

# 현장 내공변위계측 시계열 자료기반 근접터널의 순응적 시공안정성 분석

김경용<sup>1</sup>, 조국환<sup>1\*</sup>, 손석철<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 철도건설공학과, <sup>2</sup>인하대학교 토목공학과

## Aptable Construction-Stability Analysis of Proximity Tunnel based on Time Series Convergence data via Field Instrument

Kyung-Yong Kim<sup>1</sup>, Kook-Hwan Cho<sup>1\*</sup>, Seok-Chul Son<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science and technology

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Inha University

**요약** 최근 도심지 철도터널은 공용중인 터널에 인접하여 터널이 시공 되어지고 있다. 기존 공용터널에 근접하여 시공 터널을 시공하기 위해서는 운행중인 공용터널의 구조적 안정성을 확보하고 시공터널을 시공하여야 한다. 설계에서는 설계기준을 준용하여 설계하지만 실제 현장조건과 지반조건이 장소마다 큰 차이를 나타낸다. 시공단계 해석 결과도 현장조건과 불일치하고 일률적인 추정 공학 상수를 이용하므로 신뢰성이 매우 낮다. 이에 대한 해결방안은 현장계측과 적절한 시공관리시스템이다. 본 연구에서는 시공터널을 굴착하면서 인접한 공용터널의 안정성을 목표로 현장계측 시계열분석 결과를 다음 시공단계에 적용하는 순응적 순환관리체계를 시도하였다. 먼저 공용터널 직하부의 시공터널을 굴착하기전에 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 이용하여 공용터널 취약부위에 내공변위계를 설치하였다. 현장계측 결과 최대 0.028mm 발생하였다. 시공터널 굴착에 따른 공용터널의 시계열 현장계측자료를 이용하여 공용터널 내공변위 추세를 예측하였다. 예측기법으로는 시계열분석기법 중 하나인 진보된 ARIMA모형을 이용하였다. ARIMA모형을 이용한 단기 추세예측 결과는 현장계측과 오차가 최대 0.002mm 발생하였다. 이는 95% 신뢰한계값 이내이므로 매우 적합하게 예측되었다.

**Abstract** Recently, railway tunnels in urban areas have been built as proximity tunnels adjacent to operating tunnels. The structural stability of the operating tunnel must be secured, and the construction tunnel must be constructed before constructing a tunnel close to an existing operating tunnel. While designs adhere to design standards, the actual site and ground conditions exhibit significant variations across locations. The reliability of the construction stage analysis is very low because it is inconsistent with the field conditions, and a uniform estimated engineering constant is used. The solution to this is on-site measurement and an appropriate construction management system. In this study, an adaptive cycle management system was attempted to apply the results of time series analysis of field measurements to the next construction stage to ensure the stability of adjacent operating tunnels while excavating a construction tunnel. First, numerical analysis was performed before excavating the construction tunnel directly under the operating tunnel. Using numerical analysis results, a convergence meter was installed in the vulnerable area of the operating tunnel. Field measurements indicated a maximum displacement of 0.028 mm. The trend of convergence in the operating tunnel was predicted using the time series field measurement data of the operating tunnel according to the construction tunnel excavation. The advanced ARIMA model, one of the time series analysis techniques, was used as a prediction technique. The short-term trend prediction result using the ARIMA model revealed a maximum error of 0.002 mm from field measurements. This was predicted to be very suitable because it was within the 95% confidence threshold.

**Keywords** : Proximity Tunnel, Field Measurement, Convergence, Time Series Analysis, ARIMA

\*Corresponding Author : Kook-Hwan Cho(Seoul National University of Science and Technology)  
email: khcho@seoultech.ac.kr

Received March 21, 2024

Revised April 22, 2024

Accepted May 3, 2024

Published May 31, 2024

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경 및 목적

2000년대 이후 수도권에 인구가 밀집되면서 대부분의 도심지 철도터널은 공용중인 터널에 근접되어 시공터널이 진행되고 있다. 설계자로는 일률적인 설계기준을 준용하지만, 실제 현장조건과 지반조건이 장소마다 큰 차이를 나타낸다. 시공단계 해석결과도 현장조건과 불일치하고 일률적인 추정공학상수를 이용하므로 신뢰성이 매우 낮다. 현장조건 불일치는 시공터널 주변의 지반조건과 지반특성치 차이, 이웃구조물의 존재, 이웃구조물의 중요도, 지반특성의 급변, 공극과 암반의 존재, 이상지반의 발견 및 시공으로 인해 지반교란 등 다양한 원인에 의한 지반조건과 지반특성치의 변화도 장애요소이다. 설계과정에서 가설현장의 정확한 주변환경과 지반조건 변화를 예측할 수 없으며, 시공과정에서 비로소 접하는 문제이다. 정확한 사전 지반정보가 없으므로 모든 토목 구조물설계는 안전율이 큰 지반특성치를 적용하고 있다. 설계기준도 이와 같이 규정하고 있다. 시공전문가들도 설계기준과 지반보고서의 지반특성치를 적용한 설계결과를 안전한 구조설계로 인정하고 있다. 다만 정밀시공과 안전시공을 위하여 시공전문가들도 설계결과에 대한 면밀한 재확인과 재검증의 필요성을 인식하고 있다.

시공장애에 대한 해결방안은 현장계측과 적절한 시공관리시스템이다. 시공관리시스템은 정밀한 계측시스템 구축, 정확한 계측자료 분석, 시계열 자료 분석 결과를 다음 시공과정에 적용 및 관리 등 3단계로 구분할 수 있다. 대부분 터널구조 시공과정은 자동화 계측시스템을 구축하고 있다. 그러나 다음 단계 시공과정에 계측자료 분석 결과의 적용 여부는 불명확하다. 본 연구에서는 시공터널을 굴착하면서 인접한 공용터널의 안정성을 목표로 현장계측 시계열분석 결과를 다음 시공단계에 적용하는 순응적 순환관리체계를 시도하였다.

