

# 가상시험법을 이용한 알루미늄 너클의 내구수명 평가

고한영·최규재\*

군산대학교 기계공학과

## Durability Performance Evaluation of an Aluminum Knuckle using Virtual Testing Method

Hanyoung Ko · Gyoojae Choi\*

Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk 573-701, Korea

(Received 23 February 2009 / Accepted 6 July 2009)

**Abstract** : Durability performance evaluation technology using Virtual Testing Method is a new concept of a vehicle design, which can reduce the automotive components design period and cost. In this paper, the fatigue life of an aluminum knuckle of a passenger car is evaluated using virtual testing method. The flexible multibody dynamic model of a front half car module is generated and solved with service loads which are measured from Belgian roads. Using a multibody dynamic analysis software, the flexible multibody dynamic simulation of a half car model is carried out and the dynamic stress profile of an aluminum knuckle is acquired. The stress profile is exported to a fatigue analysis software and durability performance of an aluminum knuckle is evaluated.

**Key words** : Durability performance(내구성), Aluminum knuckle(알루미늄 너클), Virtual testing method(가상시험법), Flexible multibody dynamic model(유연체 다물체 동역학 모델)

### 1. 서론

자동차 부품의 내구 성능 평가 방법으로는 해석적 평가방법과 시험적 평가방법이 있다. 시험적 방법으로는 대상 부품을 차량에 직접 장착하여 내구 시험로에서 정해진 모드로 주행하여 내구성능을 평가하는 방법과 내구시험기를 이용하여 가속 내구시험을 수행하여 내구성능을 평가하는 방법을 들 수 있다. 해석적 평가방법은 자동차 부품에 작용하는 하중 이력과 물성치를 바탕으로 피로해석을 수행하는 방법이다.<sup>1)</sup>

최근 차량 개발에 있어서 경량화와 내구 품질향상을 위해 가상시험법(Virtual Testing Method)을 많이 활용하고 있다. 이 방법의 장점은 시험을 통해 차

량의 휠 하중을 구한 후 차량 동역학 모델에 입력하여 새시 부품에 대한 내구 수명을 예측할 수 있는 기술로 설계 기간의 단축과 비용절감의 효과를 얻을 수 있어 내구 성능 평가에 많이 사용되고 있다.<sup>2,3)</sup> 내구 수명 평가를 위한 가상시험법의 적용은 다양한 소프트웨어를 연결하여 사용하는 통합 해석 환경 하에서 수행되며 구조해석, 동역학 해석, 피로 해석 등을 수행하게 된다. 이와 함께 차량을 강체로만 모델링하는 경우 실제 동특성을 반영하기 어려워 해석의 정확도가 떨어질 뿐만 아니라 동하중 진동 특성이 반영되지 않는다. 따라서 내구 수명 평가의 대상 부품을 유연체로 모델링하여 해석을 수행하여야 한다.

본 논문에서는 자동차의 핵심 보안부품으로 차량 경량화를 위해 많은 연구가 수행되고 있는 알루미늄 너클(aluminum knuckle)을 대상으로 가상시험법을

\*Corresponding author, E-mail: gjchoi@kunsan.ac.kr

이용하여 내구 해석을 수행하였으며, 전륜 새시 모듈(front half car module)에서의 유연체 선정 방식과 유연체 고유 모드 수 선택에 따른 영향도를 분석하였다. 이를 통해 가상시험법을 이용한 알루미늄 너클의 효과적인 내구 성능 평가 기법을 제시하였다.

## 2. 가상 시험법 모델 구축

### 2.1 내구성능 해석 절차

내구성능을 평가하기 위한 가장 일반적인 방법은 정해진 모드에 따라 장시간 주행 시험을 실시하는 것으로 이 방법은 비용과 시간이 많이 소요되는 문제가 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 실험실 내에서 내구 시험기(road simulator)<sup>4)</sup>를 활용하기도 하지만 실제 차량 및 부품이 제작되기 이전의 단계에서는 사용할 수 없기 때문에 가상시험법에 대한 관심은 증대되고 있다.

