Korean Journal of Remote Sensing, Vol.29, No.4, 2013, pp.375~387
http://dx.doi.org/10.7780/kjrs.2013.29.4.3

ISSN 1225-6161 (Print)
ISSN 2287-9307 (Online)

DDInSAR 기반의 빙하연구를 위한 동남극 테라노바 만의 조위모델 정밀도 평가

한향선* · 이주한** · 이훈열*†

강원대학교 지구물리학과*, 극지연구소 대륙기지건설단**

Accuracy Assessment of Tide Models in Terra Nova Bay, East Antarctica, for Glaciological Studies of DDInSAR Technique

Hyangsun Han*, Joohan Lee and Hoonyol Lee*†**

Department of Geophysics, Kangwon National University*, Unit of New Antarctic Station, Korea Polar Research Institute**

Abstract : Accuracy assessment of tide models in polar ocean has to be performed to accurately analyze tidal response of glaciers by using Double-Differential Interferometric SAR (DDInSAR) technique. In this study, we used 120 DDInSAR images generated from 16 one-day tandem COSMO-SkyMed DInSAR pairs obtained for 2 years and *in situ* tide height for 11 days measured by a pressure type wave recorder to assess the accuracy of tide models such as TPXO7.1, FES2004, CATS2008a and Ross_Inv in Terra Nova Bay, East Antarctica. Firstly, we compared the double-differential tide height ($\Delta\dot{T}$) for Campbell Glacier Tongue extracted from the DDInSAR images with that predicted by the tide models. Tide height (T) from *in situ* measurement was compared to that of the tide models. We also compared 24-hours difference of tide height ($\dot{T}$) from *in situ* tide height with that from the tide models. The root mean square error (RMSE) of $\Delta\dot{T}$, T and $\dot{T}$ decreased after the inverse barometer effect (IBE)-correction of the tide models, from which we confirmed that the IBE of tide models should be corrected requisitely. The RMSE of $\dot{T}$ and $\Delta\dot{T}$ were smaller than that of T. This was because $\dot{T}$ is the difference of tide height during temporal baseline of the DInSAR pairs (24 hours), in which the errors from mean sea level of the tide models and *in situ* tide, and the tide constituents of S_2, K_2, K_1 and P_1 used in the tide models were canceled. This confirmed that $\dot{T}$ and $\Delta\dot{T}$ predicted by the IBE-corrected tide models can be used in DDInSAR technique. It was difficult to select an optimum tide model for DDInSAR in Terra Nova Bay by using *in situ* tide height measured in a short period. However, we could confirm that Ross_Inv is the optimum tide model as it showed the smallest RMSE of 4.1 cm by accuracy assessment using the DDInSAR images.

Key Words : DDInSAR, tide model, accuracy assessment, *in situ* tide height, difference of tide height, inverse barometer effect, tide constituents

접수일(2013년 7월 1일), 수정일(1차 : 2013년 7월 31일), 게재확정일(2013년 8월 5일).

† 교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons. org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

요약 : 이중차분간섭기법(Double-Differential Interferometric SAR; DDInSAR)을 이용하여 빙하의 조위반응을 정확히 해석하기 위해서는 극지 해양에 대한 조위모델의 정밀도 평가가 수행되어야 한다. 이 연구에서는 동남극 테라노바 만에서 TPXO7.1, FES2004, CATS2008a, Ross_Inv 조위모델의 정밀도를 평가하기 위해 2년 동안 획득된 16쌍의 one-day tandem COSMO-SkyMed SAR 간섭영상으로부터 생성한 120개의 DDInSAR 영상과 수압식 파고계로 11일 동안 실측한 조위를 이용하였다. 먼저, DDInSAR 영상과 조위모델로 추출된 조위의 이중차분값($\Delta\dot{T}$)을 비교하였으며, 실측조위와 조위모델의 조위(T), 그리고 실측조위와 조위모델 조위의 24시간 차분값($\dot{T}$)을 비교하였다. $\Delta\dot{T}$와 T, $\dot{T}$의 평균제곱근오차(root mean square error; RMSE)는 조위모델의 역기압 효과(inverse barometer effect; IBE) 보정 후에 감소하였고, 이로부터 조위모델의 IBE는 필수적으로 보정되어야 함이 확인되었다. $\dot{T}$와 $\Delta\dot{T}$는 T보다 작은 RMSE를 보였다. 이는 SAR 간섭쌍의 시간차(24시간) 동안의 차분값인 에 조위모델과 실측조위의 평균해수면 오차와 조위모델이 사용하는 조화상수 중 S_2, K_2, K_1, P_1의 오차가 상쇄되기 때문이다. 따라서 IBE가 보정된 조위모델의 $\dot{T}$와 $\Delta\dot{T}$가 DDInSAR 기법에 사용될 수 있음을 확인하였다. 단기간 실측된 조위로는 최적의 조위모델 선정에 어려움이 있었으나, DDInSAR를 이용한 정밀도 평가에 의하면 Ross_Inv가 4.1 cm의 RMSE를 보여 테라노바 만의 DDInSAR에 가장 적합한 조위모델로 확인되었다.

1. 서 론

극지방에서 조위는 해수면 위에 부유하는 빙붕(ice shelf)과 glacier tongue의 휨 변형을 일으키는 원인으로 빙체의 붕괴를 야기할 뿐만 아니라(von der Osten-Woldenburg, 1990; Bromirski and Stephen, 2012), 극빙의 질량균형에도 큰 영향을 미치고 있다(Mitrovica *et al.*, 2001; Moore and King, 2008). 또한 조위는 빙붕 또는 glacier tongue과 육지의 경계선인 지반선(grounding line)의 이동을 야기하며(Rignot, 1998), 빙체의 수직운동을 발생시켜 빙하의 흐름속도를 변화시키는데 기여하기도 한다(Legrésy *et al.*, 2004; Brunt *et al.*, 2010). 따라서 미래 극지의 환경변화를 예측하기 위해서는 빙하의 조위변형(tidal displacement)이 정밀하게 분석되어야 한다.

빙하의 조위변형은 인공위성 합성구경레이다(Synthetic Aperture Radar; SAR) 영상으로 분석될 수 있다. 동일 연구지역에 대해 획득된 2장 이상의 SAR 영상을 이용하여 차분간섭기법(Differential Interferometric SAR; DInSAR)을 수행하면 cm 정확도의 표면변위를 측정할 수 있는데, 빙붕이나 glacier tongue은 중력에 의한 수평방향의 흐름과 조위의 변화에 의한 수직방향의 조위변형을 모두 나타낸다. 빙하의 수평적 흐름이 시간에 따라 일정하다고 가정하면 서로 다른 시기에 생성된 두 개의 DInSAR 영상을 차분하여 조위변형의 차를 구할 수 있으며, 이를 이중차분간섭기법(Double-Differential Interferometric SAR; DDInSAR) 이라 한다(Rignot, 1996). DDInSAR 기법은 빙하의 조위변형을 고해상도로 관측할 수 있게 하므로 빙하의 지반선 위치 정의(Rignot *et al.*, 2011), 지반선의 후퇴 분석(Rignot, 1998), 조위가 빙하 흐름에 미치는 영향 해석(Legrésy *et al.*, 2004) 등 다양한 연구에 널리 사용되어 왔다.

