



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

박사학위논문

드레이크 해협을 통과하는
남극순환류의 수송량 변동

제주대학교 대학원

해양학과

홍 창 수

2014년 6월



드레이크 해협을 통과하는 남극순환류의 수송량 변동






指導教授 方 益 燦

洪 昌 秀

이 論文을 理學 博士學位 論文으로 提出함

2014 年 5 月

洪 昌 秀 의 理學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 송 상근 
委 員 문 일 주 
委 員 김 철 호 
委 員 이 지 하 
委 員 강 익 찬 

濟州大學校 大學院

2014 年 6 月



Variability of the volume transport
of the Antarctic Circumpolar Current
in Drake Passage

Chang-Su Hong

(Supervised by professor Ig-Chan Pang)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF SCIENCE
IN
OCEANOGRAPHY

DEPARTMENT OF OCEANOGRAPHY
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2014



목 차

목 차	i
그림 목차	iii
표 목 차	xiii
요 약	xiv
제 1 장 서론	1
제 2 장 드레이크 해협 의 표층 지형류 산출	9
2. 1. 개요	9
2. 2. 자료	12
2. 2. 1. 인공위성 고도계 자료	12
2. 2. 2. 유속 관측 자료	18
2. 3. 역모델을 이용한 평균 유속장 산출	19
2. 3. 1. 모델 이론	19
2. 3. 2. 역산해	25
2. 3. 3. 매개변수 조정	27
2. 3. 4. 역모델 계산 결과	34
2. 4. 해류계 관측 자료와의 비교	43
2. 4. 1. 수온과 염분의 수직구조	43
2. 4. 2. 유속 관측 결과	46
2. 4. 3. 지형류와 실측류의 상관성	52
2. 5. 토의	53

제 3 장 드레이크 해협 해수 수송량 변동성	57
3. 1. 서론	57
3. 2. 자료 및 방법	59
3. 3. 드레이크 해협 해수 수송량	59
3. 3. 1. 평균 수송량	59
3. 3. 2. 수송량 변동 산출	63
3. 3. 3. 수송량 변동 특성	68
3. 4. 해수 수송량 변동과 기후지수와의 상관성	74
3. 4. 1. 기후지수	74
3. 4. 2. 수송량 지수와 ENSO 지수의 상관성	79
3. 4. 3. 수송량 지수와 SAM 지수의 상관성	85
3. 5. 토의	89
제 4 장 종합 토의 및 결론	93
참고문헌	95
Summary	105

List of Figures

- Fig. 1-1. Map of the Southern Ocean, with bathymetry contours, mean Antarctic Circumpolar Current (ACC) fronts in orange (Fronts from Orsi *et al.*, 1995; bathymetry (m) from ETOPO1 project (Amante and Eakins, 2009)), and red box outlining Drake Passage (STF: Subtropical Front, SAF: Subantarctic Front, PF: Polar Front, SACCF: Southern ACC Front, SBdy: Southern Boundary of the ACC). 3
- Fig. 1-2. Schematic diagram of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) in the Southern Ocean (from Rintoul *et al.* (2000)). Depths shallower than 3500m are shaded. The two major cores of the ACC are shown, the Subantarctic Front and Polar Front. Other abbreviations used are F for front, C for Current and G for gyre. 4
- Fig. 1-3. Schematics of (A) the thermohaline circulation called the global ocean conveyor belt and (B) the global overturning circulation from the Southern Ocean perspective (from Talley (2013)). 5
- Fig. 1-4. Bottom topography and the ACC fronts in Drake Passage. Major fracture zones and ridges are indicated: Burwood Bank (BB), Davis Bank (DB), Endurance Fracture Zone (EFZ), Falkland Trough (FT), Hero Fracture Zone (HFZ), Interim Seamount (IS), Ona Basin (OB), Phoenix Antarctic

Ridge (PAR), Protector Basin (PB), Powell Basin (PoB), Quest Fracture Zone (QFZ), Southern Chile Trench (SCT), Shackleton Fracture Zone (SFZ), Shackleton Ridge (SR), Sars Seamount (SS), South Shetland Trench (SST), Terror Rise (TR), West Scotia Ridge (WSR), Yagan Basin (YB), Yagan Seamounts (YS). 6

Fig. 2-1. Schematic representation of the altimetric measurement principle from DUACS/Aviso team (2014) (ADT: Absolute Dynamic Ocean Topography; MDT: Mean Dynamic Ocean Topography; MSS: Mean Sea Surface; SLA: Sea Level Anomaly; SSH: Sea Surface Height; SSHA: SSH Anomaly (same as SLA)). 11

Fig. 2-2. The history of satellite altimeter mission from 1992 to 2014 (Bosch, 2014). 11

Fig. 2-3. The positions of current meter moorings in Drake Passage from 2006 to 2009, and ground tracks for the satellite altimeters of TOPEX/Poseidon(T/P) & Jason (orange line) and ERS (blue line). Filled gray circle is failure of recovering current meters. 15

Fig. 2-4. The horizontal distribution of averaged sea surface height anomaly (cm) in Drake Passage (A) from 1993 to 1999, and (B) from 1993 to 2012. 16

Fig. 2-5. The horizontal distribution of long term linear trend (cm/year) from 1993 to 2012. The contour line is the depth of 3500m. 17

- Fig. 2-6. The horizontal distribution of sea surface height variability (cm) in Drake Passage from 1993 to 2012. The blue dashed lines are the fronts of ACC (Orsi *et al.*, 1995). 17
- Fig. 2-7. The uncorrected mean surface geostrophic velocity field estimated from the merged SSHA using turning parameter $\alpha=0.1$ with the sea surface height variability in Drake Passage from 1993 to 2012. 30
- Fig. 2-8. The horizontal distribution of zonal ((A) K_x , (B) L_x) and meridional ((C) K_y , (D) L_y) components to determine the mean surface geostrophic velocity estimated from the SSHA in Drake Passage. 31
- Fig. 2-9. Zonal (left) and meridional (right) mean surface velocity across Drake Passage axis using different α (0.05~0.12) values at three longitudes, compared to the time-mean velocities derived from the satellite-tracked surface drifting buoy at 15m depth (blue) (Lumpkin and Garaffo, 2005) and computed the Ocean Surface Currents Analyses-Real time (OSCAR) data from 2000 to 2010 (red) (Bonjean and Lagerloef, 2002). The thick black line indicates the turning parameter α is 0.08. 32
- Fig. 2-10. Zonal (left) and meridional (right) mean surface velocity at the mooring stations of current meter in Drake Passage using different α (0.05~0.12) values, compared to the time-mean velocities measured with current meters at

500m depth (orange line), derived from the surface drifter at 15m (blue), and computed the OSCAR data from 2000 to 2010 (red). The thick black line indicates the turning parameter α is 0.08. 33

Fig. 2-11. The mean surface geostrophic velocity field estimated from the merged SSHA using tuning parameter $\alpha=0.08$ with the fronts of ACC and bathymetry in Drake Passage from 1993 to 2012. 36

Fig. 2-12. The mean surface geostrophic velocity field (A) estimated from the merged SSHA ($1/4^\circ \times 1/4^\circ$) using tuning parameter $\alpha=0.08$, (B) derived from satellite-tracked surface drifting buoy ($1^\circ \times 1^\circ$), (C) computed from OSCAR data ($1/3^\circ \times 1/3^\circ$) in 2000-2010, and (D) calculated from Mean Dynamic Topography ($1/2^\circ \times 1/2^\circ$) (from Maximenko *et al.* (2009)) in Drake Passage. The gray thick line is the fronts of ACC and thin and dashed line is the depth of 3500m and 1000m, respectively. 37

Fig. 2-13. Instantaneous surface geostrophic velocity field determined on January 16, 1997. AVHRR sea surface temperature is depicted by color scale. 39

Fig. 2-14. The surface current field of (top) normal and (bottom) special case in Drake Passage. 40

Fig. 2-15. The horizontal distribution of (top) mean kinetic energy (MKE) and (bottom) eddy kinetic energy (EKE) of the surface geostrophic velocity field estimated from the

merged SSHA	41
Fig. 2-16. The vertical distribution of potential temperature, salinity, neutral density, and geostrophic velocity referenced to 0 at bottom for the section of current meter mooring from March 25 to April 4, 2009. The positive value (red) of geostrophic velocity is the (north)eastward and negative (blue) is the (south)westward.	43
Fig. 2-17. Instantaneous surface geostrophic velocity field determined on April 1, 2009.	44
Fig. 2-18. The bottom topography of the mooring section. The depths of the moored current meters are marked by cross symbol.	47
Fig. 2-19. The mean current and variance ellipses measured with current meters in northern Drake Passage from April, 2008 to March, 2009 (Leg-2) and in southern Drake Passage from January, 2006 to April, 2008 (Leg-1). Colors indicate the mooring depths of current meters (red: 500 m, black: 1000 m, blue: 2000~2500 m, purple: 3000 m). The contour line is the depths of 3500 and 4000 m, and the dotted is 1000 m.	48
Fig. 2-20. Vector time series of low-pass filtered currents smoothed with 14-day moving average in northern Drake Passage during Leg-2.	50
Fig. 2-21. Vector time series of low-pass filtered currents smoothed with 14-day moving average in southern Drake Passage	

	during Leg-1.	51
Fig. 2-22.	Time series of the velocity anomalies measured with current meter and geostrophic current from SSHA at (A) M02 and (B) M09. Red line is geostrophic velocity anomaly, black is the low-pass filtered current meter velocity anomaly smoothed with 14-day moving average, grey thin line is the original current meter velocity anomaly.	53
Fig. 2-23.	The correlations of eastward and northward component between the anomalies of the low-pass filtered current meter velocity and the surface geostrophic current from SSHA. Color explains the depth of current meter. (red: top, 500m; black: middle, 1000m; blue: bottom, 2000~3000m). ..	54
Fig. 2-24.	The formal mapping error (%) of the merged SSHA of AVISO in Drake Passage.	54
Fig. 3-1.	The four sections and grids to calculate the volume transport through Drake Passage. The C-section is the ground track of the satellite altimetry of TOPEX/Poseidon and Jason, and black crosses on C-section are the positions of current meter moorings. The volume transports of sections of B and C are computed from the rotated eastward component (X') of current. Filled color contour is bathymetry and thick black line is 1000m depth.	61
Fig. 3-2.	Total mean volume transport across the Section-C in	

Drake Passage. The volume transport is computed from current meter data and accumulated from the southern station to the northern. Left side of graph is the north. Black line is used the velocity of the lower current meter at bottom, and blue is referenced to 0 cm/s at the bottom. Positive value means the volume transport of ACC is moving to eastward. 62

Fig. 3-3. Weekly time series of the surface volume transport anomaly (SVTA) from SSHA through 4 sections from Oct., 1992 to Jul., 2013. The SVTA is integrated about the unit depth (1 meter). The green line is the total length of sections in Drake Passage. The reduction of section length (green) means the extension of sea ice in the southern Drake Passage during austral winter season. The red is SVTA computed from SSHA measured with the satellite altimeter, and the black is SVTA expect if the missing data. 66

Fig. 3-4. Weekly time series of the barotropic mode volume transport anomaly (BVTA) from SSHA through 4 sections from Oct., 1992 to Jul., 2013. The BVTA is integrated the surface velocity from surface to bottom. Black line is the BVTA, and blue is the full-depth anomalous transport referenced to 0 cm/s at the bottom. 67

Fig. 3-5. Monthly sea ice concentration from the satellite of SSMI/SSMIS (Special Sensor Microwave Imager) in the

	southern hemisphere on August, (A) 1994, (B) 1995, and (C) 1996.	68
Fig. 3-6.	Spectra of the surface volume transport anomaly (left) and the barotropic mode volume transport anomaly (right) through 4 sections.	71
Fig. 3-7.	The time variation of the filtered SVTA smoothed with 3-month moving average through the four sections from Oct., 1992 to Jul., 2013.	72
Fig. 3-8.	The monthly mean of SVTA through the four sections from 1993 to 2012.	73
Fig. 3-9.	The annual mean of SVTA through the four sections from 1993 to 2012.	73
Fig. 3-10.	Monthly time series of the Multivariate ENSO Index (MEI) and the normalized Surface Volume Transport variable Index (SVTI) across Section-B in Drake Passage.	75
Fig. 3-11.	The distribution of (A) mean sea level pressure (hPa) from NOAA/ESRL and (B) Southern Annual Mode (SAM) spatial pattern as calculated from 850 hPa geopotential height anomalies of the NCEP reanalysis-2.	77
Fig. 3-12.	Monthly time series of the Southern Annular Mode (SAM) index.	78
Fig. 3-13.	Lag-correlation curves between the SVTI and the MEI from 1993 to 2012. Negative lags are for the volume transport in Drake Passage leading ENSO. Box of < 95% significance are shaded by grey.	79

- Fig. 3-14. Lag-correlation curves between the SVTI and the MEI (top) from January, 1993 to December, 2002 and (bottom) from January, 2003 to December, 2012. Negative lags are for the volume transport in Drake Passage leading ENSO. 80
- Fig. 3-15. The (top) 0 month and (bottom) - 3 month lag correlation map between the SVTI and the sea surface temperature anomaly (NOAA OI.v2 monthly SST) from January, 1993 to December, 2012. 82
- Fig. 3-16. The (top) 0 month and (bottom) - 3 month lag correlation map between the SVTI and the sea surface temperature anomaly (NOAA OI.v2 monthly SST) from January, 1993 to December, 2002. 83
- Fig. 3-17. Continuous wavelet power spectrum of (top) the SVTI, (middle) the MEI and (bottom) the SAM index from 1993 to 2012. The thick black contour designates the 5% significance level against red noise and the cone of influence (COI) where edge effects might distort the picture is shown as a lighter shade. X and Y-axis is year. 84
- Fig. 3-18. Lag-correlation curves between the SVTI and the SAM index from 1993 to 2012. Negative lags are for the volume transport in Drake Passage leading SAM. Box of < 95% significance are shaded by grey. 86
- Fig. 3-19. Seasonal correlation between the SVTI and the SAM index

	from 1993 to 2012.	86
Fig. 3-20.	The mean spatial pattern of the SAM in (left) austral summer (December-February) and (right) winter (June-August) from 1993 to 2012.	87
Fig. 3-21.	The regression spatial pattern between the SVTI and the sea level pressure of the NCEP reanalysis-2 (top) during 1993-2012 and (bottom) during austral winter (June-August). The vector is composited the regression of zonal and meridional wind at 1000 hPa against the SVTI.	88

List of Tables

Table 2-1. Observation periods of direct current measurement with current meters in Drake Passage. Dotted line means the failure of mooring recovery	20
Table 2-2. Summary of current meter measurements in Drake Passage during Leg-1. Filled gray means the data is not used	21
Table 2-3. Summary of current meter measurements in Drake Passage during Leg-2. Filled gray means the data is not used	22
Table 2-4. Basic statistics of low pass filtered currents. All directions are measured clockwise from the north	49

요 약

드레이크 해협을 통과하는 남극순환류의 수송량 변동

이 논문에서는 남극해를 시계방향으로 순환하며 대양 대순환과 연결되어 지구의 열과 에너지를 재분배하는 기후 조절자로서 중요한 역할을 담당하는 지구상의 가장 거대 해류인 남극순환류의 수송량 변동을 알아보았다. 드레이크 해협은 남극순환류가 통과하는 가장 좁은 길목이지만, 수송량을 파악하기 위하여 직접 관측하는 것은 제한적이므로 고도계 위성에서 측정한 해면고도 편차 자료로부터 표층 지형류 유속 편차를 계산하였으며, 평균 유속장을 산출하기 위하여 역모델을 구성하였다. 지형류는 저층과 연안역을 제외하면, 관측 자료와의 상관성이 높게 나타난 점으로 보아, 해면고도 편차 자료를 이용한다면 유속관측이 없더라도 지형류를 실제 유속 자료로 활용할 수 있다. 해협 내부의 전체적인 유속 구조는 성층에 의한 경압성 흐름을 보이나, 유속 변동은 순압성 특징이 강하기 때문에, 표층 수송량 편차로부터 드레이크 해협의 수송량 변동을 추정할 수 있다.

드레이크 해협을 통과하는 남극순환류의 평균 수송량은 약 136.5 Sv 정도이며 ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$), 표층 수송량 변동으로부터 추정되는 총 수송량 변동 폭은 대략 20~25 Sv 정도를 보이나, 저층 경압성 수송량을 고려하면 이보다 적을 것으로 예상된다. 해저지형에 의한 와류의 영향으로 수송량 변동 폭은 서쪽보다 동쪽이 크게 나타났다.

드레이크 해협의 해수 수송량은 남반구 겨울철에 감소하고 여름철에 증가하는 계절 변동과 5년 주기의 변동이 두드러진다. 이것은 엘니뇨/라니냐와 남극진동 (Southern Annular Mode, SAM)이 드레이크 해협

수송량에 영향을 미칠 가능성을 보여준다. 수송량과 남방진동 (El Niño and Southern Oscillation, ENSO) 지수 사이에 time-lag를 갖는 상관성이 있으며, 수송량 변동이 ENSO 보다 앞서는 상관관계가 나타났지만, 드레이크 해협 수송량 변동이 엘니뇨/라니냐 현상에 영향을 준다고 해석하기에는 그 근거가 미약하여 추후 장기간 자료를 보강할 필요가 있다. 남반구 편서풍 강도와 관련이 있는 SAM 지수와는 time-lag가 없는 상관관계를 보였으며, 남극순환류가 대기의 기압경도 변화에 바로 반응함을 의미한다. 계절을 나누어 비교한 SAM 지수와의 관계는 겨울철에 높은 상관성이 나타났으며, 겨울철 기압분포의 변화는 드레이크 해협 주변의 기압 경도를 증가시켜 남극순환류에 영향을 주는 것으로 판단된다.

주요어: 남극순환류, 남극해, 드레이크 해협, 해면고도, 지형류, 역모델, 수송량, 남방진동, 남극진동, 상관성

제 1 장 서론

남극대륙을 둘러싸고 있는 남극해 (Southern Ocean)는 태평양과 대서양, 인도양과 육지에 의한 구분 없이 인접하여 있으며 (Fig. 1-1), 지구상에서 가장 큰 해류인 남극순환류 (Antarctic Circumpolar Current, ACC)가 남극대륙을 끼고 시계방향으로 순환한다 (Fig. 1-2). 남극순환류 (ACC)는 인접한 대양의 대순환계와 연결되어, 소위 Global ocean conveyor belt 의 중심축 역할을 한다 (Fig. 1-3). 또한 남극순환류는 남극대륙 주변해역에서 침강하는 심층수의 근원 해역 (Weddell Sea)을 통과하면서 심층수를 운반하는 역할 뿐만 아니라 해빙 (melting)에 의한 담수 및 남극의 열을 전 대양에 공급하는 해역을 통과하기 때문에 이들 대양 사이에서 해수 및 물질 교환과 열의 재분배를 담당하는 연결고리 역할을 한다 (Lumpkin and Speer, 2007; Talley, 2011, 2013).

따라서 남극순환류의 변화는 연결된 대양들에 영향을 줄 뿐만 아니라 대기에도 영향을 미치며, 길게는 지구기후 변화에도 영향을 주게 된다. 이와 반대로 남반구 대기와 해양의 변화는 남극해 순환에 영향을 주고 그 결과로 남극순환류 특성 변화로 나타날 것이다. 그러므로 남극순환류 수송량을 연구하는 것은 해양순환 뿐만 아니라 기후변화 기작을 이해하는데 중요하다. 그러나 남극순환류는 큰 규모와 많은 양의 해수를 수송하는 해류로써 이를 직접 관측하는 것은 지리적으로 접근하기 곤란한 문제와 강한 바람에 의한 해상 상태의 악조건 등으로 쉬운 작업이 아니다.

드레이크 해협 (Drake Passage)은 남극순환류가 통과하는 길목 중 가장 좁은 해역이기 때문에 남극순환류를 연구하는데 여러 가지 면에서 효율적인 해역이다 (Fig. 1-1). 드레이크 해협은 남극대륙 반도 (남셰틀랜드 군도)와 남아메리카 남단 (호른 곶 (Cape Horn))사이에 위치하며,

태평양과 대서양을 연결한다. Fig. 1-4에 드레이크 해협을 연결하는 해저지형 (수심)과 명칭을 나타내었다. 드레이크 해협은 폭이 약 800~1000 km이며, 평균 수심이 약 4000 m 정도이다. 해협 내부는 북쪽과 남쪽에 급격히 깊어지는 대륙사면 (continental slope)이 있어서 남북 방향으로 'U'자 형태의 단면이며, 동서 방향으로 길게 발달한 수로 형태이다.

해협의 해저 지형들은 복잡하게 존재하고, 그 수심 변화도 급격하다. 두 개의 대륙판 (Antarctic Plate, Scotia Plate)의 지각운동으로 해협의 북서쪽 (Cape Horn)에서부터 엘리펀트 섬까지 대각선 방향으로 새클턴 단열대 (Shackleton Fracture Zone, SFZ)가 형성되어 있다 (Lagabrielle *et al.*, 2009; Dalziel, 2014). SFZ는 해저면에서 약 2000 m 높이로 솟아 있는 산맥과 1000 m 깊이의 함몰된 계곡으로 형성되어 있으며 (KIOST, 1997), 남쪽에는 3000 m 이상의 높이를 갖는 산맥 (Shackleton Ridge)이 존재하여 북에서 남으로 갈수록 높아지는 형태이다. SFZ를 중심으로 서쪽에는 남북방향으로, 동쪽에는 동서방향으로 발달한 해저산맥들이 존재한다. 서쪽에는 Phoenix Antarctic Ridge (PAR)가 SFZ의 북쪽과 근접하여 '人'자 모양의 해저지형이 형성되어 있다. 동쪽에는 SFZ의 중앙부와 West Scotia Ridge (WSR)가 연결되어 '┌'자의 산맥 모양을 하고 있으며, WSR 동쪽 끝에는 또 다른 두 개의 지각 균열 지형이 존재한다. 이들 해저지형에 의해 둘러싸인 북쪽과 남쪽에는 각각 Yagan Basin (YB)과 Ona Basin (OB), 두 개의 분지로 나누어져 있다.

Orsi *et al.* (1995)은 수온·염분관측 자료들로부터 남극순환류에 동반되는 전선들을 정의하였다 (Fig. 1-1). 드레이크 해협에는 Fig. 1-4와 같이 4개의 남극순환류 전선이 통과한다. 북쪽에 위치한 Subantarctic Front (SAF)는 해협 북부사면을 따라 위치해 있으며 1000 m 등수심을 따라 북쪽으로 향한다. SAF 남쪽에는 Polar Front (PF)가 SFZ의 중앙을

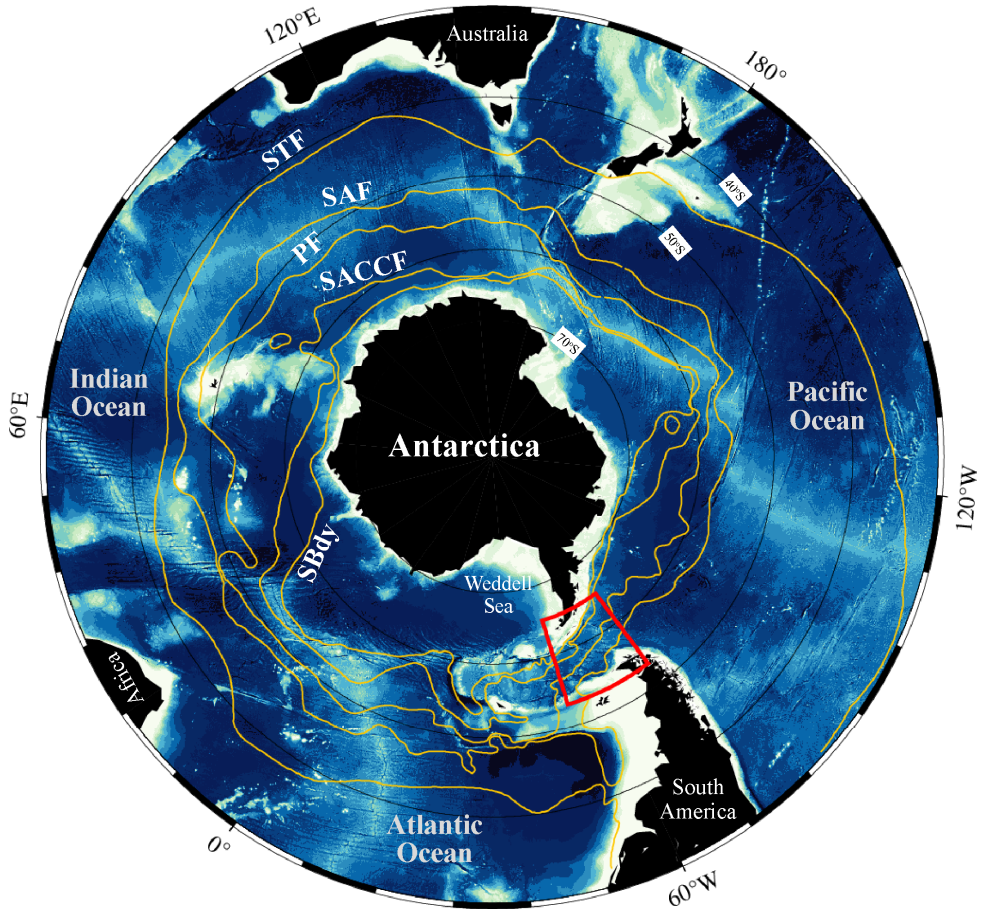


Fig. 1-1. Map of the Southern Ocean, with bathymetry contours, mean Antarctic Circumpolar Current (ACC) fronts in orange (Fronts from Orsi *et al.*, 1995; bathymetry (m) from ETOPO1 project (Amante and Eakins, 2009)), and red box outlining Drake Passage (STF: Subtropical Front, SAF: Subantarctic Front, PF: Polar Front, SACCF: Southern ACC Front, SBdy: Southern Boundary of the ACC).

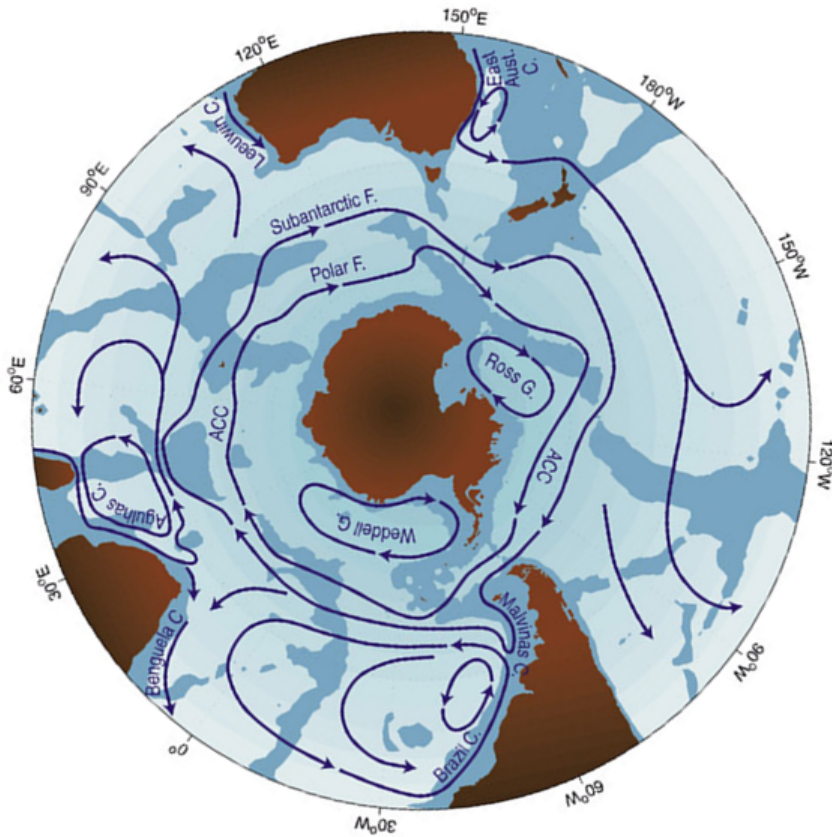
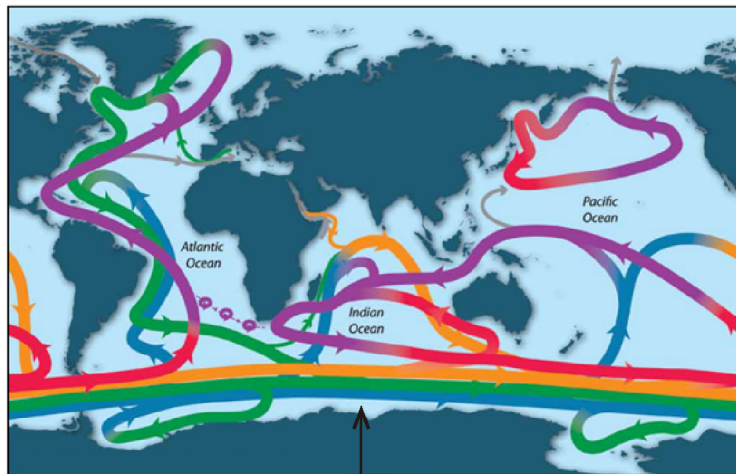
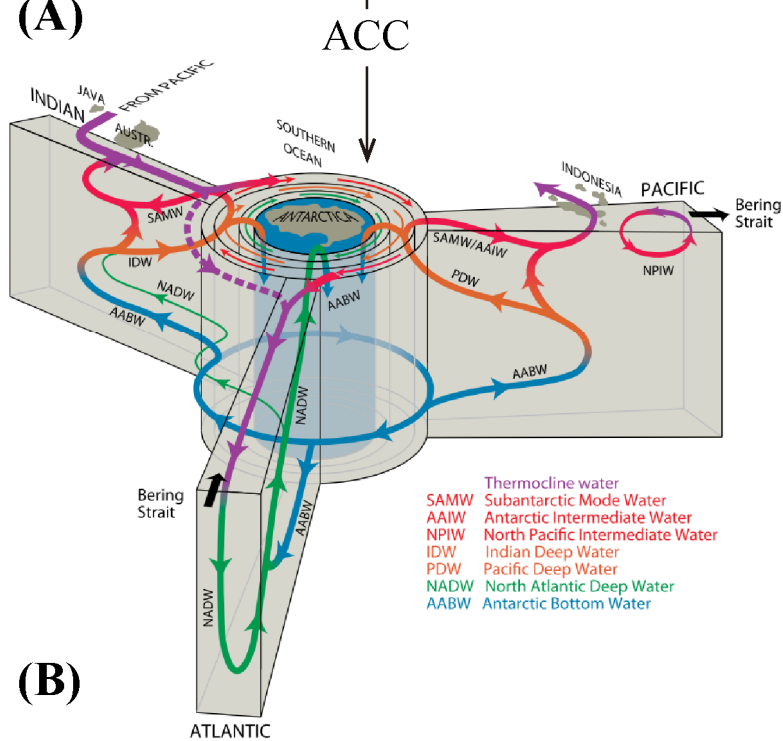


Fig. 1-2. Schematic diagram of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) in the Southern Ocean (from Rintoul *et al.* (2000)). Depths shallower than 3500m are shaded. The two major cores of the ACC are shown, the Subantarctic Front and Polar Front. Other abbreviations used are F for front, C for Current and G for gyre.



(A)



(B)

Fig. 1-3. Schematics of (A) the thermohaline circulation called the global ocean conveyor belt and (B) the global overturning circulation from the Southern Ocean perspective (from Talley (2013)).

