

Letter

북극해에서 입자추적 방법을 이용한 유빙 추적 연구

박광섭¹⁾ · 김현철²⁾ · 이태희¹⁾ · 손영백³⁾†

Tracing the Drift Ice Using the Particle Tracking Method in the Arctic Ocean

GwangSeob Park¹⁾ · Hyun-Cheol Kim²⁾ · Taehee Lee¹⁾ · Young Baek Son³⁾†

Abstract: In this study, we analyzed distribution and movement trends using in-situ observations and particle tracking methods to understand the movement of the drift ice in the Arctic Ocean. The in-situ movement data of the drift ice in the Arctic Ocean used ITP (Ice-Tethered Profiler) provided by NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) from 2009 to 2018, which was analyzed with the location and speed for each year. Particle tracking simulates the movement of the drift ice using daily current and wind data provided by HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2009-2017). In order to simulate the movement of the drift ice throughout the Arctic Ocean, ITP data, a field observation data, were used as input to calculate the relationship between the current and wind and follow up the Lagrangian particle tracking.

Particle tracking simulations were conducted with two experiments taking into account the effects of current and the combined effects of current and wind, most of which were reproduced in the same way as in-situ observations, given the effects of currents and winds. The movement of the drift ice in the Arctic Ocean was reproduced using a wind-imposed equation, which analyzed the movement of the drift ice in a particular year. In 2010, the Arctic Ocean Index (AOI) was a negative year, with particles clearly moving along the Beaufort Gyre, resulting in relatively large movements in Beaufort Sea. On the other hand, in 2017 AOI was a positive year, with most particles not affected by Gyre, resulting in relatively low speed and distance. Around the pole, the speed of the drift ice is lower in 2017 than 2010. From seasonal characteristics in 2010 and 2017, the movement of the drift ice increase in winter 2010 (0.22 m/s) and decrease to spring 2010 (0.16 m/s). In the case of 2017, the movement is increased in summer (0.22 m/s) and decreased to spring time (0.13 m/s). As a result, the particle tracking method will be appropriate to understand long-term drift ice movement trends by linking them with satellite data in place of limited field observations.

Key Words: The Arctic Ocean, Drifting Ice, ITP, Particle Tracking

Received November 12, 2018; Revised November 16, 2018; Accepted December 7, 2018; Published online December 12, 2018

¹⁾ 한국해양과학기술원 제주연구소 연구원 (Research Scientist, Jeju Research Institute, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

²⁾ 극지연구소 북극해빙예측사업단 책임연구원 (Principal Research Scientist, Unit of Arctic Sea-Ice Prediction, Korea Polar Research Institute)

³⁾ 한국해양과학기술원 제주연구소 선임연구원 (Senior Research Scientist, Jeju Research Institute, Korea Institute of Ocean Science and Technology)

† Corresponding Author: Young Baek Son (sonyb@kiost.ac.kr)

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.

요약: 본 연구는 북극해에 분포하는 유빙의 움직임을 이해하기 위해 현장관측 자료와 입자 추적 방법을 사용하여 분포 및 이동경향을 분석하였다. 북극해에서 유빙의 움직임은 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 ITP(Ice-Tethered Profiler)의 자료 중에서 2009년부터 2018년 자료를 이용했다. 유빙의 유동은 각 연도별로 분류하고 각각의 ITP 자료를 이용하여 위치 및 속도를 분석하였다. 입자 추적은 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model)과 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서 제공하는 일별 해류 및 바람 자료를 사용하여 2009년부터 2018년까지의 유빙의 움직임을 모의하였다. 북극해 전역에서 유빙의 이동경향을 분석하기 위해서 현장관측 자료인 ITP자료를 입력 자료로 이용하여 북극해에서 해류와 바람과의 관계식을 계산하여 라그랑지안 입자 추적을 수행하였다.

입자 추적 시뮬레이션은 해류에 의한, 그리고 해류와 바람에 의한 영향을 고려한 두 종류의 실험을 수행하였고, 대부분의 입자는 해류와 바람의 영향을 고려한 경우에 현장관측 자료와 동일하게 재현되었다. 북극해에서 유빙의 움직임은 바람의 영향을 고려한 관계식을 이용하여 재현되었고, 이를 이용하여 특정 연도의 유빙의 이동경향을 분석하였다. 2010년의 경우 Arctic Oscillation Index(AOI)는 음의 해로 입자들은 보퍼트 환류(Beaufort Gyre)를 따라 명확하게 움직임을 보이고, 극점 인근에서는 상대적으로 더 빠른 속도를 나타낸다. 반면에 2017년의 경우 AOI는 양의 해로 대부분의 입자들은 Gyre에 크게 영향을 받지 않는 움직임을 보이며 보퍼트 해(Beaufort Sea) 인근에서 나타나는 이동속도 또한 상대적으로 감소하였고, 극점에서의 이동속도도 감소했다. 2010년과 2017년의 계절적 특징은 2010년도의 유빙의 이동속도는 동계(0.22 m/s)에 증가되고 춘계(0.16 m/s)에 감소되며, 2017년의 경우 하계(0.22 m/s)에 증가되고 춘계(0.13 m/s)에 감소되었다. 결과적으로 입자추적 방법은 제한된 현장관측 자료를 대신하여 북극해에서 유빙의 분포 및 이동경향을 이해할 수 있는 방법으로 위성자료와 연계하여 장기적인 유빙의 탐지 및 이동경향을 이해하는 유용한 방법이 될 것이다.

1. 서론

북극해는 외해의 해수가 유입되는 열린 환경에 표층의 해수가 결빙되는 국지적 특징을 가지는 해역이다. 그러나 전 지구적 현상인 기후변화는 북극해에서 수온 및 해수면 상승을 유발하고 있어 북극해를 덮고 있는 해빙의 면적이 지속적으로 감소하고 있다. 지난 수십 년 간, 해빙은 북극의 생태계를 구성하는 주요 요인으로(Post *et al.*, 2013), 이러한 해빙의 용해가 시간이 경과함에 따라 심화되는 경향을 나타내고 있다. 지난 40년 간 북극해빙은 지속적으로 감소하며 2007년과 2012년에 최저를 기록했다(Kay *et al.*, 2008; Parkinson and Comiso, 2013). 해빙의 감소의 원인에는 여러 내/외적 요인이 연계되어 있는 것으로 알려져 왔다. 그 중에서 수온 증가 및 해빙 감소로 인한 해수면에 노출되는 면적의 증가(Comiso, 2003)와 이에 따른 증발량의 증가(Belchansky *et al.*, 2004), 그리고 저위도에서 비롯된 수분 이동이 증가되는 등(Groves and Francis, 2002) 여러 가지 요인으로 인하여 용해 시기가 빨라지는 것으로 보고되고 있다. 이처럼 북극해의 해빙 용해 현상은 여러 요인들의 복잡한 상호작용에 의해서 가속화되고 있다.

