

## 축소 곡선 트랙상에서의 축소 대차 곡선주행특성 연구

### A Study on the Curving Performance of a Scaled Bogie on a Scaled Curve Track

허연무<sup>†</sup> · 박준혁<sup>\*</sup> · 유원희<sup>\*</sup> · 박태원<sup>\*\*</sup>

Hyun-Moo Hur · Joon-Hyuk Park · Won-Hee You · Tae-Won Park

**Abstract** The performance of the railway bogie is classified into the stability and the steering performance. Testing for the bogie stability is conducted on the roller rig, but testing for the bogie steering performance on test facility is very difficult, so the testing for the vehicle curving performance is conducted on the real curve track. Testing the railway bogie on the full scale test rig is desirable, but it caused many problems relating to test costs and test time. As a possible alternative to overcome these problems, a small scaled test rig is actively used in the field of bogie stability. Thus, in this paper, we have studied a scaled track to test the bogie steering performance. For this purpose, we designed the 1/5 scaled test track equivalent to radius 200 curve and confirmed the validity of the testing for the bogie steering performance on the scaled curve track through the testing using 1/5 scaled bogie.

**Keywords** : Scaled Curve Track, Scaled Bogie, Steering, Curving Performance, Wheel Profile

**요 지** 철도차량의 곡선주행성능은 유지보수관점에서 매우 중요하다. 곡선주행성능과 관련된 대차의 조향성능은 실차를 이용한 실선로 주행시험이 적절하나 차량 개발단계에서는 이를 검증하기가 용이하지 않다. 따라서 차량의 조향 특성을 효율적으로 시험하기 위한 축소 곡선트랙에 대한 연구를 수행하였다. 대차의 곡선 주행을 모사하기 위한 곡률반경 200~250m의 급곡선과 등가인 1/5 scale 규모의 축소 곡선트랙을 설계, 제작하였다. 1/5 scale 대차를 이용한 주행시험 시험결과 곡선 주행특성이 비교적 잘 반영되고 있음을 확인하였다.

**주 요 어** : 축소곡선트랙, 축소대차, 조향, 곡선주행성능, 차륜담면형상

## 1. 서 론

철도차량 주행장치인 대차의 성능은 차량의 최고속도와 직결된 안정성과 곡선 주행성능이 요구된다. 차량 개발 단계에서 대차의 임계속도 검증을 위한 안정성 시험은 통상 대차 주행시험대(roller rig)가 활용되고 반면 곡선 주행성능과 관련된 대차의 조향 성능을 시험하기 위한 시험설비로는 곡선 주행을 일부 모사한 주행시험대가 있기는 하나 실선로 주행 특성을 적절히 모사한 시험설비로 보기에는 무리가 있으며 따라서 차량의 곡선 주행성능 평가는 주로 시운전 과정에서

실선로를 이용한 시험이 주류를 이루고 있다.

또한 full scale 규모의 주행시험설비를 이용하는 것이 실 차량 운용조건에 근접한 시험조건이기는 하나 시험설비의 과대, 시험조건 설정의 어려움, 그로 인한 시험비용 및 시험 소요시간의 과대와 같은 문제점을 초래한다. 따라서 full scale 규모 시험으로인 한 단점을 해결하기 위한 대안으로 상사기법을 적용한 축소 모델에 대한 연구가 철도선진국에서는 차량 임계속도 시험분야를 중심으로 활발히 진행되고 있으며 최근에는 곡선주행성능 시험분야에 대한 연구도 보고 되고 있다[1,2,3,4].

