

서울철원간 추가령곡의 지형분석을 위한 GPS 중력측정

이창호* · 한 욱*

GPS Gravity Surveying for the Terrain Analysis at the Choogaryeong Rift Valley between Seoul and Cheolwon

Chang Ho Lee* and Uk Han*

ABSTRACT: This study presents the gravity data with GPS surveying and the geophysical profiles at the Choogaryeong Rift Valley. And in determining geoid by GPS measurement, survey control points (SCP) which is built by the Republic of Korean Army are used. Seventy nine SCP and the two triangulation stations are reviewed by GPS. Digital terrain model is useful for terrain analysis. The analyses of the gravity surveying with GPS are as follows. The low values of the negative Bouguer anomalies represent the high elevation terrain. The Bouguer anomalies show the decreasing trend toward the eastern part of the study area. Characteristics of free-air anomalies are related with terrain elevation. The regional gravity anomalies decrease toward the eastern part of the study area. The trends of variations are associated with the thermo-tectonic and geologic structure beneath the Choogaryeong Rift Valley. The most parts of the study area represent negative residual gravity anomalies due to the low density of sedimentary cover in the Rift Valley. There are three valleys and four mountains in the direction of NE-SW or NNE-SSW which are structured by the geological features.

서 론

지오이드 결정을 위한 중력 측정에서 가장 중요한 요소는 측정의 중력 값과 좌표이다. 따라서 지오이드를 결정하기 위한 중력이상을 산출하기 위해서는 정확한 중력 측정 뿐 아니라 측정의 정밀 좌표가 필요하다.

정밀도 0.01 mgal의 중력이상을 얻기 위해 위도는 10 m 이내의 오차가 요구되며 표고의 오차범위는 3 cm 가 필요하다. 따라서 정밀한 중력 이상을 얻기 위한 결정적인 요소는 표고이다. 그러나 경·위도 결정을 위해 삼각, 삼변 측량이 요구되는 것과는 달리 표고를 결정하기 위해서는 수준 측량이 수행되어야 하기 때문에 측량을 위한 작업량이 커지게 되어 많은 인력과 시간, 비용이 필요하게 된다. 그러므로 중력 측정을 위해, 경·위도 및 표고 모두를 정확하게 측정하기 위해서는 많은 노력이 필요하다. 최근 좌표 결정해서 전통적인

측지 방법 대신 GPS (Global Positioning System)를 활용함으로써 종래의 국지적인 측지 측량의 단계를 뛰어넘어 지구상의 어떤 점이라도 통일된 좌표계에서 높은 정확도를 지닌 좌표가 결정된다. 즉, GPS 측정을 실시하고 후처리 방식으로 위치를 결정하면 두 지점간의 거리벡터를 0.1 ppm의 정밀도로 측정할 수 있다. 또한 범세계적으로 배치되어 있는 GPS Network을 통하여 연속적인 지구의 운동을 관측할 수가 있으며 특히, 최근에는 측정 기술의 발달로 연간 1 mm 정도의 지각 이동도 감지할 수 있는 장비가 개발되어 탄성과 분석을 통해 관측하지 못했던 새로운 지역에 대한 정보의 획득이 가능하게 되었다.

GPS의 이러한 정밀도는 지오이드 결정, 중력이상도 작성 등의 작업시 요구되는 정밀도를 충족한다. 덧붙여 GPS를 이용하여 중력을 측정할 경우 최소 2명의 인원 만으로 측량과 중력 측정을 충분히 수행할 수 있으므로 인원 소요가 전통적인 측량에 비해 대폭 감소하며 신속하게 이동할 수 있으므로 광역적인 중력 측정시에도 적합하다. 무엇보다도 중요한 사실은 측정거리, 시간,

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

날씨에 전혀 영향을 받지 않는다 (한 욱, 1997).

또한 표고를 알고 있는 점에서 GPS 측량을 실시하여 그 지점에 대한 정확한 지오이드를 결정할 수 있다. 즉, 임의의 GPS 측점에 수준 측량의 성과가 있다면 GPS 관측만으로도 지오이드 높이를 결정할 수 있다 (Yabuta, 1991; Hein, 1985).

현재 우리 나라의 육상 중력 측정 밀도는 20 km²에 1측점 정도이나 산악 지역의 중력 측정 지점은 매우 적으며 이러한 결과로 중력 자료 분석을 통한 각종 연구 결과를 산출함에 있어 매우 큰 장애 요인이 되고 있으며 특히 고도 이상을 기초 자료로 다루고 있는 측지학 연구에서는 고도 이상이 주위 지형에 민감하게 반응하고 있으므로 산악 지역에 대한 중력 자료의 구축이 필요하다 (한 욱, 1996).

연구 대상 지역은 서울 - 철원간 추가령 구조곡 중에서 길이가 약 120 km, 최대 폭이 40 km에 이르는 지역으로 행정 구역상으로는 의정부시, 동두천시, 포천군, 양주군, 연천군 및 남양주군과 철원군이 포함된다 (Fig. 1).

추가령 구조곡이라는 명칭은 서울에서 원산에 이르는 현저한 계곡을 지형학적 연구를 통하여 추가령 구조곡 또는 추가령 지구대라 명명하면서 유래하였으며 (Koto, 1903) 이후 명확한 기원과 위치를 밝히기 위한 수많은 연구가 수행되었다 (원종관등, 1983). 그러나 이 구조곡의 절반 정도, 특히 용암이 분출된 곳으로 추정되는 곳이 군사분계선 북부에 있고 현무암의 용암 대지도 상당한 부분이 휴전선에 인접해 있기 때문에 본격적 규명이 이루어지지 않은 상태이다. 또한 추가령 구조곡은 하나의 골짜기가 아니라 수 개의 평행 단층으로 이루어진 단층군의 계곡이며 지금까지의 연구에

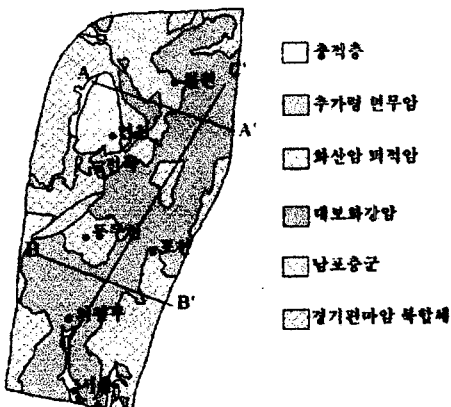


Fig. 1. Geologic map of study area.

의하면 이곳에는 고기 현무암류, 산성화산암류 그리고 전곡 현무암과 같은 서로 다른 시대의 화산암 및 현무암류의 지층으로 이루어져 있다.

