



Research Article

인공위성 해수면온도 자료를 이용한 동해 연안 냉수대 탐지 알고리즘 개발

최원준 ^{1), 2)} · 양찬수 ^{3), 4), 5)*}

Detection of Cold Water Mass along the East Coast of Korea Using Satellite Sea Surface Temperature Products

Won-Jun Choi ^{1), 2)} · Chan-Su Yang ^{3), 4), 5)*}

Abstract: This study proposes the detection algorithm for the cold water mass (CWM) along the eastern coast of the Korean Peninsula using sea surface temperature (SST) data provided by the Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST). Considering the occurrence and distribution of the CWM, the eastern coast of the Korean Peninsula is classified into 3 regions (“Goseong-Uljin”, “Samcheok-Guryongpo”, “Pohang-Gijang”), and the K-means clustering is first applied to SST field of each region. Three groups, K-means clusters are used to determine CWM through applying a double threshold filter predetermined using the standard deviation and the difference of average SST for the 3 groups. The estimated sea area is judged by the CWM if the standard deviation in the sea area is 0.6°C or higher and the average water temperature difference is 2°C or higher. As a result of the CWM detection in 2022, the number of CWM occurrences in “Pohang-Gijang” was the most frequent on 77 days and performance indicators of the confusion matrix were calculated for quantitative evaluation. The accuracy of the three regions was 0.83 or higher, and the F1 score recorded a maximum of 0.95 in “Pohang-Gijang”. The detection algorithm proposed in this study has been applied to the KIOST SST system providing a CWM map by email.

Keywords: Sea surface temperature, East coast of Korea, Cold water mass, Algorithm, K-means clustering

Received November 30, 2023; Revised December 6, 2023; Accepted December 13, 2023; Published online December 31, 2023

¹⁾ 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 석사과정생(Master Student, Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Republic of Korea)

²⁾ 한국해양과학기술원 해양영토방위연구부 연구원(Researcher, Marine Domain and Security Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, Republic of Korea)

³⁾ 한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 겸임교수(Adjunct Professor, Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Republic of Korea)

⁴⁾ 과학기술연합대학원대학교 해양융합공학학과 겸임교수(Adjunct Professor, Department of Applied Ocean Sciences, University of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea)

⁵⁾ 한국해양과학기술원 해양영토방위연구부 책임연구원(Principal Researcher, Marine Domain and Security Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, Republic of Korea)

* Corresponding author: Chan-Su Yang (yangcs@kiost.ac.kr)

Copyright © 2023 by The Korean Society of Remote Sensing. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요약: 한국해양과학기술원에서 생산하여 공개하고 있는 다중 위성 기반의 해수면온도(Sea surface temperature) 자료를 이용하여 동해안 냉수대(Cold water mass) 해역을 탐지하는 알고리즘을 개발하였다. 본 연구에서는 냉수대의 분포를 고려하여 동해안을 3개 해역(“고성-울진”, “삼척-구룡포”, “포항-기장”)으로 구분하였다. 각 해역에 K-means clustering 기법을 적용하여 3개 그룹으로 나누고 3개의 그룹은 평균 수온이 높은 순서대로 Group 1, Group 2, Group 3로 칭한다. 수온이 가장 낮은 집합인 Group 3는 냉수대 특성을 나타내는 2가지(각 해역 표준편차와 Group 1과 Group 3의 평균 수온 차이)의 임계치가 적용되고 탐지 해역내 표준편차가 0.6°C 이상이고 그룹별 평균 수온 차이가 2°C 이상일 경우 Group 3을 냉수대로 판단한다. 2022년도 탐지 결과, “포항-기장”은 77일로 가장 많이 탐지되었으며 정량적인 평가를 위해 혼동행렬 성능지표를 계산하였다. 동해안 3곳 해역의 평균 정확도(Accuracy)는 0.83 이상으로 나타났고 F1 score는 “포항-기장”에서 최대 0.95이었다. 본 연구에서 제안한 탐지 알고리즘을 적용하여 보다 구체적인 냉수대 해역의 공간 분포를 매일 이메일 서비스로 제공하고 있다.

주요어: 해수면온도, 동해안, 냉수대, 알고리즘, K-means clustering 기법

1. 서론

해수면온도(Sea surface temperature, SST)는 전 지구적인 기후 시스템을 이해하는 중요한 요소로서 수온의 분포와 특성은 해양생태계에 영향을 미친다. 매년 수온의 급격한 변화로 인해 양식 어류의 피해가 발생하고 있으며, 남해안의 경우 양식어류 피해는 이상 수온이 주요 요인임이 밝혀졌다(Lee et al., 2016). 한반도 동해 연안은 바람에 의해 표층 해수가 외해로 이동하게 되면서 저층의 해수가 올라오는 연안 용승 현상이 하계절에 빈번하게 발생하며 이러한 연안 용승으로 인해 SST가 주변 해역에 비해 5°C 이상 수온이 낮아지는 냉수대가 나타난다(Lee and Song, 2022).

