독립차륜형 초고속 열차 개념 설계안의 동특성 해석

Analysis of Dynamic Characteristics for Concept Design of Independent-Wheel Type Ultra-High-Speed Train

이진희 · 김남포 · 심경석 · 박태원*

Jin-Hee Lee · Nam-Po Kim · Kyung-Seok Sim · Tae-Won Park

Abstract In this paper, a concept design of a rail type ultra-high-speed train is proposed and its dynamic characteristics are analyzed. Instead of the existing solid axle, a new type bogie system and independently rotating wheels are applied in the proposed train. In order to analyze the dynamic characteristics, a multibody dynamic model of a vehicle is developed and the basic validity is verified by eigenvalue analysis. Also, it is shown that the critical speed is improved in comparison to that of existing high-speed train model HEMU-430X. Finally, through 7000R curved track driving analysis at a speed of 550 km/h, the lateral force of the wheels and the derailment quotient are estimated and the applicability of the new concept railway vehicle is confirmed.

Keywords : Ultra-high-speed train, Independent rotating wheel, Critical speed, Derailment quotient, Dynamic analysis

초 록 본 논문에서는 레일형 초고속 열차의 개념 설계안을 제안하고 동역학 해석을 통해 주행 동특성을 예측하고자 한다. 초고속 열차에는 단일 윤축세트가 포함된 새로운 형태의 대차가 적용되었으며, 기존의 일체형 차축 대신 독립차륜이 적용되었다. 초고속 열차의 동특성을 파악하기 위하여 먼저, 차량에 대한 동역학 수치해석 모델을 개발하고 고유치 해석을 통해 해석 모델의 기본적인 타당성을 검증하였다. 또한, 임계속도 해석을 통하여 기존 고속철도 HEMU-430X 차량에 비해 향상된 성능을 확인하였으며, 7000R 곡선선로에서 550km/h 주행해석을 통하여 횡압, 탈선계수 등을 예측하고 초고속 열차 개념 설계안의 적용 가능성을 파악하였다.

주요어 : 초고속 열차, 독립차륜, 임계속도, 탈선계수, 동역학 해석

1. 서 론

고속열차의 독자 개발 능력을 보유한 철도 선진국들은 자국이 개발한 고속열차의 운영경험 축적과 함께 보다 빠르고 쾌적한 고속철도 시스템을 개발하기 위해 치열한 신기술 경쟁을 벌이고 있다. 현재 한국형 고속열차는 목표한 성능과 신뢰성이 입증되어 2010년 3월부터 KTX-산천이란 명칭으로 한국철도공사의 경부선과 호남선에 각각 투입되어 영업 운행 중에 있다. 또한 2013년에는 최고속도 430km/h, 운영속도 370km/h를 목표로 한 차세대 고속열차 HEMU-430X가 개발을 완료하고 상용화를 위한 안정화가 진행 중이다[1]. 하지만 국내의 고속철도 분야는 한국형 고속 열차 개발을 통해 원천 설계 기술은 확보하였으나 이미 확보한 원천 설계 기술을 확대발전, 응용하려는 노력은 부족한 상황이다. 철도 선진 국가들의 속도 향상 경쟁과 신기술 경쟁 환경에서 철도산업을 지속 가능한 미래 성장 동력 산업으로 발전시키기 위해서는 세계의 고속철도 기술발전 동향을 파악하고 국가 철도 경쟁력 향상이 절실히 요구된다.

