

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.1.565>

JCCT 2024-1-68

## 지하박스구조물의 변위거동에 따른 손상영향 평가

### Evaluation on Damage Effect according Displacement Behavior of Underground Box Structure

최정열\*, 안대희\*\*, 한재민\*\*

Jung-Youl Choi\*, Dae-Hui Ahn\*\*, Jae-Min Han\*\*

**요약** 최근 도시철도 주변으로 집중되는 신축건물 및 공동구 확장 등과 같은 인접굴착공사로 인해 지하에 건설된 도시철도 지하박스 및 터널구조물의 변형이 발생되고 이로인한 보수, 보강공사가 빈번하게 시행되고 있다. 또한 지하철은 대규모 수송을 담당하고 있어 지하구조물의 안전성 및 주행성에 대한 확보가 매우 중요하다. 이에 자동화계측 시스템을 도입하여 지하박스구조물에 대한 안전성을 관리하고 있다. 그러나 지하박스구조물의 침하 또는 융기 등에 의한 구조물 손상취약부에 대한 분석은 전무한 실정이다. 본 연구에서는 지하박스구조물의 안전성 모니터링을 위한 손상취약부를 분석하고자 한다. 또한 수치해석을 통해 지하박스구조물을 모델링하여 핵심 모니터링 위치를 분석하고자 한다. 따라서 향후 지하박스구조물의 안전성 모니터링을 위한 센서 설치 위치 및 손상 취약부를 제시하고자 한다.

**주요어** : 지하박스구조물, 인접굴착, 수치해석, 손상영향

**Abstract** Recently, due to adjacent excavation work such as new buildings and common tunnel expansion concentrated around the urban railway, deformation of the underground box and tunnel structure of the urban railway built underground has occurred, and as a result, repair and reinforcement work is frequently carried. In addition, the subway is responsible for large-scale transportation, so ensuring the safety and drivability of underground structures is very important. Accordingly, an automated measurement system is being introduced to manage the safety of underground box structures. However, there is no analysis of structural damage vulnerabilities caused by subsidence or uplift of underground box structures. In this study, we aim to analyze damage vulnerabilities for safety monitoring of underground box structures. In addition, we intend to analyze major core monitoring locations by modeling underground box structures through numerical analysis. Therefore, we would like to suggest sensor installation locations and damage vulnerable areas for safety monitoring of underground box structures in the future.

**Key words** : Underground box structures, Adjacent excavation, Finite element analysis, Damage effect

## 1. 서 론

최근 도시철도 주변으로 집중되는 신축건물 및 공동구 확장 등으로 인해 인접굴착공사가 증가되는 실정이다 [1-3]. 이에 도시철도 터널구조물 및 지하박스구조물의

변형이 발생되고 보수, 보강공사가 빈번하게 시행되고 있다[4-7]. 또한 지하구조물은 대규모 수송을 담당하고 있어 지하구조물의 안전성 및 주행성에 대한 확보가 매우 중요하다[8,9]. 따라서 지하철 선로의 안전성을 확보하기 위해 자동화계측 시스템을 도입하여 실시간으로 지하

\*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)

\*\*정회원, 동양대학교 건설공학과 박사과정 (교신저자)

\*\*\*정회원, 동양대학교 건설공학과 박사과정 (참여저자)

접수일: 2023년 10월 15일, 수정완료일: 2023년 11월 일

게재확정일: 2023년 11월 30일

Received: October 15, 2023 / Revised: November 7 2023

Accepted: November 30, 2023

\*\*Corresponding Author: ahndh@dyu.ac.kr

Dept. of Construction Engineering, Dongyang University, Korea

구조물의 안전성을 관리하고 있다[7-9]. 그러나 지하구조물의 외부요인(지하수위 변화, 굴착공사 등)에 따른 구조물 변형이 발생하였을 때, 지하구조물 손상에 대한 분석은 전무한 실정이다[1-3]. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 이용하여 지하박스구조물의 손상 취약부를 분석하고자 한다. 지하박스구조물의 손상을 분석하기 위해 3차원 Solid 요소로 해석 모델링을 설정하였다. 하중조건은 현장에서 측정한 측량데이터를 이용하여 변위제어 조건을 설정하였으며, 지하박스구조물 변위거동에 따른 손상 영향을 분석하고자 한다[1]. 따라서 본 연구결과를 이용하여 향후 지하박스구조물의 중점관리가 필요한 개소 및 위치 설정에 활용하고자 한다.

