

# 스윙모션보기의 임계속도와 주행성능 평가

## Evaluation of critical speed & running performance for Swing Motion Bogie

함영삼\*      허현무\*\*      오택열\*\*\*  
Y. S. Haam    H. M. Hur      T. Y. Oh

### ABSTRACT

The research was requested by Meridian Rail Corporation in United States. The Swing Motion Bogie can application by Korea style if synthesize study result of bogie strength evaluation, bogie dynamic characteristics analysis, actual test(maximum speed, derailment coefficient, lateral force, vertical force, vibration acceleration, steady state lateral acceleration) etc..

Keywords : yield strength, dynamic characteristics, critical speed, derailment coefficient, lateral force, vertical force, vibration acceleration

### 1. 서론

본 연구는 미국의 Meridian Rail Corp.(구, ABC-NACO)로부터 의뢰받은 것으로서 한국형 Swing Motion Bogie를 개발하는데 있어 문제점과 개선방안을 도출하여 적용방안을 제시하는 내용이다. Meridian Rail사는 북미지역 철도관련 주강제품의 최대생산사 중 하나이며, 북미지역 화차 대차 시장에서 상당한 비중을 차지하고 있는 회사로서 대차와 연결기, 차륜/차축 등이 주력 생산제품이다.

연구대상인 Swing Motion Bogie는 북미지역 고성능 고속화차 대차 중에서 나름대로 인정받고 있는 대차로서 차량의 진동을 능동적으로 제어할 수 있도록 무게중심을 낮춘 것이지만, 한국철도에서 운행할 때는 선로조건이나 속도, 기후 등 여러 가지 환경이 다르기 때문에 이에 따른 문제점을 도출하여 새로운 대차의 설계방안을 제시함으로써 고속철도 개통에 대비한 화물수송의 고속화가 필요한 한국시장에서 철도기술의 발전과 더불어 철도의 숙원사업인 기존선의 속도향상을 앞당길 수 있을 것으로 기대되고 있다.

철도연구원에서는 이번 연구를 통하여 향후 현재 새마을호 객차 수준의 운행속도인 최고속도 150km/h급 고속화차를 탄생시키기 위한 시급성을 마련하고자 하였다.

### 2. 화차용 대차의 종류

Swing Motion Bogie는 Bolster가 횡방향으로  $\pm 32\text{mm}$ 까지 운동할 수 있게 한다. Swing운동은 Pedestal과 Adapter 사이에서 일어나고, 양 Side Frame을 연결하고 있는 Transom이 Rocker Seat를 통해서 움직이므로 연동되는 것이다. Side Frame 속에 부착되어 Friction Wedge와 접촉하는

\* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 책임연구원  
\*\* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원  
\*\*\* 경희대학교 기계공학과 교수

Wear Plate의 넓은 면적은 스프링의 수직 운동과 Transom의 횡방향 운동에 대한 흡수력을 제공한다.

Transom은 H-Frame Bogie와 같이 대차의 H 형태를 견고히 유지한다. 또한, Bolster는 보수를 가장 많이 요구하는 Gib가 없기 때문에 Side Frame에 간혀 있는 것이 아니다. 대신, Transom 상부와 Bolster 하단에 위치한 Lateral Stops가 서로 접촉하게 되는데, 이러한 설계는 길어진 횡방향 운동과 횡방향 충격점이 낮게 위치하도록 한다. 횡방향 운동의 중심 높이를 낮추는 것은 차륜의 들림 현상을 감소시켜, 결국 탈선 위험도를 낮추는 것이다.

이러한 Design은 차량 주행의 정숙성, 수송 화물 보호, 선로보수 및 차량운용비용의 문제가 일반 대차로서 해결되지 않을 때, Swing Motion Bogie가 선택될 수 있음을 의미한다. Table 1은 현재 우리나라에서 운용되고 있거나 개발중인 고속화차용 대차의 사양이다.