DDInSAR 기반의 빙하연구를 수행하기 위해서는 DDInSAR로 추출된 빙하의 조위반응과 비교할 조위자료가 필수적이다. 조위는 현장에서 조위계(tide gauge)로 실측하는 것이 가장 정확할 수 있으나 현재 남극에서 운용되고 있는 조위계의 수는 매우 적다. 이에 따라 남극해의 조위예측에 조위모델이 매우 유용하게 사용되고 있다. 조위모델은 인공위성 고도계와 Global Positioning System, 조위계 등으로 측정된 조위를 수치해석 모델링하여 조화상수(tide constituent)를 결정하고 조위를 예측한다. 현재까지 다수의 조위모델이 개발되어 다양한 연구에 사용되어 오고 있다. 대부분의 조위모델은 해안선의 위치 정보가 정확하고 조위관측 자료가 풍부한 지역에서는 2-3 cm의 조위예측 정밀도를 나타낸다(Andersen *et al.*, 1995). 그러나 인공위성 고도계 및 조위계 관측 자료와 수심측량 자료, 지반선의 위치 정보가 부족한 남극에서는 조위모델의 정밀도가 현저히 낮고, 지역에 따라 조위예측 오차의 편차가 큰 것으로 보고되고 있다(King *et al.*, 2005; King and Padman, 2005). 따라서 남극 빙하에 대한 DDInSAR 연구에 조위모델을 사용하는 경우 연구

지역에 대한 조위모델의 정밀도 평가가 선행되어야 한다.

현장 관측 자료가 부족한 남극의 조위모델 정밀도 평가에는 인공위성 고도계 자료가 널리 사용되었다(Shum *et al.*, 1997; Le Provest *et al.*, 1998; Padman and Fricker, 2005). 그러나 레이다 고도계의 공간 해상도는 수−수십 km로 좋지 않고(Fricker and Padman, 2002), ICESat과 같은 레이저 고도계의 경우 기상조건에 따라 고도 측정의 오차가 발생하는 단점이 있다(Griggs and Bamber, 2011). 반면에 DDInSAR 영상은 고도계의 단점을 극복할 수 있으며, 빙하가 유체 정역학적 평형 상태(hydrostatic equilibrium state)에 있을 경우 DDInSAR로 추출된 빙하의 조위변형은 조위의 이중차분값과 동일하므로 조위모델의 정밀도 평가에 유용하게 사용될 수 있다(McMillan *et al.*, 2011). 그러나 DDInSAR 기법으로 조위모델의 정밀도 평가를 수행한 연구는 거의 없다. 이는 대부분의 연구들이 제한된 개수의 DDInSAR 영상을 사용하였으므로 조위모델의 오차를 정량적으로 분석할 수 없었기 때문이다. 또한 조위모델은 순압 상태(barotropic condition)의 조위를 예측하므로, 대기압의 변화에 따라 해수면의 높이가 변화하는 역기압 효과(inverse barometer effect; IBE) (Padman *et al.*, 2003a)를 반영하지 않는다. 그러므로 실측된 대기압을 이용하여 IBE에 의한 조위모델의 정밀도 변화를 분석해야 한다.

이 연구에서는 장보고 과학기지의 건설지가 위치하고 있는 동남극 테라노바 만(Terra Nova Bay)에 대해 조위모델의 조위예측 정밀도를 평가하였다. 테라노바 만에 위치하고 있는 Campbell Glacier Tongue에 대한 120개의 Constellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation (COSMO-SkyMed) DDInSAR 영상(Han and Lee, 2013)과 테라노바 만에서 수압식 파고계(pressure type wave recorder)로 11일 동안 매 5분마다 실측된 조위를 이용하여 조위모델의 오차를 분석하였다. 또한 테라노바 만에서 실측된 대기압을 이용하여 조위모델의 IBE 보정 여부에 따른 조위예측 오차를 분석하였고, DDInSAR에 적합한 조위모델의 선택 방안을 제시하였다.

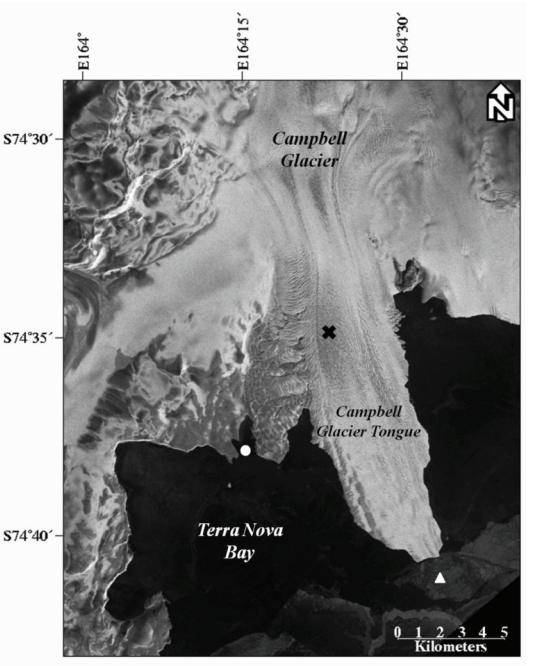


Fig. 1. COSMO-SkyMed SAR image over Terra Nova Bay, East Antarctica, obtained on June 16, 2010. For the Campbell Glacier Tongue, tide height of TPXO7.1, CATS2008a and Ross_Inv was predicted at the location of a black cross, while that of FES2004 was predicted at the location of a white triangle. A white dot represents the observation station of *in situ* tide height.

2. 연구지역 및 자료

1) 연구지역

연구지역은 동남극 로스 해(Ross Sea)의 테라노바 만으로 2014년 완공 예정인 장보고 과학기지의 건설지가 위치해 있다(Fig. 1). 테라노바 만 주변에는 Campbell 빙하와 Priestly 빙하가 위치해 있다(Han *et al.*, 2013). Campbell 빙하는 테라노바 만으로 유입되어 중력 방향의 수평적 흐름과 조위변화에 의한 수직적 변위를 모두 나타내는 Campbell Glacier Tongue을 형성하고 있다. Campbell Glacier Tongue은 Fig. 1의 × 부분에서만 유체정역학적 평형 상태를 유지하고 있다. 따라서 Fig. 1의 × 부분에서 빙하의 조위변형은 실제 조위의 이중차분값과 같다고 할 수 있으며, 조위모델의 정밀도를 평가하는데 적합하게 사용될 수 있다.

2) 연구자료

이 연구에서 평가될 조위모델은 TPXO7.1 (Egbert and

Erofeeva, 2002), Finite Element Solution tide model 2004 (FES2004) (Lyard *et al.*, 2006), Inverse Model Version 2008a of Circum-Antarctic Tidal Simulation (CATS2008a) (Padman *et al.*, 2002), Ross Sea Height-based Tidal Inverse Model (Ross_Inv) (Padman *et al.*, 2003b)이다. TPXO7.1과 FES2004는 각각 1/4°와 1/8°의 격자 간격으로 전 지구적 조위를 예측하며, CATS2008a는 4 km 격자 간격의 남극 전 해역, Ross_Inv는 10 km의 격자 간격으로 로스 해의 조위만을 예측하는 조위모델이다.

조위모델에서 예측하는 조위는 달과 태양, 지구의 운동에 기인하는 조화상수의 조합이다. 그러나 인공위성에서 관측하는 조위는 지심 조위(geocentric tide)로써, 해수 자체의 하중에 의한 지각의 탄성변형에 기인하는 자유해수면(free ocean surface)의 변화, 즉 하중 조위(load tide)를 포함한다(Egbert and Erofeeva, 2002). 따라서 조위모델의 정밀도를 평가하기 위해서는 조위모델에 하중 조위 효과를 보정해야 한다. FES2004는 내부적으로 하중 조위 효과를 보정한다. 나머지 3개의 조위모델에서는 내부적으로 보정되지 않기 때문에 TPXO6.2 load tide model(Egbert and Erofeeva, 2002)을 이용하여 보정하였다.

조위모델의 정밀도를 평가하기 위해 Han and Lee (2013)가 Campbell Glacier Tongue에 대해 2010년 6월부터 2011년 11월까지 2년 동안 획득된 24시간의 시간차를 가지는 16쌍의 COSMO-SkyMed SAR 간섭영상으로 생성한 120개의 DDInSAR 영상을 이용하였다. 또한 2011년 2월 2-13일에 테라노바 만의 1개 정점(74° 37' 42"S, 163° 14' 9"E)에서 극지연구소에 의해 수압식 파고계(model of Aanderaa WLR-7)로 5분마다 실측된 조위를 이용하여 조위모델의 오차를 분석하였다. 그리고 조위모델로 예측된 조위의 IBE를 보정하기 위해, 장보고 과학기지 건설지에 설치된 자동기상관측기구(Automatic Weather System; AWS)로 2010년 2월부터 2012년 1월까지 10분 간격으로 측정된 대기압을 1시간 단위로 평균하여 사용하였다.

