

GPS를 이용한 한반도 연안의 해양조석 부하영향의 추정

Ocean Tide Loading Effect Prediction using GPS

in Coastal Area of Korea Peninsula

윤홍식¹⁾ · 이동하²⁾ · 조재명³⁾ · 황 학⁴⁾

Yun, Hong Sic · Lee, Dong Ha · Cho, Jae Myung · Huang He

- 1) 성균관대학교 토목환경공학과 교수(E-mail:yhs@geo.skku.ac.kr)
- 2) 성균관대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정(E-mail:dhlee@geo.skku.ac.kr)
- 3) 성균관대학교 대학원 토목환경공학과 박사수료(E-mail:jmcho@geo.skku.ac.kr)
- 4) 성균관대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정(E-mail:duejihh@skku.edu)

요 지(Abstract)

본 논문에서는 해양조석의 부하효과가 매우 큰 것으로 알려져 있는 우리나라의 서해안을 비롯하여 연안에 설치된 GPS상시관측소(제주도, 호미곶, 주문진, 마라도, 팔미도, 울릉도, 영도) 데이터를 사용하여 각 관측소의 해양조석의 부하영향으로 인한 지각의 연직변동량을 계산하였다. 총 12개의 해양조석 부하성분의 결과와 실제 해양조석값을 이용한 회귀분석을 통해 실제 해양조석에 대한 한반도 연안의 해양조석 부하영향을 추정하였다. 그 후 이들을 일본과 우리나라 주변에 대하여 지역적으로 개량한 해양조석모델(NAO99jb)로부터 계산된 결과들과 비교·분석을 실시하여, 지역적인 해양조석 모델의 개발가능성을 검토하였다.

1. 서론

해양조석의 영향에 의한 부하성분, 즉 지각변동량을 계산하기 위해서는 정확한 해양조석모델(Ocean Tide Model)이 필요하다. 그러나 한반도의 서해안과 남해안의 경우 복잡한 리아스식 해안구조를 가지고 있으며, 검조기(Tide Gauge)와 인공위성 관측데이터가 부족하기 때문에 해양조석모델이 부정확하다. 또한, 해양조석 조화함수(Tidal Harmonics) 성분 중 가장 큰 진폭을 가지는 M2는 서해안 지역이 전 세계에서 두 번째로 높은 것으로 알려져 있다(Lee 등, 2001). 이러한 부정확한 해양조석모델은 지구물리를 비롯한 다양한 고정밀 측위 응용분야의 오차원인으로 작용하기 때문에 한반도와 그 주변지역의 정확한 모델 개발이 시급한 상황이다.

이와 관련하여 오늘날 DGPS의 정확도가 향상됨에 따라서 DGPS를 사용하여 해양조석의 주요 부하성분(loading components)들의 진폭(amplitude)과 위상차(phase lag)를 직접 추정할 수 있게 되어 GPS 측위 정밀도를 향상시킬 수 있는 해양조석모델의 개발을 역으로 GPS를 이용하여 수행할 수 있게 되었다. DGPS 방법에 의한 해양조석 부하성분의 결정은 2개소의 GPS 관측점간의 기선벡터를 처리하여 관측점간의 상대적인 높이차를 계산하여 이들의 시계열 데이터로부터 해양조석의 부하성분들을 직접 결정하는 것이 가능해 졌다.

따라서 본 연구에서는 해양조석의 부하효과가 매우 큰 것으로 알려져 있는 우리나라의 황해와 상대적으로 작은 해양조석 부하효과를 가지는 남·동해에 설치된 GPS상시관측소 데이터를 사용하여, 해양조석의 부하성분들 중에서 반일분조성분(M2, N2)을 계산하여 CLEAN 알고리즘(Roberts, 1987; Sterfan 등, 1999)에 의한 스펙트럼 분석을 실시함으로써, 해양조석으로 인한 지각의 연직변동량을 추정하였다. 또한 이러한 연직변동량과 실제 해양조석과의 회귀분석을 통하여 한반도 연안의 해양조석 부하영향을 추정하여, 이들을 일본과 우리 나라 주변에 대하여 지역적으로 개량한 해양조석모델(NAO99jb) 결과와 비교·분석을 실시함으로써 궁극적으로 GPS 측위 정밀도 향상에 기여하고자 하였다.

2. GPS데이터 처리

2.1 사용데이터

본 연구에서는 우리 나라 연안의 해양조석 부하로 인한 부하성분을 결정하기 위해서 해양수산부에서 운영하는 마라도(MARA), 영도(YOUN), 울릉도(ULEN), 주문진(JUMU), 팔미도(PALM), 호미곶(HOMI), 소청도(SOCH), 말도(MALD), 홍도(HONG), 소흑산도(SOHE), 가사도(GASA)의 11개 GPS 상시관측소 자료와 국립지리원에서 운영하고 있는 제주도(CHJU) 관측소 자료 및 천문연구원에서 운영하고 있는 대전(DAEJ) 관측소의 자료를 획득하여 연구하였다. DGPS 방법에 의한 자료처리를 위하여 대전 관측소를 고정점으로 고정하고 각 관측소와의 상대적인 표고차를 구하였다. GPS 관측자료는 2001년 4월 1일부터 5월 15일까지 총 45일간의 자료를 처리하였으며, 데이터를 처리하기 전에 성균관대에서 개발한 GPS 데이터 품질관리 프로그램인 GPS_QC 소프트웨어를 사용하여 각 상시관측소 데이터의 품질을 검사한 후 상태가 좋지 않은 데이터를 제거하고, 사이클 슬립 검사 및 보정 등을 실시하였다.

