

차세대 고속철의 증속을 고려한 PSC 철도교 마찰 교량받침의 동적 거동 해석

오순택¹, 이성태^{2*}

Dynamic Behavior Analysis of PSC Train Bridge Friction Bearings for Considering Next-generation High-speed Train

Soon-Taek Oh¹, Seong-Tae Yi^{2*}

Abstract: In this study, the dynamic behavior of friction bearings of PSC (Pre-Stressed Concrete) box train continuous bridge was numerically analyzed at 10 km/h intervals up to 600 km/h according to the increasing speed of the next-generation high-speed train. A frame model was generated targeting the 40-meter single-span and two-span continuous PSC box bridges in the Gyeongbu High-Speed Railway section. The interaction forces including the inertial mass vehicle model with 38 degrees of freedom and the irregularities of the bridge and track were considered. It was calculated the longitudinal displacement, cumulative sliding distance and displacement speed of the bridge bearings at each running speed so that compared with the dynamic behavior trend analysis of the bridge. In addition, long-term friction test standards were applied to evaluate the durability of friction plates.

Keywords: Single span and two-span continuous PSC box bridge, Longitudinal displacement, Cumulative sliding distance and displacement speed, Long-term friction test

1. 서론

국내 교량에서 사용되는 교량받침에는 외형 치수에 한정된 국내 설계기준인 KS 기준만 적용가능하고 제작업체에 따라서는 압축저항 실험을 바탕으로 한 유한요소해석법을 이용하여 수직하중과 횡하중에 대한 응력분포 및 이력곡선을 적용한 동적특성을 분석하지만 차세대 고속철의 증가될 주행속도에 대한 교량받침의 누적이동거리 증가 및 동적거동에 의한 예상되는 손상에 대처하기 부족하므로 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다. 또한 손상이 가장 큰 마찰판의 경우 해외기준을 바탕으로 한 장기마찰시험을 수행하고 있으며 시험에 적용된 마찰판의 이동속도는 온도하중에 의한 거동인 경우 저속 0.4 mm/sec을, 활하중에 의한 거동인 경우 고속 15.0 mm/sec를 EAD 기준과 CUAP 03.01/78 (2011)을 적용하여 실험하였다(Dae-Chang, 2014). 반면, 국내의 경우에는 국토교통연구원 인프라운영원에서 장기마찰시험과 단기시험에 관련한 기준을 제공하고 있는데 저속 마찰시험의 경우는 0.4

mm/sec의 속도를 규정하고 있으나 고속 마찰시험인 경우는 2.0 mm/sec가 제안되었다. 마찰판의 경우 대부분 상용 중인 PTFE (polytetrafluoroethylene)와 최신 개발된 UHMWPE (ultra-high molecular weight polyethylene)를 윤활유와 흡의 유무를 포함하여 다양한 기준을 제공하고 있다(KOCED, 2020). 국외 마찰받침 기준의 경우, 마찰판 누적이동거리 50,000 m 이상에 대한 실험방법과 한계 평가기준을 통한 설계기준이 수립되어 있다. 특히 유럽에서 통용되는 EN-1337-2 (2004)는 장기 마찰시험을 기준으로 온도변화와 활하중에 의한 누적이동거리에 대한 평가기준을 제안하고 있으나 이는 적용되는 주행속도가 350 km/h 이하인 경우로 한정하고 35°C 이하의 온도를 적용하고 있으므로 고온환경과 KTX와 HEMU-430X를 포함한 주행속도 450 km/h 이상의 차세대 고속철의 경우를 고려한다면 차량중량과 관성운동 그리고 주행속도 증가에 대한 영향을 고려한 교량받침 동적거동에 대한 보다 합리적인 평가기준의 수립이 요구된다.

이에 본 연구에서는 차세대 고속철의 증가하는 주행속도에 대비하여 100 km/h 부터 600 km/h 까지 10 km/h 간격으로 고속철 PSC 박스 연속교량의 교량받침에 대한 동적거동을 수치해석으로 확인하였다. 국내 고속철 구간의 대표적인 교량형식인 40 m 단경간과 2경간 연속 PSC 박스교를 연구대상으로 프레임모형을 구성하였으며, 38 자유도의 관성질량력 차량모형 및 교량과 궤도의 불규칙성을 포함한 상호작용력을 고려

¹정회원, 서울과학기술대학교 명예교수

²정회원, 인하공업전문대학 교수, 교신저자

*Corresponding author: yist@inhac.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon 22212, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

하였다. 교량, 차량, 궤도 세 가지 독립된 모형의 상호작용력을 고려한 Runge-Kutta 4th order 수치해석법을 적용하고 개선된 차량 모델로 동적 수치해석을 수행하였다. 개선된 차량모델은 수직변위, 피칭, 롤링 뿐만 아니라 횡변위, 종변위 및 요잉에 의한 운동효과를 고려한 38 자유도로 모델링된 KTX (Korea Train eXpress) 동력차와 4가지 변수(수평, 궤간, 줄, 연직면)로 지수스펙트럼 밀도함수를 이용하고 불규칙성을 고려한 궤도등급을 생성하여 수치해석에 사용하였다(Oh et al., 2010).

해당 수치해석을 통해 단경간과 2경간 연속교량의 교량받침에 대하여 횡변위, 최대 횡변위, 누적 이동거리 그리고 변위 속도와 최대 변위속도를 산정하여 선행연구에서 도출된 교량의 수직처짐, 동적 확대계수 및 처짐가속도와 관련된 내용과 비교하여 주행속도 별 최대 변위 회귀 분석식을 제안하고, 교량받침의 마찰판의 내구성평가를 위한 장기마찰시험에 적용되는 최대 변위 한계와 시험속도를 결정하기 위한 기초연구를 수행하고자 하였다.

