

B2S궤도 적용에 따른 철도교량의 동적안정성 검토

Evaluation of the Dynamic Stability of Subway Bridge in the Applying B2S Track

공선용* 김상진** 백찬호***
Kong, Sun-Yong Kim, Sang-Jin Baik, Chan-Ho

ABSTRACT

This paper presents an analytic study for replacement of the ballast track in existing subway bridge by the Precast slab panel(B2S) track. To evaluate the dynamic responses on application of B2S track, the time history analysis with the 3D modeling. A total of two models, which were one ballast track bridge and B2S track bridge, were used in the FE analysis. The results of this study show that the dynamic displacement and acceleration of the B2S track bridge were significantly reduced for a higher train speed, compared to the ballast track bridge. Also, the replacement of the ballast track bridge in existing subway bridge by the B2S track increased the structural safety of bridge and ensured sufficient dynamic stability and serviceability.

As a result, the servicing subway bridge with B2S track system has need of the reasonable measures which could be reducing the static and dynamic response and improving the performance.

key word : Ballasted track(자갈도상궤도), Precast slab track(프리캐스트 슬래브궤도), B2S track(B2S궤도),
Dynamic stability(동적 안정성)

1. 서론

철도의 역사가 시작된 이래 전통적으로 부설되어 온 종래의 자갈궤도는 열차로부터 가해지는 에너지를 자갈 입자간 마찰력에 의해 흡수하는 구조로서, 그 구조특성상 열차운행 중 잦은 궤도변형이 유발되어 이를 복원하기 위한 보수작업에 많은 노력과 비용이 소모되는 부담을 안고 있는 궤도구조이다. 서울 지하철 역시 개통당시 자갈도상궤도로 건설되어 이러한 문제들이 대두되고 있는 현실에 닥쳐왔으며, 이를 해결하기 위한 궤도구조개발 등의 노력을 통하여 1998년부터 본격적으로 자갈도상을 콘크리트 도상화하는 도상 생력화(Maintenance Free)궤도로의 개량사업을 진행 중이다.

서울메트로 지하구간은 1998년 이후 매년 약 8km 내외의 개량사업을 진행 중에 있으며, 보다 효율적인 궤도개량을 위하여 2004년 B2S Track System을 자체개발하여 현재까지 지하 및 일부지상구간의 총 11.14km구간에 대한 궤도개량을 완료하였고 잔여 180km구간의 개량을 추진 중에 있다. B2S 궤도 적용 후 6년간의 영업운행기간 동안 검증된 B2S궤도의 성능 및 시공성에 대한 충분한 기술적 노하우를 바탕으로 B2S궤도를 지상부 고가구간의 궤도개량공사에 적용하고자 한다.

* 책임저자 : 정회원, 서울메트로 철도토목팀 팀장, 공학석사
E-mail : kong@seoulmetro.co.kr
TEL : (02)6110-5620 FAX : (02)6110-5629

** 정회원, 서울메트로 철도토목팀 주임

*** 정회원, 서울메트로 철도토목팀 선임

그러나 현재 서울메트로의 고가구간은 1~4호선 개통(1974년) 이후부터 현재까지 장기간 사용에 따른 교량구조의 내하력 저감이 발생된 실정이므로, 궤도개량 시 궤도구조의 변경에 따른 교량구조의 거동 특성에 대한 검토가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 B2S궤도 적용에 따른 기존 노후 교량의 동적안정성을 해석적으로 검토하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 대상교량 및 궤도구조의 제원

본 연구의 대상교량은 20m 단순경간으로 구성된 6주형 PSC 거더교(상, 하선 분리구조)로서 대상교량의 제원 및 단면도는 Table 1과 같다.

Table 1 대상교량의 제원 및 단면도

상부구조형식	설계 하중	설계 충격계수	연장	교폭	거더 간격	단복선
PSC(6주형)	P-21	0.364	20m	10m	1.5m	복 선

대상교량은 지하철 설계하중으로 설계된 6주형 PSC 거더교이며 교량바닥판에 종방향 신축이 설치되어 상, 하행선측 거더가 독립적으로 거동하는 분리구조로서 현재 자갈도상궤도가 부설된 상태로 공용중에 있다.

