

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.1.579>

JCCT 2024-1-71

자동화계측을 통한 지하철 궤도 변형 모니터링연구

Deformation Monitoring of Subway Track using by Automatic Measurement

최정열*, 한재민**

Jung-Youl Choi*, Jae-Min Han**

요약 현재 우리나라는 지하철 선로를 인접하여 대규모, 대심도 굴착시공이 이루어지고 있다. 인접굴착공사 시 흙막이 구조물 및 지하구조물의 안전성 확보가 매우 중요하므로 자동화계측 시스템을 도입하여 지하철에 대한 안전성을 관리하고 있다. 인접굴착공사 시 지하철 궤도 변형은 열차주행안정성에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 열차 탈선사고와 연결될 수 있는 인자이다. 그러나 현재 자동화계측 시스템을 이용한 지하철 궤도 안전성평가는 측정된 데이터의 최댓값에만 의존하여, 이상거동을 과소, 과대평가할 수 있는 기법이다. 따라서 자동화계측 시스템 결과의 활용도를 개선시킬 수 있는 방법이 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 방대한 양의 지하철 궤도 변형 측정결과를 정량적으로 평가할 수 있는 기법인 가우시안 확률밀도함수 분석기법을 이용하여 분석하였다. 방대한 양의 데이터를 확률통계 분석기법을 이용하여 인접굴착공사에 따른 지하철 궤도 변형에 대한 안전성평가를 수행하였다.

주요어 : 자동화계측, 모니터링, 궤도, 유지관리, 안전성 평가

Abstract Currently, large-scale, deep construction is being carried out adjacent to subway tracks in Korea. When excavating adjacent to each other, it is very important to ensure the safety of earth retaining structures and underground structures. Therefore, we are managing the safety of the subway by introducing an automated measurement system. Deformation of the subway track during adjacent excavation may affect train running stability. This is a factor that can be linked to train derailments. However, current subway track safety evaluation using automated measurement systems relies only on the maximum value of measured data. Therefore, a method to improve the usability of automated measurement system results is needed. In this study, we utilized a technique that can quantitatively evaluate the measurement results of a large amount of subway track deformation. A safety evaluation was conducted on subway track deformation due to adjacent excavation using a vast amount of data using probabilistic statistical analysis techniques.

Key words : Automatic measurement, Monitoring, Track, Maintenance, Safety evaluation

1. 서 론

현재 우리나라는 지하철 선로를 인접하여 고층건물, 대중교통 및 편의시설 등 사회기반 시설물에 대한 시공이 증가되는 실정이다[1-6]. 또한 도심지 과밀도로 구조물과 인접하여 대규모, 대심도 굴착 시공이 이루어지고

있다[7,8]. 도심지에서의 인접굴착은 흙막이 구조물 및 지하철 구조물의 안전성 확보가 매우 중요하다[9]. 따라서 지하철 선로의 안전성을 확보하기 위해 자동화계측 시스템을 도입하여 실시간으로 궤도의 안전성을 관리하고 있다[10,11]. 그러나 지하철 궤도 자동화계측 시스템 결과의 활용도는 매우 낮은 실정이며, 합리적이고 신뢰성 높은

*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)

**정회원, 동양대학교 건설공학과 박사과정 (교신저자)

접수일: 2023년 10월 20일, 수정완료일: 2023년 11월 7일

계재확정일: 2023년 11월 29일

Received: October 20, 2023 / Revised: November 7, 2023

Accepted: November 29, 2023

**Corresponding Author: woals255@dyu.ac.kr

Dept. of Construction Engineering, Dongyang University, Korea

계측을 위한 관리기준 및 평가기법에 대한 연구는 미흡한 실정이다[7,8]. 본 연구는 실제 인접굴착공사에 따른 지하철 궤도 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 궤도의 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 궤도에 도상침하계 센서(RM01~RM68)를 설치하였다. 또한 열차진행방향으로 약 140m를 기준으로 도상침하계를 설치하였다.



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

본 연구에서는 인접굴착공사에 따라 지하철 궤도의 수직변위 데이터를 시간 당 1개씩 수집하였다. 이때, 수직변위가 양수일 때는 궤도 선형이 터널 내부방향, 음수일 때는 궤도 선형이 터널 외부방향으로 변형된 것이다.