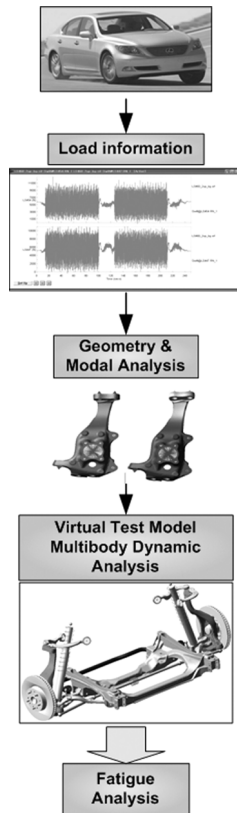


Fig. 1 Durability analysis procedure using Virtual Testing Method

Fig. 1에는 본 논문에서 사용한 유연체 다물체 동역학 모델을 기반으로 하는 가상시험법을 이용한 내구성능 해석 과정을 도시한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 주행 시험을 통해 측정된 휠 하중 신호를 기반으로 하여 대상 부품에 대하여 고유 모드를 해석한다. 가상시험법 내의 유연체 다물체 동역학 모델을 구성하고 이 결과를 이용하여 대상 부품의 동응력을 계산한 후 재료의 특성 자료와 함께 내구 해석 프로그램에 입력하여 내구수명을 예측하는 것이다. 이를 위해 유연체 부품 고유 모드 해석, 유연체 다물체 동역학 해석, 내구해석 등의 통합 해석 환경을 구축한 후 각 단계별 해석을 수행한다.

### 2.2 다물체 동역학 모델링

다물체 동역학 모델링 방법은 차량 시스템을 구성하는 각 부품, 조인트, 힘 요소 등을 이용하여 실제 시스템 그대로 모델링하는 방법으로 본 논문에서는 대상 차량의 전륜 새시 모듈에 대해 모델링을 실시하였다. Table 1에는 내구성능해석 대상 차량의 주요 제원을 기술하였다. 동역학 모델링을 위하여 시판 중인 대상 차량 부품을 구매한 후 3차원 스캐너를 이용하여 각 부품의 형상 및 연결점에 대한 정보를 추출한 후 실제 차량과의 비교를 통해 데이터를 검증하였다.

Fig. 2는 역설계된 전륜 새시 모듈을 도시한 것이다. 대상 차량의 전륜 현가장치는 멀티 링크(multi link) 형식으로 한 쪽 코너에 두 개의 로워 컨트롤 암(lower control arm, LCA), 두 개의 어퍼 컨트롤 암(upper control arm, UCA), 속 업소바(shock absorber), 타이로드(tie-rod), 너클(knuckle)로 이루어져 있고 스테빌라이저바(stabilizer bar), 서브프레임(sub-frame) 등이 추가되어 전륜 새시 모듈을 구성한다. 차체와의 연결을 위하여 서브프레임과 차체, LCA와 서브프레임, UCA와 차체, 스테빌라이저바와 서브프레임 사이는 부시(bush)로 연결하였다. 전륜 새시 모듈은 조향이 가능하기 때문에 실차 시험 시 사람이 조향핸들을 잡고 있는 정도의 강성을 가질 수 있도록 래크 차체사이를 스프링으로 연결한 병진 조인트(translation joint)로 모델링하였다.

내구성능 평가 대상인 너클은 유연체로 모델링

Table 1 Vehicle specification of benchmarking vehicle

Item	Description	
	Suspension type	Front
	Rear	Multi link type
CVW	2,030kg	
GVW	2,355kg	
Wheel base	2,970mm	
Overall length	5,030mm × 1,875mm × 1,465mm	

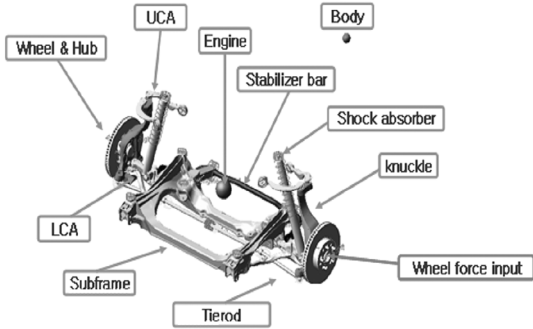
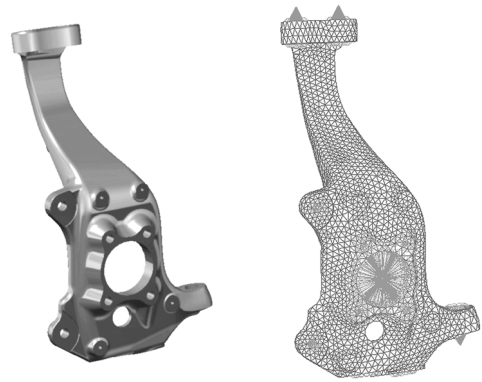


Fig. 2 Multibody dynamic model of a front chassis module

하였으며, Fig. 2에 최종 구성된 유연체 다물체 동역학 해석 모델을 도시하였다.