3. 연구방법

빙붕과 glacier tongue은 빙하의 흐름에 의한 수평방향의 변위와 조위변화에 의한 수직방향의 조위변형을 모두 나타낸다. 빙하의 흐름이 시간에 따라 변화가 없다고 가정하면, 서로 다른 시기에 대한 두 개의 DInSAR 영상을 차분하는 DDInSAR 기법을 통해 빙하 흐름에 의한 수평변위를 제거하고 조위변형의 차이만을 추출할 수 있다. 빙붕 또는 glacier tongue이 유체 정역학적 평형 상태에 있을 경우, DDInSAR로 관측되는 빙하의 조위변형은 조위의 이중차분값과 같다. Han and Lee(2013)는 16개의 COSMO-SkyMed one-day tandem SAR 간섭쌍을 이용하여 간섭도를 생성한 후, ASTER Global Digital Elevation Model을 이용하여 고도변화에 의한 위상을 제거하였다. DInSAR 영상의 절대위상복원(phase unwrapping)은 Campbell Glacier Tongue의 서쪽에 인접한 노출된 암반지역(장보고 과학기지 건설지)을 변위가 없다고 가정하고, 이 부분의 위상을 0으로 맞추어 branch cut 알고리즘(Goldstein *et al.*, 1988)을 통해 수행되었다. 절대위상이 복원된 16개의 DInSAR 영상으로부터 총 120개의 DDInSAR 영상이 생성되었다. Han and Lee (2013)의 연구에 의하면, Campbell Glacier의 흐름에 의한 수평변위는 모든 DDInSAR 영상에서 관찰되지 않았다. 이로부터 빙하의 흐름 속도는 계절에 관계없이 일정하며, DDInSAR 기법을 수행하기 위한 가정이 Campbell Glacier에서 성립함이 확인되었다. 이 연구에서는 Campbell Glacier Tongue의 유체 정역학적 평형 상태가 유지되는 Fig. 1의 × 부분에 대해 120개의 COSMO-SkyMed DDInSAR 영상으로부터 조위의 이중차분값을 추출하였다.

테라노바 만의 1개 정점(Fig. 1의 흰색 원 표식)에서 11일 동안 운용된 수압식 파고계는 매 5분마다 수온과 염분, 압력을 측정하였다. 수압식 파고계가 측정한 압력은 수압과 기압의 합이므로 테라노바 만의 AWS로 실측된 대기압을 이용하여 수압만을 추출할 수 있으며, 수온과 염분으로부터 해수의 밀도를 산출할 수 있다. 수압식 파고계로 측정된 수위 h는 해수의 밀도와 수압을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$h = \frac{p_w}{\rho g} \tag{1}$$

식 (1)에서 p_w는 수압, ρ는 해수의 밀도, g는 중력가속도(9.81 m s^{-2})이다. 수압식 파고계가 11일 동안 실측한 h를 산술평균하여 평균해수면을 추정하였고, h에서 평균해수면을 차분하여 실측조위 T_{gauge}를 산정하였다.

DDInSAR 영상을 이용한 조위모델의 정밀도 평가를 위해, 먼저 조위모델로부터 DDInSAR에 사용된 COSMO-SkyMed SAR 영상의 획득 시각(3:45 UTC)에 대한 조위를 예측하였다. TPXO7.1, CATS2008a, Ross_Inv에서 조위는 Fig. 1의 × 부분에서 예측되었다. TPXO6.2 load tide의 하중 조위도 같은 위치에서 추출되었다. 그러나 FES2004의 경우 Campbell Glacier Tongue을 육지로 간주하므로 Fig. 1의 × 부분에서 조위를 추출할 수 없었다. 이에 따라 FES2004의 조위는 Campbell Glacier Tongue의 앞바다에서 추출되었으며, 그 위치는 Fig. 1에 흰색 삼각형으로 표시하였다. 각각의 조위모델로부터 추출된 조위에 하중 조위 효과를 보정하였다. DDInSAR에 사용된 4개의 SAR 영상에 대응하는 조위를 $T_i (i = 1, \ldots, 4)$라 하면, 두 개의 DInSAR 영상에 해당하는 조위의 차분값 $\dot{T}$는 각각 $T_1 - T_2$와 $T_3 - T_4$과 같다. 그리고 DDInSAR 영상에 해당하는 조위의 이중차분값 $\Delta\dot{T}$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\dot{T} = T_1 - T_2 - T_3 + T_4 \quad (2)$$

조위모델로 예측된 조위의 이중차분값($\Delta\dot{T}_{model}$)과 DDInSAR로 추출된 조위의 이중차분값($\Delta\dot{T}_{DDInSAR}$) 사이의 상관도 분석을 통해 조위모델의 조위예측 정밀도를 평가하였다. 조위모델로부터 수압식 파고계의 측정 지점에 대해 T_{gauge}와 동일한 시각의 조위 T_{model}을 추출하였다. T_{gauge}와 T_{model}을 비교하여 조위모델의 조위예측 정밀도를 높은 시간해상도로 분석하였다. 그리고 COSMO-SkyMed SAR 간섭영상의 시간차(24시간) 동안의 T_{gauge}의 차분값($\dot{T}_{gauge}$)과 T_{model}의 차분값($\dot{T}_{model}$)을 5분 단위로 추출하여 서로 비교하였고, 이를 통해 실측조위에 의한 조위모델의 DDInSAR 적합성을 평가하였다.

DDInSAR로 추출된 조위의 이중차분값과 조위계로 실측된 조위에는 모두 IBE에 의한 조위변동의 영향이 포함되어 있기 때문에 조위모델로 예측된 조위의 IBE를 보정하여 정밀도를 재평가하였다. 이를 위해 테라노바만의 AWS로 2년 동안 실측된 대기압을 평균하여 평균대기압을 구하였다. 그리고 매 시간 측정된 대기압과 평균대기압의 차이로부터 IBE에 의한 조위의 변화량을 산출하였고, 이를 이용하여 조위모델로 예측된 조위의 IBE를 보정하였다. 이 과정에서 IBE 보정 전, 후에 대한 조위모델의 정밀도 차이를 해석하였다.

4. 연구결과 및 토의

먼저 Campbell Glacier Tongue에서 추출된 $\Delta\dot{T}_{DDInSAR}$와 IBE가 보정되지 않은 $\Delta\dot{T}_{model}$의 상관도(Fig. 2)를 분석하여 조위모델의 정밀도를 평가하였다. 각각의 상관도에서 $\Delta\dot{T}_{DDInSAR}$와 $\Delta\dot{T}_{model}$ 사이의 상관계수(R)는 0.791-0.871로 나타났으며, $\Delta\dot{T}$의 평균제곱근오차(root mean square error; RMSE)는 12.3-15.2 cm로 매우 컸다. COSMO-SkyMed DDInSAR 영상의 위상 오차에 의한 수직변위의

