



Received: 2025/08/18
Revised: 2025/08/30
Accepted: 2025/09/21
Published: 2025/09/30

***Corresponding Author:**

Sang-Shin Byun

Dept. of Oceanography, Republic of Korea Naval Academy
1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyongsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5253
Fax: +82-55-907-5231
E-mail: ssbyun@navy.ac.kr

북극 해빙의 변화와 북극항로 이용 전망

Changes in Arctic Sea Ice and the Outlook for Arctic Shipping Routes

변상신*

해군 중령/해군사관학교 해양학과 교수

Sang-Shin Byun*

CDR, ROK Navy/Professor, Dept. of Oceanography, Republic of Korea Naval Academy

Abstract

본 연구는 1979년부터 현재까지 위성 관측 데이터를 활용하여 북극 해빙의 장기적인 변화를 분석하였다. 분석 결과, 해빙은 지속적으로 감소하고 있으며 특히 북서항로보다 북동항로에서 감소 폭이 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이러한 해빙 감소는 아시아-유럽 간 해상 운송 거리를 단축할 수 있는 북극항로의 개방 가능성을 높여 한국 정부 및 해군의 선제적 대비를 요구한다. 특히, 북극해 환경을 이해하고 해군 작전에 활용할 해양학 전문인력 양성은 국가 안보 및 국제적 영향력 강화에 매우 중요하다. 본 연구는 북극 해빙 변화를 분석하고, 다가오는 북극항로 시대에 대한민국 해군이 선도적인 역할을 수행하기 위한 방안으로 해양학 전문인력 확보의 중요성을 제언한다.

This study analyzed the long-term trend of Arctic sea ice change using satellite observation data from 1979 to the present. The analysis confirmed that sea ice is continuously decreasing, with the reduction being particularly more pronounced in the Northeast Passage than in the Northwest Passage. This decrease in sea ice raises the possibility of opening the Arctic sea route, which can shorten the maritime transport distance between Asia and Europe, requiring proactive preparation by the Korean government and navy. Specifically, fostering professional oceanography personnel who can understand the Arctic's unique marine environment and apply it to naval operations is crucial for national security and strengthening international influence. This study analyzes the changes in Arctic sea ice and suggests the importance of securing oceanography professionals as a way for the ROK Navy to play a leading role in the coming Arctic era.

Keywords

북극 해빙(Arctic Sea Ice),
위성 관측(Satellite Observation),
해빙 감소(Sea Ice Decrease), 북극항로(Arctic Sea Route),
해양학 전문인력(Oceanography Professionals)

Acknowledgement

본 논문은 2025년 해군사관학교 해양연구소
학술연구과제 연구비의 지원으로 수행된 연구임.

1. 서론

북극 지역의 기후 변화는 지구 평균 온난화 속도보다 약 4배 빠르게 진행되는 '북극 증폭(Arctic amplification)' 현상으로 인해 가속화되고 있다. 이러한 현상의 가장 두드러진 결과는 바로 해빙(海氷, sea ice)의 급격한 감소이다[4,7,8]. 특히 2024년은 북반구와 남반구 모두, 그리고 육지와 해양 모두에서 역대 가장 따뜻한 해로 기록되었으며, 수심 2,000 m까지의 상층 해양 열량 또한 역대 최고치를 기록하였다[1-2].

북극 증폭은 지역적 현상에 그치지 않고 전 지구적 기후 시스템에 광범위한 영향을 미치는 중요한 기후 피드백으로 작용한다. 해빙과 눈은 태양 에너지를 우주로 반사하는 높은 알베도(Albedo) 효과를 가지지만, 해빙이 감소하면 해수면이 태양열을 더 많이 흡수하게 된다. 또한 북극 기온 상승은 해양으로부터 대기로 공급되는 수증기량을 증가시키고, 이 수증기는 지표면에서 방출되는 열을 붙잡아 온난화를 더욱 심화시키는 연쇄 반응을 일으키게 된다. 이러한 과정은 북극 해빙의 소실을 더욱 가속화하며, 궁극적으로 전 지구 기후 패턴, 전 세계 기상 및 해양 순환에 중대한 변화를 초래한다.

