

콘크리트 슬래브궤도의 피로성능평가를 위한 실내 모형실험

Laboratory Mock-Up Test for Evaluation of Fatigue Performance of Concrete Slab Track

장승엽* 조용진** 이일화* 이수형* 김 은***
Jang, Seung Yup Cho, Yong Chin Lee, Il Hwa Lee, Su Hyoung Kim, Eun

ABSTRACT

In this study, conducted was a laboratory mock-up fatigue test on the concrete slab track to evaluate the fatigue performance of the test track under repeated loads and to verify its design. The test has been performed on the full-scale slab track with cant, which is a precast slab track system installed on several layers of sub-soil consolidated in the laboratory soil box. The test results show that any deflection and any strain exceeding the target values have not been observed, and the test track have good performance under static and repeated loads up to 3 million cycles. As a consequence, the test method adopted in this study is believed to be a proper tool for evaluating the structural performance of the concrete slab track and its components in the laboratory.

1. 서론

최근 철도의 고속화와 수송 효율화로 인해 자갈궤도의 유지보수 부담이 점차 증대되고 있어서 무보수 궤도로서 콘크리트 슬래브궤도의 적용이 활발히 추진되고 있다. 콘크리트 슬래브궤도는 기존 자갈궤도에 비해 유지보수를 혁신적으로 저감할 수 있고, 궤도의 안정성과 열차 주행성도 매우 우수한 것으로 평가받고 있다. 그러나 콘크리트 슬래브궤도의 성능평가와 관련해서는 아직 국내에서 체계적인 평가방법이 정립되지 않고 있다. 특히 토노반 상 슬래브궤도의 피로성능 평가방법에 대한 연구사례는 매우 드물다고 판단된다.

이에 본 연구에서는 콘크리트 슬래브궤도의 성능평가실험을 실시하여 그 타당성을 검토함으로써 향후 슬래브궤도의 실용화를 위한 체계적인 시험방법을 정립하고자 하였다. 시험 대상 슬래브궤도는 토노반상 프리캐스트 콘크리트 슬래브궤도로 실험실 토조 내의 노반 상에 실모형으로 부설하였으며, 곡선부에서의 가장 불리한 조건을 고려하기 위하여 일정한 경사를 가진 형태로 제작되었다.

2. 시험 대상 궤도

본 연구에서 사용된 프리캐스트 콘크리트 슬래브궤도는 철근 콘크리트로 제작되는 프리캐스트 콘크리트 슬래브를 노반과 안정화기층 위에 설치하는 구조를 갖는다. 철근 콘크리트 슬래브의 설계기준강도는 45MPa이며, 슬래브 패널 하나의 크기는 3800×2300×165mm로 그림 1과 같이 충전재 주입을 위한 주입구와 횡방향 전단력에 저항하기 위한 전단연결재 설치구를 가지는 형상으로 설계되었다. 노반은 원지반 위에 입도조정쇄석으로 이루어지는 일정 두께의 동결방지층(강화노반)을 설치하고, 그 위에 다시 안정화기층을 설치하는 구조를 가지며, 안정화기층은 독일의 슬래브궤도 설계에서 사용되는 콘크리트 안정화 기층(Hdraulically stabilized base course, HSB)을 적용하여 폭 3.2m, 깊이 30cm의 빈배합 콘크리트 설계기준강도 15MPa로 이루어진다. 또한, 소요의 높이를 확보하고 슬래브와 안정화기층 사이의 공간을 들뜸없이 메우기 위해 무수축 시멘트 모르타르 충전재를 슬래브 하부에 주입하는 것으로 설계되었다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 석사후 연수 연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

