한국지반공학회논문집 제38권 12호 2022년 12월 pp. 103 ~ 112
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.38, No.12, December 2022 pp. 103 ~ 112

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2022.38.12.103

기존 계측 기반 침하 예측 이론식 한계점 도출 및 가중 비선형 회귀분석을 통한 침하 예측 개선방안 제시

Analysis of the Limitations of the Existing Subsidence Prediction Method Based on the Subsidence Measurement Data and Suggestions for Improvement Method Through Weighted Nonlinear Regression Analysis

곽 태 영[1] Kwak, Tae-Young 홍 성 호[2] Hong, Seongho
이 주 형[3] Lee, Ju-Hyung 우 상 인[4] Woo, Sang-Inn

Abstract

The existing subsidence prediction method based on the measurement data were confirmed in this study through literature research. It was confirmed that the hyperbolic method and the Asaoka method showed high accuracy, while the other prediction methods showed significantly low accuracy. Based on the analysis results, the limitations of the existing prediction equations were derived, and the improvement method of the settlement prediction equations was suggested. In this study, a weighted nonlinear regression analysis method that gives higher weight to the later data was proposed to improve the existing hyperbolic method.

요 지

본 연구에서는 시간-침하량 계측 데이터를 기반으로 한 기존 침하 예측 이론식을 확인하였다. 기존 계측 기반 침하 예측 이론식 중 쌍곡선법 및 Asaoka법이 정확도가 높게 나타났으며, 이외 방법은 정확도가 낮은 것으로 확인되었다. 이러한 분석 결과를 토대로 기존 침하 예측 방법의 한계점을 도출하였으며, 이러한 한계점을 보완할 수 있는 개선 방안으로써 가중 비선형 회귀분석을 통한 침하 예측 방법을 제시하였다.

Keywords : Asaoka method, Hyperbolic method, Settlement prediction, Weighted nonlinear regression analysis

1. 서 론

투수성이 낮은 연약한 점성토 지반 상부에 하중이 가해지는 경우, 초기에는 배수되지 못한 시료 내부의 간극수에 과잉간극수압이 발현되어 외력에 저항한다. 그 후, 시간이 흐름에 따라 간극수가 점차 배수되어 흙의 체적이 변화하며 지반에 침하가 발생하며, 이러한 기전으로 발생하는 침하를 압밀침하라 한다. 설계 단계에서 압밀

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Division, Korea Institute of Construction Technology)
2 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)
3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engrg. Research Division, Korea Institute of Construction Technology)
4 정회원, 인천대학교 도시환경공학부 건설환경공학전공 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Incheon National Univ., Tel: +82-32-835-8461, siwoo@inu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2022 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

침하를 예측하기 위해서는 Terzaghi의 압밀 이론(Terzaghi, 1943) 및 Barron의 압밀 이론(Barron, 1948)에서 제안된 이론식을 이용한다. 하지만, 압밀 이론은 실제 현상과 동떨어진 많은 가정을 기반하고 있으며, 지반 내부의 불활실성을 고려하지 못하는 단점이 있으며, 이로 인해 압밀 이론을 이용하여서는 침하를 정확하게 예측하는 것은 힘들다.

이에 따라 실제 연약 지반 개량 현장에서는 시공단계에서 성토 시공 중 원지반의 침하량을 지속적으로 계측하고, 계측을 통한 시간-침하량 자료를 이용하여 귀납적으로 장래 침하량을 예측할 수 있는 방법(Chung et al., 1998; Asaoka, 1978; Hishino, 1962; Monden, 1963; Tan et al., 1991; Yoo and Kim, 2000)을 적용하고 있다. Tan et al.(1991)은 시간-침하량 곡선을 쌍곡선으로 가정하고, 계측 침하량에 대해 선형회귀분석을 수행하여 쌍곡선 계수를 산정하고, 이를 이용하여 장래 침하량을 예측하는 방법인 쌍곡선법을 제안하였다. 통계학적으로 쌍곡선은 대표적인 선형회귀분석이 힘든 곡선이나, Tan et al.(1991)은 시간 t, 침하량 S에 대해서, 독립변수를 t로 종속변수를 t/S로 설정한 후, 선형회귀분석을 수행하였다. Hoshino(1962), Chung et al.(1998)과 Yoo and Kim (2000)은 쌍곡선법을 기반으로 하여, 식을 일부 변형한 계측 기반 침하 예측법을 제안하였다. 상기 언급한 쌍곡선법 기반의 침하 예측 방법의 경우, 선형 회귀분석 수행 시, 종속변수와 독립변수 모두 시간(t)을 포함하고 있어, 인위적인 선형성이 강요되며, 이는 쌍곡선법 기반 방법의 명확한 단점이다.

Asaoka(1978)는 Mikasa(1963)에 의해 제시된 압밀 이론을 바탕으로 등간격으로 구축된 시간-침하 계측 자료를 바탕으로 도해법을 이용하여 최종 침하량을 예측하는 방법을 제시하였다. Monden(1963)은 압밀도를 토대로 시행착오법(trial and error)을 적용하여 침하량을 예측하는 방법을 제시한 바 있다. Asaoka법과 Monden법의 경우, 일반적으로 쌍곡선법에 비해 예측 정확도는 높지만, 인위적인 데이터 보간 및 공학자의 주관적인 판단 필요하며, 적용 방법이 상당히 복잡하고 불편하다는 단점이 있다.

