

자동차 현가모듈의 내구설계를 위한 가상 내구시험기법 정립 및 응용

손 성 호¹⁾ · 허 승 진²⁾

국민대학교 자동차공학전문대학원¹⁾ · 국민대학교 기계자동차공학부²⁾

Virtual Durability Test Procedures and Applications on Design of a Vehicle Suspension Module

Sunghyo Son¹⁾ · Seung-Jin Heo²⁾

¹⁾Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

²⁾School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received 7 February 2003 / Accepted 16 April 2003)

Abstract : Recently, the virtual test techniques using computer simulation play an important part in the vehicle development procedures in order to reduce the development time and cost by replacing the physical prototypes of the vehicle components or systems with the virtual prototypes. In this paper, virtual durability test procedures for the vehicle suspension module have been developed. Virtual durability test consists of dynamic simulation computing load history of suspension components, fatigue analysis computing the life of components. A vehicle suspension module for dynamic simulation are developed and validated by comparison with the measured data obtained from the field vehicle test. And on the basis of the validated vehicle suspension model, fatigue analysis has been performed for the virtual durability design of the suspension components.

Key words : Durability(내구성), Virtual durability test(가상내구시험), Fatigue analysis(피로해석), Dynamic simulation(동특성시물레이션), Vehicle suspension module(자동차현가모듈),

1. 서론

자동차산업의 경쟁력을 확보하기 위해서는 빠르게 변화하는 수요패턴에 맞추어 새로운 상품을 얼마나 빨리 그리고 값싸게 개발하느냐가 매우 중요하게 되었다. 이를 위해 오늘날 컴퓨터 시물레이션을 이용한 가상공간에서의 설계 및 시험기법을 활용한 자동차 기술개발이 다양한 분야에서 활발히 시도되고 있다.¹⁾ 특히 차량의 현가시스템 개발시 품질향상의 중요한 목표라 할 수 있는 내구설계에 대하여 가상내구시험 기법을 응용하므로써 다른 설계

분야에 비해 상대적으로 많은 시간이 소요되는 내구성능 최적화 기술개발에 큰 효과를 가져 올 수 있다. 본 논문에서는 자동차 현가모듈의 모델링 기법 개발과 동특성 시물레이션 수행 및 내구해석 결과를 바탕으로하는 가상내구시험기법에 관한 연구를 수행하고자 한다. 이를 위해 현가시스템의 다물체 모델링 기법에 관한 연구를 수행하며, 또한 현가부품의 3D-CAD 모델을 이용해 정확한 유한요소모델을 생성하고 이를 바탕으로 피로해석을 수행하고자 한다. 또한 시물레이션시 입력신호로 이용되는 구동축하중신호 및 각 부품의 입력하중을 확보하기 위해 주행시험을 수행하며, 가상내구시험에 대한 검증을 위해 실험실내에서 현가시스템의 내구시험

^{*}To whom correspondence should be addressed.
sjheo@kookmin.ac.kr

을 수행할 수 있는 3축 내구시험기를 개발하여 활용하고자 한다.²⁾

2. 동하중 측정시험

2.1 측정장치 구축

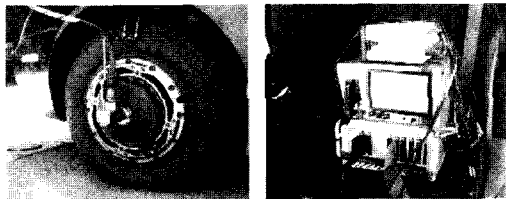
주행시험을 통하여 측정되는 데이터는 궁극적으로 차량모델 및 시험기의 입력신호로 사용된다. 입력신호의 수집을 위해 차량의 구동축(spindle)에 작용되는 주행중의 동하중을 측정하는 센서인 WFT (Wheel Force Transducer)를 이용하여 3방향의 힘과 3방향의 모멘트를 측정하였다. Fig.1(a)는 본 연구에 사용한 준중형급 승용차의 전륜에 장착된 WFT의 모습을 보이고 있으며, Fig.1(b)는 측정 및 데이터수집장치가 차량에 장착된 모습을 보이고 있다.

