

슬라이딩 궤도의 저마찰 거동에 대한 실험적 연구

Experimental Study of Low-Frictional Behavior for Sliding Slab Track

김태구 · 정동기 · 이경찬*

Tae-Gu Kim · Dong-Ki Jung · Kyoung-Chan Lee

Abstract Railway bridges with continuously welded rail have a limitation of span length due to track-bridge interaction. In order to overcome this, a sliding slab track system has been developed that comprises with a low-frictional sliding layer between the bridge deck and the track slab to isolate the longitudinal behavior between the bridge and the track. In this study, a real scale track system is prepared to experimentally evaluate the longitudinal frictional behavior. Applied loading rates were 0.2, 1.0, 5.0 and 10mm/min; vertical mass on the track are track slab only, 5,000 and 10,000kg added mass, respectively. Test results showed that the resulting frictional coefficients varied from 0.22 to 0.33. In addition, 10,000 cycle loadings were applied to simulate repetitive sliding to represent 30 years of service life. The frictional coefficient increase was measured and found to be 7% of that of the initial loading stage, which means that the sliding layer is adequate to provide low-frictional behavior for the sliding slab track system. Effects of changes of the frictional coefficient of the sliding layer were analyzed by rail-structure interaction analysis.

Keywords : Friction, Railway bridge, Slab track, Sliding layer, Track-structure interaction

초 록 장대레일이 부설된 철도 교량은 궤도-교량 상호작용으로 인하여 경간장 연장에 제약이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 궤도와 교량 사이에 저마찰 슬라이드층을 두어 교량과 궤도의 종방향 거동을 분리시켜 상호작용을 원천적으로 저감시키는 슬라이딩 궤도가 개발되고 있다. 본 연구에서는 슬라이드층을 포함하는 궤도 시스템을 실규모로 제작하여 종방향으로 반복하중을 재하하는 시험을 통하여 슬라이딩 궤도의 저마찰 거동을 종합적으로 평가하고자 하였다. 하중 재하 속도를 0.2, 1.0, 5.0, 10mm/min.으로 변화를 주었으며, 5,000, 10,000kg의 부가질량이 재하된 경우에 대한 마찰거동을 비교 검토하였다. 실험 결과 제안된 슬라이드층의 마찰계수는 0.22~0.33인 것으로 확인되었다. 더불어, 30년에 해당하는 10,000회의 반복하중을 재하하여 마찰계수 변화를 관찰한 결과, 마찰계수 증가는 7%에 머물러 반복하중에 대한 장기적인 내구성을 확보한 것으로 확인되었다. 슬라이드층의 마찰계수의 변화에 따른 영향을 상호작용 해석을 통하여 추가로 검토하였다.

주요어 : 마찰, 철도교량, 콘크리트궤도, 슬라이드층, 궤도-교량 상호작용

1. 서 론

현대 철도는 승차감 개선과 고속주행을 위하여 장대레일을 사용하며, 철도교량에 부설된 장대레일은 온도 변화에 따른 교량의 신축 변위 등에 의하여 부가 축력이 발생하는 궤도-교량 상호작용 효과가 유발된다. 과도한 레일 축력은 레일의 좌굴 또는 파단을 초래할 수 있기 때문에, 궤도-교량 상호작용 효과는 적절히 제어되어야 한다. 이러한 상호작용으로 인하여 철도교량은 보통 단경간 단순교가 선호되고 있으며, 장경간 교량의 경우 특수체결장치 또는 레일신축이음장치(REJ)를 사용하여 상호작용 효과를 저감시키고 있다. 이러한 방법은 축력 저감 효과에 한계가 있거나, 특수 장치의 설치에 따른 부수적인 문제점을 유발할 우려가 있다[1]. 최근 궤도-교량 상호작용을 저감하기 위한 대안으로 콘크리트 궤도 슬래브 하면과 교량 바닥 상판 사이에 저마찰층을 형성한 궤도 시스템인 슬라이딩 궤도가 연구 개발되고 있다[1-13]. 슬라이딩 궤도는 콘크리트 궤도 슬래브와 교량 바닥 판 사이에 저마찰 슬라이드층을 부설하여 교량의 온도 신축변위가 콘크리트 도상을 통해 장대레일로 전달되는 것을 차단하는 것에 착안하고 있다. Fig. 1에 3경간 연속교에 설치된 슬라이딩 궤도 시스템의 종방향 구성도를 나타냈다.

