



Received: 2026/05/07
Revised: 2026/05/20
Accepted: 2026/06/25
Published: 2026/06/30

***Corresponding Author:**

Donggeon Kim

333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea

Tel: +82-31-5179-7358

Fax: +82-31-5179-7086

E-mail: donggeon.kim@ligdna.com

Abstract

본 연구에서는 해수 분사 기반 표면 냉각 기법이 함정 표면의 열적 거동과 적외선 신호에 미치는 영향을 분석하였다. FF급 함정을 대상으로 열전달 해석과 적외선 신호 해석을 수행하여 해수 분사 유량 조건에 따른 표면 온도 변화 및 적외선 복사 신호 변화를 정량적으로 평가하였다. 해석 결과 해수 분사 적용 시 표면 온도가 감소하며 이에 따라 중적외선 및 원적외선 영역에서 적외선 신호가 감소하는 경향을 확인하였다.

This study investigates the effects of seawater spray cooling on the thermal behavior and infrared signature of ship surfaces. Thermal analysis and infrared signature simulation were conducted for an FF-class naval ship to evaluate the variations in surface temperature and infrared radiance under different seawater spray flow conditions. The results show that applying seawater spray cooling reduces surface temperature and consequently decreases infrared emissions in both MWIR and LWIR bands.

Keywords

적외선 신호(Infrared Signature), 함정(Naval Ship),
해수 분사 냉각(Seawater Spray Cooling),
열적 거동(Thermal Behavior),
적외선 신호 저감(Infrared Suppression)

해수 분사 기반 표면 냉각 적용에 따른 함정 표면의 열적 거동 및 적외선 신호 저감 특성 분석

Analysis of Thermal Behavior and Infrared Signature Reduction of Ship Surfaces with Seawater Spray Cooling

김동건^{1*}, 노태원², 배규환², 손현구¹, 박지환³, 김기웅⁴

¹LIG디펜스엔에어로스페이스 유도무기개발단 수석연구원

²LIG디펜스엔에어로스페이스 유도무기개발단 선임연구원

³(주)써모 CAE팀 과장

⁴(주)써모 대표이사

**Donggeon Kim^{1*}, Taewon Noh², Gyuhan Bae², Hyeongu Son¹,
Jihwan Park³, Keewoong Kim⁴**

¹Chief research engineer, Global PGM R&D Center, LIG Defense&Aerospace Co. Ltd.

²Research engineer, Global PGM R&D Center, LIG Defense&Aerospace Co. Ltd.

³Engineer, CAE Team, Thermo Co. Ltd.

⁴President, Thermo Co. Ltd.

1. 서론

현대 해군 함정은 다양한 감시 및 정찰 자산에 의해 지속적으로 탐지되는 환경에 놓여 있으며, 특히 적외선 기반 탐지 자산은 함정의 열적 특성에 의해 비교적 장거리에서도 탐지가 가능하다. 함정에서 발생하는 적외선 신호는 기관 및 배기 계통과 같은 고온 열원 뿐만 아니라 태양 복사, 대기 조건 및 선체 표면의 열적 거동 등에 의해 복합적으로 형성된다. 이러한 적외선 신호는 적외선 탐색기를 사용하는 대함 미사일이나 정찰 플랫폼에 의해 활용될 수 있기 때문에, 함정의 생존성을 향상시키기 위해서는 적외선 신호 저감 기술에 대한 연구가 지속적으로 이루어져 왔다[1].

함정의 적외선 신호를 저감하기 위한 방법으로는 배기 냉각 시스템, 구조적 차폐 설계, 저방사율 도료 적용, 그리고 능동적인 표면 냉각 기법 등이 제시되어 왔다. 특히 선체 표면의 열적 거동은

태양 복사, 대류 열전달 및 복사 열전달 등의 상호작용에 의해 결정되며, 이러한 열적 특성은 함정의 적외선 신호 형성에 직접적인 영향을 미친다. 실제 함정에서는 해수 분사 시스템을 이용하여 선체 표면에 물을 분사하고 수막을 형성함으로써 표면 온도를 낮추는 방식이 운용되기도 하며, 이러한 방식은 표면 온도 저감을 통해 적외선 신호를 감소시킬 수 있는 잠재적인 수단으로 알려져 있다[2].

해수 분사 기반 표면 냉각 기법은 분사된 해수가 선체 표면에 수막을 형성하고 흐르면서 열을 제거하는 방식으로 작동하며, 이 과정에서 대류 열전달, 수막에 의한 열전도 및 일부 증발 효과 등이 복합적으로 작용한다. 이러한 열 제거 메커니즘은 선체 표면 온도를 감소시키고 결과적으로 적외선 복사 강도를 감소시키는 효과를 유도할 수 있다. 기존 연구에서는 해양 환경 조건을 고려하여 해수 냉각이 적외선 신호 저감에 미치는 영향을 분석한 사례가 보고된 바 있으며, 해수 분사 조건 및 환경 조건에 따라 적외선 신호 변화가 나타날 수 있음을 확인하였다.

