

# 고속철도 궤도 종류에 따른 허용침하량 분석

## Analysis of Allowable Settlement on Tracks of High Speed Railway

김 영 호<sup>1</sup> Kim, Young-Ho

정 상 섭<sup>2</sup> Jeong, Sang-Seom

설 훈 일<sup>3</sup> Seol, Hoon-Il

한 영 아<sup>4</sup> Han, Young-Ah

### Abstract

An application of concrete track is being actively processed for the construction of Korean high speed railway. The concrete track has an advantage in decreasing the maintenance cost, whereas it has much difficulty controlling the long term settlement after settlement occurred. Therefore, the management and control of settlement are very important for the successful construction of concrete track. The purpose of this paper is to verify the allowable settlement between concrete track and ballast track, and piled raft foundation installation effects as settlement reducers for concrete track. Therefore, a series of 3D finite element analyses that take into account the allowable settlement were performed for major parameters such as soil condition, pile installation and loading type. Based on the analysis, it is shown that concrete track causes much smaller settlement than ballast track, and the effect of installation is necessary to effectively reduce the settlement of concrete track.

### 요 지

본 연구에서는 고속철도 궤도의 종류에 따른 허용침하량 분포 특성을 분석하기 위하여, 기존 경부 고속철도에 사용되었던 자갈도상 궤도와 시공예정인 콘크리트 궤도의 대표단면 및 지반 물성치를 바탕으로 철도 운행 시 레일상부에서 열차하중에 의해 발생하는 침하량을 3차원수치해석을 통해 분석하였다. 특히 콘크리트궤도의 경우에는 원지반의 물성 변화에 따른 침하량 결과를 토대로 말뚝지지전면기초(pile raft foundation) 보강 시 침하 감소 효과를 분석 정리하였다. 본 연구결과, 원지반이 점성토에서는 콘크리트 궤도와 자갈도상 궤도의 사용에 따라 침하량의 차이가 컸으나, 사질토 지반의 경우는 궤도별 침하량 차이가 상대적으로 작게 나타났다. 또한 콘크리트 궤도 단면의 침하량 저감을 위한 말뚝 전면기초 시공의 경우, 무보강 단면의 해석결과보다 지지력이 확보되어 침하량 감소가 나타났으며, 말뚝의 길이가 증가될수록 침하량 감소 효과가 뚜렷하게 나타났다. 하중형태의 경우는 기존 설계에 사용되었던 객차 하중에 의한 침하량보다 기관차 하중에 의한 침하량이 더 크게 발생하여 기관차 하중을 통한 궤도 설계를 할 경우 좀 더 안전측 설계가 가능함을 확인할 수 있었다.

**Keywords :** Allowable settlement, Ballast track, Concrete trak, High speed railroad, Piled raft foundation

### 1. 서 론

경부고속철도를 시작으로 호남고속철도로 이어지는

철도 건설사의 큰 획을 긋는 고속철도 건설 사업이 진행 중에 있으며, 일반철도의 개량 및 전철화 사업 또한 활발히 이루어지고 있다. 이에 따라 철도운행의 안정성 및

1 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

3 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사후과정 (Member, Ph.D., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

4 한국철도도시공단 과장 (Head of a Department, Korea Rail Network Authority)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

유지보수의 경제성 등을 감안하여 다각적인 연구가 필요한 실정이다.

일반철도건설과 경부고속철도 1단계(서울~대구)건설시 사용된 자갈도상은 초기 건설비용이 적게 들고 침하발생시 쉽게 유지보수가 가능하나, 장기적인 관점에서서는 유지보수비를 많이 지출하게 된다. 유지보수비 절감 및 승차감, 열차운행 안정성 등을 고려하여 경부고속철도 2단계(대구~부산간), 호남고속철도 등의 건설 시부터는 콘크리트 궤도가 본격적으로 적용될 예정이다. 콘크리트 궤도는 열차운행 중 궤도의 변위나 틀림이 거의 발생하지 않아 궤도보수작업과 비용을 저감시킬 수 있으나, 궤도하부에 침하가 발생하였을 경우 유지보수가 어려운 구조이다. 따라서 침하량을 예측하고 발생을 막을 수 있는 지반 보강 대책공법에 대한 연구가 활발히 논의되고 있다.

국내의 경우 일반철도 궤도에 관한 연구는 많이 수행되었으나 상대적으로 고속철도에 관한 연구(이수형, 2005; 이일화, 2006; 최찬용, 2007)는 적게 수행되었으며, 아직 국내의 지반특성에 맞는 궤도의 허용침하기준이 명시되어있지 않은 관계로 대부분 외국 기준을 준용한 설계가 이루어지고 있는 실정이다. 또한 대부분의 고속철도 해석 시, 상부 하중으로 객차구간의 하중을 사용하고 있으나, 실제 기관차 하중으로 인한 해석도 간과할 수 없으므로, 기관차 하중 재하시의 침하량 발생 정도를 기존 해석방법과 비교, 검토할 필요가 있다. 따라서, 기존 경부 고속철도에 사용되었던 자갈도상 궤도와 시공예정인 콘크리트 궤도의 대표단면 및 물성치를 바탕으로 원지반조건을 변화시키면서, 열차하중에 의한 허용침하량을 3차원수치해석을 통해 분석하였으며, 콘크리트 궤도의 경우, 과도한 침하량이 발생하는 구간은 말뚝지지전

면기초(piled raft foundation)개념의 소구경 말뚝기초(PHC 파일)를 보강하여 침하 감소 효과 및 영향정도 검토하였다.

## 2. 고속철도 궤도 종류 및 허용침하량 기준

### 2.1 철도궤도 개요

현재 전 세계적으로 널리 적용되고 있는 궤도구조는 기존의 자갈도상 궤도(ballast track)와 콘크리트궤도로 대별된다.

종래는 주로 초기 투자비에 기초하여 자갈도상 궤도 위주로 평가(건설)되어 왔으나 날로 발전하는 철도수송의 역할로 차량중량의 증가, 열차속도의 향상, 열차밀도의 증대 등의 추세로 보수작업시간의 제약은 물론, 인건비의 상승과 노동력 수급곤란 등으로 상시 보수작업이 필요한 자갈도상 궤도의 특성상 보수와 갱신에 많은 어려움을 겪게 되었다.

