

3축 로드 시뮬레이터의 구조 및 동적 해석

황 성 호^{*1)} · 김 화 진²⁾ · 박 창 수²⁾ · 최 경 략³⁾

성균관대학교 기계공학부^{*1)} · (주)윤영²⁾ · 한국생산기술연구원³⁾

Structural and Dynamic Analysis of Three-Axis Road Simulator

Sung-Ho Hwang^{*1)} · Hwa-Jin Kim²⁾ · Chang-Soo Park²⁾ · Gyeong-Rak Choi³⁾

^{*1)}School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan University, Gyeonggi-do 440-746, Korea

²⁾Yoonyoung Engineering Department, Yongin P.O. Box 25-4, Gyeonggi-do 449-860, Korea

³⁾Manufacturing System Research Center, Korea Institute of Industrial Technology, Cheonan, Chungnam 330-825, Korea

(Received 9 December 2002 / Accepted 24 July 2003)

Abstract : The three-axis road simulator is the test equipment which can simulate the standardized road conditions for the durability evaluation of automotive components such as suspensions. The road load data are collected and acquired from a vehicle test, and then these data are used to simulate road load conditions by the road simulator which consists of hydraulic actuators, link mechanism and servo controller. The link mechanism must be designed in consideration of the dynamic effect and interference during three axes motions in order to generate accurate motions. In this paper, the structural and kinematic analysis of the link mechanism is performed, and these results can be used for developing the three-axis road simulator. The three-axis road simulator provides considerable savings in cost, development time, and testing risk during developing automotive components.

Key words : Road simulator(로드 시뮬레이터), Road load data(노면부하 데이터), Durability test(신뢰성시험), Structural analysis(구조해석), Modal analysis(진동모드해석), Dynamic analysis(동적해석)

1. 서론

새로운 자동차나 부품을 개발, 상용화하는데 있어 중요한 요소인 내구 안정성에 대한 검증은 많은 경우 실제 프로토타입의 차량을 제작한 후 내구 도로의 주행 시험을 통하여 이루어지고 있다. 일반적으로 새로운 차량의 개발을 위하여 30~50대 정도의 실차 시험을 수행하고 있으며 시험기간 또한 20개월 정도로, 차량 개발 프로세스 중 가장 중요한 부분을 차지한다. 이러한 방법은 많은 비용과 개발 기간을 필요로 함에도 불구하고, 제품의 안정성 보장을

위하여 반드시 필요한 개발 절차이다.

본 논문에서 연구 대상으로 하고 있는 3축 제어용 로드 시뮬레이터(road simulator)는 실차 내구 시험을 실험실에서 똑같이 재현함으로써 실제 실차 내구 시험에 들어가는 비용과 개발 기간을 획기적으로 줄일 수 있는 장비이다.

유수한 해외의 자동차업체와 부품업체들은 이러한 3축 로드 시뮬레이터를 대부분 보유하고 있으며, 향후 자동차 모듈 산업의 발전과 자동차 개발 동향으로 볼 때 3축 로드 시뮬레이터는 자동차 제조사와 유관 부품업체로 그 필요성이 더욱 확대될 것이며, 경쟁력 있는 차량 개발을 위하여 반드시 필요한 장비가 될 것이다.¹⁾

^{*}To whom correspondence should be addressed.
hsh@mc.skku.ac.kr

이미 미국, 일본이나 유럽의 자동차 선진국에서는 3축 로드 시뮬레이터를 설계, 제작할 수 있는 장비회사와 기술력을 보유하고 있어 이런 개발 동향에 빠르게 대응해 가고 있다. 그러나, 국내 시험기업체에서는 아직 개발 초기단계에 머물고 있어 많은 경우 MTS,²⁾ Instron-Schenk,³⁾ Saginomiya⁴⁾ 등 외국의 시험기업체로부터 수입하여 사용하고 있는 실정이다.

