

## 가상내구시험을 통한 차량 샤시 부품 내구성 예측에 관한 연구

조 병 관\* · 하 정 호\*\*

\* 한국기술교육대학교 기계정보공학부

### Analysis of Durability of Vehicle Chassis Part in Virtual Test Lab

ByungKwan Cho\* and Jungho Ha\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ. of Tech. & Edu.,

(Received July 25, 2012 ; Revised January 23, 2013 ; Accepted March 6, 2013)

**Key Words:** Virtual testing laboratory(가상시험실), Fatigue analysis(피로 해석), Multibody dynamics(다물체 동역학), Durability(내구성), Flexible Body(유연체)

**초록:** 최근들어, 차량개발 비용과 시간을 줄이기 위한 가상 내구 시험 기법의 사용이 늘어나고 있다. 본 논문에서는 다물체 동역학 모델과 피로 해석을 이용한 가상 내구시험법을 제시 하였다. 유연 다물체 모델을 적용한 전륜현가장치 시스템의 휠센터에 벨지안로와 같은 내구시험로에서 측정한 도로하중이력을 입력하여 각 부품에 부여되는 동응력을 구하였다. 그리고 해석결과를 검증하기 위해 각 부품에서 측정 한 동하중과 해석결과를 비교하였으며 범용피로해석프로그램을 이용하여 부품의 내구성을 예측하였다.

**Abstract:** Recently, virtual test laboratory techniques have been widely used to reduce vehicle development costs and time. In this study, a virtual durability test process using multibody dynamics simulation and fatigue simulation is proposed. The flexible multibody model of the front half of a car suspension is solved using road loads that are measured from durability test courses such as a Belgian road. To verify the simulation results, the measured loads of components and simulation results are collated.

### 1. 서 론

차량의 개발단계에서 내구성 예측은 많은 시간과 비용이 소요된다. 최근 컴퓨터 기술이 급속도로 발전함에 따라 내구해석 범용소프트웨어를 이용한 차량의 내구성 예측 연구가 활발하게 일어나고 있다.<sup>(1~3)</sup> 하지만 이러한 내구성 예측도 차량의 각 부품에 국한되어서 차량의 시험에서 얻어진 하중이력을 각 부품에 입력하여 내구성 예측을 하는데 그쳤다. 최근 들어서는 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하여 차량의 휠센터에 하중이력을 부여함으로써 각 부품에 발생하는 부품 동하중을 예측할 수 있게 되었다. 다물체 동역학 해석 모델은 각 부품을 강체로 고려하여 서로 다른 강체를 조인트 또는 부싱으로 연결하여 구성된다. 하지만 이러한 강체 다물체 동역학 모델은

실제 강성이 낮은 요소들의 탄성변형을 고려하지 못하여 실제 시험과 다른 결과를 도출할 수도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 차량의 샤시 부품을 유연체 모델로 해석함으로써<sup>(4)</sup> 보다 정확한 해석이 가능하게 하였다. 본 연구에서는 다물체 동역학 해석프로그램 MSC.ADAMS<sup>(5)</sup>를 이용하여 다물체 동역학 모델을 구성하고 그 모델의 휠 센터에 도로하중이력을 부여하여 각 부품의 동하중을 분석하고 MSC.Fatigue<sup>(6)</sup>를 사용하여 각 부품의 수명을 예측하였다.

### 2. 가상 시험실 구축

#### 2.1 차량 모델 구축

본 연구에서 고려한 차량은 국산 대형 승용차로서 서스펜션 방식은 앞뒤 모두 멀티링크로 구성되어 있다. 본 논문에서는 시작차 제작 이전의 설계 단계에서의 전륜 현가장치의 수명 예측이므로

† Corresponding Author, [iloverc@kut.ac.kr](mailto:iloverc@kut.ac.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

