

동아시아지역 수직기준 통일을 위한 해면지형 결정 및 분석

Determination and Analysis Sea Surface Topography for Unification Vertical Datum in East-Asia Area

황 학¹⁾ · 윤홍식²⁾ · 이동하³⁾

Huang, He · Yun, Hong Sic · Lee, Dong Ha

Abstract

The SSTop (Sea Surface Topography) provides an estimate of the large scale structure of the deviations between the geoid height and the mean sea surface in terms of a normalized surface spherical harmonic series. The SSTop is the key information which has been used to determine the shape of earth, geoid, current and tide etc. Also, the SSTop is a basic source for the unification of vertical datums at the different height systems which were established according to the their respective purposes. In order to unify the vertical datum around the East-Asian (E-A) region (covers the area: 20°-45°N and 110°-140°E), we estimated the value of SSTop in the E-A region using the predicted values of mean sea surface (from KMSS04) and geoid height (from EGM96 and EIGEN-GL04C) and analyzed to aspect of SSTop at 5 tidal stations (InCheon, JeJu, QingDao, Aburatsubo, KeeLung) with the estimated values of each station previously. The result from this study indicates that the SSTop in the E-A region is relatively stable except for the area around the Japanese and Ryukyu deep, and also shows that the distribution of values of SSTop is ranged from 40 to 60 cm at tidal stations except InCheon station.

Keywords : Sea Surface Topography, EGM96, EIGEN-GL04C, KMSS04, Geoid height

초 록

해면지형은 지구형상 및 지오이드의 결정, 해류, 조석의 결정에 중요한 역할을 할 뿐만 아니라 세계수직기준 통일 및 대륙 간, 지역 간, 육지와 도서지역 사이의 수직기준을 통일하기 위한 기초자료이기도 하다. 본 연구는 동아시아지역의 수직기준 통일을 위한 기초연구로 고해상도 평균해면모델인 KMSS04를 사용하여 평균해면고를 계산하고, 전 지구 중력장모델 EGM96과 EIGEN-GL04C를 이용하여 지오이드고를 구한 후 이들을 통하여 동아시아지역 및 각 조위관측소에서의 평균해면, 지오이드고 및 해면지형을 결정하고 분석하였다. 연구결과 일본해구와 Ryukyu해구 부근을 제외한 지역에서 해면지형은 비교적 안정적이며, InCheon 조위관측소를 제외한 기타 조위관측소에서는 모두 40~60cm에 가까운 해면지형의 기록을 나타내었다.

핵심어 : 해면지형, EGM96, EIGEN-GL04C, KMSS04, 지오이드고

1. 서 론

현재의 공간측지기술은 대륙 및 전 지구 범위 내에서 고정밀도의 기하학적 위치결정이 가능케 하지만 물리적 높이 성분을 포함하는 중력장 파라미터 결정의 정밀도는

기하학적 위치결정에 비해 2~3차수의 등급이 낮은 상황이다. 이는 지오이드를 기준으로 하는 측지학적 수직기준의 정밀도에 큰 영향을 미치고 있다. 실제로 전 세계 100여개 나라에서 채용하고 있는 지역수직기준은 동일한 지오이드면이 아닌 각 지역에 위치한 조위관측소의 epoch

1) 정회원 · 성균관대학교 건설환경연구소 연구원, 공학석사(E-mail:duejihh@gmail.com)

2) 연결저자 · 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 부교수, 공학박사(E-mail:yoonhs@skku.edu)

3) 정회원 · 성균관대학교 건설환경연구소 연구원, 공학석사(E-mail:dhlee@geo.skku.ac.kr)

와 주기가 서로 다른 관측자료를 토대로 하고 있다. 또한, 해면지형의 객관적인 존재로 인한 영향도 받게 되어 수직 기준 사이에 차이를 가지고 있으며, 그 높이차가 최대 2m에 달하고 있다(管泽霖 등, 1996).

평균동적해면(Mean Dynamic Ocean Topography) 또는 해면지형은 평균해면과 지오이드면의 차이로 표현되며(Zhang, 2004), 지구형상 및 지오이드의 결정, 지구 중력장모델의 정밀화와 해류, 조석의 결정에 중요한 역할을 한다. 또한, 해면지형의 산출성과는 세계수직기준(Global Vertical Datum) 통일 및 대륙 간, 지역 간, 육지와 도서 지역 사이의 수직기준을 통일하기 위한 기초자료로 활용되기도 한다(Poutanen, 2000). 해면지형은 지오이드면과 비슷한 양상의 주파특성을 가지고 있으며 대부분 장파장 영역에 분포되어 있어 10~20km 범위에서는 거의 변화가 없다. Rummel(1993)은 평균해수면에 포함되어 있는 지오이드와 해면지형을 분리하는 일은 불가능을 의미하는 “Munchhausen 문제”라고 하였다. 하지만 TOPEX/Poseidon, ERS-1/2, Jason-1, Envisat 등 위성고도계의 활약과 CHAMP, GRACE와 같은 지구중력장 관측 위성의 발사로 고해상도의 평균해면모델과 전 지구 중력장모델이 개발되어 해면지형의 결정이 가능하게 되었다.

해면지형의 계산방법은 각 조위관측소간 연결수준측량을 통한 수준측량법; 해수면의 온도, 염도, 대기압 및 해류 속도 등 요소를 고려하여 결정하는 해양학적 방법; 위성고도계의 해수면고 관측결과를 이용하는 위성고도계법 등으로 구분된다. 수준측량법은 각 조위관측소간 해면지형의 상대적 차이 즉 해면경사를 구하는 것으로 정해진 조위관측소의 평균해면을 기준으로 기타 조위관측소가 위치한 점에서의 해면지형만을 결정할 수밖에 없다는 단점이 있다. 따라서 광활한 해역에서의 해면지형은 해양학적 방법 및 위성고도계법을 많이 사용하고 있고, 측지학적 연구에서는 후자를 통한 해면지형 결정이 우위를 차지하고 있으며, 최근에는 위성고도계자료를 이용하여 개발한 평균해면모델과 전 지구 중력장모델을 통한 결정방법을 활용하고 있다.

본 연구는 최신 평균해면모델 KMSS04, 전 지구 중력장모델 EGM96 및 EIGEN-GL04C를 이용하여 동아시아지역에 대한 평균해면고(SSH)와 지오이드고(N)를 각각 계산하여 해면지형을 결정 및 분석하였으며, 동아시아 지역 수직기준 통일을 위한 기초연구의 일환으로 한국(인천 및 제주), 중국, 일본, 대만의 수직기준 결정에 사용된 조위관측소의 해면지형 값을 계산하고 분석하였다.

2. 연구대상지역 및 사용모델

2.1 연구대상지역

본 연구는 한국, 중국, 일본 및 대만을 포함하는 동경 110°~145°, 북위 20°~45°범위의 동아시아지역을 연구 대상으로 하였으며, 동중국해(East China Sea), 황해(Yellow Sea), 동해(East Sea) 및 필리핀해(Philippine Sea) 등 해역이 포함된다.

