

매 시간단계의 동가정하중을 다중하중조건으로 이용한 준정적 구조최적화 방법

최우석* · 박경진**
(2000년 3월 10일 접수)

Quasi-Static Structural Optimization Technique Using Equivalent Static Loads Calculated at Every Time Step as a Multiple Loading Condition

Woo-Seok Choi and Gyung-Jin Park

Key Words : Equivalent Static Load(동가정하중), Multiple Loading Condition(다중하중조건), Design Cycle(설계주기), Analysis Domain(해석영역), Design Domain(설계영역), Time Step(시간단계)

Abstract

This paper presents a quasi-static optimization technique for elastic structures under dynamic loads. An equivalent static load (ESL) set is defined as a static load set which generates the same displacement field as that from a dynamic load at a certain time. Multiple ESL sets calculated at every time step are employed to represent the various states of the structure under the dynamic load. They can cover every critical state that might happen at an arbitrary time. Continuous characteristics of dynamic load are simulated by multiple discontinuous ones of static loads. The calculated sets of ESLs are applied as a multiple loading condition in the optimization process. A design cycle is defined as a circulated process between an analysis domain and a design domain. Design cycles are repeated until a design converges. The analysis domain gives a loading condition necessary for the design domain. The design domain gives a new updated design to be verified by the analysis domain in the next design cycle. This iterative process is quite similar to that of the multidisciplinary optimization technique. Even though the global convergence cannot be guaranteed, the proposed technique makes it possible to optimize the structures under dynamic loads. It has also applicability, flexibility, and reliability.

1. 서론

본 연구의 목적은 동하중을 받는 구조물의 설계를 정적 최적화 방법을 이용하여 수행하고자 하는데 있다. 이를 위해 동하중을 적절한 정하중으로 변환하는 방법과 이를 최적화에 이용하는 방법의 두 가지를 제안한다. 동하중을 동가의 정하중으로 변환하려는 노력은 토목공학 분야에서 지진을 대상으로 이루어져 왔다.⁽¹⁻¹⁰⁾ Cheng 과 Juang,^(1,2)

Truman 과 Cheng,⁽³⁾ 그리고 Truman 과 Jan⁽⁴⁾은 여러 가지의 실험코드(code provisions)와 목적함수 등을 통해 지진이 작용하는 2차원, 3차원의 건축구조물을 연구하였다. Cheng 과 Truman⁽⁵⁾은 모드응답스펙트럼의 해석을 이용하여 구조물의 최적화에 관해 연구하였다. Truman 과 Petruska⁽⁶⁾는 실제 지진의 가진 측정장치와 연계된 시간영역의 해석과정을 통해 2차원 구조물의 최적설계시 최적화 기준에 대해 연구하였다. 임의의 지진을 받는 계에 대한 구조 최적화 기법 및 신뢰성에 관한 연구가 Cheng 과 Chang^(7,8) 그리고 Austin 등^(9,10)에 의해 초보적인 단계이지만 계속 진행되었다. 그러나 이는 주로 지면으로부터 오는 지진에 국한된 실험식이

* 회원, 한국원자력연구소

E-mail : wschoi@kaeri.re.kr

TEL: (042)868-8390 FAX : (042)868-8990

** 회원, 한양대학교 기계공학부

어서 구조물에 작용하는 일반적인 동하중에 대한 정하중으로의 변환이라고 볼 수는 없었다. 또한 지금까지의 연구는 정하중을 동하중 자체로부터 동적계수(dynamic factor) 등을 이용하여 얻으려는 시도였다. 그러나 동적계수는 경험이나 설계지침서 등에 의해 결정되므로 신뢰성 감소의 우려가 있다. 따라서 제안하는 방법의 관점은 정하중은 동하중하에서 발생하는 반응치장(response field)으로부터 유도되어야 한다는 것이다. 반응치로부터 정하중을 구하기 위해서 역문제(inverse problem)의 하나인 하중을 정의하는 문제(load identification)⁽¹¹⁾를 이용할 수 있다. 구조물에 나타나는 반응(응답)을 만들어 내는 움직임(입력)을 거꾸로 찾아내는 것을 역문제라 하는데 이는 과학과 공학분야에서 오랜 역사를 가진다. 현재 이러한 종류의 연구들은 지구물리학,⁽¹²⁾ 의학,⁽¹³⁾ 재료역학,⁽¹⁴⁾ 컴퓨터 공학⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 등의 다양한 과학분야에서 접할 수 있다. 일반적으로 하중정의문제에서 고유해는 존재하지 않는다. 따라서 고유해를 얻기 위하여 여러 가지 가정들이 미리 주어진다. 예를 들면 하중이 작용하는 지점이나 모양 등이 그러한 것이다.⁽¹¹⁾ 구해진 하중의 품질은 그것이 동하중에 의한 원래의 반응치를 얼마나 잘 표현하는가와 외란(perturbation)에 대한 입력의 강건성으로 결정된다. 이러한 요건들은 위에서 언급한 하중의 작용지점이나 모양 등에 의해 결정되므로 하중의 품질이 가정에 의해 결정될 수 있다. 가정을 배제하면서 하중의 품질을 향상시키기 위해 등가정하중을 제안하고자 한다. 등가정하중은 어떤 시간에 동하중에 의한 반응치장과 동일한 반응치장을 유발하는 정하중으로 정의된다. 이는 전체강성행렬에 동적변위벡터를 직접 곱하므로써 얻을 수 있다. 등가정하중의 장점은 이를 계산하기 위해 하중의 작용지점이나 모양 등을 가정할 필요가 없다는 것이다. 슈미트(Schmit)⁽¹⁸⁾에 의해 도입된 컴퓨터를 이용한 구조최적화기법은 지금까지 많은 경우 구조물의 정적인 반응에 치중되어 연구가 이루어져 왔다. 그러나 실제의 모든 하중은 동하중(dynamic load)이므로 구조물의 동적반응 최적화를 위한 많은 연구들이 이루어지고 있으나 시간중속구조조건을 직접적으로 처리하는 알고리즘의 개발과 이로 인한 많은 계산시간문제 등의 어려움이 뒤따른다.⁽¹⁹⁻²¹⁾ 따라서 동적반응최적화 방법은 강제진동계나 자유도가 작은 문제에 한정되어 적용되고 있을 뿐 큰 구조물에 대한 동적반응최적화 문제는 거의 불가능하다고 보여진다. 한편 정적반응 최적화 기법은 비교적 많은 연구에 의해 잘 정리되어 있는 상태이고 큰 구조물에도 많이 적용되어 왔다. 따라서

동적인 하중이 구조물에 가해졌을 때의 구조최적설계를 위해 경험적으로 얻은 동적계수를 동하중의 최대값에 곱하여 적당한 정하중을 얻은 후 그 힘을 이용하여 응력해석이나 정적최적설계를 수행하는 방법이 사용되어 왔다.⁽²²⁾ 그러나 동적계수는 전술하였듯이 타당성 문제가 제기된다. 또한 동적계수를 곱하여 얻은 정하중을 동하중이 가해지는 절점에 작용시킴으로써 실제 동하중을 받을 때의 상태를 제대로 표현할 수 있는지도 의문의 여지가 많다. 따라서 이로 인한 설계상의 신뢰성(reliability) 문제가 야기된다. 이를 극복하기 위하여 동적반응최적화 문제를 다수 개의 등가정하중을 이용하여 다중하중조건을 이용한 정하중하의 최적화문제로 바꾸어 시도하려는 연구가 진행되었다.⁽²³⁻²⁵⁾ 이 방법은 공학적 관점에서 상당히 우수한 해를 제공하고 기존의 정하중을 이용한 설계의 단점을 지적하였다.⁽²⁵⁾ 그러나 변환방법의 기준에 따라 서로 다른 등가정하중이 계산된다는 점과 하중작용절점의 선택, 설계변수에 대한 등가정하중의 민감도 계산 등의 어려운 점이 있었다.⁽²⁶⁾ 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 동하중을 등가정하중으로 변환할 때 모든 시간단계에 대하여 모든 절점에 작용하는 다수 개의 등가정하중을 구하는 방법을 제안한다. 이를 최적설계에 다중하중조건으로 적용하고 해석영역과 설계영역을 오가는 설계주기의 반복수행을 통하여 최종적으로 수렴된 최적해를 찾아내었다. 이렇게 구해진 최적해가 원래의 동하중에 대해서 제한조건을 만족함을 보임으로써 제안한 준정적 구조최적화 방법의 타당성을 검증하였다. 본 연구의 해석영역에서는 NASTRAN⁽²⁸⁾가 사용되었고 설계영역에서는 GENESIS⁽²⁹⁾가 사용되었다.