동해안 냉수대는 남서풍 계열의 바람 세기에 영향을 받으며, 남풍계열의 바람이 3 m/s 이상의 풍속으로 7일간 지속되거나 4 m/s 이상으로 3일간 지속될 때 발생하는 특성을 보인다(Seung, 1974; Lee, 1983; Yoon and Yang, 2016). Lee and Na (1985)는 동해안을 따라 북쪽으로 이동하는 해류인 동한난류에 의해 등온선의 경압성 기울어짐(Baroclinic tilting)이 발생하고 연안 저층의 냉수 편중현상과 연안의 해저지형으로 인한 용승의 증가 효과를 밝혀냈다. 냉수대 발생 사례를 통해 다수의 연구가 진행되었고 Choi (2015)와 Lee (2011)는 연안 용승과 저기압 통과에 의해서 발생한 냉수대의 특성 분석과 수온의 변화가 바람에 민감하게 반응한다는 결과를 보여주었다. Kim et al. (2019)은 냉수대의 장기적인 변동성을 분석하여 월별 냉수대 발생 횟수가 동아시아 몬순(Monsoon) 지수와 관련이 있음을 연구하였다.

국립수산과학원은 냉수대로 인한 피해를 최소화하기 위해 관련 예보 및 속보를 제공하고 있지만 관측 자료 기반 수온 분포 분석은 공간적인 제한이 있다. 이에 따라 빈 공간 없는 고품질 수온 자료인 위성 SST를 이용한 냉수대 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다(Suh and Hwang, 2005). Yoon and Yang (2016)은 냉수대의 시공간적 이동에 따른 변화 분석을 통해 염록소 농도의 증감을 확인하였고, Kim et al. (2021)은 Group of High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST) 자료를 이용하여 K-means 군집화 기법을 활용한 냉수대 발생 해역을 분류하였다.

선행 연구들은 SST 분석을 통한 냉수대의 발생 원인과 특성을 연구하였지만, 본 연구는 준실시간으로 냉수대를 탐지할 수 있도록 위성 SST를 이용한 2020~2021년의 냉수대 수온 분포를 분석하였다. 군집화 기법을 이용하여 냉수대 영역을 1차적으로 추정하고 하계 SST의 특성을 반영한 임계치를 설정하여 냉수대 탐지 알고리즘을 제안하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 냉수대 발생 현황 및 탐지 결과 산출 영역

국립수산과학원은 수산자원의 관리를 위해 실시간 해양환경 어장정보시스템을 운영하고 있으며, 홈페이지를 통해 냉수대 속보를 제공하고 있다(<https://www.nifis.go.kr/board/actionBoard0023List.do>). 냉수대 속보는

Table 1. The boundary of three regions for the detection of the cold water mass

Region	Top left	Bottom right
Goseong-Uljin	38.50N, 128.30E	36.70N, 130.00E
Samcheok~Guryongpo	37.80N, 128.80E	35.70N, 130.30E
Pohang~Gijang	36.30N, 129.00E	34.87N, 130.19E

Table 2. Number of issues for the cold water mass according to three regions from 2020 to 2022

Region	2020			2021			2022		
	JUN	JUL	AUG	JUN	JUL	AUG	JUN	JUL	AUG
Goseong-Uljin	16	7	5	0	17	8	16	11	0
Samcheok~Guryongpo	16	7	18	0	17	8	20	18	16
Pohang~Gijang	0	0	20	0	15	15	20	18	20
Total	16	7	25	0	23	15	20	18	20

Source: National Institute of Fisheries Science.

주변해역과의 수온 차이를 기준으로 주의보와 경보로 구분되어 발령된다. 주의보는 수온 값이 주변해역 대비 3~5°C 이상 하강할 경우, 경보는 10°C 이상의 하강 현상을 보이는 해역을 대상으로 한다. 본 연구에서는 2020년부터 2022년도 냉수대 속보를 수집하였으며, 정량적인 평가를 위해 속보에 기재된 지역명의 위치와 냉수대의 발생 분포를 고려하여 동해안을 총 3개의 해역(“고성-울진”, “삼척-구룡포”, “포항-기장”)으로 구분하였다(Fig. 1). 각 해역별 좌표값은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 한반도 동해안의 냉수대가 주로 발생

하는 6월에서 8월 사이의 냉수대 속보를 분석하였다(Table 2). 냉수대는 3년동안 144일 발생했으며, 연도별로 비교했을 때 2022년에 58일로 가장 많이 발생했고, 월별로 비교했을 때 2020년 8월에 25일로 가장 빈번하게 발생하였다. 해역별로 비교했을 때 “고성-울진”, “삼척-구룡포”, “포항-기장”은 각각 80일, 120일, 108일 발생하였다.

