

# 부시네스크 식을 이용한 인접 센서 데이터 추세 분석 기반 손망실 계측 센서 데이터 추정 기법

최상일<sup>1</sup> · 심승보<sup>2</sup> · 공석민<sup>3</sup> · 이성원<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구원

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 박사후연구원

<sup>4</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구위원

## Lost measurement sensor data estimation technology based on trend analysis of adjacent sensors using Boussinesq equation

Sang-Il Choi<sup>1</sup> · Seungbo Shim<sup>2</sup> · Suk-Min Kong<sup>3</sup> · Seong-Won Lee<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>2</sup>Junior Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>3</sup>Post-Doctoral Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>4</sup>Senior Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*Corresponding Author : Seong-Won Lee, swlee@kict.re.kr

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
23(4)221-232(2021)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2021.23.4.221>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received June 10, 2021

Revised July 2, 2021

Accepted July 2, 2021



This is an Open Access article  
distributed under the terms of the  
Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2021, Korean Tunnelling and Underground  
Space Association

### Abstract

Most of measurement sensors used for maintenance are continuously exposed to various environmental factors such as transportation and rainfall, so the possibility of breakage increases gradually. The maintenance measurement sensor of domestic subway tunnel shows an average of 14.2% to 14.8% of loss rate after about 5 to 6 years from installation, and it shows a sensor loss rate of about 13.9% in case of foreign countries. As a result, it can be seen that an average of 15% of maintenance measurement sensors at home and abroad cannot send measuring values after 5~6 years. In order to continuously collect accurate data, measurement data must be recovered by performing repair or replacement of the sensor, but some lost measurement sensors are buried after installation. So, there are many difficulties in repairing sensors, including cost and time. Therefore, in this paper, we propose lost measurement sensor data estimation technology based on data trend analysis using adjacent sensors.

**Keywords:** Data estimation, Lost measurement sensor, Data trend analysis, Boussinesq equation, Underground infrastructure

[www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr)

## 초 록

유지관리에 활용되는 계측 센서들은 교통 수단 통행 및 강우와 같은 다양한 환경적인 요인에 지속적으로 노출됨으로써 손망실 가능성이 점차 증가하게 된다. 관련 연구에 따르면, 국내 지하철 터널 유지관리 계측 센서는 설치 후 약 5~6년이 경과한 상태에서 평균 14.2~14.8%의 손망실율을 보이고, 국외의 경우에는 동일 기준 약 13.9%로 국내외 평균 15%의 유지관리 계측 센서가 5~6년이 지난 후 정상적인 계측 값을 제공하지 못한다는 것을 알 수 있다. 원활한 유지관리를 위해서는 손망실 계측 센서에 대한 보수 및 교체를 통해 해당 계측 데이터를 확보해야 하지만, 일부 손망실된 계측 센서의 경우에는 설치 후 매립되어 유지보수 비용에 단순한 장비 구입만이 아닌 재시공까지 포함되는 등 계측 센서 보수에는 많은 시간 및 비용이 소요되고 이로 인한 지속적인 데이터 손실이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 손망실 계측 센서의 보수 및 교체 기간 동안 일시적으로 손실되는 데이터를 추정치로서 보완하여 끊임 없는 인프라 유지관리를 지원할 수 있는 인접 센서 데이터 추세 분석 기반 손망실 계측 센서 데이터 추정 기법을 제안한다.

**주요어:** 데이터 추정, 손망실 계측 센서, 데이터 추세 분석, 부시네스크 방정식, 지하 인프라

## 1. 서론

터널은 지반조건 및 규모에 따라 거동 양상이 달라지며, 경험 기반의 판단에는 한계가 존재하여 정량적인 측정 자료를 바탕으로 합리적인 공학적 판단을 수행해야 한다. 이러한 합리적인 판단의 근거 자료가 되는 터널 계측은 안전하고 경제적인 인프라 운영을 지원하는 중요한 요소로서(Rastogi, 2008; Strauss et al., 2020), 지속적인 계측 데이터 분석을 통한 과도한 변위 상황이나 붕괴의 징후를 사전에 감지함으로써 이상 상황에 대한 사전 보수 및 피해 최소화에 크게 기여한다.

이렇게 터널 계측은 안전 측면에서 그 중요도가 매우 크기 때문에, 계측 센서들을 활용한 지속적인 시공 현장에서의 데이터 수집은 필수적이다. 하지만 지하 인프라의 계측 센서들은 설치 위치와 주변 환경이 열악하기 때문에 계측 센서의 손망실 비율이 매우 높다(Woo, 2018; 2021). 서울지하철 5, 6, 7호선 도심지역 공사구간에 터널 유지관리 계측센서는 설치 후 약 5~6년이 경과한 상태에서 총 14.2~14.8%의 손망실율을 보였고, 국외 Channel Tunnel의 경우에는 총 13.9%의 손망실율을 보였다. 집중호우로 인한 우수유입, 시공사의 시공 수준, 개별 계측 센서 장비의 내구성 등 다양한 손망실 요인이 존재하지만, 결과적으로 약 15% 정도의 계측기가 설치 후 약 5~6년이 지난 시점에서 제기능을 하지 못할 가능성이 매우 높을 것으로 예상되며, 지속적인 지하 터널 인프라의 데이터 및 상태 분석을 위해서는 계측기의 보수 및 재설치가 요구됨을 알 수 있다(Woo, 2013). 하지만, 일부 계측기는 설치 후 매립되는 등 손망실된 계측기의 보수 및 재설치에도 긴 시간과 높은 비용이 소요될 수 있다. 이처럼 손망실된 계측기의 보수 및 재설치가 완료되는데 소요되는 시간이 길어질 경우, 해당 지점에 대한 계측 데이터는 누락된 상태를 장기간 유지하게 되고, 해당 인프라에 대한 안전성과 같은 상태를 검토하는 데이터에도 공백이 생기게 되어 위험 상황에 대한 사전 파악 및 대처의 지연을 야기할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 계측기에 대한 보수 및 재설치가 완료되는 시기까지 일시적으로 해당 계측 지점의 데이터와 유사성이 높은 값을 추정하여 계측 데이터 테이블에 추가함으로써 손실되는 계측 데이터를 보완함으로써, 향후 계측 센서의 유지보수가 완료되어 정상 데이터가 확보될 때까지 지속적이고 신뢰성 높은 계측 데이터 분석 업무가 유지될 수 있는 인접 센서의 데이터 추세 분석 기반 손망실 계측 센서 데이터 추정 기술을 제안한다. 실제 동일 시공 현장에서 선형으로 설치된 계측기에서 측정되는 데이터를 지속적으로 확보하기에는 어려움이 있기 때문에, 본 논문에서는 실제 계측 데이터가 아닌 부시네스크 방정식을 통한 집중하중에 따른 터널 지점의 거리별 응력 증가분 데이터를 활용한다(Sadek and Shahrour, 2007; Zhang et al., 2013; Wei and Jiang, 2021). 작용하중에 의하여 발생된 지중응력은 일반적으로 흙을 탄성체로 가정하여 계산하지만, 실제 자연 상태의 지반은 완전한 소성체도, 탄성체도 아니므로 지중응력을 계산하기 위해서 탄성이론을 적용하는 데는 어려움이 있다. 하지만 다른 적당한 방법이 없으며 경험적으로 탄성체로서의 가정이 실용상 지장이 없는 것으로 알려져 있고, 지중응력 산정 방법은 주로 부시네스크의 방법으로 기본으로 하고 있기에, 본 논문에서는 부시네스트 방정식을 통해 도출된 데이터를 기본 데이터로 활용한다(Chun et al., 2012).

