

## 고정밀 중력탐사를 이용한 천부 지질구조 조사 사례

박영수<sup>1)</sup>, 임형래<sup>1)</sup>, 임무택<sup>1)</sup>, 구성본<sup>1)</sup>, 김학수<sup>2)</sup>, 오석훈<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>한국지질자원연구원 지질기반정보연구부, [yspark@kigam.re.kr](mailto:yspark@kigam.re.kr)

<sup>2)</sup>(주)지오제니 컨설턴트

<sup>3)</sup>한국수자원공사 수자원연구원 댐안전연구소

## Case Stories of Microgravity Survey for Shallow Subsurface Investigation

Yeong-Sue Park<sup>1)</sup>, Hyoungrae Rim<sup>1)</sup>, Mutaek Lim<sup>1)</sup>, Sung Bon Koo<sup>1)</sup>,  
Hag Soo Kim<sup>2)</sup>, Seok Hoon Oh<sup>3)</sup>

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

<sup>2)</sup>GeoGeny Consultants Group Inc.

<sup>3)</sup>Dam Safety Research Center, KOWACO

**요약** : 중력탐사는 지하의 밀도 분포를 구하는 탐사법이므로 지하의 빈 공간의 탐지나 기반암의 견고성을 파악하는 데 직접적인 정보를 제공하므로, 고정밀 중력탐사는 지하 공동, 터널, 채굴적 등의 탐지에 효과적으로 적용될 수 있다. 이 논문은 석회암 공동 탐지, 폐갱도 탐지 그리고 사력댐의 밀도 구조 등 3가지 실제 탐사 사례를 통하여 고정밀 중력탐사가 천부 토목 조사와 구조물 안정성 조사에 유용하게 활용됨을 보여주고자 한다.

**주요어** : 고정밀 중력탐사, 석회암 공동, 폐갱도, 사력댐, 밀도 분포, 오일러 디컨벌루션, growing body, MS, ASA

**Abstract** : Gravity method produces subsurface density distribution, which is direct information of soundness of basement. Therefore, microgravity is one of the most effective method for detections of limestone cavities, abandoned mine-shafts and other tunnels. The paper show the effectiveness of microgravity by three different field cases.

**Keywords** : microgravity, limestone cavity, abandoned mine-shaft, rock-fill dam, density distribution, Euler deconvolution, MS, ASA

### 1. 서론

중력탐사는 탐사 심도가 깊은 반면 이상 구조에 의한 중력 이상 반응이 작기 때문에 구조 분해능이 낮고 해석의 비유일성이라는 본질적 한계 때문에 주로 대규모의 심부 지질 구조를 탐사 대상으로 하여왔다. 그러나  $1\mu\text{Gal}$ 의 민감도를 갖는 LaCoste & Romberg D-type 중력계가 개발됨으로써 천부의 소규모 지질구조를 탐사 대상으로 하는 고정밀

중력탐사(microgravity)가 가능하게 되었다.

중력탐사는 지하의 밀도 분포를 구하는 탐사법이므로 지하의 빈 공간 탐지나 암반의 견고성을 파악하는 데 직접적인 정보를 제공한다. 따라서 고정밀 중력탐사는 지하 공동, 터널, 채굴적 등의 탐지를 포함하여 기반암의 견고성 조사 및 모니터링 등에 널리 이용되고 있으며(Arzi, 1975; Butler, 1984; McDonald and Davies, 2003; Yule et. al., 1998 등), 석유 시추공의 침하, 고하상 조사, 구조물 안정성 평가, 고고 유적 탐사 등에도 활용되고 있다.

본 논문은 지반 침하의 원인이 되는 석회암 공동 탐사, 오래된 폐갱도 탐지 그리고 사력댐의 밀도 구조 등 3가지 실제 탐사 사례를 소개함으로써 고정밀 중력탐사가 지하 공동이나 이완대 등의 저밀도대를 파악하고, 토목 설계를 위한 기반암 조사에 활용되며, 대규모 구조물의 안전성 조사에도 활용될 수 있음을 보여주고자 한다.

