

GPS 상시관측소에서의 해양조석 부하로 인한 부하성분의 결정 Determination of Ocean Tidal Loading Components at GPS Permanent Stations

윤홍식¹⁾ · 이동하²⁾

Yun, Hong Sic · Lee, Dong Ha

Abstract

This paper have calculated a relative heights of an each station using the data which were observed by GPS permanent stations(Chejudo, Homigoj, Jumunjin, Marado, Palmido, Uleungdo, Youndo) established in Korea. We performed spectrum analysis with a calculated relative heights by CLEAN algorithm. Through these process, we estimated vertical displacement of earth surface by semi-dinural ocean tidal loading components, and compared them with the results which were calculated by improving ocean tide model(NAO99jb) for adjacent seas around Japan and Korea. As the result of this study, we determined the ocean tidal loading components with loading effects of M_2 and N_2 , and we noted that the amplitude and the phase lags of ocean tidal loading components from observed GPS data were almost equal to values calculated from ocean tide models. However, the loading components about semi-diurnal tide S_2 , K_2 couldn't estimate because of periods. Also, the diurnal ocean tide loading components were not considered, because the noise level have increased during the diurnal frequency.

Keywords : GPS, CLEAN algorithm, Ocean Tidal Loading Components

요 지

본 논문에서는 우리 나라 해안에 설치된 GPS상시관측소(제주도, 호미곶, 주문진, 마라도, 팔미도, 울릉도, 영도) 데이터를 사용하여 각 관측소의 상대적 높이차를 구한 후, CLEAN 알고리즘에 의한 스펙트럼 분석을 실시함으로써 해양조석의 부하성분들 중에서 반일분조성분으로 인한 지각의 연직변동량을 추정하고, 이들을 일본과 우리나라 주변에 대하여 지역적으로 개량한 해양조석모델(NAO99jb)로부터 계산된 결과들과 비교·분석을 실시하고자 하였다. 그 결과, 총 4개의 반일분조(M_2 , N_2 , S_2 , K_2) 중 M_2 와 N_2 의 부하효과에 의한 부하성분의 진폭 및 위상차를 결정하였으며, 관측된 부하성분의 진폭과 위상차는 모델에서 구한 부하성분의 진폭과 위상차와 거의 일치되는 양상을 보이고 있었다. 그러나 주기의 문제로 인해 S_2 , K_2 반일분조에 대한 부하성분은 산출하지 못하였으며, 또한 일분조(Diurnal) 주기에서는 잡음의 양이 증가함으로 인하여 부하성분을 산출하지 않았다.

핵심용어 : GPS, CLEAN 알고리즘, 해양조석 부하성분

1. 서 론

상대측위(DGPS)의 정확도가 향상됨에 따라서 DGPS를 사용하여 해양조석의 주요 부하성분(loading components)들의 진폭(amplitude)과 위상차(phase lag)를 추정할 수 있게 되었다. DGPS 방법에 의하여 2개소의 GPS 관측점간의 기선벡터를 처리하여 관측점간의 상대적인 높이차를 계산

하여 이들의 시계열 데이터로부터 해양조석의 부하성분들을 직접 결정할 수 있다. Sovers(1994)는 VLBI 데이터를 사용하여 해양조석의 부하성분들에 대한 진폭을 결정할 수 있다는 것을 발표하였으며, Hass와 Schuh(1999) 또한, 1979~1995년 사이에 관측된 전 세계의 132개 VLBI관측망으로부터 얻은 약 800,000개의 VLBI 관측치로부터 해양조석의 부하성분들을 추정하였다.

1) 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 조교수, 공학박사(E-mail:yhs@geo.skku.ac.kr)

2) 연결저자 · 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, 공학석사(E-mail:dhlee@geo.skku.ac.kr)