이와 같이 기존 계측 기반 침하 예측방법이 다양한 형태로 있기 때문에, 다양한 연구자들에 의해 실제 국내 현장 데이터를 토대로 기존 방법의 현장 적용성에 대한 연구가 수행된 바 있다. Park and Kim(2009)는 부산신항 북컨테이너 일부 부지에 대해 적용성을 검토하였으며, Kim(2021)은 서해안 중부지역인 평택의 해안지역에 대해 기존 계측 기반 침하 예측방법을 적용하였으며, 쌍곡선법과 Asaoka법이 각각 실제 계측 데이터 대비 과대 및 과소평가하는 것을 확인하였다.

본 연구에서도 기존 연구와 다른 연약지반 현장에서 계측된 데이터를 바탕으로 기존 계측 기반 침하 예측방법의 적용성을 검토하였으며, 검토 결과를 토대로 기존 예측 방법의 한계점을 확인하였다. 또한, 본 연구에서는 기존 계측 기반 침하 예측 방법 중 가장 대표적인 방법인 쌍곡선법의 통계적 불완전성을 보완하고, 침하 예측 정확도를 상승시키고, 공학자의 주관적인 판단을 최소화하고, 각 계측값의 중요도를 고려하기 위해, 가중 비선형 회귀분석 방법에 기반한 쌍곡선법을 제안한다.

2. 기존 계측 기반 침하 예측방법

2.1 쌍곡선법

쌍곡선법은 시간이 지남에 따라, 침하의 속도가 쌍곡선의 형태로 감소한다는 가정 하에 초기의 계측 침하량으로부터 장래의 침하량을 예측하는 방법이다(Tan et al., 1993; Choo et al., 2010). 시간과 침하 사이의 상관관계를 통해 침하를 추정하는데, 다음과 같은 식을 이용한다.

$$S = \frac{t}{\alpha t + \beta} \tag{1}$$

이 때, S는 침하량, t는 시간을 의미하며, α, β는 쌍곡선 계수를 나타낸다. 수식 (1)은 다음과 같이 다시 정리될 수 있다.

$$\frac{t}{S} = \alpha t + \beta \tag{2}$$

수식 (2)를 활용하여 장래 침하 계산을 수행하게 되며, 순서는 다음과 같다:

① 성토 완료 시점을 t=0으로 한다.

② 계측된 데이터에 대해서 시간 t와 $t/(S_t - S_0)$ 관계도를 도시한다.

③ 시간 t와 $t/(S_t - S_0)$ 관계도를 통해 Fig. 1과 같이 회귀분석을 수행하여 쌍곡선 계수 α, β를 결정한다.

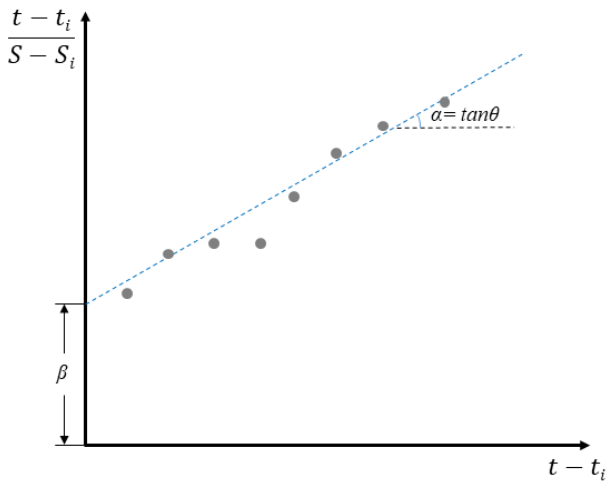


Fig. 1. Linear regression of the hyperbolic method

④ 이를 토대로 다음과 같은 식을 통해 장래 침하량을 예측한다.

$$S = S_i + \frac{t-t_i}{\alpha(t-t_i)+\beta} \tag{3}$$

이 때, t_i는 성토 완료 직후의 시간을 나타내며, S_i는 t_i에서의 침하량을 나타낸다. t와 S는 각각 계측된 데이터 중 회귀분석에 사용한 가장 최근의 시간 및 침하량을 의미한다.

2.2 쌍곡선법 개념과 유사한 방법

Hoshino법(Hoshino, 1962), Root S법(Chung et al., 1998) 및 log S법(Yoo and Kim, 2000)은 쌍곡선법의 회귀분석 방법과 유사한 모델이며, 각각 식 (4), (5), (6)과 같이 산정된다.

$$S = S_i + \sqrt{\frac{t-t_i}{\alpha(t-t_i)+\beta}} \tag{4}$$

$$\sqrt{S-S_i} = \frac{t-t_i}{\alpha(t-t_i)+\beta} \tag{5}$$

$$\log(S-S_i) = \frac{t-t_i}{\alpha(t-t_i)+\beta} \tag{6}$$

기존 쌍곡선법에서 시간 t와 침하량 S_t 관계를 통한 선형 회귀분석을 통해 계수를 결정하였다면, Hoshino법, root S법 및 log S법은 각각 침하량 S 대신 S^2, root S, log S를 적용하여, 선형 회귀분석을 수행하게 된다.

2.3 Asaoka법

Asaoka(1978)는 Mikasa(1963)의 1차원적 미분방정식을 이용하여 현장침하 계측 자료로부터 임의의 시점에서의 침하량을 산정하는 방법을 제안하였다. Terzaghi (1943)의 압밀방정식에서 과잉간극수압 대신 연직방향 변형률을 통해 시간-침하량 관계를 도출하게 되며, 식 (7)과 같다.

$$S_j = \frac{\beta_0}{1-\beta_1} - \left(\frac{\beta_0}{1-\beta_1} - S_0\right)\beta_1^{\frac{t-t_i}{\Delta t}} \tag{7}$$

이 때, t_i는 성토 완료 직후의 시간, S_i는 t_i에서의 침하량, t_j는 침하량 예측 시기, S_j는 t_j에서의 침하량, Δt는 Asaoka법 적용 시 설정해야 하는 시간 간격, β_0, β_1은 회귀분석 계수를 나타낸다.

