

GPS관측 데이터를 이용한 해양의 조석성분 결정

Determination of Ocean Tidal components by GPS Observations

윤홍식¹⁾, Hong-Sic Yun · 이동하²⁾, Dong-Ha Lee

¹⁾ 성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Univ. of Sungkyunkwan

²⁾ 성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil & Environmental Eng., Univ. of Sungkyunkwan

SYNOPSIS : This paper deal with the GPS performance for determining the ocean tidal loading components(M_2 , N_2 , S_2 , K_2) and the availability of permanent GPS stations(CHJU, KANR) established in Korea. We determined the ocean tidal loading components from GPS observation by spectrum analysis and compared to that from global ocean tidal models(GOT00.2, FES99, CRS4.0, NAO99) Through this study, we have a sense that amplitude and phase lags of ocean tidal loading components from observed GPS data was almost equal to value calculated in ocean tide models. The diurnal ocean tide loading constituents are not considered, because unmodeled troposphere effects increase the noise level near the diurnal frequency band and prevent us from obtaining significant results.

Key words : spectral analysis, ocean tidal loading components, noise level

1. 서론

DGPS의 정확도 향상으로 인하여 DGPS를 이용한 해양의 주요 조석 loading 성분들의 amplitude와 phase lag을 직접 추정하는 것이 가능하여졌다. DGPS를 사용하여 GPS관측소 2개소간의 기선벡터를 처리하면 관측점간의 상대적인 높이차를 계산할 수 있고, 이들의 시계열로부터 해양조석의 loading 성분들을 직접 결정할 수 있다.

Sovers(1994)는 최초로 VLBI 데이터로부터 해양의 loading amplitude를 결정할 수 있다는 것을 발표하였으며, Hass와 Schjh(1999) 또한, 1979~1995년 사이에 관측된 전 세계의 132개 VLBI관측망으로부터 얻은 약 800,000개의 VLBI delay관측치로부터 해양의 loading 파라미터들을 추정하였다. Khan과 Tschering(2002)은 알래스카 지역의 GPS관측치를 사용하여 반일분조해양조석 loading 성분들을 결정하였다. 이들은 알래스카 지역에서 여러개의 연직해양조석 loading 효과를 구하기 위하여 2개의 상시관측소를 선정하였다. 2개의 GPS관측소간의 기선을 계산하여 비교적 차이가 큰 loading 효과를 얻었다. 얻어진 결과를 해석하기 위하여 GSFC가 개발한 전 지구 해양조석 모델인 GOT99.2로부터 모든 일분조 및 반일분조 성분들을 계산하였다. 결과로부터 GPS로 관측된 결과와 모델링 된 M_2 , N_2 amplitude와 phase lag이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이들은 2000년 6월 13일부터 7월 31일(49일간)까지의 GPS관측데이터를 사용하였으며, 데이터 처리용 소프트웨어는 Berense 4.2를 사용하였다. 연구결과로부터 S_2 와 K_2 loading 파장을 분리하기 위하여 6개월 이상의 연속관측 데이터를 분석할 필요가 있다는 것을 제안하였다.

본 연구의 목적은 해양조석의 loading 효과가 매우 큰 것으로 알려져 있는 우리나라에 설치된 GPS 상시관측소 데이터를 사용하여 반일분조해양조석 loading 성분들을 계산하여 분석함으로써 GPS에 의한 해양조석 loading 성분들의 계산을 실시하여 GPS상시관측소 자료를 이용한 해양조석의 연구를 수행하는데 있다.

2. GPS데이터 처리 및 분석

본 연구에서는 연직해양조석 loading의 영향을 계산하기 위해서, 수원(SUWN), 제주(CHJU), 강릉(KANR)의 총 세 개의 GPS 상시관측소를 선택했다. 그리고 수원 관측소를 고정점으로 하여 제주, 강릉 관측소와의 상대적인 높이차를 구하였다. 연구에 사용한 GPS데이터는 2002년 1월 1일부터 2월 28일까지 총 59일간의 데이터이며, 데이터를 처리하기 전에 자동편집기능을 사용하여 상태가 좋지 않은 데이터, 사이클 슬립 검사 및 보정등을 실시하였다. 그림 1은 본 연구를 위하여 선정한 GPS 상시관측소의 위치를 표시한 것이며, 표 1은 선정된 GPS상시관측소의 ITRF97 좌표이다.

