

동아시아 주변해역에서의 TOPEX/POSEIDON 고도 자료와 현장 해수면 자료의 비교

윤용훈 · 오임상^{1*} · 김기현² · 박용향³

기상연구소 지구대기감시관측소, ¹서울대학교 지구환경과학부
²세종대학교 지구과학과, ³파리 자연사 박물관 해양물리연구소

Comparison of Sea Level Data from TOPEX/POSEIDON Altimeter and *in-situ* Tide Gauges in the East Asian Marginal Seas

YONG-HOON YOUN, IM SANG OH^{1*}, KI-HYUN KIM², AND YOUNG-HYANG PARK³

Korea Global Atmosphere Watch Observatory, Meteorological Research Institute, Chungnam 357-961, Korea

¹*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

²*Department of Earth Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea*

³*Laboratoire d'Océanographie Physique, Museum National d'Histoire Naturelle 75231, Paris*

동아시아 해역에서 TOPEX/POSEIDON(T/P) 위성 고도계로부터 관측된 해수면 자료의 객관성을 검증하기 위하여 위성궤적에 시·공간적으로 가장 상응하는 10개소 조위관측소 자료(tide gauge data: TG)를 택하여 비교분석을 시행하였다. 이를 위해, 1992년 10월부터 1998년 12월까지 관측된 T/P의 고도자료(2~230번 사이클)를 비교분석에 활용하였다. 연구대상지역인 동아시아 주변 해상의 강한 조석현상으로 인해, T/P자료를 이용한 역학 고도의 산출에서 조석오차의 처리가 대단히 중요하다. 이러한 문제점을 감안하여, T/P자료의 처리는 Park and Gamberoni(1995)가 제시한 방법을 이용하였다. T/P자료를 처리한 결과, M_2 , S_2 , K_1 분조에 의한 주기가 각각 62.1, 58.7, 173일 주기의 조석변형 오차로 나타났다. 이러한 오차의 영향을 감소시키기 위해, Gaussian 방식을 이용하여 다양한 주기별로 저주파 필터를 적용하였다. 필터주기별로 처리된 결과를 비교하면, 최소 200일 이상의 저주파 필터를 적용할 때 T/P자료의 거칠 신호를 이상적으로 제거할 수 있음이 확인되었다. 따라서 200일을 기준으로 모든 조위관측점들에 대해 RMS값을 구한 결과 2.8~6.7 cm의 범위로 나타났고, 두 측정방식간에서 통계적으로 유의한($P < 0.0001$) 상관성이 일관성있게 확인되었다. 이러한 연구결과에 따르면, 조석오차가 큰 동아시아 주변 해역에서 해수면 변화를 연구하기 위해서는 조석 오차의 영향을 최대한 억제할 수 있는 장주기(최소한 200일)를 기준으로 해수면자료를 비교하는 것이 바람직하다.

In an effort to assess the reliability of satellite altimeter system, we conducted a comparative analysis of sea level data that were collected using the TOPEX/POSEIDON (T/P) altimeter and the 10 tide gauge (TG) stations in the satellite passing track. The analysis was made using data sets collected from marginal sea regions surrounding the Korean Peninsula at T/P cycles of 2 to 230, which correspond to October 1992 to December 1998. Because of strong tidal activity in the study area, treatment of tidal errors is a very critical step in data processing. Hence in the computation of dynamic heights from the T/P data, we adapted the procedures of Park and Gamberoni (1995) to reduce errors associated with it. When these T/P data were treated, the alias periods of M_2 , S_2 , and K_1 constitutions were found at 62.1, 58.7, and 173 days. The compatibility of the T/P and TG data sets were examined at various filtering periods. The results indicate that the low-frequency signal of T/P data can be interpreted more safely with longer filtering periods (such as up to the maximum selected values of 200 days). When RMS errors for 200-day low-pass filter period was compared among the whole 10 tidal stations, the values spanned in the range of 2.8 to 6.7 cm. The results of correlation analysis at this filtering period also showed a strong agreement between the T/P and TG data sets over the whole stations investigated (e.g., P values consistently less than 0.0001). According to our analysis, we conclude that the analysis of surface sea level using satellite altimeter data can be made safely and reasonably long filtering periods such as 200 days.

Key words: sea level, TOPEX/POSEIDON altimeter, tide gauge

*Corresponding author: ois@storm.snu.ac.kr

서 론

Topex/Poseidon(T/P) 위성은 1992년 8월 10일 아리안(Arian) 로켓에 의해서 적도상공의 고도 1336 km에 올려졌다. 이 위성은 매우 정확한 위성궤도(orbitography)를 가지는 최초의 위성으로서, 위성의 공전궤도는 대기 마찰력의 영향과 지구 중력장의 변화를 최대한 줄이는 방향으로 선택되었다(위성의 경사도(inclination)는 조석에 기인하는 고도 변화를 잘 결정할 수 있도록 남·북반구의 위도 약 66°에 근접하게 설계되었다.). 실제로 이 위성은 2개의 고도계 레이더(altimeter radar)를 탑재하여, 수 cm의 RMS 오차범위 내에서 해수면의 변화를 측정할 수 있다. 이 위성은 동일한 조사점(ground station)을 약 10일의 반복주기로 지나가므로, 해수순환, 해수면의 계절변화, 엘니뇨와 관련된 해수면의 연변화, 지구규모의 기후변화 등을 지속적으로 감시하고 조사하는데 활용이 되고 있다(Nerem, 1995).

T/P 위성의 고도계는 해양표면에서 위성까지의 거리(altimeter range)와 준거 타원체(reference ellipsoid)에 대한 위성의 높이(altimeter height)간의 차이로부터 해수면 고도를 결정한다(Fig. 1). 이러한 원리를 바탕으로 하여 지난 20여년간 급속도로 진행된 위성의 개발(e.g., Seasat, Geosat, ERS 1으로부터 TOPEX/POSEIDON(T/P)까지)은 이를 활용한 지표면 고도관측의 정확도를 향상시키는 계기로 작용하였다. 특히 T/P의 해수면 고도자료는 대규모 해수순환의 연구에 매우 유용하게 이용되고 있다. 그리고 정확한 연구 결과들을 도출하기 위하여 현재까지 많은 과학자들이 현장 중심의 관측자료와의 비교를 통해 T/P 고도자료의 보정이나 검증은 물론 T/P자료의 유용성에 대한 평가를 시도한 바 있다(Mitchum, 1994; Christensen *et al.*, 1994; Tapley *et al.*, 1994; Katz *et al.*, 1995; Park and Gamberoni, 1995; Picaut *et al.*, 1995; Verstraete and Park, 1995). 이와 같은 수많은 노력의 결과로 외양의 경우 2~3 cm 수준의 정확도 내에서 T/P 고도자료를 생산하는 것이 가능해졌다(Marshall *et al.*, 1995). 그러나 T/P 고도자료는 전국규모의 조석모델을 사용하고 있어 조석 제거시 조차가 큰 해역이나 연안역에서 큰 오차를 발생할 수 있다. 예를 들어, 동중국해나 황해와 같이 조석현상이 복잡하고 강한 연안지역의 경우, T/P 고도자료를 그대로 사용하는데 많은 제한이 따른다(Nishida, 1980; Yanagi and Takahashi, 1997). 따라서 지금까지 조차가 큰 해역이나 연안역과 같이 양질의 T/P 고도자료를 획득하기 어려운 지역의 경우, 자료의 객관성을 확보하는데 많은 어려움을 경험하였다.

