

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.10.1039>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 다물체 동역학을 이용한 후륜 현가 부품의 내구해석

전성민\* · 조병관\*\*†

\* 한국기술교육대학교 기계공학부

### Fatigue Analysis of Rear Suspension Part Applying Multi-body Dynamics

Seong Min Jeon\* and Byung-Kwan Cho\*\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ. of Technology and Education

(Received August 13, 2014 ; Revised July 8, 2015 ; Accepted July 16, 2015)

**Key Words:** Torsion Beam Axle(토션빔 액슬), Fatigue Analysis(내구해석), Multi-Body Dynamics(다물체 동역학), Flexible Body(유연체)

**초록:** 차량의 개발단계에서 내구성 평가는 많은 시간과 비용이 소요된다. 최근 완성차 업체들은 자사만의 내구성 평가방법을 개발하고 수정·보완하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 본 연구는 토션빔 액슬의 내구성 평가를 위한 통합 CAE 기법을 개발함에 있어 세계적인 자동차 업체의 정형화된 CAE 기법과의 비교를 통해 경제성을 평가하고 실험적 방법을 통해 얻은 데이터와의 비교를 통해 신뢰성을 확보하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 현재까지 널리 사용되어 온 준정적 내구해석의 과정 및 결과에서 보완점과 문제점을 분석하였고, 업계의 요구사항을 면밀히 검토하여 정규모드해석을 통해 다물체 동역학 모델을 구성하고 이를 이용한 동역학 해석을 진행한 후 그 결과를 이용하여 내구해석인 공진 내구해석 기법을 제안하였다.

**Abstract:** During the development of vehicles, durability tests are time consuming and costly. Recently, automobile companies have attempted to develop their own durability evaluation procedures by modifying and complementing. In this paper, we propose an integrated computer-aided engineering (CAE) method to evaluate the durability of a torsion beam axle (TBA). We compare this method with the standardized durability evaluation method used by an actual automobile company in order to determine the feasibility of this method. We compare the results with the test result data to enable us to estimate the reliability of the analysis results. In this study, we analyze the processes and results of the quasi-static fatigue analysis, and found improved methods and problems. Furthermore, we perform a thorough test using the requirements of the actual company. Based on the results, the structural analysis process in the quasi-static fatigue analysis method was superseded by the multi-body dynamics analysis process. Generally, this method is referred to as the resonance-fatigue analysis method.

### 1. 서론

최근 완성차 업계에서는 차량을 경량화 함과 동시에 사용 중 문제가 되지 않을 만큼의 충분한 품질을 확보한 제품 생산을 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

차량구조의 단순화를 통해 차량을 경량화하려는 노력의 한 가지 방편으로 전륜구동차량의 설계가 많아짐에 따라 후륜에 토션빔을 적용하는 것에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>(1,2)</sup>

본 연구에서는 차량의 후륜 현가장치의 개발과정 중 컴퓨터 해석 결과의 활용도가 매우 낮음을 인식하고, 이를 대체할 수 있는 CAE(Computer Aided Engineering) 기법을 개발하는 것을 목표로

† Corresponding Author, [chobk@koreatech.ac.kr](mailto:chobk@koreatech.ac.kr)

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

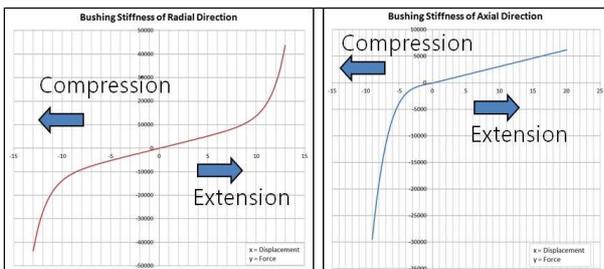


**Table 2** Hard points coordination

Rear Suspension Hard Points	ADAMS Model Hard Points		
	x	y	z
Damper Lower	3032.054	-537.100	-76.418
Damper Upper	3020.255	-527.493	428.394
Spring Lower	2924.240	-488.920	-67.873
Spring Upper	2908.547	-488.920	137.366
Trailing Arm Mount	2583.600	-527.800	10.000
Torsion Beam Ref.	2725.529	-	4.454
Wheel Center	2959.964	-699.801	17.932