### 1.2 연구 동향

Son(2005)등은 변형률 상태이론을 근거로 인접구조물 손상도 예측 및 평가기준을 제시하였다[1].-Ma(2020)등은 과거 데이터를 통계적 분석에 이용하여 유추 가능한 결과값으로 현재 및 미래를 예측하였다[2]. 이정인(1991)등은 설계해석결과와 현장 지반조건이 불일치하여 현장 계측치를 이용한 암반 응력해석 및 변형 거동을 연구하였다[3]. 박동룡(2013)등은 기존 지하철 하부 인접 터널 굴착의 시공에 따른 안정성을 3D 모델링을 통하

여 수치해석 하였다[4]. 그러나 시공터널 공사 중 인접 구조물에 대한 문제 발생 시 수치해석을 진행하는 중에는 굴착공사가 중단되어야 하며, 이는 공기 지연의 요소가 된다. 정지희(2019)등은 시공장애에 대한 해결방안 중 시계열 분석을 이용하였고 인공신경망과 시계열 분석을 활용하여 지질리스크 요인의 발생 확률을 줄일 수 있는 막장 전방 예측 방법을 제시하였다[5]. 박재훈(2021)등은 단순이동평균법을 적용한 시계열분석을 이용하여 굴착 영향도 및 위험도 평가를 구축하였다[6]. 이와 같이 시공터널 굴착시 시계열 분석을 이용하여 전방의 지질 상태 추세예측은 진행되고 있으나 인접한 공용터널에 미치는 연구는 전무한 실정이다.

### 1.3 연구 내용 및 범위

기존 공용터널에 근접하여 시공터널을 시공하기 위해서는 운행중 공용터널의 구조안정성을 확보하고 시공터널을 시공하여야 한다. 기존에는 구조적 안정성 확보를 위한 적용방법으로 설계단계에서 시공터널의 단계별 시공을 고려한 공용터널 내공변위에 대한 수치해석을 수행하여 결과값을 제시하였고, 시공단계에서 현장 계측관리를 통하여 구조안정성을 확보하였다. 기존의 이러한 구조안정성 확보 방법은 시간이 고려된 추세예측이 전혀 제시되어 있지 않고 굴착단계만 고려되었다는 단점이 있었다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 현장 계측자료의 시계열데이터에 대하여 ARIMA 모형을 적용하여 추세를 예측하였다.

연구범위는 공용터널 직하부를 기점으로 50m 전부터 시공터널 굴착에 따른 공용터널 계측자료를 이용하여 공용터널 내공변위의 추세예측이다. 예측기법으로는 시계열분석기법 중 하나인 진보된 ARIMA모형을 이용하였다. ARIMA모형 분석은 Box-Jenkins ARIMA 절차로 수행하였다[7]. Box-Jenkins ARIMA 절차는 세 단계를 거치며, 각 단계별 검증 작업을 수행 후 최적 모델을 선정하였다. 선정된 모델을 이용하여 시공터널 굴착에 따른 공용터널 내공변위 추세를 예측하였다. 추세를 예측한 내공변위값과 시공터널 굴착시 공용터널에서 계측된 내공변위값을 비교·분석하여 추세의 적합성을 확인하였다.

## 2. 현장 적용 프로젝트의 설계현황 및 관리기준

공용터널과 시공터널의 교차구간 중 공용터널의 암반

등급은 Ⅲ등급, 시공터널의 암반등급은 Ⅱ등급으로 구성되어 있다. 시공터널은 공용터널과 약 35°각도로 교차되어 있다. 공용터널과 시공터널의 평면은 Fig. 1과 같다.

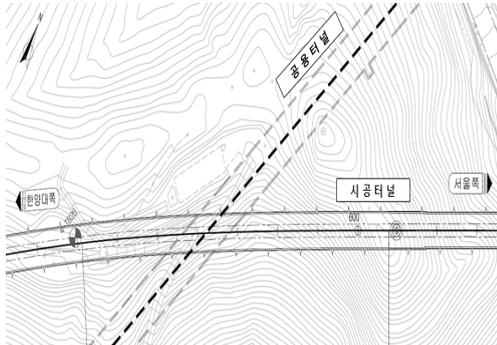


Fig. 1. Plan view of the intersection section between the operating tunnel and the construction tunnel

공용터널은 토피고 약 58m에 위치하고 있으며, 시공터널은 공용터널에서 하부로 약 22.73m 이격된 위치에 계획되어 있다. 종단면도는 Fig. 2와 같다.

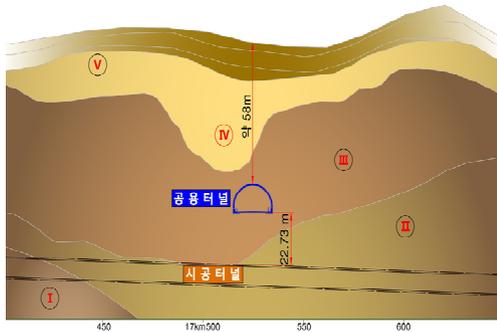


Fig. 2. Cross-sectional view of the intersection section between the operating tunnel and the construction tunnel

공용터널 단면은 폭 15.2m, 높이 11.2m로 구성되어 있고, 시공터널 단면은 폭 11.68m, 높이는 8.12m로 구성되어 있다. 시공터널 굴착에 따른 공용터널 내공변위계의 관리기준은 3단계로 관리하도록 규정하고 있다. 3mm이내는 안전, 3~4mm는 주의, 4mm 이상은 위험으로 관리해야 한다. 내공변위 관리기준은 Table 1과 같다[8].