본 연구에서는 연안역을 중심으로 관측된 T/P자료의 정확한 해석을 위해, 조위계(tide gauge: TG)를 이용한 정점별 조위자료와의 비교를 수행하였다. 이러한 비교의 객관성을 확보하기 위해, 여러 가지 보정이 수행되었다. 이를 토대로 두 가지 방식의 결과에 대한 차이점을 체계적으로 분석하고자 하였다. 이와 같은 보정에는 여러 가지 환경적 인자들에 대한 처리가 요구되는데, 특히 기상적 요소로서 대기압 효과(inverse barometric effect), 해양 요소로서 조석 변형(tidal aliasing) 등이 중요하다. 따라서 본 연구를 통해 한반도 연안과 동아시아 주변 해역에서의 T/P 고도 자료로부터 조석변형을 제거하는 방법을 제시하고, 이들 방법에 의해 계산된 해수면 고도자료의 차이점을 설명하고, 그리고 위성자료와 현장자료간의 비교를 통한 상관성을 파악하고 이해하는데 그 목적을 두었다.

이론적 배경

해수면의 변동요인

일반적으로 해양에서의 해수면 변화 h_{sl} 은 여러 가지 인자들에 의하여 영향을 받는데, 수세기에 걸쳐서 일어날 수 있는 장주기 성분의 영향들과 그 기여도가 매우 미약한 인류 활동의 영향들을 무시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{sl} = h_{tide} + h_{ib} + h_{wind} + h_{current} + h_{steric}$$

따라서 해양에서 해수면의 변화는 대체로 위의 5가지 인자들에 의해서 그 특성이 좌우된다.

한편 우리나라 주변 해역에서의 해수면 변화는 하계에 높고 동계에 낮은 계절적 경향성을 유지한다. 이처럼 해수면의 주기적 변동이 일어나는 현상은 대기압 변화, 열과 염의 변화, 바람 응력의 변화, 해류의 계절적 변화와 같은 환경요인 외에도 증발, 강수, 강물 유출 등과 같은 담수변화를 조절하는 요인 등에 직·간접적으로 영향을 받은 결과로 알려져 있다(Kang and Lee, 1985). 대기압의 변화에 의한 해수면의 변동은 해수면이 대기압에 의해 정수역학적으로 순응한 것으로 가정하여 산정한다(예를 들어, 대기압이 1 hPa 증가하면 평균해수면은 약 1 cm 정도 감소한다). 위에서 언급한 해수면의 주기적 변동과 관련된 각 요소의 상대적 중요성은 지역에 따라 다르게 나타난다. 실제로 비교적 가까운 위치에 인접한 한국, 일본, 중국의 연안지역에서도 이와 같은 요인의 영향을 쉽게 발견할 수 있다. 우선 한반도 연안의 경우, 해수면 변동은 주로 열염효과와 기압효과에 기인된 것으로 알려져 있다(Yi, 1967; Patullo *et al.*, 1955). 이에 비해 일본의 연안지역은 주로 수온의 변화가 중요한 역할을 하며, 그의 대기압의 변화도 중요한 것으로 알려져 있다(Nomitsu and Okamoto, 1927). 반면, 남중국해의 경우 대기압 변동과 같은 요인보다는 주로 문순 바람에 의해 조절되는 것으로 밝혀져 있다(Tvi, 1970).

역학고도의 계산

본 연구의 목표로 설정한 고도 측정방식의 체계적인 검증을 위해, T/P자료의 경우 AVISO(Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Data in Oceanography) Center에서 만든 T/P 자료(GDR-M)를 이용하였다. 보다 구체적으로 연구지역과 기간은 동아시아 해역(115°~160°E, 20°~50°N)의 2~230번 사이클까지(1992년 10월~1998년 12월)의 자료를 선택하였다. T/P 자료의 처리는 Park and Gamberoni(1995)가 제시한 방법을 이용하였다. 자료처리는 크게 두 단계로 구분할 수 있다. 첫 번째 단계는 Cycle 별, Path 별 역학고도를 계산하고, 날짜, 위도, 경도, 고도의 파일을 만드는 것이다. 두 번째 단계는 평균해수면과 해수면 편차(Sea level anomaly, SLA)을 계산하는 것이다.

역학고도(dynamic height)에 대한 수식적 표현은 아래와 같이 제시할 수 있다(Fig. 1).

$$\text{Dynamic height} = \text{orbit height} - (\text{altimeter range} + \text{corrections}) - \text{geoiderrors}$$

여기서 “오차”는 orbit height, altimeter range, 지구물리학적 보정, 모델 지오이드에서 발생 가능한 모든 오차를 포괄적으로 의미한다.

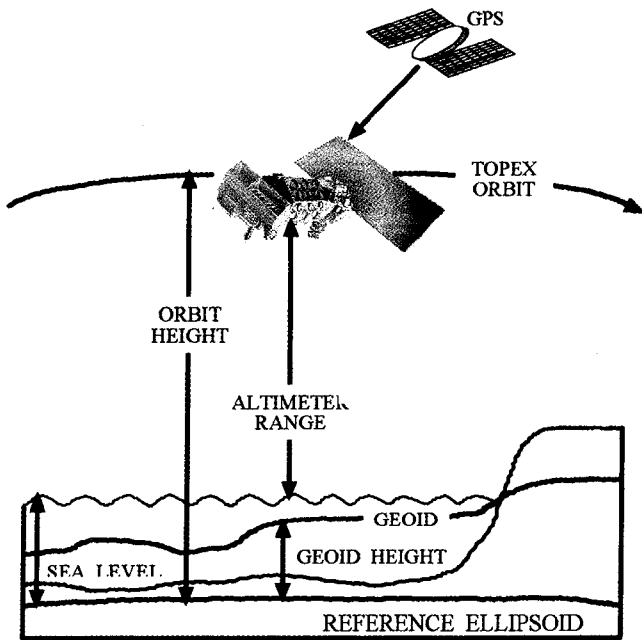


Fig. 1. TOPEX/POSEIDON measurement system.

역학고도를 산출할 때 생기는 주된 오차들 중 조석모델과 관련된 부분은 지구적인 통계에 기초하므로 지역에 따라 오차의 가변성이 크다. 특히 황해와 같이 조석현상이 강한 지역에서는 조석오차가 크게 나타난다. 그리고 지오이드의 불확실성(특히, 단 파장에서)은 역학고도의 절대값을 결정하는데 주된 제한 요소로 작용한다.