## II. 지하박스구조물 수치해석

### 1. 개요

본 연구에서는 지하박스구조물의 손상영향을 분석하기 위해 실제 형상과 동일한 3D Solid 요소로 모델링을 수행하였다[1]. 손상영향을 분석하기 위해 실제 현장에서 측량한 데이터를 변위조건으로 설정하였다. 수치해석을 통해 지하박스구조물의 손상유형과 손상취약부를 분석하였다.

### 2. 모델링

본 연구에서 측량한 데이터는 120m이나 검토구간 시점 및 중점에서의 변위를 분석하기 위해 모델링의 길이를 총 140m로 설정하였다[1]. 수치해석에 이용한 지하박스구조물 단면도는 그림 1과 같다[1].

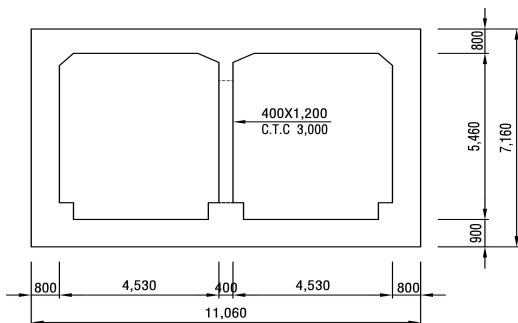


그림 1. 지하박스구조물 단면도  
Figure 1. Underground box structure front view

치해석 모델링을 설정하였으며, 그림 2와 같다.

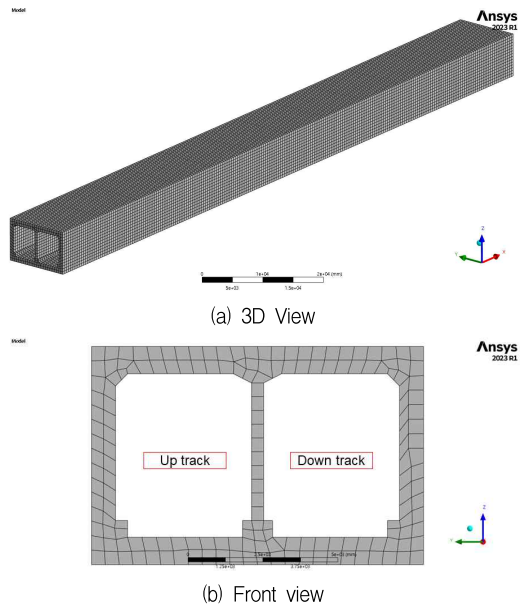


그림 2. 수치해석 모델링  
Figure 2. Finite element analysis model

본 연구에서는 그림 2와 같이 지하박스구조물 단면도를 이용하여 총 140m 연장의 모델링을 제작하였다[1]. 측량결과를 이용한 수치해석 변위제어 조건은 그림 3과 같다[1].