## 2. 인접 센서 데이터 기반 손망실 계측 데이터 추정 기법

본 논문에서는 손망실 계측기의 데이터를 인접한 계측기의 데이터를 바탕으로 추정하여 보완함으로써 터널 인프라에 대한 지속적이고 신뢰성 높은 모니터링을 지원하고자 한다. 실제 현장에서 손망실 계측기를 파악하고 해당 계측기와 인접한 데이터를 직접적으로 수집하는 것은 현장 선정, 협조 요청, 자료 공유 등 다양한 사전 작업으로 긴 시간이 소요되므로, 본 논문에서는 실제 계측 데이터가 아닌 부시네스크 방정식을 통한 집중하중에 따른 터널 지점의 거리별 응력 증가분 데이터를 활용하여 손망실 계측 데이터를 추정하기 위한 연산식을 도출한다.

Fig. 1은 인접 계측 데이터 값들을 활용하여 손망실된 계측기의 측정 값을 추정하기 위한 관계식 도출을 위해 본 논문에서 가정한 지하 터널 환경 및 각 계측 지점별 응력 값 산정 방법을 나타낸다. 본 논문에서는 일정한 간격으로 설치되어 있는 선형의 응력 계측 장비를 가정하였으며, 각 계측 지점의 응력 값은 집중하중(P), 수직거리(z), 집중하중 지점과 계측 지점 간의 거리(L)을 기준으로 집중하중(z축) 방향과 평행하게 나타나는 개별 계측 지점

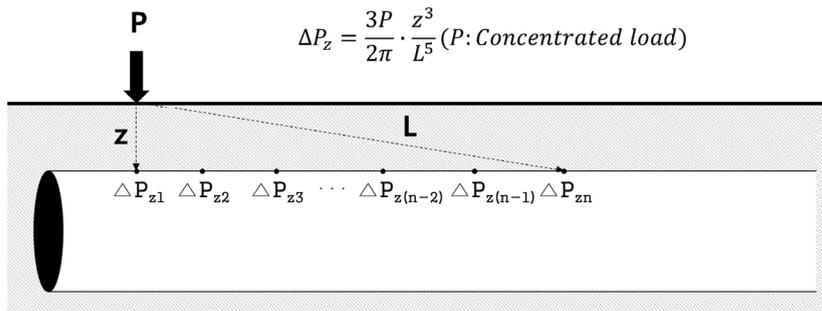


Fig. 1. Derivation of measurement data for each point using Boussinesq equation

에서의 하중 값을 도출한다.

본 논문에서는 집중하중 지점 하단 10 m ( $z = 10$ )를 기준으로, 5 m의 간격을 두고 일렬로 배치되어 있는( $x = 5 \cdot n$ ,  $y = 0$ ) 계측기들에 대해 집중하중( $P = 10$ )과 평행한 방향으로 작용하는( $\Delta z$ ) 응력 값(kN)을 기본 값으로 선정하였다. 해당 값들은 방정식을 통해 도출된 값으로, 기본 데이터를 도출하는데 활용되었던 방정식에 포함된 변수값들은 모두 연산식에서 제외되어야 한다. Fig. 2는 기본 계측값들의 변화 추이 분석을 통한 인접 계측기 간 연관식 수립을 위해 x축 거리에 따른 계측값 변화 흐름을 나타낸다.