Precast Slab Panel구조인 B2S궤도는 서울메트로에서 개발하여 효율적인 시공공정에 의한 예산절감, 궤도의 동적거동에 대한 강성과 방진·방음에 탁월한 효과가 입증되어 현재 지하구간 자갈도상궤도의 도상개량공사에 적용되고 있으며 안정적으로 운영 중인 궤도구조이다.

현재 서울메트로에서 B2S궤도는 지하구간의 도상개량에만 이용되고 있으나, 이를 고가구간에 적용하기 위해 Fig. 1과 같이 판넬 단면형상 개선 및 철근량 조정 등과 같이 최적 단면으로의 재설계 과정을 거치면서 기존의 단면강성을 유지하고 판넬중량을 감소시킨 B2S궤도(ver.2.0)를 개발하였다.

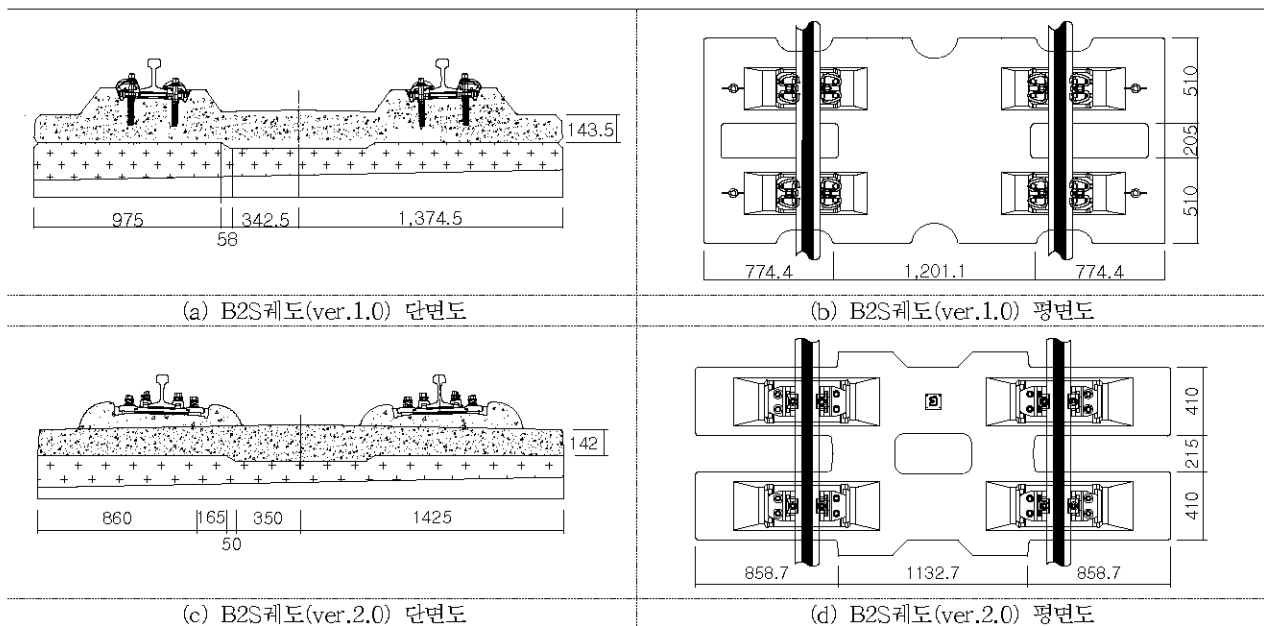


Fig. 1 B2S궤도 단면형상 개선(단위 : mm)

고가부 궤도중량 저감을 위해 개선된 B2S궤도(ver.2.0)를 고가부 궤도개량에 적용하면 Table 2와 같이 당초 자갈도상궤도의 총 사하중 대비 약 20.2%를 경감시킬 수 있는 것으로 검토되었다.

