차세대 분산형 고속열차의 후미진동 저감에 관한 연구

A Study on Tail Vibration Reduction for the Next Generation High Speed EMU

전창성* · 김영국 · 김석원 · 김상수 · 최성훈 · 박태원

Chang-Sung Jeon · Young-Guk Kim · Seok-Won Kim · Sang-Soo Kim · Sung-Hoon Choi · Tae-Won Park

Abstract This study describes the tail vibration reduction for the next generation high speed EMU(HEMU-430X). The model of 6 cars was generated and the calculation was performed using VAMPIRE(railway vehicle dynamic software). In view of ride characteristics, HEMU-430X was expected to sway at the tail because of the yaw damper direction. The lateral acceleration of vehicle body exceeded the criteria because of hunting. To reduce this hunting motion, some methods such as wheel profile change, the change of damping coefficient for the 2nd lateral damper, the damping coefficient change of yaw damper were tested, but had little effect. Finally, the yaw damper direction was changed and the tail vibration disappeared. In real running test, the tail vibration appeared at the speed of 150km/h and the yaw damper direction change made the vehicle stable at the speed of 300km/h. The maximum test speed of HEMU-430X is 430km/h. If the tail vibration appears at higher speed, some other methods in this study may be considered to reduce it.

Keywords : High speed EMU, Tail vibration, Wheel profile, Lateral damping coefficient, Yaw damper

초 록 본 연구는 차세대 분산형 고속전철 시제차량(HEMU-430X)의 후미진동저감에 관한것이다. VAMPIRE 해석을 통한 주행거동 관찰에서 HEMU-430X는 전두부 유선형 형상유지를 위하여 설치된 한방향 요댐퍼 때문에 후미차량에서 횡방향 진동이 예상되었으며, 430km/h에서 기준치를 초과하는 경우가 있었다. 이 후미진동을 감소시키기 위하여 차륜담면 형상변경, 횡댐퍼 댐핑계수조정, 요댐퍼 계수조정 등 다양한 방법을 시도하였으나 후미진동이 없어지지 않았다. 최종적으로 요댐퍼를 양방향으로 바꾸었을 때 횡방향 진동이 사라졌다. 실제 시운전에서는 150km/h로 주행하였을 때 횡방향 후미진동이 나타났으며, 요댐퍼를 양방향으로 바꾸어 300km/h 주행 시에도 후미진동이 나타나지 않았다. 추후 430km/h까지 최고속도시험을 수행할 예정인데 높은 속도에서 후미진동이 다시 발생한다면 본 연구에서 제시한 차륜담면 형상변화, 횡댐퍼 계수 조정 등의 방법을 이용해서 진동을 저감시킬 수 있을 것이다.

주요어 : 분산형 고속열차, 후미진동, 차륜담면, 횡댐퍼 계수, 요댐퍼

1. 서 론

차세대 분산형 고속철도차량(HEMU-430X)은 최고속도 430km/h, 운영속도 370km/h를 목표로 2007년부터 정부주도로 개발이 진행되어 현재 경부고속철도 2단계(대구~부산) 구간에서 시운전이 진행되고 있다. 기존 KTX 및 KTX-산천이 동력차와 객차로 구분되는 동력집중식 차량이라면 차세대 고속열차는 동력 분산형 추진시스템을 적용하여 기존 KTX에 비해 300km/h까지 도달시간을 2분 정도 단축할 수 있어, 역이 많은 우리나라 지형에 더 유리한 차량이라고 할 수 있다. 공기역학적 해석을 통하여 유선형 전두부를 설계하여 300km/h에서 주행저항을 10%정도 저감하는 효과를 가져왔는데, 이 유선형 설계를 위하여 첫 번째와 마지막 대차의 요

댐퍼의 방향을 한방향으로 설치하는 것으로, 다른 대차의 양방향 설치와 다르게 설계하였다. 철도차량 동특성 해석프로그램인 VAMPIRE로 시뮬레이션해 본 결과 이 요댐퍼의 방향 때문에 후미 차량에서 횡방향 진동이 발생하는 것을 예측하였고, 이를 해결하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