따라서 본 논문에서는 대차의 조향 특성을 효율적으로 시험하기 위한 축소 곡선 트랙에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 대차의 곡선 주행을 모사하기 위한 곡률반경 200~250m의 급곡선과 등가인 1/5 scale 규모의 축소 곡선트랙을

<sup>†</sup> 책임저자 : 회원, 한국철기기술연구원, 철도시스템연구본부  
E-mail : hmhur@krrri.re.kr

TEL : (031)469-5245 FAX : (031)460-5289

<sup>\*</sup> 한국철기기술연구원, 철도시스템연구본부

<sup>\*\*</sup> 아주대학교 기계공학과

설계, 제작하였으며 1/5 scale 축소 대차를 이용한 곡선 주행 시험을 수행하였다.

## 2. 축소 모델 제작

### 2.1 축소 곡선 트랙

축소형 곡선 트랙은 철도차량이 곡선반경 200~250m의 급곡선을 주행할 때의 궤도 및 차량의 거동 특성을 모사 시험할 수 있는 Fig. 1과 같이 1/5 scale 규모, 길이 10m의 축소형 곡선 트랙 구조로 설계하였다. 축소 곡선 트랙 상에서 시험차량의 주행 속도를 부여하기 위하여 자유낙하 방식을 이용하였고 이를 위하여 축소형 곡선 트랙의 높이차는 0.5m 이상 설정 가능하도록 하였다.

축소형 곡선 트랙의 구조는 Fig. 2와 같이 하부프레임, 고저설정지그, 레일부로 구성된다. 하부 프레임, 고저설정지그는 시험 트랙의 시험 목적에 부합할 수 있게 곡선 선형, 높이차를 부여할 수 있는 가변형 구조로 견고하게 설계하였다. 레일 형상, 곡선 트랙의 선형 치수는 KS R 9106 보통 레일 규격 중 60kg 레일을 참조하여 1/5 scale 상사조건을 충족할 수 있게 설계하였다. 또한, 레일 경좌는 실물 레일의 부설 경좌를 고려하여 1/40로 하였으며 캔트는 내외궤의 높이차를 부여함으로써 설정 가능하도록 하였다. Fig. 3은 60kg 레일 형상을 나타내며 Fig. 4는 제작된 축소 곡선 트랙을 나타낸다.

### 2.2 축소 대차

축소 대차는 Fig. 5와 같이 2개의 윤축, 대차프레임, 1차 현 가장치로 구성된다. MMU의 S.D. Iwnicki 의 상사기법에 의거하여 full scale 대차에 대하여 1/5 scale 규모로 설계하였다 [5,6]. 주요 사양 및 물성치는 국내 운용 도시철도 전동차 사