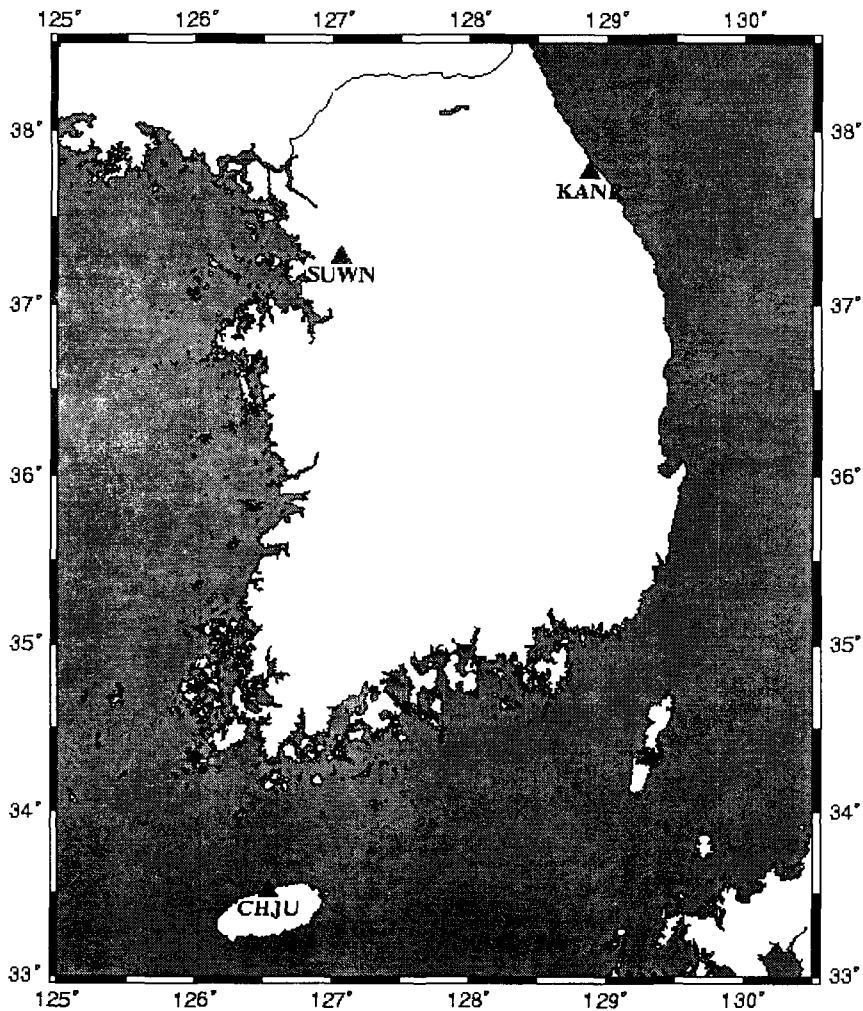


그림 1. GPS상시관측소 위치

표 1. GPS상시관측소 좌표(ITRF97)

Station name	X (m)	Y (m)	Z (m)
SUWN(수원)	-3062023.5305	4055449.0875	3841819.2607
CHJU(제주)	-3168622.2821	4277489.6050	3501650.0616
KANR(강릉)	-3167833.7078	3930397.1767	3885411.9486

데이터의 처리를 위해서 JPL에서 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 10^{-9} 이상으로 처리할 수 있는 것으로 알려져 있다. 데이터 처리전략은 IGS 표준(McCagty, 1992)에 따라서 처리하였으며, 데이터의 획득기간동안에 누락된 데이터는 CLEAN 알고리즘(Stefan 등, 1999)을 사용하여 보간하였고, 이를 이용하여 스펙트럼 분석을 실시함으로써 해양조석의 반일분조상수 M2, N2, S2 및 K2를 계산하였다.

본 연구에서 수행한 GPS데이터 처리는 Solid Earth Tide와 Pole Tide 보정을 적용하였으며, 2중차 L3 phase 해석을 실시하였다. 시간별 해석결과를 구하기 위하여 미리 결정된 불확정정수와 Saastamoinen 대류권 모델을 사용하였으며, Ocean loading 보정은 적용하지 않았다. 또한, 대류권의 Zenith Delay(ZD)는 Dragert 등(2000)에 의하면 loading 시그널에 흡수되거나 제거되기 때문에 추정하지 않았다. 대류권의 ZD 추정량을 무시함으로써 발생하는 문제점은 대류권의 영향이 노이즈로 취급되거나 또는 이러한 영향의 어느 정도는 거의 일 변화량 즉, 일 기온변화량을 가지기 때문에 일별 loading 성분을 추정하는 것이 어렵다는 점이다. 반면, 장점은 반일주조 loading 성분들을 loading 시그널이 대류권 추정량에 흡수되지 않고서 추정된다는 점이다. 즉 대류권의 영향은 반일분조 해양조석 loading 시그널에 영향을 주지 않는다는 것이다. 그림 2와 그림 3은 SUWN과 각 상시관측소간의 상대적인 높이차를 구하여 표시한 시계열 분포도이다.