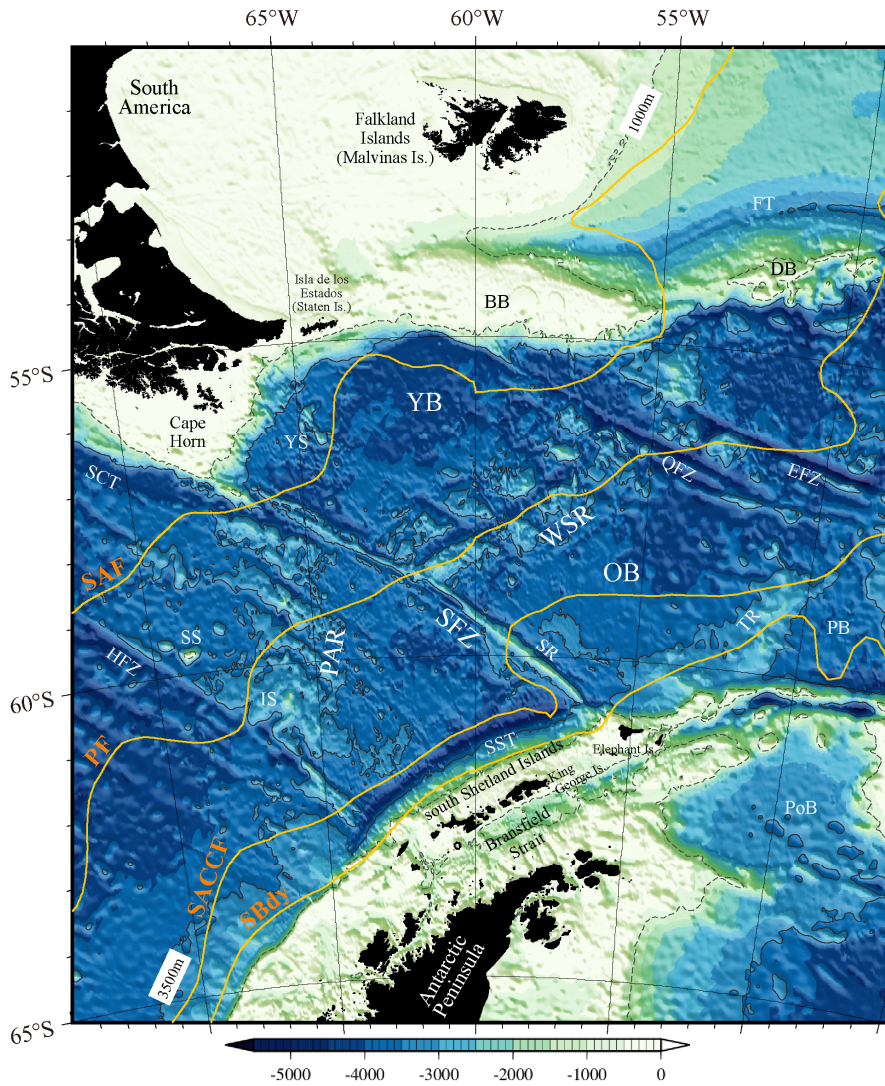


Fig. 1-4. Bottom topography and the ACC fronts in Drake Passage. Major fracture zones and ridges are indicated: Burwood Bank (BB), Davis Bank (DB), Endurance Fracture Zone (EFZ), Falkland Trough (FT), Hero Fracture Zone (HFZ), Interim Seamount (IS), Ona Basin (OB), Phoenix Antarctic Ridge (PAR), Protector Basin (PB), Powell Basin (PoB), Quest Fracture Zone (QFZ), Southern Chile Trench (SCT), Shackleton Fracture Zone (SFZ), Shackleton Ridge (SR), Sars Seamount (SS), South Shetland Trench (SST), Terror Rise (TR), West Scotia Ridge (WSR), Yagan Basin (YB), Yagan Seamounts (YS).

통과하여 WSR을 따라 북동쪽으로 향해있으며, PF의 남쪽에는 Southern ACC Front (SACCF)가 해협 남쪽 사면과 근접하게 위치하며 SFZ를 통과할 때에는 수심이 깊은 지형을 따라 북쪽으로 이동한 후 OB을 관통한다. 남극순환류의 가장 남쪽에는 Southern Boundary 전선이 해협 남쪽 사면을 따라 위치하며 SFZ과 해협 남쪽 사면 사이의 좁은 틈을 통과한다.

과거 드레이크 해협을 가로지르는 장기간 조사는 미국 주도로 국제 남극해 연구 ISOS (International Southern Ocean Studies, 1974-1981)를 통하여 처음으로 실시되었으며, 해양대순환실험 WOCE (World Ocean Circulation Experiment, 1993-2000)에서 두 번째로 집중 조사가 수행되었다. 두 개의 관측 프로그램을 통해서 각각 134 ± 11 Sv (Whitworth *et al.*, 1982; Whitworth, 1983; Whitworth and Peterson, 1985)과 137 ± 8 Sv (Cunningham *et al.*, 2003)의 수송량이 드레이크 해협을 통과한다고 제시되었다 ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$). 장기간 동안의 해류관측 자료의 부족으로 현재까지도 드레이크 해협을 통과하는 수송량을 134 Sv 정도로 받아들여지고 있다.

ISOS와 WOCE 관측 프로그램 이후에도 드레이크 해협을 통과하는 남극순환류 수송량에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있으나, 단면 횡단과 같은 단편적인 관측에 의한 수송량 절대값 산정에 치우쳐 있어 그 변동성을 알기에 어렵고, 해류조사 (mooring)를 통해 획득한 자료일지라도 그 기간이 1~2년으로 수송량 변화를 엘리뇨와 같은 장주기의 해양·대기 현상이나 기후변화와 연관 지어 연구하기에는 자료길이가 부족한 면이 있다.

드레이크 해협이 남극순환류가 통과하는 가장 좁은 수로이긴 하지만 조사선박을 이용하여 남극순환류를 직접 관측하는 것은 매우 제한적

이며, 장기간 동안 해류를 측정하는 것은 더욱 어려운 일이다. 따라서 간접적인 방법이지만, 해면고도 [해수면 높이]를 측정하는 인공위성 고도계 (satellite radar altimeter) 자료를 이용하여 지형류 (geostrophic current) 계산이 가능하다면, 드레이크 해협을 통과하는 장기간 (1992년 10월부터 현재까지) 동안의 흐름과 변동성을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 해양관측이 어려운 해역에 지속적인 표층해류 관측 (monitoring)을 할 수 있는 적절한 방법이 될 수 있다.

이 논문에서는 드레이크 해협을 통과하는 남극순환류의 수송량 변동성을 알아보기 위하여 고도계 자료를 이용하여 표층 지형류 유속장을 산출하였으며 계산한 지형류가 실제 해류를 어느 정도 나타내는지 알아보기 위하여 유속관측 자료와 비교를 하였다 (제2장). 그리고 관측 유속과 지형류 유속으로부터 드레이크 해협을 통과하는 남극순환류의 평균 수송량과 수송량 변동을 계산하였으며, 장기간 동안의 수송량 변동 특성을 살펴보았다 (제3장).

제 2 장 드레이크 해협을 표층 지형류 산출

2.1. 개요

드레이크 해협을 통과하는 해수 수송량을 정량적으로 파악하기 위하여 유속관측 자료가 필요하지만, 직접 측정하는 것은 쉬운 일이 아니기 때문에, 비교적 짧은 시간 안에 전 지구를 관측하는 고도계 위성 자료를 활용하는 것이 이러한 문제를 보완하는데 매우 유용하다. 간접적인 방법이지만 해면고도 (Sea Surface Height, SSH; 이하 SSH)의 공간적인 차이를 알면 정역학(hydrostatic) 방정식과 지형류 방정식으로부터 지형류 유속 (u, v)를 계산할 수 있다.

고도계 위성으로부터 해수면 높이를 측정하는 원리는 Fig. 2-1과 같이 위성에서 방출된 극초단파 (microwave)가 해면에 반사되어 위성으로 되돌아오는데 걸리는 시간을 측정하여 위성과 해면과의 거리, R 을 계산할 수 있다 (Shum *et al.*, 1995). 고도계 위성과 지구타원체 (reference ellipsoid)와의 거리 (공전 반경), L 은 알고 있는 값이므로 두 거리 차이로부터 SSH를 계산할 수 있다 (Fu *et al.*, 1994). 또한 SSH는 위성이 지나는 궤적 (ground track)에서 반복 측정되므로 이를 평균한 해수면 (Mean Sea Surface, MSS)과 해면고도 편차 (Sea Surface Height Anomaly, SSHA or Sea Level Anomaly, SLA; 이하 SSHA)의 합으로 구성된다 (AVISO, 2014). 개략적인 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}SSH(x, y, t) &= L(x, y) - R(x, y, t) \\ &= MSS(x, y) + SSHA(x, y, t) \\ &= Geoid(x, y) + MDT(x, y) + SSHA(x, y, t)\end{aligned}$$

$$= \text{Geoid}(x, y) + \text{ADT}(x, y, t)$$

표층 해수의 흐름은 지오이드 (geoid)의 영향을 배제한 해면에서 일어나는 현상이지만, Fig. 2-1에서처럼 고도계 위성에서 측정하는 SSH와 이를 평균한 해면 (MSS)에는 지오이드 영향이 포함되어 있으므로, 이를 제거한 평균역학해면고도 (Mean Dynamic Ocean Topography, MDT)와 SSHA의 합인 역학해면고도 (Absolute Dynamic Ocean Topography, ADT)으로부터 지형류를 계산할 수 있다.

그러나 지오이드 면에 대한 정보 부족으로 이 영향을 제거한 해면고도를 정확히 계산하는 것은 한계가 있다. 반복 관측을 통해 계산한 평균해면 (MSS)에는 지오이드가 포함되어 있으므로 평균해면 (MSS)를 뺀 SSHA 자료를 이용하여 지오이드 영향을 제거한다 (AVISO, 2013). SSHA에는 해면 절대값이 제거되었으므로, 유속을 계산하더라도 절대값 [평균유속]이 제거된 유속 편차 (anomaly)값이 된다. 따라서 유속 절대값을 계산하기 위하여 평균역학해면고도 (MDT)가 필요하다. 여러 가지 관측 자료와 수치 모델 결과를 활용하여 평균해면고도 (MDT)를 추정된 결과들이 있으나 (Gouretzki and Jancke, 1998; Tapley *et al.*, 2005; Pavlis *et al.*, 2008; Andersen and Knudsen, 2009; Maximenko *et al.*, 2009; Rio *et al.*, 2009; Mazloff *et al.*, 2010), 현재까지 그 오차가 상대적으로 크다 (Ducet *et al.*, 2000; Vignudelli *et al.*, 2005; Pascual *et al.*, 2007; Bingham and Haines, 2014).

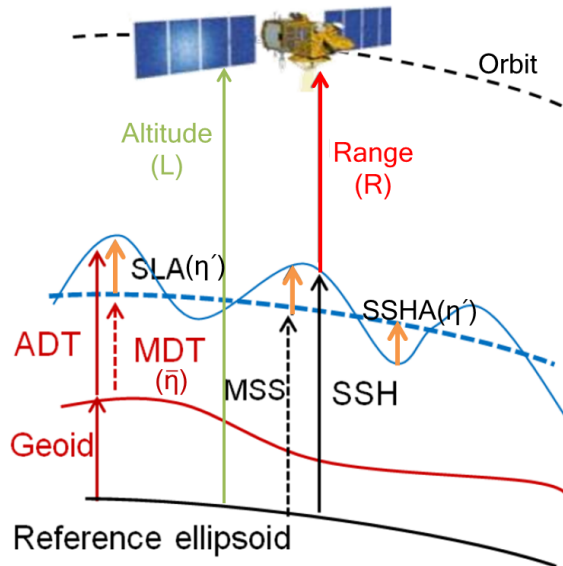


Fig. 2-1. Schematic representation of the altimetric measurement principle from DUACS/Aviso team (2014) (ADT: Absolute Dynamic Ocean Topography; MDT: Mean Dynamic Ocean Topography; MSS: Mean Sea Surface; SLA: Sea Level Anomaly; SSH: Sea Surface Height; SSHA: SSH Anomaly (same as SLA)).

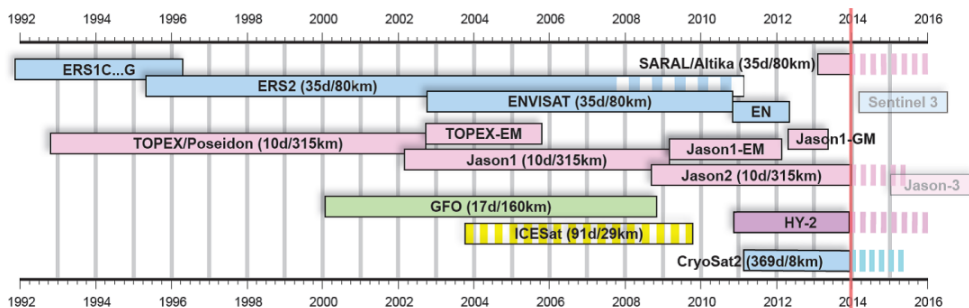


Fig. 2-2. The history of satellite altimeter mission from 1992 to 2014 (Bosch, 2014).

평균값이 제거된 해면고도 자료 (SSHA)부터 유속장을 산출하는 연구는 과거에도 수행된 바 있다. Kelly and Gille (1990), Qiu *et al.*, (1991), Gille (1994)은 통계적인 방법을 활용하여 유속장 구조를 추출하였고, 이 방법을 발전시켜 Kim and Saunders (2002)와 Chouaib *et al.* (2006)은 각각 쿠로시오 해역과 남극해에 적용하였으며, Feron *et al.* (1998)은 와도 방정식으로부터 계산된 결과를 평균하는 방식으로 유속을 산출하였지만 대부분은 통계적인 방법에 치중하였다.

이 논문에서는 SSHA 자료만으로 평균 유속을 산출하기 위하여 운동방정식을 기초로 하여 역학적 방법으로 접근한 Park (2004)의 방법을 이용하였다. 이 방법은 자유 수면 경계조건과 표층 해류는 지형류에 준하는 흐름이라는 가정 하에 역모델 (Inverse model)을 구성하여 평균 유속장을 산출하였다. 여기에 7일 간격으로 생산되는 SSHA에서 계산한 유속 편차를 더하여 표층 지형류 유속장을 계산하였다.

계산한 지형류가 트레이크 해협 의 실제 해류를 어느 정도 나타내는지 알아보기 위하여 유속관측 자료를 이용하였다. 관측 자료를 통해 역 모델 정확도 향상과 유속을 검증하였으며, 계산 결과가 표층 흐름에 국한되는 단점을 보완하기 위해 내부의 유속 구조를 파악하는데 이용하였다.

2.2. 자료

2.2.1. 인공위성 고도계 자료

트레이크 해협 의 표층 지형류를 계산하기 위하여 본 논문에서는 프랑스 AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite

Oceanographic data)에서 제공하는 1992년 10월부터 2013년 7월까지의 SSHA 자료를 이용하였다. 이 자료는 T/P (TOPEX/Poseidon)와 ERS (European Remote sensing Satellite) 위성에서 관측한 고도계 궤적자료 (along-track product)를 후처리 과정 (global space/time suboptimal interpolation method)을 통하여 7일 간격, $1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$ 격자로 합성 (merged gridded product)되었으며 (Ducet *et al.*, 2000), 1993년부터 1999년까지 7년간의 고도계 자료로부터 계산된 평균값 (MSS)이 제거되었다 (AVISO, 2013). 이러한 자료처리 과정에 앞서 최초의 고도계 자료에는 조석과 바람, 대기압 등의 영향과, 극초단파가 대기권을 통과하면서 받는 전자기적 편차 등의 영향들이 포함되어 있기 때문에 이러한 영향들을 제거하는 과정이 필요하며 (AVISO, 1996), AVISO에서는 다양한 보정 (corrections) 과정을 거쳐 자료를 제공하고 있다.

T/P 위성 이후로 최근까지 고도계 위성의 관측 기간[수명]과 공전주기 및 공전궤적 사이의 거리 (적도 기준)를 Fig. 2-2에 정리하였다. T/P 위성은 약 10일의 공전주기로 반복 관측하며, 2~3.2 cm 오차 범위 내에서 해면고도를 산출할 수 있다 (Fu *et al.*, 1994; Vignudelli *et al.*, 2005). 수명이 다한 2002년부터는 Jason-1, 2008년부터는 Jason-2 위성이 연계하여 같은 궤적을 관측하고 있으며, T/P 계열 위성 (T/P, Jason-1 & 2)은 적도면을 기준으로 공전 경사각이 66° 기울어져 있어 위도 $66^{\circ}N \sim 66^{\circ}S$ 범위까지만 관측 (드레이크 해협 포함) 할 수 있는 반면에, ERS 계열 위성 (ERS-1 & 2, ENVISAT)은 극지방까지 지구 전체를 관측 (공전 경사각 98.5°)한다. Fig. 2-3은 드레이크 해협을 지나는 T/P와 ERS 위성의 궤적을 표시한 것이다. 공전궤적 사이의 거리는 ERS 계열 위성이 T/P 계열 보다 훨씬 더 조밀하다. 그러나 ERS 계열 위성은 T/P 계열 위정보다 정확도가 떨어지고 (15~19cm 의 정확도), 공전주기가 느리다 (약

35일)는 단점이 있다 (Shum *et al.*, 1995). AVISO에서는 이러한 고도계 위성들의 특징을 고려하여 2개 이상의 고도계 자료를 합성하여 중규모 (mesoscale) 현상을 분석할 수 있도록 공간 분해능 (resolution)을 향상된 SSHA 격자 자료를 재생산하고 있다 (AVISO, 2013).

1992년 이후부터는 적어도 2개 이상의 위성이 동시에 해면고도를 측정하고 있다 (Fig. 2-2). 2000년대에는 3개 이상으로 증가하여 시간이 지날수록 늘어난 위성 수만큼이나 더욱 향상된 고해상도 합성자료가 생산되고 있지만, 이 논문에는 드레이크 해협을 파악하는 것이 주목적이므로 관측기간 동안 자료의 통일성을 유지하기 위하여 T/P와 ERS 계열 고도계 위성만 합성한 격자자료 (reference delayed time product)를 이용하였다.

드레이크 해협의 해면고도 변화

Fig. 2-4에 드레이크 해협의 SSHA 평균을 나타내었다. Fig. 2-4의 아래 그림은 20년 동안의 평균을 나타낸 것인데, 편차를 평균하면 '0 (zero)'에 가까울 것이라는 기대와는 달리 SSHA의 평균값이 존재하였다. AVISO에서 평균해면 (MSS)을 계산하는데 이용한 자료기간 동안 (1993~1999년)의 SSHA 평균을 Fig. 2-4에 나타내었다. 1993년부터 1999년까지 7년간 SSHA 평균은 공간적 차이가 미비하였다. 따라서 20년 동안의 SSHA 평균이 '0'이 아니라는 것은 해수면의 장기간 변화 추세가 있음을 의미한다. SSHA의 20년간 선형 경향성 (linear trend)을 Fig. 2-5에 나타내었다. 붉은색은 해수면 상승을 파란색은 하강을 의미한다. SSHA 20년 평균이 큰 해역에서 해수면 변화의 경향성도 높게 나타났다. West Scotia Ridge 해역을 제외하면 지난 20년 동안 드레이크 해협의 해수면은 상승

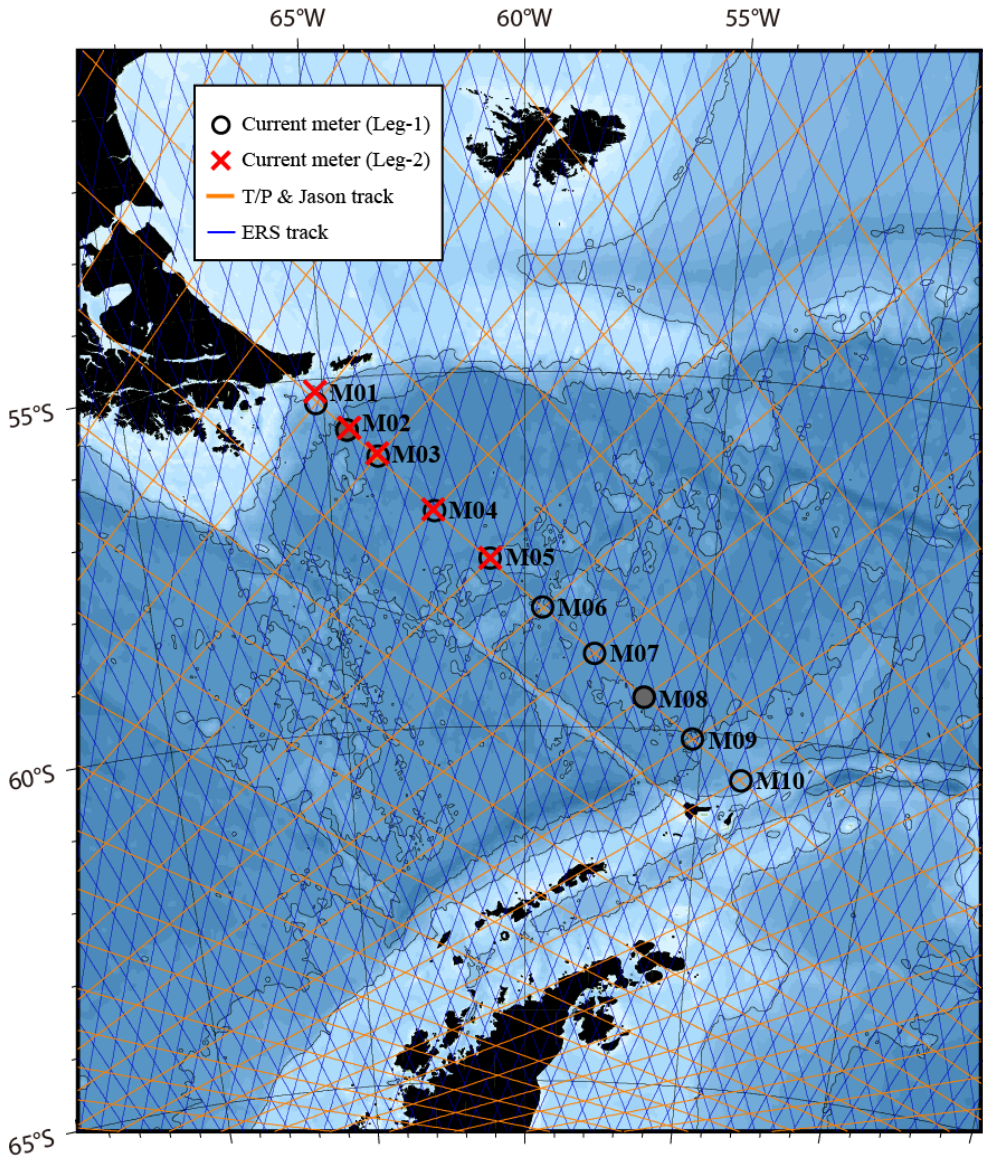


Fig. 2-3. The positions of current meter moorings in Drake Passage from 2006 to 2009, and ground tracks for the satellite altimeters of TOPEX/Poseidon(T/P) & Jason (orange line) and ERS (bule line). Filled gray circle is failure of recovering current meters.

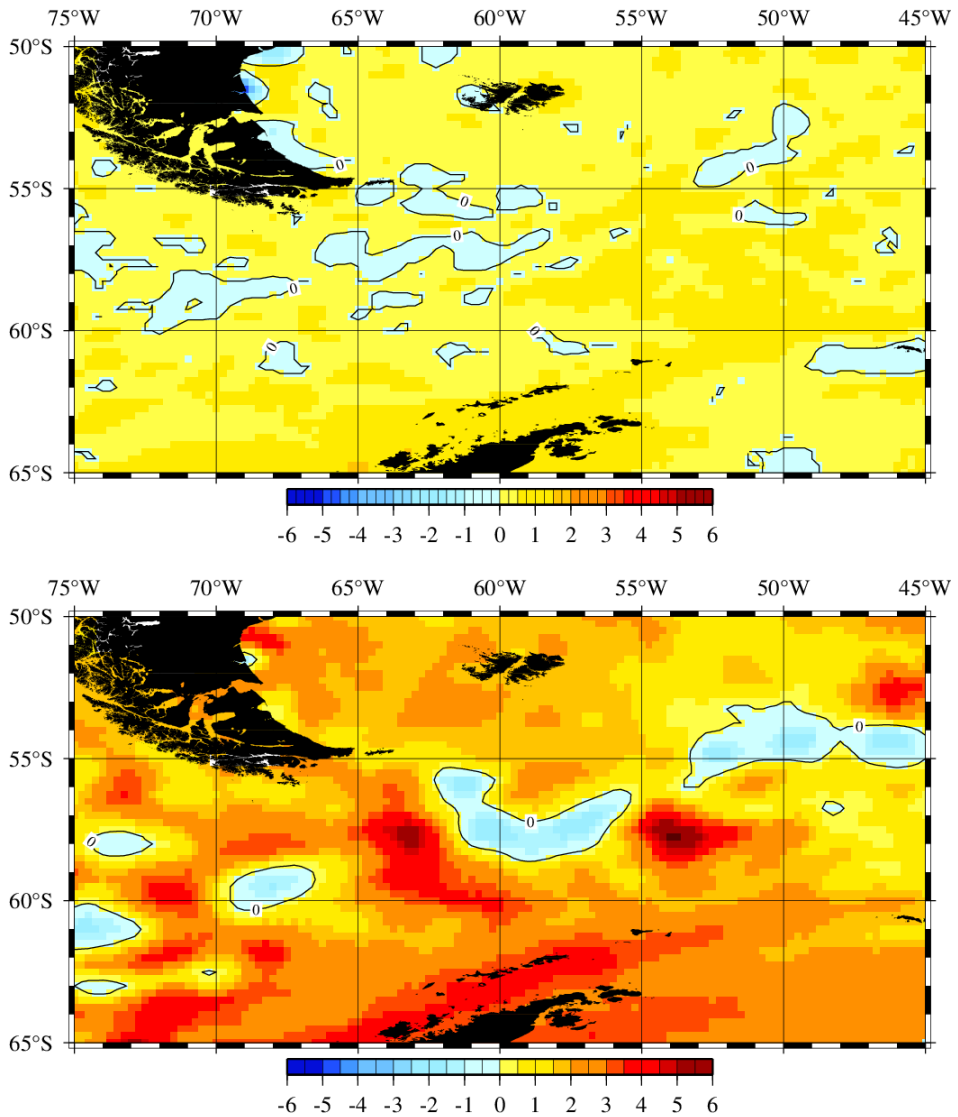


Fig. 2-4. The horizontal distribution of averaged sea surface height anomaly (cm) in Drake Passage (top) from 1993 to 1999, and (bottom) from 1993 to 2012.

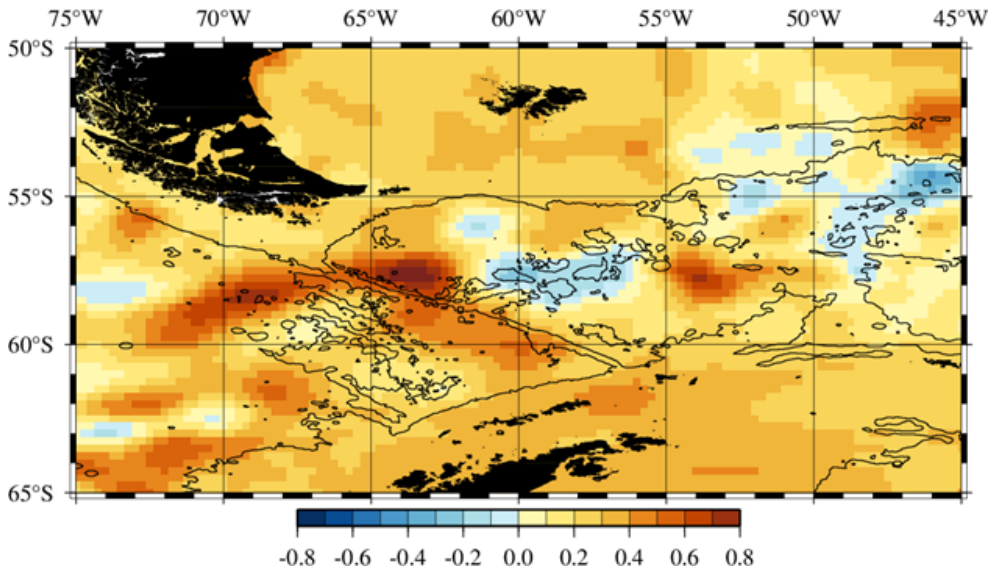


Fig. 2-5. The horizontal distribution of long-term linear trend (cm/year) from 1993 to 2012. The contour line is the depth of 3500m.

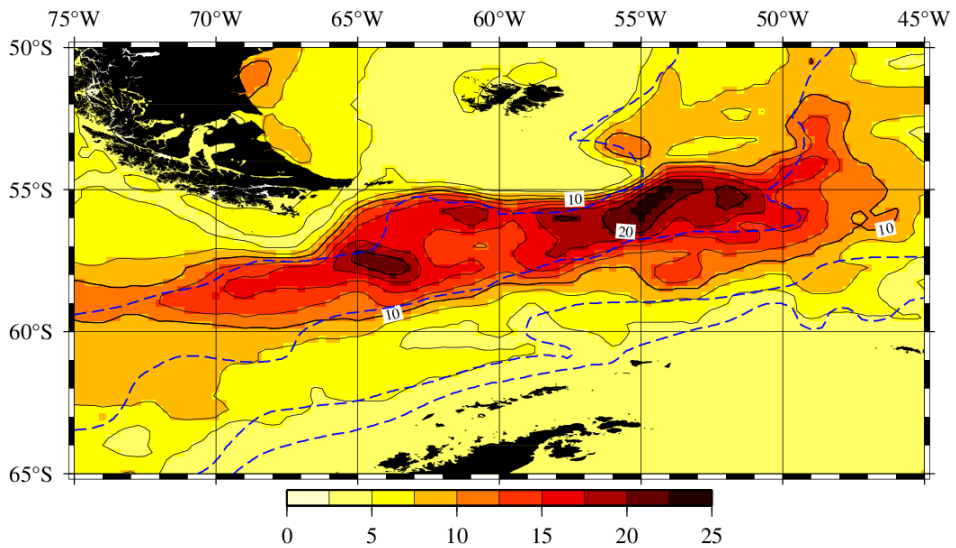


Fig. 2-6. The horizontal distribution of sea surface height variability (cm) in Drake Passage from 1993 to 2012. The blue dashed lines are the fronts of ACC (Orsi *et al.*, 1995).

하는 경향을 보였고, 특히 Shackleton Fracture Zone과 Phoenix Antarctic Ridge 북쪽해역에서 두드러졌으며, 최대 연간 8mm 이상인 곳도 있었다.

Fig. 2-6은 20년간 해면고도 변동 (Sea Surface Height Variability; 이하 SSHV)을 나타내었다. 여기서 SSHV는 지오이드 영향을 제거한 가상의 평균해수면에서의 해수면 높이 변동 폭 [범위]에 해당하며, SSHA의 표준편차이다. SSHV는 해협 북쪽이 남쪽보다 컸으며, SAF와 PF 전선 사이에서 큰 변동을 보였다. 특히, Shackleton Fracture Zone (64°W)과 SAF 전선이 북쪽으로 향하는 해역 (55°W)에서 가장 큰 변화를 보였다.

드레이크 해협 평균 지형류 유속장 (\bar{u}, \bar{v}) 을 산출하기 위한 역모델의 입력자료로 관측 기간 전체 중 1993년 1월부터 2012년 12월까지 20년 동안의 SSHA 자료의 장기 경향성을 제거하여 이용하였다. 이 장기 경향성은 유속 편차 (u', v') 를 계산할 때 원본 SSHA 자료를 사용함으로써, 유속 편차에 이 영향을 포함시켰다.

2.2.2. 유속 관측 자료

한국해양과학기술원 (KIOST)은 2003년 11월부터 드레이크 해협 남부 (정점 M10)에서 해류 관측을 시작하였다 (Table 2-1). 2006년부터는 프랑스 연구팀 (CNRS/LOCEAN, Univ. of Marie et Curie)과 독일 쇠빙 연구선 Polarstern호를 이용하여 드레이크 해협을 공동으로 관측하는 프로그램 (DRAKE project)에 참여하여 해협 전체를 장기간동안 모니터링할 수 있었다. 2006년 1월에는 드레이크 해협을 가로지르는 고도계 위성 Jason의 104번 궤적 교차점 (10개 정점)마다 약 500, 1000, 2500m 수심

층에 해류계를 설치하였으며 (Fig. 2-3), 2008년 4월에 회수하여 2년 동안의 해류 자료를 획득하였다 (Leg-1). 연속하여 2008년 4월부터 2009년 3월까지 1년간의 해협 북부 5개 정점에서도 해류 자료를 획득하였다 (Leg-2). Table 2-2와 2-3에 정점 위치와 관측 기간 및 해류계의 종류와 설치 수심, 자료 저장 간격 등을 정리하였다. 표에서 회색으로 채워진 부분은 이 논문에서 사용하지 않은 자료를 구분한 것이다. 비록 Leg-1 관측 기간에는 해협 남부를, Leg-2 기간에 해협 북부 자료를 이용하여 동시적으로 해협 전체 단면을 관측한 자료를 분석할 수는 없었지만, 드레이크 해협의 북부와 남부의 평균적인 해수 흐름의 이해와 고도계 위성자료로부터 계산한 지형류를 비교하는 자료로 이용하였다.

2.3. 역모델을 이용한 평균 유속장 산출

2.3.1. 모델이론

수평방향 (x, y) 의 유속성분 (u, v) 과 수직방향 (z) 의 해수면 높이 (η) 는 시간 (t) 에 관계없이 변화가 없는 평균 성분 (time-mean part, $(\bar{\eta}, \bar{u}, \bar{v})$)과 시간에 따라 변하는 변동 성분 (time-variable part, (η', u', v'))으로 나눌 수 있다. 여기서의 해수면 높이는 지오이드 면 위에서의 높이이다. 간략하게 표현하면 다음과 같다.

Table 2-1. Observation periods of direct current measurement with current meters in Drake Passage. Dotted line means the failure of mooring recovery

Year Station	← Leg-1 →						← Leg-2 →		Institute
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009		
M01				[Solid bar]			[Solid bar]		LOCEAN
M02				[Dotted bar]			[Solid bar]		LOCEAN
M03				[Solid bar]			[Solid bar]		LOCEAN
M04				[Solid bar]			[Solid bar]		LOCEAN, KIOST
M05				[Solid bar]			[Solid bar]		LOCEAN, KIOST
M06				[Solid bar]					LOCEAN
M07				[Solid bar]					LOCEAN
M08				[Dotted bar]					LOCEAN
M09				[Solid bar]					KIOST
M10	[Solid bar]		[Solid bar]	[Solid bar]	[Solid bar]				KIOST
	Nov.	Dec.	Jan.	Dec.	Apr.	Mar.			

