



## 극지공학 연구의 발전과정과 국내외 현황

글 : 한국해양대학교 최경식 명예교수 / [kchoi@kmou.ac.kr](mailto:kchoi@kmou.ac.kr)

본 기고문은 학회 미래기술연구소 보고서 2023-003호를 전재한 글입니다.

### 1. 극지공학 연구의 발전과정

우리가 상식적으로 이해하고 있듯이 극지공학이란 용어는 남극, 북극을 포함하는 극지에서의 공학기술을 의미한다. 하지만 이런 단순한 정의만으로는 매우 부족하며, 극지공학을 기술하는 데는 다양하고 폭넓은 설명이 필요하다. 우선 범위를 조금 넓혀서 보면 극지는 것이 대체로 지구상의 매우 추운 지역이기 때문에 極地工學(Arctic Engineering 혹은 Polar Engineering)을 寒地工學(Cold Regions Engineering)이라 이해할 수도 있으며 낮은 기온에서의 독특한 문제이기 때문에 低溫工學(Low Temperature Engineering)으로 이해할 수도 있다. 하지만 인간의 활동이 제한적이거나 정상적으로 이루어지는 범위 내에서의 저온이란 것이지 절대온도  $0^{\circ}\text{K}$ 에 가까운 현상을 다루는 초저온 혹은 극저온과는 거리가 있다.

알다시피 대부분의 공학적인 활동은 지구상의 온난한 지역에서 이루어진다. 그러나 근래 자원의 부족이나 기후온난화로 인해 공학적인 활동이 점차 지구상의 고위도 지방으로 옮겨감에 따라 얼음과 저온이라는 극지의 특별한 자연조건을 극복할 수 있는 지식이 요구되었다. 따라서 공학자에게 있어서 극지공학이란 바다의 얼음뿐만 아니라 육상의 얼음과 동토, 호수와 하천의 결빙 등 일상적이면서도 특별한 자연현상을 대상으로 하는 학문이다. 본질적으로 극지환경을 대상으로 조선해양 뿐만 아니라 토목건설, 해양학, 기계, 전자 등 다방면의 분야가 연계되는 융합적인 학문이라 정의할 수 있겠다.

하지만 극지공학은 여타 다른 공학기술에 비해 비교적 새로운 분야이다. 수 세기 동안 북유럽이나 러시아 등 북극권 국가들에 있어서 빙해역을 항행할 수 있는 선박의 확보는 매우 주요한 관심사였다. 돛을 장착한 목선들은 얼음 속에서는 거의 운항할 수 없었다. 북극권의 항해자들은 필연적으로 얼음이라는 위험요소와 싸워 왔으며 한편 육상에서 공학자들은 얼음에 덮인 지역을 가로지르는 교량과 도로를 건설하는 데 골몰해 왔다. 금세기 들어서는 북극해 해상에 인공구조물을 건조해야 할 필요가 대두되었다. 이는 얼음에 덮인 북극해의 광대한 대륙붕 해역에 상당량의 석유와 천연가스가 매장되어 있기 때문이다. 다국적 석유 메이저들에 의해 미개발지인 북극권을 개발하려는 활동이 본격화된 것은 1970년대 석유파동에 의한 것이다. 중동의 육상/연안에서 생산되는 석유의 무기화에 대응하여 미국과 캐나다, 그리고 서유럽 국가들이 대안으로 북극권 개발을 선택했기 때문이다. 1970년대 후반부터 80년대를 거치며 엄청난 개발비가 빙해역에서 석유를 찾아내는 기술과 채굴 수단을 고안하는 데 지출되었다. 또한 많은 연구자들이 빙역학에 대한 새로운 지식을 얻기 위해 극지 연구에 투입되었고 그 결과로서 북극권에서 천연자원을 개발하는 데 관련된 얼음이란 위험요소를 어느 정도 정량적으로 파악할 수 있게 되었다. 극지공학의 중요한 주제 중 하나인 빙역학(Ice Mechanics)은 인간이 만든 구조물과 얼음과의 관계를 과학적으로 이해하려는 노력의 산물이다.

빙역학에서 가장 중요한 문제는 빙해역에 설치될 구조물이 얼음과 만날 때 견딜 수 있는 빙하중의 크기는 어느 정도인가 하는 문제이다. 얼음은 아주 독특한 재료로서 보통 힘을 받으면 균열이 생기고 잘 깨어지는 것처럼 보이지만 힘을 아주 천천히 주거나 빙점에 가까운 온도에서는 균열보다는 마치 연속체처럼 변한다. 얼음의 강도는 실험실에서 작은 얼음 시편을 가지고 측정했을 때와 실제 빙해역에서 측정된 값이 수십배의 차이가 있어서 실험실에서 얻어진 자료를 실제현장에 응용할 때 어려움이 매우 크다. 이것이 빙해역 현장에서 실선시험이 꼭 필요한 이유이다. 흥미로운 사실은 만일 어떤 구조물을 건설한다고 할 때 우리는 구조물이 얼마나 튼튼한지, 다시 말해 재료가 견딜 수 있는 최대 하중은 얼마인지에 관심이 있게 마련인데 빙역학에서는 이와 반대로 얼음이 얼마나 쉽게 깨어질 수 있는지 관점에서 문제에 접근하게 된다.

한편 북극권 개발이 활발해짐에 따라 채굴된 자원의 수송과 저장을 위한 배후거점 도시들이 북극해 연안을 따라 성장하였고 이들 지역과 동아시아, 북미, 유럽의 중위도 소비지를 잇는 연안항로로 북극해 항로가 개발되었다. 북극해 항로는 북극해 연안 도시들에 대한 보급으로 사용될 뿐만 아니라 동아시아와 서유럽 국가를 연결하는 최단항로로서 또한 수에즈 운하가 폐쇄되는 경우의 대체 항로로서 대두되는 추세이다. 더욱이 지구온난화 현상으로 북극해의 만년빙이 급격히 줄어드는 최근 상황은 북극해 지역에서 선박의 활동이 빈번해진 중요한 요인이 되었다. 이에 따라 과거에는 불가능했던 고위도 북극해에서의 자원개발 활동을 기술적으로 검토하기 시작하였고 특히 고유가로 인한 러시아 경제력의 확대는 북극해에 연한 시베리아의 개발과 북극해 항로 이용에 적극적인 노력을 기울이게 하였다. 하지만 2022년 현재 진행 중인 우크라이나-러시아 전쟁의 결과에 따라 북극해 항로에 대한 러시아의 지정학적 장악력이 과거보다는 약화할 것이 예상되고 그에 따라 북극해 항로의 경제적 활용도에도 큰 변화가 있으리라 추정할 수 있다.

