



<Technical Report>

지하 굴착 후 개별탐사(GPR, MASW, 전기비저항) 결과의 복합연산에 의한 지반이완영역 해석 연구

노영화[‡] · 이석환
 주식회사 지오스캔

요 약

대규모 지하 굴착을 모사한 연구지역에서 지하 굴착 전과 지하 굴착(규모 10 m×10 m×8.6 m) 후에 동일한 조건하에서 GPR탐사, MASW탐사, 전기비저항탐사를 각각 실시하였다. 대규모 지하 굴착공사 시 지반 안전에 영향을 미치는 요소들 즉, 지하수위, 지하공동, 지반연약대, 지반이완대 등에 대한 최종 의견 결정시 신뢰도를 높이고 각 탐사결과 해석의 불확실성을 최소화하기 위한 복합해석 기법을 개발하였다. 개별탐사에 의해 획득된 자료를 각각 후처리하고 이들 결과를 복합해석(Geophysical Combined Analyzer) 소프트웨어에 적용하여 복합연산 함으로써 지하 굴착 전과 후 지반이완영역을 비교하였다. 개별탐사들의 자료처리 데이터는 균등한 간격의 그리드 형식으로 변환하고 고해상도 이미지를 위해 셀 크기는 모두 0.1 m×0.1 m로 조정하였다. 각 셀에는 각 개별탐사 고유의 지반물성값이 포함되어 있지만 복합연산을 위해 무차원상수로 가정하여 복합연산식에 적용함으로써 지하 굴착 전과 후의 복합연산 단면도를 획득하였다. 그 결과 지하 굴착을 실시한 구간에서 복합연산한 수치가 낮게 나타났으며, 상대적으로 낮은 수치의 영역이 지하 굴착 전에 비해 더 깊은 심도로 확대되었다. 지하 굴착 후 단면도에서 수치가 낮게 연산된 영역은 주변 지반의 응력이 재분배되고 토층의 강도가 약해져 지반이완영역이 형성되었을 것으로 판단된다. 그러나 낮은 수치의 영역에는 탐사환경 및 굴착구간의 잡음을 포함하고 있으므로 이들 영향을 제거하고 지반이완영역만을 정량적으로 평가할 수 있는 연구가 더 진행될 계획이다.

주요어: 지반이완대, GRP탐사, MASW탐사, 전기비저항탐사

Young-Hwa No and Seok-Hwan Lee, 2019, Analysis of ground relaxation zone by combining various near-surface geophysical data (GPR, MASW, Electrical resistivity) after underground excavation. Journal of the Geological Society of Korea. v. 55, no. 4, p. 481-491

ABSTRACT: Ground penetrating radar (GPR), Multi-channel analysis of surface wave (MASW), and electrical resistivity survey methods were conducted under the same exploration conditions before and after underground excavation (excavated scale; 10 m×10 m×8.6 m). In order to increase the reliability of the final decision on the factors affecting the ground safety during a large underground excavation (i.e. groundwater-level drawdown, underground cavern, weakness zone, and relaxation zone), a combined analysis was developed to minimize the uncertainty of interpretation of the survey results. Each data produced by individual exploration were post-processed and then applied to a Geophysical Combined Analyzer software developed in this report, to compare the temporal change of underground relaxation zone before and after excavation. The processed data of each survey was converted into a uniformly spaced grid, and the cell size was adjusted to 0.1 m×0.1 m for producing high-resolution images. The geophysical parameters by each individual geophysical survey are stored in each cell. To enable complex operation in the Geophysical Combined Analyzer, we assumed that they are non-dimensional constants. The results show that the post-excavation image has the low value areas extended much deeper than the pre-excavation image. It may indicate that the redistributed ground stress by underground excavation results in weakening the strength of the soil layer, which forms the ground relaxation area. However, because identifying such relaxation area can be affected by noise of the exploration environment and the excavation section, further studies will be conducted to quantitatively evaluate the underground relaxation zone.

Key words: Underground relaxation zone, GPR (Ground Penetrating Radar), MASW (Multi-channel Analysis of Surface Wave), Electrical resistivity survey

(Young-hwa No and Seok-Hwan Lee, Geoscan Inc., Seoul 04388, Republic of Korea)

[‡] Corresponding author: +82-2-795-6325, E-mail: 2000geo@naver.com

1. 서 론

도심지에서 대규모 구조물 건설에 따른 심도 10 m 이상의 터파기 공사는 흙막이벽의 변형에 따른 배면 흙의 이동, 토사의 유출에 따른 흙의 이동, 그리고 배수에 따른 지하수위 저하로 압밀·압축현상에 의해 지반이완영역이 발생할 수 있다(Oh *et al.*, 2015). 이러한 지반이완영역의 지속적인 확산은 잠재적으로 지반침하 및 지반함몰의 위험성을 내포하고 있으므로 터파기 공사 전과 후에 시추조사와 물리탐사가 수행되어야 한다. 일반적으로 대규모 지하 굴착 시 조사지역의 지반상태에 대한 광범위한 조사를 위해서 비파괴 검사법인 물리탐사를 수행하고 있으며, 높은 해상도로 연속적인 지반의 물성을 측정하는 GPR (Ground Penetrating Radar) 탐사, 표면파탐사, 전기비저항탐사 등이 주로 활용되고 있다.

심도 10 m 이상의 지반 상태를 파악하기 위해서는 천부 지층 및 매설물조사에 적합한 GPR 탐사와 미고결 퇴적층 및 기반암 심도 확인에 적합한 표면파탐사만으로는 지반상태를 평가하는 데 한계가 있다. 또한 지반의 전기비저항은 암석·토양의 조성, 파쇄대 및 균열에 따른 간극율, 포화도, 지하수, 풍화 및 변질에 따른 점토광물 함유량 등 여러 가지 요인이 복합적으로 전기비저항에 영향을 주기 때문에 지반이완에 따른 효과만을 분리하여 정량적으로 파악하기는 어렵다. 특히 도심지에 형성된 낮은 심도의 지하수위(지표하 약 2~8 m, 국가지하수정보센터 국가지하수관측망), 천부의 복잡한 매설물 등의 잡음(Noise)으로 인해 전기비저항탐사 결과만으로는 지반상태를 정량적으로 해석하는데 한계가 있다. 그러므로 이러한 한계점을 다른 탐사기술과 보완함으로써 해석 기술을 향상시키는 것이 요구된다.