이러한 자갈도상궤도의 문제점을 보완하고 자유로운 유지보수가 가능하도록 지향한 생력화궤도의 개발과 개량을 위해 세계 철도 선진국가들은 끊임없는 연구개발 및 개선노력을 기울여 왔으며, 현재 여러 구조형식들이 널리 채택되고 있다.

콘크리트궤도는 기존 재래 유형의 자갈도상궤도에 비해 초기건설비는 많이 소요되나 생애주기비용(LCC ; Life Cycle Cost)을 고려한 장기적인 경제성 차원에서는 오히려 자갈도상궤도 비용보다 저렴한 평가를 받고 있어 그 적용이 날로 확산되고 있는 추세이다. 표 1은 고속철도를 운영하고 있는 나라에서 채택하고 있는 궤도 구조를 정리한 것이다.

표 1. 한국 및 외국의 고속철도 궤도 구조(고속철도 전문시방서, 2003)

구 분	경부고속철도 (한국)	TGV (프랑스)	ICE (독일)	신간선 (일본)
레 일	60kg	60kg	60kg	60kg
침 목	길이 : 2.6m 간격 : 60cm 중량 : 300kg single block type	길이 : 2.4m 간격 : 60cm 중량 : 245kg twin block type	길이 : 2.6m 간격 : 60cm 중량 : 290kg single block type	길이 : 2.4m 간격 : 58cm 중량 : 318kg single block type
체 결 구	바클립	판스프링	바클립	판스프링
패 드	10mm 고무	9mm 고무	7mm 고무	7mm 고무
도 상	35cm	35cm	30cm	30cm
노 반	쇄석 강화노반	쇄석 강화노반	쇄석 강화노반	쇄석 및 슬래그 강화노반
궤도중심 간격	5m	4.2m	4.7m	4.3m

## 2.2 자갈도상 궤도

자갈도상궤도는 축조된 노반구조물 위에 레일과 침목을 결합시킨 구조체로 도상자갈은 완전한 탄성체가 아닌 탄성체의 결합으로서 탄소성 특성이 있으므로 반복하중이 가해지면 잔류변형이 축적되고 이로 인해 변위가 발생된다(정근영, 1999; 박용결, 2006). 이러한 변위는 열차의 고속주행과 고밀도 운행으로 가속되어 도상자갈의 세립화, 유동화 등과 함께 궤도파괴로 이어지게 되는데, 이러한 현상을 억제하기 위해서는 수시 보수작업이 필요하게 된다. 자갈도상궤도의 특성을 기술하면 표 2와 같으며, 경부고속철도 1단계구간에 적용한 자갈도상궤도구조의 표준단면은 그림 1과 같다.

## 2.3 콘크리트 궤도

콘크리트궤도는 무도상궤도, slab track, 직결궤도 등 여러 이름으로 불려진다. 표 2에 요약한 바와 같이, 콘크리트궤도는 자체강성 및 저항력이 크기 때문에 열차 운행 중 궤도의 변위나 틀림이 거의 발생하지 않아 궤도보수작업과 비용을 대폭 절감할 수 있을 뿐만 아니라 양호한 선형을 유지함으로써 이용 승객에게 좋은 승차감을 제공할 수 있는 장점을 갖고 있다. 전통적으로 부설되어 온 자갈도상궤도의 단점을 보완할 수 있는 대안적인 시스템으로 제시될 수 있을 뿐 아니라 생애주기비용(LCC) 측면에서도 유리한 것으로 평가(김만철, 2006; 김한중, 2006) 되고 있다. 콘크리트궤도구조는 그림 2와 같이 기

표 2. 궤도 종류에 따른 장·단점 비교

구분	장 점	단 점
자갈도상궤도	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 초기부터 널리 입증된 기술이다.</li> <li>▶ 초기건설비가 비교적 저렴하다.</li> <li>▶ 궤도선형 정정이 용이하다.</li> <li>▶ 배수성이 양호하다.</li> <li>▶ 탄성이 양호하다.</li> <li>▶ 소음감쇠가 양호하다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 도상저항력이 제한된다.</li> <li>▶ 도상입자의 분쇄로 레일·차륜의 손상이 우려된다.</li> <li>▶ 상시 유지보수노력이 필요하며 보수 시간의 제한 등 보수상의 애로가 많다.</li> </ul>
콘크리트궤도	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 유지관리가 용이한 구조이다.</li> <li>* (자갈도상궤도 보수비의 15% 정도)</li> <li>▶ 궤도강도와 저항력이 상대적으로 높다.</li> <li>▶ 구조물의 높이 및 중량이 감소된다.</li> <li>▶ 궤도의 변위가 적으며, 미세한 틀림에 대하여 정정이 가능하다.</li> <li>▶ 서비스 수명이 길고 차량주행시 매끄러운 주행면의 제공과 항상 좋은 선형이 유지된다.</li> <li>▶ 환경 친화적이다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 건설비가 높다.</li> <li>▶ 토공의 큰 변형에 대한 융통성이 적다.</li> <li>▶ 시공의 정밀성이 요구된다.</li> <li>▶ 배선변경 등이 어렵다.</li> <li>▶ 대량 수선작업시 많은 시간과 노력을 필요로 한다.</li> <li>▶ 자갈궤도에 비해 강성구조임으로 별도의 탄성대책이 수반되어야 한다.</li> </ul>

