

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.1.559

JCCT 2024-1-68

인접굴착공사에 따른 지하철 터널 구조물 안전성 평가

Safety Evaluation of Subway Tunnel Structures According to Adjacent Excavation

최정열*, 안대희**, 정지승***

Jung-Youl Choi*, Dae-Hui Ahn**, Jee-Seung Chung**

요약 현재 우리나라는 도심지 과밀도로 구조물과 인접하여 대규모, 대심도 굴착시공이 이루어지고 있다. 도심지에서의 인접굴착공사는 흠막이 구조물 및 지하구조물의 안전성 확보가 매우 중요하다. 이에 자동화계측 시스템을 도입하여 지하철 터널 구조물에 대한 안전성을 관리하고 있다. 그러나 자동화계측 시스템 결과의 활용도는 매우 낮은 실정이다. 기존 평가기법은 측정된 데이터의 최대값에만 의존하여, 이상 거동을 과대평가할 수 있는 기법이다. 이에 본 연구에서는 방대한 양의 자동화계측 데이터를 정량적으로 평가할 수 있는 기법인 가우시안 확률밀도함수 분석기법을 이용하여 분석하였다. 방대한 양의 데이터를 확률통계 분석기법을 적용하여 신뢰성 높은 결과를 도출하였다. 따라서 본 연구에서는 방대한 양의 데이터를 처리할 수 있는 기법을 이용하여 인접굴착공사에 따른 지하철 터널 구조물의 안전성 평가를 수행하였다.

주요어 : 터널, 자동화계측, 현장측정, 유지관리, 안전성 평가

Abstract Currently, in Korea, large-scale, deep excavations are being carried out adjacent to structures due to overcrowding in urban areas. for adjacent excavations in urban areas, it is very important to ensure the safety of earth retaining structures and underground structures. accordingly, an automated measurement system is being introduced to manage the safety of subway tunnel structures. however, the utilization of automated measurement system results is very low. existing evaluation techniques rely only on the maximum value of measured data, which can overestimate abnormal behavior. accordingly, in this study, a vast amount of automated measurement data was analyzed using the Gaussian probability density function, a technique that can quantitatively evaluate. highly reliable results were derived by applying probabilistic statistical analysis methods to a vast amount of data. therefore, in this study, the safety evaluation of subway tunnel structures due to adjacent excavation work was performed using a technique that can process a large amount of data.

Key words : Tunnel, Automatic measurement, Field measurement, Maintenance, Safety evaluation

1. 서 론

현재 우리나라는 도시의 인구증가로 인한 고층건물, 대중교통 및 편의시설 등 사회기반 시설물의 수요가 증가되는 실정이다[1-6]. 또한 도심지 과밀도로 구조물과

인접하여 대규모, 대심도 굴착 시공이 이루어지고 있다 [7-9]. 도심지에서의 인접굴착은 흠막이 구조물 및 지하 구조물의 안전성 확보가 매우 중요하다[10]. 따라서 시설 물에 안전성을 확보하기 위해 자동화계측 시스템을 도입 하여 실시간으로 터널 구조물의 안전성을 관리하고 있다

*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)

**정회원, 동양대학교 건설공학과 박사과정 (교신저자)

***정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (참여저자)

접수일: 2023년 9월 30일, 수정완료일: 2023년 11월 27일

게재확정일: 2023년 12월 25일

Received: September 30, 2022 / Revised: November 27, 2022

Accepted: December 25, 2023

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

Dept. of Construction Engineering, Dongyang University, Korea

[11,12]. 그러나 터널 구조물 자동화계측 시스템 결과의 활용도는 매우 낮은 실정이며, 합리적이고 신뢰성 높은 계측을 위한 관리기준 및 평가기법에 대한 연구는 미흡한 실정이다[7-9]. 본 연구는 실제 인접굴착공사에 따른 지하철 터널 구조물 안전성 평가에 관한 연구로서 방대한 양의 기존 측정데이터를 정량적으로 평가할 수 있는 가우시안 확률밀도함수를 이용하여 분석하였다[1]. 기존 평가기법은 장기간 측정데이터에 대한 활용도가 낮은 실정이다. 또한 최댓값에 대한 결과만을 평가하는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 장기 모니터링 측정결과를 이용하여 지하철 터널 구조물 안전성 평가를 수행하였다.

II. 현장측정

본 연구에서는 인접굴착공사에 따른 지하철 터널 구조물 안전성 평가를 위해 실제 인접굴착공사 현장과 근접한 지하철 터널 구조물에 센서 설치를 수행하였다. 내공변위계 센서 설치전경은 그림 1과 같다. 센서 설치위치는 그림 2와 같다.



