

비개착 강관압입공법의 지표침하 예측방법 연구

A Study on Surface Settlement Prediction Method of Trenchless Technology Pipe Jacking Method

정 지 승¹⁾ · 이 규 영[†]

Jeeseung Chung · Gyuyoung Lee

Received: September 9th, 2015; Revised: September 23rd, 2015; Accepted: October 20th, 2015

ABSTRACT : Non-excavation method is needed to secure the stability of existing structures during construction. Therefore, prediction of ground settlement is essential. Causes of settlement when using steel pipe indentation method are leading pipe-steel pipe gap, excessive excavation and soil-steel pipe friction etc. Also they are similar to the causes of settlement when using Shield TBM during construction. In this study, ground settlement during steel pipe indentation is predicted by the Gap Parameter Method and Volume Loss Method which are kinds of Shield TBM prediction Method, and compared with those of prediction methods by conducting field test. As a result, Volume Loss Prediction Method is the most similar to the field tests. However, It is needed to additional studies, such as decision of the factors and adaptability for total settlement predictions of non-excavation method.

Keywords : Non-excavation steel pipe indentation method, Ground settlement, Settlement estimation, Gap parameter, Volume loss

요 지 : 최근 급격한 도시화로 인한 신도시, 택지개발지구 등의 증가로 기존 구조물 하부를 통과하는 비개착 강관압입공법의 적용이 증가하는 추세이다. 비개착공법은 시공 중 기존구조물의 정상적인 운영 안정성이 확보되어야 하므로 강관압입에 의한 지표침하의 정밀한 예측이 필수적으로 필요한 공법이다. 강관압입 시 침하를 발생시키는 원인은 강관 선단과 강관과의 직경차에 의한 공극, 원활한 강관압입을 위한 과굴착, 강관과 지반과의 마찰에 의한 공극 발생 등이 있으며, 이는 Shield TBM 시공 시 발생하는 침하 원인과 유사하다. 본 연구에서는 Shield TBM의 침하 예측방법인 Gap Parameter Method와 Volume Loss Method를 이용하여 강관압입 시 침하를 예측하였으며, 현장시험을 통하여 예측방법에 대한 비교·분석을 수행하였다. 그 결과 Volume Loss 예측방법이 현장시험과 가장 유사한 결과로 나타났으나, 추후 예측방법의 Factor 결정 및 비개착공법 전체 침하예측을 위한 적용성 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : 비개착 강관압입공법, 지표침하, 침하 예측, 갭 파라미터, 지반손실

1. 서 론

최근 급격한 도시화로 인한 신도시, 택지개발 등의 증가로 기존 시설물(고속도로, 철도, 지하철 등)을 필연적으로 교차해야 하는 구조물 계획이 증가하고 있다. 이러한 구조물 계획은 불가피하게 기존 도로나 철도 등을 통과할 경우 종래의 개착식 공법 적용 시 기존 구조물의 불안정을 가져올 수 있으며, 원지반에 대한 손상 및 되메우기 공사 시 구조물 손상, 교통흐름 장애로 인한 민원 등의 다양한 문제가 발생된다.

국외에서는 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 도로, 철도, 하천 등을 개착하지 않고 작업구 굴착 후 파이프 형상의 관을 지중에 압입하여 추진해 나가는 비개착공법을 오래

전부터 사용해왔으며, 최근 국내에서도 사용이 증가되고 있는 추세이다.

그러나 국내 연구사례는 기존 시설물의 안정성 및 교통 시설의 운영 안정성 확보와 시공공정 개선을 위한 다양한 구조형식 개발에 초점이 맞춰져 있는 실정이며, 강관압입 시 지반변형에 의한 지표침하에 관한 연구는 미진한 상태이다. 비개착공법은 시공 중 기존구조물의 정상적인 운영 안정성이 확보되어야 하므로 구조적 안정성 검토뿐만 아니라 강관압입에 의한 지표침하의 정밀한 예측이 필수적으로 필요한 공법이다.

특히 비개착 강관압입공법의 지반거동은 강관압입 시 강관 주변 지반의 이완으로 발생하며, 상부 지표침하로 이어져 기존 시설물의 손상을 발생시키게 된다.

1) Department of Construction Engineering, Dongyang University

† Department of Construction Engineering, Dongyang University (Corresponding Author : bueng@sambu.co.kr)

따라서 본 연구에서는 비개착공법에 의한 지반거동 특성과 다양한 침하예측방법을 연구하고, 강관압입 시 침하량을 예측하여 이를 현장 시험과 비교·분석함으로써 침하예측방법에 대한 적정성을 평가하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 비개착 강관압입공법 개요

비개착공법은 압입장비 혹은 견인장비를 이용하여 강관을 압입한 후 강관 내부를 굴착하여 상부 구조물을 지지하는 공법이다. 또한 시공 시 현장상황에 따라 강관 내·외부를 그라우팅하거나, 필요 시 철근 또는 모르타르 등으로 보강하여 대상 하부의 지하구조물을 시공하는 공법을 포괄적으로 정의한다. 비개착공법은 과밀화된 교통난 및 지하 매설물의 장애로 인하여 개착공사 적용이 곤란한 지역이나 굴진면 자립이 곤란한 불량한 지반에 적용된다. 비개착공법은 시공방법에 따라 구조물 견인방식, 강관추진 방식 및 Plate 추진 방식 등으로 구분되며 이 외에도 새로운 공법이 지속적으로 개발되고 있다.

