

Article

## 남극 극 전선 탐지를 위한 접근법과 변동성에 대한 연구

박진구<sup>1)</sup> · 김현철<sup>2)</sup> · 황지현<sup>3)</sup> · 배덕원<sup>3)</sup> · 조영현<sup>4)</sup>†

### An Approach for the Antarctic Polar Front Detection and an Analysis for its Variability

Jinku Park<sup>1)</sup> · Hyun-cheol Kim<sup>2)</sup> · Jihyun Hwang<sup>3)</sup> · Dukwon Bae<sup>3)</sup> · Young-Heon Jo<sup>4)</sup>†

**Abstract:** In order to detect the Antarctic Polar Front (PF) among the main fronts in the Southern Ocean, this study is based on the combinations of satellite-based sea surface temperature (SST) and height (SSH) observations. For accurate PF detection, we classified the signals as front or non-front grids based on the Bayesian decision theory from daily SST and SSH datasets, and then spatio-temporal synthesis has been performed to remove primary noises and to supplement geographical connectivity of the front grids. In addition, sea ice and coastal masking were employed in order to remove the noise that still remains even after performing the processes and morphology operations. Finally, we selected only the southernmost grids, which can be considered as fronts and determined as the monthly PF by a linear smoothing spline optimization method. The mean positions of PF in this study are very similar to those of the PFs reported by the previous studies, and it is likely to be well represents PF formation along the bottom topography known as one of the major influences of the PF maintenance. The seasonal variation in the positions of PF is high in the Ross Sea sector (~180°W), and Australia sector (120°E-140°E), and these variations are quite similar to the previous studies. Therefore, it is expected that the detection approach for the PF position applied in this study and the final composite have a value that can be used in related research to be carried out on the long term time-scale.

**Key Words:** Antarctic Polar Front, Front detection, Bayesian Oceanic Front Detection mode

**요약:** 이 연구는 남빙양(Southern Ocean)에서 나타나는 주된 전선(Front)들 중에 남극 극 전선(Antarctic Polar Front; PF)을 탐지하기 위하여 위성 기반 해수면 온도(sea surface temperature)와 해수면 고도(sea surface height) 자료를 복합적으로 사용하였다. 정확한 PF 탐지를 위하여 일별 SST와 SSH 자료를 각각 기반으로 하여 베이지

Received November 11, 2018; Revised November 25, 2018; Accepted November 30, 2018; Published online December 5, 2018

<sup>1)</sup> 부산대학교 해양학과 박사과정생 (PhD Student, Department of Oceanography, Pusan National University)

<sup>2)</sup> 극지연구소 북극해빙예측사업단 책임연구원 (Director, Unit of Arctic Sea-Ice Prediction, Korea Polar Research Institute)

<sup>3)</sup> 부산대학교 해양학과 석사과정생 (Master Student, Department of Oceanography, Pusan National University)

<sup>4)</sup> 부산대학교 해양학과 부교수 (Associate Professor, Department of Oceanography, Pusan National University)

† Corresponding Author: Young-Heon Jo (joyoung@pusan.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.

안 결정 이론(Bayesian decision theory)을 적용하였으며, 이를 근거로 전선/비전선의 신호를 격자 별로 분류하였다. 이후, 시공간적인 합성을 통하여 일차적인 노이즈(noise) 제거 및 지리학적 연결성을 보완하였다. 그러나 이들 과정을 수행하고도 여전히 잔존하는 일부 노이즈를 제거하기 위하여 해빙 및 연안 마스크(masking)를 수행하였다. 또한 모폴로지 연산(morphology operation)을 통하여 지류 성분을 최대한으로 배제하고 주된 전선 성분만을 추출하였다. 최종적으로 선택된 전선 격자 들에서 PF의 특징을 나타낼 수 있도록 가장 최남단의 전선만을 선택하여 평활 스플라인(smoothing spline) 최적화 방식을 통해 선 형태의 월별 PF를 산출하였다. 산출된 PF는 기존의 연구에서 제시한 PF의 위치와 상당히 유사한 것으로 나타났으며, 특히 바다 지형에 따라 상당 부분 결정되는 PF의 변화를 잘 묘사하는 것으로 보인다. 로스해 주변( $\sim 180^\circ\text{W}$ )과 호주 이남의 해역( $120^\circ\text{E}$ - $140^\circ\text{E}$ )은 PF의 위치에 대한 계절적 변동이 높게 나타나며, 그러한 변동이 기존에 제시된 결과와 상당히 유사한 경향을 지닌다. 그러므로 이 연구에서 산출된 PF의 위치에 대한 탐지 결과가 향후 장기적 관점에서 수행될 연구에 사용될 수 있는 가치를 지닐 것으로 기대한다.

## 1. 서론

남극 극 전선(Antarctic Polar Front; PF)은 저온저염인 남극 표층수(Antarctic surface water)와 상대적으로 고온고염인 아남극수(Subantarctic Water)가 만나는 전이 지역(Transition zone)에서 형성되며(Freeman *et al.*, 2016; Pollard *et al.*, 2002; Sarmiento *et al.*, 2004), 표층 수온 및 염분, 영양염, 생산성에 대하여 뚜렷한 구배(gradient)를 나타낸다(Baxth *et al.*, 2001; Dong *et al.*, 2006; Freeman *et al.*, 2016; Moore *et al.*, 1999; Moore and Abbott, 2002; Trull *et al.*, 2001). PF는 남극순환류(Antarctic Circumpolar Current, ACC) 상에서 동쪽으로 흐르는 강력한 제트류를 형성하는 전선 중의 하나이며, 위도상 위치의 변동으로 인하여 중규모의 사행(meandering), 소용돌이(eddy) 등을 형성하고, 남빙양(Southern Ocean)에서 소용돌이에 의한 열플럭스 및 대기-해양 상호작용의 변화와 더불어 생산성의 변화에도 영향을 미치는 중요한 요인이다(Ansorge *et al.*, 2015; Freeman *et al.*, 2016; Pollard *et al.*, 2002; Swart and Speich, 2010). 그러므로 PF의 위치 변화와 해양-대기학적 변동과의 연관성에 대한 이해를 위해서라도 정확한 PF의 탐지가 요구되며 PF의 변동에 대한 구체적인 이해가 필요하다(Dong *et al.*, 2006).

위성 자료를 활용한 PF의 탐지는 대부분 해수면 고도(sea surface height; SSH)와 해수면 온도(sea surface temperature; SST) 자료를 바탕으로 진행되어 왔다(Dong *et al.*, 2006; Freeman *et al.*, 2016; Freeman and Lovenduski, 2016; Gille, 2002, 1994; Moore *et al.*, 1999; Sokolov and Rintoul, 2002; Swart and Speich, 2010). SSH는 해양 상층

밀도장의 특징을 내포하고 있어 SSH 구배만으로 전선의 세기와 위치를 특징짓는데 사용되기도 하였다(Freeman *et al.*, 2016). 일반적으로 SSH의 구배가 가장 강한 위치가 특정 SSH 값의 분포와 유사하여, 단순 SSH 임계치(threshold)를 통한 PF의 탐지가 수행되기도 하였다(Sokolov and Rintoul, 2002). 그러나 SSH 기반의 PF 탐지는 잠재적으로 남빙양의 기후 변화에 따른 해수면상에 상당히 민감하다(Freeman *et al.*, 2016; Gille, 2002). 그리고 SSH의 등고선이 항상 높은 SSH 구배와 일치하지 않기 때문에, 특히 전선이 약화되고 분산되는 지역에서, SSH 등고선에 의존한 방식은 PF의 정량적인 변동에 대한 분석에 제한적이다(Graham *et al.*, 2012). SST는 PF 상에서 구배가 강하게 나타난다는 특징을 기반으로 상당 연구들이 SST 자료 기반의 PF 탐지를 수행해왔다(Dong *et al.*, 2006; Freeman and Lovenduski, 2016; Moore *et al.*, 1999). Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)과 같은 적외선 영역에서 관측되는 SST를 통한 PF 탐지는 구름과 수증기에 크게 영향을 받는다는 단점을 지니고 있을 것이라 생각되어 졌지만(Dong *et al.*, 2006; Moore *et al.*, 1999), 이후 마이크로파 센서인 Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System(AMSR-E)으로 관측된 SST와 비교한 결과, AMSR-E가 보유한 구름 투과 능력을 감안하면 적외선 기반 SST 관측 또한 PF 위치를 탐지하는데 있어서 유효한 것으로 밝혀졌다(Dong *et al.*, 2006). 그러나 PF가 표층과 아표층(subsurface) 모두에서 나타나지만 수직적으로 동일한 위치에 나타나지 않음을 고려할 때(Mackintosh, 1946), 위성 기반 SST는 표층에만 국한되어

아표층의 영향을 전혀 고려치 않기 때문에 PF의 위치를 탐지하는데 다소 제한적일 수 있다.