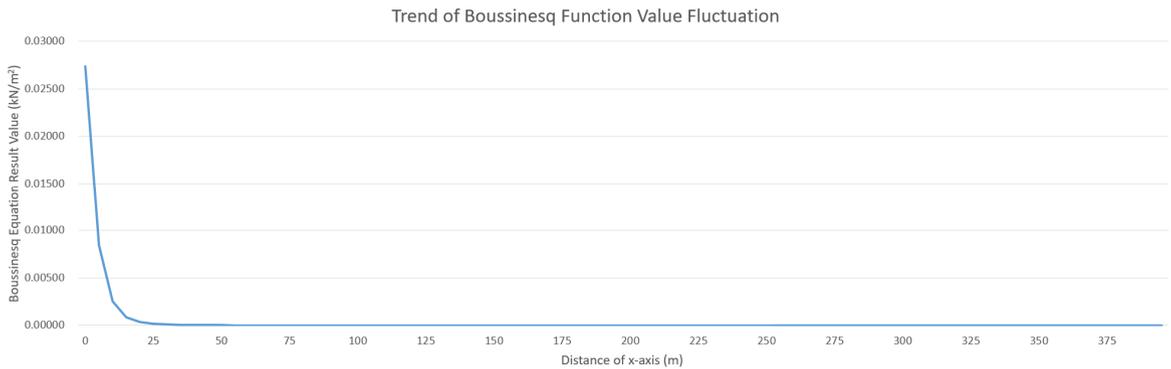


Fig. 2. Trend of Boussinesq function value fluctuation

Fig. 2를 통한 값 변화 추이를 살펴본 결과, 집중하중 지점 인근에서는 거리가 멀어짐에 따라 급격한 응력값 감소폭을 보였고, 거리가 멀어짐에 따라 점차 감소폭이 줄어들어 35~40번째 값에서부터는 집중하중과는 관계없이 일정한 값을 보임을 확인할 수 있었다. 더욱 명확한 인접 응력값 간의 상관성을 파악하기 위해 아래의 Fig. 3에서는 각 지점별 응력값이 집중하중 최초 발생 지점 방향으로 바로 직전에 위치한 지점에서 나타나는 응력값에 대비하여 감소된 비율을 나타낸다.

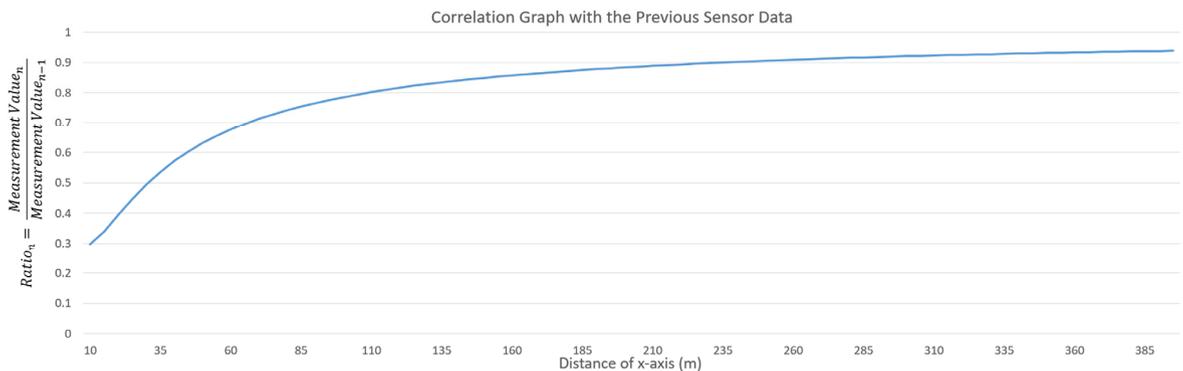


Fig. 3. Correlation graph with the previous sensor data

Fig. 3을 통해, Fig. 2와 같이 현 지점의 계측 데이터 값은 직전 계측 지점의 데이터 값에 비해 점차 감소함과 집중하중 지점에서 멀어질수록 점차 직전 계측 데이터와의 차이가 좁아지며 Y축인 직전 데이터 대비 값 비율이 점차 1에 가까워짐을 볼 수 있다. 추가로, 해당 그래프를 통해 각 지점별 계측 데이터들의 값 감소 추이를 2차 방정식의 형태로 가정할 수 있고, 이를 통해 손망실되어 누락된 계측 데이터 전후로 연속된 몇 개의 계측 데이터를 바탕으로 직전 계측 데이터 대비 현재 계측 값 비율에 대한 2차 방정식 또한 정의할 수 있다.

즉, 손실 계측 지점을 중심으로 양방향으로 연속된 소수의 계측 데이터 값을 바탕으로 범위 내의 계측 데이터 감소 추이에 대한 2차 방정식을 도출할 수 있고, 해당 2차 방정식을 활용하여 손실된 계측 지점 데이터가 가지는 직전 값 대비 감소 비율을 도출할 수 있으며, 해당 값과 직전 계측 데이터를 활용하여 손실된 계측 데이터를 추정할 수 있다.

Step 1. Basic Function :  $x_t = a \cdot R_t^2 + b \cdot R_t + c$  ( $R_t = Ratio_t$  in Fig. 3)

Step 2. Derivation of Constants using Three Value (a, b, c) :  $x_i = aR_i^2 + bR_i + c$

$$x_j = aR_j^2 + bR_j + c$$

$$x_k = aR_k^2 + bR_k + c$$

Step 3.  $x_p = aR_p^2 + bR_p + c$  ( $R_{p-1} < R_p \leq R_{p+1}$ )

Step 4.  $\therefore \Delta z_{x_p} = \Delta z_{x_{p-1}} \times R_p$  ( $\Delta z_{x_p}$  is stress at point  $x_p$ )

위의 절차는 손망실로 누락된 계측 데이터 값( $\Delta z_p$ )을 추정하기 위해 해당 지점에 인접한 3개의 계측 데이터 변동비( $(x_i, R_i)$ ,  $(x_j, R_j)$ ,  $(x_k, R_k)$ )들을 바탕으로 손실 데이터 값을 추정하는 연산의 흐름을 나타낸다. 본 논문에서는 위의 제안 절차를 바탕으로, 손망실 계측 지점 전후에 위치한 10개의 계측 데이터를 활용하여 누락된 계측 데이터에 대한 추정 및 실제 값과의 오차 범위를 확인함으로써 손실 지점의 계측 데이터 추정을 위한 최적 방식을 도출한다.

### 3. 시뮬레이션 기반 제안 기법 정확도 분석

본 장에서 제안하는 인접 계측기에서의 데이터 변동 추세를 활용한 손망실 지점 계측 데이터 추정 기법에 대한 성능 검증을 위해, 부시네스크 방정식의 변수들을 아래의 Fig. 4와 같이 가정함으로써 원본 데이터에 대한 샘플을 구성하고, 제안 기법을 활용한 특정 지점에서의 데이터 추정 값과 실제 원본 값의 오차를 Visual Studio 기반 시뮬레이션 프로그램을 이용해 비교한다(Microsoft Visual Studio).

