

가은지역 석회 공동 탐지를 위한 고정밀 중력탐사

박영수¹⁾, 임형래¹⁾, 임무택¹⁾, 구성본¹⁾

¹⁾한국지질자원연구원 지질기반정보연구부, yspark@kigam.re.kr

A Microgravity for Mapping Karstic Cavities at Gaeun

Yeong-Sue Park¹⁾, Hyoungrae Rim¹⁾, Mutaek Lim¹⁾, Sung Bon Koo¹⁾

¹⁾Geology & Geoinformation Div., KIGAM

요약 : 경북 문경군 가은읍 가은역 일대 석회암 분포 지역에서 지하 공동의 위치 및 발달 양상을 파악하기 위하여 고정밀 중력탐사를 하였다. 측정 간격은 4m로 하여 모두 약 1,100 측정점에서 중력을 측정하였다. 잔여 부계 이상도에서 가장 낮은 중력 이상대를 지나는 3개의 측선에 대하여 MS(minimum support) 역산으로 밀도 분포 단면을 작성하였다. 또한, growing body 역산을 이용하여 3차원 밀도 분포 영상을 구하였다. 2차원과 3차원 밀도 분포도는 공동이 발달한 지역을 잘 가리키고 있으며, 석회암이 지하수에 부분적으로 용해되어 복잡한 형태의 공동 시스템을 구성하고 있고 부분적으로는 상당히 얇은 곳까지 발달해 있을 것으로 해석된다.

주요어 : 고정밀 중력탐사, 석회 공동, 밀도 분포, MS 역산, growing body 역산

Abstract : A microgravity survey was applied for detecting and mapping karstic cavities over limestone area at Gaeun. The gravity data were collected at about 1,100 stations by 4 m interval. The density distribution beneath the profiles was drawn by two dimensional inversion based on the minimum support stabilizing functional, which generated better focused images of density discontinuities. We also imaged three dimensional density distribution by growing body inversion. The density image showed that the cavities were dissolved, enlarged and connected into a cavity network system.

Keywords : microgravity, karstic cavity, density distribution, minimum support, growing body inversion

1. 서론

지하 공동은 지표 하부의 빈 공간이므로, 지하의 밀도 분포를 구하는 중력 탐사가 이들을 탐지하기 위한 직접적이며 효과적인 수단이 된다. 1963년 Colley(1963)에 의하여 지하 공동을 탐지하는데 중력탐사가 이용된 이후 자연적 혹은 인공적 지하 공동, 터널, 채굴적 등의 탐지에 널리 성공적으로 이용되고 있다(Bishop et. al., 1997; Styles and Thomas, 2001 등). 한국에서도 2000년경부터 고정밀 중력탐사에 대한 기술 개발과 현장 적용 사례가 보고된 바 있다(박영수 등, 2005; 박영수 등, 2007).

경상북도 문경군 가은읍 가은역 일대의 석회암 분포지역에서 지하의 석회 공동의 존재와 그 발달 양상을 파악하기 위하여 고정밀 중력탐사를 하였다. 이 지역의 지표 지질은 조

선누층군의 대석회암층군, 평안층군의 금천/밤치층, 장성층, 옥녀봉층으로 구성된다. 스톤스트단층인 가은단층계가 가은 시가지 일대에서 나타나고 이에 수반된 부수단층들이 추가로 확인된다. 석회질 암석으로 구성된 대석회암층군은 지표수 유입에 따른 용식작용에 기인하여 석회공동 발달이 지표에서도 관찰되고 있으며 최근에도 일부 도로에서 석회공동으로 인한 지반침하가 발생하기도 하였다.

