# 화물차량용 현가계 부품의 피로 수명 예측

전갑진* · 박태원† · 이수호* · 윤지원* · 권순기**

# FATIGUE LIFE PREDICTION OF THE PARTS USED IN THE SUSPENSION SYSTEM FOR TRUCKS

Kab-Jin Juṇ, Tae-Won Park, Su-Ho Leę, Ji-Won Yooṇ and Soon-Ki Kwon

**Key Words :** 공기현가장치(Air Suspension), 모달응력회복법(Modal Stress Recovery), 다물체동역학(Multibody Dynamics), 피로수명(Fatigue Life)

**Abstract**

The air suspension system is widely used in commercial vehicles such as buses or special purpose trucks because it improves ride better than any other types of suspension. Since the durability of vehicle parts is directly related to the safety, the evaluation of the durability at the design stage is necessary. In this research, the fatigue life of the air suspension frame for trucks is predicted by the modal stress recovery(MSR) method. Using the process proposed in this research, the fatigue life of vehicle parts can be predicted efficiently at the design stage.

## 1. 서 론

최근의 화물차량은 농수산물부터 반도체, LCD 등과 같은 고가의 첨단 제품까지 다양한 생산품을 수송하는 중요한 운송 수단이 되었다. 따라서 제품의 운송단계에서 파손이나 품질 저하를 막기 위해 화물차량에 겹판 스프링형 현가장치 대신 공기현가장치를 장착하는 추세이다. 공기 현가장치는 차량의 진동을 최대한 제거하여 화물의 파손을 막아 주고 차량 부품에 가해지는 진동을 최소화하여 준다. 뿐만 아니라 승차감 개선을 통한 화물차의 고급화로 운전자가 장시간 운전을 하여도 피곤하지 않도록 해준다.

공기현가장치와 같은 차량용 부품의 내구성은 안전성과 큰 연관이 있기 때문에 설계 초기 단계부터 평가가 필요하다. 일반적으로 피로 수명을 예측하기 위한 방법에는 현장 주행 시험이나 가속내구 시험등과 같은 시험에 의한 방법이 있다. 그러나 제품의 설계 초기 단계에서는 실제작품을 준비하기 어렵기 때문에 이런 시험에 의한 방법은 한계가 있다. 그러나 전산 모델의 시뮬레이션을 활용하면 실제작품이 없는 상황에서도 내구성에 대한 평가가 가능하다.

전산 모델을 이용한 수명 연구는 적은 비용으로 빠른 시간 안에 피로 수명을 예측 할 수 있기 때문에 활발히 진행되어 왔다.[1-4] 먼저 피로 수명 예측에 필요한 동응력을 유한 요소 코드를 이용한 동역학 해석으로 산출하는 경우는 해석 시간이 매우 많이 요구된다는 단점이 있다. 그래서, 대부분의 기존 연구는 다물체 동역학 해석을 통한 동하중 이력과 유한 요소 해석에 의한 정적 응력의 선형 중첩을 이용하여 계산된 구조물의 동응력 이력을 토대로 피로 수명을 예측하고 있다.[1, 2] 그러나, 이 방법은 각 모드가 구조물의 진동 및 동특성에 얼마나 기여했는지는 예측할 수가 없다는 단점이 있다. 즉, 기존 방법은 어떤 주파수와 진동형이 구조물의 피로 수명 단축에 기여하는가를 판단

† 회원, 아주대학교 기계공학부
E-mail : park@ajou.ac.kr
TEL : (031)219-2524 FAX : (031)219-1965
* 아주대학교 기계공학과 대학원
** 아주대학교 기계공학부

할 수 없음을 의미한다. 최근 모달 좌표를 이용한 유연체 동역학 해석[3, 4] 분야의 발전과 더불어 위 단점을 극복하기 위한 다양한 연구가 국내외적으로 진행되고 있다.

