Jour. Korean Earth Science Society, v. 32, no. 7, p. 719–731, December 2011
http://dx.doi.org/10.5467/JKESS.2011.32.7.719

후빙기조륙운동 보정을 통한 한반도 주변 해역의 절대해수면 변화 분석

김경희[1,*] · 박관동[1] · 임채호[2] · 한동훈[3]

[1]인하대학교 지리정보공학과, 402-751, 인천광역시 남구 인하로 100
[2]국립해양조사원 해양관측과, 400-800, 인천광역시 중구 서해대로 365
[3](주)미래해양 해양부, 431-060, 경기도 안양시 동안구 흥안대로 439번길 65-1

Analysis of Absolute Sea-level Changes around the Korean Peninsula by Correcting for Glacial Isostatic Adjustment

Kyeong-Hui Kim[1,*], Kwan-Dong Park[1], Chaeho Lim[2], and Dong-Hoon Han[3]

[1]Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea
[2]Department of Oceanographic, Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, Incheon 400-800, Korea
[3]Department of Marine, Mirae Ocean Corporation, Gyeonggi 431-060, Korea

Abstract: Based on the ICE-3G and ICE-5G ice models, we predicted the velocities of crustal uplift caused by Glacial Isostatic Adjustment (GIA) at 39 tide gauge sites operated by Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (KHOA). We also divided the Korean peninsula in the ranges of 32-38.5°N and 124-132°E in 0.5°×0.5° grids, and computed the GIA velocities at each grid point. We found that the average uplift rates due to GIA in South Korea were 0.33 and 1.21 mm/yr for ICE-3G and ICE-5G, respectively. Because the GIA rates were relatively high at ~1 mm/yr when the updated ice model ICE-5G was used, we concluded that the GIA effect cannot be neglected when we compute the absolute sea level (ASL) rates around the Korean peninsula. In this study, we corrected the ICE-5G GIA velocities from the relative sea level rates provided by KHOA and we computed the ASL rates at 13 tide gauge stations. As a result, we found that the average ASL velocity around the Korean peninsula was 5.04 mm/yr. However, the ASL rates near Jeju island were abnormally higher than the other areas and the average was 8.84 mm/yr.

Keywords: GIA, glacial isostatic adjustment, crust uplift, relative sea level, absolute sea level

요 약: 국립해양조사원 39개소 조위관측소의 후빙기조륙운동(Glacial Isostatic Adjustment, GIA)에 의한 지각변동 속도를 ICE-3G와 ICE-5G 모델로 예측하였다. 또한 위도 32°-38.5°N, 경도 124°-132°E 범위의 한반도 지역을 0.5°×0.5° 격자로 분할하고 각 격자점에서의 GIA 지각변동 속도를 계산하였다. 그 결과 ICE-3G 모델의 경우 한반도 GIA 수직 지각변동은 평균 0.33 mm/yr이고, ICE-5G 모델의 경우 평균 1.21 mm/yr의 속도로 지각변위가 발생하는 것으로 나타났다. 최신 Ice model인 ICE-5G 모델을 사용할 경우 한반도에서도 약 1 mm/yr 이상의 비교적 높은 GIA 수직 지각변동이 발생하므로 절대해수면 변동을 산정하기 위해서 GIA에 의한 수직변위를 보정해야 함을 확인하였다. 따라서 국립해양조사원에서 제공하는 13개 조위관측소의 상대해수면 변동률에서 ICE-5G 모델에 의한 GIA 지각변동 속도를 보정하여 절대해수면 변동률을 결정하였다. 절대해수면 상승속도를 분석한 결과 GIA 지각변동 속도를 보정한 절대해수면 변동률은 한반도 해역에서 평균 5.04 mm/yr의 상승속도를 나타냈으며, 제주 해역은 평균 8.84 mm/yr로 다른 해역보다 높은 이상 상승률을 나타냈다.

주요어: GIA, 후빙기조륙운동, 지각 융기, 상대해수면, 절대해수면

*Corresponding author: kyeong-hui@inha.edu
Tel: +82-32-873-4310
Fax: +82-32-863-1506

서 론

플라이스토세(Pleistocene) 혹은 갱신세(更新世) 동안의 기후변화는 지구 역사상 가장 큰 폭으로 진행되었다(김주환, 2009). 이 시기에 존재했던 엄청난 크기의 빙하들이 그 아래에 위치한 지각을 누르고 있음에 따라 지각은 지구 중심 방향으로 변형되어 있었다. 약 15,000-20,000년 전 빙하기 종료 후 빙하들의 소멸로 지각을 누르는 하중이 제거되고, 그 결과 지각은 지속적으로 변동하고 있다. 이를 후빙기조륙운동(Glacial Isostatic Adjustment, GIA 혹은 Post-Glacial Rebound, PGR)이라고 한다.

GIA는 장기간 해수면 변동에 기여하는 유일한 지질학적 요인으로 알려져 있으며, 조위자료에서 장기적인 해수면 변동률을 결정할 경우 GIA에 의한 수직 지각변동이 보정되어야 한다. Baker(1993)는 유럽 조위관측소들의 조위자료로부터 장기간 해수면 변동을 분석한 결과를 통해 GIA의 중요성을 확인하였다. 그 결과에 의하면 포르투칼, 프랑스, 영국 그리고 네덜란드 등의 조위관측소들은 1.5-2.0 mm/yr의 해수면 상승률을 보이지만 북유럽에 위치한 스웨덴과 스코틀랜드 조위관측소에서는 다른 경향을 나타냈다. 스웨덴 조위관측소에서 해수면은 약 4 mm/yr로 하강하고 있고 스코틀랜드 조위관측소에서는 매우 낮은 상승률을 보였다. 이와 같은 결과는 스웨덴과 스코틀랜드 조위관측소가 스칸디나비아 반도에서 발생되는 GIA에 의한 수직 지각변동에 따른 영향을 받기 때문인 것으로 입증되었다. 따라서 조위관측소의 조위자료를 이용한 정확한 해수면 변동률을 결정하기 위해서는 GIA에 의한 수직 지각변동이 반드시 보정되어야 한다.

GIA에 의한 지각변동은 최후빙기(Last Glacial Maximum, LGM)의 빙하 두께를 예측하기 위한 Ice model과 함께 지구 내부의 점탄성구조를 결정하기 위한 Earth model를 처리하여 산출할 수 있다. 대표적인 Ice model로는 ICE-3G(Tushingham and Peltier, 1991), ICE-4G(Peltier, 1994, 1996) 그리고 ICE-5G (Peltier, 2004)가 있다. Earth model은 암석권 두께와 맨틀 점도로 구성되며, 맨틀 점도는 상부 맨틀 점도와 하부 맨틀 점도에 따라 VM1(Viscosity Model 1), VM2 등으로 구분된다(Peltier, 1996).

전지구 Ice model를 통한 GIA 예측은 Peltier (1974, 1976), Farrell and Clark(1976), Peltier and Andrews(1976), Clark et al.(1978) 그리고 Peltier et al.(1978)에서 개발된 해수면 방정식(Sea Level Equation, SLE)을 기반으로 산출된다. Mitrovica et al.(2001)은 GIA에 의한 지각변동 속도를 예측하는 과정에서 지구자전에 의한 영향을 반영하였으며, 이러한 영향을 무시하였을 경우와 비교하여 GIA 지각변동 속도의 차이가 있음을 증명하였다. 그 결과에 의하면 한반도의 경우, 지구 자전에 의한 영향을 반영하기 전에는 GIA 지각변동 속도가 약 0.3 mm/yr이고, 반영 후에는 약 0.7 mm/yr로 GIA 지각변동 속도가 상승됨을 보였다. Ice model은 자전에 의한 영향과 같은 지구 역학적 현상들을 반영하여 ICE-3G, ICE-4G 그리고 ICE-5G로 개선되어져 왔으며 GPS (Global Positioning System), VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 그리고 SLR(Satellite Laser Ranging)과 같은 우주측지 관측 자료들을 이용한 연구를 통해 모델의 품질을 향상시켰다(Argus et al., 1999; Johansson et al., 2002; Tarasov and Peltier, 2002).