앞으로 고도계의 정도를 한층 더 높일 수 있는 관건은 개선된 지오이드 모델의 정확성에 달려있다. 최근에 들어 해양에서 지오이드(e.g., Nerem *et al.*, 1994)를 산출하는 기술이 많이 향상되었지만, 아직까지 1000 km보다 작은 범위에서 10 cm 수준의 정확도를 가진 지오이드를 구하기는 어렵다(Centre National d'Etudes Spatiales, 1994). 지오이드에 대한 현재의 지식 수준으로는 대규모 순환(예를 들어, 약 2000 km 이상의 파장)과 관련된 해양 신호에서 오차를 분류할 수 있는 정도이다(Naeije *et al.*, 1993; Nerem *et al.*, 1994). 그런데 다행히도 지오이드 오차는 반복되는 궤도를 따라 해수면의 시간변동을 결정하는데 영향을 주지 않으므로, T/P와 TG간의 해수면 비교가 현실적으로 가능하다. 본 연구의 대상지역인 황해의 경우, 전지구적으로 조석 에너지의 약 7%를 소모할 정도로 조석현상이 복잡하고 강한 지역이다(Choi, 1980). 이와 같은 해역에서는 고도자료를 정확하게 해석하기 위해 보다 정밀한 방식으로 조석변형에 의해 발생하는 오차를 제거하는 작업이 중요하다. 다시 말하면 천해지역에서의 정확한 조위예보가 수행될 수 있는 개선된 조석모델이 필요한 것이다.

시계열 자료의 처리

T/P 및 TG의 두 시계열자료를 정확히 비교하기 위해서 Park and Gamberoni(1995)가 제시한 처리기법을 사용하였다. 이 기법은 시계열자료를 평활화(smoothing)하고 일정 간격으로 자료들을 유지하는데 사용할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$H(t, p+1) = H(t, p) + \sum_{i=1}^n w_i(t)[\eta_i - H_i(p)] / \sum_{i=1}^n w_i(t)$$

여기서 $H(t, p)$ 는 p번째 반복에 의해 시간 t에 내삽된 값이고, η_i 는 시간 t_i 에 관측된 값이다. $H_i(p) (= H(t_i, p))$ 는 p번째 반복으로 계산된 η_i 의 추정치이다. 가중함수 $w_i(t)$ 는 아래 식과 같은 가우시안 필터(Gaussian filter)로부터 계산된다. 이 때 T는 시간척도(timescale)를 의미한다.

$$w_i(t) = \exp[-(t-t_i)^2/1.44T^2]$$

연구방법

본 연구에서는 동아시아 주변해역에서 T/P 및 TG자료를 이용하여 유추한 각각의 해수면자료를 비교하고, 이를 통해 그 차이점을 분석하고자 하였다. 이러한 목적을 달성하기 위해, AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Data in Oceanography)로부터 만들어진 T/P자료(GDR-M) 중 동아시아 해역(115°~160°E, 20°~50°N)의 2~230번 사이클(1992년 10월~1998년 12월)까지의 고도계의 자료와 이에 상응하는 우물형 조위계의 자료를 앞에서 논한 시계열자료의 기법으로 동시에 처리하고 분석하였다.

T/P자료로부터 구한 해수면 고도의 재관성을 검증하기 위한 목적으로, 연구대상기간 중 T/P 위성궤도와 시공간적으로 가장 잘 일치하는 10개 조위관측소의 해수면 자료를 추출하여 비교분석을 실시하였다(각 조위관측소의 정점별 위치는 Fig. 2에 제시되었다). 실제 비교에 사용된 정점별 T/P의 고도자료는 조위관측소에서 가장 가까운 상승궤도(ascending track, 홀수 트랙) 혹은 하강궤도(descending track, 짝수 트랙)에 대해서 위도 ±0.5°(약 55 km)의 범위 내에서 선택하여 평균한 값들이다. 이때 T/P의 고도자료는 위성의 지상궤적(ground track)을 따라서 약 5.8 km 간격으로 초당 1개씩 자료가 생성된다. T/P자료로부터 역학고도를 계산하는 것은 두 가지 단계를 거쳤다. 일차적으로 AVISO 사용자 매뉴얼 [AVISO, 1992]에 따라 모든 지구물리학적 보정을 수행하였다. 그리고 이에 덧붙여, 2차적으로 CNES(1994)에서 권장하는 기준에 따라 해수면 자료에 대한 재보정을 실시하였다.

T/P자료의 비교대상인 조위계자료(TG 자료)는 조위관측소 내에 설치된 여러 형태의 조위계에 의해 이루어졌다. 해수면은 보통 우물형 조위계로 관측하는데, 이는 도수관에 의해 구조적으로 필터된 해수면 운동을 우물안 부표의 움직임에 따라 관측하는 방식이다. 우물형 조위계는 우물 안에서 부표가 해수면 운동에 따라 움직이면서 해수면을 직접 관측하므로, 관측된 해수면 자료는 대기압 효과를 포함한다. 따라서 우물형 조위계(초음파식 조위계도 미찬가지) 방식으로 구한 TG자료는 기압보정을 하지 않은 T/P 자료와 직접 비교할 수 있다. 그 밖에 압력식 조위계를 이용하여 해수면을 관측하는 경우도 있다. 그런데 압력식 조위계와 같은 경우, 해저에서 압력변화를 측정하여 간접적인 방식으로 해수면 변화를 추정한다. 이들 방식의 경우, 대기압효과를 반영하지 않기 때문에, 이들 요소에 대한 보정이 대단히 중요하다. 또한 압력식 조위계의 경우에 steric효과에 의한 영향을 제거한 후에 T/P자료와의 비교를 수행하여야 하지만 현실적으로 해양의 전 수심에 걸친 steric효

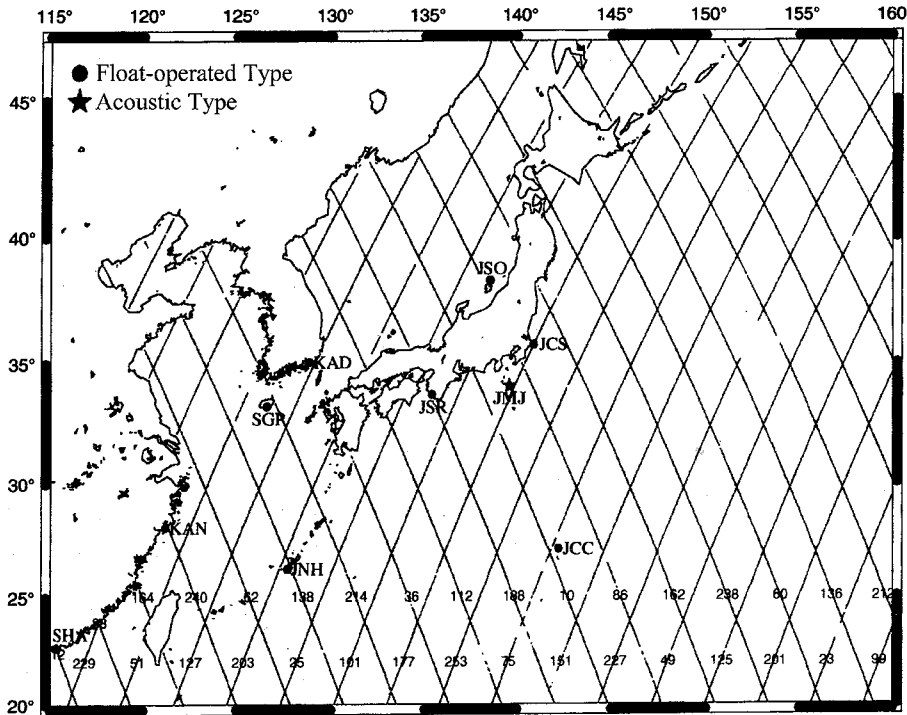


Fig. 2. Location of the tide gauge stations providing sea level data for this study. Ground tracks passing to the nearest to the tide gauge station are indicated.