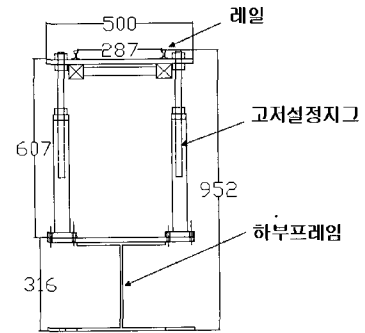


Fig. 2. Scaled track structure

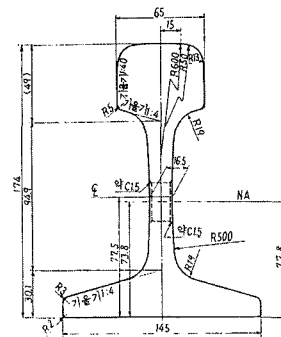


Fig. 3. 60kg rail

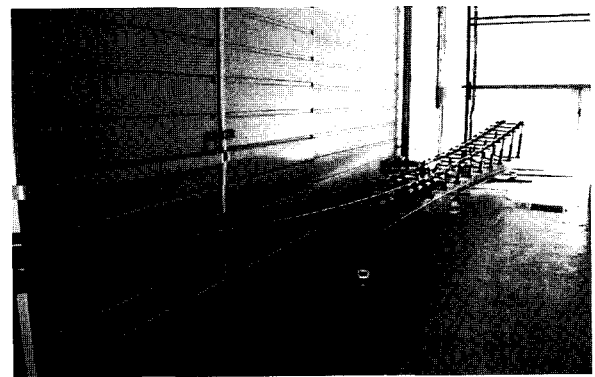


Fig. 4. 1/5 scaled curve track

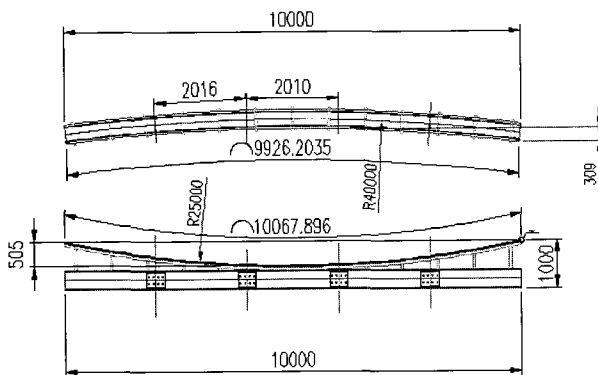


Fig. 1. Draft of the scaled track

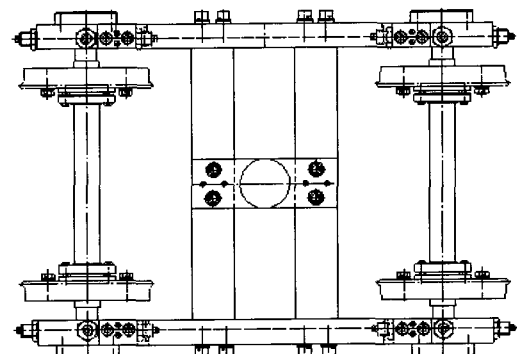


Fig. 5. 1/5 scaled bogie

양을 참조하였으며 각 파라미터에 대한 scale factor는 Table 1과 같다. 차륜담면형상은 Fig. 6과 같이 1/20 2단구배의 차륜담면형상을 적용하였다.

### 3. 차륜담면형상에 따른 대차 곡선주행특성

#### 3.1 곡선주행특성 해석

축소 곡선 트랙상에서의 축소 대차 곡선 주행특성 시험에 앞서 축소 모델에 등가인 full scale 모델에 대한 곡선주행특성 해석을 수행하였다. 해석프로그램은 철도차량 동특성해석 분야의 대표적인 S/W인 영국 AEAT사의 VAMPIRE(Vehicle dynAmic Modelling Package In a Railway Environment)를 사용하였다[7].

차량 모델은 Fig. 6과 같이 full scale 대차 모델을 대상으로 하였으며 물성치는 Table 1과 같다. 차륜담면형상은 1/20, 1/20h 담면형상 2종류를 적용하였다. 궤도 모델은 Fig. 7과 같이 곡률반경 200m, 캔트 150mm인 급곡선을 대상으로 모델

링하였으며 궤도틀림은 VAMPIRE track library file을 적용하였다. 주행속도는 축소 곡선 트랙 주행 시의 최고속도에 등가인 속도조건을 적용하였다.

해석결과는 Fig. 9와 같다. 차륜담면형상 변화에 따른 곡선 주행특성관련 인자의 영향을 분석하기 위하여 궤도 횡압, 윤축 횡압, 대차프레임 좌우진동가속도, 전위 윤축의 좌우 진동가속도에 대하여 해석하였다.

내외궤 궤도 횡압은 Fig. 9(a)-(d)에서와 같이 내외궤가 반대방향으로 나타나고 있으며 차륜담면형상이 변화에도 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나 궤도 횡압의 크기는 1/20h담면형상이 1/20담면형상에 비하여 크기가 작게 발생하고 있다.

