

한반도 동해상에서의 Topex/Poseidon 고도자료와 현장 조위계 관측 자료의 비교연구

윤용훈¹ · 김나영² · 김기현² · 황종선³ · 김정우^{2,*}

¹기상연구소 지구대기감시관측소, 357-961 충청남도 태안군 안면읍 승언리 1764-6

²세종대학교 지구정보과학과, 143-747 서울시 광진구 군자동 98

³연세대학교 지구시스템과학부, 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134

Comparison of Sea Level Data from Topex/Poseidon and *in-situ* Tide-Gauges in the East Sea

Yong-Hoon Youn¹ · Na-Young Kim² · Ki-Hyun Kim²
Jong-Sun Hwang³ · Jeong Woo Kim^{2,*}

¹Korea Global Atmosphere Watch Observatory, Meteorological Research Institute,
Chung-Nam 357-961, Korea

²Department of Earth Sciences and Research Institute of Geoinformatics & Geophysics,
Sejong University, Seoul 143-747, Korea

³Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

Abstract : In an effort to properly assess the validity of spaceborne radar altimeter measurements, we made a direct comparison of two different sea surface heights (SSH) acquired by both Topex/Poseidon (T/P) satellite and *in-situ* tide-gauges (T/G). This comparative analysis was conducted using the data sets collected from three locations along the eastern coast of Korea which include: Ulleungdo, Pohang, and Sokcho. In the course of the analysis of satellite altimeter, information of SSH was extracted from the T/P MGDR data sets through the application of both atmospheric and geophysical corrections. To compare the T/P data sets in parallel basis, the T/G data sets were averaged using the measured values within the peripheral radius of 55km. When compared among different locations, the compatibility between the two methods was much more significant in an offshore location (Ulleungdo) than the two onshore locations (Pohang, Sokcho). If the low-pass filtered results were compared among the sites, the offshore site exhibited the best correlations between the two methods (correlation coefficient of 0.91) than those of the onshore sites. These large differences in the strength of correlations among different locations are due to the deformation of M2, S2, and K1 tidal components used in the tidal model. In case of the offshore location, the compatibility of the two different methods were improved systematically by the low-pass filtering with an increase of the filtering duration such as up to 200 days.

Keywords : East sea, sea level, Topex/Poseidon altimetry, tide gauges

요 약 : 한반도 동해에서 Topex/Poseidon 위성 고도레이더로부터 관측된 해수면과 울릉도, 포항, 속초의 조위계에서 관측된 해수면을 비교하여 두 자료의 연계성을 분석하고 위성에서 관측된 해수면자료의 객관성을 검증하였다. 1992년부터 1997년 사이에 관측된 T/P MGDR 관측자료로부터 해수면을 추출하기 위하여 대기보정 및 지구물리학적 보정을 실시하였다. 조위계로부터 관측된 해수면과의 비교를 위해 조위관측소로부터 반경 약 55km 내에 위치하는 관측값들을 평균하였다. 위성 해수면과 조위계 해수면을 비교한 결과 내해역에 위치한 포항 및 속초가 외해역에 위치한 울릉도에 비해서 낮은 연관성을 보였다. 200일을 기준으로 저역통과필터를 처리했을 때 외해역에 위치한 울릉도는 상관값이 0.91로 매우 높은 유의성을 보였고, 내해역에 위치한 포항 및 속초는 각각 0.58 및 0.65로서 울릉도에 비해서 상대적으로 낮은 유의성을 보였다. 이러한 큰 차이는 M2, S2, K1 분조 등에 의한 조석변형 때문에 발생하는 현상으로 볼 수 있고, 이는 주로 T/P 자료처리에 사용된 조석모델의 오차로 볼 수 있고, 이를 저역통과필터를 적용하여 효과적으로 제거하였다.

*Corresponding author: jwkim@sejong.ac.kr

대체로 외해역의 경우는 60, 120, 180, 200 일의 필터를 순차적으로 처리함에 따라 상호 두 자료간의 유의성이 점차적으로 개선되는 것을 확인할 수 있었으나 내해역의 경우에는 거의 유의성이 개선되지 않는 것으로 확인되었다.