2.1 비개착공법 개요

비개착공법은 크게 합체견인공법, 강관압입공법, 엘리먼트(Element) 견인·추진공법, 패널(Panel) 추진공법 등으로 구분되며 대표적으로 프론트 잭킹(Front-Jacking), 파이프 루프(Pipe-Roof), R&C(Roof & Culvert) 등을 예로 들 수 있다(한국철도시설공단, 2010). 합체견인공법은 강관압입 후 구조물 전체를 외부에서 제작한 후 견인하는 방식이다. 강관압입공법은 강관의 크기에 따라 소구경(직경 600mm~800mm), 중구경(직경 800mm~1,000mm) 및 대구경(직경 1,000mm 이상) 압입공법으로 분류할 수 있다.

이러한 비개착공법들은 시공구간의 방호공으로서 설치되는 원형 또는 사각형 강관의 압입작업, 방호공 하부의 굴착 작업, 본 구조물 설치작업 등으로 시공과정을 나눌 수 있다. 특히 다양한 비개착공법들에서는 일반적으로 횡단구간에 대해 강성이 큰 원형 강관이나 사각형 강관을 압입시켜 루프(Roof)를 형성하여 강관 상부의 구조물 자중과 교통하중을 지지하는 개념을 이용한다. 이와 같이 원형 또는 사각형의 강관 루프가 상부 하중을 지지하기 때문에 토피고가 낮은 조건에서도 비개착공법에 의한 시공이 가능한 것이다.

2.2 강관압입공법 종류 및 특징

2.2.1 강관압입 방식

강관압입공법은 특별한 장치를 하지 않고 강관 선단의

굴착날을 선도체로 사용하여 발진 수직갱 내의 강관 후부에 설치한 잭의 추진력에 의해 관을 압입하여 굴착날부의 토사를 굴착·배토하면서 관을 매설하는 공법이다. 또 장거리를 추진하는 경우는 압입관의 도중에 중압 설비를 몇 개 설치하여 관의 추진에 따라 전후의 잭을 순차적으로 작동시켜 추진한다.

2.2.2 특수 추진방식

특수 추진방식에는 세미 실드 공법 혹은 견인 추진공법 등이 있다. 세미 실드 공법은 강관의 선단에 실드 잭 등을 장비하여 조향성을 유지하면서 발진 수직갱 내의 관 외부의 후부에 설치한 잭의 추력에 의해 관을 매설하는 공법이다. 이 공법은 각종 기능을 가진 실드를 사용하기 때문에 조향성이 풍부하고, 추진저항을 감소할 수 있으므로 적용 토질의 범위가 넓고 또 장거리에도 적합하다.

견인 추진공법은 추진 수직구와 도달 수직구 사이에 수평 보링으로 견인 구멍을 만들고 이 구멍에 견인 와이어를 넣어서 수직구 내에 장비한 견인 장치로 관체를 끌어당기는 공법이다. 견인 추진공법도 보통 끌어당기는 방법, 양 수직갱에 관체를 밀어 넣고 끌어당겨 중간에서 접합시키는 방법 등이 있다. 구조물의 형태는 원형관 뿐만 아니라 직사각형도 많고, 특히 성토나 배토 등 얇은 곳에 사용되고 있다.

2.2.3 소구경 추진공법

소구경 추진법은 선도관 굴착날과 유도관 또는 소구경 추진관을 접속하여 발진 수직갱에서의 제어장치에 의해 압밀 또는 굴착 등을 행하면서 추진하여 관을 매설하여 나가는 공법이다.

2.3 비개착공법 연구 동향

국내·외 비개착공법에 관한 연구동향은 공법 적용 구간 내 위치한 인접구조물의 안정성 확보, 교통시설의 운행 안전성 확보, 시공과정 단순화 및 공기단축을 위한 다양한 구조형식 개발에 초점을 맞춰 연구가 진행 중이다.

Lee et al.(2004)은 Umbrella Arch 공법이 적용된 철도터널의 강관보강 효과에 관한 수치해석적 연구를 수행하였다. Jung et al.(2009)은 기존 시설의 운행에 대한 제약을 최소화하는 공법으로 강재 엘리먼트를 이용한 기계식 Under Pass 공법(JES 공법)의 국내 적용 사례 및 활용 방안에 대해 소개하였다. 또한 기존 비개착공법 적용 시 구조물의 강성확보를 위해 강관 내 철근 설치 작업이 이루어지는데 작업공간 협소 및 배근으로 인한 자재비용 과다 등을 해소하고자 Cui et al.(2011)은 PST(Prestressed Segment Tunnel)를 개발

하였다. Kim et al.(2012)은 굴착 시 발생하는 이완토압에 대응하는 압력을 지반에 작용시켜 지반변형을 회복시킬 수 있는 공법을 제시하였다. 한편, 일본에서는 작업공중을 최소화하고 강관을 재활용하여 공사기간 및 공사비용을 줄일 수 있는 비개착공법인 SFT(Simple and Face-less method of construction of Tunnel)공법 등이 활발히 개발되고 있는 상황이다.

연구동향 분석결과, 지반침하를 최소화하고 시공성을 개선한 다양한 공법 개발 및 연구가 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나 강관압입공법 적용에 따른 지반침하를 정밀하게 예측하기 위한 연구는 미흡한 실정이다.

2.4 강관압입공법 문제점

최근 비개착 강관압입공법 적용에 따른 문제점으로 강관 압입 중 지반침하가 발생하여 기존 시설물의 손상을 발생시키는 사례가 다수 보고되고 있다. 일반적으로 설계 시 비개착 강관압입공법은 시공단계를 고려한 수치해석적 방법으로 지반침하 및 시설물 손상 정도를 예측하나, 시공단계 모사 시 강관압입 후 내부굴착 및 채움으로 강관 자체의 강성으로 내공방향 지반변위가 미소하게 발생하는 것으로 검토된다. 강관압입 시 미소한 지반변위로 비개착 강관압입공법의 전체 구조물 변형에 의한 지반변위가 지표침하의 지배적인 경향으로 나타나며, 이는 강관관입과 굴착공정에서 80% 이상의 침하가 발생하는 것으로 나타난 기존 연구(Um et al., 2001)와 상이한 결과이다.

