

차륜담면 변화에 따른 여객열차의 진동·승차감 해석

The analysis of the oscillating comfort in passenger coaches in accordance with variations of the wheel-tread.

박규한*, 박영일*, 김재철*
Ku-Han Park, Young-Il Park, Jae-Chol Kim

ABSTRACT

As well as the vibration comfort in passenger coaches largely affects passengers, it is one of the most important factors that passengers would betray their dissatisfactions among various elements, such as noise, lighting, couches, seat-arrangement, ventilation, temperature, odor, cleanliness, etc., consisting of comfort in passenger coaches. The wheel-tread figuration in the dynamic behavior of trainsets significantly affects the vibration comfort such as the running safety and the running stability. In this study, therefore, I will examine the dynamic characteristic in passenger coaches in accordance with the variation of wheel-tread figuration during the high-speed traveling with the target of trainsets (KT23 bogie), which are operated as the passenger coaches in Korea, and any variation that will exert baneful influence on the vibration comfort accordingly.

1. 서론

여객열차의 진동·승차감은 열차를 이용하는 고객에게 매우 큰 영향을 주며, 일반적으로 진동·승차감은 소음·조명·의자 안락감·좌석배치·환기·온도·냄새·청결 등 승차감을 구성하는 제반 요소들 중 열차이용 고객들의 불만이 될 우려가 있는 가장 중요한 요소 중 하나이다¹⁾. 철도차량의 동적거동에서 차륜담면형상은 주행안전성(running safety)과 주행안정성(running stability) 등과 같은 승차감에 중요한 영향을 미친다²⁾. 그러므로 본 연구에서는 현재 한국철도에서 여객용 차량으로 운행되고 있는 KT-23 대차를 대상으로 직선과 곡선주행 시 차륜담면 형상변화에 따른 여객용 열차(KT-23 대차)의 동특성을 검토하고, 동특성에 미치는 영향을 검토하겠다.

2. 차륜담면 특성

2.1 차륜담면 형상

차륜담면 형상은 외관상 유사한 것 같지만 치수기준에 의해 정해진 형상으로 제작되어진다. 담면형상의 종류에 따라 곡선을 원활하게 선회하기 쉬운 것과 직선을 고속으로 안전하게 주행할 수 있는 것 등

*1 정희원, 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정

*2 정희원, 서울산업대학교 차량공학과 교수

*3 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원

각각 특성이 다르다. Fig. 1과 같이 담면형상에 따라 원추형 담면, 원호형 담면, 원통형 담면 3종류로 분류된다. 담면형상의 종류는 담면의 구배가 인장한 원추담면, 원호형상의 원호담면, 구배가 없이 평탄한 원통담면 등이다. 담면구배는 윤축의 복원기능과 조향기능을 갖게 하는 원천인 한편, 사행동의 발생원인이기도 하다. 담면형상은 차량의 운동과 밀접한 관계가 있다².

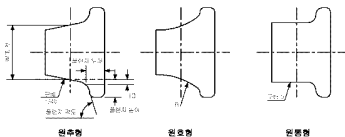


Fig. 1 담면형상의 종류

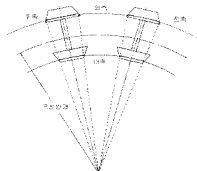


Fig. 2 곡선주행시 윤축의 위치

2.2 조향기능

Fig. 2에서와 같이 곡선구간에서는 외측의 레일 쪽이 내측보다 길어진다. 이 때문에 외측차륜은 내측차륜보다 진행거리가 길어진다. 차륜담면에 구배가 있으면 외측차륜의 반경이 커지고 내측차륜의 반경은 작아져, 윤축 중심선이 곡선 반경방향으로 가까워진다. 곡선을 부드럽게 선회하려면 윤축이 반경방향으로 위치를 잡는 것이 바람직하다. 윤축이 반경방향으로 위치를 잡는 운동특성을 조향기능이라고 한다.