또한, Asaoka법은 Fig. 2와 같이 도해적 방법을 통해 계수를 결정하는 방법에 대해서 제시한 바 있으며, 순서는 다음과 같다:

① 시간-침하량 곡선을 동일 시간(Δt)으로 나누어, 시간 당 대응하는 침하량을 결정한다.

② S_{j-1}과 S_j 축으로 이루어진 좌표계에 침하량을 표시한다.

③ S_{j-1}와 S_j 관계도를 통해 회귀분석을 수행하여 계수 β_0, β_1을 결정한다.

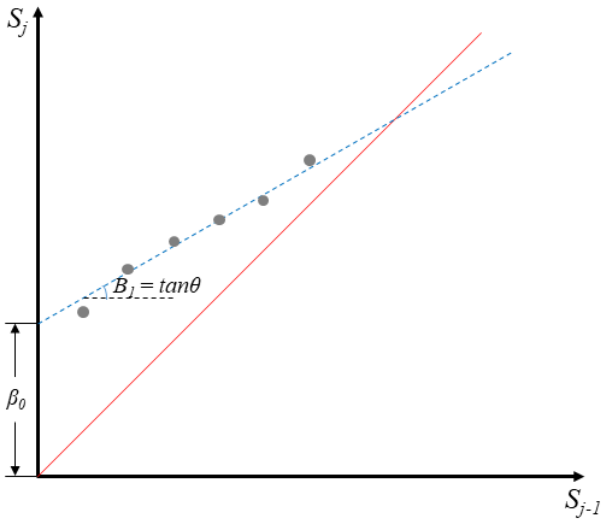


Fig. 2. Graphical solution for the Asaoka method

④ 이 때 좌표계의 점들로부터 회귀된 직선과 45° 직선이 만나는 점이 최종 침하량이다.

2.4 기존 계측 기반 침하 예측방법 적용성 검토 결과

기존 계측 기반 침하 예측 방법인 쌍곡선법, Hoshino법, root S법, log S법, Asaoka법의 적용성을 검토하기 위하여 부산신항 A 현장부지의 지표침하판 계측 데이터 3개(J-1: 최종 성토 이후 413일계측, J-2: 최종성토 이후 328일 계측, J-3: 최종성토 이후 328일 계측)에 대해서 시범 분석을 수행하였다. A 현장부지의 지층 구성 및 SPT N 값은 Fig. 3과 같다.

최종 성토가 완료된 이후를 시점으로 하여 전체 침하량이 계측된 기간을 100% 범위로 설정하였을 때, 전체 구간의 10~80% 범위에서의 시간-침하량 계측 결과를 활용하여 기존 계측 기반 침하 예측 방법을 적용하였다. 이를 통해 예측된 최종 침하량과 실제 계측된 최종 침하량의 비교를 통해 기존 계측 기반 침하량의 적용성을 확인하였다. 각 방법에 대한 적용 결과 중 대표적 결과인 지표침하판 J-1에 대한 분석 결과는 Table 1~Table 4 및 Fig. 4와 같다.

Table 1은 쌍곡선법 적용 결과를 나타낸 것으로, 전체 데이터의 10%를 적용했을 경우, 예측의 정확도는 매우 떨어지며(실제 최종 침하량 대비 약 53% 수준), 사용 데이터의 범위를 늘림에 따라 예측의 정확도는 상승하였다(전체 데이터의 50% 적용 시, 실제 침하량 대비 약 87%의 정확도). Hoshino법의 경우는 적용한 지표 침하판 데이터에서 모두 선형 회귀 결과가 음(-)으로 나타나, 침하 예측 자체가 불가능하게 나타났다. root S법 및 log S법은 쌍곡선법과 유사하게 분석에 사용한 데이터 구간이 증가할수록 정확도가 향상되었지만, 쌍곡선법보다는 예측 정확도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다(Table 2, 3 참조).

Asaoka법의 경우, 기존 연구 결과로부터 시간 간격(Δt)

