

관절형 경량전철의 주행성능 해석

Running Performance Analysis of an Articulated Light Rail Vehicle

허 신*, 박 찬경**, 한 형석*, 하 성도*

Hur, Shin Park, Chan-Kyung Han, Hyung-suk Ha, Sung-Do

ABSTRACT

In this paper, running performance analyses of an articulated light rail vehicle are carried out using VAMPIRE software package. The stability analysis to determine the critical speed and the safety analysis such as derailment coefficients, lateral forces of wheels and reduction of wheel load are carried for the track conditions of straight, transition and curving range to the operating velocity of 40 Km/h. Also, ride quality is analyzed. As the results of analysis, the safety of light rail vehicle satisfied with the limit values and the ride quality for tare and full load condition was shown to the "not uncomfortable" level in ISO 2631-1(1997) criteria.

1. 서론

관절형 경량전철은 객차와 객차 사이를 관절대차로서 지지하는 형식으로서 차량을 저상화하여 주행에서 차량의 안정성을 높이고 승객의 승/하차를 편리하게 하며, 대차 수량이 감소하므로 경량화 측면에서 유리하다. 그리고 가속 또는 감속 성능이 우수하여 시격(headway)을 짧게 할 수 있으므로 수송 효율을 극대화 할 수 있으며, 소음 및 진동을 감소시키기 위해서 탄성 차륜을 사용하고 차체에는 소음 흡수재를 코팅하는 시스템도 있다. 선로는 노면구간과 전용 주행구간을 혼합하여 사용이 가능하며 가공 전차선이나 제 3레일에 의한 전력 공급을 받을 수 있다. 이러한 시스템은 도심에서 공항, 또는 도심 외곽지역의 운행에 적합하므로 세계 여러나라에서 채용하고 있으며, 국내의 여러 지역에서 이 시스템에 대한 타당성 검토를 하고 있다. 따라서 국내의 수요 예상과 연구의 필요성에 의해서 한국기계연구원은 관절형 경량전철의 핵심기술인 관절대차 설계기술의 개발을 목표로 하여 2년간의 연구를 추진한바 있다. 1차년도(1997)에는 관절대차 시스템 개념설계 및 설계시방을 결정하고, 대차프레임의 기본설계, 현가요소 및 연결장치의 기본설계, 주행 안정성 해석을 수행하였다. [1]

본 연구에서는 2차년도(1998) 연구결과의 일부로서 현가요소의 상세설계를 위해서 철도차량의 동력학적 해석 프로그램인 VAMPIRE를 이용하여 관절형 경량전철의 현가요소 모델링, 궤도 모델링, 선회링 모델링을 수행하고 차량의 주행성능을 해석하였다. 차량의 임계속도를 결정하기 위해서 비선형 동특성 분석용 궤도 모델을 사용한 안정성(stability) 해석을 수행하였고, 차량의 안전성(safety)을 판단하기 위해서 궤도 불균일을 갖는 직선 및 곡선궤도를 사용하여 탈선계수, 운중 감소 및 궤도 횡압을 해석하였다. 또한 차량의 승차감 해석은 ISO-2631(1997판)의 승차감 분석기법을 이용하여 해석을 수행하였다. 주행성능의 해석 결과, 주행 안정성은 공차시 37 m/s이

* 한국기계연구원, 신교통기술연구부, 선임연구원

** 한국철도기술연구원, 고속철도연구팀, 선임연구원

하, 만차시 39 m/s이하의 속도에서 안정한 것으로 나타났고, 주행 안전성을 나타내는 탈선계수, 횡압, 운중감소 모두 제한 기준치이내에 포함되는 것으로 나타났다. 또한 승차감은 공차 및 만차시 모두 승차감 기준을 만족하고, 공차시 보다는 만차시가 약간 좋은 것으로 나타났다.

