The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 31, No. 4, December, 2021, pp. 533-540
https://doi.org/10.9720/kseg.2021.4.533

RESEARCH ARTICLE

비탈면 위험도 평가를 위한 중력장 해석 및 모델링

최승찬[1] · 김성욱[2*] · 최은경[3] · 이영재[4] · 장현익[5]

[1](주)지아이 지반정보연구소 책임연구원, [2](주)지아이 지반정보연구소 대표이사,
[3](주)지아이 지반정보연구소 실장, [4](주)지아이 지반정보연구소 연구원,
[5]한국도로공사 도로교통연구원 연구위원

Risk Assessment of Cut Slope by Gravity Field Interpretation and Modelling

Sungchan Choi[1] · Sung-Wook Kim[2*] · Eun-Kyoung Choi[3] · Yeong-Jae Lee[4] · Hyun-Ick Jang[5]

[1]Senior Researcher, Geo-Information Research Group Co., Ltd.
[2]CEO, Geo-Information Research Group Co., Ltd.
[3]Director, Geo-Information Research Group Co., Ltd.
[4]Researcher, Geo-Information Research Group Co., Ltd.
[5]Research Fellow, Korea Expressway Corporation Research Institute

Abstract

Gravity field analysis and density modeling were performed to evaluate the internal state of the rock mass, which is the cause of cut slope collapse. The shape of the weathered zone and the depth of basement could be confirmed from the complete Bouguer anomaly and density model. The basement depth at the center of the cut slope calculated using the Euler deconvolution inverse method is 30 m, which is about 10 m deeper than the surrounding area. In addition, the depth of basement and the thickness of the weathered zone are similar to the boundary between low resistivity and high resistivity in dipole-dipole survey. From the study results, gravity field analysis and density modeling recognizes the internal state of the rock slope and can be used for slope safety analysis, and is particularly suitable as a method to determine the shape of weathered zones in interpreting the safety of cut slopes

Keywords: cut slope, safety, gravity, Euler deconvolution, weathering zone

초 록

비탈면 안전성과 밀접한 관련이 있는 내부 상태를 평가하는 방법으로 복합지구물리탐사와 지반의 밀도 모델링을 수행하였다. 완전부게이상 분포로부터 풍화대의 규모와 신선한 기반암의 분포 위치를 확인할 수 있었다. 오일러 디콘볼루션 역산법으로 비탈면 중앙부의 신선한 기반암은 주변에 비해 10 m 정도 깊은 30 m 깊이에 분포하고 저밀도의 풍화대 두께가 증가한다. 이러한 경향은 전기비저항 분포에서 관찰되는 저비저항과 고비저항대의 깊이와 일치한다. 비탈면 지반의 밀도 모델은 암반의 차별풍화대의 분도와 유사하게 나타났으며 이러한 결과로부터 중력장 해석을 이용한 밀도 모델링이 비탈면의 내적인 상태 변화와 안전성 해석에 활용될 수 있고 노출된 암반에서 풍화대의 형상을 파악하는 방법으로써 적합함을 시사한다.

주요어: 비탈면, 안전성, 중력, 오일러 디콘볼루션, 풍화대

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Sung-Wook Kim
E-mail: suwokim@chol.com

Received: 15 October, 2021
Revised: 4 November, 2021
Accepted: 16 November, 2021

Ⓒ 2021 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

도로와 같은 건설공사 시 필연적으로 요구되는 비탈면의 설계는 시공 완료 후부터 유지관리 단계에서 지진, 강우, 기상변화 등 자연재해 요인이 발생하더라도 구조물의 안정성을 직접적으로 저해하거나 구조물의 기능을 마비시키는 붕괴가 발생하지 않는 기준으로 하여야 한다(MOLIT, 2018). 또한, 비탈면의 표준경사는 안전성 확보에 필요한 최소 기울기를 나타내는 것으로 흙쌓기 재료의 구성 토질, 토사 지반의 상태 및 암반의 종류에 의해서 결정되도록 법으로 규정하였다(MOLIT, 2021). 이는 비탈면의 안정성은 지역적인 강우량 등 외부 환경에 의한 것보다는 공사를 시행해야 하는 지역의 지반 상태, 단층의 위치, 암반의 종류와 같은 지반 내부의 물리적 분포와 밀접한 관련성이 있다는 것을 의미한다.

