R&D
13PRTD
-C059
777-03

국토교통기술촉진연구사업

R&D/13PRTD-C059777-03

최종보고서

2014

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

콘크리트궤도가 부설된 철도교량상 장대레일 축력저감 및 단부 사용성 확보를 위한 한국형 횡단궤도시스템 개발

최종보고서

2014. 11. 28

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 서울과학기술대학교 산학협력단
공동연구기관 / (주)삼현피에프
공동연구기관 / 한국철도시설공단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

이 보고서를 “콘크리트궤도가 부설된 철도교량상 장대레일 축력저감 및 단부 사용성 확보를 위한 한국형 횡단궤도시스템 개발” 연구과제의 최종보고서로 제출합니다.

2014. 11. 28.

주관연구기관명 : 서울과학기술대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 연구책임자 박 용 걸
연 구 원 : 선임연구원 최 정 열
〃 : 연구보조원 김 정 혁
〃 : 연구보조원 서 종 민
〃 : 연구보조원 유 영 준
〃 : 연구보조원 박 세 웅
〃 : 연구보조원 김 광 우
〃 : 연구보조원 조 가 영
공동연구기관명 : ㈜ 삼현피에프
공동연구책임자 : 공동연구책임자 김 충 언
공동연구기관명 : 한국철도시설공단
공동연구책임자 : 공동연구책임자 이 광 재

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>13PRTD-C
059777-03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2011.09.30.~
2014.10.31.</td><td>단 계 구 분</td><td>(3단계)/
(총 3년)</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="4">콘크리트궤도가 부설된 철도교량상 장대레일 축력저감 및 단부 사용성 확보를 위한 한국형 횡단궤도시스템 개발</td></tr>
<tr><td>단위과제명</td><td colspan="4">주관 : 횡단궤도시스템 KR 철도시설성능검증 및 현장 적용 시 제품 보완설계/시공방안
공동 : 횡단궤도시스템 현장부설용 시제품 제작 및 횡단궤도시스템용 받침개발
공동 : 현장 시험부설 승인</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>박 용 걸</td><td>총연구기간
참여
연구원수</td><td>총 : 28명
내부 : 26명
외부 : 2명</td><td>총연구비</td><td>정부:630,000천원
기업:270,000천원
계:900,000천원</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2" rowspan="2">서울과학기술대학교
산학협력단</td><td rowspan="2">참여기업명</td><td colspan="2">㈜ 삼현피에프</td></tr>
<tr><td colspan="2">한국철도시설공단</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명 :</td><td colspan="3">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요 약</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">본 연구에서 연구한 횡단궤도시스템은 철도교량상 단부 궤도의 사용성 확보를 위해 교량 단부 궤도에 설치되는 신형식 궤도구조로써 철도교량상 궤도-교량 상호작용력(단부 부상력, 압축력)에 대한 궤도구성품의 안전성, 사용성 및 열차 주행안정성을 확보하기 위해 개발되었다. 저부에 포트받침을 설치하여 교량상판과 궤도구조를 구조적으로 분리시키는 시스템으로써 교량-궤도 상호작용력 저감에 매우 유리한 시스템으로 설계속도 및 대상교량의 경간장, 신축량 등에 따라 적절한 시스템 설계가 가능하여 모든 교량구간에 적용이 가능함을 실험 및 해석적으로 검증하였다. 또한 본 연구에서는 횡단궤도시스템의 주요특징을 서술하고 성능검증의 범위 및 방법을 제시하였으며 시스템 설계, 구조안정성 및 단부 궤도-교량 상호작용력 저감을 위한 횡단궤도시스템의 적용 효과를 분석하였고 현장시험시공이 가능하도록 호남고속철도 교량상 궤도표준도를 바탕으로 실시설계에 준하는 시스템 설계를 실시하여 횡단궤도시스템의 구성요소 설계결과와 조립성능시험결과를 비롯하여 시공 및 유지보수방안, 시스템 인터페이스 검토 등 종합결과를 제시하여 향후 현장시험시공을 위해 횡단궤도시스템의 구조적 성능 및 장기내구성능을 확인함으로써 철도시설로써의 시스템의 성능 및 적정성을 검증하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">철도교량 단부, 궤도-교량 상호작용력, 횡단궤도시스템, 부상력, 압축력</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Railway bridge deck end, Track-bridge interaction forces, Transition track system, Uplift force, Compression force</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

콘크리트궤도가 부설된 철도교량상 장대레일 축력저감 및 단부 사용성 확보를 위한 한국형 횡단궤도시스템 개발

Ⅱ. 연구개발과제 개요(목적, 필요성, 범위 등을 기술)

가. 연구개발 목적

본 연구에서는 해외 철도선진국에서 사용하고 있는 철도교량 단부 횡단궤도시스템에 대한 벤치마킹을 통해 국내 현장 적용성에 대해 검토하였으며, 철도교량 단부 궤도시스템의 구조적 안전성 및 결함을 최소화하고 철도교량 설계의 제약요인을 해소함으로써 철도교량의 장대화에 기여하고자 한다. 또한 열차하중 및 자중 등에 따른 교량단부의 회전 및 이와 결부되어 발생하는 철도교량 단부 궤도에 작용하는 부상력과 압축력 및 신축거동 등과 같은 콘크리트궤도가 부설된 철도교량구조에서 해결해야할 구조적인 문제를 횡단궤도시스템의 자체적인 신축거동 및 추가 작용력 완화(소멸)기능을 통해 단부에 작용하는 부반력 거동을 상쇄시켜 철도교량 및 궤도설계 시 일반구간과의 설계 일관성을 확보할 수 있는 한국형 교량단부 횡단궤도시스템을 개발하여 그 적용성에 대해 검토하고자 한다.

나. 연구개발의 필요성

콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부에서는 열차하중에 의한 단부회전각 발생, 교량기초의 침하 및 교량 상판의 상·하연 온도차 등에 의해 교량 상판이 정, 동적으로 거동하게 되어 단부 궤도가 변형되고, 이러한 궤도의 변형은 궤도 구성품(레일 및 레일체결장치)에 직접적인 상호 작용력으로 작용하게 된다. 교량 단부회전은 교량 위에 부설된 레일의 곡률을 유발시키고 이러한 레일의 변형과정에서 교량측과 교대측 레일지지점에는 각각 압축력과 상향력이 발생하게 된다. 이에 철도교량 단부 궤도의 성능개선을 위해 독일 및 오스트리아를 비롯한 유럽과 중국 철도에서는 각국의 철도

환경에 맞게 횡단궤도시스템을 개발하여 적용되고 있다.

국내에서는 한국철도시설공단에서 발주하여 한국철도기술연구원에서 수행한 “콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구 용역(설계지침)” 결과보고서 내용에 이러한 독일의 횡단궤도시스템과 관련된 내용이 “교량단부 사용성 향상을 위한 방안”으로 간단하게 소개된 바 있으나 구체적인 단면이나 성능수준 등과 같은 내용은 없으며 이에 대한 연구개발 사례 역시 없는 실정이다.

다. 연구범위

횡단궤도시스템은 철도교량상 단부 궤도의 사용성 확보를 위해 교량 단부 궤도에 설치되는 신형식 궤도구조로써 철도교량상 궤도-교량 상호작용력(단부 부상력, 압축력)에 대한 궤도구성품의 안전성, 사용성 및 열차 주행안정성을 확보하기 위해 개발되었다. 본 연구에서는 국내·외 관련기술 동향조사 및 분석, 철도교량 단부 궤도의 역학적 거동특성 분석, 횡단궤도시스템의 설계 및 구조안정성 검토를 비롯하여 공인시험기관(KOLAS)에서 수행한 실대형 조립성능검증시험 및 평가 결과를 수록하였다.

단부 궤도-교량 상호작용력의 발생수준을 획기적으로 저감시킬 수 있는 한국형 횡단궤도시스템의 표준단면과 성능요구조건을 도출하였고 한국철도시설공단의 철도시설성능검증 심의(기술요건 적합성)를 통과함으로써 철도시설로써의 적정성을 입증하였다.

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과

본 연구의 주요 연구내용 및 결과는 다음과 같다.

가. 연구개발 수행내용

(1) 횡단궤도시스템 적용 전, 후의 철도교량 단부의 역학적 거동특성 분석
- 횡단궤도시스템 설계 및 정, 동적 구조안정성 검토
- 횡단궤도시스템 실내검증시험(조합성능) 및 평가(단부상향력 및 체결구 응력 저감효과 입증)
- 철도교량 단부궤도의 거동 예측식 도출

(2) 횡단궤도시스템의 정 동적 재하시험 및 반복피로시험을 통한 실내성능검증 및 거동특성 분석

- 현장적용을 위한 실물스케일의 실내성능검증시험

(3) 횡단궤도시스템의 현장적용성 검토를 통한 보완/상세설계

- 현장시험부설 및 현장성능검증요구조건, 설계 및 시공방안 도출
- 보완설계, 제작 및 시공지침(안), 시공절차서(안) 작성
- 철도시설성능지침에 따른 공인성능검증시험
- 현장적용을 위한 한국철도시설공단 철도시설성능검증 심의(기술요건적합성) 통과

나. 연구개발결과

(1) 횡단궤도시스템 성능요구조건 도출

독일의 횡단궤도시스템 관련기준 및 문헌조사 결과, 횡단궤도시스템은 독립된 새로운 궤도시스템으로써 단부 궤도에 발생하는 교량-궤도 상호작용력을 상쇄 혹은 소멸시키기에 충분한 강성과 중량을 확보하여야 하며 이에 대한 세부 성능요구조건은 일반적인 궤도시스템의 성능 보다 엄격한 성능수준을 확보하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 독일의 RIL804 기준 내에 있는 횡단궤도시스템의 성능요구조건을 국내 철도환경에 맞게 개량, 보완하여 한국형 횡단궤도시스템의 설계 및 제작, 시공 등을 포함하는 성능요구조건을 도출하였다.

(2) 횡단궤도시스템의 구조적 안정성(조립성능시험) 및 시스템 인터페이스 검토

건설선에 적용이 가능한 횡단궤도시스템의 표준단면(설계도면) 및 구조계산서를 작성하였으며 현장시험부설을 위한 실물스케일의 횡단궤도시스템 시제품을 제작하여 공인된 시험기관에서 구조적 성능을 비롯한 피로성능시험 및 전기절연시험을 수행함으로써 철도시설로써의 횡단궤도시스템의 적정성을 입증하였다. 횡단궤도시스템의 처짐 및 응력, 가속도 등에 대한 모든 시험항목에서 횡단궤도시스템의 성능요구조건을 모두 만족하는 것으로 분석되었으며 300만회의 반복피로시험 전, 후 횡단궤도시스템의 고유진동수 및 감쇠비를 평가함으로써 횡단궤도구조의 장기 피로내구성능 및 구조적 건전성을 입증하였다. 또한 횡단궤도시스템에 대한 시스템 인터페이스(전기

절연 성능) 검토결과, 살수 후 습윤조건에서의 전기 절연 저항이 8Ω/km 이상으로 평가되어 절연조건에서의 기준값을 만족하여 횡단궤도시스템의 전기 절연 성능을 입증하였다.

(3) 현장적용성 검토

횡단궤도시스템의 현장적용(현장시험부설)을 위한 설계, 제작 및 시공지침을 비롯한 성능요구조건을 도출하고 횡단궤도시스템 표준단면도, 상세도, 시공순서도, 배수계통도, 받침부 철근배근도를 작성함으로써 건설선 설계 및 시공에 적용할 수 있는 정량적인 성과물을 도출하였으며, 향후 횡단궤도시스템의 현장 적용성 평가 및 거동예측 시 활용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 한국철도시설공단의 철도시설 성능검증심의(기술요건적합성)를 통해 본 횡단궤도시스템의 필요성 기술적 적정성, 실내성능검증시험(조립시험)결과에 대한 적합성을 인정 받아 현장 설치시험이 필요하다는 심의결과를 득함으로써 추후 현장적용이 가능한 연구성과를 도출하였다.

Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

연구과제를 통해 독일 횡단궤도시스템을 벤치마킹하여 한국형 횡단궤도시스템의 개발을 완료하였으며 1~3차년도의 연구성과를 활용하여 차후 횡단궤도시스템의 현장시험부설을 실시하기 위해 한국철도시설공단의 철도시설성능검증을 신청하여 완료하였다. 또한 “철도교량 단부 횡단궤도 구조 및 그 시공방법(특허번호 제 10-1399839호)”에 대한 특허 등록에 성공하였으며, “철도교량 단부의 횡단궤도 구조체 및 그 시공방법(출원번호 10-2014-0066754)”를 출원하였다.

Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

연 구 내 용	추 진 일 정				진척도	비 고
	1/4	2/4	3/4	4/4		
횡단궤도시스템 KR 성능검증	————	————	————	———	100%	
현장적용 성능요구조건, 설계 및 시공방안	————	————	———		100%	
현장적용 시제품 설계서 보완	————	————			100%	
현장시험부설 시제품 제작	————	————	————	—	100%	
횡단궤도시스템 보완설계 및 개발	————	————	————	———	100%	

Ⅵ. 연구성과 활용계획

- 콘크리트궤도가 부설된 도시철도, 일반철도 및 고속철도 교량상 장대레일 축력 및 단부 궤도시스템의 사용성 및 안정성 확보방안으로 활용이 가능하다.
- 철도교량의 장대화 및 연속화 등과 같은 다양하고 진보적인 철도교량계획 및 설계 시 궤도-교량인터페이스 문제에 대한 직접적이고 실용적인 기술적 솔루션으로 활용이 가능하다.

- 본 횡단궤도시스템의 개발이 완료되면 현재 설계 및 착공되어 진행 중인 신규 철도 사업 중에 콘크리트궤도가 본선구간 기본 궤도구조로 선정되고 장대교량이 계획된 철도노선에 활용이 가능하다.

SUMMARY

The components of concrete track(rail and rail fastening system) in a railway bridge deck ends have been damaged and deteriorated by a track-bridge interaction force such as an uplift force and compression force owing to their structural flexural characteristics(bridge end rotation), calling for alternatives to improve the structural safety and serviceability.

Transition tracks are an alternative for enhancing the long-term serviceability and durability of concrete track components in railway bridges. In this study, by considering the rail supporting distance and the distance between the bridge and the abutment, the behavior of concrete track installed on a railway bridge end deck and the bridge end rotation were analyzed. In order to analyze the track-bridge interaction, bridge and abutment specimens with concrete track structures were designed and used in laboratory testing and computer analysis. Further, the influence of bridge end rotation and rail supporting distance on the bridge deck ends of a concrete track on uplift forces currently employed in high-speed lines was assessed by performing field measurement data and the proposed prediction equation using actual vehicles running along the service line. As the results, at a constant fastening support distance, an increase in the bridge end rotation caused an increase in the displacement of the rail. Therefore, the displacement of the rail directly affects the rail and clip stress. Further, it is inferred that the results of multiple regression analysis obtained using measured data such as bridge end rotation, clip stress, and rail displacement can be used to predict the uplift force acting on concrete tracks in bridge deck ends by considering rail supporting distance, and the prediction equation should be of practical use for track maintenance.

According to the change of the rail supporting distance, the empirical uplift force determined using finite element analysis and track-bridge interaction test was compared with the predicted uplift force using the dynamic bridge end rotation measured through field measurements.

The study performed a comparison between theoretical (numerical) and experimental results, and the results contributed toward the development of

simple prediction and evaluation methods for the maintenance of the in-serviced railway bridge deck ends.

In the case that the clip stress, and track and bridge properties are known, the uplift force could be predicted using the proposed prediction equation and bridge end rotation, which can be measured through a relatively simple field test.

In this study, to develop transition track to enhance the long term workability and durability of concrete track components in a railway bridge deck ends so as to improve the performance of concrete track. Therefore, a time-history analysis and a three-dimensional finite element method analysis were performed to consider the train speed and the effect of multiple loads of train and compared with the performance requirement and German standard for transition track. Also, two specimens with a normal concrete track and a transition track were fabricated to evaluate the effects of the application of the developed transition track, and static tests were conducted. From the results, the track-bridge interaction force acted on the track components (rail displacement, rail stress and clip stress) of the railway bridge deck end with the developed transition track were significantly reduced, compared with the specimen of non-transition track.

In this study, the structural behavior of transition track such as the variation in static and dynamic displacements and dynamic properties (acceleration, natural freqeuncy and damping ratio) was assessed and compared by performing loading test and finite element analysis using actual vehicle impact loading. As a result, the analytical results reproduced the experimental results well within about 2-5% difference in the values. Further, we found that the static and dynamic behavior of transition track system is expected to satisfied the actual vehicle impact loading, and therefore it is inferred that the structural capacity of transition track system is proved.

It is found that the structural behavior of the transition track system is expected to satisfy the actual vehicle impact loading, and the variation in the neutral axis and dynamic characteristics are not affected by the fatigue loading. Therefore, it is inferred that the structural capacity and long-term durability of the transition track system is proven.

CONTENTS

REPORT ····· 1
Report summary ····· 2
Sketch ····· 3
Contents ····· 14

Chapter 1. Abstract (Research and development project) ····· 25
Section 1. Purpose and necessity of research and development ····· 25
Section 2. Definition and scope of research and development ····· 29
1. Definition of transition track system ····· 29
2. Scope of transition track system ····· 32
3. Review details ····· 34
Section 3. Domestic and international developments in related technology ····· 35
1. Solutions for existing railway bridge end deck problem ····· 37
Section 4. Results of research and development in the relevant field position occupied ····· 47

Chapter 2. Contents and results of research and development projects ····· 49
Section 1. Introduction ····· 49
1. Research background ····· 49
2. Evaluation criteria and research trend for the end track railway bridges ····· 54
3. Solutions for the current railway bridge end deck track problem ····· 56
4. Necessity of Transition track system ····· 66
Section 2. Performance for transition track system ····· 69
1. Introduction ····· 69
2. Applications of Transition track system ····· 72
3. Components(material and standard section) and requirements of transition track system ····· 75

4. Effects of transition track system applications ····· 91
Section 3. Performance verification test of transition track system ····· 110
1. Numerical analysis of transition track system ····· 110
2. Full-scale model test for evaluation of transition track system's performance ····· 119
Section 4. Evaluation for field application ····· 143
1. Requirements for field application of transition track system ····· 143
2. Maintenance of transition track system ····· 148
3. Evaluation for field application of transition track system ····· 150
4. Field test Plan ····· 164
Section 5. System Interface ····· 168
1. Roadbed Interface ····· 168
2. Electricity·Signal Interface ····· 172
Section 6. summary ····· 174
Section 7. Conclusion ····· 178

Chapter 3. Final research results and actual result for system application ····· 179
Section 1. Prototype ····· 179
1. 1st year (Bridges-abutment-Transition track system) ····· 179
2. 2st year (Steel composite structure type of transition track system) 180
3. 3st year (Steel structure type of transition track system) ····· 181
Section 2. Performance Testing ····· 182
1. Full scale test using the bridge-abutment and transition track system ····· 182
2. Dynamic and static load tests and fatigue test ····· 183
3. Final model of transition track system for field application (complementary / detailed design) ····· 185
Section 3. Main research result ····· 186
1. Academic result ····· 186
2. Technical result ····· 187
3. Practical result ····· 188

Section 4. Domestic and international market prospects of technology development result ····· 188
1. Track construction and maintenance market ····· 189
2. Increase in construction high speed railway market ····· 190
3. Forceast for track structure development and performance-related market ····· 190

Chapter 4. Research objectives and effects ····· 193
Section 1. Final objectives achievement ····· 193
Section 2. Technical effectiveness analysis ····· 196
Section 3. Economic effectiveness analysis ····· 198
Section 4. Policy effectiveness analysis ····· 201

Chapter 5. Utilization of research results, and further research ····· 202
Section 1. Future Utilization of research ····· 202
Section 2. Need for additional research ····· 205

REFERENCES ····· 207
Overseas science and technical information ····· 210

목 차

제출문 ····· 1
보고서 요약서 ····· 2
요약문 ····· 3
목 차 ····· 14

제 1 장 연구개발과제 개요 ····· 25
제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 25
제 2 절 연구개발의 정의 및 범위 ····· 29
1. 횡단궤도시스템의 정의 ····· 29
2. 횡단궤도시스템의 적용범위 ····· 32
3. 주요검토사항 ····· 34
제 3 절 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 35
1. 현행 철도교량 단부 궤도의 문제점 해결방안 ····· 37
제 4 절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치 ····· 47

제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 49
제 1 절 서론 ····· 49
1. 연구배경 ····· 49
2. 국내·외 철도교량 단부 궤도의 사용성 평가 기준 및 연구동향 ····· 54
3. 현행 철도교량 단부 궤도의 문제점 해결방안 ····· 56
4. 횡단궤도시스템의 필요성 ····· 66
제 2 절 횡단궤도시스템 개요 및 성능 ····· 69
1. 횡단궤도시스템 개요 ····· 69
2. 횡단궤도시스템 적용 범위 ····· 72
3. 횡단궤도시스템의 구성재료별 기능 및 규격 ····· 75
4. 횡단궤도시스템의 적용 효과 검토 ····· 91

제 3 절 횡단궤도시스템의 성능검증시험 ····· 110
1. 횡단궤도시스템의 수치해석 ····· 110
2. 횡단궤도시스템의 실내 조립성능시험(실대형 시험결과) ····· 119
제 4 절 현장적용성 평가 ····· 143
1. 횡단궤도시스템의 현장적용을 위한 요구조건 ····· 143
2. 횡단궤도시스템의 유지보수 ····· 148
3. 횡단궤도시스템의 현장적용성 검토 ····· 150
4. 현장 시험시공 계획 ····· 164
제 5 절 시스템 인터페이스 검토 ····· 168
1. 노반 인터페이스 ····· 168
2. 전기·신호 인터페이스 ····· 172
제 6 절 요 약 ····· 174
제 7 절 결 론 ····· 178

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 179
제 1 절 시제품제작 ····· 179
1. 1차년도(교량-교대-횡단궤도시스템) ····· 179
2. 2차년도(강합성구조 횡단궤도시스템) ····· 180
3. 3차년도(강구조 횡단궤도시스템) ····· 181
제 2 절 성능시험 ····· 182
1. 교량/교대조합시험을 통한 횡단궤도시스템 적용 전,후의 철도교량 단부의 역학적 거동특성분석 ····· 182
2. 횡단궤도시스템의 정·동적 재하시험 및 반복피로시험을 통한 자체성능검증 및 거동특성 분석 ····· 183
3. 횡단궤도시스템의 현장적용성 검토를 통한 보완/상세설계후 성능검증시험 ····· 185
제 3 절 주요 연구성과 ····· 186
1. 학술적 성과 ····· 186
2. 기술적 성과 ····· 187

3. 실용적 성과 ····· 188
제 4 절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 ····· 188
1. 궤도 건설 및 유지보수 시장 규모 ····· 189
2. 고속선 건설시장의 증가 ····· 189
3. 궤도구조 개발 및 성능향상관련 시장전망 ····· 190

제 4 장 연구목표 달성 및 효과 ····· 193
제 1 절 연구개발 최종목표 달성도 ····· 193
제 2 절 연구개발성과의 기술적 효과분석 ····· 196
제 3 절 연구개발성과의 경제적 효과분석 ····· 198
제 4 절 연구개발성과의 정책적 효과분석 ····· 201

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 202
제 1 절 연구성과 향후활용방안 ····· 202
제 2 절 추가연구의 필요성 ····· 205

참고문헌 ····· 207
연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 210

표 목 차

표 1.1 교량 단부 궤도 사용성 평가결과 요약(상향력 기준값 초과개소) ····· 27
표 1.2 국내·외 고속철도 교량 사용성 관련 기준 ····· 35
표 1.3 독일 횡단궤도시스템(L=2.5m)의 거동한계(Hannover-Berlin) ····· 44
표 2.1 교량 단부 궤도 사용성 평가결과 요약(상향력 기준값 초과개소) ····· 51
표 2.2 경부고속철도 2단계(대구~부산) 교량 신축부 TCL 단부 침목
이격거리 ····· 52
표 2.3 국내·외 고속철도 교량 사용성 관련 기준 ····· 54
표 2.4 독일 횡단궤도시스템(L=2.5m)의 거동한계(Hannover-Berlin) ····· 64
표 2.5 국외 횡단궤도시스템과의 주요 구성품 및 특성 비교 ····· 72
표 2.6 횡단궤도시스템의 제원 ····· 80
표 2.7 시험체 설계조건 ····· 94
표 2.8 시험체 제원 ····· 94
표 2.9 정적 변위제어에 따른 단부회전각 발생량 비교 ····· 100
표 2.10 고정하중 재하 ····· 110
표 2.11 고정하중 산정 ····· 110
표 2.12 활하중 재하 ····· 110
표 2.13 사용하중 조합 ····· 112
표 2.14 극한하중 조합 ····· 112
표 2.15 단면계수 ····· 113
표 2.16 단면력 검토 ····· 114
표 2.17 응력 검토 ····· 114
표 2.18 응력 검토 ····· 115
표 2.19 응력해석결과 ····· 115
표 2.20 처짐 검토결과 ····· 116
표 2.21 받침당 연직반력 ····· 116
표 2.22 받침용량 검토 ····· 117

표 2.23 용접위치별 필렛용접 최소치수 검토 결과 ····· 117
표 2.24 용접위치별 필렛용접 최소치수 검토 결과 ····· 117
표 2.25 철도설계기준(피로상세) ····· 117
표 2.26 강재의 응력 검토결과 ····· 118
표 2.27 기타 상세검토 ····· 119
표 2.28 횡단궤도시스템 시험체의 구성품 ····· 120
표 2.29 횡단궤도시스템 시험하중 조건 ····· 121
표 2.30 횡단궤도시스템 성능시험 조건 ····· 121
표 2.31 시험체 하부 변위계, 스트레인게이지 설치 항목 ····· 125
표 2.32 시험체 상면 가속도계 설치 항목 ····· 126
표 2.33 하중-변위 데이터 ····· 127
표 2.34 하중-변위 데이터(300만회 종료 후, 하중단계별 정적시험) ····· 128
표 2.35 반복횟수별 하중-변위 데이터 ····· 133
표 2.36 열차종별 횡단궤도시스템의 임계속도 검토결과
(실험 및 해석 고유진동수 비교) ····· 140
표 2.37 횡단궤도시스템 성능 요구조건 ····· 142
표 2.38 고무판 품질기준 ····· 149
표 2.39 불소수지판 재료특성기준 ····· 149
표 2.40 횡단궤도시스템 성능 요구조건 ····· 166
표 2.41 모니터링 항목 및 시험기준 ····· 167
표 2.42 측정점의 조합 ····· 172
표 2.43 건조상태에서의 절연저항 측정결과 ····· 173
표 2.44 20분 살수 후 즉시 측정한 절연저항 측정결과 ····· 173
표 2.45 20분 살수 후 20분 경과 후 측정한 절연저항 측정결과 ····· 173
표 3.1 1차년도 횡단궤도시스템 시험체 제원 ····· 179
표 3.2 2차년도 강합성횡단궤도시스템 시험체 제원 ····· 180
표 3.3 3차년도 횡단궤도시스템 시험체 제원 ····· 181
표 3.4 최고속도 250km/h 이상의 국가별 고속철도운영 노선연장 ····· 190
표 3.5 선로의 개발과 성능향상

(Track New Development and Upgrade) ····· 190
표 3.6 선로의 교환과 유지관리 (Track Renewal and Maintenance) ····· 191
표 4.1 경부고속철도 2단계(O공구) 자재 및 공사단가 :
ZLR 및 레일신축이음장치 ····· 199
표 4.2 경제적 파급효과 분석결과 ····· 200
표 5.1 철도종합시험선로 시험시공 계획 ····· 203
표 5.2 횡단궤도시스템 성능 요구조건 ····· 204
표 5.3 모니터링 항목 및 시험기준 ····· 205

그 림 목 차

그림 1.1 철도교량 상부구조와 레일의 변형 ····· 25
그림 1.2 철도교량 단부에서의 레일체결장치 손상 사례 ····· 26
그림 1.3 철도교량 단부에서의 변형에 의한 체결장치 작용력 ····· 26
그림 1.4 종방향활동체결장치(ZLR) 개념도 및 설치전경 ····· 26
그림 1.5 테르밋용접부와 교량신축부가 경합된 사례 ····· 26
그림 1.6 교량 단부 침목이격거리가 확대된 사례 ····· 26
그림 1.7 교량신축이음부 횡단궤도시스템
(Switch bridge구조, 패널형식)시공사례 ····· 29
그림 1.8 횡단궤도시스템의 적용 순서 ····· 31
그림 1.9 횡단궤도시스템의 개발 목적 ····· 32
그림 1.10 횡단궤도시스템 적용범위 ····· 33
그림 1.11 종방향 활동체결장치(ZLR) 개념도 ····· 38
그림 1.12 종방향 활동체결장치(ZLR) 거동특성 ····· 38
그림 1.13 종방향 활동체결장치(ZLR)의 시공불량 사례 ····· 39
그림 1.14 교량단부용 특수 레일체결장치(ERL) ····· 39
그림 1.15 횡단궤도시스템 적용여부에 따른 단부 궤도변형 특성 ····· 40
그림 1.16 독일 횡단궤도시스템의 종류 ····· 42
그림 1.17 독일 횡단궤도시스템 적용사례 ····· 42
그림 1.18 특수 레일체결장치(ERL, BWG)를 사용한 독일
횡단궤도시스템 ····· 44
그림 1.19 교량 단부 Floating-Bearing 시스템 전경 ····· 46
그림 1.20 Floating-Bearing시스템의 받침 시공사례 ····· 46
그림 2.1 교량 단부 궤도 상향력 검토결과 요약
(경부고속철도 2단계 구간) ····· 51
그림 2.2 교량 단부 침목 이격거리 확대개소 ····· 53
그림 2.3 철도교량 단부 시공 불량 상태 ····· 53

그림 2.4 종방향 활동체결장치(ZLR) 개념도 ····· 57
그림 2.5 종방향 활동체결장치(ZLR) 거동특성 ····· 57
그림 2.6 종방향 활동체결장치(ZLR)의 시공불량 사례 ····· 58
그림 2.7 교량단부용 특수 레일체결장치(ERL) ····· 58
그림 2.8 횡단궤도시스템 적용여부에 따른 단부 궤도변형 특성 ····· 59
그림 2.9 독일 횡단궤도시스템의 종류 ····· 61
그림 2.10 독일 횡단궤도시스템 적용사례 ····· 62
그림 2.11 특수 레일체결장치(ERL, BWG)를 사용한 독일
횡단궤도시스템 ····· 63
그림 2.12 교량 단부 Floating-Bearing 시스템 전경 ····· 65
그림 2.13 Floating-Bearing시스템의 받침 시공사례 ····· 66
그림 2.14 횡단궤도시스템의 적용 순서 ····· 70
그림 2.15 횡단궤도시스템의 개발 목적 ····· 71
그림 2.16 횡단궤도시스템 적용범위 ····· 74
그림 2.17 횡단궤도시스템 표준도 ····· 81
그림 2.18 횡단궤도시스템의 전경 ····· 82
그림 2.19 횡단궤도시스템의 종방향 거더 ····· 83
그림 2.20 횡단궤도시스템의 Ⅱ형 가로보 ····· 84
그림 2.21 횡단궤도시스템 받침 ····· 84
그림 2.22 직결식 탄성 레일체결장치 ····· 85
그림 2.23 횡단궤도시스템용 포트받침 ····· 90
그림 2.24 횡단궤도시스템에 적용 가능한 직결식 탄성 레일체결장치 ····· 91
그림 2.25 수치해석 모델링 ····· 92
그림 2.26 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도 상호작용 해석결과 ····· 93
그림 2.27 실내시험 전경 ····· 95
그림 2.28 시험체 설치 개요도 ····· 96
그림 2.29 교량, 교대부 시험체 단면도 ····· 96
그림 2.30 횡단궤도시스템 시험체 설치전경 ····· 98
그림 2.31 횡단궤도시스템 시험체 단면도(강합성 구조) ····· 99

그림 2.32 교량 시험체의 단부 회전각 측정 전경 ····· 101
그림 2.33 센서 설치개요도 ····· 101
그림 2.34 변위계 설치 전경 ····· 102
그림 2.35 레일저부 응력 센서설치 전경 ····· 102
그림 2.36 체결구 응력 센서설치 전경 ····· 103
그림 2.37 레일지지점 변위 ····· 104
그림 2.38 레일저부 응력 ····· 105
그림 2.39 체결구 응력 ····· 105
그림 2.40 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도 거동분석 결과 ····· 107
그림 2.41 차량하중(LF) ····· 111
그림 2.42 해석모델링 ····· 113
그림 2.43 횡단궤도시스템의 단면력(Frame 모델) ····· 114
그림 2.44 횡단궤도시스템의 응력도(Shell 모델) ····· 114
그림 2.45 처짐형상 ····· 116
그림 2.46 활하중에 의한 연직반력 ····· 116
그림 2.47 횡단궤도시스템 시험체의 제원(System 336 적용조건) ····· 120
그림 2.48 횡단궤도시스템 성능시험 조건 ····· 122
그림 2.49 횡단궤도시스템 성능시험 전경 ····· 123
그림 2.50 변위계 설치 전경 ····· 124
그림 2.51 스트레인게이지 및 가속도계 설치 전경 ····· 124
그림 2.52 시험체 하부 변위계, 스트레인게이지 설치 위치도 ····· 125
그림 2.53 시험체 상면 가속도계 설치 위치도 ····· 126
그림 2.54 하중-변위 그래프 ····· 128
그림 2.55 하중-변위 그래프(300만회 종료 후, 하중단계별 정적시험) ····· 129
그림 2.56 하중-변위 그래프 ····· 129
그림 2.57 하중-변위 그래프 ····· 130
그림 2.58 피로시험 전·후 Case별 변위 비교(동적시험) ····· 131
그림 2.59 피로시험 전·후 Case별 가속도 비교(동적시험) ····· 131
그림 2.60 피로시험에 따른 시험체의 동특성 변화 ····· 132

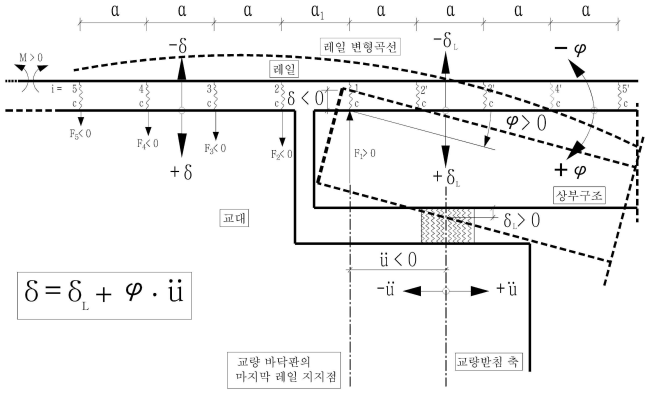
그림 2.61 하중 - 변위 그래프 ····· 134
그림 2.62 정적 시험 결과 ····· 135
그림 2.63 시험조건별 변위 비교 ····· 137
그림 2.64 시험조건별 가속도 비교 ····· 138
그림 2.65 시험조건에 따른 고유진동수 변화 ····· 139
그림 2.66 시험조건에 따른 감쇠비 변화 ····· 140
그림 2.67 횡단궤도구조와 인접궤도간의 설치(예) ····· 143
그림 2.68 횡단궤도시스템 설치 예시 ····· 144
그림 2.69 횡단궤도시스템과 인접궤도와의 단부 간격 및 이동제어장치 ····· 146
그림 2.70 횡단궤도시스템의 현장시험부설용 시제품 단면도 ····· 150
그림 2.71 횡단궤도시스템의 적용 범위 ····· 151
그림 2.72 횡단궤도시스템 현장 적용 Process ····· 152
그림 2.73 횡단궤도시스템 적용 가능 개소 ····· 153
그림 2.74 횡단궤도시스템의 시공개요도(콘크리트궤도) ····· 154
그림 2.75 횡단궤도시스템의 시공개요도(자갈궤도) ····· 155
그림 2.76 횡단궤도시스템 시공 흐름도 ····· 157
그림 2.77 횡단궤도시스템 제작 전경 ····· 159
그림 2.78 횡단궤도시스템 현장 시공순서도
(건설선 콘크리트궤도, Top-down) ····· 164
그림 2.79 철도종합시험선로 건설공사 조감도 ····· 166
그림 2.80 횡단궤도시스템 배수계통도 ····· 168
그림 2.81 횡단궤도시스템 시공개요도(콘크리트궤도) ····· 170
그림 2.82 횡단궤도시스템 시공개요도(자갈궤도) ····· 171
그림 2.83 횡단궤도 시험체의 절연저항 측정점 ····· 172
그림 3.1 1차년도 교량-교대부 횡단궤도 시험체 ····· 179
그림 3.2 2차년도 강합성구조 횡단궤도 시험체 ····· 180
그림 3.3 3차년도 강구조 횡단궤도 시험체 ····· 181
그림 3.4 실내시험 전경 ····· 182
그림 3.5 시험체 설치 개요도 ····· 183

그림 3.6 시험체 개요도 및 전경 ····· 184
그림 3.7 시험체 개요도 및 전경 ····· 185
그림 4.1 국내 공용중인 교량 신축이음부 단부 궤도현황
(침목간격확대[上], 교량신축이음부 메움으로 인한
구조물신축방해 및 궤도형태 조잡[下]) ····· 197
그림 4.2 횡단궤도시스템 적용여부에 따른 개선효과 ····· 198
그림 5.1 철도종합시험선로 건설공사 조감도 ····· 203

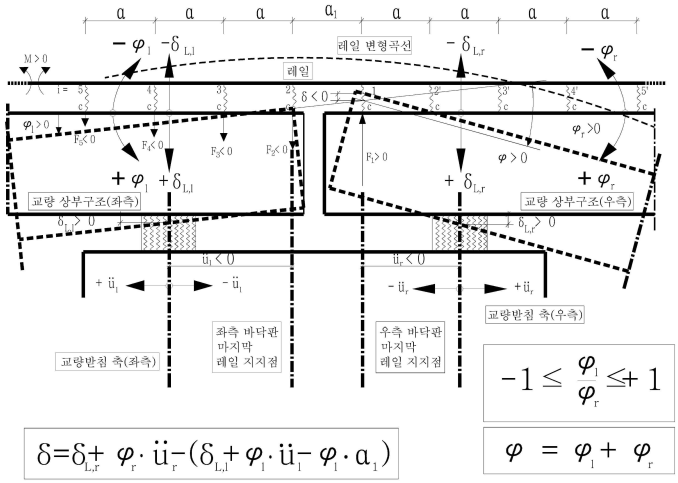
제 1 장 연구개발과제 개요

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

콘크리트궤도와 철도구조물의 상호작용에 따른 문제는 일반적으로 토공구간에서는 큰 문제가 되지 않으나 토공-교량 연결부(교대부) 또는 교량 상부구조의 연결부에서는 교량 상판단부의 변형(단차 및 회전)에 의해 궤도의 변형이 발생하고 이로 인해 과도한 응력이 작용할 수 있어 그 심각성이 더욱 큼. 이러한 부가적인 상호작용력은 구조물 경계 단부 궤도의 빈번한 유지보수를 유발할 수 있으므로 설계 단계에서 충분한 검토가 이루어져야 한다.



(a) 교대부



(b) 교각부

그림 1.1 철도교량 상부구조와 레일의 변형

철도교량 신축부(불연속지점)에서는 궤도-교량 상대변위 및 단차 발생, 상판 회전, 교각의

기초침하에 따른 변위 발생, 단부회전에 의한 상향력 발생으로 인해 체결장치의 파손이 발생하고 있는 실정이다.



그림 1.2 철도교량 단부에서의 레일체결장치 손상 사례

교량 상판 단부에서 콘크리트궤도의 사용성을 보장하기 위해서는 교량 상판 단부의 회전 및 단차로 인해 레일 지지점의 체결장치에 발생하는 수직하중이 레일체결장치의 탄성지지체, 체결클립 혹은 클램프 및 앵커시스템에서 공용기간 동안 아무런 손상없이 충분히 흡수할 수 있어야 한다.

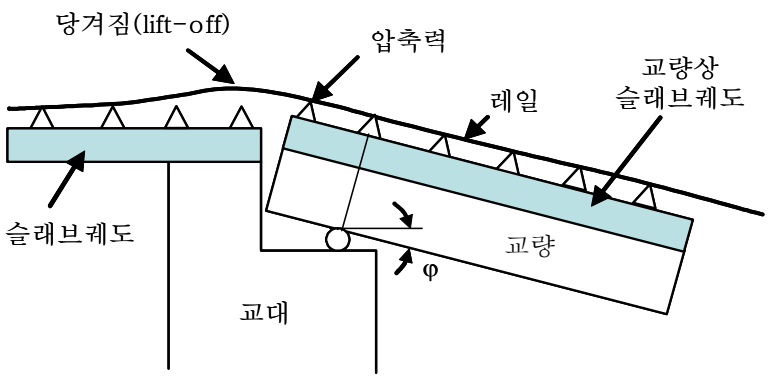


그림 1.3 철도교량 단부에서의 변형에 의한 체결장치 작용력

콘크리트궤도가 부설된 교량구조물의 경우에는 교량의 수직 운동(휨거동)에 따라 발생하는 압축력과 인장력 및 하중통과에 따른 부반력 등이 반복적으로 작용하여 교량상부구조의 거동에 따라 레일지지점(체결장치위치)에 비교적 많은 부담이 가해진다. 이 영역에서 콘크리트궤도의 사용성을 보장하기 위해서는 레일지지점(체결장치위치)에 가해지는 부상력(상향력)과 압축력이 적정한 수준의 탄성으로 설계된 체결장치에 의해 완화되어야 한다.
강재거더로 이루어진 교량구조의 경우 상대적으로 유연한 휨거동을 보이므로 단부의 부상력(상향력) 및 압축력이 과다할 수 있기 때문에 설계 시 이에 대한 면밀한 검토가 요구된다.

“콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 관한 연구, 한국철도시설공단, 2010”의 연구결과 국내 고속철도(경부2단계) 교량의 단부 사용성 검토에서 기준값(17kN)을 초과하는 개소가 다수 발생하였으며, 별도의 상향력 저감대책으로 ZLR(종방향활동 체결장치)를 적용하였다.

표 1.1 교량 단부 궤도 사용성 평가결과 요약(상향력 기준값 초과개소)
(콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 관한 연구, 한국철도시설공단, 2010)

교 량	위 치													
	좌측교대	P2	P4	P6	P8	P10	P12	P14	P16	P18	P20	P22	P24	우측교대
광석고가	40.55	20.15	19.31	19.31	19.50	31.61								48.52
구기제고가	19.57													19.62
남천제1교	41.13	19.98	18.68	18.58	18.49	18.58								41.10
대곡고가	40.79	19.27	19.78											41.70
덕천고가	40.94	19.52	19.65	18.87	18.36	20.36	19.81	18.43	18.33	18.33	18.48	19.65	19.58	39.82
방내고가	40.72	19.62	20.68	20.50	33.71									48.70
삼정제1고가	41.56	33.90												48.76
송선고가	39.17	22.24	22.64											39.20
영청고가	40.91	35.20												50.39
오목천교	20.65	18.32												25.33
월산교	26.01		57.39											28.91
이조천교	41.51	17.58	17.76	17.20	17.36	17.32								42.38
중리고가	25.82		17.85	17.14										30.00
활천제2교	41.84	19.84												48.89

(Ref. 콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 관한 연구보고서, 한국철도시설공단, 2010)

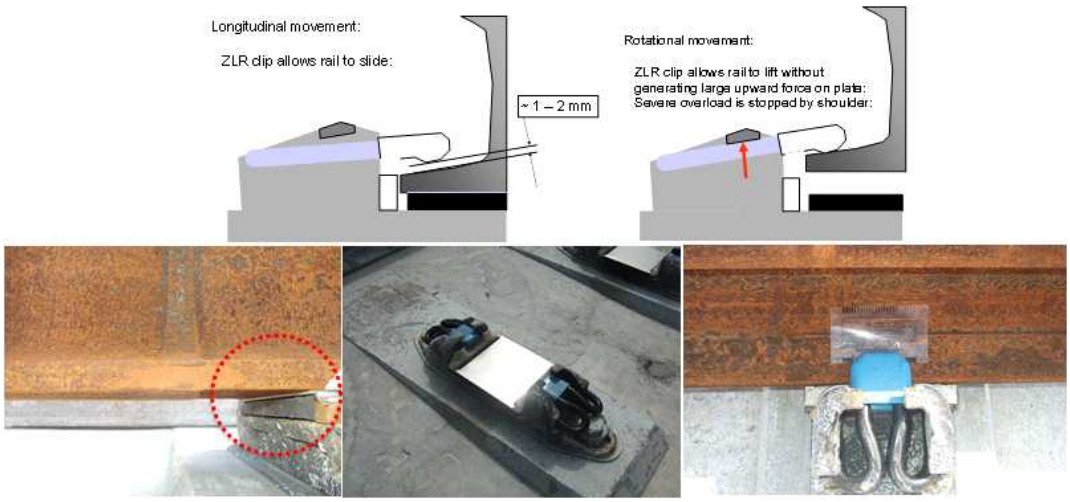


그림 1.4 종방향활동체결장치(ZLR) 개념도 및 설치전경

국내 경부고속철도 2단계구간에 부설된 종방향활동체결구(ZLR)는 토인슐레이터와 레일저부 간격확보 불량과 단부회전으로 인해 체결구 손상, 패드 이탈, 스테인레스판 파손, 패드 경화 등이 발생하고 있다.

현재 궤도공사시방서에는 테르밋용접부와 신축부 경합을 피하는 기준이 없기 때문에 교량시공 완료 후 궤도공사의 편리성을 위해 레일파단의 위험성이 높은 테르밋용접부가 교량단부에 존재하는 경우가 발생하고 있으며, 교량단부 침목 이격거리가 650mm를 초과하는 개소가 많아 교량단부에서의 레일파단이 우려된다.



그림 1.5 테르밋용접부와 교량신축부가 경합된 사례



그림 1.6 교량 단부 침목이격거리가 확대된 사례

현재 국내에서는 독일(DS804-App29)의 기준을 준용하여 한국철도시설공단에서 제정한 고속철도설계기준에서 제시하고 있는 “콘크리트궤도 부설 교량의 단부 사용성 검토(레일상향력 검토)”를 궤도설계 시 시행하도록 되어 있다. 해당 검토내용은 콘크리트궤도가 부설된 철도교량의 궤도 유지보수 요인을 줄이고 단부 궤도의 사용성을 향상시키기 위해 교량 상판 단부의 단차 및 회전에 대한 레일체결구의 안전성 검토결과를 제시하는 것을 목적으로 수행되는 설계과정의 검토이다.

또한 한국철도시설공단에서 발주하여 한국철도기술연구원에서 수행한 “콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구 용역(설계지침)”은 독일의 “Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn, 3. uberarbeitete Auflage, Stand 15.10.1995 (″Catalogues for construction of slab track″), Deutsche Bahn Gruppe, DB Netz”과 “DS-804″를 바탕으로 연구되었으며 결과보고서의 내용에 횡단궤도시스템에 대한 내용이 교량단부 사용성 향상을 위한 방안으로 간단하게 소개된 바 있다.

독일에서 발간된 “Feste Fahrbahn, Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn, Edgar Darr, Werner Fiebig, Eurail press”에는 콘크리트궤도가 부설된 철도교량의 설계 및 시공사례에 대한 소개에 횡단궤도시스템(übergangskonstruktion)과 관련한 내용이 수록되어 있으며 유럽의 철도 선진국에서는 일반적이면서도 철도교량 단부 궤도의 안정성 확보를 위한 효과적인 대안으로 제시되어 있다.

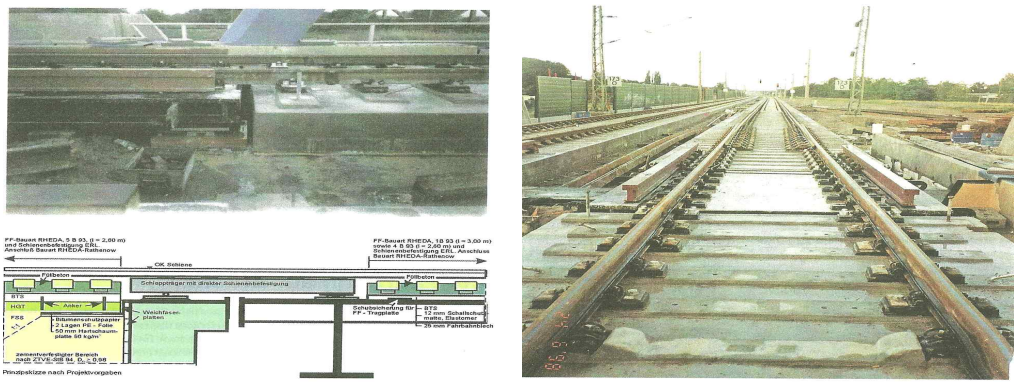


그림 1.7 교량신축이음부 횡단궤도시스템(Switch bridge구조, 패널형식)시공사례

제 2 절 연구개발의 정의 및 범위

1. 횡단궤도시스템의 정의

횡단궤도시스템이란 자갈궤도 및 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 신축이음부에 설치되어 침목간격을 일정하게 확보할 수 있으면서, 콘크리트궤도의 경우에는 단부 레일의 변형 및 레일지지점에 발생하는 상향력 및 압축력을 저감시키고, 자갈궤도의 경우에는 자갈도상의 이완 및 궤도틀림을 저감시킬 수 있는 강재거더와 부상 방지 기능을 포함하는 포트받침으로 구성된 신형식 궤도시스템을 의미한다.

철도교량 단부 궤도는 체결장치의 성능만으로 극복하기 어려운 수준의 상향력이 발생하며 변위 및 하중저항성능이 우수한 특수 체결장치, 즉 ZLR 혹은 ERL 등과 같은 대안은 단부 궤도의 역학적, 구조적 특성을 해결한다기보다 체결구의 성능에 의존하여 이러한 상호작용력을 일부 수용할 수 있을 뿐 구조적으로 이를 해소하지는 못한다.

횡단궤도시스템을 적용하여 과도한 수준의 상향력이 발생하는 교대부에 영구적으로 단부 궤도의 처짐 변형특성을 완화 혹은 소멸시켜 단부 궤도구성품의 내구수명을 향상시키고 구조물 접속부의 열차 주행안정성 및 승차감을 향상시키고자 한다.

횡단궤도시스템은 단부 궤도의 변형특성을 구조적으로 변화시키는 영구적인 대안으로써 단부의 레일상향 곡률자체를 해소함으로써 단부 궤도에 발생하는 상향력을 제거 혹은 최소화시킬 수 있는 시스템이며 단부 궤도에 발생하는 상향력을 고려하여 특수 체결장치를 사용한다거나 체결장치의 성능에 의존하지 않고 특별하게 유지관리 및 보수에 주의를 기울일 필요가 없다.

횡단궤도시스템은 단부 궤도의 변형(레일의 변형, 상향력)의 수준을 감안하여 ERL, REJ와 함께 교량 단부 궤도 상호작용력 저감을 위한 대안으로 활용할 수 있으며 적용개소는 다음과 같다.

가. 단부 궤도의 변형수준이 큰 교대부 혹은 장경간 교량(상향력 30kN 이상 개소) : ERL (최대 27kN)만으로 상향력 수용이 힘든 개소
나. 교각 및 교대부 등과 같은 구조물 접속구간에 적용 가능
다. 경간장 35~40m인 교량구간
라. 사교(Skewed bridge)와 같이 교량 단부에 침목의 배치가 용이치 못한 개소에 적용가능
마. 교량 단부의 신축이음부

횡단궤도시스템의 표준단면은 고속철도 설계기준에 적합한 단면으로써 호남고속철도 교량상 궤도 표준도를 참고하여 즉각적인 설계반영이 가능하게 개발되었다. 또한 열차의 고속주행 시 열차의 주행안정성을 향상시키고 궤도유지보수비용을 절감시키며 일반철도, 광역철도, 도시철도 및 고속철도 구분 없이 모든 철도교량 단부 궤도에 적용이 가능한 시스템이다.



그림 1.8 횡단궤도시스템의 적용 순서

콘크리트궤도가 부설된 교량 단부에서는 열차하중에 의한 단부회전각 발생, 교량기초의 침하 및 교량 상판의 상·하연 온도차 등에 의해 교량 상판이 정, 동적으로 거동하게 되어 단부 궤도가 변형되고, 이러한 궤도의 변형은 궤도 구성품(레일 및 레일체결장치)에 직적접인 상호 작용력으로 작용하게 된다. 이러한 교량-궤도 상호작용력 중 교량의 단부 회전은 교량 위에 부설된 레일의 곡률을 유발시키고 이러한 레일의 변형과정에서 교량측 마지막 레일지지점은 압축력이, 교대측 첫 번째 레일지지점에는 상향력이 발생하게 되는 데, 횡단궤도시스템을 적용하면 단부 레일의 변형 및 레일지지점에 발생하는 상향력 및 압축력을 저감시킬 수 있으며 일반구간과의 설계일관성을 확보할 수 있다.

뿐만 아니라 자갈궤도가 부설된 철도교량 단부에서는 자갈도상이 이완되고 궤도의 틀림 및 침하 등이 발생된다. 따라서 자갈궤도가 부설된 철도교량 단부에 횡단궤도시스템을 적용함으로써 교량단부 궤도의 기능과 구조적 성능을 개선하여 궤간확대, 침목간격확대 및 궤도틀림과 변형을 최소화할 수 있으며 궤도 침하를 안정화시켜 고속열차 주행에 대한 열차주행 안정성을 향상시킬 수 있다. 또한 교량 신축이음장치의 기능을 대체 하여 경량화, 단순화 및 성능을 개선시킬 수 있으며 교량 단부 궤도의 배수유도조건을 개선하고 교량 신축이음부 상면의 자갈막이가 불필요해지며 오수 및 이물질의 교량 받침부 유입을 방지할 수 있다. 마지막으로 토공-교량 접속구간에 대한 윤중변동(충격) 및 부등침하를 최소화하여 교량상 자갈궤도 보수주기를 연장하고 장, 단기적으로 유지보수비용을 절감시킬 수 있다.

해외 철도선진국에서 개발되어 사용중에 있는 횡단 구조물의 구조적 특성 및 장점을 반영하고, 단점을 보완할 수 있는 한국형 횡단궤도시스템을 개발하였다. 또한, KTX 열차하중을 이용한 정, 동적 수치해석을 통해 한국형 횡단궤도시스템의 구조적 안정성을 검토하고 실대형 시험체를 이용한 조립성능시험을 수행하였다. 또한 검토결과를 횡단궤도시스템의 적용사례가 가장 많은 독일의 횡단궤도시스템 성능요구조건과 비교하여 한국형 횡단궤도시스템의 적정성을 입증하였다. 횡단궤도시스템 개발의 목적은 그림 1.9와 같다.



그림 1.9 횡단궤도시스템의 개발 목적

횡단궤도시스템을 적용함으로써 단부 궤도에 발생되는 교량-궤도 상호작용력을 소멸 혹은 저감시킴으로써 교량 단부 궤도구성품의 내구수명을 향상시키고 유지보수 및 관리물량을 크게 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

또한 횡단궤도시스템을 적용함으로써 교량 단부 궤도에 더이상 특수 레일체결장치를 사용할 필요가 없어지므로 교량상 궤도재료의 일관성을 확보할 수 있으며, 무엇보다 단부 궤도 즉, 레일의 변형을 최소화함으로써 열차주행 안정성 및 사용성(승차감)을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 국내·외적으로 단부 궤도의 성능개선을 위해 개발, 적용되고 있는 횡단궤도시스템을 국내 철도하중 및 기준에 맞게 설계, 제작하여 횡단궤도시스템의 성능을 입증하였다.

2. 횡단궤도시스템의 적용범위

가. 횡단궤도시스템 적용의 당위성

단부 궤도는 체결장치의 성능만으로는 극복하기 어려운 수준의 상향력이 발생하며, 만약 변위 및 하중저항성능이 우수한 특수 체결장치, 즉 ERL 혹은 REJ 등과 같은 대안은 단부 궤도의 역학적, 구조적 특성을 해결한다기보다 체결구의 성능에 의존하여 이러한 상호작용력을 일부 수용할 수 있을 뿐 구조적으로 이를 해소하지는 못한다. 이에 과도한 수준의 상

향력이 발생하는 교대 및 교각부에 횡단궤도시스템을 적용함으로써 영구적으로 단부 궤도의 처짐 변형특성을 완화 혹은 소멸시킴으로써 단부 궤도구성품의 내구수명을 향상시키고 구조물 접속부의 열차주행안정성 및 승차감을 향상시키고자 한다.

횡단궤도시스템은 단부 궤도의 변형특성을 구조적으로 개선시키는 영구적인 대안으로써 단부 레일의 상향 곡률자체를 해소함으로써 단부 궤도에 발생하는 상향력을 제거 혹은 최소화하는 시스템이며 단부 궤도에 발생하는 상향력을 고려하여 특수 체결장치를 사용한다거나 체결장치의 성능에 의존하지 않고 어떠한 체결장치를 사용하여도 무방하다. 또한 단부 궤도라고 특별하게 유지관리 및 보수에 주의를 기울일 필요가 없다.

나. 횡단궤도시스템 적용 방안

단부 궤도의 변형(레일의 변형, 상향력) 수준을 감안하여 교량 단부 궤도상호작용력 저감을 위한 대안으로 활용이 가능하며 적용 대상 개소의 범위는 다음과 같다.

(1) 단부 궤도의 변형수준이 큰 장경간 교량(상향력 30kN 이상 개소 또는 경간장 35~40m 이상의 장대교량) → 교량설계 제약 조건(처짐증가) 해소를 통한 철도교량의 장대화 실현 가능
(2) 사교(Skewed bridge) : 교량 신축부 침목 배치가 어려운 개소
(3) 교각 및 교대부 등과 같은 구조물 접속구간
(4) 일반철도, 광역철도, 도시철도 및 고속철도 구분없이 모든 철도교량 단부 궤도
(5) 콘크리트궤도와 자갈궤도 구분 없이 적용 가능



그림 1.10 횡단궤도시스템 적용범위

본 연구에서 제시한 횡단궤도시스템의 표준단면은 고속철도설계기준을 준용하여 설계하였으며 호남고속철도 교량상 궤도 표준도를 참고하여 개발되었다.

3. 주요검토사항

본 연구에서 제안하는 한국형 횡단궤도시스템은 그 목적이 단부 사용성 확보이므로 철도교량상 콘크리트궤도의 궤도-교량 상호작용력(단부 상향력 및 압축력)에 대한 안전성, 사용성 및 열차 주행안전성 확보를 비롯하여 자갈궤도가 부설된 철도교량 단부 궤도의 기능 및 구조적 성능개선에 의미가 있다.

본 시스템의 주요검토 사항은 다음과 같다.

가. 횡단궤도시스템 도입의 당위성

나. 횡단궤도시스템의 구조적 안정성(정·동적 안정성 및 피로내구성)

(1) 횡단궤도구조체(강구조물)

(2) 횡단궤도용 포트받침(레일 및 레일체결장치 제외)

다. 시공성(현장적용성)

라. 시스템 인터페이스(전기절연성능)

한국형 횡단궤도시스템의 주요 설계변수인 단면 치수, 레일 및 레일체결장치의 종류, 받침의 용량 및 치수 등은 적용 대상 선로에 따라 설계속도, 설계하중, 하부교량 구조물의 설계 등을 고려하여 시스템 설계에서 결정되는 사항이므로 탄력적으로 설계가 가능하다. 앞서 정의한 적용 범위에 따라 본 시스템의 적용 대상은 아래와 같이 크게 도시철도, 일반철도 및 고속철도로 구분할 수 있다.

(1) 도시철도 : 설계속도 최대 120km/h, 설계축중 최대 160kN

(2) 일반철도 : 설계속도 최대 200km/h, 설계축중 최대 220kN

(3) 고속철도 : 설계속도 200~350km/h, 설계축중 최대 250kN(실열차축중 170kN)

본 연구에서는 일반철도 및 고속철도의 설계속도 및 축중을 고려하여 시스템 설계를 검토하였으며, 구조적 안정성과 관련해서 강재의 설계는 주어진 하중조건에 대해 강재설계기준에 따라 일반적인 구조물과 동일하게 이루어지는 사항이기 때문에 큰 차이점이 없다. 그리고 시공방법의 적정성과 시스템 인터페이스(전기절연성능)에 대한 검토를 수행하였다.

본 연구에서는 상기 주요 검토 사항에 대하여 해석 및 실험적 방법으로 검토한 결과를 제시함으로써 횡단궤도시스템의 기술적 적합성 검증하였다.

제 3 절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

철도교량의 경우, 온도하중 영향에 따른 거동을 비롯하여 열차주행으로 인한 상부구조의 휨에 기인한 종방향 변형과 수직방향 변형의 수준은 교량상 궤도구조의 거동에 직접적인 영향을 미치며, 이는 부가적인 궤도-교량 상호작용력을 발생시키는 요인이 된다. 이러한 궤도-교량 상호작용(track bridge interaction, TBI) 중 교량상부구조의 처짐에 따른 수직방향의 변형(단차 및 회전)은 열차운행안전 및 승차감 등의 사용성 및 단부 궤도구성품의 성능에 부정적인 영향을 미치게 되며, 이를 방지하기 위해 국내·외 각국에서는 교량상판의 변형에 대해 표 1.2와 같이 한계값을 규정하고 있다.

표 1.2 국내·외 고속철도 교량 사용성 관련 기준

구 분		국 내		일 본*		유 럽	
		단 선	복 선	단 선	복 선	단 선	복 선
관련기준		호남고속철도 설계지침(노반편)		철도구조물 등 설계표준·동해설 (변위제한)		EN 1990 EN 1991-2	
설계속도		350km/h		360km/h		350km/h	
안전성	처짐	L/600		L/1,100	L/1,900	L/600	
	단차	1.0mm	2.0mm	1.0mm	2.0mm	2.0mm	
	회전	5×10-4rad**		2.0‰		-1～2‰***	
승차감	처짐	L/1,100	L/1,500	L/1,500	L/2,200	L/1,050	L/1,500
	단차	-		2mm		-	
	회전	-		2.5‰		-	

* : 일본기준은 콘크리트 궤도에 대한 기준

** : BRDM Final Report(경부고속철도에 적용된 설계기준)의 동적 안전성에 관련된 기준

*** : DS 804 App.29에서 자갈도상의 유지관리에 요구하는 기준

가. 일 본

일본은 2006년'철도구조물 등 설계표준·동해설(변위제한)'편을 새롭게 제정하면서 안전성과 관련된 변위기준 뿐만 아니라 승객의 승차감을 고려하여 자갈궤도와 콘크리트궤도에 대

해 별도의 기준을 제시하고 있으며, 궤도면의 부등변위를 구조형식, 교량받침, 지반침하 등을 고려하여 산정하고, 승차감을 위한 한계치 외에 유지관리를 위한 궤도면 부등변위의 한계치를 설정하였으며, 손상레벨에 따른 연직방향 레일응력, 레일압력(체결구의 레일패드 압력) 등의 구성요소의 한계값을 정하고 있다.

나. 유 럽

교량의 수직방향 거동에 따른 궤도-교량 상호작용의 구조적 문제는 대부분 토공구간과 교량 연결부(교대부) 또는 교량 연결부(교각부)와 같은 교량의 단부에서 발생한다. 특히, 콘크리트궤도가 부설된 교량의 경우에는 교량상판에 고정되어 있는 콘크리트궤도의 레일과 레일지지점은 교량 단부의 회전에 의한 교량의 변형에 궤도가 종속적으로 함께 변형하게 되고, 이러한 교량 단부의 회전에 따른 레일의 변형과정에서 교량측 마지막 레일지지점은 압축력이, 교대측 첫 번째 레일지지점에는 상향력이 발생하게 됨에 따라 콘크리트궤도의 사용성 측면에서 문제를 야기하게 된다.