2.2. 인공위성 SST 자료

Park et al. (2015)은 해양관련 국가기관, 민간이 각종 해양 활동에 필요로 하는 해양환경의 정보를 생산 제공하는 해양예보시스템(Korea Operational Oceanographic System, KOOS)의 일환으로 다중 위성 SST를 합성한다. 다중 위성 SST는 준실시간으로 합성하는 Real-time SST (RT SST)와 최적 내삽 알고리즘을 이용하여 합성하는 Delayed Mode SST (DM SST)로 구별된다. 다중 위성 SST는 2종의 마이크로파(microwave) 센서(AMSR-2, GMI)와 5종의 적외선(infrared) 센서(AVHRR, MODIS, VIIRS, AMI, SLSTR) 수온 자료를 합성하며, 태양에 의한 간섭을 최소화 하기 위해서 전날 22:00~05:00까지 측정된 자료만 사용한다. 합성된 SST 자료는 오류값을 제거하기 위해 필터링 작업을 거친 후 공간해상도 약 0.011도를 가지는 위성 SST로 산출된다(Yang et al., 2015). 본 연구에서는 실시간으로 발생하는 냉수대를 탐지하고 탐지된 결과를 공유할 수 있도록 RT SST를 사용한다. Fig. 1은 2020년 8월 17일 한반도 주변의 합성된 위성 SST를

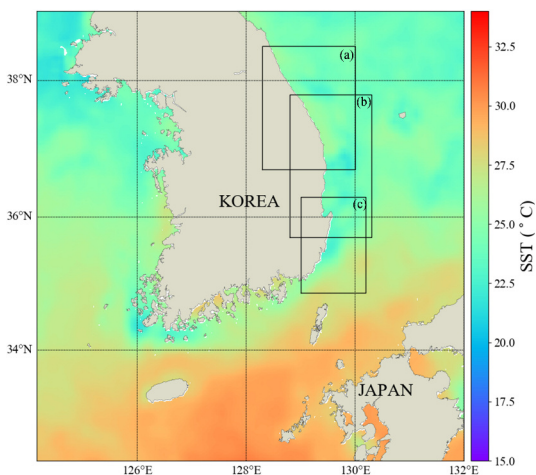


Fig. 1. Sea surface temperature (SST) on August 17, 2020, and the cold water mass (CWM) in the East Sea. Boxes (a)–(c) represent regions of interest for detecting CWM.

나타낸다. 해당일에 국립수산물과학원은 “삼척-울진”과 “포항-기장”에 냉수대 속보를 발령했고, 해당 해역은 22°C 이하의 수온을 나타내며 주변해역 대비 약 5°C 이상 수온이 낮게 분포하였다.

2.3. 냉수대 탐지 방법

Fig. 2는 냉수대 해역을 탐지하는 방법을 나타내는 흐름도이다. 다중 위성 합성을 통해 생성된 RT SST에 포함되어 있는 결측치와 육지부분을 제거한다. 동해안의 각 해역은 K-means clustering 기법을 이용하여 3개의 집단으로 분류되고 평균 수온이 높은 순서대로 Group 1, Group 2, Group 3로 설정하였다. 가장 수온이 낮은 집단인 Group 3는 냉수대 추정 영역으로 칭한다. 본 연구에서는 냉수대 추정 영역이 냉수대임을 판별하는 방법으로 임계치 기법을 사용하였으며, 임계치는 2020년과 2021년의 수온 분포를 분석한 결과를 바탕으로 설정되었다. 임계치 기법은 2단계로 구성되어 있으며, 1단계는 해역의 수온 표준편차 값이고 2단계는 냉수대 추정 영역과 수온이 가장 높은 집단간의 평균 수온 차이이다. 각각의 임계치는 0.6°C와 2°C로 설정하였고 해당 알고리즘을 이용하여 2022년 냉수대 탐지를 진행하였다.

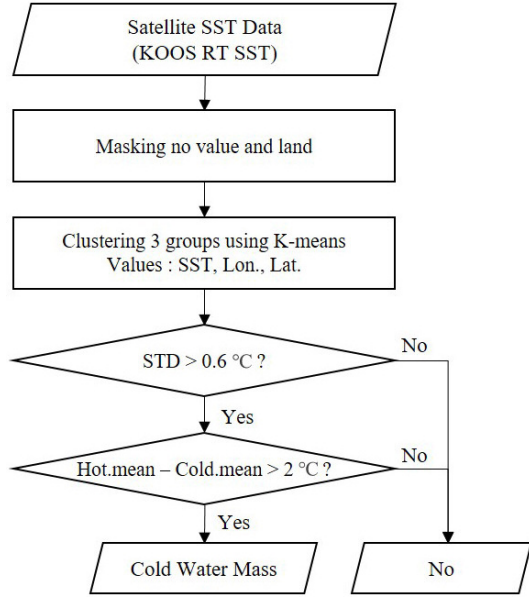


Fig. 2. Flowchart of the cold water mass detection. “Hot. mean” and “Cold.mean” represent the average sea surface temperature (SST) for the group with the highest and lowest mean of SST, respectively.