담면구배가 클수록 회전반경차가 커지고 조향기능이 좋아지며 작은 횡압으로 곡선을 통과할 수 있다. 원호담면형상은 조향기능을 향상시켜 횡압을 줄이는 것을 목적으로 한 것이다. 윤축이 좌우도 변위를 일으키고 차륜 접촉점이 횡방향으로 이동해도 단단한 원호라면 회전반경차는 그만큼 크게 된다. 이 때문에 반경이 순차적으로 작아지게 한 원호를 여러 개 연속시켜 회전반경차를 크게 할 수 있도록 한다.

2.3 등가담면구배(Equivalent conicity)

원추형 담면이 아닌 담면형상을 적용한 차륜의 경우, 윤축 횡변위와 회전 반경차의 관계는 선형적이지 않다. 윤축 횡변위 y 에 대한 회전반경차의 관계는 비선형관계이므로 등가담면구배(Equivalent conicity)를 산정하기 위해선 그래프를 직선으로 보간하는 것이 필요하다. 이 과정에선 윤축 횡변위에 따라 윤축의 운동빈도를 나타내는 weighting function이 부가되며, 통상적으로 weighting function은 평균이 제0 중심으로 가정하여 $m=0$ 이며, 표준편차가 2.5mm인 정규분포함수가 사용된다. 등가담면구배는 식 (1)과 같이 표현되며, 입차함수로의 선형화는 Booton's method가 적용된다.

$$\lambda_e = \frac{1}{2} \int \frac{N(y)(r_R - r_L)}{y} dy \quad (1)$$

여기서, $N(y)$: Weighting function(normal distribution), $r_R - r_L$: Rolling radius difference(mm)
 y : Lateral shift(mm)

3. 검증시험

전산해석에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 실차 주행시험을 수행하여 취득한 상하, 좌우진동가속도의 시험 데이터를 분석하여 RMS로 나타내었다. 데이터 분석구간은 고속주행특성이 나타나는 직선구간(삼랑진→부산)을 대상으로 하였다.

3.1 상하진동

Fig. 3은 실차 주행시험시 속도별로 차체 상하진동가속도의 응답신호를 시간영역과 주파수 영역에서 분석하였다. 하행선(삼랑진→부산) 구간으로 분석하여 나타내었다. Fig. 3에서와 같이 주행속도가 증가함에 따라 차체 상하진동가속도의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

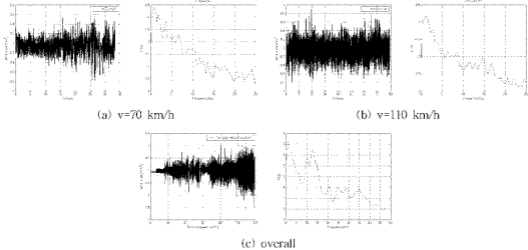


Fig. 3 The response of time and frequency for car body vertical vibration(Samrangjin→Busan)

Fig. 3의 (a)와 (b)는 하행선(삼랑진→부산)구간에서의 차체 상하진동가속도에 대한 시간응답과 주파수 응답을 주행속도별(70, 110 km/h)로 나타내었다. 주파수 응답결과 0.36, 1.1, 2.2, 3.66Hz와 같은 주파수 매수성분이 나타남을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 하행선(삼랑진→부산)구간에서의 주행속도에 따른 차체 상하진동가속도의 크기를 나타내고 있다. Fig. 4에서와 같이 주행속도가 증가함에 따라 차체 상하진동가속도의 크기가 증가함을 알 수 있었고, 주행속도 70 km/h에서 차체 상하진동가속도 크기가 증가하였다가 주행속도 증가시 다시 안정해지는 것을 확인할 수 있었다.

