

## 수직 중력 변화율 탐사 적용 사례

박영수<sup>1)</sup>, 임형래<sup>1)</sup>, 임무택<sup>1)</sup>, 구성본<sup>1)</sup>, 이영철<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한국지질자원연구원 지질기반정보연구부, yspark@kigam.re.kr

### A Vertical Gravity Gradient Survey for Shallow Density Mapping

Yeong-Sue Park<sup>1)</sup>, Hyoungrae Rim<sup>1)</sup>, Mutaek Lim<sup>1)</sup>,  
Sung Bon Koo<sup>1)</sup>, Young-Chal Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Geology & Geoinformation Div., KIGAM

**요약** : 수직 중력 변화율 탐사는 중력 탐사에 비하여 분해능과 탐지능이 높고 광역 효과를 억제하는 이점이 있다. 수직 변화율의 실제 측정은 어려움이 많아 정확성과 실용성에서 의문이 제기되기도 하였으나, 현대적인 중력계로는 요구되는 정확도를 유지하는 것이 크게 어려운 일이 아니다. 특히, 얇은 깊이의 소규모 구조를 대상으로 하는 토목, 환경 문제에는 효과적으로 적용될 수 있다. 이 논문은 수직 중력 변화율 탐사를 천부 고분해 밀도 구조 해석에 적용하기 위하여 수직 중력 변화율에 관한 전반적 고찰과 수치 역산 모델링을 통하여 중력 탐사와 비교, 분석하였으며, 전남 무안의 석회암 공동 지역에서 수행한 수직 중력 변화율 탐사를 수행하고 역산, 해석하였다.

**주요어** : 수직 중력 변화율, 분해능, 탐지능, 공동

**Abstract** : Vertical gravity gradient measurement offers greater structural resolution and detectability than gravity alone. Practical difficulties of field measurement of vertical gravity gradient have raised questions of its accuracy and utility. But, modern automated gravimeter of 1  $\mu$ Gal sensitivity makes it easier to measure vertical gradient with required accuracy. It is particularly effective to engineering and environmental problems which target shallow subsurface structure. This paper attempts to apply the vertical gravity gradient technique to high resolution density mapping. The method was generally reviewed and numerical inverse modeling was executed for comparing with conventional gravity. And actual vertical gravity gradient data surveyed over karstic cavity area at Muan was analysed and interpreted.

**Keywords** : vertical gravity gradient, resolution, detectability, cavity

#### 1. 서론

중력의 수직 및/혹은 수평 변화율은 보다 높은 분해능과 정밀도로 지하구조를 해석할 수 있음은 많은 논문에서 지적된 바 있다(Fajklewicz, 1976; Butler, 1983; Marson and Klingele, 1993).

수직 중력 변화율은 사다리 등을 이용하여 측정 높이를 달리하여 중력을 측정하여 그 차이를 활용하는데, 실제 측정은 정확도와 실용성에 문제가 있어 차라리 Hilbert 변환을 이용하여 계산으로 구하는 것이 현실적이라는 주장도 있다(Hammer, 1979). 그러나 계산에 의한 수직 변화율은 가짜 이상을 만들거나 측정 중력이 가지고 있는 오차와 불충분을 그대로 반영하며, 더욱이 측정된 수직 변화율은 중력이 직접 보여주지 못하는 지하 정보에 대한 새로운 중력 정보이다(Butler, 1983).

수직 중력 변화율을 직접 측정하고자 하는 시도는 Evjen(1936)이 최초였다. 그러나 천부의 곡소 이상에 의하여 측정값의 변동이 너무 심하고 중력계가 충분한 정밀도와 정확도를 가지고 있지 못하며, 현장 측정이 어려워 실용적이지 못하다고 결론지었다. 그러나 현대적인 중력계는 1 μGal의 정밀도로 자동 측정이 가능하므로 수직 중력 변화율 측정은 손쉬운 일이 되었고, 더욱이 Evjen이 문제점으로 지적한 천부의 소규모 곡부 이상 자체가 이제는 고정밀 중력탐사와 수직 변화율 측정의 목적이 되었다.

## 2. 수직 중력 변화율 - 분해능과 탐지능

측정 중력 변화율은 이론적인 미분 변화율이 아니라 두 지점에서의 값의 차이이므로 차분 변화율(finite difference gradient) 또는 구간 변화율(interval gradient)이다. 실제 또는 미분 변화율과 구간 또는 차분 변화율의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$g_{z,z}(P) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \Delta g_z / \Delta z \quad (1)$$

$$\Delta g_z / \Delta z = \frac{1}{\Delta z} \int_{z_1}^{z_2} g_{z,z}(z) dz \quad (2)$$

구간 수직 변화율은 구간 거리의 중간점에서의 실제 수직 변화율로 인정하여도 크게 어긋나지 않는다.