각 지역별 수직기준을 결정하는 조위관측소에는 한국의 “인천만 평균해면”을 결정하는 인천(InCheon)조위관측소, 한반도와의 직접수준측량이 불가능하여 “제주만 평균해면”을 독립적인 수직기준면으로 사용하고 있는 제주도의 제주(JeJu)조위관측소, “황해 평균해면”을 결정하는 중국 靑島(QingDao)의 大港(DaGang)조위관측소, 일본의 “동경만 평균해면”을 관측하는 油壺(Aburatsubo)조위관측소 및 “基隆항 평균해면”을 결정하는 대만의 基隆(KeeLung)조위관측소가 포함된다. 그림 1은 연구대상지역 및 조위관측소의 위치를 나타낸 것이다.

2.2 평균해면모델: KMSS04

1978년에 발사된 Seasat를 발단으로 다양한 위성고도계가 지난 30년간 방대한 양의 해면고도자료를 제공하여 왔으며, 이러한 자료를 바탕으로 CLS98, CLS_SHOM98, GSFC00, CLS01, KMS01 등 평균해면 모델이 개발되어 제공되고 있다.

최근 Andersen 등(2004)이 개발한 평균해면모델 KMSS04는 공간해상도가 2'(적도부근에서 4km)이며 TOPEX/Poseidon(1993~2001, cyc.10~342), ERS2(1995.5~2001.5, cyc.1~74), TOPEX/Poseidon Tandem Mission(2002~2003, 0.7년), GFO(2000~2001, 2년), ERS-1 GM(1994~1995, 336일), Geosat GM(1985~1986, 1.5년) 등 다양한 위성고도계로부터 획득된 데이터를 통합하여 개발되었다.

KMSS04의 개발에는 Remove/Restore기법이 이용되었으며 총 3단계를 거쳐 장파장부분(>500km), 중파장부분(100~500km)과 20~100km의 고해상도 부분을 추출하였다. 기존에 개발된 평균해면모델은 대부분 제한된 기간 내의 TOPEX/Poseidon자료만을 이용하여 개발하였기에 ±40cm의 평균해수면 변동을 유발한 1997-1998년 El Niño현상의 영향을 포함하고 있다(Fang, 2003). 하지만 KMSS04모델의 개발에서는 비교적 긴 주기인 9.9년의 TOPEX/Poseidon 관측자료를 이용하여 해수면 경년변화

에 대한 보정을 수행함으로써 평균해면모델의 정확도를 향상시켰다(Andersen 등, 2005).

2.3 전 지구 중력장모델: EGM96, EIGEN-GL04C

1966년의 SE1모델을 시작으로 현재까지 개발된 전 지구 중력장모델은 100여개에 달한다. 그중 본 연구에 이용된 EGM96은 가장 보편적으로 사용되고 있는 중력장모델이고 EIGEN-GL04C는 2006년에 개발되어 발표된 최신 중력장모델이다.

EGM96은 2000년 전후 각국의 지오이드모델 계산에 가장 많이 활용되어온 전 지구 중력장모델로 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)과 미국방성 지도제작국(Defence Mapping Agency, DMA 현 NIMA) 및 오하이오 주립대학(Ohio State University)에서 공동으로 개발한 360차의 구면조화함수 계수모델이다. 1996년에 개발된 EGM96은 여러 나라 및 기관에서 보유하고 있는 지상 및 해상 데이터를 종합하여 모델의 공간 단과 장성분을 결정하였고, Geosat의 중력데이터를 장과장성분으로 활용하였으며, Geosat 위성 관측범위 밖의 해양영역은 ERS-1 데이터를 LSC(Least-Squares Collocation)방법을 이용하여 내삽을 수행하였다.

통합 중력장모델 EIGEN-GL04는 EIGEN-CG03C의 업

그레이드 버전으로 30개월(2003.2~2005.7)의 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment) 관측데이터, 24개월(2003.2~2005.2)의 LAGEOS(Laser Geodynamics Satellite) 위성데이터와 0.5°×0.5°의 지상중력데이터 및 위성고도계 자료를 합성하여 개발된 360차수의 구면조화함수 계수모델이다(Frank 등, 2006). Ries 등(2006)의 연구에 따르면 정밀궤도 및 해양지오이드의 결정에 있어서 EIGEN-GL04C는 현재 공개적으로 이용이 가능한 전 지구 중력장모델 중 가장 바람직한 선택이다. GRACE는 미국의 NASA와 독일의 DLR(항공우주연구소)가 공동 개발하여 2002년 3월에 발사된 고도 500km를 주회하는 2개의 위성으로 구성되어 획기적인 중력관측미션을 수행하고 있으며, GRACE 위성이 30일간 획득한 지구중력장 데이터는 지난 30년간 축적해 온 모든 중력정보의 양을 초과할 정도로 방대하다(Tapley 등, 2003).

3. 해면지형 계산

해면은 조석과 바람 등의 영향으로 시시각각 변화하고 있으며, 해류의 존재로 인하여 평균해면 또한 지오이드와 완전히 일치하지 않는다. 이러한 차이를 나타내는 해면지

