철도교량 단부 궤도의 사용성 향상을 위한 횡단궤도시스템 적용에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Applying a Transition Track System to Improve Track Serviceability in Railway Bridge Deck Ends

임종일 · 송선옥* · 최정열 · 박용걸

Jongil Lim · Sunok Song · Jungyoul Choi · Yonggul Park

Abstract The components of concrete track (rail and rail fastening system) in railway bridge deck ends are damaged and deteriorated by track-bridge interaction forces such as uplift forces and compression forces owing to their structural flexural characteristics (bridge end rotation). This had led to demand for alternatives to improve structural safety and serviceability. In this study, the authors aim to develop a transition track to enhance the long term workability and durability of concrete track components in railway bridge deck ends and thereby improve the performance of concrete track. A time-history analysis and a three-dimensional finite element method analysis were performed to consider the train speed and the effect of multiple train loads and the results were compared with the performance requirements and German standard for transition track. Furthermore, two specimens, a normal concrete track and a transition track, were fabricated to evaluate the effects of application of the developed transition track, and static tests were conducted. From the results, the track-bridge interaction force acting on the track components (rail displacement, rail stress, and clip stress) of the railway bridge deck end were significantly reduced with use of the developed transition track compared with the non-transition track specimen.

Keywords : Concrete track, Bridge end rotation, Track-bridge interaction, Uplift force, Transition track

초 록 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부의 궤도구성품(레일 및 체결구)에는 교량 단부회전에 의해 상향력 및 압축력과 같은 궤도-교량의 상호작용력이 작용하여 손상 및 성능저하가 유발된다. 이러한 교량의 휨거동에 기인한 단부 궤도의 상호작용에 따른 문제를 해결하고자 본 연구에서는 횡단궤도시스템을 개발하고 그 성능을 입증하였다. 횡단궤도시스템의 구조안정성 검토를 위해 3차원 유한요소해석을 통한 시간이력해석을 실시하고 그 결과를 독일의 성능요구조건 및 관련기준과 비교하였다. 또한, 교량-궤도 상호작용 분석을 위한 시험체를 제작하여 실내시험을 수행하고 횡단궤도시스템의 적용 효과를 평가하였다. 연구결과 횡단궤도시스템의 정, 동적 구조안정성 및 횡단궤도 적용 후 교량 단부 궤도의 상호작용력(레일변위, 레일저부응력 및 체결구 응력)이 크게 저감될 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

주요어 : 콘크리트궤도, 교량 단부회전, 궤도-교량 상호작용, 상향력, 횡단궤도시스템

1. 서 론

콘크리트궤도가 부설된 교량 단부에서는 열차하중에 의한 단부회전각 발생, 교량기초의 침하 및 교량 상판의 상·하 연 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[1,7]. 이러한 교량-궤도 상호 작용력 중 교량의 단부 회전은 교량 위에 부설된 레일의 곡률을 유발시키고 이러한 레일의 변형과정에서 교량측 마지막 레일지지점은 압

축력이, 교대측 첫 번째 레일지지점에는 상향력이 발생하게 된다[1-7].

철도교량 단부 궤도의 상호 작용력에 대한 기존의 국내 연구 결과는 교량 단부에 작용하는 상호작용력에 영향을 미치는 인자로 교량의 기하학적 특성(교량받침~토목신축이음매간 거리, 교량받침~레일 체결장치간 상대위치)과 교량의 최대 처짐량을 비롯하여 레일체결장치의 스프링 강성 등에 대한 매개변수연구가 수행된 바 있다[9-11]. 또한, 교량 단부의 변형이 단부 궤도에 직접적인 영향을 미쳐 체결구의 조기 파손을 유발시킬 수 있음을 실험적으로 분석하였으며[12], 이에 대한 대책으로 횡단궤도시스템이라는 개념을 도입하여 개발하고 그 성능을 입증한 바 있다[13]. 국내외 연구결과, 철도교량의 단부 회전에 기인한 단부 궤도의 변형은 열차의 주행성능을 저하시키고 단부 궤도구성품의 수명을 단축시키

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-8005-7100, E-mail : happy@hyundai-dvp.com

