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

Vol. 31, No. 3, September, 2021, pp. 283-293
https://doi.org/10.9720/kseg.2021.3.283

RESEARCH ARTICLE

중력 데이터 해석과 드론원격정보를 이용한 지반의 다짐도 평가

김성욱[1] · 최승찬[2] · 최은경[3] · 이영재[4] · 고대홍[5] · 이규환[6*]

[1](주)지아이 지반정보연구소 대표이사, [2](주)지아이 지반정보연구소 책임연구원,
[3](주)지아이 지반정보연구소 실장, [4](주)지아이 지반정보연구소 사원,
[5](주)지아이 지반정보연구소 팀장, [6]건양대학교 재난안전소방학과 교수

Evaluation of Soil Compaction Using Gravity Field Interpretation and UAV-based Remote Sensing Information

Sung-Wook Kim[1] · Sungchan Choi[2] · Eun-Kyoung Choi[3] · Yeong-Jae Lee[4] · Daehong Go[5] · Kyu-Hwan Lee[6*]

[1]CEO, Geo-information Research Group Co., Ltd.
[2]Senior Researcher, Geo-information Research Group Co., Ltd.
[3]Director, Geo-information Research Group Co., Ltd.
[4]Staff, Geo-information Research Group Co., Ltd.
[5]Manager, Geo-information Research Group Co., Ltd.
[6]Professor, Department of Disaster Safety & Fire, Konyang University

Abstract

The homogeneity of the compacted ground was analyzed using drone-based remote terrain and gravity field data. Among the topographic elements calculated by the hydrological algorithm, the topographic curvature effectively showed the shape of the surface that occurred during the compaction process, and the non-uniformly compacted area could be identified. The appropriate resolution of the digital topography requires a precision of about 10 cm. Gravity field Interpretation was performed to analyze the spatial density change of the compacted ground. In the distribution of residual bouguer gravity anomaly, the non-homogeneously compacted area showed a different magnitude of gravity than the surrounding area, and the difference in compaction was identified through gravity-density modeling. From the results, it is expected that the topographic element and gravitational field analysis method can be used to evaluate the homogeneity of the compacted ground.

Keywords: compaction, non-uniformly, drone, topographic curvature, bouguer gravity

초 록

고해상 드론 기반의 지형 정보와 중력장 데이터를 이용하여 다짐지반의 모양과 균질성을 분석하였다. 지형과 수문 모형에서 계산된 지형요소 중 곡률은 다짐과정에서 발생한 지형의 변화를 효과적으로 보여주었으며 이를 통해 불균질 다짐 영역을 확인할 수 있다. 지형 정보의 적정 해상도는 10 cm 정도였다. 성토지반의 공간적인 밀도변화를 분석하기 위해 중력장 해석을 수행하였으며 완전 부게이상의 변화로부터 불균질 다짐 영역과 지하 밀도구조 모델링을 통해 다짐도 차이에 의한 불균질 영역을 파악하였다. 연구 결과로부터 지형요소와 중력장 해석법은 다짐된 지반의 균질성을 평가법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 다짐, 불균질, 드론, 곡률, 부게이상

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Kyu-Hwan Lee
E-mail: khlee@konyang.ac.kr

Received: 14 June, 2021
Revised: 4 July, 2021
Accepted: 8 July, 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.

서론

지반의 다짐은 토양의 밀도를 높이고 압축성과 전단강도를 높이는 지반개량 공법으로 도로, 택지의 평탄화를 위해 토양의 공극률을 감소시키는 방법으로 시행된다. 고속도로를 비롯하여 성토지반의 다짐도를 확인하기 위해 현장밀도측정시험, 평판재하시험, 방사성동위원소 측정법(RI법) 등이 주로 사용된다. 이러한 방법은 다짐이 완료된 토양에 대한 파괴 분석법으로 지반의 변형을 초래하여 일부 영역을 대상으로 하는 일점법 시험으로는 전체 지반의 균질한 다짐도를 평가하기 어렵다(Cho, 2002).

다짐도를 높이기 위해서는 품질측정이 필수적이나 현장에서의 다짐은 주로 엔지니어의 경험에 의존하며 일점법은 균등 다짐을 전제로 하고 있기 때문에 품질에 대한 대표성과 시공의 연속성을 저해하는 요소가 된다.

국내의 경우, 한국도로공사 도로교통연구원(Cho and Jung, 2000), KICT(2009), Park and Kim(2012)에서 지능형 다짐과 관련된 기초 연구가 일부 수행되었지만, 상용화 단계에 있는 해외 업체에 비해 기술이 낙후된 것으로 평가되었다. 이러한 문제를 개선하기 위한 방법으로 비파괴 다짐도 평가 방법이 개발되고 있으며 가속도계를 이용한 연속 다짐과정의 CMV (Compaction Meter Value)를 이용한 평가법이 개발되고 있다(Lee et al., 2017). 가속도계를 이용한 연속다짐(Intelligent Continuous Compaction) 기술은 시공과 동시에 토양의 다짐도를 확인할 수 있는 기술로서 다짐과 평가과정으로 구분된 공정을 통합하여 건설의 생산성을 높일 수 있다(Park et al., 2010). 이미 미국, 일본, 유럽 등지에서 연속다짐 기술이 확대 보급되고 있으나 성토에 사용되는 토양의 종류, 함수비, 기상조건 등 외부 영향을 보정할 수 있는 자료구축이 필요하다. 국내의 경우, 지역별로 모암이 다르면 토성과 함수비, 배수특성이 달라지므로 매질의 특성에 부합하는 해석기술이 필요하다.

Park and Kim(2011)은 가속도계를 이용한 평가와 기존 현장시험법(평판재하시험, 현장들밀도시험 및 동평판재하시험)의 상관관계를 분석하여 연속다짐의 적용성 검토하고 효율적인 적용을 위해서는 토질 특성을 고려한 평가법 개발의 중요하다고 하였다. Baek et al.(2020)은 대표적인 지능형 다짐값인 CMV와 일점시험(평판재하시험 및 현장밀도시험) 결과를 비교 분석하여 지능형 다짐기술을 이용한 토공사 품질관리에 대한 기초 연구를 수행하였다.

