

실차 측정 정보를 이용한 군용 차량의 다물체 동역학 모델링 및 검증[§]

류치영* · 장진석* · 유완석** · 조진우** · 강이석***

* 부산대학교 기계공학부, ** 국방과학연구소, *** 충남대학교 기계설계공학과

Modeling and Verification of Multibody Dynamics Model of Military Vehicle Using Measured Data

Chi Young Ryu^{*}, Jin Seok Jang^{*}, Wan Suk Yoo^{*†}, Jin Woo Cho^{**} and E-Sok Kang^{***}

^{*} School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.,

^{**} Agency for Defense Development,

^{***} Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received March 10, 2014 ; Revised July 21, 2014 ; Accepted August 1, 2014)

Key Words: Vehicle Model(차량 모델), Bump Test(범프 시험), ADAMS(아담스), Leaf Spring(겹판 스프링)

초록: 군용 차량의 경우 야지 주행에 대한 성능 시험이 필수적인데 실차 시험의 경우 비용과 시간에 의한 제약을 받게 되므로, 시뮬레이션을 통한 성능 분석이 효율적이다. 본 연구에서는 상용 다물체 해석 프로그램인 MSC.ADAMS 를 이용하여 차량 모델을 개발한다. 타이어 수직 강성 시험을 수행하고 FTire 모델에 반영하여 타이어 모델을 생성한다. 댐퍼의 경우 비선형 특성 시험을 통해 얻은 결과를 반영하여 댐퍼를 모델링 하였으며, 겹판 스프링은 빔 요소 모델로 차량 모델을 구성한다. 단순 장애물 통과 시험 및 파형로 통과 시험을 수행하고 가속도 응답 및 휠 하중 응답 분석을 통해 차량 모델의 신뢰성을 검증하였다.

Abstract: It is essential to perform driving performance tests of military vehicles on rough terrain. A full car test is limited by cost and time constraints, because of which a dynamic analysis via computer simulation is preferred. In this study, a vehicle model is developed using MSC.ADAMS, a commercial multibody analysis program, and compared via experiments . FTire is modeled using the results of a tire performance test to obtain the vertical stiffness. A nonlinear damper is modeled by a characteristic experiment. Leaf springs are modeled with beam force elements and consisted to a vehicle model . The vertical force and acceleration response of the wheel are identified when vehicle is passing over a simple bump as well as a sinusoidal road. The developed vehicle model is verified with the results of a full car test.

1. 서 론

군용 차량의 경우 일반적인 도로뿐만 아니라 야지를 주행하게 된다. 야지를 주행 하는 경우가 잦은 군용 차량의 경우 야지 주행에 대한 성능 시험 및 내구 시험이 중요한데, 내구 주행 시험은 비용과 시간으로 인해 제약을 받으므로, 시뮬레이션을 통해 차량의 성능을 분석할 수 있다면 비용과 시

간을 줄일 수 있다.⁽¹⁾ 가상주행시험을 통해 차량의 성능을 분석하기 위해서는 신뢰성 있는 차량의 동역학 모델 확보와 시험로에 대한 측정 및 시뮬레이션에 활용할 수 있는 가상 노면이 필요하다.

군용차량의 동역학 모델 개발을 위해 상용 동역학 해석 프로그램인 MSC.ADAMS 를 이용하여 군용 차량의 동역학 모델을 개발하였다. 타이어와 비선형 댐퍼 등에 대하여 부품특성 시험을 통해 타이어의 강성을 계측하여 FTire 모델을 개발하였으며, 노면의 물성 정보와 기하학적 형상을 반영하여 겹판 스프링 모델은 ‘Leaf spring Editor’를 이용하여 개발하였다. 또한, 모델링에 필요한 정보는 휠 하중 계측 등의 실차 시험을 통해 질량정보를

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 동역학 및 제어부분 춘계학술대회(2014. 4. 16.-18., KAIST KI 빌딩) 발표논문임

† Corresponding Author, wsyoo@pusan.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

확보하였다.