또한 강관압입 시 예측침하의 불확실성은 시공 시 침하 관리를 위한 지반보강 그라우팅을 실시하게 되며, 이는 적절한 그라우팅 압력관리 미숙 또는 과도한 주입 등으로 지반이 용기되는 사례도 보고되어 있다.

3. 비개착 강관압입공법의 거동 특성

3.1 굴착에 의한 지반침하 거동

일반적으로 상부 지장물이나 지표에 근접하여 계획되는 강관압입공법은 시공 시 주변 지반 변형에 의한 지표침하가 저토피 굴착에 의한 변형특성과 유사하게 나타난다. 지표침하의 일반적인 3차원 형태는 Fig. 1과 같이 나타나며, 정규분포 확률밀도함수 곡선과 유사한 형태로 표현될 수 있다(Peck, 1969; Attewell et al., 1986).

강관압입에 의한 지표면의 침하는 강관 주변의 지반 및 강관 자체의 변형상태에 의하여 나타나는데, 현장계측 및 관찰 결과에 의하면 강관압입방향을 기준으로 거리별로 종방향 및 횡방향 지표침하가 복합적으로 나타나는 걸로 알려져 있다. 실무에서는 이와 같이 관측된 3차원 침하형상을 터널 중심에 따라 횡단, 종단상의 침하형태로 구분하여 표기하기도 한다.

최대 지표침하는 지표의 침하부피나, 천단의 반경과 체적 변형률로부터 구해지며, 횡방향 지표침하는 지반손실 영향범위 내에서 발생한다. 종방향 지표침하는 굴진면 위치와 굴진장 및 최대 지표침하량으로부터 예측된다.

강관 상부 지표면의 침하가 최대가 되는 위치는 터널 굴진면에서 일정 거리만큼 떨어진 후방 중심축 상이며, 지표침하는 지반형태, 지층조건, 강관직경과 깊이 및 굴착방법, 라이닝 형태에 따라 상이하게 발생된다.

지반조건에 따른 지표침하는 점성토에서는 소성변형이 발생되며 사질토는 굴진면에서 유실되고 지반이 약할수록 크게 일어나는 경향을 보인다.

강관 주변지반손실은 반경 방향과 굴진면의 변형에 좌우되며 반경 방향 변형에 의한 지반손실은 강관직경에 비례하고, 굴진면 변형에 의한 지반손실은 강관직경의 제곱에 비

Table 1. Ground deformation cases for non-open-cut construction

Index	Sta. (km)	Method	Displacement (mm)	Remark
High way	Seoul-Busan line	415.4	S.T.S (Settlement)	
	Seoul-Busan line	380.5	U.P.R.S (Uplift)	Grouting
	Yeongdong line	36.4	P.R.S (Settlement)	
	Yeongdong line	39.5	U.P.R.S (Uplift)	Grouting
Kyungui Overbridge Betterment	Seongsan-ro Railway Bridge	J.E.S	92.3 (Settlement)	

※ 한국도로공사(2012), Jung et al.(2009)

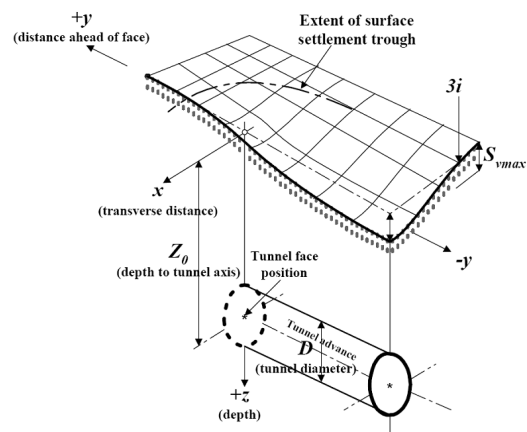


Fig. 1. Ground surface settlement induced by tunnel advance

레한다. 일반적으로 강관이 깊을수록 지표 침하영향권의 폭이 넓어져 최대 지표침하는 작아진다.

따라서 강관압입 및 굴착이 지반손실에 결정적 요소이며, 기계굴착을 실시하더라도 장비 및 운영자에 영향을 받을 뿐만 아니라 선형과 레벨유지, 장비 유격, 굴진 속도와 굴진장, 그라우팅 시점 등도 중요하다.

3.2 강관압입에 의한 지반침하 거동

비개착 강관압입공법은 강관을 지반 내 압입, 굴착 후 강관 내부에 콘크리트 충진을 통하여 고강도 구조체를 형성하는 공법으로 구조체 형성 후 외력에 의한 저항력이 우수하고 지반침하가 거의 발생하지 않는 공법이다. 그러나 Um et al.(2001)이 현장계측을 통해 프론트 잭킹 공법과 파이프 루프 공법을 적용한 철도지하 횡단공사에 따른 지반거동을 분석한 결과, 강관 압입과 굴착공정에서 80% 이상의 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 특히 공정에 따른 변위 발생결과에 따르면 강관 압입과 굴착공정에서 80% 이상의 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 실제 시공 중 지반침하 발생의 원인은 다음과 같다.

- ① 강관 선단슈 또는 비트와 강관의 직경 차이에 의한 공극(Tail Void) 발생 : Δ
- ② 원활한 강관압입을 위한 지반 과굴착 : ω (선단슈 직경(D')의 약 5~10%)
- ③ 강관과 지반의 마찰저항에 의한 공극발생 : δ

특히 비개착 강관압입공법 시공 중 관 선단슈와 강관의 직경 차이에 의한 공극(Δ)과 원활한 강관압입을 위한 지반 과굴착(ω)에 의한 지반침하($\omega+2\Delta$)는 압입강관의 구조적 특성으로 인해 필연적으로 발생된다. 일반적으로 현장에서는 강관압입 중 굴진면 전방지반에 과다한 추진력에 의한 지반 용기를 방지하기 위해 선단슈 직경(D')대비 약 5~10% 크게 굴착을 수행한다.

