

주자유도 선정 기법에 의한 동하중의 등가 정하중으로의 변환

Transformation of Dynamic Loads into Equivalent Static Loads by the Selection Scheme of Primary Degrees of Freedom

김 현 기†

HyunGi, Kim

조 맹 효*

MaengHyo, Cho

(논문접수일 : 2006년 8월 2일 ; 심사종료일 : 2007년 1월 22일)

요 지

본 연구는 동하중의 영향을 받는 구조물의 효율적인 구조 해석 및 최적화 수행을 위해 임계 시간의 동하중을 등가 정하중으로 변환하는 방법을 제안한다. 동하중을 등가 정하중으로 변환하기 위해서는 적절한 자유도 선정이 중요하다. 그러나, 기존 방법에서는 자유도의 선정이 임의로 이루어져서 몇 개의 자유도에 과도한 정하중이 부과되거나, 구조물의 거동에 영향력이 없는 자유도들이 선정됨으로써 신뢰성이 떨어지는 결과를 제공하기도 한다. 본 연구에서는 2단계 축소기법과의 연동을 통해 중요 자유도를 선정하고, 선정된 자유도에 등가 정하중을 부과하는 방법을 제안한다. 주자유도는 구조물의 거동에 지배적인 영향력을 갖고 있으며, 손상 탐지나 시스템 검증에서도 중요한 의미를 갖는 자유도이다. 수치예제를 통해 선정된 자유도에 등가 정하중을 분포시킨 후 동하중하의 시간 응답과 비교하여 그 신뢰성을 확인한다.

핵심용어 : 주자유도, 등가 정하중, 2단계 축소기법, 순차적 소거법

Abstract

The systematic method to construct equivalent static load from a given dynamic load is proposed in the present study. Previously reported works to construct equivalent static load were based on ad hoc methods. Due to improper selection of loading position, they may results in unreliable structural design. The present study proposes the employment of primary degrees of freedom for imposing the equivalent static loads. The degrees of freedom are selected by two-level condensation scheme with reliability and efficiency. In several numerical examples, the efficiency and reliability of the proposed scheme is verified by comparison displacement for equivalent static loading and dynamic loading at the critical time.

Keywords : primary degrees of freedom, equivalent static loads, two-level condensation scheme, sequential elimination scheme

1. 서 론

일반적인 구조해석은 외력이 정하중이라는 가정 하에 수행된다. 그러나, 실제로 구조물에 작용되는 하중은 동하중이며, 정하중 조건으로 해석된 결과는 구조물의 안전 설계를 반영하기 위해서는 적절하지 못하다. 따라서, 하중이 작용하는 구조물의 실제거동을 표현하는 과도응답을 통해 동하중을 고려하는 연구들이 많이 진행되어 왔다. 그러나, 시간에 따른 구조물의 거동을 나타내는 과도응답에 의해 구조 해석을 하는 것은 상당한 전산자원과 시간비용을 요구한다. 최근에는 모

달해석 방법에 의해 최대 변위가 발생하는 임계시간을 결정하고, 임계시간에서 발생하는 변위와 동등한 결과를 산출하는 등가 정하중(equivalent static load)을 근사화 기법에 의해 계산한 후, 동하중을 고려한 구조해석 및 최적화가 수행되었다(최우석 등, 1998). 이 기법은 다양한 구조물에서 등가 정하중에 의해 발생하는 변위가 임계시간에서 산출되는 변위보다 크게 산출되게 함으로써, 안전설계 관점에서 바람직한 것이라고 할 수 있다. 그러나, 동하중을 등가 정하중으로 변환할 경우, 하중을 분포시키는 자유도를 경험적으로 선정해야 하는 문제가 있다. 등가 정하중을 분포시키는 절점들

† 책임저자, 현대중공업 기술개발본부 구조연구실
Tel: 019-633-3864 ; Fax: 02-886-1693
E-mail: shotgunl@snu.ac.kr

* 교신저자, 정희원 · 서울대학교 기계항공공학부 부교수

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 4월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

을 잘 선정하는 것은 중요하다. 하중을 분포시키는 자유도가 적절하게 선정되지 못한다면, 임계시간에서 발생하는 최대 변위보다 적은 결과를 산출할 수 있으며, 선정된 자유도 이외의 지점에서도 안전성 측면에서 적절한 결과를 제공하지 못하는 위험을 갖게 된다.