### 2. 극지공학 연구의 주제들

앞서 언급한 바와 같이 극지공학은 북극권 국가들의 생존에 필요한 도구로서 발전해 왔다. 극지 개발을 위해서는 극지의 혹독한 자연

환경을 대상으로 하는 과학지식도 필요하고 아울러 극지에서 사용되는 특수장비 시설 그리고 운용 관련 공학기술도 요구된다(표 1). 간단하게 정리된 이 표와 같이 극지 관련 공학기술은 저온용 재료 관련 기술, 도로나 교량 건축물과 관련된 극한지 건설기술, 선박기술, 극지 천연자원 시추, 생산, 수송을 위한 해양구조물, 파이프라인 설계/건조/운용기술, 그리고 얼음의 재료특성에 관한 빙역학 이론 및 실험으로 구분된다. 극지용 구조물과 선박은 일반해역의 구조물에 비해 형상, 구조강도, 의장, 저온설비 등에서 새로운 개념의 기술이 요구되는 고도의 기술집약형 건조물이다. 천연자원의 해상운송을 위한 쇄빙탱커나, 쇄빙LNG선 등이 건조되고 있다. 극지 개발은 이론적 접근과 함께 실험에 의한 신뢰성 있는 자료를 축적할 필요가 있으며 이를 위해 빙해수조(Ice Tank)나 저온실험실(Cold Room) 운용기술 또한 중요하다. 빙해역에 직접 가지 않아도 극지공학 연구에 참여할 수 있는 필수시설이기 때문이다. 한편 최근에는 이런 단순한 구분에 추가하여 극지공학의 융합적인 학문 성격을 반영하는 세분화되고 융합적인 극지 연구주제에도 주목하고 있다(표 2).

〈표 1. Major Topics in Arctic Engineering〉

Icebreaking Vessels	Low Temperature Materials
Arctic Environmental Data Survey Remote Sensing/Satellite Information Ice Load Estimation Ship Hull Design/Propulsion System Outfitting Thermal Design/Icing/Deicing Ice Tank Test and Sea Trials	Welding/Fatigue Design Low Temperature Steel/Concrete Anti-Corrosion/Abrasion Paint/Coatings
Arctic Offshore Structures	
Arctic Environmental Data Survey Remote Sensing/Satellite Information Ice-Structure Interaction Arctic Underwater Pipelines/Installation	
Cold Regions Construction	Ice Properties
Buildings/Storage Tanks/Pipelines Permafrost Design Heat Insulation/Snow Removal Ice Road/Bridge/Airstrips/Piers	Cold Room Test/Field Survey Ice Constitutive Modeling Numerical Analysis

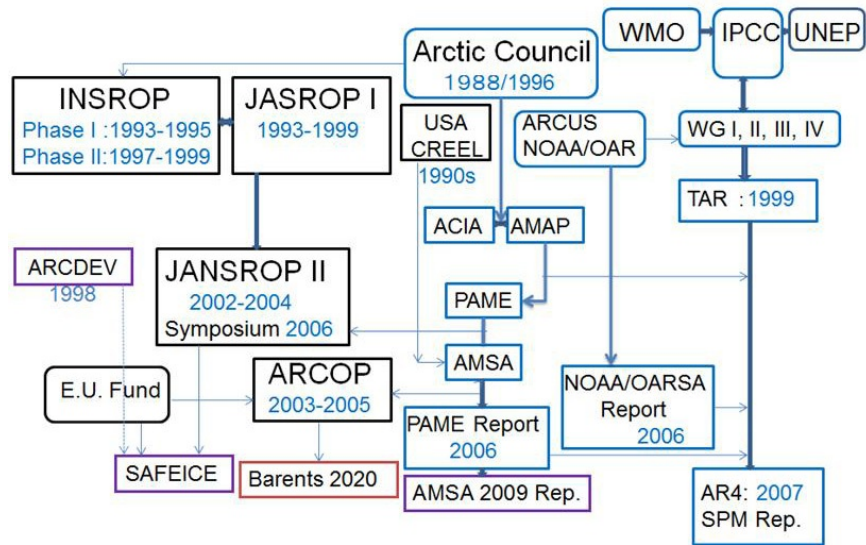
〈표 2. Various Research Topics Related with the Cold Regions(KoARC 2020년 기획보고서)〉

No.	주요 연구/기술개발 주제
1	북극권 위성 감시체계 구축
2	극지 해빙 관측 위성개발/운용을 통한 극지 빙권 정보화
3	북극해 항로 운항 지원을 위한 인공지능(AI) 기반 해빙 예측기술
4	북극항로 지역 주요 거점 항만시설 환경 모니터링 기술
5	극지 4차산업 실현을 위한 극지 통신인프라 개발/구축
6	극지 무인관측 및 항법기술
7	북극해 항로 운항 시 돌발상황 대응을 위한 관제기술
8	운항 해역·항로·화물의 종류를 고려한 한국형 표준 극지운항 선박
9	AI 딥러닝 기반 선박 빙성능 예측기술
10	운송 수요에 대응하는 최적 운송체계 개발
11	선박의 경제운항 기술
12	선박의 빙해역 운항제어 및 시운전 기술
13	선박의 극지사고 대응기술
14	북극해 항로 화물수송 선박용 기자재 방한설계 및 방한성능 평가기술
15	북극해 운용에 최적화된 부유식 해양플랜트 설계 기술
16	북극해 해양플랜트 Ice management 기초 및 운용기술
17	차세대 친환경 대체연료 전망 및 극지 빙커링 기술
18	북극권 국가의 북극 경제정책 비교분석
19	러시아의 북극항로 및 EEZ를 벗어난 항로 활용 시 규제 및 규범 분석
20	북극이사회 등 북극 거버넌스 변화 방향 연구
21	북극해 항로 활성화를 위한 물류 및 해운분야(국적선사) 전략 및 시나리오 개발
22	극지선도국 도약을 위한 중장기 국내 법제도 기반 개선방안
23	IMO 환경 및 안전규제 대응(북극관련 이슈)
24	북극 항만 인프라 개발사업 동향 및 참여방안 수립
25	북극권 경제활동 기반으로서의 통신산업 전망
26	북극 비즈니스 진출방안(에너지산업, 수산업, 관광산업 등) 수립
27	러시아 북극권 사회 인프라 및 소수 민족문화 종합연구
28	북극 원주민과의 상생 및 협력방안 수립

KoARC(한국북극연구컨소시엄)은 지속가능한 북극 이용을 위하여 북극 연구자 간의 협력 증대와 우리나라의 북극 진출 기여를 목적으로 해양수산부의 지원으로 설립된 단체인데 국내의 거의 모든 극지 관련 기관들이 모인 조직이다. KoARC는 극지 과학, 극지 기술, 극지 정책을 다루는 3개의 분과위원회를 통해 구체적인 활동을 수행하며 그중 중요한 결과가 '2030 북극연구 중장기 로드맵' 수립이다. 표 2는 이 내용을 요약 정리한 것으로 북극 환경변화 대응 및 북극 진출 활성화를 위한 4차 산업혁명 핵심기술로서 융합적 성격의 연구주제를 보여주고 있다.