실차량에 WFT(Wheel Force Transducer) 장비를 이용하여 휠의 하중을 계측하고 가속도 센서, 속도 센서 등을 이용하여 가속도 응답 및 차량의 주행 속도를 각각 계측하였다. 이들 데이터와 개발된 모델의 시뮬레이션 결과를 비교하여 그 신뢰도를 검증하였다. 시험 및 시뮬레이션에 사용된 장애물은 단일 장애물(Bump)과 파형로이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2 장에서는 단품 특성 시험을 반영한 차량 모델링을 설명하고, 3 장에서는 주행 시험과 시뮬레이션 결과를 비교 및 분석을 통해 차량 모델의 신뢰성을 확인하였으며, 결론을 4 장에 나타내었다.

2. 차량 모델링

본 연구에 사용된 차량은 5/4 톤 군용 차량으로 ADAMS 를 이용하여 가상차량을 강제 모델로 모델링 하였다. 가상차량 모델은 도면 자료를 기반으로 하드포인트 및 구속조건을 결정하였다. 조향장치는 조향 휠의 움직임 및 조향비에 따라 드래그 링크 및 타이로드의 움직임에 의해 조향을 발생하게 된다. 현가 장치의 경우 전륜 및 후륜에 접판 스프링 및 비선형 댐퍼로 구성되어 있다.⁽²⁾

대상 차량의 질량 정보는 WFT 장비를 이용하여 계측되는 작용력 및 계근장치를 이용하여 측정하였다. 측정된 값을 이용하여 질량 정보를 확인하고 질량 중심점을 구하여 가상 모델에 반영하였다. Table 1 에 차량의 기본 제원 정보를 나타내었다.

2.1 타이어 모델

타이어 모델의 경우 실제 노면 접촉 특성을 가지는 FTire(Flexible ring Tire model) 모델을 사용하여 해석 모델을 모델링 하였다. FTire 모델은 100Hz 까지의 영역에서 높은 효율성을 가지고 있으며, 3 차원 노면 특성 및 횡 방향 변형 특성을 반영 가능한 타이어 모델이다.⁽³⁾

기본적인 타이어 형상정보를 바탕으로 단품 시

험 데이터를 적용하여 시뮬레이션 모델에 적용하는 타이어 모델을 생성하였다. FTire 를 생성하기 위해서는 기하학적 정보 뿐만 아니라 동강성 측정 시험, 조향에 따른 응답계측 시험, 장애물형상에 대한 통과시험 등 다양한 시험이 요구된다. 하지만 군용 차량의 경우 Truck Tire 로 크기가 기존 타이어 시험장비에 장착 및 시험을 수행하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Cosin 사에서 제공하는 Reference Tire 중 Truck Sample 을 이용하여 기본적인 계수값을 사용하였다. 형상정보는 도면으로부터 입력하였으며, 수직강성을 측정하여 FTire 모델 생성 과정중 Cosin/Fit 을 활용하는 방법을 이용하여 적용하였다.^(4,5)

수직 강성을 측정하기 위해 편평한 노면 위에서 타이어에 하중을 가하고, 변위를 측정하였으며 시험에 사용된 타이어의 공기압은 55psi 로 설정하였다. 측정된 하중에 대한 변위 그래프는 Fig. 1 에 나타내었다. Fig. 2 는 FTire 모델을 이용한 수직 변형 시뮬레이션 결과와 시험 결과를 비교한 그래프이다. 푸른색 삼각형선이 시뮬레이션을 수행한 결과이고, 붉은색 별선으로 나타난 선이 시험 결과이다. FTire 모델이 실제 시험 특성을 반영한다고 할 수 있다.

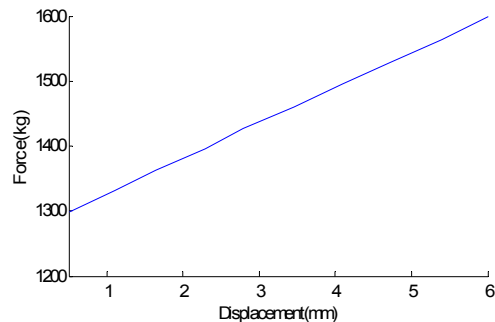


Fig. 1 Displacement-force diagram

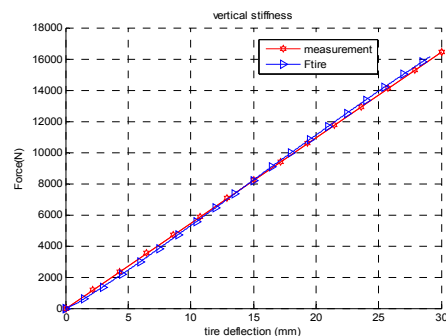


Fig. 2 Comparison simulation & experiment result (Displacement-force)

