다물체 동역학해석을 이용한 DMT 화차의 주행특성 연구
Multibody Dynamic Simulation and Running characteristics of DMT Freight

엄범규* 현석** 안천헌*** 이희성****

Eom, Beom-Gyu Hyun, Seok An, Cheon-heon Lee, Hi Sung

ABSTRACT

The present investigate is a base investigate required in development of DMT wagon train. And it deduced that follows by developing trail analysis model about Modalohr wagon train and examining traveling movement specific using analysis model developed. Vibration acceleration of all direction was increased with addition of travel speed and first suspension. But in case of right and left vibration acceleration, that could influenced by nonlinear specific of first suspension. Therefore checking about those is needed. Frequency of 2~3 Hz and 7~8 Hz generated in Right and left, up, down vibration of vehicle. And right and left vibration of bogie generated 25~35 Hz in low speed section and frequency of 40~50 Hz in high speed section, 25~35 Hz in low speed section, 10~15 or 40~50 Hz in high speed section.

---

1. 서론

세계적으로는 철도중심의 화물운송체계의 구축에 대한 관심이 증가되면서, 각종 다양한 화물수송방식이 도입, 활용되고 있는 추세이다. 또한 물류의 중요성이 부각되고 있는 시점에서 여객뿐 만아니라, 화물에 대한 신속하고 안전한 수송의 요구가 증대되고 있다. 이에 유럽을 중심으로 화물의 신속한 수송을 위하여 다양한 형태의 고속화차 개발에 많은 투자를 기울이고 있다(1). 철도화물 수송시장의 장점은 환경친화적, 에너지 효율적 교통수단, 거리관련 변동비용이 상대적 저렴, 전통적으로 대량 bulk 화물의 장거리수송에 이점이 있다. 화물자동차운송이 도로의 정체로 인해 어려움이 가중되고 있어 철도화물수송이 수출입화물의 중요 운송수단이 되어야 함에도 불구하고, 철도화물수송은 화주가 철도로 대화물을 수송할 경우 철도본선운임 이외에도 집・배송비용과 상하차 작업료 등의 부대비용을 지불해야 하므로 화물자동차와 비교해 볼 때 철도수송을 불리하게 만드는 요인으로 작용하고 있어 철도물류 활성화를 위한 DMT(Dual Mode Trailer) 수송시스템 개발 연구가 시급한 상황이다. DMT 화차는 기존 화차에 비해 물동량을 늘릴 수 있어 경제성이 양호할 것으로 판단된다. 다만 각각 기존 화차에 다른 대차와 차체 구조로 되어 있으므로 진동이 크게 발생할 수 있다. 따라서 진동을 최소화하여 기존 화차 이상의 주행안전성을 가질 수 있다면 물동량 확보에 큰 문제점이 없을 것이다. 그러므로 국내외 고속화차를 개발 관련 자료를 검토하고, 새로운 DMT 화차 해석모델을 개발하여 주행동특성 해석을 한다면 복합운송화차 관련하여 국내에서도 독자적인 기술을 확보할 수 있다(2).

본 연구에서는 DMT 화차 중 유럽지역에서 신뢰성과 성능을 인정받아 상용화되고 있는 modalohr 화차의 다량편성 해석모델을 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하여 개발하고, 개발된 해석모델을 이용하여 modalohr 화차에 대한 동적해석을 통해 주행동특성을 검토하였다.

---

* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 정회원
E-mail : zoonbi@naver.com
TEL : (02)970-6877 FAX : (02)976-6877

** 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 한국철도공사

*** 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정, 서울메트로 인재개발원 교수

**** 서울산업대학교 철도전문대학원 교수

2. DMT 화차

2.1 국외 DMT 화차 현황

현재 선진국 철도물류수송시스템에 개발, 적용되고 있는 시스템으로는 그림1과 같이 Piggyback, Bimodal, 화차 회전형, 평행이적재형으로 구분된다. 주로 피기백 시스템, 바이모달 방식은 운영된 바가 있으나, 현재 그 효율성에 있어서는 그다지 좋은 평을 얻지 못하는 실정이다. 유럽에서는 화차회전형 이적재형 및 평행 이적재형 수송 시스템 등을 개발하여 Modalohr 시스템은 현재 상용화되고 있으며, 그 외 회전 및 평행 이적재 시스템은 시운전을 앞두고 있다(3).