Peltier(2004)는 유라시아, 영국, 북아메리카 그리고 남극 대륙을 대상으로 최신 모델인 ICE-5G 모델의 정확도를 분석하였고, 그 결과 이전 모델보다 VLBI, 상대해수면(Relative Sea Level, RSL) 그리고 지질조사 자료 등과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이에 따라 해수면관련 자료를 수집 및 분석하여 제공하는 PSMSL(Permanent Service for Mean Sea Level)에서는 Peltier(2004)의 ICE-5G 모델로 예측한 GIA 결과를 제공하고 있으며, 선진국에서는 최신 모델인 ICE-5G 모델을 사용하여 GIA와 해수면에 관련된 많은 연구들이 진행되고 있다. 이와 같이 선진국에서는 해수면 연구를 위해 조위자료로부터 GIA에 의한 수직 지각변동을 보정하여 절대해수면(Absolute Sea Level, ASL)을 산출하는 것이 일반적인 연구 동향임에도 불구하고 국내에서는 조위자료에 GIA에 의한 수직 지각변동을 보정하여 절대해수면을 산출하기 위한 연구는 미비하였다. 그 이유는 우리나라의 경우 빙하기 동안 시베리아 지역에 큰 빙하가 존재하지 않았기 때문에 유럽북부와 북아메리카 대륙과 비교하여 GIA가 크게 나타나지 않는 것으로 예상했었고, 이전 GIA 모델인 ICE-3G로 한반도의 GIA에 의한 수직 지각변동을 예측하였을 경우 예측값이 낮았기 때문으로 판단된다. 그러나 최신 모델인 ICE-5G의 경우 Peltier(2004)에 의해 한반도에서도 약 1 mm/yr 이상의 수직 지각변동이 발생하고 있음이 입증됨에 따라 절대해수면 결정을 위해서는 GIA에 대한 연구 및 보

정이 수행되어져야 한다.

이 연구에서는 Peltier의 전지구 Ice model을 기반으로 한 Mitrovica and Milne(2003)의 GIA 모델을 사용하여 한반도 지역의 GIA 지각변동 속도를 비교·분석하였고, 절대해수면 변동을 산정함에 있어 GIA 지각변동 보정이 필요함을 입증하였다. 그리고 국립해양조사원(2009)의 13개 조위관측소에 대한 상대해수면 변동률에서 ICE-5G 모델에 의한 GIA 지각변동 속도를 보정하여 지구중심을 기준으로 하는 절대해수면 변동률을 결정하였다.

GIA 모델

후빙기조륙운동에 따른 영향을 예측하기 위한 GIA 모델은 Ice model과 Earth model로 이루어져 있다. Ice model은 빙하기 후의 국지적 수심변화율을 계산하기 위한 목적으로 후빙기 상대해수면 변동에 관한 해수면 방정식 이론을 사용하여 GIA에 의한 전지구 해수면 변화를 추정한다. 초기 Ice model은 Farrell and Clark(1976)의 해수면 방정식을 채택하여 개발되었고, 점차 Ice model이 개선됨에 따라 해수면 방정식도 수정 및 개선되어졌다(Mitrovica and Milne, 2003; Peltier, 2002, 2004). Peltier의 Ice model은 GIA 예측을 위한 대표적인 전지구 Ice model이며, 많은 연구자들이 GIA와 관련한 연구를 위해 사용하고 있다(Justino et al., 2006; Craymer et al., 2009; Bevis, et al., 2009). Mitrovica and Milne(2003)의 경우는 자체적으로 개선한 해수면 방정식 이론을 Peltier의 Ice model에 적용하여 GIA와 관련한 연구를 진행하였다.

GIA에 의한 지각변동을 분석하기 위해서는 Ice model과 함께 지구 내부의 점탄성구조를 결정하기 위한 Earth model을 처리하여야 한다. Earth model은 암석권 두께와 함께 맨틀의 깊이에 따른 점성의 변화량을 수치화하여 정의한 Viscosity model로 구성된다(Dziwonski and Anderson, 1981). Ice model이 개선됨에 따라 함께 사용된 Earth model도 변경되었다. ICE-3G에서는 암석권 두께 120 km, 맨틀 점도는 VM1을 사용하지만 ICE-4G 모델부터는 VM2를 사용한다(Rostami et al., 2000). VM1과 VM2의 상부 맨틀 점도는 각각 1×10^{21} Pas와 4×10^{20} Pas이고 하부 맨틀 점도는 2×10^{21} Pas로 동일하다. ICE-5G 모델에서는 Peltier et al.(2002)의 연구 결과에 따라 암석권 두께가 120 km에서 90 km로 수정되었다.

Table 1. GIA vertical crustal velocities at tide gauges around Korean Peninsula provided by Peltier homepage

조위관측소	Peltier ICE-5G (mm/yr)	조위관측소	Peltier ICE-5G (mm/yr)
인천	1.43	여수	1.37
안흥	1.42	통영	1.37
보령	1.42	추자도	1.29
군산외항	1.41	가덕도	1.36
위도	1.39	부산	1.36
목포	1.35	울산	1.34
대흑산도	1.32	포항	1.31
서귀포	1.23	울릉도	1.07
제주	1.25	묵호	1.25
완도	1.33	속초	1.28
거문도	1.31	-	-

이 연구에서는 Peltier의 Ice model(ICE-3G와 ICE-5G)을 기반으로 한 Mitrovica and Milne(2003)의 GIA 모델을 이용하여 한반도 지역 조위관측소에 대해 GIA 수직 지각변동 속도를 직접 예측하였다. 그리고 그 결과를 검증하기 위해 웹에서 제공하는 Peltier의 결과와 비교하였다. Peltier는 ICE-5G 모델로 전 지구 조위관측소에 대해 GIA 수직 지각변동 속도를 예측하고, 이를 웹사이트에서 제공하고 있다(http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/~peltier/data.php). Table 1은 Peltier에 의해 제공되는 우리나라의 일부 조위관측소의 수직 지각변동 속도를 나타낸 것이다. Table 1의 결과에 의하면 ICE-5G 모델로 예측한 GIA 지각변동 속도가 한반도의 경우 평균 1.33 mm/yr 정도로 상승하고 있음을 알 수 있다. 이 연구에서 Table 1과 동일한 조위관측소의 GIA 지각변동 속도를 산출한 값과 Peltier의 값을 비교한 결과 평균값의 차이는 0.14 mm/yr로 나타났고, 제곱근오차(RMSE, Root-Mean-Square Error)는 0.16 mm/yr로 나타나 Peltier에 의한 결과와 유사함을 확인하였다. 여기서 두 결과의 차이가 발생한 이유는 동일한 Ice model인 ICE-5G를 사용하였으나 GIA 예측을 위해 사용한 해수면 방정식에 차이가 있기 때문으로 판단된다.

