

함정적외선신호 관리를 위한 확률론적 방법의 가능성 연구

박현정¹·강대수¹·조용진^{2,†}
동의대학교 부설 함정적외선신호연구소¹
동의대학교 조선해양공학과²

A Feasibility Study on the Probabilistic Method for the Naval Ship Infra-red Signature Management

Hyun-jung Park¹·Dae-soo Kang¹·Yong-jin Cho^{2,†}
Ship Infra-Red Signature Research Center of Dong-Eui University¹
Naval Architecture and Ocean Engineering of Dong-Eui University²

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.

It is essential to reduce the Infra-red signature for increasing ship's survivability in ship design stage. However the ship's IR signature is quite sensitive to the maritime and atmosphere. Therefore, it is very important to select the marine meteorological data to be applied to the signature analysis. In this study, we selected the three meteorological sample sets from the population of the Korea Meteorological Administration's marine environment data in 2017. These samples were selected through the two-dimensional stratified sampling method, taking into account the geopolitical threats of the Korean peninsula and the effective area of the buoy. These sample sets were applied to three naval ships classified by their tonnage, and then the IR signature analysis was performed to derive the Contrast Radiant Intensity (CRI) values. Based on the CRI values, the validity of each sample set was determined by comparing Cumulative Distribution Function (CDF), and Probability Density Function (PDF). Also, we checked the degree of scattering in each sample set and determined the efficiency of analysis time and cost according to marine meteorological sample sets to confirm the possibility of a probabilistic method. Through this process, we selected the standard for optimization of marine meteorological sample for ship IR signature analysis. Based on this optimization sample, by applying probabilistic method to the management of IR signature for naval ships, the robust design is possible.

Keywords : Probability method(확률론적 방법), Infra-red signature(적외선 신호), Contrast radiant intensity(CRI, 대비복사강도), Cumulative Distribution Function(CDF, 누적분포함수), Probability Density Function(PDF, 확률밀도함수)

1. 서론

현대의 해군함정은 복합 무기체계로서 임무효과도 및 생존 가능성을 높이기 위하여 개발 단계에서부터 스텔스(stealth) 기술을 적용하고 있다. 그러나 운용 중인 함정은 내부기관의 폐기 열과 선체표면의 복사에너지에 의한 적외선(Infra-red, IR) 신호를 다량으로 방출한다. 이는 함정의 피탐성(susceptibility)을 높이는 주된 요인으로 함의 생존성(survivability)을 저하시키기 때

문에 적외선 신호 관리가 필수적이다. 이를 위하여 함정의 개발 단계별로 신호저감기술을 적용하여 신호를 제어하고 있으며 함정의 건조 이후에 실해역 시운전을 통한 적외선 신호 측정 및 결과분석 비교연구가 수행되고 있다(Cho, 2009; Kim et al., 2011). 그러나 시험과정에서 고려되는 해양환경조건, 소요기간 및 비용 등을 고려하면 충실한 시험평가 결과를 기대하는 것은 어렵다. 이는 적외선 신호 계측을 위한 해양환경의 제어가 불가능함에 따른 시험의 재현성이 보장되지 않는 문제로 인해 NATO 국가들 또한 동일한 것으로 조사되었다. 이를 보완하기

위하여 실선시험을 대신하는 시뮬레이션 및 해석적 방법을 함정 개발에 적극적으로 활용하고 있다. 국내에서는 적외선 신호 해석을 통한 소프트웨어(S/W)적 검증과정을 통해 신호 관리를 수행하고 있다.

일반적으로 함정 적외선 신호는 함정(target)과 배경(background) 간의 신호 차이를 표현하는 대비복사강도(Contrast Radiant Intensity, CRI)로 나타내며, 이는 함정의 표면 및 폐기복사(target radiation)량과 주변의 배경복사(background radiation)량의 차이를 의미한다.

