

Topex/Poseidon 위성을 이용한 남인도양의 표층 해양순환 연구

윤홍주 · 김영섭*

여수대학교

*부경대학교

Oceanic circulation on the surface layer in the South Indian Ocean by Topex/Poseidon satellite

Hong-Joo Yoon · Young-Seup Kim*

Yosu National University

*Pukyong National University

E-mail : yoonhj@yosu.ac.kr

요 약

Topex/Poseidon 위성의 자료를 통하여 남인도양의 암스테르담- 크호제트- 케르젤른 지역에 대한 표층 순환과 해수면 변화의 시·공간적인 해석을 쉽게 수행 할 수 있었다. 각 지역에서의 시·공간적인 변화 특성들을 보면, 암스테르담지역은 서쪽으로 전파하는 로쓰비파가 존재한다. 이때 이 파는 동쪽으로 전파하는 남극순환해류의 영향을 받는다. 1993년 늦가을에서 초겨울 동안에 분지의 동부지역에서 해수면이 급격히 떨어졌다. 이곳은 남극순환해류(아구라스순환반류전선과 아열대전선)의 북부에서 발전하는 시계방향(cyclonic)의 와동류가 예외적으로 강하게 북쪽으로 상승했다가 이어서 급격히 남쪽으로 하강했던 것과 관련된다. 썩빨지역은 5cm 정도의 해수면 진동과 함께 약 130일 정도의 주기성을 보였다. 서쪽으로 전파하는 신호인 자유 표면의 진동이 실제로 조사되었다.

키워드

표층 해양순환, 와동류, 해수면 변화, 남인도양, Topex/Poseidon 위성

I. 서 론

남극순환해류(Antarctic Circumpolar Current)는 아열대전선(Subtropical Front)과 아남극전선(Subantarctic Front)이 상충(confluence)하는 남인도양의 암스테르담(Amsterdam)- 크호제트(Crozet)- 케르젤른(Kerguelen)지역 내에서 형성된다[1],[2]. 두 전선의 상충대는 크호제트 대지의 북부를 지나고 그리고 크호제트 분지 입구에서 아구라스반류(Aguhas Return Current)와 혼합을 한다[3], [4]. 남극순환류는 겨울에 강한 서풍(Austral winds)의 영향을 받고 그리고 방대한 수송량(130 Sv, $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{sec}$)에 의해서 특성이 결정되어 지며[5], 세계 3대 주요 해양에 수량을 수송하는데 중요한 역할을 한다(Indian, Atlantic and Pacific Ocean). 또한 암스테르담- 크호제트- 케르젤른지역 내의 해류들은 해저 지형에 의해서 조절된다. 이때 크호제트 분지를 가로 질러야만 하는 남극순환해류는 SW-NE방향으로 뻗

혀 있는 바리케이트를 지나면서 항상 불안정한 상태를 유지하게 된다.

본 연구는 Topex/Poseidon위성의 고도계 자료를 이용해서, 암스테르담- 크호제트- 케르젤른지역 내 해수면 변화와 관련하는 여러 가지 현상들과 해양학적 일반 순환을 알아 보는데 그 목적을 두었는데, 고도계 자료의 해석으로부터 구해진 해수 자유표면 변화의 시각적 표출을 통해서 해수면 변화와 해양 순환을 더욱 잘 이해할 수 있다.

II. 자료 및 방법

3년 간의 Topex/Poseidon위성 자료를 가지고 역학고도를 계산하였다. 계산 방법은 AVISO [6], [7]의 사용자 지침서가 제공하는 표준 자료처리 과정을 따랐다. 소규모 스케일의 잡음을 제거하기 위하여, 우리는 공간에 대한 필터링 처리를 다음

과 같이 하였다. 1) 지상 위성계측을 따라서 75Km의 가우스 창을 가지고 필터링을 하였다. 그리고 2) Topex/Poseidon 자료를 0.5° x 0.5° 간격으로 그리드(grid)한 다음 위도를 따라서 100km의 가우스 창을 가지고 필터링을 하였다.