본 논문은 이러한 변화에 대한 세계적인 관심이 높아지는 가운데, 북극항로(Northern Sea Route, NSR)의 활용 가능성에 주목하고자 한다. 이를 위해 위성 관측 자료를 활용하여 과거부터 현재까지 북극 해빙의 변화 추세를 분석하고, 해빙 감소 가속화에 따른 북극항로의 이용 전망에 대해 기술한다.

2. 자료 및 분석 방법

북극 해빙 변화 분석을 위해 미국 국립빙설자료센터(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)에서 제공하는 위성관측 데이터를 사용하였다.

NSIDC는 미국의 콜로라도 대학교 볼더 캠퍼스(University of Colorado Boulder)에 위치한 연구 및 데이터 센터로, 1976년에 설립되어 빙하(glacier), 빙상(ice sheet), 해빙(sea ice), 눈(snow), 동토층(permafrost) 등 지구의 빙권(cryosphere)에 대한 과학적 데이터를 관리하고 제공하는 역할을 하고 있다. NSIDC가 제공하는 해빙 데이터는 주로 인공위성 관측을 기반으로 하며, 이번 연구에 사용된 주요 데이터는 다음과 같다.

- (1) 해빙 범위(sea ice extent): 해빙의 농도가 15% 이상인 바다의 범위를 나타낸다. 이 수치는 해빙의 분포 변화를 보여주는 가장 중요한 지표 중 하나이다.
- (2) 해빙 농도(sea ice concentration): 특정 지역에서 해빙이 차지하는 비율을 백분율(%)로 나타낸 것이다.
- (3) 시계열 데이터: 1979년부터 현재까지의 해빙 범위, 면적 및 농도 데이터를 일별, 월별로 제공하여 장기적인 변화 추세를 분석할 수 있다.

상술한 데이터는 주로 수동 마이크로파(passive microwave) 위성을 이용하므로 구름이나 어둠의 제약 없이 지속적인 자료 수집이 가능하다. NSIDC는 이 데이터를 통해 북극과 남극 해빙의 변화를 정기적으로 분석하고, 기후 변화에 대한 주요 정보를 제공한다.

NSIDC는 NASA(National Aeronautics and Space Administration, 미 항공우주국)와 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration, 미 해양 대기청)의 지원을 받아 지구 빙권의 변화를 모니터링하고, 기후 변화가 빙권에 미치는 영향을 연구하는데 중요한 역할을 수행하고 있다.

NSIDC는 콜로라도 대학교 볼더 캠퍼스 산하의 환경과학연구협동연구소(Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, CIRES)의 일부이다. 그리고 CIRES는 NOAA와 콜로라도 대학

교가 협력하여 운영하는 기관이다. 따라서 NSIDC는 대학 기관에 속해 있지만, NOAA와 NASA를 포함한 여러 연방 정부 기관의 지원을 받아 운영되고 있다.

수집된 자료 처리 및 분석을 위해 본 연구에서는 오픈소스 코딩 언어인 R과 CRAN(Comprehensive R Archive Network)에서 제공하는 각종 패키지를 활용하였다.

3. 북극 해빙의 변화

3.1 해빙 범위의 장기적 변화 추세

해빙 범위의 변화를 분석하기 위해 NSIDC에서 제공하는 1979년 1월부터 2024년 12월까지 46년간의 월평균 북극 해빙 범위 데이터를 활용하였다. 해빙 범위는 가로 및 세로 25 km 해상도의 격자 내에 해빙 농도가 15% 이상일 경우 해빙이 존재하는 것으로 정의하고, 그 미만일 경우 개방 수면(open water)로 간주한다. Fig. 1은 이 자료를 바탕으로 북극 해빙의 연도별·월별 변화 추세를 비교하기 위해 주요 연도를 선별하여 제시한 그림이다.

