

## 동하중으로부터 변환된 등가정하중을 통한 구조물의 형상최적설계

박기종\* · 이종남\* · 박경진†

(2003년 2월 25일 접수, 2003년 6월 25일 심사완료)

### Structural Shape Optimization under Static Loads Transformed from Dynamic Loads

Ki-Jong Park, Jong-Nam Lee and Gyung-Jin Park

**Key Words :** Dynamic Load(동하중), Static Load(정하중), Displacement(변위), Equivalent Force(등가하중), Shape Optimization(형상최적설계)

#### Abstract

In structural optimization, static loads are generally utilized although real external forces are dynamic. Dynamic loads have been considered in only small-scale problems. Recently, an algorithm for dynamic response optimization using transformation of dynamic loads into equivalent static loads has been proposed. The transformation is conducted to match the displacement fields from dynamic and static analyses. The algorithm can be applied to large-scale problems. However, the application has been limited to size optimization. The present study applies the algorithm to shape optimization. Because the number of degrees of freedom of finite element models is usually very large in shape optimization, it is difficult to conduct dynamic response optimization with the conventional methods that directly threat dynamic response in the time domain. The optimization process is carried out via interfacing an optimization system and an analysis system for structural dynamics. Various examples are solved to verify the algorithm. The results are compared to the results from static loads. It is found that the algorithm using static loads transformed from dynamic loads based on displacement is valid even for very large-scale problems such as shape optimization.

#### 1. 서론

구조물에 작용하는 실제하중이 동적인 하중임을 고려할 때 최적화과정에서도 작용하중을 올바르게 평가해 설계할 필요가 있다. 하지만 동적 시스템의 최적화에서는 목적함수와 구속조건이 상태변수와 시간의 음함수로 표현되므로 설계민감도 해석에 있어서 어려움이 있다.<sup>(1-4)</sup> 이런 어려움으로, 지금까지 시간영역에서의 함수를 직접처리 하는 동

적반응 최적화문제는 비교적 적은 자유도의 구조물에 대한 연구만이 진행되어 왔다.<sup>(2,5,6)</sup>

시간과 경제성 등의 이점 때문에 동적인 하중을 정적인 하중으로 변환하여 설계를 하려는 시도로 동적계수를 적용한 정하중을 통한 설계가 이루어지고 있다.<sup>(7)</sup> 그러나 이런 기법은 동적하중을 적절히 평가하지 못하는 한계가 있다. 최근 동하중에 의해 나타나는 변위장과 동일한 변위장을 생성하는 등가정하중을 통해 동적반응 최적화를 수행하는 알고리즘이 제안되었다.<sup>(8,9)</sup>

본 연구에서는 제안된 등가정하중을 통한 동적반응 최적화 알고리즘으로 형상최적설계를 수행하고자 한다. 형상최적설계의 경우 일반적으로 유한요소모델의 자유도 수가 대단히 많아, 동적반응 최적화를 수행하기 위해서는 시간중속적인 구속조

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

E-mail : gjpark@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5246 FAX : (031)407-0755

건의 수도 많아질 수 밖에 없다. 기존의 동적반응 최적화 기법을 통해서 자유도가 많은 형상최적 설계의 수행이 거의 불가능하다고 알려져 있다. 따라서, 등가정하중을 이용한 동적반응 최적화가 형상최적설계에 유용함을 예제를 통해 보이고, 동적계수를 적용한 정적반응 최적화의 문제점을 보이고자 한다.

변위법에 의해 변환된 등가정하중을 통한 동적반응 최적화는 동적해석과 구조최적화를 위한 상용 소프트웨어의 사용을 통해 가능하며, 동적해석과 최적화 간에 정보를 교환을 필요로 한다. 동적해석과 구조최적화간에 정보교환이 자동적으로 이루어지도록 하여 최적화과정을 자동으로 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

2. 등가정하중을 통한 동적반응최적화

2.1 등가정하중의 정의

변위법에 의한 등가정하중 산출법에서 등가정하중은 동적하중이 구조물에 작용할 때 발생하는 임의의 시간에 변위장과 같은 변위장을 만들어내는 정하중으로 정의하고 있다.<sup>(9)</sup> 정의에 따라, 유한요소법을 통한 등가정하중의 유도과정을 보면, 동하중  $r(t)$  가 작용하는 구조물의 지배방정식은 다음과 같다.

$$M(b)\ddot{y}(t) + K(b)y(t) = r(t) \quad (1)$$

여기서  $M$  은 질량행렬,  $K$  는 강성행렬,  $b$  는 설계변수,  $r$  은 동적하중벡터,  $y$  는 동하중에 의한 변위벡터이다. 감쇠(damping)는 무시하였다.

