

배기가스를 고려한 함정의 계절별 적외선 신호 특성에 대한 연구

Study on the Seasonal IR Signature Characteristics of a Naval Ship with Plume Gas Effect

한 국 일*
Kuk-Il Han

김 동 건*
Dong-Geon Kim

최 준 혁*
Jun-Hyuk Choi

김 태 국*
Tae-Kuk Kim

ABSTRACT

This paper is a part of developing a computer code that can be used to generate IR images of a naval ship by considering the emitted and reflected infrared signals. The spectral radiance received by an IR sensor is consisted of the self-emitted component from the ship surface, the reflected component of the solar/sky irradiance at the ship surface, the emitted radiance from the ship surface and the exhaust plume gas, and the scattered radiance by the atmosphere. The plume gas radiance occupies a large part of the emitted radiance from a naval ship in operation. Therefore plume gas radiance must be taken into account when calculating the radiance from a naval ship for reliable IR images. In this paper, IR images of a naval ship with the exhaust gas effect in various environmental conditions are generated by using an exhaust gas prediction model called the JPL model. The contrast radiance (CR) values of the IR images are calculated to analyze the effect of the exhaust gas radiance quantitatively. The results obtained by quantitative analysis show that the IR signatures with the exhaust plume gas are 2.26 times larger than those neglecting the plume gas effect. The effect of the exhaust plume gas is shown to be more eminent in winter than in summer in the daytime.

Keywords : IR Signal(적외선 신호), Exhaust Plume Gas(배기가스), Naval Ship(함정)

1. 서 론

적외선 신호를 이용한 탐지는 주위 배경과 물체간의 복사에너지 대비(radiance contrast)를 이용한다. 따라서

이러한 특성을 이용하는 센서로부터 군 장비 및 시설을 은폐하기 위해서는 복사에너지 대비 값을 중요한 요소로 고려하게 된다. 주위에 나무나 건물 등의 은폐물이 존재하는 육상 환경과 달리 주위에 은폐물이 없는 해양 환경에 놓인 함정의 경우 주위 배경과 함정 표면의 온도 및 광학 특성 차이로 인해 복사에너지 대비가 크게 나타나 적외선 탐색기에 탐지될 가능성이 매우 높다. 그러므로 이러한 환경에 놓인 함정의

† 2013년 5월 20일 접수~2013년 7월 26일 게재승인

* 중앙대학교(Chung-Ang University)

책임저자 : 김태국(kimtk@cau.ac.kr)

적외선 탐지는 해수면과 대기로부터 방사되는 복사에너지와 함정 표면에서 방사되는 복사에너지와의 대비값이 더욱 중요한 요소로 작용하게 된다^[1].

함정의 생존성을 판단하기 위해서는 함정의 적외선 신호 분석이 필수적이며, 이에 따라 적외선 신호 분석 방법 및 평가 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 함정의 적외선 신호 분석 방법에는 실측을 통한 방법과 적외선 예측 소프트웨어를 이용한 방법이 있다. 실측을 통한 방법은 물체에서 방출되는 적외선 신호를 적외선 카메라를 이용하여 측정하는 방법이며, 적외선 신호를 가장 정확하게 분석할 수 있는 방법이다. 하지만 현재 국내에서는 적외선 신호의 계측 및 분석에 관한 연구기반이 부족한 실정이다. 또한 태양복사에너지, 대기온도, 풍향 및 풍속 등 다양한 환경 인자들에 민감한 적외선 신호를 매 경우마다 측정하는 것은 사실상 불가능하기 때문에 실측을 통한 적외선 신호의 분석은 상당히 제한적이다. 따라서 시간, 공간 및 비용적인 한계들로 인하여 실제 기상조건을 고려한 파장별 적외선 신호 계측은 매우 어렵다고 할 수 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 적외선 예측 소프트웨어를 이용하여 다양한 환경에 대한 함정의 적외선 신호를 분석하는 방법을 활용하고 있다^[2,3].

