

원적외선 대역의 태양 직사광 해수면 반사신호 특성 연구

김 경 하^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

A Study on the Characteristics of Sunlint in LongWave InfraRed Band

Kyung Ha Kim^{*,1)}

¹⁾ *The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 19 December 2017 / Revised 13 April 2018 / Accepted 25 May 2018)

ABSTRACT

In maritime environment, it is necessary to understand the characteristics of sunglint since it may degrade the target detection performance of the infrared sensor mounted weapons. In this paper, sunglint in LWIR band is modeled using the slope distribution of the sea surface, and is verified by comparing the radiance of a simulated result with that of the real world. According to the simulation, sunglint is critical when the solar zenith angle is over 60°. The peak radiance of sunglint grows as the solar zenith angle increases until it reaches 83° and has a large difference depending on the solar zenith angle when the wind speed is small. Finally, seasonal and temporal characteristics of sunglint effects are analyzed. In summer, sunglint is dominant in the horizon near the solar azimuth right after sunrise and before sunset. However, in winter, the influence of sunglint lasts even during the daytime since the elevation of the sun is much lower than in summer.

Key Words : Sunlint(태양 직사광의 해수면 반사), Maritime(해양), LWIR(원적외선대역)

1. 서 론

적외선 센서는 표적과 배경의 밝기 차이를 주요 지표로 활용하여 표적을 포착하고 추적한다^[1]. 따라서 해상환경에서 운용되는 적외선 센서를 탑재한 무기체계의 개발을 위해서는 표적뿐만 아니라 배경이 되는

바다의 적외선 신호 특성에 대한 이해가 필요하다. 최근에는 저가형 영상기반 무기체계의 개발을 위해 별도의 저온 냉각장치가 필요하지 않은 비냉각식 원적외선 대역의 센서가 주목받고 있다.

해상의 원적외선 신호 특성에 대해 기존에 많은 연구가 이뤄져왔다. *Kyoung-Soo Kim et al.*^[1]은 바다 표면에 대한 원적외선 센서 신호 특성 연구를 통해 해수면의 겉보기 밝기 대비 표적 탐지 방해 요소로 작용할 수 있는 항적 및 거품의 겉보기 밝기에서 차이

* Corresponding author, E-mail: khakim@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

가 나타나는 이유를 방사율로 설명하였다. Hyeryeong Park^[2]은 해상환경 원적외선 합성 영상 구현 연구를 통해 하늘 방사 신호의 반사와 수온 자체의 방사 신호를 식별하였으며, 물리기반 합성 영상 생성 소프트웨어(SE-WORKBENCH)를 사용하여 입사각에 따른 방사율과 반사율의 변화를 반영한 해상 합성 영상을 구현하였다.

원적외선 대역의 해상 신호 특성에 관한 기존의 많은 연구에도 불구하고, 태양 직사광의 해수면 반사(sunglint) 효과에 대한 국내 연구는 부족한 편이다. 태양 복사 에너지의 크기는 가시광(0.4 ~ 0.7 μm), 중적외선(3 ~ 5 μm), 원적외선(8 ~ 12 μm)의 비율이 약 360 : 17 : 1로, 원적외선 신호의 크기가 다른 파장대역의 신호에 비해 매우 작기 때문에 상대적으로 그 중요도가 작게 알려져 왔다^[3]. 하지만 Fig. 1과 같이 특정한 상황이 연출되면 원적외선 대역에서도 태양 직사광의 반사 성분이 해수면에 강하게 나타나기도 한다.

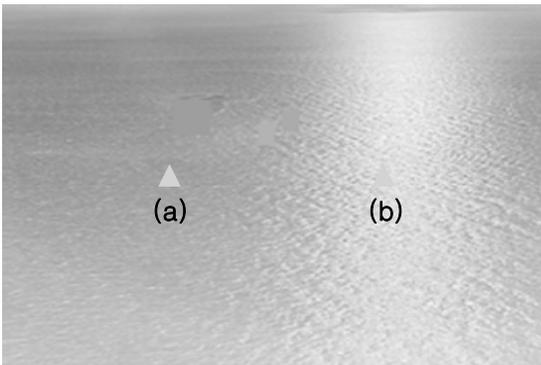


Fig. 1. Sunglint captured by LWIR sensor

원적외선 대역의 센서로 해수면을 촬영한 Fig. 1에서 삼각형 (a)와 (b)는 같은 밝기의 해상 표적을 형상화한 것이다. (a)는 배경과의 밝기 비교를 통해 쉽게 식별할 수 있지만, 태양 직사광의 해수면 반사 영역에 위치한 (b)는 같은 밝기의 표적임에도 구별이 어렵다. 이를 통해 원적외선 대역의 태양 직사광이 해수면에 반사되어 생기는 신호가 표적의 인식 및 추적에 있어서 중대한 영향을 끼치는 것을 알 수 있다. 따라서 태양광의 해수면 반사 신호가 나타나는 시간대와 방향에 따른 발현 가능성과 세기를 예측할 수 있다면, 원적외선 센서를 탑재한 무기체계의 개발 및 운용에 크

게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 태양 직사광의 해수면 반사 효과를 원적외선 대역에서 모의하고 분석한다. 해수면의 기울기 분포를 반영한 태양 직사광 반사 모델을 제시하고, 이를 토대로 모의한 결과를 실제 촬영 영상과 비교하여 검증한다. 태양의 천정각과 풍속에 따른 태양 반사광의 복사휘도(radiance)와 반치폭(FWHM : Full Width at Half Maximum)을 분석하며, 이를 기반으로 태양 직사광의 반사가 적외선 센서에 제약을 주는 시간대와 방위각의 계절별 특성을 예상해본다.