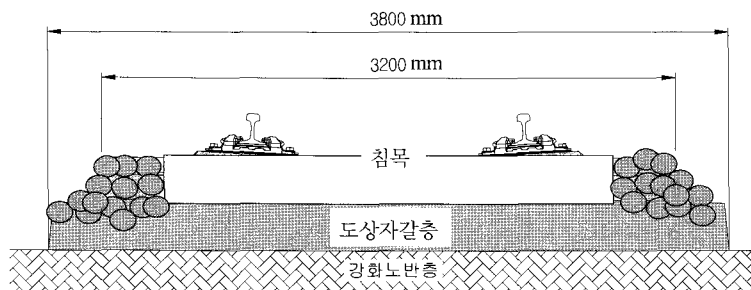


그림 1. 경부고속철도 1단계구간 자갈도상궤도구조 표준단면

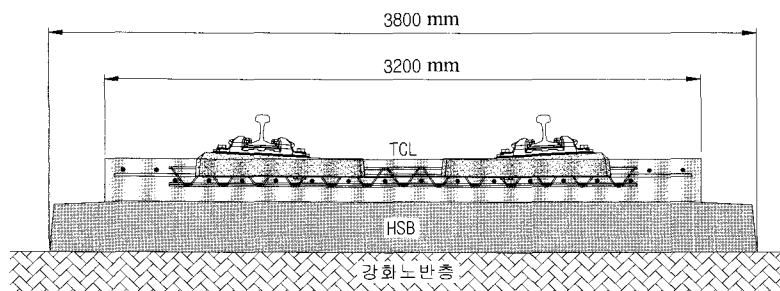


그림 2. 경부고속철도 2단계구간 기본 콘크리트궤도구조

본적으로 도상콘크리트(T.C.L : track concrete layer), 노반강화 콘크리트(H.S.B : hydraulically Stabilized Base)가 지표 상부에 설치되며, 지표 하부에 열차의 주행 안정성 확보와 궤도 상부로부터 전달된 하중을 하부 지반으로 적절히 분산하기 위하여 강화노반이 설치된다. 이러한 중요성으로 인하여, 많은 연구자들(이일화, 2000; 조삼덕, 2002; 김대상, 2005)에 의해 모든 철도 궤도를 대상으로 강화노반의 연구가 진행되어왔으며, 그 결과, 강화노반의 강성 결정이 가장 중요한 요소로 판단되어지고 있다. 강화노반의 재료로는 일본의 경우 쇄석, 아스팔트 콘크리트와 고로슬래그가 사용되고 있으나, 국내에서는 현재 입도 조정된 쇄석만을 사용하고 있다.

### 2.4 고속철도 궤도의 허용침하량 기준

고속철도 궤도는 자중 및 열차하중에 의한 장기 침하를 가급적 억제할 수 있는 내구성이 높은 토공을 건설하여 궤도보수량을 저감시킬 수 있어야 한다. 이를 위하여 궤도 구조에 과도한 응력과 변형이 발생하지 않도록 노반이 충분한 강성을 확보하여야 한다. 또한 자중 및 열차하중에 의하여 발생하는 장기 침하를 작게 하고 내구성이 높은 설계 및 시공을 위하여 적절한 재료를 선택하여 관리하여야 한다. 그리고 노반 아래의 잔류침하가 궤도의 경제성, 안전성을 고려한 침하량 이하가 되어 열차주행 시, 과도한 변형이 발생하지 않도록 해야 한다. 표 3은 국내외의 궤도형식별 허용잔류침하량을 정리한 것이다. 콘크리트 궤도의 경우, 국내 기준이 명확하게 확립되어 있지 않아서, 국외 기준을 바탕으로 설계가 진행되고 있는 실정이다.

표 3. 궤도 형식 별 허용잔류침하량(고속철도 설계기준, 2005)

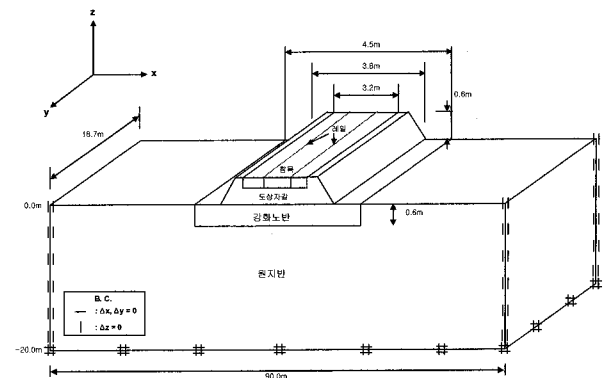
자갈궤도용	콘크리트궤도용
	1. 독일 기준 노반 구축 후 허용잔류침하량 15mm 궤도 부설 후 허용잔류침하량(열차하중 포함) 20~30mm 20m 이상 균등침하 시 30mm까지 허용 분지형 침하 시 최대허용잔류침하량 60mm 2. 일본 기준 궤도 구축 후 10년간 10mm이하 최대영구침하량 30mm 3. 대만 기준 20m 이상 균등 침하 시 10mm 이하 4. 국내 기준(호남 고속철도 설계지침 노반편, 2007) 궤도 시공완료 후 허용잔류침하량 30mm
허용잔류침하량 100mm	

## 3. 3차원 유한요소해석

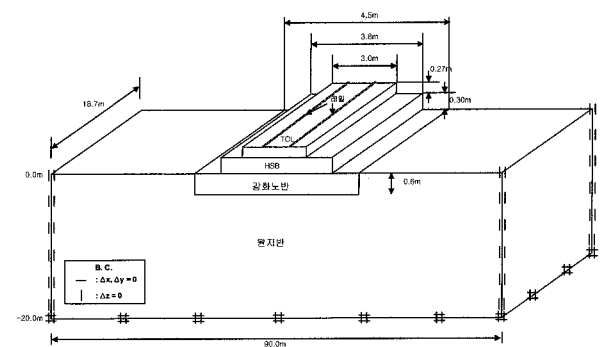
### 3.1 고속철도 궤도 모델링

궤도의 허용 침하량 산정 및 안정성을 평가하기 위해 본 연구에서는 PLAXIS사에서 개발한 PLAXIS 3D Foundation (PLAXIS ver 2.0, 2006)을 사용하였다. 모델링은 기존에 사용되어지는 자갈도상 궤도와 콘크리트 궤도를 대표 해석단면으로 결정하였으며, 각 궤도별 모델링 모식도는 그림 3에 나타내었다.