Table 1. Convergence management criteria

| 항 목  | 1차 관리 기준치(안전) | 2차 관리 기준치(주의) | 3차 관리 기준치(위험) |
|------|---------------|---------------|---------------|
| 내공변위 | 3.0mm이하       | 3.0~4.0mm     | 4.0mm이상       |

### 3. 수치해석과 현장계측

#### 3.1 수치해석

수치해석은 시공터널 굴착단계에 따른 공용터널의 내공변위에 대하여 수행하였다. 수치해석은 굴착단계별 해석을 수행하였으며, 모델링 구성은 총 61단계로 진행하였다. 모델링에서 1~2단계는 원상태 및 변위 초기화, 3~4단계는 공용터널 굴착 및 라이닝, 5~61단계는 시공터널 단계별 시공을 모사하였다. 수치해석에 적용된 60단계는 100일 동안 시공 굴착한 단계이다. 해석모델은 Fig. 3과 같다.

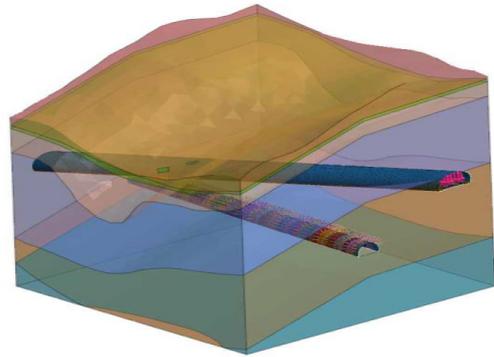


Fig. 3. Three Dimensional Analysis Model

수치해석에서 시공터널의 단계별 굴착에 따라 공용터널에 발생하는 내공변위 결과는 시공터널 직상부, 1D 전후 간격 및 2D 전후 위치의 절점에 대하여 분석하였다. 이에 대한 수치해석 결과는 Fig. 4와 같다. 수치해석 결과 시공터널 직상부와 1D지점을 지난 후 내공 변위가 가장 크게 발생하였으며, 변위는 0.18mm이다. 공용터널 직상부 내공변위는 1D지점을 지난 후 내공변위보다 급격하게 발생하는 경향을 보였다.

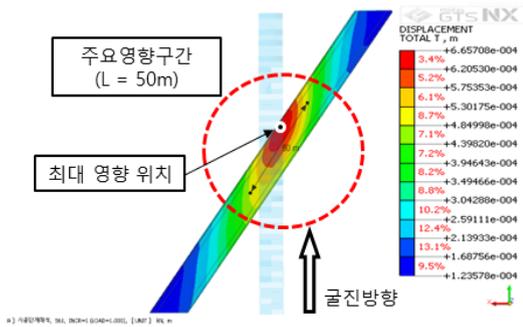


Fig. 4. Distribution of bottom displacement in the operating tunnel by construction tunnel excavation stages

수치해석에 의한 시공단계별 공용터널의 내공변위 결과의 Fig. 5와 같다.

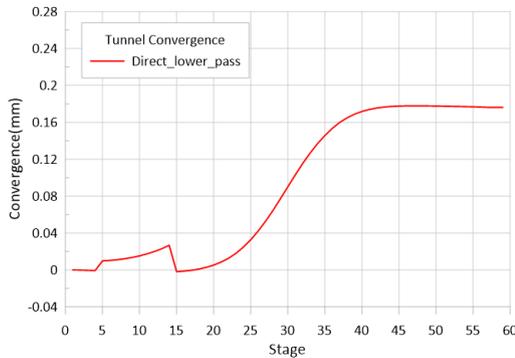


Fig. 5. Convergence of the operating tunnel by numerical analysis

### 3.2 현장계측

현장계측은 수치해석 결과를 참고하여 공용터널과 시공터널 교차부의 공용터널 내에 내공변위계를 설치하였다. 내공변위에 대한 계측은 30분 간격으로 수행하였으며 수치해석에 의한 시공터널의 굴착단계를 고려하여 일일 간격의 평균 계측값으로 정리하였다. 공용터널에 내공변위계를 설치한 평면도와 단면도는 Fig. 6과 같다. Table 2는 30분 간격의 현장계측 Data를 일일 평균값으로 정리하여 표기하였다. Fig. 7은 Table 2에 대하여 그래프로 나타내었다.

현장 계측 결과 공용터널 직하부 구간의 시공터널 굴착 완료 후 공용터널 내공변위는 최대 0.028mm 발생하였다. 이는 수치해석 최대결과값인 0.18mm에 비해 매우 적은 15% 정도의 변위가 발생되었다.



Fig. 6. Installation of convergence gauges in the structure of the operating tunnel

Table 2. Convergence by instrument

| Day | Converge (mm) | Day | Converge (mm) | Day | Converge (mm) |
|-----|---------------|-----|---------------|-----|---------------|
| 0   | 0.0137        | 50  | 0.0231        | 90  | 0.0282        |
| 1   | 0.0138        | 51  | 0.0238        | 91  | 0.0281        |
| 2   | 0.0140        | 52  | 0.0240        | 92  | 0.0281        |
| 3   | 0.0140        | 53  | 0.0248        | 93  | 0.0279        |
| 4   | 0.0143        | 54  | 0.0247        | 94  | 0.0280        |
| 5   | 0.0143        | 55  | 0.0248        | 95  | 0.0279        |
| 6   | 0.0154        | 56  | 0.0249        | 96  | 0.0280        |
| 7   | 0.0154        | 57  | 0.0250        | 97  | 0.0277        |
| 8   | 0.0140        | 58  | 0.0249        | 98  | 0.0273        |
| 9   | 0.0140        | 59  | 0.0250        | 99  | 0.0274        |
| 10  | 0.0141        | 60  | 0.0250        | 100 | 0.0276        |
| 49  | 0.0228        | 89  | 0.0283        |     |               |