Table 2-2. Summary of current meter measurements in Drake Passage during Leg-1. Filled gray means the data is not used

Station	Mooring Period & Position (Depth)	Instrument	Depth (m)	Time interval (minute)	Recording duration (day)	Remark
M01	2006/01/16 ~ 2008/04/12 55° 20.51'S, 65° 11.16'W (1700)	ADCP	200	120	815	
		Aquadopp	500	30	792	
		RCM-8	500	120	817	
		RCM-8	1000	60	436	
M02	55° 44.67'S, 64° 27.41'W (3770)	---				Lost
M03	2006/01/18 ~ 2008/04/10 56° 07.92'S, 63° 42.66'W (4130)	ADCP	400	123.5	811	
		Aquadopp	900	30	813	
		RCM-7	900	120	815	
		RCM-8	1950	120	815	
		MORS	3100	60	815	
M04	2006/01/19 ~ 2008/04/08 56° 56.54'S, 62° 19.61'W (4075)	RCM-7	400	120	810	
		Aquadopp	400	30	804	
		RCM-7	950	120	810	
		RCM-8	2450	60	810	
M05	2006/01/20 ~ 2008/04/07 57° 37.63'S, 60° 55.26'W (3325)	Aquadopp	500	30	0	Damage
		MORS	550	120	808	
		RCM-8	1070	120	808	
		RCM-8	2640	60	808	
M06	2006/01/21 ~ 2008/04/06 58° 19.06'S, 59° 31.34'W (3225)	Aquadopp	200	30	806	
		MORS	280	120	806	
		RCM-8	800	120	806	
		RCM-8	2500	60	806	
M07	2006/01/22 ~ 2008/04/05 58° 57.50'S, 58° 05.78'W (3730)	Aquadopp	450	30	0	Damage
		RCM-7	460	120	697	
		RCM-8	990	120	697	
		RCM-8	2550	60	804	
M08	59° 32.92'S, 56° 41.30'W (3530)	---				Lost
M09	2006/01/24 ~ 2008/04/02 60° 06.04'S, 55° 16.26'W (3511)	RCM-8	500	60	5	Leak
		RCM-11	1000	60	799	
		RCM-11	2550	60	799	
M10	2003/11/26 ~ 2004/12/23 60° 36.92'S, 53° 50.53'W (2802)	RCM-8	480	20	393	
		RCM-11	960	20	393	
		RCM-11	2600	20	393	
	2006/01/25 ~ 2006/12/24 60° 37.61'S, 53° 49.82'W (2789)	RCM-8	500	20	6	Leak
		RCM-11	1060	20	323	
		RCM-11	2560	20	323	
		2006/12/19 ~ 2008/04/01 60° 37.90'S, 53° 48.19'W (2677)	RCM-11	460	20	449
RCM-11	970		20	449		

Table 2-3. Summary of current meter measurements in Drake Passage during Leg-2. Filled gray means the data is not used

Station	Mooring Period & Position (Depth)	Instrument	Depth (m)	Time interval (minute)	Recording duration (day)	Remark
M01	2008/04/12 ~ 2009/03/25 55° 10.16'S, 65° 11.22'W (1600)	ADCP	450	60	347	
		Aquadopp	500	30	347	
		Aquadopp	1000	30	347	
M02	2008/04/13 ~ 2009/03/26 55° 43.14'S, 64° 24.10'W (3816)	Aquadopp	500	30	347	
		Aquadopp	1000	30	347	
		RCM-8	2000	30	347	
		RCM-8	3000	30	2	Leak
M03	2008/04/10 ~ 2009/03/27 56° 06.05'S, 63° 43.93'W (4275)	ADCP	450	60	351	
		Aquadopp	500	30	351	
		RCM-7	1000	30	351	
		RCM-8	2000	30	351	
		RCM-8	3000	30	351	
M04	2008/04/08 ~ 2009/03/27 56° 55.55'S, 62° 22.03'W (4093)	RCM-11	500	20	353	
		RCM-11	1000	20	353	
		RCM-11	2500	20	353	
M05	2008/04/07 ~ 2009/03/29 57° 37.53'S, 60° 55.01'W (3445)	RCM-11	500	20	356	
		RCM-11	1000	20	356	
		RCM-11	2500	20	356	

$$\eta(x, y, t) = \bar{\eta}(x, y) + \eta'(x, y, t)$$

$$u(x, y, t) = \bar{u}(x, y) + u'(x, y, t)$$

$$v(x, y, t) = \bar{v}(x, y) + v'(x, y, t)$$

본 논문의 역모델은 자유 수면 경계 조건 (free surface boundary condition)에 기초한 시간에 따른 해수면 변동 (kinematic free surface condition)

$$w = \frac{d\eta}{dt} = \frac{\partial\eta}{\partial t} + u\frac{\partial\eta}{\partial x} + v\frac{\partial\eta}{\partial y} \quad \text{at } z = \eta(x, y, t) \quad (1)$$

을 이용한다 (Pedlosky (1979)). 여기에서 w 는 수직성분의 유속이다. 해수면 높이와 수평유속을 위의 평균 성분과 시간 변동 성분으로 구분하면,

$$w = \frac{\partial\eta'}{\partial t} + (\bar{u}+u')\frac{\partial(\bar{\eta}+\eta')}{\partial x} + (\bar{v}+v')\frac{\partial(\bar{\eta}+\eta')}{\partial y} \quad (2)$$

로 표현할 수 있다. 만일 평균 유속이 지형류를 만족한다면

$$\bar{u} = -\frac{g}{f}\frac{\partial\bar{\eta}}{\partial y}, \quad \bar{v} = \frac{g}{f}\frac{\partial\bar{\eta}}{\partial x} \quad (3)$$

가 된다. 여기에서 g 와 f 는 각각 중력가속도 ($\approx 9.8m/s$) 및 Coriolis 변수 ($= 2\omega \sin \phi$, ω :각속도 ($\approx 7.292 \times 10^{-5}s^{-1}$), ϕ : 위도)이다. 시간변동 성분이 지형류와 유사하고 선형 운동방정식을 따른다면

$$\frac{\partial u'}{\partial t} - f v' = -g \frac{\partial \eta'}{\partial x}, \quad \frac{\partial v'}{\partial t} + f u' = -g \frac{\partial \eta'}{\partial y} \quad (4)$$

이고, 이들 식으로부터 (u', v') 은

$$u' = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial y} - \frac{1}{f} \frac{\partial v'}{\partial t} = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial y} - \frac{g}{f^2} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial x \partial t} - \frac{1}{f^2} \frac{\partial^2 u'}{\partial t^2}, \quad (5)$$

$$v' = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial x} + \frac{1}{f} \frac{\partial u'}{\partial t} = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial x} - \frac{g}{f^2} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial y \partial t} - \frac{1}{f^2} \frac{\partial^2 v'}{\partial t^2} \quad (6)$$

로 표시할 수 있다. 고도계 위성의 자료 생산 주기인 7일 보다 긴 시간 간격에 대하여 남극해 위도일 경우 $\frac{\partial^2(u', v')}{\partial t^2} \ll f^2$ 이 되므로 위 식에서 마지막 항은 무시할 수 있다. 따라서

$$u' = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial y} - \frac{g}{f^2} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial x \partial t}, \quad v' = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial x} - \frac{g}{f^2} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial y \partial t} \quad (7)$$

이 된다. 이 식들의 오른쪽 첫째 항은 순간적인 지형류, 두 번째 항은 지형류의 시간에 따른 변화를 의미한다. 평균 성분 식(3)과 시간 변동 성분 식(7)을 식(2)에 대입하여 다시 정리하면,

$$\frac{1}{f} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial y \partial t} \bar{u} - \frac{1}{f} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial x \partial t} \bar{v} + \frac{\partial \eta'}{\partial t} - \frac{g}{f^2} \left(\frac{\partial \eta'}{\partial x} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial x \partial t} + \frac{\partial \eta'}{\partial y} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial y \partial t} \right) = w \quad (8)$$

이 된다. 여기에서 해수면 변위 η' 는 고도계 자료 (SSHA)로부터 구할

수 있고, (\bar{u}, \bar{v}) 와 w 는 알 수 없는 변수인데 만일 w 를 제거하거나 알 수 있게 되면 (\bar{u}, \bar{v}) 를 구할 수 있을 것이다. 각 항들의 크기를 비교하기 위하여 수평유속 (\bar{u}, \bar{v}) 와 수직유속 w 의 크기를 각각 U, W 라고 하고, $f = O(10^{-4} s^{-1}), g = O(10^1 ms^{-2}), \eta' = O(10^{-1} m)$ 그리고 수평유속 성분을 유발하는 물리 현상의 크기는 $O(10^5 m)$ 로 볼 수 있으므로 식(8)은 각 항 크기들의 비로 표현하면

$$10^{-1}U - 10^{-1}U + 1 - (10^{-2} + 10^{-2}) = W \quad (9)$$

가 된다. 남극순환류의 경우 $U \leq O(1 ms^{-1})$ 이기 때문에 식(9)의 왼쪽에서 시간에 따른 해수면 변위가 가장 큰 항이 된다. 따라서 식(8)에서 수직 유속 성분 w 는 시간에 따른 해수면 변위 $\frac{\partial \eta'}{\partial t}$ 와 균형이 이루어져야 한다.

2.3.2. 역산해

Park (2004)이 제시한 방법과 같이 w 는 η' 의 비례함수로 가정할 수 있으므로 이 관계식을 이용하여 역모델을 구성하기 위하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\tilde{\alpha} \frac{\partial \eta'}{\partial t} = \frac{\partial \eta'}{\partial t} - w, \quad \tilde{\alpha} = \alpha(x, y) + \alpha'(x, y, t) \quad (10)$$

여기서 $\tilde{\alpha}$ 는 비례상수로써 시간에 따른 해수면 변위와 수직 유속 성분의 차이는 해수면 변위의 비례율로 표현할 수 있다. 식(10)을 식(8)에 적용하

여 각 항의 해수면 변위와 관련된 부분을 간단하게 표현하면

$$A_i \bar{u} + B_i \bar{v} + C_i + \alpha D_i = E_i \quad (11)$$

이 된다. 여기에서 i 는 자료개수 ($i = 1, 2, \dots, N$), $A = \frac{1}{f} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial y \partial t}$,

$$B = -\frac{1}{f} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial x \partial t}, \quad C = -\frac{g}{f^2} \left(\frac{\partial \eta'}{\partial x} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial x \partial t} + \frac{\partial \eta'}{\partial y} \frac{\partial^2 \eta'}{\partial y \partial t} \right), \quad D = \frac{\partial \eta'}{\partial t}, \quad \text{그리고}$$

$$E = -\alpha' \frac{\partial \eta'}{\partial t} \text{이다.}$$

비례상수 α 는 계산 영역 전체의 평균 유속장을 조율 (tuning)하는 상수로써 과거 자료를 토대로 조절하여 전 영역에서 계산되는 $\sum E_i^2$ 의 합이 최소가 되는 조건을 만족하는 (\bar{u}, \bar{v}) 를 산출할 수 있으며 이 해가 고도계 자료 (SSHA)로부터 얻는 표층 평균 지형류 유속장이 된다. 식 (11)로부터 최소자승법 (Least Squares Method)에 의한 (\bar{u}, \bar{v}) 의 해는 모

든 계산 격자점에서의 $\sum_{i=1}^N E_i^2$ 합이 극값을 가질 조건

$$\frac{\partial \sum E_i^2}{\partial \bar{u}} = 0, \quad \frac{\partial \sum E_i^2}{\partial \bar{v}} = 0 \quad \text{을 동시에 만족해야 하며 이를 정리하면 최종해}$$

는

$$\bar{u} = \frac{(\sum A_i B_i \sum B_i D_i - \sum B_i^2 \sum A_i D_i) \alpha + \sum A_i B_i \sum B_i C_i - \sum B_i^2 \sum A_i C_i}{\sum A_i^2 \sum B_i^2 - (\sum A_i B_i)^2}, \quad (12)$$

$$\bar{v} = \frac{(\sum A_i B_i \sum A_i D_i - \sum A_i^2 \sum B_i D_i) \alpha + \sum A_i B_i \sum A_i C_i - \sum A_i^2 \sum B_i C_i}{\sum A_i^2 \sum B_i^2 - (\sum A_i B_i)^2} \quad (13)$$

이다.

2.3.3. 매개변수 조정

식(12), (13)은 매개변수 (tuning parameter) α 에 관한 식으로 간략히 표현할 수 있다.

$$\bar{u} = \frac{K_x \alpha + L_x}{M}, \quad \bar{v} = \frac{K_y \alpha + L_y}{M} \quad (14)$$

여기서, 미지수 α 는 평균 유속의 세기와 방향을 결정하는 역할을 한다. 이 값을 결정하기 위해서는 α 를 조절하여 산출한 평균 유속장을 과거 자료와 비교하여 적절한 α 를 역으로 추정하는 과정이 필요하다. Gille (1994)은 Gaussian jet model 결과에서 SSH 변동 (SSHV)과 평균 유속장 사이에는 높은 상관관계가 있음을 제시하였고, Park (2004)은 이 결과를 바탕으로 아래의 식과 같이 SSHV의 비율과 제한 값 α_{max} 로 α 를 결정하였다.

$$\alpha(x, y) = \alpha_{max}(x) \frac{SSHV(x, y)}{MAX(SSHV(x))}$$

그러나, 위의 방법은 α_{max} 를 계산 영역 안에서도 해역에 따라 변경시켜야 하는 단점이 있다. 이 논문에서는 α 를 격자에 관계없이 상수로 정하고, 그 크기는 과거 자료와 비교하여 조절하였다.

Fig. 2-7은 α 를 임의로 설정 ($\alpha = 0.1$)한 역모델에서 산출한 지형류 평균 유속장이다. 유속 벡터와 SSHV를 같이 나타내었다. 유속은 시간에 따른 SSH 변동(SSHV) 범위가 큰 해역보다는 SSHV의 공간 변화 (gradient)가 큰 해역에서 강하게 나타났다. 유향은 대부분 동쪽으로 향하

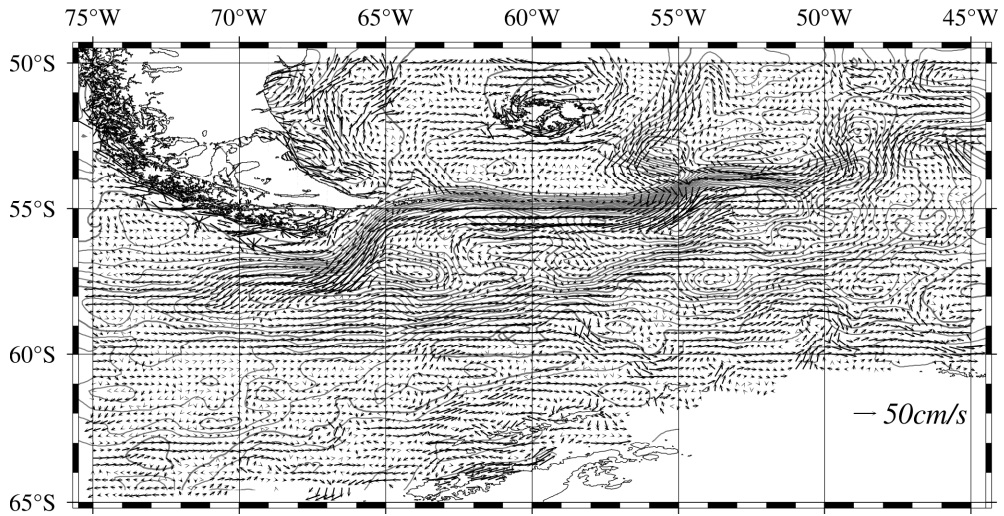


Fig. 2-7. The uncorrected mean surface geostrophic velocity field estimated from the merged SSHa using turning parameter $\alpha=0.1$ with the sea surface height variability in Drake Passage from 1993 to 2012.

였으나, 유속이 가장 강하였던 SAF 전선역 (해협 북쪽과 Falkland 섬 동쪽)에서는 반대 유향이였다. 역모델은 자동으로 평균 유속 (\bar{u}, \bar{v})의 부호를 결정하지 않으므로 (Park, 2004), 유향을 보정하기 위하여 α 의 부호를 조절하는 작업이 필요하다. 드레이크 해협에서는 대부분의 흐름이 동쪽으로 향하기 때문에 식(14)에서 $\bar{u} > 0$ 이기 위해서는 분모 M은 항상 양수이므로, $(K_x \alpha + L_x) > 0$ 의 조건을 만족하는 α 의 부호를 결정하면 된다. Fig. 2-8에 동서, 남북방향 성분의 K 와 L 을 나타내었다. 계산에 이용된 변수들은 MKS 단위로 통일하였다. 식(9)와 식(11), 식(12~13)에서처럼 시간에 따른 해수면 변동 ($D = \frac{\partial \eta'}{\partial t}$)이 가장 큰 항이므로, D 가 포함된 K 가 L 보다 $O(10^2)$ 정도 크게 나타났다. 따라서, $\bar{u} > 0$ 조건을 만족하기 위하여 K_x 와 α 는 같은 부호 ($K_x > 0$ 이면 $\alpha > 0$ 혹은 $K_x < 0$ 이면 $\alpha < 0$) 이거나, 반대로 $\bar{u} < 0$ 를 만족해야 한다면 K_x 와 α 는 서로 다른 부호 ($K_x > 0$ 이면 $\alpha < 0$ 혹은 $K_x < 0$ 이면 $\alpha > 0$)를 갖을 수 있게 α 를 조정해야 한다. Fig. 2-7과 같이 해협 북쪽에서 서향류가 산출된 이유는 Fig. 2-8 (A)와 같이 $K_x < 0$ 이지만 계산 영역 전체에 대해 α 를 양수로 설정하였기 때문이다.

유향을 보정하기 위하여 각 격자마다 α 의 부호를 설정하는 것은 쉬운 작업이 아니다. 그러나 Fig. 2-7를 보면 어떠한 부호도 조정 하지 않은 유속벡터가 마치 SSHV를 해수면 경사인 것처럼 느껴 등경사면을 따라 움직이는 특징을 보인다. 본 논문에서는 SSHV의 공간 변화도 (gradient)를 고려하여 α 의 부호를 결정하였으며, 유향을 보정한 지형류 평균 유속장은 Fig. 2-11와 같다.

Fig. 2-9는 유향 보정을 마친 역모델에서 α 를 0.05~0.12 범위로 조절하여 산출한 표층 지형류 평균 유속 (검은색)과 관측 자료로부터 구

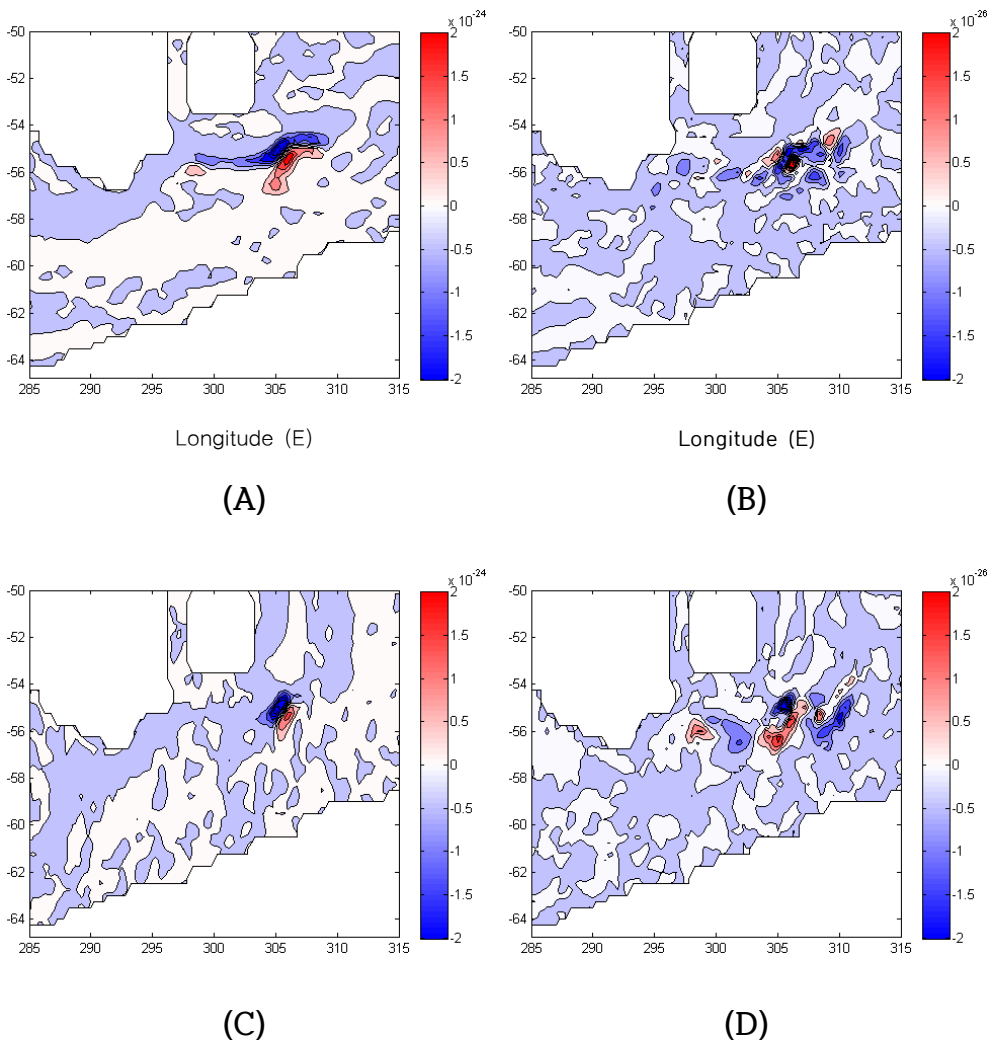


Fig. 2-8. The horizontal distribution of zonal ((A) K_x , (B) L_x) and meridional ((C) K_y , (D) L_y) components to determine the mean surface geostrophic velocity estimated from the SSHA in Drake Passage.

한 평균 유속을 동서(\bar{u}), 남북성분(\bar{v})으로 나누어 나타낸 그림이다. 비교하기 위해 이용한 자료는 다년간 표층 뜰개 (satellite-tracked surface drifting buoy)의 이동 궤적을 추적하여 얻어진 평균 유속을 $1^\circ \times 1^\circ$ 격자화한 자료 (파란색)와 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 OSCAR (Ocean Surface Currents Analyses-Real time) 프로젝트에서 생산하는 표층 유속장 ($1/3^\circ \times 1/3^\circ$ 격자)을 2000년부터 2010년까지 평균한 자료 (빨간색)이다. 표층 뜰개 자료는 바람 영향을 제거한 수심 15m에서의 지형류 유속이며 (Lumpkin and Garaffo (2005)), OSCAR 자료는 SSHA 자료와 표층 뜰개 궤적, 바람, 표층 수온자료 및 WOA (World Ocean Atlas)의 역학고도 (dynamic height) 자료를 이용하여 계산한 표층 해류 유속장이다 (Bonjean and Lagerloef, 2002). 트레이크 해협 3개의 남북 단면 (67° , 61° , 55°W)에서의 지형류의 \bar{u} 는 비교 자료와 위도별 유속 변화가 비슷함을 보였으며, $\alpha = 0.08$ 일 때, 가장 유사한 유속 범위를 보였다 (Fig. 2-9). 하지만 \bar{v} 는 어느 정도의 차이가 발생하였다.

2.3.4. 역모델 계산 결과

Fig. 2-10은 해류계를 계류 (mooring)한 정점 (Fig. 2-3)에서의 평균 유속을 비교한 것이다. 주황색은 수심 500 m에서의 해류 관측 자료로부터 평균한 유속이다. Fig. 2-9에서처럼 \bar{u} 는 지형류와 비교 자료 모두 해류계 관측 자료와 해역별 유속 변화 구조가 유사하게 나타났으며, 유속 범위도 해류계 관측 자료와 비슷함을 보였다. 다만, 57°S 와 60°S 부근에서 나타난 서향류를 나타내지는 못하였다. \bar{v} 는 지형류와 비교자료가 해류계 관측 자료와 어느 정도 차이가 있었다. 따라서 역모델에서 산출한

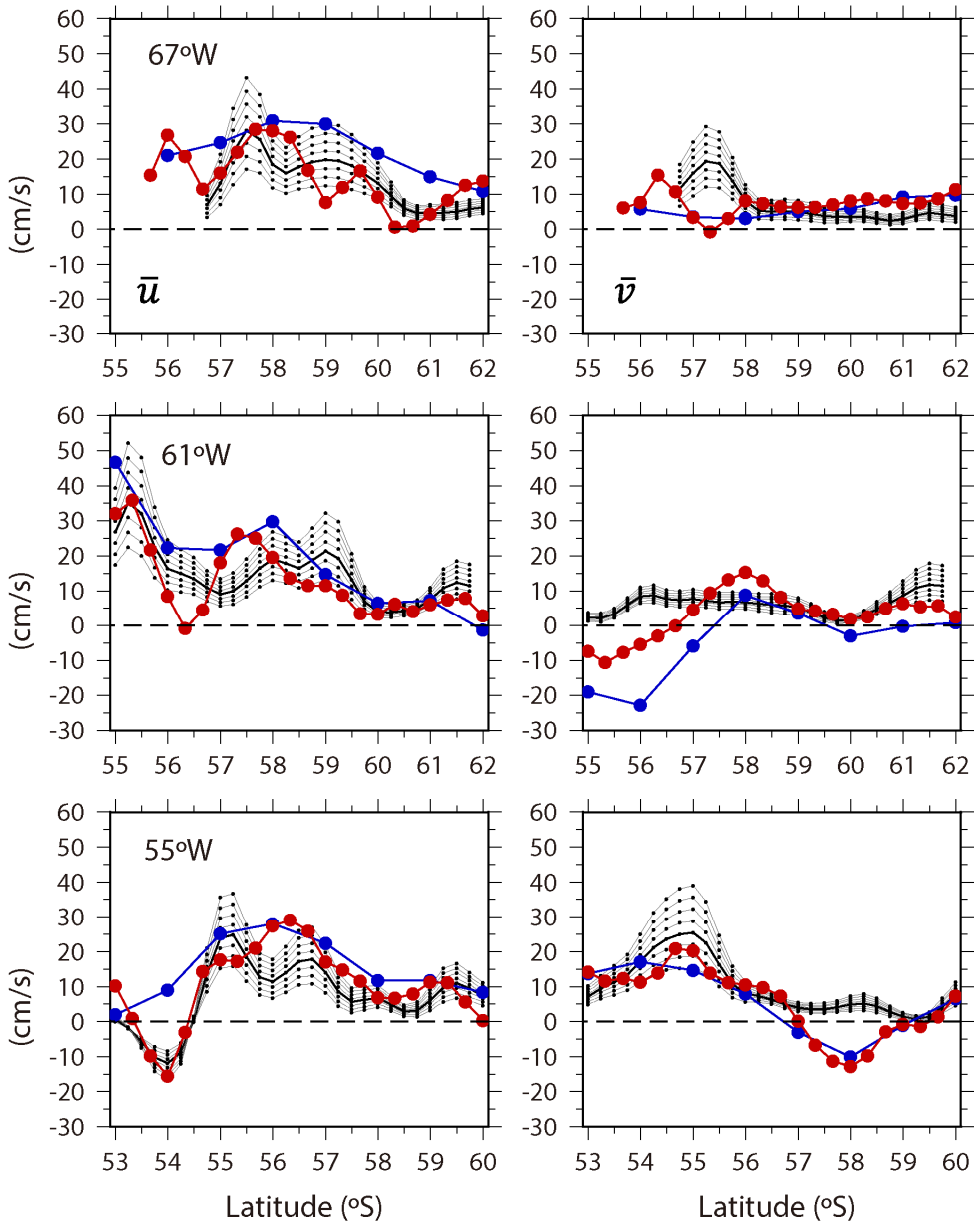


Fig.2-9. Zonal (left) and meridional (right) mean surface velocity across Drake Passage axis using different α (0.05~0.12) values at three longitudes, compared to the time-mean velocities derived from the satellite-tracked surface drifting buoy at 15m depth (blue) (Lumpkin and Garaffo, 2005) and computed the Ocean Surface Currents Analyses-Real time (OSCAR) data from 2000 to 2010 (red) (Bonjean and Lagerloef, 2002). The thick black line indicates the turning parameter α is 0.08.

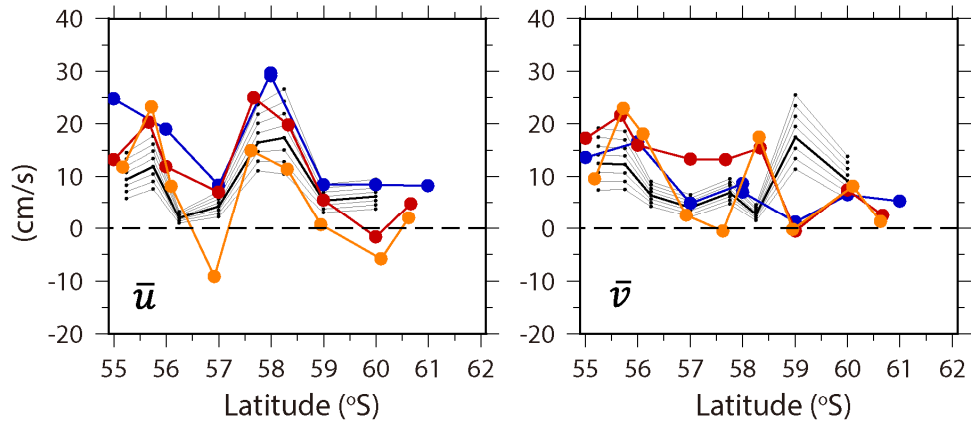


Fig. 2-10. Zonal (left) and meridional (right) mean surface velocity at the mooring stations of current meter in Drake Passage using different α (0.05~0.12) values, compared to the time-mean velocities measured with current meters at 500m depth (orange line), derived from the surface drifter at 15m (blue), and computed the OSCAR data from 2000 to 2010 (red). The thick black line indicates the turning parameter α is 0.08.

평균 유속은 실제 해류의 동서성분 유속을 어느 정도 나타내고 있지만, 남북성분 유속과는 다소 차이가 있을 수 있음을 확인할 수 있었다.

역모델에서 매개변수 $\alpha = 0.08$ 로 설정하고 산출한 드레이크 해협 의 표층 지형류 평균 유속장을 Fig. 2-11과 같이 벡터로 표시하였다. 남아메리카 근처와 Falkland 섬 주변 연안역에는 육지 영향으로 인한 고도계 자료의 정확도 감소와 강한 조석의 영향으로 인한 오차 증가, 남극반도 주변 해역에는 해빙 영향으로 인한 자료 부족으로 평균 유속을 산출할 수 없었다. 유속장은 드레이크 해협 북부와 중부 해역에 강한 유속이 나타나고 있으며 최대 유속은 약 35 cm/sec 정도로 계산되었다. Orsi *et al.* (1995)가 제시한 전선들의 위치한 강한 유속 분포대가 대체로 일치하고 있다. 유속장은 서쪽에서 유입한 해수가 Shackleton Fracture Zone을 만나 북동쪽으로 이동한 후 해협 북부사면을 따라 동쪽으로 이동하다가 Burwood Bank 와 Falkland 섬 부근의 1000m 등수심선을 따라 북쪽으로 유출되는 아남극전선 (SAF)과 Shackleton Fracture Zone을 통과하여 해협 중앙의 West Scotia Ridge 따라 동쪽으로 유출되는 극전선 (PF)을 나타내었다. 이러한 흐름의 대부분은 해저지형과 높은 상관성을 보여주는 것으로 표층 지형류가 해저지형에 영향을 받고 있음을 시사하고 있다.

Fig. 2-12는 역모델 결과가 다른 방법으로 산출한 유속장과 어느 정도 차이가 있는지 파악하기 위하여 (B) 표층 뜰개와 (C) OSCAR 재분석 자료에서 계산한 평균 유속장과 (D) Maximenko *et al.* (2009)가 생산한 평균역학해면고도 (Mean Dynamic Ocean Topography, MDT)로부터 계산한 지형류 평균 유속장을 같이 나타낸 그림이다. 4개의 유속장은 상세하게 비교하면 모두 약간의 차이를 보이고 있지만, 전체적으로 비슷한 형태를 보인다. 하지만 West Scotia Ridge 위의 PF 지역과 Shackleton Fracture Zone 남쪽의 SACCF 지역에서 북쪽 유속 성분이 약한 점 등은

향후 역모델을 세련화하는데 고려해야할 부분이다. 평균 유속장 (\bar{u}, \bar{v})과 유속 편차 (u', v')를 더한 지형류 유속장 (u, v)은 7일 간격으로 계산되었으며 Fig. 2-13은 1997년 1월 16일의 예를 보여준다. 표층 지형류는 소용돌이 (eddy)와 해류의 사행 (meandering)이 해수면온도 분포와 일치하여 재현되고 있다. Fig. 2-14는 표층 지형류 유속장을 나타낸 것이다. 위의 그림은 4개의 남극순환류 전선을 따라 흐르는 일반적인 유속장을 나타낸 것이고, 아래 그림은 해협 서쪽에서 유입하는 흐름이 Shackleton Fracture Zone을 넘으면서 보이는 여러 형태를 보여주어 드레이크 해협 서쪽 입구에서 해저지형에 의한 유속장 변동성이 큰 것으로 나타났으며, 이것은 SAF와 PF 전선 사이의 해수 및 열 교환을 일으키는 것처럼 보인다.

