

## 역해석 알고리즘을 이용한 변위예측 기법에 관한 연구

박현정\*

### A Study on the Displacement Prediction Method using the Inverse Analysis Algorithm

Hyun-Jung Park\*

Division of Architecture, Silla University, Busan 617-736, Korea

#### 요 약

본 연구에서는 지하굴착공사에서 굴착단계별 변위형상도를 미리 예측하는 기법에 관하여 역해석 알고리즘을 이용하여 현장시공사례에 적용하고 그 타당성을 검증하고자 한다. 이를 위해 IT 분야의 정보 처리 지식이 필요하고 전공융합의 필요성이 대두되어 건설 분야에 알고리즘의 적용을 시도하고자 한다. 본 연구의 기법에서 예측변위형상도는 굴착시공 시 연속벽체에 작용하는 토압과 연관이 있으며 이는 앵커 제거 후 시공하는 연속벽체의 안정성에 영향을 미치기 때문에 굴착단계별 변위형상도를 미리 예측하는 것은 아주 중요한 문제이다. 본 연구에서는 이를 위해 3곳의 지하연속벽을 사용한 현장에 반복적 역해석 알고리즘 기법을 세 단계로 적용하여 최종굴착 시 예측변위와 비교하였다. 그 결과 예측치와의 변위형상도가 잘 일치하고 있어 본 연구의 해석기법에 대한 타당성이 있음을 알 수 있었다.

#### ABSTRACT

In this study, we applied the inverse analysis algorithm to the prediction of displacement shape in the example construction and verified the feasibility of suggested algorithm. For this purpose, as information processing knowledge in the field of IT is required and the need for convergence with the major is emerged, it is intended to try to apply the algorithm to the construction sector. Prediction of displacement shape is very important since it is related to the earth pressure of slurry wall and effecting on the safety of slurry wall after anchor removal. 3 levels of inverse analysis were applied to the slurry walls in 3 sites and compared the measured displacement shape with predicted displacement shape of the last excavation construction. As the predicted displacement shape was matched well with the measured one, the applied analysis algorithm in this study can be applied to the excavation construction.

**키워드** : 역해석 알고리즘, 정보처리지식, 변위형상도, 굴착시공, 변위예측

**Key word** : Inverse analysis algorithm, Information processing knowledge, Shape of displacement, Excavation construction, Displacement prediction

접수일자 : 2014. 03. 11 심사완료일자 : 2014. 03. 19 게재확정일자 : 2014. 04. 01

\* **Corresponding Author** Hyun-Jung Park(E-mail:phj@silla.ac.kr, Tel:+82-51-999-5724)

Division of Architecture, Silla University, Busan 617-736, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.4.920>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

지하공간 활용을 위한 고층 건물의 저심도 지하굴착 시공 시 흠막이 공법으로 지하연속벽이 많이 사용되고 있다. 지하연속벽은 다른 흠막이 공법에 비하여 강성이 우수하고 배면에 침하의 영향을 최소화 할 수 있다는 장점 때문에 공사비가 고가임에도 불구하고 많이 적용하고 있는 실정이다. 지하연속벽의 시공에 있어 가장 중요한 사항은 굴착단계별 배면의 변위형상도가 최초 설계 시와 얼마만큼의 차이를 보이는가 하는 것인데, 이를 위해 굴착 시공단계별로 심도별 변위계를 설치하여 굴착 단계별 변위를 지속적으로 계측관리한다. 이러한 변위형상도는 굴착시공 시 연속벽체에 작용하는 토압과 연관이 있으며 이는 앵커 제거 후 시공하는 연속벽체의 안정성에 영향을 미치기 때문에 굴착단계별 변위형상도를 미리 예측하는 것 또한 중요한 문제 중의 하나이다. 이를 위해 각각의 시공단계별 굴착을 실시하기 전에 전 단계 굴착에서 계측한 변위형상도를 이용하여 계속적인 시행착오법에 의하여 다음 굴착단계의 토질정수값을 산정한다. 그리고 다음단계의 변위형상도를 예측하고 다음 굴착이후 시공하게 될 벽체의 안정성 검토 및 앵커력 등을 결정하게 된다. 굴착단계별 동일방법으로 반복수행을 할수록 토질정수의 값은 거의 정확한 값에 수렴하게 된다[1]. 이러한 방법을 굴착단계별 역해석 기법이라고 하는데 본 연구에서는 이러한 역해석 기법에 대한 반복 수정 알고리즘을 이용하여 현장사례에 적용하고 그 타당성을 검증하기로 한다. 이를 위해서 정보처리분야의 IT 처리 지식이 필요하고 전공융합의 필요성이 대두되어 건설분야에 알고리즘의 적용을 시도하고자 한다. 그리고 IT분야와 건설기술의 융합을 통하여 첨단화 된 정보화시공 현장관리시스템을 구축하여 설계 및 시공의 최적화를 도모하고자 한다.

