

ET 중력계에 의한 기조력 변화 연구

박정환* · 한 옥*

A Study on the Earth Tide Variations by ET Gravimeter

Jung Hwan Park* and Uk Han*

ABSTRACT : Earth tide observations were taken at AMIST observatory in Seoul by LaCoste-Romberg ET gravimeter from September 2 to 16, 1997 for determining the gravimetric factor (δ) and analyzing the tidal components. Meter drifts were corrected by regression and then denoised by thresholding wavelet, a data processing tool. The mean value of δ is 1.2 and the mean phase lag of $\Delta k (M_2, S_2)$ and $\Delta k (K_1, O_1)$ is $0.07 \pm 0.03^\circ$ and $0.08 \pm 0.07^\circ$ by analyzing the observed earth tides. For yielding measurements of gravity accurate to about 0.01 mgal, the Earth tide observations are required by ET meter. The tidal variations are due to the planet's distance and zenith angle. With the exception of Earth-Moon and Earth-Sun mechanism, the possible causes of tidal variations are tectonical, meteorological and hydrological perturbations. The long period and broad observations are required for determining the state of art gravimetric factor in Korea.

서 론

첨단 기술과 무기체계의 발달로 인하여 각종 유도 무기가 개발되고 인공위성을 이용하여 통신을 하게 됨에 따라 지구과학 분야에서 나타나는 혁신적인 변화는 지구측위 체계 (GPS: Global Positioning System)를 이용하여 정밀 지오이드 (geoid), 중력모델, 지구타원체의 설정과 그에 따른 새로운 좌표체계 변환 등을 들 수 있다 (한옥, 1995). 이러한 변화는 군사적으로 유용하게 적용되어 걸프전에서 고도의 정밀 유도무기의 운용에 응용되었다. 그러나 첨단 유도무기의 정밀도에 대한 요구가 클수록 이러한 무기체계는 넓은 지역을 커버하여야 하고 동시에 더욱 정확한 중력 자료를 요구하게 되었다. 장차 예상되는 미래 전에서 첨단 유도 무기체계의 운용을 위하여 고려되어야 할 것은 중력자료의 양적 증가뿐만 아니라 질적인 면도 향상되어야 한다 (한옥, 1996).

중력계로부터 야외에서 측정한 측정중력값 (meter reading)은 위도, 고도, Bouguer보정, 지형보정, meter drift 보정, 기조력 보정 (tidal correction) 등이 필요하다. 정밀

중력 연구에서 보정된 중력 값은 0.01 mgal 이상의 정밀도를 나타낸다 (Telford, 1990).

기조력은 시간에 따라서 변화하는 값이므로 정확한 중력 값을 결정하기 위해서는 시간에 따라 변화하는 기조력을 필수적으로 보정하여야 한다. 태양, 지구, 달의 위치와 거리로부터 이론적인 기조력은 컴퓨터로 계산할 수 있으나 시간과 지역에 따라서 그 변화량을 정확히 예측하기는 어렵다. ET (Earth-Tide) 중력계를 이용하여 기조력을 관측하고 이를 토대로 기조력을 보정 하는 것은 중력 자료의 정밀도를 향상시킨다. 또한 초전도 중력계와 같은 절대 중력계를 운용하여 절대중력을 측정하며 중력의 절대기점을 설정할 때도 시간에 따라 변화하는 기조력은 필수적으로 보정 되어야 한다. 따라서 기조력은 상대 및 절대중력 측정자료의 정밀도 향상과 절대 중력 기점의 설정에 필요한 기초자료를 제공하기 때문에 중요하다.

본 연구는 우리 나라에서 최초로 PET (Potable Earth Tide) 1074 중력계를 고정 관측소에 운용하여 실제 기조력을 관측하고 이론적인 기조력과 비교하여 한반도에서 최적의 기조력 상수를 계산한다. 또한 Fourier 변환을 이용하여 지배적인 기조력 성분을 도출하고 각각의 성분을 분석한다. 이를 이용하여 중력자료의 기조력 보정과 절대 중력기점 설정에 활용하고 기조력의 지역적인 변화양상

* 군사과학대학원 지구공학과 (Department of Earth Science and Engineering, Advanced Institute of Military Science and Technology, Seoul 139-799, Korea)

과 그 특성을 규명하는데 그 목적이 있다.