Fig. 2-15는 운동에너지를 산출한 지형류 평균 유속장 (Mean Kinetic Energy, MKE)과 지형류 편차 유속장 (Eddy Kinetic Energy, EKE)의 운동에너지로 나누어 다음의 식 (Stevens and Killworth, 1992)을 이용하여 계산한 그림이다.

$$MKE = \frac{1}{2} (\bar{u}^2 + \bar{v}^2), \quad EKE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{u_i'^2}{2} + \frac{v_i'^2}{2} \right)$$

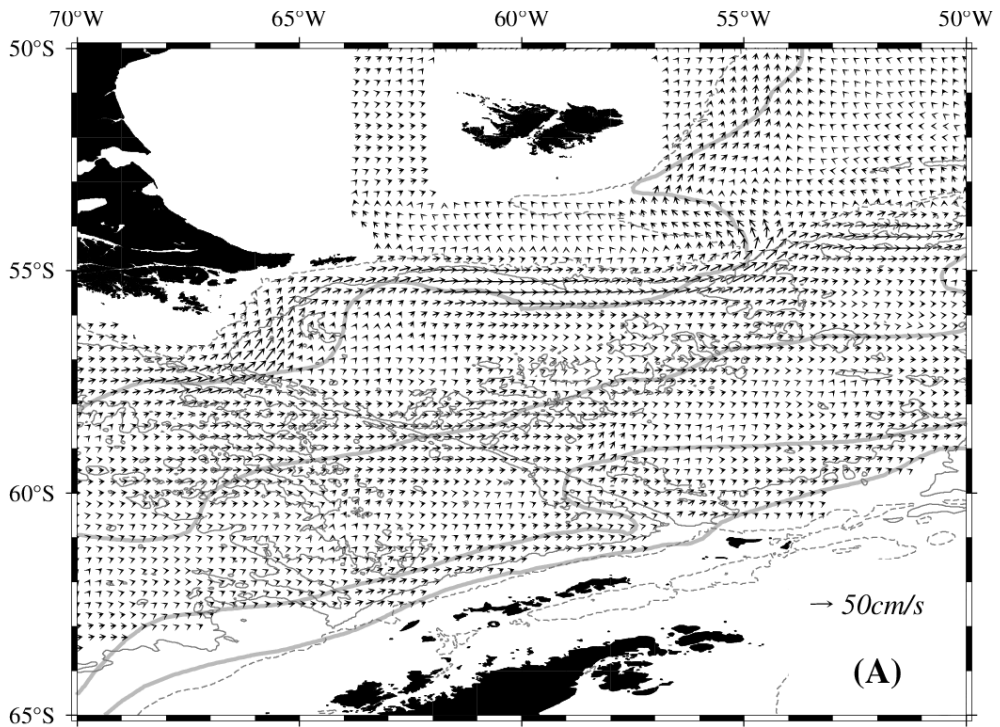


Fig. 2-11. The mean surface geostrophic velocity field estimated from the merged SSHA using tuning parameter $\alpha=0.08$ with the fronts of ACC and bathymetry in Drake Passage from 1993 to 2012.

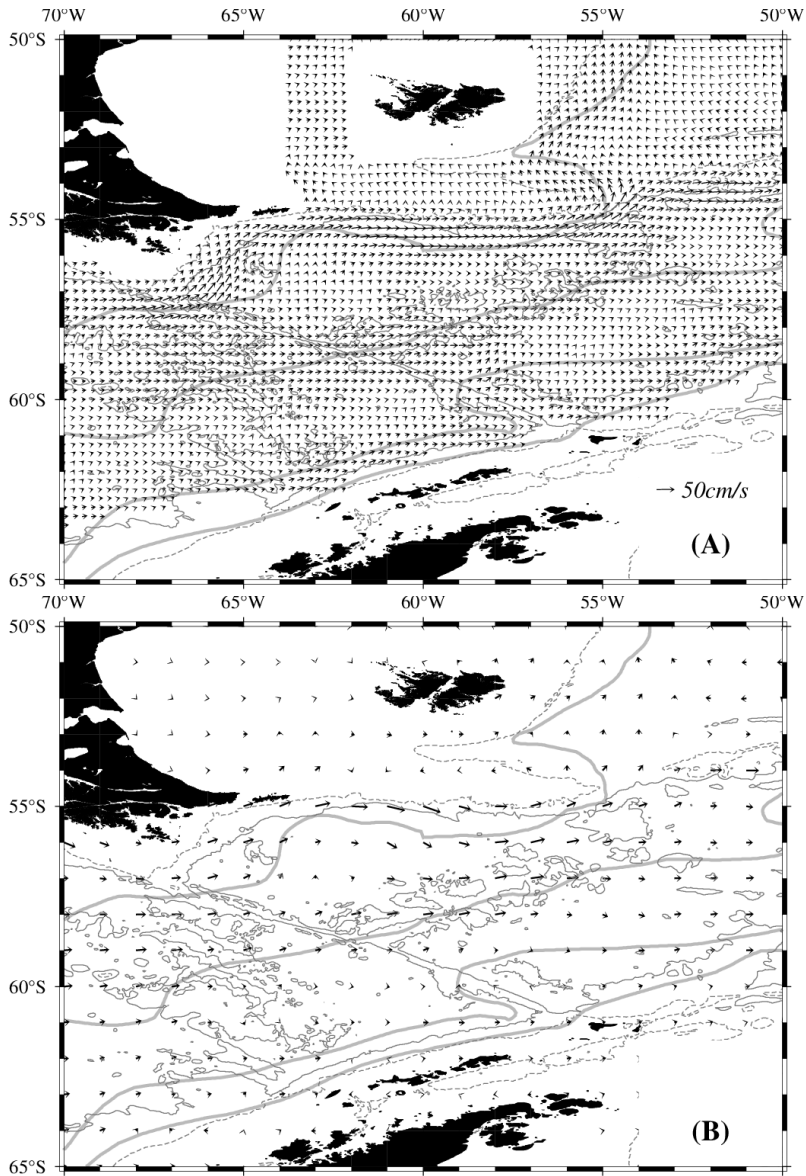


Fig. 2-12. The mean surface geostrophic velocity field (A) estimated from the merged SSHA ($1/4^\circ \times 1/4^\circ$) using tuning parameter $\alpha=0.08$, (B) derived from satellite-tracked surface drifting buoy ($1^\circ \times 1^\circ$), (C) computed from OSCAR data ($1/3^\circ \times 1/3^\circ$) in 2000–2010, and (D) calculated from Mean Dynamic Topography ($1/2^\circ \times 1/2^\circ$) (from Maximenko *et al.* (2009)) in Drake Passage. The gray thick line is the fronts of ACC and thin and dashed line is the depth of 3500m and 1000m, respectively.

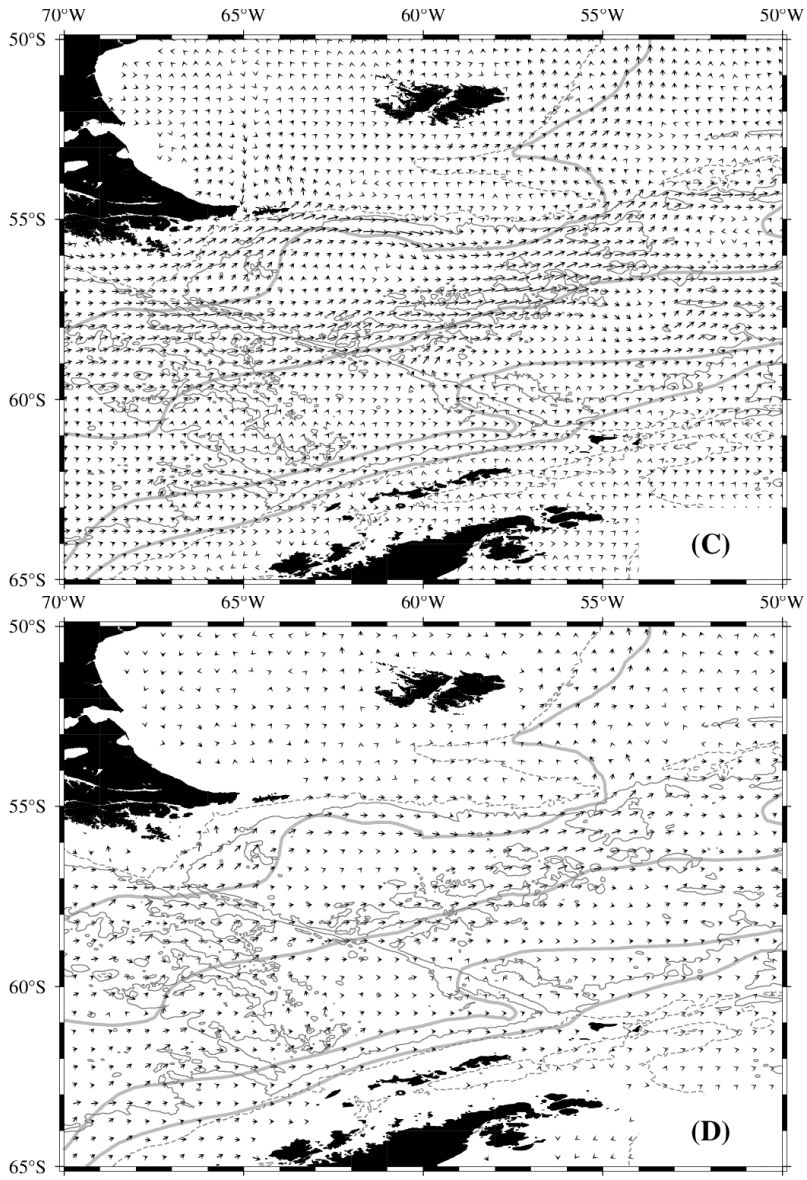


Fig. 2-12. (continued)

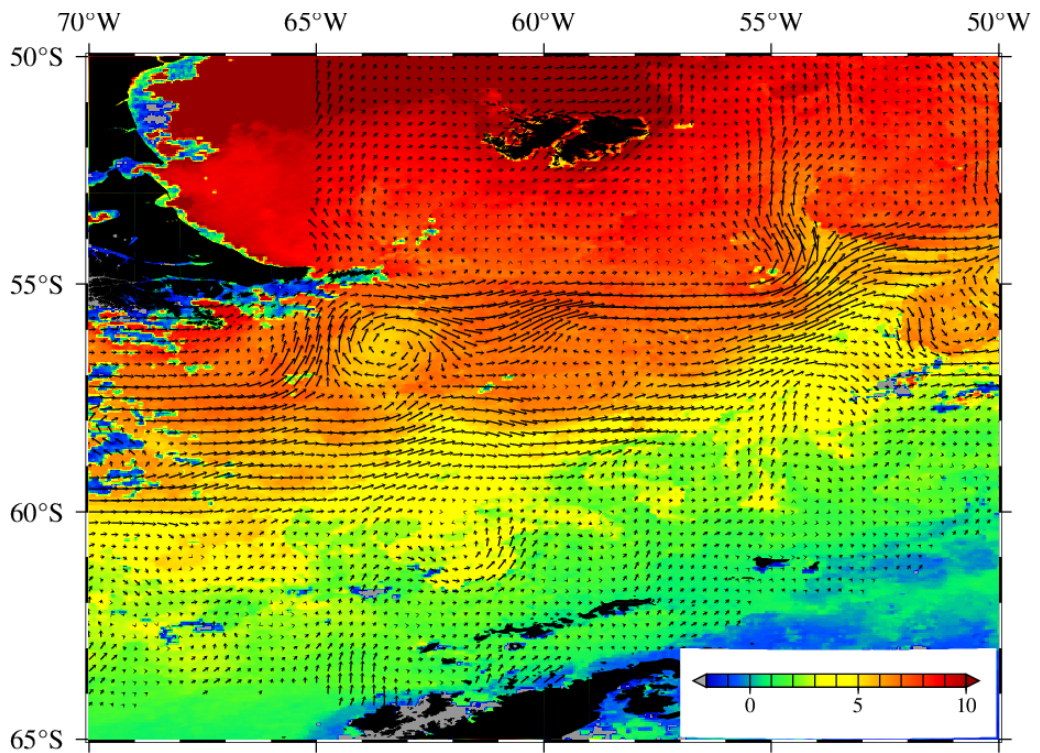


Fig. 2-13. Instantaneous surface geostrophic velocity field determined on January 16, 1997. AVHRR sea surface temperature is depicted by color scale.

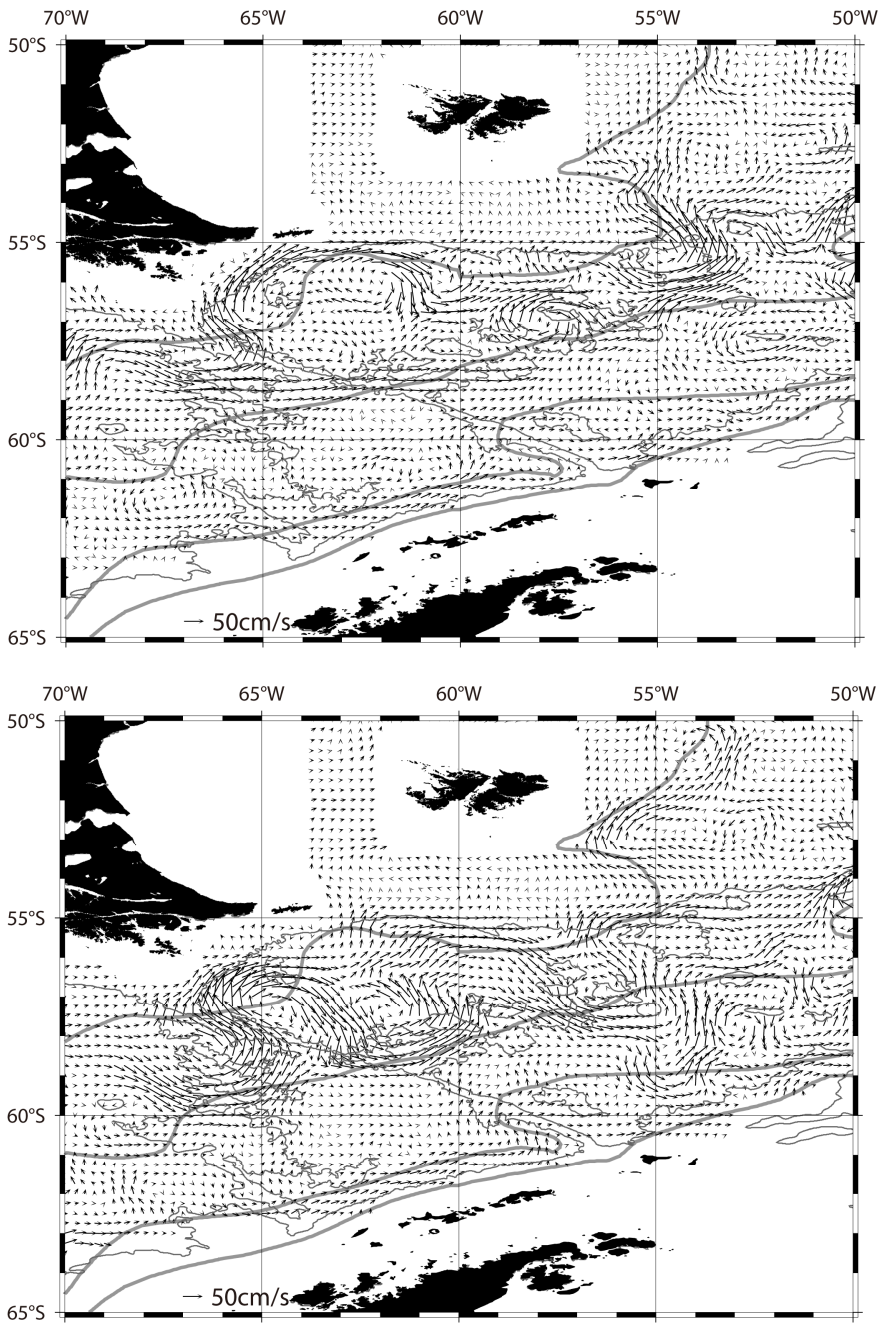


Fig. 2-14. The surface current field of (top) normal (Sep. 13, 2000) and (bottom) special case (Aug. 19, 1998) with the fronts of ACC and the depth of 3500m in Drake Passage.

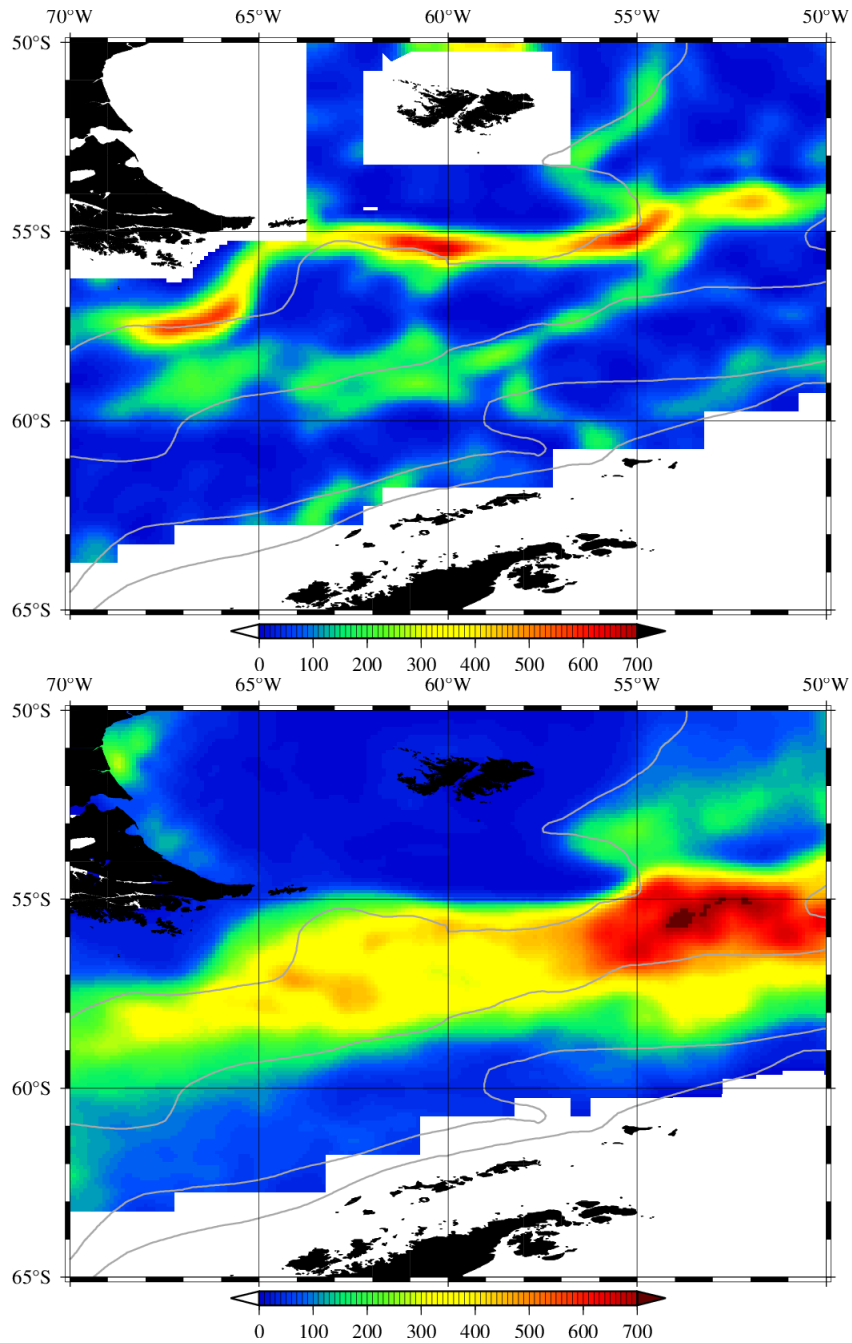


Fig. 2-15 . The horizontal distribution of (top) mean kinetic energy (cm^2/sec^2) and (bottom) eddy kinetic energy (cm^2/sec^2) of the surface geostrophic velocity field determined from the merged SSHA with the fronts of ACC (grey).

산출한 평균 유속장에서 계산한 운동에너지 (MKE)는 전선역에서 강하게 나타났으며, SAF 해역이 약 $500\sim 600\text{ cm}^2/\text{sec}^2$ 정도로 가장 큰 값을 보였으며, PF 해역은 약 $250\text{ cm}^2/\text{sec}^2$ 정도로 SAF 해역의 절반 수준으로 나타났다. 에디 운동에너지 (EKE)는 SAF와 PF 사이 해역에서 강하였으며, Shackleton Fracture Zone 북부 해역과 해협 동쪽에서 높았고, 특히 SAF가 북쪽으로 향하는 해역 (Burwood Bank 동쪽해역 (54°W , 55.5°S))에서 $700\text{ cm}^2/\text{sec}^2$ 이상의 높은 운동에너지를 보였다. 이러한 와류운동에너지 (EKE) 분포는 해수면 변동 분포 (Fig. 2-6)와 일치했다. 즉 EKE가 강한 해역은 와류 (eddy)가 자주 발생하는 지역으로 해수면 변동이 크다는 것을 의미하므로 Shackleton Fracture Zone 주변과 해협 동쪽에서 와류의 영향이 강할 것으로 판단된다.

2.4. 해류계 관측 자료와의 비교

2.4.1. 수온과 염분의 수직구조

Fig. 2-16은 2009년 3월부터 4월까지 해류계 정점에서 관측한 수온, 염분, 밀도와 지형류 유속 단면이다. 밀도는 Neutral density (Jackett and McDougall, 1997)로 나타내었다. 드레이크 해협 북부 상층에 상대적으로 고온·저염의 가벼운 해수가 남부 저층에는 저온·고염의 무거운 해수가 분포하고 중심층에는 염분 최대층이 나타나며, 해협 남쪽 100~200 m 수심에는 해빙이 녹아 형성된 저염분의 냉수가 얇은 띠 형태로 해협 중앙까지 확장하였다. 전체적인 수직구조는 북쪽이 깊고 남쪽이 얇은 기울어진 성층구조이며, 이러한 구조는 경압성 (baroclinic) 흐름을 발생시킨

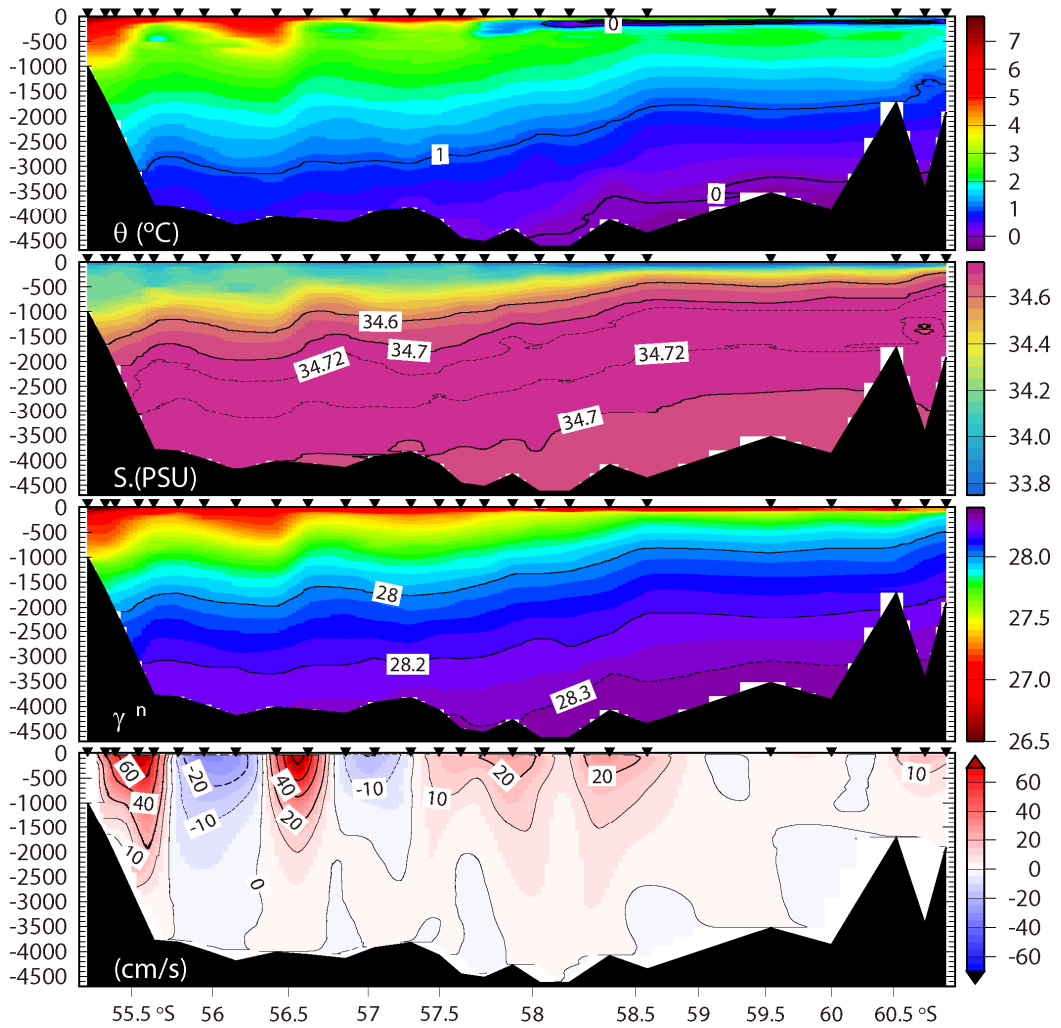


Fig. 2-16. The vertical distribution of potential temperature, salinity, neutral density, and geostrophic velocity referenced to 0 at bottom for the section of current meter mooring from March 25 to April 4, 2009. The positive value (red) of geostrophic velocity is the (north)eastward and negative (blue) is the (south)westward.

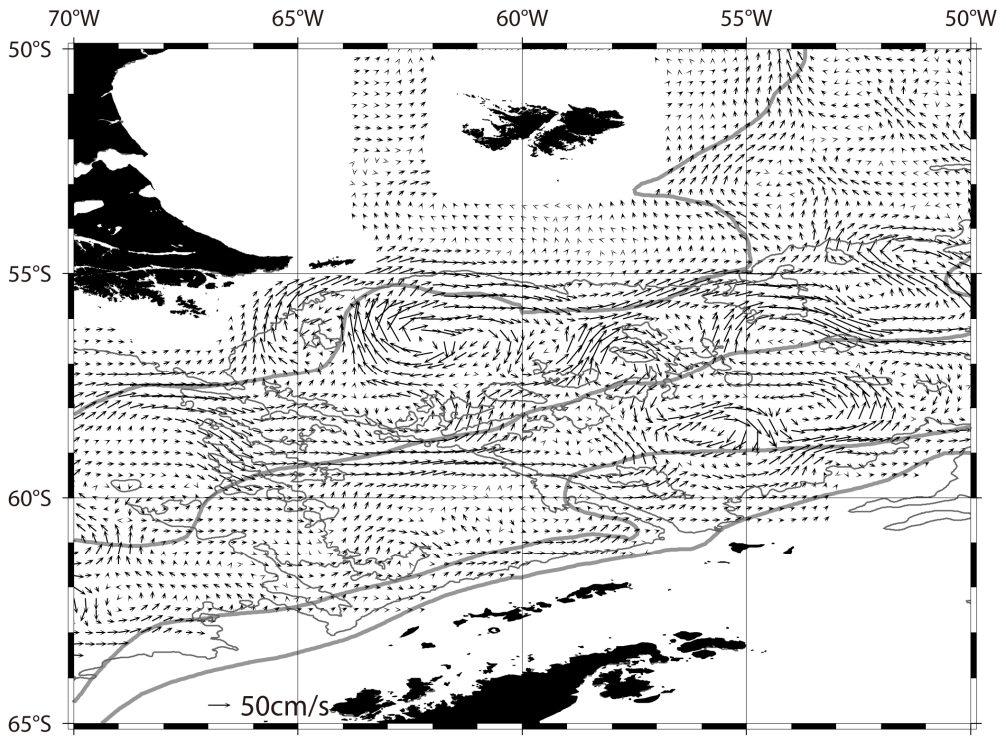


Fig. 2-17. Instantaneous surface geostrophic velocity field determined on April 1, 2009.

다. 그 기울기가 남쪽은 완만한데 비해 북쪽은 이보다 가파르다. 수온과 염분 자료로부터 계산한 지형류는 가파른 성층 경사도를 보였던 55~56.5°S 와 57.5~58.5°S에서 유속이 강하게 나타났다. SAF 전선역에서 최강 유속 87 cm/sec 였으며, PF 전선역에서는 약 20~25cm 정도였다. SAF 와 PF 해역에서 eddy의 영향으로 보이는 두 개의 서향류가 나타났다. Fig. 2-17에서처럼 관측시기에 해협 북부 Yagan Basin 해역에는 2개의 와류 (eddy)가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

2.4.2. 유속 관측 결과

해류계는 Fig. 2-3과 같이 Jason 고도계 위성 궤적의 교차점에 설치하여 2~4개의 단일 수층 유향과 유속을 측정하였다 (Table 2-2, 2-3). 상층 해류계는 수심 약 500 m 층에 설치하였으며, 저층 해류계는 2000~3000 m에 설치하였는데, 해저면에서 약 1000~1500 m 높다 (Fig. 2-18). 본 논문에서는 2006년 1월부터 2008년 4월까지 (Leg-1) 드레이크 해협 남부 Ona Basin에서 관측한 4개 정점 자료와 2008년 4월부터 2009년 3월까지 (Leg-2) 해협 북부 Yagan Basin에서 관측한 5개 정점 자료를 이용하였다.

Fig. 2-19는 해류 관측기간 동안 전체를 평균한 유속벡터이다. 전체적으로 (북)동쪽으로 이동하는 흐름을 보였다. 하지만 해협 북부 정점 M04와 남부 정점 M09에서는 (북)서향류도 나타났다. 최강 평균 유속은 해협 북부 정점 M02, 500 m 수심에서 약 33 cm/sec 정도로 나타났으며, 해협 남부에서는 정점 M06에서 21 cm/sec 정도이나 수심 200 m의 유속이므로 500 m를 고려하면 약 15 cm/sec 로 해협 북부 최강 유속에 절반 정도이다 (Table 2-4). 저층 해류계 자료의 평균 유속은 해협 북부에서

정점 M05를 제외하면 11.7~13.6 cm/sec 범위 (4개 정점 평균 12.4 cm/sec)이고, 남부에서는 3.7~8.5 cm/sec (4개 정점 평균 5.5 cm/sec) 정도로 나타났으며, 북부가 남부보다 2.3배 강하였다. 저층의 최강 유속은 해협 북부 정점 M04에서 13.6 cm/sec, 남부 정점 M09에서 8.5 cm/sec 이고, 수심 2500 m 이며, (북)서향류가 나타난 정점들이다.

Fig. 2-20과 2-21은 각각 해협 북부와 남부의 해류 자료를 14일 이동 평균한 시계열 유속 벡터이다. 해협 북부에서는 정점 M02에서 약 52 cm/sec의 최강 유속을 보였으며, 정점 M01, M02, M03에서 북동류가 우세하였고 특히 M01과 M02에서는 드레이크 해협을 통과하는 남극순환류의 전선 중 가장 강한 SAF이 통과하는 해역으로 남향 성분은 나타나지 않는 반면 SAF와 PF 사이 해역에 해당하는 정점 M04, M05 에서는 유향이 주기적으로 변하여 eddy가 주기적으로 분포하는 것으로 보인다. 해협 남부에서는 정점 M06에서 약 56 cm/sec의 최강 유속을 보였고 북동류가 우세하였으며 남향 성분은 나타나지 않는 반면 정점 M07, M09, M10에서는 유향이 주기적으로 변하였다. 유속이 강한 해협 북부 정점 M02, M03과 이보다는 약하지만 정점 M05와 해협 남부에서는 정점 M06에서 수직적인 유속 차이가 나타나 경압성 (baroclinic) 유속구조를 보이며, 이를 제외한 정점에서는 수직적인 유속 차이가 적어 순압성 (barotropic) 유속구조를 보인다. 하지만 해역마다 유속구조 (평균분포)의 차이를 보일지라도 해협 전체에서는 상층 유속 변화가 저층에도 나타나는 것으로 보아 유속 변동은 순압성 특성이 강하다는 점이 드레이크 해협의 특징이라고 할 수 있다.

