

## 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

추윤식<sup>1)</sup>, Yoon-sik Choo, 김준현<sup>2)</sup>, June-hyoun Kim, 황세환<sup>3)</sup>, Sehwan Hwang, 정충기<sup>4)</sup>, Choong-Ki Chung

<sup>1)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>3)</sup> (주)현대산업개발 부장, General Manager, Hyundai Development Company

<sup>4)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

**SYNOPSIS** : The settlement prediction is very important to preloading method for a construction site on a 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 a 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 be differed 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, were applied with the various data group. 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. Without the information about the ground water level, the alternative method gives better results with the field data than the method using an axis transformation.

**Keywords** : hyperbolic method, settlement prediction, soft ground, regression method, Levenberg -Marquardt Method

### 1. 서론

연약지반에서는 일반적으로 선행 재하 공법을 이용하여 지반을 과압밀 상태로 만듦으로써 지반의 침하량을 제어한다. 시공 계획을 수립하고 현장 상황에 따라 이를 수정, 관리하기 위해서는 성토 하중에 따른 연약 지반의 침하 거동을 예측하는 것이 매우 중요하다. 하지만 연약지반 층의 압밀 침하 거동은 점성토층의 두께, 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 자료에 기반을 둔 침하량 추세 분석 방법으로 지반의 압밀 침하 거동을 예측한다. 침하량 추정 방법으로는 쌍곡선 방법, Hoshino 방법, Root S 방법, Log S 방법, Asaoka 방법, Monden 방법 등과 같이 다양한 기법이 제안되어 있으나, 국내 시공 현장에서는 많은 적용 사례와 방법의 간편성으로 인하여 쌍곡선 방법이 가장 널리 사용된다. 쌍곡선 방법은 시간에 따른 압밀 침하 거동이 쌍곡선의 형태로 발생한다고 가정하고, 기 계측된 침하 자료를 바탕으로 향후 압밀 침하 거동을 예측하는 방법이다.

현장에서는 일반적으로 시간에 따른 침하 계측 자료를 축변환하여 선형 회귀 하며, 이때 축변환 이후 선형성이 떨어지는 초반부의 일부 데이터를 제거하기도 한다. 따라서 동일한 계측 데이터를 쌍곡선법에 적용하더라도 데이터 제거량에 따라 추정된 압밀 침하 곡선이 상이할 수 있다. 반면 축변환 없이 계측 자료를 직접적으로 회귀하여 압밀 침하 곡선을 추정한 방법도 제시되었으나, 이 경우에도 데이터의 선택 방법, 기존 축변환 이후 회귀하는 방법과의 비교, 분석 등에 대한 연구는 부족한 상황이다.

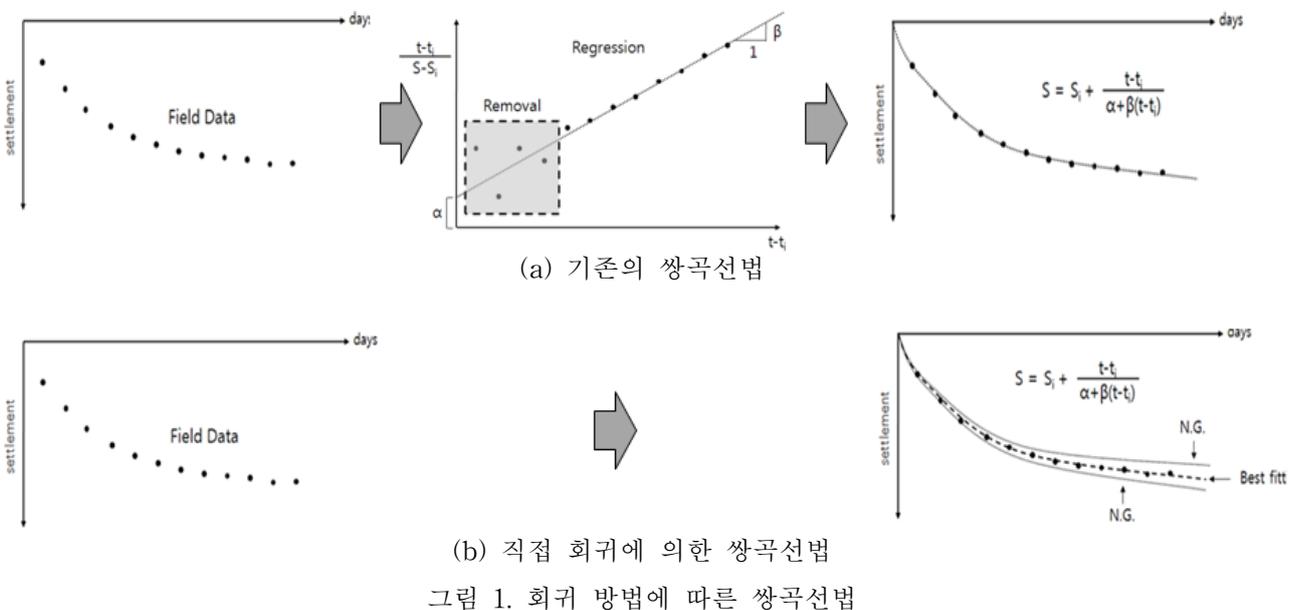
본 연구에서는 부산 OO 현장에서의 계측 자료로 쌍곡선법을 이용하여 침하 거동을 추정하였으며, 이때 두 가지 회귀 방법에 대하여 사용한 데이터의 범위를 다양하게 변화시켜 추정치 변화 양상을 평가하였다. 각 회귀방법에 따른 추정치의 정확성을 평가하기 위하여 성토 완료 후 150일의 계측 결과만을 이용하여 동일한 해석을 수행하였으며, 그 결과를 150일 이후의 계측 데이터와 비교하여 각 방법의 타당성을 검토하였다.

## 2. 쌍곡선법을 이용한 압밀침하 곡선 추정 방법

현장 계측 자료를 쌍곡선으로 회귀하기 위해서는 일반적으로 그림 1. (a)과 같이 축변환 된 데이터를 회귀하여 쌍곡선 계수를 찾아낸다. 현장에서 선행 재하 공법을 실시하면 성토 완료 시점 이후부터는 시간에 따른 침하 자료를 얻게 된다. 그림 1. (a)과 같이 축변환 된 계측 데이터에 대하여 선형 회귀를 실시하면  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 각각 구할 수 있으며, 이 값들을 쌍곡선 식에 대입하면 쌍곡선 형태의 압밀 침하 추정식이 나타나게 된다. 하지만 그림 1. (a)에서 볼 수 있듯이 데이터를 축변환하였을 때 초반 “ $S - S_i$ ”의 값이

작기 때문에  $\frac{t-t_i}{S-S_i}$  값의 변동 폭이 커지며, 이러한 불안정성을 배제하기 위하여 변환된 데이터 중 초반 부분을 임의적으로 제거하고 회귀를 실시하기도 한다. 이러한 경우 제거한 데이터에 따라 회귀 결과인  $\alpha$ 와  $\beta$ 값이 변하여 추정된 쌍곡선 식이 다르게 나타나며, 최종 침하량 등 침하 거동의 예측치도 달라진다.