주요어 : 동해 해수면, Topex/Poseidon 레이더고도계, 조위계

서 론

1974년에 항공 레이더 고도계인 SkyLab이 성공적으로 개발됨으로써(McGoogan *et al.*, 1974), 인공위성 레이더 고도계(satellite radar altimeter)를 활용한 지구관측분야에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다. 1975년과 1978년 사이에는 Geos-3 위성체에 레이더 고도계를 싣고 실험을 수행하였다. 이러한 관측은 1978년에 Seasat에 의해 최초로 해양환경으로까지 그 적용분야가 확대되었다. 그 뒤를 이어 1985년에서 1989년까지 미 해군의 Geosat 위성의 실험이 있었는데, 이는 지금까지 가장 성공적인 임무를 수행한 것으로 평가받고 있다. 그 후 1991년부터 1996년까지 유럽 ESA의 ERS-1 위성이 운용되었고(ERS-1 System, 1992), 그 뒤를 이어, 순수 해양환경의 고도 관측을 목적으로 Topex/Poseidon(이하 T/P) 위성이 미국의 NASA와 프랑스 CNES(Centre National d'Etudes Spatiales)의 공동연구를 통해 개발되었다. 1992년 8월 10일에 발사된 T/P 위성은 궤도수정과 조정기를 거쳐 1992년 10월 2일부터 지금까지 해수면 고도 자료를 본격적으로 수집하고 있다. T/P 위성은 평균 고도 1336km의 상공에서 66.05°의 경사각으로 112.4분만에 거의 원형궤도로 지구를 한바퀴씩 회전한다. 따라서 약 10일(정확하게는 9.95156일) 주기로 전 지구를 관측할 수 있도록 설계되었다. 지표면의 이동속도가 5.8km/s이기 때문에 5.8km마다 자료가 생산되고 있는 셈이다. 위도에 따른 지상 궤도 간격은 위도가 증가함에 따라 작아지는데 적도에서는 315km이고, 우리나라 부근에서는 250km 정도이다. T/P에 탑재된 고도계는 ERS-1과 ERS-2의 고도계 보다 정밀도가 높으며 실제 약 1.2cm까지 측정 가능한 것으로 알려져 있다.

T/P와 같은 위성을 이용한 고도관측은 대략 다음과 같은 방식으로 접근한다. 위성에 탑재된 고도계를 이용하여 위성과 그 하단의 해수면까지 거리를 관측하면, 지구타원체(reference ellipsoid)상의 순간적인 해수면 높이(Sea Surface Height, SSH)를 계산할 수 있다. 해수면 높이는 T/P 고도계로부터 관측된다. 해수

면 높이는 인공위성의 고도(인공위성에서 지구타원체까지의 거리)와 인공위성의 거리(인공위성에서 해수면까지의 거리)의 차이, 즉 기준타원체로부터 해수면까지의 거리를 의미한다. 실제 해수면 높이는 기준타원체 대신 지오이드로부터의 거리로 대신한다. 지오이드가 지역에 따라 다르고, 정확한 값을 알지 못하므로 평균해수면으로부터 높이를 사용하여 변화량을 파악할 수 있다. 그런데 이와 같은 계산을 수행하기 위해서는 여러 가지 요인들에 대한 정확한 보정이 필수적으로 수반되어야 한다. 특히 가장 기본적인 “해양과 고체지구 간의 조석에 의한 영향”에 대한 부분과 함께, 위성과 해수면 사이에 놓인 대기의 조성 또는 여타 지구 물리학적 요소들이 시간적으로 변동하는 부분도 감안해 주어야 할 것이다. 그러한 요인들을 감안할 때, SSH를 정확하게 계산하는 것은 단순한 일이 아니다. 따라서 특정 기간 동안 SSH의 시간적 변화를 평균함으로써, 한 고정점에 대한 평균해수면의 높이(Mean Sea Surface Height, MSSH)를 추정하는 방식이 활용되기도 한다. 그런데 MSSH는 평균해수면과 일치하는 지구중력장의 등포텐셜면인 지오이드(geoid)를 잘 반영한다. 따라서 MSSH는 Mean Dynamic Ocean Topography 혹은 큰 규모의 해양순환에 관한 정보를 의미하는 Mean Sea Surface Topography 라고도 한다(Yi, 1996).

해양학적 관점에서 보았을 때 레이더 고도계를 이용한 위성관측의 가장 큰 목적은 해양의 역동적인 변화를 객관적 및 체계적으로 파악하는데 있다. MSSH에 대한 많은 실험은 Geos-3에 의해 시도되었는데, 지구 규모에서 약 50cm 정도의 정확도를 유지하는 것이 가능하게 되었다(Stanley, 1979). 그 후 약 20년이 지난 오늘날, T/P 위성을 활용할 경우 RMS 기준으로 약 3.2cm의 정확도를 확보하는 것이 가능하게 되었다(Fu *et al.*, 1994). 따라서 T/P 위성으로 작은 규모의 해수순환에서부터 엘니뇨와 같은 대규모의 해수면 변화까지 자세하게 관측하는 것이 가능하게 되었다. 이미 윤용훈 등(2000)은 한반도 주변 해역 및 일본과 중국지역을 중심으로 관측된 T/P와 T/G 자료의 연계성을 여러 가지 관점에서 비교 확인한

바 있다. 본 연구에서는 비교적 조석간만의 차이가 완만하여 조위자료의 관측이 용이한 동해안 지역의 주요 조위관측점들(울릉도, 포항, 속초)을 중심으로 관측된 조위계(Tide Gauge, T/G) 자료와 이들 지점에 가장 인접한 지점으로부터 추출한 T/P 자료에 대한 수치분석을 실시하였다. 이를 통해, 양 측정방식으로 동일지점에서 관측된 자료간의 비교해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 한반도 동해안 지역에서 관측되는 T/P와 T/G 자료의 연계성을 분석하고, 이를 통해 T/P 자료의 객관성에 대한 검증은 시도할 수 있는 근거를 제시하고자 하였다.

