

쌍곡선법을 이용한 계측 기반 연약지반 침하 거동 예측의 최적화 방안

The Optimization of Hyperbolic Settlement Prediction Method with the Field Data for Preloading on the Soft Ground

추 윤 식¹ Choo, Yoon-Sik

김 준 현² Kim, June-Hyoun

황 세 환³ Hwang, Se-Hwan

정 충 기⁴ Chung, Choong-Ki

Abstract

The settlement prediction is very important in preloading method for a construction site on the soft ground. At the design stage, however, it is hard to predict the settlement exactly due to limitations of the site survey. Most of the settlement prediction is performed by a regression settlement curve based on the field data during construction. In Korea, hyperbolic method has been most commonly used to align the settlement curve with the field data, because of its simplicity and many application cases. The results from hyperbolic method, however, may differ by data selections or data fitting methods. In this study, the analyses using hyperbolic method were performed about the field data of OO site in Pusan. Two data fitting methods, using an axis transformation or an alternative method which is a direct regression method, were applied with various data groups. If data was used only after the ground water level being stabilized, fitting results using both methods were in good agreement with the measured data. Regardless of the information about the ground water level, the alternative method gives better results with the field data than the method using an axis transformation.

요 지

연약지반 개량을 위한 선행재하 공법에서 현장 시공 조건에 따른 연약지반의 침하 거동을 예측하는 것은 매우 중요하다. 하지만 실제 지층의 구성이나 물성치를 정확히 평가하는 것은 매우 어렵기 때문에, 대부분은 침하 계측 데이터에 기반을 둔 침하량 추세 분석 방법을 통하여 최종 침하량 및 지반 물성치를 추정한다. 현재 다양한 침하량 추세 분석 방법이 제안되었으며, 국내 시공 현장에서는 쌍곡선법이 가장 널리 사용되고 있다. 하지만 동일한 현장에 대하여 쌍곡선법을 사용하더라도 계측 침하 자료의 회귀 방법, 그리고 분석 대상 구간을 선정함에 따라 침하량 결과는 상이하게 나타난다. 본 연구에서는 쌍곡선법을 이용하여 부산 OO 현장의 현장 계측 데이터로부터 침하 곡선을 추정하였다. 이때 쌍곡선법의 적용 조건을 다양하게 적용하였으며, 그에 따른 결과들을 비교, 분석하여 최적의 적용 방법을 제안하였다. 회귀 방법과 계측 데이터의 분석 구간에 따른 추정 치 변화를 평가하였으며, 이후 검증 시험을 통하여 적용 방법의 타당성을 검증하였다. 해석 결과 성토에 따른 지하수위 상승이 안정화된 시점 이후 해석하는 것이 안정적이며, 해석 방법에 대해서는 현장 데이터를 직접 회귀하는 것이 더 정확하게 침하 곡선을 추정할 수 있었다.

Keywords : Hyperbolic method, Levenberg -Marquardt Method, Regression method, Settlement prediction, Soft ground

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engr., Seoul National Univ., cysworld00@hotmail.com, 교신저자)

2 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engr., Seoul National Univ.)

3 정희원, (주)현대산업개발 부장 (Member, General Manager, Hyundai Development Company)

4 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engr., Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

연약지반에서는 일반적으로 선행 재하 공법을 이용하여 지반을 과압밀 상태로 만듦으로써 지반의 침하량을 제어한다. 선행 하중 공법을 적용할 때, 시공 계획을 수립하고 현장 상황에 따라 이를 수정, 관리하기 위하여 성토 하중에 따른 연약 지반의 침하 거동을 예측하는 것은 매우 중요하다. 하지만 연약지반의 압밀 침하 거동은 층의 두께, 지반의 물성치 및 시공 상황 등에 따라 많은 영향을 받기 때문에, 설계 시 해석적 방법만으로는 압밀 침하 거동을 정확히 예측하기 어렵다. 따라서 대부분의 현장에서는 침하 계측 자료 기반의 침하량 추세 분석 방법으로 지반의 압밀 침하 거동을 예측, 평가한다. 이러한 침하 예측 방법으로는 쌍곡선법(Tan et al., 1991), Hoshino 방법(Hoshino, 1962), Root S 방법(정성교 등, 1998), Asaoka 방법(Asaoka, 1978), Monden 방법(Monden, 1963) 등과 같이 다양한 기법이 제안되어 있으나, 국내 시공 현장에서는 많은 적용 사례와 방법의 간편성으로 인하여 쌍곡선법이 가장 널리 사용된다.

쌍곡선법은 연약지반에서 시간에 따른 압밀 침하 거동이 쌍곡선의 형태로 발생한다는 가정하에 계측된 침하 자료를 이용하여 쌍곡선 형태의 침하 곡선을 추정하여 향후 압밀 침하 거동을 예측하는 방법이다. 일반적으로 현장에서는 계측 자료로부터 근사도가 높은 쌍곡선식을 찾기 위하여 시간에 따른 침하 계측 자료를 축변환 뒤 선형 회귀 하며, 이때 선형성을 높이기 위하여 축변환 이후 선형성이 떨어지는 초반부의 일부 데이터를 제거하기도 한다. 따라서 데이터가 제거된 정도에 따라 동일한 계측 데이터라도 회귀 결과가 달라지게 되어, 지반의 압밀 침하 곡선이 다르게 추정될 수 있다. 하지만 초반 선형성이 떨어지는 데이터를 제거하는 것에 대한 기준 등이 따로 제시되어 있지 않은 상태이기 때문에, 해석 시 현장에서 자체적인 판단에 의하여 데이터가 임의로 제거되므로, 동일한 현장에 대하여 쌍곡선법을 적용하더라도 다른 해석 결과가 나타날 수 있다. 하지만 현재 데이터의 제거에 따른 해석 결과의 변화에 대한 연구는 이루어지지 않은 상태이다. 반면 축변환을 하지 않고 계측 자료를 직접적으로 회귀하여 압밀 침하 곡선을 추정하는 방법도 제시되었으나, 현재 현장 적용이 많이 이루어지지 않은 상태이며, 축변환 이후 회귀하는 기존 방법과의 비교, 분석 등에 대한 연구 및 데이터의 선택 방법에 따른 해석 결과의 변화 등에 대한 연구도 많이 부족

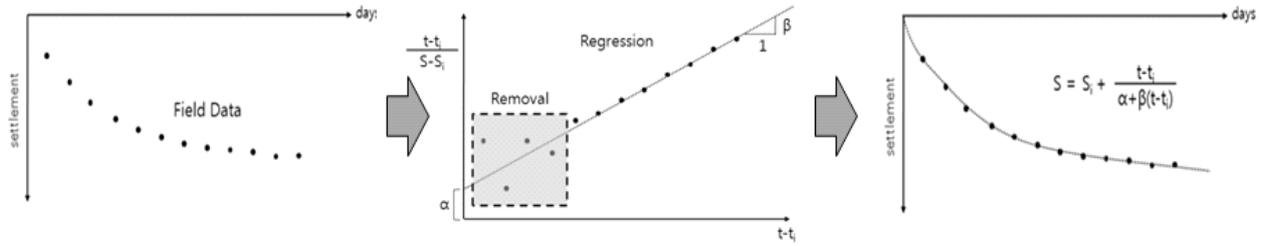
한 상황이다.

본 연구에서는 축변환 이후 회귀와 직접 회귀의 두 가지 회귀 방법을 부산 OO 현장에서의 계측 자료에 적용시켰으며, 이때 회귀 구간을 다양하게 하여, 그에 따른 추정치 및 추정치 변화 양상을 비교, 평가하였다. 또한 각 회귀방법 및 회귀 구간에 따른 추정치의 예측 정확성을 평가하기 위하여 검증 시험을 실시하였다. 이때 초반부의 계측 결과만을 이용하여 회귀 방법 및 회귀 구간을 변화시키며 추정 침하 곡선들을 산정하였으며, 이 곡선들을 후반부의 계측 데이터와 비교하였고, 이로부터 회귀 방법 및 회귀 구간의 예측 정확성을 정량적으로 비교, 검토하였다.