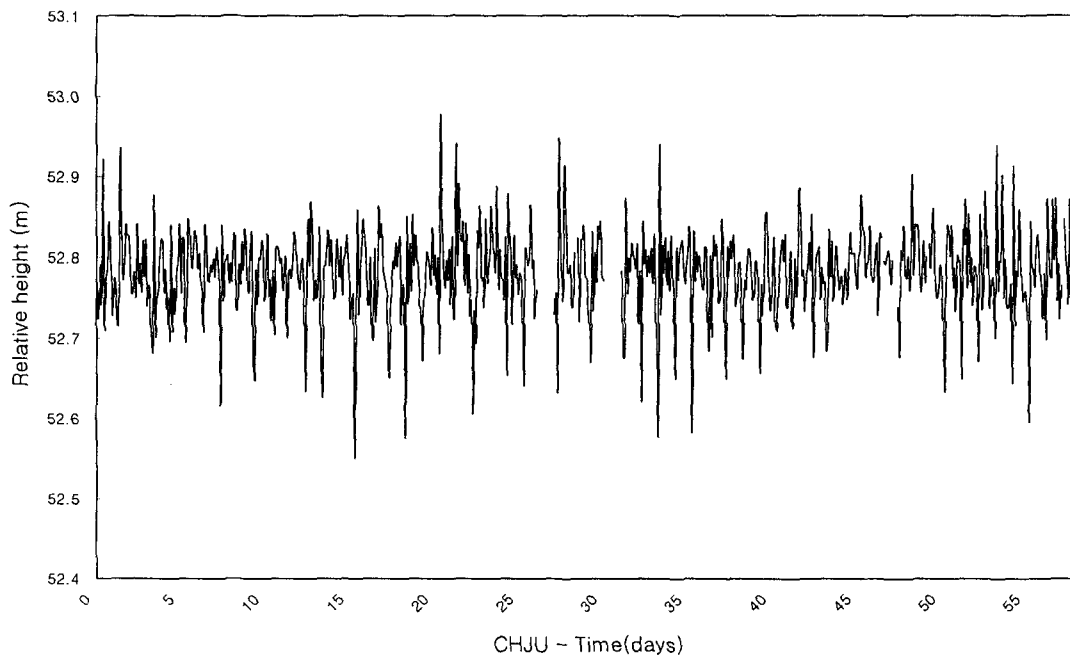


그림 2. SUWN과의 상대적인 높이차 시계열 분포도(CHJU)

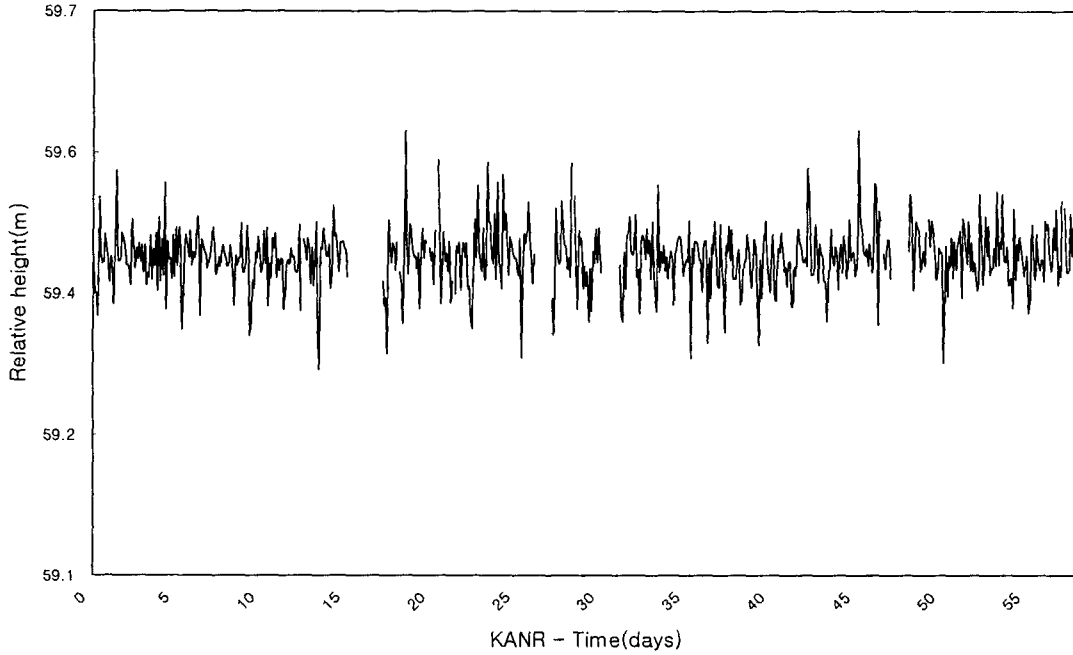


그림 3. SUWN과의 상대적인 높이차 시계열 분포도(CHJU)

그림 2와 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 각 관측소별로 데이터의 손실이 발생하여 누락된 부분이 있기 때문에 해양조석성분의 amplitude와 phase lag을 구하기 위한 스펙트럼 분석을 위하여 누락된 부분에 대한 보간이 필요하다. 보간과 스펙트럼 분석을 위하여 다양한 방법들을 이용할 수 있지만 관측치의 주기적인 변화량을 안정적으로 분석하기 위하여 CLEAN 알고리즘을 사용하였다.

CLEAN 알고리즘의 개념은 cosinusoidal(복소)의 증폭을 구하기 위하여 이산 시계열에 대하여 식 (1)과 (3)을 사용하여 모든 sidelobe에 포함된 스펙트럼에 대한 영향을 제거하는 것이다. 이산 시계열에 대하여 데이터점들이 f_r 중에서 손상되는 경우에 얻어지는 dirty 스펙트럼 $F_s(\nu)$ 의 방정식

$$F(\nu) = a \delta(\nu - \hat{\nu}) + a^* \delta(\nu + \hat{\nu}) \quad (1)$$

로 표시되며, $S(0) = 1$ 인 경우에 peak 주파수 $\hat{\nu}$ 에서

$$F(\hat{\nu}) = a + a^* S(2\hat{\nu}) \quad (2)$$

로 된다.