로 다른 요소들은 생략하고 전륜현가장치 요소만 고려하여 모델링 하였다. Fig. 1에는 MSC.ADAMS 로 구성된 현가장치 모델을 나타내었다. 한쪽 코너에 로워 레터럴 암(lower lateral arm)과 로워 텐션 암(lower tension arm), 두 개의 어퍼 컨트롤 암(upper control arm), 타이로드(tie rod), 너클(knuckle)로 이루어져 있고, 서브프레임이 추가되어 전륜 현가장치가 구성된다. 차량 모델은 실제 차량과 같은 기구학적 구조를 가지는 조인트로 구성하였다. 텐션암 및 레터럴 암과 너클, 두 개의 어퍼암과 너클, 너클과 타이로드 엔드는 자유도가 3인 구면 조인트를 사용하였다. 현가장치와 같은 다물체 동역학 해석에서 유연성을 고려하는 요소에는 부시 요소와 댐퍼 요소를 들 수 있으며 이러한 거동 모델은 해석의 정확성에 영향을 끼친다. 부시 요소는 각 차량과 부품 사이의 충격을 완화해주는 역할을 하는데 부시의 특성은 정적시험을 통하여 3 방향의 강성과 3 방향의 회전 강성을 측정하였고, 측정된 강성은 강성계수로 표현 되었다. 텐션, 레터럴 암과 서브프레임, 서브프레임과 차체, 어퍼암과 차체는 부시로 연결하였으며 각 부시의 강성은 Table 1과 같다.

2.2 유연체 모델 적용

휠 센터로부터 차량에 전달되는 하중은 현가 시스템을 통하여 흡수 또는 차체로 전달된다. 이 과정에서 현가시스템의 각 부품에 동응력이 작용되는데 이때 각 부품의 고유모드가 도로로부터 발생하는 하중의 주파수 특성과 일치하면 부품이 공진하여 하중의 진폭이 증폭될 가능성이 높아진다. 이 경우에는 차량 부품을 강체모델 대신에 유연체로 모델링하면 이러한 현상을 고려할 수 있으며, 각 노드에 부여되는 하중의 데이터화가 가능하며 MSC.Fatigue를 이용하여 각 요소의 내구성 예측이 가능하다. 이를 위해 전륜의 서브프레임, 로어 레터럴암, 로어 텐션암, 두 개의 어퍼암을 유연체로 선정하였다. 모델은 유연체 다물체 동역학 해석을 위해 MSC. NASTRAN<sup>(7)</sup>을 이용하여 자유경계조건에서 모드해석을 수행하여 Nodal coordinates, Element topology, Nodal mass, Generalized stiffness, Generalized mass, Nodal displacements 등 각 부품의 유연성 데이터를 생성한다. 이를 ADAMS.FLEX에서 MNF 파일을 생성하여 ADAMS 모델에 입력하였다. 총 6개의 부품

Table 1 Bush & Spring characteristics

Spring Model	Spring Rate (N/mm)			Preload (N)			
		35.53			7825		
Damper Model	Damping Rate(Nsec/mm)						
	4.19						
Bush Model	Bush Name	Kx (N/mm)	Ky (N/mm)	Kz (N/mm)	Rx (N*mm/deg)	Ry (N*mm/deg)	Rz (N*mm/deg)
	Lateral Arm	6350	6350	720	5000	5000	6500
	Tension Arm	1270	450	270	1000	1000	2000
	Front Upper	1870	1500	300	1900	1900	1400
	Rear Upper	1870	1500	300	1900	1900	1400
	Subframe	5000	5000	1000	2000	2000	1000

Table 2 Natural frequencies of the components

Flexible body	1st natural frequency [Hz]
Subframe	125
Knuckle	568
Lateral arm	879
Tension arm	655
Upper front	1260
Upper rear	767