### 3. 극지공학 관련 국제공동연구

러시아를 포함한 북극권 국가들에서는 1990년대 중반부터 쇄빙상선과 북극해 항로 활용을 목표로 국제공동연구와 북극위원회 (Arctic Council)나 IMO를 통한 국가간 협력을 수행하였는데 그림 1에 그 추세를 요약해 보았다. 이후에는 주요한 결과를 제공하는 몇 가지 국제공동연구에 대하여 설명한다. 이중 북극해 항로에 관한 국제공동연구 프로그램인 INSROP(1993~1999)과 후에 EU를 중심으로 진행된 SAFEICE 프로젝트(2005~2007)를 주목할 필요가 있다.



<그림 1 International Cooperation in the Fields of Arctic Study and the NSR>

#### 3.1 INSROP

INSROP(International Northern Sea Route Program)은 러시아의 북극해 연안 빙해역에 최초로 상업적인 정기항로를 개설하기 위하여 필요한 각 분야의 과학기술 정보를 구축하려는 목적으로 러시아, 노르웨이, 일본 등 여러 나라의 관련 기관들이 협력하여 이 지역에 대한 집중적인 연구를 수행한 국제공동연구 프로그램이다. 이 프로그램은 1987년 구소련의 무르만스크 선언(Murmansk Initiatives)의 결과로서 북극해 항로를 국제항로로 개방하겠다는 공식적인 의사를 밝힘에 따라 시작되었다. 무르만스크 선언이란 북극해 연안국가들 사이의 해상운송과 안전에 관한 전통적인 협력관계를 크게 확대, 진전시키기 위한 계획으로서 구소련 붕괴 이후 러시아 정부가 이를 지원하고 있다. 이 선언에 따라 1991년 러시아의 CNIINF(Central Marine Research and Design Institute)와 노르웨이의 난센연구소(FNI; Fridtjof Nansen Institute) 사이에 기초연구를 시작하였고 1992년 일본의 선박해양재단(SOF; Ship and Ocean Foundation, 현재의 해양정책연구재단(OPRF; Ocean Policy Research Foundation))이 참여함으로써 INSROP 프로그램이 정식으로 출발하였다. 이 프로그램에 참여한 국가와 기관은 다음과 같다.

- 러시아: 연방정부 및 Murmansk Shipping Co.
- 노르웨이: 외무부, 산업무역부, 환경부와 Fridtjof Nansen Institute
- 노르웨이: Kvaerner, Phillips Petroleum Co., Norsk Hydro
- 노르웨이: The Central and Eastern Europe Programme
- 일본: Japan Foundation, Ship & Ocean Foundation

이 프로그램은 6년간(1993~1999년) 진행되었고 북극해 항로와 관련된 거의 모든 주제에 대하여 167편의 보고서가 별도의 학술회의를 통하여 발표되었고 데이터를 정리한 책과 지도, 소프트웨어 등 여러 가지 방법으로 연구결과가 구체화 되었다. INSROP 프로그램은 두 단계로 나뉘어 진행되었는데 1단계 연구는 1993~1995년에 걸쳐 수행되었고 이후 프로그램의 참여기관들은 1997~1998년에 걸친 2단계 연구를 추가로 수행하였다. 1단계 연구결과는 별도의 학술회의에서 논문으로 발표되었고 (INSROP Symposium Tokyo, 1995), 후에 'Northern Sea Route: Future and Perspective'란 제목의 단행본으로 발간되었다. INSROP 2단계 연구에서는 북극해 항로를 이용하는 몇 가지 가상루트에 대하여 Ice Transit 시뮬레이션을 수행하였고 지리정보시스템(GIS) 형식으로 디지털 자료를 정리하였다. 그리고 2단계 연구결과를 발표하는 학술회의를 노르웨이의 오슬로에서 1999년 개최하였다. 이 학술회의의 연구결과를 바탕으로 INSROP 내용을 종합하는 'The 21st Century - Turning Point for the Northern Sea Route?' 제목의 단행본이 발간되었고 아울러 INSROP Working Paper No.167 'INSROP Integration Book'이 종합보고서로 제출되었다. 2022년 현재의 상황에서 볼 때 20년 전의 것이긴 하지만 INSROP 프로그램의 결론은 북극해 항로를 경제적, 기술적으로 환경에 피해를 주지 않고서 충분히 활용할 수 있다는 점이다. 북극해 항로의 양 종점인 유럽 북부와 동아시아 지역 (혹은 북미 서해안) 사이의 물동량은 현재까지는 계속 증가하는 추세였다. 특히 러시아 북극해 연안에 매장된 석유와 천연가스 생산에 따른 수송량 또한 대단한 것인데 빙해역을 통과하는 데 필요한 쇄빙선박을 기술적으로 안전하고 건조하는 문제는 아주 어려운 일은 아니지만 북극해 항로 개척을 가속화하고 항만 배후시설과 도로 등 인프라 시설 구축을 담당해야 할 러시아의 정치적, 경제적 안정이 가장 중요한 요소라고 평가하고 있다.

쇄빙상선 설계와 빙하중 문제와 관련하여 INSROP 프로그램은 북극해 항로를 운항할 수 있는 미래의 쇄빙상선 개념설계 모델을 제시한 바 있는데 그중 몇 가지 선종에 대해서는 빙해수조 모형시험도 수행하였고 SA-15 class 화물선의 북극해 항로 운항 실선시험도 수행하였다. 1995년 여름 일본 요코하마로부터 노르웨이의 북부 도시인 키르케네스까지 러시아 선적의 SA-15 class 다목적 벌크선 Kandalaksha호를 이용해 북극해 항로를 통과하는 시험항해가 있었는데 베링해협에서 키르케네스까지의 3,140마일을 10일 동안에 통과하였다. 일반적인 북극해 항로보다 북쪽인 노바야젬라 섬 북단(북위 81도)을 지나는 항로로 통과한 결과 운항거리와 운항시간을 대폭 단축할 수 있었다. 당시 항로 주변의 빙상상태가 비교적 좋았던 이유도 있지만 위성정보 등을 이용하여 최적항로를 선택하였기 때문이었다. 이러한 결과는 북극해 항로의 경제성을 처음으로 확인시켜준 성과였다. 동종의 화물선들이 요코하마에서 유럽까지 수에즈 운하를 경유하는 경우 보통 30일에서 33일 정도 소요되는 것에 비하여 여름철에 북극해 항로를 이용한다면 10일 내지 15일 정도