Khan과 Tschering(2002)은 알래스카 지역의 GPS관측치를 사용하여 해양조석의 부하성분들에 대한 반일분조성분을 결정하였다. 이들은 알래스카 지역에서 해양조석의 부하로 인한 연직방향의 영향을 구하기 위하여 2개의 상시관측소를 선정하여 GPS관측소간의 기선을 계산한 결과, 비교적 차이가 큰 부하효과가 있음을 밝혔다. 추정된 결과를 해석하기 위하여 Goddard Space Flight Center(GSFC)가 개발한 전 지구 해양조석 모델인 GOT99.2로부터 모든 일분조 및 반일분조의 부하성분들을 계산하였으며, 그 결과로부터 GPS로 관측된 결과와 모델링된 M_2 , N_2 의 진폭과 위상차가 비교적 잘 일치하는 것을 입증하였다. 이들은 2000년 6월 13일부터 7월 31일(49일간)까지의 GPS관측데이터를 사용하였으며, 데이터 처리용 소프트웨어는 Berense 4.2를 사용하고, 연구결과로부터 해양조석의 S_2 와 K_2 부하성분을 분리하기 위해서는 6개월 이상의 연속관측 데이터를 분석할 필요가 있다는 것을 제안하였다.

본 연구의 주요 목적은 우리나라에 설치된 GPS상시관측소 데이터를 사용하여, 해양조석의 부하영향에 의한 부하성분들 중에서 반일분조(M_2 , N_2)의 부하성분을 계산하여 CLEAN 알고리즘(Roberts 등, 1974 ; Stefan 등, 1999)에 의한 스펙트럼 분석을 실시함으로써, 해양조석으로 인한 지각의 연직변동량을 추정하고, 이들을 일본과 우리나라 주변에 대하여 지역적으로 개량한 해양조석모델(NAO99jb)로부터 계산된 결과들과 비교·분석을 하는데 있다.

2. GPS데이터 처리

2.1 사용데이터

본 연구에서는 우리나라 연안의 해양조석 부하로 인한 GPS 상시관측소의 연직변동량 계산하기 위해서 해양수산부에서 운영하는 마라도(MARA), 영도(YOUN), 울릉도(ULEN), 주문진(JUMU), 팔미도(PALM) 및 호미곶(HOMI)의 6개 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 자동편집기능을 사용하여 상태가 좋지 않은 데이터를 제거하고, 사이클 슬립 검사 및 보정 등을 실시하였다. 그림 1은 본 연구를 위하여 선정한 GPS 상시관측소

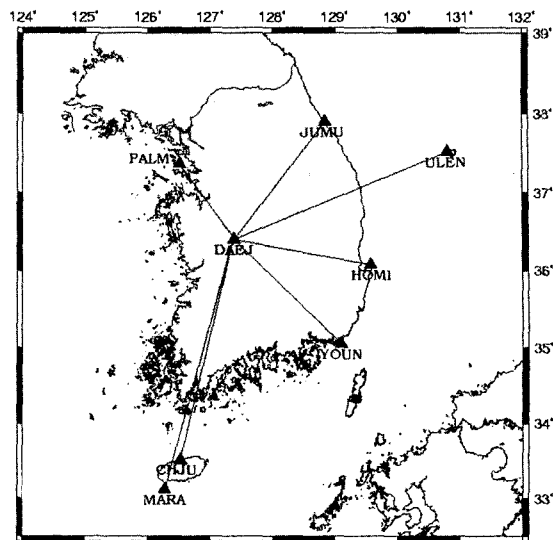


그림 1. GPS 상시관측소 위치

의 위치를 표시한 것이다.

2.2 데이터 처리

데이터의 처리를 위한 소프트웨어는 Jet Propulsion Laboratory(JPL)에서 개발한 GIPSY/OASIS-II를 사용하였고, 정밀력은 FLINN 네트워크를 통해 획득한 JPL의 정밀궤도력(ECI file)을 사용하였다. GIPSY/OASIS-II는 Lichten과 Border(1987)에 의하면 기선해석 시 정밀도 1×10^{-9} m 까지 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)과 각 상시관측소

표 1. DAEJ과 각 관측소간의 기선길이

Baselines	Baseline length(m)
DAEJ - CHJU	329245.0646
DAEJ - HOMI	200249.3960
DAEJ - JUMU	210542.7701
DAEJ - MARA	377889.9961
DAEJ - PALM	131358.8102
DAEJ - ULEN	329135.2493
DAEJ - YOUN	215572.6809

간의 기선길이를 나타낸 것이다.

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 천장방향지연(Zenith Delay)는 Dragert 등(2000)에 의하면 부하 시그널에 흡수되거나 제거되기 때문에 추정하지 않았다. 대류권의 천정방향지연 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 분포도이다.