그러나 실제 함정에서 다양한 해양 환경 조건과 운용 조건을 고려하여 해수 분사 냉각 효과를 실험적으로 검증하는 것은 현실적으로 많은 제약이 따른다. 해양 환경에서는 태양 복사, 대기 온도, 풍속 및 해수 온도 등이 시간에 따라 변화하며 이러한 조건을 실험적으로 동일하게 재현하는 것은 쉽지 않다. 또한 실제 함정에서 반복적인 시험을 수행하기에는 비용 및 운용상의 제약이 존재한다. 이러한 이유로 다양한 환경 조건에서의 열적 거동과 적외선 신호 변화를 분석하기 위해서는 수치 해석 기반의 시뮬레이션 접근이 효과적인 대안이 될 수 있다[3].

따라서 본 연구에서는 해수 분사 기반 표면 냉각이 함정 표면의 열적 거동과 적외선 신호에 미치는 영향을 분석하기 위하여 열전달 해석과 적외선 신호 해석을 기반으로 한 시뮬레이션을 수행하였다. FF급 함정을 대상으로 해수 분사 조건에 따른 표면 온도 변화를 분석하고, 이를 기반으로 중적외선(MWIR, 3~5 μm) 및 원적외선(LWIR, 8~12 μm) 영역에서의 적외선 신호 변화를 평가하였다. 이를 통해 해수 분사 냉각 기법이 함정의 적외선 신호 저감에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 향후 함정 적외선 신호 저감 기술 연구를 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 함정 표면 열 및 적외선 신호 해석 방법

2.1 함정 표면의 비정상 열전달 모델

함정 표면의 온도 분포는 선체 내부 전도와 외부 환경과의 열교환에 의해 결정되며, 이러한 열전달 과정은 비정상 열전도 방정식으로 표현할 수 있다. 선체 재질 내부의 온도 변화는 식 (1)과 같은 에너지 보존 식으로 나타낼 수 있다[4].

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 재질 밀도, c_p 는 비열, k 는 열전도도, T 는 온도이며, t 는 시간이다. 이 식은 선체 내부에서의 열전도에 의해 발생하는 온도 변화를 나타낸다.

선체 외부 표면에서는 대기와의 대류 열전달, 주변 환경과의 복사 열교환, 태양 복사 및 해수 분사에 의한 냉각 효과가 동시에 작용한다. 이러한 경계 조건은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{air}(T_s - T_{\infty}) + \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{env}^4) + q_{solar} + q_{wash} \quad (2)$$

여기서 T_s 는 표면 온도, T_{∞} 는 주변 공기 온도, h_{air} 는 대류 열전달 계수, ϵ 은 표면 방사율, σ 는 스테판-볼츠만 상수이다. 또한 q_{solar} 는 태양 복사에 의해 표면에 유입되는 열유속을 의미하며, q_{wash} 는 해수 분사에 의해 제거되는 열유속을 나타낸다.

해수 분사가 적용될 경우 선체 표면에는 얇은 수막이 형성되며, 이 수막을 통해 열이 해수로 전달된다. 이러한 과정은 표면에서의 열전달 계수를 증가시키는 효과를 가지며 결과적으로 선체 표면 온도를 감소시키는 방향으로 작용한다. 따라서 해수 분사 조건은 선체 표면의 열적 거동을 변화시키는 주요 변수로 작용한다[2].

또한 주간 환경에서는 태양 복사가 선체 표면의 주요 열부하로 작용하며, 특히 태양 입사 방향에 위치한 선체 측면에서는 상대적으로 높은 표면 온도가 형성될 수 있다. 이러한 온도 분포는 선체 형상, 표면 재질 및 환경 조건에 따라 달라질 수 있으며, 결과적으로 적외선 신호 특성에도 영향을 미치게 된다.

2.2 적외선 신호 계산 모델

물체의 적외선 신호는 표면 온도와 방사율에 의해 결정되는 열복사 현상에 기반한다. 일반적으로 표면에서 방출되는 복사 에너지는 스테판-볼츠만 법칙에 따라 식 (3)과 같이 표현된다[5].

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

이 관계에 의해 표면 온도가 증가할수록 복사 에너지는 비선형적으로 증가하게 된다.

적외선 탐지 시스템은 일반적으로 중적외선 및 원적외선 파장 대역에서 운용되며, 해당 파장 영역에서의 복사 강도는 플랑크 복사 법칙을 기반으로 계산할 수 있다. 특정 파장 영역에서의 복사 강도는 식 (4)와 같이 표현된다[6].

$$L_{\lambda_1 - \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}(T) d\lambda \quad (4)$$

여기서 $L_{\lambda}(T)$ 는 파장 λ 에서의 스펙트럼 복사 강도이며, λ_1 과 λ_2 는 분석 대상 파장 범위를 의미한다. 본 연구에서는 중적외선 및 원적외선 파장 영역에서의 복사 강도를 계산하여 적외선 신호 변화를 분석하였다.

선체 표면의 온도 분포가 변화할 경우 해당 파장 영역에서의 복사 강도 역시 변화하게 되며, 이러한 변화는 적외선 영상에서의 밝기 변화로 나타난다. 따라서 해수 분사에 의해 선체 표면 온도가 감소할 경우 적외선 복사 강도 역시 감소하는 경향을 보이게 된다.

