

ERS-1 Altimeter를 이용한 필리핀 지역의 중력이상 분석 (Free-air gravity anomaly analysis using ERS-1 Altimeter)

박상은, 강성철, 이태희, 문우일
서울대학교 지구환경과학부 ESI³ 연구실
서울시 관악구 신림동 산56-1
separk@eos1.snu.ac.kr, sungchul@eos1.snu.ac.kr

요 약

인공위성의 Radar Altimeter 자료를 통해 국지적인 중력이상을 조사하기 위하여 ERS-1 Altimeter를 이용하였다. ERS-1 Radar Altimeter는 조밀하게 인접한 데이터 간격(~ 8km)을 갖고 있어서 전지구적 규모뿐만 아니라 국지적인 연구에도 적합하다

연구대상지역은 세 개의 판이 만나서 지진과 화산활동이 활발하게 진행되는 필리핀 판 지역(동경110°~150°, 북위 0°~30°)을 선정하였다. 이 지역에 대한 해저의 지형과 중력이상 분석을 통해 판구조 운동의 여러 증거를 파악할 수 있다.

ERS-1 Radar Altimeter를 통해 얻어진 지오이드 높이(Geoid height)는 후리-에어 중력이상(Free-air gravity anomaly)으로 쉽게 전환시킬 수 있다. 본 연구에서는 Fast Fourier Transform(FFT)을 이용하여 지오이드기복을 직접 후리-에어 중력이상으로 전환시키는 Direct conversion method를 사용하였다. 후리-에어 중력이상은 지각평형과 직접적으로 연관되어 지각보상의 정도를 파악할 수 있게 하며 일반적으로 해양의 분지는 지각평형상태로 있어서 평균적인 중력이상은 0mgal 근처로 나타난다. 그러나 본 연구에서 살펴본 국지적인 후리-에어 중력이상은 판구조론과 관련한 해구나 호상열도에서는 해양분지에서의 평균적인 값과 다른 중력이상의 양상을 나타내었다.

I. 서 론

Seasat altimeter(1978)가 해양의 지오이드를 성공적으로 측정한 이후로 지구의 자세한 모양과 중력장을 알아내기 위해서 인공위성의 Radar Altimetry (RA)가 이용되어 왔으며, Geosat, Topex/Poseidon 인공위성과 더불어 ESA(European Space Agency)의 ERS-1(1991~1996), ERS-2(1995~) RA는 높은 해상도와 뛰어난 정확성을 갖는 오랜 기간 동안의 해양관측 자료를 제공하고 있다.

지구 전체의 지오이드기복(geoid undulation)은 주로 1000km이상의 긴 파장 형태로 나타나지만, 높은 주파수 변화가 해양의 해산, 해구, 중앙해령등에서 나타나며, 극값으로 약 83m, -106m의 값을 나타낸다. ERS-1 RA를 통한 지오이드기복 측정의 정밀도는 수십cm ~ 2cm에 이르고, 지구표면에서의 공간 해상도는 20km 정도로 향상되었다[4].

인공위성 RA를 통한 지오이드기복으로부터 해양의 후리-에어 중력이상을 계산하기

위해 크게 세 가지의 방법이 이용되어 왔다. 첫째로 Along track vertical deflection으로부터 중력이상과 Vertical gravity gradient를 구해내는 방법이 있고[9], 둘째는 LSC (Least Squares Collocation) 방법[1], 마지막으로 본 연구에 사용된 지오이드기복으로부터 FFT를 사용하여 직접 후리-에어 중력이상을 계산해 내는 Direct conversion 방법이 있다[5].

II. 대상지역 및 자료

(1) 연구대상 지역 / 판 구조

연구 대상지역은 필리핀판(동경 110° ~ 150°, 북위 0° ~ 35°) 부근으로, 유라시아판, 태평양판 및 오스트레일리아-인도판과 상호간에 복잡한 수렴경계를 이루고 있다(그림1(a)). 태평양판은 Izu-Bonin-Mariana 호상열도 시스템으로 연결되어있는 수렴경계에서 서쪽 경사로 필리핀판 아래로 섭입하고 있으며, 필리핀판은 다시 아시아 대륙의 가장자리에 위치하는 대만 부근까지 이어지는 Ryukyu 수렴경계에서 유라시아판 아래로 섭입하고 있다.

