동아시아 주변해역에서의 TOPEX/POSEIDON 위성 고도자료와 Tide Gauge 현장자료 간의 비교 및 해석 연구

윤홍주

여수대학교

Comparison and analysis between TOPEX/POSEIDON Altimeter data and In-Situ Tide Gauge Data in the Eastern Asian Marginal Seas

Hong-Joo Yoon

Yosu National University

E-mail : yoonhj@yosu.ac.kr

요 약

T/P자료를 처리한 결과, M_2, S_2 분조에 의한 주기가 62.1일, 58.7일의 조석변형 오차와 K1 분조에 의한 173.2일 주기의 조석변형 오차가 나타났다. 따라서 이러한 오차의 영향들을 제거하기 위하여 가우시안 필터를 사용하여 200일에 대한 lowpass fiter를 행하였다. 이때 전 조위관측점들에 대한 RMS의 평균값은 4.19 cm 이고 상관계수의 평균값 0.9로 나타났다. 특히 상관계수값은 우리나라의 서귀포와 일본의 Chichijima에서 0.96으로 가장 높게 나타났다.

ABSTRACT

These results indicate that the low-frequency signal of T/P data (with periods greater than 200 days) can be interpreted most safely. Similarly to the case of the T/P data, corrections were also applied to those of tide gauge counterparts. Hence, when the 200-day effect was filtered out, the agreement between T/P and TG data sets was optimized.

Ⅰ. 서 론

Topex/Poseidon 위성은 2개의 고도계 레이더(altimeter radar)가 탑재되어 수 cm의 rms 오차를 가지고 해수면 변화를 측정할 수 있다. 특히 T/P의 해수면 고도자료는 대규모 해수순환의 연구에 매우 유용하게 이용되고 있다. 그리고 정확한 연구 결과들을 도출하기 위하여 현재까지 수많은 연구자들이 현장 중심의 관측자료와의 비교를 통해 T/P 고도자료의 보정이나 검증은 물론 T/P자료의 유용성에 대한 평가를 시도한 바 있다 [1], [2], [3], [4], [5].

본 연구에서는 연안역을 중심으로 관측된 T/P 자료의 정확한 해석을 위해, 조위계 (tide gauge: TG)를 이용한 정점별 조위자료와의 비교를 수행하였다. 이러한 비교의 객관성을 확보하기 위해 두 가지 방식의 결과에 대한 차이점을 체계적으로 분석하고자 하였다. 즉, 한반도 연안과 동아시아 주변 해역에서의 T/P 고도 자료로부터 조석변형을 제거하는 방법을 제시며, 이들 양방법에 의해 계산된 해수면 고도자료의 차이점을 설명하고, 그리고 위성자료와 현장자료간의 비교를 통한 상관성을 파악하고 이해하는데 그 목적을 두었다.

Ⅱ. 이론적 배경

1. 역학고도의 계산

연구의 목표로 설정한 고도 측정방식의 체계적인 검증을 위해, T/P자료의 경우 AVISO (Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Data in Oceanography) Center[6]로부터 만든 T/P 자료(GDR-M)를 이용하였다. 보다 구체적으로 비교가 이루어진 연구해역은 동아시아 해역(115° -155° E, 20° -50° N)에 속하는 2 ~ 230번 사이클까지(1992년 10월~1998년 12월)의 자료

를 선택하였다. T/P 자료의 처리는 Park and Gamberoni[7]가 제시한 방법을 이용하였다. 자료처리는 크게 두 단계로 나뉘어진다. 첫 번째 단계는 Cycle 별, Path 별 역학적 고도를 계산하고, 날짜, 위도, 경도, 고도의 파일을 만든다. 두 번째 단계는 평균해수면과 해수면 편차(Sea Level Anomaly, SLA)을 계산하는 것이다.

역학적 고도 (dynamic height)는 지오이드로부터 해표면 까지 거리를 의미한다. 이에 대한 접근은 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

Dynamic height = orbit height - (altimeter range + corrections) - geoid - errors

여기서 "오차"는 altimeter orbit, altimeter range, 지구물리학적 보정, 모델 지오이드에서 발생 가능한 모든 오차를 의미한다.

2. 시계열 자료의 처리

T/P 및 TG의 두 시계열자료를 정확히 비교하기 위해서 시계열자료를 평활화(smoothing)하고 일정 간격으로 자료들을 유지하는데는 다음 수식과 같이 표현할 수 있다.

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

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's filter)로부터 계산되는데, 이 때 T는 시간척도 (timescale)를 의미한다.