본 연구에서는 에너지 평가에 의해 선정된 주자유도에 임계시간의 동하중 값을 등가 정하중으로 적절하게 분포시키는 방법을 제안한다. 주자유도는 구조물의 거동을 주로 지배하는 자유도를 의미하며, 축소시스템을 구성하기 위해 사용되는 개념이다. 본 연구에서는 등가 정하중을 분포시키기 위한 주자유도 선정을 위해 2단계 축소기법(Two-level Condensation Scheme, TLCS)을 채용한다(김현기 등, 2004; 박수현 등, 2006; Kim 등, 2006). 이 기법은 물리적 축소 방법으로 1차 축소에는 효율성이 큰 동시 선정기법을 사용하고, 2차 축소를 위해서는 정확도가 우수한 순차적 소거기법을 사용한다. 최종적으로 선정된 주자유도에 등가 정하중을 분포시킨 후, 몇 가지 수치예제의 정적해석을 통해서 제안된 방법의 신뢰성을 검증한다.

2. 근사화 기법

정적 문제에서 일반적인 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$[K]\{d\} = \{s\} \tag{1}$$

여기서, $[K]$ 는 강성행렬, $\{d\}$ 는 변위 벡터, $\{s\}$ 는 하중 벡터를 의미한다.

동적 해석에 의해 임계시간 (t_c)이 결정되면 그 시간에서 변위 값 $d(t_c)$ 가 결정된다. $d(t_c)$ 는 식 (2)로 구해진다.

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

여기서, N 은 총 자유도수(총 모드수), u_{ij} 는 j 번째 모드의 i 번째 성분, s_j 는 j 번째 하중 성분을 의미한다. 그러나, 식 (2)에 의해서 등가 정하중을 구하는 것은 전체 시스템의 모드를 모두 포함하기 때문에 많은 전산자원을 요구하며, 매우 비효율적인 방법이라고 할 수 있다.

일반적으로 구조물의 거동은 몇 개의 저차모드에 의해 지배된다. 그러므로, 전체 시스템에 의해 구성되는 N 개의 방정식을 푸는 것 보다는 모달해석에 의해 N 개보다 훨씬 적은 n 개의 방정식을 구성하는 것이 보다 효율적이다. 모달 해석을 통해서 각 시간경과에 따른 변위를 계산할 수 있으며, 최

대 변위가 발생하는 시간을 임계시간으로 결정한다. 임계시간에서 선정된 자유도에 부여되는 등가 정하중은 식 (3)과 같이 표현되는 근사화 기법에 의해 구해질 수 있다(Choi, 등 1999).

$$d_p(t_a) \leq x_p = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\omega_k^2} \left(\sum_{j=i}^{i+l-1} u_{pk} u_{jk} s_j \right) \quad (p=1, \dots, h) \tag{3}$$

when d_p is positive

$$d_p(t_a) \geq x_p = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\omega_k^2} \left(\sum_{j=i}^{i+l-1} u_{pk} u_{jk} s_j \right) \quad (p=1, \dots, h)$$

when d_p is negative

여기서, h 는 등가 정하중이 분포되는 자유도 개수이고, l 는 등가 정하중이 부과되는 개수를 의미한다.

식 (3)으로부터 등가 정하중을 구하기 위한 정식화는 식 (4)와 같다(강병수 등, 2000).

Find $s_i (i=1, \dots, l')$
 Minimization : $s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_{l'}^2$ (4)
 Subject to $d_p \leq x_p$

3. 등가 정하중 부과를 위한 자유도 선정

일반적으로 등가 정하중을 부여하기 위한 자유도는 경험적으로 선정된다. 자유도 선정이 적절하지 못한 경우 임계시간에서의 변위보다 적은 값을 산출하는 등가 정하중을 제공하게 된다. 본 연구에서는 등가 정하중이 분포될 위치 선정을 이전에 수행된 연구들과 달리 공학적인 관점에서 접근하고자 한다. 일반적인 구조물의 거동은 저차 모드에 의해서 지배되고, 이런 특성을 이용하여 몇 개의 자유도만으로 구성된 축소시스템을 통해 고유치 해석을 수행하는 연구가 많이 진행

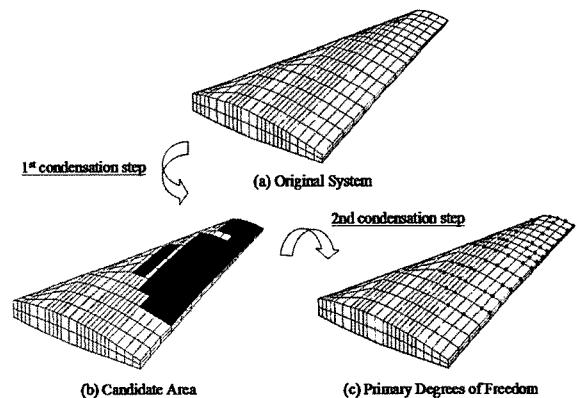


Fig. 1 Selection scheme of primary degrees of freedom by two-level condensation scheme