식 (1)을 다시 쓰면

$$K(b)y(t) = r(t) - M(b)\ddot{y}(t) \quad (2)$$

또는

$$K(b)y(t) = f_{eq} \quad (3)$$

로 표현한다. 따라서

$$f_{eq}(t) = r(t) - M(b)\ddot{y}(t) \quad (4)$$

여기서  $f_{eq}$  는 변위법에 의한 등가정하중을 나타내며, 식 (4)로부터 외력과 관성력을 포함하고 있음을 알 수 있다. 등가정하중은 구조물의 모든 자유도와 모든 이산화된 시간절점(time step)에서 계산된다. 이와 같이 산출된 모든 시간 절점의 등가정하중은 구조물에 작용하는 동적하중의 영향을

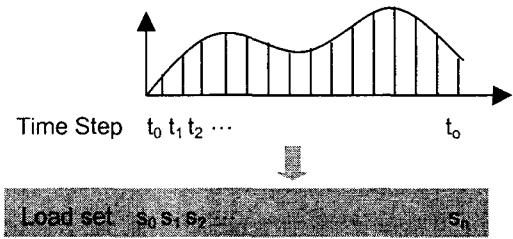


Fig. 1 Time domain and multiple loading condition

정확히 반영한다.

2.2 알고리즘

식 (1)의 해는 동적해석(dynamic analysis)를 통해 얻을 수 있으며, 이산화된 시간영역에서 다루게 되므로 등가정하중 역시 이산시간영역에서 산출할 수 있다. 이산화된 시간영역의  $u$  번째 시간절점에서의 등가정하중  $f_{eq}^u$  는 아래의 식 (5)로부터 얻어 낼 수 있다.

$$f_{eq}^u = K(b)y_u = r(t_u) - M(b)\ddot{y}_u \quad u = 1, \dots, q \quad (5)$$

그 각각의 이산화된 시간 절점에서 얻어진 등가정하중은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 독립적으로 취급하여 모든 시간에서 고려하고 있다. 기존의 동적반응 최적화에서 사용되었던 몇 개의 최대값만을 취하거나 시간영역을 적분하여 범함수화하는 등의 기법들은 최대값을 추적해야 하거나 수렴이 잘 되지 않는 문제가 있어, 등가정하중을 이용한 동적반응 최적화는 모든 이산된 시간 절점에서의 조건을 독립적인 구속조건으로 처리하고 이를 다중하중조건으로 적용하여 정적최적화를 수행하고 있다.

Fig. 2는 최적화의 전체적인 흐름을 나타내는 그림이다. 등가정하중을 산출하여 최적화하는 과정까지는 전체 최적화 과정중 한 주기(cycle)에 해당하며 최적화 결과로 갱신된 설계변수에 따라 새롭게 산출되는 등가정하중을 기준으로 하여 수렴조건을 만족할 때까지 최적화 과정을 반복하게 된다

$$\sum_{u=1}^q \|f_{eq}^u(p) - f_{eq}^u(p-1)\| < \epsilon \quad (6)$$

식 (6)은 수렴조건을 나타내는 것으로  $p$  는 주기를 의미하며, 현재 주기의 등가정하중과 이전 주기에서의 등가정하중의 차가 아주 작으면 수렴하는 것으로 하고 있다.

또한, 등가정하중을 통한 동적반응 최적화 문제는 앞에서 보인 수렴 조건을 만족하면, KKT 필요

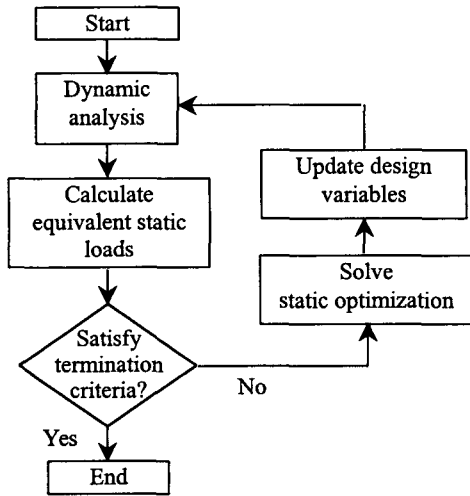


Fig. 2 Optimization process using the equivalent static loads

조건(Karush-Kuhn-Tucker necessary condition)이 시간 영역에서 직접 함수를 처리하는 동적반응 최적화 문제의 KKT 필요조건과 동일함을 보임으로써 제안된 알고리즘의 수학적 타당성을 보이고 있다.<sup>(10)</sup>

### 3. 등가정하중을 통한 형상최적설계

#### 3.1 형상최적설계

치수최적설계는 구조물의 높이, 너비 및 두께와 같은 요소들의 단면 치수를 설계변수로 하지만, 형상최적설계는 치수최적설계와 달리 절점의 좌표를 이동시켜서 해를 얻는 것으로 유한요소모델이 설계변경에 따라 변화하는 것이다.