의 시간 단축이 가능하다는 뜻이다. Kandalaksha호 시험항해의 또 다른 임무는 북극해 항로의 빙상상태와 동급 선박의 항행가능성을 파악하기 위해 인공위성을 통해 전달되는 빙상정보의 수집과 분석, 선체 성능 데이터 및 구조안전을 위한 각종 계측센서를 장착하여 실제 화물 적재상태에서 실선시험을 수행하는 것이었다. 시험항해 동안 Kandalaksha호는 실선 추진성능, 선회성능 등을 시험하면서 북극해 항로 주변을 따라 해양, 해빙에 관련된 데이터를 수집하였다. 아울러 선체에 설치한 비디오 카메라의 화면을 이미지 처리하여 해빙의 밀집도, 빙판 두께 등을 계측한 결과와 비교하였다. INSROP 프로그램은 1999년으로 종료되었지만 일본에서는 최근까지도 일본재단의 지원으로 JANSROP(NSR 이용 촉진과 한랭지역에서의 안전항행 체계에 관한 조사 연구)이란 이름으로 북극해 항로 및 쇄빙선박 관련 연구를 지속해 왔다. 이러한 연장선에서 다음에 설명할 SAFEICE 국제공동연구 프로젝트도 성립될 수 있었으며 양 프로젝트에서 일본의 역할을 무시할 수 없는 수준으로 이끌어온 것도 사실이다.



〈그림 2 Symposium Proceeding(1995) of INSROP Phase I and INSROP Integration Book(1999) of Phase II〉

### 3.2 ARCDEV

ARCDEV(Arctic Demonstration and Exploratory Voyage) 프로젝트는 일본, 노르웨이가 주도하는 INSROP 연구에 자극을 받아 EU의 재원과 핀란드 연구팀이 중심이 되어 수행한 것이다. 핀란드의 쇄빙탱커 Uikku호는 1997년 가을 서방측 선박으로는 처음으로 전체 북극해 항로를 통과하여 베링해의 Provideniya 까지 운항한 바 있다. 1998년의 ARCDEV 북극해 시험항해는 대규모 자원개발이 예상되는 Kara해와 Laptev해 주변의 빙해역에서 동급 선박의 겨울철 항행 가능성을 검토하기 위해서 계획된 것이다. 시험항해에 사용된 Uikku호는 1만6천톤 규모의 FMA 1AS class 쇄빙탱커로서 이 시험항해에서는 러시아의 쇄빙선 2척 (Rossiya, Kapitan Dranitsyn)의 인도를 받아 운항하였다. 쇄빙선 Rossiya호는 원자력추진선이다. ARCDEV 시험항해에는 여러 관련 연구기관들이 참여하여 준비하였는데 시험항해의 주관은 핀란드의 Neste Shipping 이고 조선소(Kvaerner Masa Yard), 선급(Lloyd), 연구소(HSVA), 대학(HUT), 컨설팅 기업체(EOS, ISSUS) 등이 시험항해 관련 16개 분야에 참여하였다. 이 시험항해의 결과 북극해 항로의 겨울철 항해에 대한 제반 여건을 이해할 수 있게 되었고 향후 8만톤 이상 좀 더 큰 규모의 선박을 운항하기에 앞서 필요한 기술적 요건에 대해 검토할 수 있었다.

### 3.3 SAFEICE

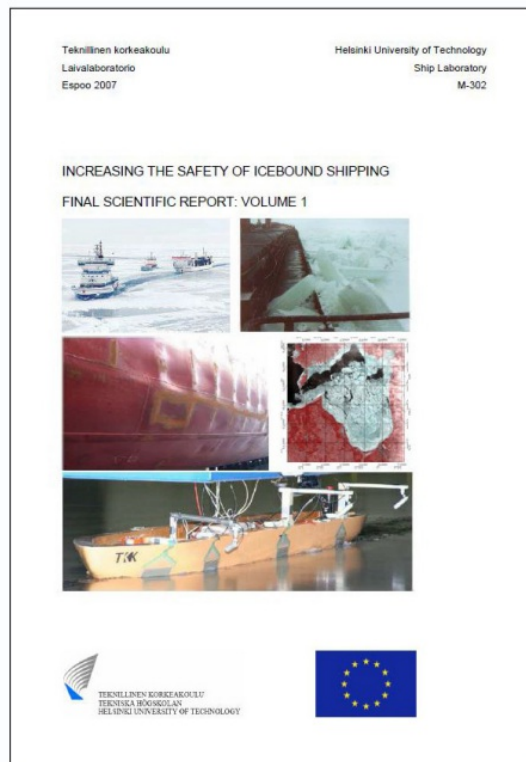
SAFEICE 프로젝트는 Ice Class 선박의 구조 안전성을 확보하고 겨울철 빙해역에서 운항 시 선체 손상의 위험을 감소시키기 위하여 현재 사용 중인 빙해역 규정의 보완에 필요한 과학적인 근거를 마련하는 것을 목표로 하고 있으며 선체구조에 작용하는 빙하중을 산정하기 위해 실선계측 데이터를 기반으로 경험적인 방법(semi-empirical method)을 찾아내려는 계획이다. 이 프로젝트는 유럽(EU), 러시아, 캐나다, 일본의 대학, 연구소 등 10개 기관이 공동으로 참여하였으며 그 결과는 FMA/SMA 및 기타 Ice Class Rule에 반영되었다. 프로젝트에 참여한 국가와 기관으로, 대학은 핀란드(HUT), 스웨덴(CUT), 에스토니아(TTU), 선급 관련 기관으로 핀란드(FMA), 스웨덴(SMA), 독일(GL), 연구소로 독일(HSVA), 러시아(AARI), 캐나다(NRC), 일본(NMRI)이 포함되어 있으며 아울러 발틱해 주변의 대다수 쇄빙선박 운영 선사들이 이 프로젝트에 참여하였는데 이들 기관들은 프로젝트 내에서 각기 보유하고 있는 연구 역량에 따라 다음과 같이 네 그룹으로 나누어 참여하였다.