2. 교량받침 장기마찰시험

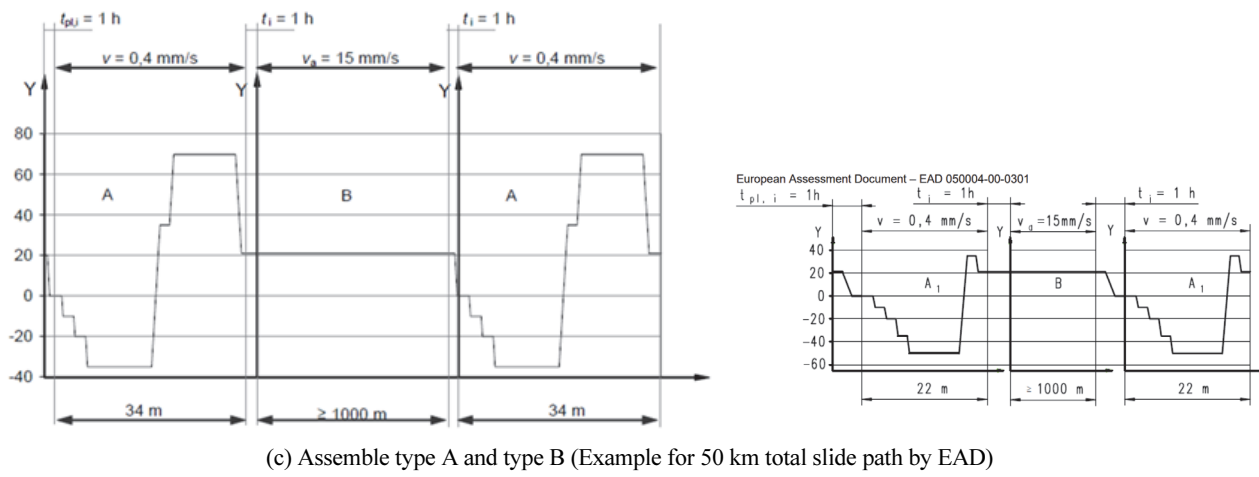
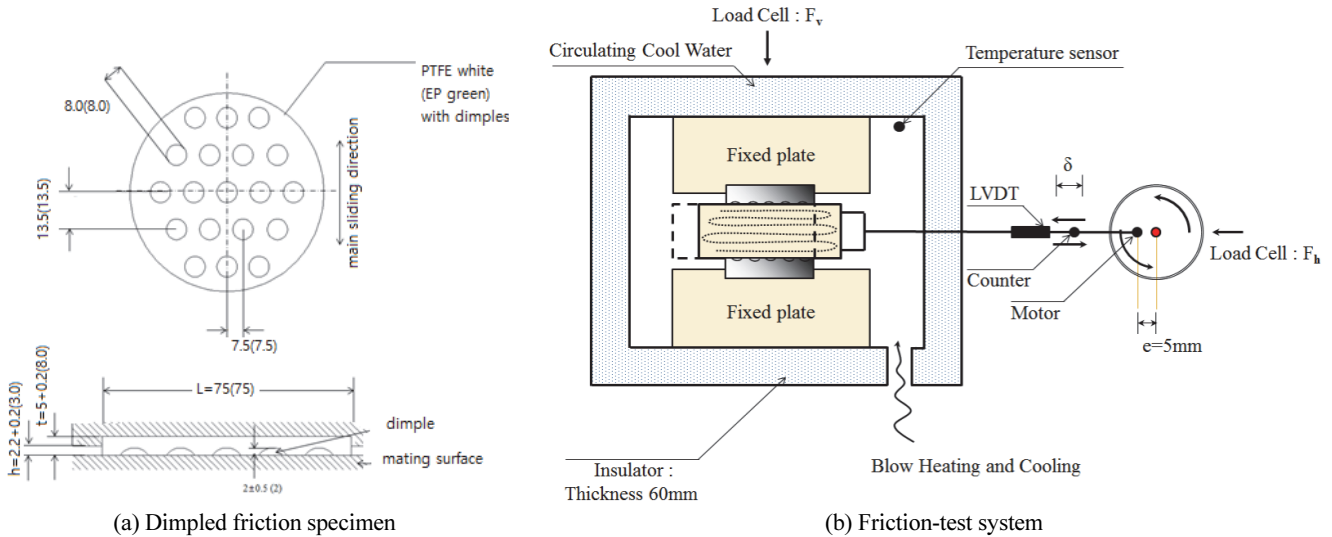
2.1 교량받침 장기마찰시험 준비

교량받침의 이동량을 지지하는 마찰재의 내구성을 검증하기 위하여 Fig. 1(a)와 같은 표준시험체를 마련하고 장기 마찰시험을 수행하였다(Dae-Chang, 2014).

장기 마찰시험은 두 가지 저속과 고속시험 타입을 23단계를 교차 반복하여 누적 이동거리인 25,388 m(1,560,400 cycle)을 Table 1과 같은 순서로 수행하였다. 저속 0.4 mm/sec로 시

Table 1 Assemble type over 25,000 m total sliding path (units m)

Phase No.	1	2	3	---	21	22	23
Type	A	B	A		A	B	A
Distance	34	2,240	34		34	2,240	34
Total	34	2,274	2,308	---	23,114	25,354	25,388



(c) Assembly type A and type B (Example for 50 km total slide path by EAD)

Fig. 1 Long-term friction test

험하는 Type A는 온도하중에 의한 거동을 시뮬레이션한 것으로 Fig. 1(c)에서 나타낸 것과 같이 8가지 온도단계를 적용하여 10 mm 왕복 1,700 cycle까지 누적 이동거리는 34 m이며 총 24시간이 요구된다. 이는 유럽기준과 비교 할 경우 70 °C의 고온단계가 550 cycle까지 추가되어 있다. 고속 15.0 mm/sec인 시험속도 Type B는 활하중에 의한 거동을 시뮬레이션한 것으로 일정온도 +21 °C(±1 °C)에서 2,240 m (140,000 cycle)까지 수행하였다.