2. 태양 직사광의 해수면 반사 성분 모의 연구

2.1 해수면에 입사하는 태양 직사광원

바다에서 관측되는 태양 직사광의 반사 성분을 모의하기 위해서 태양광원의 세기와 태양의 각지름(angular diameter)을 이용한다. 우선, 태양광의 세기(L_{sun})는 아래의 식 (1)과 같이 파장별 복사량(spectral radiance) 함수를 관심 파장 구간 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 에 대해 적분하여 구한다.

$$L_{sun}(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2c^2 h}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} d\lambda \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{where, } c &= 2.998 \times 10^8 \text{ m/s,} \\ h &= 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s,} \\ k &= 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K} \end{aligned}$$

위의 식에서 적분 구간을 8 ~ 12 μm로 설정하고, 온도 입력 변수 T 에 태양의 유효온도인 5,780 K을 대입하면, 원적외선 대역에서의 태양의 복사휘도는 약 19,200 W/m²/sr으로 산출된다. 태양의 각지름(δ_{\odot})은 태양의 반지름(R_{\odot}) 및 지구와 태양간의 거리(D)에 삼각법을 적용하여 다음의 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\delta_{\odot} = 2 \times \tan^{-1}(R_{\odot}/D) \quad (2)$$

식 (1), (2)를 이용하여 지평좌표계에서 태양 직사광의 입사 광원을 아래의 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$L_{sun}(\theta_s, \phi_s) = \begin{cases} 19,200 \text{ W/m}^2/\text{sr}, & \text{for } \|X\|_2 \leq \frac{\delta_{\odot}}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

where, $X = \begin{bmatrix} \theta_s - \theta_c \\ \phi_s - \phi_c \end{bmatrix}$,
 θ_s = zenith angle of the sky,
 θ_c = zenith angle of the Sun center,
 ϕ_s = azimuth of the sky,
 ϕ_c = azimuth of the Sun center

2.2 해수면의 기하를 고려한 태양광 반사 모델

해상 환경에서 나타나는 태양 직사광의 반사 성분은 태양에서 방사되어 바다에 도달한 빛이 해수면의 법선 벡터와 이루는 입사각과, 반사되어 관측 센서로 향하는 빛의 반사각이 같을 때 관측된다. 해수면은 전체가 거울처럼 매끈한 평면이 아닌 다양한 기울기를 갖는 수많은 미소 평면들의 집합으로 볼 수 있는데, 이때 미소 평면이 태양광을 센서 방향으로 정반사시키는 기울기를 가질 확률을 고려하여 태양광의 반사 정도를 계산한다. Fig. 2에 미소 평면(facet)의 기하를 자세히 나타내었으며, \hat{u}_s 는 하늘의 방향 벡터, \hat{u}_r 은 센서의 방향 벡터이고, θ_s 및 ϕ_s 는 하늘의 천정각 및 방위각, θ_r 및 ϕ_r 는 센서의 천정각 및 방위각을 나타낸다. ω 는 입사각이고, \hat{u}_n 은 미소 평면의 법선 벡터를 의미한다.

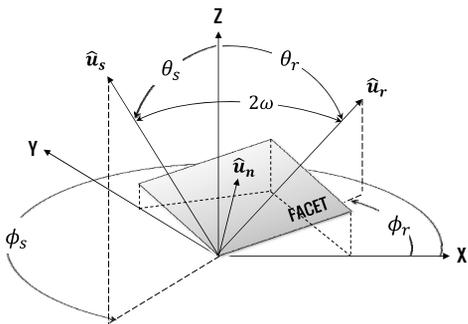


Fig. 2. Geometry of facet reflection

고정된 위치의 센서를 기준으로 해수면의 한 지점 (θ_r, ϕ_r) 에서 반사되어 관측 센서에 도달하는 태양광의 복사휘도($L_{sunglint}$)는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{sunglint}(\theta_r, \phi_r) = \iint_{-\infty}^{+\infty} q(\eta_x, \eta_y; \hat{u}_r, W) \rho_{sea}(\omega) \times \tau(\theta_s) L_{sun}(\theta_s, \phi_s) d\eta_x d\eta_y \quad (4)$$

where, θ_r = zenith angle of the sensor,
 ϕ_r = azimuth of the sensor,
 q = interaction probability,
 η_x = slope of a facet in X direction,
 η_y = slope of a facet in Y direction,
 \hat{u} = unit vector in the direction of the sensor,
 W = wind speed,
 ω = angle of incidence

위의 식에서 η_x 와 η_y 는 각각 X축과 Y축 방향으로의 미소 평면의 기울기이며, q 는 풍속이 W 일 때 해당 기울기를 갖는 미소 평면이 관측 센서 방향으로 빛을 반사시킬 확률로, 이는 풍속이 W 일 때 해당 기울기를 갖는 미소 평면이 생길 확률(p)과 관련이 있다. 기울기가 η_x 와 η_y 인 미소 평면이 생길 확률은 Cox & Munk가 아래의 식 (5)와 같이 제시하였으며^[4], 이는 지구 관측 위성의 관측 결과와 지구 전역의 해양에서 잘 일치한다는 보고가 있다^[5].

