

남인도양의 해수면 변화 특성

윤홍주*

Characteristics on sea level variations in the South Indian Ocean

Hong-Joo Yoon*

요 약

남인도양의 암스테르담- 크호제트- 케르겔른 지역에서의 Topex/Poseidon의 고도계 자료와 Tide Gauge의 해면계 자료를 상호 비교 및 검증하였다. 8개 주요 조석성분들의 진폭의 변동성과 관련하여 해양조석모델의 결과와 조화분해해석의 결과간의 미소한 차이는 궁극적으로 수온, 밀도 및 바람보다는 주로 남극순환해류의 흐름에 영향을 받는다. 두 자료간의 상관관계(correlation coefficient)와 편차(rms)를 보면, 암스테르담 대지지역에서는 $c=-0.12$ 및 $rms=11.40cm$, 크호제트 대지지역에서는 $c=0.05$ 및 $rms=5.38cm$, 케르겔른 대지지역에서는 $c=0.83$ 및 $rms=2.83cm$ 로 그리고 케르겔른 해안지역에서는 $c=0.24$ 및 $rms=6.72cm$ 로 각각 나타났다. 이 중 케르겔른 대지지역의 높은 상관성은 해안지역으로부터 멀어질수록 정도 높은 고도계의 자료를 획득할 수 있다는 것을 의미한다. 케르겔른 해안지역과 케르겔른 대지지역의 해수면의 변화의 특성은 2일 상의 장주기에 대해서는 상호 높은 상관성과 함께 유사한 해수면의 변화를 가진다. 케르겔른 대지지역 내에서는 유속이 $-3.9\sim-4.2cm/sec$ 이고 주기가 167days 그리고 진폭이 10cm인 바로크리닉 로쓰비파가 서쪽으로 전파한다.

ABSTRACT

According to standard procedures as defined in the users handbook for sea level data processes, I was compared to Topex/Poseidon sea level data from the first 350days of mission and Tide Gauge sea level data from the Amsterdam- Crozet- Kerguelen region in the South Indian Ocean. The comparison improves significantly when many factors for the corrections were removed, then only the aliased oceanic tidal energy is removed by oceanic tide model[11] in this period. Making the corrections and smoothing the sea level data over 60km along-track segments and the Tide Gauge sea level data for the time series results in the digital correlation and RMS difference between the two data of $c=-0.12$ and $rms=11.4cm$, $c=0.05$ and $rms=5.38cm$, $c=0.83$ and $rms=2.83cm$, and $c=0.24$ and $rms=6.72$ for the Amsterdam, Crozet and Kerguelenplateau, and Kerguelen coast, respectively. It was also found that the Kerguelen plateau has a comparisons due to propagating signals(the baroclinic Rossby wave with velocity of $-3.9\sim-4.2cm/sec$, period of 167days and amplitude of 10cm) that introduce temporal lags($\tau = 10\sim30days$) between the altimeter and tide gauge time series. The conclusion is that on timescales longer than about 10days the RMS sea level errors are less than or of the order of several centimeters and are mainly due to the effects

* 여수대학교 해양시스템학부

접수일자: 2001. 11. 6

of currents rather than the effects of sterics(water temperature, density) and winds.

Key words

Topex/Poseidon altimetry, In suit Tide Gauge, Data processing, Sea levels, Baroclinic Rossby waves

1. 서론

Topex/Poseidon위성의 고도계(altimeter)는 해양의 해수면 높이를 측정하는데 사용된다. 즉, 해양의 어떤 점에서의 임의의 수직 기준점에 대한 시간에 따른 해수면의 변화 값을 연속적으로 제공해준다. 이때 해수면 높이의 수직기준점이란 임의적인 것으로 지반이 수직운동을 하지 않는다는 가설을 전제로 한다. Tide Gauge와 같은 해면 측정계는 시간에 따른 해면의 높낮이 변화를 연속적으로 측정하는데 사용한다. 따라서 고도계의 해수면 자료와 해면계의 해수면 자료를 시·공간적으로 비교하여 상호간의 일치성이 어떻게 나타나는지를 파악할 수 있다. 이러한 비교연구들이 처음에는 수개월 이상에 걸친 Geosat위성의 고도계 자료들을 이용하여 수행되었다. 이때의 결과는 기본적으로는 두 자료간의 비교는 가능했으나 대체로 위성궤도의 낮은 정도 때문에 root-mean-square(rms)가 대체로 10~20cm범위의 높은 오차를 나타내었다[1]~[6]. 그러나 Topex/Poseidon의 위성은 자체의 정확하고 정도 높은 위성궤도 때문에 본 연구에서는 수 cm 정도의 매우 낮은 rms를 나타낼 것으로 생각된다.

T/P자료로부터 정도 높은 해수면의 값을 구하기 위해서는 여러 가지 원인(대기 및 해양의 영향)에 의한 들에 기인하는 오차 값들을 보정해주어야 하는데, 이러한 것을 보정해주는 알고리즘은 AVISO[7],[8]에 잘 설명되어 있다. 특히 해양에서 높은 진폭의 변화를 나타내는 해양조석에 의한 오차는 높게 나타나므로 정도 높은 해양조석 모델을 이용하여 오차의 범위를 줄이는 것이 좋다. 즉, 해양조석의 진폭의 변화에 대한 비교에서 Le Provost[9]의 해양조석모델로 계산된 진폭과 현장의 해면자료로 계산된 진폭간의 비교에서 rms가2~3cm로 오차가 매우 낮게 나타난 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 AVISO에서 제공하는 Cartwright and Ray[10]의 해양조석모델 대신에 정도가 높은 Le Provost[11]의 해양조석모델을 사용하였다.

본 연구는 근본적으로 두 가지목적을 가지고 수행

되어졌는데, 첫째는 고도계의 해수면 자료와 해면계의 해수면 자료간의 비교 및 검정을 통한 정량적인 특성을 알아보고, 둘째는 두 자료간의 불일치에 대한 원인들을 정성적으로 이해하는데 있다. 그리고 부가적으로 이 지역에서 발생하는 로쓰비파(Rossby waves)의 전파경로의 특성을 파악해 보는 것이다.