대조 기법의 경우, 현장에서 실제 운영되고 있는 손망실 계측 지점에 대한 일시적 데이터 추정 기법에 대한 자료가 확인되지 않아 별도의 절차나 알고리즘 없이 간략하게 적용 및 운영할 수 있는 기법 중 하나인 Average Filter

기법으로 가정한다(Montenegro and Gonzalez, 2016). Average Filter는 신호 처리 분야에서 많이 사용되는 대표적인 데이터 보정 기법으로, 일시적으로 작용하는 노이즈를 제거하기 위해 많이 활용되는 기법으로, 집중 하중 지점으로부터 거리가 멀어질수록 점차 응력 값이 작아지는 환경에서 다수의 데이터를 고려하게 되면 추정 값과의 격차가 크게 벌어지는 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 손실 지점과 가장 인접하게 위치한 양측의 계측 데이터를 활용하여 Average Filter를 적용한 기법을 대조 기법으로서 가정한다. 또한, 제안 기법에 대해서는 최적의 데이터 추정 방법론 도출 가능성을 확인하기 위해 다양한 조합의 손실 계측 데이터 추정을 위한 인접 계측기 그룹을 활용하였다.

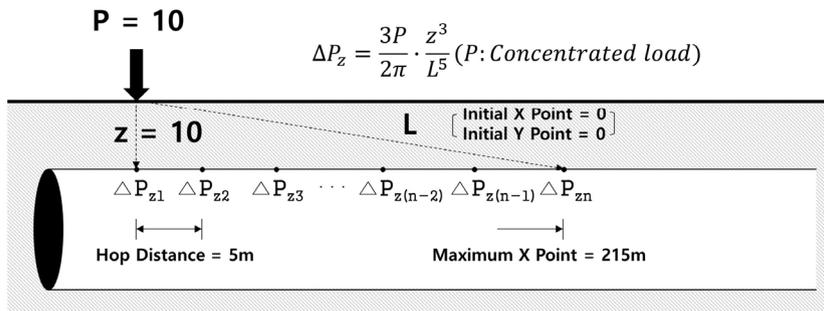


Fig. 4. Simulation environment

위의 환경에서 x축 지점이 0~215 m에 해당하는  $\Delta P_z$  값들을 기본으로, 손실 계측 데이터 추정에 대한 최적의 인접 계측기 그룹 도출을 위해 총 6개의 인접 계측기 그룹을 활용한 제안 기법과 기존 평균값을 활용한 손실 데이터 추정 기법의 정확도를 비교하였다. 6개의 인접 계측기 그룹은 손실된 데이터 지점을 포함한 총 10개의 지점 중 아래의 Fig. 5에 해당하는 그룹을 활용하였다. 또한, 손실 계측 지점 전 후방으로 5개의 센서를 고려하는 기법의 특성 상, 명확한 기법 간 정확도 비교를 위해 추정을 시작하는 계측 지점의 최초 X 좌표는 20으로 설정한다.

Missing Point

	$\Delta P_{n-4}$	$\Delta P_{n-3}$	$\Delta P_{n-2}$	$\Delta P_{z(n-1)}$	$\Delta P_{zn}$	$\Delta P_{z(n+1)}$	$\Delta P_{n+2}$	$\Delta P_{n+3}$	$\Delta P_{n+4}$	$\Delta P_{n+5}$
Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Case 1	●			●						●
Case 2	●					●				●
Case 3		●		●		●				
Case 4				●		●		●		
Case 5		●	●	●						
Case 6						●	●	●		
Use Case Summary: (1, 4, 10), (1, 6, 10), (2, 4, 6), (4, 6, 8), (2, 3, 4), (6, 7, 8)										

Fig. 5. Adjacent instrument group used in the proposed technique

Fig. 6은 부시네스크 방정식을 통해 도출된 지점별 응력 값, 평균값 필터를 활용한 대조 기법, 그리고 서로 다른 인접 계측기 그룹을 활용한 6개의 제안 기법으로 도출된 각 지점별 손실 계측 데이터 추정 값을 그래프로 나열한 결과이다. 평균값 필터를 활용한 대조 기법의 경우, 데이터의 변화 폭이 급격한 단거리에서 큰 오차를 보였다. 이는 탄성체로서 가정된 지반환경에서 집중 하중으로 인한 응력이 전파되는 흐름을 반영하지 못한 상태로 단순히 전 후 값에 대한 평균값을 취했기 때문에 나타난 한계점으로, 거리가 멀어져 지점별 응력 값의 변화 폭이 작은 45~50 m 지점부터는 제안 기법 및 원본 값과 유사한 모습을 보인다.