북극해에 존재하는 해빙은 형태와 크기가 다양하지만 지속적으로 용해와 결빙 그리고 유동을 한다. 일반적으로 해빙의 월별 변화 경향은 매년 유사하게 나타나지만(최대: 4월-5월, 최소: 9월), 계절에 따라 형태나 부피는 변화된다(Rigor and Wallace, 2004; Nghiem *et al.*, 2007). Kim *et al.*(2017)의 연구에서 북극해의 해빙농도는 평균 39.25%이고, 이 중에서 동시베리아 해와 보퍼트해(Beaufort Sea)에서 가장 높고, 넓은 면적을 차지하고 있는 것으로 보고했다. 그리고 이 해역에서는 다년생의 해빙이 분포하고 있는 것으로 조사되었다(Rigor and Wallace, 2004; Nghiem *et al.*, 2007; Maslanik *et al.*, 2011). 북극해에서 유빙의 이동 및 표층 해류의 유동에 관한 연구는 장/단기 현장관측, 위성, 재분석 및 모델 자료를 활용한 연구들이 수행되었다. Emery *et al.*(1997)은 해빙의 이동을 계산하기 위해 위성자료(SSM/I)와 부이 자료를 이용하여 이동속도와 방향을 계산했고, 상대적으로 해빙의 움직임이 작은 동계에 높은 정확도를 나타내는 것으로 보고했다. Plueddemann *et al.*(1998)는 보퍼트 환류(Beaufort Gyre)의 표층 유속 구조를 파악하기 위해 장기 표류 부이에 탑재된 ADCP의 자료를 분석하여 지름 20 km 정도의 와류(eddy)에서 평균 0.05-0.1 m/s의 해류 속

도를 관측했다. Timmermans *et al.*(2008)는 유빙에 설치된 ITP(Ice-Tethered Profiler) 자료를 이용하여 보퍼트 환류에서 이동하는 유빙의 움직임 분석하여 와류가 형성되는 해역의 특성과 형성 요인에 대해서 분석했다. Lavergne *et al.*(2010)은 유빙의 추적을 위해 다중 위성영상을 이용하여 motion tracking 방법으로 움직임을 추적하는 방법을 사용했다. 그리고 최근에는 30년 간의 모델 및 위성 자료를 사용하여 유빙의 순환과 이동 경향에 대해 연구된 결과들이 보고되어 있다. 이런 결과들 중에는 북극해에서 유빙의 분포밀도는 이들의 이동속도와는 반대 경향을 나타내고, 그리고 북극진동의 10년 주기 순환 패턴 변화는 보퍼트 환류에 존재하는 유빙의 움직임에 영향을 미친다고 보고했다(Kwok *et al.*, 2013).

이처럼 북극해에서 유빙의 분포 및 이동경향에 대한 기존의 연구들은 제한된 현장자료를 이용하여 단기적으로는 이동 경향 분석 연구와 장기적으로는 기후변화에 따른 해빙농도 변화와 같은 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 본 연구는 북극해에서 유빙의 이동경향을 파악하기 위해 기존의 제시되었던 현장자료 분석과 더불어 제한된 현장자료를 보완하기 위해 입자추적 방법을 이용하여 유빙의 움직임을 재현하여 북극해에서 해양 환경 변화에 따른 유빙의 이동경향 변화를 분석하고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 제시된 라그랑지안 입자 추적 연구의 목적은 북극해에서 유빙의 움직임에 대해서 경계조건을 변경하여 시/공간적으로 다양하게 존재하는 유빙의 유동을 이해하고, 이동해역에서 물리적 특성을 파악하여 이동 원인을 분석하기 위한 것이다. 북극해의 표층유속은 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model, <https://hycom.org>)에서 제공하는 일별 유속 성분 자료를 연구 기간(2009-2018)에 맞춰 사용했다(Fig. 1(a)). HYCOM에서 제공되는 자료는 0.08°(1/12°)의 공간해상도를 가지며, 이를 이용하여 일별 유빙 추적 시뮬레이션을 수행하였다. 바람자료는 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <https://www.ecmwf.int/>)에서 제공하는 일별 바람의 성분 자료를 사용했다(Fig. 1(b)). 기간은 HYCOM의 유속 자료와 동일하며, 공간해상도는 0.125°이다. 입자 추적은 북극의 좌표계에 맞추어 동일한 해상도의 해류와 바람의 자료를 추출하여 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에 사용된 해류와 바람 자료는 현장관측과 위성자료 등을 사용하여 자료 동화가 되어 계산된 자료이다.

ITP(<ftp://ftp.whoi.edu/>)는 대기-해빙-해양 간의 상호작용을 연구하기 위해 해빙을 뚫고 해빙 아래 해양으

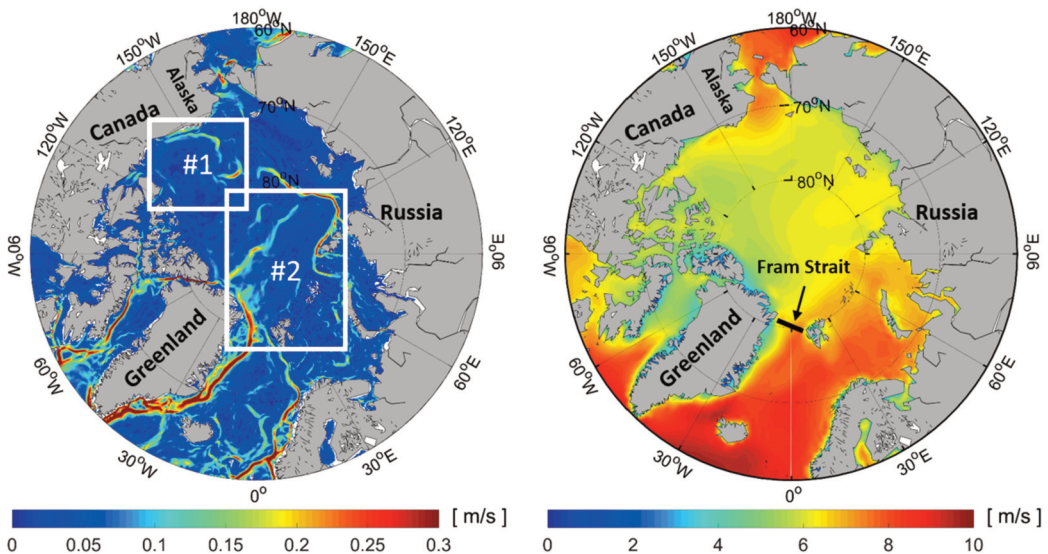


Fig. 1. Average distribution of annual ocean currents provided by HYCOM (a) and winds by ECMWF (b). HYCOM's current data show the representative ocean current of the Arctic Ocean, Beaufort Gyre (#1) and Transpolar Drift (#2) in (a). The current speed of Transpolar Drift is divided before and after Fram Strait as shown in (b).