- Group 1: Basic research on ice loading HUT, HSVA, NMRI, NRC, AARI
- Group 2: Development and implementation of ice rules FMA, GL, SMA
- Group 3: Structural response CUT, GL, HUT, AARI
- Group 4: Description of operational environment FMA, HUT, NMRI, NRC, SMA, TTU

SAFEICE 프로젝트는 선박의 운항 및 빙상조건과 빙하중 사이의 관계를 찾아내어 설계 빙하중 값을 산정할 수 있는 빙-선체 상호작용 모델을 개발하려는 것이다. 아울러 선체 부재의 최종강도를 추정하고 빙하중에 의한 선체의 손상 정도를 예측할 수 있는 방법을 찾아내는 일이다. 이 목적을 위해 필요한 것은, 서로 다른 여러 빙상조건과 여러 다른 선종의 선박에서 계측된 빙하중에 관한 지금까지의 모든 정보를 총정리해서 서로 공통된 형식의 데이터베이스를 구축하고 통계적인 방법을 이용해 설계 빙하중을 산정할 수 있도록 하는 일이다. 서로 다른 여러 빙하중 데이터를 비교하다 보면 빙상조건과 지역적으로 누락된 부분이 드러날 수 있는데 이런 자료는 추후 실선시험을 통해 보완할 수 있도록 하자는 의도도 들어 있다. 이 프로젝트에서는 최종강도를 초과하는 하중의 확률분포를 예측하여 설계 빙하중의 수준을 결정한다. 3년간의 연구는 종료되어 연구결과를 총정리한 2007년 최종보고서가 발간되었고 연구결과를 공유를 위한 참여기관 워크숍도 개최되었다. SAFEICE 프로젝트는 국제공동연구로서 쇄빙선박 건조 분야에서 기술적인 면에서 우위를 계속 유지하려는 핀란드를 비롯한 유럽연합 국가들의 의도가 집약된 것으로 볼 수 있다. 그뿐 아니라 FMA/SMA Ice Class Rule의 개정과 보완을 통해 국제표준(ISO)을 선점하고자 하는 의도도 들어있다고 판단된다. 물론 이러한 시도는 오랫동안 축적해 온 풍부한 빙해역 실선 계측자료와 모형시험 데이터가 뒷받침되기에 가능한 일일 것이다.

〈표 3. Participants of SAFEICE Project〉

No.	Acronym	Full Name	Country	Tasks
1	HUT	Helsinki University of Technology, Ship Laboratory	Finland	Project coordinator, Data analysis and ice load modelling
2	CUT	Chalmers University of Technology, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering	Sweden	Structural analysis and Determination of the ultimate strength
3	FMA	Finnish Maritime Administration	Finland	Assessment of the operative environment, Ice rule development
4	GL	Germanischer Lloyd	Germany	Ice load prediction, Rule development, Design methods
5	HSVA	Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt	Germany	Ice load modelling, Data analysis
6	NMRI	National Maritime Research Institute	Japan	Data analysis, Ice load modelling
7	NRC	National Research Council of Canada, Canadian Hydraulics Centre	Canada	Data analysis, Ice load modelling, Ice load prediction
8	SMA	Swedish Maritime Administration	Sweden	Assessment of the operative environment, Ice rule development
9	TTU	Tallinn Technical University	Estonia	Assessment of the operative environment, Ice rule development
10	AARI	Arctic and Antarctic Research Institute	Russia	Evaluation of ice loads and Structural response with application to structural design.

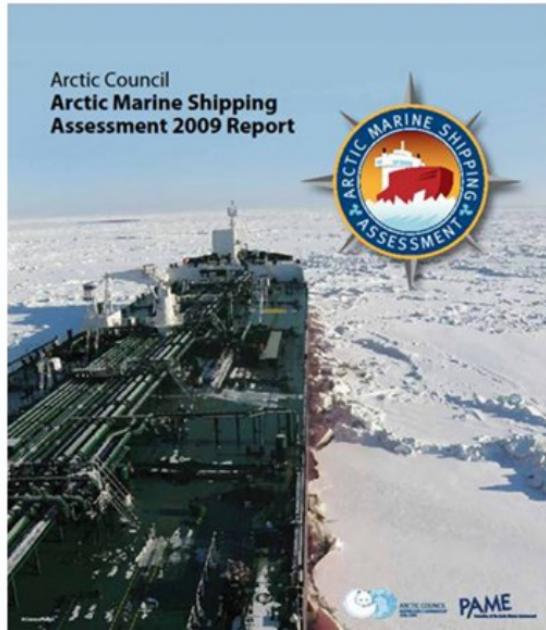


〈그림 3 Final Report(2007) of SAFEICE Project〉

### 3.4 AMSA

북극해를 둘러싼 북극권 8개국의 정부간 최고위층 모임인 북극이사회(Arctic Council: 2013년 우리나라도 상임 옵저버 국가로 가입)에서는 2004년 아이슬란드의 레이카비크에서 PAME(Protection of the Arctic Marine Environment) Working Group 모임을 갖고 지구 기후변화와 북극해 해양환경의 변화의 중요성을 인식하고 북극권 국가들의 선제적인 행동을 강조하기 위해 북극해에서의 자원개발, 선박 운항, 항만 인프라 구축, 원주민 보호 및 환경보존과 관련된 포괄적인 대책을 마련할 것을 제안하였다. 그 결과로 2009년 AMSA(Arctic Marine Shipping Assessment) 보고서가 채택되었다. 이 보고서에서 주된 관점은 북극해를 운항하는 선박과 그 활동이며 그 결과로서 북극해 해양환경과 원주민에 미치는 영향을 파악하는 것이었다. 따라서 세계 유수의 해운사, 조선사, 선급 및 보험사를 망라하는 광범위한 커뮤니티가 참여하여 각종 현황 조사와 대응책을 제시하였다. AMSA 2009년 보고서에서 주목할 사항은 기후변화의 결과로 향후 북극해의 해빙은 현저하게 감소할 것이며 그에 따라 훨씬 많은 선박이 북극해로 진출하고 더 많은 경제활동이 북극에서 이루어질 것이라는 전망이다. 이러한 북극해 내에서의 인간활동(선박운항으로 대표되는)을 환경친화적이고 지속가능하도록 유지하기 위한 국제적인 질서가 필요하며 그 역할은 유엔해양법의 기초하에 IMO와 같은 국제기구들이 맡아야 한다는 것이다. 이미 우리가 알고 있는 바와 같이 북극해 운항선박의 건조와 관련된 설계기준은 IMO 가이드라인으로 사용되는 IACS의 UR(Unified

Requirements)이 회원국들에 적용되기 시작했으며 또한 선박 안전운항과 관련된 사항들은 2016년 강제화 규정으로 IMO Polar Code가 제정된 바 있다.