3. 실험계획

3.1 시험체의 제작 및 설치

그림 2는 시험체가 설치된 모습을 보여주고 있다. 가장 불리한 하중조건을 고려하기 위하여 양 레일을 기준으로 160mm의 캔트를 갖도록 시험체를 제작하였다. 시험체는 2장에서 서술한 바와 같이 슬래브 패널-충전층-안정화기층-동결방지층-원지반의 순으로 구성된다(그림2). 길이 22m, 폭 6m, 깊이 3m의 콘크리트 토조내부에 조성된 노반은 150mm 두께에 대하여 단계별로 포설되었다. 노반재료를 5tonf 진동롤러를 5회 이상 왕복하여 다짐을 실시하였으며 원지반 다짐이 완료된 후, 입도조정 쇄석을 사용하여 동결방지층을 조성하였다. 조성방법은 원지반과 동일하며 동결방지층의 두께는 300mm로 하였다. 노반조성이 완료된 후 상부와 하부 레일 직하부에 반복하중 하에서의 노반상 압력의 변화를 측정하기 위하여 그림2와 같이 토압계를 설치하였다.

각 구성부의 재료의 특성은 표 1과 같다. 시험체에 경사를 도입하기 위해 콘크리트 안정화 기층을 기울어지도록 제작하였다. 제작된 안정화기층상에 공장제작된 프리캐스트 콘크리트 슬래브를 올려놓은 뒤 정확한 위치조정을 거쳐 충전재를 주입하였다. 그림3은 시험체 설치과정을 보여주고 있다. 시험체는 두 슬래브간의 불연속 경계부에서의 거동을 살펴보기 위해 2개의 슬래브로 구성하여 길이 약 7.8m로 제작되었다.

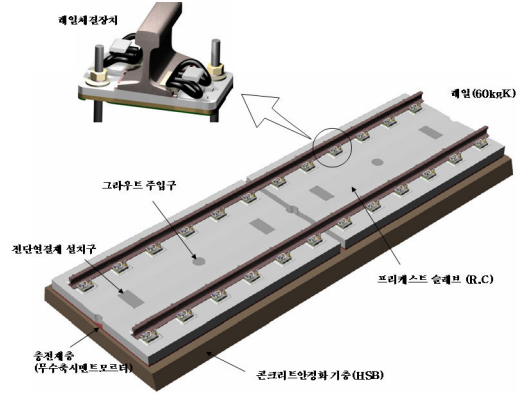


그림 1 프리캐스트 콘크리트 슬래브 কে도

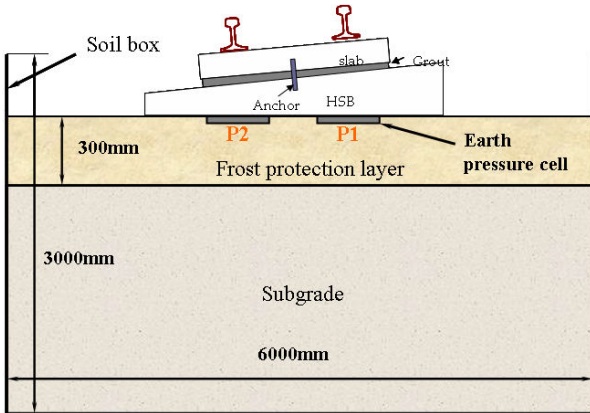


그림 2 시험체의 모형화

표 1 사용재료물성

구분	항목	재료특성값
KS60레일	탄성계수	210,000MPa
	체결장치	스프링계수
콘크리트 슬래브	탄성계수	30,000MPa
	압축강도	45MPa
충전재	탄성계수	10,000MPa
	압축강도	10MPa
HSB층	탄성계수	10,000MPa
	압축강도	15MPa
동결방지층 (강화노반)	탄성계수	120.0MPa
원지반	탄성계수	45.0MPa