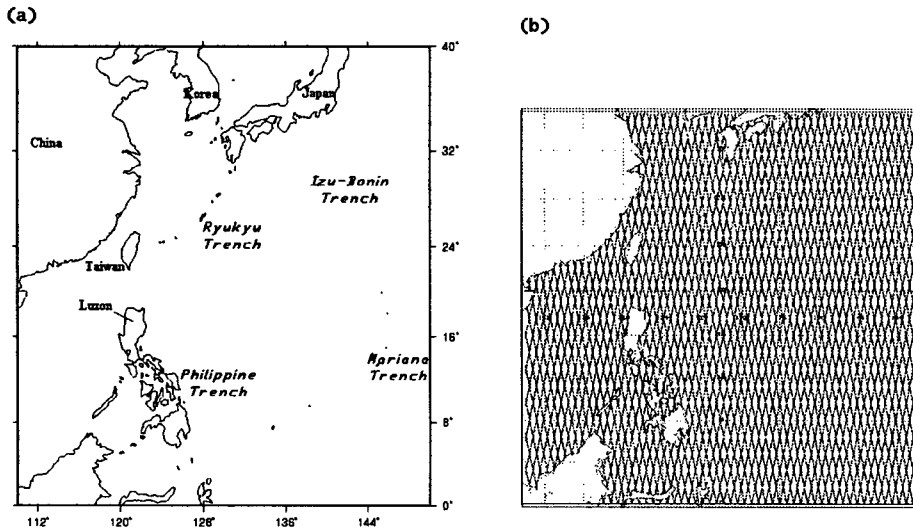


그림 1. 연구지역(a)과 연구지역에서 ERS-1 RA의 Orbit Cycle (b).

대만부근에서 섭입대는 동쪽으로 경사방향을 바꾸면서 필리핀의 루손섬의 서쪽을 지나면서 남쪽으로 이어진다[3]. 판 사이의 수렴경계면은 화산대 및 지진대 분포와 일치하기 때문에 다양한 수렴경계를 이루고 있는 이 지역에서는 지진이나 화산폭발등의 재해가 끊이지 않고 발생하고 있으므로 작은 규모의 판구조에 대한 이해와 분석이 필수적이다.

(2) 연구자료

연구지역의 지오이드기복은 ERS-1 RA(Ku밴드,13.8GHz)의 자료를 이용하였고, 비교와 검정을 위해 동일한 위치의 Topex/Poseidon RA의 지오이드기복 자료를 사용하였다. ERS-1 RA로부터 측정된 해수면표고(SSH), 지오이드기복 등의 자료는 프랑스의 CERSAT(Centre ERS d'Archivage et de Traitement)에서 전처리된 OPR(Ocean Product)로부터 추출하였고, Topex/Poseidon RA의 지오이드기복은 PO.DAAC(Physical Oceanography Distributed Active

Archive Center)의 MGDR-B(Merged Geophysical Data Records)에서 추출하였다.

RA에서 고해상도의 지오이드기복을 계산하기 위해서는 지구중력장의 중력포텐셜상수모델이 필요하며, ERS-1 RA에서는 GRIM4- C2 중력장모델과의 위·경도 방향 선형보간을 통해 1°×1°격자의 10cm~수십cm의 정확도를 가지는 지오이드기복을 계산한다[2]. Topex/Poseidon RA에서는 0.25°× 0.25°격자의 지오이드기복을 계산하기 위해 JGM3/OSU91A 중력포텐셜모델이 이용되었으며, 지오이드기복은 평균조수시스템 안에서 SSH의 위치와 보간된다[4]. ERS-1 RA를 통해 얻은 해양의 지오이드기복은 OSU91A 지구중력장 모델에 의한 지오이드기복과의 비교를 통해 200m이내의 연안에서는 ±2m의 에러를 보이며, 200m 이상의 심해에서는 ±6m의 에러를 나타낸다. (German IFP,1995)

연구지역의 ERS-1 RA의 궤도는 그림1(b)에 나타나 있으며, 조밀한 간격으로 자료가 분포함을 알 수 있다. ERS-1 RA 의 지구물리자료는 일정한 시간동안의 평균으로써 유추되기 때문에 6.7km정도의 along track distance를 나타내고, 레이더의 Footprint와 관련된 cross track width는 해수표면의 상태에 따라 다르지만 최대 10km 정도를 나타낸다[7].

