

## 준해석 설계민감도를 위한 변위하중법

이태희<sup>†</sup> · 유정훈\* · 김흥석\*

(2004년 5월 11일 접수, 2004년 8월 3일 심사완료)

### Displacement-Load Method for Semi-Analytical Design Sensitivity Analysis

Tae Hee Lee, Jung Hun Yoo and Heung Seok Kim

**Key Words :** Semi-analytical Design Sensitivity Analysis(준해석 설계민감도해석), Nonlinear Analysis(비선형해석), Commercial Finite Element Package(상용유한요소프로그램), Displacement Load Method(변위하중법)

#### Abstract

Three methods of design sensitivity analysis for structures such as numerical method, analytical method and semi-analytical method have been developed for the last three decades. Although analytical design sensitivity analysis can provide very exact result, it is difficult to implement into practical design problems. Therefore, numerical method such as finite difference method is widely used to simply obtain the design sensitivity in most cases. The numerical differentiation is sufficiently accurate and reliable for most linear problems. However, it turns out that the numerical differentiation is inefficient and inaccurate in nonlinear design sensitivity analysis because its computational cost depends on the number of design variables and large numerical errors can be included. Thus the semi-analytical method is more suitable for complicated design problems. Moreover, semi-analytical method is easy to be performed in design procedure, which can be coupled with an analysis solver such as commercial finite element package. In this paper, implementation procedure for the semi-analytical design sensitivity analysis outside of the commercial finite element package is studied and the computational technique is proposed for evaluating the partial differentiation of internal nodal force, so called pseudo-load. Numerical examples coupled with commercial finite element package are shown to verify usefulness of proposed semi-analytical sensitivity analysis procedure and computational technique for pseudo-load.

#### 기호설명

$g$	: 응답함수	$U$	: 최종변위 벡터
$K_T$	: 접선 강성행렬	$b$	: 설계변수
$K_L$	: 선형 강성행렬	$\sigma$	: 응력
$F$	: 외력 벡터	$D$	: 구성행렬
$Q$	: 내력 벡터	$B$	: 변위-변형률 관계행렬
$u$	: 변위벡터		

<sup>†</sup> 책임저자, 한양대학교 기계공학부  
E-mail : thlee@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2299-0449

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

#### 1. 서론

설계민감도해석은 최적설계, 신뢰성설계, 주요 설계변수 선정과정 등에 폭 넓게 이용되고 있다.

설계민감도는 설계자에게 설계방향의 정보를 제공하며 설계자는 이를 통하여 체계적으로 설계개선을 수행할 수 있다.

실제 설계문제에서 설계민감도해석의 효용성은 정확하며 효율적으로 설계민감도해석을 수행하는데 있다. 최근 응답해석이 점차 복잡해지고 많은 해석시간을 요구하는 시점에서 효율적인 설계민감도해석 기법은 필수적이다. 이산계의 준해석 설계민감도해석 기법은 실제 설계문제에 응용 가능한 설계민감도해석을 위하여 많은 연구가 이루어져 왔으며 현재도 활발히 연구되고 있다.

유한요소 해석프로그램은 시스템을 해석하고 설계를 개선하는 공학도구로서 많이 이용된다. 하지만 유한요소해석은 설계변수에 대한 시스템의 거동을 제공할 뿐 설계개선을 위한 설계민감도 정보는 줄 수 없다. 대표적인 이산계인 유한요소 방정식의 해석적인 설계민감도해석은 유용하게 이용될 수 있지만, 상용유한요소 해석프로그램의 내부정보를 모른다면 해석적 방법으로 설계민감도 해석을 수행하기가 불가능하다. 예를 들어 유한요소의 형상함수와 같은 공개되지 않은 정보는 프로그램 사용자가 사용하기 어렵다. 따라서 공학도구로서 많이 이용되는 상용 유한요소 해석프로그램과 외부 연동하여 실제적인 설계민감도해석을 수행하는 기법연구가 필요하다.