그림 1. 센서 설치 전경
Figure 1. Photographs of sensor installation

본 연구에서는 그림 2와 같이 인접굴착공사 현장과 인접한 지하철 터널 구조물에 내공변위계 센서를 설치하였다. 또한 총 3개 단면을 기준으로 내공변위계를 설치하였다. 본 연구에서는 인접굴착공사에 따라 터널 구조물 수평 및 수직변위 데이터를 시간 당 1개씩 수집하였다. 결과가 양수일 때는 터널 내부 방향, 음수일 때는 터널 외부 방향으로 이동한 것이다.

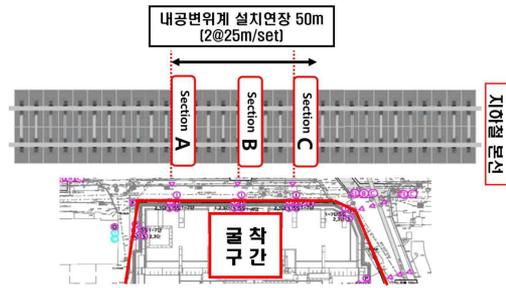


그림 2. 센서 설치 위치
Figure 2. Sensor installation location

본 연구에서는 인접굴착공사에 따라 터널 구조물 수평 및 수직변위 데이터를 시간 당 1개씩 수집하였다. 결과가 양수일 때는 터널 내부 방향, 음수일 때는 터널 외부 방향으로 이동한 것이다.

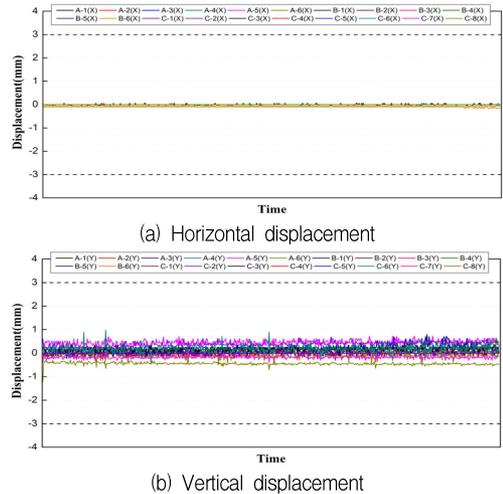
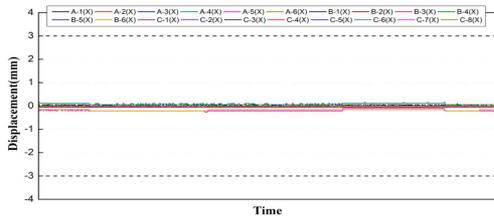
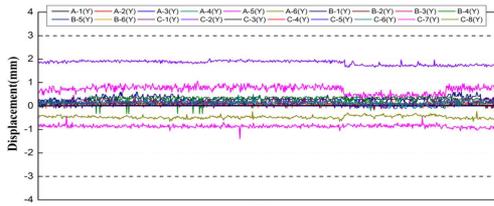


그림 3. 내공변위계 측정결과 (1개월 차)
Figure 3. Result of tunnel convergence meter measurement (1 months)

Section C에서 Sensor 2의 초기(측정 1개월 차) 내공변위계 측정결과, 그림 3과 같이 수평변위는 최대 약 0.05mm에 근접한 것으로 분석되었다. 반면 수직변위의 경우 최대 약 1.33mm로 분석되었다.



(a) Horizontal displacement



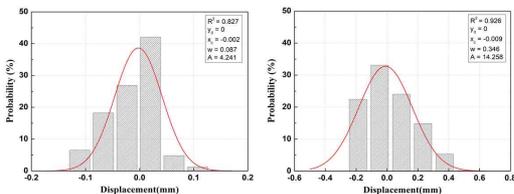
(b) Vertical displacement

그림 4. 내공변위계 측정결과 (18개월 차)
 Figure 4. Result of tunnel convergence meter measurement (18 months)

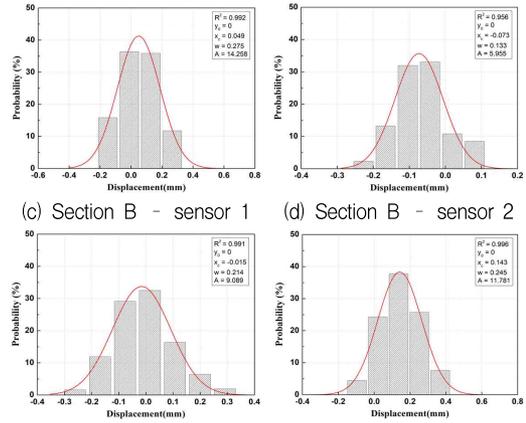
Section C에서 Sensor 2의 최종(측정 18개월 차) 내공 변위계 측정결과, 그림 4와 같이 수평변위는 0.05mm로 분석되었다. 반면 최대 수직변위는 약 2.01mm로 분석되었다.