강관과 지반의 마찰저항에 의한 지반침하(δ)는 강관압입 중 강관과 지반의 지속적인 마찰저항에 의한 공극발생, 불규칙한 강관 주변 공극분포, 불확실한 주입재의 공극 채움 효과 및 주입재의 강도특성 등에 의해 발생하며, 일반적으로 현장에서는 강관 주변에 윤택재(벤토나이트)를 지속적으로 주입하여 제어한다.

여기서 강관압입에 의한 지반침하 발생 원인이 Shield TBM 시공 시 발생하는 침하 원인과 유사함을 알 수 있다. Shield TBM 터널로 인해 침하가 발생하는 것으로 보고된 약 5가지 원인은 다음과 같다.

- ① 쉴드 전면 압력감소에 따른 지반거동
- ② 쉴드 이동 시 헤드(Head)의 과굴착 등에 의한 지반거동

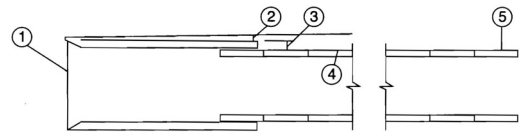


Fig. 2. Settlement factor of Shield TBM

- ③ 테일보이드의 영향 : 테일스킨과 라이닝사이의 틈새(Gap)의 존재는 지반의 터널 중심을 향한 지반거동 야기
- ④ 지반하중 작용으로 일어나는 라이닝 변형으로 인한 지반변형
- ⑤ 점토지반에서 굴진에 따른 간극수압이 평형을 이루어 가는 과정에서 발생하는 장기변형

4. 기존 지표침하 예측방법

앞서 살펴본 바와 같이 비개착 강관압입에 의한 지반거동 특성은 Shield TBM의 지표침하 발생원인과 유사한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 기존 Shield TBM의 침하량 예측에 널리 이용되고 있는 Gap Parameter법 및 Volume Loss법을 이용하여 비개착 강관압입의 침하량을 산정하여 현장시험과 비교·분석을 통하여 적정성을 평가하였다.

4.1 Volume Loss Method

터널 시공으로 인한 지표침하에 관한 대표적인 모델은 누적확률분포 모델로서 Peck(1969)은 다양한 계측자료를 토대로 횡단면 상의 침하곡선은 가우스 정규분포를 따른다는 전제로 경험식을 제안하였다. 이후 Glossop & Farmer(1979), Attewell & Woodman(1982) 등이 이에 관한 이론을 정립했다.

지상에 구조물이 위치하는 경우, 구조물과 지반의 상호작용으로 인해 지표침하의 크기와 유형이 달라질 수 있으나 설계단계에서 강관직경과 토피고와 같은 시공조건이 고려된 체적 손실을 토대로 지표침하량 및 침하 범위 예측이 가능하다는 점에서 매우 효율적이다.

일반적으로 계측으로 확인되는 터널 횡단면의 지표침하형상은 Fig. 3과 같다.

지표침하형상의 식은 Eq. (1)과 같다.

$$S_v = S_{v,max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

여기서 $S_{v,max}$: 최대침하

i : 변곡점까지의 거리 = KZ_0

Z_0 : 지하공간 축까지의 깊이
 K : 지반계수 : 0.40~0.60(clay),
 0.25~0.45(sand)

지반손실률(Volume loss)은 Eq. (2)로 구할 수 있다.

$$V_L = V_s / A \times 100\% \quad (2)$$

여기서 V_s : 지표침하면적, A : 터널 단면적

최대침하와 지반손실량의 관계는 Eq. (3)과 같으며, 지표 침하면적은 Eq. (4)와 같이 표현 될 수 있다.

$$S_{max} = \frac{V_s}{(2\pi)^{1/2} \times i} \quad (3)$$

$$V_s \approx 2.5 i S_{max} \quad (4)$$

Peck(1969)은 지표면으로부터 터널 중심축 Z_0 까지, 터널 반경(R)에 의해 정규화되는 심도별 i 값을 제안하였으며 토질종류별 심도에 따른 i 값을 경험적 관계로 나타냈다.

4.2 Gap Parameter법

Peck(1969)이 확률통계함수에 근거한 경험적 해를 정립한데 반해 Lee et al.(1992)은 실드와 강관의 직경차이 등에 의한 지반손실 등을 정량화한 Gap Parameter를 Eq. (5)와 같이 정의하였다. G_p 은 실드와 터널 라이닝의 직경차이로 정의될 수 있으며, U^*_{3D} 는 탄소성거동을 보이는 3차원 변위를 의미한다. 마지막으로 w 는 과도한 추진압에 의한 지반 용기 혹은 과굴착과 같은 장비운영 및 인력숙련도에 의한 지반변형(시공오차)을 의미한다.

