

철로하부의 강관압입 시 발생하는 지반변위 및 진동에 대한 영향평가

Estimation of Effect for Vibration and Displacement Occurred by Steel Tube Jacked under Railroad

박 승 욱*
Park, Seung Wook

김 홍 기**
Kim, Hong Ki

박 해 일***
Park, Hae Il

ABSTRACT

An important and continuing research effort has been concentrated to estimate safety for behavior of soil nearby construction site. This construction under ground would cause the soil to deform and vibrate at any direction. This paper presents to estimation of safety for movement and reliability for vibration due to steel tube jacked under ground.

1. 서 론

본 연구에서는 철로하부에 구조물 축조를 위한 강관 압입 시 주변지반에 발생하는 지반변위 및 진동의 거동을 파악하기 위해 계측기기를 지반내부에 설치하고 지반의 거동을 파악하여 시공의 신뢰성, 경제성 및 안전성을 도모하는 것이다. 특히, 국내의 경우는 지하철 건설, 지하철도 등 1980년대부터 시공 안전 측면에서 현장계측이 활성화되어 왔으나 현재까지도 시공 중 안전관리나 설계 시공법의 적합성, 환경적 변화요인에 따른 구조물의 진행성 파괴 등에 관한 조사 평가가 현장에서 적절히 수행되지 않고 있는 실정이다. 따라서, 불확실성 속에 이루어지는 지하구조물의 시공에서 과학적인 이론을 바탕으로 한 계기측정에 의한 예측방법으로 공사 중 적절한 계측 및 관리를 실시하여 가능한 실제와의 거동차이를 빨리 감지하므로서 필요한 조치를 취해야 한다.

2. 연구목적 및 내용

본 연구에서는 T.R.M공법 진행 시 발생하는 지반의 변위 측정에 관한 자료가 전무한 상태이며, 철도노반과 같이 대형사고로 인한 피해가 큰 사회적 문제를 야기하는 공사에 대한 추후 현장자료를 확보하기가 어려운 상태이다. 따라서, 본 연구에서 측정된 지반변위는 추후 시공될 동 공법에 대한 안정성 확보에 유용한 자료를 제공하고자 한다. 또한, 지반의 진동응답을 실험을 통해 정량적으로 평가한 후, 이로 인한 지반의 진동치를 신뢰도에 따라 추정하고 평가할 수 있는 진동 추정식의 개발 및 진동 영향평가를 하고자 한다.

본 연구의 목적 및 내용을 정리하면 다음과 같다.

1) T.R.M공법의 진행으로 인한 지반의 변위 측정

T.R.M공법에 의한 강관압입 진행 시 발생하는 호남선 철로 주변 지반의 심도별 변위를 측정하여 압입 시 발생하는 층별 지반변위의 추이를 알아보고 시공영향으로 인한 주변지반의 거동 상태를 지속적이고 정량적으로 점검 계측하며, 허용변위량과 실측변위량의 비교에 의해 안전성을 확인한다.

* 광주도시철도 TK-2공구 (주)현대건설 소장

** 전남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 광주도시철도 TK-2공구 (주)현대건설 과장

2) T.R.M공법의 진행으로 인한 지반의 진동 측정

T.R.M공법에 의한 강관압입 진행 시 발생하는 지반의 진동치 크기 및 진원지로부터의 거리별 진동을 측정하여 거리감쇠 정도를 진동 응답 실험을 통해 평가한다.

3) 상시 열차 주행에 의한 지반 진동 측정

열차 주행 시 철도제방에 미치는 진동치의 크기 및 거리감쇠 정도를 진동 응답 측정 실험을 통해 평가한다.

4) 강관 압입에 대한 진동 측정 결과 분석 및 신뢰도에 따른 진동 추정식 제시

진동 응답 실험을 통한 진동 측정 결과치를 분석한 후 T.R.M공법의 진행 시 강관 압입 에너지에 따른 지반의 진동치를 회귀분석하여 이에 대한 진동 추정식을 신뢰도에 따라 제시하고 이를 이용하여 제방의 진동 영향 정도를 평가한다.

5) 열차 주행 시 진동 측정 결과 분석

진동 응답 실험을 통한 진동 측정 결과치를 분석한 후 열차 주행에 따른 철도 제방의 진동치를 회귀분석하여 이에 대한 진동 추정식을 신뢰도 정도에 따라 제시하고 이를 이용하여 강관 압입으로 인한 제방의 진동 영향 평가 시 비교 자료로 사용한다.