### 2.3 유연체 부품 모델링

유연성 다물체 동역학 모델을 이용한 내구 성능 해석을 위해서는 대상 부품의 유연체 모델이 필요하다. 본 논문에서는 경량화를 위해 알루미늄으로 제작한 너클을 유연체로 모델링 하였다. Fig. 3은 Hyper-works<sup>5)</sup>를 이용하여 모델링한 너클의 유한요소 모델과 실제 제품 사진을 나타낸 것이다. 실제 차량에 장착된 알루미늄 너클의 질량은 4.2kg이며, 모델링된 질량은 4.3kg으로 약 2%의 오차를 가지고 모델링 되었다. ADAMS<sup>6)</sup> 프로그램에서 유연체 다물체 동역학 해석을 위한 유연체 모델로 입력하기 위하여 자유 경계조건에서의 고유 모드 해석을 수행하여 고유 모드와 고유 주파수를 추출하였으며 Fig. 4와 Table 2, 3에 나타내었다. 너클의 모델링 정확도를 검증하기 위하여 진동 시험 결과와 비교하였으며 표에서 보는 바와 같이 1차와 2차 공진 주파수에서 거의 오차가 발생하지 않음을 알 수 있었다. 이와 같이 구한 유연체 모델을 ADAMS 모델에 입력하여 유연체 다물체 동역학 해석을 수행하였다.



(a) Picture (b) FEM model  
Fig. 3 Finite element model of an aluminum knuckle

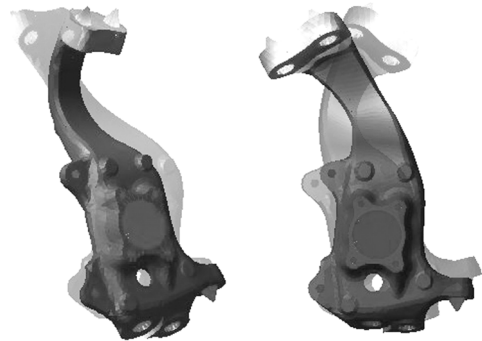


Fig. 4 1st, 2nd natural mode shape of a knuckle

Table 2 Description of knuckle finite element model

No. of element	No. of node	Material property	
		E[N/mm <sup>2</sup> ]	69000
17591	5022	ρ[kg/mm <sup>3</sup> ]	2.7E-006
		ν	0.3

Table 3 Comparison of natural frequency between analysis and experiment

No. of mode	Analysis	Experiment	Error[%]
1	559.4 Hz	557.1 Hz	0.4
2	782.1 Hz	792.1 Hz	1.3

### 2.4 주행 하중 계측

가상시험법을 이용하여 알루미늄 너클의 내구성 성능을 예측하기 위해서는 가진 하중이 필요하다. 본 연구에서는 대상 차량에 WFT(wheel force transducer)를 장착한 후 내구 시험로인 벨지안로를 주행하면서 계측한 바퀴에서의 6분력 힘을 해석 모델에 입력

Table 4 Max. and Min. value of wheel forces

	LH			RH		
	Fx[N]	Fy[N]	Fz[N]	Fx[N]	Fy[N]	Fz[N]
Max.	3690	2050	11100	4370	1900	12800
Min.	-3550	-1970	-340	-3010	-2820	311