쌍곡선법을 이용하지만, 그림 1.의 (b)와 같이 축변환 전 하중-침하 곡선을 직접적으로 회귀하는 방법도 제시되어 있다. 이 방법은 데이터를 축변환하지 않은 채, 계측 자료에서 바로 최적의  $\alpha$ 와  $\beta$ 값을 찾는 것이다. 이 회귀법을 적용하기 위하여 본 연구에서는 ‘Neural Network Design(Hagan(1996))’를 참조하여 Levenberg-Marquardt Method를 사용하였다. 비선형 회귀 기법 중에서 표준적인 방법으로 이용되는 이 방법은, 비선형 함수들에 대한 제곱의 합이 최소가 되는 값을 찾는 Newton 방법을 변형한 것으로써, 간단하지만 수렴이 빠르고 정확한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 이 방법을 적용하여 계측 데이터를 직접 회귀하면 축변환 이후 초반 데이터를 임의 제거할 필요가 없으므로, 결과적으로 해석의 임의성을 해소할 수 있다.



### 3. 해석 조건 및 방법

#### 3.1 계측 데이터 선정

본 연구에서는 부산 OO 현장의 대표적인 6개 지점에서 계측된 하중-침하 자료를 이용하여 해석을 수행하였다. 쌍곡선법에서는 그림 2와 같이 성토 완료 시점에서부터 해석을 수행하므로, 각 지점에서 성토 완료 후 성토체의 높이가 일정하게 유지되는 구간의 침하 데이터를 사용하였다. 또한 성토에 의한 일시적인 지하수위의 변동이 압밀 침하 거동에 영향을 미칠 수 있으므로, 성토 완료일 이후 지하수위가 안정된 시점을 파악하였다. 이를 표 1.에 정리하였다.

표 1. 각 지점별 해석 기간 및 지하수위 안정화 시점

지점 번호	해석 기간 (day)	지하수위 안정화 시점(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

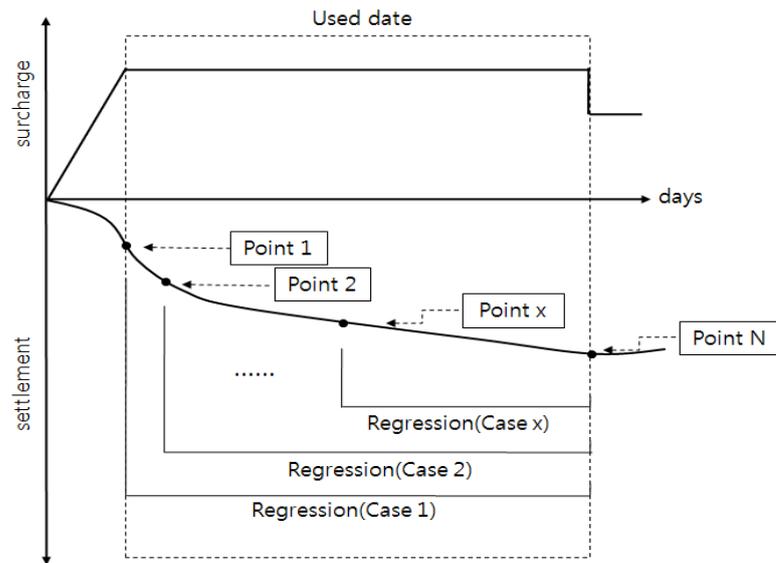


그림 2. 계측 데이터의 사용범위

#### 3.2 해석 및 분석 방법

본 연구에서는 침하 데이터를 앞서 설명한 두 가지 방법으로 회귀하였으며, 그 결과를 비교, 분석하였다. 첫 번째는 일반적으로 현장에서 많이 사용하는 방법으로서 축변환 이후 회귀(Regression(axis transformation))하는 것이고, 다른 하나는 계측 자료에서 직접 회귀(Regression(direct))하는 것이다. 또한 각 지점의 데이터 선택에 따른 추정치 변화를 파악하기 위하여, 해석 구간 앞에서부터 데이터를 하나씩 제거하면서 반복적으로 회귀하였다. 그림 2.와 표 2.에서와 같이 직접 회귀할 때에는 사용된 데이터 중

가장 앞의 것을 초기값으로 지정하여 해석을 실시하였다. 축변환 이후 회귀를 실시할 때에도 축변환 된 데이터를 하나씩 제거하여 회귀를 실시하였으나, 성토 완료 시점을 초기값으로 고정하였다. 추가적으로 축변환을 사용하는 회귀 방법에서도 제거된 데이터 이후의 값을 초기값으로 지정하여 해석하기도 하였으나, 다른 방법들에 비하여 결과가 좋지 않았기 때문에 본 논문에는 포함하지 않았다.

표 2. 회귀방법에 따른 초기점 및 사용된 회귀 기간

		Regression(direct)	Regression (axis transformation)
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

각 회귀 방법 및 데이터 사용에 대한 추정치의 안정성을 파악하기 위하여 해석 기간 내 모든 데이터를 하나씩 제거하면서 해석을 실시하였다. 또한 추정치의 타당성을 검토하기 위하여, 계측 데이터를 성토 이후 150일만 사용하고, 150일 이후 계측 데이터로는 추정치와의 RMSE를 구하여 그 오차를 평가하였다. 성토 완료 시점 이후 성토로 인한 지하수위 상승에 따라 성토체의 유효응력이 감소할 수 있기 때문에, 시공 일정상의 성토 완료 시점보다는 성토에 의한 지하수위가 안정화된 때를 성토 완료 시점으로 간주하는 것이 합리적일 수 있다. 따라서 계측 지점 인근에서 계측된 지하수위가 안정된 시점 이후의 데이터만을 이용하여 같은 방법으로 해석을 수행하였다. 그림 2와 표 2.에서 알 수 있듯이 축변환 후 회귀를 실시하는 경우에는, 전체를 사용한 경우와 지하수 안정화 이후의 데이터를 사용하는 방법에 따라 초기점이 달라지기 때문에 해석을 별도로 수행해야 한다. 그러나 직접 회귀를 하는 경우에는 데이터의 구간을 결정함에 따라 초기값이 변하기 때문에 추가 해석을 할 필요가 없다. 표 3.에 이상의 해석 조건을 정리하였다.