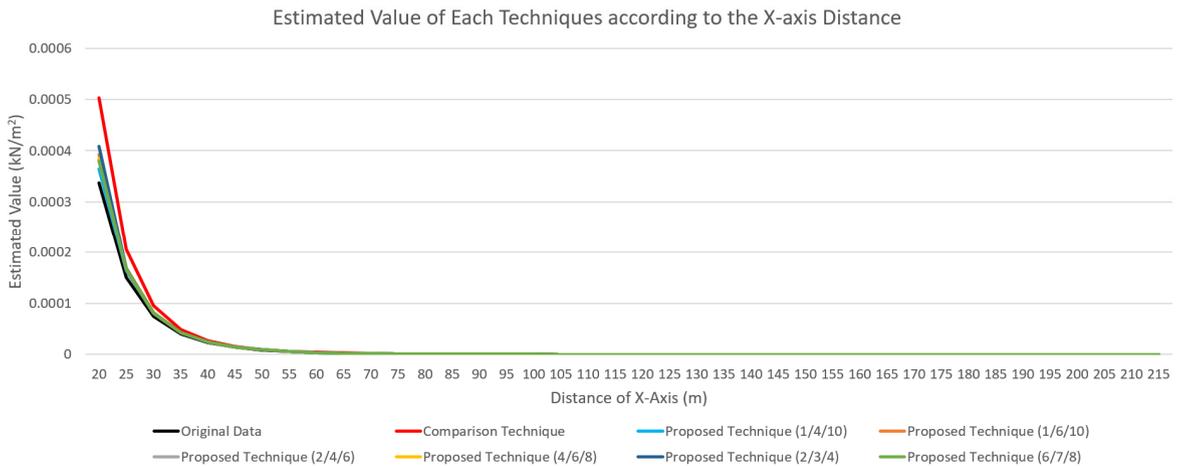


Fig. 6. Estimated value of each techniques according to the X-axis distance

인접 3점의 응력 값 변화 비율을 바탕으로 추정된 제안 기법의 경우에는 선정된 인접 3점에 따라 서로 결과를 보인다. 원본 응력 값과 가장 유사한 흐름을 보이는 것은 인접 계측기 그룹에서 1번, 4번, 10번 계측기를 선택하여 손실 값을 추정한 것으로, 원거리와 근거리의 계측기를 모두 고려하여 손실 데이터를 측정하는 경우에 추정에 대한 정확도가 더 높아짐을 알 수 있다. 또한, 근거리의 계측기만을 고려하는 경우에는 6번 7번 8번을 고려한 경우가 가장 정확도가 높았으며, 이는 지중 응력의 급격한 감소가 발생하는 전방의 계측기들보다 감소폭이 전방보다는 하향 조정되어 안정화된 후방의 계측 센서들을 활용하는 것이 데이터 추정의 정확도가 더 높음을 나타낸다.

Fig. 7은 위에서 나타난 각 기법 별 추정 데이터와 원본 데이터의 유사율을 분석하기 위해 각 기법에서 도출된 지점별 추정 값의 정확도를 나타낸다. 평균값 필터를 활용한 대조 기법의 경우, 데이터의 감소 추이를 분석하는 것이 아니라 단순한 전후 값만을 고려함으로 인해 67.13~99.23%까지 폭넓은 정확도 분포를 보여줬고, 전체 실험 환경에서는 평균적으로 96.74%의 정확도를 나타냈다. 이는 거리가 멀어질수록 원본 응력 값의 변화 폭이 작아져 데이터의 변화 폭을 고려하지 않고 인접 데이터의 평균값만을 취하더라도 어느 정도의 정확도를 확보할 수 있기 때문으로, 이를 통해 해당 대조 기법은 집중 하중 발생 지점에서 약 75 m 이상 떨어질 경우 95% 이상의 정확도를 보이는 대조 기법이 적용될 수 있음을 알 수 있다. 제안 기법의 경우, 평균값 필터 기반의 대조 기법과 마찬가지로

변화폭이 큰 초기 데이터 추정에 대해 특별히 낮은 정확도를 보여줬지만, 해당 대조 기법에 비해서는 최소 약 15%~최대 약 25%의 성능 상향을 보인다. 이는 변화 폭이 큰 초기 값들에 대해 인접한 계측 데이터의 변화 추세를 분석을 통해 적절한 응력 값 추정 수준을 파악했기 때문으로, 특정 인자에 대한 영향이 탄성체 혹은 중간 매개체를 타고 전파되는 상황의 분석에서는 단순한 인접 두 인자에 대한 고려보다는 인접 인자 그룹에서 효율적인 데이터 추정 성능을 보이는 계측기들을 선별하여 손실 데이터 추정을 하는 것이 더욱 효과적임을 알 수 있다.

