# 궤간가변화차의 주행안전성 수치해석 연구

# Numerical analysis of dynamic behaviour of a gauge-changeable freight wagon

장승호* 이승일**
Jang, Seung-Ho Lee, Seung-Il

## ABSTRACT

Gauge-changeable vehicles can be used to connect the trans-Korean railway with the trans-Siberian railway having a different gauge for the fast and safe transportation instead of transshipment or bogie-changing. In this paper, the dynamic characteristics of a gauge-changeable freight wagon was analyzed numerically in terms of rolling stock approval from the point of view of safety, track fatigue and running behaviour. The assessment quantities for the approval were calculated using ADAMS/Rail in each case of railways in South Korea, North Korea and Russia, which showed that most quantities are less than the limit values.

## 1. 서 론

현재 추진 중인 남북철도의 연결 이후에 시베리아 횡단철도와 연결하기 위해서는 궤간 차이를 극복하는 방안이 필요하며, 이를 위해서 궤간 변경의 속도가 비교적 빠르며 변경 지점에서도 정숙한 운행이 가능하고 위험물 수송에도 적합한 장점이 있는 화차용 궤간가변 시스템이 개발 중에 있다.[1,2] 궤간가변화차는 차륜의 궤간이 변경되는 기능을 가지면서 레일 단면, 궤간, 곡선 조건 등이 서로 다른 이종 궤도를 안전하게 주행할 수 있어야 한다. 표준궤간 (1435 mm)과 광궤 (1520 mm)에서 주행할 수 있는 궤간가변 화차에 있어서는 국제규격으로서 궤간가변화차에 대한 UIC code 510-4가 적용되고 있다.[3] 여기에는 동역학적 성능의 승인절차로서 UIC code 518에 규정된 안전 주행에 대한 검증 항목이 필요조건으로 규정되어 있다.[4] 따라서 본 논문에서는 궤간가변 화차의 개발에 있어서 해당 화차가 표준궤 및 광궤에서의 주행 성능이 위의 기준을 만족하는지를 수치적으로 모사하여 예측하고자 하였다.

차량의 동역학적 거동을 모사하기 위해서는 다물체 동역학 수식의 해를 구하거나 수치 해석적인 방법이 이용되고 있다.[5] 이 중에서 근사적인 가정을 통한 해석적인 방법을 이용하는 경우 차량 거동의 경향을 파악할 수 있으나 차량 설계 시 정확한 예측값을 얻기가 어렵다. 따라서 수치적인 방법이 흔히 이용되고 있으며 본 연구에서는 상용 프로그램 ADAMS/Rail을 이용하여 궤간가변 화차 (GC-freight car)의 주행 성능을 해석하였다.

## 2. 궤간가변화차 모델링

* 책임저자 : 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도대학, 정회원

## 2.1 차량 모델링

본 연구에서 다루는 궤간가변대차는 기존의 용접일체형 고속화차용 대차에 최근 개발 중인 모듈형 궤간가변 윤축을 장착하기 위해 대차프레임 폭을 늘이고 제동방식을 답면 제동에서 디스크 제동으로 바꾸고 센터 빔을 없애는 등의 변형을 가한 것이다. 또 컨테이너 화차에 대하여 해석을 수행하였다.

화차의 모델링을 위해서 몇 가지 가정을 하였다. 먼저 철도 차량들 간의 연성 효과가 작기 때문에 한 량만을 대상으로 모델링하였다. 또한 주행안전성, 궤도 피로, 승차감, 임계속도 등의 인자들에 관심을 두고 있으므로 주로 저주파수 대역을 다루게 되며 이때 차체, 대차 프레임, 차축, 차륜 등의 부품은 강체로 가정하였다. 차륜과 레일의 접촉력 (creep force) 계산에는 ADAMS/Rail에 구비된 Kalker's FASTSIM 알고리즘을 이용하였다. 이때 차륜과 레일 사이의 마찰 계수는 보다 심각한 상황을 고려하기 위하여 비교적 큰 값인 0.4로 가정하였는데 차량 진동의 외력에 해당하는 차륜-레일 접촉력이 커지게되므로 가능한 진동 상황 중 큰 값을 고려하게 된다. 이러한 값은 본 연구에서는 안전한 범위의 설계 인자를 찾는 과정이므로 타당하다고 할 수 있다. 차량 모델에의 수치 입력값은 Table 1에 나타낸 바와 같다. Fig. 1과 2는 궤간가변대차 및 화차의 ADAMS/Rail 모델링을 한 결과를 나타낸다.