이 연구에서는 각기 다른 탐사기법으로 획득된 데이터의 정성적인 결과 취합 및 해석을 수행했던 기존 방식을 벗어나 의사 결정시 불확실성을 최소화하고 (Lee *et al.*, 2014; Jeong *et al.*, 2015; Ji and Oh, 2015) 각 탐사 결과를 종합 분석하는 복합탐사 해석 소프트웨어(Geophysical Combined Analyzer)의 개발 결과를 소개하고자 한다. 개발된 초기 버전의 복합탐사 해석 소프트웨어는 도심내 대규모 지하 굴착 지역에서 측정된 물리탐사 자료에 적용하여 지반이완영역 평가의 가능성을 살펴보고자 한다.

2. 연구지역 현황

연구지역은 경기도 이천시 마장면 표교리 595번지에 위치하고 있다. 지하 굴착 전 총 3공을 시추한 결과 본 연구지역의 지층 분포는 지표하 심도 약 5.0 m까지 점토질모래로 구성된 충적층이 분포하고 있고 그 하부 약 5.0~10.0 m 구간은 실트질모래로 이루어진 풍화토층, 심도 약 10.0~18.0 m 구간은 풍화암층으로 이루어져 있음을 확인하였다(그림 1).

지하 굴착공사를 모사하기 위해 본 연구지역에서는 10 m×10 m 규모의 터파기를 심도 1.5 m (2017.12.28.), 심도 4.5 m (2018.1.6.), 심도 6.5 m (2018.1.18.), 심도 8.6 m (2018.3.28.)로 점진적으로 증가시키며 실시하였다. 이에 따라 터파기 전 지하수위가 지표하 심도 2.44 m에서 터파기 완료시점에는 심도 6.89 m로 하강하였다가 시간이 경과함에 따라 수위가 회복되었다(Kim *et al.*, 2013). 지하 굴착 완료 후에는 PHC말뚝 근입을 통한 흙막이 벽체가 완성되었고 피장(Wale)과 스트럿(Strut)으로 구성된 흙막이시설(Han, 2018)이 설치되었다. 이에 따라 지하 굴착 후 현장탐사는 흙막이시설이 설치된 상태에서 수행하였다.

3. 개별탐사 방법

지하 굴착을 실시하기 전 심도 10 m 이내의 지반 상태를 조사하기 위해 GPR (Ground Penetrating Radar) 탐사, MASW (Multi-Channel Analysis of Surface Wave) 탐사, 전기비저항탐사를 수행하였으며, 탐사별 측선은 모두 동일 위치선 상에 설정함으로써 각 탐사 결과를 비교하는데 용이하도록 하였다. 지하 굴착 후의 물리탐사는 심도 8.6 m 터파기 완료 후 170일이 경과한 시점에 동일한 탐사를 동일 조건하에 수행하였다.

GPR 탐사는 MALA ProEx를 사용하였으며, 주파수 대역은 가탐심도를 증대시키고 해상도를 고려하여 중심주파수가 100 MHz인 안테나를 사용하였다. 탐사 측선은 총 48 m, 측정간 간격은 0.02 m로 설정하였으며, 자료 취득 후 MALA GroundVision을 이용하여 데이터 처리를 하였다. GPR 탐사에서 가장 영향을 미치는 지반요소는 유전상수와 전기전도도이며, 전자기파의 감쇠는 전기전도도에 비례해서 더 증가 (NRICH, 2006; Kim and Son, 2009; Seger and

Nashait, 2011)하프론 본 연구에서는 지하수위 분포 조사에 이 특성을 활용하였다(Doolittle *et al.*, 2005; Salih, 2007; Igel *et al.*, 2012; Hengari *et al.*, 2017).

MASW탐사는 Geode장비로 지오폰 4.5 Hz, 송신기는 sledge hammer를 사용하였다. 소스오프셋은 10 m, 지오폰간 거리는 1 m로 하여 총 12채널의

(a)



(b)

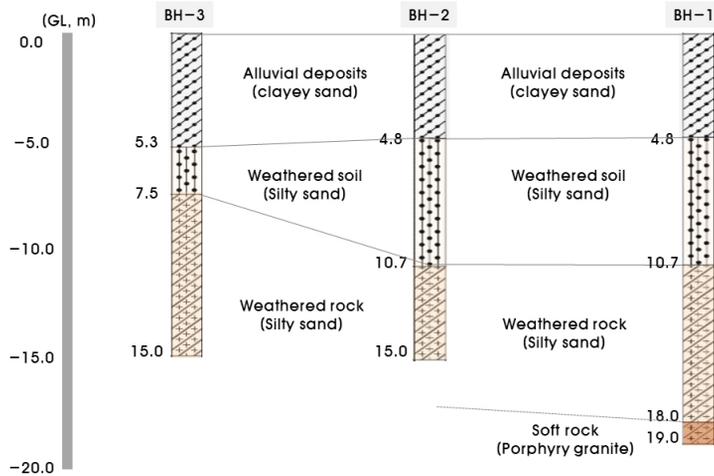


Fig. 1. Simplified near-surface geology of the study area.

