

비부합 결합을 이용한 구조물 변경법

Structural dynamics modification using non-matching substructure synthesis.

정의일*·박윤식**

Eui-Il Jung and Youn-Sik Park

Key Words : Substructure(부분구조물), Synthesis(합성), Non-matching(비부합), Eigenvale(고유치), structural dynamics modification(구조물 변경법)

ABSTRACT

For a large structure, substructure based SDM(structural dynamics modification) method is very effective to raise its dynamic characteristics. Dividing into smaller substructures has a major advantage in the aspect of computation especially for getting sensitivities, which are in the core of SDM process. But quite often, non-matching nodes problem occurs in the process of synthesizing substructures. The reason is that, in general, each substructure is modelled separately, then later combined together to form a entire structure model under interface constraint conditions. Without solving the non-matching nodes problem, the substructure based SDM can not be processed. In this work, virtual node concept is introduced. Lagrange multipliers are used to enforce the interface compatibility constraint. The governing equation of whole structure is derived using hybrid variational principle. The eigenvalues of whole structure are calculated using determinant search method. The number of degrees of freedom of the eigenvalue problem can be drastically reduced to just the number of interface degree of freedom. Thus, the eigenvalue sensitivities can be easily calculated, and further SDM can be efficiently performed. Some numerical problems are tested to show the effectiveness of handling non-matching nodes.

기호설명

N_s	부분 구조물의 개수
s	s번째 부분 구조물
Ω^s	s번째 부분 구조물의 영역
$\partial\Omega_s$	부분 구조물의 접점 영역
\bar{u}	변위
u	절점 변위
$\bar{\lambda}$	라그랑지 승수
λ	절점 라그랑지 승수
\bar{u}_b	경계 기준면 변위
u_b	경계 기준면의 절점 변위
N_u	변위 형상 함수
N_λ	라그랑지 승수의 형상 함수
N_b	경계 기준면의 형상 함수
C	연결 행렬
C_b	보간 행렬
D	동적 강성
H	주파수 응답함수
ω_r	r번째 고유 진동수

1. 서론

구조물의 동적 특성은 구조물의 고유 진동수와 고유 벡터 그리고 주파수 응답 함수 등을 지칭한다. 이런 동적 특성을 원하는 목적에 맞도록 변경하는 방법들이 많이 연구되어 왔다. 구조물을 변경하여 구조물의 진동 크기를 줄이기도 하며, 유한 요소 모델을 개선하기 위해 구조물을 변경하기도 한다. 구조물을 원하는 목적에 맞도록 변경하기 위해서는 전체 구조물의 동적 특성을 알아야 한다.

그러나, 크고 복잡한 구조물의 동적 특성을 계산하는 경우에 있어서 계산의 편리성과 효율성을 위해 전체 구조물을 작은 부분 구조물로 나누어, 부분 구조물의 해석을 통해 전체 구조물의 특성을 파악하는 방법이 연구 되어져 왔다. 전체 구조물의 자유도는 상당히 커서 전체 구조물의 동적 특성을 계산하기에는 계산 성능에 많은 부하가 작용할 수 있다. 그 대안으로 전체 구조물을 작은 부분 구조물로 나누어, 각각의 부분 구조물의 동적 특성 해석을 통해서 전체 구조물의 특성을 파악하는 것이 계산 성능에 부하를 적게 줄 수 있으며, 전체 구조물 중 일부분이 변경되었을 경우 전체 구조물을 다시 해석할 필요가 없이, 변경된 부분 구조물만 재해석을 수행함으로써 전체 구조물의 특성을 파악할 수 있는 장점이 있다.