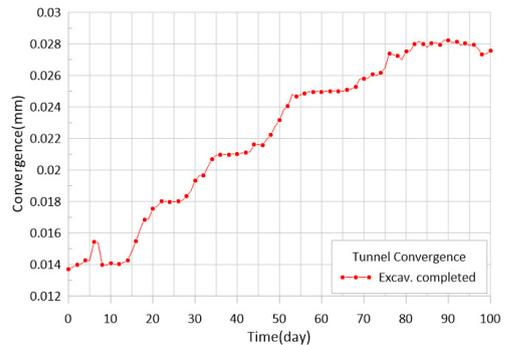


Fig. 7. Convergence by instrument

## 4. ARIMA 분석

### 4.1 개요

시계열 분석은 시계열을 그림으로 나타내거나, 표본자 기공분산함수, 표본자기상관함수 등의 기본적인 기술 통계계를 이용하여 시계열의 특징을 간결하게 표현하는 것이다. 시계열에는 다양한 특징을 가진 것들이 있으므로, 분석 대상과 목적에 따라 적절한 시계열 모델을 선택하고, 그 모델에 포함된 파라미터를 추정하는 것이 필요하다. 추세예측은 정성적기법과 정량적기법이 있다. 시계열 자료를 대상으로 하는 정량적인 예측 방법(forecasting method)에는 고전적인 방법인 지수평활법(Exponential Smoothing)과 확률적인 방법인 ARMA 및 ARIMA 모형 등이 있다. 지수평활법은 평활상수의 선택이 임의적일 수 있다는 단점이 있어 ARIMA 모형보다 신뢰도가 떨어진다. 자기회귀 이동평균 모형(ARMA)은 정상시계열의 적용에 적합한 모형이며, 자기회귀 누적 이동평균 모형(ARIMA)은 비정상시계열에 적합한 모형이다. 시계열 데이터는 대부분 비정상 시계열이다. 비정상 시계열은 통계적 모델링과 예측에 있어 예측 가능하고 안정적인 패턴을 보여주는 정상 시계열로 변환하여 ARIMA 분석을 수행하여야 한다. 본 논문의 시계열 데이터는 비정상시계열이므로 ARIMA모형을 적용하여 추세예측을 분석하였다.

시계열 데이터는 대부분 비정상 시계열이다. 비정상 시계열은 통계적 모델링과 예측에 있어 예측 가능하고 안정적인 패턴을 보여주는 정상 시계열로 변환하여 ARIMA 분석을 수행하여야 한다. 시계열 데이터의 정상성 여부는 모델의 정확도, 신뢰성, 해석 가능성에 중대한 영향을 미치게 된다. 따라서 예측 모델을 구축하기 전에 시계열 데이터의 정상성 여부를 확인하고, 필요한 경우 차분, 변환 등의 방법을 통해 데이터를 정상화하는 것이 매우 중요하다. 이렇게 함으로써 모델의 예측 성능을 향상시키고, 잘못된 결론을 도출하는 위험을 줄일 수 있다.

ARIMA 분석은 Autoregressive Integrated Moving Average 라는 뜻으로, AR(Autoregression) 모형과 MA(Moving Average) 모형을 합친 모형이며 자기상관을 갖고 있어야 한다. ARIMA 모형은 시계열 데이터가 정상성이라고 가정한다. 즉, 시계열 데이터의 특성이 시간의 흐름에 따라 변하지 않음을 의미한다.

ARIMA 분석을 위한 첫 단계에서는 모형 식별의 단계에서  $p$ ,  $q$ 의 차수를 정하는데, 이를 위해 ACF(Autocorrelation function)와 PACF(Partial autocorrelation function)를 구한다.

두 번째 단계는 모형 식별 과정에서 선택된 모델로 모수를 추정하게 된다. 모형의 파라미터 값들이 추정되면,

시계열자료가 그 모형에 얼마나 잘 적합되는지를 진단해야 하는데, 그 적합도로서 AIC(Akaike Information Criterion), AICc(corrected Akaike Information Criterion) 또는 BIC(Bayes Information Criterion) 값이 가장 작은 ( $p$ ,  $q$ )가 가장 근사한 모형이라고 판단할 수 있다. ARIMA 모델은  $p$ (AR 모델의 차수),  $d$ (정상시계열로 만들기 위한 차분의 횟수),  $q$ (MA 모델의 차수)가 필요하다. ACF, PACF에 따라 모델을 선택한 후 개략적인 차수를 선정하게 되고, 그 차수로 선택된 모델을 검정하게 되며, 그 과정에서 분석모델의 추정 차수가 커지면 추적의 효율성이 떨어질 우려가 있어 분석모델에 사용되는 차수의 수를 줄이는 원칙을 적용하는 것이 바람직하다.

세 번째 단계로 모델의 차수가 추정되면 모델이 적합한지 확인하게 된다. 예측오차 신뢰성을 평가하기 위해 ME(Mean Error), RMSE(Root Mean Square Error), MSD(Mean Squared Deviation) 등을 비교하고, 회귀의 예측변수를 고를 때 사용하는 AIC가 낮은 것을 선택한다. 잔차의 ACF를 이용하여 적합성을 판단하고 잔차가 정규분포를 따르는지, 잔차끼리 독립인지를 판단하기 위해 Box-Ljung test를 수행한다. 이 결과에서도 차수가 유사한 모델이 하나 이상 선정된다면 차수가 낮은 것을 선정하는 것이 바람직하다. 최적의 모델을 선정하기 위해 유사한 여러 가지 차수를 적용하여 적합성이 높은 것을 선택한다.