지표 하부에 0.6m 두께의 강화노반이 설치되고 자갈도상 궤도의 경우는 도상자갈과 침목이, 콘크리트 궤도의 경우는 H.S.B.와 T.C.L.이 차례되로 시공되는 경우를 대상으로 모델링 하였다. 모델링 경계범위는 일반적인 단선 궤도 폭과 한량의 대차에 의한 영향 범위 및 강화노반의 넓이를 고려하여 전체 폭 90m, 길이 18.7m로 결정하였다. 원지반은 지표면으로부터 20m로, 상부 열차하중 및 말뚝 시공에 따른 최대 영향거리를 고려하여 산정하였으며, 전체가 균질한 층으로 가정하여 해석하였다. 경계조건은 각각의 수직면에 대해서는 수평방향 변위 구속을 하였고 저면부는 수직방향 변위 구속을 하



(a) 자갈도상 궤도



(b) 콘크리트 궤도

그림 3. 모델링 대표 단면

여 모델링하였다.

강화노반 및 상부 구조물은 고속철도 전문시방서를 준용하여 대표적인 고속철도 설계 물성값을 사용하였다. 유한요소 해석 시 원지반, 강화노반 및 도상자갈은 실무에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 말뚝 전면기초와 TCL, HSB는 Linear-Elastic 모델을 적용하였다. 또한 레일은 빔(Beam) 유한요소를 이용하여 모델링하였으며, 레일 상부에 열차하중을 가하여 열차하중이 하부로 전달되도록 하였다. 이를 종합하여 정리하면 표 4와 같다.

### 3.2 말뚝기초 모델링

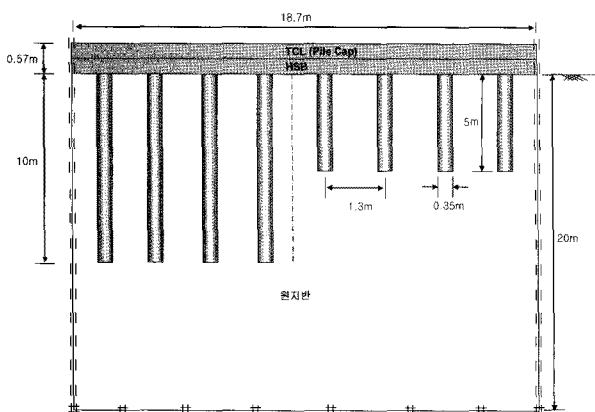
콘크리트 궤도의 경우, 상부 콘크리트 슬래브(HSB, TCL)만으로 적정 침하량 수준을 유지하지 못하는 경우에 한하여, 말뚝전면기초(piled raft foundation)를 설치하여 그에 따른 침하량 저감효과를 분석하였다. 본 연구에 사용된 말뚝 전면기초는 상부 구조물로부터의 하중을 말뚝캡(Raft)과 말뚝이 동시에 지반에 전달하는 기초

형태로 기존의 무리말뚝과 달리 말뚝캡이 지반과 접촉하여 하중을 분담한다는 것을 전제로 하고 있으며, 최근 국내에서도 많은 연구(김경남, 1999; 김명모, 2000; 이진형, 2007)가 진행되고 있는 기초 형태다.

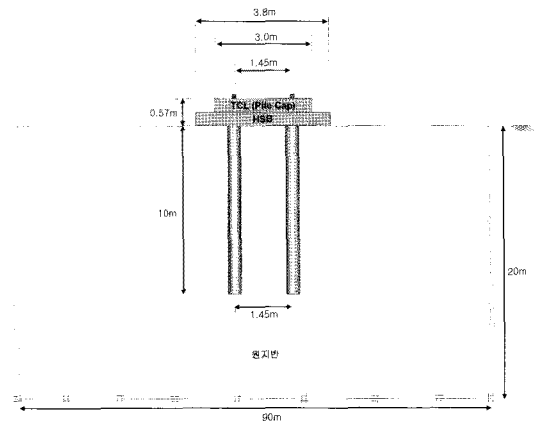
말뚝 전면기초는 설계의 기본적인 접근방식에 따라 두 종류로 나눌 수 있다. 첫번째는 전통적인 방식으로, 기초는 본질적으로 무리말뚝으로 설계되며 정상적인 안전율이 적용된다. 이 때 말뚝은 raft 하부 전체에 등간격으로 배치되며, 말뚝캡은 실질적으로 전체하중의 10~20%정도를 분담하게 된다. 두번째는 말뚝캡만으로도 지지력은 충분하나 과도한 침하가 예상되는 경우, 말뚝을 침하를 감소시키기 위해 이용하는 것이다. 이 경우 말뚝은 침하량 조절을 위해 국부적으로 배치되며, 때로는 위치에 따라 말뚝 길이를 변화시키는 경우도 있다. 말뚝은 사용하중 하에서 지지력이 충분히 발휘되도록(극한하중의 70~80%)설계된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 설계방법에 따라, 과도한 침하량이 발생하는 해석 케이스에 한하여, 그림 4와 같이, 콘크리트 슬래브

표 4. 해석에 적용된 재료 물성

구분 (층 두께)	Model	단위체적중량 (kN/m <sup>3</sup> )		점착력 (kN/m <sup>2</sup> )	내부 마찰각 (deg)	탄성계수 (MPa)	포아송비
		Wet	Sat.				
도상자갈 (0.54m)	M.C.	19	19	0	35	133.9	0.3
강화노반 (0.60m)	M.C.	19	19	0	35	120	0.3
HSB (0.30m)	L.E.	25	25	-	-	10000	0.2
TCL (0.24m)	L.E.	25	25	-	-	29100	0.2
침목 (0.21m)	L.E.	25	25	-	-	20000	0.167
PHC 말뚝	Pile	25	25	-	-	35000	0.2
구분	Model	단면적(m <sup>2</sup> )		단면2차모멘트(m <sup>4</sup> )		탄성계수	포아송비
레일	Beam	7.75×10 <sup>-3</sup>		3.09×10 <sup>-5</sup>		210000	0.3



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 4. 말뚝전면기초 모델링

하부에 5m와 10m의 PHC(φ350) 말뚝을 등 간격(3.7D)으로 설치하여 말뚝전면기초를 모델링 하였다. 개개의 말뚝 모델링은 PLAXIS 3D Foundation에서 제공되는 말뚝 요소를 사용하였으며, 말뚝캡의 경우 HSB층 및 TCL층을 말뚝 캡으로 사용하여 모델링하였다.