III. 표층 순환

1. 남극순환해류

Fig. 1은 Topex/Poseidon의 평균 역학고도를 나타낸다. 이때 화살표는 역학고도로부터 구한 표면 지형류의 속도가이다. 여기서 3 부분의 뚜렷한 지형류의 흐름이 나타나는 것을 잘 알 수 있는데, 남극순환류와 관련되어 동쪽으로 흐르는 흐름(아프리카의 남부지역에서부터 오스트리아 남부지역까지 흐른다)과, 남극순환류 북쪽에 위치한 subtropical anticyclonic gyre(<39°S와 48°-76°E)에서의 반시계 방향의 강한 흐름과 그리고 남극순환류 남쪽에 위치한 subpolar cyclonic gyre(<52°S와 46°-67°E)에서의 시계 방향의 매우 약한 흐름으로 각각 구성되어 있다.

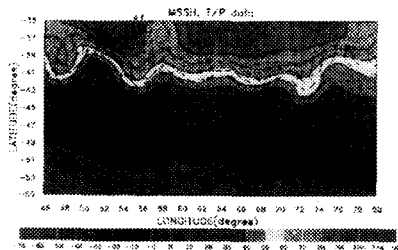


Fig. 1. Mean Sea Surface Height(cm) and Geostrophic Velocity(cm/sec) by Topex/Poseidon Altimetry.

또한 이 그림은 해면의 평균 역학고도가 114cm를 가지는 저위도(35°S)에서 -62cm를 가지는 고위도(55°S)로 나아 감에 따라 그 값들이 줄어 들고 그리고 26cm를 가지는 44°S부근에서 대체로 중간 값을 보인다. 이러한 값들은 동쪽에서 서쪽으로 나아 감에 따라 일반적으로 줄어 든다. 즉 표면 지형류의 흐름은 SE방향으로 순환하고 그리고 2°-3°의 위도 편차를 보인다.

평균 역학고도는 암스테르담 지역에서는 약 75cm이다. 상대적으로 크호제트 및 케르켈른 지역에서는 약 6cm로 그 값이 줄어들며, 이 때 두 지역은 남극순환해류의 NW-SE 방향의 흐름 축 내에서 동시에 존재한다.

평균 역학고도가 16-45cm(초록색)인 남극순환해류는 46°E의 42°-44.5°S로 유입하여 점진적으로 SE방향으로 흐르다가 80°E의 44°-48°S에서 유출한다. 아굴라스반류전선(Agulhas Return Current Front)은 45-65cm(푸른색-노란색), 아열대전선(Subtropical Front)은 35-45cm(푸른색), 아극전선(Subantarctic Front)은 16-26cm(푸른색) 그리고

극전선(Polar Front)은 -52 - -42cm(카키색)로 각각 구분할 수 있다. 그리고 흐르의 방향을 보면, 아굴라스반류전선은 동쪽/북동쪽, 아열대전선과 아남극전선은 동쪽/남동쪽 그리고 극전선은 남동쪽으로 각각 순환하는 것을 볼 수 있다.

2. Anticyclonic subtropical gyre

Subtropical gyre는 48°-76°E 사이의 39°S 이상의 북부에 위치한다. 이 것은 근본적으로 시계방향의 강한 와동류를 형성하는데, 이 때 표면 속도는 37°S와 55°E에서 전형적으로 32.4cm/sec를 나타낸다. 아프리카 남부에서부터 subtropical gyre의 남부전선까지 흐르는 아굴라스반류는 크호제트 분지 내 남극순환해류를 구성하는 아열대전선과 혼합한 후 다시 분리되어 북쪽으로 순환을 한다. 이 흐름은 모드수(Mode Water)와 남극중층수(Antarctic Intermediate Water)에 보충되면서 Ninetyeast Ridge(25°S와 85°E)로 흘러 들어 간다.

3. Cyclonic subpolar gyre

Topex/Poseidon에 의해서 나타난 평균 역학고도는 남극순환해류의 남부(<52°S와 46°-67°E)와 Weddell-Enderby분지의 북부에서 각각 시계 방향의 cyclonic circulation의 존재를 확인 시켜 주었다.

