

트럭 샤시 시스템의 동적 리그시험모델 해석

임재혁^{*1)} · 성현수²⁾ · 임세영¹⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾ · 현대자동차 상용구조연구팀²⁾

Analysis of a Dynamic Rig Test Model for Truck Chassis Systems

Jaehyuk Lim^{*1)} · HyounSoo Sung²⁾ · Seyoung Im¹⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Science Town, Daejeon 305-701, Korea

²⁾Commercial Vehicle Structure Research Team, Hyundai Motors Company, 800 Yongarm-Ri, Bongdong-Eup, Wanju-Gun, Jeonlabuk-do 565-904, Korea

(Received 8 February 2004 / Accepted 22 June 2004)

Abstract : A dynamic finite element analysis of a rig test model for truck chassis systems is conducted to establish an appropriate model designed to predict the fatigue life. A reference Belgian road input, which has been obtained from a field test, is imposed on the finite element model in the modal finite element analysis, and the resulting strain history is employed for the prediction of the fatigue life. This is compared with the prediction based upon the strain history measured in the field test. The two agree with each other within the limitation of the field data and the input data to the model. The high frequency responses over 50 Hz are confirmed to be negligible as far as their effect on the fatigue life is concerned.

Key words : Chassis system(샤시 시스템), Multiaxial fatigue analysis(다축 피로 해석), Mode superposition method(모드 중첩 방법), Rig test model(리그 시험 모델)

Nomenclature

- GVW : gross vehicle weight
- FL : front left
- FR : front right
- RL : rear left
- RR : rear right

1. 서론

상용차 내구의 건전성 확보를 위해 주요 부품들에 대한 새로운 내구평가방법의 필요성은 대두되어

왔으며, 특히 노면의 불규칙 반복하중을 지지하는 상용차 샤시 시스템에 관한 안전설계방법론에 대한 요구는 절실한 실정이다. 상용차 샤시 시스템은 자동차 구조를 이루는 프레임과 프레임에 부착되어 있는 현가장치 등을 통틀어 일컬으며, 차체의 하중 및 적재 화물의 총 하중을 지지하는 차량 구조의 핵심 요소이다. 상용차 샤시 시스템에 대한 내구시험은 주로 단품위주의 리그(Rig)시험이나 실차내구시험을 통해 수행되어져 왔는데, 실차내구시험은 차량 제작 후에나 가능하다는 문제가 있고, 단품위주의 리그시험은 그 신뢰성 면에서 많은 의문이 제기되어져 왔다. 본 연구에서는 전산해석을 통해 실차 시험 이전에 랩(Lab)환경에서 샤시시스템의 내구시

*To whom correspondence should be addressed.
ljh77@kaist.ac.kr

험을 만족할 만한 신뢰성수준에서 수행할 수 있는 리그시험모드를 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 문제정의

Fig. 1 처럼 샤시 시스템의 유한요소 모델의 전산 해석을 통해서, 시스템의 다양한 진동 모드를 검토하고 입력하중에 대한 동적거동을 해석한다. 또한 피로 파손/파괴 해석을 통해 시스템의 피로수명을 예측하며, 실차시험결과와 비교하여 타당성을 검토한다. 최종적으로 샤시 시스템의 수명에 영향을 미치는 주요 하중인자들을 확인하여 리그시험모드를 설정한다.^{1,2)}