지구의 기조력

기조력은 중력의 변화와 지구변형과 관련되며 어떤 지점에서 기조력으로 인한 지구반경의 변화량, u_r 과 퍼텐셜 변화량, w 는 다음과 같다.

$$u_r = \frac{h}{g} w_t \quad (1)$$

$$w = w_t + w_g = (1+k) w_t \quad (2)$$

w_t 는 이론적인 기조력 퍼텐셜, $w_d (=k w_t)$ 는 지구변형으로 인한 추가적인 퍼텐셜, g 는 중력 값이다. 이때 h , k 는 지구변형으로 인한 높이와 퍼텐셜의 비인 Love number이다. 그러므로 어떤 지점에서의 중력 변화에 따른 총퍼텐셜, W 는 다음과 같다.

$$W = u_r \frac{dV_0}{dr} + w \quad (3)$$

이때 V_0 는 기조력을 고려하지 않은 중력 퍼텐셜이다. 따라서 중력의 변화량, Δg 를 Love Number로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta g = \frac{\partial W}{\partial r} = (1+h - \frac{3}{2}k) \frac{\partial w_t}{\partial r} \quad (4)$$

$$\delta = (1+h - \frac{3}{2}k) \quad (5)$$

이때 δ 를 기조력 상수 (gravimetric factor)라 한다. 지구가 자전하지 않으며 완전한 구 (sphere)라하면 기조력 상수는 어디서나 동일하며 위상차 (phase difference)는 0이다. w_t 는 Laplace's tidal equation으로부터 정확하게 계산할 수 있지만 기조력 상수와 위상차는 관측을 통하여 계산하여야 한다. 또한 기조력 파장은 수 많은 기조력 성분의 합으로 일정한 주기를 가지는 데 그 대표적인 성분은 하루에 두 번의 주기를 갖는 반일주기 (semi-diurnal) 기조력 M_2 , S_2 와 하루에 한번의 주기를 갖는 일주기 (diurnal) 기조력 O_1 , K_1 이다.

지금까지 세계평균 기조력 상수는 1.0~1.5 (Wolf, 1940), 1.13~1.24 (Dehlinger, 1978), 1.16 (Melchior, 1978) 등이다. 또한 관측 기조력과 이론적인 기조력의 평균 위상차, Δk (M_2 , S_2)는 $0.15 \pm 0.09^\circ$ 이며, Δk (K_1 , O_1)는 $0.08 \pm 0.07^\circ$ 의 값을 가진다 (Parijskiy, 1978). 우리나라의 경우에는 기조력 측정을 통한 기조력 상수의 결정과 이에 대한 연구가 요구되고 있는 실정이다.

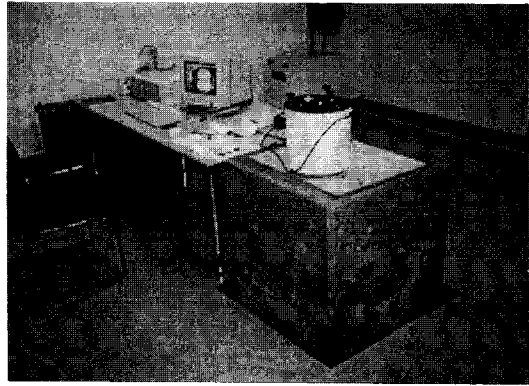


Fig. 1. ET meter and stable pier at AIMST.

ET 중력계 관측

서울 태릉 육사 캠퍼스에 있는 군사과학기술원 (Advanced Institute of Military Science and Technology) 중력 관측실에 위치한 ET 중력계의 관측실은 학교의 이름을 따서 「AIMST」라 명명하였다 (Fig. 1). 관측실의 좌표는 GPS 기준망을 이용하여 계산되었고 그 값은 경도 127.1027°E, 위도 37.6269°N, 고도 36.0이며 좌표의 정밀도는 3cm이다.

컴퓨터 프로그램 (Longman, 1959)을 이용하여 경위도 및 고도 차이에 따른 기조력의 변화를 분석해보면 다음과 같다. 측정지점에 대한 경·위도 1°변화에 따른 기조력의 진폭변화는 수 μgal 정도이므로 관측지점의 좌표는 높은 정밀도를 필요로 하지 않는다. 경도의 변화는 기조력의 진폭에는 영향을 주지 않으나 위상변화를 일으킨다. 또한 위도의 변화는 기조력의 위상변화를 일으키지는 않으나 기조력의 진폭 변화를 일으키며 그 변화량은 경도 1°변화에 따른 기조력의 진폭 변화량보다 더 크다. 일반적으로 고도가 증가할수록 기조력은 증가하지만 평균해수면 (Mean Sea Level)에서 해발 3,000 m까지는 기조력의 변화가 거의 없다. 따라서 중력계의 좌표 값은 소수점 3자리까지만 입력하였다.