2. 차량 동역학 모델링[2][3]

그림 1의 차량 동역학 모델에 사용된 질량요소는 전방 및 후방 차체, 관절대차, 전방 및 후방 구동대차, 대차당 휠셋 2개씩 총 6개로서 전체 11개이다. 표 1은 경량전철의 차체, 구동대차, 관절대차, 휠셋에 대한 각각의 질량과 관성모멘트를 나타내고 있다. 차량의 동적 모델링에 이용되는 좌표계는 그림 2와 같다. 그림에서와 같이 X 방향은 주행방향, Y는 횡방향, Z는 수직방향이며 T, P, W는 각각 롤링(rolling), 피칭(pitching), 요잉(yawing)회전 좌표이다.

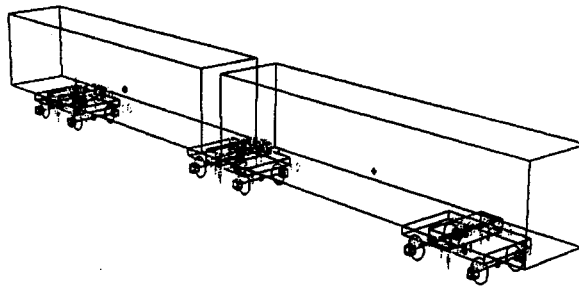


그림 1. 관절형 경량전철의 차량동역학 모델

표 1. 차량의 부품 질량과 관성모멘트 값

구분	질량 (Mg)	관성 모멘트(Mg. m ²)			수량
		I _{xx}	I _{yy}	I _{zz}	
차체(공차)	11.97	27.0	191.5	164.0	2
차체(영차)	23.01	46.0	345.0	276.0	2
구동대차	3.575	1.5	1.7	3.1	2
관절대차	1.509	0.7	0.8	1.2	1
볼스터	0.7	0.3	0.05	0.5	3
차륜셋	0.8	0.4	-	0.4	6

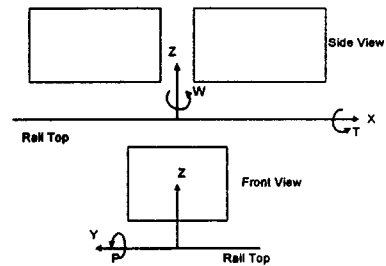


그림 2. 차량의 모델링 좌표계

대차에서 차체와 볼스터간의 연결장치는 선회링(slewing ring)이 이용되며 z축에 대한 회전만 가능하도록 하는 베어링 구조로 되어 있다. 선회링의 모델은 그림 3에서와 같이 4개의 Bush 요소를 이용하여 Z 축 회전에 해당하는 강성값은 제로로 하고, Z 방향은 $K_v=30.0$ MN/m, 반경방향은 $K_l=60.0$ MN/m을 사용하였고 감쇠값은 각각 0.6 및 0.9 MN-sec/m를 사용하였다.

볼스터와 대차프레임간의 2차 현가요소는 공기스프링, 수직/수평 오일댐퍼, 견인력바 및 운동제한요소(Bump stop)로 구성되어 있다. 그림 4의 공기스프링은 Shear Spring 요소를 사용하여 모델링 하였고, 강성 및 감쇠값은 표 2와 같이 결정하였다. 또한 수직 오일댐퍼의 감쇠값은 공차시 0.016 MN/(m/s), 만차시 구동대차는 0.0295 MN/(m/s), 관절대차는 0.031 MN/(m/s)를 사용하였다. 수평 오일댐퍼의 감쇠값은 공차시 구동대차는 0.0147 MN/(m/s), 관절대차는 0.014 MN/(m/s)를, 만차시 구동대차는 0.025 MN/(m/s), 관절대차는 0.026 MN/(m/s)을 사용하였다. 견인력바는 견인력 전달에 필요한 60.0 MN/m의 선형특성을 갖고 있는 것으로 모델링 하였다.