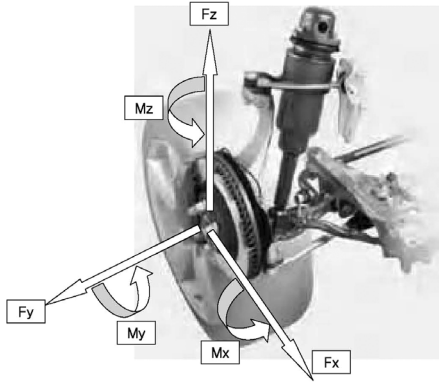
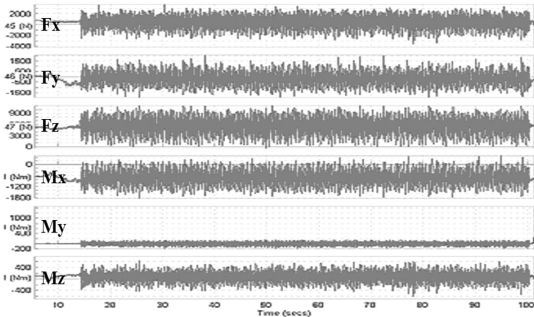
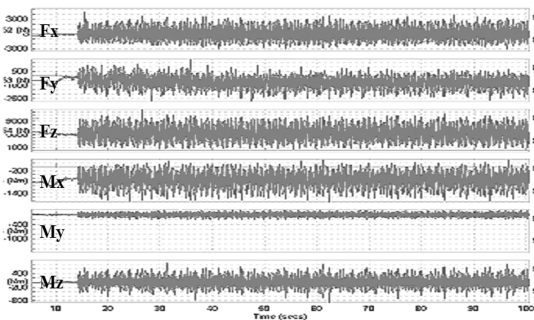


Fig. 5 Axes of wheel forces



(a) LH side



(b) RH side

Fig. 6 Measured wheel force on a Belgian road

하여 해석을 수행하였다. 일반적으로 벨지안로 주행 하중은 100배의 내구도를 가지는 것으로 알려져 있으며 이 하중 데이터를 다물체 동역학 모델의 바

퀴 중심점에 가진하였다. Fig. 5는 내구 시험로 계측 시에 사용된 좌표계이며 Fig. 6에는 계측한 좌우 휠 하중을 도시한 것이다. Table 4에는 좌우 휠 하중의 최대 최소값을 나타낸 것이며 주행 시 최대 수직방향의 하중은 기준 축 하중에 비하여 약 2.4배의 하중이 발생함을 알 수 있었다.

### 3. 내구성 해석

#### 3.1 기본 모델 내구 해석

2장에서 구성한 가상시험법 모델을 이용하여 유연체 다물체 동역학 해석을 수행하였다. 유연체 다물체 동역학 해석 결과 벨지안로 주행 중 너클에서 발생하는 동응력을 구하였으며 Fig. 7에 일부 노드에서의 동응력을 도시하였다. 이와 같이 가상시험법 모델을 이용하여 너클의 임의의 절점에서의 주행 중 동응력을 계산할 수 있으며 이를 이용하여 내구수명을 계산할 수 있다.

유연체 다물체 동역학 해석 결과를 검증하기 위하여 실차 주행 시험 시 측정된 스프링에서의 변위와 비교하였다. 비교 결과를 Fig. 8에 도시하였으며 크기(magnitude)에 다소의 오차가 있으나 전반적으로 시험과 해석 결과가 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

ADAMS/Durability 모듈을 사용하여 구한 동응력과 Fig. 9에 도시한 알루미늄 너클의 S-N 선도, 재료물성치 등 내구 해석에 필요한 조건을 입력하고 Fe-Fatigue<sup>7)</sup>를 이용하여 내구 해석을 수행하였다.

Fig. 10과 Table 5에는 내구 해석 결과를 기술하였으며 내구 시험로인 벨지안로에서 계측한 1사이클의 주행하중은 일반도로 80km를 주행한 것과 동일한 정도의 가속도를 가지고 있다. 표에서 보는 바와

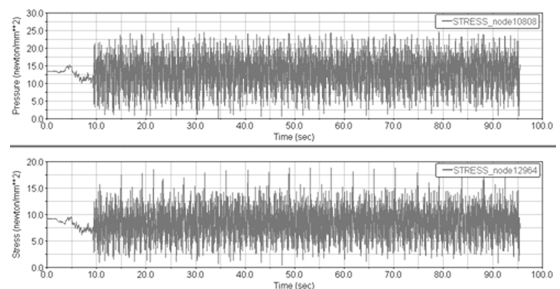
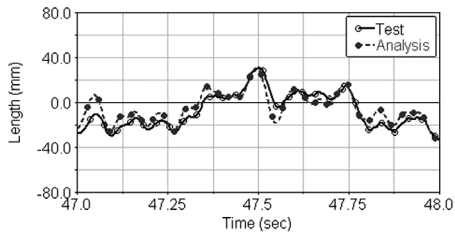
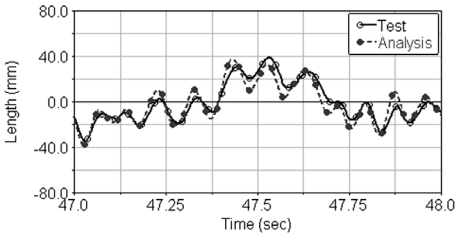