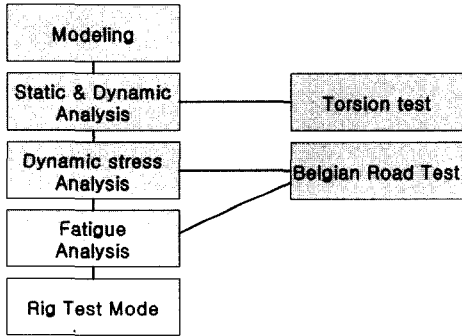


Fig. 1 Research flow

2.1 연구순서

2.2.1 모델링 및 검증

샤시시스템은 차체프레임 앞차축과 뒤차축 노면 입력에 의하여 가진되며, 이는 스프링 댐퍼 및 스테빌라이저바 등으로 구성된 현가장치에 의해 차체에 전달된다. 본 연구에서 현가장치는 빔 및 다수의 조인트요소를 사용해서 모델링 하였으며, 이는 Fig 2, Fig. 3과 같다. 차체에 얹혀지는 여러부품 중에 시스템의 강도 및 비틀림 강성에 영향을 줄 수 있는 크로스멤버(cross-member)들은 상세히 모델하고, 엔진, 차량전면의 캡(cap) 및 후면의 데크(deck), 데크에 실리는 짐의 질량 등의 경계조건은 GVW에 상당하는 등가질량요소로 처리하였다. 위 수치해석에선 강제운동의 제거 및 노면입력의 간략화를 위해 변위입력이 필요하며, 이는 스핀들부위에 설치된 가속도계에서 얻어낸 가속도를 적분하여 변위를 계산하

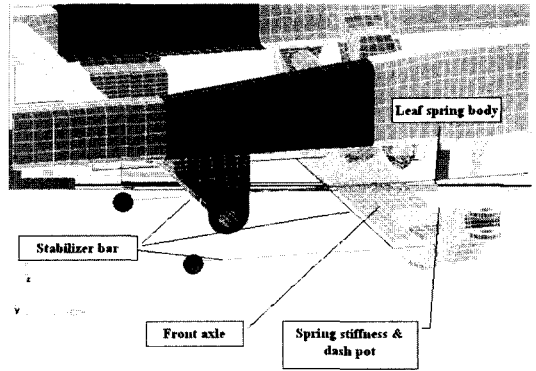


Fig. 2 Schematic draw of Front suspension system model

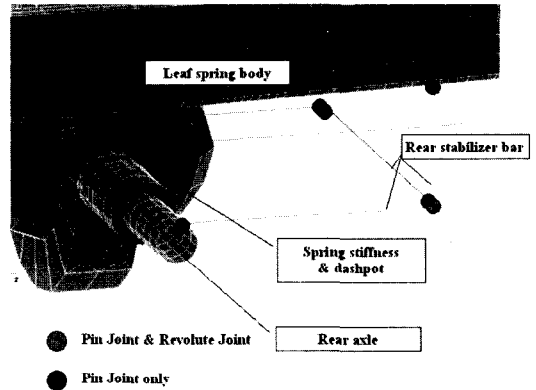


Fig. 3 Schematic draw of Rear suspension system model

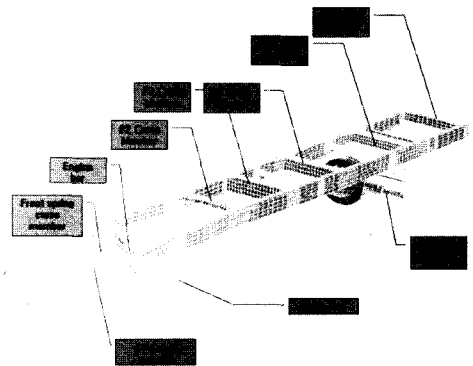


Fig. 4 Finite element modeling of chassis system

고, 이 변위를 노면입력 경계조건으로 사용하였다. Fig. 4와 같은 총 12,000여개 수준의 요소를 사용하여, 간략하면서도 샤시의 특성을 유지하는 모델을 만들었다. 위 모델링을 위해 상용 전처리기인 Hypermesh3.1³⁾를 사용했다.

Fig. 4와 같이 간략화한 유한요소모델은 실제시험과의 상관성의 검증이 필요하며, 이를 위해 본 연구에서는 차량비틀림 강성시험 결과를 전산해석결과와 비교하고, 전산모델의 고유모드해석 결과를 검토하였다. 고유모드해석 검토는 본 연구에서 사용하는 모드중첩해석에 필요한 모드를 결정함에 있어 필수적이다.