6) 지반 진동으로 인한 철도 제방의 진동 영향 평가 수행

T.R.M공법 진행 시 강관 압입에 의한 지반의 진동과 이로 인한 철도 제방의 진동 영향에 대한 안정성을 평가한다.

3. 공사개요

1) 공사명 : 광주 도시철도 1호선 2단계 T.K-2공구 건설공사 (호남선 하부통과 T.R.M 공법 구간)

2) 공사위치 : 광주시 광산구 도산동 일대

3) 공사기간 : 2000년 12월 ~ 2002년 1월

4) T.R.M 공법에 사용되는 강관의 제원

a. T.R.M 작업구 설치 및 GALLERY(STEEL PIPE) 추진작업에 사용되는 강관

; 강관의 직경(외경) : 2.5m, 강관의 두께 : 24mm

b. GALLERY 내에서 수평관(STEEL PIPE) 추진 시 사용되는 강관

; 강관의 직경(외경) : 1.2m, 강관의 두께 : 12mm

4. T.R.M공법

T.R.M(Tunnel-Tubular Roof Construction Method)의 약자로서 “수평관 압입 굴진공법”으로 명명할 수 있다. T.R.M공법은 벨기에의 Smet Boring이란 회사가 개발한 지하구조물 축조 공법으로서 지하에 거대한 Roof을 형성하는 공법으로서 이 공법은 강관을 작업구내에서 유압Jack으로 압입한 후 강관내부 굴착 및 콘크리트를 주입함으로써 Roof을 완성 시키고 강관의 하부를 굴착함으로써 구조물을 축조하는 공법이다(그림 7.5, 7.6 참조).

현재 벨기에(Brussels, Antwerpen), 스페인, 이태리, 말레이시아등 유럽과 동남아의 복잡한 시가지 중 심의 지하에 지하상가, 지하철, 전력구, 공동구등의 지하구조물을 시공하고 있다.

특히, 공사가 진행되는 동안 지상의 구조물과 도로위의 차량통행과 노면침하등의 문제점에 대하여 안 전하고 부담없이 시동할수 있는 최선의 첨단 공법으로서 세계 특허가 취득되어 있다.

5. 지질조사

본 과업구간은 현재 송정리-목포간의 호남선 단선철도 및 군 전용선(단선)이 운행중이다. 향후 복선화 계획이 추진 중에 있다. 현재 호남선 철도노반과 도시철도 구조물간의 토피고는 4.6m(호남선) 및

2.7m(군 전용철도)이다. 시/중점부에서 실시한 보링 조사에 따르면 다음과 같은 지반 특성을 갖고 있다.

매 립 층	N치 4/30 ~ 20/30 (철도 성토층) 지표하 2.8m 내지 3.8m까지 분포
충 적 층	N치 10/30 ~ 50/30 지표하 2.8m내지 3.8m에서 6.5m 내지 8.5m에 분포
풍 화 토	N치 50/30 ~ 50/18 지표하 8.5m에서 11.0m에 분포
풍 화 암	N치 50/12 지표하 11.0m 이하에 분포

6. 계측기 설치 종류 및 계측 관리 기준

6.1 지중침하계

1) 사용목적

수평관 관입 시 각 지층에서 일어나는 침하량을 측정하여 시공중 안전성 검토를 위해 이용한다.

2) 계측 관리 기준

계측종류	관리기준치	관 리 기 준 치		
		위 험	주 의	안 전
지중층별 침하계	1/357 0.28%H	측정치/관리기준치>1.2	1.2≥측정치/관리기준치≥0.8	측정치/관리기준치≤0.8

6.2 경사계(지중 수평 변위 측정기)

1) 사용목적

수평관 관입 시 지반내에 수평 변위가 발생하고 이로 인한 지반 수평 변위량을 계측하여 설계상의 예상 변위량과 비교 검토함으로써 안전성을 검토하는데 그 목적이 있다.

2) 계측 관리 기준

계측종류	굴착깊이(m)	관 리 기 준 H/200(mm)	관 리 기 준			
			위험(> 120%)	경고(100~120%)	주의(80~100%)	안전(80%<)
경사계	2.6	10	> 12	10 ~12	8 ~ 10	8 <

6.3 진동측정

1) 사용목적

T.R.M공법 진행 시 강관압입 과정에서 발생하는 진동 응답을 실험을 통해 정량적으로 평가한 후, 이로 인한 지반의 진동치를 신뢰도에 따라 추정하고 평가할 수 있는 진동 추정식의 개발 및 진동 영향평가를 하고자 한다.

