

복합위성자료(Topex/Poseidon, ERS1)를 이용한 남인도양의 해수면 변화와 와동류 연구

윤홍주* · 서영상**

부경대학교 위성정보과학과*, 국립수산과학원 해양환경부**

Sea Level Variability and Eddy in the South Indian Ocean by Multi-satellite Data (Topex/Poseidon, ERS 1)

Hong-Joo Yoon* and Young-Sang Suh**

Department of Satellite Information Sciences, Pukyong National University*,

Department of Oceanography and Marine Environment, NFRDI**

Abstract : Sea level variability and eddy in the Amsterdam-Crozet-Kerguelen region of the South Indian Ocean were studied during 1 year (October 15, 1992 ~ October 15, 1993) using multi-satellite data (Topex/Poseidon, ERS1) produced by signal treatment. We found that sea level variabilities (>10cm) generally exist along the Antarctic Circumpolar Current in the area of 35° ~ 46°S and strong sea level variabilities (20 ~ 30cm) were especially occurred from the effects of eddy due to bottom topography in two small area: 49° ~ 57°E and 38° ~ 42°S, and 58° ~ 64°E and 42° ~ 44°S.

Key Words : Multi-satellite Data, Signal Treatment, Sea Level, Eddy, Antarctic Circumpolar Current.

요약 : 복합위성자료 신호처리기법을 사용해서 남인도양 지역을 중심으로 한 해수면변화와 사행(meandering)을 연구하였다. 해수면변화는 아프리카 남부(46°E)에서 크호제트 대지(Crozet basin)의 35°~46°S대를 걸쳐서 암스테르담-케르겔렌 경로(Amsterdam-Kerguelen Passage)까지 확장된다. 이때 가장 강한 해수면변화(20~30cm)가 2개의 좁은 지역에서 발생하는데, 하나는 경도 49°~57°E(약 700Km) 및 위도 38°~42°S(약 450Km) 나타났고 그리고 나머지 하나는 경도 58°~64°E(약 450Km) 및 위도 42°~44°S(약 200Km)에서 각각 나타났다. 이것은 해저지형과 관련된 강한 와동류의 형성 때문이다. 와동류 발생지역은 아굴라스반류(Agulhas Return Current) 및 남극순환해류(Antarctic Circumpolar Current)와 관련하여 강한 흐름이 형성되는 지역에서 발생했다. 이때 복합위성자료(Topex/Poseidon, ERS1)는 표층순환과 해수면변동 특성을 잘 나타내었다.

1. 서론

Topex/Poseidon과 ERS1은 시·공간적으로 다른 해상도 및 궤도(orbit) 특성을 각각 가진다. Topex/Poseidon은 적도에서 지상궤적(ground track) 간의 거리가 315km이며 반복 주기는 약 10일 인데 시간 스케일에 관련하여 매우 좋은 해를 제공해 준다(Fig. 1a). 반면에 ERS1은 적도에서 지상궤적 간의 거리가 80km, 반복 주기는 약 35일 이며 공간 스케일에 대하여 좋은 해를 가져다준다(Fig. 1b). Fig. 1c와 같이 Topex/Poseidon과 ERS1을 결합한 복합위성자료의 사용은 시·공간적으로 아주 완전한 해를 제공해준다는 것을 잘 알 수 있다. 따라서 본 연구는 이러한 유용한 복합위성자료를 이용해서 이 지역에서의 남극순환류(Antarctic

Circumpolar Current)와 관련된 해수면 변화(sea level variability)와 와동류(eddy)현상을 명확히 시각적으로 알아보는데 그 목적을 두었다.

2. 자료 및 방법

1) 위성신호처리와 지구물리적 보정

위성 Topex/Poseidon은 정밀한 궤도 결정(determination of orbit) 때문에 RMS(root-mean-square) 5cm인 정도를 가지고 해수면을 결정할 수 있게 해준다. 반면 위성 ERS1은 궤도 결정이 Topex/Poseidon에 비하면 정확도가 떨어지는 관계로 RMS의 정도가 약 15cm이다(Massmann *et al.*, 1993; Scharro *et al.*, 1993). Topex/Poseidon의 뛰어난 궤도특성은 위성 지상궤적의 교차점과 관련하여 ERS1의 궤도 오차를 줄이는데 사용되어 진다. 이러한 문제와 관련하여 Le Traon *et al.*(1995)의 위성신호 처리기법을 사용하였다. Topex/Poseidon 자료와 ERS1자료는 CNES/CLS(Sea Level Anomaly에 대한 2 CD-ROM)에 의해서 제공되어 진다(AVISO, 1995). SLA(Sea Level Anomaly)값은 다음과 같은 지구물리적 보정(correction)을 통해서 계산되어 졌다.