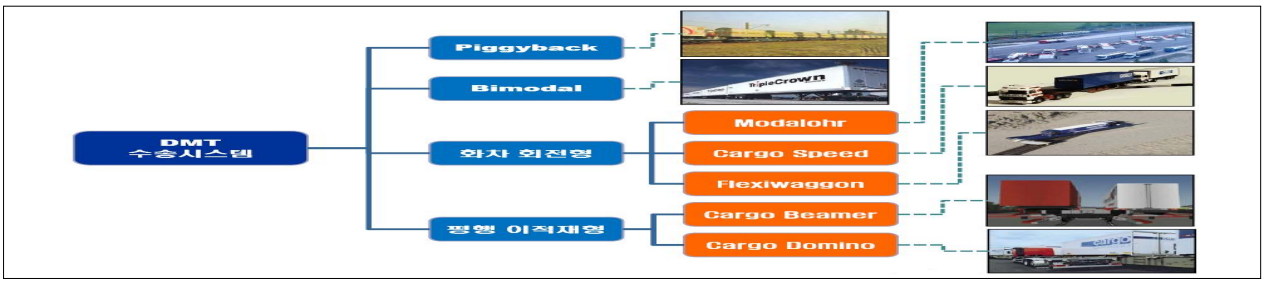


그림1. The kind of DMT transportation system

2.2 Piggyback 시스템

Piggyback 시스템은 도로수송용의 트레일러를 그대로 철도의 평장물차에 싣고 수송하는 것으로 자동차와 철도의 복합수송방식을 뜻하고, 자동차의 기동력과 철도의 대량안전수송을 결부시킴으로써, 차량한계가 큰 미국철도에서 처음으로 채택되었다. 화물열차의 대차 위에 트레일러나 트럭에 컨테이너를 함께 적재하여 운송하는 TOFC(Trailer on flat car)방식으로 컨테이너와 트레일러가 하나로 되어있어 터미널의 비용을 절감할 수 있는 이점이 있음. 그러나 총중량이 매우 크고, 공간의 소요가 엄청나게 많아지므로 오늘날의 철도터미널이나 항만여건상 적지 않은 어려움이 있다고 할 수 있다.

2.3 Bi-modal(Road railer) 시스템

Bi-modal은 철도의 약점인 door-to-door의 불완전을 해결하는 방법으로서, 철도에서는 선로 위로 달리고 도로에서는 바퀴를 이용하여 달릴 수 있는 양용방식의 수송시스템으로 미국에서 개발되었다. 이 시스템은 Piggyback과 달리 화차를 필요로 하지 않고 철도와 도로수송을 직접 연결할 수가 있으며, 철도터미널에 대형의 하역기계가 필요치 않는 등의 이점이 있고, 차체지지 장치의 개선으로 화물의 손상방지와 연료효율의 향상이 가능하다.

2.4 Flexi waggon 시스템(화차 회전형 I)

Modalohr와 유사한 화차의 일부분이 회전하여 트럭 자체를 이·적재하는 방식으로 화차는 앞부분의 대차와 가이드를 따라 분리되며, 뒷부분의 화차를 축으로 회전하도록 되어 있다. 회전된 화차에서 도로방향으로 가이드가 나와 화차를 지지하여 회전되며, 회전된 화차의 받침대가 아래 방향으로 돌출하여 화차전체를 지지하고, 화차에서 도어 개방 및 가이드가 내려와 트럭 진입 및 반출 중 한 가지를 수행한다.

2.5 Cargos Speed 시스템(화차 회전형 II)

Modalohr와 유사한 cargos speed의 요소는 화차와 내부 프레임인 Wellfloor, 그리고 회전을 위한 Pop-Up 장치로 구분되며, 화차 회전을 선로 내부 깊숙이 설치된 거대한 유압식 Pop-Up 장치를 이용하며, 대차와 화차 외부 프레임은 고정되어 있으나 내부 프레임은 분리되어 Pop-Up 장치와 결합 및 분리될 수 있는 구조이다.