함정의 적외선 신호는 해양환경조건에 매우 민감하기 때문에 (Cho., 2013) 어떠한 환경을 적용하느냐에 따라 결괏값이 달라 지므로 환경조건의 설정이 매우 중요하다. 이에 따라 해양환경 변수가 함정 표면의 적외선 신호에 미치는 영향을 분석한 연구 (Kim., 2012)와 태양고각 변화(Kim., 2010) 및 온도·풍속 변화(Choi et al., 2008)에 따른 적외선 신호 연구 등 다양한 연구가 선행되었다. 그러나 전체 해양환경을 대표할 수 있는 해양환경 표본의 기준이 매우 한정적이어서 신호해석에 필요한 환경 조건 설정에 어려움을 겪고 있다.

본 연구에서는 표본 수에 대한 적외선 신호 질감기술의 효과를 보다 분명하게 확인 가능하고, 변수에 따른 민감도가 낮은 확률론적 방법을 통해 해양환경표본 수의 최적화 기준을 설정하고 강건설계(robust design)의 가능성을 높이고자 하였다. 이를 위하여 한국 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)의 2017년도 한반도 해양기상자료를 모집단으로 한 2차원 층화추출 표본인 100개, 200개, 400개의 해양환경표본(이하 100개 : Sample 1, 200개 : Sample 2, 400개 : Sample 3이라 칭함)을 기준으로 각 케이스에 따른 함정의 적외선 신호를 해석하였다. 신호해석 결과를 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)와 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)로 나타내어 정성적(qualitative) 비교를 수행하였다. 이를 토대로 정량적(quantitative) 분석을 시행하여 함정의 규모에 따른 대비복사강도 값의 변화 및 해양환경표본별 표준편차(흩어짐의 정도)를 비교해봄으로써 표본의 신뢰도를 높이고 최적화 기준을 선정하고자 하였다. 마지막으로 신호 관리를 위한 해석에 필요한 전반적인 소요 시간의 적절성을 고려하여 함정의 적외선 신호 저감 관리에 확률론적 방법의 가능성을 제시하였다.

2. 함정적외선 신호해석

2.1 신호해석 프로그램

적외선 신호해석을 위하여 서방국가들에 의해 검증되고 국내 도입된 Ship IR/NTCS(Naval Threat and Countermeasure Simulator, Davis)를 사용하였다. 본 프로그램은 NATO의 표준 소프트웨어 및 미국 해군에서 인증한 적외선 신호해석 프로그램이며, 30여 개국에서 다양하게 사용되고 있다.

Ship IR/NTCS 는 배경 모델(background model)을 통해 주변 해양환경과의 열적 평형이 가능케 하고, 대상 함정의 형상정

보를 입력하여 대상 모델(Target model)을 구성하며, 엔진 데이터를 기준으로 폐기 모델(Plume model)을 구성한다. 또한, 관측 모델(observer model) 및 시나리오 모델(scenario model)을 통해 관측 위치에서의 영상 분석을 토대로 대상 함정의 적외선 신호를 계산한다. 이와 관련한 추가 사항은 Fig. 1(Vaitekunas., 2005)에 나타내었다. 여기서, 가장 중요한 배경 모델의 환경 구현을 위해서 대기 투과 모델인 MODTRAN 4를 기반으로 하여 태양복사, 대기 투과·복사 등에 대한 해석을 수행하였다.