2.3.1. 냉수대 추정 영역 탐지

K-means clustering은 데이터 세트 내에서 유사한 개체의 그룹 집합을 K개로 분류하는 것으로서 일반적으로

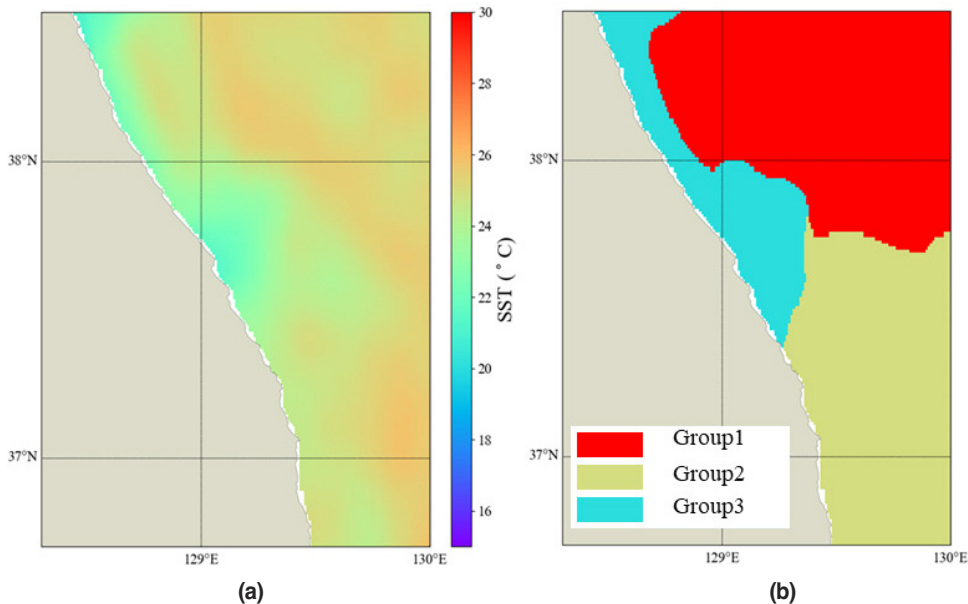


Fig. 3. Sea surface temperature (SST) (a) on July 14, 2021, and 3 groups obtained by K-means clustering for (b) image in “Goseong-Uljin”.

비지도 학습 작업으로 간주된다(MacQueen, 1967; Kriegel et al., 2011). Kim et al. (2021)은 한국 남동해역에 발생하는 냉수대의 수온 분포를 구분하기 위해 K-means clustering 기법을 이용하였고 Elbow 기법을 활용하여 최적의 K값을 3으로 설정하였다. 본 연구에서는 수온뿐만 아니라 위, 경도 정보를 추가로 사용하여 각 해역별로 K-means clustering을 진행하였고 3개의 그룹으로 분류하였다. 3개의 그룹은 각 군집별 평균수온으로 구분되며, 평균 수온이 높은 순서대로 Group 1, Group 2, Group 3이다. 가장 수온이 낮은 그룹인 Group 3는 냉수대 추정 영역으로 칭한다. Fig. 3은 2021년 7월 14일 “고성-울진”에 냉수대가 발생했을 때의 수온 분포와 K-means clustering 결과를 보여준다. 외해는 최대 26°C의 수온 분포를 띠는 반면에, 연안은 20°C 정도의 수온 분포를 나타낸다. 해당 일자의 자료를 이용하여 K-means clustering을 실행한 결과, 20°C 정도의 수온 분포를 가지는 수괴는 Group 3로 분류되었다(Fig. 3).