월별 변화를 살펴보면, 북극 해빙은 2월과 3월에 최대 범위를 기록한 후 9월까지 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. 이후 다음 해 1월까지 다시 해빙이 증가하는 계절적 주기가 반복되며, 해빙 범위가 최소가 되는 시기는 매년 9월임을 확인할 수 있다.

장기적인 연도별 변화 추세를 분석하면, 1980년 9월의 해빙 범위는 약 8백만 km²였으나, 1990년과 2000년에는 약 6백만 km²로 약 25%가 감소하였다. 그 이후로 2010년에는 약 5백만 km², 2020년에는 약 4백만 km²까지 지속적으로 감소하는 추세가 뚜렷하게 나타난다.

특히 주목할 만한 점은, 위성 관측 이래 가장 낮은 해빙 범위는 2024년이 아닌 2012년 9월에 기록되었다는 사실이다. 당시의 해빙 범위는 약 360만 km²로, 1980년과 비교했을 때 절반 이상 감소한 수치이다. 2012년의 급격한 해빙 감소는 지구 온난화로 인한 다년생 해빙의 감소와 1년생 해빙의 증가, 그리고 북극 지역의 대기 순환 변화로 인한 강력한 폭풍 발생 등 복합적 요인에 기인한 것으로 분석된다[6,9].

2012년 최저치가 관측된 이후 해빙 범위가 2024년에 약 440만 km²로 소폭 회복된 것처럼 보이지만,

이는 2010년의 수치에 비하면 여전히 크게 감소한 수준이다. 따라서 이 현상은 해빙이 회복되었다기보다는, 장기적인 감소 추세가 일시적으로 둔화되거나 안정화된 것으로 보는 것이 타당하다. 1979년부터 축적된 위성 관측 데이터는 북극 해빙이 명확한 장기적 감소 추세에 있음을 일관되게 보여준다.

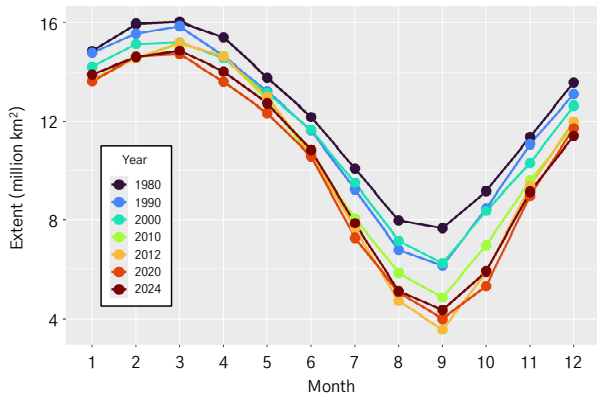


Fig. 1. Monthly mean Arctic sea ice extent for each year

3.2 월별 기후 평균 해빙 농도의 변화

월별 해빙 농도의 변화를 보다 상세하게 분석하기 위해 NSIDC에서 제공하는 1979년부터 2022년까지의 월별 기후 평균 해빙 농도 데이터를 활용하였다. Fig. 2는 이 자료를 바탕으로 월별 해빙 농도의 공간적 분포를 지도상에 시각화한 것이다. 그림에서 흰색으로 덮인 부분은 해빙의 농도가 100 %인 영역을

의미하며, 청색이 짙어질수록 농도가 낮아짐을 나타낸다.