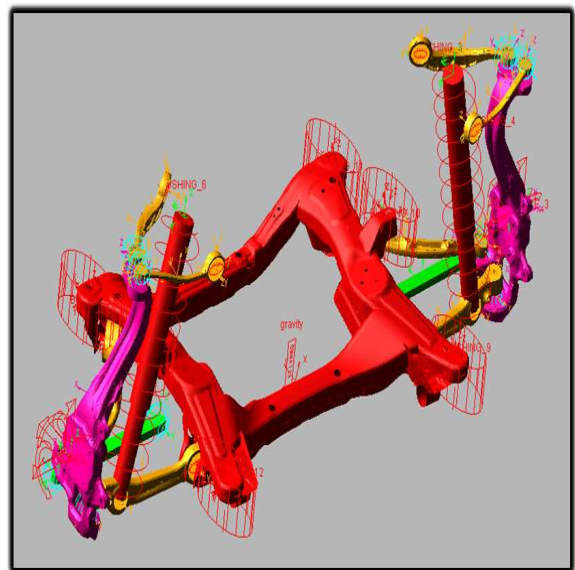


Fig. 1 Front suspension model



Fig. 2 Belgian road

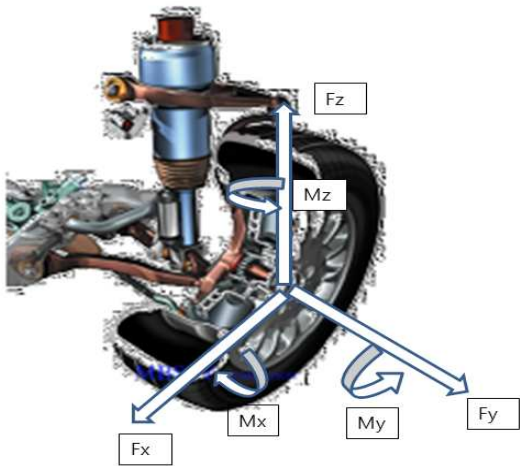


Fig. 3 Coordinates for wheel force

을 정규모드해석을 통해 고유주파수를 추출하였으며, 각 부품의 1차 모드는 Table 2와 같다.

2.3 하중 및 경계조건

가상시험실을 구축하여 차량부품의 내구성을 예측하기 위해선 각 부품에 하중이력을 부여하여야 한다. 본 논문에서는 연구 대상 차량에 WFT(wheel force transducer)를 부착하여 Fig. 2와 같은 PG(proving ground)내 내구시험로인 벨지안로를 주행하여 하중이력을 6분력으로 측정하였다. 이렇게 실제 도로에서 측정한 도로 하중이력을 가상시험실내 차량 모델의 휠 센터에 부여하였다. Fig. 3은 벨지안로 계측 시에 사용된 좌표계이며, Fig. 4는 계측한 좌우 하중을 도시한 것이다. 벨지안로는 차량의 내구테스트를 위한 테스트 도로이며 본 주행시험장의 벨지안로는 일

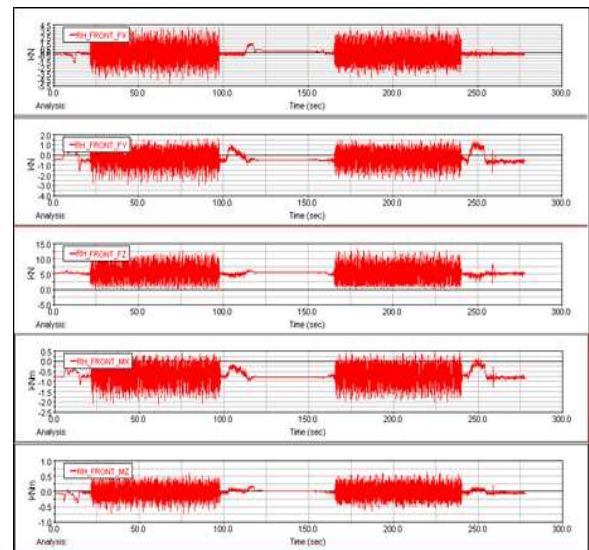
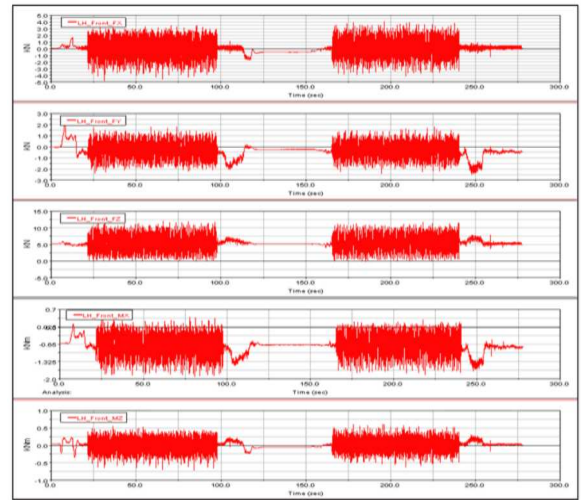