대략적인 지세는 서울에서 의정부간은 평균 표고 100 m 내외의 평탄한 지형을 이루고 있으며 동두천으로부터 전곡, 연천 지역은 매우 급격한 지형의 변화가 나타난다. 이에 비해 철원지역은 평균 표고는 높지만 경사는 매우 완만함을 보여준다. 연구 지역의 고도별 면적 분포 중 가장 넓은 면적을 차지하는 고도는 150 ~ 200 m 이다.

연구의 목적은 GPS 중력 측정 자료를 이용하여 서울에서 철원간의 추가령 구조곡에 대한 부우게 이상, 프리에어 이상, 지오이드 높이 및 지형과의 연관성을 갖는 지형 분석을 하는 것이다.

또한 총 79개의 측지통제점을 대상으로 GPS 측정 및 EGM96 지오이드 model을 통한 지오이드의 비교 분석을 시도해 보았다.

GPS와 지오이드

지구조와 GPS

GPS와 VLBI등 지표의 정밀 측지 기술의 발달로 지구의 아주 미세한 변화까지 관측이 가능해짐에 따라 측지학 분야에 근본적인 변화를 가져왔다. 즉, 위성을 이용하여 기존의 어떤 장비보다도 운용 지역에 대한 위치를 훨씬 정확하게 결정할 수가 있기 때문에 미세한 지각 운동도 측정 할 수 있다. 특히 GPS 수신 장치 및 GPS 관측소 설치가 급증하게 되어 지각의 미세한 변화와 같은 지구물리학 분야의 측정을 위한 범세계적인 GPS 관측망 (GPS; Global Positioning Station)이 구축되었다.

특히 IGS (International GPS Service for Geodynamics)의 설립으로 인해 범세계적인 GPS 관측망에 대한 통제가 가능해짐에 따라 원활한 정보의 유통에 의해 개개의 GPS 관측소들도 연속적인 지구의 운동을 관측 할 수가 있다. 현재 IGS의 GPS 관측망은 북아메리카 서부의 SCIGN (Southern California Integrated GPS Network), 남아메리카 지역의 SAGA (South America GPS Array)를 포함하여 BARD (Bay Area Regional Deformation Array), NBAR (Northern Basin and Range), EBAR (Eastern Basin and Range), PANGA (Pacific Northwest GPS Geodetic Array), GEODYSSSEA (Geodynamics of Sou-

th and South-East Asia) GPS Network 등 범세계적으로 지판 운동이 활발한 지역을 중심으로 운영되고 있다.

최근에는 연간 1 mm의 지각 운동을 감지할 수 있는 장비가 개발되어 시험 운영되고 있으며 특히 계획적인 GPS 관측소의 배치를 통해 지판의 이동에 대한 정확한 분석이 가능하게 되어 지진의 원인 및 지진의 형태를 파악할 수 있는 기본적인 단서의 제공이 가능하게 되었다.

또한 지진활동을 일으키는 지구 내부의 미세한 응력의 변화는 수천 km 떨어진 곳까지 전파가 되기 때문에 범세계적인 GPS 관측망을 통해 획득된 자료는 지진 발생 후 내부 탄성파의 운동에 대한 추적은 물론 지각의 특성을 알아내는데 매우 가치가 있다. 즉, 탄성파의 해석을 통해서 관측하지 못했던 새로운 지역에 대한 자세하고 정확한 정보를 GPS 장비를 통해 획득할 수가 있다. GPS 관측망을 통해 획득된 자료가 지진을 예측할 수는 없지만 지표 운동에 대한 자료를 제공하기 때문에 단층의 활동을 이해하는 데는 많은 도움을 주고 있다.

정밀하고 계획적인 GPS 관측소의 배치를 통해 획득되는 자료를 이용하여 지구 물리학 연구를 위한 기반을 다지고 있음은 물론 전문가들이 아닌 일반인들이 GPS 관측망을 통해 획득되는 자료들을 보다 쉽게 사용할 수 있도록 하기 위한 노력이 지속적으로 진행되고 있기 때문에 지판 운동, 지진의 원인 및 지진예보 분야에 기여할 것이다.

GPS 중력측정

측지학 분야에서 중력 측정의 가장 큰 목적은 중력 이상을 산출하기 위함이다. 중력 이상은 보정 중력과 표준 중력의 차로서 중력의 보정과 표준 중력을 계산하기 위해서는 중력 측정 지점의 정확한 좌표가 필요하다. 따라서 정확한 중력 이상을 산출하기 위해서는 측정점의 정확한 좌표가 결정되어야 하며 특히 표고가 중력 이상을 계산하는 결정적인 요소로서 정밀하게 결정되어야 한다.

기존의 좌표 결정방법은 삼각 측량 또는 삼변 측량을 이용하여 경·위도를 결정하고 높이는 수준 측량을 통하여 결정하기 때문에 측지 작업량은 커지고 특히 산악 지형이 대부분인 우리 나라에서는 표고를 결정하기 위한 수준 측량시 많은 어려움이 따르게 된다. 그러므로 기존의 측지 방법을 이용한 중력 측정시 좌표의

세 가지 요소인 경도, 위도 및 표고 모두를 정밀하게 결정하는 것은 매우 어려우며 실제 이들 요소 모두를 정확하게 결정하기 위해서는 상당한 인력과 비용이 소모된다. 특히 기존의 측량 장비는 20 km 이상의 거리 측정이 어렵고 시계가 불량하거나 악천후 또는 야간에는 사용할 수 없는 단점을 지니고 있으며 거리 측정의 정밀도도 1백만 분의 1인 1 ppm 정도에 지나지 않는다.

그러나 2대 이상의 측지용 GPS 수신기를 이용하여 측지를 할 경우 기존의 측지 방법에 의한 측지 성과보다 훨씬 정확한 값을 얻을 수가 있다. 정밀 궤도력을 이용하여 후처리할 경우 두 지점간의 거리벡터를 1천만 분의 1인 0.1 ppm의 정밀도로 측지할 수가 있어 기존의 측지 방법에 비해 10배 정도의 정확도로 측지가 가능하다. 특히 기존의 측지 방식과는 달리 GPS를 이용하여 측지를 할 경우에는 중력 측정 장비 및 GPS 장비를 취급하는 데 2명만으로도 충분히 중력 및 좌표 측정이 가능하기 때문에 인력과 시간 및 비용 면에서 많은 절약이 가능하다. 또한 GPS는 위도와 경도, 높이를 동시에 측정할 수가 있고 측정거리에 제한이 없으며 주·야간 및 날씨에 전혀 영향을 받지 않기 때문에 기존의 측지 방식에 비해 매우 효율적인 방법이라 할 수 있다.