지층 다짐도와 형상을 평가하는 방법으로 지층구조의 영상화를 통한 지하레이더(GPR) 등의 지구물리탐사법이 적용되고 있으나 주관적인 분석으로 인한 해석의 신뢰도가 떨어지며 연속다짐을 위한 장치기술의 개발이 필요하다

본 연구에서는 연속 다짐 중의 성토지반에서 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)를 이용하여 수치고도를 추출하고 수문모형을 적용하여 지표면 형태 정보에 관한 지형요소를 산정하고 다짐에 따라 지형의 모양을 나타내는 다양한 매개변수의 변화를 관찰하였다. 또한, 성토지반과 같이 저경사 지역의 다짐 평가에 유효한 지형요소의 접합성과 최적해상도에 대한 비교 연구를 하였다. 한편 다짐 지반에서 일정한 간격으로 중력장을 측정하고 부게중력이상의 공간적 변화와 3-D 지반의 밀도 모델링(Götze and Schmidt, 2002; Schmidt et al., 2004, 2010; Choi et al., 2011, 2021; Alvers et al., 2014)을 통해 영역별 다짐도를 분석하였다.

경기도 안성시 보개면 내방리 OOO 고속국도 건설현장에서 현장시험이 진행되었으며, 이곳은 안성천의 범람원 충적지가 넓게 분포하는 평탄지역으로 원지반의 지질 조건이 비교적 균질한 지역에 해당된다. 중력탐사가 적용 현장은 25 m × 15 m 면적의 원지반위에 성토재료를 약 500 mm 두께로 포설한 후, Caterpillar사의 CS54B 진동롤러(총 중량 10,555 kg, 드럼 직경 1.53 m, 드럼 너비 2.13 m)를 이용하여 다짐 된 지역이다(Fig. 1).

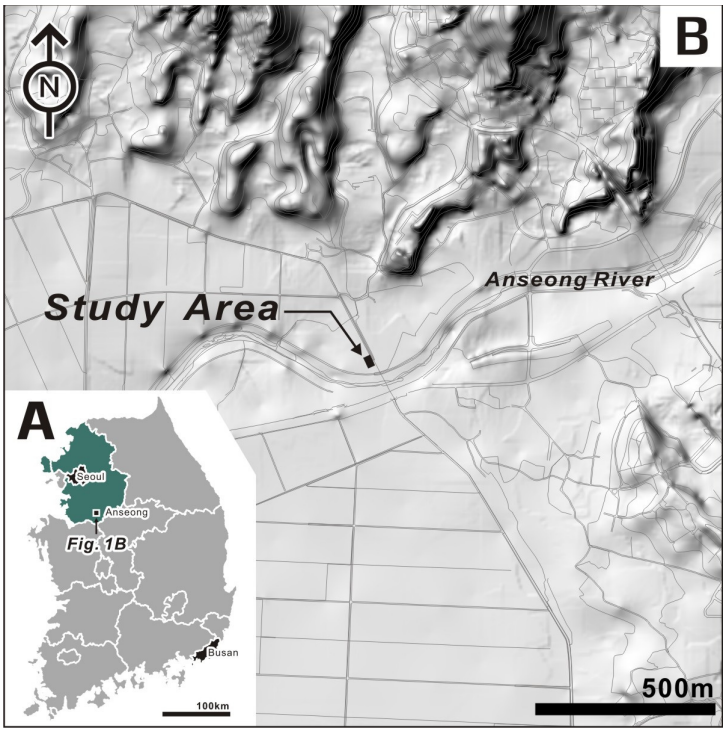


Fig. 1. (A) Location map of study area. (B) Embankment construction site.

이론적 배경

성토지반의 공간적인 형태와 밀도변화를 분석하기 위해 드론 원격정보에 기초한 수문모형과 중력장 해석을 수행하였다. 지반이 수평 또는 일정한 경사로 균질하게 다짐이 되면 지형의 형태요소 중 방위, 경사, 곡률, 습윤지수, 지형지수(상부사면기여면적) 등은 같은 크기를 가지게 된다. 불균질 다짐으로 요철이 있는 경우, 지형요소의 변화가 나타나므로 이를 이용하여 다짐 과정과 다짐 완료 후에 균질 및 불균질 다짐 영역을 구분할 수 있다.

최근 정밀도가 향상된 중력계가 보급되고 있고 지반의 밀도구조에 대한 3차원 해석법이 제안되고 있어(Götze and Schmidt, 2002; Schmidt et al., 2004, 2010; Choi et al., 2011, 2021; Alvers et al., 2014) 이를 활용하면 천부지층의 다짐도 평가에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 다짐에 사용한 토양의 밀도가 일정하다고 가정하고 다짐 과정과 다짐 후에 측정 및 보정된 중력이상은 지반의 밀도를 반영하여 공간적인 중력장 해석을 통해 다짐 효과를 분석하였다.

수문모형

지형의 형태를 나타내는 고도, 방위, 경사, 곡률, 지형지수, 습윤지수 등의 요소는 수문모형으로 계산할 수 있다. 다짐지반에서 측정한 수치고도모형(DEM)과 수분의 수렴과 발산 시뮬레이션에에 활용되는 TAPES-G(ver. 6.3) 모형을 이용하여 지형요소를 계산하였다.