2. 등가정하중의 산출

동하중은 시간에 따라 그 크기가 변화하는 실제적인 하중이고 정하중은 시간에 관계없이 일정한 크기를 가지는 이상적인 하중이다. 동하중이 구조물에 작용할 때 구조물은 진동하는데 이는 정하중으로는 표현할 수 없다. 각각의 하중들의 특징이 다르기 때문이다. 따라서 동하중에 의한 효과와 동일한 효과를 구조물에 줄 수 있는 하나의 정하중은 존재하지 않는다. 동하중을 등가의 정하중으로 변환할 때에는 어떤 기준이 존재해야 한다. 제안하는 방법은 다음과 같은 기준을 선정하였다.

“동하중에 의해 임의의 시간에 발생하는 구조물의 상태와 동일한 상태를 표현할 수 있는 정하중”

위의 기준을 만족하는 정하중은 다음과 같이 유도된다. 유한요소법을 이용한 진동이론에 따르면 구조물의 동적 거동은 다음과 같은 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{b})\ddot{\mathbf{d}}(t) + \mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{d}(t) = \mathbf{f}(t) = \{0 \cdots 0 f_i \cdots f_{i+l-1} 0 \cdots 0\}^T \quad (1)$$

여기서 \mathbf{M} 은 질량행렬, \mathbf{d} 는 동하중에 의한 변위벡터, \mathbf{K} 는 강성행렬, \mathbf{b} 는 설계변수, \mathbf{f} 는 동하중 벡터, l 은 동하중 벡터의 영이 아닌 요소의 숫자이다. 한편 정적해석의 유한요소방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{x} = \mathbf{s} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{x} 는 정적 변위이고 \mathbf{s} 는 정적하중을 의미한다. 위의 식들을 사용하면 동하중하의 과도응답 계산시 임의의 시간 t_a 에 발생하는 변위장과 동일한 변위장을 발생시키는 등가정하중 \mathbf{s} 는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\mathbf{s} = \mathbf{K}\mathbf{d}(t_a) \quad (3)$$

Fig. 1 에서 왼쪽의 7부재 트러스에 임의의 동하중이 작용한다. 임의의 시간 t_a 에 구조물의 형상은 오른쪽의 트러스 모양으로 변형한다고 하자. 임의의 시간의 동적변위장 $\mathbf{d}(t_a)$ 는 식 (1)에서 계산된다. 이를 식 (2)의 \mathbf{x} 에 대입하면 식 (3)을 얻을 수 있다. 식 (3)에 의해 계산된 정하중 \mathbf{s} 는 동하중에 의해 임의의 시간에 구조물에 발생하는 변위장과 동일한 변위장을 유발하는 등가정하중이다. 일반적으로 구조해석이나 이에 기초한 설계시 유한요소 모델을 생성한다. 모델이 완성되면 식 (3)의 전체강성행렬을 얻을 수 있다. 따라서 등가정하중은 이미 알고 있는 전체강성행렬과 임의의 시간의 동적변위벡터의 단순한 곱셈에 의하여 계산된다. 식 (3)은 당연한 듯 보이고 과도응답해석이 필요하므로 계산시간의 효율적인 측면에서 비실용적으로 비추어 질 수 있으나 임의의 시간에 동하중에 대한 등가정하중이 해석적으로 존재한다는 사실을 보여준다.

일반적으로 하중을 정의하는 문제에서 작용점의 개수 및 위치는 알고 있다고 가정한다.⁽¹¹⁾ 그 이유는 실제 반응치는 모든 자유도에 대하여 연속적인 벡터형태로 표현되지만 우리가 얻을 수 있는 반응치는 실험 등을 통하여 몇 개의 절점에서만 정의되기 때문이다. 몇 개의 절점에서의 반응치를 만족시키는 하중은 무수히 많이 존재하며 이러한

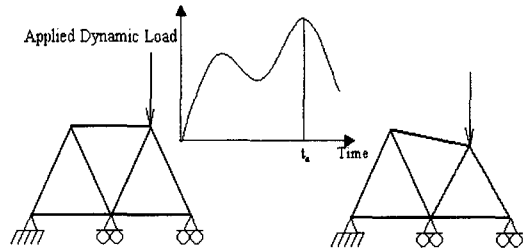


Fig. 1 The structure under dynamic load at a certain time

부정정의 문제를 고유해가 존재하도록 하기 위해서는 필연적으로 하중작용지점에 대한 가정이 필요하게 된다. 그러나 가정을 어떻게 설정하느냐에 의하여 계산된 정하중의 유효성이 결정될 수 있다는 사실은 바람직하지 못하다. 반면에 제안한 방법은 행렬의 곱셈에 의하여 유일한 하중을 계산한다. 하중작용절점의 위치 및 개수에 관한 가정은 필요 없다. 식 (3)의 등가정하중은 다른 방법으로 구할 수도 있다. 동하중이 작용할 때의 지배방정식인 식 (1)에 대한 고유치 문제는 다음과 같다.

$$\mathbf{M}\mathbf{Q}\mathbf{\Omega} - \mathbf{K}\mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{Q} = [\psi^1 \psi^2 \psi^3 \cdots \psi^n]$ 이고 $\psi^i = \{u_{1i} u_{2i} u_{3i} \cdots u_{Ni}\}^T$. \mathbf{Q} 는 열이 n 개의 구조물의 고유모드로 이루어진 $n \times N$ 의 진동형 행렬(modal matrix)이며 ψ^i 는 i 번째 고유벡터(eigenvector)이다. N 은 전체자유도를 의미하며 $\mathbf{\Omega}$ 는 i 번째 대각 요소가 i 번째 고유진동수 ω_i 의 제곱인 고유치를 가지는 $n \times n$ 의 대각행렬이다. 식 (1)의 근사해를 얻기 위해 필요한 고유모드의 개수는 방정식의 차원보다 작으므로 $n \leq N$ 이다. 일반적으로 문제의 자유도를 줄이기 위해 다음과 같은 변환식을 도입한다.

$$\mathbf{d} = \mathbf{Q}\mathbf{z} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{z} 는 n 차원의 일반좌표 또는 상태변수이다. 식 (5)를 식 (1)에 대입하고 \mathbf{Q}^T 를 먼저 곱하면 다음과 같은 비연성화된 식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{\Omega}\mathbf{z} = \mathbf{Q}^T \mathbf{f} \quad (6)$$

임의의 시간 t_a 에서 p 번째 자유도에서의 동적변위를 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$d_p(t_a) = \sum_{j=1}^n u_{pj} z_j(t_a) \quad (7)$$

식 (7)의 합은 전체자유도 N 보다 작은 n 까지 이루어 진다. 일반적으로 고차의 고유진동수는 구조물에 큰 영향을 미치지 못한다. n 은 N 개의 고유진동수 중에서 구조물에 주는 영향을 고려하여 첫 번째에서 n 번째까지의 고유진동수를 선택하겠다는 것을 의미한다. 위의 과정은 과도응답해석을 축약한 것으로 볼 수 있다. 식 (5), (6)의 치환을 동일하게 이용하면 정적해석의 유한요소방정식 식 (2)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{Qy} = \mathbf{Q}^T \mathbf{s} \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{x} = \mathbf{Qy}$ 의 치환이 이용되었다. 벡터 \mathbf{y} 의 각 성분의 값은 다음과 같다.