시험편 EP (Engineering Plastic)는 직경 $\phi 75$ mm와 두께 8^{+1}_0 mm의 크기로 준비하여 CUAP 03.01-78에 따라 가로 13.5 mm와 세로 15 mm의 교차 간격으로 깊이 2.0 mm의 홈(dimple)을 가공하였으며 마찰면에는 그리스(grease)를 도포하였다. 시험편 EP는 Fig. 1(b)와 같이 고정판(fixed plate)에 5 mm 홈을 내어 상·하 대칭으로 삽입하였으며 돌출량은 3.0 mm인 반면에 PTFE 시험편의 경우 직경 $\phi 75$ mm, 그리고 두께는 $5.0^{+1.5}_0$ mm, 돌출높이는 $2.2^{+0.2}_0$ mm였다. 여기서 두께와 돌출높이를 제외한 나머지는 모두 동일한 조건을 적용하였다. 시험장치와 시험편을 상·하 대칭으로 고정하고 수평으로 반복 이동하는 지그 플레이트는 온도변수를 최소화하기 위하여 냉각수를 순환시켰고, 단열재로 외부와 차단하였으며, 수직 압축하중을 수직로드셀로 감지하여 일정하게 유지했다. 전동모터와 회전축 기어를 이용하여 속도를 제어하고 편심베어링에 의하여 수평이동으로 전환할 때 발생하는 진동 제어 및 최대 변위는 ± 10 mm로 고정하고 변위계(LVDT)와 카운터 그리고 수평로드셀을 이용하여 측정하였다. 수평 로드셀에 기록되는 수평력의 유형은 최초 움직임에서 최대 값(static friction, $F_{Hs,l}$)을 나타내며 이후 최소 값(dynamic friction, $F_{Hd,l}$)까지 감소한 후 수평변위의 한계에 이를 때까지 소량 증가시켰다. 시험 중, cycle이 반복되면서 최대 값은 감소하지만 총 phase가 완료될 때 피크 정적 수평력($F_{Hs,T}$)과 동적 수평력($F_{Hd,T}$)을 산정하였다. 두 로드셀 값의 비로부터 사이클별 마찰계수를 얻었다. PTFE시험편의 경우 마찰계수는 적게 발생하나 시험 누적거리 4,548 m에서 마모량이 과도하여 과단으로 인해 시험을 중단하였다. 반면에, EP시험편의 경우 마찰계수가 증가되어 0.69에 이르렀으나 목표거리를 만족하였다.

2.2 교량받침 장기마찰시험 시편 pilot test

유럽기준 EN1337-2 (2004)과 국내기준 KOCED (2020)에서는 Type B의 시험속도를 2.0 mm/sec로 규정하고 있다. 두 시험편의 비교를 위하여 저속실험만 1000 cycle 수행하고 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 EN 1337-2 (2004)를 기준으로 독일에서 수행된 PTFE의 실험결과와 비교하였다.

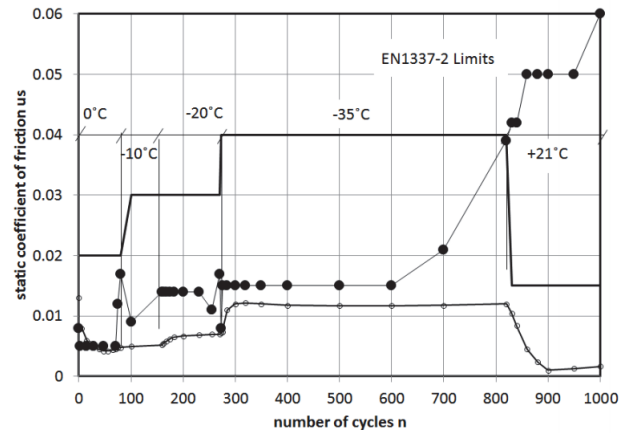


Fig. 2 Upper limits of long-term friction test

Table 2 Maximum test coefficient of friction and limits

Temperature	$\mu_{st,l}$		$\mu_{dyn,l}$		$\mu_{st,T}$		$\mu_{dyn,T}$	
	Limits	Test	Limits	Test	Limits	Test	Limits	Test
-35 °C	0.030	0.015	0.025	0.008	0.050	0.039	0.040	0.021
-20 °C	0.025	0.014	0.020	0.009	0.040	0.017	0.030	0.011
0 °C	0.020	0.008	0.015	0.005	0.025	0.017	0.020	0.012
+21 °C	0.015	0.050	0.010	0.042	0.020	0.062	0.015	0.050

온도변화에 따른 정적마찰계수의 상한 제한과 시험결과를 Table 2에 비교하였다. 이러한 상한 제한에도 불구하고 저온 -35 °C부터 증가된 마찰계수 0.04가 상온 21 °C 이후 최고 마찰계수 0.06까지 증가하였다(Oh et al., 2016).

반면에 본 시험 결과와 관련한 국내 연구 결과에서 UHMWPE의 경우 마찰계수는 시험이 진행될수록 지속적으로 증가하여 Type이 교체되는 한 시간의 휴지시간에도 불구하고 한 달간의 총 마찰시험기간 동안 0.023부터 0.062까지 꾸준히 증가되는 것으로 조사되었다(Choi et al., 2019). 따라서 PTFE의 마찰계수(0.18~0.25)는 EAD 기준에서 제안한 UHMWPE의 마찰계수(0.20~0.60) 보다 작으나 허용압축력도 부족하고 표면거칠기가 크게 작용하여 마찰계수보다 10 배 이상의 마찰계수를 산정하여 최소화된 연삭효과를 평가하였다(Dong et al., 2011).