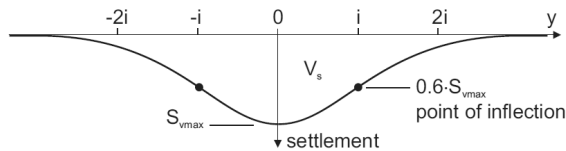


Fig. 3. Transverse settlement profile

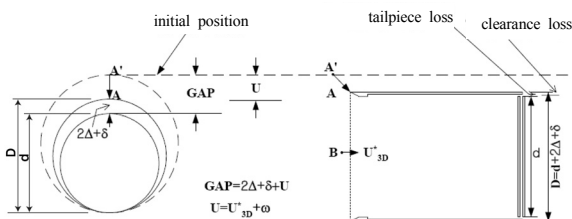


Fig. 4. Gap parameter method (Lee et al., 1992)

$$GAP = G_p + U^*_{3D} + w \quad (5)$$

여기서 $G_p = 2\Delta + \delta$

Δ = 테일 피스의 두께

δ = 클리어런스의 두께

U^*_{3D} = 굴진면의 3차원 거동에 의한 침하

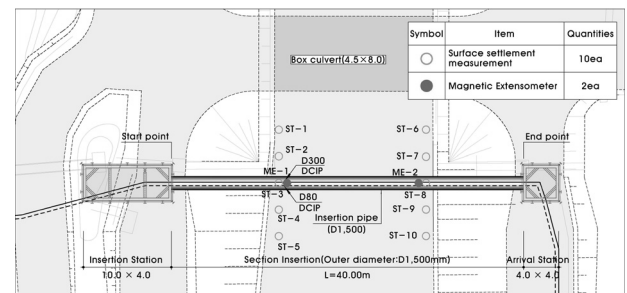
w = 시공오차로 인해 발생된 침하

(장비운영, 인력숙련도에 의한 상하여굴)

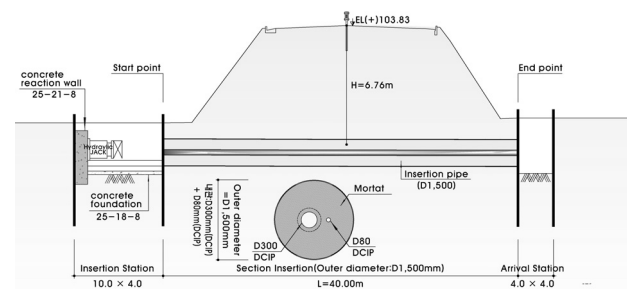
5. 현장 강관압입 시험

5.1 현장시험 개요

현장시험이 이루어진 곳은 고속국도○○호선 ○○○-○○7공구 상수관로 이설 추진구간으로 원활한 교통소통 및 인접 구조물 안정성 확보를 위해 비개착 강관압입공법이 적용되었다. 압입구간은 토피고 6.76m, 총 길이 40.0m로 강관압입을 위한 추진구 및 도달구 시공 후 추진장비를 이용, 직경 1,500mm 강관을 압입하여 본선 굴진·배토를 실시하고, 압입 완료 후에는 직경 300mm, 75mm 덕타일 추철관 삽입 및 강관 외관 내 몰탈 충전으로 시공이 이루어졌다. 굴착 및 추진압입에 따른 주변 지표침하 및 심도별 침하량 파악을 위해 지표침하계와 층별침하계를 설치하였다. 계측은 일간 측정결과와 경시변화를 분석하여 안정성 유무를 파악하는 것으로 관리기준을 선정하였다.

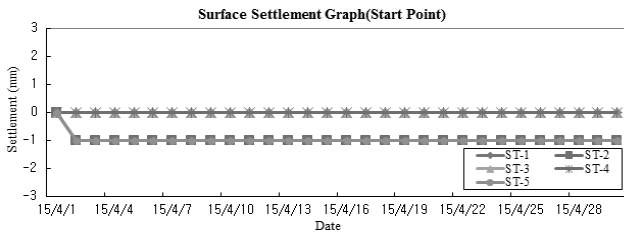


(a) Settlement measurement plan

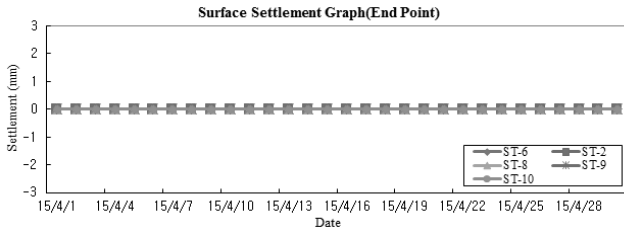


(b) Transverse section

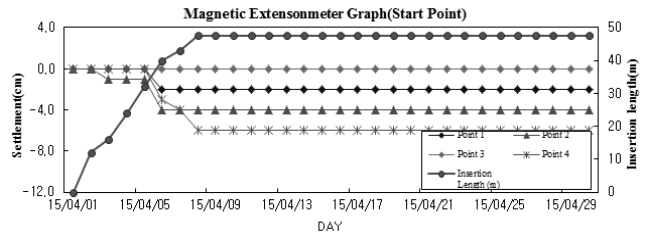
Fig. 5. Status of measurement plan and trenchless method



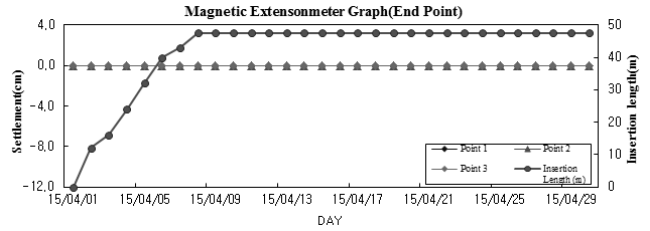
(a) Surface settlement graph (ST-1~ST-5)



(b) Surface settlement graph (ST-6~ST-10)



(c) Magnetic extensometer graph (ME-1)



(d) Magnetic extensometer graph (ME-2)

Fig. 6. Measurement result

5.2 강관압입 현장시험 계측 결과

지표침하계 계측 결과, 강관압입 시점으로부터 약 11.5m 지점에 위치한 ST-2, ST-5에서 침하량이 1mm로 나타났으나, 그 외 침하계에서는 침하량이 검출되지 않아 신뢰할 수 없는 계측 결과로 판단된다.

층별침하계 계측 결과, ME-1에서 설치심도 1.950m, 3.460m, 5.340m에서 최종침하량 -2.0cm, -4.0cm, -6.0cm로 각각 나타났으며 ME-2에서는 침하량이 계측되지 않았다.