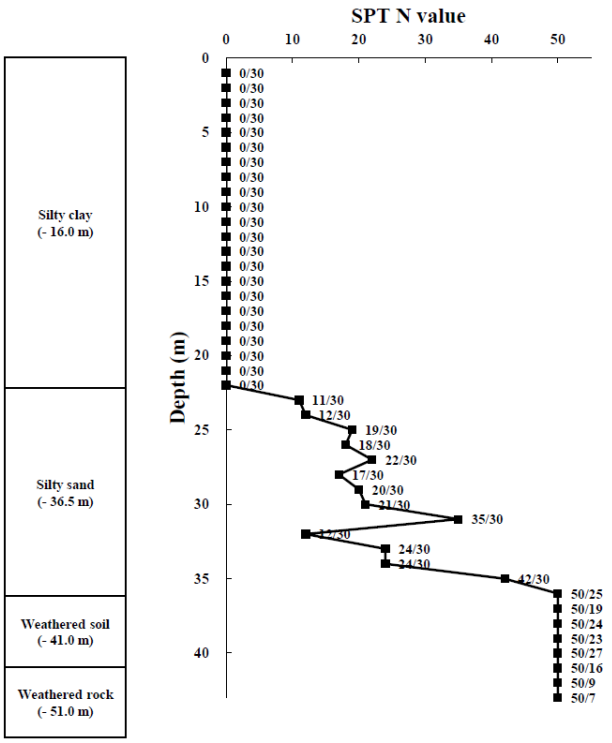


Fig. 3. Soil profile and SPT N value of the A site in Busan port

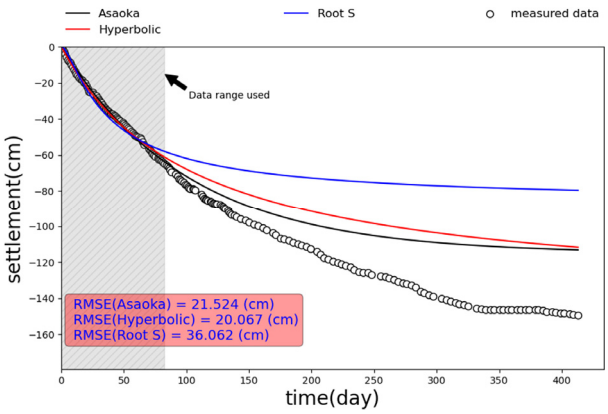


Fig. 4. Analysis results of A site by existing subsidence prediction method (20% regression range)

Table 1. Measured settlement vs. Predicted settlement of A site in Busan port by hyperbolic method

Regression range	Measured final settlement	Predicted final settlement	Accuracy
10%	1185mm	621.5mm	52.5%
20%	1185mm	755.9mm	63.8%
30%	1185mm	810.2mm	68.4%
40%	1185mm	947.5mm	80.0%
50%	1185mm	1027.0mm	86.7%
60%	1185mm	1131.8mm	95.5%
70%	1185mm	1125.2mm	95.0%
80%	1185mm	1122.8mm	94.8%

에 따라 정확도가 다르게 나타나며, 시간 간격을 28일로 설정하였을 때 가장 정확도가 높은 것을 확인하였다 (Arulrajah et al., 2003; 2004). 그러나, 국내 데이터의 경우 계측 기간이 길지 않기 때문에 계측 간격을 28일로 설정할 경우 분석에 사용되는 데이터가 거의 남지 않게 되는 문제점이 발생하였다. 따라서, 본 연구에서는 시간 간격(Δt)을 3초로 설정하였으며, 계측되지 않은 구간에 대해서는 선형 보간을 적용한 후에 도해적 방법으로 분석을 수행하였다. 분석 결과, Table 4와 같이 50% 이상의 데이터를 활용하여 최종 침하량을 예측하였을 때 정확도가 90% 이상으로 나타났다. 이는 60% 이상의 데이터를 활용할 때 Asaoka법의 정확도가 높게 나타난다는 기존 연구와 결과가 유사하였다(Bergado et al., 1991).

기존 계측 기반 침하 예측 방법을 부산신항 현장부지에서 계측된 데이터에 적용한 결과, 쌍곡선법 및 Asaoka법이 정확도가 높은 편으로 확인되었으며, root S법 및 log S법은 정확도가 상당히 낮은 것을 확인하였다. 정확도가 가장 높게 나타난 Asaoka법의 경우, 측정 간격이 동일한 침하 데이터를 필요로 하기 때문에, 인위적인 침하 데이터의 보간이 필요하다. 이러한 보간은 공학적 판단을 요구하기 때문에 실무에 적용이 쉽지 않다는 한계점이 있다.

3. 계측 기반 침하 예측 방법 개선방안 제시

3.1 가중 비선형 회귀분석 개념

앞서 확인한 바와 같이, 사용성과 정확성 측면에서 실제 현장에서는 주로 쌍곡선법을 적용하고 있는 실정이

Table 2. Measured settlement vs. Predicted settlement of A site in Busan port by root S method

Regression range	Measured final settlement	Predicted final settlement	Accuracy
10%	1185mm	323.8mm	27.3%
20%	1185mm	493.7mm	41.7%
30%	1185mm	604.0mm	51.0%
40%	1185mm	738.9mm	62.4%
50%	1185mm	858.6mm	72.5%
60%	1185mm	933.2mm	78.8%
70%	1185mm	986.5mm	83.3%
80%	1185mm	1010.3mm	85.3%

Table 3. Measured settlement vs. Predicted settlement of A site in Busan port by log S method

Regression range	Measured final settlement	Predicted final settlement	Accuracy
10%	1185mm	311.1mm	26.3%
20%	1185mm	473.1mm	39.9%
30%	1185mm	581.5mm	49.1%
40%	1185mm	713.4mm	60.2%
50%	1185mm	829.7mm	70.0%
60%	1185mm	909.7mm	76.8%
70%	1185mm	961.8mm	81.2%
80%	1185mm	989.4mm	83.5%

Table 4. Measured settlement vs. Predicted settlement of A site in Busan port by Asaoka method (Δt=3day)

Regression range	Measured final settlement	Predicted final settlement	Accuracy
10%	1185mm	424.2mm	35.8%
20%	1185mm	659.3mm	55.6%
30%	1185mm	773.7mm	65.3%
40%	1185mm	1008.0mm	85.1%
50%	1185mm	1164.2mm	98.2%
60%	1185mm	1124.5mm	94.9%
70%	1185mm	1147.3mm	96.8%
80%	1185mm	1143.5mm	96.5%

다(Anderson et al., 1994; Tan, 1991; 1993; 1995; 1996). 쌍곡선법에서는 축변환을 통해 독립변수를 시간 t로 설정하고, 종속변수를 시간 t와 침하량 S를 이용하여 t/S로 설정한 후, 선형 회귀분석을 실시하여 쌍곡선 계수를 결정하게 된다. 이와 같은 방법은 종속변수와 독립변수 모두 시간 t를 포함하고 있어, 회귀분석에서 인위적인 선형성이 강요된다는 한계점이 있다.