유럽의 EN1990과 EN1991-2에서는 이와 같은 철도교량의 구조적 변형특성에 따라 궤도구조와 레일체결장치의 기능유지 및 유지보수 감소 목적의 사용성 확보에 초점을 맞추고, 교량상판의 변위 검토조건에 추가적으로 교량받침 외부 교량상판 단부의 연직변위를 검토하여 단부에 위치하는 레일지지점에 대한 작용력을 확인할 것을 요구하고 있으며, 교량 상판 단부의 회전변위와 수직변위에 대한 검토기준을 국가별로 지정하여 시행할 것을 제안하고 있다. 이에 콘크리트궤도를 적용하고 있는 독일에서는 DS 804 App.29에 상향력 및 압축력에 대한 검토방법 및 기준을 제시하고 있으며, 단부에 사용되는 레일체결장치의 요구성능 수준을 명시하고 특수체결장치(BWG, elastic ribbed plate support, ERL)를 이용한 단부 궤도의 상호작용력 저감방안을 제시하였으며, 단부 레일지지점에 작용하는 상향력과 압축력의 한계수준을 레일체결장치의 성능과 연계하여 제시하고 이를 만족시킬 수 있는 교량 및 궤도설계를 권고하고 있다.

또한, 독일의 Eisenmann은 교대와 바닥판 또는 교각상 바닥판 사이의 횡단(Transition Zone)에서 상향력과 압축력에 의한 체결구의 손상과 승차감 저하를 방지하기 위해 교량 단부의 회전변위를 레일과 교량 바닥판의 연결 방식에 따라 0.5~2.0‰ 이내로 제한하고 교량받침과 마지막 레일지지점 사이 거리를 0.2m 이내로 하고, 이를 위해 바닥판과 교대 사이에 전환슬래브(Transition Slab)를 설치하거나 교대 전면을 돌출구조로 하는 것 등과 같은 방안을 제안한 바 있다.

다. 국 내

국내에서는 호남고속철도의 설계지침(노반편)에 교량상판의 변형과 관련한 사용성 관련 기준을 규정하고 있으며, 단부 궤도의 사용성 관련 기준은 경부고속철도 2단계 사업구간인 대구～부산 간에 콘크리트궤도를 적용하기 위한 한국철도시설공단의 “콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구”에서 교량 단부에서의 콘크리트궤도 사용성에 관한 연구를 수행하고 사용성 검토지침(안)을 제시하였다. 해당 연구에서는 독일의 DS 804 App.29의 내용을 참고한 사용성 검토에 대한 기본적인 설명과 수식을 제시하고 사용성 검토를 위한 프로그램 작성과 이를 이용한 사용성 검토를 수행하였으며 사용성에 문제가 있을 경우 이를 보완하기 위한 기본적인 구상을 제시하고 있다. 그 밖에 철도교량 단부 궤도의 상호 작용력에 관한 기존의 국내 연구결과로는 교량 단부에 작용하는 상호작용력에 영향을 미치는 인자로 교량의 기하학적 특성(교량받침～토목신축이음매간 거리, 교량받침～레일체결장치간 상대위치)과 교량의 최대 처짐량을 비롯하여 레일체결장치의 강성 등에 대한 매개변수 연구가 수행된 바 있다.

하지만 현재까지 국내외에서 진행된 철도교량 단부 궤도 사용성과 관련된 기존의 연구는 이론적 모델과 수치해석 방법에 의존한 연구로서 실제 열차운행조건에서의 현장여건을 감안한 궤도-교량 상호작용에 대한 현상을 이해하고, 콘크리트궤도가 부설된 철도교량의 단부 사용성을 확보하는 측면에서 단부 궤도 거동 수준의 예측 및 평가를 통해 공용중에 발생 가능한 궤도안전성 저해요인을 사전 구조적으로 해결할 수 있는 대안에 대한 연구가 필요하다.

1. 현행 철도교량 단부 궤도의 문제점 해결방안

가. 철도교량 단부 궤도의 사용성 및 성능개선 관련 연구동향

(1) 종방향 활동레일체결장치(ZLR, Zero longitudinal restraint)

최근 국내에서는 콘크리트궤도가 부설된 궤도-교량 단부사용성 확보를 위한 방법으로 종방향 활동레일체결장치(ZLR, Zero longitudinal restraint)를 적용하고 있다. 이는 미끄럼 발생 체결장치로서 레일패드와 레일저부사이에 스테인레스 판이 삽입되는 구조이며 침목에 팬드롤 레일 클립(fast clip)으로 고정되는 특수 레일제결장치이다.

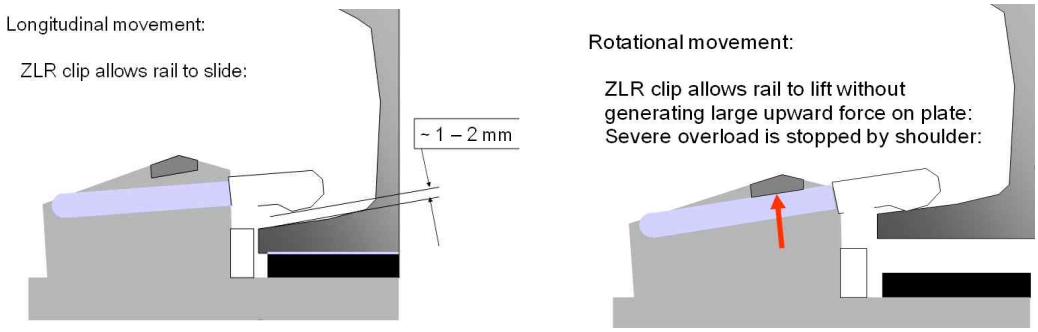


그림 1.11 종방향 활동체결장치(ZLR) 개념도

그림 1.11과 같이 일반적인 상태에서는 저면판과 레일 저부사이에 약 1~2㎜의 공간이 있으며, 횡방향력이 크게 작용할 때 저면판은 레일이 틸팅되는 것을 방지하는 역할을 한다. 레일패드는 마찰력이 작은 재료로 만들어져 있는데 열차하중이 없는 경우 레일과 침목 간에 마찰 없이 자유롭게 움직일 수 있게 하며 열차하중이 있는 경우 레일패드는 제동하중에 대해 어느 정도 저항한다. 초기에는 발생되는 일정수준의 상향변위에 대해서 클립과 레일저부사이의 틈새에 의하여 저항력이 발생하지 않으나, 그 이상의 상향변위에 대해서는 체결클립이 상압력을 저항하다가 어느 한계점 이상에서는 숄더에 의하여 매우 큰 강체저항이 발생한다. 이와 같은 거동특성을 변위-하중선도로 나타내면 그림 1.12와 같다.

①

②

①: 클립과 레일저부와의 틈새(1~2mm)
②: 활동체결구 강체저항 시작점

그림 1.12 종방향 활동체결장치(ZLR) 거동특성

국내 경부고속철도 2단계 교량의 단부 사용성 검토에서 기준값(17kN)을 초과하는 개소가 다수 발생(콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 관한 연구, 한국철도시설공단, 2010)하였으며, 상향력 저감대책으로 ZLR(종방향 활동체결장치)을 적용되었다.

그러나 경부고속철도 2단계 구간에 부설된 종방향 활동체결구(ZLR)는 토인슐레이터와 레일저부 간격확보 불량 및 과도한 수준의 단부회전으로 인해 체결구 손상, 패드 이탈, 스테인레스판 파손, 패드 경화 등이 발생하고 있다.



그림 1.13 종방향 활동체결장치(ZLR)의 시공불량 사례

(2) ERL 체결장치(ERL, Elastic ribbed plate support)

교대 및 교각 위 교량상판과 같은 토목구조물 신축이음매 구간에는 토목 구조물의 변형(신축, 수축, 처짐)에 의해 교량 신축부에 인접한 레일 지지점에는 직접적인 상향력이 발생된다. 이러한 상호작용력은 교량 상판의 변형에 기인한 단부 회전각 및 변위에 의해 발생된다.

매우 다양한 길이의 상판과 장지간 교량 상에서 레일 체결장치에 미치는 힘은 표준 체결장치의 허용범위를 벗어나게 된다. 독일 DB AG는 체결장치의 상향 및 하향 탄성을 유지하며 약 27 kN(System 300-1 : 12kN)의 상향력을 제어할 수 있도록 기존 시스템을 변형한 BWG의 특수 ERL을 소개하였다.

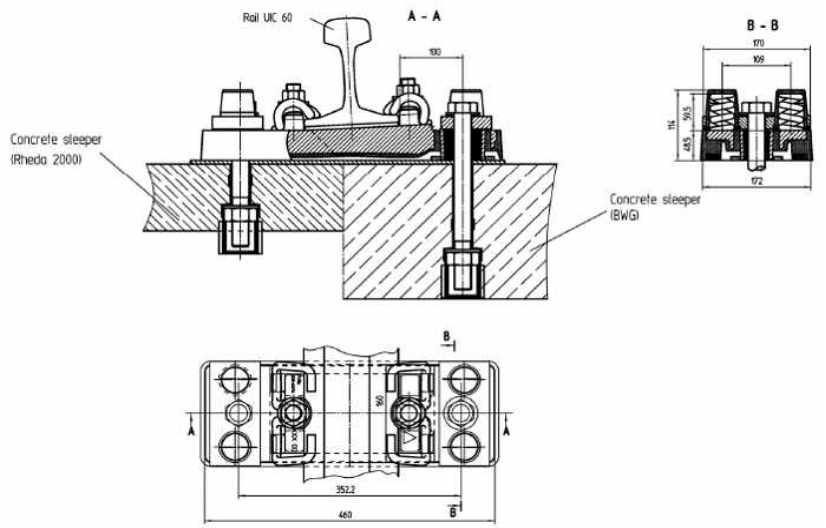


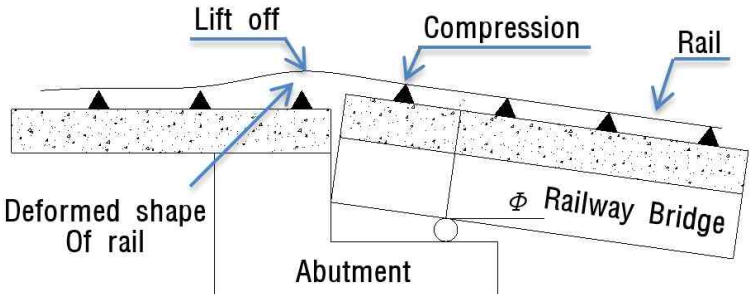
그림 1.14 교량단부용 특수 레일체결장치(ERL)

그림 1.14와 같은 ERL 체결장치는 분기기용 표준 ERL을 근간으로 발전되었으며 탄성재와 코일 스프링의 물리적 특성이 조화를 이루게 되어 가황처리된 탄성 베이스플레이트가 상향으로 1.5mm 변위와 하향으로 4.5mm 변위를 수용할 수 있으며, 약 20kN/mm의 스프링 강성을 확보한다. 이러한 레일지지점강성은 약 15kN/mm의 낮은 방진패드의 스프링강성과 상부에 체결되는 약 5kN/mm 강성의 프리텐션스프링의 상호작용에 근거한다.

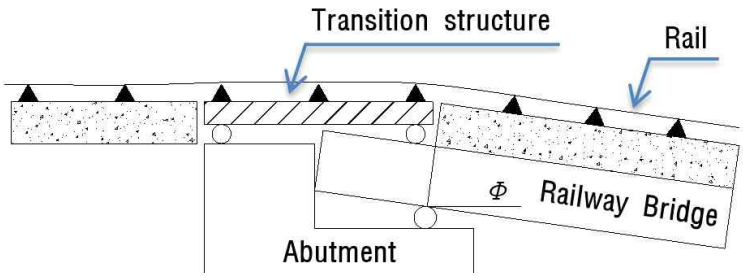
(3) 국외기술현황(독일)

독일의 콘크리트궤도 설계지침에는 교량 단부 상호작용에 의한 단부 궤도의 상향력 저감 방안으로 그림 1.14(b)와 같이 횡단궤도시스템이 제시되어 있다.(DS804, Feste Fahrbahn fur Schienenbahnen (Prof.Dr.-Ing. J. Eisenmann), Beton Kalendar 2000, pp. 291-326)

이러한 횡단궤도시스템의 적용으로 교량 단부의 상호작용력에 의한 체결장치의 조기 손상을 방지하고 체결구와 탄성패드(혹은 레일패드)에 작용하는 과도한 하중을 최소화하며, 고속선에서의 우수한 승차감을 확보할 수 있다고 기술되어 있다. 또한 교량 단부회전을 약 2‰, 1‰으로 제한하고 레일의 마지막 지지점이 교량지점 위에 위치하도록 규정화하고 있다. 만약 레일의 마지막 지지점을 교량지점 직상부에 설치함에 따라 교량 단부의 돌출부가 커지는 경우에는 교대를 외팔보처럼 튀어나오게 하거나, 횡단 구조물(횡단궤도시스템)을 설치하고 그 위에 탄성 레일체결장치를 함께 사용하는 것이 바람직하다고 제시되어 있다.



(a) 일반적인 철도교량 단부 궤도변형 개요도



(b) 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도변형 저감 개요도

그림 1.15 횡단궤도시스템 적용여부에 따른 단부 궤도변형 특성

독일의 경우 교량의 거동에 종속적으로 거동하게 되는 콘크리트궤도의 궤도구성품 중 레일체결장치의 기능유지를 열차주행안전성 확보를 위한 중요한 요소로 두고 단부 궤도 체결구의 사용성 검토에 초점을 맞추어 설계기준을 정립한 바 있다. 또한 국내 규정에서도 레일체결장치의 레일패드와 체결구에서 공용기간 동안 아무런 손상 없이 레일지지점(레일체결장치)에 가해지는 상향력과 압축력을 충분히 흡수할 수 있어야 한다고 규정하고 있다.

독일연방철도국(DB AG)에서 독일내의 대학연구소와 궤도시스템 개발업체인 PORR, Voestalphine 등과 함께 교량신축이음부 횡단궤도시스템을 개발하여 콘크리트궤도가 적용된 철도교량에 다양하게 적용하고 있다. 이러한 연구성과 및 시공사례 등을“Feste Fahrbahn”및 “Konstruktion und Bauarten fuer Eisenbahn und Straßenbahn”(Edgar Darr, Werner Fiebig, Eurail press)에 소개하고 있으며 교량의 처짐과 단부변형수준 및 신축량에 맞게 다양한 형식의 횡단궤도시스템을 개발하여 실제 설계 및 시공에 적용하고 있다.

그림 1.16은 독일 베를린 중앙역에 설치되어 사용중인 횡단궤도시스템의 전경이며 해당 시스템은 강구조를 기본으로 하고 중앙부 일부 단면이 콘크리트로 구성된 강합성 시스템이다. 베를린 중앙역의 경우 지하와 지상 플랫폼이 한 곳에 있으며 지상의 경우 교량과 연결된 구조로써 정거장 구조물과 교량간의 연결부에는 모두 횡단궤도시스템이 설치되어 있다.



(a) 강거더 구조(Berlin중앙역)



(b) 거더 구조(Skew 교량 신축이음부)



(c) 강합성 패널 구조

그림 1.16 독일 횡단궤도시스템의 종류

“Feste Fahrbahn auf großen Stahluberbauten der NBS Hannover-Berlin(Slab track on the long steel bridge in NBS Hannover-Berlin)”에 소개된 독일의 횡단궤도시스템은 그림 1.16과 같으며, Hannover-Berlin 구간을 연결하는 장경간 철도교량구간에 적용되었다. 횡단궤도시스템의 레일지지점 간격은 600mm이며 5set의 탄성 레일체결장치가 배치되어 있다.

또한, 교량바닥판을 기준으로 인접 레일과의 레일면고(Rail level, R.L)를 유지할 수 있는 횡단궤도시스템의 높이 및 받침의 높이가 결정되었음을 알 수 있다. 횡단궤도시스템의 받침은 교량받침의 연직 직상부에 위치하여야 하며 받침의 형식은 포트받침을 사용한 것으로 조사되었다.

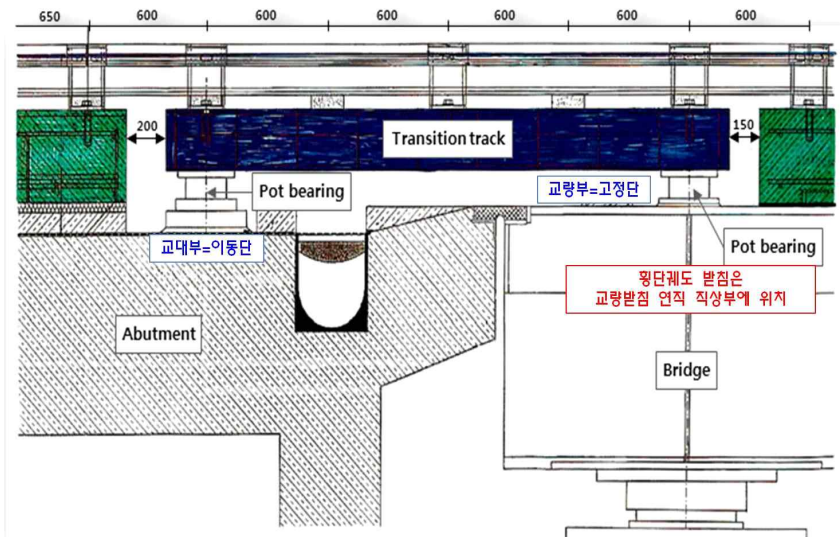


그림 1.17 독일 횡단궤도시스템 적용사례

횡단궤도시스템의 받침은 횡단궤도시스템 내의 첫 번째와 마지막 레일지지점의 위치와 연직방향으로 동일한 위치에 시공되었으며 교대부(그림 1.16의 좌측)는 이동단, 교량부(그림 1.16의 우측)는 고정단으로 설계되어있다.

그밖에 다른 형식의 횡단궤도시스템에 대한 연구는 Rudolf Seidel에 의해 수행되었으며 Hannover-Berlin 구간을 연결하는 장경간 철도교량구간에 적용된 독일의 횡단궤도시스템에 대한 연구결과를 발표하였다. Hannover-Berlin 구간에 적용된 횡단궤도시스템은 2주형 강합성 구조로 설계 및 시공되어 있으며 강재로 된 주형속에 철근콘크리트를 채우고 그 위에 일정 레일지지점간격(600mm)으로 직결식 탄성 레일체결장치(ERL, Elastic ribbed plate support)를 시공하였다. 또한, 교량바닥판을 기준으로 인접 레일과의 레일면고(Rail level, R.L)를 유지할 수 있는 횡단궤도시스템의 높이 및 받침(Port Bearing)의 높이가 결정되었다. 횡단궤도시스템의 받침은 교량받침의 연직 상부에 위치하였으며 받침의 형식은 포트받침이 적용되었다. 횡단궤도시스템의 받침은 횡단궤도시스템 내의 첫 번째와 마지막 레일지지점의 위치와 연직방향으로 동일한 위치에 시공되었으며 교대부는 이동단, 교량부는 고정단으로 적용되었다. 또한, Hannover-Berlin구간에 적용된 횡단궤도시스템의 받침은 앵커매입식이며 현장에서 받침부 채움몰탈을 타설하여 받침의 레벨을 맞추고 평탄성을 확보하였다.

또한, 그림 1.17과 같이 Hannover-Berlin구간에서 적용한 횡단궤도시스템의 교대부 가동단 받침은 앵커매입식이며 현장에서 받침부 채움몰탈(Ausgleichfuge)을 타설하며 받침의 레벨을 맞추고 평탄성을 확보하였다. 반면 교량부 고정단 받침의 경우 해당구간의 교량상판이 강재로 이루어져 교량상판에 볼트용접으로 직접 고정되었다.

그림 1.18은 Hannover-Berlin 구간에 적용된 횡단궤도시스템의 단면으로써 2주형 강합성 구조로 설계 및 시공되어 있으며 강재로 된 주형 속에 철근 콘크리트를 채우고 그 위에 일정 레일지지간격으로 직결식 탄성 레일체결장치를 시공하였다. 적용된 탄성 레일체결장치는 BWG사에서 특수 개발한 방진레일체결장치(ERL)로써 상향변위 1.5mm를 수용가능하며 정적 스프링강성이 20kN/mm인 특수레일 체결장치가 적용되었다.

상부구조물의 변형에 의한 단부 회전은 종방향 거동과 회전 운동이 상향력 또는 인장력으로 변형되어 발생되며 콘크리트궤도 적용 시 이러한 요소들은 베이스플레이트 교량신축부(구조물 경계부)에 설치되는 특수 궤도구조물(횡단궤도시스템)에 의해 조절되어야 하며 일반적으로 횡단궤도시스템의 적용은 교량과 궤도설계 시 검토되는 상향력의 수준에 따라 결정되며, 필요 시 특수 레일체결시스템(ERL)과 혼용하여 적용가능하다.

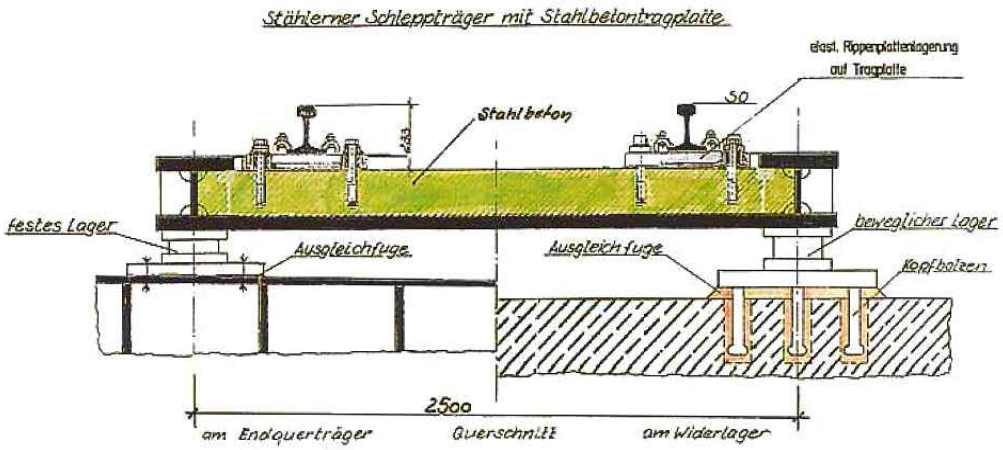


그림 1.18 특수 레일체결장치(ERL, BWG)를 사용한 독일 횡단궤도시스템

표 1.3은“Feste Fahrbahn auf großen Stahluberbauten der NBS Hannover-Berlin”에 소개된 횡단궤도시스템이 부설된 구간에서 시행된 ICE(InterCity Express) 열차 주행시험결과를 바탕으로 정리한 횡단궤도시스템의 거동한계를 나타낸다. 주행시험에 적용된 열차속도는 160～310km/h 이다.

표 1.3 독일 횡단궤도시스템(L=2.5m)의 거동한계(Hannover-Berlin)

구 분	Value
횡단궤도시스템의 중량(kNf)	70~95
고유진동수(Hz)	70~80
연직변위(mm)	< 0.5
발생가속도(g) (주행시험 결과 측정치)	0.06~0.08
가속도 허용기준(g) (단면설계 시의 기준치)	< 0.25
설계 충격계수(i)	2.0
발생 충격계수(i)	< 1.2

독일의 횡단궤도시스템과 관련된 문헌에 따르면 가장 중요한 횡단궤도시스템의 설계요건은 충분한 강성과 중량이다. 횡단궤도시스템은 자체적으로 충분한 강성을 확보함으로써 횡단궤도시스템의 상향변위(부상)가 거의 발생하지 않아야 하며 발생응력의 수준 또한 충분한 안전율을 확보하며 장기적인 피로내구성을 확보할 수 있어야 한다. 또한 교량 단부의 상향력에 의한 횡단궤도시스템의 부상 혹은 들뜸현상을 방지하기 위해 충분한 중량을 가져야 한다. 그리고 이러한 강성과 중량의 수준은 횡단궤도시스템이 열차의 운행속도 대역에서 공

진이 발생되지 않는 적정한 수준의 고유진동수를 확보할 수 있도록 설계시 고려하여야 한다.

독일에서 개발된 횡단궤도시스템은 도시철도구간(S-Bahn), 일반철도(Regional Bahn) 및 고속철도구간(IC, ICE)을 비롯하여 중량 화물전용선 구간 내에 있는 교량에 적용된 바 있으며 다양한 열차하중 및 환경에서 그 성능 및 효과가 입증되었다. 따라서 Hannover-Berlin구간의 횡단궤도시스템의 거동한계 기준값을 본 연구에서 개발한 한국형 횡단궤도시스템의 성능 기준값으로 활용하였다.

국내에서도 한국철도시설공단에서 발주하여 한국철도기술연구원에서 수행한“콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구 용역(설계지침)” 결과보고서 내용에 이러한 독일의 횡단궤도시스템과 관련된 내용이“교량단부 사용성 향상을 위한 방안”으로 간단하게 소개된 바 있으나 구체적인 단면이나 성능수준 등과 같은 내용은 없으며 이에 대한 연구개발 사례 역시 없는 실정이다.

본 연구의 횡단궤도시스템은 Hannover-Berlin 구간에 적용된 강합성 형식의 횡단궤도시스템의 장점을 벤치마킹하여 개발된 시스템으로써 국내에서 사용되는 궤도용품과 설계기준에 적합하게 설계 및 제작하였다. 독일의 횡단궤도시스템과 관련된 문헌에 따르면 횡단궤도시스템은 자체적으로 충분한 강성을 확보함으로써 횡단궤도시스템의 변위가 거의 발생하지 않아야 하며 발생응력의 수준 또한 충분한 안전율을 확보하여 장기적인 피로내구성을 확보할 수 있어야 한다. 그리고 이러한 강성과 중량의 수준은 횡단궤도시스템이 열차의 운행속도 대역에서 공진이 발생되지 않는 적정한 수준의 고유진동수를 확보할 수 있도록 설계 시 고려하여야 한다. 독일에서 개발된 횡단궤도시스템은 도시철도구간, 일반철도 및 고속철도구간을 비롯하여 화물전용선 구간 내에 있는 교량에 적용된 바 있으며 다양한 열차하중 및 환경에서 그 성능 및 효과가 입증되었다.

(4) 중국의 플로팅 베어링 시스템

중국 고속철도에 적용된 플로팅 베어링 시스템은 교량상 장대레일축력을 해소하기 위한 목적으로 궤도슬래브층을 탄성받침을 이용하여 부유시킴으로써 궤도-교량 상호작용력을 완화시켜 장대레일 축력을 해소한 시스템이다. 중국 무광선에 적용한 플로팅 베어링 시스템은 그림 1.19와 같다.



그림 1.19 교량 단부 Floating-Bearing 시스템 전경

중국의 플로팅 베어링 시스템은 건설선에 적용하기에는 유리하나 운행선 시공이 매우 어렵고 현장타설 콘크리트량이 많아 공기확보에도 용이하지 않다. 또한 레일체결장치의 형식변화에 직접적인 영향을 받는 궤도구조형식으로써 국내 철도환경에는 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

중국의 플로팅 베어링 시스템은 탄성재를 이용한 부유궤도를 실현함으로써 궤도-교량 상호작용력인 장대레일 축력을 저감 할 수는 있었으나, 플로팅 궤도시스템의 특성상 건설비가 매우 고가이고 시공과정이 복잡하여 공기가 장기간 소요되며 궤도하부에 매입되는 형식으로 설치된 플로팅 베어링(탄성재)의 유지관리가 어렵다는 단점이 있다.



그림 1.20 Floating-Bearing시스템의 받침 시공사례

더욱이 중국의 플로팅 베어링 시스템의 구조적 특성상 궤도를 부유시킨 높이(탄성재의 높이)가 매우 낮고 플로팅 베어링의 설치 위치 또한 교량베어링 위치와 어긋나게 설치되어 있어 이론적인 교량 단부 궤도의 역학적 거동특성을 감안할 때 교량 단부 궤도에 작용하는 상향력 및 부가작용력을 완화시키기에는 다소 불리한 구조인 것으로 분석되었다.

결론적으로 중국의 플로팅 베어링 시스템은 장대레일 축력저감에는 효과가 있으나 단부 궤도작용력 완화에는 비교적 효과가 적은 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 횡단궤도시스템에서는 중국의 플로팅 베어링 시스템에 적용된 탄성재를 이용한 플로팅의 기본 원리를 채택하여 횡단궤도시스템을 교량 상부구조와 분리시키는 원리를 탄성받침보다 내구성 측면에서 유리한 포트받침을 적용함으로써 중국 플로팅 베어링 시스템의 장점을 효과적으로 국내 철도환경에 접목시켰다.

제 4 절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

현재 국내 철도는 초고속 철도차량개발, 한국형 틸팅차량개발 및 기존선 고속화를 위한 인프라구축 등과 같이 세계의 철도기술과 견주어 손색이 없을 만큼 비약적인 발전을 거듭하였으나 철도교량상 장대레일 축력저감 및 단부 사용성 확보와 관련한 기술이 미약하였던 바, 본 연구를 통해 국외 철도선진국 중 독일 다음으로 교량-궤도상호작용과 관련한 실용기술을 개발함으로서 세계 철도시장에서의 국내기술력을 입증할 수 있는 기회라 판단된다.

또한, “콘크리트궤도가 부설된 철도교량상 장대레일 축력저감 및 단부 사용성 확보를 위한 한국형 횡단궤도시스템 개발”을 통해 국내 철도교량 단부 궤도 사용성 및 주행안정성 확보와 관련된 핵심기술력을 확보하고 초장대 철도교량의 대중화도 가능하게 되었다.

국외 선진기술개발 성과를 벤치마킹하여 보다 진보적인 시스템의 개발되어 국내 실정에 적합한 국산화 기술로 재탄생시킴으로서 기술개발 비용과 시행착오를 최소화하여 국가기술개발 예산 저감을 도모하였으며 독일의 단일기능(단부사용성 확보) 횡단궤도시스템의 기술수준을 뛰어넘어 한국형 다기능(단부사용성 확보 및 장대레일 축력저감) 횡단궤도시스템을 개발하여 해외기술과의 차별성을 확보하고 진보적 국산화 기술개발을 완료하여 성과를 곧바로 현장에 적용할 수 있게 만들었다.

본 연구에서 개발한 한국형 횡단궤도시스템은 국내 최초로 개발된 것으로서 타 연구개발사업과의 중복성이 없으며 국내 기술력으로 국내 환경과 실정에 적합한 독자적인 한국형 철도교량 단부 횡단궤도시스템을 개발함으로써 해외 기술의존도가 높은 국내 콘크리트 궤도기술분야의 기술 자립도를 향상시키고 국가적인 차원에서의 철도 궤도기술력 향상과 같은 파급효과가 예상된다. 한 해외우수기술을 응용한 국산화 기술개발로 독자적인 국내고유의 철도교량과 궤도인터페이스분야의 기술력을 확보하여 해외기술이전 및 컨설팅 등으로 궤도기술력에 대한 해외 역수출의 기반 인프라를 구축하여 부가가치를 창출하고 국가기술력향상을 도모할 수 있다. 정부주도하에 진행된 콘크리트궤도관련 선행연구결과(콘크리트궤

도 인터페이스 성능향상에 대한 연구 용역)의 미비점을 보완 할 수 있는 실질적인 실용화기술개발로 국가 R&D정책의 실효성을 입증하고 부가적인 궤도분야 연구개발의 인프라 확산 효과가 예상된다.

제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 서 론

1. 연구배경

가. 교량 단부 궤도의 문제점

콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부에서는 열차하중에 의한 단부회전각 발생, 교량기초의 침하 및 교량 상판의 상·하연 온도차 등에 의해 교량 상판이 정, 동적으로 거동하게 되어 단부 궤도가 변형되고, 이러한 궤도의 변형은 궤도 구성품(레일 및 레일체결장치)에 직접적인 상호 작용력으로 작용하게 된다. 교량 단부회전은 교량 위에 부설된 레일의 곡률을 유발시키고 이러한 레일의 변형과정에서 교량측과 교대측 레일지지점에는 각각 압축력과 상향력이 발생하게 된다. 이에 철도교량 단부 궤도의 성능개선을 위해 독일 및 오스트리아를 비롯한 유럽과 중국 철도에서는 각국의 철도환경에 맞게 횡단궤도시스템을 개발하여 적용되고 있다.

(1) 국내 고속철도 교량 단부 궤도 상향력 발생 수준 검토

횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도 상호작용력 저감 효과를 검토하고자 선행 연구결과(콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 관한 연구, 한국철도시설공단, 2010)를 인용하여 국내 철도교량의 단부 궤도에 발생하는 상호작용력의 수준 및 범위를 조사하였으며, 경부고속철도 2단계구간 교량상 콘크리트궤도 설계보고서(궤도구조계산서)를 참조하여 DS 804 Appendix 29 및 철도설계편람에 근거한 궤도와 교량의 최대처짐을 발생시키는 모든 하중조합을 검토하였다.

검토결과, 단부 궤도의 상호작용력은 교량바닥판 회전에 의한 레일지지점 수직변위와 교각회전이나 받침 침하에 의한 수직변위의 차이가 작을 때 작아지는 것을 확인하였다. 이에 따라 상부구조의 휨 강성, 교량받침 배치방식 및 받침의 강성이 단부 궤도 상호작용력에 큰 영향을 미치는 것으로 검토되었다. 반면, 교각높이와 지반의 강성은 단부 궤도에 작용하는 상호작용력의 변화에 거의 영향을 주지 못하며 교량받침과 마지막 레일지지점 사이의 거리는 대폭적인 감소가 아니면 작용력 감소에 큰 효과가 없는 것으로 검토되었다.

하중의 영향은 열차수직하중이 상향력에 가장 큰 영향을 미치고, 압축변위는 차륜하중의

직접적인 작용에 의해 결정되는 것으로 확인되었으며, 교각부 상향력에서는 크리프 및 건조수축, 바닥판 상하면 온도차, 레일-교량 온도차에 대한 상호작용의 영향이, 압축력에서는 시제동하중에 대한 상호작용의 영향이 미소한 것으로 나타났다.

레일체결구 상향력 해석에서는 열차 수직하중, 기초침하 및 상판 상·하연 온도차 등에 의해 교량상판의 휨이 발생할 때 교량상판과 레일체결구간의 인장력을 계산하였다. 이때 교량상판과 레일체결구간의 최대 인장력은 토목신축이음매에 가장 근접하여 위치한 레일체결구에서 발생한다. 따라서 최대 인장력 값에 영향을 미치는 인자로는 교량의 기하학적 특성(교량받침~토목신축이음매간 거리, 교량받침~레일체결구간 상대위치, 교량의 최대 처짐량) 및 레일체결구의 수직스프링계수를 들 수 있다. 따라서 교량 단부에서의 변위는 레일에 추가적인 변위를 발생시키며 동시에 레일체결구에 부가 인장력을 발생시키므로 이러한 상호작용력을 허용기준값 이내로 제한하여야 선로의 내구성 및 사용성을 보장할 수 있다. 해석방법은 DS804 Appendix 29를 참조하였으며 이때 교량의 최대 처짐을 발생시키는 모든하중을 조합하여 검토하였다.

(1) 지지점(교량받침)에서 단위 회전각(φ=+1‰)
(2) 각 지지점(교량받침)에서 지점처짐(δ=1mm)
(3) 레일상에 단위윤중(P=100kN)

레일체결구 상향력 산정은 단위변위 및 단위하중으로 계산된 각각의 레일체결구에서 발생한 인장력을 합산하였다. 열차하중에 의한 교량상판 단부 회전에 따른 레일체결구 상향력 계산시 하중계수(동적증가계수)를 적용하였다.

본 연구에서는 경부고속철도 2단계 구간의 철도교량에 대해 교량형식 및 제원을 총 21개 타입으로 구분하여 국내에 공급되는 체결장치(SFC FC1501)의 스프링계수(KIMM 시험값)로 정적스프링계수(C_{stat}=47.971kN/mm), 동적스프링계수(C_{dyn}=71.075kN/mm)를 해석에 적용하였다.

상향력 해석 시 독일기준인 DS804를 적용하였으며 계산결과에 대한 평가시 사용되는 레일체결장치의 특성 값은 DS804 Appendix 29를 적용하였다.

표 2.1 교량 단부 궤도 사용성 평가결과 요약(상향력 기준값 초과개소)
(콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 관한 연구, 한국철도시설공단, 2010)

교 량	위 치													
	좌측교대	P2	P4	P6	P8	P10	P12	P14	P16	P18	P20	P22	P24	우측교대
광석고가	40.55	20.15	19.31	19.31	19.50	31.61								48.52
구기제고가	19.57													19.62
남천제1교	41.13	19.98	18.68	18.58	18.49	18.58								41.10
대곡고가	40.79	19.27	19.78											41.70
덕천고가	40.94	19.52	19.65	18.87	18.36	20.36	19.81	18.43	18.33	18.33	18.48	19.65	19.58	39.82
방내고가	40.72	19.62	20.68	20.50	33.71									48.70
삼정제1고가	41.56	33.90												48.76
송선고가	39.17	22.24	22.64											39.20
영청고가	40.91	35.20												50.39
오목천교	20.65	18.32												25.33
월산교	26.01		57.39											28.91
이조천교	41.51	17.58	17.76	17.20	17.36	17.32								42.38
중리고가	25.82		17.85	17.14										30.00
활천제2교	41.84	19.84												48.89

교량상판 단부에서의 변위는 레일에 추가적인 변위를 발생시키며 동시에 레일체결구에 부가 인장력을 발생시키는데 이러한 궤도-교량 상호작용력을 허용기준값 이내로 제한하여 궤도의 내구성 및 사용성을 확보하여야 한다.

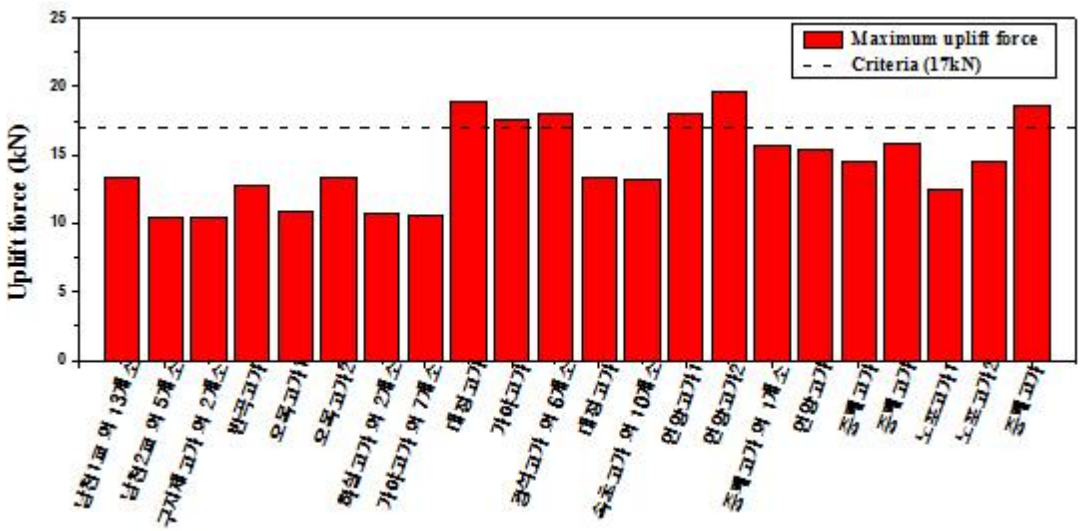


그림 2.1 교량 단부 궤도 상향력 검토결과 요약(경부고속철도 2단계 구간)

궤도-구조물 상호작용 검토 결과, 그림 2.1과 같이 대정고가, 가야고가, 광석고가, 언양고가, 중궤고가의 경우 각각 18.93kN, 17.59kN, 17.97kN, 17.99kN, 19.61kN, 18.53kN으로 나타나 허용 상향력 기준인 17kN보다 3.5% ~ 15.4% 크게 나타났으며, 전체 교량 37개소 중 약 30%인 언양고가외 10개소가 허용 기준을 초과하는 것으로 나타났다(콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 관한 연구, 한국철도시설공단, 2010).

나. 교량 단부 침목 이격거리 검토

국내 고속철도에 부설되어있는 궤도 침목의 간격은 650mm 이하로 시공되도록 설계되어 있으며, 침목 시공 시 혹한기 최대 수축량을 계산하여 동절기에도 허용량인 670mm가 넘지 않도록 침목간격을 최대한 축소하여 시공되어야 한다.

침목간격 및 궤도충격하중 수준은 본선 일반구간보다 교량 단부에서 더욱 크게 발생되며, 이는 교량 단부 궤도 변형 및 침목간격의 확대를 야기하고, 단부 레일 및 체결장치의 내구수명 단축과 사요성 저하가 우려될 것으로 판단된다. 현 경부고속철도 2단계 구간 중 침목간격이 650mm를 초과하는 개소가 발생하고 있으며, 침목간격 확대로 인한 교량 단부 레일의 휨응력 증가가 나타날 것으로 사료된다.

표 2.2 경부고속철도 2단계(대구~부산) 교량 신축부 TCL 단부 침목 이격거리

TCL span	단부 침목 이격거리
8.0m	695mm
7.5m	720mm
7.0m	670mm
6.5m	845mm
6.0m	695mm



그림 2.2 교량 단부 침목 이격거리 확대개소

다. 사교(Skew)의 침목배치 불량 검토

현재까지 국내에는 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부 레일체결구에 발생하는 작용력과 교량단부 회전각 및 단차를 해소하여 단부 궤도의 사용성 및 안정성 확보를 위한 대안으로 설계단계에서 레일 지지간격과 교량 베어링-레일지지점간 거리를 조정하거나 적정한 수준의 레일체결장치를 사용하는 등 2차적이고 수동적인 대안밖에는 없는 실정이다. 그러나 현장에서는 시공상의 편의 때문에 구조물 신축이음부의 침목간격(레일지지점)이 비정상적으로 확대되거나 침목간격확보를 위해 교량 신축이음부를 메움으로 인해 구조물 신축을 방해하고 궤도형태가 조잡해지는 경우가 발생하고 있는 것으로 검토되었다.



(a) 국내 공용중인 교량 신축이음부 단부 궤도현황(침목간격확대)



(b) 교량신축이음부 메움으로 인한 구조물 신축방해 및 궤도형태 조잡

그림 2.3 철도교량 단부 시공 불량 상태

2. 국내·외 철도교량 단부 궤도의 사용성 평가 기준 및 연구동향

철도교량의 경우, 온도하중 영향에 따른 거동을 비롯하여 열차주행으로 인한 상부구조의 휨에 기인한 종방향 변형과 수직방향 변형의 수준은 교량상 궤도구조의 거동에 직접적인 영향을 미치며, 이는 부가적인 궤도-교량 상호작용력을 발생시키는 요인이 된다. 이러한 궤도-교량 상호작용(track bridge interaction, TBI) 중 교량상부구조의 처짐에 따른 수직방향의 변형(단차 및 회전)은 열차운행안전 및 승차감 등의 사용성 및 단부 궤도구성품의 성능에 부정적인 영향을 미치게 되며, 이를 방지하기 위해 국내·외 각국에서는 교량상판의 변형에 대해 표 2.3과 같이 한계값을 규정하고 있다.

표 2.3 국내·외 고속철도 교량 사용성 관련 기준

구 분		국 내		일 본*		유 럽	
		단 선	복 선	단 선	복 선	단 선	복 선
관련기준		호남고속철도 설계지침(노반편)		철도구조물 등 설계표준·동해설 (변위제한)		EN 1990 EN 1991-2	
설계속도		350km/h		360km/h		350km/h	
안	처짐	L/600		L/1,100	L/1,900	L/600	
전	단차	1.0mm	2.0mm	1.0mm	2.0mm	2.0mm	
성	회전	5×10-4rad**		2.0‰		-1～2‰***	
승	처짐	L/1,100	L/1,500	L/1,500	L/2,200	L/1,050	L/1,500
차	단차	-		2mm		-	
감	회전	-		2.5‰		-	

* : 일본기준은 콘크리트 궤도에 대한 기준

** : BRDM Final Report(경부고속철도에 적용된 설계기준)의 동적 안전성에 관련된 기준

*** : DS 804 App.29에서 자갈도상의 유지관리에 요구하는 기준

가. 일 본

일본은 2006년'철도구조물 등 설계표준·동해설(변위제한)'편을 새롭게 제정하면서 안전성과 관련된 변위기준 뿐만 아니라 승객의 승차감을 고려하여 자갈궤도와 콘크리트궤도에 대해 별도의 기준을 제시하고 있으며, 궤도면의 부등변위를 구조형식, 교량받침, 지반침하 등을 고려하여 산정하고, 승차감을 위한 한계치 외에 유지관리를 위한 궤도면 부등변위의 한계치를 설정하였으며, 손상레벨에 따른 연직방향 레일응력, 레일압력(체결구의 레일패드 압력) 등의 구성요소의 한계값을 정하고 있다.

나. 유 럽

교량의 수직방향 거동에 따른 궤도-교량 상호작용의 구조적 문제는 대부분 토공구간과 교량 연결부(교대부) 또는 교량 연결부(교각부)와 같은 교량의 단부에서 발생한다. 특히, 콘크리트궤도가 부설된 교량의 경우에는 교량상판에 고정되어 있는 콘크리트궤도의 레일과 레일지지점은 교량 단부의 회전에 의한 교량의 변형에 궤도가 종속적으로 함께 변형하게 되고, 이러한 교량 단부의 회전에 따른 레일의 변형과정에서 교량측 마지막 레일지지점은 압축력이, 교대측 첫 번째 레일지지점에는 상향력이 발생하게 됨에 따라 콘크리트궤도의 사용성 측면에서 문제를 야기하게 된다.

유럽의 EN1990과 EN1991-2에서는 이와 같은 철도교량의 구조적 변형특성에 따라 궤도구조와 레일체결장치의 기능유지 및 유지보수 감소 목적의 사용성 확보에 초점을 맞추고, 교량상판의 변위 검토조건에 추가적으로 교량받침 외부 교량상판 단부의 연직변위를 검토하여 단부에 위치하는 레일지지점에 대한 작용력을 확인할 것을 요구하고 있으며, 교량 상판 단부의 회전변위와 수직변위에 대한 검토기준을 국가별로 지정하여 시행할 것을 제안하고 있다. 이에 콘크리트궤도를 적용하고 있는 독일에서는 DS 804 App.29에 상향력 및 압축력에 대한 검토방법 및 기준을 제시하고 있으며, 단부에 사용되는 레일체결장치의 요구성능 수준을 명시하고 특수체결장치(BWG, elastic ribbed plate support, ERL)를 이용한 단부 궤도의 상호작용력 저감방안을 제시하였으며, 단부 레일지지점에 작용하는 상향력과 압축력의 한계수준을 레일체결장치의 성능과 연계하여 제시하고 이를 만족시킬 수 있는 교량 및 궤도설계를 권고하고 있다.

또한, 독일의 Eisenmann은 교대와 바닥판 또는 교각상 바닥판 사이의 횡단(Transition Zone)에서 상향력과 압축력에 의한 체결구의 손상과 승차감 저하를 방지하기 위해 교량 단부의 회전변위를 레일과 교량 바닥판의 연결 방식에 따라 0.5~2.0‰ 이내로 제한하고 교량받침과 마지막 레일지지점 사이 거리를 0.2m 이내로 하고, 이를 위해 바닥판과 교대 사이에 전환슬래브(Transition Slab)를 설치하거나 교대 전면을 돌출구조로 하는 것 등과 같은 방안을 제안한 바 있다.

다. 국 내

국내에서는 호남고속철도의 설계지침(노반편)에 교량상판의 변형과 관련한 사용성 관련 기준을 규정하고 있으며, 단부 궤도의 사용성 관련 기준은 경부고속철도 2단계 사업구간인 대구~부산 간에 콘크리트궤도를 적용하기 위한 한국철도시설공단의 “콘크리트궤도 인터페

이스 성능향상에 대한 연구"에서 교량 단부에서의 콘크리트궤도 사용성에 관한 연구를 수행하고 사용성 검토지침(안)을 제시하였다. 해당 연구에서는 독일의 DS 804 App.29의 내용을 참고한 사용성 검토에 대한 기본적인 설명과 수식을 제시하고 사용성 검토를 위한 프로그램 작성과 이를 이용한 사용성 검토를 수행하였으며 사용성에 문제가 있을 경우 이를 보완하기 위한 기본적인 구상을 제시하고 있다. 그 밖에 철도교량 단부 궤도의 상호 작용력에 관한 기존의 국내 연구결과로는 교량 단부에 작용하는 상호작용력에 영향을 미치는 인자로 교량의 기하학적 특성(교량받침~토목신축이음매간 거리, 교량받침～레일체결장치간 상대위치)과 교량의 최대 처짐량을 비롯하여 레일체결장치의 강성 등에 대한 매개변수 연구가 수행된 바 있다.

하지만 현재까지 국내외에서 진행된 철도교량 단부 궤도 사용성과 관련된 기존의 연구는 이론적 모델과 수치해석 방법에 의존한 연구로서 실제 열차운행조건에서의 현장여건을 감안한 궤도-교량 상호작용에 대한 현상을 이해하고, 콘크리트궤도가 부설된 철도교량의 단부 사용성을 확보하는 측면에서 단부 궤도 거동 수준의 예측 및 평가를 통해 공용중에 발생 가능한 궤도안전성 저해요인을 사전 구조적으로 해결할 수 있는 대안에 대한 연구가 필요하다.

3. 현행 철도교량 단부 궤도의 문제점 해결방안

가. 철도교량 단부 궤도의 사용성 및 성능개선 관련 연구동향

(1) 종방향 활동레일체결장치(ZLR, Zero longitudinal restraint)

최근 국내에서는 콘크리트궤도가 부설된 궤도-교량 단부사용성 확보를 위한 방법으로 종방향 활동레일체결장치(ZLR, Zero longitudinal restraint)를 적용하고 있다. 이는 미끄럼 발생 체결장치로서 레일패드와 레일저부사이에 스테인레스 판이 삽입되는 구조이며 침목에 팬드롤 레일 클립(fast clip)으로 고정되는 특수 레일제결장치이다.

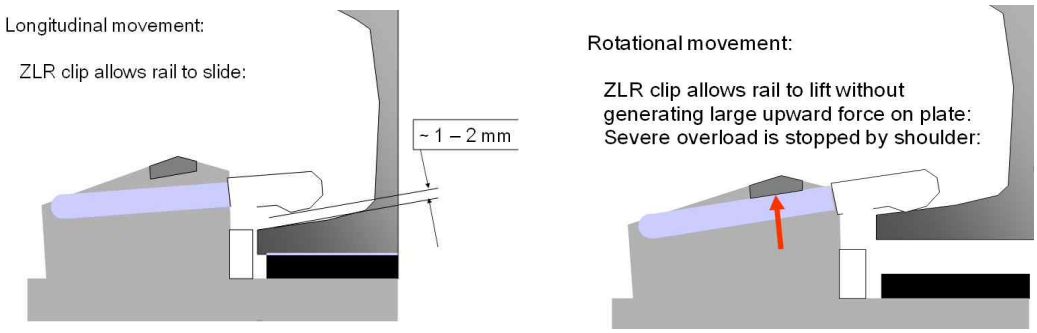
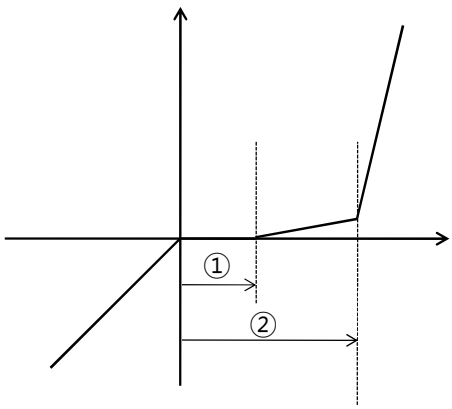


그림 2.4 종방향 활동체결장치(ZLR) 개념도

그림 2.4와 같이 일반적인 상태에서는 저면판과 레일 저부사이에 약 1~2㎜의 공간이 있으며, 횡방향력이 크게 작용할 때 저면판은 레일이 틸팅되는 것을 방지하는 역할을 한다. 레일패드는 마찰력이 작은 재료로 만들어져 있는데 열차하중이 없는 경우 레일과 침목 간에 마찰 없이 자유롭게 움직일 수 있게 하며 열차하중이 있는 경우 레일패드는 제동하중에 대해 어느 정도 저항한다. 초기에는 발생되는 일정수준의 상향변위에 대해서 클립과 레일저부사이의 틈새에 의하여 저항력이 발생하지 않으나, 그 이상의 상향변위에 대해서는 체결클립이 상압력을 저항하다가 어느 한계점 이상에서는 숄더에 의하여 매우 큰 강체저항이 발생한다. 이와 같은 거동특성을 변위-하중선도로 나타내면 그림 2.5와 같다.



① : 클립과 레일저부와의 틈새(1~2mm)
② : 활동체결구 강체저항 시작점

그림 2.5 종방향 활동체결장치(ZLR) 거동특성

국내 경부고속철도 2단계 교량의 단부 사용성 검토에서 기준값(17kN)을 초과하는 개소가 다수 발생(콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 관한 연구, 한국철도시설공단, 2010)하였으며, 상향력 저감대책으로 ZLR(종방향 활동체결장치)을 적용되었다.

그러나 경부고속철도 2단계 구간에 부설된 종방향 활동체결구(ZLR)는 토인슐레이터와 레일저부 간격확보 불량 및 과도한 수준의 단부회전으로 인해 체결구 손상, 패드 이탈, 스테인레스판 파손, 패드 경화 등이 발생하고 있다.



그림 2.6 종방향 활동체결장치(ZLR)의 시공불량 사례

(2) ERL 체결장치(ERL, Elastic ribbed plate support)

교대 및 교각 위 교량상판과 같은 토목구조물 신축이음매 구간에는 토목 구조물의 변형(신축, 수축, 처짐)에 의해 교량 신축부에 인접한 레일 지지점에는 직접적인 상향력이 발생된다. 이러한 상호작용력은 교량 상판의 변형에 기인한 단부 회전각 및 변위에 의해 발생된다.

매우 다양한 길이의 상판과 장지간 교량 상에서 레일 체결장치에 미치는 힘은 표준 체결장치의 허용범위를 벗어나게 된다. 독일 DB AG는 체결장치의 상향 및 하향 탄성을 유지하며 약 27 kN(System 300-1 : 12kN)의 상향력을 제어할 수 있도록 기존 시스템을 변형한 BWG의 특수 ERL을 소개하였다.

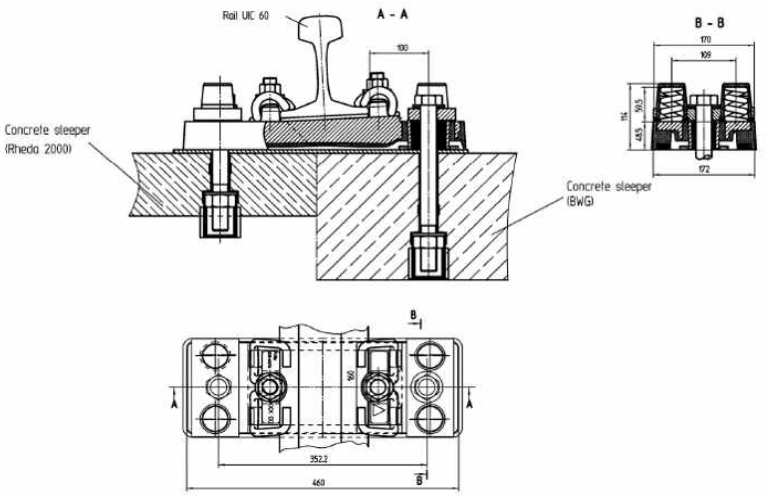


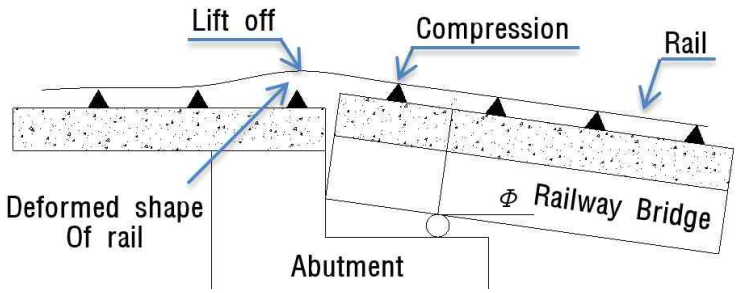
그림 2.7 교량단부용 특수 레일체결장치(ERL)

그림 2.7과 같은 ERL 체결장치는 분기기용 표준 ERL을 근간으로 발전되었으며 탄성재와 코일 스프링의 물리적 특성이 조화를 이루게 되어 가황처리된 탄성 베이스플레이트가 상향으로 1.5mm 변위와 하향으로 4.5mm 변위를 수용할 수 있으며, 약 20kN/mm의 스프링강성을 확보한다. 이러한 레일지지점강성은 약 15kN/mm의 낮은 방진패드의 스프링강성과 상부에 체결되는 약 5kN/mm 강성의 프리텐션스프링의 상호작용에 근거한다.

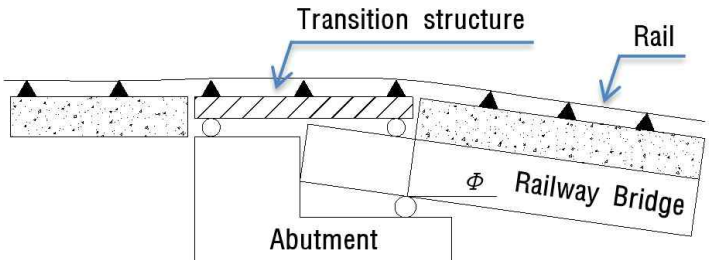
(3) 국외기술현황(독일)

독일의 콘크리트궤도 설계지침에는 교량 단부 상호작용에 의한 단부 궤도의 상향력 저감 방안으로 그림 2.8(b)과 같이 횡단궤도시스템이 제시되어 있다.(DS804, Feste Fahrbahn fur Schienenbahnen (Prof.Dr.-Ing. J. Eisenmann), Beton Kalendar 2000, pp. 291-326)

이러한 횡단궤도시스템의 적용으로 교량 단부의 상호작용력에 의한 체결장치의 조기 손상을 방지하고 체결구와 탄성패드(혹은 레일패드)에 작용하는 과도한 하중을 최소화하며, 고속선에서의 우수한 승차감을 확보할 수 있다고 기술되어 있다. 또한 교량 단부회전을 약 2‰, 1‰으로 제한하고 레일의 마지막 지지점이 교량지점 위에 위치하도록 규정화하고 있다. 만약 레일의 마지막 지지점을 교량지점 직상부에 설치함에 따라 교량 단부의 돌출부가 커지는 경우에는 교대를 외팔보처럼 튀어나오게 하거나, 횡단 구조물(횡단궤도시스템)을 설치하고 그 위에 탄성 레일체결장치를 함께 사용하는 것이 바람직하다고 제시되어 있다.



(a) 일반적인 철도교량 단부 궤도변형 개요도



(b) 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도변형 저감 개요도

그림 2.8 횡단궤도시스템 적용여부에 따른 단부 궤도변형 특성

독일의 경우 교량의 거동에 종속적으로 거동하게 되는 콘크리트궤도의 궤도구성품 중 레일체결장치의 기능유지를 열차주행안전성 확보를 위한 중요한 요소로 두고 단부 궤도 체결구의 사용성 검토에 초점을 맞추어 설계기준을 정립한 바 있다. 또한 국내 규정에서도 레일체결장치의 레일패드와 체결구에서 공용기간 동안 아무런 손상 없이 레일지지점(레일체결장치)에 가해지는 상향력과 압축력을 충분히 흡수할 수 있어야 한다고 규정하고 있다.

독일연방철도국(DB AG)에서 독일내의 대학연구소와 궤도시스템 개발업체인 PORR, Voestalphine 등과 함께 교량신축이음부 횡단궤도시스템을 개발하여 콘크리트궤도가 적용된 철도교량에 다양하게 적용하고 있다. 이러한 연구성과 및 시공사례 등을“Feste Fahrbahn”및 “Konstruktion und Bauarten fuer Eisenbahn und Straßenbahn”(Edgar Darr, Werner Fiebig, Eurail press)에 소개하고 있으며 교량의 처짐과 단부변형수준 및 신축량에 맞게 다양한 형식의 횡단궤도시스템을 개발하여 실제 설계 및 시공에 적용하고 있다.

그림 2.9는 독일 베를린 중앙역에 설치되어 사용중인 횡단궤도시스템의 전경이며 해당 시스템은 강구조를 기본으로 하고 중앙부 일부 단면이 콘크리트로 구성된 강합성 시스템이다. 베를린 중앙역의 경우 지하와 지상 플랫폼이 한 곳에 있으며 지상의 경우 교량과 연결된 구조로써 정거장 구조물과 교량간의 연결부에는 모두 횡단궤도시스템이 설치되어 있다.



(a) 강거더 구조(Berlin중앙역)



(b) 거더 구조(Skew 교량 신축이음부)



(c) 강합성 패널 구조

그림 2.9 독일 횡단궤도시스템의 종류

“Feste Fahrbahn auf großen Stahluberbauten der NBS Hannover-Berlin(Slab track on the long steel bridge in NBS Hannover-Berlin)”에 소개된 독일의 횡단궤도시스템은 그림 2.10과 같으며, Hannover-Berlin 구간을 연결하는 장경간 철도교량구간에 적용되었다. 횡단궤도시스템의 레일지지점 간격은 600mm이며 5set의 탄성 레일체결장치가 배치되어 있다. 또한, 교량바닥판을 기준으로 인접 레일과의 레일면고(Rail level, R.L)를 유지할 수 있는 횡단궤도시스템의 높이 및 받침의 높이가 결정되었음을 알 수 있다. 횡단궤도시스템의 받침은 교량받침의 연직 직상부에 위치하여야 하며 받침의 형식은 포트받침을 사용한 것으로 조사되었다.

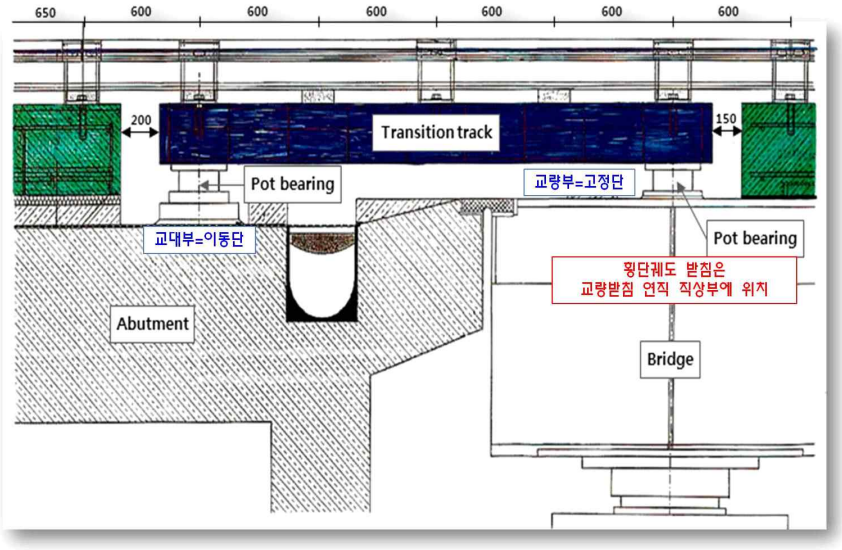


그림 2.10 독일 횡단궤도시스템 적용사례

횡단궤도시스템의 받침은 횡단궤도시스템 내의 첫 번째와 마지막 레일지지점의 위치와 연직방향으로 동일한 위치에 시공되었으며 교대부(그림 2.10의 좌측)는 이동단, 교량부(그림 2.10의 우측)는 고정단으로 설계되어있다.

그밖에 다른 형식의 횡단궤도시스템에 대한 연구는 Rudolf Seidel에 의해 수행되었으며 Hannover-Berlin 구간을 연결하는 장경간 철도교량구간에 적용된 독일의 횡단궤도시스템에 대한 연구결과를 발표하였다. Hannover-Berlin 구간에 적용된 횡단궤도시스템은 2주형 강합성 구조로 설계 및 시공되어 있으며 강재로 된 주형속에 철근콘크리트를 채우고 그 위에 일정 레일지지점간격(600mm)으로 직결식 탄성 레일체결장치(ERL, Elastic ribbed plate support)를 시공하였다. 또한, 교량바닥판을 기준으로 인접 레일과의 레일면고(Rail level, R.L)를 유지할 수 있는 횡단궤도시스템의 높이 및 받침(Port Bearing)의 높이가 결정되었다.