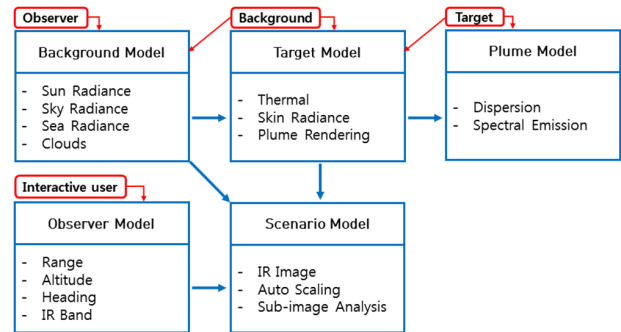


Fig. 1 Ship IR/NTCS Model and Analysis steps

2.2 해양환경표본

현재 국내 해상에 고정된 17개(동해 5개, 서해 6개, 남해 4개, 제주도 2개, Fig. 2 참조)의 부이에서 수온(water temperature), 기온(Air Temperature), 풍속(wind speed), 풍향(wind direction), 상대습도(relative humidity) 등에 대한 해양환경 정보를 매시간 당 얻을 수 있다. 본 연구에 사용된 해양환경표본은 2017년 한국 기상청의 해양환경 자료를 기준으로 이상치 제거 및 한반도 해역의 위치를 고려한 지정학적 위험과 고정 설치된 부이의 유효면적을 고려하였다. 여기서, 주성분분석을 통하여 상관관계가 가장 높은 수온과 기온을 기준으로 2차원 층화추출을 통해 3가지 표본을 선정하였다. 각 표본의 주/야간 비율은 약 50% 내외로 주/야간의 영향에 따른 편향성 또한 최소화하였다. 각 표본은 선행연구(Cho., 2018)를 통해 모집단을 잘 따른다는 것이 검증되었다.

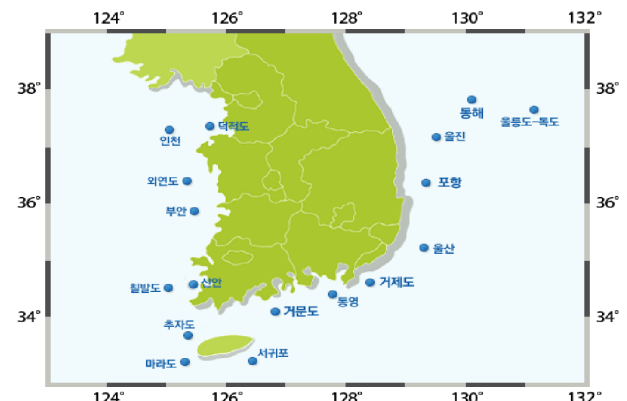


Fig. 2 Location of Buoys in Korean waters

2.3 대상함 모델

해양환경표본의 적용을 위하여 함정의 톤수에 따라 소형(300ton.), 중형(3,000ton.), 대형(20,000ton.)으로 구분된 3종의 함정(이후 ton. 대신 T로 기술)을 선정하였으며, 이는 함정의 특성에 따른 비편향성(unbiasedness)을 증가시키기 위함이다.

2.4 적외선 신호해석 범위

적외선 신호해석의 범위는 함정의 설계과정에서 설정된 적외선 탐지 센서를 기준으로 대기 투과도가 우수한 중적외선 대역(3~5μm)과 원적외선 대역(8~12μm)을 적용하였다.

2.5 적외선 신호의 확률론적 관리방법

적외선 신호 값의 분석을 위해서 크게 결정론적 접근법과 확률론적 접근법 두 가지로 나눌 수 있다. 기존의 설계과정에서는 한정적인 해양환경조건을 토대로 적외선 신호 값의 기준치 및 목표치를 설정하여 함정의 개발을 수행하는 결정론적 해석에 의존하였다. 이는 절차가 단순하고 변수에 따른 변화가 즉각적으로 나타나는 장점이 있으나 결정론적 방법에서 설정되어야 할 기준치 및 목표치에 요구되는 여유 마진(Margin)에 대한 이견이 존재한다. 이견을 축소하기 위해서는 실험역 시운전을 통한 경험 값을 축적하는 것이 가장 좋으나 시험의 재현성에 따른 다양한 어려움이 있다.

이를 보완하기 위하여 확률론적 접근법을 고려해 볼 수 있다. 이전에는 국내 해양환경조건 수집의 어려움에 따른 확률론적 접근의 한계가 있었으나 현재 국내 해역의 부이(Buoy)를 통해 매시간 당 해양환경정보를 획득할 수 있어 확률론적 접근이 가능하게 되었다.