## II. 역해석 수행 알고리즘 및 기법

### 2.1. 역해석 수행 알고리즘

지하굴착 시 굴착단계별 역해석을 수행하는 이유는 굴착이전 설계치와 실제 굴착 도중 계측을 통하여 산정해 내는 수정치와의 차이를 통하여 최적설계를 도모하고자 하는 것이다. 본 연구의 알고리즘 수행 시 사용

하는 범용 프로그램은 SUNEX(13th Edition for Ver. w6.10)이며, 이는 단계별 지하굴착에 대한 탄소성해석 프로그램이다. 역해석 수행 알고리즘은 그림 1과 같다 [2,3].

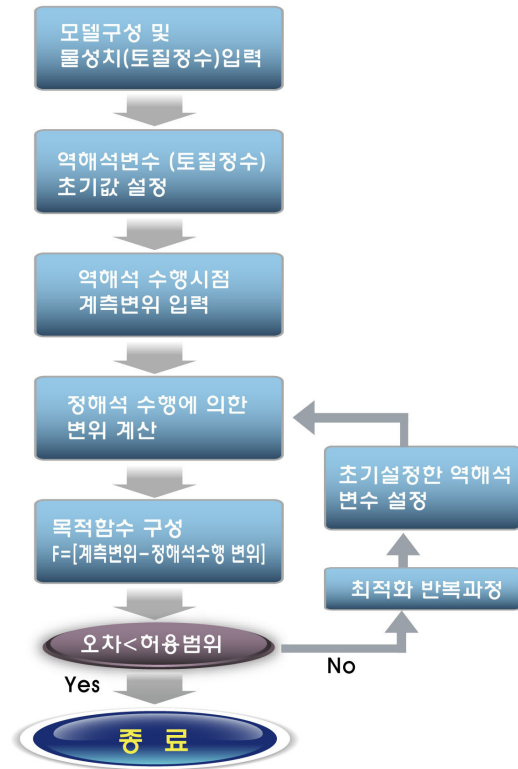


그림 1. 역해석 수행 알고리즘  
Fig. 1 Algorithm of Inverse analysis Method

### 2.2. 역해석 기법의 적용과정

그림 1의 알고리즘을 이용하여 본 연구의 현장사례에 적용하게 될 역해석 기법에 대한 내용을 간단히 정리해 보면 다음과 같다[4].

- ① 범용 프로그램을 활용한 굴착 전 사전설계 (현장 보링 성과치 및 실내 모형실험, 그리고 지층별 자료의 경험치를 통하여 토질정수를 결정)
- ② 단계별 굴착 중 역해석 기법 적용단계 도달
- ③ 적용단계에서 계측치를 통한 변위형상도 출력
- ④ 계측 변위형상도에 맞추어 현장조건 및 계측치와의 변화를 이용한 토질정수의 수정 적용
- ⑤ 토질정수의 수정 반복적용으로 계측치와의 변위 형

- 상도에 근접
- ⑥ 현 굴착 단계에서 토질정수치 결정
- ⑦ 다음 굴착단계에서 변위계측치와 전 단계 역해석에 의한 변위해석치를 비교하여 2단계 역해석 수행
- ⑧ ⑤~⑦의 과정을 반복
- ⑨ 수정된 토질정수치를 이용한 안정성 검토

### III. 현장사례 적용

앞 절에서 제시한 역해석 알고리즘을 이용한 굴착단계별 역해석 기법 적용을 계측과 굴착시공이 완료된 3개의 현장사례에 적용하고 반복적인 역해석 기법의 기본 알고리즘의 타당성을 검증한다.