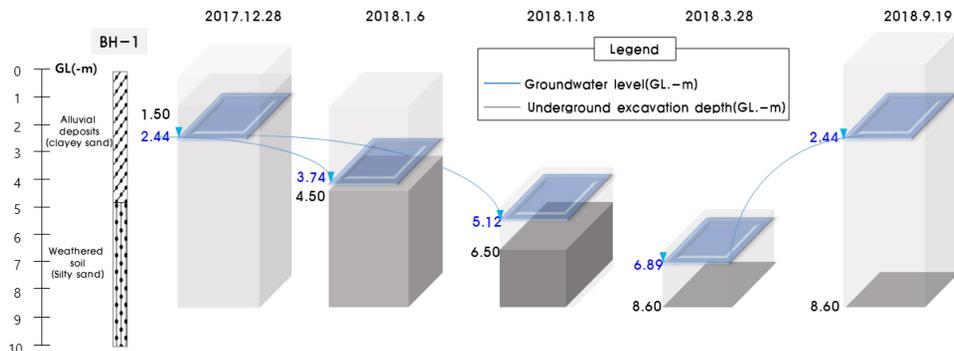


Fig. 2. Groundwater level changes at BH-1 during underground excavation.

스트리머를 배치하였고 자료처리는 ParkSEIS를 이용하였다. 이 연구에 적용된 MASW탐사는 다중수신기를 이용하여 탄성파의 전파를 측정하므로 지반매질을 통하여 전파되는 탄성파 파동이 그 측정되는 위치에 따라 다양하고 풍부한 지반구조 및 지하매질의 특성을 포함한다(Jeong *et al.*, 2009).

전기비저항탐사는 ABEM Terrameter LS장비를 사용하였으며, 측선은 총 48 m를 설정하여 가탐심도 10 m의 데이터를 획득하기 위해 측정 간격은 1 m로 전극을 설치하여 전위차를 측정하였다. 전극배열법은 쌍극자-쌍극자배열법을 적용하였으며, 자료처리는 DIPRO for Windows를 활용하였다.

4. 개별탐사 결과

4.1 GPR탐사 결과

GPR 영상에 가장 영향을 미치는 지하매질 중 전

기전도도는 지하수의 존재와 연관성이 높으므로 본 연구에서는 GPR profile을 활용하여 지하수위 분포 조사(Yang *et al.*, 2006)에 활용하였다. GPR탐사에 의해 획득된 자료는 영점조정(adjusted zero time), DC 필터링, 속도스펙트럼 분석, 그리고 GPR 이미지의 게인 조정(automatic gain control)을 통하여 데이터를 처리하였다. GPR profile과 트레이스(trace window)의 속도분석을 통해 지하수위 분포 심도로 가정하였다. 단, 모관현상에 의한 영향으로 추정된 지하수위는 정확한 수치는 아니며(Salih, 2007), 개략적인 지하수위를 모사하는데 활용하였다.

지하 굴착 전 측정된 자료에서 각 지점별 트레이스를 모두 확인한 결과 심도 2.5~2.8 m 구간(그림 3a의 파랑색 점선)에서 지하수위가 변동하는 것으로 관찰되었다. 본 지하수위 심도를 검증하기 위해 연구지역에 개발되어 있는 시추공을 활용하여 지하수위를 확인한 결과 GPR탐사에 의해 추정된 지하수위 분포 심

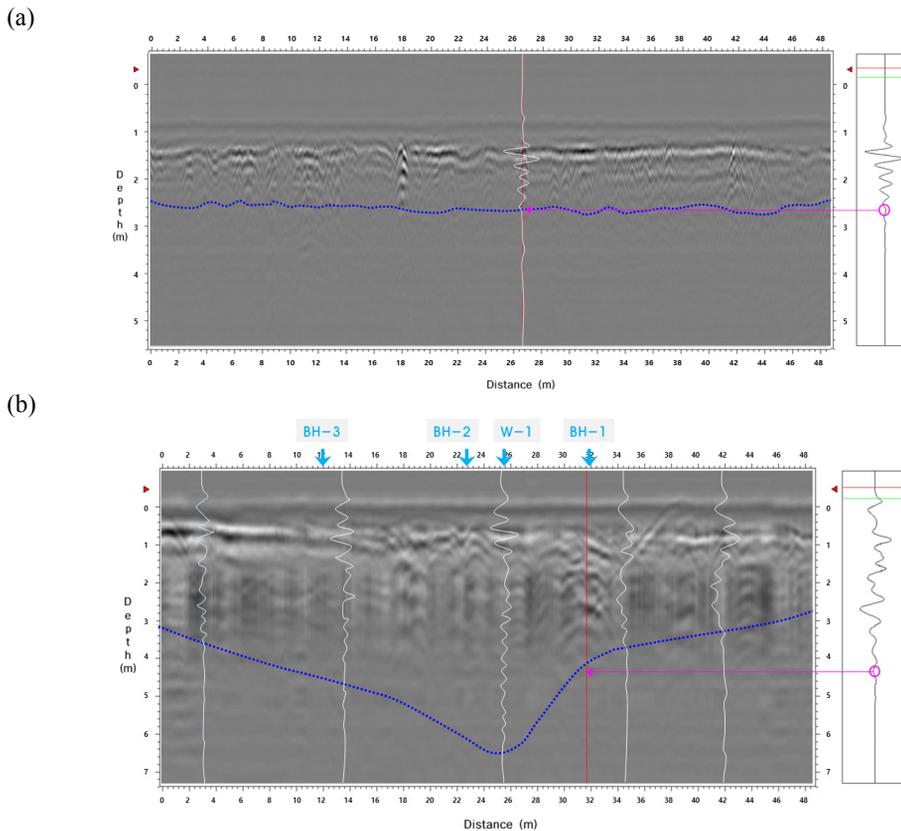


Fig. 3. Comparison of GPR radargrams (a) before and (b) after excavation profile (White line: Trace, Blue dotted line: water table).

도와 유사하였다.