연구방법

연구지역 및 자료처리

본 연구에서는 1992년부터 1997년까지 국립해양조사원에서 관측한 울릉도(37-29-34N, 130-54-53E), 포항(36-01-04N, 129-23-57E), 속초(38-12-15N, 128-35-48E) 지역 조위관측소의 T/G 자료를 이용하였다. 연구에 사용된 T/G 자료는 조위관측소 내에 설치된 우물형 조위계로 관측한 것으로, 이는 기계적으로 필터된 해수면 운동을 우물안 부표의 움직임에 따라 관측하는 방식이다. 비교 분석에 사용된 이들 각 관측점의 위치는 Fig. 1에 개별적으로 제시하였다. 이들 T/G 자료는 Bell *et al.*(1998)의 방법으로 조화 분석된 자료를 추출하여 T/P 자료와의 비교에 사용하였다. 해수면 고도의 객관성을 검증하기 위한 목적으로, T/P 고도자료는 시간적으로 T/G 자료와 동일한 연구대상기간을, 공간적으로는 T/G 자료의 조위관측소에 대해서 위·경도 $\pm 0.5^\circ$ (약 55km)의 범위 내에서 선택하여 평균한 값을 사용하였다.

T/P 고도에 대한 해석에는 MGDR(Merged Geophysical Data Record) 자료를 활용하였다. T/G 자료와의 체계적인 비교분석을 위해 1996년부터 1997년까지 2년간의 자료를 분석하였다. 극궤도(polar-orbiting) 위성인 T/P가 지구 전체를 완전히 관측하는 데 약 10일이 소요되어 이를 사이클(Cycle)이라고 하며, 각 사이클은 254개의 패스(Pass)로 구성되어있다.

해수면 고도산정을 위한 보정

1) 대기보정

위성 고도계의 발신기가 보낸 임펄스(radar impulse)는 해양 표면에서 반사되어져서 메이리 형태의 임펄

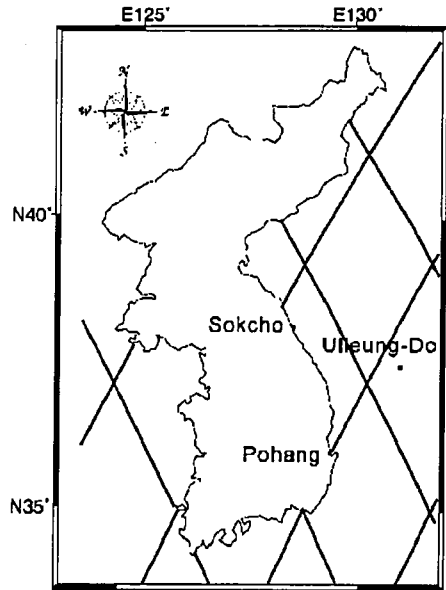


Fig. 1. Location of in-situ tide-gauges and T/P passes.

스로 위성 수신기에 기록되어진다. 이렇게 반사된 신호로부터 우리는 해양 표면과 관련된 3가지 특성을 구할 수 있다. 첫째는 위성-해수 표면간의 거리, 둘째는 해수 표면에서의 파의 진폭 그리고 셋째는 돌아오는 임펄스의 형태를 각각 알수 있다. 그리고 레이 다빔(beam)은 콘(cone)의 형태로 감지하는데, 지표면에서의 구경은 약 10km 정도가 된다.

위성-해수 표면간의 거리를 소위 경로(range) 혹은 고도측정(altimeter measurement)이라고 표현하는데, 이것은 임펄스의 왕복 시간으로부터 구하여 진다. 이 경로내에서 여러 신호들이 고도계에 의해서 측정되어지며, 이때 이 경로 내에서 대기의 다른 여러 층들을 가로지르는 레이더파의 전파와 해양 표면에서의 파의 변형과 같은 환경 측성에 따르는 보정으로는 이온권(ionosphere)의 영향에 대한 보정, 건조 및 습윤 대류권(troposphere)의 영향에 대한 보정 그리고 전자기적 편차(bias)의 영향에 대한 보정이 있다. 그 외 측정에 영향을 미칠 수 있는 현상들로는 해수 표면에 대한 위성 안테나의 기울기(경사도)와 위성 거리의 요동(fluctuation)들이 있다.

이들 요소를 고려한 range 식은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \text{Corrected Range} = & \text{range} + \text{wet troposphere correction} \\ & + \text{dry troposphere correction} + \text{ionosphere correction} \\ & + \text{electromagnetic bias} \end{aligned} \quad (1)$$

실제로 고도계의 펄스에 가장 큰 영향을 미치는 환경요소는 대기에 존재하는 여러 가지의 입자들이다. 이 입자들은 레이더 펄스의 관측시간을 지연시키거나 오차를 발생시킨다. 따라서 이러한 입자들의 영향을 고려해 주어야 한다.