본 연구는 역해석 알고리즘 적용이 주목적이므로 역해석 수행방법은 논문의 지면관계상 한 굴착지점에서 역해석을 수행하고 최종굴착단계의 계측치와 비교하는 것을 3단계 반복수정 과정을 통하여 나타내고 고찰과 결론 부분에서 역해석 기법의 반복 수정 알고리즘 적용의 타당성을 검증하기로 한다. 모든 현장에서 역해석 적용 시 지하수위의 변동은 현장조건대로 적용하였으며 사용한 범용프로그램은 앞 절에서 소개한 흙막이용 탄소성 해석 프로그램인 SUNEX(Ver. w5.81)를 이용하였다. 수행방법은 세 현장 모두 동일하게 앞 절에서 소개한 역해석 기법의 수행과정을 기본으로 적용하였다 [5,6].

#### 3.1. A 현장

본 현장은 부산광역시 해운대구에 위치한 지하 5층, 지상 28층의 철골철근콘크리트구조의 건설현장이다. 본 지역의 지층 구성은 매립층(약 4m)에 이어 실트질 모래(약 9m), 실트질 점토층(약 17~20m), 모래자갈층 및 연암층이 나타나며, 지하수위는 G.L(-)4.0~(-)7.0m의 범위로 실트질 모래층에 분포하는 것으로 조사되었다. 본 현장의 흙막이공은 지하연속벽(D/W, L=35.5m~37.5m)으로 계획 되었으며, 지하굴착은 Top-Down 방식으로 일부 구간에는 Strut 및 Anchor공이 계획되어 있었다. 최종 굴착심도는 당시 지반고(E.L+4.35m) 기준으로 G.L(-)20.25m~(-)23.22m이다. 본 현장에서 역해석을 수행 적용한 굴착지점은 G.L(-)19.5m이다. 그림 2는 사례현장의 역해석 실시 해당지역 단면도이고, 역

해석 수행을 19.5m 지점 굴착단계에서 하여 최종굴착시 계측치와 3회 반복 비교수행 하였고 최종 조정된 토질정수 값을 구하였다. 당초 설계보고서에 의하면 지하수위는 G.L(-)6.0m에 위치하는 것으로 되어 있었으나, 검토 당시 측정결과에 따라 지하수위는 G.L(-)5.2m에 위치하는 것으로 수정 적용하였다[7].

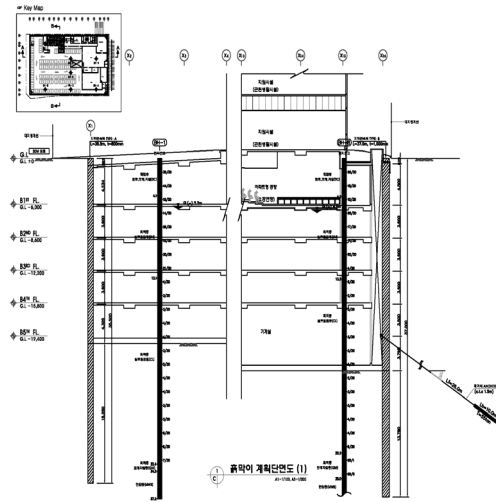


그림 2. A현장 역해석 검토 단면  
Fig. 2 Inverse analysis section of field A

그림 3 ~ 그림 5는 19.5m 굴착지점에서 실시한 역해석에 의해 수정되어 가고 있는 역해석 변위도와 굴착 종료 후 계측 변위형상과의 비교도를 나타낸 것이다.

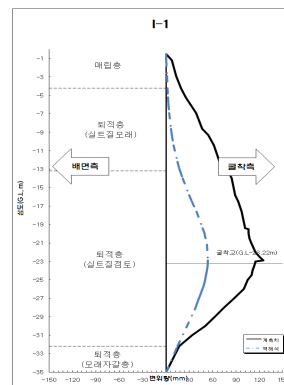


그림 3. 1단계 역해석과 최종굴착 계측변위 비교도  
Fig. 3 Disp. of 1st Inverse analysis & measuring value