유사하게 F^* 을 쓰고 a^* 에 대입하면 그 주파수 $\hat{\nu}$ 를 알고 있는 경우에 식 (3)을 사용하여 peak의 증폭 a 를 결정할 수 있다.

$$a(\hat{\nu}) = \frac{F_s(\hat{\nu}) - F_s^*(\hat{\nu}) S(2\hat{\nu})}{1 - \|S(2\hat{\nu})\|^2} \quad (3)$$

CLEAN 알고리즘에 대한 상세한 내용은 Roberts 등(1987)과 Stefan 등(1999)를 참조할 수 있다. 그림 4는 CLEAN 알고리즘을 사용하여 보간된 상대적인 표고차의 시계열 분포도이며, 그림 5는 시계열 분포도를 바탕으로 한 해양조석 loading 성분들에 대한 Power 스펙트럼을 표시한 것이다.

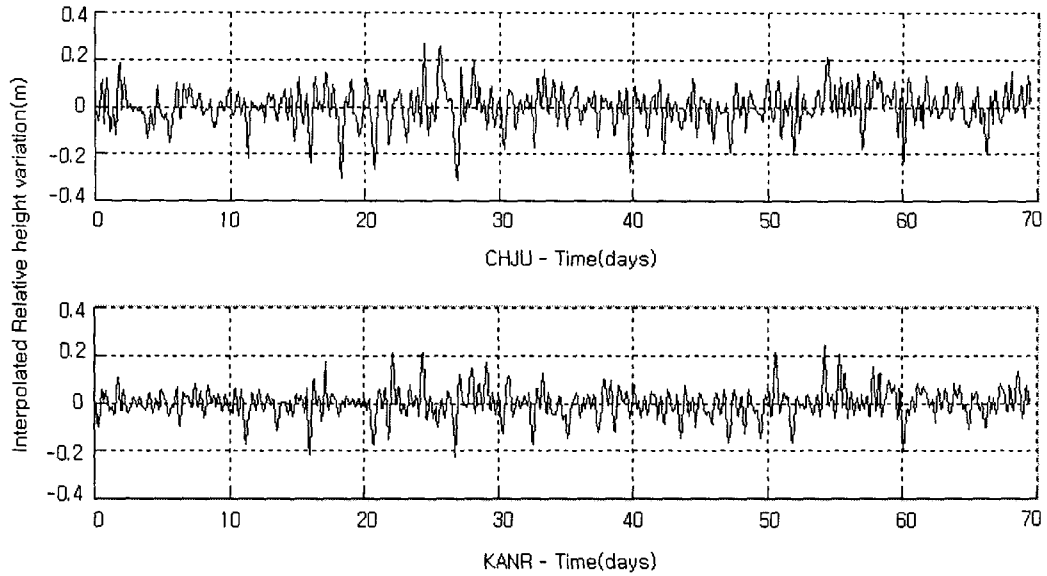


그림 4. CLEAN 알고리즘을 통해 보간된 상대적 표고차 시계열 분포도

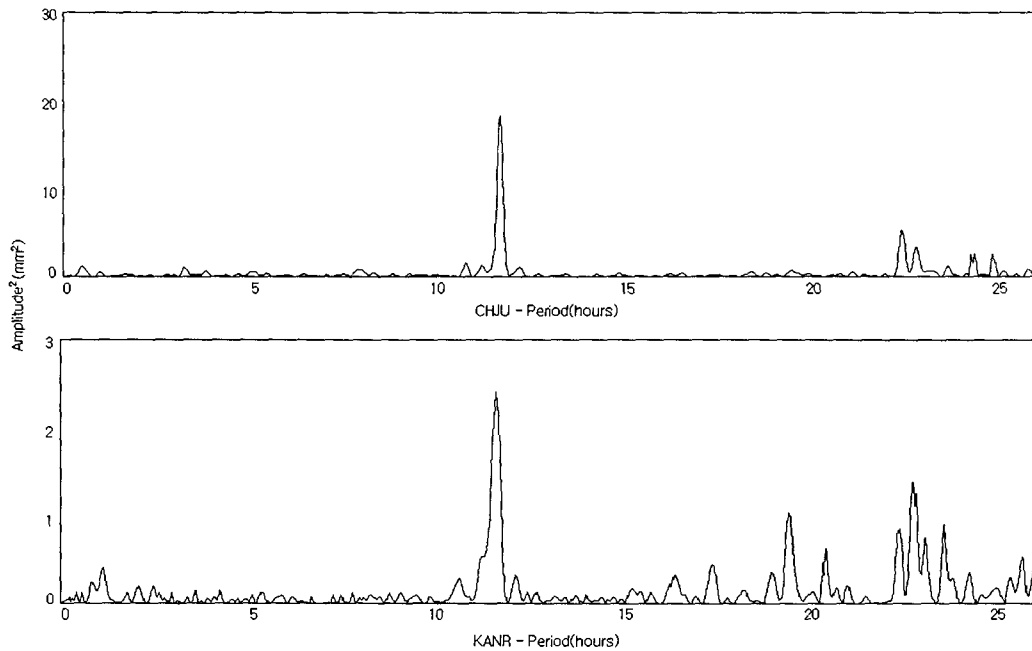


그림 5. CLEAN 알고리즘을 통해 구한 Power 스펙트럼

3. 비교 및 분석

GPS관측에 의하여 계산된 해양조석 loading 성분들을 분석하기 위하여 조석 모델들(GOT00.2, FES99, CRS4.0, NAO99)과 비교하였다. 본 연구에서 선정된 GPS상시관측소의 좌표를 이용하여 각 모델에서 해양조석 loading 성분들을 추출하고, 추출된 loading 성분의 amplitude와 phase lag에 inverse FFT를 적용하여 각 모델별의 해양조석 loading 성분을 결정하는 연직 변위의 시계열 분포를 역계산하였다. 해양

