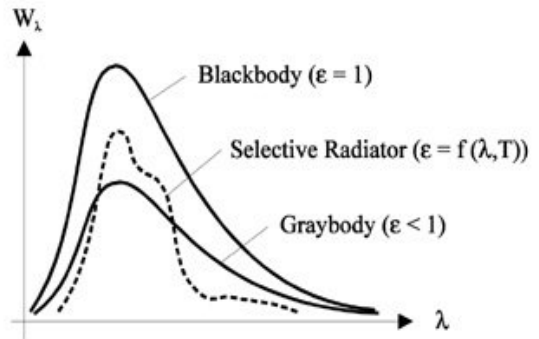


Figure 1: Comparison of emissivity by wavelength

태양과 같은 광원에서 발생한 빛은 물체에 반사되어 센서에 도달하는 Solar irradiance는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 광원에서 방사되는 에너지는 물체 표면의 법선 벡터와 광원 방향의 사이각인 $\cos\theta_i$ 와 물체 고유의 특성인 반사율 ρ_{λ} 에 의해서 크게 결정되는 것을 확인할 수 있다.

$$L_{solar}^R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \cos\theta_i L_{\lambda, solar} \rho_{\lambda} \phi_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda \quad (5)$$

광원의 에너지가 대기 산란에 의해서 물체에 반사되어 입사되는 Skyshine irradiance는 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{skyshine}^R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\phi_{\lambda} \rho_{\lambda} \tau_{\lambda}}{\pi} \frac{2\pi}{N} \sum_N (Solar Diffuse + Sky) d\lambda \quad (6)$$

대기 중에 존재하는 에너지와 광원의 산란에 의해서 센서에 직접 도달하는 에너지인 Path radiance 성분은 MODTRAN(MODerate resolution atmospheric TRANsmision)을 활용하여 계산하였다.

3. 실험 결과

3.1 실제 적외선 카메라를 이용한 자체방사 에너지 결과와 비교

일반적으로 야외에서 실제 적외선 카메라를 이용하여 물체의 에너지를 측정하면 물체에서 방사되는 에너지, 광원에서 반사되어 입사되는 에너지, 대기에 산란되어 물체에 반사되어 입사되는 에너지, 물체와 카메라의 거리에 따른 대기 투과도 등의 에너지가 적외선 센서에 입사된 결과가 반영되기 때문에 물체의 자체방사 에너지를 계측 결과와 본 연구 결과의 비교가 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 L_{solar}^R 와 $L_{skyshine}^R$ 의 영향을 최소화하기 위해서 실내의 암실에서 실험을 수행하였으며, 흑체와 적외선 카메라와의 거리는 1 m를 유지한 상태에서 온도에 따른 자체 방사 에너지를 측정하였으며, 적외선 카메라는 FLIR사의 SC7650 모델을 이용하였고 세부 사양은 Table 1과 같다.

Table 1: Specifications of infrared camera

Model	SC7650
Detector	InSb
Wavelength	2.5 ~ 5.15 μm
Resolution	640 × 512
Detector pitch	15 μm
NETD	<25 mK
Well cap.	6.5M electrons
Fusibility	> 99.8 %

실제 적외선 카메라를 이용한 측정은 흑체의 온도를 273K에서 303K까지 5K 단위로 증가하면서 각 온도에서의 방사되는 에너지를 측정하였다.

사용된 흑체의 사양은 **Table 2**에 나타내었다.

Table 2: Specification of black body

Temperature Range	-20 °C ~ 150 °C
Temperature Uncertainty	±1 °C
Temperature Resolution	0.1 °C
Stability	±0.1 °C per 8 hour period
Emitter Non-uniformity	±0.2 °C less than 100 °C, 0.4 °C greater than 100 °C
Apparent Emissivity	1.0 at 8~14 μm

시뮬레이션 조건은 실제 측정조건과 동일한 환경을 구축하기 위하여 **Table 3**과 같은 값으로 입력값을 설정하였다.

Table 3: Input condition of simulation

Wavelength	2.5 ~ 5.15 μm
Emissivity	1.0
Temp.	273K ~ 303K
Sensor reaction rate	1.0
Transmittance	1.0
Solar/Lunar Irradiance	0.0 W/m ² ·sr
Skyshine Irradiance	0.0 W/m ² ·sr
Path Radiance	0.0 W/m ² ·sr

Table 4는 각 온도별 적외선 카메라를 이용하여 측정한 결과와 플랑크 복사 법칙(식 (1))을 기반으로 시뮬레이션 결과를 비교한 결과이다.