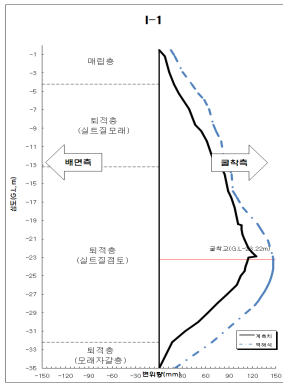


그림 4. 2단계 역해석과 최종굴착 계측변위 비교도  
Fig. 4 Disp. of 2nd Inverse analysis & measuring value

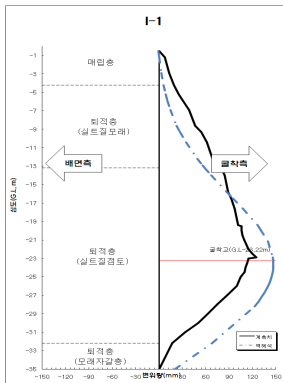


그림 5. 3단계 역해석과 최종굴착 계측변위 비교도  
Fig. 5 Disp. of 3rd Inverse analysis & measuring value

표 1은 3단계 역해석 반복수행에 의해서 구해진 토질 정수의 값을 나타내었다.

표 1. 3단계 반복 역해석기법으로 구해진 토질정수값  
Table. 1 Soil parameter using inverse analysis

구분	c (t/m <sup>2</sup> )			φ (°)			k <sub>h</sub> (t/m <sup>3</sup> )		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
매립층	0	0	0	35	20	25	2332	2332	1200
실트질모래	0	0	0	40	20	25	2075	2075	1400
실트질점토	3.0	2.0	3.3	20	10	7	1213	1213	1213
모래, 자갈층	0	0	0	35	25	35	3383	3383	5000
연암층	5.0	5.0	5.0	40	40	40	3500	3500	12000

표 1에서 c는 점착력을, φ는 흙의 내부마찰각, 그리고 k<sub>h</sub>는 지반 반력계수를 의미한다. 그리고 명암부분으

로 처리한 값이 역해석 수행 시 수정한 값들이며 나머지는 최초설계 시 적용한 토질정수 값들이다. 1,2,3은 반복 역해석 수행 단계를 나타낸다.

### 3.2. B현장

본 현장은 부산광역시에 신축된 철골철근콘크리트 건물로, 지층구조는 상부로부터 5.5m~7.25m의 매립층이 전 구간에 걸쳐 분포하고 그 아래 13.3m~14.45m의 풍화토층, 그리고 40.13m~42.5m의 풍화암층이 나타나며 지하수위는 G.L(-)2.0m~2.6m에 걸쳐 분포한다. 현장조건은 도심지 굴착이며 도로 및 기존 구조물이 인접해 있으므로 지하연속벽 공법을 적용하였다. 역해석 적용방법은 A 현장과 동일하고 역해석 수행굴착 지점은 G.L(-)10.0m이다. 본 현장의 지하수위 변화는 없었다. 그림 6은 역해석 지역 검토단면을 나타내고 있다[7].

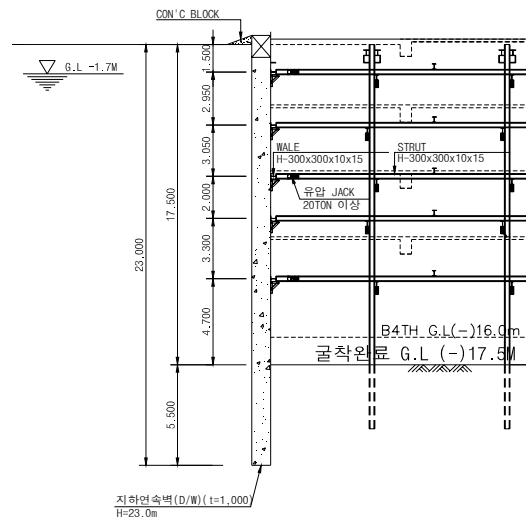


그림 6. B현장 역해석 검토단면  
Fig. 6 Inverse analysis section of field B

그림 7~그림 9는 B현장의 G.L(-)10.0m 굴착지점에서 역해석을 수행하여 최종굴착 시 계측치와 비교에 의해 반복 수정되어 가고 있는 변위형상 비교도를 나타낸 것이다. 그리고 반복수행 후 얻어진 토질정수 값은 표 2에 나타내었다. 표 2의 기호 설명은 앞 절의 표 1과 동일하다.