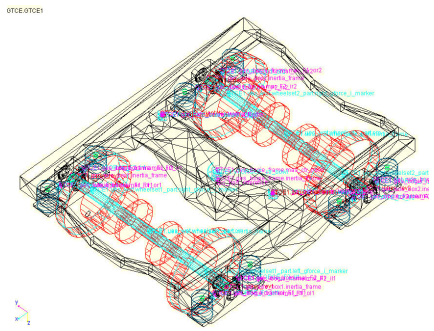

**Fig. 1.** Model of the bogie for a GC-freight car

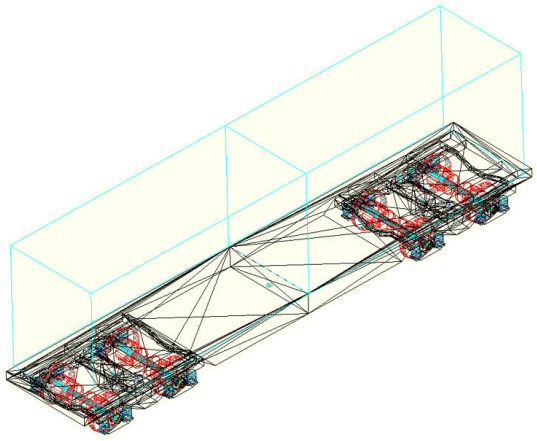

**Fig. 2.** Model of a GC-freight car

**Table 1.** Input data for modeling a GC-freight car

| 구분 | 변수 | 단위 | 입력값 |
|---|---|---|---|
| 차체 | 질량 | kg | 공차 조건: 8,900<br>영차 조건: 58,935 |
| | 관성모멘트 (차체 1/2) | $kgm^2$ | 공차조건:<br>Ix: 3,894 Iy: 49,472 Iz: 47,177<br>영차조건:<br>Ix: 25,000 Iy: 370,000 Iz: 390,000 |
| 대차 프레임 | 질량 | kg | 1,337 |
| | 관성모멘트 | $kgm^2$ | Ix: 833 Iy: 633 Iz: 1,408 |
| 윤축 | 질량 | kg | 1,572 |
| | 관성모멘트 | $kgm^2$ | 표준궤간 상태:<br>Ix: 661 Iy: 103 Iz: 661<br>광궤간 상태:<br>Ix: 706 Iy: 103 Iz: 706 |
| | 차륜 지름 | m | 0.86 |
| | 차축 길이 | m | 2.027 |
| | Tape circle 거리 | m | (표준궤간) 1.502 (광궤간) 1.587 |
| 차축 박스 | 질량 | kg | 100 |
| | 관성모멘트 | $kgm^2$ | Ix: 25 Iy: 25 Iz: 25 |
| 1차 현가 스프링 | 강성 | MN/m | tare S/P:<br>kx: 0.7 ky: 0.7 kz: 0.415<br>laden S/P:<br>kx: 0. ky: 0. kz: 0.660 |
| 사이드 베어러 | 강성 | MN/m | kz: 2.16 MN/m |
| 기타 치수 | 차축간 거리 | m | 1.9 |
| | 대차 중심간 거리 | m | 8.70 |
| | 사이드베어러 간 거리 | m | 1.450 |

위에서 차체의 경우에 x축 방향으로 긴 구조로서 x축 방향 비틀림을 고려하기 위해 차체를 2개의 강체로 나타낸 다음 bushing 요소로서 연결하였다. 이것은 기존에 긴 차체를 하나의 강체로 모델링한 경우보다는 좀더 실제적인 모델이라고 할 수 있다. 이때 비틀림 강성 (torsional stiffness)은 참고문헌의 시