위와 같은 장점으로 인해 크고 복잡한 구조물을 다루는 경우에 있어서 전체 구조물을 크기가 작은

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과
E-mail : junguiil@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3060, Fax : (042) 869-8220

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

몇 개의 부분 구조물로 나누어 해석하고, 부분 구조물의 해석을 통해 전체 구조물의 특성을 파악하는 방법을 사용해 왔다. 그러나 각 부분 구조물을 서로 다른 엔지니어가, 그리고 서로 다른 환경에서 만들게 되며 부분 구조물끼리 서로 절점이 서로 맞지 않는 일이 발생할 수 있다. 서로 다른 엔지니어가 유한 요소 모델법으로 부분 구조물에 대한 해석적 모델을 만드는 경우, 만들어진 모델들 간에 절점(node)이 서로 맞지 않는 경우가 일반적이다. 또는 어떤 부분 구조물은 실험에서 구한 모델을 사용하고, 다른 부분 구조물은 유한 요소 모델링 법으로 모델을 만드는 경우에도 모델들 간에 서로 측정점과 절점이 일치하지 않는 경우도 발생하기 쉽다. 물론 위의 문제들을 해결하는 방법으로 사전에 절점들의 위치를 조정하여 일치시킬 수가 있다. 본 연구에서는 서로 절점의 위치가 맞지 않는 부분 구조물들의 합성을 다루고자 한다. 이 합성을 통해서 전체 구조물의 동특성을 파악하고, 구조물 동특성 변경법에 적용하여 변경법의 적용 범위를 넓히고자 한다.

최근에 비부합 문제에 대한 연구가 발표되고 있다. Farhat⁽¹⁾는 부분 구조물끼리 경계면의 구속 조건을 라그랑지 승수를 사용하여 처리하기도 했으며, Park^(2,3)는 국부 라그랑지 승수를 사용하기도 하였다.

또한, 실제 구조물을 해석하기 위해 구조물을 유한 요소 모델링 법으로 모델을 만드는 경우에 있어서, 정확치 않은 구조물의 치수나 물성치 또는 부정확한 경계 조건의 등으로 실제 구조물과 유한 요소법에 의해 만들어진 모델과는 서로 불일치되는 점이 있다. 이를 위해 유한 요소 모델 개선을 수행해야 하는 부가적인 번거로움이 있다. 그러나 실제 구조물에 대한 모델을 생성할 때 실험에서 구한 데이터를 사용할 경우 이런 노력과 시간을 절약할 수 있는 장점이 있다. 이를 위해 실험에서 구한 주파수 응답함수를 구조물의 모델로 사용할 수 있도록 하였다. 그리하여 복잡한 구조물도 유한요소 모델이 필요없이 주파수 응답함수를 실험으로 구함으로써 모델로 사용할 수 있도록 하였다.

2. 지배 방정식

그림 1 과 같이 만약 3 개의 부분 구조물로 이루어진 구조물이 있다고 가정하자. 전체 구조물은 3 개의 부분 구조물로부터 합성할 수 있다.

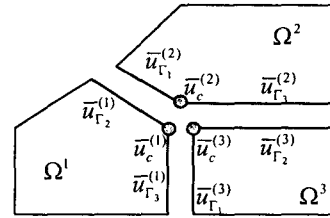


Figure 1: Structure of Three Substructure Domain

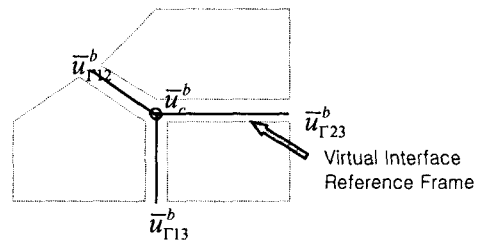


Figure 2: Virtual Interface Frame

합성을 하기 위해서는 부분 구조물의 경계 변위를 서로 접하는 부분 구조물의 변위와 같도록 하여야 한다. 그림 1 과 같은 경우에 경계면의 변위 구속 조건식은 다음과 같다.

$$\bar{u}_{r_2}^{(1)} = \bar{u}_{r_1}^{(2)}, \quad \bar{u}_{r_3}^{(1)} = \bar{u}_{r_1}^{(3)}, \quad \bar{u}_{r_3}^{(2)} = \bar{u}_{r_2}^{(3)} \quad (1a, 1b, 1c)$$

$$\bar{u}_c^{(1)} = \bar{u}_c^{(2)}, \quad \bar{u}_c^{(2)} = \bar{u}_c^{(3)}, \quad \bar{u}_c^{(3)} = \bar{u}_c^{(1)} \quad (2a, 2b, 2c)$$

여기서 $\bar{u}_{r_i}^{(s)}$ 는 s 번째 부분 구조물의 i 번째 부분 구조물과 접하는 위치의 경계 변위를 나타낸다. 또한 첨자 c 는 교차점, 즉 두 개 이상의 부분 구조물과 접하는 점을 나타낸다.