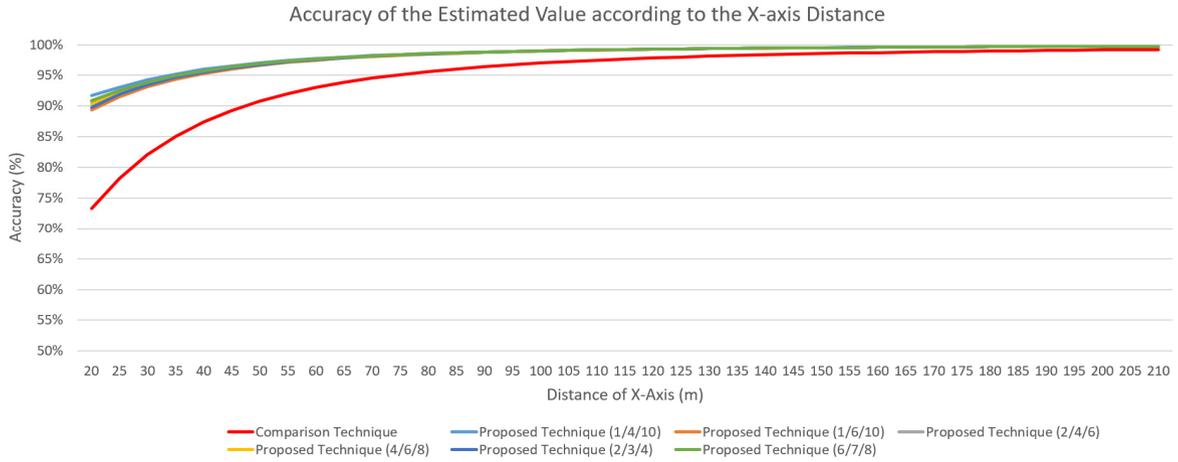


Fig. 7. Accuracy of the estimated value according to the X-axis distance

본 논문에서 제안하는 기법이 선형의 형태를 보이는 부시네스크 방정식의 지점별 응력 결과값에 대해 100%의 정확도를 보이지 못하는 것에는 다음의 이유가 있는 것으로 파악된다. 먼저, 부시네스크 방정식의 결과 값은 집중 하중 지점에서 탄성체를 지난 거리에 따른 응력 값을 도출하는 것으로, 단순히 손실 값 전 후의 데이터 비율을 활용하여 2차 방정식 구성만으로는 부시네스크 방정식의 결과 값과 100% 일치하는 값을 도출할 수 없었다. 더 복잡하고 높은 차원의 방정식 구성을 통해 부시네스크 방정식의 결과 값과 완벽히 일치하는 데이터를 추출할 수도 있지만, 해당 추정식을 구성하는 과정에서 2차 방정식 기법보다 더 많은 변수 연산이 요구되어 계측 데이터 수집 장비의 성능 저하 및 과부하를 초래할 수 있기에 본 논문에서는 2차 방정식 구성을 통한 데이터 추정에 초점을 맞췄다. 향후 추정식 연산 알고리즘을 수정하여 변수 연산의 과부하를 줄인 고차원 방정식 도출 및 복합적인 외부 요인과 물성 정보가 반영되어 있는 실제 현장의 계측 데이터를 활용한 제안 기법의 정확도 검증을 추가 연구로서 수행할 예정이다.

추가로, 본 논문에서는 계측기의 설치 간격 및 지하 인프라의 심도에 따른 정확도를 파악하기 위해 아래의 시뮬레이션 분석을 진행하였다. Fig. 8은 계측기 설치 간격에 따른 기법 별 손실 계측 데이터 추정 정확도 파악을 위해 X축의 간격을 20 m로 조정된 환경에서의 데이터 추정 결과를 나타낸다.

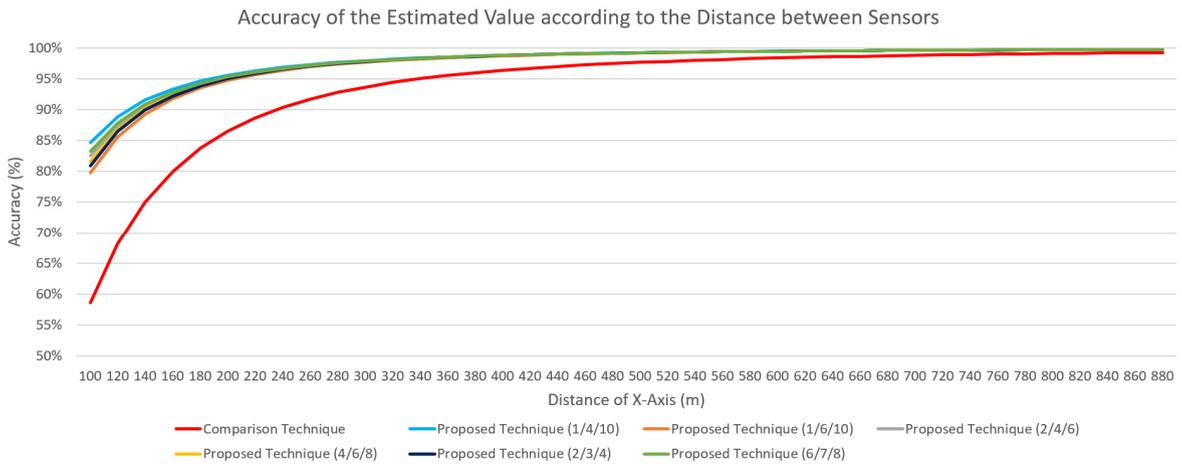


Fig. 8. Accuracy of the estimated value using each technique (distance = 20 m)

위의 그래프를 통해 계측기 설치 간격을 20 m로 조정하였을 경우, 기존 5 m 간격에서 제안 기법들이 약 85~90%의 정확도를 보였던 것과는 달리 80~85%의 하향된 정확도를 보임을 알 수 있다. 이는 계측기 설치 간격이 클수록 개별 계측기들이 보이는 직전 계측기 대비 응력 감소 비율이 정확히 추정에 어려움이 있는 것으로 확인되었고, 이러한 한계점을 극복하기 위해 계측기 손망실 기간이 길어질 경우, 설치가 용이한 인접 지점에 추가 계측기를 설치하여 해당 데이터를 추정에 활용함으로써 일시적인 손실 데이터 추정 및 보완에 대한 정확도를 향상시킬 수 있다. Fig. 9는 보편적인 유지관리 계측기의 설치 간격을 고려하여, 계측기 간의 거리에 따른 정확도 변화를 나타낸다.