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.3.207>

며, 유지보수를 증가시키게 되어 교량상 궤도의 취약개소로 평가될 수 있다[1-3,6,7]. 현재까지 이러한 단부 궤도에 발생하는 궤도-교량 상호 작용력을 저감시킬 수 있는 대안으로는 소프트한 레일패드와 체결력 조절이 가능한 체결구를 사용하여 레일의 변형에 유연하게 저항할 수 있는 특수 레일 체결장치를 사용하거나[1,5,6], 체결장치의 구조적 특성 상 체결클립과 레일 플랜지 사이의 공간이 확보되어 레일의 상향변위에 직접적인 작용력을 피할 수 있는 중방향 활동체결장치[3,13] 등이 사용되고 있으나, 이러한 대안은 교량 단부 궤도에 발생하는 상호 작용력을 근본적으로 해소시킬 수 있는 방법이 될 수 없으며, 반영구적인 구조적 해결방안에 대한 연구 또한 매우 부족할 실정이다. 하지만 독일 및 유럽의 일부 국가에서는 교량의 처짐에 기인한 단부 회전 및 기타 교량 상부구조의 구조적 변형에 종속적인 단부 궤도의 거동수준을 안정화 하고 단부 궤도의 사용성 및 구성품의 유지보수를 최소화하기 위해 교량 단부의 궤도에 전환부 구조물(Transition structure 혹은 Ausgle ichsplatten, Übergangskonstruktion)을 설치함으로써 교량의 변형과 무관하게 안정적인 궤도의 변형수준을 확보할 수 있는 구조적 대안을 마련하고 이를 규정화하기도 하였다[2,4,6]. 더욱이 이러한 교량 단부에 설치되는 특수 궤도구조물은 콘크리트 궤도뿐만 아니라 자갈궤도가 부설된 교량구간에서도 적용되고 있다[2,6].

따라서 본 연구에서는 교량 단부 궤도에서 발생하는 궤도-교량 상호 작용력을 저감시키고 단부 궤도의 성능을 향상시키기 위한 구조적 대안으로써 횡단궤도시스템을 제안하고 그 성능을 검토하였다[13]. 또한, 궤도-교량 상호작용분석을 위한 시험체를 이용한 실내시험을 수행하여 횡단궤도시스템 적용에 따른 단부 궤도의 교량-궤도 상호작용력 저감효과를 실험적으로 입증하였다.

2. 본 론

2.1 철도교량 단부 궤도의 사용성 평가 및 성능개선 관련 연구동향

현재 콘크리트궤도와 철도구조물의 상호작용에 따른 문제는 토공구간과 교량 연결부(교대부) 또는 교량 상부구조의 연결부(교각부)에서 모두 발생되고 있다[1-4]. 교량 상판의 변형(단차 및 회전)에 의해 궤도(레일)의 변형이 발생하고 이러한 작용력은 직접적으로 레일체결장치에 전달된다. 따라서 국내외 관련규정 및 기준에서는 레일지지점에 작용하는 상향력과 압축력의 한계수준을 별도로 제시하고 이를 만족시킬 수 있는 교량-궤도설계를 권고하고 있다[1-3,5,7]. Fig. 1은 철도교량 단부회전에 따른 레일의 변형 개요도를 나타낸다.

자갈궤도가 부설된 교량의 경우 교량 상판과 레일 및 침목을 포함하는 레일지지점 사이는 도상자갈에 의해 구조적으로 분리되어 교량 상판의 거동이 궤도의 변형에 직접적으로 영향을 미치지지는 못하였다. 하지만 콘크리트궤도가 부설된 교량의 경우에는 Fig. 1과 같이 교량 상판에 고정되어 있

Fig. 1 Deformed shape (curvature) of the rail and bridge deck due to end rotation