이번 연구에서 사용한 최적화 시스템인 GENESIS 는 설계경계를 적은 수의 매개 변수로 표시하여 유한요소모델을 자동으로 재생성하는 기법으로 설계영역(domain)을 설정하여 영역내의 절점들을 설계변수의 변화에 따라 이동하도록 하고 있다. 설계변수들은 설계영역의 끝점과 중간점에 설정할 수 있으며, 설계변수의 변화에 따라 중간점과 끝점이 변화하면서 변화한 설계영역의 형태에 따라서 내부에 있는 절점들이 내삽법(interpolation)에 의해서 이동하게 된다.<sup>(11)</sup>

#### 3.2 동적반응최적화

정적시스템에 관한 최적설계문제에 있어서는 목적함수 및 구속조건이 단지 설계변수만의 함수로 나타나는 반면, 동적시스템에 관한 최적설계

문제는 목적함수와 구속조건이 설계변수뿐만 아니라 상태변수와 시간의 음함수로 표현된다. 상태변수는 동적시스템의 특성을 기술하기 위해 필요한 변수로 설계변수와 달리 시간에 대해서 종속적이다.

동적시스템의 최적화문제에 있어서 상태변수는 설계변수와 함께 처리되며, 시간에 종속적인 상태변수는 이산화된 시간영역의 절점 수에 따라 최적화 문제의 변수를 급격히 증가시킨다. 또한 구속조건 역시 시간에 종속적이므로 그 수가 크게 증가한다. 따라서 동적시스템의 해석이 간단한 문제라고 하더라도 최적화 문제는 대형화 하게 된다

설계변수와 구속조건이 2 개이고 시간영역을 50 개로 이산화하여 1 자유도 진동절연체 문제를 동적반응 최적화하게 되면 103 개의 변수를 갖고 257 개의 구속조건을 갖는 최적화문제가 된다<sup>(1)</sup> 이번 연구에서 수행한 받침대(bracket) 예제는 558 개의 절점과 490 개의 요소로 구성된 모델로 3 개의 설계변수와 1 개의 구속조건을 가지며 시간을 100 개의 절점으로 이산화 하였다. 이 예제를 동적반응 최적화하고자 하면 49,003 의 변수와 49,309 개의 구속조건을 갖는 문제가 된다. 동적해석을 수행하면서 이와 같은 문제를 최적화하는 것은 어려움이 있다.

#### 3.3 최적화 수행을 위한 프로그램

최근까지 변위법에 의한 등가정하중으로의 변환과 이를 이용한 구조최적화는 치수최적화에 대한 연구였다. 치수최적화의 경우 일반적으로 유한요소모델의 절점과 요소의 수가 많지 않고, 최적화 과정 중에 절점의 변화가 없어 등가정하중을 계산하고, 최적화 알고리즘을 수행하는데 수작업이 가능하였다. 형상최적설계의 경우 치수최적화에 비하여, 최적화 과정에서 다루어야 할 절점의 자유도 수가 많고, 더불어 등가정하중의 계산량이 많아진다. 또한, 매 주기마다 절점의 좌표가 변하여, 동적해석을 위한 절점 좌표의 수정이 필요하다. 이런 이유로 수작업으로 최적화를 수행하는데 어려움이 있으며, 계산량과 정보의 처리량이 많아지게 되는 형상최적설계를 위해 최적화를 자동으로 수행하기 위한 프로그램이 필요하다.