가상 차량 동특성 시뮬레이션을 수행할 경우 차량모델의 검증에 위해 여러 현가부품의 하중이력을

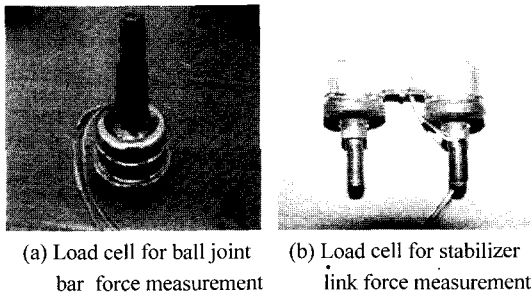
측정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 구동축 하중이력을 측정하는 동시에 현가 부품에 센서를 장착하여 각 부품의 하중이력 데이터를 측정하였다.³⁾ Fig.2는 본 연구에서 센서로 활용한 부품을 나열하고 있다. Fig.2(a)에서는 로어컨트롤암(lower control arm, LCA)의 볼 조인트(ball joint)에 작용되는 X, Y방향으로의 하중 측정용 로드셀(loadcell)의 부착모습을 보여주고 있으며, Fig.2(b)에서는 스테빌라이저 바(stabilizer bar)의 연결 링크에 작용되는 축방향 하중을 측정하기 위한 로드셀을 보여주고 있다. Fig.2(c)에서는 현가시스템의 변위를 측정하기 위해 스프링에 장착한 변위센서의 모습을 보이고 있다. Fig.2에 사용된 센서는 모두 풀 브릿지 타입(full bridge type)의 스트레인게이지(strain gauge)를 이용하였으며 별도의 시험을 통해 보정 한 후 하중신호 측정을 위해 차량의 현가시스템에 장착되었다. Fig.3에서는 각각의 센서가 차량에 부착된 모습을 보여주고 있다.

2.2 측정시험 결과

본 연구에서는 여러 주행상황에서의 현가시스템에 걸리는 하중이력을 벨지안(Belgian), 자갈길(cobblestone), 빨래판(washboard) 노면과 같은 내구용 특수로에서 속도별로 측정하였으며, 일반 도로상에서는 Slalom, J-Turn, 급제동 주행 시험의 수행



(a) Wheel force transducer (b) Data acquisition system
Fig. 1 Field test system for measurement of the spindle input loads



(a) Load cell for ball joint bar force measurement (b) Load cell for stabilizer link force measurement

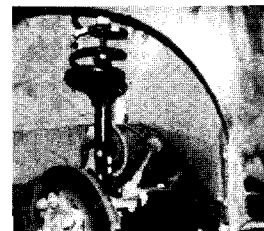


(c) Displacement sensor for spring deflection

Fig. 2 Strain-gauge type force and displacement sensors



(a) Stabilizer bar link (b) LCA ball joint



(c) Spring

Fig. 3 Installed sensors of front suspensions module

을 통하여 측정하였다. Fig.4에서는 대표적으로 벨지안 노면에서의 주행시험 모습을 보여주고 있다.

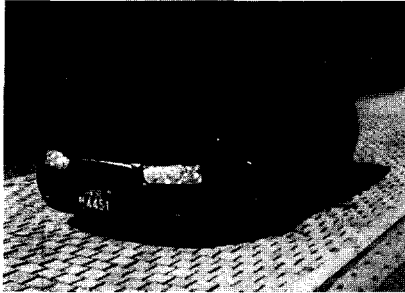
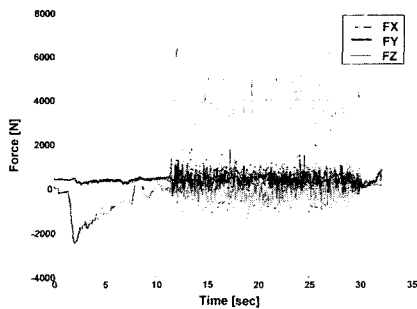
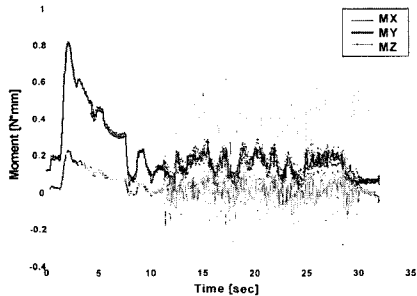