Table 1. Tidal alias periods of TOPEX/POSEIDON (T/P) altimeter data for eight major diurnal and semidiurnal constituents*.

Tide	Tidal Period, hours	Alias Period, days	Model Tide Error, cm	variance contribution, %	
				Aliasing Error	Cumulative
O ₁	25.819342	45.7	1.16	7	7
N ₂	12.658348	49.5	1.63	13	20
S ₂	12.000000	58.7	1.57	12	32
M ₂	12.420601	62.1	2.97	43	75
Q ₁	26.868357	69.4	0.52	1	76
K ₂	11.967235	86.6	1.15	7	83
P ₁	24.065890	88.9	0.78	3	86
K ₁	23.934470	173.2	1.71	14	100

*The results of RMS errors in Texas tides and their variance contribution to the tidal aliasing error (Park and Gamberoni, 1995) are also provided.

과를 파악하기는 불가능하다. 따라서 장기간에 걸쳐서 그 변화가 미미하므로 일반적으로 무시하는 경향이이다.

본 연구의 조사대상 해역은 조석현상이 매우 강한 지역으로 조석변형에 의한 오차를 적절히 제거하는 작업이 중요하다. 해양의 8개 주요 조석분조로는 O₁, N₂, S₂, M₂, Q₁, K₂, P₁, K₁ 등을 들 수 있다. 조석 주기와 위성고도 자료의 추출간격 불일치는 조석신호의 변형을 가져온다(Cartwright and Ray, 1990; Jacobs *et al.*, 1992). Table 1은 Park and Gamberoni(1995)가 제시한 대부분의 T/P 조석변형을 보여준다. 이 방식에 따르면, 전체 조석변형 오차의 75%를 45~62일 사이의 변형 주기로 설명하는 것이 가능하다. 그중 M₂ 분조(62일)가 가장 우세하고, K₁ 분조(173일)는 전체 변형 오차의 14%를 차지하고 있다. S₂ 분조(59일)의 변형 주기도 M₁ 분조의 변형 주기와 매우 근사하게 나타난다.

연안 역의 한반도 남해안의 서귀포와 비교적 외해에 위치한 일

본의 Chichijima의 조위관측소의 조위 관측자료의 조회분석결과 는 지역적인 차이점을 보여 준다(Table 2참조). 서귀포의 경우 M₂, S₂ 분조가 전체 에너지의 약 50%를 차지하고 있으며, K₁ 분조에 의한 에너지도 10%를 차지한다. 반면, 외해에 위치한 Chichijima 는 M₂ 분조가 28.6%, K₁ 분조가 16.7%, S₂ 분조가 12.8%를 차지 하고 있어, K₁ 분조를 무시할 수 없다. 이러한 여건을 감안할 때, M₂, S₂, K₁ 분조에 의한 조석변형 오차를 적절히 제거하는 것이 중요하다. 이러한 오차를 제거하기 위해 가우시안 저주파 필터를 적용하였다(Park and Gamberoni, 1995). 가우시안 필터의 반응함 수는 주기 T 근방에서 절단주기를 가지며 2T 근방에서 신호 진폭 의 반 정도가 제거된다. 즉 주기 T=15일, 30일, 60일, 100일을 적용하여 평활화된 시계열 자료는 각 주기에 대해 30, 60, 120, 200 일 보다 훨씬 짧은 주기의 고주파 진동을 잘 제거한다. 반면 주기 2T보다 긴 신호는 위상의 변형 없이 보존된다.

Table 2. Amplitudes of major harmonic constituents (unit: cm).

Station Constituents	Sogwipo (SGP)	Chichijima (JCC)
O ₁	17.71 (7.9%)	12.06 (12.3%)
N ₂	16.32 (7.3%)	5.19 (5.3%)
S ₂	33.79 (15.1%)	12.60 (12.8%)
M ₂	76.56 (34.1%)	28.15 (28.6%)
Q ₁	3.60 (1.6%)	2.46 (2.5%)
K ₂	8.94 (4.0%)	3.50 (3.6%)
P ₁	7.92 (3.5%)	5.32 (5.4%)
K ₁	24.32 (10.8%)	16.39 (16.7%)

결과 및 토론

내해역 자료의 비교

지금까지 수많은 T/P 고도자료와 현장관측 자료간의 비교 검증 을 위한 연구가 시도된 바 있다(Mitchum, 1994; Christensen *et al.*, 1994; Tapley *et al.*, 1994; Katz *et al.*, 1995; Park and Gamberoni, 1995; Picaut *et al.*, 1995; Verstraete and Park, 1995). Tapley *et al.*(1994)은 T/P 자료와 태평양(13개 지점) 및 인도양에 위치한 조위 관측소(6개 지점)의 자료를 비교한 결과 RMS가 각각 4 및 6 cm에 달한다고 밝힌 바 있다. Picaut *et al.*(1995)은 서태평양 적도 해역의 두 정점(2°S~156°E, 2°S~164.4°E)에서 T/P 고도자료와 현장 관측자료를 비교한 결과, 조석보정 기법의 선택에 따라 3~4 cm 정확도를 갖는 역학적 고도를 제공 할 수 있다고 제시하였다. Verstraete and Park(1995)은 Sao Tom 섬의 현장 관측자료와 T/P 고도자료의 비교 연구에서 60일 저주파 필터링을 하였을때, RMS가 2.2 cm(상관계수가 0.88)로 계절변화와 연변화 등을 어느 정도 재현하는 것이 가능하다는 것을 확인시켜 주었다.

본문에서는 조석변형 오차에 따라 해수면 고도자료의 차이가 크게 나타난다는 사실을 검증하기 위해, 비교대상점중 가장 내해역의 성격을 띠는 곳의 하나인 서귀포지점(SGP)을 선택하여 TP 및 TG 자료의 비교를 수행하였다. Fig. 3은 한반도 남해의 SGP에서 1992년 10월부터 1998년 12월까지 관측된 T/P 자료와 조석 시계열 자료를 크기가 다른 윈도우(30, 60, 120, 200일)를 적용하여 비교한 결과를 제시하였다. 여기서 1시간 간격으로 관측된 조석관측 해수면 자료는 조화분석을 수행하여 짧은 주기의 조석성분들(일주조, 반일주조 조석성분)을 제거한 후, 가우시안 필터를 적용하였다. 비교의 대상이 된 연안 가까이에 위치한 서귀포 주변 해역은 조석현상이 매우 복잡하고 강한 지역이다. 실제로 Fig. 3의 (a) 30일(T=15 days)과 (b) 60일(T=30 days)에 가우시안 필터를 적용한 경우, 조석 관측자료에서는 나타나지 않은(일정한 주기의) 강한 신호가 T/P 자료에 발견된다. 이는 사실상 해양 신호와 관계가 없는 잘못된 신호로 간주할 수 있다. 또한 (c) 120일(T=60 days)을 기준으로 가우시안 필터를 적용한 경우에는 많이 좋아지긴 하였으나 아직도 거짓신호가 완전히 제거되지 않고 있다. 이러한 현상은 M₂, S₂, K₁ 분조 등에 의한 조석 변형 때문에 발생하는 현상이 잘 알려져 있다(Schrama and Ray, 1994; Park and Gamberoni, 1995). 필터의 적용일을 더 늘려서 (d) 200일(T=100 days)의 자료에 가우시안 필터를 적용한 경우, T/P 고도자료와 조