Table 1 Vehicle specification

Classification	Value
Weight	4350 kg
Length	5460 mm
Width	2180 mm
Height	2450 mm
Wheelbase	3200 mm

2.2 겹판 스프링 모델

차량의 현가장치는 판 스프링으로 이루어져 있다. 판 스프링은 승차감이 중요시 되지 않는 트럭에 주로 사용되며, 구조가 간단하고 설치높이가 낮은 장점이 있다. 판 사이의 마찰에 의하여 진동을 억제하는 작용을 하지만, 마찰로 인해 작은 진동의 흡수가 곤란하다.

전륜 및 후륜에 사용된 판 스프링은 언더 슬링 타입과 오버 슬링 타입이 각각 적용되어 있다. 언더 슬링 타입의 경우 판 스프링이 차축 보다 아래에 존재하며, 오버 슬링 타입의 경우는 차축 윗쪽에 판 스프링이 존재한다.

판 스프링은 MSC. ADAMS 의 Leaf Spring Editor 를 이용하여 빔 요소 모델로 생성한다. ADAMS 에서 제공하는 Leaf Spring Editor 를 사용하는 경우 판 스프링의 기하 정보와 물성 정보, 클립과 부싱의 체결 상태 정보를 이용하여 신뢰성 있는 판스프링 모델을 생성할 수 있다. 이렇게 생성된 빔 요소 모델은 각 요소들이 힘 벡터와 충격함수를 이용하여 모델링 되므로, 자유도가 높고 판간 마찰 등의 물리적 특성을 표현할 수 있다. Fig. 3 과 같이 판 스프링의 기하학적 정보등을 입력하여 전륜 및 후륜 판 스프링을 모델링 하였다. 생성된 판스프링 모델은 부싱을 이용하여 샤시 및 샤킴, 각각의 차축에 연결되어 있다. 차량 모델의 경우 전륜 판스프링은 전방 연결부에 샤킴이 연결되어 있으며, 후륜의 경우 후방 연결부에 샤킴이 연결되어 있다. 샤킴은 샤시와 판스프링 사이에 연결되어 있으며, 판스프링이 변형하는 경우 샤킴이 회전운동을 하게 된다.

겹판 스프링의 이론적인 전개법 또는 판단법을 이용하여 판 스프링의 수직 강성값을 계산할 수 있다. 전개법을 이용하여 구한 대상 차량 모델의 전륜 및 후륜 판 스프링의 수직 강성값을 Table 2 에 나타내었다.⁽⁶⁾

Leaf spring editor 를 이용하여 생성된 판스프링 모델의 하중-변위 선도를 구하면 Fig. 4 와 같이 나타 낼 수 있다. 전개법을 이용하여 구한 이론적인 수직 강성값은 겹판 스프링의 대변위에 따른 특성, 또는 이력 특성을 나타내지 못하지만, leaf spring editor 를 사용하여 생성된 모델은 이러한 특성을 반영할 수 있다.^(7,8)

Table 2 Stiffness of leaf spring

Classification	Stiffness
Front	115.7 N/mm
Rear	136.3 N/mm

2.3 댐퍼 모델

현가 장치를 구성하고 있는 댐퍼는 비선형 특성을 가지고 있다. 비선형 댐퍼 특성 곡선 및 감쇠력을 확인하기 위하여, Fig. 5 에 나타난 MTS 장비

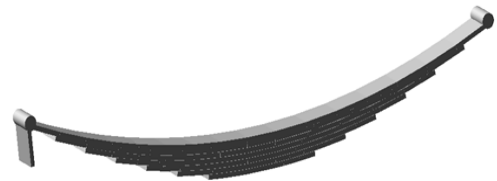
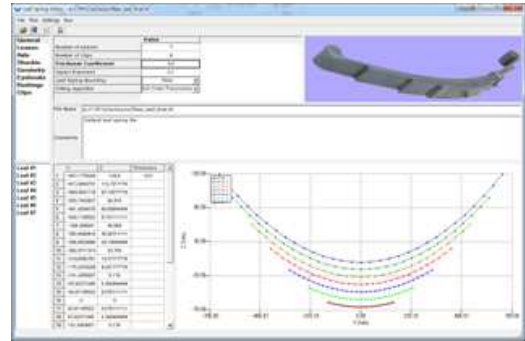