Fig. 7 Von mises stress of typical nodes of knuckle



(a) LH side



(b) RH side

Fig. 8 Comparison of spring displacements between experiments and analysis

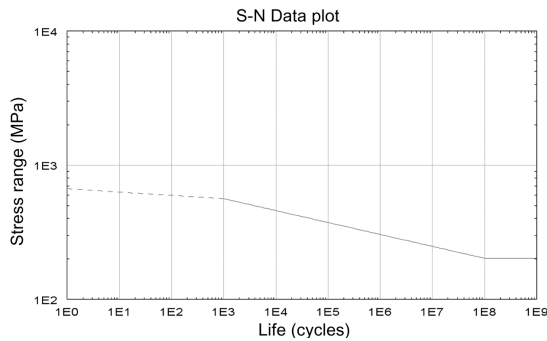


Fig. 9 S-N Curve of aluminum knuckle

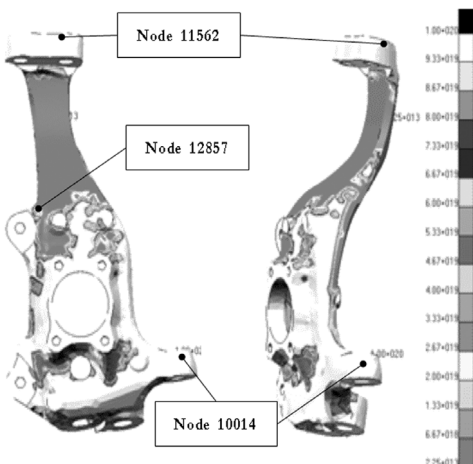


Fig. 10 Results of durability analysis of a knuckle

Table 5 Fatigue life prediction of an aluminum knuckle

Node No.	Damage	Life Repeats
10014	$2.7501 \times 10^{-12}$	$3.363 \times 10^{11}$
11562	$6.1145 \times 10^{-13}$	$1.635 \times 10^{12}$
12857	$1.1016 \times 10^{-13}$	$9.077 \times 10^{12}$
12849	$8.7348 \times 10^{-14}$	$1.145 \times 10^{13}$
12964	$5.3313 \times 10^{-14}$	$1.876 \times 10^{13}$
10808	$2.8723 \times 10^{-14}$	$3.481 \times 10^{13}$

같이 가장 짧은 수명을 가진 노드에서의 수명이  $3.363 \times 10^{11}$  회로  $3.363 \times 10^{11} \times 80\text{km}$ 의 수명을 가짐을 의미한다. 따라서 너클은 무한 수명을 보이고 있으며 이것은 목표 주행 거리 내에 알루미늄 너클의 내구수명이 충분하다는 것을 의미한다.

### 3.2 유연체 너클의 모드 수 선정에 따른 영향도 분석

유연체 다물체 동역학 해석을 수행하기 위해서는 알루미늄 너클의 고유 모드 해석을 통해 구한 고유 모드를 입력해야 한다. 유한요소해석을 통해 구한 알루미늄 너클의 고유 모드 개수는 모델링된 너클의 자유도 수 만큼 구해지며 일반적으로 정확도를 높이기 위하여 유한요소의 크기를 작게 하기 때문에 상당히 고차의 모드까지 구해진다. 유연체 다물체 동역학 해석 시에는 입력하는 고유모드의 개수에 많아지면 많아질수록 해석의 정확도는 높아지게 되나 동역학 해석에 소요되는 시간이 오래 걸리는 문제점이 있다. 따라서 해석의 정확도 확보와 함께 계산 시간을 단축시킬 수 있도록 적절한 수의 고유 모드 개수 선정이 중요하다.