이 연구에서는 PF에 대한 표층 특성과 연관된 SST와 아표층에서 나타나는 PF의 특성을 반영하는 SSH(Gille, 1994)를 토대로 PF의 위치를 정의하고자 하였다. Fig. 1(a)와 1(b)는 각 자료의 구배장을 제시한 것으로 SST 구배의 크기는 SSH에 비하여 크게 나타나지만 남빙양 전체에 걸쳐 균등하고 산발적으로 분포하는 특성을 지니며, 비록 SST에 비하여 SSH의 구배 크기(*gradient magnitude*, GM)는 작지만 공간적으로 밀집되어 있는 형태를 띤다. 각 자료를 이용하여 산출된 구배장에 대한 2017년 1년 동안의 상관성은 PF 인접 지역에서 높게 나타난다(Fig. 1(c)). 약 0.6이상의 높은 상관성이 Orsi *et al.*(1995)가 제시

한 PF와 아남극 전선(Subantarctic Front; SAF)을 중심으로 분포하고 있다. 특히, 최남단 경계 지점이 PF의 위치와 상당히 유사한 형태를 보이기 때문에 두 자료를 복합적으로 이용하여 PF를 탐지한 결과가 대체로 유효할 것으로 생각된다.

## 2. 위성 관측 기반 자료

이 연구에서 사용된 SST 자료는 National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA)에서 제공하는 위성, 선박 및 부이 자료를 통하여 재구성된 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature(OISST)이 사용되

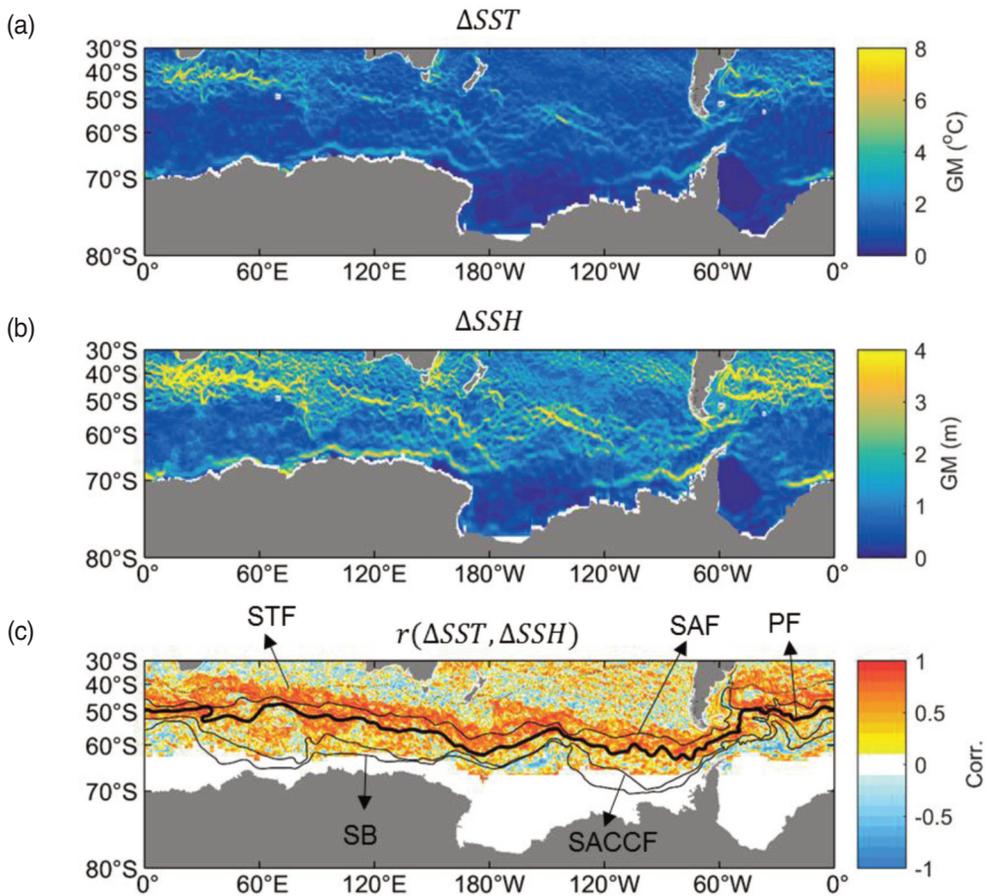


Fig. 1. Examples of gradient magnitude (GM) distribution for (a) sea surface temperature and (b) height datasets. The correlation coefficients between SST and SSH GM values at each pixel during 2017. The black lines indicate the front locations from Orsi *et al.* (1995). The fronts are abbreviated as follows (Subtropical Front: STF, Subantarctic Front: SAF, Polar Front: PF, Southern Antarctic Circumpolar Current Front: SACCf, Southern Boundary: SB).

었다(Reynolds, 1993)(<https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>). 이들 자료는 전 지구에 걸쳐 0.25°의 공간 해상도로 일별로 제공되고 있다. 일별 OISST 자료는 두 가지 버전으로 제공되고 있는데 원격 탐사 자료로서 오직 AVHRR의 산출물만을 사용한 것과 AMSR-E의 자료와 함께 사용한 것이다. 근적외선 영역 기반 관측을 수행하는 AVHRR 기반 SST 자료는 1981년부터 현재까지 꾸준히 제공되고 있지만 마이크로파 기반의 AMSR-E가 추가된 자료의 경우 오직 2002년부터 2011년까지 제공되고 있기 때문에 향후 이 연구에서 제시된 방식의 장기적 적용을 위하여 오직 AVHRR 기반으로 제작된 OISST 자료를 사용하고자 하였다. 그러므로 이 연구에서는 PF 탐지를 위한 알고리즘의 적용과 평가에 초점을 두고 있기 때문에 가장 최근 1년간(2017년)의 자료만을 사용하였으며, 또한 1년간의 자료는 계절적인 변동을 포함하고 있기 때문에 사전 연구들에서 제시된 PF의 계절적 변동 특성을 잘 반영하는지 판단하는데 유용할 것으로 보인다. 추가적으로 SSH 자료는 Copernicus Marine

Environment Monitoring Service(CMEMS)로부터 획득되었다(<http://marine.copernicus.eu/>). 이 자료는 Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, Topex/Poseidon 등의 해면고도계(altimeter)들로부터 산출된 평균적인 고도장이며 1993년부터 2017년까지 OISST와 동일하게 일별, 0.25°의 해상도로 제공된다.