횡단궤도시스템의 받침은 교량받침의 연직 상부에 위치하였으며 받침의 형식은 포트받침이 적용되었다. 횡단궤도시스템의 받침은 횡단궤도시스템 내의 첫 번째와 마지막 레일지지점의 위치와 연직방향으로 동일한 위치에 시공되었으며 교대부는 이동단, 교량부는 고정단으로 적용되었으며, Hannover-Berlin구간에 적용된 횡단궤도시스템의 받침은 앵커매입식이며 현장에서 받침부 채움몰탈을 타설하여 받침의 레벨을 맞추고 평탄성을 확보하였다.

또한, 그림 2.10과 같이 Hannover-Berlin구간에서 적용한 횡단궤도시스템의 교대부 가동단 받침은 앵커매입식이며 현장에서 받침부 채움몰탈(Ausgleichfuge)을 타설하며 받침의 레벨을 맞추고 평탄성을 확보하였다. 반면 교량부 고정단 받침의 경우 해당구간의 교량상판이 강재로 이루어져 교량상판에 볼트용접으로 직접 고정되었다.

그림 2.11는 Hannover-Berlin 구간에 적용된 횡단궤도시스템의 단면으로써 2주형 강합성 구조로 설계 및 시공되어 있으며 강재로 된 주형 속에 철근 콘크리트를 채우고 그 위에 일정 레일지지간격으로 직결식 탄성 레일체결장치를 시공하였다. 적용된 탄성 레일체결장치는 BWG사에서 특수 개발한 방진레일체결장치(ERL)로써 상향변위 1.5mm를 수용가능하며 정적 스프링강성이 20kN/mm인 특수레일 체결장치가 적용되었다.

상부구조물의 변형에 의한 단부 회전은 종방향 거동과 회전 운동이 상향력 또는 인장력으로 변형되어 발생되며 콘크리트궤도 적용 시 이러한 요소들은 베이스플레이트 교량신축부(구조물 경계부)에 설치되는 특수 궤도구조물(횡단궤도시스템)에 의해 조절되어야 하며 일반적으로 횡단궤도시스템의 적용은 교량과 궤도설계 시 검토되는 상향력의 수준에 따라 결정되며, 필요 시 특수 레일체결시스템(ERL)과 혼용하여 적용가능하다.

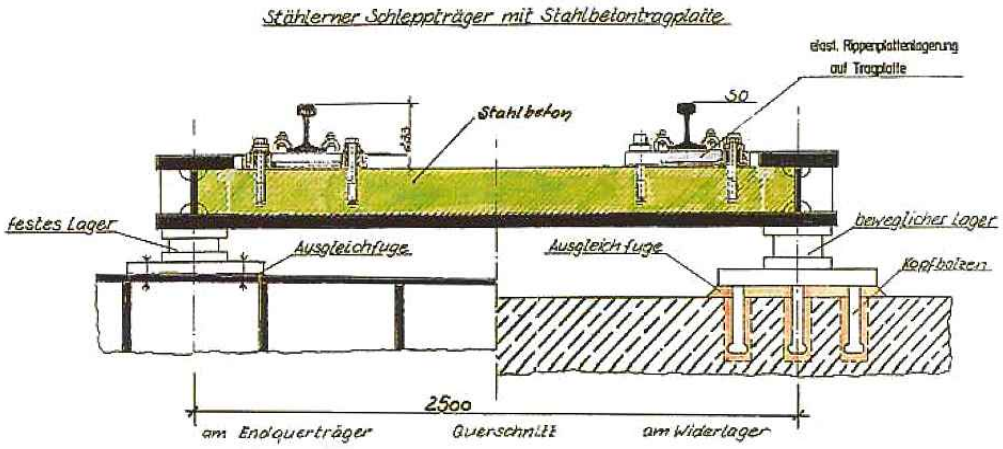


그림 2.11 특수 레일체결장치(ERL, BWG)를 사용한 독일 횡단궤도시스템

표 2.4는“Feste Fahrbahn auf großen Stahluberbauten der NBS Hannover-Berlin”에 소개된 횡단궤도시스템이 부설된 구간에서 시행된 ICE(InterCity Express) 열차 주행시험결과를 바탕으로 정리한 횡단궤도시스템의 거동한계를 나타낸다. 주행시험에 적용된 열차속도는 160~310km/h 이다.

표 2.4 독일 횡단궤도시스템(L=2.5m)의 거동한계(Hannover-Berlin)

구 분	Value
횡단궤도시스템의 중량(kNf)	70~95
고유진동수(Hz)	70~80
연직변위(mm)	< 0.5
발생가속도(g) (주행시험 결과 측정치)	0.06~0.08
가속도 허용기준(g) (단면설계 시의 기준치)	< 0.25
설계 충격계수(i)	2.0
발생 충격계수(i)	< 1.2

독일의 횡단궤도시스템과 관련된 문헌에 따르면 가장 중요한 횡단궤도시스템의 설계요건은 충분한 강성과 중량이다. 횡단궤도시스템은 자체적으로 충분한 강성을 확보함으로써 횡단궤도시스템의 상향변위(부상)가 거의 발생하지 않아야 하며 발생응력의 수준 또한 충분한 안전율을 확보하며 장기적인 피로내구성을 확보할 수 있어야 한다. 또한 교량 단부의 상향력에 의한 횡단궤도시스템의 부상 혹은 들뜸현상을 방지하기 위해 충분한 중량을 가져야 한다. 그리고 이러한 강성과 중량의 수준은 횡단궤도시스템이 열차의 운행속도 대역에서 공진이 발생되지 않는 적정한 수준의 고유진동수를 확보할 수 있도록 설계시 고려하여야 한다.

독일에서 개발된 횡단궤도시스템은 도시철도구간(S-Bahn), 일반철도(Regional Bahn) 및 고속철도구간(IC, ICE)을 비롯하여 중량 화물전용선 구간 내에 있는 교량에 적용된 바 있으며 다양한 열차하중 및 환경에서 그 성능 및 효과가 입증되었다. 따라서 Hannover-Berlin구간의 횡단궤도시스템의 거동한계 기준값을 본 연구에서 개발한 한국형 횡단궤도시스템의 성능 기준값으로 활용하였다.

국내에서도 한국철도시설공단에서 발주하여 한국철도기술연구원에서 수행한“콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구 용역(설계지침)”결과보고서 내용에 이러한 독일의 횡단궤도시스템과 관련된 내용이“교량단부 사용성 향상을 위한 방안”으로 간단하게 소개된 바 있으나 구체적인 단면이나 성능수준 등과 같은 내용은 없으며 이에 대한 연구개발 사례 역시 없는 실정이다.

본 연구의 횡단궤도시스템은 Hannover-Berlin 구간에 적용된 강합성 형식의 횡단궤도시스템의 장점을 벤치마킹하여 개발된 시스템으로써 국내에서 사용되는 궤도용품과 설계기준

에 적합하게 설계 및 제작하였다. 독일의 횡단궤도시스템과 관련된 문헌에 따르면 횡단궤도시스템은 자체적으로 충분한 강성을 확보함으로써 횡단궤도시스템의 변위가 거의 발생하지 않아야 하며 발생응력의 수준 또한 충분한 안전율을 확보하여 장기적인 피로내구성을 확보할 수 있어야 한다. 그리고 이러한 강성과 중량의 수준은 횡단궤도시스템이 열차의 운행속도 대역에서 공진이 발생되지 않는 적정한 수준의 고유진동수를 확보할 수 있도록 설계 시 고려하여야 한다. 독일에서 개발된 횡단궤도시스템은 도시철도구간, 일반철도 및 고속철도 구간을 비롯하여 화물전용선 구간 내에 있는 교량에 적용된 바 있으며 다양한 열차하중 및 환경에서 그 성능 및 효과가 입증되었다.

(4) 중국의 플로팅 베어링 시스템

중국 고속철도에 적용된 플로팅 베어링 시스템은 교량상 장대레일축력을 해소하기 위한 목적으로 궤도슬래브층을 탄성받침을 이용하여 부유시킴으로써 궤도-교량 상호작용력을 완화시켜 장대레일 축력을 해소한 시스템이다. 중국 무광선에 적용한 플로팅 베어링 시스템은 그림 2.12와 같다.



그림 2.12 교량 단부 Floating-Bearing 시스템 전경

중국의 플로팅 베어링 시스템은 건설선에 적용하기에는 유리하나 운행선 시공이 매우 어렵고 현장타설 콘크리트량이 많아 공기확보에도 용이하지 않다. 또한 레일체결장치의 형식변화에 직접적인 영향을 받는 궤도구조형식으로써 국내 철도환경에는 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

중국의 플로팅 베어링 시스템은 탄성재를 이용한 부유궤도를 실현함으로써 궤도-교량 상호작용력인 장대레일 축력을 저감 할 수는 있었으나, 플로팅 궤도시스템의 특성상 건설비가 매우 고가이고 시공과정이 복잡하여 공기가 장기간 소요되며 궤도하부에 매입되는 형식으

로 설치된 플로팅 베어링(탄성재)의 유지관리가 어렵다는 단점이 있다.



그림 2.13 Floating-Bearing시스템의 받침 시공사례

더욱이 중국의 플로팅 베어링 시스템의 구조적 특성상 궤도를 부유시킨 높이(탄성재의 높이)가 매우 낮고 플로팅 베어링의 설치 위치 또한 교량베어링 위치와 어긋나게 설치되어 있어 이론적인 교량 단부 궤도의 역학적 거동특성을 감안할 때 교량 단부 궤도에 작용하는 상향력 및 부가작용력을 완화시키기에는 다소 불리한 구조인 것으로 분석되었다.

결론적으로 중국의 플로팅 베어링 시스템은 장대레일 축력저감에는 효과가 있으나 단부 궤도작용력 완화에는 비교적 효과가 적은 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 횡단궤도시스템에서는 중국의 플로팅 베어링 시스템에 적용된 탄성재를 이용한 플로팅의 기본 원리를 채택하여 횡단궤도시스템을 교량 상부구조와 분리시키는 원리를 탄성받침보다 내구성 측면에서 유리한 포트받침을 적용함으로써 중국 플로팅 베어링 시스템의 장점을 효과적으로 국내 철도환경에 접목시켰다.

4. 횡단궤도시스템의 필요성

국내·외에서 궤도 유지관리비용 저감 및 안정적인 승차감 확보를 위해 콘크리트궤도 부설이 늘어나고 있으며 철도교량은 장대화 되고 있는 추세이다. 일반적인 자갈도상궤도는 교량상판과 궤도(레일 및 침목) 사이에 도상 자갈이 위치하여 구조적으로 교량구조와 궤도구조는 분리되어 있다. 하지만, 콘크리트 궤도는 교량상판에 궤도콘크리트층(TCL)이 탄성분리재에 의해 구조적으로는 분리되어 있으나 상대적으로 중량과 강성이 큰 궤도콘크리트층은 교량의 거동에 종속적으로 거동하며 교량 상부구조는 궤도콘크리트층의 궤도지지층으로써 궤도콘크리트층의 변위를 전달받고 하중을 분산시키며 궤도콘크리트층 자체의 하중부담을 경

감시켜주는 구조적인 역할을 수행하게 된다. 따라서 궤도콘크리트층에 고정된 레일 및 레일지지점은 교량구조의 거동에 직접적인 영향을 받는 구조적인 특징을 가지고 있다. 또한 콘크리트궤도가 부설된 교량 단부에서는 열차하중에 의한 단부회전각 발생, 교량기초의 침하 및 교량 상판의 상·하연 온도차 등에 의해 교량 상판이 정, 동적으로 거동하게 되어 단부 궤도가 변형되고, 이러한 궤도의 변형은 궤도 구성품(레일 및 레일체결장치)에 직적접인 상호 작용력으로 작용하게 된다. 이러한 교량-궤도 상호작용력 중 교량의 단부 회전은 교량 위에 부설된 레일의 곡률을 유발시키고 이러한 레일의 변형과정에서 교량측 마지막 레일지지점은 압축력이, 교대측 첫 번째 레일지지점에는 상향력이 발생하게 된다.

철도교량 단부 궤도의 상호작용력에 대한 기존의 국내 연구결과는 교량 단부에 작용하는 상호작용력의 영향 인자로 교량의 기하학적 특성(교량받침~토목신축이음매간 거리, 교량받침~레일체결장치간 상대위치)과 교량의 최대 처짐량을 비롯하여 레일체결장치의 스프링 강성 등에 대한 매개변수 연구가 수행된 바 있다. 이러한 수치해석적인 방법은 교량 및 궤도 설계 측면에서는 유용할 수 있으나, 이러한 설계과정에 적용하는 분석절차를 이용하여 공용중인 교량의 궤도-교량 상호작용력 특성을 평가하기에는 여러 가지 제약요인이 있다. 실제 교량에서 발생되는 교각의 부등침하 및 교각의 회전(휨)은 공용상태에서 열차하중에 의한 변형이라기보다는 환경 및 노반조건에 영향을 받아 발생되는 장·단기 변형특성으로써 주행시험을 통한 측정으로 이러한 교량 하부구조물의 변형이 단부 궤도에 미치는 영향수준을 추출해 내기에는 현실적으로 매우 어렵다. 하지만 이러한 교각의 침하 및 기타요인으로 인한 단부 궤도의 단차는 단부 궤도에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한 교량 단부의 궤도 구성품은 일반적인 토목구조물의 시공오차 보다 매우 미소한 수준의 변형에도 심각한 손상 및 장기내구성에 직접적인 영향을 받을 수 있으며, 현장시공 과정에서 발생하는 단부 궤도의 단차를 비롯하여 공용기간 중 발생 가능한 레일패드(탄성패드)의 열화에 따른 경화, 두께감소 등에 따라 단부 궤도의 변형특성은 영향을 받게 될 수 있다. 따라서 이러한 다양한 현장요인들에 의해 공용중인 교량 단부에서 단부 회전의 수준이 설계수준에서 안정적으로 거동을 하더라도 단부 궤도가 받는 궤도-교량의 상호 작용력은 과도한 상태일 수 있으며, 이에 따른 궤도구성품의 파괴가 발생할 수도 있다. 따라서 교량의 상부구조물의 거동뿐만 아니라 궤도의 거동 역시 한계상태 분석기법을 이용하여 극한의 상태에서의 거동수준을 예측하고 평가함으로써 공용 중 발생 가능한 궤도 안전성 저해요인을 사전에 분석하는 연구가 필요하다.

콘크리트궤도와 철도구조물의 상호작용에 따른 문제는 일반적으로 토공구간에서는 큰 문제가 되지 않으나 토공-교량 연결부(교대부) 또는 교량 상부구조의 연결부에서는 교량 상판 단부의 변형(단차 및 회전)에 의해 궤도의 변형이 발생하고 이로 인해 과도한 응력이 작용

할 수 있으며, 이러한 부가적인 상호작용력은 구조물 경계 단부 궤도의 빈번한 유지보수를 유발할 수 있으므로 설계 단계에서 충분한 검토가 이루어져야 한다. 따라서, 교량 상판 단부에서 콘크리트궤도의 사용성을 보장하기 위해서는 교량 상판 단부의 회전 및 단차로 인해 레일 지지점의 체결장치에 발생하는 수직하중이 레일체결장치의 탄성지지체, 체결클립 혹은 클램프 및 앵커시스템에서 공용기간 동안 아무런 손상 없이 충분히 흡수할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 해외 철도선진국에서 사용하고 있는 철도교량 단부 횡단궤도시스템에 대한 벤치마킹을 통해 국내 현장 적용성에 대해 검토하였으며, 철도교량 단부 궤도시스템의 구조적 안전성 및 결함을 최소화하고 철도교량 설계의 제약요인을 해소함으로써 철도교량의 장대화에 기여하고자 한다.

또한 열차하중 및 자중 등에 따른 교량단부의 회전 및 이와 결부되어 발생하는 철도교량 단부 궤도에 작용하는 부상력과 압축력 및 신축거동 등과 같은 콘크리트궤도가 부설된 철도교량구조에서 해결해야할 구조적인 문제를 횡단궤도시스템의 자체적인 신축거동 및 추가 작용력 완화(소멸)기능을 통해 단부에 작용하는 부반력 거동을 상쇄시켜 철도교량 및 궤도 설계 시 일반구간과의 설계 일관성을 확보할 수 있는 한국형 교량단부 횡단궤도시스템을 설계하여 그 적용성에 대해 검토하고자 한다.

국내·외 연구결과, 철도교량의 단부 회전에 기인한 단부 궤도의 변형은 열차의 주행성능을 저하시키고 단부 궤도구성품의 수명을 단축시키며, 유지보수를 증가시키게 되어 교량상 궤도의 취약개소로 평가될 수 있다.

현재까지 이러한 단부 궤도에 발생하는 궤도-교량 상호작용력을 저감시킬 수 있는 대안으로는 소프트한 레일패드와 체결력 조정이 가능한 체결구를 사용함으로써 레일의 변형에 유연하게 저항할 수 있는 특수 레일체결장치를 사용하거나, 체결장치의 구조적 특성 상 체결클립과 레일플랜지 사이의 공간이 확보되어 레일의 상향변위에 직접적인 작용력을 피할 수 있는 종방향 활동체결장치(ZLR)가 사용되고 있으나 이러한 대안은 교량 단부 궤도에 발생하는 상호 작용력을 근본적으로 해소시킬 수 있는 방법이 될 수 없다.

독일 및 유럽의 일부 국가에서는 교량의 처짐에 기인한 단부 회전 및 기타 교량상부구조의 구조적 변형에 종속적인 단부 궤도의 거동수준을 안정화 하고 단부 궤도의 사용성 및 구성품의 유지보수를 최소화하기 위해 교량 단부의 궤도에 횡단 구조물(Transition structure, Ausgleichsplatten, uebergangskonstrucktion)을 설치함으로써 교량의 변형과 무관하게 안정적인 궤도의 변형수준을 확보할 수 있는 구조적 대안을 마련하고 이를 규정화하기도 하였다. 더욱이 이러한 교량 단부에 설치되는 특수 궤도구조물은 콘크리트궤도 뿐만 아니라 자갈궤도가 부설된 교량구간에서도 적용되고 있다.

제 2 절 횡단궤도시스템 개요 및 성능

1. 횡단궤도시스템 개요

가. 개요

철도교량 단부 궤도는 체결장치의 성능만으로 극복하기 어려운 수준의 상향력이 발생하며 변위 및 하중저항성능이 우수한 특수 체결장치, 즉 ZLR 혹은 ERL 등과 같은 대안은 단부 궤도의 역학적, 구조적 특성을 해결한다기보다 체결구의 성능에 의존하여 이러한 상호작용력을 일부 수용할 수 있을 뿐 구조적으로 이를 해소하지는 못한다.

횡단궤도시스템을 적용하여 과도한 수준의 상향력이 발생하는 교대부에 영구적으로 단부 궤도의 처짐 변형특성을 완화 혹은 소멸시켜 단부 궤도구성품의 내구수명을 향상시키고 구조물 접속부의 열차 주행안정성 및 승차감을 향상시키고자 한다.

횡단궤도시스템은 단부 궤도의 변형특성을 구조적으로 변화시키는 영구적인 대안으로써 단부의 레일상향 곡률자체를 해소함으로써 단부 궤도에 발생하는 상향력을 제거 혹은 최소화시킬 수 있는 시스템이며 단부 궤도에 발생하는 상향력을 고려하여 특수 체결장치를 사용한다거나 체결장치의 성능에 의존하지 않고 특별하게 유지관리 및 보수에 주의를 기울일 필요가 없다.

횡단궤도시스템은 단부 궤도의 변형(레일의 변형, 상향력)의 수준을 감안하여 ERL, REJ와 함께 교량 단부 궤도 상호작용력 저감을 위한 대안으로 활용할 수 있으며 적용개소는 다음과 같다.

(1) 단부 궤도의 변형수준이 큰 교대부 혹은 장경간 교량(상향력 30kN 이상 개소) : ERL (최대 27kN)만으로 상향력 수용이 힘든 개소
(2) 교각 및 교대부 등과 같은 구조물 접속구간에 적용 가능
(3) 경간장 35~40m인 교량구간
(4) 사교(Skewed bridge)와 같이 교량 단부에 침목의 배치가 용이치 못한 개소에 적용가능
(5) 교량 단부의 신축이음부

횡단궤도시스템의 표준단면은 고속철도 설계기준에 적합한 단면으로써 호남고속철도 교량상 궤도 표준도를 참고하여 즉각적인 설계반영이 가능하게 개발되었다. 또한 열차의 고속

주행 시 열차의 주행안정성을 향상시키고 궤도유지보수비용을 절감시키며 일반철도, 광역철도, 도시철도 및 고속철도 구분 없이 모든 철도교량 단부 궤도에 적용이 가능한 시스템이다.



그림 2.14 횡단궤도시스템의 적용 순서

콘크리트궤도가 부설된 교량 단부에서는 열차하중에 의한 단부회전각 발생, 교량기초의 침하 및 교량 상판의 상·하연 온도차 등에 의해 교량 상판이 정, 동적으로 거동하게 되어 단부 궤도가 변형되고, 이러한 궤도의 변형은 궤도 구성품(레일 및 레일체결장치)에 직적접인 상호 작용력으로 작용하게 된다. 이러한 교량-궤도 상호작용력 중 교량의 단부 회전은 교량 위에 부설된 레일의 곡률을 유발시키고 이러한 레일의 변형과정에서 교량측 마지막 레일지지점은 압축력이, 교대측 첫 번째 레일지지점에는 상향력이 발생하게 되는 데, 횡단궤도시스템을 적용하면 단부 레일의 변형 및 레일지지점에 발생하는 상향력 및 압축력을 저감시킬 수 있으며 일반구간과의 설계일관성을 확보할 수 있다.

뿐만 아니라 자갈궤도가 부설된 철도교량 단부에서는 자갈도상이 이완되고 궤도의 틀림 및 침하 등이 발생된다. 따라서 자갈궤도가 부설된 철도교량 단부에 횡단궤도시스템을 적용함으로써 교량단부 궤도의 기능과 구조적 성능을 개선하여 궤간확대, 침목간격확대 및 궤도틀림과 변형을 최소화할 수 있으며 궤도 침하를 안정화시켜 고속열차 주행에 대한 열차주행 안정성을 향상시킬 수 있다. 또한 교량 신축이음장치의 기능을 대체 하여 경량화, 단순화 및 성능을 개선시킬 수 있으며 교량 단부 궤도의 배수유도조건을 개선하고 교량 신축이음부 상면의 자갈막이가 불필요해지며 오수 및 이물질의 교량 받침부 유입을 방지할 수 있다. 마지막으로 토공-교량 접속구간에 대한 윤중변동(충격) 및 부등침하를 최소화하여 교량상 자갈궤도 보수주기를 연장하고 장, 단기적으로 유지보수비용을 절감시킬 수 있다.

해외 철도선진국에서 개발되어 사용중에 있는 횡단 구조물의 구조적 특성 및 장점을 반영하고, 단점을 보완할 수 있는 한국형 횡단궤도시스템을 개발하였다. 또한, KTX 열차하중을 이용한 정, 동적 수치해석을 통해 한국형 횡단궤도시스템의 구조적 안정성을 검토하고 실대형 시험체를 이용한 조립성능시험을 수행하였다. 또한 검토결과를 횡단궤도시스템의 적용사례가 가장 많은 독일의 횡단궤도시스템 성능요구조건과 비교하여 한국형 횡단궤도시스

템의 적정성을 입증하였다. 횡단궤도시스템 개발의 목적은 그림 2.15와 같다.



그림 2.15 횡단궤도시스템의 개발 목적

횡단궤도시스템을 적용함으로써 단부 궤도에 발생되는 교량-궤도 상호작용력을 소멸 혹은 저감시킴으로써 교량 단부 궤도구성품의 내구수명을 향상시키고 유지보수 및 관리물량을 크게 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

또한 횡단궤도시스템을 적용함으로써 교량 단부 궤도에 더이상 특수 레일체결장치를 사용할 필요가 없어지므로 교량상 궤도재료의 일관성을 확보할 수 있으며, 무엇보다 단부 궤도 즉, 레일의 변형을 최소화함으로써 열차주행 안정성 및 사용성(승차감)을 확보할 수 있다.

본 연구에서는 국내·외적으로 단부 궤도의 성능개선을 위해 개발, 적용되고 있는 횡단궤도시스템을 국내 철도하중 및 기준에 맞게 설계, 제작하여 횡단궤도시스템의 성능을 입증하였다.

나. 국내·외 횡단궤도시스템의 특징 비교

독일 및 중국의 시스템과 본 연구에서 개발한 한국형 횡단궤도시스템의 주요구성품별 차이점과 특성을 비교하여 표 2.5와 같이 나타내었다.

표 2.5 국외 횡단궤도시스템과의 주요 구성품 및 특성 비교

구 분	중 국	독 일	한국
레 일	ALL	ALL	ALL
레일체결장치	직결식 특수레일체결장치 (ERL, RLR)	직결식 특수레일체결장치 (ERL, RLR)	ALL
침 목	None	None	None
도 상	철근콘크리트 (현장타설)	Steel girder / Steel composite (공장제작&현장타설)	Steel Structure (공장제작)
받 침	탄성받침	포트받침	포트받침
종방향 가동범위 (L=40m 기준)	35mm	25~40mm(조정가능)	±100mm
횡단궤도 높이 (받침 포함)	410mm	420mm(조정가능)	530mm
강재두께	None	50mm	28~38mm
자 중	55kN(3.7m 기준)	70kN(2.4m 기준)	45kN(3.0m 기준)
횡단궤도 (판넬) 수량	3EA/1Set	1EA/1Set	1EA/1Set

본 연구에서 제시한 횡단궤도시스템은 중국의 플로팅베어링시스템 및 독일 횡단궤도시스템과 기본적인 적용처 및 사용 용도측면에서는 유사하나 성능구현의 방법이나 구조형식 및 특성, 단면 등 그 기술적 특성이 차별화 되어 있다. 따라서 본 연구에서 제시하는 횡단궤도시스템은 중국의 플로팅베어링시스템과 독일 횡단궤도시스템의 단점을 보완하고, 장점을 극대화시킨 새로운 형식의 한국형 횡단궤도시스템이다.

2. 횡단궤도시스템 적용 범위

가. 시스템의 적용 범위

(1) 횡단궤도시스템 적용의 당위성

단부 궤도는 체결장치의 성능만으로는 극복하기 어려운 수준의 상향력이 발생하며, 만약 변위 및 하중저항성능이 우수한 특수 체결장치, 즉 ERL 혹은 REJ 등과 같은 대안은 단부 궤도의 역학적, 구조적 특성을 해결한다기보다 체결구의 성능에 의존하여 이러한 상호작용력을 일부 수용할 수 있을 뿐 구조적으로 이를 해소하지는 못한다. 이에 과도한 수준의 상향력이 발생하는 교대 및 교각부에 횡단궤도시스템을 적용함으로써 영구적으로 단부 궤도의 처짐 변형특성을 완화 혹은 소멸시킴으로써 단부 궤도구성품의 내구수명을 향상시키고 구조물 접속부의 열차주행안정성 및 승차감을 향상시키고자 한다.

횡단궤도시스템은 단부 궤도의 변형특성을 구조적으로 개선시키는 영구적인 대안으로써 단부 레일의 상향 곡률자체를 해소함으로써 단부 궤도에 발생하는 상향력을 제거 혹은 최소화하는 시스템이며 단부 궤도에 발생하는 상향력을 고려하여 특수 체결장치를 사용한다거나 체결장치의 성능에 의존하지 않고 어떠한 체결장치를 사용하여도 무방하다. 또한 단부 궤도라고 특별하게 유지관리 및 보수에 주의를 기울일 필요가 없다.

(2) 횡단궤도시스템 적용 방안

단부 궤도의 변형(레일의 변형, 상향력) 수준을 감안하여 교량 단부 궤도상호작용력 저감을 위한 대안으로 활용이 가능하며 적용 대상 개소의 범위는 다음과 같다.

(가) 단부 궤도의 변형수준이 큰 장경간 교량(상향력 30kN 이상 개소 또는 경간장 35~40m 이상의 장대교량) → 교량설계 제약 조건(처짐증가) 해소를 통한 철도교량의 장대화 실현 가능

(나) 사교(Skewed bridge) : 교량 신축부 침목 배치가 어려운 개소

(다) 교각 및 교대부 등과 같은 구조물 접속구간

(라) 일반철도, 광역철도, 도시철도 및 고속철도 구분없이 모든 철도교량 단부 궤도

(마) 콘크리트궤도와 자갈궤도 구분 없이 적용 가능

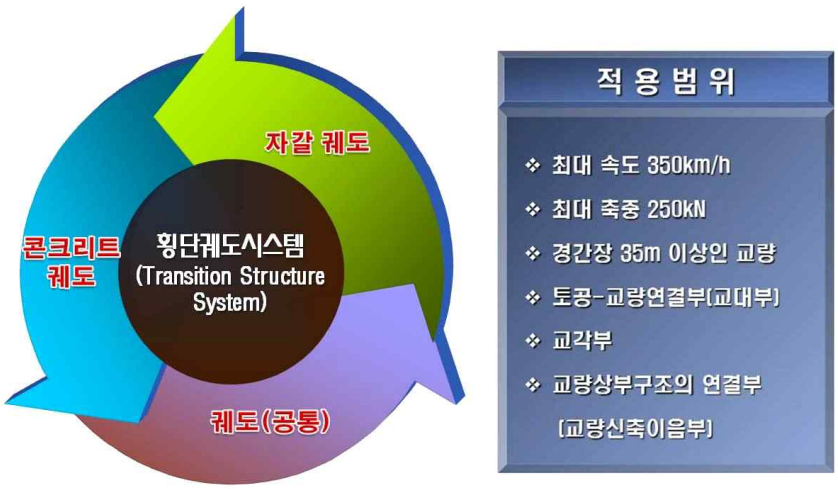


그림 2.16 횡단궤도시스템 적용범위

본 연구에서 제시한 횡단궤도시스템의 표준단면은 고속철도설계기준을 준용하여 설계하였으며 호남고속철도 교량상 궤도 표준도를 참고하여 개발되었다.

나. 주요검토사항

본 연구에서 제안하는 한국형 횡단궤도시스템은 그 목적이 단부 사용성 확보이므로 철도교량상 콘크리트궤도의 궤도-교량 상호작용력(단부 상향력 및 압축력)에 대한 안전성, 사용성 및 열차 주행안전성 확보를 비롯하여 자갈궤도가 부설된 철도교량 단부 궤도의 기능 및 구조적 성능개선에 의미가 있다.

본 시스템의 주요검토 사항은 다음과 같다.

(1) 횡단궤도시스템 도입의 당위성
(2) 횡단궤도시스템의 구조적 안정성(정·동적 안정성 및 피로내구성)
(가) 횡단궤도구조체(강구조물)
(나) 횡단궤도용 포트받침(레일 및 레일체결장치 제외)
(3) 시공성(현장적용성)
(4) 시스템 인터페이스(전기절연성능)

한국형 횡단궤도시스템의 주요 설계변수인 단면 치수, 레일 및 레일체결장치의 종류, 받침의 용량 및 치수 등은 적용 대상 선로에 따라 설계속도, 설계하중, 하부교량 구조물의 설계 등을 고려하여 시스템 설계에서 결정되는 사항이므로 탄력적으로 설계가 가능하다. 앞서

정의한 적용 범위에 따라 본 시스템의 적용 대상은 아래와 같이 크게 도시철도, 일반철도 및 고속철도로 구분할 수 있다.

(가) 도시철도 : 설계속도 최대 120km/h, 설계축중 최대 160kN
(나) 일반철도 : 설계속도 최대 200km/h, 설계축중 최대 220kN
(다) 고속철도 : 설계속도 200~350km/h, 설계축중 최대 250kN(실열차축중 170kN)

본 연구에서는 일반철도 및 고속철도의 설계속도 및 축중을 고려하여 시스템 설계를 검토하였으며, 구조적 안정성과 관련해서 강재의 설계는 주어진 하중조건에 대해 강재설계기준에 따라 일반적인 구조물과 동일하게 이루어지는 사항이기 때문에 큰 차이점이 없다. 그리고 시공방법의 적정성과 시스템 인터페이스(전기절연성능)에 대한 검토를 수행하였다.

본 연구에서는 상기 주요 검토 사항에 대하여 해석 및 실험적 방법으로 검토한 결과를 제시함으로써 횡단궤도시스템의 기술적 적합성 검증하였다.

3. 횡단궤도시스템의 구성재료별 기능 및 규격

횡단궤도시스템은 일반철도, 고속철도를 비롯하여 도시철도 등 거의 대부분의 철도교량에서 적용이 가능하다. 독일의 경우 횡단궤도시스템이 적용될 노선의 설계기준에 맞추어 각기 다른 형태의 다양한 횡단궤도시스템이 개발되고 실제 적용되기도 한다. 가령 경간장이 길어 교량의 신축량과 처짐이 상대적으로 큰 장대교량의 경우 횡단궤도시스템을 2개 연속 배치하여 해당 교량구간의 신축량을 수용하고 처짐에 따른 단부 회전각을 해소하는 방법을 적용한 사례도 있다.

또한 독일의 베를린 중앙역(Berlin Hauptbahnhof)에 설치된 횡단궤도시스템의 경우에는 그중 특수한 형식과 단면을 가진 것으로 알려져 있다. 베를린 중앙역의 경우에는 정거장 구조물과 교량의 연결부가 경사가 있는 사교이며, 정거장 구조물에 연결된 모든 교량의 단부에는 모두 횡단궤도시스템이 시공되어 있다. 이 경우에는 레일면고(RL)로 부터 교량바닥판(FL) 사이의 콘크리트궤도의 높이가 충분하지 못하여 강합성 혹은 콘크리트 단면으로 충분한 단면력을 확보하지 못하는 경우로써 횡단궤도시스템의 단면 전체를 강재로 설계, 제작하여 저형고 고강성의 횡단궤도시스템을 적용한 사례도 있다.

이렇듯 횡단궤도시스템의 설계는 횡단궤도시스템이 필요한 노선(구간)의 주요제원 및 환경적 조건을 감안하여 적절한 단면으로 설계가 가능하며, 횡단궤도시스템의 설계에서 가장 중요한 부분은 횡단궤도시스템의 주요기능인 단부 회전에 따른 단부 궤도에 발생되는 상호

작용력을 저감시키기에 충분한 횡단궤도의 강성 확보 여부이다. 횡단궤도시스템은 자체적인 강성으로 단부의 상호작용력을 수용할 수 있어야 하며 교량 및 교대부 구조물과 궤도의 구조적 분리를 유도할 수 있어야 한다. 또한 횡단궤도시스템 자체의 처짐(침하)은 비교적 짧은 구간에서의 궤도틀림과 같은 악영향을 초래하여 열차주행성능을 오히려 저해할 가능성이 있으므로 충분한 강성으로 설계하여 구조적인 처짐 및 변형을 최소화하는데에 설계의 중점을 두었다.

본 연구에서는 국내 철도환경에 적합하게 설계하기 위해 국내 철도관련 기준을 준용하였으며, 현재 국내·외에서 규격화되어 사용되고 있는 궤도용품을 고려하여 횡단궤도시스템을 설계하였다. 본 연구에서 제안하는 새로운 형식의 횡단궤도시스템의 단면은 국내 고속철도 교량상 궤도 표준단면을 이용하여 교량 단부에 부설될 횡단궤도시스템의 높이와 폭원을 결정하였으며, 국내 철도설계지침 및 편람(토목/궤도편, 2012)을 고려하여 충분한 강성을 확보할 수 있도록 설계하였다.

횡단궤도시스템의 폭은 열차주행 시 위협감 및 외적 미관을 고려하기 위해 교량상 궤도 폭원 2.8m 이내로 설계하여 조형미와 구조적 성능 모두를 고려하였으며, 높이는 일반 궤도 구간의 TCL(Track Concrete Layer) 높이를 기준으로 횡단궤도 받침의 높이를 고려하여 설계하였다. 횡단궤도시스템의 길이는 경부고속철도 2단계구간 교량 단부의 유간 조사결과를 참고하여 3m로 선정하였다.

가. 횡단궤도시스템의 특성 및 기술사양

(1) 개요

횡단궤도시스템이란 자갈궤도 및 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 신축이음부에 설치되어 침목간격을 일정하게 확보할 수 있으면서, 콘크리트궤도의 경우에는 단부 레일의 변형 및 레일지지점에 발생하는 상향력 및 압축력을 저감시키고, 자갈궤도의 경우에는 자갈도상의 이완 및 궤도틀림을 저감시킬 수 있는 강재거더 및 부상 방지 기능을 포함하는 포트받침으로 구성된 횡단궤도시스템을 의미한다.

(2) 목적

(가) 철도교량 신축이음부에 설치되어 철도교량의 변형(단부회전)에 영향을 받지 않고 레일의 변형 및 레일지지점의 작용력을 안정적으로 유도하기 위한 궤도 구조물

(나) 강재거더가 적용된 횡단궤도시스템을 통하여 단부 궤도에 발생하는 교량-궤도 상호작용력(상향력 및 압축력, 상대변위)을 구조적 해소하기 위한 궤도 구조물

(다) 강재로 구성된 구조체를 이용하여 거동의 명확성 및 장기내구성을 확보함

(라) 열차간섭을 피하면서 레일의 측부에서 레일보다 상향으로 돌출되는 강재거더를 적용하여 휨강을 증대시킨 궤도 구조물



(마) 레일지지점 하부가 개방된 Π형 레일지지 구조체(가로보)를 적용하여 구조물(교량 및 교대, 교각, 토공노반)에 전달되는 열차하중 및 궤도진동을 절연시킴으로써 직접적인 진동하중의 분산 및 소멸 효과

(바) 사교(Skewed bridge)의 신축부 침목배치가 용이치 못한 경우 적용이 가능한 궤도 구조물

(사) 자갈궤도가 부설된 교량신축부 도상자갈의 이완 및 궤도불규칙 침하, 궤도틀림 등을 방지하기 위한 궤도 구조물

(아) 사전에 강재로 구성된 횡단궤도시스템 하면에 받침을 용접처리하여 현장에서 Top-down공법으로 시공하거나, 또는 사전에 가공된 볼트구멍을 이용하여 받침의 현장조립으로 시공되는 Bottom-up 시공방법 모두 적용이 가능한 받침부 시공방법

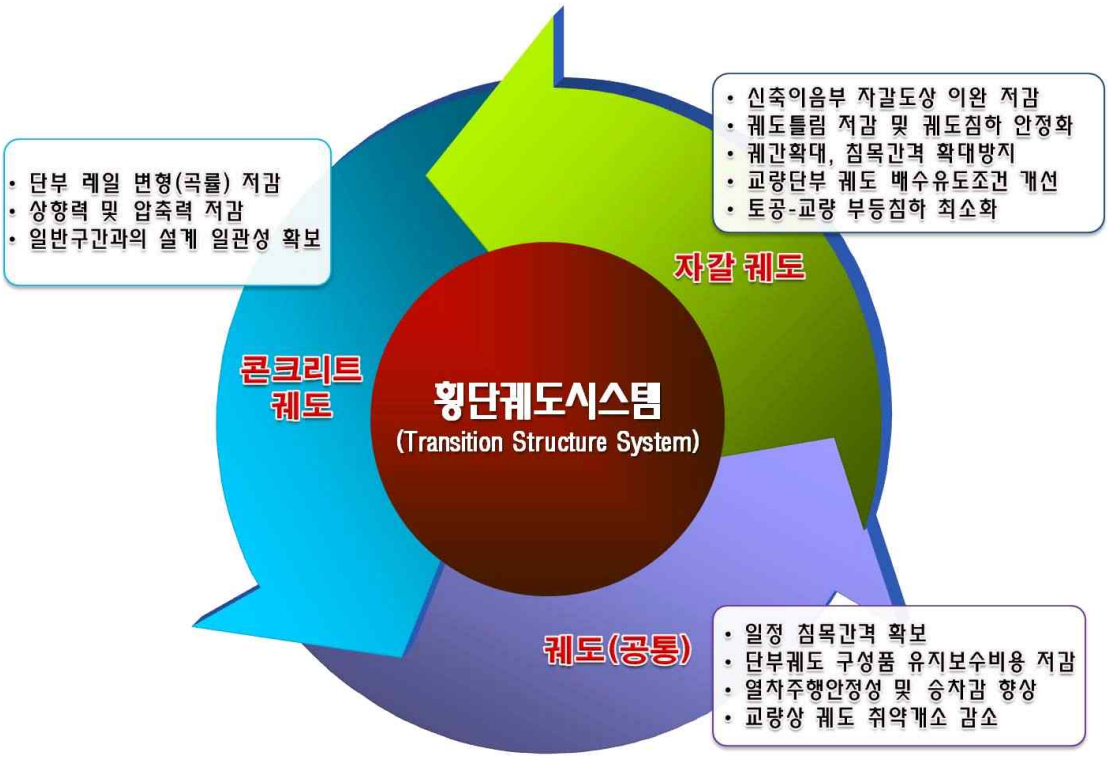
(3) 시스템 구성

(가) 레일의 측부에서 레일보다 상향으로 돌출되는 I형 강재거더 4개

(나) 레일지지점 하부가 개방된 Π형 레일지지 구조체(가로보) 10개

(다) 부상방지키가 설치된 포트받침 8개

(4) 시스템 적용효과



(가) 철도교량 단부 레일의 변형 및 레일지지점 상호작용력 저감

(나) 레일의 측부에서 레일보다 상향으로 돌출되는 강재거더를 적용하여 휨강성을 증대시킴으로 인해 횡단궤도구조 처짐 최소화

(다) 하부가 개방된 형태인 Π형 레일지지 구조체(가로보)를 적용하여 열차하중이 교량구조물 및 횡단궤도시스템에 직접적으로 작용되는 것을 방지함으로써 충격 및 진동을 저감시키는 효과

(라) 공장제작형 강재거더 구조체를 적용함으로써 현장시공을 간소화하고 공기를 단축시킴으로써 공사비 절감효과

(마) 강재로만 구성되어 콘크리트 또는 강합성 구조형식의 거동의 불명확성을 배제

(바) 구조적으로 좌우레일의 지지체가 분리 거동하도록 유도함으로써 하중지지형태를 안정화 시키고 연결부재를 최소화하여 거동특성을 명확하게 하는 효과

(사) 독립된 좌우레일 지지체가 구조부재가 아닌 궤간조절이 가능한 볼트형 절연체로 연결되어 궤도절연에 대한 불명확성을 배제

(아) 강재거더로 구성된 횡단궤도시스템의 중량 감소에 따른 부상에 대한 염려를 부상방지키가 설치된 포트받침을 사용하여 횡단궤도시스템의 부상을 방지함으로써 콘크리트 및 강합성 형식으로 된 횡단궤도시스템의 중량을 저감시킬 수 있으며 궤도구조의

안전성을 증대시킴

(자) 사교(Skewed bridge)의 신축부 침목배치가 용이치 못한 경우 및 침목간격 확보가 용이치 못 한 개소 적용하여 레일지지점을 안정화시킴으로써 열차 주행안전 및 궤도구조안전성 확보 가능

(차) 자갈궤도가 부설된 교량신축부 도상자갈의 이완 및 궤도불규칙 침하, 궤도틀림 등을 방지하고, 궤간확대, 침목간격 확대 및 궤도침하를 안정화시킴으로써 고속열차 주행에 대한 열차주행 안정성 향상

(카) 자갈궤도가 부설된 교량 신축부에 적용함에 따라 교량 단부 신축이음장치를 최적화(경량화, 단순화 및 성능개선)하고, 교량 신축이음부의 궤도 배수 유도조건을 개선함

(타) 자갈궤도가 부설된 교량 신축이음부에 횡단궤도시스템의 적용으로 교량 신축이음부 상면의 자갈막이(덮개판)가 불필요함

(파) 자갈궤도가 부설된 교량 신축이음부의 철재로된 덮개판을 철거하여 신축이음부 사이로 오물 및 우수 등의 교량 받침부 유입을 방지함

(하) 토공-교량 접속부 궤도와 같은 궤도강성 천이구간에 대한 부등침하를 최소화하여, 동적 윤중변동 및 충격효과 최소화하고 교량상 자갈궤도의 궤도틀림 저감 및 궤도유지관리(보수) 비용 절감 효과

나. 횡단궤도시스템의 기본 구조 및 성능

(1) 개요

횡단궤도시스템의 단면은 고속철도 교량상 궤도표준단면을 이용하여 교량단부에 부설될 횡단궤도시스템의 높이와 폭원을 결정하였으며, 국내 철도설계기준(궤도편, 2010)의 5.4.8(7)의 슬래브와 궤광의 자중이 상향력의 1.3배 이상임을 입증할 것이라는 조항에 준용하여 충분한 강성과 중량을 고려하여 설계하였다. 횡단궤도시스템의 폭은 열차주행 시 위협감 및 외적 미관을 고려하여 일반궤도구간의 궤도폭인 2.8m 이내로 설계하였으며, 높이는 TCL(Track Concrete Layer)을 기준으로 횡단궤도시스템 받침(90mm)의 높이를 고려하여 530mm로 설계하였다. 횡단궤도시스템의 길이는 경부고속철도 교량의 최대 유간 조사결과를 고려하여 3m로 선정하였다.

횡단궤도시스템의 주요부재 및 재료의 제원은 표 2.6과 같다. 본 횡단궤도시스템은 국내 고속철도 궤도구조로써 이미 성능을 입증받은 UIC60과 Vossloh System336을 적용하였으나 레일과 레일체결장치의 종류는 횡단궤도시스템이 적용되는 구간의 레일 및 레일체결장치의 종류에 맞게 적용이 가능하며, 레일체결장치의 종류 및 성능에 영향을 받지 않고 횡단궤도

시스템의 구조적 특성으로 단부 궤도의 거동을 안정적으로 개선시킬 수 있는 시스템이다.

또한 횡단궤도시스템이 구조부재인 주형은 충분한 강성을 확보하고 발생응력의 안전율을 감안하여 설계되었으며 강종은 일반 구조용 강재인 SM520을 사용함(선택적 적용 가능)으로써 강구조로써의 구조적 안전성을 확보하고자 하였다.

표 2.6 횡단궤도시스템의 제원

구 분	제 원
레 일	UIC60 (Variable)
레일체결장치	직결식 탄성 레일체결장치 모두 적용 가능 (System336, ATL-Ⅰ,Ⅱ, SFC 등)
침 목	사용안함
강 종	SM520 (Variable)
받 침	포트받침 (수직력 : 300kN, 수평력 : 240kN, 부상력 : 80kN, 이동량 : ± 100mm)
콘크리트	사용안함

본 횡단궤도시스템의 구조적 특징은 고정된 레일면고와 교량바닥판 PCL 사이의 제한된 공간에 TCL로써의 성능과 기능을 만족할 수 있도록 횡단궤도시스템을 설계해야만 한다는 것에 있다. 또한 받침의 높이 역시 여유치가 없는 조건을 감안할 때 횡단궤도시스템 자체의 형고가 비교적 낮으면서도 충분한 강성과 중량을 확보하여야 한다는 설계 기본조건에서 횡단궤도시스템은 설계되었다. 이에 본 연구에서는 횡단궤도시스템을 강구조로 설계함으로써 저형고 고강성 구조물인 횡단궤도시스템을 개발하게 되었다. 횡단궤도시스템의 표준도는 그림 2.17과 같다.

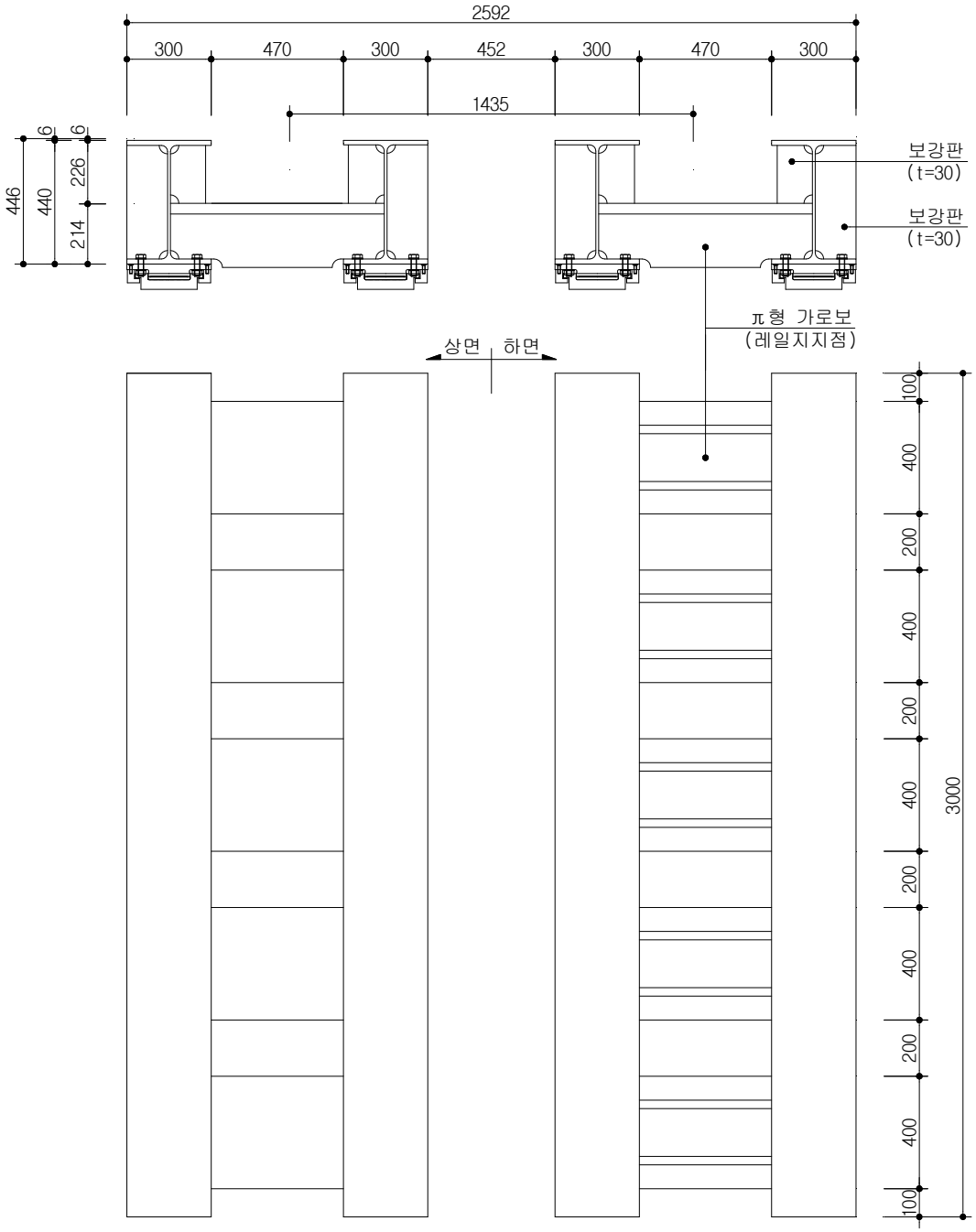
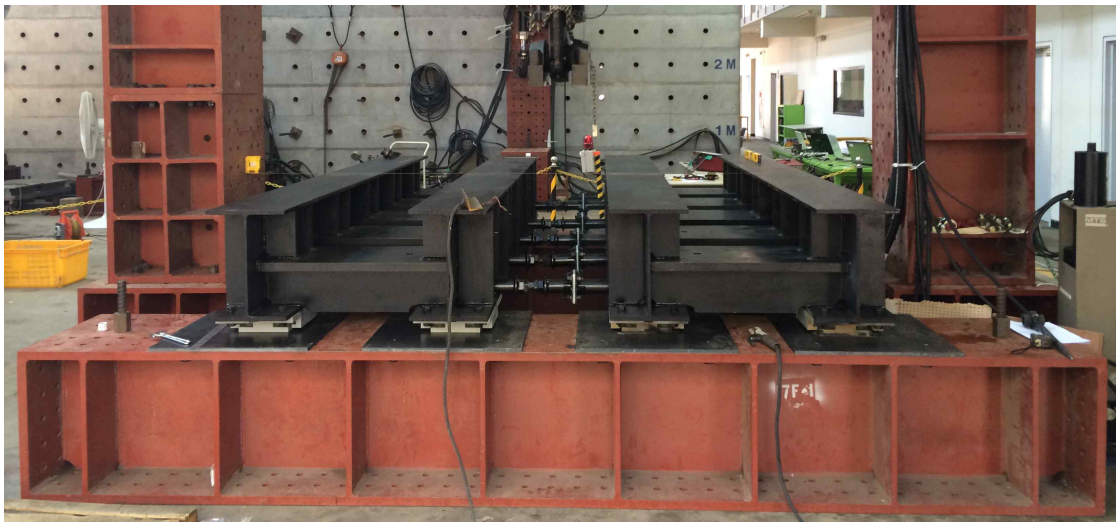
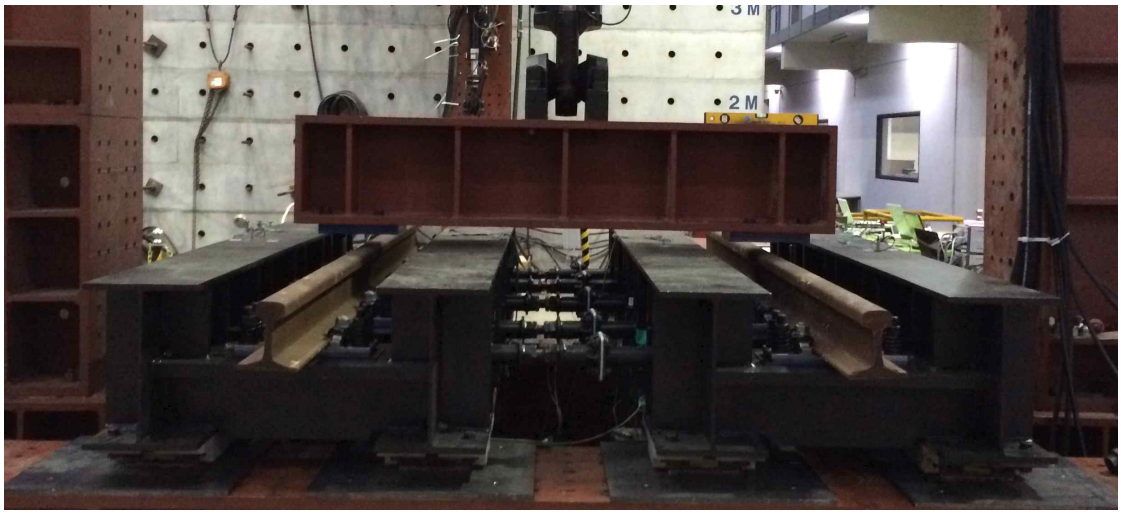


그림 2.17 횡단궤도시스템 표준도



(a) 횡단궤도시스템 전경(체결장치 미설치)



(b) 횡단궤도시스템 전경(System336 적용)



(c) 횡단궤도시스템 전경(ERL 적용)

그림 2.18 횡단궤도시스템의 전경

횡단궤도시스템의 구조는 강재로만 구성되어 콘크리트 또는 강합성 구조형식의 거동의

불명확성을 배제하였으며 구조적으로 좌우레일의 지지체가 독립적으로 안정감 있게 거동하도록 유도함으로써 하중지지형태를 안정화 시키고 연결부재를 최소화하여 거동특성을 명확하게 하였다. 또한 강재거더로 구성함에 따른 중량 감소가 횡단궤도시스템의 부상에 미치는 영향을 부상방지키가 설치된 포트받침을 사용함으로써 방지할 수 있으며, 이로써 전체 구조계의 중량을 저감시키고 궤도구조의 안전성을 증대시켰다.

(2) 종방향 거더

횡단궤도시스템은 레일의 측부에서 레일보다 상향으로 돌출되는 강재거더를 적용하여 휨강성을 증대시킴으로 인해 구조물의 처짐을 최소화한다.



그림 2.19 횡단궤도시스템의 종방향 거더

(3) Ⅱ형 가로보(레일지지점)

하부가 개방된 형태인 Ⅱ형 레일지지 구조체(가로보)를 적용하여 열차하중이 교량구조물 및 횡단궤도시스템에 직접적으로 작용되는 것을 방지함으로써 충격 및 진동을 저감시키는 효과를 확보하였다.

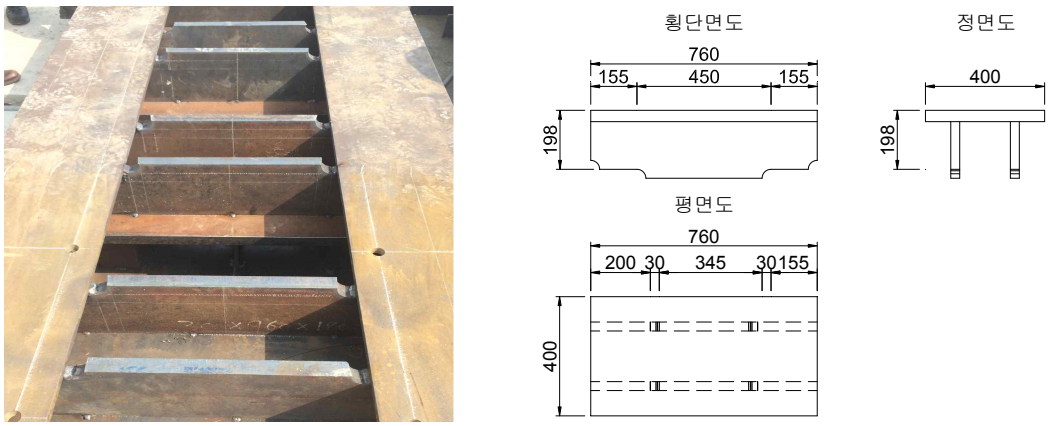
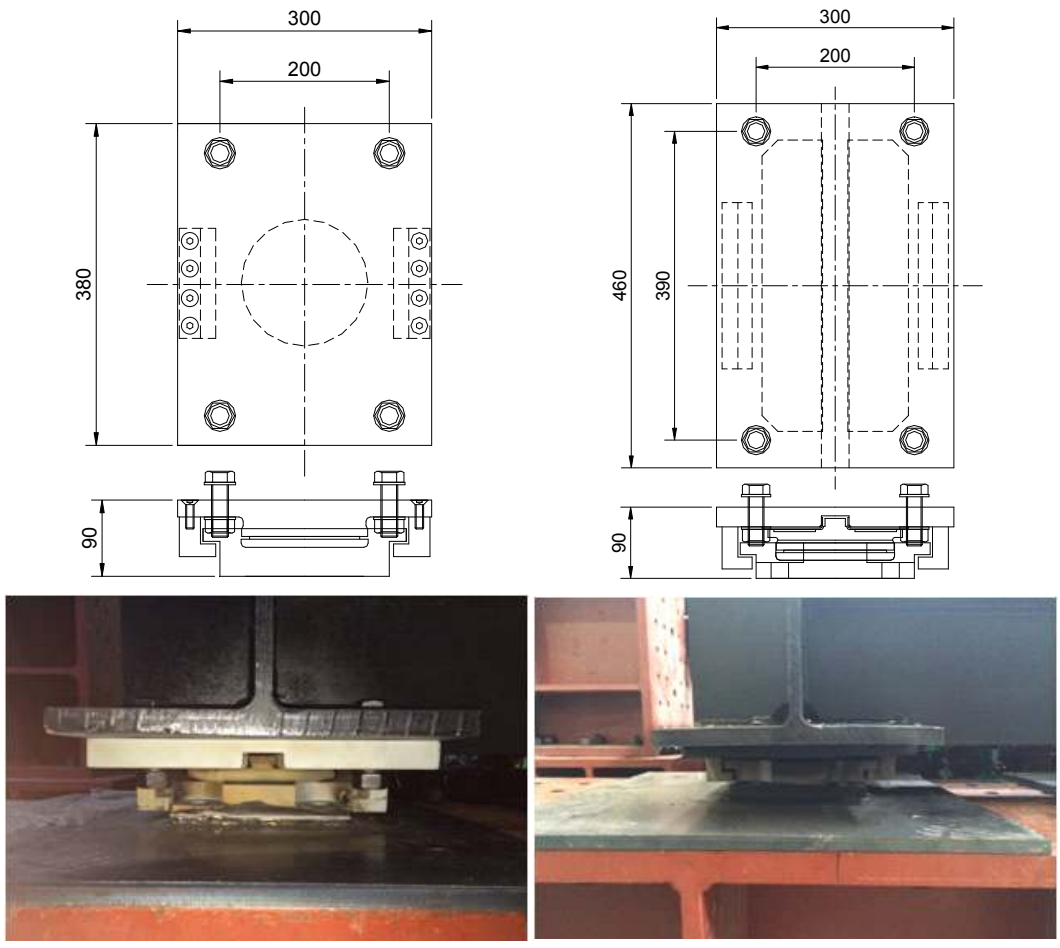


그림 2.20 횡단궤도시스템의 Ⅱ형 가로보

(4) 받침(포트받침)



(a) 고정단 (b) 가동단

그림 2.21 횡단궤도시스템 받침

횡단궤도시스템에 적용한 받침의 최대 용량은 고속철도의 실 운행열차하중(KTX)을 고려

하고 일반철도 설계속도 및 하중크기를 만족할 수 있는 300kN으로 결정하였다. 따라서 받침의 사이즈는 받침용량 300kN에 맞는 약 300×380×90T(고정단), 300×460×90T(이동단)로 결정하였다.

받침의 용량은 받침당 수직력 300kN, 수평력 240kN에 저항할 수 있으며 뿐만 아니라 부상력 80kN을 지지할 수 있도록 설계, 제작하였다. 횡단궤도시스템 받침의 크기 및 높이는 받침의 수직 및 수평력 수용능력 뿐만 아니라 받침의 종방향 가동범위에도 직접적인 영향을 미친다.

교량연장이 35~40m인 교량의 신축량은 양방향으로 약 25~28mm 수준으로 발생된다. 이러한 신축범위를 갖는 교량의 단부에 설치된 횡단궤도시스템의 경우 교량의 신축량을 횡단궤도시스템의 받침에서 수용가능해야만 한다. 따라서 횡단궤도시스템용 포트받침의 종방향 가동범위를 최대 100mm까지 확보하였다.

횡단궤도시스템에 적용된 받침의 수평력 수용치는 240kN으로써 한개의 레일을 지지하는 받침이 총 4개이므로 총 960kN의 수평력을 지지할 수 있는 구조이다. 따라서 체결장치에서 저항하는 수평력 수준이라면 횡단궤도시스템이 좌우레일로 분리되어 독립지지 되어도 궤간 확대에 따른 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

(5) 레일체결장치

모든 직결식 탄성 레일체결장치가 사용가능하며 본선구간(인접구간)의 궤도지지강성과 조율하여 체결장치의 강성을 결정하여야 한다.



(a) System336 (b) ERL

그림 2.22 직결식 탄성 레일체결장치

다. 횡단궤도시스템의 받침 설계

(1) 횡단궤도 받침의 성능요구조건

(가) 일반사항

횡단궤도시스템에 적용할 받침(bearing)은 일방향 가동받침을 기본으로 하며 다음 요구조건을 충족해야 한다.

① 250kN의 축하중에 의한 변위(침하량)는 1mm를 이내로 관리되어야 하며 이로써 횡단궤도시스템에서 발생하는 수직변위가 레일과 레일지지점에 부가되는 것을 방지하여야 한다.

② 횡단궤도시스템 받침부의 회전각은 정적하중 125kN 재하 시 0.0005rad을 초과해서는 안 된다.

③ 횡단궤도시스템 받침의 수평방향 총 변형량은 받침의 가로방향으로 1mm로 제한되어야 한다.

④ 횡단궤도시스템을 지지하는 포트받침(이하 포트받침이라고 칭한다)의 성능 및 설치기준은 한국산업규격 KS F 4424의 규정을 준수함을 원칙으로 한다.

⑤ 포트받침은 ISO 9000 시리즈 인증업체에서 생산된 제품이어야 한다.