Dry troposphere correction은 대기 중에 존재하는 입자들에 의한 굴절로 발생하는 요소를 보정해 주는 인자이다. MGRD에서 건조 대기 보정을 위해 Dry_corr이 사용되었다. 이 값은 -300cm에서 -200cm까지의 변화폭을 가지고 있으며, range 값에 더해져야 한다. 이 Dry_corr 값은 European Center for Medium-Range Weather Forecasts에 근거하여 프랑스 기상국이 대기압을 이용하여 계산하였다.

Wet troposphere correction은 대기 중에 존재하는 수증기나 구름내의 물입자에 의한 굴절로 발생하는 전파의 지연을 보정하기 위해 고려되었다. 이 값은 3-frequency TOPEX Microwave Radiometer(TMR)을 이용하여 brightness temperature를 관측함으로써 구할 수 있다. Wet troposphere correction은 dry correction에 비해 작은 값을 갖지만 시·공간적인 변화가 크기 때문에 보정이 훨씬 복잡하다. 이로부터 추출된 값은 -100cm부터 0까지의 값을 가지고 있다. Ionosphere correction은 대기 중에 존재하는 자유전자에 의한 고도계의 전파속도 지연을 보정하기 위한 과정이다.

해양의 파는 레이더 고도계가 왕복하는 과정에서 복잡하게 작용한다. 실제로 레이더가 관측하는 지표면의 면적(footprint)이 넓기 때문에 표면에서 산란된 양이 레이더에 균일하게 도달하는 것은 아니다. 예를 들면 파의 골에서 반사되는 펄스가 파의 봉우리에서 반사되는 것보다 훨씬 잘 반사되는 것으로 알려져 있다. 이러한 보정을 하기 위해 기기보정 중의 하나인 sea state bias 혹은 electromagnetic bias라 알려진 보정을 해수면 높이 계산에 고려해 주어야 한다.

이상과 같이 경로 내의 환경 특성들에 따르는 보정과 함께 조석 신호(tidal signal) 및 해면 기압 신호(inverted barometer signal)의 영향을 제거하므로써 우리는 해양 순환에 관련하는 최종 신호인 역학고도(dynamic topography)를 구할 수 있다. 아울러 위성에 의해서 포착된 변형된 임펄스의 세기로부터 당시 조사된 점에서의 바람의 강도 및 파의 의해서 생기는 신호의 분산을 통해서 파의 높이를 각각 알 수 있다.

미국 항공우주국(NASA; National Aeronautic and

Space Administration)의 고도계(Topex)는 13.6GHz & 5.3GHz의 두 주파수 대를 가지고 조사를 수행하는데, 이러한 주파수 대는 위성 고도의 측정과 관련하여 이온층 내의 자유 전자의 영향을 보정하는데 사용되어진다. 이때 주파수에 따른 위상(phase)의 지연은 단위면적 당 레이더의 진동에 반비례하고 2개의 주파수 대로부터 측정되어진 차이로부터 이온층의 자유 전자에 기인하는 지연을 알 수 있다. 그리고 또한 이 고도계는 다른 3개의 주파수대(18GHz, 21GHz & 37GHz)내에서 자연 태양광을 측정할 수 있도록 마이크로복사계(microwave radiometer)가 갖추어져 있다. 이때 21GHz인 중간 주파수 대로부터 수증기의 누적 함량을 평가할 수 있다(수직적으로 40cm의 수증기의 영향에 대해서 수 cm 정도의 오차를 나타낸다). 또한 나머지 주파수 대들은 부가적으로 바람의 속도와 구름의 덮힘도에 대한 영향을 평가할 수 있게 해준다.

프랑스 항공우주국(CNES; Centre National d'Etudes Spatiales)의 고도계(Poseidon)는 단지 13.6GHz의 주파수 대만을 가지고 있는데, 이때 이온층의 교정은 DORIS(Determination d'Orbite et Radiolocalisation Integree par Satellite: 복수 주파수 위성궤도반경 시스템)의 측정과 관련된 기본 모델에 따라서 수행되어진다.

2) 지구물리학적 보정

해수면 고도를 정확하게 산정하기 위해서는 geoid, tide effects, solid earth body tide correction, ocean tide correction, load tide correction, atmospheric loading과 같은 지구물리학적 인자들에 대한 보정이 요구된다. 이들 개별 인자에 대한 보정은 다음과 같이 고려되었다. 우선 지오이드는 지구중력장의 등포텐셜면이며 해류와 조석과 같은 동적인 성분을 무시할 경우 평균해수면과 일치한다. T/P 자료의 경우, JGM3/OSU91A 모델을 사용하였다. 또한 SSH를 계산하는데 있어 조석의 영향을 제거하기 위해, 조석효과(tide effect)는 다음과 같이 고려하였다.