II. 자료 및 방법

1. 고도계의 해수면자료(Topex/Poseidon sea level data)

본 연구에서는 1993년 7월에서 1994년 9월까지의 기간에 걸친 T/P의 고도계자료를 사용했다. T/P자료의 처리과정은 AVISO의 사용자 지침서를 따랐다. 조사 대상지는 남인도양의 암스테르담-크호제트-케르겔렌 지역으로서 45~80 °E 및 35~55 °S에 위치한다(Fig. 1). 따라서 이 지역은 해양학적으로 중규모 스케일의 범위에 포함되는 것을 알 수 있다. 그림에 나타낸 기하학적 지상계좌는 각각 위도 및 경도에 대하여 보 간법을 이용하여 재구성하였다(Fig. 2). 그리고 해면계

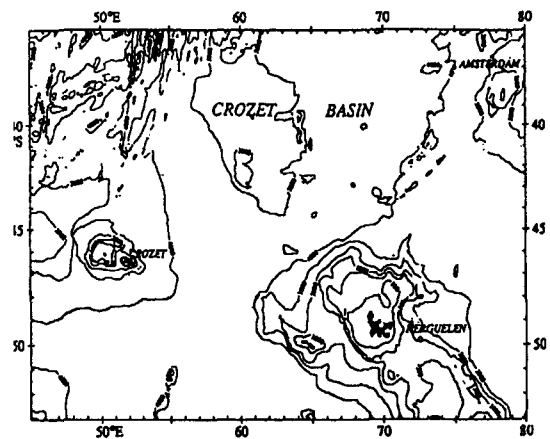


Fig. 1. Amsterdam-Crozet-Kerguelen region of the South Indian Ocean.

의 자료를 현장에서 조사할 당시에 대기압의 자료를 획득할 수 없었으므로 고도계의 자료 처리과정에서 대기압력의 영향인 해면기압(inverted barometer)성분은 고려하지 않았다. 고도계의 자료는 상호 정확한 비교를 위해서 위도를 따라서 해면계의 자료가 측정되는

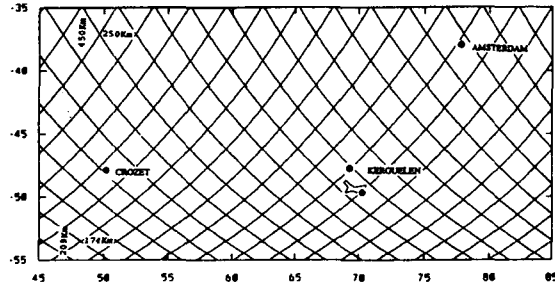


Fig. 2. Ground tracks of Topex/Poseidon satellite and 4 Tide gauge points(●) for Amsterdam, Crozet and Kerguelen plateau, and Kerguelen coast, respectively.

점의 가장 가까운 근접점에서의 자료를 선택하였다. 왜냐하면 일반적으로 해수면의 물리적인 특성들은 해류의 유동과 관련하여 위도를 따라서 잘 보존되기 때문이다. 고도계의 자료는 해면계의 자료와의 비교를 위해서 보간법을 이용하여 1일 간격의 자료로 재구성하여 사용하였다. 고도계의 자료는 지상궤적을 따라서 임의의 조사점에 대하여 약 10일의 반복주기를 가지면서 자료를 만들어내며, 이때 지상궤적 내의 임의의 두 고도계 조사점간의 거리는 매초 약 7km의 거리를 두면서 자료가 제공된다. 따라서 고도계의 자료는 다음과 같이 처리되었다.

1.1 해양 및 기상학적 영향의 보정

고도계의 자료에 탄성조석의 영향, 하중조석의 영향, 해양조석의 영향, 습윤 및 건조 성층의 영향, 이온층의 영향, 전자기적 편파의 영향 그리고 해면상태 편차의 영향들이 각각 보정되어졌다.

1.2 공간적 자료처리

앞에서 보정된 고도계자료에 대한 소규모 스케일의 잡음을 제거하기 위하여 전 조사기간에 걸쳐 지상궤적의 경로를 따라서 60km의 가우시안필터가 처리되었다 [12].

1.3 시간적 자료처리

최종적으로 (1)과 (2)의 단계를 거친 고도계의 자료를 본 연구의 자료로 사용하였다. 이때 고도계의 자료는 단위가 cm이다. 그리고 고도계의 자료는 시간의 간격이 약 10일인데, 해면계의 자료와의 비교를 위해서 선형보간법을 이용해서 1일간격의 자료로 재처리하였다.

2. 해면계의 해수면자료(Tide Gauge sea level data)

일반적으로 해면계의 자료는 자료의 간격이 수초에서 수 시간의 간격으로 측정된다. 이러한 자료들은 고주파수(단주기)의 성분들을 가지고 있는데, 1시간 간격의 자료를 획득하기 위해서는 이러한 고주파수의 성분들을 평균하여야 한다. 이때 1시간 간격의 자료는 일주조 및 반일주조의 성분을 제거하고 계산한다. 그러나 장주기의 조석성분은 자료처리과정에서 드러나지 않는다. 본 연구에서는 해면계에서 조사된 저층 및 표층의 압력자료를 이용하여 시간변화에 따른 해수면 $h(t)$ 의 높이를 아래와 같은 방법으로 구하였다.

2.1 수리학 방정식의 적용

$$h(t) = \frac{P_b(t) - P_a(t)}{\rho g}$$

여기서 P_b 는 해저대지의 150m에서의 저층압력 (mbar), P_a 는 기상관측소의 대기압력(mbar), ρ 는 해수의 밀도(kg/m³) 그리고 g 는 중력가속도(m/sec²)를 각각 나타낸다. 여기서 우리는 ρ 는 수심에 수심에 관계없이 항상 일정하다고 가정하였다.

2.2 시간적 자료처리

위의 식으로부터 계산된 해면계의 해수면에 대하여 해양조석성분을 제거한 후, 이 자료를 시계열을 따라 10일의 가우시안필터가 처리되었다[13]. 이상과 같이 앞의 (1)과 (2)단계를 거친 최종자료를 본 연구에 사용하였다. 이때 해면계의 해수면자료의 단위는 cm이며 시간의 간격은 1일이다.