선행 연구[1,3,4,5]에서 슬라이딩 궤도를 적용한 경우 장대레일의 레일 부가축력이 80~90% 저감되는 것을 해석적으로 확인

*Corresponding author. E-mail: kclee@krii.re.kr.

© 2017 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<https://doi.org/10.7782/JKSR.2017.20.2.241>

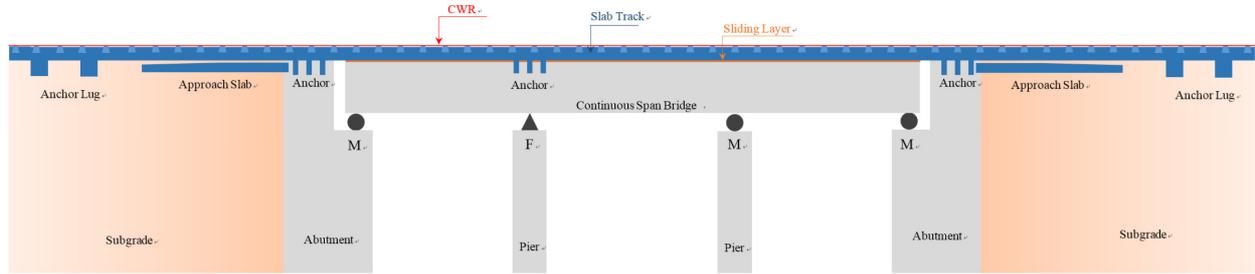


Fig. 1. Longitudinal profile of sliding slab track on three-span continuous bridge [1].

하였다. 또 다른 선행연구[9,10]에서 장경간 연속교에 레일신축이음장치를 설치한 경우와 슬라이딩 궤도를 적용한 경우를 해석하여, 슬라이딩 궤도가 상호작용 효과 저감 성능이 더 우수한 것으로 확인되었다. 선행 연구[1-10]에서 상호작용 해석을 수행할 때 슬라이드층의 마찰계수는 외국 사례[14]를 바탕으로 0.3으로 가정하였다.

슬라이딩 궤도를 구현하기 위해서는 슬라이드층의 저마찰 성능이 필수적으로 수반되어야 한다. 본 연구에서는 실제 크기의 슬라이딩 궤도 시험체를 제작하여 길이방향으로 하중을 재하하여 전체 궤도 시스템의 마찰 거동을 평가하고자 한다. 이때 하중 재하 속도를 달리하여 재하 속도에 따른 거동 차이를 살펴보고, 궤도에 추가 수직하중이 있는 경우와 없는 경우를 각각 평가하여 열차 하중의 유무에 따른 영향을 살펴보고, 나아가 슬라이드층의 장기적인 내구성을 검토하기 위하여 반복하중을 재하하여 마찰거동의 변화 추이를 실험적으로 평가하였다.

2. 실험방법

슬라이딩 궤도의 저마찰 슬라이드층은 교량 바닥판 상면과 궤도 슬래브 하면에 각각 토목섬유(geo-textile)가 설치되고 그 사이에 저마찰 슬라이드층인 PE-시트가 부설된다. PE-시트는 경도 D95 두께 1.5mm의 폴리에틸렌 시트를 사용하였으며, 토목섬유는 단위질량 400g/m²인 장섬유 폴리에스터 부직포를 사용하였다. 슬라이딩 궤도의 마찰 거동은 토목섬유와 PE-시트 사이에서 발생하므로, 두 재료 사이에서의 마찰 계수를 ASTM D1894-01[15]의 시험 방법에 따라 시험하였다. 이 시험은 200g의 슬래드(sled)를 150mm/min의 속도로 수평방향 하중을 재하하여 마찰계수를 측정하며, 공인인증시험기관은 한국화학융합시험연구원(KTR)과 한국고분자시험연구소(KOPTRI)에 의뢰하여 실험을 각각 진행하였다. 양 기관의 시험 결과 정마찰계수는 각각 0.405와 0.301을 얻었으며, 동마찰계수는 0.417과 0.368을 얻었다. 동일한 재료를 동일한 방법으로 시험했음에도 불구하고, 시험 기관에 따라 얻어진 마찰계수에 다소 차이가 있었으며, 기존 연구[1-5]에서 가정한 슬라이딩 궤도의 마찰계수 0.3을 시험 결과의 동마찰계수와 비교하면, KTR의 결과는 39% KOPTRI의 결과는 23% 더 크게 나타났다.