**Table 3** Natural frequency of torsion beam

Mode	Normal Frequency (Hz)
1st	251.4
2nd	410.6
3rd	450.4
4th	498.0



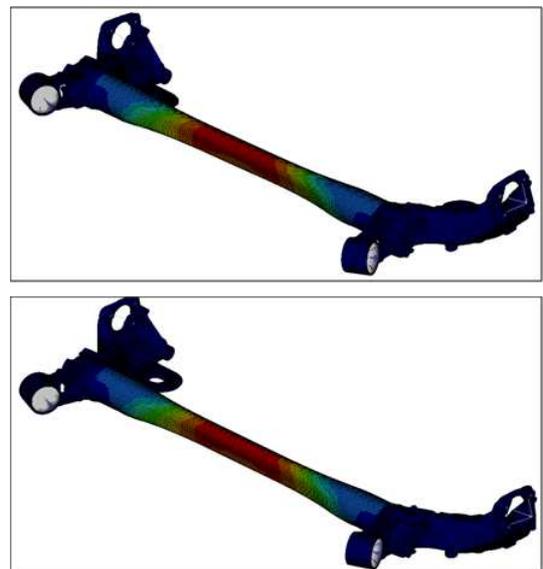
**Fig. 4** Stiffness of A bush

기구학적 요소의 연결을 위해서는 그라운드와 댐퍼의 연결과 토션빔과 댐퍼의 연결에 자유도가 3인 구면 조인트를 이용하였고, 그라운드와 토션빔의 연결과 토션빔과 차축과의 연결에 자유도가 1인 레볼루트 조인트를 이용하였다. 그리고 차체에 장착되는 하드 포인트를 고정 조인트를 이용하여 완전 구속하였다.

부시는 트레일링 암과 차체의 결합부에 사용된 A Bush의 물성치를 사용하였다. 이때 사용된 물성치는 제품 제작 업체에서 제공한 Data를 활용하였다. Table 2에 모델의 각 요소를 생성하기 위한 하드 포인트를 나타내었으며, Fig. 4에 부시의 원주 방향과 축 방향에 따른 물성치를 나타내었다. 부시의 x, y축의 회전에 대한 강성은  $253,375.8N \cdot mm/rad$ 이며, z축의 회전에 대한 강성은  $145,031.8N \cdot mm/rad$ 이다.

Fig. 5는 토션빔의 대표적인 모드 형상을 도시한 것이다. Table 2에는 토션빔의 4차 모드까지의 해석결과를 나타내었다.

유연체 모델을 동역학 모델에 적용 시 본 연구



**Fig. 5** 1st & 2nd mode shape of the TBA

의 대상이 되는 토션빔의 경우에는 모드 선택을 통해 실제 작동 조건이 고주파 영역에서는 작동하지 않으므로 고(高) 차수 모드를 제외하고 과도 응답 해석을 진행하여도 해석에 충분한 신뢰성을 얻을 수 있다. 또한 이러한 과정에서 해석의 시간을 단축할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 준정적 내구해석과의 차이를 최소화하기 위해 정규 모드해석의 결과로 얻은 36차 모드까지의 결과 중 강제 모드 6개를 제외한 총 30개의 모드를 모두 선택하여 유연체 해석을 수행하였다. 이것은 준정적 내구해석에서 이와 같은 중간과정에서 결과에 영향 끼치는 작업을 할 수 없기 때문이다.

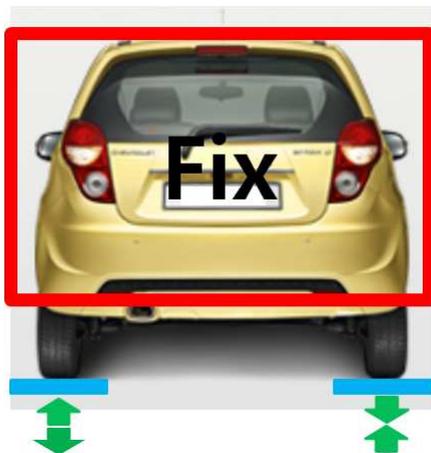
2.3 동역학 해석의 하중 및 경계조건

ADAMS/View 모델 구성 후 시험에서와 동일한 조건으로 차체에 결합된 부분을 모두 고정시킨 상태에서 블록입력(Block Input)을 좌우 휠 센터에 Fig. 6과 같이 위상차가 180도가 되도록 입력하였