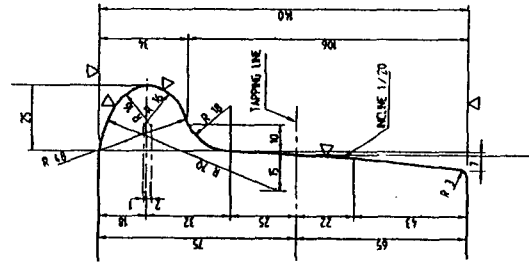


Fig. 6. 1/20 wheel profile

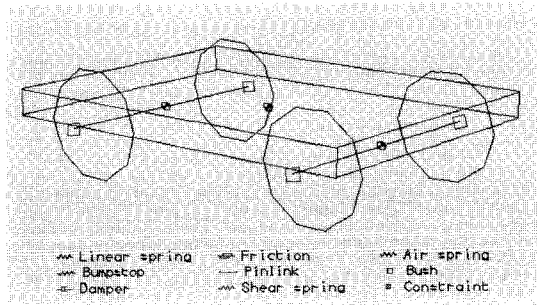


Fig. 7. Vehicle model

Table 1. Specification of scale bogie

parameter	model	Full	scale factor	1/5 scale
대차프레임 길이(m)		2.97	1/φ	0.594
대차프레임 폭(m)		1.97	1/φ	0.394
대차프레임 높이(m)		0.75	1/φ	0.150
고정축거(m)		2.10	1/φ	0.420
차륜직경(m)		0.86	1/φ	0.172
차륜내면거리(m)		1.356	1/φ	0.2712
궤간(m)		1.435	1/φ	0.287
축상스프링간 거리의 반(m)		1.0	1/φ	0.2
차륜담면형상		1/20 1/20h	1/φ	←
레일두부형상		60kg레일	1/φ	←
윤축 질량(kg)		1,600	1/φ <sup>3</sup>	12.8
대차프레임 질량(kg)		2,400	1/φ <sup>3</sup>	19.2
윤축 yaw moment of inertia(kgm <sup>2</sup> )		550	1/φ <sup>5</sup>	0.176
대차 yaw moment of inertia(kgm <sup>2</sup> )		2100	1/φ <sup>5</sup>	0.672
1차현가장치 전후/좌우 방향 강성(N/m)		6.6e6/ 4.8e6	1/φ <sup>3</sup>	5.28e4/ 3.84e4
윤충(N)		13,734	1/φ <sup>3</sup>	110
Young's modulus(N/m <sup>2</sup> )		2.07e11	1/1	2.07e11

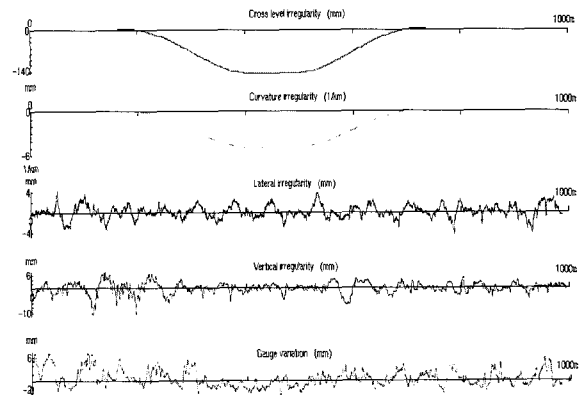
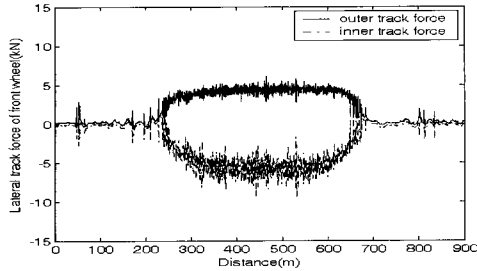
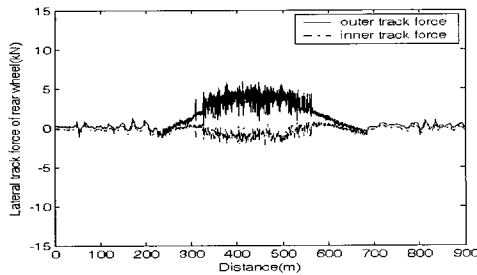