III. 연구방법

지오이드기복은 후리-에어 중력이상과 다음과 같은 식으로 직접 연결된다.[5]

$$\Delta g = -\frac{\partial}{\partial r}(N\gamma) - \frac{2}{R}(N\gamma) \quad (1)$$

N 은 지오이드기복, γ 는 국제표준중력식에서 유도된 normal equation, R 은 지구의 평균 반지름, r 은 지구의 질량중심방향을 나타낸다. 지오이드기복(N)과 위도에 따른 중력값(γ)은 Brun' fomula에 의해 중력의 disturbing potential T 와 $T = N\gamma$ 의 관계를 맺고 있으며, (1)식에서 T 의 미분항은 gravity disturbance(δg)라고 부르고 푸리에변환의 방법을 이용하여 근사시킬 수 있다. $x-y$ 평면상에서 $\delta g(x, y)$ 는 계수 χ 를 포함하는 이산 푸리에 역변환의 식으로 표현된다.

$$\delta g(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \sqrt{\chi} T_{uv}(z) e^{j(u\frac{2\pi}{M}x + v\frac{2\pi}{N}y)} \quad (2)$$

$$\chi = (u\frac{2\pi}{M})^2 + (v\frac{2\pi}{N})^2 \quad (3)$$

여기서 M, N 은 x, y 방향의 data point, $\overline{T_{uv}}(z)$ 는 wavenumber u, v 인 T_{xy} 의 2차원 푸리에 변환을 나타낸다. 따라서 식(2)와 (1)을 이용하여 지오이드기복으로부터 후리-에어 중력이상을 구해낼 수 있다.

ERS-1 OPR 자료로부터 지구물리 자료를 추출할 때에는 보통 전지구모델에 기반하는 wet troposphere, dry troposphere, ionosphere등의 여러 보정을 가해준다[8]. 그러나, 1000km보다 짧은 주기의 중력이상을 구할 때에는 이러한 모든 보정은 적절하거나 유용하지 못하다. 이러한 경우에 가장 적절한 보정은 해양조석에 대한 보정이며, CSR(Center for Space

Research)의 해양조석모델 v.3.0은 ERS-1 OPR 자료에 가장 효과적이다[9].

연구지역에 대한 조석보정된 지오이드기복은 ERS-1 RA의 궤도 및 측정간격과 관련하여 11km 정도의 공간적인 거리를 갖는 6'x6'간격으로 격자화하여 이용한다. 푸리에변환을 이용한 지구중심방향으로의 미분을 통해 구해진 후리-에어 중력이상은 다른 방법을 사용한 중력이상 자료와 비교할 수 있으며, 지리좌표로 표현된 지오이드기복과 후리-에어 중력이상을 2차원 평면으로 표시하기 위해서는 지도투영법이 필요하다.

IV. 결과 및 고찰

ERS-1 RA에서 추출된 지오이드기복 자료의 검정을 위해 ERS-1 RA의 자료와 동일한 위치에 대응하는 Topex/Poseidon RA의 지오이드기복과의 상관관계수(Correlation Coefficient)는 0.99 정도로 상당히 높은 값을 나타내고 있고, 그림2에는 동일한 경도에서 위도에 따른 두 RA의 지오이드기복에 대한 관계가 표시되어 있다. 두 RA에서 얻어진 자료에 대한 상관관계 분석에 의하면, 결과로 나타난 후리-에어 중력이상에 대해 발생할 수 있는 오차는 본래의 지오이드기복 자료에 기인하지 않음을 알 수 있다.

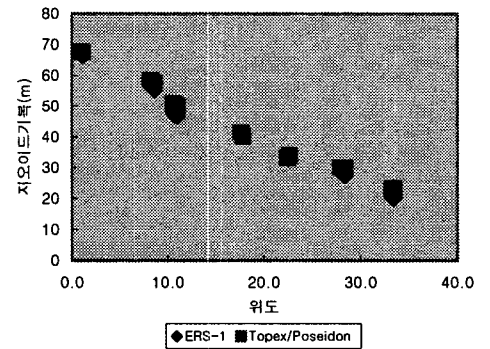


그림2. ERS-1과 Topex/Poseidon RA의 위도에 따른 지오이드기복

그림3에는 연구지역 (동경 110°~150°, 북위 0°~35°)에 대한 격자화된 지오이드기복과 FFT 방법을 이용하여 계산된 후리-에어 중력 이상이 Gray scale과 등치선으로 표현되어 있으며, 그림4(a)는 그림3(b)에서 위도 15°와 25°에 해당하는 동서방향 단면에 대한 후리-에어 중력이상 값을 보여준다.