마지막 단계로 모형의 적합성을 통계량에 따라 분석해야 한다. 잔차들은 통계적으로 서로 독립되어야 하는데, 이를 위해 잔차 자기상관함수의 Ljung-Box 검증에서 유의수준이 0.05보다 커야 한다. 평균제곱편차 MSD는 적합 시계열 값의 정확도를 측정한다. 또한, 평균제곱오차 MS(Mean Squared)를 사용하면 모형이 데이터를 얼마나 잘 적합시키는지 확인할 수 있다. 값이 작을수록 더 적합한 모형을 나타낸다. 이러한 기준을 만족해야만, 분석에 적용한 ARIMA 모델이 주어진 시계열 자료를 분석하는데 적합하다고 할 수 있다.

## 4.2 ARIMA 분석

공용터널의 내공변위 시계열계측에 대한 기술통계분석 결과는 Table 3과 같다.

공용터널의 내공변위에 대한 계측결과 평균은 0.022mm, 중위값은 0.023mm, 가장 많은 관측값이 나타나는 최빈값은 0.028mm 가 분석되었다. 최대값은 0.028, 최소값은 0.0137, 왜도는 -0.3979, 첨도는 -1.1926mm로 분석되었다. 이는 정규분포가 좌우대칭이 아니고 우측으로

기울어져 있는 분포가 나타나게 됨을 의미한다. 즉 좌측 하단이 길어지는 분포형태를 가지게 된다.

Table 3. Reference values of random variables

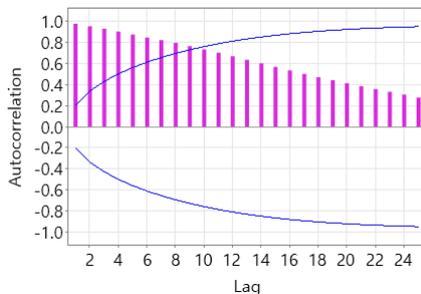
| Classification | Statistic  | Classification   | Statistic        |
|----------------|------------|------------------|------------------|
| Mean           | 0.02219493 | Minimum          | 0.01370833       |
| Median         | 0.0237     | Skewness         | -0.39794705      |
| Mode           | 0.0281     | Kurtosis         | -1.19263399      |
| Variance       | 0.00002357 | Mean + 1 * Sigma | 0.0174 to 0.0271 |
| Sum of Squares | 0.052134   | Mean + 2 * Sigma | 0.0125 to 0.0319 |
| Maximum        | 0.02825000 | Mean + 3 * Sigma | 0.0076 to 0.0368 |

시계열 데이터가 정상적인지 아닌지를 판별하는 데 사용되는 통계적 방법인 ADF (Augmented Dickey-Fuller) 검정을 사용하여 분석한 결과 p-value 0.999는 유의수준인 0.05보다 크고 자기상관함수는 서서히 감소되는 그래프이므로 계측데이터는 비정상 시계열이다. 따라서 예측 모델을 만들기 전에 차분등을 통하여 정상성으로의 변환이 필요하다.

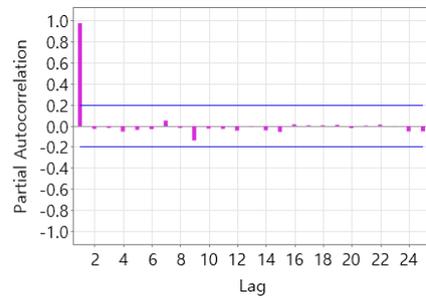
Table 4. Augmented Dickey-Fuller Test

| Test Statistic | P-Value | Recommendation                                 |
|----------------|---------|--|
| 2.60903        | 0.999   | Test statistic > critical value of -1.94406.   |
|                |         | Significance level = 0.05                      |
|                |         | Fail to reject null hypothesis.                |
|                |         | Consider differencing to make data stationary. |
|                |         | Null hypothesis: Data are non-stationary       |
|                |         | Alternative hypothesis: Data are stationary    |

Table 4는 ADF 검정결과를 나타내었다. Fig. 8은 자기상관함수와 편자기상관함수에 대한 상관도표이다.



(a) Autocorrelation function



(b) Partial autocorrelation

Fig. 8. Correlogram

Fig. 9는 비정상 시계열에 대한 데이터에 대하여 정상 시계열로 변환하기 위하여 1차 차분한 그래프를 나타내었다.

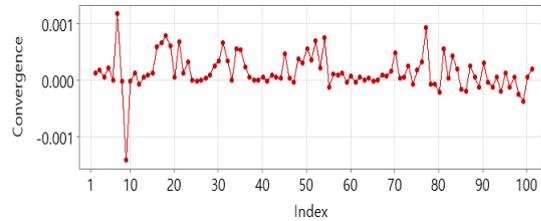
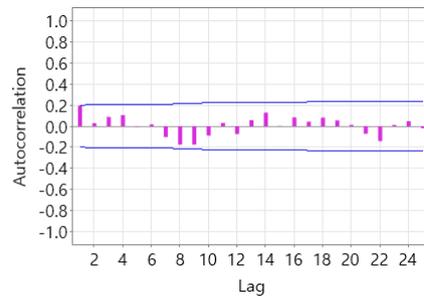


Fig. 9. Time Series Plot for Convergence after Differencing

1차 차분 후 데이터가 정상시계열인지 비정상시계열 인지를 판단하기 위하여 차분후 자기상관함수와 편자기상관함수에 대한 상관도표를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10의 1차 차분후 상관도표에서와 같이 1차 차분으로 비정상시계열데이터는 정상시계열로 변환되었다. 따라서 1차 차분과 AR 및 MA를 통한 ARIMA 분석으로 추세를 예측하였다.