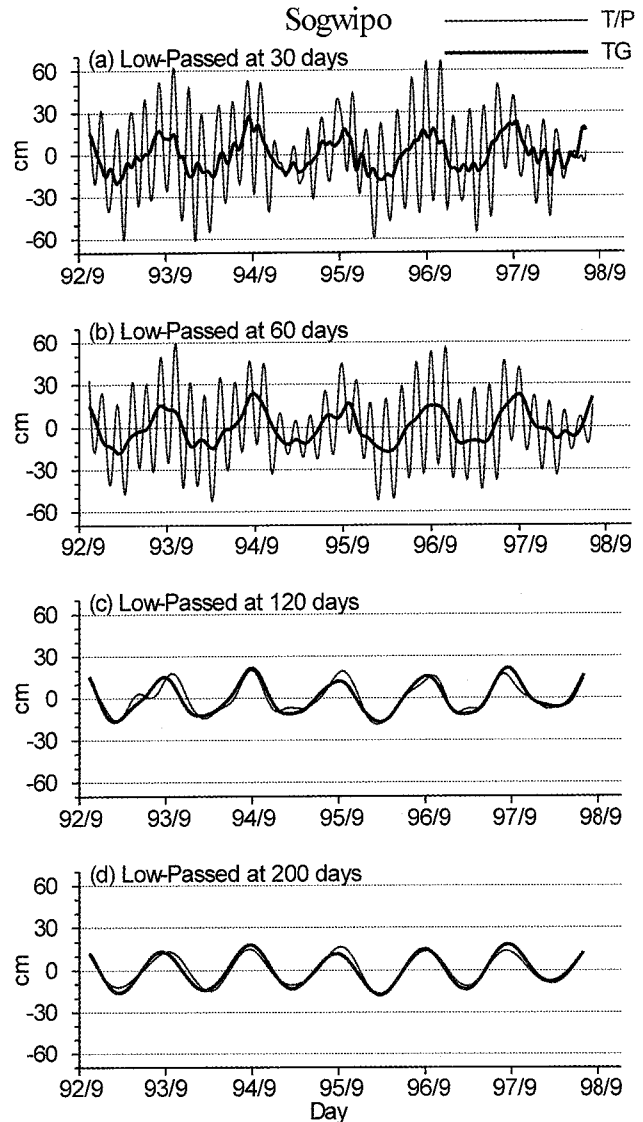


Fig. 3. Comparison of sea level time series derived from the TOPEX/POSEIDON altimetry (thin line) without inverse barometer correction and the tide gauge measurements (heavy line) at Sogwipo in Korea. Data have been low-pass filtered using (a) a 30-day, (b) a 60-day, (c) a 120-day, and (d) a 200-day Gaussian filter.

위계에 의해 관측된 해수면 자료는 비교적 잘 일치한다.

외해역 및 전체 조위관측점간 자료의 비교

이미 일반적으로 알려진 바와 같이 외해역 지점의 경우, T/P자료와 TG자료의 일치성이 높게 나타나는 것으로 잘 알려져 있다. 이러한 가설을 확인하기 위해, 본 연구에서 조위자료가 축적된 모든 정점 중에서 가장 외해역의 조건에 가까운 Chichijima(JCC)를 택하여 T/P자료와 TG자료의 비교를 시도하였다(JCC 정점의 위치는 Fig. 2참조). 이러한 분석결과에 따르면, 양 지점간의 차이나 유사성이 비교적 뚜렷하게 나타났다. 예를 들어, JCC의 경우 조석현상이 비교적 약한 지역으로서, 앞서 설명한 서귀포에 비해 T/P 자료에서 거짓신호의 영향이 미미하다. 그리고 200일 저주파 필터

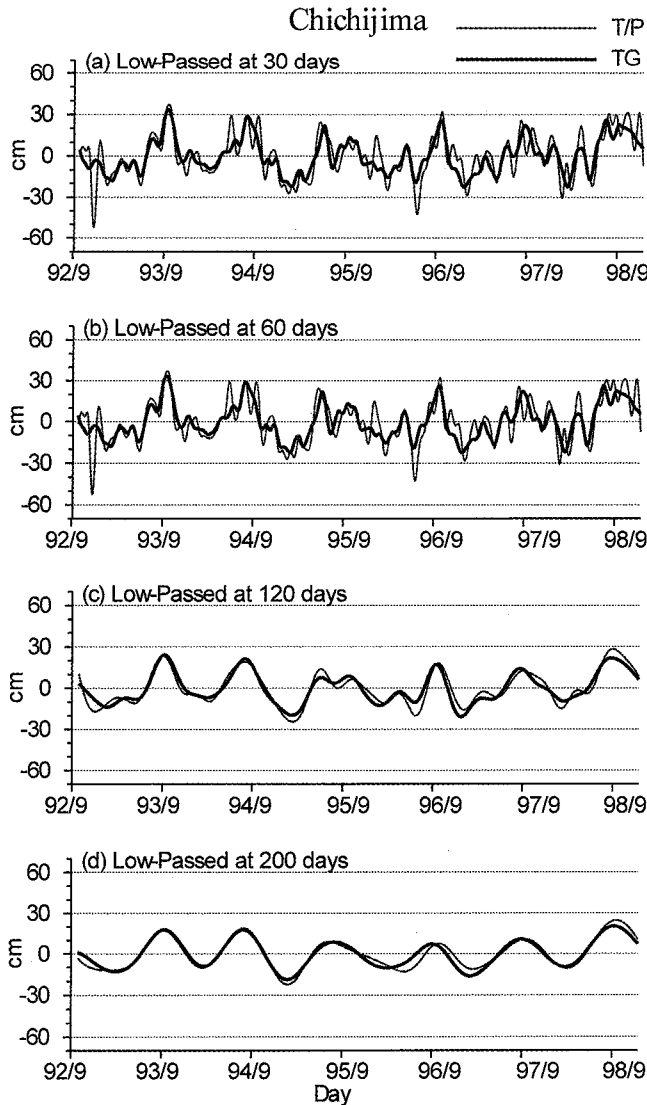


Fig. 4. Comparison of sea level time series derived from the TOPEX/POSEIDON altimetry (thin line) without inverse barometer correction and the tide gauge measurements (heavy line) at Chichijima in Japan. Data have been low-pass filtered using (a) a 30-day, (b) a 60-day, (c) a 120-day, and (d) a 200-day Gaussian filter.

