

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.10.1339

ISSN 1226-4873

모달 응력 회복법(Modal Stress Recovery)을 이용한 Torsion Beam Axle 내구해석

고준복*† · 임영훈* · 이동철**

* 현대위아 선형연구팀, ** 현대위아 시험평가팀

Analysis of Durability of Torsion Beam Axle Using Modal Stress Recovery Method

Jun Bok Ko*, Young Hoon Lim** and Dong Cheol Lee**

* Dept. of advanced research, Hyundai-WIA,

** Dept. of test. Hyundai-WIA

(Received November 12, 2009 ; Revised June 18, 2010 ; Accepted July 27, 2010)

Key Words: Modal Stress Recovery(모달응력 회복법), Modal Superposition Method(모달중첩법) Torsion Beam Axle(토션빔 액슬), Durability Analysis(내구해석), Modal Coordinate(모달좌표)

초록: 모달중첩법은 구조물의 진동특성을 고려하여 내구수명을 평가할 수 있는 내구해석 기법이다. 본 논문에서는 모달중첩법과 유사하면서도 다물체 동역학 해석시 모달좌표를 직접 계산하여 전체적인 해석시간을 줄일 수 있는 모달응력 회복법을 이용한 내구해석 기법의 타당성에 대하여 검토하였다. 이를 위해 자동차 부품 중 대표적으로 동특성을 고려해야 하는 토션빔 액슬에 대하여 모달응력 회복법을 이용한 내구해석 및 시험을 실시하였다. 해석결과는 시험결과와 취약위치, 내구수명 등이 양호한 일치 결과를 나타내었다. 따라서 모달응력 회복법을 이용한 내구해석 기법은 다양한 구조물의 동특성을 반영한 내구수명 평가에 적용될 수 있을 것이다.

Abstract: MSM (Modal Superposition Method) is a technique for analyzing structural durability by taking the vibration characteristics into consideration. In this paper, MSR (Modal Stress Recovery) method, which is similar to MSM, was reviewed to check its validity as a durability analysis method. The MSR method directly calculates the modal displacement time history in multibody dynamics analysis; as a result, the total analysis time is shorter than that of MSM method. We conduct durability analysis using the MSR method and a durability test of a torsion beam axle that is affected by various road loads within the natural frequency of the beam axle. The analysis results for critical location and durability were in good agreement with the respective test results. Therefore, durability analysis using the MSR method is effective in predicting the durability of the structures of various dynamic systems.

1. 서 론

1.1 연구배경

자동차 서스펜션 부품은 차량 주행중 다양한 도로 노면으로부터 불규칙적인 반복 하중을 지속적으로 받는 부분이다. 따라서 신차 개발 단계에서 다양한 가속내구 시험과정을 이용한 내구해석 및 시험평가를 실시하여 부품의 내구강도 신뢰성에 대해 검증을 해야만 한다. 해석적 방법은 물

리적 시험 이전에 다양한 조건에서 강도 평가를 해볼 수 있어 매우 다양한 방법으로 적용되고 있다. 대표적인 내구해석 기법으로는 정적 내구해석, 과도응답해석(Time Transient), 진동내구(Vibration Faigue), 모달 중첩법(Modal Superposition Method, 이하 MSM) 등이 있으며 각각 장.단점을 가지고 있다. 이중 MSM법을 이용한 내구해석 기법은 부품의 동적 특성을 반영하고, 국부적인 소성영역을 고려할 수 있는 변형률-수명법이 적용 가능하여 최근 다양하게 적용되어 지고 있다.⁽⁶⁾

본 논문에서는 MSM법과 방법론은 동일하면서 다물체 동역학 해석시 모달변위를 직접 계산하여

† Corresponding Author, junbok.ko@hyundai-wia.com

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

전체 해석 단계를 줄일 수 있는 모달응력 회복법 (Modal Stress Recovery, 이하 MSR)을 이용한 내구해석 기법의 타당성에 대해 연구하였으며 이를 위해 자동차 부품중 동적 특성을 고려해야하는 대표적인 부품인 토션빔 액슬에 대해 MSR법을 이용한 내구해석 및 시험을 실시하였다. Fig. 1은 MSM법과 MSR법을 이용한 내구해석 프로세스를 나타낸다.