열차가 주행하기 위해서는 전력공급 장치인 가선계-판토그래프의 역할이 중요하다. 특히 고속으로 주행할수록 차량의 속도가 가선계의 파동전파속도에 근접해지고 상호간에 이선(Loss of contact) 발생 확률이 증가한다는 것은 이미 많은 연구를 통해 알려진 문제점이다[2]. 하지만 최근에는 고속주행을 위한 전력공급을 지상 전력변환장치에 의존해 주행하는 기술이 제안되면서 기존의 가선계-판토그래프를 이용한 집전시스템의 한계를 극복한 초고속 주행 열차 기술 개발이 가능하게 되었다. 이러한 하이브리드 철도시스템 중 휠-레일 방식에 기초하지만 회전형 전동기가 아닌 선형 전동기를 이용하는 방식을 레일형 초고속 열차(Rail-type ultra-high-speed train)라 일컫는다. 레일형 초고속 열차는 선형 추진이 적용되기 때문에 비점착구동이 가능하며 이로 인하여 휠과 레일은 단순히 차량의 지지, 안내의 역할을 하므로 기존 점착구동 방식에서 발생하는 속도한계를 극복할 수 있다[3]. 이러한 레일형 초고속열차가 실용화되기 위해서는 국내 지형에 맞는 궤도조건을 포함해야 할 것이며, 기본적으로 고속열차의 개발 요구사항인 주행 안전성 및 승차감 개선, 충분한 수송 능력 등을 확보해야 할 것이다. 또한 안정적인 곡선 주행 성능 및 승차감 확보를 위하여 틸팅제어 및 대차조향제어 등과 같은 기술의 적용에 대한 검토도 필요하다. 레일형 초고속 열차의 경우에는 기존의 선로조건 하에서

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-219-2524, E-mail : park@ajou.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2014

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.1.28>

직선 및 곡선 주행의 안정성을 확보하고 동하중의 최소화 및 에너지 소비율을 절감하여야 하는 과제를 안고 있다. 이러한 한계를 극복하고 목표 성능을 만족하기 위하여 기존 시스템의 개념을 넘어서는 새로운 개념의 대차 및 차륜 시스템을 필요로 한다. 이와 같은 요구사항을 충족하기 위하여 현재 철도 선진국들을 중심으로 독립차륜 형태의 대차 개념이 제시되고 있으며[4-6], 이미 다양한 디자인의 대차 개발이 진행 중에 있다[7]. 독립차륜형 대차는 초고속 영역까지 헌팅에 의한 주행안정성 확보에 유리하나, 자가 중심 복원 기능과 곡선 자가 조향기능이 저하되어 이를 극복하는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 새로운 개념의 독립차륜형 대차에 대한 동역학 해석 모델 개발하고 이를 이용한 임계속도 및 동특성 해석을 통해 초고속화의 달성 가능성을 제시하고자 한다.

2. 독립차륜형 초고속 열차 동역학 모델

2.1 개념 설계안

철도차량은 일반적으로 크게 레일과 상호작용하며 실질적으로 차량의 구동을 담당하는 윤축세트(Wheelset)와 현가장치 및 구동시스템 등을 포함하는 대차(Bogie) 그리고 승객이 탑승하고 각종 전장들이 포함되어 있는 차체(Car body)로 분류된다. 철도차량의 구조 및 배치 등은 그 용도 및 운영속도 영역, 상호작용하는 궤도의 종류에 따라 다양한 형태가 존재한다. 현재 국내에서 운영되는 철도차량이 대부분 전기철도차량이며 2개의 평행한 레일을 사용하는 쌍궤직립철도라는 사실은 동일하나, 차량이 고속철도인지 일반철도인지 등의 여부에 따라 적용되는 대차의 종류 및 형태, 배치 방법 등은 다양하다. 대표적으로 현재 국내에서 개발이 완료 후 상용화 준비 중인 최고시속 430km/h급 고속철도 HEMU-430X는 차량 1량에 전, 후 두 개의 대차가 장착되어 있으며, 각 대차에는 두 개의 일체형 차축(Solid axle)이 장착되어 있다. 하지만 본 연구의 대상인 레일형 초고속 열차는 독립차륜(Independently rotating wheel) 및 단일 윤축대차(Single wheelset bogie) 개념의 적용으로 인하여 대차 중량이 대폭 감소되고, 차체가 저중심화 되었으며 대차 간 조향장치를 적용하여 기존 열차와는 다른 새로운 형태의 구조를 지닌다. 또한 집전시스템으로 기존의 가선계-판토프레프가 아닌 선형 추진제어 시스템이 적용된다.