한반도의 후빙기조륙운동 지각변위 특성

이 연구에서는 전지구 Ice model인 Peltier의 ICE-

3G와 ICE-5G 모델을 기반으로 한 Mitrovica and Milne(2003)의 GIA 모델을 사용하여 한반도 지역 GIA 지각변동 속도를 분석하였다. 한반도의 GIA에 의한 지각변동 속도 분석을 위하여 이어도를 포함한 국립해양조사원 39개소 조위관측소의 GIA에 의한 지각변동 속도를 예측하였다. 또한 위도 32°-38.5°, 경도 124°-132° 범위의 한반도 전역을 0.5°×0.5° 격자로 분할하고, 각 격자점에 대한 GIA 지각 변동 속도를 모델별로 예측하였다. 조위관측소에 대한 Ice model 별 GIA 지각변동 결과는 Table 2에 나타내었다.

ICE-3G와 ICE-5G 모델로 예측한 GIA에 의한 한반도 수직 지각변동은 각각 평균 0.33 mm/yr와 1.21 mm/yr의 속도로 지각변위가 발생하고 있음을 예측하였고, 두 모델의 차이가 한반도의 경우 0.88 mm/yr로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 큰 차이가 발생하는 이유는 Ice model이 ICE-3G에서 ICE-5G로 개선되고 그에 따른 Earth model이 변경되었기 때문이다. 또한 ICE-3G 모델의 경우 예측값이 우리나라 평균 해수면 상승률(1.9 mm/yr)과 비교하여 영향이 크지 않음을 확인하였다. 그러나 Ice model이 개선됨에 따라 ICE-5G 모델의 경우 평균 1.21 mm/yr로 예측되어 우리나라 평균 해수면 상승률과 비교하여 GIA에 의한 수직 지각변동이 작지 않으므로 국내에서도 절대해수면 결정을 위해 GIA에 의한 수직 지각변동 보정이 필요함을 알 수 있었다. GIA에 의한 지각변위의 최대 예측치는 ICE-3G 모델의 경우 강화 조위관측소에서 0.41 mm/yr, ICE-5G 모델의 경우 강화와 전류리 조위관측소에서 1.39 mm/yr로 다른 조위관측소에 비해 높게 나타났다. 가장 낮은 예측값은 ICE-3G의 경우 울릉도 조위관측소에서 0.14 mm/yr, ICE-5G의 경우 이어도 조위관측소에서 0.86 mm/yr로 가장 낮은 상승속도를 나타냈다.

또한 한반도 주변 지역에서의 GIA에 의한 지각변동 속도가 어떻게 발생하고 있는지 파악하기 위하여 앞서 분석한 조위관측소 및 한반도 전역의 0.5°×0.5° 격자점을 제외한 위도 10°-60°, 경도 100°-150° 범위의 지역을 1°×1° 격자로 분할하였다. 그리고 각 격자점에 대한 GIA 지각변동 속도를 예측하여 포함하였으며 그 결과를 Fig. 1과 2에 나타내었다. Fig. 1의 ICE-3G 모델은 바다와 육지가 구분되어 GIA 지각변동이 나타나고 있는 반면, Fig. 2의 ICE-5G 모델에서는 빙하가 많이 존재했던 북반구 쪽으로 위도가 높아짐에 따라 GIA 지각변동이 크게 나타남을 알 수 있었다. Fig. 1과 2에서 위도가 높아질수록 GIA에 의한 수직 지각변동이 비교적 크게 나타나는 현상은 Table 2의 39개 조위관측소의 결과에서도 동일하게 나타난다.

Table 2. GIA velocities at tide gauges in Korea

조위관측소	ICE-3G (mm/yr)	ICE-5G (mm/yr)	조위관측소	ICE-3G (mm/yr)	ICE-5G (mm/yr)
대청도	0.39	1.34	거문도	0.31	1.12
굴업도	0.39	1.34	고흥	0.34	1.17
강화	0.41	1.39	여수	0.36	1.20
전류리	0.40	1.39	통영	0.38	1.22
인천	0.40	1.37	거제도	0.38	1.23
안산	0.39	1.36	마산	0.38	1.24
대산	0.39	1.34	가덕도	0.38	1.23
평택	0.39	1.35	부산	0.38	1.24
안흥	0.38	1.31	울산	0.37	1.23
보령	0.38	1.30	포항	0.34	1.23
장항	0.37	1.28	후포	0.30	1.21
군산외항	0.37	1.27	묵호	0.28	1.24
어청도	0.35	1.26	속초	0.30	1.30
위도	0.35	1.23	울릉도	0.14	1.06
영광	0.34	1.22	모슬포	0.22	0.97
목포	0.31	1.15	제주	0.25	1.02
대흑산도	0.27	1.09	서귀포	0.23	0.99
진도	0.29	1.11	성산포	0.26	1.03
추자도	0.27	1.06	이어도	0.15	0.86
완도	0.31	1.12	-	-	-

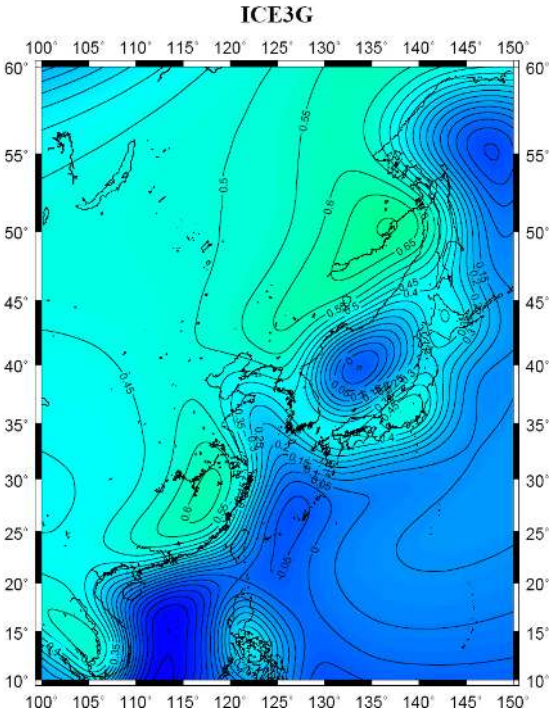

Fig. 1. Contour map of the vertical crustal displacement based on the ICE-3G GIA model.

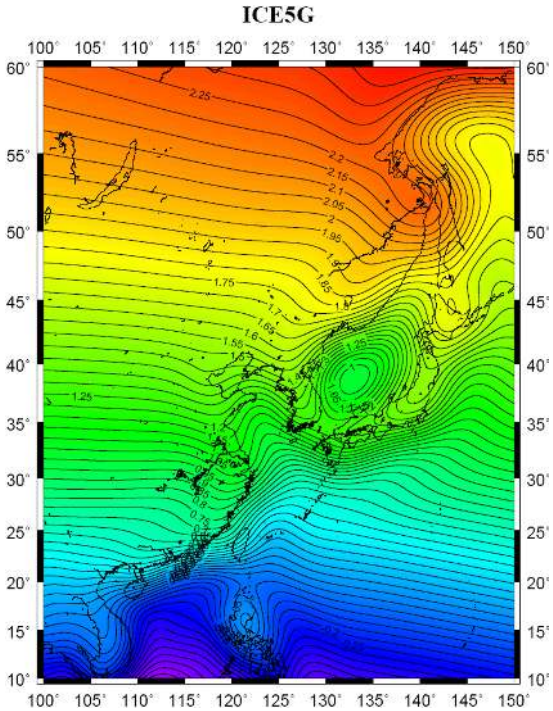

Fig. 2. Contour map of the vertical crustal displacement based on the ICE-5G GIA model.

