

## 동적 피로를 고려한 자동차 부품의 최적설계

이정준\*(KAIST 기계공학과), 주병현(KAIST 기계공학과), 이병채(KAIST 기계공학과)

Optimization of a vehicle component under dynamic fatigue

J. J. Lee(Mechanical Eng. Dept. KAIST), B. H. Joo(Mechanical Eng. Dept., KAIST) B. C. Lee(Mechanical Eng. Dept, KAIST)

### ABSTRACT

Generally, in case the natural frequency of vehicle components is larger than the reversing frequency of load history, we can obtain the analysis results with small errors. But in case of having the low natural frequency, we must avoidably carry out the dynamic analysis, and it requires much time and storage. Specially executing the fatigue analysis for vehicle components requires more time. To this end, it is not easy that we accomplish the optimization considering fatigue for the vehicle component based on the dynamic analysis.

In this research we introduce an efficient method which performs the fatigue analysis based on the dynamic analysis. Finally as making the response surface we optimize the vehicle component under dynamic fatigue.

**Key Words** : Dynamic fatigue, Response surface method, vehicle component

### 1. 서론

동적 하중을 받는 구조물에 대해 피로를 평가하는 것은 쉬운 일이 아니다. 주어진 자동차 부품에 대해 피로 해석을 수행하기 위해서는 하중 이력과 피로와 관련된 재료 물성치가 필요하다. 또한 주어진 하중 이력이 유한 요소 모델에 작용될 때 각각의 요소 또는 절점 별로 얻어지는 응력확대계수(Stress intensity factor)를 구해야 한다. 하중 이력이 동적인 특성을 가지고 있으므로 응력확대계수를 얻기 위해서 동적 해석을 수행한 뒤 각각의 요소 또는 절점에 대해 응력 이력을 얻고 이를 이용해 피로 해석을 수행해야 한다.

그러나 동적 해석을 통해 모든 요소 또는 절점의 응력에 대한 이력을 얻는 것은 많은 시간과 저장 공간을 요구하는 작업이므로 실제 대형 문제에 적용하기는 쉽지 않다. 이런 이유로 피로 해석은 주로 외부 하중의 반복 주파수에 비해 고유진동수가 높아 준정적 해석으로도 오차가 작은 결과를 얻을 수 있는 LCA 와 같은 부품에 집중되어 왔다. 또한 최적설계를 하기 위해서는 여러 번의 해석을 수행해야 하기 때문에 동적 해석에 기반한 피로를 고

려하기란 더욱 어려운 일이다. 그래서 피로를 고려한 최적설계도 대부분이 이런 부품들에 대해서 이루어져 왔다.

본 논문의 목적은 먼저 동적 해석에 기반한 피로 해석을 효율적으로 할 수 있는 방법을 소개하고 이를 바탕으로 최적설계를 수행하는 것이다. 이때 수명에 대해 적절한 반응표면을 구성하고 이를 이용하는 방법을 선택한다

### 2. 자동차 부품의 피로 해석

#### 2.1 동적 해석에 기반한 피로 해석 과정

유한 요소법을 이용하여 응력의 시간응답을 구하는 동적 해석을 수행하기 위해서는 많은 시간과 저장 공간을 필요로 하기 때문에 가급적 정적 해석을 하는 것이 바람직하며 어쩔 수 없이 동적 해석을 수행해야 하는 경우 시간과 저장 공간을 고려해야 한다. 특히 피로 해석의 경우 동적 해석을 선형 작업으로 처리해야 하므로 그와 같은 제약 사항이 문제가 될 수 있다.

대표적인 동적 해석 방법으로는 동적 평형 방정식을 수치적분 하여 동적 반응을 요구되는 때 시간

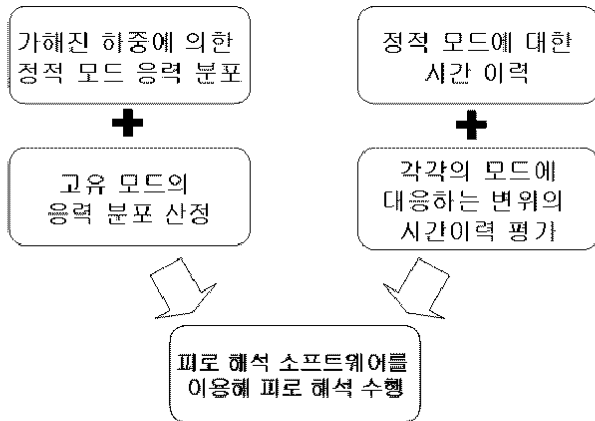


Fig. 1 Fatigue analysis procedure based on the dynamic analysis

간격마다 풀어내는 직접 적분방법과 동적 반응을 고유 모드의 선형결합으로 표현하는 모드 합성 방법이 있다. 물론 정확도 면에서는 컴퓨터 계산상의 오차가 영향을 끼칠 정도로 시간 간격을 작게 하지 않으면 직접 적분방법이 모드 합성 방법에 비해 더 정확하다. 그러나 이 방법을 실제적인 문제에 적용하는 것은 거의 불가능하기 때문에 피로 해석에서는 대부분 모드 합성 방법을 사용한다.