Fig. 1(a)는 본 연구의 해석 대상인 레일형 초고속 열차에 대한 개념도를 보여준다. 차량은 총 3량 1편성으로 구성되어 있으며, 1량의 길이는 12.5m이고 대차 중심간 거리는 11.5m이다. 차체 1량은 전, 후 두 개의 대차가 지지하는 구조이며, 각 대차는 독립차륜이 적용된 단일 윤축세트로 구성된 것이 특징이다. Fig. 1(b)는 두 차체가 연결된 부분에 위치한 대차의 모습을 보여준다. 대차는 기본적으로 대차 프레임(Bogie frame), 윤축세트, 1차 현가장치, 공기스프링으로 구성된 2차 현가장치, 횡 댐퍼, 수직 댐퍼 등으로 구성되며 실제로는 모터, 제동장치, 집전 시스템, 각종 전장 부품들이 배치된다. 동역학 모델 상에서 이러한 전장 부품들은 대차

(a) Overall configuration

(b) Configuration of an independent wheel type bogie

Fig. 1 Concept design of ultra-high-speed train

와 차체에 등가 질량 및 관성으로 고려되어 반영되었으며, 차량 전두부와 후미의 대차는 Fig. 1(b)에 제시된 대차에서 대차간 조향링크가 제외된 것과 동일한 형상이다. 특징으로는 독립차륜이기 때문에 두 차륜 사이에 차축이 없으며, 대신 빔 형태의 구조물이 연결되어 있다는 점과 두 대차가 대칭 형태의 조향 링크로 연결되어 있다는 점이 있다. 이 대차간 조향링크는 선두 열차에서 발생한 조향력을 후미 열차에 전달하는 역할을 하며, 이는 차량이 곡선 선로를 주행할 때 차륜의 공격각(Attack angle), 횡력(Lateral force) 및 탈선계수를 감소시켜 보다 안정적인 성능을 확보할 수 있도록 보조 하는 역할을 한다. Fig. 1에 제시된 새로운 개념의 독립차륜형 대차는 기존의 고속철도 및 일반 도시철도의 대차 구조에 비하여 상대적으로 매우 단순한 구조를 보이고 있기 때문에 이로 인한 공간 활용의 이점이 있다. 또한 독립차륜의 적용으로 인하여 임계속도의 제한 범위가 대폭 증가하였다. 하지만 독립차륜의 적용은 기존 일체형 차축과 차륜-레일 사이의 거동이 전혀 다른 특성을 보이기 때문에 이에 대한 해석적 검토와 이해가 요구된다.

2.2 동역학 모델링

2.2.1 차량 설계 제원

신규 차량의 물성정보 및 현가장치 특성치를 적용하여 철도차량의 동역학 모델을 생성하였다. 차량 1량의 길이는 앞서 언급하였듯이 12,500mm이고 대차간 거리(Bogie base)는 11,500mm이다. 또한, 차륜-레일 접촉점간 거리는 1,500mm이며, 레일 내측간 최단거리를 의미하는 궤간(Gauge)은 국

내 고속선 설비 기준인 1,435mm이다. 차륜직경 역시 동일한 규격인 860mm이다. 윤축세트의 경우 총 중량은 1.3ton이지만 독립차륜이기 때문에 단일 차륜의 중량은 0.55ton, 차축 빔의 중량은 0.2ton으로 적용되었다. 차체 1량의 총 공차중량은 24.8ton으로 고속철도 HEMU-430X 1량의 길이가 23,500mm, 공차중량이 58.3ton인 것에 비하여 전체적으로 축소화 및 경량화 되었음을 알 수 있다. 현가장치는 크게 코일스프링으로 구성된 1차 스프링과 공기스프링으로 구성된 2차 스프링, 횡 댐퍼, 상하 댐퍼, 횡 버퍼로 구성되며 상세한 수치의 제시는 생략한다. 견인장치 및 대차 커플링 장치는 임의의 강체를 추가하여 모델링 하였으며 차체 혹은 타 대차와 연결하여 상호작용 할 수 있도록 모델상에 구현되었다.