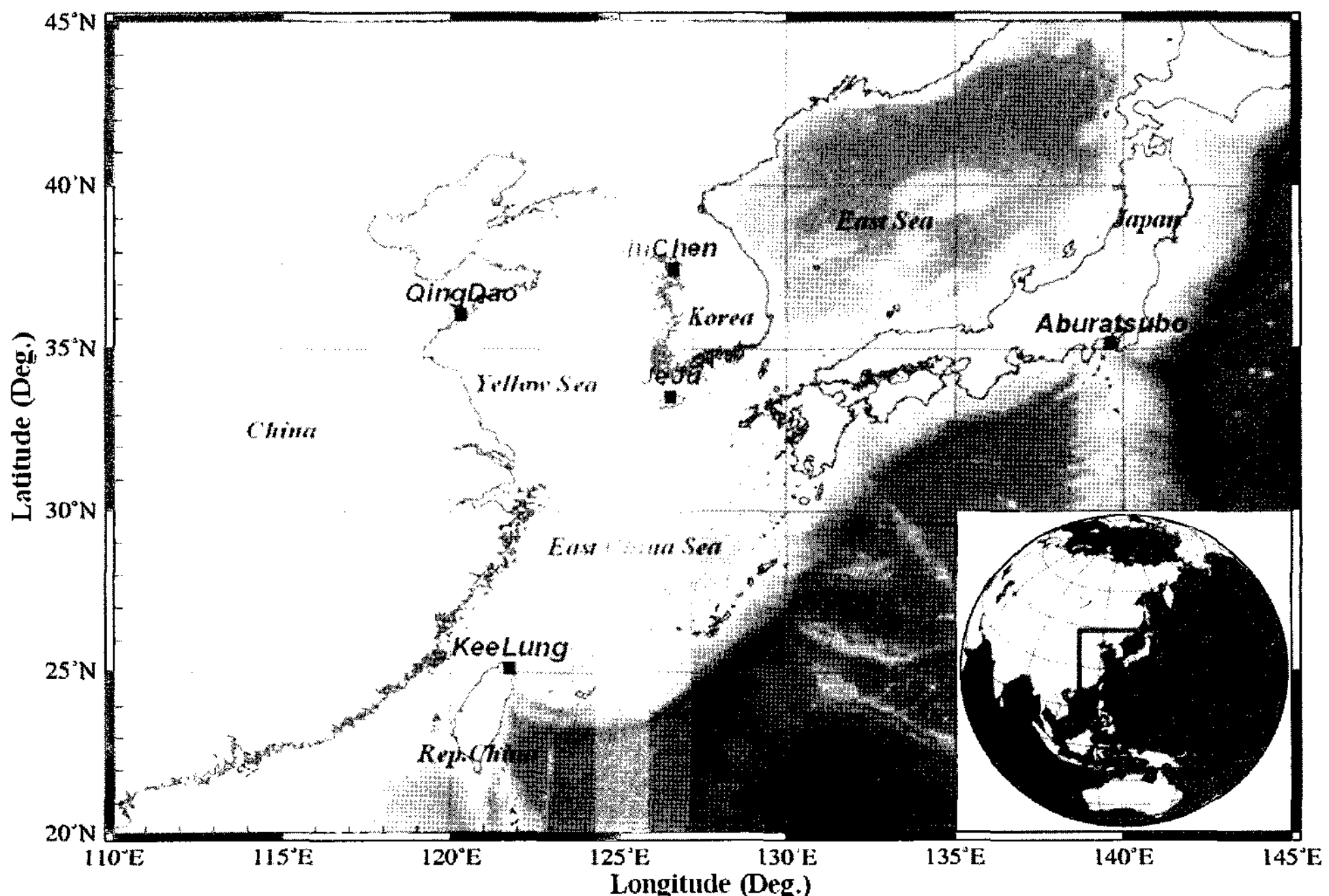


그림 1. 연구지역 및 조위관측소 분포도

형(Sea Surface Topography, SSTop)은 식 1과 그림 2에서 표시한바와 같이 일반적으로 평균해수면(SSH)과 지오이드고(N)의 차이로 표시된다.

$$\text{해면지형(SSTop)} = \text{평균해면고(SSH)} - \text{지오이드고(N)} \quad (1)$$

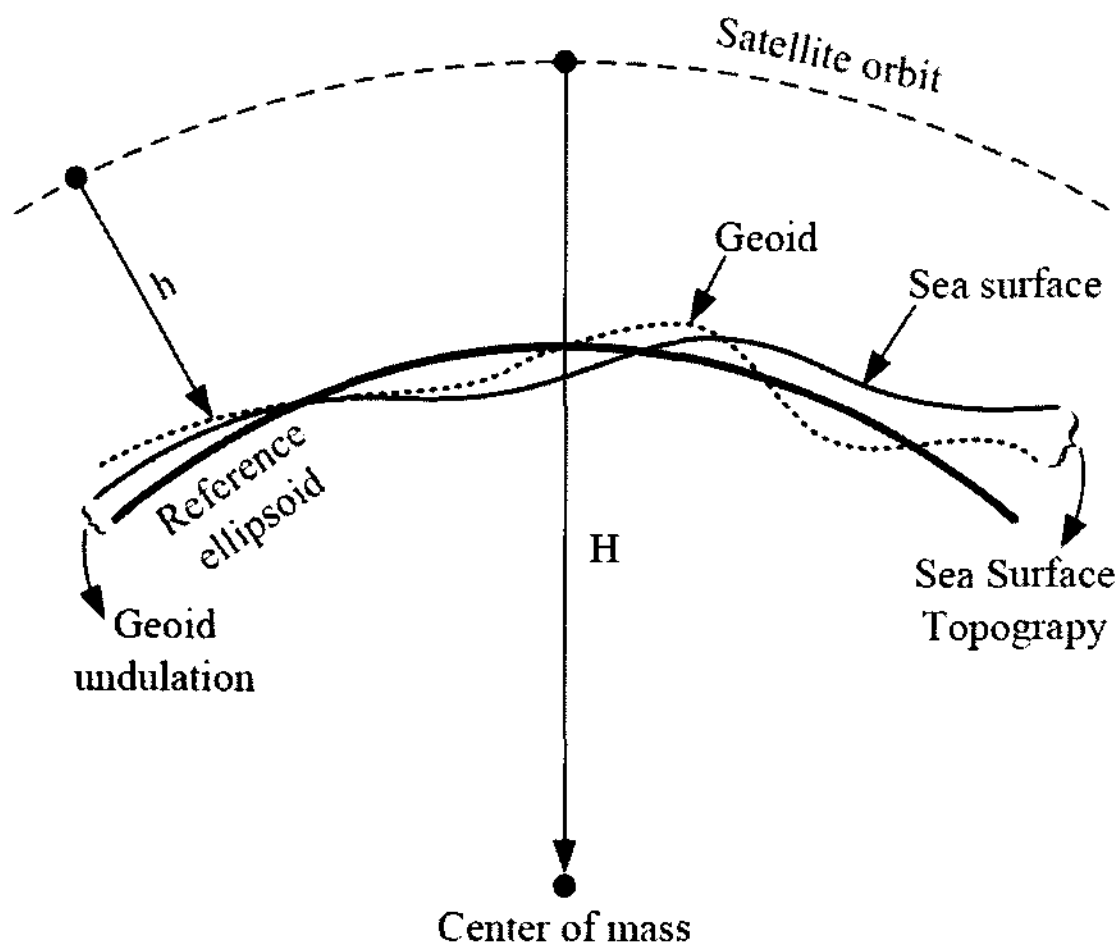


그림 2. 지오이드고, 평균해면 및 해면지형 간 관계

해면지형의 값은 전 세계적으로 약 1~2m에 달하는데 이는 중력이상에 0.3~0.6mgal의 계통오차를 초래할 수 있으며, 따라서 고도이상에도 ±15~50cm의 차이를 가지게 하므로 10cm 이상 정밀도의 지오이드 개발에서 반드시 고려해야 할 요소이다(管泽霖 등, 1996).

3.1 평균해면고(SSH) 계산

평균해면고모델을 이용한 평균해면고는 식 2(윤홍식 등, 2006)를 통하여 계산되며 다음과 같이 표현된다.

$$h(\Phi, \lambda) = \sum_{n=0}^{N_{\max}} A_{nm} \cos(m\lambda) + B_{nm} \sin(m\lambda) \times P_{nm}(\sin\Phi) \quad (2)$$

여기서, λ 와 Φ 는 측지경도와 측지위도를 나타내고, N_{\max} 는 처리되는 구면조화 계수의 최대차수를 의미한다.