재료 수준이 아닌 궤도 시스템에서의 마찰계수를 검토하기 위하여 실제 규모의 시험체를 제작하였다. 슬라이딩 궤도의 슬래브는 실규모 콘크리트 궤도와 동일하게 폭 2800mm, 높이 240mm로 제작하였으며 길이는 실험실 조건에 맞추어 2550mm로 제작하였다. 콘크리트 궤도 슬래브는 저면에 토목섬유를 설치 후 콘크리트를 타설하고 양생하였다. 슬래브를 액츄에이터와 일체로 연결하기 위하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 궤도 슬래브를 관통하는 종방향 철근에 가력 프레임 설치하였으며, 종방향 철근은 앞뒤로 볼트를 체결하여 하중 재하시 일체로 거동하도록 하였다. 교량 바닥판을 모사하는 콘크리트 바닥판은 궤도 슬래브 크기와 반력상 앵커홀 위치를 고려하여 길이 3700mm, 폭 3700mm, 높이 240mm로 제작하였다. 바닥판 상면에 토목 섬유를 포설하고 PE-시트를 설치하여 슬라이드층을 구성하였으며, 슬라이드층은 길이방향으로 전후 끝단에서 타정못으로 고정하였다. 슬라이딩 궤도 슬래브의 횡방향 변위를 구속하기 위하여 횡방향 지지 블록을 좌우 각각 2개씩 바닥판에 후설치 앵커를 이용하여 설치하였다. 액츄에이터는 Fig. 3에 보인바와 같이 반력벽에 고정하여 종방향으로 수평 가력하였다.

슬라이드층의 종방향 변위는 온도 변화에 따른 교량의 신축에 의해 발생한다. 교량의 고정지점간 길이가 100m일 때, 시간당 온도 변화를 6°C/hr., 교량의 선팽창계수를 1.0E-5로 가정하면, 교량의 온도신축변위 속도는 0.6mm/hr. (0.01mm/min.)이다. 교량과 궤도 사이의 실제 거동은 이와 같이 매우 느린 속도로 발생하지만, 실험에서는 시간적 제약 때문에 이보다 빠른 속도로 수평 하중을 재하하였다. 하중 재하 속도에 따른 영향을 살펴보기 위하여 속도를 0.2, 1.0, 5.0, 10.0mm/min.로 각각 다르게 선택하였다. 궤도에 열차 하중이 재하된 경우의 마찰 거동을 살펴보기 위하여, 별도의 수직 하중없이 궤도의 자중만으로 시험하고 이에 더하여 각 재하 속도 별로 궤도 상부에 5,000kg, 10,000kg의 부가 질량을 각각 상재(上載)한 후 시험하였다.

슬라이드층의 변위는 교량의 온도변화에 의하여 발생하므로, 온도가 상승 하강하는 일별 온도 변화에 따라 변위가 반복된다.

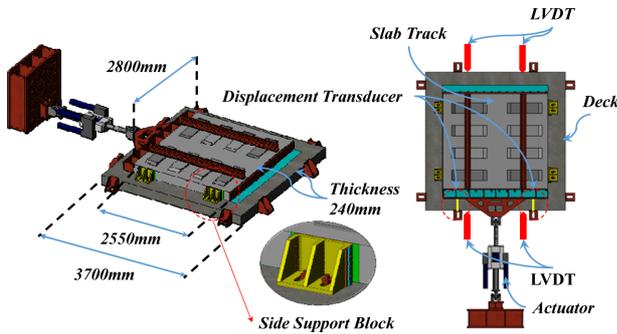


Fig. 2. Sliding slab track [7].



Fig. 3. Test specimen.

이러한 반복적인 변위가 지속적으로 재하된 경우 장기적인 슬라이드층의 마모와 그에 따른 마찰 거동의 변화를 살펴보고자 반복하중을 재하하여 내구성을 평가하였다. 1일 1회의 반복 거동을 한다고 보았을 때, 30년에 해당하는 10,000회의 반복하중을 재하하였다. 실험 시간을 줄이고, 실제보다 가혹한 마모 환경을 제공하기 위하여 120 mm/min.의 속도로 $\pm 5\text{mm}$ 의 변위를 재하하였다. 하중재하는 각 500회씩 나누어 총 22세트로 재하하여 마찰 거동의 변화 추이를 살펴보았다.