Table 1 대차 주요사양 비교

| 항목          | Y-25 type Welded Bogie    | Conical Rubber Spring Bogie             | Swing Motion Bogie  |
|-------------|---------------------------|---|---|
| 최고속도        | 120 km/h                  | 120 km/h                                | 120 km/h  |
| 프레임 구조      | 용접 일체구조                   | 용접 일체구조                                 | 4-piece 주강구조  |
| 고정축거        | 1,800 mm                  | 1,800 mm                                | 1,727 mm  |
| 차륜경         | 860 mm                    | 860 mm                                  | 860 mm  |
| 차축          | D축, KRS SFA60             | D축, KRS SFA60                           | E축, KRS SFA60 (시험용)   |
| 차륜          | KRS SSW1                  | KRS SSW1                                | KRS SSW1  |
| 중량          | 4.63 ton                  | 4.73 ton                                | 4.281 ton   |
| 현수장치        | 1차 : 코일스프링<br>2차 : 없음     | 1차 : Conical Rubber Spring<br>2차 : 없음   | 1차 : 없음<br>2차 : 코일스프링   |
| 센터 플레이트     | 구면형                       | 구면형                                     | 평면형   |
| 사이드 베어링     | 코일스프링+마모판                 | 탄성블록/롤러+마모판                             | 탄성블록+마모판  |
| Friction 장치 | 저널박스와 후레임 사이 페데스탈         | 마찰부 및 Seal 없음                           | 볼스터와 사이드후레임에 Friction Wedge   |
| 베어링         | AAR "D" Class 테이프 롤러 베어링  | AAR "D" Class 테이프 롤러 베어링                | AAR "E" Class 테이프 롤러 베어링  |
| 특징          | 축상부에 코일스프링 및 마찰감쇄기구의 현가장치 | 축상부에 코니컬형 고무스프링과 유압식 감쇄장치가 일체로 조합된 현가장치 | 스윙운동은 페데스탈과 Adapter 사이에서 일어나고, 양 Side Frame을 연결하고 있는 Transom이 Rocker Seat를 통해서 움직이므로 운동 |

### 3. 동특성 분석

이론해석을 하기 위해서는 대상 물리계를 수학적으로 모델링하는 과정과 이를 해석하는 두가지 단계가 필요하다. 이중에서도 모델링 과정은 매우 중요한 과정으로서 통상 이론해석의 성패를 좌우하게 된다. 해석모델은 대상계를 최대한 정확하게 표현하면서도 현실적으로 수치화가 가능하도록 단순화 되어야 하므로 서로 상반되는 이 두가지 목표를 어떻게 조화시키느냐가 모델링 작업의 애로사항이기도 하다.

최근 들어 철도차량운동 이론해석 분야에서 많은 연구가 진행되었으나 현재까지도 일반적으로 동용되는 해석 모델은 없으며 상황에 따라 다양한 형태의 모델을 수립하여 사용하고 있는 실정이다. 또 수립된 모델에 의한 해석결과를 실험결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증한 후에 이를 활용하는 것이 원칙이나 철도차량 모델의 경우에 이러한 시도는 많이 있었음에도 불구하고 그 결과는 대부분 만족스럽지 못했다.

철도차량의 이론해석은 설계의 초기단계에서부터 시험단계에 이르기까지, 또는 기존 철도차량 및 궤도의 보수유지 기준자료 등으로 활용될 수 있으며, 해석대상도 승차감, 안전성, 차륜 및 궤도의 마모와 파괴 등 다양하므로 해석목적과 대상에 따라 가장 적절한 모델을 선정해야 한다.

수립된 모델을 수학적으로 해석하는 방법은 크게 주파수 영역 해석과 시간 영역 해석, 그리고 준정적 해석 등으로 나눌 수 있다.

주파수 영역 해석은 주로 선형계의 해석에 적용되며 계의 주파수 응답특성과 안정성을 포함한 고유치 해석 등에 사용되며, 시간영역 해석은 선형, 비선형계 관계없이 적용이 가능하며 주로 시간적분법을 활용하여 계의 시간에 따른 응답특성을 계산하는 방법이다. 과거에는 계산시간이 길어 많이 사용되지 않았으나 최근 전산기술의 발달로 계산시간이 큰 문제가 없게 되자 가장 많이 사용되고 있는 계산방법이기도 하다.

준정적 방법은 곡선통과 성능을 계산할 때 주로 사용하는 방법으로 관성의 효과를 무시한 채 기하학적 구속조건만으로 계산하는 방법이다.

Fig. 1은 궤도의 입력데이터인데 해석에서는 Table 2와 같은 궤도의 정비기준대로 정비되었다고 가정하였다.