2.6 Modalohr 시스템(화차 회전형 III)

트럭이 화차에 사선으로 진입한 후 트레일러는 분리되고, 화차 중앙부가 회전하여 장착되는 방식으로 현재 프랑스에서 상용으로 운행 중이며, 유럽 전역으로 확장 계획이 있다. 기계적 접합구조의 형태를 지니며 기존 시스템에 비해 보다 높은 신뢰성을 갖고 이송차량은 회전시스템이나 실린더가 불필요하며 아주 간단한 기계적 조립이 가능하며 또한 유지보수가 용이 하며 경제적이다.

2.7 Cargo Beamer 시스템(평행 이적재형 I)

터미널 도로에 평행으로 이동할 수 있는 bucket과 구동장치가 각각 설치되어 있고, 버킷에 트레일러가 진입하여 이적재한 후, 버킷은 수평으로 이동하여 선로까지 이동. 반출의 경우 반대의 순서로 구동한다.

2.8 Cargo Domino 시스템(평행 이적재형 II)

스왑 바디형식의 Cassette장치가 요구되며 이를 수평으로 이동시킬 수 있는 장치가 요구되고, 트레일러 샤시 및 화차에 모두 설치되어야 한다. 트럭은 화차 측면에 정차하게 되고 롤러형식의 컨베이어 장치 및 스왑바디형식의 장치가 요구되며, 적용을 위해서는 트레일러 구조 전체 변경 및 추가 장치 부착 등이 요구되고, 차량이 직접 탑재하지 않기 때문에 터널 및 운송한계에는 저촉되지 않는다.

3. 해석모델

3.1 차량모델

DMT 화차 중 그림2와 같은 Modalohr 차량을 대상으로 차량모델을 개발하였다. 차량모델은 차체, 대차, 연결기를 ADAMS/RAIL(4)에서 모델링하여 template를 생성하고, 이를 subsystem로 다시 생성 후 각각의 subsystem을 조합하여 2량의 DMT 차량모델을 개발하였다. 그림3은 본 연구에서 사용된 중간대차 형식의 차량모델로 차체, 대차, 중간대차, 연결기로 구성되어 있다.

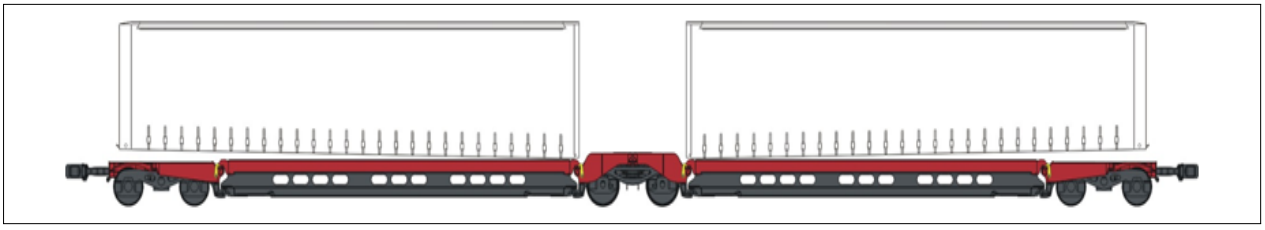
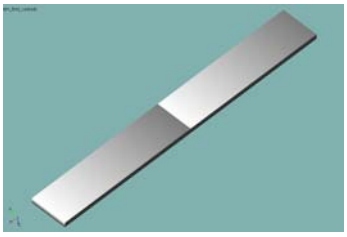
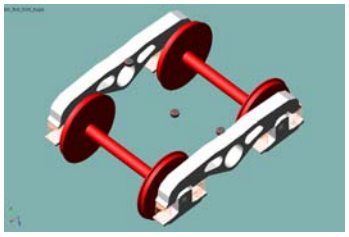


그림2. Double wagon of Modalohr

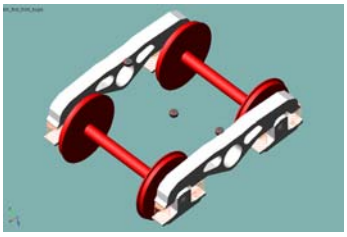
도표 1은 Modalohr 차량의 geometry and loading properties이다.