3.2 하중조건

하중조건은 BS-13230-2002 콘크리트 침목 피로시험에서 적용되는 시험조건을 적용하였다(그림 4). 먼저 정적 하중을 재하하여 궤도의 거동을 관찰한 후 피로시험을 수행하는 것으로 하였다. 그림에서 피로시험하중 F_0 는 축중 $220\text{kN} \times 1/2 \times 1.2 = 132\text{kN}$ 로 하였고, 최소하중 F_{\min} 는 상시 작용하는 하중으로 10kN 으로 하며, 정적 최대하중 F_d 는 최대 설계하중으로 $220\text{kN} \times 1/2 \times 1.6 = 176\text{kN}$ 으로 하였다. 그림 5와 6은 시험체의 설치 및 하중재하 모습을 보여주고 있다. 액추에이터 하중을 궤도면에 대한 수직하중과 횡하중으로 분배시키기 위하여 경사 시험지그를 제작하여 설치하였다(그림 5). 하중재하장치는 그림 6의 반력 프레임에 4Hz로 300만회까지 재하하였다. 최대동적 하중 250kN , 가진 진동수 $0 \sim 100\text{Hz}$, 동적변위 $\pm 100\text{mm}$ 의 유압식 액추에이터 2대를 설치하여 동시에 주점에서 재하토록 하였다. 또한 프레임 자체의 진동을 최소화하기 위하여 바닥판과 고장력 볼트로 연결하였다. 하중재하위치는 구조적으로 가장 취약할 것으로 판단되는 슬래브 간 불연속 지점에 지그를 설치하여 재하하였다.

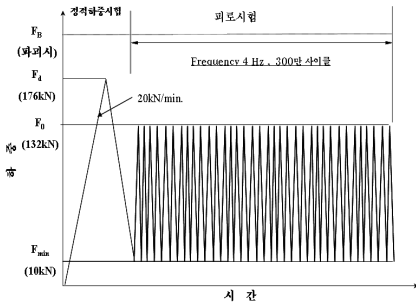


그림 4 하중 그래프(액추에이터당)

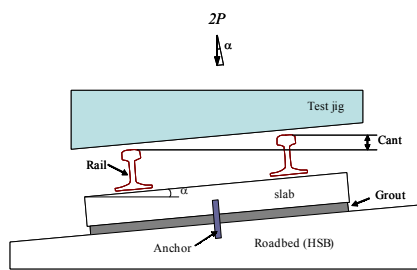


그림 5 시험체의 설치 단면



그림 6 하중재하 전경

3.3 측정위치 및 측정항목

슬래브 각 부의 거동을 분석하기 위하여 레일, 슬래브, 안정화기층(HSB) 및 노반으로 나누어 각각의 데이터를 측정하였다. 슬래브 및 레일에서는 하중재하위치를 중심으로 수직/수평변위와 변형율을 측정하였다. 레일의 경우 변형이 가장 크게 발생할 것으로 예상되는 레일의 저부를 상부와 하부로 나누어 측정하였으며 콘크리트 슬래브의 경우 레일 체결장치에서 일정간격 유격된 위치의 표면 변형률을 측정하였다. 노반부는 반복하중 하에서의 토압변화를 관찰하기 위하여 토압계 2개를 하중 재하점 하부에 설치하였다. 각 위치별 측정항목, 측정장치와 측정위치는 표 2와 같으며 그 설치위치와 측정기호는 그림 7과 같다.