2. 현장 탐사

탐사 현장은 지방도를 중심으로 서쪽은 마을이고 동쪽은 버려진 철길이나 밭 또는 나대지이다. 측선은 도로, 마을 안 골목 그리고 철길 등을 따라서 설정하였으며, 측점 간격은 4m로 하여 모두 약 1,100 측점에서 중력을 측정하였다. Fig. 1은 측점도이다. 많은 측점을 대상으로 하므로 Scintrex CG-3와 CG-5 그리고 ZLS Burriss 중력계 등 모두 3대의 전자식 자동 측정 중력계를 사용하여 측정하였다. 중력계 계기 보정을 위하여 평균 1.5시간에 한번씩 가은역 앞에 설정한 basestation에서 되돌이 측정을 하였으며, 표준 중력은 한국표준과학연구원의 중력 기준점을 이용하였다. 측량은 Trimble 5700을 사용하여 DGPS(Differential GPS)로 기준점을 설정하고, 각 측점들은 Leica Total Station 1100 광과측량기를 이용하여 기준점에 대한 상대 좌표를 구한 후, 기준점으로부터 절대 좌표를 결정하였다. 측량 오차는 3 mm 이내로 유지하도록 하여 측량에 의한 중력 오차는 1 μ Gal 이하일 것으로 예상된다.