2.3 CLEAN 알고리즘

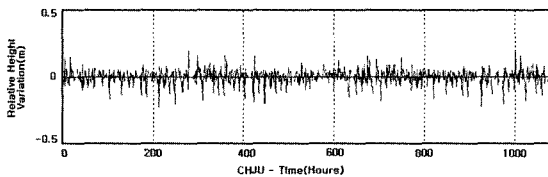
데이터 처리 결과로부터 얻어진 시계열 자료에 대한 스펙트럼 분석을 실시함으로써 해양조석의 부하영향으로 인한 부하성분의 진폭과 위상차를 구하게 된다. 이 때 그림 2(a)와 그림 3(a)에서 보여지듯이 각 관측소별로 자료의 손

실로 인해 누락된 부분이 발생한다. 스펙트럼 분석에서 가장 문제가 되는 것은 자료가 누락되거나 큰 손실량이 있는 자료 기록의 불완전성 문제라고 할 수 있는데, 이러한 자료의 누락은 스펙트럼 분석 시 오류를 발생시키게 된다. 표준화된 기법인 FFT를 사용하여 스펙트럼 분석을 실시하는 경우에는 일정한 격자간격으로 된 자료가 필요하므로 분석 시에 보간이 필요하다. 이때, 보간된 값은 얻어지는 스펙트럼에 중대한 영향을 주거나 어떤 경우에는 매우 지배적인 경향을 나타내게 된다. 따라서 불규칙한 분포로 자료가 주어진 경우에는 표준화된 기법이 적합하지 않을 수 있다(Stefan 등, 1999). Khan과 Tschering(2001)은 자료에서의 손실을 보간하기 위해서 FFT 알고리즘을 사용하였으나, 본 연구에서는 위에서 언급한 표준기법의 문제를 해결하기 위해서 손실된 자료가 있을 경우, 일정한 간격으로 획득된 자료의 스펙트럼 추정을 위해 효과적인 기법인 CLEAN 알고리즘을 사용하였다.

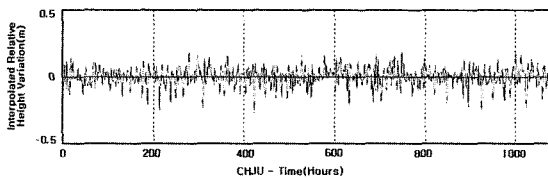
CLEAN 알고리즘의 개념은 복소(cosinusoidal)의 증폭을 구하기 위하여 이산 시계열에 대하여 식 (1)과 (3)을 사용하여 모든 sidelobes에 포함된 스펙트럼에 대한 영향을 제거하는 것이다. 이산 시계열에 대하여 데이터들이 f_s 중에서 손상되는 경우에 얻어지는 dirty 스펙트럼 $F(\hat{\nu})$ 의 방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서, $a = (A/2) e^{i\phi}$ (A : amplitude, ϕ : phase)
 $\hat{\nu}$: frequency

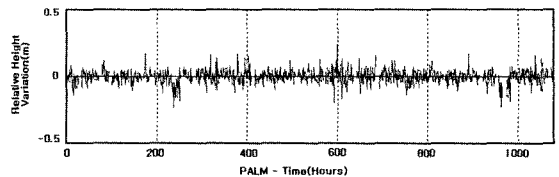


(a) Observed

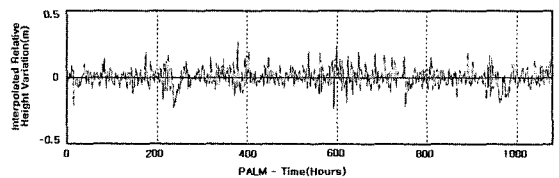


(b) Interpolated

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



(a) Observed



(b) Interpolated

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

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

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

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 (1974)과 Stefan 등(1999)를 참조할 수 있다. 그림 2(b)와 그림 3(b)는 CLEAN 알고리즘을 사용하여 보간된 대전(DAEJ)과 팔미도(PALM), 제주도(CHJU)간의 상대적인 표고차 시계열 분포도이다.