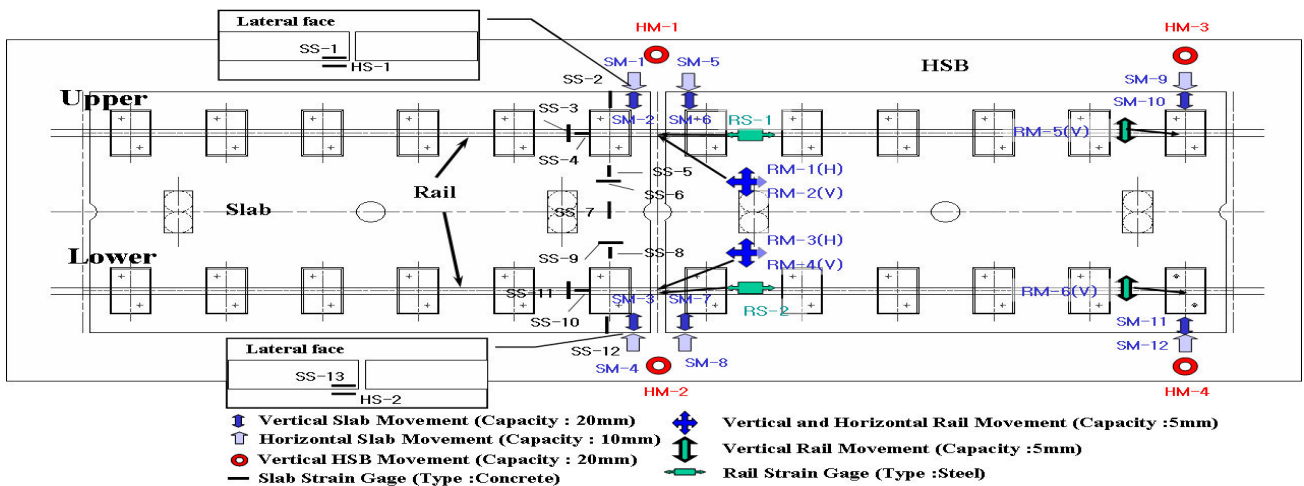


그림 7 각 구성부의 측정위치 및 측정사항

표 2 각 구성부의 측정항목

구분	측정항목	측정장치	개소	구분	측정항목	측정장치	개소
슬래브	수직 변위량	변위계	8	레일	수직 변위량	변위계	8
	수평 변위량	변위계	4		수평 변위량	변위계	2
	선로방향 변형률	Strain Gage	8		변형률	Strain Gage	4
	선로직각방향 변형률	Strain Gage	7	노반	토압	토압계	2
HSB	수직 변위량	변위계	2	측정 채널수			45

