

Topex/Poseidon 위성의 Altimeter 자료를 이용한 남인도양의 환경보정인자 특성에 관한 연구

윤홍주* · 김영섭** · 이재철***

기상연구소 원격탐사연구실*, 부경대학교 지구환경과학부**, 부경대학교 해양과학부***

On characteristics of environmental correction factors in the South Indian Ocean by Topex/Poseidon satellite altimetric data

Hong-Joo Yoon*, Young-Seup Kim**, and Jae Chul Lee***

Remote Sensing Research Laboratory, Meteorological Research Institute*, Division of Earth Environmental
Sciences, Pukyong National University**, Division of Ocean Science, Pukyong National University***

Abstract

Topex/Poseidon satellite, launched in August 1992, has provided more 5 years of very good quality data. Efficient improvements, either about instrumental accuracy or about sea level data correction, have been made so that Topex/Poseidon has become presently a wonderful tool for many researchers. The first mission data of 73 cycles, September 1992 - August 1994, was used to our study in order to know characteristics of environmental correction factors in the Amsterdam-Crozet-Kerguelen region of the South Indian Ocean.

According to standard procedures as defined under user handbook for sea surface height data processes, then we have chosen cycles 43 as the cycle of reference because this cycle has provided the completed data for measurement points and has presented the exacted position of ground track compared to another cycles. It was computed variations of various factors for correction in ascending ground track 103(Amsterdam-Kerguelen continental plateau) and descending ground track 170(Crozet basin). Here the variations of ionosphere, dry troposphere, humid troposphere, electromagnetic bias, elastic tide and loading tide were generally very smaller as a few of cm, but the variations of oceanic tide(30-35cm) and inverted barometer(15-30cm) were higher than another factors. For the correction of ocean tide, our model(CEFMO: Code d' Elements Finis pour la Maree Oceanique) - This is hydrodynamic model that is very well applicated in all oceanic situations - was used because this model has especially good solution in the coastal and island area as the open

1998년 3월 31일 접수 ; 1998년 9월 11일 수리.

sea area. Conclusively, it should be understood that the variation of ocean free surface is mainly under the influence of tides (> 80-90%) in the Amsterdam - Crozet - Kerguelen region of the South Indian Ocean.

Keywords : Topex/Poseidon Altimeter, Enviromental Correction Factors, Ocean Tidal Model

요 약

본 연구는 Topex/Poseidon 위성의 첫 운행인 1992년 9월~1994년 8월(2년간, 73 사이클) 동안에 남인도양의 암스테르담-코호제트-케르겔른 지역(35°-55°S, 55°-80°E)에서의 환경학적 보정인자들의 특성을 조사하기 위하여 수행되었다. 환경 보정인자들의 특성이 지역에 따라 어떻게 다른가를 알아 보기 위하여, 상승 지상트랙 103이 지나는 암스테르담-케르겔른 대지지역과 하강 지상트랙 170이 지나는 코호제트 분지지역으로 구분하여 비교하였다.

전리권, 건조 및 습윤 대류권, 전자기적 편차, 탄성조, 하중조들과 같은 보정인자들의 변화폭은 일반적으로 수 cm 이하로 나타났으나, 해양조 및 해면기압의 변화폭은 각각 30~35cm, 15~30cm 로서 다른 보정인자들의 변화폭 보다 상당히 높게 나타났다. 남인도양의 해수면 변화는 주로 해양조석에 기인하며 그 기여도는 80~90%에 이른다. 그리고 두 번째의 기여 인자는 해면기압으로 무시할 수 없을 정도로 중요한 환경 보정인자임을 알 수 있었다.

I. 서 론

지구 표면의 약 70% 이상을 차지하고 있는 해양은 방대한 열을 저장하는 저장소로서 해양순환을 통하여 기후계 (climatic system)와 밀접하게 관련되어 있다. 즉 해양-대기 간의 상호 열 교환에 대한 지구의 온도 조절자로서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나 최근 인류 활동에 의한 탄산가스(CO₂)를 비롯한 온실기체(CFCs, N₂O & CH₄)들의 농도 증가는 지구 온난화 현상을 가중시키고 있으며 이로인한 해양의 변화가 기후계 전체에 어떠한 영향을 초래할 개연성이 높아지고 있다. 온난화 현상은 우선 해수온도와 해수면에 어떤 변동을 초래하게 될 것이므로 이에 대한 지구규모적인 감시가 크게 요구되고 있다(Barnett, 1984; Cess and Goldenberg, 1981; Wendland, 1977).