는 콘크리트 궤도의 레일과 레일지지점은 교량 단부의 회전에 의한 교량의 거동에 궤도가 종속적으로 함께 변형하게 되고 이러한 변형곡선(곡률, curvature)은 궤도구성품에 직접적인 상호 작용력으로 작용하게 된다[1, 3-5,7]. 이러한 교량 단부의 회전에 따른 레일의 변형과정에서 교량측 마지막 레일 지지점은 압축력이, 교대측 첫 번째 레일지지점에는 상향력이 발생하게 된다[1,2,5,7]. 이러한 철도교량의 단부에서 콘크리트궤도의 사용성을 보장하기 위해서는 교량 단부 회전 및 단차로 인해 레일 지지점의 체결장치에 발생하는 상호작용력(상향력 및 압축력)이 레일체결장치의 탄성패드 및 체결구에서 공용기간 동안 아무런 손상 없이 충분히 흡수할 수 있어야 한다[1,2,5,7]. 교량단부의 회전 및 이에 기인한 궤도의 부당력과 관련한 국내외 기준 및 연구는 다양하게 이루어 졌다[1-7]. 독일의 경우 교량의 거동에 종속적으로 거동하게 되는 콘크리트궤도의 궤도구성품 중 레일체결장치의 기능유지를 열차 주행 안전성 확보를 위한 중요한 요소로 두고 단부 궤도 체결구의 사용성 검토에 초점을 맞추어 설계 기준을 정립한 바 있다[1]. 또한 국내 규정에서도 레일체결장치의 레일패드와 체결구에서 공용기간 동안 아무런 손상 없이 레일지지점(레일체결장치)에 가해지는 상향력과 압축력을 충분히 흡수할 수 있어야 한다고 규정하고 있다[7]. 여기서, 체결구에 작용하는 상향력의 허용치는 식 (1)과 같이 레일체결장치의 초기 체결력(F_0 , pre-load) 이내로 규정하였다[1,7]. 즉, 상향력의 경우 초기 체결력을 초과하는 하중이 레일지지점에 작용하게 되면 레일 하부의 패드에는 아무런 pre-load가 작용하지 않게 되므로 패드가 자유롭게 움직일 수 있는 상태가 되며, 열차진동 등에 의해 레일패드가 밖으로 밀려나 체결장치에 추가적인 손상이 발생할 수 있고 열차주행안전성을 저해하게 된다[1,7]. 또한, 압축력에 대한 허용치는 식 (2)와 같이 탄성패드(레일패드)의 변형한계를 초과하지 않는 수준으로 규정하고 있다[1,7].

$$\max \sum F_u \leq F_0 \quad (1)$$

$$\frac{\max \sum F_c}{c_d} \leq S_d \quad (2)$$

여기서,

$\max \sum F_u$, $\max \sum F_c$: 체결장치에 작용하는 상향력(F_u) 및 압축력(F_c)의 중합 최대값(kN)

- F_0 : 체결구의 초기 체결력(kN)
 C_d : 동적 스프링계수(kN/mm, 압축력 검토 시 정적 스프링 계수와 동일하다고 가정함)
 S_d : 탄성패드의 변형한계(mm, 각 레일체결장치에 사용되는 탄성패드의 특성에 따라 상이함)

현재까지 국내에서는 이러한 교량 단부 상호 작용력에 대한 대응책으로 교량 단부 궤도의 레일지지점간 간격조정을 비롯하여 교량 받침과 레일지지점간 거리를 조정하는 것과 같은 설계단계에서의 교량 및 궤도구조의 기하학적 조건을 변경하는 방법과, 종방향 활동체결장치(ZLR)를 사용하여 교량상 장대레일 축력을 해소함과 동시에 종방향 활동체결장치의 구조적 특성상 존재하는 클립과 레일 플랜지 사이의 여유 공간(1~2mm)을 이용하여 단부 궤도의 상향거동에 대응하는 방법 등이 적용된 바 있다[3,13]. 그러나 교량 단부 궤도의 레일지지점 간격 조정과 교량 받침과 레일지지점간 거리 조정 등과 같은 문제는 상대적으로 신축량이 커서 교량 단부의 유간(교량상판~교대배면간 거리)이 길어질 소지가 있는 장대 철도교량(Long-span railway bridge) 및 궤도설계 시 애로사항으로 작용할 수 있으며, 특히 교량 신축이음부(Expansion joint)가 경사진 사교(Skewed bridge)의 경우 교량 신축이음부 근처의 레일지지점(침목) 배치가 용이하지 못해 부득이 하게 일부 레일지지점의 간격이 확대될 소지가 있다[4,6,13]. 따라서 이러한 궤도-교량간의 인터페이스 문제에 대한 대안으로 독일의 경우 교량 단부의 거동에 제약을 받지 않고 열차가 교량 및 교대 경계부를 통과 할 수 있도록 하는 전환부 구조물(이하 횡단궤도시스템)을 개발하고 관련 규정을 정립하여, 현재 콘크리트궤도가 적용된 철도교량 뿐만 아니라 자갈궤도가 부설된 교량에서도 다양하게 적용하고 있다[2,4-6,13]. 또한 횡단궤도시스템은 단부 궤도에 발생하는 상향력 및 압축력과 같은 콘크리트궤도가 부설된 교량 구조에서 해결해야 할 구조적인 문제를 횡단궤도시스템의 적용으로 레일의 변형곡선을 완만하게 변화시킴으로써 궤도-교량 상호 작용력을 저감시켜 단부 궤도구성품의 사용수명 및 열차주행성능을 향상시키는 효과가 있는 것으로 검토되었다[2,4-6,13].