조석 모델들 중의 하나인 GOT00.2에 따르면 제주의 경우 약 12cm의 연직 변위가 계산되었는데, 이는 고형지구조석(Solid Tidal loading) 영향의 20%에 달하는 상당히 큰 수치이다. 표 2는 각 모델들의 해상도를 나타내고 있으며, 그림 6은 GOT00.2 모델에서 구한 한반도 주변의 연직해양조석 loading 영향의 최대치를 1cm의 간격으로 표시한 Contour Map이다.

표 2. 해양조석 모델의 해상도

Global ocean tidal model	Resolution (deg × deg)
GOT00.2	0.5 × 0.5
FES99	0.25 × 0.25
CRS4.0	0.5 × 0.5
NAO99	0.5 × 0.5

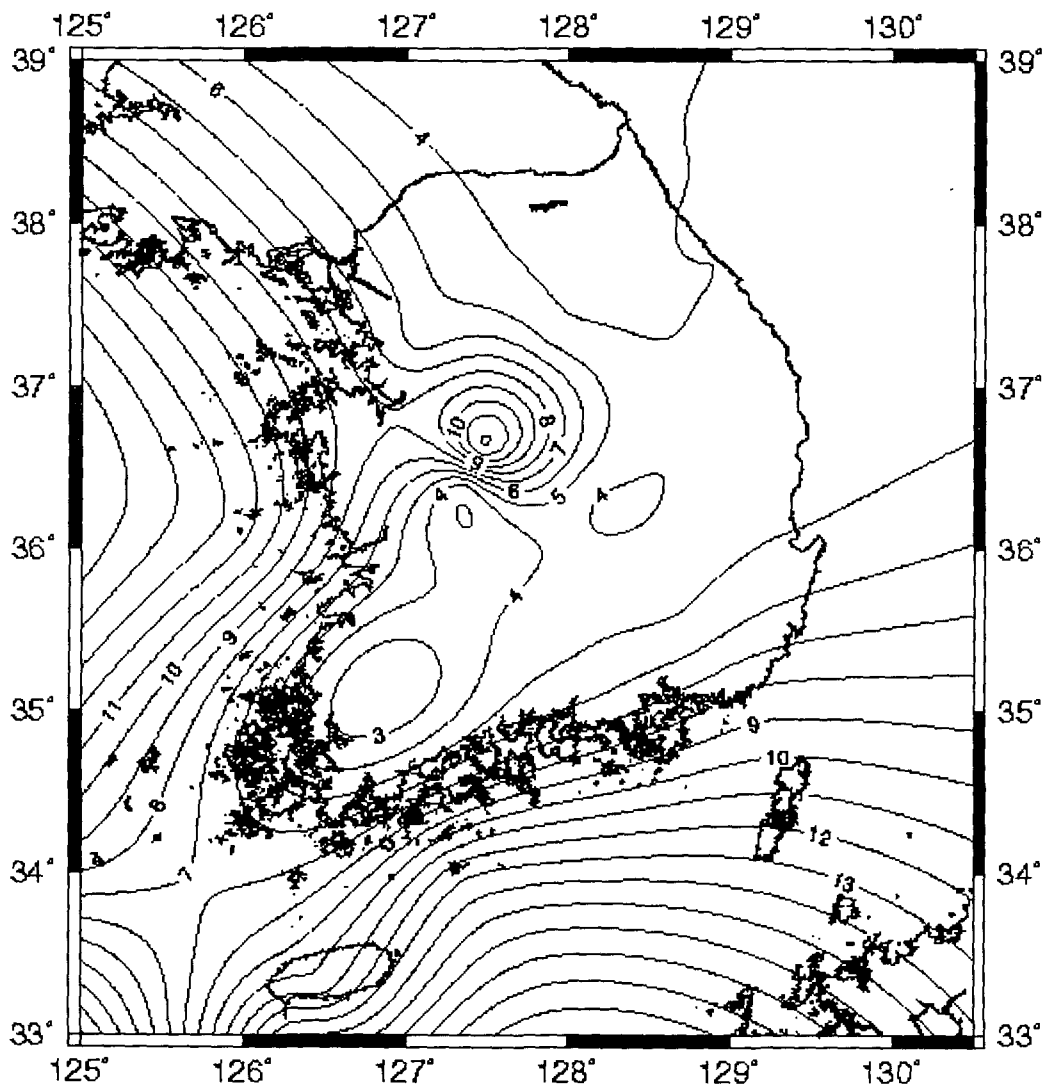


그림 6. 한반도 연직해양조석 loading 영향에 대한 Contour Map(GOT00.2)

이렇게 모델에서 구한 반일분조상수의 amplitude와 phase lag을 GPS로 관측된 결과에서 구한 amplitude와 phase lag과 비교하고, 또한 모델에서 구한 연직 변위를 이용하여 Power 스펙트럼을 작성한 후, 이를 GPS데이터 처리를 통해 구한 Power 스펙트럼과 비교하여 GPS를 통해 구한 반일분조상수의 신뢰성을 분석하였다. 그 결과 그림 7과 8에서 보여지듯이 M_2 주기에 동일한 peak를 그리는 진폭의 양상을 나타냄을 알 수 있었다. 본 연구에서는 S_2 와 K_2 를 하나의 과장으로 간주하였는데 49일간의 데이터만을 이용하여서는 12시간의 주기를 가지고 있는 S_2 와 11시간 58분의 주기를 가지고 있는 K_2 에서 분리할 수 없었기 때문이다. 최소 6개월 이상의 연속된 데이터를 처리한다면 이러한 문제를 해결할 수 있을 것이라 생각된다.