3. 비교 및 분석

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 조석 관측소 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 4~10은 각 GPS 상시 관측소의 시계열 자료를 사용하여 구한 해양조석의 부하 영향과 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석의 부하영향을 "Cleaned power spectrum"으로 표시한 것이다.

GPS 관측치와 모델로부터 구한 결과로부터 M_2 와 N_2 의 진폭의 크기는 모델의 수치와 거의 일치되는 양상을 보이고 있었으며, 또한 위상차의 크기도 상당 부분 일치되는 양상을 보였다. 하지만 본 연구에서는 총 4개의 반일분조 (M_2 , N_2 , S_2 , K_2) 중 S_2 와 K_2 의 부하효과에 의한 부하성분의 진폭 및 위상차를 결정하지 못하였는데, 45일간의 자료만을 이용하여서는 12시간의 주기를 가지고 있는 S_2 와 11시간 58분의 주기를 가지고 있는 K_2 부하영향을 따로 분리

할 수 없었기 때문이다. 하지만 모델에서 구한 시계열분포를 분석해 본 결과, 6개월 이상의 1시간 단위의 시계열을 주파수 영역으로 변환하면 S_2 와 11시간 58분의 주기를 가지고 있는 K_2 부하영향을 따로 분리할 수 없었기 때문이다. 하지만 모델에서 구한 시계열분포를 분석해 본 결과, 6개월 이상의 1시간 단위의 시계열을 주파수 영역으로 변환하면 S_2 와 K_2 의 주기가 분리되는 양상을 보였다. 따라서, 최

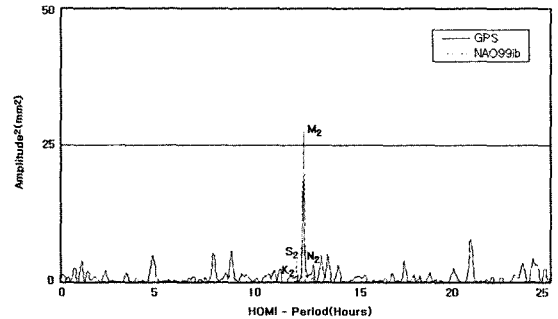


그림 4. HOMI - GPS와 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석 부하성분의 Power 스펙트럼

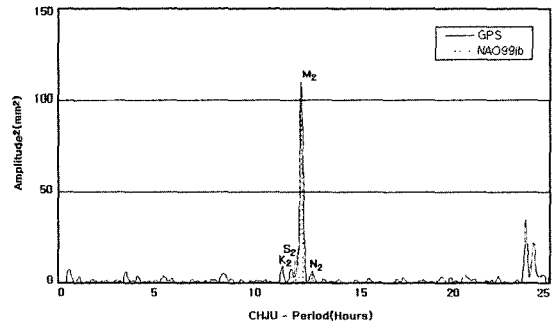


그림 5. CHJU - GPS와 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석 부하성분의 Power 스펙트럼

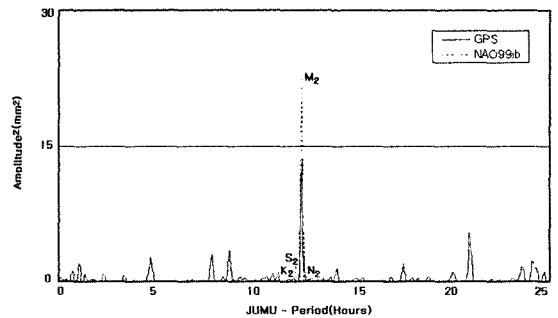


그림 6. JUMU - GPS와 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석 부하성분의 Power 스펙트럼

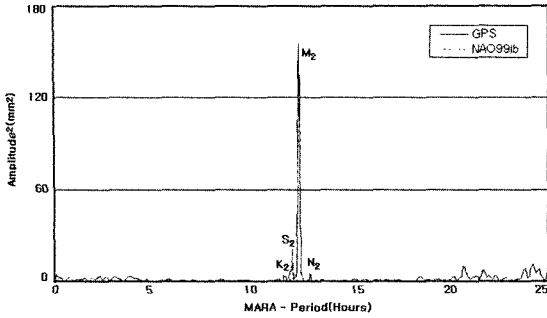


그림 7. MARA - GPS와 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석 부하성분의 Power 스펙트럼