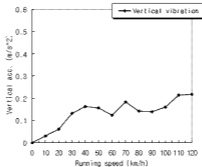


Fig. 4 The RMS of Car body vertical vibration(Samrangjin→Busan)

3.2 좌우진동

Fig. 5는 실차 주행시험시 속도별로 나타나는 차체 좌우진동가속도의 응답신호를 시간영역과 주파수 영역에서 분석하였다. 하행선(삼랑진→부산) 구간으로 분석하여 나타내었다. Fig. 5에서와 같이 주행속도가 증가함에 따라 차체 좌우진동가속도의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

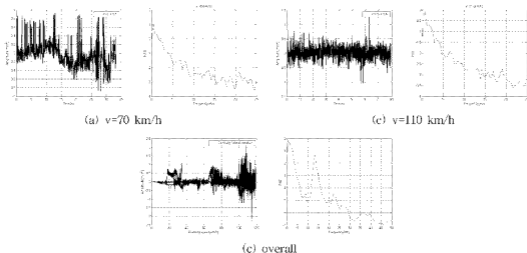


Fig. 5 The response of time and frequency for car body lateral vibration(Samrangjin→Busan)

Fig. 5의 (a)와 (b)는 하행선(삼랑진→부산)구간에서의 차체 좌우진동기속도에 대한 시간응답과 주파수 응답을 주행속도별(70, 110 km/h)로 나타내었다. 주파수 응답결과 0.36, 3.6, 5.13 Hz 성분이 나타남을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 하행선(삼랑진→부산)구간에서의 주행속도에 따른 차체 좌우진동기속도의 크기를 나타내고 있다. Fig. 6에서와 같이 주행속도가 증가함에 따라 차체 좌우진동기속도의 크기가 증가함을 알 수 있었고, 주행속도 70 km/h와 100 km/h에서 차체 좌우진동기속도 크기가 증가하였다가 주행속도 증가시 다시 안정해지는 것을 확인할 수 있었다.

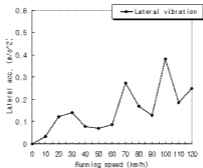


Fig. 6 The RMS of Car body lateral vibration(Samrangjin →Busan)

4. 전산해석

4.1 해석모델

4.1.1 차량모델

ADAMS/RAIL을 이용하여 여객용 열차(KT-23 대차)의 해석모델을 모델링하였다. Fig. 6의 (a), (b)에서와 같이 전대차(front bogie), 후대차(rear bogie)와 차체(car body)의 세 가지 서브시스템(subsystem)을 모델링하였다. 각각의 서브시스템은 해당 모델의 특성을 감청정한 템플릿으로 구성되어 있다. Fig. 6의 (c)에서와 같이 각각의 모델링을 결합하여 8량 편성의 열차 해석모델을 개발하였다.



Fig. 6 Modeling with ADAMS/RAIL

4.1.2 차륜모델

차륜담면 모델은 여객용 열차에 적용되고 있는 차륜담면구배가 1/40과 1/20을 모델링하였고, UIC 50 레일을 사용하였다. Fig. 7(a)와 (b)는 차륜담면구배가 1/40과 1/20에 대한 차륜담면 형상을 나타내었다.

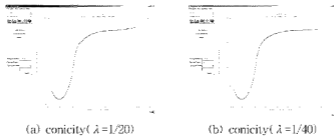


Fig. 7 Wheel profiles

4.2 해석결과 및 분석

개발된 해석모델은 이용하여 차륜담면 형상변화에 따른 여객용 열차의 동특성해석을 주행속도를 증가 시켜가면서 수행하였다. 여객용 열차(KT-23 대차)차체, 대차, 윤축의 결량, 강성값, 댐핑값을 이용하여 해석을 수행하였다. 차륜담면 형상변화에 따른 차량 각 부분의 시간응답과 주파수응답을 수행하여 동적 해석을 수행하였다. 차륜담면 형상변화에 따른 여객용 열차(KT-23 대차)에 사용하는 동특성을 검토하기 위하여 ADAMS /RAIL을 이용하여 8량 편성차량에 대한 동적해석(Dynamic Analysis)을 속도별 증가시켜가면서 수행하였다. 먼저 해석모델의 타당성을 검토하기 위하여 직선구간에서 차륜담면구배가 1/40에 대한 동특성 해석을 수행하였다. 해석결과를 시험결과와 비교 분석하였다.