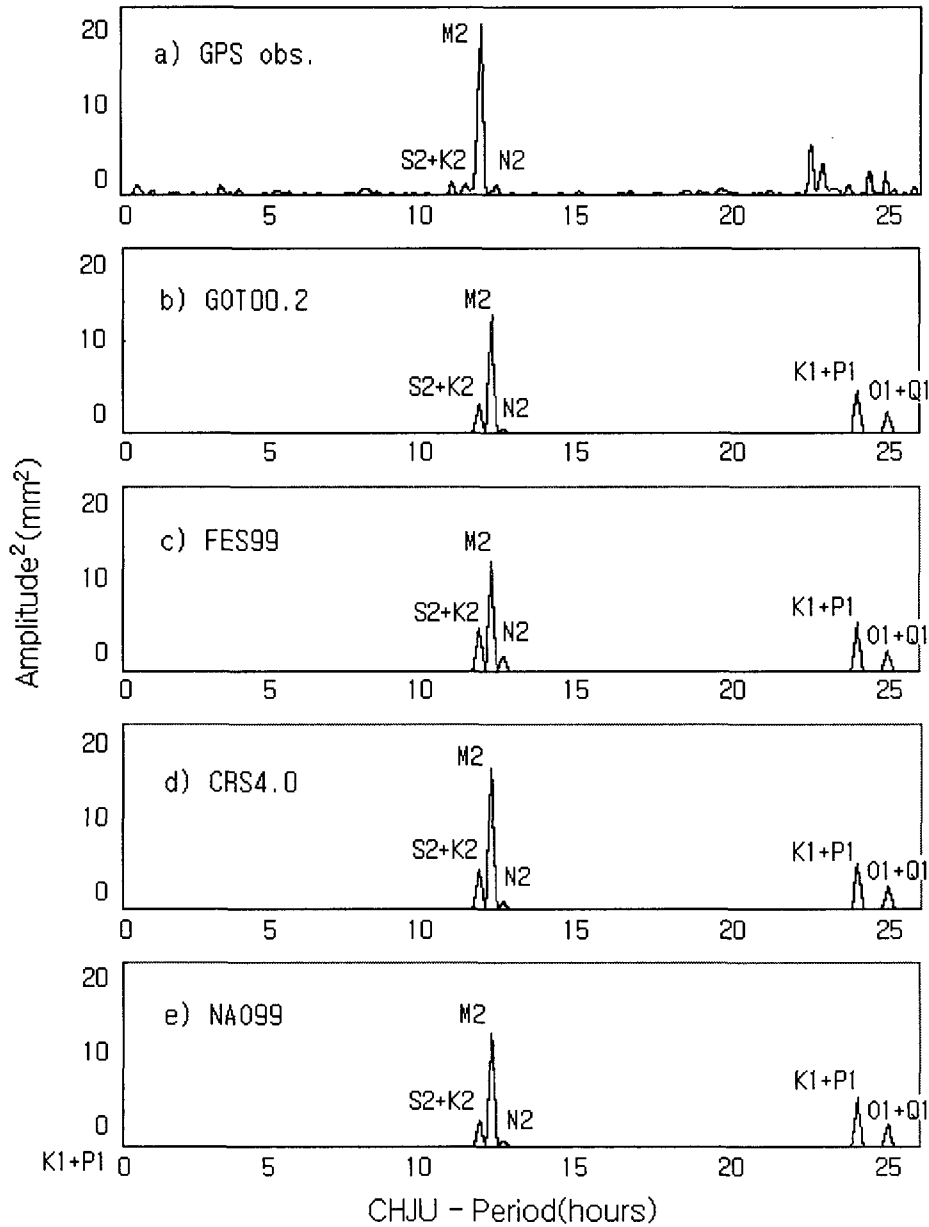


그림 7. GPS와 조석 모델을 이용하여 구한 수직 변위의 Power 스펙트럼 분석(CHJU)