지형요소 중 경사는 수치고도모형의 해당 격자에서 경사가 가장 가파른 방향으로의 고도 변화율이며 수문모형에서 중력에 의해 수분의 흐름을 발생 시키는 정도를 의미한다. 방위는 북(N)을 기준으로 시계방향으로 최대 경사의 방위각에 해당한다. 곡률은 곡률반경의 역수이며 지표수의 수렴과 발산을 나타내는 변수로, 윤곽구배곡률(Profile, Kp), 등고선구배곡률(Plan, Kc), 접선구배곡률(Tangential, Kt)로 구분된다. 이 중 등고선구배곡률은 등고선을 따라 생성되는 단위격자

면의 변화율로 물의 수렴과 발산 정도를 나타낸다. 윤곽구배곡률은 흐름선 방향으로 경사의 기울기 변화율로 흐름 속도 변화를 나타낸다. 접선구배곡률(Tangential, Kt)은 등고선구배곡률(Kc)에 경사도의 사인(sine) 값을 곱한 것으로 작은 경사로 인한 곡률을 보정하여 등고선구배곡률(Kc)에 비해 지형의 변화를 잘 표현하는 장점이 있다(Mitášová and Hofierka, 1993). 상부사면기여면적은 격자의 상부지역으로부터 수분을 공급받을 수 있는 흐름량을 나타내는 것으로 계산 방법으로 단방향 흐름(Single Flow Direction, SFD), 다방향 흐름(Multiple Flow Direction, MFD), DEMON(Digital Elevation MOdel Networks) 알고리즘 등으로 구분된다.

본 연구에서는 격자 기반의 모형으로 강우에 따른 흐름의 점원적 발생과 하부 경사 방향의 면으로 2차원적 수분의 흐름 경로를 효과적으로 표현하는 DEMON 알고리즘(Costa-Cabral and Burges, 1994)을 적용하였다. 습윤지수는 격자의 포화정도를 반영하는 지형인자이며 TOPMODEL(Beven and Kirkby, 1979), THALES(Grayson et al., 1992) 및 TOPOG (O'Loughlin, 1986) 등의 분포형 수문 모형의 입력변수로 사용되며 비탈면의 유출모의에도 사용된다. 수문모형을 이용한 지형요소의 계산 방법은 Choi et al.(2013, 2017), Lee et al.(2012)에 상세히 설명되어 있다.

중력장 데이터

지상의 관측점에서 측정된 중력은 평균해수면(기준면)의 중력값으로 환산할 수 있고 이렇게 보정된 중력을 중력이상(Gravity anomaly)이라 한다. 관측된 중력은 프리-에어보정, 부게보정, 지형보정 등의 과정을 통해 측정점의 고유한 지반 밀도에 의한 중력이상으로 변환된다.

고도가 높아질수록 지구중심에서 거리가 멀어짐에 따라 중력값은 상대적으로 낮아지므로 측정점의 고도가 높을 경우 높이에 의해 감소된 중력 값을 더해주어야 한다. 이러한 과정을 프리-에어보정이라 하며, 보정을 거친 중력값을 프리에어 중력이상(Free-air anomaly, δg_{FAA})이라 한다, 중력보정의 방법은 다음 식 (1)과 같다.

$$\delta g_{FAA} = g_{obs} - (\pm \Delta g_L - \Delta g_A - \Delta g_{FAA}) - g_{ref}\} \tag{1}$$

측정점이 기준면보다 높은 곳에 위치하고 측정점과 기준면사이에 다른 물체가 분포하는 경우, 매질에 의한 인력이 발생하는데 이를 제거하는 과정을 부게보정(Bouguer anomaly)이라 하며, 부게보정으로 보정된 중력을 단순부게중력이상(δg_{SBA})이라고 한다. 즉, 단순부게중력이상은 프리-에어 이상에 부게보정을 추가하여 계산된 중력이상으로 식 (2)와 같다. 이와 달리 완전부게중력이상(δg_{CBA})은 단순부게중력이상에 지형 보정($\triangle g_T$, Terrain correction)을 추가하여 계산된 중력이상으로 식 (3)과 같다.

$$\delta g_{SBA} = g_{obs}\{-(\pm \Delta g_L - \Delta g_A - \Delta g_{FAA} + \Delta g_{BA}) - g_{ref}\} \tag{2}$$

$$\delta g_{CBA} = \delta g_{SBA} + \triangle g_T \tag{3}$$

중력이상을 계산할 때 측정점의 고도가 기준면의 고도 보다 낮으면 프리-에어 보정에서 중력값을 빼주고, 부게보정에서 중력값을 더해주어야 한다. 즉, 보정 식에서 δg_{FAA}와 δg_{SBA}의 부호는 반대가 되어야 한다. 최종적으로 계산된 완전 부게중력이상을 역해석하여 지하 내부의 3차원적인 밀도 분포를 파악할 수 있다.

지층의 밀도구조

보정과정을 거쳐 계산된 완전부게중력이상(δg_{CBA})을 대상으로 지반의 3차원적인 밀도변화를 모사할 수 있다(Choi et al., 2021). 공간상의 밀도변화는 이론적인 중력 효과 값을 계산한 후 모형의 계산 값과 실측된 중력을 비교하면서 지하 밀도 구조를 현실화하는 과정이다. 본 연구에서 지반의 밀도구조 모델링은 3차원 순산 모델링 프로그램인 IGMAS+(Interactive Gravity & Magnetic Application System)를 사용하였다(Götze, 1984). 모델링 과정에서 가장 중요한 것은 초기에 주어지는 지각 모델의 정확성이라는 것을 고려할 때, IGMAS+의 이러한 기능은 제시된 최종 모델의 3차원 밀도 분포에 대한 신뢰성을 높일 수 있으며, 지질학적인 해석에 지구물리학적인 의미를 부여할 수 있다.

IGMAS+를 활용한 모델링에서, 지하에 존재하는 모든 물질의 성질 및 총량은 간단하게 밀도나 대자율 같은 물성과 부피로 정의된다. 밀도를 갖고 있는 3차원적인 지하 매질이 나타내는 중력은 측정점 P1, P2 지점에서 측정한 중력만으로 해석하며 2차원 스톡스(Stocks) 법칙을 사용한다. 2차원 지하구조를 3차원적으로 확장하기 위해서 가우스(Gauss) 법칙을 이용한다(Fig. 2). 모든 3차원 구조는 3각 측량에 의해 연결된 면(Plane)으로 해석(Schmidt and Götze, 1998, 2003; Schmidt et al., 2004, 2010)한다. 이런 과정을 거쳐 물질의 밀도를 나타내는 3차원적인 중력 값을 계산해 낼 수가 있으며, 이를 통해서 지하에 어떤 구조가 존재하는지 알아낼 수 있다.