III. 결과 및 고찰

1. 해양조석모델의 결과와 조화분해해석의 결과

간의 비교

서론에 밝힌 바와 같이 해수면의 변동에 가장 큰 영향을 미치는 환경인자는 해양조석이다. 따라서 순수한 해수면 신호를 추출하기 위해서는 정도 높은 해양조석 모델을 사용하여 잡음신호로 작용하는 해양조석의 영향을 제거하여야 한다. 따라서 Le Provost[11]의 해양조석모델을 이용해서 고도계의 자료를 가지고 구한 결과와 실제로 해면계의 자료를 가지고 조화분해해석을 통하여 구한 결과 - 진폭과 위상 - 를 각각 비교해봄으로서 그 정도를 파악할 수 있다.

Table 1은 해양조석모델과 조화분해로부터 구한 8개($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, Q_1, P_1$)의 주요 해양조석성분들의 진폭을 각각 나타낸다.

우선 두 해양조석모델(model 95.1과 model 95.2)로부터 구한 각 조석성분들의 진폭을 서로 비교해 보면, 무시될 정도 그 차이가 작다는 것을 알 수 있다. 이어서 두 해양조석모델에 대한 진폭의 평균값과 조화분해 해석으로 구한 진폭의 값과 비교를 해보면, 각각의 진폭간에 그 값들이 차이를 각각 나타낸다. 즉, 암스테르담 대지지역의 최대차 및 최소차는 $dt_{max} = 1.735\text{cm}$ (M_2) 및 $dt_{min} = 0.040\text{cm}$ (Q_1), 크호제트 대지지역의 최대차 및 최소차는 $dt_{max} = -1.375\text{cm}$ (M_2) 및 $dt_{min} = 0.020\text{cm}$ (Q_1) 그리고 케르겔른 대지지역의 최대차 및 최소차는 $dt_{max} = 1.920\text{cm}$ (K_1) 그리고 최소차가 $dt_{min} = 0.080\text{cm}$ (Q_1)였다. 여기서 관심을 끄는 것은 암스테르담 대지지역($rms = 0.545$)과는 달리 크호제트 대지지역($rms = -0.475$) 및 케르겔른 대지지역($rms = -0.565$)의 rms가 모두 '-' 값은 보인다. 이것은 두 지역을 지나는 남극순환류(Antarctic Circumpolar Current, ACC)의 흐름이 관여하기 때문인 것으로 보인다. 또한 해면계의 자료와 관련한 케르겔른 대지지역과 케르겔른 해안지역간의 rms비교에서, 케르겔른 해안지역($rms = 16.14\text{cm}$)이 케르겔른 대지지역($rms = 8.22\text{cm}$)보다 2배정도 높게 나타난다. 이러한 현상은 케르겔른 해안지역의 지형적 특성과 관계하는 국부적인 연안해류의 흐름에 기인하여 각 조석성분들이 상대적으로 높은 진폭의 변동성 나타내기 때문인 것으로 보여진다.

이상과 같이 8개 주요 조석성분들의 진폭의 변동성과 관련하여 해양조석모델의 결과와 조화분해해석의 결과간의 미소한 차이는 궁극적으로 수온, 밀도 및 바람보다는 주로 해류의 흐름에 영향을 받는다고 말할

수 있다.

a) Amsterdam plateau						
waves	tide gauge 95	model 95.1	model 95.2	model mean	dt	
	37.90 E	37.9022 E				
	77.58 E	77.5784 E				
1 M2	41.42	39.69	39.68	39.685	1.735	
2 S2	22.31	22.22	22.22	22.220	0.090	
3 M2	7.55	6.83	7.32	7.075	0.475	
4 N2	20.31	6.18	6.18	6.180	0.130	
5 K1	7.63	6.43	6.39	6.420	1.210	
6 O1	3.67	4.18	5.45	5.115	-0.345	
7 P1	0.79	0.73	0.73	0.730	0.040	
8 Q1	2.30	2.10	2.00	2.050	-0.250	
mean	11.49	10.99	10.99	10.970	0.500	
rms	13.80	13.34	13.15	13.225	0.545	
b) Crozet plateau						
waves	tide gauge 95	model 95.1	model 95.2	model mean	dt	
	46.39 E	46.3991 E				
	51.94 E	51.9420 E				
1 M2	17.48	15.85	13.76	13.855	-1.375	
2 S2	12.56	12.56	12.56	12.560	0.000	
3 M2	2.96	3.30	3.16	3.235	-0.315	
4 N2	0.92	0.73	0.73	0.730	-0.175	
5 K1	2.51	2.19	1.93	2.060	-0.250	
6 O1	1.34	1.34	1.01	1.280	-1.020	
7 P1	0.93	0.95	0.93	0.930	0.020	
8 Q1	0.52	0.55	0.40	0.475	-0.045	
mean	3.25	3.65	3.55	3.600	-0.35	
rms	3.67	2.34	2.33	2.345	-0.475	
c) Kerguelen plateau						
waves	tide gauge 95	model 95.1	model 95.2	model mean	dt	
	47.66 E	47.6600 E				
	69.30 E	69.5615 E				
1 M2	24.89	25.34	25.81	25.375	-0.485	
2 S2	14.39	13.32	15.02	14.920	-1.370	
3 M2	4.54	3.84	4.60	4.150	-0.410	
4 N2	10.22	9.34	10.00	9.750	-0.320	
5 K1	4.18	2.00	2.58	2.280	-0.920	
6 O1	1.92	1.92	1.92	1.920	0.000	
7 P1	1.06	0.92	0.92	0.920	0.080	
8 Q1	1.39	0.74	1.01	0.880	-1.110	
mean	7.37	6.65	6.78	6.730	-0.020	
rms	8.22	6.79	6.78	6.785	-0.565	
d) Kerguelen coast						
waves	tide gauge 95	model 95.1	model 95.2	model mean	dt	
	46.39 E	46.3991 E				
	70.22 E	70.2200 E				
1 M2	46.73					
2 S2	20.56					
3 M2	10.43					
4 N2	7.28					
5 K1	7.28					
6 O1	1.15					
7 P1	0.15					
8 Q1	1.15					
mean	16.14					
rms	16.14					

Table 1. Comparison between Tide Gauge sea levels and Topex/Poseidon sea levels (model 95.1 and model 95.2) for 8 significant amplitudes(unit: cm)

2. 고도계의 해수면과 해면계의 해수면간의 비교

2.1 암스테르담 대지지역

이 지역의 두 해수면간의 비교에서, 고도계의 조사점(37.9100°S, 77.4228°E)과 해면계의 조사점(37.9000°S, 77.5800°E)이 상대적으로 서로 가까운 거리(distance, d=13.77km)에 위치해있음에도 불구하고 낮은 상관계수(coefficient of correlation, c=-0.12)와 높은 편차값(root-mean-square, rms=11.40cm)을 보인다(Fig. 3a and 3b). 이러한 결과는 그림에서 보는 바와 같이 고도계의 해수면자료의 초기값의 오차에 주로 기인하는 것으로 보인다.