적외선 영상 생성 시 함정, 탱크, 전투기 등과 같은 기동성을 가지는 장비들의 적외선 신호 분석을 하기 위해서는 자체방사성분 및 반사성분과 더불어 배기가스로부터의 영향을 무시할 수 없다. 특히 함정의 경우 배기가스에서 방사되는 적외선 신호는 전체 적외선 신호 중 가장 큰 부분을 차지한다. 따라서 보다 정확하고 신뢰성 있는 적외선 영상 생성 및 분석을 하기 위해서는 배기가스에서 방출되는 적외선 신호 분석이 필수적이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 일반적인 함정의 3D 모델링과 계절별 환경 조건을 이용하여 함정의 표면온도를 계산하였으며, 계산된 표면온도와 배기가스 모델을 이용하여 함정의 적외선 영상을 생성하였고, 함정의 적외선 신호는 복사대비(CR : Contrast Radiance) 값을 계산하여 정량적으로 분석하였다. 배기가스에 따른 함정의 적외선 신호의 영향을 분석하기 위해 먼저 배기가스의 유무에 따른 영향을 분석하였으며, 계절에 따른 함정 적외선 영상을 생성하여 그 특성을 분석하였다.

2. 센서로 입사되는 적외선 신호 분석

센서로 입사되는 적외선 신호는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 함정 표면에서 방출되어 입사되는 성분, 배기가스에서 방출되어 입사되는 성분, 그리고 대기에서 산란되어 입사되는 성분의 합으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다^[4,7].

$$L_{sensor} = L_{Target} + L_{Plume} + L_{Background} \quad (1)$$

여기서, L_{Target} 은 물체에서 방출되는 복사에너지를 말하며, L_{Plume} 은 배기가스에서 방출되는 복사에너지, $L_{Background}$ 는 대기에서 산란된 복사에너지이다.

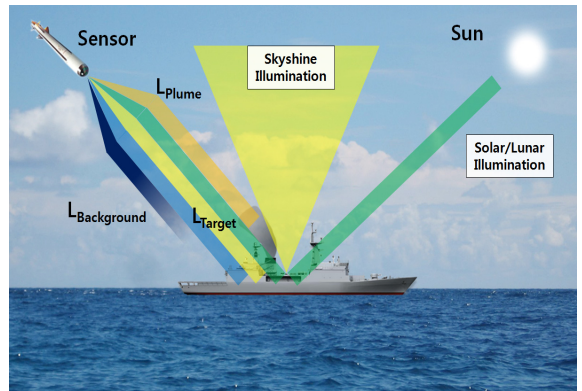


Fig. 1. Radiance received by an IR sensor

가. 물체에서 방사되는 적외선 신호

물체에서 방사되는 적외선 신호는 표면 자체에서 방사되는 성분, 표면에서 반사되어 나오는 성분으로 구분되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{Target} = L_{self-emitted} + L_{reflected} \quad (2)$$

여기서, $L_{self-emitted}$ 는 물체의 표면온도에 의해 자체 방사되는 복사에너지, $L_{reflected}$ 는 표면에서 반사되어 센서로 입사되는 태양 및 대기복사에너지이다.

1) 함정 자체에서 방사되는 복사에너지

함정 표면에서 온도의 크기에 따라 자체적으로 복사에너지가 방출되어 센서에 도달하는 자체 방사 복사에너지($L_{self-emitted}$)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{self,emitted} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{self,emitted}(\lambda) \cdot \psi(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

여기서, $L_{self,emitted}(\lambda)$ 는 함정의 표면온도에 의해 자체적으로 방출되는 파장별 복사에너지, $\psi(\lambda)$ 는 센서의 파장별 반응율을 나타낸다. 본 논문에서는 센서의 파장별 반응율은 고려하지 않았다($\psi(\lambda) = 1.0$ 으로 가정).

2) 함정 표면에서 반사되는 복사에너지

외부 광원인 태양복사에너지 및 대기 복사(sky radiation)가 함정 표면에서 반사되어 센서로 들어오는 복사에너지 ($L_{reflected}$)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{reflected} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\theta, \phi, \lambda) L_{reflected}(\lambda) \cdot \psi(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

여기서, $\rho(\theta, \phi, \lambda)$ 는 물체 표면의 분광 반사율(spectral reflectivity)을 나타내며, 천정각(zenith angle, θ)과 방위각(azimuth angle, ϕ), 그리고 파장(λ)에 따라 다른 값을 갖는다. 함정 표면에서 반사되는 파장별 복사에너지 ($L_{reflected}(\lambda)$)는 대기 복사 및 태양 복사에 의한 영향으로 구분할 수 있다.

