

가상시험기법을 이용한 승용차 전륜 알루미늄 서브프레임 내구설계

남진숙*, 신행우⁺, 최규재⁺⁺

(논문접수일 2011. 09. 14, 수정일 2011. 12. 30, 심사완료일 2011. 12. 30)

Durability Design of a Passenger Car Front Aluminum Sub-frame using Virtual Testing Method

Jinsuk Nam*, Hangwoo Shin⁺, Gyoojae Choi⁺⁺

Abstract

Durability performance evaluation of automotive components is very important and time consuming task. In this paper, to reduce vehicle component development time and cost virtual testing simulation technology is used to evaluate durability performance of a passenger car front aluminum sub-frame. Multibody dynamics based vehicle model and virtual test simulation model of a half car road simulator are validated by comparisons between rig test results and simulation results. Durability life prediction of the sub-frame is carried out using the model with road load data of proving ground which can evaluate accelerated durability life. We found that the durability performance of the sub-frame is sufficient and it can be predicted within short time compared to rig test time.

Key Words : Durability life prediction(내구수명 예측), Virtual test simulation(가상시험 시뮬레이션), Front aluminum sub-frame(전륜 알루미늄 서브프레임), Multibody dynamics based vehicle model(다물체 동역학 기반 차량 모델)

1. 서론

1.1 자동차 새시시스템 내구수명 예측

자동차 새시시스템은 차량의 하중을 지지함과 동시에 차량의 운동에 직접적으로 영향을 미치는 기능부품이다. 이 새시시스템은 차량 운행기간 동안 다양한 하중을 받게 되며 범프 통과, 포트 홀(pot hole) 통과 등과 같은 순간하중에 의해 파손될 뿐만 아니라 지속적인 도로하중에 의한 피로파괴는 차량뿐만 아니라 인명 손상까지도 유발할 수 있다. 따라서 이들 부품이 각종 주행 상황뿐만 아니라 자동차 수명기간 동안 아무런 문제가

발생되지 않도록 설계되어야 하며 제작 이전의 단계에서 검증되어야 한다. 이를 위해 다양한 시험방법을 통하여 자동차 새시시스템의 내구성을 평가하고 문제가 발생하는 경우 이를 보완하기 위하여 설계를 변경하고 재제작을 하게 되는데 Fig. 1에 자동차 부품 내구시험 방법을 도시하였다.

자동차가 주행하는 도로는 주행성능 및 관리등급에 따라 고속국도, 일반국도, 지방도, 시내도로, 기타 등으로 구분할 수 있다. 이들 도로 중 고속국도를 제외한 도로들은 자동차가 주행하기에 적합하도록 포장된 것과 비포장 구간으로 구분되며 시내도로 중에서도 자동차의 고속 주행을 위한 자동차 전용도로와

* 군산대학교 기계공학과
+ 군산대학교 자동차부품기술혁신센터
++ 교신저자, 군산대학교 기계자동차공학부 (gjchoi@kunsan.ac.kr)
주소: 573-701 군산시 대학로 558

일반 주행용 도로로 구분된다. 국내의 도로를 주행하는 자동차는 이와 같은 성질이 각각 다른 도로를 수명이 다할 때까지 반복적으로 주행하게 되며 각각의 도로 특성상 자동차에 상이한 하중을 가하게 된다. 따라서 자동차의 내구수명 평가는 이들 도로를 주행함으로써 얻을 수 있으나 매번 모든 시험차량에 대해 장시간의 시험운전을 반복할 수는 없다. 따라서 이들 도로의 하중이력과 대등한 조건을 갖는 대표성 있는 하중이력을 추출하고 이를 반복적으로 검증할 수 있는 시험도로가 필요하다. 이와 같은 역할을 수행하는 도로가 특수로를 포함하는 주행시험장(proving ground) 시험도로이며 벨지안로(Belgian road)를 포함한 다수의 특수로와 주행성을 확인할 수 있는 직선 주행로 등으로 구성된다. 가속주행 내구성 평가에는 시험시간의 단축을 위해 여러 가지 특수로를 종합한 종합로 내구시험과 대표성을 갖는 특수로에서 반복적으로 시행하는 극악로 내구시험인 가속주행 내구시험이 주로 사용된다⁽¹⁾. 이들 가속내구시험 시 차량에 가해지는 피로도는 실제로 차량의 운행 중에 받는 피로도와 동등한 수준에 있어야 한다.

가속주행 내구시험은 실제 도로를 자동차 수명시간 동안 주행하며 받게 되는 손상도와 동일한 값으로 시험로를 통해 부품에 손상을 가하며 시간을 단축하는 시험방법이다. 그러나 이 방법은 시험차량이 만들어진 이후에 가능하며 단위 부품 또는 모듈 부품 상태에서 실시하는 것은 불가능하다. 따라서 부품 설계자는 실제 도로 주행 내구 손상도와 동일한 값을 받도록 전용 시험기를 이용하여 하중 작용을 모사한 조건으로 부품에 대해 내구 신뢰성 시험(또는 rig test)을 실시하게 된다⁽²⁾.