되어 왔다. 이 때 선정된 자유도는 구조물의 거동을 잘 표현하므로, 등가 정하중을 부과하는 자유도로 선정되기에 적합하다. Fig. 1은 주자유도 선정을 위한 2단계 축소기법의 schematic 이다. Fig. 1에서 (a)는 초기 시스템이고, (b)는 첫 번째 단계에 의해서 근사화된 영역을 표시한 것이다. (c)는 두 번째 단계에서 순차적 소거법에 의해 선정된 자유도이다. 그림에서 표시된 점은 선정된 자유도를 포함하는 절점을 표시한 것이다.

3.1 2단계 주자유도 선정 기법

축소시스템을 구성하기 위한 주자유도 선정은 순차적 소거법이 신뢰성 높은 결과를 제공한다. 그러나, 순차적 소거법은 최종적인 자유도를 얻기 위해서는 지나치게 많은 시간을 필요로 한다. TLCS는 시간 비용에 대한 문제점을 해결하고, 구조물의 거동을 잘 표현할 수 있는 자유도 선정에 대해 높은 신뢰도와 효율성을 보장하는 기법이다. TLCS는 두 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 리츠 벡터(Ritz vector)에 의해 각 요소별 레일리 에너지 평가에 의해 근사화된 축소모델을 구성한다. 두 번째 단계에서는 순차적 소거법을 적용하여 최종적인 주자유도가 선정된다. 두 번째 단계에서 적용되는 순차적 소거법은 에너지 평가에 의해 충분히 축소된 모델에 적용되기 때문에 많은 시간을 요구하지 않게 된다.

3.1.1 에너지 평가에 의한 후보영역 선정

첫 번째 단계에서 요소단위의 에너지를 평가하기 위해서는 리츠 벡터를 구해야 한다. 초기 리츠 벡터는 질량 행렬의 대각항으로부터 근사화된다.

$$[K]\{x^{(1)}\} = \{m_{ii}\} \quad (5)$$

식 (5)에서 구해진 정적 벡터는 정규화 과정을 거친 후 첫 번째 리츠 벡터가 된다.

$$\{x^{(1)}\}^T [M] \{x^{(1)}\} = 1 \quad (6)$$

첫 번째로 구해진 리츠 벡터는 두 번째 정적벡터를 구하기 위해 사용된다. 구해진 정적벡터는 정규직교화 과정을 거친 후 두 번째 리츠 벡터로 얻어진다. 이 과정과 관련된 식은 식 (7)에 주어져 있다.

$$\{x^{(i)}\} = \{x^{(i)}\} - \sum_{k=1}^{i-1} \left[\{x^{(k)}\}^T [M] \{x^{(i)}\} \right] \{x^{(k)}\} \quad (7)$$

초기에 설정했던 k번째 리츠 벡터를 얻을 때 까지 위의 과정은 반복된다. 위의 과정에서 구성된 리츠 벡터를 사용하여 각 요소에서의 레일리 값들은 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda_e^i = \sum_{k=1}^n \frac{\{z^{(k)}\}^T [K_e^i] \{z^{(k)}\}}{\{z^{(k)}\}^T [M_e^i] \{z^{(k)}\}} \quad (8)$$

{z}는 k번째 리츠 벡터이다. i번째 요소의 레일리 에너지는 1st부터 nth까지의 리츠 벡터에 의해 계산된 각 레일리 값들의 합에 의해서 구해진다. 최종적으로 모든 영역에서 구해진 레일리 에너지 중에서 가장 작은 값을 갖는 요소들부터 후보영역으로 선정된다.

3.1.2 순차적 소거법에 의한 최종 주자유도 선정

제 2단계에서는 레일리 에너지 지수 평가에 의해 선정된 후보영역에 순차적 소거법이 적용되어 최종 주자유도를 선택하게 된다. 일반적으로, 순차적 소거법은 반복적인 연산과정에서 강성/질량 행렬의 비가 가장 작은 자유도를 순차적으로 소거하기 때문에, 많은 시간 비용을 필요로 한다. 그러나, 여기에서는 1단계 축소과정을 거친 시스템에 적용되므로 많은 전산비용과 시간을 요구하지 않는다. Fig. 2는 2단계에서 적용되는 순차적 소거법의 전체적인 알고리즘을 보여주고 있다.