이러한 배경에서 다양한 방법으로 세계 해양을 감시하고 있으나 그중에서 가장 효율적인 수단은 역시 위성에 의한 감시이다. 해양 감시용 위성에서 얻어지는 여러 종류의 자료들 중 고도계 자료(altimetric data)는 해양의 다양한 규모의 현상을 연구·조사하는데 대단히 유용한 정보를 제공해 준다(Bernstein *et al.*, 1982; Rapp *et al.*, 1991a, 1991b; Rapp and Wang, 1992; Rapp, 1992). Topex/Poseidon 위성은 WOCE (World Ocean Circulation Experiment) 계획의 일환으로 1992년 8월 11일에 발사되어 지금까지도 계속적으로 그 역할을 수행하고 있다. 이 위성은 기본적으로 세계 기후현상과 관련해서 해양의 주요 역할을 이해하고 나아가서 지구규모적인 평균 해양순환 연구에 그 목적이 있다 할 수 있으며, 그동안 얻어진 자료를 이용한 많은 연구들이 수행된 바 있다(Lyard,

1992; Le Provost *et al.*, 1994a, 1994b; Yoon, 1997).

고도계 레이더의 근본원리는 임펄스를 보내어 위성 직하로부터 해수표면까지의 거리를 측정하는 것으로, 반사된 echo의 특성은 3가지 환경조건에 의해서 좌우된다. 즉 1) 해수표면에서 위성까지의 거리, 2) 파의 진폭 그리고 3) 돌아오는 임펄스의 형태이다. 해수표면에서 위성까지의 거리를 고도계 거리(Fig. 1)라 하고 임펄스의 왕복시간을 측정하여 이 거리를 계산한다. 이때 레이더파가 전파하면서 여러 대기층을 가로지르고 그리고 해양표면에서 변형되므로, 이러한 환경학적인 인자들을 보정해 주어야만 정확한 거리를 측정 할 수 있다. 이러한 보정으로는 대기층 내에서는 전리권 보정, 건조 및 습윤 대류권 보정이 있으며, 해양표면에서는 전자기적 편차가 있다. 또한 해면높이(sea height)를 알기 위해서는 등중력 표면 즉 지오이드의 높이를 제거하여야 한다. 그리고 마지막으로 해면 높이에 내포되어져 있는 조석신호(조석에 기인하는 수위)를 제거한 후에야, 우리가 원하는 해양신호(순수 해수면)를 구할 수 있다. 이러한 해양신호로부터 전술한 바와 같이 해양과

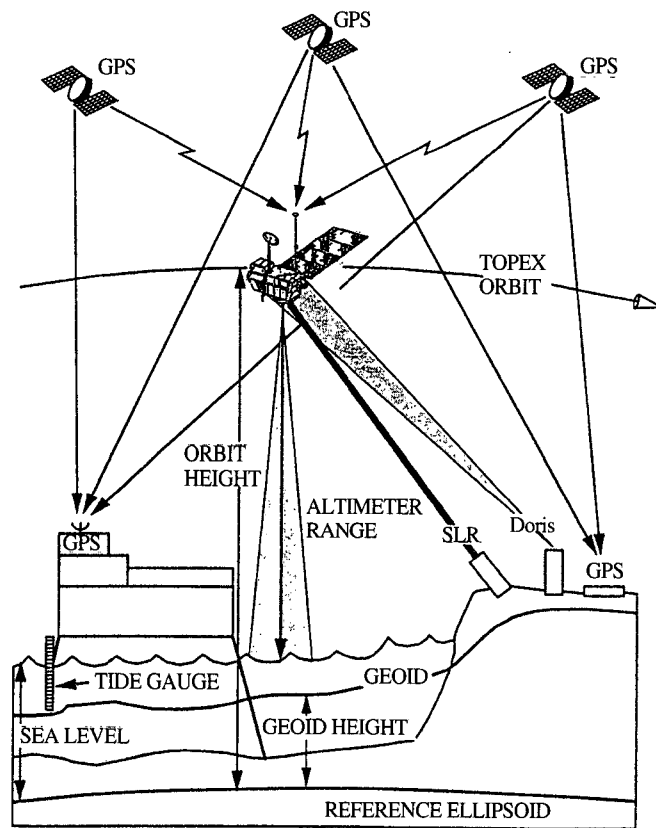


Fig. 1. Concept of closure at Platform. Sea level relative to the reference ellipsoid as measurement by the altimeter is compared to that determined from the orbit height and a tide gauge at the platform.