1.2 가상시험 시뮬레이션

기존의 내구 시험 방법은 시작 차량을 제작하고 주행 시험을 통하여 차량 및 각 부품의 내구 성능을 검증하였으며 문제가 발생할 경우 재제작 후 시험을 실시하는 등 많은 시간과 비용이 소요되었다. 또한 고정밀 주행재현시험기(road simulator)를 이용하여 부품 또는 모듈에 대한 내구성을 검증한 다음 실차 주행 시험을 수행하지만 이 역시 각 부품 및 모듈 제작에 시간



Fig. 1 Durability test methods of automotive components

과 비용이 소요되고 파손이 발생할 경우 개발기간이 지연되는 문제점이 있다. 최근 세계적인 자동차 시장 경쟁 격화에 따라 신차 개발 기간의 획기적 단축이 요구되고 있는 상황 하에서 반복적인 주행재현시험기 시험이나 실차 시험을 통한 내구성 검증에는 한계가 있다. 이에 따라 최근 부품 개발 기간의 단축과 내구 신뢰성 향상을 목적으로 내구 시험 평가에 CAE (computer aided engineering) 가상 기술을 접목하여 내구시험 평가를 수행하고 있으며⁽³⁾ 대표적인 기술로 Fig. 2에 도시한 바와 같은 가상시험(virtual testing) 기술을 들 수 있다⁽⁴⁾.

이 기술은 실차 주행 시험을 통해 획득한 차량의 휠 하중 이력을 가상 차량 모델에 입력하여 평가 대상 부품 및 모듈의 내구 수명을 예측하는 기술이다. 이것은 다양한 하중조건에 대한 해석을 빠른 시간 내에 수행할 수 있고 문제가 발생하는 경우 곧바로 설계에 반영하여 조기에 새로운 부품을 설계하고 다시 가상시험기술을 활용하여 검증할 수 있기 때문에 시험용 프로토타입(prototype) 부품이나 모듈 제작 횟수를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이와 같은 장점 때문에 개발비용 절감, 개발기간 단축을 위하여 자동차부품 성능 평가에 적용하고 있으며, 자동차 단위 부품에 대한 적용이 증가하고 있다⁽⁵⁾. 또한 시험과의 통합을 통하여 설계 최적화를 시도하고 있다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 승용차 전륜 알루미늄 서브프레임(sub-frame)에 가상시험기술을 적용하여 내구수명을 예측할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 서브프레임은 자동차 좌우측 현가시스템이 연결되는 모듈로 기존의 단위 부품에 비하여 규모가 크고 좌우바퀴 도로하중에 동시에 영향을 받는 모듈로 주행시험을 통하여 예측한 도로 하중이력을 가상 차량 모델의 좌우바퀴에 입력하여 서브프레임의 내구수명을 예측하였다. 또한 알루미늄 서브프레임의 열처리 조건에 따른 내구수명 변화를 평가하였다.

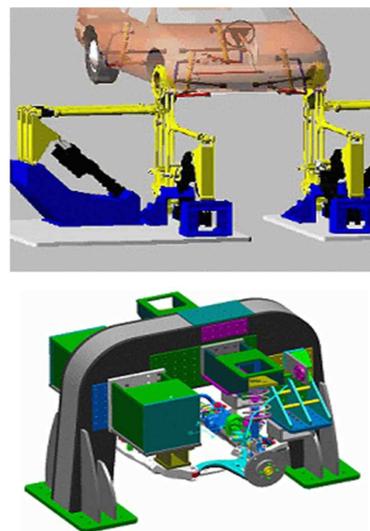


Fig. 2 Durability test using virtual testing technology

2. 다물체 동역학 해석 기반 가상시험모델 구축

2.1 가상시험 절차

Fig. 3에는 본 논문에서 사용한 유연체 다물체 동역학 모델 기반의 가상시험기법을 이용한 내구성 해석 과정을 도시한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 주행 시험을 통해 측정된 휠 하중 신호를 기반으로 대상 부품에 대한 고유 모드를 해석한다. 가상시험기법 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, 검증시험 등의 통합 해석 환경을 구축한 후 각 단계별 해석을 수행한다.