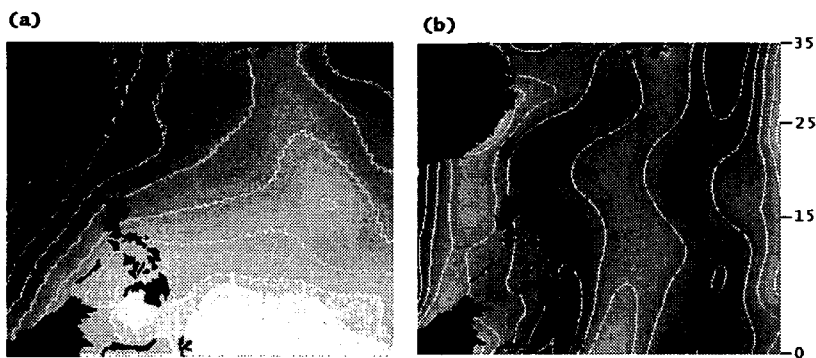


그림 3. 연구지역의 지오이드기복도(a), 후리-에어 중력이상도(b)

그림4(b)는 다른 RA 및 배를 이용하여 매우 조밀하고 정확하게 측정된 지오이드기복 자료로부터 vertical deflection 방법으로 구해진 매우 짧은 주기의 후리-에어 중력이상[9]과 ERS-1 RA로부터 추출해낸 중력이상 값의 동서방향 단면도를 비교한 것이다. 그림4(b)의

동서방향의 후리-에어 중력이상의 단면도를 살펴보면 1000km정도 되는 상당히 긴 주기의 중력이상만이 표현되어 있음을 알 수 있다. 그러나, 그림4(a)를 보면 그림1(a)에서 보이

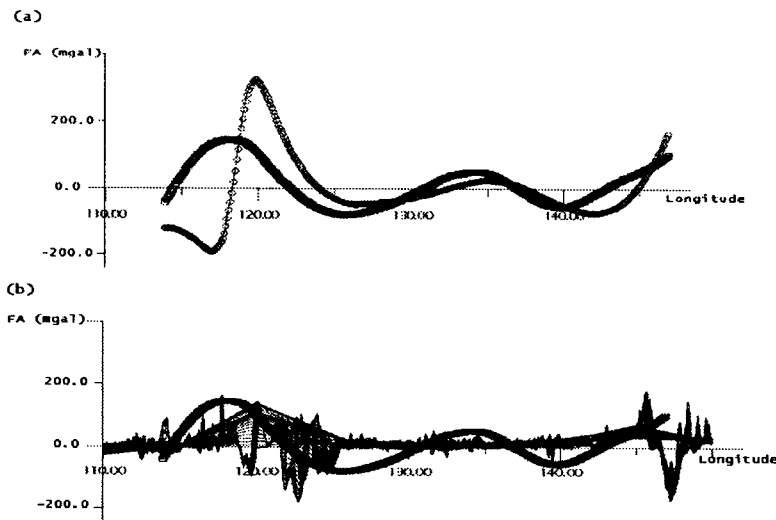


그림 4. (a)북위15°()와 25°(O)에서의 동서방향 후리-에어 중력이상 단면도.

(b)북위 15°에서 ERS-1 Geodetic phase, Geosat, shipborn 지오이드기복을 이용하여 vertical deflection 방법으로 계산한 후리-에어 중력이상 자료와의 비교.