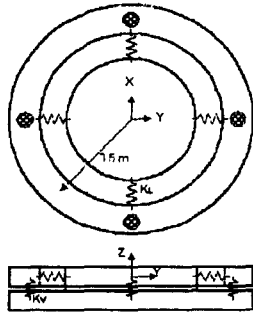


그림 3. 선회링의 모델

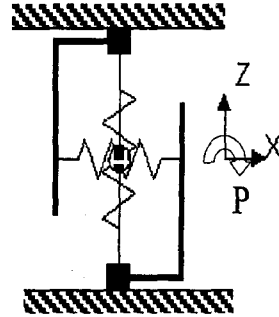


그림 4. 공기스프링의 모델

대차프레임과 차륜셀사이의 현가요소는 웨브론스프링이 장착되어 있으며, 이를 6 자유도(스프링강성 $K_x, K_y=3.0 \text{ MN/m}, K_z=2.0 \text{ MN/m}, K_t, K_p, K_w=3.0 \text{ MNm/rad}$ 및 감쇠상수 $D_x, D_y=1.0 \text{ MNm/(rad/s)}, D_z=0.003 \text{ MNm/(rad/s)}$)의 부쉬 요소를 사용하여 축상중심 위치에서 모델링 하였다.

표 2. 공기스프링의 강성

구분		K_x (MN/m)	K_y (MN/m)	K_z (MN/m)	K_t (MN/rad)	K_p (MN/rad)	K_w (MN/rad)
공차	구동대차	0.124	0.124	0.164	0.0147	0.0147	0.0112
	관절대차	0.130	0.130	0.172	0.0155	0.0155	0.0117
만차	구동대차	0.234	0.234	0.310	0.0279	0.0279	0.0211
	관절대차	0.244	0.244	0.324	0.0292	0.0292	0.0220

Bumpstop은 좌우방향으로 비선형 스프링 강성으로 모델링 하였다. 즉 좌우 변위가 10 mm 이내 일 때는 강성이 0이나 10 mm를 초과할 경우, 즉 프레임과 접촉하였을 때는 큰 강성이 작용하도록 모델링한다.

차량 주행 안정성을 판단하기 위해서 사용된 궤도모델은 VAMPIRE의 비선형 동특성 분석용 궤도 모델 데이터를 사용하였다. 그림 5의 궤도모델은 초기의 궤도 불균일에 의한 차량의 동적거동이 궤도 불균일이 없는 궤도를 주행하면서 정상상태에 도달하는 것을 판단함으로써 안정성을 판단할 수 있게 되어 있다. 또한 승차감 및 안전성 해석을 위한 궤도모델은 그림 6 및 7과 같이 BR에서 제공한 주행 최고속도 110km/h용 궤도 모델과 곡선 궤도모델을 이용하였다. [4] 곡선 궤도는 곡선 반경 170m, 캔트 150mm, 본곡선길이 200m, 완화 곡선길이 50m로 모델링하였다. [5]

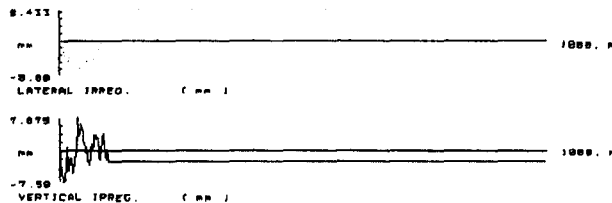


그림 5. 안정성 분석에 사용된 궤도모델

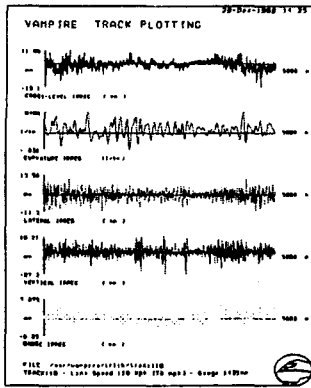


그림 6. 궤도 불균일 모델

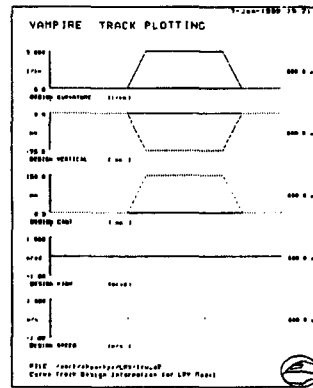


그림 7. 곡선 궤도 모델

사용된 휠은 UIC/ERRI profile(D=760, d=630)이고 레일은 표준궤도(1,435mm)를 가지는 50 kgN 을 이용하였다. 휠의 형상은 그림 8과 같고 레일의 형상은 그림 9와 같다.