2.2 승용차 전륜 알루미늄 서브프레임

Fig. 4에는 본 연구에서 사용된 승용차 전륜 알루미늄 서브프레임을 도시한 것이다. 현가시스템이나 파워트레인을 프레임에 장치하고 그 프레임을 차체에 결합하는 방법을 서브프레임 방식이라고 한다. 서브프레임은 현가시스템이나 파워트레인으로부터의 진동이나 소음을 차단하며, 암(arm)이나 링크(link)를 직접 차체에 설치하지 않기 때문에 차체 강성에 영향이 적어

현가시스템 연결부의 강성을 높일 수 있으므로 적절한 기하학적(geometry) 특성을 얻기가 쉽다. 또한 조립라인에서 현가시스템을 탑재할 때 작업효율의 향상이나 설치 정밀도의 향상에도 유용하기 때문에 사용하지만 중량이 증가하고 가격이 상승되기 때문에 주로 중형 차량 이상에서 채용하고 있다. Fig. 5에는 서브프레임의 CAD 모델을 도시하였다. 이 CAD 모델로부터 유연성 다물체 동역학 해석⁷⁾을 위한 유한요소모델을 생성하고 고유모드해석을 수행하였다.

2.3 Half car 가상시험모델 구성

가상시험법을 이용하여 승용차 전륜 알루미늄 서브프레임의 내구수명을 예측하기 위해서는 half car 가상시험모델을 구성해야 한다. 이것은 half car road simulator를 이용한 대상내구시험을 가상시험으로 대체하기 위한 것으로 이 장비를 이용하여 시험을 실시하였으며 Fig. 6와 7에 서브프레임을 장착한 사진을 도시하였다. Half car road simulator는 차량의 전륜 또는 후륜 전체 모듈의 내구시험을 실시할 수 있도록 개발한 장치로 차량 절반 부분을 실제 차량과 동일하게 장착하여 시험을 실시할 수 있는 첨단 시험장비이다. 서브프레임의 가상시험을 위해 다물체 동역학 모델링 방법을 이용하여 전륜 half car 모듈을 모델링하였다. 다물체 동역학 모델링 방법은 차량 시스템을 구

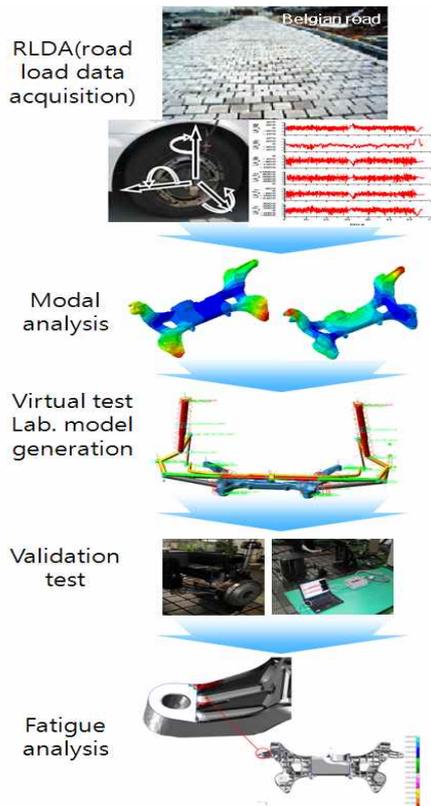


Fig. 3 Durability analysis procedure using Virtual Testing Method



Fig. 4 Passenger car front aluminum sub-frame

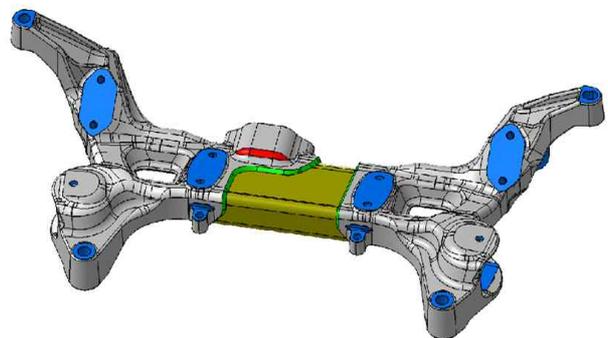


Fig. 5 CAD model of a passenger car front aluminum sub-frame

성하는 각 부품, 조인트, 힘 요소 등을 이용하여 실제 시스템과 동일하게 모델링 하는 방법으로 본 논문에서는 대상 차량의 전륜 새시 모듈에 대해 모델링을 실시하였다. Table 1에는 대상 차량의 주요 제원을 기술하였으며 Fig. 8에는 ADAMS⁽⁷⁾를 이용하여 구성한 전륜 새시모듈을 도시한 것이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 대상 차량의 전륜 현가장치는 맥퍼슨 스트럿 (MacPherson strut) 형식으로 한 쪽 코너에 한 개의 로워 컨트롤

롤 암, 스트럿형 속 업소버, 타이로드, 너클로 이루어져 있고 스테빌라이저 바, 서브프레임 등이 추가되어 전륜 새시 모듈을 구성한다. 차체와의 연결을 위해 서브프레임과 차체, 로워 컨트롤 암과 서브프레임, 스테빌라이저 바와 서브프레임 사이는 부쉬로 연결하였다.