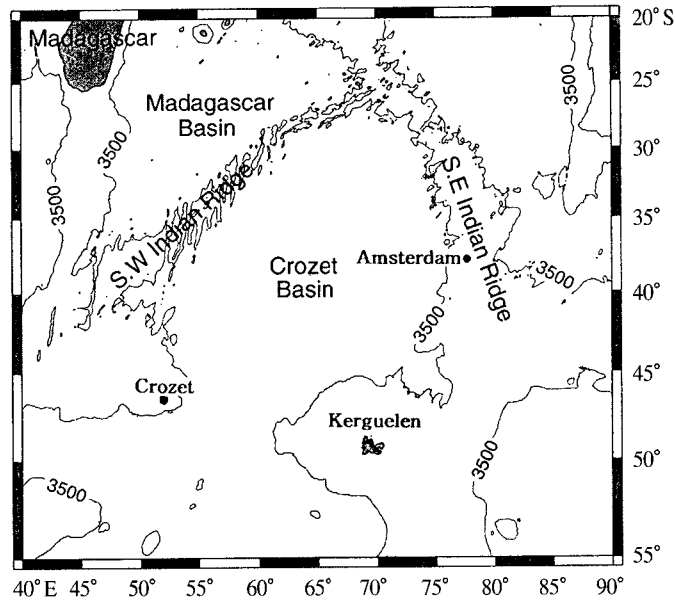


Fig. 2. Schematic presentation of the Crozet Basin. Isobath is 3500m.

기후변화에 관련된 연구들을 수행할 수 있다.

이상과 같이 위성 고도계 자료가 제공해 주는 환경보정 인자들(전리권, 건조 및 습윤 대류권, 전자기적 편차, 조석 그리고 해면기압)에 대한 신호들은 지역에 따라 그 특성들이 달리 나타난다. 본 연구는 이러한 특성들이 남인도양(Fig. 2)에서는 어떻게 나타나며 그리고 그들간의 상호관계는 어떠한지를 조사하는데 주안점을 두었다.

II. 자료 및 방법

AVISO(Archivage, Validation et Interpretation des donnees Satellites Oceanographiques) 사용자 지침서에 따라 CD-ROM에 내장되어 있는 1992년 9월부터 1994년 8월까지 2년간의 자료(73 사이클)를 추출하여 사용하였다.

환경보정인자들로 보정되는 거리는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{range_cor} = H_Alt + \text{wet_tro} + \text{dry_tro} + \text{iono} + \text{em_bia}$$

여기서 range_cor은 보정된 거리, H_Alt는 고도계가 측정한 거리, wet_tro와 dry_tro는 대류권 내의 습윤 및 건조 대류권 보정인자들을 나타낸다. 그리고 iono는 전리권 보정인자, em_bia는 해

양표면에서의 전자기적 보정인자이다. 윗식에서 기준 타원체에서의 궤도높이(orbit height: HP_sat)와 두 고도계간의 고도측정 편차(bias)를 보정함으로서 해수면을 구할 수 있다. 즉,

$$h_cor = HP_sat - range_cor + bias$$

이때 bias 값은 Fu와 Glazman(1994)의 결과에 따라 -20.5cm로 하였다. 따라서 최종적인 해양신호는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$h_tot = h_cor - (H_Geo + H_Lt_CR + H_Set - ot_Cef)$$

여기서 H_Geo는 OSU91모델(Rapp *et al.*, 1991a, 1991b)에 의한 지오이드, H_Lt_CR는 Cartwright와 Ray모델(Cartwright and Ray, 1990)에 의한 하중조, H_Set는 Schwiderski모델(Schwiderski, 1980)에 의한 탄성조 그리고 ot_Cef는 CEFMO모델(Le Provost *et al.*, 1994a, 1994b)에 의한 해양조를 각각 나타낸다.

III. 결과 및 고찰

1. 남인도양 암스테르담-코호제트-케르젤른 지역에서의 보정인자들 특성

조사지역 내 각각의 지상트랙들을 따라 환경 보정인자들의 값들은 각기 다르게 나타난다. 본 연구에서는 대표적인 두 지상트랙을 선정하여 그 특성들을 비교하였다. 상승 지상트랙 103은 암스테르담 섬 및 케르젤른 대지를 지나며, 하강 지상트랙 170은 코호제트 분지를 지난다(Fig. 3). 이때 기준 사이클을 43으로 정했는데, 이 사이클은 전 조사기간에 걸쳐 다른 사이클에 비해 자료의 결손이 거의 없고, 그리고 정확한 지상트랙의 위치를 나타내었기 때문이다.

1) 고도계 거리에 대한 보정인자들의 영향

고도계 거리에는 3종류의 보정이 필요한데, 이들의 변화폭은 수 cm로 아주 작았다. 즉 전리권 보정을 보면, 지상트랙 103과 170의 RMS는 각각 0.26cm 및 0.24cm 였다(Fig. 4a). 그리고 지상트랙 103과 170의 건조 대류권에서의 RMS는 각각 1.43cm 및 2.46cm였고(Fig. 4b), 습윤 대류권의 RMS는 각각 0.50cm 및 0.46cm 로 나타났다(Fig. 4c).

전리권 보정의 경우에 지상트랙 남쪽의 맨 끝부분(>55°S)에 뚜렷한 잡음들이 존재하는 것을 알 수 있는데(그림에는 나타나지 않았음), 이러한 잡음들은 주로 해양지역에서 일어나는 것으로 알려져 있다. 이때에는 GDR AVISO(1994a, 1994b)에 따라 Lanczos filter를 사용하여 low-pass filtering 처리를 한다.