Fig. 2는 독일의 Hannover-Berlin 구간을 연결하는 장대 철

Fig. 2 Illustrations of typical transition track in Germany (Line of Hannover-Berlin)

도교량구간에 적용된 독일의 대표적인 횡단궤도시스템의 설치 개요도를 나타낸다[4]. 해당구간에 적용된 레일체결장치는 BWG사에서 개발한 특수 방진 레일체결장치(ERL)로써 베이스플레이트 저부에 고무마운트가 배치되고 4개의 스프링 앵커로 고정되며 레일패드의 정적 스프링계수는 20kN/mm(rail pad deflection range : 1.5~4.5mm)로써 교량 단부의 레일지지점을 매우 소프트하게 설계하였다. 또한 해당 체결장치의 형상을 비롯한 상향력 허용기준 및 특성치는 DS804-Appendix29-Table 1에 제시되어 있다[1,2,4].

Rudolf Seidel[4]은 독일의 고속열차 ICE(Inter City Express)에 대한 주행시험을 통해 Hannover-Berlin 구간에 설치된 횡단궤도시스템의 성능검토 결과(Table 2 참조)를 제시하였으며, 횡단궤도시스템의 주요 설계요건으로 횡단궤도 자체의 처짐(변형) 최소화와 열차하중에 의한 횡단궤도구조의 비틀림 및 부상에 저항할 수 있는 충분한 강성과 중량으로 제시하였다[2,4].

독일에서 개발된 횡단궤도시스템은 강교, 콘크리트교 및 강합성교 모두 적용이 가능하고 도시철도, 일반철도 및 고속철도구간을 비롯하여 중량화물 전용선 구간 내에 있는 철도교량에 모두 적용되어 다양한 열차하중 및 환경에서 그 성능과 효과가 입증되었다[2,4,6].

2.2 횡단궤도시스템의 구조해석

본 연구에서는 국내 철도하중, 주요부재의 재료적 특성 및 레일체결장치 등의 특성을 반영하여 횡단궤도시스템을 개발하였으며, Hannover-Berlin 구간에서 검토된 독일의 연구결과(횡단궤도시스템의 설계기준 및 성능검토결과)를 본 연구에서 개발한 횡단궤도시스템의 목표 성능기준 값으로 활용하였다[4,13]. 본 연구에서 개발한 횡단궤도시스템을 독일의 횡단궤도시스템의 성능수준과 비교, 검토하고자 유한요소해석(Finite element analysis, FEA)을 수행하였다. 횡단궤도시스템의 구조검토는 범용유한요소해석 프로그램인 MIDAS CIVIL을 이용하였으며, 레일 및 레일체결장치를 비롯한 횡단궤도구조 단면을 3차원 요소를 사용하여 실제 형상을 반영할 수 있도록 모델링 하였다. 레일과 강재 주형은 각각 Frame element와 Shell element를 이용하였고 콘크리트층은 Solid element로, 레일체결장치는 실험에 적용한 Pandrol SFC 체결장치의 정적 수직 스프링계수 48kN/mm를 고려한 Spring element로 모델링하여 레일과 횡단궤도의 콘크리트 상면에 600mm간격으로 절점을 연결하여 열차하중의 전달 구조를 모델링 하였다[13]. 실내시험에 적용된 횡단궤도시스템의 받침은 탄성받침이나 본 구조해석에서는 안전측의 검토를 위해 고정단으로 고려하여 해석을 수행하였다. 적용하중은 KTX 1편성(20량)을 선정하여 시간이력해석(Time history analysis)을 수행하였으며, 수치해석모델의 제원 및 모델링 형상은 각각 Table 1 및 Fig. 3과 같다.

본 연구에서 개발한 횡단궤도시스템의 최대 정적변위는 0.38mm로 나타나 독일의 변위 제한기준[2,4]을 만족하는 것으로 나타났다(Table 2 참조). 강합성 구조로 설계된 횡단궤도시스템의 주요 구조부재인 강재 주형과 콘크리트의 정적

Table 1 Properties of developed transition track

Components		Value
Steel girder (H×B×L)		254×2600×2400(mm)
Thickness of steel girder	Flange	50mm
	Web	25mm
	Stiffener	15mm
	Bottom plate	50mm
Rail		UIC60
Static spring stiffness on rail support		48kN/mm
Steel grade		SS400
Concrete grade		C400

Fig. 3 FE model of developed transition track

최대 응력은 Fig. 4 및 Table 2와 같이 각각 약 56MPa(인장)과 8MPa(압축)로 국내 설계기준을 모두 만족하는 것으로 검토되었다[8].