2.3 평가 지표 정의

본 연구에서는 해수 분사 적용에 따른 열 및 적외선 신호 변화를 정량적으로 분석하기 위하여 표면 온도와 적외선 복사 신호를 기반으로 한 평가 지표를 사용하였다. 먼저 선체 측면에서 설정된 관심 영역(region of interest, ROI)의 평균 표면 온도를 계산하여 해수 분사 적용 전후의 온도 변화를 비교하였다. 온도 감소 효과는 해수 분사 미적용 조건을 기준 상태(baseline)로 설정하고 동일 조건에

서 해수 분사를 적용한 경우와의 차이를 통해 평가하였다.

적외선 신호 변화는 MWIR 및 LWIR 파장 영역에서의 복사 강도 변화를 통해 분석하였다. 해수 분사 적용 전후의 복사 강도 차이를 비교함으로써 표면 온도 변화가 적외선 신호에 미치는 영향을 평가하였다[2].

또한 적외선 탐지 환경에서의 대상 대비 특성을 분석하기 위하여 ΔT_{rss} 지표를 사용하였다. ΔT_{rss} 는 대상 영역과 배경 영역 간의 온도 차이를 기반으로 한 지표로 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\Delta T_{rss} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{target,i} - T_{background,i})^2} \quad (5)$$

여기서 T_{target} 은 대상 영역의 온도, $T_{background}$ 는 배경 영역의 온도를 의미하며, N 은 ROI 내의 픽셀 수를 나타낸다. ΔT_{rss} 값이 감소할수록 대상과 배경 간의 열적 대비가 감소하며, 이는 적외선 기반 탐지 가능성이 낮아지는 방향으로 해석할 수 있다.

3. 해석 조건 및 시나리오

본 연구에서는 해수 분사 기반 표면 냉각이 함정 표면의 열적 거동 및 적외선 신호에 미치는 영향을 분석하기 위하여 FF급 함정을 기반으로 한 수치 해석을 수행하였다. 해석 대상은 실제 함정 형상을 단순화한 모델을 사용하였으며, 선체 외판 및 상부 구조물을 포함한 전체 형상에 대해 열전달 및 적외선 신호 해석을 수행하였다. Fig. 1에는 해석에 사용된 함정 모델과 함정 측면의 해수 분사 적용 영역을 나타내었다.

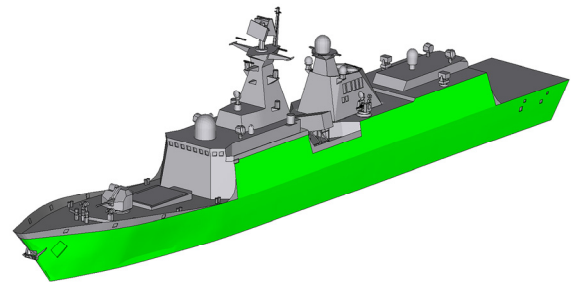


Fig. 1. Simulation geometry and seawater spray application area

Table 1. Environmental and simulation conditions

Parameter	Value
Ship model	Simplified FF-class ship model
Simulation period	14:00 ~ 15:00
Reference condition	Water spray OFF at 14:00
Ambient temperature	28 °C
Sea water temperature	22 °C
Wind speed	5 m/s
Solar condition	Time-dependent solar irradiation (using with MODTRAN)
Bow direction	True north
Analysis type	Transient thermal and IR signature simulation

해수 분사는 선체 측면 중 태양 복사에 의해 상대적으로 높은 온도가 형성되는 영역을 중심으로 적용하였으며, 해당 영역에 대해 균일한 분사 조건을 가정하였다. 분사된 해수는 표면에 수막을 형성하며 흐르는 것으로 가정하였으며, 이를 통해 표면에서의 열전달 특성이 변화하는 것으로 모델링하였다.

해석에 적용된 환경 조건은 실제 운용 환경을 고려하여 설정하였으며, 주요 조건은 Table 1에 정리하였다. 대기 온도, 해수 온도, 풍속 및 태양 복사 조건을 포함하였으며, 특히 태양 복사는 주간 조건에서 선체 표면 온도 분포에 미치는 영향을 고려하기 위하여 포함하였다. 태양 입사 방향은 선체 좌측면에 직접적으로 복사가 작용하는 조건으로 설정하여, 해수 분사 적용 효과가 가장 뚜렷하게 나타나는 조건을 구성하였다. 이 때 태양 복사 에너지는 전 세계적으로 널리 이용되고 있는 미국에서 개발된 대기 모델 MODTRAN을 사용하였다[7].

해수 분사 조건은 질량유량을 기준으로 8 kg/s, 12 kg/s, 16 kg/s의 세 가지 경우로 설정하였으며, 이를 통해 분사 유량 변화에 따른 냉각 효과를 비교하였다. 해수 분사가 적용되지 않은 조건을 기준 상태(baseline)로 설정하고, 동일 환경 조건에서 해수 분사를 적용한 경우와의 차이를 통해 해석 결과를 비교하였다. 해수 온도는 주변 해수 온도와 동일한 조건으로 설정하였다.