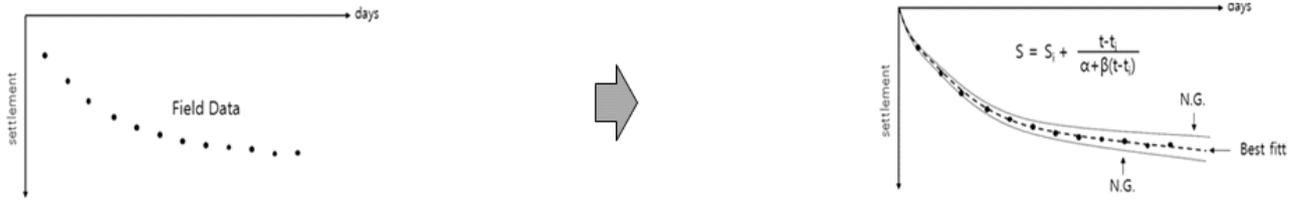
2. 회귀 방법 및 회귀 구간

2.1 회귀 방법

본 연구에서는 성토 완료 시점 이후의 데이터를 쌍곡선법에 적용하기 위하여 “축변환 후 회귀”와 “직접회귀” 두 가지 방법을 사용하였다. 첫 번째로, 축변환 후 회귀하는 방법은 가장 일반적으로 사용하는 방법으로 그림 1(a)와 같이 데이터를 축변환 시킨 후 선형 회귀를 수행한다. 이때 얻어진 선형 회귀식의 y절편과 기울기인 α 와 β 를 쌍곡선 식에 대입하여 침하 곡선을 구하게 된다. 두 번째로 직접 회귀하는 방법은 그림 1(b)와 같이 계측 데이터의 축변환 없이 계측된 하중 침하 곡선으로부터 바로 회귀하여 최적의 α 와 β 값을 갖는 쌍곡선을 결정하는 것이다. 본 연구에서 직접 회귀를 통하여 쌍곡선 계수를 결정할 때는 Levenberg -Marquardt Method를 사용하였다(Kenneth Levenberg, 1944; Donald Marquardt, 1963). 이 방법은 계산 방법이 간단하지만 수렴이 빠르고 정확한 결과를 나타내어 비선형 회귀 기법 중에서 표준적으로 사용되고 있다(Hagan, 1996). Levenberg -Marquardt Method는 비선형 형태의 함수가 존재할 때 이 함수와 x축이 만나는 점을 반복적으로 찾는다는 개념에서는 비선형 회귀방법 중 하나인 Newton 방법과 유사하지만, Newton 방법과는 다르게 계수 λ 를 추가적으로 도입하였다. 계수 λ 는 비선형 함수의 값이 x축에 가까워지면 정확도를 높이기 위하여 작아지지만, 멀어지게 되면 λ 값이 증가하여 결과가 발산하는 것을 방지하며, 이로 인하여 결과의 수렴성 및 정확성을 높일 수 있다. 본 연구에서는 이 방법에서 계측값과 쌍곡선 식에 대한 오차를



(a) 축변환 후 회귀에 의한 쌍곡선법



(b) 직접 회귀에 의한 쌍곡선법

그림 1. 회귀 방법에 따른 쌍곡선법

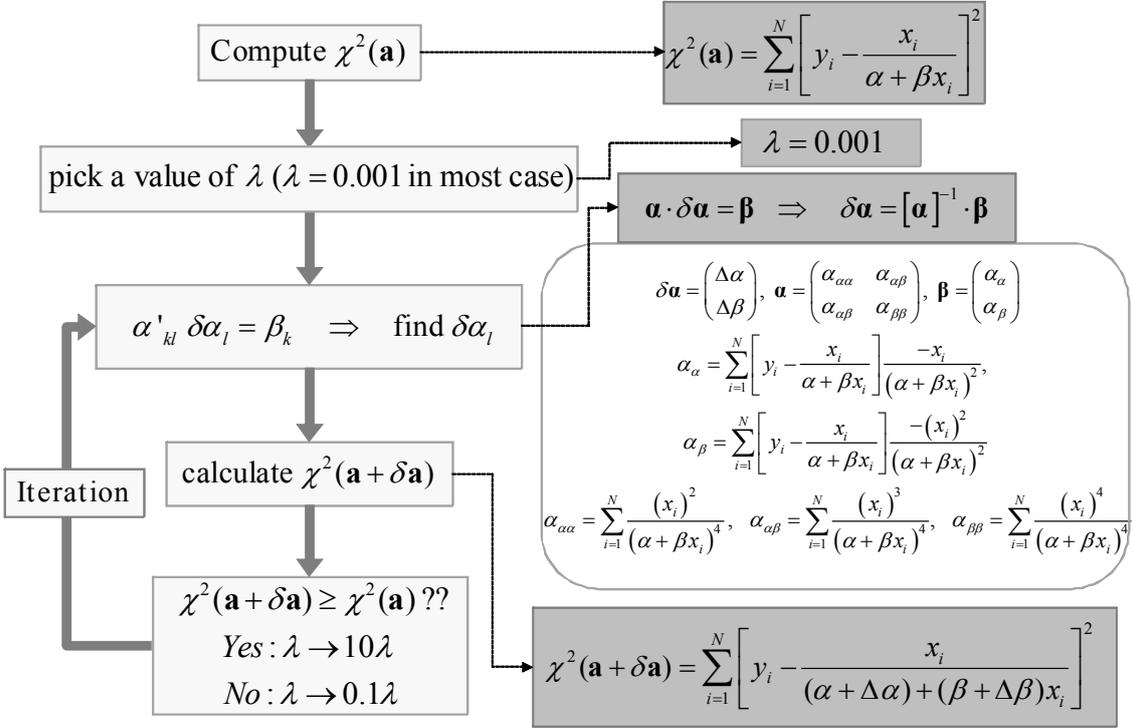


그림 2. Levenberg-Marquardt method를 이용한 직접 회귀 알고리즘

비선형 함수로 결정하여, 쌍곡선 식의 계수 α 와 β 를 변화시키며 오차가 최소가 되도록 하였으며, 그 알고리즘은 다음 그림 2와 같다.

2.2 회귀 구간

회귀 구간에 따른 추정치의 변화를 비교, 분석하기 위하여 회귀 방법에 따라 회귀 구간을 다양하게 적용하였

다. 일반적으로 현장에서 축변환된 데이터의 초반부분을 선형 회귀 전에 제거하는 것과 동일한 조건을 만들기 위하여, 본 연구에서도 계측 데이터를 성토 완료 이후 시점부터 하나씩 제거하면서 회귀 구간을 설정하였다. 그림 3과 같이 계측 데이터가 point 1부터 point N까지 총 N개가 있다고 가정하면, 처음 해석에서는 point 1부터 point N까지를 회귀 구간으로 정하였고, 그 다음 해석에서는 point 2부터 point N까지, 그 다음은 point 3부

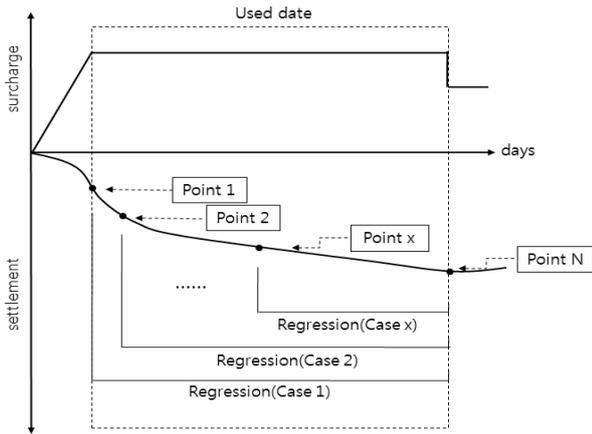


그림 3. 계속 데이터의 사용범위

터 point N까지로 설정하였다. 이런 방법으로 데이터를 하나씩 제거하며 회귀 구간을 정하였으며, 마지막 회귀 구간은 point N-1부터 point N까지 데이터로 하였다.