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

III. 연구방법

T/P자료로부터 구한 해수면 고도의 객관성을 검정하기 위한 목적으로, 연구대상기간 중 T/P 위성궤도와 시공간적으로 가장 잘 일치하는 10개 조위관측소의 해수면 자료를 추출하여 비교분석을 실시하였다. 각 조위관측소의 정점별 위치는 Fig. 1에 나타내었다. 실제 비교에 사용된 정점별 T/P의 고도자료는 조위관측소에서 가장 가까운 상승궤도(ascending track, 홀수 트랙) 혹은 하강궤도(decending track, 짝수 트랙)에 대해서 위도 ±0.5° (약 55km)의 범위 내에서 선택된 값들이다. 이때 T/P의 고도자료는 위성의 지상궤적(grounding track)을 따라서 약 7 km 간격으로 초당 1개씩 자료가 생성한다. T/P자료로부터 역학적 고도를 계산하는 것은 두 가지 단계를 거쳤다. 일차적으로 AVISO 사용자 매뉴얼 [6]에 따라 모든 지구물리학적 보정을 수행하였다. 그리고 이에 덧붙여 2차적으로 CNES에서 권장하는 기준에 따라 해수면 자료에 대한 재수정을 실시하였다.

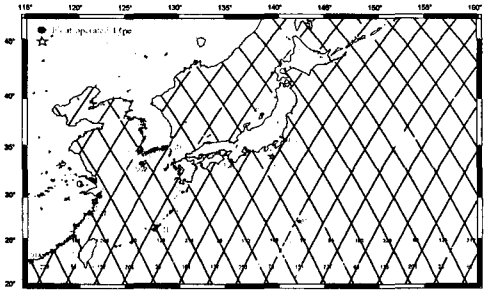

Figure 1. Location of the tide gauge stations providing sea level data for this study. Ground tracks passing to the nearest to the tide gauge station are indicated.

본 연구해역인 동아시아 주변 해역은 조석현상이 매우 복잡하고 강한 지역을 포함하고 있어 T/P 자료의 오차가 비교적 크며, 특히 M_2, S_2 분조에 의한 약 60일 주기의 조석변형 오차가 크게 나타났으며 K_1 분조에 의한 주기 173일의 조석변형 오차도 무시할 수 없다. 연안 역의 한반도 남해안의 서귀포와 비교적 외해에 위치한 일본의 Chichijima의 조위관측소의 조위 관측자료의 조화분석결과에 의하면, 서귀포의 경우 M_2, S_2 분조가 전체 에너지의 약 50%를 차지하고 있으며, K_1분조에 의한 에너지도 10%를 차지한다. 외해에 위치한 Chichijima는 M_2분조가 28.6%, K_1분조가 16.7%, S_2 분조가 12.8%를 차지하고 있어 K_1분조를 무시할 수 없다. 따라서 M_2, S_2, K_1분조에 의한 조석변형 오차를 제거하여야 한다. 이러한 오차를 제거하기 위해 가우시안 저주파 필터를 적용하였다. 가우시안 필터의 반응함수는 주기 T 근방에서 절단주기를 가지며 2T 근방에서 신호 진폭의 반 정도가 제거된다. 즉 주기 T= 15일, 30일, 60일, 100일을 적용하여 평활화된 시계열 자료는 각 주기에 대해 30, 60, 120, 200일 보다 훨씬 짧은 주기의 고주파 진동을 잘 제거하였고 주기 T보다 긴 신호는 위상의 변형 없이 보존된다.

IV. 결과 및 토론

1. 내해역 자료의 비교

본연구에서는 측정방식에 따라 해수면 고도자료의 차이가 크게 나타난다는 사실을 검증하기 위해, 가장 내해역의 성격을 띠는 지점중 하나인

서귀포지점 (SGP)을 선택하여 TP 및 TG 자료의 비교를 수행하였다. Fig. 2 은 한국남해의 SGP에서 1992년 10월부터 1998년 12월까지 관측된 T/P 자료와 조석시계열 자료를 크기가 다른 윈도우 (30, 60, 120, 200일)를 적용하여 비교한 결과를 제시하였다. 여기서 1 시간 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 주변해역은 조석현상이 매우 복잡하고 강한 지역이다. 실제로 Fig. 2의 (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 경우에도 이러한 거짓신호가 제거되지 않고 있다. 이러한 현상은 M_2, S_2 K_1 분조 등에 의한 조석 변형 때문에 발생하는 현상임이 잘 알려져 있다[8]. 마지막으로 (d) 200일(T=100 days)의 자료에 가우시안 필터를 적용한 경우, T/P 고도자료와 조위계에 의해 관측된 해수면 자료는 비교적 잘 일치한다.