2.2.2 차량 동역학 모델

Fig. 2는 앞서 설명한 차량의 제원 및 특성치를 반영하여 생성한 3량 1편성 독립차륜형 초고속 열차 동역학 모델의 모습을 보여준다. 해석 프로그램은 상용 철도차량 동역학 해석 프로그램인 ADAMS/Rail을 사용하였다[8]. ADAMS/Rail에서 차륜과 레일의 접촉력 계산은 선형 이론을 이용하는 방법, 차륜의 횡방향 운동에 대한 함수로 사전에 계산된 표를 이용하는 방법, 차륜과 레일의 형상 파라미터를 이용하는 방법이 있는데, 본 논문에서는 사전에 계산된 표를 이용하는 방법을 적용하였다. Fig. 2에 제시된 철도차량 동역학 모델을 활용하여 임계속도 및 기타 주행 거동을 해석하였다.

(a) View of overall vehicle dynamic model

(b) View of connection position

Fig. 2 Dynamic model of concept design of a train

2.3 차륜, 레일 프로파일

철도차량의 대표적인 특징 중 하나는 차륜과 레일이 접촉하며 구동한다는 것이다. 차륜과 레일의 접촉을 어떻게 정

의하느냐에 따라서 차량의 주행거동이 크게 차이가 나기 때문에 이들에 대한 올바른 정의 여부는 매우 중요하다. 차륜과 레일의 형상은 단순한 선형적인 형태가 아니며, 차륜의 경우 답면(Tread) 영역과 플랜지(Flange) 영역으로 구분되어 차량이 곡선 선로를 주행하거나 횡 변위가 발생할 때 복원력을 갖고 탈선에 대비하도록 설계되어 있다. 레일 역시 곡면으로 구성되어 있으며 따라서 이들의 프로파일 형태에 따라 특성에 차이가 발생한다. 레일은 Fig. 3에 제시된 UIC60의 프로파일을 적용하였다[9]. 차륜에는 두 종류의 프로파일이 적용되었다. 첫 번째는 기존 고속철도 및 HEMU-430X 차량에 적용되고 있는 S1002 프로파일이며[10,11], 두 번째는 독립차륜형 초고속 열차에 적합하게 고안된 신규 프로파일이다. 두 종류의 차륜 프로파일은 Fig. 4에 제시되어 있다. 신규 차륜 프로파일은 S1002의 형태와 유사하지만 레일과 주로 상호작용하는 답면 영역의 구배가 상대적으로 크게 설계되었다. 이는 독립차륜에서는 발생하지 않는 중심로의 복원력 및 횡력을 발생시키기 위하여 고안된 형상이다. Fig. 5와 Fig. 6은 두 프로파일을 적용한 좌, 우측 차륜에 대한 구름반경 차이(Rolling radius difference)와 접촉각 차이(Contact angle difference)를 보여준다. Fig. 5와 Fig. 6을 통하여 본 연구에서 적용된 두 종류의 차륜 프로파일에 대한 기하학적인 차이를 확인할 수 있다.

Fig. 3 Rail profile (UIC60)

Fig. 4 Wheel profile (S1002, new profile)

Fig. 5 Rolling radius difference

Fig. 6 Contact angle difference

2.4 고유치 해석을 통한 해석 모델의 타당성 검토

앞서 언급한 차량 모델에 대하여 임계속도 및 주행 해석을 수행하기 위해 앞서 고유치 해석(Eigenvalue analysis)을 통하여 차량 모델의 기본적인 타당성을 확인하였다. 고유치 해

(a) 1st mode: pitch (1.0330 Hz)

(b) 2nd mode: vertical (1.1132 Hz)

(c) 3rd mode: lateral (1.1449 Hz)

(d) 4th mode: yaw (1.4715 Hz)

(e) 5th mode: roll (2.0953 Hz)