Fig. 8. Track model(R200)

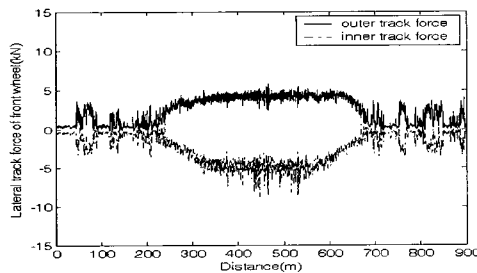
Fig. 9(e)에서와 같이 윤축에 작용하는 횡압을 보면 답면형상에 따라 같은 경향을 보이고 있으며 1/20h답면형상이 1/20답



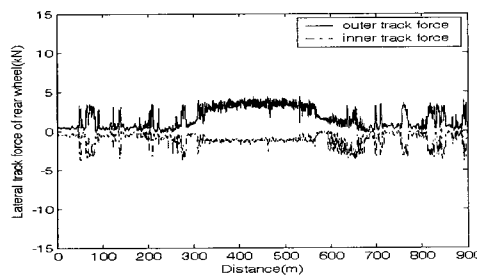
(a) Lateral track force of front wheel(1/20)



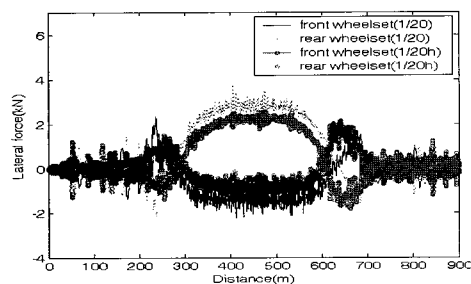
(b) Lateral track force of rear wheel(1/20)



(c) Lateral track force of front wheel(1/20h)



(d) Lateral track force of rear wheel(1/20h)

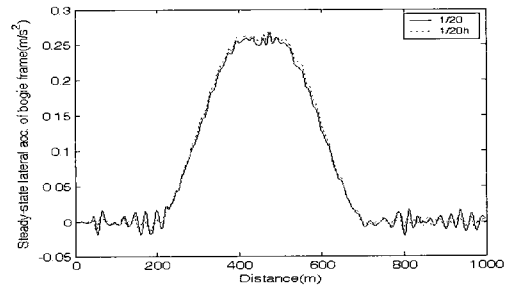


(e) Wheelset lateral force

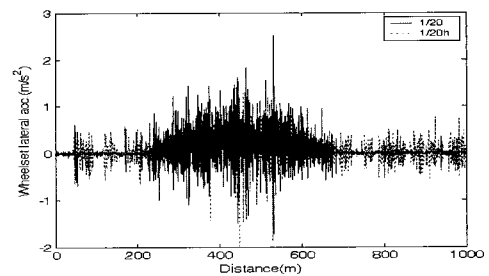
면형상에 비하여 크기가 작음을 알 수 있다. 이는 1/20h답면형상이 원호형 1/20답면형상에 비하여 곡선에 적응성이 우수한 원호형 답면구조에서 기인한 결과라 판단된다[8,9]. Fig. 9(f)에서와 같이 대차프레임의 좌우 정상횡가속도는 두 답면형상 모두 유사한 결과를 보이고 있으며 전위 윤축의 좌우진동가속도는 Fig. 9(g)와 같이 1/20답면형상의 경우 감소하는 경향을 보이고 있다.