해석은 비정상 열전달 해석으로 수행하였으며, 총 해석 시간은 60분으로 설정하였다. 초기 조건은 해수 분사가 적용되지 않은 상태에서 열적 평형에 도달한 상태를 기준으로 설정하였으며, 이후 해수 분사를

적용하여 시간에 따른 표면 온도 변화를 계산하였다. 이러한 시간 기반 해석을 통해 해수 분사 적용에 따른 온도 변화 및 수막 특성을 분석하였다. 해석에 사용된 선체 재질, 표면 코팅 및 수막의 주요 열·광학 물성은 Table 2에 정리하였다. 선체 표면의 도료 및 광학 물성은 방사율과 태양 반사율을 변화시켜 적외선 신호 형성에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로, 본 연구에서는 표면 코팅의 방사율, 태양 반사율 및 주요 열물성을 해석 입력 조건으로 반영하였다. 수막의 경우 해수 분사 적용 시 표면에 형성되는 유체층으로 가정하였으며, 물(water)의 열물성 및 광학 특성을 기반으로 설정하였다[8].

Table 2. Thermophysical and optical properties used in simulation

Material	Surface	Hull (mild steel)	Glass (glass)	Water film (water)
Density [kg/m ³]		7768.98	2529.6	997.97
Specific heat [J/KgK]		460.967	754.04	4180.9
Thermal conductivity [W/mK]		52.019	1.1717	0.6062
Averaged emissivity		0.7953	0.4999	0.9799
Solar reflectivity		0.9127	0.3804	0.9666

적외선 신호 해석은 열전달 해석 결과로부터 계산된 표면 온도 분포를 기반으로 수행하였다. MWIR 및 LWIR 파장 영역에 대해 복사 강도를 계산하고, 이를 이용하여 적외선 영상 및 신호 변화를 분석하였다. 해수 분사 적용 전후의 표면 온도 및 복사 강도 변화를 비교하여 냉각 효과 및 적외선 신호 저감 효과를 평가하였다.

본 연구에서는 상기 해석 절차를 구현하기 위한 플랫폼으로 MuSES를 활용하였으며, 열전달 해석과 적외선 신호 해석을 통합적으로 수행하였다[9].

4. 해석 결과

4.1 표면 온도 변화 특성

본 연구에서는 해수 분사 시작 시점인 14:00의 값을 기준으로 설정하고, 이후 시간에 따른 표면 온

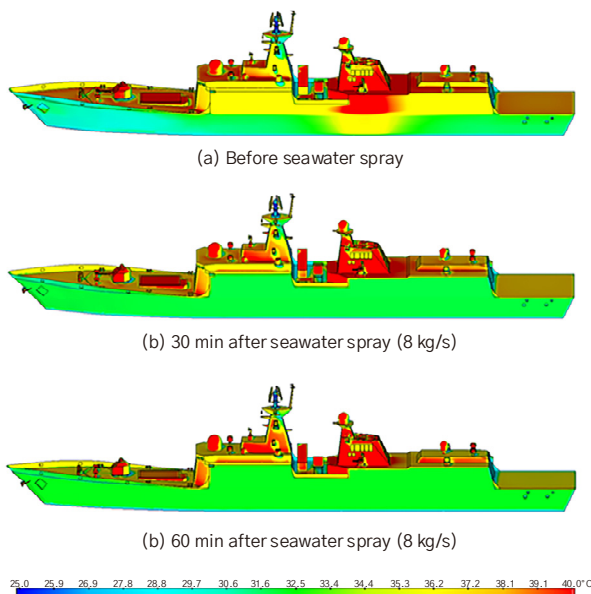


Fig. 2. Surface temperature distributions before and after seawater spray cooling

도 변화를 분석하였다. Fig. 2에는 물 분사 전후의 표면 온도 변화 영상을 나타내었고 Fig. 3에는 대표적으로 유량 8 kg/s 조건에서의 선체 좌, 우측면의 표면 온도 변화에 대해 그래프로 나타내었다. Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 해수 분사 이후 모든 조건에서 표면 온도는 초기 급격한 감소 이후 점진적으로 완만한 변화 양상을 보인다.

유량 조건에 따른 차이를 살펴보면, 좌측(태양 복사 영향 영역)의 경우 8 kg/s 조건에서 약 33.4°C에서 32.3°C 수준으로 약 1.1°C 감소하는 데 그친 반면, 16 kg/s 조건에서는 약 9.3°C 이상의 온도 감소가 나타났다. 이는 유량 증가에 따라 증발 및 대류 열전달 효과가 강화되면서 표면 냉각이 촉진되었음을 의미한다.

반면, 우측(음영 영역)에서는 동일 조건에서 온도 감소 폭이 더욱 크게 나타났다. 8 kg/s 조건에서 약 6.9°C 감소한 반면, 16 kg/s 조건에서는 약 9°C 이상 감소하는 경향을 보였다. 이는 초기 표면 온도가 낮고 외부 복사 영향이 제한된 환경에서 해수 분사에 의한 냉각 효과가 보다 직접적으로 작용했기 때문이다.