를 적용할 경우, SGP와 마찬가지로 조위계 해수면을 잘 재현한다 (Fig. 4). Table 3에는 SGP와 JCC 정점에 대해, T/P 자료와 조석시계열 자료를 크기가 다른 윈도우(30, 60, 120, 200일)를 적용하여 계산한 결과(RMS, 상관계수, 유의확률)를 제시하였다. SGP와 JCC 모두에서 200일 가우시안 필터를 적용할 경우, 상관계수가 각각 0.96으로 가장 높게 나타났다. 이 때 RMS는 각각 2.81과 3.02 cm이며, 상관계수의 유의확률이 높게 나타났다(P-value ~ 0.0001). 따라서, 양 지점 모두 T/P 및 TG 자료간에 밀접한 관계가 있다.

연구해역에서 SGP나 JCC와 같은 지점을 중심으로 T/P 및 TG 자료를 크기가 다른 윈도우에서 비교한 결과, 200일 가우시안 필터($t=100$ 일)에서 가장 잘 일치하고 그 보다 더 큰 주기의 해양신호는 잘 보존하는 것으로 보인다. 이를 감안하여 양 자료군 간의 검증용 조위관측이 이루어진 모든 정점으로 확대하였다(Fig. 5).

Table 3. Comparison of RMS errors of Sogwipo (Korea) and Chichijima (Japan) as a function of low-pass filtering period.

Filter Period	Station	Sogwipo (SGP)	Chichijima (JCC)
30 day	RMS error (cm)	25.43	9.16
	Correlation	0.35	0.80
	P-Value	0.0001	0.0001
	Number of data	2087	2269
60 day	RMS error (cm)	22.22	6.48
	Correlation	0.39	0.80
	P-Value	0.0001	0.0001
	Number of data	2087	2269
100 day	RMS error (cm)	3.90	4.02
	Correlation	0.93	0.94
	P-Value	0.0001	0.0001
	Number of data	2087	2269
200 day	RMS error (cm)	2.81	3.02
	Correlation	0.96	0.96
	P-Value	0.0001	0.0001
	Number of data	2087	2269

그 결과 관측된 T/P 자료와 10개소의 조위관측소의 조위 시계열 자료가 비교적 잘 일치 함을 알 수 있다. 이와 같은 비교로부터 rms의 중간값은 4.19 cm이고 상관계수의 중간값은 0.9로 나타났다(Table 4). 모든 정점에서 계산된 상관계수는 0.80~0.96 범위에 있는데, 특히 국내 정점인 SGP와 일본의 JCC에서 가장 높게 나타났다. 이때 상관계수의 유의확률(P-value)이 전 조위관측소에서 공히 0.0001 이하를 유지하므로, 양 자료간의 통계적 유의성은 매우 높다고 할 수 있다(Table 4). Table 4에서의 우물형과 초음파식의 조위계 해수면 자료와 T/P 고도자료를 비교할 때, 대기압 보정을 하지 않았을 때, 더 높은 상관계수가 나타난다는 것을 확인시켜 주고 있다.

결 론

동아시아 주변 해역에서의 조석관측자료와 T/P 자료의 일치성을 조사하기 위해 2~230번 사이클을 포함하는 기간까지, T/P 고도 자료(위성 궤도에서 가장 근접한 10개 조위관측소로부터 구한)와 TG 자료를 비교하였다. 본 연구해역은 기존의 대부분 비교 연구가 수행된 태평양이나 대서양과 같은 대양과 달리, 수심이 낮고 조석현상이 강한 지역을 포함한다. 따라서 T/P 자료의 오차를 줄이기 위해, 조석변형에 의한 오차를 적절히 제거하는 작업이 요구된다. 실제로 조석현상이 복잡하고 강한 연안지역인 우리나라의 서귀포와 비교적 외해에 위치하여 조석현상이 덜 복잡한 일본의 Chichijima에 대한 관측자료의 조화분석결과를 비교해 보면, 서귀포의 경우 M_2 , S_2 분조가 전체 에너지의 약 50%를 차지하고 있으며, K_1 분조에 의한 에너지도 10%를 차지한다. 반면 외해에 위치한 Chichijima는 M_2 분조가 28.6%, K_1 분조가 16.7%, S_2 분조가 12.8%를 차지하고 있어 K_1 분조의 역할이 더 강조되고 있다. 즉, T/P 자료에 기인하는 M_2 , S_2 분조에 의한 약 60일 주기, K_1 분조에 의한 약 173일 주기의 조석변형 오차들을 무시할 수 없다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 조사대상 정점들에 대하여 편의상 가우시안 필