### 3.2 축소 곡선트랙상에서의 축소대차 주행시험

축소 곡선트랙상에서의 곡선주행 특성시험의 적합성을 확인하기 위하여 축소대차를 이용한 주행시험을 수행하였다. 측정량은 대차의 곡선 주행특성관련 인자를 반영하는 외궤진동가속도, 대차프레임 진동가속도, 내외궤 궤도횡압, 대차주행속도도 하였다. 시험시스템 구성및 측정량은 Table 2와 같다. Fig. 10은 진동 및 횡압 측정을 위하여 주행속도가 최대



(f) Steady-state lateral acceleration of bogie frame



(g) Lateral acceleration of front wheelset

Fig. 9. Results of curving analysis

Table 2. Summary of test

구분	내역
시스템 구성	- 1/5 scale 축소 트랙, 축소 대차 - Data Acquisition system
측정량	- 외궤 진동가속도 : 좌우, 상하 - 대차프레임 좌우진동가속도 - 내외궤 궤도 횡압 - 대차 주행속도

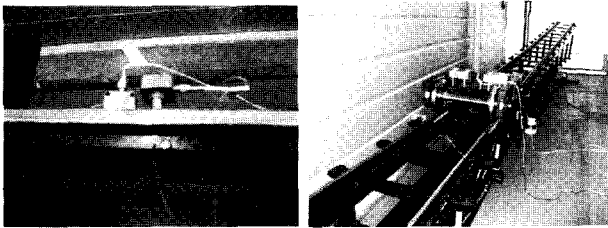
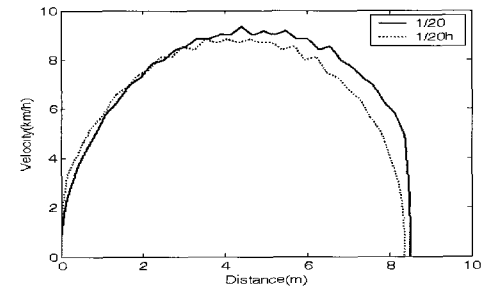
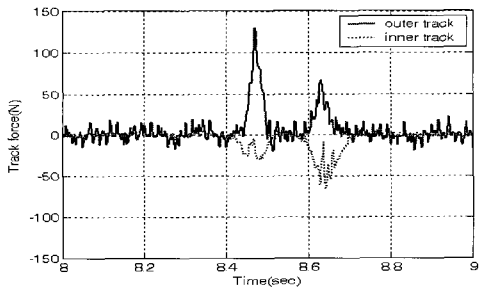


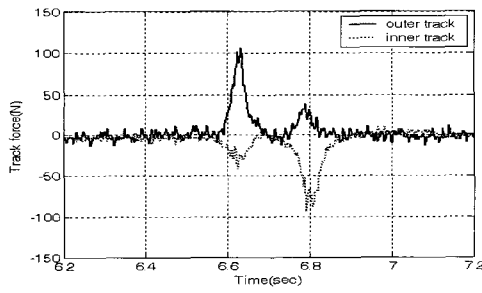
Fig. 10. Accelerometer and strain gage Fig. 11. Scaled bogie test on the scaled track



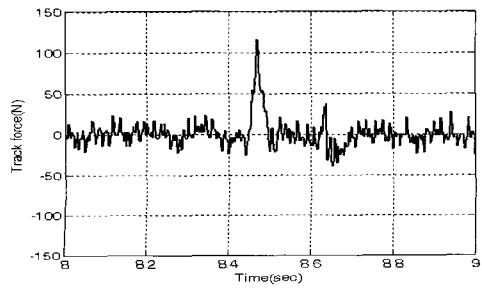
(a) Running speed



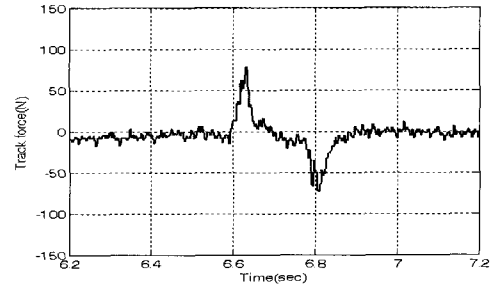
(b) Track lateral force(1/20)