해양 표면 상태와 관련되는 전자기적 보정의 변화폭은 다른 보정들의 변화폭과 마찬가지로 수 cm의 범위를 나타낸다(Fig. 4d). 이때 지상트랙 103의 RMS는 2.97cm 그리고 지상트랙 170의 RMS는 2.06cm를 각각 보였다.

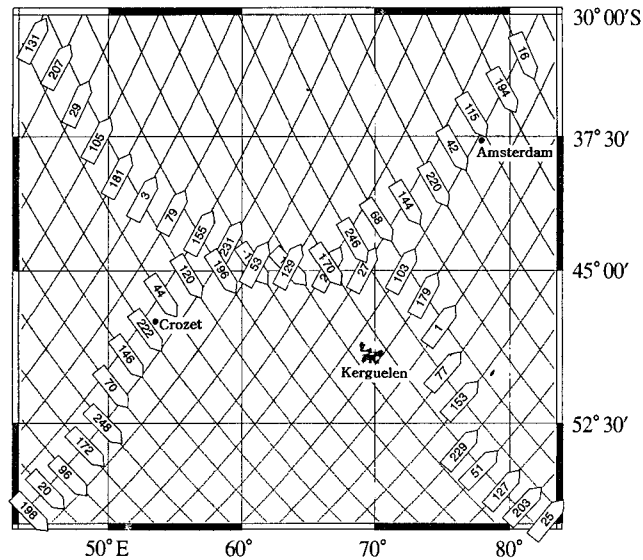


Fig. 3. Ground tracks of Topex/Poseidon in the Amsterdam-Crozet-Kerguelen of the South Indian Ocean.

2) 해수면에 대한 보정인자들의 영향

해수면에 대한 탄성조 및 하중조의 보정은 무시할 수 있을 정도로 그 변화폭이 작았다(Fig. 5a, 5b). 즉 탄성조의 경우, 지상트랙 103과 170의 RMS는 각각 4.15cm와 1.14cm의 변화폭을 보였다. 지상트랙 103이 170보다 더 큰 변화폭을 보이는 것은 암스테르담-케르겔렌 경로 내에 있는 대지나 대륙붕과 같은 육지의 영향으로 해석된다.

해수위 변동을 통하여 해양순환을 연구하는데 있어서 조석수위(해양조에 기인하는 수위변화)를 제거하는 것은 필수적이다. 두 지상트랙과 관련하여 CEFMO(Code d'Elements Finis pour la Marea Oceanique) 모델로 계산된 조석수위 변화폭은 약 30~35cm로 나타났다(Fig. 5c). 이때 지상트랙 103의 RMS는 6.96cm 그리고 170 트랙의 RMS는 9.76cm였다. 즉 이러한 위성의 고도계 자료를 통하여 해수면 및 해양순환 연구에 있어서는 조석수위의 변화가 무시될 수 없을 정도로 매우 큰 기여를 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6a는 지오이드 높이를 나타내는데, 지상트랙 103의 경우 3,600cm(RMS 1,218.2cm), 170 트랙의 경우는 1,700cm(RMS 557.55cm)의 변화를 각각 나타내었다. 앞서 탄성조 변화에서와 마찬가지로 지오이드 또한 암스테르담-케르겔렌 경로에 따라 큰 변화를 보였다.

Fig. 6b는 지오이드 보정 후의 역학고도(dynamic topography) 변화를 나타내고 있다. 지상트랙 103의 RMS는 62.45cm 그리고 170 트랙의 RMS는 53.95cm로 나타났다.

해양표면에서의 해면기압(inverted barometer)에 의하여 생기는 해수면 변화 성분을 구하기 위하여 ECMWF모델(1993)의 결과치를 이용하였다. 앞에서의 여러 인자들에 의한 보정에 더하여 이