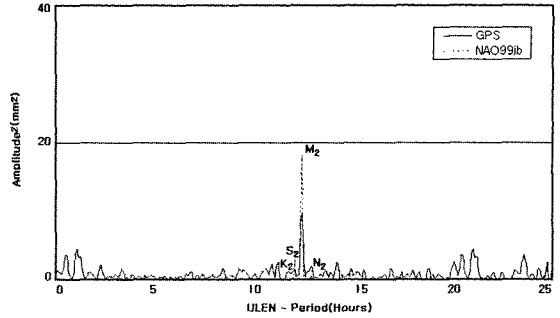


그림 9. ULEN - GPS와 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석 부하성분의 Power 스펙트럼

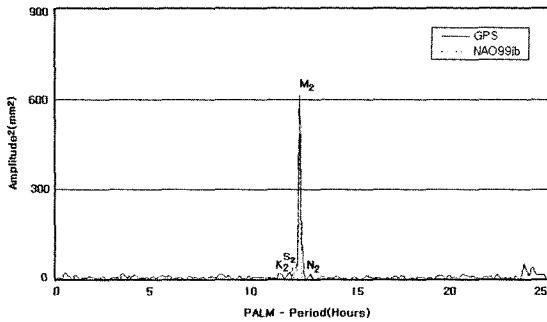


그림 8. PALM - GPS와 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석 부하성분의 Power 스펙트럼

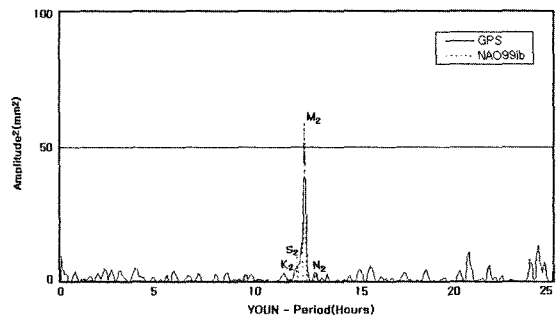


그림 10. YOUN - GPS와 NAO99jb 모델에서 구한 해양조석 부하성분의 Power 스펙트럼

표 2. GPS와 NAO99jb 모델에서 구한 반일분조(M_2 , N_2)에 대한 부하성분

SITE		GPS		NAO99jb	
		Amplitude (mm)	Phase lag (deg.)	Amplitude (mm)	Phase lag (deg.)
CHJU	M_2	11.40	188.2	10.98	194.51
	N_2	3.10	192.3	2.70	186.00
HOMI	M_2	4.30	121.7	5.25	113.17
	N_2	1.80	124.9	1.04	121.21
JUMU	M_2	3.80	77.7	4.49	80.83
	N_2	1.10	86.2	0.76	87.41
MARA	M_2	12.50	178.9	11.75	184.97
	N_2	2.10	172.6	2.82	178.01
PALM	M_2	24.50	59.3	22.90	53.67
	N_2	4.20	40.6	4.25	32.25
ULEN	M_2	3.10	87.8	4.27	83.43
	N_2	1.40	91.3	0.71	94.05
YOUN	M_2	7.10	128.4	7.66	139.01
	N_2	1.70	136.5	1.64	140.38

소 6개월 이상의 연속된 자료를 처리한다면 이러한 문제를 해결할 수 있을 것이라 생각된다.