5.3 현장시험 분석

층별침하계 ME-1 계측 결과 설치심도에 따라 최종침하량이 증가하는 양상을 보이며, 이는 강관압입 시 강관 주변 지반의 교란으로 인해 지표면보다 강관 주변의 침하량이 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

ME-1의 계측 결과를 축점별로 살펴보면 지표에 가까운 축점일수록 침하가 빨리 수렴되며 강관에 가까울수록 수렴이 늦는 것을 확인할 수 있으며, 압입이 완료된 후 전반적으로 침하가 수렴된 점을 미루어볼 때 비개착 강관압입공법 시공 시 발생하는 침하는 강관압입 및 굴착단계에서 이루어짐을 알 수 있다.

지표침하계 계측 결과 ST-2, ST-5에서 지표침하량이 1.0mm로 계측되었으나 ME-1 계측 결과로 미루어 볼 때 강관 상부 지표면인 ST-3에서는 1.0mm보다 더 큰 침하가 발생했을 것으로 추정된다. 따라서 본 현장시험 계측구간 중 계측 결과의 신뢰성이 가장 높은 것으로 보여지는 ME-1의 계측 결과로 천단침하량을 추정한 결과 약 2.11mm로 나타났다(Fig. 7).

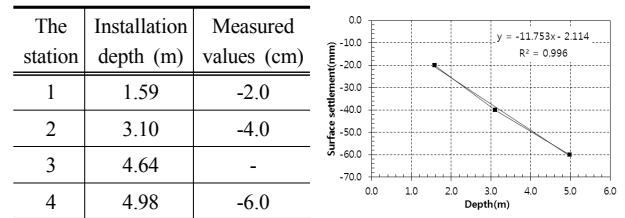


Fig. 7. ME-1 Measured results and estimation equation

6. 지표침하 예측방법 검토

6.1 기존 해석방법에 의한 지표침하 예측

일반적으로 설계 시 비개착 강관압입공법 적용에 따른 지표침하는 시공단계를 고려한 수치해석을 통해서 예측하고 있다. 따라서 본 현장 강관추진 시험구간을 대상으로 기존 방법인 초기단계→강관압입→내부굴착의 시공단계를 고려하여 수치해석을 통한 지표침하를 예측하였다.

수치해석 프로그램은 MIDAS GTS NX를 이용하였으며, 축방경계는 5.0D 이상 충분히 이격시켜 해석을 수행하였다. 수치해석 시 적용된 지반정수는 Table 2와 같다.

기존 일반적인 방법으로 지표침하를 예측한 결과, 강관압입으로 약 0.07mm의 침하 발생 후 내부 굴착으로 용기가 발생하는 경향으로 나타났다(Fig. 8). 강관의 강한 강성은 연직변위로 인한 수평변위가 지반으로 밀어냄으로써 최종적으로 지표변위가 약 0.7mm 용기하는 것으로 나타나 현장시험의 계측 결과와 상이하게 나타났으며, 상부 지장물에 대해 불안전측 결과로 평가된다.

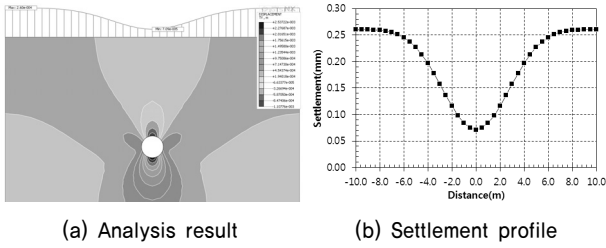


Fig. 8. Result of General old methods

Table 2. Soil parameter

Unit weight kN/m ³	Cohesion (c)	Internal friction angle (°)	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio
19	10	30	30	0.32

6.2 Volume Loss Method

6.2.1 경험적 방법

Shield TBM 공법 침하예측 시 주로 사용되는 경험적 방법인 Volume Loss법을 이용하여 현장시험 구간의 최대침하량 및 침하형상을 예측하였다. 시험구간 상부는 기시공된 고속국도○○호선으로 양질의 토사에 다짐이 이루어졌을 것으로 판단되어 압밀 등으로 인한 침하영향은 무시하였다. 최대경사는 Peck(1969)이 제안한 도표(Fig. 9)로부터 산정하였다.

- $Z_0 / D = 4.92$ 이므로 $2i / D = 4.40$
- $i = 3.35m$

최대침하는 지표침하함수인 Eq. (3)에 의하여 Eq. (6)과 같이 산정된다.

$$S_{max} = \frac{V_s}{(2\pi)^{1/2} \times i} = \frac{0.01 \times \pi \times 1.524^2 / 4}{(2\pi)^{1/2} \times 3.35} = 2.14mm \quad (6)$$

경험적 방법을 통하여 강관압입으로 인해 발생 가능한 최대침하는 2.14mm로 산정되었으며, 현장시험 지표침하량과 유사하게 예측되었다. 침하형상은 Fig. 10과 같다.

6.2.2 해석적 방법

비개착 강관압입공법에서 강관이 설치된 후 발생하는 변위를 무시할 경우 지표침하를 예측하기 위한 방법으로 수치해석을 이용한 변위제어법이 있다. 변위제어법은 강관압입으로 발생하는 지반의 손실량(Volume loss) 및 천단변위(Gap parameter)를 매개변수로 해석할 수 있다(신중호, 2002).