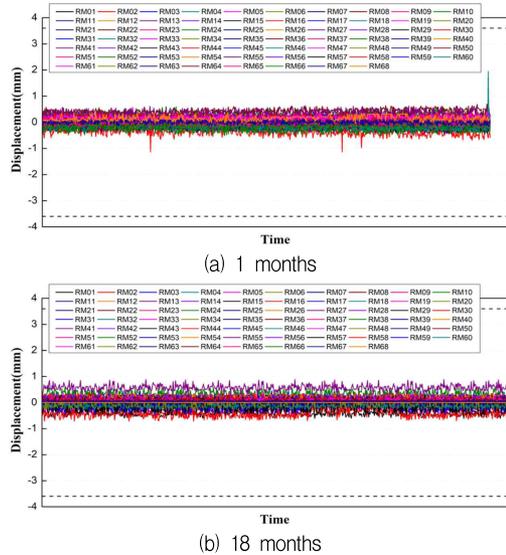


그림 3. 도상침하계 측정결과
Figure 3. Result of rail bed settlement monitoring sensor measurement

도상침하계 초기(측정 1개월 차) 도상침하계 측정결과, 그림 3(a)와 같이 최소 수직변위는 RM 31센서에서 약 (-)1.07mm로 나타났으며, 최대 수직변위는 RM10에서 약 0.60mm로 나타났다. 도상침하계 측정 18개월 차 측정결과, 그림 3(b)와 같이 최소 수직변위는 RM 31센서에서 약 (-)0.82mm로 나타났으며, 최대 수직변위는 RM41에서 약 0.89mm로 나타났다.

III. 현장측정 분석결과

본 연구에서는 도상침하계 센서를 통해 측정된 자동화계측 데이터를 분석하기 위해 가우시안 확률밀도함수 분석기법을 적용하였다. 여기서, 도상침하계를 1개월 마다 측정한 결과, 측정결과와의 변화가 있는 것으로 나타나 월별 가우시안 분석을 수행하였다. 초기(측정 1개월 차) 데이터 가우시안 분석결과는 그림 4와 같다.

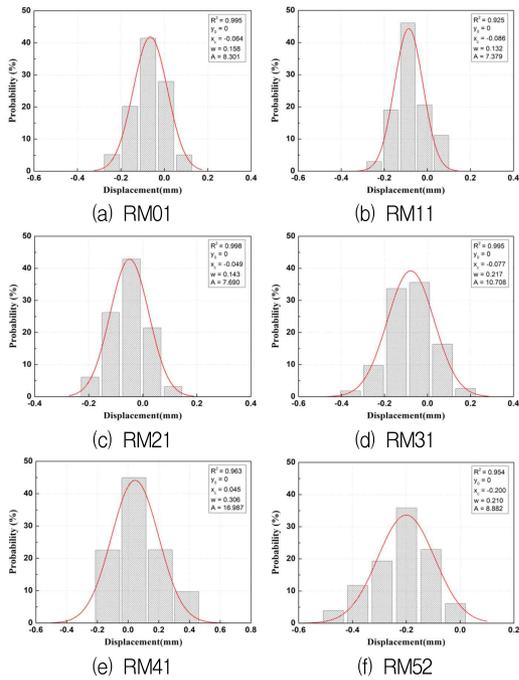


그림 4. 측정데이터 가우시안 분석결과(1개월 차)
 Figure 4. Results of measurement data Gaussian analysis(1 months)

본 연구에서는 총 68개 센서의 초기(측정 1개월차) 데이터를 이용하여 가우시안 분석을 수행하였으며 대표 분석결과 예시는 그림 4와 같다. 또한 표 1과 같이 결정계수 R^2 , 확률평균 X_c , 표준편차 SD , 면적 A 를 분석하였다.

표 1. 도상침하계 가우시안 분석결과(1개월 차)

Table 1. Result of Gaussian analysis of rail bed settlement monitoring sensor(1 months)

Sensor	R^2	X_c	SD	$X_c \pm SD$	A
RM01	0.995	-0.064	0.079	-0.143	8.301
RM11	0.925	-0.086	0.066	-0.152	7.379
RM21	0.998	-0.049	0.072	-0.121	7.690
RM31	0.995	-0.077	0.109	-0.186	10.708
RM41	0.963	0.045	0.153	0.198	16.987
RM52	0.954	-0.200	0.105	-0.305	8.862

대표적으로 총 6개의 위치에서 측정된 결과를 이용한 가우시안 분석결과, 결정계수 R^2 은 최소 0.95 이상인 것으로 분석되었다. 초기 데이터 가우시안 분석결과, 확률

평균은 대부분 음수로 나타났으며, RM52센서의 확률평균이 (-)0.20mm로 가장 작은 것으로 분석되었다. 반면 표준편차는 RM41센서가 0.153으로 가장 큰 것으로 분석되었다. 표준편차가 유사한 RM31과 RM52센서의 A는 다소 차이나는 것으로 나타났으며, 이는 RM31센서에서 평균과 유사한 결과가 측정될 확률이 높은 것으로 판단된다. 측정 18개월 차 데이터 가우시안 분석결과는 그림 5와 같다.