KTX 도입 당시 철도차량의 후미진동이 발생하여 이에 대한 다양한 연구들이 수행되었다. Kim[1], Lee[2] 등은 KTX 차량의 후미진동을 해석 및 실험적 방법으로 연구하였으며, 후미 횡진동은 차륜 담면구배의 영향을 많이 받는 것을 확인하였다. 차륜 담면 구배를 GV40(1/40)에서 XP55(1/20)로 바꾸었을 때 횡방향 진동이 사라지는 것을 보고하였다. Lee[3], Chang[4] 등은 ADAMS/RAIL 프로그램을 이용하여 KTX 차량의 사행동 특성에 대해 연구하였으며 후미 진동의 원인은 차륜담면 형상과 2차 횡강성에 의한 것임을 확인하였다. Kang[5]은 편성차량수에 따른 후미 불안정 진동의 측정결과가 고유모드 해석시에 나타난 차체의 불안정모드의 진동수와 거의 일치하는 것을 확인하였다. 차세대 분산형 고속철

*Corresponding author.

Tel.: +82-2-31-460-5508, E-mail : csjeon@krri.re.kr

©The Korean Society for Railway 2012

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.6.543

도차량의 주행 동특성에 관해서도 다양한 연구들이 수행되었는데, Back[6] 등은 승차감 향상을 위하여 진동에 영향을 미치는 여러 가지 설계인자들을 도출하였다. Park[7] 등은 1차 현가장치의 탄성계수가 6량 편성의 차세대 분산형 고속열차의 주행안정성에 큰 영향을 미친다고 보고하였다.

본 연구에서는 차세대 분산형 고속열차의 후미진동을 해석적 방법으로 예측하였고, 이를 해결하기 위하여 다양한 방법을 제시하였으며, 최종적으로 시운전 시험을 통하여 후미진동해결을 위해 제시된 방법이 효과가 있음을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

2.1.1 차세대 분산형 고속전철 차량 모델

본 연구에서 차량의 동적 거동 해석은 델타 레일사(DeltaRail Group)의 철도차량 전용 동특성 해석 프로그램인 VAMPIRE를 이용하였으며, 해석용 시스템 편성 모델은 Fig. 1에서와 같이 TC(제어객차)+4M(동력객차, M1~M4)+MC(제어동력차)로 총 6량으로 구성하였다. 대차는 TC(제어객차)용 부수대차(Tailer Bogie) 2대, 동력객차 및 제어동력차용(M, MC)용 동력대차(Motor Bogie) 10대로 구성되어 있다. 차량의 중량은 공차(W0) 조건으로 계산하였고, 휠셋의 번호는 TC차의 선두대차의 휠셋부터 1~24번을 순차적으로 부여하였다. 차량 사이에는 상하 연결댐퍼가 각 4개씩 설치되어 있다.

Fig. 1 Structure of HEMU-430X 6 car model

차세대 분산형 고속전철 시제차량(이하 HEMU-430X)의 현가장치는 크게 휠셋과 대차를 연결하고 지지하는 1차 현가장치와 대차와 차체를 연결하고 지지하는 2차 현가장치로 구성되며, 현가장치 구성 요소의 특성치는 제작사에서 제시한 자료를 이용하여 정량화하였다. 현가장치의 모델링은 요댐퍼가 양방향으로 장착된 경우(Fig. 2(b))의 대차 10대와 차량 끝단의 전두부 형상을 유선형으로 유지하기 위하여 요댐퍼가 단방향으로 장착된 경우(Fig. 2(a))의 대차 2대로 이루어지며, 대차 현가장치를 살펴보면 1차 현가장치로 코일스프링, 탄성조인트, 수직댐퍼로 구분하였고, 2차 현가장치에는 에어스프링, 수직댐퍼, 횡댐퍼, 요댐퍼, 횡방향 범프스탑, 피봇 조인트로 구분하여 Fig. 2에 나타내었다.

(a) One-directional yaw damper

(b) Bi-directional yaw damper

Fig. 2 Bogie model

Fig. 3 Wheel and rail profile

계산에 사용된 선로는 UIC60의 1/20 프로파일, 휠의 형상은 EN 13715:2006에 있는 S1002 프로파일을 사용하였으며, 휠과 레일의 형상은 Fig. 3에 나타내었다[8].