본 연구에서는 응력-수명법[7]을 이용해 공기 현가 장치의 피로수명을 예측하여 본다. 피로수명을 예측하기 위해 필요한 동응력이력은 모달응력회복법[3, 4]에 의한 유연체 동역학 해석을 통해 계산될 수 있다. 계산된 동응력 이력과 재료의 응력-수명선도는 사이클 집계법과 선형 손상 법칙 의해 피로 수명을 계산하는데 사용된다.

본 연구에서 제안된 방법은 차량 부품의 개발 소요 시간과 비용을 절감시킬 수 있기 때문에 설계 단계에서 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

## 2. 유한 요소 모델 및 모달 해석

모달 응력 회복법을 이용하여 현가장치 프레임의 동응력 이력을 계산하기 위해 Fig. 1 과 같은 유한 요소 모델을 생성하였다. 현가장치 프레임은 Table 1 과 같이 강체로 생성된 차량 모델과 총 8 개의 연결부를 갖는다. 각 연결부로 입력되는 하중의 상호 작용은 복잡한 응력 분포를 일으킨다.

본 연구에서는 20 개의 정규 모드와 48 개의 구속모드를 사용하였다. 이 모드들은 Craig-Bampton 방법에 의해 부분 구조 합성되며 정규 - 직교화 [5] 된다. 결과는 Table 2 와 같다. 변형 및 응력 분포에 가장 영향을 미칠 것으로 예상되는 7, 8 차 모드는 Fig. 2, 3 과 같다. 이들은 강체 모드를 제외하면 실제적인 1, 2 차 모드가 된다

**Table 1** Connection point to the vehicle

| Point | Connection part |
|---|---|
| ①, ② | Upper suspension frame |
| ③, ④ | Axle bracket |
| ⑤, ⑥ | Damper |
| ⑦, ⑧ | Air spring |

**Table 2** Result of modal analysis

(Unit: Hertz)

| Mode Number | Frequency | Comment |
|---|---|---|
| Mode 1 ~ 6 | 0 | Rigid Body Mode |
| Mode 7 | 14 | 1st Torsion |
| Mode 8 | 43 | 1st Bending |
| Mode 9 | 96 | |
| Mode 10 | 107 | |
| Mode 11 | 252 | |
| Mode 12 | 305 | |
| ~ | ~ | |
| Mode 68 | 16955 | |

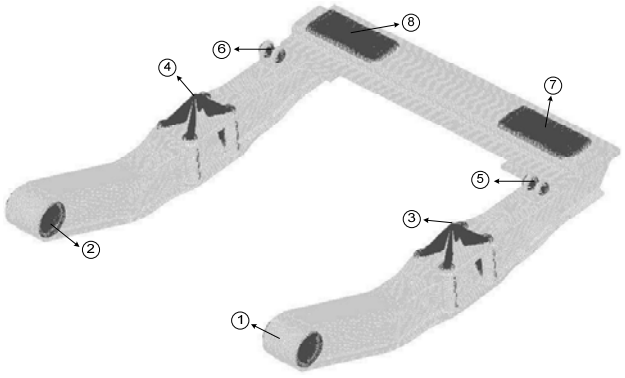



**Fig. 1** FE model of suspension frame

**Fig. 2** The 7th mode shape of suspension frame

**Fig. 3** The 8th mode shape of suspension frame

## 3. 유연체 동역학 모델링 및 해석

### 3.1 공기스프링과 높이조절밸브 모델링

공기 현가 장치의 특징은 공기 스프링과 연결된 높이 조절 밸브에 의해 사용자가 원하는 일정한 높이가 유지되는 것이다. 공기스프링과 높이조절 밸브의 조합은 Fig. 4 와 같다. 높이 조절 밸브는 공기스프링의 높이를 항시 감지하여 스프링이 압축될 경우 스프링에 공기를 유입시키고 반대로 스프링의 높이가 높아질 경우 스프링내의 공기를 배출한다. 이런 특징은 공기 현가 장치가 겹판 스프링으로 이루어진 일반 현가 장치에 비해 더 좋은 승차감을 보장하게 한다.