Fig. 4 Measured wheel force on the Belgian road

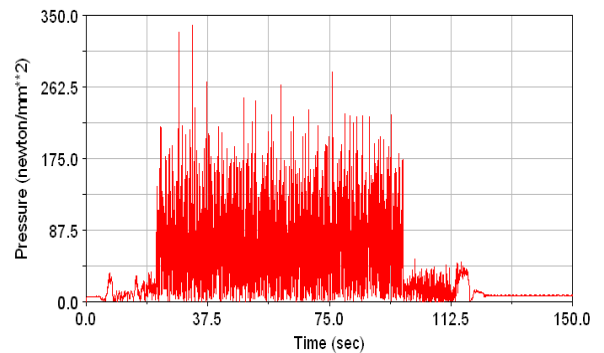


Fig. 5 Hotspot stress plot of upper rear arm

반도로의 100배의 내구도를 가지는 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup>

### 3. 동역학 해석 결과

2장에서 모델링한 가상시험 모델을 이용하여 가상내구해석을 수행하였다. 유연체 다물체 동역학 해석을 통하여 차량 서스펜션 요소에서 가장 큰 응력을 나타내는 래터럴 암과 어퍼 리어 암의 내구해석을 수행하였다. Fig. 5는 다물체 동역학 해석 시 부품의 가장 큰 응력을 나타내는 어퍼 리어 암의 핫스팟(Hot spot)의 하중 이력을 도시하였다. 특정한 경우를 제외하고 200MPa 정도의 응력이 일정하게 작용하는 것을 볼 수 있으며 Table 3은 핫스팟에서의 최대 응력을 나타내었다.

#### 3.1 동역학 해석 검증

가상내구시험은 실제 내구시험로를 주행한 것과 동일하게 300초간 수행하였으며 Fig. 6은 래터럴 암의 볼 조인트 Y방향 하중, Fig. 7은 전륜 스프링의 변위를 시험과 비교한 결과를 도시하였다. 저주파수 구간에서 부품하중에 대한 최대값을 비교할 경우 시험결과와 해석결과가 일치하는 것으로 나타났다. 하지만 고주파수 구간에선 시험결과와 다소 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 시간에 따른 하중으로는 비교할 수 없다고 판단하여 피로 해석학적으로 의미 있는 레인지-페어 카운팅(Range-pair counting) 기법을 이용하여 해석 결과를 검증하였다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 시험에서 얻은 하중의 측정결과와

가상시험에서 수행한 결과의 오차가 10% 이내이다. 이는 해석결과가 도로하중의 특성을 잘 반영한 것으로 판단되며 이와 같은 결과를 이용하여 차량 부품의 내구성의 판단이 가능함을 의미한다.