해면지형 계산에 필요한 평균해면을 결정하기 위해 KMSS04모델에서 연구대상지역 내 789,301점에 대한 GRS80 타원체를 기준으로 하는 평균해면 값을 2'간격으로 추출하였으며, 계산결과 이 지역에서의 평균해면은 최소 -31.83m에서 최대 52.85m사이의 값을 나타내었고, 평균은 18.92m 및 표준편차는 20.33m로 계산되었다(그림 3 참조). 평균해면의 분포는 대체로 서에서 동으로 가면서 높아지는 양상을 보이고 있으며, 그 변화가 황해, 동해

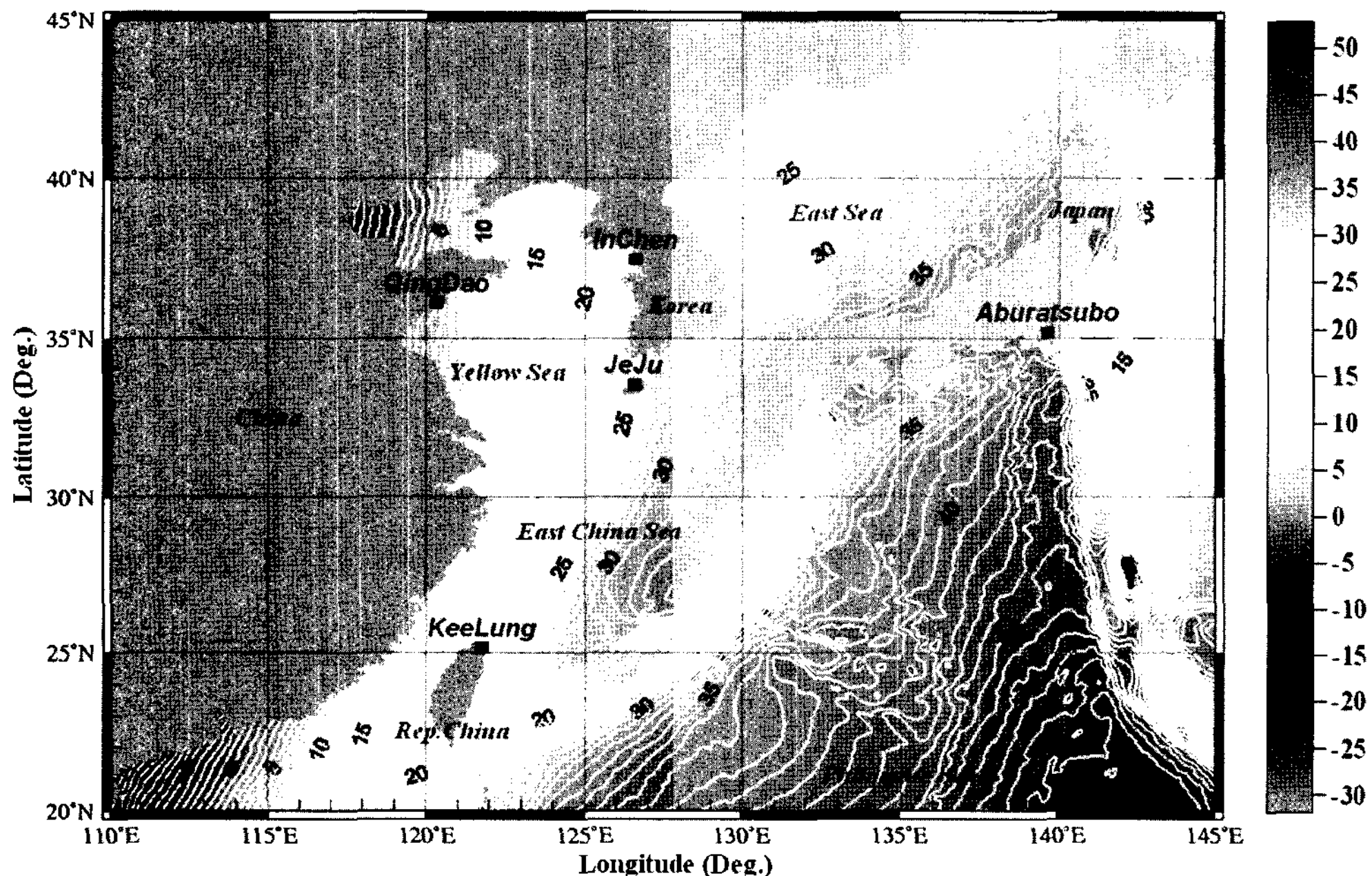


그림 3. KMSS04에서 추출된 평균해면 값(단위: m, 등고선 간격: 1m)

의 중국해역에서는 비교적 고른 편이나 일본해구와 Ryukyu해구 부근에서 급격한 변화를 보이고 있었다.

3.2 지오이드고(N) 계산

정규화 구면조화계수를 이용한 지오이드고는 Featherstone(2002)이 제시한 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$N_{GM} = \frac{GM}{R\gamma} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^{\ell_{max}} (\ell_{max} - 1) [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] \bar{P}_{nm}(\sin\Phi) \quad (3)$$

- 여기서, C_{nm}, S_{nm} : 완전(fully) 정규화한 구면조화 계수,
 P_{nm} : 차수가 n, m인 완전 정규화된 르장드르 계수;
 ℓ_{max} : 최대차수;
 GM : 대기를 포함한 지심인력상수 (GRS80: $3.986\ 005\ 000 \times 10^{14} \text{m}^3/\text{s}^2$);
 R : 지구반경;
 γ : 준거타원체면상의 정규중력 (GRS80: $62\ 636\ 860.85 \text{m}^2/\text{s}^2$);
 λ, Φ : 측지경도와 측지위도.

최근에 개발되는 전 지구 중력장모델은 일반적으로 최대차수가 360까지 구성되어 있는데 중력장모델의 구체적인 활용용도에 따라 해석하는 최대차수가 다르다. Zhang 등(2004)은 파워스펙트럼(Power spectrum)분석을 통하여 지오이드의 대부분이 장파장으로 구성되어 있음을 시사하고, 180차수보다 높은 부분(>200km)이 0.02%에 불과하므로 중력장모델을 200차수까지 계산하여도 충분한 정밀도와 해상도의 결과를 얻을 수 있다는 결론을 내렸으

며, KMSS1과 GGM01C모델을 이용하여 해면지형을 계산하였다. 또한, 윤홍식 등(2006)은 Verogos(2002)등의 연구결과를 참조하여 EGM96으로부터 지오이드고를 최대차수 20차까지 계산하여 사용하였는데, 이는 장파장효과(약 2000km)를 포함하는 평균해면모델 CLS_SHOM과의 차수와 동일한 해상도를 가지도록 하기 위해서였다. 본 연구에서는 이와 같은 연구방법을 종합하여 최대차수를 20, 80, 200 및 360 등 4가지 경우로 지오이드고를 계산하였으며 그 결과를 최대(Max), 최소(Min), 평균(Mean), 평균제곱근(Root Mean Square, RMS), 표준편차(Standard deviation, STD)로 정리하여 표현하였다. 그 중 RMS 및 STD의 계산공식은 다음의 식 (4)과 같다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{N}}; \quad STD = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (4)$$

여기서, x_i 는 관측 값, \bar{x} 는 관측 값들의 평균, N 은 관측 값의 개수를 나타낸다.

표 1과 그림 4에 나타난 것과 같이 최대차수를 20, 80, 200과 360으로 처리한 결과, 20차를 제외한 80, 200, 360에서는 최대, 최소 값에서 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 평균 및 표준편차에서도 거의 동일한 값을 나타나고 있다. 또한, 20차 처리결과에서는 일본해구 및 대만 섬과 일본의 규슈 섬을 잇는 Ryukyu해구지역의 지오이드의 변화를 표현하지 못하고 있지만 해석되는 최대차수의 증가와 함께 일본해구와 Ryukyu해구의 급격한 해저지형의 변화로 인해 지오이드고가 뚜렷하게 변화하는 것을 관찰할 수 있다.