Tide effect =

$$\text{Ocean Tide} + \text{Solid Earth Tide} + \text{Pole Tide} \quad (2)$$

정확한 고도산정을 위해서는 앞에 언급한 조석효과와 연관된 여러 가지 조석오차에 대한 보정이 필요하다. 가장 대표적으로 Solid Earth body tide

correction은 지구고체에 대한 조석모델을 고려한 것으로서, 달과 태양의 조석 포텐셜 반응을 감안한 것이다. 본 연구에서 T/P MGDR 자료에 사용한 알고리즘은 T/P GDR 자료에 사용된 것과 동일하다. Flag는 관측지점에서의 solid earth tide, H_set을 사용하였으며, -1000에서 1000mm까지의 변화폭을 가지고 있다. 그 외에도 고도계의 표면높이 관측에 있어 ocean tide의 제거는 다른 일반적인 보정보다 가장 큰 값을 차지한다(Ocean tide correction). 1991년 Ray, Koblinsky, Beckley는 ocean tide가 신호의 변화에 80% 이상의 역할을 차지한다고 말했다. 모든 위성에 대한 Pathfinder ocean tide model은 사실 여러 가지 해양모델을 결합한 것을 사용했다. 기본적인 deep-ocean 모델은 1994년의 Schrama와 Ray의 모델을 개선시킨 것이다. 이 모델은 960104로 잘 알려져 있지만(SR960104, NASA report), 사실 1997년의 Shum과 그의 동료들이 광범위하게 연구한 모델과 거의 비슷하다. 본 연구에서 사용된 해양모델은 University of Texas Center for Space Research (version CSR 3.0, R. Eanes, 1996, personal communication; see also ma *et al.*, 1994, for a previous version of this model)에서 만든 모델을 사용하고 있다. 이 CSR3.0은 T/P 자료와 Le Provost *et al.*(1994)의 모델과 연관되어 있다. Solid earth tide 와 ocean tide는 약 3cm의 RMS를 가지고 있다.

Pole tide는 지구 중심축의 흔들거림으로 인해 발생하는 원심력의 변화에 따른 바다의 변화를 반영하기 위해 계산된 것이다. 이 pole tide는 두 개의 중요한 주기를 가지고 있다. 하나는 연주기이며 다른 하나는 14개월의 주기이다(이중 14개월의 주기는 Chandler Wobble 주기라 일컬어 짐). 이 pole tide correction은 해양과 지구고체의 변화 모두를 포함한 보정으로 1960년대에 Munk와 MacDonald(1960)에 의해 계산되었다. 이 당시 사용된 식은 Pole Tide elevation = $A * \sin(2 * \text{lat}) * [X * \cos(\text{lon}) + Y * \sin(\text{lon})]$ 에 기초한다. 여기서 x와 y는 그리니치와 90°E 자오선을 의미한다(본 연구에서는 이 Pole tide correction을 해수면 높이 계산에 고려하지 않았다. 그리고 Load tide는 해양조석의 무게에 의한 고체지구의 지역적 연직변화를 의미하기 때문에, load tide는 해양 모델과 일치하여야 한다. 마찬가지로 본 연구에서는 load tide correction을 해수면 높이 계산식에 고려하지 않았다).

미국 NASA에서 제공하는 많은 자료들은 대기의 무

게에 대한 영향을 미리 제거시켜 자료를 제공하고 있다. 특히 대기의 영향을 전혀 고려하지 않아도 되는 경우, 바로 자료를 사용할 수 있다는 편리한 점이 있다. 그러나 본 연구와 같이 해수면 높이를 계산하는 경우, 해수면이 대기의 무게에 의해 영향을 받기 때문에 지역적인 대기의 표면압력과 지구 규모적인 압력값을 이용하여 이러한 보정을 해야 만 한다. 이를 위해 GDR 자료에서는 Callahan(1994)이 제시한 압력단위와 관련 수식을 사용하였다. 본 연구에서는 미국 NASA와 마찬가지로 압력은 dry-troposphere correction과 일치하고 있다. 참고로 T/P, Geosat, ERS-1에 사용된 압력은 European Centre for Medium-range Weather Forecasting의 결과를 사용하였다. 특히 초창기 Seasat의 경우, Fleet Numerical Ocean Center의 대기모델이 사용된 것으로 알려지고 있다.

해수면 고도의 계산

T/P 위성의 MGDR 자료를 이용하여 해수면 높이를 계산하기 위해 다음과 같이 기준을 설정하였고, 기준치를 벗어나는 자료는 삭제하였다.