### 3. 극 전선 탐지

이 연구에서는 SST와 SSH가 지니는 특징을 동시에 가지고 있는 PF를 추출하기 위하여 Fig. 2와 같은 절차가 수행되었다. 우선적으로 SST와 SSH 자료들에 대한 전선 추출은 Bo *et al.*(2014)에 의해 제시된 베이지안 해양 전선 탐지 모델(Baeyesian Oceanic Front Detection model; BOFD)을 통해 이루어졌으며, SST와 SSH 기반의 이미지들에서 추출된 전선의 공통적인 위치를 도출하고 시

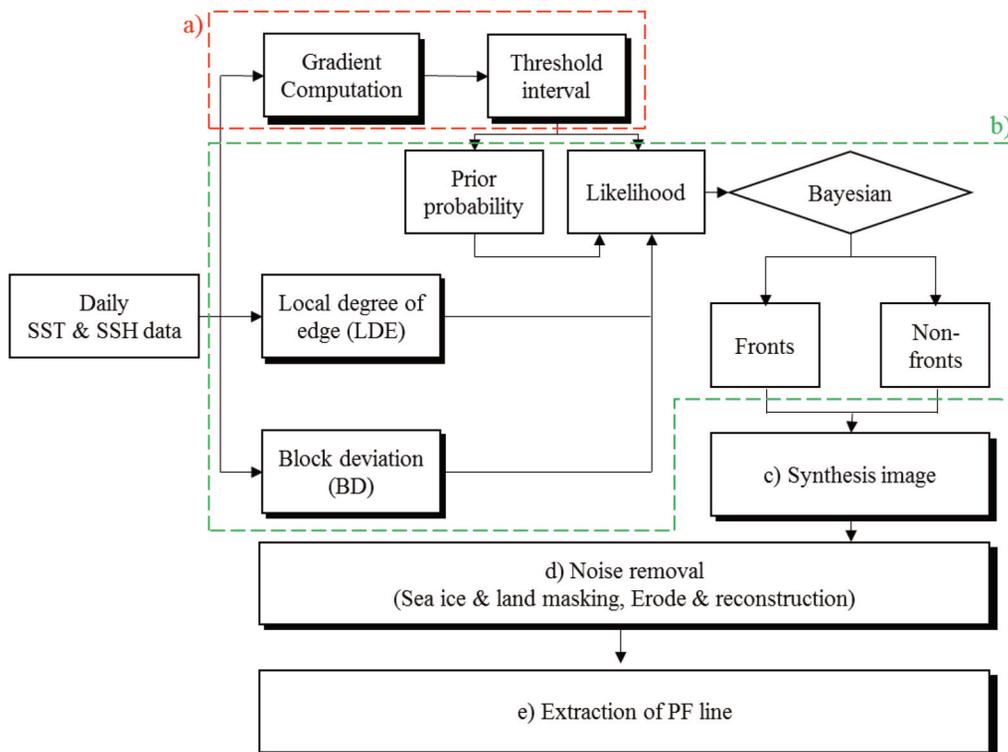


Fig. 2. Workflow for the detection of Polar Front line (modified from Bo *et al.* (2014)). The parts a) and b) are described in section 3.1 and c), d) and e) are explained in Sections 3.2, 3.3 and 3.4, respectively.

공간적인 합성이 수행되었다. 앞선 과정에도 불구하고 남아있는 노이즈를 제거하기 위하여 해빙(sea ice) 및 해안선 자료를 이용한 지리학적인 방식과 물성적인 특성을 고려한 SST의 임계치 마스크가 수행되었으며, 침식(erosion) 및 재구성(reconstruction) 절차를 수행하여 주요한 전선의 신호만을 선택하였다. 최종적으로 전선으로 선택된 픽셀 중 최남단에 위치한 격자만을 선택하여 평활 스플라인(smoothing spline) 방식을 통해 경도상 연속적인 PF를 추출하였다.

1) 전선 추출

(1) 구배 산출 및 임계치 설정

SST 및 SSH 자료로부터 PF를 추출하기 위하여 이 연구에서는 베이지안 결정 이론(Bayesian decision theory)에 근거한 BOFD가 사용되었다(Bo *et al.*, 2014). BOFD는 각 자료의 구배장을 산출하고 임계치를 설정하는 것으로부터 시작된다(Fig. 2(a)). 우선 구배를 계산하기 위하여 가장 폭넓게 사용되고 있는 소벨 알고리즘 연산자(Sobel algorithm operator)가 적용되었다. 3×3 픽셀과 x, y 축 방향의 소벨 마스크의 각 화소들을 곱하여 더한 값들을 통해 최종적으로 구배의 크기를 계산하였다. 즉, 3×3 픽셀이 Fig. 3과 같이 표현될 때, 중심 픽셀 E의 2차원 변화율은 식 (1)과 (2)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta T_x &= T_G + 2T_H + T_I - T_A - 2T_B - T_C \\ \Delta T_y &= T_C + 2T_F + T_I - T_A - 2T_D - T_G \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_x &= H_G + 2H_H + H_I - H_A - 2H_B - H_C \\ \Delta H_y &= H_C + 2H_F + H_I - H_A - 2H_D - H_G \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $T_A$ 와  $H_A$ 는 픽셀 A에서의 SST와 SSH를 나타낸다. 그러므로, 중심 픽셀 E의 구배 크기는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta T_E = (T_x^2 + T_y^2)^{\frac{1}{2}}, \Delta H_E = (H_x^2 + H_y^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

위의 식 (3)으로 산출된 구배 값의 분포에서 Oram *et al.*(2008)에 의해 제시된 임계치 범위(threshold interval)

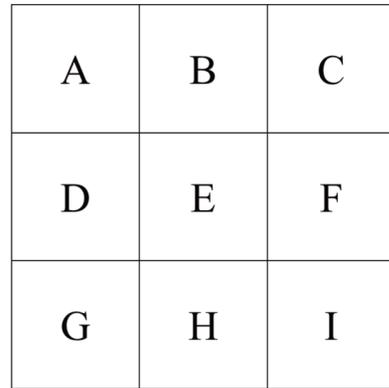


Fig. 3. 3×3 neighborhood for each pixel (Bo *et al.*, 2014).

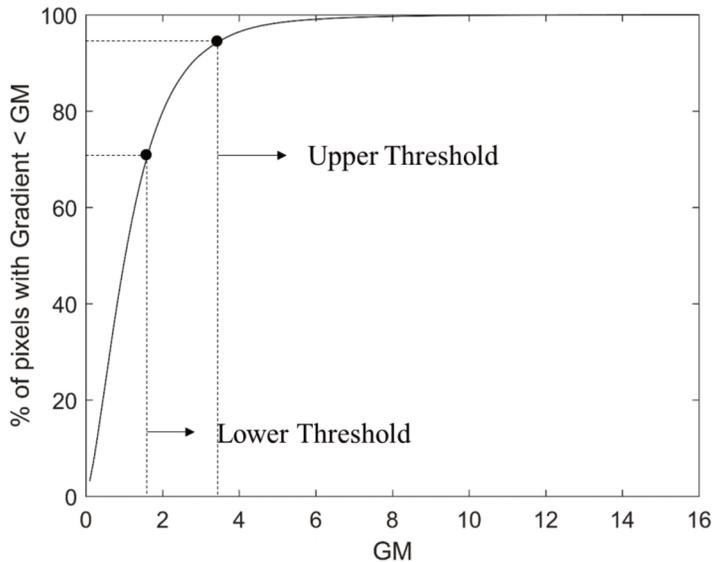


Fig. 4. Cumulative curve for the gradient magnitude. Lower and Upper thresholds are set at 70% and 95% of pixels with the gradient magnitude, respectively.

를 설정하여 전선/비전선(front/non-front) 격자를 분류 하는데 기준치로서 적용하였다. 설정되는 상위 혹은 하위 임계치(upper and lower threshold)는 연구 지역 전체의 구배의 분포를 통해 결정되는데(Fig. 4), 모든 픽셀의 구배 크기의 분포에서 일정한 백분율로서 구분한다. 이 연구에서는 상위와 하위 임계치를 각각 95%, 70%로 설정했으며, 하위 임계치보다 작은 구배 크기를 나타내면 비전선 격자로, 상위 임계치와 하위 임계치 사이에 있으면 전선 격자로서 고려된다. 상위 임계치 이상의 값은 AVHRR 기반의 자료가 가질 수 있는 잔존하는 오차로 인한 구배로서 고려되었다. 비록 구배장으로부터 전선/비전선 격자를 구분하기 위하여 정량적인 임계치를 설정하였으나 실제로 약 10% 내외의 설정차는 결과에 크게 영향을 미치지 않는다(Bo *et al.*, 2014).