로 연결되는 와이어를 통해 연직 방향으로 수층내 해양 환경을 관측하는 장비이다. ITP는 1시간 간격으로 시간에 따른 해빙의 위치와 현장자료를 제공한다. 본 연구에서는 북극해에서 시/공간적으로 변화하는 유빙의 유동을 이해하고, 입자추적 모델을 이용하여 유빙의 유동에 영향을 주는 원인에 대한 분석을 위하여 미국 Woods Hole 해양연구소에서 제공하는 ITP의 시간별 위치 자료를 사용했다. Fig. 2는 2009년부터 2018년까지 연구에

사용된 ITP의 시/공간적 변화 및 이동속도를 연도별로 분석한 것으로, 본 연구에서는 연구기간 내에 관측을 수행한 ITP의 일별 이동 궤적을 기준으로 입자추적 모델을 개발하고 시뮬레이션 결과를 비교했다.

입자추적 시뮬레이션은 Runge-Kutta scheme(RK4)를 사용했다(Jeon *et al.*, 1997). ITP에서 제공하는 유빙의 이동 위치 자료는 재분석 자료의 일별 표층유속과 풍속 자료와의 관계를 일 간격으로 계산하여 유빙의 위치를 시

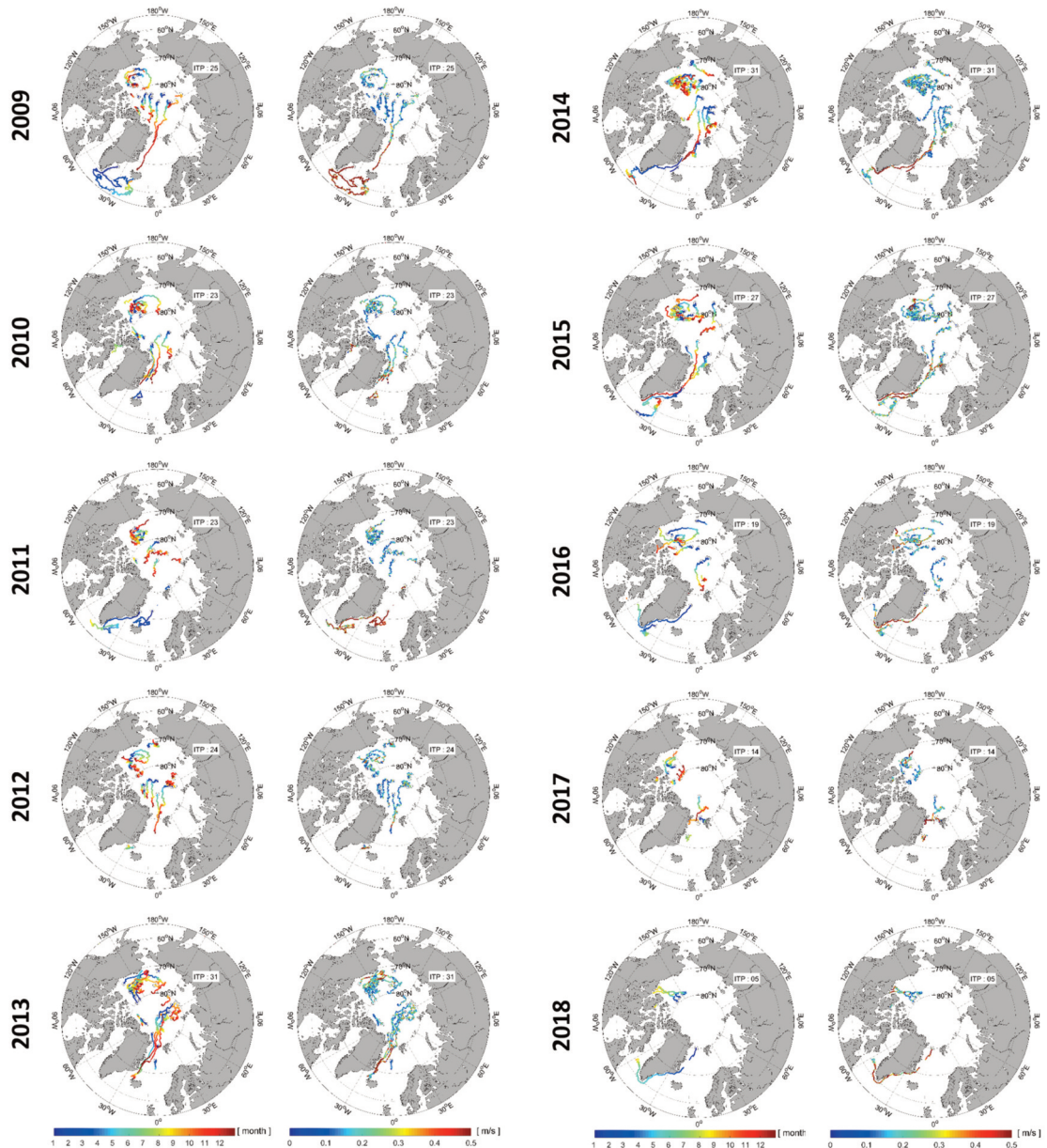


Fig. 2. The period (left) and speed (right) of ITP movement observed from 2009 to 2018 in the Arctic Ocean.

물레이션 했다. RK4 scheme은 주어진 초기값에서 일정 간격 이후의 변수에 의해 변화하는 값을 계산하여 도출되는 결과값에 다시 변수를 적용하는 미분방정식이다. 시물레이션의 초기값은 연도별 ITP의 위치이며 일별 유속/풍속에 의한 유빙의 이동거리를 계산하여 일별 위치를 계산하였다. 적용되는 수식은 아래와 같다.

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (1k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$k_1 = f(x_n, y_n)$$

$$k_2 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{hk_1}{2})$$

$$k_3 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{hk_3}{2})$$

$$k_4 = f(x_n + h, y_n + hk_3)$$

where y_n : location of ice
 h : time term to simulate
 $k_1 k_2 k_3 k_4$: transport distance of ice

북극해의 해양환경에 영향을 미치는 외적 요인 중 하나인 북극진동지수(Arctic Oscillation Index; AOI)는 2°N 이북의 1000 hpa 기압(해면기압)의 편차를 경험직교함수(Empirical Orthogonal Function)에 대입하여 첫 번째 모드로 추출되는 기압변동패턴이다(Lim *et al.*, 2012). 북위 45°N로 정의되는 중위도 지역을 기준으로 북극과 중위도 지역의 기압 차이로 북극진동지수의 음/양을 결정하며, 북극진동지수가 음의 경향일 때에는 북극의 기압이 중위도보다 높으며, 양의 경향일 때에는 북극의 기압이 중위도보다 낮다. 북극진동지수는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration, <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)에서 제공하는 자료를 이용하여 지수를 계산했다.

3. 결과

북극해에서 유빙의 이동 시물레이션을 수행하기 위해서, HYCOM과 ECMWF에서 제공하는 북극해의 해류와 바람 자료를 이용하여 연구를 수행했다(Fig. 1). 위성자료가 동화된 HYCOM 해류 자료는 북극해에서 나타나는 대표적인 해류인 보퍼트 환류와 Transpolar Drift를 나타내고 있다(Fig. 1(a)). HYCOM 자료에서 계산된 보퍼트 환류는 평균 0.1-0.2 m/s의 유속을 나타냈다. 러

시아의 시베리아 연안에서부터 극점을 통과하여 그린란드 동쪽 해역의 Fram Strait를 통과해 지나가는 Transpolar Drift는 Fram Strait를 통과하기 전에는 0.2 m/s 이하, Fram Strait를 통과하면서부터 0.3 m/s 이상의 유속을 나타냈다. ECMWF의 재분석자료에서 계산된 북극해의 바람은 평균 6 m/s으로 나타나고, 지역적으로 대서양에서 북극해로 들어가는 바렌츠 해(Barents Sea)에서 상대적으로 높게 나타난다(Fig. 1(b)).