지하 굴착 후 지하수위 변화를 관측하기 위해 관측공 2개소(그림 1)에 2017년 12월 20일부터 지하수위계를 설치하여 1시간 간격으로 관측데이터를 수집하였다. GPR탐사는 심도 8.6 m의 지하 굴착 완료 후 170일이 경과한 후 동일한 측선에서 수행되었다. 자료처리 후 트레이스의 속도분석을 통해 그림 3b의 파랑색 점선과 같이 지하수위 분포를 추정할 수 있었다. 지하수위 분포를 검증하기 위해 자동 지하수위계를 설치한 관측공(그림 1의 BH-1, W-1)에서 수집한 자료와 GPR탐사 당일 수동 지하수위계를 통해 BH-2, BH-3에서 지하수위를 측정하였다. 그 결과 W-1은 지표하 심도 6.8 m, BH-1은 4.0 m, BH-2는 약 6.0 m, BH-3은 4.2 m로 측정되었다. W-1은 굴착 구간의 중간지점에 위치하고 있어 이를 중심으로 원추형으로 하강하는 양상을 보였으며, 이는 관측공의 데이터 수가 충분하지 않지만 GPR탐사에 의해 추정된 지하수위 분포와 대략적으로 유사한 경향을 보였다.

4.2 MASW탐사 결과

MASW탐사는 다중채널분석기법에 의한 표면파 탐사로서 천부지반이나 토사부 및 미고결 퇴적층의 지층탐사에 효율적이다. 표토층이나 퇴적층 등 풍화대 상부층은 암반층에 비하여 주변 지반굴착으로 인해 토층의 교란과 지하수위 변동에 따른 토사 유실 등이 발생(Kim *et al.*, 2017)할 확률이 높으므로 이에 대한 지층 구분 및 지반의 특성을 파악하는 것은 중요하다.

지하 굴착 전에 측정된 MASW 자료는 풍화암층이 분포하는 심도까지는 전단파속도가 350 m/sec 이내로 암반층에 비해 낮은 편임을 보여준다. 시추조사 결과와 비교하여 보면 지표하 약 0~5.0 m 구간까지는 퇴적층으로 MASW탐사 결과 전단파속도는 130~165 m/sec로 측정되었다. 심도 약 5.0~10.0 m 구간은 풍화토층(165~270 m/sec)으로 시추조사 결과와 각 지층별 전단파속도가 구분되었다.

지하 굴착 후 MASW탐사 결과 지표하 약 0~5.0

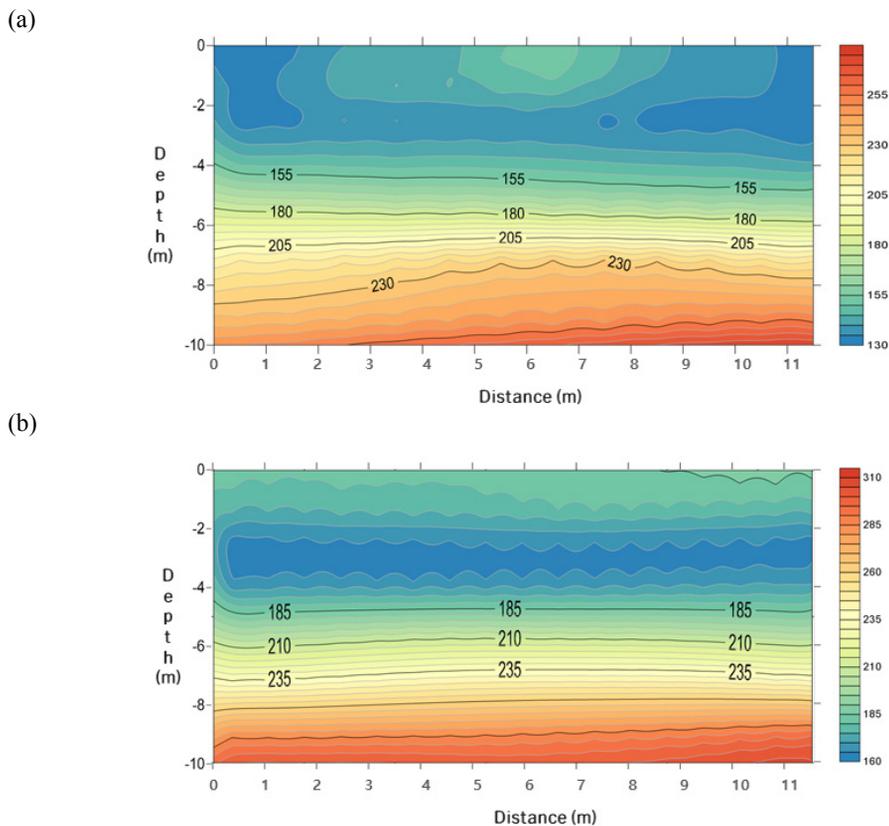


Fig. 4. Comparison of MASW profiles (a) before and (b) after underground excavation.

m 구간까지 전단파속도는 160~190 m/sec로 측정되었으며, 심도 약 5.0~10.0 m 구간은 풍화토층으로 190~305 m/sec로 각 지층별 전단파속도가 구분되었다. 지하 굴착 전과 비교하여 굴착 후에는 지층 전체적으로 전단파속도가 높게 측정되었으며, 이는 굴착 후 다짐작업으로 인해 전단파속도가 약간 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 지하 굴착 후에 실시한 MASW탐사 결과에서 특이할 사항은 터파기를 수행했던 구간의 심도 약 2.5~4.0 m에서 인근 퇴적층에 비해 상대적으로 낮은 전단파속도대가 형성되었다. 이는 MASW탐사를 수행한 총 12 m 구간 중 대부분이 굴착구간에 해당하므로 전체적으로 낮은 전단파속도가 분포한 것으로 판단된다.

4.3 전기비저항탐사 결과

전기비저항탐사는 지하 매질의 전기전도도에 따라 전위차를 측정하여 전기비저항분포를 파악함으로써 지반상태를 평가하는데 효율적이다.