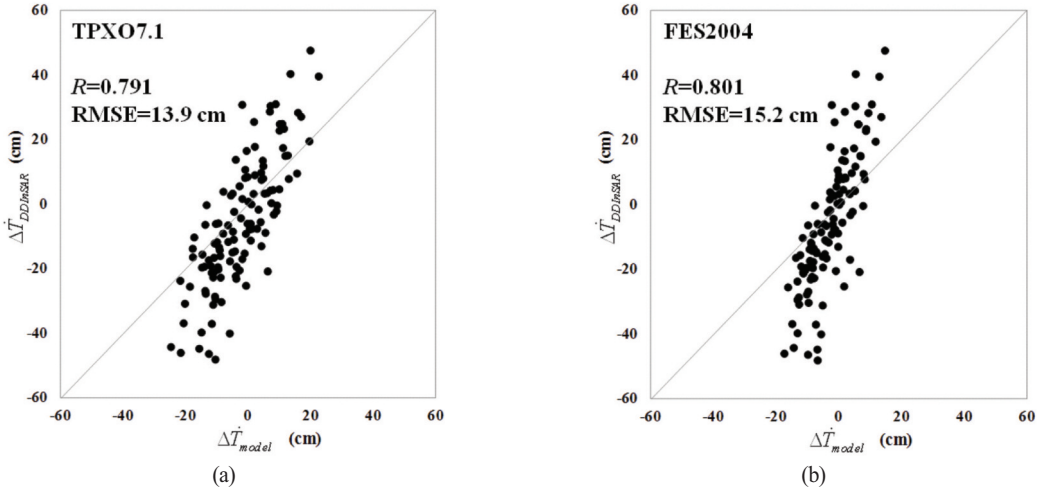
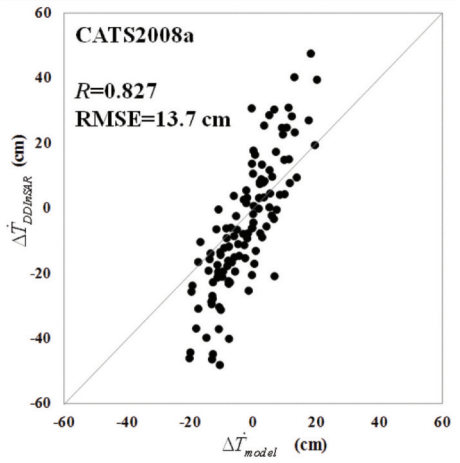
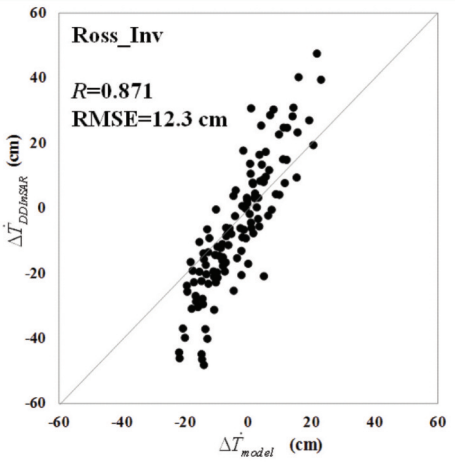


Fig. 2. Relationships between double-differential tide height for Campbell Glacier Tongue extracted from DDInSAR images ($\Delta\dot{T}_{DDInSAR}$) and that predicted by the tide models ($\Delta\dot{T}_{model}$) such as (a) TPXO7.1, (b) FES2004, (c) CATS2008a and (d) Ross_Inv.

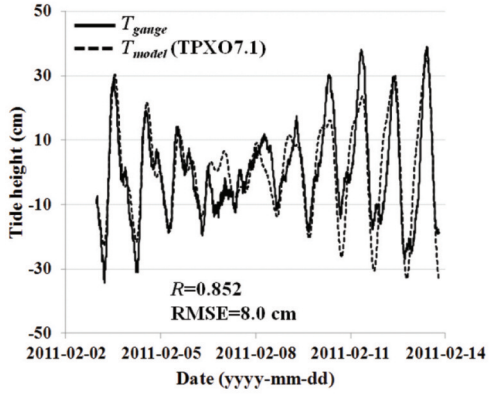


(c)

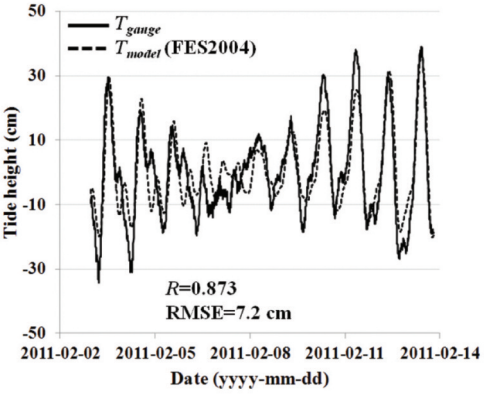


(d)

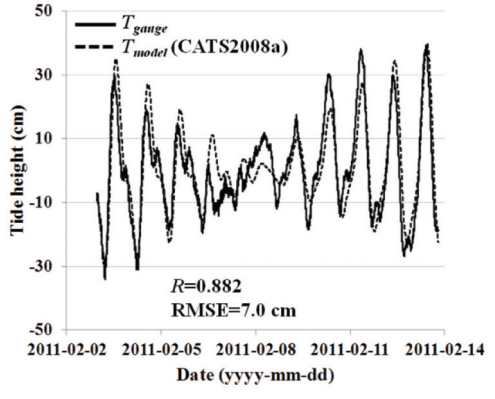
Fig. 2. Contiuned



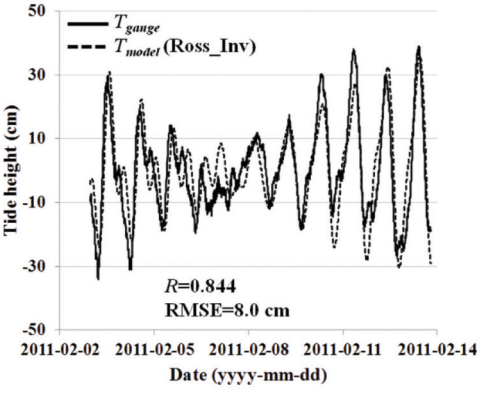
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. *in situ* tide height (solid lines, T_{gauge}) and tide height predicted by the tide models (dotted lines, T_{model}) such as (a) TPXO7.1, (b) FES2004, (c) CATS2008a and (d) Ross_Inv.

오차는 1 cm 이내로 매우 작기 때문에(Han and Lee, 2013) Fig. 2에서 분석된 RMSE는 조위모델의 오차로 판단할 수 있다.

수압식 파고계로 11일 동안 측정된 수위를 평균하여

테라노바 만의 평균해수면(11.41 m)을 구하였다. 그리고 수압식 파고계가 측정한 수위로부터 평균해수면을 차분하여 실측조위 T_{gauge}를 산정하였다. Fig. 3은 T_{gauge}와 IBE가 보정되지 않은 T_{model}을 비교한 것이다. Fig. 3에서 테라노바 만의 T_{gauge}와 T_{model}은 모두 일주조의 특성을 보이고 있으나, 조위의 진폭(amplitude)은 서로 잘 일치하지 않았다. T_{gauge}와 T_{model} 사이의 R은 0.844-0.882로 분석되었고, T의 RMSE는 7.0-8.0 cm로 컸다. Fig. 4는 24시간마다의 실측조위 차분값 $\dot{T}_{gauge}$와 조위모델로 예측된 조위의 차분값 $\dot{T}_{model}$을 비교한 것으로, 조위의 차분값이 서로 잘 일치하지 않음을 볼 수 있다. $\dot{T}$의 RMSE는 6.9-7.2 cm로 컸으며, $\dot{T}_{gauge}$와 $\dot{T}_{model}$사이의 R은 0.553-0.595로 매우 낮았다.