Table 4: Comparison of measurement results by infrared camera and simulation results

Temp. [K]	Measurement [W/m ² ·sr]	Simulation result [W/m ² ·sr]	Difference [%]
273	0.81	0.81	0.00
278	1.01	1.00	1.0
283	1.24	1.22	1.64
288	1.5	1.48	1.35
293	1.81	1.79	1.12
298	2.16	2.14	0.93
303	2.60	2.56	1.56

Table 4에 나타난 것과 같이 적외선 측정 결과와 시뮬레이션 결과의 차이는 최대 0.04 W/m²·sr으로 이는 흑체를 기준으로 약 0.4K 온도의 차이이기 때문에 큰 차이가 없는 것을 확인하였다.

각 온도조건에서 1% 내외의 오차 값이 발생하는 것은 실험에 사용된 흑체의 방사율이 2.5~5.15 μm 의 파장에서는 1.0으로 보장이 되지 않고, 암실 분위기에서 가까운 거리에서 측정을 하였으나 $L_{skyshine}^R$ 이나 L_{path} 성분이 미세하게 측정된 것으로 사료된다.

3.2 상용 SW 출력 결과와 비교

상용 sw와 출력 결과 비교는 3.0~5.0 μm 대역의 중적외선(Middle Wavelength Infrared, MWIR)과 8.0~12.0 μm 대역의 원적외선(Long Wavelength Infrared, LWIR)에 영역에서의 계산을 수행하였다. 온도 조건은 280 ~ 750K의 다양한 조건에서 계산하였으며, 계산 결과는 Oktal SE의 SE-RAY-IR을 이용한 자체방사 에너지와 비교 분석하였다.

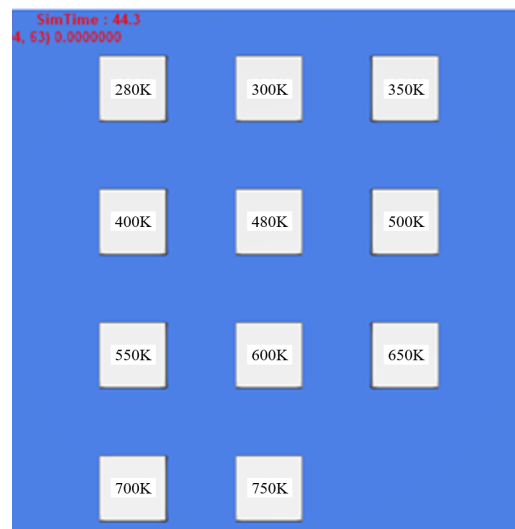


Figure 2: Screen image of temperature setup for simulation

여러 온도에서 계산을 동시에 수행하기 위해 **Figure 2**와 같이 각 영역마다 온도를 설정하여 계산을 수행하였으며, **Figure 3 (a)**, **Figure 3 (b)**에는 MWIR, LWIR에서의 측정 이미지 및 측정 결과를 **Table 5**에 나타내었다.

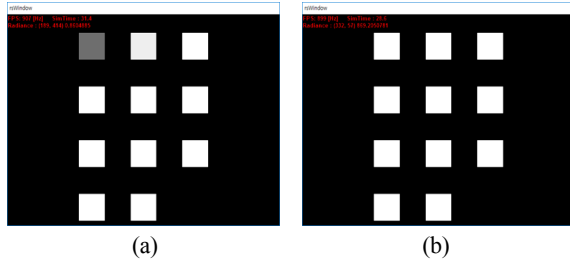


Figure 3: Image of (a) MWIR and (b) LWIR bands

Table 5: Simulation Results in MWIR and LWIR Bands

Temp. [K]	MWIR		LWIR	
	Simulation result [W/m ² ·sr]	Difference (%)	Simulation result [W/m ² ·sr]	Difference (%)
280	0.8604	0.05	27.1500	0.18
300	1.8658	0.00	38.4998	0.00
350	8.9739	-	78.0346	-
400	29.8462	-	133.7397	-
450	77.2959	-	204.8218	-
500	167.5229	-	289.8319	-
550	318.2909	-	387.1197	-
600	547.0957	-	495.0744	-
650	869.7394	-	612.2315	-
700	1299.4458	-	737.3087	-
750	1846.4701	0.02	869.2050	0.02

MWIR 대역에서 SE-RAY-IR과의 비교결과, 280K와 750K 영역에서 소숫점 이하 자릿수가 일치하지 않는 오차가 발생하였으며, 2지점을 제외한 모든 측정영역에서 동일한 결과를 얻었다.

