

이학석사 학위논문

상세 미래기후예측자료를 이용한
북극항로의 선박 접근성에 관한 연구

지도교수 오 재 호



부경대학교 대학원

환경 대기 과학과

진 현 근

이학석사 학위논문

상세 미래기후예측자료를 이용한
북극항로의 선박 접근성에 관한 연구

지도교수 오 재 호

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.

2014년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 대 기 과 학 과

진 현 근

진현근의 이학석사 학위논문을 인준함.

2014년 7월 25일



주	심	이학박사	김 재 진	(인)
위	원	이학박사	정 형 빈	(인)
위	원	이학박사	오 재 호	(인)

목 차

그림 목차	ii
표 목차	v
Abstrack	vi
I. 서론	1
1. 연구배경	1
2. 선행연구 분석	4
3. 연구목표	6
II. 자료 및 연구방법	8
1. 모델 및 자료	8
2. 연구영역	12
3. 연구방법	14
III. 결과	20
1. 북반구 해빙 면적 변동성 분석	20
2. 쇄빙선 유형별 항해가능시기 및 기간	30
3. 쇄빙선 유형별 최적항해경로 예측	38
IV. 결론	44
V.참고문헌	46

List of Figures

- Figure 1. Grid generation by successively halving the triangle edges to form new triangles. 10
- Figure 2. Navigation routes used in this analysis (NWP, TPR, NSR) international high seas, and marine EEZs (dashed lines) of Canada, Greenland, Norway, Russia, and the U.S. within the IMO Arctic Ship Guidelines Boundary (thick black border) (Stephenson et al, 2013) 13
- Figure 3. Monthly Arctic Sea Ice Extent during 1979–2009 between Hadl–SST SIC (blue) and GME–AMIP experiment results (red) (units : km²). 22
- Figure 4. Annual mean Arctic sea ice extent for RCP 4.5 (blue line) and RCP 8.5 (red line) scenarios (units : km²). 25
- Figure 5. Arctic Sea Ice Extents for RCP4.5 scenario (left) and RCP8.5 scenario (right). Black lines mean average extents for AMIP data (1979–2009), Green lines for twenty-first cen-

	<p> tury (2010–2039), blue lines are average extents for mid twenty–first century (2040–2079) and red lines are for late twenty–first century (2070–2099). 26 </p>
Figure 6.	<p> Monthly Arctic Sea Ice Extent based on the RCP 4.5 scenario (units : km²) 27 </p>
Figure 7.	<p> Same as Figure 6, but based on the RCP 8.5 scenario (units : km²). 27 </p>
Figure 8.	<p> Trends of sea ice thickness over the Arctic Ocean among early twenty–first century (2010–2039), mid twenty–first century (2040–2079) and late twenty–first century (2070–2099) (units : m/decade). 29 </p>
Figure 9.	<p> Mean navigation days for the early twen- ty–first century (2010–2039) over the Arctic Ocean by RCP4.5 (right) and RCP8.5 (left) scenarios. (top) OW type (mid) PC6 type (bottom) PC3 type (units : days). 31 </p>
Figure 10.	<p> Same as Figure 9, but for the mid twen- ty–first century (2040–2069) (units : days) ... 33 </p>

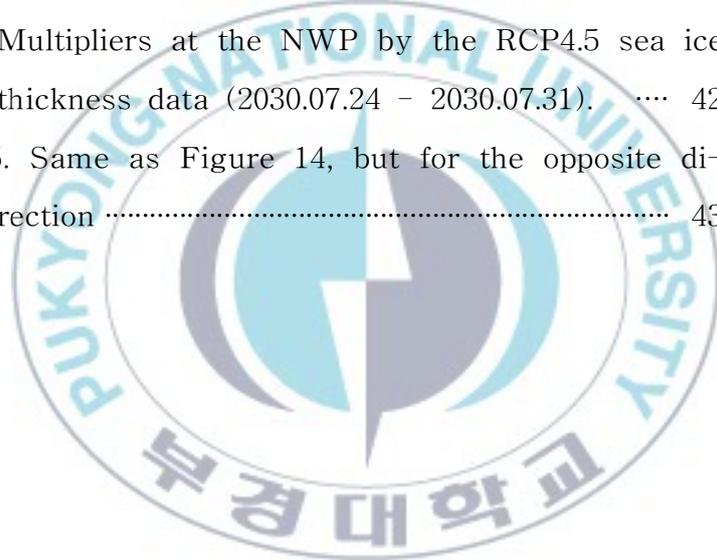
Figure 11. Same as Figure 9, but for the late twenty-first century (2070–2099) (units : days) ... 35

Figure 12. Optimal navigation route for OW and its Ice Multipliers at the NSR by the RCP4.5 sea ice thickness data (2040.07.21 - 2040.07.29). 40

Figure 13. Same as Figure 12, but for the opposite direction. 41

Figure 14. Optimal navigation route for PC6 and its Ice Multipliers at the NWP by the RCP4.5 sea ice thickness data (2030.07.24 - 2030.07.31). 42

Figure 15. Same as Figure 14, but for the opposite direction 43



List of Tables

Table 1. CMIP5 boundary data for RCP scenarios based on GME.	11
Table 2. Polar Class Descriptions (IMO, 2010)	15
Table 3. Ice Multipliers for selected vessel classes (Transport Canada, 1998)	16
Table 4. Ship-accessible days for vessel classes at the Northern Sea Route (NSR) (Shaded days mean days of next years).	36
Table 5. Same as Table 4, but for the Northwest Passage (NWP)	37
Table 6. Container ship Shanghai - Hamburg via the NSR (Source : Østreng et al, 2013)	39
Table 7. Same as Table 6, but for the NWP (Source : Østreng et al, 2013)	39

Study on Ship Accessibility at the Arctic Sea Routes
based on RCP scenarios

Hyun-keun Jin

Department of Environmental Atmospheric Sciences,
The Graduate School, Pukyong National University

Abstrack

Change of arctic sea ice extent by climate change offers new opportunity as social, environmental and economic aspects. Especially, it becomes an important issue to use the Arctic ship route via Northern Sea Route(NSR) and Northwest Passage(NWP).

It's so difficult to decide navigation durations and ship accessibilities as an economic aspect with regarding to potential impacts. So, we need more detail information for significant change over the arctic. High resolution climate model may provide a regional information on the changes in arctic sea ice extent as well as thickness in detail.

GME used in this study is a high-resolution model

adopted on icosahedral-hexagonal grid.

As an evaluation of model simulation overestimates the sea ice extent compared to observation for all months in 1979-2009. However, it is in a good agreement with observed data (HadlSST-SIC) in term of the maximum in March and the minimum in September.

We analyzed thickness and extent changes of the Arctic sea ice for the future. Projections of marine accessibility has been estimated based on daily sea ice thickness data for 2010-2039, 2040-2069, and 2070-2099.

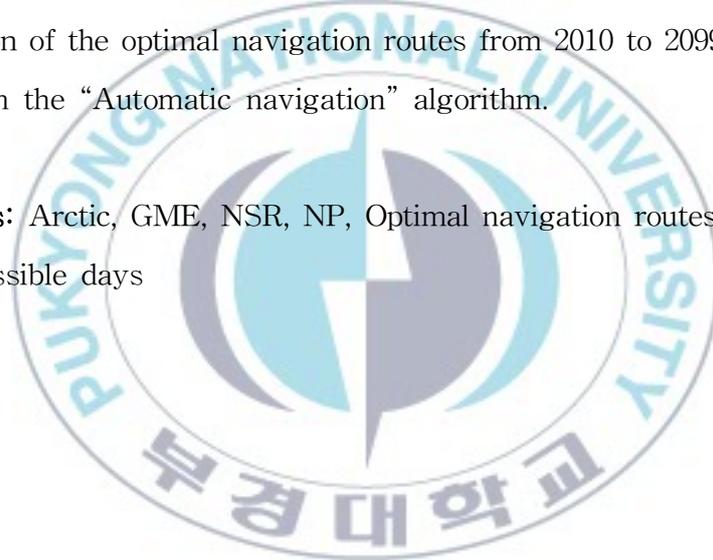
With the RCP 4.5 scenarios, sea ice has maintained until 2100 except for Barents Sea. Under RCP 8.5 scenario, the sea ice extent decreased dramatically after 2060. Finally, it would be continue the almost ice-free seasons over the Arctic in 2090s.

Ship-accessible days which is estimated by three vessel classes(PC3, PC6 and OW) from 2010 to 2099. Under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, changes in terms of day over study area for vessel classes, PC3 has the largest and OW shows the smallest among the three vessel types. After 2070, PC3

and PC6 may be possible to access year-round over the Arctic Ocean with the RCP 8.5 scenario. In contrast, OW shows seasonal handicap that is hard to pass through the NSR and NP.

In conclusion, we have performed a study to estimate the ship accessibility for Northern Sea Route (NSR) and Northwest Passage (NP) based on the future climate with RCP 4.5 and 8.5 scenarios. And this study has suggested prediction of the optimal navigation routes from 2010 to 2099 based on the “Automatic navigation” algorithm.

Keywords: Arctic, GME, NSR, NP, Optimal navigation routes, Ship-accessible days



I. 서론

1. 연구배경

최근, 기후변화로 인해 북극의 해빙감소 추세가 급격하게 나타남에 따라, 이에 대한 계절변동 및 경년변동에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한, 북극 해빙의 급격한 감소는 북극지역의 비가역적 변화를 촉진할 수 있다. 이러한 환경변화는 지금까지 정치적·경제적·환경적 제약으로 인해 활용할 수 없었던 북극해 항로를 재조명하는 계기가 되었다.

북극해 주변에 부존하고 있는 천연자원 개발 이외에도 북극항로 개척을 통한 수송거리의 단축은 시간 및 비용 절감으로 인해 세계 각국의 관심이 높아지고 있다. 예를 들어, 부산에서 유럽 로테르담까지 수에즈 운하를 경유하는 남단항로(Southerly route)를 이용할 경우의 이동거리는 17,419km(10,824마일)이지만 북극을 경유하는 북동항로(Northern Sea Route, 이하 NSR)를 이용할 경우 12,147 km(7,548마일)로 운송거리가 30% 이상 단축된다(남청도·김정만, 2010). 북동항로(NSR) 이용에 따른 경제적 효과는 최대 40% 비용절감 효과

가 있을 것으로 전망하였다 (Liu and Kronbak, 2010). 또한, 북서항로(Northwest Passage, 이하 NWP)를 이용할 경우, 노르웨이 트롬소(Tromso)에서 캐나다 밴쿠버(Vancouver)까지 이동거리가 37%(5,391km/ 3,350마일) 단축된다 (최경식·조성철, 2003).