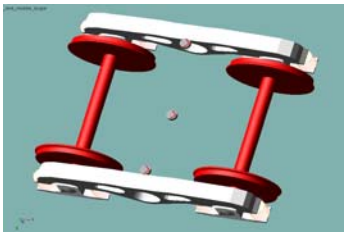
(a) Car-body



(b) Front and rear bogie



(b) Front and rear bogie



(c) Middle bogie

(d) Connecter

(e) Full assembly

그림3. Modalohr car model

도표 1. Geometry and loading properties

Item	Value	Unit	Note
Wheelset tape circle distance	1.5	m	
Rolling radius	0.42	m	
Bogie wheel base	1.8	m	
Bogie pivot spacing	15.7	m	
Secondary total preload	392,240	N	
Secondary side bear preload(x2)	19,282	N	
Secondary center bowl preload	353,676	N	
Primary suspension preload(tot)	103,625	N	
Primary suspension preload lad K	37,450	N	
Primary suspension preload tare K	14362	N	
Static axle load	220,390	N	
Static wheel load	110,195	N	

3.2 트랙과 차륜모델

트랙모델은 그림4와 같이 좌우, 상하 불규칙궤도 데이터를 사용하여 해석을 수행하였고, 차륜과 레일모델은 Modalohr 차량에 적용되고 있는 차륜답면 구배가 1/20과 UIC 60 레일을 그림5와 같이 모델링하여 해석에 사용하였다(5).

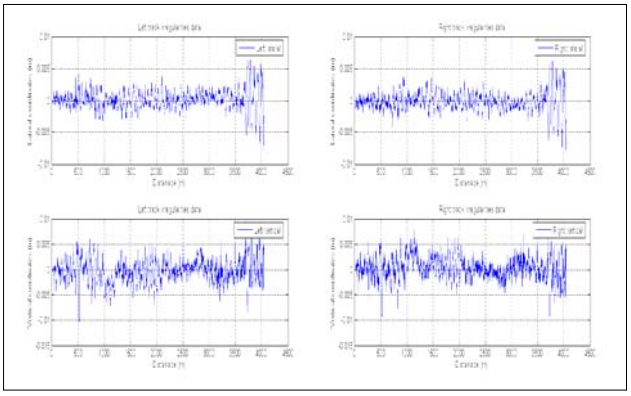


그림4. Wheel model

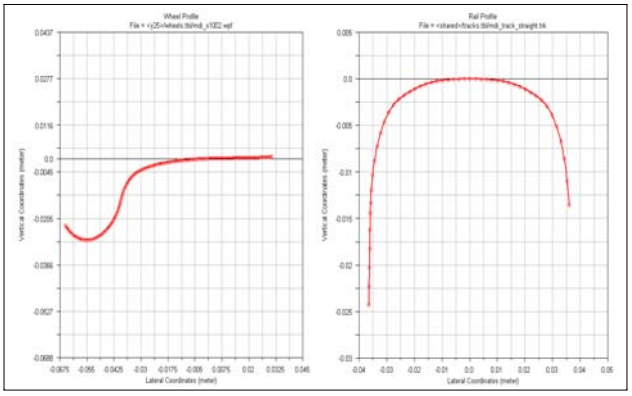


그림5. Fully Arranged PMC train

4. 해석결과

개발된 Modalohr 화차의 해석모델을 이용하여 차량설계변수 중 주행안정성 가장 큰 영향을 주는 1차 현가장치의 강성변화에 따른 해석모델의 주행동특성을 검토하였다.

4.1 해석조건

해석조건은 직선선로에서 도표 2와 같이 1차 현가장치의 강성과 주행속도를 변화시켜가면서 해석을 수행하였다.