횡단케도시스템은 4개의 받침(Bearing)을 갖는 단경간 강합성 교량에 준하는 구조적 특성을 갖는다[2,4]. 따라서 횡단케도구조는 주행열차하중이 유발하는 가진 주파수에 의한 구조적 공진(Resonance)이 발생할 가능성이 있으며, 상대적

(a) Stress contour for steel structure

(b) Stress contour for concrete structure

Fig. 4 Static stress of developed transition track

으로 짧은 횡단케도구조 내에서 공진에 의한 동적 처짐 및 가속도의 증폭은 열차의 주행안정성 확보 및 횡단케도구조의 구조적 안전성 확보에 매우 위험한 요소로 작용할 수 있다[4]. 따라서 독일에서는 횡단케도시스템의 공진발생을 피하기 위해 충분한 중량과 휨강성을 확보하여 일정수준의 고유진동수를 확보하는 방법을 사용하고 있다[2,4]. 또한 횡단케도시스템의 중량은 교량 단부 케도에 작용하는 상향력(부상력) 및 열차하중에 의해 횡단케도구조가 부상(Lift-off)되거나, 횡단케도자체의 회전각 및 단차가 발생하지 않기 위해서도 충분한 중량을 확보하여야 한다[2,4]. 이러한 횡단케도시스템의 중량과 강성 설계를 통해 횡단케도구조의 고유진동수를 상용 열차의 고정축간 거리와 운행 가능한 속도대

Table 2 Summary of FEA results for developed transition track

Analysis items		Criteria	Analysis results
Static performance	Self-weight (Case of 2.4m)	70~95kN ^{*1}	74kN
	Displacement	< 0.5mm ^{*1}	0.38mm
	Allowable compressive stress of concrete	0.4f _{ck} =16MPa ^{*3}	8MPa
	Allowable stress of steel	130MPa ^{*3}	56MPa
Dynamic performance	Natural frequency	94.76×(2.4) ^{-0.748} =49.23Hz ^{*3} 70~80Hz ^{*1}	67.5Hz
	Displacement	< 0.5mm ^{*1}	0.48mm
	Acceleration	0.25g ^{*1*3}	0.232g (at V=300km/h)
	Impact factor (Design criteria)	< 2.0 ^{*1}	1.03~1.20
	Impact factor (Based on measured value)	d _{dyn} /d _{sta} ≤ 1.2 ^{*1*2}	

^{*1}: Requirement of performance for transition track[2,4]

^{*2}: d_{dyn}(Maximum displacement(measured value)), V=40, 80, 120km/h),
d_{sta}(Maximum pseudo displacement(measured value)), V=10km/h)[4]

^{*3}: Railway design Standard(track & roadbed part)[7,8]

역에 의해 발생 가능한 모든 가진 주파수의 범위를 벗어나게 함으로써 공진발생을 구조적으로 피할 수 있다[2,4]. 횡단궤도시스템의 고유치 해석결과 Table 2와 같이 67.5Hz로써 검토대상 차량인 KTX의 유효타격거리를 고려한 임계속도가 약 4,544.77km/h로 산출되어 예상대로 현실적으로 운행가능한 열차속도 대역에서의 구조적인 공진발생은 없을 것으로 분석되었다.

수치해석결과, 횡단궤도시스템의 중량은 Table 2와 같이 레일(UIC60, 2.4m)을 포함하여 74kN으로 나타나 독일에서 제시하고 있는 횡단궤도시스템의 적정 중량범위(70~95kN)를 만족하였다[2,4]. 또한 1차 휨 고유진동수가 약 67.5Hz로 나타나 독일의 측정 고유진동수와 유사하게 나타났으며[4], Fig. 5와 같이 KTX 주행속도대역에서 횡단궤도시스템의 공진은 예상대로 발생하지 않는 것으로 검토되었다. KTX 하중을 적용한 횡단궤도시스템의 시간이력해석 결과, Fig. 5와 같이 열차속도 300km/h까지 횡단궤도시스템의 공진은 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 속도변화에 따른 동적 변위의 발생 수준은 Fig. 5(a)와 같이 독일의 변위 제한기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 속도변화에 따른 가속도 발생수준 또한 독일의 설계 가속도 기준을 만족하는 것으로 나타났다(Fig. 5(b)).