그 외에도, 북극해 개발에 따른 경제적 파급효과는 물류업, 조선해양 플랜트 산업, 석유화학 등에 다양한 산업에 걸쳐 영향을 미칠 것으로 전망된다 (황진회 외, 2010).

우리나라의 경우, 운송비용 절감에 따른 경제적 이윤 창출 이외에도 안정적인 국제 교역로 확보 차원에서 북극항로는 하나의 대안이 될 수 있다. 세계 경제성장 및 FTA 체결 등을 통해, 국가 간의 무역규모 확대되고 있으며, 이러한 경제교역은 대부분 선박을 통해 이루어지고 있다. 특히, 우리나라의 경우 전체 교역량의 99.8%를 선박에 의존하고 있다 (KB 금융지주 연구소, 2013). 2012년 기준, 우리나라의 전체 원유 수입량에서 남단항로를 통해 수급되는 원유의 비중이 100% 이다¹⁾.

만약, 선박들의 병목현상이 자주 발생하게 되는 말라카 해협 부근에서 해상사고가 발생하거나, 남중국해 부근의 영해분

1) 2012년 현재, 우리나라의 전체 원유 수입량은 947만 배럴(bbl)이며, 수입국가 현황을 살펴보면 사우디아라비아(32.0%), 쿠웨이트(14.5%), 카타르(11.0%), 이라크(9.8%), UAE(9.1%), 이란(5.9%) 등 총 6개국이다 (출처 : e-나라지표 <http://www.index.go.kr>).

쟁에 따른 국제적인 갈등이 발생하게 남단항로를 이용한 교역에 차질을 주어 우리나라 경제전반에 타격을 입을 수 있다. 따라서, 천연가스 등 안정적인 에너지 수급 및 대체 교역로 확보 차원에서 북극항로 개발이 중요하다.

기후변화에 따른 북극해빙의 감소가 뚜렷하게 나타날 것으로 전망됨에 따라, 북극항로 개발에 따른 경제적 잠재력은 점진적으로 성장할 것으로 기대된다. 이러한 북반구 해빙두께 및 면적, 공간 분포의 변화는 북극항로에 대한 선박의 접근가능 지역, 항해 가능 일수의 길이, 잠재적인 수송량에 대한 경제성을 결정하는데 매우 중요한 요소이기 때문이다. 하지만, 국내외에서 북극항로 개발의 잠재력을 인식하고 있지만, 경제적 과급효과 예측에 필요로 하는 참고자료가 부족한 실정이다.

북극항로의 이용은 연중 가능한 것이 아니라 해빙의 확장 과 수축에 따라 계절적 제약이 존재한다. 미래의 기후변화에 따른 북극해빙 환경변화와 구체적인 항해가능시기에 대한 자료수요가 증가할 것으로 전망된다.

2. 선행연구 분석

가. 북반구 해빙 변동성에 관한 연구

2007년과 2012년 9월 해빙면적은 1979년 관측 이래로 가장 크게 감소하였다. 1~2년차 해빙(perennial ice)의 경우, 지난 10년간 12% 감소하였고, 다년차 해빙(multiyear ice)은 지난 10년 간, 15% 감소하였다 (Comiso, 2012). 1~2년차 빙하(perennial ice)에 비해 상대적으로 두터운 다년차 빙하(multiyear ice)의 감소추세가 더 크게 나타나는데, 이는 북극의 전반적인 해빙의 감소를 의미한다 (Comiso, 2012). 향후에는 대기중 온실가스 농도가 높아짐에 따라 이러한 변화는 가속화될 것으로 전망된다.

선행연구에 따르면 북극의 해빙(sea ice)이 소멸되는 시기에 대하여 다소간의 차이는 있다. Wang and Overland(2009)에 따르면, 북극 해빙(sea ice)이 최초로 사라지는 시기를 2037년 9월로 예측하였다 (Wang and Overland, 2009).

『IPCC 4차 보고서』에서는 여름철 북극 해빙이 최초로 소멸되는 시기를 2040년 전후로 추정하고 있으며, 2070년 이후에는 북반구 해빙의 대부분이 소멸될 것으로 예측하고 있다 (IPCC, 2007).

나. 북극항로 개발에 관한 전망

노르웨이 ECON (社)에서 북극항로를 활용한 화물, 원유, LNG 가스 및 목재 등 해상운송 가능성에 대해 3가지 시나리오를 제시하고 있다. 이 중 『신생 동서기간항로(Stormy Passage) 시나리오』에서는 여름철에 한하여 아시아-북극해-유럽 또는 아시아-북극해-북미 간 운송서비스가 상업적으로 가능하다고 전망하였다 (ECON, 2007). 하지만, 이 연구에서는 미래의 기후변화 양상 및 해빙변화에 대한 구체적인 정보가 부족한 상태에서 경제성을 평가하였기 때문에 한계점이 있다.

Khon et al(2010)의 연구에서는 IPCC 4차 보고서 A1B 시나리오(6개 모델 앙상블)를 이용하여, 북동항로(NSR)과 북서항로(NWP)에 대한 항해가능기간을 예측하였다. 이 연구에서는 선박의 유형을 고려하지 않고, 빙하의 유무(해빙농도 15%를 기준)에 따른 항해가능 여부를 판별하였다. 북동항로(NSR)의 항해가능 기간은 3~6개월, 북서항로(NWP)의 항해가능 기간은 2~4개월로 전망되었다.

기존의 연구들은 GCM을 이용하여 생산한 미래기후 예측자료(2010~2099년 간)를 바탕으로 미래의 북극 해빙면적 변화 및 쇄빙선 유형(Polar Class)별 항해가능기간을 예측하였다 (Stephenson et al., 2013 and Rogers et al., 2013). 위의 연

구에서는 다양한 선박 유형별 항해가능기간을 분석하고 있으나, 항해가능시기와 종료시기가 일부기간에 국한하여 제공되거나 월단위로 제시되고 있으며, 북극항로에 대한 선박의 최적항로와 같은 구체적인 정보를 제공해주지 못하는 한계점이 있다.

3. 연구목표

본 연구의 목표는 다음과 같다. 1) 일단위의 쇄빙선 유형별 항해가능시기 및 기간 예측, 2) 해빙의 공간적 분포를 고려한 쇄빙선 유형별 최적항해경로 예측 및 분석이다. 특히, 시·공간적으로 상세한 미래기후 예측자료(40km)를 활용하여, 미래의 북극해 해빙환경 변화 및 일단위의 항해가능시기 및 기간에 대해 분석하였다. 또한, “자동항해내비게이션” 알고리즘을 개발하여, 북동항로(NSR) 및 북서항로(NWP)에 3가지 쇄빙선 유형별 최적항해경로를 제시하고자 한다.

II. 자료 및 연구방법

1. 모델 및 자료

본 연구에서 사용한 Operational Global Model and regional model for central Europe(GME) 모델은 독일 기상청(Deutscher Wetterdienst)에서 개발한 수치예보 (Numerical Weather Prediction) 모델이다 (Majewski et al., 1998).

모델의 수평 좌표계는 icosahedral-hexagonal grid로 구성되어 있다(Figure 1). 연직 좌표계의 경우 hybrid (sigma and pressure) layer이다.

본 실험에서 사용한 상세 미래기후 예측자료의 경우, GME 모델을 이용한 현재기후(1979-2009년, 31년간) 실험 및 미래기후(1979-2100년, 122년간) 실험의 산출물이다. 이를 위해 사용된 GME 모델의 버전은 v2.24이며, 수평해상도 40km, 연직 40층이다.

모델의 초기장은 ECMWF ERA40을 이용하였다. 현재기후(1979-2009) 실험에 대한 경계자료는 AMIP 관측 해수면

자료(Sea Surface Temperature, SST) 및 해빙농도 자료(Sea Ice Concentration)를 이용하였으며, 미래기후(1979-2100)에 대한 경계자료는 RCP4.5 and RCP8.5 시나리오 기반의 CMIP5 4개 모델에 대한 산술평균 값을 이용하였다 (Table 1). 경계자료의 처방간격은 일간격(Daily Interval)으로 하였다.

연구에 사용된 변수는 해빙두께 자료를 사용하였으며, 자료의 단위는 m 이다. 자료의 간격은 일 간격이며 수평 40km의 해상도를 갖는다.

GME 모델에서 해빙의 경우 해빙층에 대한 열역학적 효과를 고려하여 모의하도록 구성되었다(Mironov and Ritter, 2003 and Mironov and Ritter, 2004). 해빙층의 온도 연직 프로파일의 경우, 일정한 값으로 고정된 것이 아니라 시간의 경과함에 따라 가변하면서 정의되며, 해빙층을 통한 열전도는 대량 접근 양식을 통해 매개변수화 하였다. 해빙의 온도와 대기에 접하는 해빙의 두께 등 두 가지 진단변수가 있다. 모델이 SST에 대한 모의를 수행하는 과정에서 매일 00 UTC에 대한 경계자료를 반영하며 해빙변수를 계산한다. 해빙두께의 경우 최대 3m 이하의 값으로 모의하게 된다 (Majewski et al., 2002).

현재기후(1979-2009)에 대한 모델의 모의성능을 검증하

기 위해 Hadl-SST Sea Ice Concentration 자료를 이용하였다. 자료의 수평 해상도는 $1^\circ \times 1^\circ$ 이며 시간간격은 월간격이다.