1월부터 5월까지는 러시아와 캐나다 연안 및 캐나다 북부의 허드슨만까지 해빙이 고농도로 광범위하게 분포한다. 이후 6월부터는 해빙 농도가 점차 감소하기 시작하며, 특히 허드슨만과 베링해협에서 그 감소가 두드러진다. 이러한 감소 추세는 여름철에 더욱 강화되는데, 7월에는 베링해협이 개방되기 시작한다. 9월이 되면 해빙 농도가 가장 낮아지는데, 이때 캐나다 연안보다 러시아 연안의 해빙 감소가 더욱 뚜렷하다. 9월에 최소가 된 해빙 범위는 다시 점차 증가하기 시작하는데, 12월이 되면 캐나다 연안과 러시아 연안, 허드슨만, 베링해협까지 해빙으로 가득 채워진 것을 확인할 수 있다. 이처럼 월별로 변화하는 연간 주기가 뚜렷한 모습은 앞서 3.1절에서 살펴본 연도별 변화 추세와 잘 일치하는 경향을 보인다.

3.3 일별 해빙 범위 비교

본 절에서는 NSIDC에서 제공하는 다중센서로 분석된 일별 북극 해빙 범위 데이터를 이용하여 일자별 해빙의 세부 변화현황을 분석하였다. Fig. 3에는 해빙 범위가 역사적으로 최소치를 보인 2012년 9월 15일의 자료를 제시하였고, 현재 시점에서 가장 최근인 2025년 8월 12일의 자료, 그리고 이와 비교하기 위한 2012년 8월 12일의 자료를 함께 제시하였다.

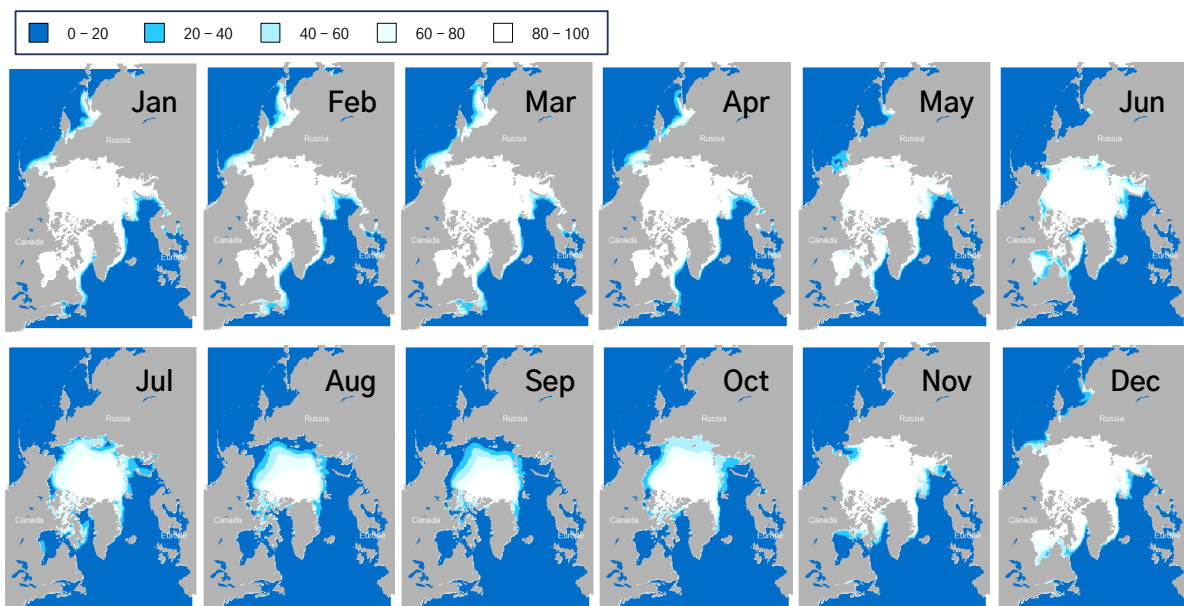
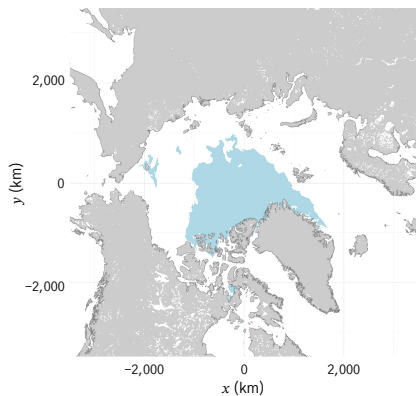
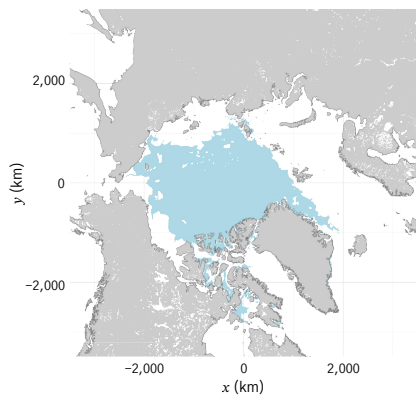