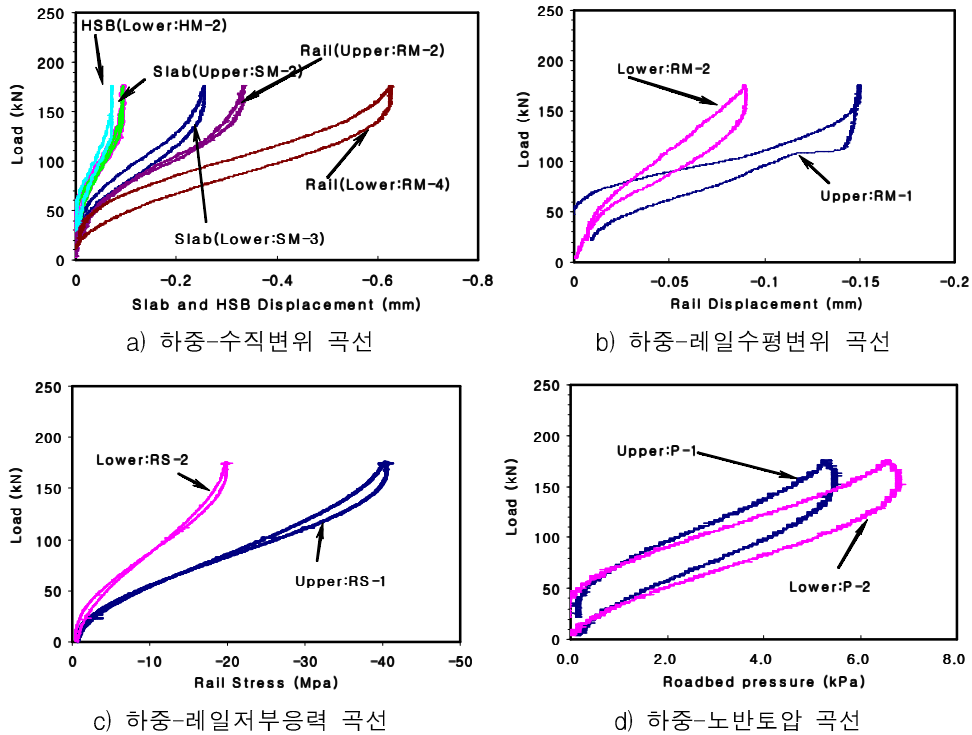


그림 8 정적하중하 실험 결과

4. 실험결과

4.1 정적하중 하에서의 슬래브궤도 거동

피로실험 전 슬래브궤도의 정적하중 하에서의 거동을 관찰하기 위하여 정적실험을 실시하였다. 실험결과 일정한 하중증가/감소에 대한 콘크리트 슬래브 시스템의 거동은 그림 8과 같다. 그림에서 모든 변위는 슬래브 시스템 전체에 대한 각부의 절대변위를 나타내고, 하중은 액츄에이터 하나의 하중(P)를 나타낸다. 하중-변위 곡선에 나타난 바와 같이 궤도는 비선형거동을 나타내며 일정한 캔트를 가진 시스템의 특성상 한쪽으로 하중집중이 발생하면서 상부와 하부의 변위가 차이를 보이고 있다. 레일의 수평변위와 안정화 기층의 수직변위는 상부에서 크게 나타난 반면, 슬래브와 레일의 수직변위는 오히려 하부에서 큰데, 이는 슬래브 패널과 안정화 기층사이에 충전재를 주입하는 과정에서 충전재의 주입부쪽으로 슬래브 하부가 들뜨면서 이 위치에서 과도한 변위가 발생했기 때문인 것으로 추정된다. 그러나, 그 변위는 대략 0.2mm 이내로 전체 거동에 큰 영향을 미칠 정도는 아니라고 판단된다. 그림에서와 같이 레일 응력 및 수평변위를 바탕으로 판단할 경우 레일에 나타난 상하부 하중분배는 하부레일이 상부레일에 비하여 40~60%정도의 하중만을 받는 것으로 나타난다. 그러나 이와 같은 하중분배율은 슬래브 및 안정화 기층에서도 동일하게 나타나지 않았다. 정적 최대하중(P) 176kN에서 레일 저부의 응력은 상부와 하부 각각 40.6MPa과 19.5MPa로 나타났고, 콘크리트 슬래브의 표면인장응력은 0.1~0.60MPa로 측정되었다. 이 값은 허용응력에 비하여 매우 낮은 값이다. 정적하중 시험결과 시험하중 하에서 각부의 변위 및 변형에 의한 응력은 캔트의 영향 및 시공 시 발생한 결함에 의한 차이는 있으나 콘크리트 슬래브 궤도 시스템 자체의 안전성에는 전혀 문제가 없는 것으로 판단된다.

4.2 반복하중 하에서의 슬래브궤도의 거동

4Hz의 주기로 최대하중(P) 132kN에서 최소하중 10kN의 범위에서 300만회 반복 재하하여 슬래브 시스템을 거동을 분석하였다. 주요 반복횟수별로 각 측정위치에서의 변위, 응력의 값의 변화를 살펴보면(그림9 참조), 초기에는 탄성거동을 보이며 하중 재하횟수의 증가에 따라 영구변위 및 변형률이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 피로실험결과 최대, 최소변위 및 응력을 표 4에 요약하여 나타냈다. 레일의 저부응력은 300만회까지 재하횟수의 증가에 큰 영향을 나타내지 않았으며 초기와 동일한 응력수준을 유지하였다. 반면 레일의 수직변위는 하중재하횟수의 증가에 따라 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며 이는 하중 반복횟수에 따라 잔류변위가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 레일응력은 상부에서는 최대 122MPa, 하부에서는 최대 61MPa로 나타나 정적하중시험 결과에 비해 더 큰 응력을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 동적하중 하에서 패드의 강성증가에 기인하는 것으로 추정되나, 보다 자세한 원인에 대해서는 추가 분석이 요망된다. 콘크리트 슬래브의 수직변위 역시 초기에 비하여 하중반복횟수에 따라 증가하였으며 약 1mm의 잔류변위를 나타냈고, HSB의 변위 역시 하중반복에 따라 잔류변위가 증가하는 것으로 나타났다. 슬래브 표면에 발생하는 응력은 하중반복횟수에 따라 응력이 50%까지 증가했지만, 그 값은 2MPa 이내로 미미한 수준을 나타냈다. 노반토압 역시 변위와 유사하게 하중재하횟수에 따라 증가하였으나, 토압은 25kPa 이내로 낮은 수준을 나타냈다.