### 3.3 해석적용 지반 정수

실제 설계 시, 본 연구의 해석 결과가 현장 지반 종류에 따른 참고 값으로 최대한 반영될 수 있도록 대표적인 비배수전단강도( $c_u$ )와  $N$ 치에 따라 탄성계수( $E$ )값을 산정하여 원지반을 점성토와 사질토 단일 지반으로 각각 느슨 ~ 조밀, 연약 ~ 견고의 단계로 나누어 침하량 분석을 수행하였다. 특히 점성토의 경우, 배수물성을 사용하였으며, 이는 도로교 설계 시방서(2001)방법에 따라, 다음 식과 같이 비배수 물성으로부터 배수물성을 산정하였다. 해석에 적용한 지반 물성 값은 표 5와 같다.

$$E_u = (150 \sim 200) \times c_u \quad (1)$$

$$G_u = \frac{E_u}{2(1+\nu_u)} = \frac{E'}{2(1+\nu')} = G' \quad (2)$$

여기서,  $c_u$  : 비배수전단강도(연약점토 25kPa, 보통점토

40kPa, 견고점토 60kPa)

$E_u$  : 지반 탄성계수(비배수)

$\nu_u$  : 포아송비(비배수), 0.5

$G_u$  : 전단변형계수(비배수)

$E'$  : 지반 탄성계수(배수)

$\nu'$  : 포아송비(배수), 0.3

$G'$  : 전단변형계수(배수)

### 3.4 열차하중 산정

레일상부에 작용하중으로는 고속열차 대차 1대의 주행하중을 대차간격 2.6m를 고려하여 정적 집중하중으로 환산하여 산정하였다. 또한 본 연구에서는 그림 5와 같이, 기존에 연구되어왔던 객차 중심의 하중 산정 모델링 이외에 축이 객차의 2배인 기관차 구간의 하중 모델링을 추가하여 분석하였다.

고속열차의 정적 축중은 열차 무계를 축의 개수로 나누어 산정되며 KTX의 경우 170kN이다. 정적 윤중은 정적 축중의 1/2이며, 열차하중의 동적 효과를 고려하여 산정되는 주행윤하중( $P_d$ )은 정적윤중 ( $P_s$ )에 열차속도의 함수인 속도 충격률을 곱하여 구할 수 있다.

일반적으로 장대레일에 적용하는 충격계수(1+0.3V/100)는, 변동하는 주행 윤하중 실측치를 토대로 결정된 변동계수(표준편차의 평균값에 대한 비)로, 일본에서 사용하고 있는 열차속도(V)에 따른 상한값 1.8을 적용한다. 본 연구의 경우, 고속열차 설계속도 300km/hr를 열차속도로 가정하여 주행윤중을 산정하면 충격률 상한값 1.8이 적용되어 아래의 식 (3)과 같이 주행윤하중을 산정할 수 있다.

$$P_d = P_s \times [1 + 0.3V/100 \text{ 또는 } 1.8] = 85 \times 1.8 = 153 \text{ kN} \quad (3)$$

여기서,  $P_d$  : 주행윤중

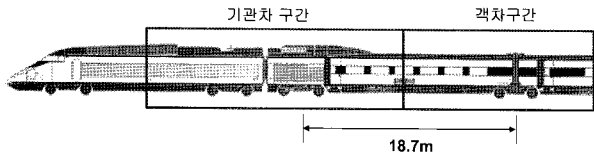
$P_s$  : 정적윤중

V : 열차속도(km/h)

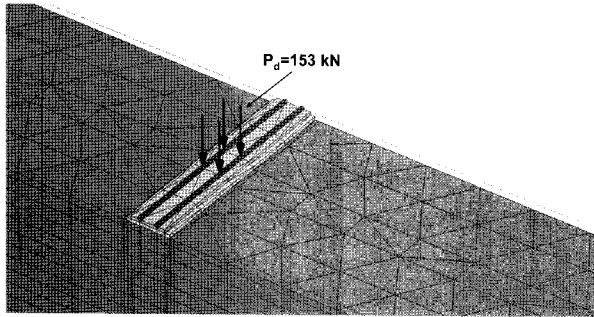
결정된 주행윤중은 해석대상의 축 개수에 따라 객차 구간의 경우 레일 상부 4지점(그림 5b)에 재하 하였고, 기관차 구간의 경우는 레일 상부 8지점(그림 5c)에 정적 집중하중으로 재하하였다.

표 5. 해석에 적용된 지반물성

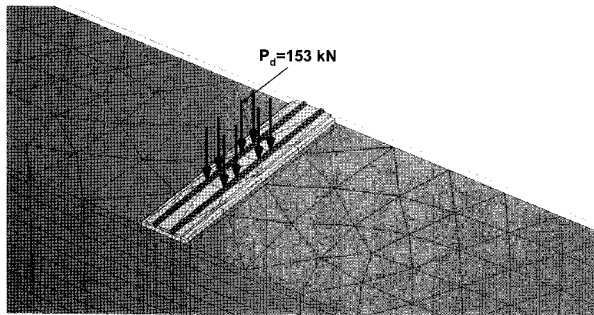
지반정수	흙의종류	점성토			사질토		
		연약	중간	견고	느슨	중간	조밀
탄성계수 (MPa)		3.25	5.20	7.8	10	30	50
접착력 (kN/m <sup>2</sup> )		0.3	0.8	5	0.001	0.001	0.001
내부마찰각 (deg)		21	22	25	30	30	35
단위체적중량 (kN/m <sup>3</sup> )		17.5	17.5	18	18	18	18.5
포아송비		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3



(a) 전체 구간



(b) 객차 구간(4축)



(c) 기관차 구간(8축)