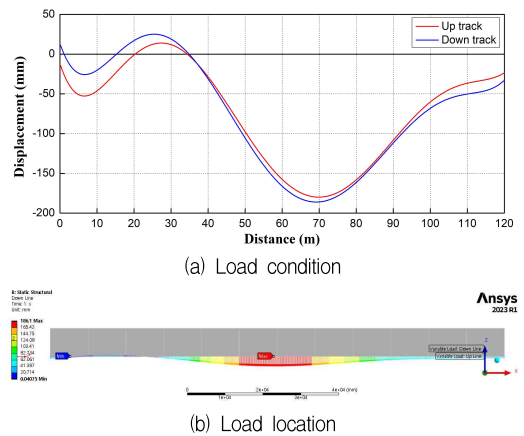


그림 3. 하중위치 및 조건  
Figure 3. Load location and condition

본 연구에서는 지하박스구조물 단면도와 동일하게 수

본 연구에서는 그림 3(a)와 같이 측량결과를 이용하여

그림 3(b)와 같이 지하박스구조물 하부에 변위거동을 해석 모델링에 적용하였다.

### 3. 해석결과

본 연구에서는 측량데이터를 이용하여 수치해석 모델링에 적용하였으며, 전체 모델링에 대한 수치해석결과는 그림 4와 같다.

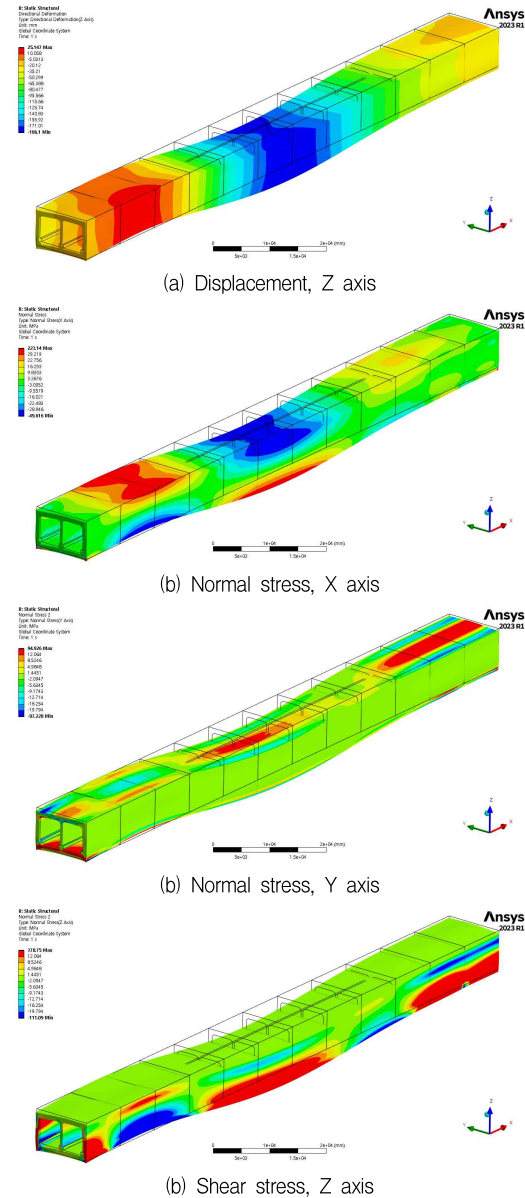


그림 4. 수치해석결과(전체)  
 Figure 4. Result of numerical analysis(all)

수직변위 해석결과, 그림 4(a)와 같이 수직방향 변위의 경우 최대 용기부에서는 상부 슬래브보다 하부 슬래브에서 용기량이 더 큰 것으로 분석되었다. 또한 최대 용기량은 25.147mm로 분석되었다. 최대 침하부에서도 상부 슬래브보다 하부 슬래브에서 침하 영향범위가 큰 것으로 분석되었다. 또한 최대 침하량은 186.1mm로 분석되었다.