Fig. 4 Belgian road driving test

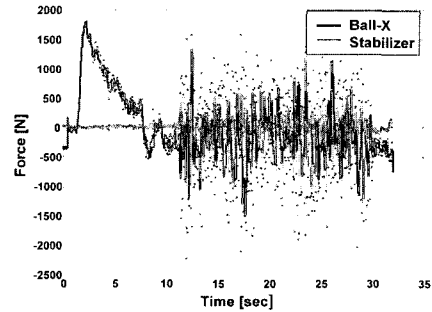
Fig.5는 벨지안 노면을 40km/h 속도로 주행시 측정된 결과를 나타내고 있다. 여기에서는 정상상태의 주행뿐 아니라 정지부터 가속 및 감속단계 즉, 과도상태에서의 동특성을 아울러 측정하였다. Fig.5 (a), (b)는 각각 WFT를 이용하여 구동축에서 측정된 3방향의 힘과 3방향의 모멘트값을 나타내고 있으며, Fig.5(c), (d)에서는 현가부품에 장착된 각종 센서로부터 측정된 대표적인 동적하중 및 변위신호를 나타내고 있다. 이 때 Fig. 5의 X, Y, Z방향은 각각 차량직진방향, 횡방향, 수직방향을 가리킨다.



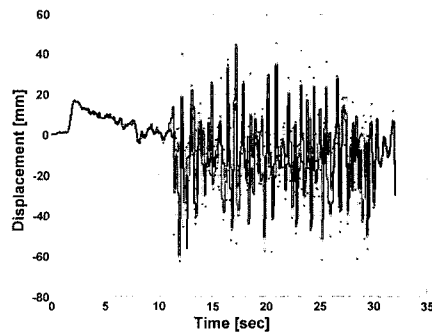
(a) Spindle load history (forces)



(b) Spindle load history (moments)



(c) LCA ball joint & stabilizer bar forces

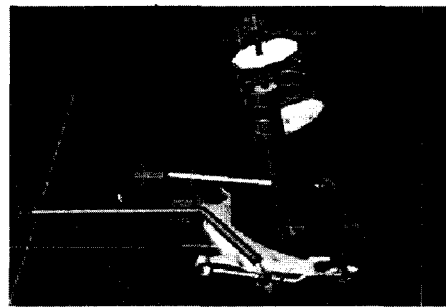


(d) Suspension deflection

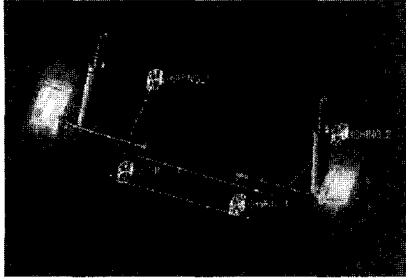
Fig. 5 Measured signals of the suspension corner module during belgian road driving test (v = 40km/h)

3. 현가 코너모듈 동하중 해석

내구해석 및 설계에 있어서 기본적으로 요구되는 사항은 내구설계 대상 부품에 작용되는 동하중이력을 가능한 실제치와 유사하게 구하는 것이다. 본 연구에서는 이와 관련하여 보다 실제적인 현가코너모듈의 차량동역학적인 모델을 구축하기 위해 범용다물체 해석프로그램인 ADAMS를 활용하여 Fig.6과 같은 코너모듈(corner module) 및 1/2차량(half car)에 대한 모델링을 수행하였다.⁴⁾