2.3 교량받침 장기마찰시험 결과

마찰거리 25,000 m에 대한 장기 마찰시험의 실험결과는 PTFE의 경우 유럽기준을 모두 만족시켰으나 이미 언급한 바와 같이 도중에 파단되어 최종 마찰거리 목표를 만족하지 못하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이, EP의 경우 Type A의 저온(-35 °C)에서 0.095에 도달한 이후 상온(70 °C)에서 0.075 이하로 회복되었으나 Type B에서 마찰계수 0.03 이하부터 시작하

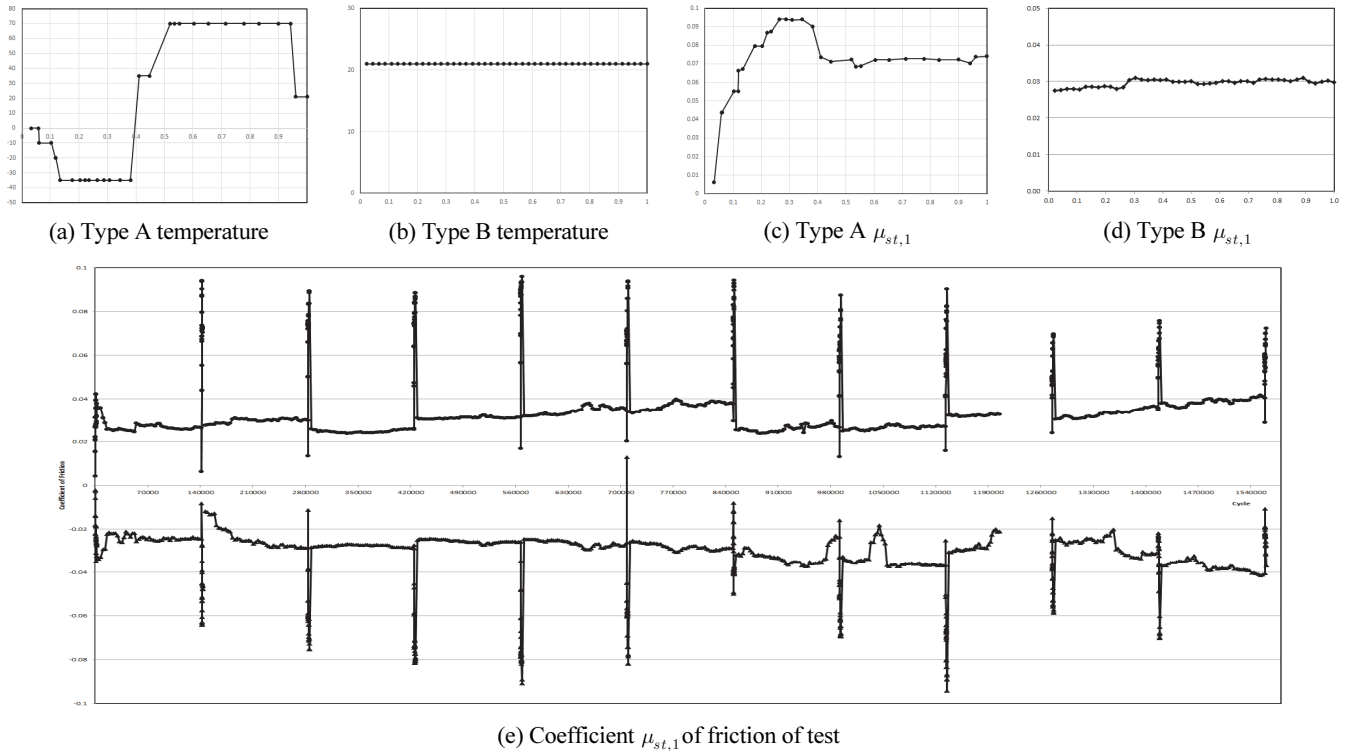


Fig. 3 Long term friction test results

여 이후 지속적으로 상승하여 총 1,560,400 cycle 시험 중 최대 값 0.045을 기록하였다. D사에서 실험한 장비의 상세는 해당 연구보고서와 관련논문에 상술되어 있다(Oh et al., 2016).

3. 수치해석 모델링

KTX 동력차량에는 1개의 차체 질량과 2개의 대차 질량에 총 6개의 자유도를, 4개의 운축장치 질량에는 피칭을 제외한 롤링, 요잉, 연직변위, 횡변위, 종변위 총 5가지의 자유도를 고려하였다. 이로 인한 동력차 전체의 자유도 수는 38개이다(Oh et al. 2010). 수치해석의 대상 교량은 경부 고속철 구간 중 공용 중인 PSC 박스교에서 최대 경간길이인 40 m의 구간을 선택하였다. 또한, 단순교와 2경간 연속교에서 얻은 해석결과를 비교하기 위해 두 교량에는 동일한 단면을 적용하였다. 폭 14m 복선 교량으로 Fig. 4에서 하이라이트된 연속된 2경간의 길이 80m와 진입부 단경간 길이 40 m를 3차원 프레임 요소로 모델링하였다. 동력차와 교량 그리고 궤도의 불규칙성은 상호작용력을 고려하여 Runge-Kutta 4th order 수치해석법으로 해석하였으며 각각의 주행속도에서 교량의 동적/정적 거동을 비교하여 동적확대계수를 산정하고 3차 다항의 회귀 분석식을 교량형식 별로 제안하였다. 또한, 주행 안정성평가를 위한 최대 처짐과 처짐가속도를 단경간과 2경간 연속교에서 비교하였다(Oh et al., 2023). 특히 본 연구에서는 선행연구에서도

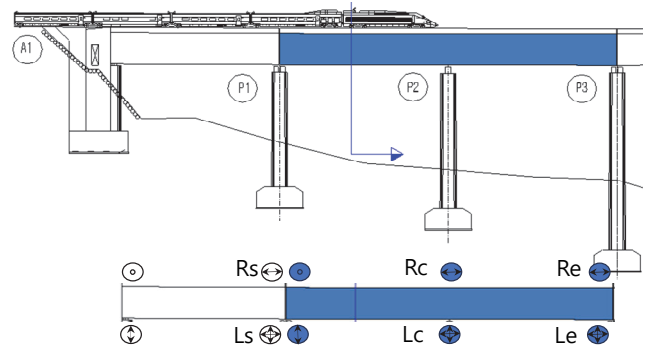


Fig. 4 PSC bridge bearing arraignment on the Gyeongbu railway

출된 최대 처짐 주행속도 구간과 연속교의 후위경간에서 발생하는 거동 증폭 현상을 교량받침에서도 동일하게 증폭되는 지의 여·부에 집중하여 연구하였다.