3.3 일반 재질을 이용한 측정 결과

방사율이 1.0인 흑체가 아닌 널리 알려진 재질(자갈, 알루미늄, 자갈+알루미늄 혼합)을 이용하여 일정 온도(300K)에서 자체방사 에너지를 상용 SW와 비교 분석 하였다.

M&S 기법에서 3차원 모델링 된 모델에서 재질 부여는 3D 모델의 Texture의 컬러별로 재질 부여를 수행하였으며, **Figure 4**에 색상별 재질 설정 상태를 나타내었다.

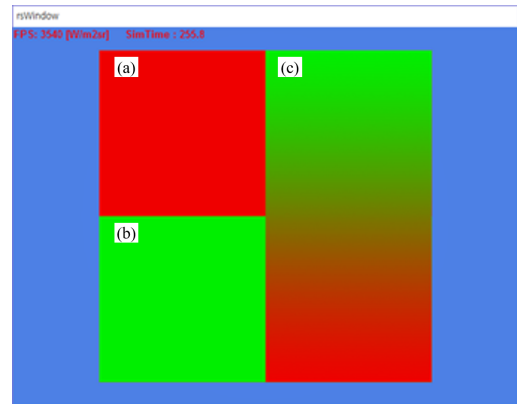


Figure 4: Color setting status of each material
(a) Gravel, (b) Aluminum(Al), and (c) Al-gravel gradient mixer

Figure 4 (a)의 빨간색(RGB(255, 0, 0))은 자갈 재질, **Figure 4 (b)** 초록색(RGB(0, 255, 0))은 알루미늄 재질을 부여하였다. 그리고 **Figure 4 (c)**의 빨간색~초록색의 혼합된 색상(RGB(0~255, 0~255, 0))은 자갈과 알루미늄의 조합으로 재질을 부여하였다. 빨간색과 초록색의 혼합 정도에 따라 자갈>알루미늄, 알루미늄>자갈로 혼합 재질을 계산하였다.

모든 재질의 온도는 공통적으로 300K로 고정하였고, 자체방사 에너지의 비교를 위해서 대기에 의한 Irradiance와 Transmittance의 성분은 0으로 설정하였다.

자갈과 알루미늄 재질에 대해서 중적외선 대역의 파장별 방사율 값을 **Table 6**과 같다.

Table 6: Emissivity of material at each wavelength

Wavelength [μm]	Material	
	Gravel	Al
3.060	0.9679	0.3867
3.500	0.8787	0.2844
3.800	0.8034	0.2233
4.080	0.8133	0.2052
4.440	0.8844	0.1848
4.860	0.9225	0.1735
5.000	0.9425	0.1690

흑체는 모든 파장에 대해서 동일한 방사율(1.0)을 갖고 있지만 일반적인 재질은 파장별로 방사율이 상이하다. 따라서 자체 방사 에너지 계산을 위해서는 계산하고자 하는 파장 대역의 방사율을 적분하여 평균 방사율 값을 계산하여 적용하였다.

SE-RAY-IR을 이용한 중적외선 대역의 자갈, 알루미늄, 자갈+알루미늄 혼합 재료의 자체방사 에너지 결과와 시뮬레이션 영상 이미지 및 결과를 Figure 5과 Table 7에 나타내었다.