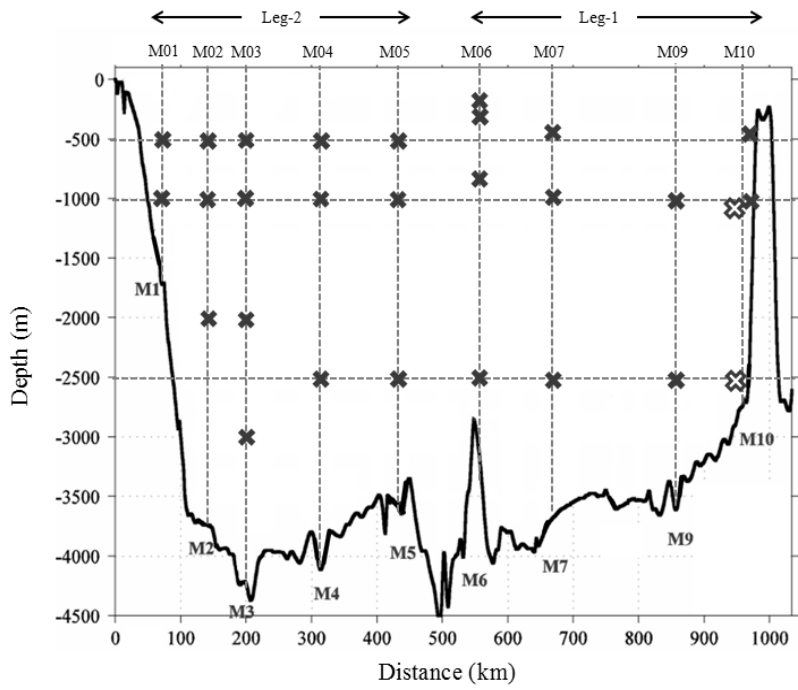


Fig. 2-18. The bottom topography of the mooring section. The depths of the moored current meters are marked by cross symbol.

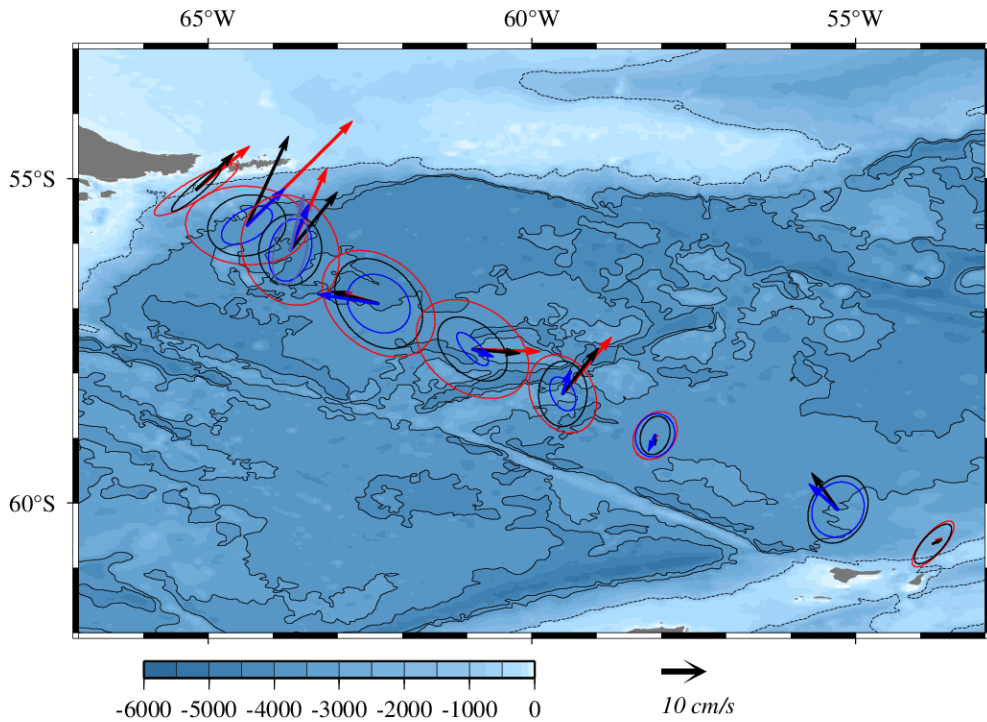


Fig. 2-19. The mean current and variance ellipses measured with current meters in northern Drake Passage from April, 2008 to March, 2009 (Leg-2) and in southern Drake Passage from January, 2006 to April, 2008 (Leg-1). Colors indicate the mooring depths of current meters (red: 500 m, black: 1000 m, blue: 2000~2500 m, purple: 3000 m). The contour line is the depths of 3500 and 4000 m, and the dotted is 1000 m.

Table 2-4. Basic statistics of low pass filtered currents. All directions are measured clockwise from the north

Station (Leg)	Depth (m)	Vector mean		Max. speed	u_mean	u_rms	v_mean	v_rms
		Dir. (°)	Speed (cm/s)					
M01	500	51	15.2	43.9	11.8	9.1	9.6	5.6
	(2) 1000	46	11.7	32.9	8.4	5.3	8.1	4.7
M02	500	45	32.7	53.6	23.3	13.4	23.0	8.6
	(2) 1000	25	21.8	37.2	9.2	8.5	19.7	6.7
	2000	46	11.7	28.2	8.4	5.6	8.2	4.2
M03	500	24	19.8	46.2	8.1	10.7	18.1	12.0
	(2) 1000	39	16.5	35.6	10.4	6.9	12.8	7.7
	2000	22	11.0	25.6	4.1	4.7	10.2	6.8
M04	500	286	9.4	36.9	-9.1	12.3	2.6	11.6
	(2) 1000	284	10.9	32.8	-10.5	9.6	2.7	9.8
	2500	279	13.6	29.7	-13.5	6.9	2.1	6.4
M05	500	92	15.0	43.9	15.0	12.2	-0.5	10.8
	(2) 1000	95	10.5	29.4	10.5	7.6	-0.9	7.0
	2500	110	5.0	16.2	4.7	3.4	-1.7	3.6
M06	200	33	20.9	58.6	11.4	9.7	17.5	12.3
	(1) 280	41	16.6	40.8	10.9	7.4	12.6	8.5
	800	38	12.9	36.6	7.9	5.3	10.1	7.1
M07	2500	18	5.5	16.6	1.7	2.8	5.3	3.7
	(1) 460	107	0.7	17.1	0.7	4.8	-0.2	5.2
	990	181	2.2	15.4	0.0	3.3	-2.2	4.2
M09	2550	203	3.8	22.9	-1.5	4.3	-3.5	4.7
	(1) 1000	324	10.0	26.5	-5.8	6.6	8.1	7.3
	2550	312	8.5	23.7	-6.4	5.7	5.7	6.0
M10	480	99	3.1	23.3	3.0	8.1	-0.5	6.9
	(1a) 960	112	2.7	18.2	2.5	7.1	-1.0	6.0
	2600	156	4.0	18.2	1.6	5.7	-3.7	4.9
(1b)	1060	137	1.2	13.7	0.8	4.2	-0.9	3.9
	2560	166	3.7	16.6	0.9	3.0	-3.6	3.2
(1c)	460	56	2.4	19.4	2.0	4.6	1.3	5.0
	970	67	2.2	17.2	2.0	4.1	0.9	4.3

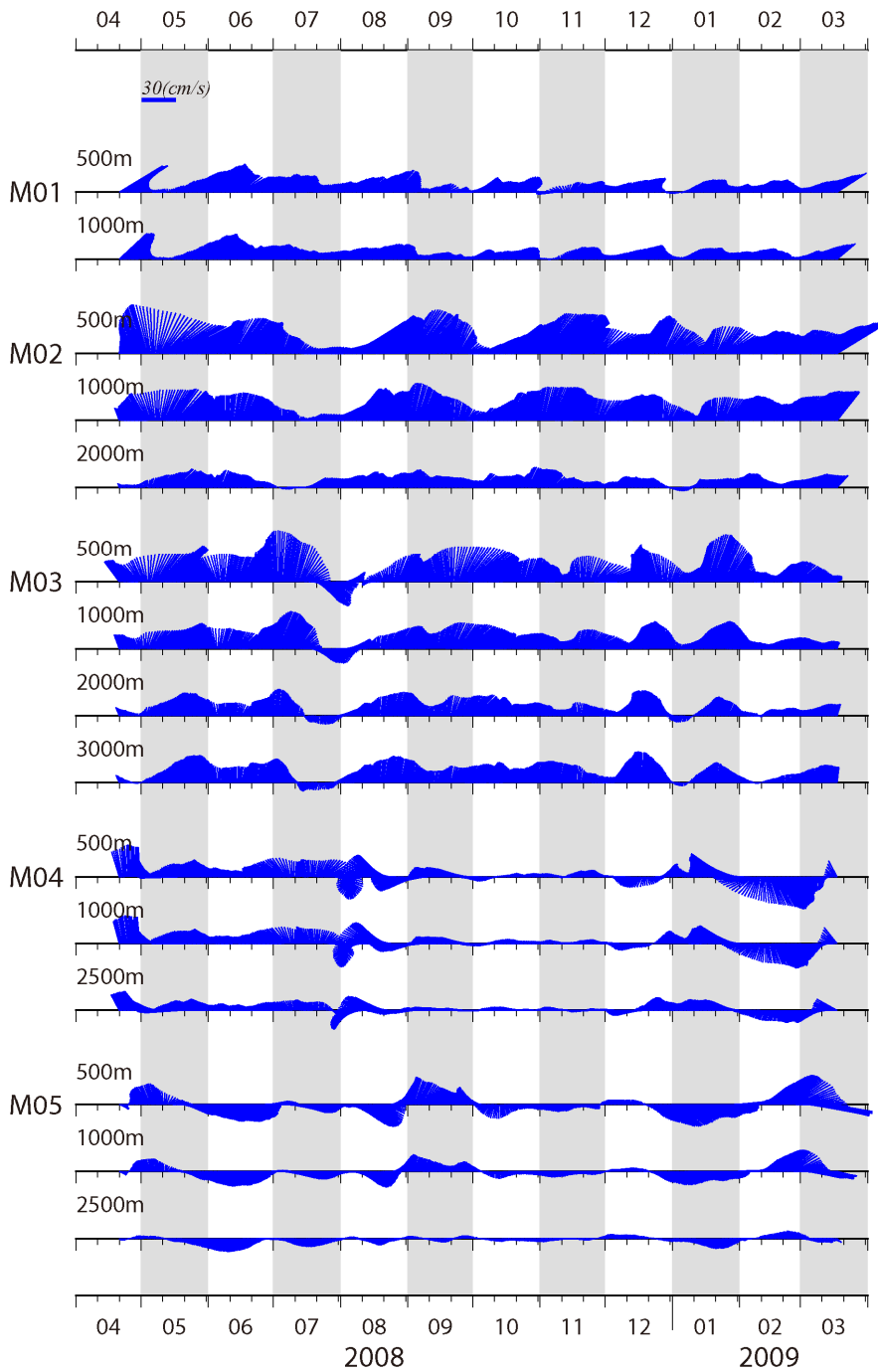


Fig. 2-20. Vector time series of low-pass filtered currents smoothed with 14-day moving average in northern Drake Passage during Leg-2.

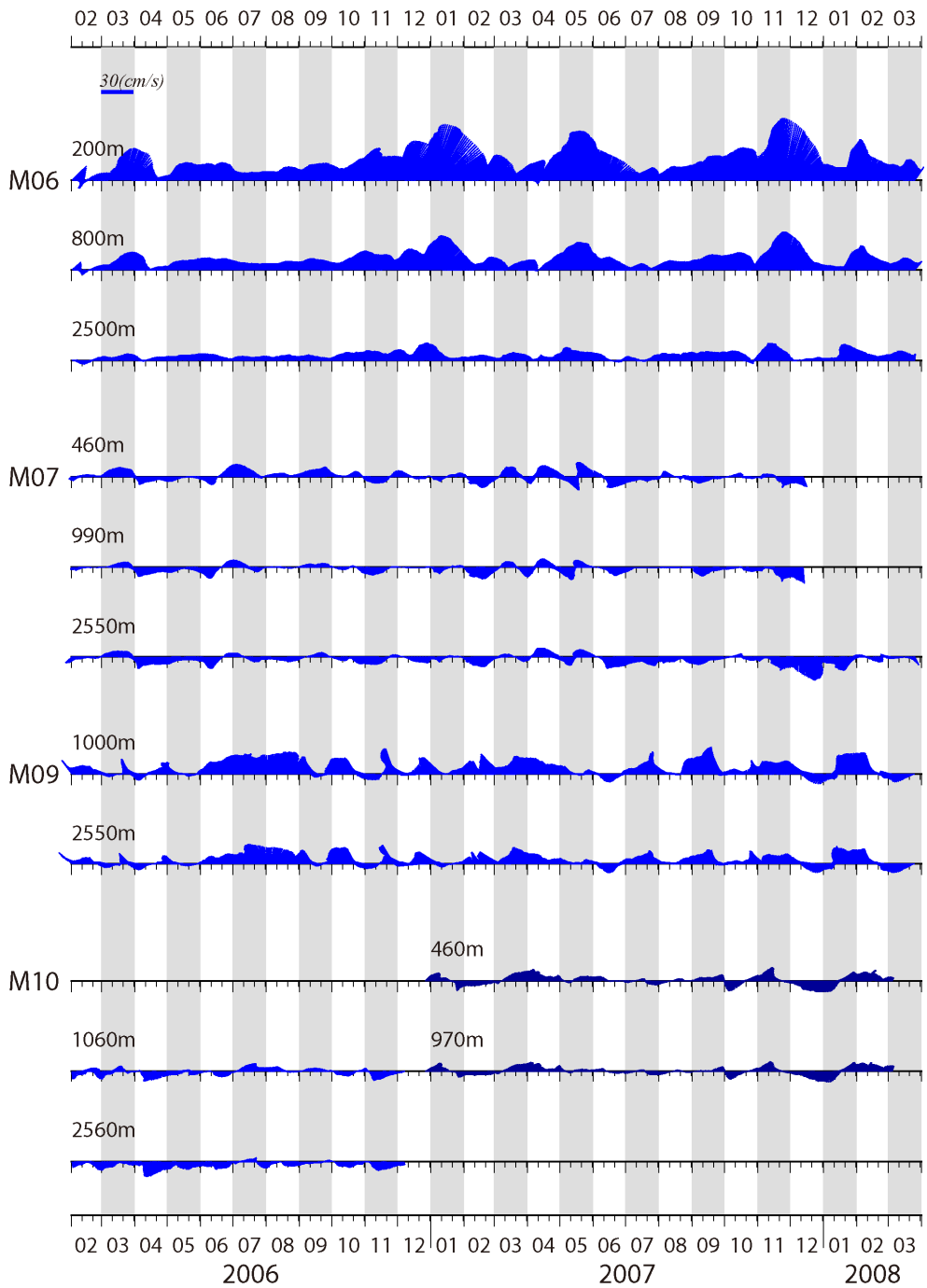
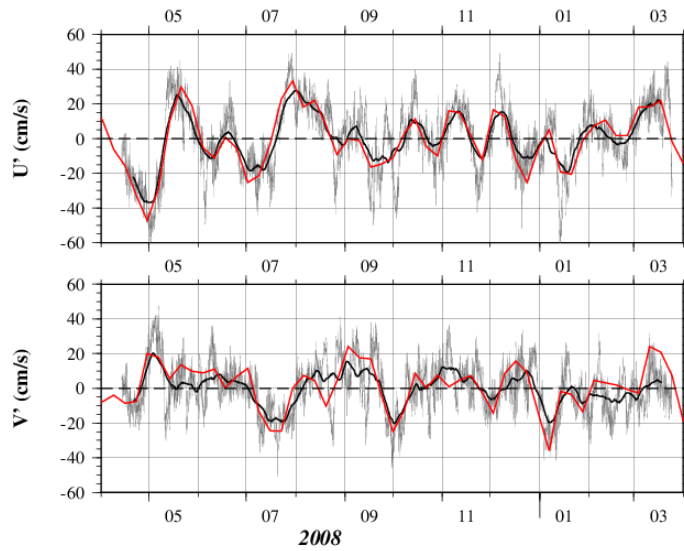


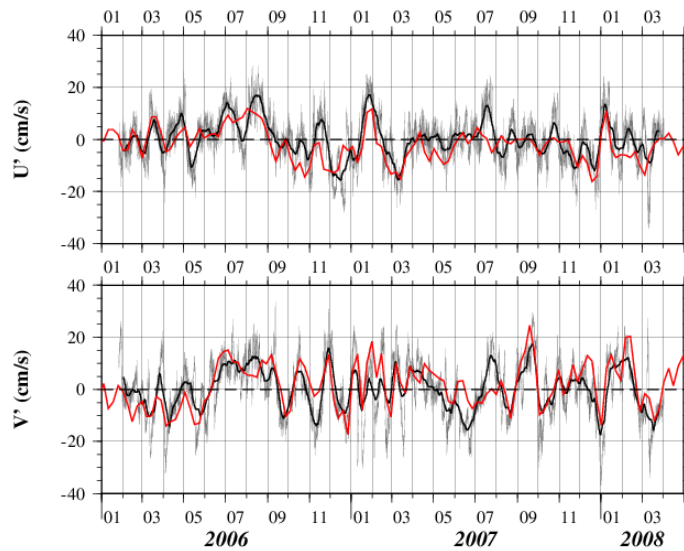
Fig. 2-21. Vector time series of low-pass filtered currents smoothed with 14-day moving average in southern Drake Passage during Leg-1.

2.4.3. 지형류와 실측류의 상관성

계산한 지형류 유속이 관측한 해류자료를 어느 정도 나타내는지 알아보기 위하여 Fig. 2-22와 같이 해류계 정점 M02, M09의 평균을 제거한 유속 편차자료와 같은 위치 격자의 유속 편차자료를 시계열로 나타내었다. 빨간색은 지형류 유속, 검은색은 14일 이동평균한 해류계 유속, 회색은 원래의 해류계 유속을 나타낸다. 현재 (i)의 지형류 유속을 계산하기 위해서는 SSHA 자료를 현재보다 한 단계 이전 ($i-1$)과 한 단계 이후 ($i+1$)의 차이를 통하여 지형류를 계산 (centered scheme)하였기 때문에 시간 간격을 맞추기 위해 해류계 유속 자료를 14일 평균하여 지형류와 비교하였다. 해류관측 자료는 표층과 가장 가까운 수심 500 m의 유속이다. 유속의 동서성분, 남북성분이 모두 유사한 변화를 보였다. Fig. 2-23은 해류계와 지형류 유속 편차의 상관계수를 정점과 수심에 따라 계산한 결과이다. 가로축은 정점을 의미하고 세로축은 상관계수를 나타낸다. 빨간색, 검은색, 파란색은 각각 500 m, 1000 m, 2000~3000 m의 해류관측 자료를 나타낸다. 해협 중앙부 500~1000m 해류 자료와는 지형류가 Fig. 2-23과 같이 높은 상관성을 보인다. 같은 수심 층이라도 해협 북쪽과 남쪽 가장 자리에서 상관성이 상대적으로 낮게 나왔다. 해면고도 자료는 육지근처에서 정확도가 떨어지는 단점이 있는데 (Fig. 2-24), 육지에 의한 자료의 한계로 보여진다. 수직적으로는 수심 1000m 까지 상관성이 높게 나왔으나, 그 보다 깊은 수심에서는 상관성이 얕은 수심보다 조금 낮은 수치를 보였고 정점에 따라 다르게 나타났다. 상관성 결과로 보아 육지에서 조금 떨어진 해역에서는 고도계 자료로부터 계산한 표층 지형류가 드레이크 해협의 해류를 표현한다고 할 수 있다. 하지만 심층해류는 해역에 따라 표현 정도가 다르게 나타났다.



(A)



(B)

Fig. 2-22. Time series of the velocity anomalies measured with current meter and geostrophic current from SSHA at (A) M02 (500m depth) and (B) M09 (1000m depth). Red line is geostrophic velocity anomaly, black is the low-pass filtered current meter velocity anomaly smoothed with 14-day moving average, grey thin line is the original current meter velocity anomaly.

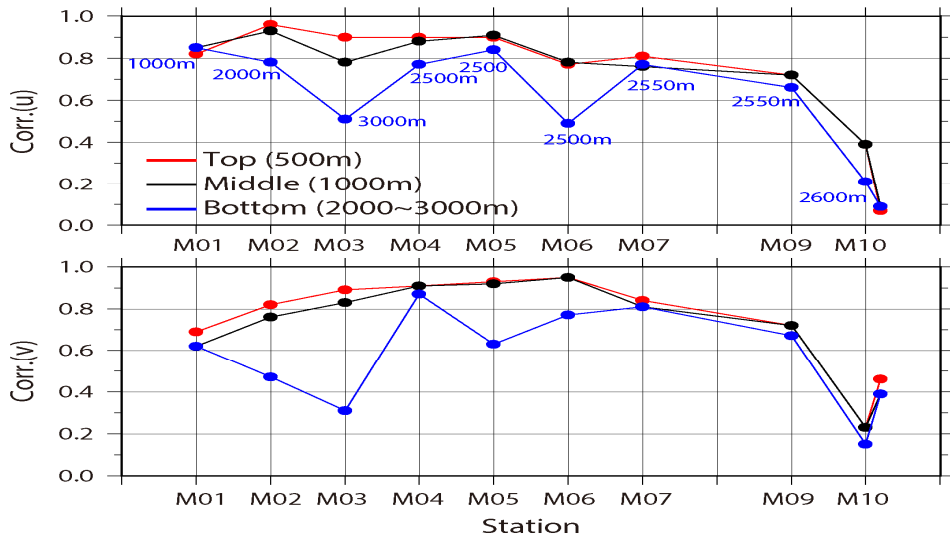


Fig. 2-23. The correlations of eastward and northward component between the anomalies of the low-pass filtered current meter velocity and the surface geostrophic current from SSHA. Color explains the depth of current meter (red: top, 500m; black: middle, 1000m; blue: bottom, 2000~3000m).

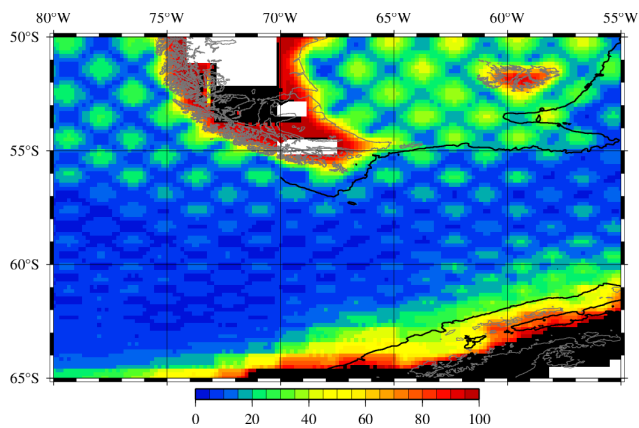


Fig. 2-24. The formal mapping error (%) of the merged SSHA of AVISO in Drake Passage.

2.5. 토의

드레이크 해협을 통과하는 해수 수송량을 파악하기 위하여 유속 자료가 필요하지만, 직접 관측의 어려움으로 인공위성 고도계 자료로부터 지형류를 계산하였다. 지오이드에 대한 정보 부족으로 평균값이 제거된 해면고도 편차 (SSHA)자료를 이용하였으며, SSHA로부터 계산한 지형류는 편차 유속이므로 평균 유속장을 산출하기 위하여 역모델 (inverse model)을 구성하였다. 사용된 역모델에서는 유향과 유속이 자동적으로 결정되지 않으므로 관측 자료와의 비교 과정을 통하여 드레이크 해협의 평균 유속장을 산출하였다. 산출한 평균 유속장에 7일 간격의 유속 편차를 더하여 계산한 표층 지형류 유속장은 와류 (eddy)와 해류의 사행 (meandering)이 해수면 온도 분포와 일치하여 재현됨을 확인하였다. 드레이크 해협 서쪽으로 유입한 흐름이 Shackleton Fracture Zone 을 지나면서 여러 유동 형태를 보여주었으며, SSH 변동이 크고, 와류 운동에너지 (EKE)도 높은 점으로 보아 해저지형에 의한 유속장 변동성이 큰 것으로 나타났다. 이러한 해수 유동에 의해 드레이크 해협 SAF와 PF 전선역 사이의 해수 및 열 교환이 활발히 일어날 것으로 생각된다.

해류계 자료로부터 계산한 평균 해류는 대부분 (북)동향류이나, 해협 북부의 Yagan Basin 남쪽 (정점 M04)과 해협 남쪽의 SACCF 해역 (정점 M09)에서 (북)서향류도 나타났다. 최강 평균유속은 해협 북쪽 사면 정점 M02 (수심 500m) 약 33 cm/sec 정도이고 북동류이나, 저층 (2500m)은 북부에서 13.6 cm/sec, 남부에서 8.5 cm/sec 로 모두 (북)서향류이다.

산출한 표층 지형류의 유속 변동은 해류계로 관측한 유속 변동과 높은 상관성을 보였다. 몇몇 정점의 저층에서는 일치하지 않았으며, 육지

가 있는 해협 북쪽과 해빙(sea ice) 영향이 있는 남쪽에서 차이가 나타났지만, SSHA의 자료 한계에 불구하고 표층 지형류는 드레이크 해협의 해류를 나타내었다. 다만 해면고도 자료는 수심이 얇은 연안역에서 강한 조석과 육지의 영향 등에 의해 오차를 포함하므로 계산한 지형류가 실제 유속과의 차이가 발생하며, 해협 남부에서 겨울철 확장하는 해빙 (sea ice) 의해 해면고도 자료를 얻을 수 없는 점은 자료가 갖고 있는 한계이므로 지형류 계산을 할 때에는 이점에 유의해야할 것이다.

해협 내부 유속의 수직구조는 기울어진 성층구조에 의해 경압성 (baroclinic) 흐름이 나타나며, 기울기가 완만한 해협 남부보다 가파른 북부 (특히 SAF, PF 지역)에서 경압성 흐름이 강하였다. 유속의 변동성은 상층의 변화가 저층에도 나타나는 점으로 보아 순압성 (barotropic) 특징을 보여준다. 따라서 오랜 시간의 변화는 주로 경압성 성분에 의한 것이며, 수개월의 짧은 시간에 일어나는 변동은 순압성 성분에 의한 것이 우세하였다. Tracey *et al.* (2014)는 4년 간의 CPIES 관측을 통해서 드레이크 해협을 통과하는 해수 수송 총량의 75%가 경압류에 의한 것이며, 수송량 변동의 80%가 순압류에 의한 것이라고 제시하였다. 유속 변동은 순압성으로 수심 전 층에 작용하고 있기 때문에 표층 지형류 변동으로부터 드레이크 해협의 수송량 변동을 추정하는데 무리가 없을 것으로 판단된다.

제 3 장 드레이크 해협을 해수 수송량 변동

3.1. 서론

해양에서 가장 거대한 해류인 남극순환류가 드레이크 해협을 통과할 때 발생하는 변화는 짧게는 대기와 해양 변화에 영향을 줄 뿐만 아니라 길게는 지구기후 변화에도 영향을 준다. 이와 반대로 남반구 대기와 해양의 변화는 남극해 순환에 영향을 미치고 그 결과가 남극순환류 수송량 변동으로 나타날 것이다. 따라서 남극순환류 수송량을 연구하는 것은 해양순환 뿐만 아니라 기후변화 기작을 이해하는데 중요하다.

과거 드레이크 해협의 수송량 연구는 1970년 중반 ISOS (International Southern Ocean Studies)와 1990년대 WOCE (World Ocean Circulation Experiment) 프로그램을 통해 집중적으로 진행되었다. 그 이전에는 Clowes (1933) 가 1929년부터 1930년까지 Discovery 호 관측을 통해서 얻어진 수온·염분 자료로부터 약 110 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$)의 유량이 통과한다고 처음으로 드레이크 해협의 수송량을 추정하였다. Gordon (1967)은 최대 218 Sv 이 동쪽으로 빠져나간다고 했으며, Reid and Nowlin (1971)은 1969년 4일 동안의 해류계 관측으로부터 최대 237 Sv 이 통과한다는 범위를 제시하기도 했다.

ISOS 프로그램에서는 수온·염분 측정과 더불어 해류계를 통한 해류 관측도 이루어졌다. FDRAKE75 (First Dynamic Response and Kinematics Experiment in 1975) 관측 결과 해수 수송량은 110~138 Sv 의 범위를 갖으며, 해류계 자료로부터 보정된 지형류를 통해 산출한 수송량은 124 Sv 라고 제시되었고 (Nowlin et al., 1977), Bryden and Pillsbury (1977) 은 $139 \pm 36 \text{ Sv}$, Fandry and Pillsbury (1979)은 127 ± 14

Sv 의 수송량을 계산하였다. 이어서 수행된 FDRAKE79 관측에서는 17개 해류계 관측 및 해협 북쪽과 남쪽 2개 정점 해저면에서 측정된 압력 구배와 지형류 계산을 통해서 총 수송량은 134 ± 11.2 Sv 로 제시하였으며 (Whitworth, 1983; Whitworth and Peterson, 1985; Cunningham *et al.*, 2003), WOCE 프로그램 기간 동안 (1993-2000)에는 여러 차례에 걸쳐 해협 단면 (SR1b)을 관측한 수온·염분자료로부터 Cunningham *et al.* (2003)은 137 ± 8 Sv으로 제시하였다. 현재까지 드레이크 해협을 통과하는 해수 수송량은 통상적으로 134~137 Sv으로 받아들여지고 있다.

ISOS 프로그램 이후 중단되었던 해류 모니터링이 2006~2009년에 실시한 DRAKE 프로그램 (Provost *et al.*, 2011)과 2007~2011년 동안 해저면에 설치한 CPIES (Current and Pressure recording Inverted Echo Sounders) 장비로부터 유속을 추정하는 cDrake 프로그램 (Chereskin *et al.*, 2012)을 통해 장기간 해류 관측이 진행되었다.

남극순환류 수송량에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있으나, 단면 횡단과 같은 단편적인 관측에 의한 수송량의 절대값 산정에 치우쳐 있는 것이 대부분이고, 1~4년 동안의 해류 모니터링으로부터 획득된 자료일지라도, 수송량 변화를 엘리뇨/라니냐 등 해양-대기 현상이나 기후변화와 연관지어 연구하기에는 자료길이 부족할 면이 있다. 여전히 남극순환류 수송량의 장기 변동성에 대한 연구는 미비한 편이다.

2장에서 인공위성 고도계자료 (SSHA)에서 산출한 표층 지형류 유속이 관측한 실제 해류의 유속을 나타내고 있음을 확인하였으므로, 표층 지형류에서 계산한 수송량도 실제 수송량을 어느 정도 표현한다고 할 수 있을 것이다. 3장에서는 2장에서 계산한 표층지형류 유속 편차로부터 표층 수송량 편차를 계산하였으며, 20년 동안의 장기 변동성에 대해 알아보았다.

3.2. 자료 및 방법

드레이크 해협을 통과하는 남극순환류 수송량을 계산하기 위하여 Fig. 3-1과 같이 단면의 시작과 끝이 수심 1000 m 등수심선에 놓이도록 설정하여 그 내부 지형이 1000 m 보다 깊은 골짜기 형태를 갖추도록 4개 단면을 선정하였다. 해류계 정점을 연결한 단면 C와 같이 기울어진 경우에는 동서방향의 유속 축이 단면에 수직이 되도록 그림처럼 유속벡터의 좌표축 (x,y) 을 반시계 방향으로 회전 (X', Y') 하여 유속 벡터를 변환하였다.

수송량 계산은 해류계에서 측정한 유속자료와 SSHA로부터 산출한 표층 지형류 유속편차 자료를 이용하였다. 표층 지형류는 그 하부 유속구조를 알 수 없기 때문에 수송량 절대값 (평균 수송량) 계산에는 해류계 유속을 이용하였다. Fig. 2-18과 같이 해류계 위치의 수심과 각 정점 마다의 거리를 통해 사각형 형태의 단면을 구성하고 사각형에 접한 해류계의 평균유속으로부터 평균 수송량을 계산하였다. 유속관측 시기가 해협 북부와 남부가 동일하지 않아서 유속관측 자료로는 해협 단면 전체를 통과하는 수송량 변동을 파악하는데 한계가 있다. 따라서 표층 지형류가 드레이크 해협의 해류를 나타내며, 그 변동은 순압성 특징을 보임을 확인하였으므로, 표층 유속편차로부터 수송량 변동을 계산하였다.

3.3. 드레이크 해협의 해수 수송량

3.3.1. 평균 수송량

Fig. 3-2 는 단면 C를 가로지르는 수층별 해류계 관측자료의 평균 유속으로부터 수직 적분한 총 수송량으로 남쪽에서 북쪽으로 수송량을 누적하여 그린 그림이다. 해협 남부 (Leg-1: 2006/01~2008/04)과 해협 북부 (Leg-2: 2008/04~2009/03)의 해류관측 시기는 다르나, 평균흐름은 시기에 크게 변하지 않을 것이기 때문에, 해협 북부와 남부를 연결하여 평균수송량을 계산하였다. 표층에는 해류계를 설치하지 않았으므로, 표층 자료는 수심 500 m 층의 유속을 사용하였다. 제일 깊은 수심에 있는 해류계는 해저면으로부터 약 500~1500 m 높이에 설치 (Fig. 2-18)하였으므로, 해저면의 유속자료는 얻을 수 없었지만, 제일 깊은 수심의 해류계 유속이 해저면까지 연장된다는 가정 (검은색 실선)하여 계산하면 평균 수송량은 약 123 Sv 정도이며, 해저면 유속을 0 (zero)으로 가정 (파란색 실선)하고 계산한 수송량은 약 115 Sv 정도로 저층 유속의 수직구조에 따라 8 Sv 차이가 발생하였다. 2006년 해류계를 설치한 단면 C에서 LADCP (Lowered Acoustic Doppler Current Profiler) 해류계를 이용하여 유속관측을 한 프랑스 팀의 결과 (Renault *et al.*, 2011)를 보면 해저면에서부터 50 m 높이에서도 단면을 가로지르는 -20~40 cm/s 정도의 비교적 강한 유속이 관측된 점으로 보아 드레이크 해협 해저면에는 상층만큼의 강한 유속이 존재함을 알 수 있다. 따라서 드레이크 해협의 평균 수송량은 해저면 유속을 0으로 가정하여 계산한 115 Sv 보다 클 것이며, 123 Sv에 가까울 것으로 판단된다.