시공기술의 발전에도 불구하고 비탈면 하부에 발달하는 단층, 차별풍화대 등의 지질이상대에 의한 유실사고가 빈번하게 발생하며 설계와 시공과정에서 확인하지 못한 이상대는 잠재적인 위험요소로서 대응책 마련을 위한 조사기법의 개발이 필요하다. 또한 대부분의 도로비탈면은 녹화 등의 표면 보호공법이 적용되어 표면관찰이 불가하여 암석의 풍화와 지반의 붕괴의 전조현상을 관찰할 수 없는 단점이 있다.

지구물리탐사는 지반의 내부 상태 진단을 통한 비탈면 조사에 널리 이용되고 있고 암석의 유체 함량, 공극의 연결성 등 매질의 전기적 특성에 기초한 전기비저항탐사는 필수적인 지반조사법으로 활용되고 있다. 물리탐사법은 이용되는 물성에 따라 얻어지는 지반 특성이 제한적이므로 탐사법마다 장단점이 있다. 저자들은 이러한 탐사법 중 하나로 중력장 해석과 지반정보를 통합한 모델링에 의한 비탈면의 3차원적인 밀도 구조를 분석하고 이를 통해서 비탈면의 안정성을 평가할 방법을 소개하고자 한다(Lee et al., 2020; Park et al., 2017).

연구 지역

한반도 남부에 분포하는 백악기 육성 퇴적분지는 경상분지(Fig. 1A의 GB, Fig. 1B의 ①)로 대표되며, 옥천조산대(Fig. 1A의 OB)의 경계부를 따라 소규모 분지가 옥천 조산대의 경계부를 따라 분포한다. 대상 비탈면은 지구조상 백악기 육성 퇴적분지의 하나인 공주분지(Fig. 1B의 ⑥)에 속하며 경기육괴(Fig. 1A의 GM)와 옥천조산대의 경계부에 형성된 인리형 분지(pull-apart basin)에 해당한다(KIGAM, 2002).

공주분지는 횡축의 최대 폭은 4.5 km, 종축의 길이는 28 km의 마름모꼴을 보이며 분지 가장자리에 역암이 분포하며 분지 내부로 갈수록 역암, 사암, 이암의 호층대로 퇴적상으로 전이된다. 이병주와 김복철(Lee and Kim, 2003)의 연구에서 공주분지의 단층은 기반암과 경계가 되는 북동-남서 방향의 좌향 주향이동단층과 분지 내부 단층인 북서-남동 방향의 우향주향이동단층이 공존한다(Fig. 2).

분지의 형성과 발달은 북동-남서 방향의 공주단층 활동으로 퇴적분지가 열개되고, 분지의 확장으로 내부의 북서-남동 방향 단층 작용이 수반되어 분지의 중심이 남서 방향으로 이동되었다. 북서-남동 방향 주향이동단층은 공주단층과 전단감각이 다른 공액전단단열(antithetic Riedle shear)로 분지 형성과정에서 순차적으로 형성되어 인리형 분지로 발달하였다(Lee et al., 1996; Lee and Kim, 2003).

연구 대상 비탈면은 서천을 기점으로 공주 방향으로 건설된 고속도로 구간 중 57.6 km 지점에 위치하며 충청남도 공주시 우성면 보흥리에 해당한다. 대상 비탈면의 규모는 길이가 200 m, 중앙부의 높이가 40 m이며 하단에서 30 m 높이에 1개의 소단이 조성되어 있다(Fig. 3A). 암종은 선캠브리아기의 편마암과 쥬라기 화강암의 역으로 이루어진 역암이며 북동-남서 방향 주향과 도로 방향으로 경사진 층리가 발달한다. 서천공주 고속도로는 2009년 5월로 준공하였고 2018년 3월 공주분지를 통과하는 51.0 km 지점의 깎기 비탈면에서 붕괴가 발생하였다. 암종은 역암으로 구성되어 있고 붕괴 당시

설계와 시공에서 확인하지 못한 파쇄대가 확인되었으며 장기적인 암반 노출로 인한 풍화로 인해 표층 박리와 표면 유실이 관찰된다.