도표 2. The condition of analysis

Variable	Value
Running speed(V)	50, 70, 90, 110 km/h
Primary suspension(K1)	-20, -10, 0, +10, + 20 %

4.2 해석결과

그림6과 그림7은 주행속도 50, 70, 90, 110 km/h로 직선선로를 주행하는 첫 번째 차량 차체의 좌우·상하진동가속도 RMS값을 나타내고 있다. 그림6과 그림7에서와 같이 주행속도와 1차 현가장치 강성이 증가함에 따라 차체의 좌우·상하진동가속도가 증가함을 확인할 수 있었다. 그러나 차체의 좌우진동가속도에서 주행속도 70 km/h에서 감소하였다가 주행속도가 증가함에 따라 차체의 좌우진동가속도가 증가하였다. 이는 1차 현가장치의 비선형 특성에 의해 발생하는 현상이라고 사료된다. 그림8과 그림9는 첫 번째 차량, 전대차의 좌우· 상하진동가속도 Rms값을 나타내고 있다. 그림8과 그림9에서와 같이 주행속도와 1차 현가장치 강성이 증가함에 따라 대차의 좌우·상하진동가속도가 증가함을 확인할 수 있었다. 그림10과 그림11은 주행속도와 1차 현가장치 강성변화에 따른 차체와 대차의 좌우·상하진동가속도에 대한 주파수분석 결과를 나타내고 있다. 그림10에서와 같이 차체의 좌우진동가속도의 경우, 모든 속도대역에서 2~3 Hz의 주파수 성분이 발생하였고, 차체의 상하진동가속도의 경우, 모든 속도대역에서 7~8 Hz의 주파수 성분이 발생함을 알 수 있었다. 그림11에서와 같이 대차의 좌우진동가속도의 경우, 저속대역에서 3~4 Hz, 25~35 Hz, 고속대역에서 3~4 Hz, 40~50 Hz의 주파수 성분이 발생하였고, 대차의 상하진동가속도의 경우, 저속대역에서 25~35 Hz, 고속대역에서 10~15 Hz, 40~50 Hz의 주파수 성분이 발생함을 알 수 있었다. 그림12는 주행속도와 1차 현가장치 강성의 변화에 따른 대차에 대한 차체의 좌우, 상하진동 감쇠비를 나타내고 있다. 그림12에서와 같이 주행속도가 증가함에 따라 대차에 대한 차체의 좌우, 상하진동 감쇠비는 감소함을 알 수 있었고, 모든 속도대역에서 1차 현가장치 강성값이 증가함에 따라 대차에 대한 차체의 좌우, 상하진동 감쇠비도 증가함을 알 수 있었다. 그림13은 주행속도와 1차 현가장치 강성의 변화에 따른 윤축에 대한 대차의 좌우, 상하진동 감쇠비를 나타내고 있다. 그림13에서와 같이 주행속도가 증가함에 따라 윤축에 대한 대차의 좌우, 상하진동 감쇠비는 감소함을 알 수 있었고, 모든 속도대역에서는 1차 현가장치 강성값이 증가함에 따라 윤축에 대한 대차의 좌우, 상하진동 감쇠비가 감소함을 알 수 있었다.