Fig. 3 Leaf spring editor & leaf spring model

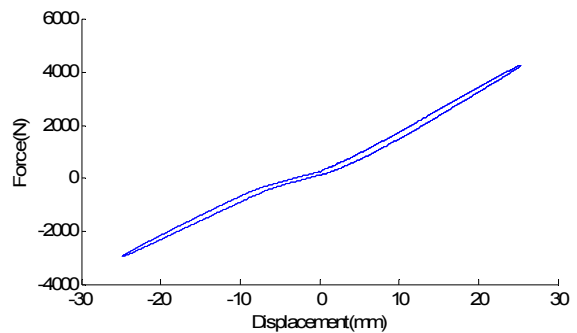
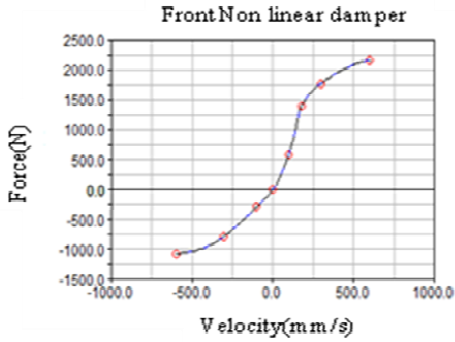


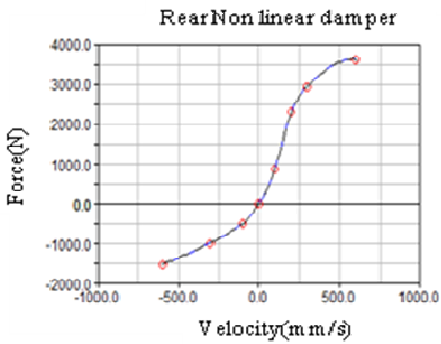
Fig. 4 Displacement-force diagram of leaf spring model



Fig. 5 Characteristic curve of non-linear damper



(a) Characteristic curve of front non-linear damper



(b) Characteristic curve of rear non-linear damper

Fig. 6 Characteristic curve of non-linear damper

를 이용해 변위 제어를 통해 하중 및 속도를 측정하기 위한 단품 시험을 수행하였다. 댐퍼의 비선형 특성을 반영하기 위하여 Fig. 6 과 같은 특성 곡선을 생성하고 가상 차량 모델에 적용하였다.

3. 시험 및 분석

가상 차량 모델을 검증하기 위해 단순 장애물 통과 시험 및 파형로 통과 시험을 수행하였다. 실차 시험에서는 차량에 가속도 센서와 휠 하중 센서(WFT), GPS 장비를 이용하여 휠 하중, 가속도 응답 및 차량의 속도 정보를 획득하였다. 실차 시험을 통해 측정된 결과와 시뮬레이션 수행 결과를 분석하여 차량 모델을 수정 및 검증하였다.

3.1 시험 장비 및 시험 조건

시험에 사용된 차량은 및 장애물 통과시험 사진은 Fig. 7 에 나타내었으며, 각 휠에 6 축 휠 하중 센서를 장착하고 타이어 작용력을 계측하였다. 가속도 센서를 이용하여 질량 중심점의 가속도 응답을 측정하였다.

단일 장애물 통과 시험에 사용된 장애물은 일반 도로에서 많이 사용되는 장애물인 범프를 사용하였다. 범프의 제원은 높이 75mm, 폭 1000 mm 의



Fig. 7 Vehicle for experiment



Fig. 8 Wheel force transducer & bump

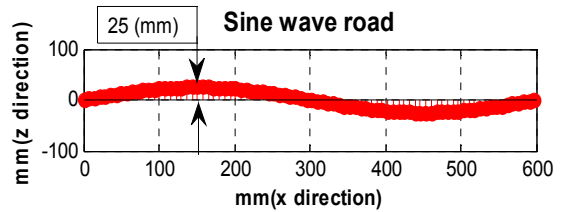


Fig. 9 Shape of sine wave road

원형 형상을 가지며 도로 폭에 맞게 설치하였다. 파형로 통과 시험은 진폭 25mm, 주기 600mm 형상을 가지는 시험로를 통과하였으며, 노면에 의해서 발생하는 일정한 가진에 대한 차량의 응답 특성을 확인하기 위해 시험을 수행하였다.