1) 정적해석

차량전면에서 비틀림에 대한 강성을 측정하기 위해 Fig. 5와 같이 변위 제어를 통해 차축을 중심으로 4 가량의 비틀림을 일으켜 #2 크로스멤버(A) 및 엔진(Engine)크로스 멤버(B)의 최대주축변형율을 계산하여 시험결과와 비교한다. 비틀림강성은 식 (1)과 같이 간략화 할 수 있다.

$$K = \frac{GJ}{L} \tag{1}$$

K는 비틀림 강성, G는 재료의 비틀림 계수, J는 단면의 비틀림 강성계수, L은 차축간의 거리이다.

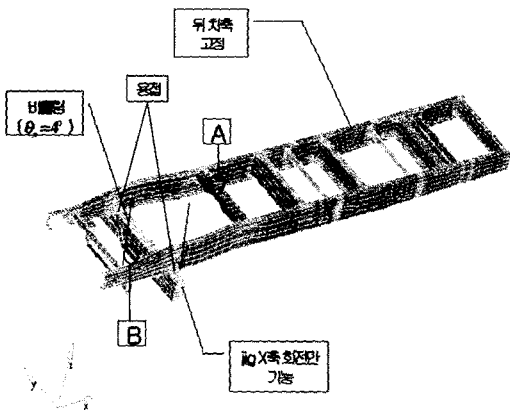


Fig. 5 Boundary Condition for Torsion test

2) 고유모드 해석

차량모델을 샤시시스템으로 구성된 등가차량모델로 구성하기 위해서는 등가 관성요소(등가질량, 등가회전강성)를 사용해서 모델을 보완해야 하며, 그 후 고유모드 해석을 실시해야 한다.

2.2.2 동적해석

1) 모드중첩해석법

상용패키지인 ABAQUS⁴⁾에서 지원하는 모드중첩해석법을 이용해서 동적 해석을 실시하였다. 모드중첩해석은 행렬의 직교성을 고려하고, 실제 입력하중에 응답하는 소수의 저차모드만 고려가 가능하기 때문에 기존의 수치해석보다 효율적인 수치해석이 가능하다. 식 (2)는 모드중첩해석을 위해 직교화시킨 동적해석 지배방정식이다.

$$\ddot{q} + 2\xi w \dot{q} + w^2 q = F \tag{2}$$

q는 모달변위, w는 고유진동수, F는 모달변위가 곱해진 하중벡터를 의미한다.

2) 가진 주파수 검토

본 연구에서는 시험에서 102.4Hz까지 측정된 노면 입력을 상용차 노면입력 가진기 성능 및 파워스펙트럼 분포를 고려하여 주요한 50Hz까지 수치해석의 노면입력으로 사용하였다. 하지만, 피로해석에서는 로우패스 필터링(Lowpass Filtering)에 의해 무시된 고주파의 작은 신호의 변화가 변형을 크기를 변화시킬 수 있고 이 변형을로 피로수명을 예측할시 피로해석 특성상 큰 피로수명의 차이를 줄 수 있다. 따라서, 50Hz까지 고려한 가진주파수의 타당성을 위해 각각 50Hz, 102.4Hz까지의 시험데이터를 노면입력으로 하여 샤시모델을 수치해석하고 피로수명을 비교하였다. Table 1에서 알 수 있듯이 약 20%내에 피로수명의 차이를 볼 수 있었다. 유효한 피로수명의 범위를 6배 내외로 볼 때 거의 같은 피로수명결과로 볼 수 있으며, 50Hz내의 노면입력이

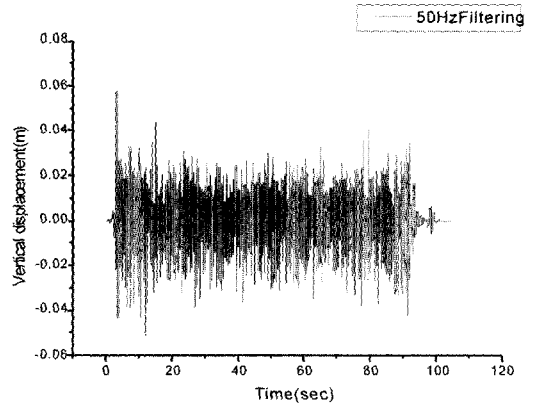


Fig. 6 Input vertical displacement for FL axle

Table 1 Fatigue life after filtering

Fatigue life of #4cross member(cycle)	
Raw Data 100Hz	3.86×10^8
After 50Hz filtering	4.76×10^8