나. 배기가스에서 방사되는 복사에너지

배기가스에서 적외선 센서로 입사되는 선 경로는 많은 수의 작은 요소로 분할하여 해석할 수 있으며, 계산하고자 하는 파장대역의 복사 스펙트럼도 수많은 작은 파장 간격으로 나눌 수 있다. 이러한 복사특성의 복잡성으로 인하여 복사강도 계산은 수치해석적 방법으로 계산되며, 원하는 파장대역과 경로에 대한 적분은 모든 파장간격과 요소간격에서 나타나는 영향들의 합(summations)으로 대체할 수 있다. 따라서 배기가스의 성분을 고려하여 방사되는 복사에너지(L_{Plume})는 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다^[5].

$$L_{Plume} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{s=1}^N L_{\lambda,b}(T_s) [\tau_{gas}(s) - \tau_{gas}(s-1)] d\lambda \quad (5)$$

여기서, s 는 배기가스의 성분과 온도에 대한 위치 좌표값, τ_{gas} 는 파장별 배기가스의 투과율, $L_{\lambda,b}$ 는 흑체에서 방출되는 복사에너지이다.

Fig. 2와 같이 배기가스의 층을 N 개의 구간으로 나눠 계산할 경우, 자체 방출되는 배기가스 복사에너지 (L_{Plume})는 센서로 입사되는 경로에 대하여 각 구간에 대한 복사에너지의 합으로 계산할 수 있으며, 따라서 식 (5)는 다음과 같이 근사적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$L_{Plume} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{s=1}^N L_{\lambda,b}(T_s) [\tau_{gas}(s) - \tau_{gas}(s-1)] \Delta\lambda(6)$$

여기서, 흑체에서 방출되는 복사에너지($L_{\lambda,b}$)는 플랑크 함수를 이용하여 계산할 수 있다.

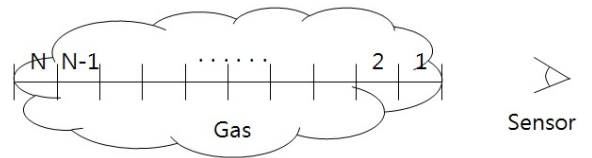


Fig. 2. A discrete path line

본 연구에서는 배기가스 투과율을 계산하기 위하여, 비 등온 비 균질 혼합가스의 정확한 소멸계수를 예측할 수 있는 SLG(Single Line Group) band model을 이용하여 배기가스에 대한 복사물성치를 구하였다^[6].

다. 대기에서 산란된 복사에너지

태양복사에너지 중 대기에 의해 산란된 복사에너지와 대기에서 방출되는 복사에너지가 센서로 바로 입사되는 복사에너지는 다음과 같다.

$$L_{Background} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{Background}(\lambda) \cdot \psi(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

여기서, $L_{Background}(\lambda)$ 는 파장별 path radiance이며, MODTRAN^[7]을 이용하여 계산할 수 있다.

3. JPL Plume Model

JPL(Jet Propulsion Lab) 배기가스 모델은 배기가스의 동역학적 특성에 대해 Brigg의 방정식을 적용한 Gaussian 배기가스 모델이다^[8]. Brigg의 방정식은 배기가스의 중심선 높이를 계산하기 위해 사용되며, 계산

되는 배기가스의 중심선 높이는 실험을 통해 얻은 경험치이다. 이 방정식은 굴뚝 출구 부근의 배기가스 운동량과 부력효과를 고려하여 근사화 하였으며, 부력에 따른 상승 비율에 대해 대기 중 공기의 유입 효과를 포함시켰다. Brigg의 방정식에서 배기가스의 중심선의 높이(h)는 굴뚝 출구 높이(h_0)와 관련되어 있으며, 바람의 방향에 대해 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$h = h_0 + 3 \left[\frac{r_0 m^2}{m + 3} \right]^{2/3} x^{1/3} \quad (8)$$

여기서, r_0 는 굴뚝 출구의 반경을 나타내며, m 은 풍속에 대한 배기가스의 배출속도 비율로써 다음 수식으로 나타낸 값이다.

$$m = w_0 / v_0 \quad (9)$$

여기서, w_0 는 배기가스의 배출속도[m/s], v_0 는 풍속[m/s]을 의미한다.

Gaussian 모델에서 배기가스의 온도와 밀도 분포는 각각 유사한 공간적 분포로 관련되어 있으며, 위치에 따라 달라지는 배기가스의 온도 및 밀도 분포는 가스의 분포(C)를 이용하여 계산할 수 있으며, 다음과 같은 수식과 같다^[9].