그러나 GPS 측정에 의한 높이는 WGS84 타원체를 기준으로 하는 타원체 높이이므로 지오이드를 기준으로 하고 있는 물리적인 높이인 표고로 변환하기 위해서는 GPS 측정 지점에 대한 정확한 지오이드를 알고 있어야 한다. 즉, GPS 측정을 통해 높이를 산출할 때 정확도를 결정하는 가장 중요한 요소는 지오이드의 정밀도이다.

지형 고도와 지오이드

GPS에 의해 결정된 높이 즉, 타원체고도 (ellipsoidal height)는 지구 타원체로부터 측정점까지의 높이로서 기하학적인 관측량이다. 그런데 우리가 사용하고 있는 높이는 기하학적인 좌표로서의 높이가 아니라 중력 포텐셜과 관련된 지오이드에 대한 물리좌표 즉, 표고이다. 타원체 높이 및 지오이드 높이와의 관계를 나타낸 Fig. 2에서 지오이드 높이 (N)는 GPS 관측에 의해 결정되는 타원체고도 (H)로부터 직접 표고 (h)를 구할 수 있는 정보를 제공한다.

즉, 지오이드 높이와 타원체 고도 및 표고와의 관계는 아래와 같다.

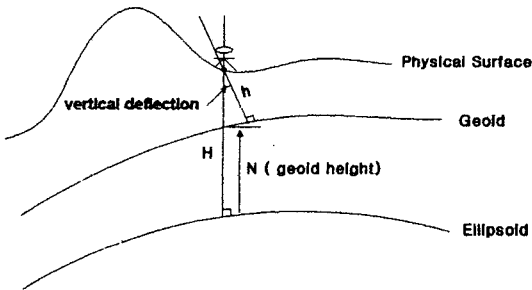


Fig. 2. Geoidal height relationship between physical surface and ellipsoid.

$$N = H - h \quad (1)$$

물론 측정 표고(h)는 지오이드면의 법선을 따라 측정 한 거리로서 타원체면의 법선인 타원체 고도(H)와는 연직선 편차로 인해 서로 일치하지 않는다. 그러나 이 편차 값은 매우 미미한 값으로서 10,000 m의 측정 표고에 대해 두 법선간의 차이를 계산하면 수 mm 정도에 지나지 않으므로 두 법선의 길이가 같다고 하여도 무관하다. 이처럼 지오이드와 표고 및 타원체간에는 밀접한 관계가 있으며 특히 GPS에 의해 측정된 높이를 이용하기 위해서는 지오이드에 대한 이해 및 적합한 지오이드 모델의 선정이 필수적이다.

지구에 고정된 실재하는 기준면인 지오이드는 중력이 장소에 따라 다르므로 국지적으로는 매우 복잡한 형상을 지니고 있다. 그러나 최근에는 인공위성에 의한 지오이드의 결정 등 지역적인 특성이 반영된 정밀 지오이드의 결정이 가능하다.

기존의 중력 자료 및 새롭게 측정된 중력 자료를 이용하여 정밀 지오이드를 결정하기 위해서는 해당 지역에 대한 많은 중력의 측정 및 측정 자료의 분석을 통한 완벽한 고도 이상도가 작성되어야 한다. 그러나 우리나라 육상 지역에 대한 전체 중력 측정 수의 부족, 특히 산악 지역에 대한 자료의 절대적인 부족, 그리고 북한 지역과 중국 및 구 소련 지역의 자료 부족으로 인하여 정확한 고도 이상도를 작성하기는 어렵다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 지형의 특성에 대한 영향을 별로 받지 않아 매우 완만한 변화가 일어나는 부우계 이상을 이용하면 중력 측정 수가 많지 않아도 연구 지역에 대한 고도 이상을 구할 수가 있다. 이렇게 부우계 이상을 이용하여 역계산한 고도 이상을 condensed 푸리에어 이상이라 하며 중력 자료가 거의 전무한 지역의 연구에 많이 활용되고 있다. 본 연구에서도 condensed 푸리에어 이상을 이용하여 정밀 지오

Table 1. Comparisons between long wave and the detailed geoid in the study area.

geoid model	mean (m)	s.d. (m)	max. (m)	min. (m)
Long wave	23.149	0.264	23.662	2.700
Detailed	23.438	0.411	24.372	22.843

이드를 결정하였다. Condensed 푸리에어 이상과 “remove and restore” method를 이용하여 결정된 정밀 지오이드 EGM96 model을 이용하여 결정된 광역 지오이드간의 비교가 Table 1에 나타나 있다.

연구 지역 내 광역 지오이드 및 정밀 지오이드를 비교한 Table 1에서 알 수 있는 사실은 연구 지역을 포함하는 한반도 일원에서 고도의 정밀도가 요구되지 않는 장비의 운용시 EGM96 model을 채택하게 되면 EGM96 model에 의해 계산된 지오이드 높이의 정확도가 ± 0.5 m에서 ± 1.0 m (한 옥, 1996) 이기 때문에 문제점이 전혀 없으나 보다 정밀한 장비의 운용을 위해서는 해당 지역 중력 자료의 처리를 통해 결정된 정밀 지오이드를 채택하여야 한다. 따라서 정밀하고 정확한 지오이드 map을 획득하기 위한 한반도 전 지역에 대한 고른 중력 자료의 측정이 필요하며 측정의 밀도가 낮은 산악지역에 대한 지속적인 측정이 이루어져야 한다. 특히 EGM96 model을 기본으로 하여 한반도 내 모든 중력 자료가 포함되어 개선된 지오이드 map이 조속히 개발되어야 하며 이러한 정밀한 map이 개발되면 GPS를 채택하고 있는 장비 운영에 있어서 획기적인 발전이 기대된다.

중력 측정 및 중력이상

기존자료

한반도 내에서 측지 목적을 위한 현대적 의미의 중력 측정은 일본의 Matuyama등이 1927년부터 1932년 사이에 Sterneck 진자를 사용하여 한반도 전체에서 21개 지점의 중력을 측정했었던 것이 처음이다. 이후 1950년대 말에 Woollard와 Lose가 전세계 중력 기준망을 확립하기 위한 목적으로 LaCoste & Romberg 중력계를 이용하여 7개 지점의 중력 측정을 실시하였고 USAM-SFE (U.S. Army Map Service Far East, 1964)는 1961년부터 1962년 사이에 2대의 Worden 중력계를 이용하여 한반도 내륙과 도서 지역을 포함한 163개 지점에서 중력을 측정하였다. 이후에도 미군에 의해서 한반

Table 2. Gravity stations of Korea (measured by U.S. Army).