3축 제어용 로드 시뮬레이터는 자동차의 내구 안정성 평가를 위하여 표준화된 실차 내구 주행 도로를 실험실에서 구현할 수 있는 시험 장비이다. 이것은 자동차가 내구 도로를 주행시 지면의 상태 및 운전조건에 따라 휠(wheel)이 받는 하중특성을 수집하여, 실험실내에서 유압장치와 제어시스템에 의해 실제와 동일한 3축 방향으로의 하중특성을 부여함으로써 자동차의 내구성평가를 수행할 수 있도록 하는 시스템이다. 이러한 시험 조건을 재현시키기 위해서 로드 시뮬레이터는 각 축별로 연성작용(coupled motion)이 적어야 하며, 진동과 피로하중에 견딜 수 있는 구조를 가져야 한다.^{5,6)}

본 논문에서는 3축 로드 시뮬레이터에 대한 기구 및 동적 해석을 수행하였다. 시험기 구조물에 대한 응력 및 진동모드 해석과 함께 동적 시뮬레이션을 수행함으로써 링크부의 안정성 평가와 함께 구조물의 동특성을 파악하고자 하였다. 수행된 연구결과는 국내 독자 기술로 3축 로드 시뮬레이터를 개발할 때 구조물 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 로드 시뮬레이터의 구조물 분석

본 논문에서 대상으로 하는 3축 로드 시뮬레이터는 미국의 시험 전문 제작 업체인 MTS사의 3축 로드 시뮬레이터인 MTS 329의 기본 링크 메커니즘을 기반으로 설계되었다.⁷⁾ 이는 벨 크랭크(bell crank) 메커니즘을 이용하여 공간을 많이 차지하지 않으면서도 자동차용 현가 장치의 수직방향, 횡방향, 종방향 운동을 실차와 동일하게 구현할 수 있다는 특징을 가진다. 자동차의 현가 장치 시스템에 대한 신뢰성 검증용 목적으로 하는 3축 로드 시뮬레이터는 3차원 움직임의 비연성화(uncoupled motion)를 위해

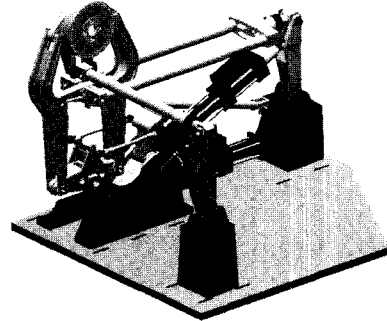


Fig. 1 Road simulator (JKS Design)

서 로딩바/loading bar) 길이를 차량의 수배로 길게 하여 회전 운동의 효과를 감소시켜야 한다. 그러나 본 로드 시뮬레이터는 벨 크랭크를 이용하여 3축 링크 메커니즘을 적절히 연결시켜 로딩바의 길이를 최소화시키고, 현가 장치에 선형 운동이 가능하도록 설계하였다. 본 논문의 연구 대상인 JKS 3축 로드 시뮬레이터는 국내 자체 기술로 설계, 제작된 것으로 Fig. 1은 전체적인 형상을 보여준다.

복잡한 기구물 중에서 본 논문에서는 운동재현에 가장 많은 영향을 주는 휠 하우징 장착부, 교차 링크부, 수직축 벨 크랭크부에 대해 구조해석 및 진동해석을 수행하였다.

2.1 휠 장착 하우징부

휠 장착 하우징(wheel adapter housing)부는 수직 운동 제어용 스트럿(vertical control strut)과 고무 부시로 연결되어 있으며, 고무 부시의 안쪽 파이프 내에 롤러 베어링으로 지지되어 있다. 또한, 허브부와

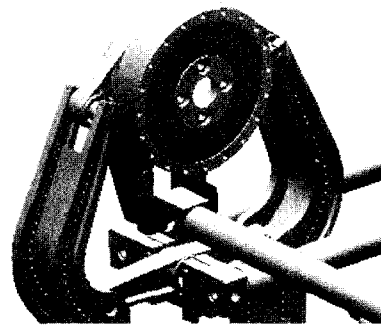


Fig. 2 Wheel adapter housing

볼트로 체결할 수 있게 되어 있으며, 허브-볼트 장착 직경의 변경에 따라 허브를 교체하면서 시험이 가능하도록 구성되어 있다.

이 부분은 직접적으로 시험 부품인 스프링들과 연결되어 가장 큰 하중을 받게 되는 부분으로, 볼트가 체결되는 부위의 강성 해석이 필수적이라 할 수 있다.

2.2 교차 링크부

교차 링크부(cross link)는 수직운동 제어용 스트럿을 중간에서 연결하는 부분으로 내부는 고무 부시와 베어링으로 지지되며, 이의 중앙에 종방향 로딩바(longitudinal loading bar)가 연결되어 있다.