$$p(\eta_x, \eta_y; W) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\eta_x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\eta_y^2}{\sigma_y^2} \right) \right] / 2\pi\sigma_x\sigma_y \quad (5)$$

where, $\sigma_x^2 = 3.16 \times 10^{-3} W$,
 $\sigma_y^2 = 1.92 \times 10^{-3} W + 0.003$

위의 기울기 분포 함수 모델을 적용하여 기울기가 η_x 와 η_y 인 미소 평면이 관측 센서 방향으로 빛을 반사시킬 확률 q 를 구하면 아래의 식 (6)과 같이 표현할 수 있다^[6].

$$q(\eta_x, \eta_y; \hat{u}_r, W) = q_0(\hat{u}_r, W) \frac{\cos \omega_u}{\cos \theta_u} p(\eta_x, \eta_y; W) \quad (6)$$

where, $q_0(\hat{u}_r, W) = \begin{cases} \frac{1}{\iint \frac{\cos \omega_u}{\cos \theta_u} p d\eta_x d\eta_y}, & \omega_u \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \omega_u > \frac{\pi}{2} \end{cases}$
 ω_u = angle between \hat{u}_r and \hat{u}_n ,
 θ_n = zenith angle of \hat{u}_n

식 (4)에서 ρ_{sea} 는 입사각(ω)에 따라 변화하는 해수면의 반사율로, 아래의 식 (7)과 같은 Schlick's approximation^[7]을 적용하고, ρ_0 는 입사각이 0°일 때의 반사율로 원적외선 대역에서의 물의 굴절률을 고려하여 약 0.012를 적용한다^[8].

$$\rho_{sea}(\omega) = \rho_0 + (1 - \rho_0)(1 - \cos\omega)^5 \quad (7)$$

where, $\rho_0 = \left(\frac{\tilde{n}-1}{\tilde{n}+1}\right)^2$
 $\tilde{n} = n + ik = \text{refractive index}$

태양광은 대기를 통과하면서 대기 소광(atmospheric extinction) 현상을 겪게 되는데, 이를 대표하는 변수가 대기투과도(τ)이다. 이는 아래의 식 (8)과 같이 광 경로상의 대기량(air mass)과 파장에 따른 각종 계수에 의해 달라진다^[9].

$$\tau = \exp[-(c_1 + c_2 + c_3)m - c_4(v_p m)^{1/2}] \quad (8)$$

where, $c_1 = \text{Rayleigh optical depth}$,
 $c_2 = \text{attenuation coefficient due to turbidity}$,
 $c_3 = \text{ozone optical depth}$,
 $c_4 = \text{empirical constant}$,
 $m = \text{air mass}$,
 $v_p = \text{amount of precipitable water vapor}$

위의 식 (8)에서 계수(c_1, c_2, c_3, c_4)는 참고문헌^[9,10]의 원적외선 대역의 값을 참조하였고, 가강수수증기량(v_p)은 중위도 지역의 연간 평균값^[9]을 적용하였다.

이를 종합하여 앞 절에서 제시한 태양 입사 광원에 대한 함수(L_{sun})에 대기투과도와 해수면의 반사율 및 센서 방향으로 빛이 반사될 확률을 곱한 후 해수면의 전체 기울기에 대해 적분하면 특정 해수면 위치(θ_r, ϕ_r)로부터 센서 방향으로 향하는 태양 직사광 반사 성분의 복사휘도를 구할 수 있다.

3. 모의 결과

3.1 실측 영상과 모의 영상의 비교 및 검증

태양 직사광의 해수면 반사 모델을 검증하기 위해 원적외선 대역의 센서로 해수면을 촬영하고, 촬영 시

기와 같은 환경 조건으로 태양 반사 성분을 모의하여 비교하였다. Fig. 1은 Table 1의 제원을 갖는 FLIR사의 SC660 원적외선 카메라를 이용한 실측 영상으로, 2014년 11월 20일 오후 4시경의 안면도 지역 해수면을 촬영한 것이다. 카메라의 출력인 겐보기 온도를 식 (1)을 이용하여 8 ~ 12 μm 의 복사휘도로 환산하여 비교, 분석하였다. 당시의 기상 조건은 Table 2와 같으며, 태양 직사광은 센서와 해수면 전체 영역에 천정각 73°, 방위각 225°N에서 평행광으로 입사한다. 센서는 영상 중심부의 해수면으로부터 천정각 83°, 방위각 40°N에 위치하며, 약 2.3 km 떨어져 있다.

Table 1. Specifications of FLIR SC660

| FLIR SC660 Technical Specifications | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Field of view | 24°×18° |
| Thermal sensitivity | < 30 mK @ +30°C |
| Spectral range | 7.5 – 13 μm |
| Resolution | 640 × 480 pixels |
| Temperature range | -40°C to +1500°C |

Table 2. Meteorological conditions of the observation site

| Meteorological conditions of Anmyeon-do | |
|--|-------------------|
| Date and time | 2014/11/20, 16:00 |
| Wind Speed (Average) | 5.0 m/s |
| Solar zenith angle / Solar azimuth angle | 73° / 225°N |
| Refractive index of sea in LWIR | 0.012 |