3. 해석 결과 및 분석

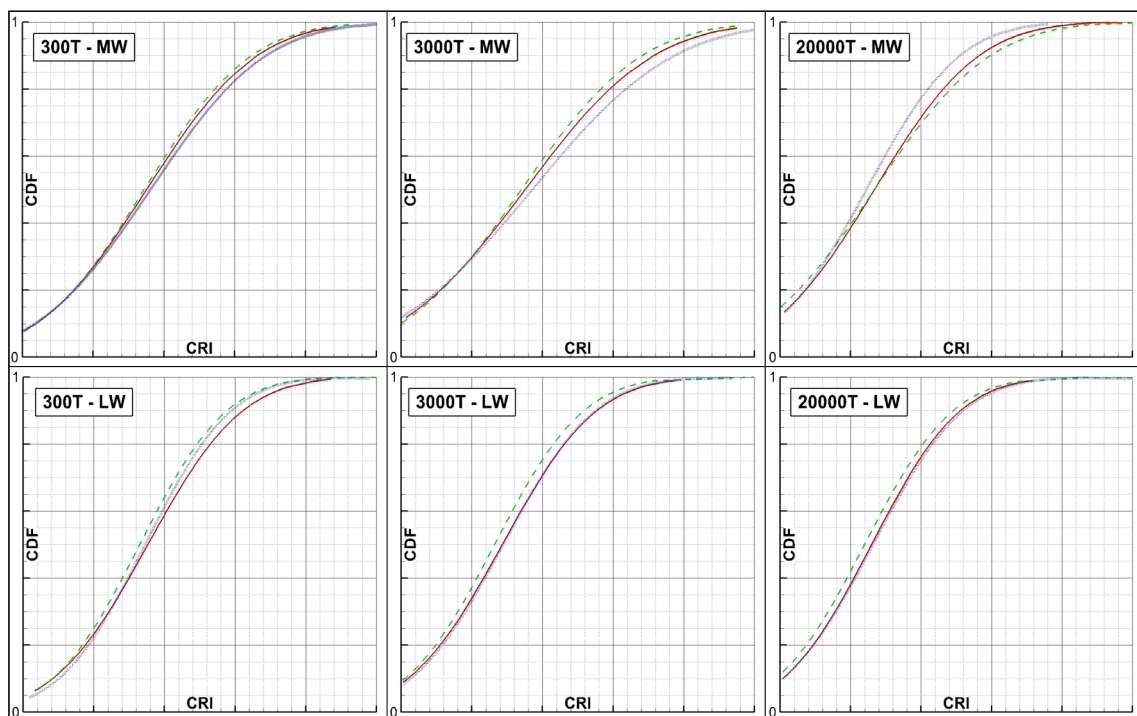
본 연구에서는 각 해양환경표본 표본별 대비복사강도 값의 상대적 비교를 통해 얻은 결과를 기반으로 분석하였다.

3.1 정성적 분석

해양환경표본의 정성적 비교를 위하여 분포함수의 일종인 누적분포함수와 확률밀도함수를 사용하였다. 이는 전체 해양환경조건을 포함한 모집단에 대한 신호해석이 불가함에 따라 3가지 해양환경표본의 경향성을 비교하여 표본의 적합성을 판단할 수 있고, 해양환경 표본의 선정 기준을 판별할 수 있다.