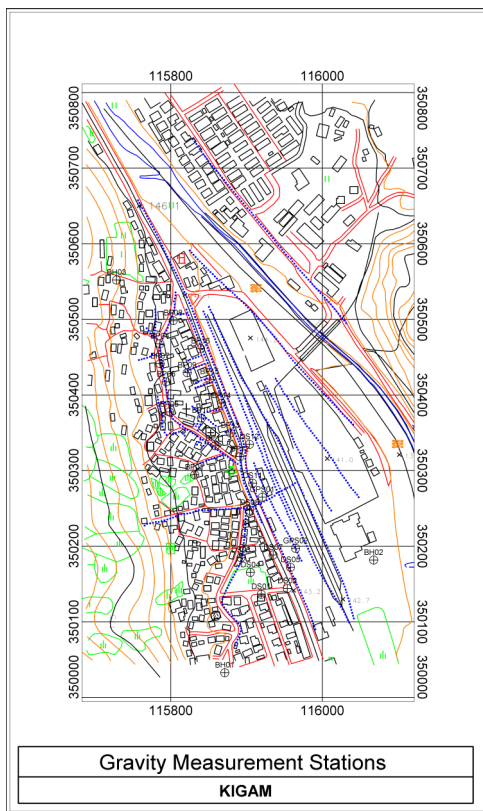


Fig. 1. Gravity Measurement stations

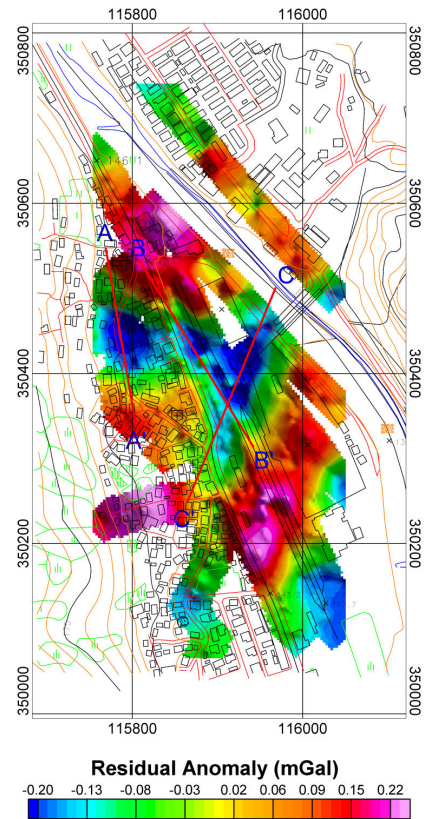


Fig. 2. Residual gravity anomaly

3. 결과 및 해석

Fig. 2는 다항식 접합법에 의한 잔여 중력 이상도이다. 대체로 광업소 부속병원에서 주유소 사이, 지질적으로는 가은6단층 ~ 가은7단층 사이에서 낮은 중력을 보여준다. 중력이 낮다는 것은 그 하부가 주위에 비해서 밀도가 낮다는 것을 시사하는데, 이것은 석회암층이 주변의 옥녀봉층이나 평안층군에 비하여 평균 밀도가 낮다고 생각할 때, 이 지역의 석회암층이 비교적 두껍다고 생각할 수 있다. 또한, 중력이 낮다는 것은 질량의 손실을 의미하며, 따라서 석회 공동 또한 가장 잘 발달한 지역이라고 생각할 수 있다. 다만, 중력탐사 측정의 분포가 이들을 세밀하게 분해할 만큼 충분하지 못하여 각각의 공동의 발달 양태를 뚜렷하게 보여 주지는 못하고 있다. 정밀 지질도 상에 보이는 옛 하천의 흐름이 마을 뒷산에서 마을 앞 하천 쪽으로 흘렀음을 보여주는데, 이것은 잔여 중력이상도 상에서 연속적인 경향을 보이는 낮은 이상대와 일치한다. 이것은 옛 하천이 지나던 지역 주위로 밀도가 낮은 퇴적물들이 분포하고 있음을 유추할 수 있다. 이렇게 밀도 낮은 퇴적물들이 분포하는 지역과 지하 공동이 다수 발달하고 있는 지역이 겹쳐지면서 공동의 발달 영향보다도 더 큰 저이상대의 중력이상을 만들어 내고 있는 것으로 보인다.

잔여 부계 이상도에서 가장 낮은 중력 이상대를 지나는 3개의 역산 축선을 설정하여 2차원 MS(minimum support) 역산을 하였다. 규모가 작고 형태가 복잡한 지하 공동을 정밀하게 분해하여 영상화하기 위해서는 모델 파라미터인 물성(밀도차)이 급격하게 변화하거나 불연속한 경계부를 뚜렷하게 구현해 주는 역산이 요구되는데, 이러한 경우에 MS 역산이 우수한 결과를 보여준다(박영수 등, 2004). Fig. 3은 각 축선의 지하 밀도 단면이다.

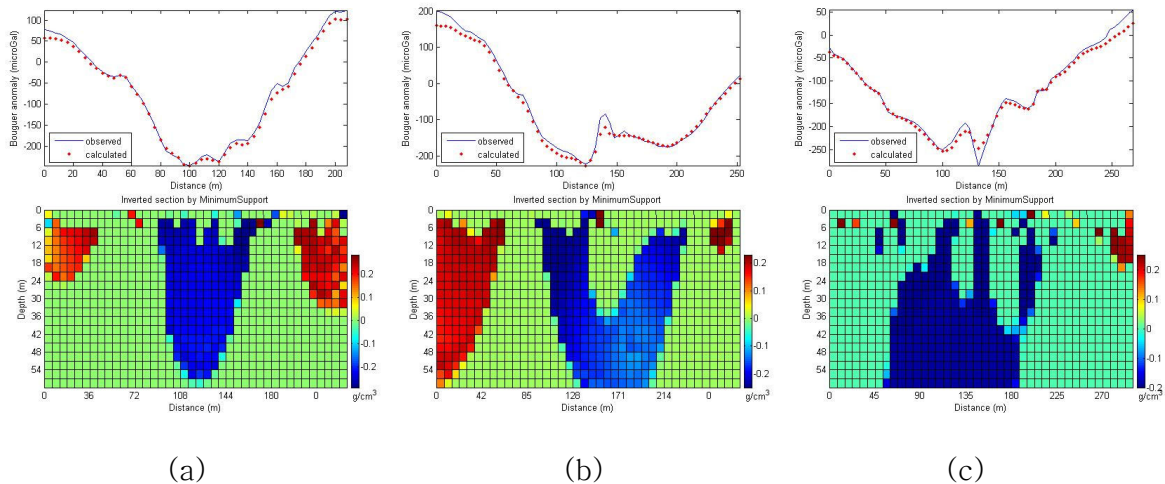


Fig. 3. Density distribution imaged by MS inversion: (a) profile AA', (b) profile BB', (c) profile CC'