2.3.2. 냉수대 여부 판단

각 해역별로 산출되는 Group 3와 냉수대의 관계를 나

타내는 과정을 거친다. 냉수대 탐지를 위해서 2020년과 2021년의 냉수대 속보 발령 정보를 이용하여 SST의 특성을 분석하였다. 2020년 8월 23일 “포항-기장”에 발생한 냉수대는 24°C 이하의 수온 분포를 나타내는 반면, 주변 해역은 30°C에 이르는 수온을 나타내며 5°C 이상의 수온 차이를 보여준다. 또한 냉수대로 인한 극심한 수온 차이는 각 픽셀별 SST 값과 해역의 평균 SST 값의 차이로 산출되는 편차의 양극화로 이어지고 냉수대 영역의 편차는 평균보다 3°C 이상 낮다(Fig. 4). 이러한 수온 분포 특성을 이용하여 임계치 기법을 사용한 냉수대 여부 판단을 하였고 임계치는 냉수대의 발생여부에 따른 표준편차와 Group 1과 Group 3의 차이를 분석하여 결정하였다. 표준편차와 집단간 수온 차이의 임계치는 냉수대가 발생했을 경우와 발생하지 않은 일반 해역의 수온 특성을 고려하여 각각 0.6°C 와 2°C로 설정하였다(Fig. 5). 표준편차 검사는 냉수대 해역의 표준편차 값이 더 반영될 수 있도록 설정하였고 집단간 수온 차이 검사는 일반적인 해역에서 나타나지 않는 수온 차이값으로 설정하였다.

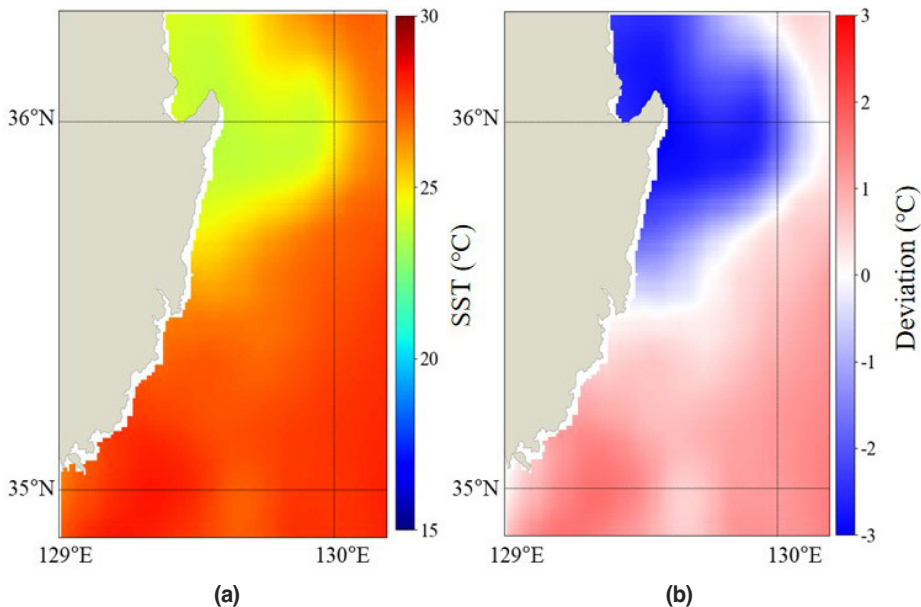


Fig. 4. Sea surface temperature (SST) (a) on August 23, 2020, and deviation image (b) calculated from the spatial average of (a) in “Pohang-Gijang” as shown in Fig. 1.

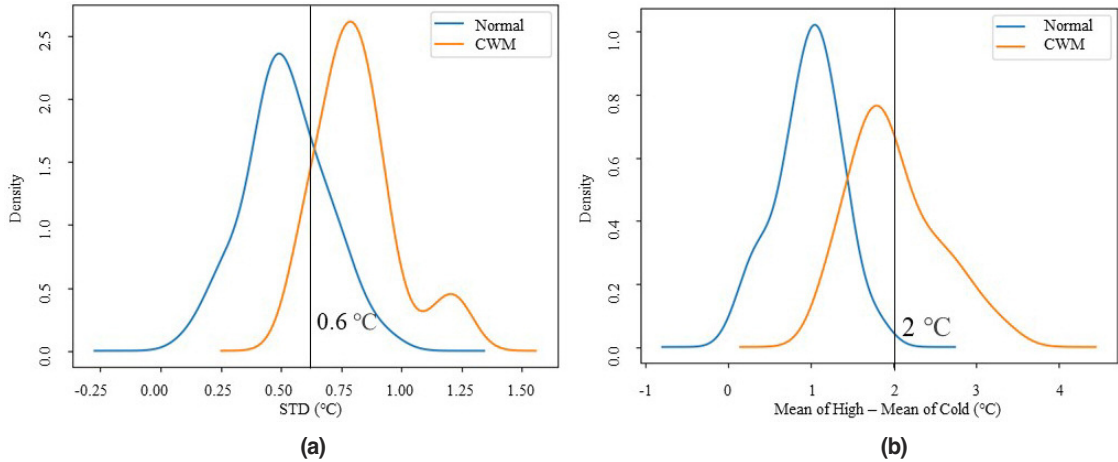


Fig. 5. Probability density graph for each step for determining whether the cold water mass (CWM) is present. (a) depicts the standard deviation (STD) of sea surface temperature (SST), and (b) indicates the mean difference between the Hot and Cold groups.