Fig. 2. Climatological monthly mean sea ice concentration maps for 1979–2022

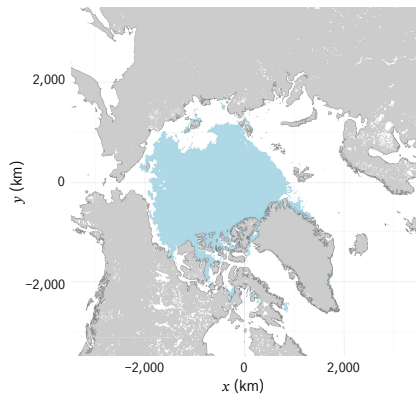
Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)를 비교해 보면 2012년 8월 12일의 해빙 범위가 2025년보다 더 적었음을 알 수 있다. 더불어 역사적으로 해빙이 최소가 되었던 2012년 9월 15일의 자료(Fig. 3(a) 참조)를 보면 같은 해 8월보다 훨씬 더 줄어든 모습이 뚜렷하다. 지리적으로는 캐나다 연안보다 러시아 연안의 해빙이 훨씬 더 많이 감소하였음을 알 수 있다. 이는 향후 북극항로 이용시 캐나다 연안을 거치는 북서항로보다 러시아 연안의 북동항로의 이용 가능성이 훨씬 높음을 시사한다.



(a) September 15, 2012



(b) August 12, 2012



(c) August 12, 2025

Fig. 3. Multi-sensor-analyzed-daily sea ice extent

3.4 소 결론

지금까지 위성으로 관측된 데이터를 기반으로 북극 해빙의 변화를 살펴보았다. 이를 통해 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. 첫째, 1979년 위성 관측 이래 북극 해빙의 범위가 최소가 된 시기는 2012년이다. 둘째, 북극 해빙은 장기적으로 지속적인 감소 추세에 있다. 셋째, 해빙의 범위가 연중 최소가 되는 시기는 매년 9월이다. 넷째, 북극 해빙은 캐나다 연안보다 러시아 연안 쪽의 북동항로(세부분류는 4장 참조)에서 그 감소의 폭이 훨씬 크다.

이러한 해빙의 감소는 향후 아시아와 유럽을 잇는 북극항로의 개방 가능성과 그 기대감을 높여주고 있다. 따라서 다음 장에서는 북극항로의 이용 전망에 대해 살펴보고자 한다.

4. 북극항로 이용 전망

4.1 북극항로의 분류

북극해를 통과하는 주요 해상 운송 경로인 북극항로는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 일반적으로 세 가지로 구분한다. 첫째, 베링 해협을 거쳐 러시아 북부 연안을 따라가는 북동항로(Northeast Passage, NEP), 둘째, 캐나다 연안과 캐나다 북부의 여러 섬 사이를 통과하는 북서항로(Northwest Passage, NWP), 셋째, 북극점 근처를 직접 가로질러 지나가는 북극횡단항로(Transpolar Sea Route, TSR)이다.