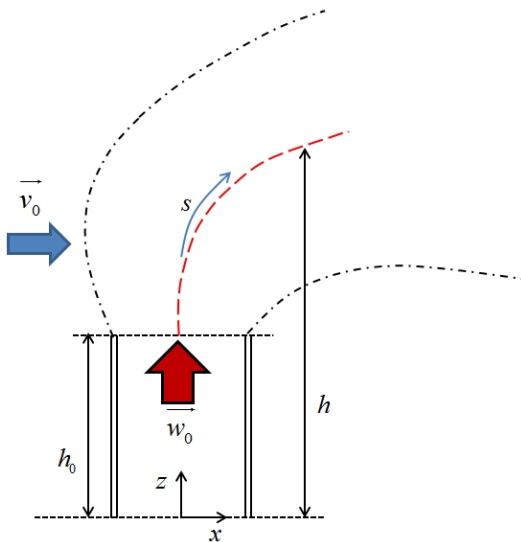


Fig. 3. Schematics of Jet plume model

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v} \times \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (10)$$

여기서 Q 는 배기가스 유량(g/s)이며, σ_y, σ_z 는 방향에 따른 분산계수를 의미한다.

4. 적용조건

가. 3차원 형상 모델 및 재질 할당

본 논문에서는 일반적인 함정을 고려하여 적외선 신호를 분석하였으며, Fig. 4에는 적외선 영상 생성을 위한 함정의 3차원 형상 모델을 나타내었다. 형상 모델은 10,616개의 격자로 세분화하여 온도분포 및 적외선 신호 분석을 하도록 계획하였다. 재질은 전부 주철로 가정하였으며, 표면은 짙은 회색 페인트로 도포된 것으로 가정하였다. 자세한 재질 물성치는 Table 1에 나타내었다.

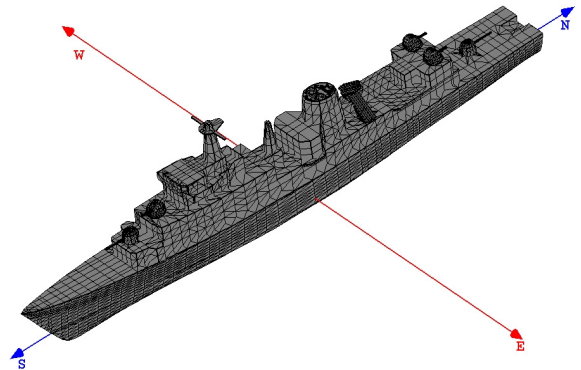


Fig. 4. 3D modeling of a naval ship

Table 1. Material properties

재질	밀도 [kg/m ³]	비열 [J/kg-K]	열전도율 [W/m-K]
Steel	7768.98	460.967	52.019
	태양흡수율		방사율(MWIR)
	0.5597		0.8295

나. 환경조건

본 연구에서는 계절별 분석을 위해 필요한 기상자료 중 태양복사에너지는 대기투과모델 프로그램인 MODTRAN을 이용하여 계산한 결과 값을 사용하였다. 배기가스에 따른 함정 적외선 신호 특성을 분석하기 위해 1월 및 7월을 대상으로 24시간동안 비정상상태 표면온도를 계산한 후에 24시간째에 해당하는 적외선 신호를 분석하였다. 표면온도 계산에 필요한 기상조건 중 풍향, 풍속, 대기온도 그리고 해수면 온도는 거제도 기상대(위도 : 34.86N, 경도 : 128.44E)에서 측정된 데이터를 이용하였으며, 이들 자료는 Fig. 6 및 Fig. 7에 각각 나타내었다^[10]. Fig. 8은 MODTRAN을 이용하여 계산한 1월 및 7월의 대기투과도 결과 그래프이다.