(a) ACF after Differencing

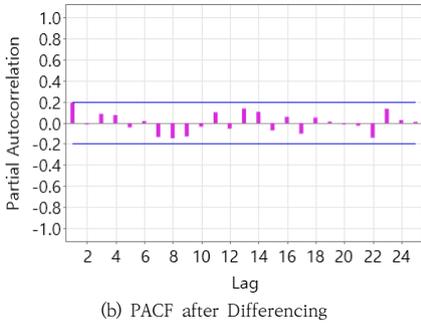


Fig. 10. Correlogram after differencing

공용터널 내공변위에 대한 최상의 ARIMA 모형으로 예측한 모형은 1차 차분한 모델( $d = 1$ )의 경우에 대하여 Table 5와 같이 다양한 경우의 모형이 있다. 이중 최상의 모형은 AIC 값이 가장 작은 수가 근사한 모형이라고 판단할 수 있다. 따라서 ARIMA(0,1,1)모형에 대하여 추세를 예측을 분석하였다.

Table 5. Alternative design, case of the model( $d = 1$ )

| AR(p), MA(q)        | Log Likelihood | AICc            | AIC             | BIC             |
|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>p = 0, q = 1</b> | <b>667.794</b> | <b>-1329.34</b> | <b>-1329.59</b> | <b>-1321.77</b> |
| p = 1, q = 0        | 667.776        | -1329.30        | -1329.55        | -1321.74        |
| p = 0, q = 0        | 665.869        | -1327.61        | -1327.74        | -1322.53        |
| p = 0, q = 2        | 667.783        | -1327.14        | -1327.57        | -1317.14        |
| p = 2, q = 0        | 667.769        | -1327.12        | -1327.54        | -1317.12        |
| p = 1, q = 2        | 666.192        | -1323.96        | -1324.38        | -1313.96        |
| p = 2, q = 1        | 666.123        | -1323.82        | -1324.25        | -1313.82        |
| p = 1, q = 1        | 664.751        | -1323.25        | -1323.50        | -1315.69        |
| p = 2, q = 2        | 666.175        | -1321.71        | -1322.35        | -1309.32        |

ARIMA(0,1,1)모형의 적합성에 대한 검증은 Table 6에서와 같이 수정된 Box-Pierce (Ljung-Box)카이-제곱 통계량 분석을 통하여 평가하였다. 적합성을 분석한 결과 P-value가 0.05보다 큰 값이므로 잔차간 자기상관성이 없고 잔차가 정상시계열을 만족하는 적합한 모형이다. Table 7은 ARIMA(0,1,1) 모형에 대한 결과값이다.

Table 6. Modified Box-Pierce Chi-Square static

| Lag Time   | 12    | 24    | 36    | 48    |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| Chi-Square | 8.77  | 16.12 | 28.18 | 39.97 |
| DF         | 10    | 22    | 34    | 46    |
| P-value    | 0.554 | 0.810 | 0.748 | 0.722 |

\* DF는 Degrees of Freedom

Table 7. ARIMA(0,1,1) Model Summary

| DF | SS        | MS        | MSD       | AICc     | AIC      | BIC      |
|----|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| 98 | 0.0000093 | 0.0000001 | 0.0000001 | -1329.34 | -1329.59 | -1321.77 |

\* SS는 Sum of Squares

Table 7에서와 같이 ARIMA(0,1,1) 모형은 평균제곱오차(MS)와 평균제곱편차(MSD)값이 매우 적어 모형의 데이터가 적합하고 시계열 값의 정확도는 매우 높다. 일반적으로 ARIMA분석에서는 임의의 기간에 대한 예측값을 얻을 수 있으나 예측의 길이가 길면 길수록 정확도가 떨어지는 단점이 있으므로 정확성을 확보하기 위하여 20일 주기를 선정하여 추세예측을 분석하였다. Table 8은 공용터널 내공변위의 20일에 대한 시계열계측데이터를 바탕으로 ARIMA분석을 통해 20일간 추세를 예측하여 테이블로 정리하였다. 초기 20일 예측후 20일 이후에 대하여 추세를 예측한 결과 실제측과 오차가 최대 0.002mm 발생하였다. 이는 ARIMA(0,1,1)모형이 단기 추세 예측에 있어 적합한 모형임을 알 수 있다.

Table 8. ARIMA forecasting for 20days after 20-day measurement

| Period (day) | Forecast (mm) | 95% Limits |            | Actual (mm) | Error (mm) |
|--------------|---------------|------------|------------|-------------|------------|
|              |               | Lower (mm) | Upper (mm) |             |            |
| 21           | 0.017         | 0.016      | 0.018      | 0.018       | -0.001     |
| 22           | 0.017         | 0.016      | 0.018      | 0.018       | -0.001     |
| 23           | 0.017         | 0.016      | 0.018      | 0.018       | -0.001     |
| 24           | 0.017         | 0.016      | 0.019      | 0.018       | -0.001     |
| 25           | 0.018         | 0.016      | 0.019      | 0.018       | 0.000      |
| 26           | 0.018         | 0.016      | 0.019      | 0.018       | 0.000      |
| 27           | 0.018         | 0.016      | 0.020      | 0.018       | 0.000      |
| 28           | 0.018         | 0.016      | 0.020      | 0.018       | 0.000      |
| 29           | 0.018         | 0.016      | 0.020      | 0.018       | 0.000      |
| 30           | 0.018         | 0.016      | 0.020      | 0.019       | 0.000      |
| 31           | 0.018         | 0.016      | 0.021      | 0.019       | -0.001     |
| 32           | 0.019         | 0.016      | 0.021      | 0.020       | -0.001     |
| 33           | 0.019         | 0.016      | 0.021      | 0.020       | -0.001     |
| 34           | 0.019         | 0.016      | 0.021      | 0.020       | -0.001     |
| 35           | 0.019         | 0.016      | 0.022      | 0.021       | -0.002     |
| 36           | 0.019         | 0.016      | 0.022      | 0.021       | -0.002     |
| 39           | 0.019         | 0.016      | 0.023      | 0.021       | -0.001     |
| 40           | 0.020         | 0.016      | 0.023      | 0.021       | -0.001     |