Fig. 3은 개발된 프로그램의 구성과 역할을 보이고 있다. 프로그램은 동적해석과 최적화 사이에서 얻어진 변위와 강성행렬로부터 각 절점에 적용될 등가정하중을 모든 시간절점에서 계산하여 등가정하중을 최적화를 위한 입력화일에 적용하여 작성한다. 등가정하중을 통해 수행된 최적화의 결과로부터 새로이 변한 절점 정보와 설계변수를 적용해

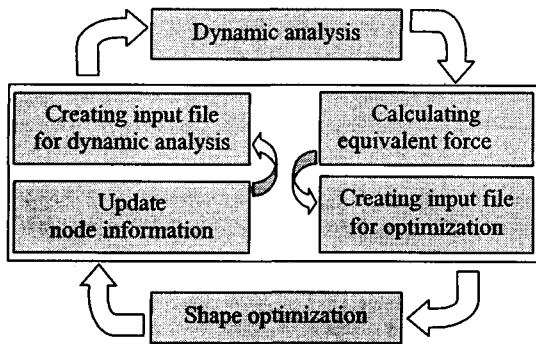
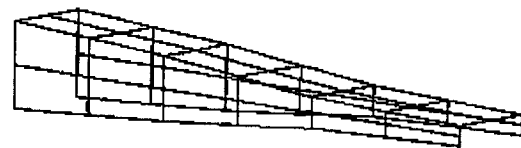
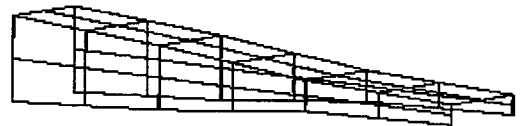


Fig. 3 Shape optimization process using equivalent static loads



(a) Using static loads with a dynamic factor



(b) Using equivalent static loads

Fig. 4 Shape optimization result of C-beam

서 새로운 동적해석의 입력화일을 작성한다.이과 같은 과정은 수렴 시까지 반복된다.

최적화 과정에서 동적해석을 위해서 ABAQUS 를 사용하였고, 구조 최적화를 위해서는 GENESIS 를 사용하였다. ABAQUS 는 동적해석을 수행하여 등가정하중 산출에 필요한 변위와 강성행렬의 정보를 제공하고, GENESIS 는 동하중으로부터 변환된 등가정하중을 통해 구조최적화를 수행하여 매 주기에서의 최적화 결과의 요소정보를 제공한다.

#### 4. 예 제

예제는 동적해석으로부터 변환된 등가정하중을 이용한 최적화와 동적계수를 적용한 정하중을 이용한 최적화의 비교를 중심으로 수행하였다.

동적하중의 전형적인 예로 충격하중을 들 수 있다. 블록의 낙하에 의한 스프링 충돌 문제로부터 에너지보존 법칙을 적용하여 충격하중에 의한 최대 변위와 정적하중에 의한 변위와의 관계식을 다음과 같이 얻어낼 수 있다.<sup>(12)</sup>

$$\Delta_{max} = 2\Delta_{st} \quad (7)$$

또한 충격하중을 적용함에 있어 작용시간에 대해 고려해야 한다. 구조물에 짧은 시간동안 작용하는 하중은 비록 그 하중의 크기가 큰 것이라 하더라도 그 구조물에 큰 영향을 미치지 못한다. 하중 작용시간이 구조물의 고유주기의 0.5 배보다 길어야 하중의 크기가 작용시간과 관계없이 동일한 최대변위를 유발한다.<sup>(13)</sup>

따라서, 동하중으로는 작용시간을 충분히 길게 한 충격하중으로 하였고 스프링 충돌 문제에서 얻어진 결과에 따라 정적반응 최적화에 적용될 동적계수로 2 를 선정하여 두 최적화 결과를 비교하였다.

#### 4.1 C 형 외팔보

C 형 단면의 외팔보에 한쪽단을 고정하고 상단면에 하중을 주었다. 설계 변수는 외팔보 측면의 4 지점의 높이를 형상최적설계를 위한 설계 변수로 정하였다.

Fig. 4는 최적화 결과를 보이고 있는 그림이다. 등가정하중을 이용한 경우와 동적계수를 적용된 정하중을 이용한 경우가 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 외팔보 형태의 구조물이 수직으로 작용하는 하중에 대해 변위를 발생시키는 양상이 동적하중과 정적하중이 크게 다르지 않게 때문에 나타나는 결과로 보인다.

외팔보에 동적하중이 가해질 때 과도응답의 형태가 자유단을 아래쪽 또는 위쪽으로 발생시키는 두 가지 변형 형태에 국한되어 나타나며, 최적화에 있어서 두 경우 모두 고정단의 응력을 증가하게 하는 양상을 보임으로써, 자유단이 아래쪽으로 변위를 발생시키도록 하는 정적하중이 동적하중의 영향을 어느 정도 포함할 수 있다.