지하 굴착 전 전기비저항탐사에 의한 역산단면도를 살펴보면, 대체적으로 지표하 심도 2.0~4.2 m 구간에서 전기비저항값이 100 ohm-m 이하로 분포하

고 있다. 이는 전기비저항탐사 시 지하수의 영향으로 상부층은 상대적으로 저비저항대를 형성하고 있으며, 이는 실제 시추공에서 측정한 지하수위 심도와 어느 정도 일치하였다(그림 5a의 파랑색 선).

지하 굴착 후 수행한 전기비저항탐사 결과 심도 약 2.0~7.1 m 구간에서 전기비저항값이 100 ohm-m 미만으로 측정되었다. 지하 굴착을 수행했던 지점에서는 굴착 전과 비교하여 낮은 전기비저항 영역이 심도 약 7.0 m까지 확대된 것을 알 수 있다. 자동 및 수동 지하수위계를 이용하여 지하 굴착 후 측정된 지하수위는 BH-2 지점에서 심도 6.0 m, W-1에서는 6.8 m, BH-1는 4.0 m로 측정되었다. 이는 분석된 전기비저항 영역과 비교해 보면 대체적으로 양상은 유사한 것으로 판단된다.

지하 굴착을 실시한 구간에서 저비저항대가 형성된 것으로 보아 지하 굴착에 의해 지하수위 하강과 주변 지반의 느슨한 영역이 확대되었기 때문에 판단된다. 하지만 낮은 전기비저항영역은 탐사 환경조건, 굴착영향 등 잡음을 포함하고 있으므로 모두 지반이완영역에 해당되지 않는다. 현재 연구는 지하 굴착 전과 후 데이터 변화의 양상을 파악할 수 있지

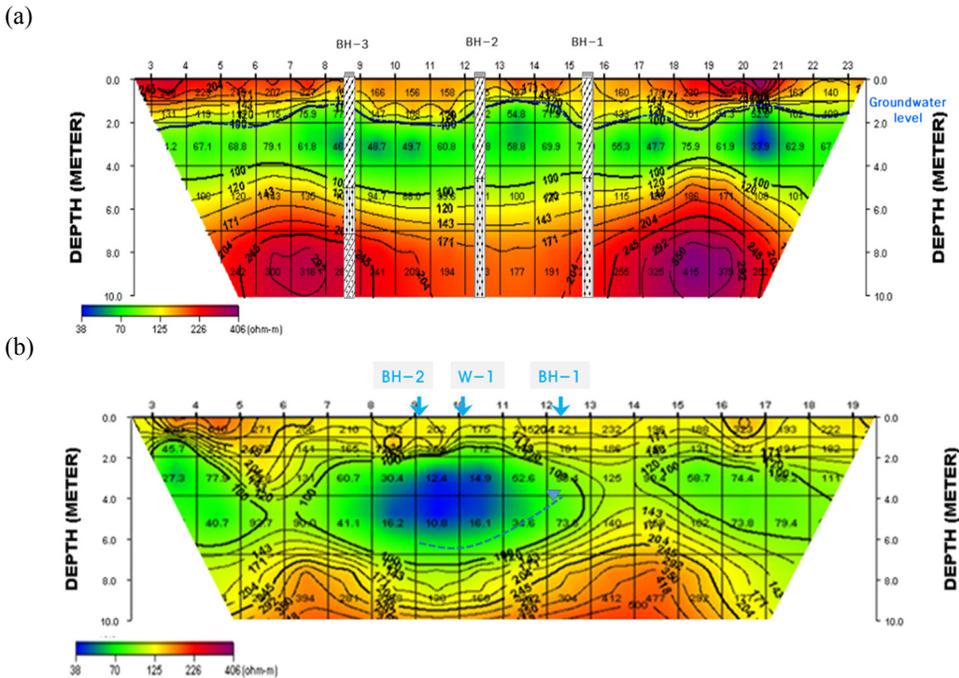


Fig. 5. Comparison of inversion profiles of electrical resistivity survey (a) before and (b) after underground excavation.

만 정확한 지반이완영역의 범위 확인은 불가능하였다. 그러므로 향후 지반이완영역의 정량적인 해석을 위해 연산알고리즘을 활용하는 연구를 진행할 계획이다.

5. 복합해석 소프트웨어에 의한 복합연산

연구지역에서 실시한 개별탐사 결과를 복합해석하기 위해서 본 연구를 통하여 개발된 복합탐사 해석 소프트웨어(Geophysical Combined Analyzer, 이하 Combined Analyzer)를 활용하였다. Combined Analyzer는 C#언어로 개발된 윈도우, 닷넷(.NET) 응용프로그램으로서 그리드 파일형식으로 작성된 이중 이상의 탐사 결과를 임의의 수식을 적용하여 복합연산할 수 있는 프로그램이다.

Combined Analyzer의 데이터 입력은 2차원의 floating point 배열에 해당하는 Grid 파일 형식으로 가능하며, 해석단면도는 2차원 이미지로 시각화하였다. Combined Analyzer에서 해석단면도의 시각화한 작업 화면은 그림 6에 도시한 바와 같이 Works Tree Window에서 트리구조 및 리스트구조로 데이터 항목을 확인할 수 있다.

복합연산은 서로 다른 지반 물성이 주어진 지하

구조에 대하여 구조적으로 유사한 분포를 가진다는 점을 가정하고 구조적 유사성을 수치적으로 정량화하는 방법에 해당한다(Ko et al., 2017). 자체 제작한 Combined Analyzer에 의한 복합연산을 위해서는 다음의 전제조건 및 자료 후처리(post-processing)가 필요하였다.

첫째, 각각의 GPR, MASW, 전기비저항탐사 분석값은 모두 무차원상수로 가정하였다. GPR탐사에 의한 전자기장(Electromagnetic field), MASW탐사에 의한 전단파속도(V_s , m/sec), 그리고 전기비저항탐사에 의한 전기비저항값(ohm-m)이므로 각 탐사에서 획득한 데이터는 Combined Analyzer라는 도구(tool)를 통해 복합연산을 수행하기 위해서 모두 무차원상수로 통일하였다.