표 3. 해석 방법 및 조건

회귀 방법	명 칭	회귀하기 위하여 사용된 데이터 구간	데이터 사용량
직접 회귀	Regression (direct)	성토 완료시 이후	성토 완료 후 성토 후 150일
	(해석 X)	성토 완료 후 지하수위 불안정 구간 제거	성토 완료 후 성토 후 150일
축변환 후 회귀	Regression (axis transformation)-1	성토 완료시 이후	성토 완료 후 성토 후 150일
	Regression (axis transformation)-2	성토 완료 후 지하수위 불안정 구간 제거	성토 완료 후 성토 후 150일

## 4. 결 과

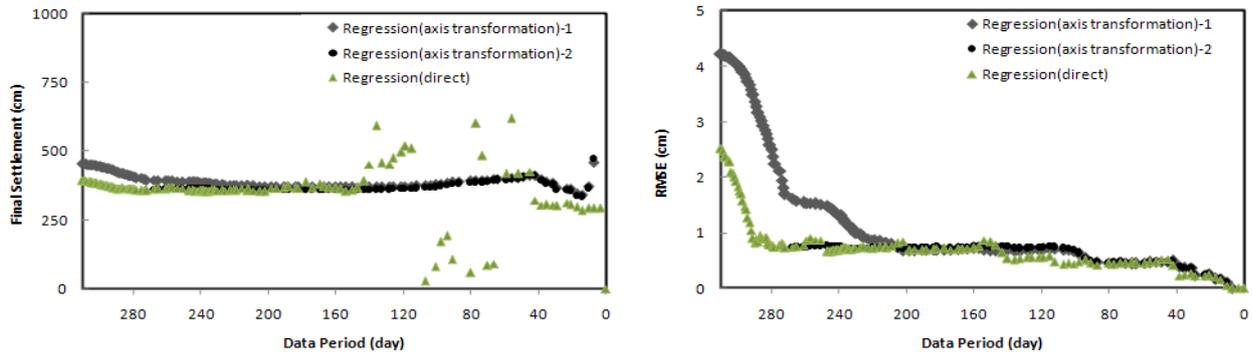
### 4.1 계측 데이터에 따른 침하예측 결과의 변화

그림 3.은 각 지점에서 계측된 데이터를 쌍곡선법으로 회귀한 결과이다. 각 지점마다 앞에서 제시한 세

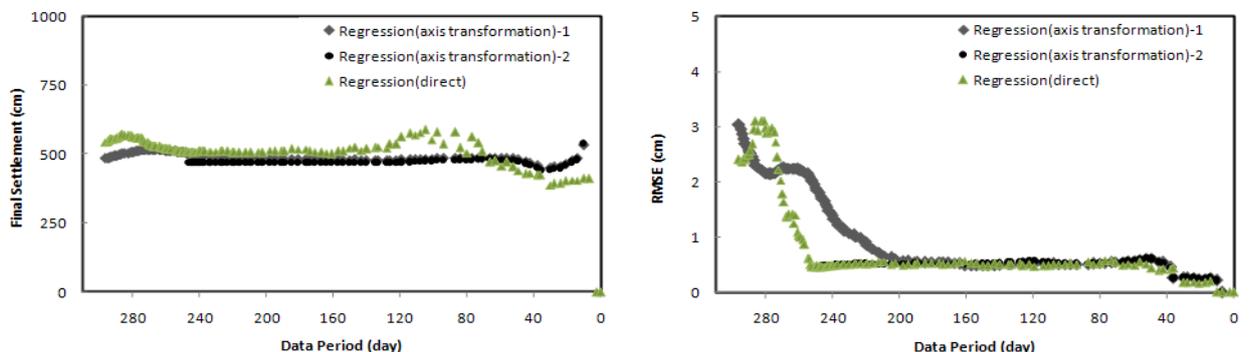
가지 방법을 적용하였다. 각 방법들에 대하여 최종 침하량(Final Settlement)을 나타냈으며, 추정치와 계측데이터의 RMSE(Root Mean Square Error)도 표시하였다. 회귀 방법에 따라 직접 회귀한 것은 'Regression(direct)', 축변환 이후 회귀를 한 것은 'Regression(axis transformation)-1', 그리고 지하수위가 불안정한 구간을 제거한 후 축변환을 이용하여 회귀한 것은 'Regression(axis transformation)-2'으로 명명하였다. x축은 회귀에 사용한 데이터 기간(Date Period)이다. 즉, 그래프의 왼쪽 부분이 가장 긴 기간의 데이터로 회귀를 실시한 것이며, 오른쪽으로 갈수록 데이터를 앞에서부터 제거하였기 때문에 회귀에 사용한 기간이 점점 짧아진다. 예컨대 ss-02의 경우에는 초기에 320일 정도 기간의 데이터를 사용하였으며(왼쪽부분), 점점 오른쪽으로 갈수록 사용된 회귀 기간이 짧아져 해석 기간이 0에 도달한다.

최종 침하량에 관한 그래프에서 가장 긴 기간의 데이터를 사용한 해석(그래프의 왼쪽)은 사용된 기간의 길이가 줄어들수록(그래프의 오른쪽으로 이동할수록) 최종 침하량의 추정치가 불안정하게 나타나기도 하지만, 모든 방법에서 지하수위가 안정화된 시점부터는 대부분 일정한 결과를 보인다. 그러나 Regression(direct)에 의한 최종 침하량은 대부분의 지점에서 기간이 짧은 부분(그래프의 오른쪽)은 변동폭이 크며, Regression(axis transformation)-1, Regression(axis transformation)-2에서는 변동성이 작다.