기조력 관측

ET 중력계를 이용한 기조력 관측은 측정 데이터를 정밀하게 분석·해석하기 위하여 1분 간격으로 측정하였고 측정시간은 GMT (Greenwich Mean Time)를 사용하였다. 9월중 달의 위상변화는 9월 1일 23:52에 삭 (new moon), 9월 16일 18:51에 망 (full moon)이었다 (역서, 1997). 따라서 측정시 달의 위상변화에 따른 기조력의 변

화를 연구하고 중력계의 기계적인 특성을 파악하기 위하여 1997년 9월 2일 00:00부터 1997년 9월 7일 24:00까지 그리고 1997년 9월 11일 00:00에서 1997년 9월 16일 24:00까지 2회 (session)로 구분하여 기조력을 관측하였다.

설치조건

ET 중력계는 주변환경에 민감하게 반응하므로 중력계로부터 받은 데이터의 질은 측정 조건에 크게 좌우된다. 따라서 측정 기간중 ET 중력계의 설치 조건 (Melchior, 1983)에 맞는 제반 환경을 구비하여 관측소를 운영하였다. 즉, 중력계에 안정된 전원공급을 위한 UPS (Uninterruptible Power Supply)를 설치하였고 진동 및 소음 방지와 장기간 안정되게 중력계를 설치하기 위하여 건물과 이격된 견고한 기둥 모양의 콘크리트 구조물을 관측실 내부에 설치하였다. 관측실의 온도는 10~30°C가 적합하며 온도의 변화는 0.5°C이내여야 한다. 본 연구에서는 관측기간에 안정된 온도 유지를 위하여 에어컨을 설치하여 실내 온도를 25°C로 유지하였다.

기타 관측시 고려해야 할 사항으로는 관측실의 위치는 지진이 빈번한 지역은 피해야 하고, 차량이 통행하는 도로에서 이격되어 진동 및 소음을 피해야 한다. 이와 같이 지진계의 원리를 이용한 ET 중력계는 민감하기 때문에 지구의 진동 (oscillation) 현상을 관측할 수 있으므로 지진, 화산, 폭풍 등 재난을 예보하는데 이용된다 (Melchior, 1978).

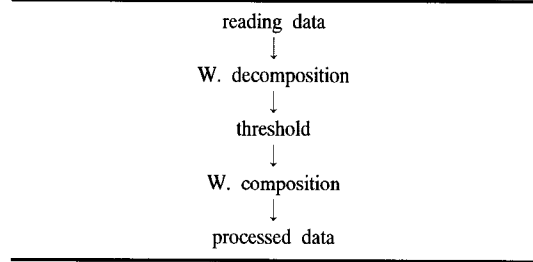
또한 장기간 기조력 관측을 위해서는 기반암 (bed-rock) 위에 설치된 화강암 설치대가 더욱 바람직하다. 이 밖에도 관측실이 있는 건물은 비교적 오래된 건물이 새로운 건물 보다 좋으며 가장 아래층이 수평 및 수직적인 안정을 유지할 수 있다는 것도 고려되어야 한다. 또한 온도, 습도 및 기압의 변화에도 민감하므로 항온 및 항습기의 설치가 요구된다.

데이터 처리 및 분석

데이터 처리

ET 중력계의 특성은 일반적으로 양 (+)의 방향으로 편이 (drift) 현상이 생기며 그 증가율은 한 달에 1 mgal 정도이며 새로 구입한 중력계의 경우에는 그 보다 더 높은 비율로 증가한다. 따라서 ET 중력계의 측정값 (meter reading)들은 기조력과 meter drift의 합으로 나타나며 시간에 따라서 선형적으로 증가한다. 그러므로 실제 기조

Table 1. Data processing by Wavelet.



력을 계산하기 위하여 drift rate를 계산하고 그 값을 보정 하여야 한다. 따라서 24시간 단위로 drift 구간을 정하고 측정값에 대한 drift rate의 평균값을 구한 후 구간별 증가율에 대하여 회귀분석 (regression)을 이용하여 시간에 따라 보정 하였다. 이와 같이 보정된 관측 기조력은 2가지의 오차요인을 가지고 있는데 첫째는 ET 중력계 자체의 기계적 오차이며, 두 번째는 회귀분석을 이용한 보정이 완전하지가 않다는 점이다.