2) 계측 관리 기준

계측종류	관리기준치	관 리 기 준 치		
		위 험	주 의	안 전
진동측정	3.0 kine	측정치/관리기준치>1.2	1.2≥측정치/관리기준치≥0.8	측정치/관리기준치≤0.8

7. 계측결과 및 분석

7.1 수평변위

수평관 압입에 따른 수평변형량을 확인하기 위하여 시점부에서 20m떨어진 곳에 경사계를 갤러리관의 각각 좌, 우에 설치하였다.

표 7.1과 그림 7.1은 Sta. 17k763 T.R.M좌측부에서는 경과일수 20일이 지난 수평변위량은 11.31mm의 변위량을 나타냈으며, 현재 7.60mm의 변위량을 보이고 있어, 더 이상의 변위는 없으며 수렴상태로 안전하다.

표 7.2와 그림 7.2는 Sta. 17k763 T.R.M우측부에서는 경과일수 40일이 지난 최대 수평변위량은 9.45mm의 변위량을 보이다가 현재 7.60mm의 최대변위량을 보이고 있고, 더 이상의 진행은 없으며 수렴상태로 안전하다.

Sta. 17k 763(좌측부)

Time (Day)	Displace ment(mm)	Time (Day)	Displace ment (mm)
0	1.21	80	7.72
5	2.57	85	8.31
10	7.10	90	7.91
15	8.00	95	7.60
20	11.31	100	7.60
25	11.08	105	7.60
30	4.54	115	7.60
35	7.70	120	7.60
40	8.37	125	7.60
45	8.29		
50	8.81		
55	8.53		
60	7.98		
65	7.98		
75	7.72		

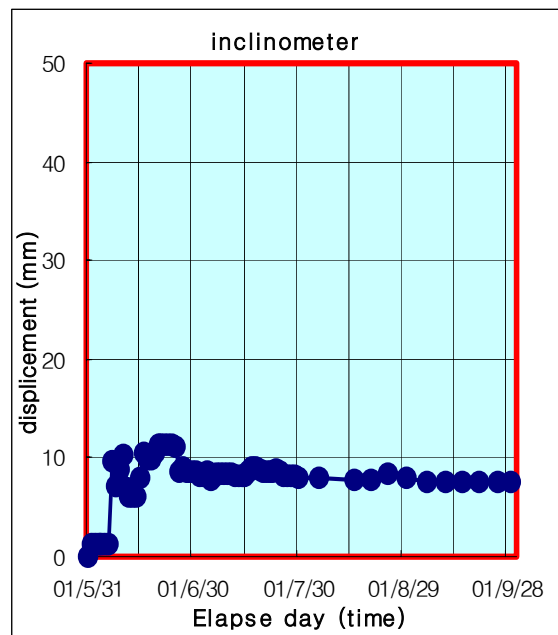


표 7.1 경과일수별 수평변위

Sta. 17k 763(우측부)

Time (Day)	Displace ment(mm)	Time (Day)	Displace ment (mm)
0	0.0	80	8.08
5	1.18	85	8.13
10	2.20	90	8.10
15	3.54	95	8.18
20	5.98	100	8.16
25	7.95	105	8.15
30	8.84	115	8.16
35	9.32	120	8.16
40	9.45	125	8.15
45	9.48		
50	8.25		
55	8.48		
60	8.69		
65	8.84		
75	7.94		

그림 7.1 경과일수별 변위 그래프

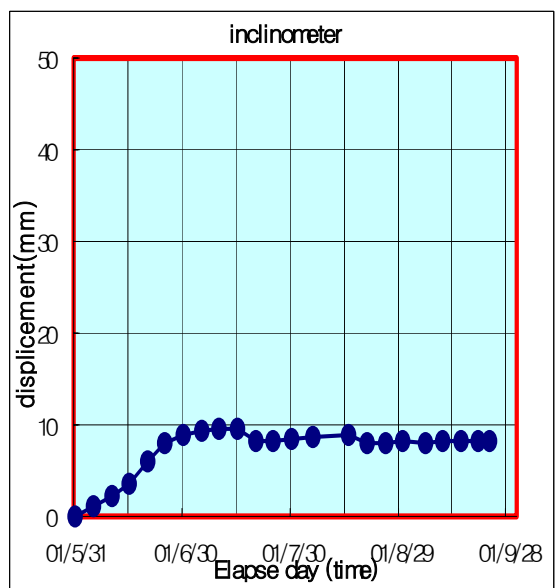


표 7.2 경과일수별 수평변위

그림 7.2 경과일수별 변위그래프

7.2 수직변위

수평관 압입에 따른 수직변형량을 확인하기 위하여 시점부에서 20m떨어진 곳에 지중침하계를 팰러리관의 각각 좌, 우에 설치하였다.