또한, 현재 대부분의 계측 기반 침하 예측법의 경우, 회귀분석을 실시할 때 모든 침하 데이터의 가중치를 동일하게 설정하고 있는 실정이다. 하지만, Choo et al. (2010)에 따르면 성토 직후에 지하수위가 상승하였다가 다시 안정되기 때문에 초기 데이터에 오차가 많이 발생하여 데이터 신뢰도가 떨어진다는 문제점을 제시한 바 있다. 즉, 하중 재하 초기에 계측된 침하 데이터보다 최근에 측정된 침하 계측 데이터가 더 중요한 정보를 포함하고 있다고 볼 수 있다. 또한, 계측간격이 넓은 데이터와 계측간격이 좁은 데이터는 서로 다른 가중치가 고려되어야 한다.

기존 쌍곡선법의 한계점을 보완하기 위해 본 연구에서는 비선형 회귀분석을 수행하며, 최신 데이터에 더 높은 가중치를 부여할 수 있도록 하였다. 비선형 회귀분석 시에, 최소자승법(Least Square Method)을 적용하였다. 최소자승법은 모델과 데이터와의 잔차 제곱의 합 또는 평균을 최소화할 수 있도록 계수를 결정하는 방법이다. 최소자승법을 위해 잔차 제곱 산정 시에, 최신 데이터에 선형적으로 더 높은 가중치를 부여할 수 있도록 다음 식 (8)과 같은 가중치 부여 비선형 회귀분석 방법을 제안하였다.

$$R = \sum_i W_i \left(\frac{t_i}{at_i + b} - S_i \right)^2 \tag{8}$$

이 때, a, b는 쌍곡선법과 관련된 계수이며, t_i는 최종 성토 완료 이후부터의 날짜, S_i는 t_i에서의 침하량 계측 데이터, W_i는 가중치 함수를 나타낸다. 추가적으로, 가중치 함수는 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$W_i = \frac{t_i}{t_f} \tag{9}$$

이 때, t_f는 최종 성토 완료 이후의 마지막 계측날짜를 나타내며, 가중치 함수는 최대 1의 크기를 가진다.

3.2 개선 침하 예측 방법 적용을 통한 검증 방법

오픈 소스 기반의 Python을 활용하여 개선된 가중 비선형 회귀분석 방법에 대해서 프로그래밍을 수행하였으며, 기존 계측 기반 침하 이론식과의 비교를 위해 대표적인 방법인 쌍곡선법에 대해서도 함께 프로그래밍을 수행하였다. 프로그램의 상세 분석 과정은 다음과 같다: (1) 침하 예측에 사용하고자 하는 계측 데이터(시간, 침하량) 불러오기, (2) 계측 데이터를 통한 각 방법별 회귀분석 수행, (3) 회귀분석 결과를 통한 예측값 및 그래프 표출 순으로 진행된다. 일반적인 분석 과정 이외에 추가적으로 침하 예측에 사용할 회귀분석 구간을 설정 가능하도록 하였으며, 회귀분석 구간 이후의 데이터들을 활용하여 예측되는 침하량과 및 실제 계측된 침하량 사이의 RMSE(Root Mean Square Error)를 산정하여 침하 예측법의 정확성을 확인할 수 있도록 하였다.

부산신항 B 현장부지의 지표침하판 계측 데이터 중 200일 이상 계측된 데이터 5개를 선정하여 시범분석을 수행하였다. B 현장부지의 지층 구성 및 SPT N 값은 Fig. 5와 같다. 기존 계측 기반 침하 예측식과 마찬가지로 최종 성토가 완료된 이후를 시점으로 하여 전체 침하량이 계측된 기간을 100%로 설정하여, 회귀분석 구간