그림 5. 고속철도 하중 선정

### 3.5 수치해석 방법과 절차

선정된 모델링 방법을 바탕으로 지반조건에 따른 자갈도상 궤도와 콘크리트궤도의 침하량 및 말뚝 전면기초의 설치효과 분석을 위해 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 우선, 원지반을 연약, 중간, 견고의 점성토와 중간, 느슨, 조밀의 사질토로 강도에 따라 분류하여 동일하중 재하시의 궤도별 침하량 발생 정도를 분석하였다. 원지반 조건에 따른 침하량 발생정도를 바탕으로 과도한 침하가 발생하는 콘크리트 궤도의 경우 추가로 5m와 10m 말뚝을 시공하여 그때의 침하량 저감 정도를 파악하였다. 정확한 해석을 위하여, 본 연구에서는 대표 단면을 기초로 초기단계(initial State)에서 강화노반 궤도준설, 말뚝시공, TCL 및 HSB 설치, 시공까지 이르는 시간경과에 따른 일련의 시공단계를 해석단계별로 모사하였다. 그리고 실제의 시공과정을 시간에 따라 모사하기 위해 일반적인 고속철도 현장의 시공일지를 바탕으로 시공단계별 경과시간을 본 해석에 반영하였다. 본 연구에서 수행한 수치해석 case는 표 6에 정리하였다.

### 4. 해석결과 및 분석

본 연구에서는 시공과정에 따른 레일 두부에서의 침하량에 따른 안정성을 평가하기 위하여 일반철도 궤도 정비보수기준을 준용하여 궤도 침하량에 대한 기준을 표 7과 같이 사용하였다.

표 6. 유한요소해석을 통한 해석 cases

궤도 분류	자갈도상 궤도						콘크리트 궤도					
	원지반조건			점성토			점성토			사질토		
	연약	중간	견고	연약	중간	견고	연약	중간	견고	연약	중간	견고
말뚝 미설치	O*	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
5m PHC말뚝 설치	-	-	-	-	-	-	O	O	O	O	X	X
10m PHC말뚝 설치	-	-	-	-	-	-	O	O	X*	O	X	X

\*Note: O : 해석 수행

X : 말뚝전면기초 설치 없이도 과도한 침하가 발생하지 않는 경우로 해석하지 않음.

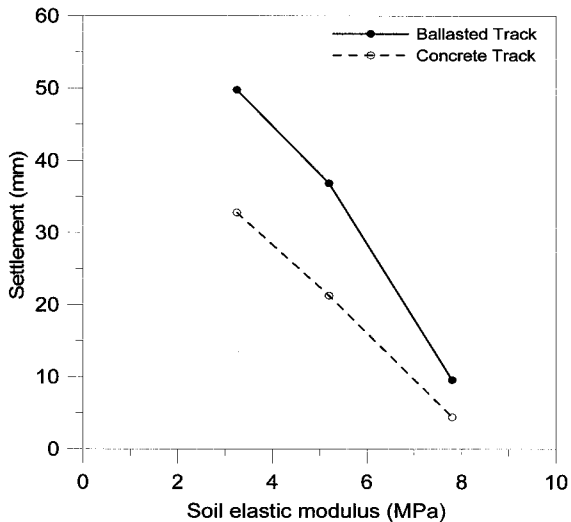
표 7. 궤도틀림관리기준(단위 mm)

구분	1단계(시급보수)		2단계(우선보수)		3단계(정상보수)		정비 목표치
	자갈궤도	콘크리트궤도	자갈궤도	콘크리트궤도	자갈궤도	콘크리트궤도	
궤간	+18, -2	+14, -2	+14, -2	+10, -2	+10, -2	+7, -2	±2
수평	16	12	12	7	7	4	3
줄	16	12	12	7	7	4	4
면	16	12	12	7	7	4	3
평면	16	12	12	7	7	4	3

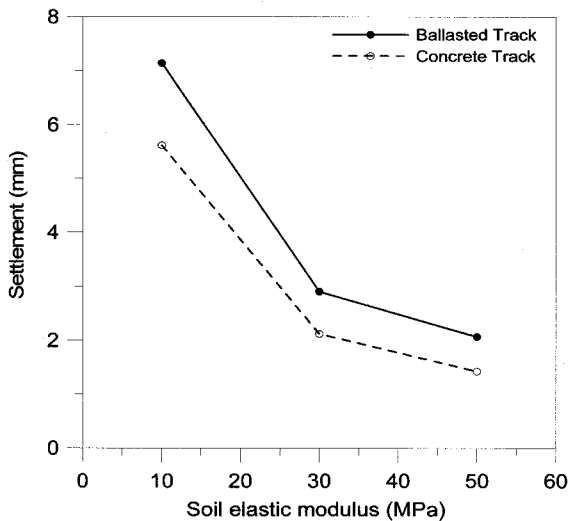
Note : 자갈도상궤도는 일반철도 궤도정비 기준을 준용하였으며, 콘크리트 궤도는 일반철도 궤도정비기준을 1단계씩 상향 조정하였다.

#### 4.1 고속철도 궤도에 따른 침하량 분석

그림 6은 원지반 물성(점성토, 사질토)에 따른 궤도별 침하량을 나타낸다. 전체적인 침하량 발생 정도는 콘크리트 궤도가 자갈도상 궤도보다 작게 나타났으며, 두 궤도 모두 원지반이 연약점토(3.25MPa)에서 보통점토(5.20MPa)사이의 물성을 가질 때 과도한 침하량이 발생하였으며, 견고점토(7.85MPa)로 지반이 바뀌면서 급격



(a) 점성토 지반



(b) 사질토 지반

그림 6. 궤도에 따른 허용침하량 분포

히 침하량이 감소하였다. 사질토의 경우는 지반이 느슨(10MPa)에서 조밀(50MPa)로 강도가 증가함에 따라 선형적으로 서서히 감소하였으며, 점토층과 비교하였을 때 침하량의 크기는 일반 침하기준인 10mm를 모두 만족하는 정도로 작았다. 또한, 중간이상의 사질토(>30MPa)의 경우 보수기준 4mm를 만족하므로 추가적인 말뚝 설치와 같은 침하 억제 공법의 적용 없이도 허용 침하 기준을 만족시키는 것을 알 수 있다. 따라서 표 8과 같이, 두 단면 모두 침하량 감소를 위한 원지반 개량 시 견고한 점토 이상의 물성값을 가지는 지반으로 개량하여야 효과적인 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4.2 말뚝전면기초 설치시의 허용 침하량 분석

레일 보수기준 4mm를 만족하지 못하는 점성토와 느슨한 사질토를 대상으로 하여 그림 7과 같이 콘크리트 궤도 하부에 5m, 10m 길이의 말뚝(PHC 말뚝,  $\phi 350$ ) 설치에 따른 침하량 저감 효과를 분석하였다.