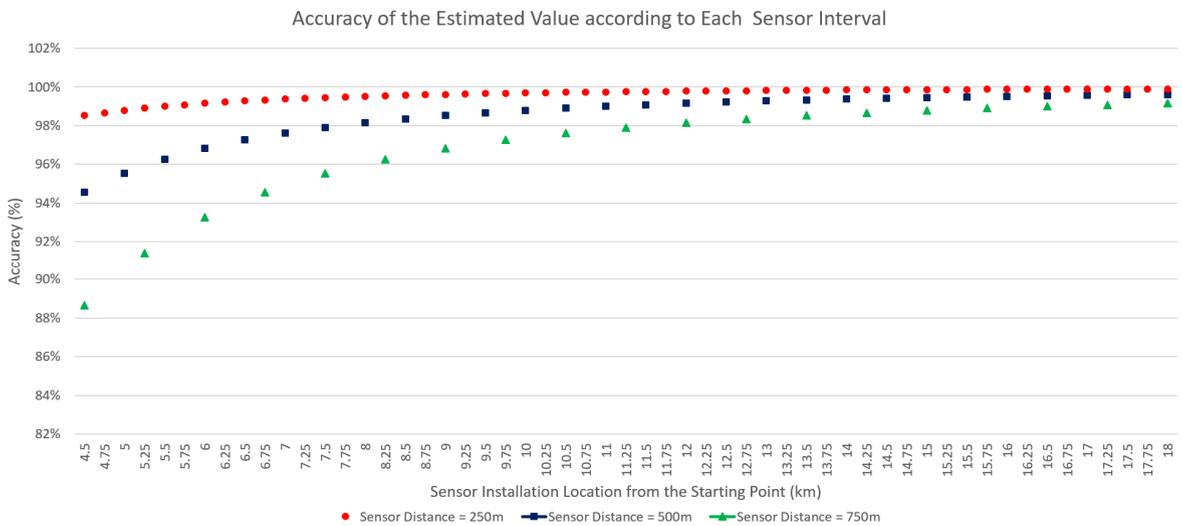


Fig. 9. Accuracy of the estimated value according to each sensor interval

보편적인 유지관리 계측기의 설치 간격은 500~1,000 m이므로, 해당 실험에서는 단거리(250 m), 중거리(500 m), 장거리(750 m)의 세 가지 경우를 고려했다. 서로 다른 간격을 가지는 세 가지 환경에서 손실 데이터 추정 값이 최초로 함께 발생하는 지점(집중하중 발생 지점에서부터 4.5 km 떨어진 지점)을 초기 값으로, 단거리의 경우 계측기 설치 간격인 250 m마다 설치된 계측기에 대한 데이터 추정이 수행되고, 중거리는 500 m, 장거리는 750 m 단위로 추정 데이터 값을 도출한다. 서로 다른 계측기 설치 간격을 바탕으로 도출된 정확도를 살펴보면, 약 88~98%의 정확도를 보임을 알 수 있다. 이는 제안 기법이 전체적인 데이터 변화 비율을 바탕으로 값을 추정하는 것이기 때문에 계측기 간 거리가 멀어지더라도 급격한 정확도의 하락이 발생하지 않고, 계측기의 설치 간격이 먼 만큼 추정 데이터 산정 시작 시점이 집중 하중 지점에서부터 떨어지게 됨에 따라 정확도 감소의 주요 원인이 되는 급격한 응력값 변화 지점이 그래프에 나타나는 손실 데이터 추정 범위에서 포함되지 않았기 때문이다.

Fig. 10은 계측기가 지하 인프라의 심도(천심도 - 4 m, 저심도 - 10 m, 중심도 - 30 m, 대심도 - 50 m)에 따른 데이터 추정 정확도를 나타낸다. 해당 실험에서는 각 심도에 따른 제안 기법의 정확도 차이를 분석하기 위한 것으로, 다양한 인접 계측기 그룹에 대한 차이를 나타내지 않고 동일한 인접 계측기 그룹을 활용하여 손실 계측 데이터를 추정했을 때 심도에 따라 나타나는 정확도 차이만을 확인했다. 활용된 기법은 이전 실험에서 가장 높은 정확도를 보였던 1번, 4번, 10번 계측기 그룹을 활용한 사례로, 계측기가 설치된 지하 인프라의 깊이가 깊어질수록 정확도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 지상에서 발생하는 집중 하중에 대한 지하 인프라에서의 응력을 분석하는 것이기 때문에 심도가 깊어진다는 것은 집중 하중 지점에서의 거리가 멀어지는 것과 동일하다고 할 수 있다. 즉, 심도가 깊어질수록 집중 하중 지점에서의 거리가 멀어져 응력 감소 비율이 충분히 안정화된 상태의 데이터를 취득 및 추정함으로써 추정된 값의 정확도가 점차 증가하는 것이다. 위 실험을 바탕으로, 제안 기법은 심도가 깊어져 지상에서 발생하는 하중 요인과 관련하여 충분한 거리를 유지할 수 있는 환경에 적합하고, 계측 장비 간 거리가 멀어 발생할 수 있는 정확도 감소와 관련해서는 5 m 거리 내에 손쉽게 계측기를 추가 설치할 수 있는 지점을

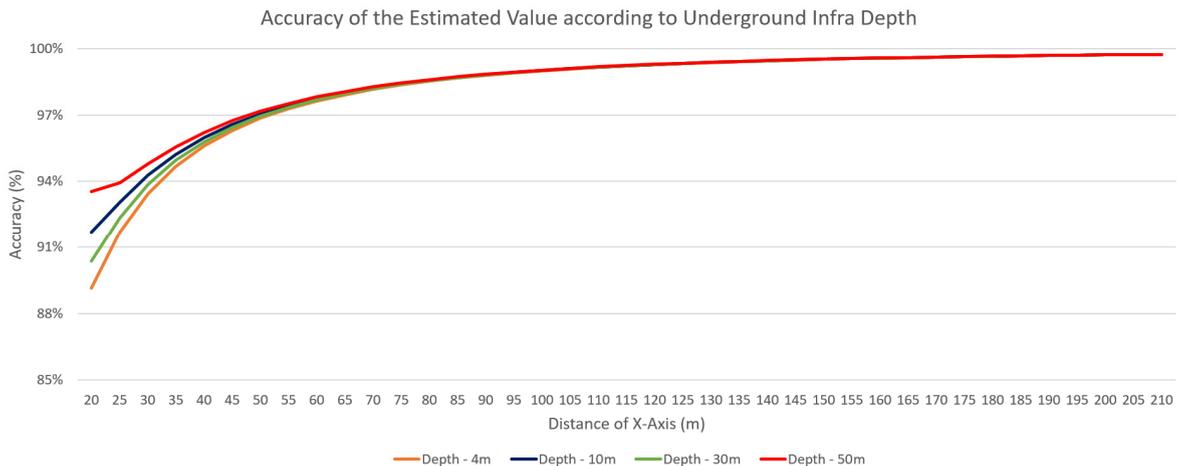


Fig. 10. Accuracy of the estimated value according to underground infra depth (4 m/10 m/30 m/50 m)

선정하여 추정에 활용되는 데이터를 보강해줌으로써 약 5% 이상의 정확도를 향상시켜 90%에 인접한 추정 정확도를 보일 수 있음을 확인하였다.