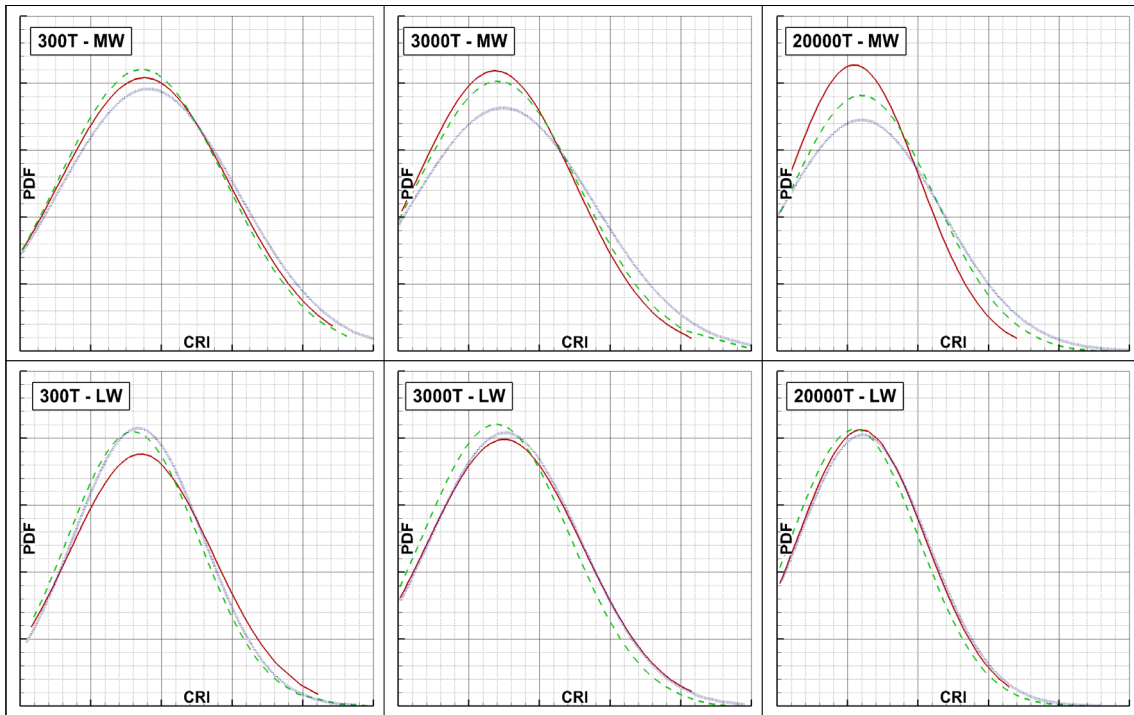
먼저 누적분포함수에 대해 살펴보고자 한다. 누적분포함수란 확률변수 x 에 대하여 변수 x 가 특정 값보다 같거나 작을 확률을 의미하며 식 (1)과 같다.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u)du \tag{1}$$



— Sample 1(100) --- Sample 2(200) Sample 3(400) *T : tonnage / MW : Midwave / LW : Longwave

Fig. 3 Tendency of CDF according to the CRI values of each naval ship



— Sample 1(100) --- Sample 2(200) Sample 3(400) *T : tonnage / MW : Midwave / LW : Longwave

Fig. 4 Tendency of PDF according to the CRI values of each naval ship

Fig. 3은 각 함정의 크기에 따른 대비복사강도 값을 누적분포함수의 그래프를 나타낸 것으로 중적외선 대역과 원적외선 대역을 나누어 도식화하였다. 중적외선 대역에서는 Sample 1과 Sample 2가, 원적외선 대역에서는 Sample 1과 Sample 3이 매우 유사한 경향을 나타내는 것을 확인하였다. 그러나 선종별 해양환경에 따른 대비복사강도 값의 분포도 및 누적 구간의 변화 양상은 Sample 1~3의 세 가지 경우 모두 유사함을 확인하였다. 이는 선정된 3가지 표본이 포함하는 해양조건의 개수(각 sample 별 100, 200, 400개)가 대비복사 강도 값에 미치는 영향은 크지 않다는 것을 의미한다. 즉, 누적분포함수 측면에서 신호해석 수행 시 3종의 해양환경표본 중 어느 것을 선택하더라도 결괏값의 양상 및 정성적 추이 관찰에 문제가 없을 것으로 판단된다.

다음으로 확률밀도 함수에 대해 비교해보고자 한다. 확률밀도 함수는 변수 x 가 일정한 미소 구간에 포함될 확률을 의미하며 식 (2) 와 같다.

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2)$$

확률밀도 함수를 통하여 전체 대비복사강도값이 도출되는 구간을 아주 미소한 폭으로 나누어 각 구간의 확률을 살펴봄으로써, 결괏값의 흠여짐의 정도를 확인하였다.

확률밀도함수 그래프는 Fig. 3과 마찬가지로 함정의 크기별 중적외선 및 원적외선 대역으로 나누어 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4를 보면 중적외선 대역에서는 Sample 1과 Sample 2가, 원적외선 대역에서는 Sample 1과 Sample 3이 유사함을 확

인하였다. 그러나 확률밀도함수의 경우 중적외선 대역에서는 중형과 대형 함정, 원적외선 대역에서는 소형 함정의 경우 해양환경표본별 대비복사강도 값의 차이가 누적분포함수에 비해 큰 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 보완하기 위하여 수치적 비교가 가능한 정량적 분석을 수행하였다.