열차진행방향인 X axis 응력 해석결과, 그림 4(b)와 같이 최대 용기부의 경우 상부 슬래브에서는 인장응력, 하부 슬래브에서는 압축응력이 지배적인 것으로 분석되었다. 반면 최대 침하부의 경우 하부 슬래브에서 인장응력, 상부 슬래브에서는 압축응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 단면에서 수평방향인 Y axis 응력 해석결과, 그림 4(c)와 같이 최대 침하부 상부 슬래브에서 인장응력이 집중되는 것으로 나타났으며, 기둥으로 인해 기둥상부가 인장을 받는 것으로 분석되었다. 단면에서 수직방향인 Z axis 응력 해석결과, 그림 4(d)와 같이 최대 용기부의 경우 벽체 하부 쪽에 압축응력이 집중되는 것으로 분석되었다. 반면 최대 침하부의 경우 벽체 하부 쪽에 인장응력이 집중되는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 최대 용기가 발생한 위치에서의 지하박스구조물의 단면 응력을 분석하였다. 단면 응력 해석결과는 그림 5와 같다.

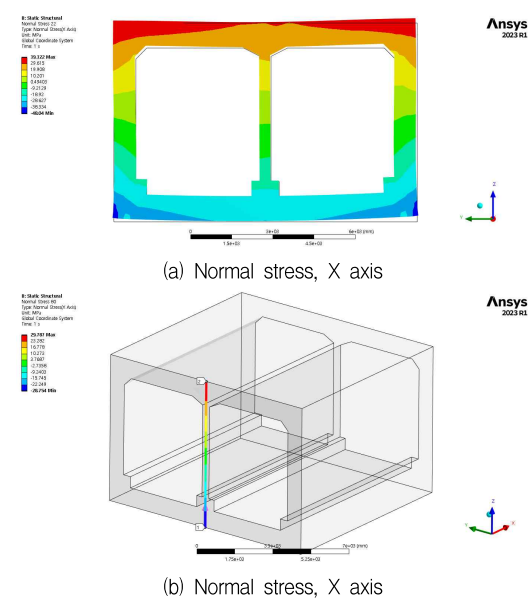


그림 5. 수치해석결과(최대 용기부)  
 Figure 5. Result of numerical analysis(max. uplift)

최대 용기가 발생한 위치에서의 단면 응력 해석결과, 그림 5(a)와 같이 상부 슬래브의 경우 전체적으로 인장응력이 발생하는 것으로 나타났으며, 상부 슬래브 중앙부 보다 모서리부의 인장응력이 큰 것으로 분석되었다. 반면 하부 슬래브의 경우 압축응력이 발생하는 것으로 나타났으며, 모서리부의 압축응력이 큰 것으로 분석되었다. 최대 침하가 발생한 위치에서의 지하박스구조물의 단면응력 해석결과는 그림 6과 같다.

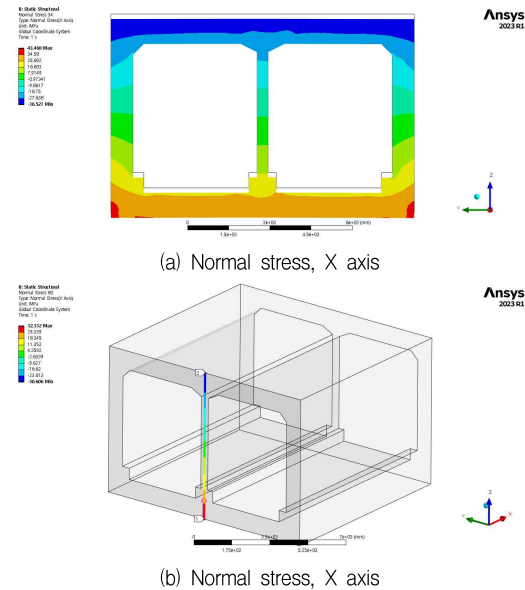


그림 6. 수치해석결과(최대 침하부)  
Figure 6. Result of numerical analysis(max. subsidence)

최대 침하가 발생한 위치에서의 단면 응력 해석결과, 그림 6(a)와 같이 상부 슬래브의 경우 전체적으로 압축응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 반면 하부 슬래브의 경우 인장응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 최대 침하부는 최대 용기가 발생한 단면 응력 해석과는 달리 상, 하부 슬래브에서의 편차는 미소한 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 최대 용기 및 침하가 발생한 단면에서의 해석 응력을 분석하였으며, 지하박스구조물 기둥을 기준으로 상부부터 하부까지의 응력변화를 분석하였다. 변위거동에 따른 기둥부 기준 응력 분석결과는 그림 7과 같다.