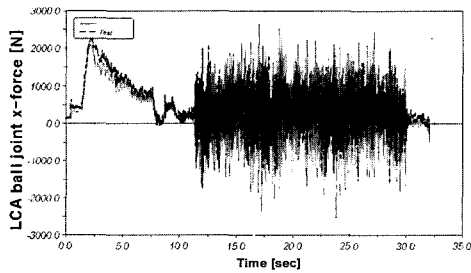
(a) Corner module model



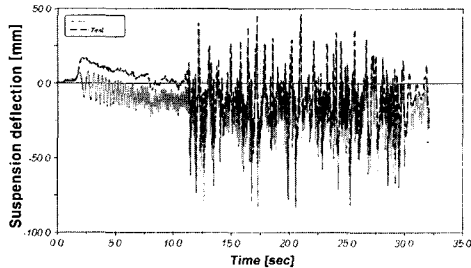
(b) Half car model

Fig. 6 Vehicle dynamics models for virtual durability test

Fig.7에서는 벨지안 노면 주행시험을 통하여 측정된 구동축에서의 동적하중이력의 입력에 대한 현가코너모듈의 시뮬레이션 결과를 시험결과와 함께 비교하여 나타내고 있는데, Fig.7(a),(b)는 각각 볼 조인트의 X방향의 힘과 스프링 변위에 대한 결과를 보여주고 있다. 차량이 정지상태부터 가속하는 과도주행 구간은 그 경향이 잘 일치하고 있으나, 고주파수 신호가 주로 분포하는 특수로에서의 정속 주행시에는 볼 조인트의 경우 피크발생크기에서 약간의 오차가 나타나고, 스프링 변위값의 경우는 과도상태에서 약간의 DC 오프셋이 발생되고 있으나, 전반적으로 시뮬레이션과 시험결과가 상당히 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.



(a) Ball joint X-direction load history



(b) Suspension deflection history

Fig. 7 Comparison between simulation and test results (Belgian road driving test, v = 40 km/h)

4. 3축 내구시험기 제작 및 가상내구시험기 모델링

4.1 3축 내구시험기 제작

2절에서 측정된 6방향의 휠하중 그래프에서 알 수 있듯이 현가시스템의 각 부품은 복합적인 힘을 받는다. 그러나 각 부품에 작용되는 동하중 측정 및 내구시험을 위한 반복적 주행시험의 수행은 과도한 비용 및 시간을 소요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Fig.8에서와 같이 1/4차량 현가코너모듈을 시험할 수 있는 3축 내구시험기를 제작하고 실제 주행시험을 실험실에서 재현하고자 하였다. 3축 내구시험기에는 본 연구의 적용모델인 맥퍼슨(MacPherson) 형식의 준중형차 전륜현가시스템이 장착되었다.

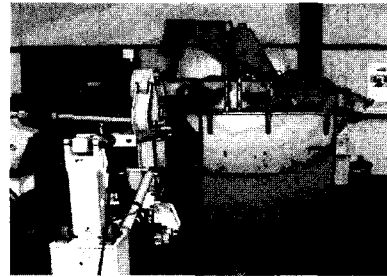


Fig. 8 3-axis durability test rig for the front suspension corner module

4.2 가상내구시험기 모델링

3축 내구시험기를 활용한 시험에 대한 분석 및 최종적인 가상내구시험기법을 개발하기 위해 Fig.9와 같이 가상 3축 내구시험기를 모델링 하였으며, 실제 시험상황과 동일한 조건으로 시험을 수행할 수 있게 하였다.⁵⁾

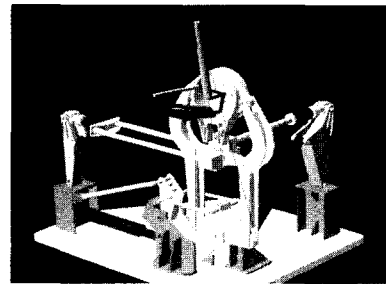


Fig. 9 Virtual durability test rig model for the front suspension corner module

Fig.10에서는 가상내구시험기모델을 이용한 시뮬레이션 결과로서 스테빌라이저 바의 축 방향의 힘을 시험측정결과와 비교해서 보여주고 있다. 1Hz 및 5Hz의 정현파 입력신호를 Z축으로 가졌을 때의 결과를 비교하여 볼 때 시험과 시뮬레이션이 대체적으로 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 시험의 경우 시뮬레이션 결과에 비하여 왜곡된 정현파 형태를 보여주고 있는데, 3축 내구시험기의 결합요소에 존재하는 각종 유격 및 비선형성에 대한 보다 정확한 모델링을 위한 추가적인 연구가 요구됨을 알 수 있다.