본 연구에서 개발한 횡단궤도시스템의 수치해석결과를 독일의 연구결과[5]와 비교하여 Table 2에 나타내었다. 의사정

적 최대 처짐(10km/h)과 각 속도 대역별 동적 최대 처짐을 비교하여 횡단궤도시스템의 해석 충격계수를 Table 2와 같이 산출하였으며, 독일의 설계 및 측정 충격계수의 수준을 만족하는 것으로 나타나 열차속도 증가에 따른 동적 충격의 효과는 크지 않을 것으로 분석되었다. 또한 본 연구에서 개발한 횡단궤도시스템에 대한 수치해석결과는 Table 2와 같이 독일 횡단궤도시스템의 성능수준을 모두 만족하였으며 국내 철도하중에 대해서 정, 동적 구조안정성을 확보하는 것으로 나타났다.

2.3 실내시험

본 연구의 실내시험에서는 횡단궤도시스템의 적용에 따른 단부 궤도의 상호작용력(레일상향변위, 체결구 및 레일저부 응력) 저감효과를 실험적으로 입증하고자 콘크리트궤도가 고려된 교량 및 교대 시험체를 제작하여 교량의 처짐에 따른 단부 회전발생을 모사하였다. 실내시험을 위한 시험체의 제원은 Table 3과 같으며, 시험체의 단면도는 Fig. 6과 같다 [13].

Fig. 6(a)와 같이 시험하중에 의해 교량 시험체의 자체적인 휨변형이 발생되지 않도록 충분한 강성을 갖는 강합성 구조로 교량 시험체를 설계 및 제작하였다. 교대 시험체 역시 레일체결장치를 견고히 고정할 수 있고 자체적인 변형이 발생되지 않도록 Fig. 6(b)와 같이 중량 콘크리트 구조로 제작되었다. 횡단궤도는 Fig. 6(c)와 같이 수치해석의 검토단면과 동일한 단면제원으로 시험체를 제작하였으며, 콘크리트의 설계강도와 강재주형의 종류는 시험체 제작여건상 일부 변경되었으나 단부 궤도의 상호작용력 저감 효과 입증을 위한 본 실험의 목적에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 횡단궤도 적용 전, 후의 시험체 설치 개요도 및 전경을 나타낸다. 교량 및 교대 시험체의 배치는 단부 궤도에 발생하는 상호 작용력을 극대화하고 횡단궤도시스템의 적용효과를 뚜렷하게 파악하기 위하여 교량 단부의 유간을

(a) Vertical displacement

(b) Vertical acceleration

Fig. 5 Time-history analysis results for developed transition track

Table 3 Properties of specimens

Specimen		Value
Bridge		Length : 3.4m, Width : 2.8m
Abutment		Length : 2.8m, Width : 2.8m
Track type		Direct fixation concrete track system
Rail		UIC60
Rail fastening system		Pandrol SFC 1501 (Single fast clip) Static spring stiffness : 48kN/mm, Thickness : 10mm
Developed transition track (steel composite structure)	Size(H×B×L)	254×2600×2400 (mm)
	Girder(Steel)	SM490
	Concrete	C270

Fig. 6 Cross-section of test specimens (unit : mm)

600mm(교량측 마지막 레일지지점과 교대측 첫 번째 레일지지점의 간격 1,000mm)로 시험체를 세팅하였으며, 횡단케도 시험체를 포함한 교량 및 교대 시험체 상의 모든 레일지지점 간격은 600mm로 동일하다. 본 시험에 적용된 교량 시험체는 Fig. 7과 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 변위 발생을 최대한 구속함으로써 교량의 수직 처짐에 기인한 궤도(레일 및 레일지지점)의 수직방향 거동을 극대화 하였다.

교량의 단부 회전에 의해 발생하는 단부 궤도의 상호작용력을 보다 뚜렷하게 파악하기 위해 단부회전의 수준을 가급적 크게 유도하고자 일본 및 유로코드의 설계기준치를 초과할 수 있는 수준으로 다양한 단부회전각의 수준을 설정하였다[14-18]. 국내 철도교량 단부회전각의 기준은 0.0005 rad으로써 일본 및 유로코드 대비 약 10배 이상 작게 설정되어 있으며 국외기준 대비 상대적으로 철도교량의 거동한계에 여유치가 없는 것으로 분석되었다[8,11]. 따라서 국내 단부회전각 허용기준은 실험적으로 철도교량의 단부 회전에 따른 단부 궤도에 발생하는 교량-궤도 상호작용력의 수준을 파악하기에는 다소 작은 수준으로써 본 연구에서는 고려하지 않았다.