이 부분은 종방향과 횡방향 운동이 교차되는 점으로서, 수직방향 운동에 따라 횡방향 로딩바와 종방향 로딩바의 움직임이 서로 비연성화(uncoupled) 되도록 링크 구조를 설계하는 것이 중요하다.

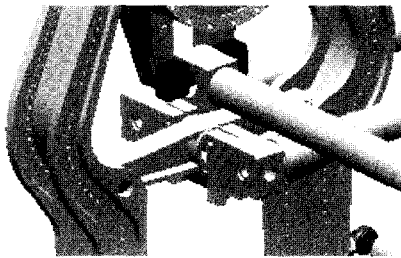


Fig. 3 Cross link

2.3 수직축 벨 크랭크

수직운동 제어용 스트럿의 하부는 수직축 벨 크랭크와 부시 베어링으로 양쪽이 지지되어 있다. 수직축 벨 크랭크는 수직축 링크(vertical link)와 부시

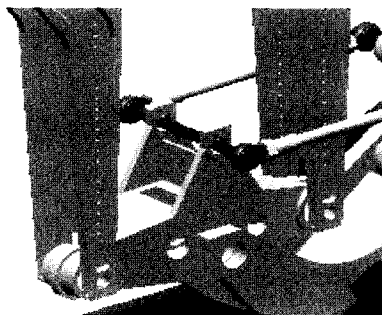


Fig. 4 Vertical bell crank

베어링으로 연결, 지지되어 있으며, 수직축 링크의 수평 운동은 이 벨 크랭크에 의해 수직방향으로 변환되어 수직운동 제어용 스트럿을 통해 휠에 수직방향 운동으로 전달하게 된다.

따라서, 이 부분은 가장 직접적으로 액츄에이터로부터 하중을 받는 부분으로서 연결부위에서의 강도 해석이 필요하며, 수평운동을 수직운동으로 변환시킬 수 있는 구조로 설계되어야 한다.

3. 기구부 구조해석 및 진동모드해석

3.1 구조해석

본 논문의 연구 대상인 JKS 3축 로드 시뮬레이터의 구조적인 검증에 기초적인 자료로 활용하고자 먼저 각 부위별로 구조해석을 수행하였다. 3축 로드 시뮬레이터 전체 시스템을 한번에 해석하기에는 시간적, 시스템적으로 어려우므로 동역학해석 전용 프로그램인 ADAMS S/W를 이용하여 각 조인트 부위에서 반력을 먼저 계산한 후 그 반력값을 경계조건으로 단품별 구조해석을 수행하였다. 반력 계산을 위한 경계조건으로는 장비 액츄에이터에서 발생할 수 있는 최대하중을 부여하여 가장 가혹한 상태에서의 반력을 계산하였다. 즉, 횡방향으로는 3ton, 종방향으로는 5ton, 수직방향으로는 10ton의 하중을 액츄에이터가 발생시키도록 하여 이때 각 부재에 걸리는 힘을 계산하였다. 이렇게 계산된 각 조인트 부위에서의 반력을 이용하여 휠 장착 하우징부, 수직운동 제어용 스트럿부, 교차 링크부, 수직축 벨 크