이와 같은 전형적인 구조물의 경우 예제에 앞서 제시한 스프링 충돌문제로부터 이론적으로 얻은 적절한 동적계수를 적용한 정적하중에 의한 최적화가 동적반응 최적화를 충분히 대신할 수 있다고 하겠지만, 앞으로 살펴볼 예제에서는 동적계수를 적용한 정적최적화가 적절하지 못할 수 있음을 보이고 있다.

#### 4.2 트러스

18 부재 트러스 문제로 한쪽단을 고정하고 상단의 절점에 하중을 주었다. 이 예제는 형상만을 변수로 하지 않고 부재의 면적도 변수로 설정하였다. 상단부의 부재의 면적을 첫번째 설계변수로 하였고 하단부의 부재의 면적과 사선으로 놓인 부재 그리고 수직으로 세워진 부재의 각각의 면적을 변

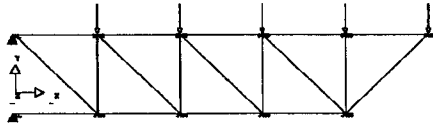
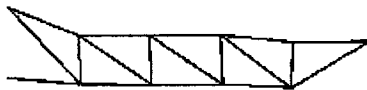


Fig. 5 Loading condition for the shape optimization of the bracket



(a) Dynamic analysis



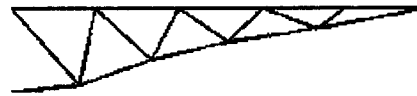
(b) Static analysis

Fig. 6 Dynamic analysis and static analyses for the initial model of the eighteen rod truss

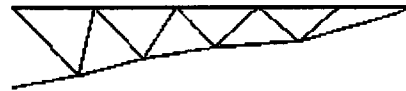
수로 놓고 트러스 하단부 절점의 x 좌표와 y 좌표를 형상최적설계를 위한 변수로 정하여 총 12 개의 설계변수를 설정하였다.

최적설계 결과를 비교해 보면, Fig. 7의 모습과 같고 자유단의 응력이 상대적으로 작아 자유단 부분의 부재가 길량이 작아지는 양상을 보이고 있다. 전체적인 형상에 있어서는 이전 예제의 변화 양상과 유사하다. 하지만 Table 1을 보면, 하단부 부재와 중간부 부재의 면적이 최적화 결과에서 차이가 있다. 특히, 네번째 설계 변수인 수직으로 세워진 부재의 면적의 경우는 등가정하중을 이용한 경우 약 40%의 차이를 보인다.

Fig. 6는 초기모델에 대해서 동적해석과 동적계수를 적용한 정적해석을 한 결과를 나타낸 것으로 (a)는 동적하중이 트러스 구조물에 작용하는 순간의 변위를 나타내는 그림이며, (b)는 동적계수를 적용한 정하중이 구조물에 작용할 때의 변형 양상을 보이고 있다. 동하중이 작용하는 초기에 순간적으로 중간부 중에 수직으로 세워진 부재의 길이가 작게 그려져 있음을 볼 수 있으며, 이는 동적하중이 작용하는 순간에 축방향으로 압축력을 발생시켜 횡방향 처짐인 좌굴을 발생하였음을 나타낸다. 이에 비하여 동적계수를 적용한 정하중의 경우 좌굴에 대한 영향이 거의 없는 것을 볼 수 있다.



(a) Using static loads with a dynamic factor



(b) Using equivalent static loads

Fig. 7 Shape optimization result of 18 rod truss

Table 1 Comparison of optimizations for the 18 rod truss

	Optimization using static loads with a dynamic factor	Optimization using equivalent static loads
Objective	2451.7 kg	2565.7 kg
Design variable 1	5135.3 mm <sup>2</sup>	5045.8 mm <sup>2</sup>
Design variable 2	18221.2 mm <sup>2</sup>	16703.8 mm <sup>2</sup>
Design variable 3	5125.6 mm <sup>2</sup>	7318.0 mm <sup>2</sup>
Design variable 4	2007.1 mm <sup>2</sup>	3490.3 mm <sup>2</sup>

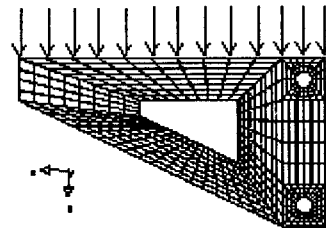


Fig. 8 Loading condition for the shape optimization of the bracket

동적하중으로부터 변환된 등가정하중을 통한 최적화의 경우 앞에서 논의한 동적하중에 의한 발생하는 좌굴의 특성이 반영되어 구속조건을 위반하는데, 비해 동적계수를 적용한 정하중의 경우 동적하중에 의한 양상을 적절히 반영하지 못하여 결과적으로 수직으로 세워진 부재의 면적에 있어서 값을 차이를 보이고 있다.