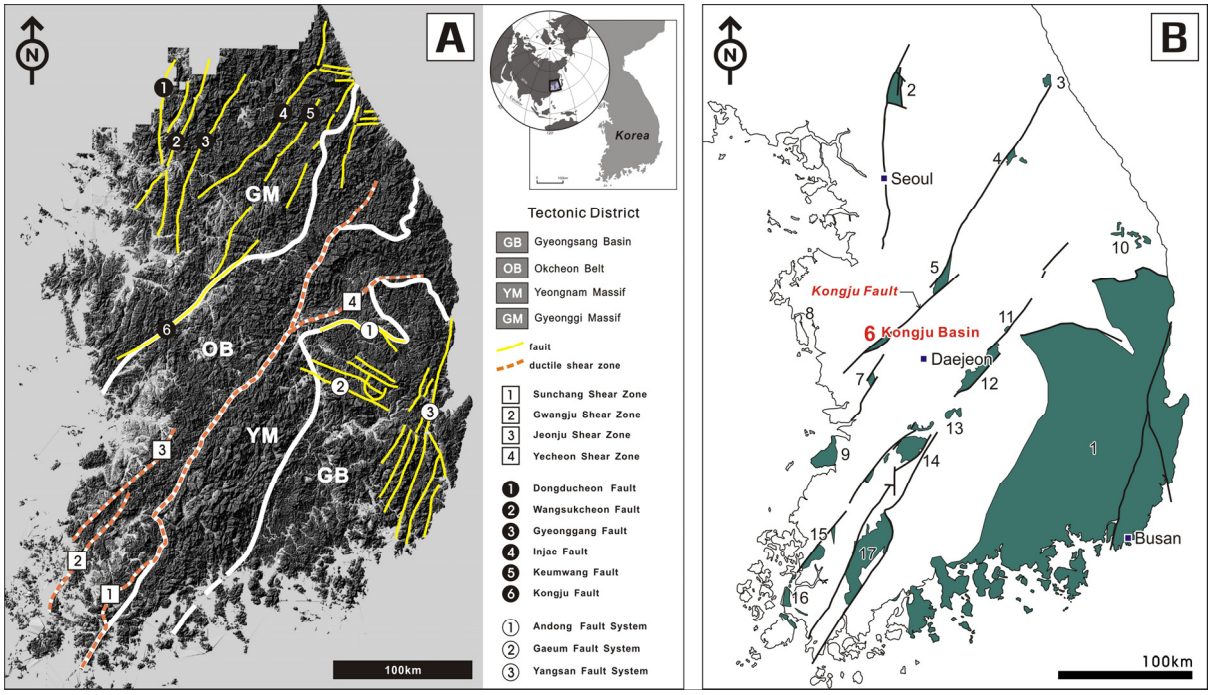

Fig. 1. (A) Fault and tectonic map of Korea. (B) Cretaceous non-marine basins in the southern part of the Korean Peninsula. 1. Gyeongsang Basin. 2. Cheolweon Basin. 3. Misiryeong Basin. 4. Pungam Basin. 5. Eumseong Basin. 6. Kongju Basin. 7. Buyeo Basin. 8. heonsuman Basin. 9. Kyeokpo Basin. 10. Tongni Basin. 11. Jungsori Basin. 12. Yeongdong Basin. 13. Muju Basin. 14. Jinan Basin. 15. Hampyeong Basin. 16. Haenam Basin. 17. Neungju Basin (Lee and Kim, 2003).

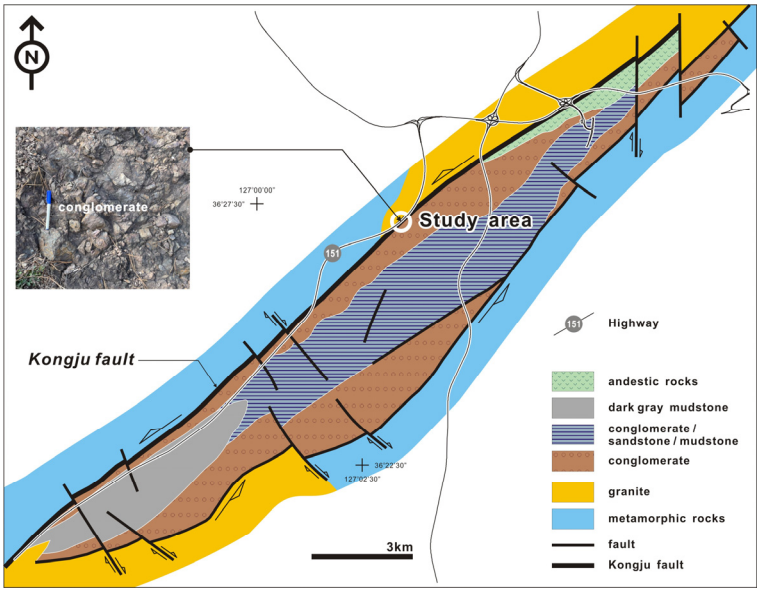

Fig. 2. Geologic map of Kongju basin (modified Lee and Kim, 2003).