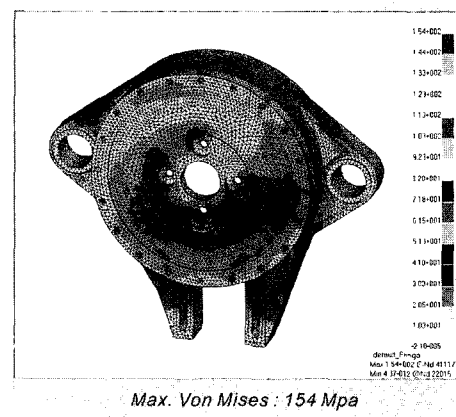


Fig. 5 FEM analysis of wheel adapter housing

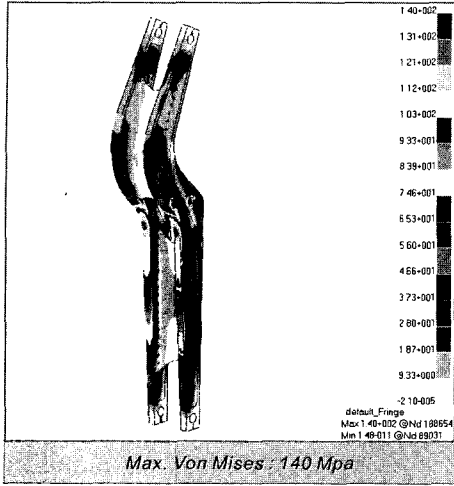


Fig. 6 FEM analysis of vertical control strut

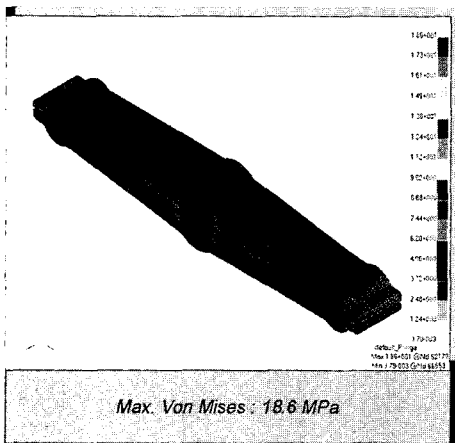


Fig. 7 FEM analysis of cross link

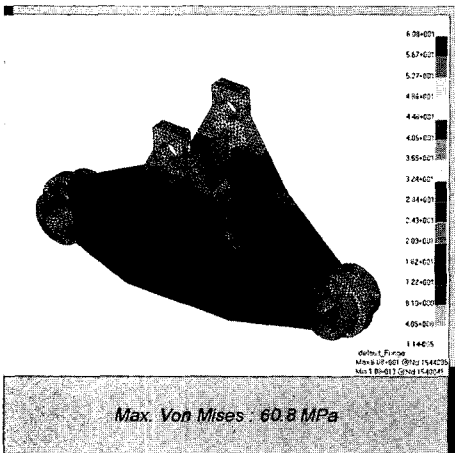


Fig. 8 FEM analysis of vertical bell crank

랭크부에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 5 ~ Fig. 8은 구조 해석 결과로서, 각 부위에서 발생된 최대 응력 값은 구조물의 주재료인 알루미늄 A6061의 인장강도 340MPa보다 낮은 응력인 154MPa, 140MPa, 18.6MPa, 60.8MPa로 나타났다.

3.2 단품 진동모드해석

다음으로 JKS 3축 로드 시뮬레이터의 구조물에 대한 단품별 고유 진동 모드해석(modal analysis)을 수행하여 각 단품에 대한 진동모드 특성을 분석하였다. 고주파 영역에서 작동이 되는 장비의 경우, 기발시 가장 많이 문제가 되는 것이 공진 문제이다. 이런 문제 해결을 위해서는 각 단품 및 시스템에 대한 진동모드 분석이 이루어져야만 한다.

단품 진동모드 해석 결과, 휠 장착 하우징부(Fig. 9), 교차 링크부(Fig. 10), 수직축 벨 크랭크부(Fig. 11)에서의 1차 진동 모드가 각각 17.2Hz, 25.1Hz, 53.7Hz에서 발생하였다. 로드 시뮬레이터의 경우, 여러 개의 단품이 시스템으로 묶여 작동되기 때문에 이러한 단품별 고유진동수 그 자체로서는 큰 의미를 갖지 않는다. 그러나, 향후 보완된 설계모델에 대해 동일한 방법으로 해석을 수행하여 변경 전후의 진동모드 분석이 이루어진다면, 이 결과는 설계 변경 및 수정보완이 이루어질 경우 이에 대한 적정성 여부를 검토, 판단하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