## 2. 본론

### 2-1. 무안지역의 석회암 공동 조사

무안읍 용월리 덕보들에서 지반침하의 원인이 되는 석회암 용식에 의한 공동 발달 상황을 조사하기 위하여 중력탐사를 하였다. 이 지역은 충적층 하부에 옥천층군의 석회암이 발달된 지역으로 시추 결과에 의하면 석회암의 용식에 의한 지하공동이 발달된 것으로 보인다. 중력계는 정밀도 10  $\mu$ Gal인 Scintrex AutoGrav CG-3이며, 측점의 좌표는 Trimble GPS 5700과 Leica Total Station 1100 광파측량기를 이용하였는데, 측량에 의한 중력값 오차를 1  $\mu$ Gal 이내로 유지되도록 하였다. 측점 간격은 5m이고 측선 간격은 대체로 30m 정도이다.

Fig. 1의 (a)는 잔여 부계 중력 이상이고, (b)는 시추 주상도이다. 전체적으로는 북서쪽 사분면에서 가장 중력이 낮게 나타나며 특히 마을 진입로의 북쪽, 측선 E6~W6를 중심으로 낮은 중력 이상대가 발달해 있다. 시추 주상도에서도 BH-75, BH-92, BH-93 등 중력 이상이 낮은 지역의 시추공에서 공동이 심하게 발달되었다는 것을 보여준다. 이 낮은 중력 이상대 하부는 공동이 이미 심하게 용해되어 서로 연결, 확장된 상태(dissolved enlargement)로 판단된다.

지하 공동에 의한 중력 이상의 전형적인 모양을 보이는 측선 W8에 대하여 Euler deconvolution으로 이상 구조의 위치를 결정하였고, 본 연구에서 개발한 역산 프로그램 패키지에서 최소반침(minimum support)법으로 역산하였다(Fig. 2(a)). W8은 전형적인 단일 공동에 의한 중력 이상 프로파일로서 측점 50을 중심으로 20m x 20m 정도의 상당히 큰 규모의 공동이 발달해 있는 것으로 보이며, 밀도차가 0.6~0.8 g/cm<sup>3</sup> 정도인 것으로 보아 공동 안은 비어있는 것이 아니고 물과 토사가 혼합되어 있을 것으로 추정된다.

밀도분포 영상의 분해능을 높이려면 역산 공간을 잘게 나누어야 되고, 모델 파라미터가 기하급수적으로 증가하게 되어 역산의 비유일성이 증가하게 된다. 3차원의 경우는 문제가 더욱 심각해 진다. 이 연구에서는 중력 역산의 비유일성 문제를 해결하는 방안으로서 오일러 디컨벌루션으로 이상체의 위치 정보를 얻어, 오일러 방정식의 해 주위의 일정 범위 이내의 모델 공간만을 추려서 역산 모델공간을 형성하는 방법을 고안하였다. Fig. 2(b)는 오일러 디컨벌루션 결과를 사전 정보로 이용하고 growing body 방법(Camacho et. al., 2000)으로 역산한 3차원 밀도분포도 이다.