정적 구조문제의 설계민감도해석은 1980년대 중반이후 활발하게 연구되었다. Haftka 와 Adelman 은 1980년대 후반까지의 이산시스템의 설계민감도해석과 관련된 연구결과를 정리 발표하였다.<sup>(1-2)</sup> Van Keulen 과 Haftka 는 2000년까지의 구조문제에 대한 설계민감도해석 연구를 정리 발표 하였다.<sup>(3)</sup> Ryu 등은 이산계의 비선형 설계민감도해석에 대하여 연구하였으며 Wu 와 Arora 는 준해석 방법론으로 비선형 설계민감도해석을 수행하였다.<sup>(4-5)</sup> 유한요소 해석프로그램과 연동하는 설계민감도해석 기법에 대한 연구도 이루어 지고 있다. Choi, Santos 그리고 Predrick 은 연속체 개념을 기반으로 형상함수를 알고 있는 특정 요소에 대하여 ANSYS 를 사용하여 설계민감도해석을 수행하였다.<sup>(6)</sup> Arora 와 Cardoso 는 코드가 공개된 ADINA 를 이용하여 비선형 설계민감도해석을 수행하였다.<sup>(7)</sup> Zhang 과 Domaszewski 는 국한된 요소와 설계변수에 대하여 설계민감도해석이 가능한 ABAQUS 의 설계민감도해석 모듈을 개발하였다.<sup>(8)</sup> 최근에는 준해석 설계민감도해석의 오차와 정확성에 대한 연구가 많이 이루어 지고 있다. Van Keulen 과 de Boer 는 강체이동에 대하여 해석적

미분을 이용하여 준해석 설계민감도해석의 정확성을 향상시켰다.<sup>(9-10)</sup> Van Keulen, Vervenne 그리고 de Boer 는 최근의 정확성 향상에 대한 연구를 정리 발표하였다.<sup>(11)</sup> Parente Jr.과 Vaz 은 평형관계를 이용한 비선형구조물의 준해석 설계민감도해석 기법을 연구하였다.<sup>(12)</sup> 김현기, 조맹효는 강체모드 분리와 뉴만급수를 이용하여 준해석 설계민감도해석의 정확성을 향상시켰다.<sup>(13-14)</sup>

본 논문에서는 이산계의 준해석 설계민감도해석에 대하여 정리하고, 준해석 설계민감도해석 방법으로 상용유한요소 해석프로그램의 해석결과를 이용하여 해석프로그램과 독립적으로 설계민감도해석을 수행하는 기법을 연구하였다. 이 설계민감도해석 기법은 외부의 독립적 해석을 통해서 유한요소모델 요소의 종류에 영향 받지 않고 적용될 수 있다. 그리고 정적 설계민감도해석에서 가장 중요한 가상하중의 계산을 내력의 차분에 의하여 쉽게 구할 수 있는 변위하중법을 제안하였다. 이 기법은 응력 설계민감도해석 및 비선형 설계민감도해석에서 수치적으로 편미분을 계산하는데 유용하게 사용할 수 있다. 마지막으로 예제를 통하여 제안된 설계민감도해석 방법의 정확성을 검증하였다.

## 2. 설계민감도해석

### 2.1 정적 설계민감도해석

정적 문제의 응답은 식 (1)같이 설계변수와 상태변수인 변위의 함수로 나타낼 수 있다.

$$g = g(U, b) \tag{1}$$

응답의 설계민감도해석은 식 (1)을 설계변수로 미분하여 식 (2)와 같이 수행한다.

$$\frac{dg}{db} = \frac{\partial g}{\partial b} + \frac{\partial g}{\partial U} \frac{dU}{db} \tag{2}$$

따라서 변위 설계민감도(dU/db)와 응답의 설계변수 및 변위에 대한 편미분을 구하면 설계민감도를 구할 수 있다.