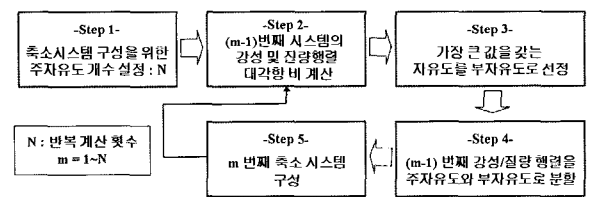


Fig. 2 Sequential elimination scheme in 2nd stage

4. 주자유도에 기초한 등가 정하중으로의 전환

3절의 과정을 통해 선정된 주자유도와 식 (4)로 부터 구해진 등가 정하중의 적절성을 검토하기 위해 평판, 실린더 튜브, 트러스 구조물에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 9와 Fig. 12에서 ()안의 숫자는 선택된 자유도를 나타낸다. 1은 u, 2는 v, 3은 w방향 자유도를 의미한다.

4.1 충격 하중 하의 평판

Fig. 3은 평판 모델에 작용하는 하중을 나타내고 있다. 평판의 중앙에서 충격 하중이 작용하고 있으며, 네 변은 고정

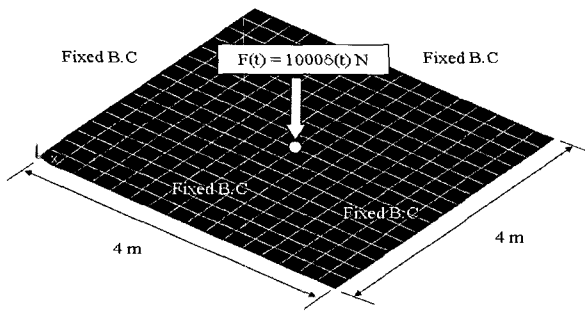


Fig. 3 Configuration of plate under impulse loading ($E = 210\text{GPa}$, $\nu = 0.3$, $t = 2\text{mm}$, $\rho = 7850\text{kg/m}^3$)

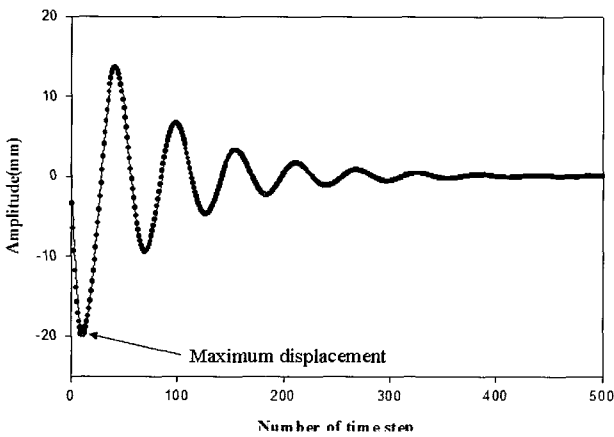


Fig. 4 Time response at the maximum displacement position ($\Delta t = 2.5 \times 10^{-3}$)

경계이다. 모달 해석에 의한 최대 변위 발생 시간은 0.0275sec이고, 최대 변위는 충격 하중이 작용하는 지점에서 발생하며 그 값은 -19.58mm이다. Fig. 4는 최대 변위가 발생하는 자유도의 과도응답을 나타낸 그림이다.

Fig. 5는 충격 하중을 등가 정하중으로 분포시키기 위해 2단계 축소기법으로 선정된 10개의 주자유도 위치를 보여주고 있으며, 절점 145는 하중 작용점이다. 식 (3)의 관계식에 의한 방정식이 구성되면, 식 (4)에 의한 SLP(sequential linear program) 알고리즘을 통해 최적의 등가 정하중이 구해진다. 구해진 등가 정하중 값들은 정적해석을 통해 동하중 하에서 임계시간에서의 변위보다 큰 값으로 계산되어야만 보수적인 해석을 수행할 수 있다. Table 1은 각 자유도에서의 등가 정하중, 등가 정하중에 의한 변위결과와 동하중하에서 임계시간의 변위값을 비교한 것이다.