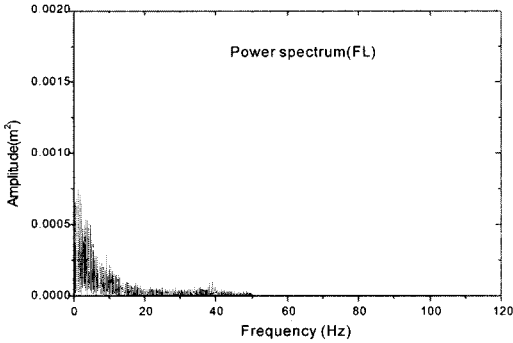


Fig. 7 Power spectrum of Input vertical displacement for FL axle

타당함을 알 수 있다.⁵⁻⁷⁾ 그러므로 본 연구에서는 규정험로인 벨지안로드를 Fig. 6, 7과 같이 100초가량 달린 노면 변위중 평균적인 거동을 보이는 초반 10초가량(20~30sec)입력을 50Hz까지 고려하여 수치해석 입력으로 사용하였다.

2.2.3 피로해석

험로를 달리는 상용차는 복잡한 하중에 의해가진되며, 부재는 다축피로 상태에 놓이게 된다. 다축피로해석을 위해 다양한 이론이 제시되었으나, 본 연구에서는 등가변형을 환산을 이용한 최대 주변형율이론^{8,9)}을 사용하여 시험 결과와 비교하였으며, 피로해석을 위해서 상용패키지인 nSoft-E¹⁰⁾를 사용하였다.

2.2.4 리그시험모드설정

리그시험모드를 결정하기 위해서는 실제시험에 가까운 가진요소를 모두 고려해야 하며, 그러지 못한 경우 적절한 보상을 해야한다. 노면입력을 모두 고려하는 경우 상용차 수준의 무게를 지탱할 수 있는 고비용의 3축 변위 가진기가 필요하지만, 이는 비용 및 장비성능 면에서 리그시험에 또 다른 문제를 수반한다. 본 연구에서는 위와 같은 문제점을 고려하여 노면입력은 수직 변위경계조건을 사용하여 재현하고, 프레임위에 하중은 2.5톤 트럭의 GVW경계조건을 기준으로 캡 600kg, 엔진 400kg, 데크와 적

재하중 3200kg을 등가질량 처리하도록 하였다. 또 실제시스템의 등가 평균하중을 재현하도록 하기 위해 노면의 수직 입력을 10~20%정도 보상하여 실차 시험결과와 비교하였다.

3. 수치해석 및 결과

3.1 정적해석 및 고유모드해석

정적, 동적 모델 검증을 위해 비틀림 해석 및 진동 모드해석을 수행하였으며, 비틀림 모드 해석결과는 Table 2와 같다. 변형형상은 Fig. 8과 같으며 #2(A) 및 엔진 크로스 멤버(B)의 주축변형율의 3% 범위 내에서 일치하며, 이는 정적 유한요소모델의 신뢰성을 보여준다. 차량의 최대 적재물을 포함한 GVW 경계조건에서 6개의 강체운동모드와 기타 스프링 진동모드를 제외한 초기 특성주파수는 모드9에서 약 2.54Hz가량이며 Fig. 9 (a)~(c)처럼 1차 주축방향 비틀림 모드이고, 이어 1차 면내전단, 1차 축 방향 굽힘등이 순차적으로 나타난다.