Table 2 궤도개량에 따른 궤도중량 비교

구 분	자갈도상궤도	B2S궤도(ver.2.0)
궤도 단면 (단위:mm)		
레 일	$50.4\text{kg/m} \times 2\text{ea} = 100.8\text{kg/m}$	$60.8\text{kg/m} \times 2\text{ea} = 121.6\text{kg/m}$
침 목	체결구 $1\text{kg/개} \times 4\text{개} \times 1.7 = 6.8\text{kg/m}$	$16\text{kg/조} \times 2\text{개} \times 1.6 = 51.2\text{kg/m}$
	침 목 $240\text{kg/개} \times 1.7 = 408\text{kg/m}$	$1,249\text{kg/판} \times (1.0/1.25) = 999.2\text{kg/m}$
도 상	$1,401\text{m}^2 \times 1,750\text{kg/m} = 2,451.7\text{kg/m}$	$[(0.386651\text{m}^2 \times 1.25\text{m}) + (0.198788\text{m}^2)] \times (1.0/1.25) \times 2,300\text{kg/m} = 1,255\text{kg/m}$
자갈막이+배수콘크리트	$0.4282\text{m}^2 \times 2,300\text{kg/m} = 984.8\text{kg/m}$	$0.4282\text{m}^2 \times 2,300\text{kg/m} = 984.8\text{kg/m}$
공제량 (-)	자갈막이 -	$0.072178\text{m}^2 \times 1\text{m} \times 2,300\text{kg/m}^2 = 166\text{kg/m}$
	채움콘크리트 -	$\{(0.0266\text{m}^2 \times 2\text{개소}) \times (1/1.25) \times 2,300\text{kg}\} = 97.9\text{kg/m}$
총 계	3.95tonf/m	3.15tonf/m

또한 개선된 B2S궤도(ver.2.0)는 판넬의 형상개선으로 기존 B2S궤도(ver1.0)와 달리 레일지지점 사이의 도상콘크리트를 없애고 판넬중앙에 설치한 전단포켓으로 판넬의 구조적 안전성(횡이동 방지, 도상콘크리트와의 합성거동 유도)을 확보하고 기존 B2S궤도(ver.1.0) 보다 궤도중량(현장 채움 콘크리트)을 약 100kg/m 저감시킬 수 있다.

2.2 모델링

본 연구에서는 실제 철도교량의 거동특성과 가장 근접한 응답치를 얻기 위해 Fig. 3과 같이 PSC 거더는 주형과 가로보, 바닥판 모두를 3차원 솔리드요소로 모델링 하였으며, 레일과 PC침목은 3차원 공간뼈대요소로 모형화하여 궤도의 질량 및 강성에 기여할 수 있도록 모델링하고, 도상 자갈, 레일패드 및 B2S궤도의 레일지지점 궤도강성(레일패드와 방진패드의 종합강성)은 스프링-댐퍼 요소(Viscoelastic damper)로 모델링함으로써 실제 궤도구조와 가장 흡사한 이산지지 궤도 모형을 해석모델에 적용하였다.

Fig. 2는 수치해석을 위한 궤도구조별 수치모델의 구조개요도를 나타내며, 궤도-교량 해석모델은 Fig. 3과 같다. 또한 Table 3은 해석에 적용된 궤도구성 요소별 제원을 나타내고 있다.