Table 3 Maximum stresses at hot spot

Part Name	Node No.	Max Stress [MPa]
Upper Rear Arm	25316	331.6
Lateral Arm	7556	135.6

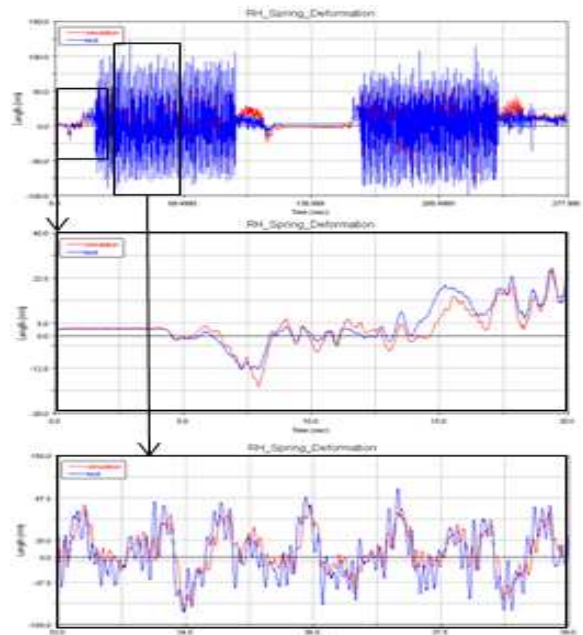


Fig. 7 Deformation of RH spring

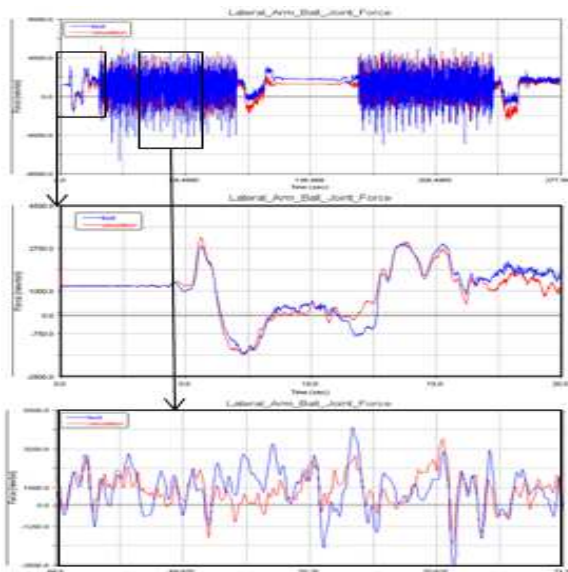


Fig. 6 Joint force at lateral arm

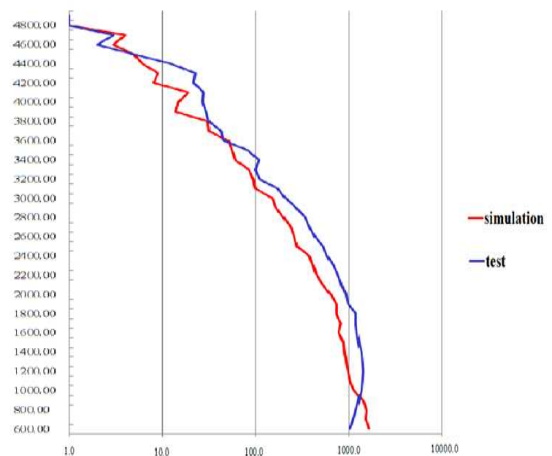


Fig. 8 Ball joint range-pair curve



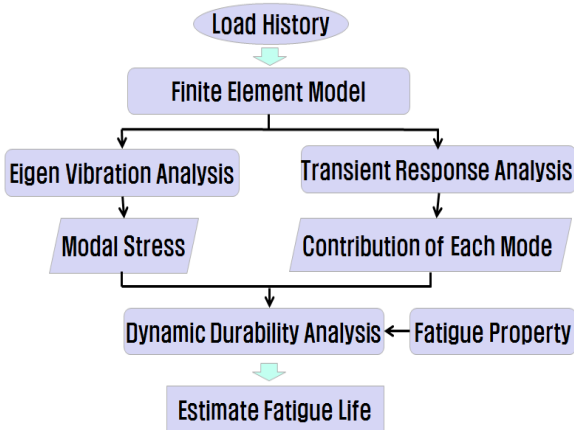


Fig. 9 Process of MSM durability analysis

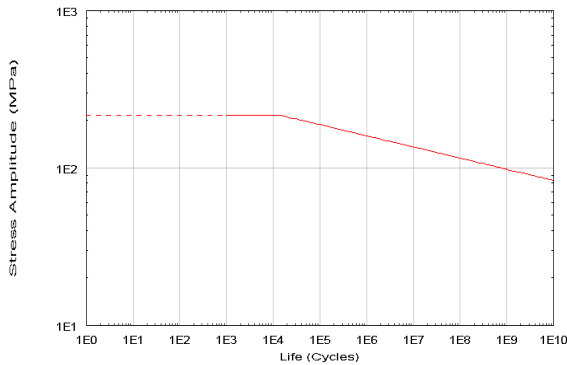


Fig. 10 S-N curve of lower lateral arm

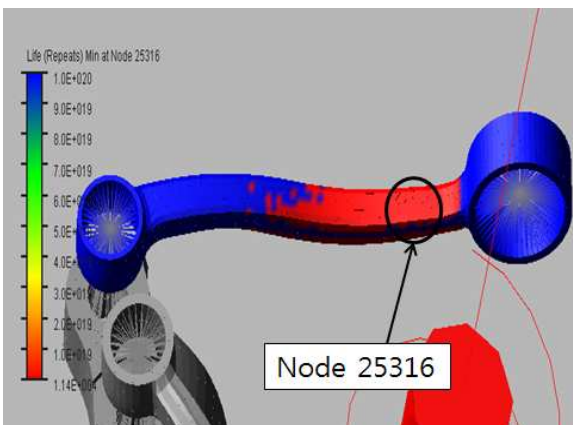


Fig. 11 Life diagram of upper rear arm

3.2 내구성 예측