내구수명 예측 대상인 서브프레임은 유연체로 모델링하였으며 Fig. 9에 유연체로 모델링한 서브프레임을 도시하였다. 전륜 새시 모듈을 구성하는 각종 부품과 유연체 서브프레임을 장착한 전체 전륜 새시모듈을 Fig. 8에 도시하였으며 각 부품 및 서브프레임은 실제 차량과 동일한 위치에 장착되어 전체 모듈을 구성하였다.

Table 1 Specification of a test vehicle

Item	Description	
	Suspension type	Front
Rear		Multi link type
CVW	1,415kg	
Wheel base	2,795mm	
Overall length	4,820mm x 1,835mm x 1,470mm	



Fig. 6 Half car road simulator test



Fig. 7 Front chassis module equipped with the sub-frame

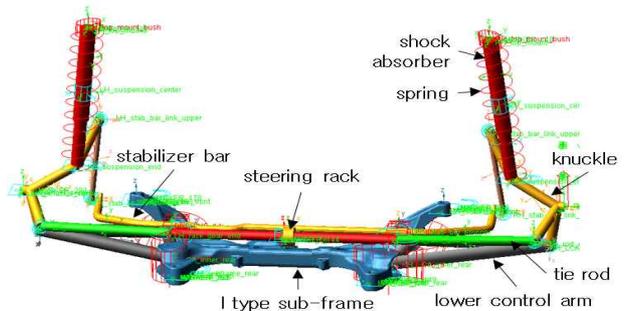


Fig. 8 Modeling of a front chassis module

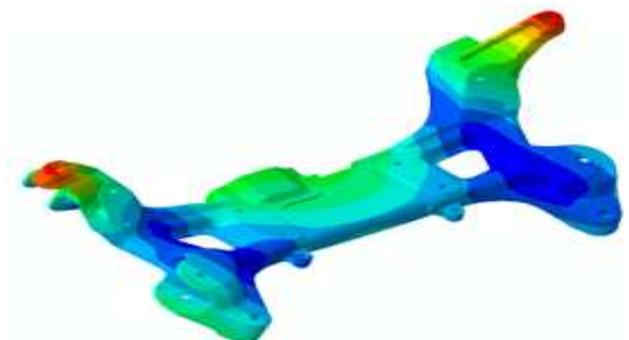


Fig. 9 Flexible aluminum sub-frame

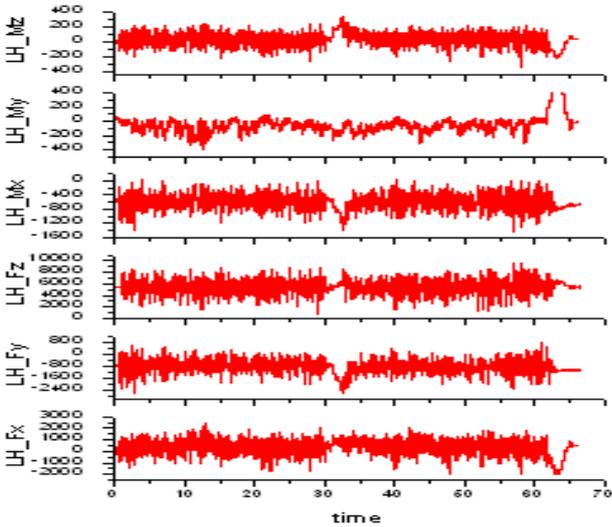
2.4 주행하중 생성

다물체 동역학 기반 가상시험기법을 이용한 서브프레임의 내구수명을 예측하기 위해서는 가진 하중이 필요하다. 본 연구에서는 주행시험장에서 실제 대상 차량이 주행하면서 계측한 휠에서의 6분력 힘을 다물체 동역학 모델의 휠 중심점에 가진하였다. Fig. 10은 주행시험장에서 계측한 좌우 휠 하중을 도시한 것으로 이 하중을 가상시험 모델에 입력하여 내구해석을 수행하였다. 그림에서 LH, RH는 운전석 기준으로 왼쪽, 오른쪽 바퀴를 나타내며, Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz는 각각 차량의 종방향, 횡방향, 수직방향 힘과 모멘트를 나타낸 것이다.