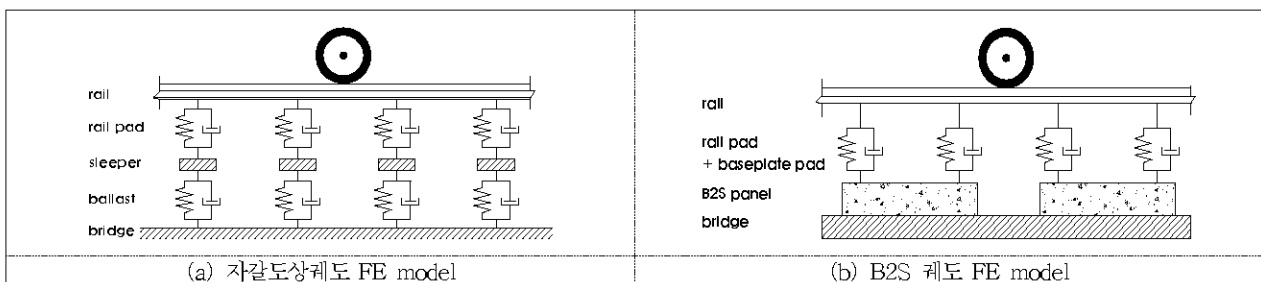


Fig. 2 궤도모델의 구조개요도

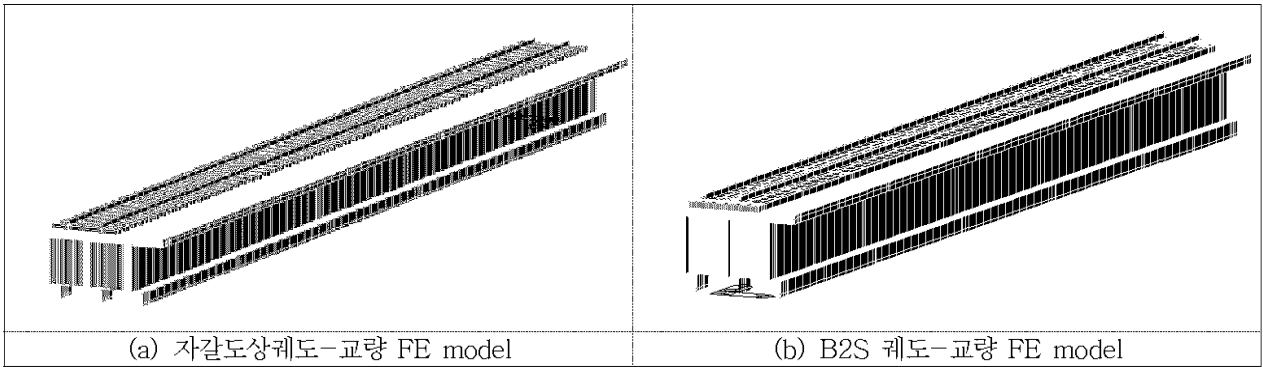


Fig. 3 FE model

Table 3 궤도구성 요소별 제원

구분	레일 (50kg N)	자갈도상궤도			B2S궤도		
		레일패드 (EVA)	침목(PCT)	도상자갈	레일패드 (EVA)	방진패드 (PUR)	레일지지점 (총합)
탄성계수(E), kN/m ²	2.1×10^9	-	2.7×10^8	-	-	-	
단위중량(w), kN/m ³	78.5	-	25	-	-	-	
단면2차모멘트(I _x), m ⁴	3.72×10^{-6}	-	-	-	-	-	
단면2차 모멘트(I _y), m ⁴	1.96×10^{-5}	-	9.69×10^{-5}	-	-	-	
스프링계수(K _{uz}), kN/mm	-	600	-	1.78×10^6	600	20	19.35
감쇠계수(C _{uz}), kN·s/m	-	98	-	980	98	98	98

자갈도상궤도와 B2S궤도가 고려된 대상교량의 동적거동 검토를 위해 실 주행열차 하중을 적용한 해석모델별 유한요소해석 결과를 비교·분석하였다. 동적해석은 실 운행열차하중을 적용하여 해석모델별 공진속도를 포함하는 10~300km/h의 주행속도로 재하하여 시간이력해석을 수행하였으며, 시간이력해석에 적용한 지하철 열차하중 모델과 축중 배치를 Fig. 4에 나타내었다. 다수의 집중하중으로 재하되는 열차하중의 시간이력을 해석에 적용하기 위해 열차하중의 요소 내 위치를 주행속도에 따른 시간간격마다 요소길이에 따라 재하되고 사라지는 충격하중(윤중)의 형상으로 모델링하였다.

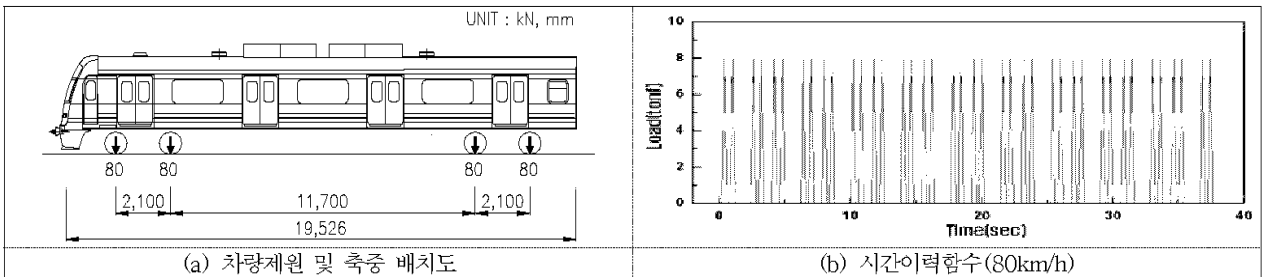


Fig. 4 차량의 축중 배치도 및 시간이력함수(80km/h)