이산계에서 구조물의 정적 해석문제는 식 (3)과 같이 정의 된다.

$$Q = F \tag{3}$$

식 (3)을 설계변수에 대하여 미분하면 다음과 같은 수식을 구할 수 있다.

$$Q = Q(U, b) \quad (4)$$

$$\frac{dQ}{db} = \frac{dF}{db} \quad (5)$$

$$\frac{dQ}{db} = \frac{\partial Q}{\partial b} + \frac{\partial Q}{\partial U} \frac{dU}{db} \quad (6)$$

여기서 내력은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$Q = \int_0^U K_T du \quad (7)$$

식 (6) 우측항의 변위에 대한 내력의 편미분은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial U} = \int_0^U \frac{\partial K_T}{\partial U} du = K_T(U) \quad (8)$$

식 (8)을 식 (6)에 대입하면 식 (5)의 관계에 의해서 변위설계민감도 수식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$K_T(U) \frac{dU}{db} = -\frac{\partial Q}{\partial b} + \frac{dF}{db} \quad (9)$$

본 연구에서는 외력이 단순 절점력으로 표현되는 경우에 국한하겠다. 이 경우 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dF}{db} &= 0 \\ K_T(U) \frac{dU}{db} &= -\frac{\partial Q}{\partial b} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 풀면 변위의 설계민감도를 구할 수 있다. 여기서 우변을 가상하중(pseudo load)이라고 부른다.

선형 해석일 경우 강성행렬은 변위에 대하여 선형이다. 결국 식 (11)과 같이 접선강렬행렬은 상수가 된다. 선형 정적구조문제에서 설계민감도해석은 식 (12)와 같다.

$$K_T(U) = K_L \quad (11)$$

$$K_L \frac{dU}{db} = -\frac{\partial Q}{\partial b} \quad (12)$$

식 (10) 및 식 (12)와 같이 변위에 대한 정적 설계

민감도해석은 선형해석으로 표현되며  $K_T$  나  $K_L$  은 해석과정에서 구할 수 있기 때문에 설계민감도 해석을 수행하기 위해서 가장 중요한 문제는 설계민감도해석의 하중으로 표현되는 가상하중의 계산이다.

### 2.2 준해석 설계민감도해석

설계민감도해석을 수치적으로 수행하는 가장 간단한 방법은 유한차분법이다. 설계변수의 차분에 따른 응답함수의 변화를 이용하여 식 (13)과 같이 설계민감도를 계산한다.

$$\frac{dg}{db} \cong \frac{g(U + \Delta U, b + \Delta b) - g(U, b)}{\Delta b} \quad (13)$$

그러나 유한차분법은 각 설계변수에 대해서 해석을 수행해야 하므로 실제 문제에 적용하면 계산이 비효율적이다. 또한 안정된 설계민감도해석을 위한 일반적인  $\Delta b$  의 예측이 어렵다.

준해석 방법은 식 (10)과 식 (12) 같은 해석적인 설계민감도식에서 미분으로 표현되는 가상하중을 유한차분법으로 구해서 사용하는 해석적 방법과 수치적방법의 혼합적인 방법이다. 준해석 방법은 특히 유한차분법에 비하여 계산상의 효율이 뛰어나 실제 문제에 유용하게 사용될 수 있다. 식 (10)과 같이 설계민감도해석은 선형해석으로 표현되기 때문에 특히 비선형 해석문제의 경우 비선형 해석을 반복해야 하는 유한차분법과 비교하여 계산이 효율적이다. 일단 가상하중을 구하면 식 (14)와 같이 설계민감도해석은 다수의 설계변수에 대해서 이미 수행된 해석정보를 이용하여 쉽게 구현된다.

$$\begin{aligned} \frac{dU}{db_i} &= K_L^{-1} \left( -\frac{\partial Q}{\partial b_i} \right) && \text{(linear)} \\ \frac{dU}{db_i} &= K_T^{-1} \left( -\frac{\partial Q}{\partial b_i} \right) && \text{(non-linear)} \end{aligned} \quad (14)$$

가상하중은 식 (15)와 같은 유한차분법으로 계산할 수 있다. 식 (15)은 편미분 특성상 유한요소 모델의 각 요소에 개별적으로 적용할 수 있다. 결국 각 설계변수에 대한 가상하중을 구하기 위하여 설계변수 개수만큼의 해석은 필요하지 않다. 유한요소 모델에서 설계변수로 선정된 각 요소의 설계변수를 동시에 모두 섭동시킨 후 해석하고 각 요소별로 내력의 차분을 계산하면 된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial b} \cong \frac{Q(U, b + \Delta b) - Q(U, b)}{\Delta b} \quad (15)$$