⑥ 포트받침은 국가 공인시험기관(KOLAS)에서 발급한 시험성적서를 제출하여 감독원의 승인을 득하여야 한다.

⑦ 포트받침은 횡단궤도시스템에 조립된 상태에서 300만회 내구성시험을 만족하여야 한다.

⑧ 횡단궤도시스템의 포트받침은 고정단과 일방향 가동단으로 구성되며, 궤도시스템의 부반력(부상력)에 충분히 저항할 수 있어야 하고, 교량 및 교대 구조물(슬래브 등) 상부에 방석철근이 조립되어 하중에 대한 전달이 원활하여야 한다.

⑨ 독일 횡단궤도시스템에 적용된 받침 역시 포트받침으로써 포트받침의 적용으로 받침부 가동량이 크고 이에 따른 궤도이동 및 궤광유지를 위해 횡단궤도시스템의 상면에 별도의 종방향 및 횡방향 이동방지를 위한 부속장치가 필요하였다. 그러나 본 연구에서 개발한 포트받침은 받침당 허용부상력 80kN을 부담할 수 있는 부상방지키를 적용함으로써 횡단궤도시스템의 구조형상을 간소화하면서도 전체시스템의 안정성을 향상시켰다.

(2) 종류

포트받침 (Pot Bearing)은 그 기능에 따라 다음 2가지로 분류한다.

(가) 고정단 포트받침 (Pot bearing, fixed)

: 수직력 300kN, 수평력 240kN, 부상력 80kN

(나) 일방향가동단 포트받침 (Pot bearing, movable in one direction)

: 수직력 300kN, 수평력 240kN, 부상력 80kN, 가동범위 ±100mm

(3) 횡단궤도시스템용 포트받침의 추가 요구조건(시공 및 유지관리 측면)

횡단궤도시스템용 받침은 시공 및 유지관리 측면에서 다음의 추가적인 요구조건을 충족해야 한다.

(가) 횡단궤도시스템의 레벨(Level)을 조정하고 횡방향 위치조정을 위해서, 또한 횡단궤도시스템 받침의 설치 작업을 위해서 횡단궤도시스템의 받침은 수직, 수평방향으로의 조절이 가능해야 하며, 시공이후에도 신속하고 쉽게 위치조절이 가능한 것이 좋다.

(나) 횡단궤도시스템의 받침은 가급적 보수가 필요 없어야 하며, 가동단의 경우 슬라이드판의 마모율은 적어야 하고 유지보수를 위해 시간이 많이 소요되면 안된다.

(다) 예외적인 응급 복구가 필요한 경우, 열차운전 중지기간을 최소화하기 위해 횡단궤도시스템의 받침은 쉽게 교체될 수 있어야 한다.

(라) 횡단궤도시스템 받침의 재료적 변형에 기인한 회전각 발생은 받침의 허용 회전각의 범위 내에서 수용되어야 한다.

(4) 횡단궤도용 포트받침의 용량 검토

(가) Case 1 : KTX 열차하중을 이용한 받침 당 하중 산정

KTX 열차하중을 고려한 상재하중 3.875tonf/m, 열차가 없을 때의 상재하중 1.33tonf/m를 사용하중으로 가정하고(횡단궤도 자중을 약 4tonf으로 가정하고, 횡단궤도시스템 전체길이 3m를 고려하여 산출), 횡단궤도시스템 받침의 배치간격(2.4m, 좌우 2개) 및 동적 증가계수 0.27을 반영하여 횡단궤도시스템 받침 1개당 하중을 산정하였다.

① 최대하중 (Pdyn : 활하중)

= 3.875(tonf/m)×2.4(m)/4(EA)×(1+0.27)×9.8(kN/tonf)=28.94kN≒29kN

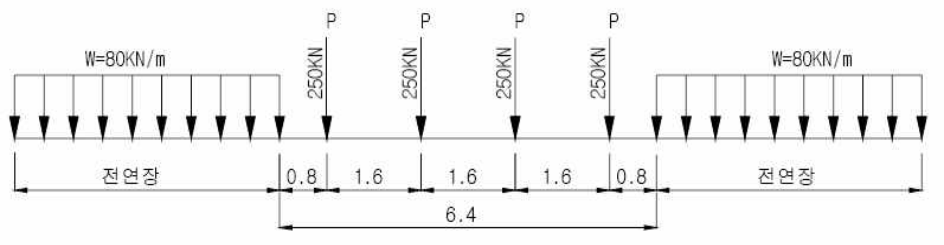
② 최소하중 (Psta : 자중)

= 1.33(tonf/m)×2.4(m)/4(EA)×9.8(kN/tonf)=7.82kN≒8kN

③ 횡단궤도 받침 1개당 하중 (Pmax) = 145kN

(나) Case 2 : HL-25 표준활하중을 이용한 받침당 하중 산정-철도설계편람(궤도편) 4-29

<표준 동적하중>



HL-25 표준활하중

(1)-① 궤도틀림 및 캔트부족 또는 캔트초과에 기인한 윤하중을 고려한 유효하중

$Q_{eff} = Q \times 1.2$

(1)-② 차륜/레일간 요철, 레일절손 등에 기인하는 차량 탄성하 부분의 상하진동에 따른 예외충격하중

$Q_{dyn} = Q_{eff} \times DAF$

여기서, 60<V≤300km/h 여객열차의 경우, $DAF = 1 + t \cdot \Phi(1.0 + 0.5\frac{V-60}{190})$

$DAF = 1 + (1) \cdot (0.2)(1.0 + 0.5\frac{300-60}{190}) = 1.326$

* t의 적용기준 ☞ t=1 적용

t=1 : 접촉응력, 노반 구조계산에 적용

t=2 : 횡하중, 도상 구조계산에 적용

t=3 : 레일응력, 체결장치, 침목구조계산에 적용

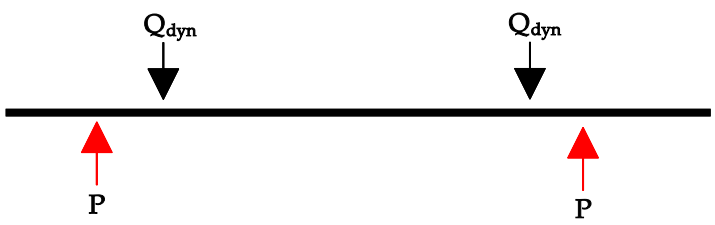
* Φ의 적용기준 : 설계시 추천 적용값 0.2 적용

* V의 적용기준(고속선) : 300km/h 적용

※ 표준 동적하중 산출결과

$Q_{eff} = Q \times 1.2 = 125 \times 1.2 = 150kN$

$Q_{dyn} = Q_{eff} \times DAF = 150 \times 1.326 = 198.94kN$



① 최대하중(Pdyn : 활하중)

= (198.94kN×2)/4(EA)=99.47kN≒100kN

② 최소하중(Psta : 자중)

= 1.33(tonf/m)×2.4(m)/4(EA)×9.8(kN/tonf)=7.82kN≒8kN

③ 횡단궤도시스템 받침 1개당 하중(Pmax) = 230kN

(다) Case 3 : 일반철도의 경우, LS-22하중을 이용한 받침당 하중 산정-철도설계편람(궤도편) 4-25

$$DAF = 1+(1) \bullet (0.2)(1.0+0.5\frac{230-60}{190}) = 1.289$$

* t의 적용기준 ☞ t=1 적용

* Φ의 적용기준 : 설계시 추천 적용값 0.2 적용

* V의 적용기준(일반철도) : 230km/h 적용

$$Q_{dyn} = Q_{eff} \times DAF = 110 \times 1.289 = 141.84kN$$

① 최대하중(Pdyn : 활하중)

= (141.84kN×2)/4(EA)=70.92kN≒71kN

② 최소하중(Psta : 자중)

= 1.33(tonf/m)×2.4(m)/4(EA)×9.8(kN/tonf)=7.82kN≒8kN

③ 횡단궤도시스템 받침 1개당 하중(Pmax) = 172kN

④ 횡단궤도시스템 받침 용량 범위

㉮ Case 1 : KTX 고려 = 150kN

㉯ Case 2 : HL-25 고려(고속철도) = 230kN

㉰ Case 3 : LS-22 고려(일반철도) = 172kN

횡단궤도시스템 받침의 최대 용량은 충분한 안전율을 고려하여 고속철도의 실 운행열차하중(KTX) 및 일반철도 설계속도 및 하중크기를 만족할 수 있도록 300kN으로 결정하였다.

횡단궤도시스템 받침의 크기는 수직력 및 수평력 뿐만 아니라 받침의 종방향 가동범위에도 직접적인 영향을 미친다. 교량연장이 35~40m인 교량의 신축량은 양방향으로 약 25~28mm 수준으로 발생된다. 이러한 신축범위를 갖는 교량의 단부에 설치된 횡단궤도의 경우

교량의 신축량을 횡단궤도의 받침에서 수용가능해야만 한다. 이에 본 횡단궤도 받침의 종방향 가동범위를 충분한 안전율을 고려하여 ±100mm로 설계 적용하였다.

또한 횡단궤도시스템에 사용되는 받침은 일방향 가동받침으로써 교축 직각방향, 즉 횡방향 변위는 구속되어야 한다. 횡단궤도시스템의 횡방향 가동범위는 받침당 1mm를 초과해서는 안 되며, 이를 위해 받침 상하부 플레이트에 부상방지키 및 쐐기(스토퍼)를 설치하고 상부 쐐기와 하부 쐐기의 간격은 1mm로 설계하여 횡방향 변위 발생을 받침당 1mm로 제한하였다.

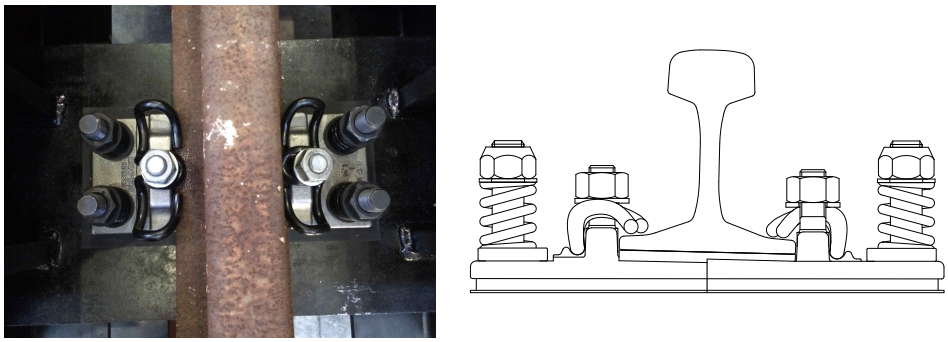


(a) 이동단 (b) 고정단

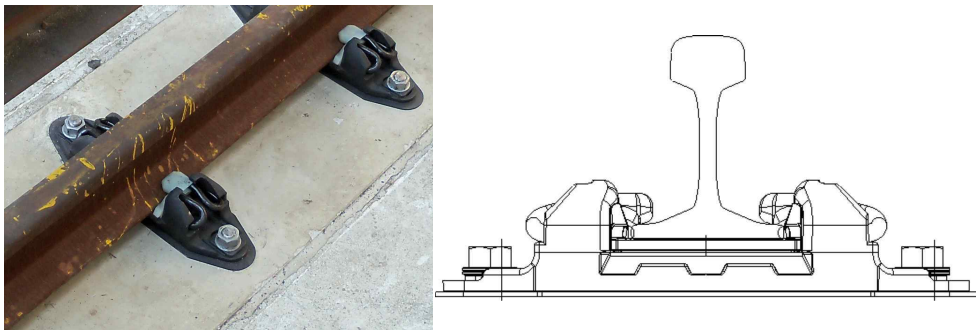
그림 2.23 횡단궤도시스템용 포트받침

라. 횡단궤도시스템의 레일체결장치 선정

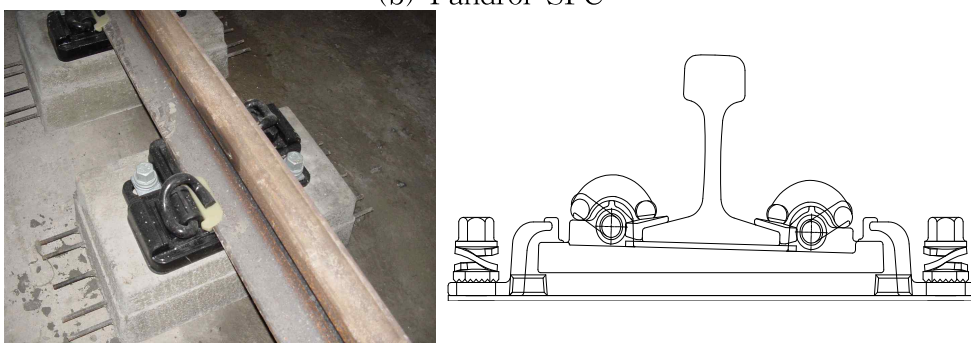
모든 직결식 탄성 레일체결장치(Direct fixation rail fastening system)가 사용가능하며 본선구간(인접구간)의 궤도지지강성과 조율하여 체결장치의 강성을 결정하여야 한다. 현재 국내에서 적용되고 있는 직결식 탄성 레일체결장치인 ALT-Ⅰ, Ⅱ, Pandrol SFC 및 Vossloh system 336 등 별도의 콘크리트침목 없이 직결식으로 체결이 가능한 시스템이면 적용이 가능하며, 본 연구에서 제안하는 횡단궤도시스템의 최대 처짐이 고속철도 설계하중 범위에서 약 0.6mm 이내이므로 레일지지점의 침하에 따른 횡단궤도시스템과 인접 궤도구간간의 궤도지지강성 차이는 크지 않을 것으로 판단되어 횡단궤도시스템에 적용할 레일체결장치의 스프링강성은 인접구간의 궤도지지강성을 고려하여 동일한 스프링강성으로 적용하여도 무방하다. 즉, 인접 궤도구간에 사용된 레일체결장치의 스프링강성과 동일하게 적용하여도 무방하다.



(a) Vossloh System336



(b) Pandrol SFC



(c) ALT-Ⅱ

그림 2.24 횡단궤도시스템에 적용 가능한 직결식 탄성 레일체결장치

4. 횡단궤도시스템의 적용 효과 검토

복합적인 동적하중이 재하되는 철도교량 및 궤도구조간의 상호작용력 동특성을 파악하기 위해서는 다양한 하중 조건에 대한 실험이 필요하다. 그러나 실 교량을 대상으로 수행되는 현장재하시험은 재하하중 외의 다양한 조건과 인자들에 따라 실험 환경이 제한적이므로 이를 고려한 축소모형 시험을 통해 상세하게 분석하는 것이 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 독일의 횡단궤도시스템과 국내 철도교 설계기준을 준용하여 설계 및 제작한 한국형 횡단궤도시스템을 이용하고, 콘크리트궤도(레일 및 레일체결장치 포함)가 고려된 교량 및 교대부를 조합한 실대형 시험체를 이용하여 횡단궤도시스템의 설치유무에 따른 단부 궤도의

사용성(uplift 및 압축력, 변위)을 검토함으로써 횡단궤도시스템의 적용 효과를 실험적으로 입증하고자 하였다. 이를 위해 최대하중, 가진주파수 및 하중진폭 등의 주요 매개변수를 고려한 횡단궤도시스템의 조합성능시험을 통해 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 상향력 저감 효과를 입증하고 단부 궤도구성품(레일상향변위, 레일저부응력, 체결구응력)의 거동특성을 분석하였다.

가. 교량 단부 궤도-교량 상호작용해석

횡단궤도시스템의 적용에 따른 단부 궤도 레일지지점에 발생하는 상향력의 수준을 분석하기 위해 시험체 제원 및 실험조건과 동일한 조건으로 모델링하여 해석을 수행하였다.
본 연구에서 수행한 상호작용해석은 범용구조해석 프로그램인 LUSAS 14.7을 이용하였으며, 수치해석 모델링은 실내시험에 사용된 시험체와 동일한 제원으로 그림 2.25와 같이 모델링하였다.

레일은 Frame element, 교량과 교대는 Solid element로 모델링하였으며, 레일체결장치의 스프링강성을 고려하여 레일과 교량, 교대 및 횡단궤도시스템 상면의 각각의 절점을 Spring element로 연결하여 하중 및 변위가 전달될 수 있도록 모델링 하였다.

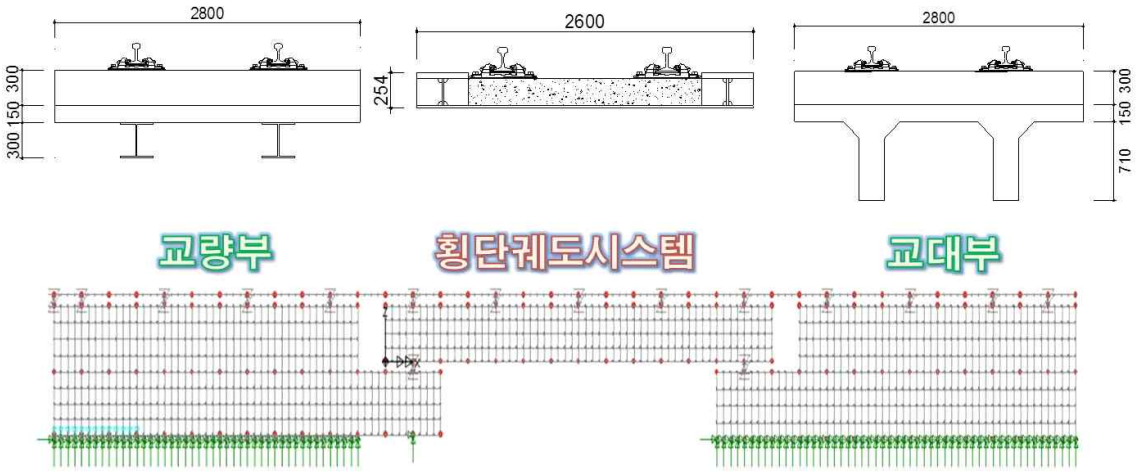
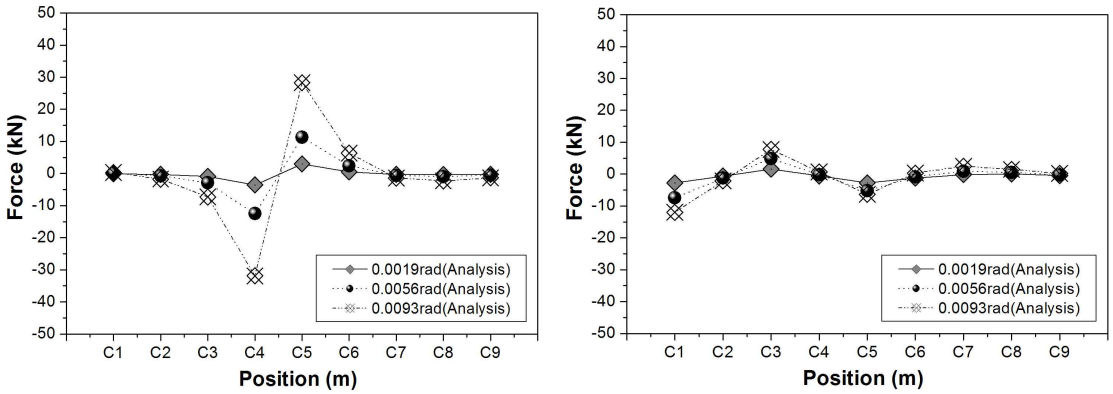


그림 2.25 수치해석 모델링

단부 레일지지점에 상향력을 발생시키기 위해 교량 모델 자유단의 처짐을 발생시켜 교량 단부의 회전을 유도하였다. 교량 단부 회전에 기인한 단부 레일지지점의 상호작용력을 검토하였으며 그 결과는 그림 2.26과 같다.



(a) 횡단궤도시스템 적용 전 (b) 횡단궤도시스템 적용 후

그림 2.26 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도 상호작용 해석결과

교량 단부회전에 따른 횡단궤도시스템 적용 전·후의 단부 레일지지점 상향력 검토결과, 그림 2.26과 같이 횡단궤도시스템 적용 전의 단부 궤도에서는 교량부 마지막 레일지지점에서 최대 압축력이 발생하였으며, 교대부 첫 번째 레일지지점에서는 최대 상향력이 발생하는 것으로 나타났다.

반면 횡단궤도시스템 적용 후에는 횡단궤도시스템의 첫 번째 레일지지점에 약 10kN 미만의 상향력이 발생되었으며 이는 독일 DS 804에서 제시하고 있는 SFC 1501 체결장치의 상향력 허용기준(17~21.5kN)을 충분히 만족하는 것으로 분석되었다. 또한 횡단궤도시스템을 교량단부에 적용함에 따라 교량 단부 및 교대부 전구간에서 교량 단부 회전에 기인한 상호작용력의 영향이 크게 저감되었으며, 특히 교량 단부 궤도(레일)의 변형수준이 완만하게 유도되어 고속열차 주행에 따른 주행안전성 확보에 횡단궤도시스템의 적용이 효과가 있을 것으로 분석되었다.

따라서 횡단궤도시스템 적용에 따라 교량 및 교대부 레일지지점에 발생하는 상호작용력과 변형수준이 매우 안정적으로 나타나는 것으로 검토되어 횡단궤도시스템의 적용효과를 해석적으로 입증하였다.

나. 교량 단부 궤도-교량 상호작용실험(실대형 시험)

(1) 개요

시험체 제작은 교량 단부 궤도의 거동특성을 분석하기 위한 실험의 목적에 부합되도록 실제 교량상 궤도구조의 설계조건을 적용하여 궤도구조의 단면을 설계하였으며, 설계하중은 표 2.7과 같다.

표 2.7 시험체 설계조건

항 목	기 준
설계 속도	고속철도 : 350km/h
설계 기준	철도교설계기준(철도교편)
적용활하중	HL-25 표준열차하중 중 집중하중(250kN)

시험체는 교량, 교대 및 횡단궤도시험체로 구분되며 시험체의 제원과 전경은 표 2.8 및 그림 2.27과 같다.

표 2.8 시험체 제원

구 분		내 용	
시험체		교량	Length : 3.4m, Width : 2.8m
		교대	Length : 2.8m, Width : 2.8m
레일종류		UIC 60	
궤도 형식		직결식 궤도(Direct fixation track system)	
레일체결시스템		Pandrol SFC 1501(Single fast clip)	
레일패드의 정적 스프링강성 및 두께		Static spring stiffness : 48kN/mm Thickness : 10mm	
횡단궤도 시스템	크기(H×B×L)	254×2,600×2,400(mm)	
	주형	SM490	
	콘크리트	C270	



(a) 교량시험체



(b) 횡단궤도시험체 I



(c) 교대 시험체



(d) 횡단궤도시험체 II

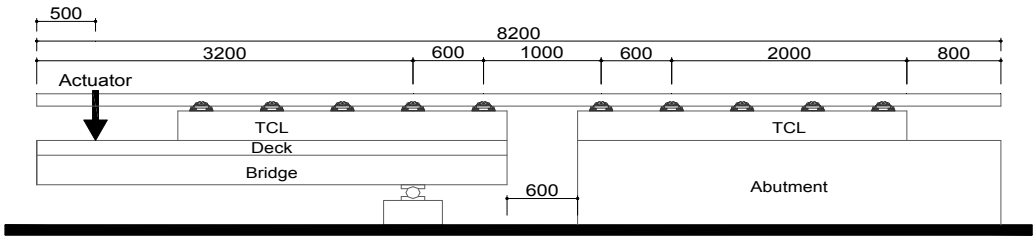
그림 2.27 실내시험 전경

(2) 교량 및 교대 단면 선정

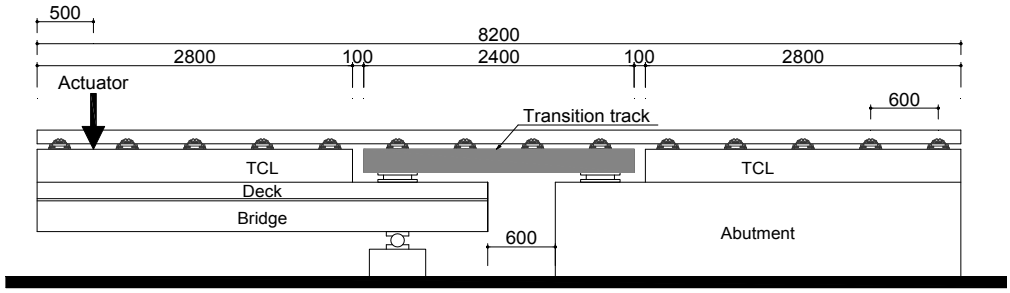
철도교량의 폭원은 고속철도(복선)의 경우 14.0m로 표준화되어 있으며, 단선 교량의 경우도 표준화된 단면은 없으나 최소 노반폭 4.0m에 좌우측 유지관리통로 등을 감안하여 9.0m를 사용하고 있다. 그러므로 실제 철도운행에 필요한 교량의 폭은 4.0~9.0m 정도이나, 이 경우 제작 및 운반의 어려움과 비용이 많이 소요되며 실험장소의 제약으로 인해 실험의 어려움이 발생된다. 또한 일반적인 철도교량의 길이는 25~40m이지만 본 시험의 목적은 단부궤도에 발생하는 교량-궤도 상호작용력의 입증에 있으므로 교량시험체는 단부회전각을 유발시켜 단부 궤도에 상호작용력을 발생시키는 역할을 수행하여야 한다. 따라서 교량 자체의 휨변형을 최소화하고 실제 교량의 단부회전을 모사하기 위하여 교량시험체의 길이는 4m, 교량의 폭을 2.8m로 설계하였다.

교량 시험체는 그림 2.28과 같이 교량지점부의 회전 자유도만을 허용하는 핀 지지(pin support)된 캔틸레버 구조로써 자유단의 처짐에 의해 단부의 회전을 유발시키고 이에 따라 단부 궤도에 상향력 및 압축력을 부가시키는 가력지그로써의 역할을 할 수 있도록 시험체를 설계하였다. 또한 별도의 지그를 이용하여 교대 및 교량 시험체를 비롯한 레일의 종방향 변위발생을 최대한 구속함으로써 교량의 수직 처짐에 기인한 궤도(레일 및 레일지지점)의 수직방향 거동을 극대화 하였다.

교량 및 교대 시험체의 배치는 단부 궤도에 발생하는 상호작용력을 극대화하고 횡단궤도시스템의 적용효과를 뚜렷하게 파악하기 위하여 그림 2.28과 같이 교량 단부의 유간을 600mm(교량측 마지막 레일지지점과 교대측 첫 번째 레일지지점의 간격 1,000mm)로 시험체를 세팅하였으며, 횡단궤도시스템 시험체를 포함한 교량 및 교대 시험체 상의 모든 레일지지점 간격은 600mm로 동일하다.

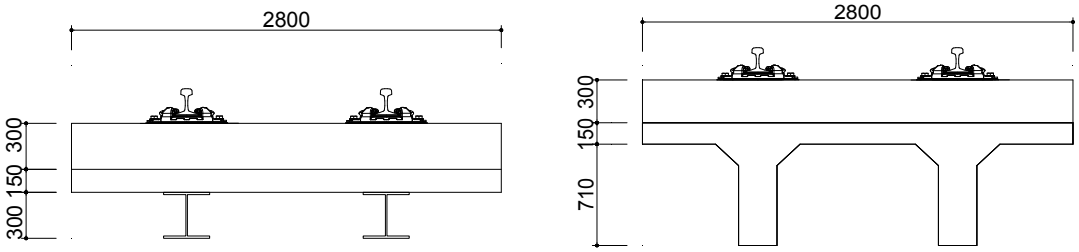


(a) 횡단궤도시스템 적용 전 시험체



(b) 횡단궤도시스템 적용 시험체

그림 2.28 시험체 설치 개요도



(a) 교량부 (b) 교대부

그림 2.29 교량, 교대부 시험체 단면도

횡단궤도시스템을 적용하기 전 실험이 종료된 이후에 레일과 레일체결장치를 모두 해체하고 교량 및 교대 시험체를 회전시켜 사전에 확보해둔 교량 및 교대 시험체의 빈 공간에 횡단궤도시스템을 설치하였다. 횡단궤도시스템 설치 시 정밀 측량을 통해 교량 및 교대 시험체 직상부 레일지지점과의 레벨을 유지시켰으며, 레일은 평평한 바닥에 놓아 자체적인 영

구변형이 발생되지 않도록 주의하였다.

교량 시험체에 레일체결장치에 의해 고정된 레일은 교량 시험체의 변형에 종속적으로 변형되게 된다. 또한 이러한 변형은 교량 시험체 직상부 궤도뿐만 아니라 교대 시험체 상부에 고정된 레일 및 레일체결장치에 까지 전달되게 될 것 이며, 이때 교량 및 교대 직상부 레일 지지점에 발생하는 변위 및 작용력의 수준이 횡단궤도시스템을 적용함에 따라 어느 정도 저감되는지를 입증하는 것이 본 실험의 목적이다. 따라서 교량시험체는 캔틸레버구조의 자유단의 처짐에 따른 단부회전이 발생되어야 하며 이러한 단부회전의 효과가 교량 단부에 부설된 궤도까지 원만하게 전달되어야 한다.

이에 본 실험에서는 시험하중에 의해 교량 시험체의 자체적인 휨변형이 발생되지 않도록 그림 2.29(a)와 같이 시험체 제작 및 실험 효율을 고려하여 교량 시험체의 형고는 작더라도 충분한 강성을 가질 수 있는 강합성 구조로 교량 시험체를 설계 및 제작하였다. 교대 시험체 역시 레일체결장치를 견고히 고정할 수 있고 자체적인 변형이 발생되지 않으며 교량시험체로부터 전달된 작용력에 부상되지 않을 수 있도록 그림 2.29(b)와 같이 충분한 중량을 갖는 라멘형식의 콘크리트 구조로 제작되었다.

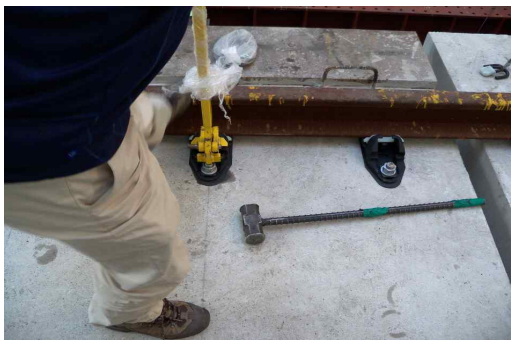
본 실험에 사용된 교량 시험체의 형고는 750mm로써 실제 교량의 형고 보다 매우 작다. 철도교량 단부 궤도에 작용하는 궤도-교량 상호작용 중 단부 회전에 의해 발생하는 교량 및 궤도의 종방향 변형(longitudinal deformation)은 교량 상부구조의 형고(bridge depth)에 직접적인 영향을 받으며 형고의 사이즈에 비례하여 증가한다. 따라서 본 실험에서 검토한 단부 회전각과 동일한 조건이라면 실제 교량에서의 단부 회전에 따른 종방향 상호작용력의 발생수준은 본 실험에서의 결과보다 클 것이다. 하지만 본 연구에서 검토하고자 하는 궤도-교량 상호작용력은 단부 회전에 따른 교량 상판의 수직방향 변형(vertical deformation)이며, 이러한 수직방향의 상판변형수준(vertical tolerance of deck)은 형고에 직접적인 영향을 받지 않는다. 따라서 본 연구에서는 종방향 변형에 따른 효과를 최소화 하고자 교량 시험체의 형고를 작게 설계하였다.




(a) 횡단궤도시스템 및 받침 설치 전경




(b) 체결장치 설치 전경

(c) 레일 부설 및 레일체결장치 시공 전경

그림 2.30 횡단궤도시스템 시험체 설치전경

(3) 횡단궤도시스템 단면 선정

횡단궤도시스템의 표준단면은 좌우레일을 독립된 강구조체가 지지하는 형식으로써 본 절에서 기술하는 시험체와는 다소 상이하다.

본 절의 실험은 교량 단부 궤도에 발생되는 상호작용력 및 궤도구성품의 거동을 실험적으로 파악하고, 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도-교량 상호작용력(레일상향변위, 체결구응력, 상향력)의 저감수준을 평가하여 횡단궤도시스템의 적용효과를 입증하기 위한 실험을 설계하여 수행하였다. 따라서 횡단궤도시스템의 초기 시험모델은 독일에서 적용한 2.4m로 시작되었으며, 선행연구결과 및 연구과정에서 도출된 결과를 종합적으로 분석하여 최종적으로는 국내 철도환경 및 기준에 최적화된 단면으로 개선된 3.0m 길이의 시험체로 실대

형 조립성능 실험을 수행하였다. 또한 횡단궤도시스템의 길이(경간장)는 적용대상 개소의 조건 및 설계방침에 따라서 변경이 가능하다. 이는 다양한 길이와 재료의 횡단궤도시스템이 존재하는 독일의 경우와 마찬가지인 횡단궤도시스템의 설계조건이다. 따라서 본 절에서 수행한 2.4m 길이의 횡단궤도시스템을 적용한 단부 궤도-교량 상호작용 실험의 목적은 횡단궤도시스템의 적용효과를 파악하는 것에 있다. 또한 단부 궤도 레일지지점에 발생되는 상호작용력의 수준을 극대화하고 궤도-교량 상호작용력 발생 측면에서 보다 안전측의 검토가 가능할 수 있도록 비교적 체결장치의 수직스프링계수가 높고, 체결클립의 피로진폭(탄성변형한도)이 작은 레일체결장치를 사용한 실험을 수행하였다.

횡단궤도시스템의 높이는 고속철도 교량상 콘크리트 궤도구조의 표준단면을 적용하여 일반구간과의 레일면고를 유지하면서 TCL(Track Concrete Layer)의 공간에 설치될 수 있도록 횡단궤도시스템 받침의 높이를 0.1m로 고려하여 0.254m로 설계하였다. 또한 국내 철도설계기준(궤도편, 2010 5.4.8(7))을 준용하여 충분한 강성과 중량을 고려하여 설계하였으며 횡단궤도시스템의 길이는 경부고속철도 교량의 표준단면인 35m PSC Box 거더교의 받침의 위치와 최대 유간을 감안하여 2.4m로 선정하였다.

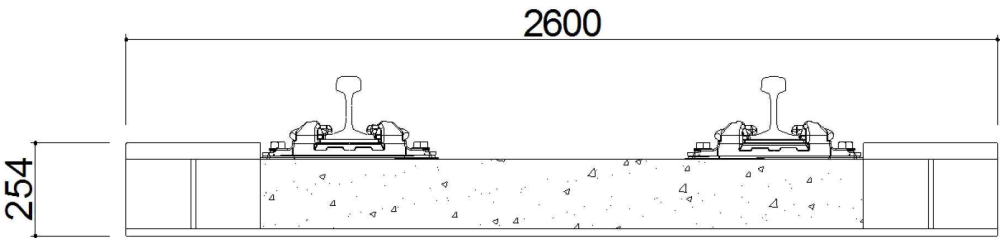


그림 2.31 횡단궤도시스템 시험체 단면도(강합성 구조)

(4) 시험하중 산정

교량의 단부 회전에 의해 발생하는 단부 궤도의 상호작용력을 보다 뚜렷하게 파악하기 위해 단부회전의 수준을 가급적 크게 유도하고자 일본 및 유로코드의 기준치를 초과할 수 있는 수준으로 다양한 단부회전각을 설정하였다. 국내 철도교량 단부회전각의 기준은 0.0005rad으로써 일본 및 유로코드 대비 약 10배 이상 작게 설정되어 있어 상대적으로 국외기준에 비해 대비 안전측으로 설계하는 것으로 분석되었다. 따라서 국내 단부회전각 허용기준을 실험에 적용하여 철도교량의 단부 회전에 따른 단부 궤도에 발생하는 교량-궤도 상호작용력의 수준 및 경향을 파악하기에는 다소 작은 수준이므로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 교량 시험체의 변위는 최대 25mm까지 5mm 단위로 증가시켜 가며 단계별 정적 변위

제어를 실시하였으며, 단계별 정적 변위제어(prescribed loading, displacement)에 따른 교량 시험체의 단부회전각 발생량을 국외 철도교량 단부회전각 허용기준과 비교하여 표 2.9에 나타내었다.

표 2.9 정적 변위제어에 따른 단부회전각 발생량 비교

Test condition		Reference Code	
Prescribed loading (displacement)	Bridge end rotation	Country	Bridge end rotation
5 mm	0.0019 radians	Japan(360km/h)	0.002 radians
10 mm	0.0037 radians	-	-
15 mm	0.0056 radians	UIC (Slab track on one side)	0.005 radians
20 mm	0.0074 radians	-	-
25 mm	0.0093 radians	UIC (Ballasted track on both side)	0.010 radians

또한 본 실험에서 가장 중요한 조건은 단부 레일 및 레일지지점의 거동에 영향을 미치는 하중인자는 오직 교량의 회전만이 고려되어야 한다는 것이다. 이를 위해 교량 시험체의 길이(가력지점부터 핀 지지받침까지의 거리) 및 자유단의 처짐량(변위제어 수준)을 고려하여 교량 시험체에 발생하게 될 단부회전각의 수준을 사전에 계산하고, 받침부의 상대변위량 측정을 통해 단부회전각을 산출함으로써 설정된 단부회전각에 대한 적정성을 검증하여 표 2.9에 나타내었다. 표 2.9와 같이 실험에 적용된 교량 시험체의 변위 5mm는 교량 단부에 약 0.002rad 만큼의 단부회전각을 유발시키며 이는 일본 고속선 철도교량의 단부회전각 허용기준과 유사한 수준을 모사하고자 하였다. 또한 UIC에서 제시하는 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부회전각 기준을 초과하는 수준의 시험하중(0.0056rad)을 고려하였으며, 마찬가지로 UIC의 자갈궤도 부설교량의 단부회전각 기준을 최대 실험하중으로 산정하여 실험에 적용하였다.

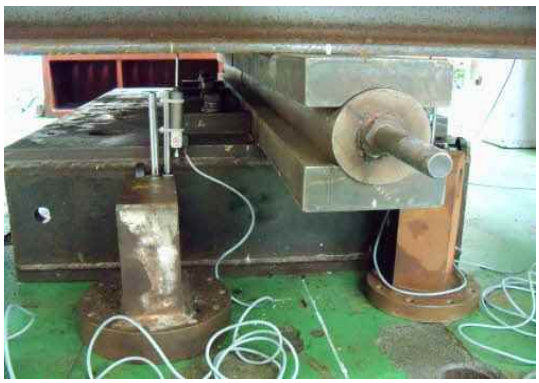
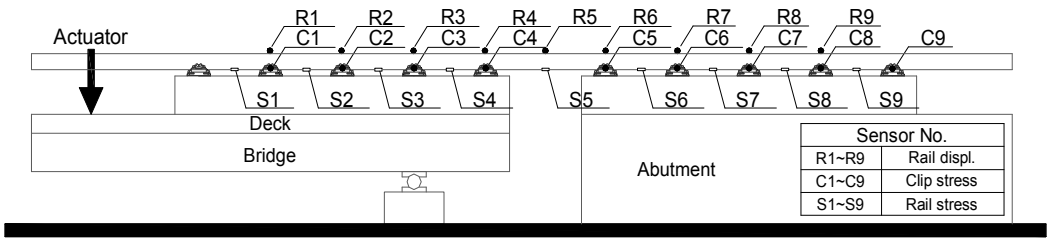



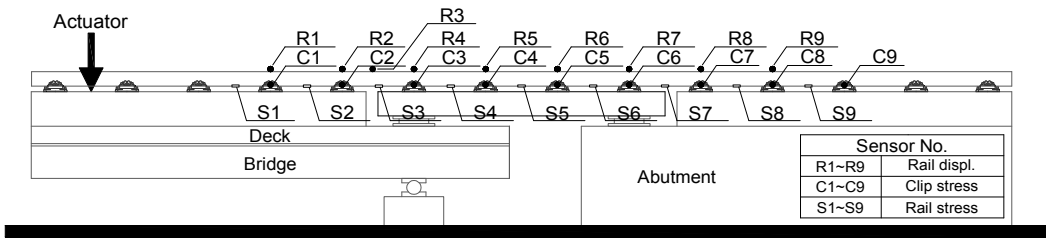
그림 2.32 교량 시험체의 단부 회전각 측정 전경

(5) 측정항목 및 방법

횡단궤도시스템 적용에 따른 교량 단부 궤도 상향력(상호작용력) 저감효과를 입증하기 위하여 횡단궤도시스템 유무에 따른 단부 궤도의 거동을 검토하였다. 이를 위해 교량 및 교대부 레일상면에 LVDT를 설치하여 레일 지지점의 변위를 측정하여 단부 궤도 레일지지점에 발생하는 상향력의 영향을 실험적으로 입증하였다. 또한, 가장 상향력이 큰 레일 지지점 체결구에 Strain Gauge를 설치하여 상향력에 의한 체결구의 발생 응력의 수준을 검토하였다. 센서 설치개요도는 그림 2.33과 같다.



(a) 횡단궤도시스템 적용 전



(b) 횡단궤도시스템 적용 후

그림 2.33 센서 설치개요도

(가) 레일 및 레일지지점 변위

그림 2.34와 같이 교량 단부 유간 중앙과 교량 단부에서의 레일 및 레일지지점 변위(패드 변위 혹은 레일들림)를 측정하였다. 레일지지점에 설치된 변위계는 변위계의 스트로크가 하

향으로 발생되도록 설치하였으므로 측정결과에서 (-)는 상향변위를, (+)는 하향변위를 의미한다. 또한 레일지지점 변위는 레일직하부 탄성패드의 변위를 직접 측정하기에 무리가 있으므로 체결지점의 레일에서 발생되는 변위량으로 평가하였다. 따라서 단부 레일지지점 변위 측정시 위치에 따라서는 패드의 압축변위가 측정되는 것이 아니라 레일의 들림량이 측정됨으로써 레일의 상향변형 수준을 판단할 수 있도록 하였다.



그림 2.34 변위계 설치 전경

(나) 레일저부 응력

교량 단부회전에 따른 단부 레일의 곡률 발생의 수준과 레일저부 응력을 파악하고자 유간 중앙부와 교량 단부 레일을 비롯하여 레일지지점간 중앙의 레일 저부에 1축 스트레인게이지를 종방향으로 설치하였으며 설치 전경은 그림 2.35와 같다.

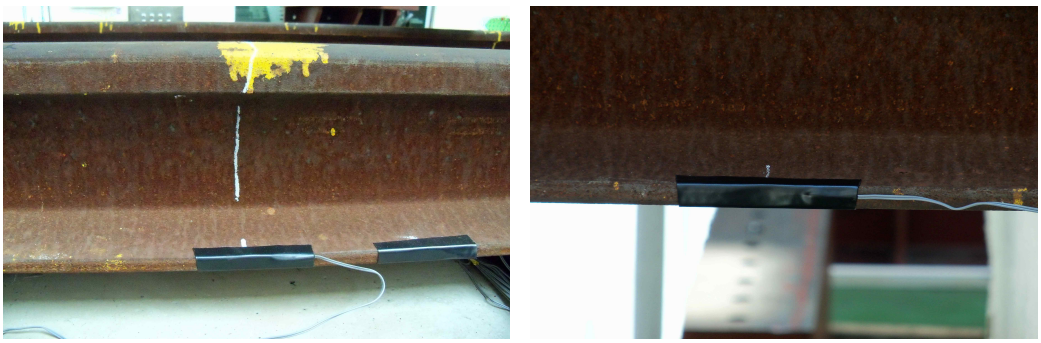


그림 2.35 레일저부 응력 센서설치 전경

(다) 체결구(클립) 응력

레일이 상부구조에 고정된 슬래브에 직접 체결되는 콘크리트궤도의 특성에 따라 교량상부구조의 변형은 레일의 변형에 직접적으로 영향을 미친다. 이러한 레일의 변형에 직접적인 영향을 받는 체결클립은 레일의 부상에 저항할 수 있는 유일한 궤도구성품이다. 따라서 단부 레일의 휨 변형이 레일지지점을 지지하는 체결장치 클립의 응력발생에 미치는 영향을 실험적으로 입증하고자 체결클립 각부에 1축 스트레인게이지를 부착하였으며, 설치 전경은 그림 2.36과 같다.



그림 2.36 체결구 응력 센서설치 전경

(6) 횡단궤도시스템의 적용효과 분석

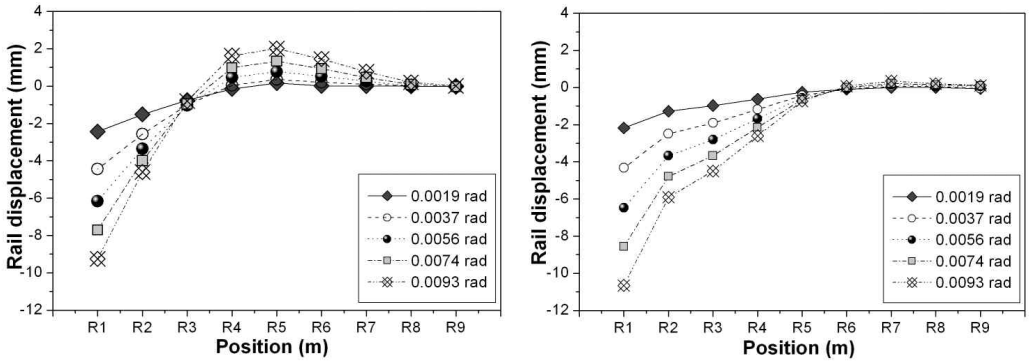
(가) 레일 및 레일지지점 변위

그림 2.37(a)와 같이 횡단궤도시스템 적용 전 레일변위는 교량 시험체의 받침 직상부(R3)를 기준으로 교량측 레일(R1, R2)에서는 하향변위가 발생되었으며, 교량 마지막 레일 지지점(R4)부터 교대 직상부 레일(R4~R9)까지는 상향변위가 발생하여 전형적인 교량 단부 레일의 변형곡선 특성이 나타났다. 횡단궤도시스템 적용 전 시험결과는 교량 단부회전각의 증가에 따라 레일의 상향변위 또한 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 단부회전각 발생 시(25mm, 0.01rad) 최대 레일상향변위는 R4~R5위치에서 약 2mm로 나타났다.

반면, 횡단궤도시스템 적용 후에는 그림 2.37(b)와 같이 횡단궤도시스템의 첫 번째 레일지지점에서 하향변위가 발생되었으며 이는 해당위치에 압축력이 발생된 것을 의미한다. 또한, 횡단궤도시스템을 포함한 교량 및 교대부 전구간에서 레일의 상향변위 발생 수준은 매우 미소한 것으로 분석되었다.

따라서 횡단궤도시스템의 적용으로 국내·외 철도교량 단부회전각 허용기준을 초과하는 과대변형 상태에서도 이러한 교량의 변형특성을 효과적으로 완화시킴으로써 단부 궤도에 발

생하는 궤도-교량 상호작용력을 최대 80% 이상 크게 저감시킬 수 있으며, 레일의 변형(곡률)을 최소한으로 조정할 수 있음을 실험적으로 입증하였다.



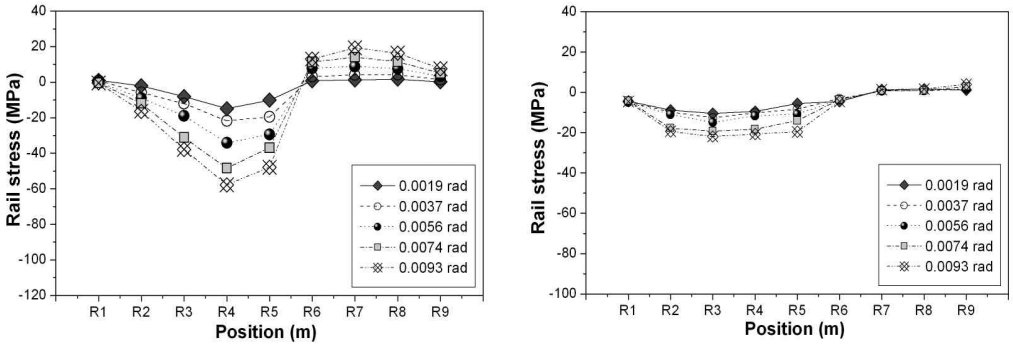
(a) 횡단궤도시스템 적용 전 (b) 횡단궤도시스템 적용 후

그림 2.37 레일지지점 변위

(나) 레일저부 응력

그림 2.38(a)와 같이 횡단궤도시스템 적용 전 레일저부 응력은 예상대로 교량과 교대 사이(S4-S5)에서 최대 압축응력이 발생하였으며 교대부에서는 인장응력이 발생하였다. 또한 교대부 레일에 발생한 인장응력은 교대부 마지막 레일지지점에서 거의 0으로 수렴하여 레일상향변위 측정결과와 일치하는 경향이 나타났다. 그림 2.38(a)와 같이 레일의 응력은 레일의 곡률과 직접적인 관계가 있으며, 따라서 교량 단부의 레일에 발생한 상향변위(upward curvature)로 인해 교량과 교대부 사이의 레일저부에는 압축응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 교량 단부회전각의 증가에 따라 레일저부 응력 역시 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

따라서 본 실험에 적용된 궤도-교량 시험체의 조합(교대 포함)에서 교량 시험체의 단부회전각은 교량 단부 레일의 발생 곡률에 적절히 반영된 것으로 분석되었다. 또한 그림 2.38(b)와 같이 횡단궤도시스템 적용 후에는 횡단궤도시스템 중앙부(교량과 교대 사이)부터 교량측 첫 번째 레일지지점 사이에서 최대 압축응력이 발생하였으나 그 발생수준은 매우 미소하며, 교량의 처짐(단부회전각) 변화에도 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 또한 횡단궤도시스템의 적용에 따라 단부 레일의 최대 응력이 약 75% 이상 크게 감소되는 것으로 나타나 횡단궤도시스템의 적용에 따른 단부 궤도의 교량-궤도 상호작용력 저감효과를 실험적으로 입증하였다.

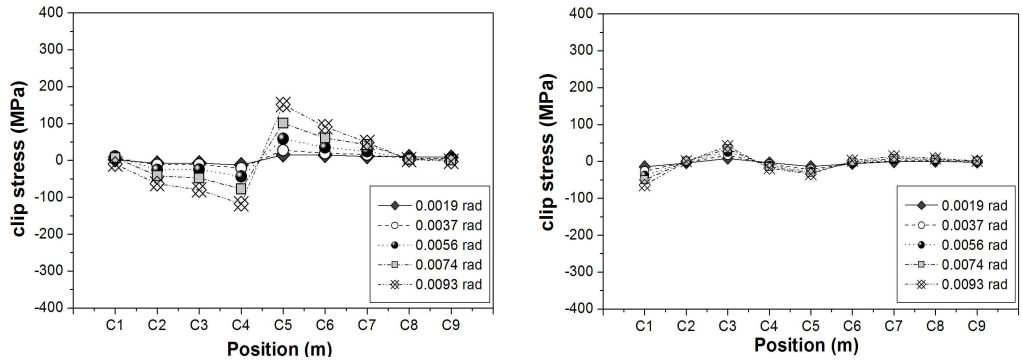


(a) 횡단궤도시스템 적용 전 (b) 횡단궤도시스템 적용 후

그림 2.38 레일저부 응력

(다) 체결구 응력

횡단궤도시스템 적용 전, 후 체결구의 응력 측정결과를 그림 2.39에 나타내었다. 횡단궤도시스템 적용 전 체결구의 응력은 교량 지점(pin support, bearing) 직상부(C3)의 경우 교량과 체결구의 회전축 일치로 단부 회전에 따른 상호작용력이 발생하지 않아 매우 미소한 응력이 발생하였다. 그림 2.39(a)와 같이 교량측 마지막 레일 지지점(C4)과 교대부 레일지지점(C5, C6)에서 최대 체결구 응력(인장)이 발생했음을 확인할 수 있으며, 이는 해당위치의 레일이 부상했음을 의미한다.



(a) 횡단궤도시스템 적용 전 (b) 횡단궤도시스템 적용 후

그림 2.39 체결구 응력

교량측 마지막 레일지지점 C4에서의 최대 압축응력은 단부 회전에 따른 교량 단부 바닥판의 들림현상이 교량측 마지막 레일지지점에 압축력을 유발시킨 것에서 기인된 것으로 분석되었으며, 해당 위치는 레일상향변위가 발생된 위치(R4)이나 최대 상향력이 발생된 위치는 아닌 것으로 나타났다. 최대 상향력이 발생되는 위치는 교량 단부 회전에 의한 교량의

변형이 레일에 전달되어 레일에 상향 곡률이 발생되는 교량측의 R4와 교대측의 R5 중 레일지지점의 위치가 고정되어 위상의 변화가 작은 부동구간인 교대부 첫 번째 레일지지점(R5=C5)에서 최대 상향력이 발생되게 된다. 따라서 교량 단부 레일지지점의 상향력은 레일과 레일을 지지하는 레일지지점(체결장치 고정위치)의 위상변화의 차이(상대변위)에 직접적인 영향을 받는 것으로 분석되었다.

또한, 레일상향변위와 마찬가지로 체결클립 응력 역시, 단부 회전각의 증가에 따라 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 곧 레일지지점에 발생하는 상향력의 증가를 의미한다. 본 실험에 적용한 체결구의 경우(Pandrol SFC), 체결구를 조립함과 동시에 소정의 체결력이 도입되며 이때 체결클립에 도입되는 응력은 압축응력을 나타낸다. 교량의 단부 회전에 의해 단부 레일 및 레일지지점에는 상향변위가 발생하게 되고 이러한 교량과 레일의 변형특성에 기인하여 그림 2.39(a)와 같이 교대부 체결클립에는 초기 응력상태와 반대되는 인장응력이 발생되는 것으로 나타났다. 따라서 단부 궤도의 체결클립은 일반적인 구간에 설치된 체결클립 보다 발생응력의 범위가 크게 증가하게 되어 체결클립의 장기내구성 확보에 불리한 것으로 나타났다.

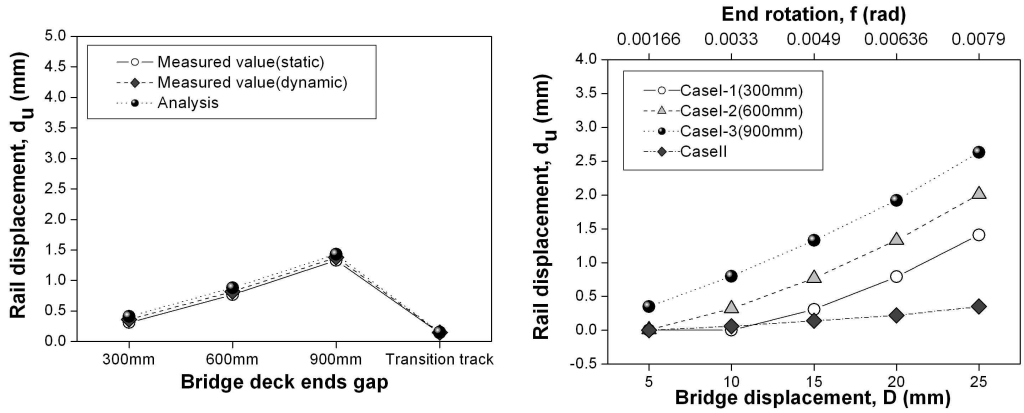
반면, 횡단궤도시스템 적용 후에는 그림 2.39(b)와 같이 횡단궤도시스템의 첫 번째 레일지지점인 C3에서 상향력이 발생되었으나 그 수준은 매우 미소하였으며, 횡단궤도시스템을 포함한 교량 및 교대부 전구간에서 발생된 체결클립의 응력 수준은 매우 미소한 것으로 분석되었다.

교량 단부 궤도 상호작용력 분석 및 횡단궤도시스템 적용 효과 입증을 위한 실대형 궤도-교량-교대 실험결과, 횡단궤도시스템을 적용함에 따라 교대부 첫 번째 레일지지점에 발생되던 최대 상향력은 크게 저감되었으며 단부 궤도의 레일 및 레일지지점의 상호작용력의 수준 및 경향이 크게 변화되는 것으로 나타났다. 따라서 횡단궤도시스템의 교량 단부 궤도 적용에 따라 단부 궤도의 역학적 메커니즘이 크게 개선될 수 있는 것으로 분석되었다.

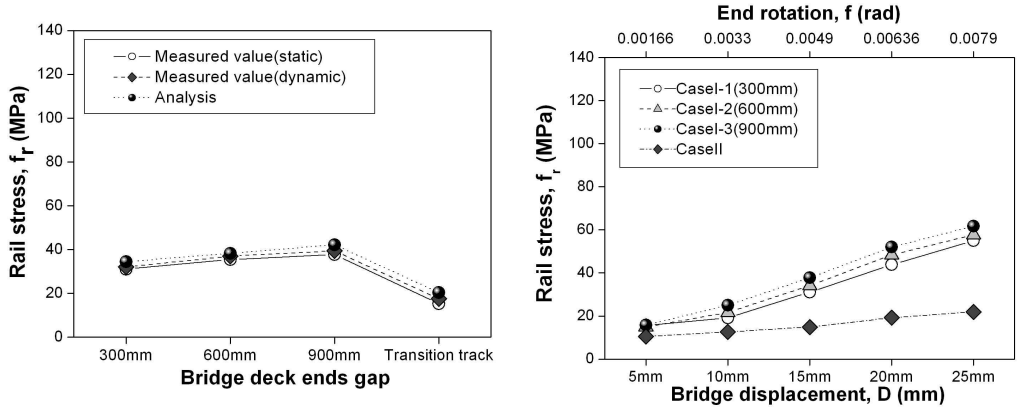
결론적으로 횡단궤도시스템 적용에 따라 단부 체결구는 교량의 처짐(단부회전각) 변화에 영향을 받지 않고 안정적인 거동을 나타내었으며, 횡단궤도시스템 적용 전 보다 체결구 응력이 약 90% 이상 크게 감소한 것으로 분석되었다.

(7) 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도의 거동분석 종합

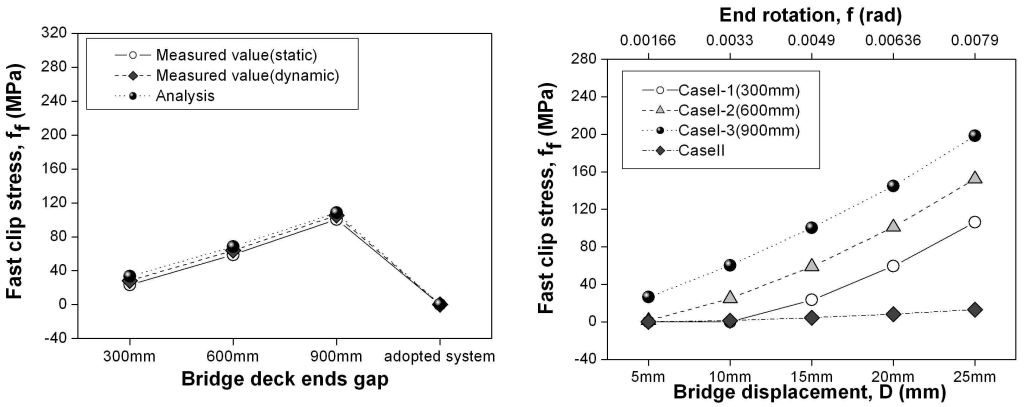
본 연구에서 수행한 횡단궤도시스템 적용효과 입증을 위한 실내시험에서 도입한 교량 시험체의 단부회전각은 국내 철도교 설계기준을 약 10배 이상 초과하는 수준임에도 불구하고 횡단궤도시스템의 적용으로 단부 궤도의 사용성을 확보할 수 있음을 실험적으로 입증하였다.



(a) 레일상향 변위



(b) 레일저부 응력



(c) 체결구 응력

그림 2.40 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도 거동분석 결과

본 절에서 수행한 실내시험을 통해 횡단궤도시스템의 적용효과를 실험 및 해석적으로 입증되었다. 콘크리트궤도(레일 및 레일체결장치 포함)가 고려된 교량 및 교대부를 조합한 단부 궤도-교량 시험체를 이용하여 횡단궤도시스템 설치유무에 따른 단부 궤도의 거동특성(상향력 및 압축력, 변위)을 검토함으로써 횡단궤도시스템의 적용효과를 실험적으로 입증하였다. 연구결과, 동일한 단부유간(600mm) 조건에서 횡단궤도시스템 적용에 따라 레일저부 응력은 약 75%, 단부 체결구 응력이 약 90%, 단부레일의 상향변위(변형)가 약 87% 저감되

어 횡단궤도시스템이 단부 궤도에 발생하는 상호작용력을 저감시키기에 효과적임을 입증하였다.

따라서 횡단궤도시스템의 철도교 적용을 통해 향후 국내 철도교량의 설계 시 교량의 구조적인 안전성 및 사용성 측면에서 문제가 없다면 단부 궤도 사용성 측면에서의 설계 제한요소를 구조적으로 해소할 수 있을 것으로 판단되며 보다 유연한 장대 철도교량의 설계가 가능할 것으로 예상된다.

다. 자갈궤도가 부설된 철도교량 단부 적용성 검토

자갈궤도가 부설된 고속철도 교량상 궤도검측 결과를 살펴보면 교량 단부 신축이음을 경계로 약 10m 정도의 구간에서 궤도틀림이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 교량 단부 자갈궤도의 궤도침하 및 틀림을 조정하기 위해 정기적으로 선형을 정정하거나, 도상안정제(고결제)를 시공하기도 하지만 장기적인 구조적 대안이 될 수는 없다. 열차하중에 의한 교량 단부회전각의 발생은 철도교량 단부의 자갈 이완 및 교란현상을 유발할 수 있으며, 온도신축에 따른 신축이음부의 간격확대는 해당구간의 자갈의 밀도를 감소시켜 과도한 수준의 궤도처짐(고저틀림)을 유발할 수 있다.

자갈궤도가 부설된 철도교량상 궤도틀림 측정결과만으로도 교량의 경간장 및 교각의 위치를 파악할 수 있을 정도로 교량 단부 신축이음부의 도상자갈 이완 및 교란 등은 “열차하중 및 계절변화에 따라 공용기간 중 반복적으로 발생되는 궤도결함”으로써 궤도유지관리측면에서 매우 취약한 위치이다. 따라서 이러한 자갈궤도가 부설된 철도교량 단부의 열차하중 및 온도신축에 따른 영향은 공용상태에서 상시 발생 가능한 조건이므로 이에 대한 보다 영구적이고 구조적인 대안이 필요하다.

횡단궤도시스템을 자갈궤도가 부설된 철도교량 단부 궤도에 적용함에 따라 다음과 같은 기대효과가 예상된다.