침하량은 표 7.3와 그림 7.3는 Sta. 17k 763 T.R.M중양부(좌측)의 지중침하량을 도식화한 것으로 최종침하량은 심도 3m지점 2.04mm와 10m지점 0.31mm, 13m지점에서 0.18mm로 관리치 7.3mm에 대비하여 안전하다. 표 5.4와 그림 5.4는 Sta. 17k 763 TRM중양부(우측)의 지중침하량을 도식화한 것으로 최종침하량은 3m지점에서 0.48mm와 10m지점에서 0.12mm, 13m지점에서 0.00mm로 관리기준치 7.3mm에 대비하여 안전하며 강관압입 이후 더 이상의 침하량은 없어 수렴한 것으로 판단된다.

Sta. 17k 763(좌측부)

Time(Day)	Displacement(mm)		
	3 M	10 M	16 M
0	0	0	0
20	0.10	0.10	-0.02
30	-1.57	-0.18	-0.02
40	-1.30	-0.30	-0.18
50	-2.04	-0.31	-0.18
60	-1.91	-0.17	-0.18
70	-1.91	-0.22	-0.18
80	-1.91	-0.14	-0.18
90	-1.91	-0.14	-0.18
100	-1.91	-0.14	-0.18
120	-1.91	-0.14	-0.18
130	-1.91	-0.14	-0.18
140	-1.91	-0.14	-0.18
150	-1.91	-0.14	-0.18
160	-1.91	-0.14	-0.18

표 7.3 경과일수별 수직변위

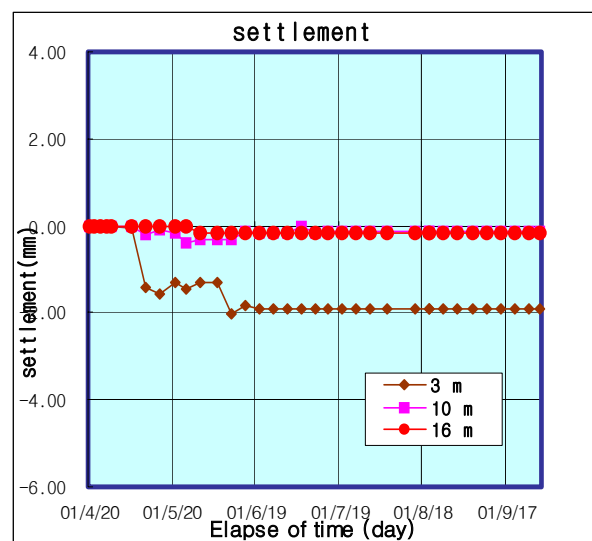


그림 7.3 경과일수별 그래프

Sta. 17k 763(우측부)

Time(Day)	Displacement(mm)		
	3 M	10 M	16 M
0	0	0	0
10	-0.48	-0.08	0
20	0.18	-0.08	0
30	0.18	-0.12	0
40	0.18	-0.12	0
50	0.18	-0.12	0
60	0.18	-0.12	0
80	0.18	-0.12	0
90	0.18	-0.12	0