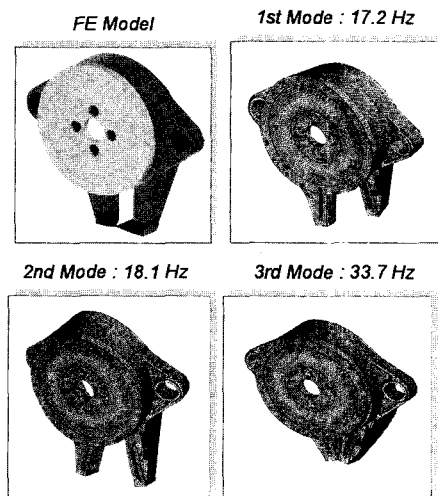


Fig. 9 Modal analysis of wheel adapter housing

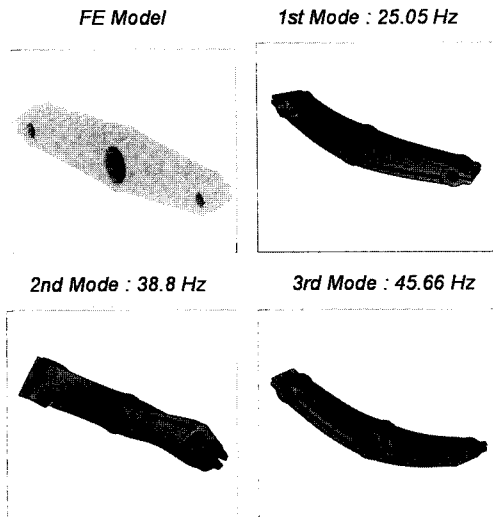


Fig. 10 Modal analysis of cross link

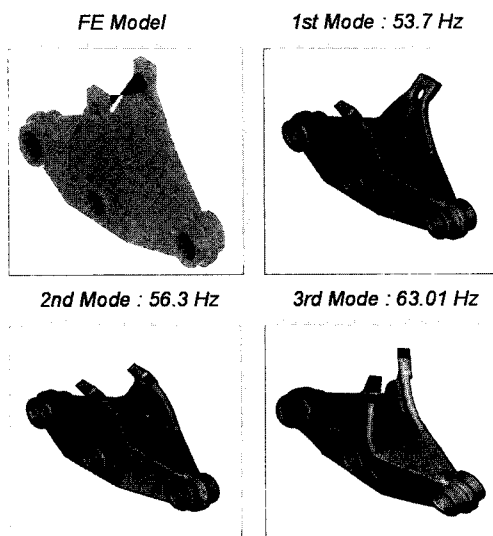


Fig. 11 Modal analysis of vertical bell crank

4. ADAMS 모델링 및 동적시뮬레이션

4.1 ADAMS 모델링

Fig. 12는 범용 동역학 해석 소프트웨어인 ADAMS를 이용하여 모델링한 결과를 보여준다. 이것은 30자유도로 모델링하였으며, 32개의 동적 부품이 결합된 것으로, 3개의 실린더 조인트, 13개의 회전 조인트, 5개의 구형 조인트, 3개의 후크 조인트로 구성되어 있다.

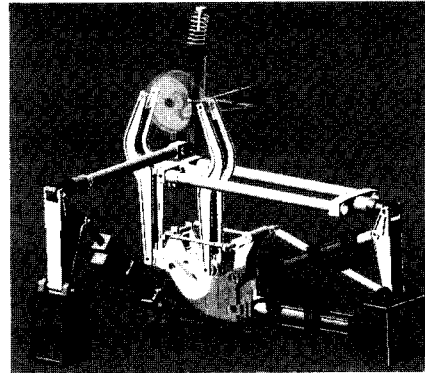


Fig. 12 ADAMS model

4.2 모드별 시뮬레이션

4.2.1 시스템 진동 모드 해석

본 논문의 연구 대상인 3축 로드 시뮬레이터에 대하여 차량 내구 노면 주행시에 가진되는 최대 진동수 50Hz 미만에서 공진되는 시스템 모드를 분석하였다. Table 1은 ADAMS를 이용하여 해석한 시스템 고유진동수를 나타낸다.

Table 1 System natural frequencies

	Suspension uninstalled [Hz]	Suspension installed [Hz]
1st	0.4	6.7
2nd	4.0	28.3
3rd	6.7	44.4
4th	44.6	-

현가 장치 장착시와 미장착시 서로 다른 진동 모드를 갖고 움직이는데, 이는 현가 장치의 시스템 구조에 따라 발생하는 차이이다. 현가 장치 미장착시에는 50Hz 미만에서 강제 모드를 제외한 총 4가지의 공진 모드를 갖고 있다. 현가 장치를 장착한 후에는 3개의 고유 진동 모드를 갖게 되는데, 이 중 20~30Hz 사이의 진동은 현가 장치의 shimmy 모드이며, 6.7Hz의 종축 로딩바 비틀림 고유 진동모드와 44.4Hz의 횡축 로딩바 고유 진동 모드는 시험 중 내구 노면과의 공진을 유발시킬 수 있는 요인으로 판단된다.