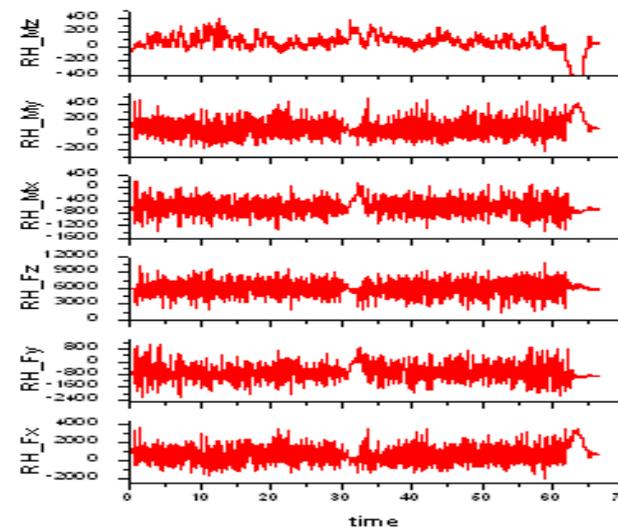
3. 가상시험 모델 검증

3.1 다물체 동역학 해석 모델 검증

다물체 동역학 기반의 가상시험 해석 모델의 정확도를 확인하기 위하여 모델의 구속조건 및 입력하중을 Fig. 6에 도시한 대상 리그(rig) 시험과 동일 조건으로 해석을 수행하였다. Fig. 8에 도시한 바와 같이 연결점(hard point), 부쉬(bushing), 속업소버(shock absorber), 스프링, 조인트(joint) 등의 동역학적 구성요소를 실제 차량에 장착되어 있는 것과 동일하게 모델링하였다. 또한 half car 다물체 동역학 해석 모델링의 정확도를 확인하기 위해 검증시험을 실시하였다. 시험 조건은 좌측 바퀴 중심(LH wheel center)를 고정한 후 우측 바퀴 중심(RH wheel center)에 하중을 입력한 후 발생하는 변위를 비교하는 것으로



(a) LH wheel force transducer data



(b) RH wheel force transducer data

Fig. 10 Measured road load data

해석과 시험 결과를 비교하였다. 비교 결과 Fig. 11에서 보는 바와 같이 해석을 통해 구한 우측 바퀴 중심에서의 변위량이 대상 리그 시험 결과와 크기 및 위상이 거의 유사하였다. 검증 시험을 통하여 다물체 동역학 해석 모델의 동역학적 구성에 대한 높은 정확성과 유용성을 확인하였다.

3.2 가상시험 모델 검증

내구수명 예측을 위한 가상해석 모델의 정확도를 확인하기 위해 해석과 시험 시 발생하는 스트레인(strain)을 비교하여야 한다. 이를 위해 대상차량 알루미늄 서브프레임에 스트레인 게이지(strain gage)를 부착하고 랜덤 하중(random wave function)을 바퀴 중심에 가진하며 측정된 스트레인과 가상시험 해석을

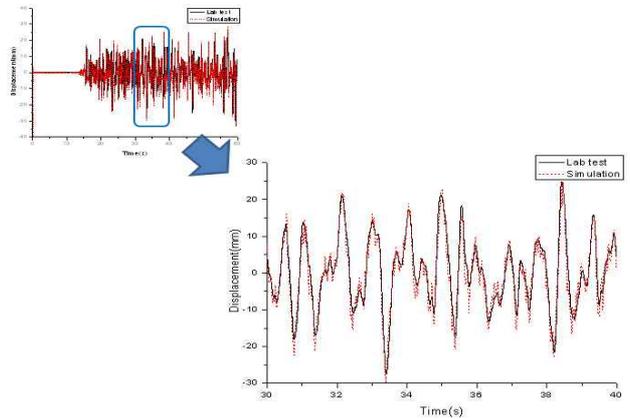
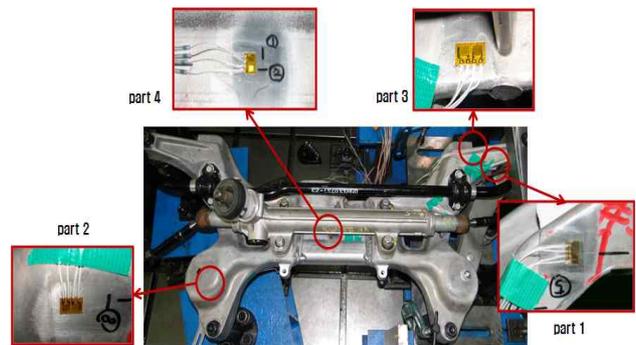