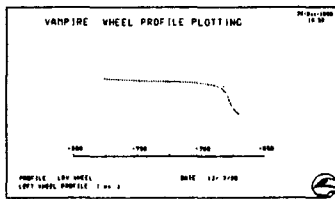


그림 8. 휠의 단면 형상

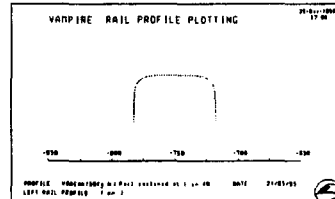
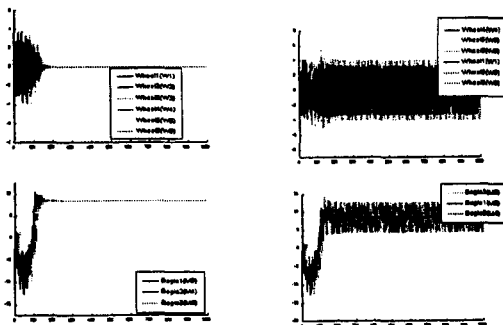


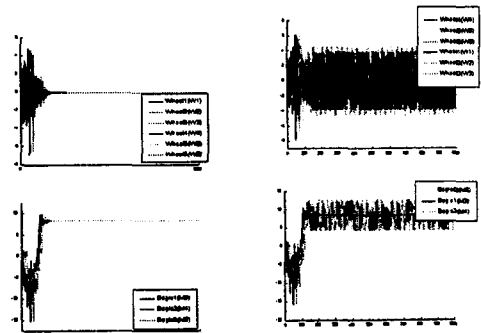
그림 9. 레일의 단면 형상

3. 안정성 해석

시간적분법에 의한 과도응답 해석은 그림 5의 궤도 불균일 모델과 그림 7 및 8의 휠 및 레일의 형상을 이용하여 수행하였다. 공차상태에서 휠 및 대차의 좌우 변위는 그림 10(a)의 주행속도 36 m/s(130km/h)에서 진동이 수렴되나, 그림 10(b)의 주행속도 37 m/s(133km/h)로 속도를 증가시킨 경우에는 휠 및 대차의 진동이 수렴하고 있지 않다. 따라서 공차상태에서는 안정성이 있다고 판단되는 속도는 36m/s이하로 생각된다. 또한 만차상태는 그림 11(a), (b)에서 처럼, 주행속도 39 m/s(140km/h)에서 안정성이 있다고 판단된다.



(a) V = 36 m/s (b) V = 37 m/s
그림 10. 휠 및 대차의 좌우 변위(공차상태)



(a) V = 39 m/s (b) V = 40 m/s
그림 11. 휠 및 대차의 좌우 변위(만차상태)

4. 주행 안전성 해석

직선 궤도불균일과 곡선 궤도불균일이 중첩된 선로에서 40km/h의 속도로 주행하였을 경우, 각 휠의 좌측 및 우측 차륜에 대하여 탈선계수 변화를 해석하였다. 공차와 만차 상태에서 각각의 결과는 그림 12 및 13에 나타내었다. 곡선 주행해석 결과는 30 Hz Low Pass 필터를 이용하여 후처리되었다. 그림 12 및 13에서 알 수 있듯이, 공차상태보다 만차상태가 다소 작은 값을 갖고 있으며 곡선이 우측으로 회전되고 있기 때문에 우측 차륜보다는 좌측 차륜에서 큰 값을 보이고 있다. 탈선계수는 좌측 차륜의 경우 1.0이하, 우측 차륜의 경우 0.3이하의 값을 보이고 있다. 탈선계수의 제한치가 최대값 1.2이하, 평균 0.8이하임을 고려하면 공차 또는 만차시 모두 안전한 것으로 판단된다.