Fig. 2-Fig. 4를 통해 조위모델은 모두 7 cm 이상의 매우 큰 RMSE를 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 DDInSAR에 의한 빙하의 조위변형 연구를 위해 일반적으로 요구되는 조위모델의 정밀도인 ~ 5 cm (Padman *et al.*, 2002)를 벗어난 수치이다. 이와 같이 조위모델의 큰 오차는 IBE에 기인하는 것으로 추정할 수 있다. 이는 DDInSAR 영상에서 추출한 조위의 이중차분값과 조위계로 실측된 조위에는 IBE에 의한 조위의 변동이 반영되어 있기 때문이다. 따라서 조위모델로 예측된 조위의 IBE를 보정한 후 정밀도를 다시 평가할 필요가 있다. 조위모델의 IBE 보정을 위해 먼저 테라노바 만의 AWS로 2년간 측정된 대기압의 평균(986.2 mbar)을 계산하였다. 그리고 조위모델의 조위예측 시각에 대한 대기압과 평균대기압의 차이를 이용하여 조위모델의 IBE를 보정하였다.

Fig. 5는 IBE가 보정된 $\Delta\dot{T}_{model}$과 $\Delta\dot{T}_{DDInSAR}$의 상관도로, R은 0.954-0.980로 $\Delta\dot{T}_{model}$의 IBE 보정 전에 비해 매우 높아진 것을 알 수 있다. 또한 $\Delta\dot{T}$의 RMSE는 4.1-6.0 cm로 크게 감소하였다. Ross_Inv가 4.1 cm의 가장 작은 오차를 보였으며(Fig. 5d), CATS2008a가 두 번째로 작은 오차(4.9 cm)를 보였다(Fig. 5c). 전 지구적 조위예측 모델인

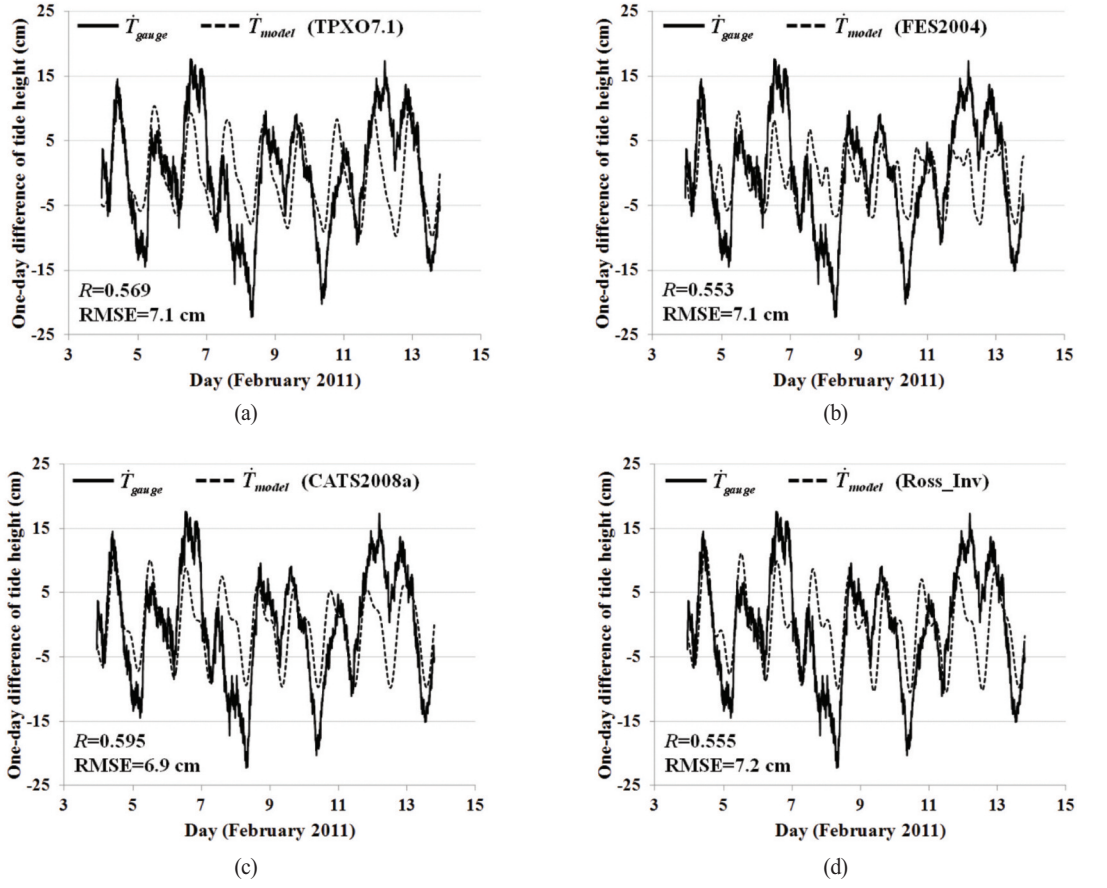


Fig. 4. 24-hours difference of tide height in every 5 minute calculated from *in situ* tide height (solid lines, $\dot{T}_{gauge}$) and predicted by the tide models (dotted lines, $\dot{T}_{model}$) such as (a) TPXO7.1, (b) FES2004, (c) CATS2008a and (d) Ross_Inv.

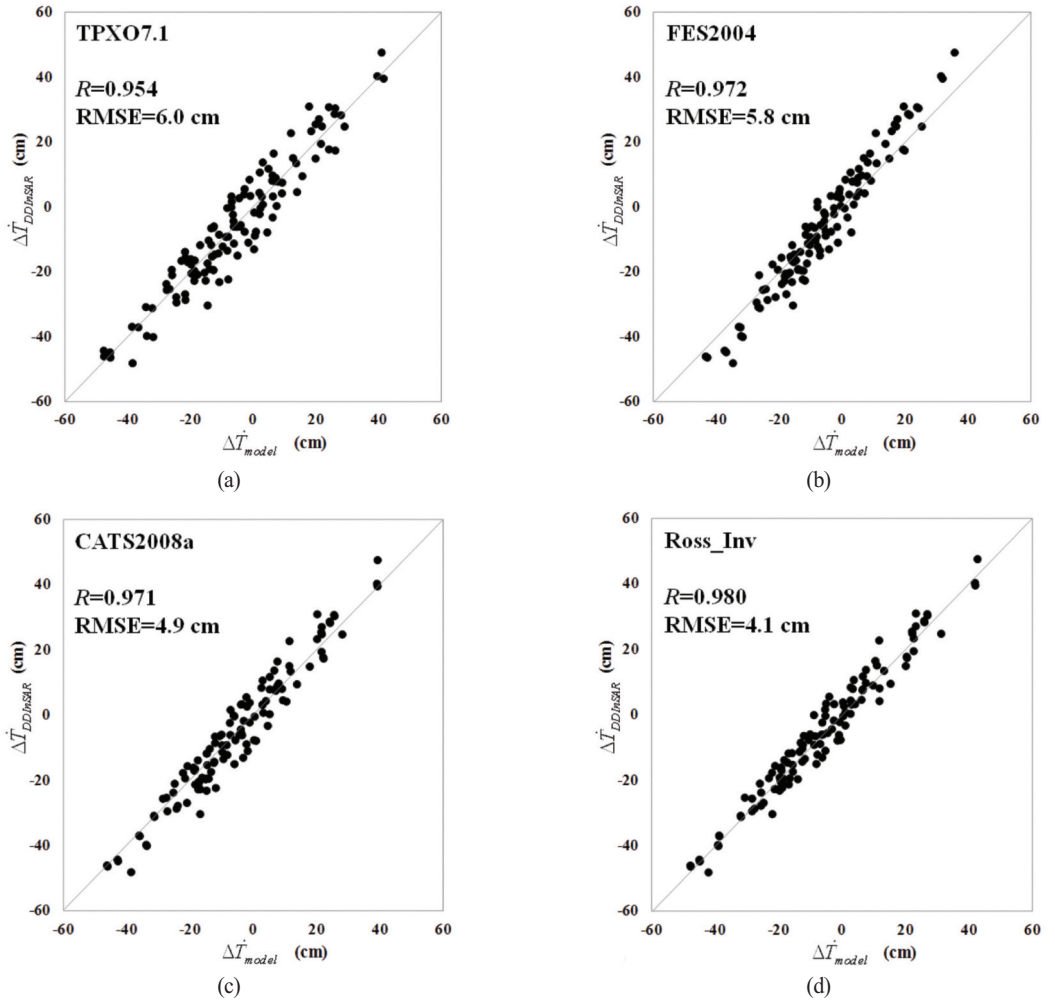


Fig. 5. Relationships between double-differential tide height for Campbell Glacier Tongue extracted from DDInSAR images ($\Delta\dot{T}_{DDInSAR}$) and that predicted by the IBE-corrected (a) TPXO7.1, (b) FES2004, (c) CATS2008a and (d) Ross_Inv tide model ($\Delta\dot{T}_{model}$).