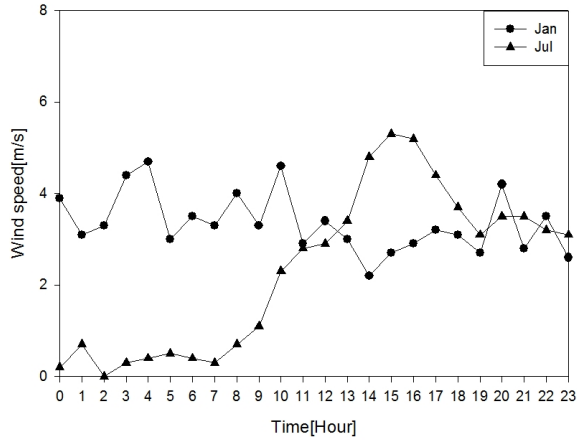


Fig. 7. Daily wind speed variations

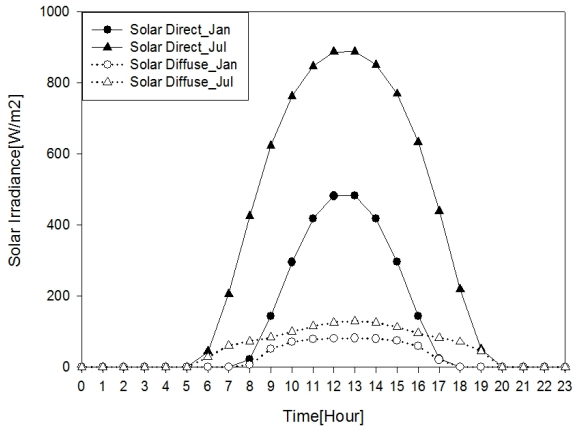


Fig. 5. Daily solar irradiance variations

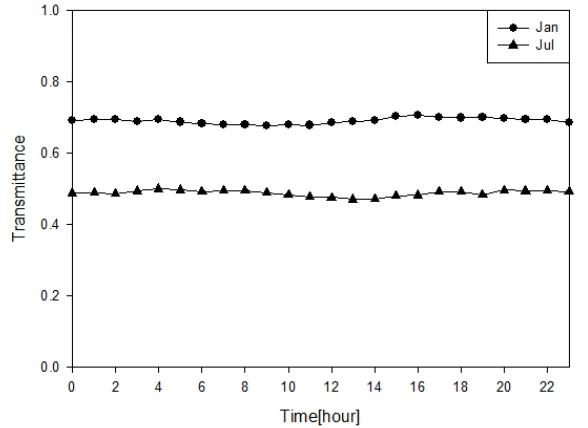


Fig. 8. Daily transmittance variations

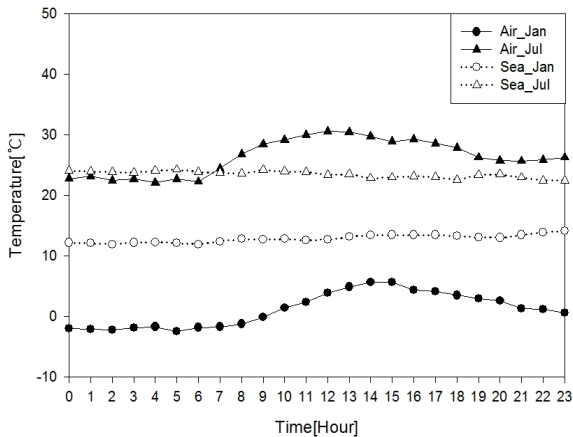


Fig. 6. Daily air and sea water temperature variations

다. 분석조건

배기가스의 온도 분포 및 복사에너지 계산을 위해 이용된 배기가스 조건을 Table 2에 나타내었으며, 적외선 영상 생성에 사용되는 적외선 센서 특성은 Table

Table 2. Applied exhaust gas conditions

항목	분석조건
배기가스 성분	CO ₂ , H ₂ O
배기가스 표준 압력	0.237[atm], 0.021[atm]
배기가스 온도	300°C
배출속도	20.0m/s
상대풍속	5.0m/s

Table 3. Applied sensor conditions

항목	분석조건
과장 대역	MWIR(3~5μm)
관측 방위/고도각	90°/0°(동쪽, 선수 : 남쪽)
관측 거리	1km
IR 영상 해상도	640 × 480pixel
Camera FOV	11° × 8°

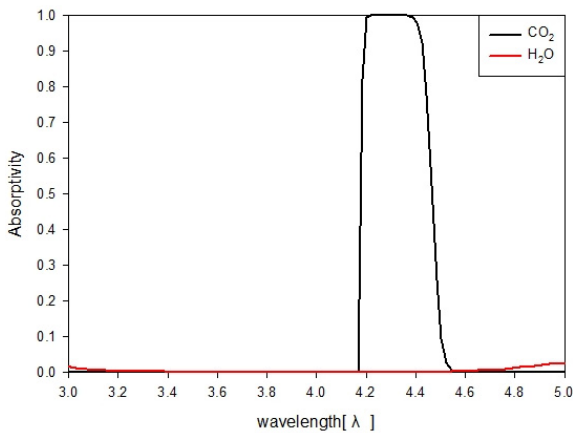


Fig. 9. Spectral gas absorptivities

3에 나타내었다. 배기가스의 적외선 신호 계산 시 1월과 7월의 특성 차이를 분석하기 위해 상대풍속을 5.0 m/s로 하였다. Fig. 9는 투과길이가 1m일 때, 배기가스 조건을 이용하여 계산한 배기가스 성분의 과장별 흡수율이다.