### 4.3 받침대

Fig. 8과 같은 사각형 구멍(hole)을 가지는 받침대(bracket)문제. 받침대 오른쪽에 있는 원형 구멍을 고정하고 상단의 절점에 하중을 가하였다. 설계 변수는 사각형 구멍의 상하위치를 첫번째 설계변수로 잡았으며, 사각형 구멍의 좌우위치와 사각형 구멍의 크기를 설계변수로 잡아 최적화를 수행하여 보았다.

Fig. 9는 최적화의 결과를 보여주고 있는 그림이다. 두번째 설계 변수인 사각형 홀의 상하 위치에 대한 결과가 동적계수를 적용한 경우는 양의 값을 갖는 것에 비해 등가정하중을 이용한 경우는 음의 값을 갖는 결과를 보였다. 그림에서 보면, 동적계수를 적용한 정하중에 의한 최적화는 받침대의 상단부의 면적이 넓게 최적화 되었으며, 등가정하중을 이용한 최적화는 반대로 하단부의 면적이 상대적으로 넓게 최적화 되었다. 이는 동적계수를 적용한 정적하중은 받침대의 상단에 작용하여 상단부 주변에만 응력을 집중시킨 것에 반해서 동적해석으로부터 얻어진 등가정하중은 받침대의 상단뿐만 아니라 하단부를 비롯한 전체적으로도 큰 응력을 일으키는 다양한 형태의 하중을 포함하고 있다고 할 수 있다.

이와 같은 사실은 두 최적화로 결정된 모델을 동적해석함으로써 확인 할 수 있다. Fig. 10은 최적화 모델의 동적해석 결과로서 응력의 분포를 보여주고 있다. 등가정하중의 의한 최적화 결과는 허용응력에 근사한 값을 갖는 것에 반해서, 동적계수를 적용한 정하중 문제의 경우 최적화에서 허용응력 300Mpa이하의 범위를 만족되었던 응력이 동적해석에서 329Mpa로 크게 넘어서고 있다. 이는 동적계수를 적용한 정하중이 동적하중의 영향을 충분히 반영하지 못하고 있음을 의미한다.

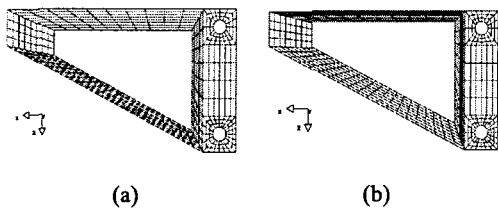


Fig. 9 Shape optimization for the bracket with holes ; (a) Using static loads with a dynamic factor / (b) Using equivalent static loads

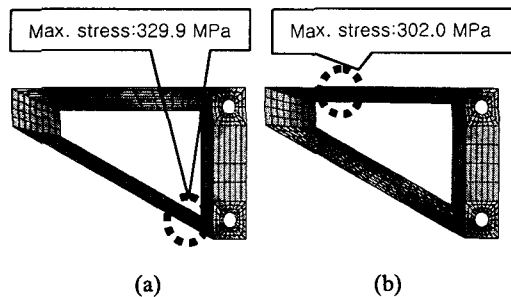


Fig. 10 Comparison of dynamic analyses for the optimum brackets holes ; (a) Using static loads with a dynamic factor (b) Using equivalent static loads

4.4 커넥팅로드

Fig. 11에서 보는 것과 같이 연결봉(connecting rod)이 구조물의 축방향으로 충격하중이 가해질 때의 문제를 모델링하여 최적화 하여 보았다. 원형 중심을 기준으로 한 양쪽 끝단의 크기를 형상 최적화의 첫번째와 다섯번째 설계변수로 잡고, 중간부 3 지점의 폭을 두번째, 세번째, 네번째 설계 변수로 잡았다.