TPXO7.1과 FES2004는 각각 6.0 cm와 5.8 cm의 조위예측 오차를 나타냈다(Fig. 5a and 5b). Fig. 5를 통하여 조위모델로 예측된 조위는 IBE가 필수적으로 보정되어야 함을 확인할 수 있었고, DInSAR 간섭쌍 사이의 시간 간격에 관계없이 DDInSAR로 추출된 Campbell Glacier Tongue의 조위변형은 매우 정확함을 다시 확인할 수 있었다. 그리고 모든 조위모델은 5 cm 내외의 오차를 나타내 Campbell Glacier Tongue에서 DDInSAR를 위한 연구에 사용될 수 있으며, 특히 Ross_Inv가 가장 적합한 조위모델임이 판명되었다.

수압식 파고계의 측정기간 동안 IBE에 의한 조위의 변화량은 Fig. 6과 같으며, 이를 보정한 T_{model}을 T_{gauge}와 비교하여 조위모델의 조위예측 오차를 분석하였다. IBE가

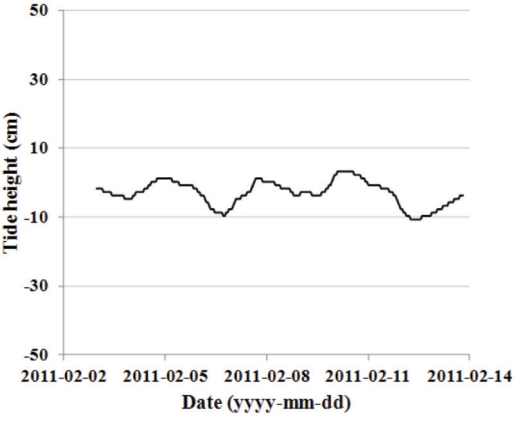


Fig. 6. Tide height induced by the IBE during *in situ* tide height measurements.

보정된 T_{model}은 T_{gauge}와 0.877-0.917의 비교적 높은 R을 보였다(Fig. 7). 그러나 고조위(high-tide level)와 저조위(low-tide level)일 때 오차가 큰 것으로 나타났다. 또한 T의 RMSE는 6.4-7.6 cm로 분석되었는데, 이는 조위모델의 IBE 보정 전과 비교하여 거의 변화가 없는 값이다. 이러한 T의 오차는 DDInSAR를 위한 조위모델의 정밀도를 만족하지 못한다. 반면에 IBE가 보정된 $\dot{T}_{model}$은 $\dot{T}_{gauge}$와 0.876-0.907의 매우 높은 R을 나타내며 서로 잘 일치하였고, $\dot{T}$는 3.6-4.1 cm의 매우 작은 RMSE를 나타냈다(Fig. 8). 이를 통해 IBE가 보정된 $\dot{T}$는 DDInSAR에 사용될 수 있다고 판단할 수 있다. 그러나 실측조위의 측정기간이 11일로 매우 짧기 때문에, 실측조위로부터 테라노바 만에서의 DDInSAR를 위한 최적의 조위모델을 선정하기에는 어려움이 따른다.

IBE가 보정된 $\dot{T}$와 $\Delta\dot{T}$의 RMSE는 각각 3.6-4.1 cm와 4.1-6.0 cm로 서로 비슷하였다. 그러나 IBE 보정 후의 T의 RMSE는 6.4-7.6 cm로, 조위모델의 IBE 보정 전과 비교하여 감소폭이 크지 않았다. 이는 T와 $\dot{T}$의 오차 발생 원인이 서로 다르기 때문이다. T의 RMSE에는 실측조위와 조위모델의 평균해수면 오차, 조위모델이 사용하는 조화상수의 오차가 모두 영향을 미친다. 조위계로 정확한 조위를 측정하기 위해서는 장기간 관측된 해수면 높이로부터 정밀한 평균해수면이 산출되어야 하는데 (Watson *et al.*, 2008), 이 연구에서 사용한 평균해수면은 11일 동안 측정된 해수면 높이를 평균한 것이므로 부정확할 수 있으며, 이는 IBE 보정 후에도 T의 RMSE가 크게 평가된 원인으로 작용할 수 있다. 반면에 평균해수면의 오차는 실측조위의 차분값인 $\dot{T}_{gauge}$를 계산하는 과정에 제거되어 $\dot{T}$의 정밀도에 영향을 주지 않는다. 또한 수심측량 및 지반선 자료의 부정확성에 의한 조위모델의 평균해수면 오차도 $\dot{T}_{model}$을 계산하는 과정에서 상쇄되므로 $\dot{T}$의 RMSE에 영향을 주지 않는다. 뿐만 아니라

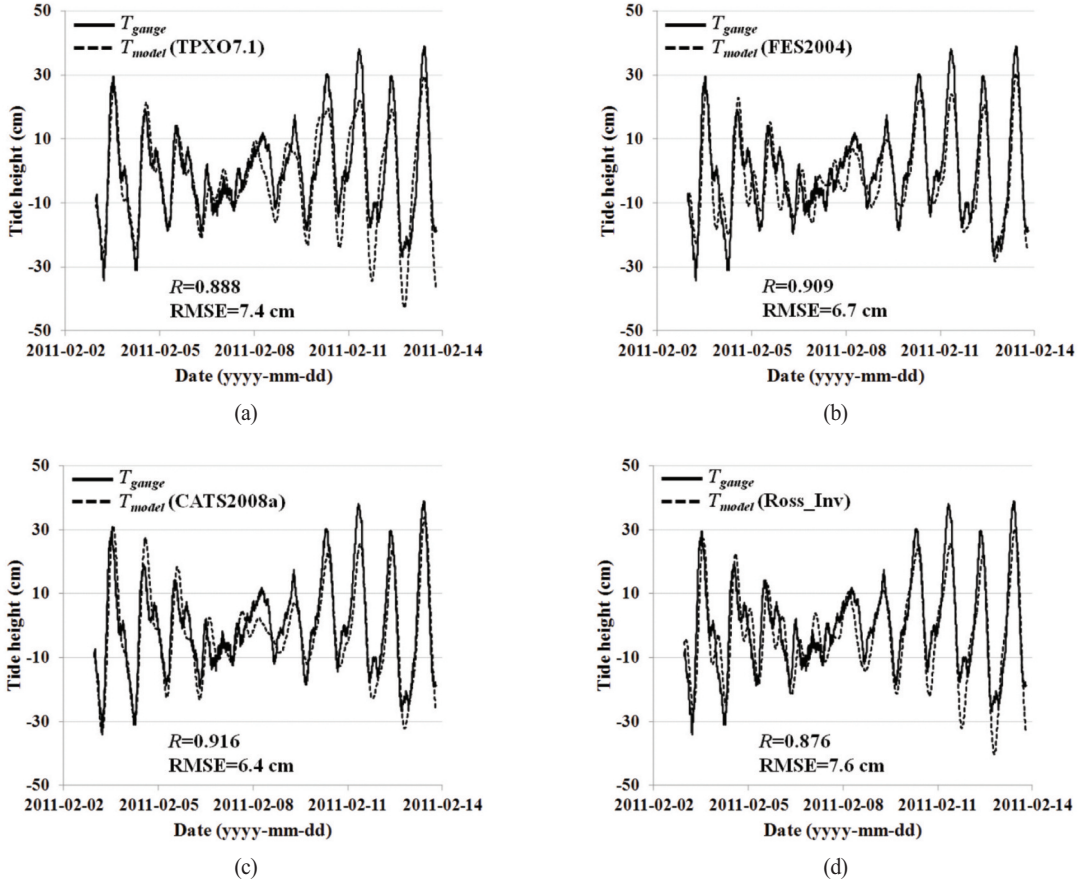


Fig. 7. *in situ* tide height (solid lines, T_{gauge}) and tide height predicted by the IBE-corrected (a) TPXO7.1, (b) FES2004, (c) CATS2008a and (d) Ross_Inv tide model (dotted lines, T_{model}).