2.1.2 시운전 구간 궤도 모델

HEMU-430X가 시운전 시험시에 주행하게 될 경부고속철도 2단계 시운전 구간의 노선현황을 살펴보면 시운전 구간 전체 길이는 서울역 기점 294km지점(동대구 근처의 고모기지 부근)에서 403km지점(금정터널)까지 총 109km이고, 이 구간에는 터널과 교량이 이어져 있으며 신경주역과 울산역이 존재한다. 또한 최대 중구배는 25%이며, 곡선반경은 7,000m가 5곳, 10,000m가 3곳이 존재한다. 본 연구에서는

(a) Track design data

(b) Track irregularity

Fig. 4 Track design and irregularity

전체 시운전 구간 중 294km지점에서부터 388.356km까지의 94.356km를 대상으로 궤도검측차(EM-120)로 검측된 versine 자료를 변환하여 불규칙 데이터를 생성하였으며[9], 선로 모델과 궤도불규칙 데이터는 Fig. 4에 나타내었다[9]. Fig. 4에서 보듯이 94.365km 구간에는 곡선반경 7,000m가 4곳, 10,000m가 3곳 존재한다. 캔트는 최대 130mm로 설정되어 있으며, 좌우 방향틀림은 전반적으로 $\pm 4\text{mm}$, 최대 6mm로 나타나고 있고, 고저틀림은 전반적으로 $\pm 2\text{mm}$, 최대 4mm로 나타나고 있다. 또한 궤간 틀림은 전반적으로 $\pm 2\text{mm}$, 최대 $\pm 4\text{mm}$ 의 변동폭을 갖고 있다.

2.2 해석결과

시운전 구간에서 HEMU-430X가 최고속도 430km/h로 주행하였을 경우 주행 거동을 EN14363:2005 규격의 Normal Method를 이용하여 분석하였다[10]. HEMU-430X가 시운전 구간에서 430km/h의 속도로 주행할 때 선두 대차(TC차 선두대차)와 마지막 대차(MC차 후미대차) 상단 차체바닥의 횡가속도를 Fig. 5에 나타내었는데, 그림에서 보듯이 선두차의 횡가속도보다 후미차의 횡가속도가 많이 흔들리는 것을 볼 수 있다. 이는 마지막 대차의 요(Yaw)댐퍼가 전두부 형상을 유선형으로 유지하기 위하여 한 방향으로 설치되어 이 부분이 후미차가 되었을 때 좌우방향 흔들림(Sway)이 발생하기 때문이다.

이 좌우방향 후미진동은 KTX차량 도입시에도 있었던 문제이며, 이에 대한 해석과 시험이 이루어졌다. 결국 선두차와 마지막 동력차량의 차륜담뎀 구배를 프랑스 규격인 NF F01-115의 1/40프로파일(GV40)에서 1/20프로파일(XP55)로 바꾸면서 진동을 줄일 수 있었다고 보고되고 있다[2]. 이 좌

Fig. 5 Lateral acceleration in vehicle body

Fig. 6 FFT result of lateral acceleration in vehicle body

Table 1 Lateral acceleration in vehicle body

Assessment value	Cars	Criteria [m/s ²]	Maximum value [m/s ²]	Remarks
Maximum lateral acceleration in vehicle body ($\dot{y}_{\max}^*$)	TC	2.5	0.988	R7000 & transient sections
	M1		1.280	
	M2		1.366	
	M3		1.252	
	M4		1.377	
	MC		2.735	
Lateral acceleration in vehicle body ($\dot{y}_{\text{rms}}^*$)	TC	0.5	0.312	R7000 & transient sections
	M1		0.323	
	M2		0.464	
	M3		0.431	
	M4		0.448	
	MC		1.427	

우방향 후미진동의 특성을 분석하기 위하여 Fig. 5의 마지막 대차상단의 차체바닥 횡가속도 신호를 FFT분석하여 Fig. 6에 나타내었으며, 진동값의 가장 큰 주파수는 1.739Hz이었다. 또한 차량의 고유치 분석을 통해 1.758Hz에서 좌우방향 흔들림(Sway)이 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 이는 요방향(Yawing)성분이라고 판단되었다.