또한 시간 경과에 따라 온도 감소율이 점차 감소하는 경향이 관찰되었으며, 약 30분 이후에는 준정상 상태에 접근하는 것으로 나타났다. 이는 표면과 유막 간 열평형이 형성되면서 추가적인 냉각 효과가 제한되기 때문으로 해석된다.

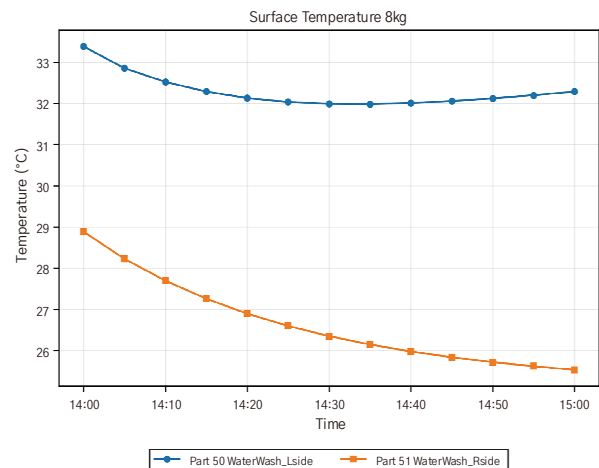


Fig. 3. Time history of surface temperature variation under seawater spray cooling at 8 kg/s

4.2 유막 온도 변화 및 열전달 특성

Water film temperature ΔT 결과를 통해 해수 분사 시 형성되는 유막의 열적 거동을 분석하였다. Fig. 4에 따르면, 유량 증가에 따라 유막 온도 또한 빠르게 감소하며, 특히 초기 10~20분 구간에서 급격한 감소가 나타난다.

좌측 영역에서는 8 kg/s 조건에서 약 10.7°C 수준의 ΔT 를 유지하는 반면, 16 kg/s 조건에서는 약 6.4°C 수준까지 감소하여 약 40% 이상의 차이를 보인다. 이는 높은 유량 조건에서 유막의 두께 증가와 함께 증발 잠열 및 대류 효과가 동시에 증가했음을 의미한다.

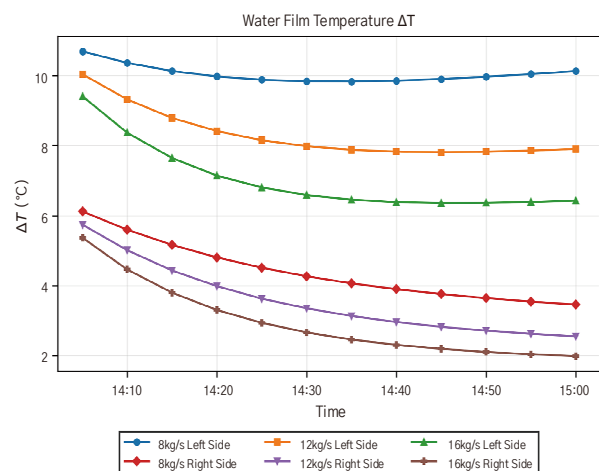


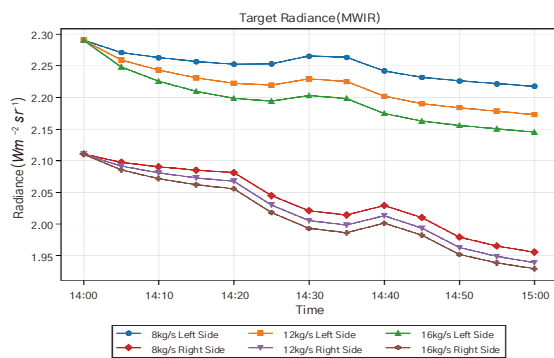
Fig. 4. Time history of water film temperature variation for different seawater spray flow rates

우측 영역에서는 유막 온도 감소 효과가 더욱 두드러지며, 8 kg/s 조건에서 약 6.1°C에서 3.5°C 수준으로 감소하는 반면, 16 kg/s 조건에서는 약 5.3°C에서 2.0°C 수준까지 감소한다. 이는 음영 조건에서 유막이 외부 열원으로부터 상대적으로 자유로워 냉각 효율이 증가하기 때문이다.

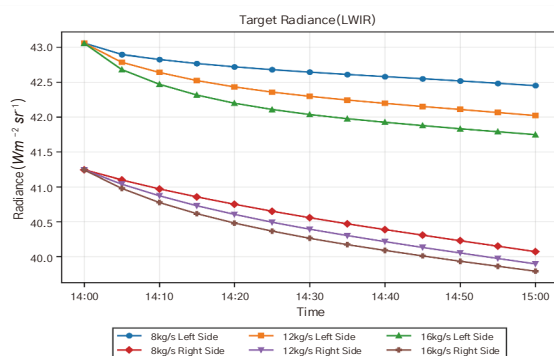
이러한 결과는 해수 분사에 의해 형성된 수막이 단순한 표면 냉각을 넘어, 표면과 해수 사이의 열교환 경로를 변화시키는 주요 인자로 작용함을 보여준다. 수막은 공기 중 대류 조건에 비해 큰 열용량을 갖는 유체층을 제공하고, 표면에서 해수로의 열전달을 증가시킴으로써 표면 온도 저감에 기여한다. 본 해석에서는 수막 형성에 따른 유효 열전달 변화와 해수 온도 조건을 중심으로 냉각 효과를 반영하였으며, 증발에 따른 잠열 효과는 별도의 지배 인자로 분리하여 해석하지 않았다[10].