2.4. 알고리즘 평가

본 연구에서는 탐지 알고리즘 평가를 위해 2022년 냉수대 속보를 기반으로 육안 판독을 진행했으며 혼돈행렬(Confusion matrix)을 이용하여 정량적 평가를 하였다. 혼돈행렬은 정탐지(True Positive, TP), 정무탐지(True Negative, TN), 오탐지(False Positive, FP), 미탐지(False Negative, FN)로 구성되며, 4가지의 지표를 이용하여 성능지표를 계산한다. 성능지표는 정확도(Accuracy), 정밀도(Precision), 재현율(Recall), F1 score, False alarm rate (FAR)로 구성된다. 정확도는 전체 데이터에서 결과값과 실제값이 동일한 비율로 식(1)과 같이 정의된다. 정밀도는 알고리즘의 결과값이 얼마나 정확한지를 나타내는 지표로서 알고리즘의 결과가 True인 것 중에서 실제 True 값의 비율로 식(2)와 같이 정의된다. 재현율은 실제 True인 것 중에서 알고리즘의 결과값이 True인 비율로 식(3)과 같이 정의되며 미탐지에 대한 정보를 제공한다. F1 score는 정밀도와 재현율의 조화평균을 의미하며 식(4)와 같이 계산된다. FAR은 실제 False인 것 중 결과값이 True인 비율로 식(5)와 같이 정의된다.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$F1\ score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (4)$$

$$FAR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (5)$$

3. 연구결과 및 토의

3.1. 동해안 냉수대 탐지 결과

2020~2021년도 6~8월 SST를 이용하여 한반도 동해안 냉수대의 특성을 분석하였고 분석한 정보를 바탕으로 2022년도에 발생한 냉수대를 탐지하였다. Fig. 6은 2022년 6월 2일과 7월 2일에 발생한 냉수대의 가시화와 탐지 결과이다. 6월 2일에 발생한 냉수대는 울진에서 부산 기장 해역의 연안을 따라 좁은 형태의 띠를 형성하였고 냉수대 영역내 외해에서 연안 방향으로 수온이 하강하는 것을 볼 수 있다. 이와 달리 7월 2일에 발생한 냉수대는 수온이 가장 낮은 구룡포 해역을 시작으로 외해로 냉수대가 퍼지는 형태를 하고 있으며 넓은 해역에 분포하였다.

3.2. 동해안 냉수대 탐지 알고리즘 평가

Fig. 7은 각 해역별 2022년도 냉수대 속보 발령일, 육안 판독을 통한 냉수대 발생일, 위성을 이용한 냉수대 탐지일의 횟수를 각각 나타낸다. 속보 발령일은 “포항-

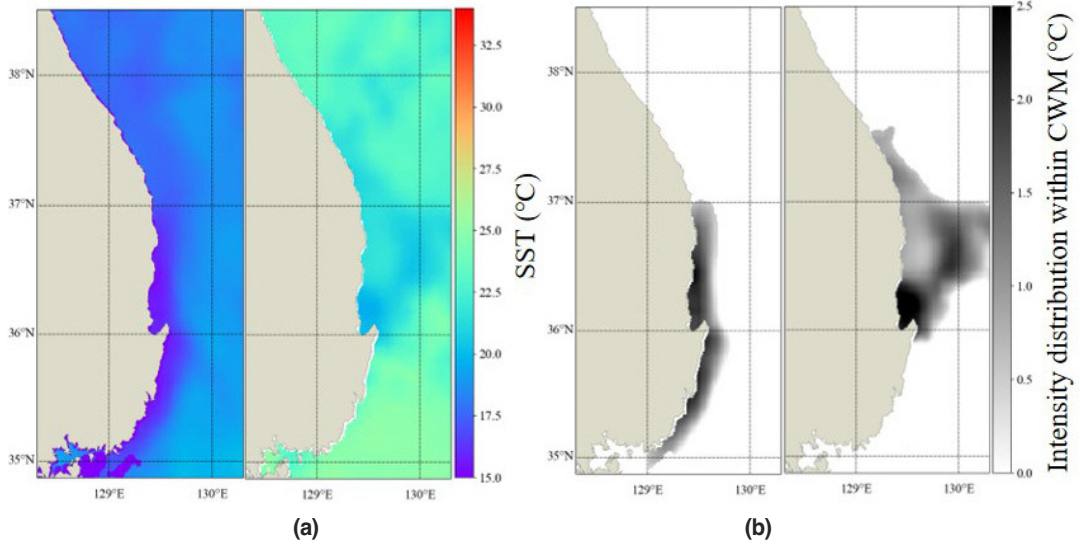


Fig. 6. Detection of the cold water mass (CWM) using the algorithm presented in this study. (a) and (b) represent sea surface temperature (SST) and the results of the CWM detection on June 2 and July 2, 2022, respectively. The color map of (b) means the intensity of the CWM within the detection result.