본 연구에서는 알루미늄 너클의 고유 모드 선정 개수 변화에 따른 내구 수명 해석 결과를 비교하였

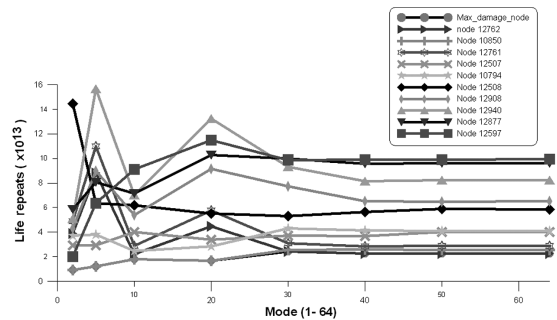


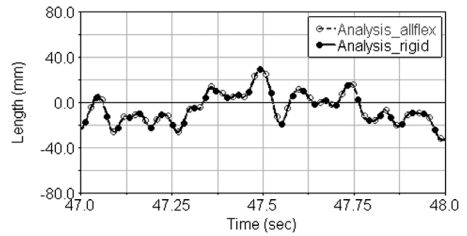
Fig. 11 Life variation of typical nodes

다. Fig. 11에는 선정된 고유 모드 개수 증가에 따른 내구 성능 해석 결과를 나타낸 것으로 너클의 주요 노드의 수명 변화를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모드 수를 40차 이상 고려하여도 해석 결과가 일정하게 유지됨을 알 수 있으며 40차까지 고유 모드를 선정하여 해석을 진행하는 것이 효율적임을 확인할 수 있다.

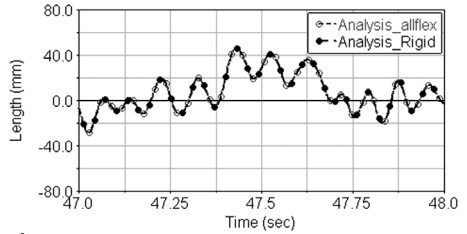
### 3.3 유연체 모델 구성 방법에 따른 영향도 분석

본 연구에서 구성한 전륜 새시 모듈의 너클, 어퍼암, 로워 암, 서브 프레임 등 각종 구조 부재는 강체가 아니며 힘이 작용하는 경우 변형이 발생하는 유연체라고 할 수 있다. 그러나 모든 구성 부품을 유연체로 모델링하는 경우 각 부품 하나 하나 고유 모드 해석을 수행하고 다물체 동역학 해석 시 모든 고유 모드를 입력해야 하기 때문에 모델링 시간 뿐만 아니라 해석 시에도 시간이 많이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 내구해석 대상인 알루미늄 너클만 유연체로 모델링하고 이외의 부품은 모두 강체로 모델링하는 경우와 모든 구성 부품을 유연체로 모델링하는 경우를 비교하여 유연체 모델 구성 방법에 따른 영향도를 분석하였다.

Table 6에는 유연체 선정에 따른 다물체 동역학 해석 시간을 기술하였으며 이것은 사용하는 하드웨어 성능, 선정 고유모드 수 등에 따라 계산시간이 다르지만 유연체 선정수 변화에 따른 상대 비교는 가능할 것으로 판단된다. 또한 여기에는 유연체 선정 수 증가에 따라 증가하는 유한 요소 모델링, 고유 진동수 해석, 상호 인터페이스 시간 등은 고려하지 않은 것이며 순수하게 유연체 다물체 동역학 해석 시간만을 비교한 것이다. Fig. 12에는 상기 두 가지 경우의 모델 구성에 따른 유연체 다물체 동역학 해석 결과를 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 두 가지의 경우에 대하여 응답에 변화가 거의 보이지 않았다. Table 7에는 내구 성능 해석 결과를 표시하였다. 일부 노드의 수명 순서는 변경되었지만 정량적인 수치는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 따라서 내구 성능 해석 대상인 너클만을 유연체로 모델링하고 이외의 다른 부품은 강체로 모델링 하는 것이 모델링 시간 단축과 해석 시간 단축에 효과적인 방법임을 알 수 있다.