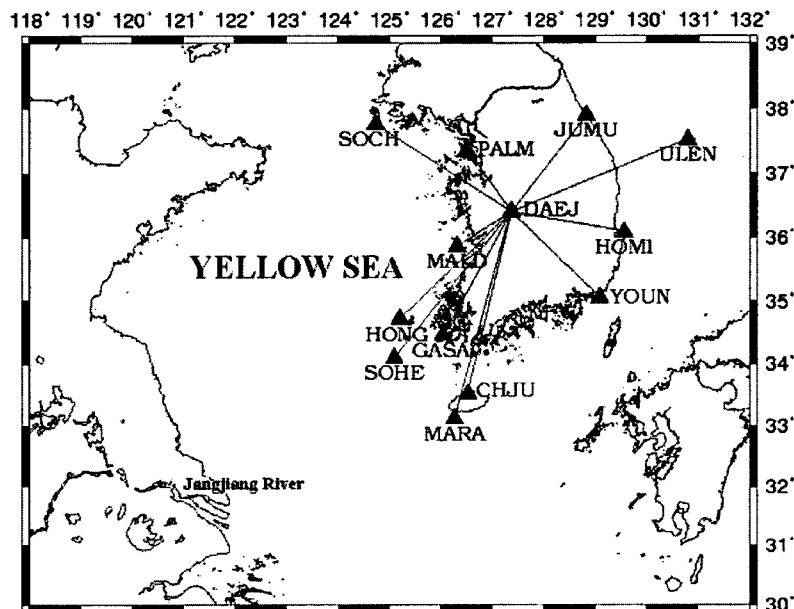


그림 1 연구 대상 상시관측소 위치

2.2 데이터 처리

DGPS를 이용하여 해양조석의 부하영향에 의한 지각의 부하성분을 정확하게 결정하기 위해서는 먼저 해양조석의 부하영향이 거의 없는 내륙의 한 점을 고정점으로 하여 각 상시관측소의 수직위치 변동량을 1시간 단위로 정밀하게 측정하여야 한다. 그 후 데이터 처리 결과로 얻어진 시계열 자료에 대해서 스펙트럼 분석을 실시함으로써 해양조석의 부하영향으로 인한 부하성분의 진폭과 위상차를 구하게 된다. 이러한 부하성분은 해양조석의 부하영향을 대표하는 값으로서 각 분조에 대한 진폭과 위상을 구할 수 있으면 이를 이용하여 해양조석 부하에 의한 지각의 연직변동량을 모델링할 수 있다.

데이터의 처리를 위한 소프트웨어는 Jet Propulsion Laboratory(JPL)에서 개발한 GIPSY/OASIS-II를 사용하였고, 정밀력은 FLLIN 네트워크를 통해 획득한 JPL의 정밀궤도력(ECI file)을 사용하였다. GIPSY/OASIS-II는 Lichten과 Border(1987)에 의하면 기선해석 정밀도가 1×10^{-9} m 이상으로 처리할 수 있는 것으로 알려져 있다. 데이터 처리전략은 IGS 표준(McCagty, 1992)에 따라서 처리하였으며, 데이터의 획득기간 동안에 누락된 데이터는 CLEAN 알고리즘(Stefan 등, 1999)을 사용하여 보간과 스펙트럼

분석을 실시함으로써 해양조석의 부하성분(반일분조성분 M_2, N_2)으로 인한 지각의 연직변동량을 계산하였다. 표 1은 기선해석을 통해 구해진 고정점 대전(DAEJ)와 각 상시관측소간의 기선길이를 나타낸 것이다.

표 1. DAEJ과 각 관측소간의 기선길이

| Baselines | Baseline length(km) |
|-------------|---------------------|
| DAEJ - SOCH | 279.525 |
| DAEJ - PALM | 131.359 |
| DAEJ - MALD | 112.716 |
| DAEJ - HONG | 271.616 |
| DAEJ - SOHE | 328.979 |
| DAEJ - GASA | 246.745 |
| DAEJ - CHJU | 329.245 |
| DAEJ - MARA | 377.890 |
| DAEJ - YOUN | 215.572 |
| DAEJ - HOMI | 200.249 |
| DAEJ - JUMU | 210.843 |
| DAEJ - ULEN | 329.135 |