그러나 모드 합성 방법을 사용한다 할지라도 요소 또는 절점 별로 응력에 대한 이력을 얻어내는 것은 많은 시간이 소요되므로, 유한요소 해석에서 직접 응력에 대한 이력을 얻어내는 것은 바람직하지 않다. 고유 모드의 선형 결합으로 동적 반응을 근사할 수 있듯이 피로 해석을 위해 필요한 응력 또는 변형률에 대한 이력을 효과적으로 얻어내기 위해 고유 모드의 응력을 구하고 이를 선형 결합하여 구조물의 응력에 대한 이력을 구하는 방법을 적용한다. 즉, 각각의 고유 모드에 대응하는 응력을 얻어 낸 후 모드 합성 해석을 통해 외부에서 가해지는 하중 이력을 작용하고 각각의 고유 모드에 대한 변위의 시간 이력을 얻어낸다. 그리고 고유 모드의 응력과 변위에 대한 시간 이력을 적절히 결합하여 최종적으로 응력에 대한 시간 이력을 얻어낼 수 있다. 추가적으로 고유 모드에 정적 모드를 추가 하여 적은 개수의 고유 모드로도 높은 고유 진동수 영역을 포함할 수 있게 하였다. 최종적인 작업은 상용 피로 해석 프로그램을 이용하여 수행하였으며 이에 대한 과정을 Fig. 1 에 나타내었다.

## 2.2 RTB(Rear Torsion Bar)의 피로 해석

Fig. 2 와 같은 RTB 모델은 가장 낮은 고유진동수가 27Hz 정도이고 이 경우 하중 이력의 반복 주

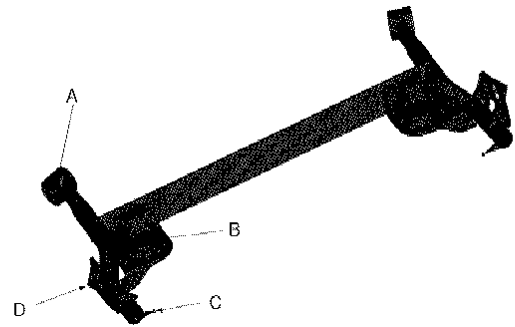


Fig. 2 Finite element model of Rear Torsion Bar

파수와 주파수 영역이 겹치게 된다. 그러므로 동적 해석을 수행해야 한다. 그림 2 와 같은 해석 모델의 왼쪽 부분에 대해 A 는 차체와 연결되는 부분, B 는 스프링에 의해 힘을 받는 부분, C 는 댐퍼에 의해 힘을 받는 부분, D 는 휠에 의해 힘이 가해지는 부분으로 각각에 3 개의 힘과 3 개의 모멘트가 가해지므로 총 48 개의 하중이력이 가해지게 된다.

10 개의 고유 모드를 사용하여 피로 해석을 수행한 결과는 Table 1 과 같고 선택된 절점에 대해 고유 모드의 개수를 증가시켜 피로 해석을 수행한 결과는 Fig. 3 과 같다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

Node number	Life(Repeats)
2012	36.2
12060	36.3
274	42.3
10322	42.4

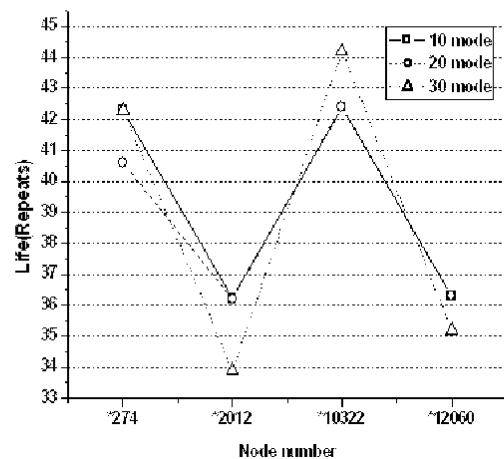


Fig. 3 Fatigue analysis results according to the number of used modes

### 3. RTB의 최적설계

#### 3.1 개요

RTB에 대해 동적 피로를 고려한 최적설계를 수행하려면 최적점 탐색 과정에서 동적 피로해석을 반복해서 수행하여 필요한 정보를 얻게 되므로, 피로 해석 프로그램과 최적설계 프로그램 사이에 유기적인 연결관계가 필요하게 된다. 만약 이러한 연결 시스템이 구축될 수 없는 경우에는 피로 해석 프로그램과 최적설계 프로그램이 별개로 수행되어야 하므로 반응표면법과 같이 적절한 근사기법을 도입하여 설계 변수와 응답 변수 사이의 관계식을 도출하여 최적설계를 수행하는 것이 합리적이다.

본 논문에서는 RTB에 대해 동적 피로수명을 초기값보다 100% 정도 높이면서 RTB의 무게를 최소화하는 최적설계 문제를 설정한 후, 상용 최적설계 프로그램에서 제공되는 반응표면 근사를 이용하여 최적화를 하고자 한다.