3. 실험결과

고전적인 쿨롱(Coulomb) 마찰 법칙에 따르면, 마찰력은 미끄럼면의 외관상 면적에 무관하고(제1법칙), 마찰력은 하중(수직력)에 비례하여 증가($F=\mu N$)하며(제2법칙), 동마찰은 정마찰보다 적으며 마찰력은 미끄럼속도에 의존하지 않고 일정하다(제3법칙) [16]. 근래에는 이러한 마찰법칙이 경우에 따라서 완전히 성립하지 않아 접촉면적, 수직력의 크기 및 재하속도에 따라 마찰계수가 변화할 수 있음이 밝혀진바 있다[17].

슬라이딩 궤도의 마찰 실험결과 Fig. 4에 보인 바와 같다. 하중 재하 초기에는 하중 증가에 따라 선형적으로 변위가 증가하며 약 0.2~0.4mm 이후부터 운동마찰력에 도달하면서 슬라이딩이 발생하였다. 각 실험 케이스에 대한 평균 동마찰계수는 0.5~1.0mm의 변위 구간의 하중을 산술평균하여 산정하였으며, 하중속도와 부가 질량에 대한 평균 동마찰계수는 Table 1에 제시된 바와 같다. 앞에 제시한 ASTM D1894-01[15]에 따른 재료 수준의 마찰시험에서 동마찰계수가 각각 0.417, 0.368이었던 반면, Table 1에 제시된 궤도 시험체의 평균 동마찰계수는 0.216~0.333인 것을 보면, 재료시험에서 마찰계수를 더 크게 평가하는 것을 확인할 수 있다.

재하속도에 따른 영향을 평가하기 위하여, 재하속도별 평균 동마찰계수를 Fig. 5에 도시하였다. 그래프에 보인바와 같이 재하속도가 증가할수록 마찰계수는 다소 증가하는 경향을 보여, 쿨롱 마찰의 제3법칙이 성립하지 않는 것을 확인하였다. 슬라이딩 궤도의 거동은 온도변화에 의해 매우 느리게 거동하므로, 실제 구조물에서의 마찰계수는 부가 질량이 없는 경우 0.31, 부가 질량이 5,000kg이 재하된 경우 0.23, 부가 질량 10,000kg이 있는 경우 0.22인 것으로 예상되었다. 따라서 재료 시험에서의 마찰계

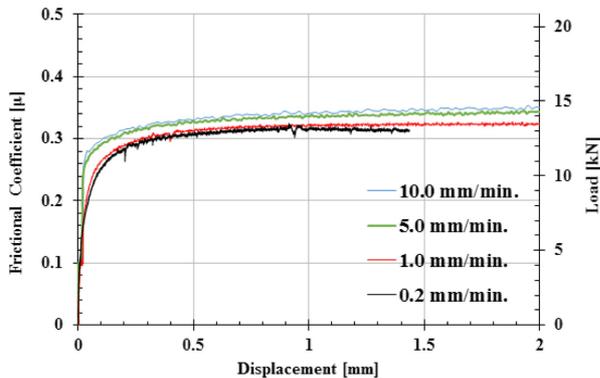


Fig. 4. Frictional behavior of sliding slab track.

Table 1. Average kinetic frictional coefficient w.r.t. loading rate and additional mass.

Loading rate (mm/min)	Additional mass (kg)		
	none	5,000 kg	10,000 kg
0.2	0.312	0.233	0.216
1.0	0.315	0.237	0.239
5.0	0.328	0.254	0.253
10.0	0.333	0.263	0.260

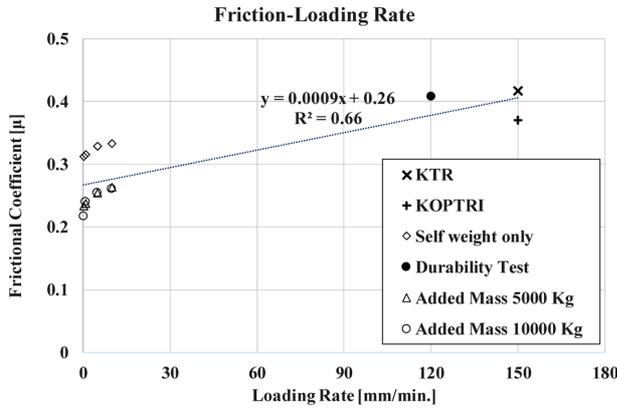


Fig. 5. Friction coefficient w.r.t. loading rate.