또한 쌍곡선법에서는 동일한 회귀 구간을 사용하더라도 초기점을 설정함에 따라 해석 결과가 달라질 수 있기 때문에, 해석 시 초기점을 지정하는 것이 매우 중요하다. 이 이유는 다음의 일반적인 쌍곡선 식으로부터 확인할 수 있다.

$$S = S_i + \frac{t - t_i}{\alpha + \beta(t - t_i)} \quad (1)$$

여기서 α 와 β 는 회귀를 통하여 결정되는 쌍곡선 계수이고, S , t 는 임의의 시간에서의 침하량 및 시간이며 S_i , t_i 는 성토 완료 시점, 즉 초기점에서의 침하량과 시간이다. 여기에서 동일한 α 와 β 를 갖는 쌍곡선이라도 초기의 값, S_i , t_i 가 변하게 되면 임의의 시간 (t)에서의 침하량(S)는 변하게 되는 것이다. 일반적으로 축변환 후 회귀를 실시하는 경우에는 모든 데이터들을 축변환 시킨 후 직선으로 회귀하고 그 직선을 다시 원래의 형태로 축변환하여 쌍곡선의 형태로 만든다. 따라서 축변환 이

후 직선 회귀 시 선형성이 떨어지는 데이터 구간을 삭제한다 하더라도 회귀 이전과 이후의 데이터 구간이 일정해야 하기 때문에 회귀에 사용된 데이터들 중 가장 앞의 데이터가 아닌, 축변환 전의 데이터 구간에서의 가장 앞의 데이터를 초기점으로 정한다. 하지만 직접 회귀의 경우에는 축변환 없이 회귀에 사용된 구간에서의 데이터만으로 해석을 실시하므로 회귀 구간의 가장 앞의 데이터를 초기점으로 정한다. 추가적으로 해석 조건을 동일하게 하기 위해 각 회귀 방법에 적용한 초기점을 다른 회귀 방법에 적용하려 하였으나 결과가 합리적이지 못하여 본 논문에 포함하지 않았다. 축변환 후 회귀에 있어서 회귀 구간 내의 최초의 데이터를 사용하였을 때에는 앞에서 언급하였듯이 축변환 이후 초기 데이터들의 선형성이 떨어지기 때문에 해석 결과가 매우 좋지 않았으며, 직접 회귀에서는 회귀 이후 성토 완료 지점을 초기점으로 곡선을 그리면 회귀에 사용된 구간과 초기점이 달라지기 때문에 전혀 다른 곡선이 생성된다. 따라서 본 연구에서는 그림 3과 표 1에 나타난 바와 같이 축변환 후 회귀에 대해서는 초기점을 성토 완료 지점으로 일정하게 하였으며, 직접 회귀한 경우에는 초기점을 회귀 구간에서의 최초 데이터를 초기점으로 하여 회귀를 실시하였다.

3. 회귀 구간에 따른 해석 및 결과

3.1 전체 데이터에 대한 해석 및 결과

3.1.1 해석 조건

본 연구에서는 부산 OO 현장에서 대표적인 6개 지점을 선별하여, 이 지점들에서 계속된 하중-침하 자료를 이용하여 해석을 수행하였다. 쌍곡선법은 그림 3과 같이 성토 완료 시점에서부터의 데이터를 이용하여 해석을 수행하므로, 각 지점에서 성토 완료 후 성토고가 일

표 1. 회귀방법에 따른 초기점 및 사용된 회귀 기간

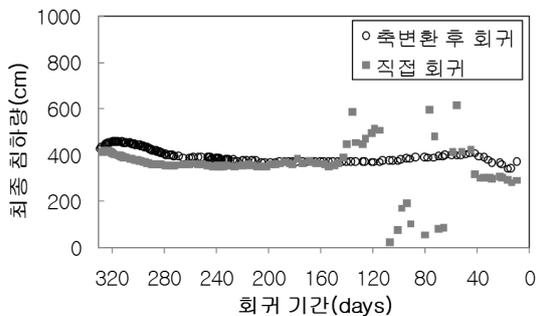
		직접 회귀	축변환 후 회귀
Case 1	초기값	Point 1	Point 1
	회귀시 사용된 구간	Point 1 ~ Point N	Point 1 ~ Point N
Case 2	초기값	Point 2	Point 1
	회귀시 사용된 구간	Point 2 ~ Point N	Point 2 ~ Point N
...
Case x	초기값	Point x	Point 1
	회귀시 사용된 구간	Point x ~ Point N	Point x ~ Point N

표 2. 각 지점별 해석 기간

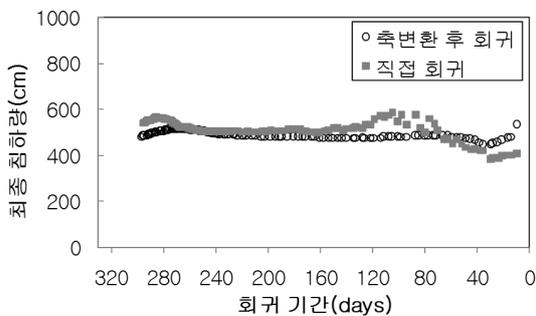
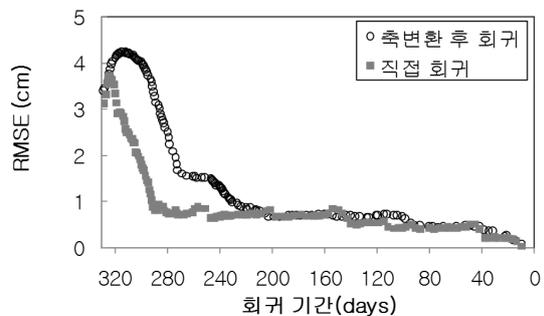
지점 번호	해석 기간(day)
ss-02	329
ss-06	297
ss-11	281
ss-17	302
ss-24	288
ss-31	307

정하게 유지되는 동안의 침하 데이터를 해석에 사용하였으며, 해석에 사용된 데이터 구간의 길이를 표 2에 정리하였다. 해석 결과는 예측 최종 침하량으로 표시하였으며, 회귀 데이터와 추정 침하 곡선의 형상이 잘 일치하는지 확인하기 위하여 계측 데이터와 추정치의 오차를 따로 표시하였다. 본 연구에서는 오차를 정량적으로 평가하기 위하여 RMSE를 사용하였다. RMSE(Root Mean Square Error)는 계측치와 추정치 사이의 오차를 나타내는 일반적인 방법으로서 본 연구에서는 식 (2)와 같이 사용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_{measured} - S_{calculated})^2}{N}} \quad (2)$$



(a) ss-02



(b) ss-06

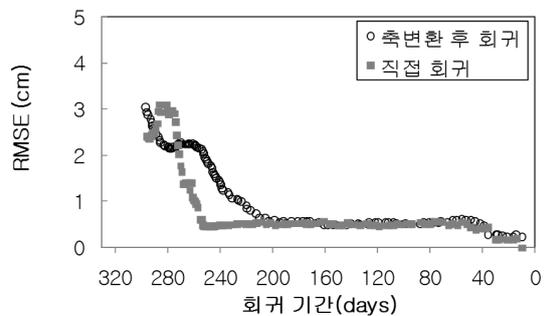


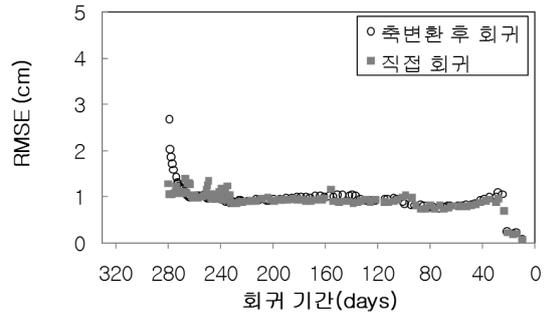
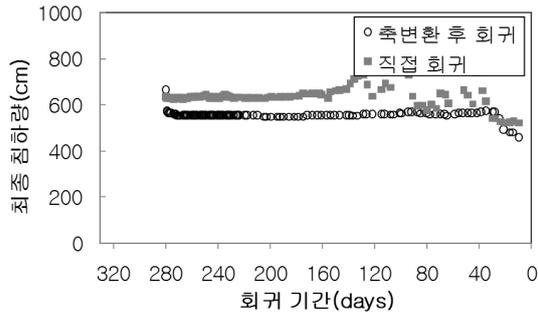
그림 4. 회귀 방법에 따른 최종 침하량 및 RMSE

여기서 $S_{measured}$ 와 $S_{calculated}$ 는 각 시점의 계측치와 쌍곡선법에 의한 추정치이며 N 은 총 데이터 개수이다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 계측치와 추정치에 대한 오차 제공의 평균에 대한 제곱근이며, 따라서 RMSE가 작아질수록 계측치와 추정치의 오차가 작고 추정 곡선과 계측 데이터가 잘 맞는 것을 의미한다.