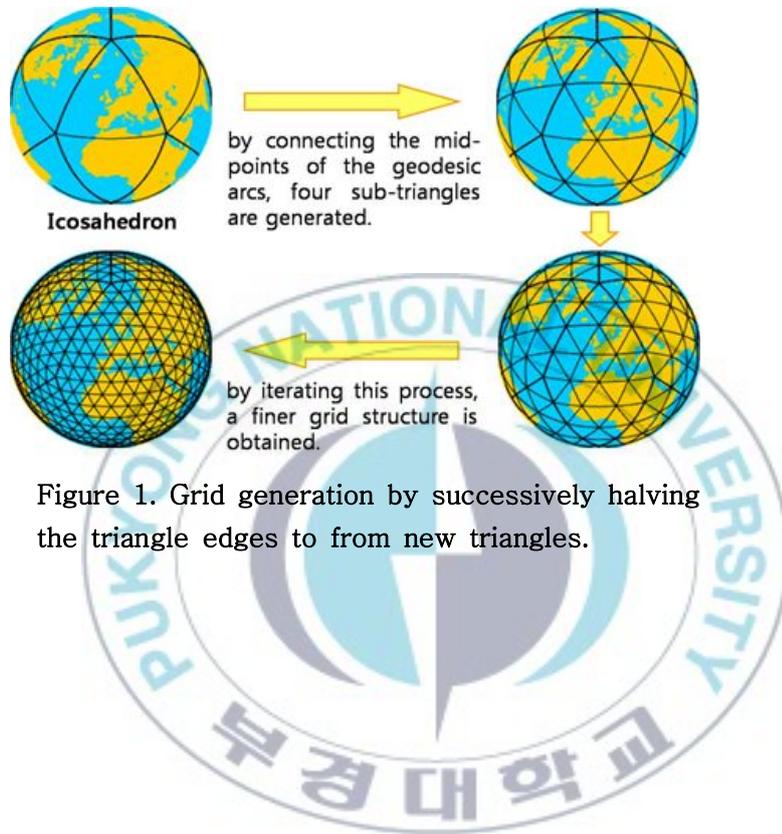
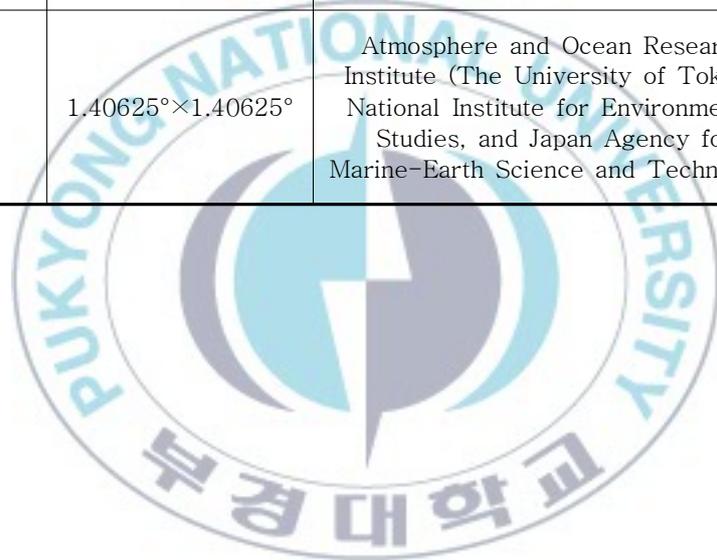


Figure 1. Grid generation by successively halving the triangle edges to form new triangles.

Table 1. CMIP5 boundary data for RCP scenarios based on GME.

Model	Resolutions	Institution
CanESM2	2.8125°×2.8125°	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)
CNRM-CM5	1.40625°×1.40625°	Centre National de Recherches Meteorologiques/Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS)
HadGME2-ES	1.875°×1.24°	Met Office Hadley Centre (MOHC)
MIROC5	1.40625°×1.40625°	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology



2. 연구영역

IMO(2007)에 따르면, 북극에 대한 정의를 66.5N° 이상의 북극해 주변지역으로 규정하고 있다(IMO, 2007). 본 연구에서 66.5N° 이상 북극해 주변지역 및 북극항로 주변지역을 중심으로 분석을 수행하였다.

북극해를 경유하는 주요 항로를 살펴보면 동아시아-유럽을 통하는 북동항로(Northern Sea Route, NSR), 북아메리카-유럽을 통하는 북서항로(Northwest Passage, NWP), 북극해를 관통하는 Trans-Polar route 3가지로 구분된다(Stephenson et al, 2013) (Figure 2). 여기서 북동항로(NSR)란, 서쪽의 러시아 무르만스크(Murmansk)에서 동쪽의 베링해협까지를 연결하는 길이 약 2,200~2,900마일인 해상수송로를 의미한다(최경식·조성철, 2003).

북극 항로 개발관련 선행연구의 경우, 주로 북극해 전체지역을 대상으로 연구를 수행하거나 북동항로(NSR)에 국한되어 있다. 특히, 북서항로(NWP)에 대한 선행연구 사례는 부족하다. 하지만 본 연구에서는 북극해빙이 점차 감소함에 따른 북동항로(NSR) 뿐만 아니라, 북서항로(NWP) 역시 잠재적인 북극항로 개발 가능성이 있다고 판단되어 연구 범위를 확대하였다.

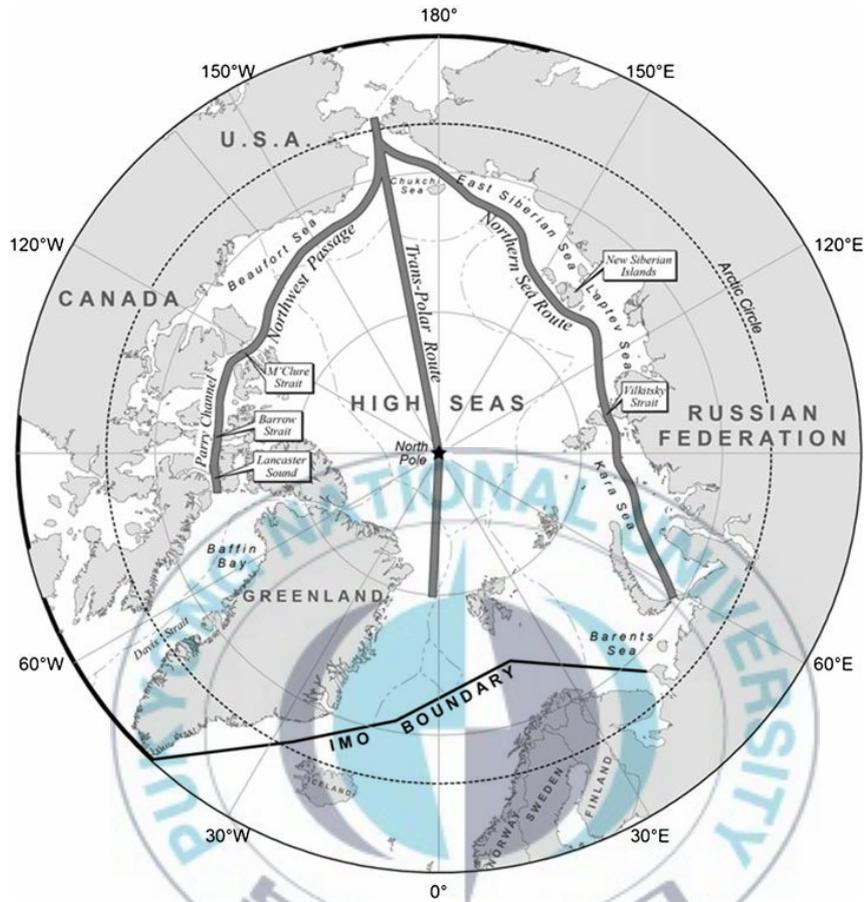


Figure 5. Navigation routes used in this analysis (NWP, TPR, NSR) international high seas, and marine EEZs (dashed lines) of Canada, Greenland, Norway, Russia, and the U.S. within the IMO Arctic Ship Guidelines Boundary (thick black border) (Stephenson et al, 2013)

3. 연구방법

가. 쇄빙선 유형별 항해가능일수 분석

(1) 쇄빙선의 분류

북극 지역을 항해하는 선박에 대하여 다수의 분류방법이 존재한다. Transport Canada(1998)는 해빙두께에 대한 저항력을 고려해 선박의 종류를 8가지로 분류하고 있다 (Table 2). 이러한 분류방법을 Polar Class라고 한다. 지난 2006년, International Association of Classification Societies (IACS)에서 Polar Class를 국제표준 분류기준으로 채택하였다.

선행연구와 마찬가지로 본 연구에서도 분석대상을 쇄빙선(PC3), 경량쇄빙선(PC6), 일반상선(OW) 등 3가지 선박을 선정하였다.

Table 2. Polar Class Descriptions (IMO, 2010)

Polar Class	Ice description
OW	No ice strengthening
PC1	Year-round operation in all polar waters
PC2	Year-round operation in moderate multi-year ice conditions
PC3	Year-round operation in second-year ice which may include multi-year ice inclusions
PC4	Year-round operation in thick first-year ice which may include old ice inclusions
PC5	Year-round operation in medium first-year ice which may include old ice inclusions
PC6	Summer/autumn operation in medium first-year ice which may include old ice inclusions
PC7	Summer/autumn operation in thin first-year ice which may include old ice inclusions

(2) 항해가능지역의 정의

Stephenson et al. (2013)는 해빙의 두께에 따른 쇄빙선 유형 및 해빙두께를 고려하여 항해가능여부를 판별하는 지수인 빙하승수(IM)을 제시하였다 (Table 3). IM이 양수이면 항해가능, IM이 음수이면 항해불가능을 의미한다. 본 연구에서는 이를 이용하여 3가지 선박(PC3, PC6, OW)에 대한 항해가능지역과 항해불가능지역을 판별하였다.

Table 3. Ice Multipliers for selected vessel classes (Transport Canada, 1998 and Stephenson et al. 2013)

Sea-ice type (n)	Thickness (cm)	Ice Multiplier		
		PC3	PC6	OW
Open water	~ 10	2	2	2
Gray	10 ~ 15	2	2	1
Gray-white	15 ~ 30	2	2	-1
Thin 1st-year, 1st stage	30 ~ 50	2	2	-1
Thin 1st-year, 2nd stage	50 ~ 70	2	2	-1
Medium 1st-year	70 ~ 120	2	1	-2
Thick 1st-year	120 ~ 140	2	-1	-3
2nd-year*	140 ~ 190	1	-3	-4
Multi-year*	190 ~	-1	-4	-4

나. 쇄빙선 유형별 최적항해경로 알고리즘

북극 해빙의 두께 및 공간적 분포를 고려하여 북극항로에 대한 3가지 쇄빙선 유형별 최적항로를 추정하는 알고리즘에 관하여 서술하겠다.

【 1단계 】 북극해빙의 두께를 고려하여, 3가지 쇄빙선 유형별

항해가능지역 / 항해불가능지역 정의 (Table 3 참조)

【 2단계 】 북극항로(NSR/NWP)에 대한 횡단가능 여부 판별 (쇄빙선 유형별 항해가능일수를 구함)

【 3단계 】 북극항로에 대한 출발지점과 도착지점 설정

◎ 북동항로(NSR) 출발점 / 도착점

- 프로비데니아(Provideniya)²⁾ ↔ 무르만스크(Murmansk)³⁾

◎ 북서항로(NWP) 출발점 / 도착점

- 프로비데니아(Provideniya) ↔ 우페르나비크(Upernavik)⁴⁾

2) 프로비데니아(Provideniya)는 러시아 최동단 추코트 반도에 위치한

【 4단계 】 북극항로에 대한 출발점-도착점 사이 중간지점을 설정하고, 각 구간별 출발지점과 도착지점을 임시출발점과 임시도착점으로 설정함.

(북동항로(NSR) : 8개 지점, 북서항로(NWP) 7개 지점)

【 5단계 】 구간별 최단거리에 대한 기울기를 구함.