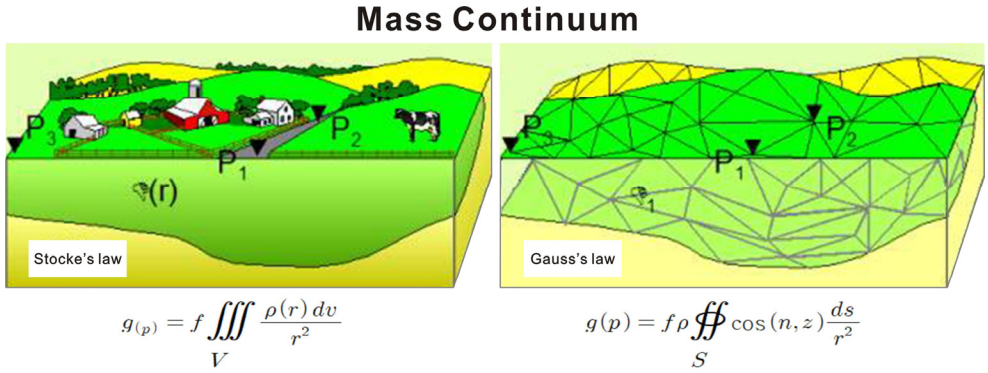


Fig. 2. Simplified model and formula of stocke's law (left) and gauss's law (right).

자료구축

지형

성토지반의 지형 정보는 드론 기반의 사진측량을 이용하였고 디지털 맵핑을 위한 영상 및 고도는 DJI사에서 제작한 Phantom4 회전익 드론을 이용하였다. 연구 대상지의 현황 파악과 실감정보 구축을 위해 6개의 렌즈(가시광 촬영용 RGB 센서 1개, 다중 스펙트럼 촬영용 모노크롬 센서 5개)로 구성된 다중 스펙트럼 카메라를 사용하였다. 또한, 드론의 비행계획을 수립하기 위해 DJI GS Pro 소프트웨어를 활용하여 약 50 m 고도에서 2.7 cm급으로 촬영하였으며, 종중복도와 횡중복도는 각각 80%와 70%로 설계하였다. 드론으로 촬영한 영상을 접합하기 위해 Pix4Dmapper 소프트웨어를 사용하였으며, 접합시 정확한 좌표매칭을 위해 8개의 지상기준점(Ground Control Point, GCP)을 선정한 후, MRP-2000 GPS(Global Positioning System) 장비를 활용하여 GCP 측량을 하였다. 지상기준점의 실제 좌표와 영상좌표 간의 오차는 ±2.4 cm(X), ±2.1 cm(Y), ±3.6 cm(Z)였다.

수치 고도 모형은 가로와 세로의 길이가 105 m × 100 m인 성토지반에서 평균 2.7 cm 간격으로 획득한 드론 기반 지형 정보를 10 cm 간격으로 재구성하여 총 1,052,051개의 단위격자로 구성하였다.

중력장

다짐된 성토지반의 중력 측정에 사용한 중력계는 Scintrex사의 CG5이며 장비의 이론상 오차 값은 0.001 mGal이나, 현지 측정시 평균 오차 값은 다소 증가하는 것이 일반적이다(Fig. 3A). 중력보정을 위해서는 측정 지점의 정확한 위치가 필요하며 위치 측량은 MRP-2000 GPS를 이용하였다. 측정점에서 중력에 영향이 큰 고도의 평균 오차는 1 ± 0.5 cm이며, 측정 시 고도와 주변 지장물에 등에 의한 중력 오차는 0.005 mGal 이하였고 이는 중력 해석에 영향을 줄 수 있는 정도보다 작은 값이다.

중력장은 성토를 마친 도로에서 남-북 방향은 10 m, 동-서 방향은 5 m로 간격으로 측정하였고 가로(25 m) × 세로(40 m)의 면적에서 총 30개 지점의 중력과 표고를 측정하였다(Fig. 3B). 토양의 다짐에 따른 밀도 분포를 계산하기 위해 측정한 중력을 부게이상(Bouguer anomaly)으로 변환하였고 이때 사용한 부게판(Bouguer plate)은 전 지구의 평균 밀도인 2.67 g/cm^{3}을 적용하였다. 고도보정은 보정식(flat-topped square prism)(Nagy, 1966)을 사용하였고 지형보정은 연구진이 개발한 GR3 프로그램을 사용하였다.

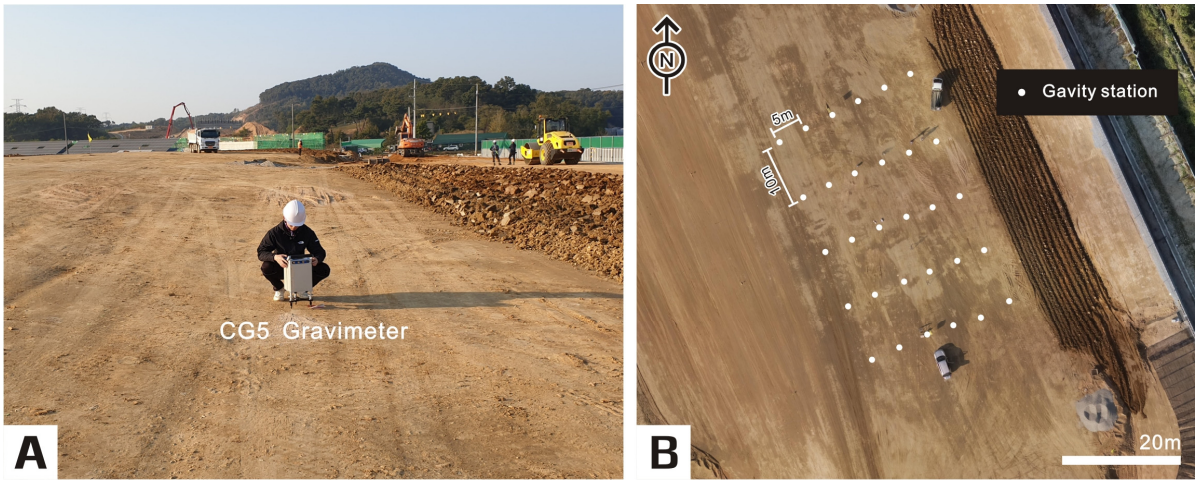


Fig. 3. (A) Photo of on-site gravity measurement. (B) Location of the gravity measuring point in the field.