2.2 크호제트 대지지역

이 지역(Fig. 4a)에서는 고도계의 조사점(46.3992°S, 51.2025°E)과 해면계의 조사점(46.3991°S, 51.9420°E)의 거리(d=57.30km)가 상대적으로 암스테르담 대지지역에 비해서 멀리 떨어져있음에도 불구하고 높은 상관

계수와 낮은 편차 값을 나타낸다. 이때 $c=0.55$ 이며 $rms=5.38cm$ 였다(Fig. 4b).

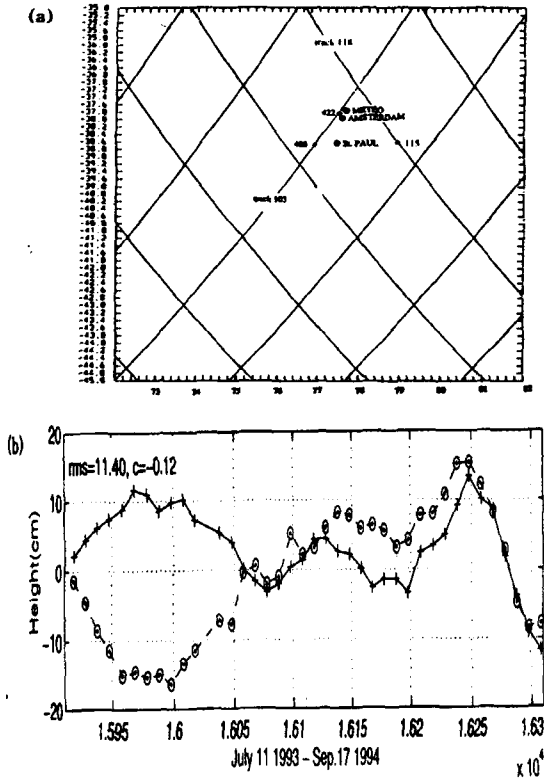


Fig. 3. (a) Position of the Tide Gauge point(●;AMSTERDAM) and Topex/Poseidon point(●; No422 in track 103), and (b) comparison between Tide Gauge sea levels(o) and Topex/Poseidon sea levels(+) in the Amsterdam plateau.

2.3 케르겔른 대지지역

이 지역(Fig. 5a)은 상관계수와 편차 값이 가장 이상적인 결과를 보인다. 즉, $c=0.83$ 및 $rms=2.83cm$ 로 나타났다(Fig. 5b). 이러한 좋은 결과는 고도계의 조사점(47.6471°S,69.4208°E)과 해면계의 조사점(47.6600°S, 69.3600°E)간의 거리($d=4.55km$)가 서로 매우 근접하고 그리고 이 지역이 육상 및 해안으로부터 멀리 떨어진 원해에 위치하여 정도 높은 고도계의 자료를 획득할 수 있었기 때문이다.

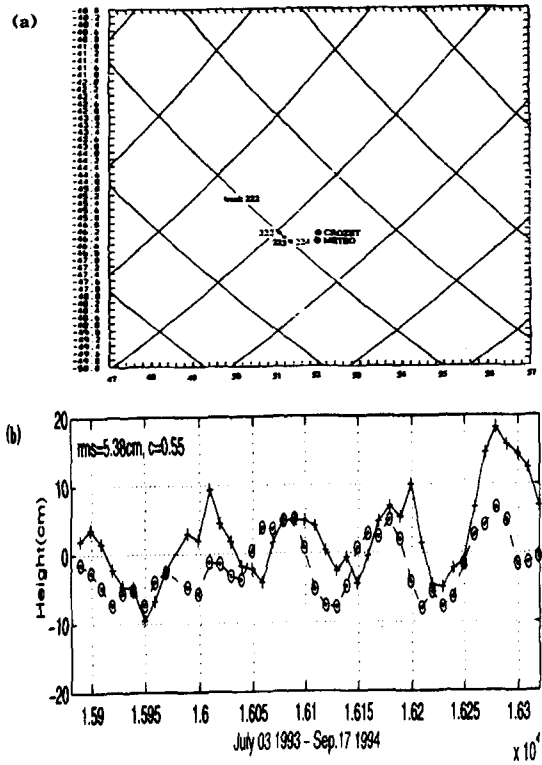
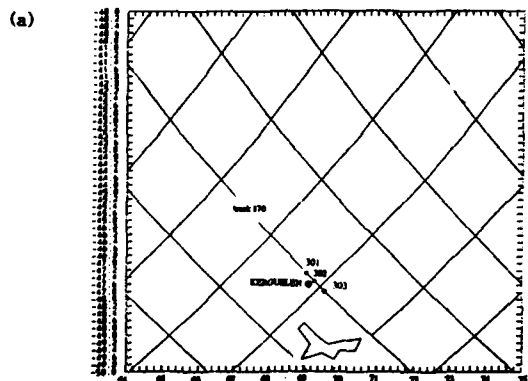


Fig. 4. (a) Position of the Tide Gauge point(●; CROZET) and Topex/Poseidon point(●; No223 in track 222), and (b) comparison between Tide Gauge sea levels(o) and Topex/Poseidon sea levels(+) in the Crozet plateau.