이를 원활히 제어하기 위해서는 종축 로딩바와 횡축 로딩바의 연결 조인트 부시(joint bush)에 대한 강성(stiffness) 연구가 추가적으로 필요한 것으로 판

단된다. 강제 진동에 따른 장비의 동적 거동을 분석한 결과, 내구 노면 가진력에 의해서는 장비에 심각한 손상을 주는 동적 거동은 발생하지 않음을 알 수 있었다.

4.2.2 다축 모드 시뮬레이션

여러 축을 동시에 가진하는 다축 모드 시뮬레이션 결과, 연구 대상 로드 시뮬레이터는 종축과 횡축 하중으로 가진 할 경우 최대 2mm 이하의 움직임이 발생하여 상호간에 연성화 운동이 거의 발생하지 않으며, 또한 수직축 방향으로도 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 수직축 변위 운동에 의한 연성은 주로 횡축 방향으로 발생되나, 이는 링크 작동 위치에 따른 횡방향 움직임으로 현가 장치에는 별 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

Fig. 13은 수직축을 변위모드 100mm @ 1Hz, 횡축을 하중모드 0.72ton @ 1Hz, 종축을 하중모드 0.4ton @ 1Hz로 가진하였을 때 나타나는 하중과 변위값을 보여준다.

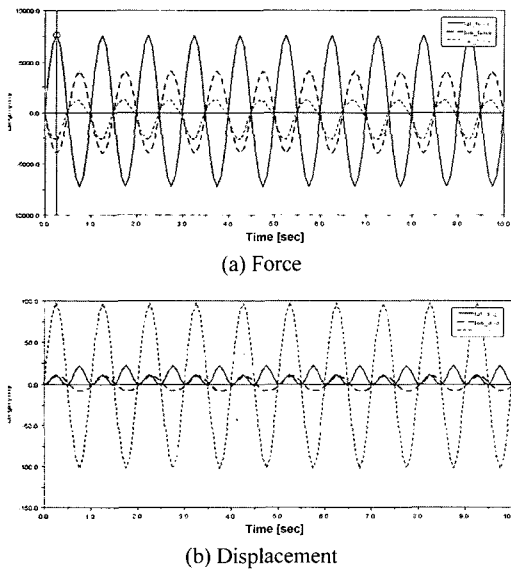


Fig. 13 Simulation results of multi-axis motion

4.2.3 RLDA 데이터와 비교

영국 MIRA P.G.의 Kerb.Island 내구 노면 데이터를 이용하여, 실제 차량에서 발생된 휠의 XYZ 방향에 대한 RLDA(road load data)와 액츄에이터 가진시

휠 고정 조인트(wheel fixed joint)에 작용되는 부하(load)를 시간에 따라 상호 비교, 분석하였다. 이는 실 노면 측정 데이터와 액츄에이터 가진시의 발생 데이터를 비교함으로써 연구 장비가 실제 노면 데이터를 가진할 수 있는 능력을 보유하고 있는지 판단할 수 있다.