(북동항로(NSR) : 9개 구간, 북서항로(NWP) 8개 구간)

【 6단계 】 임시출발점에서 구간별 도착지점까지 동서남북 방향으로 격자를 1칸씩 이동하면서, 구간별 최단거리에 대한 기울기와 가장 오차가 작은 격자점을 최적항로로 정의함.

알고리즘의 1번째 단계는 북극해 해빙의 두께를 고려하여, 3가지 쇄빙선 유형별 항해가능지역과 불가능지역을 정의하는 단계이다.

항만도시로 외국국적 선박의 접안이 가능하고, 화물처리가 가능하다.

3) 무르만스크(Murmansk)는 러시아 콜라반도(Kola Pen.)에 위치한 항만도시이다. 대서양 및 전세계 해로와 연중 교역이 가능한 러시아 북서부 지역의 유일한 북동항이다.

4) 우페르나비크(Upernavik)는 그린란드 서부해안에 위치한 항만도시이다.

2단계에서 북동항로(NSR)와 북서항로(NWP)에 대하여 횡단이 가능한지 여부를 판별하여 항해가능일수를 산출한다.

3단계에서는 북동항로(NSR)와 북서항로(NWP)의 최종적인 출발지점과 목적지를 설정하는 단계이다. 이를 위해, 북극해 연안의 주요 항만도시 중, 대형선박에 대한 접안시설을 갖춘 도시들을 선정하였다.

4단계는 북극항로에 대한 중간지점을 설정하는 단계이다. 북극항로에 대한 최적항로 추정에 있어서 지형이 협소하거나, 북극해 연안 주요 항만시설에 인접해역을 선정하였다. 특히, 북극해를 항해하는 선박에 있어서 항만시설은 매우 중요한 의미를 갖는데, 항해에 필요한 각종물품을 조달하거나 긴급피난 및 보수를 위한 유일한 거점이기 때문이다 (황진회 외, 2010).

5단계에서는 최적항로의 기준이 되는 구간별 최단거리에 대한 기울기를 구하는 단계이다. 북극항로 최종 출발점, 목적지점, 그리고 중간지점을 기준으로 하여 7~9개의 구간으로 나누었다.

6단계에서는 각 구간별 임시출발점에서 구간별 도착지점까지 격자 1칸씩 이동을 하면서 최적항해경로를 구하는 단계이다. 이때, 5단계에서 구한 최단거리에 대한 기울기와 오차가 가장 작은 격자점을 최적항로로 선정하였다.

Ⅲ. 결과

1. 북반구 해빙 면적 변동성 분석

가. 현재기후(1979-2009)에 대한 해빙 변동성

1979-2009년 (31년) 간의 북극 해빙 면적에 관한 월별 변동성을 분석을 통해 모델의 해빙모의 성능을 검증하였다. 이를 위해 모델자료는 GME-AMIP 실험(1979-2009)의 해빙두께 월평균 자료를 이용하였다. 관측 자료로는 Hadl-SST Sea Ice Concentration (위·경도 1°) 월자료를 이용하였으며, 해빙농도 15%이상 일 때 해빙면적으로 정의하였다 (Arzel et al, 2006, Lemke et al, 2007, Kattsov et al, 2010 and Rogers et al., 2013). 이는 해빙농도 15%을 해빙의 경계로 정의한 것은 실제 해빙의 경계에 부합하기 때문이다 (Lemke et al, 2007).

현재기후(1979-2009, 31년간)에 대한 북극 해빙면적을 살펴보면 GME-AMIP 모의결과(연평균 1,151만km²)는 관측(연평균 1,079만km²)에 비해 과대모의 하였다 (Figure 3).

해빙면적에 대한 월별 변동성을 살펴보면 다음과 같다.

GME-AMIP 모의결과는 관측과 마찬가지로 3월의 해빙면적이 최대로 나타났으며, 9월에 해빙면적이 최소로 나타났다 (Figure 3). 모델은 관측에 비해 연중 과대모의(2.2 ~ 10.3%, 연평균 6.7%)하는 것으로 나타났다. 상대적으로 겨울철보다 여름철의 북극 해빙면적 오차가 적게 나타났다.

이러한 결과는 GME AGCM의 해빙변화 메커니즘이 오로지 복사에너지에 의한 가열과 냉각, 대기의 열교환만 고려되고 바람에 의한 해빙이동 등 다른 요인들을 고려하지 않았기 때문에 비롯된 것으로 사료된다.



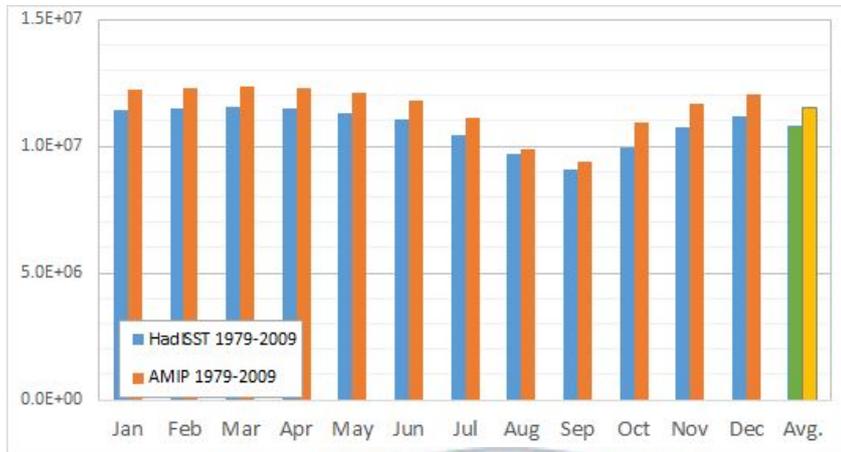
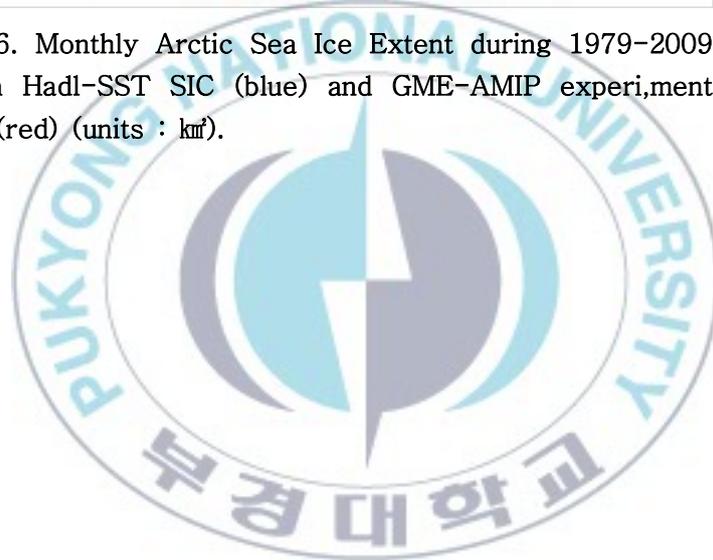


Figure 6. Monthly Arctic Sea Ice Extent during 1979–2009 between Hadl–SST SIC (blue) and GME–AMIP experiment results (red) (units : km²).



나. 미래기후(2010-2099)에 대한 해빙 변동성

미래기후에 대한 북극해 항해가능기간 및 최적항로 분석에 앞서 미래의 북반구 해빙환경 변화에 대한 분석이 필요로 하다. 2010 ~ 2099년 간, RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 이용하여, 상세 기후변화 시나리오에 따른 북반구 해빙의 공간적 분포 변화 및 해빙두께 변동성에 관하여 살펴보도록 하겠다. 미래기후 전체기간에 대한 변화를 살펴보기 위하여, 전기(2010-2039), 중기(2040-2069), 후기(2070-2099) 등 총 3개의 기간으로 나누어 분석을 실시하였다.

먼저 북반구 연평균 해빙면적 변화를 살펴보면 21세기 중반까지 RCP4.5와 RCP8.5 실험 모두 900만km² 내외로 비슷한 수준을 보이거나 RCP8.5의 해빙면적이 근소하게 넓은 것으로 나타난다. 21세기 중반 이후, RCP8.5 실험의 연평균 해빙면적이 급격하게 감소하여 2090년 이후, 100만km² 이하인 해빙이 없는 상태(ice-free)가 된다 (Figure 4). 이러한 추세는 해빙의 공간적 분포 변화에도 잘 반영되어 있다. 21세기 전기(2010-2039)의 연평균 해빙 경계는 RCP4.5와 RCP8.5 실험의 결과가 거의 일치하는 것으로 나타난다. 이러한 추세는 21세기 중기(2040-2069)까지 이어지게 되는데, RCP 8.5의 경

우, RCP4.5와 비교하였을 때 바렌츠 해(Barents Sea) 및 카라 해(Kara Sea)를 제외한 대부분의 지역의 해빙경계와 거의 일치한다 (Figure 5). 이는 지구온난화로 인한 멕시코 난류의 영향이 더 크게 반영된 결과이다.

21세기 후기(2070-2099)의 경우, RCP4.5에 비해 RCP 8.5의 평균 해빙면적이 급격하게 수축한 것을 확인할 수 있다. RCP4.5의 경우 바렌츠 해(Barents Sea)를 제외한 대부분의 지역에서 해빙이 존재하지만 RCP8.5에서는 랍테프 해(Laptev Sea)와 그린란드 북부-배핀 만(Baffin Bay) 지역을 제외하고 해빙이 소멸되는 것을 확인할 수 있다 (Figure 5).

21세기 후반으로 갈수록 해빙이 형성되는 ice season의 길이가 점차 짧아지는 것을 확인할 수 있다. RCP4.5에서는 21세기 후기(2070-2099)의 8월과 9월 2달간 해빙이 거의 소멸된 상태(ice-free)가 나타나지만, RCP8.5의 경우 해빙이 거의 소멸된 상태(ice-free)가 8월부터 11월까지 4달가량 지속되는 것으로 나타났다 (Figure 5). RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 대한 월별 해빙면적 변동성을 분석한 결과, 겨울철에 비해 여름철의 해빙 감소가 뚜렷하게 나타났다 (Figure 6 and Figure 7). 이는 21세기 중반 이후 북반구 연평균 해빙면적의 급격한 감소와 연관이 있다 (Figure 4).