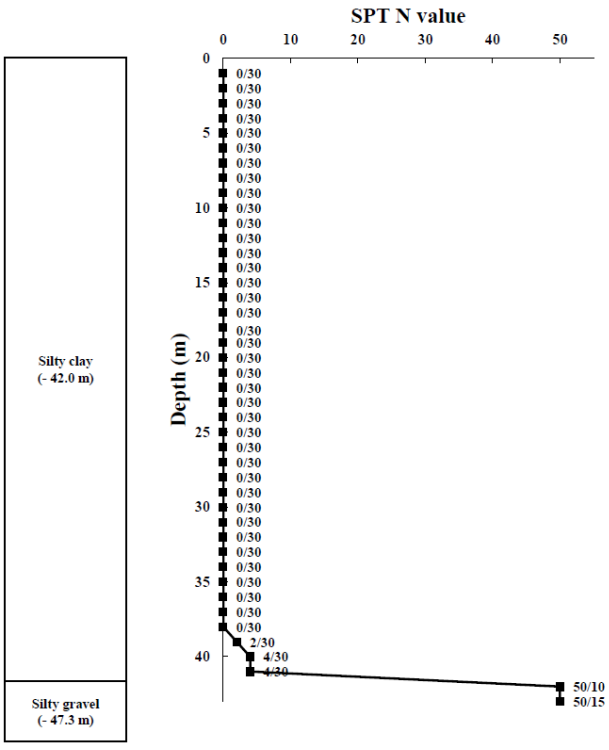


Fig. 5. Soil profile and SPT N value of the B site in Busan port

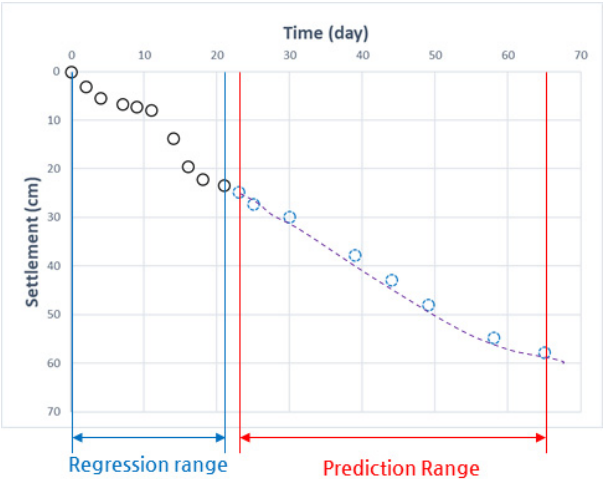


Fig. 6. Verification concept of weighted nonlinear regression analysis method and hyperbolic method

을 30%, 50%, 70% 범위로 구분하여 쌍곡선법 및 개선 침하 예측 방법을 적용하여 이후 구간에서의 침하량을 예측하였다(Fig. 6 참조).

3.3 개선 침하 예측 방법을 통한 분석 결과

시범분석 대상인 부산신항 B 현장부지에서 선정된 지표침하판 데이터 5개(S-1, S-2, S-3, S-4, S-5)에 대한 분석 결과는 Table 5와 같다. Table 5는 각각의 지표침하판 별로 회귀분석 구간 30%, 50%, 70% 범위에 대해서 쌍곡선법 및 가중 비선형 회귀분석 방법에 대한 결과를 나타내며, RMSE를 통해 예측 정확도를 평가하였다. 또한, Fig. 7과 Fig. 8은 쌍곡선법 및 가중 비선형 회귀분석 방법의 실제 현장 적용 예시로써, 지표침하판 S-1과 S-2에 대한 예측 결과 및 실제 계측 결과를 보여준다.

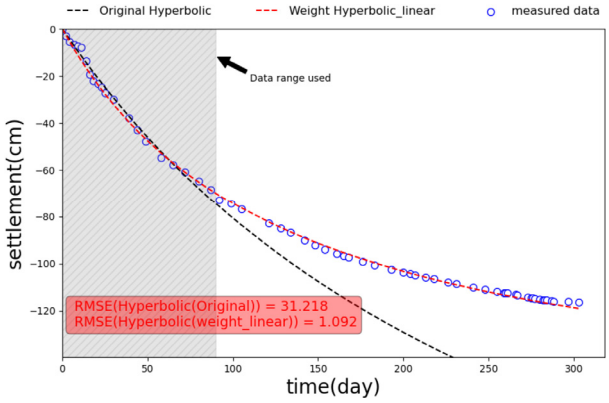
S-1 지표 침하판의 경우 회귀분석 구간 30, 50, 70%에 따라 쌍곡선법의 예측 결과와 실계측값 사이의 RMSE는 각각 31.218cm, 12.009cm, 6.585cm로 나타났다. 이에 반해 가중 비선형 회귀분석 방법의 경우 회귀분석 구간 30, 50, 70%에서 RMSE가 각각 1.092cm, 2.374cm, 1.681cm로 나타났다. S-1 지표 침하판과 유사하게, S-2 지표 침하판에서도 회귀분석 구간 30, 50, 70%에 따라 쌍곡선법과 가중회귀분석 방법의 RMSE는 각각 30.703 cm, 9.819cm, 6.161cm 및 2.029cm, 0.985cm, 2.096cm로 나타났다. 가중 비선형 회귀분석 방법의 경우, 기존 쌍곡선법 대비 RMSE가 최대 3.5% 수준까지 감소하여 정확도가 상당히 향상되는 결과를 확인하였다.

S-3 지표침하판에서는 회귀분석 구간을 70%로 설정한 경우에도 쌍곡선법을 적용했을 때 예측 구간에서 RMSE가 17.847cm로 나와, 허용 잔류 침하량 이상으로 나오는 것을 확인하였다. 이에 반해, 가중 비선형 회귀분석의 경우 회귀분석 구간을 50%로 설정한 경우에도 RMSE가 4.154cm로 나와 상당히 정확도가 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

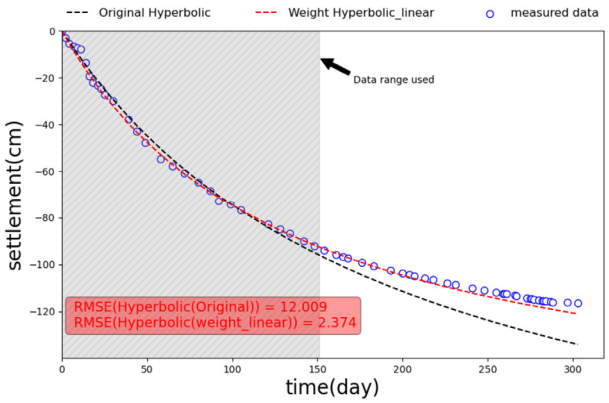
S-4 지표침하판의 경우, 쌍곡선법 및 가중 비선형 회귀분석 방법 모두 RMSE가 10cm보다 크게 나오는 것을

Table 5. Analysis results of B site in Busan port by hyperbolic method and weighted nonlinear regression method