Station	Location		Gravity value (magal)	Accuracy (mgal)	Date
	Latitude	Longitude			
Taegu	35° 50.4'	128° 35. 6'	979808.88	0.1	1973.7
Taejon	36° 20.6'	127° 23.1'	979834.50	0.1	1973.7
Wonju	37° 26.6'	127° 58. 5'	979902.30	0.1	1973.7
Kwangju	35° 08.6'	126° 48. 8'	979744.85	0.1	1973.7
Chonju	35° 49.7'	127° 07. 9'	979791.11	0.2	1988.5
Pusan	35° 06.91'	129° 04.31	979770.30	0.3	1994.9
Pusan	35° 06.91'	129° 04.38	979770.55	0.1	1994.9
Pusan	35° 09.82'	129° 03.45'	979767.68	0.1	1994.9
Pusan	35° 09.82'	129° 03.45'	979767.69	0.1	1994.9

도 지역에 대한 중력 측정은 지속적으로 이루어지고 있다. 연구 기간 동안 획득된 미군의 한반도 내 중력 측정 자료는 DMA의 K. Burke 박사의 초청으로 1996년 8월 한 옥 교수가 St. Louis 소재 DMA의 Aerospace Center 방문시 gravity library의 supervisor인 LeRoy D. Schmider씨가 중력 자료 교환 및 공동 연구를 위해 제공한 자료로서 1970년대는 대구, 대전, 원주, 광주 소재의 비행장 총 4개소를 대상으로 측정이 이루어졌으며 1980년대는 원주 비행장 1 개소, 1990년대는 부산의 향만 및 미군기지를 대상으로 4개소에 대한 측정이 이루어졌다. 미군이 지속적으로 중력을 측정하고 있는 것은 한반도 내에서 정밀 유도 무기 등의 사용을 위한 기초 자료를 구축하기 위한 것으로 미군에 의한 한반도 내 중력 측정 자료는 Table 2와 같다. 우리 나라 과학자에 의한 중력의 측정은 1973년 국립지질광물연구소에서 전국의 15개 지점에 중력 기점을 설치한 것이 최초이고 이후 국립 지리원, 부산대, 서울대 등 일부 대학에 의한 중력 측정이 지속적으로 이루어져 현재는 5,500여 지점에 대한 중력 측정이 이루어졌으며 평균 측정 밀도는 20 km²당 1 측정 정도이다 (최광선 등, 1996).

GPS 중력측정

GPS 중력 측정은 1998년 5월 22일부터 6월 10일 까지 79개 측지 통제점에 대해 측정하였다. 중력 측정은 LaCoste & Romberg 사의 Deluxe type 중력계 (Serial Number : D-210)를 이용하여 실시하였고 GPS 측정은 Trimble 사의 4000SSI geodetic surveyor 2 대를 사용하였다. 연구에 사용한 중력계는 LaCoste & Romberg 사의 최신형 model로서 0.1 µgal까지 측정이 가능하며 Labview software를 이용하여 중력측정과정

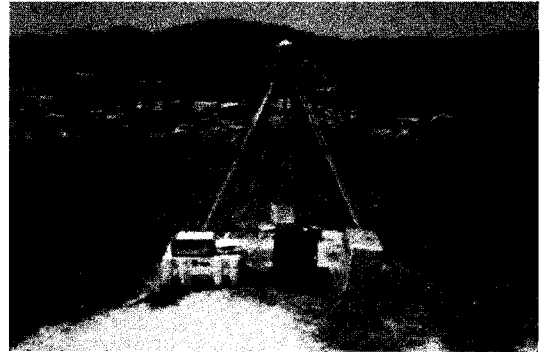


Fig. 3. Gravity surveying using GPS at survey control point.

을 시각적으로 관측할 수 있는 장비이다. 측정간에는 1개 SCP에 중력계 및 GPS 장비를 동시에 설치하여 측정하였다 (Fig. 3).

각 SCP당 측정시간은 10분을 기준으로 하였으며 15 개 중요 지점에 대해서는 1시간 동안 측정하였다. 특히 대전 천문대 기준점과 연구 지역이 200 km 이상 이격 되어 있기 때문에 연구 지역 중앙지점인 연천군 백의 리에 GPS 임시 기준점을 설치하였다.

연구지역내의 기 측정된 지점 (최광선 등, 1996) 및 금번 기간 중에 측정된 중력 측정의 위치는 Fig. 4와 같다.

GPS 측정을 위한 SCP 제원은 매년, 좌표와 표고는 물론 표식주에 대한 확인 작업 및 재 측정 작업을 실시

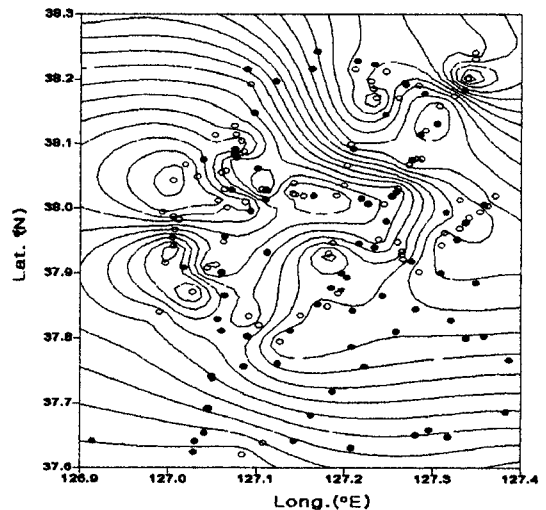


Fig. 4. Previous and new gravity values of study area (Closed cycles indicate previous values, open circles indicate new values).

한 후 발간하는 측지통제점 제원철을 기준으로 하였다.

GPS 측정시 백의리에 설치한 GPS 임시 기준점에는 L1/L2 ground plane antenna를 야외 측정시에는 choke ring antenna를 사용하였다. 이들 수신기의 정밀도는 0.5 cm 정도이다. 대부분의 SCP들은 장애물이 거의 없는 주위 보다 높은 지형에 매설되어 있기 때문에 79개 모든 측정 지점에서 수신 위성이 4개 이상이 되어 수신 환경은 매우 좋았다.

수신한 자료는 Trimble 사의 GPSurvey 2.30을 이용하여 대전 천문대를 기준점으로 후처리하였으며 정밀한 계산을 위하여 정밀 궤도력을 이용하였다.

중력이상

중력이상이란 관측된 중력 값에 각종 보정을 한 다음 정규 중력 값과의 차이를 나타내는 것으로 보정의 정도에 따라 프리에어 이상, 부우계 이상, 지각 균형이상 등으로 나눌 수 있다.