Fig. 11는 공용터널의 내공변위 시계열 데이터에 대한 20일 예측결과를 바탕으로 ARIMA분석을 통하여 20일간 추세를 예측하여 그래프로 표현하였다.

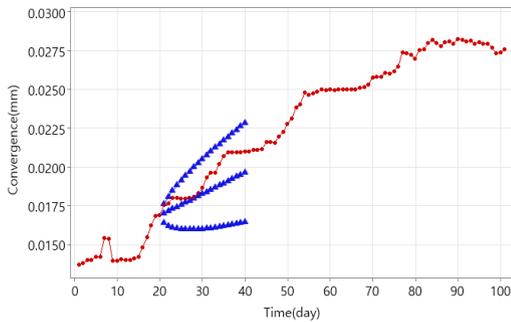


Fig. 11. ARIMA forecasting model for 20days after 20-day measurement

20일간 계측이후 20일만에 대한 내공변위의 추세를 예측한 결과 최대변위는 0.02mm 발생하였다. 이는 내공변위 1차관리기준치 3mm 대비 0.67%이다. 실제측값은 0.021mm 발생하였고, 이는 1차관리기준치 3mm 대비 0.7%이다. Table 9는 60일에 대한 시계열계측데이터를 바탕으로 ARIMA분석을 통해 20일간 추세를 예측하여 테이블로 정리하였다. 초기 60일 계측후 20일 이후에 대하여 추세를 예측한 결과 실제측과 오차가 최대 0.001mm 발생하였다.

Table 9. ARIMA forecasting for 20days after 60-day measurement

| Period (day) | Forecast (mm) | 95% Limits |            | Actual (mm) | Error (mm) |
|--------------|---------------|------------|------------|-------------|------------|
|              |               | Lower (mm) | Upper (mm) |             |            |
| 61           | 0.025         | 0.025      | 0.026      | 0.025       | 0.000      |
| 62           | 0.025         | 0.024      | 0.026      | 0.025       | 0.000      |
| 63           | 0.025         | 0.024      | 0.027      | 0.025       | 0.000      |
| 64           | 0.026         | 0.024      | 0.027      | 0.025       | 0.001      |
| 65           | 0.026         | 0.024      | 0.027      | 0.025       | 0.001      |
| 66           | 0.026         | 0.024      | 0.028      | 0.025       | 0.001      |
| 75           | 0.027         | 0.024      | 0.030      | 0.026       | 0.001      |
| 76           | 0.027         | 0.024      | 0.030      | 0.026       | 0.001      |
| 77           | 0.027         | 0.024      | 0.030      | 0.027       | 0.000      |
| 78           | 0.027         | 0.024      | 0.031      | 0.027       | 0.000      |
| 79           | 0.028         | 0.025      | 0.031      | 0.027       | 0.000      |
| 80           | 0.028         | 0.025      | 0.031      | 0.027       | 0.001      |

Fig. 12는 공용터널의 내공변위 시계열 데이터에 대한 60일 계측결과를 바탕으로 ARIMA분석을 통하여 20일간 추세를 예측하여 그래프로 표현하였다.

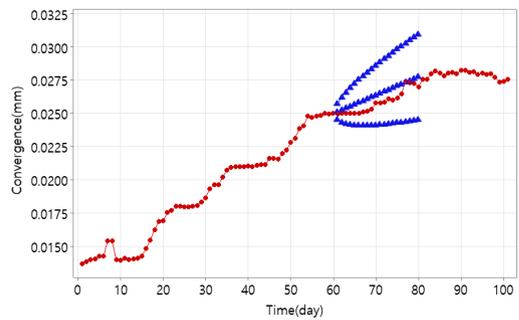


Fig. 12. ARIMA forecasting model for 20days after 60-day measurement

60일간 계측이후 20일만에 대한 내공변위의 추세를 예측한 결과 최대변위는 0.028mm 발생하였다. 이는 내공변위 1차관리기준치 3mm 대비 0.93%이다. 실제측값은 0.027mm 발생하였고, 이는 1차관리기준치 3mm 대비 0.9%이다.

시공터널과 공용터널의 내공변위 계측데이터는 ADF 검정결과 p-value가 유의수준인 0.05보다 크고 자기상관함수는 서서히 감소되는 비정상 시계열을 확인하였다. 비정상적 시계열 데이터는 차분을 통하여 정상시계열로 변환하여 최적의 ARIMA모형을 이용하여 추세예측을 수행하였다.

추세예측에 적용되는 ARIMA모형은 Box-Pierce 카이-제곱 분석을 통하여 P-value값이 유의수준 0.05 이상으로 모델의 적합성을 확인하였고, 평균제곱오차(MS)와 평균제곱편차(MSD)를 통하여 모형의 정확도가 매우 높음을 확인하였다. 시공터널과 공용터널의 ARIMA분석을 통한 추세예측은 실제측과 오차가 최대 0.002mm 발생하였고 95% 한계값 이내이므로 매우 적합하게 예측되었다.