Table 7: Comparison of self-radiation energy results in the MWIR band

Material	SE-RAY-IR [W/m ² ·sr]	Simulation [W/m ² ·sr]
(1) Gravel	1.642	1.6428
(2) Aluminum(Al)	0.441	0.4416
(3) Al > Gravel	0.691	0.6894
(4) Gravel > Al	1.384	1.3874

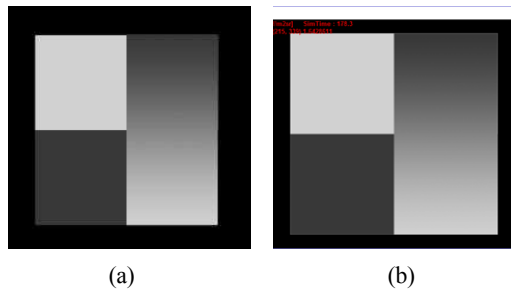


Figure 5: Self-radiation image (a) SE-RAY-IR and (b) Simulation result

Table 7의 결과값으로 부터 각 파장 대역에서 방사율이 더 높은 자갈이 자체 방사 에너지가 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 Figure 5에 나타난 것처럼 혼합 재료에서도 자갈 재질이 많은 부분이 알루미늄 재질이 많은 부분보다 방사율을 값이 높아 더 밝은 색으로 나타났다.

혼합 재료에 대해서는 우선 각각의 재질별 방사율을 계산하고, 해당 Pixel의 RGB 컬러값 혼합비율에 따라 재질의 혼합량을 계산하여 혼합 재료의 자체방사 에너지를 계산하였다. 자갈, 알루미늄의 단일 재질에 대해서는 상용 SW와 동일한 자체방사 에너지가 계산됨을 확인하였다. 상용 SW와 비교에서 혼합재료에서 차이가 나는 것은 측정 위치에 따른 자갈 및 알루미늄의 혼합된 비율이 상용 SW와 본 연구 결과와 상이하기 때문에 약간의 차이가 나타나는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 M&S 기법을 이용하여 적외선 영상의 성분 중 자체 방사 에너지에 대해서 실제 측정 결과와 상용 SW의 결과를 온도, 재질을 변경하여 비교하였다.

적외선 카메라로 측정하는 경우에는 이상적인 흑체가 존재하지 않고, 자체방사 에너지 성분 이외의 적외선 영상에 영향을 주는 성분의 통제가 불가하여 100% 일치하는 결과

를 얻지 못했으나, 오차범위 약 1%로 실제와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

상용 SW 비교에서는 측정위치의 재질 혼합 비율을 명확하게 알 수가 없기 때문에 약간의 오차가 발생한 것으로 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구를 통해 적외선 성분 중 자체 방사 에너지에 대해서 M&S 기법으로 실제와 유사한 영상을 얻을 수 있음을 확인하였다.

향후 실제와 유사한 적외선 영상 생성을 위해서 자체방사 성분을 제외한 Solar/Lunar Irradiance, Skyshine Irradiance, Path Radiance, Transmittance 성분에 대해 MODTRAN을 이용한 해석 결과를 추가적으로 연구할 필요가 있다고 사료된다.

Author Contributions

Conceptualization, Y. Song and J. Yang; Methodology, Y. Song and J. Kwon; Software, Y. Song; Validation, Y. Song and J. Yang; Formal Analysis, Y. Song; Investigation, Y. Song and S. Choi; Resources, Y. Song; Data Curation, J. kwon; Writing-Original Draft Preparation, Y. Song; Writing-Review & Editing, J. Yang; Visualization, S. Choi; Supervision, J. Yang; Project Administration, J. Yang;

References

- [1] J. H. Kim and Y. S. Yoon, "A comparative study between measurement and prediction results of a naval ship infrared signature in the marine environment," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, vol. 48, no. 4, pp. 336-341, 2011 (in Korean).
- [2] H. J. Yoo, "Infrared image enhancement method to improve target recognition in marine environments," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 43, no. 6, pp. 436-442, 2019 (in Korean).
- [3] Y. C. Kim and S. H. Ahn, "Estimated temperature error compensation for wavelength-band conversion of infrared image," Journal of Korea Multimedia Society, vol. 17, no. 11, pp. 1270-1278, 2014 (in Korean).
- [4] H. Jang, N. Ha, S. Lee, T. Choi, and M. Kim, "Three-dimensional conjugate heat transfer analysis for infrared target modeling," Journal of Korean Institute of Information Scientists and Engineers, vol. 44, no. 4, pp. 411-416, 2017. (in Korean)
- [5] T. W. Bae, "Small target detection using 3-dimensional bilateral filter," Journal of Korea Multimedia Society, vol. 16, no. 6, pp. 746-755, 2013 (in Korean).
- [6] D. K. Kim, "Flame detection using region expansions

and on-line variance in infrared image,” Journal of Korea Multimedia Society, vol. 12, no. 11, pp. 1547-1556, 2009 (in Korean).