3.2 동적해석 및 피로내구해석 결과

벨지안 로드를 달린 노면변위의 수직입력을 50Hz 로우패스 필터링을 하여, 동적해석을 수행하였다. 피로내구해석을 위해 시험측정부위와 일치하는 Fig. 10의 4군데 주요한 #2(A), #3(B), #4(C), 끝단(D) 크로스멤버 굴곡부위에서 최대 주축 변형율을

Table 2 Result of torsion test

Strain(10 ⁻⁶)	C/MBR #2(A)	Engine C/MBR(B)
Test result	301.8	103.5
Numerical analysis	303.8	106.9

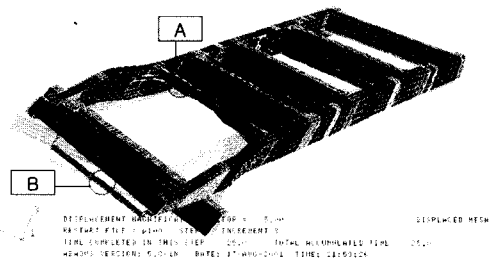
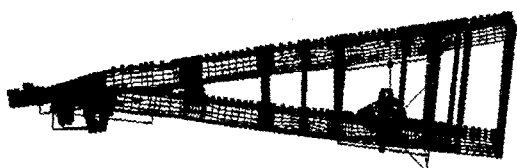


Fig. 8 Deformed Shape of the torsion



MS: msdmgp.cad ABAP/Standard 4.2-1P Fri Nov 23 14:25:31 KST '06 (GMT+09:00)
 Size: 1000mm
 1st Freq = 2.5427 Hz = 2.5427 (cm/sqrt(NMM))
 Deflated Yrs: 0 Deformation Scale Factor: 15.789e-05

(a) Mode9(2.54HZ)



MS: msdmgp.cad ABAP/Standard 4.2-1P Fri Nov 24 14:27:11 KST '06 (GMT+09:00)
 Size: 1000mm
 1st Freq = 5.3426 Hz = 5.3426 (cm/sqrt(NMM))
 Deflated Yrs: 0 Deformation Scale Factor: 15.789e-05

(b) Mode11(5.34HZ)



MS: msdmgp.cad ABAP/Standard 4.2-1P Fri Nov 24 14:29:33 KST '06 (GMT+09:00)
 Size: 1000mm
 1st Freq = 7.2518 Hz = 7.2518 (cm/sqrt(NMM))
 Deflated Yrs: 0 Deformation Scale Factor: 15.789e-05

(c) Mode13(7.25HZ)

Fig. 9 Mode shape of chassis system with GVW

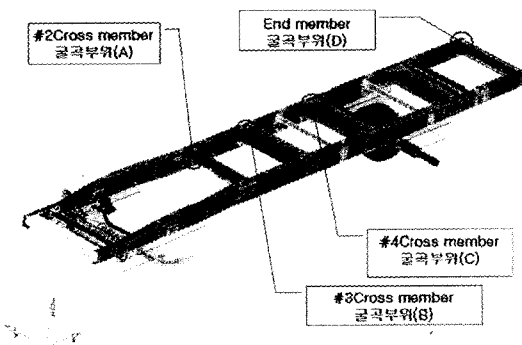


Fig. 10 Strain Measurement spots for fatigue life

계산하여 피로 해석하고 그 결과를 시험 결과와 비교하였으며, 이는 Fig. 11, Table 3와 같다. 부재의 피로파손정도는 #4 - 끝단 - #2 - #3의 순으로 시험결과와도 일치한다. 노면의 전후 좌우 수직입력을 모두 고려한 경우 #3크로스 멤버를 제외한 모든 부재

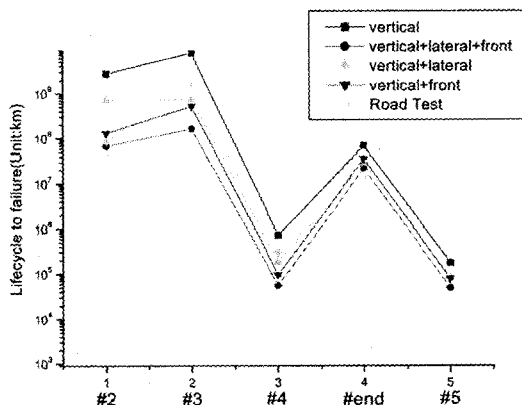


Fig. 11 Result of Fatigue life for Chassis system

Table 3 Fatigue life evaluation for Chassis system

unit(km)	vertical	vertical+lateral+front	Road test
#2cross member(1)	2.73E+9	6.72E+7	8.05E+7
#3cross member(2)	7.90E+9	1.65E+8	1.04E+9
#4cross member(3)	7.21E+5	5.53E+4	3.80E+5
End member(4)	6.92E+7	2.18E+7	9.80E+6
#5cross member(5)	1.76E+5	4.84E+4	