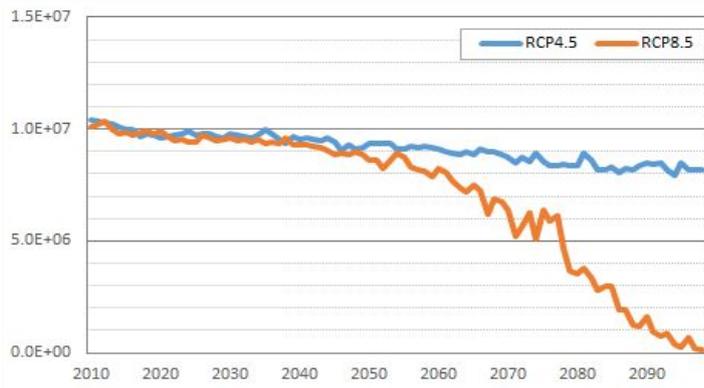
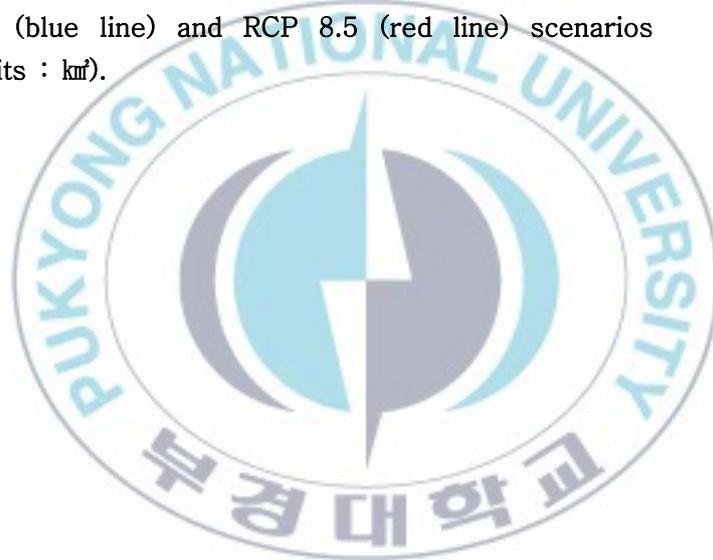


Figure 7. Annual mean Arctic sea ice extent for RCP 4.5 (blue line) and RCP 8.5 (red line) scenarios (units : km²).



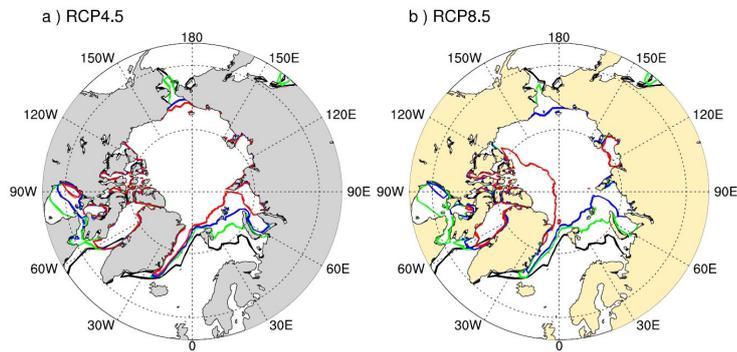


Figure 8. Arctic Sea Ice Extents for RCP4.5 scenario (left) and RCP8.5 scenario (right). Black lines mean average extents for AMIP data (1979-2009), Green lines for twenty-first century (2010-2039), blue lines are average extents for mid twenty-first century (2040-2079) and red lines are for late twenty-first century (2070-2099).

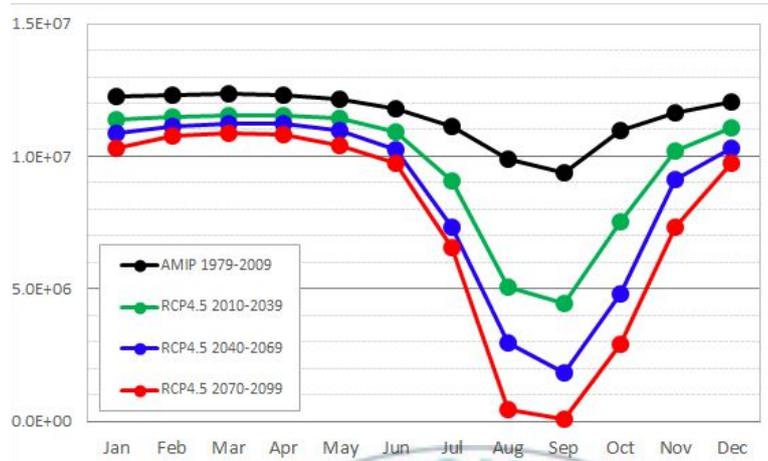


Figure 9. Monthly Arctic Sea Ice Extent based on the RCP 4.5 scenario (units : km²).

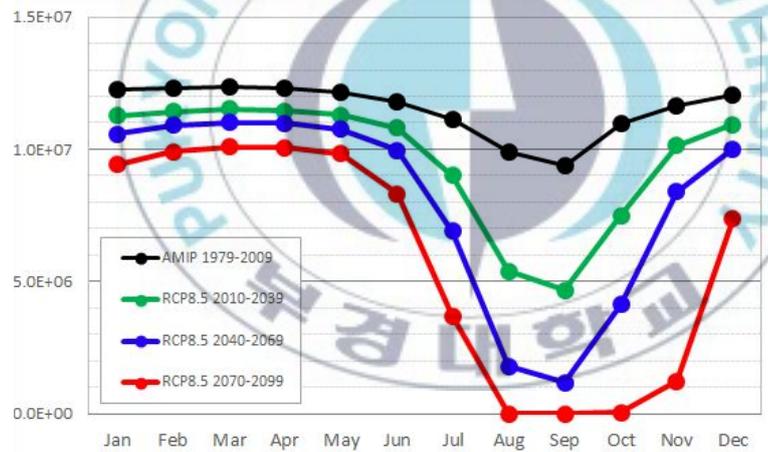


Figure 10. Same as Figure 6, but based on the RCP 8.5 scenario (units : km²).

미래기후에 대한 북극 해빙두께의 추세에 대하여 살펴보면 아래와 같다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 모두 중기(2040-2069) 및 후기(2070-2099)에 비해 전기(2010-2039)의 해빙 두께 감소가 더 크다 (Figure 8). 특히, 캐나다 북극군도-그린란드 북부해안을 중심으로 해빙의 감소 추세가 뚜렷하게 나타난다. 이 지역은 북극에서 가장 해빙의 두께가 두꺼운 지역이다. 이는 중기와 후기의 해빙의 경우, 상대적으로 두께가 얇은 1~2년차 빙하(perennial ice)의 비중이 증가하였음을 의미한다.



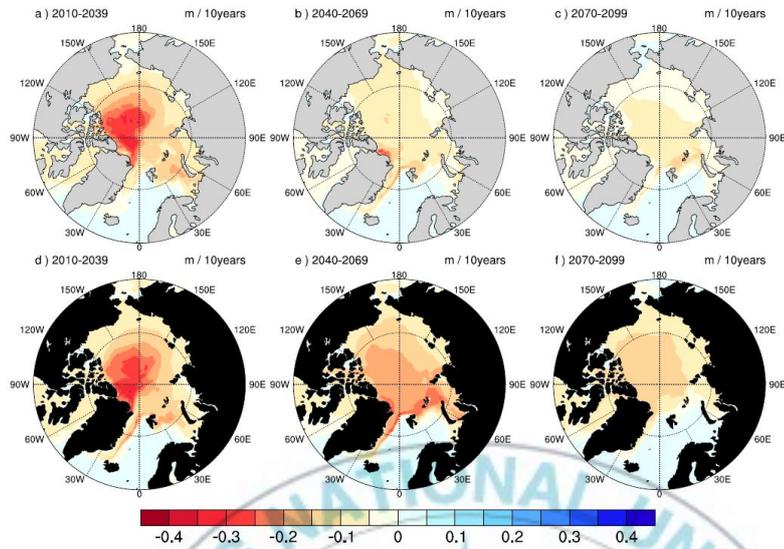


Figure 11. Trends of sea ice thickness over the Arctic Ocean among early twenty-first century (2010–2039), mid twenty-first century (2040–2079) and late twenty-first century (2070–2099) (units : m/decade).

2. 쇄빙선 유형별 항해가능시기 및 기간

가. 전기(2010-2039)에 대한 항해가능기간 분석

전기(2010-2039)의 연평균 3가지 선박 유형별 항해가능 일수를 살펴보면 해빙의 두께가 상대적으로 두꺼운 그린란드 북부를 중심으로 항해가능일수가 가장 적다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 대한 연평균 항해가능지역에 대한 공간적 분포는 3가지 쇄빙선 유형 모두 유사하게 나타난다 (Figure 8). 이 시기의 경우, RCP4.5와 RCP8.5의 연평균 해빙면적 및 해빙의 공간적 분포가 거의 비슷하다 (Figure 9 and Figure 10).

북동항로(NSR)에 대한 일반선박(OW)의 항해가능일수는 RCP4.5는 평균 115.8일, RCP8.5는 평균 117.2일로 나타난다. 경량 쇄빙선(PC6)의 항해가능일수는 RCP4.5 168.3일, RCP8.5 173.2일, 쇄빙선(PC3)의 항해가능일수는 RCP4.5 239.4일, RCP8.5 244.0일로 나타난다 (Table 4). 북서항로(NWP)에 대한 일반선박(OW)의 항해가능일수는 RCP4.5는 평균 51.7일, RCP8.5는 55.6일로 나타난다. 경량 쇄빙선(PC6)의 항해가능일수는 RCP4.5 139.8일, RCP8.5 141.6일, 쇄빙선(PC3)의 항해가능일수는 RCP4.5 214.9일, RCP8.5 221.9일로 나타난다 (Table 5).