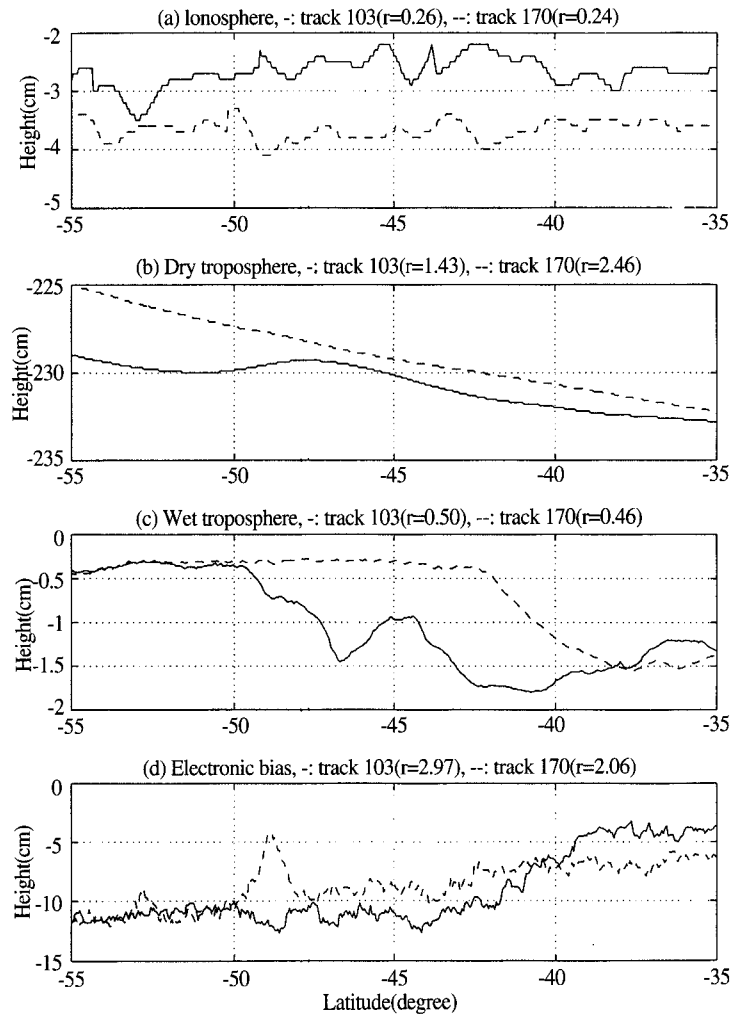


Fig. 4. Variations of various factors for correction in the ascending ground track 103(-) and the descending ground track 170(-) for (a) Ionosphere, (b) Dry troposphere, (c) Wet troposphere and (d) Electromagnetic bias, respectively.

성분에 의한 변화를 고려함으로써 마지막으로 순수 해양신호(oceanic signal)를 구할 수 있다. 해면 압력에 기인하는 수위는, 지상트랙 103의 경우가 15cm(RMS 5.82cm), 170 트랙의 경우가 30cm(RMS 10.14cm)로 나타났다(Fig. 6c). 이것은 조석이 해수위 변화에 크게 기여하는 것으로 그 기여도가 높다는 것을 알 수 있다.

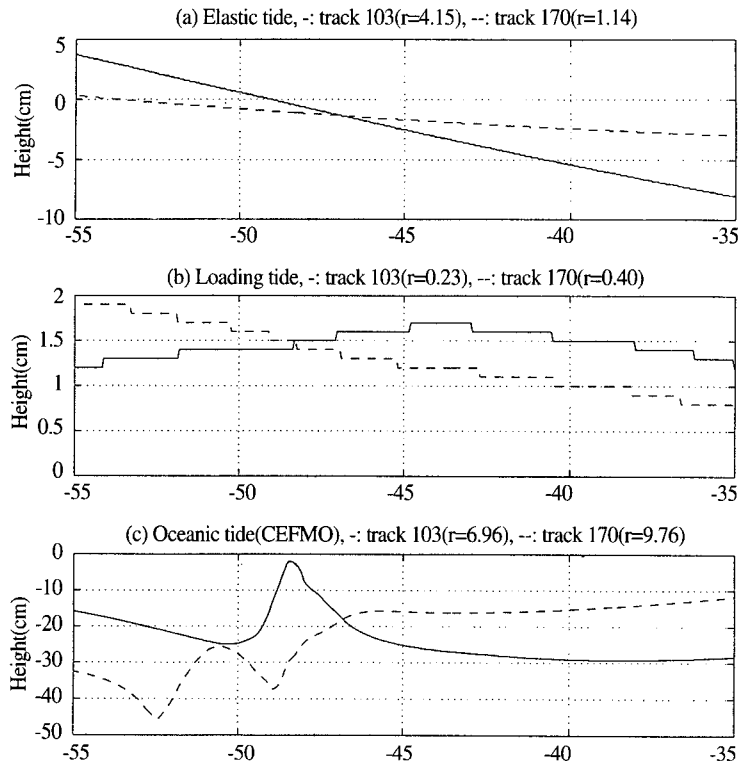


Fig. 5. Variations of various factors for correction in the ascending ground track 103(-) and the descending ground track 170(-) for (a) Elastic tide, (b) Loading tide and (c) Oceanic tide, respectively.