전체 구조물을 만들기 위한 위의 조건식은 과도한 조건식이다. 식 (1c)와 (2c)는 전체 구조물을 구성하기 위해 불필요한 식이기 때문이다. 이러한 과도 조건식을 피하기 위해서 그림 2 와 같이 가상의 경계 기준면을 만들어 이 가상 기준면에 부분 구조물의 경계 변위를 구속시킨다. 이런 경우 전체 구조물이 되기 위한 구속 조건식은 아래와 같이 된다.

$$\bar{u}_{r_2}^{(1)} = \bar{u}_{r_{12}}^b, \quad \bar{u}_{r_3}^{(1)} = \bar{u}_{r_{13}}^b, \quad \bar{u}_c^{(1)} = \bar{u}_c^b \quad (3a, 3b, 3c)$$

$$\bar{u}_{r_1}^{(2)} = \bar{u}_{r_{12}}^b, \quad \bar{u}_{r_3}^{(2)} = \bar{u}_{r_{23}}^b, \quad \bar{u}_c^{(2)} = \bar{u}_c^b \quad (4a, 4b, 4c)$$

$$\bar{u}_{r_1}^{(3)} = \bar{u}_{r_{13}}^b, \quad \bar{u}_{r_2}^{(3)} = \bar{u}_{r_{23}}^b, \quad \bar{u}_c^{(3)} = \bar{u}_c^b \quad (5a, 5b, 5c)$$

여기서 \bar{u}_{ij}^b 는 i 번째 부분 구조물과 j 번째 부분 구조물과의 경계에 해당하는 경계 기준면의 변위를 나타낸다. 식(3)은 첫번째 부분 구조물의 경계 변위가 경계 기준면의 변위와 같아야 됨을 보이고 있다. 식(4)과 식(5)도 각각 접하는 경계 기준면과 변위가 같아야 됨을 보이고 있다. 합성된 전체 구조물의 지배 방정식을 세우기 위해서 위와 같이 서로 접하는 변위들간의 구속 조건을 라그랑지 승수를 사용하여 처리하여 해밀턴 정리(Hamilton's Principle)에 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\delta \int_t^t (T - V + W_{nc} + \Pi_\lambda) dt = 0 \quad (6)$$

여기서

$$\Pi_\lambda = \sum_{s=1}^{s=N_s} \int_{\Gamma^{(s)}} \bar{\lambda}^{(s)T} (\bar{u}^{(s)} - \bar{u}^b) dS \quad (7)$$

을 나타낸다. N_s 는 부분 구조물의 개수를 나타내며, \bar{u}^b 는 가상의 경계 기준면을 나타낸다. $\bar{\lambda}^{(s)}$ 는 라그랑지 승수를 나타내며, 물리적으로는 전체 구조물의 평형을 유지하기 위해 부분 구조물간에 작용하는 내력에 해당한다.

변위를 적당한 형상 함수로 이산화하면 다음과 같이 된다.

$$\bar{u}^{(s)} = N_u^{(s)} u^{(s)} \quad (8)$$

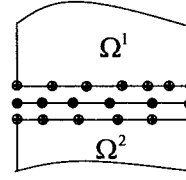
$$\bar{\lambda}^{(s)} = N_\lambda^{(s)} \lambda^{(s)} \quad (9)$$

$$\bar{u}^b = N_b^{(s)} u_b^{(s)} \quad (10)$$

여기서 $N_u^{(s)}$, $N_\lambda^{(s)}$, $N_b^{(s)}$ 은 각각 부분 구조물의 변위 형상 함수, 라그랑지 승수의 형상 함수, 경계 기준면의 형상 함수이다. $u^{(s)}$, $\lambda^{(s)}$, $u_b^{(s)}$ 는 각각 부분 구조물, 라그랑지 승수, 경계 기준면의 절점 변위를 나타낸다.