IV. 구역별 변화 특성

1. 35°-45°S 구역

계절적인 신호의 공간적인 분포를 식별하기 위하여 해수면의 편차를 위도에 대한 시간 함수의 변화를 Fig. 2로 나타내었다. 이때 선택한 위도는 각각 50°E(입구역), 63°E(중부역) 그리고 76°E(출구역)이다.

50°E의 위도를 따라 종단한 입구역(Fig. 2a)은 약 39°S 부근에 아굴라스반류전선과 아열대전선 내에서 강한 와동류가 존재하는 곳이다. 3월에서 6월까지 실제로 계절적 신호가 뚜렷이 나타난다. 그리고 매년 따뜻한 부분의 와동류가 동쪽 혹은 남동쪽 방향으로 플러스 편차를 가지면서 이동을 하며 동시에 차가운 부분의 와동류가 서남쪽 혹은 서쪽 방향으로 회전하는 마이너스 편차가 북부에서 나타난다. 이러한 현상은 매년 일어난다. 또한 매 가을마다 전체적인 해수면이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이처럼 늦 가을의 해수면 증가(특히 1994년)는 전지역에 걸쳐서 영향을 미칠 것이다.

63°E의 중부역은 현상들을 설명하기가 매우 복잡하다(Fig. 2b). 이 종단면은 시계 혹은 반시계 방향의 와동류 그리고 사행이 규칙적으로 가로질러 나타나는 곳이다. 비록 시계 혹은 반시계 방향의 와동류들이 많이 존재하기는 하지만 입구역에서와 같이 정적인 상태(stationary condition)로 나타내지는 않는다. 따라서 이 지역은 실제로 지형적

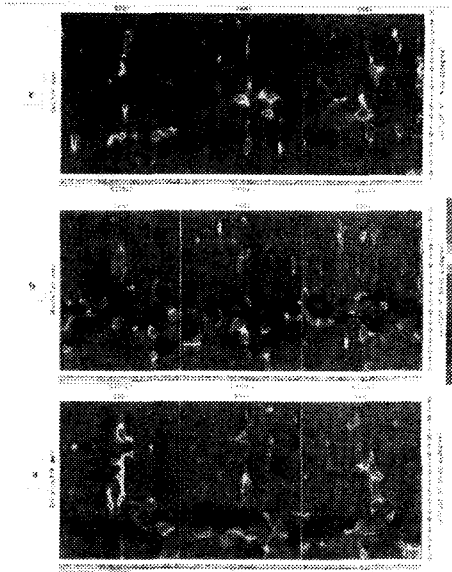


Fig. 2. (a) Entrance, Variations of sea level anomaly to time-latitude along 50°E, (B) Middle, Variations of sea level anomaly to time-latitude along 63°E and (c) Exit, Variations of sea level anomaly to time-latitude along 75°E.

인 영향을 뚜렷이 받지 않는 지역이라고 할 수 있다. 1995년의 끝부분을 보면 따뜻한 와동류 신호가 반시계 방향의 회전 운동(movement with anticyclonic rotation)을 하면서 북동쪽을 향해 이 종단면을 가로지르는 것을 볼 수 있다.

2. 38°-49°S 구역

76°E의 출구역은 흐름이 아주 없는 지역에 위치한다. 또한 이 지역은 암스테르담대지와 케르젤른대지 사이를 남극순환해류가 통과하여 발산(divergence)하고 그리고 와동류가 정체성을 가지는 지역이기도 하다(Fig. 2c).

1993년 10월에 아주 뚜렷한 현상이 강하게 나타나는데, 시계 방향(cyclonic meander)의 와동류가 북쪽을 올라감에 따라 암스테르담과 쉐벨의 해수면이 떨어진다. 이어서 1993년 말과 1994년 초에 케르젤른 근처까지 해수면 증가를 일으키는 반시계 방향(anticyclonic)의 와동류가 형성된다. 와동류계 내 cyclonic 성분의 북쪽 방향을 향한 새로운 이동(migration)은 1994년 말에 나타난다. 그리고 1995년에 이러한 진동(oscillation)이 약해진다.