표 7.4 경과일수별 수직변위

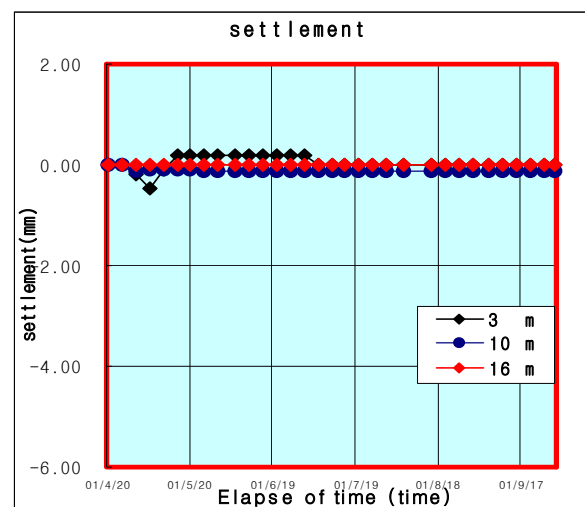


그림 7.4 경과일수별그래프

7.3 진동계측

T.R.M 공법 진행시 강관압입에 대한 1차 진동 측정 위치는 T.R.M시점으로부터 10.65m 및 16.10m 떨어진 지표면 위치에서 측정하였으며, 2차 진동 측정은 T.R.M시점으로부터 16.60m 및 23.50m 떨어진 지표면 위치에서 측정을 하였다. 측정센서의 부착은 강력접착제를 사용하여 부착하였으며 측정위치와 방향은 아래와 같다.

표 7.5 T.R.M 공법 진행시 강관 압입에 대한 측정위치 및 측정방향

측정 센서	측 정 위 치		측 정 방 향	비 고
	1차 측정	2차 측정		
#1	발진기로부터 10.65m 떨어진 지표면	발진기로부터 16.6m 떨어진 지표면	연직방향(z 방향)	속도계 및 가속도계 센서 사용
#2	발진기로부터 10.65m 떨어진 지표면	발진기로부터 16.6m 떨어진 지표면	강관압입 진행방향 (x 방향)	
#3	발진기로부터 10.65m 떨어진 지표면	발진기로부터 16.6m 떨어진 지표면	강관압입진행 직각방향(y 방향)	
#4	발진기로부터 16.1m 떨어진 지표면	발진기로부터 23.5m 떨어진 지표면	연직방향(z 방향)	
#5	발진기로부터 16.1m 떨어진 지표면	발진기로부터 23.5m 떨어진 지표면	강관압입 진행방향 (x 방향)	
#6	발진기로부터 16.1m 떨어진 지표면	발진기로부터 23.5m 떨어진 지표면	강관압입진행 직각방향(y 방향)	