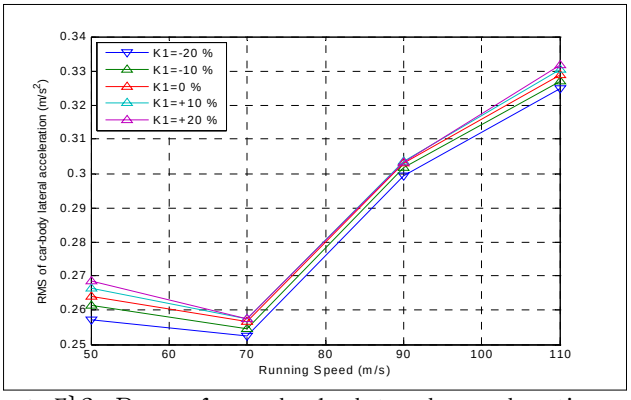


그림6. Rms of car-body lateral acceleration depending on primary suspension

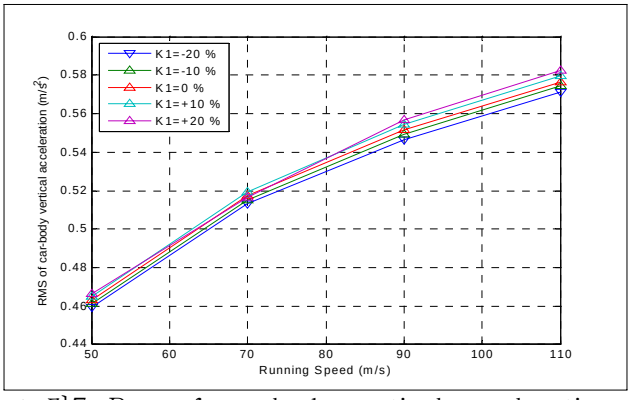


그림7. Rms of car-body vertical acceleration depending on primary suspension

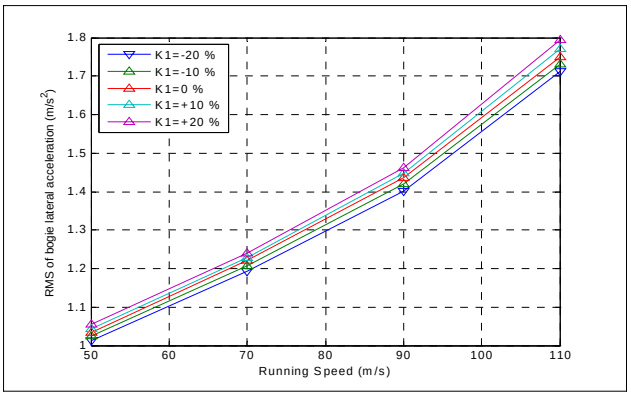


그림8. Rms of bogie lateral acceleration depending on primary suspension

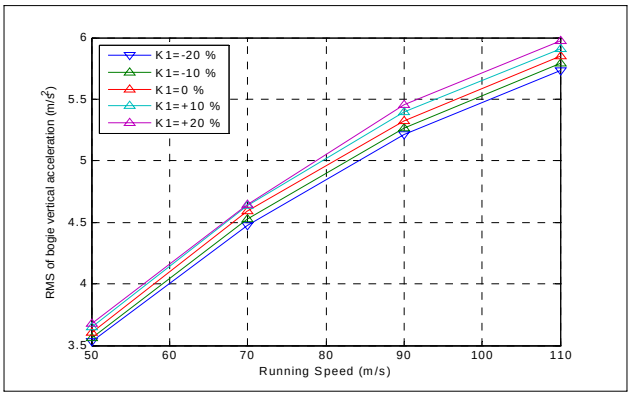


그림9. Rms of bogie vertical acceleration depending on primary suspension

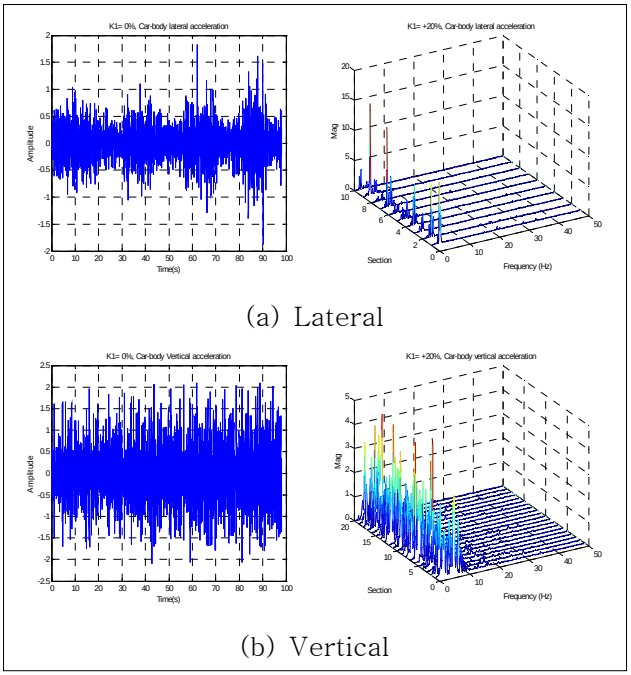


그림10. FFT of car-body lateral and vertical acceleration

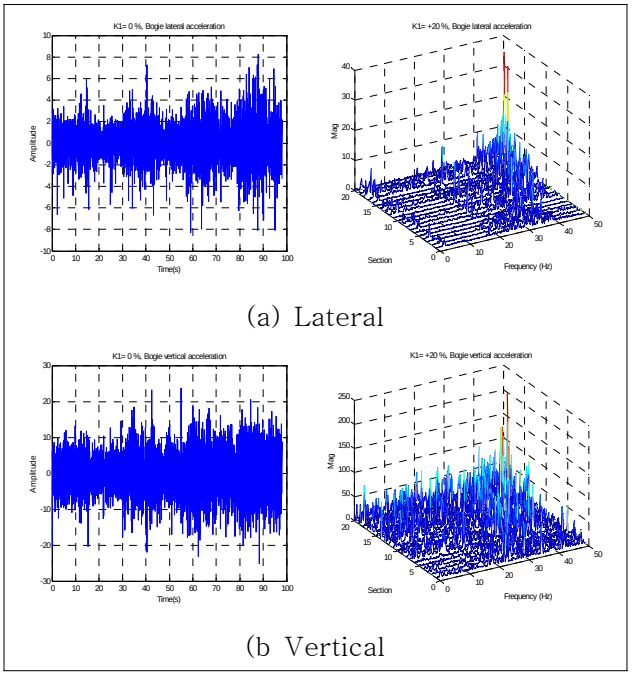


그림11. FFT of bogie lateral and vertical acceleration

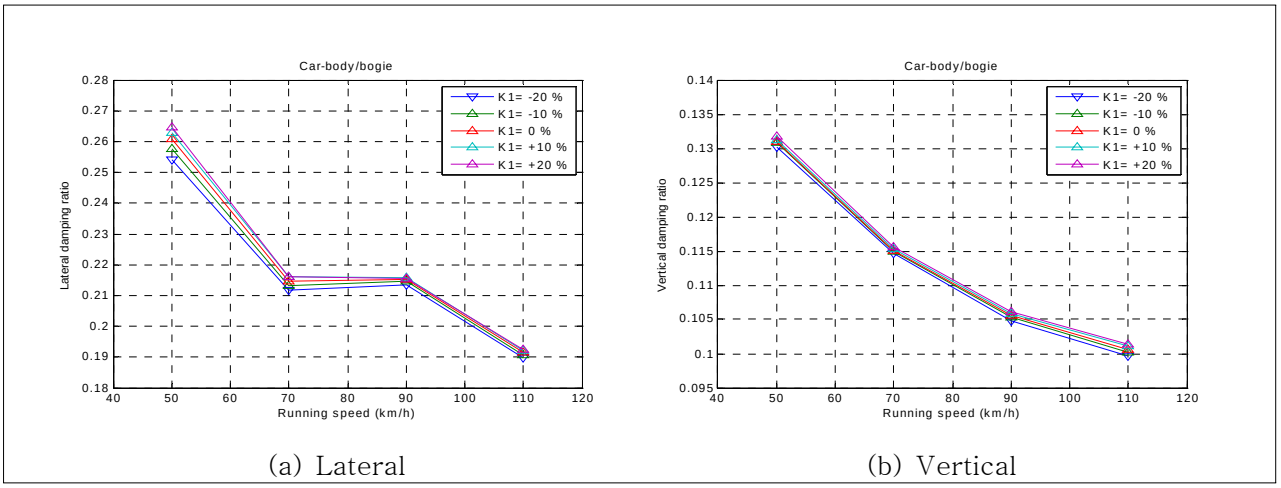