- Significant Wave Height > 15m or < 0
- Dry Trop < -2600mm or > -2000mm
- Wet Trop < -1000mm or > 0
- Ocean Tide < -10000mm or > 10000mm
- IB < -1000mm or > 1000mm
- Ocean Load < -200mm or > 200mm
- Solid Earth Tide < -1000mm or > 1000mm
- Ionosphere < -600mm or > 0

여기서 Sea Surface Height(이하 SSH)는 지구타원체(reference ellipsoid) 위의 해수 표면의 높이이다. SSH는 지구타원체 위로부터 위성까지의 고도에서 corrected range를 감해 줌으로써 계산할 수 있다.

$$SSH = \text{Altitude Range} - \text{Corrected Range} \quad (3)$$

본 연구에서 SSH를 계산하기 위해 최종적으로 사용한 식은

$$SSH = \text{sat_height} - (\text{altimeter_range} + \text{delta_alt_range} + \text{altimeter_bias}) - \text{geoid_height} - \text{geocentric_body_tides} - \text{ocean_tides} - \text{atmospheric_loading} \quad (4)$$

이며, 여기서 $altimeter_range + delta_alt_range$ 는 Corrected Range와 동일하다.

위에서 언급한 wet/dry troposphere, ionosphere, inverted barometer, sea state bias and ocean tide 등의 관측 결과들을 MGDR 자료로부터 추출한 후, 각각에 맞는 기준으로 보정하였다. 한편 T/P 위성은 적도지역에서 약 2.83°(약 314km)의 패스간 간격을 가지고 있는 반면 위성의 패스에 따라서는 약 7km 간격의 자료가 있으므로 보간법을 이용, 이들을 등간격화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 Nerem *et al.*(1994)에 의해 제안된 식을 이용하였다.

결과 및 토의

울릉도에서의 비교결과

Fig. 2는 울릉도에서 1992년 10월부터 1997년 12월까지 관측된 T/P 자료와 T/G 자료를 크기가 다른 윈도우(60, 120, 180, 200일)를 적용하여 비교 분석한 결과이다. 해양에서는 8개의 주요 조석 분조가 있는데 이는 O_1 , N_2 , S_2 , M_2 , Q_1 , K_2 , P_1 , K_1 이다. 조석 주기와 위성 고도자료의 추출간격의 불일치는 조석 신호의 변형을 가져온다. 따라서 조석 변형의 오차를 제거하기 위해서 본연구에서는 가우시안 저주파 필터를 적용하여 비교하였다.

비교대상점 가운데 육지에서 가장 멀리 위치한 울릉도 지점의 경우, 가우시안 필터를 적용한 결과가 60일에서 120일, 180일, 200일로 갈수록 T/P 고도자료와 조위계에 의해 관측된 해수면 자료간에 비교적 잘 일치함을 확인 할 수 있다(Fig. 2). 특히 200일 가우시안 필터를 적용한 결과 그이상에는 위상의 변형이 없이 잘 보존됨을 알 수 있다. 울릉도는 조석 현상이 약하고 비교적 외해에 위치하고 있어 타 지점에 비해 높은 일치도를 나타낸다. Table 1은 3개의 조사 대상점에 대한 T/P 자료와 T/G 자료를 각각 크기가 다른 윈도우를 적용하여 계산한 상관계수(correlation), 유의확률(t-value, p-value)을 보여준다. 실제로 울릉도 자료에서 가우시안 필터를 적용한 결과의 최초 상관계수는 0.57(60일)인데 반해, 주기가 확장됨에 따라 0.62(120일), 0.86(180일), 0.91(200일)로 개선되는 것을 확인할 수 있다. 또한 200일에서 상관계수의 p-value의 유의확률이 0에 근사하므로 상관계수의 값이 통계적으로 매우 유의하다고 이야기 할 수 있다. 즉 200일 가우시안 필터에서 가장 잘