교량 시험체의 변위는 최대 25mm까지 5mm 단위로 증가시켜 가며 단계별 정적 변위제어를 실시하였으며, Table 5는 단계별 정적 변위제어(prescribed loading, displacement)에 따른 교량 시험체의 단부회전각 발생량을 국외 철도교량 단부회전각 허용 기준과 비교하여 나타낸 것이다.

Table 5 Angle of bridge end rotation controlled by prescribed loading

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

Fig. 7 Measurement setting for the experiment (unit : mm)

Fig. 8 Illustrations of sensors instrumentation

Fig. 9 Photograph of sensor instrumentation

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, Fig. 9(b)와 같이 측정을 통해 검증하여 Table 5에 나타내었다. Table 5와 같이 교량 시험체의 변위 5mm는 교량 단부에 약 0.002 rad 만큼의 단부회전각을 유발시키며 이는 일본 고속선 철도교량의 단부회전각 허용기준과 유사한 수준을 모사하고자 하였다. 또한 UIC에서 제시하는 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부회전각 기준을 초과하는 수준의 시험하중(0.0056 rad)을 고려하였으며, 마찬가지로 UIC의 자갈궤도 부설교량의 단부회전각 기준을 최대 시험하중으로 산정하여 시험에 적용하였다[14-18].

횡단궤도시스템 적용 전, 후의 센서설치 개요도는 Fig. 8과 같다. 교량 단부회전에 기인한 레일의 변형수준을 정량적으로 파악하기 위해 레일변위측정 시 교량 및 교대 시험체의 거동에 변위계(displacement transducer, LVDT)가 간섭받지 않도록 별도의 프레임(Fig. 9(a) 참조)을 설치하여 횡단궤도시스템 적용 전, 후의 레일변위를 측정하였다. 또한,

Fig. 9(a)와 같이 체결구(single fast clip) 및 레일저부에 Strain gage를 설치하여 레일의 휨 변형 및 상향력에 따른 체결구 및 레일저부의 발생 응력을 측정하였으며, 변위제어에 따른 단부회전각의 발생 수준을 파악하기 위해 Fig. 9(b)와 같이 교량 지점부 상대 변위측정을 통해 단부회전각을 산출하였다.

2.4 실험 결과 및 분석

2.4.1 레일변위

Fig. 10(a)와 같이 횡단궤도 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. 횡단궤도 적용 전 시험결과는 교량 단부회전각의 증가에 따라 레일의 상향변위 또한 선형적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 최대 단부회전각 발생 시(25mm, 0.01 rad) 최대 레일상향변위는 R4~R5위치에서 약 2mm로 나타났다.

반면, 횡단궤도 적용 후에는 Fig. 10(b)와 같이 횡단궤도시스템의 첫 번째 레일지지점에서 하향변위가 발생되었으며

(a) Non-transition track

(b) Applying transition track

Fig. 10 Measured vertical rail displacement along bridge and abutment

횡단케도를 포함한 교량 및 교대부 전구간에서 레일의 상향 변위 발생 수준은 매우 미소한 것으로 분석되었다. 따라서 횡단케도시스템의 적용으로 국내의 철도교량 단부회전각 허용기준을 초과하는 과대변형 상태에서도 이러한 교량의 변형특성을 효과적으로 완화시킴으로써 단부 케도에 발생하는 케도-교량 상호 작용력을 최대 80% 이상 크게 저감시킬 수 있고 레일의 변형(곡률)을 최소한으로 조정할 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

2.4.2 레일저부응력

Fig. 11(a)와 같이 횡단케도 적용 전 레일저부응력은 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. Fig. 10(a) 및 Fig. 11(a)와 같이 레일의 응력은 레일의 곡률과 직접적인 관계가 있으며, 따라서 교량 단부의 레일에 발생한 상향변위(upward curvature)로 인해 교량과 교대부 사이의 레일 저부에는 압축응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 교량 단부회전각의 증가에 따라 레일저부응력 역시 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험에 적용된 케도-교량 시험체의 조합(교대 포함)에서 교량 시험체의 단부회전각은 교량 단부 레일의 발생 곡률에 적절히 반영된 것으로 분석되었다. 또한 Fig. 11(b)와 같이 횡단케도 적용 후에는 횡단케도 중앙부(교량

(a) Non-transition track

(b) Applying transition track

Fig. 11 Measured rail stress along bridge and abutment

과 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 횡단케도시스템의 적용에 따라 단부 레일의 최대 응력이 약 75% 이상 크게 감소되는 것으로 나타나 횡단케도시스템의 적용에 따른 단부 케도의 교량-케도 상호 작용력 저감효과를 실험적으로 입증하였다.