3.2 정량적 분석

각 함정에 따른 해양환경표본별 대비복사강도 값의 평균과 표준편차의 변화율을 정량적으로 확인하였고, 이는 Table 1은 중적외선 대역을, Table 2는 원적외선 대역을 나타내었다. 먼저 중적외선 대역의 경우 평균값은 약 5~9%, 표준편차는 7~10%의 변화율을 나타내었고 원적외선 대역의 경우 평균값은 6~9%, 표준편차는 2~9%의 변화율을 보였다.

정성적 평가에서 가장 큰 차이를 보였던 중적외선 대역의 중형, 대형 함정의 변화율을 확인해보면 중형의 경우 평균값 7%, 표준편차 10%, 대형의 경우 평균값 9%, 표준편차 8% 차이를 보였으며 원적외선 대역의 소형 함정은 평균값 6%, 표준편차 9%의 차이를 확인할 수 있었다. 즉, 중적외선 대역과 원적외선 대역의 정량적 변화율은 크게 다르지 않다. 이를 통해 확률밀도 함수 그래프에서 보인 차이는 대비복사강도 값에 따른 확률밀도 함수값의 변화폭이 워낙 미소하여 나타난 것으로 판단된다.

또한, 10% 이내의 변화율은 전체적인 대비복사강도 값의 변화에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 모집단에서 추출한 3가지 해양환경표본 중 어떤 것을 적외선 신호해석에 적용하더라도 유사한 결괏값의 획득이 가능하다는 것을 의미한다.

Table 1 Rate of change of mean and standard deviation at Midwave range

MW (midwave)				
300T	Average		Standard deviation	
	mean	35.23	mean	24.56
	Max-Min	1.82	Max-Min	1.76
	rate of Ch.	0.05	rate of Ch.	0.07
3,000T	Average		Standard deviation	
	mean	241.49	mean	187.84
	Max-Min	18.85	Max-Min	19.49
	rate of Ch.	0.07	rate of Ch.	0.10
20,000T	Average		Standard deviation	
	mean	649.30	mean	522.29
	Max-Min	57.26	Max-Min	45.35
	rate of Ch.	0.09	rate of Ch.	0.08

Table 2 Rate of change of mean and standard deviation at Longwave range

LW (longwave)				
300T	Average		Standard deviation	
	mean	616.50	mean	356.87
	Max-Min	41.37	Max-Min	35.02
	rate of Ch.	0.06	rate of Ch.	0.09
3,000T	Average		Standard deviation	
	mean	3520.61	mean	2569.88
	Max-Min	306.77	Max-Min	140.47
	rate of Ch.	0.08	rate of Ch.	0.05
20,000T	Average		Standard deviation	
	mean	8891.89	mean	6949.43
	Max-Min	844.126	Max-Min	141.18
	rate of Ch.	0.09	rate of Ch.	0.02

*rate of Ch. : rate of change

3.3 해양환경표본별 분산

표준편차는 자료를 구성하는 값들의 변화 양상을 보여주는 척도로 신뢰성 확인에 핵심적인 요소이자 자료의 변동 폭에 민감한 수치이다. 즉, 표준편차가 작다는 것은 변수에 따른 민감도가 낮다는 의미이다. 본 연구에서 사용된 각 해양환경표본의 표준편차 범위(range)는 신호 값의 해석 과정에서 수행된 이상치 제거를 통하여 세 가지 케이스 모두 유사하다. 각 함정의 크기에 따른 표준편차 값은 원적외선 대역에서 Sample 3의 표준편차 값을 제외하고 모두 Sample 2의 표준편차가 가장 작은 것을 알 수 있다. 이는 Sample 2(200개)의 민감도가 낮아 다른 표본에 비해 강건 설계에 적합함을 의미한다.