최적화 수행 전, 초기모델에 대해 동적해석과 정적해석을 수행하여 최적화의 결과를 예측해 보았다. Fig. 12는 초기모델의 동적해석과 정적해석 결과이다. 동그란 점선의 원은 최대 응력이 발생한 영역으로, 정적해석의 경우는 하중작용 지점의 주변에 응력이 집중되면서 최대응력이 발생하였다. 그리고, 동적해석의 경우는 하중 작용 지점의 반대편인 구속된 구멍 주변에 최대 응력이 발생하였다. 이런 결과로부터 동적계수를 적용한 정적하중과 동하중으로부터 변위법에 의해 변환된 등가정하중이 구조물에 작용할 때 전혀 다른 반응을 나타내고 있음을 알 수 있다. 동적계수를 적용한 경우는 하중작용 지점이 크게 최적화 되고, 등가정하중의 경우는 구멍 주변이 상대적으로 크게 최적화 될 것이라고 예측할 수 있다.

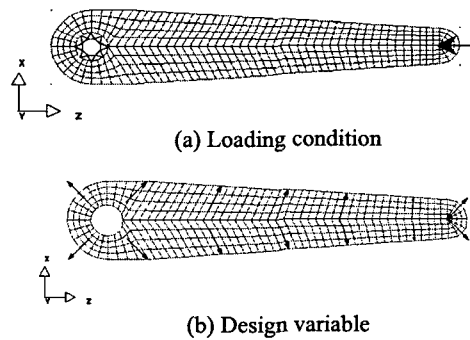


Fig. 11 Loading condition for the shape optimization of the bracket

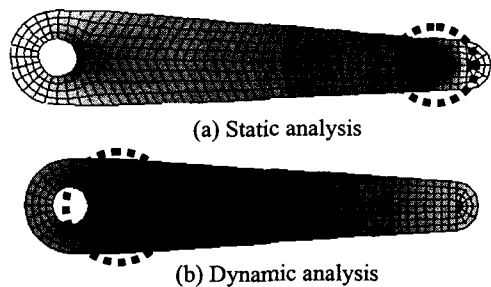


Fig. 12 dynamic analysis and static analysis for the initial model

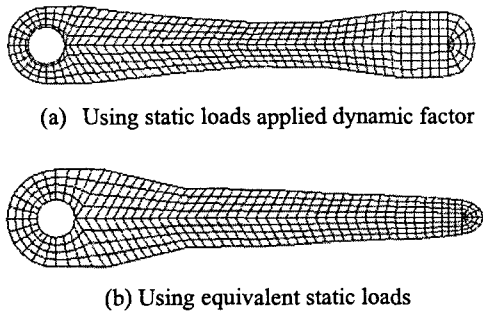


Fig. 13 Shape optimization of the connecting rod

최적화 결과를 보면, 두 최적화가 전혀 다른 양상을 보이고 있다. 동적계수를 적용한 정하중에 의한 최적화는 하중작용 주변의 영역이 크게 형상이 변화였고, 변위법에 의해 변환된 등가정하중을 통한 최적화는 구멍 주변의 크기가 유지된 채 하중작용 주변의 영역의 크기가 감소하는 형상으로 변화였다. 이 결과는 초기모델에 대한 동적해석과 정적해석의 결과를 최적화에서도 예측했던 것과 유사하다. 동적계수를 적용한 정하중에 의한 최적화결과가 하중작용 지점을 보강하는 최적화를 한 것은 동적하중보다는 정적하중의 특성을 가지고 있음을 보인 것이며, 등가정하중이 구멍 주변을 상대적으로 크게 유지하고 있는 것은 동적하중의 특성을 충분히 반영하고 있기 때문이라 할 수 있다.

두 최적화 형상에 대한 타당성 평가를 위해 최적화 결과에 대해서 동적해석을 수행하였다. Fig. 14는 동적해석의 결과로 최대응력의 분포와 크기를 나타내는 그림이다. 동적계수를 적용한 정하중에 의한 최적화 형상이 상대적으로 큰 최대응력이 발생하고 있다. 최적화과정에서 구속조건인 250Mpa의 허용응력을 만족했음에도 동적해석을 수행한 결과 최대응력이 허용응력을 상당히 넘어서는 것을 볼 수 있다. 이는 단순히 동적하중의 최대크기만을 기준으로 동적계수를 적용한 정하중은 관성력을 포함하며 시간에 종속적인 동적하중이 발생시키는 다양한 특성을 충분히 포함하지 못하는 것으로 보인다.