지구물리탐사 및 해석

현장 측정

비탈면 내부 상태를 확인하기 위한 복합물리탐사는 서천-공주 고속도로 비탈면의 30 m 높이에 조성된 소단을 따라 남서에서 북동 방향으로 수행하였다. 중력은 10 m 간격으로 170 m의 중력을 측정하였으며 시점부는 중력계 설치가 가능한 10개 지점에서 중력과 고도를 추가하였다(Fig. 3A). 중력 측정은 Scintrex사의 CG5 중력계를 사용하였고 기기의 이론상 측정 오차는 0.001 mGal이나, 현장에서 측정된 중력장의 평균 오차는 약 0.01 mGal 정도였다. 중력 보정을 위해서는 측정 지점에서의 정확한 위치와 고도 값이 필요하며, 고도 측량은 Trimble 사의 R4S GPS 수신기를 이용하였다. 수신기의 고도 오차는 ±5 cm이며 이로 인해 예상되는 중력 오차는 약 0.001 mGal로 중력 해석에 영향을 줄 수 있는 0.05 mGal보다 낮은 값이다.

중력을 측정한 동일 지점에서 쌍극자배열법의 전기비저항탐사를 수행하였고 전극 간격은 7 m로 하여 최대 가탐심도가 35 m가 되도록 하였다(Fig. 3A). 비탈면의 비저항은 Advanced Geosciences사의 SuperSting R1탐사기를 이용하여 측정하였고 역산은 DIPRO 프로그램(Kim, 2003)으로 2차원의 지하 비저항 분포도를 제작하였다.

부게 중력이상

지반의 내부 밀도를 계산하기 위해서는 측정한 중력을 부게이상으로 보정해야하며 계산에 사용한 부게판(Bouguer plate)의 밀도는 한반도 남부의 평균 밀도인 2.67 g/cm^{3}을 적용하였다(Choi et al., 2021). 이렇게 계산한 부게이상을 단순부게이상(Simple Bouguer Anomaly, SBA)이라고 하며 중력의 변화는 9.5 mGal (최소) -10.2 mGal (최대)의 범위를 나타낸다(Fig. 3C). 단순부게이상은 지형에 의한 영향을 포함하고 있으며 지반 내부의 밀도에 의한 중력 효과만을 계산하기 위해서는 지형 보정이 필요하다. 지형보정(Terrain effect)은 연구진이 개발한 프로그램(GR3)을 사용하여 지형효과를 보정한 완전부게이상(Complete Bouguer anomaly, CBA)을 계산하였다(Fig. 3B).

Fig. 3B에서 완전부게중력이상은 10.8~12.5 mGal의 범위를 나타내며 평균값은 11.5 mGal이다. 비탈면의 중앙부는 중력의 평균값보다 낮은 중력을 나타내며 이는 지반의 밀도가 상대적으로 낮은 풍화대의 두께가 증가하는 것을 지시하며 동시에 주변에 비해 풍화도 큰 지반이 분포하여 지반의 안정성이 낮다는 것을 의미한다. 다른 측면에서 신선한 연·경암이 주변에 비해 깊은 곳에 분포한다고 추측할 수 있다.

중력과 동일 지점에서 측정한 전기비저항 분포도(Fig. 3E)에서 연·경암으로 판단되는 고비저항대(Fig. 3E에서 빨간색 부분)가 중앙부에서 약 20 m 심부에서 관찰된다. 노출된 비탈면의 중앙부는 쐐기형으로 불연속면이 발달하며 표면 박리와 풍화작용의 차이에 의해 층상의 암색 변화가 관찰되어(Fig. 4E) 중력장 및 전기비저항 분포와 유사한 상태를 보여준다.

오일러 디콘볼루션 역산에 의한 기반암의 깊이

완전부게이상(CBA)을 이용하여 비탈면 중앙부에 분포하는 기반암 심도를 계산하기 위해서 2차원 오일러 디콘볼루션(Euler deconvolution) 역산법을 사용하였다. 중력장 변화의 원인이 되는 밀도 경계와 깊이(source depth)를 3차원적으로 계산하기 위한 방법으로 식 (1)에 제시한 오일러 디콘볼루션 역산법이 널리 이용되고 있다(Thomson, 1982; Reid et al., 1990; Pašteka et al., 2009).

$$(x-x_0)\frac{\partial \Delta g}{\partial x}+(y-y_0)\frac{\partial \Delta g}{\partial y}+(z-z_0)\frac{\partial \Delta g}{\partial z}=-N\Delta g \quad (1)$$