2. 조석모델 간의 비교

앞에서 알아 본 바와 같이 해수위 변화에 가장 큰 기여인자는 해양조석이다. 따라서 위성의 고도계 자료로부터 신뢰 높은 해양역학고도를 구하기 위해서는 우선 해양조석을 정확하게 예측할 수 있는 모델을 선택하는 것이 중요하다. 현재 Topex/Poseidon 고도계는 3종류의 해양조석모델을 동시에 사용해서 그 결과를 제공하고 있다. 3종류의 모델은 CEFMO모델, Cartwright와 Ray모델 그리고 Schwiderski모델이다. 이들 모델로 구해진 결과(2년 평균값)들을 지상트랙 103 및 170에 대해 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다. CEFMO모델을 기준으로 하여 각 모델간의 비교를 행하였는데, 이 모델은 유한요소법을 이용한 유체역학 모델로서 외해 뿐만 아니라 연안에서도 좋은 결과를 준다는 것이 입증·연구된 바 있다(Le Provost *et al.*, 1994a, 1994b; Yoon, 1997).

케르젤른 대지지역 내를 지나는 지상트랙 103을 보면, 차이가 -5cm 및 -1.8cm 그리고 RMS가 4.5cm 및 6.2cm로 나타났다(Fig. 7d). 그리고 코호제트 분지지역을 지나는 지상트랙 170은 그 차이가 4.2cm 및 2.0cm 그리고 RMS가 4.8cm 및 3.1cm로 각각 나타났다(Fig. 8d). 이와 같이 조석모델에 따른 차이는 평균해수면높이(Mean Sea Surface Height)에 상당한 직접적인 오차를 유발할 수

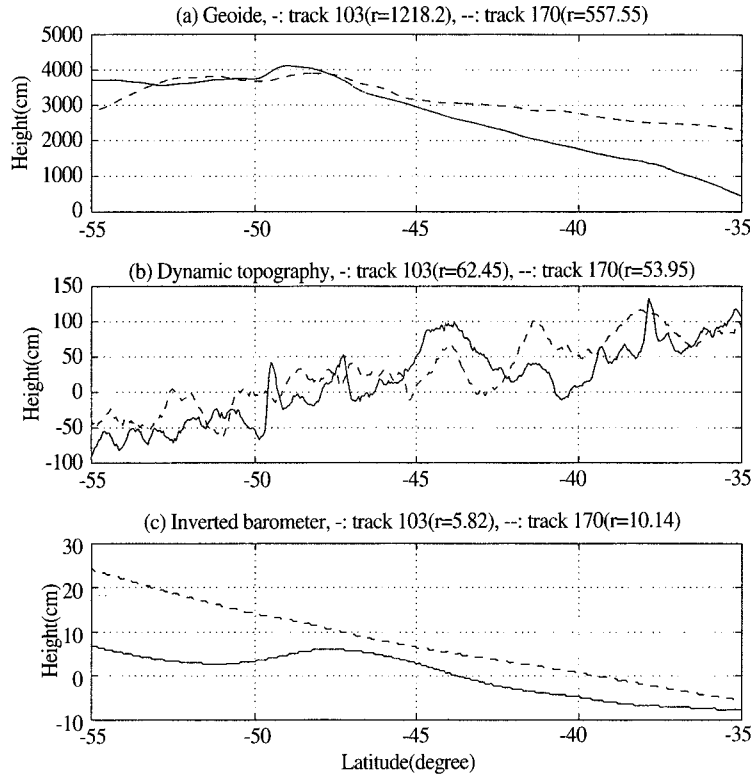


Fig. 6. Variations of various factors for correction in the ascending ground track 103(-) and the descending ground track 170(-) for (a) Geoid, (b) Dynamic topography height and (c) Inverted barometer, respectively.

있다. 모델들에 의한 차이는 코호제트지역(외해) 보다는 케르겔른지역(연안 및 섬지역)에서 더 크게 나타났다. 이것은 Cartwright와 Ray모델과 Schwiderski모델이 특히 연안이나 섬지역(케르겔른섬)에서 부정확한 결과를 준다는 것을 의미한다. 결론적으로 고도계로부터 CEFMO모델이 아닌 나머지 두 모델로써 연안 혹은 섬주변의 해수위를 구하게 되면 항상 수 cm의 오차가 존재할 것이다.

IV. 요약

Topex/Poseidon위성은 1992년 8월에 발사된 이후 최근까지 수 많은 양질의 정보를 제공해 주고 있다. 본 연구는 첫 운행인 1992년 9월부터 1994년 8월까지 (2년간, 73 사이클) 사이에, 남인도양 암스테르담-코호제트-케르겔른 지역(35°-55°S, 55°-80°E)에서의 환경 보정인자 특성들을 조사하였는데 그 목적을 두었다. 자료처리는 사용자 지침서(AVISO user handbook)에 정의된 표준처리과정을