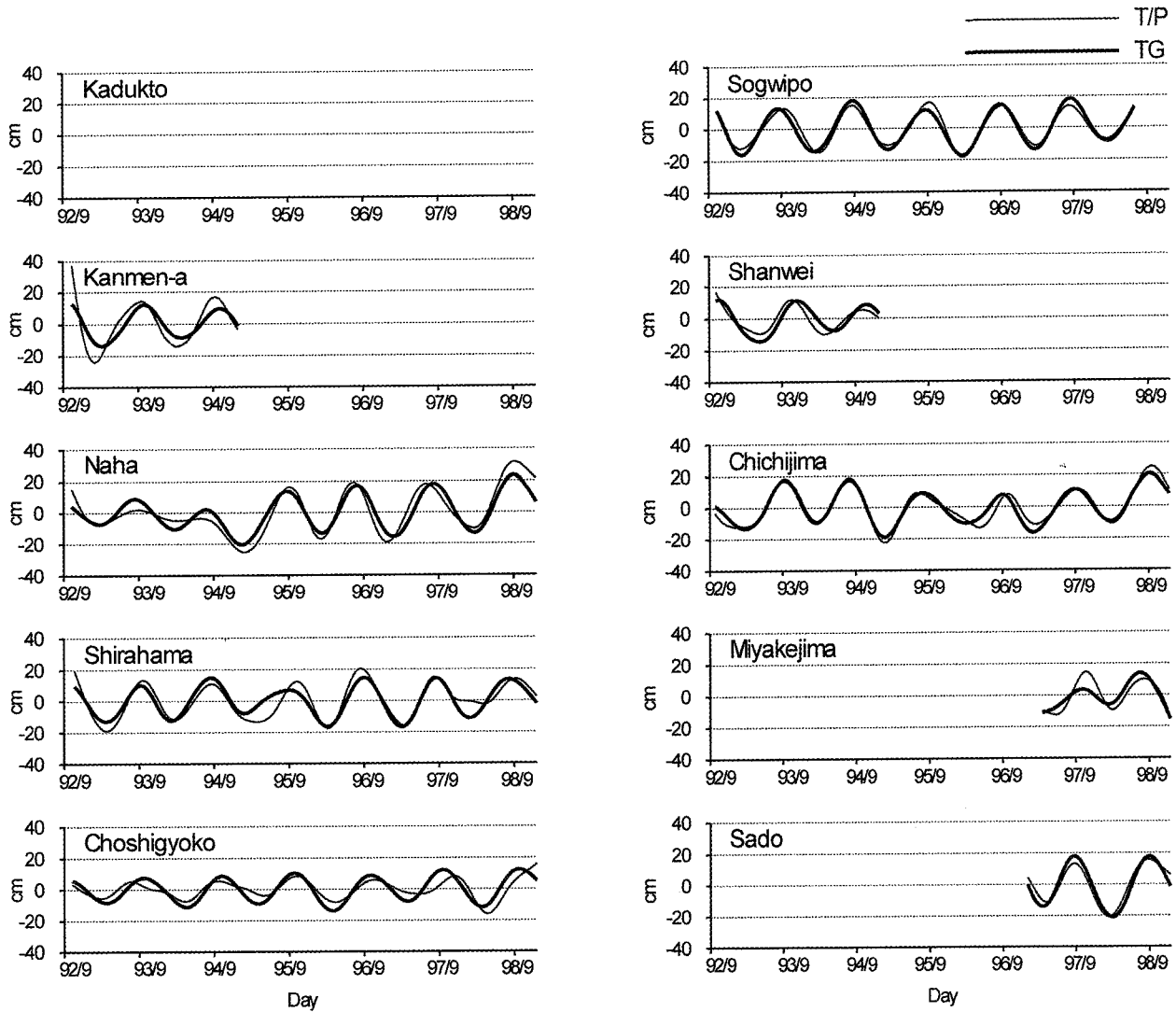


Fig. 5. Comparison of sea level time series derived from the TOPEX/POSEIDON altimetry (thin line) without inverse barometer correction and the tide gauge measurements (heavy line) at 10 tide stations in the East Asian Marginal Seas. Data have been low-pass filtered using a 200-day Gaussian Filter.

Table 4. A comparison of T/P and TG data sets from 10 tidal stations. All data have been low-pass filtered using a 200-day Gaussian filter. For each station investigated, the parameters compared include: root mean square (RMS) error, correlation coefficients, p-value, number of data and type of tide gauge.

Station	RMS Error (cm)	Correlation coefficient	P-value	Number of data	Type of tide gauge
Kadukto (KAD)	3.23 (6.05)*	0.94 (0.64)	0.0001 (0.0001)	1288	Float
Sogwipo (SGP)	2.81 (7.43)	0.96 (0.69)	0.0001 (0.0001)	2087	Float
Kanmen-a (KAN)	6.70 (5.59)	0.88 (0.89)	0.0001 (0.0001)	809	Float
Shanwei (SHA)	4.08 (4.64)	0.86 (0.86)	0.0001 (0.0001)	818	Float
Naha (JNH)	5.24 (6.42)	0.92 (0.82)	0.0001 (0.0001)	2260	Float
Chichijima (JCC)	3.02 (4.12)	0.96 (0.91)	0.0001 (0.0001)	2269	Float
Shirahama (JSR)	4.91 (6.43)	0.87 (0.75)	0.0001 (0.0001)	2250	Float
Miyakejima (MJJ)	5.16 (6.25)	0.80 (0.65)	0.0001 (0.0001)	642	Acoustic
Choshigyoko (JCS)	4.30 (5.15)	0.81 (0.72)	0.0001 (0.0001)	2260	Float
Sado (JSO)	3.78 (6.88)	0.95 (0.85)	0.0001 (0.0001)	712	Float

*The values in parenthesis are the rms values corrected with inverse barometer.

터를 적용하였다. 그 결과 30, 60, 120, 200일의 순으로 low-pass filter를 하였을 때, 200일에서 T/P자료에 조석오차에 기인하는 거짓 신호를 거의 완벽하게 제거할 수 있다는 것이 확인되었다. 즉, Chichijima에 비해서 서귀포의 해수면 값이 상대적으로 높은 수준에서 개선된 것을 알 수 있다. 이때 서귀포의 경우 30일의 low-pass에서 RMS가 25.4 cm 그리고 상관계수가 0.35에서, 200일의 low-pass에서는 RMS가 2.81 cm 그리고 상관계수가 0.96으로 향상되었다. 그러나 Chichijima의 경우는 30일의 low-pass에서 RMS가 3.02 cm 그리고 상관계수가 0.80에서, 200일의 low-pass에서는 RMS가 2.81 cm 그리고 상관계수가 0.96으로 약간 개선되었다. 따라서 동아시아 주변 해역에서 T/P자료를 이용한 해수면 변화 연구와 관련하여 T/P에 기인하는 조석 오차의 영향을 제거하기 위해서는 전체적으로 200일 이상의 장주기에서 양 자료를 비교하는 것이 의미있는 것으로 보인다. 천해지역의 경우, 앞으로 2000년 말에 발사될 Jason 위성은 유한요소법을 이용한 해양조석모델을 사용하여 조석에 기인하는 RMS 오차를 2~3 cm로 줄일 수 있을 것으로 예측된다(Le Provost *et al.*, 1994).

본 연구의 결과로부터 우리는 몇 가지 결론의 도출이 가능하다. 두 관측방식간의 비교에서 200일의 장주기를 적용할 때, 해수면의 시계열변동을 안정적으로 해석하는 것이 가능하다. 이런 점을 감안할 때, 위성자료의 사용으로 현장자료를 대신할 수 있는 범용성을 확보하는 것이 가능하다. 즉, 현실적으로 근접이 거의 불가능한 어떤 조사대상 지역에 대한 일반적인 특성을 알고자 할 때는 이러한 방법을 통해서 신속하게 연구를 수행할 수 있다. 이것이 바로 위성이 제공해주는 장점 중의 하나라 할 수 있다. 둘째, 전체적으로 볼 때 연안 혹은 섬지역 보다는 대양에서 양 방식간에 더 높은 호환성이 발견된다. 다시 말해서 위성자료는 육지와 연안지역의 지형적인 영향을 전혀 받지 않는 원해지역으로 나아갈수록 일치도가 높아진다는 것을 의미한다. 셋째 동아시아 주변 해역에서 T/P자료를 이용한 해수면 변화 연구와 관련하여 T/P에 기인하는 조석 오차의 영향을 제거하기 위해서는 전체적으로 최소한 200일의 장주기 이상에서 비교할 때 의미가 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 검증결과에서 나타나듯이, 연안지역을 중심으로 한 T/P의 위성자료도 장주기 해수면변동, 대규모 해양순환, 기후변화 등의 연구에 응용하는 것이 가능하다.

사 사

이 연구는 기상연구소 지구대기감시관측소의 사업비와 과학기술부에서 시행하는 국가지정연구실 사업의 하나인 “한반도 기후변화 감시 기술 개발” 연구과제 및 1999 과학기술부 정책연구용역사업의 일부 지원으로 이루어졌으며, 이 논문을 읽고 많은 조언을 해 주신 한국해양연구소 변상경 박사님, 여수대학교 윤홍주 교수님께 감사의 뜻을 전합니다. 논문을 심사해주신 두분의 심사위원님께도 감사드립니다.

참고문헌

Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Data in Oceanography (AVISO), 1992. AVISO user Handbook: Merged TOPEX/POSEIDON products, Publ. AVII-NT-02-101-CN, 2.1, Cent, Natl.