본 연구에서 GPS데이터 처리하여 시간별 해석결과를 구하기 위해 고체지구조석과 극조석 보정을 적용하였고, 2중차 L3 phase 해석을 실시하였으며, 미리 결정된 불확정정수와 Saastamoinen 대류권 모델을 사용하였다. 본 연구를 위하여 해양조석의 부하영향에 대한 보정은 적용하지 않았으며, 대류권의 Zenith Delay(ZD)는 Dragert 등(2000)에 의하면 부하 시그널에 흡수되거나 제거되기 때문에 추정하지 않았다. 대류권의 ZD 추정량을 무시함으로써 발생하는 문제점은 대류권의 영향이 잡음으로 취급되거나, 이러한 영향의 일정 부분이 하루 단위의 기온변화량을 가지기 때문에 해양조석의 일분조에 대한 부하효과를 추정하는 것이 어렵다는 점이다. 반면, 장점은 반일주조에 대한 부하효과는 부하 시그널이 대류권 추정량에 흡수되지 않고서 추정된다는 점이다. 즉, 대류권의 영향은 해양조석의 반일분조에 대한 부하 시그널에는 영향을 주지 않는다는 것이다. 그림 2(a)와 그림 3(a)은 대전(DAEJ)과 연구결과들 중에서 해양조석의 부하효과가 가장 큰 팔미도(PALM)와 제주도(CHJU)간의 상대적인 표고차를 구하여 표시한 시계열 분포도이며, 그림 2(b)와 그림 3(b)는 CLEAN 알고리즘을 사용하여 보간된 대전(DAEJ)과 팔미도(PALM), 제주도(CHJU)간의 상대적인 표고차 시계열 분포도이다.

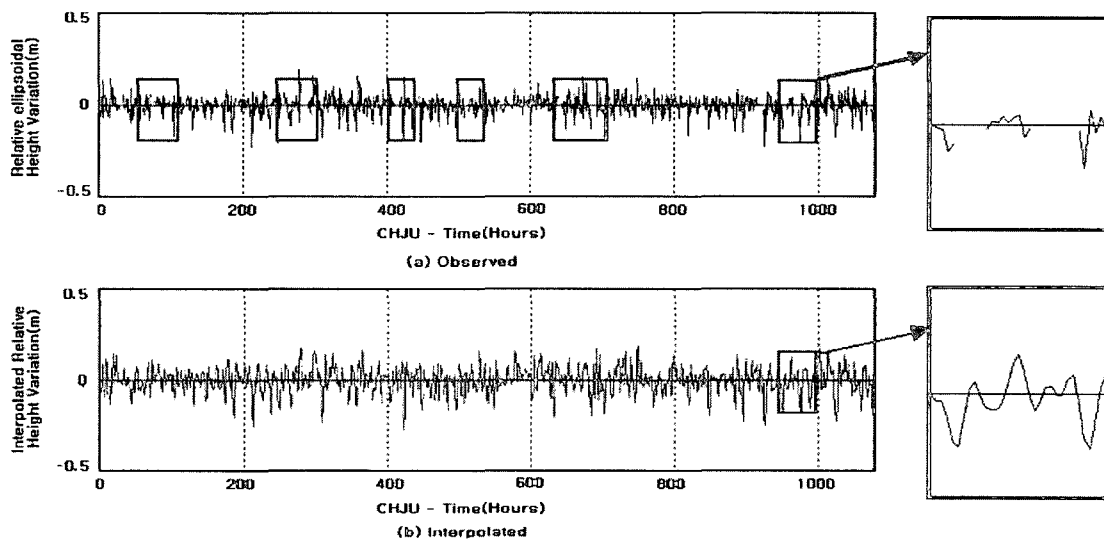


그림 2 관측된 시계열 분포도(a) 및 CLEAN 알고리즘에 의해 보간된 시계열 분포도(b)

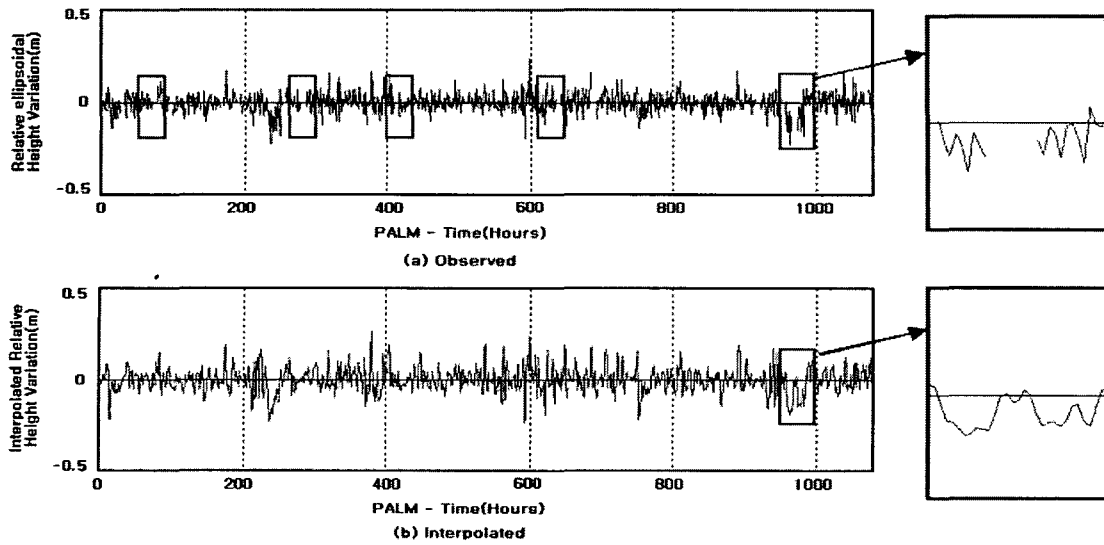


그림 3. 관측된 시계열 분포도(a) 및 CLEAN 알고리즘에 의해 보간된 시계열 분포도(b)