해수면의 원적외선 영상에는 대기(air)의 방사 신호에 대한 반사 신호와 수온에 따른 방사 신호가 포함되어 있다^[2]. 태양 직사광 반사에 의한 해수면의 신호만을 비교, 분석하기 위해서는 앞서 언급한 대기 반사와 수온 방사 신호를 제거해야 하는데, 이들 신호는 반사율과 방사율의 함수이며, 이 비율은 다시 입사각

에 따라 달라진다^[2]. 따라서 촬영한 영상에서 태양 직사광 반사가 나타나지 않은 영역의 평균 신호 크기를 내림각(depression angle)별로 구하여, 이를 원본에서 내림각별로 빼주는 보정 과정이 필요하다. Fig 3의 (a)는 Fig. 1의 중심점을 기준으로 시야각 20°×15°에 놓인 영역을 위의 방식으로 보정하여 태양 직사광에 의한 해수면 반사 신호를 나타낸 영상이다. Fig 3의 (b)는 실측 당시와 같은 기상 조건으로 8 ~ 12 μm의 원격외선 대역에 대해 태양 직사광의 해수면 반사 성분을 모의한 결과이다. 실측과 모의 결과 모두 태양 반사광의 개략적인 형태와 폭 그리고 발생 위치가 유사하게 나타난다. 이를 더 정량적으로 분석하기 위하여 Fig. 3에서 점선으로 표시한 곳에 해당하는 해수면의 복사 휘도를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다.

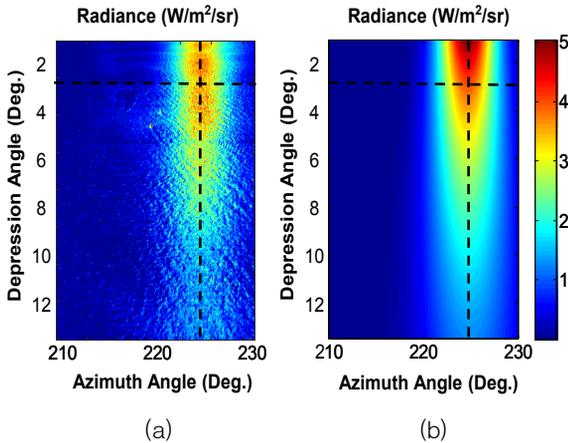


Fig. 3. Sun glint patterns (a) photographed by a LWIR camera and (b) simulated by the algorithm corresponding to a 73° SZA, solar azimuth angle of 225°N and a mean wind speed of 5.0 m/s, and direction of 220°N

Fig. 4의 (a)는 Fig. 3의 영상에서 센서를 기준으로 내림각이 3°인 바다의 수평 방향 복사휘도를 방위각에 따라 표시한 것으로, 실측값과 모의 결과 모두 태양이 위치한 225°N에서 가장 큰 복사휘도를 보였다. 또한 이를 중심으로 ±5° 밖에서는 태양 직사광 반사에 의한 효과가 20% 수준으로 작아는 것을 볼 수 있다. 태양 직사광 반사에 의한 최대 복사 휘도는 실제 영상에서 약 3.1 W/m²/sr으로 측정되었으며, 모의 영상에서는 약 3.7 W/m²/sr로 계산되었다. 태양 직사광 반

사 이외의 기타 신호를 제거하기 전 해수면의 복사휘도가 28 W/m²/sr임을 고려하면, 태양 직사광 반사 모의 결과에 의한 해수면 신호의 상승은 관측된 해수면 신호와 약 2%의 차이를 보인다. Fig. 4의 (b)는 태양의 해수면 반사가 가장 강한 지점인 방위각 225°N 지점에서 수직 방향으로의 복사휘도를 나타낸 것으로, 실측 결과와 모의 결과 모두 내림각이 2°에서 12°로 증가함에 따라 복사휘도가 대략 4 W/m²/sr에서 1 W/m²/sr로 줄어드는 것을 볼 수 있다.

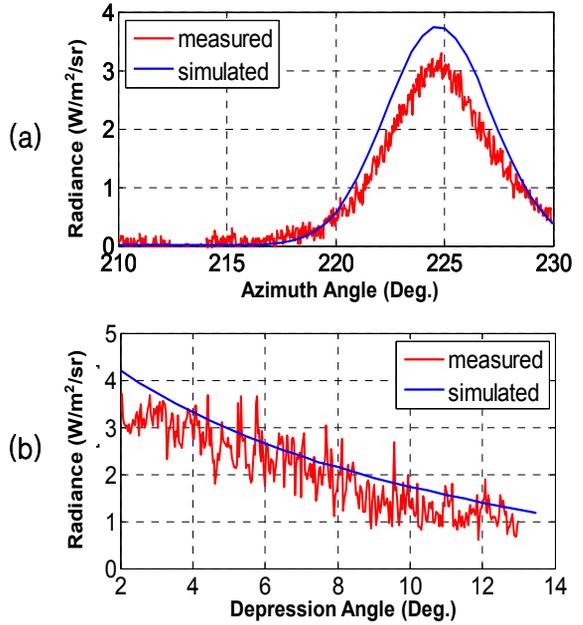


Fig. 4. Axial comparison between measured and simulated radiance. (a) Horizontal radiance corresponding to a depression angle of 3°. (b) Vertical radiance corresponding to a azimuth of 220°N

3.2 환경 변수에 따른 태양 반사 성분 모의 결과

태양 반사 성분의 형태와 세기에 영향을 주는 대표적인 환경 변수로는 태양의 위치와 풍속이 있다. 우선 태양의 위치에 따른 해수면 반사 신호에 대한 특성을 살펴보기 위해 풍속을 5 m/s로 고정하였고, 태양의 천정각을 25°에서 75°까지 10° 간격으로 변화를 주며 모의한 결과를 Fig. 5에 태양에 대한 상대 방위각(RAA : Relative Azimuth Angle)과 내림각으로 도시하였다.