4.3 적외선 Radiance 변화 분석

MWIR 및 LWIR 대역에서의 target radiance 변화를 분석한 결과, 해수 분사에 따라 방사 강도가 전반적

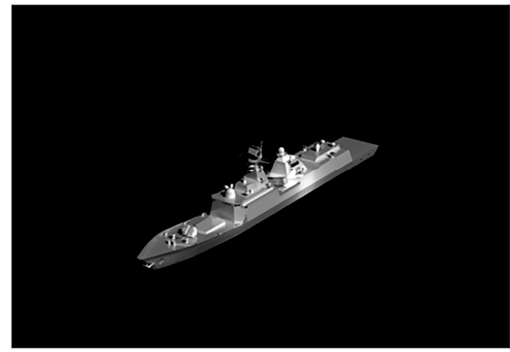


(a) MWIR

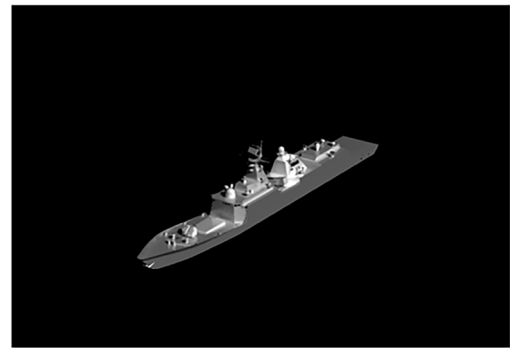


(b) LWIR

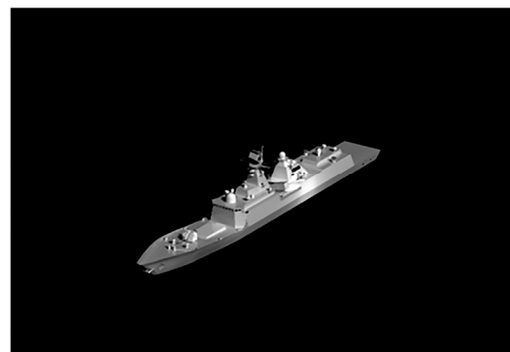
Fig. 5. Target radiance variation in the IR bands



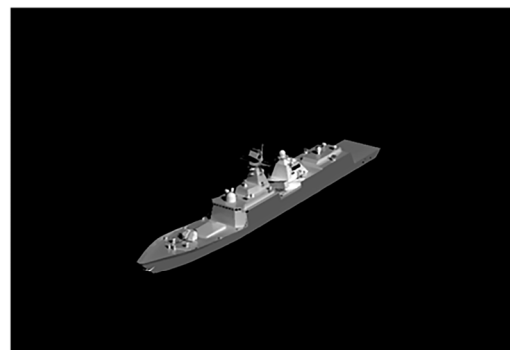
(a) MWIR, Before seawater spray



(b) MWIR, After seawater spray(8 kg/s, 60 min)



(c) LWIR, Before seawater spray



(d) LWIR, After seawater spray(8 kg/s, 60 min)

Fig. 6. Simulated IR images before and after seawater spray cooling

으로 감소하는 경향이 확인되었다. Fig. 5에 따르면, MWIR 대역에서 8 kg/s 조건의 좌측 영역 radiance는 약 $2.29 \text{ W/m}^2\text{sr}^{-1}$ 에서 $2.22 \text{ W/m}^2\text{sr}^{-1}$ 로 감소한 반면, 16 kg/s 조건에서는 약 $2.15 \text{ W/m}^2\text{sr}^{-1}$ 까지 감소하였다. 이는 약 3% 이상의 감소율에 해당한다.

LWIR 대역에서도 유사한 경향이 나타났으며, 8 kg/s 조건에서 약 $43.1 \text{ W/m}^2\text{sr}^{-1}$ 에서 $42.45 \text{ W/m}^2\text{sr}^{-1}$ 로 감소한 반면, 16 kg/s 조건에서는 약 $41.75 \text{ W/m}^2\text{sr}^{-1}$ 수준까지 감소하였다. 이는 약 1.5~2% 수준의 감소율로 나타났다.

우측 영역에서는 radiance 감소 폭이 좌측보다 크게 나타났으며, 이는 표면 온도 감소가 더욱 크게 발생한 결과와 일치한다. 특히 MWIR 대역에서 약 $2 \text{ W/m}^2\text{sr}^{-1}$ 에서 $1.93 \text{ W/m}^2\text{sr}^{-1}$ 수준까지 감소하여 약 8% 이상의 감소율을 보였다.

이러한 결과는 해수 분사가 표면 온도 감소를 통해 방사 에너지를 직접적으로 감소시키며, 특히 MWIR 대역에서 상대적으로 높은 민감도를 보인다는 점을 확인할 수 있다. Fig. 6는 8 kg/s 조건에서 해수 분사 전후의 MWIR 및 LWIR 영상을 비교한 결과이다. 정량 그래프에서 확인된 radiance 감소 경향은 영상에서도 선체 표면의 신호 강도 감소로 확인된다.