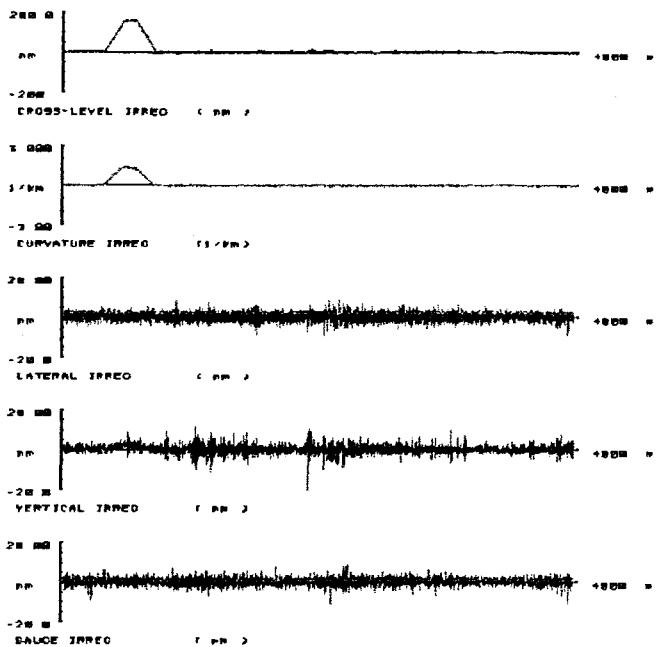


Fig. 1 경부선 Track Data Sample

Table 3 궤도의 정비기준

(단위 : mm)

| 구분  | 본 선                  | 측 선               |
|-----|----------------------|-------------------|
| 궤 간 | +10 ~ -2             | +10 ~ -2          |
| 수 평 | 7                    | 9                 |
| 면마춤 | 직선 레일길이 10m에 대하여 7mm | 레일길이 10m에 대하여 9mm |
|     | 곡선 레일길이 2m에 대하여 3mm  | 레일길이 2m에 대하여 4mm  |
| 줄마춤 | 레일길이 10m에 대하여 7mm    | 레일길이 10m에 대하여 9mm |

### 3.1 Swing Motion Bogie 모델링

Swing Motion Bogie를 적용한 고속 컨테이너화차의 국내 선로 주행시의 주행성능을 검토하기 위하여 구성된 모델의 특성으로서 대차 현가계는

- 1차현가계 : 축상베어링 어댑터, 페데스탈베어링
- 2차현가계 : 볼스터코일스프링, 프릭션블록

등을 기본으로 하였으며, 기존 Barber형 주강대차의 고속주행시의 불안정성, 횡방향 충격 및 차체 롤링안정도 감소 등의 문제점을 개선하기 위하여, Side Frame 사이에 하볼스터 역할을 하는 Transom을 적용하여 차체 기울임에 의한 윤증감소의 방지를 기하였다. 급번 해석과 시험에 사용한 SMB를 채용한 컨테이너 견용 평판차의 주요제원은 Table 3과 같고, 모델링에 사용한 구성요소는 Table 4와 같다.

Table 4 SMB 화차 주요제원

| 항 목          | 제 원  |
|--------------|--|
| 하 중          | 약 50 Ton   |
| 자 중          | 약 18.5 Ton   |
| 차체길이         | 12,500 mm  |
| 연결면간 길이      | 13,410 mm  |
| 대차 중심간 거리    | 8,700 mm   |
| 차체 무게중심높이    | 845 mm   |
| 연결기 높이       | 880 mm   |
| 차 체 폭        | 2,438 mm   |
| 차 륜 경        | Ø860 mm  |
| 차 축          | RCT D축   |
| 고정축거         | 1,728 mm   |
| Side Bearing | KRS 2240-2482  |
| 차륜담변형상       | 1/20   |
| 차체 물성치       | ○중량 : 9.2 Ton<br>○Ixx : 6.5 Mgm'<br>○Iyy : 178 Mgm'<br>○Izz : 183 Mgm' |
| 볼스터스프링 강성    | 5.84 MN/m  |

Table 5 SMB 모델링에 사용한 구성요소

| 구성요소  | 모 델  |
|---|--|
| 질량요소 (Mass)                                   | ○Body(#1)  |
|   | ○Front Bogie : Bolster(#2), Side-Frame(#3, #4) Transom(#5) |
|   | ○Rear Bogie : Bolster(#6), Side-Frame(#7, #8) Transom(#9)  |
|   | ○Wheelset(#10, #11, #12, #13)                              |
| 축상스프링   | Bush + Bumpstop element                                    |
| Side Frame - Bolster                          | Constraint element   |
| Side Frame - Transom                          | Bush element   |
| Bolster - Transom                             | Bumpstop element   |
| Bolster Spring Friction Spring Friction Wedge | Shear+Stiffness+Friction element                           |
| Side Bearing                                  | Bumpstop + Friction element                                |
| Center Pivot                                  | Bush element   |
| Wheel/Rail Contact                            | Non-linear   |