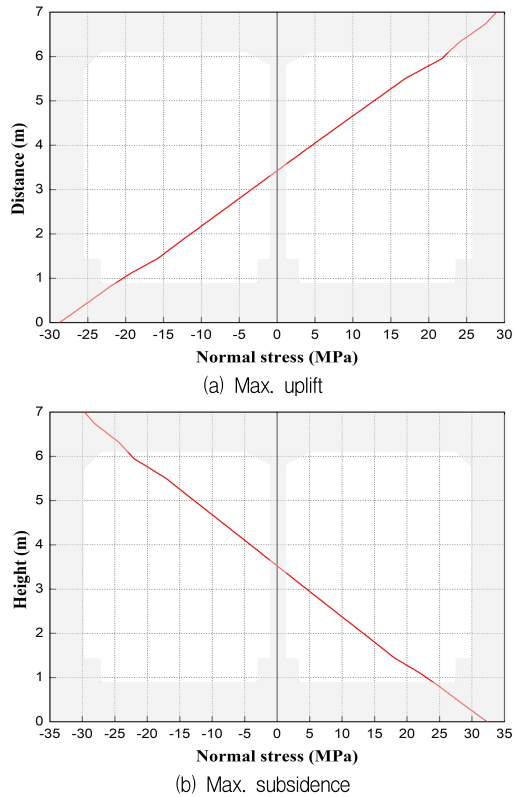


그림 7. 응력 분석결과(기둥 기준)  
Figure 7. Result of stress analysis(column)

지하박스구조물 기둥을 기준으로 상부부터 하부까지 응력 분석결과, 그림 7(a)와 같이 최대 용기부의 경우 최대 압축응력은 약 28.75MPa로 분석되었다. 반면 최대 인장응력은 약 29.79MPa로 분석되었다. 그림 7(b)와 같이 최대 침하부의 경우 최대 압축응력은 30.61MPa, 최대 인장응력은 약 32.33MPa로 분석되었다. 최대 압축응력 측면에서는 최대 용기부 보다 최대 침하부의 압축응력이 약 6.47% 큰 것으로 분석되었다. 최대 인장응력 측면에서는 최대 용기부 보다 최대 침하부의 인장응력이 약 8.52% 큰 것으로 분석되었다. 또한 대표적으로 최대 침하가 발생한 구간에서 하부 슬래브 내측의 최대 인장응력은 약 23.98MPa인 것으로 분석되었다. 이는 하부 슬래브 외측의 최대 인장응력보다 약 25.83% 작은 것으로 분석되었다. 따라서 수치해석결과와 같이 지하박스구조물 내부의 응력보다는 외부에 발생하는 응력이 큰 것으로 분석되었다. 이는 지하박스구조물의 변위거동에 따라 구조물 내부에는 손상이 없을 수 있으나 구조물 외부에는

손상이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

### III. 결론

본 연구에서는 현장에서 측정한 측량데이터를 이용하여 변위제어 조건을 설정하였으며, 지하박스구조물 변위 거동에 따른 지하박스구조물의 손상영향을 분석하고자 한다. 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 응력 방향별 분석결과, 열차진행방향인 X axis 응력은 용기부의 경우 상부는 인장응력, 하부는 압축응력이 발생하였다. 반면 침하부의 경우 상부는 압축응력, 하부는 인장응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 단면에서 수직방향인 Z axis 응력은 상, 하부 슬래브 보다는 벽체 및 기둥에 응력이 집중되는 것으로 분석되었다. 용기부의 경우 벽체에 압축응력, 침하부의 경우 벽체에 인장응력이 발생하는 것으로 분석되었다.