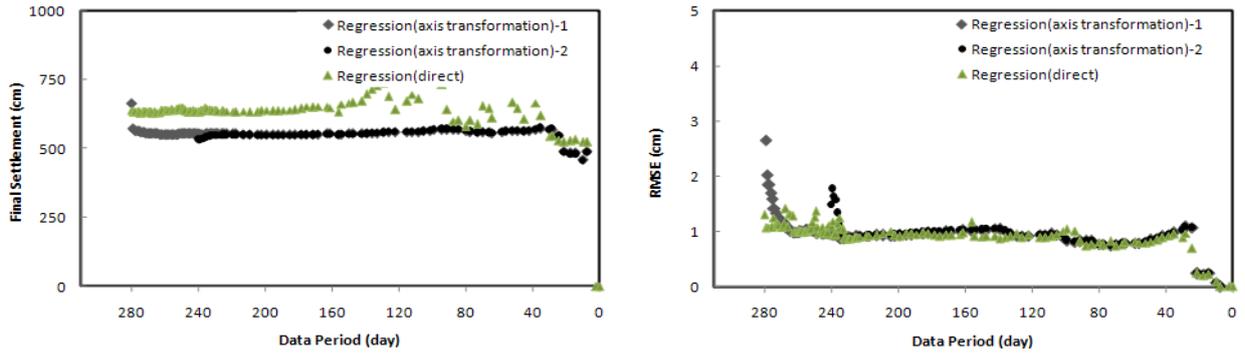
계측 데이터와 추정치의 RMSE를 비교해보면, Regression(axis transformation)-2가 가장 높은 안정성을 보여준다. 이 방법에 의한 RMSE는 대부분 초반부터 안정적인 값을 나타내며, 그렇지 않은 경우(ss-11, ss-24)에도 10일 제거 시점을 전후로 수렴한다. 그러나 Regression(axis transformation)-1과 Regression(direct)의 경우에는 초반에 큰 RMSE를 보인다. Regression(direct)는 지하수위가 안정화된 시점인 40~60일이 지난 후에는 대부분의 지점에서 1cm 이하의 안정적인 RMSE 값으로 수렴하지만, Regression(axis transformation)-1의 경우에는 지하수위 안정화 시점보다 더 이후에 RMSE가 1cm 이하로 나오므로, Regression(direct)이 상대적으로 더 좋은 안정성을 보여준다. 세 가지 방법 모두에서 데이터의 기간이 짧은 경우(그래프의 오른쪽)에는 그 오차가 줄어들기 때문에 '0'으로 수렴한다.