Fig. 7 Results of eigenvalue analysis

석은 ADAMS/Rail에서 'linear analysis'라는 명칭으로 제공된다. 모델의 고유치 해석을 통하여 주요 거동에 대한 모드 및 주파수를 확인하였다. 철도차량의 주요 모드가 3Hz 미만을 갖는 것이 일반적이며, 만약 그 이상의 고주파에서 주요 모드가 확인 될 때에는 모델의 타당성을 재확인해볼 필요가 있다. Fig. 7은 고유치 해석 결과 산출된 주요 모드와 주파수를 보여준다. 차량에 대한 pitch, vertical, lateral, yaw, roll에 대한 주요 모드가 모두 2.1Hz 이하로 산출된 것을 확인할 수 있으며 차량의 거동이 대략적으로 타당한 범위를 보인다고 판단할 수 있다.

3. 임계속도 해석

3.1 해석 개요

철도차량의 거동은 원추형상의 차륜과 레일의 상호작용으로 인하여 기본적으로 사행동(Snake motion)을 보이며 차량과 차륜-레일의 특성에 따라 일정 주행속도 이상이 될 시 사행동의 진폭이 커지며 수렴하지 않는 거동을 보이게 된다. 이를 헌팅(Hunting)이라고 하며, 차량이 이러한 헌팅 거동을 보이기 전까지의 속도를 임계속도(Critical speed)라고 한다 [12]. 임계속도는 차량의 고유한 성질로 차량의 최고속도 및 운영속도는 반드시 임계속도 이하의 범위에서 설계되어야 하며, 따라서 고속철도일수록 고속에서의 임계속도 확보가 필수적이다. 이러한 임계속도를 해석적으로 예측하는 방법은 크게 선형 방법과 비선형 방법으로 나눌 수 있다. 선형 임계속도 예측 방법은 유효 담면구배(Equivalent conicity)가 적용된 선형화된 차량을 이용하여 고유치 해석을 수행한 후 특정 모드에 대하여 속도에 따른 감쇠비를 변화를 파악하여 임계속도를 결정하는 해석적인 방법이다. 비선형 예측 방법은 비선형 차륜-레일 프로파일이 적용된 모델을 수치적분을 적용하여 주행시키고 차량에 초기 외란을 가하여 거동의 수렴 여부를 판단하여 임계속도를 파악하는 방법이다. 본 논문에서는 초고속 열차 개념 설계안의 동역학 모델을 사용하여 비선형 방법을 통해 임계속도를 파악하였다. 해석에 사용된 가진 입력 자료는 상용 철도차량 해석 프로그램인 VAMPIRE에서 제공하는 순간 불규칙도 선로 모델을 사용하였다[13]. 입력 선도는 초기 일정 구간에서 레일에 좌우, 상하 방향으로 Fig. 8에 제시된 불규칙도가 적용된 형태이며, 차량이 일정한 속도로 해당 구간을 지나면서 발생하는 거동을 통해 임계속도를 판단하게 된다.

(a) Lateral irregularity

(b) Vertical irregularity

Fig. 8 Track irregularity for critical speed analysis

3.2 임계속도 해석 결과

임계속도 해석은 본 연구의 대상인 독립차륜형 초고속 열차 개념 설계안과 기존 고속철도인 HEMU-430X 모델에 대하여 각각 수행하며, 차륜 프로파일도 S1002와 신규 차륜 프로파일을 각각 적용하여 프로파일 변화에 따른 거동 변화를 동시에 비교하였다. 해석 속도는 300, 500, 700km/h이며 각 모델에 대하여 선두 차량 앞 대차의 좌측 차륜의 횡방향 변위와 수직방향 변위 결과를 비교, 분석하였다. Fig. 9는 초기 외란에 의한 차륜의 횡방향 변위를 보여준다. Fig. 9에서 초기 횡방향 변위가 -3mm 위치인 것은 차륜의 지역 좌표 계로 부터의 정의된 거리이기 때문이며, 동특성과는 관계없음을 밝힌다. 먼저 독립차륜형 초고속 열차와 기존 일체형 차축이 적용된 HEMU-430X의 거동을 비교하면 500km/h까지의 속도에서는 초기 외란에 의한 변위 발생 후 일정 시