$$y_k = \frac{1}{\omega_k^2} \left(\sum_{j=1}^N u_{jk} s_j \right) \quad (k=1, \dots, n) \quad (9)$$

만일 $x_p = d_p(t_a)$ ($p=1, \dots, N$)의 조건이 만족되면, 두 종류의 외력에 의한 변위장은 동일하게 되고 다음 식이 성립한다.

$$d_p(t_a) = x_p = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\omega_k^2} \left(\sum_{j=1}^N u_{pk} u_{jk} s_j \right) \quad (p=1, \dots, N) \quad (10)$$

식 (10)은 N 개의 성분을 갖는 벡터 \mathbf{s} 를 구하는 연립방정식이다. $n=N$ 일 때, 즉 식 (10)을 전체자유도 N 까지 중첩했을 때, 식 (3)과 식 (10)은 서로 동일한 의미를 가진다. 이러한 등가정하중은 모든 자유도에 작용하며 동하중에 의해 임의의 시간에 발생하는 변위장과 동일한 변위장을 생성하는 하중이다. 식 (3)은 유한요소 지배방정식을 그대로 이용하는 것이고 식 (10)은 모드해석결과를 이용하는 방법이다. 이 두 가지 방법 모두 사용할 수 있으나 자유도가 큰 경우 모드해석결과를 이용하는 방법은 자유도 개수만큼의 고유진동수와 그에 상응하는 진동형 행렬을 중첩해야 하는 어려움이 있다. 또한 중첩과정에서 오차가 발생할 수 있다. 따라서 주로 유한요소 지배방정식을 그대로 이용하는 방법이 사용된다. 식 (1)을 사용하면 식 (3)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{s} = \mathbf{f}(t) - \mathbf{M}(\mathbf{b})\dot{\mathbf{d}}(t) \quad (11)$$

식 (3)과 식 (11)을 비교해 보면 등가정하중은 동하중하에서는 작용하는 하중에 질량과 가속도의

곱으로 표현되어 있는 관성효과에 관한 항이 더해지는 것을 알 수 있다. 만약 구조물의 설계가 변경되면 강성행렬 및 질량행렬이 변한다. 이 때 등가정하중은 변경된 질량행렬에 의한 관성효과가 작용하중 $\mathbf{f}(t)$ 에 더해져서 얻어진다. 이는 이전의 동하중과는 다른 새로운 등가정하중이며, 등가정하중이 설계변수의 함수임을 의미한다. 참고문헌 [24]에 의하면 등가정하중을 구하는 방법은 엄밀한 방법과 근사화 방법의 두 가지가 있다. 엄밀한 방법은 식 (3)이나 식 (10)을 이용하여 등가정하중 \mathbf{s} 를 계산하는 것이다. 근사화 방법은 동하중에 의한 변위장보다 크거나 같은 변위장을 유발하는 정하중을 계산하는 것이다. 이를 위해 식 (10)을 부등식으로 변환하고 이를 제한조건으로 작용하여 최적화 문제를 풀어 이를 만족하는 최소의 등가정하중의 크기를 계산한다.⁽²⁴⁾ 이 때 등가정하중이 작용하는 위치를 임의로 선택할 수 있고 제한조건으로 선택하는 변위의 위치를 또한 선택할 수 있다. 따라서 선택한 변위에서 동하중에 의한 변위보다 크거나 같은 변위를 발생하는 등가정하중을 선택한 위치에 작용할 수 있다. 참고문헌에서 근사화 방법을 제안하게 된 이유는 엄밀한 방법에 의한 등가정하중의 크기가 동하중의 크기보다 상대적으로 크고 동하중이 작용하지 않는 절점에서도 크게 계산되어 나오기 때문이었다. 그러나 식 (11)에서도 알 수 있듯이 등가정하중은 관성효과가 고려된 하중이므로 동하중과 다른 경향으로 나올 수 있다. 본 논문에서는 엄밀한 방법에 의한 등가정하중을 사용하였다.

3. 최적설계로의 적용

모든 실제 구조물에 작용하는 하중은 동하중이므로 구조최적설계시에도 이러한 동하중을 그대로 처리하는 동적반응최적화 방법과^(19~21) 이를 준정적인 방법으로 변환하여 시도하는 연구가^(5~10) 진행되어 왔다. 두 가지 방법은 각각 다음과 같은 문제점을 가지고 있다. 예를 들어 항공기의 날개를 설계한다고 할 때 과도응답해석에 바탕을 둔 동적반응최적화 방법은 많은 설계변수와 제한조건, 시간종속구속조건의 처리 등으로 인해 어려움이 뒤따른다. 준정적인 최적화의 경우 공기역학에 의한 해석을 통해 양력, 항력 등의 하중조건을 구하고 이를 설계하중으로 적용하여 비행기 날개의 형상 등을 결정할 수 있다. 그러나 비행기 날개의 형상이 변경되면 그에 의해 날개에 작용하는 여러 가지 반력들이 달라지게 된다. 따라서 설계하중에 대한 한번의 정적인 최적화는 적절한 설계값을 줄

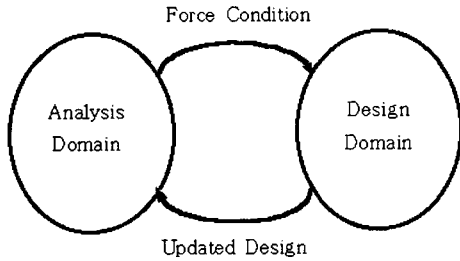


Fig. 2 The analysis domain and the design domain

수 없다. 따라서 준정적인 최적화의 경우 반복수행이 고려되어야만 한다. 따라서 새로운 하중조건을 구하기 위해서는 다시 공기역학에 근거한 해석이 필요하고 이렇게 구해진 하중조건은 다시 설계에 사용된다. 이러한 과정은 반복적으로 진행된다. 이를 도식적으로 표현하면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 준정적인 최적화의 과정은 해석영역(analysis domain)과 설계영역(design domain)으로 나누어진다. 해석영역에서의 결과를 바탕으로 설계영역에서 사용될 하중조건이 계산되고 설계영역에서의 결과값으로 계산된 설계에 대하여 다시 해석을 수행하여 제한조건의 만족을 검증한다. 이러한 일련의 과정을 설계주기(design cycle)라고 하며 이는 설계값이 수렴할 때까지 반복적으로 수행되어야 한다.

동하중하에서 나타나는 구조물의 동적특성(속도, 가속도, 진동)은 정하중으로 모사(simulation)할 수 없다. 그러나 동적특성이 중요하게 취급되는 강체진동계를 제외한 일반적인 구조물에서는 동적특성보다는 응력이나 피로 등에 의한 파손 및 파괴특성이 중요하게 여겨진다. 순수한 시간영역에서의 과도응답해석보다는 조화응답해석 또는 모드해석 등이 구조물의 동적 특성을 반영하는 방법으로 사용되어왔고 설계할 때는 정하중을 이용하여 구조물의 파손조건에 초점을 맞추어 진행되어 왔다. 그러나 하나의 설계정하중만을 사용하여 동하중을 받는 구조물의 파손조건을 계산하는 것은 충분하지 않다. 동하중을 받는 구조물은 진동하기 때문에 동일한 부재라도 시간에 따라서 인장과 압축이 바뀌어 작용할 수 있지만 하나의 정하중은 동일한 부재에 한가지의 응력 상태만을 가져오기 때문이다. 따라서 특정한 시간들에서 동하중의 효과를 표현할 수 있는 다수 개의 정하중을 만들어 이를 최적설계시 적용한 연구가 발표되었다.⁽²⁵⁾ Choi 등은 최대변위가 발생하는 위험시간⁽²⁷⁾을 정의하고 여러 개의 위험시간에서의 변위장을 만족하는 다수 개의 등가정하중을 구하여 다중하중조건으로 적용하였다. 다수 개의 정하중으로 동하중의 효과