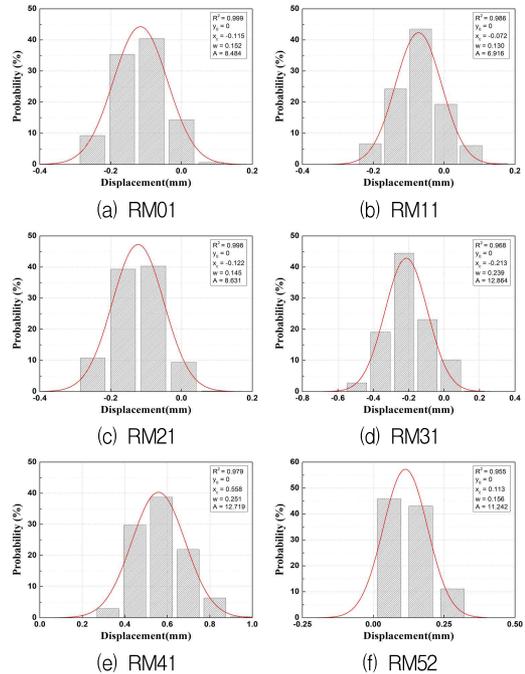


그림 5. 측정데이터 가우시안 분석결과(18개월 차)

Figure 5. Result of Gaussian analysis of internal displacement(18 months)

표 2. 도상침하계 가우시안 분석결과(18개월 차)

Table 2. Result of Gaussian analysis of rail bed settlement monitoring sensor(18 months)

Sensor	R^2	X_c	SD	$X_c \pm SD$	A
RM01	0.999	-0.115	0.076	-0.191	8.484
RM11	0.986	-0.072	0.065	-0.137	6.916
RM21	0.998	-0.122	0.073	-0.195	8.631
RM31	0.968	-0.213	0.119	-0.332	12.864
RM41	0.979	0.558	0.126	0.684	12.719
RM52	0.955	0.113	0.078	0.191	11.242

총 68개 센서의 측정 18개월차 데이터를 이용한 대표 분석결과 예시는 그림 5와 같다. 또한 표 2와 같이 결정 계수, 확률평균, 표준편차, 및 면적 A를 분석하였다

대표적으로 총 6개의 위치에서 측정된 결과를 이용한 가우시안 분석결과, 결정계수 R^2 은 최소 0.95 이상인 것으로 분석되었다. 확률평균은 대부분 음수로 나타났으며, RM31센서의 확률평균이 (-)0.213mm로 가장 작고 RM41센서의 확률평균이 0.558mm로 가장 큰 것으로 분석되었다. 표준편차는 RM41센서가 0.126으로 가장 큰 것

으로 분석되었다. 표준편차가 유사한 RM21과 RM52센서의 A는 다소 차이나는 것으로 나타났으며, 이는 RM52센서에서 평균과 유사한 결과가 측정될 확률이 높은 것으로 판단된다.

본 연구에서는 총 도상침하계 센서 68개를 설치하였으며, 총 측정 연장은 약 140m이다. 센서는 약 2m 간격으로 설치되어 있으며, 이를 거리로 환산하여 분석을 수행하였다. 열차진행방향에 따른 위치별 결과는 그림 6과 같다.