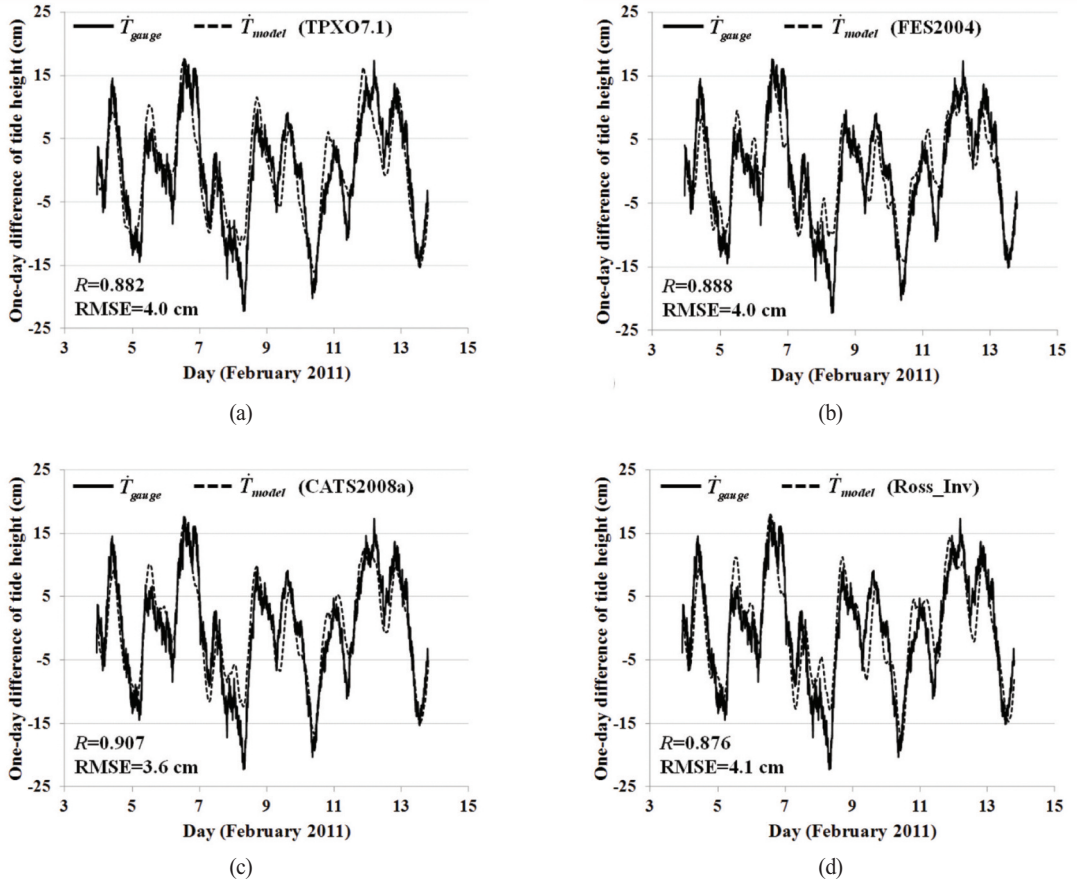


Fig. 8. 24-hours difference of tide height in every 5 minute calculated from *in situ* tide height (solid lines, $\dot{T}_{gauge}$) and predicted by the IBE-corrected (a) TPXO7.1, (b) FES2004, (c) CATS2008a and (d) Ross_Inv tide model (dotted lines, $\dot{T}_{model}$).

Table 1. Major tide constituents used in TPXO7.1, FES2004, CATS2008a and Ross_Inv tide models

Species	Symbol	Period (hr)	Speed (°/hr)	Used in*
Shallow water overtides of principal lunar	M_4	6.210	57.968	T, F
Principal lunar semidiurnal	M_2	12.421	28.984	T, F, C, R
Principal solar semidiurnal	S_2	12	30	T, F, C, R
Larger lunar elliptic semidiurnal	N_2	12.658	28.440	T, F, C, R
Lunar elliptical semidiurnal second-order	$2N_2$	12.905	27.895	F
Lunisolar semidiurnal	K_2	11.967	30.082	T, F, C, R
Lunar diurnal	K_1	23.934	15.041	F, C, R
Lunar diurnal	O_1	25.819	13.943	T, F, C, R
Larger lunar elliptic diurnal	Q_1	26.868	13.399	T, F, C, R
Solar diurnal	P_1	24.066	14.959	T, F, C, R
Solar diurnal	S_1	24	15	F
Lunar monthly	M_m	661.311	0.544	T, F, C, R
Lunisolar fortnightly	M_f	327.860	1.098	T, F, C, R

* T: TPXO7.1, F: FES2004, C: CATS2008a, R: Ross_Inv

COSMO-SkyMed SAR 간섭영상의 시간차(24시간)에 대한 조위의 차분값인 $\dot{T}$에는 12시간의 주기(phase lag)를 가지는 S_2(Table 1)가 식 (2)를 수행하는 과정에서 완전히 상쇄된다. FES2004의 경우에는 24시간 주기의 S_2도 상쇄되어 포함되지 않는다. 또한 주기가 12시간 또는 24시간에 가까운 K_2, K_1, P_1도 $\dot{T}$에 큰 영향을 주지 않는다. 따라서 COSMO-SkyMed SAR 간섭영상의 시간차인 24시간 동안에 대해 IBE가 보정된 조위모델의 조위 차분값과 이중차분값은 테라노바 만에서 DDInSAR 기법에 충분히 사용될 수 있다고 판단할 수 있다.

DDInSAR 영상에서 추출된 빙하의 조위변형과 실측조위를 이용하여 조위모델의 T, $\dot{T}$, $\Delta\dot{T}$의 정밀도를 평가하였고, 이로부터 조위모델의 IBE가 필수적으로 보정되어야 함을 확인할 수 있었다. 또한 조위모델은 시간에 따른 조위변화 예측에 더욱 유용하며, DDInSAR에 적합한 조위모델은 $\dot{T}$ 및 $\Delta\dot{T}$의 정밀도 평가를 통해 선정되어야 함을 알 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 동남극 테라노바 만에 위치한 Campbell Glacier Tongue에 대해 2년 동안 획득된 16쌍의 COSMO-SkyMed DInSAR 간섭영상으로 생성한 120개의 DDInSAR 영상과 테라노바 만에서 수압식 파고계로 11일 동안 실측한 조위를 이용하여 대표적인 조위모델인 TPXO7.1, FES2004, CATS2008a, Ross_Inv의 정밀도를 평가하였다. 이를 위해 먼저 DDInSAR로 추출된 빙하의 조위변형과 조위모델로 예측된 조위의 이중차분값($\Delta\dot{T}$)을 비교하였다. 실측조위와 조위모델로 예측된 조위(T)를 비교하였고, 또한 실측조위와 조위모델로부터 COSMO-SkyMed SAR 간섭영상의 시간차에 해당하는 24시간의 조위의 차분값($\dot{T}$)을 서로 비교하였다. $\Delta\dot{T}$, T, $\dot{T}$는 모두 조위모델의 역기압 효과 보정 전보다 보정 후에 더 작은 RMSE를 보였으며, 이를 통해 조위모델로 예측된 조위의 역기압 효과가 필수적으로 보정되어야 함을 확인할 수 있었다. 조위모델로 예측된 조위의 역기압 효과 보정 후에 $\dot{T}$의 RMSE는 $\Delta\dot{T}$의 RMSE와 유사한 값을 보였으나, T의 RMSE는 역기압 보정 후에도 감소폭이 크지 않았다. 이는 실측조위의 평균해수면 오차와 조위모델이 사용하는 모든 조화상수의 오차가 T의 RMSE에 포함되는 반면에, SAR 간섭영상의 시간차(24시간)에 대한 차분값인 $\dot{T}$에는 평균해수면 오차와 조화상수 중 S_2, K_2, K_1, P_1의 오차가 상쇄되기 때문이다. 이를 통해 역기압 효과가 보정된 조위모델로부터 예측된 조위의 차분값($\dot{T}$)과 이중차분값($\Delta\dot{T}$)이 DDInSAR 기법에 의한 빙하연구에 사용될 수 있음을 확인하였다. 11일 동안 획득된 실측조위에 의한 $\dot{T}$의 RMSE는 3.6-4.1 cm로 모든 조위모델에서 서로 비슷하게 나타났으며, 단기간 측정된 실측조위로는 DDInSAR에 적합한 조위모델을 선정하는데 어려움이 있었다. 그러나 DDInSAR를 이용하여 2년 동안의 조위모델의 $\Delta\dot{T}$를 평가한 결과 4.1 cm의 RMSE를 보인 Ross_Inv가 Campbell Glacier Tongue을 포함한 테라노바 만에서 가장 정확한 조위모델임이 확인되었다.