평균 수송량 123 Sv은 드레이크 해협 수송량 절대값으로 받아들여지는 134~137 Sv 보다 11~14 Sv 적은 유량이다. 이것은 표층 유속을 500 m 층의 유속으로 사용하여 평균 수송량을 계산하였기 때문에 발생한 차이로 생각한다. Lenn *et al.* (2007)은 SADCP (Shipboard ADCP) 해류계를 이용하여 반복관측한 정선자료를 통해 표층에서 수심 250 m까지의

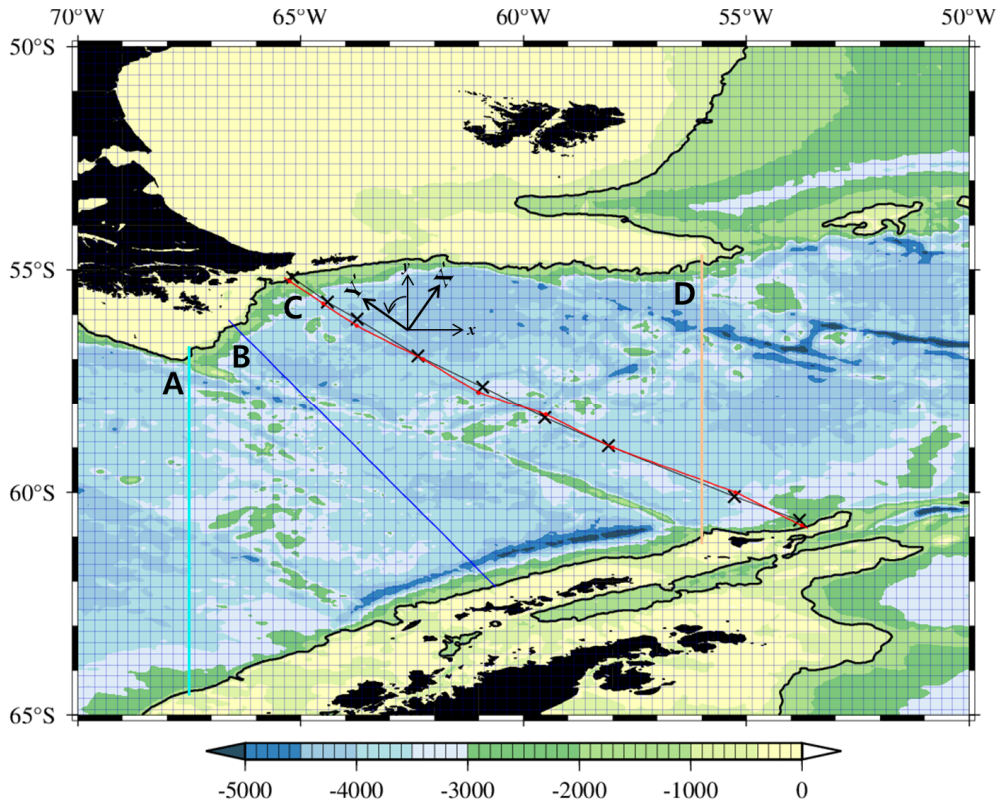


Fig 3-1. The four sections and grids to calculate the volume transport through Drake Passage. The C-section is the ground track of the satellite altimetry of TOPEX/Poseidon and Jason, and black crosses on C-section are the positions of current meter moorings. The volume transports of sections of B and C are computed from the rotated eastward component (X') of current. Filled color contour is bathymetry and thick black line is 1000m depth.

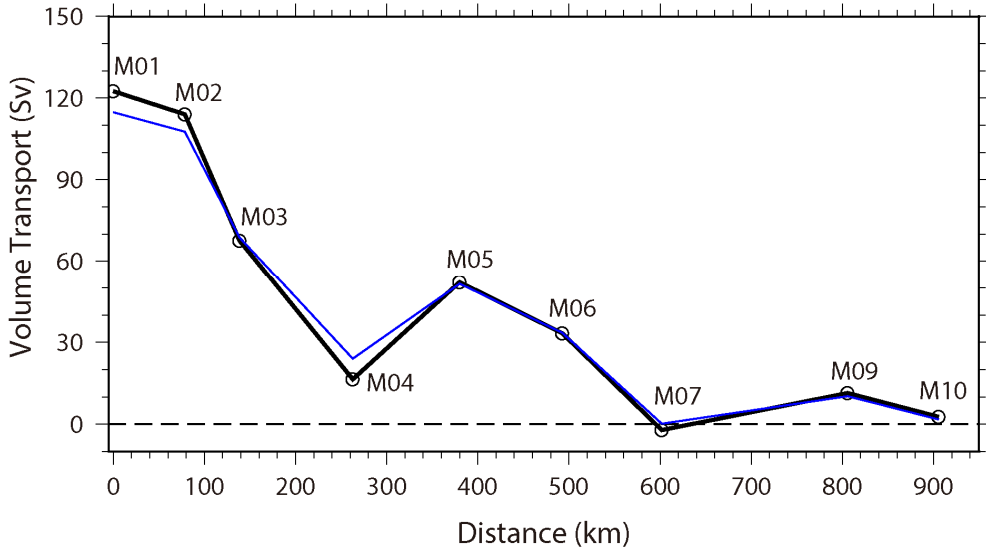


Fig. 3-2. Total mean volume transport across the Section-C in Drake Passage. The volume transport is computed from current meter data and accumulated from the southern station to the northern. Left side of graph is the north. Black line is used the velocity of the lower current meter at bottom, and blue is referenced to 0 cm/s at the bottom. Positive value means the volume transport of ACC is moving to eastward.

수송량을 27.8 ± 1 Sv 로 제시하였으며, Renault *et al.* (2011)은 2006년 LADCP 해류계를 이용하여 관측한 단면 C의 0~250 m 수심층의 수송량도 27 Sv 이었다. 단면 C의 표층에서 수심 500 m까지 유속관측 자료로부터 계산한 수송량은 37.6 Sv이고, 이 수심 층의 반인 수심 250 m까지의 수송량은 18.8 Sv이다. 위의 연구결과와 비교하면 단면 C에서는 표층에서 수심 250m 층까지 약 9 Sv 의 차이가 있으며, 수심 250~500m 사이에는 4.5 Sv 의 차이를 추정할 수 있으므로, 표층에서 수심 500m 까지 유속의 수직구조를 고려하면 약 13.5 Sv의 수송량 추가분이 있음을 추정할 수 있다. 그러므로 이 차이를 고려하면 단면 C의 평균 수송량은 약 136.5 Sv 정도이며, 해저면 마찰에 의한 저층유속의 감속을 고려한다면, 이보다 약간 적을 것으로 예상된다. 이 수송량은 드레이크 해협 수송량으로 통상적으로 받아들여지고 있는 134~137 Sv 의 범위에 해당한다.

단면 C에서의 평균 수송량은 해협 북부의 YB (Yagan Basin) 부근 (정점 M04)과 남부의 OB (Ona Basin) 부근 (정점 M07)에서 수송량이 감소하였고, PF (Polar Front)가 통과하는 정점 M05-06과 SAF (Subantarctic Front)가 통과하는 정점 M01-03 해역에서 수송량이 증가하였다. 수송량 증가는 PF 부근에서 약 50 Sv, SAF 부근에서 약 106 Sv으로 SAF 전선역 수송량이 PF 전선역 보다 약 2배 많았다. Cunningham *et al.* (2003)은 전역에 따라 SAF 해역은 53 Sv, PF 해역은 57.5 Sv 수송량이 통과한다고 제시하였다. 두 결과를 비교하면 PF 해역 수송량은 비슷하지만, SAF 해역은 2배 차이가 있다. Cunningham 이 분석에 이용한 단면은 C-단면의 동쪽으로 YB을 벗어난 위치이다. 따라서 해저 지형에 의해서 서향류가 형성된 정점 M04 해역의 유량이 등수심선을 따라 북쪽으로 이동하여 SAF 해역 (M01-03)으로 유입되면서 SAF 해역의 수송량이 급격히 증가한 것으로 판단된다.

3.3.2. 수송량 변동 산출

Fig. 3-1에서처럼 단면에 해당하는 각 격자에서 계산된 표층 지형류 유속편차와 각 격자 사이의 거리를 곱하여 표층 수송량 편차 (Surface Volume Transport Anomaly, SVTA; 이하 SVTA)를 계산하였다 (Fig. 3-3). 여기서 표층 수송량은 단위 수심 1 m 깊이의 수송량이다. 해협 단면 전체를 통과하는 수송량 절대 [평균]값이 제거된 편차이므로 Fig. 3-3에서 양의 값은 절대값 보다 증가를, 음의 값은 절대값 보다 감소를 뜻한다. SVTA에 실제 수심을 곱하면 전 수심 층에서 표층 유속과 동일하게 움직이는 순압성 모드를 가정한 수송량 변동 (Fig. 3-4)을 의미한다 (Barotropic mode Volume Transport Anomaly, BVTA). 여기서 SSHA로부터 계산한 표층 유속에는 순압성과 경압성 흐름을 포함하고 있으므로, SVTA와 BVTA에도 순압성 수송량 뿐만 아니라 경압성 성분도 포함되어 있다. SVTA와 BVTA가 실제 수송량 변동을 정확하게 나타낼 수는 없지만, 순압성과 경압성 흐름을 모두 포함하고 있으므로 드레이크 해협을 통과하는 해수 수송량 변동의 특성 및 경향성을 살펴볼 수 있다.

드레이크 해협으로 유입한 남극순환류가 복잡한 해저지형 (Fig. 1-4)을 갖는 드레이크 해협을 통과하면서 어떠한 변화를 보이는지 살펴보기 위하여 서쪽 입구에서 동쪽 출구까지 4개 단면을 설정하였다. 유입하는 남극순환류가 해저지형을 통과하기 전인 단면 A (서쪽 입구), SFZ (Shackleton Fracture Zone)을 약간 가로지르지만 PAR (Phoenix Antarctic Ridge)과 SFZ 사이에 위치한 단면 B, 그리고 YB (Yagan Basin), OB (Ona Basin), WSR (West Scotia Ridge)를 가로지르는 단면 C (해류계 관측정점)와 단면 D (동쪽 출구)으로 나누었다. SFZ을 기준으로 단면 A와 B는 SFZ 서쪽에 위치하여 남극순환류가 SFZ를 통과하기

이전, 단면 C와 D는 SFZ 동쪽에 위치하여 통과이후로 구분하였다.

Fig. 3-3 은 1992년 10월부터 2013년 7월까지 4개 단면에서 표층 지형류 편차로부터 계산한 7일 간격의 표층 수송량 편차 (SVTA)를 나타낸 시계열 그림이다. 단면 전체의 길이는 녹색 실선으로 표시하였고 거리 (km)를 그래프 오른쪽에 나타내었다. 단면 전체 거리가 줄어들었다는 것은 수송량을 계산하는 자료 개수(격자 수)가 감소함을 뜻한다. 4개 단면에서 공통적으로 남반구 겨울철 (8~9월)에 감소하였으며, 특히 1995년 8~9월에는 자료 감소 기간이 약 2개월가량으로 관측기간 중 가장 길었으며 자료 공백도 가장 많았다. Fig. 3-5는 1994~1996년 8월에 인공위성 (Special Sensor Microwave Imager (SSMI))에서 관측한 남극대륙 주변 해역에 해빙(sea ice) 밀도를 보여주는 그림이다. 특히 1995년 8월에는 드레이크 해협에서 해빙이 차지하는 면적이 가장 넓었고 해빙의 가장자리가 해협 중앙부까지 확장하였으며, 해협 남부에는 70% 이상의 밀도를 갖는 해빙 분포가 표층을 덮고 있음을 알 수 있다. 해빙의 영향으로 이 시기에 고도계 위성에서 해면 고도를 측정할 수 없었기 때문에 수송량 계산에 필요한 자료 개수가 전체 관측기간 중 가장 적었고, 공백 일수도 가장 많았다. 그러나 해빙에 의한 자료 감소는 매해 겨울철마다 나타나지는 않았으며, 해협 내에서도 지역에 따라 차이가 있지만 관측기간 중에는 1~4차례 발생하였으나, 전체 관측기간을 보면 일부에 해당하기 때문에 수송량의 장기적인 변화를 살펴보면 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 해빙에 의해 해협 남부의 해면고도를 측정할 수 없었던 겨울철 수송량은 Fig. 3-3에서처럼 그 부분 (빨간색 실선)을 제외시켰고, 단면 전체의 자료가 있는 부분만 (검은색 실선) 선택하였으며, 자료가 비어있는 부분을 선형 보간 (linear interpolation)하여 수송량을 추정하였다.

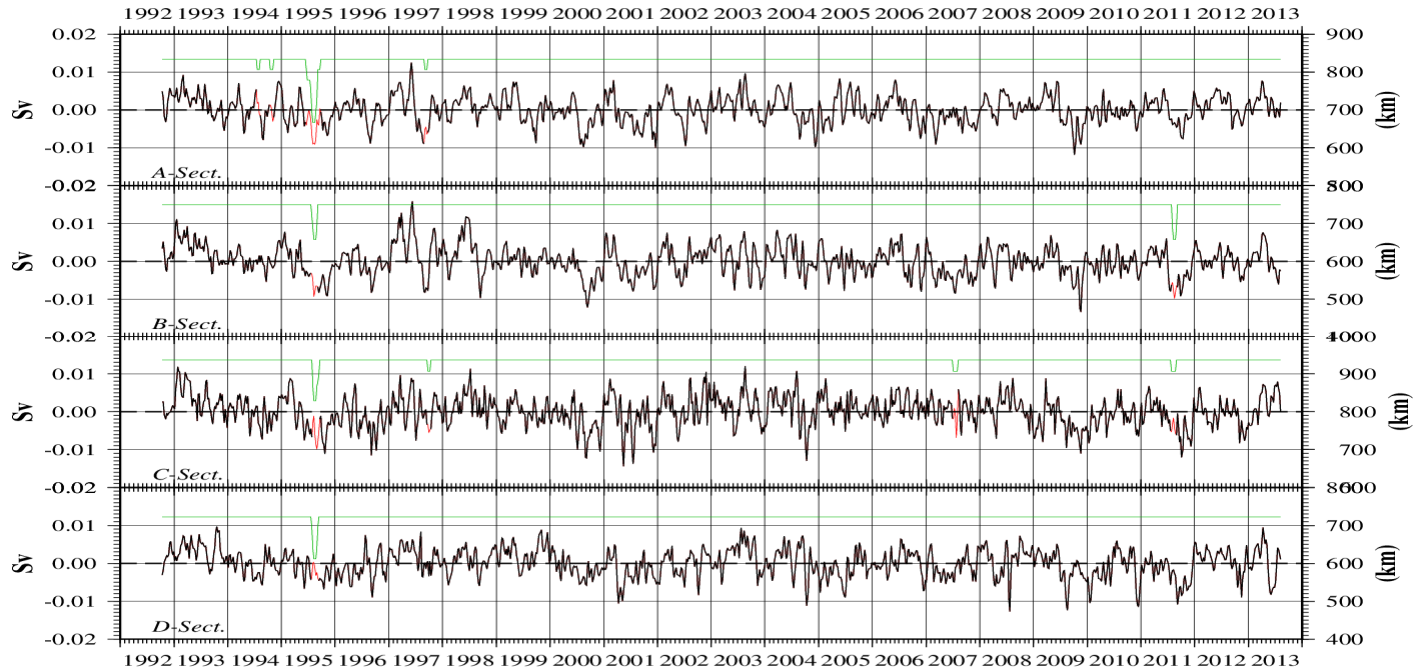


Fig. 3-3. Weekly time series of the surface volume transport anomaly (SVTA) from SSHA through 4 sections from Oct., 1992 to Jul., 2013. The SVTA is integrated about the unit depth (1 meter). The green line is the total length of sections in Drake Passage. The reduction of section length (green) means the extension of sea ice in the southern Drake Passage during austral winter season. The red is SVTA computed from SSHA measured with the satellite altimeter, and the black is SVTA expect if the missing data,

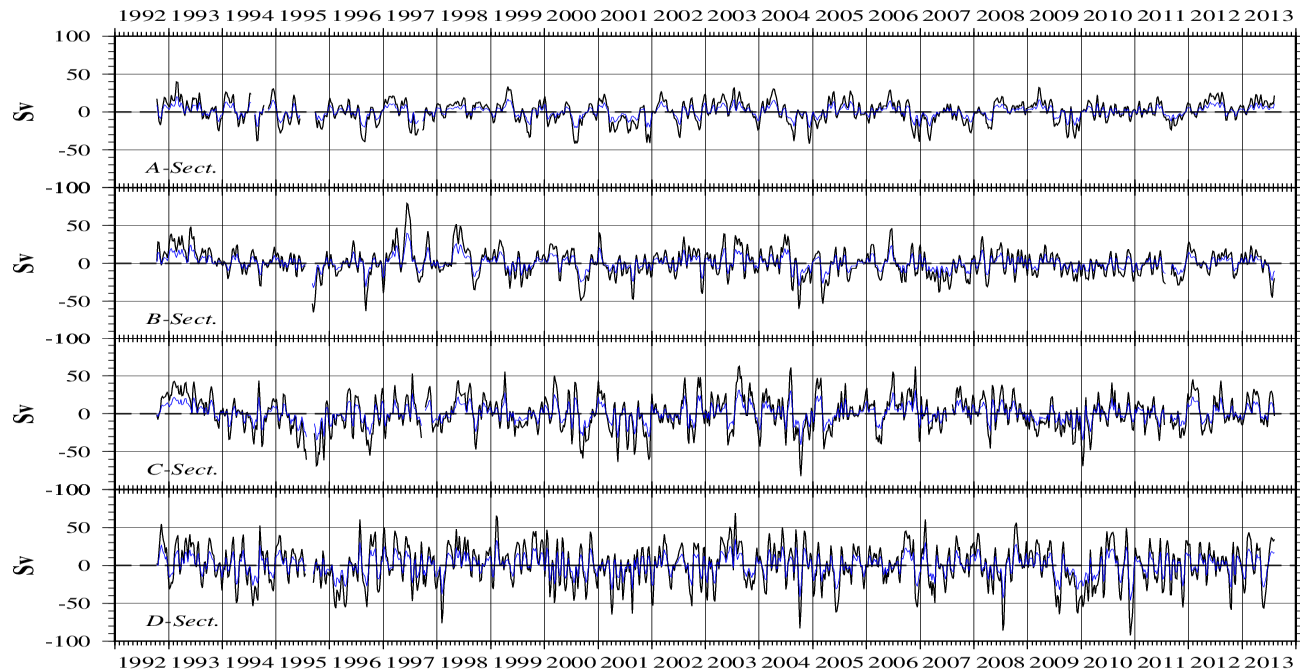
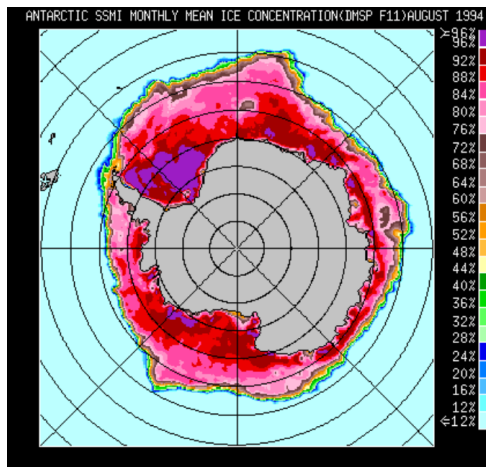
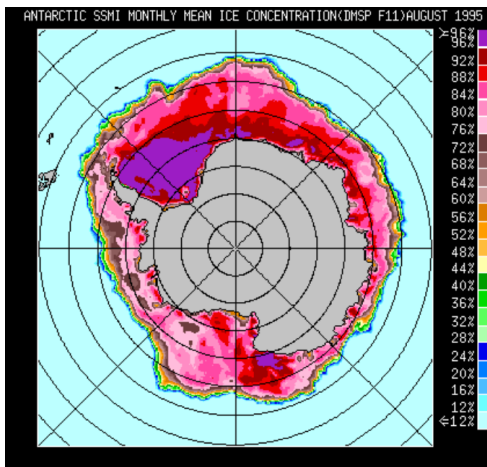


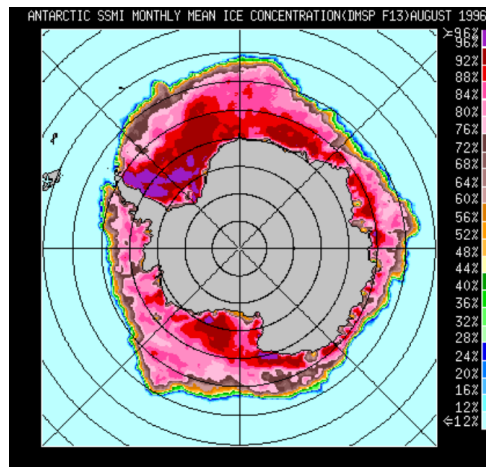
Fig. 3-4. Weekly time series of the barotropic mode volume transport anomaly (black) through 4 sections from Oct., 1992 to Jul., 2013. The blue is the volume transport anomaly integrated the linear reduced surface velocity anomaly referenced to 0 cm/s at the bottom.



(A)



(B)



(C)

Fig. 3-5. Monthly sea ice concentration from the satellite of SSMI/SSMIS (Special Sensor Microwave Imager) in the southern hemisphere on August, (A) 1994, (B) 1995, and (C) 1996.

3.3.3. 수송량 변동 특성

Fig. 3-3과 같이 4개 단면을 통과하는 7일 간격의 표층 수송량은 단주기 (3개월 미만) 변동과 장주기 (1~5년) 변동이 결합하여 나타났으며, SFZ 서쪽 (단면 A, B)보다 동쪽 (단면 C, D)에서 단주기 진폭이 증가하였다. 변동 폭 (표준편차 1배수)은 SFZ 서쪽 단면 A에서 약 ± 0.0036 Sv 을 보였고, SFZ 동쪽 단면 D에서는 ± 0.0041 Sv 을 보여 해협 동쪽으로 갈수록 변동 폭이 증가함을 알 수 있었다. 4개 단면의 평균 수심 (약 4000m)을 고려하면 순압성 변동 폭이 약 14.4~16.4 Sv 정도임을 의미한다.

Fig. 3-4는 각 격자마다의 실제 수심을 적용하여 계산한 수송량 변동 (BVTA)이다. 검은색 실선은 순압성 수직구조일 때를 가정한 것이며, 파란색 실선은 해저면 유속을 0 (zero)으로 설정하고 표층유속이 해저면까지 선형으로 감소하는 유속 수직구조를 가정했을 때 수송량 변동으로 검은색 실선의 순압성 수송량 변동량의 절반이다. 표층 이하의 유속 수직구조 변화를 알지 못하지만 실제 수송량 변동은 검은색 실선과 파란색 실선 사이에 위치해 있을 것이다. 실제 수심이 적용된 수송량은 유입하는 남극순환류가 SFZ를 통과하기 전인 해협 서쪽에서 비교적 작은 변동 폭을 보이지만, SFZ를 통과한 이후 해협 동쪽으로 이동할수록 단주기 성분이 발달하여 변동 폭이 증가하였다 (Fig. 3-6, 스펙트럼 분석에서도 같은 결과를 보였다). 이와 같은 해협 서쪽에서 나타나지 않았던 단주기 성분의 발달은 남극순환류가 드레이크 해협의 복잡한 해저지형을 만나면서 생성되는 에디 (eddy)와 사행 (meandering)의 영향으로 판단된다 (García *et al.*, 2002). 실제 수심을 고려한 순압성 변동 폭은 해협 서쪽 입구에서 14.2 Sv 정도였으나, 동쪽 출구에서는 25.5 Sv 정도로 증가하였다. 수송량

변동의 에너지를 Fig. 3-6과 같이 주기[주파수] 영역에서 나열하였다. 왼쪽 그림은 표층 수송량 변동, 오른쪽은 실제 수심을 고려한 순압성 수송량 변동의 스펙트럼이다. 해협 서쪽에서는 1년 주기의 에너지가 가장 강하였고, 5년 주기 에너지가 이보다 약하였는데, 동쪽으로 이동할수록 1년 주기 에너지가 약화되는 반면에 5년 주기 에너지는 강화되었다. 이와 같이 스펙트럼 결과에서도 SFZ 이전 (단면 A, B)과 이후 (단면 C, D)가 명확히 구분되었다.

4개 단면 수송량의 단주기 성분을 제거 (low-pass filter)하기 위하여 Fig. 3-7과 같이 3개월 이동 평균한 표층 수송량 변동을 나타내었고, 각 단면을 Fig. 3-1의 단면 색으로 통일하여 구분하였다. 2005~2008년을 제외하면 4개의 변동이 유사한 변화를 보였다. 1년 주기와 5년 정도의 장주기 수송량 변동이 섞여서 나타났다. 대략 2003년을 기준으로 이전에는 장주기 성분에서 변동 폭이 큰 변화를 보이지만, 이후에는 장주기 성분의 변동 폭이 줄어들었다. 3개월 이동 평균한 변동에서는 약 ± 0.005 Sv 정도의 변동 폭을 나타내었다. 수심을 고려하면 순압성 변동은 약 20 Sv 정도이다.

Fig 3-8과 3-9 는 각각 표층 수송량 변동의 전체 월평균 (monthly climatology)과 연평균 (annual mean)을 나타낸 그림이다. 남반구 겨울에서 봄철까지 (7~12월) 수송량 감소, 여름에서 가을까지 (1~6월)는 수송량이 증가하는 계절변화를 보였으며, 단면 D에서는 뚜렷하지 않았다. 계절변화에 의한 수송량은 최대 ± 0.002 Sv 의 변동 폭을 나타내었으며, 수심을 고려하면 순압성 변동은 약 7 Sv 정도이다. 연평균 수송량 변동은 비교적 뚜렷한 연변동성을 보여주고 있다. 1993, 1997-1998, 2002-2004년에는 양의 수송량 편차를, 1995-1996, 2000-2001, 2007, 2009-2011년에는 음의 수송량 편차를 보이며, 약 4~6년의 연변동을 나타

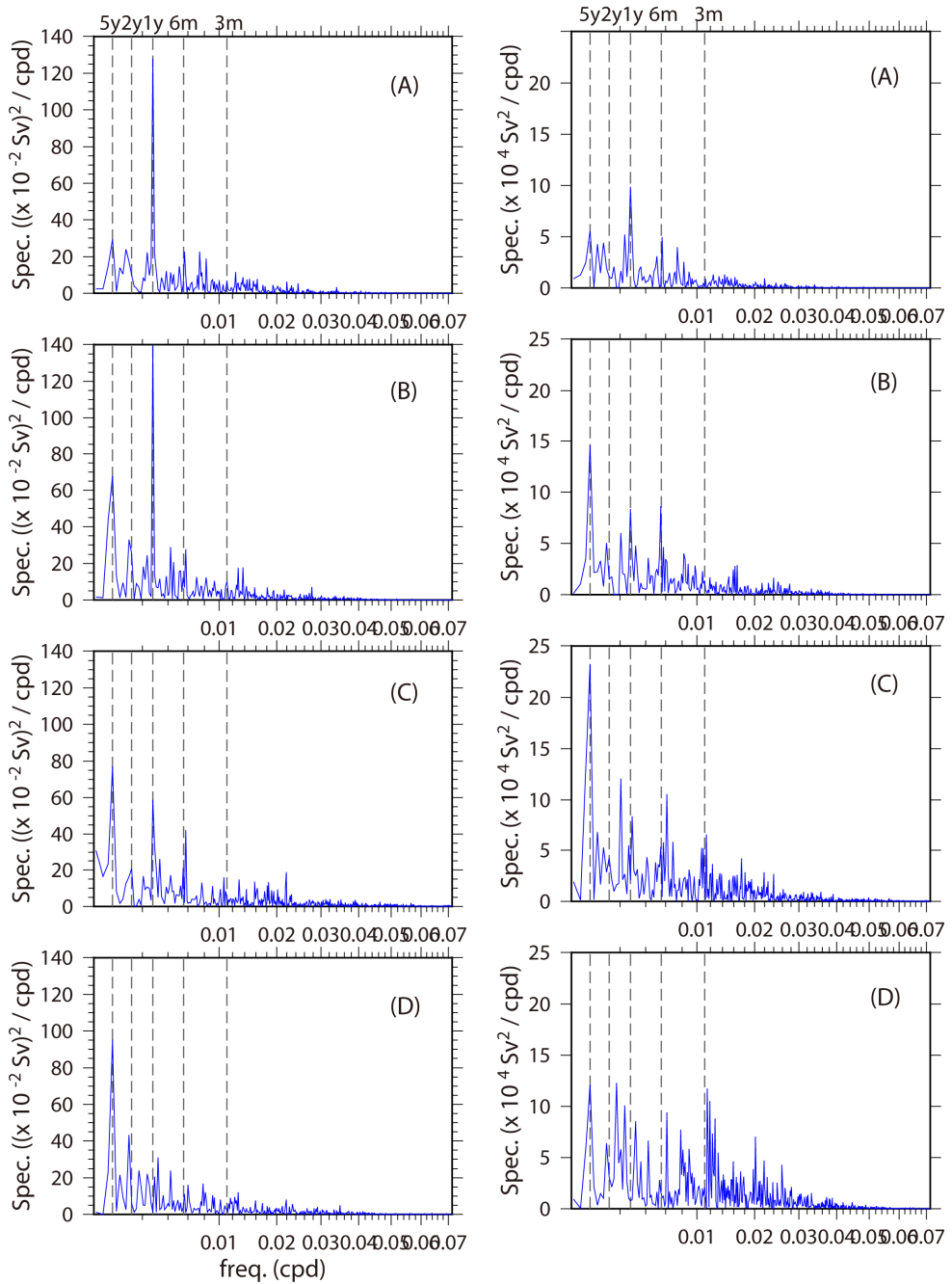


Fig. 3-6. Spectra of the surface volume transport anomaly (left) and the barotropic mode volume transport anomaly (right) through 4 sections.

내었다. 이는 엘니뇨/라니냐가 나타나는 시기와 비슷하여 이 영향이 수송량 변동에 영향을 미칠 가능성이 있는 것으로 판단된다. 연변화에 의한 수송량은 최대 ± 0.003 Sv 의 변동 폭을 나타내었으며, 수심을 고려하면 순압성 변동은 약 10.5 Sv 정도이며 연변화가 계절변화보다 큰 변동을 보이는 것으로 나타났다. 연평균 변동에서도 2003년 정도를 기준하여 이전에는 장주기 성분에서 뚜렷한 변동을 보였으나, 이후에는 그 변동 폭이 줄었다. 4개 단면을 통과하는 표층 수송량은 연간 $0.015 \sim 0.07 \times 10^{-2}$ Sv 정도로 모두 감소하는 경향성이 나타났으며, 4개 단면 평균 감소율은 연간 0.043×10^{-2} Sv 정도이다. 수송량 감소 추세가 해협 의 표층에서만 일어나는 현상인지, 해협 내부 전체에서 발생하는지 파악하기 어렵고, 남극순환류의 장기간 경향성에 대해 보고된 바가 거의 없기 때문에, 현재로서는 판단할 수 있는 증거가 부족하지만, 장주기 변화가 감소 추세에 있는 일부분의 자료만을 분석하기 때문으로 판단된다.

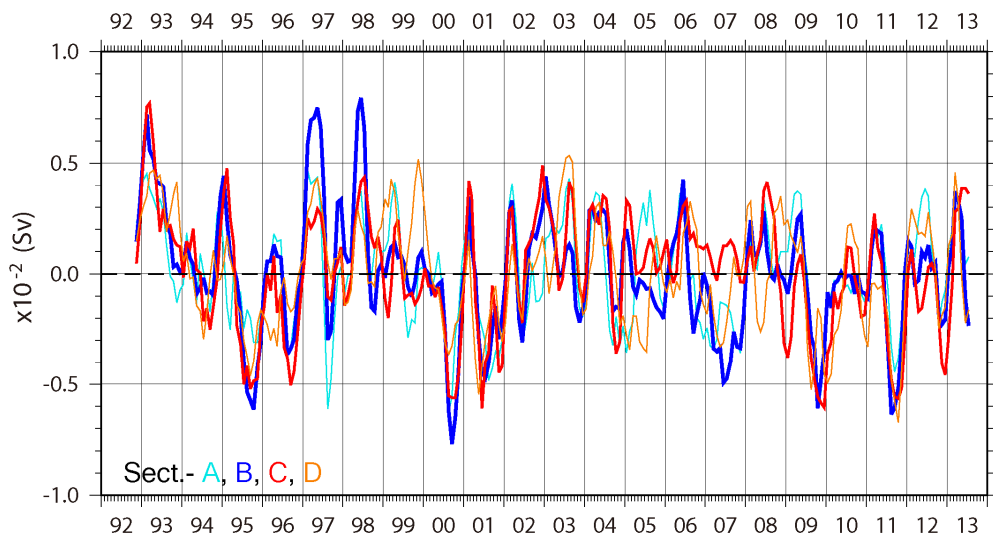


Fig. 3-7. The time variation of the filtered SVTA smoothed with 3-month moving average through the four sections from Oct., 1992 to Jul., 2013.