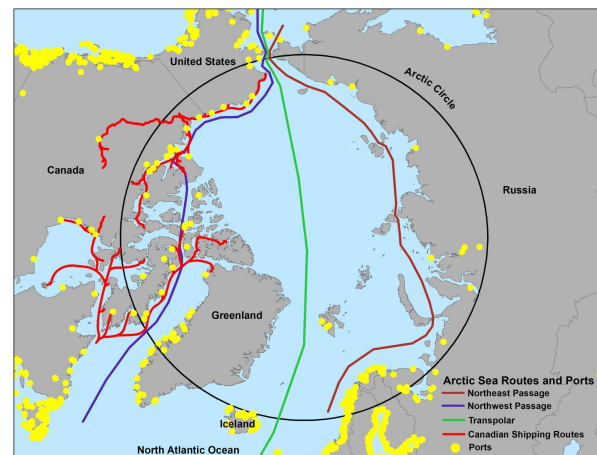


Fig. 4. Map of Arctic Sea Routes(source: Deb & Bailey, 2023[3])

이 세 가지 경로 중 북극횡단항로는 두꺼운 해빙의 분포로 항해가 거의 불가능하며, 지구온난화가 계속 진행되더라도 가장 늦게 열릴 것으로 예상되는 항로이다. 이에 비해 다른 항로는 훨씬 더 빨리 열릴 수 있는데, 앞서 3장에서 살펴본 바와 같이 북서항로보다는 북동항로가 더 빨리 열릴 수 있다. Fig. 3에서 북극 해빙 범위가 최소가 되었던 2012년 9월의 자료를 보면 북동항로가 완전히 개방되었음에도 북서항로는 여전히 해빙으로 덮여 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 전 세계에서 가장 주목하는 항로는 바로 북동항로이다.

4.2 북극항로의 장점 및 개방 가능 시기

북극항로의 가장 큰 장점은 해상 운송 거리가 줄어들어 물류비용이 절감될 수 있다는 것이다. 기존 항로인 수에즈 운하를 이용할 경우, 부산항에서 유럽의 최대 항구인 네덜란드 로테르담 항까지 운송 거리는 약 22,000 km이다. 그러나 북극항로를 이용할 경우 약 13,000 km - 15,000 km로 단축된다. 이는 기존 경로 대비 약 30% - 40%가 단축되는 것이며, 항해 일수로는 약 40일에서 약 30일로 대략 10일이 줄어드는 효과를 얻는다[11]. 이러한 항로 및 항해시간 단축은 선박 운항에 소요되는 연료비, 인건비 등 직접적인 물류비용을 크게 절감시킬 수 있을 뿐만 아니라 재고 유지 비용을 줄이고 상품 도달 시간을 앞당기는 등 기업의 경쟁력 강화에도 도움이 된다.

현재 북극항로 중 북동항로의 이용은 필요할 경우 러시아의 쇄빙선 지원을 받아 7~10월까지 약 4개월 정도 가능한 것으로 알려져 있으며, 지구온난화가 가속화함에 따라 연중 운항 가능 기간은 더욱 증대될 것으로 예상된다. 2021년 IPCC 보고서는 온실가스 배출량이 높은 시나리오에서 2050년 이전 최소 한 번은 9월에 북극 해빙이 거의 사라질 수 있음을 밝히고 있다[5].

4.3 현시점에서 북극항로 이용의 제한점

북극항로 이용에 대한 기대가 점차 증대되고 있으나 현시점에서 많은 제한점이 존재하는데, 이를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 항해 가능 기간이 한정되어 있다. 지구온난