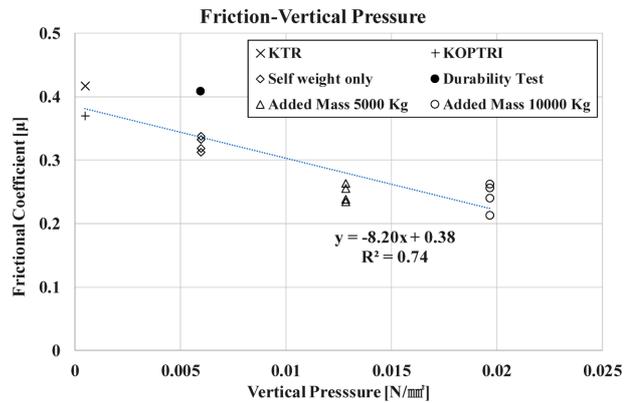
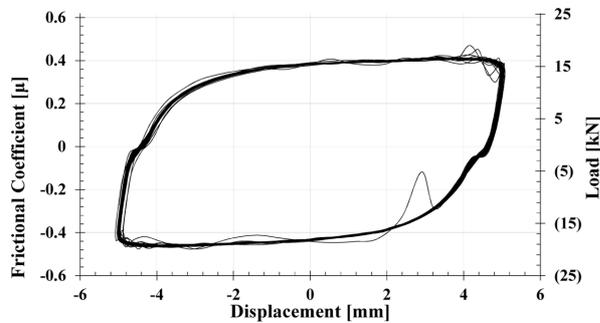
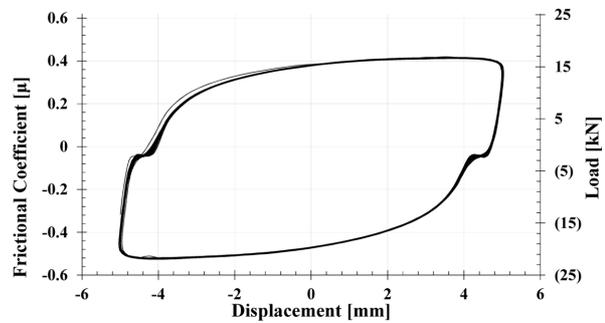


Fig. 6. Friction coefficient w.r.t. vertical pressure



(a) 300~800 cycles



(b) 8000~8500 cycles

Fig. 7. Hysteresis curve for cyclic loading.

Table 2. Frictional coefficient of durability test (± 5 mm cyclic load with loading rate of 120 mm/min.).

Measurement point	Cycles					
	1	2,000	4,000	6,000	8,000	10,000
@ 0 mm (Push)	0.357	0.374	0.364	0.366	0.369	0.403
@ 0 mm (Pull)	0.408	0.441	0.430	0.450	0.461	0.456

수가 실패도 시험 보다는 큰 것은, 재료 시험에서의 하중 재하속도가 150mm/min.으로 궤도 시험체의 하중 재하속도 0.2~1.0mm/min 보다 매우 빠른 것에 일부 기인한다고 볼 수 있다.

부가 질량에 따른 효과를 보기 위하여 수직방향 압력에 대한 마찰계수 결과를 Fig. 6에 도시하였으며, 재료 시험에서 사용한 슬래드의 질량 200g에 대한 경우를 함께 표기하였다. 수직 압력이 증가할수록 마찰계수는 명백히 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향으로 보건데, 쿨롱 마찰의 제2법칙이 성립하지 않는 것을 확인할 수 있다. 쿨롱 마찰 거동은 표면의 점착이 없는 완전 마찰을 가정하고 있지만, 실제 문제에 있어서는 재료의 특성에 따라 이러한 가정이 유효하지 않으며, 본 실험의 결과에서 슬라이드층의 점착 등에 의한 영향으로 인하여 수직 압력이 클수록 마찰계수가 작아지는 것으로 생각된다. 재료 시험에서는 실제 궤도 보다 상대적으로 작은 수직압력으로 마찰계수를 평가하기 때문에, 궤도 시험체에서 측정된 마찰계수 보다 더 큰 마찰계수를 주는 것으로 확인되었다. 본 실험의 결과와 유사한 결론을 얻는 기존 연구 사례가 있다. Teller와 Bosley[18]는 지반에 놓인 슬래브의 마찰계수 실험을 통하여 슬래브의 두께가 증가할수록 마찰계수가 감소하는 경향을 확인하였다. 또한 Lee[19]는 선형 실험 결과들을 수집한 데이터를 바탕으로 슬래브 포장의 마찰 거동의 모사할 수 있는 모델을 제시하면서, 슬래브 무게의 증가에 따라 마찰계수가 감소하도록 제시한 바 있다.