고정밀 중력탐사를 이용한 천부 지질구조 조사 사례

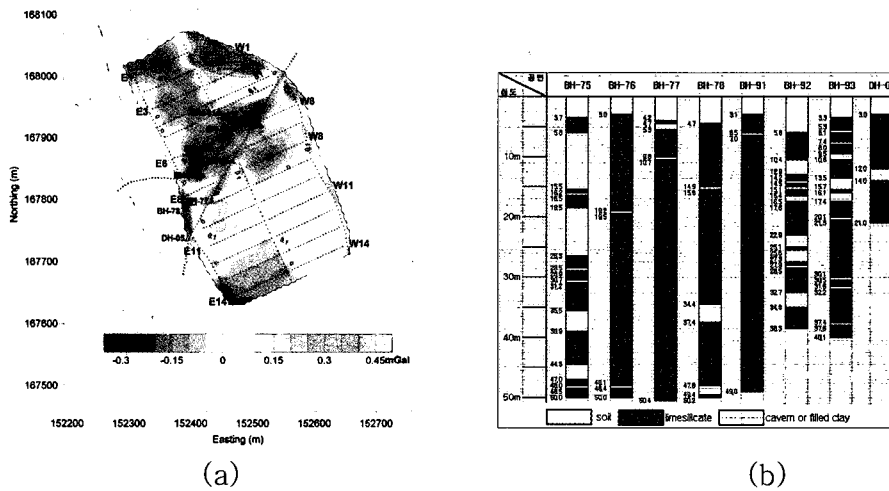


Fig. 1. Microgravity for detection of limestone cavities at Muan; (a) residual Bouguer gravity anomaly, (b) drill-hole logs

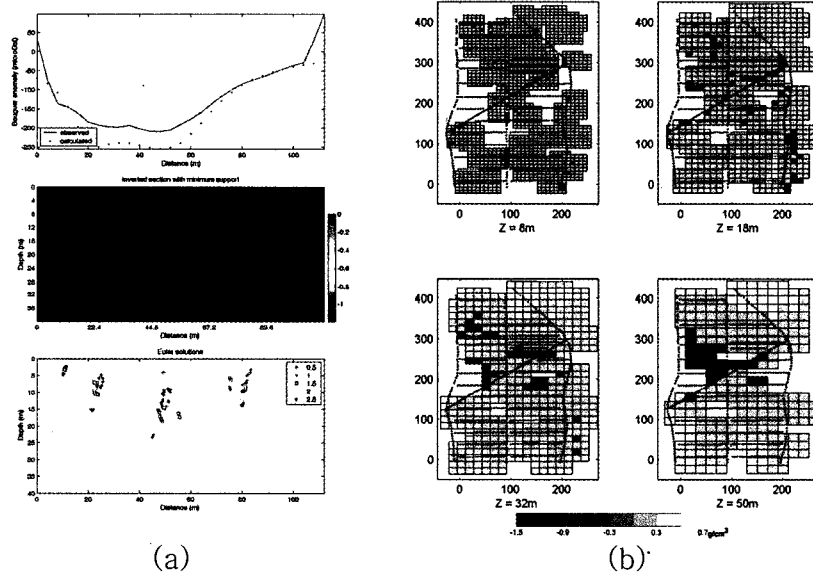


Fig. 2. Density distribution of Muan site; (a) profile W8, (b) 3-D inversion using growing body routine with Euler deconvolution as a priori information

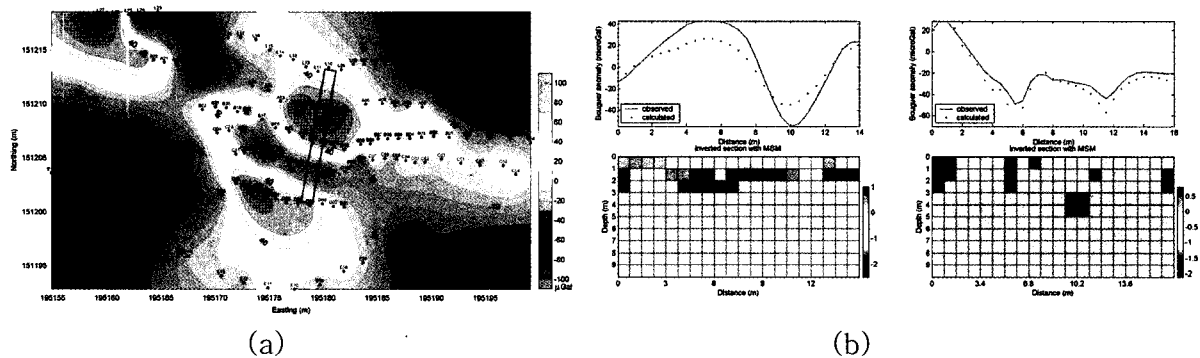


Fig. 3. Microgravity for detection of an abandoned mine-shaft; (a) residual Bouguer gravity anomaly, (b) Density distribution of expected tunnel and line C by MS inversion