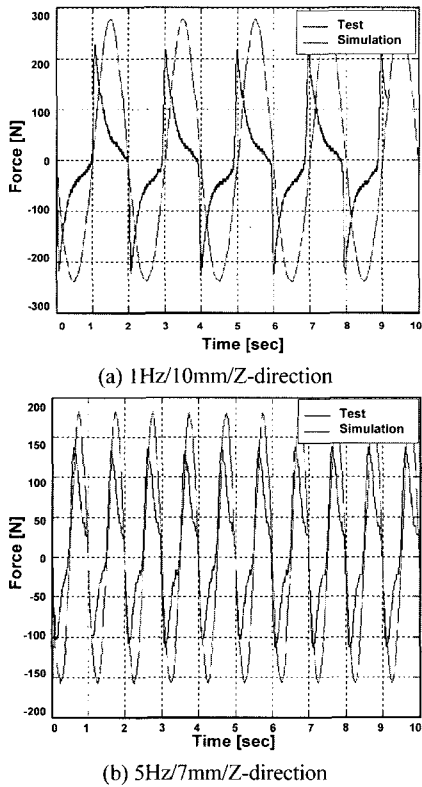
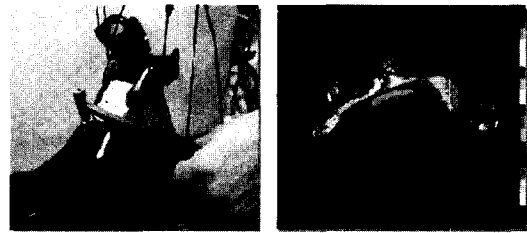


Fig. 10 Validation of virtual test rig model

5. 피로 해석

가상내구설계의 마지막 단계는 가상차량모델을 통해 얻어진 현가부품의 하중이력선도를 이용하여 피로해석을 수행한 후, 내구성을 향상시키기 위한 설계변경단계라 할 수 있다. 본 연구에서는 이와

관련한 응용으로서 현가부품중 LCA에 대해 피로해석을 수행하였다.⁶⁾ Fig.11에서는 유한요소 모델의 검증에 위한 모달 시험(modal test) 및 해석 모습을 나타내고 있으며, Table 1에서 모달 시험결과를 해석결과와 비교하고 있는데 공진주파수가 거의 정확하게 일치됨을 알 수 있다.

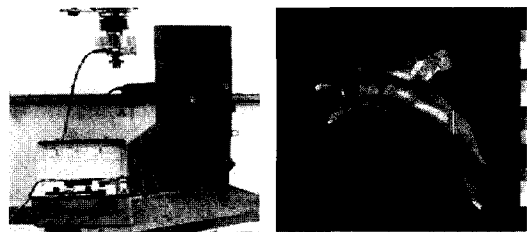


(a) Modal test (b) Modal analysis
Fig. 11 Modal test and analysis of the low control arm

Table 1 Comparison between modal test and analysis results

Mode shape	Test [Hz]	Simulation [Hz]
1st Bending	775	774
1st Torsion	989	959
2nd Bending	1,031	1,045
2nd Torsion	1,199	1,158

Fig.12에서는 유한요소모델의 검증을 위한 LCA의 강도시험 및 해석수행모습을 보이고 있으며, Table 2에서 스트레인게이지가 부착된 각 지점에서의 변형률(strain)에 대한 시험 및 해석결과를 비교하고 있는데, 전체적인 오차율이 2%를 넘지 않음을 볼 수 있다. 따라서 상기 두 가지 검증시험을 통해서 피로해석을 위한 유한요소모델의 적용 신뢰성이 충분하다고 판단된다.

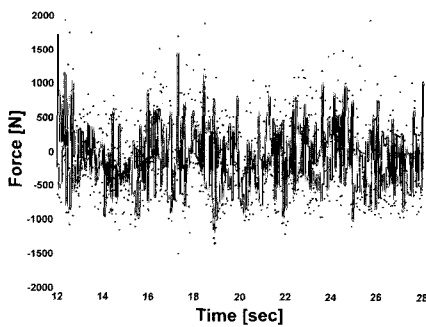


(a) Strength test (b) Strength analysis
Fig. 12 Strength test and analysis of the low control arm

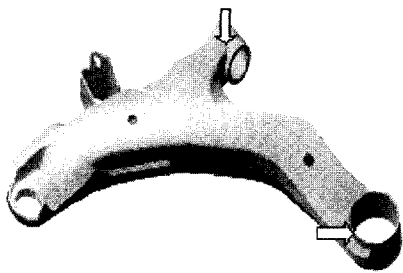
Table 2 Comparison between static loading test and analysis results