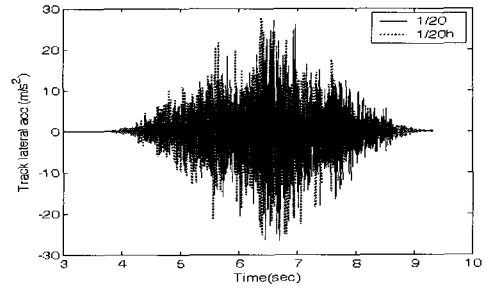
(c) Track lateral force(1/20h)



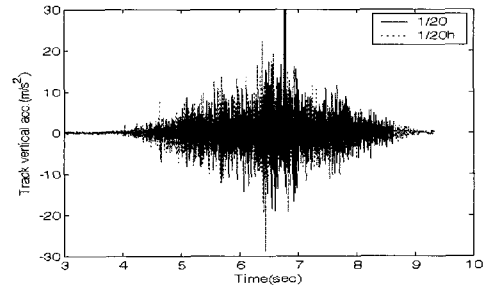
(d) Wheelset lateral force(1/20)



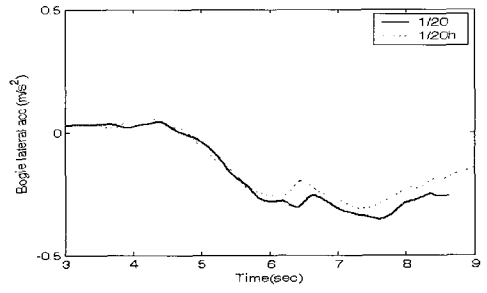
(e) Wheelset lateral force(1/20h)



(f) Track lateral acceleration



(g) Track vertical acceleration



(h) Steady-state lateral acceleration of bogie

Fig. 12. Test results

가 되는 축소트랙의 중간지점에 취부한 센서를 나타내며 Fig. 11은 축소 곡선트랙상에서의 축소 대차 주행시험 전경을 나타낸다.

Fig. 12는 시험결과를 나타낸다. 축소트랙상에서의 축소대차의 주행속도는 Fig. 12(a)에서와 같이 최대 9.35km/h의 속도를 나타냈다. 자유낙하방식을 이용한 설계 최대속도는 11.3km/h였으나 윤축 회전부의마찰의 영향으로 주행속도는

다소 감소한 수치를 보이고 있다. 차륜담면형상에 따른 내외 궤 횡압은 Fig. 12(b)~(c)와 같다. 2개의 윤축이 지나감에 따라 2개의 피크 횡압을 보이고 있으며 최대값의 크기의 방향은 반대인 형상을 보이고 있다. 이는 곡선부 주행에 따라 대차가 yaw 방향으로 회전함에 따른 것으로 해석할 수 있다. 궤도 횡압의 최대값은 1/20담면형상이 129.7N임에 비하여 1/20h담면형상의 횡압은 105.3N으로 감소하고 있다. Fig. 12(d)~(e)에서와 같이 윤축에 작용하는 횡압을 보면 1/20담면형상의 경우 최대 116.5N, 1/20h담면형상의 경우 최대 77.1N으로서 1/20h담면형상이 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 윤축간 횡압차를 보면 1/20담면형상의 경우 77.1N, 1/20h담면형상의 경우 5.2N으로서 1/20h담면형상에서 전후 윤축간의 작용 횡압의 균형이 적절하게 나타남을 확인 할 수 있다. 이는 앞서 해석한 횡압 결과와도 같은 경향을 보이는 결과라 할 수 있다.