### 5. 결론

자동화된 프로그램을 통하여 동적해석으로부터 얻어진 변위와 강성행렬로부터 각 절점과 각 이산 시간마다의 등가정하중을 산출 하였고, 얻어진 등가정하중을 다중하중조건으로 처리하여 형상최적

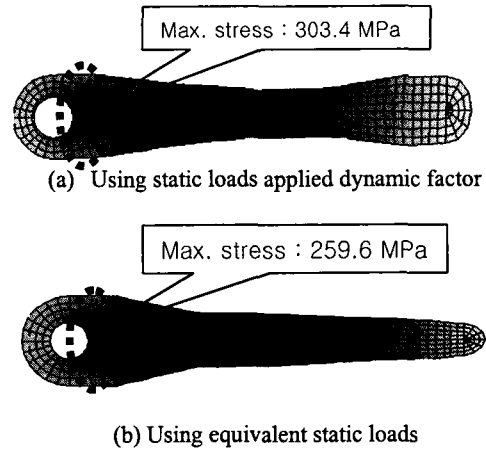


Fig. 14 Comparison of dynamic analysis of optimizations for the connecting rod

설계를 수행할 수 있었다. 동적계수를 적용한 정적하중에 의한 최적화와 등가정하중에 의한 최적화 결과를 비교하여 보았다. 간단한 문제의 경우 스프링 충돌문제로부터 얻은 이론적인 동적계수의 적용이 가능하였지만, 일반적인 형상최적설계 문제에 적용하기에는 적절하지 않음을 보였다.

동적계수를 적용한 정적하중에 의한 최적화는 시간에 따른 다양한 하중의 변화를 반영하기에는 한계가 있었다. 동적하중이 구속조건을 위반할 수 있는 여러 다양한 양상을 보이고 있음에도 이것을 표현하지 못함으로써 최적화과정에서 구속조건을 위배하지 않았던 최적화 결과가 동적해석을 수행하여 결과를 보면 허용 구속조건을 위배하고 있음을 보였다.

반면 변위법을 통해 변환된 등가정하중을 이용한 최적화의 경우 초기모델의 동적해석으로부터 예측되었던 최적화와 유사한 결과를 보였을 뿐만 아니라 최적화 이후의 동적해석 결과도 허용응력과 근사한 값을 가짐으로써 등가정하중이 동적하중을 충분히 반영하고 있음을 보였다.

### 후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Haug, E.J., Arora, J.S., 1979, *Applied Optimal Design*, Wiley & Sons, New York, U.S.A.
- (2) Feng, T.T., Arora, J.S., and Haug, E.J., 1977,

- "Optimal Structural Design under Dynamic Loads," *Int. J. for Num. Mech. In Eng.*, Vol. 11, pp. 39~62.
- (3) Haug, E.J. Arora, J.S., and Feng, T.T., 1978, "Sensitivity Analysis and Optimization of Structures for Dynamic Response," *J. of Mech. Design*, Vol.100, pp. 311~318.
- (4) Hsieh, C.C., Arora, J.S., 1984, "Design Sensitivity Analysis and Optimization of Dynamic Response," *Comput. Meths. Appl. Mech. Engng.* Vol. 43, No. 2, pp. 195~219.
- (5) Lim, O.K. and Arora, J.S., 1987, "Dynamic Response Optimization Using An Active Set RQP Algorithm," *Int. J. for Num. Meth. In Engng.*, Vol. 24, pp. 1827~1840.
- (6) Paeng, J.K. and Arora, J.S., 1989, "Dynamic Response Optimization of Mechanical Systems with Multiplier Methods," *ASME Journal of Mechanism, Transmission and Automation in Design*, Vol. 37, pp. 413~430.
- (7) Haftka R.T., Gurdal Z., 1991, *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- (8) Kang, B.S., Choi, W.S. and Park, G.J., 2001, "Structural Optimization under Equivalent Static Loads Transformed from Dynamic Loads Based on Displacement," *computer & Structures*, Vol. 79, No. 2, pp. 145~154.
- (9) Choi, W.S. and Park, G.J., 2002, "Structural Optimization Using Equivalent Static Loads at All the Time Intervals," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 191, pp. 2105~2122.
- (10) Kang, B.S., 2002, *On Optimality of Solution by Equivalent Static Load Method and Its Application to Flexible Multibody Dynamic System*, Ph. D. Thesis, Hanyang University, Korea.
- (11) *GENESIS User Manual version 7.0*, 2001, VMA Engineering.
- (12) Hibbeler, R.C., 1996, *Mechanics of Materials*, Prentice Hall.
- (13) Choi, W.S., 1994, *Transformation of a Dynamic Load into an Equivalent Static Load and Shape Optimization of the Road Arm*, M.S. Thesis, Hanyang University, Korea. (In Korean)