둘째, 복합연산을 위한 각각의 탐사 결과 데이터는 동일한 수의 행(row)과 열(column)로 작성하고 균등한 간격의 그리드로 변환하였다. 현장탐사에 의한 GPR, MASW, 전기비저항탐사 결과 데이터는 무작위로 간격을 둔 파일이므로 균등한 간격의 격자구조로 변환하여야 한다. 이를 위해 GPR탐사에 의한 지하수위 정보를 Data 파일로 정리하고 MASW탐사와 전기비저항탐사 자료처리 결과는 ASCII 및 Data 파일로 출력하여 Surfer 13에서 동일 격자구조로 변

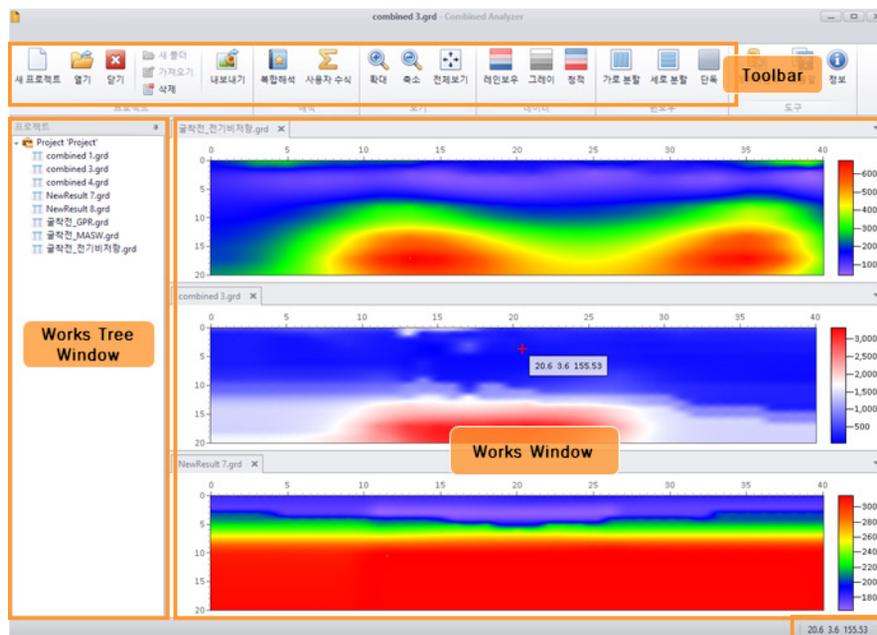


Fig. 6. Frame work of Combined Analyzer.

환하였다. 그리딩 방법(Gridding method)은 보간법(Interpolation) 중 주위 값들을 선형조합으로 관심 있는 지점의 값을 예측하는 크리깅(Krigging)(Lee *et al.*, 2016)을 적용하였다. 각 데이터 후처리 시 개별탐사 결과의 수평적 거리는 총 40 m, 심도는 10 m 연산이 가능하도록 하였다.

6. 복합해석 결과

각 개별탐사 결과를 복합연산하기 위해 GPR탐사에 의한 지하수위 정보를 데이터화 하였으며, 복합연산 시 불확실한 가중치가 적용되는 것을 배제하기 위해 MASW 및 전기비저항탐사 데이터의 범위를 고려하여 50~400 범위내의 무차원상수로 작성하였다. 이들 후처리(post processing)된 데이터 파일을 고해상도 이미지로 출력하기 위해 크리깅에 의한 격자(cell) 크기는 모두 0.1 m×0.1 m로 조정하였다.

복합연산은 Combined Analyzer에서 3종류의 개

별탐사 결과들을 최종적으로 평균값에 유사하도록 제곱평균제곱근(Root Means Square) $\sqrt{\frac{A^2+B^2+C^2}{3}}$ 을 적용하였다(여기서, GPR; Input File (A), MASW; Input File (B), 전기비저항; Input File (C)).

복합연산 결과 단면 이미지에는 GPR탐사 자료처리 결과 해석에 의한 지하수위 정보, MASW탐사에 의한 풍화대층 상부의 지층 정보 및 기반암 심도 정보, 전기비저항탐사에 의한 지반상태 및 지반구조 등의 정보들이 복합연산식을 통해 새로운 정량적인 데이터로 재 작성되었다. 그리고 복합해석을 통하여 GPR 탐사의 낮은 가탐심도 한계를 극복하고 MASW탐사에 의한 지반 강성(Bae *et al.*, 2018) 정보를 반영, 전기비저항탐사의 천부 지하수위에 의한 노이즈를 감소시킴으로써 심부의 지반상태 해석이 가능하도록 노력하였다.