## 2-2. 폐갱도 확인을 위한 고정밀 중력탐사

전남 화순군 유치-이양간 지방도 공사 설계와 관련하여 신석리 야산에서 과거 가행되었던 것으로 알려진 소규모 탄광의 폐갱도 또는 채굴적의 확인을 위하여 고정밀 중력탐사를 수행하였다. 폐광산에 대한 어떠한 도면도 남아있지 않고, 50여 년 전에 실제로 가행되었고, 폐광 당시에 발파로 막았다는 입구의 위치를 근처의 지형과 비교하여 추정할 수 있을 뿐이었다.

탐사의 대상인 갱도는 약  $2\text{m} \times 2\text{m}$  정도의 크기로 굴진하는 것이 보통이므로 갱도의 깊이가 5m 정도이면 최대 중력 이상값은 약  $30 \mu\text{Gal}$ , 10m 이면  $20 \mu\text{Gal}$  정도에 불과하다. 더욱이 갱도 속이 비어있지 않고, 토석이나 지하수로 차있다면 밀도 대비가 줄어들어 이상값은 더욱 작아져 탐지 능력 이하로 떨어질 수도 있다. 그러나 주 갱도에서 채탄 갱도가 좌우로 뚫어져 있거나 일부분 채탄에 의한 채굴적이 발달해 있다면 더 강한 중력 이상을 기대할 수도 있다.

탐사가 요구하는 정밀도가 매우 높으므로 측정점의 간격은 예상 폐갱도 근처에서는 1m로 하였고, 멀어지면서 차차 2m~3m로 하여, 모두 6개 측선에 걸쳐 총 153 측정점에서 중력을 측정하였다. 현장의 평균 경사가 약  $38^\circ$  이고 지표 상황이 열악하여, 측선 및 측정점 사전에 개척해야 하였으며, 측정점을 잘 다지고 말목을 박아 위치를 고정하여 측량과 중력 측정에서 지표의 흔들림에 의한 오차를 없애도록 하였다.

Fig. 3(a)는 잔여 부계 중력 이상도인데 다음과 같이 정성적으로 해석할 수 있을 것이다. (1)L10이 갱의 입구라고 알려져 있는 곳인데, 주위 측정점 L9와 L11에 비하여 약간 낮은 값을 보이나 선입견 없이 볼 경우는 구분할 수 없는 정도이다. 이것은 갱 입구 근처는 이미 무너져 공동 상태가 아니라고 생각할 수 있다. 실제로 갱구를 폭파했다는 당시 관련자의 증언과 일치하는 것이 아닌가 생각된다. (2)측선 A와 B에서는 예상 갱도와 일치하는 저밀도대가 없고, 오히려 고밀도를 보인다. 이것은 측선 L과 같이 이미 갱도가 무너진 상태인데다가 그 깊이가 더 깊기 때문에 전혀 탐지되지 않는 것일 것이다. (3)측선 C를 따라서 최대  $-50 \mu\text{Gal}$  정도의 띠 모양의 강한 저밀도 이상대가 탐지되었다. 이것은 갱도를 굴진하다가 옆으로 채탄 갱도를 굴진하였거나, 그 근처에 채탄작업에 의한 채굴 공동이 존재한다고 생각할 수 있다.

예상 갱도 L10-D4와 이에 수직한 측선 C의 두 개의 측선에 대한 MS역산의 결과는 Fig. 3(b)에서 보여준다. 예상 갱도 측선의 역산 결과에 의하면 갱구로부터 8~10m(측선 B~C)에 저밀도대를 보여주며, 그 깊이는 1m~2m로서 시추 결과로부터 연장, 추정하면 측선 C에서는 대체로 4m~5m가 되는 것에 비하여 얕은데, 이것은 잔여 이상의 추출과 역산에서 밀도대비 상한에 의한 것으로 해석된다. 측선 C의 역산 결과에서는 C13~C18 범위에서 저밀도대가 형성되며, 그 중심은 C13~C16에 있으며 예상 갱도(C13)로부터 서쪽으로 공동이 더 발달한 결과를 보여준다. 해석 깊이는 1m~4m 정도로 시추 결과보다는 역시 약간 얕게 나타난다.