5. 함정 적외선 신호 분석

가. 계절별 적외선 신호 특성 분석

적외선 신호를 비교 분석하기 위해 복사대비(CR : Contrast Radiance)값을 계산하여 이용하였다^[11]. CR은 단위 면적당 단위 입체각 당에 대한 평균 복사에너지의 대비값을 분석할 때 사용된다. 이는 적외선 영상 내에서 함정의 평균 복사휘도와 배경에 대한 평균 복사휘도의 차이를 나타내며 다음 수식과 같다.

$$\Delta CR = |\bar{L}_{target} - \bar{L}_{background}| \quad (11)$$

여기서, \bar{L} 는 평균 복사휘도(W/m²sr)를 나타낸다.

본 논문에서는 CR값 계산 시 적외선 영상의 전체영역을 기준으로 결과를 분석하였다.

Fig. 10은 배기가스를 고려하지 않은 경우의 적외선 영상이며, Fig. 11은 JPL 배기가스 모델을 이용하여 생성한 적외선 영상이다. 함정, 배경, 그리고 배기가스의 적외선 신호에 대해 계절별로 계산된 결과를 Fig. 12 및 13에 그래프로 나타냈다. 결과를 보면, 함정과 배경에 대한 복사에너지는 1월보다는 7월에 더 크게 나타나지만 배기가스 복사에너지는 1월에 더 크게 나타나는 특징을 확인할 수 있었다. 1월에 배기가스 복사에너지가 높은 이유는 대기투과도를 고려하여 나타난 현상이며, 상대습도가 낮은 1월이 7월보다 대기투과도가 높게 나타난다.

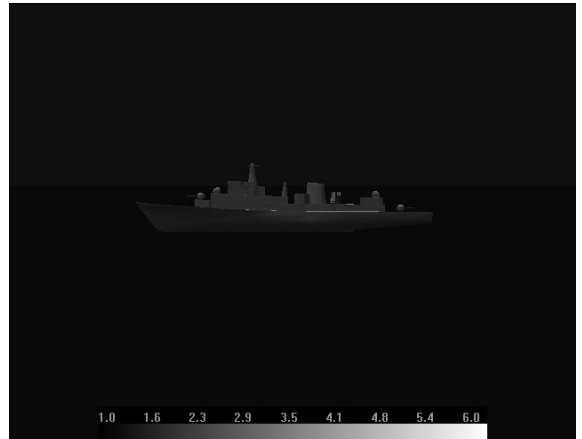


Fig. 10. IR image(MWIR, July, 12h, No plume)

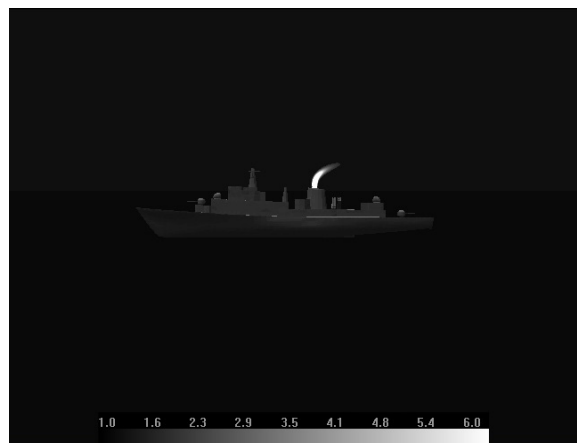


Fig. 11. IR image(MWIR, July, 12h, JPL plume)