분석 결과

지형 요소

드론 원격정보를 획득한 성토지반은 수평으로 다짐 시공하였고 고도(Height), 경사(Slope) 및 방위(Azimuth)는 거의 같은 크기를 가지고 있어 구분되지 않지만 곡률과 습윤지수는 다짐 영역별로 차이가 나는 것을 볼 수 있었다(Fig. 4).

특히, 곡률 중 윤곽구배곡률(Kp)에 비해 접선구배곡률(Kt)에서 변화가 잘 관찰되었다. 접선구배곡률의 분포도에서 Fig. 4의 ① 영역은 곡률의 변화가 ±0.5의 범위를 보이지만 ② 영역은 주변보다 ±1.0 이상으로 지형의 기복을 확인할 수 있다. 이론적으로 수평층의 곡률은 0이 되어야 하므로 곡률이 크기를 가지는 것은 지형에 기복이 생긴 것을 의미하며 ②의 영역은 주변보다 다짐이 불균질한 것으로 해석할 수 있다. 육안으로 다짐의 균질성을 확인하기는 어렵지만, 지반의 형상에 대한 정밀디지털 수치정보를 이용하여 성토체의 균질 다짐을 평가할 수 있었다. 특히, 접선구배곡률은 경사의 변화가 미세한 다짐 지반에도 효과적으로 적용할 수 있었다.

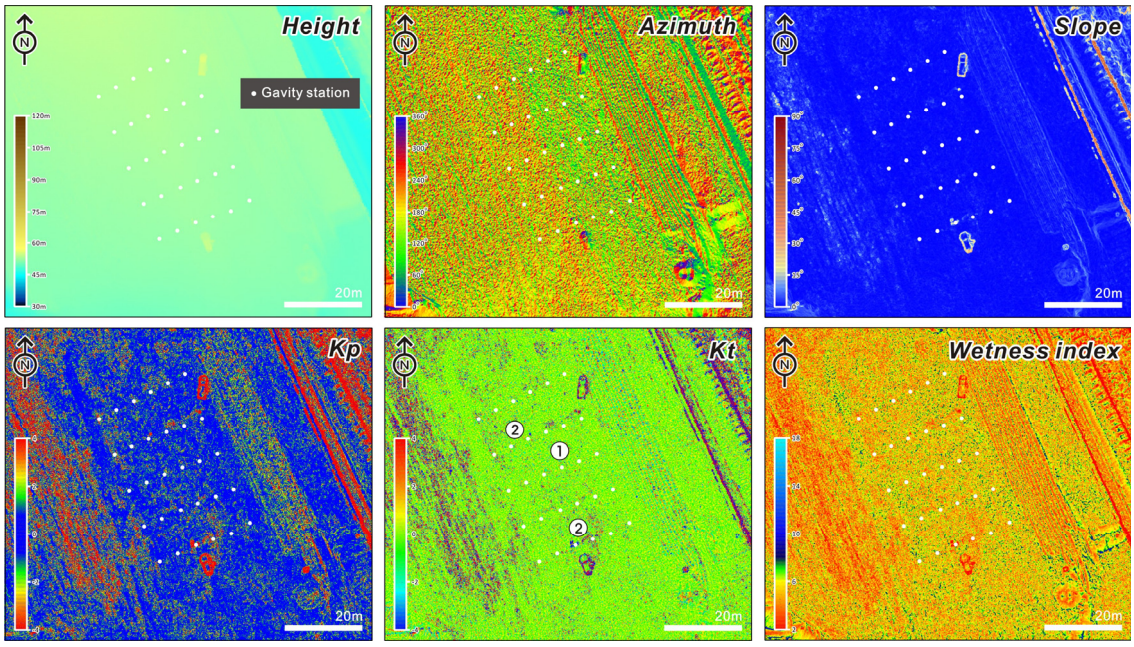
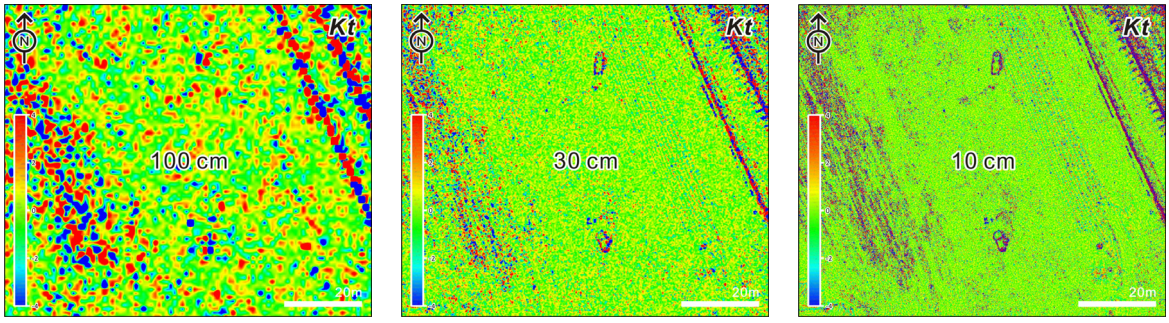


Fig. 4. Terrain factors calculated from DEM data extracted from UAV.