선형해석 문제의 경우 강성행렬이 변위의 함수가 아니므로 식 (16)와 같이 가상하중을 구할 수도 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = \frac{\partial \mathbf{K}_L}{\partial b} \mathbf{U} \cong \left\{ \frac{\mathbf{K}_L(b + \Delta b) - \mathbf{K}_L(b)}{\Delta b} \right\} \mathbf{U} \quad (16)$$

준해석 설계민감도해석의 가상하중 계산 및 설계민감도해석을 위한 유한차분법은 전방차분법을 이용하였다. 중앙차분법이 정확성에서 우수하긴 하지만 이 방법을 이용할 경우 설계민감도해석 과정에서 유한요소 해석의 횟수가 증가하기 때문에 해석시간이 긴 실제 문제에서는 전방차분법을 많이 사용한다. 특히 유한차분법을 이용한 설계민감도의 경우 해석횟수가 설계변수에 비례하여 늘어나기 때문에 계산의 효율이 떨어진다. 본 연구에서는 실제 설계과정의 설계민감도해석을 고려하여 준해석 설계민감도해석과 유한차분법에 의한 설계민감도해석 동일하게 전방차분법을 이용하였다.

### 2.3 변위하중법

상용 유한요소 프로그램과 연동하여 설계민감도 해석을 수행하는 경우 가상하중을 구하는 유한차분법은 다음과 같은 기법으로 구현된다.

선형해석의 경우 식 (16)과 같이 선형 강성행렬의 설계변수에 대한 차분으로부터 쉽게 구할 수 있지만 비선형의 경우 강성행렬이 변위에 독립적이지 않기 때문에 식 (15)와 같이 최종변위 상태의 내력 차분을 이용해야 한다. 식 (15)를 계산하기 위해서는  $Q(U, b + \Delta b)$  을 구해내야 된다. 식 (15)는 설계변수에 대한 편미분을 의미하기 때문에 설계변수의 섭동이 일어나도 변위의 변화는 없는 차분량이 필요하다.

상용유한요소 프로그램에서  $Q(U, b + \Delta b)$  값은 Fig. 1 과 같은 변위하중법으로 계산한다. 우선 기존 모델을 해석하여 변위와 내력을 구한다. 모델의 설계변수를 섭동 시킨 후 기존모델의 변위결과를 하중으로 작용하여 내력을 계산하고 기존 내력과의 차로부터 편미분을 계산할 수 있는 내력 차분을 구할 수 있다. 비선형 해석의 경우 식 (15)의 계산을 정확하게 하기 위해서는 힘 하중에 의한 비선형 유한요소해석의 내력의 수렴값과 변위하중에 의한 내력의 수렴값이 일치해야 한다.

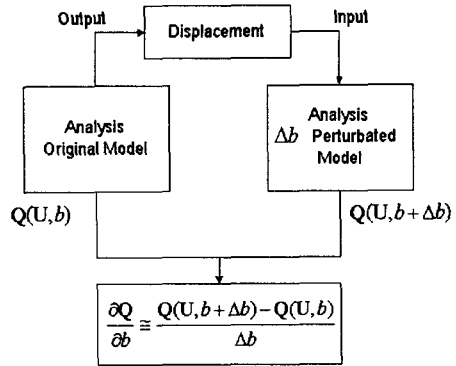


Fig. 1 Displacement load method

### 2.4 응력 설계민감도해석

응력의 설계민감도해석은 식 (2)으로부터 식 (17)와 같이 표현된다.

$$\frac{d\sigma}{db} = \frac{\partial \sigma}{\partial b} + \frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{U}} \frac{d\mathbf{U}}{db} \quad (17)$$