(2) 베이지안 결정 이론

Fig. 2(b)에 해당하는 과정을 진행하는데 사용되는 베이지안 결정 이론은 어떠한 결정에 수반되는 확률과 비용을 이용하여 다양한 의사 결정 간의 상충 관계를 정량화 하는 통계적인 접근법으로, 베이즈 정리(Bayesian theory)에 의거하여 사후 확률(posterior probability,  $P(A|B)$ )은 증거(evidence,  $P(B)$ ), 사전 확률(prior probability,  $P(A)$ ) 그리고 조건부 확률(conditional probability 혹은 likelihood,  $P(B|A)$ )에 의하여 식 (4)와 같이 결정된다.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \tag{4}$$

이 연구에서 모든 격자가 전선( $\omega_1$ )과 비전선( $\omega_2$ )으로 구분된다면, 특정 격자  $x$ 의 사전 확률(전선:  $P_x(\omega_1)$ , 비전선:  $P_x(\omega_2)$ )은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$P_x(\omega_1) = \frac{\Delta T_x - u_l}{u_u - u_l}, \quad P_x(\omega_2) = \frac{u_u - \Delta T_x}{u_u - u_l} \tag{5}$$

조건부 확률을 계산하기 위하여 Bo *et al.*(2014)는 구배의 지역성(Local degree of edge; LDE)과 블록 편차(Block deviation; BD)의 개념을 도입하였다. 식 (4)에서 조건부 확률  $P(B|A)$ , 즉 A가 주어졌을 때 B의 발생 확률에서 B는 LDE와 BD가 되고 A는 전선/비전선으로 분류된 결과를 의미한다. 예를 들어, 특정 격자  $x$ 가 전선으로 사전에 분류되었을 때, 나머지 격자들에서  $x$ 보다 구배가 크거나 동일하게 나타난다면, 이 격자들에서는 전

선이 존재한다고 보아도 무방하며, 이들 격자의 집합을 “전선 세트”라고 지칭한다. 반대로 격자  $x$ 가 비전선으로 분류되었다면  $x$ 보다 구배 크기가 낮거나 동일한 격자들은 “비전선 세트”로 분류할 수 있다. 그러므로  $x$ 의 조건부 확률은  $x$ 의 사전 확률에 근거한 분류 결과와  $x$ 와 전선/비전선 세트 간의 LDE와 BD의 차이를 이용한다. 이러한 조건부 확률을 계산하기 위하여 다음과 같은 비율을 사용한다.

$$P(x_1|\omega_i) = \frac{m_1}{n}, \quad P(x_2|\omega_i) = \frac{m_2}{n} \tag{6}$$

식 (6)에서  $m_1$ 과  $m_2$ 는 전선 세트의 픽셀들의 LED와 BD 그리고  $x$ 의 LDE와 BD의 차이가 0.1보다 적은 전선 세트 내의 격자 개수를 각각 의미하며,  $n$ 은 전선 세트의 격자 개수를 나타낸다. 결국 이들 비율들은  $x$ 가 전선으로 고려될 때, 두 특징(LDE와 BD)의 조건부 확률이 되며 이들은  $P(x_a|\omega)$ 로 표현될 수 있다. 여기서  $a$ 는 LDE와 BD를 나타낸다. 동일하게  $x$ 가 비전선으로 고려되면 조건부 확률은  $P(x_a|\omega)$ 로 표현될 수 있다. 이 연구에서 각 격자에 대한 4가지 조건부 확률(전선/비전선으로 고려될 때의 LDE와 BD)을 얻을 수 있으며 식 (7)과 같은 베이즈 모델로 표현될 수 있다.

$$P(q|\omega_k) = \prod_{a=1}^2 P(x_a|\omega_k), \quad k = i, j \tag{7}$$

결과적으로, 앞서 제시된 식 (4)의 베이즈 정리를 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} P(\omega_i|x) &= \frac{P(x|\omega_i)P(\omega_i)}{P(x)} \\ P(\omega_j|x) &= \frac{P(x|\omega_j)P(\omega_j)}{P(x)} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

여기서  $P(x)$ 는 공통적인 항이므로 제외할 수 있고, 전선/비전선을 결정 짓는 규칙은 식 (9)과 같이 표현될 수 있다.

$$\left\{ \begin{aligned} &\{\omega_i, P(x|\omega_i)P(\omega_i) > P(x|\omega_j)P(\omega_j)\} \\ &\{\omega_j, P(x|\omega_j)P(\omega_j) < P(x|\omega_i)P(\omega_i)\} \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

식 (9)에 따라 최종적으로  $\omega_i$ (전선)의 조건에 만족하면 전선 신호를 가지는 격자로, 그렇지 않으면 비전선( $\omega_2$ )으로 분류된 격자로 고려되어 사전에 알고있던 정보(사전확률을 바탕으로 수립된)를 수정하게 된다.

## 2) 시공간적 이미지 합성

SST와 SSH 자료가 내포하고 있는 특성을 동시에 고려한 PF를 탐지하기 위하여 두 자료로부터 BOFD를 통해 산출된 결과(섹션 3.1)를 합성하고자 하였다(Fig. 2(c)). Fig. 5에 이들 합성 과정이 제시되어 있다. Fig. 5(a)와 5(b)는 일별 SST와 SSH 자료로부터 BOFD를 적용한 결과이다. 그러나 이 단계에서는 SST 기반 전선 산출 결과가

남빙양 전체에 걸쳐 상당한 노이즈를 포함하고 있다. 특히 이는 육상 근처 해역 및 중규모 해양 현상이 활발히 나타나는 해역에서 높게 나타나며, 이로 인하여 뚜렷한 PF의 형태를 보이지는 않는다. 이에 반해 SSH 기반 전선 산출 결과는 여전히 육상 지역 근처 그리고 일부 해역에서 노이즈를 포함하고 있으나 SST 기반 전선 산출 결과에 비해서는 다소 뚜렷한 전선의 형태를 보인다. 그러나 여전히 이들 단일 센서 기반 자료만으로는 연속적인 선

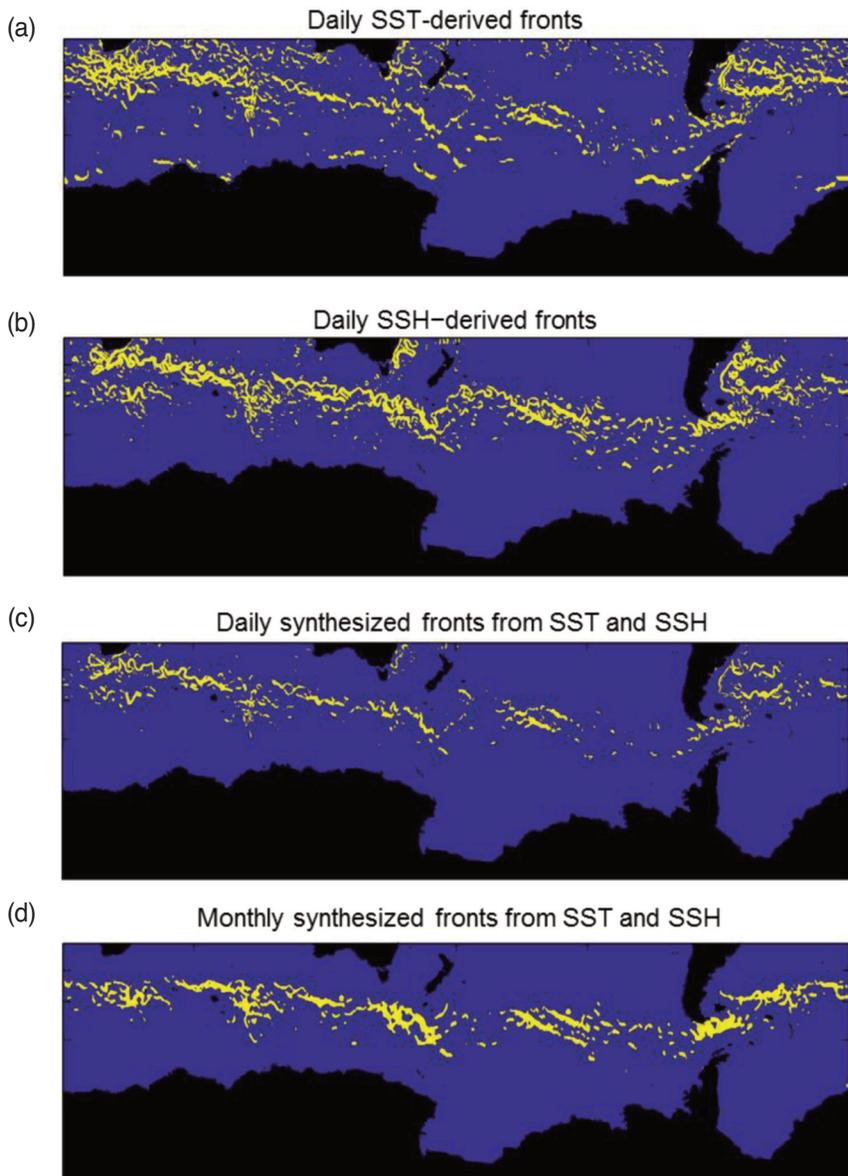


Fig. 5. Daily fronts in the Southern Ocean from only (a) SST and (b) SSH. (c) Daily synthesized fronts from both datasets and (d) monthly composite of the synthesized fronts.