3.2 임계속도 해석

- 하중조건 : 공차
- 주행속도 : 35~40m/s 구간에서 1m/s단위로 해석
- 임계속도 : 38m/s(137km/h)대역으로 추정

3.3 주행성능 해석

- 하중조건 : 공차
- 해석구간 : 경부선 1km구간 sampling(425-426km)
- 주행속도 : 70~150km/h 구간에서 10km/h단위로 해석
- 분석 : 차체 좌우, 상하진동 data를 10Hz Filtering  
100m구간마다 p-p의 최대값을 구한 후 평균
- 차체 좌우진동은 140km/h 대역에서 기준치 초과
- 차체 상하진동은 130km/h 대역에서 기준치 초과

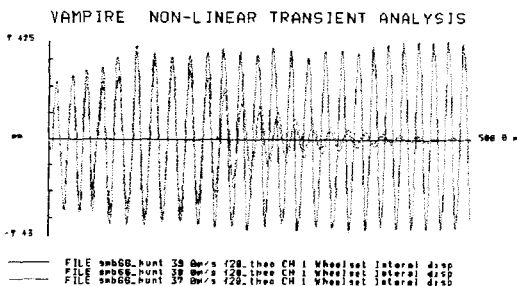


Fig. 2 임계속도 해석결과(윤축좌우변위)

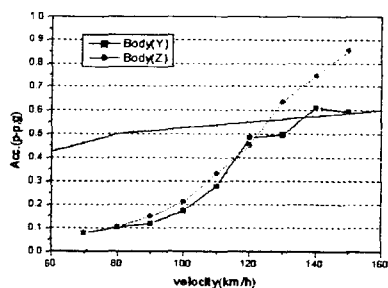


Fig. 3 차체 진동가속도 해석결과

#### 4. 주행성능시험

실제의 본선주행시험에서는 피로강도를 비롯한 여러 항목들을 시험하였지만 본 장에서는 해석 결과 검증을 위한 주행안전성시험과 진동가속도시험 등의 결과만을 기술하고자 한다.

##### 4.1 주행안전성 측정용 윤축가공 및 스트레인 게이지 부착위치 선정

Fig. 4는 주행안전성 측정을 위한 윤축 가공도면을 보여주고 있다. 리드선 인출을 위하여 좌우의 차륜이 대칭이 되도록 직경 20mm의 홀을 60°각도로 드릴 가공하였다.

차륜직경이 Ø860mm이므로 수직하중 검출용 게이지 부착위치는 Ø468mm 지점 부근일 것으로 예측하였으며, 정확한 위치의 결정은 Fig. 5와 같은 응력집중 게이지를 부착하여 수직하중과 수평하중 사이에 상호간섭은 적으면서도 출력감도는 큰 지점을 선택하였다.

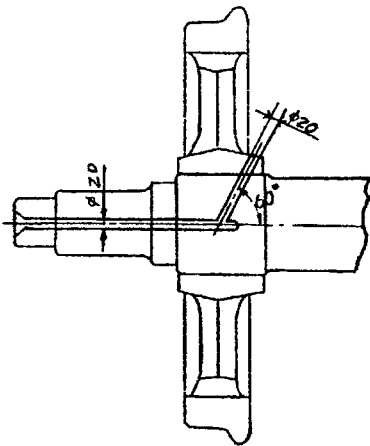


Fig. 4 윤축 가공도

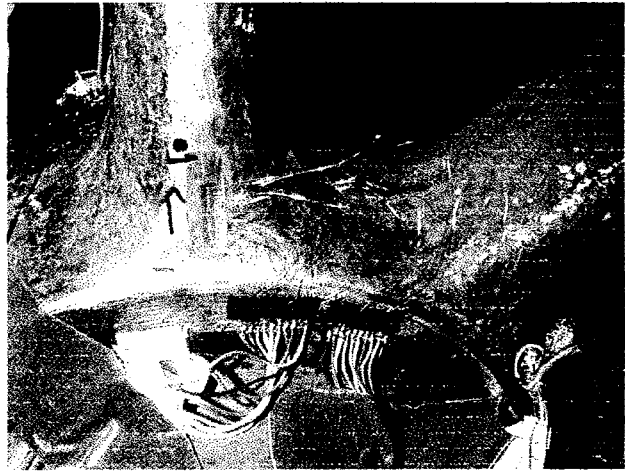


Fig. 5 수평하중용 응력집중게이지

#### 4.2 시험방법 및 기준

##### 4.2.1 주행안전성시험

- 1) 탈선계수(Q/P) : 수평방향 하중에 대한 수직방향 하중의 비
  - 기준 : 빈도누적확률로 나타내어 100%일 때 0.8, 0.1%일 때 1.1 이하
- 2) 윤중감소율( $\Delta P/P$ ) : 윤중 감소치에 대한 정적인 윤중의 비
  - 기준 : ① 정적 윤중감소 :  $\Delta P/P \leq 0.6$
  - ② 동적 윤중감소 : 빈도누적확률로 10%일 때 0.6, 0.1%일 때 0.8 이하
- 3) 횡압(Q) : 차륜 플랜지와 레일의 접촉에서 발생하는 횡방향 하중
  - 기준 : 탈선계수가 0.9를 넘지 않는 범위에서 횡압  $Q \leq 2.9+0.3P$