이 연구를 통하여 우리나라의 장보고 과학기지 건설지가 위치한 동남극 테라노바 만에 대한 조위모델의 정밀도를 평가할 수 있었으며, 역기압 효과를 보정한 조위모델이 실측조위가 부족한 남극에서 DDInSAR를 이용한 빙하연구에 유용함을 확인할 수 있었다. 또한 DDInSAR 기법에 적합한 조위모델은 조위예측 정밀도보다 SAR 간섭영상의 시간차 동안의 조위 차분값에 대한 정밀도 평가를 통해 선택되어야 함을 제시하였다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2013R1A1A2008062)과 한국해양과학기술원 부설 극지연구소의 장보고 과학기지 주변 빙권과 지각권의 상효작용 규명: David Glacier 종합 관측망 구축 및 빙하 진화 연구(과제번호: PE13050)와 2013년도 강원대학교 학술연구조성비(과제번호-120131384)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

Reference

Andersen, O.B., P.L. Woodworth, and R.A. Flather, 1995. Intercomparison of recent ocean tide

models, *Journal of Geophysical Research*, 100(C12): 25,261-25,282.

Bromirski, P.D. and R.A. Stephen, 2012. Response of the Ross Ice Shelf, Antarctica, to ocean gravity-wave forcing, *Annals of Glaciology*, 53(60): 163-172.

Brunt, K.M., M.A. King, H.A. Fricker, and D.R. MacAyeal, 2010. Flow of the Ross Ice Shelf, Antarctica, is modulated by the ocean tide, *Journal of Glaciology*, 56(195): 157-161.

Egbert, G.D. and S.Y. Erofeeva, 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2): 183-204.

Fricker, H.A. and L. Padman, 2002. Tides on Filchner-Ronne Ice Shelf from ERS radar altimetry, *Geophysical Research Letters*, 29(12), 50.

Goldstein, R.M., H.A. Zebker, and C.L. Werner, 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, *Radio Science*, 23(4): 713-720.

Griggs, J.A. and J.L. Bamber, 2011. Antarctic ice-shelf thickness from satellite radar altimetry, *Journal of Glaciology*, 57(203): 485-498.

Han, H. and H. Lee, 2013. Tidal deflection of Campbell Glacier Tongue analyzed by COSMO-SkyMed double-differential interferometric SAR images, *Proc. of 2013 International Symposium on Remote Sensing*, Chiba, Japan, Apr. 15-17.

Han, H., Y. Ji, and H. Lee, 2013. Estimation of annual variation of ice extent and flow velocity of Campbell Glacier in East Antarctica using COSMO-SkyMed SAR images, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(1): 45-55.

King, M. and L. Padman, 2005. Accuracy assessment of ocean tide models around Antarctica, *Geophysical Research Letters*, 32, L23608.

King, M., N.T. Penna, P.J. Clarke, and E.C. King, 2005. Validation of ocean tide models around Antarctica using onshore GPS and gravity data, *Journal of Geophysical Research*, 110, B08401.

Le Provest, C., F. Kyard, J.M. Molines, M.L. Genco, and F. Rabilloud, 1998. A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter-derived data set, *Journal of Geophysical Research*, 103(C3): 5513-5529.

Legrésy, B., A. Wendt, I. Tabacco, F. Remy, and R. Dietrich, 2004. Influence of tides and tidal current on Mertz Glacier, Antarctica, *Journal of Glaciology*, 50(170): 427-435.

Lyard, F., F. Lefevre, T. Letellier, and O. Francis, 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004, *Ocean Dynamics*, 56(5-6): 394-415.

McMillan, M., A. Shepherd, P. Nienow, and A. Leeson, 2011. Tide model accuracy in the Amundsen Sea, Antarctica, from radar interferometry observations of ice shelf motion, *Journal of Geophysical Research*, 116, C11008.

Mitrovica, J.X., M.E. Tamisiea, J.L. Davis, and G.A. Milne, 2001. Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change, *Nature*, 409(6823): 1026-1029.

Moore, P. and M.A. King, 2008. Antarctic ice mass balance estimates from GRACE: Tidal aliasing effects, *Journal of Geophysical Research*, 113, F02005.

Padman, L. and H.A. Fricker, 2005. Tides on the Ross Ice Shelf observed with ICESat, *Geophysical Research Letters*, 32, L14503.

Padman, L., H.A. Fricker, R. Coleman, S. Howard, and L. Erofeeva, 2002. A new tide model for the Antarctic ice shelves and seas, *Annals of Glaciology*, 34(1): 247-254.

Padman, L., M. King, D. Goring, H. Corr, and R. Coleman, 2003a. Ice shelf elevation changes due to atmospheric pressure variations, *Journal of Glaciology*, 49(167): 521-526.

Padman, L., S. Erofeeva, and I. Joughin, 2003b. Tides of the Ross Sea and Ross Ice Shelf cavity, *Antarctic Science*, 15: 31-40.

Rignot, E., 1996. Tidal motion, ice velocity and melt rate of Petermann Gletscher, Greenland, measured from radar interferometry, *Journal of Glaciology*, 42(142): 476-485.

Rignot, E., 1998. Radar interferometry detection of hinge-line migration on Rutford Ice Stream and Carlson Inlet, Antarctica, *Annals of Glaciology*, 27: 25-32.

Rignot, E., J. Mouginot, and B. Scheuchl, 2011. Antarctic grounding line mapping from differential satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 38, L10504.

Shum, C.K., P.L. Woodworth, O.B. Andersen, G.D. Egbert, O. Francis, C. King, S.M. Klosko, C. Le Provost, X. Li, J-M. Molines, M.E. Parke, R.D. Ray, M.G. Schlax, D. Stammer, C.C. Tiemey, P. Vincent, and C.I. Wunsch, 1997. Accuracy assessment of recent ocean tide models, *Journal of Geophysical Research*, 102(C11): 25,173-25,194.

von der Osten-Woldenburg, H., 1990. Icequakes on Ekstrom Ice Shelf near Atka Bay, Antarctica, *Journal of Glaciology*, 36(122): 31-36.

Watson, C., R. Coleman, and R. Handsworth, 2008. Coastal tide gauge calibration: a case study at Macquarie Island using GPS buoy techniques, *Journal of Coastal Research*, 24(4): 1071-1079.