이상의 결과로 HEMU-430X는 고속으로 주행할 때 후미차량에서 좌우방향 흔들림(Sway)이 나타날 것으로 예상되며,

이는 직선구간보다는 곡선구간을 주행할 때 더 크게 나타날 것으로 예상되었다. EN 14363:2005의 분석방법에 의하여 시제차량이 430km/h로 주행할 때 전체차량의 좌우방향 횡가속도성분의 최대값($\ddot{y}_{\max}^*$)과 RMS값($\ddot{y}_{\text{rms}}^*$)을 Table 1에 나타내었다. 센서 위치는 각 차량의 선두와 후미 대차 상부의 차체 바닥이다. Table 1에서 횡가속도 값의 최대값과 RMS값은 대체적으로 기준치를 만족시키지만 상기에서 설명했던 열차 후미진동의 영향으로 마지막(MC 후부) 대차 상부의 차체 바닥의 횡가속도 값이 곡선구간에서 기준치를 초과하는 것을 알 수 있었다.

2.3 후미진동 원인고찰

철도차량의 차륜은 원통형이 아닌 원추형으로 답면구배를 가지고 있으며, 이것에 의해 차축이 레일의 한쪽 편으로 치우쳤을 경우 올바른 위치로 되돌리는 복원력을 주며(자기조향), 곡선 통과를 원활하게 하는 기능이 있다. 차륜의 답면구배에 의한 자기조향 기능은 윤축에 좌우방향의 운동을 일으키는 원인이 되며, 심할 경우 사행동을 일으키게 된다. 철도 차량의 사행동은 공진현상 중 하나로 주로 직선부를 고속으로 주행할 경우 차체나 대차, 차축들이 연직축 둘레방향으로 회전진동을 일으키는 현상이며, 궤도나 차체에 손상을 준다[11]. 사행동은 차륜의 답면구배에 기인하여 일정한 파장과 주파수를 가지는데, 사행동의 주파수는 다음 식으로 표현할 수 있다[12].

$$f_k = \frac{V}{2\pi} \left[\frac{\lambda}{a r_0 [1 + b^2/a^2]} \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, f_k 는 사행동 주파수, V 는 주행속도, λ 는 차륜의 답면구배, a 는 궤간의 1/2, r_0 는 휠반경, b 는 휠베이스 1/2이다. 위의 식에서 알 수 있듯이 주행속도가 높을수록 진동속도가 커져서 고속화에 방해가 된다. 위 식에 HEMU-430X의 데이터를 입력하면 430km/h에서의 사행동 주파수는 2.614Hz로 계산되었으며, 고유치 분석의 결과인 1.758Hz와 차이가 있었다. 이 차이는 식 (1)을 유도한 모델과 HEMU-430X 모델의 차이에 기인한다고 사료된다.

고속 볼스타리스 대차에서는 차체와 대차를 요댐퍼로 연결하여 사행동을 억제하는 방법이 있는데, 댐퍼는 특성상 고주파의 움직임에만 저항하며, 저주파의 움직임에는 저항하지 않는다. 이런 특성을 이용해 곡선부에서의 원만한 회전은 허용하면서, 고속 진동인 사행동만을 억제하기 위하여 요댐퍼를 설치한다. HEMU-430X에서의 후미진동은 전면부의 디자인 때문에 전후부차의 사행동을 억제하기 위하여 설치한 요댐퍼의 방향이 적절하지 않고, 차륜의 답면구배가 작아서 곡선에서의 주행성능이 나빠진 것으로 사료되었다. HEMU-430X 초기 설계 당시에 양방향과 한방향 요댐퍼에 대해 다양한 해석을 수행하였는데 전체적으로 양방향에 대한 결과가 좋았으나, 한방향 요댐퍼도 기준값을 초과하지는 않았다. 시제열차의 특성상 전면부 디자인을 강조하다 보니, 전면부를 미려한 유선형으로 만들기 위하여 한방향 요댐퍼

(a) Stability test track

(b) One-directional yaw damper

(c) Bi-directional yaw damper

Fig. 7 Damping force on yaw damper

로 결정되었다.

후미진동의 원인을 분석하기 위하여 한방향과 양방향 요댐퍼에 대해 Fig. 7(a)의 좌우와 수직의 불균형을 가지는 트랙에 대하여 안정성 테스트를 수행하였다. Fig. 7(b)는 후미차량인 MC차의 전후부 대차의 요댐퍼 8개에 가해지는 힘을 나타낸 것이다. 150km/h 속도로 주행할 때 전부대차와 후부대차의 요댐퍼에 걸리는 힘은 경향이 다르게 나타나며 계속 진동하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, MC차의 전부에는 Fig. 2(b)와 같은 양방향 댐퍼가, 후부에는 Fig. 2(a)와 같은 한방향 댐퍼가 설치되어 힘의 균형을 이루지 못하여 후미진동이 발생하여 계속 유지된다. Fig. 7(c)는 MC차의 전후부 대차의 요댐퍼를 Fig. 2(b)와 같은 양방향 댐퍼로 바꾸었을 때의 결과이다. 8개 댐퍼의 특성이 비슷하고 후미진동이 발생하지 않음을 알 수 있다.