를 최대한 표현하겠다는 의도였다. 몇 가지 문제점으로 지적할 수 있는 것들은 다음과 같다. 모든 자유도에 대하여 모든 위험시간을 계산한 것이 아니라 중요한 자유도, 예를 들면, 다른 자유도에 비해 최대변위의 크기가 큰 자유도 등에 대해서만 위험시간을 계산하였다. 따라서 위험시간을 구하기 위해 어떤 자유도와, 얼마나 많은 자유도를 기준으로 선택할 것인가 하는 문제 등이 대두되었다. 또한 매 설계주기마다 위험시간이 달라지므로 이를 따라가야 한다는 것과 등가정하중의 작용절점의 선택, 설계변수의 함수인 등가정하중의 민감도 계산 문제 등이 있었다. 어떤 구조물에 임의의 동하중이 작용한다고 가정하자. Fig. 3은 동하중이 작용할 때 자유도 A와 자유도 B의 시간에 따른 변위선도이다. 자유도 A는 t_{1A} 에서 최대값을 t_{2A} 에서 최소값을 가지고 자유도 B는 t_{1B} 에서 최소값을 t_{2B} 에서 최대값을 가진다. 참고문헌 [25]에서는 이 두 가지 자유도만 고려한다고 가정할 때 4개의 위험시간에 대하여 등가정하중을 구하여야 한다. 등가정하중에 대하여 설계영역에서 설계치가 계산되면 해석영역에서 다시 과도응답해석을 수행한다. 변경된 설계에 대하여는 초기설계에서와 동일한 시간이 위험시간이 되지 않는다. 다른 시간에 더 큰 최대변위가 발생할 수도 있다. 따라서 매 반복수행마다 이를 따라가야 하는 어려움이 있다. 다른 자유도가 추가되면 더 많은 위험시간을 고려해야 한다. 이는 문제를 더 복잡하게 만들 수 있고 수렴특성에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다.

본 논문에서 제안한 방법은 모든 해석시간에 대하여 등가정하중을 계산하기 때문에 위험시간을 구할 필요도 없고 매 반복수행마다 위험시간을 따라가야 할 필요도 없다. 모든 시간단계에 대하여 등가정하중을 구하면 그 개수가 상당히지만 다중하중조건으로 적용되기 때문에 큰 어려움은 없다. 최적화 과정에서 다중하중조건을 고려하는 방법은 위배된 각각의 제한조건들 중에서 가장 위험한 것들에 대하여만 민감도 해석을 수행한다. 따라서 계산시간은 작고 효율적이다. 또 최대변위가 발생하는 시간과 인접한 시간에서의 변위장을 표현하는 등가정하중도 하중조건으로 작용하기 때문에 최대변위발생시간을 따라가며 최적화하는 것보다 좋은 결과를 준다. 위험시간을 매 자유도에 대하여 구하는 것은 많은 계산량을 필요로 한다. 위험시간을 계산하지 않고 매 시간단계마다 등가정하중을 구하는 것이 오히려 계산량이 적고 또 예상치 못한 위험시간에 대해서도 방어할 수 있는 장

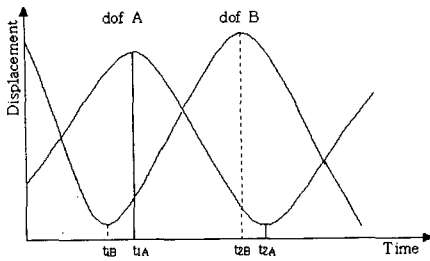


Fig. 3 The time-history displacements

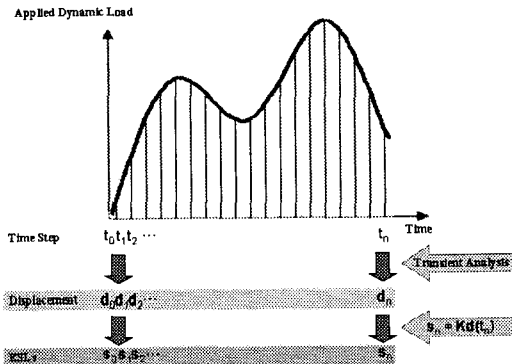


Fig. 4 A diagram for the proposed quasi-static optimization technique

점이 있다. 이러한 장점들은 수렴특성을 향상시킨다. 본 논문에서는 해석시간 전체에 대하여 모든 자유도에 작용하는 등가정하중을 구하여 다중하중조건으로 적용하여 Fig. 1의 해석영역과 설계영역을 왕래하며 반복수행을 통해 수렴시키는 최적화 기법을 제안한다. Fig. 1에서 해석영역과 설계영역으로 이루어지는 한 번의 설계주기에 대한 일련의 과정을 도식화하면 Fig. 4와 같이 표현될 수 있다. 이를 단계별로 나타내면 다음과 같다.

- STEP 1. 구조물의 초기 설계값에 대한 과도응답해석의 수행(해석영역)
- STEP 2. 매 시간단계에 대한 변위장의 계산
- STEP 3. 매 시간단계에 대한 등가정하중의 계산 (식 (3)을 이용하여 매 시간단계에서 계산된 변위장을 전체 강성행렬과 곱하여 매 시간단계에서 얻은 등가정하중을 계산한다.)
- STEP 4. 다수 개의 등가정하중을 다중하중조건으로 적용한 최적설계(설계영역)
- STEP 5. 개선된 설계값에 대한 과도응답해석의 수행(해석영역)
- STEP 6. 수렴할 때까지 STEP 2 ~ STEP 5의 과정을 반복수행

제안하는 최적화 방법에 대한 설계영역에서의 정

식화는 다음과 같다.

Find Design Variables
 Minimize $F(\mathbf{b})$
 subject to $\mathbf{K}(\mathbf{b})\mathbf{x} = \mathbf{s}_i(\mathbf{b})$
 $(i = 1, \dots, \text{No. of time steps})$ (12)
 $\Phi(\mathbf{b}, \mathbf{x})_j \leq 0$
 $(j = 1, \dots, \text{No. of constraints})$

식 (12)에서 제한조건인 유한요소 지배방정식은 매 시간단계마다 계산된 등가정하중의 집합이다. 최적화시 수렴조건은 다음과 같이 정의된다.

$$\varepsilon_i = \frac{b_i - b_{i-1}}{b_i} \leq \varepsilon_0 \quad (i = 1, 2, \dots, \text{No. of design cycles}) \quad (13)$$

여기서 b_i 는 i 번째 설계주기의 설계변수이고 b_{i-1} 는 $i-1$ 번째 설계주기의 설계변수이다. 개선된 설계값과 이전 설계값의 차이가 허용오차 내에 있으면 수렴한 것으로 한다. 이전 설계값과의 차이가 없다는 것은 마지막 설계주기의 설계영역에서 초기값과 개선해의 값이 동일함을 의미한다. 개선해에 대하여 구조물에 작용하는 동하중에 대한 등가정하중을 계산하면 이전설계주기에서와 동일하게 계산되고 따라서 더 이상의 설계값의 변화가 없음을 의미한다.

동하중을 받는 구조물의 해석 및 설계에 정하중을 이용하기 위해서는 고려해야 할 두 가지가 있다. 첫번째는 동하중에 대한 정하중의 산출시 타당성 문제이고 두 번째는 적절한 정하중이 산출되었다고 하더라도 이를 어떻게 적용하는가 하는 문제이다. 요약하면 첫번째 문제는 제안한 등가정하중을 이용하여 해결하고 두번째 문제는 다중하중조건과 설계주기를 반복수행하는 최적화 과정을 통하여 해결하는 것이다.