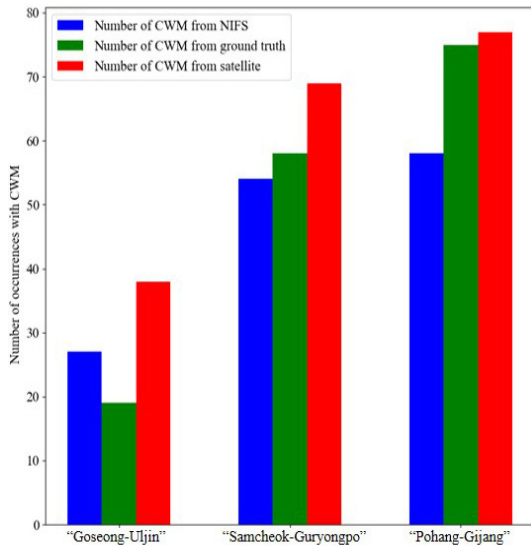


Fig. 7. Number of the cold water mass (CWM) issued by the National Institute of Fisheries Science (NIFS) (blue), ground truth (green), and detection using satellite (red) in 2022.

기장”, “삼척-구룡포”, “고성-울진” 해역 순으로 각각 58 일, 54일, 27일 발령되었다. 탐지 알고리즘 평가를 위해 냉수대 속보를 기반으로 위성 SST의 육안 판독을 진행하였고 육안 판독 결과를 최종적인 냉수대 발생 참값으로 설정하였다. “고성-울진”은 위성을 활용한 탐지 결과 38일로 육안 판독 발생일보다 2배 이상 탐지되었다. “삼척-구룡포”와 “포항-기장”은 냉수대 탐지 결과 각각 69일, 77일 탐지되었고 육안 판독 발생일보다 11일, 2일 더 많이 탐지되었다.

본 연구에서는 알고리즘의 정량적인 평가를 위해 혼동행렬의 성능지표를 이용하여 알고리즘을 평가하였다(Table 3). 동해안의 모든 해역은 정확도가 0.833 이상 이었고 특히 “포항-기장”은 0.914의 정확도를 나타냈다. “고성-울진”은 F1 score가 0.714, FAR이 0.167로 나타났으며, “삼척-구룡포”는 F1 score가 0.904, FAR이 0.263으로 나타났고 “포항-기장”은 F1 score가 0.925, FAR이 0.333으로 나타났다. F1 score의 경우 “고성-울진”의 정밀도

Table 3. Evaluation of detecting algorithm for the cold water mass (CWM) from confusion matrix by three regions

Region	Accuracy	Precision	Recall	F1 score	FAR
Goseong-Uljin	0.833	0.625	0.833	0.714	0.167
Samcheok-Guryongpo	0.857	0.912	0.897	0.904	0.263
Pohang-Gijang	0.914	0.972	0.933	0.952	0.333

가 0.625로 다른 해역에 비해 현저히 떨어지는 것을 볼 수 있으며, 이는 2022년 “고성-울진”에 발생한 냉수대 일자가 적고 오탐지한 결과값이 상대적으로 높아 정밀도가 떨어진 것으로 사료된다. 또한 2020년과 2021년 냉수대 발생 횟수가 “포항-기장”이 가장 많은 것을 감안했을 때, 냉수대 여부 판단 단계에 사용되는 임계값이 “포항-기장”의 SST 특성에 더 반영되어 “포항-기장”의 FAR이 0.333으로 높게 나타난 것으로 보인다.