을 추출하는데 있어 다소 무리가 있기 때문에 두 자료가 공통적으로 전선으로 분류하는 격자를 선택하여 Fig. 5(c)와 같이 나타내었다. 노이즈는 일부 제거 되었으나 브라질-말비나스 수렴대(Brazil-Malvinas Confluence zone)와 동 호주(Eastern Australia) 일부 해역에서는 여전히 노이즈가 잔존하고 있다. 뿐만 아니라 각 자료 간에 공통적으로 전선으로 분류된 격자만을 선택함에 따라 다소 전선이 위도상 범위가 좁혀진다는 장점이 있으나 반대로 전반적으로 희미해지는 경향이 있다. 특히 태평양 지역에서 이러한 현상이 두드러진다. 이를 보완하기 위하여 일별 자료를 월별 자료로 합성하여 뚜렷한 전선의 흔적을 나타낼 수 있도록 하였으며(Fig. 5(d)), 여전히 주요한 전선 신호 주변으로 노이즈들이 남아 있지만 앞선 과정들에 비하여 상당히 개선된 결과를 보여준다.

### 3) 노이즈 제거

베이저안 전선 탐지 및 시공간적 이미지 합성을 수행함에 따라 상당 부분 노이즈가 제거되었음에도 불구하고 일부 남아있는 노이즈들은 추가적인 절차를 통해 정확하고 위경도 상 연속적인 PF를 추출하고자 하였다(Fig. 2(d)). 이러한 노이즈에는 연안에서 생성되는 전선 및 해양 에디의 남쪽 경계에서 나타나는 강한 구배로 인해 발생한 노이즈로서 연속적인 선 형태의 PF를 추출하는데 상당한 영향을 미친다. 그러므로 이 연구에서는 지역적인 노이즈 및 에디 기반 노이즈를 제거하기 위하여 두 가지 노이즈 제거 과정을 수행하였다. 첫째, PF에 비하여 북쪽에 대체로 위치하는 SAF에서 수괴의 온도가 10°C보다 높다는 점을 감안하여 10°C 이상의 해수면 온도가 나타나는 지역을 마스킹 하였으며(Dong *et al.*, 2006;

Freeman and Lovenduski, 2016; Orsi *et al.*, 1995), 또한 육상에서 100km 떨어진 지점과 해빙이 뒤덮고 있는 지역에서 나타나는 전선 신호를 무시하였다. 둘째로, 침식과 재구성 과정을 통하여 주요한 전선 신호만을 남기고자 하였다(Fig. 6). 침식과 재구성 과정은 미리 알고 있는 대상 객체의 정보를 반영하여 이미지 내에서 원하는 부분만을 추출하는 모폴로지 연산(Morphology operation)에 속한다(Gonzalez *et al.*, 2003). 이러한 방식은 마스크 역할을 수행하는 구조 요소(Structuring element)를 사용하여 영상 내의 원하는 부분만을 추출하는 연산으로 이 연구에서는 3×3 구조 요소를 사용하였다. 이 구조 요소에서 중심값은 인근 8개의 픽셀을 선택하여 결과 이미지의 위치에 값을 할당하며 전선인 격자의 값이 1, 전선이 아닌 격자의 값이 0으로 구성되어있는 이전 결과 이미지를 일종의 이진화된 이미지라고 고려했을 때, 중심 및 인근 격자의 모든 값이 1의 값을 가져야 1의 결과를 내며 만약 대상 위치에서 한 격자라도 0의 값을 가지면 결과가 0으로 산출되는 침식 과정을 거쳐 노이즈를 제거하게 된다. 이러한 과정에서는 노이즈 뿐만 아니라 일부 주요한 전선 신호의 경계 부분도 같이 제거되기 때문에 기존의 이미지에 대한 정보와 구조 요소를 통해 재구성 과정을 수행하여 주요한 전선 신호를 다시 나타나게 한다. 이러한 과정을 통하여 해양 에디의 남쪽 경계에서 나타나는 강한 구배를 최대한 배제하고자 하였다.

위에서 언급된 과정을 수행한 후, 최종적으로 PF를 추출하기전에 마지막으로 산출된 전선 신호를 가지는 격자들 중 가장 최남단에 위치한 격자만을 선택하였다. 이러한 절차는 Fig. 1(c)에 제시한 것처럼 SST와 SSH의 구배장 간에 나타나는 높은 상관성을 지닌 지역의 최남

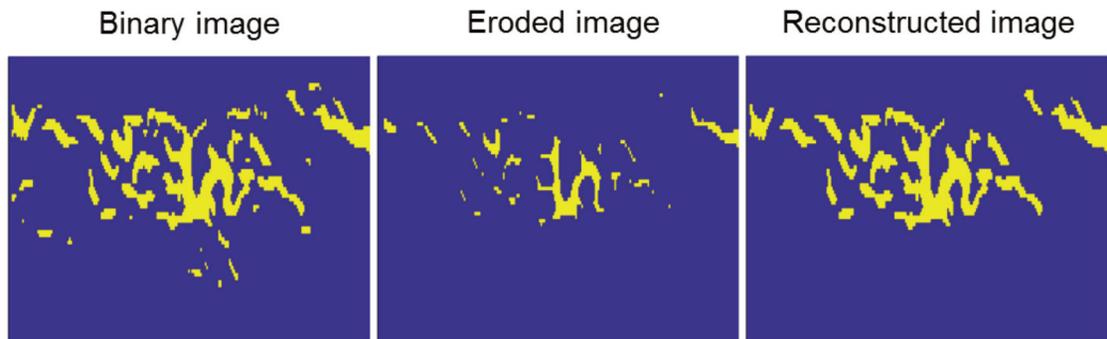


Fig. 6. Binarized (left), eroded (middle) and reconstructed (right) images. Objects mean to be the front pixels.

단 위치와 PF의 위치 간에 높은 일치성을 바탕으로 수행되었다. 그러나 최남단의 전선 격자를 선택하는데 있어서 경도상의 불연속적인 출현을 방지하기 위하여 경도 0.1°당 5°이상의 위도 차이는 자연적으로 나타나는 것이 불가능하다고 판단하여 해당 차이를 나타내는 격자는 제외하고 가장 남쪽에 위치한 격자를 선택하도록 하였다.