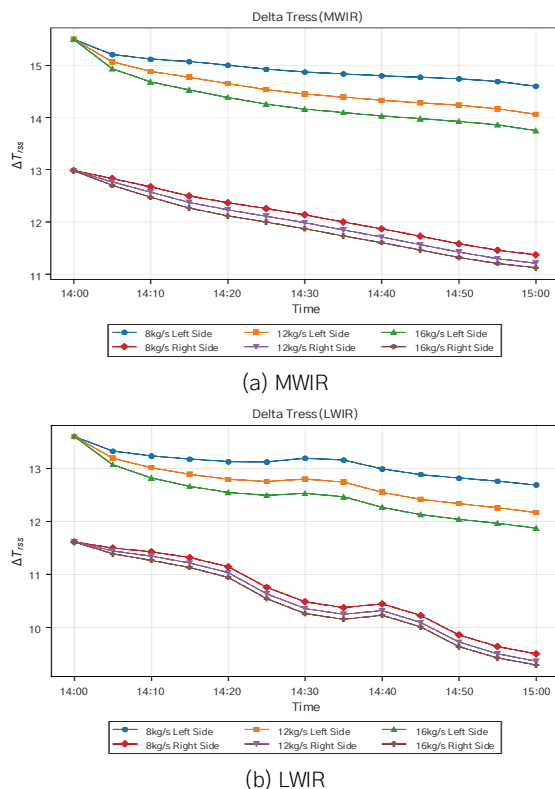


Fig. 7. ΔT_{rss} variation in the IR bands

4.4 적외선 대비 특성

ΔT_{rss} 는 표적과 배경 간 열적 대비를 나타내는 지표로서, 값이 감소할수록 적외선 탐지 가능성이 저하됨을 의미한다. 따라서 본 절에서는 ΔT_{rss} 의 시간 변화가 아닌, 각 조건에서의 절대값 변화를 중심으로 분석하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

LWIR 대역에서 좌측 영역의 ΔT_{rss} 는 8 kg/s 조건에서 약 12.7 수준을 유지하는 반면, 16 kg/s 조건에서는 약 11.9 수준으로 감소하였다. 이는 약 6% 이상의 대비 감소를 의미하며, 유량 증가에 따라 배경 대비가 효과적으로 약화됨을 나타낸다.

MWIR 대역에서도 유사한 경향이 확인되었으며, 8 kg/s 조건에서 약 14.6 수준이던 ΔT_{rss} 가 16 kg/s 조건에서는 약 13.8 수준으로 감소하였다. 이는 약 5~6% 수준의 감소로 나타났다.

우측 영역에서는 ΔT_{rss} 값 자체가 좌측보다 낮게 나타났으며, 이는 초기부터 배경 대비가 상대적으로 약한 환경임을 의미한다. 그러나 유량 증가에 따른 추가적인 감소 효과는 제한적으로 나타났다. 이는 이미 낮은 대비 상태에서는 추가적인 냉각이 탐지 성능에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문이다.

결과적으로, 해수 분사는 표면 온도 감소를 통해 radiance를 감소시키고, 궁극적으로 ΔT_{rss} 를 감소시켜 적외선 대비를 약화시키는 효과를 나타낸다. 특히 고유량 조건에서 이러한 효과가 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 이는 적외선 스텔스 성능 향상 측면에서 중요한 설계 변수로 작용할 수 있다.

5. 논의

본 연구 결과에 따르면, 해수 분사 적용 시 표면 온도 감소에 따라 MWIR 및 LWIR 대역의 radiance가 감소하고, 이에 따라 ΔT_{rss} 가 감소하는 경향이 일관되게 나타났다. 특히 16 kg/s 조건에서 ΔT_{rss} 는 MWIR 기준 약 5~6%, LWIR 기준 약 6% 수준으로 감소하였으며, 이는 해수 분사가 적외선 탐지 환경에서의 표적 대비를 효과적으로 저감시킬 수 있음을 의미한다. 이러한 결과는 표면 온도 감소가 방사 강도 감소로 이어지고, 궁극적으로 탐지 성능 저하로 연결되는 일련의 물리적 인과관계를 보여준다.

유량 증가에 따른 효과를 분석한 결과, 표면 온도

및 $\Delta T_{r_{ss}}$ 감소는 유량 증가에 따라 증가하였으나 그 증가폭은 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 일정 수준 이상의 유량에서는 열전달이 포화 상태에 근접하여 추가적인 냉각 효과가 제한되기 때문으로 판단된다. 따라서 해수 분사 시스템 설계 시 단순히 최대 유량을 적용하기보다는 목표 성능을 만족하는 범위 내에서 최적 유량을 설정하는 것이 중요하다.