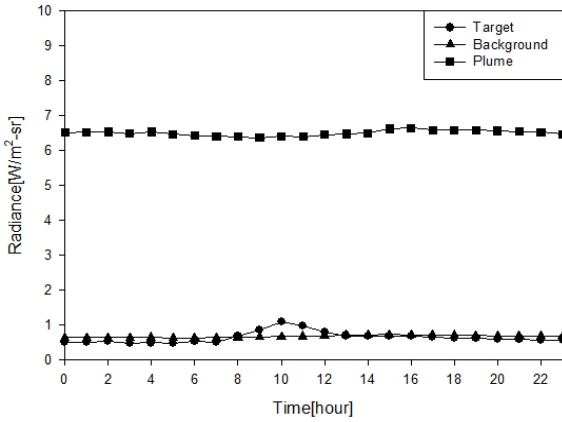


Fig. 12. Calculated radiances in January

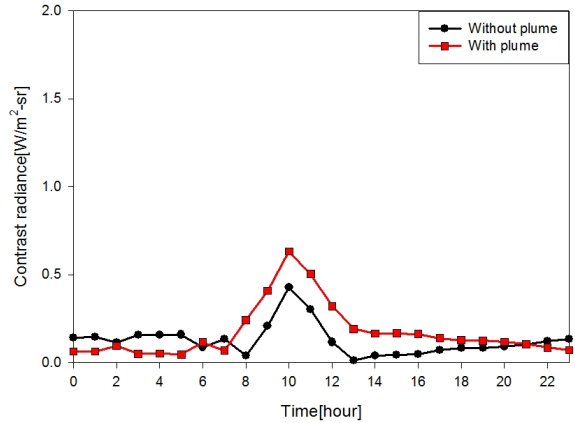


Fig. 14. Contrast radiances in January

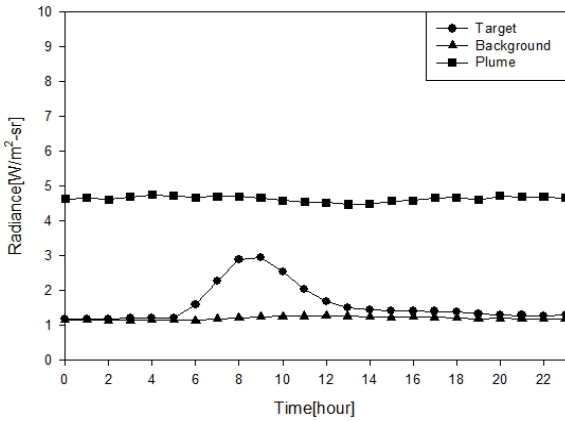


Fig. 13. Calculated radiances in July

1) 1월

복사대비값에 대한 분석결과는 Fig. 14에 나타내었으며, 배기가스가 고려되지 않았을 경우와 JPL 배기가스 모델을 고려하였을 경우를 서로 비교하였다. 1월의 경우 대기온도와 해수온도의 차가 큰 특징을 보이며, 태양이 없는 야간에는 배기가스를 고려할 경우 CR값이 더 낮아지는 현상도 발생하였으며, 일반적으로 야간에는 CR값의 크기가 크지 않았다. 이는 해수온도에 의해 주변 환경에서 나오는 복사에너지가 함정에 비해 상대적으로 높게 나타나기 때문이다. 태양이 존재하는 주간에는 CR값의 증가가 크게 나타났으며, 특히 13시의 경우 배기가스가 고려되지 않은 경우의 CR값은 $0.014\text{W/m}^2\text{sr}$ 이며 고려된 경우에는 $0.1799\text{W/m}^2\text{sr}$ 로 배기가스가 고려되지 않은 경우에 비해 약 12.8배 증가함을 알 수 있었다.

2) 7월

7월의 복사대비값 분석결과를 Fig. 15에 나타냈으며, 1월과 동일하게 CR값을 분석하였다. 7월의 경우 1월과 다르게 주간보다 야간에 배기가스의 유무에 따른 CR값의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 야간의 CR값은 배기가스의 유무에 따라 새벽 2시에 5.24배로 가장 크게 영향을 미쳤으며, 전체적으로 배기가스 영향을 2.04~5.24배 사이로 대비값을 증가시키게 됨을 알 수 있었다. 주간에는 16시에 1.9배로 가장 크게 증가시켰으며, 전체적으로 배기가스는 적외선대비값을 1.08~1.9배 사이로 증가시킴을 확인하였다. 함정의 평균복사에너지와 주위 환경에서 나오는 복사에너지의 차이가 주간보다 야간에 큰 차이가 나타나지 않아 야간에 배기가스가 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