여기서, x, y, z는 측정 점의 좌표이며, x_0, y_0, z_0는 얻고자 하는 밀도 변화 경계 지점의 좌표이고, g는 측정된 중력값이다. N은 위 식에서 가장 중요한 변수로서 structural index(SI) 라고 하며, 위 식 (1)을 계산하기 위해 임의로 주어진 변수다. 연구에 사용한 오일러 디콘볼루션 역산법(REDGER, Pašteka et al., 2009)에서는 지각 내의 밀도 변화의 평균 깊이(Center Of Source Depth)를 계산하기 위해서는 SI 값을 2로 주어야 하며(Fig. 2A의 사각형 표시), 지표면과 가장 가까운 깊이(Minimum Source Depth)를 계산하기 위해서는 0에 가까운 값을, 그리고 단층면 등의 불연속면을 찾아내기 위해서는 1의 값을 주도록 설계 되었다(Pašteka et al., 2009). 식 (1)에서 2차원 중력 측정 데이터를 위해서는 y축에 대한 모든 값을 0으로 처리해야 하므로 식 (2)와 같이 정리된다.

$$(x-x_0)\frac{\partial \Delta g}{\partial x}+(z-z_0)\frac{\partial \Delta g}{\partial z}=-N\Delta g \tag{2}$$

비탈면 중앙부에서 주변에 평균값보다 낮은 중력값의 원인이 되는 기반암의 최대 깊이(source depth) 계산을 위해서, 위의 X축과 Z축의 미분 값들과 SI = 2의 값(Pašteka et al., 2009)을 식 (2)에 대입하여 최대 깊이를 계산하였다. 그 결과 (Fig. 3D)는 비탈면의 중앙부에 분포하는 기반암의 최대 깊이는 지표면으로부터 30 m 깊이에 위치하며 전기비저항 단면도의 고비저항대의 깊이와 거의 일치한다(Fig. 3E).

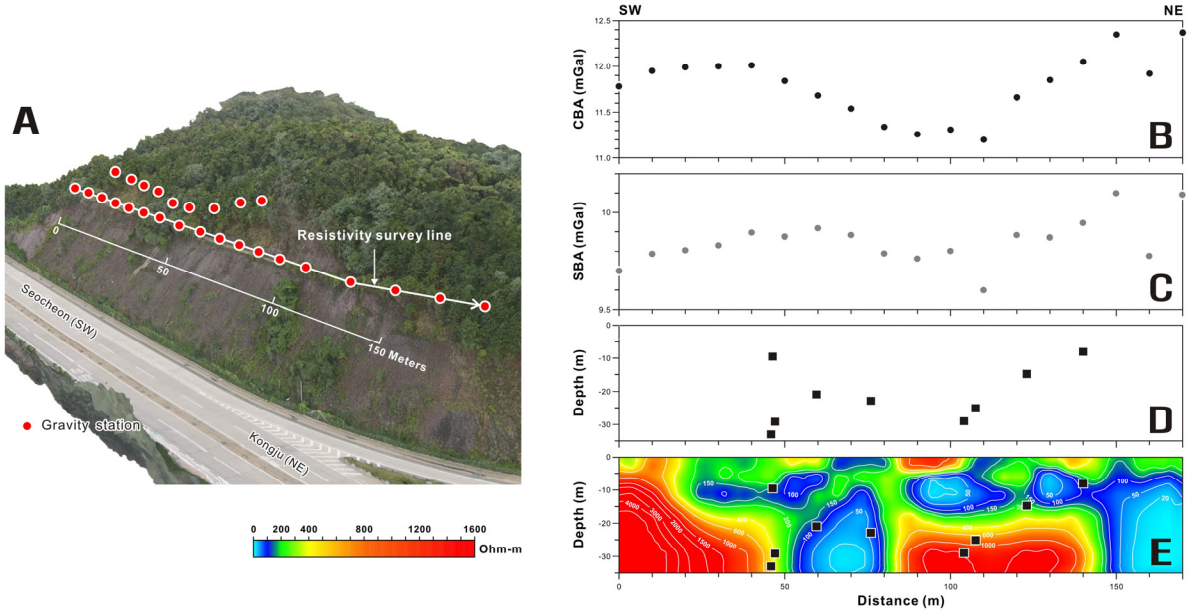

Fig. 3. (A) Location of geophysical exploration. (B) Complete bouguer anomaly. (C) Simple bouguer anomaly. (D) Source depth. (E) Electrical resistiviy distribution.