화로 북극의 해빙은 감소 추세에 있으나 여전히 두꺼운 해빙이 남아있어 겨울철에는 항해가 불가능하며, 여름철 약 4개월 정도만 항로 이용이 가능하다. 둘째, 불안정한 기상 환경에 노출되어 있다. 북극 지역은 전 지구 기후 시스템과 상호작용하므로 돌풍, 안개, 극심한 저온 현상 등 예측하기 어려운 기상 현상이 빈번히 발생한다. 셋째, 항해 인프라가 부족하다. 북극항로에는 컨테이너를 처리할 대형 항만이나 연료 보급기지, 긴급 시 선박 구조 및 수리를 할 수 있는 시설이 거의 없다. 넷째, 해도 정보 및 실시간 유빙 관측 정보가 부족하다. 북극해는 연중 해빙으로 덮여 있는 영역이 많아 해저지형과 수심 등 상세한 정보가 부족하며 유빙에 대한 실시간 추적 정보 역시 부족하여 항해 안전 위험이 상존한다. 다섯째, 쇄빙선 동반 및 높은 선박 보험료 등의 요인으로 인해 경제성이 떨어진다. 해빙이 완전히 사라지지 않는 한, 쇄빙선의 동반이 필수적이며, 북극항로 상 사고 위험을 고려하여 선박 보험료가 매우 높게 책정되어 있다. 이외에도 북극해를 둘러싼 국가(러시아, 캐나다, 미국 등) 간의 영유권 및 항로 통제권 갈등을 비롯해 다양한 문제들이 존재한다.

4.4 북극항로의 미래전망

북극항로가 완전히 개방되는 시기를 정확히 예측하기는 어렵다. 그럼에도 많은 연구들이 향후 북극항로의 개방 가능성을 높게 예측하고 있으므로, 경제적·전략적 국익 증대를 위해 향후 전망을 살펴볼 필요가 있다.

첫째, 여름철에 국한된 항로에서 탈피하여 상시 항로화가 가능할 것이다. 북극 해빙이 지속 감소함에 따라 점차 항해 가능 기간이 늘어나고, 어느 시점에는 상시 운항이 가능한 항로로 발전하게 될 것이다. 둘째, 북극항로의 다양화가 가능할 것이다. 현재 제한적으로 운용되고 있는 북동항로뿐만 아니라 북서항로의 이용이 가능해질 것이며, 최종적으로는 북극횡단항로까지 이용할 수 있게 될 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 1979년부터 현재까지 위성으로 관측된 데이터를 이용하여 북극해의 해빙 변화를 살펴

보았다. 해빙은 장기 지속적인 감소 추세를 보이며 연중 9월에 최소가 됨을 알 수 있었다. 또 캐나다 북부 연안을 경유하는 북서항로보다 러시아 연안을 경유하는 북동항로의 해빙 범위 감소가 훨씬 더 뚜렷함을 확인하였다. 북동항로를 경유하는 북극항로를 이용할 경우, 기존의 수에즈 운하를 거쳐 유럽으로 이동하는 경로 대비 약 40%의 거리 단축과 약 10일의 항해 기간 단축이 가능함을 알 수 있었다. 지구온난화가 진행됨에 따라 북동항로의 이용 가능 기간은 점차 증대될 것이며 궁극적으로는 북극횡단항로까지 열릴 가능성이 있다. 이러한 예측에 따라 최근 우리 정부는 2030년까지 차세대 쇄빙연구선을 건조하여 북극항로 정보 수집에 투입할 계획이다[12].

북극 지역의 군사적·경제적 중요성이 커져감에 따라 한국 해군도 북극항로의 안보적 가치를 인식하고 필요한 역할 수행에 대비할 필요가 있다. 그러기 위해서는 무엇보다 북극해의 해양환경을 정확히 파악하고 대응할 수 있는 해양학 전문인력 양성이 중요하다. 북극해의 해류, 조석, 바람 등의 정보는 해빙의 이동을 정확히 예측하여 함정의 안전 운항에 도움을 줄 수 있다. 또 북극해는 해빙과 극저온의 환경을 가지고 있어, 수중에서의 음파전달 특성은 다른 해역과 큰 차이를 보인다. 이는 수중통신과 대잠작전에 매우 중요한 정보가 된다. 더불어 북극 지역에 증가하는 군사 활동에 대비하기 위해 해양데이터 수집 및 분석을 통한 정보 우위를 확보해야 한다. 이는 북극항로 이용 관련 국제협력 및 외교 활동에서 대한민국의 입지와 영향력을 강화하는 데에도 크게 기여할 수 있다.