또한 좌측과 우측 영역 간의 열적 및 적외선 신호 변화는 뚜렷한 차이를 보였다. 태양 복사의 영향을 받는 좌측 영역에서는 온도 감소 및 $\Delta T_{r_{ss}}$ 감소 효과가 상대적으로 제한적으로 나타난 반면, 음영 영역에서는 최대 약 40% 수준의 온도 감소가 나타났다. 이는 해수 분사 효과가 외부 열환경에 크게 의존함을 의미하며, 실제 운용 시 환경 조건에 따른 성능 편차가 발생할 수 있음을 시사한다.

MWIR과 LWIR 대역 간 비교 결과, MWIR 대역에서 radiance 및 $\Delta T_{r_{ss}}$ 변화가 상대적으로 크게 나타나 온도 변화에 대한 민감도가 높은 것으로 확인되었다. 반면 LWIR 대역에서는 변화폭이 상대적으로 작게 나타났으며, 이는 동일한 온도 변화에 대해 방사 특성이 다르게 나타나는 스펙트럼 특성에 기인한다.

한편 본 연구는 일정한 환경 조건 및 단순화된 함정 모델을 기반으로 수행되었으며, 실제 해상 환경에서의 복합적인 외란 요소는 충분히 반영되지 않았다. 또한 배경 조건을 단순화하여 $\Delta T_{r_{ss}}$ 를 산출하였기 때문에 실제 탐지 성능과의 직접적인 정량 비교에는 한계가 존재한다. 향후에는 다양한 환경 조건과 센서 특성을 포함한 확장 연구를 통해 보다 현실적인 IR 저감 성능 평가가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 해수 분사 기반 표면 냉각이 함정 표면의 열적 거동 및 적외선 신호에 미치는 영향을 분석하기 위한 해석 절차를 제시하고, 이를 기반으로 정량적 시뮬레이션을 수행하였다. 해수 분사 적용 시 표면 온도 감소에 따라 MWIR 및 LWIR 대역의 radiance가 감소하였으며, $\Delta T_{r_{ss}}$ 또한 MWIR 기준 약 5~6%, LWIR 기준 약 6% 수준 감소하는 것으로 나타났다. 이는 해수 분사가 적외선 탐지 환경에서의 표적 대비를 효과적으로 저감시킬 수 있음을 의미한다.

유량 증가에 따라 냉각 및 적외선 저감 효과는 증가

하였으나, 그 증가폭은 점차 감소하는 포화 특성을 보였다. 또한 태양 복사의 영향을 받는 영역에서는 냉각 효과가 제한적으로 나타난 반면, 음영 영역에서는 상대적으로 큰 온도 감소가 확인되어, 해수 분사 효과가 외부 열환경에 크게 의존함을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 해석 절차는 다양한 환경 조건에서 해수 분사 기반 적외선 저감 효과를 평가할 수 있는 방법론으로 활용될 수 있으며, 실제 시스템 설계 및 운용 조건 설정에 기초 자료로 활용될 수 있다. 다만 본 연구는 제한된 조건에서 수행된 시뮬레이션 결과에 기반하므로, 향후에는 보다 다양한 환경 조건과 실제 운용 조건을 반영한 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] Y. S. Kim, 'A Study on the Infrared Signature of a Naval Ship Under the Marine Climate,' Journal of the Society of Naval Architects of Korea, VOL. 49, NO. 3, 2012, pp. 264-272.
- [2] K. I. Han, S. J. Park, J. H. Choi, J. H. Kim, and T. K. Kim, 'A Study on IR Signal Reduction Effect of a Naval Ship due to Water Spray Hull Cooling Device,' in proceeding of the Conference of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, November 2013, pp. 156-159.
- [3] Hoseok Jung and Yong Jin Cho, 'An Effectiveness Analysis of the Infrared Signature Reduction with Sea Water Cooling According to the Meteorological Environment,' Journal of the Society of Naval Architects of Korea, VOL. 53, No. 6, 2016, pp. 521-528.
- [4] Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, and David P. DeWitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer (7th ed.), Wiley, 2011.
- [5] John R. Howell, Robert Siegel, and M. Pinar Mengüç, Thermal Radiation Heat Transfer (5th ed.), CRC Press, 2010.
- [6] M. F. Modest, Radiative Heat Transfer (3rd ed.), Academic Press, 2013.
- [7] Alexander Berk, Gail P. Anderson, Prabhat K. Acharya, Lawrence S. Bernstein, Leon Muratov, Jamine Lee, Marsha Fox, Steve M. Adler-Golden, James H. Chetwynd Jr., Michael L. Hoke et al., 'MODTRAN5: A Reformulated Atmospheric Band Model With Auxiliary Species And Practical Multiple Scattering Options,' Proceedings of SPIE 5655, Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications II, 2005.
- [8] Jun-Ryeong Park and Seok-Tae Yoon, 'Infra-Red Signature Analysis According to Paint Properties of a 150m-Class Stealth Destroyer,' Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, VOL. 26, No. 12, 2025, pp. 92-97.
- [9] ThermoAnalytics Inc., MuSES — EO/IR Signature

Simulation Software, Calumetn, MI: ThermoAnalytics Inc., 2023.

- [10] Jungho Kim, "Spray Cooling Heat Transfer: The State of the Art," International Journal of Heat and Fluid Flow, VOL. 28, No. 4, 2007, pp. 753-767.