Fig. 7은 최종적으로 PF를 탐지하기 위한 전선 격자를 선택한 결과로서 2017년 1월의 예시를 나타낸 것이다. 최남단의 전선 격자들의 분포는 기존에 제시된 Orsi *et al.*(1995)의 PF 위치(PF<sub>0</sub>) Freeman and Lovenduski(2016)가 제시한 PF(PF<sub>F</sub>)와 상당히 밀접한 것을 알 수 있다. 그들에 의해 제시된 PF가 장기적인 기후 값을 감안할 때, PF가 계절성을 지니고 있기 때문에 어느 정도의 차이는 동반될 수 있을 것으로 보인다. 그러나 이 연구에서 산출된 최종적인 최남단의 전선 격자의 위치가 해석 센서로부터 획득된 2017년 1월 클로로필 농도에 대한 평균장에서 나타나는 구배를 잘 반영하고 있음을 보여 준다. 특히, 경도 약 60°E, 170°W, 10°W 부근에서 이 연구에서 산출된 전선 격자의 이전 연구에 의해 제시된 PF에 비하여 남북으로 뚜렷한 클로로필 농도차를 보여 준다. 그러므로 이전에 제시된 PF 보다 PF를 중심으로 수행될 생산성 연구에 있어서 보다 더 정확한 연구를 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

4) 극 전선 추출

최종적으로 산출된 최남단의 전선 격자를 이용하여

연속적인 선 형태의 PF를 산출하기 위하여 이 연구에서는 평활 스플라인(smoothing spline)을 사용하였다(Eubank, 2004)(Fig. 2(e)). 평활 스플라인은 특정한 구간으로 분할한 후, 분할된 구역 내에서 관측된 자료에 오차를 최소화하는 함수  $f(x)$ 를 찾는 방식으로 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 + \lambda \int f''(x)^2 dx \quad (10)$$

식 (10)은 손실 항(loss term)과 페널티 항(penalty term)으로 구성되며 손실 항은 잔차제곱합(residual sum of squares; RSS)를 의미하며 페널티 항은 오버피팅(overfitting)이 발생하지 않도록 평활화시켜주는 역할을 한다. 여기서  $i$ 는 특정한 구간의 개수를 의미하며,  $y_i$ 는 구간  $i$ 에서의 관측 값,  $\lambda$ 는 조율파라미터(turning parameter)로 0에 근접할 경우 RSS가 최소화 되기 위하여 모든 점들이 보간되며 반대로 무한대에 근사하면 함수는 선형적으로 나타나게 된다. 이러한 방식에 대한 자세한 사항은 Eubank(1994)를 참조하기 바란다. 결과적으로 이 연구에서는 최남단의 전선 격자만을 사용하여 평활 스플라인을 통해 연속적인 전선의 형태로 추출하였으며, 평활 스플라인에 적용된 조율파라미터는 0.001로 설정하였다. 평활 스플라인을 적용한 결과는 상대적으로 이전에 제시된 PF에 비하여 보다 원활한 곡선을 산출하게 된다. 비록 이러한 방식이 세부적인 PF의 구조를 표현할 수는 없으나 대규모의 시공간적 규모 상의 변동성 측면에서 보다 원활한 해석을 가능하게 할 수 있다. 만약 세부적인 구조에 대한 해석이 필요할 경우 이 과정을 생

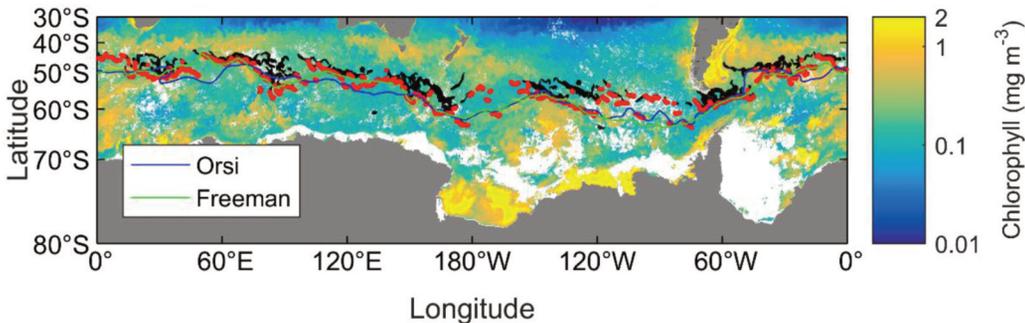


Fig. 7. Examples of front pixels (black dots) and southernmost pixels (red dots) determined in this study and the PF location reported by Orsi *et al.* (1995) (blue line) and Freeman and Lovenduski (2016) (green line). The background color indicates the monthly mean of chlorophyll concentration during January 2017 obtained from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS).

략하고 최종적인 전선 격자 만을 가지고 연구를 수행할 수 있다.

#### 4. 결과 및 토의

Table 1과 Fig. 8은 일련의 PF 탐지 과정을 단일 자료들에 적용하여 산출된 PF 탐지 결과와 두 자료를 합성하여 산출된 PF 탐지 결과를 비교한 것이다. 총 2017년 동안 월별 PF 위치와 PF<sub>O</sub>와 PF<sub>F</sub> 위치를 각각 비교하여 제시한 것이다. 두 자료를 합성하여 산출된 PF는 PF<sub>O</sub>와 2.32°, PF<sub>F</sub>와 1.93°의 평균 RMSE를 가지며 대체로 7-10월에 높은 RMSE를 나타내며 2017년 동안의 RMSE의 표준편차는 각각 0.17°, 0.28°로 나타난다. 반면, SST 자료만을 바탕으로 산출된 PF탐지 결과의 2017년 평균 RMSE는 4.69°(vs. PF<sub>O</sub>), 4.89°(vs. PF<sub>F</sub>)로 두 자료가 합성된 결과에 비하여 다소 높은 RMSE를 나타내며 표준편차도 1.75°, 2.21°로 상당히 증가되었음을 알 수 있다. SSH 자료 기반의 PF 탐지 결과는 PF<sub>O</sub>와 PF<sub>F</sub>의 위도상 위치 대비 평균 3.27°, 2.81°의 RMSE를 나타내며 이는 SST에 비해서는 다소 낮으나 합성된 결과에 비해서는 높게 나타난다. 표준오차의 경우 PF<sub>O</sub>와 PF<sub>F</sub>간에 각각 0.55°, 0.38°로 SST에 비해서는 상당히 낮은 변화폭을 보

이지만 합성된 자료로부터 산출된 PF의 위치에 비해서는 약간 높게 나타남을 알 수 있다. 결과적으로 이 연구에서 수행된 SST와 SSH를 함께 고려하여 산출된 PF는 단순히 SST와 SSH의 각 자료만을 토대로 산출된 것에 비하여 평균적으로 기준에 제시된 PF의 위도상 위치에 비하여 가장 낮은 오차를 나타내고 있으며, 표준오차도 가장 작게 나타나고 있으며 이러한 수치는 PF의 계절적 변동의 변화폭에 포함되는 수준인 것으로 보인다.

2017년 동안 매월 PF가 산출되었으며 그 평균값은 이전 연구에서 제시된 PF들의 위치와 상당히 유사한 것으로 보인다(Fig. 9)(Orsi *et al.*, 1995; Freeman and Lovenduski, 2016). 기본적으로 PF의 형성은 바다 지형에 강한 영향을 받는데(Moore *et al.*, 1997), 케르겔렌 해대(Kerguelen Plateau, 75°-80°E)와 포클랜드 해대(Falkland Plateau, ~50°W) 같은 경사가 급격히 변화하는 지역에서 기존의 PF들과 유사한 위치에서 산출되었다(Moore *et al.*, 1999). 특히, 케르겔렌 해대에서는 PF<sub>O</sub>보다는 PF<sub>F</sub>에 근접하게 나타나며, 아문젠(Amundsen) 및 베링스하우젠(Bellinghusen) 해역에서는 PF<sub>O</sub>의 북단 경계의 위치와 유사한 위치에서 PF가 추출된 것으로 보인다. 계절적 변동이 가장 심하게 나타나는 지역은 로스해(Ross Sea)이며 이 지역에서 기존의 PF들과의 위치와도 가장 동떨어진 결과를 나타내고 있다. 이러한 원인은 Belkin and

Table 1. RMSE between previous PF positions (Orsi *et al.*, 1995; Freeman and Lovenduski, 2016) and the extracted PF position from the composite of SST and SSH, only SST and SSH datasets

(unit: degree)	SST+SSH		Only SST		Only SSH	
	Orsi	Freeman	Orsi	Freeman	Orsi	Freeman
Jan.	2.07	1.59	2.74	2.61	2.63	2.37
Feb.	2.54	1.72	4.49	5.44	4.09	2.88
Mar.	2.33	1.83	8.12	9.00	2.71	2.40
Apr.	2.20	2.04	6.90	7.51	2.78	2.60
May.	2.25	2.00	4.97	5.00	3.28	2.82
Jun.	2.27	1.93	4.34	4.66	2.97	2.51
Jul.	2.63	2.43	3.85	3.70	3.33	2.79
Aug.	2.45	2.17	5.46	5.87	3.53	3.28
Sep.	2.38	2.15	6.43	7.16	3.26	3.02
Oct.	2.45	2.19	3.04	2.28	4.49	3.68
Nov.	2.15	1.52	2.76	2.14	3.20	2.85
Dec.	2.11	1.62	3.25	3.27	2.99	2.58
Mean	2.32	1.93	4.69	4.89	3.27	2.81
S.D.	0.17	0.28	1.75	2.21	0.55	0.38