III. 현장측정 분석결과

본 연구에서는 내공변위계 센서를 통해 측정된 자동 화계측 데이터를 분석하기 위해 가우시안 확률밀도함수 분석기법을 적용하였다. 여기서, 수평변위의 경우 1개월 마다 측정된 결과, 일정한 변위가 지속적으로 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 측정결과의 변화가 있는 수직변위 데이터를 이용하여 가우시안 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 내공변위계 센서의 초기(측정 1개월차) 데이터를 이용하여 가우시안 분석을 수행하였으며 분석결과는 그림 5와 같다.



(a) Section A - sensor 1 (b) Section A - sensor 2
 그림 5. 측정데이터 가우시안 분석결과(1개월 차)
 Figure 5. Results of measurement data Gaussian analysis(1 months)



(c) Section B - sensor 1 (d) Section B - sensor 2
 (e) Section C - sensor 1 (f) Section C - sensor 2
 그림 5. 측정데이터 가우시안 분석결과(1개월 차)
 Figure 5. Results of measurement data Gaussian analysis(1 months)

내공변위계 센서의 측정 1개월 차 데이터를 이용하여 가우시안 분석을 수행하였으며, 표 1과 같이 결정계수 R^2 , 확률평균 X_c , 표준편차 SD, 면적 A를 분석하였다.

표 1. 내공변위계 가우시안 분석결과(1개월 차)

Table 1. Result of Gaussian analysis of tunnel convergence meter(1 months)

Section	Sensor	R^2	X_c	SD	$X_c \pm SD$	A
A	1	0.827	-0.002	0.044	-0.046	4.241
A	2	0.926	-0.009	0.173	-0.182	14.258
B	1	0.992	0.049	0.138	0.187	14.258
B	2	0.956	-0.073	0.067	-0.140	5.955
C	1	0.991	-0.015	0.107	0.122	9.089
C	2	0.996	0.143	0.123	0.266	11.781

대표적으로 총 6개의 위치에서 측정된 결과를 이용한 가우시안 분석결과, 결정계수 R^2 은 Section A에서 센서 1을 제외하고 모두 0.95 이상인 것으로 분석되었다. 확률 평균은 대부분 음수로 나타났으며, Section A에서 센서 2의 확률평균이 (-)0.18mm로 가장 작은 것으로 분석되었다. 표준편차 또한 0.173으로 가장 큰 것으로 분석되었다. 표준편차가 유사한 Section B 센서 2와 Section C 센서 2의 A는 다소 차이는 것으로 나타났으며, 이는 Section B 센서 2에서 평균과 유사한 결과가 측정될 확률이 높은 것으로 판단된다. 측정 18개월 차 데이터 가우시안 분석결과는 그림 6과 같다.

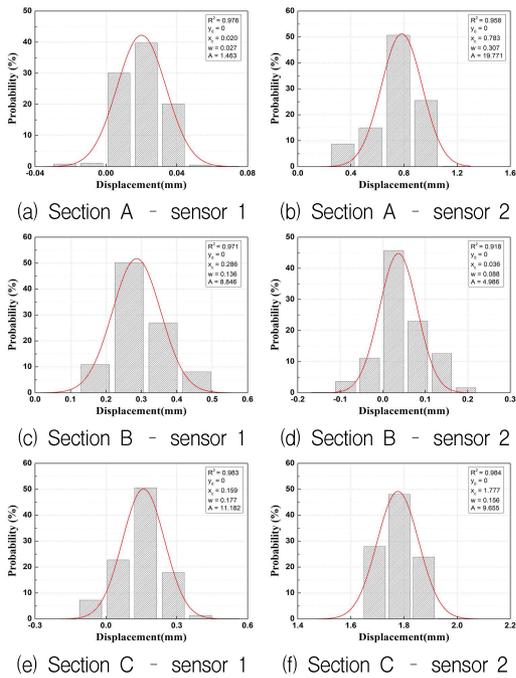


그림 6. 측정데이터 가우시안 분석결과(18개월 차)
Figure 6. Result of Gaussian analysis of internal displacement(18 month)

내공변위계 센서의 측정 18개월 차 데이터를 이용하여 가우시안 분석을 수행하였으며, 표 2와 같이 결정계수, 확률평균, 표준편차, 면적을 분석하였다.