2.4 후미진동 저감

후미진동 문제를 해결하기 위하여 몇 가지 방법이 고려되

Fig. 8 Effect of wheel profile change

Fig. 9 Variation of design variables

었다. 시제차량에서 요댐퍼를 양방향으로 설치하면 대차 스커드 및 도유기 박스와의 간섭문제가 있어 다른 방법으로 해결하기 위하여 몇 가지 방법을 검토하였다.

참고문헌[1,2]을 참조하여 후미진동을 감소시키기 위한 목적으로 차륜답면 형상을 EN 13715:2006에 있는 S1002에서 프랑스 규격인 NF F01-115의 1/20프로파일(XP55)과 1/40프로파일(GV40)로 바꾸면서 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 차륜 형상을 Fig. 8(a)에 나타내었으며, S1002와 GV40의 프로파일이 XP55보다 좀 더 편평(flat)함을 알 수 있다. 차륜답면 형상 및 속도에 따라 곡선반경 7,000m구간에서 마지막(MC 후부) 대차 상부의 차체 바닥의 횡가속도 RMS값(y_{rms}^*)을 Fig. 8(b)에 나타내었다. 속도가 증가할수록 횡가속도 RMS값(y_{rms}^*)은 증가하며 S1002에서 GV40, XP55로 갈수록 차량 후미진동이 감소하나, 후미진동이 완전히 없어지는 것은 없었다. XP55를 사용하였을 때 350km/h정도의 속도에서 횡가속도 RMS값(y_{rms}^*)이 기준치 이내에 들어움을 확인할 수 있었다.

철도차량의 횡방향 진동을 억제하는 다른 방법으로 차체와 대차간에 연결된 횡댐퍼의 댐핑계수를 조정하는 방법을 고려하였으며, 이를 Fig. 9(a)에 나타내었다. 댐핑계수가 커질수록 차체와 대차의 횡가속도는 감소하다가 댐핑계수가 130%이상 커지게 되면 포화되는 경향을 보였다. 그러나, 이 방법 또한 후미진동을 완전하게 없애지는 못하였다.

전후부차량의 끝단에 Fig. 2(a)에서의 한방향의 요댐퍼를 설치한 대차에 대하여 차륜답면 형상을 바꾸는 것, 횡댐퍼의 계수를 조정하는 방법 외에 안티롤바의 강성변화, 공기 스프링의 강성변화, 안티요댐퍼의 댐핑계수 조정 등 다양한 방법을 시도하였으나 차량 후미진동을 완전히 없애지는 못하였기 때문에(Fig. 9(b)), 앞의 Fig. 2(a)에서의 선두와 마지

Fig. 10 Change of yaw damper direction

Table 2 Effect of yaw damper direction change

Assessment value	Yaw damper	Criteria [m/s ²]	Maximum value [m/s ²]	Remarks
$y_{\max}^*$	One	2.5	2.735	
	Both		1.164	
y_{rms}^*	One	0.5	1.427	
	Both		0.365	

막 대차에 사용되었던 요댐퍼가 한 방향으로 설치된 모델을 Fig. 2(b)에서처럼 요댐퍼가 양방향으로 설치된 모델로 바꾸어, 시제열차가 430km/h로 주행하였을 때의 해석을 수행하였다. 차륜의 형상은 S1002를 적용하였으며 선두 대차(TC차 선두대차)와 마지막 대차(MC차 후미대차) 상단 차체바닥의 횡가속도를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 10을 비교하면 MC차 후미대차 상부의 차체바닥의 횡방향 흔들림이 사라짐을 알 수 있다. Table 2에는 MC차 후미대차 상부의 차체바닥 횡가속도 최대값($y_{\max}^*$)과 RMS값(y_{rms}^*)을 나타내었는데 한방향 요댐퍼가 설치되었을 때 기준치를 초과하던 값이 양방향 요댐퍼로 바꾸었을 때 기준치 이내로 들어움을 알 수 있다.