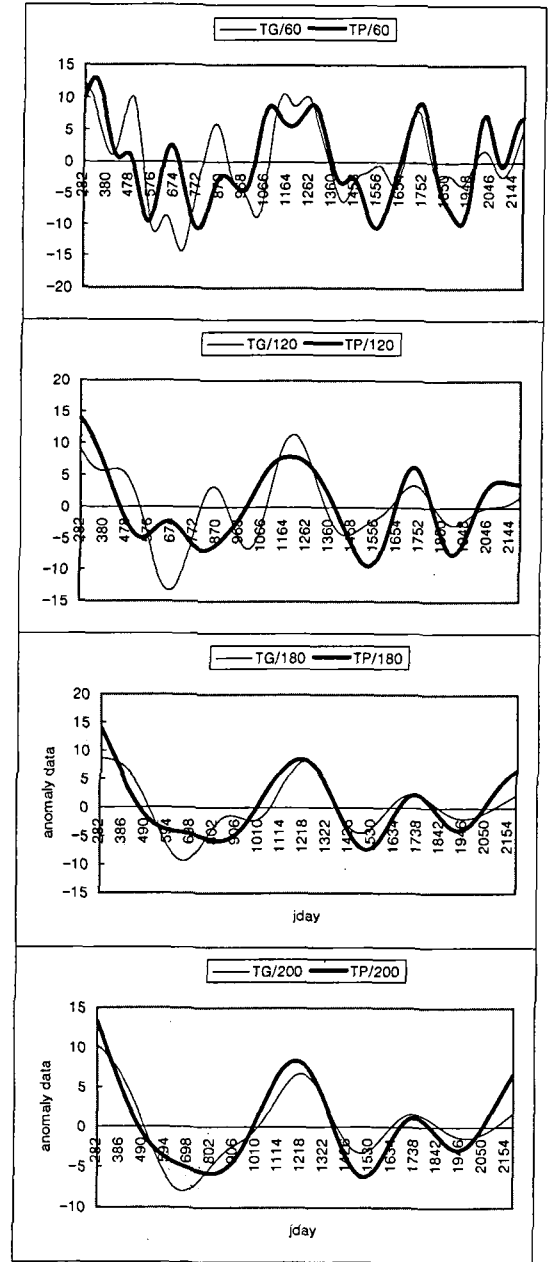


Fig. 2. Low-pass filtered T/P and T/G sea surface heights for 60, 120, 180, and 200 days at Ulleungdo site.

일치하며 그 보다 더 큰 주기의 해양신호는 잘 보존하는 것으로 보인다.

포항 및 속초에서의 비교 결과

울릉도 지점에서의 T/P와 T/G의 가우시안 필터 결과가 가장 긴 적용기간에 해당하는 200일 주기에서

Table 1. Results of correlation analysis between T/P and T/G data sets obtained from three comparative measurement sites (N=1904 matching pairs for each comparison site).

		Pohang	Sokcho	Ulleungdo
60	r	0.26	-0.18	0.57
	t-value	11.50	-7.80	30.64
	P-value	1.19E-29	1.03E-14	5.61E-168
120	r	0.16	0.07	0.62
	t-value	6.96	2.99	34.06
	P-value	4.75E-12	2.83E-03	5.95E-199
180	r	0.50	0.56	0.86
	t-value	25.26	29.38	74.87
	P-value	1.21E-121	9.06E-157	0.00E+00
200	r	0.58	0.65	0.91
	t-value	31.00	37.59	97.38
	P-value	3.89E-171	8.61E-232	0.00E+00

상당히 높은 수준의 일치도를 보인 반면에, 상대적으로 육지에 인접한 포항과 속초 지점의 결과는 이의는 대단히 다른 양상을 보여 주었다. 물론 이들 지역에서도, 필터의 적용기간이 늘어남에 따라 양 자료간의 일치도가 증가하는 것이 비교적 뚜렷한 경향성을 보이지만(Table 1 참조), 200일의 가우시안 필터를 적용한 경우에도 포항지역의 상관계수가 0.58, 속초는 0.65로 울릉도 지역에서 관측된 0.91에 훨씬 못 미치는 수준이라는 것이 확인되었다.

본 연구에서 그림으로는 세부적인 정보를 제시하지는 않았지만 60, 120, 180일에 걸쳐서 조석 관측자료에 나타나지 않은 일정한 주기의 강한 신호가 T/P 자료에서 발견되는 것을 알 수 있다. 이러한 부분은 해양신호와 관계없는 잘못된 신호로서 거짓신호가 제거되지 않았기 때문에 나타나는 현상이다. 이러한 현상은 M2, S2, K1 분조 등에 의한 조석변형 때문에 발생하는 현상이라고 할 수 있다(Schrama and Ray, 1994; Park and Gamberoni, 1995). 이들 지역에서 상대적으로 T/P와 T/G 자료의 일치도가 떨어진다는 사실은 세 비교대상에 대한 200일 가우시안 필터를 적용한 결과를 제시한 Fig. 3에서도 뚜렷하게 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 양 관측방식으로부터 구한 자료의 차이를 어느 정도 설명할 수 있는데, 특히 T/P 자료와 T/G 자료의 일치성이 내해역에서 보다 외해역에서 높게 나타난다는 사실과 일치하는 결과이다(윤용훈 등, 2000).

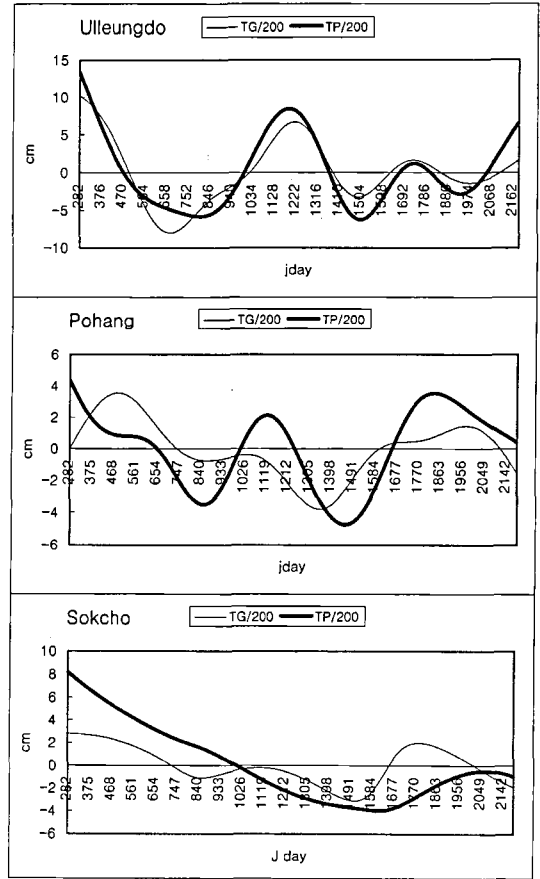


Fig. 3. 200-day low-pass filtered T/P and T/G sea surface heights at Ulleungdo, Pohang, and Sokcho sites.