## 5. 결론

본 연구는 기존의 공용터널 직하부에 인접하여 신설하는 터널을 굴착할 경우 공용터널에 미치는 내공변위 영향을 분석하고 추세를 예측하는 것을 연구목적으로 한다. 추세예측 방법은 시계열계측데이터의 비정상성을 정상성으로 차분이 가능한 ARIMA 분석을 통한 최적모형을 적용하였다. 기존의 공용터널과 시공터널의 계측자료에 따른 ARIMA 분석결과, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

공용터널 내공변위 계측데이터에 대한 ADF검정결과

p-value 0.9999로 유의수준인 0.05보다 크고 자기상관 함수는 서서히 감소되는 비정상 시계열을 확인하였다. 비정상적 시계열 데이터는 차분을 통하여 정상성으로 변환하고 ARIMA(0,1,1)모형을 이용하여 추세예측을 수행하였다.

Box-Pierce 카이-제곱 검정에 의한 P-value값 0.554는 유의수준 기준인 0.05 이상이므로 모델의 적합성을 확인하였다. 평균제곱오차(MS) 0.0000001와 평균 제곱편차(MSD) 0.0000001는 모형 데이터의 정확도가 매우 높음을 확인하였다. 20일간 계측이후 20일간에 대한 내공변위의 추세를 ARIMA분석을 통하여 예측한 결과 최대변위는 0.02mm 발생하였다. 이는 내공변위 1차 관리기준치 3mm 대비 0.67%이다. 실제측값은 0.021mm 발생하였고, 이는 1차관리기준 치 3mm 대비 0.7%이다. 단기 추세예측 결과는 실제측과 오차가 최대 0.002mm 발생하였다. 이는 95% 신뢰한계값 이내이므로 매우 적합하게 예측되었다.

본 연구에서는 데이터 분석, 예측이 가능한 범용프로그램 Minitab의 자동화 머신러닝 기능인 진보된 ARIMA 분석을 적용하여 Table 5와 같이 다양한 대체 모형을 제시하였고, 제시 모형 중 Akaike의 정보기준(AIC)과 같은 최적값을 가진 ARIMA 모형을 적용하여 추세예측을 분석하였다.

향후 연구에서는 공용터널과 시공터널이 교차되는 위치에서 시공 굴착에 따른 공용터널의 안정성을 확보하기 위하여 ARIMA 분석에 의한 추세예측의 정확성 여부를 스스로 판단할 수 있는 딥 러닝 모델 개발이 필요할 것으로 판단된다.

## References

[1] Son, M., Cording, E. J., "Estimation of Building Damage Due to Excavation-Induced Ground Movements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.131, Issue.2, pp.162-177, Feb. 2005. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(162\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(162))

[2] Ma, Q., Liu, S., Fan, X., Chai, C., Wang, Y., Yang, K., "A time series prediction model of foundation pit deformation based on empirical wavelet transform and NARX network", *MDPI Mathematics*, Vol.8, No.9, pp.1,535-1,546, Sep. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/math8091535>

[3] Lee, J. I., Kim, C. H., "Stress analysis and deformation behaviour of rock around underground caverns by back analysis of field measurements : (I)

Characteristics Analysis of Measured Convergence Displacement", *Tunnel and underground space*, V.1, No.1, pp.75-90, May. 1991.

<https://koreascience.kr/article/JAKO199111920161046.page>

- [4] Park, D. R., Eum, K. Y., Cho, K. H., "A Study on the stability of passing Construction Method under the Station Structure", *Journal of Korean Society for Railway*, pp.1,146-1,154., November 2013. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02282149>
- [5] Jung, J. H., Kim, B. K., Chung, H. Y., Kim, H. M., Lee, I. M., "A ground condition prediction ahead of tunnel face utilizing time series analysis of shield TBM data in soil tunnel", *J. of Korean Tunn Undergr Sp.Assoc.*, Vol.21, No.2, pp.227-242., Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.2.227>
- [6] Park, J. H., Lee, H., Kim, C. Y., Park, C. M., Kim, J. E., "Development of web-based system for ground excavation impact prediction and risk assessment", *J. of Korean Tunn Undergr Sp.Assoc.*, Vol.23, No.6, pp.559-575., Nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.6.559>
- [7] Box, G. E. P & Jenkins, G. M., *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, p.537, Holden-Day, 1970, pp. 199-243. DOI: <https://doi.org/10.2307/3008255>
- [8] Seoul Metropolitan Infrastructure Headquarters, *Improvement of Seoul Subway Instruments Mangemet Guidelines*, p.226, Seoul Metropolitan Infrastructure Headquarters, 2015, pp.205-206. <https://news.seoul.go.kr/citybuild/archives/228263>

김 경 용(Kyung-Yong Kim)

[정회원]



- 2012년 8월 : 서울시립대학교 과학기술대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도시스템공학과 (공학석사)

• 2022년 8월 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도 건설공학과 (박사수료)

• 1995년 7월 ~ 현재 : 롯데건설(주)

<관심분야>

철도건설, 토질및기초, 토목시공, 건설안전

조 국 환(Kook-Hwan Cho)

[정회원]



- 1990년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 2002년 5월 : North Carolina State University, Department of Civil Engineering (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도건설공학과 교수

〈관심분야〉

철도건설, 토질및기초

---

손 석 철(Seok-Chul Son)

[정회원]



- 2011년 2월 : 인하대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 토목공학과 (박사과정)
- 2010년 7월 ~ 현재 : 롯데건설(주)

〈관심분야〉

철도건설, 토목시공, 건설안전, 도로및공항