1.2 이론

다물체 동역학 상용 S/W인 MSC. ADAMS 는 모드합성 기법중 Craig-Bampton Method를 사용하여 탄성체의 거동을 구현한다. 유연체(Flexible body)의 정보를 담고 있는 MNF(Modal Neutral File) 파일은 구속 모드(Constraint Mode)와 자유 조건에서 계산한 Normal Mode 정보를 모두 담고 있다. 구속모드(Constraint Mode)는 타 부품과 연결되는 External Point에서 하나의 자유도를 제외한 나머지 자유도를 구속한 상태에서 계산한 모드로, 하나의 Point 당 6개의 구속모드를 가지게 된다. 유연체의 구속 절점에 조인트 반력이나 외력이 없는 경우에는 구속 모드 좌표는 작용하지 않는 반면 외력이 작용하게 되면 존재하게 된다. 이때 각 모드 별 응력에 각 모드의 모달변위(Modal Participation Factor, 이하 MPF)를 곱하여 임의의 시간에 대하여 선형적으로 더하여 응력을 계산하게 되며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다. 감

쇠를 고려하지 않는 경우 외부에서 힘이 가해지면 동역학에서의 식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = F \tag{1}$$

여기서 $\{u\}$ 는 구속모드와 고유모드의 선형적 조합으로 나타낼 수 있다.

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_B \\ u_I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ \phi_c & \phi_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_c \\ q_N \end{Bmatrix} \tag{2}$$

여기서,

ϕ_c, ϕ_N : Constraint Mode, Normal Mode
 q, u : 모드좌표, 일반좌표

Modal Matrix를 $[\phi]$, 모드좌표 행렬을 $\{q\}$ 로 표현 하면 식 (2)는

$$\{u\} = [\phi]\{q\} \tag{3}$$

으로 나타낼 수 있고, Modal Matrix $[\phi]$ 는 시간에 독립적이므로 식 (3)으로부터 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\{\ddot{u}\} = [\phi]\{\ddot{q}\} \tag{4}$$

식 (3), (4)를 이용하여 질량행렬과 강성행렬을 정규화하여 식 (1)을 다시 쓰면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[\phi]^T[M][\phi]\{\ddot{q}\} + [\phi]^T[K][\phi]\{q\} = [\phi]^T\{F\} \tag{5}$$

모드좌표 $\{q\}$ 에 대한 하중벡터를 $\{Q\}$ 로 정의하면

$$\{Q\} = [\phi]^T\{F\} \tag{6}$$

으로 표현되고, 정규화된 질량행렬과 강성행렬을 $[\hat{M}], [\hat{K}]$ 로 표현하여 식 (5)를 다시 쓰면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\hat{M}]\{\ddot{q}\} + [\hat{K}]\{q\} = \{Q\} \tag{7}$$

식 (7)에서 모드좌표 행렬 $\{q\}$ 는 n개의 고유 모드좌표와 구속 모드좌표로 구성되어 있으며, 임의의 시간 (t)에 대한 $q_1(t), q_2(t), q_3(t) \dots q_n(t)$ 을 모달변위라 한다. ADAMS solver는 각 모드별 응력에 각 모드의 모달변위를 곱하여 임의의 시간에 대하여 선형적으로 더하여 응력을 계산하게 되며 식으로 나타내면 아래와 같다. 이를 모달응력 회복법(Modal Stress Recovery, 이하 MSR)이라 한다.^(1~3)