- 1) 조석보정은 미국 텍사스대학의 조석모델을 사용하였다(Ma *et al.*, 1994).
- 2) 기압보정(inverted barometer)은 Topex/poseidon에 대해서는 ECMWF(European Center for Medium range Weather Forecasting)모델을 그리고 ERS 1은 ARPEGE(French meteorological model)모델을 각각 사용하였다(AVISO, 1995).
- 3) 전자기 bias보정은 Topex/Pseidon에 대해서는 BM4 공식(Gaspar *et al.*, 1994)을 그리고 ERS 1은 significant height(5.5%)를 각각 사용하였다(Gaspar and Ogor, 1994).
- 4) Ionosphere보정은 Poseidon에 대해서는 Doris를, Topex에 대해서는 Dual-frequency measurement 그리고 ERS 1은 Bent model을 각각 사용하였

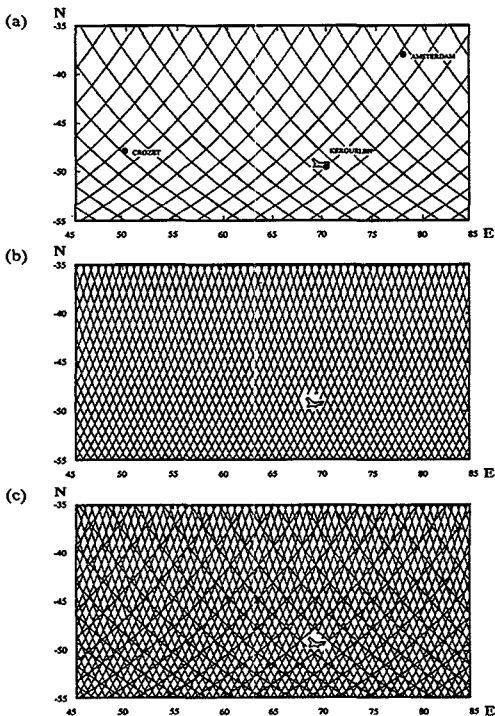


Fig. 1. (a) Ground track of Topex/Poseidon satellite, (b) Ground track of ERS 1 satellite and (c) Multi-ground of track of Topex/Poseidon & ERS 1 satellite in the Amsterdam-Crozet-Kerguelen region of the South Indian Ocean.

다(AVISO, 1995).

- 5) Radiometer에 의한 습윤 troposphere보정은 Topex/Poseidon에 대해서는 TMR을, ERS 1은 ATSR을, 건조 troposphere보정은 Topex/Poseidon에 대해서는 ECMWF모형을 그리고 ERS 1은 ARPEGE을 각각 사용하였다 (AVISO, 1995).

2) 궤도보정과 filtering

ERS 1에 대한 궤도보정은 Topex/Poseidon과 ERS1간의 교차점에서의 차를 최소화하는 것인데, 그 근본원리는 다음과 같다.

- 1) Topex/Poseidon과 ERS 1의 두 위성에 대한 SLA계산을 위해서 공통기준 궤적(track)을 설정하였다. SLA의 값은 14개월(1992. 10. 15~1993. 10. 15) 평균값에 대한 편차 값으로 각각 계산하였다.
- 2) 작은 스케일에 대한 잡음을 제거하기 위해서 공간필터를 처리했다. 이때 필터의 길이(주기)는 위도의 함수로 변화한다(적도에서는 200km, 70°S에서는 50km). 필터 후에 시간에 대해서는 5일 간격으로 그리고 공간에 대해서는 21km간격으로 자료를 재 추출(re-sampling) 하였다.

3) 위성자료의 해석

본 연구에서는 일반목적해석(general objective analysis)법을 근간으로 하는 알고리즘(De Mey and Menard, 1989)을 사용하였다. 이 목적해석법은 기본적으로 다음과 같은 상관함수로 재 표현된다(Oschlies, 1994).

$$C(r) = [1 + ar - \frac{1}{3}ar^3]e^{-ar}$$

$$L_0(\lambda, \phi) = L_0(\phi) = 50\text{km} + 205\text{km} \frac{\phi_0^2}{\phi^2 + \phi_0^2} \quad (1)$$

$$\phi_0 = 30^\circ$$

여기서 $a=2,1038/L_0$, L_0 는 first zero crossing의 위상변위 값으로서 적도(255km)부터 50°S(90km)에 걸쳐서 위도의 변화에 따라 천천히 변화한다. 이

때 공간에 대한 자기상관함수는 Stationary gaussian decay($D(t) = \exp(-t^2/T^2)$, $T=5\text{days}$)의 gaussian함수에 의하여 모델화 되어졌다.