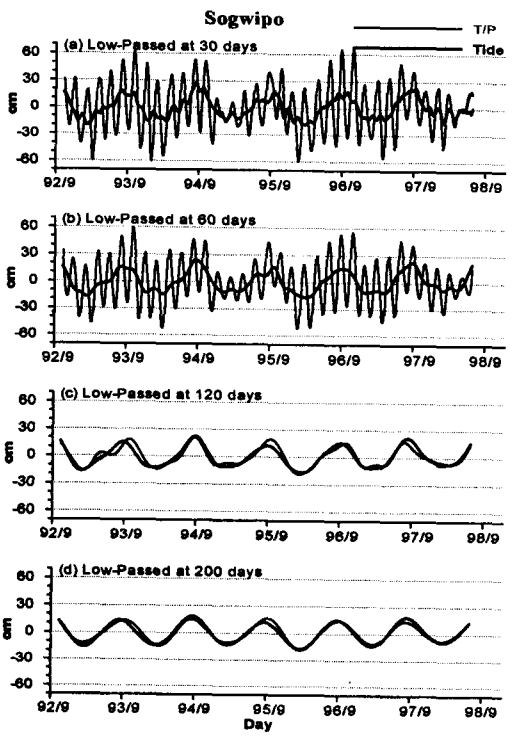

Figure 2. Comparison of sea level time series derived from the TOPEX/POSEIDON altimetry(thinline) without inverse barometer correction and the tide gauge measurements (heavy line) at Sogwipo in korea. Data have been low-pass filtered using (a) a 30-day, (b) a 60-day, (c) a 120-day, and (d) a 200-day Gaussian filter.

2. 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 TG 자료의 비교를 시도하였다. 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 필터를 적용할 경우, SGP와 마찬가지로 조위계 해수면을 잘 재현한다 (Fig. 3).

연구해역에서 SGP나 JCC와 같은 지점을 중심으로 T/P 자료와 조석시계열 자료를 크기가 다른 윈도우 (30, 60, 120, 200일)에 적용한 결과, 200일 가우시안 필터(t=100 일)에서 가장 잘 일치하며 그보다 더 큰 주기의 해양신호는 잘 보존하는 것으로 보인다. 관측된 T/P 자료와 10개소의 조위관측소의 조위 시계열 자료를 크기가 다른 윈도우에 적용한 결과, T/P 자료가 M_2, S_2, K_1 조석변형 주기 부근에서 조석변형 효과가 비교적 강하게 나타났다.

이와 같은 비교로부터 rms의 중간값은 4.19 cm 이고 상관계수의 중간값은 0.9로 나타났다. 상관계수는 0.80-0.96으로 SGP와 일본의 CJJ에서 가장 높게 나타났다. 이때 상관계수의 유의확률 (p-value)이 전 조위관측소에서 공히 0.0001을 보여 상관계수값들이 통계적으로 매우 유의 하다고 할 수 있다. 또한 보통 우물형 조위계를 사용하여 해수면을 관측하는데 이는 우물 안에서 부표가 해수면 운동에 따라 움직이면서, 해수면을 직접 관측하도록 고안되어 있다. 따라서 관측된 해수면 자료는 대기압 효과와 steric 효과를 포함하고 있어 기압보정이 되지 않은 T/P 자료와 직접 비교할 수 있다(초음파식 조위계도 마찬가지이다). 반면에 압력식 조위계는 해저에서 압력변화를 이용하여 간접적으로 해수면 변화를 추정하므로 대기압효과와 steric효과가 포함되지 않으므로 이에 대한 보정이 필요하다.