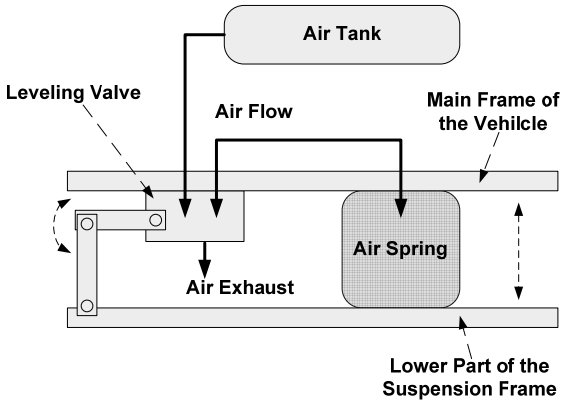



**Fig. 4** Assembly of air spring and leveling valve

공기현가장치의 특성을 구현하기 위해서는 스프링내부의 비선형적인 압력변화를 표현할 수 있는 수식이 필요하다. 스프링과 공기탱크의 공기를 가역단열과정으로 유동중인 이상기체로 가정하면 식 (1)이 성립한다.[6]

$$\frac{dP}{dt} = \frac{kRT}{V}\left(\frac{P_f}{P_i}\right)^{(k-1)/k}\frac{dm}{dt} - \frac{kP}{V}\frac{dV}{dt} \qquad (1)$$

여기서, $P$, $t$, $k$, $R$, $T$, $V$, $P_f$, $P_i$ 그리고 $m$ 은 각각 공기 스프링의 내부 압력, 시간, 상태변수(공기 1.4), 기체상수, 공기 온도, 공기스프링의 부피, 공기 탱크의 초기 압력, 공기 스프링의 초기 압력 그리고 스프링내의 공기 질량이다. 식 (1)에서 좌변은 공기 스프링의 시간에 대한 압력 변화를 의미한다. 우변에서 첫 번째 항은 높이 조절 밸브에 의해 조절되는 공기 유입에 의한 시간에 대한 공기 스프링 압력 변화이다. 높이 조절 밸브의 공기 유입량 변화 특성은 Fig. 5 와 같이 시험에 의해 측정되었다. 그리고 두 번째 항은 공기 스프링의 부피 변화에 의한 시간에 대한 압력 변화이다.

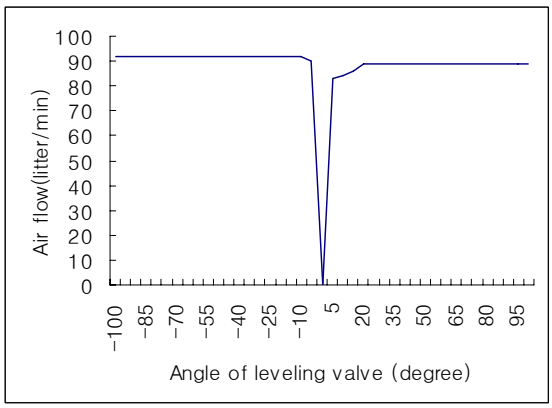



**Fig. 5** Air flow depended on angle of leveling valve

공기스프링과 높이 조절 밸브 조합 모델링의 타당성을 확인하기 위해 동역학 모델에 Fig. 6 과 같이 계단함수형태의 하중을 입력하였다. 1500N 의 힘이 1 초부터 1.2 초 사이에 스프링을 압축하는 방향으로 입력된다. 공기스프링의 높이 응답은 Fig. 7 과 같다.