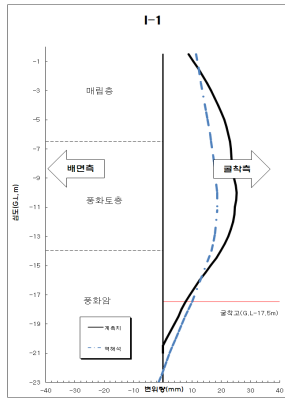


그림 7. 1단계 역해석과 최종굴착 계측변위 비교도  
Fig. 7 Disp. of 1st Inverse analysis & measuring value

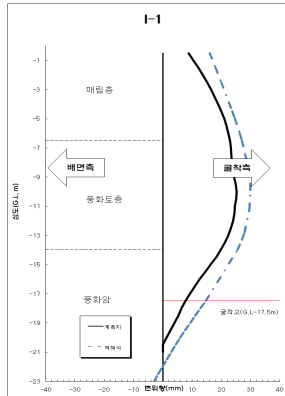


그림 8. 2단계 역해석과 최종굴착 계측변위 비교도  
Fig. 8 Disp. of 2nd Inverse analysis & measuring value

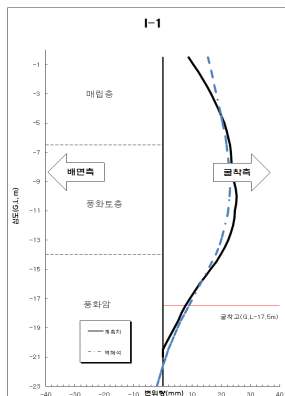


그림 9. 3단계 역해석과 최종굴착 계측변위 비교도  
Fig. 9 Disp. of 3rd Inverse analysis & measuring value

표 2. 3단계 반복 역해석기법으로 구해진 토질정수값  
Table. 2 Soil parameter using inverse analysis

구분	c (t/m <sup>2</sup> )			φ (°)			k <sub>h</sub> (t/m <sup>3</sup> )		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
매립층	1.0	0	0	35	20	25	1500	1500	1800
풍화토	3.0	1.0	1.5	35	25	27	2500	2500	3000
풍화암	4.0	4.0	5.0	35	35	35	4000	4000	8000

### 3.3. C현장

본 현장은 부산광역시에 신축된 지하 5층 지상 24층의 철골철근콘크리트 구조의 오피스텔 공사현장으로, 지층구조는 상부로부터 2.4m~4.3m의 매립층이 전 구간에 걸쳐 분포하고, 그 아래 5.6m~20.5m까지 모래층과 호박돌 층이 매우 치밀하게 번갈아 분포하고 있으며 20.5m~29.5m에서 단단한 풍화대와 연암층이 분포하고 있다. 설계 시 지하수위는 GL(-) 8.1m~9.4m로 적용되었으나, 실제 계측 수행 시 지하수위를 확인한 결과, GL(-) 16.0m~19.4m로 상당히 아래에 분포하고 있는 것으로 나타났으며 역해석 수행 시 변경 적용하였다. 역해석 적용방법은 앞의 A, B 현장과 동일하고 역해석 수행굴착 지점은 G.L(-)12.55m이다. 그림 10은 역해석 지역의 검토단면을 나타내고 있다[7].

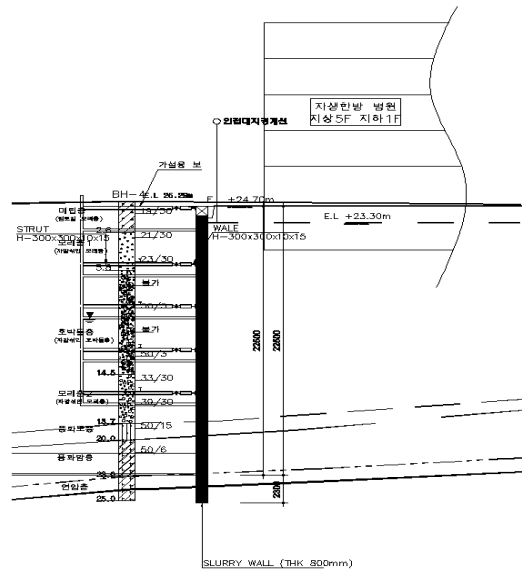


그림 10. C현장 역해석 검토단면  
Fig. 10 Inverse analysis section of field C

그림 11~그림 13은 C현장의 G.L(-)12.55m 굴착 지점에서 역해석을 수행하여 반복 수정되어 가고 있는 역해석 변위도와 최종굴착 시 계측 변위형상 비교도를 나타낸 것이다. 그리고 반복수행 후 얻어진 토질정수 값은 표 3에 나타내었다. 표 3의 기호 설명은 앞 절의 표 1과 동일하다.