NOAA의 ITP 현장관측자료는 북극해에서 유빙의 입자 추적 연구를 수행하기 위한 실측 관측 자료이고, 모델 자료와 연계하여 입자추적 시물레이션을 수행했다(Fig. 2). ITP 관측은 매년 20-30개 정도가 계류하여 자료를 수집하고 있고, 대부분이 보퍼트 해와 Transpolar Drift의 해류가 지나가는 해역에서 설치하여 유빙의 움직임과 유동하는 해역의 해양환경 변화를 동시에 모니터링하고 있다. 유빙에 설치된 ITP는 일반적으로 1년에서 3년정도 연속적인 관측을 수행한다. 본 연구기간(2009-2018) 동안 사용된 ITP 자료는 보퍼트 환류 해역에서 26개 그리고 Transpolar Drift가 지나가는 해역에서 17개를 이용하여 총 43개 자료를 분석했다. 연구기간 동안 분석된 ITP 관측 자료에서 유빙의 이동속도는 보퍼트 환류에서 평균 0.09 m/s, 최고 이동속도 0.17 m/s를 나타낸다. 보퍼트 환류 해역에 설치된 ITP는 상대적으로 하계에 빠른 이동속도를 보여주고, 동계에는 감소되어 나타난다. Transpolar Drift에서 Fram Strait 통과 이전의 ITP에 나타나는 이동속도는 평균 0.03 m/s 이하의 이동속도를 나타내지만, Fram Strait 통과 이후 ITP의 이동속도는 0.25 m/s 이상으로 빠른 이동 속도를 나타낸다.

입자추적 시물레이션은 위성과 현장 자료를 이용하여 계산된 재분석 자료의 해류와 바람장을 이용하여 북극해에서 유빙의 유동을 계산했다. 입자추적 계산은 북극해에서 분포하는 유빙으로 가정하여 두 가지 경우에 대해서 수행했다. 첫 번째, 유빙은 해수면에 부유하는 물체로 가정하여 해류에 의한 영향으로 이동을 할 것으로 고려한 경우이다(Fig. 3(a)). 두 번째, 유빙은 해수면에 부유하는 물체이기 때문에 해류에도 영향을 받지만 바람에도 영향을 받기 때문에 해류와 바람의 영향을 고려한 경우이다(Fig. 3(b)). 두 방법에 대한 결과 비교는 ITP의 현장관측 자료에서 제공되는 유빙의 위치 자료를 이용하여 검증했다. 해류만을 고려하여 유빙의 이동궤적

을 계산한 경우(Fig. 3(a)), ITP(녹색)와 시뮬레이션 결과(적색)는 이동기간(2016년 6월 1일 ~ 2016년 9월 6일, 98 일) 동안 평균 84 km의 편차를 보이고, 시뮬레이션 결과는 ITP의 경로와 다른 방향으로 움직임을 나타냈다. 그

러나 해류와 바람의 영향을 동시에 고려한 경우(Fig. 3(b)), ITP(녹색)와 시뮬레이션 결과(적색)는 평균 74 km의 편차를 보였고, 전체적인 경향에서 ITP 자료와 유사한 이동경로를 나타냈다. 이런 결과는 연구기간 전체 자

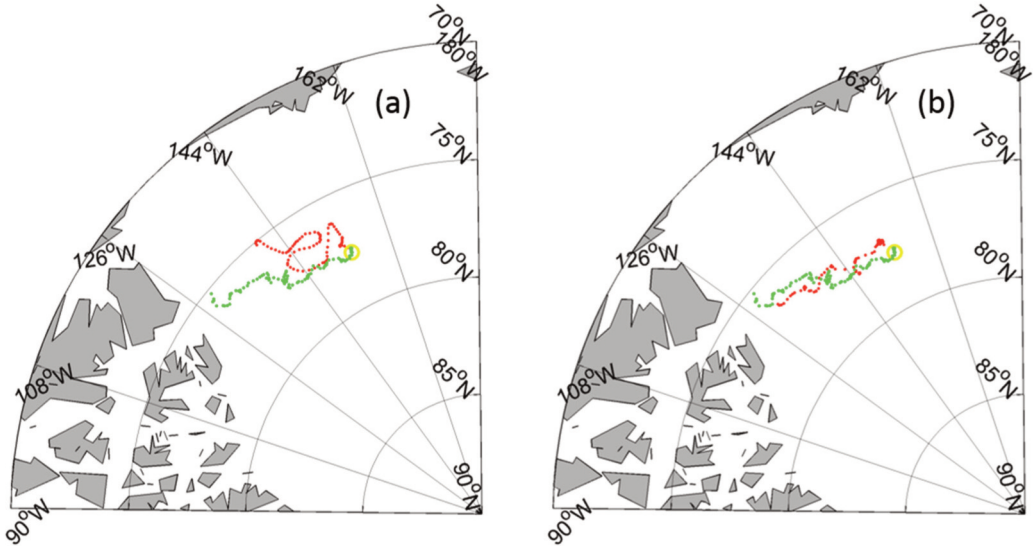


Fig. 3. Location of particles from the particle-tracking experiment (green dot) and in-situ observation (red dot) from June 1 to September 5, 2016. Comparing simulation using the current only (a) and using the combined effects of ocean current and wind (b). The result of the combined effect is closer to the field observations.