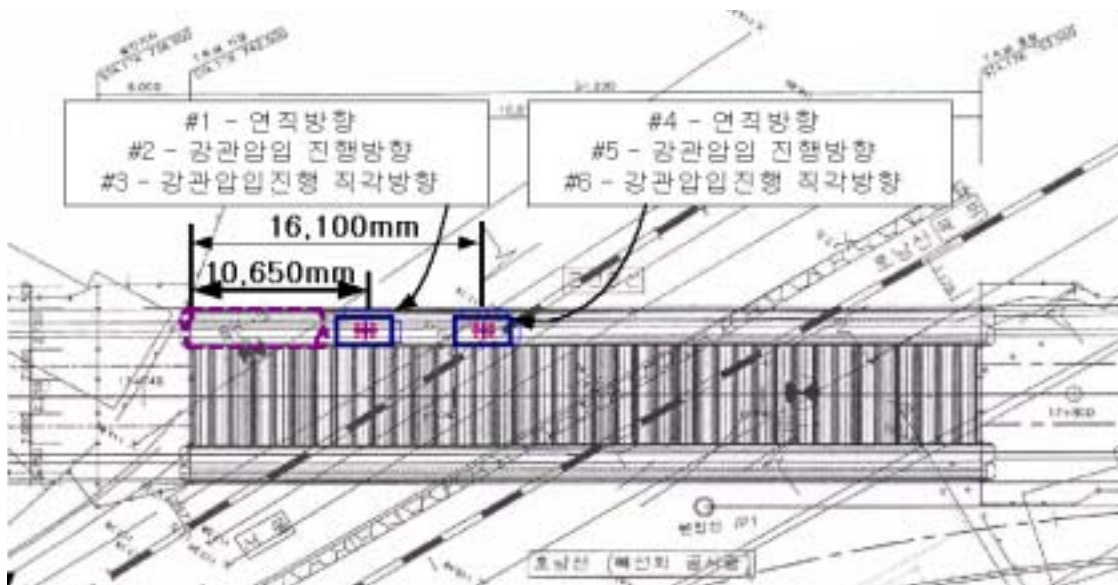


그림 7.5 T.R.M 공법 진행시 강관 압입에 대한 측정위치도

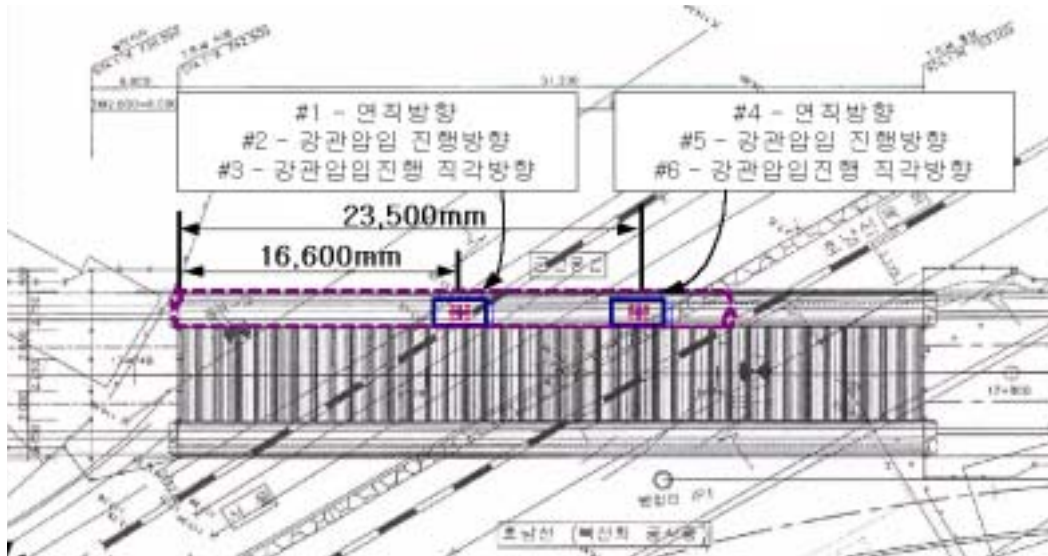


그림 7.6 T.R.M 공법 진행시 강관 압입에 대한 측정위치도(4월 25일)