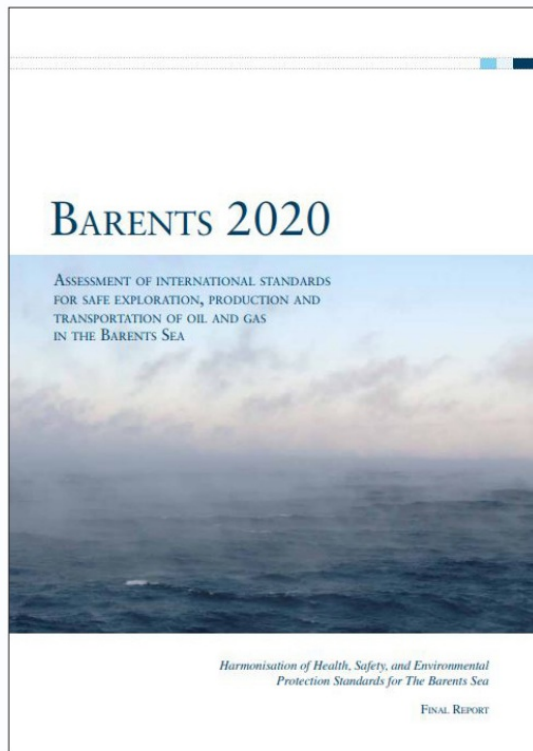
<그림 4 AMSA Final Report>

### 3.5 Barents 2020

Barents 2020 프로젝트는 노르웨이 정부가 러시아와의 협력을 위해 DNV 선급에 중재를 요청하여 성사된 것으로 러시아와 이해관계가 중첩되는 해역인 Barents해에서의 자원개발에 참여하는 산업체 HSE 기술표준을 확립하려는 목적에서 2007년에 시작하였다. 노르웨이측 참여자이자 전체 프로젝트 운영자는 DNV 선급이었고 러시아측 참여자는 VNIIGAZ/Gazprom 이었으며 1단계 프로젝트(2007-2008)에 서는 기존 5가지 국제 기술표준을 검토하는 것으로 시작하여 이후 4단계까지 프로젝트가 진행되는 내내 노르웨이-러시아 사이의 기본적인 협력모델이 지속되었다. 2단계(2008-2009)와 3단계(2009-2010) 프로젝트에서는 역외 기업체의 지원을 추가로 받아 7분야의 전문가 그룹을 구성하였는데 그 분야는 다음과 같다.

- 1) Common offshore standards
- 2) Ice loads
- 3) Risk management
- 4) Escape, evacuation and rescue
- 5) Working environment
- 6) Loading/unloading and ship transportation
- 7) Operational emissions and discharges to air and water

기본적으로 그동안 북해의 해양작업 시 적용되어 오던 HSE 기술표준을 고위도인 Barents해에 확대 적용하되 수색구조 및 해양오염 방지에 관한 부분에는 훨씬 더 강화된 수준을 적용한다는 원칙이었다. 3단계 프로젝트의 결과는 130가지 세부 기술표준안으로 만들어졌다. 이후 4단계(2010-2012)의 프로젝트에는 기존의 DNV, Gazprom 외에도 Statoil, ENI, Total, OGP 등 40여 기관이 참여하여 노르웨이-러시아를 넘어 실질적으로 국제공동연구의 성격을 갖게 되었고 Barents 2020 프로젝트의 마지막 보고서는 2012년 발표되었다. 중요한 것은 Barents 2020 프로젝트의 결과는 극지 해양플랜트에 적용되는 ISO 19906 기술표준의 기반이 되었다는 점이다.



〈그림 5 'Barents 2020' Final Report〉

#### 4. 극지 개발 관련 최근 동향

1970년대 석유파동 이후 원유가 변화에 영향을 받기는 하지만 구미 선진국에서는 북극 개발에 지속적으로 상당한 자본과 인력을 투자해 왔다. 미국, 캐나다, 노르웨이, 핀란드, 그리고 러시아, 일본, 중국 등지에서는 극지 자원개발에 필요한 각종 구조물의 건조 실적을 보유하고 있으며 앞서 언급한 여러 국제공동연구나 국제기구의 포럼을 통해 극지 개발과 관련 국제적으로 주요한 이슈를 부각시키고 상당량의 환경자료와 실험결과를 축적해 왔다. 이미 알고 있다시피 북극권에서는 알래스카, 캐나다의 보퍼트해, 러시아 북쪽의 카라해, 바렌츠해 그리고 극동의 오희츠크해에서 석유와 천연가스 시추와 생산이 이루어지고 있다.

##### 4.1 러시아 동향

북극해를 둘러싼 러시아의 광대한 영토와 거기에 부존된 천연자원의 규모만으로도 러시아의 존재는 극지공학의 미래에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 20세기 초반부터 러시아의 극지공학은 20세기 초반부터 극지에서 경험과 폐쇄적이긴 하지만 비교적 높은 수준의 기초과학에 기반을 두고 발전되어 왔기 때문에 21세기 현시점으로도 주목할 만한 많은 연구주제를 제공해 왔다. 특히 러시아는 북극해 항로를 실질적으로 관리하고 있는 극지공학의 최종 기술수요자인 만큼 러시아의 정책과 경제의 변화를 예의주시할 필요가 있다. 푸틴의 러시아 정부는 2006년 이래 자국의 조선산업 육성정책을 지속적으로 추진하면서 '2030년까지의 조선업 발전과 개혁전략'을 발표한 바 있다. 이에 따라 지역별 조선소를 구조 조정하고 최신기술 도입을 전제로 선박의 해외 발주를 제한하는 정책을 시도하기도 하였다. 2014년 우크라이나의 크림반도 병합에 따른 서방측의 경제제재로 러시아는 독자적으로 북극 자원 및 운송로 개발을 본격화하기 위해 자국 최대 민간 천연가스 기업인 노바텍이 주도하는 북극지역 개발 프로젝트를 적극 지원하였다.

Yamal LNG 프로젝트는 파이프라인을 통한 유럽 위주의 수출 구조에서 탈피하기 위한 사업으로 북극권에 위치한 야말반도의 육상 가스전에서 채굴된 천연가스를 아시아 지역으로 수송하기 위한 계획이다. 러시아 정부는 이전의 폐쇄적인 태도를 버리고 여기에는 중국 등 외국의 지분 참여도 허용하였다. 한편 Yamal LNG 프로젝트 이후 후속 사업으로 Arctic LNG-2 프로젝트도 추진하고 있다. 이는 북극권의 기단(Gydan)반도 육상 가스전을 개발하고 연간 1,980만 톤 규모의 LNG 생산설비를 건설하는 사업으로 2023년부터 생산이 예정되어 있다. 러시아 정부는 2020년 '북극 개발 및 국가안보 전략 2035'를 공식적으로 채택하였는데 그 내용은 북극해 항로를 '국가 교통로'로 독점하기 위한 법규 정비와 북극해 항로를 따라 공항과 항만 인프라 개발에 주력하는 등 북극 지역의 단순 자원개발이 아닌 관련 인프라 구축, 기술개발 등 자국 산업 활성화 방안을 모색하고 있다. 하지만 2022년 러시아의 우크라이나 공격으로 발생한 국제 정세의 불확실성과 러시아의 경제적 손실이 러시아의 극지자원 개발 계획과 북극해 항로의 운영에 어떤 방향으로 영향을 미칠지 계속 주목할 필요가 있다.