절대해수면 상승속도 분석

국립해양조사원에서 제공되고 있는 조위자료는 육지에 설치된 조위관측소에서 해당 관측소에 대한 상대적인 해수면 변화를 측정한 것으로 관측소 자체의 수직변동이 포함되어 있다. 따라서 조위자료를 이용하여 절대해수면 상승속도를 분석하기 위해서는 상대해수면 변화에 영향을 미치는 지각변동을 정확히 산출하여야 한다. 조위관측소의 수직 지각변위를 고려하는 방법으로는 조위관측소에 설치된 GPS 관측 데이터로부터 수직 속도를 직접 검출하는 방법과 GIA 모델로 조위관측소의 수직 지각변위를 예측하는 방법이 있다. 우리나라는 현재 이어도를 포함한 39개 조위관측소 중 12개소에 GPS 상시관측소가 설치되어 있으나 아직 운영기간이 짧기 때문에 조위관측소 자체의 수직 지각변동을 보정하기엔 관측기간이 충분하지 않다(국립해양조사원, 2009). 그러므로 이 연구에서는 조위관측소의 수직 지각변위를 고려한 절대해수면 상승속도를 분석하기 위해 GIA에 의한 수직 지각변위를 예측하여 보정하였다. 앞서 ICE-3G와 ICE-5G 모델을 사용하여 예측한 한반도 지역의 GIA 지각변동 속도를 비교·분석한 결과에서 최신 ICE-5G 모델은 우리나라에서 발생되는 GIA에 의한 수직 지각변동이 작지 않음을 나타냈다. ICE-5G 모델은 많은 연구를 통해 ICE-3G 모델로부터 개선되어졌고, 이를 통해 한반도의 GIA에 의한 수직 지각변위를 보다 정확하게 예측할 수 있기 때문에 절대해수면 상승속도 분석을 위해 ICE-5G 모델로 예측한 값을 이용하였다.

조위자료를 이용한 방법 외에 절대해수면을 산정할 수 있는 방법으로 위성고도계를 이용할 수 있다. 위성고도계는 미국 NASA와 프랑스 CNES 공동으로 1992년 8월에 발사된 TOPEX/Poseidon 위성을 시작으로 Jason-1과 Jason-2가 뒤를 이어 전지구 해양 고도를 측정하고 있다. 위성에 탑재된 고도계는 우주공간에서 위성과 해수면 사이의 거리(altimeter range)를 측정하여 해수면이나 지오이드 높이를 계산하므로 육지의 수직운동에 대한 보정이 필요하지 않다. 따라서 이 연구에서는 GIA에 의한 수직 지각변동을 보정하여 산출한 절대해수면 상승률 결과 검증을 위해 위성고도계에 의한 해수면 상승률과 비교하였다.

국립해양조사원(2009)에서는 조위관측소의 이력조

사 및 매시별 조위자료 분석을 기반으로 조위관측소에 대한 상대해수면 변동률을 산정하였다. 해수면 상승률 분석에서 분석기간이 동일하지 않아 발생할 수 있는 오차를 방지하고, 위성고도계에 의한 해수면 상승률과의 비교 · 분석을 수행하기 위해 1993년부터 2008년까지 16년 동안의 조위자료를 이용하였다. 동일기간의 해수면 상승률 분석에 사용된 조위관측소는 주변 조위관측소와 비교하여 이상상승률을 나타내거나 조위관측소 이설에 따른 분석 종료기간이 2005년 이전인 조위관측소를 제외한 13개 조위관측소이다. 인천 조위관측소의 경우 1999년 월미도에서 현 조위관측소로 이설된 이후인 1999년부터 2008년까지의 자료를 이용하여 분석하였다. 이와 같이 선별된 13개 조위관측소의 매시별 조위자료를 이용하여 월평균해면을 구한 후 선형 추세분석으로 상대해수면 상승률을 산정하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 분석 결과 상대해수면 상승률은 남해 제주에서 9.9 mm/yr로 가장 높고 여수에서 0.8 mm/yr로 가장 낮았다. 또한 제주부근 조위관측소의 상승률이 모두 5.0 mm/yr 이상으로 각각 서귀포 5.8 mm/yr, 거문도 7.7 mm/yr, 제주 9.9 mm/yr 순으로 다른 조위관측소와 비교하여 매우 높은 해수면 상승률을 나타냄을 확인하였다. 해역별 상승률은 동해 3.1 mm/yr, 서해 3.6 mm/yr, 남해(제주부근 포함) 4.7 mm/yr 순으로 높게 나타남을 알 수 있었다.

상대해수면 변동률에는 지각의 움직임이 고려되지 않기 때문에 이를 보정하기 위해서는 지각의 수직변동을 더해주어 절대해수면 변동률을 산정하게 된다. 따라서 이 연구에서는 국립해양조사원 조위자료에 의한 상대해수면 변동률에 ICE-5G 모델에 의한 GIA 수직 지각변동 속도를 더하여 절대해수면 상승속도를 산출하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 최근 16년간의 상대해수면 상승률에 GIA 수직 지각변동 속도를 보정한 결과, 동해안과 서해안은 각각 평균

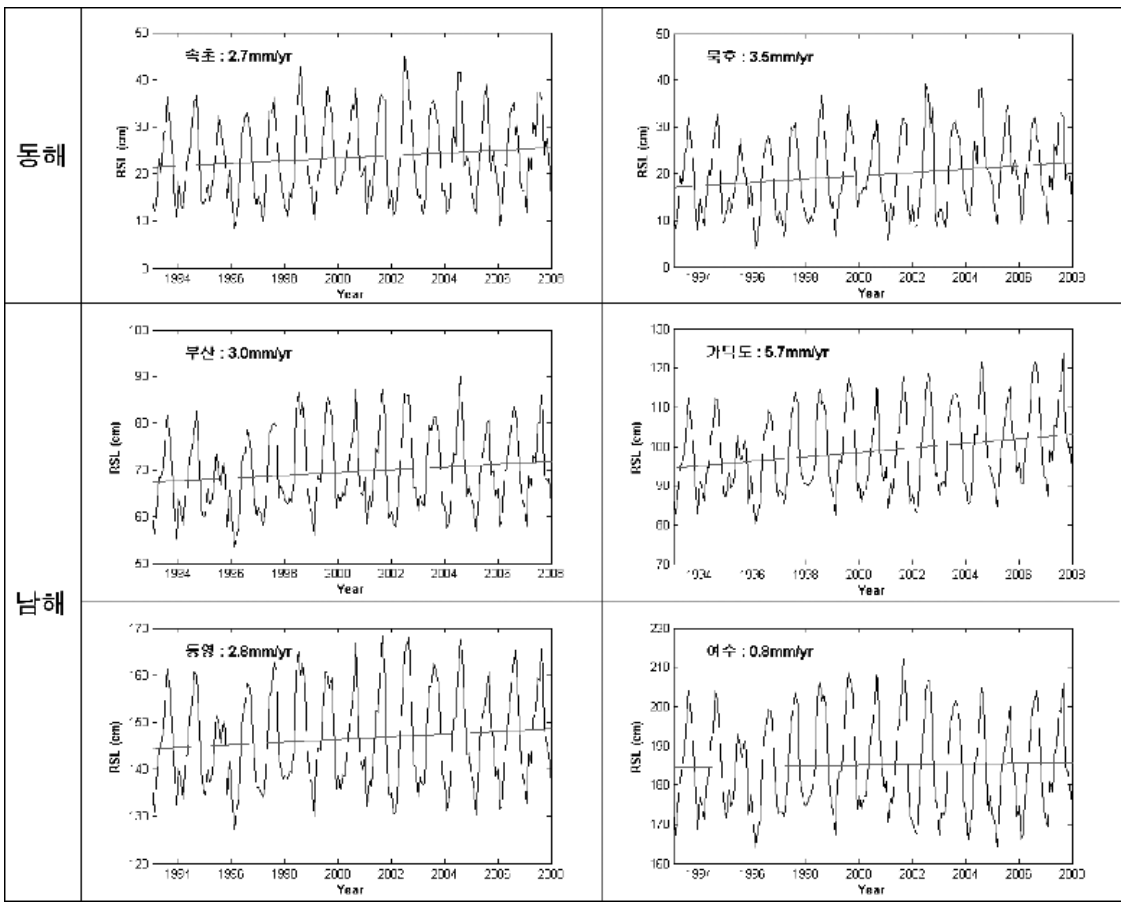

Fig. 3. The relative sea level rates at selected 13 tide gauges.