순산 모델링(IGMAS+)

위에서 제시한 역산 방식은 측정된 중력값을 해석하여 역으로 원인이 되는 지각 물질의 지구물리적 성질(예, 밀도, 대자율)을 규명하는 것이다. 반대로 중력 및 자기장을 이용한 순산 방식 해석을 이용할 수 있고 다음과 같은 방식으로 진행된다. 첫째로, 원인이 되는 지각 물성(예, 밀도, 대자율)의 분포를 가정한 다음 순산 방식의 알고리듬(Talwani et al., 1959;

Götze and Lahmeyer, 1988)을 이용하여 지각 물성의 중력 및 자기장 효과를 계산하는 것이다. 둘째로, 이렇게 계산된 효과 값들을 실제로 측정된 중력 또는 자기장의 크기와 비교한다. 마지막으로 계산된 효과 값들이 측정된 실제 값들과 만족할 정도로 근접했을 때 제시된 지각 모델을 지질학적으로 해석한다.

중력장을 이용한 2차원 순산 모델링 알고리듬은 Talwani et al.(1959)에 의해 이론이 제시되었으며, 3차원 모델링의 이론은 Götze and Lahmeyer(1988)에 의해서 정립되었다. 2차원 방식은 한 선을 중심으로 좌에서 우로 주어진 밀도와 지각 구조의 이론적인 중력 및 자기장을 적분 방식으로 계산하는 것으로(Talwani et al., 1959) 임의의 지점에서 좌, 우측에 존재하는 밀도 구조에 대해서는 매우 효과적으로 그 중력 및 자기장의 효과 값들을 계산할 수 있으나, 앞과 뒤에 위치하는 중력 및 자기장의 효과는 고려하지 못하는 단점을 갖고 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해서 제시된 방법이 3차원 계산 방식이다. 즉 몇 개의 2차원적 모델들이 삼각형(Triangulation)으로 연결되어 있다고 가정할 경우, 각각의 2차원 모델은 Green 2차 적분 식으로 계산된다. 이렇게 계산된 2차원 각각의 모델은 가우스 3차 적분 식으로 연결되어 3차원적인 중력 및 자기장 효과 값들을 계산해 낼 수 있다(Götze and Lahmeyer, 1988).

모델링 과정에서 가장 중요한 것은 초기에 주어져야 할 모델의 정확성이다. 그렇기 때문에, 모델을 결정할 수 있는 가능한 많은 정보가 종합적으로 비교 분석되어야 한다. 연구에 사용한 3차원 중력장 및 자기장 순산 모델링 프로그램(IGMAS+)은 베를린 자유대학과 킬 대학 중력측정 연구소에서 개발한 3D 지반정보(geo-information system)와 객체 및 응답형 기능(interactive function)이 탑재되어 있고 다양한 형태의 정보를 3차원적으로 비교 분석하여 지반 모델을 발전시킬 수 있다. 그런 기능으로 인해서 IGMAS+에 의해서 제시된 최종 모델은 3차원 밀도 및 자기장 분포에 대한 신뢰성을 높일 수 있으며, 지질학적인 해석에 지구물리학적인 의미를 부여할 수 있을 것이다.

연구지역에서 획득한 중력 데이터를 이용한 모델링에서는 지층이나 암석의 구조(polygon) 그리고 각 구조의 밀도가 주어져야만 측정점들에서의 중력효과 값을 계산할 수 있다(이론적인 배경은 Choi et al., 2021 참조). 지하 구조 모델을 위한 암석의 구조를 만들어내기 위한 참고 데이터(constraints)로 지하 40 m까지의 전기비저항 단면(Fig. 3E), 경사지 절개면에서 관찰한 암반의 풍화 정도(Fig. 4E) 그리고 역산을 통해 계산해 낸 기반암 심도(source depth, Fig. 3D)를 활용하였다. 또한, 암석 시편을 이용하여 측정한 풍화대 암석의 밀도(2.00 g/cm^3)와 경암의 밀도(2.40 g/cm^3)를 해석을 위한 참고자료로 활용하였다.