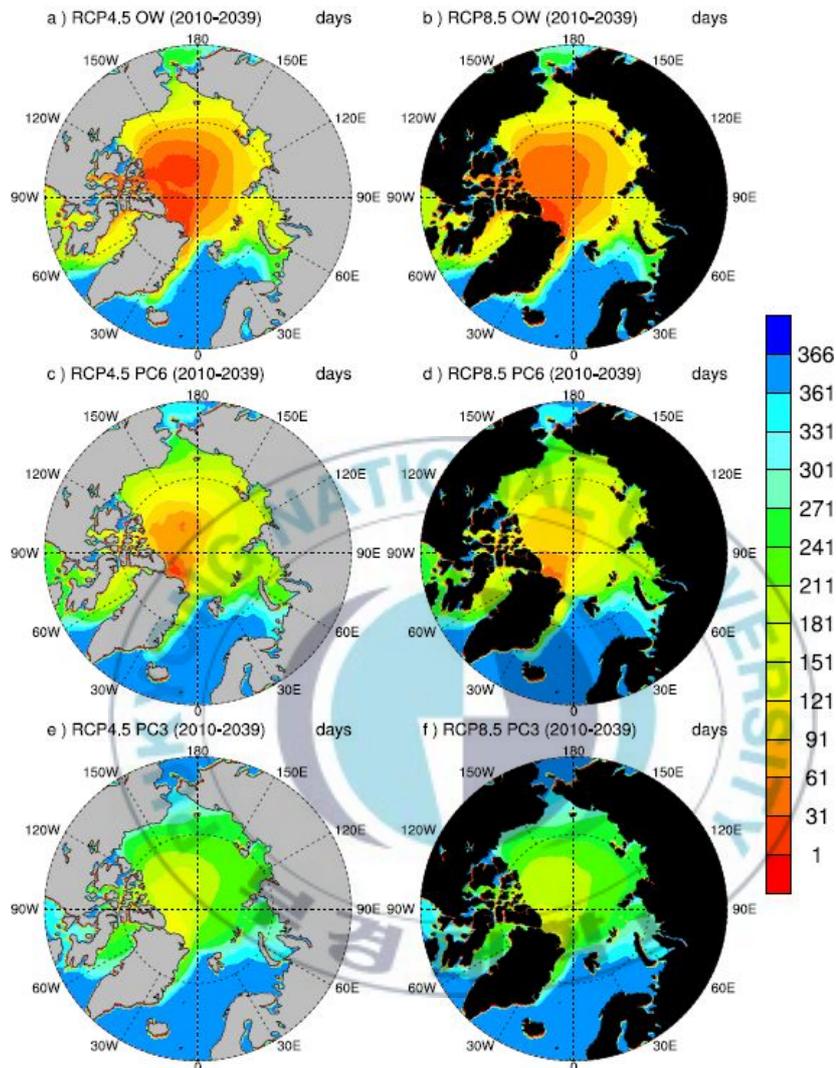


Figure 12. Mean navigation days for the early twenty-first century (2010–2039) over the Arctic Ocean by RCP4.5 (right) and RCP8.5 (left) scenarios. (top) OW type (mid) PC6 type (bottom) PC3 type (units : days).

나. 중기(2040-2069)에 대한 항해가능기간 분석

중기(2040-2069)의 경우, 3가지 선박에 대한 연평균 유형별 항해가능일수를 살펴보면 RCP4.5와 RCP8.5의 공간적 패턴은 유사하게 나타나지만, RCP4.5에 비해 RCP8.5의 항해가능일수가 더 긴 것으로 전망되었다 (Figure 10).

북동항로(NSR)에 대한 일반선박(OW)의 항해가능일수는 RCP4.5는 평균 140.6일, RCP8.5는 평균 158.2일로 전망되었다. 경량 쇄빙선(PC6)의 항해가능일수는 RCP4.5 207.2일, RCP8.5 211.7일, 쇄빙선(PC3)의 항해가능일수는 RCP4.5 266.4일, RCP8.5 288.3일로 나타났다 (Table 4).

북서항로(NWP)에 대한 일반선박(OW)의 항해가능일수는 RCP4.5는 평균 80.1일, RCP8.5는 101.0일로 전망되었다. 경량 쇄빙선(PC6)의 항해가능일수는 RCP4.5 161.1일, RCP8.5 177.0일, 쇄빙선(PC3)의 항해가능일수는 RCP4.5 235.1일, RCP8.5 255.7일로 나타났다 (Table 5).

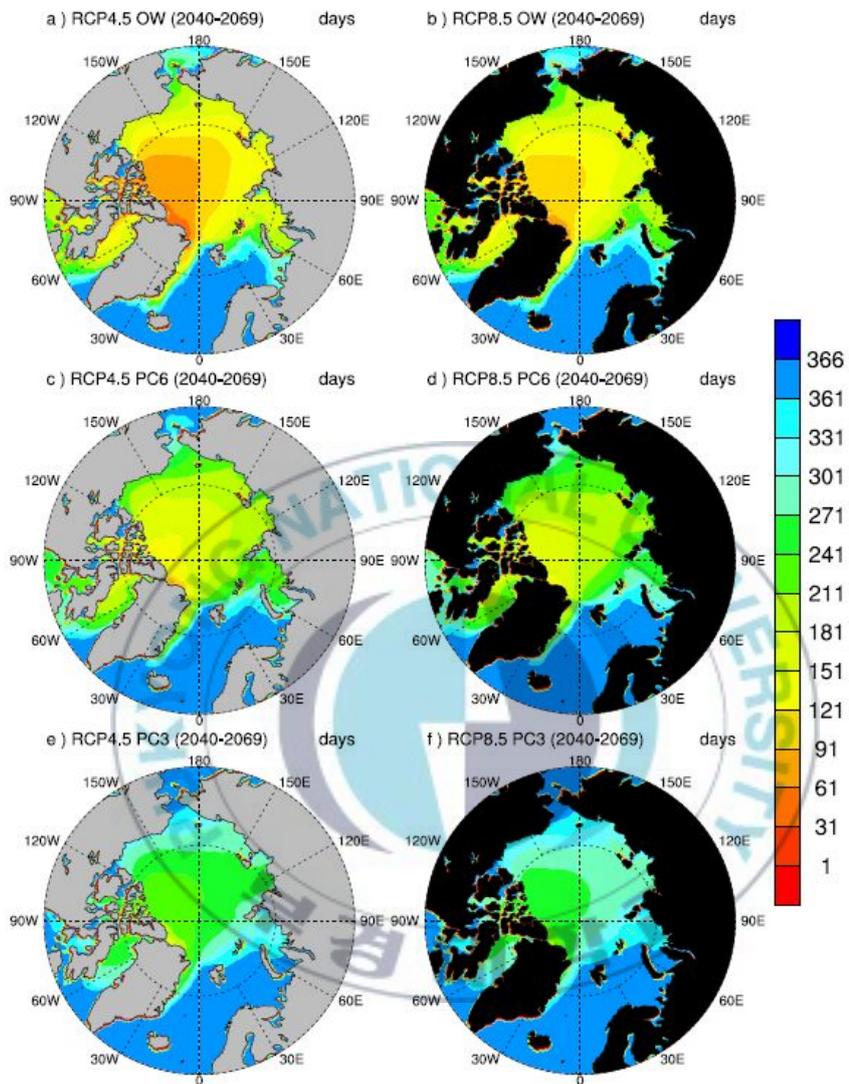


Figure 13. Same as Figure 9, but for the mid twenty-first century (2040-2069) (units : days).

다. 후기(2070-2099)에 대한 항해가능기간 분석

후기(2070-2099)의 연평균 3가지 선박 유형별 항해가능 일수를 살펴보면 RCP4.5에 비해 RCP8.5의 항해가능일수가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 특히, RCP8.5 시나리오에 따르면 쇄빙선(PC3)의 경우, 2070년 6월 이후 항시 북동항로(NSR) 및 북서항로(NWP)에 대한 횡단이 가능해지고, 경량쇄빙선(PC6)은 2080년 6월 이후 북동항로(NSR) 및 북서항로(NWP)에 대한 항해가 가능할 것으로 전망되었다 (Figure 11). 이는 RCP 8.5 시나리오에 대하여, 2070년 이후의 북극해 대부분 지역에서의 해빙두께가 연중 1.2m 이하로 모의됨을 의미한다. 북동항로(NSR)에 대한 일반선박(OW)의 항해가능일수는 RCP4.5는 평균 155.2일, RCP8.5는 평균 217.4일로 전망되었다. 경량 쇄빙선(PC6)의 항해가능일수는 RCP4.5 215.1일, RCP8.5 344.0일, 쇄빙선(PC3)의 항해가능일수는 RCP4.5 285.2일, RCP8.5 360.0일로 나타났다 (Table 4).

북서항로(NWP)에 대한 일반선박(OW)의 항해가능일수는 RCP4.5는 평균 96.7일, RCP8.5는 158.1일로 나타났다. 경량 쇄빙선(PC6)의 항해가능일수는 RCP4.5 179.8일, RCP8.5 342.2일, 쇄빙선(PC3)의 항해가능일수는 RCP4.5 250.1일, RCP8.5 359.7일로 전망되었다 (Table 5).

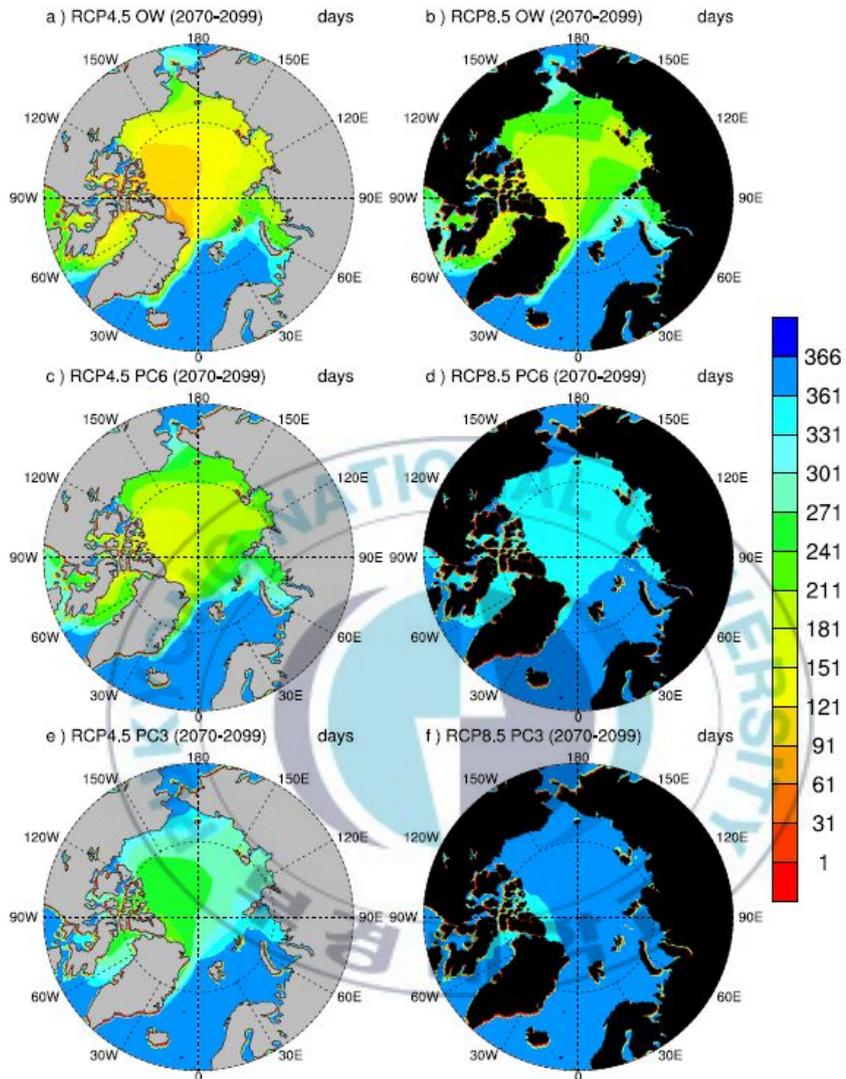


Figure 14. Same as Figure 9, but for the late twenty-first century (2070–2099) (units : days).