$$\sigma(t) = \sum_1^n \sigma_n q_n(t) \tag{8}$$

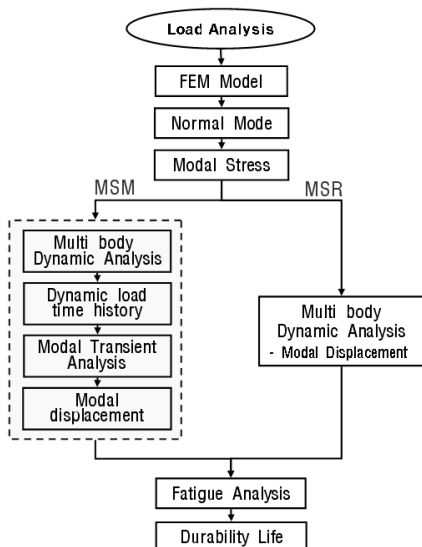


Fig. 1 Schematic of analysis using MSM, MSR

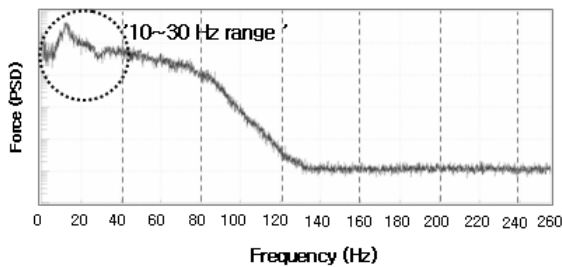
내구수명을 계산하는 solver에서는 구속모드와 자유모드를 포함하는 모달응력과 각 모드의 모달 변위를 곱하여 선형적으로 합산하여 동응력 이력을 계산한후 cycle counting을 통해 내구 수명을 구하게 된다.

2. 본 론

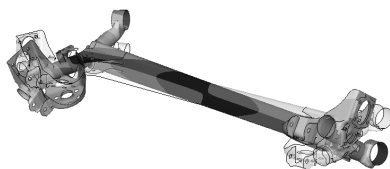
2.1 가속내구 시험 파형 분석

토션빔 액슬의 내구시험 및 해석에 적용하기 위하여 가속 시험로에서 6축하중 센서를 이용하여 하중을 측정 하였다. Fig. 2는 측정파형의 주파수 분석(PSD) 및 토션빔 액슬의 고유치 해석 결과를 나타낸다.

시험하중은 60 Hz 이하에서 대부분 에너지가 분포하고 있으며, 특히 10~30 Hz 영역에서 큰 에너지가 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 토션빔 액슬의 주요 1, 2차 모드의 주파수는 20.1Hz, 67.5 Hz로 도로 하중의 주요 에너지 분포 주파수 대역



(a) PSD diagram of load data



mode 1 : 20.1 Hz



mode 2 : 67.5 Hz

(b) Natural frequency and mode shape of TBA

Fig. 2 Result of frequency analysis for load & TBA

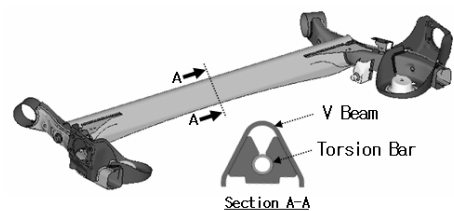
과 일치한다. 따라서 토션빔 액슬에 대한 내구해석을 위해서는 동적 특성을 반영할 수 있는 해석 기법을 적용 하여야 한다.

2.2 토션빔 액슬 내구해석 및 시험 결과

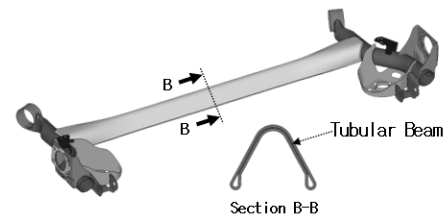
토션빔 액슬에 대한 내구시험 및 해석은 2가지 모델에 대해 수행 하였으며 Fig. 3에 나타내었다. 토션빔 액슬은 센터부 빔의 형태에 따라 V자형 Beam 적용 타입과 튜블러(Tubular)형으로 나눌 수 있다.

MSR법을 적용한 내구해석을 위해서는 다물체 동역학 해석을 통해 모달변위를 계산해야 한다. 이를 위해 Fig. 4와 같이 토션빔 액슬에 대한 모델을 구성 하였으며 지그모델은 당사 내구 시험기인 MTS329를 구현하여 개발한 해석모델을⁽⁵⁾ 적용 하였다. 토션빔 액슬의 탄성체 특성을 표현하기 위해 본 연구에서는 40개의 정규모드와 48개의 구속모드를 사용 하였다. 이 모드들은 Craig-Bampton 방법에 의해 부분 구조 합성되며 정규-직교화된다. 토션빔 액슬은 Fig. 4, Table 1에서 보는 바와 같이 총8개의 위치에서 시험용 지그와 결합된다. 입력 하중으로는 토션빔 액슬 내구시험시 부가한 가속내구시험 파형을 적용하였다. F_x , F_y , M_x , M_z 하중은 휠센터점에, Z방향 하중은 상하방향 하중 액추에이터부에 시험에서 측정한 변위값을 각각 부가 하였다.