**Table 4** Block profile loading condition

Block	Peak (mm)	Valley (mm)	Cycles	Freq. (Hz)
A	44.8	-44.8	1	1
B	41.7	-41.7	100	
C	32.4	-32.4	500	2
D	28.5	-28.5	600	
E	23.7	-23.7	2,500	3

Total cycle = ((B+C+D+E) × 10 + A) × 4 = 148,004



**Fig. 6** Boundary condition for dynamic analysis

다. **Table 4**은 하중조건을 표시한 것이다.

2.4 내구 해석 조건

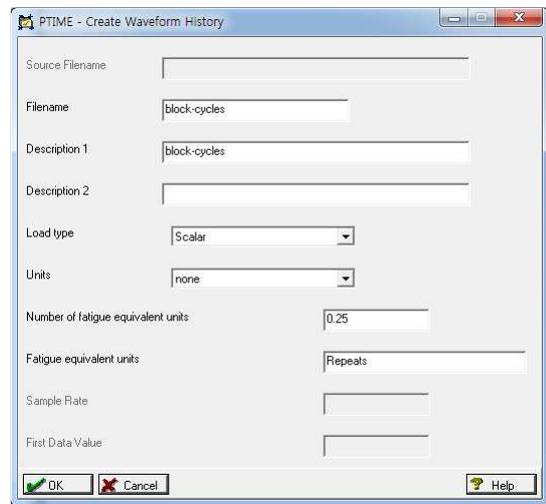
토션빔 액슬의 해석은 초기 균열(Initial Crack)이 발생했을 때, 파손이 일어났다고 판단하기 위해서 초기균열(Crack Initiation) 해석을 수행하였다. 평균응력의 효과를 고려하기 위해서 Morrow식을 적용하였다. Morrow식은 SWT식에 비해 강재(Steel) 제품에 대해 높은 정확성을 가진다.<sup>(4,5)</sup> 또한, 노치부의 소성거동을 고려하기 위해서 Neuber's Rule<sup>(6)</sup>을 적용하였다.

Table 5는 피로물성치이다. 여기서  $\sigma'_t$ 은 Fatigue strength coefficient,  $b$ 은 Fatigue strength exponent,  $c$ 은 Fatigue ductility coefficient,  $\epsilon'_t$ 은 Fatigue ductility coefficient,  $n$ 은 Cyclic strain hardening exponent,  $k'$ 은 Cyclic strength coefficient를 나타낸다.

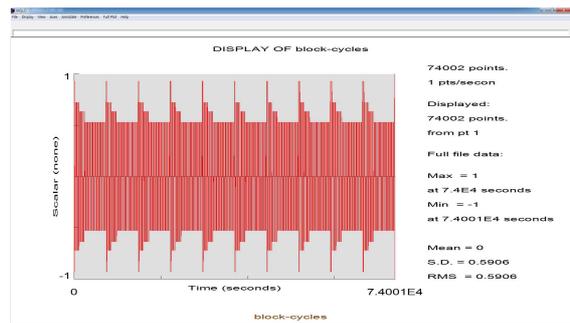
**Fig. 7**과 **Fig. 8**은 각각 하중조건을 해석프로그램 상에서 구현하는 방법이다. 여기서 가장 주의하여야 할 점은 ‘Number of fatigue equivalent units’에서 주어진 값에 따라 내구수명이 달라진

**Table 5** Cyclic and fatigue property

Materials	Parameters	$\sigma'_t$ (MPa)	$b$	$c$	$\epsilon'_t$	$n'$	$k'$ (MPa)
	Torsion Beam	No Heat Treated	1035	-0.087	-0.58	0.5654	0.15
Heat Treated		1594	-0.087	-0.58	0.4749	0.15	1852
Trailing Arm		958.9	-0.089	-0.72	0.5110	0.12	993



**Fig. 7** Creating block profile loading condition



**Fig. 8** Loading condition

다는 점이다. 이는 여기서 작성하는 하중조건이 ILive를 몇 조각으로 나누어 놓았는가를 나타내는 수라는 점이다. 사용한 Block Profile은 ‘(E+D+C+B)×10+A = 0.25 Lives’의 형태로 하중조건을 구현하면 작업이 효율적이다. **Fig. 8**에서 ‘2 points = 1Cycle’을 나타낸다. 따라서 구현된 하중조건은 37,001Cycles가 되며, Number of fatigue equivalent units의 값으로 0.25를 고려하면 ‘37,001 Cycles ÷ 0.25 = 148,004 Cycles’가 된다.