(a) LH side



(b) RH side

Fig. 12 Comparison of spring displacement according to flexible body modeling methods

Table 6 Comparison of analysis time according to the number of flexible bodies

No. of flexible body	Analysis time (approximated)
0	20 minute
3	40 minute
4	80 minute
8	100 minute
12	130 minute

Table 7 Comparison of knuckle fatigue life

All flexible body model		Knuckle only flexible body model	
Node No.	Life Repeats	Node No.	Life Repeats
12762	$2.25 \times 10^{13}$	10850	$2.106 \times 10^{13}$
10850	$2.546 \times 10^{13}$	12762	$2.453 \times 10^{13}$
12761	$2.872 \times 10^{13}$	12761	$2.899 \times 10^{13}$
12507	$4.007 \times 10^{13}$	12507	$4.311 \times 10^{13}$
10794	$4.09 \times 10^{13}$	10794	$4.493 \times 10^{13}$
12908	$5.832 \times 10^{13}$	12908	$5.689 \times 10^{13}$

## 4. 결론

본 논문에서는 실차주행 시험이나 실험실 내에서의 로드 시뮬레이터로 내구 시험을 수행하기 전에 보다 짧은 시간 내에 내구성능을 파악할 수 있는 가상시험법을 이용하여 알루미늄 너클의 내구 수명을 해석하였으며 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- 1) 3차원 스캐너를 이용하여 대상 차량 부품의 형상을 측정하여 CAD 모델을 구성하였으며 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하여 진륜 새시 모듈을 모델링 하였다.
- 2) 유연체 다물체 동역학 해석 모델 구성을 위해 알루미늄 너클의 고유 모드 해석을 수행하였으며 진동 시험과 비교 결과 1, 2차 모드에서 약 0.4, 1.3%의 오차 내에서 일치하였다.
- 3) 구성된 유연체 다물체 동역학 모델에 내구 시험로에서 계측한 휠 하중을 입력하여 동응력 이력을 해석한 후 이를 바탕으로 내구해석을 수행하였으며 해석 결과 대상 차량 알루미늄 너클은 무한 내구 수명을 가짐을 확인하였다.
- 4) 컴퓨터 계산 시간을 최소화하기 위하여 유연체 너클의 모드 수 선정에 따른 영향도를 분석하였으며 40차 이상 선정 시에는 내구 수명에 크게 변화가 없음을 알 수 있었다.
- 5) 가상시험법을 이용하여 진륜 새시 모듈 모델링 시 모델링 시간과 컴퓨터 계산 시간을 단축하기 위하여 유연체 구성 방법에 따른 영향도를 분석하였으며 관심 부품인 알루미늄 너클 이외의 부품은 강체로 모델링하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

이상과 같이 본 논문에서는 실제 제품 제작 이전의 단계에서 구조해석, 다물체 동역학 해석, 피로 해석 등의 복합적인 시뮬레이션 환경을 활용한 가상시험법을 이용하여 자동차 알루미늄 너클의 내구 성능을 평가하였다. 이에 따라 초기 설계 단계에서 가상시험법을 이용하여 시제품 제작 후 로드 시뮬레이터 시험과 실차 시험을 통하여 상호 검증이 이루어진다면 해석의 정확도를 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부가 시행하는 부품소재기술 개발사업의 지원으로 이루어진 연구이며, 관계자 여러분과 자동차부품연구원 관계자분들의 협조 감사드립니다.

## References

- 1) S. J. Choi, J. W. Park, K. K. Jeon and Y. M. Yoo, G. J. Choi and T. W. Park, "A Study on Durability Performance Estimation for Development of Chassis Corner Module," Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.159-166, 2006.
- 2) B. L. Choi, J. M. Min, D. H. Choi, K. K. Jeon, J. W. Park, S. J. Choi and J. M. Ko, "Optimization of Torsion Beam Axle System for Maximizing Fatigue Life Cycle and Improving K&C Characteristics," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.692-697, 2007.
- 3) S. H. Son, Y. G. Ryu, S. J. Heo, Y. H. Lee and D. S. Kim, "Calculation of Suspension Component Forces for Durability Analysis using Virtual Testing Lab," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.646-651, 2007.
- 4) A. Li, P. Leblanc and D. C. W. Wong, "6DOF RTS Drive File Development Technique for Solid-Axle-Type Rear Suspension Instrumented for 4DOF Applications," SAE 2005-01-0855, 2005.
- 5) Hyper Works User's Manual, Altair Engineering, Inc., 2006.
- 6) ADAMS User's Manual, MSC. Software Corporation, 2008.
- 7) Fe-Fatigue User's Manual, nCode International Ltd, 2007.