또한 그림 4~10에서 Power 스펙트럼의 형상을 보면 제주도(CHJU)의 경우 0시에서 23시까지, 팔미도(PALM), 마라도(MARA), 울릉도(ULEN) 및 영도(YOUN)의 경우 5시에서 20시까지, HOMI와 JUMU 경우는 10시에서 20시 까지의 주기에서 매우 적은 잡음을 관찰할 수 있다. 이는 GPS를 통해 해양조석 반일분조에 대한 부하 시그널을 직접 관측하여 사용할 수 있는 가능성을 보여준다. 그러나 대부분의 Power 스펙트럼에서 일본조 부하성분의 주파수 영역인 23시에서 25시까지의 주기에서는 잡음의 양이 증가함을 알 수 있는데 이는 모델화되지 않은 GPS 대류권 신호지연, 위성궤도 오차와 멀티패스에 의한 영향으로 사료된다. 따라서 이러한 잡음의 증가로 인하여 해양조석의 일본조의 부하영향에 의한 부하성분은 산정하지 않았다. 표 2는 GPS관측데이터로 구한 M_2 , N_2 반일분조 부하성분의 진폭과 위상차와 NAO99jb 해양조석모델에서 구한 부하성분의 진폭과 위상차를 비교한 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 GPS 관측자료를 이용해서 해양조석의 반일분조 부하영향에 의한 부하성분을 결정할 수 있는지에 대한 가능성을 살펴 보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. GPS 관측자료를 이용하여 해양조석의 주요 반일분조 성분(M_2 , N_2)의 부하영향으로 인한 수직방향 지각변동량은 마라도가 14.6mm, 영도가 8.8mm, 울릉도가 4.4mm, 제주도가 14.5mm, 주문진이 4.9mm, 팔미도가 28.7mm, 호미곶이 6.1mm 정도로 나타났으며, 서해안에 위치한 팔미도가 28.7mm로 가장 크게 나타났고, 또한 제주도와 마라도가 각각 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 결과, M_2 의 경우 진폭과 위상차의 최대편차가 각각 1.60mm와 10.61° , N_2 의 경우 진폭과 위상차의 최대편차가 각각 0.76mm와 8.53° 로 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 따라서, 다년간의 GPS 관측자료와 적합한 스펙트럼 기

법을 적용하면 향후 우리 나라 해양조석의 부하영향에 대한 모델링에 큰 기여를 할 수 있을것으로 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. 해양조석의 주분조인 일본조(K_1 , P_1 , Q_1 , O_1 등)와 반일분조(M_2 , N_2 , S_2 , K_2 등) 등을 포함한 모든 주요 해양조석의 부하영향에 대한 부하성분의 정확한 진폭과 위상차를 구하기 위해서는 대류권의 신호지연 영향을 고려해야 하는데, 대류권 신호지연량은 해양조석 부하 시그널에 흡수되지 않도록 따로 모델링되어서 산출되어야 한다. 이러한 문제의 해결을 위해서 기상학적 관측치를 사용하여 대류권 신호지연량을 산정할 필요가 있다. 또한 잡음의 증가와 주기의 문제로 인하여 계산하지 못한 해양조석의 부하영향에 의한 부하성분을 결정하기 위해서는 6개월 이상의 GPS 데이터를 처리해야 할 필요가 있다.

4. 마라도(MARA), 제주도(CHJU), 팔미도(PALM)와 같이 해양조석의 부하영향이 큰 지역은 연직 방향의 변위뿐만 아니라, 수평방향의 변위도 이용하여 수평방향 해양조석 부하성분의 진폭과 위상차를 산정하여 해양조석모델과 비교·분석할 필요가 있다.

참고문헌

- Dragert, F., James, T. S. and Lambert, A. (2000) Ocean loading corrections for continuous GPS: A case study at the Canadian coastal site Holberg. *Geophys. Res. Lett.* 27: 2045-2048.
- Haas, R. and Schuh, H. (1998), Ocean loading observed by geodetic VLBI, in Ducarme, B. (ed.), *Proc. 13th Int. Symp. Earth tides* Brussels 1996.
- Khan, S. A. and Tscherning, C. C. (2001), Determination of semi-diurnal ocean tide loading constituents using GPS in Alaska. *Geophys. R. Lett.* 28(11):2249-2252.
- Khan, S. A. and Scherneck, H. G. (2002), The M_2 ocean tide loading wave in Alaska: Vertical and horizontal displacements, modelled and observed. *Journal of Geodesy.* 20-12-2002.
- Roberts, D. H., Lehar, J. and Dreher, J. W. (1974), Time series analysis with CLEAN. I. Derivation of a spectrum. *Astronomical Journal*, 93(4), 929-989.
- Stefan, B. and Bokelmann, H. R. (1999), Spectral analysis with incomplete time series: an example from seismology. *Computer & Geosciences* 25: 739-750.
- Sovers, O. J. (1994), Vertical Ocean loading amplitude from VLBI measurements, *Geophysical Research Letters*, 21, 357-360.

(접수일 2003. 10. 20, 심사일 2003. 11. 29, 심사완료일 2003. 12. 20)