험자료에 의하여 근사적으로 10.5 MNm/rad을 이용하였다.[6] 특히, 현가장치는 tare 스프링과 laden 스프링이 한쌍을 이룬 코일 스프링 조합과 Lenoir 링크로 이루어져 있다. Laden 스프링은 공차조건에서는 작동하지 않으며 어느 정도 이상의 화물이 실리게 되면 작동한다. Tare 및 laden 스프링의 자유고는 각각 275, 231 mm이다. 따라서 44 mm의 간격, tare 스프링의 스프링 상수 및 하중에 따라서 laden 스프링에 걸리는 하중이 결정된다. 본 대차에서의 감쇠는 사이드베어러, Lenoir 링크에 따라 하중에 의존하는 수직력에 의한 차축박스와 차체 사이 마찰, 센터 피봇 마찰판 등 모두 마찰에 의해 이루어진다. 마찰력은 Coulomb의 법칙을 이용하여 수식화하되 상용 프로그램에 함수 입력의 용이성을 위하여 불연속적인 값을 다음과 같이 연속함수로 모델링하였다.[7] 또한 차륜은 1/20-1/10 답면구배의 KNR 차륜이다.

### 2.2 주행궤도 조건

직선 주행조건은 본 궤간가변 화차의 최고속도 목표치인 공차 시 120 km/h, 영차 시 100 km/h로 주행할 경우이며 각 국가별 조건을 Table 2에 나타내었다. 곡선부에서는 향후 궤간가변 화차가 주로 주행할 것으로 예상되는 노선 중 남한은 경원선을 대상으로 하였으며 북한의 경우 경원선, 동해북부선을 대상으로 하였다. 러시아에서는 극동지역에서의 일반적인 최소 곡선반경일 경우를 대상으로 하였다. 각 국가의 철도에서 규정하고 있는 곡선부 통과 최고속도로 주행할 때를 해석하였다. 캔트량, 완화곡선 길이 등의 곡선부 인자와 최고속도는 Table 4와 같이 각 국가의 철도건설규칙에 따른 값을 이용하였다. 해당 노선들은 3급선에 해당한다고 하였으며 궤도틀림조건은 Table 4에 나타낸 바와 같다. 이 값은 UIC code 518에서 시험노선 규정치 80~120 km/h 속도에 해당하는 궤도 틀림 조건을 대략 만족하고 있다.

**Table 2.** Condition of tangent tracks for simulation

| 궤도 조건 분류 | 궤도단면 | 궤간(mm) | 내부경사도 |
|---|---|---|---|
| Case T1 (남한) | KS50N | 1435 | 1/20 |
| Case T2 (북한) | ㄹ50 | 1435 | 1/20 |
| Case T3 (러시아) | P65 | 1520 | 1/20 |

**Table 3.** Condition of curved tracks

| 구분 | 단위 | Case C1 (남한) | Case C2 (북한) | Case C3 (러시아) |
|---|---|---|---|---|
| 궤간 | mm | 1,435 | 1,435 | 1,520 |
| 레일 규격 | | KS50N | ㄹ50 | P65 |
| 레일 내부경사도 | | 1:20 | 1:20 | 1:20 |
| 곡선반경 | m | 300 | 300 | 300 |
| 완화곡선 길이 | 캔트 | 700배 | 600배 | 500배 |
| 캔트량 | mm | 110 | 100 | 130 |
| 슬랙량 | mm | 12 | 18 | 20 |
| 곡선통과 최고속도 | km/h | 78 | 75 | 65 |

**Table 4.** Condition of track irregularity

| 궤도 틀림 조건 | 좌측 레일 (mm) | 우측 레일 mm) |
|---|---|---|
| 수직궤도틀림 표준편차 | 2.33 | 2.27 |
| 수평궤도틀림 표준편차 | 1.52 | 1.53 |
| 수직궤도틀림 최대치 | -11.7, 9.93 | -10.08, 7.70 |
| 수평궤도틀림 최대치 | -8.08, 6.39 | -8.73, 6.18 |