최종적으로 반복하중재하 후 콘크리트 궤도 시스템상의 구조적 결함의 정도를 파악하기 위하여 표면상에 나타난 균열 및 파괴정도를 파악하였다. 그러나 실제적으로 콘크리트 슬래브에는 건조수축 등에 의한 초기 미세균열이 피로시험 중에 일부 진전된 것으로 나타났지만 대부분 0.1mm 이하의 미세균열로 슬래브의 성능저하를 유발할 정도는 아닌 것으로 사료된다. 안정화 기층에서는 육안 관찰되는 균열을 발견할 수 없었다.

실험결과로부터 궤도 시스템의 거동을 평가하기 위해 표 5와 같이 실험결과를 요약하여 나타냈다. 표에서 기준치로 제시한 값은 국외 문헌에 제시된 값을 참고한 것으로 안전한계치라기 보다는 참고치 정도로 이해하는 것이 바람직하다. 표 5에서 알 수 있듯이 모든 항목에서 기준치를 만족하고 있는 것으로 나타났다.

표 4 각 위치의 변형률 및 변위 피로실험결과

구 분	기호	탄성구간				구 분	기호	탄성구간					
		500회		300만회				500회		300만회			
		최대	최소	최대	최소			최대	최소	최대	최소		
변형률 $\mu\epsilon$	레일	RS-1	-54.47	-623.9	-55.03	-629.1	변위 mm	레일	RM-1	-0.895	-0.546	-1.033	-1.244
		RS-2	-39.84	-346.5	-40.71	-374.4			RM-2	-0.318	-1.755	-2.046	-3.281
	슬래브	SS-3	65.19	-58.19	147.79	46.53		RM-3	0.41	0.055	0.23	-0.212	
		SS-4	-1.89	-33.7	8.89	-29.24		RM-4	-0.5	-2.726	-1.478	-3.977	
		SS-10	-0.34	-35.5	-19.75	-62.78		슬래브	SM-2	-0.138	-0.572	-1.148	-1.449
		SS-11	8.09	-1.58	16.33	8.64			SM-3	-0.222	-1.072	-1.236	-2.092
	안정화 기층	HS-1	7.2	-3.87	25.51	14.60	안정화 기층	HM-1	-0.134	-0.494	-1.02	-1.422	
		HS-2	1.08	-5.85	19.87	12.49		HM-2	-0.158	-0.598	-1.138	-1.642	

표 5 콘크리트 슬래브 성능 결과 기준치

측정항목	단위	기 준	시험결과		
			피로시험	정적시험	
궤도변위 (노반침하포함)	탄성(수직)	mm	≤4	3.88	0.62
	탄성(수평)	mm	≤2.5	0.61	0.15
	잔류(수직)	mm	≤2	0.99	-
	잔류(수평)	mm	≤4	1.21	-
노반압력	MPa	≤0.065	0.020	0.006	
궤도구성품 손상	-	마모/손상없을것	이상없음	-	
콘크리트 슬래브 균열	-	균열 0.5mm이하	이상없음	-	

주) *잔류변위는 총 변위에서 탄성변위를 뺀 값을 의미한다.