Table 3 Standard deviation for each meteorological data

Items		Sample 1	Sample 2	Sample 3
300T	MW	24.45	23.73	25.49
	LW	378.83	347.97	343.81
3,000T	MW	185.14	173.75	204.62
	LW	2638.28	2497.81	2573.57
20,000T	MW	519.13	483.56	564.48
	LW	6910.66	6898.23	7039.41

*MW : Mid-wave , LW : Long-wave

3.4 해석 소요시간 비교

적외선 신호해석 절차에 따른 항목별 소요시간을 함정의 톤수에 따라 비교하여 Table 4와 Fig. 4에 나타내었으며, 이는 전처리(Pre-processing) 및 후처리(Post-processing)를 제외한 해석 프로그램(Ship IR/NTCS)을 이용한 계산 소요시간이다.

Table 4 IR analysis time for each sample * H : Hour

Processing		Sample 1	Sample 2	Sample 3
Background		7.75 H	16.50 H	46.3 H
300T	Target	5.62 H	11.88 H	21.42 H
	Scenari o	MW	2.00 H	3.95 H
LW		2.38 H	4.06 H	9.00 H
3,000 T	Target	6.27 H	13.37 H	24.20 H
	Scenari o	MW	2.40 H	5.00 H
LW		2.25 H	4.30 H	9.10 H
20,00 OT	Target	6.20 H	13.10 H	23.30 H
	Scenari o	MW	5.20 H	10.77 H
LW		4.13 H	9.15 H	17.90 H

신호해석은 해양환경조건을 설정(background processing)하고 해석하고자 하는 함정에 적용하여 얻고자 하는 데이터를 결정(target processing)한 후 적외선 대역에 따라 신호해석을 수행한다(scenario processing).

Fig. 5에서 S는 소형(300T), M은 중형(3,000T), L은 대형(20,000T) 함정을 의미한다. Fig. 4에서 각 과정의 해석소요시간은 함정의 규모보다는 함정에 적용되는 해양환경표본의 환경조건 개수에 비례함을 알 수 있다.

이는 신호해석 장비(personal computer)의 비약적 발달에 따라 해양환경표본의 해석 소요 시간은 수용 가능한 것처럼 보인다. 그러나 신호해석의 경우 다양한 변수의 변화에 따라 즉각적인 추가해석을 요구되는 경우가 많고, 실질적인 신호해석 시간 소요의 주원인은 전처리 및 후처리 과정이므로 수용 가능 여부를 확인할 수 없다. 특히, 후처리 과정은 신호해석을 수행하는 핵심이자 가장 많은 시간이 필요한 과정이므로 이 과정만 살펴보고자 한다.

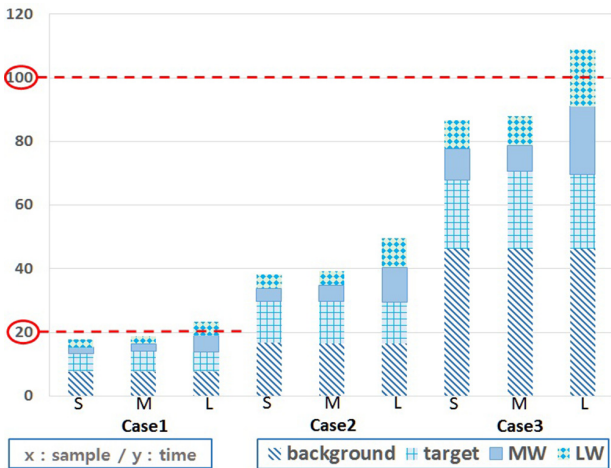


Fig. 5 IR analysis processing time for each sample

후처리 과정은 결괏값을 도식화한 후 이미지 분석을 통하여 이상치 제거 및 값의 적합성 판별이 주목적이다. 연구자의 숙련도에 따라 차이는 있으나 한 가지 해양환경의 경우 약 15~20분 정도 소요되며 Sample 1 대비 Sample 3의 경우 총 소요 시간은 약 3~4배 이상의 시간이 요구된다. 앞서 수행한 정성적 및 정량적 평가 결과에서 Sample 1~3의 대비복사강도 값의 변화율의 차이가 미소하였으므로, 효율적 측면에서 Sample 3은 함정의 적외선 신호해석 수행 시 적용 가능한 해양환경표본의 우선순위에 제외되는 것이 바람직하다.