4. 등가정하중을 이용한 최적화 예제

4.1 중공 외팔보 예제

Fig. 5와 같은 중공의 단면을 가지는 4개의 요소로 이루어진 외팔보의 자유단에 반주기 역현파의 동하중이 작용한다. 설계 변수는 내측 지름(d)과 두께(t)이다. 해석시간은 0 ~ 0.025 초까지이며 이를 145개의 시간단계로 나누었다. 각각에 대하여 모든 자유도에 작용하는 145개의 등가정하중

을 산출하여 다중하중조건으로 적용하고 설계주기의 반복과정을 통하여 최적화를 진행하였다. 참고문헌 [25]의 결과와의 비교를 위해 제안한 방법을 Case 0 이라 하고 참고문헌 [25]의 근사화 등가정하중을 이용한 방법을 각각 Case 1 에서 Case 3 라 하면 각각은 아래와 같다. 참고문헌 [25]에서 위험시간은 끝 단의 수직 아래 방향 변위가 최대가 되는 시점을 선택하였다. Fig. 5의 굵은 화살표는 위험시간 선택의 기준을 나타낸다.

Case 0; 해석시간범위의 모든 시간단계에서의 모든 자유도에 작용하는 엄밀한 등가정하중을 이용한 최적설계

Case 1; 위험시간에 절점 4, 5의 수직방향변위보다 큰 변위를 유발하는 절점 4, 5에 작용하는 등가정하중을 이용한 최적설계

Case 2; 위험시간에 절점 4, 5의 수직방향변위보다 큰 변위를 유발하는 모든 절점에 작용하는 등가정하중을 이용한 최적설계

Case 3; 위험시간에 모든 절점의 수직방향변위보다 큰 변위를 유발하는 모든 절점에 작용하는 등가정하중을 이용한 최적설계

재료의 탄성계수, 밀도, 포아송비는 각각 206GPa, 7750kg/m³, 0.3 이며 설정한 최적화 문제의 정식화는 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && \text{weight} \\
 & \text{subject to} && \left| \sigma_{\max} \right| < 310.2 \text{MPa} \\
 & && \left| (v_5)_{\max} \right| < 25.4 \text{mm} \\
 & && f_1 > 30 \text{Hz} \\
 & && 17.78 \text{mm} < d < 47.75 \text{mm} \\
 & && 2.54 \text{mm} < t < 3.05 \text{mm}
 \end{aligned} \tag{14}$$

제안한 최적화의 경우 3 번째 설계주기의 개선해가 2 번째 설계주기의 개선해와 동일하여 수렴함을 알 수 있었다. 각각의 최적화의 결과와 동적반응최적화 방법을 사용한 참고문헌 [19]의 결과가 함께 Table 1에 나타나 있다. Table 1에서 응력 및 변위값은 초기치 또는 최적해를 가지고 원래의 동하중에 대한 과도응답해석을 수행하였을 때의 최대값을 의미한다. 일관성을 기하기 위해 Case 0, 1, 2, 3에서 쓰여진 동일한 해석프로그램으로 참고문헌 [19]의 최적해에 대하여 과도응답해석을 수행하였다. 그 결과는 참고문헌 [19]와 조금 다르다. Table 1에서 보면 Case 0의 경우 최적해에 대한 과도응답해석 결과 최대응력값이 허용응력값에 가

까워서 최적화가 잘 수행되었음을 알 수 있다. 반면 Case 1의 경우 응력제한조건을 위배하고, Case 2의 경우 응력제한조건을 약간 위배하며, Case 3의 경우 위배하지 않는다. 근사화 등가정하중을 이용한 최적화의 경우 등가정하중을 어떻게 산출하느냐 하는 문제와 어디에 작용하느냐 하는 문제가 제한조건을 만족시키느냐 위배하느냐 하는 결과의 차이로 나타났다. 이는 작용절점의 선택이 하중의 품질을 좌우한다는 것을 의미하고 이에 의해 최적화 해의 특성도 좌우됨을 의미한다. 이는 바람직하지 못하다. 참고문헌 [19]의 경우는 허용응력값에 크게 미치지 못하여 아직 설계개선의 여지가 있음을 알 수 있다. 참고문헌에서 사용된 해석코드와 본 논문에서 사용된 해석코드가 서로 다르므로 2개의 결과를 정량적으로 비교할 수는 없다. 적어도 제안한 방법에 의한 최적해가 원래의 동하중에 대한 제한조건을 만족시키는 적절한 설계이고 중량을 살펴보면 제안한 방법이 중량감소의 효과가 큰 좋은 결과임을 알 수 있다. 설계주기의 회수는 과도응답해석의 실행회수와 동일하기 때문에 수렴속도 및 계산량에 매우 중요한 영향을 준다. 참고문헌의 방법은 17번의 반복과정을 통하여 수렴한 반면에 제안한 방법은 3회의 설계주기를 통하여 수렴하여 계산량을 많이 줄일 수 있었다. 그러나 제안한 방법은 계산된 등가정하중 하에서 최적설계를 수행하므로 동적반응최적화 방법과 비교할 때 이는 부가적인 노력이 필요한 것이라 할 수 있다. 동적반응최적화 방법이 쿤-터커 조건(Kuhn-Tucker conditions)을 만족하는 최적값을 주는 반면에 제안한 방법은 정적으로 근사화하여 최적화 하는 방법이므로 쿤-터커 조건의 만족을 보장할 수 없다. 따라서 해의 질(quality)을 따지면 동적반응최적화 방법을 이용한 것이 우수하다. 그러나 해석하고자 하는 구조물의 자유도가 커지면 과도응답해석 및 시간중속 구속조건의 처리 등의 어려움으로 인하여 동적반응최적화 방법을 그대로 적용할 수 없게 된다. 반면에 제안된 방법은 상대적으로 적은 노력으로 동적반응최적화 기법을 적용한 것과 유사한 결과를 얻을 수 있어 공학적으로 매우 유용하다. 수렴특성을 살펴보기 위해서 식 (13)에서 정의된 값을 설계주기의 변화에 따라 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 3번의 설계주기를 거치면서 이전 설계주기의 설계 변수값과의 차이가 0으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 본 예제를 통하여 엄밀한 등가정하중을 이용한 최적화 방법이 동하중이 작용하는 구조물의 최적화 방법으로 안정적인 해를 제공할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 3부재 트러스 예제

Fig. 7 과 같은 3 부재 트러스에 서로 다른 반주기 여현파 모양의 동하중이 작용한다. 4 번 절점에 오른쪽과 왼쪽으로 2 개의 동하중이 작용하는 데 이러한 2 개의 하중이 서로 다른 하중조건으로 작용한다. 동하중의 최대값은 각각 88,960N 과 84,515N 이다. 반정현파의 동하중이 작용하는 시간은 0 초에서 0.0002 초까지이고 해석시간은 0.0005 초까지이다. 3 부재 트러스는 첫 번째 고유진동수가 2000~3000Hz 사이에 있는 매우 단단한 구조물

이기 때문에 0.0002 초까지 작용하는 하중이 충격 하중의 형태로는 작용하지 않는다고 볼 수 있다. 각각의 반정현파 형태의 동하중에 대하여 매 시간 단계마다 등가정하중을 계산하였다. 하나의 동하중에 대하여 125 개의 시간단계로 나누었다. 따라서 2 개의 동하중에 대하여 250 개의 등가정하중을

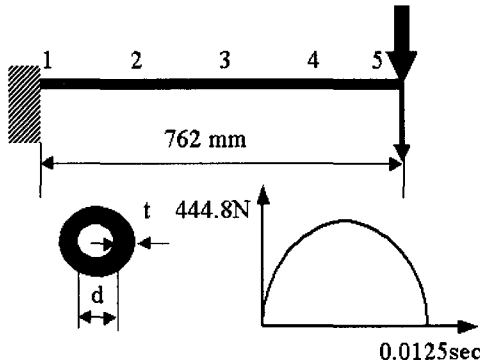


Fig. 5 A cantilever beam with a circular hollow section and the applied dynamic load