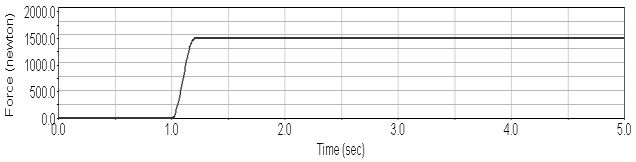



**Fig. 6** Compression load to air spring

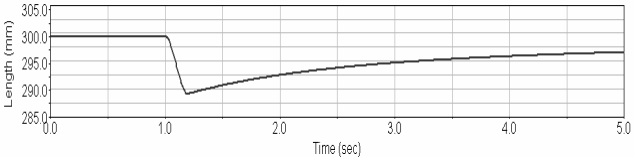



**Fig. 7** Displacement response of air spring

높이 조절 밸브가 없는 공기스프링은 계단함수 형태의 하중에 의하여 압축된 높이를 유지한다. 반면에 높이 조절 밸브가 장착된 공기스프링은 설계된 높이를 유지하기 위하여 공기탱크에서 스프링으로 공기를 유입시킨다. 따라서 스프링은 원래의 장착높이 300mm 를 일정하게 유지할 수 있다. Figure 7 은 이러한 특성이 동역학 모델로 잘 구현되었음을 보여준다.

### 3.2 벨지안 로드 주행 시뮬레이션

벨지안 로드는 차량의 내구 테스트에 많이 사용되는 노면으로서 일반도로의 100 배의 가혹도를 가진다. 일반적으로 이 도로를 주행하는 차량이 1km 를 달리는 것이 가능하다면 100 km 의 일반도로를 주행 할 수 있다고 평가된다. 본 연구에 사용된 벨지안 로드의 거리는 200m 이다. 5 톤 화물차량이 적재함을 가득 채우고 ( 총 중량 : 10.5 ton ) 56 km/h 의 주행 속도로 시뮬레이션 된다. 벨지안 로드의 프로파일은 Fig. 8 과 같다.

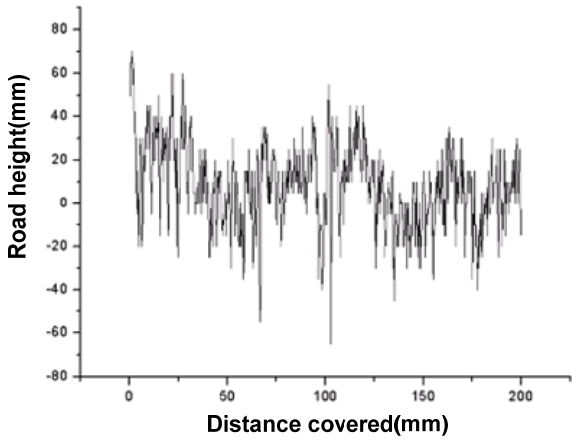
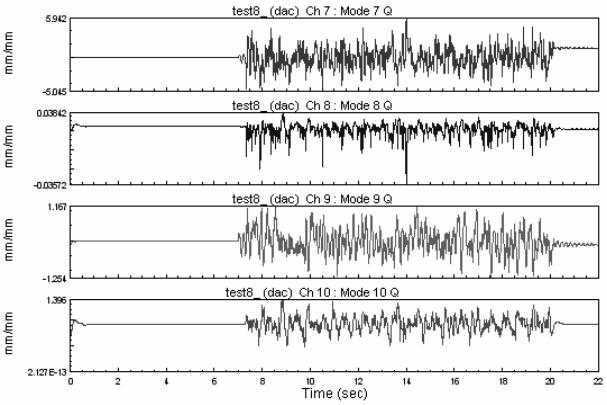



**Fig. 8** Profile of Belgian road

노면 데이터는 250mm 간격으로 총 800 개의 노면의 높이 데이터를 포함한다. 노면은 컴퓨터로 구현된 화물차량의 타이어 밑면에 위치한 액추에이터로 구현된다. 따라서 Fig. 8 의 데이터는 시뮬레이션 시간에 따른 높이로 표현된다.