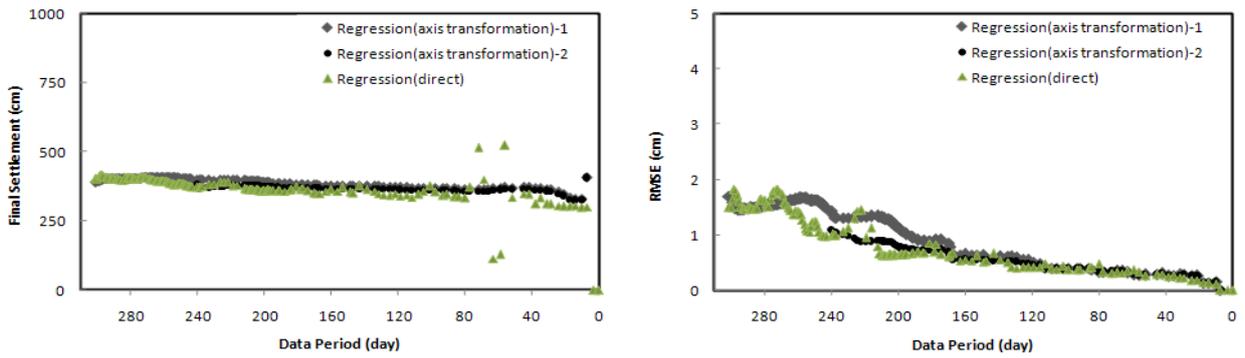
(a) ss-02



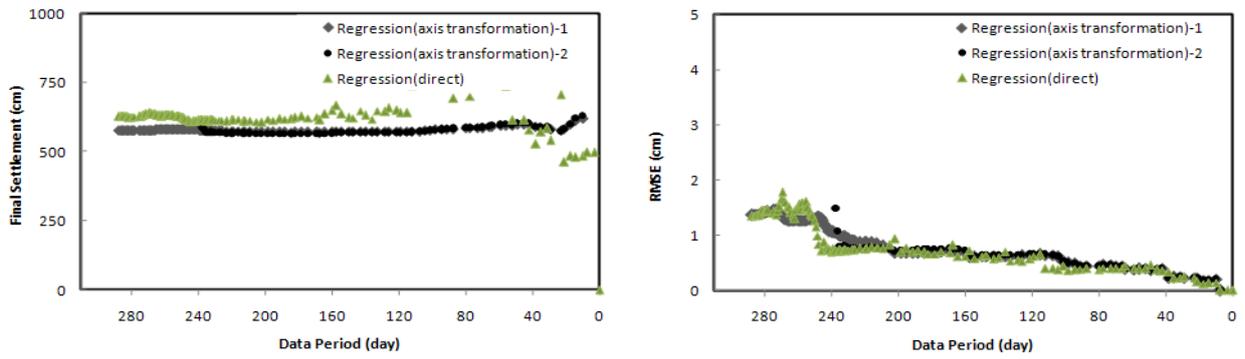
(b) ss-06



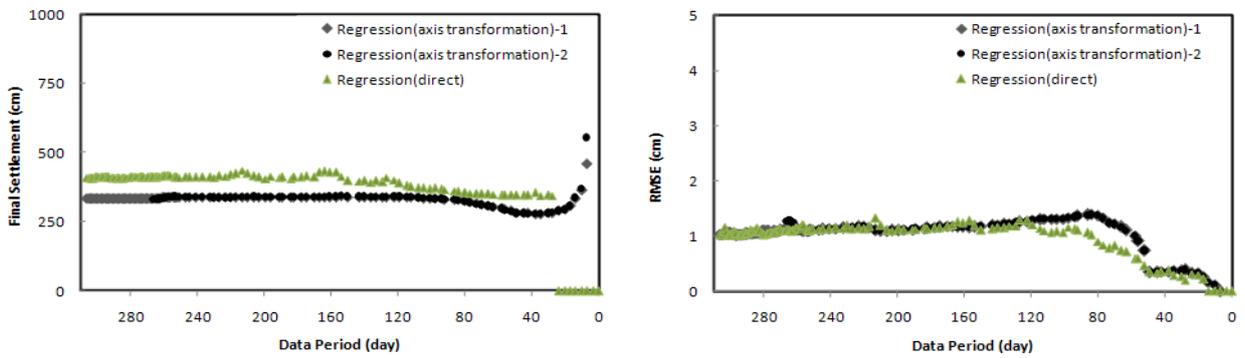
(c) ss-11



(d) ss-17



(e) ss-24

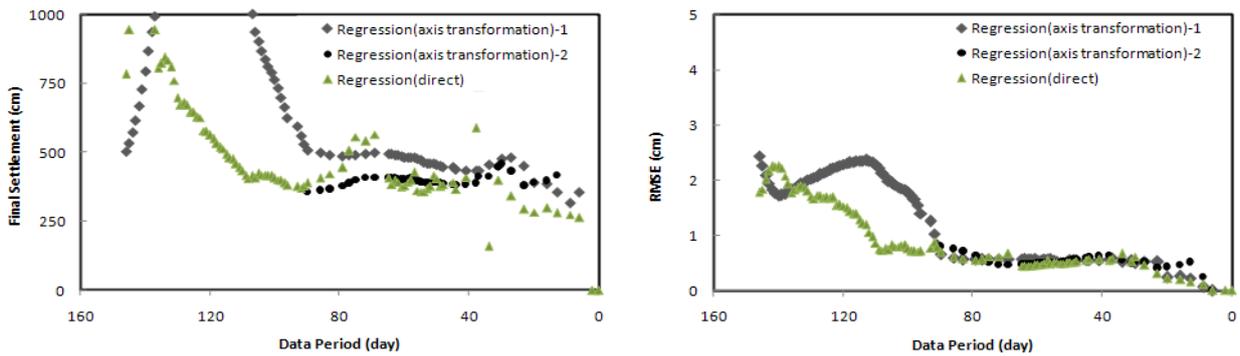


(f) ss-31

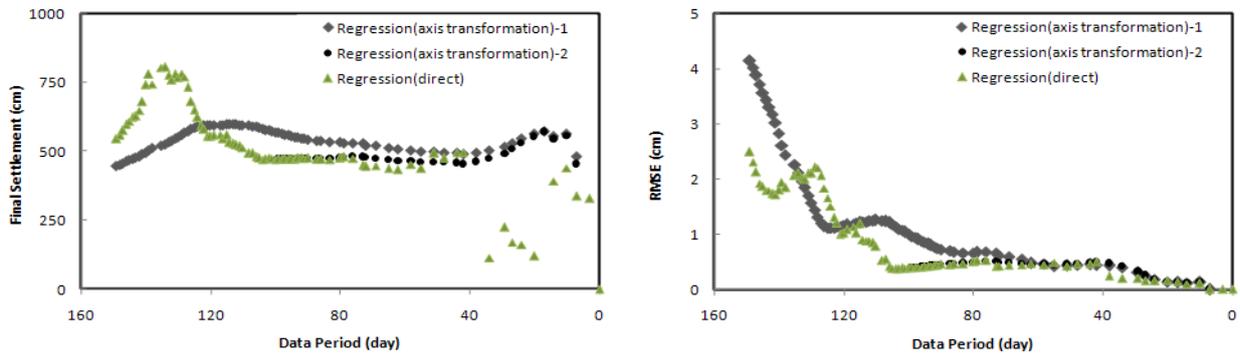
그림 3. 회귀 방법에 따른 최종 침하량 및 RMSE (전체 데이터 사용시)

## 4.2 계측 데이터를 이용한 추정 압밀침하 거동의 확인

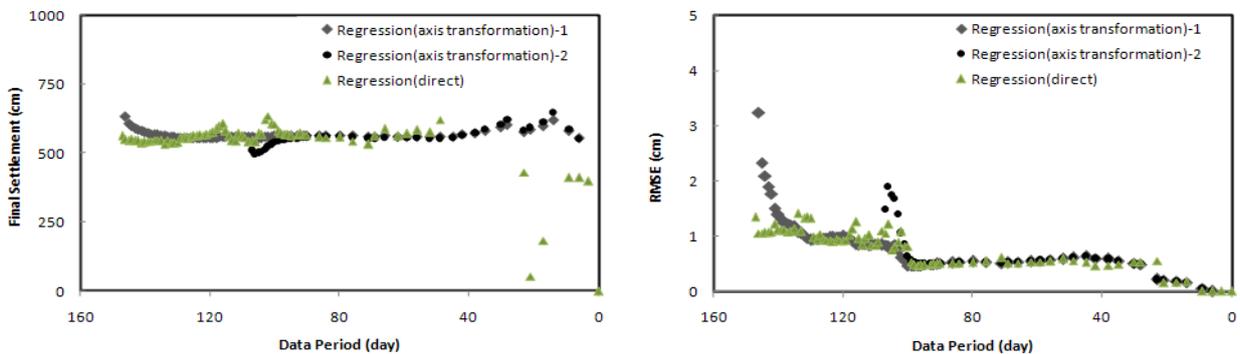
성토완료 후 150일간의 데이터를 이용하여 4.1 절에서와 동일한 방법으로 해석을 수행하였으며, 이 결과를 그림 4.에 나타냈다. 해석 결과는 4.1절과 비슷하게 수렴하는 경향을 나타냈으나, 앞 절에 비하여 짧은 기간의 데이터를 이용하여 해석했기 때문에 결과의 차이가 존재한다. 최종 침하량의 경우 전체적인 수렴성이 낮아진다. 특히 직접 회귀하는 경우에는 회귀에 사용된 기간이 짧은 부분(그래프 오른쪽)의 값이 불안정한 현상이 앞의 결과와 유사하게 나타나며, 안정적인 결과가 나타나는 구간도 앞 절에 비하여 짧다. RMSE는 수렴하는 경향이 전체적으로 비슷하고, 지하수위가 안정화되는 시점에서 RMSE가 작다는 공통점도 보였으나, Regression (axis transformation)-2에서도 바로 수렴하지 않는 지점이 이전보다 증가하는 등, 전체적인 수렴성은 떨어진다.