등가 정하중을 적용함으로써 동하중보다 보수적인 해석 결과를 얻을 수 있으며, 등가 정하중이 부여된 이 외의 모든 절점에서도 유사한 경향을 나타내게 된다. 이것은 안전성을 고려한 최적화 설계시 바람직한 사항으로 사료된다. 만약 동하중이 작용하는 절점에만 등가 정하중을 부여할 경우 나머

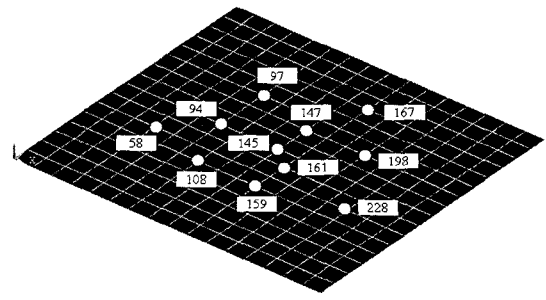


Fig. 5 Positions of selected primary degrees of freedom(The nodes connected with the selected DOFs are marked and position 145 is the loading point)

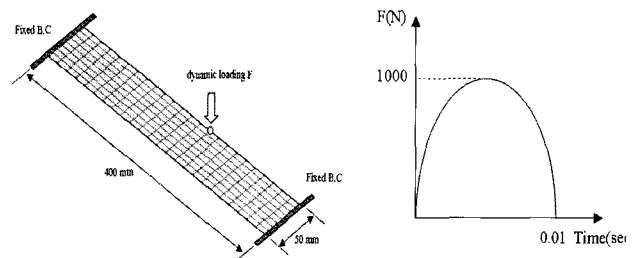
지 절점들에서는 임계시간에서의 시간응답보다 보수적인 해석 결과를 얻을 수 없거나 전환된 정하중 값이 지나치게 크게 산출되므로 매우 비효율적인 구조해석이 이루어지게 된다. 또한 적절한 자유도가 선택되지 못한 경우에도 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 없다.

Table 1 Displacement comparison between equivalent force and dynamic loading

절점 번호	자유도	등가 정하중(N)	등가 정하중 변위(mm)	동하중 변위(mm)
58	3	-1970.37	-6.04	-5.00
94	3	-5402.91	-14.16	-13.35
97	3	-3642.74	-10.07	-8.96
108	3	-4553.57	-12.36	-11.23
145	3	-8213.72	-19.92	-19.58
147	3	-6844.09	-17.07	-16.58
159	3	-5179.84	-13.78	-12.80
161	3	-7507.83	-18.57	-18.03
167	3	-2214.67	-6.55	-5.75
198	3	-4553.56	-12.02	-11.23
228	3	-1970.47	-5.75	-5.00

4.2 정현파가 작용하는 평판

두 번째 문제는 평판의 양쪽이 고정되어 있고, 길이 방향 임의의(중앙부가 아닌) 지점에서 정현파가 작용하는 문제이



(a) Configuration of plate under sinusoidal loading (b) Sinusoidal dynamic loading
Fig. 6 Cantilever Plate under dynamic loading and its position($E = 72\text{GPa}$, $\nu = 0.3$, $t = 5\text{mm}$, $\rho = 7850\text{kg/m}^3$)

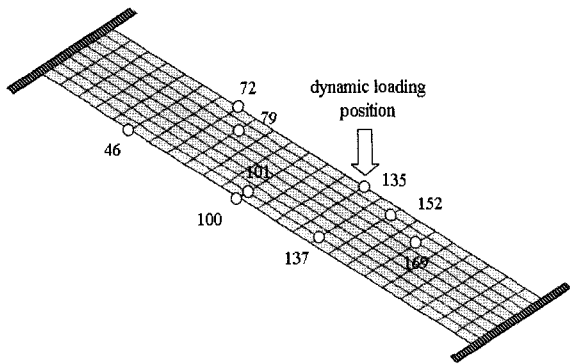


Fig. 7 Positions of primary degrees of freedom selected for equivalent static load

Table 2 Displacement comparison between equivalent force and dynamic loading(unit : mm)

절점 번호	자유도	등가 정하중(N)	등가 정하중 변위	동하중 변위
46	3	-24.12	-1.5459	-0.9553
72	3	-52.29	-2.5786	-1.8091
79	3	-59.83	-3.0005	-2.2030
100	3	-71.05	-3.8860	-3.0414
101	3	-72.95	-3.8685	-3.0828
135	3	-92.42	-3.8158	-3.7699
137	3	-70.87	-3.4611	-3.0946
152	3	-76.04	-3.1545	-3.0840
169	3	-51.23	-2.1857	-2.0181

다. 시간 응답에 의해 임계시간은 2.484sec이며, 그 때의 최대 변위는 -3.7699mm이다.