주행 해석 결과 중에서 강체 모드를 제외한 62 개의 모달 변위 이력은 동응력 이력을 계산할 때 사용된다. Fig. 9 는 7~10 차 모드가 기여한 모달 변위 이력을 나타낸 것이다. 첫 번째 비틀림 모드인 7 차 모드에 의한 변위가 가장 큰 것을 알 수 있다. 이는 차량이 주행 중에 지면으로부터 차축으로 입력되는 하중에 의해 현가장치 프레임이 비틀림에 의한 영향을 많이 받기 때문인 것으로 생각된다.




| Marker | Title | Y Max | Y Min | Y Mean | Y Units |
|---|---|---|---|---|---|
| | test8_(dac) Ch 7 : Mode 7 Q | 5.942 | -5.045 | 0.05926 | mm/mm |
| | test8_(dac) Ch 8 : Mode 8 Q | 0.03842 | -0.03572 | 0.02162 | mm/mm |
| | test8_(dac) Ch 9 : Mode 9 Q | 1.167 | -1.254 | -0.02711 | mm/mm |
| | test8_(dac) Ch 10 : Mode 10... | 1.396 | 2.127E-13 | 0.9194 | mm/mm |

**Fig. 9** Modal coordinates time histories of suspension frame

## 4. 피로 수명 예측 및 신뢰성 평가

### 4.1 동응력 이력

모달 해석으로 구한 각 절점에서의 모달 응력과 유연체 동역학 해석으로 계산된 각 모드에서의 모달 변위 이력을 선형 중첩하여 각 절점에서의 동응력 이력을 계산할 수 있다.[5] 계산된 동응력 이력에서 현가장치 프레임의 최대 응력 분포는 Fig. 10 과 같다. 이는 주행중 노면으로부터 입력된 하중에 의한 응력이 차축과 가까운 현가장치 프레임의 형상 변화부인 ①~④에 집중되기 때문이라고 여겨진다. 취약부 중에 하나인 ①의 동응력 이력은 Fig. 11 과 같다. 선형 손상 법칙을 이용하여 피로수명을 계산하기 위해 레인플로우 집계법를 통하여 동일한 평균과 진폭을 가진 사이클의 개수를 Fig. 12 와 같이 계산하였다.[10]