정규 중력(γ)은 지구를 2축 부동 타원체로 가정한 경우의 타원체면 상에서의 위도 변화에 따른 중력의 변화를 나타낸 것으로 금번 연구에서는 중력 이상을 산출하기 위하여 아래 식(2)와 같은 GRS 1980 정규 중력식을 이용하였다.

$$\gamma = \frac{a\gamma_e \cos^2\Phi + b\gamma_p \sin^2\Phi}{\sqrt{a^2 \cos^2\Phi + b^2 \sin^2\Phi}} \quad (2)$$

여기서

- Φ: 위도
- a: 적도 반경 (6,378,137.00 0 0 m)
- b: 극 반경 (6,356,752.3141 m)
- γ_e : 적도 표준 중력 (978.03267715 cm/sec²)
- γ_p : 극표준중력 (983.211863685 cm/sec²)

고도 보정과 대기질량보정을 모두 고려하여 결정된 연구지역의 프리에어 이상 map은 Fig. 5에 나타나 있다.

부우계보정과 지형 보정을 모두 고려한 연구 지역의 부우계 이상 map은 Fig. 6과 같다. 연구 지역의 부우계 이상의 변화량은 최저 -29.6 mgal에서 최고 14.4 mgal의 변화를 보인다.

DMA (Defence Mapping Agency)의 15" × 15" DTED (Digital Terrain Elevation Data) 자료를 이용하여 실시한 지형 보정량은 0.296 mgal에서 2.88 mgal의 변화가 나타나며 연구 지역에서의 최대 보정

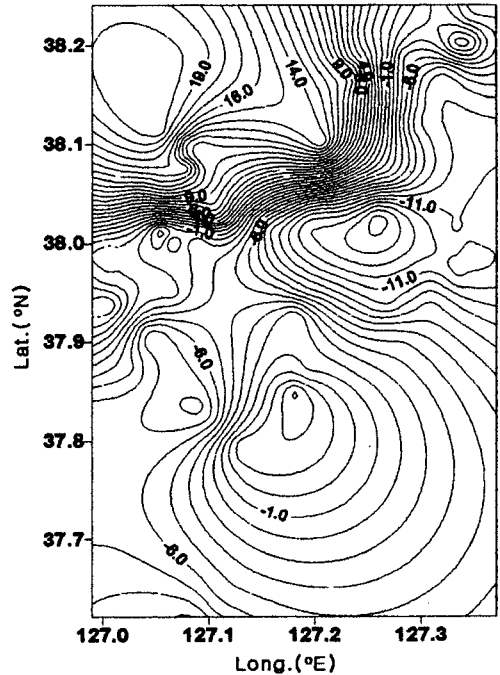


Fig. 5. The contour map of free-air anomaly in the study area.

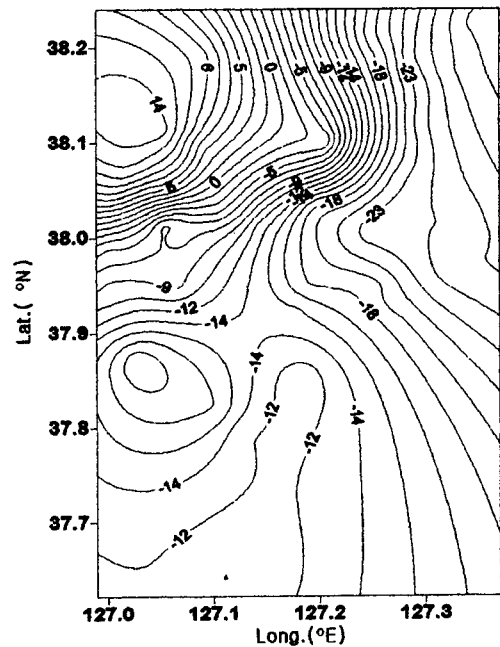


Fig. 6. The contour map of Bouguer anomaly in the study area.

값은 경도 127.26047°E, 위도 37.94797°N, 고도 104.95 m 지점이다.

중력 자료 해석

한반도 주변의 중력 자료

한반도와 동해, 그리고 일본과 중국, 시베리아의 일부를 포함하는 28°N~48°N, 120°E~140°E 지역 (Fig. 7)의 중력 이상과 지오이드 및 지형과의 관계가 Fig. 8 나타나 있다.

지형 고도와 중력 값과의 밀접한 관계를 Fig. 8에서 쉽게 알 수 있다. 즉, 동해와 같이 수심이 깊고 지각이 얇은 곳에서는 부우계 이상 값이 높게 나타나고 비교적 지각이 두꺼운 곳에서는 상대적으로 낮게 나타난다. 이는 부우계 이상과 지각 두께의 변화모형이 유사한 경향을 나타내는 반면 지형 고도는 부우계 이상과는 거울 효과를 나타낸다. 그러나 지오이드 높이의 변화는 부우계 이상 및 지형고도와는 연관성을 나타내지 않는다 (한 옥, 김영석, 1997).

연구 지역 중 부우계 이상이 가장 높은 곳은 일본해구 부근으로 최대값이 350 mgal에 이르며 일본열도 쪽으로 가면서 점점 낮아져 0~50 mgal 정도의 분포를 보인다. 한편 황해와 북 중국 일대는 -50~0 mgal로 일정한 값을 보이며 거의 변화가 없다. 모호 깊이에서 알 수 있듯이 동해의 지각 두께는 20 km 정도로 상당히 얇지만 한반도와 북 중국으로 가면서 상당히 증가하여 40 km정도에 이른다.

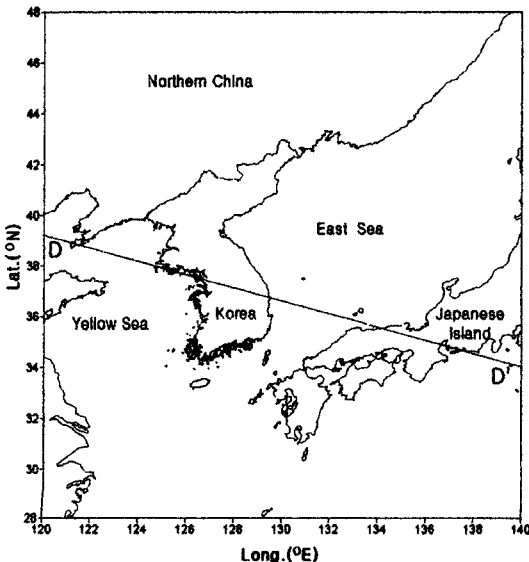


Fig. 7. Location map of the Korean peninsula and its vicinity.