다물체 동역학 해석의 신뢰성을 확보하기 위하여 내구시험시 빔 센터부에 Shear Strain gague를 이용해 측정한 스트레인값과 해석결과와 비교 분



(a) V beam type



(b) Tubular beam type

Fig. 3 Torsion beam axle shape

Table 1 Connection point to the test Jig

Point	Connection part
①②	Trailing Arm Bush-Car body
③④	Wheel center-Tire
⑤⑥	Spring-Car body
⑦⑧	Damper-Car body

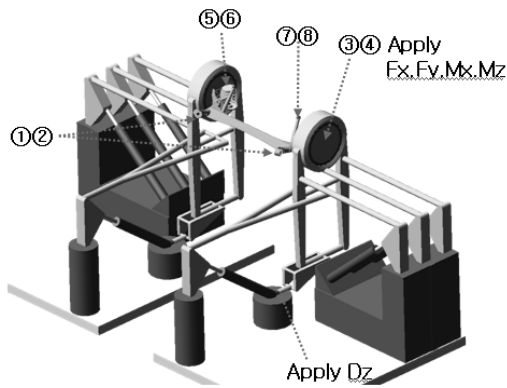


Fig. 4 Multi-body dynamics analysis model

석을 실시하였으며 그 결과를 Table 2, Fig. 5에 나타내었다. 해석시 Z축을 하중이 아닌 시험에서 계측한 변위값으로 부가함으로써 토션빔 액슬의 좌우측 휠 스트로크(Stroke) 차이에 따른 빔의 비틀림 경향을 시험과 매우 유사하게 재현 하였음을 확인할 수 있었다.

다물체 동역학해석을 통해 계산한 주요 모드(1,2,3차)의 모달 변위값을 Fig. 6에 나타내었다.

MSR 내구해석은 MSC. Nastran을 이용하여 계산한 Torsion Beam Axle의 MNF(Modal Neutral File) 해석결과와 MSC. Adams에서 계산된 모달 변위값을 내구해석 상용 S/W인 MSC. Fatigue를 이용하여 선형 중첩하여 동응력 이력을 계산한 다음 각 부품의 변형률-수명 물성치 데이터를 적용하여 수행하였다. 또한 해석결과와 타당성을 검토하기 위하여 서스펜션 모듈내구 시험장비인 MTS329 장비를 이용하여 내구시험을 실시하였다. Fig. 7은 시험모습을 나타낸다.

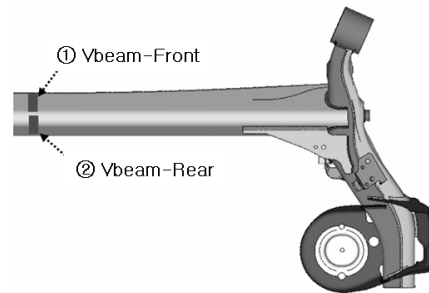
V자형 Beam을 적용한 토션빔 액슬에 대한 내구해석 및 시험결과를 Table 3 및 Fig. 8에 나타내었다. 해석수명은 시험결과를 1로 하였을 시

Table 2 Comparison result of strain data

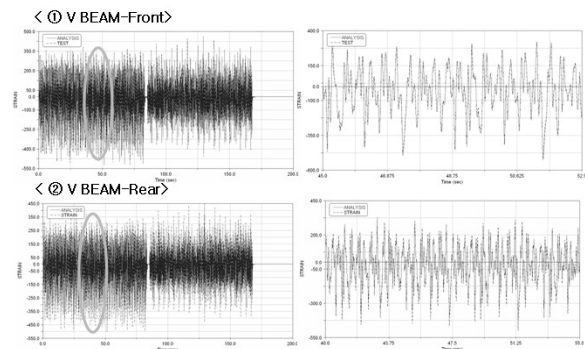
location	Strain(RMS)		
	Test	CAE	Error
① Vbeam-Front	138.9	140.9	1.4%
② Vbeam-Rear	134.6	121.3	9.8%

Table 3 Durability test & analysis result

Item	Test	Analysis
Durability Life	1	1.04
Critical Location	Torsion Bar end	



(a) Location of strain gauge attachment



(b) Comparison result of strain data(Test/Analysis)