또한 ET 중력계로부터 측정된 데이터는 여러 가지 측정에 영향을 미치는 요인, 즉 전원공급 중단, 소음 및 진동, 조작 오류 등에 의하여 noise가 발생되므로 데이터 처리 및 분석을 위하여 이를 제거하여야 한다. Wavelet은 이러한 요구 조건을 만족하도록 Table 1과 같이 Wavelet 계수를 이용하여 측정값 (meter reading)을 시간영역에서 Wavelet 영역으로 decomposition하고, Wavelet 필터를 이용하여 적합한 형태로 thresholding (keep or kill)하고 smoothing한 다음 이를 다시 시간 영역으로 복원시켜 composition하는 방법이다. 즉 필터링 계수를 조정하여 noise 제거 정도와 데이터 손상 정도를 비교하여 만족할 때까지 noise를 제거하였다. 이와 같이 제거된 noise는 session별로 각각 최대 3 μ gal, 2.5 μ gal 정도가 제거되었는데 이는 진폭의 약 2~3%에 해당하는 값이다. 그러나 대부분의 측정 데이터는 1 μ gal 이내에서 noise가 제거되었다.

데이터 분석

회귀분석과 Wavelet을 이용하여 보정된 12일간의 측정값은 관측 기조력 (observed tides)으로서 Fig. 2에서 Fig. 7까지와 같이 2일간씩 이론 기조력 (Longman, 1959)과 비교하였다. 이때 곡선 A는 ET 중력계로부터 측정된 측정값 (meter reading)이며, 곡선 B는 회귀분석을 이용한 측정값의 24시간 평균 drift rate를 나타낸다. 곡선 C는 기조력 계산 프로그램 (Longman, 1959)을 이용하여 관측위치와 시간에 따른 이론적인 기조력 (predicted tide, $\delta=1.0$)이다.

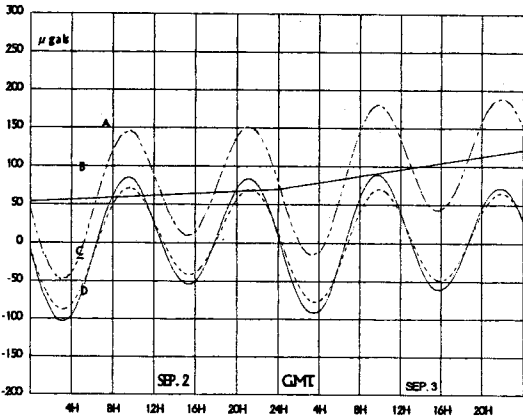


Fig. 2. Earth tide variations on Sep. 2-3; A; meter reading, B; meter drift, C; predicted, D; observed tide.

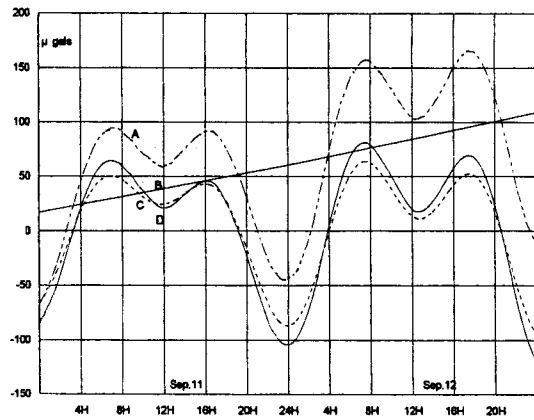


Fig. 5. Earth tide variations on Sep. 11-12.

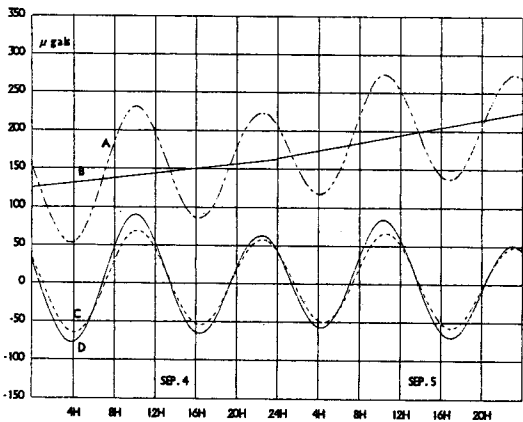


Fig. 3. Earth tide variations on Sep. 4-5.