(1) 교량 단부 궤도의 기능 및 구조적 성능 개선

(가) 궤간확대, 침목간격 확대 및 궤도침하 안정화 등

(2) 고속열차 주행에 대한 열차주행 안정성 향상

(가) 궤도 중량화 및 안정화, 궤도침하 및 틀림 최소화, 레일의 변형 최소화

(3) 교량단부 신축이음장치 최적화

(가) 경량화, 단순화 및 성능개선

(4) 교량 단부 궤도 배수 유도조건 개선

(가) 횡단궤도시스템의 적용으로 교량 신축이음부 상면의 자갈막이(덮개판) 불필요

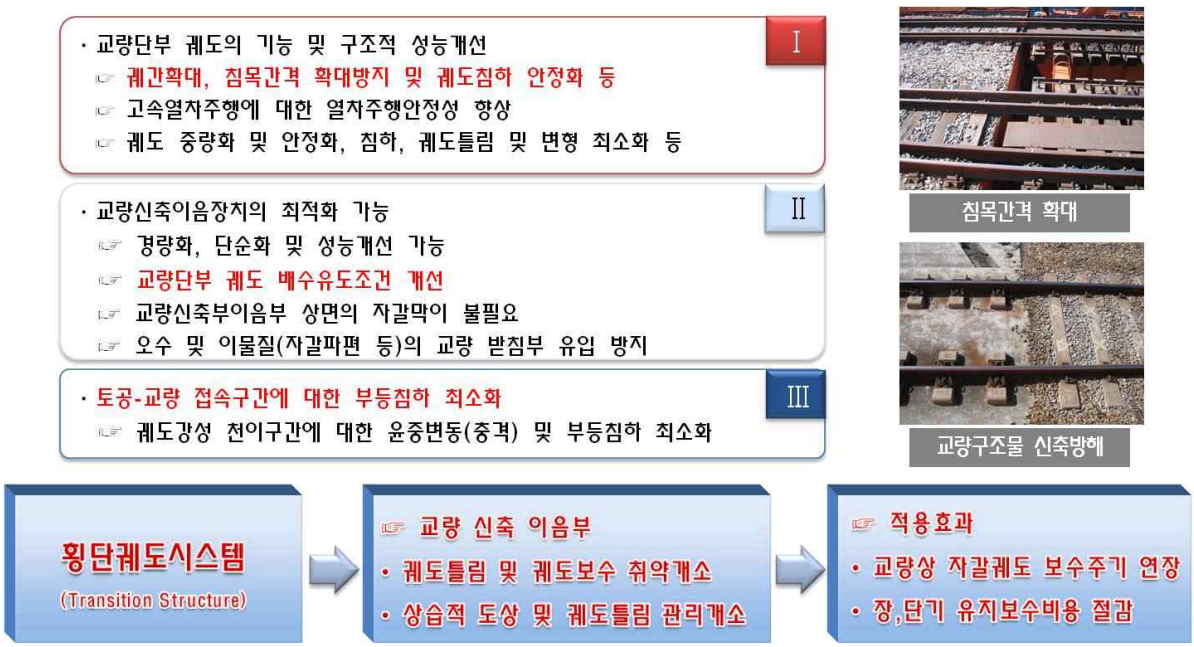
(나) 교량 신축이음부를 통한 오물 및 우수 등의 교량 받침부 유입 방지

(5) 토공-교량 접속부 궤도의 안정화

(가) 궤도강성 천이구간에 대한 부등침하 최소화

(나) 궤도강성 천이구간에 대한 동적 윤중변동 및 충격효과 최소화

(6) 교량상 자갈궤도의 궤도틀림 저감 및 궤도유지관리(보수) 비용 절감



제 3 절 횡단궤도시스템의 성능검증시험

1. 횡단궤도시스템의 수치해석

가. 하중산정

(1) 고정하중(D)

(가) 고정하중 재하

표 2.10 고정하중 재하

구 분	하중산정식	재하하중
강재자중	프로그램 자동계산(15%할증 적용)	

(나) 2차 고정하중 중 하중분포폭에 작용하는 하중

표 2.11 고정하중 산정

구 분	하중산정식	재하하중
궤 도	1.5 / 2	0.75
계		0.75

(2) 활하중(L)

(가) 표준열차하중(LS-22)

(나) 충격계수(설계속도 230km/h, 접촉응력, 노반 구조계산)

(다) 활하중 재하위치: 프로그램 자동계산

표 2.12 활하중 재하

구 분	설계속도(km/h)	t	충격계수(%)
값	230	1.00	0.289

(3) 장대레일 종하중(LR)

(1) 궤도당 10.0kN/m로 레일면상에 재하하며 1궤도당 2000kN를 초과하지 않도록 하였다.

(2) 본 시스템에서는 양방향으로 전체에 재하하였다.

(4) 온도하중(T)

(가) 부등온도변화: 슬래브 두께 방향에 대하여 0.5℃/cm의 온도변화를 고려하였다.

(나) 콘크리트의 선팽창계수 : 10×10-6

(다) 강재의 선팽창계수 : 12×10-6

(5) 차량하중(LF)

(가) LS 하중의 동륜축중의 15%

(나) 레일면상에 재하

(다) 1궤도에 대한 것만 고려

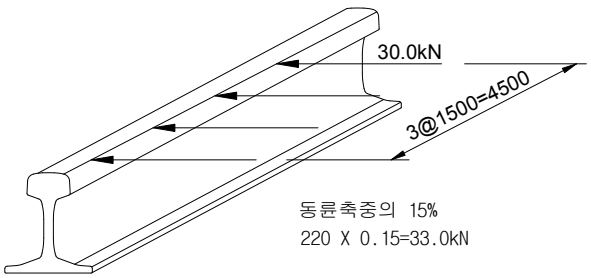


그림 2.41 차량하중(LF)

(6) 시동 및 제동하중(SB)

(가) 레일면상 2.0m 높이에서 교축방향으로 재하

(나) 제동하중 : LS하중의 15%

110×0.15=16.5kN

220×0.15=33.0kN

440/3×0.15=22.0kN

220/3×0.15=11.0kN/m

(다) 시동하중 : 동륜하중의 25%

220×0.25=55.0kN

(7) 하중조합

(가) 사용하중 조합

표 2.13사용하중 조합

구 분	D	L	LR	T	LF	SB
Comb1	1.00	1.00	1.00			
Comb2	1.00	1.00	1.00	1.00		
Comb3	1.00	1.00	1.00		1.00	
Comb4	1.00	1.00	1.00			1.00

(나) 극한하중 조합

표 2.14 극한하중 조합

구 분	D	L	LR	T	LF	SB
Comb1	1.40	2.00				
Comb2	1.70	1.70	1.70			
Comb3	1.40	1.40	1.40	1.40		
Comb4	1.40	1.40	1.40		1.40	1.40

나. 구조해석

(1) 구조해석개요

(가) 횡단궤도시스템은 I형 강재거더를 Ⅱ형 가로보로 연결하는 강구조 형식의 구조물이다.

(나) 격자구조해석으로 충분하지만, 보다 엄밀한 해석을 위해 3차원 쉘요소의 해석과 병행한다.

(다) 8개의 받침을 이용하여 지지한다.

(2) 해석방법

(가) 설계에 적합한 구조계산을 위해서 몇가지 해석 모델을 이용하여 구조해석을 수행하였다.

(나) 모델의 종류

① Model 1 : Frame 모델

② Model 2 : Shell 모델

③ 해석프로그램: MIDAS/CIVIL 2012

(3) 단면계수

(가) 단면치수

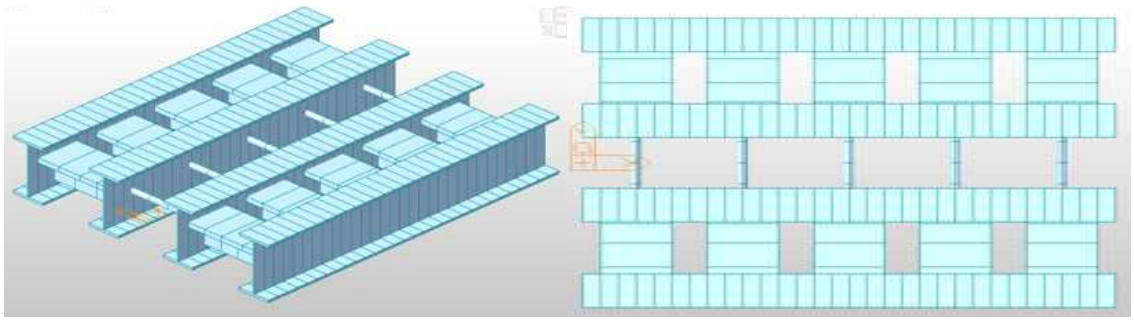
① 종방향 거더 : H형강(H440 × 300 × 11 × 18)

② Ⅱ형 가로보 : 플랜지(400 × 38), 복부(30 × 190 × 2EA)

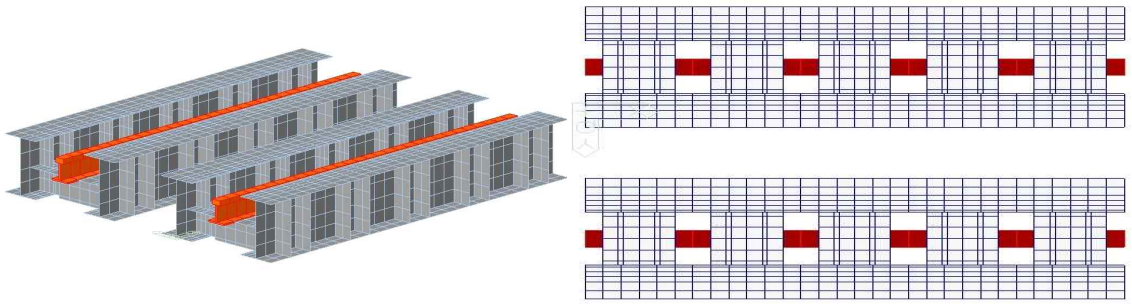
표 2.15 단면계수

구 분	A(mm^2)	y(mm)	I_z(mm^4)	Z_t(mm^3)	Z_b(mm^3)
종방향 거더	1,574	220	561,000,000	2,550,000	2,550,000
Ⅱ형 가로보	2,660	160	120,700,000	754,375	1,775,000

(4) 해석모델링



(a) Frame 모델(3D) (b) Frame 모델 상면



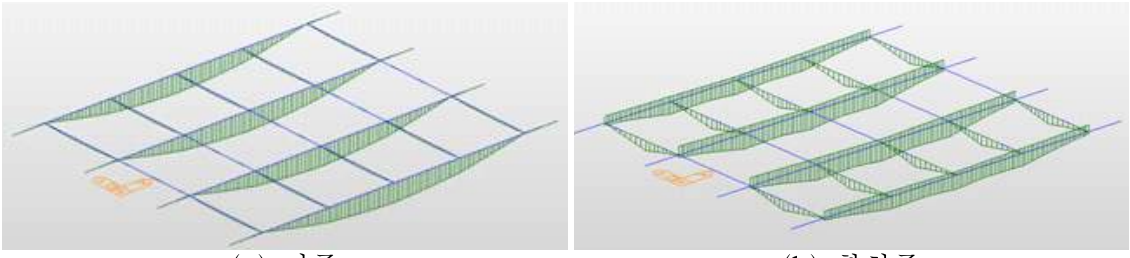
(c) Shell 모델(3D) (d) Shell 모델 하면

그림 2.42 해석모델링

다. 구조해석결과

(1) Model 1(Frame Model)

(가) 단면력 검토결과



(a) 자중 (b) 활하중

그림 2.43 횡단궤도시스템의 단면력(Frame 모델)

표 2.16 단면력 검토 (단위 : kN-m)

구 분	자 중	2차고정하중	활하중	계
종방향 거더	2.38	0.293	55.575	58.248
Ⅱ형 가로보	0.197	0.086	30.705	30.988

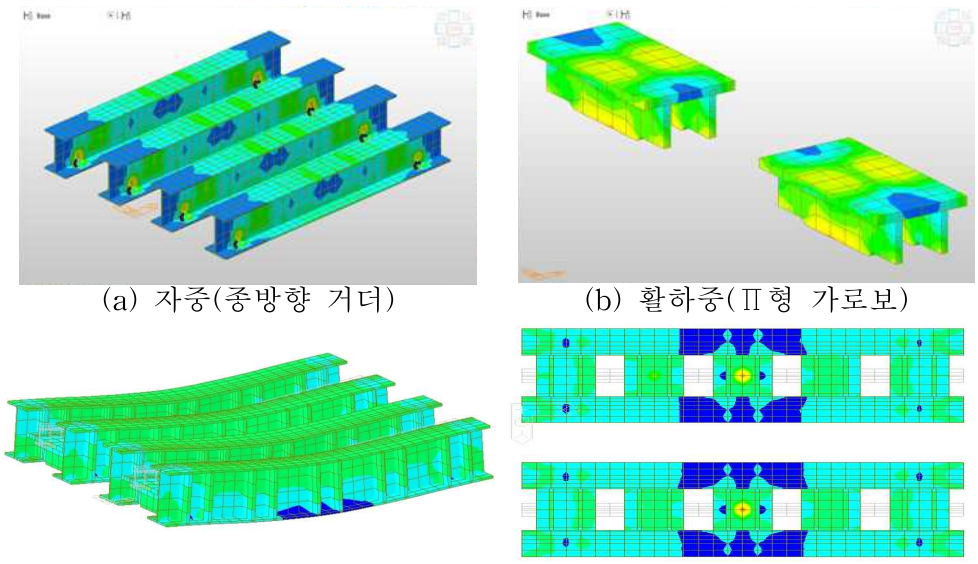
(나) 응력 검토결과

표 2.17 응력 검토

구 분	$Z_t(mm^3)$	$Z_b(mm^3)$	f_t(MPa)	f_b(MPa)	설계검토
종방향 거더	2,550,000	2,550,000	22.84	22.84	O.K.
Ⅱ형 가로보	754,375	1,775,000	41.08	17.46	O.K.

(2) Model 2(Shell Model)

(가) 응력도



(a) 자중(종방향 거더) (b) 활하중(Ⅱ형 가로보)

(c) 활하중(전체모델) (d) 활하중(전체모델 하면)

그림 2.44 횡단궤도시스템의 응력도(Shell 모델)

(나) 응력 검토결과

표 2.18 응력 검토 (단위 : MPa)

구 분	자 중	2차고정하중	활하중	계
종방향 거더	1.00	0.12	42.45	43.57
Ⅱ형 가로보	0.73	0.15	27.96	28.84

(다) 응력해석결과 요약

표 2.19 응력해석결과 (단위 : MPa)

구 분	Frame 모델	Shell 모델	허용응력
종방향 거더	22.84	43.57	185
Ⅱ형 가로보	17.46	28.84	185

응력의 차이가 발생하는 것은 Frame 모델은 전체적인 응력수준을 보여주며, Shell 모델은 레일과 연결된 절점에 발생되는 국부적인 응력집중까지 나타내기 때문이다.

라. 보강재 검토

(1) 수평보강재 필요성 검토

복부판의 높이 및 두께는 D=404mm, t=11mm로써 폭-두께비(D/t=36.7)의 허용값(SM520, D/to=150) 미만이므로 수평보강재는 필요 없는 것으로 검토되었다.

(2) 수직보강재 필요성 검토

복부판의 높이 및 두께는 D=404mm, t=11mm로써 폭-두께비(D/t=36.7)의 허용값(SM490, D/to=60) 미만이므로 수직보강재는 불필요한 것으로 검토되었으나 안정적인 구조 거동을 위해 Ⅱ형 가로보 복부 위치에 수직보강재를 설치하였다.

마. 기타 상세검토

(1) 처짐 검토결과

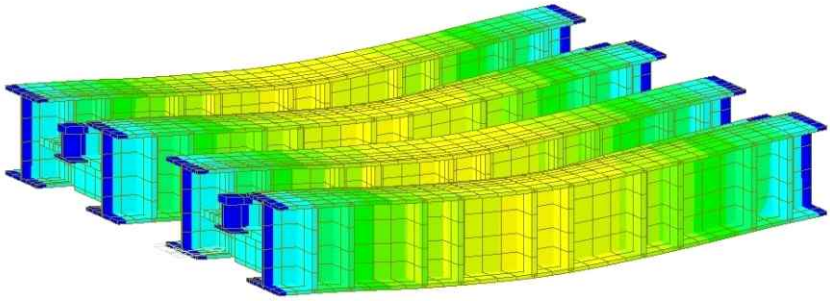


그림 2.45 처짐형상

표 2.20 처짐 검토결과 (단위 : mm)

Frame 모델	Shell 모델	허용처짐	설계검토
0.28	0.29	2.40	O.K.

허용처짐 = L/1000

(2) 반력 검토결과

(가) 받침당 연직반력(kN)

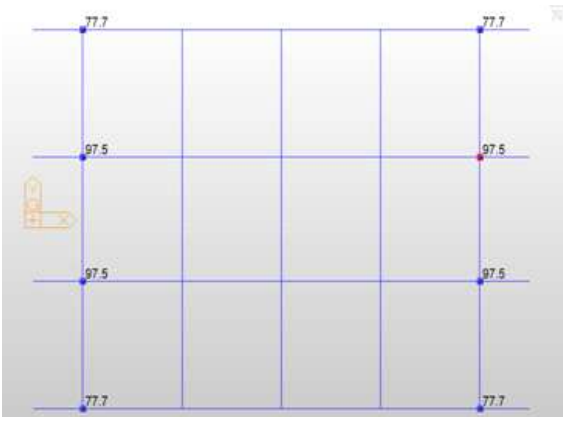


그림 2.46 활하중에 의한 연직반력

표 2.21 받침당 연직반력

구 분	자 중	2차고정하중	활하중	사용하중
Frame 모델	5.11kN	0.63kN	97.55kN	103.29kN
Shell 모델	5.09kN	0.63kN	98.38kN	104.10kN

(나) 받침용량 검토

표 2.22 받침용량 검토

사용하중	적용받침	설계검토
103.29kN	300.00kN	O.K.
104.10kN	300.00kN	O.K.

(3) 용접부 및 피로 검토

(가) 필렛용접 최소치수 검토

표 2.23 용접위치별 필렛용접 최소치수 검토 결과

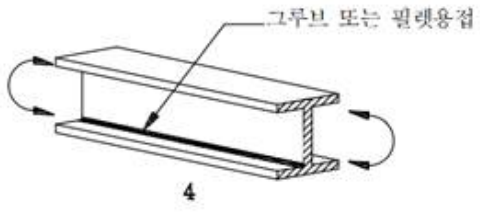
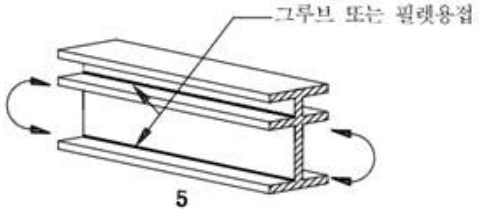
용접위치	두꺼운 쪽 모재 두께	최소치수	적용치수
종방향 거더 보강재	30mm	8mm	8mm
Ⅱ형 가로보 상부플랜지	38mm	8.7mm	9mm
Ⅱ형 가로보 복부	38mm	8.7mm	9mm

(나) 용접부 피로 검토(응력반복 횟수 200만회 이상)

표 2.24 용접위치별 필렛용접 최소치수 검토 결과

용접위치	피로상세	사용응력	허용응력	설계검토
종방향 거더	B	43.6MPa	112.0MPa	O.K.
Ⅱ형 가로보	B	28.8MPa	112.0MPa	O.K.

표 2.25 철도설계기준(피로상세)

상 황	응력의종류	상세범부	적용(예)
응력방향과 평행하게 연속완전용입 그루브용접(뒷댐판 제거)이나 연속 필렛용접으로 접합되었으며 부착물이 없는 부재의 모재와 용접부	인장 또는 교번	B	3,4,5,7
 4			
 5			

(4) 신축량검토

(가) 온도변화에 의한 이동량(ΔL1)

① ΔT = ±35.0℃

② α = 0.000012

③ ΔL1 = α·ΔT·L = 1.26mm

(나) 처짐에 의한 이동량(ΔL1)

① 보의 중립축에서 받침의 회전중심까지의 거리

h = 2/3 ×(45 + 440/2) = 176.67mm

② 보의 회전각

Θ = 1/150 = 0.0067

③ 회전에 의한 신축량

ΔL2 = h·Θ = 1.18mm

(다) 설치여유량(ΔL3)

① 회전에 의한 신축량

ΔL3 = ±10.0mm

(라) 설계이동량

① 설계수축량(ΔLl) 및 신장량(ΔLe)

ΔLs = 12.44mm

ΔLe = 11.26mm

② 설계수축량(ΔLs) 및 신장량(ΔLe)

ΔL = 23.70mm

바. 구조검토결과 요약

(1) 강재의 응력

표 2.26 강재의 응력 검토결과

구 분	사용응력	허용응력	설계검토
종방향 거더	43.57MPa	185MPa	O.K.
Ⅱ형 가로보	28.84MPa	185MPa	O.K.

(2) 기타 상세검토

표 2.27 기타 상세검토

구 분	사용값	허용값	설계검토
활하중 처짐(㎜)	0.3	0.9	O.K.
받침반력(kN)	103.3	300	O.K.
신축량(㎜)	23.7	100	O.K.

2. 횡단궤도시스템의 실내 조립성능시험(실대형 시험결과)

실제 건설선에 적용이 가능한 횡단궤도시스템의 표준단면을 바탕으로 실물 스케일의 시험체를 제작하여 실내 조립성능시험을 수행하였으며, 이를 수치해석 결과 및 독일 횡단궤도시스템의 성능요구조건, 국내 철도설계기준과 비교함으로써 본 연구에서 제안한 횡단궤도시스템의 구조적 적정성 및 성능을 입증하고자 하였다. 횡단궤도시스템의 조립성능시험은 정격하중 500kN인 Actuator를 이용하여 KTX 하중 및 HL-25 하중을 포함한 충격계수가 고려된 HL-25 하중에 대한 정, 동적 재하시험 및 300만회 피로시험을 수행하였다. 또한 동적 가진시험을 통해 획득한 가속도 응답의 자유진동 파형을 이용하여 고유진동수 및 감쇠비를 산출하고, 이를 수치해석 결과와 비교, 분석하였다. 그림 2.47은 횡단궤도시스템 시험체 개요도를 나타낸 것이다.

가. 횡단궤도시스템 시험체 제원

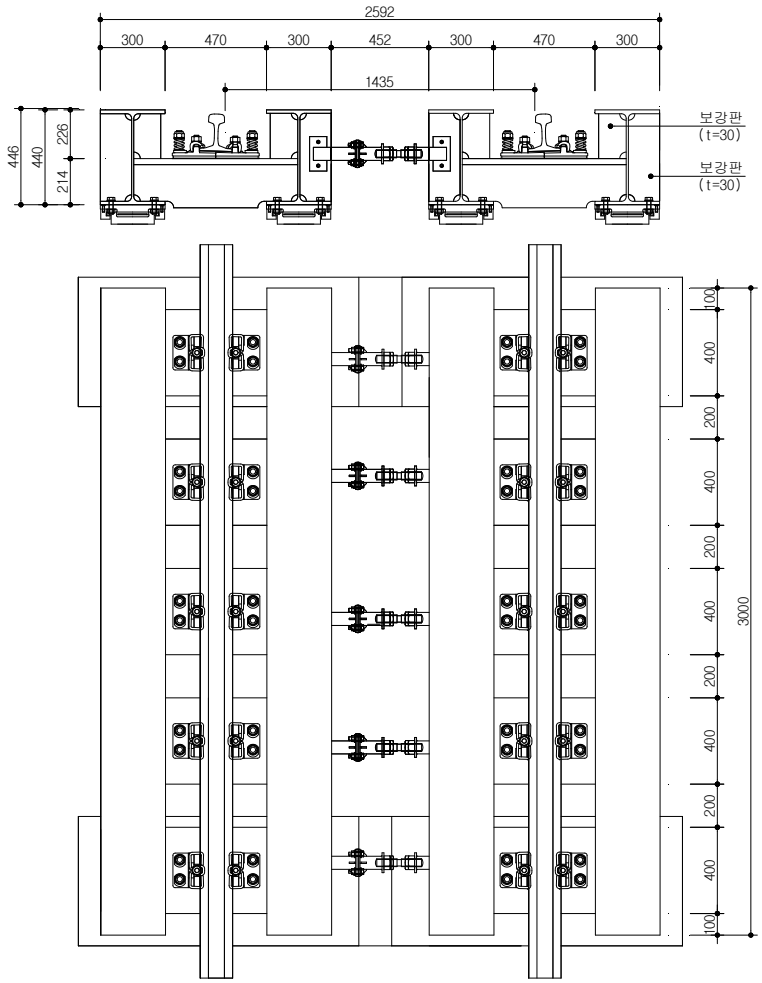


그림 2.47 횡단궤도시스템 시험체의 제원(System 336 적용조건)

표 2.28 횡단궤도시스템 시험체의 구성품

주요 구성품	제 원
① 레일	UIC 60
② 레일체결장치	System 336 and None
③ 침목	사용안함
④ 강종	SM520
⑤ 받침	포트받침 (수직:300kN, 수평:240kN, 부상:80kN, 이동량:±100mm)
⑥ 콘크리트	사용안함

본 연구의 횡단궤도시스템의 레일체결장치는 국내 철도용품성능검증을 통과한 보슬로사의 시스템 336을 채택함으로써 실제 국내에서 사용하고 있는 기성품을 사용하였다.

나. 시험하중 조건

정격하중 500kN인 Actuator와 별도로 구성된 재하 프레임을 통해 레일상면을 가력하여 시험체를 가진시키는 방식으로 고유진동수 및 감쇠비의 변화 수준을 분석하였다. 또한 고유진동수 및 감쇠비를 측정하기 위한 자유진동신호를 얻기 위해 Actuator의 Quick Release기능을 이용하여 일정 주파수(5Hz, 10Hz)를 가진한 후 시험하중을 시험체에서 일시에 완전히 제거하는 방식으로 자유진동신호를 추출하였다. 본 연구의 실내시험에서 적용한 하중케이스는 표 2.29과 같다.

표 2.29 횡단궤도시스템 시험하중 조건

Test type	Loading condition				Frequency
Static	0 ~ 340kN(loading step : 20kN)				-
Dynamic		Case1(5%)	Case2(15%)	Case3(25%)	5Hz
	170kN	161.9 ± 8.1	147.9 ± 22.1	136.0 ± 34.0	5~35Hz
	250kN	238.1 ± 11.9	217.4 ± 32.6	200.0 ± 50.0	
	331.5kN	314.9 ± 16.6	281.8 ± 49.7	248.6 ± 82.9	

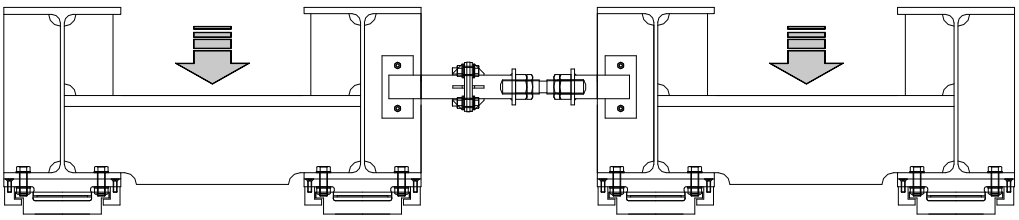
* 250kN × DAF(1.326) = 331.5kN(동적증폭계수, DAF고려)

다. 횡단궤도시스템 성능시험의 내용 및 방법

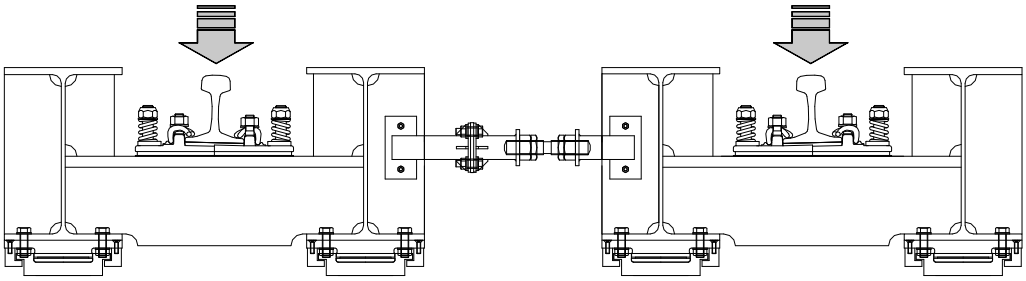
(1) 횡단궤도시스템 성능시험 조건

표 2.30 횡단궤도시스템 성능시험 조건

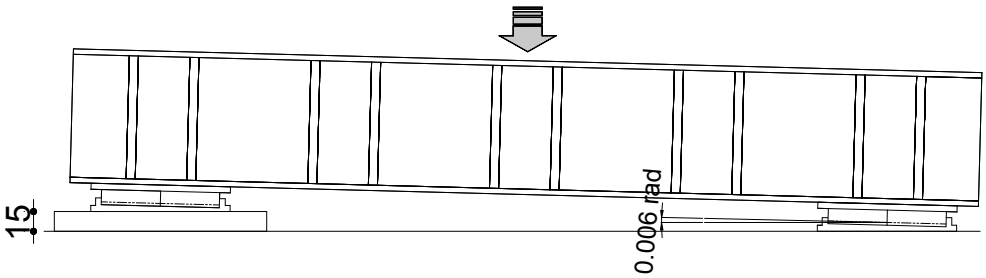
구 분	성능시험 조건
Test Case 1	레일 및 레일체결장치 없을 경우
Test Case 2	System 336 체결장치 적용 시
Test Case 3	System 336 체결장치 적용 & 경사조건(0.006 rad) 적용 시



(a) Test Case 1 : Non-Rail



(b) Test Case 2 : System 336 체결장치 적용 시



(c) Test Case 3 : System 336 & 경사조건(0.006 rad)

그림 2.48 횡단궤도시스템 성능시험 조건

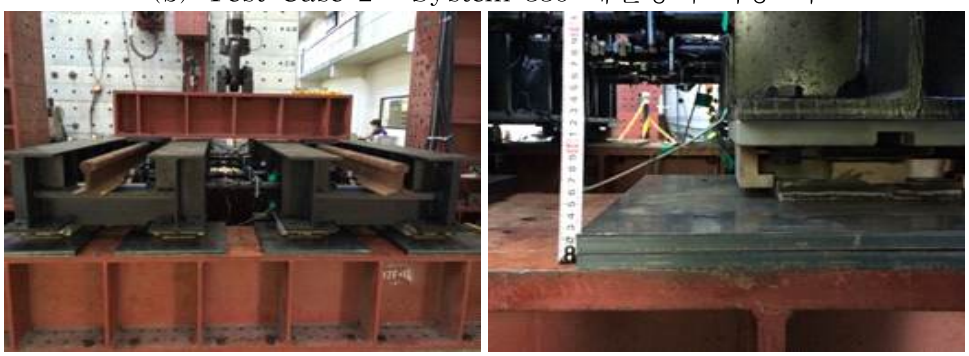
(2) 횡단궤도시스템 성능시험 전경



(a) Test Case 1 : Non-Rail



(b) Test Case 2 : System 336 체결장치 적용 시

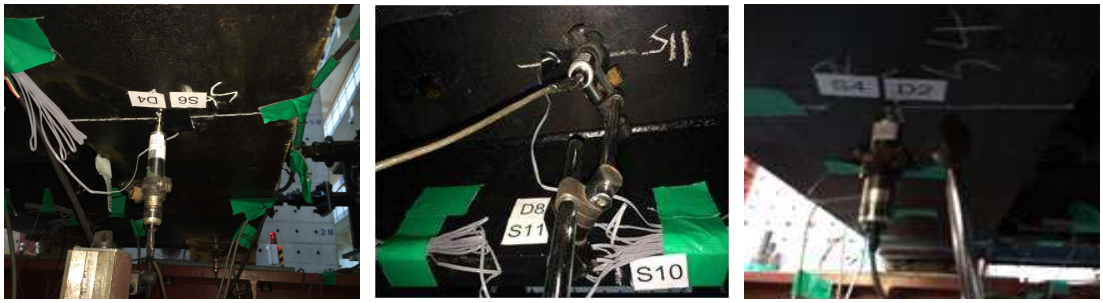


(c) Test Case 3 : System 336 & 경사조건(0.006 rad)

그림 2.49 횡단궤도시스템 성능시험 전경

(3) 변위 측정

횡단궤도시스템의 Ⅱ형 가로보 중앙부와 종방향 거더 중앙부에서의 변위를 측정하였으며 그림 2.50은 변위계 설치 전경을 나타낸다. 본 연구에서 제안한 횡단궤도시스템은 8개의 포트받침으로 지지되는 구조이며, 각각의 포트받침은 횡단궤도구조의 자중을 고려한 상태에서 변위 발생이 최소화 되도록 설계되었다. 본 실험에서는 횡단궤도시스템을 구성하는 강구조체의 성능을 평가하고자 횡단궤도시스템 중앙부 단면에 변위계를 설치하여 시험하중상태에서의 변위발생 수준을 측정함으로써 횡단궤도시스템의 휨강성을 검토하였다.



(a) 종방향 거더 중앙부 (b) 종방향 거더 하면 (c) Ⅱ형 가로보 하면

그림 2.50 변위계 설치 전경

(4) 응력 및 가속도 측정

정, 동적 시험하중에 의해 발생하는 횡단궤도시스템 각부의 발생응력의 수준을 파악하고자 강재단면에 1축 스트레인게이지를 설치하였으며 횡단궤도구조의 고유진동수 및 감쇠비와 같은 동특성 산출을 위해 그림 2.51과 같이 종방향 거더 상면에 가속도계(2g)를 설치하여 동적가진하중에 따른 가속도를 측정하고 자유진동 신호를 이용하여 고유진동수 및 감쇠비를 분석하였다.

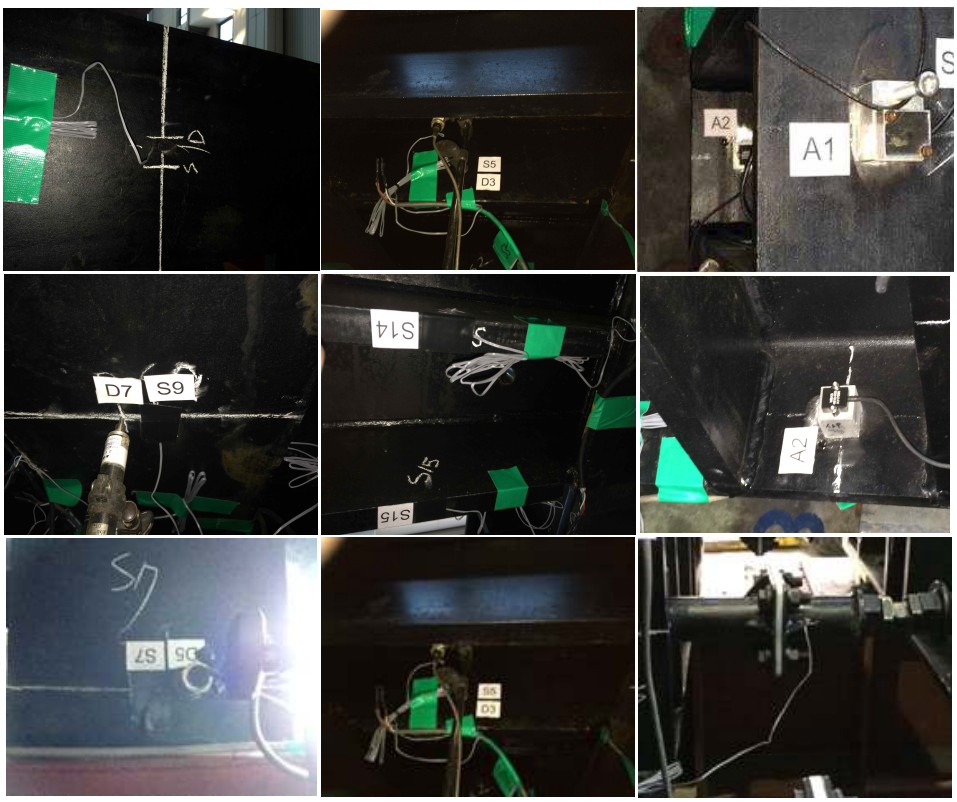


그림 2.51 스트레인게이지 및 가속도계 설치 전경

(5) 시험체 센서 설치 위치도

(가) 변위계, 스트레인게이지 위치도

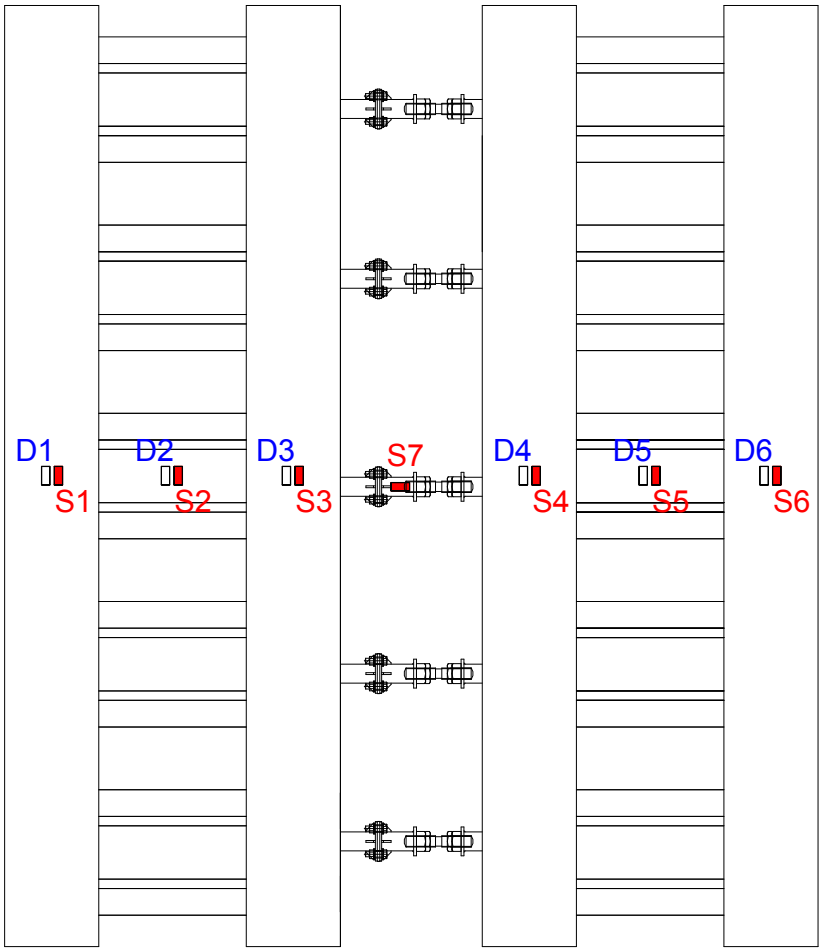


그림 2.52 시험체 하부 변위계, 스트레인게이지 설치 위치도

표 2.31 시험체 하부 변위계, 스트레인게이지 설치 항목

센 서	No.	계측기명	위 치
변위계	D1	LVDT(10mm)	종방향 거더(주형) 하부플랜지 중앙부
	D2	LVDT(10mm)	Ⅱ형 레일지지 가로보 하면 중앙부
	D3	LVDT(10mm)	종방향 거더(주형) 하부플랜지 중앙부
	D4	LVDT(10mm)	종방향 거더(주형) 하부플랜지 중앙부
	D5	LVDT(10mm)	Ⅱ형 레일지지 가로보 하면 중앙부
	D6	LVDT(10mm)	종방향 거더(주형) 하부플랜지 중앙부
스트레인 게이지 (Steel)	S1	Strain gauge	종방향 거더(주형) 하부플랜지 중앙부
	S2	Strain gauge	Ⅱ형 레일지지 가로보 하면 중앙부
	S3	Strain gauge	종방향 거더(주형) 하부플랜지 중앙부
	S4	Strain gauge	종방향 거더(주형) 하부플랜지 중앙부
	S5	Strain gauge	Ⅱ형 레일지지 가로보 하면 중앙부
	S6	Strain gauge	종방향 거더(주형) 하부플랜지 중앙부
	S7	Strain gauge	게이지 스트럿트

(나) 가속도계 설치 위치도

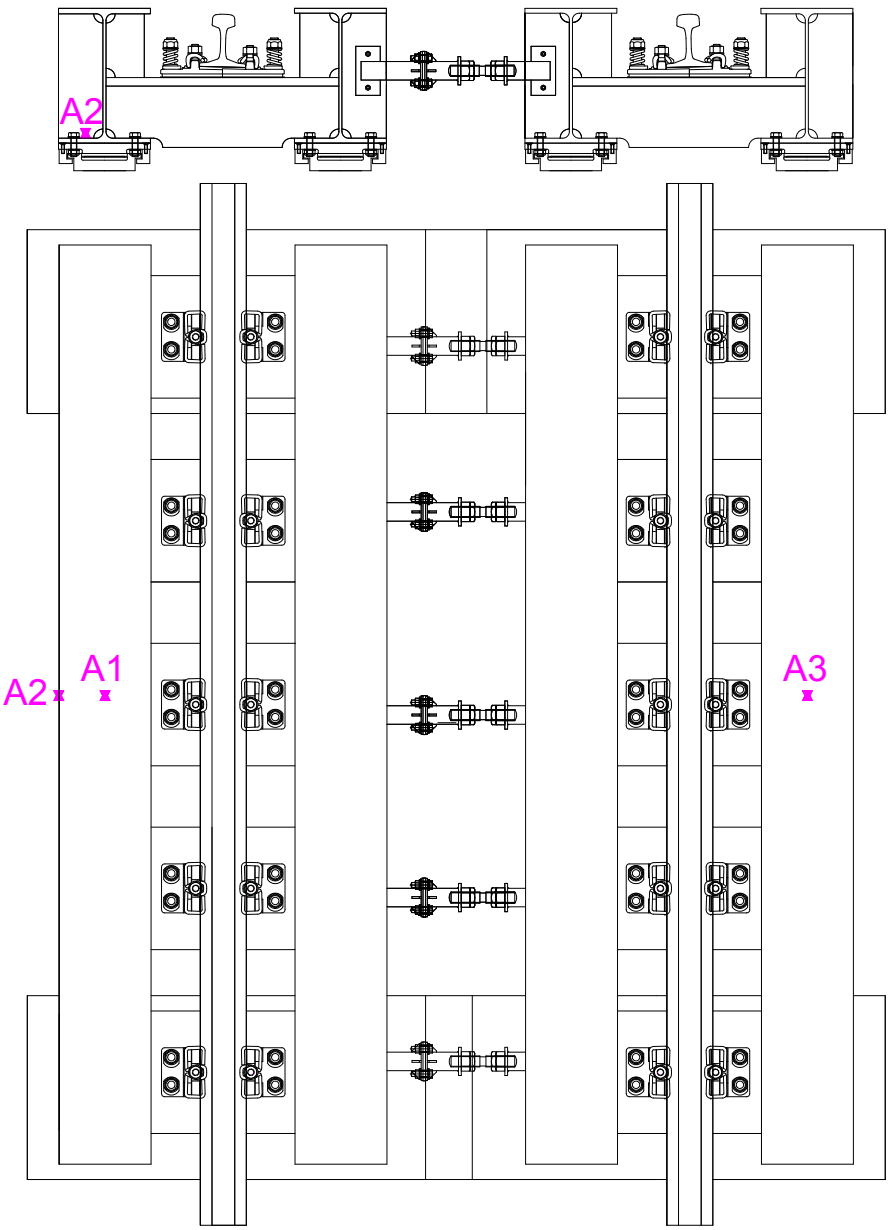


그림 2.53 시험체 상면 가속도계 설치 위치도

표 2.32 시험체 상면 가속도계 설치 항목

센 서	No.	계측기명	위 치
가속도계	A1	Acceleration(2g)	종방향 거더(주형) 상부플랜지 중앙부(상면)
	A2	Acceleration(2g)	종방향 거더(주형) 하부플랜지 중앙부(상면)
	A3	Acceleration(2g)	종방향 거더(주형) 상부플랜지 중앙부(상면)

라. 횡단궤도시스템 성능시험 결과

(Test Case 2 : 레일 및 레일체결장치 조립 조건)

(1) 피로시험 전(정적 시험) - 변위

횡단궤도시스템의 정적변위는 주형 하부플랜지 중앙부, Ⅱ형 레일지지 가로보 하면 중앙부를 검토하였으며, 검토결과 피로시험 전 최대 정적변위는 0.72mm(340kN 재하 시)로 나타나 독일 횡단궤도시스템의 정적변위 한계기준(0.9mm 이하, 210kN 기준)을 충분히 만족하는 것으로 분석되었다.

표 2.33 하중-변위 데이터

Max Load (kN)	Displacement (mm)					
	D1	D2	D3	D4	D5	D6
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.041	0.058	0.067	0.065	0.055	0.038
40	0.106	0.122	0.149	0.144	0.117	0.099
60	0.147	0.186	0.219	0.212	0.179	0.137
80	0.187	0.247	0.292	0.283	0.237	0.174
100	0.222	0.297	0.354	0.344	0.285	0.207
120	0.254	0.340	0.403	0.391	0.326	0.236
140	0.286	0.379	0.445	0.432	0.364	0.266
160	0.318	0.414	0.479	0.464	0.397	0.296
180	0.348	0.445	0.508	0.493	0.427	0.323
200	0.379	0.477	0.536	0.520	0.457	0.352
220	0.408	0.509	0.562	0.545	0.489	0.379
240	0.436	0.539	0.590	0.572	0.517	0.405
260	0.464	0.568	0.614	0.596	0.545	0.431
280	0.492	0.597	0.640	0.621	0.573	0.457
300	0.518	0.630	0.667	0.647	0.604	0.482
320	0.544	0.658	0.694	0.673	0.631	0.506
340	0.573	0.689	0.721	0.700	0.661	0.532

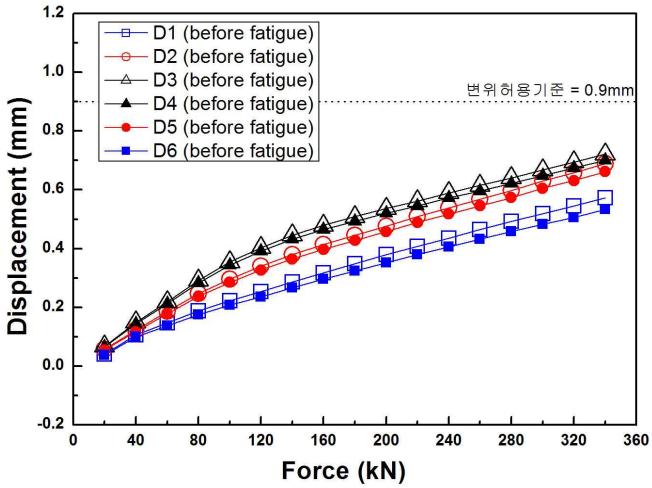


그림 2.54 하중-변위 그래프

(2) 피로시험 후(300만회 종료 후, 정적 시험) - 변위

횡단궤도시스템의 피로시험 후(300만회) 최대 정적변위는 0.72mm(340kN 재하 시)로 피로시험 전과 차이가 없었으며 독일 횡단궤도시스템의 정적변위 한계기준(0.9mm 이하, 210kN 기준)을 충분히 만족하는 것으로 분석되었다.

표 2.34 하중-변위 데이터(300만회 종료 후, 하중단계별 정적시험)

Max Load	Displacement (mm)					
(kN)	D1	D2	D3	D4	D5	D6
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	0.042	0.048	0.073	0.072	0.037	0.042
40	0.089	0.102	0.145	0.144	0.101	0.086
60	0.127	0.166	0.220	0.215	0.160	0.125
80	0.163	0.239	0.288	0.275	0.223	0.164
100	0.196	0.280	0.339	0.329	0.259	0.200
120	0.228	0.328	0.380	0.365	0.294	0.236
140	0.259	0.364	0.416	0.399	0.327	0.266
160	0.291	0.398	0.449	0.432	0.359	0.300
180	0.320	0.431	0.481	0.464	0.392	0.330
200	0.351	0.460	0.513	0.494	0.423	0.362
220	0.381	0.482	0.541	0.527	0.457	0.394
240	0.413	0.514	0.570	0.561	0.491	0.428
260	0.444	0.554	0.599	0.595	0.527	0.460
280	0.472	0.578	0.628	0.625	0.562	0.493
300	0.500	0.606	0.659	0.660	0.593	0.517
320	0.527	0.643	0.690	0.689	0.621	0.542
340	0.559	0.665	0.720	0.718	0.655	0.572

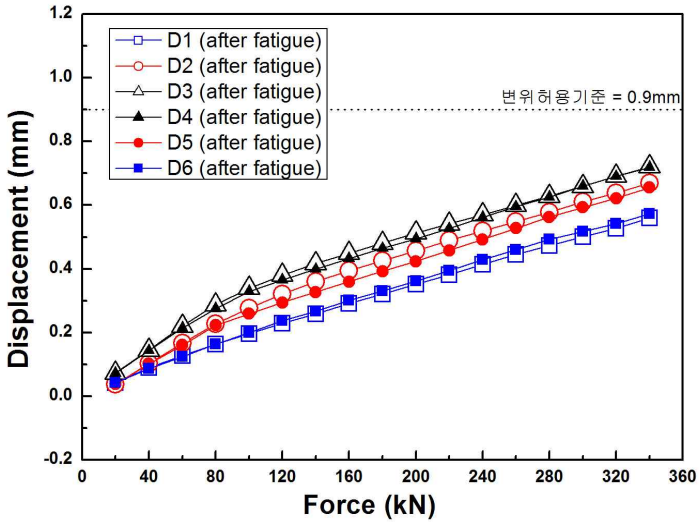
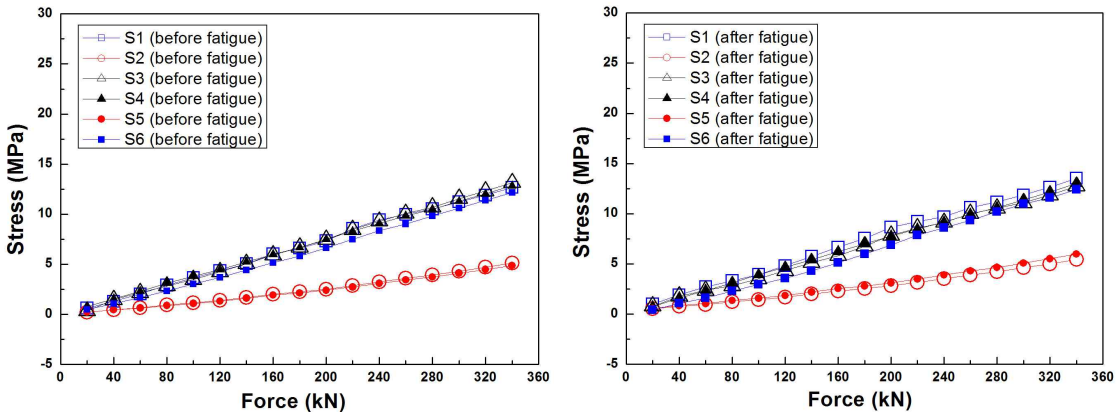


그림 2.55 하중-변위 그래프(300만회 종료 후, 하중단계별 정적시험)

(3) 피로시험 전·후(정적 시험) - 응력(Steel)

피로시험 전·후 발생응력의 수준은 그림 2.56과 같이 강재 허용응력기준(185MPa)을 크게 하회하는 것으로 나타나 횡단궤도시스템은 최대하중 340kN 범위까지 충분한 응력 여유치를 확보하여 피로하중에 대한 장기내구성능을 확보하는 것으로 분석되었다.



(a) 피로시험 전 (b) 피로시험 후

그림 2.56 하중-변위 그래프

(4) 피로시험 전·후(정적 시험) - 응력(게이지 스트럿트)

실내시험 조건 상 부득이하게 설치한 게이지 스트럿트의 피로시험 전·후 발생응력 수준은 그림 2.57과 같이 강재 허용응력기준(190MPa)의 약 1.05% 미만으로써, 허용기준치를 크게 하회하는 것으로 나타났으며 피로에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 하중을 전달 받는 구조부재로써의 의미는 없으며, 횡단궤도시스템의 독립적 거동 특성을 입증하였다.

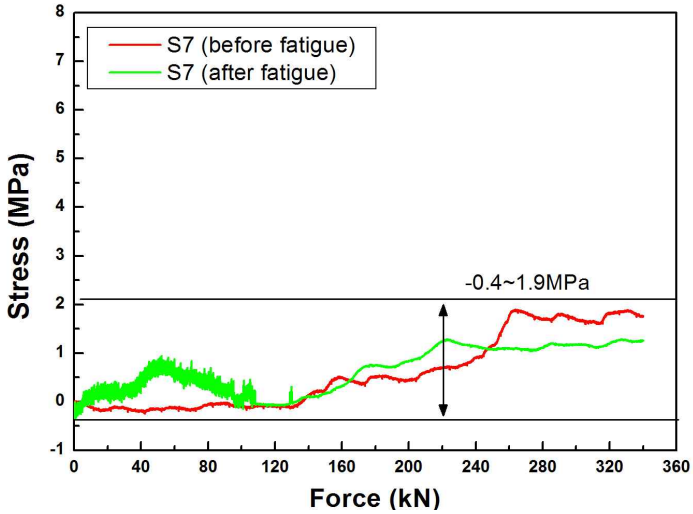
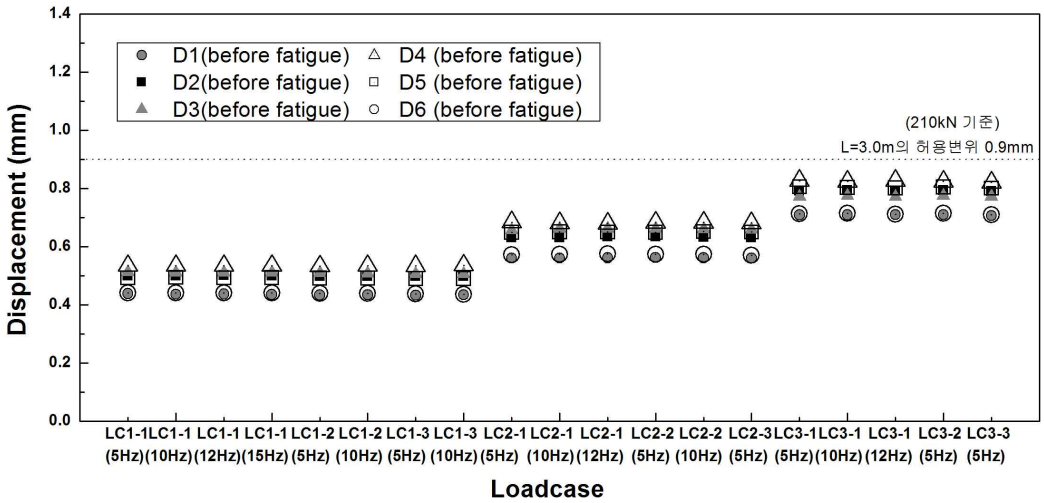


그림 2.57 하중-변위 그래프

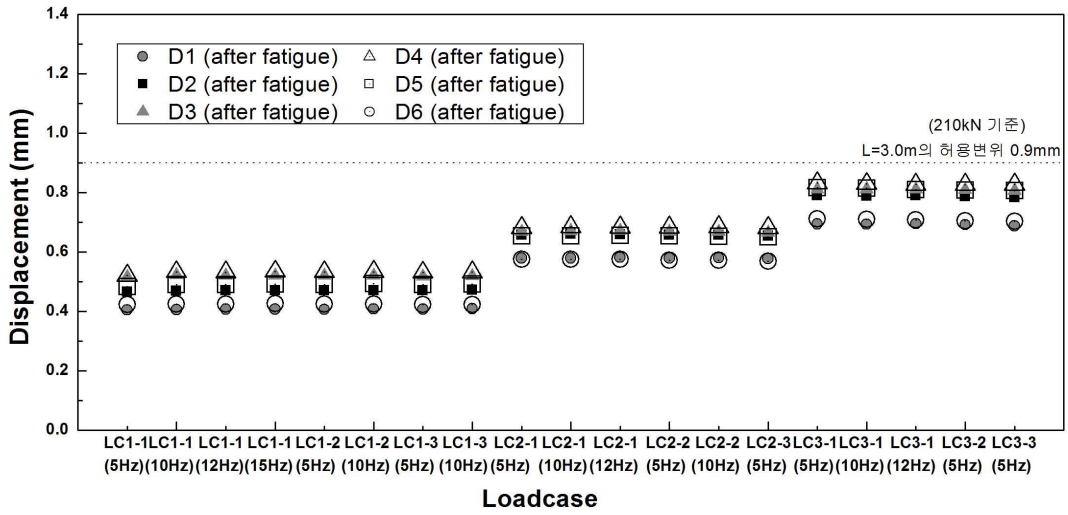
(5) 동적 변위 및 연직 가속도 분석

(가) 피로시험 전·후(동적 시험) - 변위

동적 재하시험결과 그림 2.58과 같이 피로시험 전·후의 변위량은 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며 가진하중의 크기 및 진폭에 영향을 받지 않고 횡단궤도시스템의 성능요구조건(0.9mm 이하, 210kN 기준) 및 국내 궤도면틀림 허용기준(1.2mm/3m)을 모두 하회하는 것으로 나타났다.



(a) 피로시험 전



(b) 피로시험 후

그림 2.58 피로시험 전·후 Case별 변위 비교(동적시험)

(나) 피로시험 전·후(동적시험) - 수직가속도

피로시험 전·후의 동적가진시험을 통해 획득한 가속도 응답은 그림 2.59와 같이 나타났으며 콘크리트궤도의 가속도 허용기준(0.5g)과 횡단궤도시스템 성능요구조건(0.25g)을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

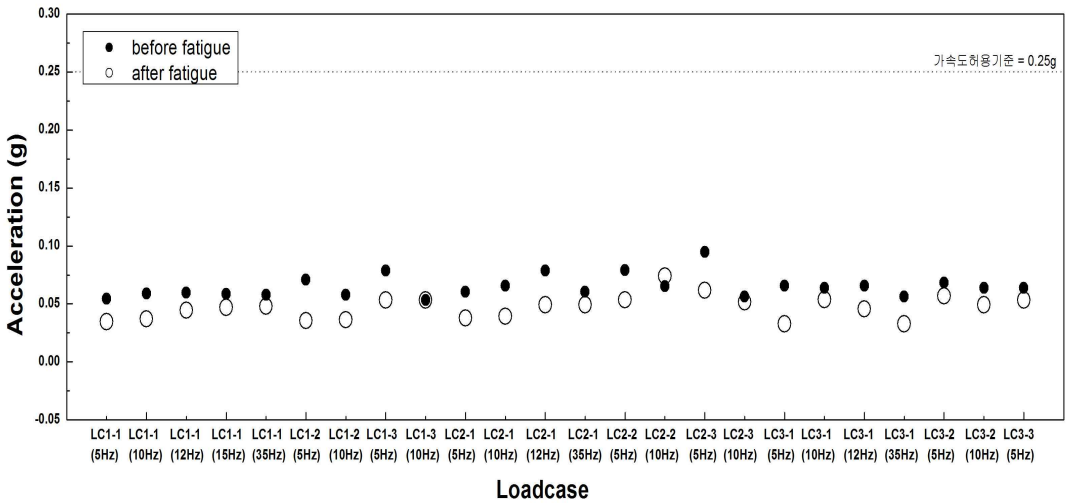


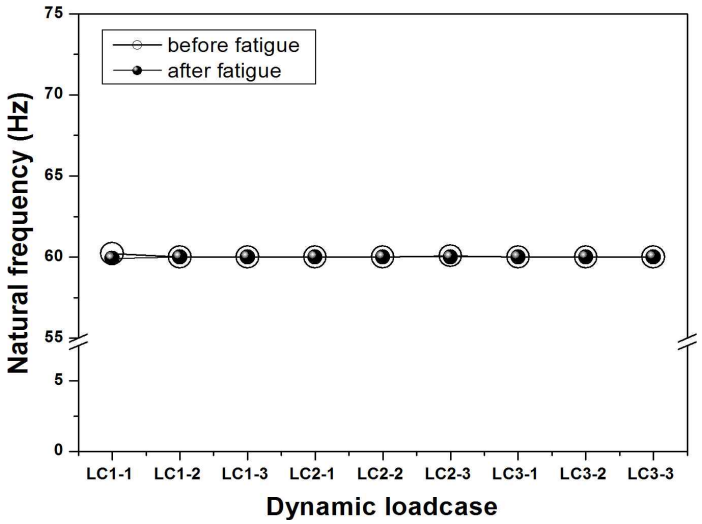
그림 2.59 피로시험 전·후 Case별 가속도 비교(동적시험)

(6) 동특성 검토(고유진동수 및 감쇠비 분석)

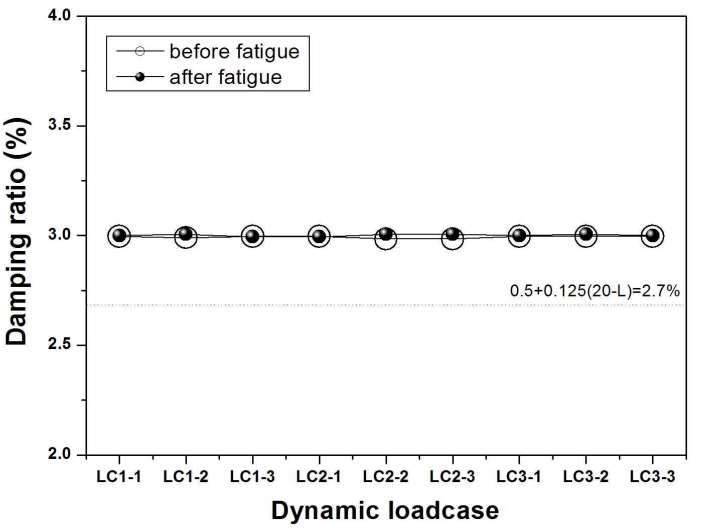
(가) 피로시험 전·후(동적시험) - 동특성 변화

본 연구에서는 시험체의 고유진동수를 분석하기 위해 가진 후 자유진동영역에 대한

FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 수행하여 횡단궤도시스템의 측정 고유진동수를 산출하였다. 고유진동수 분석결과, 그림 2.60(a)와 같이 횡단궤도시스템의 고유진동수는 가진 하중의 크기 및 가진 주파수 변화에 영향을 받지 않았으며, 피로시험 전, 후의 고유진동수의 차이는 매우 미소한 것으로 나타났다. 따라서 피로시험에 따른 횡단궤도시스템의 구조적인 손상(강성 및 질량 변화)은 발생하지 않은 것으로 나타났다.



(a) 고유진동수



(b) 감쇠비

그림 2.60 피로시험에 따른 시험체의 동특성 변화

본 연구에서는 실물스케일의 횡단궤도시험체를 이용한 실내시험을 통해 획득한 가속도파형의 자유진동응답 측정결과를 이용하여 대수감소법(Logarithmic decrement)으로 감쇠비를 산정하였다. 횡단궤도시스템은 국내 최초로 개발된 신형식 궤도시스템으로써 횡단궤도시스

템의 성능평가기준 및 방법은 아직까지 명확하게 정립되지 않은 실정이다. 따라서 이러한 성능평가기준 및 방법을 정립하기 위한 다양한 실험적 접근방법이 필요하며 이에 본 연구에서는 횡단궤도시스템의 구조 및 재료적 건전성 평가 방법의 일환으로 300만회 피로시험 전, 후의 고유진동수 및 감쇠비의 변화수준을 비교, 검토함으로써, 피로하중에 따른 횡단궤도시스템의 구조 및 재료적 특성의 변화 여부를 검토하여 횡단궤도시스템의 장기 내구성능(구조 및 재료적 건전성)을 평가하였다. 그림 2.60(b)는 300만회 피로시험 전, 후에 대한 시험조건별 감쇠비 측정결과를 나타낸 것이다. 측정 감쇠비 분석결과, 고유진동수와 마찬가지로 가진 하중의 크기와 주파수에 영향을 받지 않고 일정한 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 또한 최대 측정 감쇠비(약 3.0%)는 설계기준에서 제시하는 강구조의 감쇠비 하한 값(2.7%)을 만족하는 것으로 분석되었으며, 피로시험 전, 후 감쇠비의 차이는 매우 미소하게 나타나 강구조인 횡단궤도시스템의 300만회 피로하중에 대한 구조 및 재료적 건전성을 입증하였다.