또한, 각 경우에서 다양한 인접 계측기 그룹을 활용한 제안 기법은 유사한 수준의 정확도를 보였지만, 시뮬레이션의 특성적 영향으로 손실 계측기 지점이 포함된 총 10개의 지점 가운데, 1번, 4번, 10번 지점의 데이터를 활용하여 손실 지점인 5번의 데이터를 추정하는 것이 가장 우수한 성능을 보이는 것으로 나타났다. 하지만, 이는 환경적인 요인에 영향을 받은 것으로 개별 환경에 따라 조금씩 다른 결과를 나타내기 때문에, 실제 적용 시에는 다양한 케이스의 그룹을 비교하여 지속적으로 높은 정확도를 보이는 계측기 그룹을 사전에 선정하여 활용하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 계측기에 대한 보수 및 재설치가 완료되는 시기까지 해당 계측 지점의 데이터와 유사성이 높은 값을 추정하여 계측 데이터 테이블에 추가함으로써 손실되는 계측 데이터를 계측기가 교체 및 수리될 때까지 일시적으로 보완하여 지속적이고 신뢰성 높은 계측 데이터 분석 업무가 유지될 수 있는 부시네스크 식을 이용한 인접 센서 데이터 추세 분석 기반 손망실 계측 센서 데이터 추정 기술을 제안했다.

시뮬레이션 분석을 통해, 대조 기법은 시뮬레이션 환경 기준으로 96.74%의 데이터 추정 정확도를 보였고, 다양한 인접 계측기 그룹을 활용한 제안 기법은 각각 98.84~98.94%의 데이터 추정 정확도를 보임으로써 약 2%의 데이터 추정 정확도 향상을 나타냈다. 하지만, 계측 데이터 변화폭이 큰 집중하중 인근지역(20~80 m)에 초점을 맞출 경우, 평균값 필터를 활용한 대조 기법은 67.13~95.13%의 정확도로 집중하중 지역에 가까우수록 급격히 낮은 정확도를 보였지만, 제안 기법은 82.55~98.42%의 정확도로 기존 기법 대비 약 15% 높은 정확도를 보였다. 제안 기법 내에서도 20 m 지점에서 가장 높은 정확도를 보여주는 기법의 경우에는 92.53%의 보임으로써 대조 기법 대비 25%의 성능 향상도 가능성을 알 수 있었다. 마지막으로 계측기 설치 간격 및 심도에 따른 시뮬레이션을 수행함으로써 본 제안 기법은 집중 하중 발생 요인과 충분한 거리를 유지할 수 있는 깊은 심도에서 더 높은 정확도를 보이고, 계측기 설치 간격이 멀어질수록 정확도가 낮아지는 문제와 관련하여 최대 5 m 간격 내에 설치가 용이한 지점에 추가 계측기 설치를 통해 정확도를 5% 이상 향상시킬 수 있는 방안의 적용이 필요함을 확인하였다.

본 논문의 제안 기법에서 활용하는 인접 계측기 그룹은 다양한 환경적 요인에 영향을 받는 요소로, 실제 시공 및 운영 현장으로의 적용 시에는, 다양한 계측기 그룹의 성능을 함께 비교하고 최적의 성능을 보이는 그룹을 도출하여 손실 계측 데이터 추정 업무를 수행하는 것이 필요할 것으로 고려된다. 또한, 향후 추정식 연산 알고리즘을 수정하여 변수 연산의 과부하를 줄인 고차원 방정식 도출 및 복합적인 외부 요인과 물성 정보가 반영된 실제 현장의 계측 데이터를 활용한 제안 기법의 검증 연구도 수행할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원(과제명: 도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구, 과제번호: 21UUTI-B157786-02)으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 저자 기여도

최상일은 연구 개념 설계 및 시뮬레이션 코드 구현, 원고 작성을 하였고, 심승보는 개념 구체화 및 시뮬레이션 코드 보완을 하였고, 공석민은 데이터 수집 및 데이터 분석을 하였고, 이성원은 개념 설계 구체화 및 원고 검토를 하였다.

## References

1. Chun, B.S. et al. (2012), "Stress in the Ground", Geotechnical Engineering - Theory and Practice, Vol. 4, Chapter 5, pp. 143-160.
2. Microsoft Visual Studio Home page, <https://visualstudio.microsoft.com> (May 27, 2020).
3. Montenegro, D., Gonzalez, J. (2016), "Average Filtering: Theory, Design and Implementation", Digital Signal Processing (DSP): Fundamentals, Techniques and Applications, Chapter 3, pp. 1-21.
4. Rastogi, V.K. (2008), "Instrumentation and monitoring of underground structures and metro railway tunnels", World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety - India, pp. 795-808.
5. Sadek, M., Shahrour, I. (2007), "Use of the Boussinesq solution in geotechnical and road engineering: influence of plasticity", Comptes Rendus Mecanique, Vol. 335, No. 9-10, pp. 516-520.
6. Strauss, A., Bien, J., Neuner, H., Harmening, C., Seywald, C., Österreicher, M., Voit, K., Pistone, E., Spyridis, P., Bergmeister, K. (2020), "Sensing and monitoring in tunnels testing and monitoring methods for the assessment of tunnels", Structural Concrete, Vol. 21, No. 4, pp. 1356-1376.
7. Wei, Z., Jiang, Y. (2021), "A simplified analysis method for the deformation response of an existing tunnel to ground surcharge based on the Pasternak model", Applied Sciences, Vol. 11, No. 7, 3255.
8. Woo, J.T. (2013), "A study on estimation of the total loss and damage ratio of maintenance monitoring sensor of subway tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 1, pp. 25-31.
9. Woo, J.T. (2018), "A study on the regulation of durability standard of underground structures monitoring sensors", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 1, pp. 73-81.
10. Woo, J.T. (2021), "An analytical study on the durability standard of ground structures monitoring sensors", Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 17, No. 1, pp. 53-59.
11. Zhang, J.F., Chen, J.J., Wang, J.H., Zhu, Y.F. (2013), "Prediction of tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft soil", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 36, pp. 24-33.