(a) Vehicle speed: 300 km/h

(b) Vehicle speed: 500 km/h

(c) Vehicle speed: 700 km/h

Fig. 9 Results of critical speed analysis (lateral displacement)

간 안에 수렴이 되는 것을 볼 수 있다. 하지만 700km/h의 속도에서는 HEMU-430X의 거동이 수렴하지 못하고 플랜지 접촉에 의한 헤팅 운동을 보이는 것을 알 수 있다. 반면 독립차륜형 초고속 열차는 700km/h의 속도에서도 거동이 수렴하는 것을 볼 수 있다. 한편, 차륜 프로파일 S1002를 적용한 독립차륜형 열차의 거동이 외란에 의해 한쪽 방향으로 이동하는 것을 볼 수 있는데, 이때 좌, 우측 차륜의 구름 반경에 차이가 나게 되지만 독립적으로 회전하기 때문에 헤팅 운동이 발생하지 않고 정상적으로 주행하는 것으로 볼 수 있다. 이를 통하여 독립차륜의 적용으로 인하여 임계속도가 대폭 향상된 것을 확인할 수 있다. 다음으로 동일한 독립차륜형 열차에서 차륜의 프로파일을 기존의 S1002를 적용했을 때와 답면 영역의 구배를 증가시킨 신규 차륜 프로파일을 적용했을 때의 결과를 비교하면 S1002를 적용하였을 때는 앞서 언급하였듯이 횡방향 복원력이 발생하지 않지만 신규 차륜 프로파일을 적용한 경우에는 복원력이 발생하여 초기 중심 위치로 돌아오는 것을 확인할 수 있다. 이는 상대적으로 높은 답면구배에서 발생하는 횡력으로 인한 결과로 판단할 수 있다. 이를 통하여 신규 차륜 프로파일의 자가 중심복원 기능(Self-centering) 효과를 확인할 수 있다. 자가 중심복원 기능의 확보를 통해 좌, 우 휠에서 발생하는 동하중의 불균형을 최소화 할 수 있다.

4. 곡선선로 주행해석

4.1 해석 시나리오

본 장에서는 앞서 생성 및 기본적인 검증을 마친 독립차륜형 초고속 열차의 개념 설계안 동역학 모델을 활용하여, 실제 곡선 선로에서의 주행 해석을 통해 동특성 및 고속 주행 가능성을 파악한다. 설계 목표 성능은 곡선반경 7000R 선로에서 550km/h의 속도를 만족하는 것으로 해당 목표 성능 만족 여부를 판단할 수 있는 해석 시나리오를 제시하고 동특성을 분석한다. 주행 특성을 파악하기 위하여 다음과 같은 선로와 시나리오를 적용하여 해석을 수행한다. Fig. 10은 S형태의 곡선 선로의 정의를 보여준다. 설정칸트는 180mm를 적용하였다.

4.2 해석 결과

앞서 언급한 주행 시나리오를 적용하여 각 속도별로 해석

Fig. 10 Definition of S curve track

Fig. 11 Comparison of analysis results in S curve track

을 수행하였다. 먼저 앞서 임계속도를 통해 성능을 비교한 독립차륜형 초고속 열차 개념 설계안(S1002, 신규 차륜 프로파일 적용)과 HEMU-430X에 대하여 차륜에 발생하는 횡압, 수직력, 탈선계수를 비교하고 거동의 변화경향 및 범위를 비교하였다. Fig. 11은 차량이 S형 곡선선로를 550km/h의 주행 속도로 통과 할 때 발생하는 선두 대차 좌측 차륜에 대한 횡압(Lateral force), 수직력(Vertical force), 탈선계수(Derailment quotient)를 보여준다. 각 그래프에서 파란색 실선(Blue solid line)은 S1002가 적용된 독립차륜형 열차, 붉은색 파선(Red dashed line)은 신규 차륜 프로파일이 적용된 독립차륜형 열차, 녹색 점선(Green dotted line)은 일체형 차축이 적용된 HEMU-430X의 결과이다. 한편, 탈선계수는 식 (1)을 근거로 산출된다[14].