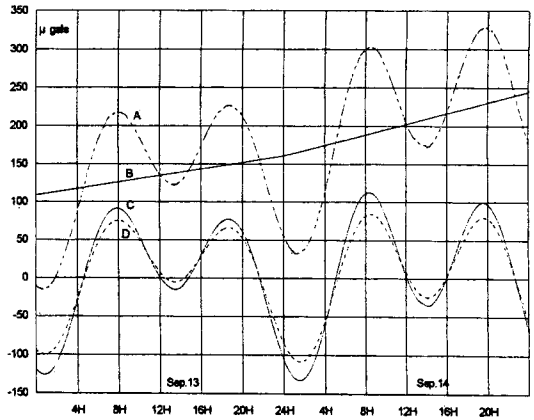


Fig. 6. Earth tide variations on Sep. 13-14.

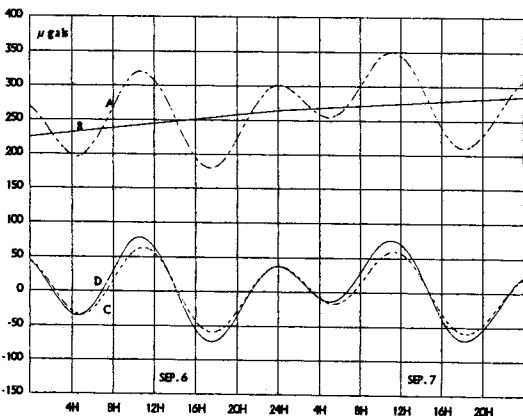


Fig. 4. Earth tide variations on Sep. 6-7.

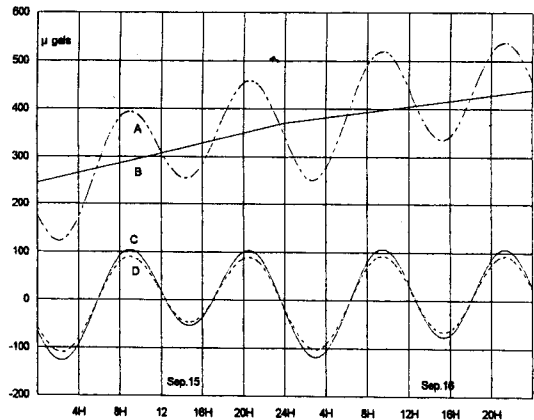


Fig. 7. Earth tide variations on Sep. 15-16.

곡선 D는 회귀분석을 이용하여 drift를 보정하고 Wavelet을 이용하여 noise를 제거한 관측 기조력 (observed tide)이다.

관측 기조력과 이론 기조력 ($\delta=1.0$)의 최대 및 최소 값, 표준편차 그리고 기조력 상수 (δ)를 종합하면 Table 2와 Table 3과 같다. 즉, 관측 기조력의 진폭은 최대 0.26

Table 2. The Earth tide variations (the 1st session).

Period	Observed			Predicted ($\delta=1.0$)			G-factor (δ)
	max. (μgal)	min. (μgal)	s. d.	max. (μgal)	min. (μgal)	s. d.	
total	89.9	-103.1	51.4	71.3	-87.9	42.7	1.205
9. 2-3	89.1	-103.1	58.9	71.3	-87.9	49.2	1.197
9. 4-5	89.9	-77.8	50.8	69.0	-64.7	42.0	1.210
9. 6-7	78.4	-73.3	43.3	63.5	-59.1	35.7	1.211

Table 3. The Earth tide variations (the 2nd session).

Period	Observed			Predicted ($\delta=1.0$)			G-factor (δ)
	max. (μgal)	min. (μgal)	s. d.	max. (μgal)	min. (μgal)	s. d.	
total	122.7	-132.5	68.1	92.6	-109.7	55.4	1.229
9.11-12	81.5	-112.0	54.7	64.1	-94.3	43.9	1.244
9.13-14	113.1	-132.4	69.5	84.3	-108.4	56.0	1.240
9.15-16	122.7	-132.5	77.9	92.6	-109.7	64.3	1.211

Table 4. The differences between observed and predicted ($\delta=1.16$) tides.