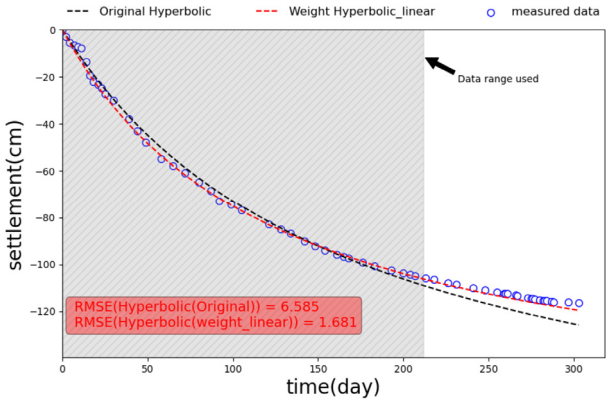
Surface settlement plate	Regression range	RMSE (unit : cm)	
		Original hyperbolic method	Weighted nonlinear regression method
S-1	30%	31.218	1.092
	50%	12.009	2.374
	70%	6.585	1.681
S-2	30%	30.703	2.029
	50%	9.819	0.985
	70%	6.161	2.096
S-3	30%	68.351	28.102
	50%	38.623	4.154
	70%	17.847	3.111
S-4	30%	96.138	6.121
	50%	52.41	11.249
	70%	20.813	12.337
S-5	30%	4026.109	2.659
	50%	66.537	1.474
	70%	20.493	3.964



(a) 30% regression range

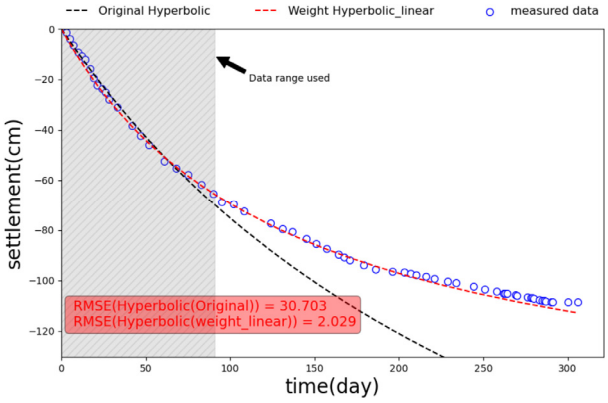


(b) 50% regression range

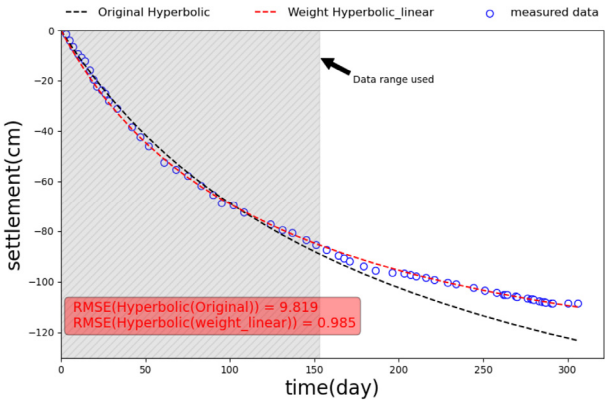


(c) 70% regression range

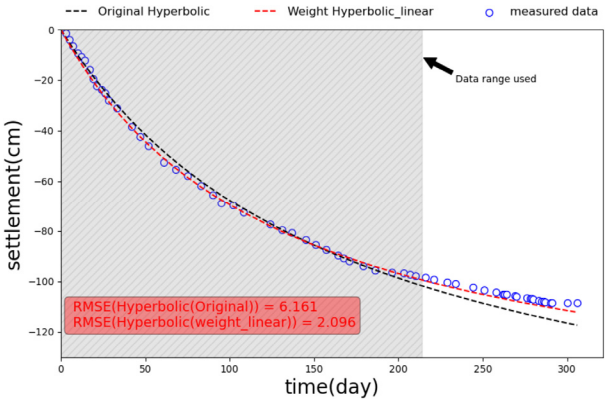
Fig. 7. Analysis results of S-1 settlement plate



(a) 30% regression range



(b) 50% regression range



(c) 70% regression range

Fig. 8. Analysis results of S-2 settlement plate

확인하였다. 그럼에도 불구하고 쌍곡선법은 회귀분석 구간이 증가하여 약 70% 데이터를 사용하는 경우에도 RMSE가 약 20cm 수준으로 높게 나타난 반면에, 가중 비선형 회귀분석 방법은 회귀분석 구간과 무관하게 RMSE가 약 10cm 내외로 나오는 것을 확인할 수 있었다. S-5 지표 침하판 역시, 쌍곡선법과 가중 비선형 회귀분석 결과가 다른 지표침하판 결과와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

전반적으로 가중 비선형 회귀 방식이 기존 쌍곡선법 대비 정확도가 상당히 향상되는 예측 결과를 보였다. 기존 쌍곡선법의 경우 전체 데이터 중 70% 이상의 데이터를 활용한 경우에 RMSE가 약 20cm 정도로 나타났으나, 가중 비선형 회귀분석 방법은 전체 데이터 중 50% 정도만 활용하여 예측한 경우에도 대체로 RMSE가 10cm 보다 작게 나타났다. 특히 초기 데이터(30%)만 적용한 경우에도, 가중 비선형 회귀분석 방법의 정확도가 상당히 높은 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 계측 데이터를 통해 침하량을 예측하는 다양한 이론식을 확인하였으며, 실제 부지 현장 데이터 일부에 적용함으로써, 기존 예측기법의 한계점을 확인하였다. 분석 결과, 쌍곡선법과 Asaoka법이 정확도가 높은 편으로 나타났으며, 다른 예측방법의 경우 정확도가 상당히 낮게 나오는 것을 확인하였다.