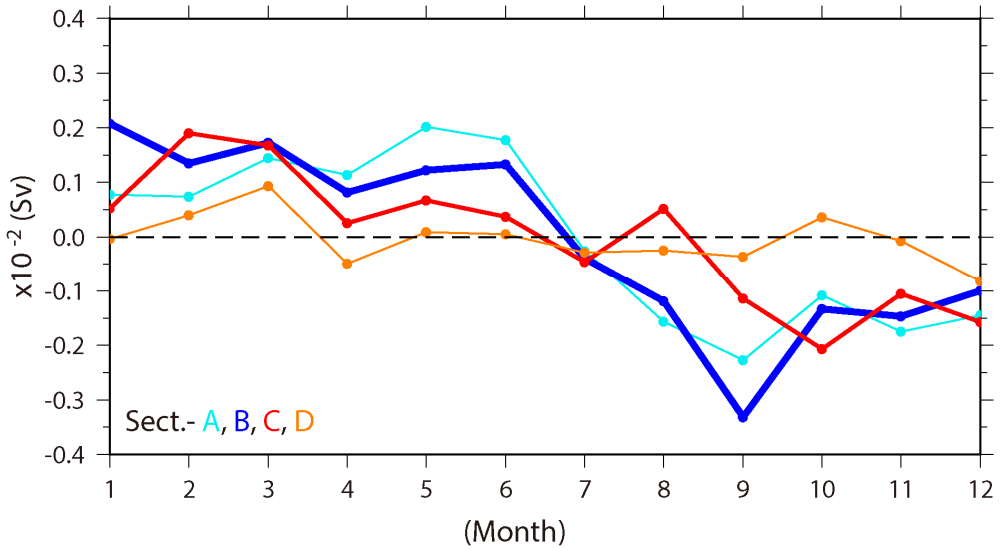


Fig. 3-8. The monthly mean SVTA through the four sections from 1993 to 2012.

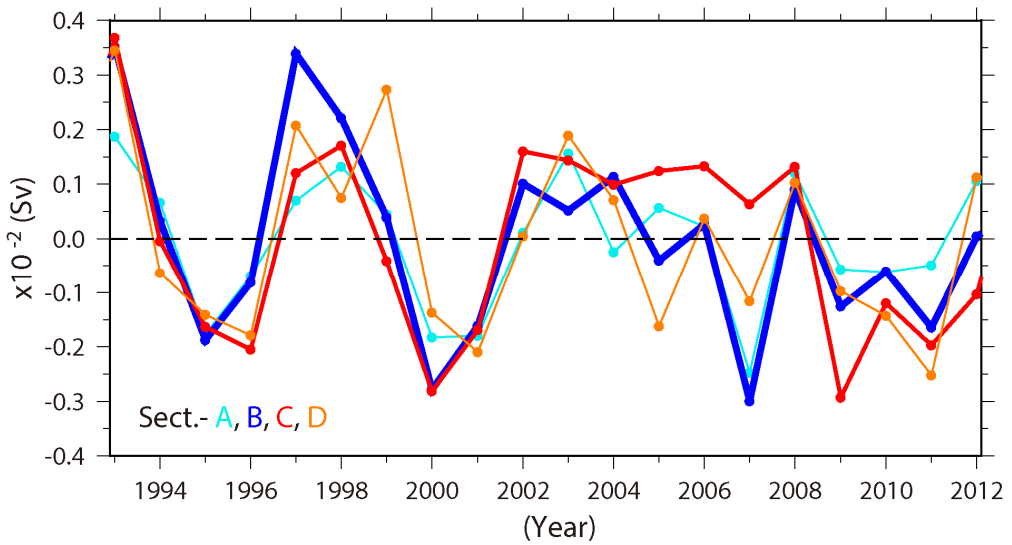


Fig. 3-9. The annual mean of SVTA through the four sections from 1993 to 2012.

3.4. 해수 수송량 변동과 기후지수와의 상관성

남극해 해양순환과 해수의 물성 분포 및 해빙 분포의 장기 변화에 영향을 주는 대규모 해양/기상 현상으로 엘리뇨-남방진동 (El Niño and Southern Oscillation, ENSO; 이하 ENSO)과 남극진동 (Antarctic Oscillation, AAO or Southern Annular Mode, SAM; 이하 SAM)을 들 수 있다 (Turner, 2004; Yuan, 2004; Sallée *et al.*, 2008). ENSO는 태평양 적도해역의 현상이지만 이는 중위도 뿐만 아니라 극지역의 기상패턴에도 영향을 미칠 것임이 연구 결과들은 보여주고 있다. SAM은 그 정의 자체가 남반구의 기압 분포의 상태이기 때문에 바람과 기압의 지배를 받는 해수면의 상태는 바로 반응을 보일 것이다. 이러한 현상은 드레이크 해협을 통과하는 남극순환류의 수송량에도 변화를 미칠 것이기 때문에 이들 기후지수의 장기변동성이 드레이크 해협 표층수송량 변동성과 어떠한 상관관계를 보이고 있는지 알아보았다.

3.4.1. 기후지수

엘리뇨-남방진동 (ENSO)

ENSO는 태평양 적도해역에서 부정기적으로 발생하는 해양과 대기의 대규모 현상으로 해양-대기간의 기후 현상이다. ENSO 정도를 나타내는 지수로 MEI (Multivariate ENSO Index)를 사용하였다 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>). MEI는 열대 태평양해역의 해면 기압, 바람, 해수면 온도, 구름 정도 등을 종합적으로 분석하여 지수화한 것이다 (Wolter and Timlin, 1998). Fig. 3-10에 1950년부터 2013년까지 자료 전체 기간의 월별 MEI 지수와 드레이크 해협의 수송량 분석 기

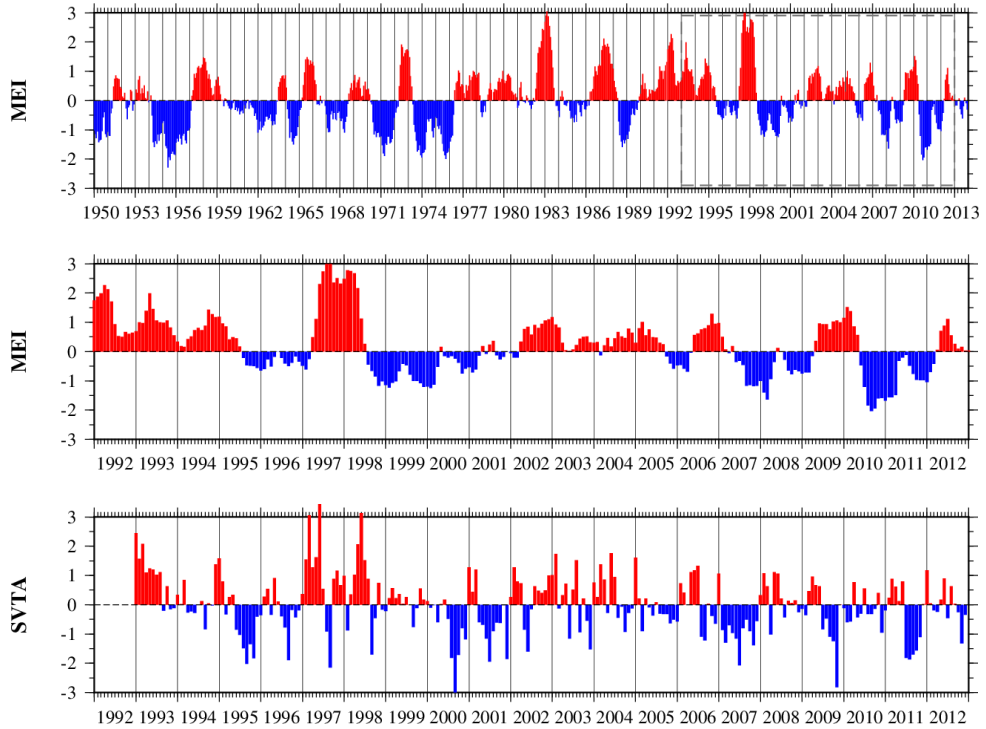


Fig. 3-10. Monthly time series of the Multivariate ENSO Index (MEI) and the normalized Surface Volume Transport variable Index (SVTI) across Section-B in Drake Passage.

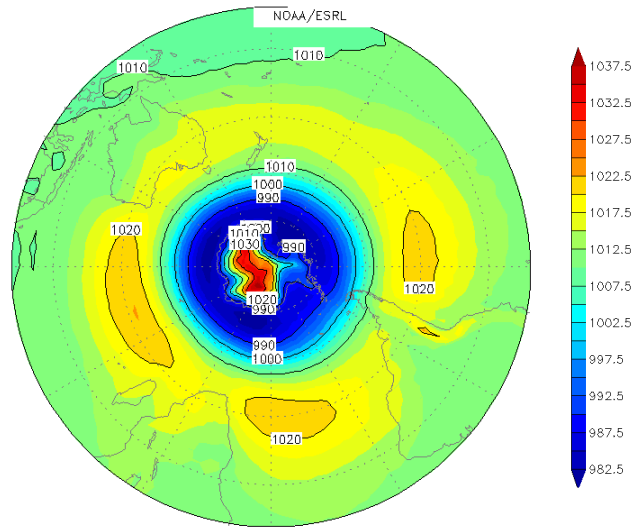
간 동안의 시계열 자료를 나타내었다. 양의 값 (빨간색)이 클수록 강한 엘리뇨를 나타내며 음의 값 (파란색)이 클수록 강한 라니냐 상태를 의미한다. 최근의 엘리뇨는 1991-1992, 1994-1995, 1997-1998, 2002-2003, 2004-2005, 2006-2007, 2009-2010년에 발생하였고, 라니냐는 1995-1996, 1998-1999, 2000-2001, 2005-2006, 2007-2008, 2008-2009, 2010-2011, 2011-2012년에 발생하였다 (밑줄은 강한 시기를 의미).

남극진동 (SAM)

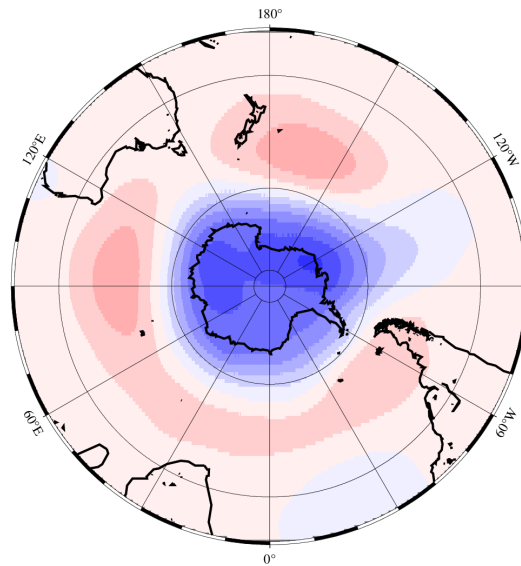
남반구의 평균 해면 기압분포는 남극대륙과 30°S 위도대에 고기압대가 분포하고 그 사이에 저기압대 (파란색)가 고리모양으로 분포한다 (Fig. 3-11 (A)). 위도대별 기압차에 의해 바람의 강약이 조절되므로 기압대 강도의 표현을 위하여 두 기압계 간의 위도에 따른 기압 차이를 이용하여 SAM 지수로 제시되었다. Fig. 3-11 (B)는 850 hPa 지오폠펜설 고도의 편차 (geopotential height anomaly)를 EOF (Empirical Orthogonal Function) 분석하여 제 1모드의 공간분포를 나타낸 것이며, 지오폠펜설 고도 변동에 약 40%를 표현한다. 이는 Thompson and Wallace (2000)의 방법으로 1992년부터 2012년까지 20°S~90°S 위도대의 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) reanalysis 2 자료를 사용하였다. Fig. 3-12는 Fig. 3-11 (B) 공간구조의 강약을 시계열로 나타낸 것이다 (SAM 지수). 양의 SAM 지수는 평균 기압차보다 커지는 것을 의미하며 이는 편서풍이 평균보다 강해짐을 뜻한다.

수송량 지수 (SVTI)

Fig. 3-10과 같이 드레이크 해협을 통과하는 남극순환류 수송량변동을 지수화 하기위해 1993년부터 2012년까지의 표층수송량변동(SVTA)



(A)



(B)

Fig. 3-11. The distribution of (A) mean sea level pressure (hPa) from NOAA/ESRL and (B) Southern Annual Mode (SAM) spatial pattern as calculated from 850 hPa geopotential height anomalies poleward of 20°S of the NCEP reanalysis-2 from 1992 to 2012.

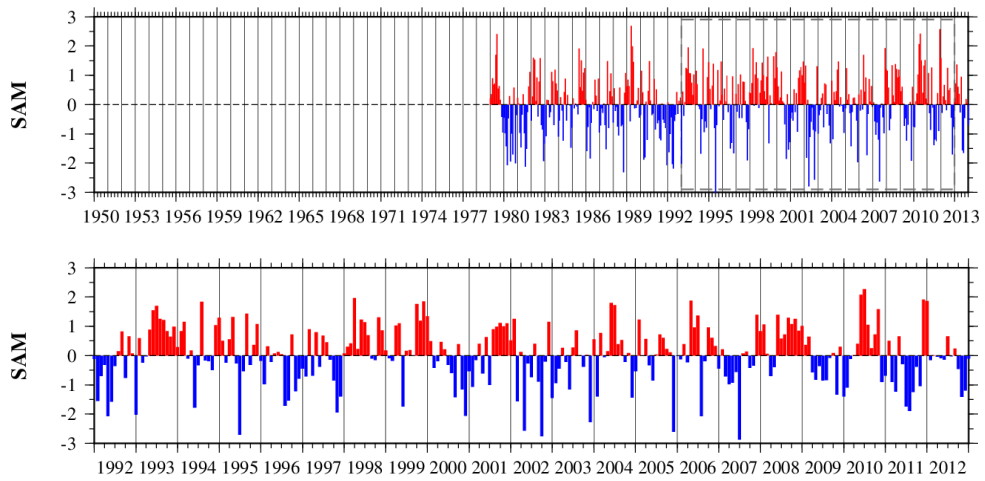


Fig. 3-12. Monthly time series of the Southern Annular Mode (SAM) index.

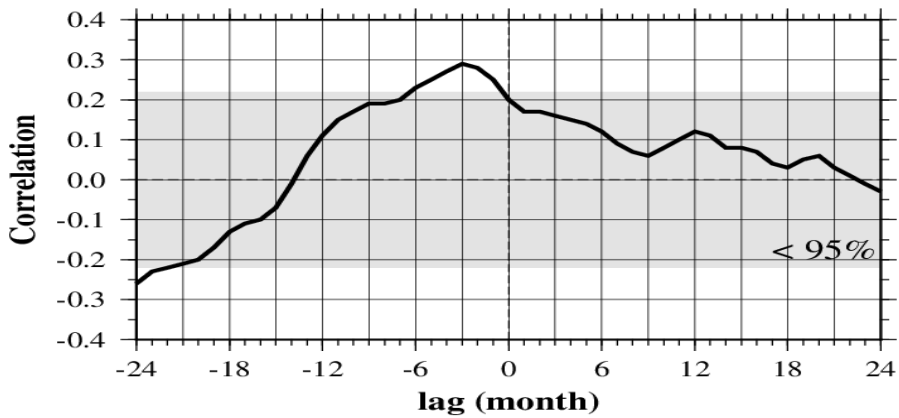


Fig. 3-13. Lag-correlation curves between the SVTI and the MEI from 1993 to 2012. Negative lags are for the volume transport in Drake Passage leading ENSO. Box of < 95% significance are shaded by grey.

자료를 이용하였다. 7일 간격의 SVTA를 월평균하고 각 월마다 전체 월 평균 (monthly climatology)을 제거하였으며, 기후지수와 비교하기 위하여 표준화 (normalization)시킨 수송량 지수를 생성하였다 (Surface Volume Transport variable Index, SVTI). 드레이크 해협 4개의 단면 중 해저지형의 영향을 덜 받으면서 해협의 수송량 변동을 잘 나타내는 단면 B로 정하였다.

3.4.2. 수송량과 ENSO 지수의 상관성

Fig. 3-13는 SVTI와 MEI 지수의 상관관계를 나타낸 것이다. 여기서 상관성 분석을 위해 수송량과 기후지수의 장기 추세 (linear detrend)를 제거하였다. SVTI와 MEI 사이에서 약 3개월의 time lag를 갖는 극값이 뚜렷하게 나타났다. Bretherton *et al.* (1999)에서 제시된 EDOF (Effective number of degrees of freedom)을 이용하여 자유도를 계산하고, t-test 검정을 통해 유의수준을 계산하였다. 유의수준을 고려하면 해수수송량 변동과 ENSO 변동 사이에 유의할만한 양의 상관성이 있는 것으로 판단된다. 음의 time-lag에서의 높은 상관성은 수송량이 ENSO 보다 먼저 일어남을 의미한다. 연평균 수송량 변동은 장주기의 진폭이 2003년 이전보다 뚜렷하지 않음을 확인하였다(Fig. 3-9). 수송량의 장주기 변동에 영향을 미치는 요인은 ENSO 같은 대규모 대기 운동 (혹은 어떠한 대규모 해양 변동)이라 생각하고 Fig. 3-14와 같이 2003년을 기준하여 그 이전 10년, 이후 10년의 상관관계를 나타내었다. 2003년 이전에도 -3개월 lag에 상관계수 극값이 나타났으며 +3개월 lag에도 비슷한 극값을 보였다. 2003년 이후의 상관관계는 극값이 -9개월 lag에서 나타났으나 크기는 2003년 이전과 비슷하다. Fig. 3-15는 수송량과 표층수온

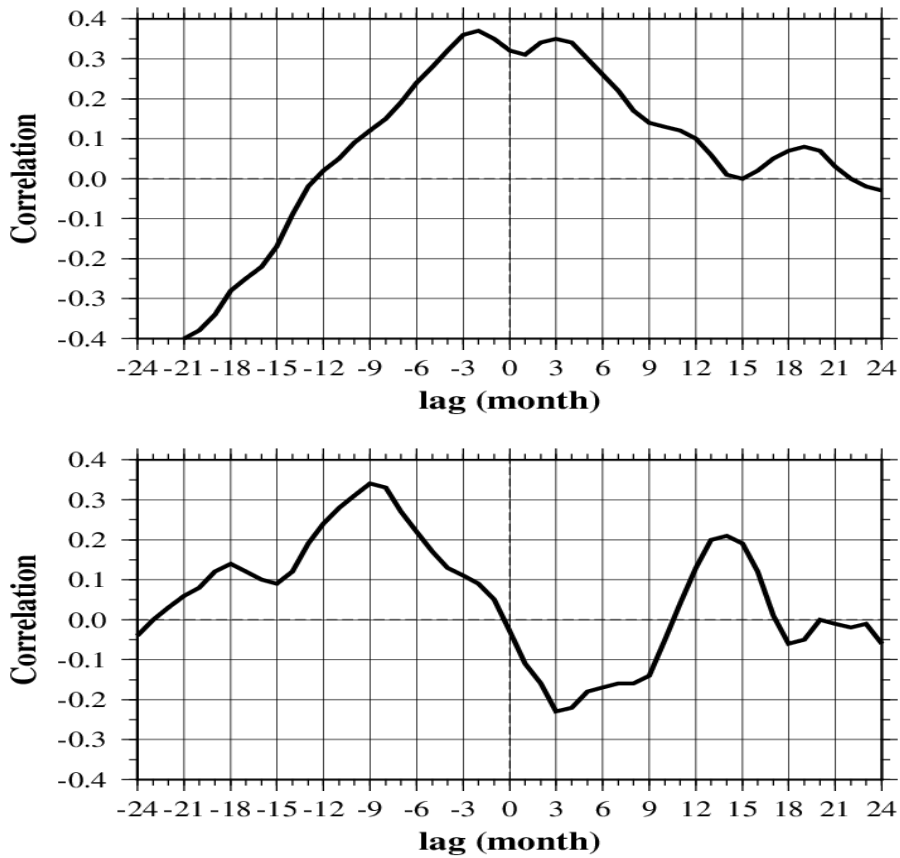


Fig. 3-14. Lag-correlation curves between the SVTI and the MEI (top) from January, 1993 to December, 2002 and (bottom) from January, 2003 to December, 2012. Negative lags are for the volume transport in Drake Passage leading ENSO.

편차 (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA)와 상관관계를 계산한 결과이다. lag가 없을 때와 극값을 보였던 -3개월 lag 때로 나누어 계산하였다. lag가 없을 때는 드레이크 해협에서 상관성이 높았고, -3개월 lag 일 때는 동태평양 적도주변 해역에서 양의 극값을 보였으며, 서태평양에는 음의 상관관계가 나타났다. 이 상관관계는 현재 드레이크 해협 수송량이 증가하면 3개월 후 동태평양 적도해역의 표층수온이 증가함을 의미한다. 상관계수 수평분포는 엘니뇨가 발생했을 때 적도해역에 나타나는 SSTA 분포 형태와 유사하며, ENSO와의 상관성이 있음을 시사한다. lag에 따른 상관계수 분포는 마치 드레이크 해협의 시그널이 남아메리카 연안을 따라 북상하여 동태평양 적도해역으로 전달되는 형태로 보인다. Fig. 3-16은 2003년 이전의 SVTI와 SSTA와의 상관관계를 나타낸 그림이다. Fig. 3-14 (A)의 상관계수 분포와 유사하며, 더 높은 상관관계를 나타내었다. SVTI와 MEI, SVTI와 SSTA와의 상관관계에서 수송량과 ENSO는 상관성이 있는 것으로 판단된다. 상관성 극값의 time-lag 변화는 어떠한 시기를 기준하여 수송량 변동주기와 ENSO의 변동주기가 변경되기 때문에 나타나는 결과로 보인다.

각 지수의 주기성을 알아보기 위하여 SVTI과 MEI 및 SAM 지수의 wavelet 결과를 Fig. 3-17에 나타내었다. 시간 (가로축)에 따라 주기 (세로축)와 그 에너지(색깔)를 표시한 그림이다. 검은색 실선은 95% 유효수준을 나타내며, 호 모양의 선 (cone of influence, COI)은 자료 길이에 따라 분석 가능한 주기를 나타내며 호 안의 결과를 분석한다 (Torrence and Compo, 1998; Grinsted *et al.*, 2004). 3개 지수에서 공통으로 대략 2003년 정도를 기준하여 강한 에너지가 나타나는 주기 영역이 달라졌다. 이것은 SVTI와 MEI의 상관관계 결과와 일치한다. 2003년 이전 수송량은 4년 이상의 장주기와 1년 주기, 이보다 짧은 주기의 변동이 있었고,

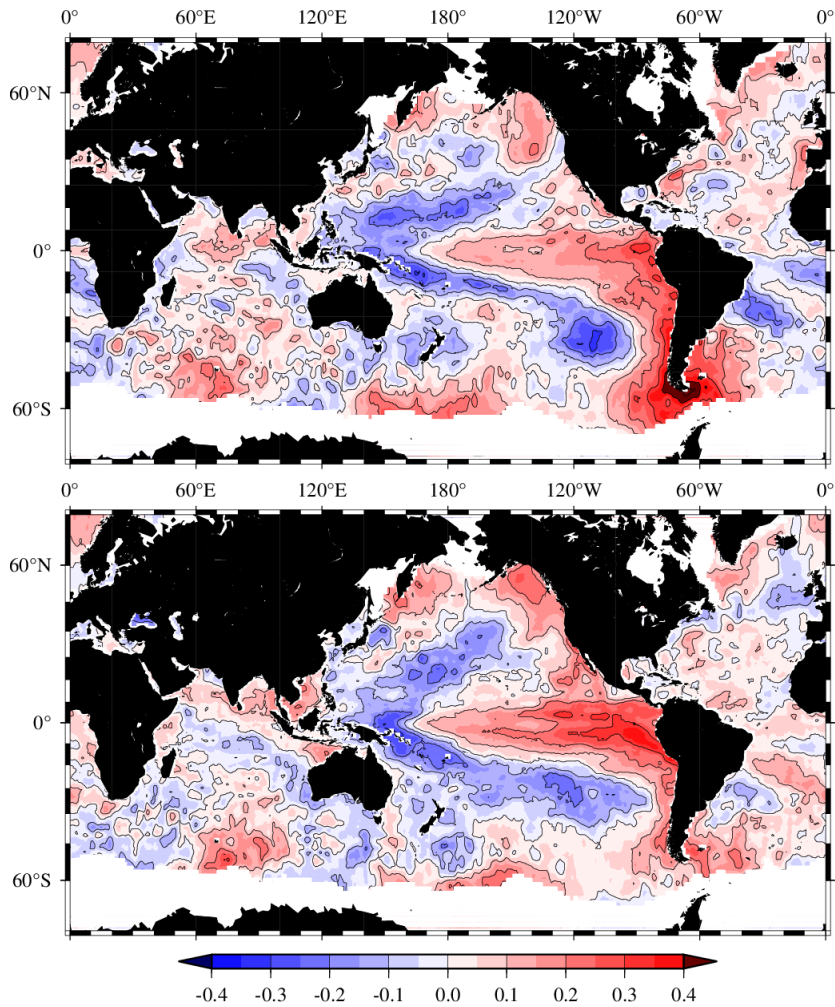


Fig. 3-15. The (top) 0 month and (bottom) -3 month lag correlation map between the SVTI and the sea surface temperature anomaly (NOAA OI.v2 monthly SST) from January, 1993 to December, 2012.

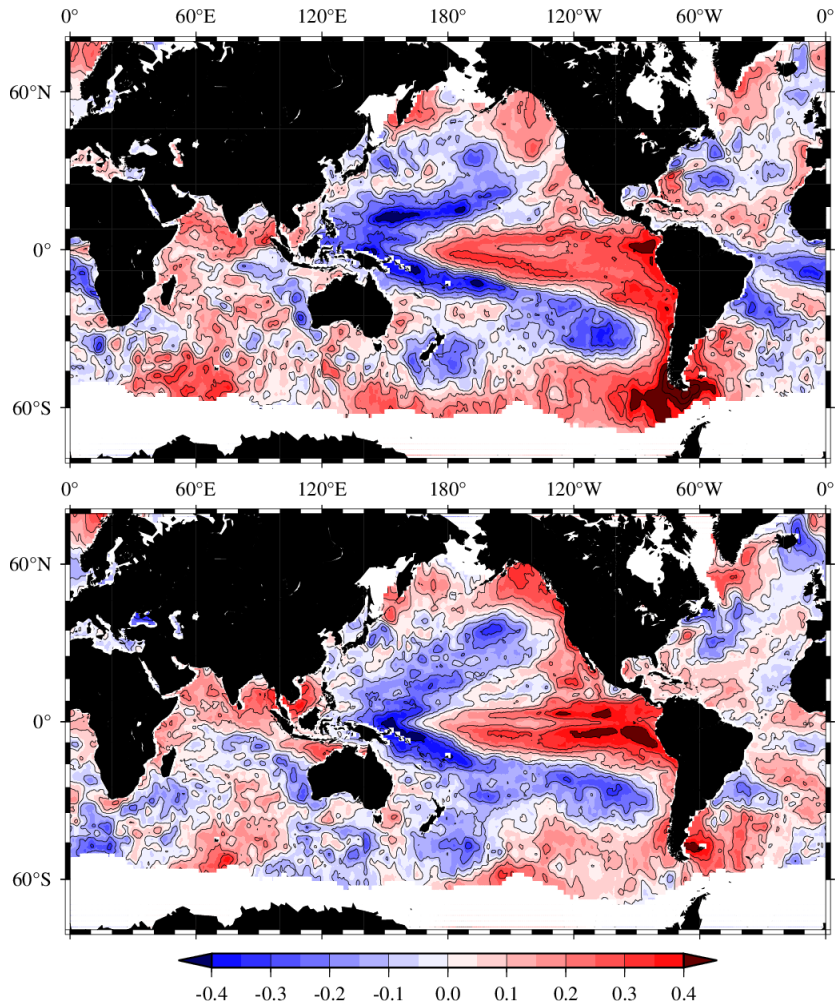


Fig. 3-16. The (top) 0 month and (bottom) -3 month lag correlation map between the SVTI and the sea surface temperature anomaly (NOAA OI.v2 monthly SST) from January, 1993 to December, 2002.

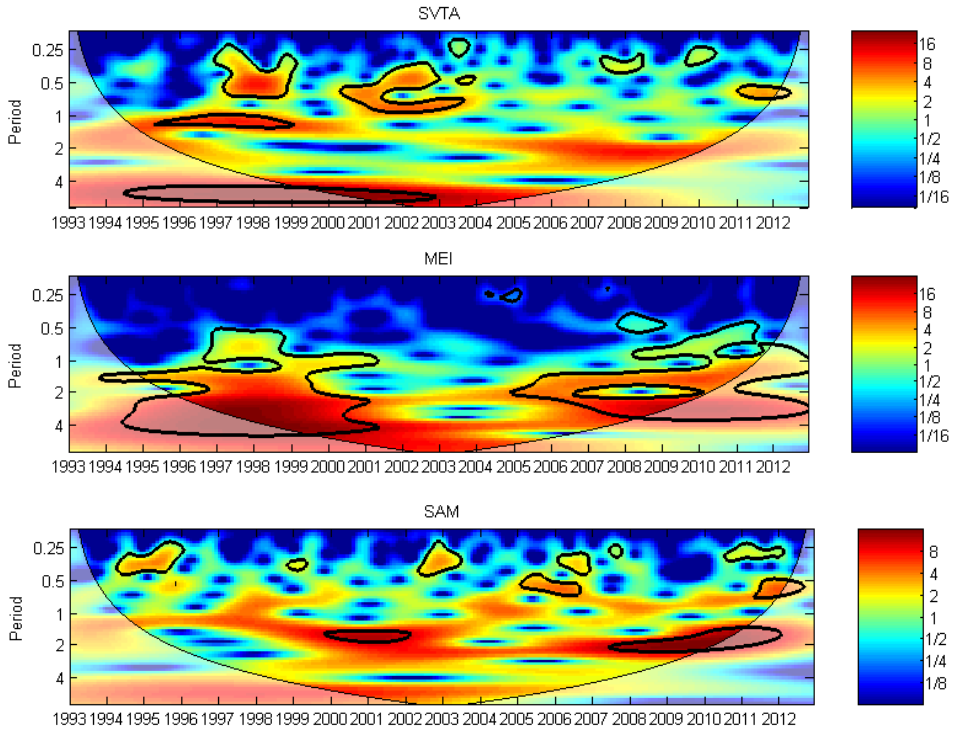


Fig. 3-17. Continuous wavelet power spectrum of (top) the SVTI, (middle) the MEI and (bottom) the SAM index from 1993 to 2012. The thick black contour designates the 5% significance level against red noise and the cone of influence (COI) where edge effects might distort the picture is shown as a lighter shade. X and Y-axis is year.

ENSO도 4년 이상과 1~4년의 변동이 있었으며, SAM은 다른 지수처럼 뚜렷하지는 않지만 4년 이상의 변동이 있었다. 하지만 2003년 이후 수송량과 ENSO와 SAM 모두 4년 이상 장주기의 에너지가 약화되었다.

3.4.3. 수송량과 SAM 지수의 상관성

Fig. 3-18은 SVTI와 SAM 지수와의 상관관계를 나타낸 것이다. 수송량과 SAM의 상관관계는 위상차이가 없는 상관성이 나타났으며, ENSO 보다는 조금 높았다. 이것은 남극순환류가 대기의 기압경도 변화에 바로 반응함을 의미한다. 계절에 따라 수송량과 SAM과의 상관관계를 Fig. 3-19에 나타내었다. 계절 구분을 남반구 봄철 SON (September ~ November), 여름철 DJF (December ~ February), 가을철 MAM (March ~ May), 겨울철 JJA (June ~ August)로 나누었다. 봄과 여름철 수송량과 SAM과의 관련성이 적었지만, 겨울철에는 상관성이 높게 나타났다. Fig. 3-20에 여름철과 겨울철 SAM의 공간분포를 나타내었다. 겨울철에는 남인도양과 남서태평양, 남아메리카 동부해역의 45°S 위도대에서 고기압이 발달하였고, 이곳과 마주보는 동남극과 서남극(아문젠해) 주변에는 저기압이 발달하여 기압 경도가 강화되었다. 여름철에는 저기압대가 원형을 나타내었는데 반해 겨울철 아문젠해를 중심으로 발달한 저기압대는 남서태평양(칠레 남부) 방향으로 확장하여 혀 모양의 분포를 나타내었다. 계절에 따른 기압 배치 변화는 수송량 변동과 어떠한 관계가 있는지 알아보기 위하여 Fig. 3-21과 같이 수송량 지수와 해면 기압 편차(sea level pressure anomaly)와의 회귀분석(regression)을 계산하였다. 위의 그림은 자료 전체의 regression 결과이며 색으로 나타내었다. 1000 hPa 층 바람 속도 편차를 동서, 남북성분으로 나누어 수송량과의 regression 을 계산하

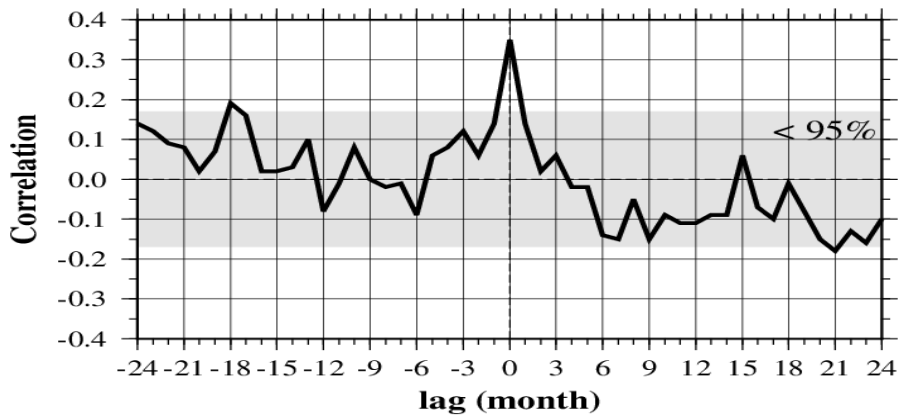


Fig. 3-18. Lag-correlation curves between the SVTI and the SAM index from 1993 to 2012. Negative lags are for the volume transport in Drake Passage leading SAM. Box of < 95% significance are shaded by grey.