Session	Observed			Predicted ($\delta=1.16$)			Difference			
	max. (μgal)	min. (μgal)	s. d.	max. (μgal)	min. (μgal)	s. d.	max. (μgal)	min. (μgal)	mean	s. d.
I	89.9	-103.1	51.4	82.7	-101.9	49.5	13.6	-13.2	-0.065	5.98
II	122.7	-132.5	68.8	107.4	-127.2	64.2	18.9	-16.7	0.032	7.01

mgal까지 변화하였고 기조력 상수는 1.197에서 1.244까지 변화하였으며 기조력 상수의 평균은 1.2를 나타냈다. 관측 기조력을 이용한 기조력 상수는 이론 기조력 ($\delta=1.0$)값에 1.0에서 1.5까지 0.001 간격으로 곱하여 관측 기조력의 최대 및 최소 값 그리고 표준편차와 가장 일치하는 값을 찾는 방법을 이용하여 계산되었다. 이와 같이 계산된 기조력 상수를 이론 기조력 ($\delta=1.0$)에 곱한 결과는 관측 기조력의 최대 및 최소 값 그리고 표준편차와 99.9% (수 μgal 이내) 일치하였다.

기조력 계산을 위하여 ET 중력계를 매 번 이용하는 것은 경제적이지 못하기 때문에 기조력 상수는 이론적인 기조력을 이용하여 기조력을 계산하는 척도로 이용된다. 기조력 상수는 관측 위치, 관측 방법, 중력계, 지구물리 학자에 따라서 차이는 있으나 세계 평균 기조력 상수는 1.16이다 (Melchior, 1978). ET 중력계로 측정된 관측 기조력과 이론 기조력 ($\delta=1.16$)의 진폭을 비교하면 Table 4와 같이 0.02 mgal이내의 차이를 나타냈다. 따라서 일반적인 중력자료 보정에는 $\delta=1.16$ 을 적용하여 기조력을 계산해도 그 차이는 크지 않다. 그러나 0.01 mgal 이상의 정밀도가 요구되는 중력자료의 기조력 보정과 절대중력계의 운용 및 측정을 위해서는 ET 중력계를 이용한 기조력 관측이 요구된다.

Fourier 변환을 이용한 기조력 성분 분석은 관측기조력으로부터 수많은 기조력 성분을 분리하여 frequency, amplitude, phase 등을 결정하고, 역으로 기조력 성분을 조합하여 기조력을 계산하는데 이용할 수 있다. 최근에는 1,000여개의 성분을 분리·합성하여 $\pm 0.1 \text{ ngal}$ 까지 정밀하게 기조력을 계산하게 되었다 (Torge, 1991). Fourier 변환 및 Inverse Fourier 변환을 이용하여 기조력 스펙트럼을 분석해 보면 기조력의 주성분은 Table 5와 Table 6에서와 같이 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 등 4개이며 지배적인 성분은 M_2 였다. 4개 성분의 진폭은 전체 진폭의 79%에 해당되며 M_2 성분의 진폭은 전체 진폭의 41%이다. S_2 와 K_1 는 session별로 그 우열이 다르게 나타났으며 M_2 성분에 대한 S_2 와 K_1 성분들의 진폭 비는 40% 이하였다. 4가지 성분에 대한 기조력 상수의 계산 방법은 기조력 분석에서의 기조력 상수 계산 방법, 즉 최대 및 최소 값과 표준편차를 이용하였으며 주요 성분에 대한 기조력 상수는 평균 1.2를 나타냈다.

phase lag는 기조력의 시간지연 현상으로서 기조력 성분의 합성과 관련된다. Fourier 변환을 통하여 phase lag는 session I에서 0.08° , session II에서 0.09° 이며, 이를 시간으로 환산하면 동쪽으로 20~21초의 시간지연을 나타낸 것이다. 주요 기조력 성분들에 대한 phase lag는 M_2 ,

Table 5. The main components by tidal spectrum analysis (the 1st session).

Symbol	Observed			Predicted			Factor (δ)	Phase lag (Δk)
	Amplitude (μgal)	Phase (degree)	Ratio ($M_2=100$)	Amplitude (μgal)	Phase (degree)	Ratio ($M_2=100$)		
M_2	60.49	0.93	100.0	50.78	0.84	100.0	1.191	0.09
S_2	22.03	0.46	13.3	18.57	0.42	13.4	1.186	0.04
K_1	18.99	0.50	10.0	14.15	0.35	0.8	1.342	0.15
O_1	11.59	0.02	0.7	9.82	0.02	0.6	1.180	0.00

Table 6. The main tidal components by tidal spectrum analysis (the 2nd session).