Fig. 4D는 위에서 언급한 참고 자료들을 활용하여 만든 비탈면 하부의 지층 및 밀도 분포이다. 비탈면 남서쪽의 표층 두께는 약 15 m, 평균 밀도는 약 2.20 g/cm^3 정도인 것에 반해 북동쪽의 표층 두께는 최대 10 m 미만이며, 평균 밀도는 2.10 g/cm^3 정도로 판단된다. 중앙부 표층 밀도는 연구 지역에서 가장 낮은 약 1.50 g/cm^3 정도이며, 깊이는 주변보다 뚜렷하게 증가하여 최대 30 m에 이른다. 또한 중앙부에서 기반암(Fig. 4D에서 basement로 표시된 지층) 밀도도 주변에 비해서 약 0.2 g/cm^3 정도 감소하며 깊이 또한 증가하는 경향이 뚜렷하다. Fig. 4B의 파선은 이와 같은 지하구조 모델에 의해서 계산한 부게이상이며, 모델의 계산값은 비탈면을 따라 측정한 완전부게이상(Fig. 4B에서 실선)과 오차 범위 내에서 일치한다. 이러한 결과는 Fig. 4D의 지하구조와 밀도 분포 모형의 신빙성이 있다는 것을 의미한다. 즉 중앙부에서 평균보다 낮은 중력이상은 밀도가 가장 낮은 표층과 분포 심도가 깊은 기반암의 위치와 밀도에 의한 것으로 설명할 수 있다.

지반의 밀도구조 모델링 결과는 비탈면의 중앙부에서 밀도 감소를 수반하는 풍화가 주변에 비해 가속되며 일부는 표층 붕괴로 이어져 있는 상태를 지시한다(Fig. 4C에서 화살표). 한편 밀도구조에서 비탈면의 중앙부는 주변에 비해 낮은 밀도의 지층이 발달하며(Fig. 4C의 LDZ) 공주분지의 확장에 수반된 북서-남동 방향의 공액전단단열로 판단된다. 비탈면 북서부에서 공주단층이 발달하며 비탈면의 설계와 시공 과정에서 확인하지 못한 북서-남동 방향 전단단열이 저밀도영역(LZD)으로 나타나고 이로 인해 지표에 노출된 단열의 상층부의 붕괴가 점이적으로 진행된 것을 의미한다.

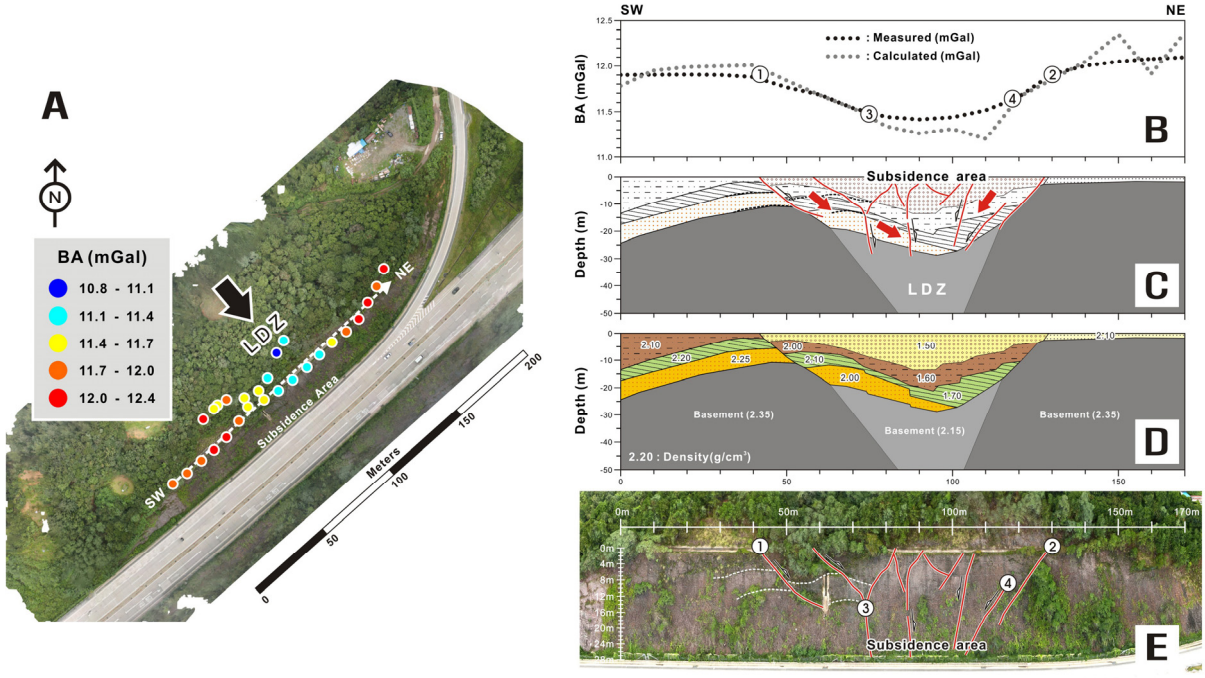

Fig. 4. (A) Gravity field. (B) Modelling of Bouguer anomaly. (C) Subsidence area. (D) Structure and density. (E) Cut slope.