표 1. EGM96 및 EIGEN-GL04C를 이용하여 계산한 지오이드고

Global Potential Model	ℓ_{max}	Geoid Height(m)				
		Max	Min	Mean	RMS	STD
EGM96	20	48.00	-29.93	18.12	26.92	19.91
	80	52.23	-31.58	18.30	27.01	19.86
	200	50.90	-31.58	18.31	27.07	19.94
	360	51.28	-31.69	18.31	27.07	19.95
EIGEN-GL04C	20	48.02	-29.97	18.09	26.89	19.90
	80	52.29	-31.73	18.27	26.98	19.85
	200	50.85	-31.93	18.28	27.04	19.93
	360	51.31	-31.96	18.28	27.05	19.93

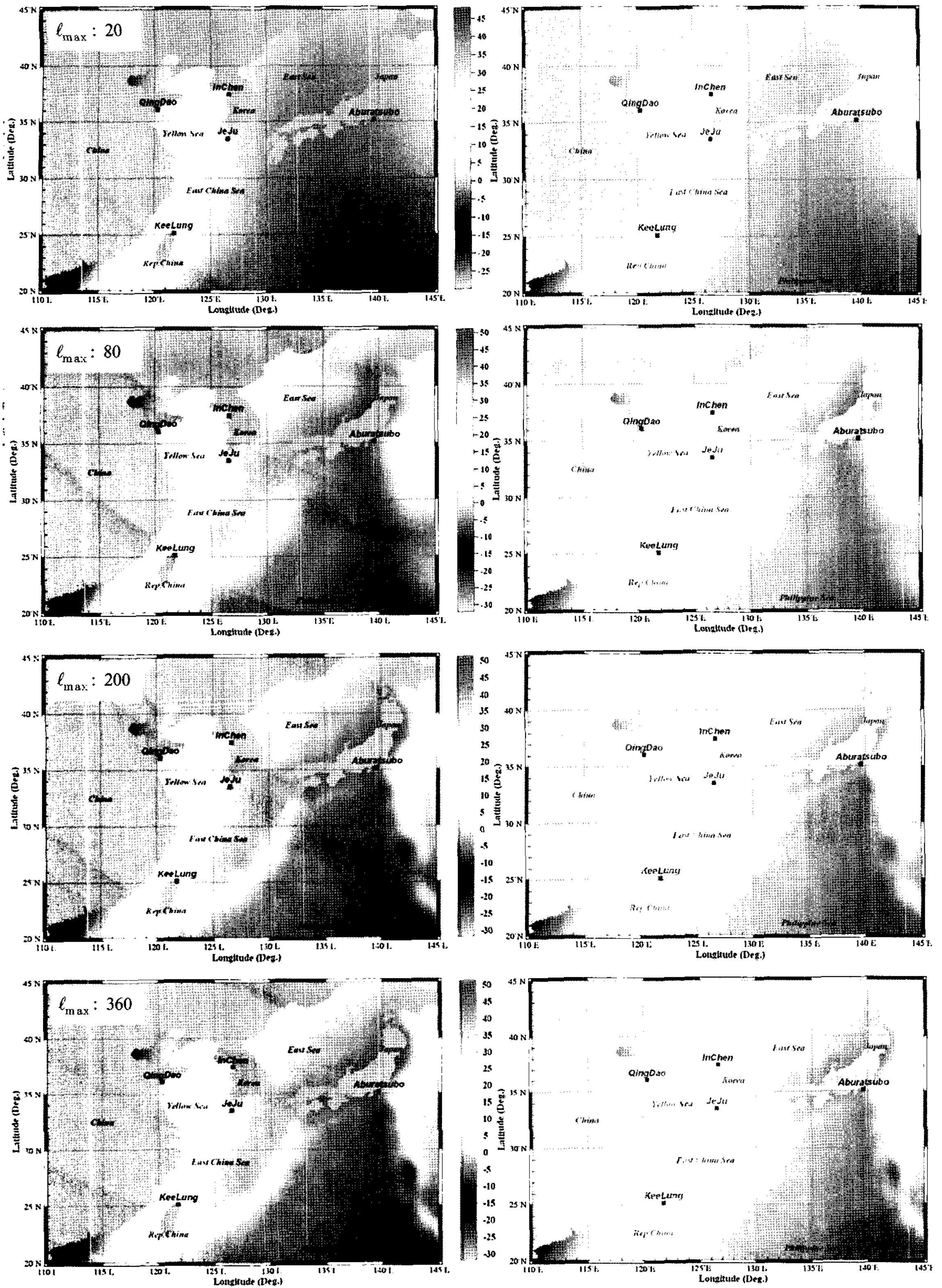


그림 4. EGM96(좌)과 EIGEN-GL04C(우)에서 계산된 지오이드고(단위: m)

전 지구 중력장모델 EGM96과 EIGEN-GL04C의 정밀도를 분석하기 위해 그림 5와 같이 최대차수별 지오이드고의 계산결과를 비교하였다. 두 중력장모델은 최대차수가 20차인 장파장부분에서 $-0.12 \sim 0.10\text{m}$ 의 미소한 차이를 나타내었지만 80차에서는 $-1.3 \sim 1.1\text{m}$ 에 달하는 비교적 큰 차이를 보였고 200차와 360차에서는 안정적인 양상을 보이며 $-1.6 \sim 1.4\text{m}$ 의 차이를 나타내고 있다. 이러한 원인은 EIGEN-GL04C가 장파장 부분에서는 EGM96과 데이터의 구성이 비슷하지만, 중장파장 부분에서는 GRACE와 LAGEOS의 중력데이터 추가로 인하여 정밀도가 대폭 향상되었음을 설명한다. 이는 최근에 개발된 중력장모델에 중력장 관측위성(CHAMP, GRACE)의 데이터가 추가되어 30~120차 구간 파장영역에서의 정밀도가 EGM96에 비해 매우 우월하다는 福田洋一(2005)의 연구와 일치하다. 또한, 윤홍식(2005)에 의하면 EGM 96모델의 개발에 사용된 데이터에 한국 서해지역의 중력데이터가 부족하여 EGM96과 EIGEN-CG01C 사이에 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 본 연구의 계산 결과와 선행연구를 종합하여 볼 때 EIGEN-GL04C의 계산결과를 최종 해면지형 값 계산에 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

3.3 해면지형 계산결과

위에서 계산된 평균해면고와 지오이드고를 식 (1)을 이용하여 계산한 해면지형의 결과를 표시하면 그림 6과 표 2와 같다. 최대차수가 20차일 경우, $SSTop$ 의 값이 약 15m에서 -20m 사이의 분포양상을 보이는데 이는 KMSS04의 평균해면 정밀도가 상승한데 반해, 최대차수를 장파장부분인 20까지만 처리하였기 때문인 것으로 사료된다. 해면지형의 값은 80차에서 수렴되기 시작하였고 200차, 360차의 처리결과에서는 $SSTop_{EGM96}$ 와 $SSTop_{EIGEN-GL04C}$ 모두 동일한 평균값을 나타내었으며, $SSTop_{EIGEN-GL04C}$ 의 결과는 전반적으로 $SSTop_{EGM96}$ 에 비하여 여러 지역에서 평활화되어 있음을 알 수 있다. 특이한 점은 그림 6의 360차 결과에서 $SSTop_{EIGEN-GL04C}$ 의 QingDao, JeJu, KeeLung 조위관측소 주변의 해면지형이 $SSTop_{EGM96}$ 에 비해 많은 차이를 보이고 있다.