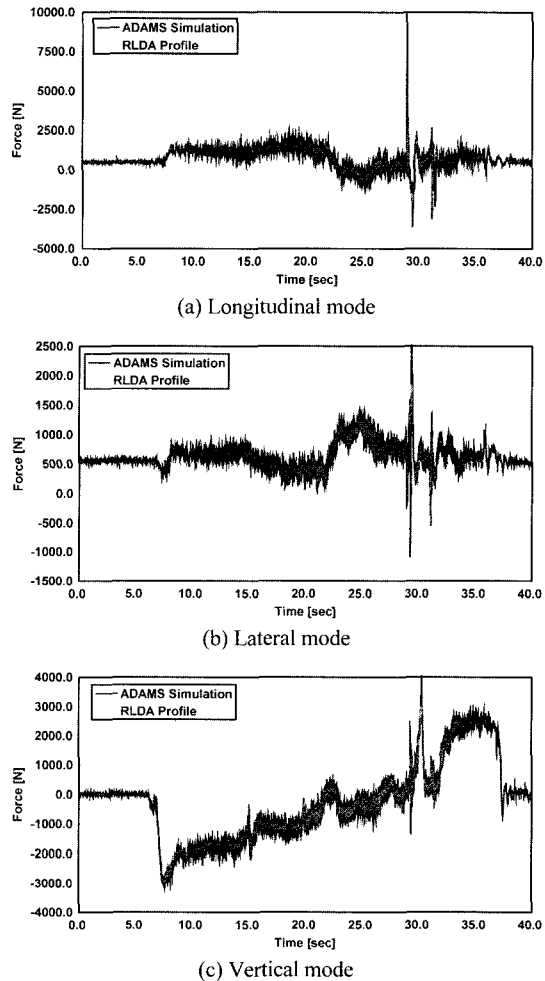


Fig. 14 Comparison of ADAMS simulation results with road load data

4.3 결과 검토

설계된 JKS 로드 시뮬레이터는 장비의 시스템 동적 거동과 단품의 진동 및 구조적 강성을 분석한 결과, 이론적으로 충분히 안정화되어 있으며 제품의 특성과 제조 방법 및 장착 방법에 대해서도 충분히

연구가 진행되고 있어 국산화 기술로 개발 가능한 사양으로 판단된다.

구조 해석 결과, 본 논문에서 설계된 로드 시뮬레이터는 구조적 강성 측면에서 거의 무한 수명의 응력 강도를 갖고 있음을 알 수 있었다. 동적 거동해석 결과에서도 비연성화된 3축간의 움직임은 재현시킬 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 가진 노면의 50Hz 미만에서 발생하는 6.7Hz의 중축 로딩바의 비틀림 공진에 대해서는 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다. 이 중축 로딩바의 공진은 MTS 329에서 역시 동등하게 발생하는 진동 모드로 실제 장비와의 상관관계(correlation) 분석이 요구된다.

RLDA 데이터에 대해 실제 노면 실험 데이터와 시뮬레이션 결과인 부하 하중을 에너지 측면에서 비교한 결과 거의 1% 미만의 오차 범위를 보이고 있어, 내구 노면에 대한 장비의 성능 면에서는 문제가 없는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 3축 로드 시뮬레이터에 대한 구조 해석과 진동모드해석, 그리고 동적 시뮬레이션을 수행하였다.

기구해석 결과 각 부위에서 발생된 최대 응력값은 145MPa로 A6061 재질의 인장강도 340 MPa보다 낮은 응력값을 보임으로써 구조적 강성 측면에서는 거의 무한 수명의 응력 강도를 갖고 있음을 확인할 수 있었다. 동적 거동 측면에서도 비연성화된 3축간의 움직임을 재현시킬 수 있는 것으로 해석되었다. 그러나, 가진 노면의 50Hz 미만에서 발생하는 6.7Hz의 중축 로딩바의 비틀림 공진에

대해서는 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다. RLDA 데이터에 대해 실제 노면 실험 데이터와 시뮬레이션 결과인 부하 하중을 에너지 측면에서 비교한 결과 거의 1% 미만의 오차 범위를 보이고 있어, 내구 노면에 대한 장비의 성능 면에서는 문제가 없는 것으로 판단된다.

본 논문의 연구 결과는 국내 독자 기술로 3축 로드 시뮬레이터를 개발할 때 구조물 설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 이 결과를 바탕으로 국내 독자 기술에 의한 로드 시뮬레이터를 개발함으로써, 국내 자동차 산업의 개발비용 절감, 개발 기간 단축 등에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- 1) Y. I. Kim, "Introduction of 4 channel road simulator," Asia Technical Report, pp.63-74, 1992.
- 2) <http://www.mts.com>
- 3) <http://www.instron.com>
- 4) <http://www.saginomiya.co.jp>
- 5) S. H. Jeong, W. Y. Kim, S. H. Ryu, T. H. Kim, "Realization Software Development of Road Profile for Multi-axial Road Simulator," Transactions of the KSAE, Vol.10, No.5, pp.190-198, 2002.
- 6) G. H. Kim, "A Minimum Interference Design of 6 Axes Link Mechanism for Vehicle Simulator," Master Thesis, Chonnam National University, 2000.
- 7) J. W. Daley, "Linkage for Vehicle Simulator," US Patent 5083453, 1992.