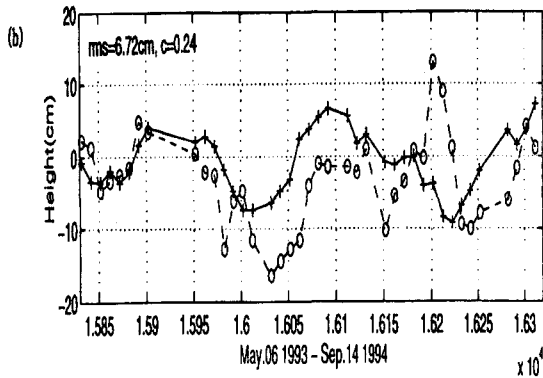


Fig. 5. (a) Position of the Tide Gauge point(●; KERGUÉLEN) and Topex/Poseidon point(●; No302 in track 170), and (b) comparison between Tide Gauge sea levels(o) and Topex/Poseidon sea levels(+) in the Kerguelen plateau.

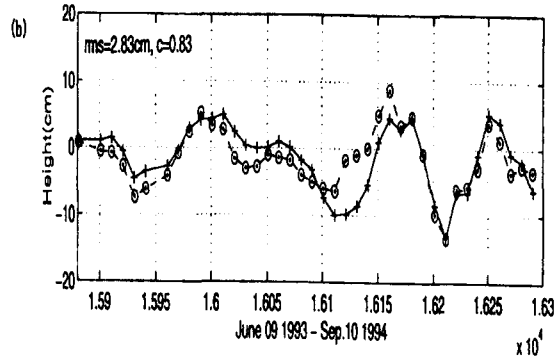
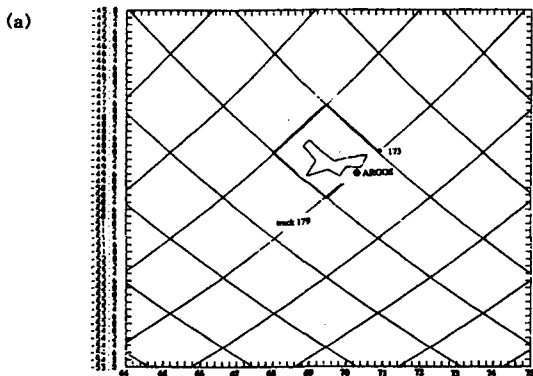


Fig. 6. (a) Position of the Tide Gauge point(●; ARGOS) and Topex/Poseidon point(●; No173 in track 179), and (b) comparison between Tide Gauge sea levels(o) and Topex/Poseidon sea levels(+) in the Kerguelen coast.

2.4 케르겔른 해안지역

이지역(Fig. 6a)에서의 고도계의 조사점(49.2694°S, 70.5859°E)과 해면계의 조사점(49.3300°S, 70.2200°E)간의 거리(d=27.31km)는 상대적으로 그렇게 멀리 떨어져있지는 않으나, 고도계의 조사점이 해안가 가까이 접해있는 관계로 정도가 낮은 고도계의 자료가 획득되었다. 따라서 낮은 상관관계와 높은 편차 값을 보이는데, 이때 c=0.24이며 rms=6.72cm로 나타났다(Fig. 6b).



결과는 고도계의 해수면자료의 오차에 주로 기인한다. 왜냐하면 T/P위성의 고도계는 일반적으로 해안지역 근처에서는 정도 높은 자료를 제공하지 못하기 때문이다.

3. 해면계의 해수면에 대한 케르겔른 대지지역과 케르겔른 해안지역간의 비교

해면계의 해수면과 관련하여 케르겔른 대지지역과 케르겔른 해안지역간의 해수면 변동에 대한 상관성을 알아보는 것은 중요하다. 만약 우리가 이 두 지역간의 정량적인 상관성을 잘 파악할 수 있다면, 풍부한 자료(ARGOS 위성에 의한 대기 및 저층 압력자료, 프랑스 기상청의 대기 압력자료)를 쉽게 획득할 수 있는 케르겔른 해안지역의 자료를 이용해서 케르겔른 대지지역의 해수면 변동과 관련한 물리 및 역학적 현상들을 잘 예측할 수 있다. Coherency squard는 어떤 특정주기에서의 두 해수면간의 상관관계(r^2) 및 위상차(θ)에 대한 좋은 정보를 제공해 준다. 일반적으로 이 식은 아래와 같이 나타낸다.

$$S_{xy}(\omega) = K_{xy}(\omega) - iQ_{xy}(\omega)$$

$$K_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int (C_{xy}(\tau) + C_{yx}(\omega)) \cos \omega \tau$$

$$Q_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int (C_{xy}(\tau) - C_{yx}(\omega)) \sin \omega \tau$$

$$r^2(\omega) = \frac{K_{xy}^2(\omega) + Q_{xy}^2(\omega)}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)}, 0 \leq r^2(\omega) \leq 1$$

$$\theta_{xy}(\omega) = \tan^{-1} \frac{Q_{xy}(\omega)}{K_{xy}(\omega)}$$

여기서 x 및 y 는 케르겔른의 대지지역 및 해안지

역의 해수면, ω 는 $2\pi f$, S_{xy} 는 x 및 y 간의 자기스펙트럼(autospectrum), K_{xy} 는 실수부의 상호스펙트럼(cospectrum), Q_{xy} 는 허수부의 상호스펙트럼(quadspectrum), $C(\tau)$ 는 자기상관의 함수, r^2 는 coherency squard, θ_{xy} 는 위상차, S_{xx} 및 S_{yy} 는 x 및 y 에 대한 자기스펙트럼을 각각 나타낸다.