(7) 피로시험 결과-변위

(가) 반복횟수별 하중-변위 데이터(정적시험)

표 2.35 반복횟수별 하중-변위 데이터

Cycle (N)	Median~ Max Load (kN)	Displacement (mm)					
		D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	232.3	0.417	0.545	0.586	0.511	0.535	0.483
	328.9	0.531	0.679	0.706	0.647	0.679	0.601
50,000	232.3	0.424	0.543	0.591	0.522	0.539	0.489
	331.3	0.543	0.684	0.714	0.662	0.690	0.611
500,000	232.1	0.425	0.532	0.586	0.518	0.541	0.489
	331.2	0.546	0.676	0.711	0.658	0.693	0.612
1.000,000	232.4	0.435	0.540	0.597	0.530	0.548	0.495
	331.0	0.557	0.684	0.721	0.670	0.701	0.617
1,500,000	232.3	0.438	0.543	0.601	0.535	0.550	0.499
	331.1	0.561	0.688	0.726	0.676	0.703	0.621
2,000,000	232.3	0.424	0.526	0.585	0.522	0.544	0.492
	330.9	0.548	0.669	0.711	0.663	0.697	0.610
2,500,000	232.8	0.442	0.544	0.604	0.539	0.553	0.502
	331.0	0.564	0.687	0.728	0.680	0.706	0.623
3,000,000	232.3	0.435	0.533	0.594	0.535	0.549	0.499
	331.2	0.560	0.678	0.720	0.677	0.703	0.621
종료 후 변화율(%)		4.89	1.86	1.68	4.67	3.08	3.32

(나) 시험결과 그래프(300만회 피로시험 후 처짐(하중-변위))

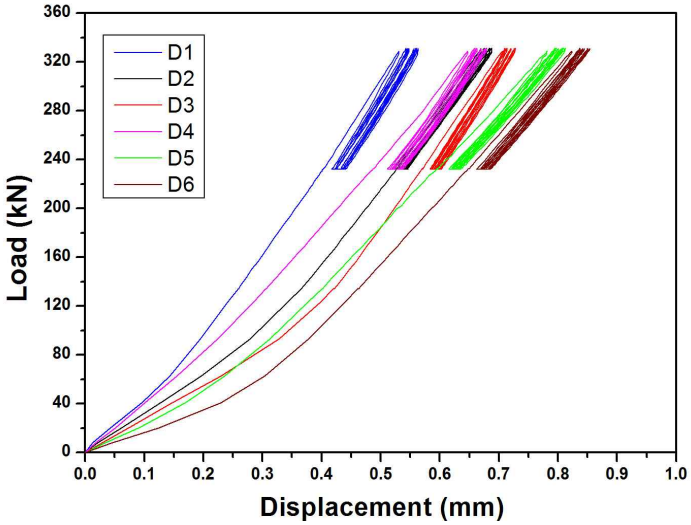
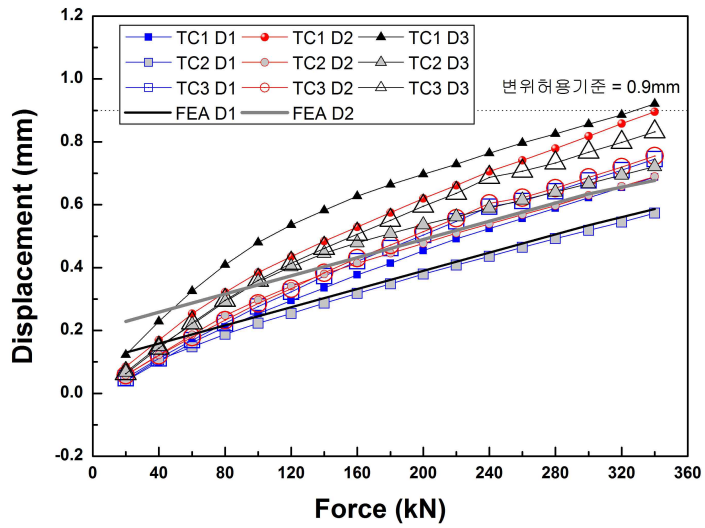


그림 2.61 하중 - 변위 그래프

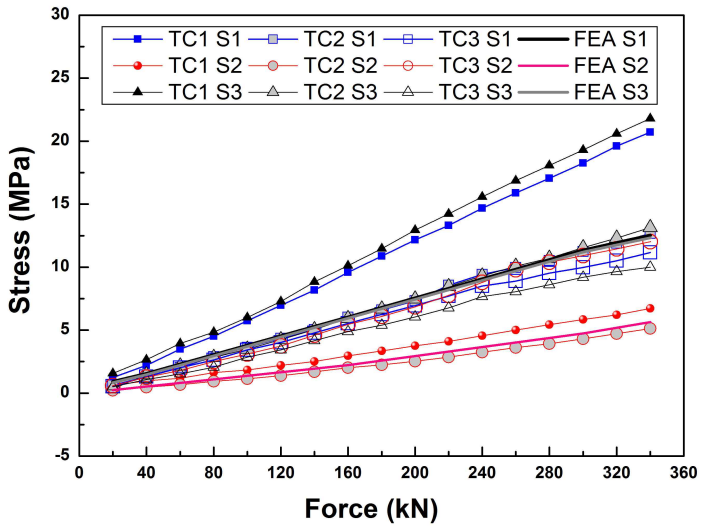
그림 2.61과 같이 피로시험 이후에도 횡단궤도시스템의 거동변화(변위 및 응력)는 없었으며 고유진동수와 감쇠비 역시 변화수준이 매우 미소한 것으로 나타나 횡단궤도시스템의 강성과 질량 등과 같은 구조계의 변화는 발생하지 않은 것으로 분석되었다. 또한 300만회 피로시험 이후에도 최대하중 340kN까지의 시험하중에 대하여 변위 및 발생응력의 수준이 허용기준치를 크게 하회하는 것으로 나타나 횡단궤도시스템은 충분한 내하력 및 300만회 피로시험에 대한 구조적 건전성 및 안전성을 확보할 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

마. 횡단궤도시스템 성능시험 결과(종합)

(1) 정적 시험 결과



(a) 변위



(b) 응력

그림 2.62 정적 시험 결과

횡단궤도시스템의 정적변위 검토결과 최대 정적변위는 레일지지점에서 0.70mm 미만(340kN 재하 시)으로 나타나 독일 횡단궤도시스템의 정적 변위 한계기준(0.9mm 이하, 210kN 기준)을 만족하고 수치해석결과와의 차이가 0.1mm 미만인 것으로 나타났다. 그림 2.62(a)는 횡단궤도시스템의 주형단면에서의 정적 변위를 나타낸 것이며 레일과 레일체결장치 적용유무에 따른 시험조건인 TC1과 TC2의 차이가 약 0.1mm 미만으로 나타나 레일과

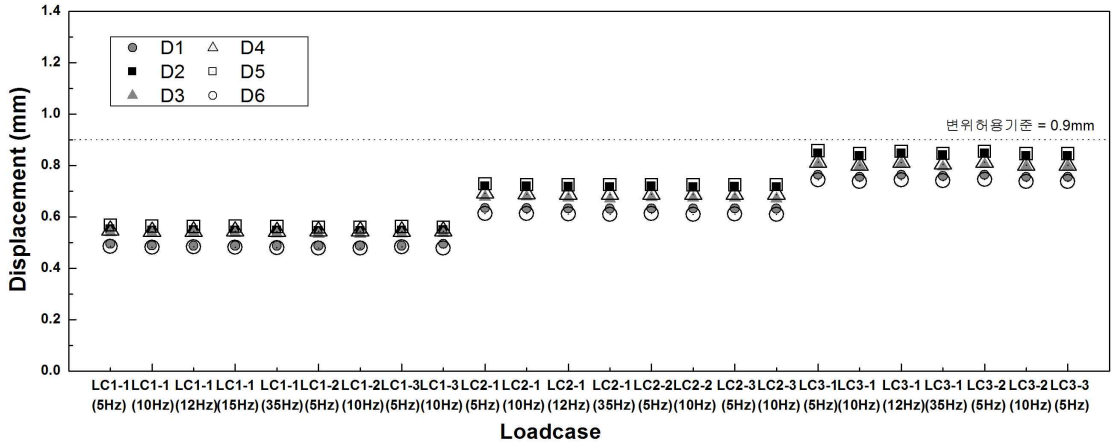
레일체결장치의 적용에 따른 차이는 미소한 것으로 나타났다. 또한 지점부 단차를 고려한 TC3와 레일과 레일체결장치를 적용한 TC2의 시험결과의 차이는 약 0.17mm 수준으로 나타나 지점부 단차 등의 경사조건에 따른 차이 역시 미소한 것으로 나타났다.

강재의 허용응력은 시험체에서 사용된 강재인 SM520과 하부강판의 두께 38mm를 고려하여 허용응력 185MPa를 기준으로 주형의 인장응력을 검토하였다. 횡단궤도시스템의 강재 주형의 정적 응력 검토결과, 그림 2.62(b)와 같이 강재 주형의 휨응력은 15MPa로 나타나 설계기준(185MPa)을 만족하며 충분한 안전율을 확보하는 것으로 분석되었고 수치해석결과와의 차이가 약 0.5MPa인 것으로 나타났다. 또한 레일과 레일체결장치 적용유무에 따른 TC1과 TC2의 차이가 약 1.6MPa 미만으로 나타났으며 최대발생응력이 모두 설계기준(185MPa)의 약 12% 수준으로 나타나 이는 사용강재의 피로한도를 크게 하회하므로 횡단궤도시스템의 장기내구성능을 입증하였다. 또한 지점부 단차를 고려한 경사조건의 TC3와 레일과 레일체결장치를 적용한 TC2의 시험결과의 차이 역시 약 3.2MPa 수준으로 나타나 지점부 단차 등의 경사조건에 따른 시험체의 변위 및 응력의 변화는 매우 미소하며 허용기준을 크게 하회하는 것으로 나타났다.

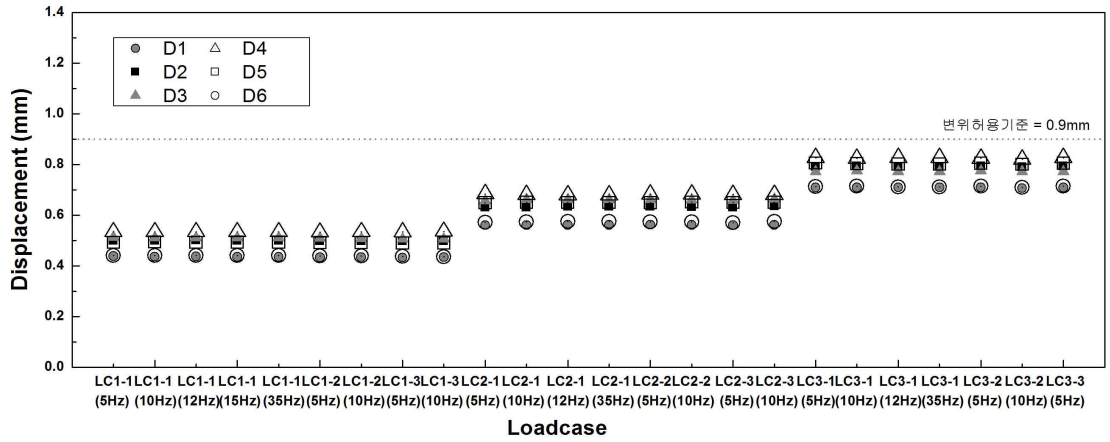
결론적으로, 횡단궤도시스템의 변위, 응력, 스트럿트 응력에 대한 Test Case별 정적시험결과는 변위, 응력 모두 허용기준치를 만족하는 것으로 나타났으며 스트럿트의 경우 허용응력의 약 1.05% 미만으로써, 이는 사용강재의 피로한도를 크게 하회하므로 피로에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 스트럿트의 경우 하중을 전달 받는 구조부재로써의 의미는 없으며, 이로써 횡단궤도시스템의 독립적 거동 특성을 입증하였다.

(2) 동적 변위 및 연직 가속도 분석

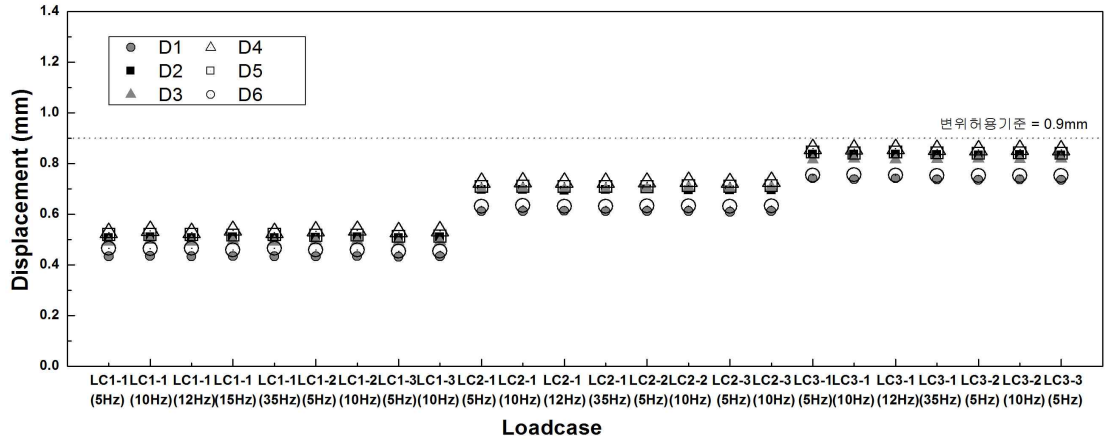
(가) 시험조건별 변위 분석결과



(a) Test Case 1



(b) Test Case 2



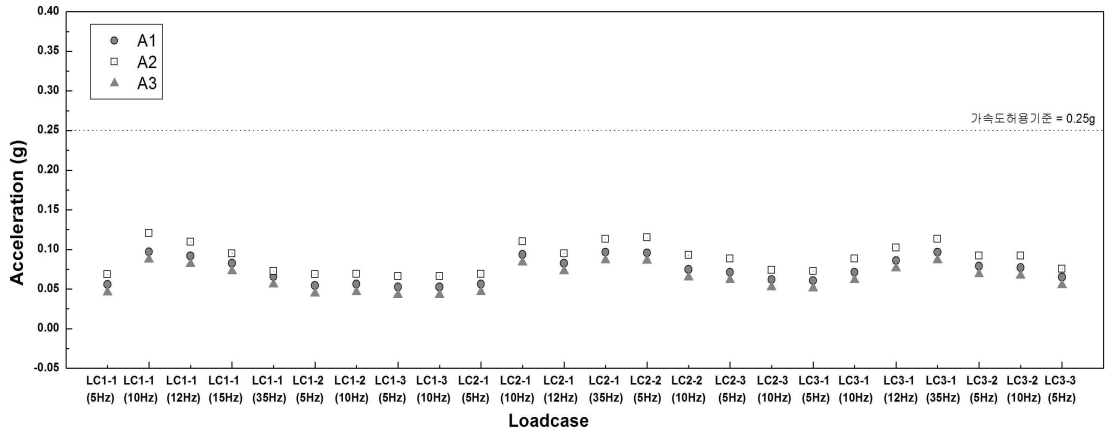
(c) Test Case 3

그림 2.63 시험조건별 변위 비교

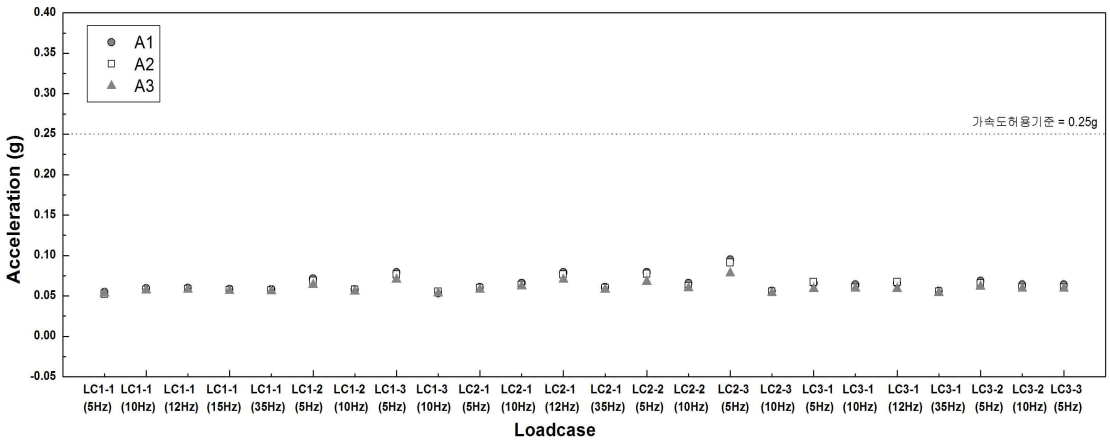
Test Case별 동적재하시험 결과는 그림 2.63(a), (b)와 같이 레일 및 레일체결장치 유무에

따른 변위량은 차이는 뚜렷하지 않았으며, 그림 2.63(b), (c)와 같이 경사조건에 따른 영향 역시 큰 차이를 나타내지 않았다.

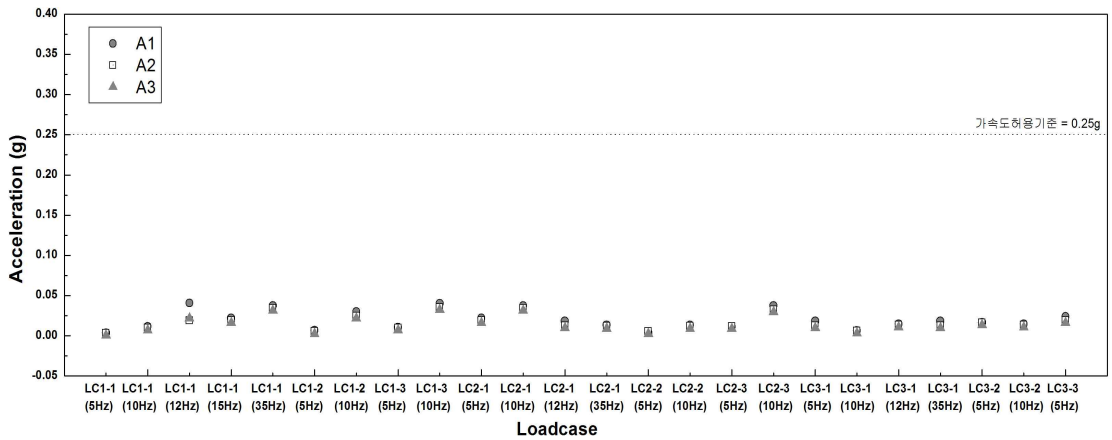
(나) 시험조건별 가속도 분석결과



(a) Test Case 1



(b) Test Case 2



(c) Test Case 3

그림 2.64 시험조건별 가속도 비교

그림 2.64와 같이 시험조건별 가속도 분석결과 역시 레일 및 레일체결장치 설치유무에 따른 가속도 차이는 뚜렷하지 않았으며 경사조건에 따른 영향 역시 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서 횡단궤도시스템은 레일 및 레일체결장치의 특성 및 경사조건에 영향을 받지 않았음을 실험적으로 입증하였다.

(3) 동특성 검토(고유진동수 및 감쇠비 분석)

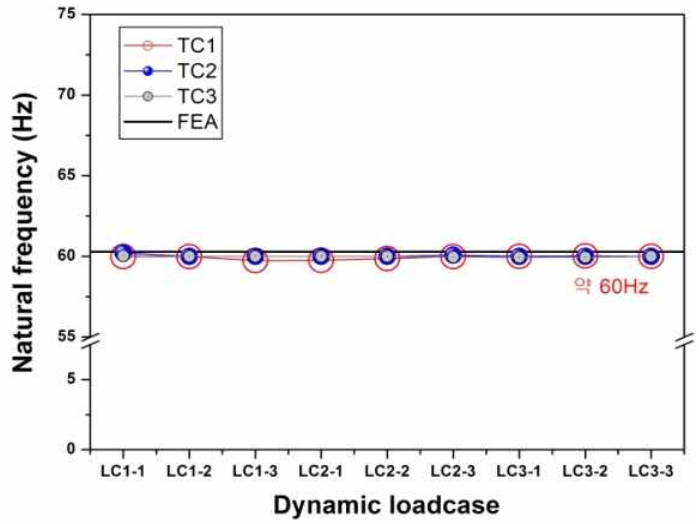


그림 2.65 시험조건에 따른 고유진동수 변화

고유진동수 분석결과, 그림 2.65와 같이 횡단궤도시스템의 고유진동수는 300만회 피로시험 전, 후 및 가진하중의 크기와 가진주파수의 변화에 영향을 받지 않았으며, Test Case별 고유진동수의 차이는 매우 미소한 것으로 나타나 레일 및 레일체결장치 설치유무 및 경사조건은 횡단궤도시스템의 고유진동수에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

또한 교량의 고유진동수와 열차의 유효타격간격을 알면 공진을 유발하는 차량의 임계속도(Critical speed)를 파악할 수 있다. 표 2.36은 실험 및 해석적으로 도출한 횡단궤도시스템의 고유진동수와 열차종별 유효타격간격을 이용하여 산출한 횡단궤도시스템의 임계속도를 산출한 결과이다.

표 2.36 열차종별 횡단궤도시스템의 임계속도 검토결과 (실험 및 해석 고유진동수 비교)

열차종별	유효타격간격	임계속도(km/h)	
		수치해석 (60.29Hz)	실내시험 (59.96Hz)
새마을호, 무궁화호, 틸팅열차	23.50m	5,100	5,073
화물열차	13.95m	3,028	3,011
KTX, G7	18.70m	4,059	4,037

열차종류별 유효타격간격을 고려한 임계속도 검토결과, 운행속도 대역이 가장 빠른 KTX 열차주행에 따른 임계속도는 4,037km/h로 산출되어 주행가능한 속도대역을 감안할 때 횡단궤도시스템의 공진은 발생하지 않는 것으로 검토되었다.

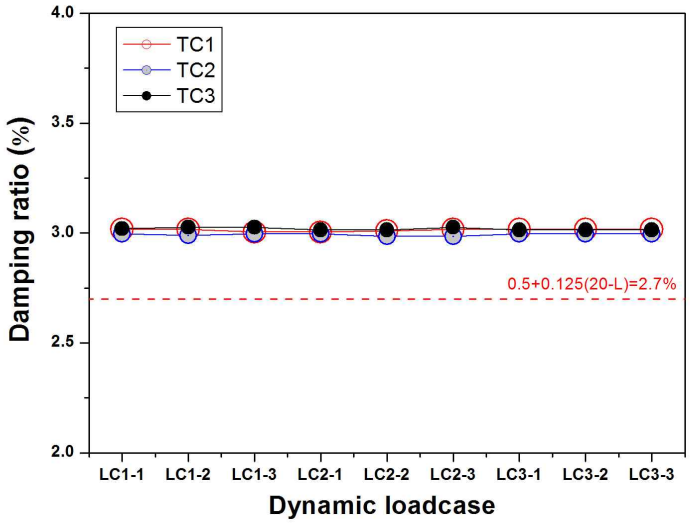


그림 2.66 시험조건에 따른 감쇠비 변화

Test Case별 감쇠비 분석결과, 그림 2.66과 같이 고유진동수와 마찬가지로 가진하중 및 가진주파수의 영향을 받지 않고 일정한 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 또한 Test Case별 감쇠비의 차이가 매우 미소하므로 레일 및 레일체결장치 유무 및 경사조건이 감쇠비 변화에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 철도설계지침 및 편람(토목/궤도편, 2012)에서 제시하고 있는 감쇠비 하한치(강구조, 2.7%)를 모두 만족하는 것으로 나타났다.

실대형 시험체를 이용한 횡단궤도시스템의 조립성능시험결과, 모든 분석항목에서 독일 횡단궤도시스템의 성능요구조건 및 국내 관련기준을 만족하는 것으로 분석됨으로써, 본 연구의 횡단궤도시스템은 윤중변동(충격효과)을 고려한 고속열차(KTX) 하중 및 설계 활하중

(HL-25)을 비롯한 300만회 피로하중에 대하여 충분한 정, 동적 구조안전성 및 장기내구성능을 확보하는 것으로 나타났으며 설계단면의 구조적 적정성을 실험적으로 입증하였다.

바. 실대형 시험체를 이용한 조립성능시험 분석결과 요약

실제 건설선에 적용이 가능한 횡단궤도시스템의 표준단면(설계도면) 및 구조계산서를 작성하였으며 현장시험부설을 위한 실물스케일의 횡단궤도시스템 시제품을 제작하여 공인된 시험기관에서 구조적 성능시험을 비롯한 300만회 피로시험을 수행함으로써 철도시설물로써의 횡단궤도시스템의 적정성을 입증하였다.

정·동적재하시험 결과, 횡단궤도시스템의 처짐 및 응력, 가속도 등에 대한 모든 시험항목에서 국내·외 관련기준 및 성능요구조건을 모두 만족하는 것으로 분석되었다.

또한 300만회 피로시험 전, 후 횡단궤도시스템의 고유진동수 및 감쇠비를 평가함으로써 피로하중에 따른 횡단궤도구조의 구조적 건전성(구조 및 재료적 건전성)을 입증하였다. 피로시험 이후에도 변위, 응력 및 가속도 응답의 변화는 매우 미소한 것으로 분석되었으며 고유진동수의 변화 역시 발생하지 않아 피로시험 이후에도 횡단궤도시스템의 강성과 질량 등과 같은 구조계의 변화는 발생하지 않은 것으로 검토됨으로써 횡단궤도시스템의 장기 내구성능을 실험적으로 입증하였다.

실물스케일의 횡단궤도시스템의 조립성능시험결과, 횡단궤도시스템의 고유진동수는 약 60Hz로 나타나 KTX 열차의 고정축간 거리를 고려한 공진가능 속도대역이 약 4,037km/h 이상으로 산출됨에 따라 공진발생에 따른 구조적인 문제는 없을 것으로 분석되었다. 또한 횡단궤도시스템의 처짐량이 최대하중 340kN 가력시 약 0.72mm 수준으로 나타나 횡단궤도시스템의 성능요구조건 및 국내 궤도 면틀림 허용기준(1.2mm/3m)을 만족하였으며, 횡단궤도구조 각부의 발생응력의 수준이 모두 허용기준치를 크게 하회하는 수준으로 나타나 횡단궤도구조에 사용된 강재 주형 단면의 적정성을 입증하였다. 또한 횡단궤도시스템은 윤중변동수준(충격효과)을 감안한 KTX 실열차하중 및 설계활하중(HL-25)의 정, 동적 구조안전성을 입증하였다.

현장적용을 위한 횡단궤도시스템의 실물 시제품을 제작하여 실시한 조립성능시험결과, 본 연구에서 제안하는 한국형 횡단궤도시스템은 국내 주행열차하중에 대해 구조적으로 안전하며, 충분한 내하력을 확보하였으며 300만회 피로시험에 대한 구조적 건전성 및 안전성을 입증하였다.

사. 횡단궤도시스템의 성능 요구조건

표 2.37 횡단궤도시스템 성능 요구조건

시험종류		평가항목		단위	평가기준
제품 성능 시험	조립 성능 시험	1)	연직변위(피로시험 전, 3m 기준) : 구조안전 측면(최대하중 340kN 기준)	mm	≤ 0.9
		2)	궤도면틀림 기준 : 사용성 측면	mm/3m	< 1.2
		3)	연직가속도 허용기준	g	< 0.25
		4)	횡단궤도 받침의 허용회전각	rad	0.02
		5)	횡단궤도 받침의 허용침하량	mm	< 1
		6)	피로시험(300만회) 후 시스템 건전성 확보 유무 (고유진동수 & 감쇠비 변화)	-	< 1~2%
현장 성능 시험	현장 설치 시험	7)	궤도지지강성(측정치) ·궤도지지강성 변화율(≤350km/h)	kN/mm	본선과의 균일성 확보 (≤1.8)
		발생응력	8) 레일저부응력(측정치) : 장대레일	MPa	≤ 130(허용응력) ≤ 90(평가기준치)
		발생응력	체결구응력(측정치)	MPa	적용 전, 후 저감효과 입증
		단부 레일의 상향변위(측정치)		mm	적용 전, 후 저감효과 입증
		9)	단부 레일의 상향변위 저감비	-	60% 이상
		10)	탈선계수	-	≤ 0.8
		11)	레일 두부 횡변위(궤간확대안정성)	mm	≤ 4
		12)	충격계수(DAF) (t=1,Φ=0.2, V=300km/h, DAF : 1.326)	DAF	$\leq 1+t \cdot \Phi(1.0+0.5\frac{V-60}{190})$

1) RIL804(2003) 및 자체 연구결과 이용 설정
2) 철도설계편람 참조
3) 철도설계편람 및 독일문헌* 참조
4) RIL804(2003) 참조
5) RIL804(2003) 참조
6) 자체 연구결과 이용 설정
7) 철도설계편람, 궤도편(2012) 참조
8) 철도설계편람, 궤도편(2012) 참조
9) 자체 연구결과 이용 설정
10) 철도설계편람, 궤도편(2012) 참조
11) 철도설계편람, 궤도편(2012) 참조
12) 철도설계편람, 궤도편(2012) 참조

* Rudolf Seidel.(2000). “Feste Fahrbahn auf großen Stahlüberbauten der NBS Hannover-Berlin”, EI-Eisenbahningenieur (51), pp. 23-29(German language).

제 4 절 현장적용성 평가

1. 횡단궤도시스템의 현장적용을 위한 요구조건

가. 횡단궤도시스템의 설계 및 현장적용을 위한 요구조건

횡단궤도구조는 철도교량 중 경간장이 길고 상부구조의 신축량이 커서 교량 신축이음부의 이격거리 확대가 불가피한 콘크리트교, 강교 또는 합성교 및 특수교량에 적용이 가능하며, 이는 교량 상부구조의 바닥판에 고정되고 레일 및 레일지지점을 포함하는 궤도구조를 의미한다. 횡단궤도시스템을 적용하기 위한 최소 요구조건은 다음과 같다.

(1) 교량 상부구조물의 단부 바닥판의 수직변위가 크며, 이에 따라 교량 상부구조물의 휨에 의한 변형 및 침하 등에 따른 레일의 부상(리프팅) 또는 침하가 발생되는 개소
(2) 레일지지점에 발생되는 상향력 또는 압축력이 사용되는 레일체결장치의 허용범위(체결장치 제조사 자료참조 혹은 DS804-app29-Table.1)를 초과할 소지가 있는 개소
(3) 교량 상부구조물 단부 바닥판의 종방향 상대변위를 조절하여, 교량 신축이음부 근처에 위치한 레일지지점 간격이 최대 허용 값(650mm 이하)을 준수하기 어려운 개소

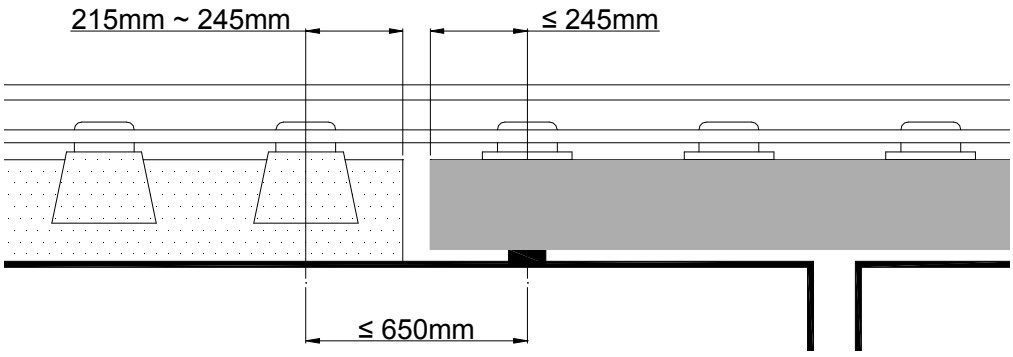
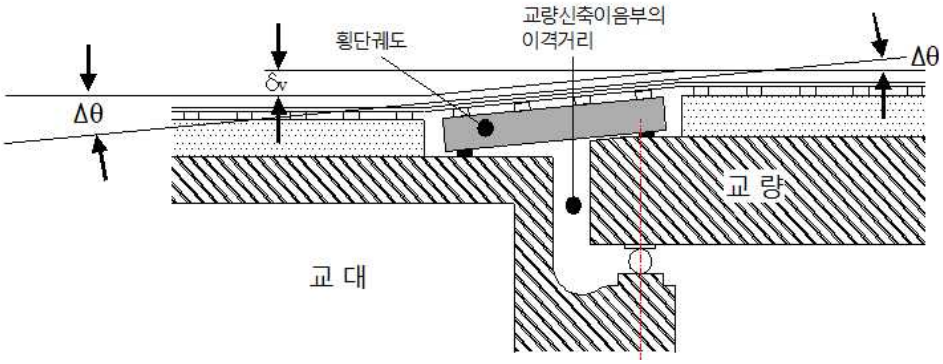


그림 2.67 횡단궤도구조와 인접궤도간의 설치(예)

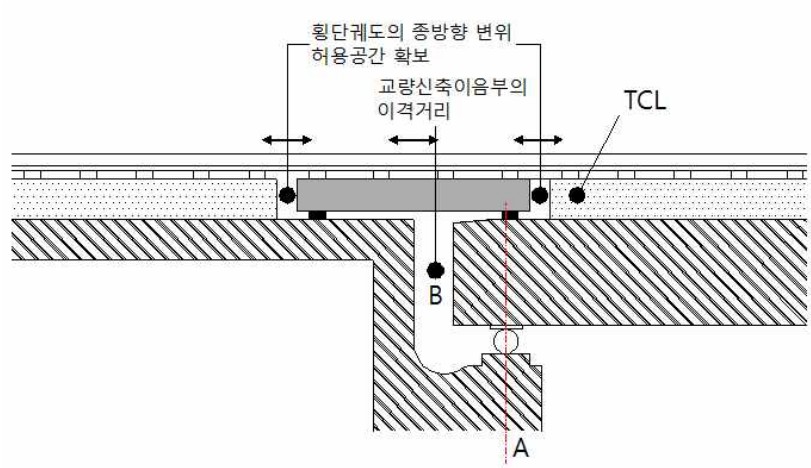
나. 횡단궤도시스템의 설치 일반사항

(1) 횡단궤도시스템의 주요 설치조건

횡단궤도시스템은 철도교량상 단부 궤도에 작용하는 부상력과 압축력 및 신축거동 등과 같은 콘크리트궤도가 부설된 철도교량구조에서 해결해야할 구조적인 문제를 횡단궤도시스템의 자체적인 추가 작용력 완화(소멸) 기능을 통해 단부에 작용하는 교량 단부 궤도-교량 상호작용력 및 부반력 거동을 상쇄시켜 철도교량 및 궤도설계 시 일반구간과의 설계 일관성을 확보할 수 있는 구조체이다.



(a) 잘못된 설치의 예



(b) 잘된 설치의 예

그림 2.68 횡단궤도시스템 설치 예시

횡단궤도시스템은 기본적으로 단선을 기준으로 설계하도록 하며, 이는 레일이 종방향으로 이동이 가능하면서, 횡방향으로는 이동이 가능하지 않도록 하여야 한다. 횡단궤도시스템은 철도교량 중 자갈궤도 및 콘크리트궤도로 설계된 콘크리트교, 강교 또는 합성교에 어디에든 설치될 수 있으며 복선궤도로 설계된 철도교량에는 2세트의 횡단궤도구조를 설치하는 것을 원칙으로 한다.

횡단궤도시스템에 사용되는 받침은 적용대상 교량의 신축범위를 감안하여 종방향 변위를 허용해야 하며, 횡방향 변위 발생을 방지하여야 한다. 또한, 횡단궤도시스템의 받침은 횡단

궤도구조의 끝단의 레일지지점에 정렬되어야 한다. 교량단부와 교대배면사이의 중심(교량 신축이음부 중심, 유간 중심)에서는 교량의 휨 거동에 기인한 레일의 휨 변형(곡률)이 최대가 되는 위치이므로, 횡단궤도시스템 내의 레일지지점의 설치를 가급적 피하는 것을 원칙으로 한다.

(2) 횡단궤도시스템의 최소 길이(Span)

횡단궤도시스템의 최소 길이는 다음 요건을 고려하여 결정하여야 한다.

(가) 교량 받침의 중심축과 교량상판 단부(돌출부)의 거리
(나) 교량 신축이음부의 이격거리(유간)
(다) 교량 신축이음부의 신축량(길이)
(라) 교대부에 횡단궤도를 적용할 경우 : 교대배면의 두께의 1/2
(마) 횡단궤도구조 위에 설치할 레일지지점(레일체결장치)의 간격 및 개수
(바) 횡단궤도구조 위에 설치된 마지막 레일지지점과 인접 궤도의 마지막 레일지지점 사이의 이격거리(215~245mm)

(3) 횡단궤도구조의 처짐 한계

LM 71(상황에 따라 실 운행 열차하중 적용)에 따른 횡단궤도구조의 수직 처짐은 횡단궤도시스템의 중앙부에서 L/1000을 초과하면 안된다(구조 안전 기준).

(4) 횡단궤도시스템의 이동 제어장치

교량상에 레일신축이음매가 있는 구간 혹은 교량의 신축에 따라 교량 신축이음부에서의 레일지지점 간격은 최대 허용값(일반적으로 650mm)으로 제한되어야 하며 이때 인접 궤도의 단부와 횡단궤도구조간의 간격은 최소 20mm를 확보하여 서로간의 간섭을 방지하여야 한다.

과도한 교량신축 및 횡단궤도시스템의 종방향 이동이 예상되는 구간의 경우 횡단궤도시스템의 위치를 제어하고 종방향으로의 과도한 이동을 방지하기 위한 이동 제어장치가 필요하며, 이러한 이동 제어장치는 인접 궤도와 횡단궤도시스템 사이에 각각 설치하여 일정량의 종방향 변위만을 허용하게 된다.

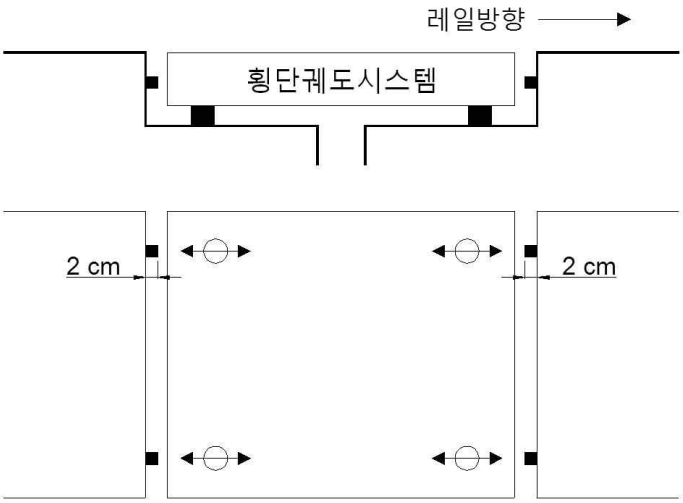


그림 2.69 횡단궤도시스템과 인접궤도와의 단부 간격 및 이동제어장치

(5) 횡단궤도시스템 하부의 건축한계

횡단궤도시스템 하부의 건축한계(횡단궤도구조의 바닥면과 교량상판 사이 공간, 즉, 횡단궤도받침의 높이)는 교량 상부구조물의 수직방향 거동(단부 바닥판 들림)에 간섭받지 않을 수준의 충분한 공간이 있어야 한다.

(6) 횡단궤도시스템의 부상 방지

횡단궤도시스템의 자중은 횡단궤도구조에 작용하는 부상력 및 열차하중에 의해 횡단궤도시스템이 부상(리프팅, Lift-off)되거나, 회전각 및 단차가 발생하지 않도록 부상방지키가 설치되어 있어야 하며 충분한 허용부상력을 확보하여야 한다.

다. 주요 재료에 대한 요건

(1) 강재(Steel)

강재 부품, 용접 첨가제 그리고 기계적 결합제에 대해서는 KS B 0885, KS D 3515, 제3항(구조용 강재관련기준, 구조용 용접재료 관련 기준)이 적용된다. 강재 부품의 요건은 횡단궤도구조 또는 받침에 적용되어야 한다. 이용된 강재 부품의 절단면과 구멍은 치핑(단면손실)을 보여선 안 된다.

(2) 부식보호, 도장(Coating, Painting)

부식보호를 받아야 하는 자재에 대해서는 강재 부품에 대한 도료(코팅층)만이 사용될 수 있다. 부식 보호시스템은 KS M 6030(강재도장용 페인트 도료 관련기준)에 따라 선택되어야 하며 이는 일반적인 교량상 주요부재의 부식방지 계획에 규정되어야 한다(KS D 0295).

라. 횡단궤도시스템의 제작 및 납품

횡단궤도시스템은 제작오차를 최소한으로 할 수 있는 엄격한 제작 품질이 확보될 수 있는 공장에서 제작하여 시공현장에 완성품으로 납품되어야 하며, 시공 계획에 따라 받침 및 체결장치가 선 조립되어 납품될 수 있다. 또한 철도궤도의 주요부재로서 응급상황 발생에 따라 필요시 신속한 교체가 가능하도록 보수물량을 확보하여야 한다.

마. 횡단궤도시스템의 조립 및 설치

횡단궤도시스템의 현장 설치는 횡단궤도 받침 설치를 위한 작업 후에 제조사 또는 발주처에서 정한 시공사가 시행할 수 있으며, 횡단궤도시스템의 공급자 측 전문 엔지니어에 의

해 설치 및 조립 과정이 엄격하게 감독되어야 하며 주요 설치 치수를 기록하여야 한다.(예: 설치 시 횡단궤도와 인접 궤도간의 이음매부의 치수 조절량, 이격거리 등)

2. 횡단궤도시스템의 유지보수

가. 개요

횡단궤도시스템에 있어서 일반적인 유지보수는 통상적인 궤도 및 강구조물에 준하여 시행할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 레일 및 레일체결장치에 대한 유지보수는 제외하고, 횡단궤도시스템 자체에 대한 유지보수와 횡단궤도시스템에 적용되는 포트받침의 유지보수와 관련된 사항에 대해 기술한다.

횡단궤도시스템에 포트받침을 적용함으로써 얻을 수 있는 가장 중요한 장점 중의 하나는 포트받침의 상태를 주기적으로 점검하고 문제가 있을 경우 교체가 용이하다는 점이다. 횡단궤도시스템의 점검은 아래와 같이 일상 검사와 정기 검사로 구분하여 시행한다.

(1) 일상 검사 : 포트받침의 볼트 풀림, 파손 등 이상 여부와 강재 부식 및 도장상태 등을 육안으로 검사

(2) 정기 검사 : 횡단궤도시스템의 진동 및 변위, 응력 발생 특성을 확인하고 포트받침의 성능 검사

나. 유지보수 지침

본 횡단궤도시스템의 포트받침은 강재, 고무판, 불소수지판(PTFE)으로 구성되어 있다.

(1) 강재

포트받침의 금속 부분은 모두 강재이어야 하며 포트받침의 포트는 주강품을 사용할 수 있다.

(2) 고무판

천연고무나 인공 합성고무를 사용하며, 품질기준은 표 2.38과 같다.

표 2.38 고무판 품질기준

항 목		단 위	고 무 판	
			천연고무	합성고무
인 장 강 도		kgf/cm^2	155 이상	155 이상
신 장 율		%	450 이상	400 이상
경 도		HS	+ 5, 50, - 4	+ 5, 50, - 4
노 화 후 (70℃, 168시간)	경도변화	HS	10 이하	15 이하
	인장강도 변 화 율	%	15 이하	15 이하
	신 장 율 변 화 율	%	20 이하	40 이하
압축영구줄음율 (70℃, 22시간)		%	30 이하	35 이하
오 존 균 열 시 험	50 ± 5 ppm 40 ± 2℃ 신장율 20%, 48 시간		균열없음	균열없음

(3) 불소수지판(PTFE)

윤활구멍을 가진 순수한 불소수지판을 사용하며, 순수 불소수지판의 재료특성기준은 표 4.2와 같다.

표 2.39 불소수지판 재료특성기준

항 목	단 위	규 격
인 장 강 도	kgf/cm^2	175 이상
신 장 율	%	200 이상
비 중	-	2.10 ~ 2.23

다. 검사 주기 및 방법

(1) 일상 검사

일상 검사는 분기당 1회 이상 실시하여 포트받침의 볼트, 너트의 고정 상태, 구성요소의 파손이나 균열 등 이상 여부를 육안으로 검사한다. 볼트 및 너트의 풀림이 확인되면, 다시 토크 렌치를 이용하여 체결한다. 또한 횡단궤도시스템을 구성하는 강재 단면에 대한 부식

및 도장 상태를 육안으로 검사하고 이상 발견 시 부분적인 재도장을 실시한다.

(2) 정기 검사

정기 검사는 횡단궤도시스템의 성능을 확인하기 위하여 시행하는 것으로써, 최대 5년 주기로 시행하는 것이 좋다. 정기 검사에서는 단부 회전에 따른 레일의 변형 수준이 설계수준에서 안정적으로 거동하는지를 판단한다. 또한 기타 이상거동이 확인되는 경우에는 제작업체와 협의하여 횡단궤도시스템의 손상 여부 및 포트받침의 물성 또는 설치 상태를 정밀 점검해야 한다.

3. 횡단궤도시스템의 현장적용성 검토

가. 횡단궤도시스템의 시제품 제작

본 연구에서 개발한 한국형 횡단궤도시스템은 그림 2.70과 같이 크게 횡단궤도구조체와 받침부로 구성되며 레일과 레일체결장치는 적용 개소의 인접궤도 구성품의 종류 및 특성(레일 종류 및 체결장치 스프링강성)을 고려하여 다양하게 선택, 적용이 가능하다.

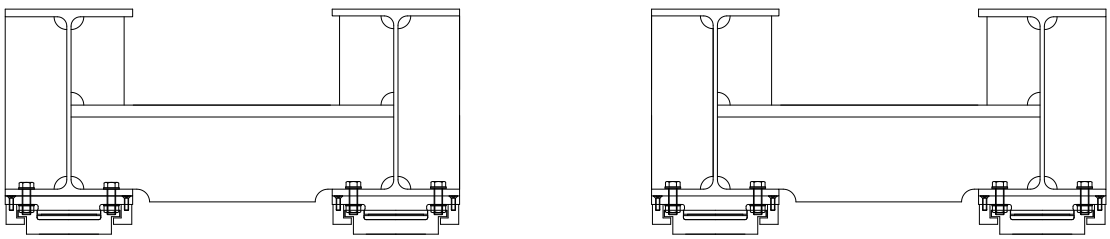


그림 2.70 횡단궤도시스템의 현장시험부설용 시제품 단면도

나. 횡단궤도시스템의 현장적용 범위 및 대상선정

횡단궤도시스템은 특정 교량형식에만 적용이 가능한 것이 아니며 교량의 형식 및 경간장뿐만 아니라 궤도구조의 형식에 큰 영향을 받거나 적용범위가 제한되지는 않는다. 횡단궤도시스템의 현장적용 시 우선적인 검토 사항으로는 콘크리트궤도가 부설된 교량구조의 경우, 적용대상 교량 단부 궤도의 설계 상향력이 기본이 되며, 설계 상향력의 수준에 의해 적용여부를 결정하여야 한다. 따라서 단부 궤도 레일지지점에 발생하는 상향력의 수준이 레일체결

장치의 허용상향력의 범위를 초과되는 개소에 한하여 선택적인 적용이 가능하다. 따라서, 횡단궤도시스템을 적용하고자 하는 대상구간에 대한 교량 및 궤도의 설계제원(교량받침의 위치, 교량의 신축량, 설계 단부회전각, 궤도구조 및 체결장치, RL 및 FL, 교대부 혹은 교각부 등)을 바탕으로 횡단궤도시스템의 길이 및 형고가 결정되어야 한다.

본 연구에서는 횡단궤도시스템의 기본적인 구조특성, 적용 목적, 기능 등을 비롯하여 설계, 시공 및 성능요구조건 등과 같은 기술적 연구성과를 제시하였으며 적용대상 개소에 따라 설계기준 및 제원을 준용하여 적절한 단면으로의 구조설계검토 및 시공 계획의 재수립은 불가피하다.

본 연구는 횡단궤도시스템이라는 특수 궤도구조를 이용하여 교량단부에 발생되는 궤도상호작용력(상향력 및 레일상향변위 등)을 저감시킬 수 있음을 이론 및 실험적으로 입증하고, 이를 바탕으로 국내 철도현장에 적용하기 위한 적정성을 검토한 것이다. 따라서 설계상향력이 초과되어 횡단궤도시스템이 필요한 철도교량의 경우에는 해당 구간의 제원 및 기준을 준용하여 횡단궤도시스템의 제원(길이 및 형고)을 일부 적절히 변경하여 적용이 가능하다. 즉, 본 연구에서 제안한 횡단궤도시스템의 단면 및 적용성에 대한 분석결과의 활용은 특정개소에 한정적으로 적용이 가능한 것이 아닌 교량 단부 궤도의 구조계를 전체적으로 개선시키기 위한 새로운 특수형식의 궤도시스템으로 적용되어야만 한다.

단부 궤도에 발생하는 상향력의 수준은 교량 단부 회전 및 교량의 종방향 신축거동에 영향을 미치는 교량의 지간장에 직접적인 영향을 받는다. 본 연구를 통해 검토된 바에 따르면 지간장 35~40m 정도의 교량이 배치된 교대부의 경우가 상향력 측면에서 다소 불리한 조건이 될 수 있는 것으로 분석되었다. 특히 최대 발생 상향력의 수준이 약 30kN 이상인 개소의 경우에는 최대 27kN의 상향력을 수용할 수 있는 ERL과 같은 특수 레일체결장치의 성능수준을 초과하여 그 적용효과를 기대하기 어려운 것으로 분석되었다.

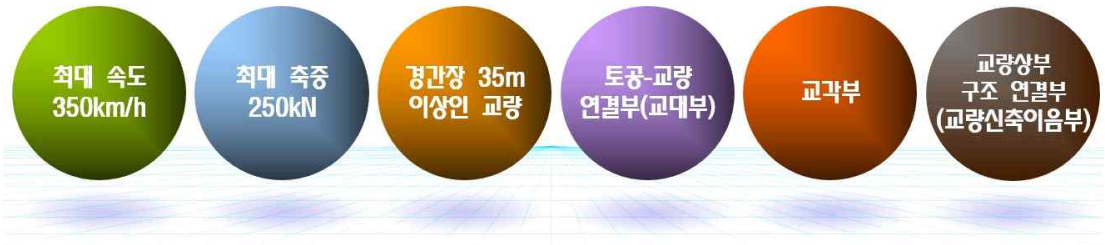


그림 2.71 횡단궤도시스템의 적용 범위

따라서, 과대 상향력이 발생되는 개소의 경우에는 본 연구에서 제안하는 횡단궤도시스템의 적용을 통해 단부 궤도에 발생되는 상향력의 수준을 기준치 이내로 저감시켜 특수한 레

일체결장치는 불필요할 수 있다. 뿐만 아니라 단부 레일의 휨 곡률개선을 통해 고속으로 주행하는 열차의 주행로를 건전한 상태로 유지함으로써 단부 궤도의 사용성 및 승차감이 크게 개선될 수 있으며 철도교량의 장대화도 가능할 것으로 판단된다.

따라서 횡단궤도시스템의 현장적용을 위해서는 그림 2.72와 같이 우선 대상교량의 설계상향력을 기반으로 횡단궤도시스템의 적용 여부를 결정하는 것이 바람직하며, 검토된 상향력의 수준이 특수 레일체결장치의 성능수준을 초과하여 수용이 불가능한 경우에는 횡단궤도시스템을 적용하여 구조적으로 완전히 해소하는 것이 바람직하다.

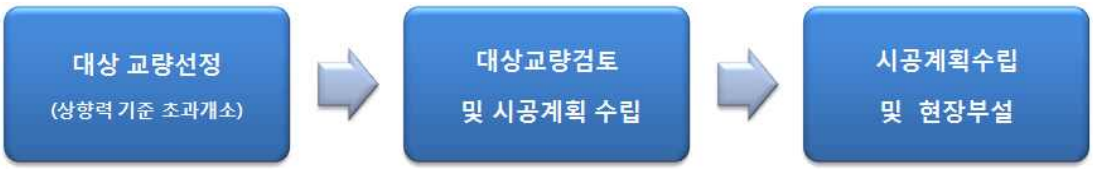


그림 2.72 횡단궤도시스템 현장 적용 Process

횡단궤도시스템은 그림 2.73과 같이 교각부 혹은 교대부 등과 같은 교량구조물 접속구간에 모두 적용이 가능하며, 특히 사교(Skewed bridge)와 같이 교량 단부에 침목의 배치가 용이치 못한 개소에도 적용이 가능하다. 침목배치간격은 레일지지점 간격을 의미하며, 레일지지점의 간격은 레일지지점의 스프링강성과 함께 레일의 처짐 및 응력과 같은 궤도구조안전에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 궤도의 침하량에 영향을 주어 궤도파괴 및 열차주행안정성에도 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 철도 교량 단부와 같이 일정한 침목배치가 용이하지 못한 개소에 횡단궤도시스템을 적용함으로써 철도교량 단부일지라도 교량의 신축 및 교량신축이음장치의 간섭을 받지 않고 침목간격을 본선 일반 궤도구조와 일정하게 유지할 수 있다. 또한 횡단궤도시스템은 일반철도, 광역철도, 도시철도 및 고속철도 구분 없이 모든 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부 궤도에 적용이 가능하다. 단, 본 연구에서 검토된 횡단궤도시스템의 표준단면은 고속철도 설계기준에 적합한 단면으로써 호남고속철도 교량상 궤도 표준도를 참고하여 작성되었다.

본 연구에서 제안하는 횡단궤도시스템은 단부 궤도의 변형(레일의 변형 및 상향력) 수준을 감안하여 ERL 및 REJ(브릿지 조인트) 등과 함께 교량 단부 궤도의 상호작용력 저감을 위한 새로운 구조적인 대안으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.



그림 2.73 횡단궤도시스템 적용 가능 개소

따라서 횡단궤도시스템의 현장 적용대상 개소는 경제성을 고려하여 단부 궤도의 변형수준이 큰 교대부 혹은 장경간 교량(상향력 30kN 이상 개소) 및 사교가 효과적이며, 횡단궤도시스템의 적용에 따라 단부 궤도의 사용성 및 성능개선이 가능할 것으로 판단된다.

다. 횡단궤도시스템 시공개요도

횡단궤도시스템의 현장시험부설을 고려하여 현장시공 개요도를 작성하였다. 전술한 바와 같이 교대부의 경우 교량 연속부, 즉 교각부 보다 상대적으로 상향력이 크게 발생한다. 따라서 본 연구에서 계획한 횡단궤도시스템의 현장적용 대상 개소를 우선적으로 교대부로 선정하고 인접 궤도구간의 궤도종류에 따라 각각 그림 2.74 및 그림 2.75와 같이 횡단궤도시스템을 교대부 TCL에 배치하고자 계획하였다.

횡단궤도시스템의 받침은 교량 받침 직상부에 위치하여야 하며 교대부 측의 경우에는 특별한 위치가 중요하지는 않으나 본 검토에서 적용한 횡단궤도시스템의 경간장 3.0m를 감안할 때 교량측은 2세트, 교대측은 3세트의 기존 Rheda Bi-block 침목을 횡단궤도시스템이 대체하게 된다. 일반 고가부 침목배치 간격은 650mm를 유지하며 횡단궤도시스템 내부 침목간격은 600mm로 하고 횡단궤도와 인접한 침목간격은 625mm를 초과하지 않도록 설계하였다. 또한 횡단궤도시스템과 일반 궤도구조간의 간격은 100mm를 확보함으로써 교량의 종방향 신축거동을 수용할 수 있도록 설계하였으며 만약 종방향으로 횡단궤도가 밀려나더라도 침목의 간격이 650mm를 초과하지 않을 수 있도록 계획하였다. 횡단궤도시스템과 인접 궤도간의 이격거리는 교량의 지간장을 고려한 종방향 신축량을 감안하여 조정이 가능하다.

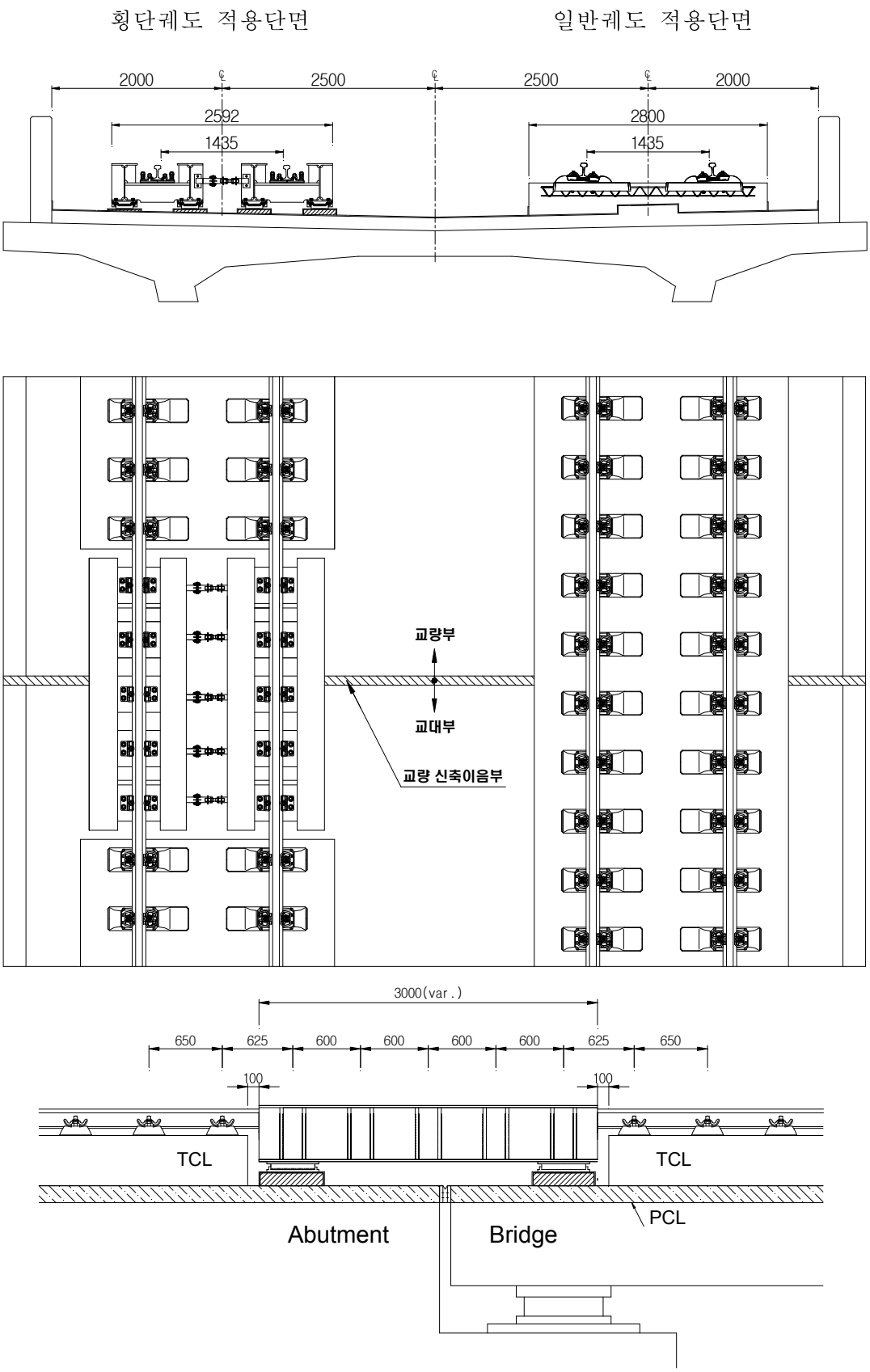
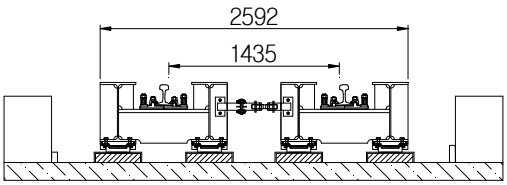
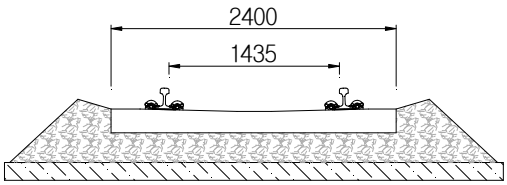


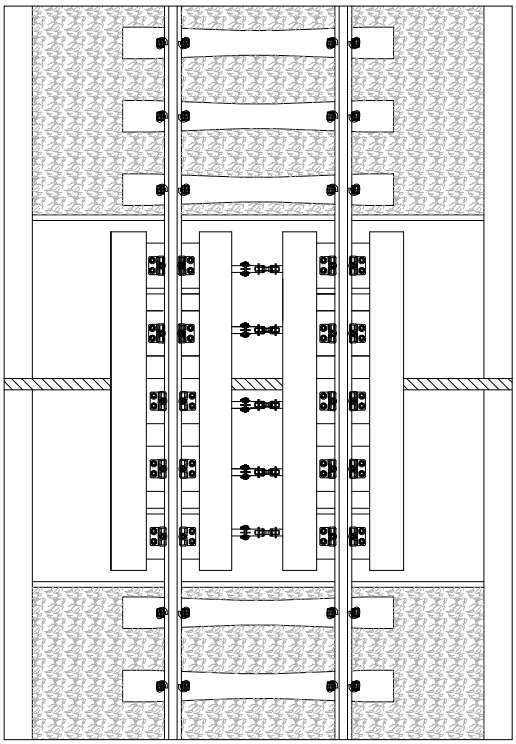
그림 2.74 횡단궤도시스템의 시공개요도(콘크리트궤도)

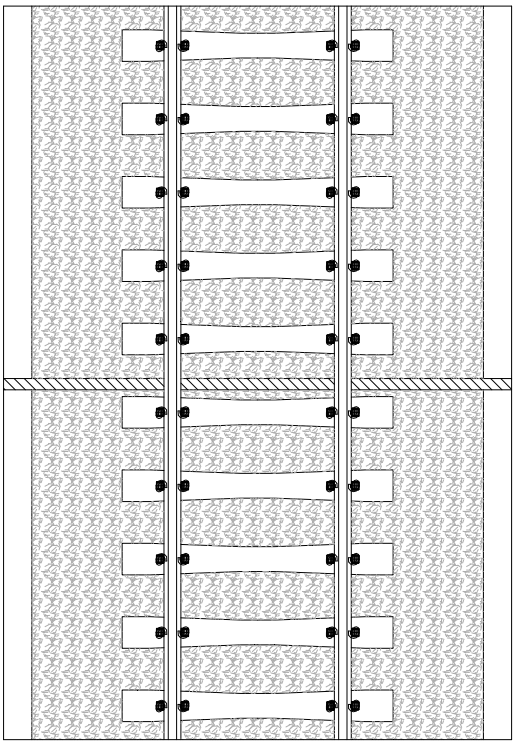
횡단궤도 적용단면



일반궤도 적용단면







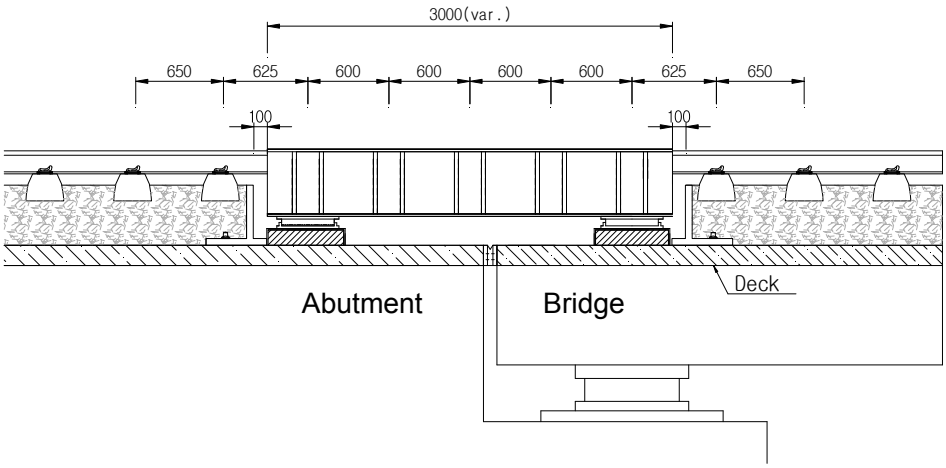


그림 2.75 횡단궤도시스템의 시공개요도(자갈궤도)

라. 횡단궤도시스템 시공절차서

(1) 일반사항

(가) 적용범위

본 시공절차서는 횡단궤도시스템에 관한 것으로 시공절차와 세부항목을 규정한다.

(나) 관련시방서

① 철도설계기준(2011년), 국토교통부

② 철도공사 전문시방서(2004년), 국토교통부

(다) 참조규격

① KS D 3503 일반구조용 압연강재

② KS D 3515 용접구조용 압연강재

③ KS D 3529 용접구조용 내후성 열간 압연강재

④ KS D 3542 고내후성 압연강재

⑤ KS D 7006 고장력강용 피복아아크 용접봉

(2) 재 료

(가) 강재

강재는 한국산업규격에 적합한 재료를 사용하되 강재의 검사통칙 KS D 0001에 의하여 작성된 밀시트와 대조·확인해야 한다.