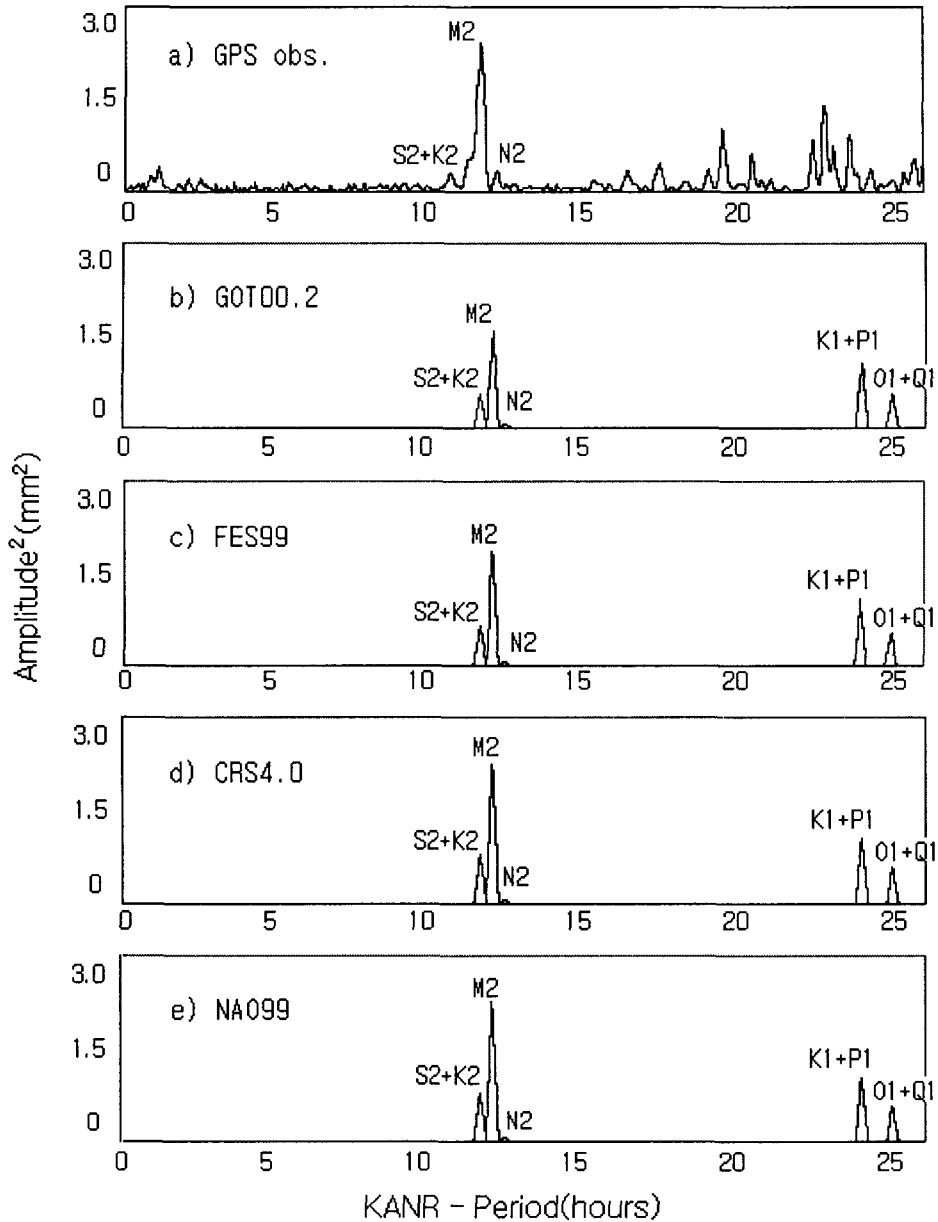


그림 8. GPS와 조석 모델을 이용하여 구한 수직 변위의 Power 스펙트럼 분석(KANR)

그림 7과 8에서 GPS를 이용하여 구한 Power 스펙트럼의 형상을 보면 CHJU의 경우 9시부터 23시까지, KANR의 경우 3시부터 15시까지의 주기에 매우 적은 노이즈를 관찰할 수 있다. 이는 반일분조 해양 조석 loading 시그널을 직접 관측하여 사용할 수 있는 가능성을 보여준다. 그러나 일분조성분의 주파수 영역에서는 노이즈의 양이 증가함을 알 수 있는데, 이는 모델화되지 않은 GPS 대류권 신호지연에 영향을 받았을 것이라고 생각된다. 또한 위성궤도 오차와 멀티패스도 영향을 주었다고 생각된다. 따라서 이러한 문제로 인하여 일분조상수인 K_1 , O_1 , P_1 및 Q_1 을 산정하지 못하였다.

표 3과 4는 GPS관측데이터로 구한 각 반일분조상수의 amplitude와 phase lag을 조석 모델에서 구한 amplitude와 phase lag을 비교한 것이다. 관측된 수치와 모델에서 구한 수치 양쪽에서 보여지듯이 가장 큰 amplitude를 가진 M_2 는 모델의 수치와 거의 일치되는 양상을 보이고 있다. 또한 N_2 의 수치도 거의 일치되는 양상을 보인다. 하지만 S_2+K_2 의 수치는 모델에서 구한 수치보다 작게 평가되었으며, M_2 와 N_2

에 비해 상대적으로 잘 부합되지 않는 양상을 보이고 있다. 앞에서도 언급했듯이 이러한 문제는 좀 더 많은 양의 데이터를 처리한다면 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

표 3. GPS와 조석 모델에서 구한 반일분조상수의 amplitude와 phase lag(CHJU)