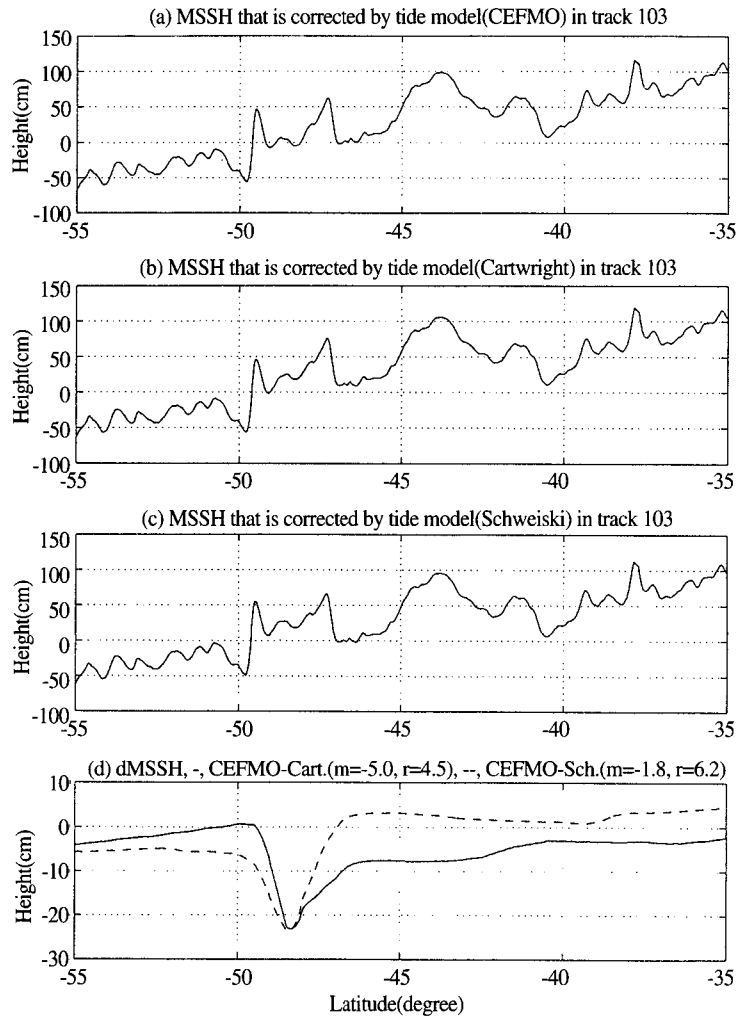


Fig. 7. Variations of MSSH(Mean Sea Surface Height) that is corrected by tidal model in in the ascending ground track 103, (a) CEFMO, (b) Cartwright, (c) Schwiderski and (d) the differences of MSSH between CEFMO and Cartwright(-), Schwiderski(- -), respectively.

따랐으며 조사기간 동안에 다른 사이클에 비해서 자료결손이 적고, 지상트랙의 위치가 정확한 사이클 43을 표준으로 선택하여 조사하였다. 환경 보정인자들이 지역특성에 따라 어떻게 변하는가를 알아 보기 위하여, 상승 지상트랙 103이 지나는 암스테르담-케르겔른 대지지역과 하강 지상트랙 170이 지나는 코호제트 분지지역을 설정하였다.

전리권, 건조 및 습윤 대류권, 전자기적 편차, 탄성조, 하중조들과 같은 보정인자들의 변화폭을 일반적으로 수 cm 이하로 나타났으나, 반대로 해양조 및 해면기압의 변화폭은 각각 30~35cm 및

On characteristics of environmental correction factors in the South Indian Ocean by Topex/Poseidon satellite altimetric data