지하 굴착 전과 후의 복합연산 단면도를 비교하여 보면 지하 굴착 후에는 터파기를 실시한 구간(그림 8

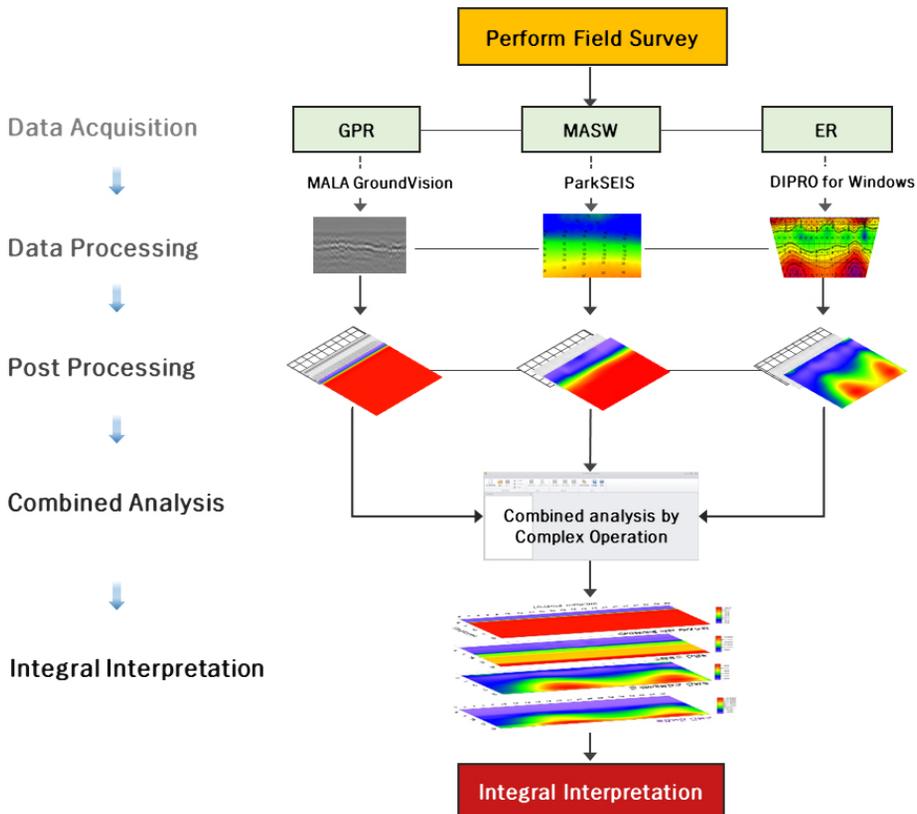


Fig. 7. Flow chart of combined analysis.

의 파랑색 사각형)에서 상대적으로 낮은 수치의 영역이 지하 굴착 전에 비해 더 깊은 심도로 확대되었다. 이는 지하 굴착으로 인해 주변 지반의 응력이 재분배되면서 토층이 느슨한 상태로 변했을 것으로 판단된다. 이렇게 낮은 수치를 보이는 영역 모두 지반이완영역에 해당되지 않으며, 실질적인 지반이완영역에 대한 정량적인 확인은 연산알고리즘을 활용하는 연구를 진행할 계획이다.

7. 토의 및 결론

본 연구는 지하 굴착공사에 의한 지반상태의 변화를 정량적으로 확인하고자 지하 굴착 전과 후에 3종류의 물리탐사를 수행하였다. 이들 개별탐사 결과 해석의 불확실성을 최소화하고 대규모 지하 굴착시 지반 안전에 영향을 미치는 요소들(지하수위, 지하공동, 지반연약대, 지반이완대 등)에 대한 최종 의견 결정시 신뢰도를 높이고자 복합해석 방법을 적용하였다. 그동안 이중 이상의 개별탐사 복합해석에 대해서는 다양한 연구들이 수행되어 왔으나 각 탐사방

법에 따라 획득된 물성이 다르고 자료 처리에 따른 데이터 취득 형태도 다양하므로 이들을 복합연산하는 것은 쉽지 않다.

연구를 위해 지하 굴착 전과 후에 GPR탐사, MASW탐사, 전기비저항탐사를 수행하여 이들 결과를 그리드 형식으로 변환하여 자체 제작한 해석 소프트웨어(Combined Analyzer)에서 복합연산 함으로써 복합해석을 시도하였다. 또한 지하 굴착 전과 후의 복합연산 결과를 비교함으로써 지하 굴착에 의한 정량적인 지반이완영역 확인의 가능성을 평가하고자 하였다.

각 개별탐사 결과를 복합연산한 결과 단면상에는 GPR탐사에 의한 지하수위 정보, MASW에 의한 풍화대 상부층 및 기반암 심도 정보, 전기비저항탐사에 의한 지반 상태 정보 등이 복합연산식을 통해 정량적 데이터를 생성하였다.

지하 굴착 전과 후에 산출된 수치 변화를 비교하면 굴착 후에는 터파기를 실시한 구간에서 상대적으로 낮은 수치의 영역이 굴착 전에 비해 더 깊은 심도로 확대되었다. 굴착 후 단면도에서 복합연산 수치가 낮게 계산된 영역은 굴착에 의해 주변 지반의 응

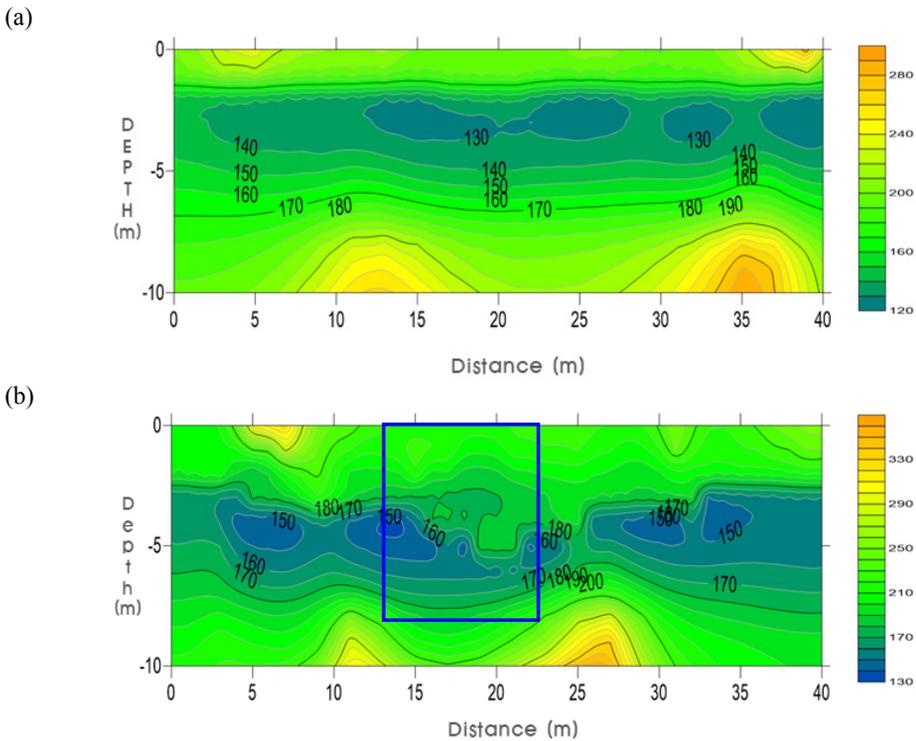


Fig. 8. Comparison of integrated analysis (a) before and (b) after excavation.