표 2. 내공변위계 가우시안 분석결과(18개월 차)
Table 2. Result of Gaussian analysis of tunnel convergence meter(18 months)

Section	Sensor	R ²	Xc	SD	Xc±SD	A
A	1	0.976	0.020	0.014	0.034	1.463
A	2	0.958	0.783	0.154	0.937	19.771
B	1	0.971	0.286	0.068	0.354	8.846
B	2	0.918	0.036	0.044	0.080	4.986
C	1	0.983	0.159	0.089	0.248	11.182
C	2	0.984	1.777	0.078	1.855	9.655

내공변위계 센서 측정결과를 이용한 가우시안 분석결과, 결정계수 R²은 최소 0.91 이상인 것으로 분석되었다. 초기 데이터 가우시안 분석결과, 확률평균은 모두 양수로 나타났으며, Section C에서 센서 2의 확률평균이

1.78mm로 가장 큰 것으로 분석되었다. 반면 표준편차는 section A에서 센서 2가 0.154로 가장 큰 것으로 분석되었다. 표준편차가 유사한 Section B 센서 1과 Section C 센서 2의 A는 다소 차이나는 것으로 나타났으며, 이는 Section C 센서 2에서 평균과 유사한 결과가 측정될 확률이 높은 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 굴착공사 현장과 인접한 지하철 터널 구조물에 내공변위계를 설치하여, 18개월 간 터널 구조물의 변위를 측정하였다. 측정된 방대한 양의 데이터를 정량적으로 평가하기 위해 가우시안 확률밀도함수 분석 기법을 적용하여, 측정 월별 평균과 표준편차를 기준으로 최대 변위를 분석하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 굴착공사 현장과 인접한 지하철 터널 구조물에 내공변위계를 설치하여 1개월마다 수평 및 수직변위 최댓값을 유지관리기준치와 비교하였다. 이때, 최댓값은 센서의 오작동 및 인적오류로 인해 발생한 결과를 포함하고 있다. 따라서 방대한 양의 측정데이터를 합리적이고 신뢰성 높은 분석을 위해 가우시안 확률밀도함수를 이용하여 확률기반의 평균과 표준편차를 분석하였다.

(2) 본 연구에서는 기존 평가결과와 가우시안 분석결과를 비교하였으며, Section C에서 Sensor 2의 기존 수직변위 평가결과는 2.01mm 이었으나, 가우시안 확률밀도함수 분석을 통한 최댓값은 약 1.86mm로 분석되었다. 이와 같이 확률기반에서 Section A 단면의 최댓값과 기존 평가결과와의 차이가 있는 것으로 분석되었다.

(3) 연구결과, 방대한 양의 측정데이터를 확률기반에서 정량적인 결과를 제시하여 지하철 터널 구조물의 안전성을 평가하는 것이 필요하다. 또한 방대한 양의 측정데이터를 평가할 경우에는 최댓값만을 평가하는 것이 아니라 확률기반에서의 신뢰성 높은 결과를 제시하는 것이 필요하다. 따라서 향후 자동화계측 데이터를 이용하여 지하철 터널 구조물 안전성 평가 시 확률기반에서 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

References

[1] J.Y. Choi, D.H. Ahn, J.M. Han, J.S. Chung, J.H. Kim, B.C. Joo, "Improvement of SOC Structure

- Automated Measurement Analysis Method through Probability Analysis of Time History Data”, Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 9, No. 1, pp. 679-684, 2023. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.1.679>
- [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] H.S. Kim, J.Y. Choi and J.S. Chung, “A Study on Track Deformation Characteristics of Turnout System by Adjacent Excavation Work on Urban Transit”, Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 8 No. 5 pp. 477-482, 2022. <http://doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.5.477>
- [6] 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/jkges.2016.17.11.55>
- [7] 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>
- [8] 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>
- [9] J.Y. Choi, H.H. Lee, Y.S. Kang and J.S. Chung, “Evaluation of Structural Stability of Tunnel due to Adjacent Excavation on Urban Transit”, Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 6, No. 2, pp. 503-508, 2020. <http://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.2.503>
- [10] 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>
- [11] J.Y. Choi, S.H. Kim, H.H. Lee and J.S. Chung, “Improvement of Automatic Measurement Evaluation System for Subway Structures by Adjacent Excavation”, Materials(MDPI), Vol. 14, No. 24, pp. 1-20, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14247492>
- [12] 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.