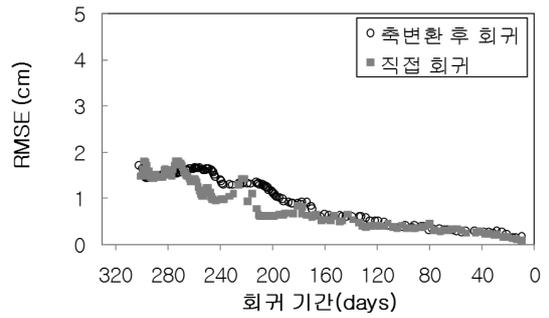
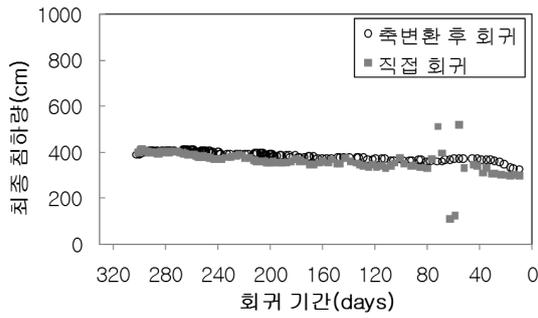
3.1.2 해석 결과

그림 4는 각 지점에서 계측된 데이터를 쌍곡선법으로 회귀한 결과이다. 앞에서 제시한 두 가지 방법(측변환 후 회귀, 직접 회귀)을 이용한 추정치를 표시하였으며, 각 방법들에 대하여 최종 침하량과 추정 침하 곡선과 계측데이터의 RMSE를 표시하였다. 각 그래프에서 x축은 회귀에 사용한 데이터 기간을 의미한다. 즉, 그래프의 왼쪽 부분이 가장 긴 기간의 데이터로 회귀를 실시한 것이며, 그래프가 오른쪽으로 갈수록 데이터가 하나씩 제거되어 회귀에 사용한 기간이 짧아지는 것이다. 예를 들어 그림 4(a) ss-02의 경우에는 초기에 320일 정도 기간의 데이터를 사용하여 회귀하였으며(왼쪽부분), 점점 오른쪽으로 갈수록 사용된 회귀 기간이 짧아지고 최종적으로 x축 값이 0인 것은 회귀 구간이 0에 도달한다는 것을 의미한다.

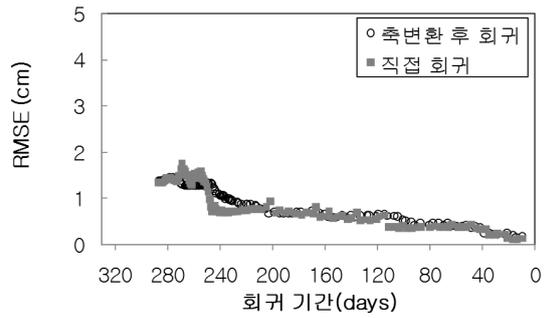
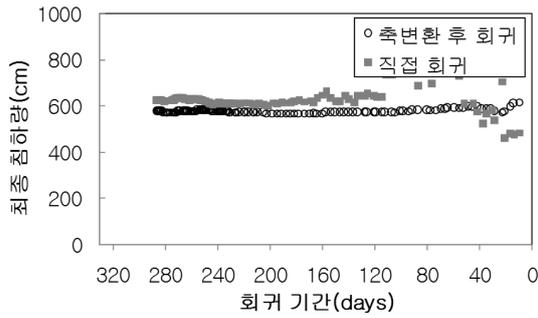
최종 침하량에 대한 그래프에서 긴 기간의 데이터를



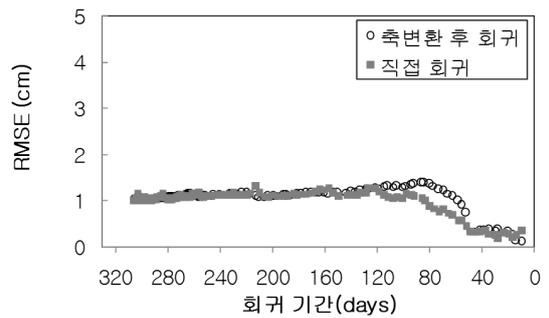
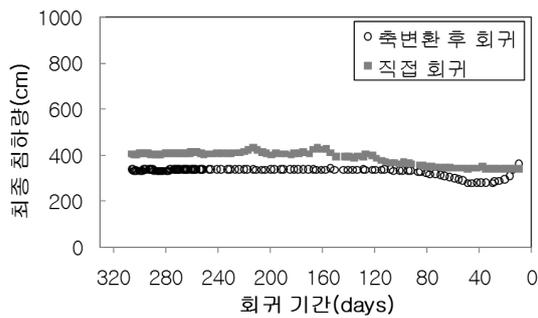
(c) ss-11



(d) ss-17



(e) ss-24



(f) ss-31

그림 4. 회귀 방법에 따른 최종 침하량 및 RMSE (계속)

사용한 해석(그래프의 왼쪽 부분)은 추정치 변동이 나타나기도 하지만, 일정 기간이 제거된 후에는 대부분 일정한 결과를 보인다. 그러나 짧은 회귀 구간으로 해석한 결과들(그래프의 오른쪽 부분)은 다시 추정치의 변동이 발생한다. 이는 사용되는 데이터의 수가 적어서 데이터

가 하나씩만 제거되어도 추정치에 큰 영향을 미치기 때문이며, 따라서 쌍곡선법을 적용할 때는 어느 정도의 데이터가 있는 것이 좀더 안정적인 결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 본 연구에서는 축변환 후 회귀를 사용하는 경우 약 40일 이상의 데이터를 이용하면 대체적으로 일정

한 결과를 보였으나, 직접 회귀를 사용한 경우에는 140 일 이상을 사용해야 일정한 결과가 나왔다. 이 이유는 회귀 방법에 있어 축변환 후 회귀는 비교적 간단한 선형 회귀를 실시하지만 직접 회귀의 경우에는 상대적으로 복잡한 비선형 회귀를 실시하기 때문으로 추정된다. 따라서 실제 현장에서 쌍곡선법을 적용할 때는 많은 양의 데이터가 있는 경우에 모든 회귀 방법에서 더 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 적은 양의 데이터를 사용할 때에는 축변환 후 회귀를 사용하는 것이 좀더 안정적인 결과를 나타낼 수 있다고 판단된다.

추정치와 계측치의 오차를 나타내는 RMSE에서는 두 방법 모두 초반에 큰 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 즉 초반에는 회귀를 실시한 결과 계측 데이터가 쌍곡선 형태에 잘 맞지 않는다는 것을 의미한다. 축변환 후 회귀를 사용한 경우에는 축변환 이후 생기는 초반 선형성이 떨어지는 데이터 때문에 RMSE가 클 수 있지만, 직접 회귀는 축변환을 사용하지 않기 때문에 이러한 오차가 생길 수 없고, 따라서 계측 데이터의 선별에서 문제가 있을 것이라 판단된다. 이 문제에 대해서는 다음 장에서 좀더 자세히 다루도록 하겠다. 초반의 높은 RMSE는 데이터가 제거됨에 따라 RMSE가 빠르게 감소하여 일정 구간부터는 RMSE가 1cm이하로 유지되며, 이에 따라 회귀 구간이 짧아질수록 데이터에 더 잘 맞는 쌍곡선 형태를 찾을 수 있다. 전체적으로는 직접 회귀를 사용한 경우의 RMSE가 축변환 후 회귀한 것과 비슷하거나 더 낮은 값을 보였으며, 직접 회귀한 경우가 축변환 후 회귀한 경우보다 데이터의 제거에 따라 RMSE가 빠르게 감소하였다. 따라서 같은 회귀 구간을 정하였더라도 직접 회귀를 사용한 경우에 계측 데이터에 좀더 잘 맞는 침하 곡선을 산정한다고 판단된다.