이러한 분야는 민간 연구소와 학자들에게만 의존하여 해결할 수 없는 분야이다. 학술 연구와 현장 적용 사이에는 괴리가 존재하기 때문이다[10]. 연구기관이나 대학에서 수집된 자료와 분석 결과를 충분히 이해하고 해군 작전에 활용할 수 있는 정보로 재가공하기 위해서라도 해양학 전문인력 양성이 중요하다. 참고로 미국 해군연구청(Office of Naval Research, ONR)은 학계와 산업계의 연구 결과를 해군에 적용 가능한 기술로 전환시키는 것을 핵심 임무로 삼고 있다. 이에 따라 해양학 분야의 여러 전문인력이 관련 부서에서 중요한 역할을 수행하고 있다.

향후 북극항로의 지속 가능한 이용을 위해서는 국제협력, 내빙선 및 쇄빙선 확보, 항로 안전관리 시스템 구축 등 다양한 노력이 필요할 것이나, 우리 해군

에 부족한 해양학 전문인력 양성에도 관심을 가져야 한다. 그래야 곧 도래할 북극항로 시대에 선도적인 역할을 수행할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Cheng, L., Abraham, J., Trenberth, K. E., Reagan, J., Zhang, H. M., Storto, A., ... Gues, F. (2025). Record High Temperatures in the Ocean in 2024. *Advances in Atmospheric Sciences*, 42(6), 1092–1109.
- [2] Davy, R., & Griewank, P. (2023). Arctic Amplification Has Already Peaked. *Environmental Research Letters*, 18(8), 084003.
- [3] Deb, J. C., & Bailey, S. A. (2023). Arctic Marine Ecosystems Face Increasing Climate Stress. *Environmental Reviews*, 31(3), 403–451.
- [4] England, M. R., Eisenman, I., Lutsko, N. J., & Wagner, T. J. (2021). The Recent Emergence of Arctic Amplification. *Geophysical Research Letters*, 48(e2021GL094086).
- [5] IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.)]. Cambridge University Press.
- [6] Parkinson, C. L., & Comiso, J. C. (2013). On the 2012 Record low Arctic sea ice cover: Combined Impact of Preconditioning and an August Storm. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1356–1361.
- [7] Serreze, M. C., Barrett, A. P., Stroeve, J. C., Kindig, D. N., & Holland, M. M. (2009). The Emergence of Surface-based Arctic Amplification. *Cryosphere*, 3(11).
- [8] Serreze, M. C., & Francis, J. A. (2006). The Arctic Amplification Debate. *Climatic Change*, 76(241), 241–264.
- [9] Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Malanik, J., & Barrett, A. P. (2012). The Arctic's Rapidly Shrinking Sea Ice Cover: A Research Synthesis. *Climatic Change*, 110(3), 1005–1027.
- [10] Yuk, J. H., & Byun, S. S. (2025). Estimating Tidal Currents at the Sewol Ferry Tragedy Site: Insights into Slack Water Determination in the Yellow Sea. *Regional Studies in Marine Science*, 82, 103960.
- [11] 이호진 (2025. 9. 3). “북극이 열린다... 부산, ‘글로벌 해양수도’가 된다 [부산, 대한민국 해양수도,]” 부산일보, <https://www.busan.com/view/busan/view.php?code=2025090318334829203>
- [12] 권서아 (2025. 8. 15). “해운업계 ‘북극항로 개척...美 ‘마스가’로 한화오션 등 조선업에 기회”, 아이뉴스24, <https://www.inews24.com/view/1873291>