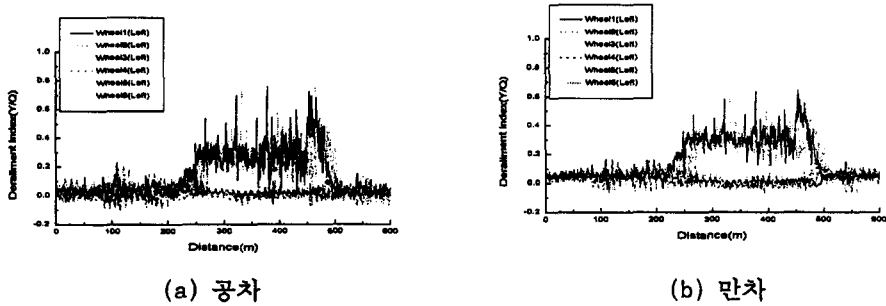


그림 12. 궤도불균일이 포함된 곡선에서 좌측차륜의 탈선계수

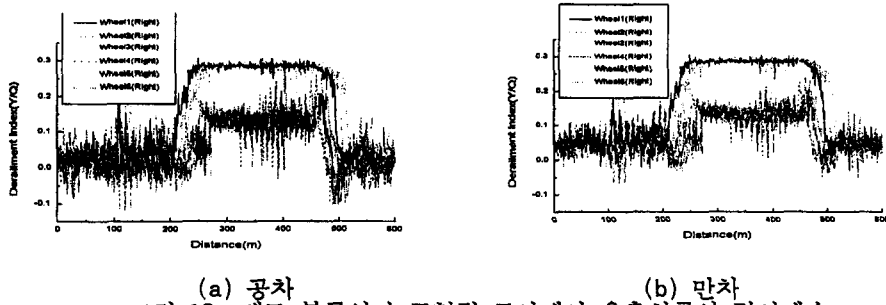


그림 13. 궤도 불균일이 포함된 곡선에서 우측차륜의 탈선계수

탈선계수 해석시와 동일한 궤도조건에서 각 휠의 좌우측 차륜에 대한 윤증감소 계산 결과는 그림 14 및 15와 같다. 탈선계수에서와 같이 30Hz Low Pass 필터를 적용하였고 양의 값은 윤증 감소이며 음의 값은 윤증 증가를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 곡선부에서 좌측 차륜의 경우는 2, 4, 6번 휠에서, 우측 차륜의 경우는 1, 3, 5번 휠에서 윤증 감소가 나타난다. 윤증감소는 공차시는 0.7이하, 만차시는 0.5이하로 나타나고 있다. 윤증감소 제한값을 일반적인 동적 윤증감소

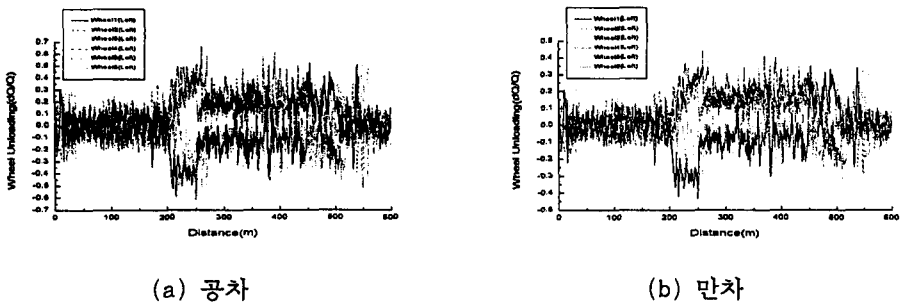
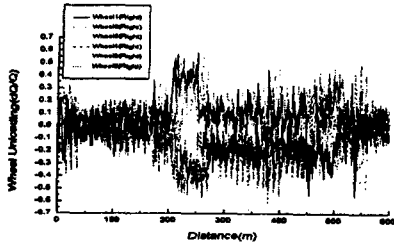
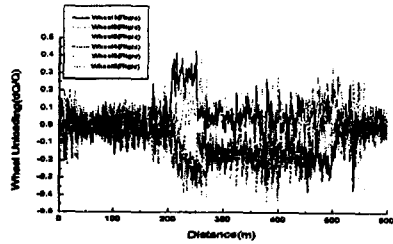


그림 14. 궤도 불균일이 포함된 곡선에서 좌측 차륜의 윤증 감소

기준치인 0.8이하로 고려하면 제한값 이내를 만족하고 있다.