강재의 종류는 산업규격의 기준에 준하되 본 규격품 이외의 강재를 사용하고자 할 때는 사용강재의 해당 산업규격 절차에 의하여 제 시험에 합격한 품질확인서를 제출하여 감독자의 승인을 받아 사용할 수 있다.

(나) 기타 부재

앞의 관련시방서 규정에 따른다.

(3) 시공절차

(가) 시공절차

횡단궤도시스템 제작 시 I형 강재거더는 운반이 가능한 분절상태까지 공장제작을 원칙으로 하며 현장에서 조립, 용접 후 그림 2.76과 같이 시공 흐름도에 따라 시공한다.

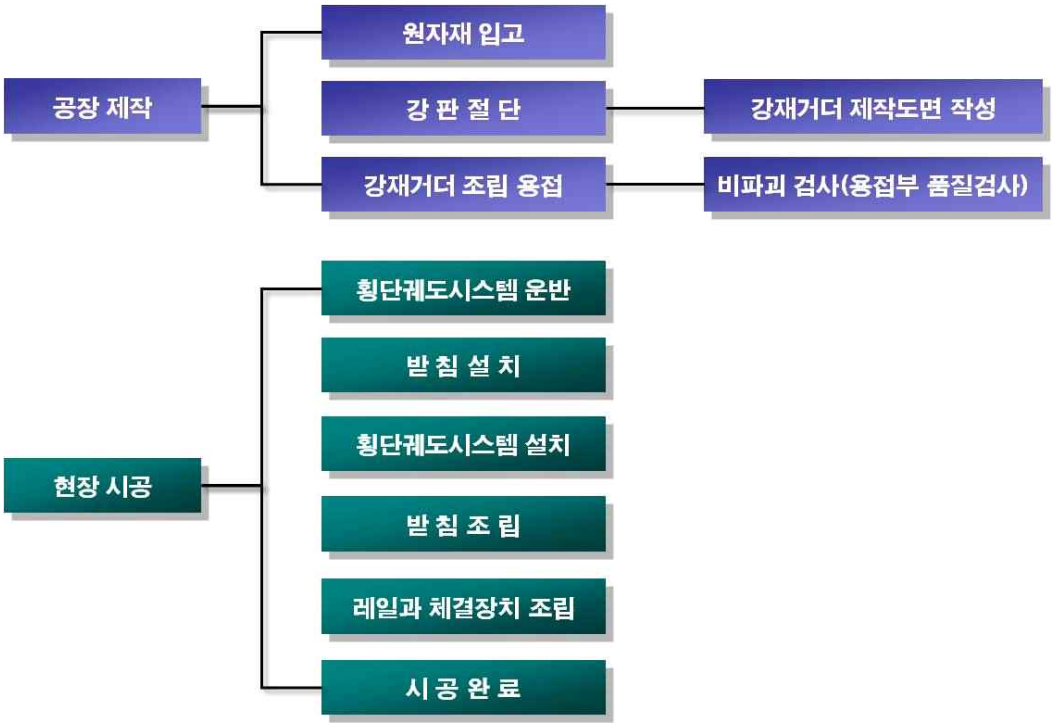


그림 2.76 횡단궤도시스템 시공 흐름도

(4) 시공

(가) 강재의 공장제작

① 원자재 반입

㉮ 강판은 반입검수시 규격증명서 또는 밀시트가 첨부되고 공장제조 번호 및 규격, 형상, 치수가 확인 되어야 한다.

㉯ 판 두께에 따라 생산 가능한 강판의 길이가 제한되어 설계도면에 도시된 강판의 생산이 불가능할 경우 절단 계획상 이음위치를 변경하여 강판길이를 조정할 수 있다.

② 강재 제작

㉮ 제작도 현도 및 강판의 절단

㉯ 강재 제작도면에 의거 강판 절단 계획(shop drawing)을 작성한다.

㉰ 강판의 절단은 자동 가스절단으로 시행하고 노치가 생기지 않도록 한다.

③ 강재의 조립 및 용접

㉮ 강재거더(복부 및 플랜지)와 하부강판의 조립시 플랜지판을 압착시켜 용접면의 밀착을 완전하게 하고 플랜지와 복부를 비롯한 하부강판과의 연결부는 항상 직각이 되게 한다.

㉯ 강재거더의 용접에서 공장 제작은 자동용접을 원칙으로 하고, 현장 용접은 수동용접으로 시행한다.

㉰ 용접작업자는 각 자격에 따라 적정한 작업이 이루어지도록 하여야하며 용접작업자의 자격요건은 KS B 0885(용접기술검정 시험방법, 판정기준)에 합격한 자여야 한다.

㉱ 강재거더(복부 및 플랜지)와 하부강판의 용접은 처음부터 끝까지 동일한 조건으로 시행하여야 한다.



(a) 강재 고정



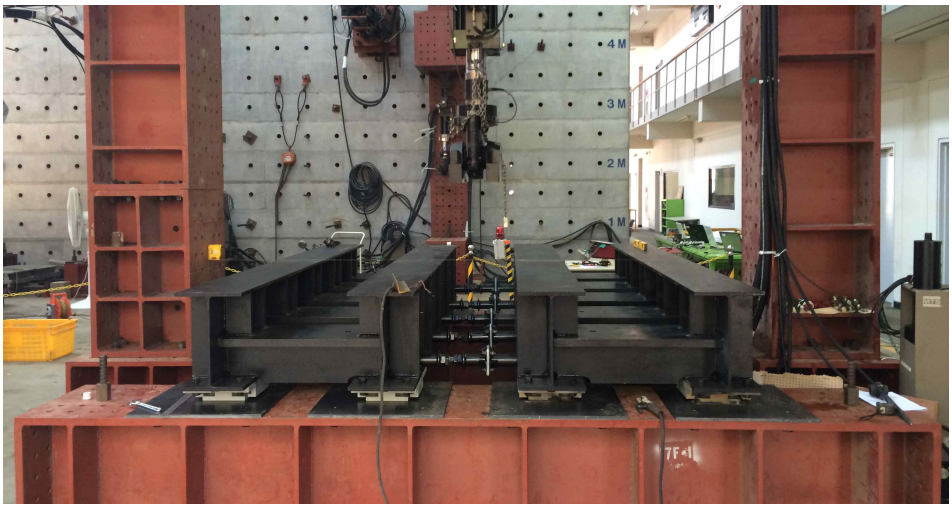
(b) 세부 용접



(c) 마무리 작업



(d) 강재 용접작업 완료



(e) 제작 완료

그림 2.77 횡단궤도시스템 제작 전경

① 용접부의 검사

㉮ 용접부 검사 시기는 용접 완료 후 시행한다.

㉯ 용접작업은 용접절차서(WPS)에 따라야 하며, 독립검사기관의 엄격한 검사를 받아야 한다.

㉰ 방사성 투과시험의 합격기준

- 인장 및 교번하중이 작용하는 부재의 용접부 : 2류 이상 합격

- 압축 및 전단하중이 작용하는 부재의 용접부 : 3류 이상 합격

㉲ 필릿용접부분에 대한 검사는 복부판과 플랜지 연결부분의 전용접 길이 10%에 대하여 자분탐상검사(KS D 0213)를 실시한다.

㉳ 부분용입 그루부 용접부에 대해서는 단부를 포함하여 전용접 길이 10%에 대하여 초음파 탐상검사를 실시한다.

㉴ 부부재의 필렛용접부는 자분탐상검사를 하지 않아도 된다.

㉵ 인장 또는 교번하중을 받는 맞대기 용접부에 대한 검사는 방사선 투과검사(2매)로 하고 나머지 길이는 초음파탐상으로 전수검사를 실시해야 한다.

㉶ 압축응력이나 전단응력을 받는 맞대기 이음부는 50%의 초음파탐상검사를 실시해야 한다.

㉷ 검사 후 불합격 이음은 이음 전체 부위를 검사하여 결함의 범위를 확인하고 결함 보수방법에 따라 보수한 후 감독원의 확인을 받아야 한다.

㉸ 용접비드 표면은 오버랩, 균열, 크레이터 등의 외관검사를 시행하고 용접치수, 목 두께 등의 치수검사도 병행 실시하여야 한다.

(나) 받침

① 시공 전 준비사항

㉮ 받침의 기술적 사항을 충분하게 숙지한 후, 상부 구조별로 작업방법을 택하여 그 방법에 맞게 횡단궤도시스템용 받침을 제작의뢰 하여야 한다.

㉯ 받침은 시공 전 반드시 제작사의 도면을 미리 점검하여야 한다.

㉰ 받침이 설치되어질 상부의 Block-Out은 설계도에 따라 정확하게 마감되어야 하며, 항상 청결한 상태를 유지한다.

㉱ PCL층의 철근 배근 시, 탄성받침 하부판의 스터드 볼트와 철근이 간섭을 받지 않도록, 철근 배근 조립 작업을 할 때 미리 탁본(Template) 등을 사용하여 철근 배근이 간섭받지 않도록 하며 받침부 방석철근과 PCL 철근의 이격거리를 충분히 확보하거나 절연처리하여 전기절연 성능을 확보하여야 한다.

㉲ Block-Out의 표면은 Chipping하여 우둘투둘하게 마감한다.

② 보관 시 주의사항

㉮ 현장에 도착한 받침은 지게차 혹은 크레인을 사용하여 조심스럽게 하차한다.

㉯ 서늘하고 통풍이 잘되는 창고에 보관하여야 하고, 수평 상태를 유지하며 지면으로부터 10cm~20cm정도 높게 보관한다.

㉰ 소운반시 제품의 도장이 벗겨지지 않도록 주의하며, 외부 충격으로부터 보호되어야

한다.

③ 설 치

㉮ 받침이 설치될 위치를 정확하게 측량하여야 한다.

㉯ 측량된 결과에 따라 받침 하부판을 가거치한다.(Block-Out 내부에 Set Anchor를 박아 받침 거치 후, 높이 및 수평을 조절할 수 있도록 한다.)

㉰ 받침 거치 후 설계도면에 따라 종, 횡 방향이 정확하게 거치되었는지 확인한다. Set Anchor 위에 받침 하부판을 올려놓은 후, Set Anchor의 조절 나사를 돌려 Level을 맞춘다.

㉱ 정확한 거치 확인 작업 후, 이상이 없으면 무수축 Mortar를 타설한다.

㉲ 무수축 Mortar는 고강도(fck=60MPa 이상)이어야 하며, 주입 시에는 모든 공기가 빠져나가 받침 하단 콘크리트 타설 부위에 Air Pocket이 생기지 않도록 한다.(Mortar을 한쪽 측면에서만 주입하며, W/C는 공급사의 시방서를 준수하여야 한다.)

㉳ Mortar 채움 모서리는 받침 하부판과 수평을 이루어야 하며, 설계도면과 일치하여야 한다.

㉴ 습윤 양생을 실시하여 Mortar의 Crack 발생을 방지하여야 한다.

㉵ 무수축 Mortar의 소요강도가 발현될 때까지는 받침에 어떠한 하중도 재하되지 않도록 임시 가받침(작키)을 설치하여 횡단궤도시스템을 지지토록 함으로써 Level을 유지할 수 있도록 조치하여야 한다.

㉶ 받침 상부판과 횡단궤도는 Fillet 용접 또는 볼팅 처리 되어야 한다.

㉷ 용접 후 용접부위 및 주위를 깨끗이 청소하고 필요시 부분 도장을 반드시 실시한다.

(다) 가설

① 운반 및 가설시는 현장조건에 따라 사용장비, 운반로 가설방법 및 순서 등을 고려하여 계획한다.

마. 횡단궤도시스템의 제작 절차 및 시공 절차 검토

(1) 횡단궤도시스템의 제작 절차

횡단궤도시스템의 제작은 현장용접 혹은 현장타설 콘크리트량을 최소화 하여 제작품질 및 시공품질을 확보하기 위해 사전에 공장에서 정밀 제작되어 현장에 투입되게 된다. 횡단궤도시스템은 크게 강재주형 및 받침으로 구성된다.

본 연구에서 제안하는 새로운 형식의 횡단궤도시스템은 독일 및 중국의 횡단궤도시스템과 달리 사전 공장제작을 기반으로 하고, 고속철도 및 일반철도에서 그 성능 및 품질이 입증된 체결장치를 적용함으로써 횡단궤도시스템의 현장 적용성에 있어 범용성을 향상시키고자 했으며 본선 일반궤도구간과 궤도재료의 일관성을 유지할 수 있도록 고안하였다.

횡단궤도시스템의 제작에서는 강구조로써 그 기능과 성능을 확실하게 확보 할 수 있도록 강판의 조립 및 용접이 매우 중요한 요소이며 용접부에 대한 비파괴시험을 통한 제작품질 확보가 중요하다.

횡단궤도시스템의 포트받침 역시 공장에서 사전 설치되어 현장에 투입되게 된다. 현장시공 여건에 따라 가변적이나 Top-down 시공방법 채택 시, 횡단궤도시스템의 포트받침의 상부 플레이트는 공장에서 횡단궤도구조의 하부강판의 소정의 위치에 정밀하게 4면 용접으로 설치되며 받침 하부플레이트에는 현장에서 받침을 설치하기 위해 필요한 앵커 소켓까지 설치가 완료된 상태로 공장제작이 마무리 되게 된다. Bottom-up 시공시에는 포트받침이 사전에 현장설치가 완료된 상태에서 횡단궤도시스템과 볼트로 고정되게 되므로 공장에서는 횡단궤도시스템의 종방향 거더 하부 볼트구멍을 천공하여야 한다.

(2) 횡단궤도시스템 현장 시공 절차(건설선 콘크리트궤도, Top-down)

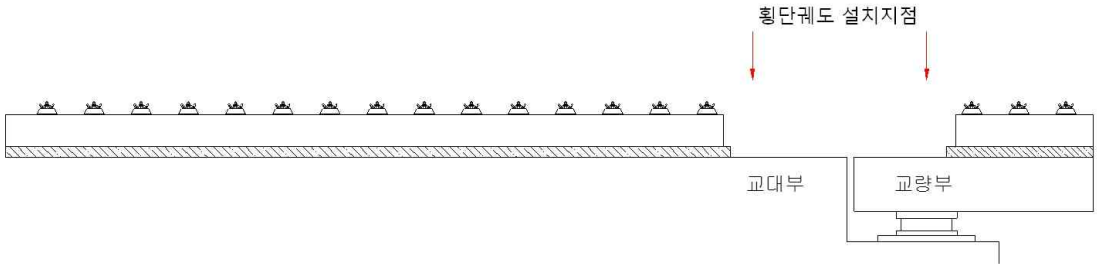
횡단궤도시스템의 현장 시공은 받침의 시공으로 요약될 수 있다. 횡단궤도시스템은 전술한 바와 같이 받침을 포함한 전체 시스템이 공장에서 정밀하게 사전 제작되므로 현장 시공절차는 받침시공 및 체결장치 조립에 국한됨으로써 다른 일반적인 궤도시공절차에 비해 비교적 간단하다.

그림 2.78은 횡단궤도시스템의 현장 부설을 고려하여 작성한 현장 시공순서도(건설선 콘크리트궤도, Top-down)를 나타낸다. 횡단궤도시스템이 설치되는 위치는 그림 2.78(a)와 같이 교량상 TCL위치이며, 교량구조물의 단면과 경합되는 부분은 없다. 횡단궤도시스템은 교량시공이 완료된 이후에 궤도시공 인수위치부터가 시공대상 위치로써 교량단면이 아닌 콘크리트궤도 단면의 일부(교량상 TCL)를 대체하는 시스템이다. 따라서 교량상부구조물의 바닥판 콘크리트를 일부 제거하는 등의 작업은 불필요하므로 교량의 구조적인 측면에서 전단취약부에 대한 문제는 없을 것으로 판단된다.

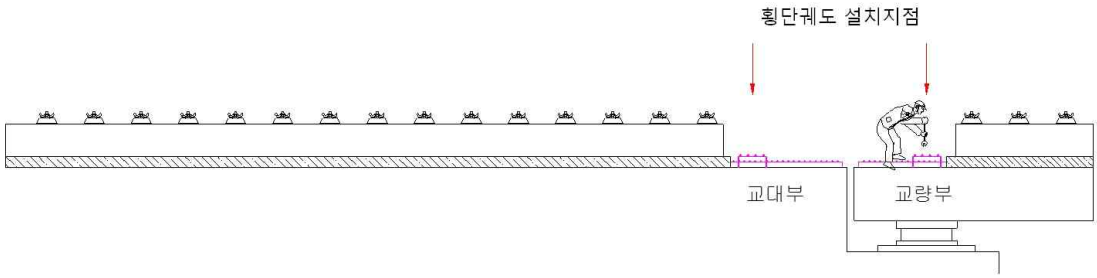
전술한 바와 같이 교대부의 경우 교량 연속부, 즉 교각부 보다 상대적으로 상향력이 크게 발생한다. 따라서 본 연구에서 제시한 횡단궤도시스템의 현장적용 대상 개소를 교대부로 선정하고 그림 2.78과 같이 횡단궤도시스템을 교대부 TCL에 배치하는 것을 검토하였다.

횡단궤도시스템의 시공에서 가장 중요한 사항은 제한된 공간(RL~FL)하에서 인접 궤도와

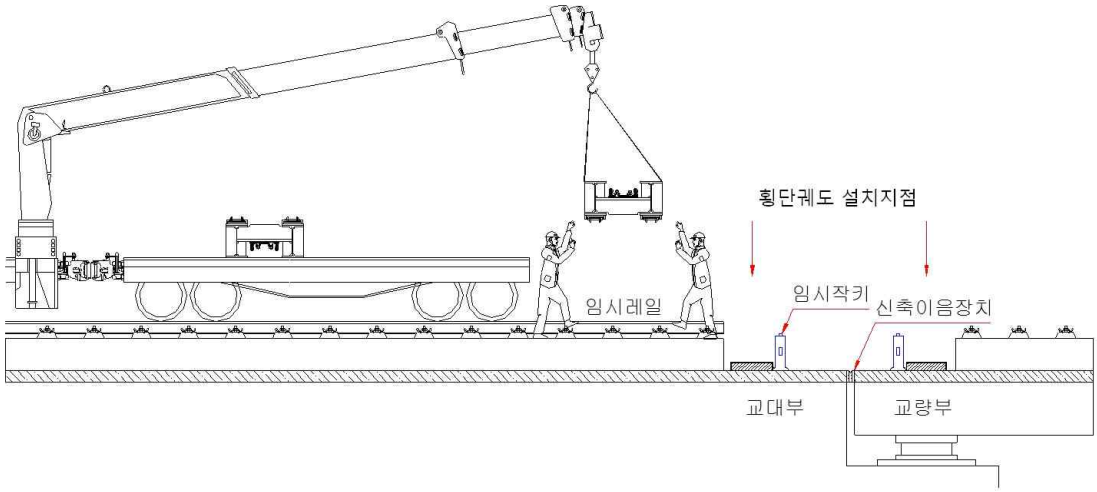
의 레일면고(RL)를 맞추어 시공하는 점을 들 수 있다. 그림 2.78(a)와 같이 횡단궤도시스템이 현장에 투입되기 이전에 궤도시공인수 위치인 PCL층의 상태를 파악하고 교량바닥판의 배수구배 등을 감안하여 횡단궤도시스템의 받침이 설치될 위치를 확보하고 사전 준비작업을 시행하여야 한다. 이후 그림 2.78(b)와 같이 건설선의 경우 PCL층 철근과 받침부의 방석철근 배근이 일괄적으로 시공되어야 한다. 받침위치에 맞게 받침부 방석철근을 배근한 후 모르타르를 타설하고 양생하여 횡단궤도시스템의 PCL층과 받침부를 완성한다(필요시 절연소재를 이용한 철근보호가 가능하다).



(a) 횡단궤도시스템 설치 준비

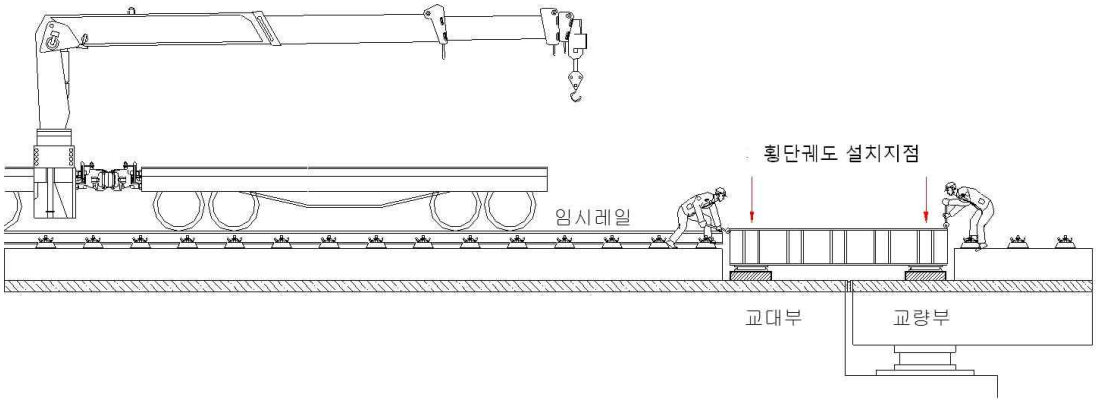


(b) PCL층 철근 배근, 횡단궤도 받침부 위치 확인 및 방석철근 배근

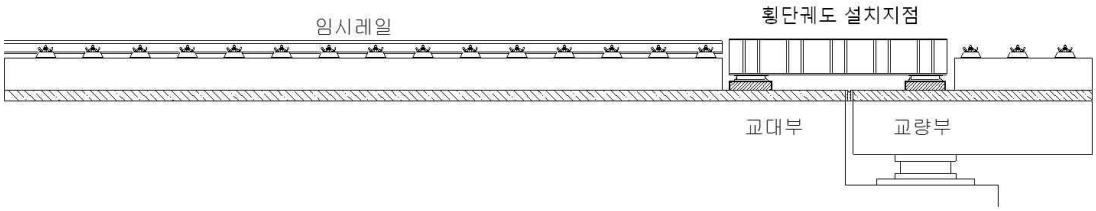


(c) 교량 신축이음장치 설치, 임시레일 설치 후 횡단궤도 운반 및 하역

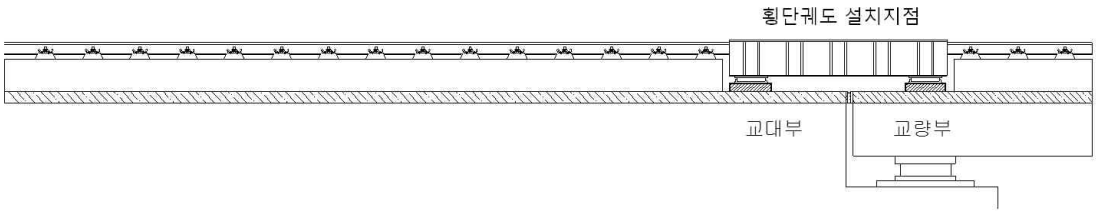
(레일체결장치 선조립 조건)



(d) 횡단궤도시스템 받침 조립



(e) 횡단궤도시스템 설치완료



(f) 임시레일 철거 후 장대레일 부설 및 체결장치 조립

그림 2.78 횡단궤도시스템 현장 시공순서도(건설선 콘크리트궤도, Top-down)

그림 2.78(c)와 같이 횡단궤도시스템의 레일면고는 인접궤도와 일치하여야 하며 이때 최소 4개 이상의 작키 가받침을 통해 정밀하게 레벨을 조정하여 설치위치를 확정한 후 횡단궤도시스템을 하역한다. 그림 2.78(d)와 같이 횡단궤도 받침을 조립한 후 임시레일을 철거하고 장대레일 부설 및 체결장치 조립의 절차로 횡단궤도시스템의 설치가 완성된다.

4. 현장 시험시공 계획

가. 횡단궤도시스템 현장 시험시공 개소 선정(안)

횡단궤도시스템의 현장시험 부설 위치는 최초 설계가 끝나고 시험부설업체 모집계획이 있는 철도종합시험선로 건설공사 구간을 현장시험 부설 개소로 계획하였다.

횡단궤도시스템은 철도교량상 단부 궤도에 작용하는 부상력과 압축력 및 신축거동 등과

같은 콘크리트궤도가 부설된 철도교량구조에서 해결해야할 구조적인 문제를 횡단궤도시스템의 자체적인 신축거동 및 추가 작용력 완화(소멸) 기능을 통해 단부에 작용하는 부반력 거동을 상쇄시켜 철도교량 및 궤도설계 시 일반구간과의 설계 일관성을 확보할 수 있는 구조체이다.

도시철도구간의 경우 교량지간이 상대적으로 짧고 이미 기 시공되어 영업운행 중인 노선들이 대다수이므로 운행선 궤도구조 개량에 준하는 수준으로 횡단궤도시스템의 현장시험부설이 이루어 질 수 밖에 없는 실정이다. 그러나 운행선 궤도개량공사는 매우 어려운 상황이며 더욱이 단경간의 도시철도구간은 본 횡단궤도시스템의 적용효과를 입증하기에는 적절하지 못하다고 판단되었다. 이에 건설선인 철도종합시험선로(오송시험선) 구간에 횡단궤도시스템을 적용하고자 한국철도시설공단의 철도시설성능검증을 완료하였다.

횡단궤도시스템의 현장 성능검증은 아래와 같이 실시설계(TK)중인 철도종합시험선로 구간에 시험시공을 계획하고 있다.





과업명	• 철도종합시험선로 건설공사 실시설계
공간적 범 위	• 충청북도 청원군 오송읍 ~ 세종특별자치시 전동면 일원
시간적 범 위	• 공사기간 : 착공(지정)일로부터 33개월 (단, 2016년 12월)
내용적 범 위	• 본선실측 : 12km989.98 • 용지측량 : 294,960m^2 • 지반조사 : 26공 • 실시설계 : 1식 (토공, 교량, 터널, 궤도, 시스템, 건축)

시·종점 좌 표

구 분	좌 표(GRS80)		
	X	Y	Z
시 점	446446.863	228671.602	131.31
종 점	450202.044	224185.599	145.95



그림 2.79 철도종합시험선로 건설공사 조감도

시험시공 이후에는 다음과 같은 현차주행시험 및 모니터링(최소 1년 이상)을 시행하고자 한다.

(1) 현차주행시험

현차주행시험은 본선 시운전 시험 및 개통 이후 실시하여 표 2.40의 시험항목 및 평가기준을 바탕으로 실시한다.

표 2.40 횡단궤도시스템 성능 요구조건

시험종류		평가항목		단 위	평가기준
현차 주행 시험	현장 설치 시험	궤도지지강성(측정치) ·궤도지지강성 변화율(≤350km/h)		kN/mm	본선과의 균일성 확보 (≤1.8)
		발생응력	레일저부응력(측정치) : 장대레일	MPa	≤ 130(허용응력) ≤ 90(평가기준치)
			체결구응력(측정치)	MPa	적용 전, 후 저감효과 입증
		단부 레일의 상향변위(측정치)		mm	적용 전, 후 저감효과 입증
		단부 레일의 상향변위 저감비		-	60% 이상
		탈선계수		-	≤ 0.8
		레일 두부 횡변위(궤간확대안정성)		mm	≤ 4
		충격계수(DAF) (t=1,Φ=0.2, V=300km/h, DAF : 1.326)		DAF	$\leq 1+t \cdot \Phi(1.0+0.5\frac{V-60}{190})$

(2) 장기 모니터링

열차 개통 후 최소 1년 이상 표 2.41과 같이 모니터링을 수행하여 횡단궤도시스템의 공용중 안정성 및 장기내구성능을 측정하고자 한다.

표 2.41 모니터링 항목 및 시험기준

항 목	시험항목	시험방법	합격기준
궤도틀림	궤도검측	궤도검측차 또는 그에 준하는 장비를 이용하여 궤도측정 (전·후 접속부 궤도 틀림 및 손상상태)	선로정비지침 궤도보수기준 적용, 통상적인 수준 이하의 궤도틀림 유지보수 횟수 및 난이도 확보
외관상태	구성품의 손상상태 (강재 및 포트받침) 균열	육안조사	① 강재, 포트받침 등 하중 전달 구조에서 구조적 안정성에 영향을 주는 균열 또는 손상이 없을 것 ② 체결장치 각 구성요소는 파손, 변형 등이 없을 것 ③ 레일의 이상마모 등 구성품의 조기손상(Premature failure)이 없을 것(단, 검증 대상 궤도구조의 특성에 기인하는 것이 아닌 선형, 차량 등 다른 요인에 의한 경우는 예외로 함)
타 분야와의 인터페이스	신호시스템 인터페이스	신호시스템 적합성 시험기준(철도시설공단) 적용	① 궤도회로저항 8Ω·km 이상 ② 운행선 시험 전후 타 분야와의 인터페이스 정상기능 유지

※ 횡단궤도시스템의 적용효과 검증을 위하여 동일 교량 조건에서 본 시스템이 설치 안 된 일반구간이나 특수체결구 설치 구간 등과 비교 가능토록 샘플 확보 후 상호 효과를 비교할 계획임.

※ 현장성능시험 평가 시 시공성 및 유지관리 등을 포함한 종합적 비교 분석 수행 예정임.

제 5 절 시스템 인터페이스 검토

1. 노반 인터페이스

가. R.L-F.L

횡단궤도시스템의 인터페이스 부분에서 가장 중요한 사항은 제한된 공간(RL~FL)하에서 인접 궤도와의 레일면고(RL)를 맞추어 시공하는 점을 들 수 있다. 레일면고(RL)와 교량바닥판 PCL 사이의 제한된 공간에 TCL로써의 성능과 기능을 만족할 수 있도록 횡단궤도시스템을 설계하는 것이 중요하다. 또한 받침의 높이 역시 여유치가 없는 조건을 감안할 때 횡단궤도시스템 자체의 형고가 비교적 낮으면서도 충분한 강성을 확보하여야 한다. 본 연구에서 제안하는 횡단궤도시스템의 단면은 고속철도 교량상 궤도표준단면을 이용하여 교량단부에 부설될 횡단궤도시스템의 높이와 폭원을 결정하였으며, 국내 철도설계기준을 준용하여 충분한 강성을 확보할 수 있으면서 기존 RL~FL의 인터페이스를 고려하여 설계하였으므로 해당 부분에 대한 문제는 없다.

나. 배수

횡단궤도시스템은 그림 2.80과 같이 슬래브 하부가 존재하지 않는 궤도시스템으로 받침을 제외하곤 횡단궤도시스템 자체가 교량상 PCL층과 일정 높이만큼 부상되어 있는 상태이기 때문에 횡단궤도시스템 하부로 배수가 되는데 문제가 없다. 따라서 횡단궤도시스템은 교량상 배수계획에 영향을 주지 않는다.

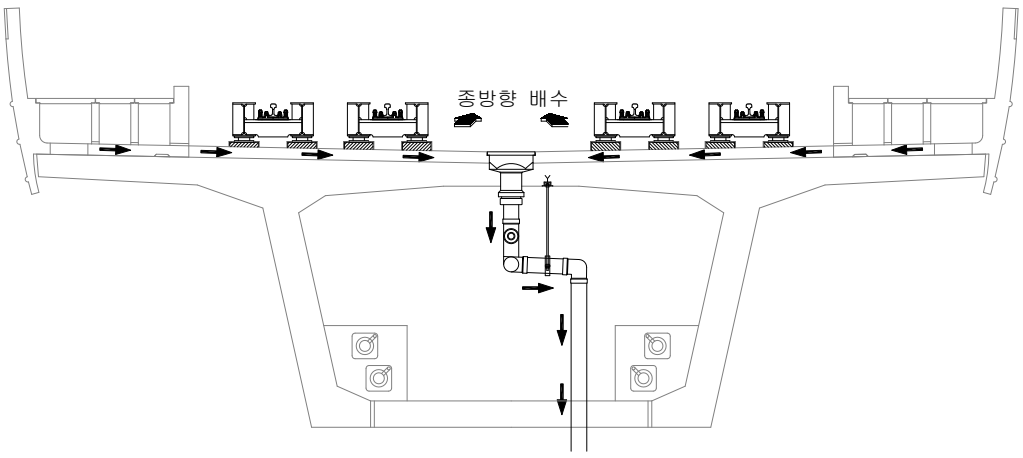


그림 2.80 횡단궤도시스템 배수계통도

다. 접속구간

일반 콘크리트궤도 구간과의 접속구간에서는 궤도의 높이차, 궤도지지강성의 차이 등을 고려해야 한다. 접속구간에서 인접궤도와의 높이 차이를 산정하고 이를 횡단궤도시스템의 Ⅱ형 가로보의 높이 조정으로 시공 높이를 정확히 설정한다면 특별한 시공 상의 문제는 없다. 또한 횡단궤도시스템 자체의 변위(처짐)는 최대하중 340kN 기준으로 약 0.7mm 미만으로 검토되어 실제 운행조건에서의 침하는 무시할만한 수준이므로 레일체결장치의 스프링강성을 인접 궤도구간과 일치시킨다면 궤도지지강성의 차이는 설계조건에서 조정이 가능 할 것으로 판단된다.

인접 궤도가 자갈도상궤도의 경우에는 횡단궤도시스템에 적용하는 레일체결장치의 스프링강성과 인접 자갈궤도구간의 침목간격을 조정함으로써 궤도지지강성의 변동수준을 설계기준치(1.8 이하) 이내로 조정이 가능하다.

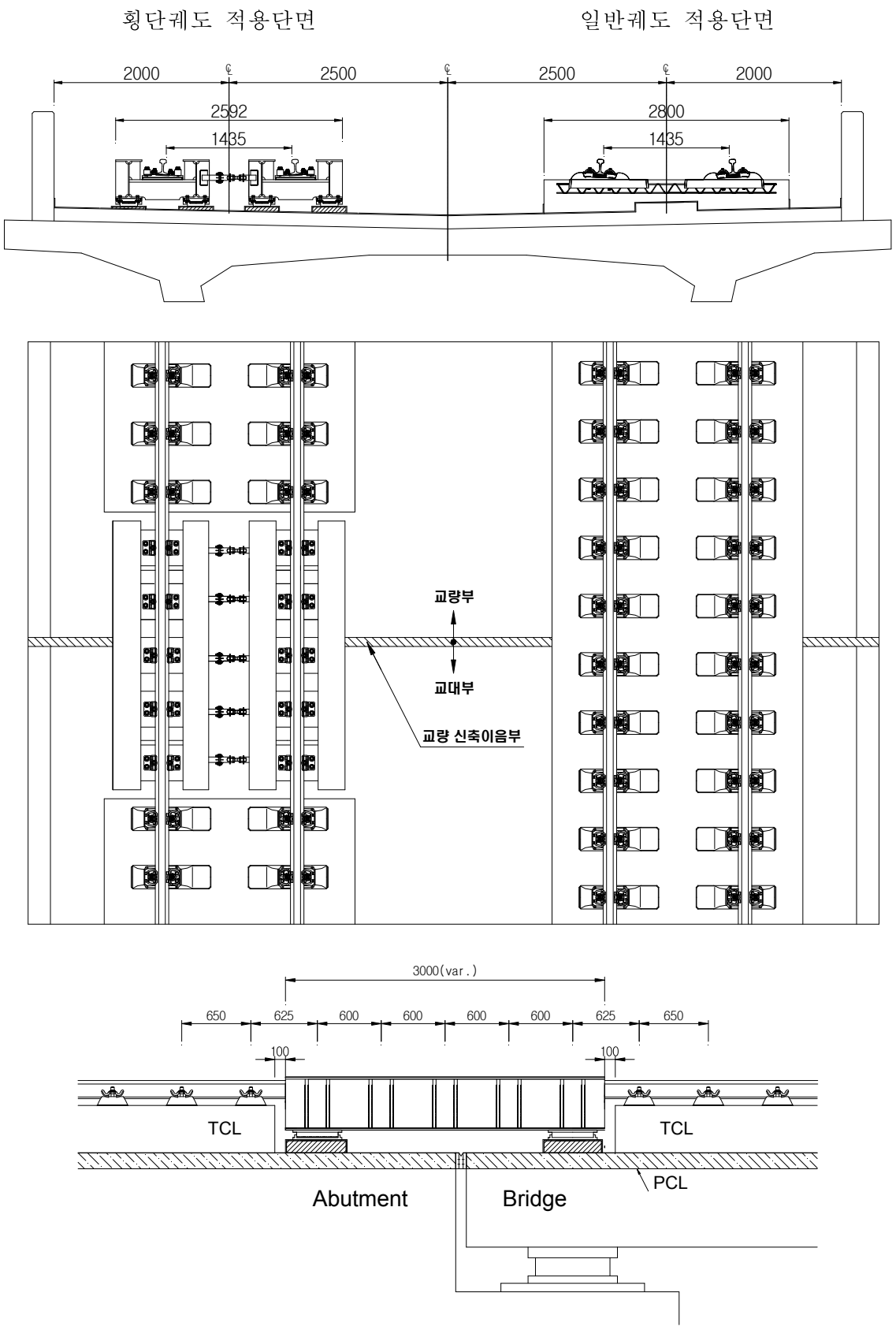
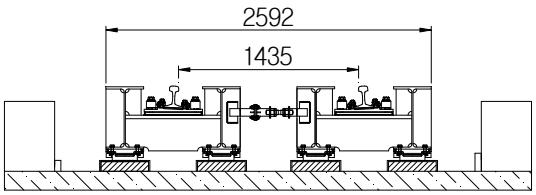
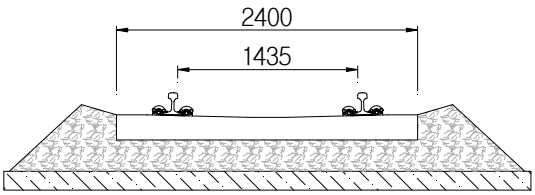


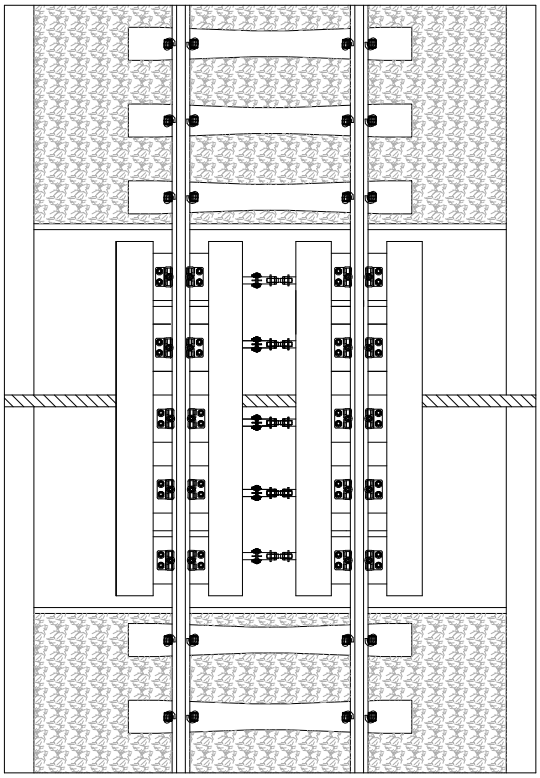
그림 2.81 횡단궤도시스템 시공개요도(콘크리트궤도)

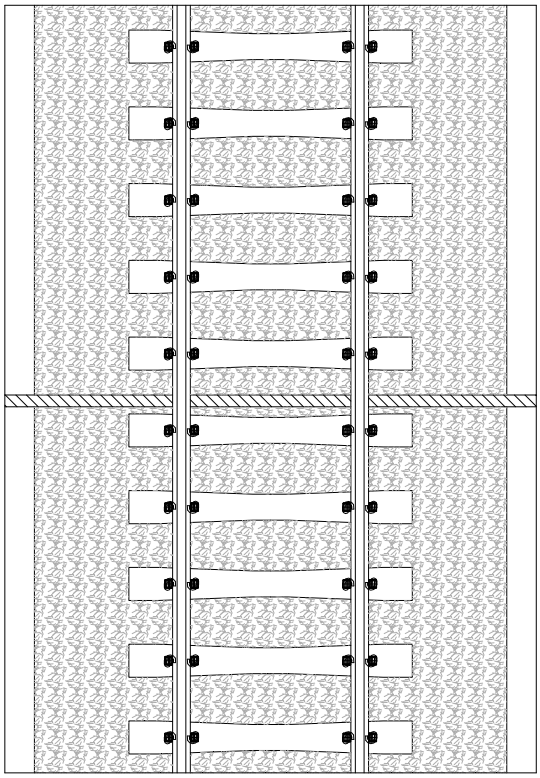
횡단궤도 적용단면



일반궤도 적용단면







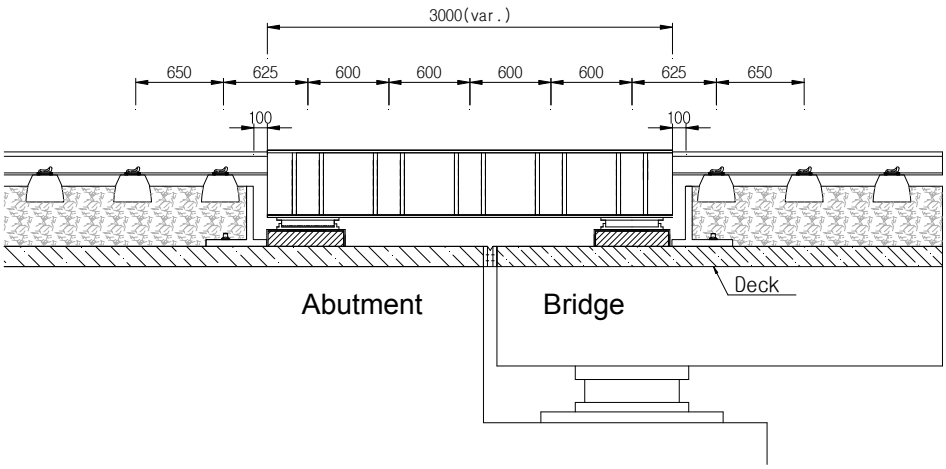


그림 2.82 횡단궤도시스템 시공개요도(자갈궤도)

2. 전기·신호 인터페이스

횡단궤도시스템에 대한 절연저항 측정 시험 내용은 다음과 같다.

가. 절연저항 측정 시험

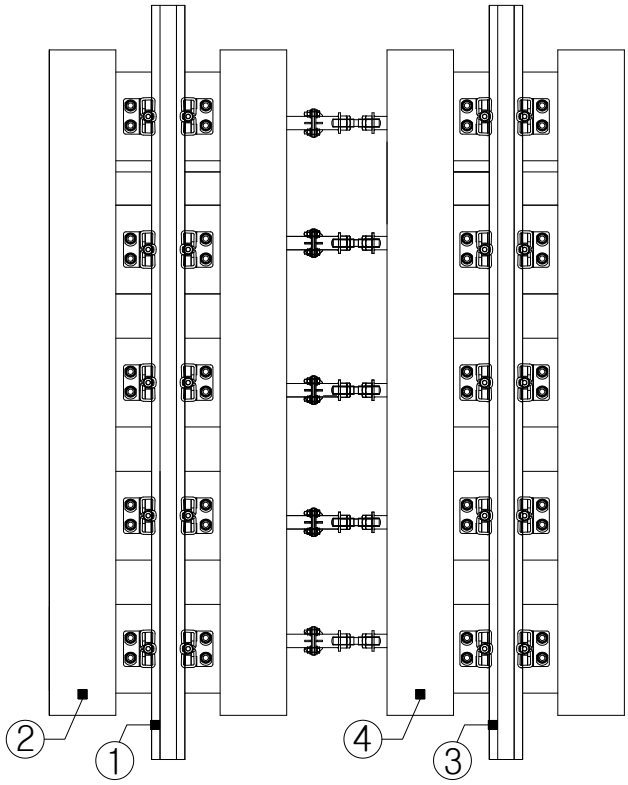


그림 2.83 횡단궤도 시험체의 절연저항 측정점

측정위치의 선정은 레일과 횡단궤도시스템간의 도통상태를 측정하고자 표 2.42와 같이 총 3개소의 측정점을 선정하였다.

표 2.42 측정점의 조합

측정점	설 명
1-2	좌측 레일과 좌측 거더 상면
3-4	우측 레일과 우측 거더 상면
1-3	좌측 레일과 우측 레일

나. 측정 결과

(1) 건조조건

표 2.43 건조상태에서의 절연저항 측정결과

측정점	측정 저항 값(MΩ/3m)
1-2	425
3-4	542
1-3	1,000

(2) 습윤조건(20분 살수 후, 즉시 측정)

표 2.44 20분 살수 후 즉시 측정한 절연저항 측정결과

측정점	측정 저항 값(MΩ/3m)	환산저항(Ω/km)
1-2	0.01	30
3-4	0.03	90
1-3	0.03	90

(3) 습윤조건(20분 살수 후, 20분 후 측정)

표 2.45 20분 살수 후 20분 경과 후 측정한 절연저항 측정결과

측정점	측정 저항 값(MΩ/3m)	환산저항(Ω/km)
1-2	0.01	30
3-4	0.03	90
1-3	0.03	90

다. 측정결과 요약

살수 후 절연저항 측정결과, 건조조건 대비 절연저항이 약 10^{-5} 수준으로 감소하였다. 따라서 최악의 경우가 고려된 “살수 후 저항”을 절연저항으로 고려할 수 있으며, 본 절연저항 시험에 사용된 횡단궤도시스템(시험체)의 살수 후 절연저항은 8Ω/km 이상(콘크리트궤도 기준)이므로 절연조건에서의 기준 값을 만족한다.

제 6 절 요 약

본 연구에 수록한 횡단궤도시스템의 주요 검토결과는 다음과 같다.

1. 횡단궤도시스템의 정의

횡단궤도시스템이란 자갈궤도 및 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 신축이음부에 설치되어 침목간격을 일정하게 확보할 수 있으면서, 콘크리트궤도의 경우에는 단부 레일의 변형 및 레일지지점에 발생하는 상향력 및 압축력을 저감시키고, 자갈궤도의 경우에는 자갈도상의 이완 및 궤도틀림을 저감시킬 수 있는 강재거더와 부상 방지 기능을 포함하는 포트받침으로 구성된 신형식 궤도시스템을 의미한다.

2. 횡단궤도시스템의 적용 범위

본 연구에서 제안하는 한국형 횡단궤도시스템은 그 목적이 단부 사용성 확보이므로 철도교량상 콘크리트궤도의 궤도-교량 상호작용력(단부 상향력 및 압축력)에 대한 안전성, 사용성 및 열차 주행안전성 확보를 비롯하여, 자갈궤도가 부설된 철도교량 단부 궤도의 기능 및 구조적 성능개선에 의미가 있다.

본 연구의 적용 범위는 다음과 같다.

가. 횡단궤도시스템 도입의 당위성

나. 횡단궤도시스템의 구조적 안정성(정·동적 안정성 및 피로내구성)

(1) 횡단궤도구조체(형상 및 구조)

(2) 횡단궤도용 포트받침(레일 및 레일체결장치 제외)

다. 시공성(현장적용성)

라. 시스템 인터페이스(전기절연성능)

3. 횡단궤도시스템 도입의 필요성(당위성)

가. 횡단궤도시스템은 과도한 수준의 상향력이 발생하는 철도교량(교각 및 교대부) 단부 궤도의 처짐 변형특성을 영구적으로 완화 혹은 소멸시켜 철도교량 단부 궤도구성품의 내구

수명을 향상시키고 구조물 접속부의 열차 주행안정성 및 승차감을 향상시킬 수 있다.

횡단궤도시스템은 철도교량 단부 궤도의 변형특성을 구조적으로 변화시키는 영구적인 대안으로써 단부의 레일 상향 곡률자체를 해소함으로써 단부 궤도에 발생하는 상향력을 제거 혹은 최소화시킬 수 있는 시스템이다. 따라서 단부 궤도에 특수 레일체결장치를 사용하여 레일체결장치의 성능에 의존하지 않으면서도 철도교량 단부 궤도라고 하여 특별하게 유지관리 및 보수에 주의를 기울일 필요가 없다.

나. 철도교량 단부 궤도는 레일체결장치의 성능만으로는 극복하기 어려운 수준의 상향력이 발생하여 현행 단부 궤도 사용성 확보를 위해 적용되고 있는 특수 레일체결장치로는 단부 궤도의 상호작용력을 일부 수용할 수 있을 뿐 구조적으로 완전히 해소시키지는 못한다. 반면, 횡단궤도시스템은 단부 궤도의 변형특성을 구조적으로 해결하는 영구적인 대안으로써 단부 궤도에 발생하는 상향력을 제거 혹은 최소화시킬 수 있으며, 특수 레일체결장치를 사용한다거나 레일체결장치의 성능에 의존할 필요 없이 어떠한 레일체결장치를 사용하여도 무방하다.

4. 횡단궤도시스템의 적용 범위 및 적용 시 기대효과

가. 단부 궤도의 변형수준이 큰 장경간 교량
(상향력 30kN 이상 개소 또는 경간장 35~40m 이상의 장대교량)
→ 장대교량설계 제약 조건(처짐증가) 해소를 통한 철도교량의 장대화 실현 가능

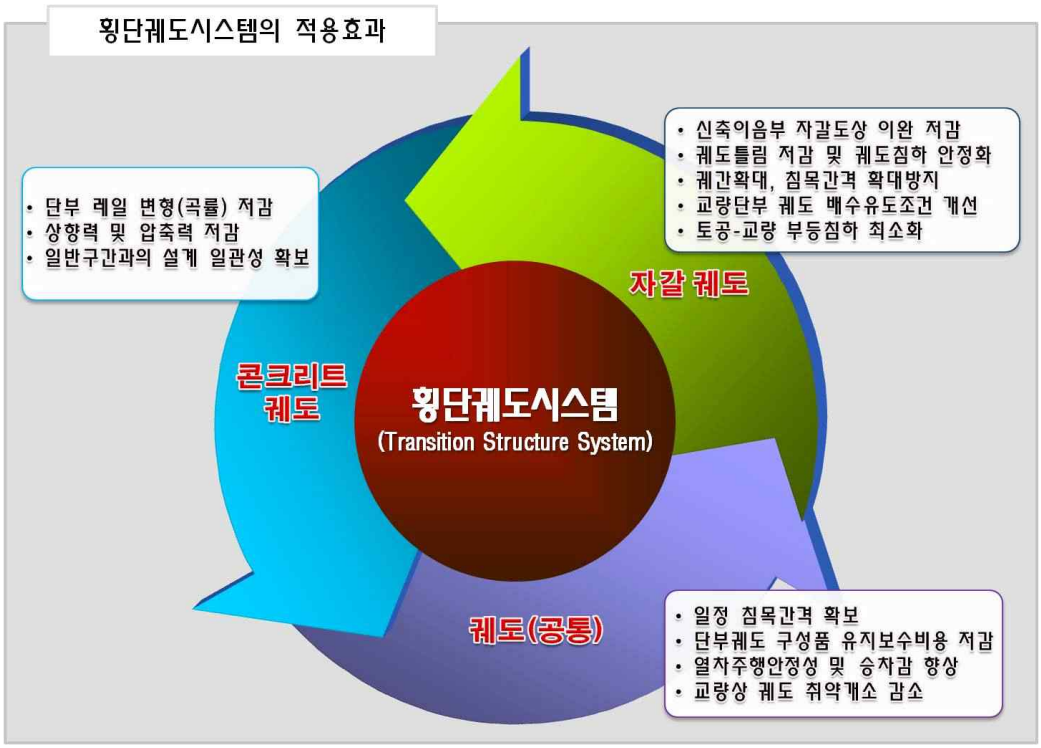
나. 사교(Skewed bridge) : 교량 신축부 침목 배치가 어려운 개소 적용 가능

다. 교각 및 교대부 등과 같은 구조물 접속구간 적용 가능

라. 일반철도, 광역철도, 도시철도 및 고속철도 구분없이 모든 철도교량 단부 궤도 적용 가능

마. 콘크리트궤도와 자갈궤도 구분 없이 적용 가능





5. 횡단궤도시스템의 구조적 안정성(조립성능시험) 및 시스템 인터페이스 검토결과

건설선에 적용이 가능한 횡단궤도시스템의 표준단면(설계도면) 및 구조계산서를 작성하였으며 현장시험부설을 위한 실물스케일의 횡단궤도시스템 시제품을 제작하여 공인된 시험기

관에서 구조적 성능을 비롯한 피로성능시험 및 전기절연시험을 수행함으로써 철도시설로써의 횡단궤도시스템의 적정성을 입증하였다.

가. 실물스케일의 횡단궤도시스템의 조립성능시험 결과, 횡단궤도시스템의 고유진동수는 약 60Hz로 나타나 KTX 열차의 고정축간 거리를 고려한 공진가능 속도대역이 약 4,037km/h 이상으로 산출되어 공진발생에 따른 구조적인 문제는 없을 것으로 분석되었다. 또한 횡단궤도시스템의 최대 처짐량이 최대하중 340kN 가력시 약 0.7mm 수준으로 나타나 횡단궤도시스템의 성능요구조건(0.9mm) 및 국내 궤도 면틀림 허용기준(1.2mm/3m)을 만족하였다. 또한 횡단궤도시스템 각부의 발생응력 역시 모두 허용기준치를 크게 하회하는 수준으로 나타나 횡단궤도시스템에 사용된 강재 단면의 적정성을 입증하였으며, 진동가속도 역시 0.15g 이내로 나타나 국내 콘크리트궤도 진동가속도 허용기준(0.5g) 및 횡단궤도시스템의 성능요구조건(0.25g)를 크게 하회하는 것으로 분석되었다. 결론적으로, 횡단궤도시스템의 처짐 및 응력, 가속도 등에 대한 모든 시험항목에서 횡단궤도시스템의 성능요구조건을 모두 만족하는 것으로 분석되었다. 또한 300만회의 반복피로시험 전, 후 횡단궤도시스템의 고유진동수 및 감쇠비를 평가함으로써 횡단궤도구조의 장기 피로내구성능 및 구조적 건전성을 입증하였다. 따라서 본 횡단궤도시스템은 윤중변동수준(충격효과)을 감안한 국내 철도하중(KTX 실열차하중 및 설계활하중(LS-22, HL-25))에 대한 충분한 내하력을 확보하고 있음을 입증하였다.

나. 횡단궤도시스템에 대한 시스템 인터페이스(전기 절연 성능) 검토결과, 살수 후 습윤조건에서의 전기 절연 저항이 8Ω/km 이상으로 평가되어 절연조건에서의 기준값을 만족하여 횡단궤도시스템의 전기 절연 성능을 입증하였다.

6. 횡단궤도시스템의 현장적용성 검토

횡단궤도시스템의 현장적용(현장시험부설)을 위한 설계, 제작 및 시공지침을 비롯한 성능요구조건을 도출하고 횡단궤도시스템 표준단면도, 상세도, 시공순서도, 배수계통도, 받침부 철근배근도를 작성함으로써 건설선 설계 및 시공에 적용할 수 있는 정량적인 성과물을 도출하였으며, 향후 횡단궤도시스템의 현장 적용성 평가 및 거동예측 시 활용이 가능할 것으로 판단된다.

제 7 절 결 론

횡단궤도시스템은 철도교량상 단부 궤도의 사용성 확보를 위해 교량 단부 궤도에 설치되는 신형식 궤도구조로써 철도교량상 궤도-교량 상호작용력(단부 부상력, 압축력)에 대한 궤도구성품의 안전성, 사용성 및 열차 주행안정성을 확보하기 위해 개발되었다.

본 연구에서는 국내·외 관련기술 동향조사 및 분석, 철도교량 단부 궤도의 역학적 거동특성 분석, 횡단궤도시스템의 설계 및 구조안정성 검토를 비롯하여 공인시험기관(KOLAS)에서 수행한 실대형 조립성능시험 및 평가 결과를 수록하였다. 횡단궤도시스템의 적용효과에 대한 원천기술연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원한 연구과제를 통해 입증하였으며 단부 궤도-교량 상호작용력의 발생수준을 획기적으로 저감시킬 수 있는 한국형 횡단궤도시스템의 표준단면과 성능요구조건을 도출함으로써 실제 건설선에 적용하기 위한 설계도면(표준단면도, 상세도, 시공순서도, 배수계통도, 받침부 철근배근도) 등과 같은 제반검토를 완료하였다.

횡단궤도시스템은 강구조 형식으로 설계된 저형고 고강성 궤도시스템이며, 이러한 강구조체 저부에 포트받침을 설치하여 교량상판과 궤도구조를 구조적으로 분리시키는 시스템으로써 교량-궤도 상호작용력 저감에 매우 유리한 시스템이다. 또한 설계속도 및 대상교량의 경간장, 신축량 등에 따라 적절한 시스템 설계가 가능하여 모든 교량구간에 적용이 가능함을 실험 및 해석적으로 분석하였다.

이상 본 연구에서는 횡단궤도시스템의 주요특징을 서술하고 적용 범위 및 방법을 제시하였으며 시스템 설계, 구조안정성 및 단부 궤도-교량 상호작용력 저감을 위한 횡단궤도시스템의 적용 효과를 분석하였다. 또한 현장시험시공이 가능하도록 호남고속철도 교량상 궤도 표준도를 바탕으로 실시설계에 준하는 시스템 설계를 실시하여 횡단궤도시스템의 구성요소 설계결과와 조립성능시험결과를 비롯하여 시공 및 유지보수방안, 시스템 인터페이스 검토 등 종합결과를 제시하였다.

향후 현장시험시공을 통해 실제 주행차량에 대한 횡단궤도시스템의 구조적 성능 및 장기내구성능을 확인함으로써 철도시설로써의 시스템의 성능 및 적정성을 평가하고자 한다.

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적

제 1 절 시제품제작

1. 1차년도(교량-교대-횡단궤도시스템)

표 3.1 1차년도 횡단궤도시스템 시험체 제원

구 분		내 용	
시험체		교 량	연장 : 3.4m, 폭 : 2.8m
		교 대	연장 : 2.8m, 폭 : 2.8m
슬래브 궤도	궤도형식	도상 직결식	
	레 일	UIC 60	
	레일패드	Secant Stiffness 30-75MN/m, 패드두께 9-10mm	
	체결시스템	Pendrol SFC (Single Fast Clip)	
횡단궤도	시험체	2주형 강합성 거더	
	크기(H×B×L)	2400×2600×254(mm)	
	강종	SM490	
	콘크리트	C270($f_{ck} = 27MPa$)	

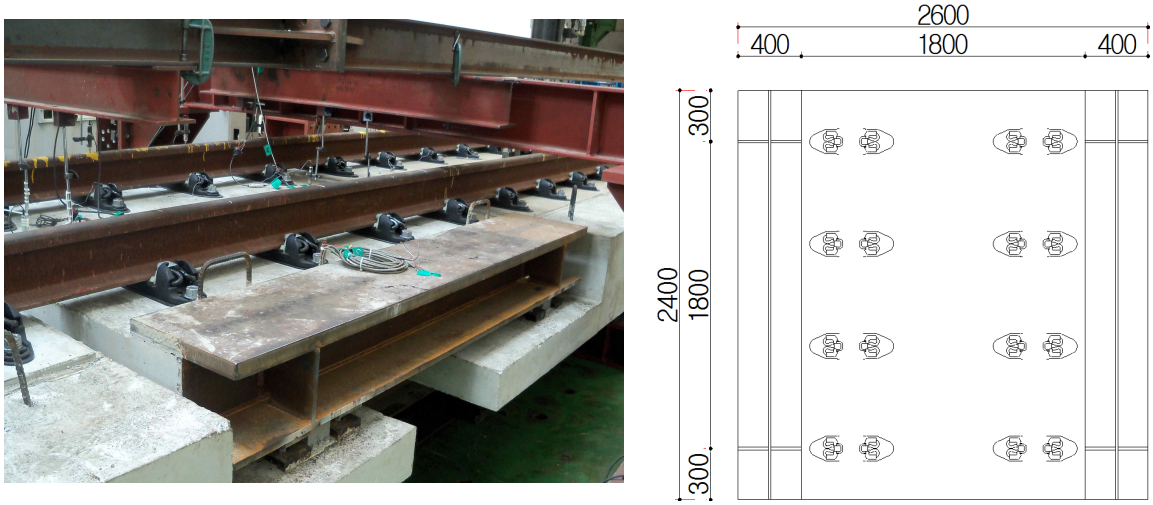


그림 3.1 1차년도 교량-교대부 횡단궤도 시험체

2. 2차년도(강합성구조 횡단궤도시스템)

표 3.2 2차년도 강합성횡단궤도시스템 시험체 제원

구 분		제 원
레일		UIC60
체결장치		Vossloh system300-1 (Ksta=22.5kN/mm)
침목		Rheda2000 Bi-block
강재두께	T-Beam (Welding)	3000×200×30t, 3000×188×20t
	Plate	150×2900×28t
강종		SM490
콘크리트		fck=45MPa
받침		탄성받침(150×250×30t) (K=121.56kN/mm)

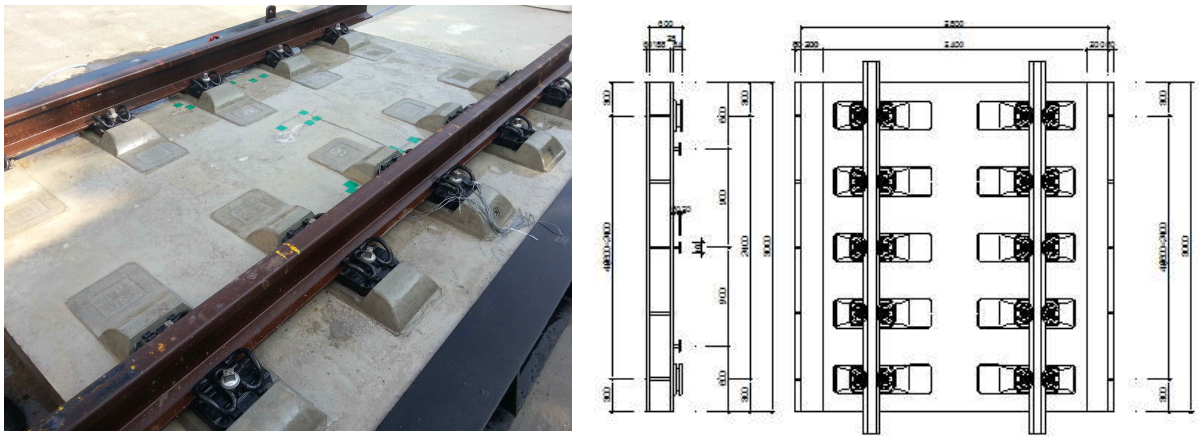


그림 3.2 2차년도 강합성구조 횡단궤도 시험체

3. 3차년도(강구조 횡단궤도시스템)

표 3.3 3차년도 횡단궤도시스템 시험체 제원

구 분		제 원
주거더 강재치수		2592 x 440 x 3000(mm)
주거더 강재두께	상, 하부 플랜지	18 mm
	복부	10 mm
	수직 보강재	30 mm
	Π형 가로보	38 mm
레일		UIC60(variable)
레일체결장치		system336 (직결식 탄성레일체결장치)
강 종		SM520(variable)
콘크리트		사용안함
받침		포트받침 수직력 : 300kN, 수평 : 240kN, 부상력: 80kN, 이동량: ±100mm

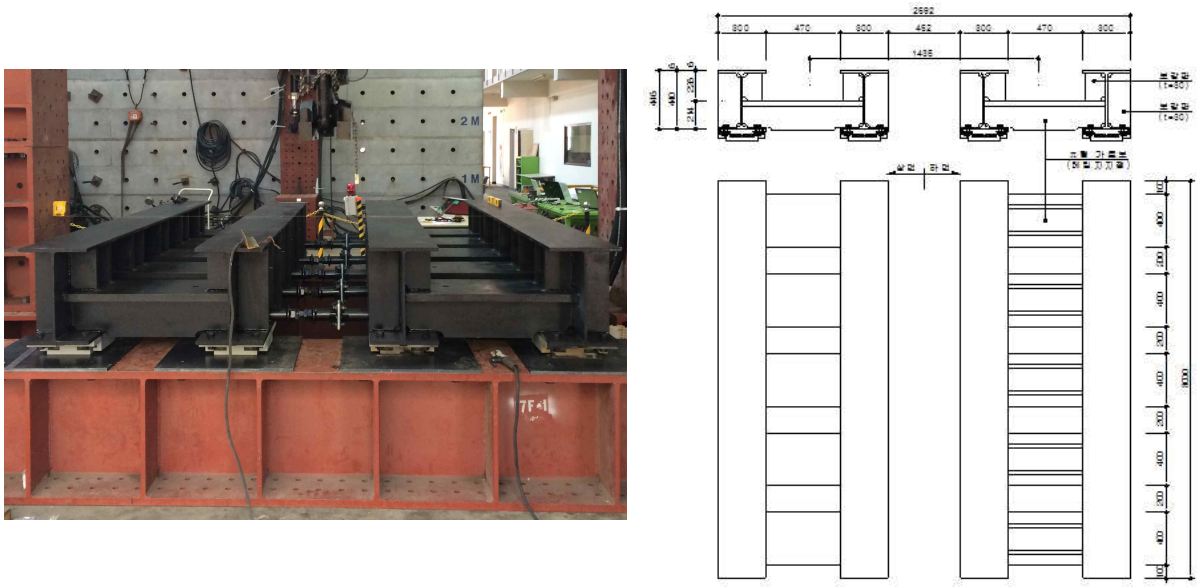


그림 3.3 3차년도 강구조 횡단궤도 시험체

제 2 절 성능시험

1. 교량/교대조합시험을 통한 횡단궤도시스템 적용 전,후의 철도교량단부의 역학적 거동특성분석

복합적인 동적하중이 재하되는 철도교량 및 궤도구조간의 상호작용력 동특성을 파악하기 위해서는 다양한 하중 조건에 대한 실험이 필요하다. 그러나 실 교량을 대상으로 수행되는 현장재하시험은 재하하중 외의 다양한 조건과 인자들에 따라 실험 환경이 제한적이므로 이를 고려한 축소모형 시험을 통해 상세하게 분석하는 것이 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 독일의 횡단궤도시스템과 국내 철도교 설계기준을 준용하여 설계 및 제작한 한국형 횡단궤도시스템을 이용하고, 콘크리트궤도(레일 및 레일체결장치 포함)가 고려된 교량 및 교대부를 조합한 실대형 시험체를 이용하여 횡단궤도시스템의 설치유무에 따른 단부 궤도의 사용성(uplift 및 압축력, 변위)을 검토함으로써 횡단궤도시스템의 적용 효과를 실험적으로 입증하고자 하였다. 이를 위해 최대하중, 가진주파수 및 하중진폭 등의 주요 매개변수를 고려한 횡단궤도시스템의 조합성능시험을 통해 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 상향력 저감 효과를 입증하고 단부 궤도구성품(레일상향변위, 레일저부응력, 체결구응력)의 거동특성을 분석하였다.