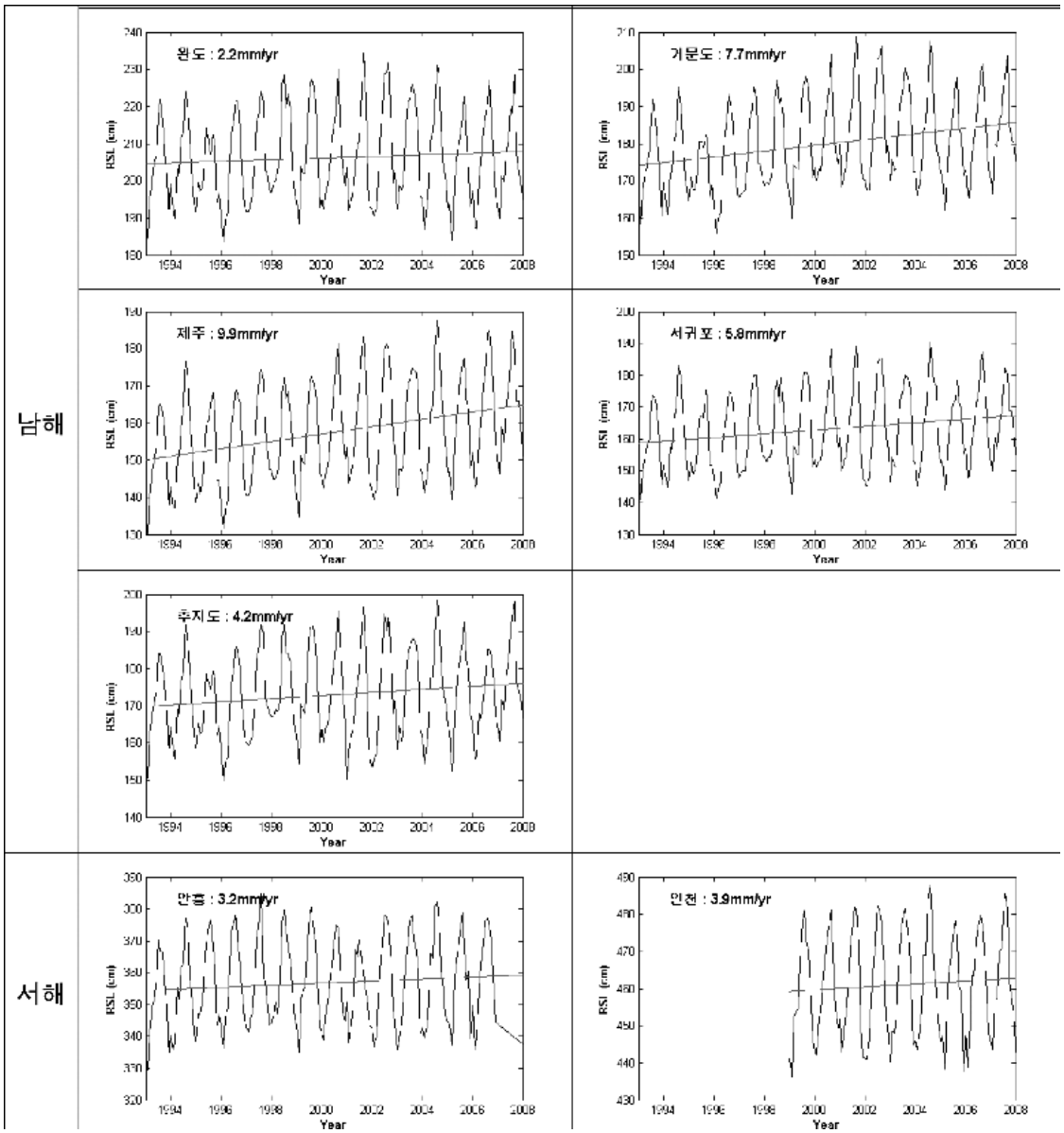

Fig. 3. Continued.

4.41 mm/yr와 4.91 mm/yr의 절대해수면 상승률을 보였다. 남해안은 동해 및 서해와는 달리 높은 절대해수면 상승률인 5.81 mm/yr를 가지는데, 이는 남해안에 위치하는 조위관측소 중 제주도 및 제주도 인근에 위치한 조위관측소들의 상대해수면 상승률이 높기 때문이다 .

Fig. 4의 남해안에 위치한 조위관측소 중에서 서귀포, 제주, 거문도 조위관측소들은 제주도와 제주 인근에 위치하고 있으며 다른 조위관측소에 비해 큰 상승률을 나타냄을 확인할 수 있다. 제주 해역에 위치한 조위관측소들의 GIA에 의한 수직 지각변동 속도는 다른 해역에 위치한 조위관측소들보다 조금 낮은 값을 보이지만, 제주 해역의 절대해수면 상승률은 평균 8.84 mm/yr로 다른 해역보다 매우 높은 이상 상승률을 나타냈다(Table 3). 이와 같은 결과는 근본적으로 국립해양조사원에서 제공된 상대해수면 변동률이 남해 일부와 제주 해역에서 큰 값을 가지기 때문이다. 이 지역들은 쿠로시오 및 쓰시마 난류의 영

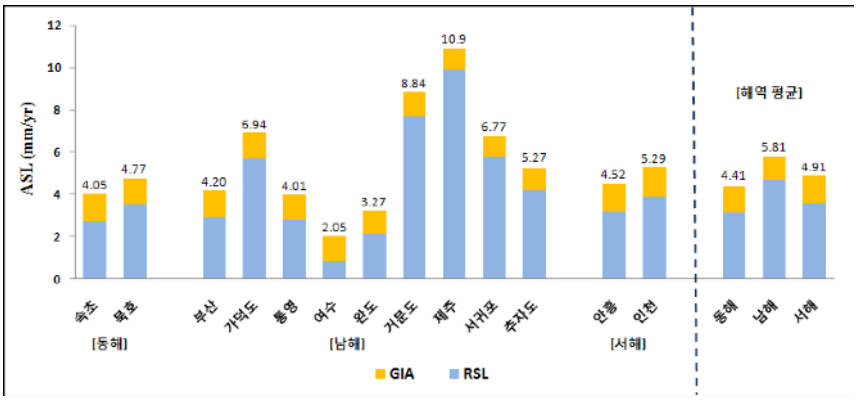

Fig. 4. The absolute sea level rates after GIA corrections.