3. 수치해석 및 동적안정성 검토결과

3.1 고유진동수

본 연구에서 적용한 궤도시스템을 고려한 해석모델의 적정성 및 차량하중에 의한 공진발생 속도대역(임계속도)을 알아보고자 교량의 고유치 해석(Eigenvalue analysis)을 수행하여 지배적인 첫 번째 휨 고유진동수를 산정하였다. 자갈도상궤도가 적용된 해석모델의 경우 레일패드 강성은 600kN/mm, 자갈도상은 일본 철도총합연구소에서 제시한 200kN/mm를 적용하였으며, B2S궤도의 경우에는 레일지지점 스프링 강성을 19.35kN/mm로 가정하여 적용하였다.

궤도구조 적용에 따른 고유진동수(1st mode) 검토 결과는 Fig. 5와 같다.

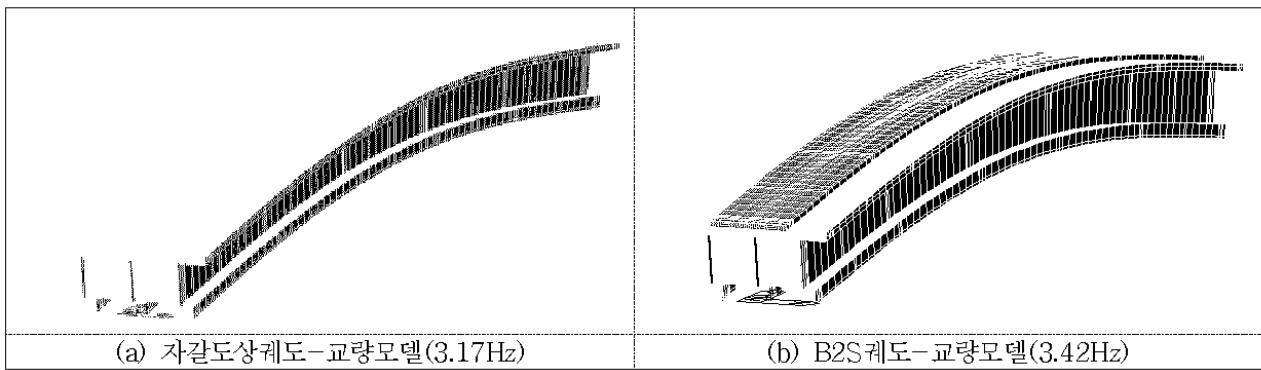


Fig. 5 1st mode 형상 및 결과

대상교량의 궤도구조 형식별 모드해석 결과, 고유진동수는 Fig. 5와 같이 1차 모드에서 자갈궤도 모델과 B2S궤도 모델에서 각각 3.17Hz, 3.42Hz로 나타났다. 이는 UIC 776-1에서 제시한 20m 교량의 고유진동수 기준의 상한치(10.08Hz)와 하한치(4Hz) 사이의 값으로써 관련 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

궤도시스템 적용에 따른 고유치 분석결과, 레일, 침목, 패드 및 자갈을 모형화한 자갈도상궤도가 적용된 해석모델의 경우 3.17Hz 수준으로 나타났으나, B2S궤도가 적용된 해석모델의 경우 B2S궤도 적용에 따른 강성증가로 인해 자갈도상궤도의 강성과 질량을 고려한 해석모델보다 고유진동수가 약 7.31% 크게 나타났다.