4) RMS의 계산

앞서 논한 자료의 추출 및 처리 그리고 해석 방법을 통하여 구한 최종적인 복합위성자료 (Topex/Poseidon, ERS 1)를 가지고 이 지역에서의 해수면 변화와 와동류 현상 파악하기 위하여 RMS(Root Mean Square)공식을 이용하였다. RMS는 중규모 스케일(meso-scale)에 있어서의 주요한 해양역학적 현상들(meander, mixing turbulence, eddy, sea level variability, 해류의 이동과 속도변화, mass transport 등)에 대한 변화특성들을 잘 이해할 수 있게 해준다. RMS식은 다음과 같이 주어진다.

$$RMS(i, j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (h_k(i, j) - h(i, j))^2} \quad (2)$$

여기서 $h_k(i, j)$ 는 고려된 점에서 위성의 각 cycle에 대한 해수면, $h(i, j)$ 는 고려된 점에서의 평균 해수면, N 는 cycle의 횟수이다. 따라서 RMS는 해수면(h_k)의 평균 해수면(h)에 대한 차의 값이다.

3. 결과 및 고찰

1) 현장관측자료(hydrological data)로 표현된 표층순환

Fig. 2는 남인도양 암스테르담-크호제트-케르겔른(Amsterdam-Cozet-Kerguelen)지역의 해저지형과 크호제트 분지(Crozet basin) 내에서의 개략적인 표층순환을 나타낸다. 이 그림에서 AF는 아구라스반류 전선(Agulhas Return Current Front), STF는 아열대 전선(Subtropical Front), SAF는 아남극 전선(Subantarctic Front), PF는 극 전선(Polar Front), AAIW는 아남극 중층수(Antarctic Intermediate Water) 그리고 MW는 모더 수(Moder Water)를 각각 나타낸다. 각 전선들에 대

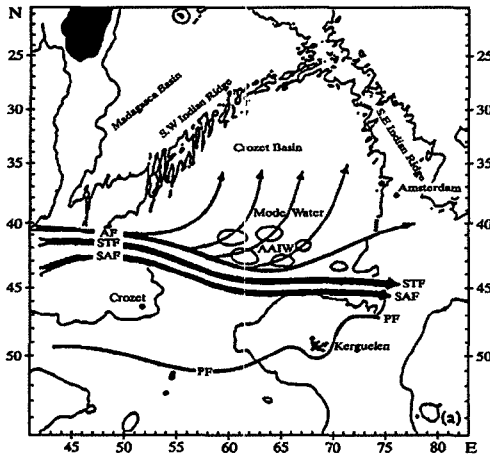


Fig. 2. Schematic presentation of sea surface circulation in the Crozet basin. Isobathis 3500m.

한 재반 해양학적 특성들은 Park and Saint-Gully (1993)에 의해서 매우 상세히 잘 설명되어져 있다. 북부지역 내에 있는 세 전선(AF+STF+SAF)의 상충대(confluence)를 남극순환류라고 일반적으로 부르는데, 이 흐름이 42°S를 중심으로 위도를 따라서 전개되어지는 것을 그림에서 잘 식별할 수 있다. 이것은 크호제트 섬(Crozet island)입구에서 62°S까지 굽어져서 45°S에서 암스테르담-크호제트 경로(Amsterdam-Crozet passage)로 진행한다. 아굴라스반류(Agulhas Return Current)와 관련된 동쪽으로 흐르는 고온고염의 아열대수(Subtropical water)는 중규모 스케일(meso-scale)운동을 보이면서 점진적으로 분리되어 북쪽으로 향한다. 이러한 북쪽을 향한 재 순환은 남인도양 아열대기어(Subtropical gyre)의 남반구 반 시계방향의 순환(anticyclonic circulation)과 잘 일치한다(Wyrtki, 1971). 한편 극 전선(Polar Front)은 크호제트 입구에서 점진적으로 약해지며 그리고 그 특성이 케르겔렌 대지(Kerguelen plateau)의 북부에서 완전히 사라진다. 이때 전선대에서는 단지 두 전선(STF+SAF)만이 강한 상충대를 형성한다. 이러한 강한 밴드(band)가 남극순환류의 중심흐름이

된다. 크호제트 섬(Crozet island) 북부의 SAF는 43°S 위치하며 이 SAF는 크호제트 대지(Crozet plateau)의 서쪽 면에 대해서 흐르는 남극순환류의 북부지류와 관련된다. 크호제트 대지를 가로질러 북부를 향한 팽창은 신선한 아남극수(등온선 13°C 이하)의 47°S 및 33°E 그리고 42°S 및 52°E에서 명확히 나타난다(Pollard et al., 1987). 극 전선(PF)은 2°C의 등온을 가지면서 크호제트 분지의 남쪽 부분에서 50°S로 향한다. 이것은 다른 전선대에서 완전히 분리되어지고 크호제트 분지 내에서의 존재하는 남극순환류의 중심 흐름과는 무관한 흐름을 형성한다.