4. 조위관측소별 해면지형 분석

현재 각 나라별 수직기준망이 왜곡(distortion)되어 있는 주된 원인은 조위관측소에서 관측한 해면지형과 지오이드를 분리하지 않은 평균해수면을 0 기준으로 하고 있기 때문이다.

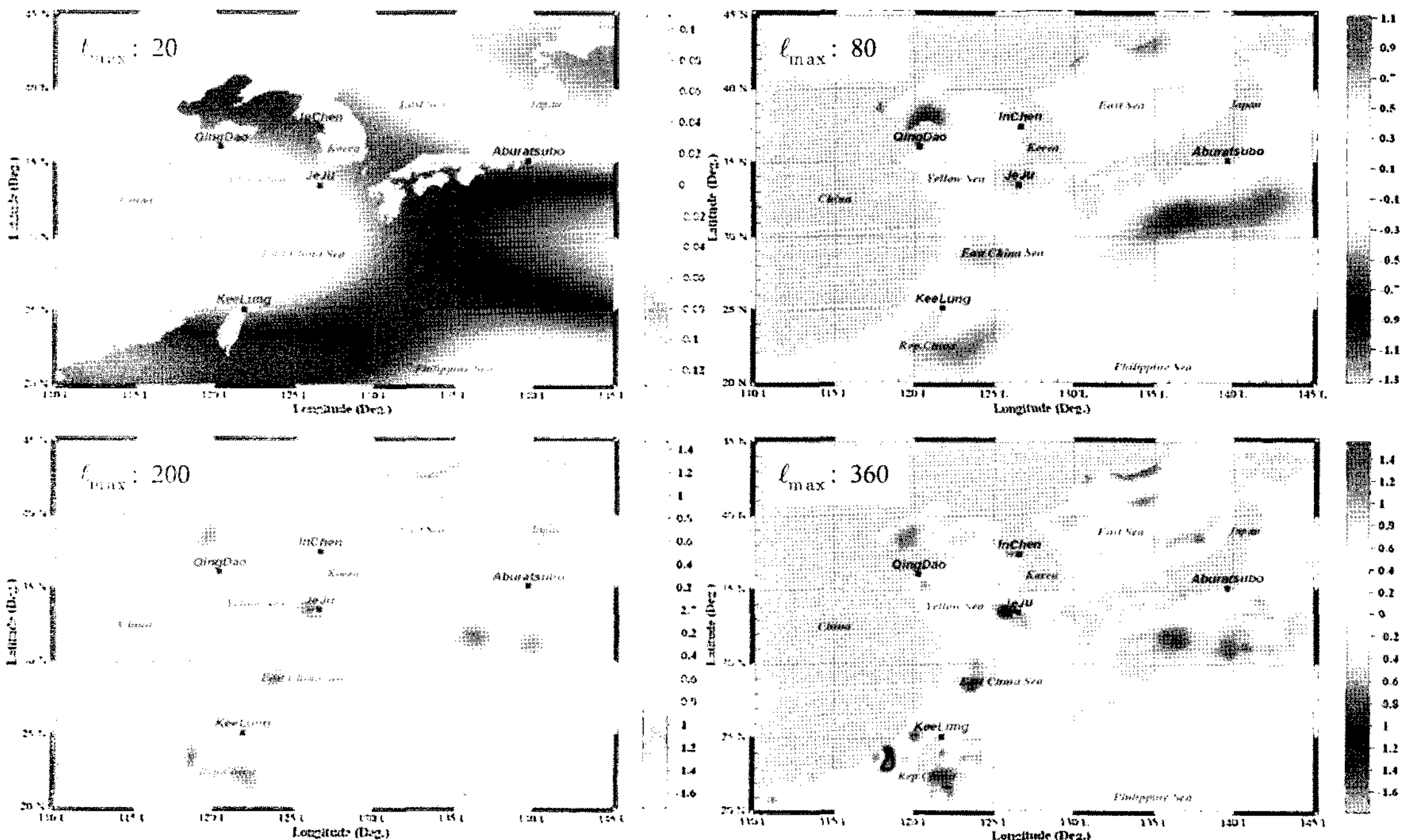


그림 5. 최대차수(l_{max}) 20, 80, 200, 360에서 EIGEN-GL04C과 EGM96의 지오이드고 차이(단위: m)