4. PSC 박스교 교량받침의 동적 거동

공용 중인 고속철 구간 중, 최대 지간인 40 m를 각각 갖는 PSC 박스 단순교 및 2경간 연속교 교량받침의 동적 거동을 파악하기 위해 유한요소 해석법을 이용하였다. 단경간 및 2경간 연속교의 중앙교각과 단부교각에 위치하는 각각의 교량받침에서 종방향 변위를 구하였으며 해석은 속도구간을 주행속도 100 km/h에서부터 600 km/h까지 10 km/h 간격으로 수행하였

고 기존 운행 중인 300 km/h 이하인 KTX 속도구간과 450 km/h 이하인 HEMU 속도구간 그리고 차세대 고속철 속도구간의 3가지로 구분하였다. 그리고 해석결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 선행 연구한 교량의 최대처짐에 대한 해석결과와 비교/분석하였다(Oh et al., 2021).

4.1 교량받침의 최대 동적 증방향 변위

수치해석 결과로부터 주행속도에 따른 최대 증방향변위를 계측위치 별로 Fig. 4에 나타내었다. PSC 40 m 단경간 교량에서는 양방향 이동단 교량받침 Ls (Left single-span)의 경우가 최대 변위값을 나타내었고, 회전단과 마주보는 교량받침 Rs (Right single-span)의 경우는 해석된 속도 구간 내에서 평균은 84.6 %이고 표준편차는 0.046이었다. 이 차이는 회전단을 기준으로 두 교량받침 거리의 비가 94.4 %이므로 평균값은 10 % 정도로 확대되며 또한 차량의 주행노선이 왼편으로 모형화되어 발생한 결과로 판단된다. 또한 좌·우 두 교량받침 간 해석결과의 비가 90 % 이내로 해석된 구간은 330 km/h부터 360 km/h까지로 조사되었다. 이는 동적특성이 발현되지 않는 속도구간으로 최대 동적효과가 발현된 280 km/h와 430 km/h 구간에서는 평균 비율 84.6 % 이하의 차이를 나타내었다.

선행연구(Oh et al., 2022)에서 조사된 동일한 규격의 단경

간 PSC 교량의 동적 수직처짐은 최대 8.13 mm로 주행속도 430 km/h에서 발생하였으며, 최대값에 도달한 이후 급속하게 감소하는 유형으로 조사되었다. 따라서 현재 공용 중인 330 km/h 이하의 주행속도 구간에서는 최대 처짐 6.94 mm가 280 km/h에서 발생하였으며 차세대 고속철 주행속도인 430 km/h 이상인 구간에서는 570 km/h에서 최대 처짐 6.26 mm가 조사되어 이 결과를 바탕으로 3차항 회귀 분석식을 제안하였다. 조사범위 내에서 최대 처짐 8.13 mm를 기준으로 각각 85.4 %와 77.0 %였다. 이와 마찬가지로 교량받침의 증방향 최대 변위는 위에서 언급한 동일 주행속도에서 1.2869 mm, 1.0887 mm 그리고 1.0157 mm의 순서로 해석되어 최대값을 기준으로 각각 84.6 %와 78.9 %의 비율로 계산된다. 결과적으로 단순교의 교량처짐과 교량받침의 횡변위의 주행속도별 추이는 전체적인 유형과 일치하고 비율도 유사한 값으로 평가되었다.

PSC 2경간 연속교의 경우, 중간 교각에 위치하는 양방향 이동단 교량받침 Lc (Left center)의 경우가 해당 교량받침 중 최대 변위를 나타내었고 Ls의 최대 횡변위를 기준으로 비교하면 평균 61.2 %로 계산되었으며 표준편차는 0.030이고 변동계수(CV, Coefficient of Variation)는 5.0 %이다. 이는 Rs/Ls 비율의 변동계수 5.4 %와 유사한 상관도를 나타내며 추이도 일치하였다. 특히 주행속도 430 km/h에서 최대 변위 0.76385

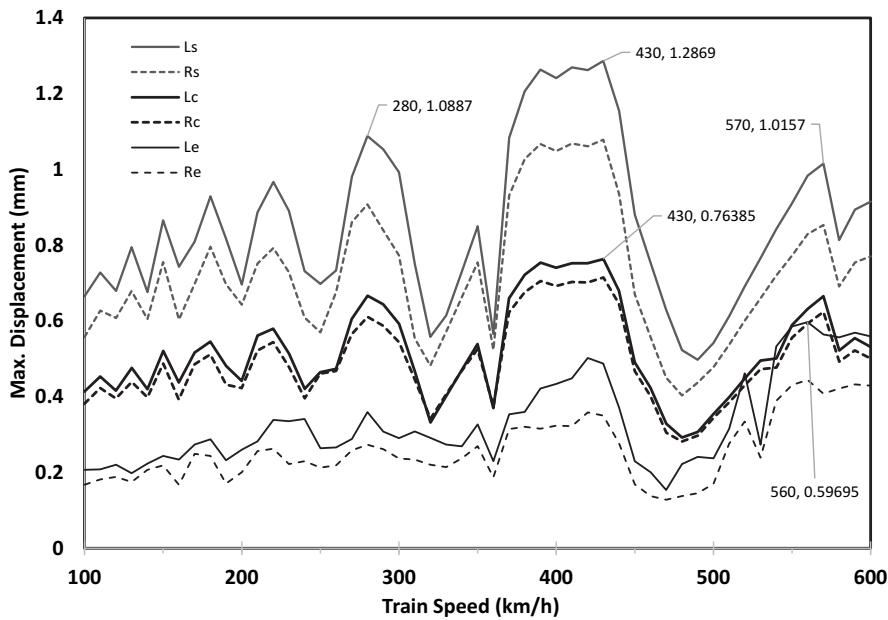


Fig. 5 Maximum displacement of PSC box bridge bearings

Table 3 Regression equation of maximum displacement of bearing by running speed

	Regression Equation of maximum bearing displacement (mm) (x = running speed; km/h)	R ² (%)	Eq.
Simply supported PSC bridge bearing	$y = -1.709 \times 10^{-8}x^3 + 1.170 \times 10^{-5}x^2 - 5.227 \times 10^{-4}x + 0.674$	95.1	(1)