Fig. 5 Test and analysis strain data comparison

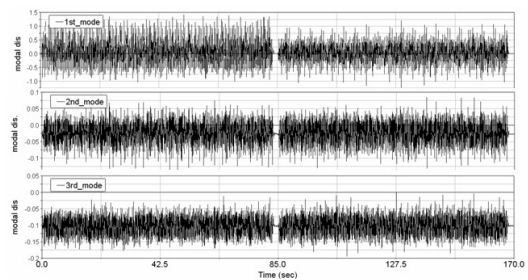


Fig. 6 Modal coordinates data of mode 1~3

Table 4 Durability test & analysis result

Item	Test	Analysis
Durability Life	1	2.6
Critical Location	Trailing Arm & Beam weld	

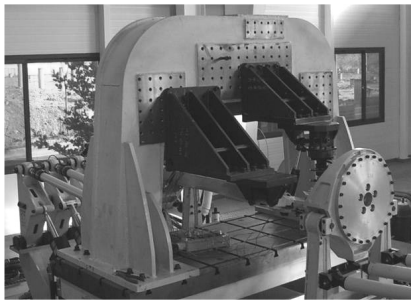


Fig. 7 Durability test of torsion beam axle



Fig. 8 Durability test & analysis result

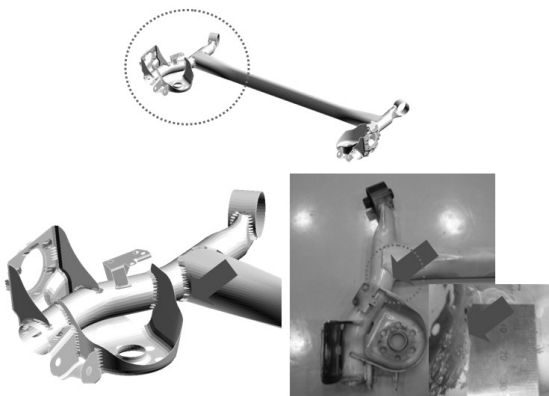


Fig. 9 Durability test & analysis result

그 비율로 나타내었다. 내구수명은 시험1, 해석 1.04 이고 취약위치는 시험/해석 모두 토션바 끝단으로 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

튜블러 타입 토션빔 액슬에 대한 내구 해석 및 시험 결과를 Table 4 및 Fig. 9에 나타내었다. 취약위치는 ‘트레일링암과 빔의 용접부’로 시험 및 해석결과가 일치한다. 내구수명은 시험1, 해석 2.6으로 해석결과가 시험결과 대비 높은 해석 수명을 나타내고 있으나 취약부위가 용접부로 해석 변수가 다양한 점을 고려할 때 유의할만한 차이는 아니라고 판단된다.⁽⁴⁾

3. 결 론

본 연구에서는 모달 응력 회복법(MSR, Modal Stress Recovery)을 이용한 내구해석 기법의 타당성을 검토하기 위하여 토션빔 액슬에 대한 내구해석 및 시험을 실시하였다. 토션빔 액슬은 V자형 빔 형태와 튜블러 타입 형태의 2가지 모델에 대해 검토하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) MSR 기법을 이용하여 구조물의 동적 내구수명을 예측하는 프로세스를 정립할 수 있었다.
- (2) 토션빔 액슬에 대해 MSR 기법을 적용한 내구 해석 결과 취약위치 및 수명이 시험결과 값과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.
- (3) 따라서, MSR 기법을 적용한 내구해석 기법은 동적 특성을 반영하여 구조물의 취약부 및 수명을 예측하는데 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) MSC Fatigue, Adams User Manual, 2005.
- (2) Craig, R. R. Jr and Bampton, M. C. C., 1968, "Coupling of Substructures for Dynamic Analysis," *AIAA Journal*, Vol. 6, No. 7, pp. 1313~1319.
- (3) Myklebust, L. I. and Skallerud, B., 2002, "Model Reduction Methods for Flexible Structures," *15th Nordic Seminar on Computational Mechanics*, pp. 171~175.
- (4) Kim, J., Jeon, J. W., Chang, C. S. and Kim, T. J., 2009, "A Comparison Study Among the Commercial Durability Analysis Codes for Arc-Welded Structures," Hyundai-Kia motor Group's conference.
- (5) Kim, J.-G., Kim, K.-W., Kang, J.-S., Lee, D.-C.,

2005, "VTL Development for Durability Analysis of Suspension by Using MSR Method," MSC User's Conference.

(6) Suh, K., Lim, H., Song, B. and Ahn, C., 2008,

"Virtual Fatigue Analysis of a Small-sized Military Truck Considering Actual Driving Modes," *KSAE*, Vol 16, No. 4, pp. 120~127.