결 론

비탈면 안정성과 밀접한 관련이 있는 내부 상태를 평가하는 방법으로 중력장 해석과 지반 모델링을 수행하였다. 완전부게이상 분포로부터 비탈면 중앙부의 밀도가 주변에 비해 낮고 이는 표층의 풍화대 두껍고 연·경암이 깊은 심도에 위치하는 것을 알 수 있고 부분적으로 노출된 노두의 산상을 통해 확인할 수 있었다. 오일러 디콘볼루션 역산법으로 비탈면 중앙부의 신선한 기반암은 30 m 깊이에 분포하며 주변과 10 m 정도의 차이를 보이며 전기비저항 분포도에서 관찰되는 고비저항대의 깊이와 일치한다.

시공 후 장기간의 풍화에 의한 불연속면 이완과 설계와 시공 중 인지하지 못한 단층 주변으로 비탈면 붕괴가 빈번하게 발생하고 있다. 대형 비탈면은 녹화 등의 표면보호 공법이 적용되어 표면관찰이 불가한 경우가 대부분이며 지반의 내적 변화 파악을 위한 비파괴 조사법이 필요하다. 이러한 관점에서 본 연구의 중력장 해석에 기초한 비탈면의 모델링은 다양한 지반정보를 통합하고 수평 및 수직적인 지층의 밀도 변화를 제시하여 내적인 상태변화의 진단과 안전성 해석에 활용될 수 있다. 특히 장기간의 지표에 노출된 암반에서 풍화대의 규모와 심도를 파악하는 방법으로써 적합함을 시사한다.

사 사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설기술개발 국가R&D사업(과제번호 20SMIP-A157130-01)”과 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2020R1F1A1054863)의 지원으로 수행되었음. 또한 현장조사에 도움 준 한국도로공사에 감사를 드린다.

References

Choi, S.C., Kim, S.W., Choi, E.K., Lee, Y.C., Ha, S.M., 2021, Gravity field interpretation and underground structure modelling as a method of setting horizontal and vertical zoning of a active fault core, Economic and Environmental Geology, 54(1), 91-103 (in Korean with English abstract).

Götze, H.J., Lahmeyer, B., 1988, Application of three-dimensional interactive modeling in gravity magnetics, Geophysics, 53, 1096-1108.

KIGAM, 2002, Tectonic map of Korea (1:1,000,000).

Kim, J.H., 2003, Dipro for Windows v. 4.0.

Lee, B.J., Kim, B.C., 2003, Geology and structural development of the Cretaceous Gongju Basin, Korea, Journal of the Geological Society of Korea, 39(2), 161-170 (in Korean with English abstract).

Lee, B.J., Kim, D.H., Choi, H.I., Ki, W.S., Park, K.H., 1996, Explanatory note of the Daejeon sheet, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (in Korean with English abstract).

Lee, S.J., Kim, J.S., Kim, K.S., Kwon, I.R., 2020, Delineation of the slip weak zone of land creeping with integrated geophysical methods and slope stability analysis, The Journal of Engineering Geology, 30, 289-302 (in Korean with English abstract).

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2018, Korean design standard; 11 00 00, Retrieved from https://www.kcsc.re.kr/Home/Index.

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport), 2021, Practical guidelines for designing national road construction, 11-1613000-00083-14.

Park, B.S., Cho, H., Park, D.I., Kim, J.H., Choi, J.H., 2017, Case study on rock slope failures causesd by geologic structures, The Journal of Engineering Geology, 27, 417-427 (in Korean with English abstract).

Pašteka, R., Richter, F.P., Karcol, R., Brazda, K., Hajach, M., 2009, Regularized derivatives of potential fields and their role in semi-automated interpretation methods, Geophysical Prospecting, 57, 507-516.

Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millet, A.J., Somerton, I.W., 1990, Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution, Geophysics, 55, 80-91.

Talwani, M., Worzel, J.L., Landisman, M., 1959, Rapid gravity computation for two dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone, Journal of Geophysical Research, 64, 49-59.

Thomson, D.T., 1982, EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data, Geophysics, 47, 31-37.