내구성 검토를 위한 반복하중 재하에 따른 하중 변위 곡선은 Fig. 7에 보인 바와 같다. 시험체를 미는 하중(push)과 당기는 하중(pull)에 대하여 다소 다른 마찰계수를 보였으며, 중앙점인 변위 0mm에 해당하는 하중으로부터 마찰계수를 산정하여 Table 2

에 표기하였다. 마찰계수는 미는 하중에서 초기 0.357에서 종료시 0.403로 13% 증가하였으며, 당기는 하중에서 초기 0.408에서 종료시 0.456으로 12% 증가하였다. 내구성 시험은 하중 재하속도가 120mm/min.로 앞선 시험보다 빠르기 때문에 마찰계수가 다소 크게 나타났으며, 재하횟수가 증가할수록 슬라이드층의 마모에 의하여 마찰계수가 점차 증가하였다. 하지만 30년 사용에 해당하는 10,000회의 반복하중에 대하여 마찰계수는 약 13% 정도 증가하였고, 시험 종료 후 표면을 살펴보았을 때에도 표면 마모는 다소 있었지만 저마찰 거동을 제공하기에는 충분한 상태인 것으로 확인되었다.

실험 결과를 종합하면, 하중재하속도가 빠를수록 마찰계수는 다소 증가하며, 슬라이드층 상부에 재하되는 질량으로 인한 수직 압력이 증가할수록 마찰계수는 감소하는 것으로 확인되었다. 실제 슬라이딩 궤도에서의 조건은 매우 느린 속도에 궤도 자중만이 재하된 경우에 해당하므로, 현장에서 슬라이드층의 마찰계수는 0.31이며, 30년 사용 후 마찰계수는 13% 증가하여 0.35일 것으로 예상된다.

4. 상호작용 해석

실험결과에서 본 바와 같이 슬라이드층의 마찰계수는 재하속도 및 수직 압력 그리고 사용연수에 따라 0.2~0.4까지 변동할 수 있는 것으로 확인되었다. 실제 마찰계수의 변화가 슬라이딩 궤도의 작동에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 슬라이딩 궤도가 적용된 장대교 연속교를 대상으로 궤도-교량 상호작용 해석을 수행하여, 슬라이드층의 마찰계수 변화에 따른 장대레일 부가 축응력 변화를 검토하였다. 슬라이딩 궤도를 적용한 상호작용해석은 기존 연구[1, 10]에 제시한 모델링 및 해석 방법을 동일하게 적용하였다. 해석 프로그램은 Midas Civil을 사용하였으며, 교량, 궤도 및 레일은 2차원 프레임요소로 모델링하였고, 레일체결장치 및 슬라이드층은 비선형 스프링요소로 모사하였다. 대상 교량은 측경간은 50m, 중앙경간은 70m인 3경간 연속교를 선정하였으며, 중앙부에 고정지점을 두었다. 레일은 UIC-60을 적용하고, 하중은 온도하중 25°C를 교량에 재하하였다. 슬라이딩 궤도를 적용하지 않고 기존 직결식 콘크리트 궤도를 적용한 경우(FIX)에 대하여 해석하고, 슬라이딩 궤도는 슬라이드층의 마찰계수를 각각 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6의 5가지 케이스에 대하여 검토하여 슬라이드층의 마찰계수 변화에 따른 영향을 검토하였다.

궤도-교량 상호작용 해석에 따른 장대레일 부가 축응력은 Fig. 8과 Table 3에 보인 바와 같다. 직결식 궤도를 적용한 경우에는 레일부가축응력이 기준값인 92MPa를 초과한 것으로 확인되었으며, 슬라이딩 궤도를 적용한 경우 레일부가축응력이 현저히 저감된 것으로 확인되었다. 이는 선행 연구[1-5,9,10]에 제시되었던 결과와 동일하다. 다만 선행연구에서는 슬라이드층의 마찰계수를 0.3으로 일정하게 두고 마찰계수의 변화에 따른 영향을 검토하지 않았다.

본 연구에서 슬라이드층의 마찰계수를 변화시켜가면서 상호작용 해석을 수행한 결과, 마찰계수가 증가함에 따라 상호작용 저감 효과가 다소 감소한 것으로 확인되었다. 슬라이드층의 마찰계수가 0.2인 경우 레일부가축응력은 최대 2.02MPa이었고, 마찰계수가 0.6인 경우에는 5.94MPa 이었다. 이와 같이 슬라이드층의 마찰계수가 증가할수록 레일부가축응력이 다소 증가하지만, 레일부가축응력의 기준값인 92MPa보다 충분히 작은 값이므로, 슬라이드층의 마찰계수가 다소 증가하더라도 슬라이딩 궤도를 적용함으로 기대할 수 있는 상호작용 저감 효과는 여전히 유효한 것으로 확인되었다.