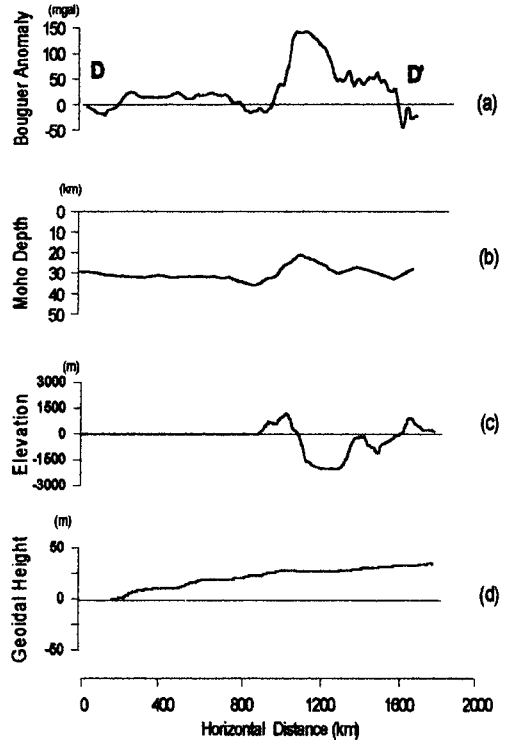


Fig. 8. (a) Bouguer gravity anomaly profile along D-D' line. (b) Moho depth profile along D-D' line. (c) Topographic profile along the D-D' line. (d) Geoidal height profile along D-D' line.

추가령 구조곡 지역의 중력 자료

동두천 부근 및 휴전선에 인접한 연천의 2개 지역은 동서 방향으로, 추가령 구조곡을 따라서 연천에서 의정부에 이르는 지역은 남북 방향으로, 총 3개의 단면에 대해 중력 측정 자료를 이용하여 계산한 부우계 이상, 프리에어 이상, 연구 지역의 고도 자료 및 EGM96에 의해 계산된 지오이드를 이용하여 중력 자료를 분석하였다.

연천 지역을 절단한 A-A'측선에 대한 중력 자료의 분석은 Fig. 9에 나타나있으며 동두천 지역을 동서 방향으로 절단한 B-B' 측선에 대한 중력 자료의 분석은 Fig. 10에 나타나있다. 또한 연구 지역을 남북 방향으로 절단한 C-C' 측선에 대한 중력 자료의 분석은 Fig. 11에 나타나 있다.

연천지역의 동서방향 단면인 A-A' 측선을 나타낸 Fig. 9와 동두천 지역의 동서방향 단면인 B-B' 측선을 나타낸 Fig. 10에서 구조곡의 형상이 구조곡 좌우의 지형과 대비되어 선명하게 드러난다. 이에 비해 구조곡

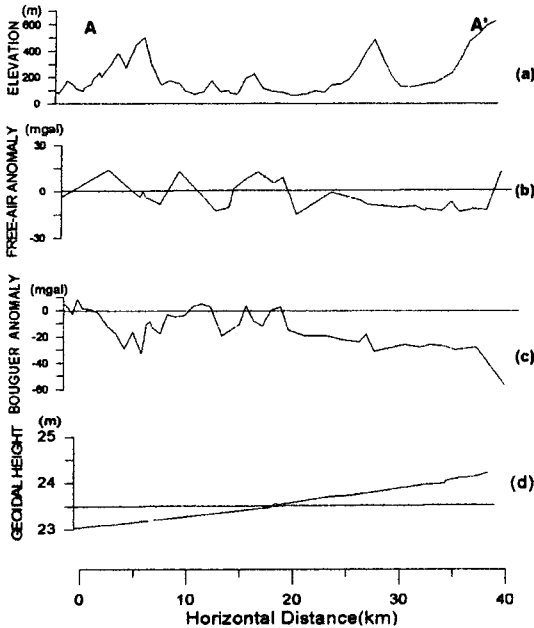


Fig. 9. (a) Topographic profile along A-A' line. (b) Free-air anomaly profile along A-A' line. (c) Bouguer anomaly profile along A-A' line. (d) Geoidal height profile along A-A' line.

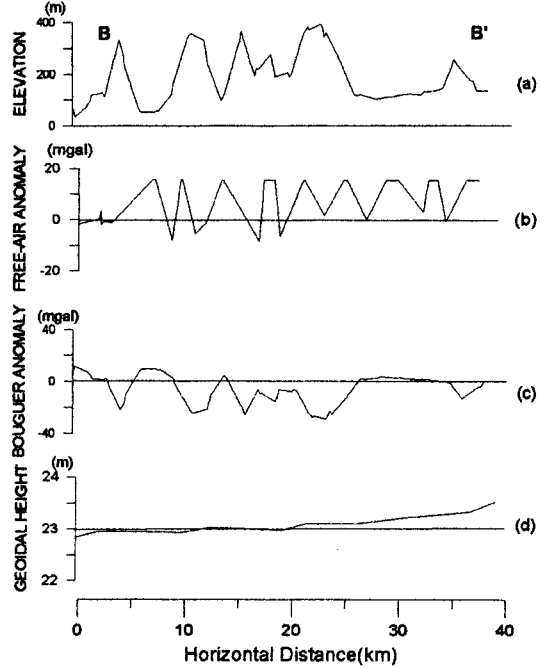


Fig. 10. (a) Topographic profile along B-B' line. (b) Free-air anomaly profile along B-B' line. (c) Bouguer anomaly profile along B-B' line. (d) Geoidal height profile along B-B' line.

의 종단면인 C-C' 측선을 나타내는 Fig. 11에서는 구조곡의 형상이 선명하게 나타나지 않고 하천, 산악, 평야 지대 등의 표고 차에 의한 지형의 다양한 변화가 발견된다. 한반도 주변 중력 자료의 분석에서와 마찬가지로 추가령 구조곡 일대의 연구 지역에 대한 중력 자료의 분석을 통해서도 A-A', B-B', C-C' 세 측선 모두에서 지형의 높리와 부우계 이상의 값은 거울 효과가 나타나는 데 비해 지형의 높리와 프리에어 이상은 유사한 경향을 가진다. 이에 비해 지오이드 높리는 지형의 기복 및 중력 이상치와는 관계없이 A-A', B-B', C-C' 측선 모두에서 동으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다.

또한 프리에어 이상은 기복이 적은 평지에서는 고도에 관계없이 거의 일정한 값으로 나타나지만 산악 지형에서는 고도의 변화에 상당히 민감하게 나타난다. 이에 비해 부우계 이상은 고도의 변화에 상당히 민감하게 반응하며 일부 지역을 제외하고 대부분의 지역에서 음(-)의 값을 가지며 연구지역의 동쪽으로 갈수록 음(-)의 값이 점차 커진다는 사실을 알 수 있다.

연구 지역의 A-A', B-B' 단면의 지역적인 이상 및 잔차 이상을 나타낸 Fig. 12와 C-C' 단면의 지역적인 이상 및 잔차 이상을 나타낸 Fig. 13에서 잔차 이상 값이 음(-)의 값을 가진다는 사실을 쉽게 발견할 수가 있다.