Table 4. Ship-accessible days for vessel classes at the Northern Sea Route (NSR) (Shaded days mean days of next years).

Vessel Classes	Period	RCP4.5			RCP8.5		
		Open	Close	Total days	Open	Close	Total days
OW (일반 상선)	2010-2039	7/13	11/5	115.8	7/13	11/6	117.2
	2040-2069	7/3	11/20	140.6	6/28	12/2	158.2
	2070-2099	6/29	11/30	155.2	6/6	1/9	217.4
PC6 (경량 쇄빙선)	2010-2039	7/9	12/24	168.3	7/6	12/25	173.2
	2040-2069	6/27	1/20	207.2	6/23	1/20	211.7
	2070-2099	6/18	1/18	215.1	2080-06-11 이후 항시 항해가능		344.0
PC3 (쇄빙선)	2010-2039	6/18	2/12	239.4	6/17	2/15	244.0
	2040-2069	6/9	3/2	266.4	6/3	3/17	288.3
	2070-2099	6/4	3/15	285.2	2070-06-01 이후 항시 항해가능		360.0

Table 5. Same as Table 4, but for the Northwest Passage (NWP).

Vessel Class	Period	RCP4.5			RCP8.5		
		Open	Close	Total days	Open	Close	Total days
OW (일반 상선)	2010-2039	8/7	9/27	51.7	8/4	9/28	55.6
	2040-2069	7/26	10/13	80.1	7/19	10/27	101.0
	2070-2099	7/21	10/25	96.7	7/3	12/9	158.1
PC6 (경량 쇄빙선)	2010-2039	7/16	12/2	139.8	7/14	12/2	141.6
	2040-2069	7/9	12/16	161.1	7/4	12/27	177.0
	2070-2099	6/28	12/24	179.8	2080-06-25 이후 항시 항해가능		342.2
PC3 (쇄빙선)	2010-2039	6/26	1/26	214.9	6/19	1/25	221.2
	2040-2069	6/19	2/8	235.1	6/11	2/21	255.7
	2070-2099	6/15	2/19	250.1	2070-06-10 이후 항시 항해가능		359.7

3. 쇄빙선 유형별 최적항해경로 예측

해빙의 공간적 분포 및 두께를 고려하여 선박 유형별 최적 항해경로를 산출하는 “자동항해내비게이션” 알고리즘 예시를 제시하고자 한다. 쇄빙선 유형별 최적항해경로 이 외에도 선박의 평균 이동속도 및 북극항로 항해기간을 고려해야 한다.

기존의 문헌자료에 따르면 중국 상하이-독일 함부르크 간 북동항로(NSR)과 북서항로(NWP)를 경유하는 컨테이너 상선(OW)의 평균 이동속도는 평균 14 knot(약 25.9 km/h)이다. 북동항로(NSR)의 총 이동거리는 4,345 km, 전체 항해기간인 18일 중 8일간 북극해를 경유하였다 (Table 6). 북서항로(NWP)의 이동거리는 5,556 km이며 전체 항해기간은 19일로 나타났고, 이 중 9일간 북극해를 경유하는 것으로 나타났다 (Table 7). 이를 참조하여 북동항로(NSR)의 경우, 베링해협(67.6°N, 160.4°E)↔무르만스크(Murmansk : 69.6°N,30°E) 간 RCP4.5 시나리오 2040년 7월 21일 - 2040년 7월 29일까지 총 9일간 OW 선박의 최적항로를 제시하였다 (Figure 12 and Figure 13).

북서항로(NWP)의 경우, 베링해협(67.6°N, 160.4°E)↔그린란드 항만도시인 우페르나비크(Upernavik, 70.4°N,55.6°W)

간 RCP4.5 시나리오 2030년 7월 24일 - 2030년 7월 31일까지 총 8일간 PC6 선박의 최적항로를 제시하였다 (Figure 14 and Figure 15).

Table 6. Container ship Shanghai-Hamburg via the NSR (Source : Østreng et al, 2013)

Total distance NSR in km	4,345 km (2,700 nm)
Speed in NSR in knots	14 knots (25.9 km/h)
Speed outside NSR in knots	23 knots (42.6 km/h)
Day in the NSR	8
Day outside the NSR	10
Total days	18

Table 7. Same as Table 6, but for the NWP (Source : Østreng et al, 2013)

Total distance NWP in km	5,556 km (3,000 nm)
Speed in NWP in knots	14 knots (25.9 km/h)
Speed outside NWP in knots	23 knots (25.9 km/h)
Day in the NWP	9
Day outside the NWP	10
Total days	19

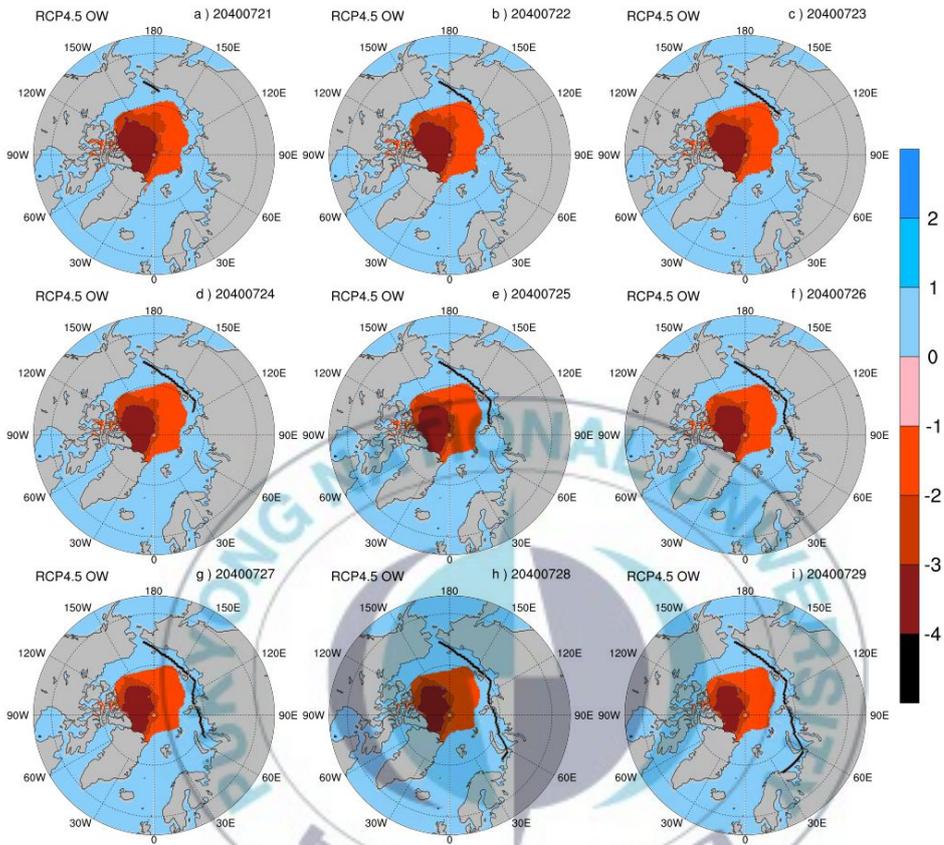


Figure 15. Optimal navigation route for OW and its Ice Multipliers at the NSR by the RCP4.5 sea ice thickness data (2040.07.21 - 2040.07.29).

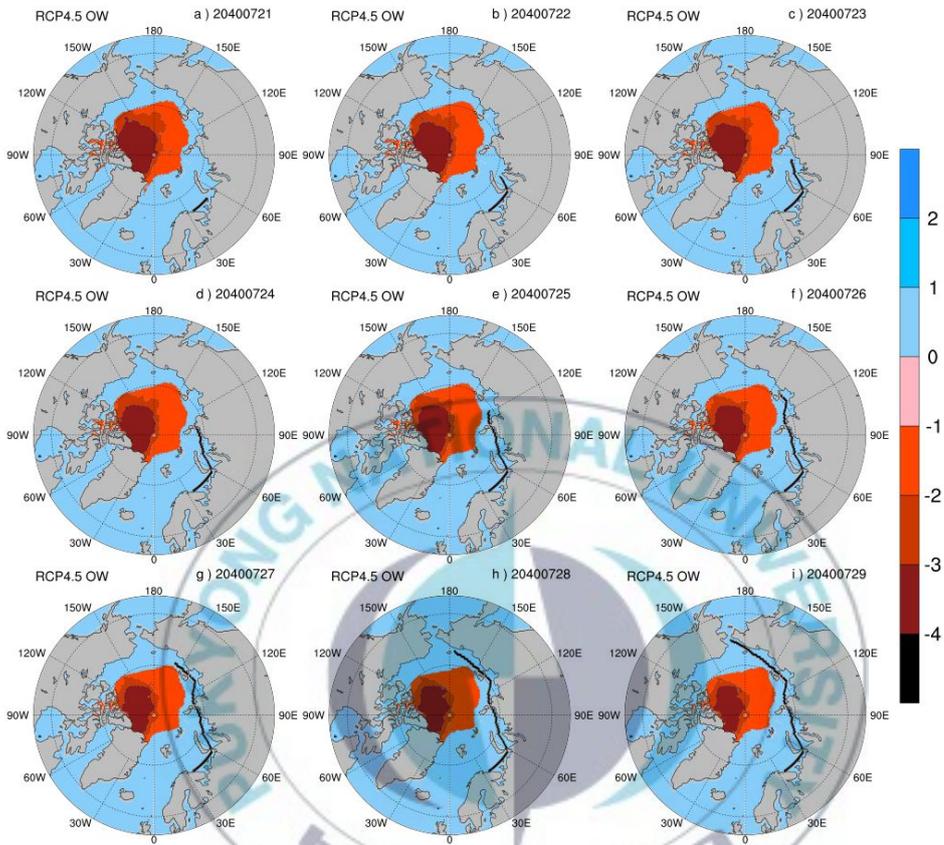


Figure 16. Same as Figure 12, but for the opposite direction.