Symbol	Observed			Predicted			Factor (δ)	Phase lag (Δk)
	Amplitude (μgal)	Phase (degree)	Ratio ($M_2=100$)	Amplitude (μgal)	Phase (degree)	Ratio ($M_2=100$)		
M_2	66.97	-0.98	100.0	52.84	-1.03	100.0	1.267	0.05
K_1	42.55	-0.12	40.4	35.78	-0.20	40.4	1.189	0.08
S_2	39.32	-0.26	34.5	32.12	-0.30	34.5	1.224	0.04
O_1	22.03	-0.79	10.8	18.78	-0.71	10.8	1.173	-0.08

Table 7. The distance from the Earth to the Moon and to Sun.

Session.	Moon-Earth			Sun-Earth			Zenith angle			
							Moon		Sun	
	max. (km^5)	min. (km^5)	mean (km^5)	max. (km^8)	min. (km^8)	mean (km^8)	max. (deg)	min. (deg)	max. (deg)	min. (deg)
I	4.065	3.963	4.037	1.510	1.507	1.508	49.2	-52.2	49.9	-41.7
II	3.804	3.570	3.652	1.506	1.504	1.505	43.3	-54.0	48.1	-44.0

S_2 가 $0.07 \pm 0.03^\circ$ 이며, K_1 , O_1 은 $0.08 \pm 0.07^\circ$ 를 나타냈다. 이와 같은 시간지연 현상의 원인은 지구와 달이 공전하기 때문이며 ET 중력계의 컴퓨터 시간 오차와 좌표 값의 오차도 phase lag를 유발하는 요인이 된다. 따라서 본 연구에서는 GPS를 이용한 측정지점의 좌표 및 시각을 사용하였고, 측정 데이터를 저장·처리하는 컴퓨터에 clock stabilization card를 설치하여 시각의 정밀도를 수개월에 5초 이내로 유지되도록 하였다.

ET 중력계로 관측된 기조력 데이터를 처리 및 분석해 보면 기조력 상수는 관측시간에 따라서 1.197에서 1.244까지 변화하였다. 또한 기조력 상수는 관측위치에 따라서도 변화한다 (Melchior, 1978). 이와같은 기조력 상수의 변화 요인은 다음과 같은 직·간접적인 요인으로 설명할 수 있다.

기조력 변화의 직접적인 요인은 태양, 지구, 달의 궤도와 관련된다. 즉 기조력은 질량에 비례하고, 거리와 천정각의 크기에 반비례하기 때문에 관측위치와 시간에 따라 계산된다. 따라서 태양, 지구, 달의 질량 변화는 무시할 수 있기 때문에 기조력의 진폭 변화는 행성간의 거리와 천정

각 (zenith angle)의 변화와 관련된다.

달과 태양과의 거리 및 천정각은 Table 7과 같이 주기적으로 변화한다. 즉 달과 태양의 거리는 하루 평균 달은 $1.7 \times 10^3 \text{ km}$, 태양은 $3.9 \times 10^3 \text{ km}$ 정도로 변화하였다. 이에 따라서 기조력의 진폭은 하루에 수 μgal 정도로 증가하였다. 또한 천정각 (ϕ)의 변화는 달의 경우 -54.0° 에서 49.2° 까지, 태양의 경우 -44.0° 에서 49.9° 까지 변화하였다. 달과 태양이 지구와 일직선상에 위치하는 각도 ($\phi=0$)에서 진폭은 최대가 되며, 천정각이 커질수록 달과 태양에 의한 기조력은 분산되어 진폭은 작아졌다. 천정각의 변화에 따른 기조력의 진폭은 일일 최대 0.26 mgal까지 변화하였다.

기조력의 진폭 변화요인은 지구가 강체 (rigid body)라는 가정 하에서 이론적으로 계산되지만 실제로 지구는 이상적인 강체라기보다는 변형체 (deformation body)에 가깝기 때문에 기조력의 변화는 다음과 같은 요인이 복합적으로 작용한다. 즉 지질 및 지형, 해수 및 지하수의 변화, 지구 밀도의 변화, 지구 구성 물질의 특성 등에 따라서 기조력이 변화한다. 기조력 변화에 영향을 미치

는 간접적인 요인은 관측지점에서의 조석 (oceanic tide), 기압의 변화, 지하수면의 변화, 주위 지형 등이다 (Melchior, 1978). 이 밖에도 기조력은 핵과 맨틀, 암권과 약권의 밀도 변화 등에 의해서도 변화한다 (IAGBN, 1986). 이와 같이 기조력 변화에 영향을 미치는 여러 요인을 규명하고 그 변화량을 계산하는 것은 기조력 연구의 목적이며 불균질한 지구 환경을 보다 더 이해하는 방법 중의 하나이다.