측선 AA'는 측정점 80m ~ 140m 하부에 커다란 낮은 밀도대를 보인다. 이는 측선 중앙부에 존재하는 낮은 이상대에 해당하는 밀도 이상대의 역산으로 계산한 결과이다. 이것이 커다란 하나의 공동이라고 볼 수 있는 것은 아니고, 이 낮은 밀도대는 여러 개의 공동들을 전체적으로 표현한 것이다. 즉, 공동이 발달해 있을 가능성이 높은 대역이라고 해석할 수 있다. 실제로는 석회암이 지하수에 부분적으로 용해되어 복잡한 형태의 공동 시스템

을 구성하고 있으며, 부분적으로는 상당히 얇은 곳까지 발달해 있을 것으로 예상된다. 석회암 공동의 발달 특성상 대체로 작은 공동 시스템이 서로 연결되어 있는 양상으로 나타는데 이런 공동의 분포는 중력탐사로는 하나의 낮은 밀도 이상대로 파악된다. 즉 공동의 심도가 깊어질수록 중력 측정점에서는 각 공동에 의한 반응이 중첩되어서 영향을 미치므로 이들 공동들이 하나로 뭉쳐진 낮은 밀도대로 해석된다.

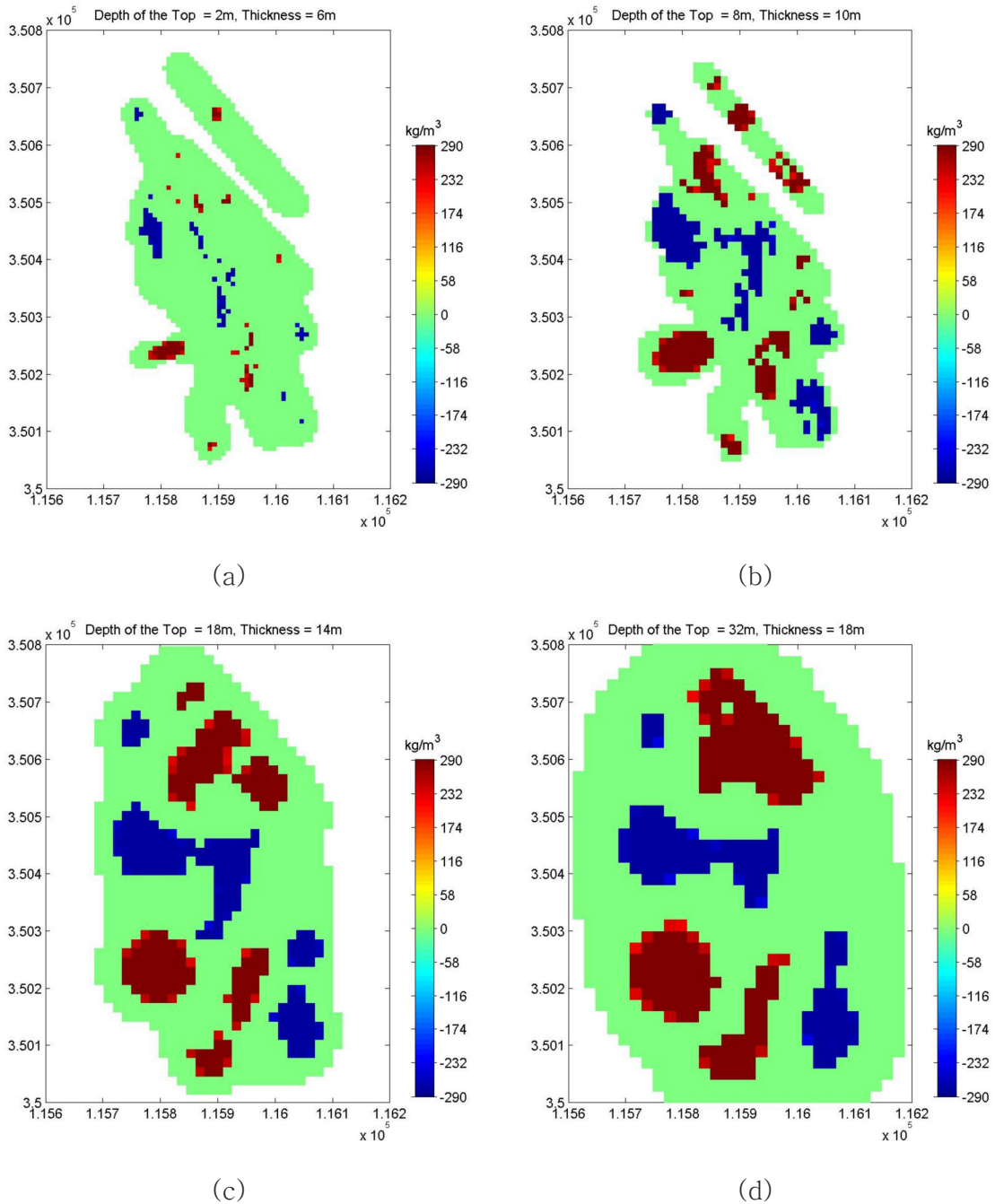


Fig. 4. Density distribution of depth slices: (a) slice 2m, (b) slice 8m, (c) slice 18m, (d) slice 32m

측선 BB'는 석회 공동 시스템이 측선 100m 부근과 200m 부근의 두 곳으로 갈라져 있는 결과를 보여준다. 그 중 100m 부근은 상당히 심하게 용해되었고, 얇은 곳까지 발달해 있으며, 140m 부근은 용해가 아직 덜 진행된 것으로 보인다.