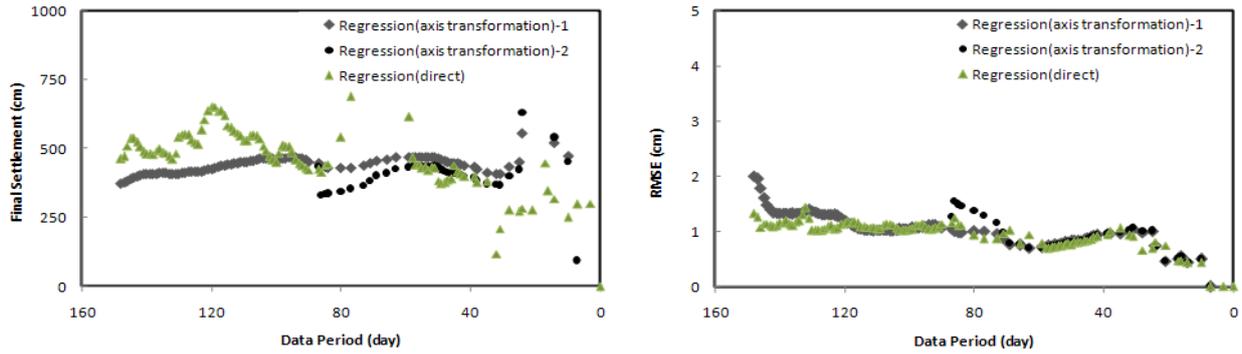
(a) ss-02



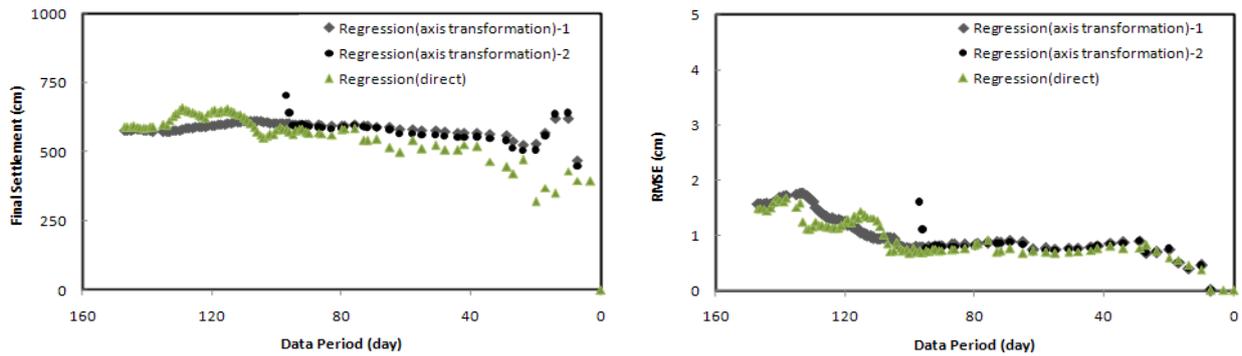
(b) ss-06



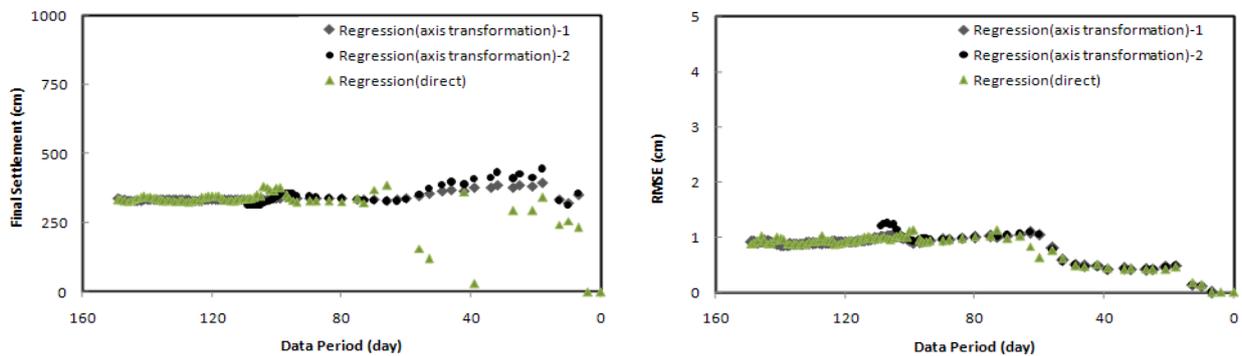
(c) ss-11



(d) ss-17



(e) ss-24



(f) ss-31

그림 4. 각 회귀 방법에 따른 최종 침하량 및 RMSE (성토완료 이후 150일 데이터 사용 시)

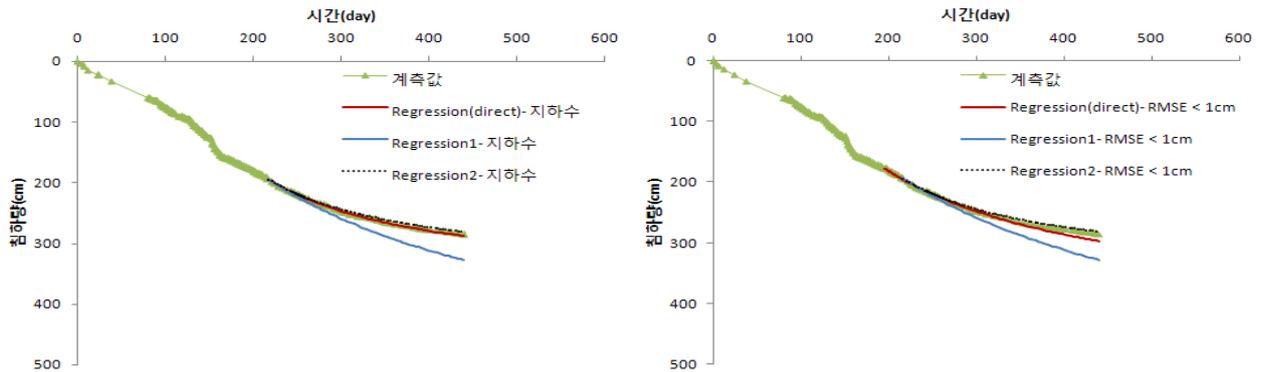
성토완료 후 150일간의 데이터를 사용한 해석에서의 추정치와 150일 이후 계측치의 유사성을 RMSE 기준으로 확인하였다. 앞의 분석을 통하여 지하수위가 안정화되는 시점에서는 결과들이 대부분 안정적으로 나타났으므로, 지하수위가 안정화된 시점의 해석 결과를 이용한 추정치와 계측치를 비교하였다. 또한 추가적으로 현장에서 지하수위에 대한 정보가 없거나 부족한 경우를 대비하여, 지하수위 정보와는 무관하게 회귀 구간에 따른 RMSE가 최초로 1cm 이하가 되는 시점에서의 해석 결과도 비교하였다. 각각의 결과는 그림 5.와 표 4.에 나타나 있다.