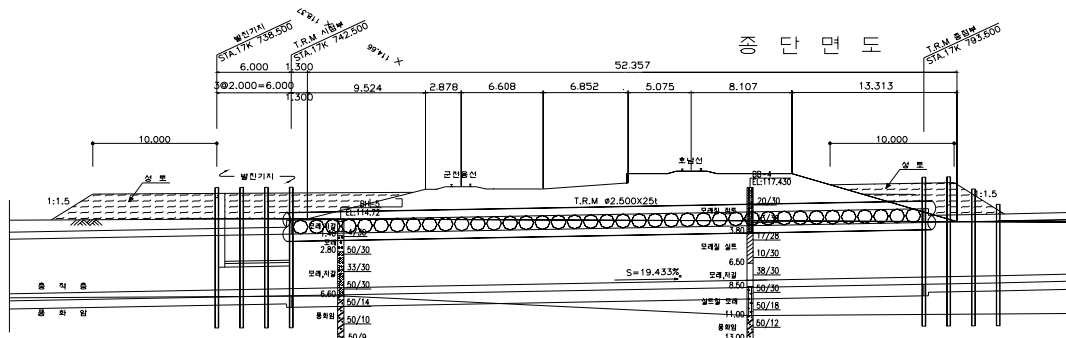


그림 7.7 T.R.M 공법 진행시 강관 압입에 대한 단면도

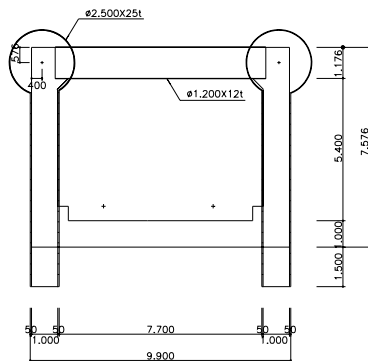


그림 7.8 TRM 단면도

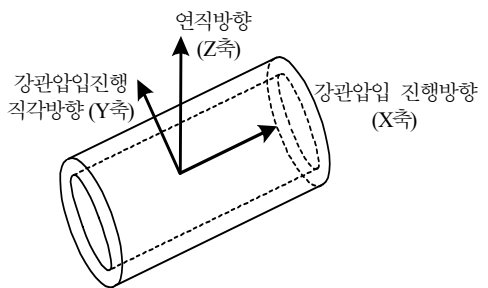


그림 7.9 강관압입으로 인한 진동 발생 방향

표 7.6 강관압입 및 열차에 대한 1, 2차 측정 진동분석

측정종류	계측기 번호	거리 (m)		압입에너지 (kg)		진동가속도 (gal)		진동수 (Hz)		진동속도 (kine)		측정회수
		1차	2차	1차	2차	1차	2차	1차	2차	1차	2차	
강관압입 (Z축)	1	10.65	16.6	80,000	180,000	8.19	4.66	29.7	7.8	0.051	0.045	1회
	2	16.1	23.5	80,000	180,000	0.71	11.27	29.7	68.0	0.031	0.038	1회
	1	10.65	16.6	80,000	180,000	1.80	3.23	29.7	7.8	0.046	0.042	2회
	2	16.1	23.5	80,000	180,000	0.74	9.48	29.7	68.0	0.030	0.032	2회
	1	10.65	16.6	80,000	180,000	2.28	3.59	29.7	7.8	0.075	0.043	3회
	2	16.1	23.5	80,000	180,000	0.82	7.14	29.7	68.0	0.044	0.025	3회
강관압입 (X축)	1	10.65	16.6	80,000	180,000	1.26	14.81	29.7	5.5	0.059	-	1회
	2	16.1	23.5	80,000	180,000	10.92	18.25	63.3	78.9	-	0.061	1회
	1	10.65	16.6	80,000	180,000	1.33	20.36	29.7	5.5	0.054	-	2회
	2	16.1	23.5	80,000	180,000	22.46	9.74	63.3	78.9	-	0.089	2회
	1	10.65	16.6	80,000	180,000	1.30	17.26	29.7	5.5	0.050	-	3회
	2	16.1	23.5	80,000	180,000	12.83	8.71	63.3	78.9	-	0.071	3회
강관압입 (Y축)	1	10.65	16.6	80,000	180,000	7.62	17.92	60.2	5.5	-	-	1회
	2	16.1	23.5	80,000	180,000	11.53	21.75	57	5.5	-	-	1회
	1	10.65	16.6	80,000	180,000	7.10	18.25	60.2	5.5	-	-	2회
	2	16.1	23.5	80,000	180,000	11.31	17.80	57.0	5.5	-	-	2회
	1	10.65	16.6	80,000	180,000	7.12	15.92	60.2	5.5	-	-	3회
	2	16.1	23.5	80,000	180,000	8.89	20.24	57.0	5.5	-	-	3회
열차진동 (Z축)	1	10.65	16.6	-		30.20	52.80	42.2	99.2	0.141	0.158	1회
	2	16.1	23.5	-		92.95	15.55	61.0	67.2	0.259	0.063	1회
열차진동 (X축)	1	10.65	16.6	-		25.31	59.42	42.2	84.4	0.084	0.054	1회
	2	16.1	23.5	-		47.60	11.50	61.0	61.7	-	-	1회
열차진동 (Y축)	1	10.65	16.6	-		28.80	74.41	43.0	63.3	-	-	1회
	2	16.1	23.5	-		78.30	18.44	52.3	60.2	-	-	1회

3) 진동영향평가

T.R.M 공법 진행시 강관 압입에 대한 진동 추정식을 제안하기 위해서는 강관 압입시 진행 과정에서 발생하는 진동을 통해 발생하는 진동 응답에 영향을 미치는 다양한 변수들의 그 상관정도에 따라 구분하는 과정이 필요하다. 그러나, 압입 에너지의 크기, 압입거리 등 많은 변수들이 강관압입의 진동 응답을 결정 짓는데 영향을 미치고 있다. 현재 상태에서는 그 변수들의 상관정도와 기여도 정도에 대한 연구가 전혀 이루어지지 않은 상황이며, 이들을 모두 고려한 다는 것은 무의미하기도 하다.

본 연구에서 T.R.M 공법 진행시 강관 압입 에너지의 크기는 가장 큰 진동을 발생시킬 수 있는

것으로 결정되었다. 결과적으로 직접 영향을 미치는 강관 압입 에너지 및 강관 압입 거리의 2가지 변수를 고려하여 진동 응답을 추정할 수 있도록 하였다.

해석 방법에 의해서 강관 압입에 대한 지반 진동의 진동 속도 응답의 자료에 대해서 회귀분석하였다.