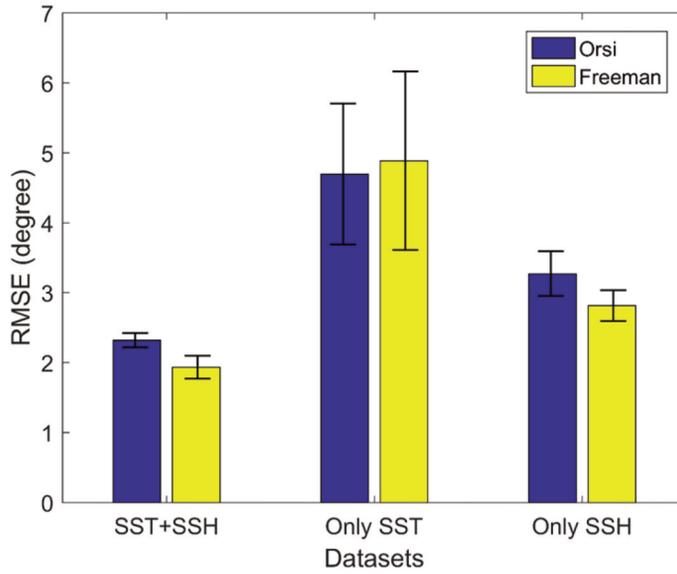


Fig. 8. Mean RMSE between the latitudinal PF position of Orsi *et al.* (1995) (blue) and Freeman and Lovenduski (2016) (yellow) and the results from the composite of SST and SSH, only SST and only SSH datasets in 2017. The error bars represent the standard error of mean values.

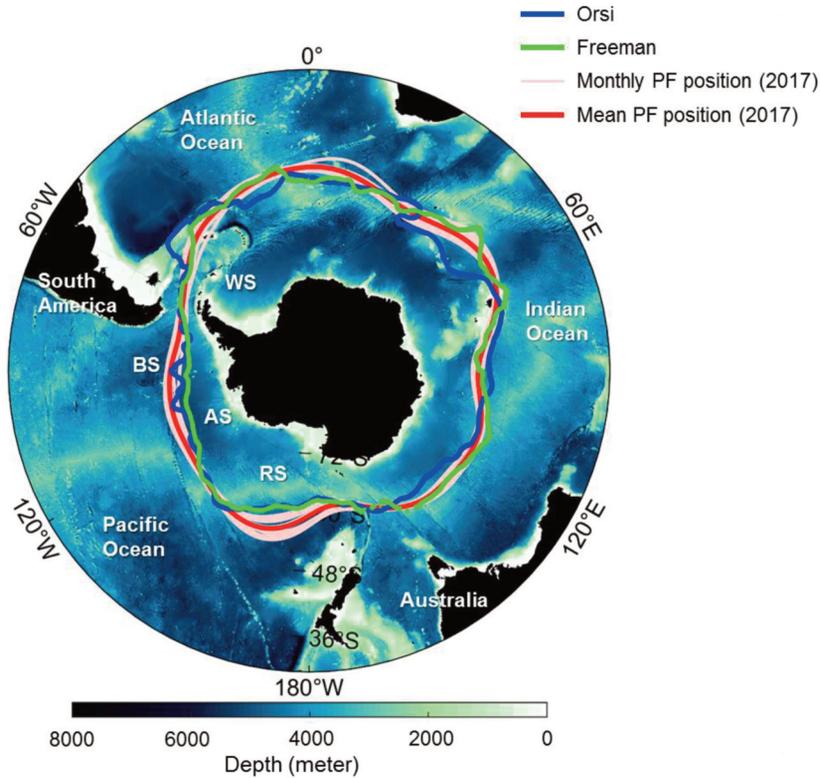


Fig. 9. Monthly positions of PF (light red) and their mean position (red) in this study. The blue and green thick lines represent PFs by Orsi *et al.* (1995) and by Freeman and Lovenduski (2016), respectively. The oceans around Antarctica are abbreviated as follows (WS: Weddell Sea, BS: Bellingshausen Sea, AS: Amundsen Sea, RS: Ross Sea).

Gordon(1996)이 제시했던 PF 구역(PF와 SAF의 범위)이 남극 전체에서 가장 넓게 나타나는 지역으로 수직적으로 PF의 변화가 크게 나타남에 따라 표층을 대변하는 SST와 아표층의 영향을 포함하는 SSH의 결합으로 인해 나타난 것으로 판단되며, 실제로 SSH를 기반으로 산출된 PF(Gille, 1994)의 로스해 상의 위치보다는 남쪽에 위치한 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 PF가 표층에 국한된 현상이 아니라는 점을 감안할 때, 표층에 국한되어 있는 SST를 기반으로 한 PF 탐지 절차가 이 지역에서 큰 오차를 지닐 수 있음을 암시한다. 그러므로 이 연구에서 적용된 방식은 아표층과 표층의 큰 차이를 나타내는 이 지역에서 어느 정도의 오차를 보완해 줄 것으로 기대한다. 이 밖에도 서인도양과 아문젠 및 베링스하우젠 해역, 그리고 드레이크 해협( Drake passage, ~60°W)의 동쪽 해역에서 높은 계절적 변화를 나타내고 있다.

계절적 변화를 면밀히 파악하기 위하여 Fig. 10과 같이 제시하였다. 오직 1년의 자료만으로 탐지 방식을 적용함에 따라 남반구 여름철(DJF)은 동년 1-2월과 12월의 평균으로 산출되었다. PF의 위치 상 계절적인 변화가 가장 큰 해역은 로스해 주변(~180°W)으로 봄철에

름철에 가장 남쪽에 위치하다가 겨울철이 될 때까지 북상하고 이후로 다시 남하하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 Freeman *et al.*(2016)이 제시한 변동과 상당히 흡사하며, 이는 로스해에 형성되는 해빙의 분포에 따른 결과로서 판단된다. 뿐만 아니라 Freeman *et al.*(2016)이 제시한 2002년부터 2014년까지의 계절적 평균의 변동 경향에서 가장 큰 계절적 변동을 나타내는 또 다른 지역으로는 호주 이남의 해역(120°E-140°E)을 들 수 있으며 겨울철과 봄철에 남하해 있다가 여름철과 가을철에 북상하는 경향을 보이는 것 또한, 이 연구와 전반적으로 유사한 형태로 나타난다. 이러한 사실을 바탕으로 이 연구에서 산출된 PF를 이용한 계절적인 변동을 잘 표현하고 있음을 의미한다.