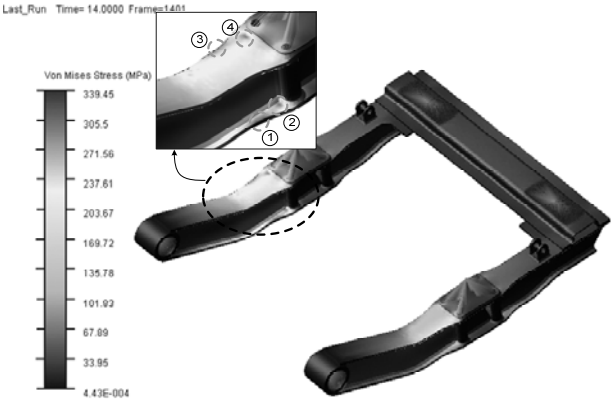



**Fig. 10** Maximum stress range of suspension frame driving on the Belgian road

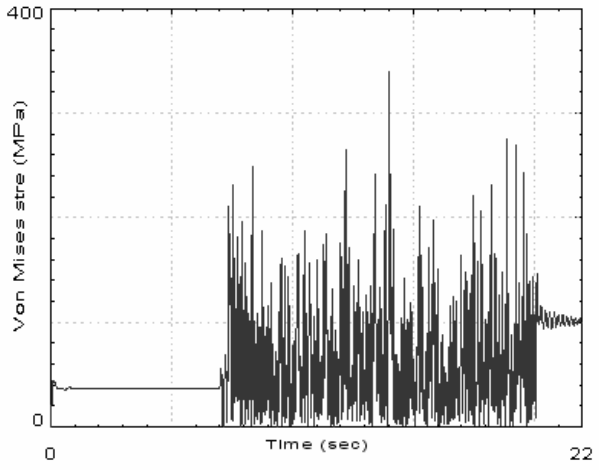



**Fig. 11** DSTH on the worst node

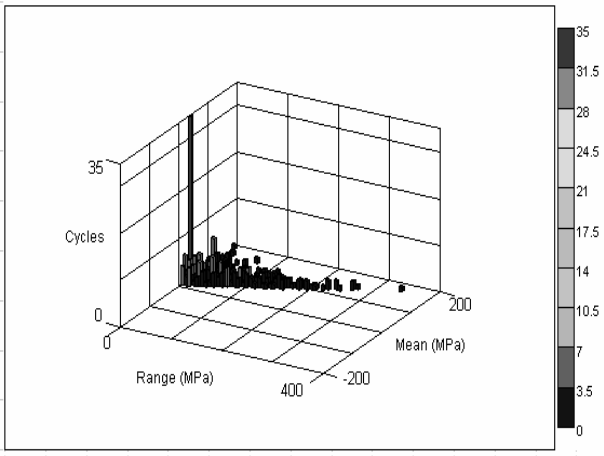



**Fig. 12** Cycle counting of the DSTH on the worst node

4.2 재료의 물성치와 피로 수명 특성

현가장치 프레임의 재질은 용접 구조용 고장력 강판인 DOMEX 700 이다. 재질 물성치와 피로수명 특성은 Table 2 와 같다. 피로 수명이 상대적으로 길고, 소성변형 영역이 상대적으로 매우 작은 경우에는 응력-수명법을 주로 사용한다. 철강재질의 응력-수명선도는 일반적으로 인장강도와 피로강도를 이용하여 Fig. 11 와 같이 구할 수 있다.[10]

**Table 2** Material and fatigue properties of DOMEX 700

| Material name | DOMEX 700 |
|---|---|
| Yield strength | 686 MPa |
| Ultimate tensile strength | 750 MPa |
| Elastic modulus | 210 GPa |
| Stress range intercept | 1215 MPa |
| Fatigue transition life | 1e6 cycles |
| First fatigue strength exponent | -0.08509 |
| Second fatigue strength exponent | 0 |
| R-ratio of specimen test | -1 |

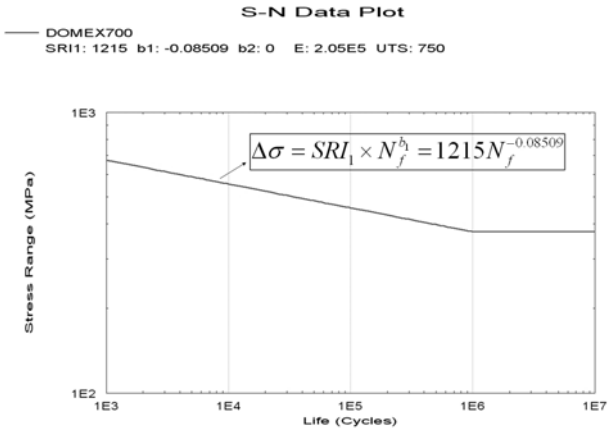



**Fig. 13** S-N curve of DOMEX 700

4.3 피로 수명 예측

4.1 절에서 설명된 각 절점에서 계산된 동응력 이력과 4.2 절에서 설명된 재료의 S-N 선도는 사이클 집계와 선형 손상 법칙에 의해 피로 수명을 계산하는데 사용된다. 평균 응력이 존재할 경우, 대부분 피로 시험 결과는 Goodman 선도와 Gerber 선도 사이에서 나타난다.[7] 현가장치 또한 주행 중에 지속적으로 일련의 평균응력을 받게 되므로 Goodman 과 Gerber 의 평균 응력 고려 방법을 이용하여 Table 3 과 같이 피로 수명을 예측하였다. 이 중에서 더 보수적으로 계산된 Goodman 선도를 이용한 피로 해석결과를 현가장치의 최종 피로 수명으로 예측하는 것이 타당할 것이다. 여기서 무한 수명은 1E6 사이클 보다 긴 수명을 의미한다.