고유치 해석결과를 이용하여 서울메트로 차량의 유효타격거리에 대한 교량의 최대 동적응답이 발생할 것으로 예상되는 열차(임계)속도를 식 (1)을 이용하여 Table 4와 같이 산정하였다.

$$V_{\sigma} = w_1 \times S_{eff} \quad (1)$$

- 여기서, V_{σ} : 임계속도 (m/s)
- w_1 : 1st mode 고유진동수 (Hz)
- S_{eff} : 유효타격거리 (m)

Table 4 대상교량의 임계속도 산정

구 분	서울메트로 차량 대차중심간 거리(13.8m)	
	자갈도상궤도-교량	B2S궤도-교량
FE Model		
고유진동수(Hz)	3.17	3.42
임계속도(km/h)	157.49	169.91
부임계속도(km/h)	78.74	84.95

임계속도 검토결과, 자갈도상궤도 모델에 비해 B2S궤도가 적용된 해석모델의 고유진동수가 증가하여 임계속도가 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, 대상교량의 공진발생을 유발하는 임계속도는 궤도형식별로 각각 약 157km/h, 170km/h 이상으로 나타났으며 이러한 속도대역은 도시철도 구간에서 주행 가능한 속도대역이 아니기 때문에 본 대상교량은 궤도형식과 무관하게 공진에 대해 안정한 것으로 판단된다. 다만, B2S궤도를 적용한 고가부 궤도개량에 따른 공진속도(임계속도 및 부임계속도)에 대한 여유는 고유진동수 차이 만큼인 당초 자갈도상궤도 보다 약 7.31% 향상될 수 있는 것으로 나타났다.

3.2 궤도시스템별 철도교량의 동적응답 분석

자갈도상궤도가 부설된 철도교량과 B2S궤도로 개량된 철도교량과의 동적성능을 검토하기 위해 일반적인 지하철 교량형식인 지간 20m 6주형(상, 하선 분리구조) PSC 거더에 대해서 실운행 열차하중에 대한 동적해석을 수행하여 관련기준과 비교·분석 하였다. 대상교량은 상, 하선 분리구조로써 본 연구에서 수행한 동적해석을 위한 교량모델은 상행선측 거더(3주형)와 궤도구조만을 고려하였다.

동적해석은 서울메트로 운영차량의 제원을 이용한 시간이력해석을 수행하였으며 사용프로그램은 범용 구조해석프로그램인 MIDAS-Civil. 6.3.0을 사용하였다. 궤도시스템 변화에 따른 철도교량의 동적응답 해석결과와 관련 기준을 비교하여 Table 5에 나타냈다.

Table 5 궤도시스템 변화에 따른 철도교량의 동적응답 비교(공진시 최대응답)

구 분	성능검증 비교		해석결과		비교	
	기준치		관련기준	자갈궤도-교량(A)		B2S궤도-교량(B)
교량상관 연직가속도(g)	자갈도상궤도	0.35g	EN1990	0.194	24.7% 감소	
	콘크리트궤도	0.50g	호남고속철도기준	-		0.146
상판의 면틀림(mm)	1.5mm/m/3m		호남고속철도기준	0.129	0.112	15.2% 감소
최대 연직처짐(mm)	33.33mm		호남고속철도기준(주행안전)	12.82	12.25	4.4% 감소
	14.73mm		호남고속철도기준(승차감)			

※최대 연직처짐규정(승차감기준, EN1990) : 대상교량이 1련 단순교이므로 L/δ에 계수 0.7곱한 값임.

해석결과에서 최대연직처짐 및 연직가속도는 경간 중앙점의 외측레일 아래에 위치한 슬래브의 수직변위 및 연직가속도를 의미하며, 상판의 면틀림은 하중이 재하된 궤도간격(1.5m)으로 경간중앙부와 경간중앙에서 3m 위치에서의 연직처짐을 구하여 궤도간격(1.5m)을 1m로 보정하여 산출한 결과이다.

궤도형식별 공진시 경간중앙부 최대 연직처짐응답 파형은 Fig. 6과 같으며 공진발생에 따라 두 가지 모델 모두 동적응답의 증폭효과가 발생하고 있으나, 제시한 기준치보다 작게 나타남으로써 동적안정성을 확보하는 것으로 나타났다.