3.2 지하수위 안정화 시점 이후 및 해석

3.2.1 해석 조건

앞에서 언급하였듯이 두 가지 회귀 방법(축변환 후 회귀, 직접 회귀)에서 초반부터 계측데이터를 사용한 경우, 불안정한 최종 침하량 및 높은 RMSE가 나왔으며, 일정 기간을 제거한 이후 안정화되었다. 축변환 후 회귀한 경우에는 축변환에 의한 영향이 있다고 하더라도 직접 회귀의 경우에는 축변환에 의한 오차가 발생하지 않으므로 계측 데이터의 선별에서 문제가 있을 수 있다. 따라서 초반에 오차를 보이는 데이터 발생 원인을 확인

하기 위하여 각 지점에 대하여 추정치가 안정화된 시점을 현장의 여러 조건과 비교하였으며, 성토에 따른 상승된 지하수위가 원상태로 돌아와 다시 안정된 시점과 유사한 것을 확인할 수 있었다. 그림 5는 실제 현장에서 성토에 따른 지하수위의 변화를 측정한 그래프이다. 본 연구가 적용된 현장에서는 바다 모래를 슬러리 형태로 살포하여 성토하므로 성토 직후에는 성토 지역을 중심으로 국부적인 지하수위 상승이 발생하며, 일정 시간이 지난 뒤 슬러리에 포함된 물이 주변으로 흩어지게 되면 지하수위가 다시 원상태로 돌아오게 된다. 따라서 성토 직후 지하수위가 상승하게 되면 성토체의 유효응력이 감소하고 그에 따라 성토 완료 시점에서 아직 완전하게 성토하중이 재하되지 않을 수 있으며, 상승된 지하수위가 다시 안정화된 이후 성토하중이 완전히 재하될 수 있다. 따라서 지하수위 상승이 안정화되었을 때를 성토 완료 시점으로 보고 해석을 수행하는 것이 합리적일 수 있다.

계측 지점 인근에서 계측된 지하수위가 원상태로 돌아와 안정화된 시점 이후의 데이터만을 이용하여 쌍곡선법을 적용하였다. 표 3은 각 지점에 따라 지하수위가 안정화되는데 걸린 시간을 나타내고 있으며, 성토완료 시점부터 이 기간이 지난 후를 새로운 성토완료 시점으로 지정하여 두 가지 회귀 방법에 대한 해석을 앞 장과 마찬가지로 수행하였다.

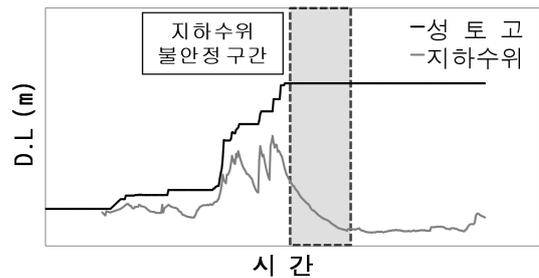


그림 5. 성토에 따른 지하수위 상승 및 안정화 과정

표 3. 각 지점별 지하수위 안정화 시점

지점 번호	전체 데이터 기간(day)	지하수위 안정화에 걸리는 시간(day)
ss-02	329	60
ss-06	297	50
ss-11	281	40
ss-17	302	60
ss-24	288	50
ss-31	307	40

3.2.2 해석 결과

그림 6은 지하수위가 안정화된 이후의 데이터만을 이용한 결과를 표시하고 있다. 앞 장과 마찬가지로 회귀 구간(x축)에 따른 최종 침하량에 대해서 나타냈으며, 계측치와 추정 침하곡선 사이의 RMSE를 통하여 오차를

평가하였다.

두 방법 모두 추정된 최종 침하량이 초반 회귀 구간부터 일정하게 나타나고 있으며, 앞 장보다 변동폭이 매우 낮은 것을 알 수 있다. 하지만 앞 장에서와 마찬가지로 회귀에 사용된 데이터의 사용량이 적은 경우에는 추

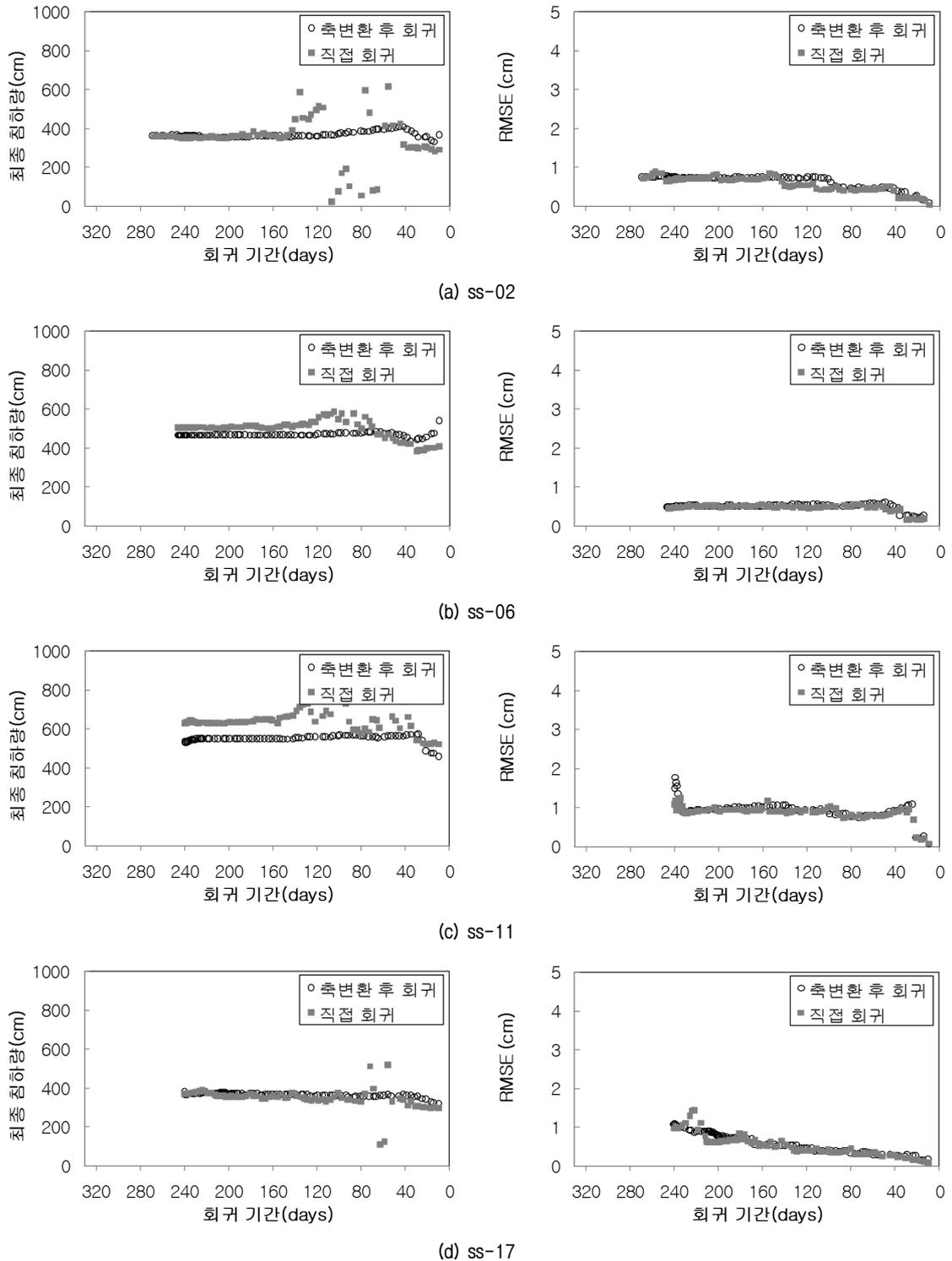
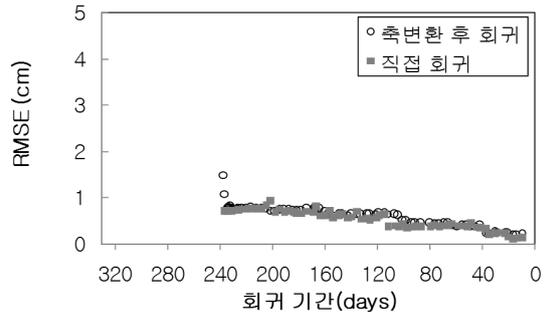
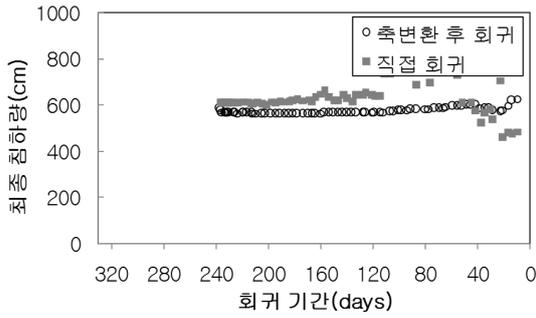
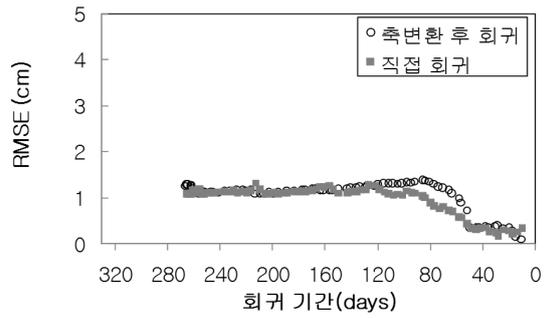
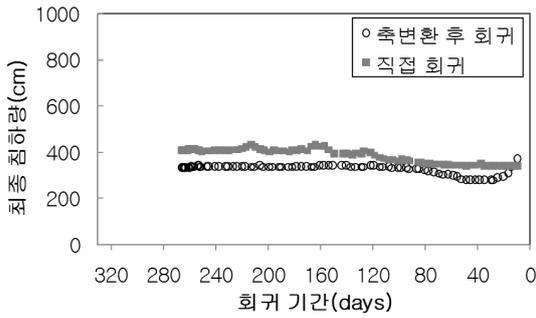