mm를 나타내며 전술한 특이 속도 구간의 응답과 유사한 비율로 해석되었다. 한편 동일한 중간 교각에 위치한 회전단과 마주 보는 일방향 이동단 교량받침 Rc (Right center)의 경우 Lc의 응답에는 미치지 못하나 거의 일치된 응답으로 해석되었다. 이는 연속교의 특성상 좌·우 교량받침이 유사하게 연행하는 응답으로 전술한 회전단을 기준으로 거리의 차이가 최소로 발현하기 때문으로 판단된다.

반면에 2경간 연속교의 종점부 단부교각에 위치한 교량받침 Le (Left end)의 경우 Ls의 최대 횡변위를 기준으로 비교하여 평균 39.6%의 값이 계산되었으며 표준편차는 0.119이고 변동계수는 30.1%였다. 이는 주행속도 500 km/h 이상의 속도구간에서 횡방향 변위가 크게 증가하여 주행속도 550 km/h에서 0.59695 mm를 나타냈으므로 Lc와 Rc의 최대 변위를 상회하여 상관도를 산란시킨 것으로 평가된다. 역시 최단부 교각에 위치한 우측 교량받침 Re (Right end)의 경우 이러한 역전 현상 없이 Rc의 응답과 유사한 추이를 나타내며 일정한 간격을 유지하였다. 2경간 연속교의 좌측 최단부 양방향 이동단 교량받침의 역전 현상은 교량의 최대 처짐 해석결과에서 급한 증가세를 보이며 주행속도 570 km/h에서 해석구간 내 최대 처짐인 8.17 mm를 기록한 현상에는 미치지 못하였으나 추후 이와 관련한 실증적 연구가 요구되는 것으로 판단된다.

4.2 교량받침의 최대 변위 추세 분석

고속철 PSC 단경간교에서 종방향 교량받침의 주행속도에 따른 최대 횡변위를 연결하면 주기함수의 형태로 도출되어 각각의 주기에서 peak point를 선택하여 3차 다항식 형태의 회귀 분석식을 Fig. 6에서 제시하였다. 여기서 해당 회귀 분석식의 결정계수는 95.1%로 신뢰성이 높은 제안식으로 평가된다. 즉, 이 제안식은 교량의 최대 처짐에 대한 회귀 분석식과 유형

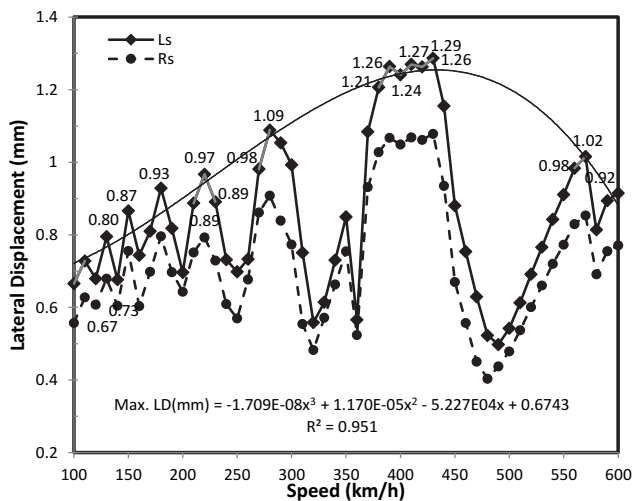


Fig. 6 Poly-nominal regression equation

별로 상관관계가 높은 것으로 판단되며, 그로 인해 대상 교량의 동적거동과 교량받침의 거동은 동일한 유형으로 주행속도와 연동되는 것으로 판단된다. 본 연구의 범위 내에서 해석결과와 회귀 분석에서 구한 추정값 모두 최대치인 1.29 mm 이하의 값이 되는 것으로 조사되었다.

4.3 교량받침의 누적 이동거리

교량받침의 경우, 요구성능 설계기준은 앞에서 언급된 안정성 확보를 위한 최대 변위의 한계와 내구성을 평가하기 위한 누적 이동거리가 주요 항목으로 고려된다. 교량받침의 누적 이동거리는 Fig. 6의 최대 변위에 대한 해석결과를 바탕으로 단경간 교량의 경우 회전단과 대각 방향에 위치한 양방향 이동단에서 발생할 것으로 예상되며, 2연속경간의 교량받침인 경우 이보다 적게 발생한 것으로 예상된다. 그러나 차량통과로 발생하는 최대 변위와 연속된 부변위를 포함한 누적 이동거리를 도식한 교량받침 별 Fig. 7의 해석결과를 확인하면 2연속경간 교량받침의 경우 최대 변위의 경우와 달리 누적 이동거리에서는 단경간의 결과와 대부분 근접하며 때로는 우세한 응답을 나타내는 구간도 조사됨을 알 수 있다.

전체 해석구간 내에서 최대 누적 이동거리는 단순교 양방향 이동단에서 주행속도 390 km/h일 때 3.17 mm이고, KTX 주행속도 범위 내에서 290 km/h일 때 2.59 mm, 그리고 저속인 150 km/h일 때 2.75 mm를 기록하여, 특정 주행속도와 독립사건으로 누적 이동거리가 결정되는 것으로 평가된다. 또한 2연속경간 교량받침의 경우에도 중앙부에서 최대 기록은 410 km/h일 때 2.95 mm이며 저속구간에서 280 km/h일 때 2.51 mm로 단경간의 경우에 근접하고 일부구간에서 상회하였다. 또한 고속구간에서는 570 km/h일 때 2.50 mm로 단부 양방향 이동단의 2.51 mm와 함께 단경간의 결과를 크게 상회하였다.