내구성 해석은 MSC.Fatigue를 사용하였으며 데이터 양을 줄이면서 구조물의 동적인 효과를 고려할 수 있는 모드 중첩법을 이용하여 내구성 해석을 수행하였다.<sup>(5)</sup> Fig. 9에 모드 중첩법을 이용한 내구 해석 방법을 도시하였다. 고유모드 해석을 통해 시스템 고유진동수가 가진 주파수 범

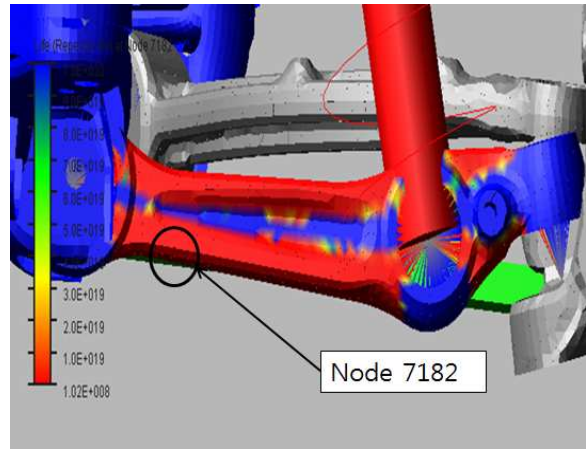


Fig. 12 Life diagram of lower lateral arm

위 내에 있다면 동적특성을 고려한 피로해석을 수행해야 하며, 이 과정에서 고유모드 해석시 모드별 응력 값을 산출한다. 다음으로 입력하중에 대한 시스템 응답을 구하기 위해 과도 진동해석을 수행한다. 마지막으로 피로해석부에서는 모드별 응력과 과도응답해석의 결과인 모드기여도를 중첩하여 실제 응력을 얻고, Fig. 10과 같은 S-N 선도를 입력하여 피로수명을 산출한다. 이러한 일련의 과정을 본 연구대상 부품에 적용한 결과는 Fig. 11, Fig. 12와 같으며 내구 시험로에서 측정 한 싸이클의 하중이력은 일반 아스팔트 도로에서 160km를 주행한 것과 같은 가속도를 가지고 있다.<sup>(3)</sup> 그러므로 어퍼 리어 암은 11,400회로 11400×160km의 수명을 가지며 로워 래터럴 암은 1.02×10<sup>8</sup>회로 1.02×10<sup>8</sup>×160km의 수명을 가진다. 따라서 현가장치의 두 부품은 무한수명을 보이고 있으며 이것은 차량 부품의 내구성이 충분하다는 것을 의미한다.