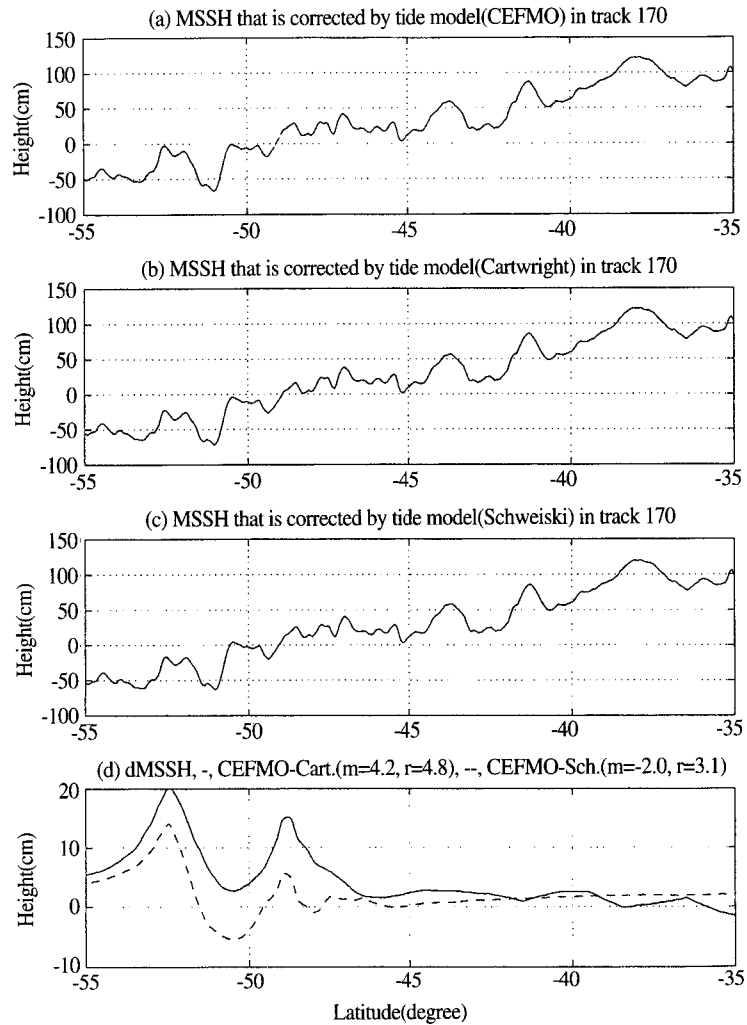


Fig. 8. Variations of MSSH(Mean Sea Surface Height) that is corrected by tidal model in in the ascending ground track 170, (a) CEFMO, (b) Cartwright, (c) Schwiderski and (d) the differences of MSSH between CEFMO and Cartwright(-), Schwiderski(- -), respectively.

15~30cm로써 다른 보정인자들 보다 대단히 크게 나타났다. 해양조석 보정을 위해 필요한 조석 모델을 비교하여 본 바, CEFMO모델이 나머지 두 모델(Cartwright and Ray와 Schwiderski)에 비해 조사 대상해역에서 매우 좋은 결과를 주었다.

결론적으로 남인도양에서 해수위 변화에 가장 큰 영향을 미치는 것은 해양조석으로 그 기여도는 80~90%에 이르고, 그 다음으로 중요한 것은 해면기압으로 이 또한 무시할 수 없는 환경 보정 인자임을 알 수 있었다.

참고문헌

- AVISO, 1994a, 'AVISO CD-ROM User Manual: Merged TOPEX/POSEIDON Products', AVI-NT-02-100-CN, Edition 2.1.
- AVISO, 1994b, 'AVISO User Handbook: Merged TOPEX/POSEIDON Products', AVI-NT-02-101-CN, Edition 2.1.
- Barnett, T. P., 1984. The estimation of global sea level change: A problem of uniqueness. *J. Geophys. Res.*, 89: 7870-7988.
- Bernstein, R. L., Born, G. H., and Whritner, R. H., 1982. Seasat altimeter determination of ocean current variability. *J. Geophys. Res.*, 87: 3261-3268.
- Cartwright, D. E. and R. D. Ray, 1990. Oceanic tides from Geosat altimetry, *J. Geophys. Res.*, 95: 3069-3090.
- Cess, R. D., and S. D. Goldenberg, 1981. The effect of ocean heat capacity upon global warming due to increasing atmospheric carbon dioxide. *J. Geophys. Res.*, 86: 498-502.
- European Center for Medium-Range Weather Forecasts, 1993. *The description of the ECMWF/WCRP Level, III-A Global Atmospheric Data Archive.*
- 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.
- Le Provost, C., Genco, M., L., Lyard, F., 1994a. Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model, *J. of Geophys. Res.*, 99: 24777-24797.
- Le Provost, C., Genco, M., L., Lyard, F., 1994b. Modeling and prediction tides over the World Ocean, *Coastal and Estuarine*, 48: 267-285.
- Lyard, F., 1992. *Modelisation de la maree oceanique: Application a l'Ocean Indien*, Memoire de these, Universite Joseph Fourier, France.
- Rapp, R. H., Wang, Y. M., Pavlis, N. K., 1991a. *The Ohio State University 1991 Geopotential and Sea Surface Topography Harmonic Coefficient Models*, report N 410, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, USA.
- Rapp, R. H., Wang, Y. M., Pavlis, N. K., 1991b. *High resolution gravity models combining terrestrial and satellite data*, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, USA.
- Rapp, R. H., Wang, Y. M., 1992. *Geoid Undulation Difference Between Geopotential Models*, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, USA.
- Rapp, R. H., 1992. *Computation and Accuracy of Global Undulation Models*, Departement of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, USA.
- Schwiderski, E. W., 1980. On charting global ocean tides, *Rev. Geophys.*, 18: 243-268.
- Wendland, W.M., 1977. Tropical storm frequencies related to sea surface temperature. *J. Applied Meteor.*, 16:480.
- Yoon, H. J., 1997. *La variation du niveau de la mer sur la region d'Amsterdam-Crozet-Kerguelen au Sud de l'Ocean Indien*, Memoire de these, Universite Joseph Fourier, France.