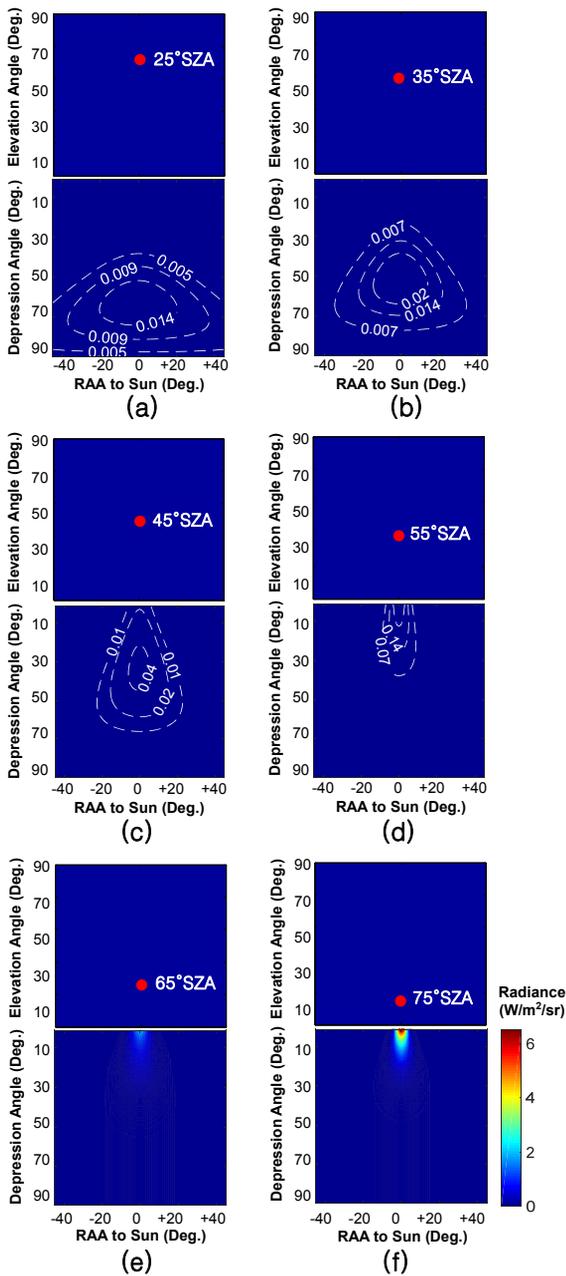


Fig. 5. Sunlight patterns for a mean wind speed of 5.0 m/s and the sun at (a) 25° SZA, (b) 35° SZA, (c) 45° SZA, (d) 55° SZA, (e) 65° SZA, and (f) 75° SZA

태양의 천정각이 커짐에 따라(태양의 고도가 낮아짐에 따라) 해수면에 나타나는 태양 직사광의 반사가

관측자 부근에서 점차 수평선 방향으로 이동하는 것을 볼 수 있으며, 태양의 천정각이 55°일 때부터는 태양 직사광의 해수면 반사 세기가 최대인 지점이 수평선(내림각 0°)에 위치하는 것을 볼 수 있다. 또한 넓은 영역으로 퍼져있던 태양의 해수면 반사 신호가 좁은 영역으로 집중되는 특징을 볼 수 있다.

Fig. 5에 대한 정량적인 특징은 태양 천정각 변화에 따른 최대 복사휘도와 최대 복사휘도 발생 지점에서의 반치폭 변화를 표현한 Fig. 6에서 볼 수 있다.

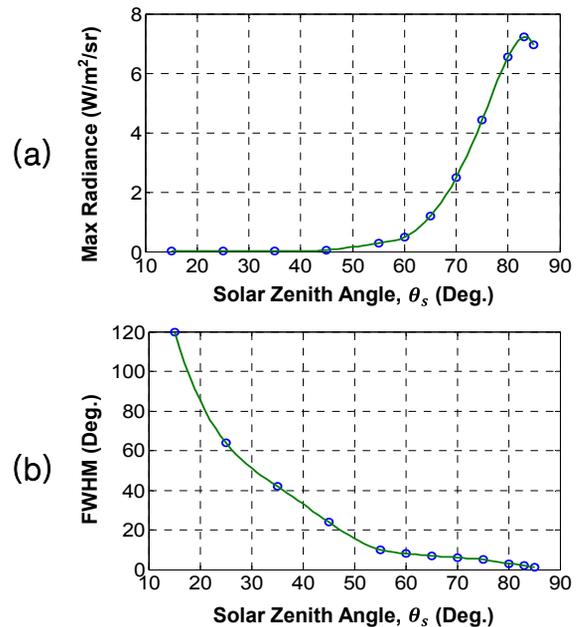


Fig. 6. Change in (a) sunglint radiance and (b) horizontal FWHM of a peak sunglint radiance depending on the solar zenith angle for a mean wind speed of 5.0 m/s