결론

한반도 동해에서 Topex/Poseidon 위성 고도레이더로부터 관측된 해수면과 울릉도, 포항, 속초의 조위계에서 관측된 해수면을 비교하여 두 자료의 연계성을 분석하고 위성에서 관측된 해수면자료의 객관성을 검증한 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 내해역에 위치한 포항 및 속초가 외해역에 위치한 울릉도에 비해서 낮은 상관성을 보였다. 위성자료는 육지와 연안 지역의 영향을 받지 않은 원해(외해) 해역으로 나아갈수록 일치도가 높아진다. 울릉도는 조석현상이 약하고 비교적 외해에 위치하고 있어 타 지점에 비해 높은 일치도를 나타낸다. 이러한 차이는 M2, S2, K1 분조 등에 의한 조석변형 때문에 발생하는 현상이며, 육지와 연안 지역의 영향을 받지 않은

원해(외해) 해역으로 나아갈수록 위성자료의 정확도가 높음을 알 수 있다.

2) 조석변형 때문에 발생하는 신호는 해양신호와 관계없는 잘못된 거짓신호로서 이를 제거하기 위해서는 저역통과필터(lowpass filter)를 적용하는 것이 적절하다. 대체로 외해역의 경우는 60, 120, 180, 200일의 필터를 순차적으로 처리함에 따라 상호 두 자료간의 유의성이 점차적으로 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 내해역의 경우에는 거의 유의성이 개선되지 않는 것으로 확인되었다.

3) 200일을 기준으로 저역통과필터를 처리했을 때 외해역에 위치한 울릉도는 상관값이 0.91로 매우 높은 유의성을 보였고, 내해역에 위치한 포항 및 속초는 각각 0.58 및 0.65로서 울릉도에 비해서 상대적으로 낮은 유의성을 보였다.

사 사

자료처리를 도와준 이준우, 강성철에게 감사하며, 본 연구는 과학기술부 기술개발용역사업과 기상연구소 지구대기감시관측소의 사업비의 일부 지원으로 이루어졌음을 밝힌다.

참고문헌

윤용훈 · 오임상 · 김기현 · 박용향, 2000, 동아시아 지역에서 의 TOPEX/POSEIDON 고도 자료와 현장 해수면 자료와의 비교, *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 5(4), 267-275.
 Bell, C., 1998, POL/PSMSL Tidal Analysis Software Kit

2000, Natural Environment Research Council, p.
 Fu, L.-L., Christeen, E.J., Yamarone, C.A., Lefebvre, M., Menard, Y., Dorrer, M., and Escudier, P., 1994, Topex/Poseidon mission overview, *Journal of Geophysical Research*, 99, 24369-24382.
 LeProvost, C., Genco, M.L., Lyard, F., Vincent, P., and Canceil, P., 1994, Tidal spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model, *Journal of Geophysical Research*, 99, C12, 24777-24798.
 McGoogan, J.T., Leitao, C.D., and Wells, W.T., 1974, Summary of SKYLAB S-193 Altimeter Altitude Results, NASA Document X-6935, p.
 Munk, W. and MacDonald, G.F., 1960, The Rotation of the Earth, p.
 Nerem, R.S., Schrama, E.J., Koblinsky, C.J., and Beckley, B.D., 1994, A preliminary Evaluation of Ocean Topography From the TOPEX/POSEIDON Mission, *J. Geophys. Res. Oceans*, p.
 Park, Y.H. and L. Gambèroni, 1995, Large-scale circulation and its variability in the south Indian Ocean from Topex/Poseidon altimetry, *Journal of Geophysical Research*, 100, 24911-24929.
 Ray, R.D., Koblinsky, C.J., and Beckley, B.D., 1991, On the Effectiveness of Geosat Altimeter Corrections, *International Journal of Remote Sensing*, 12(9), 1979-1984.
 Schmana, E.J.O. and Ray, R.D., 1994, A preliminary tidal analysis of TOPEX/POSEIDON altimetry, *Journal of Geophysical Research*, 99, C12, 24799-2480.
 Stanley, H.J., 1979, The Geos 3 project, *Journal of Geophysical Research*, 84, 3779-3783.
 The ERS-1 System, 1992, European Space Agency Publication ESA SP-1146.
 Yi, Y., 1995, Determination of Gridded Mean Sea Surface from Topex, Ers-1 and Geosat altimeter data, Rep. 434, Dept. Geod. Sci. and Surv., The Ohio State Univ., Columbus, p.

2001년 7월 6일 원고 접수
 2002년 3월 5일 수정원고 접수
 2002년 3월 23일 원고 채택