3. 45°-55°S 구역

이 지역은아남극전선과 극전선이 동시에 지나가는 곳이다. 이 지역 기준선의 위치는 35°-45°S에 비하면 거의 변화가 없다. 이 것은 의심할 바 없이 암스테르담- 크호제트 축을 따르는 흐름의 강도가 매우 약하고 그리고 이 축의 남쪽에 위치한

극전선의 아주 약한 불안정성 때문이다(Fig. 3a). 그런데 케르젤른 동부에서는 아주 강한 변화가 존재한다(Fig. 3b). 이 것은 평균 흐름(Fig. 1)에서

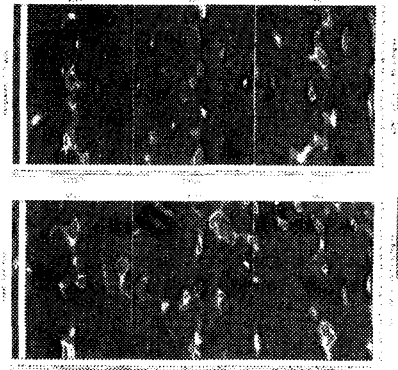


Fig. 3. (a) Crozet, Variations of sea level anomaly to time-latitude along 46.60°S and (b) Kerguelen, Variations of sea level anomaly to time-latitude along 47.65°S.

나타 나는 시계 혹은 반시계 방향의 성분을 가지는 정체적인 와동류 및 사행의 존재와 위치에 관계된다. 이러한 현상은 케르젤른대지의 유입구에서의 지형적인 영향에 기인한다. 이러한 현상은 크호제트와 케르게른의 두 지역에서 함께 일어나면서 진동의 계절적인 과정을 보인다. 이때 약한 진폭은 크호제트- 케르젤른 축내 남극순환해류의 약한 불안정성과 관련된다.

V. 해수면 변화

Fig. 4는 RMS(Root- Mean- Square)로 구한 해수면 변화를 나타낸다. 3년 동안의 제11 사이클에서 제121 사이클에 걸친 Topex/Poseidon의 자료를 사용했다. RMS는 중규모 주요 흐름계의 변화 특성들(사행, 난류 혼합, 해류 흐름 축의 이동, 해류 속도의 변화 등)을 정량적으로 알 수 있게 해준다.

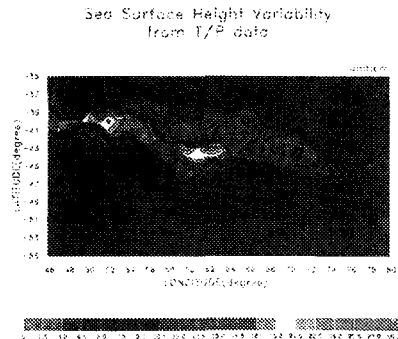


Fig. 4. Sea Surface Height Variability in the South Indian Ocean.

뚜렷한 현상은 강한 흐름(아규라스반류전선, 아열대전선 그리고 아극전선)을 따라 존재하는 와류 운동(푸른색-붉은색, > 10cm)이다. 이 와류 운동은 크호제트분지 내 35°-46°S의 범위에 걸쳐 위도를 따라서 아프리카 남부(46°E)에서부터 암스테르담- 케르겔른 경로(76°E)까지 확장된다. 이 중 가장 강한 와류 운동은 2 개의 좁은 폭(band)으로 한정된다. 하나는 위도 및 경도의 폭이 약 700Km(49°-57°E) 및 450Km(38°-42°E)이며 그리고 나머지 하나의 위도 및 경도의 폭이 약 500Km(58°-64°E) 및 200Km(42°-44°S)를 각각 보인다. 첫 번째 경우는 이 그림에서 보는 바와 같이 해저 지형의 방수로에서 곧 바로 발견되어 진다.