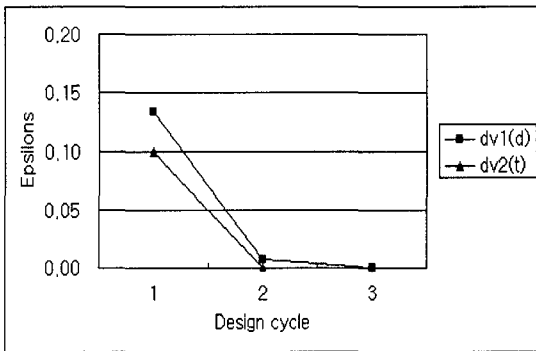


Fig. 6 The convergence parameters vs. design cycle for case 0

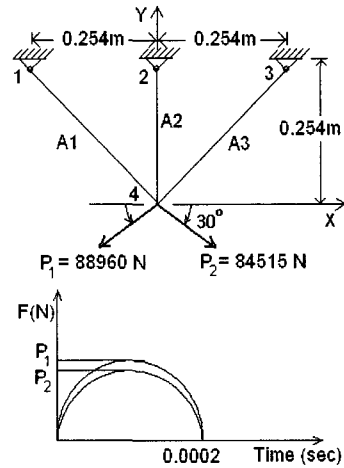


Fig. 7 A three bar truss and the applied dynamic load

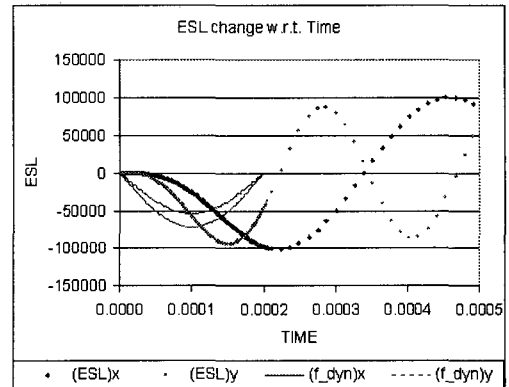


Fig. 8 The equivalent static loads vs. time

Table 1 The initial values and the optimum results for the cantilever beam (mm, MPa, Hz, kg)

	t	D	σ_{max}	δ_{max}	f_1	No. of design cycle	Mass
Initial value	2.794	35.30	217.3	-9.081	67.05		1.975
Case 0	2.540	31.38	306.9	-14.09	59.71	3	1.598
Case 1	2.540	29.97	333.2	-15.73	57.29	3	1.537
Case 2	2.540	30.83	314.6	-14.64	58.79	3	1.573
Case 3	2.540	31.12	309.4	-14.28	59.29	2	1.586
Ref. [19]	2.540	32.59	282.2	-12.72	61.84	17	1.655

구하고 이를 다중하중조건으로 적용하여 최적화를 진행하였다. 재료의 탄성계수, 밀도는 각각 69GPa, 2710kg/m³ 이다. 설정한 최적화 문제의 정식화는 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} && \text{weight} \\ &\text{subject to} && -103\text{MPa} < \sigma_i < 138\text{MPa} \\ &&& (i = 1, 2, 3) \quad (15) \\ &&& |(v_{4j})_{\max}| < 0.5 \text{ mm } (j = x, y) \end{aligned}$$

초기 설계값에 대한 첫번째 동하중의 매 시간단계에서 계산된 등가정하중의 크기를 시간에 대하여 표현한 그래프가 Fig. 8 에 나타나 있다. 동하중의 개형과 비교해 보면 그 크기가 1~2 배 정도에 해당하는 것을 알 수 있다. 동하중은 비록 0.0002 초 까지만 작용하고 있지만 등가정하중은 동하중에 의해 발생하는 변위에 기초하여 0.0002 초 후에 오히려 큰 값을 가진다. 이는 관성효과가 크게 반영되고 있음을 의미한다. 최적화의 결과와 초기설계와 최적화된 설계에 대한 과도응답해석 결과가 Table 2 에 나타나 있다. 예를 들면 1 번 부재의 응력의 경우 초기설계에 대하여 최소값이 -118.1MPa, 최대값이 123.5MPa 로서 두 가지 모두 첫 번째 하중조건하에서 발생하였다. 이에 비해 최적화된 설계에 대하여는 최소값과 최대값이 각각 -101.8 MPa, 106.8MPa 이고, 둘 다 두 번째 하중조건하에서 발생하였음을 의미한다. 최적화된 설계는 제한 조건을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

4.3 18 부재 트러스 예제

Fig. 9 와 같은 18 부재 트러스에 반주기 여현파 형태의 동하중이 각각 절점 1, 2, 4, 6, 8 에 작용하고 있다. 재료의 탄성계수, 밀도는 각각 69GPa, 2765 kg/m³ 이다. 4 개의 크기설계변수와 8 개의 형상설계변수를 선택하였다. 위 부재(1, 4, 8, 12, 16), 아래 부재(2, 6, 10, 14, 18), 세로 부재(3, 7, 11, 15), 그리고 대각선 부재(5, 9, 13, 17)의 단면적을 각각

크기설계변수로, 절점 3, 5, 7, 9 의 x, y 좌표를 형상 설계변수로 선택하였다. 초기설계에 대한 각 절점에서의 시간에 따른 수직방향변위가 Fig. 10 에, 각 요소에서의 축방향응력이 Fig. 11 에 나타나 있다. 변위와 응력의 최대값과 최소값을 고려하여 1.5 ~ 4 sec 까지 시간영역에서 매 시간단계에 대하여 등가정하중을 계산하였다. 이렇게 계산된 120 개의 등가정하중을 다중하중조건으로 적용하여 최적화를 진행하였다. 최적화의 정식화는 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize weight} \\ &\text{subject to} && |\sigma_{\max}| < 138\text{MPa} \quad (16) \\ &&& |v_{\max}| < 20.3\text{cm} \end{aligned}$$

최적화 결과는 Table 3 과 같으며 X's 와 Y's 는 그 값에 1.27m 를 곱한 값이 초기좌표에서의 이동값이다. 초기 설계와 최적설계의 비교는 Fig. 12 에 나타나 있다. 최적화된 설계에 대하여 과도응답해석을 수행한 결과는 Fig. 13 과 Fig. 14 에 나타나 있다. 그림에서 보면 변위와 응력 모두 제한조건을 만족하고 있음을 알 수 있고 변위가 활성화 제한조건으로 작용하였음을 알 수 있다.

4.4 외팔평판 예제

Fig. 15 와 같은 16 개의 요소로 이루어진 외팔평판에 작용시간이 0.125 초인 반주기 여현파 형태의 동하중이 평판의 끝단 중앙에 작용한다. 해석시간은 0~0.25 초까지이며 이를 167 개의 시간단계로 나누었다. 각각에 대하여 모든 자유도에 작용하는 등가정하중을 산출하여 다중하중조건으로 적용하여 형상최적화를 진행하였다. 설계변수는 고정단과 자유단의 폭을 결정할 수 있는 인자를 선택하였다. Fig. 15 에서 평판의 중앙선을 기준으로 좌우 대칭인 화살표 방향으로의 이동량을 결정하는 인자이다. 재료의 탄성계수, 밀도, 포아송비는 각각 210GPa, 7.6kg/m³, 0.33 이다. 설정한 최적화 문제의 정식화는 식 (17)과 같다.

Table 2 The initial values and the optimum results for the three bar truss (mm², MPa, mm)

	A ₁	A ₂	A ₃	σ ₁	σ ₂	σ ₃	u _x	u _y	Mass
Initial Design	645	1290	645	-118.1(1) 123.5(1)	-49.7(1) 54.0(1)	-114.1(1) 121.0(1)	-0.813(1) 0.811(1)	-0.199(1) 0.183(1)	2.144
Optimum Design	1136	258	1215	-101.8(2) 106.8(2)	-82.1(1) 84.5(1)	-101.9(1) 107.2(1)	-0.499(1) 0.491(2)	-0.311(1) 0.303(1)	2.466

(1) means that the maximum properties happen under the first dynamic load.