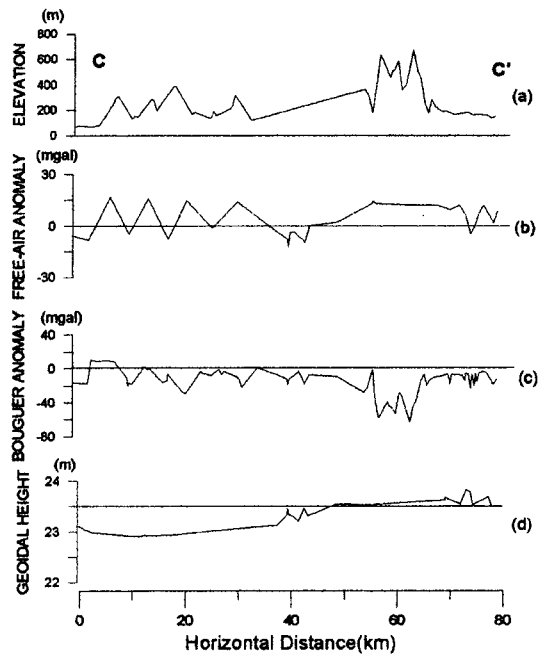


Fig. 11. (a) Topographic profile along C-C' line. (b) Free-air anomaly profile along C-C' line. (c) Bouguer anomaly profile along C-C' line. (d) Geoidal height profile along C-C' line.

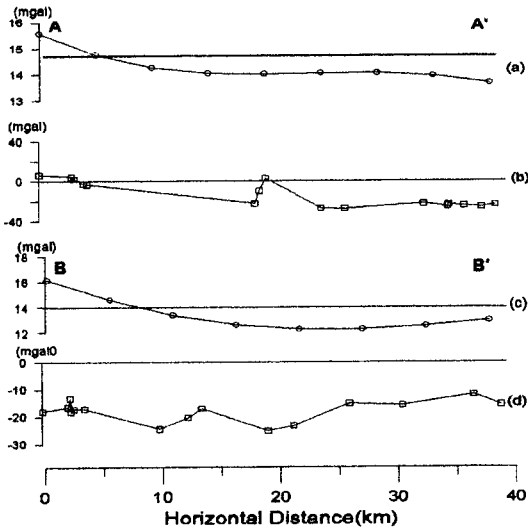


Fig. 12. (a) Regional anomaly profile along A-A' line. (b) Residual anomaly profile along A-A' line. (c) Regional anomaly profile along B-B' line. (d) Residual anomaly profile along B-B' line.

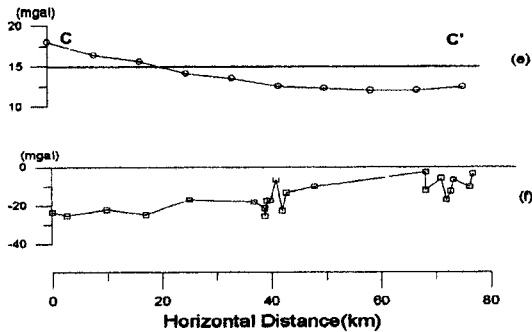


Fig. 13. (a) Regional anomaly profile along C-C' line. (b) Residual anomaly profile along C-C' line.

이는 추가령 구조곡 지역의 지하 구성 물질의 밀도가 주변 지역의 지하 물질의 밀도보다 낮다는 것을 나타낸다. 이러한 경향은 C-C' line의 잔차 이상을 나타내고 있는 Fig. 13에서 종단면 전체에 해당되는 값이 음(-)의 값을 갖는다는 것으로부터 더 확연해지며, 추가령 구조곡의 성인 및 발달 과정을 잘 설명해 준다. 즉, 화산 활동간에 분출된 용암으로 덮인 지형은 거대한 용암대지를 이룬 후 침식 작용이 일어났으며 이런 영향을 받지 않은 지형은 현재 형성된 지형과 크게 다를 것이 없는 침식 및 퇴적 작용이 진행되었다. 따라서 최초 화산활동에 의해 분출된 용암이 밀도가 낮은 현무암으로 구성되어있으며 또한 퇴적 작용에 의해 퇴적된 물질이 구조곡의 하부를 메웠기 때문에 구조곡 지역이 밀

도가 낮은 퇴적암으로 형성되었다는 것이다. 추가령 구조곡이 백악기와 제 4기 화산활동에 의해 형성된 화산 지형이라는 것은 추가령 구조곡의 성인을 규명하기 위한 여러 연구 중 원종관 등(1990)의 화산 활동 자체의 연구와 이대성 등(1983)의 화산활동의 결과로 분출된 암석에 대한 연구에서 잘 나타난다. 즉, 위와 같은 구조곡의 성인 및 발달과정의 설명이 가능하기 위해서는 추가령 구조곡을 이루고 있는 대부분의 지역이 인접한 다른 지역보다 밀도가 낮아야 한다. 그런데 중력 자료를 이용하여 결정된 연구 지역의 잔차 이상값이 구조곡의 종단면을 따라서 음(-)의 값을 나타내고 있으며 잔차 이상 값이 음(-)의 값을 가진다는 것은 그 지역의 밀도가 낮을 때 전형적으로 나타나는 현상이기 때문에 추가령 구조곡 일대가 주변 지역보다 밀도가 낮다는 사실을 잘 나타낸다. 연천, 철원 지역과 의정부, 동두천 지역의 잔차 이상을 비교하면 연천, 전곡 지역보다 의정부, 동두천 지역의 잔차 이상 값이 보다 큰 음(-)의 값을 가진다. 이는 추가령 구조곡에 포함된 지역이라 하더라도 의정부, 동두천 지역에서의 지하 구성 물질의 밀도가 연천, 전곡지역 보다 낮다는 것을 의미한다.

지형 분석

일반적으로 지형의 고도별 면적이 고도가 낮을수록 넓어지는 데 비해 연구 지역의 가장 넓은 면적을 차지하는 고도는 150 m~200 m로서 이는 하천에 의해 형성된 과거의 지형 상부에 나중에 분출된 현무암이 넓게 분포하기 때문이며 이로 인해 본 연구 지역은 하천 지형의 전형적인 고도-면적 관계가 나타나지 않는다. 연구 지역의 남, 북측을 나타낸 Fig. 14와 북, 남측을 나타낸 Fig. 15에서 추가령구조곡 자체 및 구조곡 양측 사면에서 서로 다른 2개의 경사 패턴을 쉽게 발견할 수가 있다. 이와 같은 서로 다른 경사 패턴은 구조곡의 상부, 즉, 용암대지 끝 부분에서의 급경사로 인해 침식된 물질이 상류 쪽으로 많이 퇴적됨으로써 concave slope이 형성된 것으로 판단된다.