### 5. 결론

이 연구에서는 Bo *et al.*(2014)가 제시한 베이지안 해양 전선 탐지법을 활용하여 SST와 SSH 자료 기반 PF 탐지를 수행하고 그 결과에 대한 유효성에 대한 평가를 수

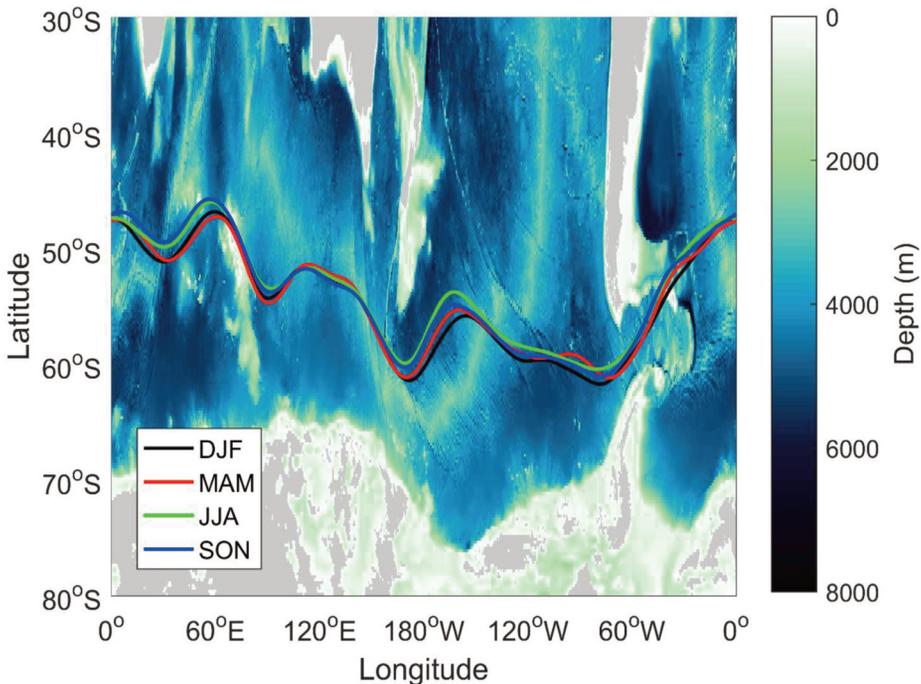


Fig. 10. Seasonal mean position of the PF during one year (2017) (summer: DJF (black), fall: MAM (red), winter: JJA (green), spring: SON (blue)).

행하였다. 이러한 과정에서 SST 및 SSH 자료 기반 전선 신호를 합성하고 노이즈를 제거하기 위한 마스킹과 모폴로지 연산을 적용하였으며 최종적으로 선 형태의 PF를 산출하기 위하여 평활 스플라인 최적화 방식을 사용하였다. 우선 SST 및 SSH 단일 자료만을 토대로 동일한 방식을 적용하였을 때, 기존의 PF 위치에 대한 오차가 월등히 줄어들었으며 계절적인 변동 또한 다른 자료에 비하여 약화되었다. 비록 기존의 연구들은 장기간에 걸쳐 평균적인 PF의 위치를 제시하였으나, 이 연구에서 제시한 2017년 평균적인 PF의 위치는 로스해를 제외하고는 큰 차이를 보이지 않았다. 로스해에서 나타나는 이러한 오차는 기존의 PF들이 수온에 기반 된 것이며, 실제로 탐지된 로스해 상의 PF의 위치는 표층과 아표층을 각각 반영하는 SST와 SSH의 결합으로 인하여 나타난 것으로 보인다. 불행히도 연구 지역의 관측 자료에 대한 접근이 상당히 제한적이었기 때문에 기존의 PF에 비하여 이 연구에서 산출된 PF가 정확한지 아닌지에 대하여 입증할 수는 없었다. 2017년 동안, 연구 지역에서 표류되는 뜰개의 경로에 대한 자료가 부족한 실정으로 인해 향후 이 연구를 과거로 확장하여 정확한 검증 절차가 필요할 것으로 판단된다. 그러므로 이 연구에서는 최대의 기존의 연구 대비 결과의 정량적인 평가만을 수행하였으며, 그 결과 전반적으로 이전 연구에서 제시된 PF와 유사하고 계절적인 변동 특성 또한 잘 반영함에 따라 향후 기후 변화와 연관된 PF의 변동성 분석에서 사용될 수 있는 가치를 지니는 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 한국해양수산부에서 지원하고(20170336) 한국해양과학기술원부설 극지연구소에서 주관하는 “남극해 해양보호구역의 생태계 구조 및 기능 연구(과제번호: PM18060)” 과제와 한국연구재단의 “Global warming Hiatus 기간 동안의 기후변화가 동해에 미친 해양물리-생태 변화 연구(과제번호: NRF-2018R1A2B2006555)” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Ansorge, I.J., J.M. Jackson, K. Reid, J. V. Durgadoo, S. Swart, and S. Eberenz, 2015. Evidence of a southward eddy corridor in the South-West Indian ocean, *Deep-Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 119: 69-76.
- Baxth, J.A., T.J. Cowles, and S.D. Pierce, 2001. Mesoscale physical and bio-optical structure of the Antarctic Polar Front near 170°W during austral spring, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106: 879-902.
- Belkin, I.M. and A.L. Gordon, 1996. Southern Ocean fronts from the Greenwich meridian to Tasmania, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101: 3675-3696.
- Bo, P., S. Fenshen, M. Yunshan, F. Shenghui, and D. Yunyan, 2014. A model of sea surface temperature front detection based on a threshold interval, *Acta Oceanologica Sinica*, 33: 65-71.
- Dong, S., J. Sprintall, and S.T. Gille, 2006. Location of the Antarctic Polar Front from AMSR-E Satellite Sea Surface Temperature Measurements, *Journal of Physical Oceanography*, 36: 2075-2089.
- Eubank, R.L., 2004. A simple smoothing spline III, *Computational Statistics*, 19: 227-241.
- Freeman, N.M. and N.S. Lovenduski, 2016. Mapping the Antarctic Polar Front: Weekly realizations from 2002 to 2014, *Earth System Science Data*, 8: 191-198.
- Freeman, N.M., N.S. Lovenduski, and P.R. Gent, 2016. Temporal variability in the Antarctic Polar Front (2002-2014), *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121: 7263-7276.
- Gille, S.T., 1994. Mean sea surface height of the Antarctic Circumpolar Current from Geosat data: Method and application, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99: 18255-18273.
- Gille, S.T., 2002. Warming of the Southern Ocean since the 1950s, *Science*, 295: 1275-1277.

- Gonzalez, R.C., R.E. Woods, and S.L. Eddins, 2003. Digital Image Processing Using MATLAB, *Quest*, 1: 2-20.
- Graham, R.M., A.M. De Boer, K.J. Heywood, M.R. Chapman, and D.P. Stevens, 2012. Southern Ocean fronts: Controlled by wind or topography?, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117: C08018.
- Mackintosh, N.A., 1946. The Antarctic Convergence and the Distribution of Surface Temperatures in Antarctic Waters, *Discovery Reports (Cambridge)*, 23: 177-212.
- Moore, J.K. and M.R. Abbott, 2002. Surface chlorophyll concentrations in relation to the Antarctic Polar Front: Seasonal and spatial patterns from satellite observations, *Journal of Marine Systems*, 37: 69-86.
- Moore, J.K., M.R. Abbott, and J.G. Richman, 1997. Variability in the location of the Antarctic Polar Front (90°-20°W) from satellite sea surface temperature data, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102: 27825-27833.
- Moore, J.K., M.R. Abbott, and J.G. Richman, 1999. Location and dynamics of the Antarctic Polar Front from satellite sea surface temperature data, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104: 3059-3073.
- Oram, J.J., J.C. McWilliams, and K.D. Stolzenbach, 2008. Gradient-based edge detection and feature classification of sea-surface images of the Southern California Bight, *Remote Sensing of Environment*, 112: 2397-2415.
- Orsi, A.H., T. Whitworth, and W.D. Nowlin, 1995. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current, *Deep Sea Research Part I*, 42: 641-673.
- Pollard, R.T., M.I. Lucas, and J.F. Read, 2002. Physical control on biogeochemical zonation in the southern ocean, *Deep Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49: 3289-3305.
- Reynolds, R.W., 1993. Impact of Mount Pinatubo aerosols on satellite-derived sea surface temperatures, *Journal of Climate*, 6: 768-774.
- Sarmiento, J.L., N. Gruber, M.A. Brzezinski, and J.P. Dunne, 2004. High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity, *Nature*, 427: 56-60.
- Sokolov, S. and S.R. Rintoul, 2002. Structure of Southern Ocean fronts at 140°E, *Journal of Marine System*, 37: 151-184.
- Swart, S. and S. Speich, 2010. An altimetry-based gravest empirical mode south of Africa: 2. Dynamic nature of the Antarctic Circumpolar Current fronts, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115: C03003.
- Trull, T., S.R. Rintoul, M. Had, and E.R. Abraham, 2001. Circulation and seasonal evolution of polar waters south of Australia?: Implications for iron fertilization of the Southern Ocean, *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 48: 2439-2466.