3. 비교 및 분석

3.1 해양조석모델과의 비교

GPS관측에 의하여 계산된 해양조석에 의한 부하성분들을 분석하기 위하여 NAO99jb 해양조석모델과 비교하였다. NAO99jb 해양조석모델은 경도 110°E ~ 165°E와 위도 20°N ~ 65°N 사이의 지역에 대하여 5' × 5' 격자간격의 해상도를 가지는 고해상도 해양조석모델로서 TOPEX/Poseidon 데이터와 일본 주변에 위치하는 219개소의 조석관측소 데이터를 사용하여 개발된 모델이다(Koji 등, 2000). 본 연구에서는 NAO99jb 해양조석모델을 이용하여 선정된 GPS 관측지점의 해양조석의 각 분조에 의한 부하성분들을 추출한 후, GPS 관측자료의 스펙트럼 분석을 통해 결정된 해양조석의 반일분조(M_2 , N_2)에 대한 부하성분의 진폭과 위상차를 비교하였다. 그림 4와 5는 해양조석 부하영향이 상대적으로 큰 팔미도(PALM)와 제주(CHJU) GPS 상시관측소의 시계열 자료를 사용하여 구한 해양조석의 부하영향과 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석의 부하영향을 “Cleaned power spectrum”으로 표시한 것이다.

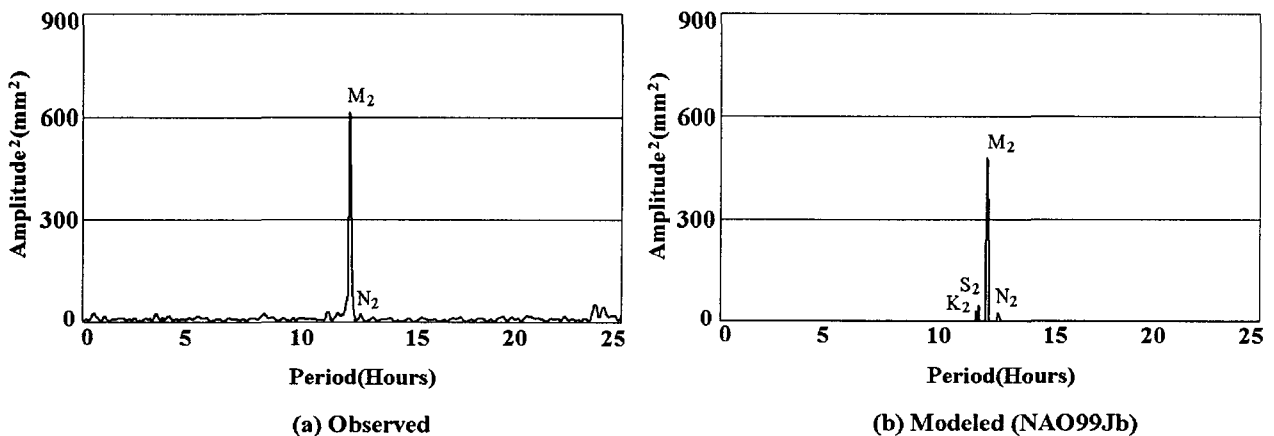


그림 4. PALM - GPS와 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석 부하성분의 Power 스펙트럼

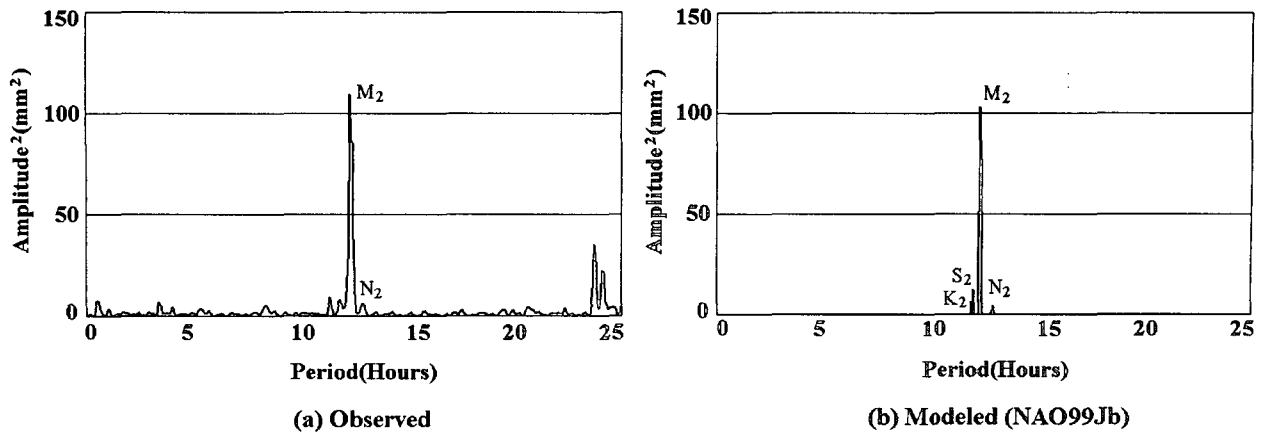


그림 5. CHJU - GPS와 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석 부하성분의 Power 스펙트럼