식 (17)에서 응력의 설계변수에 대한 편미분은 식 (18)과 같이 변위하중법을 통해서 내력의 편미분과 동일하게 구한다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial b} \cong \frac{\sigma(U, b + \Delta b) - \sigma(U, b)}{\Delta b} \quad (18)$$

응력 이외의 다른 응답의 설계변수에 대한 편미분도 변위하중법을 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 응력은 식 (19)와 같이 표현되며 따라서 변위에 대한 응력의 편미분은 식 (20)과 같다.

$$\sigma = \int_0^U \mathbf{D}_T(\mathbf{u}, b) \mathbf{B}_T(\mathbf{u}, b) d\mathbf{u} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{U}} = \mathbf{D}_T(\mathbf{U}) \mathbf{B}_T(\mathbf{U}) \quad (20)$$

결국 식 (17)의 우변의 오른쪽 항은 식 (21)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \mathbf{U}} \frac{d\mathbf{U}}{db} = \mathbf{D}_T \mathbf{B}_T \frac{d\mathbf{U}}{db} \quad (21)$$

위 값은 설계민감도해석을 위해서 식 (10)을 해석할 때의 응력값이 된다. 결국 응력의 설계민감도는 변위하중법으로 구한 설계변수에 대한 응력의

편미분과 변위 설계민감도를 구하는 해석모델 응력의 합으로 표현된다.

2.5 유한요소 프로그램과 연동하는 설계민감도 해석

본 논문에서는 위에 설명된 설계민감도해석기법을 상용유한요소 프로그램과 연동하는 설계민감도 외부모듈을 통하여 구현하였다. 상용유한요소 프로그램은 정적 해석결과로 여러 가지 결과 파일을 사용자에게 제공한다. 설계민감도해석은 기존의 해석모델에 가상하중을 가하고 재해석함으로써 구할 수 있다. 설계민감도해석 외부모듈은 Fig. 2와 같이 상용유한요소 프로그램 결과파일에서 가상하중을 구하기 위한 내력을 구하고 내력사이의 차분을 통하여 가상하중을 계산하고 상용유한요소 프로그램 명령어 형태로 가상하중 파일을 만들어 준다. 상용유한요소 프로그램 결과파일은 요소별로 내력과 강성행렬을 제공하기 때문에 설계변수를 포함하는 요소의 내력만을 이용해서 가상하중을 계산할 수 있다.

3. 예 제

본 연구에서는 평판 셀 구조물, 원통 셀 구조물, 비선형 빔 구조물에 대한 변위 및 응력 설계민감도 해석을 수행하였다. 변위하중법을 이용하는 준해석 설계민감도해석을 이용하였으며 연동하는 상용 유한요소프로그램은 ANSYS 를 사용하였다. 그리고 준해석 설계민감도해석 결과는 유한차분법에 의한 설계민감도와 오차를 비교하여 정확성을 검증하였다.