Fig. 11 Comparison of a RH wheel center displacement

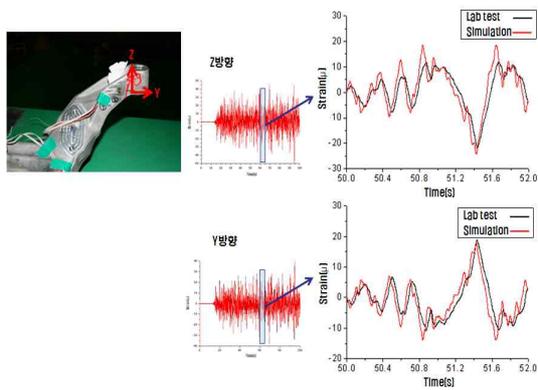


(a) Attached strain gages on the sub-frame

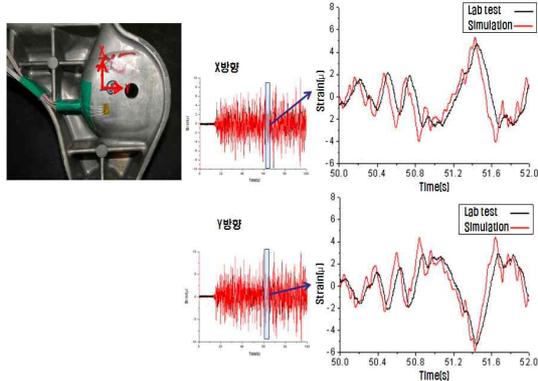


(b) Strain measurement system

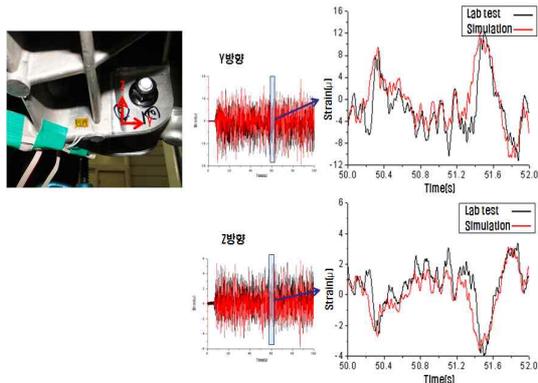
Fig. 12 Strain measurement system of the sub-frame



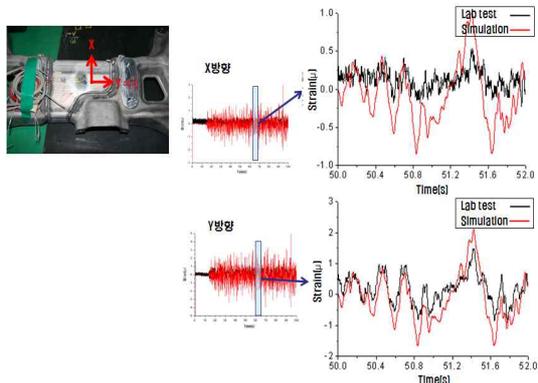
(a) Strain on the part 1



(b) Strain on the part 2



(c) Strain on the part 3



(d) Strain on the part 4

Fig. 13 Comparison of strains on the sub-frame

통해 해석한 스트레인 값을 비교하였다. Fig. 12(a)에는 서브프레임에 스트레인 게이지를 부착한 모습을 도시한 것으로 구조상 큰 스트레인이 발생할 것으로 예측되는 부위에 스트레인 게이지를 부착하였으며 Fig. 12(b)는 계측장비를 도시하였다. 가상시험 모델을 이용하여 대상시험 조건과 동일한 조건으로 해석을 수행하였으며 시험조건은 전륜 새시모듈의 좌측 바퀴 중심 및 조향부를 고정하고 우측 바퀴 중심에 수직방향의 랜덤 하중 조건을 입력한 후 서브프레임에 부착된 스트레인 게이지의 데이터를 취득하였다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 각 계측 지점 별로 대상 시험 데이터와 가상시험 시뮬레이션 결과를 비교하였으며 거의 동일함을 확인하였다. 8개 지점에서의 스트레인 측정 결과를 Fig. 13에 도시하였으며 대부분의 비교 결과가 위상 및 크기에 있어서 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 13(d)에서 x 방향의 스트레인 값이 시험과 해석 결과에 차이를 보이고 있음을 볼 수 있다. 이것은 이 부위의 스트레인이 타 부위에 비해 1/10 이상 낮아 스트레인 게이지에서 미세한 변화를 스트레인 게이지에서 잘 측정하지 못했기 때문이라고 판단된다. 그러나 다른 부위의 결과를 비교해 볼 때 잘 일치하고 있으며 구성된 다물체 동역학 기반의 가상시험 모델이 동역학 해석 및 내구해석에 잘 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2 Input data and boundary condition for multibody dynamic and fatigue analysis

Analysis type	Input data	Boundary condition
Multibody dynamic analysis S/W (ADAMS)	- material property - hard point - force element(spring, damping, bushing) - joint type - flexible sub-frame mode shape	- body fixed
Fatigue analysis S/W (Fe-Fatigue)	- material property - sub-frame CAD data - dynamic stress history - S-N curve	- no constraints