2.5 시운전 시험결과

현재 HEMU-430X는 경부고속철도 2단계구간(동대구~부산)에서 시운전이 진행되고 있다. 실제 시운전시에 차량 사이 연결댐퍼의 입고가 지연된 관계로 실제 차량에 설치되지 못하여, 150km/h의 낮은 속도로 주행하였을 때도 횡방향의 진동이 발생하였으며, 이를 개선하기 위하여 Fig. 11과 같이 한방향으로 설치되어 있던 요댐퍼를 양방향으로 바꾸는 작업을 수행하였다. 차량과의 간섭문제는 대차 스커드 하단부를 절단하고, 도유기 박스를 제거하여 해결하였다. 향후 상용모델에서는 이 변경사항을 반영하여 도유기 박스의 위치 변경 등의 재설계가 필요하다.

Fig. 12는 요댐퍼 방향을 바꾸기 전후의 실제 시운전시의 차량속도, 후부차량 대차 횡가속도, 차체 횡가속도 및 차체 상하방향의 가속도를 나타낸 것이고, 차체 횡방향가속도의 값을 Table 3에 나타내었다. Fig. 12(a)에서는 한방향 요댐퍼의 경우 150km/h의 속도에서도 후미 진동이 발생함을 알 수 있고, 이 구간의 차체 횡방향가속도 RMS값은 0.635m/s²

(a) HEMU-430X

(b) One-directional yaw damper

(c) Bi-directional yaw damper

Fig. 11 Change of yaw damper direction

(a) One-directional(150km/h)

(b) Bi-directional(300km/h)

Fig. 12 Test result of yaw damper direction

Table 3 Experimental data of yaw damper direction change

Assessment value	Yaw damper	Criteria [m/s ²]	Maximum value [m/s ²]	Speed [km/h]
$y_{\max}^{**}$	One	2.5	0.997	150
	Both		0.716	300
y_{rms}^{*}	One	0.5	0.635	150
	Both		0.334	300

(a) One-directional(150km/h)

(b) Bi-directional(300km/h)

Fig. 13 Simulation result for comparison with test result

으로 기준치인 0.5m/s^2 을 초과하였다. 요댐퍼의 방향을 양방향으로 바꾸었을 때 300km/h 의 속도로 주행하여도 후미 진동이 발생하지 않음을 확인하였다(Fig. 12(b)). Table 3에서 보듯이 후미 진동을 저감하기 위해서 요댐퍼의 방향을 양방향으로 바꾼 것이 효과가 있음을 알 수 있다.

이상의 시험결과를 확인하기 위하여 차량간 연결댐퍼가 없는 모델을 시험조건과 같은 속도로 150km/h 와 300km/h 에 대해 해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 시험결과와 유사하게 한방향 요댐퍼에 대해서는 150km/h 에서도 후미진동이 발생하였고, 양방향 요댐퍼에 대해서는 300km/h 에 대해서도 후미진동이 발생하지 않음을 알 수 있다.

현재 HEMU-430X는 300km/h 까지 후미 진동 없이 시운전이 진행되고 있다. 향후 430km/h 까지 최고속도시험이 진행될 예정인데, 만약 높은 속도에서 후미진동이 다시발생한다면 앞에서 제시한 차륜답면 형상변화, 횡댐퍼 계수 조정 등의 방법을 이용해서 진동을 저감시킬 수 있을 것이다.

3. 결 론

본 연구에서는 차세대 분산형 고속전철 시제차량(HEMU-430X)이 경부고속철도 2단계 시운전 구간을 주행하였을 때

후미진동 현상을 철도차량 전용 동특성해석 프로그램인 VAMPIRE를 이용하였으며 살펴보았으며, 그 결과를 국제 규격인 EN 14363:2005에 의거하여 분석하였다.