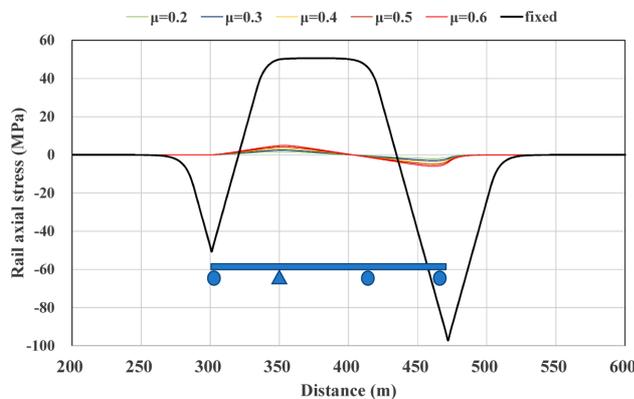


Fig. 8. Additional rail stress w.r.t. frictional coefficients of sliding layer of three-span continuous bridge.

Table 3. Maximum additional rail stress w.r.t. frictional coefficients of sliding layer of three-span continuous bridge.

Frictional coefficient of sliding layer	Absolute maximum rail additional stress [MPa]	Ratio
Fixed	97.20	100%
0.2	2.02	2%
0.3	3.01	3%
0.4	4.00	4%
0.5	4.97	5%
0.6	5.94	6%

5. 결 론

궤도-교량 상호작용저감을 위한 슬라이딩 궤도는 교량 바닥판과 궤도 사이에 저마찰 슬라이드층을 두어 종방향 거동을 서로 분리시킨다. 본 연구에서는 슬라이딩 궤도와 바닥판 사이 슬라이드층의 저마찰 거동을 검토하기 위하여, 슬라이딩 궤도를 실제 크기로 제작하여 마찰 거동을 실험적으로 평가하였다.