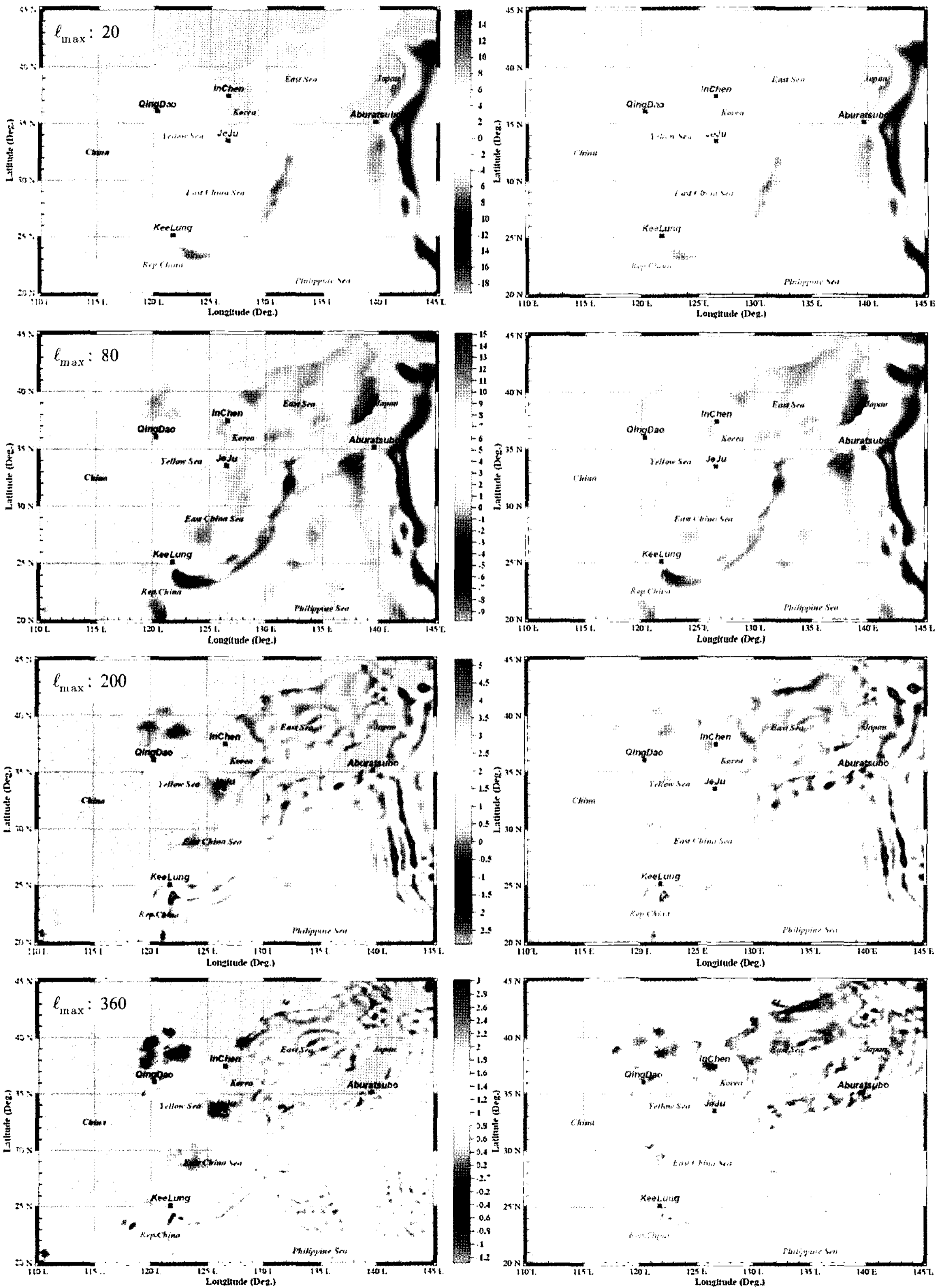


그림 6. SSTop EGM96(좌) 및 SSTop EIGEN-GL04C(우) (단위: m)

연구대상지역 내 각 조위관측소 위치에서의 계산된 평균해면고, 지오이드고 및 해면지형 값을 표 3과 그림 7에 표시하였다. EIGEN-GL04C에서 계산된 지오이드고(360차)를 인천 조위관측소를 기준으로 비교하면 제주가 +2.361m, KeeLung이 -2.387m로 비교적 작은 차이를 나타내었고, QingDao와 Aburatsubo 조위관측소는 각각 -16.953m와 +14.440m의 차이를 보이고 있다.

각 조위관측소별 해면지형은 그림 6과 같이 최대차수 200에서 대부분 수렴된 상태이며, 360차의 결과와도 비슷하다. KMSS04와 EIGEN-GL04C를 이용하여 계산한 200차 및 360차 해면지형의 평균을 본 연구의 최종결과로 볼 경우, InCheon이 0에 근접한 결과를 보였고, JeJu, QingDao, Aburatsubo, KeeLung 등 기타 조위관측소에서는 40~60cm의 분포를 보이고 있다.

표 2. 최대차수별 SSTop 처리결과

SSTop 구분	l_{max}	SSTop 값(m)				
		Max	Min	Mean	RMS	STD
SSTop _{EGM96} (KMSS04-EGM96)	20	15.63	-19.41	0.79	11.60	3.41
	80	15.07	-9.78	0.61	2.88	1.70
	200	5.17	-2.89	0.60	0.60	0.76
	360	2.75	-1.28	0.60	0.41	0.64
SSTop _{EIGEN-GL04C} (KMSS04-EIGEN-GL04C)	20	15.74	-19.34	0.82	11.63	3.41
	80	15.16	-9.60	0.64	2.88	1.70
	200	5.15	-2.79	0.63	0.61	0.78
	360	3.01	-1.28	0.63	0.42	0.65

표 3. 동아시아지역 조위관측소별 평균해면, 지오이드고 및 해면지형 비교(단위: m)

Zone	Tidal Station	SSH KMSS04	l_{max}	N EGM96	N EIGEN-GL04C	SSTop KMSS-EGM96	SSTop KMSS-EIGEN-GL04C
Korea	InCheon Lat: 37°26'57" Lon: 126°35'39"	22.913	20	23.237	23.172	-0.324	-0.259
			80	23.428	23.660	-0.515	-0.747
			200	22.349	22.823	0.564	0.090
			360	22.454	22.987	0.459	-0.074
	JeJu Lat: 33°31'39" Lon: 126°32'35"	25.975	20	25.069	25.039	0.906	0.936
			80	25.384	24.996	0.591	0.979
			200	26.121	25.466	-0.146	0.509
			360	26.104	25.348	-0.129	0.627
China	QingDao Lat: 36°05'05" Lon: 120°18'40"	6.642	20	5.444	5.414	1.198	1.228
			80	6.506	6.154	0.136	0.488
			200	5.798	6.019	0.844	0.623
			360	5.976	6.034	0.666	0.608
Japan	Aburatsubo Lat: 35°09'37" Lon: 139°36'56"	37.077	20	32.720	32.673	4.357	4.404
			80	36.929	37.169	0.148	-0.092
			200	36.911	37.589	0.166	-0.512
			360	36.616	37.427	0.461	-0.350
Rep.China	KeeLung Lat: 25°09'26" Lon: 121°44'39"	21.095	20	18.284	18.241	2.811	2.854
			80	19.113	19.452	1.982	1.643
			200	20.212	20.566	0.883	0.529
			360	20.103	20.600	0.992	0.495