2) 복합위성자료(multi-satellite data)로 표현된 표층순환

Fig. 3a는 복합위성자료(Topex/Poseidon, ERS 1)를 사용해서 구한 이 지역에서의 해수면 변화를 나타낸다. 즉 1년 동안에 대한 5일 간격의 SLA변화에 대한 RMS의 결과를 의미한다. AF(아굴라스 반류), STF(아열대 전선)와 SAF(아남극 전선)를 따라서 뚜렷한 해수면 변화가 잘 나타난다(푸른색에서 진한적색까지: 10cm이상). 이 해수면 변화는 아프리카남부(46°E)에서 크호제트 분지(Crozet basin)의 35°~46°S대를 걸쳐서 암스테르담-케르겔렌 경로(Amsterdam-Kerguelen passage)까지 확장된다. 이때 가장 강한 해수면 변화(노란색에서 진한적색까지, 20~30cm)가 2개의 좁은 지역에서 발생하는데, 하나는 위도 49°~57°E(약 700km) 및 경도 38°~42°S(약 450km)에서 나타나고 그리고 나머지 하나는 위도 58°~64°E(약 450km) 및 경도 42°~44°S(약 200km)에서 각각 나타난다. 이것은 해저지형과 관련된 강한 와동류의 형성 때문이다. 전체적으로 볼 때 와동류의 발생지역은 아굴라스반류 및 남극순환류와 관련하여 강한 흐름이 형성되는 지역에서 주로 발생한다는 것을 복합위성자료는 단수위성자료(Topex/Poseidon)에 비해서 잘 나타내 주었다(Fig. 3b).

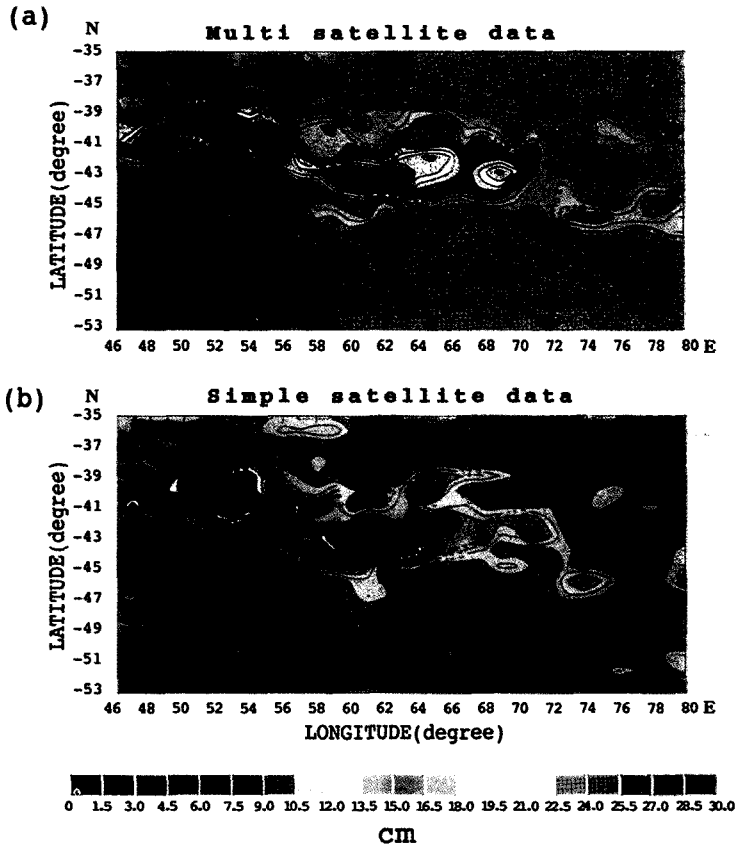


Fig. 3. Sea level variability in 1993 (RMS) in the Amsterdam-Crozet- Kerguelen region of South Indian Ocean by (a) multi-satellite data (Topex/Poseidon & ERS 1) and (b) simple satellite data (Topex/Poseidon). Here, Amsterdam, Crozet and Kerguelen Island were presented as A, C and K, respectively (unit: cm).