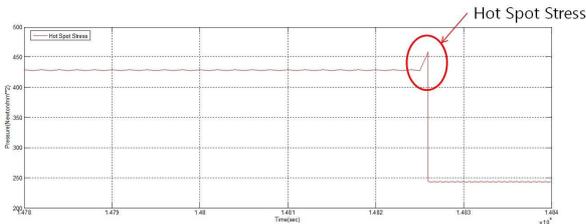


Fig. 9 Hot spot stress result

### 3. 해석 결과

구성 완료한 모델을 이용하여 1 Live의 동역학 해석을 진행한 후 이 결과를 다시 MSC.Fatigue를 이용하여 내구해석 하는 방법과 ADAMS/Durability를 이용하여 내구해석을 하는 방법을 모두 이용하여 내구해석을 수행하였다.

Fig. 9는 1 Live의 동역학 해석을 완료한 결과로부터 핫스팟의 하중 이력을 도시한 것이다. 이 결과를 구조해석의 최대 응력과 비교한 Table 4에서 두 결과의 오차가 0.502%인 것으로 보아 해석 결과는 본 연구에 이용된 기법과 준정적 내구해석에서 이용된 기법의 차이가 거의 없는 것으로 판단된다.

하지만 해석을 위한 시간만을 비교해 보면 준정적 내구해석의 경우 총 20회의 반복 해석을 한 결과, 해석 시간이 평균 약 13시간으로 본 연구에 이용된 기법에서의 총 30회의 반복 해석 평균인 약 32분에 비해 약 25배 오래 걸림을 확인하였다. 따라서 본 연구 중 개발한 기법을 사용할 경우 부품 개발 시간을 획기적으로 단축할 수 있는 이점이 있다.

또한 두 방법의 내구해석의 결과에서도 그 결과가 1390 Lives(= 205,725,560 cycles)로 무한 수명이라 판단하였던 준정적 내구해석의 결과보다 시험에서 목표로 했던 5 Lives의 수명에 가까운 결과를 도출하여 기존의 방법에 비해 업체의 요구조건에 부합하였다고 판단된다.

Fig. 10에 도시한 1 Live의 동역학 해석을 진행한 후 이 결과를 다시 MSC.Fatigue를 이용하여 내구해석을 하는 방법에서의 내구수명은 10.4 Lives(=1,539,242 cycles)로 나타났으며, Fig. 11에 도시한 ADAMS/Durability를 이용한 내구해석에서는 내구수명이 35.4 Lives(=5,239,341 cycles)라는 결과가 도출되었다.

차이가 발생한 이유는 ADAMS/Durability의 경

Table 6 Maximum stress comparison

구 분	Element No.	Max. Stress (MPa)	Error (%)
준정적 내구해석	363077	461.500	0.502
본 연구	363045	459.183	



Fig. 10 Fatigue analysis result using MSC.Fatigue



Fig. 11 Fatigue analysis result using ADAMS/Durability

우 해석조건인 Morrow method, mean stress correction, critical plane, Crack Initiation, Neuber's rule 등의 내구해석이론을 선택적으로 적용할 수 없기 때문이다.

하지만 내구해석은 모두 사이클 카운팅 기법을 이용하기 때문에 해석시간 면에서의 차이는 없다. 따라서 이 모델의 경우 1 Live의 동역학 해석을 진행한 후 그 결과를 이용하여 MSC.Fatigue에서 해석조건을 모두 입력한 후에 내구해석을 진행하는 것이 가장 좋은 방법이다.