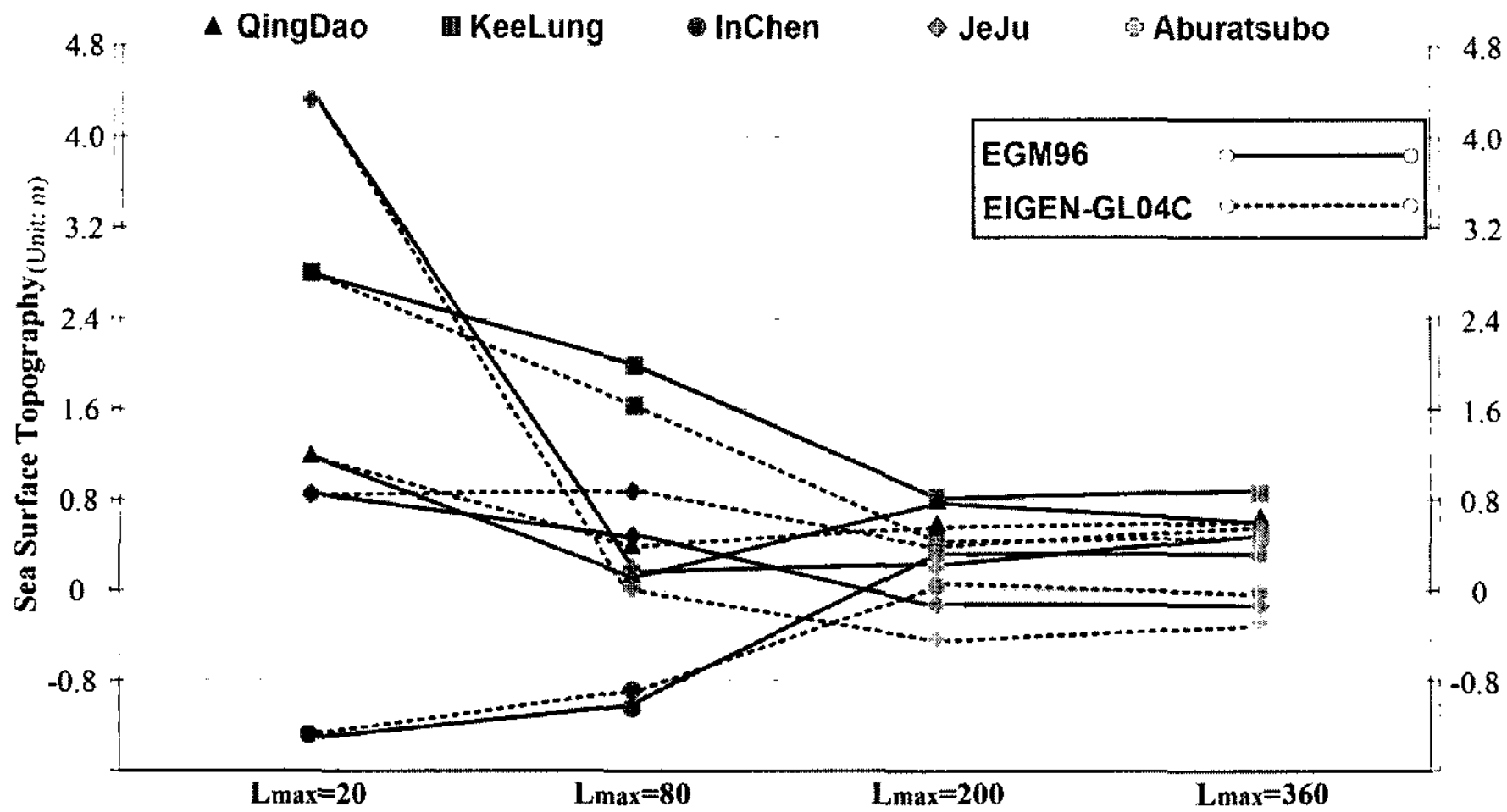


그림 7. 최대차수에 따른 조위관측소별 해면지형 변화 비교

5. 결 론

동아시아지역 수직기준사이의 해면지형의 분포와 그 차이를 분석하기 위하여 평균해면모델 KMSS04와 전 지구 중력장모델 EGM96, EIGEN-GL04C를 이용하여 동아시아지역의 평균해면고와 최대차수별(20, 80, 200, 360) 지오이드고 및 해면지형을 계산하고 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동아시아지역의 평균해면은 서에서 동으로 가면서 높아지는 양상을 나타내고 일본해구와 Ryukyu해구 부근에서 급격한 고도변화를 보이고 있다. EGM96와 EIGEN-GL04C에서 해석된 지오이드고는 장파장 부분에서는 큰 차이를 보이지 않지만 중장파장 부분에서는 중력장 관측 위성 데이터의 추가로 인하여 EIGEN-GL04C가 높은 정밀도를 가지는 것을 알 수 있다.

2. 동아시아지역 각 조위관측소에 대해 분석한 결과 평균해면 값은 Aburatsubo(37.077m), JeJu(25.975m), InCheon(22.913m), KeeLung(21.095m), QingDao(6.642 m)의 순이었 고, 지오이드고는 InCheon을 기준으로 JeJu (2.361m), QingDao(-16.953m), Aburatsubo(14.440m), KeeLung(-2.387 m)의 차이를 보이고 있다. 또한, 해면지형은 InCheon이 0에 가까운 반면, 기타 조위관측소에서는 모두 40~60cm에 가까운 값을 나타내었으며, 이중 일본의 Aburatsubo 조위관측소만 부수의 값을 가져 지오이드면이 평균해수면 위에 위치한다는 것을 의미한다.

3. 평균해수면의 장기적인 변화로 인하여 해면지형 역

시 변화하기 때문에 향후 장기간 해면지형에 대한 시계열 분석이 필요하며, 평균해면모델과 전 지구 중력장 모델을 토대로 조위관측소에 대한 GPS관측, 선상/항공/지상중력 측량을 통합하여 더욱 정밀한 해면지형의 계산이 필요하다. 또한, 측지자료의 공유와 통합처리를 위한 동아시아 지역 국가 및 지역 간 긴밀한 협력연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 윤홍식, 조재명 (2005), GPS Levelling데이터를 사용한 새로운 지구중력장모델의 정확도 분석, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제23권 제4호, pp. 353-358.
- 윤홍식, 이동하 (2006), 동해의 해면지형 계산에 의한 지형류의 흐름 추정, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제24권 제2호, pp. 159-165.
- Andersen O.B. (2004), Sea level determination from satellite altimetry recent development. In: Play H, Zhang X H, eds. Book of Abstracts-First Workshop on Observing and Understanding Sea Level Variations, Julians Malta.
- Andersen, O.B., Vest, A.L., and Knudsen, P. (2005), The KMS04 Multi-Mission Mean Sea Surface. In Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie volume 25. Proceedings of the Workshop: "GOCINA: Improving modeling of ocean transport and climate prediction in the North Atlantic region using GOCE gravimetry".
- Featherstone, W.E. (2002), Expected contributions of dedicated satellite gravity field missions to regional geoid determination with some examples from Australia, Journal of Geospatial Engineering, Vol. 4 No. 1, pp. 1-19.
- Frank Flechtner, Roland Schmidt, et al. (2006), The Benefit of

- EIGEN Gravity Field Models for Altimetry and Vice Versa, Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry, ESA.
- Fang Mingqiang (2003), Sea surface height anomalies may help find more about El Nino/La Nina event, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. Vol. 5, pp. 3129-3131.
- Poutanen M. (2000), Sea surface topography and vertical datums using space geodetic techniques. Doctoral thesis, University of Helsinki. Also in: Publications of Finnish Geodetic Institute. 128.
- Ries, J., Chambers, D., Bettadapur, S., Tapley, B. (2006), GRACE Mission Status and Current Results, Ocean Surface Topography Science Team Meeting Vienna, Austria.
- Rummel, R. (1993), Principle of Satellite Altimetry and elimination of Radial Orbit Errors, In: R. Rummel and F. Sanso (Eds.), Satellite Altimetry in Geodesy and Oceanography. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 189-241.
- Tapley, B.D., Chambers, D.P., Bettadapur, S., et al. (2003), Large scale ocean circulation from the GRACE GGM01 Geoid, Geophysical Research Letters, 30(22), pp. 2163-2166.
- Vergos, G. S. (2002), Sea Surface Topography, Bathymetry and Marine Gravity Field Modelling, UCGE Report No. 20157, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada.
- Zhang Zizhan, Lu Yang (2004), Spectral Analysis of Mean Dynamic Ocean Topography From the GRACE GGM01 Geoid, Gravity, Geoid and Space Missions(GGSM) 2004 IAG International Symposium, Porto, Portugal.
- 福田洋一 (2005), 最近の衛星重力研究の動向, 平成16年度東京大学地震研究所研究集会 “地球の「流れ」を見る衛星重力ミッション” 研究集会論文集, pp. 1-5.
- 管泽霖, 管铮, 瞿国君 (1996), 海面地形与高程基准, 北京: 测绘出版社, pp. 30-31.

(접수일 2007. 12. 14, 심사일 2008. 6. 16, 심사완료일 2008. 6. 16)