Fig. 6의 (a)와 같이 태양의 천정각이 60°보다 작을 때에는 0 W/m²/sr에 가까운 복사휘도를 보이고, 65°일 때에는 약 1 W/m²/sr의 값을 갖는다. 이 때, 1 W/m²/sr은 상온에서 약 2°C의 겉보기 온도 상승을 야기하는 수치이다. 이후 천정각이 커짐에 따라 태양의 해수면 반사 신호가 가파르게 증가하고 태양의 천정각이 83°일 때에는 태양의 해수면 반사에 의한 최대 복사휘도가 약 7 W/m²/sr에 도달한다. 이를 온도로 환산하면 상온에서 약 12°C의 겉보기 온도 상승을 일으킬 수 있는 수치이다. 태양 천정각이 80°일 때부터는 태양 천정각

이 커짐에 따라 최대 복사휘도가 완만하게 상승하다가 다시 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 대기투과도와 확률 밀도의 복합적 작용에 의한 것이다. 태양의 천정각이 커짐에 따라(태양의 고도가 낮아짐에 따라) 빛이 해수면에 도달하기까지 통과하는 대기 중 광 경로가 길어져 대기 소광 현상이 크게 발생한다. 식 (8)을 이용하여 태양 천정각에 따른 대기투과도를 구해보면, 천정각 80°까지는 대기투과도가 천천히 작아지지만, 그 이후에는 대기 중 광 경로가 급격히 커져 대기투과도 역시 가파르게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 확률 밀도 분포 역시 태양 반사광의 복사휘도 감소에 영향을 주는데, 천정각 85°에 위치한 하늘 영역의 에너지원을 반사시킬 확률이 천정각 83°에 위치한 하늘 영역의 에너지원을 반사시킬 확률보다 작게 나타난다.

태양의 해수면 반사 신호의 퍼진 정도를 살펴보기 위한 척도로 반치폭을 이용하였다. Fig. 6의 (b)는 천정각에 따른 태양 직사광 반사 성분의 반치폭을 나타낸 것으로, 반사광이 가장 센 위치의 수평 방향 복사휘도 분포에서 최대치의 1/2이 되는 지점 간의 폭을 도시하였다. Fig. 5의 그림에서 나타난 바와 같이 태양의 천정각이 커질수록 태양 반사 성분의 폭이 좁아지는 것을 볼 수 있고, 태양 천정각이 60°보다 클 때에는 반치폭 8° 이하의 값을 갖는다.

태양 직사광의 해수면 반사 특성에 영향을 주는 또 다른 요인 중 하나인 풍속에 따른 변화는 Fig. 7과 같다. 이는 태양이 천정각 65°, 70°, 73°, 75°, 77°, 80°, 85°에 위치할 때, 풍속이 1 m/s ~ 9 m/s 일 때의 해수면 반사 신호의 최대 복사휘도의 변화를 보여준다. 천정각이 65°인 경우에는 풍속과 관계없이 약 1 W/m²/sr의 최대 복사휘도를 보인다. 반면에 태양 천정각이 85°인 경우에는 풍속이 1 m/s일 때의 최대 복사휘도가 36.6 W/m²/sr이고, 풍속이 증가함에 따라 점차 감소하여, 풍속이 9 m/s일 때에는 3.3 W/m²/sr으로 상대적으로 작은 값을 보인다. 이를 통해 천정각이 작은 경우에는 풍속이 중요한 인자가 아니지만, 천정각이 큰 경우에는 해수면에 나타나는 태양광 반사가 풍속의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 풍속이 큰 날의 거친 해수면에서는 태양 반사에 의해 약 6 °C의 겉보기 온도 상승이 발생할 수 있지만, 풍속이 작은 날의 잔잔한 바다에서는 10 °C이던 해수면의 겉보기 온도가 태양의 해수면 반사에 의해 약 60 °C까지 크게 상승할 수도 있다.

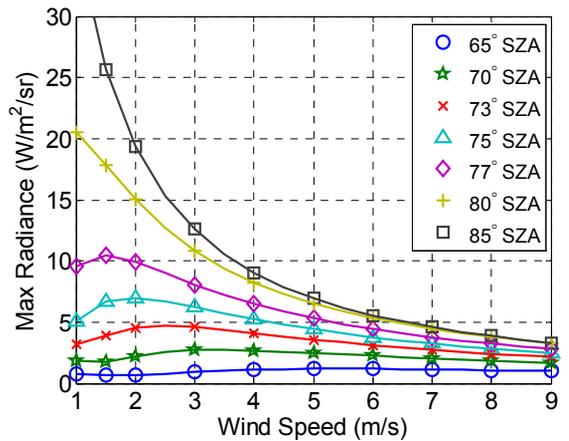


Fig. 7. Change in maximum sunglint radiance depending on the wind speed

Table 3은 풍속에 따른 해수면 태양직사광 반사 신호의 반치폭에 대한 결과로써, 풍속 1 m/s부터 9 m/s 일 때까지의 반치폭의 평균값, 최대값, 최소값을 보여준다. 태양 천정각이 65°, 85° 일 때의 반치폭은 풍속의 증가에 따라 각각 6°에서 9°, 1°에서 3°로 증가한다. 이는 풍속의 증가하면 태양의 해수면 반사 신호가 대체적으로 넓게 퍼진다는 것을 의미한다.