## 2-3. 댐의 밀도구조 확인을 위한 고정밀 중력탐사

댐은 그 안전성이 가장 크게 요구되는 구조물이어서 댐의 누수 및 침하에 대한 우려는 운문댐과 같이 가끔 사회적 이슈가 되기도 한다. 고정밀 중력탐사가 댐의 밀도 구조의 확인을 위하여 적용될 수 있는지 사력댐에서 pilot survey를 수행하였다.

댐 자체만에 의한 잔여 중력을 추출하기 위해서는 매우 세심한 자료처리가 필요하다. 댐은 주로 경사가 급한 계곡에 건설되므로 지형효과가 크게 나타나므로 보다 정밀한 지형보정

이 필요하며, 또한 호수의 물에 대한 영향도 고려한 지형보정이 필요하다.

Fig. 4(a)는 잔여 중력 이상을 추출한 과정을 보여준다. 지형 효과는 댐에서 5km 이내에서는 30m x 30m 격자망을 구성하여 삼각요소법으로 계산하였으며, 호수의 물에 의한 효과도 고려하였다. Fig. 4(a)의 (a)는 단순 부계 이상이고, (b)는 호수의 물의 영향을 포함한 지형 효과를 제거한 부계 이상이며, (c)는 다항식 접합에 의한 잔여 부계 이상이며, (d)는 댐 자체만에 의한 효과만을 남기기 위하여 댐 설계도를 참고하여 댐 양쪽의 기울어진 부분에 의한 효과를 제거한 최종 잔여 부계 이상도이다.

잔여 부계 중력 이상으로부터 ASA(adaptive simulated annealing)을 이용한 3차원 역산을 통하여 댐의 밀도분포도를 작성하였다(Fig. 4(b)). 댐의 모양이 직육면체가 아니고 기울어진 모양이므로 역산 셀이 모양이 일정하지 않다. 이런 경우에는 역산 과정에서 파라미터 사이의 미분을 계산하는 알고리즘은 적용이 곤란하므로 다면체의 밀도를 독립적으로 찾아가는 역산 방법을 이용하여야만 한다.

역산 단면을 보면 전체적으로 고밀도를 보이는 댐체 중심부 코어와 저밀도에 해당하는 모래와 암석으로 채워진 사면 부분을 구분할 수 있다. 중심 코어는 점토로 구성되어 있고, 오랫동안의 다짐에 의해서 단단하게 고화가 진행되어 고밀도를 보이고 있다. 반면 사면 부분은 공극이 많은 모래와 암석으로 이루어져 있어서 상대적으로 저밀도를 보인다. 중심부의 코어만을 따로 놓고 보면 상부층과 하부층 두 단면 모두 댐체의 양 끝단 보다 댐체의 중앙부가 상대적으로 더 낮은 밀도 값을 가지고 있음을 보여준다. 이는 댐체 중앙부가 양 끝단에 비해서 상대적으로 고화가 덜 진행된 것이 아닌가 추정된다.