(2) means that the maximum properties happen under the second dynamic load.

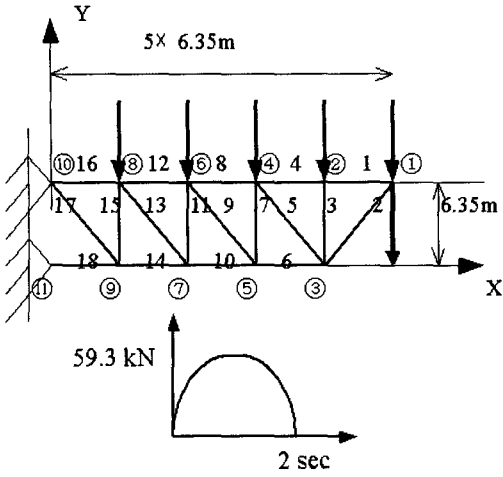


Fig. 9 An 18-rod truss and the applied dynamic load

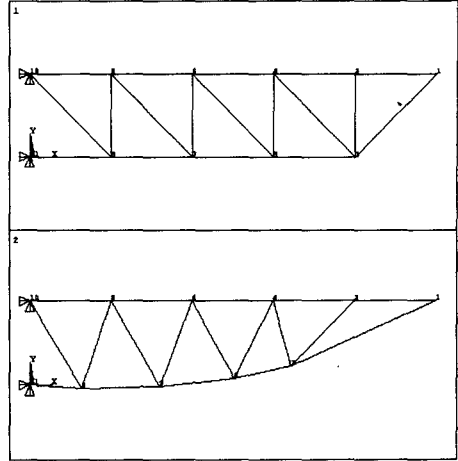


Fig. 12 The shape of the initial design and the optimum design

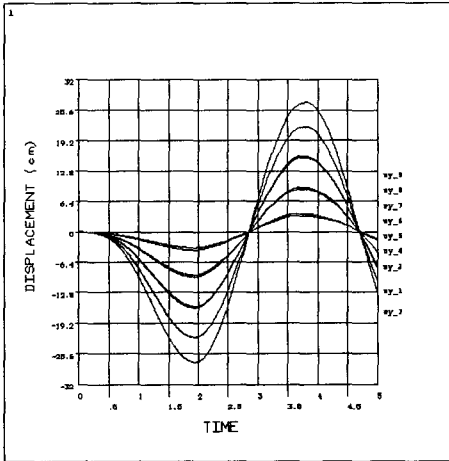


Fig. 10 The displacements in the vertical direction vs. time for the initial design

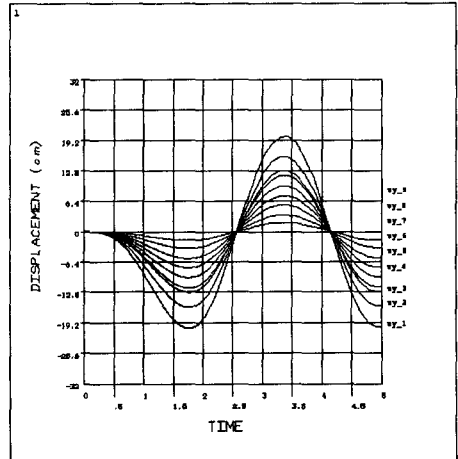


Fig. 13 The displacements in the vertical direction vs. time for the optimum design

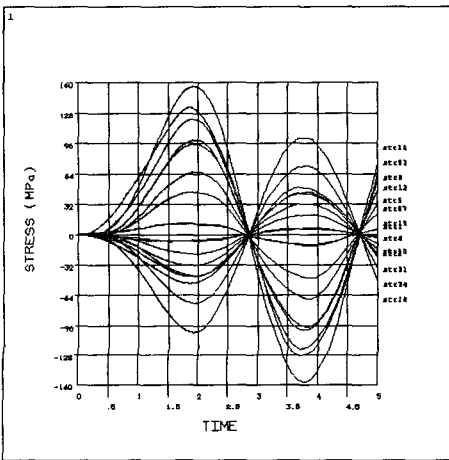


Fig. 11 The axial stresses vs. time for the initial design

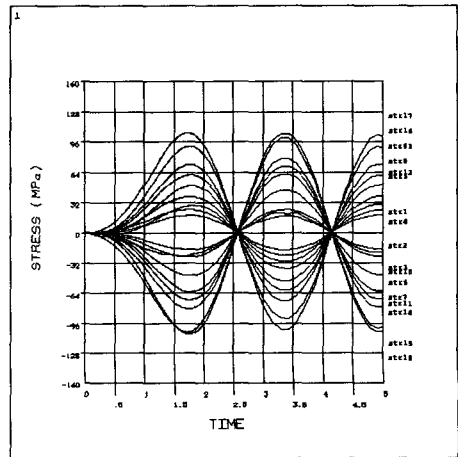


Fig. 14 The axial stresses vs. time for the optimum design

Table 3 The changes and the results of the design variables (cm², kg, cm, MPa)

Design Variables	Initial	1	2	3	4	Optimum
Area(top)	64.52	113.34	129.03	129.03	129.03	129.03
Area(bottom)	139.68	121.22	149.16	152.60	168.74	143.08
Area(vertical)	80.65	29.21	40.22	34.91	27.72	44.35
Area(diagonal)	45.61	53.11	64.51	64.01	62.97	64.52
X3	0.00	-4.00	-3.89	-3.90	-3.55	-3.94
Y3	0.00	1.61	1.46	1.48	1.97	1.09
X5	0.00	-2.95	-2.32	-2.25	-1.83	-2.39
Y5	0.00	0.80	0.59	0.81	1.38	0.42
X7	0.00	-1.75	-1.72	-1.66	0.07	-2.00
Y7	0.00	0.19	0.02	0.16	0.67	-0.10
X9	0.00	-1.53	-1.74	-1.49	-0.84	-1.78
Y9	0.00	-0.24	-0.18	-0.26	-0.18	-0.22
Mass	2916.78	2688.72	3260.07	3241.71	3313.62	3260.90
Displacement	-27.4	-24.7	-20.3	-20.4	-20.3	-20.3
Stress	-156.5(16)	-133.1(15)	-111.7(15)	-112.7(15)	-113.2(15)	-106.5(8)

(#) means the maximum stress happens in element #.

Table 4 The optimum value for the cantilevered plate (mm, kg)

Design Cycle	Initial Design	Optimum Design
Mass	304	123
B1	4.00	1.00
B2	4.00	2.24

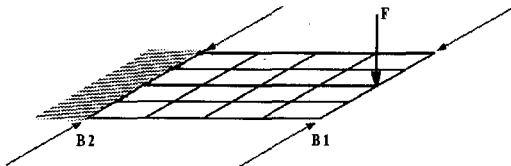


Fig. 15 A cantilevered plate and the applied dynamic Load

$$\begin{aligned} &\text{Minimize mass} \\ &\text{subject to } |\sigma_{\max}| < 200\text{MPa} \end{aligned} \quad (17)$$

한번의 설계주기를 거치면 외팔평판의 자유단 부근이 하한값으로 접근하여 그 모양이 사다리꼴 모양으로 변한다. 이러한 개선해에 대하여 다시 요소를 생성하였다. 그 이유는 이전의 요소를 그대로 사용할 경우 요소의 부적합성으로 인한 오류가 발생하기 때문이다. 재성성된 요소의 모양은 최적화된 형상과 함께 Fig. 16 에 나타나 있다. Table 4 에 최적화결과가 나타나 있다. 9 번의 설계주기를 통해 수렴하였다. 최적해에 대한 과도응답 해석을 하면 최대응력값은 199.2MPa 이다.