Table 3. Horizontal FWHM of a peak sunglint radiance

| SZA | FWHM(°) | | |
|-----|---------|-----|-----|
| | Average | Max | Min |
| 65° | 8 | 9 | 6 |
| 70° | 6.2 | 7.5 | 5 |
| 75° | 4.3 | 5 | 3 |
| 80° | 3.7 | 5 | 2 |
| 85° | 1.9 | 3 | 1 |

4. 서해의 태양 직사광 해수면 반사 특성 분석

한반도 서해에서 원적외선 대역의 태양 직사광 해수면 반사신호의 계절별 특성을 시간대 및 방향에 대해 분석한 결과는 Fig. 8과 같다. 태양의 해수면 반사에 의한 적외선 신호의 크기가 같더라도, 적외선 영상 센서에 적용되는 표적의 탐지 및 추적 알고리즘에 따

라 그 영향력이 다르게 작용한다. 본 논문에서는 알고리즘에 영향을 줄 수 있는 신호 크기의 차이를 $1 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ (겉보기 온도 약 $2 \text{ }^\circ\text{C}$)로 가정하여 분석하였다.

계절을 대표하는 날로, 봄·가을, 여름, 겨울에 대해 각각 춘·추분, 하지, 동지를 선정하였다. 풍속은 2000년부터 2013년의 서산의 평균 풍속 3 m/s 를 적용하였다. 앞 장의 결과를 참고하면 $1 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ 보다 큰 태양의 해수면 반사 신호가 모의되는 태양의 천정각은 65° 이고, 수평선 부근에서만 신호가 강하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 태양의 고도가 25° 이하($\text{SZA} \geq 65^\circ$)일 때 수평선 부근에서의 태양 직사광의 해수면 반사 효과가 중요할 것으로 예상할 수 있다. Fig. 8에서 태양이 고도 0° 와 25° 사이에 있는 시간대(방위각)를 음영으로 표시하였다.

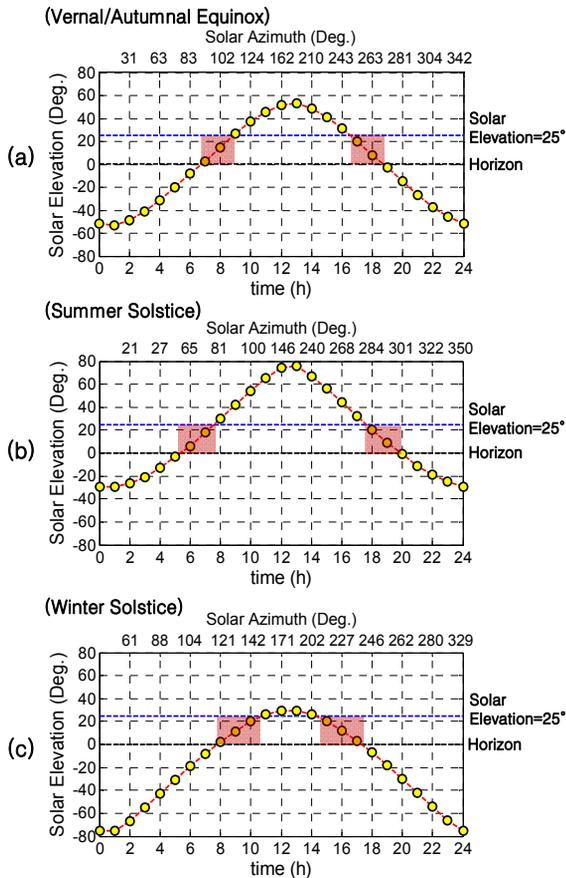


Fig. 8. Solar elevation depending on season and time. The time zone influenced by sunglint is shown in shaded color

Fig. 8의 (a)는 춘분·추분의 시간대별 태양의 고도를 나타낸 것으로, 봄·가을철에는 태양 직사광의 해수면 반사가 오전과 오후 각각 두 시간에 걸쳐 발생할 것으로 보인다. 태양 직사광의 해수면 반사 신호는 일출 때에 방위각 92° 부근의 수평선에서 강하게 발생하여 태양을 따라 방위각 112° 까지 이동한 후 오전 9시경부터 매우 작은 값을 가질 것으로 예상된다. 오후에는 17시경에 방위각 254° 부근에서 나타나 방위각 272° 부근까지 이동한 후 일몰과 함께 사라질 것으로 보인다. 특히 태양의 고도가 5° 일 때에 약 $13 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ 의 강한 적외선 신호가 반치폭 2° 로 나타날 것으로 예상된다. 태양의 고도가 높아지면 점차 복사휘도가 작아지고, 태양의 고도가 25° 일 때의 반치폭은 대략 8° 까지 넓어질 것으로 보인다.

Fig. 8의 (b)는 태양이 높게 뜨는 하지의 시간대별 태양 고도를 나타낸 것으로, 여름철 태양 직사광의 해수면 반사는 일출인 오전 5시경에 방위각 57° 부근의 수평선에서 강하게 발생하고, 태양을 따라 방위각 81° 까지 이동한 후 8시경에는 보이지 않을 것으로 예상된다. 오후에는 18시경에 방위각 284° 부근에서 나타나 방위각 301° 부근까지 태양을 따라 이동한 후 20시경 일몰과 함께 사라질 것으로 보인다. 춘분·추분에 비해 낮이 길어진 만큼, 태양의 해수면 반사 효과가 나타나는 시간대가 오전에는 더 이른 시각으로, 오후에는 더 늦은 시각으로 변화하였다. 또한 주의해야 하는 태양의 방향이 오전에는 더욱 동쪽으로, 오후에는 더욱 서쪽으로 이동하였다.