측선 CC'에는 꽤 넓은 공동 시스템이 상당히 깊은 곳에 자리하고 있으며, 부분적으로 위로 발달하여 측점 100m, 130m, 170m 등에는 매우 얇은 곳까지 진행되어 있는 것을 보여준다.

또한, 측점이 3차원 해석을 할 만큼 충분히 촘촘하지는 못하지만, 3차원 역산으로 지하의 3차원 밀도 분포를 구하였다. 3차원 중력 역산은 Camacho *et al.*(2000)의 Growing body inversion을 이용하였다. 이 역산법은 중력 자료가 3차원 지형에서 불규칙한 형태로 측정되더라도 적용이 가능하고, 최종적으로 찾아갈 이상체의 개수를 미리 정하지 않고 시작함으로 다수의 이상체를 동시에 역산 해석할 수 있다.

역산 공간은 깊이에 따라 지표~2m(두께 2m), 2m~8m(두께 6m), 8m~18m(두께 10m), 18m~32m(두께 14m), 32m~50m(두께 18m)의 5개의 slice로 나누었고, 각 slice의 가로, 세로 크기는 slice의 두께와 같아서 정육면체를 이룬다. 실제 측점에서 너무 먼 곳에는 역산 셀도 구성하지 않도록 하였다. Fig. 4는 3차원 역산으로 구한 지하 3차원 밀도 분포를 각각의 slice 별로 보인 그림이다.

조사 지역에서는 23개 공의 시추를 하였는데, 각 시추공에서 밝혀진 공동의 발달 상황은 Fig. 5와 같다. 중앙교회를 포함하는 블록의 BP4 ~ BP11 시추공에서 공동들이 잘 발달되어 있는 결과를 보이는데, 이것은 낮은 중력 이상대가 BP4, BP7, BP6, BP9에서 가장 낮은 중력 이상대를 보여주는 등 중력탐사의 결과와 잘 일치함을 보여준다.