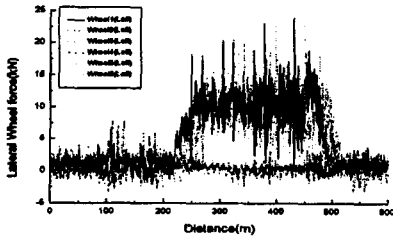
(a) 공차



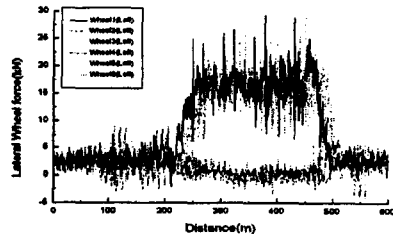
(b) 만차

그림 15. 불규칙이 포함된 곡선 상태에서 우측 차륜의 운동 감소

탈선계수와 동일한 궤도조건에서 각 휠의 좌우측 차륜에 대한 차륜횡압 계산 결과는 그림 16 및 17과 같다. 차륜횡압 계산 결과는 30Hz Low Pass 필터를 적용하였다. 좌측 및 우측 차륜의 횡압은 방향은 서로 반대이지만 동일하게 1, 3, 5번 휠이 2, 4, 6번 휠보다 큰 횡압이 작용하는 것으로 나타나고 있다. 차륜 횡압에 대한 기준값은 여러 가지가 있으며 실제 건설되는 궤도상의 허용치를 적용해야 하나 일반적으로 사용하는 안전계수 0.85의 Prudhomme 제한치를 적용하면 공차 상태의 정적 차륜 수직력을 32 kN이라 하면 횡압 제한치는 27kN이고, 만차상태의 정적 차륜 수직력을 50 kN이라 하면 횡압 제한치는 37 kN 정도로서 모두 제한치를 만족하고 있음을 알 수 있다.

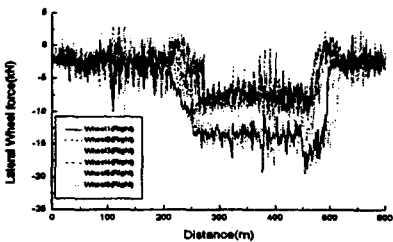


(a) 공차

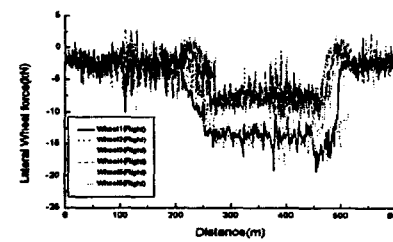


(b) 만차

그림 16. 불규칙이 포함된 곡선에서 좌측차륜의 횡압



(a) 공차



(b) 만차

그림 17. 불규칙이 포함된 곡선에서 우측차륜의 횡압

5. 승차감 해석

승차감 해석 방법은 과도 응답해석으로 수행하고 분석위치는 전후 차체의 무게 중심점과 구동 대차의 중심위치에 해당되는 차체 부위(무게 중심점으로부터 3.3 m 지점) 및 관절대차 방향으로 6.5 m 지점을 선정하여 각 차체마다 세군데의 위치를 선정하였다. 승차감 분석에 사용하는 가속도 값은 상하 및 좌우 방향 가속도 값을 사용한다.

과도응답해석에 의한 승차감 해석은 궤도 불균일을 갖는 직선 궤도모델과 곡선 궤도모델을 이용하였으며 차량속도는 40 km/h에서 해석하였다. 표 3의 과도응답에 의한 각 해석위치의 r.m.s 가속도 값은 ISO 2631의 필터를 통과시켜 계산된 값이다.

표 3. 과도응답 해석에 의한 상하방향 및 좌우방향 가속도 계산결과(단위: %)

계산위치		상하방향 가속도 해석				좌우방향 가속도 해석			
		공차		만차		공차		만차	
		직선	곡선	직선	곡선	직선	곡선	직선	곡선
앞차체	전방	0.049	0.061	0.055	0.062	0.037	0.053	0.033	0.052
	무계중심	0.045	0.059	0.044	0.055	0.036	0.053	0.034	0.049
	후방	0.083	0.110	0.082	0.106	0.069	0.095	0.068	0.096
뒷차체	전방	0.084	0.110	0.085	0.107	0.065	0.096	0.063	0.096
	무계중심	0.045	0.058	0.044	0.054	0.035	0.051	0.033	0.049
	후방	0.047	0.059	0.053	0.060	0.036	0.052	0.033	0.050

승차감 평가기준은 ISO 2631-1(1997)을 사용하였으며, 표 4는 승차감 기준을 보이고 있다.