해석에 사용된 시운전 구간은 곡선반경 7,000m 4곳, 10,000m 3곳을 포함하여 총 94.365km이며, 궤도분야에서 제공된 선로도와 궤도검측차(EM-120)로 검측된 versine 데이터를 변환하여 선로 불규칙도를 생성하였다. 해석을 통한 주행거동 관찰에서 HEMU-430X는 전두부 유선형 형상유지를 위하여 한방향으로 설치된 요댐퍼 때문에 후미차량에서 횡방향 흔들림이 있을 것으로 예상되었으며, 430km/h로 주행하였을 때 횡가속도는 차량후미에서 증가되어 기준치를 초과하는 경우가 있었다. 이 후부 흔들림을 감소시키기 위하여 차륜담면 형상을 변경하여 해석을 수행하였으며, 차륜형상이 S1002에서 XP55로 변경되었을 때 후부 흔들림이 감소함을 알 수 있었다. 또, 차체와 대차간에 연결된 횡댐퍼의 댐핑 계수 조정, 안티롤바의 강성변화, 공기스프링의 강성변화, 요댐퍼의 댐핑계수 조정 등 다양한 방법을 시도하였으나 차량 후미진동을 완전히 없애지는 못하였다.

최종적으로 요댐퍼가 한 방향으로 설치된 모델을 양방향으로 바꾸었을 때 횡방향 진동이 없어짐을 확인하였다. 실제 시운전에서는 시제열차가 150km/h로 주행하였을 때 횡방향 후미 진동이 나타났으며 이로 인해 후부차의 흔들림이 심하였다. 요댐퍼 방향을 양방향으로 수정하는 작업을 통해서 실제 300km/h 주행시에도 후미진동이 나타나지 않았다. 추후 430km/h까지 최고속도시험을 수행할 예정인데 높은 속도에서 후미진동이 다시 발생한다면 본 연구에서 제시한 차륜담면 형상변화, 횡댐퍼 계수 조정 등의 방법을 이용해서 진동을 저감시킬 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 미래철도기술개발사업으로 지원된 “430km/h급 고속열차 시운전 시험 연구” 과제의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] J.C. Kim, Y.S. Ham (2007) Analysis on Running Safety for KTX Vehicle, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(5), pp.473-479.
- [2] C.W. Lee, J.C. Kim, K.H. Moon (2003) The Analysis on the Carbody Vibration of Wheel Profiles for KTX, *Proceedings of the Korean Society for Railway Spring Conference*, pp. 730-733.
- [3] S.I. Lee, Y.S. Choi (2005) Running Stability Analysis on the Tail car of KTX, *Proceedings of the Korean Society for Railway Spring Conference*, pp. 19-24.
- [4] J.K. Chang, S.I. Lee, Y.S. Choi (2003) Dynamic Characteristics of the KTX on Wheel Conicity, *Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference(III)*, pp. 22-27.
- [5] B.B. Kang (2010) Dynamic Analysis of Unstable Vibration of KTX, *Proceedings of the 2010 IEEE/ASME Joint Rail Conference*, pp. 1-9.
- [6] S.G. Baek, R.M. Lee, B.S. Shin et al. (2008) Vibration Reduction of the High-speed EMU for Improvement of Ride Comfort, *Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference*, pp. 1435-1440.
- [7] C.K. Park, Y.G. Kim, K.K. Kim et al. (2008) Analysis of the Suspension Characteristics for Next Generation High Speed Train Formed with 6 Cars in Concept Design Stage, *Proceedings of the Korean Society for Railway Autumn Conference*, pp. 387-392.
- [8] CEN (2010) Railway applications-Wheelsets and bogies-Wheels-Tread profile, *European Standard*, EN 13715 : 2006.
- [9] W.J. Chung, Y.S. Ham (2004) Investigation of the Track Irregularities Reconstruction Methods, *Key Engineering Materials*, 270-273, pp. 1659-1664.
- [10] CEN (2005) Railway applications-acceptance of running characteristics of railway vehicles-Testing of running behaviour and stationary tests, *European Standard*, EN 14363 : 2005.
- [11] A. A. Shabana, K. E. Zaazaa, H. Sugiyama (2008) Railroad Vehicle Dynamics, *CRC Press*, pp. 24-31.
- [12] V. K. Garg, R. V. Dukkipati (1984) Dynamics of Railway Vehicle Systems, *Academic Press*, pp. 257-258.

접수일(2012년 7월 26일), 수정일(2012년 11월 1일),
게재확정일(2012년 11월 6일)

Chang-Sung Jeon : csjeon@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi 437-757, Korea

Young-Guk Kim : ygkim@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi 437-757, Korea

Seok-Won Kim : swkim@krri.re.kr

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

Sang-Soo Kim : sskim@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi 437-757, Korea

Sung-Hoon Choi : shchoi@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi 437-757, Korea

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

Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-7549, Korea