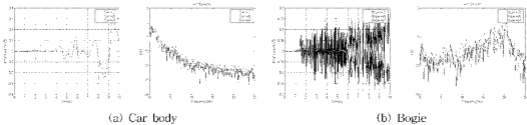


Fig. 8 The response of time and frequency for car body lateral vibration($v=110$ km/h)

Fig. 8은 차륜담면구배가 1/40인 차륜을 장착하고 주행을 경우, 주행속도 $v=110$ km/h에서의 대차, 차체 및 횡방향 진동가속도를 시간영역과 주파수 영역으로 나타내었다. Fig. 9는 주행속도에 따른 각 차량별

횡진동가속도의 진동크기를 나타내고 있다. Fig. 9에서와 같이 주행속도 100 km/h에서 후미부 차량이 전두부 차량보다 진동가속도 크기가 증가함을 확인할 수 있었다.

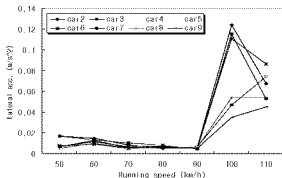


Fig. 9 The RMS of car body lateral vibration

Table 1 The response of frequency for KT23 bogie train

| v (km/h) | 30 | 70 | 90 | 110 |
|--------------------|------|-------|------|------|
| Name | | | | |
| Car-body_No.2 (Hz) | 0.67 | 0.68 | 1.3 | 0.3 |
| Bogie_No.2 (Hz) | 0.19 | 0.29 | 0.3 | 20 |
| Wheelset_No.2 (Hz) | 0.19 | 0.29 | 0.3 | 0.4 |
| Car-body_No.5 (Hz) | 0.68 | 0.68 | 0.29 | 0.58 |
| Bogie_No.5 (Hz) | 0.19 | 0.195 | 0.3 | 20.5 |
| Wheelset_No.5 (Hz) | 0.19 | 0.195 | 0.3 | 0.4 |
| Car-body_No.9 (Hz) | 0.59 | 0.78 | 0.68 | 0.68 |
| Bogie_No.9 (Hz) | 0.19 | 0.29 | 0.4 | 19.6 |
| Wheelset_No.9 (Hz) | 0.19 | 0.29 | 0.4 | 0.29 |

Table 1은 차량의 횡면위에 대한 주파수 분석한 결과를 나타내고 있다. Table 1에서와 같이 차륜담면 구배가 1/40인 열차의 경우 0.3, 0.68, 1.3 Hz 등의 배수성분이 나타남을 확인할 수 있었다. Fig. 9와 Table 1에서와 같이 전산해석 결과와 신차 주행시험에서 나타난 진동가속도의 크기와 주파수 성분이 유사함을 나타내고 있어 해석모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

5. 결론

여객용 차량으로 운행되고 있는 KT-23 대차를 대상으로 곡선주행 시 차륜담면 형상변화에 따른 여객용 열차(KT-23 대차)의 동특성을 검토하였다. 여객용 열차의 동특성을 검토하기 위해 ADAMS/RAIL을 이용하여 8량 편성의 해석모델을 개발하였고, 해석모델의 타당성을 검증하기 위해 실차 주행시험에 취득한 데이터를 분석한 결과, 0.3, 0.68, 1.3 Hz 등의 주파수 성분이 전산해석과 신차 주행시험에 나타나 타당성을 검증할 수 있었다. 향후 검증된 해석모델을 이용하여 곡선구간에서 차륜담면구배가 1/40과 1/20의 차량별 상하, 좌우방향의 진동특성과 차량별 곡선 주행성능을 비교하고 시간영역과 주파수 영역에서 차륜담면 형상별로 분석하였다.

참고문헌

1. 이승일, 김재철, 최연선(2003), "KTX 현명운동해석," 한국철도학회논문집, pp.755~761.
2. 한국철도기술연구원(1996), "철도차량의 진동방지에 관한 연구," 철도청.
3. 한국철도기술연구원(2003), "경제적 차륜담면관리 기술 개발," 철도청.
4. J. J. Kalker(1991), "Wheel-rail Rolling Contact Theory," Elsevier, pp.243~261.