4. 결론

본 논문은 한국해양과학기술원에서 제공하는 준실시간 RT SST 자료를 이용하여 하계철 동해안에 발생하는 냉수대 탐지 방법을 제안하였다. 기상 조건에 따라 변화하는 냉수대의 분포를 고려하여 동해안을 “고성-울진”, “삼척-구룡포”, “포항-기장”으로 분류하여 탐지 알고리즘을 적용하였다. K-means 군집화를 통해 평균 수온이 높은 순으로 Group 1, Group 2, Group 3를 설정하였으며, 가장 평균 수온이 낮은 Group 3를 냉수대 추정영역으로 칭하였다. 2020~2021년도의 하계철 SST의 특성을 분석하여 표준편차와 그룹별 평균 수온 차이의 임계치를 설정하였다. 2022년 6월 2일 울진-기장에 연안을 따라 긴 띠의 형태로 발생한 냉수대와 7월 2일 구룡포에서 외해로 퍼지는 형태의 냉수대를 탐지하였고 탐지 결과는 SST 분포와 유사함을 확인하였다. 본 연구에서 2022년 냉수대 탐지 횟수는 “고성-울진”이 38일, “삼척-구룡포”가 69일, “포항-기장”이 77일이며, 정량적인 알고리즘 평가를 위해 국립수산물과학원에서 발령하는 속보를 기반으로 냉수대 육안 판독 결과를 참값으로 하는 혼동행렬 성능지표를 계산하였다. 동해안 모든 해역의 정확도가 0.833 이상으로 나타났고 F1 score가 최대 0.952로 비교적 알고리즘 성능이 뛰어났다. “고성-울진”의 F1 score가 0.714로 다른 해역에 비해 현저히 떨어져, 정확한 냉수대 탐지를 위해서는 각 해역별 풍부한 데이터셋 확보와 SST 특성 분석을 통해 임계치를 상이하게 할 필요성이 있다. 본 연구는 준실시간으로 생산되는 위성 SST를 이용하여 신속한 냉수대 탐지 활용성을 제시하였으며, 향후 위성기반 연안해역 냉수대 모니터링 체계 구축에 기여할 것이다.

사사

이 논문은 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원(20180456: 다중위성 기반 해양위성 실용화 기술 개발)과 산업통장자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성 (R&D)(과제번호: PN92110)” 연구비 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

Choi, Y. K., 2015. Upwelling in the southwest region of the East Sea in July, 2013. *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, 51(2), 212–220. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.2.212>

Kim, B. K., Yoon, H. J., and Lee, J. H., 2021. A study on the distribution of cold water occurrence using K-means clustering. *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, 16(2), 371–378. <http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2021.16.2.371>

Kim, J. Y., Han, I. S., Ahn, J. S., and Park, M. H., 2019. Long-term trend analysis of cold waters along the eastern coast of South Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 25(5), 581–588. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2019.25.5.581>

Kriegel, H. P., Kröger, P., Sander, J., and Zimek, A., 2011. Density-based clustering. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 1(3), 231–240. <http://dx.doi.org/10.1002/widm.30>

Lee, J. C., 1983. Variations of sea level and sea surface temperature associated with wind-induced upwelling

- in the southeast coast of Korea in Summer. *The Korean Society of Oceanography*, 18, 149–160
- Lee, J. C., 2011. Upwelling-response of the cold water off Haeundae in summer. *The Sea: Journal of the Korea Society of Oceanography*, 16(4), 206–211. <https://doi.org/10.7850/jkso.2011.16.4.206>
- Lee, J. C., and Na, J. Y., 1985. Structure of upwelling off the southeast coast of Korea. *The Korean Society of Oceanography*, 20(3), 6–19.
- Lee, J. S., and Song, J. Y., 2022. Development of forecast system for the upwelled coastal cold waters in the eastern coast of Korea. *Journal of Coastal Disaster Prevention*, 9(3), 207–215. <https://doi.org/10.20481/kscdp.2022.9.3.207>
- Lee, Y. H., Shim, J., Choi, Y. H., Kim, S. W., and Shim, J. M., 2016. A study on cold water damage to marine culturing farms at Guryongpo in the southwestern part of the East Sea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 22(6), 731–737. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2016.22.6.731>
- MacQueen, J., 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Cambridge, UK, June 21–July 18, pp. 281–291. <https://www.cs.cmu.edu/~bhiksha/courses/mlsp.fall2010/class14/macqueen.pdf>
- Park, K. S., Heo, K. Y., Jun, K., Kwon, J. I., Kim, J., Choi, J. Y. et al., 2015. Development of the operational oceanographic system of Korea. *Ocean Science Journal*, 50, 353–369. <https://doi.org/10.1007/s12601-015-0033-1>
- Seung, Y. H., 1974. A dynamic consideration on the temperature distribution in the east coast of Korea in August. *Journal of Oceanological Society of Korea*, 9, 52–58.
- Suh, Y. S., and Hwang, J. D., 2005. Study on the cold mass occurrence in the eastern coast of the Korean Peninsula in Summer. *Journal of Environmental Science International*, 14(10), 945–953. <https://doi.org/10.5322/JES.2005.14.10.945>
- Yang, C. S., Kim, S. H., Ouchi, K., and Back, J. H., 2015. Generation of high resolution sea surface temperature using multi-satellite data for operational oceanography. *ActaOceanologica Sinica*, 34, 74–88. <https://doi.org/10.1007/s13131-015-0694-8>
- Yoon, S., and Yang, H., 2016. Study on the temporal and spatial variation in cold water zone in the East Sea using satellite data. *Korean Journal of Remote Sensing*, 32(6), 703–719. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2016.32.6.14>