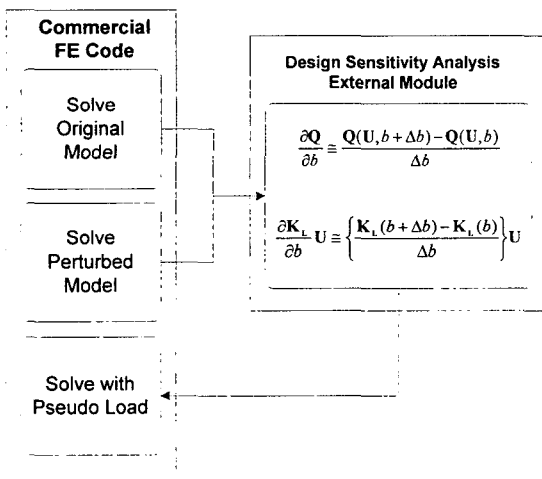


Fig. 2 External module for design sensitivity

본 논문 예제의 수행에서 유한차분법의 섭동량을 선정하는 뚜렷한 수학적 기준은 사용되지 않았다. 하지만 계속적인 준해석 설계민감도해석의 연구를 통해서 경험적으로 알맞은 섭동량을 선정하였다. 일반적인 상용 유한요소프로그램은 사용자에게 각종 응답 및 물성치에 대하여 유효자리 6~7 개 정도를 제공한다. 본 연구에서는 유한요소프로그램의 결과 파일을 사용하여 수치적 미분을 위해 사용되는 값들의 유효자리를 15 개까지 제공하였다. 이 경우 설계민감도해석에서 섭동량을 10<sup>-8</sup>(%)보다 작게 하면 라운드오프 에러가 일어날 수 있고 설계민감도 값 자체의 적당한 유효자리를 확보하기 어렵다. 또한 유한요소 해석의 종류와 모델에 따라 차이를 보이지만 섭동량의 크기가 10<sup>-3</sup>(%)~10<sup>-7</sup>(%)인 구간에서 수치적 미분값이 안정적으로 나타났다. 따라서 섭동량은 설계민감도 값의 유효자리를 확보하고 신뢰성 있는 수치적 미분을 위하여 안정적 섭동량 구간의 중간 값인 10<sup>-5</sup>(%)를 사용하였다.

설계민감도해석 결과의 오차는 식 (22)와 같이 유한차분법의 설계민감도에 대한 상대오차로 계산하였다.

$$Error(\%) = \frac{|\Delta g / \Delta b - dg / db|}{dg / db} \quad (22)$$

여기서,  $\Delta g / \Delta b$  는 전방차분법에 의한 설계민감도이며,  $dg / db$  는 준해석 설계민감도이다.

3.1 평판 셀 구조물의 설계민감도 해석

본 예제에서는 Fig. 3 과 같은 정사각형 평판 셀 구조물의 변위 및 응력에 대한 선형 설계민감도 해석을 수행하였다. 하중은 모서리 부분에 평판 수직 방향으로 작용시켰다. 이런 경우의 하중형태는 일반적으로 설계민감도해석 시 오차가 크게 발생할 수 있다. 설계변수는 하중을 받고있는 요소의 두께이며 응답함수는 하중을 받는 절점의 변위로 하였다. 모델 제원은 Table 1 과 같다.

셀 평판을 해석하여 변위를 구하고 이 변위를 설계변수를 섭동시킨 모델에 작용시킴으로써 Fig. 1 과 같이 변위하중법으로 가상하중을 구하였다. Fig. 2 와 같이 설계민감도해석 외부모듈은 가상하중을 구하는 과정과 가상하중을 통한 재해석 과정을 자동으로 처리하여 설계민감도해석을 수행하게 된다. 이러한 설계민감도해석 과정은 다음 예제에서도 동일하게 적용된다. Table 2 및 3 은 각각 변위와 응력의 설계민감도해석 결과이며 해의 효용성을 확인하기 위해서 유한차분법의 결과와

비교하였다.

Table 2 및 3 에서 준해석 설계민감도와 유한차분의 결과는 변위와 응력 모두 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

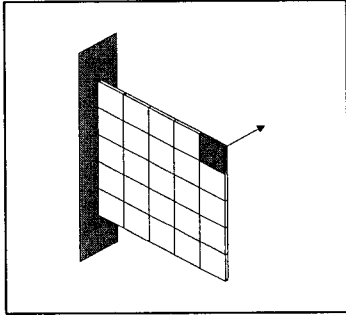


Fig. 3 Finite element model of plate shell structure

Table 1 Geometric and material properties of plate

Length of side (m)	1
Load (N)	1000
Young's modulus (GPa)	209
Poisson's ratio	0.3
Design variable (thickness, m)	0.01
Perturbation (%)	0.00001

Table 2 Comparison of the displacement design sensitivity between finite difference method and semi-analytical method for plate

	$dU_z / db$	$d\theta_x / db$	$d\theta_y / db$
FDM	0.273800	1.189163	-1.238536
Semi	0.273830	1.189205	-1.238599
Error(%)	0.0110	0.0035	0.0051

Table 3 Comparison of the stress design sensitivity between finite difference method and semi-analytical method for plate

	$d\sigma_y / db$	$d\sigma_x / db$	$d\sigma_{xy} / db$
FDM	1532736740	1354705000	-4556397000
Semi	1532778408	1354721496	-4556547694
Error(%)	0.0027	0.0012	0.0033