결 론

이론적인 기조력의 최대 범위는 0.28 mgal이며, 태양에 의한 기조력은 달에 의한 기조력의 46% 정도이다. 기조력은 위도 및 경도의 변화에 민감하지 않아서 경·위도 1°변화에 따른 기조력의 변화는 수 μgal 정도이다. 또한 평균해수면에서 해발고도 3,000 m까지의 고도변화에 따른 기조력의 변화는 무시할 수 있었다.

중력계의 특성인 meter drift는 한 달에 평균 1~2 mgal 정도로 증가하였으며 회귀분석을 이용하여 보정하였다. 관측 조건에 따라서 drift 경사가 일정하지 않기 때문에 기조력 관측을 위해서는 제반 관측 조건을 구비하여야 한다.

관측된 기조력의 진폭은 최대 0.26 mgal까지 변화하였고 삭과 망에서 최대 진폭을 나타냈으며 기조력의 진폭과 성분 분석에 대한 평균 기조력 상수는 모두 1.2이므로 서울지역에서의 기조력 보정에 이용할 수 있다. 관측 기조력과 이론 기조력 ($\delta=1.16$)의 진폭 차는 0.02 mgal이내이기 때문에 일반적인 기조력 보정에는 $\delta=1.16$ 을 적용할 수 있다. 그러나 0.01 mgal 이상의 정밀도가 요구되는 중력자료의 기조력 보정과 절대중력계의 운용 및 측정을 위해서는 ET 중력계를 이용한 기조력 관측이 요구된다.

ET 중력계에 의한 기조력 관측을 통하여 기조력의 직접적인 변화 요인은 달과 태양의 거리와 천정각이며, 거리 변화에 따른 진폭 변화는 하루에 수 μgal 정도, 천정각에 의한 진폭 변화는 일일 최대 0.26 mgal까지로 나타났다. 따라서 달과 태양의 거리와 천정각의 변화는 해안지역에서의 만조, 간조, 대조, 소조 등의 조석현상과 관련됨

을 알 수 있었다.

기조력 변화의 간접적인 요인은 지질 및 지형, 해수 및 지하수의 변화, 지구 밀도의 변화, 지구 구성 물질의 특성 등이며 이러한 간접적인 요인은 지역마다 차이가 있기 때문에 기조력은 지역적인 변화 양상을 보인다. 따라서 우리나라에 적합한 최적의 기조력 모델을 개발하기 위해서는 더 많은 station에서 1년 이상의 기조력 관측과 분석이 요구된다.

사 사

이 연구는 1997년도 국방부의 지구중력모델 및 변환계수 연구 지원의 일부로 수행되었으며, 본 연구를 수행하는 과정에서 일본 동경대학 Okubo 교수, 독일 GFZ의 Dittfeld와 Schwintzer 박사님, 그리고 LaCoste & Romberg 회사의 Fett 사장님의 도움과 협조에 감사한다.

참고문헌

- 천문대 (1997) 역서. 남산당, p. 25.
 한옥 (1996) WGS84 신 좌표체계 전환 연구. 국방정보본부, p. 1-7.
 한옥, 김두일 (1995) 지구측위체계 및 지리정보체계의 군사적 활용 연구. 육사 화랑대 연구소, p. 1-33.
 IAGBN (1986) Status Report. International Absolute Gravity Basestation Network, p. 1-60.
 Longman, I.M. (1959) Formulas for computing the tidal acceleration due to the Moon and Sun. Journal of Geophysical Research, v. 64, p. 2351-2355.
 Melchior, P. (1978) The tides of the planet Earth. Pergamon Press, p. 350-369
 Parijskiy, N.N. (1978) The study of Earth tides. Earth Physics, v. 14, p. 639-645.
 Dehlinger P. (1978) Marine gravity. Elsevier Scientific Publishing Co., p. 51-70.
 Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990) Applied geophysics, second Edition. Cambridge University Press, p. 6-26.
 Torge W. (1991) Geodesy, Water de Gruyter, p. 30-34, 86-89
 Wolf, A. (1940) Tidal force observations. Geophysics, v. 5, p. 317-320.