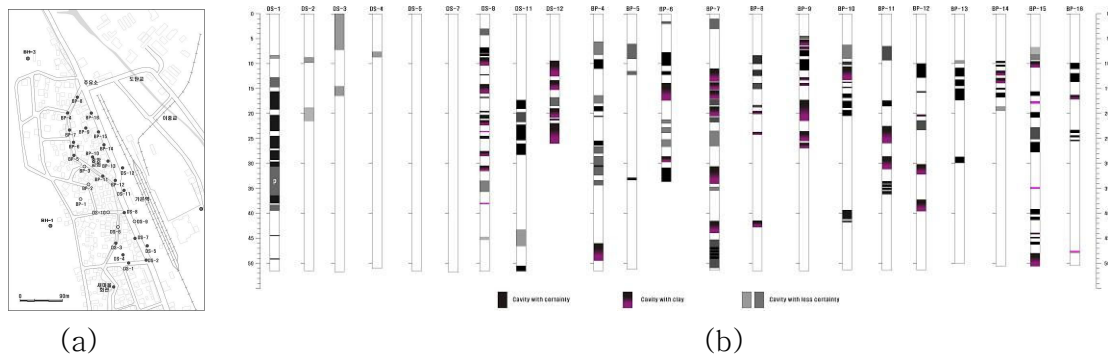


Fig. 5. Drill hole logs showing development of cavities; (a)drill locations, (b)cavity logs

중력탐사가 여러 개의 공동들의 결합을 각각의 공동으로 분해된 역산 단면을 보여주기 위해서는 공동이 서로 멀리 떨어져 있어서 중력 측정점에서 이상값들이 분리되어 보여야 한다. 석회암 공동의 발달 특성상 보통은 작은 공동들이 서로 연결되어 있는 공동대 양상으로 나타는데, 이런 공동의 분포는 하나의 낮은 밀도 이상대로 파악된다. 또한, 공동들이 충분히 분해될 만큼 떨어져 있어도 중력 측정점의 간격이 너무 넓으면 각각의 공동으로 분해된 단면을 얻을 수 없다. 이 연구 지역은 읍내 시가지에서 탐사를 하였으므로 도로나 마을 안의 셋길에서는 측점 간격이 일정하고 충분히 좁게 설정할 수 있었지만, 건물들 때문에 측점 간격을 일정하게 유지할 수 없었으므로 중력 자료가 균질하지 분포

하지 않고 자료가 없는 부분이 있을 수밖에 없었다. 이러한 자료 분포로는 고해상도의 3차원 역산 단면을 얻기에는 부족한 부분이 있다. 향후 낮은 밀도 이상대를 중심으로 측정점을 측선의 형태로 설정하지 않고 마을 안 쪽에서도 무작위로 퍼져 있는 형태로 중력을 측정하여 random grid 형태의 중력 자료를 얻는다면 좀 더 분해능이 높은 3차원 밀도 분포도를 작성할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 박영수, 임형래, 임무택, 구성본, 정호준, 2004, non-smooth 중력역산 패키지의 구성, 대한지구물리학회·한국물리탐사학회 공동학술발표회 논문집, 한국해양연구원.
- 박영수, 임형래, 임무택, 구성본, 김학수, 오석훈, 2005, 고정밀 중력탐사를 이용한 천부 지질구조 조사 사례, 2005 한국물리탐사학회·대한지구물리학회 공동 학술대회, 한국지질자원연구원.
- 박영수, 임형래, 임무택, 구성본, 2007, 지하 공동의 탐지와 모니터링을 위한 고정밀 중력탐사, 물리탐사, **10**, 383-392.
- Bishop, I., Styles, P., Emsley, S. J., and Ferguson, N. S., 1997, The detection of cavities using microgravity technique; case histories from mining and karstic environments *in Modern geophysics in engineering geology*, McCann, D. M., Eddleston, M., Fenning, P. J., and Reeves, G. M. eds, The Geological Society, 153-166.
- Camacho, A. G., Montesinos, F. G., and Vieira, R., 2000, Gravity inversion by means of growing bodies, *Geophysics*, **65**, 95-101.
- Styles, P. and Thomas, E., 2001, The use of microgravity for characterization of karstic cavities on Grand Bahama, Bahamas, *in Geotechnical and environmental applications of karstic geology and hydrology*, Beck, B. F. and Herring, J. G. eds, Balkema publishers, 389-394.