단일 장애물 통과 시험 및 파형로 시험에 대하여 차량은 10km/h 의 기준 속도로 수행하였다. 차량의 속도가 빠를 경우에 발생할 수 있는 충격에 의한 영향이 나타나지 않고, 장애물을 통과하면서 발생하는 차량의 응답 특성만이 나타나도록 주행 속도를 결정하였다. Fig. 8 에는 차량에 장착된 WFT 장비 및 시험에 사용된 장애물을 나타내었으며, 파형로의 1 주기의 단면 형상은 Fig. 9 에 나타내었다.

3.2 시험 결과

가상 모델의 검증을 위해 먼저 단순 장애물 통과 시험을 수행하였다. Fig. 10~11 에는 샤시 질량 중심점의 가속도 응답 및 FFT 결과를 나타내었으며, Fig. 12 에는 전륜 및 후륜의 휠 하중 응답을

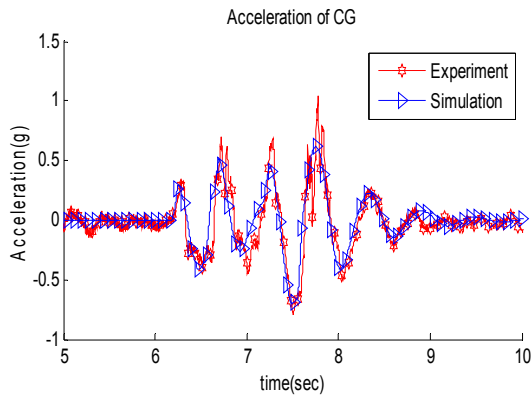


Fig. 10 Acceleration of center of gravity

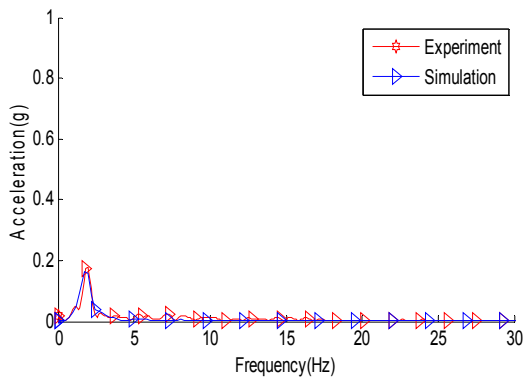
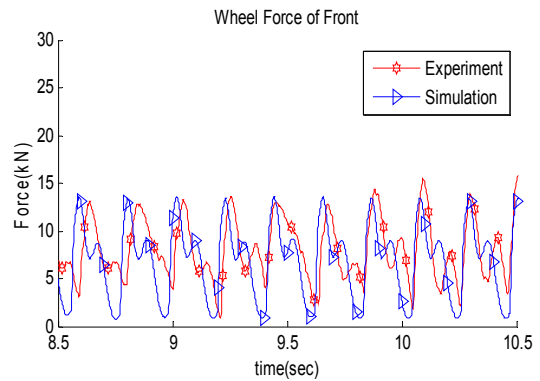
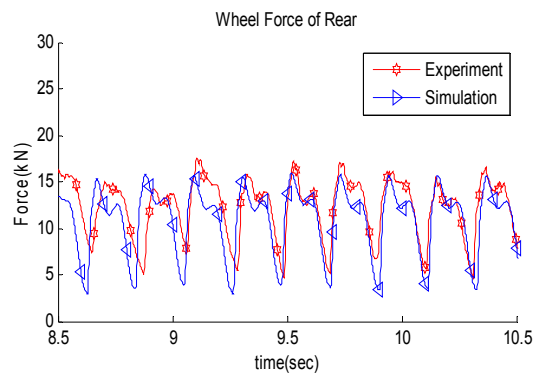


Fig. 11 FFT result of acceleration of center of gravity

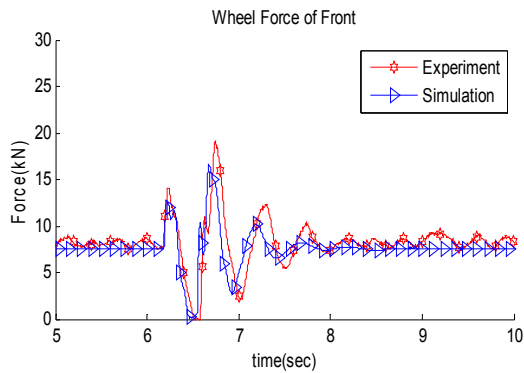


(a) Front wheel (z-direction)