Table 3 의 결과에서 1 사이클은 벨지안 로드의 총 길이인 200m 를 의미하는 것이다. 따라서 1 사이클은 벨지안 로드 0.2km 이다. Goodman 선도에 의해 계산된 수명에 의해 현가장치 프레임은 화물차량이 약 29000km 의 벨지안 로드를 주행하는 동안 안전할 것으로 평가된다. 벨지안 로드가 일반 도로의 약 100 배 정도의 가혹도를 가지므로 일반적인 화물차량의 사용기간에 현가장치는 충분히 안전하다고 볼 수 있다.

**Table 3** Results of fatigue analysis

(Unit: Cycles)

| Goodman | Gerber |
|---|---|
| 1.4531E5 | Infinite |

현가장치 프레임에서 수명의 취약부는 Fig. 14 와 같다. 이 부위는 Fig. 10 에서 계산된 최대 응력 분포 지점과 일치한다.

**Fig. 14** Fatigue life of the suspension frame

## 5. 결 론

본 연구에서는 트럭용 현가장치 모듈의 설계 단계에서 현가장치 프레임의 피로수명예측을 하였다. 피로수명 예측은 유연체 동역학 해석과 응력-수명법에 의해 수행되었다.

본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 이상 기체 방정식을 이용해 공기 스프링과 높이 조절 밸브가 모델링 되었다. 이를 통해 외력에 대해 일정한 높이가 유지되는 공기현가장치의 특성을 표현할 수 있었다.

(2) 현가장치 프레임의 유연체 동역학 해석을 통해 동응력 이력과 최고 응력의 집중부를 계산할 수 있었다. 현가장치 프레임의 거동은 노면으로부터 입력되는 하중에 의해 비틀림 현상이 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

(3) 동응력 이력의 사이클 집계 결과와 재료의 응력-수명선도를 이용해 선형 손상 법칙에 의한 피로수명을 예측할 수 있었다.

(4) 벨지안 로드가 일반도로의 100 배의 가혹도를 가진 것을 고려하면 현가장치 프레임의 수명은 일반적인 차량의 사용기간에 비하여 충분하다고 평가할 수 있다.

본 연구에서의 기술된 방법은 빠르고 간단하기 때문에 차량부품의 설계단계에서 내구성 평가에 효율적으로 적용될 수 있다.

## 참고문헌

(1) H. J. Yim and S. B. Lee., 1996, "An Integrated CAE System for Dynamic Stress and Fatigue Life Prediction of Mechanical Systems." *Journal of the KSME*, Vol. 10, No. 2, pp. 158~168.

(2) S. B. Lee, T. W. Park and H. J. Yim. , 2000, "A Study on Computational Method for Fatigue Life Prediction of Vehicle Structure." *Journal of KSNVE*, Vol. 10, No. 4, pp. 686~691.

(3) W. S. Yoo and E. J. Haug. ,1986, "Dynamics of Flexible Mechanical System Using Vibration and Static Correction Modes. " Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol. 8, pp. 315~322.

(4) H. Jung, T. W. Park, J. H. Seo, K. J. Jun, H. J. Yim, H. Kim and J. K. Park., 2005, "A Study on the Fatigue Life Prediction of OHT Vehicle Structures Using the Modal Stress Recovery Method", Proceedings of IDETC/CIE 2005, DETC2005-84319.

(5) R. R. Craig Jr. Structural Dynamics, John Wiley & Sons, 1981.

(6) D. Cho and J. K. Hendrick. , 1985, "Pneumatic Actuators for Vehicle Active Suspension Applications.", Transaction of the ASME, Vol. 107, pp. 67~72.

(7) J. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock. , 1989, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, New Jersey.