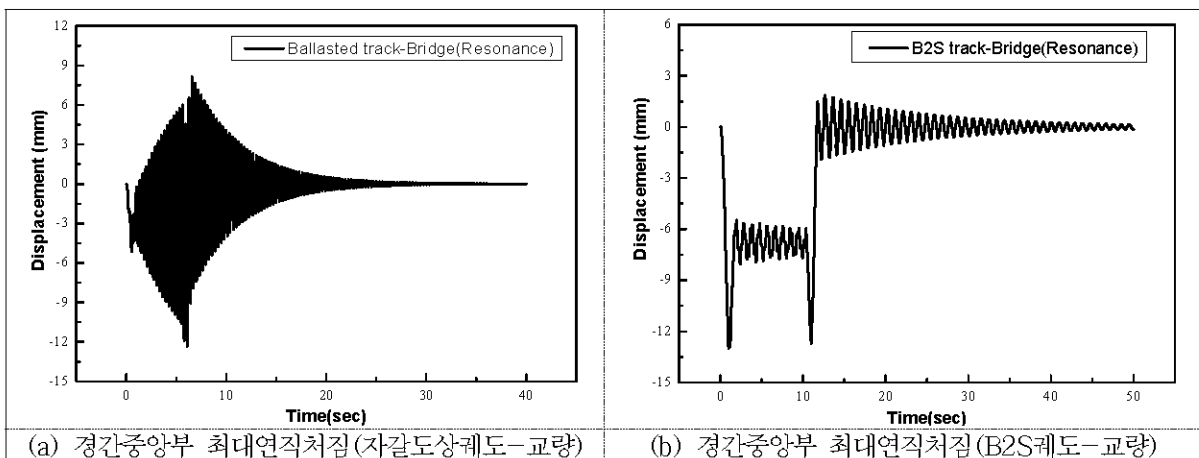


Fig. 6 궤도형식별 철도교량 경간중앙부 최대연직처짐(공진시)