#### 3.2 최적설계 정식화

반응표면법을 구성하는 요소로는 실험을 수행할 자료점을 선정하는 기법인 실험계획법과 반응 표면을 최소 오차의 관점에서 근사하는 반응 표면근사법, 그리고 얻어진 반응 표면을 최적화하는 기법 등이 있다. 그리고, 반응 표면을 근사할 때 관심 영역을 어떻게 선정하느냐 하는 것도 정확도의 관점에서 중요한 사항이다. 본 논문에서는 동적 피로 해석을 고려한 최적설계에 반응표면법을 적용하여 적절한 최적해를 얻고자 하여 실험계획법 중 중심 합성 계획법(Central composite design)을 이용하고, 반응표면 근사는 전진 선택법(forward stepwise selection)을 이용하여 최대 이차항까지를 포함하는 반응 표면을 구성하였다.

Table 2 Result of design optimization

	Initial design	Optimal design
Weight	15.6kg	13.7kg
Lowest fatigue life	36 repeats	70 repeats
Node number	2012	12060
x1	4.00	3.07
x2	3.00	2.00
x3	3.00	2.04
x4	6.00	6.10
x5	3.60	3.96
x6	3.00	2.02
x7	11.00	11.98

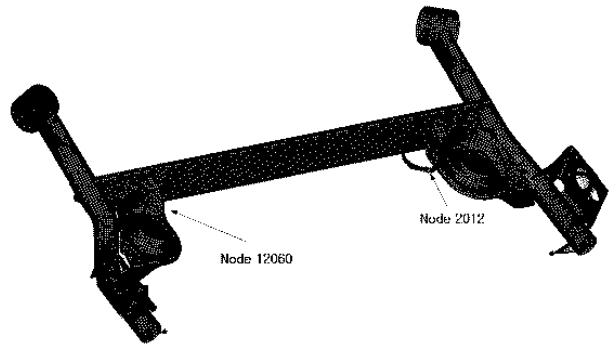


Fig. 4 Node of lowest fatigue life

최적설계 문제는 RTB의 단면 두께 7개를 설계 변수로 선정하여, 가장 낮은 피로 수명을 초기 피로수명보다 100% 향상되는 제한조건을 만족하면서 RTB의 무게를 최소화하는 것으로 정식화하였고, 각 설계변수에 대한 근사영역은 초기값을 중심으로 1mm와 2mm의 편차를 가지는 영역으로 정하였다. 초기점에서의 피로 수명과 무게, 최적점에서의 피로 수명과 무게는 Table 2와 같다. 이 때, 동적 피로 해석을 수행할 때 이용한 고유 모드의 개수는 20개이다.

최적 설계점에서 무게는 12% 정도 감소했으며, 가장 낮은 피로수명은 94% 정도 증가하였음을 알 수 있고, Fig. 4에 가장 낮은 피로수명이 나타나는 절점을 표시하였다. 초기 설계점에서 가장 낮은 피로수명을 나타내는 절점은 오른쪽에 표시되어 있고, 최적 설계점에서의 최저 수명 절점 위치는 왼쪽에 표시되어 있는데, 두 절점이 거의 대칭인 곳에 위치하고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 얻어진 최적 설계점이 적절한 것임을 미루어 판단할 수 있다.

### 4. 결론

고유진동수가 하중의 반복 주파수와 비슷한 경우 동적 해석을 해야 하며 피로 해석을 할 경우 이 결과를 바탕으로 해야 한다. 유한 요소 해석 단계에서 직접 요소 또는 절점에 대한 응력의 이력을 구하는 것은 비효율적이기 때문에 고유모드의 응력과 모드 합성 방법을 통해 얻은 고유모드의 시간 변위를 적절히 결합하여 효율적으로 응력에 대한 이력을 얻을 수 있었다. 이런 효율성을 바탕으로 여러 번의 해석을 필요로 하는 최적설계를 수행하였다.

최적설계를 위해 7개의 설계변수를 잡았고 적절한 수명을 유지하면서 무게를 최소화하는 것을

목표로 하였다. 그 결과 최적 설계점에서 무게는 12% 감소하였고 가장 낮은 피로 수명은 이전에 비해 94%정도 증가한 결과를 얻을 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. M. Anvari, and B. Beigi, "Automotive body fatigue analysis. Inertia relief or transient dynamics?", SAE Paper, No.993149, 1999
2. E. Chase, "Truck durability evaluation through computer simulation", SAE Paper, 2001-01-2763, 2001
3. nSoft V5.3 Online Documentation
4. W. J. Roux, N. Stander, and R. T. Haftka, "Response surface approximations for structural optimization," *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 42, pp. 517-534, 1998.
5. T. H. Lee, K. K. Lee, and J. K. Koo, "Optimization of Chassis Frame by Using D-optimal Response Surface Model," *KSME Journal series A*, Vol. 24, pp. 894-899, 2000 (In Korean).
6. M. S. Kim and S. J. Heo, "Conservative Quadratic RSM combined with Incomplete Small Composite Design and Conservative Least Squares Fitting," *KSME International Journal*, Vol. 17, pp. 698-703, 2003.