4. 결론

복합위성자료를 통해서 명확히 알 수 있는 것은 높은 값을 나타내는 해수면 변화는 남극순환류를 따라서 발생한다는 것과 이때 와동류 계(system)의 존재를 명확히 식별할 수 있다는 것이다. 또한 아구라스반류(Agulhas Rerum Current)와 관련하여 아열대 기어(Subtropical gyre)에서 강한 와동류가 존재하는 것을 알 수 있다. 이 와동류는 이 지역 남부를 점차적으로 관통하여 남극순환류에 의해서 전달되어진다. 즉 남극순환류의 강한 주류를 형성하는 STF(아열대 전선)와 SAF(아남

극 전선)의 상층대를 따라서 강한 와동류가 발생되어지는 것을 알 수 있다. 이때의 와동류는 사행(meandering)현상과 밀접한 관계를 가진다(Yoon, 1997). 또한 크호제트 분지(Crozet basin)에서도 강한 와동류를 보이는데, 이것은 지형의 영향에 기인한 것이다(Park et al, 1992). 결론적으로 본 연구에서 처리한 신호기법으로 산출된 복합위성자료는 만족스럽게 표층해양순환 및 해양수의 수송(water mass transports)을 잘 이해하게 해주고 그리고 해류의 강도와 특성을 정량적 및 정성적으로 파악할 수 있게 해주었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2002-000-00369-0) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- AVISO, 1995. Aviso Users Handbook: Sea Level Anomaly files, Technical Report, AVI-NT-011-312-CN, Edition 1.
- De Mey, P., and Y. Menard, 1989. Synoptic analysis and dynamical adjustment of GEO 3 and Seasat altimeter eddy fields in the northwest Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 94,C5(62): 221-231.
- Gasoar, P., F. Ogor, P. Y. Le traon, and O. Z. Zanife, 1994. Joint estimation of the TOPEX and POSEIDON sea-state biases, *J. Geophys. Res.*, 99,(24): 981-994.
- Gasoar, P., F. Ogor, 1994. Estimation and analysis of the sea-state bias of the ERS 1 altimeter, Technical Report, IFREMER/CNRS 94/2426016/C.
- Le Traon, P. Y., P. Gaspar, F. Ogor, and J. Dorandeu, 1995. Global adjustment of ERS 1 DATA using TOPEX/POSEIDON as a reference. Technical Report, CNES/CLS GO/94/522.
- Ma, X. C., C. K. Shum, R. J. Eanes, and B. D. Tapley, 1994. Determination of ocean tides from the first year of TOPEX/POSEIDON altimeter measurements, *J. Geophys. Res.*, 99(24): 809-280.
- Massmann, F. H., C. Reigber, R. Kning, J. C. Raimondo, and C. Rajasenan, 1993. ERS 1 orbit information provided by D-PAF. *Proc. second ERS 1 symposium*, Hamburg, 11-14 October 1993, ESA.
- Oschlies, A., 1994. *Assimilation of satellite altimeter data into an eddy-resolving primitive equation model of the North Atlantic Ocean*, Ph. D. thesis, ber, Inst. f. meersk. Kiel, Nr. 256, 131.
- Park, Y. H., B. Saint-Guily, 1993. Sea level variability in the Crozet -Kerguelen -Amsterdam area from bottom pressure and Geosat altimetry, in sea level changes: determination and effects, *Geophys. Monogr.* 69, IUGG, 11: 117-131.
- Park, Y. H., L. Gamberoni, and E. Charri, 1992. Frontal structure, Water masses and Circulation in the Crozet Basin, *J. of Geophys. Res.*, 98(12): 361-386.
- Pollard, R. T., J. F. Read, J. Smith, and M. W. Stirling, 1987. SeaSoar section from the Antarctic Circumpolar Current at 52 S, 32 E to the Subtropical Front at 37 S, 52 E, rep., 224, 55, *Ins. of Oceanogr. Sci.*, Wormley.
- Scharoo, R., K. F. Wakker, and G. J. Mets, 1993. The determination accuracy of the ERS 1 mission, *Proc. second ERS 1 symposium*, Hamburg, 11-14 October 1993, ESA.
- Wyrtki, K., 1971. *Oceanographic Atlas of the International Indian Ocean Expedition*, NSF 531, Washington.
- Yoon, H. J., 1997. *The variation of sea level in the Amsterdam-Crozet-Kerguelen region of South Indian Ocean*, Ph. D. Thesis, Joseph Fourier University - Grenoble I, 144, III75.