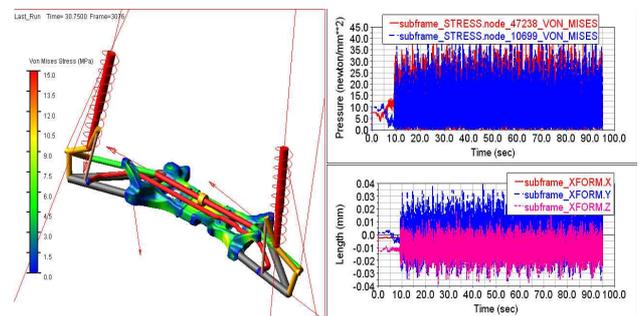


Fig. 14 Virtual test simulation of the front chassis module

4. 승용차 전륜 알루미늄 서브프레임 내구수명 예측

4.1 알루미늄 서브프레임의 내구수명 평가

전절에서 검증된 다물체 동역학 기반 가상시험 모델을 이용하여 승용차 알루미늄 서브프레임에 대하여 가상시험기법을 이용한 내구해석을 수행하였다. 해석에 필요한 입력조건과 경계조건은 Table 2에 요약하였다. 대상차량의 6분력에 대한 휠 하중 및 유원체 모델에 적용한 가상시험모델을 이용하여 Fig. 14와 같이 해석을 수행하였다. Fig. 15에는 서브프레임의 일부 노드(node)에 대한 동응력 이력을 도시하였으며, 이 동응력 이력을 이용하여 내구해석을 수행하였다. 동응력 이력을 내구해석 S/W⁽⁸⁾에 입력하여 내구해석을 수행한 결과를 후처리(post processing) S/W를 이용하여 Fig. 16에 결과를 도시하였다. Table 3에는 서브프레임 피로내구수명 해석 결과를 수명이 짧은 순으로 기술한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 수명이 가장 짧은 곳은 노드번호 36974로 서브프레임과 차체와의 연결부로 Fig. 16에서 위치를 확인할 수 있다. 이 부분의 수명은 가진 하중이 6.757×10^4 회 반복되면 피로 파손이 발생한다는 의미로 하중을 측정할 벨지안로 등 내구시험로를 6.757×10^4 회 반복하여 주행할 경우 파손이 발생함을 의미하며, 무한 수명을 가지고 있다. 개발된 알루미늄 서브프레임의 내구수명을 확인하기 위

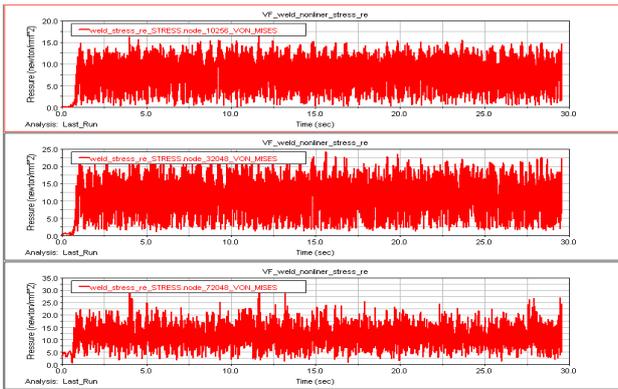


Fig. 15 Typical dynamic stress history of the sub-frame

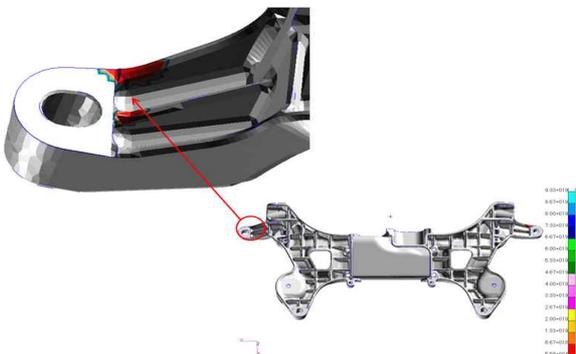


Fig. 16 Durability life prediction plots of the sub-frame

하여 대상 내구시험을 실시하였으며 시험 결과 품질보증 마일리지 동안 손상이 발생하지 않음을 확인하였다.

4.2 열처리 특성에 따른 내구수명 변화

전절에서 열처리를 하지 않은 알루미늄 서브프레임에 대하여 내구수명을 평가하였으나 실제 사용하는 서브프레임은 대부분 열처리를 하기 때문에 열처리 조건에 따른 내구수명 변화 해석을 수행하였다. 서브프레임의 재질은 알루미늄 6061로 열처리에 의한 내구수명 변화를 예측하기 위해 열처리 전과 대표적인 열처리 조건인 T4, T6 열처리⁽⁹⁾를 수행한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. Table 4에는 T4 열처리 시의 내구수명 해석 결과이며 Table 5에는 T6 열처리 시의 내구수명 예측 결과를 기술한 것이다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 T4 열처리 시 약 5.974×10^3 배, T6 열처리 시 약 4.274×10^3 배 내구 수명이 증가

Table 3 Durability life prediction results of the sub-frame

Node No.	Damage	Life repeats
36974	1.48×10^{-5}	6.757×10^4
36977	9.327×10^{-6}	1.072×10^5
35923	4.065×10^{-6}	2.460×10^5
36976	2.371×10^{-6}	4.218×10^5
36558	1.845×10^{-6}	5.420×10^5
35948	1.747×10^{-6}	5.723×10^5
19932	7.672×10^{-7}	1.303×10^6

Table 4 Durability life of the sub-frame with T4 heat treatment

Node No.	Damage	Life repeats
36974	2.477×10^{-9}	4.037×10^8
36977	1.733×10^{-9}	5.769×10^8
35923	8.317×10^{-10}	1.202×10^9
36976	5.426×10^{-10}	1.843×10^9
36558	4.200×10^{-10}	2.381×10^9
35948	4.051×10^{-10}	2.468×10^9
19932	2.173×10^{-10}	4.601×10^9