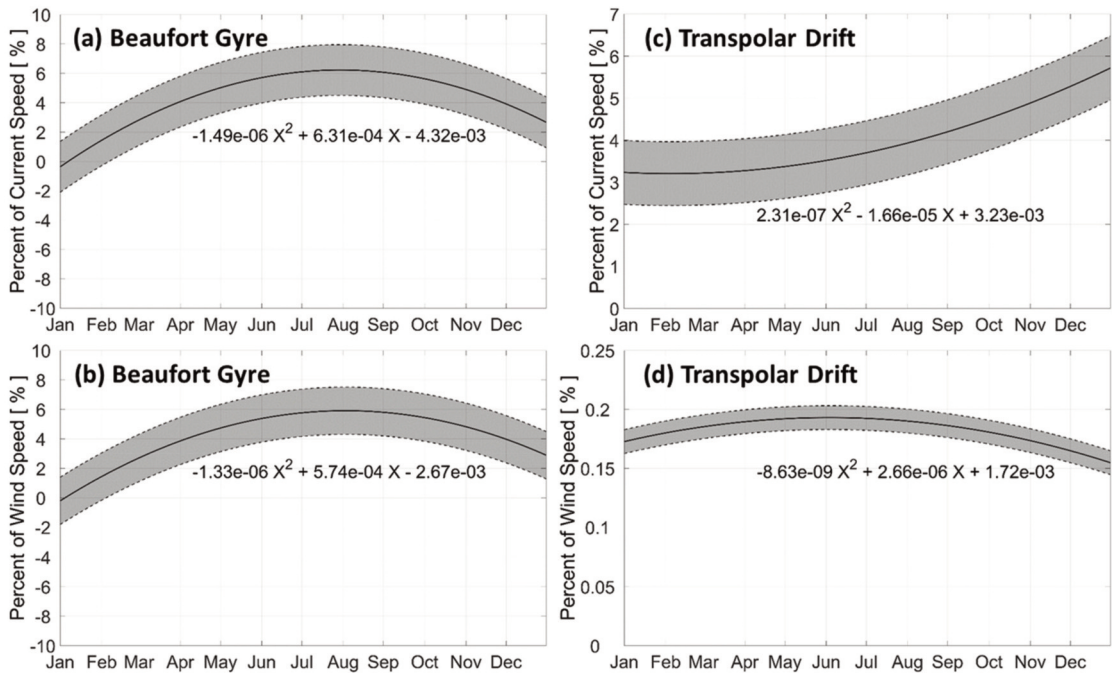


Fig. 4. The regression between the factors of the currents and winds in the Beaufort Gyre ((a) and (b)), and Transpolar Drift ((c) and (d)) in the Arctic Ocean. Shade area indicates the standard deviation.

료에서 유사한 경향으로 북극해에서 유빙의 이동 경로를 시뮬레이션하기 위해서는 해류와 바람의 영향을 고려하여 계산했다.

북극해에서 유빙의 이동을 이해할 수 있는 입자추적의 일반해를 구하기 위해, 보퍼트 환류와 Transpolar Drift의 해역에 설치된 총 43개의 ITP 자료에서 제공되는 유빙의 위치 자료를 이용하여 시뮬레이션을 수행했다. 입자추적의 일반해는 유빙의 이동 속도 및 위치를 구현하기 위해 사용되는 재분석 자료의 해류와 바람에 시간에 따른 factor를 두 해역으로 구분하여 계산했다. 시뮬레이션 기간은 1년을 기준으로 하여 두 해역에서 해류와 바람의 factor에 대한 회귀식을 계산했다(Fig. 4). 보퍼트 환류 해역(Fig. 4(a)-(b))은 상대적으로 Transpolar Drift 해역(Fig. 4(c)-(d))보다 표준편차가 크게 나타났다. Fig. 4에서 제시된 관계식을 이용하여 2009년부터 2018년까지의 해류 및 바람의 연 평균 자료를 사용하여 입자추적 시뮬레이션을 수행한 결과 북극해를 대표하는 보퍼트 환류와 Transpolar Drift 해역에서 실측치와 유사하게 구현되었다. 보퍼트 환류의 해역에서는 평균 0.15 m/s, Transpolar Drift 해역에서는 Fram Strait 이전과 이후로 구분하여 각각 평균 0.04 m/s, 0.25 m/s의 이동속도를 보였다.

연도별로 수행된 입자추적 시뮬레이션의 결과를 이용하여 북극해에서 유빙의 이동경향을 분석하기 위해

서 AOI를 이용하여 상대적으로 해양환경의 차이가 발생하는 해를 구분했다. 북극 표층해류에 미치는 AOI는 NOAA에서 제공하는 계절적 신호가 제거된 자료를 사용하여 동계(12, 1, 2월)의 평균값을 계산했다(Fig. 5). AOI가 양의 위상을 나타내는 연도와 음의 위상을 나타내는 연도 중 극값을 나타내는 2010년(-3.42)과 2017년(+1.02)을 선정하고, 1월 1일부터 12월 31일까지 1년 간의 유빙의 입자추적 시뮬레이션을 수행했다. 본 연구에서는 입자추적 모델에 대한 정확도 분석을 위해 민감도 분석(sensitivity analysis)을 수행했다. 민감도 분석은 Fig. 4의 회귀식을 기준으로 재분석 자료의 해류와 바람의 factor에 $\pm 1, 3, 5\%$ 씩 증감하여 두 시기(2010년과 2017년)에 두 해역에서 절대적 차이(absolute difference)를 계산했다(Table 1). 계산은 회귀식(Fig. 4)에 의해 계산된 위치와 회귀식에 해류와 바람의 factor의 증감에 의해 계산된 위치와의 차이를 계산했다. 절대적 차이는 해류와 바람의 factor에 상관없이 일정한 경향은 나타나지 않았고, 이것은 해류나 바람의 경우 수평 및 수직적 성분이 변하기 때문에 계산결과에서 일정한 경향을 나타내지 않았다. 입자추적 모델은 보퍼트 환류와 Transpolar Drift 두 해역에서 상대적으로 낮은 차이를 나타냈다. 일반적으로 모델이 안정적이지 못할 경우 작은 변화에도 값의 변화가 상대적으로 크지만, 본 연구에서 사용된 모델은 상대적으로 안정적인 것으로 사료된다.

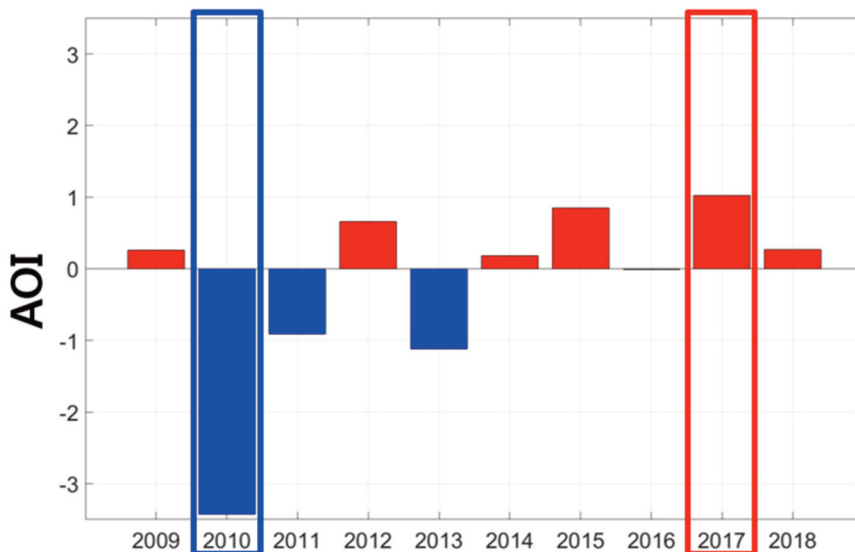


Fig. 5. The time series of winter mean AOI (Arctic Oscillation Index) from 2009 to 2018.