GPS 관측치와 모델로부터 구한 결과로부터 M₂와 N₂의 진폭의 크기는 모델의 수치와 거의 일치되는 양상을 보이고 있었으며, 또한 위상차의 크기도 상당 부분 일치되는 양상을 보였다. 하지만 본 연구에서는 총 4개의 반일분조(M₂, N₂, S₂, K₂) 중 S₂와 K₂의 부하효과에 의한 부하성분의 진폭 및 위상차를 결정하지 못하였는데, 45일간의 자료만을 이용하여서는 12시간의 주기를 가지고 있는 S₂와 11시간 58분의 주기를 가지고 있는 K₂ 부하영향을 따로 분리할 수 없었기 때문이다. 최소 6개월 이상의 연속된 자료를 처리한다면 이러한 문제를 해결할 수 있을 것이라 생각된다. 표 2는 GPS관측데이터로 구한 M₂, N₂ 반일분조 부하성분의 진폭과 위상차와 NAO99jb 해양조석모델에서 구한 부하성분의 진폭과 위상차를 비교한 것이다.

표 3. GPS와 조석 모델에서 구한 반일분조에 대한 부하성분의 진폭과 위상차

| SITE | GPS Observation | | NAO99jb | | GOT00.2 | | SITE | GPS Observation | | NAO99jb | | GOT00.2 | | | |
|------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------|-------|
| | Amplitude (mm) | Phase Lag (Deg) | Amplitude (mm) | Phase Lag (Deg) | Amplitude (mm) | Phase Lag (Deg) | | Amplitude (mm) | Phase Lag (Deg) | Amplitude (mm) | Phase Lag (Deg) | Amplitude (mm) | Phase Lag (Deg) | | |
| SOCH | M2 | 12.60±0.5 | 85.6±1.2 | 13.54 | 82.5 | 10.06 | 89.2 | CHJU | M2 | 11.40±0.4 | 188.2±1.7 | 10.98 | 194.5 | 10.03 | 192.8 |
| | N2 | 4.70±0.5 | 87.3±2.5 | 2.55 | 75.2 | 1.99 | 85.8 | | N2 | 3.10±0.4 | 192.3±2.4 | 2.70 | 186.0 | 2.57 | 186.0 |
| PALM | M2 | 24.50±0.7 | 59.3±1.5 | 22.90 | 53.7 | 13.17 | 55.4 | MARA | M2 | 12.50±0.9 | 178.9±0.7 | 11.75 | 184.9 | 12.00 | 185.2 |
| | N2 | 5.20±0.7 | 40.6±1.8 | 4.25 | 32.3 | 2.32 | 47.0 | | N2 | 2.10±0.9 | 172.6±1.0 | 2.82 | 178.0 | 2.91 | 179.1 |
| MALD | M2 | 14.20±0.6 | 18.8±1.4 | 13.66 | 15.4 | 12.37 | 16.5 | YOUN | M2 | 7.10±0.7 | 128.4±3.1 | 7.66 | 139.0 | 8.37 | 138.7 |
| | N2 | 3.10±0.6 | 2.4±3.1 | 2.20 | 354.1 | 2.06 | 357.7 | | N2 | 1.70±0.7 | 136.5±3.3 | 1.64 | 140.4 | 1.84 | 135.6 |
| HONG | M2 | 12.40±0.3 | 322.6±2.4 | 10.93 | 319.7 | 9.78 | 317.2 | ULEN | M2 | 3.10±0.6 | 87.8±2.0 | 4.27 | 83.4 | 4.12 | 83.5 |
| | N2 | 4.30±0.3 | 293.1±3.3 | 2.06 | 290.2 | 1.97 | 288.9 | | N2 | 1.40±0.6 | 91.3±2.7 | 0.71 | 94.1 | 0.78 | 88.5 |
| SOHE | M2 | 7.40±0.2 | 280.7±0.8 | 8.55 | 278.04 | 9.75 | 272.6 | JUMU | M2 | 3.80±0.6 | 77.7±1.8 | 4.49 | 80.8 | 4.07 | 83.6 |
| | N2 | 3.60±0.2 | 253.3±1.5 | 1.93 | 248.40 | 2.30 | 249.1 | | N2 | 1.10±0.6 | 86.2±1.9 | 0.76 | 87.4 | 0.80 | 89.9 |
| GASA | M2 | 8.00±0.8 | 283.9±1.3 | 6.73 | 280.4 | 7.78 | 276.1 | HOMI | M2 | 4.30±0.8 | 121.7±2.5 | 5.25 | 113.2 | 5.15 | 107.4 |
| | N2 | 2.60±0.8 | 255.2±1.6 | 1.71 | 248.0 | 1.94 | 252.3 | | N2 | 1.80±0.8 | 124.9±2.9 | 1.04 | 121.2 | 1.10 | 108.7 |