또한 와동류 변화의 공간적 분포는 Geosat로부터 구한 결과와 아주 잘 일치한다[8]. 와동류는 남극순환해류와 아규라스반류가 서로 상충하는 강한 해류가 발생하는 지역에서 발생한다. 아열대전선의 동부와 극전선의 서부는 반대로 약한 변화를 보인다(< 7.6cm, 자주색). 그런데 해수면 변화도에서 우리가 또 알 수 있는 것은 크호제트 및 케르겔른 대지 주변에 집중 해서 뚜렷한 와동류 운동이 일어나지 않는다는 것을 발견 할 수 있다. 이러한 대지 주변에도 공간적으로 최소규모의 운동과 관련되는 와동류의 존재가 나타나야만 한다. 그러나 이러한 와동류의 비존재의 결과는 Topex/Poseidon의 아주 약한 해(분해능)와 본 연구에서 적용된 공간 필터링때문으로 사료된다.

결론적으로, Topex/Poseidon 위성의 고도계 자료는 해수면의 변화에 대한 흐름의 강도와 집중도를 시간적으로 잘 이해할 수 있게 해주며 그리고 전체적인 해양 순환을 잘 이해하는데 있어서 보충적으로 유용한 정보를 제공해준다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

Topex/Poseidon 위성의 자료를 통하여 남인도양의 암스테르담- 크호제트- 케르겔른 지역에 대한 표층 순환과 해수면 변화의 시·공간적인 해석을 쉽게 수행 할 수 있었다. 각 지역에서의 시·공간적인 변화 특성들은 아래와 같이 결론지을 수 있다.

암스테르담지역은 서쪽으로 전파하는 로쓰비파가 조사되었다. 그러나 이 파는 동쪽으로 전파하는 남극순환해류의 영향을 받는다.

쌍뿔지역은 5cm 정도의 해수면 진동과 함께 약 130일 정도의 주기성을 보였다. 서쪽으로 전파하는 신호인 자유 표면의 진동이 실제로 조사되었다.

크호제트지역의 장주기 해수면 변화는 10-20cm 정도의 진동을 보이며, 이 때 반년 주기보다는 적은 약 120- 130일 정도의 주기를 가진다.

케르겔른지역은 대지지역과 섬지역으로 나누어진다. 대지지역은 장주기의 해수면 진동이 다른

지역에 비해서 작은 진폭인 약 10cm 정도를 보이며 그리고 주기는 약 130- 140일 정도 였다. 이 대지지역은 남극순환해류의 남북 방향의 계절적 운동(glissement)과 관련된다. 해안지역을 보면, 위성자료의 경우는 자료의 결손으로 뚜렷한 진폭은 찾아 볼 수 없으나 전체적으로 반년 정도의 장주기를 나타내었다.

참고문헌

- [1] Gamberoni, L., Geronimi, P. F., Jeanninan and J. F. Murail. 1982. Study of front zones in the Crozet- Kerguelen region, *Oceanol. acta*, 5, 289-299.
- [2] Park, Y. H., L. Gamberoni and E. Charriaud. 1991. Frontal structure and transport of the Antarctic Circumpolar Current in the South Indian Ocean sector, 40°-80°E, *Mar. Chem.*, 35, 45-62.
- [3] Molinelli, E. J. 1981. Antarctic influence on Antarctic Intermediate Water, *J. Mar. Res.*, 39, 267-293.
- [4] Gordon, A. L., J. R. E. Lutjeharms and M. L. Grundling. 1987. Stratification and circulation at the Agulhas Retroflexion, *Deep Sea res.*, 43, 565-599.
- [5] Nowlin, W. D., Jr. and J. M. Klink, 1986. The physics of the Antarctic Circumpolar Current, *rev.*, *Gephys*, 24, 469-491.
- [6] AVISO. 1995a. Aviso Users Handbook: reduced GDR, AVI- NT- 011- 311- CN, Edition 1.
- [7] AVISO. 1995b. Aviso Users Handbook: Sea Level Anomaly files, Technical Report, AVI- NT- 011- 312- CN, Edition 1.
- [8] Park, Y. H. and Saint-Guily B. 1992. Sea Level Variability in the Crozet- Kerguelen- Amsterdam Area from Bottom Pressure and Geosat Altimetry, *Geophysical Monography* 69, IUUGG Volume II, pp. 117-131.