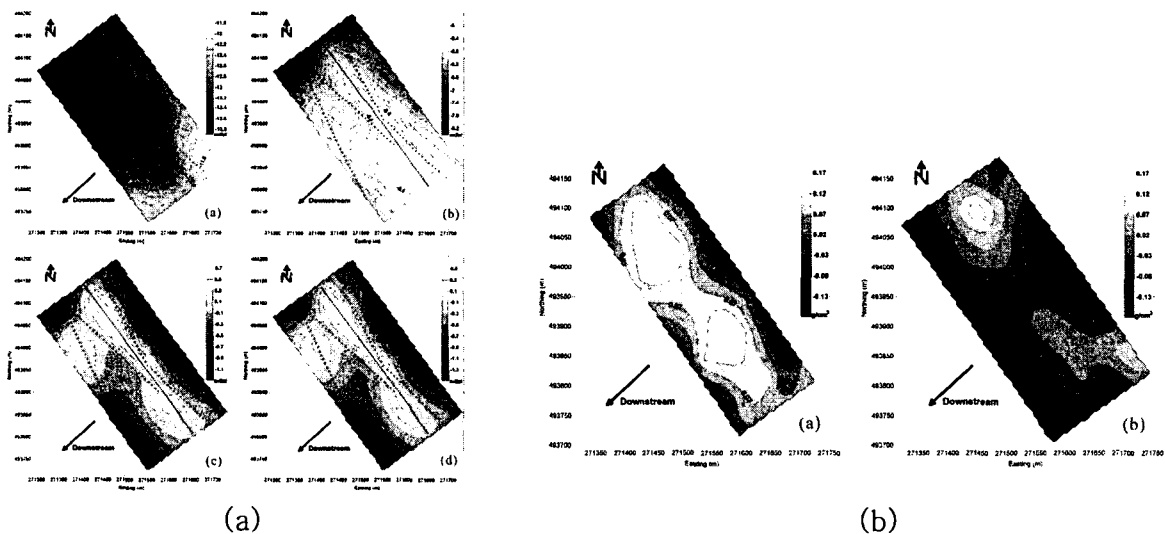


Fig. 4. Microgravity for density distribution of a rock-fill dam; (a) processes for extracting residual anomaly due to dam body itself, (b) three dimensional density distribution

## 5. 결론

기존의 중력탐사가 대규모 광역 지질 구조 조사에 널리 이용되어 왔지만,  $\mu\text{Gal}$  단위의 고정밀 중력탐사는 지하 공동의 탐지, 기반암의 건전도 평가, 구조물의 밀도 분포 확인 및 모니터링을 통한 안정성 평가 등 천부의 소규모 지질 이상 구조의 확인에 효과적으로 적용될 수 있다는 것을 몇 가지 현장 사례를 통하여 보여주었다. 고정밀 중력탐사는 지

하 공동의 확인 뿐 아니라 지하 공동의 발달 상태도 예측할 수 있었으며, 현장 탐사 조건이 상당히 나쁜 경우에도 상당히 좋은 자료를 얻을 수 있었으며, 특히 구조물의 안정성 확인을 위해서는 시간 모니터링이 효과적인 방법이 될 수 있다는 것을 제안한다.

### 참고문헌

- 박영수, 임형래, 임무택, 구성본, 정호준, 2004, non-smooth 중력역산 패키지의 구성, 2004 대한지구물리학회·한국물리탐사학회 공동학술대회, 한국해양연구원, 83-87.
- 임형래, 박영수, 임무택, 권병두, 2003, 삼각요소법을 이용한 정밀 중력계산, 한국지구과학회 2003년도 추계학술발표회, 충남대학교, 37-43.
- 임형래, 박영수, 임무택, 구성본, 권병두, 오석훈, 2005, 인공구조물의 밀도분포 파악을 위한 고정밀중력탐사, 한국지구과학회 2005년도 춘계학술발표회, 서울대학교, 147-152.
- 임형래, 박영수, 임무택, 구성본, 권병두, 2005, Euler deconvolution의 해를 이용한 3차원 중력역산, 한국지구시스템공학회 2005년도 춘계학술발표회, 한국지질자원연구원, 189-194.
- Arzi, A. A., 1975, Microgravimetry for engineering applications, *Geophysical prospecting*, 1, 408-425.
- Butler, D. K., 1984, Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities, *Geophysics*, 49, 1084-1096.
- Camacho, A. G., Montesinos, F. G., and Vieira, R., 2000, Gravity inversion by means of growing bodies, *Geophysics*, 65, 95-101.
- McDonald, R., and Davies, R., 2003, Integrated geophysical surveys applied to karstic studies, *First Break*, 21, 23-35.
- Yule, D. E., Sharp, M. K., and Butler, D. K., 1998, Microgravity investigations of foundation conditions, *Geophysics*, 63, 95-103.