케르겔른 대지지역 및 해안지역에 대한 편차 값은 각각 $rms=10.88cm$ 및 $rms=9.13cm$ 로, 그리고 두 해수면간의 상관관계는 $c=0.65$ 로 각각 나타났다(Fig. 7a). 95%의 신뢰구간을 가지는 $r^2 \geq 0.46$ 에 대해, 전체적으로 Coherency squard은 $f > 0.5cpd$ (cycles per day)의 주파수에서 높은 상관성을 보인다(Fig. 7b). 즉, 두 해수면간의 거리가 비록 서로 먼 거리에 위치해 있음에도 불구하고 2일 이상의 주기에서는 상호 밀접한 해

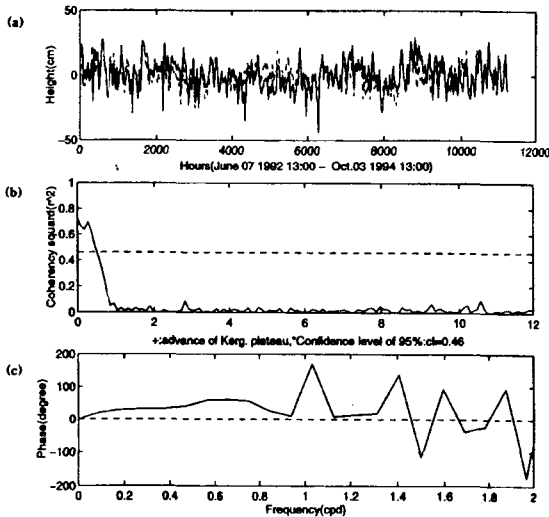


Fig. 7. (a) Variation of the Tide Gauge sea levels in the Kerguelen plateau(—, $rms=10.88cm$) and the Kerguelen coast(···, $rms=9.13cm$), (b) coherency (r^2), and (c) phase (θ) for two sea levels, respectively.

수면의 변동성을 나타낸다는 것을 의미한다. 위상차는 $f > 1.4cpd$ 의 주파수(7일 이상의 주기)에서 일정하게 '+'의 부호를 나타낸다(Fig. 7c). 즉, 케르겔른 대지지역의 해수면의 변동이 앞선다. 따라서 케르겔른 대지지역의 해수면의 변화의 특성이 케르겔른 해안지역의 해

수면의 변화에 전파된다는 것을 의미한다. 이상과 같이 모두 결과들을 종합해 볼 때, 두 지역은 2일 상의 장주기에 대해서는 상호 높은 상관성과 함께 유사한 해수면의 변화를 가진다는 것을 알 수 있다.

4. 케르겔른 대지지역내의 로스비파(Rossby wave)

앞으로 돌아가 다시 Fig. 5b를 관심 있게 보면 여기서 재미있는 현상을 발견할 수 있다. 즉, 이 지역내의 두 지점의 해수면간에는 시간에 따른 어떤 위상 차가 존재한다. 따라서 해면계의 조사점의 해수면의 변화는 고도계의 조사점의 해수면의 변화에 대해서 수십 일을 앞서서 해수면의 변화를 가진다는 것을 쉽게 생각할 수 있다. 이상과 같이 이 지역에서 두 해수면간의 정확한 위상차(시간차)를 알기 위하여 220일까지의 기간에 걸친 자기 및 상호 상관관계를 구하였다(Fig. 8). 두 해수면의 각각에 대한 자기상관(autocorrelation)에 대해서는 뚜렷한 특성을 파악할 수는 없었다(Fig. 8a

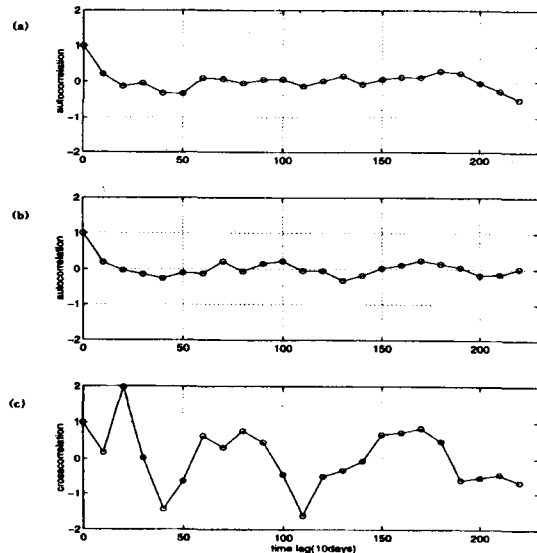


Fig. 8. Autocorrelation of (a) the Topex/Poseidon sea levels and (b) the Tide Gauge sea levels, and (c) cross-correlation between the Topex/Poseidon sea levels and the Tide Gauge sea levels.

and 8b). 그러나 두 해수면간의 상호상관(cross-correlation)은 10~20일 사이에서 최대의 상관계수값($c=2$)을 보인다. 여기서 '+'의 부호는 해면계의 해수

면이 고도계의 해수면보다 앞서서 해수면의 변화를 일으킨다는 것을 의미한다.

해면계의 조사점과 같은 위도에 위치한 지상계적 170번 내 고도계의 조사점(302번)의 표면에서의(Fig. 5a) 지형류의 속도를 알아볼 필요가 있다. Fig. 9a는 지상계적 170번에 대한 약 1년 간의 각각 싸이클(12~46 cycles)의 해수면의 변화를 나타낸다. 전 기간에 걸쳐서 남극순환류(Antarctic Circumpolar Current, ACC)가 강하게 흐르는 케르겔른의 경로(passage, 35~50°S)에서 가장 높은 해수면의 변화를 일으키는 것을 잘 알 수 있다.

이러한 높은 해수면의 변화는 주로 남극순환류와 해저지형(케르겔른의 북부 대륙사면과 크호제트의 남부 해저대지)의 영향에 기인한다. Fig. 9b에서 점선은 Fig. 9a의 각각의 싸이클을 평균한 평균해수면(MSL, rms=52.89cm)을 그리고 실선은 평균해수면에 대하여 지오이드의 변동(ondulation of geoid)에 기인하는 오차를 제거한 후의 평균해수면(MSL_{geo}, rms=52.89cm)을 각각 나타낸다. 이때 적용한 지오이드모델은 G91OSU이다. 여기서 알 수 있는 것은 이 지역이 소규모의 스케일이기 때문에 앞의 두 평균해수면의 편차 값간의 차이가 1.16cm 정도 작게 나타나지만, 대규모의 스케일에서는 큰 차이를 나타낼 것이다. 이렇게 평균해수면에 지오이드의 변동성에 기인하는 오차를 제거해주는 이유는 더욱 정확한 지형류를 계산하기 위해서이다. 예를 들어 Fig. 9c와 같이 지오이드의 오차가 제거된 후의 219번의 조사점(43.75°S)과 302번의 조사점(47.65°S)간의 평균해수면은 지오이드의 오차가 제거되지 않은 평균해수면에 비해서 더욱 이상적인 해저지형(크호제트 해저대지내의 케르겔른 대륙사면)을 반영한다고 할 수 있다.