지반의 형상을 이용한 다짐의 균질도를 평가하기 위해서는 목적에 부합하는 해상도의 지형정보가 필요하다. Fig. 5는 드론으로 획득한 원격정보의 고도를 이용하여 100 cm, 30 cm, 10 cm 격자 간격으로 계산한 접선구배곡률 분포도를 나타낸 것으로 격자 간격이 좁아질수록 곡률의 변화가 상세하게 표현되는 것을 볼 수 있다. Fig. 5a의 격자 간격 100 cm에서는 도로 제방과 수평으로 다짐된 지반의 구분이 뚜렷하지 못하였다. Fig. 5b의 격자 간격 30 cm에서는 제방과 수평으로 성토된 지반의 구분이 가능하나 수평층의 변화를 효과적으로 표현하지 못하고 있다. 따라서 지반의 연속다짐 중 제체의 형상에 따른 균질성을 파악하기 위해서는 Fig. 5c와 같이 최소 10 cm 이하의 정밀한 지형정보가 요구된다.



(a) 100 cm (b) 30 cm (c) 10 cm

Fig. 5. Distribution of tangential curvature by size of grid spacing.

시공 과정 중 현장 측량을 통해 지반의 형상정보 획득이 가능하나 지형 측량과 안전을 위해 시공 중단이 필요하며 투입되는 시간과 인력으로 인한 생산성이 저하되어 오히려 비능률적인 방법이 될 수 있다. 이에 반해 드론 원격정보는 짧은 시간에 고해상의 지형정보를 획득할 수 있고 간단한 계산을 통해 지형요소의 분포도를 가시화할 수 있는 장점이 있다.

중력장 해석

연구 대상지역의 성토지반에서 측정한 중력 데이터에서 계산한 완전부게이상은 3.48~3.76 mGal 범위를 보였으며 최대값과 최소값의 차이는 0.28 mGal이다(Fig. 6A). 부게이상은 중앙부(① 부분)에서 가장 크고 가장자리로 갈수록 감소하는 분포를 보여준다. 성토지반은 같은 기간 동안 롤러 다짐을 하였고 균질한 모래가 사용된 것을 감안하면 부게이상은 일정 크기를 가져야 한다. 부게이상의 차이는 다짐된 지반의 밀도 차이를 반영한 것이다. 중력데이터의 분포에서 ①과 같이 부게이상이 증가하는 것은 밀도가 큰 매질이 중력에 영향을 미치는 것으로 성토체의 다짐 정도가 큰 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 6에서 A는 성토층의 두께와 유사한 1 m 격자 간격으로 부게이상을 계산한 것이다. B는 모델링한 중력자료를 이용하여 지표면의 다짐에 의한 밀도변화를 관찰하기 위하여 5 m 간격으로 파장(wavelength)의 변화를 주어 필터링한 것으로 원시자료(A)와 필터링된 자료(B)의 차이를 잔류 중력으로 도식화하였다(C). 즉, 좁은 간격의 중력이상(A)에서 넓은 간격의 중력이상(B)을 제거하면 지표면의 특성이 부각된 잔류 중력(C)으로 표현된다. 측정지점의 잔류 중력은 ②와 같이 잔류부게이상이 ±0.010 mGal 이하로 중력의 변화가 거의 나타나지 않는다. 반면 ③은 잔류부게중력이 +0.030 mGal에서 -0.025 mGal로 변화가 관찰되며 정(+)과 부(-)의 잔류부게이상이 대칭으로 분포한다. 이러한 중력 분포는 중력이 증가하는 지점이 더 많이 다짐이 되고 주변은 성토재료의 이동으로 다짐도가 감소하였기 때문으로 판단된다. 특히 잔류부게이상이 증가하는 부분과 감소하는 부분이 대칭되는 현상은 중력장 해석을 통한 다짐도 분석에서 균질 다짐의 평가 방법으로 활용될 것으로 판단된다.

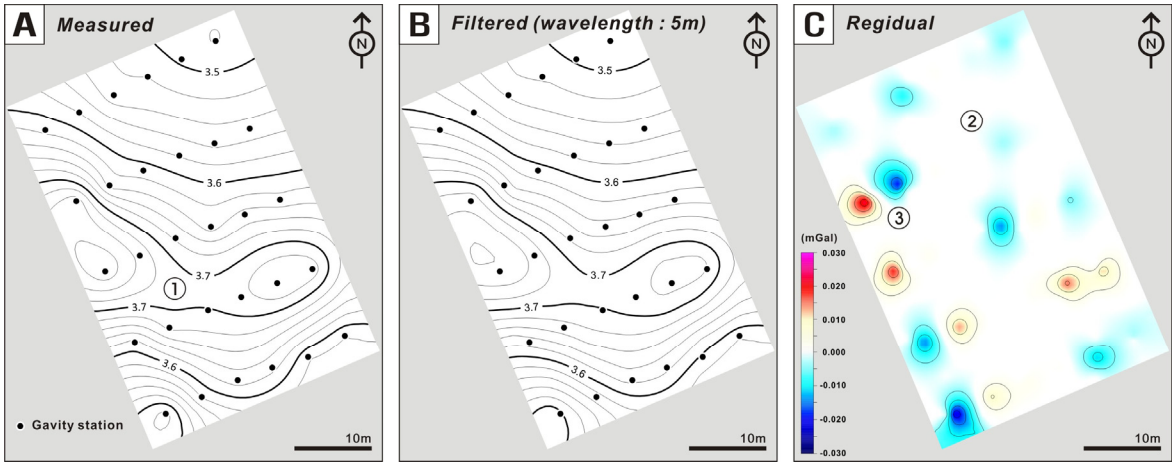


Fig. 6. (A) Calculate the Bouguer anomaly at 1 m grid intervals similar to the thickness of the embankment layer. (B) Filtered by changing the wavelength at 5 m intervals. (C) The residual gravity change is plotted by subtracting the original data (A) and the filtered data (B).