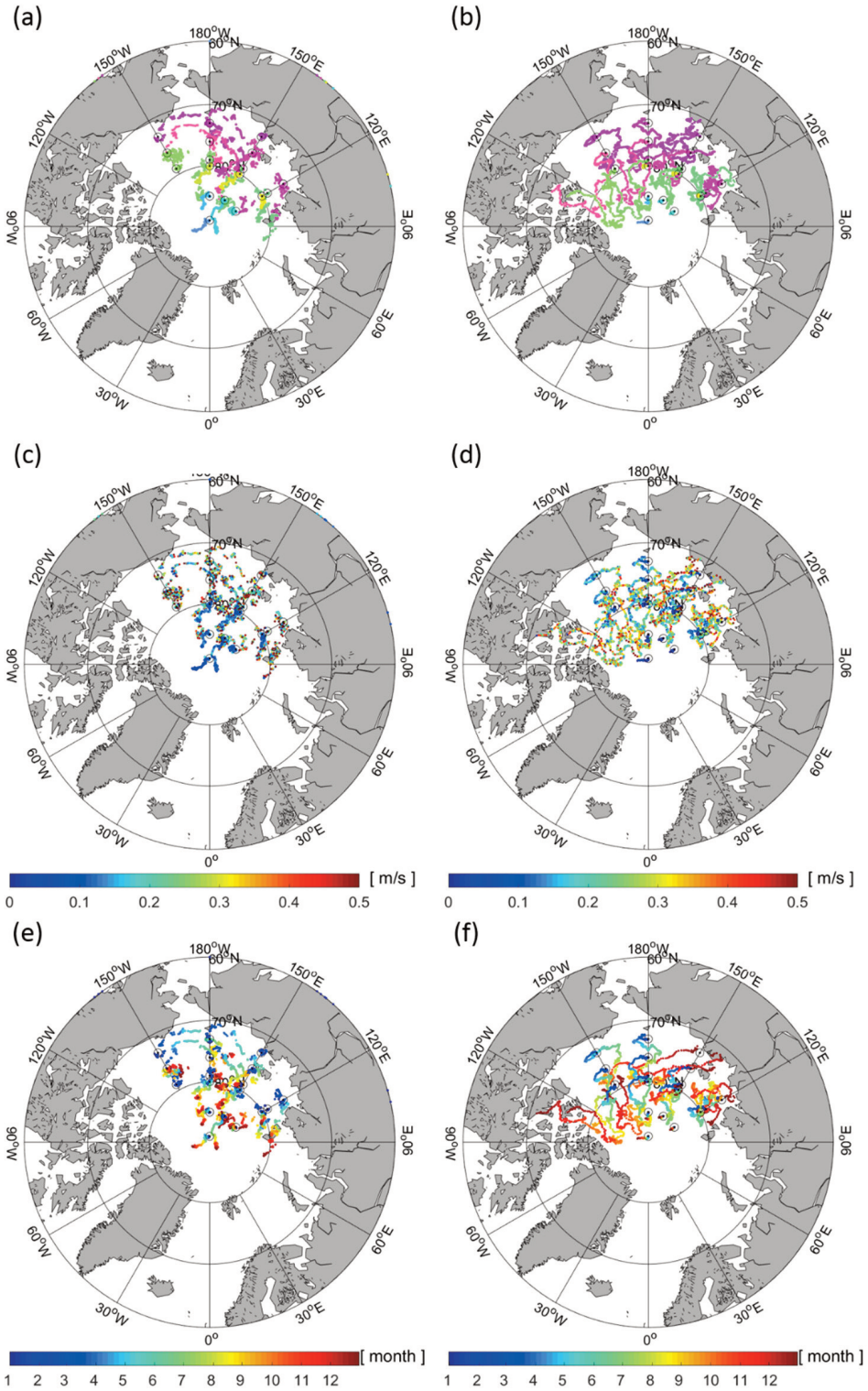


Fig. 6. Particle-tracking simulation ((a), (b)) of the drift ice across the Arctic Ocean using the current and wind data with the formulas presented in Fig. 4. Trajectory with the movement speeds ((c), (d)) and the periods ((e), (f)) of the simulation in 2010((a), (c), (e)) and 2017((b), (d), (f)).

Table 1. Mean absolute difference used for evaluating the sensitivity of particle tracking model to the variation of the currents and winds during 2010 and 2017

	Current [%]	Wind [%]	Absolute Difference [km]	Standard Deviation [km]
2010	1	1	68	26.35
	3	3	39	17.23
	5	5	39	20.93
	-1	-1	44	20.30
	-3	-3	51	25.02
	-5	-5	79	29.02
2017	1	1	25	13.81
	3	3	31	19.86
	5	5	36	13.72
	-1	-1	26	14.43
	-3	-3	31	19.53
	-5	-5	38	24.60

입자 추적 시뮬레이션은 해역별 변화를 이해하기 위해 2010년과 2017년 모두 동일한 15개 지점에서 일별 1개의 입자를 투하하여 연속적인 변화를 분석했다(Fig. 6). 입자의 구분은 보퍼트 환류가 위치한 해역에서 연안에 위치한 입자들을 외부로, 극점 가까이의 위치에 투하한 입자들을 내부로 구분했다. 유빙 추적 시뮬레이션 결과에서 AOI가 음의 위상을 나타내는 2010년의 경우는 환류의 외부에 투하한 입자들은 8월과 9월까지 보퍼트 환류의 외곽을 따라 상대적으로 큰 움직임을 보이고, 그리고 이후 시베리아 연안으로 움직이다가 극점을 향해 선회했다. 내부에 투하한 입자들은 시간에 따른 움직임이 외부의 입자와 비교하여 상대적으로 작은 움직임을 보였다. 모델 시뮬레이션에서 계산된 유빙의 이동속도는 Gyre의 외부에서 평균 0.20 m/s, 내부에서 평균 0.13 m/s를 나타냈다(Fig. 6(a), (c)). 이 외에도 2010년 보퍼트 환류에 위치한 입자들의 계절별 평균 이동속도를 비교해보면, 춘계(3, 4, 5월)는 0.16 m/s, 하계(6, 7, 8월)는 0.19 m/s, 추계(9, 10, 11월)는 0.20 m/s, 동계(12, 1, 2월)는 0.22 m/s의 평균 이동속도를 나타내며 동계에 상대적으로 빠른 이동속도를 나타냈다(Fig. 6(e)).

AOI가 양의 위상을 나타내는 2017년의 유빙입자추적 시뮬레이션 결과에서 입자들의 이동은 보퍼트 환류에서 나타나는 와류의 형태가 뚜렷이 나타나지 않으며, 환류의 외부에서 평균 0.13 m/s, 내부에서 평균 0.11 m/s를 나타냈지만, 하계 이후 보퍼트 환류의 움직임과 상관없이 유동을 나타냈다(Fig. 6(b), (d)). 보퍼트 환류 해역에

서 계산된 유빙의 이동속도를 비교하면 춘계는 0.13 m/s, 하계는 0.22 m/s, 추계는 0.17 m/s, 동계는 0.15 m/s를 나타냈고, 하계에 상대적으로 빠른 이동속도가 나타났다(Fig. 6(f)). Transpolar Drift 해역에서 계산된 유빙의 이동속도를 비교하면 입자들이 극점을 향해 움직이며 평균 0.06 m/s의 이동속도로 2017년의 경우 입자들의 움직임이 거의 나타나지 않았다(평균 0.01 m/s 이하).