따라서 이상과 같은 결과들을 근거로 이 지역에서의 표면 지형류를 계산할 수 있다. Fig. 10a는 고도계의 해수면의 조사점 302번에서 12~46 싸이클에 걸친 시간에 따른 x축 방향의 지형류 속도의 변화를 나타낸다. 여기서 실선은 평균 해수면에 대한 지형류(U) 그리고 점선은 평균 해수면에 지오이드오차를 보정한 후의 평균 해수면에 대한 지형류(U_{geo})를 각각 나타낸다. 계산 결과 두 지형류 모두 유사한 값을 보인다(U=4.3972cm/sec, U_{geo}=4.4026cm/sec). 그러나 주기에 따른 스펙트럼분석(Power Spectrum Density, PSD)을 해보면 U_{geo}가 U에 비해서 뚜렷한 특성을 보

인다. 이 특성을 상세히 알아보기 위하여 Fig. 10b에 U_{geo}에 대한 PDS를 나타내었다.

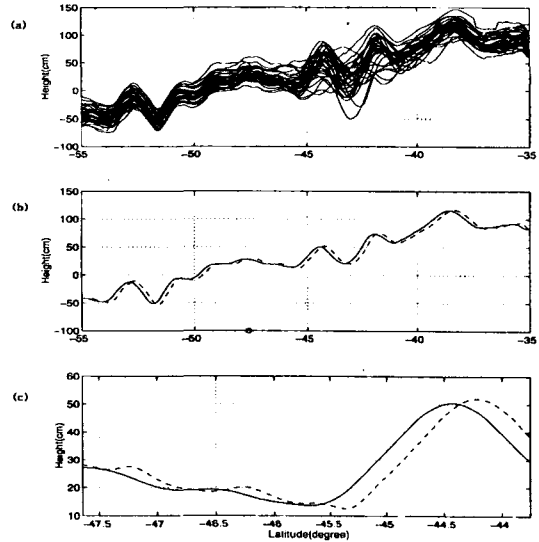


Fig. 9. (a) Variations of sea levels, (b) Mean Sea Level(MSL, ...) and MSL corrected by the G91OSU(MSL_{geo}, —) along the 35~55°S, and (c) MSL(...) and MSL_{geo}(—) along the 43.75~47.65°S, respectively, in track 170 during 1 year(from 12 to 47 cycles).

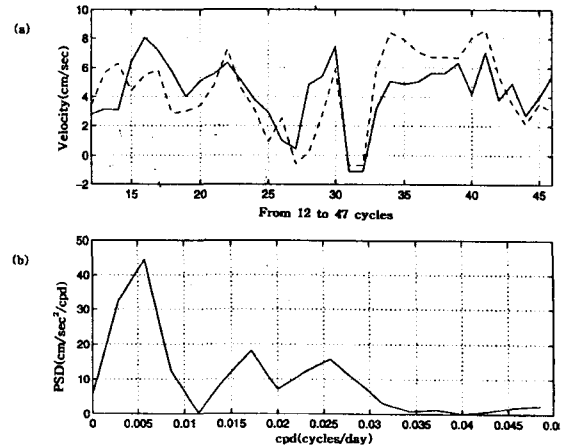


Fig. 10. (a) Surface geostrophic currents by MSL(U=4.3972 cm/sec, —) and MSL_{geo}(U_{geo}=4.4026cm/sec, ...) at the point 305 in the ground track 170 during 1 year(from 12 to 47 cycles), and (b) Power Spectrum Density(PSD) for U_{geo}.

이때 주파수가 $f=0.006$ cycle/day(주기는 $T=166.6$

days)에서 최대의 피크(peak)를 보인다. 즉, 표면에서 advection 성분의 지형류($U_{adv} = U_{geo}$)가 발생하는데 동쪽방향으로 진행을 하면서 4.4cm/sec의 속도와 167일(약 4개월)의 주기를 가진다는 것을 의미한다. Fig. 11은 케르겔른 대지지역 내에서 서쪽으로 로쓰비파가 전파한다는 것을 보여준다. 이 그림에 대한 설명은 앞서 논의한 모든 결과들로부터 다음과 같은 가설을 설정하여 설명 할 수 있다. 여기서 (1) U_{geo} 는 이 지역에서 항상 일정한 속도를 가진다($U_{geo}(x)=U_{geo}(y)$), (2) 해면계의 조사점은 초기시간(t)에 advection하는 지형류가 순간적으로 포착된 지점이며, perturbation을 통하여 어떤 특정시간($t+dt$)에 고도계의 조사점까지 전파된다. 이때 이 것은 약 1일 후에 도달하게 된다($dt=dx/U_{geo}=4550m/0.044m/sec=1day$). (3) 지형류가 해면계의 조사점에서 고도계의 조사점까지의 도달하는 데는 10~30일정도의 시간차를 가진다(Fig. 8c 참조). (4) 외형속도(U_{appear} , 겉보기속도)는 동쪽으로 전파하고 반대로 로쓰비파(U_c)는 서쪽으로 전파한다($U_{appear} = 4550m/10\sim 30days = 0.18\sim 0.5cm/sec$, $U_c = -(U_{adv} - U_{appear}) = -3.9\sim -4.2cm/sec$). 끝으로 (5) 고도계의 해수면과 해면계의 해수면간의 변화에 대한 진폭은 약 10cm이다(Fig. 5b 참조). 이상을 종합해 보면, $-3.9\sim -4.2cm/sec$ 정도의 유속, 167일 정도의 주기 그리고 10cm 정도의 진폭을 가지며 서쪽으로 전파하는 로쓰비파가 존재한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는

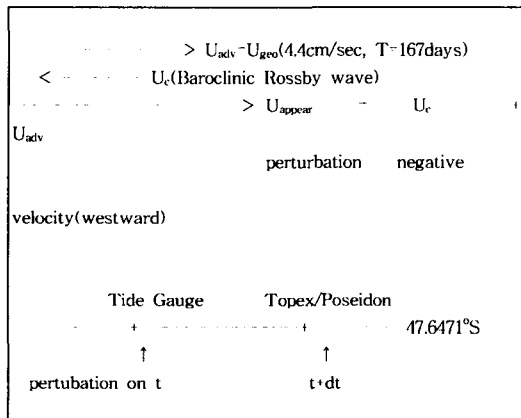


Fig. 11. Propagation of Baroclinic Rossby wave for the western direction in the Kerguelen plateau.