8. 결론

T.R.M 공법 진행 시 강관 압입에 대한 철도제방의 지반 진동 영향 평가에 대한 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 강관 압입 시 호남선 철로 주변 지반의 심도별 변위를 측정된 결과 시공영향으로 인한 주변지반의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

2. 강관 압입 작업시 수반되는 지반의 진동을 측정하기 위하여 강관 압입 에너지 및 압입되는 강관 선단으로부터의 이격거리를 변화시켜 가면서 지반의 진동 응답을 측정하였으며, 지반의 진동 발생 정도를 정량적으로 비교·평가하기 위하여 열차의 주행으로 인한 지반의 진동치와 비교하여 나타났다. 강관 압입과 열차의 주행으로 인해 발생한 지반의 진동치의 측정 및 분석 결과는 아래와 같다.

<철도제방의 진동 영향 평가 결과>

진동 발생원		속도 (kine)	가속도 (gal)	허용치 (철도제방)	진동영향 및 안전성 평가	
TRM	$\beta=0$	0.075	22.46	3.0kine	O.K	
	$\beta=1.28$	0.098				
	$\beta=3$	0.139				
열차	$\beta=0$	0.259	92.95			O.K
	$\beta=1.28$	0.301				
	$\beta=3$	0.370				

※ 위의 속도응답은 신뢰도 50%($\beta=0$), 90%($\beta=1.28$), 99.9%($\beta=3$)에 해당한다.

3. 강관압입 진행과정 중에 발생하는 지반 진동치의 측정값을 신뢰성 이론을 도입하여 회귀분석한 후 50%, 90%, 99.9%의 신뢰도를 갖는 진동추정식을 제시하였다. 99.9%의 신뢰도를 갖는 철도제방의 최대 지반 진동은 0.139kine으로 추정되었으며, 열차의 주행 시에는 0.370kine으로 추정된다. 이것은 철도 제방의 진동규준치인 3.0kine 이하의 진동치로써 강관 압입 시 발생하는 지반 진동은 철도 제방에 대해 아무런 진동영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

4. 강관압입 진행과정 중에 발생하는 진동치는 속도계와 가속도계를 이용하여 근거리 및 원거리를 동시에 측정하였다. 이 측정치를 신뢰성 지수를 이용하여 분석한 후 진동추정식을 제시하였다. 강관 압입으로 인한 지반의 진동 추정식은 아래와 같다.

<신뢰성 지수를 이용한 진동추정식>

구 분	신뢰성지수(β)	진 동 추 정 식
강관압입(Z축)	0	$Vel.(kine) = 0.0609 (SD)^{-1.09}$
	1.28	$Vel.(kine) = 0.0793 (SD)^{-1.09}$
	3	$Vel.(kine) = 0.1130 (SD)^{-1.09}$
강관압입(X축)	0	$Vel.(kine) = 0.149 (SD)^{-4.62}$
	1.28	$Vel.(kine) = 0.162 (SD)^{-4.62}$
	3	$Vel.(kine) = 0.181 (SD)^{-4.62}$
열차진동(Z축)	0	$Vel.(kine) = 3.57 (D)^{-1.66}$
	1.28	$Vel.(kine) = 4.14 (D)^{-1.66}$
	3	$Vel.(kine) = 5.09 (D)^{-1.66}$
열차진동(Y축)	0	$Vel.(kine) = 5.74 (D)^{-1.97}$
	1.28	$Vel.(kine) = 7.24 (D)^{-1.97}$
	3	$Vel.(kine) = 9.90 (D)^{-1.97}$
열차진동(X축)	0	$Vel.(kine) = 2.26 (D)^{-1.72}$
	1.28	$Vel.(kine) = 2.70 (D)^{-1.72}$
	3	$Vel.(kine) = 3.29 (D)^{-1.72}$

참고문헌

1. 박연수, 박선준, 강성후 (1998년), “발파진동식의 신뢰성에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제18권, 제I-1호, pp.143-152
2. 이송, 이규환, 최혁 (1997년), “굴착에 따른 측방변위에 관한 사례연구”, 서울시립대학교 수도권연구소 연구논총 제23권, pp.113-120
3. 최인걸, 김효철 (1997년), “계측관리 침하해석 사례”, 농경기술정보 56, pp.93-114
4. 박종덕 (1996년), “현장계측에 의한 다층토류벽의 거동예상”, 충청전문대 논문집, pp.273-285
5. 한국소음진동공학회 (1995년), “소음-진동편람”
6. 박연수 등 (1988년), “건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구”, (주)대우엔지니어링 기술연구소