$$\text{Derailment quotient} = Q/P \quad (1)$$

여기서, Q 는 차륜에 작용하는 횡압, P 는 수직력으로 탈선계수는 횡압과 수직력의 비로 정의되며, 단위는 비율이므로 무차원이다. 국제규정 UIC 518에서는 탈선계수의 제한값을 0.8으로 제시하고 있다[15]. Fig. 11에 제시된 결과에서 일체형 차축을 적용한 차량과 독립차륜을 적용한 차량의 거동을 비교해보면 서로 상이한 것을 볼 수 있으며, 독립차륜에서 일반적으로 S형 곡선 통과 시 예상되는 거동과는 다른 특성

을 보이는 것을 볼 수 있다. 독립차륜형 열차에서 차륜 프로파일 변경에 따른 거동 변화를 살펴보면 S1002 프로파일에 비해 신규 프로파일이 횡압과 그에 따른 탈선계수가 상대적으로 높게 산출되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 신규 프로파일의 답면 영역 구배가 높기 때문에 야기되는 결과로 판단할 수 있다. 탈선계수를 살펴보면 모두 최대 0.5 이하의 범위를 만족하는 것을 볼 수 있으며, 이는 목표 주행 조건인 7000R 곡선 선로에서 550km/h로 정상 주행할 수 있음을 해석적으로 제시해준다. 하지만 본 해석 궤도는 궤도 불규칙도가 적용되지 않은 이상적인 궤도이기 때문에 차후 불규칙도가 적용된 선로에서의 주행 가능성 여부를 추가적으로 판단해야 할 것이다. 또한 독립차륜형 열차는 기존 고속철도에 비해 횡력 및 탈선계수가 높게 산출되는데 이는 차륜과 레일에 과도한 마모 및 손상을 야기 시키고 차량의 안전성을 저하시킬 수 있으므로 이에 대한 보완이 필요할 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 독립차륜형 초고속 열차의 개념 설계안을 대상으로 동역학 해석을 통해 주행 거동을 파악하였다. 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 상용 철도차량 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하여 3량 1편성으로 구성된 초고속 열차의 개념 설계안에 대한 차량 모델을 개발하였다. 초고속 열차는 기존 고속열차에서 사용된 일체형 차륜 대신 독립차륜이 적용되었으며 대차 당 하나의 휠셋만 적용되어 저중심화, 축소화 및 경량화 되었다. 또한 차륜 프로파일은 S1002와 독립차륜에 적합하게 고안된 신규 프로파일을 적용하여 거동을 비교하였다. 이어서 고유치 해석을 통해 차량 모델의 기본적인 타당성을 검증하였다.

(2) 생성한 독립차륜형 열차 동역학 모델과 기존 고속철도인 HEMU-430X의 모델을 활용하여 임계속도 해석을 수행하였다. 해석을 통해 HEMU-430X는 700km/h 이상의 속도에서 불안정 거동을 보이지만 초고속 열차는 그 이상의 속도에서도 거동이 안정되는 것을 확인하였다. 또한 차륜 프로파일 변화에 따라서는 기존 S1002에 비해 신규 차륜 프로파일을 적용했을 때, 궤도 중심으로의 자가 복원 효과가 발생하는 것을 확인하였다.

(3) 목표 주행 조건인 곡선반경 7000R의 S형 선로에서 최고속도 550km/h까지의 주행 해석을 수행하여 각각 횡압, 수직력, 탈선계수의 변화를 확인하였다. 횡압 및 탈선계수의 변화 추이가 기존 일체형 차축이 적용된 차량과 비교하여 상이한 것을 확인하였으며, 크기는 상대적으로 크게 산출되지만 목표 최고 속도에서 최대 탈선계수 0.5 미만을 확보하여 국제규정의 제한값을 만족하는 것을 확인하였다.