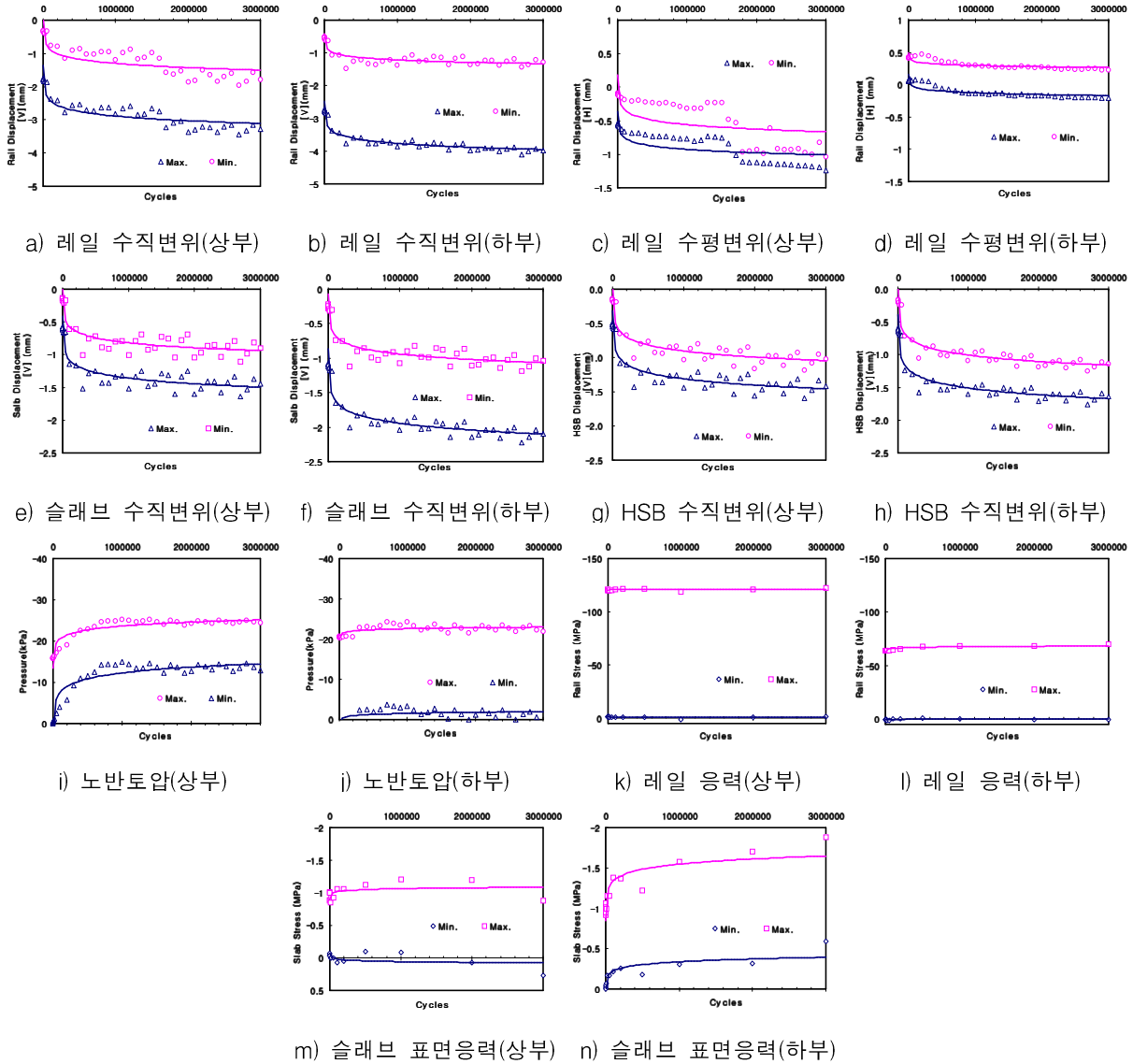


그림 9 각 구성부별 중앙부 피로실험 결과

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 슬래브 궤도의 반복하중시험을 통해 슬래브궤도의 피로성능을 평가하였다. 실험결과 본 실험의 대상인 프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도는 300만회의 반복하중 작용 후에도 궤도의 안정성의 영향을 미칠 수 있는 주요 항목에서 모두 기준치를 만족하는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 적용된 실내모형실험은 경사지그에 의해 하중이 한쪽으로 집중되는 문제가 있었으나, 전반적으로 슬래브궤도 시스템 및 각 구성요소의 장기적 성능을 예측하기 위한 주요 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. BSI(2002), Railway Applications Track-Concrete sleepers and bearers, British Standard, BS EN 13230.
2. Claire G. Ball(2004), Slab Track Laboratory Test Program. Portland Cement Association, PCA R&D Serial No. 2795.
3. 장승엽 외 (2005), 도시철도표준화 연구개발사업 2005년도 연구결과 최종보고서, 한국철도기술연구원, 건설교통부.
4. 장승엽, 양신추, 김정일, 김태욱(2003), 프리캐스트 콘크리트 슬래브궤도 기술현황, 2003년도 추계학술대회논문집, 한국철도학회, pp104~110.