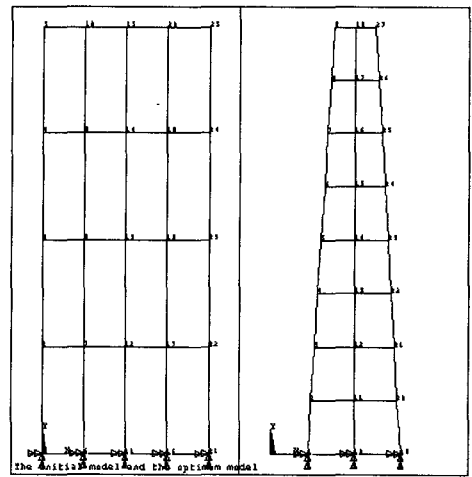


Fig. 16 The initial design and the optimum design

5. 결론

동하중을 받는 구조물에 대한 준정적인 최적화 기법을 제안하였다. 주어진 동하중에 대하여 매 시간단계마다 등가정하중을 구하고 최적화시 이를 다중하중조건으로 적용하였다. 등가정하중은 임의의 시간에 동하중에 의해 구조물에 발생하는 모든 반응치장과 동일한 반응치장을 유발하는 정하중으로 정의되었다. 동하중에 의한 효과를 정하중으로 표현하기 위해 매 시간단계에서 구해진 등가정하

중 집합을 모두 고려하는 방법을 제안하였고 이는 다중하중조건을 적용함으로써 가능하였다. 설계가 변경되면 동하중에 대한 반응치도 달라지고 등가정하중도 달라지게 된다. 따라서 해석영역과 설계영역을 정의하고 이 두 영역 사이를 오가는 과정을 설계주기로 정의하였다. 제한한 준정적인 최적화 기법은 설계주기의 반복과정을 통하여 이루어졌다. 수렴조건은 이전 설계주기의 설계값과 현재 설계주기의 설계값과의 차이가 허용오차 범위 내에 있을 때로 정의하였다. 모든 경우에 대하여 수학적으로 수렴성을 보장할 수 없지만 동하중이 작용하는 큰 구조물의 동적반응최적화가 거의 불가능한 현실을 감안할 때 공학적인 최적화 방법으로 적용가능성을 보였다. 특히 본 논문의 제한된 예제의 범위내에서는 동하중을 받는 구조물에 대한 최적화 방법으로 상당히 좋은 특성을 보여주었다.

후 기

본 연구는 교육부학술연구조성비(기계공학분야 과제번호[ME96-C-25]의 지원을 받아 수행된 것입니다.

참고문헌

(1) Cheng, F.Y. and Juang, D.S.,1988, "Assessment of Various Code Provisions Based on Optimum Design of Steer Structures," *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16, pp. 46~61.
 (2) Cheng, F.Y. and Juang, D.S.,1989 "Recursive Optimization for Seismic Steel Frames," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, pp. 445~466.
 (3) Truman, K.Z. and Cheng, F.Y., 1990, "Optimum assessment of irregular 3-D Buildings," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, pp. 3324~3337.
 (4) Truman, K.Z. and Jan, C.T., 1988, "Optimal Bracing Schemes for Structural Systems Subject to the ATC 3-06, UBC, and BOCA Seismic Provisions," *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo and Kyoto, Japan, August 2~9, 1998, Vol. V, pp. 1149~1155.
 (5) Cheng, F.Y. and Truman, K.Z., 1983, "Optimization Design of 3-D Building Systems for Static and Seismic Loadings," *Modeling and Simulation in Engineering*, III, North-Holland Publishing Co., New York, pp. 315~326.
 (6) Truman, K.Z. and Petruska, D.J., 1991, "Optimum Design of Dynamically Excited Structural Systems Using Time History Analysis," OPTI91—*International Conference for Computer Aided Optimum Design of Structures*, Boston, MA, June 25~27, 1991; *Optimization of Structural Systems and Industrial*

Applications, S. Hernandez and C.A. Brebbia, eds. Elsevier Applied Science, London, 197~207.
 (7) Cheng F.Y. and Chang, C.C., 1985, "Optimum Design of Steel Building with Consideration of Reliability," *Proceedings of 4th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Kobe, Japan, Vol. 3, pp. 81~88.
 (8) Cheng F.Y. and Chang, C.C., 1988, *Safety-Based Optimum Design of Nondeterministic Structures Subject to Various Types of Seismic Loads*, NSF Report, U.S. Department of Commerce, VA, NTIS No. PB90-133489/AS p. 326.
 (9) Austin, M.A., Lister, K.S., and Mahin, S.A., 1987a, "Probabilistic Design of Moment-Resistant Structures," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 113(8), pp. 1642~1659.
 (10) Austin, M.A., Lister, K.S., and Mahin, S.A., 1987b, "Probabilistic Design of Moment-Resistant Frame Under Seismic Loading," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, pp. 1660~1677.
 (11) Möller, P.W., 1999, "Load Identification Through Structural Modification," *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 66, pp. 236~241.
 (12) Menke, W., 1989, *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*, Academic Press, New York.
 (13) Tarantora, A., 1987, *Inverse Problem Theory: Methods for Data Fitting and Model Parameter Estimation*, Elsevier, Amsterdam.
 (14) Bui, H.D., 1994, *Inverse Problems in the Mechanics of Materials: An Introduction*, CRC Press, Boca Raton, FL.
 (15) Imregun, M. and Visser, W.J., 1991, "A Review of Model Updating Techniques," *Shock and Vibration Digest*, Vol. 23, pp. 9~20.
 (16) Motlershead, J.E. and Friswell, M.I., 1993, "Modal Updating in Structural Dynamics: A Survey," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 167, pp. 347~375.
 (17) Friswell, M.I., and Moltershead, J.E., 1995, *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
 (18) Schmit, L.A., 1960, "Structural Design by Systematic Synthesis," *Proceedings of the 2nd Conference on Electric Computation*, ASCE, New York.
 (19) Feng, T.T., Arora, J.S., and Haug, E.J., 1977, "Optimal Structural Design under Dynamic Loads," *Int. J. for Num. Meth. in Engng.*, Vol. 11, pp. 39~62.
 (20) 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. 111, pp. 73~80.
 (21) Chahande, A.I. and Arora, J.S., 1994, "Optimization of Large Structure Subjected to Dynamic Loads with the Multiplier Method," *Int. J. for Num. Meth. in Engng.*, Vol. 37, pp. 413~430.
 (22) Haftka R.T. and Gürdal Z., 1991, *Elements of*

- Structural Optimization*, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- (23) Shin, M.J., Choi, W.S., and Park, G.J., 1997, "Transformation of Dynamic Loads into Equivalent Static Loads and Shape Optimization of the Road Arm," *PACAM V Conference*, Puerto Rico.
- (24) Choi, W.S. and Park, G.J., 1999, "Transformation of Dynamic Loads into Equivalent Static Loads Based on Modal Analysis," *Int. J. for Num. Meth. in Engng.*, Vol. 46, pp.29~43.
- (25) Kang, B.S., Choi, W.S., and Park, G.J., 1999, "Structural Optimization Under Equivalent Static Loads Transformed from Dynamic Loads Based on Displacement," *AIAA Conference*, St. Louis, MO.
- (26) 최우석, 1999, "동하중의 등가정하중으로의 변환 및 이를 이용한 구조최적설계," 박사학위논문, 한양대학교, 서울.
- (27) Grandhi, R.V., Haftka, R.T., and Watson, L.T., 1986, "Design-Oriented Identification of Critical Times in Transient Response," *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 4, pp. 649~656.
- (28) *CSA/NASTRAN Users Manual*, 1994, CSAR.
- (29) *GENESIS User Manual: version 3.0*, 1996, VMA Engineering.