임계시간 2.484sec에서의 동하중을 부과하기 위해 Fig. 7에 주어진 것처럼 8개의 주자유도를 선정하였으며, 동하중이 작용하는 절점(135) 자유도를 등가 정하중을 분포시키는 자유도 선정에 포함시켰다. 등가 정하중과 임계시간의 동하중에 의한 변위 비교 결과가 Table 2에 주어져 있다.

4.3 충격 하중하의 실린더 튜브

Fig. 8은 동하중하의 실린더 튜브 형상이다. 축 방향으로 동하중이 작용하고 있으며 왼편 끝단에서는 고정경계, 양쪽 측면에서는 대칭경계가 부과되었다. 길이방향은 400mm, 반경방향은 100mm이다.

동하중을 정하중으로 치환할 때는 등가 정하중의 크기가 적절하게 부과되도록 주자유도 개수를 잘 결정하여야 한다. 만약, 선정된 자유도 개수가 너무 적게 선택된다면, 등가 정하중의 크기가 상대적으로 크게 부여되므로, 지나친 하중 하에서 구조해석이 수행된다. 등가 정하중의 부과를 위한 자유

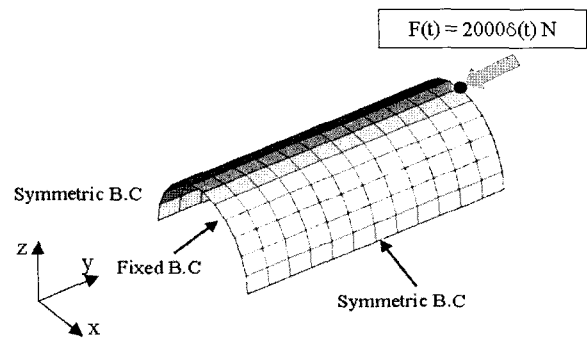


Fig. 8 Configuration of cylindrical tube and position of dynamic loading ($E=72\text{GPa}$, $\nu=0.3$, $t=2\text{mm}$, $\rho=7850\text{kg/m}^3$)

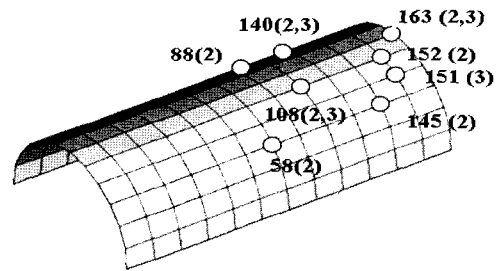


Fig. 9 Primary degrees of freedom selected by two-level condensation scheme

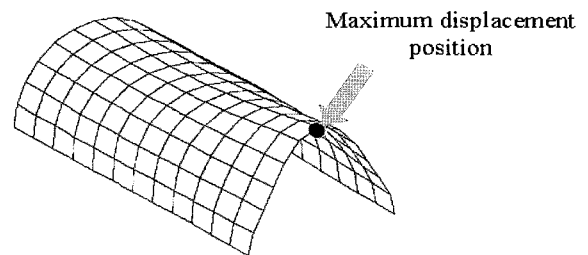


Fig. 10 Position of maximum displacement at the critical time

도로 2단계 축소기법에 의해 총 10개 주자유도와 하중 작용점 163(2)을 선정하였다. Fig. 9는 해당 절점과 선정된 자유도를 보여주고 있다.

최대 변위가 발생하는 임계시간은 0.016sec이며, 그 때의 최대 변위값은 하중 작용점인 절점 163번에서 w 방향으로 24.31mm이다. Fig. 10은 임계시간에서의 변형된 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 9에 주어진 주자유도에서의 등가 정하중에 의한 해석 결과를 동하중하 임계시간에서의 변위와 비교한 결과가 Table 3에 주어져 있다. 이 결과에서는 보수적인 결과를 제시하고 있으나, 앞의 예제와 비교하여 등가 정하중에 의한 변위와 동하중하 임계시간에서 변위 차이가 상대적으로 크게 나타나고 있다. 이것은 동하중을 등가 정하중으로 적절하게

Table 3 Displacement comparison between the equivalent force and dynamic loading(unit : mm)

절점 번호	자유도	등가 정하중(N)	등가 정하중 변위	동하중 변위
58	2	-558.47	-0.8749	-0.7268
88	3	4646.37	4.3069	3.5848
108	2	-202.63	0.2300	0.2062
108	3	10859.95	6.2746	3.7615
140	2	411.45	0.3619	0.2970
140	3	2916.42	4.3930	3.1237
145	2	1012.22	1.2251	1.0300
151	3	3196.85	20.9623	16.0091
152	2	-22.86	-0.6026	-0.4976
163	2	-1212.58	-2.9637	-1.7741
163	3	9011.31	38.2446	24.3113

분포시켜 선정된 자유도에 과도한 정하중이 부과되지 않도록 하기 위해서는 몇 개의 자유도를 더 포함시켜야 한다는 것을 의미한다.