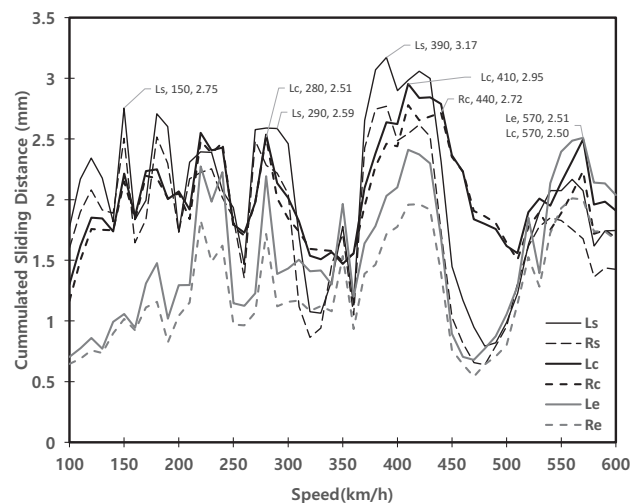


Fig. 7 Total sliding distance of PSC bridge bearings

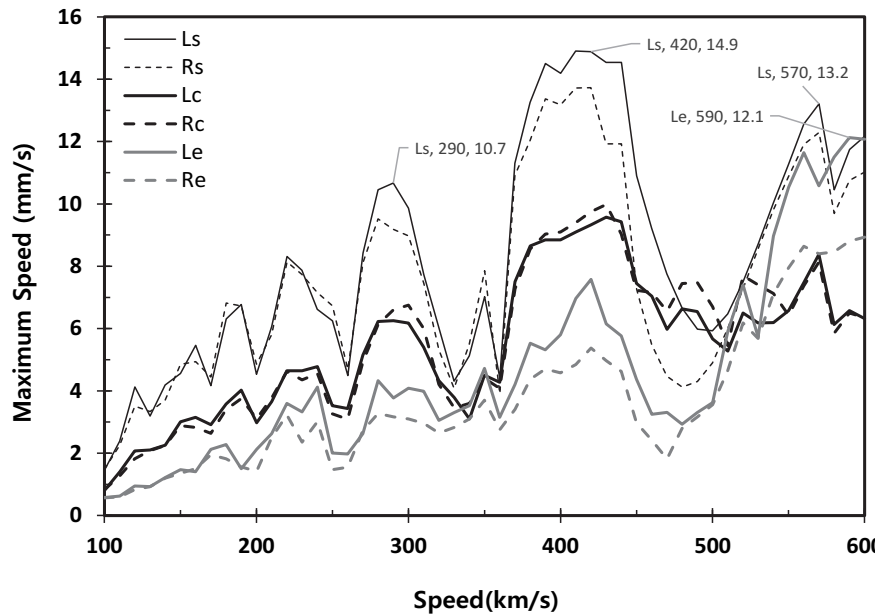


Fig. 8 Maximum sliding speed of PSC box bridge bearings

오른쪽 회전단과 대응하는 중간 교각에 위치한 일방향 이동단의 경우, 철도하중이 왼쪽 PSC 단면으로 편중되어 최대 변위의 경우 상대적으로 우세하지 않았으나 누적 이동거리에서는 440 km/h일 때 2.72 mm가 발생하여 500km/h일 때까지 최대 응답을 주도하는 현상이 조사되었다.

4.4 교량받침의 최대 이동속도

교량의 거동에 관련된 연구에서는 최대 처짐과 처짐가속도에 대한 주행안정성이 관련 설계기준을 만족시켜야 하는 반면에 교량받침의 경우 최대 횡변위와 관련된 최대 변위속도를 예측하고 마찰판의 소재 개발을 위한 장기 마찰시험 속도를 적용하여 내구성능을 평가하는 기준으로 활용할 수 있다. 관련 국내·외 장기마찰시험에 따르면 온도하중의 경우 시험 변위속도는 0.4 mm/sec로 시험거리 22 m와 활하중의 경우 변위속도 2.0 mm/sec로 시험거리 1,000 m 이상을 교차하고 21회 반복해야 하며 총 시험거리는 50,000 m여야 한다(EN 1337-2, 2004; SPS-F KOCED 0012-7400, 2020; Choi et al., 2019). 한편 활하중에 대한 시험속도를 15.0 mm/sec로 적용한 기준과 연구도 있었다(EAD 050004-00-0301, Dae-Chang, 2014).

교량받침의 횡변위 속도에 대한 해석결과를 Fig. 8에 교량받침 위치 별로 나타내었다. 교량받침의 횡변위 최대 속도는 단경간 양방향 이동단의 해석결과가 가장 우세한 값을 나타내고 있으며 회전단과 마주보고 있는 일방향 이동단의 변위속도는 최대 변위의 경우와 다르게 250 km/h 이하인 저속구간에서 양방향 이동단의 변위속도를 상회한 결과를 나타내고 있다. 해석구간 내에서 최대 변위속도는 양방향 이동단에서

주행속도 420 km/h에서 14.9 mm/sec를 기록하였고, KTX 운행속도 구간에서는 주행속도 290 km/h에서 최대 변위속도 10.7 mm/sec로 계산되었으며 차세대 고속철 주행속도 구간에서는 570 km/h일 때 13.2 mm였다. 연속경간교의 교량받침의 해석결과는 대부분의 속도구간에서 단경간교의 해석결과에 미치지 못하나 특이하게 550 km/h이상의 속도구간에서 단부 교각에 위치한 양방향 이동단에서 변위속도가 크게 증가하여 590 km/h일 때는 12.1 mm/sec를 기록 단경간의 결과를 상회하였다.