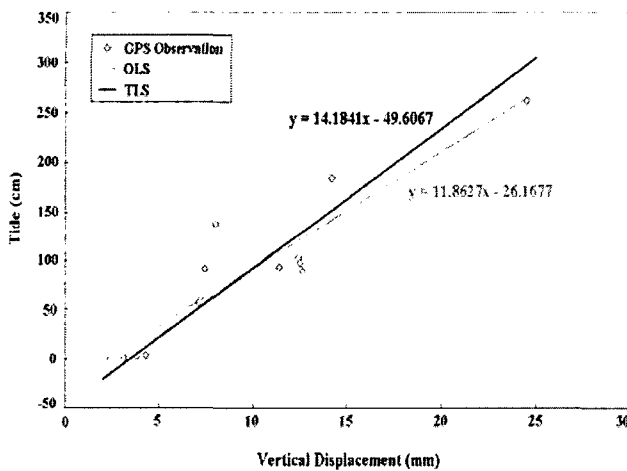
3.2 조석모델과의 비교

GPS를 이용하여 획득한 해양조석 부하성분과 실제 조석과의 영향을 분석하기 위하여 ECOMSED 조석 모델을 이용하여 각 관측소의 조석값을 구한 후 GPS 결과와 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 위하여서는 TLS(Total Least Squaer) 방법과 OLS(OLS Least Square) 방법을 적용하였으며, 반일분조 M₂, N₂의 부하영향에 의한 지각변동량과 실제 조석과의 선형회귀식을 산출하였다. 그 후 NAO.99Jb 해양조석모델에서 구한 5'×5' 간격의 한반도 연안의 해양조석에 의한 지각변동량과 비교하여 지역적인 해양조석모델의 개발 가능성에 대하여 검토하였다. 표 4는 각 GPS 관측소의 연직변동량과 조석모델에

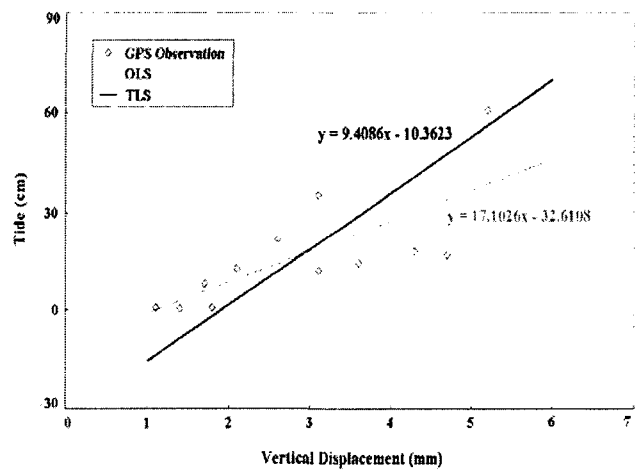
서 구한 조석값을 표시한 것이며, 그림 6은 표 4의 수치를 이용하여 구한 조석과 연직변동량의 상관관계에 대한 TLS, OLS 선형회귀식이다.

표 4. GPS 관측소의 연직변동량과 조석값

| SITE | GPS Observation | | Tide (ECOMSED tidal model) | |
|------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| | M2 Amplitude (mm) | N2 Amplitude (mm) | M2 Amplitude (mm) | N2 Amplitude (mm) |
| SOCH | 12.60 ± 0.5 | 4.70 ± 0.5 | 89.43 | 16.82 |
| PALM | 24.50 ± 0.7 | 5.20 ± 0.7 | 262.05 | 60.88 |
| MALD | 14.20 ± 0.6 | 3.10 ± 0.6 | 185.05 | 35.31 |
| HONG | 12.40 ± 0.3 | 4.30 ± 0.3 | 103.03 | 17.90 |
| SOHE | 7.40 ± 0.2 | 3.60 ± 0.2 | 91.44 | 14.50 |
| GASA | 8.00 ± 0.8 | 2.60 ± 0.8 | 138.26 | 21.85 |
| CHJU | 11.40 ± 0.4 | 3.10 ± 0.4 | 93.02 | 12.11 |
| MARA | 12.50 ± 0.9 | 2.10 ± 0.9 | 97.52 | 12.74 |
| YOUN | 7.1 ± 0.6 | 1.7 ± 0.6 | 57.44 | 8.12 |
| ULEN | 3.1 ± 0.5 | 1.4 ± 0.5 | 1.42 | 0.40 |
| JUMU | 3.8 ± 0.4 | 1.1 ± 0.4 | 2.55 | 0.64 |
| HOMI | 4.3 ± 0.4 | 1.8 ± 0.4 | 3.73 | 0.85 |