본 연구에서 사용하고 있는 자유도 선정기법은 동하중 방향과 같은 방향으로의 자유도만을 선정하지 않는 장점이 있다. 실린더 예제에서 하중은 축 방향(v방향)으로 작용하고 있으나, 임계시간에서 최대변위는 w방향이다. 그러므로, 동하중 방향과 동일한 자유도만을 선택하는 것은 부적절하며, 경험에 바탕을 둔 선정에서는 이런 점들을 고려하기가 용이하지 않다.

4.4 3차원 트러스 구조물

Fig. 11은 하단부가 고정되어 있고, 상부 2지점에 충격 하중이 작용하고 있는 3차원 트러스 구조물이다. 주자유도로

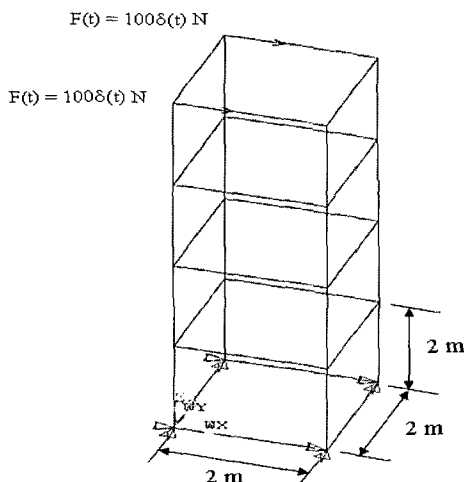


Fig. 11 Configuration of the truss and analysis conditions (200GPa, A=0.00125m², ρ = 7850kg/m³)

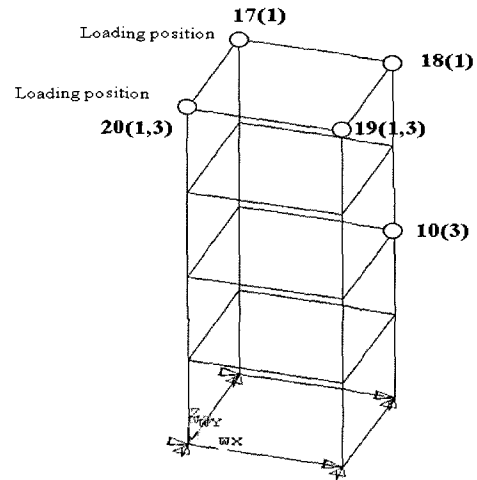


Fig. 12 Primary degrees of freedom selected by two-level condensation scheme

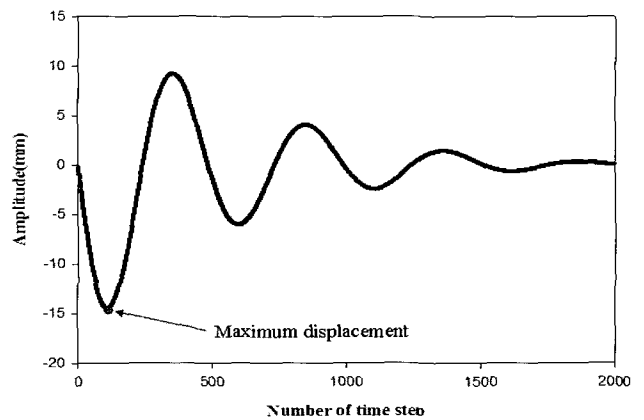


Fig. 13 Time response at the maximum displacement position(Δt=1×10⁻⁴)

Table 4 Displacement comparison between the equivalent force and dynamic loading(unit : mm)

절점 번호	자유도	등가 정하중(N)	등가 정하중 변위	동하중 변위
10	3	-981.76	-2.00	-1.89
17	1	-5633.17	-14.93	-14.49
18	1	-5623.53	-14.89	-14.48
19	1	-888.81	-2.52	-2.00
19	3	-4244.13	-13.28	-13.03
20	1	732.55	1.35	1.26
20	3	-4246.09	-13.32	-13.05

선정된 자유도 위치들이 Fig. 12에 표시되었으며, 7개의 자유도(하중위치 포함)가 선정되었다.