Table 5 Durability life of the sub-frame with T6 heat treatment

Node No.	Damage	Life repeats
36974	3.462×10^{-9}	2.888×10^8
36977	2.710×10^{-9}	3.690×10^8
35923	1.460×10^{-9}	6.850×10^8
36976	1.069×10^{-9}	9.356×10^8
36558	8.707×10^{-10}	1.149×10^9
35948	8.102×10^{-10}	1.234×10^9
19932	5.282×10^{-10}	1.893×10^9

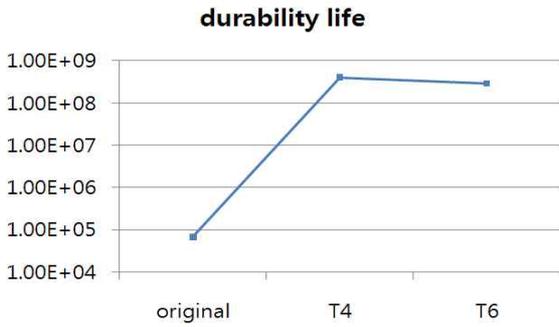


Fig. 17 Shortest durability life changes according to the heat treatment methods

함을 알 수 있다. 또한 T4, T6 열처리 비교 시 내구수명은 T4 조건이 T6에 비해 1.4배 증가함을 알 수 있다. Fig. 17에는 열처리 조건에 따른 내구수명 변화를 도시 한 것으로 T4 조건이 내구수명 면에서 상대적으로 우수한 열처리 방법이라 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 가상시험 시뮬레이션 기술을 이용한 승용차 전륜 알루미늄 서브프레임 내구수명평가 기법에 대하여 연구하였다. 가상시험 시뮬레이션 기술은 자동차 부품 개발 기간의 단축과 비용 절감을 목적으로 내구 시험 평가에 CAE 가상 기술을 접목하여 내구시험 평가를 수행하는 것이다. 본 논문에서는 이를 위해 다음과 같은 내용의 연구를 수행하였다.

- (1) 전륜 새시 모듈에 대한 유연체 다물체 동역학 해석 모델 및 half car road simulator에 대한 가상시험 모델을 구성하였다.
- (2) 구성된 모델에 대한 시험과 시뮬레이션 결과를 비교 검증하여 구성된 가상시험 모델의 정확도를 검증하였다.
- (3) 검증된 가상시험 모델에 주행시험장에서 측정한 가속내구시험 도로하중을 입력하여 서브프레임의 내구수명을 예측할 수 있었으며, 대상 리그 시험에 비하여 짧은 시간 내에 서브프레임의 내구수명을 예측할 수 있었다.
- (4) 알루미늄 6061 서브프레임의 열처리 방법에 따른 내구수명 변화를 해석하였으며 T4 열처리 조건이 내구수명적인 측면에서 더 우수한 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 군산대학교 국외과건연구 “Virtual testing method를 이용한 자동차부품 모델링 및 시험 기법 연구”과제의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) Jeong, J. W., Yoon, Y. J., Lee, Y. J., and Lee, M. H., 2002, “Implementation of the Autonomous Guided Vehicle Driving System for Durability Test,” *2002 Spring Conference Proceedings of the KSMTE*, pp. 608~613.
- (2) Choi, S. J., Park, J. W., Jeon, K., Yoo, Y. M., Choi, G. J., and Park, T. W., 2006, “A Study on Durability Performance Estimation for Development of Chassis Corner Module,” *Transactions of KSAE*, Vol. 14, No. 1, pp. 159~166.
- (3) Cho, J. U., and Han, M. S., 2010, “Durability and Stress Analysis on Automotive Lower Arm,” *Transactions of KSMTE*, Vol. 19, No. 3, pp. 376~380.
- (4) You, S., and Joo, S. G., 2006, “Virtual Testing and Correlation with Spindle Coupled Full Vehicle Testing System,” *SAE Paper* Number: 2006-01-0993.
- (5) Yang, F., Hamilton, J., and Cheng, H., 2008, “Virtual Rig Simulation in the Exhaust System Development,” *SAE Paper* Number: 2008-01-1215.
- (6) Saraf, M. R., Jambhale, M. S., Pawar, P. R., Shaikh, A., Dwivedi, S., Boone, F., Garcia, J., and Stachel, T., 2011, “Integration of Real and Virtual Tools for Suspension Development,” *SAE Paper* Number: 2011-26-0115.
- (7) ADAMS, 2008, *ADAMS User's Manual*, MSC. Software Corporation.
- (8) Fe-Fatigue, 2007, *Fe-Fatigue User's Manual*, nCode International Ltd.
- (9) Davis, J. R., 1993, *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International.