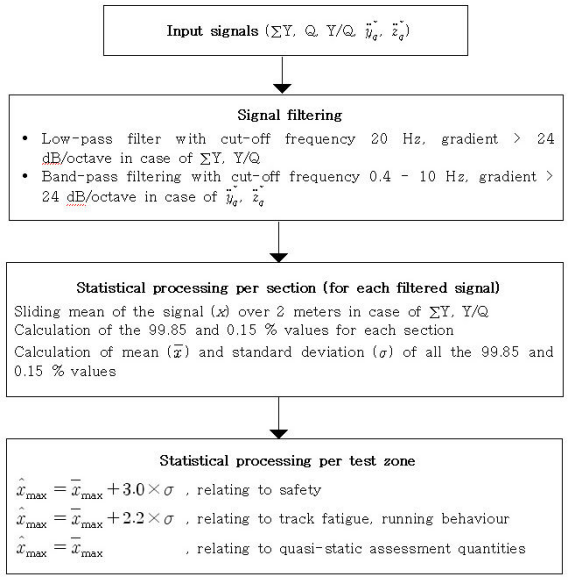


**Fig. 3.** Procedure of signal and statistical processing for calculating assessment quantities

## 3. 평가인자 계산 방법

UIC code 518은 국제적인 운행허가 목적으로 안전, 궤도피로, 주행 거동의 관점과 관련된 동역학적 거동의 관점에서 철도차량 (기존 차량, 신기술 차량과 특수 차량)에 대한 승인절차로서의 노선 주행 시험 및 분석 방법을 다루고 있다. 이 코드는 국제적인 허가에 대한 최소 필요조건으로 운행되는 지역에서 만날 수 있는 특정한 심각한 운행 조건을 포함하지는 않는다. 측정하거나 계산된 입력값에서 횡압력의 합, 탈선계수, 수직하중, 차체 가속도의 평가인자들을 계산하는 방법은 해당 코드에서 규정하고 있는 바에 따라 Fig. 3과 같이 하였다.

## 4. 해석 결과

**Table 5.** Simulation results in the case of tangent tracks

| 궤도 조건 분류 | 횡압의 합 $(\sum Y)_{2m}$, kN | | 탈선계수 $(Y/Q)_{2m}$ | |
|---|---|---|---|---|
| | 공차 | 영차 | 공차 | 영차 |
| Case T1 (남한, 1/20) | 4.22 | 12.95 | (좌) 0.086 (우) 0.113 | (좌) 0.25 (우) 0.21 |
| Case T2(북한) | 4.23 | 11.89 | (좌) 0.086 (우) 0.103 | (좌) 0.26 (우) 0.18 |
| Case T3(러시아) | 4.30 | 14.48 | (좌) 0.086 (우) 0.106 | (좌) 0.29 (우) 0.19 |
| 제한치 (UIC-518) | 21.5 | 56.2 | 0.8 | 0.8 |

**Table 6.** Simulation results of r.m.s. accelerations at body above running gear in the case of tangent tracks

| 궤도 조건 분류 | 공차 | | 영차 | |
|---|---|---|---|---|
| | $s\ddot{y}_q^*$ , m/s$^2$ | $s\ddot{z}_q^*$ , m/s$^2$ | $s\ddot{y}_q^*$ , m/s$^2$ | $s\ddot{z}_q^*$ , m/s$^2$ |
| Case T1 (남한, 1/20) | 0.2869 | 0.4112 | 0.4937 | 0.2995 |
| Case T2(북한) | 0.2836 | 0.4103 | 0.4838 | 0.3026 |
| Case T3(러시아) | 0.2849 | 0.4118 | 0.4982 | 0.3189 |
| 제한치 (UIC-518) | 1.3 | 2 | 1.3 | 2 |

**Table 7.** Simulation results in the case of curved tracks

| 궤도 조건 분류 | 횡압의 합 $(\sum Y)_{2m}$, kN | | 탈선계수 $(Y/Q)_{2m}$ | |
|---|---|---|---|---|
| | 공차 | 영차 | 공차 | 영차 |
| Case C1 (남한) | 8.79 | 30.33 | (좌) 0.525 (우) 0.388 | (좌) 0.415 (우) 0.379 |
| Case C2 (북한) | 9.13 | 30.90 | (좌) 0.587 (우) 0.432 | (좌) 0.459 (우) 0.404 |
| Case C3 (러시아) | 9.93 | 23.00 | (좌) 0.703 (우) 0.481 | (좌) 0.531 (우) 0.433 |
| 제한치 (UIC-518) | 21.5 | 56.2 | 0.8 | 0.8 |