그림 6. 회귀 방법에 따른 최종 침하량 및 RMSE(지하수위 안정화 시점 이후)



(e) ss-24



(f) ss-31

그림 6. 회귀 방법에 따른 최종 침하량 및 RMSE(지하수위 안정화 시점 이후) (계속)

정된 최종 침하량의 변동이 크며 나타났다. 그리고 축변환 후 회귀에 비하여 직접 회귀에 의한 결과가 더 큰 변동폭을 보였으며, 추정치가 일정하게 나오기 위한 데이터의 수도 더 많았다.

RMSE의 경우, 직접 회귀에서는 거의 모든 지점에서 초반부터 1cm 이하의 RMSE가 나왔으며 축변환 후 회귀에 있어서는 초반에 축변환에 의한 오차로 인하여 높은 RMSE를 보이기도 하지만 데이터가 제거됨에 따라 빠르게 줄어든다. 각 회귀 방법에 따라서는, 직접 회귀의 RMSE가 축변환 후 회귀한 것보다 비슷하거나 더 낮은 값이 나타나며, 따라서 직접 회귀를 사용하는 것이 계속 데이터에 더 잘 맞는 쌍곡선을 찾는다고 할 수 있다.

4. 검증 시험

4.1 검증 시험 방법

지금까지 회귀 방법 및 조건에 따른 추정치의 추세를 살펴보았으며, 지하수위 안정화 시점부터 회귀한 결과가 더 안정적인 것을 확인하였다. 하지만 안정적으로 나오는 추정치가 정확한 예측을 한다고 확신할 수 없기 때문에, 추정치의 정확성을 검증할 필요가 있다. 따라서 앞의 쌍곡선법 회귀 기간 및 회귀 방법을 바탕으로 추정

치의 타당성을 확인하기 위한 검증 시험으로써 블라인드 테스트를 수행하였다. 블라인드 테스트는 알고 있는 정보의 일부만으로써 해석을 수행한 후, 나머지 데이터들로 그 결과를 검증, 확인하는 시험 방법이다. 본 연구에서는 계속 데이터의 초기 구간을 이용하여 추정 침하 곡선을 산정하고, 회귀 시 사용되지 않은 데이터 구간의 뒷부분과 추정 침하 곡선을 비교하여 그 오차로서 예측 타당성을 검증하였다. 여기에서도 오차를 정량적으로 평가하기 위하여 앞 장에서와 마찬가지로 RMSE를 이용하였다.

해석은 앞 장에서와 수행한 것과 동일하게 수행하였다. 즉 회귀 방법에 대해서는 축변환 후 회귀와 직접 회귀를 사용하였으며, 성토 완료 시점과 성토에 의한 지하수위 상승이 안정화된 시점부터 각각 해석을 실시하였다. 블라인드 테스트에 앞서 추정치 산정에 사용될 데이터와 추정치 비교에 사용될 데이터를 나누었으며, 표 4에 각 지점별로 표시되어 있다. 현장 상황을 고려하면 블라인드 테스트는 최소의 데이터를 이용하여 추정치를 산정하여, 이후 많은 양의 데이터와 비교하는 것이 합당하다. 따라서 앞서 확인한 바와 같이 직접 회귀의 경우 150일 이후에는 안정적인 결과를 나타내므로, 최소한의 데이터로 안정적인 결과를 낼 수 있는 초반 150일간의 데이터로 회귀를 실시하였고, 그 이후의 데이터

표 4. 블라인드 테스트에 사용될 계측 데이터 구간

지점 번호	전체 데이터 기간 (day)	지하수위 안정화에 걸리는 시간(day)	성토완료 시점 이후 회귀		지하수위 안정화 이후 회귀	
			추정치 산정 (day)	추정치 비교 (day)	추정치 산정 (day)	추정치 비교 (day)
ss-02	329	60	150	179	90	179
ss-06	297	50	150	147	100	147
ss-11	281	40	150	131	110	131
ss-17	302	60	150	152	90	152
ss-24	288	50	150	138	100	138
ss-31	307	40	150	157	110	157

는 추정 침하 곡선과의 비교하는데 사용되었다. 또한 해석에 사용되는 기간을 더 늘리면 추정치를 검증할 수 있는 기간이 짧아져 예측 타당성을 정확히 평가하기 힘들기 때문에, 지하수위 안정화 시점 이후 회귀한 경우 지하수위 안정화 시점까지의 기간이 제거되어 150일보다 짧은 기간이 회귀에 사용되더라도 회귀 기간을 추가적으로 늘리지 않았다.

각 해석 조건으로부터 얻어진 추정 침하 곡선을 검증하기 위하여 추정된 침하 곡선과 회귀에 사용되지 않은 뒷부분의 계측 데이터를 비교하였으며, 정량적인 비교를 위하여 이 값들의 오차를 RMSE로 따로 표시하였다. 이 과정에서 모든 회귀 구간에 대한 추정치들을 계측 데이터와 비교하는 것은 무리가 있기 때문에, 일정한 조

건을 만족시키는 회귀 구간에서의 추정치를 선별하여 계측 데이터와 비교하였다. 앞 장에서 확인할 수 있듯이 추정 침하 곡선과 회귀에 사용된 데이터와의 RMSE가 1cm 이하로 나오는 회귀 구간에서는 대부분 추정치가 안정적으로 나오기 때문에, 다양한 회귀 구간 중 최초로 RMSE가 1cm 이하가 되는 회귀 구간에서 산정된 추정 침하 곡선을 대표적인 값으로 선별하였으며 이를 계측 데이터와 비교하였다.