구분	GPS		GOT99.2b		FES99		CRS4.0		NAO99b	
	Amp. (mm)	Phase (deg.)	Amp. (mm)	Phase (deg.)	Amp. (mm)	Phase (deg.)	Amp. (mm)	Phase (deg.)	Amp. (mm)	Phase (deg.)
M ₂	13.50±0.38	-139.5±0.9	11.31	-164.2	10.90	-163.7	12.33	-160.3	11.10	-162.5
N ₂	3.10±0.38	-137.3±0.9	2.77	-169.6	4.19	-173.7	2.95	-168.2	2.76	-174.8
S ₂ +K ₂	3.50±0.38	-112.7±0.9	5.81	-137.7	6.92	-136.8	6.55	-132.3	5.44	-140.1
S ₂	NA	NA	4.24	-132.6	4.81	-144.8	5.13	-133.1	4.24	-137.0
K ₂	NA	NA	1.57	-142.7	2.11	-128.7	1.42	-131.4	1.20	-143.1

표 4. GPS와 조석 모델에서 구한 반일분조상수의 amplitude와 phase lag(KANR)

구분	GPS		GOT99.2b		FES99		CRS4.0		NAO99b	
	Amp. (mm)	Phase (deg.)	Amp. (mm)	Phase (deg.)	Amp. (mm)	Phase (deg.)	Amp. (mm)	Phase (deg.)	Amp. (mm)	Phase (deg.)
M ₂	4.9±0.32	64.8±1.3	3.95	86.7	4.38	78.0	4.79	84.4	4.42	90.9
N ₂	1.3±0.32	69.9±1.3	0.74	95.4	0.88	105.4	0.90	89.0	0.90	94.6
S ₂ +K ₂	1.7±0.32	78.4±1.3	2.33	100.3	2.56	111.7	2.56	101.3	2.56	102.7
S ₂	NA	NA	1.70	88.8	2.02	112.2	2.23	100.1	1.85	105.3
K ₂	NA	NA	0.63	111.7	0.54	112.1	0.61	102.5	0.54	100.0

4. 결론

본 연구에서는 GPS관측데이터를 이용해서 해양조석 loading 성분인 반일분조상수를 결정할 수 있는가에 대한 가능성을 살펴 보았다. 그 결과 반일분조상수 M₂, N₂, S₂+K₂의 수치를 만족할만한 수준으로 결정할 수 있었다. 이는 향후 해양조석 loading 성분의 영향에 대한 모델링을 하는데 큰 도움을 줄 것으로 판단된다. 특히 범 지구 대양 조석 모델은 지역적 현상(wave interaction, bottom friction 등)을 포함하고 있지 않기 때문에 보다 복잡한 해안 지역은 GPS를 이용해서 실제 관측을 수행함으로써 해양조석 loading 모델의 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다.

그리고 전체 해양조석 loading 스펙트럼을 사용하여 일분조상수(K₁, P₁, Q₁, O₁ 등)와 반일분조상수(M₂, N₂, S₂, K₂ 등) 등을 포함한 모든 주요 해양조석 loading 성분의 정확한 amplitude와 phase lag을 구하기 위해서는 대류권의 영향을 고려해야 하는데, 대류권 신호지연량은 해양조석 loading 시그널에 흡수되지 않도록 따로 모델링되어서 산출되어야 한다. 이러한 문제의 해결을 위해서 기상학적 관측치를 사용하여 대류권 신호지연량을 산정할 필요가 있다고 생각된다. 또 노이즈의 증가로 인해 산출하지 못한 일분조상수를 결정하기 위해서는 6개월 이상의 GPS 데이터를 처리해야 할 필요가 있다.

또한 제주(CHJU)와 같이 해양조석의 영향이 큰 지역은 GPS관측데이터에서 구할 수 있는 수평방향의 변위를 이용하여 수평방향의 분조상수의 amplitude와 phase lag을 산정하여 해양조석 모델과 비교·분석할 필요가 있다고 생각한다

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 M_2 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
8. Lambert, A., S. D. Pagiatakis, A. P. Billyard and H. Dragert (1998) Improved ocean tide loading correction for gravity and displacement: Canada and northern United States. *J. Geophys. Res.* 103(B12): 30231-30244
9. Le Provost, C., Genco, M. L., Lyard, F., Vincent, P., and Can-ceil, P. (1994) Spectroscopy of the world ocean tides from a finite-element hydrodynamic model. *J. Geophys. Res.* 99(C12): 24,777-24,797
10. Lefvre, F., F. H. Lyard, Le Provost, C. and E. J. O. Schrama, FES99: A tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information. *J. Atm. Oceano. Tech.* 19 (9), in press
11. Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M. (2000) Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan. *J. of Oceanog.* 56: 567-581
12. Ray, R. (1999) A Global ocean tide model from T/P altimetry: GOT99.2. NASA Technical Memorandum. NASA/TM-1999-209478. National Aeronautics and Space Administration. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA
13. Ray, R.D. and B.V. Sanchez (1989) Radial Deformation of the Earth by Oceanic Tidal Loading. NASA Technical Memorandum 100743. NASA. Greenbelt, MD, USA
14. Rothacher, M., G. Beutler, R. Weber and J. Hefty (2001) High-Frequency Variation of Earth Rotation from Global Positioning System Data. *J. Geophys. Res.* 106(B7): 13711-13738
15. Row, L. W., D. A. Hastings, and P. K. Dunbar (1995) Terrain-Base Worldwide Digital Terrain Data. CDROM. NOAA. National Geophysical Data Center. Boulder CO. USA
16. Scherneck, Hans-Georg (1991) A parametrized solid earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic base-line measurements. *Geophys. J. int.* 106: 677-694