표 3. 3단계 반복 역해석기법으로 구해진 토질정수값  
Table. 3 Soil parameter using inverse analysis

구분	c (t/m <sup>2</sup> )			φ (°)			k <sub>n3</sub> (t/m <sup>3</sup> )		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
매립층	1	0	0	35	20	24	1600	1600	1600
모래층	1	0	0	35	20	27	1900	1900	1900
호박돌층	0	0	1.5	45	40	40	3300	3300	3300
풍화토층	1.0	4	2.0	30	40	35	3300	3300	3300
풍화암층	3.0	5	5.0	35	40	40	5000	5000	5000
연암층	5.0	10	15	37	40	40	6500	6500	6500

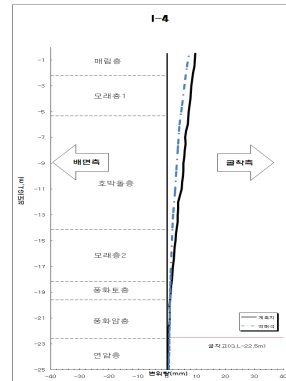


그림 13. 3단계 역해석과 최종굴착 계측변위 비교도  
Fig. 13 Disp. of 3rd Inverse analysis & measuring value

#### IV. 역해석 알고리즘 적용 및 고찰

III장의 서두에서 언급한 바와 같이 본 논문은 역해석의 알고리즘 파악이 주 목적이므로 실제 굴착단계별 반복과정이 너무 많아 지면 관계상 기준 단계의 역해석 결과치와 최종굴착 단계의 계측치를 비교하여 반복수정하는 과정을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 3가지 현상 사례는 모두 동일한 조건으로 역해석을 수행 적용하는 과정을 표현하였으며, 사례별 결과에 따른 역해석의 기본 알고리즘의 적용에 대한 타당성을 검토해 보았다.

세 현장의 경우 모두 역해석 굴착단계 (A현장 : G.L(-)19.5m, B현장 : G.L(-)10.0m, C현장 : G.L(-)12.55m)의 계측결과와 최종 설계의 변위 양상을 비교한 결과, 탄소성 해석 결과와 계측결과가 다소 차이를 보이므로 지반조사 결과에 근거하여 각 지층별 토질정수 범위 (c,φ,kh)를 고려하여 반복적으로 역해석을 수행하였다. A현장의 역해석 수행 결과는 단계가 반복 될수록 변위형상은 유사해지고 있으나 변위값이 계측치보다 10%~20%정도로 상부는 작고 하부는 조금 크게 발생하는 것으로 나타나고 있는데, 이는 전이현상에 의한 토압의 재분배가 발생한 것으로 초기 역해석 단계에서 설계 시 결정된 토질정수의 범위가 확실하지 못했던 것으로 판단된다. B, C현장에서는 역해석 최종수행 단계에서 거의 변위의 일치성을 보이고 있다. 다만 굴착 상부의 변위차이는 초기 굴착 시 시공관리의 문제로 항두변위의 해석 적용에 기인한 오차로 판단된다. 각 현장의 3단계 역해석 수행과정을 흐름도로 정리해 보면 그림 14와 같다.