지반손실률법은 강관추진에 의해 발생하는 지표침하 영향을 고려하고자 굴착량(V)에 따라 발생하는 지표에서의 지반손실량(V_L)을 매개변수로 해석을 수행하는 방법이다. 일반적으로 쉘드터널 검토 시 V_L/V의 값은 1~3% 범위이며, 본 검토에서는 성토 지반이므로 V_L/V=1%로 목표값을

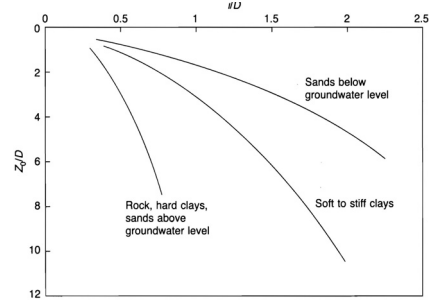


Fig. 9. i Versus Z₀ (Peck, 1969)

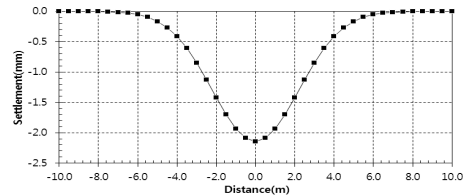
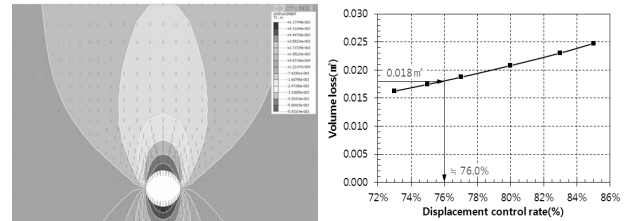


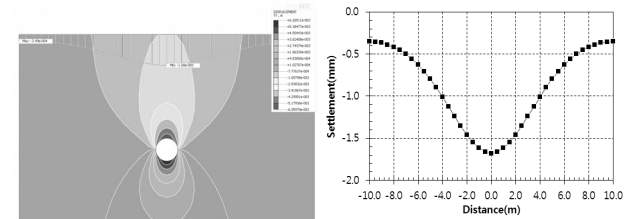
Fig. 10. Settlement profile estimated by Peck (1969)

Table 3. Steel pipe parameter

Area, A (m ²)	Height, H (m)	Diameter, D (m)	Depth, Z ₀ (m)	Volume loss, V _L (%)
1.824	6.76	1.524	7.52	1



(a) Back analysis



(b) Settlement profile

Fig. 11. Result of volume loss method

설정하여 목표값을 만족하는 지표침하량 발생경향을 검토하였다(Fig. 11 참조).

지반손실률에 따른 지표침하 검토 결과, 강관압입 중앙 상단 지표에서 최대 약 1.7mm가 발생하는 것으로 나타나 현장시험의 예측 결과(2.1mm) 및 경험적 방법에 의한 Volume loss(2.1mm)보다 다소 미소하게 예측되었다.

6.3 Gap Parameter Method

수치해석을 통하여 천단침하량을 매개변수로 지표변위

를 예측하는 Gap parameter method의 목표값은 강관선단보강(Fig. 12)으로 인한 공극(Tail Void)으로 산정할 수 있다.

단순 정량적 평가를 위하여 굴진면의 3차원 거동에 의한 침하 및 시공오차로 인해 발생한 침하 등은 제외하고 선단보강 공극 차이만 발생하는 것으로 가정하여 목표값(Gap)은 12.0mm로 선정하였다.

변위제어에 따른 천단침하 변화량을 분석하여 목표값(12.0mm)을 만족하는 변위제어율을 역해석으로 산정하였으며, 산정된 변위제어율로 수치해석을 수행하여 천단침하 발생경향을 분석하였다(Fig. 13 참조).

지표침하 검토 결과, 강관압입 중앙 상단 지표에서 최대 약 3.5mm가 발생하는 것으로 나타나 현장시험의 계측 결과(2.1mm)보다 다소 보수적으로 예측되었다.

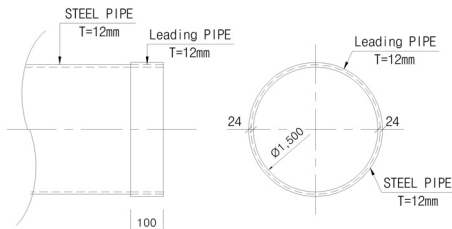
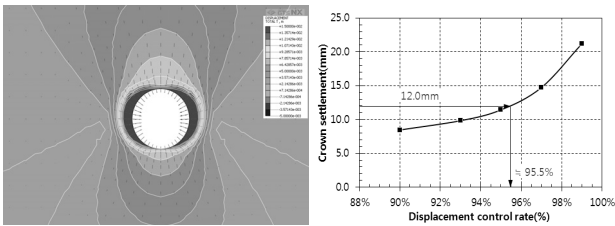
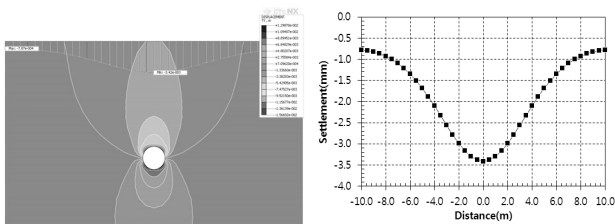


Fig. 12. Leading pipe reinforcement



(a) Back analysis



(b) Settlement profile

Fig. 13. Result of gap parameter method

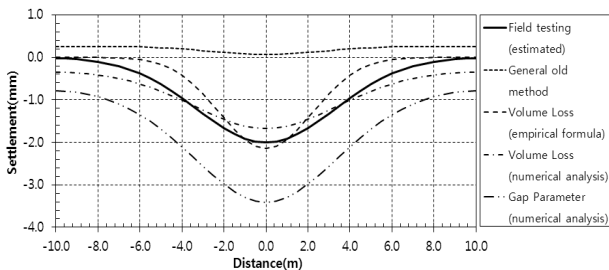


Fig. 14. Total result

6.4 현장시험 계측 결과 비교

비개착 강관압입공법을 적용한 현장 계측 결과를 바탕으로 기존 해석방법, Volume loss(경험식), Volume loss(해석), Gap Parameter(해석)에서 산정된 예측 침하량과 비교·분석하였다(Fig. 14 참조).