표 4. ISO 2631-1(2nd edition, 1997) 승차감 기준[6]

실효값(m/s^2)	평가
0.315 미만	편안함(not uncomfortable)
0.315이상 0.63미만	조금 편안함(a little uncomfortable)
0.5 이상 1.0미만	약간 불편함(fairly uncomfortable)
0.8 이상 1.6미만	불편함(uncomfortable)
1.25 이상 2.5미만	꽤불편함(very uncomfortable)
2.0 이상	매우 불편함(extremely uncomfortable)

표 3의 해석값을 승차감 기준 ISO 2631-1(1997)의 계산 과정에 따라 분석을 수행한 결과, 공차 상태와 만차상태의 r.m.s 가속도는 직선선로 주행시의 경우 $0.1918 m/s^2$ 와 $0.1912 m/s^2$ 이며, 곡선포함 주행시의 경우는 $0.2609 m/s^2$ 와 $0.2535 m/s^2$ 로 나타났다. 이 값들을 승차감 기준과 비교하여 승차감을 판정한 결과, 만차시 또는 공차시에 모두 편안함(not uncomfortable)으로 나타났다으며 만차시가 다소 낮은 값을 갖고 있음을 알 수 있었다.

6. 결 론

철도차량의 동력학적 해석 프로그램인 VAMPIRE를 이용하여 관절형 경량전철의 현가요소 모델링, 궤도 모델링, 선회링 모델링을 수행하고 차량의 주행 안정성, 탈선계수, 운중감소, 횡압 등의 주행 안전성, 승차감을 해석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 주행안정성의 경우, 공차상태에서는 주행속도 36 m/s(130 km/h)이하에서 안정성이 있다고 판단되고, 만차상태에서는 주행속도 39 m/s(140 km/h)에서 안정성이 있다고 판단되었다. 따라서 관절형 경량전철의 설계 최고속도는 19.4 m/s(70 km/h)이므로 주행안정성에는 충분한 여유가 있다고 판단된다.
- (2) 주행안전성의 경우, 최대 탈선계수는 공차상태에서 좌측차륜이 1.0이하로 나타나서 제한치인 최대값 1.2이하를 만족하고, 평균값 0.8이하도 만족하는 것을 알 수 있었다. 최대 운중감소는 공차상태에서 우측차륜 1,3,5번 휠이 0.7이하로서 기준치 0.8이하를 만족하였고,

최대 횡압은 공차상태에서 정적 차륜수직력 32 kN에 대해 27 kN으로서 0.85의 Prudhomme 제한치를 만족한다.

- (4) 승차감 해석의 결과, 직선 및 곡선 궤도모델을 사용하여 공차 및 만차 상태에서 과도 응답 해석을 수행한 결과, 최대 r.m.s 가속도는 공차상태에서 0.2609 m/s^2 가 발생하였으며, 승차감 기준 ISO 2631-1(1997)에 대해서 공차상태 및 만차상태의 승차감이 모두 편안함(not uncomfortable)으로 나타나 승차감이 우수한 것으로 평가되었다.

참고 문헌

1. M. Wanibe, S. Nishimura, M. Suzuki(1981), "On the New Sumitomo Bogie Trucks", Sumitomo metal report, UDC 621.135.4, pp 93-112
2. 송달호 외 (1997), "경전철용 관절대차 핵심기술 연구(I)", 한국기계연구원.
3. Yoshihiro Suda, Masaki Nomura, "Dynamic Analysis of Rail Vehicles using Multibody Dynamic System", J-Rail '95, pp.175-178
4. VAMPIRE User's Manual, BRR, England
5. F Clement (1984), "Dynamic Curving Simulation of Forced-Steering Rail Vehicles," Ph.D Thesis, Queen's University, Canada.
6. International Standard "Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-, part 1: General requirements" ISO 2631-1, second edition 1997-05-01.