Table 3. The absolute sea level rates in and near the Jeju island

조위관측소	RSL (mm/yr)	GIA (ICE-5G) (mm/yr)	ASL (RSL+GIA) (mm/yr)	해역평균 RSL (mm/yr)	해역평균 ASL (mm/yr)
거문도	7.72	1.12	8.84		
제주	9.88	1.02	10.9	7.79	8.84
서귀포	5.78	0.99	6.77		

향을 받는 해역으로 이러한 난류의 영향으로 수온 상승에 의한 열팽창 효과가 발생함에 따른 것으로 판단되며, 국립해양조사원(2009)에서는 열팽창에 의한 해수면 상승률을 남해 0.44 mm/yr, 동해 0.32 mm/yr, 서해 0.26 mm/yr로 보고하였다. 따라서 추후 제주 해역의 조위자료에 대한 다양한 분석을 통해 제주 해역에서 높은 상대해수면 상승속도를 보이는 이유를 파악해야 하며, 상대해수면 자료 분석 방법의 다양화를 통해 남해안의 조위관측소 조위자료와 제주 해역 조위자료의 구분되는 특성에 대한 분석이 필요하다. 또한 2006년에 제주 조위관측소에 설치된 GPS 상시관측소와 제주도 내륙에 위치한 GPS 상시관측소 자료를 정밀 분석하여 제주도 일대에서 지각의 하강이 발생하고 있는지 여부를 파악해야 할 것이다.

최근 16년 동안의 한반도 해역에 대한 절대해수면 상승률을 산출한 결과 평균 5.0 mm/yr로 나타났으며, 이와 같은 결과는 AVISO에서 1993년부터 2008년까지 위성고도계 자료를 이용하여 발표한 전지구 평균 해수면 상승률 3.3 mm/yr보다 약 1.7 mm/yr 높은 상승속도이다. 좀 더 정확한 결과 비교를 위해 국립해양조사원(2009)에서 한반도 인근 해역에 대한 위성고도계 TOPEX/Poseidon과 Jason-1의 자료를 1993년부터 2008년까지 분석하여 산출한 결과와 해역별로 비교하였다. 위성고도계에 의한 해역별 상승률은 동해 4.4 mm/yr, 남해 4.4 mm/yr(제주 해역 포함), 서해 3.5 mm/yr, 제주 해역 4.8 mm/yr로 산출되었다. 이러한 위성고도계기반 절대해수면 상승률을 GIA 지각변동을 고려한 조위자료 기반의 해역평균 절대해수면 상승속도와 비교하면 동해의 경우 거의 유사한 속도를 나타내는 반면, 서해 및 남해의 경우는 1.4 mm/yr 차이가 존재하고 제주 해역의 경우 4 mm/yr의 큰 차이를 나타낸다(Fig. 5). 이와 같은 결과는 각 해역별로 분석에 사용된 조위관측소의 수는 매우 적고 연안에 분포되어 있는 반면, 위성고도계는 외해에서의 넓은 지역을 대상으로 해수면 상승률 산정하기 때문이다. 또한 이 연구에서는 조위관측소의 절대해수면 산정을 위해서 장기적인 해수면 변화에 기여하는 빙하 소멸에 의한 수직 지각변동인 GIA만을 고려하였다. 따라서 향후에는 GPS 상시관측소 자료로부터 GIA에 의한 지각변동 외에 다른 요인으로 발생되는 지각변동을 보다 정밀하게 산출할 필요가 있다. 이와 더불어 위성고도계 자료의 시계열 정밀분석, 수온 및 염분 자료 활용 그리고 해양모델과의 비교 분석 등을 통하여 보다 정확한 절대해수면 산출이 필요할 것으로 판단된다.

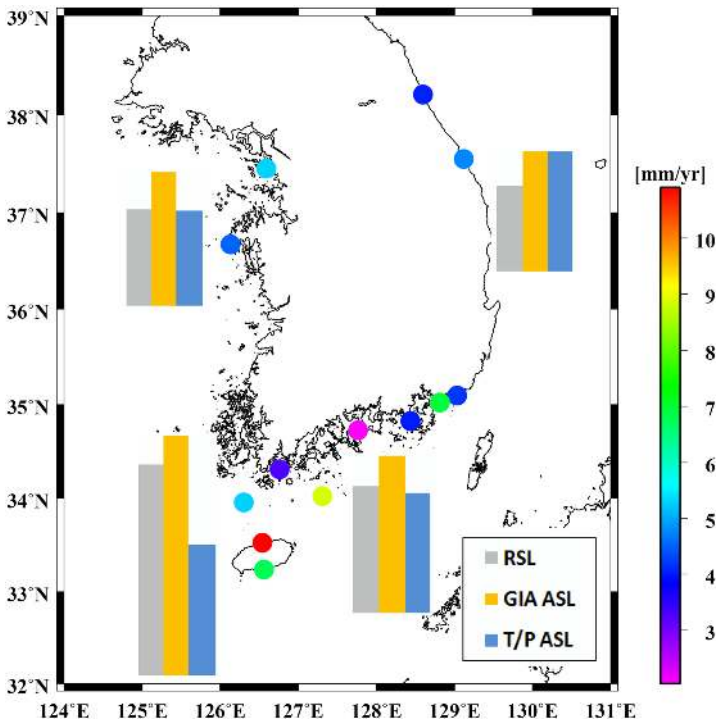

Fig. 5. The absolute sea level rates after GIA corrections of 13 tide gauges and bar graphs for the sea level rates of each coastal region.

결 론

이 연구에서는 전지구 Ice model인 Peltier의 ICE-3G와 ICE-5G 모델을 기반으로 한 Mitrovica and Milne(2003)의 GIA 모델을 사용하여 한반도 지역의 GIA 지각변동 속도를 분석하였다. 그 결과 ICE-3G 모델의 경우 한반도 GIA 수직 지각변동은 평균 0.33 mm/yr, ICE-5G 모델의 경우 평균 1.21 mm/yr의 속도로 지각변위가 발생하고 있음을 확인하였다. Ice model의 개선에 따라 한반도의 경우에도 GIA가 간과할 수 없는 절대해수면 상승요인이라고 판단하여, 국립해양조사원에서 제공한 13개 조위관측소의 상대해수면 변동률에서 ICE-5G 모델에 의한 GIA 지각변동 속도를 보정하여 절대해수면 변동률을 결정하였다. 그 결과 GIA 지각변동 속도를 보정한 절대해수면 상승속도는 평균 5 mm/yr로 계산되었다. 이 결과는 전지구 평균해수면 상승률 3.3 mm/yr보다 약 1.7 mm/yr 높은 상승속도이며, 위성고도계 관측 자료에서 산출된 한반도 지역 절대해수면 상승속도인 평균 4.1 mm/yr와 비교하여 0.9 mm/yr의 차이를 나타냄을 확인하였다. 이러한 차이가 발생한 원인으로는 이 연구에서 절대해수면 상승률 분석에 사용된 조위관측소의 위치 및 지점 수가 위성고도계와 비교하여 연안에만 분포되어 있고 그 수가 매우 적다는 사실을 들 수 있다. 따라서 향후 조위자료를 이용한 상대해수면 및 지각변동이 보정된 절대해수면 상승률을 보다 정밀하게 산출하기 위해서는 해수면 변동에 영향을 미치는 다양한 요인들에 대한 정밀한 분석이 필요하다. 그리고 도서지역을 포함한 관측망의 확대뿐만 아니라 GIA 이외의 지각변동 요인에 대한 분석을 위해 현재 국립해양조사원 설치 운영 중인 정밀 GPS 상시관측소를 확대 구축하여 GPS 상시관측소 자료에 의한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 “국토해양부 국립해양조사원의 기후변화 적응 해양기반 구축(과제명: 해수면 변동 정밀 분석 및 예측)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

국립해양조사원, 2009, 해수면 변동 정밀분석 및 예측. 국토해양부 국립해양조사원, 11-1611234-000049-10, 155 p.