수직 중력 변화율을 측정하는 가장 중요한 이유는 이들이 분해능(resolution)과 탐지능(detectability)을 향상시키기 때문이다. 탐지능의 향상은 심도의 제한이 있지만 분해능의 향상은 원칙적으로 항상 유지된다.

지표에서 측정된 이상값은 각각의 지하구조에 의한 이상의 중첩 합이다. 따라서, 두 개의 이상의 구조체로부터 기인하는 이상값은 그 구조체들의 깊이와 상호 위치에 따라서 하나의 이상으로 합쳐져서 관측될 수도 있고 각각의 이상이 구분(분해)될 수도 있다. 예를 들어, 동일한 심도에 있는 두 개의 무한 수평 원통 모델에 의한 중력 이상은

$$g_z(x) = 2\pi\gamma\Delta\rho R^2 \left[ \frac{\zeta_0}{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + (\zeta_0)^2} + \frac{\zeta_0}{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + (\zeta_0)^2} \right] \quad (3)$$

가 된다. 여기서, Δρ는 원통의 밀도차, R은 원통의 반지름, ζ<sub>0</sub>는 두 개의 원통의 중심까지의 깊이, d는 원통 사이의 간격이다.

(3) 식을 ζ<sub>0</sub>에 관하여 2차 편미분하면 이론적 분해능을 구할 수 있다.

$$d_m = \frac{2}{\sqrt{3}}\zeta_0 \quad (4a)$$

$$\zeta_{m0} = \frac{\sqrt{3}}{2}d \quad (4b)$$

즉, 두 개의 무한 수평 원통이 분해될 수 있으려면 최소한 그 간격이 심도의  $\frac{2}{\sqrt{3}}$  배 이

상 되어야 한다. 바꾸어 말하면, 두 개의 원통이 그 간격의  $\frac{2}{\sqrt{3}}$  배보다 깊게 있으면 두 개의 이상으로 분해될 수 없다.

동일한 모델에 의한 수직 중력 변화율은

$$g_{z,z}(x) = 2\pi\gamma\Delta\rho R^2 \left[ \frac{\zeta_0^2 - (x - \frac{d}{2})^2}{\left\{ (x - \frac{d}{2})^2 + (\zeta_0)^2 \right\} + \frac{\zeta_0^2 - (x + \frac{d}{2})^2}{\left\{ (x + \frac{d}{2})^2 + (\zeta_0)^2 \right\}}} \right] \quad (5)$$

이 되며, 이론적 분해능은 다음과 같다.

$$d'_m = \frac{2}{\sqrt{3 + \sqrt{8}}} \zeta'_0 \quad (6a)$$

$$\zeta'_{0m} = \frac{\sqrt{3 + \sqrt{8}}}{2} d' \quad (6b)$$

따라서, 식 (4)와 (6)을 비교하면 수직 중력 변화율의 경우가 중력의 경우에 비해 각각의 이상체에 의한 이상으로 분해될 수 있는 최대 깊이는 39% 깊으며, 최소 간격은 28% 좁다는 것을 알 수 있다.

구조의 탐지능은 이상의 크기(신호)와 측정 오차(잡음)의 비에 의한다. 구조의 깊이가 얕을 경우에는 중력보다 중력 변화율이 높은 S/N비를 가질 것이다. 반지름 3 m이고 밀도차  $2 \text{ g/cm}^3$ 인 구형 이상체가 5 m 깊이에 있을 경우, 이상체의 직상부에서 최대 중력 이상  $60 \mu\text{Gal}$ 이 되고 이론 수직 변화율은  $24 \mu\text{Gal/m}$ , 구간 수직 변화율은  $18 \mu\text{Gal/m}$ 가 된다(Fig. 1). 정성적으로 수직 변화율이 중력 이상에 비하여 날카로운 이상곡선을 보여 이상체의 존재를 보다 쉽게 인식할 수 있음을 볼 수 있다.