의 시험결과와 6배내외에서 일치함을 알 수 있고, #3크로스 멤버도 약 10배내외에서 일치함을 알 수 있다. 이는 현재의 리그시험모드가 실제 차량주행 상태를 잘 근사한다고 할 수 있다.

4. 리그 시험모드의 설정

내구해석 결과를 통해 노면의 입력 및 등가질량을 고려한 샤시시스템의 동적해석은 실제 시험결과와 상응하는 피로수명을 예측함을 알 수 있었다. 하지만 노면입력을 모두 고려하는 경우 상용차 수준의 무게를 지탱할 수 있는 고비용의 3축 변위 가진기가 필요하며, 이는 비용 상에 문제로 실제 적용에 어려운 점이 많다. 이를 보정하기 위해 노면의 수직 입력만 고려시 전후 좌우 하중의 부재로 인한 전반적인 높은 피로수명이 예측되며, 이는 안전설계 관

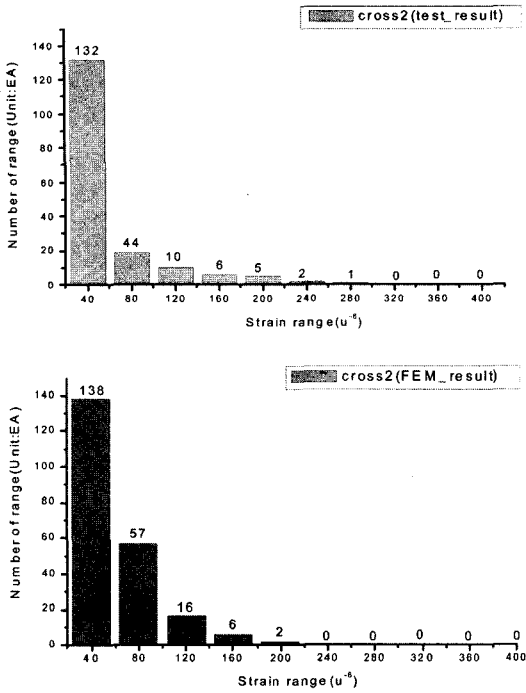


Fig. 12 Range matrix of #2cross member

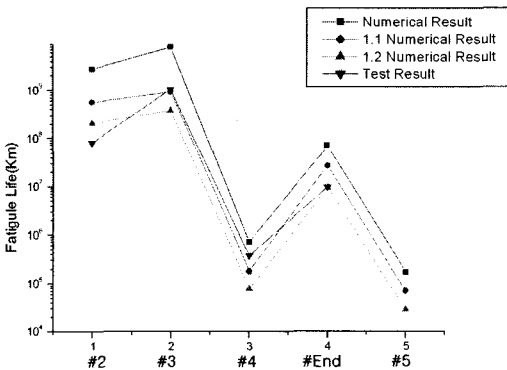


Fig. 13 Result of Fatigue life for Chassis system at Various displacment input

점에서도 적합하지 못하다. Fig. 12에서 변형율의 크기에 따른 출현횟수를 나타낸 레인지 매트릭스와 같이 작은 변형율의 출현은 수치결과가 더 많지만 큰 변형율의 출현은 시험결과가 더 많은 것을 볼 때, 평균적인 하중에 보상이 필요함을 알 수 있다.