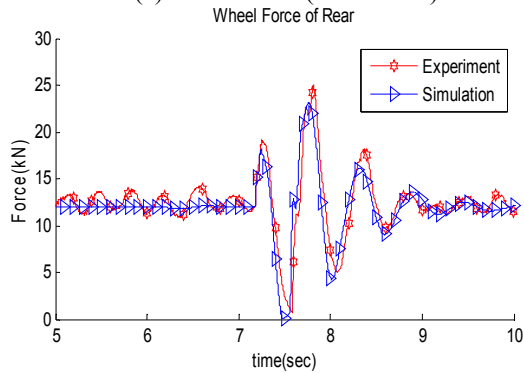


(b) Rear wheel (z-direction)

Fig. 13 Wheel force (z-direction)



(a) Front wheel (z-direction)



(b) Rear wheel (z-direction)

Fig. 12 Wheel force (z-direction)

나타내었다. 붉은 실선은 시험 결과를 나타내며, 파란색 선은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 먼저 샷시의 수직 가속도 응답을 비교해보면 약 6.3초 지점에서 응답이 발생하기 시작하는 것을 확인할 수 있으며, 피크 응답의 크기가 유사하게 나오는 것을 확인할 수 있다.

FFT 결과를 보면 약 2Hz 에서 피크가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 시험과 시뮬레이션 결과의 주기 응답은 비슷하다고 말할 수 있다. 휠 하중의 응답의 경우 전륜과 후륜은 각각 약 6.3 초와 약 7.3 초에 장애물을 통과하는 것을 확인할 수 있으며, 휠 하중의 피크 응답 크기 및 주기는 시험 결과와 유사하다고 말할 수 있다.

과형로 시험을 수행하고 전륜에 작용하는 휠 하중과 후륜에 작용하는 휠 하중을 시뮬레이션 결과와 비교한 결과를 Fig. 13 에 나타내었다. 휠 하중 응답의 시험 결과를 보면 하중이 일정한 현상을 나타내지 않는데, 과형로 구간을 통과할 때 차속을 일정하게 유지하지 못하므로 발생하는 현상이라 생각된다. 과형로 통과 시험에서 측정된 실제 주행 속도는 약 10.5km/h 였으며, 이 때 노면에 의해 차체에 가해지는 가진 주파수는 약 4.9 Hz 이

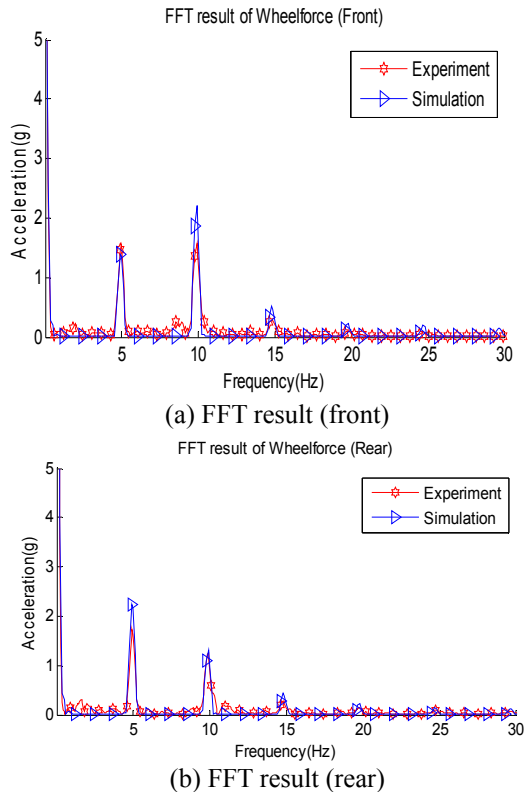


Fig. 14 FFT result of wheel force

다. 전륜 및 후륜 휠 하중응답에 대한 FFT 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 시험과 시뮬레이션 결과에서 피크응답이 발생하는 주파수는 거의 같다고 말할 수 있으며, 약 4.9Hz의 가진을 가지는 노면에 의한 주파수 응답 특성이 나타남을 확인할 수 있다. 과형로에 대한 시험 및 시뮬레이션 응답을 분석하면 휠 하중 응답의 경우 노면에 대한 차량의 실제 응답 특성을 유사하게 나타낸다.