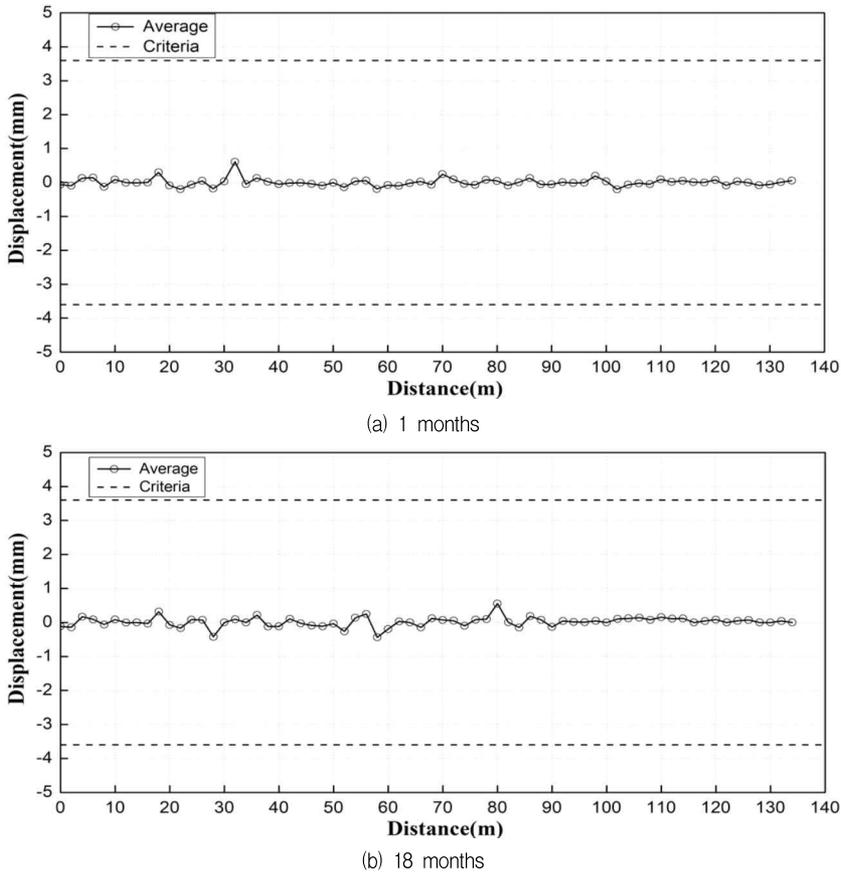


그림 6. 측정데이터 가우시안 분석결과
Figure 6. Results of measurement data Gaussian analysis

본 연구에서는 지하철 궤도 변형을 평가하기 위해 콘크리트 도상에 도상침하계를 설치하였다. 1시간 마다 1개의 데이터를 수집하는 조건에서 18개월 모니터링을 수행하였으며, 방대한 양의 데이터를 정량적으로 평가하고자 가우시안 확률밀도함수를 적용하였다.

측정 1개월차 위치별 가우시안 분석결과, 그림 6(a)와 같이 인접굴착공사영역 시점인 RM17(32m지점)센서에

서 최댓값이 발생하였으며, 확률평균은 약 0.61mm로 분석되었다. 반면 102m지점(RM52)인 센서에서 최솟값이 발생하였으며, 확률평균은 약 (-)0.20mm로 분석되었다.

측정 18개월 차 위치별 가우시안 분석결과, 82m지점(RM41)에서 최댓값이 발생하였으며, 확률평균은 약 0.55mm로 분석되었다. 반면 인접굴착공사영역 중심인 60m지점(RM30)에서 최솟값이 발생하였으며, 확률평균

은 약 (-)0.44mm로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 위치별 도상침하계 측정결과를 바탕으로 굴착공사가 케도 변형에 미치는 영향범위를 분석하였다. 이를 바탕으로 열차진행방향 전체에 케도 변형특성 및 영향범위 분석에 활용 가능할 것으로 판단된다.

IV. 결론

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

(1) 본 연구에서는 굴착공사 현장과 인접한 지하철 케도 구조물에 도상침하계를 설치하여 1개월마다 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, 굴착공사 초기 RM31의 기존 평가결과는 (-)1.07mm이나, 가우시안 확률밀도함수 분석을 통한 최댓값은 (-)0.186mm로 분석되었다. 굴착공사 후 18개월 차 RM41의 기존 평가결과는 0.89mm이나, 가우시안 분석결과 최댓값은 0.684mm로 분석되었다. 따라서 기존 평가결과와 가우시안 분석결과의 차이는 다소 큰 것으로 나타났으며, 측정기간별 또는 공사단계별 가우시안 분석결과를 통해 확률기반에서 케도 변형의 거동을 파악하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

(3) 연구결과, 방대한 양의 측정데이터를 확률기반에서 정량적인 결과를 제시하여 지하철 케도의 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 케도 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>,<http://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.2.503>
- [9] 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>
- [10] 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>
- [11] 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.