(2) 단면에서의 최대 용기 및 침하부 응력 분석결과, 용기부의 경우 상, 하부 슬래브 기둥부 보다는 모서리부에서의 응력이 큰 것으로 분석되었다. 반면 침하부의 경우 지하박스구조물 상, 하부 슬래브에서의 응력은 기둥부 및 모서리부 모두 유사한 것으로 분석되었다. 따라서 지하박스구조물의 침하가 발생할 경우 기둥과 근접한 위치, 모서리부와 근접한 위치의 손상이 유사할 것으로 판단된다. 반면 용기가 발생할 경우 기둥과 근접한 위치보다 모서리부와 근접한 위치의 손상이 클 것으로 판단된다.

(3) 지하박스구조물 내부와 외부의 응력차이 분석결과, 지하박스구조물 변위거동에 따른 내부의 발생응력은 외부에 비해 약 23% 작은 것으로 분석되었다. 이는 지하박스구조물 변위거동 시 내부에 손상이 없더라도 구조물 외부에는 손상이 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 하부 슬래브의 경우 철도구조물인 콘크리트 도상이 부설되므로 지하박스구조물의 손상을 파악하기에는 어려운 실정이다. 따라서 지하박스구조물의 상부 슬래브나 벽체에 균열 또는 손상이 발생한다면 하부 슬래브와 지하박스구조물 외부에 손상 발생 여부를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

### References

[1] J.Y. Choi, S.H. Kim, G.N. Yang, H.H. Lee, J.S. Chung, "Failure Analysis of Subway Box

Structures According to Displacement Behavior on a Serviced Urban Railway", *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 24, pp. 1-15, 2022.

<https://doi.org/10.3390/app122412637>

- [2] J.Y. Choi, G.N. Yang, T.J. Kim and J.S. Chung, "Analysis of Ground Subsidence according to Tunnel Passage in Geological Vulnerable Zone", *Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 6, No. 3, pp. 393-399, 2020. <http://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.3.393>
- [3] J.Y. Choi, G.N. Yang, T.J. Kim and J.S. Chung, "Analysis of Changes in Groundwater Level according to Tunnel Passage in Geological Vulnerable Zone", *Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 6, No. 3, pp. 369-375, 2020. <http://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.3.369>
- [4] J.Y. Choi, S.I. Cho and J.S. Chung, "Parameter Study of Track Deformation Analysis by Adjacent Excavation Work on Urban Transit", *Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 6, No. 4, pp. 669-675, 2020. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.4.669>
- [5] J.S. Chung, M.H. Kim, S.G. Lee, H.J. Kim and Y.W. Shin, "A Study on the Behaviour of the Station Structure due to Adjacent Construction", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 1, p. 55-64, 2016. <https://doi.org/10.14481/jkge>  
<https://doi.org/10.14481/jkges.2016.17.11.55>
- [6] J.S. Chung, D.R. Park and J.Y. Choi, "Evaluation of Track Irregularity Effect due to Adjacent Excavation on Serviced Railway Line", *Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 5, No. 4, pp. 401-406, 2019. <http://doi.org/10.17703/JCCT.2018.5.4.401>
- [7] J.Y. Choi, H.H. Lee, Y.S. Kang and J.S. Chung, "Evaluation of Track Irregularity due to Adjacent Excavation Work on Serviced Urban Transit", *Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT)*, Vol. 6, No. 2, pp. 481-487, 2020. <http://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.2.481>
- [8] J.Y. Choi, D.R. Park, J.S. Chung and S.H. Kim, "Dynamic Wheel-Rail Force-Based Track Irregularity Evaluation for Ballasted Track on Serviced Railway by Adjacent Excavation", *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-21, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12010375>
- [9] H.H. Lee, "A Study on Improvement of Automatic Measurement Evaluation System for Subway Structure by Adjacent Excavation", Master thesis, DongYang University, 2021

※ 본 논문은 행정안전부 “광섬유 센서 기반 지하구조물 재난관리시스템 개발(과제번호: 20015728)” 의 지원을 받아 작성되었음.