Measured position	Test (10e-6)	Simulation (10e-6)	Error (%)
A	100	98.3	1.7
B	19.5	19.2	1.5
C	106.9	105.7	1.1

상기와 같이 검증된 유한요소모델에 동하중해석으로부터 얻어진 입력동하중이력, 부시(bush) 특성 데이터 그리고 LCA의 재질 특성값을 함께 고려하여 피로해석을 수행하였다. Fig.13(a)에서는 벨지안 노면을 40km/h 속도로 주행시 측정된 구동축의 하중이력에 대한 LCA의 작용 동하중 특성값을 나타내고 있으며, Fig.13(b)에서는 부시 특성 데이터가 적용된 부위와 함께 LCA의 피로해석용 모델을 보여주고 있다.



(a) Dynamic input load history



(b) Fatigue analysis model with bush positions

Fig. 13 Input load history and fatigue analysis model of the low control arm

피로해석 결과를 Fig.14에서와 같이 보여주고 있는데 상대적으로 피로도가 높은 부분이 LCA의 중앙부위에 나타나고 있으며, 수명은 LCA의 재질을

철재로 가정할 경우 약 38,000 Cycles로 계산되었다. 1 Cycle이 111m 임을 고려하면 38,000 Cycles는 약 4,218km로 계산되는데, 이는 벨지안 노면에서 40km/h 속도로 주행시 LCA의 수명이 대략적으로 4,218km임을 의미하고 있다.

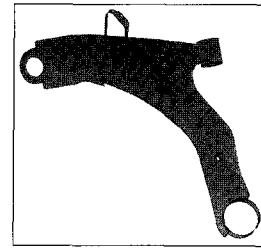


Fig. 14 Fatigue analysis result of the LCA

6. 결론

본 연구에서는 자동차 현가코너모듈의 내구설계를 위한 가상내구시험 기법의 전체적인 과정을 수행하였다. 실차를 이용하여 특수로 직진 정속주행 및 기타 다양한 과도상태의 주행상황을 통해 차량에 입력되는 스피들 하중이력을 측정하였다. 또한 내구시험용 차량 모델을 정립한 후 측정된 스피들 하중이 적용될 때 각 부품에 작용되는 하중이력 선도를 계산하였다. 각 부품에서 계산된 하중이력 결과는 측정치와 상당히 잘 일치함을 알 수 있었다.⁷⁾

또한 실험실 내에서 현가 시스템의 내구시험을 수행할 수 있는 3축 시험기를 개발하였으며, 이에 해당되는 가상내구시험기 모델을 정립하여 실제 3축 내구시험상황을 재현하도록 하였다.

마지막으로 현가부품중 LCA을 피로해석의 대상으로 하여 현가코너모듈의 동특성 시뮬레이션 결과를 활용한 피로해석을 예시적으로 수행하였다.

본 연구결과는 향후 3축 내구시험기를 이용한 내구시험수행 및 해석 모델검증을 통한 보다 실제적으로 활용 가능한 가상내구시험기법의 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- 1) K. B. Baek, "A Study on Durability Test Method of Vehicle Suspension System",

- Journal of KIIS Vol.10, No.2, pp.24-31, 1995.
- 2) P. Heyes, "The Use of Fatigue Calculations in the Durability Engineering System", Korea ADAMS User Conference, 2001.
 - 3) H. Klaetschke, M. Kieninger, "Experimental & Numerical Methods for the Specification of Loads, Stressess & Strains for Fatigue Strength Investigations", The 2nd KATECH International Seminar, 2002.
 - 4) ADAMS/VIEW/CAR Documentation kit, Version 12.0, Mechanical Dynamics ADAMS.
 - 5) G. R. Choi, S. H. Hwang, S. B. Jeon, "Design and Manufacture of Road Simulator for Suspension Durability Test", KSPE Spring Conference Proceeding, pp.155-160, 2001.
 - 6) J. H. Yoon, S. J. Heo, "Durability Life Prediction Analysis and Optimized Design of a Wheel Suspension Control Arm Based on the Accelerated Durability Test Technique", 2001 KSAE Autumn Conference Proceeding, pp.1075-1080, 2001.
 - 7) H. K. Min, J. G. Jung, I. Y. Yang "Accelerated Durability Analysis of Suspension System", Transactions of KSAE, Vol.10, No.5, pp.168-173, 2002.