4. 결론

(1) 차량의 각 부품을 유한요소로 모델링 한 후 MSC.NASTRAN을 이용하여 모드해석을 수행하고 유연체 모델을 생성하여 Adams/View 상의 강체 모델에 입력하였다. 그 결과 탄성변형을 고려한 해석으로 좀 더 정확한 해석을 가능케 하였다.

(2) 실제 도로에서 추출한 하중이력을 가상시험실 내의 차량의 휠 센터에 입력하여 각 부품에 부여되는 동하중을 해석하고 실제 주행 테스트 결과와 비교하여 해석결과를 검증하였다. 그

결과 스프링의 변위는 시험 결과와 수렴하였지만 로워 래터럴 암의 볼 조인트의 동하중은 다소 상이하게 나타났다. 이러한 문제를 해결하기 위해 피로역학적으로 의미 있는 레인지-페어 기법을 이용하여 동역학 해석 결과를 검증하였다.

(3) 모드 중첩법과 응력-수명 방법을 이용하여 차량 부품 중 가장 응력이 크게 집중되는 리어 어퍼암과 차량부품 내구성에 영향을 미치는 로워 래터럴 암을 MSC.Fatigue를 이용하여 내구성 해석을 수행하였다. 그 결과 어퍼 리어 암은 11,400회 벨지안로를 주행할 수 있는 결과를 예상하여 최적설계 범주 안에 들지만, 로워 래터럴 암은  $1.02 \times 10^8$  회가 예상되어 다소 과설계된 측면이 있으므로 부품의 두께를 줄이거나 기존의 소재보다 강성이 낮은 저렴한 소재를 사용하여 차량의 경량화와 비용 절감이 충분히 가능 하다고 판단된다.

이와 같이 본 논문에서는 차량설계가 완료되기 전 개발 초기단계에 내구성 해석, 구조 해석, 유연체 다물체 동역학 해석 등 다양한 해석을 복합적으로 수행함으로써 실험실 내에서의 로드 시뮬레이터를 이용하여 내구 시험을 수행하기 전에 가상 시험실에서의 내구성 예측을 가능하게 하여 비용과 시간의 절감을 가능하게 하였다.

### 감사의 글

이 논문은 한국기술교육대학교 2011년 교수연구지원 프로그램의 지원에 의하여 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Ko, H. Y. and Choi G. J., 2010, "Durability Performance Evaluation of an Aluminum Knuckle Using Virtual Testing Method," *Transaction of KSAE*, Vol. 18, No. 1, pp.44~50
- (2) Kim, G. H., Kang, W. J., Kim, D. S., Ko, W. H. and Lim, J. Y., 2006, "The Effect of the Flexible Bodies in the Analysis of Virtual Testing Laboratory," *Transaction of KSAE*, Vol. 14, No. 3 pp. 68~74.
- (3) Kim, M. S., Park, D. W., Park, S. J. and Yoo, W. S., 2004, "Durability Analysis Techniques of Vehicle Components," *Transaction of KSAE*, pp. 816~821.
- (4) Kim, S. S., Lee, S. B., Jung, H. K., Son, H. S., 2002, "Vehicle Rid and Handling Simulation with Flexible Car Body," *Transaction of KSAE*, pp.805~812
- (5) Lee, J. H., Kim, S. J., Han, M. G., Chang, S. I., Jung, I. S., 2009, "A Study on Fatigue Life Evaluation of a Bracket for ESC Assembly by Using Modal Superposition Method," *Trans Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, pp.1370~1374
- (5) MSC.ADAMS user manual
- (6) MSC.Fatigue user's guide
- (7) MSC.NASTRAN user manual