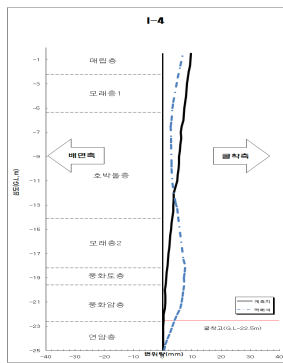


그림 11. 1단계 역해석과 최종굴착 계측변위 비교도  
Fig. 11 Disp. of 1st Inverse analysis & measuring value

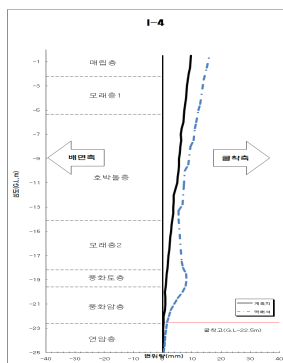


그림 12. 2단계 역해석과 최종굴착 계측변위 비교도  
Fig. 12 Disp. of 2nd Inverse analysis & measuring value

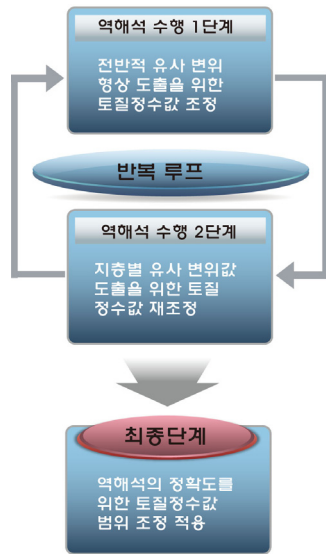


그림 14. 단계별 역해석 수행 흐름도  
 Fig. 14 Flow chart of step by step Inverse analysis

이상 그림 14와 같은 단계별 해석방법으로 현장 적용한 결과 세 현장 모두 단계별 반복 수행이 진행됨에 따라 계측치와의 변위형상이 거의 일치하는 것으로 나타났다.

## V. 결 론

본 연구에서는 지하굴착 시공현장에서 지하연속벽체의 굴착 단계별 변위를 역해석 알고리즘을 이용하여 예측하는 기법의 타당성을 검증하였다. 역해석 기본 알고리즘을 이용하여 세군데 현장에 단계별 역해석 기법을 수행한 결과 역해석 최종 단계에서 계측치와 거의 유사한 변위형상도를 나타내고 있어 본 연구에서 수행한 예측기법 수행의 타당성이 있음을 알 수 있었다. 향후 본 연구에서 시행한 예측기법을 현장조건이 유사한

타 현장에 적용함에 있어 단계별 역해석을 수행할 때 조정해야 할 토질정수 값들의 적용방법은 굴착 이전의 지층별 보링 성과치 및 결정된 토질정수 자료들에 대해 정확한 범위 내에서 조정해 나가는 것이 역해석 단계를 최소한으로 감소시키고 정확한 결과를 얻을 수 있는 방법일 것으로 판단된다. 본 연구에서는 IT 분야의 정보처리 지식과 건설 분야의 시공기술을 접목하여 건설시공 알고리즘의 IT융합 적용을 시도하였다. 그 결과 IT 분야와 건설기술의 융합을 통하여 첨단화 된 정보화시공 현장관리시스템을 구축으로 설계 및 시공의 최적화가 가능할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] S. H. Lee, J. M. Kim, S. I. Kim, B. S. Jang, "Back Analysis of the Earth Wall in Multi-layered Subgrade," *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.1, pp.71-78, 2002.
- [2] Korean Geotechnical Society, *Excavation & Earth Retaining Method (Geotechnical engineering. series No.3)*, 2002.
- [3] Korean Geotechnical Society, *Design Criteria of Structure Basis*, 2009.
- [4] J. S. Lee, S. H. Cho, E. S. Hwang, J. H. Lee, "Analysis of Monitoring Results and Back Analysis for Rigid Diaphragm Wall Supported by Ground Anchor," *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.25 No.5, pp.39-46, 2009.
- [5] D. J. Kim, *Design & Measuring of Slurry Wall*, Saeron, 2000.
- [6] The Institute for Structural Maintenance Inspection, *Safety Measuring Theory & Practice of Underground Structure*, 2006.
- [7] H. J. Park, "A Field Case Research by Construction Management of Underground Excavation Construction Using Inverse Analysis Method," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.15, No.2, pp.1089-1095, 2014.



박현정(Hyun-Jung Park)

1993년 2월 : 부산대학교 건축공학과 공학사  
 1995년 2월 : 부산대학교 건축공학과 공학석사  
 2001년 2월 : 부산대학교 건축공학과 공학박사  
 2003년 3월 ~ 현재 : 신라대학교 건축학부 교수  
 ※ 관심분야 : IT 융합기술, 인공지능, 최적화