3.2 원통 셸 구조물의 설계민감도해석

본 예제에서는 Fig. 4 와 같은 원통 셸 구조물의 자유단 처짐과 본미세스 응력에 대한 설계민감도 해석을 수행하였다. 하중은 자유단에서 수직하향으로 작용시켰다. 설계변수는 그림과 같이 원통 자유단의 환형 요소그룹으로 선정하였다. 모델 제원은 Table 4 와 같으며 Table 5 에서 설계민감도 해석 결과와 유한차분법의 결과를 비교하였으며 두 결과는 매우 잘 일치하고 있다.

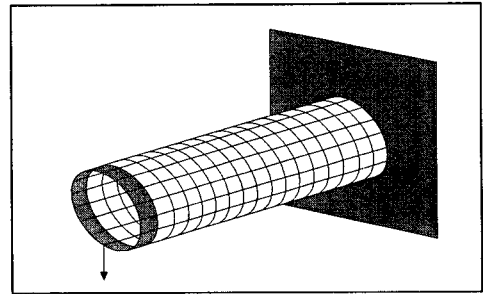


Fig. 4 Finite element model of cylindrical shell structure

Table 4 Geometric and material properties of cylinder

Length of cylinder (m)	10
Load (N)	1000
Young's modulus (GPa)	209
Poisson's ratio	0.3
Design variable (thickness, m)	0.01
Perturbation (%)	0.00001

Table 5 Comparison of the displacement and von-Mises stress design sensitivity between finite difference method and semi-analytical method for cylinder

	$dU_y / db$	$dU_z / db$	$d\sigma_{von} / db$
FDM	0.056585	0.002519	-579028000
Semi	0.056601	0.002520	-579091871
Error(%)	0.0283	0.0397	0.0110

3.3 비선형 빔 구조물의 설계민감도해석

본 예제에서는 Fig. 5 와 같은 빔 구조물의 기하 비선형해석에 대한 변위 설계민감도해석을 수행하였다.

빔의 단면적은 정사각형이고 높이를 설계변수로 선정하였다. 설계응답은 끝 자유단의 변위이다. 모델 제원은 Table 6 과 같으며 Table 7 에서 설계민감도해석 결과와 유한차분법의 결과를 비교하였다. 비선형 해석의 경우도 준해석 설계민감도해석과 유한차분법의 오차가 0.15% 이내로 잘 일치하고 있다.

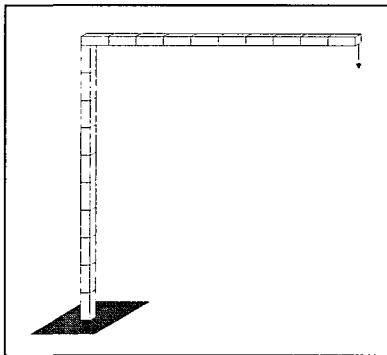


Fig. 5 Finite element model of nonlinear beam structure

Table 6 Geometric and material properties of beam

Length of each beam (m)	0.2
Load (N)	1000
Young's modulus (GPa)	209
Poisson's ratio	0.3
Design variable (height, m)	0.01
Perturbation (%)	0.00001

Table 7 Comparison of the displacement design sensitivity between finite difference method and semi-analytical method for nonlinear beam structure

	$dU_x / db$	$dU_y / db$	$d\theta_z / db$
FDM	-2.553014	7.384457	0.035813
Semi	-2.556915	7.384125	0.035794
Error(%)	0.1526	0.0045	0.0531

위 각 예제의 설계민감도해석과 결과 비교를 통해서 변위하중법을 이용한 준해석 설계민감도해석이 신뢰할 수 있는 설계민감도 정보를 제공함을 알 수 있다.