지하수위가 안정된 시점에서는 상대적으로 Regression(direct)의 결과가 계측 데이터와 가장 유사한 것을 확인할 수 있다. Regression(axis transformation)-2의 경우도 대부분 RMSE가 낮지만, ss-24, ss-31의 경우에는 RMSE가 높게 나타났다. 이는 축변환 된 데이터의 초기 부분이 불안정하기 때문인 것으로 보인다. 이 두 방법은 데이터가 제거된 이후 값으로 초기점을 지정하기 때문에 지하수위 변동에 의한 영향이 배제되어 상대적으로 좋은 결과를 보인 것으로 판단된다. 그러나 Regression(axis transformation)-1은 회

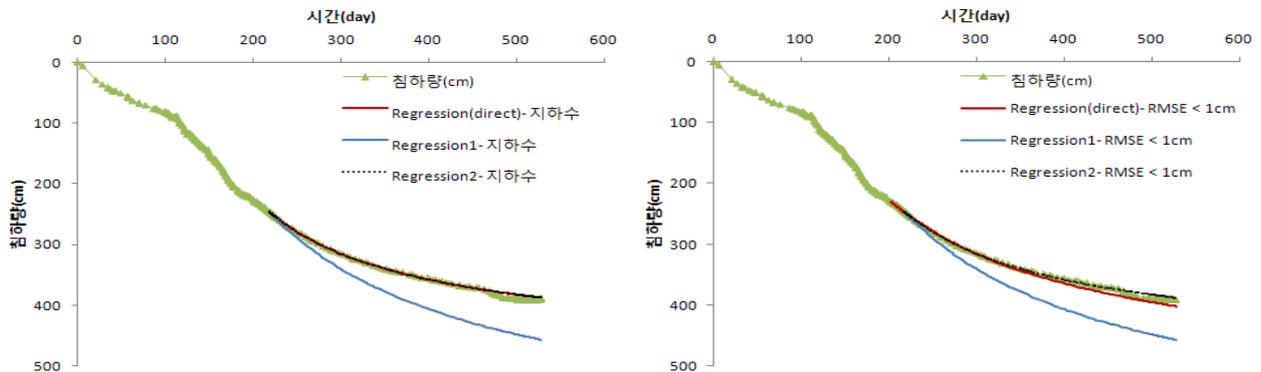
귀에 사용된 데이터를 제거하였더라도, 초기 시작점은 성토완료 시점으로 고정되어 있기 때문에 오차가 상대적으로 크게 발생한 것으로 생각된다. 회귀 구간의 RMSE가 최초로 1cm 이하가 되는 시점을 이용한 경우에 대해서도 이후 데이터와의 적합성을 확인하였다. Regression(axis transformation)-2의 경우에는 지하수위 안정화 시점 이후로만 회귀를 실시하여 지하수에 따른 영향이 없으며, 축변환에 따른 초기 오차도 배제되어 대부분의 지점에서 가장 좋은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. Regression(direct)의 경우에는 지하수위 안정 시점과 유사한 시점이나 더 앞선 시점에서 RMSE가 1cm 이하로 나타나며, ss-17, ss-31을 제외한 모든 지점에서 Regression(axis transformation)-1보다 낮은 RMSE가 나타난다.

표 4. 회귀 방법에 따른 예측값과 계측값의 RMSE

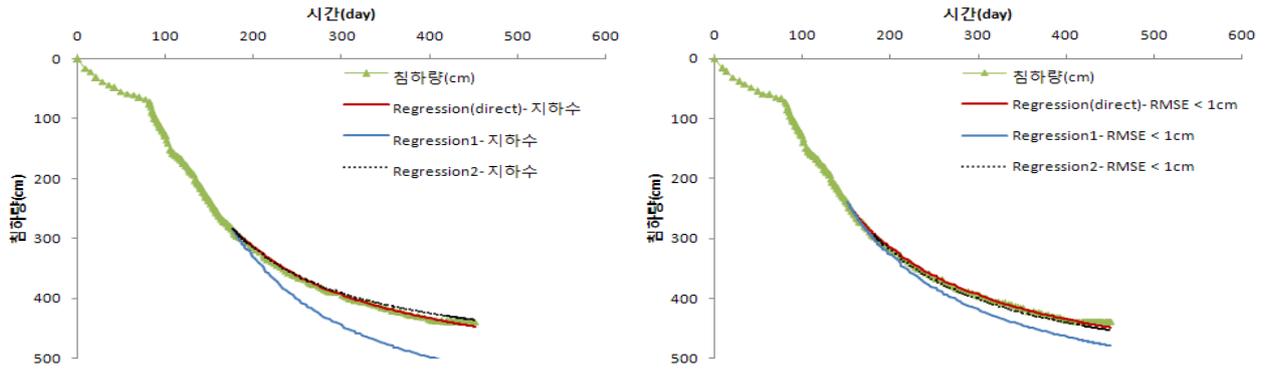
지점	RMSE (cm)					
	Regression(direct)		Regression (axis transformation)-1		Regression (axis transformation)-2	
	지하수위가 안정된 시점	RMSE<1 cm	지하수위가 안정된 시점	RMSE<1 cm	지하수위가 안정된 시점	RMSE<1 cm
ss-02	1.7924	7.3622	11.0799	12.5164	0.8584	←
ss-06	0.8156	7.3191	10.6665	←	0.9251	←
ss-11	1.1645	1.4212	1.6822	1.6440	6.5505	2.7001
ss-17	1.6697	9.7019	6.6387	5.2415	7.3004	1.1158
ss-24	2.7336	3.5115	5.3183	5.8479	16.4789	4.5976
ss-31	1.2273	1.4379	1.6071	1.2548	4.8313	1.2338