김주환, 2009, 지형학-기후지형학. 동국대학교출판부, 서울, 438 p.

Argus, D.F., Peltier, W.R., and Watkins, M.M., 1999, Glacial isostatic adjustment observed using very long baseline interferometry and satellite laser ranging geodesy. Journal of Geophysical Research, 104, 29077-29093.

Baker, T.F., 1993, Absolute sea level measurements, climate change and vertical crustal movements. Global Planetary Change, 8, 149-159.

Bevis, M., Kendrick, E., Smalley Jr,R., Dalziel, I., Caccamise, D., Sasgen, I., Helsen, M., Taylor, F.W., Zhou, H., Brown, A., Raleigh, D., Willis, M., Wilson, T., and Konfal, S., 2009, Geodetic measurements of vertical crustal velocity in West Antarctica and the implications for ice mass balance. Geochemistry Geophysics Geosystems, 10, Q10005.

Clark, J.A., Farrell, W.E., and Peltier, W.R., 1978, Global changes in postglacial sea level: A numerical calculation. Quaternary Research, 9, 265-287.

Craymer, M.R., Henton, J.A., and Piraszewksi, M., 2009, Predicting present-day rates of glacial isostatic adjustment using a smoothed GPS-based velocity field for the reconciliation of NAD83 reference frames in Canada. Workshop on Monitoring North American Geoid Change. http://www.ngs.noaa.gov/GRAV-D/2009 Workshop/Presentations/Henton_NAD83GPS09.pdf (검색일: 2009. 5. 23.)

Dahlen, F.A., 1976, The passive influence of the oceans upon the rotation of the Earth. Geophys. Journal of the Royal Astronomical Society, 46, 363-406.

Dziewonski, A.M. and Anderson, D.L., 1981, Preliminary Reference Earth Model. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 25, 297-356.

Farrell, W.E. and Clarke, J.A., 1976, On postglacial sea level. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 46, 647-667.

Forte, A.M. and Peltier, W.R., 1994, The kinematics and dynamics of poloidal-toroidal coupling in mantle flow: The importance of surface plates and lateral viscosity variations. Advances in Geophysics, 36, 94-119.

Johansson, J.M., Davis, J.L., Scherneck, H-G, Milne, G.A., and Vermeer, M., 2002, Continuous GPS measurements of postglacial adjustment in Fennoscandia: I. Geodetic Results. Journal of Geophysical Research, 107, 2157-2184.

Justino, F., Timmermann, A., Merkel, U., and Perltier, W.R., 2006, An Initial Intercomparison of Atmospheric and Oceanic Climatology for the ICE-5G and ICE-4G Models of LGM Paleotopography. Jounrnal of Climate, 19, 3-14.

Mitrovica, J.X., Milne, G.A., and Davis, J.L., 2001, Glacial isostatic adjustment on a rotating earth. Geophysical Journal International, 147, 562-578.

Mitrovica, J.X. and Milne, G.A., 2003, On post-glacial sea level: I. General theory. Geophysical Journal International, 154, 253-267.

Peltier, W.R., 1974, The impulse response of a Maxwell Earth. Reviews of Geophysics and Space Physics, 12, 649-669.

Peltier, W.R., 1976, Glacial isostatic adjustment II: The inverse problem. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 46, 669-706.

Peltier, W.R. and Andrews, J.T., 1976, Glacial isostatic adjustment I: The forward problem. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 46, 605-646.

Peltier, W.R., Farrell, W.E., and Clark, J.A., 1978, Glacial isostasy and relative sea level: A global finite element model. Tectonophysics, 50, 81-110.

Peltier, W.R., 1994, Ice age paleotopography. Science, 265, 195-201.

Peltier, W.R., 1995, VLBI baselines from the ICE-4G model of postglacial rebound. Geophysical Research Letters, 22, 465-468.

Peltier, W.R., 1996, Mantle viscosity and ice age ice sheet topography. Science, 273, 1359-1364.

Peltier, W.R., 1998, Postglacial variations in the level of the sea: Implications for climate dynamics and solid-earth geophysics. Reviews of Geophysics, 36, 603-689.

Peltier, W.R., 2002, Global glacial isostatic adjustment: Palaeogeodetic and space-geodetic tests of the ICE-4G (VM2) model. Journal of Quaternary Science, 17, 491-510.

Peltier, W.R., Shennan, I., Drummond, R., and Horton, B., 2002, On the postglacial isostatic adjustment of the British Isles and the shallow viscoelastic structure of the Earth. Geophysical Journal International, 148, 443-475.

Peltier, W.R., 2004, Global glacial isostasy and the surface of the ice age Earth: The ICE-5G (VM2) model and GRACE. Annual Review of Earth and Planetary Science, 32, 111-149.

Rostami, K., Peltier, W.R., and Mangini, A., 2000, Quaternary marine terraces, sea level changes and uplift history of Patagonia, Argentina: Comparisons with predictions of the ICE-4G (VM2) model of the global process of glacial isostatic adjustment. Quaternary Science Reviews, 19, 1495-1525.

Tarasov, L. and Peltier, W.R., 2002, Greenland glacial history and local geodynamic consequences. Geophysical Journal International, 150, 198-229.

Tushingham, A.M. and Peltier, W.R., 1991, ICE-3G: A new global model of late Pleistocene deglaciation based

upon geophysical predictions of post-glacial relative sea level change. Journal of Geophysical Research, 96, 4497-4523.

Peltier homepage: http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/~peltier/data.php (검색일: 2009. 3. 11.)

2011년 7월 6일 접수
2011년 9월 1일 수정원고 접수
2011년 11월 14일 채택

부 록

후빙기조륙운동 계산

ICE-3G 모델은 상대해수면 변화율을 계산하기 위해서 식 (1)의 해수면 방정식을 사용하며, 식 (1)로부터 빙하 소멸이 발생되는 지점에서의 해면(ocean surface)상의 퍼텐셜변화를 컨볼루션(convolution) 적분으로 계산해준다 (Tushingham and Peltier, 1991).

$$S(\theta,\lambda,t) = C(\theta,\lambda,t)\left[\int_{-\infty}^{t} dt' \int\int_{\Omega} d\Omega' L(\theta',\lambda',t') G^{L}(\gamma, t-t') + \frac{\Delta\Phi(t)}{g}\right] \tag{1}$$

이 식에서 S는 시간 t의 함수로 위경도 (θ,λ)에서의 고체지구 표면 변형에 따른 해수면 변화이며, (θ,λ)와 (θ',λ')는 각각 field point와 source point에서의 위경도이다. C는 해양 함수(ocean function)로 육지에서는 0이고, 해양에서는 시간에 대한 함수로 표현된다. 그리고 Ω는 위경도상의 지구 표면을 나타낸다. 식 (1)의 마지막 항 $\Delta\Phi(t)$는 대양저(ocean basins)의 해수질량과 빙하가 소멸됨으로 생성되는 해수의 질량이 일치한다는 질량보존을 설명하기 위한 함수이고 g는 중력가속도이다(Peltier, 2004).