2.4.3 체결구 응력

횡단케도 적용 전, 후 체결구의 응력 측정결과를 Fig. 12에 나타내었다. 횡단케도 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. Fig. 12(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.

본 실험에 적용한 체결구의 경우(Table 3 참조), 체결구를 조립함과 동시에 소정의 체결력이 도입되며 이때 체결클립에 도입되는 응력은 압축응력을 나타낸다[1,12,13]. 교량의 단부 회전에 의해 단부 레일 및 레일지지점에는 상향변위가 발생하게 되고 이러한 교량과 레일의 변형특성에 기인하여 Fig. 12(a)와 같이 교대부 체결구에는 초기 응력상태와 반대되는 인장응력이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 단부 케도의 체결구는 일반적인 구간에 설치된 체결구 보다 발생응력의 범위가 증가하게 되어 체결구의 장기내구성 확보에 불

Fig. 12 Measured clip stress along bridge and abutment

리한 것으로 나타났다. 반면 횡단궤도 적용 후에는 Fig. 12(b)와 같이 횡단궤도를 포함한 교량 단부 및 교대부 전구간에서 체결구의 발생 응력 수준이 매우 미소한 것으로 나타났다. 또한 횡단궤도 적용에 따라 단부 체결구는 교량의 처짐(단부회전각) 변화에 영향을 받지 않고 안정적인 거동을 나타내었으며, 횡단궤도 적용 전 보다 체결구 응력이 약 90% 이상 크게 감소한 것으로 분석되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 철도교량 단부 궤도의 성능개선을 위한 횡단궤도시스템의 적용을 위해 수치해석을 통한 정, 동적 구조 안정성 검토 및 단부 궤도의 거동분석을 위한 실내시험을 수행하였다. 연구결과 횡단궤도시스템의 적용을 통해 콘크리트궤도가 부설된 철도교량 단부 레일의 변형수준을 완화시킬 수 있었으며 이로 인해 단부 레일 및 레일지지점(체결구)의 직접 작용력(uplift force)을 비롯하여 응력 및 변위 등과 같은 궤도-교량 상호 작용력을 크게 감소시킴으로써 단부 궤도 구성품의 구조적 안전성, 사용성 및 장기내구성 확보가 가능한 것으로 분석되었다.

본 연구의 실내시험에서 도입한 교량 시험체의 단부회전각은 국내 철도교 설계기준을 약 10배 이상 초과하는 수준임에도 불구하고 횡단궤도시스템의 적용으로 단부 궤도의 사용성을 확보할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 따라서 횡

단궤도시스템의 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.

후 기

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원 미래철도 기술개발사업의 연구비지원(과제번호: 11PRTD-C060294-01-000000, 과제명 : 콘크리트궤도가 부설된 철도교량상 장대 레일 축력저감 및 단부 사용성 확보를 위한 한국형 횡단궤도시스템 개발)에 의해 수행되었으며, 관련자분들께 감사드립니다.

References

- [1] D.B. Deutsche Bahn, A.G. Netz (2008) Bridge deck Ends, Check for serviceability limit state of superstructure, DS804 – Appendix 29(German language).
- [2] D.B. Deutsche Bahn, A.G. Netz (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] D.B. Deutsche Bahn, A.G. Netz (1995) Anforderungskatalog zum Bau der Fahrbahn, 3. Überarbeitete 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*, 11(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*, 12(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*, 15(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*, Kwang-ju, Republic of Korea, pp. 1624-1633.

- [13] K.W. 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.

접수일(2013년 3월 18일), 수정일(2013년 4월 14일),
게재확정일(2013년 5월 24일)

Jongil Lim : limji316@molit.go.kr

Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Korea

Sunok Song : happy@hyundai-dvp.com

Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Korea

Jungyoul Choi : cjypassion@hotmail.com

Dept. of Track and Railway Operations, Technische Universität Berlin (TU-Berlin), SG18, Salzuffer 17-19, D-10587, Berlin, Germany

Yonggul Park : ygpark@seoultech.ac.kr

Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Korea