시간 응답해석에서 위험시간은 0.011sec이며, 절점 17의 u방향 변위에서 최대 변위가 발생하게 된다. 그 때의 최대 변위는 -14.49mm이다. 최대 변위가 발생하는 자유도의 시간 응답이 Fig. 13에 주어져 있다.

Table 4는 Fig. 13의 최대 변위가 발생하는 임계시간에서

의 시간응답과 등가 정하중으로 변환 후 변위 해석 결과를 비교한 것이다. 임계시간에서의 시간 응답과 비교하여 보수적인 해석을 수행하고 있으며, 그 변위값도 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 자유도 선정 위치와 그 개수가 적절함을 의미한다.

5. 결 론

일반적인 구조해석은 정하중이 작용하는 것으로 가정하여 이루어지고 있으며, 그 결과를 바탕으로 수행되는 최적화 작업은 구조물의 안전성 측면에서 충분한 신뢰를 주기 어렵다고 할 수 있다. 지금까지 구조 안전성을 고려한 최적화 작업을 보다 효율적으로 수행하기 위해 동하중을 정하중으로 전환한 방법들이 제안되어 왔다. 이 방법에서는 최대 변위가 발생하는 임계시간에서의 변위보다 큰 변위를 산출하는 등가 정하중을 부과하고, 정하중하의 조건과 동일한 방법으로 최적화를 수행하였다. 그러나, 동하중을 분포시킬 자유도는 경험적으로 선택되어졌다. 만약 적절하지 않은 절점이 선정되는 경우 임계시간보다 적은 변위 값을 제공할 수 있으며, 이는 구조물의 평가와 해석, 설계의 신뢰도에 심각한 영향을 줄 수 있다.

본 연구에서는 축소시스템을 구성하기 위해서 사용되는 축소기법에 의해 등가 정하중이 분포될 주자유도를 선정하였다. 수치 예제에서 선택된 주자유도에 등가 정하중을 분포시킨 후 구조해석을 수행하였다. 임계시간에서의 변위 비교를 통하여 모든 경우에서 구조 안전성을 보다 엄격하게 고려할 수 있는 결과를 얻을 수 있었으며, 선정된 자유도 이외의 절점에서도 시간 응답보다 보수적인 해석 결과를 얻을 수 있었다.

그러나, 등가 정하중 부과를 위해 몇 개의 자유도를 선정해야 하는지 결정하는 것은 아직까지 어려운 문제이다. 본 연구는 등가 정하중으로의 변환을 위해 적절한 자유도 선정 개수를 결정하는 연구로 확장될 계획이며, 제안된 기법을 적용하여 대형 구

조물에서 등가 정하중에 의한 최적화를 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 및 서울대학교 비행체특화 연구센터의 연구비 지원에 의한 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- 강병수, 최우석, 박경진**(2000) 변위에 기초한 동하중에서 변환된 등가 정하중에서의 구조최적설계, *대한기계학회 논문집 A권*, 24(8), pp.1949~1957.
- 김현기, 조맹효**(2004) 주자유도 선정을 위한 2단계 축소 기법의 제안과 축소시스템 구성에 관한 연구, *한국전산구조공학회 춘계 학술대회 논문집*, 국민대학교, pp.87~94.
- 김현기, 조맹효**(2004) 임의의 하중하에서 축소시스템 구성을 통한 구조물의 동적 거동 연구, *한국전산구조공학회 추계 학술대회*, 목포 해양대학교, pp.19~26.
- 박수현, 김현기, 조맹효**(2006) 2단계 동적축소법을 적용한 구조물의 위상최적 설계, *한국전산구조공학회논문집*, 19(2), pp.213~219.
- 최우석, 강병수, 박경진**(1998) 모드해석에 기초한 동하중의 등가 정하중으로의 변환, *대한기계학회 논문집 A권*, 22(7), pp.1193~1204.
- Choi, W.S., Park, G.J.**,(1999) Transformation of dynamic loads into equivalent static loads based on modal analysis, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46, pp.29~43.
- Kim, H., Cho, M.**,(2006) Two-level scheme for selection of primary degrees of freedom and semi-analytic sensitivity based on the reduced system, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195/33-36, pp.4244~4268.