a) M2 조석과 부하영향 회귀분석



b) N2 조석과 부하영향 회귀분석

그림 6. 실제 조석과 부하영향의 상관관계 도출

얻어진 선형회귀식(OLS, TLS)을 이용하여 한반도 연안(경도 120~132°, 위도 32~40°)에 대하여 5' × 5' 간격으로 연직변동량을 추정하였으며, 이를 이용하여 GMT 소프트웨어에서 Spline 보간을 수행하였다. 그 결과 실제 조석과 해양조석 부하영향 간에 선형적인 상관관계가 있음을 알 수 있었으며, OLS로 추정된 결과보다 TLS를 이용하여 추정한 결과가 NAO.99Jb 해양조석모델에서 구한 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 다음 그림7과 8은 실제 M2, N2 조석과 해양조석모델에서 구한 조석에 의한 부하영향, GPS를 이용하여 추정한 조석의 부하영향을 표현한 것이다.

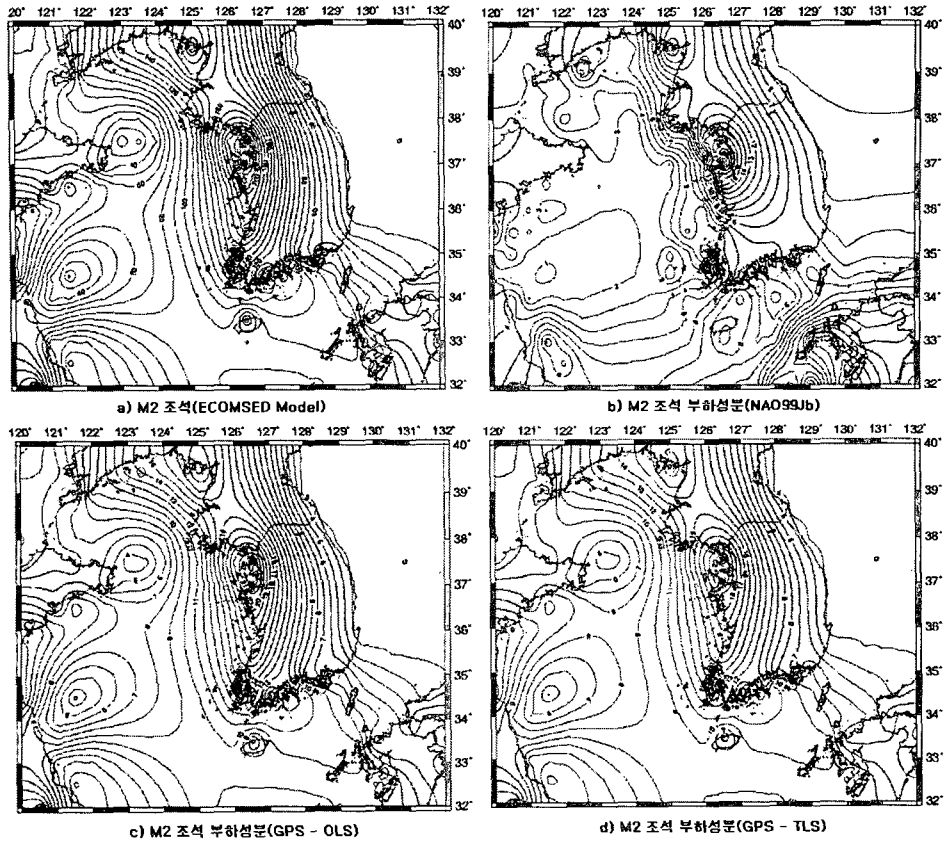


그림 7. 실제 조석과 M2 분조 부하성분의 추정

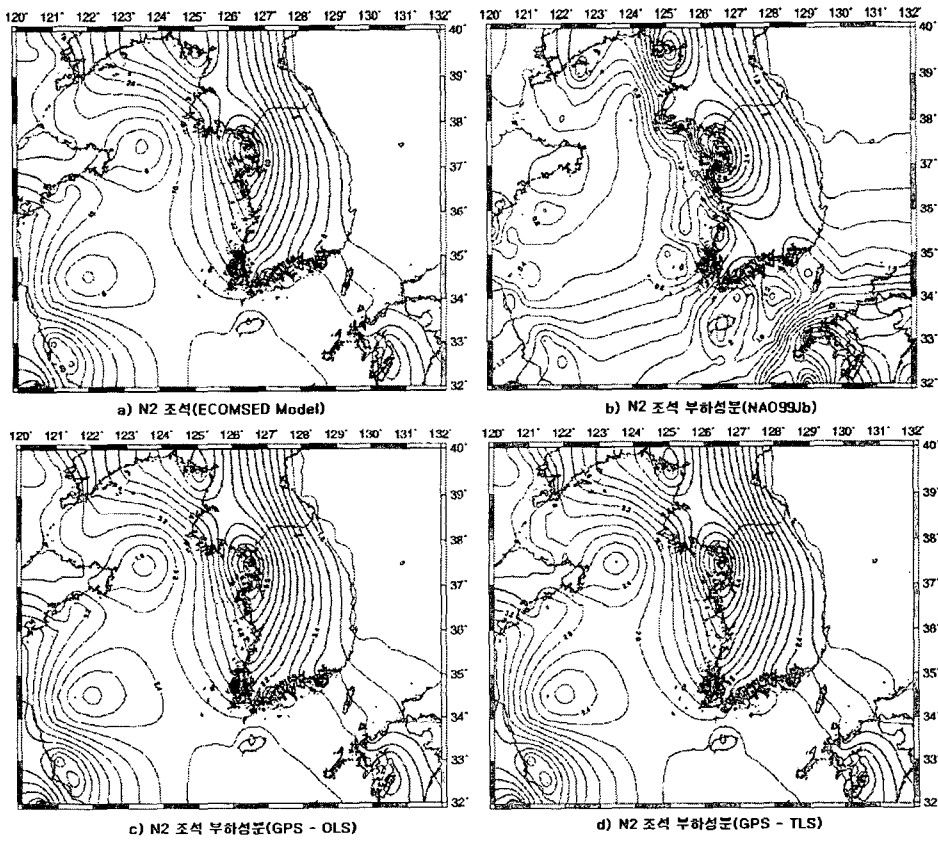


그림 8. 실제 조석과 N2 분조 부하성분의 추정

4. 결론

본 연구에서는 GPS 관측자료를 이용해서 해양조석의 반일분조 부하영향에 의한 부하성분을 결정할 수 있는지에 대하여 살펴본 후 이를 이용한 지역적인 해양조석모델의 개발 가능성을 검토해 보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. GPS 관측자료를 이용하여 해양조석의 주요 반일분조성분(M2, N2)의 부하영향으로 인한 수직방향 지각변동량은 소청도가 17.3mm, 말도가 17.3mm, 홍도가 16.7mm, 소흑산도가 11.0mm, 가사도가 10.6mm, 마라도가 14.6mm, 영도가 8.8mm, 울릉도가 4.4mm, 제주도가 14.5mm, 주문진이 4.9mm, 팔미도가 29.7mm, 호미곶이 6.1mm 정도로 나타났으며, 서해안에 위치한 팔미도가 28.7mm로 가장 크게 나타났고, 또한 소청도, 말도, 홍도, 제주도와 마라도가 각각 17.3mm, 17.3mm, 16.7mm, 14.5mm, 14.6mm로 나타나 서해안의 해양조석으로 인한 부하영향이 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있었다. 조석의 영향이 거의 없는 동해안에 위치한 영도, 울릉도, 호미곶 및 주문진은 지각변동량이 4mm ~ 8mm 사이로 작게 나타나고 있음을 알 수 있었다.
2. 기존의 해양조석모델에서 산출된 부하성분과 비교한 결과는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었고, 다년간의 GPS 관측자료와 적합한 스펙트럼 기법을 적용하면 향후 우리 나라 해양조석의 부하영향에 대한 모델링에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 해양조석모델은 특정한 지역적 현상을 포함하고 있지 않기 때문에 보다 복잡한 해안 지역은 GPS를 이용해서 실제 관측을 수행함으로써 해양조석모델의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.