본 연구 결과를 통해 독립차륜형 초고속 열차의 개발 및 적용에 대한 가능성을 확인할 수 있었다. 차후 상세 모델 개발 및 궤도 불규칙도를 적용한 성능 평가 등을 추가적으로 수행할 수 있을 것이며, 선형 추진제어에 따른 수직방향 반

력의 효과 및 틸팅제어 반응에 따른 승차감 향상 효과 등을 분석할 수 있을 것이다. 본 논문의 결과가 독립차륜형 초고속 열차를 설계하는 데에 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 주요사업인 레일방식 초고속철도 핵심기술개발과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] C.S. Jeon, Y.G. Kim, S.W. Kim, *et al.* (2012) A Study on Tail Vibration Reduction for the Next Generation High Speed EMU, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(6), pp. 543-549.
- [2] J.H. Lee, T.W. Park (2012) A Study on the Estimation and Improvement of the Current Collection Performance for the Next Generation High-Speed Train (HEMU-430X), *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(5), pp. 429-435.
- [3] H.W. Lee, C.B. Park, J. Lee (2011) Improvement of Thrust Force Properties of Linear Synchronous Motor for an Ultra-High-Speed Tube Train, *IEEE Transaction on Magnetics*, 47(11), pp. 4629-4634.
- [4] H. Sugiyama, R. Matsumura, Y. Suda, H. Ezaki (2011) Dynamics of Independently Rotating Wheel System in the Analysis of Multibody Railroad Vehicles, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 6, pp. 011007.
- [5] Y. Cho, J. Kwak (2012) Development of a New Analytical Model for a Railway Vehicle Equipped with Independently Rotating Wheels, *International Journal of Automotive Technology*, 13(7), pp. 1047-1056.
- [6] Y. Suda, W. Wang, M. Nishina, S. Lin, Y. Michitsuji (2012) Self-Steering Ability of the Proposed New Concept of Independently Rotating Wheels using Inverse Tread Conicity, *Vehicle System Dynamics*, 50(Supplement), pp. 291-302.
- [7] B. Kurzeck, L. Valente (2011) A Novel Mechatronic Running Gear: Concept, Simulation and Scaled Roller Rig Testing, *Proceedings of the 9th World Congress on Railway Research*, Lille, France.
- [8] MSC software (2005) MSC. ADAMS 2005 User's Manual.
- [9] EN 13674-1 (2002) *Railway applications – Track – Rail – Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*, BS EN.
- [10] EN 13715 (2006) *Railway applications – Wheelsets and bogies – Wheels – Tread profile*, BS EN.
- [11] K.S. Sim, T.W. Park, J.H. Lee, G.B. Jeong (2012) An Evaluation on Derailment according to Running Safety of Next-Generation High Speed Train (HEMU-430X), *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(4), pp. 343-351.
- [12] N.P. Kim, J.S. Kim, T.W. Park (2007) A Study on the Critical Speed of Korean Tilting Train Hanbit200, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(3), pp. 257-263.
- [13] B.M. Eickhoff (1995) Railway Vehicle Dynamics Course, British Railways Board, No. RR-DYN-95-166, Section 4, pp. 1-7.
- [14] J. Santamaria, E.G. Vadillo, J. Gomez (2009) Influence of creep forces on the risk of derailment of railway vehicles, *Vehicle System Dynamics*, 47(6), pp. 721-752.
- [15] UIC CODE 518 OR (2003) *Testing and Approval of Railway Vehicle from the Point of View of Their Dynamics Behavior-Safety-Track Fatigue-Ride Quality*, UIC.

접수일(2013년 11월 26일), 수정일(2014년 1월 7일),
게재확정일(2014년 1월 22일)

Jin-Hee Lee : ljh1227@ajou.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Ajou University, San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Korea

Nam-Po Kim : npkim@krii.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-Dong, Uiwang, 437-757, Korea

Kyung-Seok Sim : sukisi83@ajou.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Ajou University, San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Korea

Tae-Won Park : Park@ajou.ac.kr

Department of Mechanical Engineering, Ajou University, San 5, Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Korea