**Table 8.** Simulation results of r.m.s. and quasi-static accelerations at body above running gear in the case of curved tracks

| 궤도 조건 분류 | 공차 | | | 영차 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $s\ddot{y}_q^*$ , m/s$^2$ | $s\ddot{z}_q^*$ , m/s$^2$ | $\ddot{y}_{qst}^*$, m/s$^2$ (excl. transition curve) | $s\ddot{y}_q^*$ , m/s$^2$ | $s\ddot{z}_q^*$ , m/s$^2$ | $\ddot{y}_{qst}^*$, m/s$^2$ (excl. transition curve) |
| 남한 | 0.4215 | 0.3113 | 1.56 | 0.3612 | 0.2627 | 1.56 |
| 북한 | 0.3998 | 0.3067 | 1.46 | 0.3510 | 0.2498 | 1.47 |
| 러시아 | 0.3424 | 0.2558 | 1.09 | 0.3668 | 0.2124 | 1.09 |
| 제한치 (UIC-518) | 1.3 | 2 | 1.3 | 1.3 | 2 | 1.3 |

해석결과 중 신조차륜에서의 값을 Table 5~8에 나타내었다. 여기서 횡압력의 합과 탈선계수는 가장 크기가 큰 앞쪽 윤축 (leading wheelset)에 대한 값이며 차체가속도는 UIC code 518의 규정에 따라 앞쪽 대차 위의 차체 바닥에서의 값이다.

위 표에서 알 수 있듯이 직선 주행에서 평가인자들이 모두 제한치를 만족한다. 차체 가속도에서는 영차조건에서 공차조건보다 좀 더 작은 크기를 보이고 있는데, 이것은 공차 시 사이드 베어러 쪽에 대부분의 하중이 걸리고 영차 시에는 센터 피봇 쪽에 대부분의 하중이 걸리게 되어 하중뿐만 아니라 동특성도 바뀌기 때문이다.

곡선 주행 시에 발생하는 횡압은 곡선통과 시의 초과 원심력으로 인한 횡압, 곡선전향 횡압, 궤도틀림으로 인한 동요나 사행동 등에 수반하는 차량 동요로 인한 횡압, 레일 이음매부나 분기기 등을 통과할 때의 충격에 수반하여 생기는 충격적인 횡압으로 구성된다. 이중에 곡선전향 횡압은 내측 궤에서 발생한 마찰력이 반력으로서 외궤 측에 전해지는 반면, 다른 횡압 요소들은 주로 차륜 플랜지가 접촉하는 외궤 측에서 발생한다. 우측 차륜의 횡압은 주로 곡선전향 횡압으로 볼 수 있으며, 좌측 차륜의 횡압과의 차이의 평균적인 값은 초과 원심력에 의한 횡압이고 작은 파장의 변동분은 차량동요와 이음매 충격에 의한 횡압으로 볼 수 있다. 궤간가변 대차의 경우에 횡압과 관련한 값은 기준치를 만족하지만 저감의 필요가 있을 경우 비교적 크기가 큰 곡선전향 횡압 부분을 저감하는 것이 효과적이다. 이를 위해서 시도할 수 있는 방안은 축거의 단축, 대차 선회 저항 저감, 원호 답면의 차륜 이용, 유연한 축상 지지 대차 또는 조타 대차의 이용이 가능하다. 한편, 차체의 경량화도 횡압의 감소에 우선 시도해 볼 수 있는 대책이다. 궤간가변 대차의 경우 스프링 하 질량이 기존 대차보다 증가하기 때문에 레일 이음매부 또는 분기기 등의 통과 시 충격적인 횡압 성분이 다소 클 수 있다.

차체 가속도의 좌우방향 및 상하방향 r.m.s. 가속도 성분은 공차와 영차 조건 모두에서 UIC의 제한치를 만족한다. 그러나 곡선부의 좌우방향 정상가속도는 남한과 북한에서 제한치보다 약간 크며, 러시아의 조건에서는 제한치보다 작다. 외국의 시험결과에서 좌우 정상가속도 단독의 지표로 쓰는 것이 아니라, 좌우 정상가속도와 좌우 진동가속도의 조합이 승차감을 잘 설명할 수 있다고 한다. 이때 좌우 진동가속도가 작다면, 보다 큰 좌우 정상가속도라도 허용될 수 있다고 한다. 따라서 본 해석 결과에서도 좌우 r.m.s. 가속도 성분이 비교적 작으므로 약간 초과한 좌우방향 정상가속도는 허용될 수 있을 것으로 본다.