분석 결과, 대체적으로 5m 길이의 말뚝 보강 시 일반적인 허용침하량 기준인 10mm를 만족시키는 것으로 나타났다으며 말뚝길이가 5m에서 10m로 늘어남에 따라 말뚝 보강에 따른 침하량 저감효과는 증가하여 연약점토를 제외하고는 보수기준인 4mm를 거의 만족하였다. 따라서 연약 점토의 경우는 말뚝기초의 시공을 통한 침하량 저감보다는 지반개량을 통한 지반의 강도 증가가 더 효율적일 수 있으므로 두 방법의 경제성 검토가 필요할 것으로 판단된다. 해석 결과는 표 9에 정리하였다.

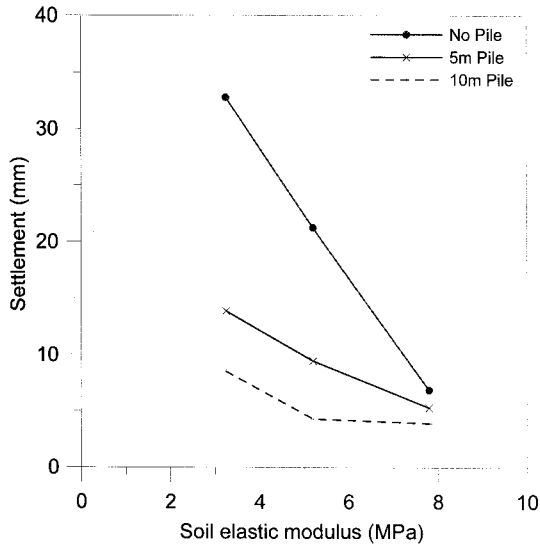
#### 4.3 기관차 하중 재하시의 허용 침하량 분석

그림 8은 상부 하중으로 기관차 하중을 재하한 경우의 레일 상부의 침하량과 기존 해석 방법인 객차 하중 재하시의 침하량을 비교한 것이다. 분석결과, 기관차 하중 재하시의 해석결과는 축의 개수가 객차에 비해 많기 때문에, 침하량도 훨씬 크게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 고속철도 설계 시 객차 구간 뿐 아니라 기관차 구간의 거동 분석도 면밀히 이루어져야 할 것으로 판단

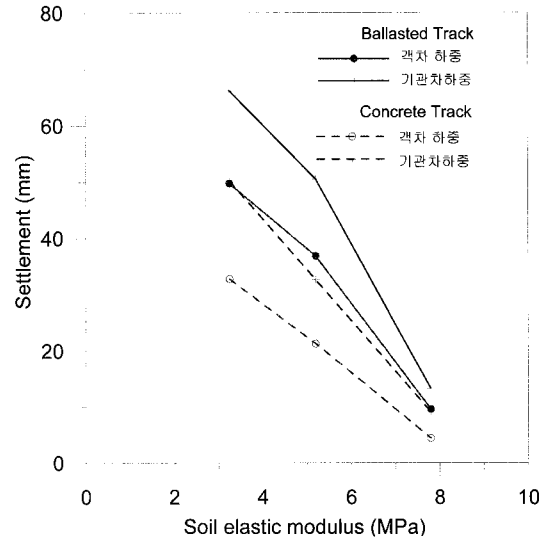
표 8. 궤도별 허용 침하량 결과

궤도형식	지반분류	점성토 침하량(mm)			사질토 침하량(mm)		
		연약	중간	견고	느슨	중간	조밀
		3.25MPa	5.20MPa	7.8MPa	10MPa	30MPa	50MPa
콘크리트도상		32.81	21.26	6.87	5.61	2.12	1.42
자갈도상		49.76	36.87	9.59	7.14	2.91	2.06