- ASTM D1894-01에 따른 재료 시험에 의한 슬라이드층의 동마찰계수는 실험 기관에 따라 각각 0.417과 0.368로 확인되었다.
- 실제 크기의 궤도 시험체를 제작하여 마찰계수를 평가한 결과, 하중 재하속도가 0.2~10.0mm/min일 때, 궤도 자중만을 재하한 경우 동마찰계수는 0.312~0.333, 궤도 상부에 5,000kg의 부가하중이 재하된 경우 동마찰계수는 0.233~0.263, 부가하중 10,000kg이 재하된 경우 동마찰 계수는 0.216~0.260으로 각각 측정되었다.
- 하중 재하속도가 증가할수록 마찰계수가 증가하며, 수직 압력이 증가할수록 마찰계수는 감소하였다.
- 재료 시험으로 마찰계수를 측정할 경우 실제 궤도가 작동하는 상황보다, 하중 재하 속도는 빠르고 수직 압력은 작다. 따라서 재료 시험으로 평가한 마찰계수보다 실제 궤도 시스템에서 작동하는 마찰계수가 작은 것은 이러한 변수 효과에 따른 것으로 설명할 수 있다.
- 30년 사용에 해당하는 10,000회의 반복하중을 재하하여 슬라이드층의 내구성을 검토한 결과, 마찰계수 증가가 13%에 머물러 장기적인 반복하중에 대한 내구성을 확보한 것으로 확인되었다.
- 궤도 자중만이 작용하고 하중 재하속도가 느린 실제 궤도 시스템에서 슬라이드층의 마찰계수는 0.31인 것으로 확인되며, 30년 사용후에는 마찰계수가 13% 증가하여 0.35일 것으로 예상된다.
- 슬라이드층의 마찰계수를 변화시켜 궤도-교량 상호작용 해석을 수행한 결과, 마찰계수 증가에 따른 장대레일 부가축응력의 증가는 크지 않기 때문에, 마찰계수가 다소 증가하더라도 슬라이딩 궤도의 작동에는 문제가 없는 것으로 확인되었다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 연구비지원(과제번호 17RTRP-B071568-05, 과제명: 상호작용완화를 위한 궤도 및 교량 바닥판 구조 개발)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] K.C. Lee, S.Y. Jang, D.K. Jung, H.K. Byun (2015) Evaluation of stress reduction of continuous welded rail of sliding slab track from track-bridge interaction analysis, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 35(5), pp. 1179-1189.
- [2] K.C. Lee (2014) Feasibility analysis of sliding slab track for reducing track-bridge interaction, *Proceedings of the 2014 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Changwon, Korea, pp. 916-920.
- [3] K.C. Lee, I.H. Yeo, K.H. Kim, D.K. Jung (2014) Rail-Structure interaction analysis of sliding slab track, *Proceedings of the 2014 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, Jeju, Korea, pp. 165-169.
- [4] K.C. Lee, S.Y. Chang, S.I. Kim, I.H. Yeo, K.H. Kim (2014) Sliding slab track reducing interaction between railway bridge and track, *Proceedings of the Korean Institute of Bridge and Structural Engineers 2014 Technical Conference*, Ilsan, Korea, pp. 105-106.
- [5] K.C. Lee, S.Y. Chang, D.K. Jung, H.K. Byun, H.K. Park, T.S. Yang (2015) Rail-structure interaction analysis of sliding slab track on bridge, *Proceedings of the Joint Rail Conference 2015*, San Jose, CA, USA, Paper No. JRC2015-5661.
- [6] K.C. Lee, S. Y. Chang, I.H. Yeo, C.E. Kim (2015) Preliminary design of continuously reinforced slab for sliding slab track, *Proceedings of the 2015 Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Mokpo, Korea, pp. 56-61.
- [7] K.C. Lee, S.C. Lee, S.Y. Jang, I.H. Yeo (2015) Estimation of cold-weather-cracking at concrete slab for sliding slab track, *Proceedings of the 2015 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, Yeosu, Korea, pp. 545-549.
- [8] D.K. Jung, K.C. Lee, S.Y. Chang, I.H. Yeo, T.G. Kim (2015) Experimental study for friction behavior of sliding slab track, *Proceedings of the 2015 Autumn Conference of the Korean Society for Railway*, Yeosu, Korea, pp. 533-536.
- [9] K.C. Lee, S.Y. Jang, J. Lee, H.S. Choi (2015) Track-bridge interaction analysis technique for railway bridges with continuous welded rail, *Proceedings of the Korean Institute of Bridge and Structural Engineers 2015 Technical Conference*, Uiwang, Korea, pp. 25-26.
- [10] K.C. Lee, S.Y. Jang, J. Lee, H.S. Choi (2016) Comparative analysis of track-bridge interaction of sliding slab track and rail expansion joint for long-span railway bridge, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 29(2), pp. 169-177.
- [11] S.C. Lee, K.C. Lee (2016) Crack width check on sliding railway slab in winter, *Proceedings of the Spring Conference of Korea Concrete Institute*, Yeosu, Korea, pp. 181-182.

- [12] D.K. Jung, K.C. Lee (2016) Evaluation of additional rail stress for partial application of sliding slab track, *Proceedings of the 1st Asian Conference on Railway Infrastructure and Transportation*, Jeju, Korea, pp. 276-279.
- [13] K.C. Lee, T.G. Kim, D.K. Jung (2016) Experimental study of low-frictional behavior for sliding slab track, *Proceedings of the 1st Asian Conference on Railway Infrastructure and Transportation*, Jeju, Korea, Paper No. ART 2016-235
- [14] P. Wang, J.J. Ren, R. Xiang, X.Y. Liu (2012) "Influence of rub-plate length on forces and displacements of longitudinally coupled slab track for a bridge turnout." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 226(3), pp. 284-293.
- [15] ASTM (2001) Standard Test Method for Static and Kinetic Coefficients of Frictions of Plastic Film and Sheeting, D 1894-01.
- [16] H.Y. Lee (2005) *Friction Wear Engineering*, Taeilsa.
- [17] P.J. Blau (2009) *Friction Science and Technology from Concepts to Applications*, CRC Press, Boca Raton, pp. 1-208.
- [18] L.W. Teller, H.L. Bosley (1936) The arlington curing experiments, *Public Roads*, 16(9), pp.169-197.
- [19] S.W. Lee (2000) Horizontal joint movements in rigid pavements, The Pennsylvania State University Ph.D. Dissertation.

(Received 29 November 2016; Revised 10 February 2017; Accepted 2 March 2017)

Tae-Gu Kim : taeguvs@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang Gyeonggi-do, Korea

Dong-Ki Jung : dkjung0428@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang Gyeonggi-do, Korea

Kyoung-Chan Lee : kclee@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang Gyeonggi-do, Korea