식 (1)의 L은 빙하와 해수에 의한 표면질량 하중으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Peltier, 2004).

$$L(\theta,\lambda,t) = \rho_I I(\theta,\lambda,t) + \rho_W S(\theta,\lambda,t) \tag{2}$$

여기서 ρ_I와 I는 각각 빙하 밀도와 빙하 두께이고 ρ_W와 S는 해수 밀도와 상대해수면이다. 또한 식 (1)의 G^L는 표면질량 하중과 관련된 지오이드 변화를 나타내는 그린 함수(Green function)이며 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$G^{L}(\gamma, t-t') = \frac{a}{m_e}\sum_{l=0}^{\infty}(1 + k_l^L(t) - h_l^L(t)) P_l(\cos\gamma) \tag{3}$$

a, m_e, γ는 각각 평균 지구반지름, 평균 지구질량, field point와 source point 사이의 각거리이다. P_l는 르장드르 다항식(Legendre polynomial)이며 $k_l^L(t)$, $h_l^L(t)$는 표면질량 하중의 점탄성 Love number이다(Peltier, 2004).

GIA에 의한 3차원 지각변위는 표면질량 하중과 그린 함수의 컨볼루션 적분으로 계산되는 식 (1)을 구함에 따라 예측된다. 수직 변위 스칼라(scalar) U와 수평 변위 벡터(vector) $\underline{V}$는 각각 식 (4a)와 식(4b)를 이용하여 계산한다(Peltier, 1995).

$$U(\theta,\lambda,t) = \sum_{l=o}^{\infty}\sum_{m=-l}^{+l}\left[\frac{4\pi a^3}{(2l+1)m_e}\left(L_{lm} h_l^{E,L} + \sum_{k=1}^{k(l)} q_k^l \beta_{lm}^k\right)\right] Y_{lm} \tag{4a}$$

$$\underline{V}(\theta,\lambda,t) = \sum_{l=o}^{\infty}\sum_{m=-l}^{+l}\left[\frac{4\pi a^3}{(2l+1)m_e}\left(L_{lm} l_l^{E,L} + \sum_{k=1}^{k(l)} t_k^l \beta_{lm}^k\right)\right] \underline{\nabla} Y_{lm} \tag{4b}$$

식 (4a)와 (4b)에서 L_{lm}은 표면질량 하중 L의 구면조화 전개 계수이며 q_k^l, t_k^l는 극(poles)에서의 잔여 값이다. 또한 $h_l^{E,L}$, $l_l^{E,L}$는 표면질량 L 하중의 Love number h와 l 스펙트럼의 탄성 점근선(elastic asymptote)이며, β_{lm}^k는 LGM 이전의 하중이력을 나타내기 위한 함수이다. 식 (4a)의 Y_{lm}는 구면조화함수(spherical harmonics)이고 (4b)의 $\underline{\nabla}$는 gradient이다(Peltier, 1995).

Peltier(1995)는 ICE-3G 모델을 통한 GIA 예측 값과 Barbados 지역의 해수면 기록을 일치시키기 위해 LGM을 18,000 years(B.P.)에서 21,000 years(B.P.)로 조정하였다. 또한 구면캡(spherical cap)의 형태로 GIA 적용범위를 추정함으로써 발생되는 비균질성을 제거하기 위해 적용범위에 대한 수평방향 분할(horizontal discretization)을 수정하여 ICE-4G 모델로 개선하였다(Peltier, 1995). 이를 반영하여 ICE-4G 모델에서는 식 (4b)의 구면조화

함수의 gradient $\underline{\nabla} Y_{lm}$은 Forte and Peltier(1994)에 의해 제공되는 식 (5)를 사용하여 산출한다.

$$\underline{\nabla} Y_{lm} = l\sqrt{\frac{l+1}{2l+1}} Y^m_{ll+1} + (l+1)\sqrt{\frac{l}{2l+1}} Y^m_{ll+1} \tag{5}$$

Peltier(1998, 2002)는 ICE-4G 모델에 지구 자전으로 인한 원심퍼텐셜(centrifugal potential)과 원심력(centrifugal force)의 변화를 반영하여 ICE-5G 모델로 개선하였다. ICE-5G 모델에서 개선된 해수면 방정식은 식 (6)과 같다(Peltier, 2002, 2004).

$$S(\theta,\lambda,t) = C(\theta,\lambda,t)\left[\int_{-\infty}^{t} dt' \int\int_{\Omega} d\Omega' \{L(\theta',\lambda',t')G^L(\gamma,t-t') + T(\theta',\lambda',t')G^T(\gamma,t-t')\} + \frac{\Delta\Phi(t)}{g}\right] \tag{6}$$

식 (6)에서 T는 지구 자전에 의한 해면과 고체지구에 가해지는 원심퍼텐셜의 변화이며 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다(Peltier, 2004).

$$T(\theta,\lambda,t) = T_{00}(t)Y_{00}(\theta,\lambda) + \sum_{m=-1}^{+1} T_{2m}Y_{2m}(\theta,\lambda) \tag{7}$$

식 (7)의 계수 T_{lm}은 Dahlen (1976)의 결과를 이용한 아래의 식을 이용하여 계산한다(Peltier, 2002, 2004).

$$T_{00} = \frac{2}{3}\omega_3(t)\Omega_o a^2 \tag{7a}$$

$$T_{20} = -\frac{1}{3}\omega_3(t)\Omega_o a^2\sqrt{4/5} \tag{7b}$$

$$T_{2,-1} = -(\omega_1(t) + i\omega_2(t))(\Omega_o a^2/2)\sqrt{2/15} \tag{7c}$$

$$T_{2,+1} = (\omega_1(t) - i\omega_2(t))(\Omega_o a^2/2)\sqrt{2/15} \tag{7d}$$

식 (7a)-(7d)에서 $\omega_i(t)(i=1,2,3)$는 지구의 각속도 Ω_o에서의 섭동(perturbations) 요소이다. 식 (6)에서 G^T는 원심퍼텐셜로 인한 조석(tidal) 하중과 관련된 고체지구 표면의 변화를 나타내는 그린 함수이며 식 (8)과 같다.

$$G^T(\gamma,t-t') = \frac{1}{g}\sum_{l=0}^{\infty}[1 + k_l^T(t) - h_l^T(t)]P_l(\cos\gamma) \tag{8}$$

식 (8)의 $k_l^T(t)$, $h_l^T(t)$는 조석 Love number이다. ICE-5G에서 3차원 지각변위는 원심력 변화를 반영한 식 (9a)와 (9b)를 이용하여 구할 수 있다(Peltier, 2002, 2004).

$$U(\theta,\lambda,t) = \sum_{l=o}^{\infty}\sum_{m=-l}^{+l}\left[\frac{4\pi a^3}{(2l+1)m_e}\left(L_{lm}h_l^{E,L} + \sum_{k=1}^{k(l)} q_k^l \beta_{lm}^k\right) + \frac{4\pi}{(2l+1)g}\left(T_{lm}h_l^{E,T} + \sum_{k=1}^{k(l)} q'^E_k \beta'^k_{lm}\right)\right] Y_{lm} \tag{9a}$$

$$\underline{V}(\theta,\lambda,t) = \sum_{l=o}^{\infty}\sum_{m=-l}^{+l}\left[\frac{4\pi a^3}{(2l+1)m_e}\left(L_{lm}l_l^{E,L} + \sum_{k=1}^{k(l)} t_k^l \beta_{lm}^k\right) + \frac{4\pi}{(2l+1)g}\left(T_{lm}l_l^{E,T} + \sum_{k=1}^{k(l)} t'^E_k \beta'^k_{lm}\right)\right] \underline{\nabla} Y_{lm} \tag{9b}$$

식 (9a)와 (9b)에서 T_{lm}는 원심퍼텐셜 T의 구면조화 전개 계수이고 q'^l_k, t'^l_k는 극(poles)에서의 잔여 값이다. $h_l^{E,T}$, $l_l^{E,T}$는 원심퍼텐셜 T 하중의 Love number h와 l 스펙트럼의 탄성 점근선이다(Peltier, 2002, 2004).