##### 4.2 EU/구미 북극권 국가 동향

최근 국제해사기구(IMO)에서는 북극해에서 선박 운항 시 벙커C유와 같은 중질유(Heavy Fuel Oil, HFO)의 사용 금지를 승인하였다. 중질유 관련 현재 규정들의 허점들로 인해 많은 선박이 적절한 규제 없이 항해를 계속할 것이라는 환경단체들의 비판을 받아들이는 것인데 일부 예외 조건과 유예기간이 존재하지만 향후 극지를 운항하는 선박이나 해양구조물 운용 시 지속 가능하면서 좀 더 환경친화적인 연료나 장비의 사용이 강제화되면서 선박의 구조나 설계에도 상당한 기술적 변화가 있을 것으로 예상된다.

EU/구미권에서 극지공학의 기술적 선두주자는 노르웨이라 볼 수 있는데 노르웨이에서는 EU에서 예산을 지원하는 SAMCoT/NTNU 대학 과제를 통해 북극해 및 주변 해역에서의 자원개발과 선박과 해양구조물의 빙성능 평가 및 유빙관리(Ice Management) 기술 등을 연구하고 있다. 빙-구조물 수치해석 기술과 빙해역 선박 운항 시뮬레이터 분야에서도 앞서 나가고 있으며 최근에는 프로토타입의 자율주행 컨테이너 상선 연구도 이루어지고 있다. 핀란드의 경우는 Aker Arctic사를 중심으로 새로운 개념의 쇄빙선박 개발을 주도하고 있으며 최근에는 북극해 항로를 단독 운항하는 쇄빙컨테이너선도 시도하고 있다. 미국은 러시아의 북극해 영유권 주장과 어업 방해

에 대응하기 위하여 최근 해안경비대 쇄빙선인 'Polar Star'호의 북극해 동계 초계임무를 재개했는데 이는 1982년 이래 처음이었다. 미국 의회는 2020년 6척의 신조 쇄빙선 확보에 대한 국방방법안을 통과시키고 건조예산도 할당한 바 있다.

### 4.3 일본 동향

일본 정부는 2016년 러시아와 경제협력 구상에 대한 실현 방안을 논의했으며 2018년 제3기 해양정책기본계획(2018년~22년)에 북극정책을 포함시켰다. 원래 일본은 서방의 러시아 제재에 동참하는 국가로, 정부의 직접적인 주도로 북극권 문제에 접근하는 대신 자신의 경험과 기술을 이용한 참여에 중점을 두고 있으며 동시에 민간기업 주도의 협력사업을 장려하는 정책을 시행하고 있다. Yamal LNG 프로젝트와 같이 지분 참여와 같은 직접적인 투자가 아닌 LNG 공장 건설, LNG운반선 건조, 환적터미널 건설 등 인프라 및 기술 투자방식으로 진행하고 있다. 일본의 문부과학성은 2020년 '지속가능성 있는 북극 도전 II (ArCS II: Arctic Challenge for Sustainability II)' 프로젝트를 발표한 바 있다. 이 프로젝트는 북극연구 프로젝트(ArCS 2015년~19년)의 후속사업으로서 2020년부터 2025년까지 수행하는 북극 관련 국책사업이다. 이 사업의 공동연구기관으로 국립극지연구소(NIPR), 일본해양연구개발기구(JAMSTEC) 및 홋카이도대학이 참여하고 있다. 최근 일본의 경우 경제적으로 보나 학술적으로 보나 2010년대 이전에 비해 극지공학 연구의 역동성은 많이 떨어진 듯한 느낌이다.

### 4.4 중국 동향

중국의 북방정책과 러시아와의 협력 현황을 살펴보면, 중국 정부는 2017년 북극을 공식적으로 일대일로 구상에 포함시킨 '일대일로 구상 해양협력전략'을 발표하였고 2018년에는 일대일로에 빙상 실크로드를 포함시킨 '북극정책백서'를 수립하였다. 중국은 러시아의 신동방정책 추진을 위한 파트너 역할을 수행하며 러시아는 중국의 대륙간 육해상 네트워크 구축을 통한 운송로 다각화 전략의 파트너 역할을 수행함으로써 양국의 협력관계는 적극적으로 발전하고 있다. 이는 최근 미국의 대러시아 정책 및 대중국 정책의 흐름에 따라 중국과 러시아 관계가 더욱 가까워지는 것을 볼 수 있다. 한편 중국은 북극 지역과 관련된 사안들에 움저버 국가가 아닌 이해관계자로서 직접적인 참여를 희망하고 있는데 중국 정부는 석유나 천연가스, 광물, 수산자원 등 자원개발 프로젝트에 자국 기업을 중심으로 직접 투자방식으로 참여하고 있다. 중국은 Yamal LNG 프로젝트 지분 참여를 통해 LNG 수입원 확보, LNG 운반을 위한 용선계약 등을 추진했으며 2017년 Arctic LNG-2 프로젝트 실행을 위한 파트너십 계약도 체결한 바 있다.