정확성 및 편의성의 측면에서 가장 널리 사용되고 있는 쌍곡선법에 대해서, 회귀분석의 통계적 타당성에 대한 검토를 통해 비선형 회귀분석 방법과 함께 각 데이터에 가중치를 다르게 두는 가중 회귀분석 개념을 적용하여 가중 비선형 회귀분석 방법을 제시하였다. 제시된 가중 비선형 회귀분석 방법을 이용하여 실제 부산항 신항 현장 데이터 일부를 활용하여 시범 분석을 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 전반적으로 가중 비선형 회귀 방식이 기존 쌍곡선법 대비 정확도가 상당히 향상되는 예측 결과를 보였으며, 동일한 데이터 적용 시에 RMSE가 최대 3.5% 수준까지 감소하였다.
(2) 기존 쌍곡선법의 경우 전체 데이터 대비 70% 이상의 데이터를 적용하는 경우에 침하량 예측 정확도가 높게 나타났으나, 가중 비선형 회귀분석 방법은 전체 데이터의 50% 정도로도 기존 쌍곡선법보다 더 높은 정확도를 보였다.
(3) 가중 비선형 회귀분석 방법의 경우, 초기 데이터(0~30%)만을 활용하는 경우에도 상당히 정확도가 높게 나타났기 때문에, 실제 현장 적용 시에 성토 완료 이후 초기 단계에서부터 정확한 침하량 예측이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 기존 계측 기반에 대한 개선 방향을 제시하였다는 의의가 있으나, 아직 시범 적용 단계로써 부산신항 일부의 지표침하판 데이터를 바탕으로 도출된 결론이다. 추가적으로 부산신항 내의 다양한 현장 및 기타 연약지반 현장 데이터를 활용하여 본 연구 결과에서 제시한 가중 회귀분석 방법을 적용한다면, 개선 방안에 대한 신뢰도가 충분히 확보될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌 (References)

1. Anderson, L. R., Sampaco, C. L., Gilani, S. H., Keane, E., and Rausher, L. (1994) “Settlements of Highway Embankments on Soft Lacustrine Deposits”, Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, ASCE Geotechnical Publication, No.40, pp.376-395.
2. Arulrajah, A., Nikraz, H., and Bo, M. W. (2003), “Factors Affecting Field Assessment and Back-analysis by Asaoka and Hyperbolic Methods”, *Australian Geomechanics*, Vol.38, No.2, pp.29-37.
3. Arulrajah, A., Nikraz, H., and Bo, M. W. (2004), “Observational Method of Assessing Improvement Ofmarine Clay”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, Vol.8, No.4, pp.151-169.
4. Asaoka, A. (1978) “Observational Procedure of Settlement Prediction”, *Soils and Foundations*, Vol.18, No.4, pp.87-101.
5. Barron, R. A. (1948). “Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells Transactions”, *American Society of Civil Engineers*, Vol. 113.
6. Bergado D. T., Asakami H., Alfaro M.C., and Balasubramaniam A.S. (1991), “Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.10, pp.1509-1530.
7. Choo, Y. S., Kim, J. H., Hwang, S. H., and Chung, C. K. (2010), “The Optimization of Hyperbolic Settlement Prediction Method with the Field Data for Preloading on the Soft Ground”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.7, pp.147-159 (in Korean).
8. Chung, S. G., Choi, G. H., Choi, H. K., and Cho, K. Y. (1998), “$\sqrt{s}$ - Observational Procedure for Consolidation Analysis”, *Geotechnical Engineering*, Vol.14, No.2, pp.41-53.
9. Hoshino, S. (1962), “Problems of Foundation s in Recent Years”, *Society of Civil Engineering*, Vol.47, No.7, pp.63-67 (in Japanese)
10. Kim, J. S. (2021), “An Experimental Study on the Settlement Characteristics of Soft Ground in the Central West Coast Region”, *Journal of The Korean Society of Disaster Information*, Vol.17, No.4, pp.786-793.
11. Mikasa, M. (1963), “Consolidation of Soft Clay”, Kajima-shuppan-kai, Tokyo, Japan (in Japanese).
12. Monden, H. (1963), “A New Time Fitting Method for the Settlement Analysis of Foundation on Soft Clays”, Menoir Fac. Eng., Hiroshima University, Vol.20, No.1, pp.21.
13. Park, H. I. and Kim, H. Y. (2009), “Analysis of the Settlement of Pusan New Port Construction Site Using the Settlement Prediction Methods”, International Symposium on Urban Geotechnics, Incheon, Korea.
14. Tan, S. A. (1993), “Ultimate Settlement by Hyperbolic Plot for Clays with Vertical Drains”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.5, pp.950-956.
15. Tan, S. A. (1995), “Validation of Hyperbolic Method for Settlement

in Clays with Vertical Drains", *Soils and Foundations*, Vol.35, No.1, pp.101-113.
16. Tan, S. A. and Chew, S. H. (1996), "Comparison of the Hyperbolic and Asaoka Observational Method of Monitoring Consolidation with Vertical Drains", *Soils and Foundations*, Vol.16, No.3, pp.31-42.
17. Tan, T. S., Inoue, T., and Lee, S. L. (1991), "Hyperbolic Method for Consolidation Analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.11, pp.1723-1737.
18. Terzaghi, K. (1943), Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New York, USA.
19. Yoo, H. K. and Kim, J. H. (2000), "A Study on the Prediction of Long-Term Settlement by the Modified Hyperbolic Method", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.16, No.3, pp. 163-172.

Received : November 30th, 2022
Revised : December 6th, 2022
Accepted : December 7th, 2022