이를 위해서 수직입력을 10%~20%를 더 고려해서 수치해석을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 13, Table 4와 같다. 수직입력의 1.1배를 이용한 경우 시

Table 4 Fatigue life evaluation for Chassis system at Various displacement input

	vertical (1.0)	vertical (1.1)	vertical (1.2)	Road test
#2cross member(1)	2.73E+9	5.63E+8	2.08E+8	8.05E+7
#3cross member(2)	7.90E+9	9.27E+8	3.77E+8	1.04E+9
#4cross member(3)	7.21E+5	1.83E+5	7.91E+4	3.80E+5
End member(4)	6.92E+7	2.68E+7	9.35E+6	9.80E+6
#5cross member(5)	1.76E+5	7.10E+4	2.86E+4	

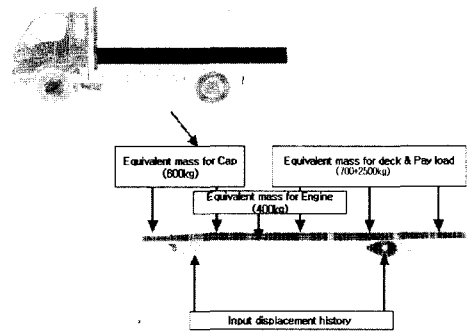


Fig. 14 Rig test mode boundary condition

험결과와 피로수명과 6배내외에 가까운 피로수명 결과를 볼 수 있었으며, 수직입력의 1.2배인 경우는 수치해석에서 잘 예측하지 못한 #2크로스 멤버, 끝단 크로스 멤버의 피로수명을 적절히 보상함을 알 수 있었다. 이는 Fig. 14와 같은 수직방향 노면입력 및 등가질량을 고려한 샤시 리그시험모드의 타당성을 제시할 뿐만 아니라 이를 이용한 효율적인 상용차 샤시 내구설계의 가능성을 보여준다.

5. 결론

전산해석을 이용한 선행설계를 통해 실차시험이 전에 상용차의 샤시시스템 내구해석을 할 수 있는 적절한 리그시험 모드를 얻을 수 있었으며, 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 벨지안 로드로부터 측정된 변위 입력을 리그리 시험에 입력으로 사용할때 노면입력 가진기

의 성능 및 피로수명을 고려해서 50Hz까지 고려해도 타당하다.

- 2) 등가질량을 고려한 경계조건은 샤시 시스템의 수직방향 하중 조건을 표현하는데 적합하며, 주요한 수직변위의 입력 변화(1.0~1.2배)는 샤시 시스템의 피로특성(피로수명 및 부재 취약도)을 유지하면서 제외된 가진효과를 적절히 보상할 수 있다.
- 3) 전산해석을 이용한 선행 설계로 효율적인 리그 시험모드의 예측이 가능하다.

후 기

본 연구는 현대자동차 상용구조연구팀 지원아래 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) M. Gobbi, G. Mastinu, "Expected Fatigue Damage of Road Vehicles due to Road Excitation," *Vehicle System Dynamics*, Vol.28, pp.778-788, 1998.
- 2) H. K. Min, J. A. Jung, I. Y. Yang, "Accelerated Durability Analysis of Suspension System," *The Transactions of the KSAE*, Vol.10, No.5, pp.168-173, 2002.
- 3) Hyper Mesh 3.1 Training Manual, Yéwon Engineering, 2000.
- 4) ABAQUS User's Manual Vol.3, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., 2001.
- 5) H. S. Kim, "Dynamic Stress Analysis of a Flexible Body in Multibody System for Fatigue Life Prediction," Ph. D. Thesis, Inha University, Korea, 1999.
- 6) Truck Systems Design Handbook, SAE, 1996.
- 7) R. K. Luo, B. L. Gabbitas, B. V. Brickle, W. X. W, "Fatigue Damage Evaluation for a Railway Vehicle Bogie Using Appropriate Sampling Frequencies," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 28, pp.404-415, 1998.
- 8) J. A. Bannantine, L. J. Comer, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall Inc., 1990.
- 9) J. H. Song, J. S. Gu, J. H. Choi, H. J. Yim, "The Research On the Development of Load History for Vehicle and Evaluation of Multi-axial Fatigue Life," Daewoo Motors, 1997.
- 10) N-Soft V5.3 Manual, Famtech, 2002.