Fig. 12(f)~(g)는 외궤에 작용하는 좌우, 상하방향진동가속도를 나타낸다. 좌우 진동가속도의 rms값은 1/20담면형상의 경우  $5.63\text{m/s}^2$ , 1/20h담면형상의 경우  $5.37\text{m/s}^2$ 로서 1/20h담면형상인 경우 미소하게 감소하고 있다. 상하 진동가속도의 rms값은 1/20담면형상의 경우  $12.83\text{m/s}^2$ , 1/20h담면형상의 경우  $12.64\text{m/s}^2$ 로서 거의 등가의 수준을 보이고 있음을 알 수 있다. 대차프레임의 정상횡가속도는 Fig. 12(h)에서와 같이 곡선부 주행에 따라 원심력 성분이 나타나는 유형을 보이고 있으며 1/20h담면형상의 경우 미소하게 감소하는 경향을 보이고 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 대차의 조향 특성을 효율적으로 시험하기 위한 축소 곡선 트랙에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 대차의 곡선 주행을 모사하기 위한 1/5 scale 규모의 축소 곡선트랙을 설계, 제작하였으며 1/5 scale 축소 대차를 이용한 곡선 주행시험을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

축소 대차를 이용하여 차륜담면형상 별로 축소 곡선 트랙 상에서 주행시험을 수행한 결과 full scale 대차를 대상으로 한 곡선주행 해석 결과와 같이 유사한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 각 분석 항목별로 유형이 일부 차이가 있기는 하나 이는 해석시 궤도의 상하구배를 고려하지 않은 점, 축소

대차의 상사 과정에서 인위적으로 상사가 불가한 항이 존재한다는 점 등에서 비롯된 결과라 추정된다.

그러나 전반적으로 대차 1차 현가계 및 차륜담면형상에 의한 조향특성을 시험하기 위한 축소 모델로 활용하기에는 무리가 없다고 판단된다. 좀 더 실모델에 근사한 축소 모델 완성을 위해선 오차를 최소화하기 위한 적정 파라미터를 선정하고 scaling함으로서 full scale 모델과의 상사를 최적화하는 연구가 필요하다. 이와 관련된 부분은 향후 축소 대차 및 축소 트랙에 대한 보완 및 실험적 연구를 통하여 지속적으로 추진되어야 할 부분이라 사료된다. 또한 본 연구 결과는 향후 대차 개발 시 대차 축소모델 시제를 활용한 조향성능 검증 시험 장치로 적절히 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

#### 참고 문헌

1. Iwnicki, S.D., Wickens, A.H. (1998), "Validation of a MATLAB railway vehicle simulation using a scale roller rig", *Vehicle System Dynamics*, Vol.30, No.3, pp.257-270.
2. N. Bosso, A. Gugiotta, A. Soma (2006), "Dynamic Identification of a 1/5 Scaled Railway Bogie on Rolling Rig", *Sc. and Tech. Bull. of the "Aurel Vlaicu" Univ. Arad, Mech. Eng.* Vol.2, No.1, pp.5-15.
3. Moritz Gretschel, Alfred Jaschinski (2004), "Design of an Active Wheelset on a Scaled Roller Rig", *Vehicle System Dynamics*, Vol.41, No.5, pp.365-381.
4. Yohei Michitsuji, Yoshihiro Suda (2004), "Evaluation of Running Motion for Railway Vehicle with Controlled Single-Axle Bogies", *Proceeding of ACMD*, pp.377-382.
5. Simon Iwnicki (1996), "Handbook of Railway Vehicle Dynamics", CRC Press.
6. H.M. Hur, et al (2007), "A Study on The Scale Model of Roller Rig for Bogie Testing", *Proceedings of the KSPE Spring Annual Meeting*. pp.841-842.
7. AEA Technology(2004), "Vampire User Manual"
8. 허현무, 서정원, 권석진, 김남포(2005), "국내 철도 차륜/레일 형상 조합에 따른 차량 동특성 분석 연구", *한국철도학회논문집*, 제8권, 제5호, pp.483-489.
9. 허현무(2004), "경제적 차륜담면관리기술 개발", *한국철도기술연구원*.

(2007년 9월 14일 논문접수, 2007년 10월 4일 심사완료)