4. 결 론

실제 설계에서 설계민감도해석을 유용하게 이용하기 위해서는 정확성과 계산의 효율성이 필수적이다. 정확성과 효율성을 만족하면서 실제 설계 문제에 적용하기 알맞은 방법으로서 준해석 설계민감도기법을 정리하였고, 준해석 설계민감도해석을 상용 유한요소프로그램에서 실제적으로 적용할 수 있는 변위하중법을 제안하였다. 그리고 정적 선형 구조문제의 변위 및 응력 그리고 비선형 구조문제의 변위 설계민감도해석을 수행하여 제안된 변위하중법을 이용한 준해석 설계민감도해석의 정확성을 보였다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Haftka, R. T. and Adelman, H. M., 1986, "Sensitivity Analysis for Discrete Structural Systems," *AIAA J*, Vol. 24, pp. 823~832.
- (2) Haftka, R. T. and Adelman, H. M., 1989, "Recent Developments in Structural Sensitivity Analysis," *Structural Optimization*, pp. 137~151.
- (3) Van Keulen, F, Haftka, R. T. and Qu, X-Y, 2000, "Review of Option for Structural Sensitivity Calculations," AIAA-00-1351, pp. 1~14.
- (4) Ryu, Y. S., Hapijian, M., Wu, C. C. and Arora, J. S., 1985, "Structural Design Sensitivity Analysis of Nonlinear Response," *Computers & Structures*, Vol. 21. No. 1/2, pp. 245~255.
- (5) Wu, C. C. and Arora, J. S., 1987, "Design Sensitivity Analysis and Optimization of Nonlinear Structural Response Using Incremental Procedure," *AIAA J*, Vol. 25, No. 8, pp. 1118~1125.
- (6) Choi, K.K., Santos, J.T.L. and Frederick, M.C., 1987, Implementation of Design Sensitivity Analysis with Existing Finite Element Codes," *ASME Journal of Mechanism, Transmissions, Automation in Design*, Vol. 109, pp. 385~391.
- (7) Arora, J.S. and Cardoso, J.E.B., 1989, "A Design Sensitivity Analysis Principle and Its Implementation into ADINA," *Computers & Structures*, Vol. 32, pp. 691~705.
- (8) Zhang, W.H. and Domaszewski, M., 1998, "Recent Developments of Sizing Optimization with ABAQUS Code," *AIAA-98-4710*, pp. 190~197.

- (9) Van Keulen, F. and de Boer, H., 1998, "Rigorous Improvement of Semi-Analytical Design Sensitivities by Exact Differentiation of Rigid Body Motion," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 42, pp. 71~91.
- (10) Van Keulen, F. and de Boer, H., 2000, "Refine Semi-analytical Design Sensitivities," *Int. J. Solids and Structures* Vol. 37, pp. 6961~6980.
- (11) Van Keulen, F., Vervenne, K. and de Boer, H., 2001, "Accuracy Improvement of Semi-Analytical Design Sensitivities – An Overview of Recent Developments," *Engineering Design Optimization, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ASMO-UK/ISSMO Conference*, Harrogate, North Yorkshire, UK, 9th – 10th July.
- (12) Parente, E. Jr. and Vaz, L. E., 2001, "Improvement of Semi-analytical Design Sensitivities of Non-linear Structures using Equilibrium Relations," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 50, pp. 2127~2142.
- (13) Kim, H. and Cho, M., 2001, "A Refined Semi-Analytic Sensitivity Study Based on the Mode Decomposition and Neumann Series Expansion ( I )," *Transactions of the KSME, A.*, Vol. 27, No. 4, pp.585~592.
- (14) Kim, H. and Cho, M., 2001, "A Refined Semi-Analytic Sensitivity Study Based on the Mode Decomposition and Neumann Series Expansion (II)," *Transactions of the KSME A.*, Vol. 27, No. 4, pp. 593~600.
- (15) Santos, J.L.T. and Choi, K.K., 1988, "Sizing Design Sensitivity Analysis of Non-linear Structural Systems. Part II: Numerical Method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 26, pp. 2097~2114.
- (16) Camarda and Adelman, 1984, "Static and Dynamic Structural Sensitivity Derivatives Calculations in the Finite-Element Based Engineering Analysis Language (EAL) System," NASA TM-85743.