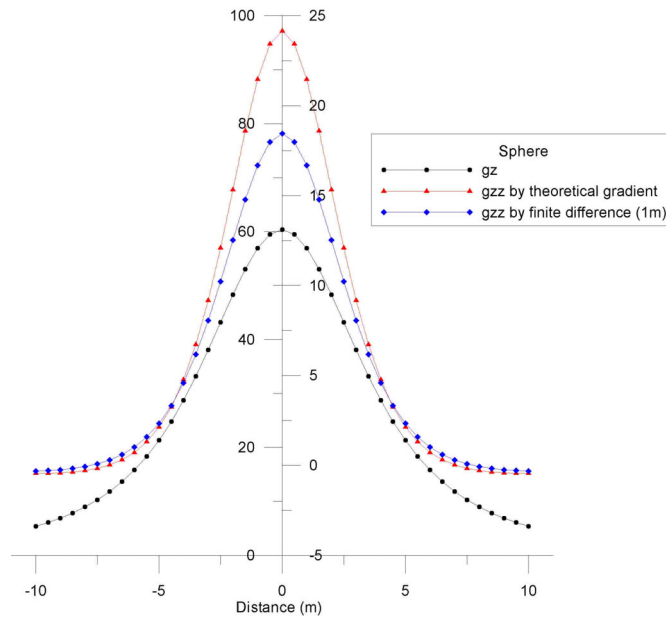


Fig. 1. Comparison of gravity, theoretical vertical gradient and finite difference vertical gradient over a spherical model

Butler(1983)에 의하면 고정밀 중력탐사의 잔여 중력값의 예상 오차는  $5 \mu\text{Gal}$  정도이고, 구간 수직 변화율의 예상 오차는  $1 \mu\text{Gal/m}$  정도로 보는 것이 타당하다고 하였는데, 이에 의하면 그림 1의 경우의 S/N 비는 12, 24, 18이 되어 정성적으로도 탐지능이 향상된 것을 볼 수 있다.

위와 같은 조건에서,  $g_z \propto \frac{1}{\zeta_0^2}$  이며,  $g_{z,z} \propto \frac{1}{\zeta_0^3}$  이다. 즉, 수직 중력 변화율은 중력값

의 경우보다 깊이에 따른 값의 감쇠가 빠르다. 중력값과 수직 중력 변화율의 최댓값 관계식에서  $\zeta_0 = 2g_z/g_{z,z}$  를 얻을 수 있다. 이 식으로부터 중력과 수직 변화율의 예상 오차가 같아지는 깊이는 10m임을 알 수 있다. 즉, 이상체의 깊이가 10m 이상이면 분해능의 향상은 계속 유지되지만, 탐지능의 유리함은 없어진다는 뜻이다.

수직 변화율 탐사의 또 다른 이점은 필터링 효과 즉, 심부의 저주파 광역 효과는 억제되고 천부의 고주파 잔여 효과는 강조된다는 것이다. 그러나 이것은 천부의 잡음도 동시에 증폭된다는 의미도 된다는 점도 유념하여야 한다.

### 3. 수치 모델링

너비 10m, 길이 28m인 두개의 프리즘이 깊이 4m에 10m 간격으로 나란히 있는 모델에 대하여 중력 자료만으로 역산한 경우와 중력과 수직 중력 변화율 자료를 동시에 이용한 역산을 비교해 보았다(Fig. 2). 역산 알고리즘은 입력 자료에 따른 역산 결과를 비교하기 위하여 일반적으로 이용되는 최대 평활화를 이용하였다.

Fig. 2(a)는 중력값만으로 역산한 경우이다. 두개의 프리즘이 서로 가까이 있기 때문에 이상 프로파일에서 두개의 프리즘을 인식하기 어렵고, 역산 결과도 두개의 이상체로 분리하지 못하였다. Fig. 2(b)는 중력값과 수직 중력 변화율을 동시에 이용하여 역산한 결과이다. 수직 변화율은 중력 이상에 비하여 두개의 이상체 사이에서 뚜렷한 골은 보여주고 있고, 역산 결과도 완전히 두개의 이상체로 분리하지는 못하였지만, 중력값만으로 역산한 경우보다는 분해능이 상당히 향상된 것을 볼 수 있다.