### 4. 결 론

본 연구는 차량의 후륜 현가장치의 개발과정에서 컴퓨터 해석 결과의 활용도가 매우 낮음을 인식하고 이를 대체할 수 있는 통합 CAE 기법을 개발하고, 범용 소프트웨어를 이용한 피로수명 예측 과정에 소요되는 시간을 단축하며, 피로수

명 예측 결과와 실험 결과의 비교 분석을 통해 정확도를 확보함을 목표로 하였다.

이 목표를 실현하기 위하여 준정적 내구해석 기법을 검토하고 문제점을 도출하였다.

본 연구 이전에 동일한 모델로 진행된 연구<sup>(7)</sup>에서는 해석결과에 영향을 미치는 유한요소모델 요소의 분석을 위해 준정적 내구해석을 이용하였으며, 비선형 특성을 보이는 부시의 물성치를

고려하기 위하여 ABAQUS/Standard를 이용하여 구조해석을 수행하였고, 이로 인해 최종 결과를 도출하기까지 평균 20시간이 소요되었다. 이 중 구조해석 시 컴퓨터를 이용한 계산에 소요된 시간은 평균 13시간으로 이 시간을 줄일 수 있다면 최종적으로 전체 내구해석에 소요되는 시간을 줄일 수 있을 것으로 판단하였다.

따라서 이를 대체할 방법을 도출하기 위해 내구해석 결과를 활용하는 업계의 요구사항을 연구하였으며 그 결과 구조해석 대신 정규모드해석의 결과를 이용한 다물체 동역학 모델을 구성하고 이를 이용해 동역학 해석을 할 경우 업체에서 요구하는 차량의 기구학적 특성 예측 및 차량 전체(Full car)해석을 위한 차량의 하위 모델을 구축할 수 있었다. 이를 통해 기존의 구조해석과 동역학 해석을 따로 하던 과정을 일원화하여 해석 결과의 활용도를 높였으며 해석 결과의 검증 및 이해가 쉽도록 하였다.

또한 준정적 내구해석에서 가장 많은 시간을 소요했던 구조해석의 계산 시간과 비교하여 동역학 해석을 위한 모델을 구성하고 동역학 해석을 진행하면 획기적인 시간 단축이 가능하였다.

마지막으로 준정적 내구해석 시 진행된 내구시험의 결과와 내구해석의 결과,<sup>(7)</sup> 그리고 본 연구에서 진행된 내구해석의 결과를 비교한 결과 내구시험에서 목표로 한 값에 더욱 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 또 이 결과는 준정적 내구해석에서 내구시험 결과와 해석 결과의 연관성 확보를 위해 했던 부시의 강성을 변경하거나 환산계수(Scale Factor)의 조정을 하지 않고도 도출한

결과였기에 준정적 내구해석을 함께 진행한 업체의 정형화된 해석 방법보다 시간을 획기적으로 축소하고 내구수명 결과를 비교적 정확히 예측할 수 있는 방법이라 판단하였다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Marsh, A. J., Wolperding, K. and Wille, H. C., 1996, "Simulation of the twist beam rear suspension system using flexible bodies in ADAMS," *Proceedings of the 11th European ADAMS User Conference*, Frankfurt, Germany, pp. 19~20.
- (2) Sugiura, H., Kojima, Y., Nishigaki, H. and Arima, M., 2000, "Trailing Twist Axle Suspension Design Using ADAMS," *Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress*, F2000G306, Seoul, Korea, pp. 1~6
- (3) Yoo, W. S. and Haug, E. J., "Dynamics of Flexible Mechanical Systems Using Vibration and Static Correction Modes," 1986, *Journal of Mechanical Design* 108.3, pp. 315~322.
- (4) Dowling, N. E., 2004, "Mean Stress Effects in Stress-Life and Strain-life Fatigue," *SAE Technical Paper*, No. 2004-01-2227.
- (5) Ince, A. and Glinka, G., 2011, "A Modification of Morrow and Smith-Watson-Topper Mean Stress Correction Models," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* Vol. 34, Issue 11, pages 854-867.
- (6) ASTM Standard E606, 2004, "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing," *Annual Book of ASTM Standards* 3, ASTM International.
- (7) Park, S. M., 2012, "Effect of Modeling on the Analysis of Torsion Beam Axle and Its Verification Using Test Results," *Master's thesis*, Korea University of Technology and education Graduated school.