그림4. Fully Arranged PMC train

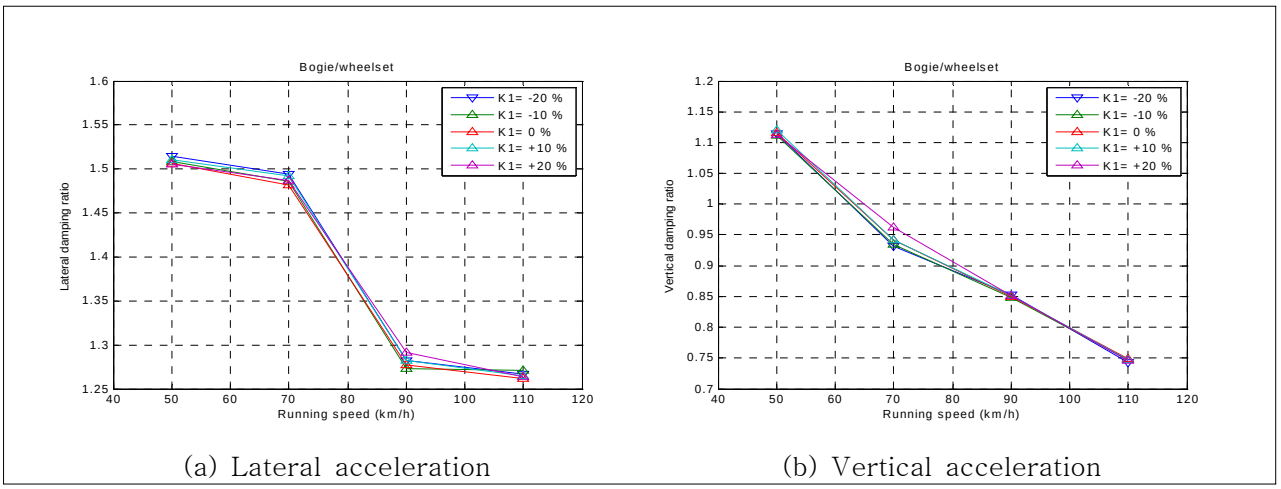


그림4. Fully Arranged PMC train

5. 결론

본 연구는 기존 화차에 비해 물동량을 늘릴 수 있어 경제성이 양호할 것으로 판단되는 DMT 화차 개발과정에 필요한 기초연구로 Modalohr 화차에 대한 다량편성 해석모델을 개발하고, 개발된 해석모델을 이용하여 주행동특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

주행속도와 1차 현가장치 강성이 증가함에 따라 차체와 대차의 좌우•상하진동가속도가 증가하였다. 그러나 차체의 좌우진동가속도의 경우, 1차 현가장치의 비선형 특성에 의해 영향을 받을 수 있어 이에 대한 검토가 필요하다.

차체의 좌우진동와 상하진동은 모든 속도대역에서 2～3 Hz와 7～8 Hz의 주파수 성분이 발생하였고, 대차의 좌우진동과 상하진동은 저속대역에서 25～35 Hz, 고속대역에서 40～50 Hz와 저속대역에서 25～35 Hz, 고속대역에서 10～15 Hz, 40～50 Hz의 주파수 성분이 발생하였다. 그러므로 차체와 대차 설계 시 이에 대한 공진설계가 반드시 고려되어야 한다.

참고문헌

1. Kim, H. E, Moon, D. S (2003), “A Primary Study on High Speed Intermodal Rail Freight Transportation, ” 2003 Symposium Spring of the Korean Society for Railway, pp.185～189.
2. Shin, S. K, Kim, S. W, Seo, S. I (2007), “DMT Transport System Analysis for Rail Logistics Efficiency,” 2003 Symposium Autumn of the Korean Society for Railway, pp.1668～1673.
3. Lee, S. H (2007), “DMT Transport System Analysis for Rail Logistics Revitalization,” Korea Railroad technology, Vol.11, No.12.
4. Vi grade (2008), "VI-Rail 2005r2.11.0 documentation."
5. Park, K. S, Lee, S. I, Lee, H. S (2007), "A Safety Assessment and Vibration Characteristics of Railway Vehicle Passing Curves," Transactions of the korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.17, No.10, pp.993～1001.