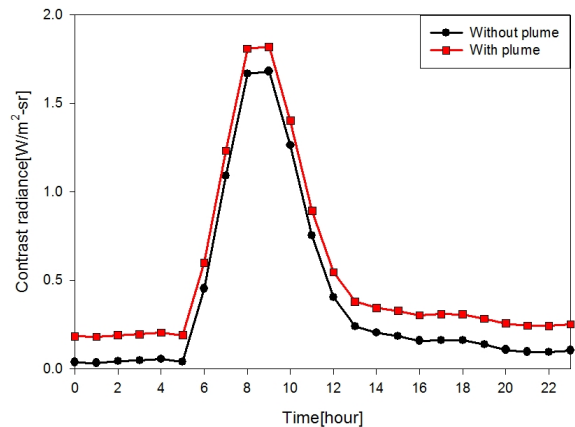


Fig. 15. Contrast radiances in July

6. 결론

본 논문에서는 함정에서 배출되는 배기가스가 함정의 적외선 신호에 미치는 영향에 대해 살펴보았으며, 운용 중인 함정에 대한 적외선 영상을 생성하여 계절에 따른 적외선 신호 분석을 실시하였다.

- 1) 겨울철에 해당하는 1월의 경우, 야간보다 주간에 배기가스의 영향이 크게 나타났으며, 주간에 함정의 적외선 신호는 배기가스가 고려되지 않은 경우에 비해 고려된 경우 ΔCR 값이 배기가스 모델별로 평균 3.85~4.11배 증가함을 확인하였다.
- 2) 여름철에 해당하는 7월의 경우, 주간보다 야간에 배기가스의 영향이 크게 나타났으며, 야간에 함정의 적외선 신호는 배기가스가 고려된 경우 고려되지 않은 경우에 비해 ΔCR 값이 평균 3.66~3.81배 증가함을 확인하였다.

따라서 논문의 결과를 통해 함정이 운용 중일 경우 발생하는 배기가스의 적외선 신호에 의해 상대적으로 피격 확률이 높아짐을 확인할 수 있었으며, 계절에 따라 다른 특성을 보여 계절별 특성이 중요함을 확인하였다.

향후에는 다양한 조건에 대한 함정의 적외선 신호를 분석할 계획이며, CFD분석을 통하여 배기가스 모델의 정확성에 대해 검토할 계획이다.

후 기

이 논문은 2012년도 중앙대학교 연구장학기금 지원에 의한 것입니다.

References

[1] 최준혁, 이지선, 김정호, 이성호, 김태국, “대기온도 및 풍속 변화에 따른 함정의 적외선 신호 특성

분석”, 한국군사과학기술학회지, 제11권 제5호, pp. 84~91, 2008.

[2] Schott. J. R., Brown. S. D., Raqueno. R. V., Gross. H. N., and Robinson. G., “An Advanced Synthetic Image Generation Model and Its Application to Multi/Hyperspectral Algorithm Development”, Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 25, No. 2, pp. 99~111, June 1999.

[3] 최준혁, 김정호, 정인화, 이필호, 김태국, “거제도 해양의 여름 및 겨울철 환경에서 거리에 따른 대기투과도를 고려한 함정의 적외선 신호 특성 분석”, 한국군사과학기술학회지, 제13권 제2호 pp. 320~327, 2010.

[4] Jacobs, P. A., Thermal Infrared Characterization of Ground Target and Backgrounds, SPIE Press, 2006.

[5] Fei Mei, Shiguo Chen, Yong Jiang, A Preliminary Model of Infrared Image Generation for Exhaust Plume, Graphics and Signal Processing, 2011, 4, 46~52.

[6] C. Ludwig, W. Malkmus, J. Reardon, and J. Thomson, Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases, NASA SP-3080, 1973.

[7] A. Berk, L. S. Bernstein and D. C. Robertson, “MODTRAN : A Moderate Resolution Model for Lowtran 7”, GL-TR-89-C122, Spectral Sciences Inc., 1984, 4.

[8] S. Didi, Kuo, Synthetic Image Generation of Factory Stack and Water Cooling Tower Plumes, Ph.D. Dissertation, Rochester Institute of Technology, 1997.

[9] Digital Imaging and Remote Sensing Laboratory, Rochester, NY, The DIRSIG User's Manual, February 2006.

[10] 기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr/>

[11] 김태준, 최준혁, 김정호, 김태국, “해양 환경을 고려한 센서 방위에 따른 함정과 배경 사이의 IR 복사대비 분석”, 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2010.