국내 화차용 용접 대차에 대한 철도공사 표준규격에 상하 및 좌우 방향 차체 진동가속도 및 횡가속도에 대한 값이 주어져 있으나 곡선부에서의 정상가속도에 대한 국내 기준은 없다.[8] 위의 차체 가속도 값은 국내 철도공사 규격 품질 수준을 만족한다. 또한 공차 및 영차 조건에서 좌우방향 정상가속도의 크기가 각 국가별로 거의 같다. 좌우방향 정상가속도가 주로 곡선부의 캔트 조건에 의한 영향을 받기 때문에 캔트부족량에 관련한 곡선부 통과속도를 조정한다면 정상가속도를 저감할 수 있을 것이다.

한편, UIC code 518에서 궤도 피로 관점에서의 수직력 제한치를 규정하고 있는데 본 해석 결과 직선 주행 조건과 곡선 주행 조건 모두에서 변동 규정과 속도에 따른 제한치를 모두 충분히 만족함을 관찰하였다. 또한 차량의 주행거리가 늘어남에 따라 차륜이 마모되어 답면 형상과 conicity가 바뀌게 되는데 본 연구에서는 일반적인 마모 차륜 형상에 대하여 동일한 해석을 수행하였고 그 결과도 규정치를 모두 만족한 결과를 얻을 수 있었다.

## 4. 결 론

개발 중에 있는 궤간가변 화차에 대하여 레일 단면, 궤간, 곡선 조건 등이 서로 다른 이종 궤도를 안전하게 주행할 수 있는지를 예측하기 위해 ADAMS/Rail을 이용한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 절차 및 평가인자의 계산은 UIC code 518에 규정된 조건에 따라서 수행되었으며 남한, 북한, 러시아의 궤도 조건 각각의 결과에 대해서 평가인자와 규제치를 비교하였다. 비교 결과로서 신차에 대한 동역학적 성능 승인 절차로서 각각의 규제치를 만족할 수 있을 것으로 예측되었다. 다만, 곡선부에서 좌우방향 차

체 가속도의 정상성분이 해석 대상이었던 국내 및 북한의 조건에서 약간 초과하였다. 그러나 이 값은 차량의 특성에 의한 것보다는 주로 곡선부의 캔트 조건에 의한 영향을 받기 때문에 캔트부족량에 관련한 곡선부 통과속도를 조정하여 저감할 수 있다.

**감사의 글**

본 연구는 건설교통부 국가교통핵심기술개발사업의 “궤간가변장치 기술개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

**참고문헌**

1. Isao Okamoto (2000), “World trend of gauge change train,” RTRI Report, vol. 14(10), pp. 1-6.
2. 장승호, 나희승, 한준석 (2005) “동북아 철도망 연계를 위한 궤간가변장치 개념설계,” 한국철도학회 추계학술대회 논문집.
3. UIC CODE 510-4 (2002), “Wagons, variable-gauge running gear for 1435 mm/1520 mm and 1668 mm, recommendations for bilateral agreements,” UIC, 2nd ed.
4. UIC CODE 518 (2005), “Testing and approval of railway vehicles form the point of view of their dynamic behaviour - Safety - Track fatigue - Ride quality,” UIC, 3rd ed.
5. 이승일, 최연선 (2003) “고속주해을 위한 화차 한량의 사행동 해석,” 한국철도학회논문집 제6권 제3호, pp. 149-155.
6. Railway Group Standard, “Resistance of railway vehicles to derailment and roll-over,” GM/RT2141, RAILTRACK PLC.
7. N. Bosso, A. Gugliotta, A. Soma (2000) "Simulation of a freight bogie with friction dampers," 5th ADAMS/Rail Users' Conference, Netherlands.
8. 철도청 철도용품 표준규격, 철도 2240-2444다 (2003) “화차용 용접 대차.”