4.2 검증 시험 결과

그림 7은 성토 완료 이후 150일까지의 데이터를 사용한 블라인드 테스트 결과를 이용한 결과를 나타내고 있

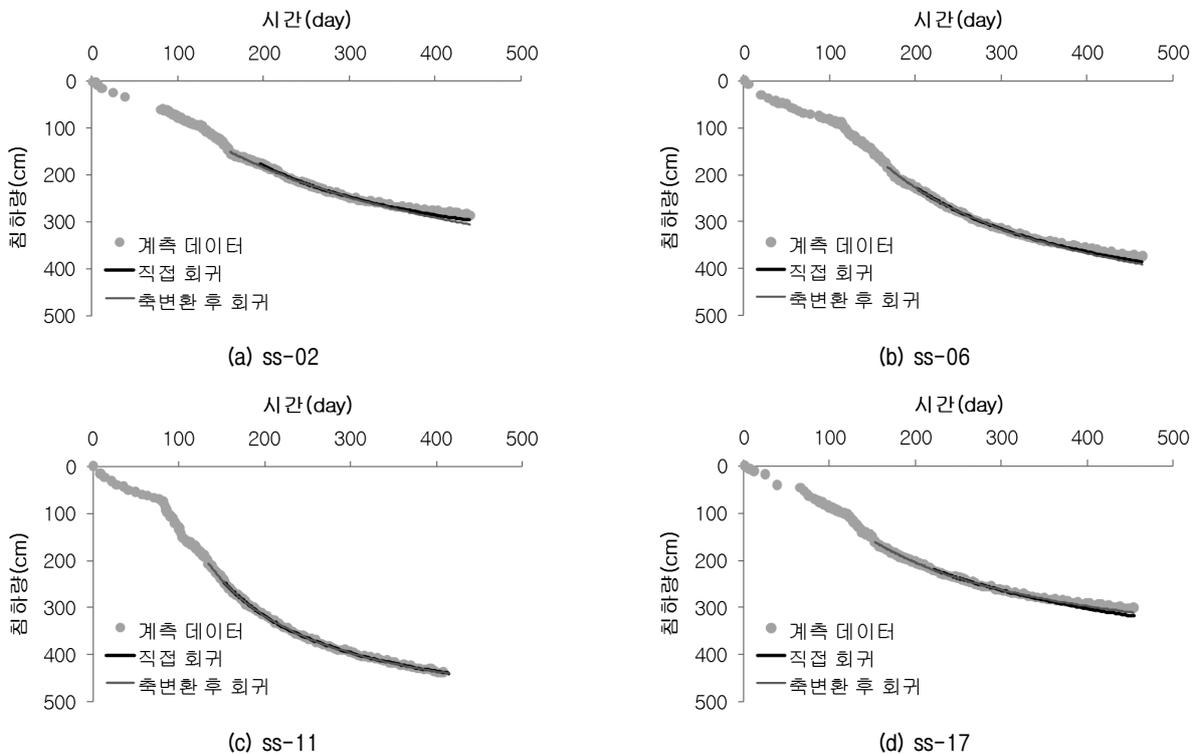
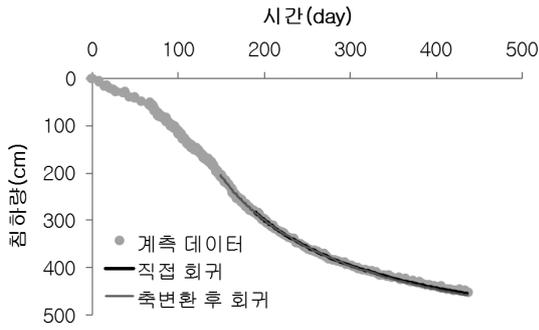
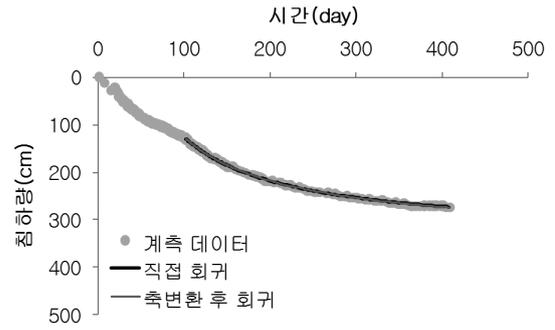


그림 7. 각 회귀 방법에 따른 침하 곡선(성토완료 이후 150일 데이터 사용)

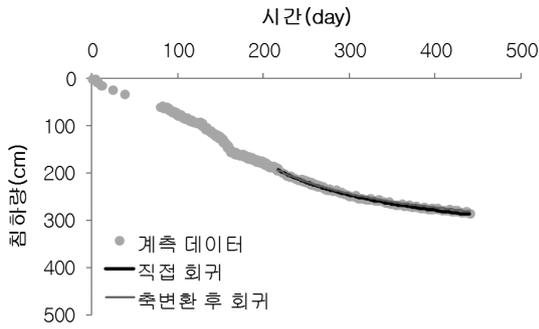


(e) ss-24

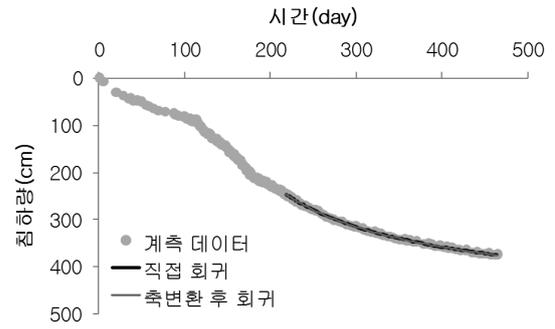


(f) ss-31

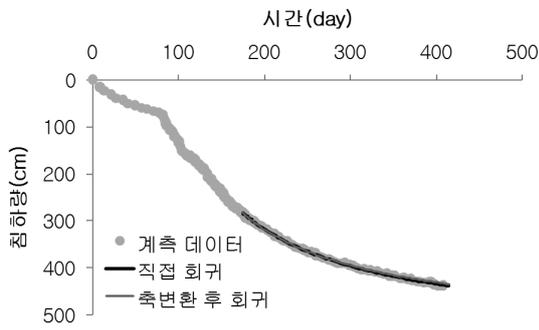
그림 7. 각 회귀 방법에 따른 침하 곡선(성토완료 이후 150일 데이터 사용) (계속)



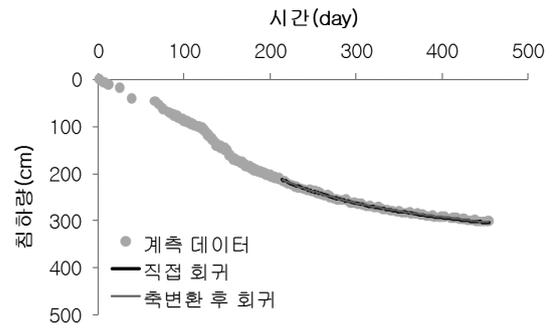
(a) ss-02



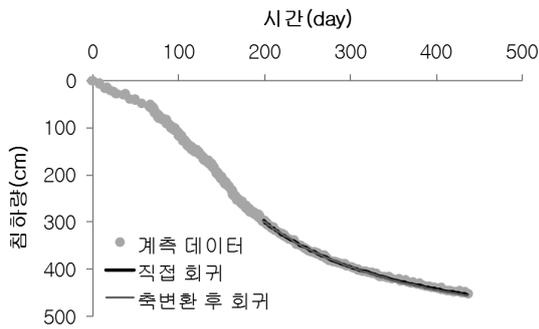
(b) ss-06



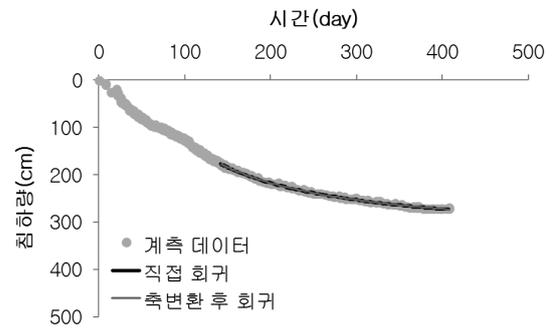
(c) ss-11



(d) ss-17



(e) ss-24



(f) ss-31

그림 8. 각 회귀 방법에 따른 침하 곡선(지하수위 안정화 시점 이후 데이터 사용)

으며 그림 8에서는 지하수위 안정화 이후부터 성토 완료 이후 150일까지의 데이터를 사용한 결과를 표시하고 있다. 또한 표 5는 추정된 침하 곡선과 회귀 시 사용되

지 않은 계측 데이터 뒷부분과의 RMSE가 회귀 구간 및 회귀 방법에 따라 정리되어 있다.