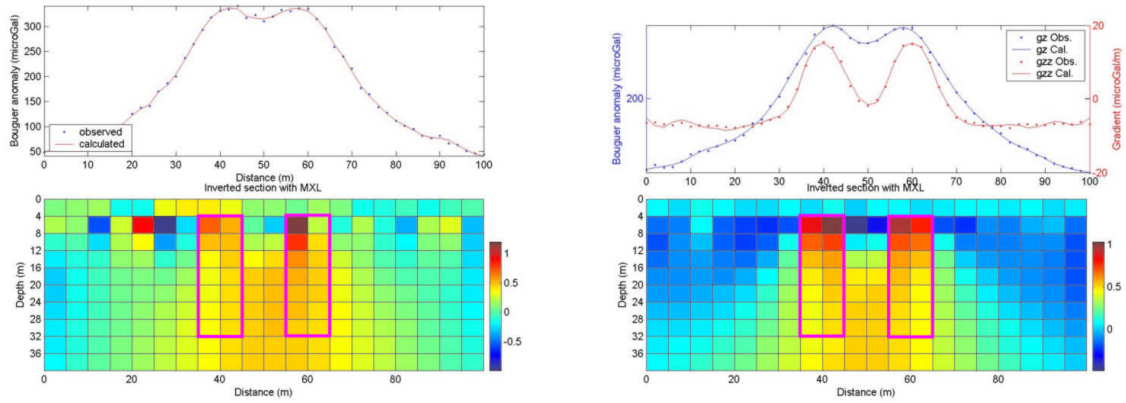
### 4. 현장 탐사 - 무안

전남 무안군 용월리 덕보들에서 석회암 지하공동 탐사의 일환으로 고정밀 중력탐사를 수행하고 있다. 마을 진입로의 침하를 예방하기 위한 grouting의 효과를 평가하기 위한 time-lapse monitoring으로서 수직 중력 변화율 탐사를 하였다.

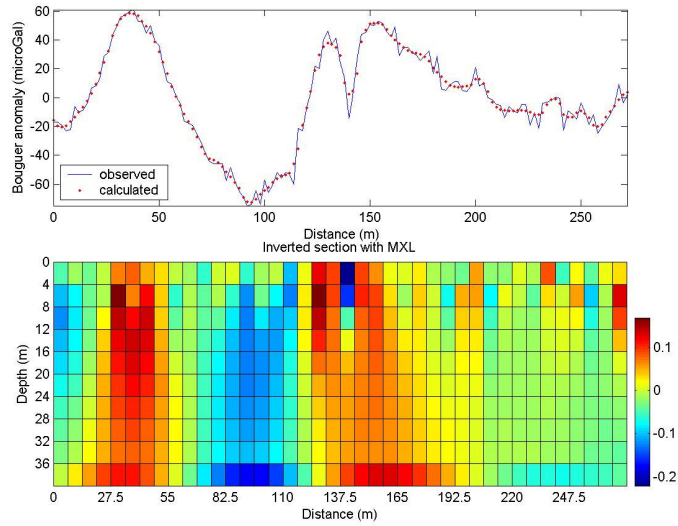
탐사측선은 약 270m이며, 측정간격은 2m이고 수직 간격은 대체로 1m 정도로 측정하였다. 탐사기기는 Scintrex CG-3이고, 측정점의 위치는 differential GPS와 광파 측량으로 위치 오차를 3mm 이내로 유지하였다. 또한 바람의 영향을 최소화하기 위하여 바람막이를 제작하는 등 수직 변화율 측정의 문제점으로 지적되는 측정 자료의 질을 높이기 위하여 최대한 노력하였다.

Fig. 4는 잔여 중력을 이용한 역산과 잔여 중력과 수직 변화율을 동시에 이용한 역산 결과이다. 먼저 측정 자료를 보면, 잔여 중력 이상은 측정점 100 부근에서 대체로 낮은 중력값을 보이고 있으며 측정점 170부터 270 사이에서는 점진적으로 낮아져서 얇은 부분의 밀도 분포에 의한 것이 아닐 것이다. 측정점 150 부근의 뾰족한 이상은 2m x 2m 정도의 관개 수로에 의한 것이다. 수직 중력 변화율 곡선은 세심한 측정에도 불구하고 오르내림이 심하여 noisy하게 보이는데, 이것은 측선 하부의 복잡한 소규모 3차원 구조에 의한 영향일 것이다.

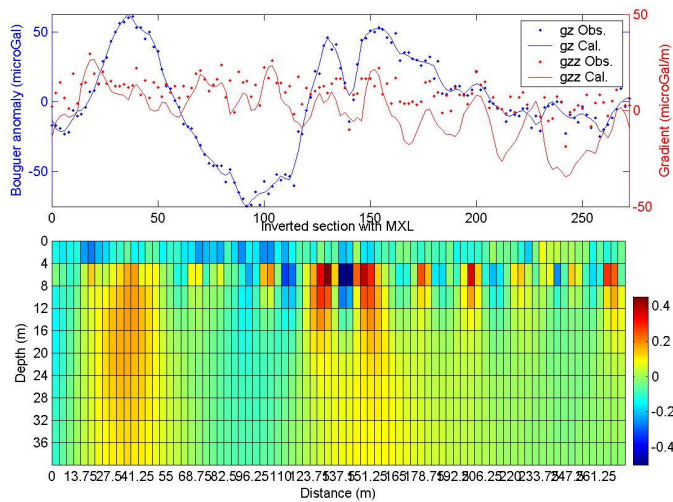
수직 중력 변화를 탐사 적용 사례



(a)  $G_z$  (b)  $G_z$  and  $G_{zz}$   
 Fig. 2. Comparison of inversion results of adjacent two prisms; (a) using  $G_z$  only, (b) using  $G_z$  and  $G_{zz}$  together