Fig. 7은 IGMAS+ 프로그램을 이용하여 잔류부게이상의 변화가 가장 크게 나타나는 Fig. 6C의 ③지점 주변의 3차원적인 지반의 밀도모델을 계산한 후 순산법을 이용하여 밀도 경계 단면을 나타낸 것이다. 모델링에서 성토지반의 하부지반은 5 m 깊이까지 동일한 지층으로 가정하였고 현장의 여건도 안성천의 충적층이 10 m 이상의 두께로 분포한다. 성토된 지반의 다짐이 균질한 경우 중력의 크기는 균등해야하며 이론적으로 ❶과 같이 표현된다. 반면, 현장에서 측정된 중력장의 최대치와 최소치는 0.02 mGal의 차이를 보이며 ❷와 ❸과 같이 ±0.009 mGal 범위의 잔류중력의 변화를 수반한다. 연구지역에서 다짐도의 차이에 의한 잔류부게이상이 5% 정도 변화를 보이며 중력의 증가와 감소는 공극률 차이에 따른 밀도변화를 지시한다. 다짐 전 토양의 초기 공극률을 50%로 가정하면 ❷부분은 다짐과정을 통해 이론적인 중력에 비해 2.5%

공극률이 감소하고 +0.009 mGal 만큼의 중력이 증가하였다. 반면 ❸부분은 균등 다짐 된 경우에 비해 2.5% 공극률이 증가하고 +0.009 mGal 만큼의 중력이 증가하였다. 중력이상에서 환산한 최대 및 최소 중력이상으로 계산한 밀도의 변화는 0.05 g/m^{3}이며 불균질 다짐에 의한 효과에 해당한다.

밀도 모델링에서 다짐이 가장 양호한 지반과 가장 불량한 지반의 밀도 차이가 0.05 g/m^{3}인 것을 확인할 수 있다. 그러나 다짐된 지반의 실제 밀도는 불확정적이며 본 연구에서는 1.95~2.0 g/m^3 범위의 밀도를 입력자료로 활용하였다. 정확한 중력장 해석을 위해서 측정 지점 중 최소 1개 지점에서 성토체를 대상으로 한 실측된 밀도가 필요하며 이를 기준으로 상대적인 밀도변화율을 파악할 수 있으므로 해석의 신뢰성을 위해 실측자료의 구축이 필요하다.

본 연구에서 측정된 중력 자료는 해당 지역의 원지반 조건이 균질하고 성토지반의 두께가 2 m 이상인 점을 감안하여 5 m간격으로 측정하였다. 그러나 원지반의 변화가 심하고 얕은 두께로 성토하는 경우 다짐 정도를 확인하기 위해서는 상세한 중력장 측정 자료가 필요할 것으로 판단된다.

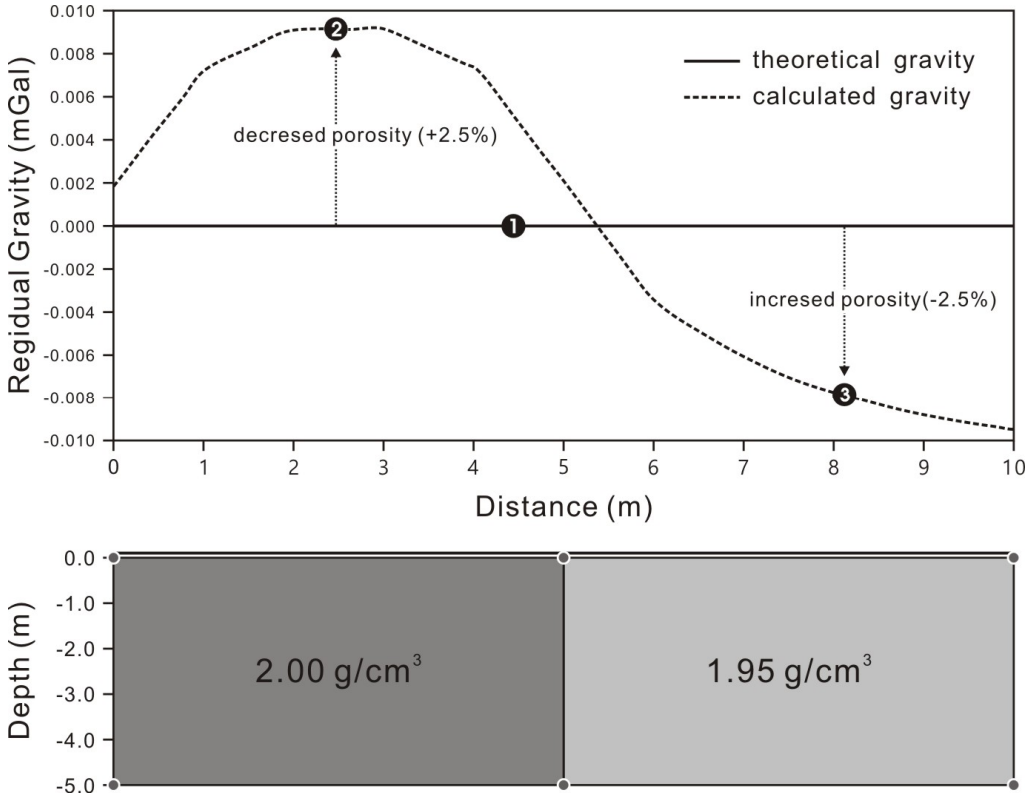


Fig. 7. Gravity model along the E-W profile in 3 of Fig. 6C. The subsurface density structure is modeled with iterative modifications by using residual gravity field.

결 론

롤러를 이용하여 다짐된 성토지반에서 드론 원격정보를 이용한 지형의 형상과 중력장을 해석을 통해 균등 다짐도 정도를 분석하였다.

다짐의 목적은 토양공극을 줄이고 밀도와 전단강도를 높이기 위한 시공법으로 형상으로 평탄화를 목적으로 한다. 불균질 다짐으로 지반의 요철이 발생하면 지형요소의 변화가 수반되며 다양한 지형요소 중 곡률은 다짐된 표면이 미세한 변화

를 잘 표현하는 요소로 판단되며 모든 지형요소 중 접선구배곡률은 평탄화된 지반의 변형을 잘 보여주었다. 지반의 형상을 이용하기 위해서는 적합한 해상도가 필요하며 격자의 크기별로 비교에서 최소 30 cm 이내의 지형정보가 필요하고 10 cm 정도의 고해상 지형정보는 육안으로 평탄화된 성토지반의 변화를 효과적으로 보여주었다.