그림 7과 8을 비교하여 보면 두 방법 모두에서 지하

표 5. 각 조건에 따른 침하곡선과 계측 데이터의 RMSE 비교

회귀 방법	성토 완료 시점부터 해석		지하수위 안정화 시점부터 해석	
	직접 회귀	축변환 후 회귀	직접 회귀	축변환 후 회귀
ss-02	7.362	12.516	1.792	0.858
ss-06	7.319	10.667	0.816	0.925
ss-11	1.421	1.644	1.165	2.700
ss-17	9.702	5.242	1.670	1.116
ss-24	3.512	5.848	2.734	4.598
ss-31	1.438	1.255	1.227	1.234
평균	5.126	6.195	1.567	1.905

수위를 제거하고 해석을 수행한 결과가 계측 데이터와 더 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 표 5에서도 확인할 수 있는데, 성토 완료 시점 이후 해석을 수행한 경우에는 RMSE가 최대 12cm까지 나왔고 평균적으로 5~6cm 정도였으나, 지하수위 안정화 시점부터 해석한 경우에는 최대 4.6cm 정도이고, 평균적으로 1cm 정도의 RMSE를 보였다. 이는 초반의 지하수위 상승이 안정화된 이후의 데이터를 사용하여 회귀하는 것이 두 방법에서 더 정확한 결과를 나타낸다는 것을 의미한다. 또한 각 회귀 방법에 따른 예측성을 비교하여보면, 대부분의 지점에서 회귀 구간에 상관없이 직접 회귀를 사용하는 결과가 낮은 RMSE를 보여주었다. 특히 성토 완료 시점부터 해석을 수행한 경우에 있어서는 그 차이가 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 지하수위 안정화 시점부터 해석한 경우에도 그 차이는 작았지만 직접 회귀의 경우가 계측데이터와 더 잘 맞았다. 비록 몇 개의 지점에서는 축변환 후 회귀를 하는 것이 더 낮은 RMSE를 보이기도 하였으나, 이는 회귀에 사용된 데이터 기간이 100일 이하로 짧기 때문으로 판단되며, RMSE의 차이도 직접 회귀가 우수한 경우의 RMSE의 차이에 비하여 작았다.

블라인드 테스트를 통하여 검증 시험을 수행한 결과 해석 시 잘 맞는 경우, 즉 회귀에 사용된 계측 데이터와 추정 침하 곡선의 RMSE가 작은 경우 대부분 좋은 예측성을 보인 것을 확인하였다. 특히 성토에 따른 지하수위 상승이 안정된 이후 해석을 수행하면 보다 확실히 안정적이며 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 국내 연약지반 침하 예측 방법으로 널리 사용되는 쌍곡선법을 적용하되, 회귀 방법 및 회귀 기간을 다양하게 바꾸어 그 추정치의 변화를 비교하였

다. 회귀 방법으로는 축변환 이후 회귀하는 기법과 침하 곡선에서 직접 회귀하는 기법을 사용하였으며, 해석 구간의 데이터를 성토 완료 이후부터 제거하면서 다양한 회귀 기간을 적용하였다. 각 조건에 대한 결과는 최종 침하량 및 계측 데이터와의 RMSE를 기준으로 비교하여, 회귀 방법과 회귀 구간에 따른 추세 변화를 확인하였다. 또한 성토 완료 이후 150일까지의 데이터로부터의 추정치와 그 이후의 계측 데이터를 비교하는 블라인드 테스트를 통하여 각 조건에 따른 추정치의 타당성을 검증하였다. 해석 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (a) 성토 완료 이후의 모든 데이터를 이용한 경우에는, 회귀 기법(축변환 후 회귀, 직접 회귀)에 상관없이 최종 침하량이 불안정하게 평가 되었으며 RMSE도 높게 났다. 성토에 의한 지하수위가 상승되었다가 원상태로 돌아와, 수위가 안정화 된 구간부터 해석을 다시 실시하였으며, 이전의 결과보다 안정적인 결과를 얻을 수 있었다. 또한 직접 회귀를 사용한 경우 데이터 제거에 따른 안정화가 빨리 되었으나, 회귀에 사용된 데이터의 기간이 150일 이하인 경우에는 축변환 후 회귀보다 추정치의 변동이 컸다.
- (b) 블라인드 테스트를 실시하여 추정치 타당성을 검증한 결과, 회귀 방법에 상관없이 지하수위 안정화 시점부터 해석을 실시하는 것이 그렇지 않는 경우에 비하여 더 정확한 결과를 나타냈다. 또한 블라인드 테스트에서 지하수위 안정화 여부에 상관없이, 직접 회귀를 적용한 결과가 축변환 후 회귀를 이용한 결과보다 좋은 결과를 나타냈다.

본 연구의 결과에 따르면 쌍곡선법을 이용하여 합리적이고 안정적인 결과를 얻기 위해서는, 성토에 따른 지하수위 변동을 측정하고, 그 값이 안정화 된 이후의 계

측 데이터로 해석을 수행하는 것이 좋으며, 데이터 기간이 충분한 경우에는 직접 회귀를 사용하는 것이 축변환 후 회귀하는 것보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있다고 판단되며, 데이터 기간이 100일 이하로 짧은 경우에는 축변환 후 회귀하는 것이 더 좋을 것이라 판단된다. 특히 지하수위의 안정화 시점 고려 여부는 예측 정확성 및 추정치의 안정성에 많은 차이를 나타내기 때문에 쌍곡선법을 이용할 때 지하수위 계측은 꼭 필요하다고 판단된다.

본 연구는 단일 시공 현장에서 얻은 결과를 이용한 것이므로, 추가적으로 타 현장 데이터를 이용하여 동일한 분석을 실시한다면, 해석 기법의 신뢰도와 객관성이 제고될 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. 김영수, 김대만 (2009), Levenberg-Marquardt 알고리즘의 지반공학 적용성 평가, *한국지반환경 공학회 논문집*, 제 10권, 제 5호, pp.49-57.
2. 정성교, 최관희, 최호광, 조기영 (1998), 압밀해석을 위한 \sqrt{S} 예측 기법, *한국지반공학회지*, Vol.14, No.2, pp.41-53.
3. Asaoka, A. (1978), Observational procedure of settlement prediction, *Soils and Foundations*, *JSSMFE*, Vol.18, No.4, pp.87-101.
4. Donald Marquardt (1963), An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, Vol.11, pp.431-441.
5. Hoshno (1962), Problems of foundation s in recent years, *Society of civil engineering*, Vol.47, No.7, pp.63-67 (Japanese).
6. Kenneth Levenberg (1944), A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares, *The Quarterly of Applied Mathematics*, Vol.2, pp.164-168.
7. Monden, H. (1963), A new time fitting method for the settlement analysis of foundation on soft clays, *Memoir Fac. Eng., Hiroshima University*, Vol.20, No.1, pp.21.
8. Tan T. S., Inoue. T., Lee. S. L. (1991), Hyperbolic method for consolidation analysis, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.11, pp.1723-1737.
9. Hagan (1996), *Neural Network Design*, University of Colorado, chap 12-19.
10. Press, William H., Flannery, Brian P., Teukolsky, Saul A., Vetterling, William T. (1999), *Numerical Recipes in C*, Cambridge University, pp.681-684.

(접수일자 2010. 4. 27, 심사완료일 2010. 7. 21)