이러한 해석결과 중, 해석 속도 구간의 최대 해석값 14.9 mm/sec가 가장 의미가 있는 것으로 평가된다. 따라서 유럽기준 EN1337-2와 국내기준 및 실험에서 제안된 시험속도 2.0 mm/sec 보다 EAD (European Assessment Document, 2017)에서 제시한 15.0 mm/sec가 고속철 교량의 마찰판 교량받침의 성능평가를 위한 장기마찰시험 속도로 가장 적절한 것으로 평가되었다.

5. 결론

이 연구에서는 차세대 고속철의 증속에 대비한 PSC 박스 교량에서 교량받침의 변위와 변위속도를 산출하고 받침 마찰판의 장기마찰시험에 응용하기 위하여 수치해석을 실시하였다.

교량받침의 종방향 변위에 대한 해석결과에 의하면 단경간과 연속경간 교량의 경우, 모두 최대 처짐에 대한 해석결과와 유사하게 450 km/h 이하인 HEMU 주행속도 구간에서 단경간 양방향 이동단에서 430 km/h일 때 최대 1.2869 mm가 발생하

였다. 따라서 이들 피크값을 선정하여 3차의 다항 회귀 분석식을 제안하였다. 부변위 값이 포함되는 누적이동거리의 해석결과 역시 동일한 위치 교량받침에서 390 km/h일 때 최대 3.17 mm가 발생하고 특히 모든 해석대상 속도와 교량받침의 해석결과가 확연히 구분되는 최대 변위와 달리 매우 근사한 결과를 나타내어 서로의 상관관계없이 이동단의 마찰거리는 일정하다.

교량받침의 마찰속도에 대한 해석결과, 최대값은 단경간 양방향 이동단에서 420 km/h일 때 14.9 mm/sec로 조사되어 이는 EAD에 제시된 시험속도 15.0 mm/sec와 부합하는 것으로 평가된다. 또한 300 km/h 이하인 KTX 속도구간에서는 동일한 위치 받침에서 290 km/h일 때 10.7 mm/sec로 조사되었고, 차세대 고속철 속도구간에서는 570 km/h일 때 13.2 mm/sec가 발생한 반면에 연속 경간교의 최단부 양방향 이동단에서 590 km/h일 때 단경간의 경우와 근사한 12.1 mm/sec로 조사되었다. 이는 2경간 연속교 최대 처짐이 고속 주행 시 최대 값까지 증폭되는 특이 현상과 유사하므로 기존 인프라 교량 위를 차세대 고속철이 고속 주행 시 발견된 특이현상에 대한 실증적 검토가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2021년 정부재원으로 한국연구재단 중견연구 NRF-2021R1A2C1010762 과제지원을 받아 수행된 기초연구 사업임.

References

1. British Standards Institution (2004), Structural Bearings, Part 2: Sliding Elements (BS EN 1337-2), UK.
2. Choi, E. S., Choi, Y. B., Lee, J. I., Jang, Y. H., and Lee, S. J. (2019), Assessment of Friction of EP Frictional Materials used for

- Spherical Bearings of Railway Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 31(4), 293-299 (in Korean).
3. Dae-Chang E&G Corporation (2014), Improved Reliability of Spherical bridge bearings for train, R&D report by KIAT.
4. Dong, S., Chung, K. H., and Lee, K. S. (2011), Effect of Surface Roughness of Counterface on Tribological Characteristics of PTFE and UHMWPE, *Journal of the Korean Tribology Society*, 27(6), 293-301 (in Korean).
5. EOTA (European Organization for Technical Assessment) (2011), CUAP 03.01/78 - Spherical bearings with special sliding material and lubricant suitable for high operating temperatures, Building Testing and Research Institute, Brussels Belgium 11.
6. European Assessment Document (2017), Spherical and Cylindrical Bearing with Special Sliding Material made of UHMWPE, EAD 050004-00-0301, www.eota.eu.
7. Oh, S. T., Lee, D. J., Jeong, S. H., and Jun, S. M. (2016), Experimental Assessments of Friction Plate for KTX Bridge Bearings, *International Organization of Scientific Research Journal of Engineering*, 6(5), 29-33.
8. Oh, S. T., Lee, D. J., Yi, S. T., and Jeong, B. J. (2022), Numerical Analysis for Dynamic Characteristics of Next Generation High-Speed Railway Bridge. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection(JKSMI)*, 26(2), 9-17 (in Korean).
9. Oh, S. T., Lee, D. J., Yi, S. T., and Jeong, B. J. (2023), Numerical Analysis for Dynamic Characteristics of Bridge considering Next-Generation High-Speed Train, *Advances in Computational Design, Techno-Press*, 8(1), 1-12.
10. Oh, S. T., Shim, Y. W., and Lee, D. J. (2010), Dynamic Analysis of PSC Bridge for a High Speed Railway Vehicle Using Improved 38-Degree of Freedom Model. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(6), 797-803 (in Korean).
11. KOCED (Korea Construction Engineering Development) (2020), Method of Static Friction Test for Sliding Materials of Bridge Bearings, KOCED 0012-7400.

Received : 10/08/2023

Revised : 11/02/2023

Accepted : 11/06/2023

요 지 : 이 연구에서는 차세대 고속철의 증가하는 주행속도에 따라 600 km/h 까지 10 km/h 간격으로 고속철 PSC 박스 연속교량의 교량받침에 대한 동적거동을 수치해석하였다. 경부 고속철 구간의 40미터 단경간과 2경간 연속 PSC 박스교를 연구대상으로 프레임모형을 구성하였으며, 38자유도의 관성질량 차량모형 및 교량과 궤도의 불규칙성을 포함한 상호작용력을 고려하였다. 주행속도별 교량받침의 중방향 변위와 누적이동거리와 변위속도를 산정하여 교량의 동적거동 추이분석과 비교하였다. 또한 마찰판의 내구성평가를 위한 장기마찰시험 기준을 적용하였다.

핵심용어 : 단경간과 2경간 연속 PSC 박스교, 횡변위, 누적 이동거리와 변위속도, 장기마찰시험