4. 토의 및 결론

본 연구는 북극해에 분포하는 유빙을 추적할 수 있는 기술 개발의 한 부분으로 현장이나 위성에서 탐지된 유빙의 이동 및 분포에 대한 원인 분석을 위한 선행 연구이다. 북극해에서 유빙의 분포나 움직임은 현장관측이나 위성자료에서 잘 나타나지만, 이동에 영향을 주는 원인을 파악하기에는 힘들다. 본 연구에서 시도된 입자추적 방법은 이동된 결과를 재분석 자료를 이용하여 재현하고 다양한 해역 및 조건 하에서 시뮬레이션을 수행하여 해양환경 변화에 따른 유빙의 변화를 이해하고 이동 경향을 분석할 수 있다. 유빙의 입자 추적은 NOAA에서 제공하는 ITP 현장관측 자료(Fig. 2, 2009년-2018년)를 이용하여 현장과 위성자료를 이용한 재분석 해류와 바람의 자료를 이용하여 관계식을 계산하여 북극해에서 시뮬레이션을 수행했다(Fig. 4). 그리고 수행된 입자추적의 결과를 이용하여 북극해의 해양환경 변화에 따

른 유빙의 이동경향을 살펴보았다.

북극해에 분포하는 유빙의 움직임은 일반적으로 표층해류에 의해 조절되고, Fig. 1(a)에서 대표적인 보퍼트 환류와 Transpolar Drift가 재분석 자료에서 구현되어 나타났다. 본 연구에 사용된 HYCOM의 해류 자료에는 COADS(Comprehension Ocean-Atmosphere Data Set)의 바람 자료가 동화되어 있어 바람의 영향을 포함하지만, 북극해에서 유빙의 움직임을 재현하기 위해 현장자료와 비교하여 해류자료만을 사용하여 시뮬레이션을 한 경우에는 실측자료를 재현하기 힘들었다(Fig. 3). 일반적으로 유빙의 90%는 해수면 아래에 잠겨있어 해류의 영향을 우선적으로 많이 받지만 해수면 위로 드러난 부분은 바람의 영향을 받기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 유빙의 이동은 해류 자료만을 가지고 수행된 시뮬레이션 결과(Fig. 3(a))보다 해류와 바람의 영향을 고려한 시뮬레이션 결과(Fig. 3(b))에서 현장 ITP자료와 유사하고 선행연구들에서 제시된 이동경로와 속도(보퍼트 환류: 평균 0.15-0.2 m/s)를 나타내는 것을 확인되었다(Jackson *et al.*, 2012; Timmermans *et al.*, 2008). 기존의 연구에서 해수면 위에 부유하는 물체들은 바람에 의한 Leeway Drift 효과가 존재하고 입자 추적 시뮬레이션을 수행할 경우 이에 대한 영향을 고려해야 된다고 제시하고 있다. Richardson(1997)은 shipdrift 자료를 표층 해류로 사용할 경우에는 바람의 영향으로 배의 움직임이 발생하기 때문에 실제 해류와는 차이를 나타내는 것으로(평균 1%의 오차 발생) 분석했다. Breivik *et al.*(2011)은 여러 가지 부유물질에 Leeway Drift 효과를 적용하여 실험해본 결과에서, 부유물의 크기에 따라 다르지만 풍속의 1-2% 정도의 이동 효과를 나타내는 것으로 조사되었다. Neumann *et al.*(2014)은 대서양의 북해 남부를 대상으로 해수면에 부유해 있는 해양 쓰레기를 추적하기 시뮬레이션에서 바람에 의한 Leeway Drift 효과를 1%에서 5% 사이의 범위로 설정할 때, 실제와 모의가 가장 유사하게 나타나는 것으로 제시했다. Son *et al.*(2015)의 연구에서도 해수면에 부유되어 있는 녹조를 대상으로 입자추적 실험을 할 경우 바람의 효과에 대해서 3% 이하의 Leeway Drift 효과를 고려할 경우 실제 결과와 유사한 것으로 제시했다. 선행연구들에서 제시된 Leeway Effect의 평균적인 효과는 풍속의 2-3% 내외의 속도로 부유물을 이동시킬 수 있으며, 이는 Fig. 4에서 제시된 그래

프에서의 풍속의 적용 비율 범위에 포함된다. 북극해에서 해빙의 규모는 하계에 감소하지만 동계로 가면서 거대한 군집을 이루면서 규모가 커지는 등 계절에 따른 비율 변화를 고려해야 하는 것으로 조사되었다.

전체 ITP자료를 이용하여 해류와 바람의 관계식을 계산한 결과에서(Fig. 4), 보퍼트 환류가 존재하는 해역에서는 해류와 바람의 영향은 정의 관계를 가지고 있고, Transpolar Drift 해역은 역의 관계를 나타냈다. 보퍼트 환류 해역은 1월부터 3월까지의 3% 미만의 해류와 바람의 영향을 받는 것으로 계산되지만, 그 이외의 계절에서는 그 이상의 영향을 고려해야 유빙의 움직임을 재현할 수 있었다. Transpolar Drift 해역은 1월부터 6월까지의 해류의 영향보다는 바람의 영향이 증가되지만, 이후 해류의 영향이 증가되고 바람에 의한 영향이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 유빙의 형태가 다르고, 지형적인 특성 또는 해류의 속도가 다르기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 계산된 관계식을 이용하여 북극해에서 유빙의 이동경향을 재현하고 해양환경 변화에 따른 유빙의 차이점을 분석하기 위해 북극해의 해양환경이 다른 두 해를 선정하여 분석하였다. 북극해에서 유빙의 움직임은 북극해 상공의 기압 배치에 따른 변화되는 AO의 음/양 위상에 따라 표층 해류의 변화가 다르게 나타나는 것으로 조사되었다. 북극해의 해양환경 변화를 연구한 내용 중에서 Rigor *et al.*(2002)은 AO의 위상이 음일수록 Transpolar Drift가 상대적으로 서쪽으로 움직이고, 보퍼트 환류의 순환은 확장되는 것으로 조사되었다. 그리고 Bourgain *et al.*(2013)은 AO의 위상이 변화되면 보퍼트 환류의 영향권과 Transpolar Drift 해류의 이동 경로가 변화되어 북극해의 표층해양환경(표층수온, 염분)에 영향을 미치는 것으로 제시했다. 그래서 본 연구에서는 AO가 음일 경우와 양일 경우에 어떤 유빙의 변화가 나타나는지 알아보기 위해서 기존의 자료를 이용하여 2010년과 2017년의 변화를 분석했다.