##### 4.2.2 진동가속도시험

- 1) 측정구간은 경부선에서 100km 이상으로 하였다.
- 2) 차체진동에서 고주파 진동을 제거하기 위한 필터는 10Hz로 하였다.
- 3) 진동측정데이터는 측정구간을 100m 단위로 나누어 이 구간 내에서 최대치의 전진폭(Peak to Peak)을 취하여 그 때의 속도를 읽고, 이를 5km/h 단위의 같은 속도별로 모아서 평균하였다.
  - ① 상하방향 진동가속도 : 0.55 g 이하
  - ② 좌우방향 진동가속도 : 0.4 g 이하

### 4.3 시험결과

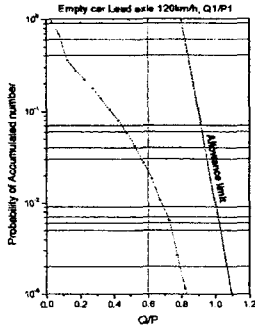


Fig. 6 공차 120km/h Q/P

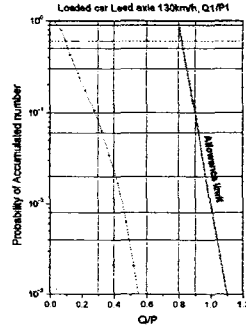


Fig. 7 영차 130km/h Q/P

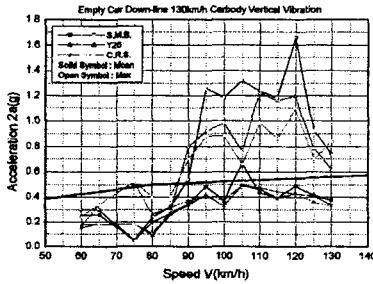


Fig. 8 공차 상하방향 진동가속도

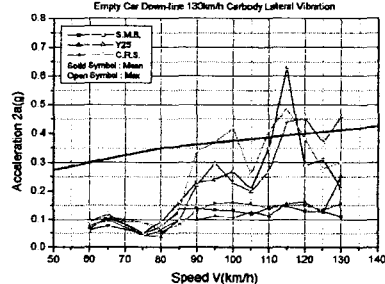


Fig. 9 공차 좌우방향 진동가속도

### 5. 결론

- 1) VAMPIRE를 이용한 동특성 분석으로서 차량의 임계속도 해석과 진동성능 해석을 수행한 결과는 현재 우리나라와 같은 선로조건에서 차량의 운행최고속도는 130km/h 미만인 것이 적당하다고 나타났다.
- 2) 주행안전성 관련항목으로서 130km/h까지의 탈선계수시험결과, 충분히 안전하였다.
- 3) 진동가속도를 Y25형 대차, Conical Rubber Spring Bogie 등과 비교해 볼 때 120km/h까지의 진동성능은 큰 차이가 없었으며, 130km/h 속도에서는 좌우방향 진동에서 Swing Motion Bogie가 상대적으로 우수한 성능을 발휘하였다.
- 4) 본 연구결과를 바탕으로 스프링상수 개선 등 문제점을 보완하고 대차최적설계가 이루어진다면 향후 우리나라에서도 150km/h 수준의 고속화차 개발이 가능할 것으로 판단된다.

### 6. 참고문헌

- 1) 철도기술연구소, 철도차량의 주행안전성 평가방법, 철도기술연구보 VOL23 NO1, pp. 198~204, 1989.
- 2) 함영삼 외, 화물수송용 철도차량 현가장치의 설계변수와 진동성능에 관한 연구, 대한기계학회 2001년도 춘계학술대회는논문집 B, pp. 507~512, 2001.6
- 3) "在來鐵道運轉速度向上 試驗 マニュアル.解説", 鐵道總合技術研究所, pp. 67~94, 平成 5年
- 4) "鐵道の ための 試驗法・計測法", 鐵道總合技術研究所, pp. 74~81, 昭和 5年
- 5) 日本機械學會編, 鐵道車輛のグイナミクス", (株)電氣車研究會, 1996