이상적으로 성토 재질이 동일한 경우, 천부 지반의 부게중력이상은 같은 크기를 보여야 하며, 적용 지역에서 국부적인 잔류부게이상을 확인하였다. 중력이상의 차이는 밀도차를 반영하며 이는 곧 불균질 다짐을 의미한다. 또한, 중력이상대의 위치는 곡률의 이상대와 동일한 지점에서 관찰되었다.

사 사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원이 시행하고 한국도로공사가 총괄하는 “스마트건설기술개발 국가R&D 사업(과제번호 20SMIP-A157130-01)”과 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2018R1D1A1B0704909314)의 지원으로 수행되었다.

References

Alvers, M.R., Götze, H.J., Barrio-Alvers, L., Schmidt, S., Lahmeyer, B., Plonka, C., 2014, A novel warped-space concept for interactive 3D-geometry-inversion to improve seismic imaging, First Break, 32(4), 81-87.

Baek, S.H., Kim, J.Y., Cho, J.W., Kim, N.G., Jeong, Y.H., Choi, C.H., 2020, Fundamental study on earthwork quality control based on intelligent compaction technology, Journal of the Korean Geotechnical Society, 36(12), 45-56 (in Korean with English abstract).

Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979, A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, Hydrological Sciences Bulletin, 24, 43-69.

Cho, S.M., 2002, Method for evaluating the degree of compaction of road embankment, Pavement Engineers, 4(4), 41-45 (in Korean).

Cho, S.M., Jung, G., 2000, Development of a new compaction test method based on ground reaction force, Korea Expressway Corporation Research Institute (in Korean with English abstract).

Choi, E.K., Kim, S.W., Cho, J.W., Lee, J.H., 2017, GIS-based subsidence hazard map in urban area, Journal of The Korean Geotechnical Society, 33(10), 5-14 (in Korean with English abstract).

Choi, E.K., Kim, S.W., Lee, Y.C., Lee, K.H., Kim, I.S., 2013, Analyzing the disaster vulnerability of Mt. Baekdusan area using terrain factors, Journal of Korean Earth Science Society, 34(7), 605-614 (in Korean with English abstract).

Choi, S.C, Götze, H.J., Meyer, U., 2011, 3-D density modelling of underground structures and spatial distribution of salt diapirism in the Dead Sea Basin, Geophysical Journal International, 184(3), 1131-1146.

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).

Costa-Cabral, M.C., Burges, S.J., 1994, Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas, Water Resources Research, 30(6), 1681-1692.

Götze, H.J., 1984, Über den Einsatz interaktiver computergraphik im rahmen 3-dimensionaler interpretationstechniken in gravimetrie und magnetik, habilitationsschrift, T. U. Clausthal.

Götze, H.J., Schmidt, S., 2002, Geophysical 3D modeling using GIS-functions, Proceedings of the 8th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, Terra Nostra, 87-92.

Grayson, R.B., Moore, I.D., McMahon, T.A., 1992, Physically based hydrologic modeling: 1. A terrain-based model for investigative purposes, Water Resources Research, 28(10), 2639-2658.

KICT (Korea Institute of Construction Technology), 2009, Intelligent compaction management system using telematics.

Lee, J.H., Kim, S.H., Ryu, S.H., Koo, H.B., Kim, S.W., 2012, Case study on the hazard susceptibility prediction of debris flows using surface water concentration analysis and the distinct element method, The Journal of Engineering Geology, 22(3), 283-291 (in Korean with English abstract).

Lee, S.M., Lee, S.S., Yu, S.H., Seo, J.W., 2017, A Study on analysis method for roller compaction work, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 37(3), 621-627 (in Korean with English abstract).

Mitášová, H., Hofierka, J., 1993, Interpolation by regularized spline with tension: Ⅱ. Application to terrain modeling and surface geometry analysis, Mathematical Geology, 25, 657-669.

Nagy, D., 1966, The prism method for terrain corrections using digital computers, Pure and Applied Geophysics, 63, 31-39.

O'Loughlin, E.M., 1986, Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis, Water Resources Research, 22(5), 794-804.

Park, K.B., Kim, J.H., 2011, Development of an intelligent compaction evaluation method based on statistics analysis, Journal of the Korean Geotechnical Society, 27(8), 5-16 (in Korean with English abstract).

Park, K.B., Kim, J.H., 2012, Application of the new degree of compaction evaluation method, Journal of the Korean Geotechnical Society, 28(2), 5-14 (in Korean with English abstract).

Park, K.B., Kim, J.H., Cho, S.D., 2010, Study of the intelligent compaction evaluation, Proceedings of the Korean Geotechical Society Conference, 722-729 (in Korean with English abstract).

Schmidt, S., Götze, H.J., 1998, Interactive visualization and modification of 3D-models using GIS-functions, Physics and Chemistry of the Earth, 23(3), 289-295.

Schmidt, S., Götze, H.J., 2003, Pre-interpretation of potential fields by the aid of curvature attributes, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, 6-11 April 2003, 7689.

Schmidt, S., Götze, H.J., Fichler, C., Alvers, M.M., 2010, IGMAS+ a new 3D gravity and magnetic modeling software, In: Zipf, A., Behncke, K., Hillen, F., Schefermeyer, J. (Eds.), Die Welt im Netz, Osnabrück: Akademiesche Verlags-gesellschaft, AKA GmbH, 57-63.

Schmidt, S., Götze, H.J., Siehl, A., Tasárová, Z., 2004, 3D gravity and magnetic modelling and integration of constraints using open GIS: the IGMAS software package, Proceedings of the ASEG 17th Geophysical Conference and Exhibition, Sydney.