(a) 교량시험체



(b) 횡단궤도시험체 I

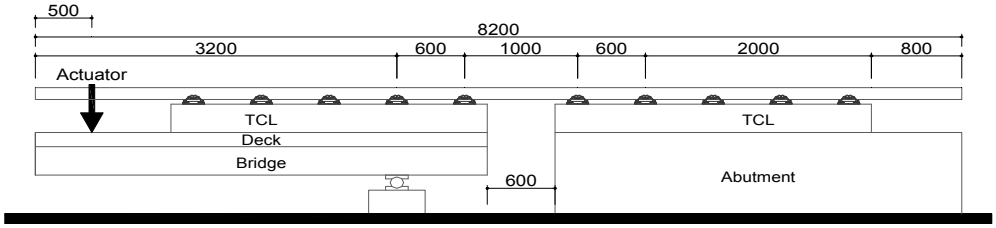


(c) 교대 시험체

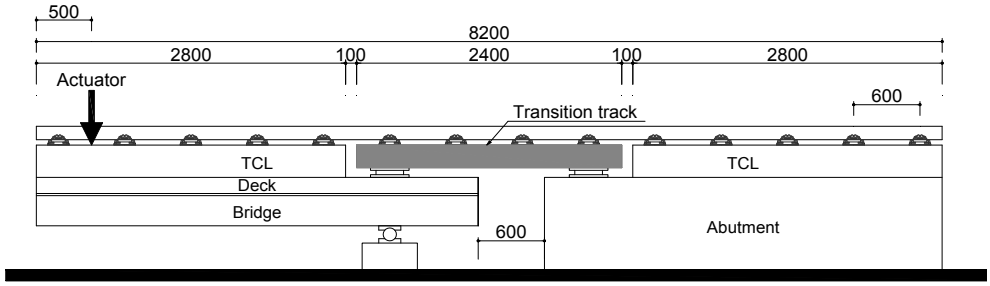


(d) 횡단궤도시험체 II

그림 3.4 실내시험 전경



(a) 횡단궤도시스템 적용 전 시험체

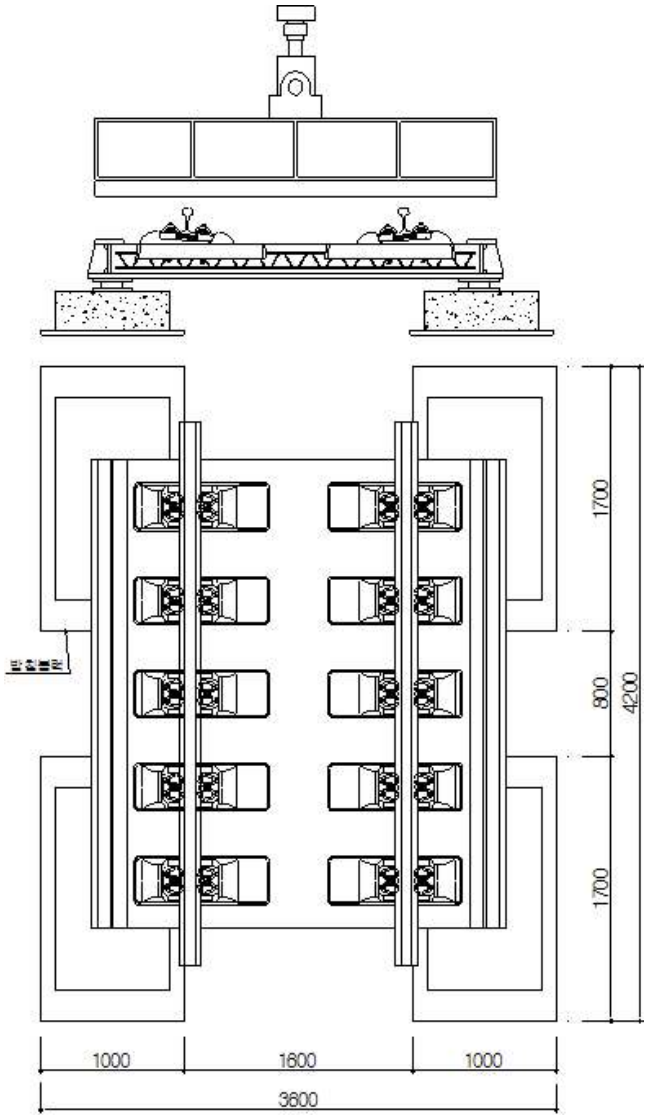


(b) 횡단궤도시스템 적용 시험체

그림 3.5 시험체 설치 개요도

2. 횡단궤도시스템의 정·동적 재하시험 및 반복피로시험을 통한 자체성능검증 및 거동특성 분석

철도교량 단부 궤도의 성능개선을 위해 개발된 횡단궤도시스템에 대한 정·동적 거동특성 및 요구조건을 수치해석 및 실내시험을 통하여 분석하는 것이다. 본 연구에서는 국내 고속철도 궤도설계기준을 바탕으로 설계된 횡단궤도시스템에 대한 수치해석을 수행하고 횡단궤도시스템의 정·동적 거동특성을 분석하였다. 연구결과, 본 연구에서 적용한 횡단궤도시스템은 국내 철도하중에 대하여 충분한 정·동적 구조안정성을 확보할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 또한 철도하중에 대한 피로시험을 수행하였으며, 피로시험에 따른 횡단궤도시스템의 중립축 변화를 비롯한 고유진동수 및 감쇠비와 같은 동특성을 실험적으로 산출하여 피로시험 전과 비교하여 그 결과를 제시하였다. 또한 수치해석을 수행하여 실험결과의 비교분석하였다. 연구결과, 실험결과와 해석결과가 비교적 잘 일치하여 본 연구에 적용한 해석모델은 적정한 것으로 분석되었으며, 피로시험에 따른 횡단궤도시스템의 중립축 및 동특성 변화가 매우 미소한 것으로 나타나, 국내 고속철도 궤도설계기준을 준용하여 설계, 제작한 횡단궤도시스템은 국내 철도하중 및 충격효과를 고려한 피로하중에 대한 장기내구성능 확보에 문제가 없음을 실험적으로 입증하였다.



(a) 시험체 개요도

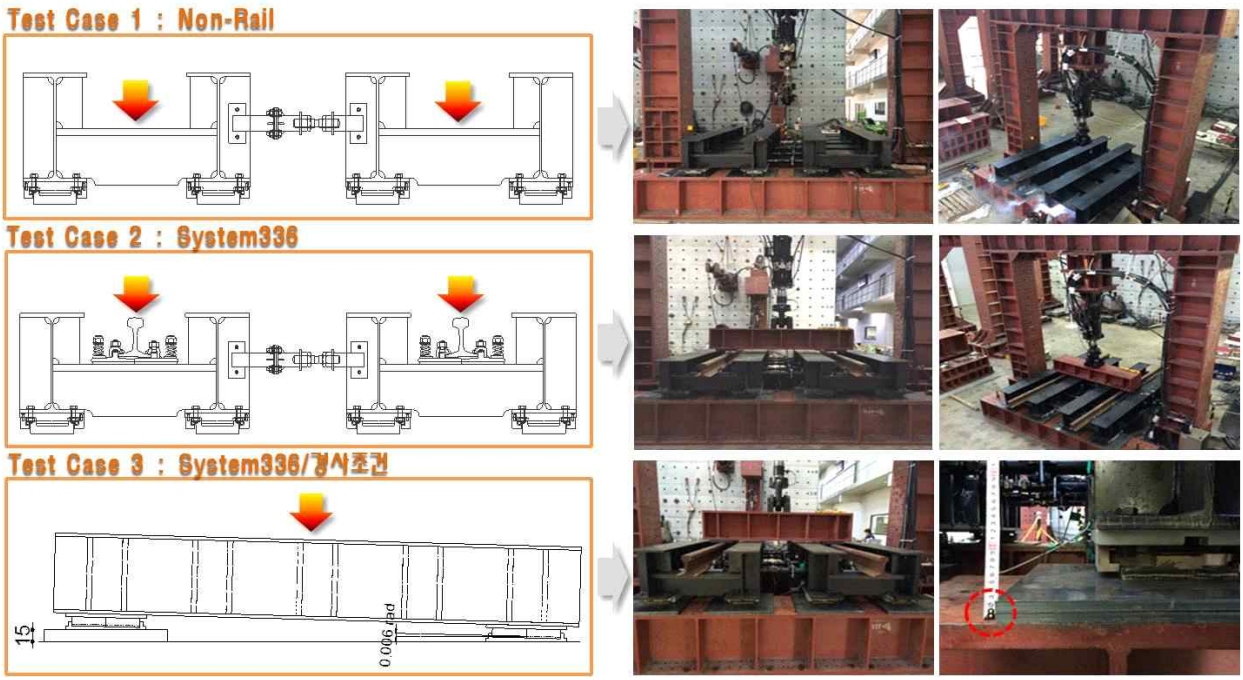


(b) 시험체 전경

그림 3.6 시험체 개요도 및 전경

3. 횡단궤도시스템의 현장적용성 검토를 통한 보완/상세설계 후 성능검증시험

건설선에 적용이 가능한 횡단궤도시스템의 표준단면(설계도면) 및 구조계산서를 작성하였으며 현장시험부설을 위한 실물스케일의 횡단궤도시스템 시제품을 제작하여 공인된 시험기관에서 구조적 성능을 비롯한 피로성능시험 및 전기절연시험을 수행함으로써 철도시설로써의 횡단궤도시스템의 적정성을 입증하였다. 또한 향후 건설선에서 횡단궤도시스템에 영향을 미칠수 있는 매개변수를 설정하여 시험한 결과 횡단궤도시스템의 처짐 및 응력, 가속도 등에 대한 모든 시험항목에서 횡단궤도시스템의 성능요구조건을 모두 만족하고 매개변수에 따른 시험결과의 차이가 미소한 것으로 분석되었으며 300만회의 반복피로시험 전, 후 횡단궤도시스템의 고유진동수 및 감쇠비를 평가함으로써 횡단궤도구조의 장기 피로내구성능 및 구조적 건전성을 입증하였다. 또한 횡단궤도시스템에 대한 시스템 인터페이스(전기 절연 성능) 검토결과, 살수 후 습윤조건에서의 전기 절연 저항이 8Ω/km 이상으로 평가되어 절연조건에서의 기준값을 만족하여 횡단궤도시스템의 전기 절연 성능을 입증하였다.



(a) 시험체 개요도 (b) 시험체 전경

그림 3.7 시험체 개요도 및 전경

제 3 절 주요 연구성과

1. 학술적 성과

국내외에서 궤도 유지관리비용 저감 및 안정적인 승차감 확보를 위해 콘크리트 궤도 부설이 늘어나고 있으며 철도교량은 장대화 되고 있는 추세이다. 일반적인 자갈도상궤도는 교량상판과 궤도(레일 및 침목) 사이에 도상 자갈이 위치하여 구조적으로 교량구조와 궤도구조는 분리되어 있다.

하지만, 콘크리트 궤도는 교량상판에 궤도 콘크리트층(TCL)이 탄성분리재에 의해 구조적으로는 분리되어 있으나 상대적으로 중량과 강성이 큰 궤도 콘크리트층은 교량의 거동에 종속적으로 거동하며 교량 상부구조는 궤도 콘크리트층의 궤도지지층으로써 궤도 콘크리트층의 변위를 전달받고 하중을 분산시키며 궤도 콘크리트층 자체의 하중부담을 경감시켜주는 구조적인 역할을 수행하게 된다. 따라서 궤도 콘크리트층에 고정된 레일 및 레일지지점은 교량구조의 거동에 직접적인 영향을 받는 구조적인 특징을 가지고 있다. 또한 콘크리트 궤도가 부설된 교량 단부에서는 열차하중에 의한 단부 회전각 발생, 교량기초의 침하 및 교량 상판의 상·하연 온도차 등에 의해 교량 상판이 정, 동적으로 거동하게 되어 단부 궤도가 변형되고, 이러한 궤도의 변형은 궤도 구성품(레일 및 레일체결장치)에 직접적인 상호 작용력으로 작용하게 된다. 따라서 콘크리트궤도가 부설된 교량 단부 사용성을 확보하는 측면에서 궤도-교량의 상호작용에 대한 현상을 이해하는 것이 필요하다.

철도교량 단부 궤도의 상호작용력에 대한 기존의 국내 연구결과는 교량 단부에 작용하는 상호작용력의 영향 인자로 교량의 기하학적 특성(교량받침~토목신축이음매간 거리, 교량받침～레일 체결장치간 상대위치)과 교량의 최대 처짐량을 비롯하여 레일체결장치의 스프링 강성 등에 대한 매개변수 연구가 수행된 바 있다. 이러한 수치해석적인 방법은 교량 및 궤도 설계 측면에서는 유용할 수 있으나, 이러한 설계과정에 적용하는 분석절차를 이용하여 공용중인 교량의 궤도-교량 상호작용력 특성을 평가하기에는 여러 가지 제약요인이 있다. 실제 교량에서 발생되는 교각의 부등침하 및 교각의 회전(휨)은 공용상태에서 열차하중에 의한 변형이라기 보다는 환경 및 노반조건에 영향을 받아 발생되는 장·단기 변형특성으로써 주행시험을 통한 측정으로 이러한 교량 하부구조물의 변형이 단부 궤도에 미치는 영향수준을 추출해 내기에는 현실적으로 매우 어렵다. 하지만 이러한 교각의 침하 및 기타요인으로 인한 단부 궤도의 단차는 단부 궤도에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한 교량 단부의 궤도구성품은 일반적인 토목구조물의 시공오차 보다 매우 미소한 수준의 변형에도 심각한 손

상 및 장기내구성에 직접적인 영향을 받을 수 있으며, 현장시공 과정에서 발생하는 단부 궤도의 단차를 비롯하여 공용기간 중 발생 가능한 레일패드(탄성패드)의 열화에 따른 경화, 두께감소 등에 따라 단부 궤도의 변형특성은 영향을 받게 될 수 있다. 따라서 이러한 다양한 현장요인들에 의해 공용중인 교량 단부에서 단부 회전의 수준이 설계수준에서 안정적으로 거동을 하더라도 단부 궤도가 받는 궤도-교량의 상호 작용력은 과도한 상태일 수 있으며, 이에 따른 궤도구성품의 파괴가 발생할 수도 있다. 따라서 교량의 상부구조물의 거동뿐만 아니라 궤도의 거동 역시 한계상태 분석기법을 이용하여 극한의 상태에서의 거동수준을 예측하고 평가함으로써 공용 중 발생 가능한 궤도 안전성 저해요인을 사전에 분석하는 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 공용중인 철도교량의 단부 회전의 수준을 국내외 철도교량 설계기준을 상회하는 조건의 한계상태 실험을 수행하고, 궤도-교량 상호 작용력의 수준을 극대화하기 위해 교량 유간(레일지지점 간격) 및 교량 처짐(단부 회전각)과 같은 단부 궤도와 교량 상판의 수직방향 변형에 직접적인 영향을 미치는 매개변수를 시험에 적용하여 교량의 단부 회전에 의한 궤도-교량 상호작용력의 발생경향 및 수준을 실험적으로 입증하였다. 또한, 각각의 매개변수에 대한 시험결과를 바탕으로 단부 궤도구성품(레일, 체결구)에 대한 궤도-교량 상호작용력의 수준을 확인할 수 있는 예측식을 도출하고, Case study(경부고속철도 2단계 구간)를 통해 실제 공용중인 고속철도 교량에 대한 적용성을 검토함으로써 콘크리트 궤도가 부설된 철도교량의 설계 및 유지보수 측면에서 실용적으로 활용이 가능한 분석기법을 제안하였다.

2. 기술적 성과

철도교량 단부궤도의 성능개선을 위한 횡단궤도시스템의 적용성에 대해 평가하고자 철도교량단부 역학적 거동특성 분석, 횡단궤도시스템 설계 및 정·동적 구조안정성 검토성을 분석하여 횡단궤도시스템의 설계모델을 설정하여하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

독일의 횡단궤도시스템을 벤치마킹하여 해당 시스템의 단점을 보완하여 국내환경에 적합한 횡단궤도시스템을 설계하였으며, 구조안정성 검토를 통해 독일의 기준에 적합함을 해석적으로 입증하였다.

철도교량 단부궤도의 역학적 거동특성을 분석하여 횡단궤도시스템의 설계모델을 설정하였으며 수치해석 결과, 횡단궤도시스템 적용으로 단부 상향력이 약 80% 감소하였고, 이에 대한 실험적 검증을 위해 교량-교대부 모델을 이용한 횡단궤도시스템 성능검증시험을 수행하

였다.

실물스케일의 교량-교대부 모델을 이용한 횡단궤도 성능검증시험을 수행하였으며, 실험결과 횡단궤도시스템 적용에 따라 동일유간 600mm 대비 레일저부응력이 약 75%, 단부 체결구응력이 약 90%, 단부레일의 상향변위(변형)가 약 87% 저감될 수 있음을 입증하였다.

철도교량 단부 궤도의 역학적 거동 및 국외 횡단궤도시스템 특성을 분석하여 횡단궤도시스템의 설계모델을 설정하였으며, 해석 및 실험적 검증을 위해 실물스케일의 횡단궤도시스템을 고려한 수치해석 및 실내시험을 수행하였다.

횡단궤도시스템의 고유진동수는 38.08Hz로써, 국내 철도운행열차속도 대역에서 공진발생의 위험은 없는 것으로 분석되었으며, 측정 감쇠비(2.46%)는 강합성 구조형식의 감쇠비 기준을 만족하는 것으로 분석되었다.

횡단궤도시스템의 구조 성능시험 결과, 처짐 및 응력, 가속도 등과 같은 정·동적 거동특성이 횡단궤도시스템의 성능요구조건을 모두 만족하며 국내 철도하중에 대한 충분한 내하력을 확보하는 것으로 분석되어 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부 궤도의 사용성 향상을 위한 대안으로써 횡단궤도시스템은 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

3. 실용적 성과

한국철도시설공단 “철도시설성능검증”신청을 통해 횡단궤도시스템의 성능을 입증하고 검증 받음으로써 보다 많은 적용 가능성을 확보하고 연구성과의 상용화 기술개발이라는 보다 가치있는 기술개발 성과를 달성 할 수 있을 것으로 예상된다.

또한, 향후 건설선 현장시험부설을 위해 건설선인 철도종합시험선로(오송시험선) 구간에 횡단궤도시스템을 적용할 것으로 계획하였다. 시험시공 이후 현차주행시험 및 모니터링(최소 1년 이상)을 시행하여 횡단궤도시스템의 현장성능검증이 필요하다.

제 4 절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

독일의 경우 독일연방철도국 DB AG에서 독일내의 대학연구소와 궤도시스템 개발업체인 PORR, Voestalphine 등과 함께 교량신축이음부 횡단궤도시스템을 개발하여 콘크리트궤도가 적용된 철도교량에 다양하게 적용하고 있으며 “Feste Fahrbahn”에 그 적용사례 및 성과를 소개하고 있다. 또한 교량의 처짐과 단부변형수준 및 신축량에 맞게 다양한 형식의 횡단궤도시스템을 개발하여 실제 설계 및 시공에 적용하고 있다. 독일에서 개발된 횡단궤도시스템

은 도시철도구간(S-Bahn, Stadt Bahn), 일반철도(Regional Bahn) 및 고속철도구간(IC, ICE)을 비롯하여 중량화물 전용선 구간 내에 있는 교량에 모두 적용된 바 있으며 다양한 열차하중 및 환경에서 그 성능과 효과가 입증되었다.

1. 궤도 건설 및 유지보수 시장 규모

- "The Worldwide Market for Railway Technology 2007-2011(SCI verkehr GmbH)"에 의하면 전세계 선로구축물의 시장은 각 지역의 경제력 향상과 긴밀한 관계가 있다.
- 증가하는 교통수요를 충족하고 다른 교통수단과의 경쟁적 우위를 점하고 철도의 고속화와 성능향상이 이루어지는 것으로 나타나고 있다.
- 새로운 궤도구조 개발 및 성능향상과 관련해서 현재 6,400 백만 유로(한화 약 8조원) 규모의 시장이 형성되어 있으며 이중 서유럽과 아시아가 가장 큰 시장 규모를 형성하고 있다.
- 선로의 유지관리 및 교체와 관련해서는 현재 21,000 백만 유로(한화 26조원) 규모의 시장이 형성되어 있으며 이 중 서유럽과 북아메리카가 가장 큰 시장 규모를 형성하고 있다.

2. 고속선 건설시장의 증가

- 200km/h 이상의 고속선은 최근 연장거리가 급격히 증가하고 있으며 급격한 경제성장을 하고 있는 중국 등의 신흥 철도 시장에 선진기술을 보유하고 있는 일본, 독일, 프랑스 업체 등은 정부의 지원 아래 직접 또는 해당국 업체와의 컨소시엄을 구성하여 진출하는 실정이다.
- 현재 고속선 부설거리는 약 6240km에 이르고 고속철도 운용은 서유럽이 약 12%을 차지하고 있으며 통계적으로 인구수가 유럽보다 3배나 더 작은 일본 철도망의 고속선 점유비율이 유럽보다 2.5배 이상 큰 점을 감안할 때 21세기 유럽 고속철도 역시 일본 고속철도 점유율 이상까지 상승할 것으로 전망된다. 지형학상, 인구 통계학상의 특성을 고려하더라도 IMIA conference 발표자료에 의하면 2020년까지 유럽에서만 10,000km의 고속신선이 운영될 것으로 예측된다.

표 3.4 최고속도 250km/h 이상의 국가별 고속철도운영 노선연장

국 가	거 리 (km)	국 가	거 리 (km)	국 가	거 리 (km)
일 본	2,837.5	프랑스	1,395	독 일	857.5
스페인	377	이탈리아	237	한 국	224
벨기에	140	영 국	108		

3. 궤도구조 개발 및 성능향상관련 시장전망

- SCI The Worldwide Market for Railway Technology 2007-2011 향후 연도별 동향분석 자료는 표 3.5와 같다. 증가하는 교통수요를 충족하고 다른 교통수단과의 경쟁적 우위를 점하고 철도의 고속화와 성능향상이 이루어 질 것으로 예측된다.
- 새로운 궤도구조 개발 및 성능향상과 관련해서는 현재 6,400 백만 유로(한화 8조원)에서 2011년까지 8~9% 증가할 것으로 예측되며 선로의 유지관리 및 교체와 관련해서는 현재 21,000 백만 유로(한화 26조원)에서 2011년까지 2~3% 증가할 것으로 예측된다.

표 3.5 선로의 개발과 성능향상 (Track New Development and Upgrade)

(단위 : EUR million)

지 역	시장거래수요량 (EUR million)	평균거래량증가예측 2007-2009 (in% p.a)	평균거래량증가예측 2009-2011 (in% p.a)
서유럽	3,400	+4~5	+10~12
동유럽	320	+15~18	+8~10
북아메리카	370	+20~30	+10~12
남/중부아메리카	160	+16~18	+12~15
아시아	1,500	+10~11	+9~11
아프리카/동부	230	+25~30	+10~12
독립국가연합	250	+/- 0	+18~22
오스트레일리아/태평양	170	-7~9	-3~5
합 계	6,400	+7~9	+8~10

표 3.6 선로의 교환과 유지관리 (Track Renewal and Maintenance)

지 역	시장거래수요량 (EUR million)	평균거래량증가예측 2007-2009 (in% p.a)	평균거래량증가예측 2009-2011 (in% p.a)
서유럽	7,900	+2~3	+2~3
동유럽	1,500	+2~3	+2~3
북아메리카	4,800	+2~3	+2~3
남/중부아메리카	600	+2~3	+2~3
아시아	3,700	+4~5	+4~5
아프리카/동부	450	+2~3	+2~3
독립국가연합	2,000	+2~3	+2~3
오스트레일리아/태평양	350	+2~4	+2~4
합 계	21,300	+2~3	+2~3

- 세계의 고속철도는 300km/h를 넘는 시대에 돌입하면서 이와 관련하여 최근에 완공되었거나 준공예정, 신설선 계획 중인 고속철도 인프라는 일본에서 현재 추진 중인 모리오카~신아오모리간의 토호쿠 신간센을 포함하여 3개 노선 500km 연장에 대하여 시행하고 있으며, 홋카이도 신간센과 다른 2개의 노선에 대하여 환경영향평가 등을 실시 중이다. 신간센의 신선건설에는 대규모의 재정투입이 요구되기 때문에 정부가 개발방식과 재원조달에 관하여 면밀한 조사 후 추가 건설계획을 발표할 예정이다.
- 아시아에서는 대만의 THSRC(Taiwan High Speed Rail) 중국, 호주, 남아프리카, 카자흐스탄, 이란, 인도 등 새로운 형태의 막대한 철도인프라 건설이 예상된다. 동남아의 베트남에서도 2020년까지 350km/h 급 고속철도 전용노선 건설계획을 발표하였을 뿐만 아니라 고유가 행진을 계속하면서 브라질과 사우디아라비아 등의 산유국에도 고속철도인프라 건설에 대한 막대한 수요가 잠재되어 있다.
- 중국 철도부는 최근 전국철도국장회의에서 '제11차 철도건설 5개년 계획' 기간 동안 추진할 철도건설 계획을 확정했다. 총연장 1만 7000㎞에 달하는 철도를 새로 건설할 계획을 세웠으며 향후 5년 동안 1조 2500억 위안(약 156조원)을 투입할 예정이고, 이 가운데 3분의 1가량인 5,457㎞는 시속 200~300㎞ 속도의 고속철이 운행할 수 있는 고속철도를 건설할 계획이다.
- 최근에는 철도경영의 합리화를 위해 건설과 운영을 분리하여 시행하고 있으며, 유지보수비 저감을 위한 콘크리트궤도 사용이 증가되고 있는 추세이다. 산악지대가 많아 우리나

라와 환경이 비슷한 일본, 독일, 이탈리아 등에서는 매우 적극적으로 사용하고 있으며, 일본 신간선의 경우 대부분의 구간을 콘크리트궤도로 시공, 운영되고 있다.

구 분	기존 사항		변화 사항
경쟁 시장	- 국지적	▶	- 세계화, 국제화
열차 속도	- 150km/h 이하	▶	- 시속 200km/h 이상의 고속선 건설 급증
궤도 system	- 자갈도상 궤도	▶	- 콘크리트궤도 사용증가 (현장타설 콘크리트궤도, Precast Slab Track의 사용 증가) - 환경을 고려한 특수한 방진궤도 사용증가

제 4 장 연구목표 달성 및 효과

제 1 절 연구개발 최종목표 달성도

연차	성과목표	성과지표	측정방법	가중치	달성치
1차년도	1-1 철도교량 단부 역학적 거동특성 분석	횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도상호작용력 저감 효과 제시	횡단궤도시스템 적용 전· 후의 상향력 및 압축력 저감(해석결과)	5%	5%
		횡단궤도시스템 적용에 따른 장대레일축력 저감 효과 제시	횡단궤도시스템 적용 전· 후의 장대레일축력 저감(해석결과)	5%	5%
	1-2 횡단궤도시스템 설계 및 정·동적 구조안정성 검토	횡단궤도시스템의 변위(처짐한계)수준 검토	고속철도, 일반철도 및 도시철도 콘크리트 궤도변위한계기준 대비	10%	10%
		횡단궤도시스템의 충격계수 검토	실험 또는 해석결과 대비 국내외 궤도충격계수기준 비교(속도고려)	5%	5%
		횡단궤도시스템의 공진 시 응답검토	공진시 최대처짐 및 가속도 /교량부 일반구간(해석결과)	5%	5%
	1-3 횡단궤도시스템 실내 성능검증시험 및 평가	횡단궤도시스템의 파괴하중(극한하중)	실험 및 해석결과 /설계윤중	5%	5%
		횡단궤도시스템의 정, 동적 휨강성	본선구간 설계 궤도 휨강성 대비	5%	5%
		횡단궤도시스템의 궤도지지(스프링)강성	본선구간 설계 궤도지지(스프링)강성 대비	5%	5%
		횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도상호작용력 저감 효과 제시	횡단궤도시스템 적용 전· 후의 상향력 및 압축력 저감(실험결과)	15%	15%
		횡단궤도시스템의 공진 시 응답검토	공진시 최대처짐 및 가속도 /교량부 일반구간(실험결과)	10%	10%
	2-1 횡단궤도시스템 형식별 구조계산 및 도면 작성	횡단궤도시스템 형식별 구조계산 및 도면 제시	횡단궤도시스템 형식별 구조계산 및 도면 제시 여부	5%	5%
	2-2 횡단궤도시스템 받침부 설계	횡단궤도시스템 받침부 용량 및 형식 제시	횡단궤도시스템 받침부 용량 및 형식 제시 여부	5%	5%
	2-3 횡단궤도시스템 실내성능검증 시제품 제작	횡단궤도시스템 시제품 제작	횡단궤도시스템 형식별 시제품 제작	15%	15%
	3-1 국외 횡단궤도시스템 기술조사	국외 횡단궤도시스템 설계 및 시공기술 분석	국외 횡단궤도시스템 기술조사 건수	5%	5%
	소 계				100%
	사업연계 지표	국내외 학술지 논문게재 건수	논문게재 건수	2건	20%
		국내외 지적재산권 확보 건수	특허출원 건수	2건	40%
		시제품 개발 건수	시제품 개발 건수	2건	40%
	소 계				100%

2차년도	1-1 횡단궤도시스템 성능요구조건 제시	성능요구조건 제시	횡단궤도시스템 현장적용 시(설계 시) 성능요구조건	15%	15%
	1-2 횡단궤도시스템 시제품 상세해석 및 단면보완	횡단궤도시스템의 동적 성능검증 요약서 제시	횡단궤도시스템의 현장적용을 위한 동적 성능검증결과 제시여부	15%	15%
	1-3 횡단궤도시스템 현장적용성 분석 및 현장시험부설	횡단궤도시스템의 현장시험부설 계획수립	횡단궤도시스템 시제품 현장시험부설 계획제시 여부	20%	20%
	2-1 횡단궤도시스템 시공개요도 및 시공절차서 작성	시공개요도 및 시공절차서	현장시공을 위한 시공개요도 및 절차서 제시 여부	20%	20%
	2-2 횡단궤도시스템 현장시험부설 시제품 제작	횡단궤도시스템 받침부 상세구조검토	받침부 보완설계 및 성능시방서 제시	20%	20%
	3-1 횡단궤도시스템 현장적용성 분석	횡단궤도시스템 현장적용 범위 및 대상 선정	횡단궤도시스템 현장적용범위 및 대상 선정 제시 여부	10%	10%
	소 계				100%
	사업연계 지표	국내외 학술지 논문게재 건수	논문게재 건수	2건	50%
		분야별 인력양성(석사)	학위논문제출	1명	50%
	소 계				100%

3차년도	1-1 횡단궤도 시스템 KR 성능검증	횡단궤도시스템 성능검증 승인	KR 철도시설성능검증 승인 여부	20%	20%
	1-2 현장적용 성능요구조건, 설계 및 시공방안	현장적용 성능요구조건 제시	현장적용을 위한 성능요구조건 제시 여부	10%	10%
		현장적용 설계 및 시공방안 제시	현장적용을 위한 설계 및 시공방안 제시 여부	10%	10%
	1-3 현장적용시제품 설계서 보완	현장적용 시제품 설계 보완/ 개선사항 제시	현장적용을 위한 설계 및 시공방안 제시여부	10%	10%
	2-1 현장시험부설 시제품 제작	횡단궤도시스템 현장시험부설용 시제품 제작	횡단궤도시스템 현장시험부설용 시제품 제작	20%	20%
	2-2 횡단궤도시스템 보완설계 및 개발	횡단궤도시스템 보완설계 및 개발 (받침포함)	횡단궤도시스템 보완설계 및 개발 여부	5%	5%
		횡단궤도시스템의 시제품제작 (받침포함)	횡단궤도시스템 시제품 제작여부	5%	5%
		횡단궤도시스템 성능시험 및 평가 (받침포함)	횡단궤도시스템 성능시험 여부	10%	10%
	3-1 현장시험부설 개소 제공	현장시험부설 개소 제공	KR성능검증 승인 및 공정 개선 방안 제시여부	10%	10%
	소 계				100%
	사업연계 지표	국내외 학술지 논문게재 건수	논문게재 건수	1건	30%
		국내외 지적재산권 확보 건수	특허출원 건수	1건	40%
		분야별 인력양성(석사)	학위논문제출	2명	30%
	소 계				100%

※ 초과달성내용

국내외 학술지 논문게재	임종일, 2014, 06, 철도교량 단부 회전에 따른 콘크리트 궤도의 변형특성에 관한 실험적 연구 송선옥, 2014, 06, 철도교량 단부궤도의 사용성 향상을 위한 횡단궤도시스템 적용에 관한 실험적 연구	2건
국내외 지적재산권 확보	철도교량 단부의 전환부 궤도 구조체 및 그 시공 방법 (2014. 06. 02 출원)	1건
분야별 인력양성 (박사)	임종일, 2014, 02, 철도교량 단부궤도의 사용성 향상을 위한 전환부궤도시스템의 적용 연구 송선옥, 014, 08, 철도교량 단부의 레일지지점 간격 변화에 따른 콘크리트궤도의 상향력 평가에 관한 연구	2명

제 2 절 연구개발성과의 기술적 효과분석

궤도유지보수 및 열차주행안전측면 등에서 유리하여 다양한 이점을 갖는 콘크리트궤도가 국내에서도 최근 건설 혹은 계획됨에 따라 거의 모든 선구에 널리 적용되고 있으며, 콘크리트궤도가 부설된 철도구조물의 상호작용에 대한 관심이 더욱 커지게 되었고, 그 중 교량상 장대레일 축력검토 및 교량 단부 궤도의 사용성 확보를 위한 검토는 설계 실무자들에게는 큰 현장애로사항으로 인식되고 있다.

이러한 콘크리트궤도와 철도구조물 상호작용에 따른 문제는 일반적으로 토공구간에서는 큰 문제가 되지 않으나 토공-교량 연결부(교대부) 또는 교량 상부구조의 연결부에서는 교량 상판 단부의 변형(단차 및 회전)에 의해 궤도 변형이 발생하고 이로 인해 과도한 응력이 작용할 수 있어 그 심각성이 더욱 큼. 이러한 부가적인 상호 작용력은 구조물 경계 단부 궤도의 빈번한 유지보수를 유발할 수 있으므로 설계 단계에서 충분한 검토가 이루어져야 하나 체결장치에서의 안전성을 검토하는 수준 외에는 뚜렷한 해결 방안이 없는 실정이어서 철도교량 계획 및 설계 시 교량 형식과 경간 배치를 비롯하여 교량상 콘크리트 궤도 설계에 많은 기술적 제약이 따른다.

현재 국내에서는 독일(DS804-App29)의 기준을 준용하여 한국철도시설공단에서 제정한 고속철도 궤도설계기준에서 제시하고 있는 “콘크리트궤도 부설 교량의 단부 사용성 검토”를 궤도설계 시 시행하도록 되어 있으나 구체적인 대안을 제시하거나 직접적인 해결방안으로 활용할 수 있는 내용이 아닌 설계과정에서 진행되는 검토수준으로써 철도교량 및 궤도설계자들로 하여금 창의적이고 진보적인 설계를 하는데 제약요인으로 작용한다.

일반적으로 궤도설계는 교량설계가 완료된 이후에 진행되며 체결장치 선정과 교량상 침목배치 및 TCL경간설계 등과 같은 구체적인 궤도설계가 완료되어야 하고, 교량상 장대레일 축력검토 및 단부 사용성 검토는 철도교량 및 궤도설계의 최종단계에 놓일 수밖에 없는 실정임. 그러나 모든 설계가 완료된 시점에서 진행된 교량상 장대레일 축력검토 및 단부 궤도 검토결과 문제가 발생할 경우 이미 수행된 설계과정을 다시 반복해야 하는 등 설계효율성 측면에서 매우 불합리할 뿐만 아니라 마땅한 대책이 없어 결국엔 문제를 궤도설계, 특히 체결장치(종방향 활동체결구, ZLR)에서 해결하여야 하는 실정이나 그 단가가 비싸며 유지보수 측면에서 불리함은 물론이고 효과를 기대하기엔 무리가 있다.

현재까지 국내에는 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부 레일체결구에 발생하는 작용력과 교량단부 회전각 및 단차를 해소하여 단부 궤도의 사용성 및 안정성 확보를 위한 대안으로 설계단계에서 레일 지지간격과 교량 베어링-레일지지점간 거리를 조정하거나 적정한

수준의 레일체결장치를 사용하는 등 2차적이고 수동적인 대안밖에는 없는 실정임. 그러나 현장에서는 시공상의 편의 때문에 구조물 신축이음부의 침목간격(레일지지점)이 비정상적으로 확대되거나 침목간격확보를 위해 교량신축이음부를 메움으로 인해 구조물 신축을 방해하고 궤도형태가 조잡해지는 경우가 발생하고 있다.



그림 4.1 국내 공용중인 교량 신축이음부 단부 궤도현황(침목간격확대[上], 교량신축이음부 메움으로 인한 구조물신축방해 및 궤도형태 조잡[下])

이렇듯 현행 철도교량 설계 시 가장 큰 제약요인은 궤도-교량 인터페이스에서 발생하는 상호 작용력인 장대레일 축력 및 교량단부 사용성 문제이며 이러한 궤도-교량간의 인터페이스 문제에 대한 고민의 결과로 유럽철도에서는 이미 횡단궤도시스템을 개발하여 현재까지 큰 문제없이 사용하고 있다. 따라서 유럽의 횡단궤도시스템을 기본 모델로 하여 국내 철도교량-궤도환경에 적합한 한국형 횡단궤도시스템을 개발함으로써 콘크리트궤도가 부설된 장대 철도교량, 연속교 및 특수교량의 설계 및 적용을 활성화하고 단부 궤도 사용성 및 안정성 확보를 위한 직접적이고 구체적인 솔루션을 제시해 줄 수 있다. 더욱이 독일의 횡단궤도시스템은 단부 사용성 확보만을 위한 시스템이나 본 연구에서 개발하고자 하는 횡단궤도시스템의 경우에는 장대레일축력저감 및 단부 궤도사용성 확보 모두를 하나의 시스템으로 해결함으로써 경제적이고 효율적인 해결방안으로 활용이 가능하다. 한국형 횡단궤도시스템

은 교량상 장대레일 축력 및 단부 궤도에 작용하는 부상력, 압축력 및 신축거동에 따른 교각의 회전 등과 같은 콘크리트궤도가 부설된 교량구조에서 해결해야할 구조적인 문제를 한국형 횡단궤도시스템의 자체적인 신축거동 및 하중완화(소멸)기능을 통해 단부에 작용하는 부반력 거동을 상쇄시켜주는 데에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

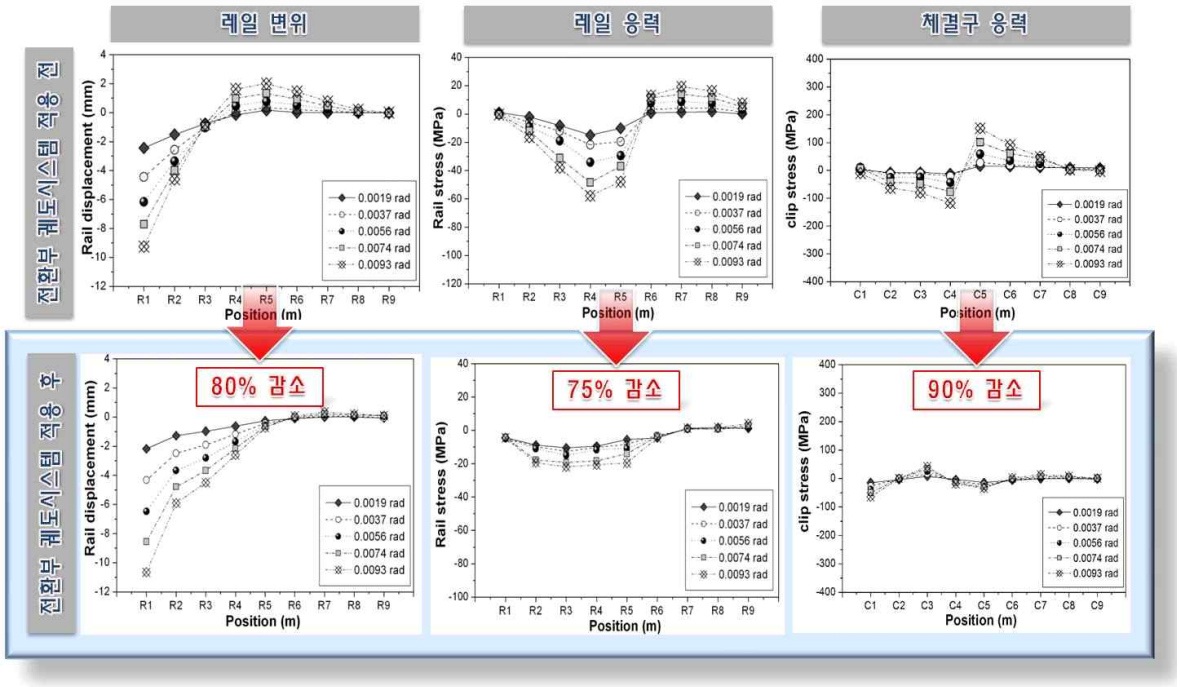


그림 4.2 횡단궤도시스템 적용여부에 따른 개선효과

제 3 절 연구개발성과의 경제적 효과분석

현재 국내에서도 경부고속철 2단계 구간 및 호남고속철도를 비롯한 신설 선로의 경우 대부분 콘크리트궤도를 적용하고 있으며, 국토운영 효율화를 위해 교량건설이 장려되고 있고, 철도교량의 장대화를 위한 연구(초 장대교량 개발을 위한 연구)가 활발히 추진되고 있다. 그러나 철도교량설계 시 장대레일 축력안정성 확보뿐만 아니라 경관과 경제성 측면에서 유리한 연속교 형식이나 장대교량 등의 적용은 그동안 교량신축이음부의 유간이 커짐에 따라 교량 신축부 궤도의 침목간격확대 문제 등이 발생하여 교량설계 시 제약요인으로 작용하였으나 특별한 대책이 없는 실정이었다.

향후 철도교량은 현재보다 더 장대화 될 것이며 다양한 형식의 특수교량이 개발, 설계될 것으로 예상되나 철도교량의 장대화 및 연속교 형식의 채택은 다양한 교량/궤도의 상호작용력 측면의 문제를 초래하여 교량형식, 경간구성 및 재료의 선택 등에 많은 제약이 따르는

실정이므로 이에 대한 대책강구가 시급한 실정이다

본 기술의 개발을 통해 철도교량 장대화 및 연속화 실현으로 교량건설비 최적화를 통한 저비용 고효율 철도건설기술을 확보 할 수 있으며, 교량단부 궤도손상의 최소화로 콘크리트 궤도 유지관리 비용의 최적화를 실현할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 국내 철도교량상 장대레일 축력저감 및 단부 궤도사용성 확보를 위한 유일한 대안인 종방향활동체결장치(ZLR) 및 레일신축이음장치(REJ)의 설치 시 경부고속철도 2단계 구간 중 1개 공구의 경우만으로도 아래 표와 같은 직접비(자재비+공사비)가 소요된다.

표 4.1 경부고속철도 2단계(O공구) 자재 및 공사단가 : ZLR 및 레일신축이음장치

(본선 교량부 L=15.476km, 단가산출서 참조)

항목		수량	단위	단가	금액
종방향 활동체결장치 (ZLR)	ZLR체결구	18,324	조	36,000	659,664,000
	Toe insulator	367	개	610	223,870
	side post insulator	367	개	670	245,890
	ZLR 레일패드(철판포함)	184	개	4,500	828,000
					660,961,760
레일 신축이음장치	레일신축이음장치 (REJ600)	4	틀	90,228,000	360,912,000
	레일신축이음장치설치 (일단, ±300mm)	4	틀	3,083,978	12,335,912
					373,247,912
합계					1,034,209,672

그럼에도 불구하고 종방향활동체결장치 및 레일신축이음장치는 영구적이지 못하고 효과적인 대안이 되지 못하는 실정이며 새로운 유지관리개소로 대두되는 실정인 점을 감안할 때 본 횡단궤도시스템의 개발에 따른 현장적용으로 교량상 장대레일 축력저감 및 단부 궤도사용성 확보를 위한 직, 간접비용의 저감이 가능하며 반영구적인 해결방안으로 활용이 가능하다.

교량단부 궤도의 상호작용력(회전변위, 상향력, 압축력 등) 및 축력제한에 따른 교량계획 변화에 대한 경제적 효과 검토

- 회전변위 제한에 따라 미관이 우수한 최적화 교량시공이 어려움.
  - 고강도 재료 사용이 어려움.

- 하로교량의 적용이 어려움.
- 장경간교량으로 설계하기 어려움.

→ 통상의 설계법(허용응력설계/극한강도설계)을 만족하는 경우에도, 교량의 형고가 높아져야 한다.

- 철도교량-궤도인터페이스에서 발생하는 부가 축력제한으로 인한 영향
- 철도교는 도로교량과 달리 종방향 축력이 크므로 장대레일 축력으로 인한 연속교 계획이 어려움(장대레일 종하중 궤도당 10kN/m).
- 궤도에 의해 전달되는 하중 : 장대레일 종하중, 시/제동하중

→ 하부구조물 설계에 있어 지배하중으로 작용

- 교량단부 궤도의 변형과 축력저감을 위해 특수교량받침을 사용하여야 한다.

- 경제적 파급효과 검토결과
- 철도교에도 장경간 적용이 가능할 것으로 예상된다.
- 통상의 받침에 비해 1.5~2.5배 가량 비싼 특수교량받침을 사용하지 않을 수 있다.
- 교량 하부구조의 직경을 줄일 수 있다.
- 연속교의 적용이 가능해짐에 따라 처짐 및 진동 측면에서의 사용성이 유리하고, 유지관리 시설인 교량신축이음장치의 설치를 줄일 수 있게 된다.

표 4.2 경제적 파급효과 분석결과

구분		절감요인	정량적 효과(예상)	교량공사비 절감(예상)
직접적 효과	하부 구조	상부 수평력 감소로 인한 기둥 및 기초 모멘트감소	기둥 및 기초의 10%	15% 이상 절감
	교량 받침	특수받침사용 배제	연속교 교량받침의 50%절감	5% 이상 절감
	신축 이음	연속교 사용에 따른 개소감소	신축이음비용 20%	유지관리비용개선
교량미관개선		장경간 적용에 따른 효과	시거개선 효과 20% (연속교 적용에 따른 형고저감)	10% 이상 절감 (저형고 장대교량 효과)

또한, 해외 철도선진국의 우수기술을 받아들여 국내환경과 실정에 적합한 국산화 기술로 재탄생시킴으로써 기술개발비용과 시행착오를 최소화하여 국가기술개발 예산절감을 도모할 수 있을 것으로 예상된다.

제 4 절 연구개발성과의 정책적 효과분석

국내 기술력으로 국내 환경과 실정에 적합한 독자적인 한국형 철도교량 단부 횡단궤도시스템을 개발함으로써 해외 기술의존도가 높은 국내 콘크리트 궤도기술분야의 기술 자립도를 향상시키고 국가적인 차원에서의 철도 궤도기술력 향상과 같은 파급효과가 예상된다.

또한 해외우수기술을 응용한 국산화 기술개발로 독자적인 국내고유의 철도교량과 궤도인터페이스분야의 기술력을 확보하여 해외기술이전 및 컨설팅 등으로 궤도기술력에 대한 해외 역수출의 기반 인프라를 구축하여 부가가치를 창출하고 국가기술력 향상을 도모할 수 있다.

정부주도하에 진행된 콘크리트궤도관련 선행연구결과(콘크리트궤도 인터페이스 성능향상에 대한 연구 용역)의 미비점을 보완할 수 있는 실질적인 실용화 기술개발로 국가 R&D정책의 실효성을 입증하고 부가적인 궤도분야 연구개발의 인프라 확산 효과가 예상된다.

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

제 1 절 연구성과 향후활용방안

1. 기술실시계획

횡단궤도시스템의 현장시험 부설 위치는 최초 설계가 끝나고 시험부설업체 모집계획이 있는 철도종합시험선로 건설공사 구간을 현장시험 부설 개소로 계획하였다.

횡단궤도시스템은 철도교량상 단부 궤도에 작용하는 부상력과 압축력 및 신축거동 등과 같은 콘크리트궤도가 부설된 철도교량구조에서 해결해야할 구조적인 문제를 횡단궤도시스템의 자체적인 신축거동 및 추가 작용력 완화(소멸) 기능을 통해 단부에 작용하는 부반력 거동을 상쇄시켜 철도교량 및 궤도설계 시 일반구간과의 설계 일관성을 확보할 수 있는 구조체이다.

도시철도구간의 경우 교량지간이 상대적으로 짧고 이미 기 시공되어 영업운행 중인 노선들이 대다수이므로 운행선 궤도구조 개량에 준하는 수준으로 횡단궤도시스템의 현장시험부설이 이루어 질 수 밖에 없는 실정이다. 그러나 운행선 궤도개량공사는 매우 어려운 상황이며 더욱이 단경간의 도시철도구간은 본 횡단궤도시스템의 적용효과를 입증하기에는 적절하지 못하다고 판단되었다. 이에 건설선인 철도종합시험선로(오송시험선) 구간에 횡단궤도시스템을 적용하고자 한국철도시설공단의 철도시설성능검증을 완료하였다.

횡단궤도시스템의 현장 성능검증은 아래와 같이 실시설계(TK)중인 철도종합시험선로 구간에 시험시공을 계획하고 있다.

표 5.1 철도종합시험선로 시험시공 계획



과업명	• 철도종합시험선로 건설공사 실시설계
공간적 범 위	• 충청북도 청원군 오송읍 ~ 세종특별자치시 전동면 일원
시간적 범 위	• 공사기간 : 착공(지정)일로부터 33개월 (단, 2016년 12월)
내용적 범 위	• 본선실측 : 12km989.98 • 용지측량 : 294,960m^2 • 지반조사 : 26공 • 실시설계 : 1식 (토공, 교량, 터널, 궤도, 시스템, 건축)

시·종점 좌 표

구 분	좌 표(GRS80)		
	X	Y	Z
시 점	446446.863	228671.602	131.31
종 점	450202.044	224185.599	145.95



그림 5.1 철도종합시험선로 건설공사 조감도

시험시공 이후에는 다음과 같은 현차주행시험 및 모니터링(최소 1년 이상)을 시행하고자 한다.

(1) 현차주행시험

현차주행시험은 본선 시운전 시험 및 개통 이후 실시하여 표 4.3의 시험항목 및 평가기준을 바탕으로 실시한다.

표 5.2 횡단궤도시스템 성능 요구조건

시험종류		평가항목		단위	평가기준
제품 성능 시험	조립 성능 시험	1)	연직변위(피로시험 전, 3m 기준) : 구조안전 측면(최대하중 340kN 기준)	mm	≤ 0.9
		2)	궤도면틀림 기준 : 사용성 측면	mm/3m	< 1.2
		3)	연직가속도 허용기준	g	< 0.25
		4)	횡단궤도 받침의 허용회전각	rad	0.02
		5)	횡단궤도 받침의 허용침하량	mm	< 1
		6)	피로시험(300만회) 후 시스템 건전성 확보 유무 (고유진동수 & 감쇠비 변화)	-	< 1~2%
현장 성능 시험	현장 설치 시험	7)	궤도지지강성(측정치) ·궤도지지강성 변화율(≤350km/h)	kN/mm	본선과의 균일성 확보 (≤1.8)
		발생응력	8) 레일저부응력(측정치) : 장대레일	MPa	≤ 130(허용응력) ≤ 90(평가기준치)
			체결구응력(측정치)	MPa	적용 전, 후 저감효과 입증
		단부 레일의 상향변위(측정치)		mm	적용 전, 후 저감효과 입증
		9)	단부 레일의 상향변위 저감비	-	60% 이상
		10)	탈선계수	-	≤ 0.8
		11)	레일 두부 횡변위(궤간확대안정성)	mm	≤ 4
		12)	충격계수(DAF) (t=1,Φ=0.2, V=300km/h, DAF : 1.326)	DAF	$\leq 1+t \cdot \Phi(1.0+0.5\frac{V-60}{190})$

(2) 장기 모니터링

열차 개통 후 최소 1년 이상 표 4.4와 같이 모니터링을 수행하여 횡단궤도시스템의 공용중 안정성 및 장기내구성능을 측정하고자 한다.

표 5.3 모니터링 항목 및 시험기준

항 목	시험항목	시험방법	합격기준
궤도틀림	궤도검측	궤도검측차 또는 그에 준하는 장비를 이용하여 궤도측정 (전·후 접속부 궤도 틀림 및 손상상태)	선로정비지침 궤도보수기준 적용, 통상적인 수준 이하의 궤도틀림 유지보수 횟수 및 난이도 확보
외관상태	구성품의 손상상태 (강재 및 포트받침) 균열	육안조사	① 강재, 포트받침 등 하중 전달 구조에서 구조적 안정성에 영향을 주는 균열 또는 손상이 없을 것 ② 체결장치 각 구성요소는 파손, 변형 등이 없을 것 ③ 레일의 이상마모 등 구성품의 조기손상(Premature failure)이 없을 것(단, 검증 대상 궤도구조의 특성에 기인하는 것이 아닌 선형, 차량 등 다른 요인에 의한 경우는 예외로 함)
타 분야와의 인터페이스	신호시스템 인터페이스	신호시스템 적합성 시험기준(철도시설공단) 적용	① 궤도회로저항 8Ω·km 이상 ② 운행선 시험 전후 타 분야와의 인터페이스 정상기능 유지

2. 신기술신청

연구과제를 통해 독일 횡단궤도시스템을 벤치마킹하여 한국형 횡단궤도시스템의 개발을 완료하였으며 1~3차년도의 연구성과를 활용하여 차후 횡단궤도시스템의 현장시험부설을 실시하기 위해 한국철도시설공단의 철도시설성능검증을 신청하여 완료하였다.

또한 “철도교량 단부 횡단궤도 구조 및 그 시공방법(특허번호 제 10-1399839호)”을 등록하였으며 “철도교량 단부의 횡단궤도 구조체 및 그 시공방법(출원번호 10-2014-0066754)”을 출원하였고 추후 현장성능검증 진행과정에서 건설신기술 또는 철도시설공단 신기술신청을 계획하였다.

제 2 절 추가연구의 필요성

3년간의 연구과제를 통해 한국형 횡단궤도시스템의 개발을 완료하였으며 횡단궤도시스템

의 주요특징을 서술하고 적용 범위 및 방법을 제시하였으며 시스템 설계, 구조안정성 및 단부 궤도-교량 상호작용력 저감을 위한 횡단궤도시스템의 적용 효과를 분석하였다. 또한 현장시험시공이 가능하도록 호남고속철도 교량상 궤도표준도를 바탕으로 실시설계에 준하는 시스템 설계를 실시하여 횡단궤도시스템의 구성요소 설계결과와 조립성능시험결과를 비롯하여 시공 및 유지보수방안, 시스템 인터페이스 검토 등 종합결과를 제시하였다.

그러나 당초 과제 계획 단계에서는 비교적 짧은 과제기간(실질적으로 3년 이내에 기술개발, 제작부터 현장시공을 마무리 하고 그 성능까지 입증하여야 하는 시간적 한계)을 감안하여 현장적용 이후에 바로 성능을 확인할 수 있는 운행선 시험시공을 계획하여 운행선을 대상으로 현장적용을 위한 검토를 진행하였다. 또한 당초 과제기간 내에 건설선 적용을 위한 설계 및 시공이 가능한 곳은 없었다. 이에 한국철도시설공단의 성능검증을 완료함으로써 추후 계획된 건설선 시공가능성을 높이고 현장적용의 적정성을 입증하였다.

향후 현장시험시공을 통해 실제 주행차량에 대한 횡단궤도시스템의 구조적 성능 및 장기내구성능을 확인함으로써 철도시설로써의 시스템의 성능 및 적정성을 평가하기 위해 추가 예산 확보가 필요하며 추가 연구로 횡단궤도시스템의 실용화 연구가 필요한 실정이다.

참고문헌

[1] Deutsche Bahn, DB Netz AG (2008) Bridge deck Ends, Check for serviceability limit state of superstructure, DS804 - Appendix 29 (German language).

[2] Deutsche Bahn, DB Netz AG (2003) Richtlinie 804.5202 (German language).

[3] Korea Rail Network Authority (2008) Research for improvement of concrete track interface performance.

[4] Rudolf Seidel (2000) Feste Fahrbahn auf großen Stahlüberbauten der NBS Hannover-Berlin, EI-Eisenbahningenieur (51), pp. 23-29 (German language).

[5] Deutsche Bahn, DB Netz AG (1995) Anforderungskatalog zum Bau der Fahrbahn, 3. Uberarbeitete Auflage, Stand, Catalogues for construction of slab track (German language).

[6] Edgar Darr, Werner Fiebig (2006) Feste Fahrbahn, Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn, ISBN 3-8266-1485-2, Eurail press (German language).

[7] Korea Rail Network Authority (2011) Railway design Standard (Track part).

[8] Korea Rail Network Authority (2011) Railway design Standard (Roadbed part).

[9] J.Y. Choi, S.C. Yang (2008) The Displacement Limit at the End of an Approach Slab for a Railway Bridge with Ballastless Track, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 11, No. 2, pp.195-202.

[10] H.K. Park, S.Y. Jang, S.C. Yang, Y.G. Park (2009) A Parametric Study on the Serviceability of Concrete Slab Track on Railway Bridge, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 12, No. 1, pp.95-103.

[11] R.K. Min, D.Y. Sung, Y.G. Park (2012) Analysis of Dynamic Behavior of Railway Bridge with Concrete Track, Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 15, No. 2, pp.147-153.

[12] D.S. Chun, J.Y. Choi, H.Y. An, Y.G. Park (2008) Behavior of Fastening system of HSR bridge ends deck on slab Track installed Bridge, Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference, pp.1624-1633.

[13] K.H. Lee (2013) Applying transition track system to improve track performance in a railway bridge deck ends, Master's thesis, Seoul National University of Science & Technology.

[14] International Union of Railway (UIC), Track Bridge Interaction.

[15] International Union of Railway (UIC), Code776-3, Deformation of Bridge.

[16] Eurocode (2003) Actions on Structure, Part 2, Traffic load on bridge, EN 1991-2.

[17] Eurocode (2005) Basis of Structural Design, EN 1990:2001 +A1.

[18] International Union of Railway (UIC) (2008) Recommendations for Design & Calculation of ballastless track, ISBN2-7461-1397-X.

[19] Korea Rail Network Authority (2011) Railway bridge design Standard (Railway bridge part)

[20] G.Y. Jo (2014) The Evaluation of Fatigue Behavior for Transition Track System of Railway Bridge, Master's thesis, Seoul National University of Science & Technology.

[21] K.W. Kim (2014) A Study on Behavioral Characteristics of Transition Track System, Master's thesis, Seoul National University of Science & Technology.

[22] J.I. Lim (2014) An Applying a Transition Track System to Improve Track Serviceability in Railway Bridge Deck Ends, Ph.D dissertation, Seoul National University of Science & Technology.

[23] K.W. Kim, J.Y. Choi, Y.G. Park (2013) A Study on Behavioral Characteristics of Transition Track System, 2013 Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, No. 319.

[24] G.Y. Jo, J.Y. Choi, B.J. Park, Y.G. Park (2013) A Study on Evaluation of Fatigue Behavior for Transition Track System of Railway Bridge, 2013 Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway , No. 318.

[25] J.I. Lim, S.O. Song, J.Y. Choi, Y.G. Park (2013) Experimental Study on Applying a Transition Track System to Improve Track Serviceability in Railway Bridge Deck Ends, Journal of the Korean society for railway, VOL.16, NO.3, pp. 207-216.

[26] J.I. Lim, S.O. Song, J.Y. Choi, Y.G. Park (2013) Experimental Study on Characteristics of Deformation for Concrete Track on Railway Bridge Deck End induced by Bridge End Rotation, Journal of the Korean society for railway, VOL.16, NO.3, pp. 217-225.

[27] S.I. Kim (2010) Experimental Evaluations of Track Structure Effects on Dynamic Properties of Railway Bridges, Journal of Vibration and Control, 17(12), pp. 1817-1826.

[28] Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(2013) 'Development of Korean intersection Track System for Reducing the Axial force of CMR and

Securing the Seviceability of Bridge deck ends on Concrete Slab Track-installed Railway Bridge', Research report (part 2 of 3)

연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

[1] B45_Techn_Rili_fuer_Eisenbahnbruecken

[2] DS804_App 29

[3] British Stamdard - Eurocode 1 Action on structure

[4] Josef_Hess_REJ-BWG

[5] 2000_X1-Endtangentenwinkel

[6] 2003_X5-Br_Ausgleichplatten_Bln-Hbf

[7] Slab Track System ÖBB - PORR

[8] PORR-Nachrichten Nr. 140, 2002 p23-28

[9] Eisenbahnbrücke über den Main

[9] Interaktion Gleis Stand der Tchnik und Beispiele

[10] Slab track SYSTEM ÖBB - PORR ELASTICALLY SUPPORTED TRACK BASE PLATE

[11] RIL_804