### 4.5 국내 동향

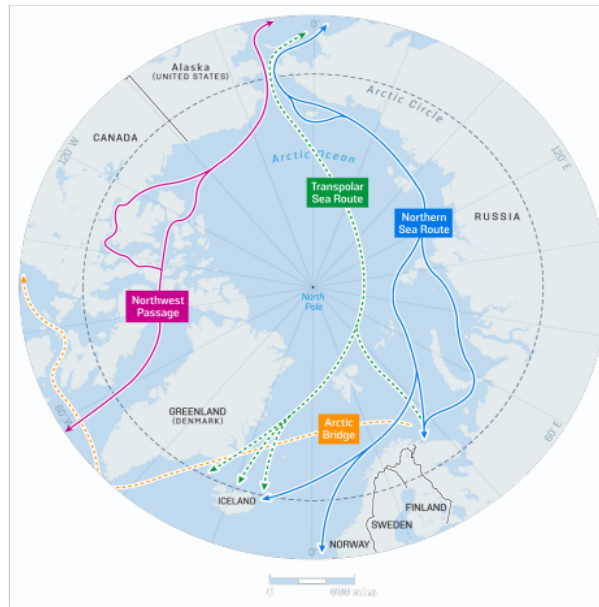
석유와 천연가스 자원의 안정적 확보와 극지개발 경쟁에의 참여라는 관점에서 볼 때 우리나라도 극지공학 분야에 대한 독자적인 연구와 기술축적이 절실히 요구되고 있는 시점이다. 우리나라의 북극 관련 정책으로 2013년 '북극정책 기본계획(2013년~17년)'이 처음으로 수립된 바 있다. 북극정책 기본계획에서 북극해 항로와 관련한 직접적인 내용은 '북극 비즈니스 발굴·추진' 전략 항목에서 '북극항로 개척 등 해운·항만 협력'이라는 세부 추진과제로 포함되었다. 이에 따르면 북극해 통과화물 선박의 국내 유치를 위한 방안으로 항만 시설 사용료 감면 및 인센티브를 제공하는 정책이 명시되었는데 2018년 머스크 선사의 선박이 부산항을 들러 북극항로 시범운항을 할 때 관련 정책의 혜택을 받은 것으로 파악된다. 2017년 우리 정부는 신북방경제를 주관하기 위한 북방경제협력위원회를 출범하고 'Nine Bridge 전략'을 발표하면서 가스, 철도, 항만, 전력, 북극항로, 조선, 농업, 수산, 일자리 등의 분야에 해외 협력사업 추진을 발표하였다. 여기서는 국가간 협력을 바탕으로 북극항로 및 북극권 자원개발 본격화에 대비하여 인프라, 법·제도 등 제반 여건을 조사하고 북극지역 비즈니스 진출 여건을 조성하는 것을 목표로 하고 있다. 북극항로 진출로 해운과 조선 신시장을 개척하기 위해서 러시아와의 협력을 특별히 강조하고 있는데 하지만 철도 및 가스 파이프라인 연결 등은 북한 문제가 해결되어야 추진이 가능하기에 가시적인 성과는 쉽지 않다고 보인다. 북극정책 기본계획과 신북방정책에 따라 앞서 언급한 KoARC(한국북극연구컨소시엄)가 발족하였다. KoARC는 그간 개별적으로 분산 활동하던 국내 북극연구자 간의 협력 증대와 우리나라의 북극권 진출 기여를 목적으로 국내의 극지 관련기관들이 모인 조직으로 북극항로 국제 세미나와 북극협력주간(Arctic Partnership Week) 행사가 매년 부산을 중심으로 열리고 있다.

한편 2019년 한국-노르웨이 북극 연구기관간 협력의정서가 체결되었고 우리나라의 북극 과학연구에 대한 기여도를 높이고 북극권 국가와의 협력 강화를 기대할 수 있게 되었다. 2020년에는 해양수산부의 '극지과학 미래발전전략'이 발표되었는데 여기에 차세대 쇄빙연구선 사업이 포함되었다. 2009년 Araon호 건조 이후 두 번째로 계획되는 차세대 쇄빙연구선 건조사업은 2022년부터 5년 동안 총사업비 3,250억 원 규모의 예산으로 친환경 연료를 사용하는 추진방식의 대형선으로 2026년 진수될 예정이다.

## 5. 전망

1980년대 후반부터 본격적으로 시작된 국내의 빙역학/극지공학 연구도 삼십여 년의 시간이 흘러 이제는 국제사회에서 학문적으로 충분히 목소리를 낼 수 있는 단계에 이르렀다는 생각이 든다. 2009년 선박해양플랜트연구소(KRISO)에 국내 최초의 빙해수조를 건설하였고 극지연구소(KOPRI)의 쇄빙연구선 아라온호도 건조되어 남북극 빙해역 탐사활동에 투입되고 있다. 세계를 선도하는 국내의 조선산업은 빙해역을 운항하는 쇄빙선박과 극지 해양플랜트 건조 경험을 확보하였고, 국내 해운업계에서는 쇄빙탱커나 쇄빙LNG선, 그리고 최근에는 쇄빙컨테이너선의 북극해 항로 운항도 가능할 것으로 예상하고 있다. 향후 북극해의 자원개발과 북극해 항로를 통한 물류수송 확대를 희망하고 있지만 2020년부터 세계를 휩쓴 COVID 팬데믹과 우크라이나 전쟁의 여파는 여전히 미래 전망이 명확하지는 않다는 것을 보여주고 있다. 하지만 지구온난화에 따른 급격한 해빙 축소는 북극해에 신항로(러시아 EEZ 외곽 고위도 항로)의 출현도 예고하고 있으며 이러한 환경 변화에 선제적으로 대응하는 운항기술도 요구된다. 북극해 항로 활성화에 대비해 국내 기업(선사, 조선소 등)의 수요에 대응하고, 국제기구(IMO, ITTC)의 기술규제 대응을 위한 기반도 구축해야 할 것이다.





<그림 6 Possible Sea Routes across the Arctic Ocean>

### 참고문헌

- Cammaert, A.B. and Muggeridge, D.B., 1988, Ice Interaction with Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Michel, B., 1978, Ice Mechanics, Les Presses De L'universite Laval, Quebec, Canada.
- Nozawa K.(野澤和男), 2006, 氷海工學, 成山堂書店, 東京.
- Ostreg, W.(ed), 1999, INSROP Integration Book - The Challenge of the Northern Sea Route, INSROP Working Paper No.167.
- Sanderson, T.J.O., 1988, Ice Mechanics - Risks to Offshore Structures, Graham & Trotman, London.
- 최경식, 1997, “극지공학에 있어서 산학연구의 국내외 전망(1)” 대한조선학회지, 1997년 7월.
- KoARC 2020년 기획보고서 “북극 환경변화 대응 및 북극진출 활성화를 위한 4차 산업혁명 핵심기술 활용 융복합 기술 개발” 2021년 3월, 해양수산부.

현재 국외에는 빙해용 해양구조물 혹은 빙역학을 다루는 전문서적이 몇 가지 발간되어 있다. Michel(1978)의 ‘Ice Mechanics’, Eranti and Lee(1986)의 ‘Cold Region Structural Engineering’, Cammaert and Muggeridge(1988)의 ‘Ice Interaction with Offshore Structures’ 그리고 Higashi(1981)의 ‘寒地工學基礎論’ 등이다. 국내에서는 1995년 처음으로 필자에 의해 Sanderson(1988)의 영문판 ‘Ice Mechanics - Risks to Offshore Structures’가 ‘빙역학과 극지용해양구조물’란 제목으로 한글로 번역되었으며 일본의 Nozawa(2006)가 지은 ‘氷海工學’도 2010년 한글판으로 번역 출간되었다. 이들은 기술적인 수준으로 볼 때 빙역학/쇄빙선박에 관한 비교적 일반적인 사항을 다루고 있어서 입문서나 참고서적으로 보는 것이 더 타당할 것이다. 그리고 2015년 필자에 의해 발간된 ‘쇄빙선박과 빙하중’은 지금까지의 입문서와는 달리 쇄빙선박 설계와 건조에 참여하는 전문가를 위한 빙하중이란 주제를 다루고 있다.