최종 침하량이 현장 계측 결과(2.1mm)와 가장 근사치로 나타난 예측방법은 Volume loss(경험식) 예측방법이 2.1mm로 나타났으며, 전반적인 지표침하 발생경향이 유사한 방법은 Volume loss(해석) 예측방법인 것으로 나타났다. 그러나 Volume loss 방법은 지반손실률을 결정에 따라 예측결과가 상이하게 나타남으로 추후 다양한 지반조건 및 손실률 결정에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

7. 결 론

본 연구에서는 비개착 강관압입공법 시공 시 발생하는 지반침하량의 정밀한 예측을 위해 강관압입 시 지반거동 특성을 분석하여 거동특성에 맞는 예측방법을 연구하였으며, 침하 예측방법에 따라 현장시험과 비교·분석을 수행하여 적정성을 평가하였다.

- (1) 비개착 강관압입공법은 강관압입으로 발생하는 지반거동 특성은 터널 굴착과 같은 3차원 침하형태로 나타나며, 강관 선단과 강관의 공극 등으로 침하가 발생하는 것으로 분석된다. 이는 저토피 Shield TBM 시공 시 발생하는 지반거동 특성과 유사한 형태로 나타난다. 따라서 Shield TBM에서 지표침하를 예측하기 위한 방법인 Volume loss method 및 Gap parameter method를 이용하여 강관압입공법의 지표침하를 예측하였다.
- (2) 현장시험은 고속국도 00호선 000-007공구 상수관로 이설 추진구간으로 원활한 교통소통 및 인접구조물 안정성 확보를 위해 비개착 강관압입공법이 적용되었으며, 강관추진 및 굴착에 따른 주변지표침하 파악을 위해 지표침하계와 층별침하계가 설치되었다. 현장시험 계측 결과는 강관에 가까운 심도일수록 침하량이 크고 지표에 가까울수록 침하가 빨리 수렴하는 것으로 나타났으며, 층별침하계의 계측 결과에 따라 강관 직상부의 지표침하는 2.1mm가 발생한 것으로 추정됐다.
- (3) 비개착 강관압입공법을 적용한 현장시험 구간의 지표침하 계측 결과를 바탕으로 기존 해석방법, Volume loss(경험식), Volume loss(해석), Gap parameter(해석)를 수행하여 지표침하 발생 경향을 비교한 결과 최대침하량은 Volume loss(경험식) 예측방법이 가장 근사치로 나

타났으며, 침하 발생 경향은 수치해석을 통한 Volume loss(해석) 예측방법이 가장 유사하게 나타났다. 그러나 Volume loss 예측방법은 지반손실률 결정에 따라 침하량 예측이 상이하게 나타난다.

- (4) 따라서 본 연구는 비개착 강관압입 공법의 침하예측을 위한 기초 연구로 Gap parameter 및 Volume loss 예측방법을 적용하기 위한 Factor 결정 또는 별도의 예측식 연구와 비개착 강관압입공법 전체 구조물의 침하를 예측하기 위한 적용성 평가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

1. 신중호 (2002), 터널의 수치해석에 적용하는 하중분담율을 결정하는 방법, 한국지반공학회지, 제18권, 제2호, pp. 83~88.
2. 한국도로공사 (2012), 비개착 횡단공사 관리체계 개선방안, 2012년도 고속도로 설계 실무자료집, pp. 18~27.
3. 한국철도시설공단 (2010), 고속철도 지하횡단구조물 공법기준 정립 및 안정성평가 연구, 한국철도기술연구원 연구보고서, p. 382.
4. Attewell, P. B. and Woodman, J. P. (1982), Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil, Ground Engineering Vol. 15, pp. 13~22.
5. Attewell, P. B., Yeates, J. and Selby, A. R. (1986), Soil movements induced by tunnelling and their effects in pipelines and structures, Blackie, pp. 325.
6. Cui, J., Yoon, J. N., Eum, K. Y., Hong, S. N. and Park, S. K. (2011), An experimental study on flexural behavior in framed structure of P.S.T method, Journal of the Korea institute for Structural maintenance and inspection, Vol. 15, No. 2, pp. 144~152 (in Korean).
7. Glossop, N. H. and Farmer, I. W. (1979), Settlement associated with removal of compressed air pressure during tunnelling in alluvial clay, Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 67~72.
8. Jung, K. H., Jung, S. T., Kim, D. H., Kim, J. S., Hwang, Y. C. and Park, M. G. (2009), The design and construction with the JES method used steel elements for under pass in Korea and the practical use of the JES method, 2009 Spring Conference Journal of the Korean Society for Railway, pp. 1498~1508 (in Korean).
9. Kim, D. Y., Lee, H. S. and Sim, B. K. (2012), Development of trenchless tunneling method using pressurizing support and its field application, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 28, No. 7, pp. 17~30 (in Korean).
10. Lee, H. S., Lee, J. S., Bang, C. S. and Kim, Y. T. (2004), A numerical study on reinforced effect of the railway tunnel by umbrella arch method, 2004 Spring Conference Journal of the Korean Society for Railway, pp. 164~169 (in Korean).
11. Lee, K. M., Rowe, R. K., and Lo, K. Y. (1992), Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, No. 6, pp. 929~940.
12. Peck, R. B. (1969), Deep excavations and tunnels in soft ground, Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State of the Art Volume pp. 225~290.
13. Um, K. Y., Jung, H. C. and Kim, J. H. (2001), The analysis of ground behavior on the crossing construction under railroad using in-door model experiment, 2001 Autumn Conference Journal of the Korean Society for Railway, pp. 540~545 (in Korean).