Fig. 8의 (c)는 태양이 낮게 뜨는 동지의 시간대별 태양 고도 그래프로, 겨울철 태양 직사광의 해수면 반사는 오전과 오후 각각 세 시간에 걸쳐 발생할 것으로 보인다. 해가 뜨는 오전 8시경에 방위각 121° 부근의 수평선에서 태양 직사광에 의한 해수면 반사가 강하게 나타나고, 방위각 156° 까지 태양을 따라 이동한 후 오전 11시경에는 거의 보이지 않을 것으로 예상된다. 오후에는 14시경에 방위각 202° 부근에서 나타나 방위각 237° 부근에서 일몰과 함께 사라질 것으로 보인다. 춘분·추분에 비해 낮이 짧아진 만큼, 태양의 해수면 반사 효과가 나타나는 시간대가 오전에는 더 늦은 시각으로, 오후에는 더 이른 시각으로 변화하였다. 이와 함께 주의해야하는 태양의 방향이 오전에는 남동, 오후에는 남서 방향으로 변화가 생겼다. 겨울에는 해는 짧고 태양의 고도가 낮으므로, 해가 떠있는 시간 중 한낮을 제외한 대부분의 시간대에 태양의 해수면

반사 신호를 주의해야 할 것으로 보인다.

5. 결 론

본 논문에서는 해수면의 기울기 분포와 태양의 위치를 고려한 태양 직사광의 해수면 반사 모델을 제시하고, 이를 이용해 원격외선 대역의 해수면 반사 신호를 모의하였다. 실측 영상과 모의 결과를 비교하여 방위각 및 내림각에 따른 태양광의 해수면 반사 복사휘도의 프로파일이 유사함을 보임으로써 제시한 모델을 검증하였다. 태양의 천정각에 따른 특성을 분석하여 태양 천정각이 60°보다 클 때에 태양 직사광의 해수면 반사 효과가 중요하게 작용함을 보였다. 또한 풍속과 태양의 천정각에 따른 특성을 같이 분석함으로써 천정각에 따른 풍속의 중요성이 달라짐을 보였다. 끝으로 계절에 따른 해수면의 태양 직사광 반사 특성을 분석한 결과, 계절별로 주의해야할 시간대와 방위각을 제시하였다.

본 연구는 기상 및 계절에 따른 환경변수를 반영하여 해수면의 태양 직사광 반사 성분을 사실성 있게 모의하고 분석하였다는 점에서 의의가 있다. 본 논문의 결과를 활용하여 태양 직사광의 해수면 반사에 의한 해상 클러터를 사전에 예측한다면 원격외선 센서를 탑재한 무기체계의 개발, 운용 및 임무계획에 도움이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] Kyoung-Soo Kim et al., "A Study on Long-Wave Infrared Sea Surface Signature," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 823-824, 2014.
- [2] Hyeryeong Park, "Implementation of Virtual Maritime Environment for LWIR Homing Missile Test," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 19, No. 2, pp. 185-194, 2016.
- [3] Sung-Kun Jang et al., "Analysis of the Infrared Image Property with Respect to the Variation of Time and Wavelength," IEEK Conference Proceedings, pp. 1040-1041, 2009.
- [4] C. Cox, and W. Munk, "Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter," J. Opt. Soc. Am., Vol. 44, No. 11, pp. 838-850, 1954.
- [5] F. M. Breon, and N. Henriot, "Spaceborne Observations of Ocean Glint Reflectance and Modeling of Wave Slope Distributions," J. Geophys. Res., Vol. 111, C06005, pp. 1-10, 2006.
- [6] D. Freund et al., "Numerical Computations of Rough Sea Surface Emissivity using the Interaction Probability Density," J. Opt. Soc. Am. A., Vol. 14, No. 8, pp. 1836-1849, 1997.
- [7] C. Schlick, "An Inexpensive BRDF Model for Physically-based Rendering," Computer Graphics Forum, Vol. 13, No. 3, pp. 233-246, 1994.
- [8] G. Hale, and M. Querry, "Optical Constants of Water in the 200-nm to 200-um Wavelength Region," Appl. Opt., Vol. 12, No. 3, pp. 555-563, 1973.
- [9] A. T. Mecherikunnel, and J. C. Richmond, "Spectral Distribution of Solar Radiation," NASA Technical Memorandum 82021, Greenbelt, Goddard Space Flight Center, 1980.
- [10] D. M. Gates, and W. J. Harrop, "Infrared Transmission of the Atmosphere to Solar Radiation," Appl. Opt., Vol. 2, No. 9, pp. 887-898, 1963.
- [11] Kyung Ha Kim et al., "A Study on Sun glint in LWIR Band using the Slope Distribution of the Sea Surface," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 323-324, 2016.
- [12] C. R. Zeisse, "Radiance of the Ocean Horizon," J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 12, No. 9, pp. 2022-2030, 1995.
- [13] Huijie Zhao et al., "Mid-Infrared Imaging System based on Polarizers for Detecting Marine Targets Covered in Sun Glint," Optics Express, Vol. 24, No. 15, pp. 16396-16409, July, 2016.
- [14] Fondriest Environment, Inc., "Solar Radiation and Photosynthetically Active Radiation," Fundamentals of Environmental Measurements, 21 Mar. 2014. Web. <http://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/solar-radiation/>.