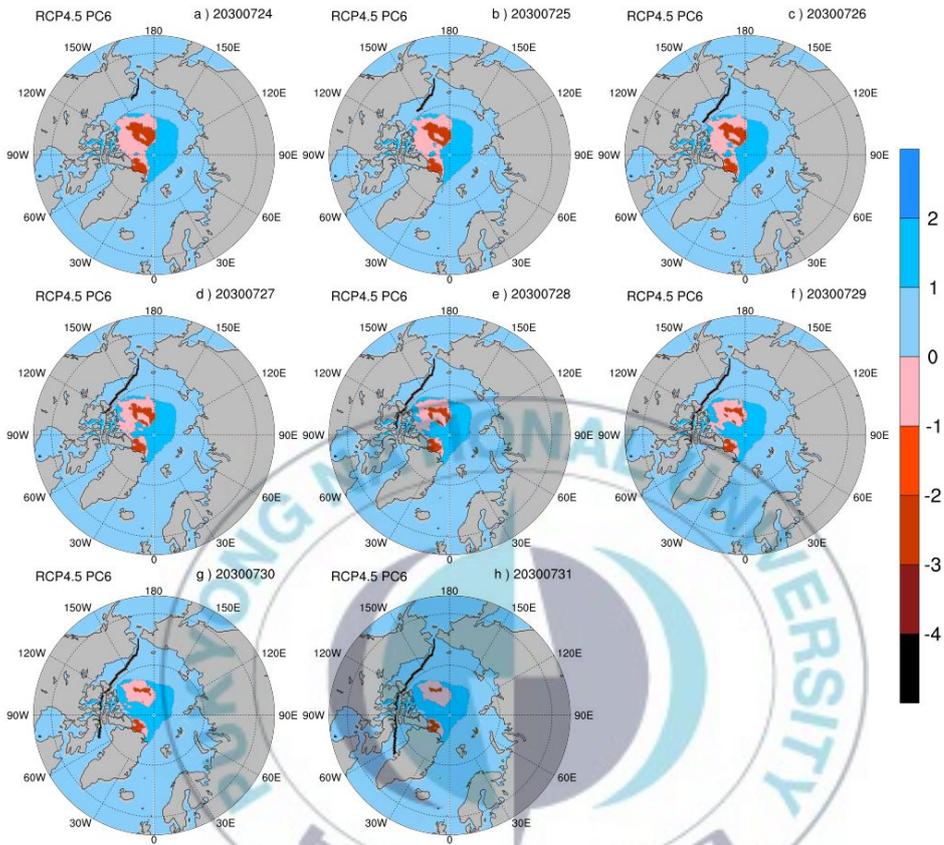


Figure 17. Optimal navigation route for PC6 and its Ice Multipliers at the NWP by the RCP4.5 sea ice thickness data (2030.07.24 - 2030.07.31).

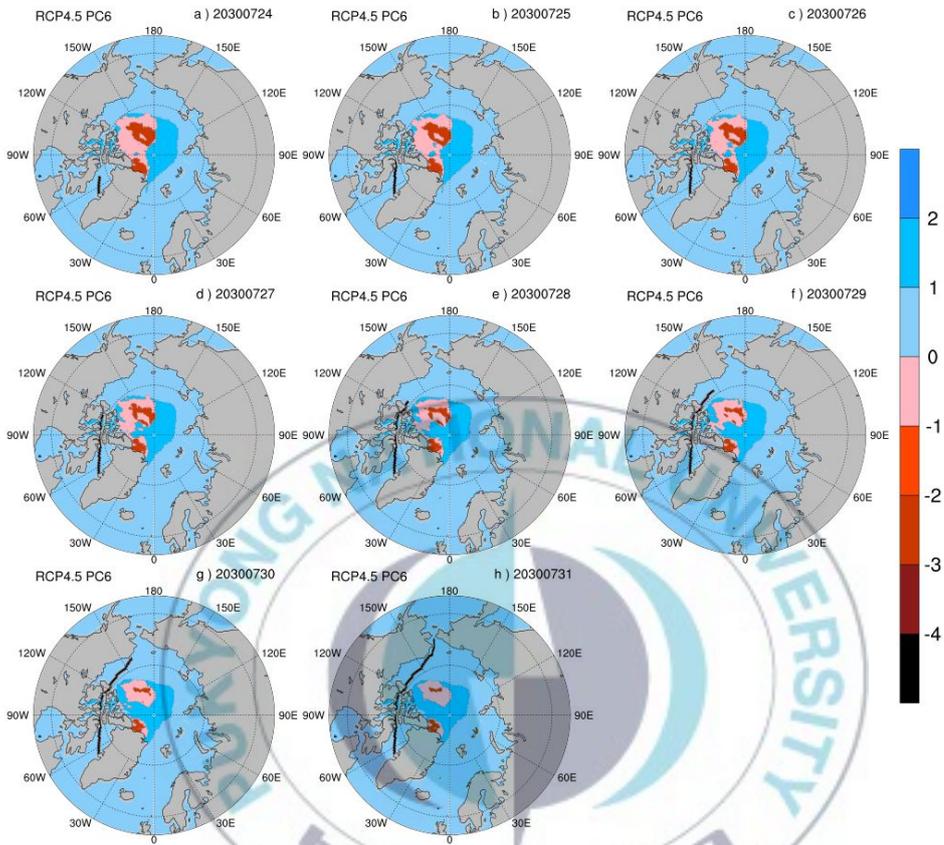


Figure 18. Same as Figure 14, but for the opposite direction.

IV. 결론

전지구 모델 GME의 2010부터 2100년간의 일 예측자료를 활용하여 미래의 북극 해빙 환경변화에 따른 3가지 선박 유형별 북극해의 접근성에 관한 연구를 수행하였다. 미래의 북극 해빙환경 변화에 대한 정보 이외에도, 3가지 쇄빙선박 유형별 잠재적 항해가능일수 및 최적항해경로를 제시한 연구결과는 추후 진행될 관련 연구나 북극항로 개발에 관련된 의사결정 과정에서 유용한 참고자료로 활용될 수 있다.

한편, 본 연구에서는 단순히 해빙의 두께만을 고려하였으므로 향후 바람, 해류, 유빙, 안개, 과량 등 선박의 운행에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 요인들에 대한 추가적인 논의가 필요하다.

최적항로 분석에 있어서 배타적경제수역(EEZ)과 같은 사회적인 측면을 고려할 필요가 있다. 북극항로 개발이 가시화됨에 따라, 러시아 및 북극해 주변국들은 선박 운항에 관한 제도적 장치를 마련하였다. 선박이 특정국가의 영해 및 배타적 경제구역(EEZ)를 통과하면 추가비용을 청구할 수 있는 법적 근거가 된다.. 이는 북극항로에 대한 경제성 평가에서 중요한 요

인으로 작용하고 있다. 본 연구에서 제시된 RCP8.5 실험의 결과에서 2050년 이후 북동항로(NSR)에서는 일반상선(OW)들이 배타적 경제수역(EEZ) 외곽지역에 대한 항해가 가능할 것으로 전망된다. 이에 대한 항해가능일수 및 구체적인 시기에 대한 추가적인 연구가 보강된다면 연구결과의 실질적인 활용을 높일 것으로 사료된다.



V.참고문헌

- 남청도·김정만, 2010: 북극항로를 운항하기 위한 선결과제, 한국
항해항만학회 2010년도 추계학술대회 발표자료집, 한국
항해항만학회
- 최경식·조성철, 2003: 북극해 항로 전망과 쇄빙상선의 활용, 한국
해양공학학회지, 제17권 제6호, 96-101
- 황진희·엄선희·허소영, 2010: 북극해 활용전략 연구, 한국해양수
산개발원 보고서, 한국해양수산개발원
- KB 금융지주연구소, 2013: Credit Risk 지속되는 국내 해운업,
KB daily 지식 비타민 13-103호, 2013-09-10
- Arzel. O, T. Fichefet, H. Goosse 2006: Sea ice evolution
over the 20th and 21st centuries as simulated by
current AOGCMs, Ocean Modelling 12, 401-415
- Comiso. J. C., 2011: Large Decadal Decline of the Arctic
Multiyear Ice Cover. JOURNAL OF CLIMATE
Volume 25, Issue 4 (February 2011) 1176-1193.
- ECON .2007: Arctic Shipping 2030 : From Russia with Oil,
Stormy Passage. or Arctic Great Game
- IPCC. 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report.
Contribution of Working Group I, II and III to the
Fourth Assessment Report of the Intergovernmental
Panel on Climate Change [Core Writing Team,

- Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IMO, 2007: The IMO Guidelines for Ships Operating in Arctic Ice-covered Waters
- IMO, 2010: Guidelines for ships operating in polar waters, INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, Electronic edition.
- KATTISOV, V. M., V. E. RYABININ, J. E. OVERLAND, M. C. SERREZE, M. VISBECK, J. E. WALSH, W. MEIER, X. ZHANG, 2010: Arctic sea-ice change: a grand challenge of climate science, Journal of Glaciology, Vol. 56, No. 200
- Khon, V.C., I. I. Mokhov, M. Latif, V. A. Semenov, W. Park. 2010: Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the twenty-first century. Climatic Change, 100, 757–768.
- Lemke, P., J. Ren, R. B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P. Mote, R. H. Thomas, T. Zhang, 2007: Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. , Titel: Climate change 2007 : the physical science basis ; summary for policymakers, technical summary and frequently asked questions. Part of the Working Group I contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 350

pp, ISBN: 92-9169-121-6.

- Majewski, D., D. Liermann, P. Prohl, B. Ritter, M. Buchhold, T. Hanisch, G. Paul, W. Wergen, and J. Baumgardner. 2002: The Operational Global Icosahedral-Hexagonal Gridpoint Model GME: Description and High-Resolution Tests, *Monthly Weather Review*, 130, 319-338
- Østreg. W, K. M. Eger, B. Fløistad, A Jørgensen-Dahl, L. Lothe, M. Mejlænder-Larsen, T. Wergeland, 2013, *“Shipping in Arctic Waters: A comparison of the Northeast, Northwest and Trans Polar Passage”*. Springer, 345-347
- Rogers, T. S., J. E. Walsh, T. S. Rupp, L.W. Brigham, and M. Sfraga. 2013: Future Arctic marine access: analysis and evaluation of observations, models, and projections of sea ice. *The Cryosphere*, 7, 321-332
- Stephenson, S. R., L. C. Smith, L. W. Brigham and J. A. Agnew. 2013: Projected 21st-century changes to Arctic marine access. *Climatic Change*, 118, 885-899.
- Transport Canada. 1998: Arctic ice regime shipping system (AIRSS) standards.
- Liu. M and J. Kronbak. 2010: The potential economic viability of using the Northern Sea Route (NSR) as an alternative route between Asia and Europe.

Journal of Transport Geography.

기타 참조자료

e-나라지표, 우리나라 석유수급 현황

http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1164