AO가 음의 위상을 나타내는 2010년의 경우 유빙은 보퍼트 환류와 Transpolar Drift 해역에서 상대적으로 많은 유동을 나타내고, 환류의 내부보다는 외부에서 상대적으로 빠른 움직임을 나타냈다. 그러나 AO가 음의 위상을 나타내는 2017년의 경우 유빙은 보퍼트 환류 해역에서 입자들의 유동은 상대적으로 약화되었고, 환류의 내부와 외부에서도 움직임이 상대적으로 느려졌다. 이

런 결과는 북극해에 분포하는 유빙이 결빙과 융해와 상관성이 있는 것으로, Stroeve *et al.*(2011)의 연구 결과에서 2010년 9월의 해빙농도는 2008년에 관측된 최소치보다 감소된 것으로 보고했다. 북극해에서 해빙 분포의 감소는 상대적으로 환류가 유동할 수 있는 해역이 넓어지면서 유빙이 이를 따라서 넓은 해역에서 이동을 나타냈다. 실제로 재분석 해류 자료에서 2010년의 1월부터 4월까지 해류는 보퍼트 환류가 유동하는 방향으로 상대적으로 평균보다 강한 흐름을 나타낸 반면 2017년의 경우에는 환류의 움직임과 반대 방향의 흐름을 나타내면서 상대적으로 움직임을 약화시킨 것으로 보인다. 바람의 경우 2010년과 2017년의 1월부터 4월까지의 평균보다 상대적으로 감소했다. 그러나 바람의 경향은 4월 이후 평균보다 증가되었고, 그리고 2010년이 2017년보다 상대적으로 증가되었다.

본 연구는 기후변화에 따른 유빙의 감소나 증가를 고려한 결과 또는 전체적의 경향을 설명하는 결과이기보다는 북극해에서 유빙의 분포를 추적하고 분포 양상을 이해하기 위해 입자추적 방법을 이용하여 연구를 수행했다. 결론적으로 북극해에 분포하는 유빙을 추적하는 기술들이 개발되면서 탐지된 결과에 대한 주요 원인에 대한 연구들이 필요하게 될 것이고, 이런 원인들을 파악하기 위해 입자추적 방법은 유용한 기술이 될 것이다.

사사

본 연구는 극지연구소의 북극 해빙 위성관측을 위한 분석 기술 개발(PE18120) 연구과제의 지원(한국해양과학기술원 위탁과제 PN67320)으로 수행 되었습니다.

References

- Armitage, T.W.K., S. Bacon, and R. Kwok, 2018. Arctic sea level and surface circulation response to the Arctic Oscillation, *Geophysical Research Letters*, 45: 6576-6584.
- Belchansky, G.I., D.C. Douglas, and N.G. Platonov, 2004. Duration of the Arctic sea ice melt season: Regional and interannual variability, 1979-2001, *Journal of Climate*, 17(1): 67-80.
- Breivik, O., A.A. Allen, C. Maisondieu, and J.C. Roth, 2011. Wind-induced drift of objects at sea: The leeway field method, *Applied Ocean Research*, 33: 100-109.
- Comiso, J.C., 2003. Warming trends in the Arctic from clear sky satellite observations, *Journal of Climate*, 16(21): 3498-3510.
- Groves, D.G. and J.A. Francis, 2002. Variability of the Arctic atmospheric moisture budget from TOVS satellite data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(24): 4785.
- Jeon, H.J. and H.S. An, 1997. Numerical simulation of the circulation and suspended materials movement in the Yellow Sea and the East China Sea by tidal residual and wind-driven current, *Journal of Korean Earth Science Society*, 18(6): 529-539 (in Korean with English abstract).
- Kay, J.E., T. L'Ecuyer, A. Gettelman, G. Stephens, and C. O'Dell, 2008. The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum, *Geophysical Research Letters*, 35: L08503.
- Kim, H., J. Park, H.-C. Kim, and Y.B. Son, 2017. Climatological variability of multisatellite-derived sea surface temperature, sea ice concentration, chlorophyll-a in the Arctic Ocean, *Korean Journal of Remote Sensing*, 33(6-1): 901-915 (in Korean with English abstract).
- Kwok, R., G. Spreen, and S. Pang, 2013. Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118: 2408-2425.
- Lavergne, T., S. Eastwood, Z. Teffah, H. Schyberg, and L.-A. Breivik, 2010. Sea ice motion from low-resolution satellite sensors: An alternative method and its validation in the Arctic, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115: C10032.
- Maslanik, J., J. Stroeve, C. Fowler, and W. Emery,

2011. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011, *Geophysical Research Letters*, 38: L13502.
- Neumann, D., U. Callies, and M. Matthies, 2014. Marine litter ensemble transports simulations in the southern North Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 86: 219-228.
- Lim, S.M., S.-W. Yeh, and G.-R. Kim, 2012. Analysis on the Relationship between the Korean temperature and the atmospheric circulation over the Northern Hemisphere during winter, *Atmosphere*, 22(2): 187-197 (in Korean with English abstract).
- Nghiem, S.V., I.G. Rigor, D.K. Perovich, P. Clemente-Colon, J.W. Weatherly, and G. Neumann, 2007. Rapid reduction of Arctic perennial sea ice, *Geophysical Research Letters*, 34: L19504.
- Parkinson, C.L. and J.C. Comiso, 2013. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm, *Geophysical Research Letters*, 40: 1356-1361.
- Post, E., U.S. Bhatt, C.M. Bitz, J.F. Brodie, T.L. Fulton, M. Hebblewhite, J. Kerby, S.J. Kutz, I. Stirling, and D.A. Walker, 2013. Ecological consequences of sea-ice decline, *Science*, 341: 519-524.
- Proshutinsky, A., R.H. Bourke, and F.A. McLaughlin, 2002. The role of the Beaufort Gyre in Arctic climate variability: seasonal to decadal climate scales, *Geophysical Research Letters*, 29(23): 2100.
- Proshutinsky, A.Y. and M.A. Johnson, 1997. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 102(C6): 12493-12514.
- Plueddemann, A.J., R. Krishfield, T. Takizawa, K. Hatakeyama, and S. Honjo, 1998. Upper ocean velocities in the Beaufort Gyre, *Geophysical Research Letters*, 25(2): 183-186.
- Richardson, P.L., 1997. Drifting in the wind: leeway error in shipdrift data, *Deep-Sea Research*, 44(11): 1807-1903.
- Rigor, I.G. and J.M. Wallace, 2004. Variations in the age of Arctic sea-ice and summer sea-ice extent, *Geophysical Research Letters*, 31: L09401.
- Rigor, I.G., J.M. Wallace, and R.L. Colony, 2002. Response of sea ice to the Arctic Oscillation, *Journal of Climate*, 15(18): 2648-2663.
- Son, Y.B., B.-J. Choi, Y.H. Kim, and Y.-G. Park, 2015. Tracing floating green algae blooms in the Yellow Sea and the East China Sea using GOCI satellite data and Lagrangian transport simulations, *Remote Sensing of Environment*, 156: 21-33.
- Stroeve, J.C., J. Maslanik, M.C. Serreze, I. Rigor, W. Meier, and C. Fowler, 2011. Sea ice response to an extreme negative phase of the Arctic Oscillation during winter 2009/2010, *Geophysical Research Letters*, 38: L02502.
- Timmermans, M.-L., J. Toole, A. Proshutinsky, R. Krishfield, and A. Plueddemann, 2008. Eddies in the Canada Basin, Arctic Ocean, observed from Ice-Tethered Profilers, *Journal of Physical Oceanography*, 38: 133-145.