(a)  $G_z$



(b)  $G_z$  and  $G_{zz}$

Fig. 3. Comparison of inversion results over profile E of Muan site: (a) using  $G_z$  only, (b) using  $G_z$  and  $G_{zz}$  together

잔여 중력 이상의 역산 결과는 이상 곡선과 잘 부합하며, 수로와 측점 100 주위의 낮은 밀도대를 보여준다. 잔여 중력 이상과 수직 변화율을 동시에 역산한 결과에서도 잔여 중력에 대한 역산 성적을 좋으나 수직 변화율의 심한 변화는 제대로 추적하지 못하여 역산 성적이 불량하다.

이것은 2m 간격으로 측정한 수직 변화율이 지나치게 들쭉날쭉하여 역산으로 그것을 쫓아갈 수가 없기 때문이다. 심한 변화를 추적하기 위해서는 셀을 측점 간격 이하로 잘게 나누어 주어야 하지만 그럴 경우 미지 변수가 지나치게 많아지게 되는 문제가 있다. 더욱이 잡음의 영향도 배제할 수 없는 자료를 억지로 추적하는 것은 역산 성적은 좋아지나 정해를 추구한다고 볼 수는 없다.

수치 모델링에서는 수직 변화율 자료의 역산 효과가 뚜렷한데 반하여 측선 E의 경우에는 확인하기 어려워 보인다. 이것은 현장 측정에는 여전히 어려움이 있으며, 분해능의 향상에 따르는 천부 지질 잡음의 증폭 문제가 지적될 수 있으며, 이러한 문제점의 해결을 위해서는 현장 탐사 기술, denoising 그리고 효과적인 역산 기법 등 수직 변화율 탐사에 대한 더 많은 연구가 필요하다는 점을 시사한다.

## 5. 결론

수직 중력 변화율 측정은 분해능과 탐지능을 향상시키고 광역 효과의 분리효과가 있어 천부 소규모 구조의 규명에 효과적이다. 수치 역산 모델링에서는 수직 변화율의 효과를 분명히 보여 주었으나 현장 탐사 자료의 경우에는 분해능의 향상에 수반되는 잡음의 증폭으로 인하여 분명한 효과를 확인하기는 어려웠다. 수직 중력 변화율 탐사를 현장에서 적용하기 위해서는 현장 측정, denoising 그리고 수직 변화율 자료에 적합한 역산 기법 등에 대한 연구가 필요할 것이다.

## 참고문헌

- 박영수, 임무택, 구성본, 조진동, 이명중, 설순지, 정호준, 임성근, 2002, 고정밀 중력/자력 탐사기술개발, 한국지질자원연구원, KR-20(C)-09.
- 박영수, 임형래, 임무택, 구성본, 김학수, 오석훈, 2005, 고정밀 중력탐사를 이용한 천부 지질구조 조사 사례, 한국물리탐사학회·대한지구물리학회 2005 공동학술대회 논문집, 한국지질자원연구원. 181-186.
- 박영수, 임형래, 임무택, 구성본, 정호준, 2004, non-smooth 중력역산 패키지의 구성, 대한지구물리학회·한국물리탐사학회 2004 공동학술대회 논문집, 한국해양연구원, 83-87.
- Butler, D. K., 1983, *Microgravimetry and the theory, measurement and application of gravity gradient*, Ph.D. Thesis, Texas A&M University.
- Evjen, H. M., 1936, The place of the vertical gravity gradient in gravitational interpretations, *Geophysics*, **1**, 127-136.
- Fajkiewicz, Z. J., 1976, Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geologic and anthropogenic forms, *Geophysics*, **41**, 1016-1030.
- Hammer, S., 1979, Relative precision of vertical and horizontal gravity gradients measured by gravimeter, *Geophysics*, **44**, 99-101.
- Marson, I., and Klingele, E. E., 1993, Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation, *Geophysics*, **58**, 1588-1595.