4. 결론

군용 차량의 가상 시뮬레이션을 통한 차량의 성능 분석을 위해 상용 다물체 동역학 해석 소프트웨어인 MSC.ADAMS 를 이용하여 차량을 모델링 하였으며, 차량의 타이어, 서스펜션 등의 특성을 단품 시험을 통해 차량 모델에 반영하였다. 특히 타이어 모델의 경우 형상 정보와 수직 강성 시험을 통해 얻은 결과를 이용하여 생성한 Ftire 모델을 적용하였다. 차량 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 단순 장애물 통과 시험 및 과형로 통과 시험을 수행하여 가속도 응답 및 휠 하중 응답을 계측하였다. 단순 장애물 통과 시험을 통해 저주파 영역에서의 시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 차량 모델을 수정하였으며, 과형로 통과 시험

을 통해 상대적인 고주파에 대한 응답에 대해서 휠 하중 응답 결과를 비교하여 가상 차량 모델의 신뢰성을 검증하였다. 일반적으로 가상 시뮬레이션을 통해 차량의 내구성을 예측하기 위해서는 차량에 WFT 를 부착하고 내구 시험로를 주행하여 하중이력을 측정하고, 이렇게 측정된 하중 이력을 가상 차량 모델의 휠에 부여하여 부품내구해석을 수행해왔다.

본 연구를 통해 실차 측정 정보를 이용한 군용 차량의 다물체 동역학 모델의 타당함을 검증하였다. 이처럼 형상 정보 및 시험 결과를 반영하여 생성한 Ftire 를 적용한 차량 모델을 활용한다면, 다양한 장애물 통과에 대하여 가상 주행 시뮬레이션을 통해 보다 신뢰도 높은 하중 이력을 확보할 수 있다. 추후 야지주행 등 다양한 주행로에 대하여 시험 대신 시뮬레이션을 활용한 분석을 통해 시험비용을 절감할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Cho, B., K. and Ha, J., H., 2013, "Analysis of Durability of Vehicle Chassis Part in Virtual Test Lab," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 6, pp. 747~752.
- (2) Lee, C., H., Lee, D., W., Lee, Y., S., Sohn, J., H., Kim, K., S. and Yoo, W., S., 2013, "Steering System Design of Commercial Vehicle for Improving Pulling Phenominon During Braking," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 3, pp. 379~385.
- (3) Jang, J. S., Yoon, C. G., Ryu, C. Y., Kim, K. S. and Yoo, W. S., 2013, "Study on Dynamics Response of the Tire Model According to the Road Types," *Conference Proceedings, KSAE*, pp. 84~85
- (4) 2010, FTire Documentation and User's Guide, COSIN Scientific Software. Gipsper, Hofmann, GERMANY.
- (5) Gipsper, M., Hofer, R., Lugner, P. 1997, "Dynamical Tire Forces Response to Road Unevennesses," In *Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis. Supplement to Vehicle System Dynamics*, Swets&Zeitlinger Lisse, Vol. 27.
- (6) Kim, K., S., Lee, J., W. and Yoo, W., S., 1999, "Modeling Technique of a Leaf Spring as Force Element in Vehicle Dynamic Analysis," *Transactions of KSAE*, Vol. 7, No. 1, pp. 181~191.

- (7) Moon, I., D., and Oh, J., Y., 2005, "Comparison of Vibration Characteristics of a Multi-leaf Spring and a Papered Leaf Spring of a Heavy Truck," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 29, No. 2, pp. 270~276.
- (8) Park, T., W., Yim, H., J., Lee, G., H., Park, C., J. and Jeong, I., H., 1998, "Development of a Leaf Spring Modeling Method for Dynamic Analysis of a Mini-Bus," *Transactions of KSAE*, Vol. 6, No. 6, pp. 1~6
- (9) Choi, S., H., Park, S., J., Lee, J., H., Yoo, W., S. and Sohn, J., H., 2010, "Matching Simulations with Tests of Cruise Bus Using Multi-body Dynamics Technology," *Transactions of KSAE*, Vol. 18, No. 6, pp. 14~22.