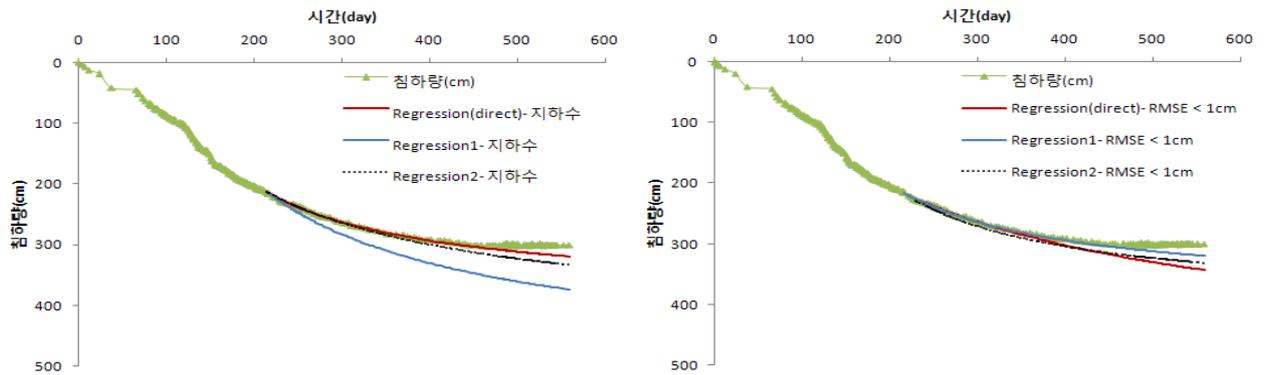
(a) ss-02



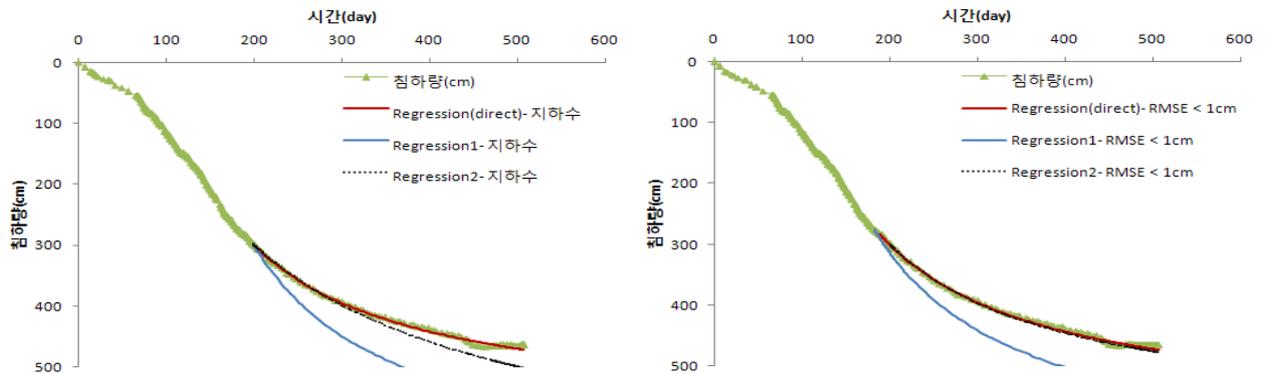
(b) ss-06



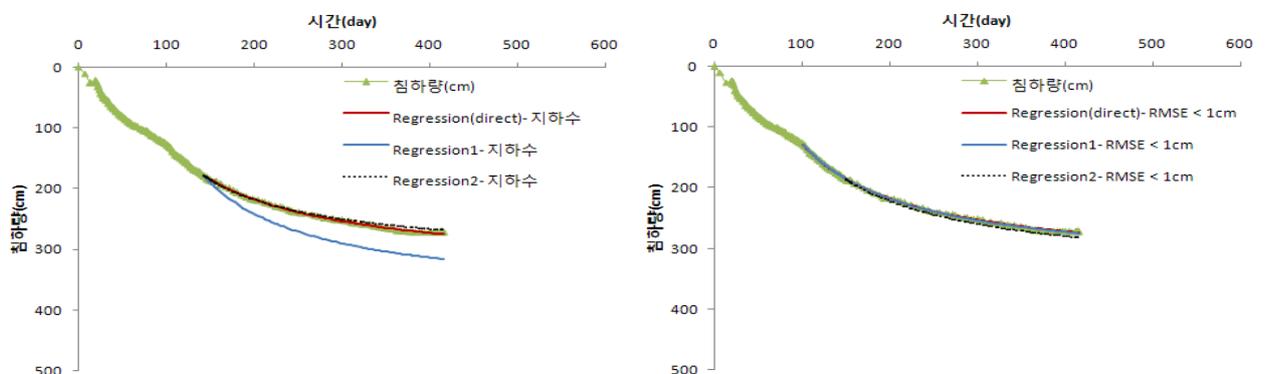
(c) ss-11



(d) ss-17



(e) ss-24



(f) ss-31

그림 5. 지하수위 안정화 시점과 RMSE < 1cm 시점에서의 추정 압밀 침하 곡선

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 국내 연약지반 침하 예측 방법으로 널리 사용되는 쌍곡선법을 적용하되, 회귀 방법 및 회귀 기간을 다양하게 바꾸어 그 결과를 비교하였다. 회귀 방법으로는 축변환 이후 회귀하는 기법과 침하 곡선에서 직접 회귀하는 기법을 사용하였으며, 해석 구간의 데이터를 앞에서부터 하나씩 제거하여 다양한 회귀 기간을 적용하였다. 각 조건에 대한 결과는 최종 침하량 및 계측 데이터와의 RMSE를 기준으로 비교하였다. 성토 완료 이후 전체 데이터를 사용하여 조건에 따른 추세 변화를 확인하였으며, 또한 성토 완료 이후 150일의 결과를 사용한 추정치와 그 이후의 계측 결과를 비교하여 각 조건에 따른 추정치의 타당성을 검증하였다. 해석 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (a) 성토 완료 이후의 모든 데이터를 이용한 경우에는, 회귀 기법에 상관없이 최종 침하량이 불안정하게 평가 되었으며 RMSE값도 높게 나타났다.
- (b) 지하수위가 불안정한 구간을 제거한 이후 데이터를 사용할 때에는, 일반적인 회귀 방법을 사용하되 RMSE가 1cm 보다 작아지는 시점에서 추정하는 것이 가장 좋은 결과를 보였다.
- (c) 지하수위에 대한 정보를 사용하지 않는 경우에는 RMSE가 1cm 보다 낮아질 때를 해석 시점으로 정하고, 직접 회귀하는 것이 대부분 더 좋은 결과를 나타냈다.

본 연구의 결과에 따르면 실제 현장에서도 성토에 따른 지하수위 변동을 측정하고, 그 값이 안정화 된 이후의 계측 데이터로 해석할 때 더 정확한 결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 이 때 (b)와 같은 방법으로 해석을 수행하는 것이 가장 합당하며, 지하수위 측정이 여의치 않을 시에는 (c) 방법을 이용할 때 비교적 좋은 결과를 얻을 것이라 판단된다. 하지만 본 연구는 단일 시공 현장에서 얻은 결과를 이용한 것이므로, 추가적으로 타 현장 데이터를 이용하여 동일한 분석을 실시한다면, 해석 기법의 신뢰도와 객관성이 제고 될 것이라 사료된다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. 김영수, 김대만, (2009), "Levenberg-Marquardt 알고리즘의 지반공학 적용성 평가", **한국지반환경공학회 논문집**, 제 10권, 제 5호, pp 49~57
2. Hagan, (1996), *Neural Network Design*, University of Colorado, chap 12-19
3. Miyakawa, (1961), "Soft round, embankment, soil and foundation of design method", *The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.3, pp.178~181
4. Press, William H., Flannery, Brian P., Teukolsky, Saul A., Vetterling, William T., (1999), *Numerical Recipes in C*, Cambridge University, pp 681~684