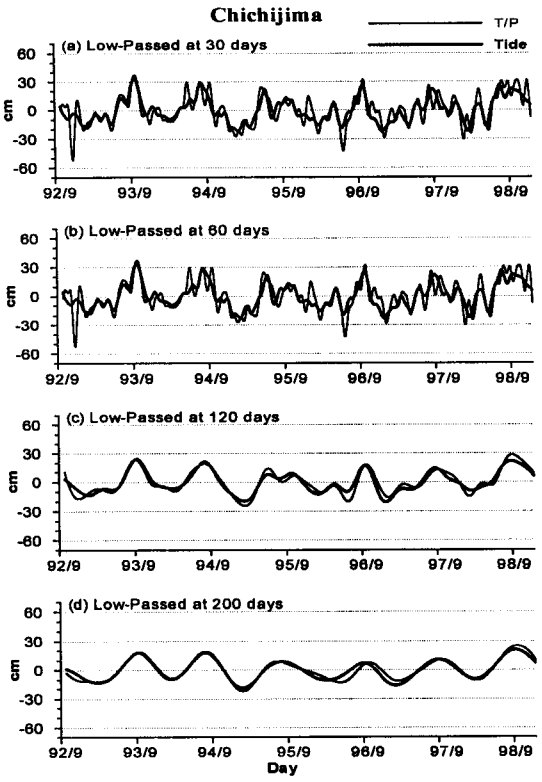

Figure 3. Comparison of sea level time series derived from the TOPEX/POSEIDON altimetry (thin line) without inverse barometer correction and the tide gauge measurements (heavy line) at Chichijima in Japan. Data have been low-pass filtered using (a) a 30-day, (b) a 60-day, (c) a 120-day, and (d) a 200-day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

V. 결 론

동아시아 주변 해역에서의 조석관측자료와 T/P 자료가 어느 정도 잘 일치하는지 조사하기 위해, 2번 사이클부터 230번 사이클까지의 T/P 고도자료와 위성 궤도에서 가장 근접한 10개 조위관측소의 해수면 자료를 비교하였다. 실제로 조석현상이 복잡하고 강한 연안지역인 우리나라의 서귀포와 비교적 외해에 위치하여 조석현상이 덜 복잡한 일본의 Chichijima에 대한 두 관측자료의 조화분석결과를 보면, 서귀포의 경우 M_2, S_2 분조가 전체 에너지의 약 50%를 차지하고 있으며, K_1분조에 의한 에너지도 10%를 차지한다. 그리고 외해에 위치한 Chichijima는 M_2분조가 28.6%, K_1 분조가 16.7%, S_2 분조가 12.8%를 차지하고 있어 K_1분조를 무시할 수 없다. 즉, T/P 자료에 기인하는 M_2, S_2 분조에 의한 약 60일 주기, K_1 분조에 의한 주기 약 173일의 조석변형의 오차들을 무시할 수 없다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 조사대상 정점들에 대하여 편의상 가우시안 필터를 사용하였는데, 30day, 60day, 120day 그리고 200day의 순으로 lowpass filter를 해보면 200day에서 T/P자료에 기인하는 거짓 신호를 거의 완벽하게 제거할 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 동아시아 주변 해역에서 T/P자료를 이용한 해수면 변화 연구와 관련하여 T/P에 기인하는 조석오차의 영향을 제거하기 위해서는 전체적으로 최소한 180day 이상의 장주기에서 만 T/P자료와 TG자료간의 비교가 가능하다.

참고문헌

[1] Mitchum, G. T., Comparison of TOPEX sea surface heights and tide gauge sea level, *J. Geophys. Res., 99,* 24,541-24,553, 1994.

[2] Christensen, E. J., et. al., Calibration of TOPEX/POSEIDON at Platform Harest, *J. Geophys. Res., 99,* 24,465-24,485, 1994.

[3] Tapley, B. D., et. al., Accuracy assessment of the large-scale dynamic ocean topography from TOPEX/POSEIDON altimetry, *J. Geophys. Res., 99,* 24,465-24,485, 1994.

[4] Katz, et. al., A comparison of coincidental time series of the ocean surface height by satellite alitimeter, mooring, and inverted echo sounder, *J. Geophys. Res., 100,* 25, 101-25 108, 1995.

[5]Picaut, Jo ̈e l et. al., Open-ocean validation of TOPEX/POSEIDON sea level in the western equatorial Pacific, *J. Geophys. Res., 100,* 25,109-25,127, 1995.

[6] Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Data in Oceanography (AVISO), *AVISO User Handbook: Merged TOPEX/ POSEIDON Products, Publ. AVI-NT-02-101-CN,* 2.1, Cent, Natl. d'Etudes Spatiales, Toulouse, France, 1992.

[7] Park, Y. H., and G. Gamberoni, Large-scale circulation and its variability in the south Indian Ocean from TOPEX/POSEIDON altimetry, *J. Geophys. Res., 100,* 24,911-24,929, 1995.

[8] Schrama, E, J, O., and R. D. Ray, A preliminary tidal analysis of TOPEX/ POSEIDON altimetry, *J. Geophys. Res., 99,* 24,799-24,808, 1994.