- d'Etudes Spatiales, Toulouse, France, 208 pp.
- Bonnefond, P., P. Exertier, P. Schaeffer, S. Bruinsma and F. Barlier, 1995. Satellite altimetry from a short-arc orbit technique: Application to the mediterranean. *J. Geophys. Res.*, **100**: 25,365–25,382.
- Centre National d'Etudes Spatiales, 1994. SWT/JASO Meeting. *Publ. TP-CR-03-8554-CN*, Toulouse, France.
- Choi, B.H., 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the East China Sea. *Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI) Report*, **80-02**: 1–72.
- Christensen, E.J., B.J. Haines, S.J. Keihm, C.S. Morris, R.A. Norman, G.H. Purcell, B.G. Williams, B.D. Wilson, G.H. Born, M.E. Parke, S.K. Gill, C.K. Shum, B.D. Tapley, R. Kolenkiewicz, and R.S. Nerem, 1994. Calibration of TOPEX/POSEIDON at Platform Harest, *J. Geophys. Res.*, **99**: 24,465–24,485.
- Fu, L.-L. and R. Glazman, 1994. The effect of the degree of wave development on the sea state bias in radar altimetry measurement. *J. Geophys. Res.*, **96**: 829–834.
- Jacobs, G.A., G.H. Born, M.E. Parke and P.C. Allen, 1992. The global structure of the annual and semiannual sea surface height variability from Geosat altimeter data. *J. Geophys. Res.*, **97**: 17,813–17,828.
- Kang, Y.Q. and B.D. Lee, Byung, 1985. On the annual variation of mean sea level along the coast of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **20**: 22–30.
- Katz, E.J., A. Busalacchi, M. Bushnell, F. Gonzalez, L. Gourdeau, M. McPhaden, and J. Picaut, 1995. A comparison of coincidental time series of the ocean surface height by satellite altimeter, mooring, and inverted echo sounder. *J. Geophys. Res.*, **100**: 25,101–25,108.
- Le Provost, C., M.F. Genco, F. Lyard, P. Vincent and P. Canceil, 1994. Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model. *J. Geophys. Res.*, **99**: 24,777–24,797.
- Marshall, J.A., N.P. Zelensky, S.M. Klosko, D.S. Chinn, S.B. Luthcke and K.E. Rachlin, 1995. The Temporal and spatial characteristics of TOPEX/POSEIDON radial orbit error. *J. Geophys. Res.*, **100**: 25,331–25,352.
- Mitchum, G.T., 1994. Comparison of TOPEX sea surface heights and tide gauge sea level. *J. Geophys. Res.*, **99**: 24,541–24,553.
- Molines, J.M., C.L. Provost, F. Lyard, R.D. Ray, C.K. Shum and R.J. Eanes, 1994. Tidal correlations in the TOPEX/POSEIDON geophysical data records. *J. Geophys. Res.*, **99**: 24,749–24,760.
- Naeije, M.C., E. Wisse, R. Scharro and K.F. Wakker, 1993. Ocean Dynamics from the ERS-1 35-day repeat mission, in *proceedings of the Second ERS-1 Symposium, Hamburg, 11-14 October 1993*. *Eur. Space Agency Space. Publ.*, **ESA SP-361**: 1–6.
- Nerem, R.S., 1995. Measuring global mean sea level variations using TOPEX/POSEIDON altimeter data. *J. Geophys. Res.*, **100**: 12, 25,135–25,151.
- Nerem, R.S., F.J. Lerch, J.A. Marshall, E.C. Parliss, B.H. Putney, B.C. Tapley, R.J. Eanes, J.C. Ride, B.E. Schutz, C.K. Shum, M.M. Watkins, S.M. Klosko, J.C. Chan, S.B. Luthcke, G.B. Patel, N.K. Parliss, F.G. Williamson, R.H. Rapp, R. Biancale and F. Nouel, 1994. Gravity model development for TOPEX/POSEIDON: Joint Gravity Models 1 and 2. *J. Geophys. Res.*, **99**: 24,421–24,447.

- Nishida, H., 1980. Improved tidal charts for the western part of the North Pacific Ocean. *Report of Hydraulic Researches*, **15**: 55–70.
- Nomitsu, T. and M. Okamoto, 1927. The causes of the annual variation of the mean sea level along the Japanese coast. *J. Mar. Res.*, **14**: 88–155.
- Oh, I.S., B.R. Alexander, M.S. Park and R.N. Mansurov, 1993. Seasonal sea level oscillations in the East Sea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **28**: 1–16.
- Park, Y.H. and G. Gamberoni, 1995. Large-scale circulation and its variability in the south Indian Ocean from TOPEX/POSEIDON altimetry. *J. Geophys. Res.*, **100**: 24,911–24,929.
- Patullo, J.W., Munk, R., Revelle and E. Strong, 1955. The seasonal oscillation in sea level, *J. Mar. Res.*, **14**: 88–156.
- Picaut, J., A.J. Busalacchi, M.J. Mcphaden, L. Gourdeau, F.I. Gonzalez, and E.C. Hackert, 1995. Open-ocean validation of TOPEX/POSEIDON sea level in the western equatorial Pacific. *J. Geophys. Res.*, **100**: 25,109–25,127.
- Rapp, R.H., wang, Y.M., Pavlis, N.K., 1991. The Ohio State University 1991 Geopotential and Sea Surface Topography harmonic Coefficient Models. *report N 410*: Columbus, USA, 91 pp.
- Schlax, M.G. and D.B. Chelton, 1994. Aliased tidal errors in TOPEX/POSEIDON sea surface height data. *J. Geophys. Res.*, **99**: 24,761–24,775.
- Schrama, E.J.O. and R.D. Ray, 1994. A preliminary tidal analysis of TOPEX/POSEIDON altimetry. *J. Geophys. Res.*, **99**: 24,799–24,808.
- Schwiderski, E.W., 1980. On charting global ocean tides. *Rev. Geophys.*, **18**: 243–268.
- Tapley, B.D., D.P. Chambers, C.K. Shum, R.J. Eanes, J.C. Ries and R.H. Stewart, 1994. Accuracy assessment of the large-scale dynamic ocean topography from TOPEX/POSEIDON altimetry. *J. Geophys. Res.*, **99**: 24, 605–24, 617.
- Tvi, N.N., 1970. Seasonal sea-level variations of the South China Sea and their causes. *Oceanography*, **10**: 465–471.
- Verstraete J.M. and Y.H. Park, 1995. Comparison of TOPEX/POSEIDON altimetry and in situ sea level data at Sao Tome Island, Gulf of Guinea. *J. Geophys. Res.*, **100**: 25,129–25,134.
- Wyrtki, K, 1979. Sea level variations. Monitoring the breath of Pacific. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, **60**: 25–27.
- Yanagi, T. and S. Takahashi, 1993. Seasonal variation of circulations in the East China Sea and Yellow Sea. *J. Oceanogr.*, **28**: 1–16.
- Yi, S.U., 1967. On the variations of monthly mean sea level along the coast of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **2**: 24–33.
- Yoon, H.-J., 1999. Signal treatment for Topex/Poseidon satellite altimeter data and its application near the Korean seas. *J. Korean Asso. of Geograph. Inform. Studies*, **2**: 12–31.

2000년 4월 7일 원고접수

2000년 9월 2일 수정본 채택

담당 편집위원: 이동규