또한 남, 북측을 나타낸 Fig. 14에서 추가령구조곡의 서울, 철원 간의 곡이 잘 인식된다는 사실을 쉽게 알 수 있다. 이 부분은 동두천 의정부곡과 포천 의정부곡이 의정부에서 합류하여 서울로 이어지는 협곡이며 양측에 협준한 사면을 가진 도봉산과 수락산이 자리잡고 있다. 포천에서 축석령까지 이어지는 부분은 고도 80~100 m, 폭 5~7 km에 이르는 넓고 상당히 평탄한 지형이나 축석령에 이르러서는 주위의 죽엽산 등에 의해 막

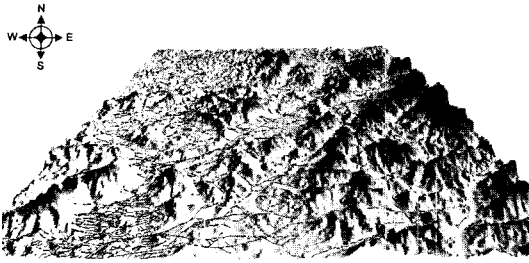


Fig. 14. 3-D map of study area. (South → North).

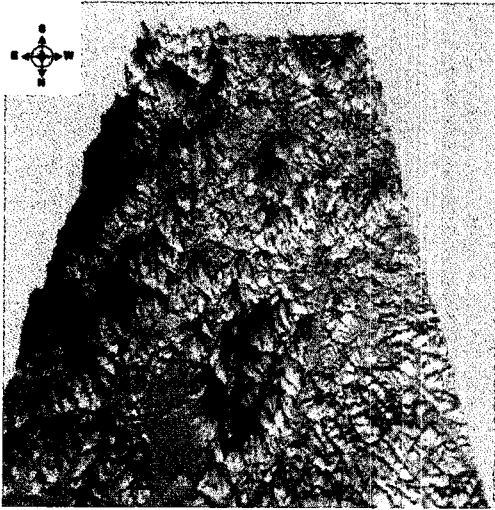


Fig. 15. 3-D map of study area. (North → South).

히고 오로지 측석령을 통해서 의정부로 연결되고 있다. 따라서 포천-의정부간의 43번 도로가 추가령구조곡지역의 가장 중요한 이동 공간임을 알 수가 있다. 이에 비해 북쪽에서 남측의 가시도를 나타낸 Fig. 15에서는 중격실 지형을 횡으로 막고있는 43번 도로 부근의 죽엽산과 측석령으로 이어지는 횡격실 지형을 쉽게 발견할 수 있다. 이러한 횡격실 지형은 남북간의 이동시에 협곡을 연해 발달해 있는 3번 및 43번 도로에 의존할 수밖에 없음을 알려주고 있다.

결 론

추가령 구조곡 지역의 GPS 중력 측정을 위해 La-Coste & Romberg 사의 Deluxe type (Serial number D-210) gravity meter와 Trimble 사의 4000SSI Geo-detic surveyor 2대를 이용하여 79개 측지 통제점에 대해 GPS에 의한 중력 측정을 실시하였다.

GPS 1대는 연구 지역의 중앙 지점인 백의리 일대에 10일간의 측정 기간 동안 고정으로 설치 운영하였으며 중력계 및 GPS 1대는 야외 측정을 위해 이용하였다.

추가령 구조곡 지역에 대한 중력 자료의 해석 결과 지형의 높이와 부우계 이상의 값은 지형 고도가 가장 높은 곳에서 부우계 이상의 음(-)의 값이 최저로 나타나는 데 비해 프리에어 이상은 지형의 높이와 아주 유사한 경향을 가지며 변화하는 사실을 알 수 있다. 그러나 지오이드는 지형의 기복, 부우계 이상 및 프리에어 이상과는 연관성이 전혀 발견되지 않는다. 또한 프리에어 이상은 기복이 적은 평지에서는 고도에 관계없이 거의 일정한 값으로 나타나지만 산악 지형에서는 고도의 변화에 상당히 민감하게 나타난다. 그러나 부우계 이상은 고도의 변화에 상당히 민감하게 반응하며 일부 지역을 제외하고 대부분의 지역에서 음(-)의 값을 가진다는 사실을 알 수 있다. 연구 지역의 부우계 이상 map에서 중력 분포가 서에서 동쪽으로 갈수록 부우계 이상이 낮게 나타나며 추가령 구조곡의 동쪽에서 음(-)의 부우계 이상 값이 나타난다는 사실을 알 수가 있으며 이는 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 높아지는 지형의 영향에 기인한다. 또한 지형 보정량의 최대치가 2.89 mgal, 평균은 1.06 mgal로 비교적 큰 값이며 이는 중력 보정시 지형보정이 필수적임을 시사한다.

연구 지역에 대한 지역적인 이상 및 잔차 이상의 분석 결과 추가령 구조곡 지역이 인접한 다른 지역 보다 상당히 낮은 값을 가진 것으로 나타났으며, 이는 추가령 구조곡의 지하 물질의 밀도가 다른 지역에 비해 낮다는 것을 의미한다. 이러한 결과들은 추가령 구조곡의 성인 및 발달 과정을 규명하기 위한 자료로 활용될 수 있다.

참고문헌

- 원종관, 이문원, 우준기 (1987) 추가령구조대의 지형발달과 화산활동. 강원대학교 출판부, p. 11-45.
- 이대성, 유기주, 김광호 (1983) 추가령 열곡의 지구조적 해석. 지질학회지, 19권 1호, p. 19-38.
- 최광선, 김정희, 양철수 (1996) 지리산 일원의 중력 측정. 한국 지구과학회지, 17권 5호, p. 422-428.
- 한 옥 (1986) WGS 신좌표체계 전환연구. 국방정보본부, 환 7장, p. 1-21.
- 한 옥 (1997) 지구과학 연구를 위한 GPS 활용. 박희인 교수 정년 퇴임 기념집, p. 198-206.
- 한 옥, 김영석 (1997) 한국 동해 암권 내의 열영력 분포에 관한 연구. 한국 지구과학회지, 18권 3호, p. 176 - 182.
- Koto, M. (1903) An Orographic Sketch of Korea. J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo, v. 19, Art. 1.

Hein, G.W. (1985) Orthometric Height Determination Using GPS Observation and Integrated Geodesy Adjustment Model. NOAA Technical Report NOS 110 NGS32, National Geodetic Information Center, NOAA, Rockville, Md., p.16.
USAMSFE (1964) South Korea report on gravity survey

1961-1962. U.S. Army Map Service Far East.
Yabuta (1991) GPS/Leveling geoid Difference in Kinki District, Japan. Proceeding of the Japanese Symposium on GPS, p.94-106.

1999년 2월 4일 원고접수, 1999년 3월 18일 게재승인.