력이 재분배되고 토층의 강도가 약해졌을 것으로 판단된다. 그러나 이 영역은 물리탐사 환경 잡음(Noise)과 굴착구간에 의한 영향, 흙막이시설의 잡음 등이 포함되어 있으므로 낮은 수치 영역 모두 지반이완영역이라고 해석할 수는 없다. 그러므로 지하 굴착효과에 의한 잡음을 배제하고 신호(signal) 데이터만을 획득하여 지반이완영역의 정확한 경계면을 해석하거나 정량화할 수 있도록 연산알고리즘을 적용하여 복합해석 하는 연구가 요구된다. 향후 연구를 보완하고 정량적인 지반이완영역에 대한 해석이 가능하면 지하 굴착 시 굴착 심도 및 경과 시간에 따른 지반이완영역 확대를 모니터링 함으로써 지반침하를 예측하는데 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 건설기술연구사업(과제번호 19SCIP-B108153-05)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bae, H.S., Lee, Y.D. and Won, K.S., 2018, A validation study on the reinforcement effect of reservoir grouting by surface wave survey. *Journal of the Engineering Geology*, 28, 297-312 (in Korean with English abstract).
- Doolittle, J.A., Jenkinson, B., Hopkins, D., Ulmer, M. and Tuttle, W., 2006, Hydropedological investigations with ground-penetrating radar (GPR): Estimating water-table depths and local ground-water flow pattern in areas of coarse-textured soils. *The Global Journal of Soil Science*, 131, 317-329.
- Han, Y.S., 2018, Numerical Analysis and Exploring of Ground Condition during Groundwater Drawdown Environment in Open-cut Type Excavation. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 34, 93-105 (in Korean with English abstract).
- Hengari, G.M., Gall, C.R., Kozusko, T.J. and Bostater, C.R., 2017, Use of Ground Penetrating Radar for determination of water table depth and subsurface soil characteristics at Kennedy space center. *Proc. of SPIE 8893, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Application IV*, 889318.
- Igel, J., Gunther, T. and Kuntzer, M., 2013, Ground-penetrating radar insight into a coastal aquifer: the freshwater lens of Borkum Island. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 519-531.
- Jeong, J.S., Park, J.B., Im, H.S., Park, K. Y. and Oh, W.G., 2009, Measurement and application of shear wave velocity for reasonable soil classification in seismic design. *Land & Housing Institute*, 59-71 (in Korean).
- Jeong, S.C., Seol, S.J. and Byun, J.M., 2015, Effective estimation of porosity and fluid saturation using joint inversion result of seismic and electromagnetic data. *Journal of the Geophysics and Geophysical Exploration*, 18, 54-63 (in Korean with English abstract).
- Ji, Y.S. and Oh, S.H., 2015, Integrated analysis of electrical resistivity monitoring and geotechnical data for soft ground. *The Korean Earth Science Society*, 36, 16-26 (in Korean with English abstract).
- Kim, G.B., Shin, K.H., Cha, E.J., Jeong, S.J. and Hwang, J.Y., 2013, Changes in groundwater levels and quality due to a large-scale land excavation at Gimpo area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 565-577 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.H. and Son, H.W., 2009, Geophysical survey report around Manjanggal, Jeju Special Self-Governing Province. *PAICHAJ university Industrial-Academic Cooperation Group*, 11-25 p (in Korean).
- Kim, Y.G., Kim, H.Y., Kim, Y.S., You, S.K. and Han, J.G., 2017, Experimental Study for Confirmation of Relaxation Zone in the Underground Cavity Expansion. *Journal of Geosynthetics Society*, 16, 231-240 (in Korean with English abstract).
- Ko, G.B., Lee, M.J., Choi, S.G., Jeong, M.Y. and Jeong, J.J., 2017, Exploration technology for securing iron oxide-based composite metal light and development of iron ore beneficiation process technology for steelworks. *Ministry of Trade Industry and Energy, Sejong-si*, 76-81 p (in Korean).
- Lee, H.S., Oh, S.H., Chung, H.J., Noh, M.G., Ji, Y.S., Ahn, T.G., Song, S.H. and Yong, H.H., 2014, Application of DC Resistivity Survey from Upper Portion of Concrete and Geostatistical Integrated Analysis. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 35, 29-40 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.H., Yu, S.C., Ahn, J.W. and Shin, D.B., 2016, A Study on Analysis of the Social Vulnerable Areas Using GIS Spatial Analysis: Focusing on Local Governments in Seoul Metropolis. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, 4, 47-58 (in Korean with English abstract).
- National Research Institute of Cultural Heritage (NRICH), 2006, Excavation and Prospection. 14-32 p (in Korean).
- Oh, D.W., Kong, S.M., Lee, D.Y., Yoo, Y.S. and Lee, Y.J.,

- 2015, Effects of Reinforced Pseudo-Plastic Backfill on the Behavior of Ground around Cavity Developed due to Sewer Leakage. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 16, 13-22 (in Korean with English abstract).
- Salih, S.A., 2007, Application of Ground Penetrating Radar (GPR) in Detection of Behavior of Groundwater Table Near Pumping Well. *Tikrit Journal of Pure Science*, 12, 1-13.
- Seger, M.A. and Nashait, A.F., 2011, Detection of water-table by using Ground Penetration Radar (GPR). *Engineering and Technology Journal*, 29, 554-566.
- Yang, C.H., Tong, L.T. and Yu, C.Y., 2006, Integrating GPR and RIP methods for water surface detection of geological structures. *Journal of the Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 17, 391-404.
-
- Received : March 6, 2019
Revised : May 2, 2019
Accepted : July 10, 2019