듯이 동경145°와 동경125° 부근에서 그 지역의 섭입대의 증거인 여러 해구들과 관련하여 나타나는 최저값을 확연하게 보여주고 있으며, 그림3(b)를 보면 짙은색의 낮은 후리-에어 중력이상 값이 섭입대의 분포와 거의 일치하여 나타나는 것을 알 수 있다. 해구로부터 호상열도 방향으로 갈수록 차고 무거운 지각이 맨틀아래로 섭입하면서 생기는 중력과잉의 결과로서 후리-에어 중력이상의 값은 점차적으로 양으로 변하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림3(b)와 4(a)를 보면 대륙과의 경계인 해안지역에서도 판의 경계에서 나타나는 후리-에어 중력이상의 특징이 나타나며 해양에서보다 더 큰 양의 중력이상 값과 음의 중력이상 값을 나타낸다. 매우 조밀하고 정확한 지오이드기복으로부터 얻어낸 중력이상보다 상당부분 과장되고 주기가 길게 나타나긴 하지만, 후리-에어 중력이상값의 변화를 살펴보면 해양의 깊은 해구는 -100mgal 정도의 낮은 값을 나타내고 호상열도로 갈수록 +100mgal 까지 변화하게 됨을 알 수 있다. 반면에 해양에서 육지로 바뀌는 해안지역에서는 더 변화폭이 커서 -200mgal 에서 +300mgal 까지 변화하게 된다.

V. 결 론

후리-에어 중력이상은 지구표면에서 나타나는 지각평형과 밀접하게 연결되어 있어서 빙하의 해빙과 관련하는 지표고도의 상승도 중력이상의 분석을 통해 알 수 있다[6]. 해양에서는 대부분 지역이 평형상태로 유지되고 있고 대륙지역보다 지각평형의 보상깊이는

지구의 물리적 표면과 직접적으로 연관되어 있어서 후리-에어 중력이상을 통한 지각평형의 분석은 직접적으로 밀도가 낮은 판과 밀도가 큰 판 아래의 맨틀과의 관계를 나타내며, 인공위성의 RA를 통해 측정된 해양의 후리-에어 중력이상은 이러한 관계를 잘 나타내고 있다.

35일의 Repeat cycle을 갖는 ERS-1 RA로부터 얻어낸 지오이드기복을 통한 직접 후리-에어 중력이상으로의 근사는 1000km이하 주기의 국지적인 중력이상의 변화를 정확하게 구해내지 못하였다. 판 경계 지역의 높은 지각열류량 등의 다른 지질학적이거나 지구 물리적 자료와 여러 조밀한 RA자료를 함께 이용함으로써 판구조를 정확하게 분석할 수 있을 것이다.

VI. 감사의 글

본 연구에서 사용된 ERS-1 및 Topex/Poseidon 자료는 CERSAT과 PO.DAAC에서 제공되었습니다. 또한 연구에 많은 조언과 자료를 제공해 주신 세종대학교 김정우 교수님께 감사드립니다.

VII. 참고자료

- [1] Basic T. and R.H.Rapp, 'Oceanwide prediction of gravity anomalies and sea surface heights using Geos-3, Seasat and Geosat altimeter data and ETOPO5U bathymetric data. Report No.417', Dept. of geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, 1992
- [2] CERSAT(1995), 'Altimeter and Microwave Radiometer ERS products user's manual v1.2', July 20, C2-MUT-A-01-IF, CERSAT IFREMER BP
- [3] Eldridge M.Moore, Robert J.Twiss, 'Tectonics', W.H.Freeman and Company, NewYork, 1995
- [4] J.Robert Benada, 'Merged GDR(Topex/Poseidon) Generation B user's handbook v2.0', July 30 1997, D-111007, PO.DAAC
- [5] Kim,J.H., 'Improved recovery of gravity anomalies from dense Altimeter data. Report No.437', Dept. of geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, 1996
- [6] Mark Simons, Bradford H.Hager, 'Localization of the gravity field and the signature of glacial rebound', Nature, V.390 N.6659, Dec 4, 1997
- [7] P.Queffeuilou, 'Long-term Comparison of ERS, TOPEX and POSEIDON Altimeter Wind and Wave Measurements', May 30-June, Proceedings of the 9th(1999) International Offshore and Polar Engineering Conference
- [8] Rashmi Sharma, M.M.Ali, 'Validity of ERS-1 Altimeter Corrections', IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol.36, No.3, pp.1003-1006, May 1998
- [9] Sandwell.D.T., Smith,W.H.F., 'Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry', Geophys.Res., v102 No.5, 0039-10054, 1997