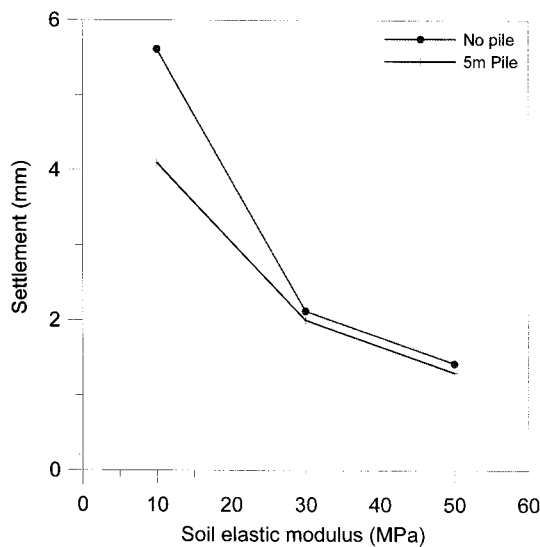




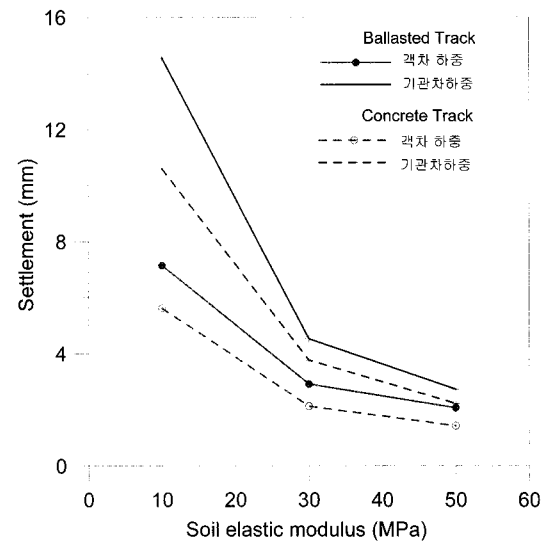
(a) 점성토 지반



(a) 점성토 지반



(b) 사질토 지반



(b) 사질토 지반

그림 7. 콘크리트 궤도의 말뚝 설치에 따른 허용침하량 분포

그림 8. 궤도 조건 및 하중에 따른 침하량 분포

표 9. 말뚝 설치에 따른 허용 침하량 결과

해석단면	말뚝길이 (m)	말뚝길이에 따른 침하량(mm)			
		연약점토 (3.25MPa)	중간점토 (5.2MPa)	건고점토 (7.8MPa)	느슨한 사질토 (10MPa)
콘크리트궤도	5m	13.69	9.45	5.26	4.2
	10m	8.52	4.31	3.14	2.91

되며, 두 구간의 하중 분포가 적절히 고려된 침하량 기준 및 하중 산정 방법의 연구도 앞으로 수행되어야 할 과제로 판단되어진다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기존 고속철도에 사용되었던 도상자갈 궤도와 시공예정인 콘크리트 궤도의 대표단면 및 지

반 물성치를 바탕으로 철도 운행 시 레일상부의 침하량 검토를 수치해석으로 분석하였으며, 특히 원지반물성에 따라 허용 침하량 기준인 10mm와 더 나아가서 보수기준 4mm를 만족시킬 수 있는 설계방법 제안에 중점을 두었다. 이상의 분석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 원지반 물성이 연약 점성토에서 조밀한 사질토로

변할수록 레일 상부의 침하량이 점점 감소하였으며, 같은 원지반 조건 하에서, 자갈도상 궤도와 콘크리트 궤도의 침하량을 비교한 결과, 대체적으로 콘크리트 궤도의 침하량 발생량이 자갈도상 궤도보다 작게 나타나, 콘크리트 궤도의 궤도 자체 침하량 저감효과가 더 뛰어난 것으로 분석되었다.

- (2) 말뚝 전면기초 시공에 따른 콘크리트 궤도의 침하량 저감효과는 말뚝 시공전과 비교하여 확연하게 나타났으며, 말뚝 길이가 길어짐에 따라 더 큰 지지력을 확보하게 되어 침하량 저감 효과가 증대되는 것으로 나타났다. 하지만, 연약점토 지반의 경우, 10m 말뚝을 설치하여도 허용 침하 기준이 10mm를 만족하지 못하므로, 지반이 너무 연약한 경우는 말뚝 시공보다는 지반 개량을 통한 지반 강도 증대의 방법이 더 효율적일 수 있으므로 두 방법의 경제성 검토가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 기관차 구간과 객차 구간의 침하량을 비교한 결과 기관차 해석구간의 침하량이 객차보다 크게 산정되었으며 이는 기관차 구간의 축의 개수가 객차보다 많기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 따라서, 향후 고속열차 설계 시, 획일적인 객차 구간 하중을 통한 설계 방법 보다는 기관차 구간의 하중 분포도 고려된 침하량 기준 및 하중 산정 방법 등이 연구되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2001), 도로교 설계시방서.
2. 김경남, 이수형, 정충기, 이해성 (1999), "Piled Raft 기초의 부등침하 최소화를 위한 최적말뚝배치", *대한토목학회논문집*, pp.831-839.
3. 김대상, 박영근, 하태욱, 신민호 (2005), "수치해석을 통한 일반 철도의 강화노반 침하량 및 수직응력 평가", *한국철도학회논문집*, pp.24-29.
4. 김만철, 장승엽 (2006), "고속철도 터널에서의 궤도 형식에 따른 궤도와 차체의 진동 특성", *대한토목학회논문집*, pp.125-132.
5. 김명모 (2000), "Piled Raft 기초", *말뚝기초 학술발표 논문집*, pp.31-49.
6. 김한중, 이상진, 김재학, 박대근 (2006) "콘크리트궤도 적용을 위한 궤도/노반 인터페이스 검토", *한국철도학회논문집*, pp.24-32.
7. 이수형 (2005), "수치해석을 통한 콘크리트궤도 침하감소 목적의 말뚝기초 설치효과", *한국지반공학학회 학술발표 논문집*, pp.73-83.
8. 이일화, 김현기, 황선근, 조용권 (2000), "고속전철 강화노반의 침하특성에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, pp.681-690.
9. 이일화, 이수형, 강원석 (2006), "고속철도 콘크리트 궤도용 흙노반의 거동 특성", *한국철도학회논문집*, pp.298-304.
10. 이진형 (2007), "Nonlinear Three Dimensional Analysis of Settlement of Piles raft in Clay Soils", 박사학위 논문, pp.10-78.
11. 정근영, 김현기, 이종득 (1999), "도상자갈의 마모/파쇄 특성", *한국철도학회논문집*, pp.61-69.
12. 조삼덕, 윤수호, 김진만, 정문경, 김영운 (2002), "연약지반상 고속철도 노반 축조시 지오셀 시스템의 효과", *한국지반공학학회 논문집*, pp.5-12.
13. 철도총합기술연구소 (1992), 철도구조물 등 설계기준 및 동해설 도구조물편, 일본철도총합기술연구소.
14. 최찬용, 이성혁, 황선근 (2007), "철도하중에 따른 강화노반 두께별 토압 특성", *대한토목학회논문집*, pp.217-224.
15. 한국철도시설공단 (2003), 고속철도 전문시방서, 한국철도시설공단.
16. 한국철도시설공단 (2005), 고속철도 설계기준 노반편, 한국철도시설공단.
17. 한국철도시설공단 (2006), 경부고속철도 대구~부산간 궤도공사 시방서. 한국철도시설공단.
18. 한국철도시설공단 (2007), 호남고속철도설계지침 노반편, 한국철도시설공단.
19. PLAXIS 3D Foudnation (2006), Program manual, version 2, PLAXIS Inc.

(접수일자 2008. 3. 14, 심사완료일 2008. 11. 4)