Park and Saint-Guilly[6]가 이 지역의 남극순환류 내에서 발생하는 바로크리닉 로쓰비파(baroclinic planetary Rossby wave)의 유속($U_c = -2\sim -4cm/sec$) 및 주기($T=180\pm 40days$)에 대하여 이론적으로 설명한 결과들과 대체로 잘 일치한다.

IV. 결론

약 1년 간에 걸쳐서 조사된 남인도양의 암스테르담-크호제트-케르겔른 지역에서의 Topex/Poseidon의 고도계 자료와 Tide Gauge의 해면계 자료를 상호 비교 및 검증하였다. 고도계의 자료로부터 고도계의 해수면을 산출하는 데는 AVISO가 제공하는 사용자지침의 자료처리과정을, 해면계의 자료로부터 해면계의 해수면을 산출하는 데는 수리학 방정식을 각각 이용하였다. 그리고 두 자료간의 비교를 위해서 보간법을 이용하여 1일의 같은 시간간격으로 재배열하였다.

8개 주요 조석성분들의 진폭의 변동성과 관련하여 해양조석모델의 결과와 조화분해석의 결과간의 미소한 차이는 궁극적으로 수온, 밀도 및 바람보다는 주로 남극순환해류의 흐름에 영향을 받는다고 말할 수 있다. 특히 케르겔른 대지지역보다 케르겔른 연안지역의 진폭의 변동성이 높은 것은 해안지역의 지형적 특성과 관계하는 연안해류의 흐름이 크게 영향을 미치기 때문이다.

두 자료간의 상관관계(correlation coefficient)와 편차(rms)를 보면, 암스테르담 대지지역에서는 $c=-0.12$ 및 $rms=11.40cm$, 크호제트 대지지역에서는 $c=0.05$ 및 $rms=5.38cm$, 케르겔른 대지지역에서는 $c=0.83$ 및 $rms=2.83cm$ 로 그리고 케르겔른 해안지역에서는 $c=0.24$ 및 $rms=6.72cm$ 로 각각 나타났다. 이 중 케르겔른 대지지역이 상관계수와 편차 값이 가장 이상적인 결과를 보이는데, 이 것은 케르겔른 해안지역과는 달리 육상 및 해안지역으로부터 멀어질수록 정도 높은 고도계의 자료를 획득할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 2일 이상의 장주기에 대한 케르겔른 해안지역의 해수면 자료로부터 케르겔른 대지지역의 해수면의 변화의 특성을 파악할 수 있다. 즉, 두 지역은 2일 상의 장주기에 대해서는 상호 높은 상관성과 함께 유사한 해수면의 변화를 가진다. 끝으로 케르겔른 대지지역 내에서는 바로크리닉 로쓰비파가 발생하는데, 이 파는

-3.9~-4.2cm/sec의 유속, 167days의 주기 그리고 10cm의 진폭을 가지면서 서쪽으로 전파한다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] Tai, C. -K., W. White, and S. Pazan, 1989, Geosat crossover analysis in the tropical Pacific, 2, Verification of altimetric sea level maps with expendable bathythermograph and island sea level data, J. Geophys., 94, pp. 879-908.

[2] Cheney, R., B. Douglas, and L. Miller, 1989, Evaluation of Geosat altimeter data with application to tropical Pacific sea level variability, J. Geophys. Res., 94, pp. 4737-4748.

[3] Wyrtki, K., and T. Bongers, 1987, Sea level at Tahiti- A minimum of variability, J. Phys. Oceanogr., 17, pp. 164-168.

[4] Harangozo, S., P. Woodworth, R. Rapp, and Y. Wang, 1993, A comparison of monthly mean sea level variability determined from Geosat altimetry and a global tide gauge dataset, Int. J. Remote Sens., 14, pp. 789-795.

[5] Chao, Y., D. Halpern, and C. Perigaud, 1993, Sea surface height variability during 1986-1988 in the tropical Pacific Ocean, J. Geophys. Res., 98, pp. 6949-6960.

[6] Park, Y. H. and B. Saint-Guily, 1992, Sea level variability in the Crozet- Kerguelen-Amsterdam area from bottom pressure and Geosat altimetry, Geophysical Monograph 69, IUGG Vol. 11, pp. 117-131.

[7] AVISO, 1994a, AVISO CD-ROM User manual: Merged Topex/Poseidon products, AVI-NT-02-100-CN, Edition 2.1.

[8] AVISO, 1994b, AVISO User handbook: Merged Topex/Poseidon products, AVI-NT-02-101-CN, Edition 2.1.

[9] Le Provost, C., M. Genco, and F. Lyard, 1994b, Modeling and prediction tides over the World

Ocean, Coastal and Estuarine, Geophys. Res. Lett., pp. 845-848.

[10] Cartwright, d. E. and R. D. Ray, 1990, Oceanic tides from Geosat altimetry, J. of Geo. Res. 95: 3069-3090.

[11] Le Provost, C., M. Genco, and F. Lyard, 1994a, Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model, J. Geo. Res., Vol. 99, C12, pp. 24777-24797.

[12] Yoon, H. J., 1997, The variation of sea level in the Amsterdam- Crozer- Kerguelen region of the South Indian Ocean, PhD. thesis, Joseph fourier University - Grenoble I, III, pp. 31-32.

[13] Park, Y. H. and L. Gamberoni, 1995, Large-scale circulation and its variability in the South Indian Ocean from Topex/Poseidon altimetry, J. geo. Res., Vol.100, c12, pp. 24911-24929.



윤홍주(Yoon, Hong-Joo)

1983 釜慶大學校 海洋工學科(工學士)

1985 釜慶大學校 大學院 海洋工學科(工學碩士)

1993 프랑스 Paris VI대학 博士準備課程(DEA)

1999 ~ 현재 麗水大學校 해양시스템학부 해양공학과 조교수

※ 관심분야: 위성원격탐사(위성해양학, 위성기상학), 해양GIS, GPS