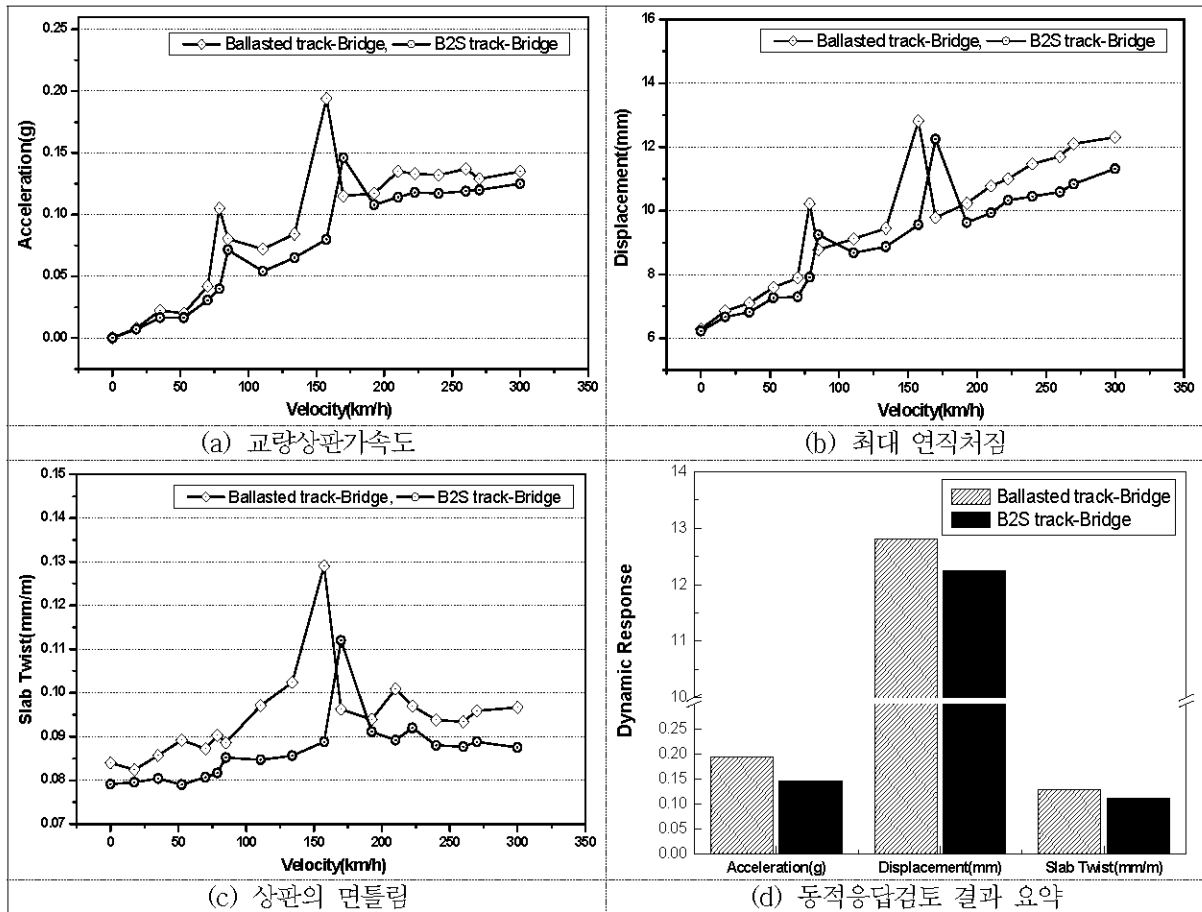


Fig. 7 주행속도별 교량의 동적응답검토 결과

시간이력해석 결과, Table 5와 Fig. 7과 같이 B2S궤도 적용에 따른 기존 노후 철도교량의 공진시 최대 동적응답의 수준은 교량상판 연직가속도, 상판 면틀림 및 최대 연직처짐과 같은 모든 항목에서 자갈도상궤도가 적용된 해석모델 보다 각각 24.7%, 15.2%, 4.4% 작게 나타났다.

또한 B2S궤도 적용 모델의 경우, 각각의 동적응답수준이 허용기준치 대비 각각 29.2%, 7.5%, 83% 수준으로 나타남으로써 충분한 안정성을 확보하는 것으로 분석되었다.

4. 결론

B2S궤도 적용에 따른 공용중인 지하철 철도교량의 동적안정성 검토를 위해 지하철 운행열차를 고려한 시간이력해석을 수행하였으며 해석결과를 관련기준(동적안정성 검토)과 비교함으로써 B2S궤도가 적용된 기존 운행선 지하철 철도교량의 동적성능을 검증하였으며 그 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1. 대상교량의 경우 궤도형식과 무관하게 공진발생을 허용한 경우에도 관련기준의 동적 처짐기준과 승차감기준을 충분히 만족하여 동적안정성 측면에서 문제가 없을 것으로 판단된다.
2. B2S궤도를 운행선 고가부 도상개량공사에 적용할 경우 기존 자갈도상궤도보다 최대 동적변위응답과 가속도 응답이 각각 4.4%, 24.7% 저감되는 효과를 기대할 수 있으며 이를 통해 충분한 동적안정성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 운행 최고속도를 훨씬 상회하는 수준인 169km/h 이상의 경우에도 충분한 동적안정성을 확보할 수 있는 것으로 검토되어 B2S궤도를 이용한 도상개량은 기존 철도교량의 동적성능 및 속도 향상에 효과적일 수 있음을 해석적으로 입증하였다.

3. 또한 당초 자갈도상궤도의 궤도중량 보다 개선된 B2S궤도(ver2.0)를 적용함에 따라 궤도의 중량을 낮추고 강성은 증가시킴으로써 기존 고가부의 장기 내구성을 확보하는 데에 유리할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 철도청 (1999), “철도설계기준(철도편)”, 철도청
2. 한국콘크리트학회 (2003), “콘크리트구조설계기준”, 건설교통부
3. 한국건설기술연구원 (2002), “S.C.P 합성거더 개발 연구 보고서”
4. 한국건설기술연구원 (2004), “S.C.P 단순합성철도교 중간 보고서”
5. SYSTRA(1995), "bridge Design Manual(BRDM) Final Report", Korea High Speed Rail Construction Authority (KHRC)
6. UIC Code 776-1R(1994), "Loads to be considered in railway bridge design", 4th edition, International Union of Railway
7. UIC Code 776-3R(1989), "Deformation of bridges", 1st edition, International Union of Railway