Fig. 3-19. Seasonal correlation between the monthly SVTI and the SAM index from 1993 to 2012.

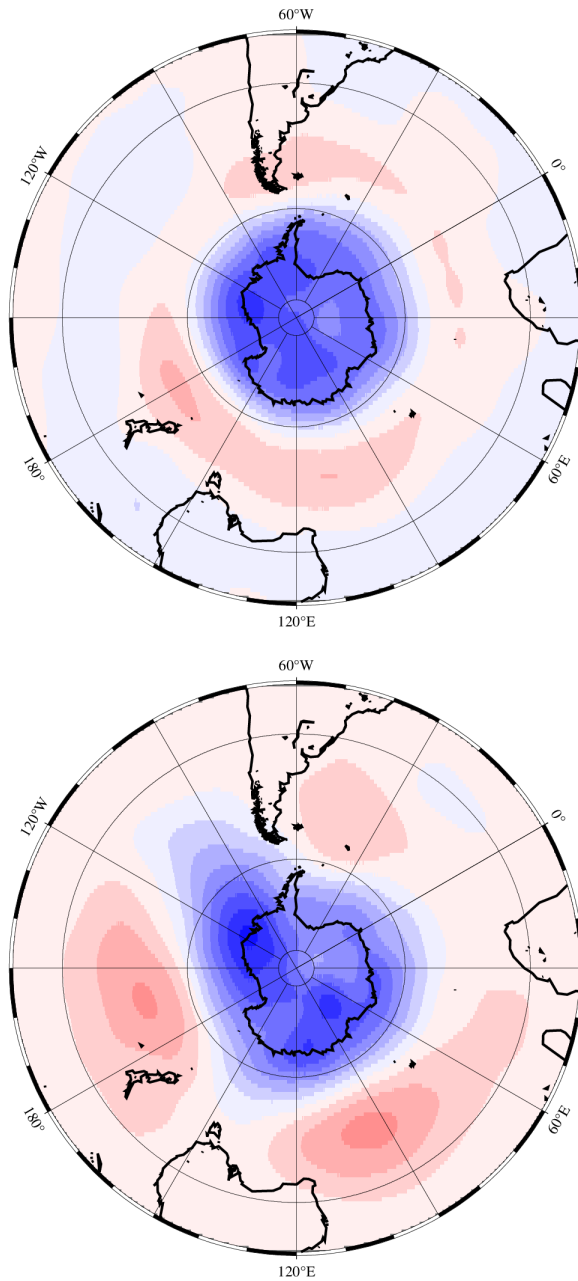


Fig. 3-20. The mean spatial pattern of the SAM in (top) austral summer (December-February) and (bottom) winter (June-August) from 1992 to 2012.

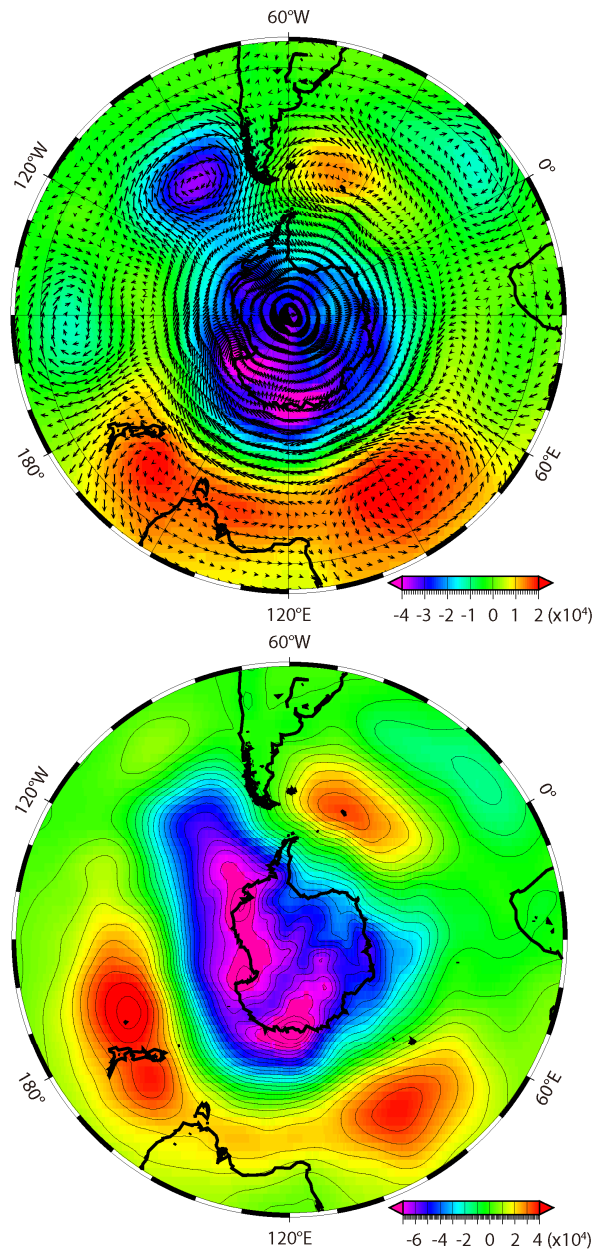


Fig. 3-21. The regression spatial pattern between the SVTI and the sea level pressure of the NCEP reanalysis-2 (top) during 1993-2012 and (bottom) during austral winter (June-August). The vector is composed the regression of zonal and meridional wind at 1000 hPa against the SVTI.

였으며, 두 성분을 합성하여 벡터로 표시하였다. 빨간색은 해면기압이 상승하면 수송량도 증가함을 의미하며, 풍속 편차 regression 벡터도 물리적 의미를 함축한다. 수송량과 해면기압의 regression 형태는 SAM의 공간구조와 유사하다 수송량은 드레이크 해협 동쪽과 남인도양 및 남서태평양의 해면기압과 비례 관계이며 해협 북서쪽과 남극대륙의 기압과는 반비례 regression 관계로 나타났다. 즉 드레이크 해협 북서부와 남극대륙의 기압이 하강하고 해협 동부의 기압이 상승하면 수송량은 증가하고, 바람은 평균 흐름에서 남쪽으로 향할 때 수송량이 증가함을 의미한다. Fig. 3-21의 아래 그림은 겨울철 수송량과 해면기압 편차의 regression 이다. 겨울철 기압 배치구조 (Fig. 3-20)와 유사한 regression 분포인데 겨울철 기압 배치가 수송량 증가와 관련이 있음을 의미한다.

3.5. 토의

드레이크 해협을 통과하는 남극순환류의 수송량 변동을 알아보기 위하여 해면고도 편차 (SSHA) 자료를 이용하였다. SSHA 자료로부터 산출한 표층 지형류는 표층의 상태만 나타내므로 해류계에서 측정된 유속관측 자료로부터 해협 단면 전체를 통과하는 평균 수송량을 계산하였다. 표층 지형류가 해협의 실제 해류를 나타내며, 그 변동은 순압성 특징을 보임을 확인하였으므로, 표층 지형류 유속편차로부터 수송량 변동을 계산하였다. 겨울철 확장하는 해빙 (sea ice) 영향으로 고도계 위성이 해면고도를 측정할 수 없는 기간도 있었으나, 드레이크 해협에서는 겨울철마다 발생하는 현상은 아니었기 때문에 그 때의 수송량은 제외하였다.

평균 수송량은 해류계 관측 수심 (500~3000 m)에서 약 115 Sv

정도로 계산되었으나, 수심 이외의 저층 (3000~4500 m)과 상층 (0~500 m)영역의 수송량을 추정하면, 해저면에도 유속이 존재하므로 저층 해류계 (2000~3000 m) 유속을 해저면 유속으로 이용하여 저층 수송량을 계산하고, 수심 500 m 유속자료와 과거 결과를 토대로 추정된 상층 수송량을 합하면, 드레이크 해협 단면 전체를 통과하는 평균 수송량은 약 136.5 Sv 정도였다. 이 평균 수송량은 통상적으로 받아들여지는 드레이크 해협의 수송량 134~137 Sv 범주에 해당한다.

표층 수송량 변동은 1년 주기의 계절변화와 5년 장주기에서 우세하였으며, 전 수심 층에서 표층 유속과 같은 순압성 변동을 한다면 대략 20~25 Sv 정도의 변동 폭을 추정할 수 있다. 수송량은 겨울철에 감소하고, 여름철에 증가하는 계절변화를 보였으며, 계절변동 폭은 최대 약 7 Sv 정도로 나타났다. 연평균 수송량은 대략 2003년을 기준하여 이전에는 5년 정도의 장주기 변동이 뚜렷하였고 진폭도 컸으나, 이후에는 장주기 진폭이 줄어들었으며, 최대 약 10.5 Sv 정도의 연변동 폭을 보였다. Cunningham *et al.* (2003)은 수온·염분자료로부터 약 7.8 Sv 의 경압성 변동 폭을 제시하였고, Meredith *et al.* (1996)은 해저면의 압력 차를 측정하여 약 8.9 Sv 의 순압성 변동 폭을 제시하였으며, Chidichimo *et al.* (2014)과 Tracey *et al.* (2014)은 CPIES 관측을 통하여 약 8.1 Sv 의 경압성 변동 폭과 약 18.3 Sv 의 순압성 변동 폭을 제시하였다. 표층 수송량 변동으로부터 추정되는 약 20~25 Sv 정도의 변동 폭은 표층 유속의 순압류 및 경압류 변동이 포함된 수송량이므로, 이전 결과들을 합한 총 수송량 변동 폭인 약 26 Sv 의 범위에 해당하지만, 이 변동에는 표층의 경압 성분이 저층에도 동일하게 적용되었으므로, 이 영향을 고려하면 실제 변동 폭은 이보다 약간 적을 것으로 예상된다.

드레이크 해협 서쪽에서 유입한 남극순환류가 동쪽으로 이동하는

동안 본래 지닌 변동성 주기가 복잡해지는 특징을 보였다. 해협 서쪽에는 1년 주기의 변동이 5년 변동보다 강하였는데, 해협 동쪽에는 5년 변동이 강화되고 1년 변동은 약화되는 경향을 보였으며, 감소된 에너지가 단주기(3개월 미만) 변동 성분으로 전이됨에 따라, 수송량 변동 폭은 해협 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 증가하였다. 해협 서쪽과 동쪽의 주기특성이 다르게 나타나는 이유는 순압성 흐름이 강한 남극순환류가 복잡한 해저지형을 통과하면서 자신의 와도(vorticity)를 유지하기 위해 같은 수심을 따라가기 위해 발생하는 소용돌이(eddy)와 사행(meandering)에 의한 것으로 생각한다. 이러한 지역적 변동성 차이를 이해한다면 앞으로 드레이크 해협 해수 수송량을 연구할 때에는 어떤 단면을 선택해야 하는지 도움이 될 것이다.

드레이크 해협의 해수 수송량과 엘니뇨-남방진동(ENSO)사이에는 time lag를 갖는 상관관계가 나타났다. 수송량 자료의 전체 기간 동안의 상관관계는 수송량 변동이 ENSO보다 3개월 앞서 발생하는 상관성을 보였으며, 표층수온 편차와의 상관관계를 보면 드레이크 해협의 시그널이 남아메리카 연안을 따라 북상하여 동태평양 적도해역에 전달되는 것처럼 보였다. 수송량의 장주기 변동이 약화되는 2003년 이후에는 상관성 극값이 발생하는 lag가 변경되었다. 주기 분석(wavelet)을 통하여 2003년을 기준하여 수송량과 ENSO는 4~5년 이상의 장주기 변동성분이 약화되었고, 1~2년 주기의 변동성분이 강화되었음을 확인하였다. 2003년을 기준하여 수송량의 우세한 변동 주기와 ENSO의 우세한 변동 주기가 어떠한 원인에 의해 변하였기 때문에 상관성 극값이 나오는 time lag도 변하여 나타나는 것으로 판단된다. Ivchenko *et al.* (2006)는 드레이크 해협에서의 해양 시그널이 서태평양 적도까지 Rossby 파 형태로 전달되는 모식도를 제시한 바 있다. 한편 Jin and Kirtman (2009)은 엘니뇨 초기의 시그널이

남반구로 전달되며, 적도에서는 엘리뇨가 발달하여 최대치에 도달하는 동안 남반구의 시그널과 시간 차이가 발생하므로 마치 남반구의 시그널이 엘리뇨를 일으키는 것처럼 보이는 상관관계가 나타날 수 있다고 제시하였다. 하지만 상관관계 분석만으로 드레이크 해협 수송량이 엘리뇨/라니냐 현상에 영향을 준다고 해석하기에는 여전히 자료가 부족하며, 추후 장기간 자료를 획득한 후에 재분석할 필요가 있다.

편서풍 강도와 관련이 있는 SAM과의 관계는 위상 차이가 없는 상관성이 나타났으며, 남극순환류가 대기의 기압경도 변화에 바로 반응하는 것을 의미한다. 계절에 따른 상관관계는 겨울철에 가장 높은 상관성을 보였으며, 겨울철 기압 배치 변화가 드레이크 해협 서쪽 해역에 기압 경도를 강화시켜 드레이크 해협으로 유입하는 수송량을 증가시키는 것으로 판단된다.

제 4 장 종합 토의 및 결론

드레이크 해협을 통과하는 남극순환류의 수송량 변동성을 파악하기 위하여 고도계 위성에서 측정한 해면고도 편차 (SSHA) 자료를 이용하여 표층 지형류 유속 편차를 계산하였다. 지형류 유속 편차는 저층류와 연안역을 제외하면, 관측 유속과의 상관관계가 높은 점으로 보아 실제 해류를 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 드레이크 해협에서는 유속관측 자료가 없더라도 지형류를 실제 유속자료로 활용할 수 있다.

해면고도 편차 자료에서는 평균 유속이 제거된 유속 편차를 계산되므로, 평균 유속장을 산출하기 위하여 역모델을 구성하였다. SSHA 자료만으로 평균 유속장을 산출하였으며, 드레이크 해협의 평균 해류 특징을 나타내었다. 표층 지형류는 해저지형에 의한 여러 유동 형태를 보여주었으며, 이러한 해수 유동에 의해 SAF와 PF 전선역 사이의 해수 및 열교환이 활발히 일어날 것으로 생각된다. 해협 내부의 전체적인 유속 구조는 경압성 흐름을 보이며, 변화 정도가 작고 느리지만, 유속 변동은 순압성이 강하며, 변화 정도가 크고 빠르다. SSHA에서 계산한 표층 유속에는 순압류와 경압류가 포함되었으며, 지형류는 실제 해류를 나타내고 있으므로, 지형류에서 계산한 표층 수송량 편차로부터 드레이크 해협을 통과하는 총 수송량 변동을 추정할 수 있다.

드레이크 해협을 통과하는 남극순환류의 평균 수송량은 약 136.5 Sv 정도로 계산되었으며, 수송량 변동 폭은 대략 20~25 Sv 정도로 추정된다. 여기서 경압류 성분은 수심이 깊어질수록 감소하므로 이보다 적은 변동 폭을 보일 것으로 예상된다. 해저지형에 의해 생성된 와류에 의해 해협 서쪽에서 동쪽으로 이동할수록 수송량의 단주기 변동이 발달하여 변동 폭이 서쪽보다 동쪽이 크게 나타났다.

해수 수송량은 계절변동과 5년의 장주기 변동이 우세하였다. 계절 변화는 남반구 겨울철에 유량 감소, 여름철에 증가로 나타났으며, 최대 ± 7 Sv의 계절변동 폭을 보였다. 장주기 성분은 2002년까지 큰 진폭을 보이며 변동하였으나 그 이후에는 진폭이 줄어드는 변화를 보였으며, 연변동 폭은 최대 ± 10 Sv 정도로 나타났다. 수송량 연변동 극값이 나타난 해는 엘니뇨/라니냐 현상이 발생한 해와 비슷하여 ENSO가 남극순환류에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 수송량과 ENSO 지수와의 상관관계는 수송량 변동이 ENSO 변동보다 3개월 앞서 나타나는 상관관계 나타났다. 표층수는 편차와의 상관관계에서도 수송량이 3개월 앞서는 상관성을 보였고, 상관관계수의 분포는 엘니뇨 시기일 때 표층수온 편차 분포와 유사하게 나타났으며 lag에 따른 상관관계 분포는 드레이크 해협 의 시그널이 남아메리카 연안을 따라 적도로 전파되는 형태를 보였다. 하지만 상관관계만으로 드레이크 해협의 해수 수송량이 엘니뇨/라니냐 현상에 영향을 준다고 해석하기에는 그 근거가 다소 미약한 부분이 있으며 추후 장기간 자료를 보강할 필요가 있다. 남반구 편서풍 강도와 관련이 있는 SAM 지수와는 time-lag가 없는 상관관계를 보였으며, 남극순환류가 대기의 기압경도 변화에 바로 반응함을 의미한다. 계절을 나누어 비교한 SAM 지수와의 관계는 겨울철에 높은 상관성이 나타났으며, 겨울철 남반구의 기압분포 변화는 드레이크 해협 주변의 기압 경도를 증가시켜 수송량 변동에 영향을 주는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- Amante, C. and B. W. Eakins, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDCS-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5C8276M.
- Andersen, O. B and P. Knudsen, 2009. DNSC08 mean sea surface and mean dynamic topography models. *J. Geophys. Res.*, **114**, C11001, doi:10.1029/2008JC005179.
- AVISO, 1996. AVISO user handbook for merged TOPEX/Poseidon products (GDR-Ms). AVI-NT-02-101-CN, 3rd ed. CNES, Toulouse, France, 194 pp.
- AVISO, 2013. SSALTO/DUACS user handbook: (M)SLA and (M)ADT near-real time and delayed time products. CLS-DOS-NT-06-034, issue 3rev 6, CNES, Toulouse, France, 70pp.
- AVISO, 2014. A new version of SSALTO/DUACS products available in April 2014. issue 1.0, CNES, Toulouse, France, 31pp.
- Bonjean, F. and G. S. E. Lagerloef, 2002. Diagnostic model and analysis of the surface currents in the tropical Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **32** (10), 2938-2954.
- Bosch, W., D. Dettmering, and C. Schwatke, 2014. Multi-mission cross-calibration of satellite altimeters: Constructing a long-term

- data record for global and regional sea level change studies. *Remote Sens.*, **6**, 2255–2281, doi:10.3390/rs6032255.
- Bretherton, C. S., M. Widmann, V. P. Dymnikov, J. M. Wallace, and I. Blade, 1999. The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field. *J. Climate*, **12**, 1990–2009.
- Bryden, H. L., and R. D. Pillsbury, 1977. Variability of the deep flow in Drake Passage from yearlong current measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, **7**, 803–810.
- Chereskin, T. K., K. A. Donohue, and D. R. Watts, 2012. cDrake: Dynamics and transport of the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage. *Oceanography*, **25** (3), 134–135.
- Chidichimo, M. P., K. A. Donohue, D. R. Watts, and K. L. Tracey, 2014. Baroclinic transport time series of the Antarctic Circumpolar Current measured in Drake Passage. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 1829–1853.
- Chouaib, N., F. Sttoehr, and C. Provost, 2006. Variability of the Subantarctic and Polar fronts in the Drake Passage as deduced from altimetry. *J. Mar. Res.*, **64**, 669–693.
- Clowes, A. J., 1933. Influence of the Pacific on the circulation in the southwest Atlantic Ocean. *Nature*, **131**, 189–191.
- Cunningham, S. A., S. G. Alderson, and B. A. King, 2003. Transport and variability of the Antarctic Circumpolar Current in Drake

- Passage. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2001JC001147.
- Dalziel, I. W. D., 2014. Drake Passage and the Scotia arc: A tortuous space-time gateway for the Antarctic Circumpolar Current. *Geology*, **42**, 367–368, doi:10.1130/focus042014.1.
- Ducet, N., P. Y. Le Traon, and G. Reverdin, 2000. Global high resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1/2. *J. Geophys. Res.*, **105**, 19477–19498.
- Fandry, C. and R. D. Pillsbury, 1979. On the estimation of absolute geostrophic volume transport applied to the Antarctic Circumpolar Current. *J. Phys. Oceanogr.*, **9**, 449–455.
- Feron, R. C. V., W. P. M. De Ruijter, and P. J. van Leeuwen, 1998. A new method to determine the mean sea surface dynamic topography from satellite altimeter observations. *J. Geophys. Res.*, **103**, 1343–1362.
- Fu, L.-L., E. J. Christeen, C. A. Yamarone, M. Lefebvre, Y. Ménard, M. Dorrer, and P. Escudier, 1994. TOPEX/Poseidon mission overview. *J. Geophys. Res. Lett.*, **99** (C12), 24369–24382.
- García, M. A., I. Bladé, A. Cruzado, Z. Velásquez, H. García, J. Puigdefàbregas, and J. Sospedra, 2002. Observed variability of water properties and transports on the World Ocean Circulation Experiment SR1b section across the Antarctic Circumpolar Current. *J. Geophys. Res.*, **107** (C10), 3162, doi:10.1029/2000JC000277.

- Gille, S. T., 1994. Mean Surface height of the Antarctic Circumpolar Current from Geosat data: Method and application. *J. Geophys. Res.*, **99**, 18255–18273.
- Gordon, A. L., 1967. Geostrophic transport through the Drake Passage. *Science*, **156**, 1732–1734.
- Gouretzki, V. V. and K. Jancke, 1998. A new climatology for the World Ocean. *WOCE Special Analysis Centre, Max-Planck Institute, Hamburg, WHP SAC Tech. Rep. (No. 3)*, WOCE Report No. 162/98.
- Grinsted, A., J. C. Moore, and S. Jevrejeva, 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Proc. Geoph.*, **11**, 561–566.
- Ivchenko, V. O., V. B. Zalesny, M. R. Drinkwater, and J. Schroter, 2006. A quick response of the equatorial ocean to Antarctic sea ice/salinity anomalies. *J. Geophys. Res.*, **111**, C10018, doi:10.1029/2005JC003061.
- Jackett, D. R. and T. J. McDougall, 1997. A neutral density variable for the World's Oceans. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 237–263.
- Jin, D. and B. P. Kirtman, 2009. Why the Southern Hemisphere ENSO responses lead ENSO. *J. Geophys. Res.*, **114**, D23101, doi:10.1029/2009JD012657.
- KIOST, 1997. *A study on the tectonic structure of the Shackleton*

- Fracture Zone, Antarctica*. KIOST report BSPE 00565-990-7, 46pp.
- Kelly, K. A. and S. T. Gille, 1990. Gulf Stream surface transport and statistics at 69°W from the Geosat altimeter. *J. Geophys. Res.*, **95**, 3149-3161.
- Kim, S.-B. and M. A. Saunders, 2002. An improved Gaussian jet model for deriving absolute geostrophic velocity from satellite altimetry. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **19**, 2020-2029.
- Lagabrielle, Y., Y. Godd ris, Y. Donnadieu, J. Malavieille, M. Suarez, 2009. The tectonic history of Drake Passage and its possible impacts on global climate. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **279**, 197-211.
- Le Traon, P. Y. and F. Ogor, 1998. ERS-1/2 orbit improvement using TOPEX/POSEIDON: The 2cm challenge. *J. Geophys. Res.*, **103** (C4), 8045-8057.
- Lenn, Y. D., T. K. Chereskin, J. Sprintall, and E. Firing, 2007. Mean jets, mesoscale variability and eddy momentum fluxes in the surface layer of the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage. *J. Mar. Res.*, **65**, 27-58.
- Lumpkin, R. and K. Speer, 2007. Global ocean meridional overturning. *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 2550-2562.
- Lumpkin, R. and Z. Garraffo, 2005. Evaluating the decomposition of tropical Atlantic drifter observations. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **22**,

1403-1415.

- Maximenko, N., P. Niller, M.-H. Rio, O. Melnichenko, L. Centurion, D. Chambers, V. Zlotnicki, and B. Galperin, 2009. Mean Dynamic Topography of the ocean derived from satellite and drifting buoy data using three different techniques. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **26**, 1910-1919.
- Mazloff, M., P. Heimbach, and C. Wunsch, 2010. An eddy-permitting Southern Ocean State Estimate. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 880-899.
- Meredith, P. M., J. M. Vassie, K. J. Heywood, and R. Spencer, 1996. On the temporal variability of the transport through Drake Passage. *J. Geophys. Res.*, **101** (C10), 22485-22494.
- Nowlin, W. D., T. Whitworth, and R. D. Pillsbury, 1977. Structure and transport of the Antarctic Circumpolar Current at Drake Passage from short-term measurements, *J. Phys. Oceanogr.*, **7**, 788-802.
- Orsi, A. H., T. Whitworth III, and W. D. Nowlin Jr, 1995. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Cirumpolar Current. *Deep Sea Res. I*, **42**, 641-673.
- Park, Y.-H., 2004. Determination of the surface geostrophic velocity field from satellite altimetry. *J. Geophys. Res.*, **109**, C05006, doi:10.1029/2003JC002115.
- Pascual, A., M. I. Pujol, G. Larnicol, P. Y. Le Traon, and M. H. Rio, 2007. Mesoscale mapping capabilities of multisatellite altimeter

- missions: First results with real data in the Mediterranean Sea. *J. Mar. Sys.*, **65**, 190–211.
- Pavlis, N. K., S. A. Holmes, S. C. Kenyon, and J. K. Factor, 2008. An Earth gravitational model to degree 2160: EGM2008. *EGU General Assembly, Vienna Austria*, **17**.
- Pedlosky, J., 1979. *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, New York, 624 pp.
- Provost, C., A. Renault, N. Sennéchaël, V. Garçon, J. Sudre, and O. Huhn, 2011. Two repeat crossings of Drake Passage in austral summer 2006: Short-term variations and evidence for considerable ventilation of intermediate and deep waters. *Deep-Sea Res. II*, **58**, 2555–2571.
- Qiu, B., K. A. Kelly, and T. M. Joyce, 1991. Mean flow and variability in the Kuroshio Extension from Geosat altimeter data. *J. Geophys. Res.*, **96**, 18491–18507.
- Rio, M. H., P. Schaeffer, G. Moreaux, J. M. Lemoine, and E. Bronner, 2009. A new Mean Dynamic Topography computed over the global ocean from GRACE data, altimetry and in-situ measurements. *Poster communication at OceanObs09 symposium, 21–25 September 2009, Venice*.
- Reid, J. L. and W. D. Nowlin, 1971. Transport of water through the Drake Passage. *Deep-Sea Res.*, **18**, 51–64.

- Renault, A., C. Provost, N. Sennéchaël, N. Barré, and A. Kartavtseff, 2011. Two full-depth velocity sections in the Drake Passage in 2006—Transport estimates. *Deep-Sea Res. II*, **58**, 2572–2591.
- Rintoul, S. R., C. W. Hughes, and D. Olbers, 2001. The Antarctic Circumpolar Current System. In: Siedler, G., Church, J. (Eds.), *Ocean Circulation and Climate*, International Geophysics Series. Academic Press, San Diego, CA, pp. 271–302.
- Sallée, J. B., K. Speer, and R. Morrow, 2008. Response of the Antarctic Circumpolar Current to atmospheric variability. *J. Climate*, **21**, 3020–3039.
- Shum, C. K., J. C. Ries, and B. D. Tapley, 1995. The accuracy and applications of satellite altimetry. *Geophys. J. Int.*, **121**, 321–336.
- Stevens, D. P. and P. D. Killworth, 1992. The distribution of kinetic energy in the Southern Ocean: a comparison between observations and an eddy resolving general circulation model. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, **338**, 251–257.
- Talley, L. D., 2013. Closure of the global overturning circulation through the Indian, Pacific, and Southern Oceans: Schematics and transports. *Oceanography*, **26** (1), 80–97, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2013.07>.
- Tapley, B. D., J. C. Ries, S. Bettadpur, D. P. Chambers, M. Cheng, F. Condi, B. Gunter, Z. Kang, P. Nagel, R. Pastor, T. Pekker, S. Poole, and F. Wang, 2005. GGM02 An improved Earth gravity

- field model from GRACE. *J. Geod.*, **79**, 467-478.
- Thompson, D. W. J. and J. M. Wallace, 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, **13**, 1000-1016.
- Torrence, C. and G. P. Compo, 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **79** (1), 61-78.
- Tracey, K. L., K. A. Donohue, and D. R. Watts, 2014. Barotropic transport of the Antarctic Circumpolar Current measured in Drake Passage. *AGU Ocean Science Meeting, Honolulu Hawaii, February, 950*.
- Turner, J., 2004. The El Niño-Southern Oscillation and Antarctica. *Int. J. Climatol.*, **24**, 1-31.
- Vignudelli, S., P. Cipollini, and L. Roblou, 2005. Improved satellite altimetry in coastal systems: Case study of the Corsica Channel (Mediterranean Sea). *Geophys. Res. Lett.*, **32** (7), L07608, doi:10.1029/2005GL022602.
- Whitworth, T., W. D. Nowlin, and S. J. Worley, 1982. The net transport of the Antarctic Circumpolar Current through Drake Passage. *J. Phys. Oceanogr.*, **12**, 960-971.
- Whitworth, T., 1983. Monitoring the transport of the Antarctic Circumpolar Current at Drake Passage. *J. Phys. Oceanogr.*, **13** (11), 2045-2057.

- Whitworth, T. and R. G. Peterson, 1985. Volume transport of the Antarctic Circumpolar Current from bottom pressure measures. *J. Phys. Oceanogr.*, **15** (6), 810–816.
- Wolter, K. and M. S. Timlin, 1998. Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank?. *Weather*, **53**, 315–324.
- Yuan, X., 2004. ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: a synthesis of phenomenon and mechanisms. *Antarctic Science*, **16** (4), 415–425, doi:10.1017/s0954102004002238.

SUMMARY

Variability of the volume transport of the Antarctic Circumpolar Current in Drake Passage

This study is to find out the variability of the volume transport of Antarctic Circumpolar Current (ACC) in Drake Passage. As the direct observation of the volume transport which passes through Drake Passage is not limited, the volume transport was derived from the surface geostrophic velocity field from the sea surface height anomaly (SSHA) measured by the satellite altimeter. As the surface geostrophic velocity determined from SSHA is the anomaly removed of the average, the inverse model was formulated for determination of the mean geostrophic current field. The surface geostrophic current are highly correlated with the velocity measured with the current meter except at the bottom and the coastal area. Although the vertical velocity structure in Drake Passage showed the baroclinic flow due to the layers, the variability of the velocities was characterized by the strong barotropic flow. Therefore, the volume transport anomaly in Drake Passage can be estimated by using the surface volume transport anomaly, which is determined by the change in the speed of the geostrophic current.

The total mean volume transport of the ACC passing through Drake Passage is about 136.5 Sv. Although the variability of the

volume transport estimated from the barotropic surface volume transport anomaly is 20~25 Sv but if we consider the change in the baroclinic volume transport at the bottom, the range of change is likely be lower than that. The variance in the short term grows more as the ACC is going from west to east in Drake Passage and this looks like to be caused by the eddy which is generated by the bottom topography.

The volume transport through Drake Passage goes down in austral winter time but goes up in summer time and shows the significant cycles every 5 years. This shows that El niño/La niña and Antarctic Oscillation may affect the volume transport in the Drake Passage. The fluctuation of the surface volume transport is statistically coherent with the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) index with a phase lag of 3 months and the transport variation leading the ENSO index. But those are not enough to prove that the volume transport affects the El niño/La niña. Therefore more data should be acquired in the future. The correlation between the surface volume transport anomaly and the SAM (Southern Annular Mode) index, which is related to the westerlies of Southern Hemisphere, shows the positive peak at zero-month lag. It means that the ACC directly responds to the change in the sea level pressure gradient. Its correlation with SAM index showed high during the winter time. So, it is likely that the change in the distribution of the sea level pressure in the winter increases the horizontal gradient of the pressure around Drake Passage, thus affecting the volume transport variability of the ACC

through Drake Passage.

Key Word : Antarctic Circumpolar Current, Drake Passage, Sea surface height, Geostrophic current, Inverse model, Volume transport, El Niño-Southern Oscillation index, Southern Annular Mode index, Correlation