4. 결론

본 논문에서는 함정 적외선 신호해석의 대비복사강도에 따른 해양환경표본의 최적화 기준의 선정 및 확률론적 방법의 가능성에 관한 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 2017년 해양기상자료를 통해 추출한 3종의 해양환경데이터 표본을 기준으로 적외선 신호해석을 수행하여 대비복사강도 값을 도출하였다.
- 2) 정성적 분석을 통해 해양환경데이터 표본 간 약간의 차이는 있으나 이는 그래프상에 나타난 거시적 한계로 판단되었다.
- 3) 정량적 분석을 통해 각 해양환경데이터의 변화율을 10% 내외로 확인하였으며, 이는 함정의 전체적 대비복사강도 값에 큰 영향을 미치지 않는 수준으로 확인되었다.
- 4) 각 해양환경표본의 표준편차 비교를 통해 Sample 2의 표준편차가 가장 작은 것을 확인하였다.
- 5) 해석소요시간은 함정의 크기가 아닌 해양환경표본에 포함된 환경조건의 개수에 비례하며, Sample 1과 비교하여 Sample 3의 경우 약 6배 이상의 계산시간이 요구되었다.
- 6) 신호해석 결과의 후처리 과정은 Sample 1 대비 Sample 3의 경우 약 3배 이상의 시간이 요구되므로 해양환경표본의 최적화 기준에서 제외하였다.
- 7) 본 결과를 통해 Sample 1~3은 정성적 및 정량적으로 모두 유사한 경향을 가지며, 표준편차 및 효율성 분석에 따

라 Sample 2를 해양환경 최적화 기준으로 선정하였다. 따라서 함정의 적외선 신호 관리에 확률론적 방법을 적용함으로써 강건설계가 가능하다고 판단된다.

본 연구 결과는 한반도 해역을 운항하는 함정에 대하여 적외선 신호해석을 위한 기본 해양환경으로 적용할 예정이며, 이는 신호해석을 수행하여 얻어진 적외선신호 값에 대한 신뢰도 향상을 기대할 수 있을 것이다.

References

Choi, J.H., Lee, J.S., Kim, J.H., Lee, S.H. & Kim, T.K., 2008. Infrared signature analysis of a ship of different atmosphere temperature and wind velocity. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 11(5), pp.84-91.

Cho, Y.J., 2009. A study on measuring procedure and analysis technique of ship infrared signature at sea. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(3), pp.53-58.

Cho, Y.J., 2018. A study on the sampling of ocean meteorological data to analyze signature of naval ships. *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 23(2), pp.19-28.

Cho, Y.J. & Jung, H.S., 2013. Study on effectiveness of ocean meteorological variables through sensitivity analysis of ship infrared signature. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(3), pp.69-42.

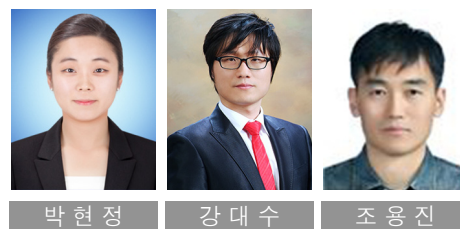
Han, S.I. & Cho, Y.J., 2014. Feasibility study on sampling ocean meteorological data using stratified method. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(3), pp.254-259.

Kim, J.H. & Kim, Y.S., 2011. 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*, 48(4), pp.336-341.

Kim, Y.S., 2010. A study on effect of the solar elevation on the ship IR signature. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(3), pp.38-45.

Kim, Y.S., 2012. A study on the infrared signature of a naval ship under the marine climate. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(3), pp.264-272.

Vaitekunas., 2005. Validation of ship IR (v3.5): methodology and results. *1st International IR Target and Background Modeling Workshop, Ettlingen, Germany, 27-30 June 2005.*



박현정

강대수

조용진