3. GPS 관측을 통하여 획득된 해양조석 부하성분과 실제 조석과 선형 회귀분석을 통하여 한반도 연안의 부하성분을 추정한 결과는 NAO.99Jb 해양조석모델에서 구한 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었으며, 특히 TLS 기법을 이용하여 추정된 연직변동량이 더 잘 맞는 것으로 판단되었다.
4. 많은 수의 GPS 관측을 통하여 한반도 연안의 해양조석 부하성분을 정확하게 산출하여 회귀분석 등을 통하여 실제 조석과의 상관관계를 명확하게 정립한다면 우리나라에 적합한 해양조석모델을 개발하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Khan, S. A., and C. C. Tscherning (2001) Determination of semi-diurnal ocean tide loading constituents using GPS in Alaska. *Geophys. Res. Lett.* 28(11):2249-2252
2. Khan, S. A. and H. G. Scherneck (2002) The M2 ocean tide loading wave in Alaska : Vertical and horizontal displacements, modelled and observed. *Journal of Geodesy.* 20-12-2002
3. Baisch, Stefan. and H. R. Bokelmann (1999) Spectral analysis with incomplete time series : an example from seismology. *Computer & Geosciences* 25: 739-750
4. Baker, Trevor F., Deborah J, Curtis and Alan H. Dodson (1995) Ocean Tide Loading and GPS. *GPS WORLD*: 54-59
5. Dragert, F., T. S. James, and A. Lambert (2000) Ocean loading corrections for continuous GPS: A case study at the Canadian coastal site Holberg. *Geophys. Res. Lett.* 27: 2045-2048
6. Egbert, G. D., Bennett, A. F., and Foreman, M. G. G. (1994) TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. *J. Geophys. Res.* 99(C12): 24,821-24,852
7. Kirchner, M. (2001) Study of local site displacements due to ocean tide loading using a GPS network in Island. Research Report no.184. Onsala Space Observatory. Sweden