위의 이산화 과정을 통해서 식(6)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta \int_t^t \sum_{s=1}^{s=N_s} \left(\frac{1}{2} \dot{u}^{(s)T} M^{(s)} \dot{u}^{(s)} - \frac{1}{2} u^{(s)T} K^{(s)} u^{(s)} + f^{(s)T} u^{(s)} + \lambda^{(s)T} C^{(s)} u^{(s)} - \lambda^{(s)T} C_b^{(s)} u_b^{(s)} \right) dt = 0 \quad (11)$$



- Interface reference frame
- Substructure interface
- + Lagrange multiplier
- ⊙ Collocated

Figure 3: Non-matched Interface Nodes

여기서

$$C^{(s)} = \int_{\Omega^s} N_\lambda^T N_u dS \quad (12)$$

$$C_b^{(s)} = \int_{\Omega_b^{(s)}} N_\lambda^T N_b dS \quad (13)$$

위 식에서 $M^{(s)}$, $K^{(s)}$, $f^{(s)}$, $C^{(s)}$, $C_b^{(s)}$ 는 각각 s 번째 부분 구조물의 질량 행렬, 강성 행렬, 외력, 연결 행렬, 보간 행렬을 나타낸다. 만약 그림 3 과 같이 라그랑지 승수의 절점이 부분 구조물의 경계 절점과 일치하는 경우는 연결 행렬 $C^{(s)}$ 는 0 과 1 로 이루어지는 Boolean 행렬이 된다. 1 은 부분 구조물의 절점이 다른 구조물과 접하는 경계에 있는 절점임을 나타낸다.

여기서 $C_b^{(s)}$ 을 보간 행렬이라 부른다. 보간 행렬은 경계 기준면을 근사화함으로써 계산되는 양인데, 경계 접점에서 경계 기준 형상 함수를 계산함으로써 얻어진다.

그 다음으로 식(11)로부터 적분항의 미소 변화량을 영으로 취하면 다음과 같이 이산화된 지배 방정식을 세울 수 있다.

$$\delta u^{(s)} : M^{(s)} \dot{u}^{(s)} + K^{(s)} u^{(s)} = f^{(s)} + C^{(s)T} \lambda^{(s)} \quad (14)$$

$s = 1, \dots, N_s$

$$\delta \lambda^{(s)} : C^{(s)} u^{(s)} - C_b^{(s)} u_b^{(s)} = 0 \quad (15)$$

$s = 1, \dots, N_s$

$$\delta u_b : \sum_{s=1}^{s=N_s} (C_b^{(s)} B_b^{(s)})^T \lambda^{(s)} = 0 \quad (16)$$

여기서

$$u_b^{(s)} = B_b^{(s)} u_b^{(s)}$$

$B_b^{(s)}$ 는 Boolean 행렬로써 s 번째 부분 구조물의 경계에 해당하는 경계 기준 변위 $u_b^{(s)}$ 의 전체

경계 기준 변위 u_b 에 대해 차지하는 부분을 나타낸다. 위의 관계식 (14~16)을 연립해서 식을 만들면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \dot{\lambda} \\ \ddot{u}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -C^T & 0 \\ -C & 0 & C_b B_b \\ 0 & (C_b B_b)^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \lambda \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 M , K 와 C 는 전체 구조물의 질량 행렬, 강성 행렬, 연결 행렬로써 각 부분 구조물의 행렬 값이 대각 성분에 위치한다. $C_b B_b$ 는 $C_b^{(i)} B_b^{(i)}$ 을 열 방향으로 쌓아서 만들 수 있다.

3. 합성된 구조물의 고유진동수

만약 주파수 w 로 가진되는 조화 가진의 경우에 식(17)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} D & -C^T & 0 \\ -C & 0 & C_b B_b \\ 0 & (C_b B_b)^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \lambda \\ u_b \end{bmatrix} = B(w) \begin{bmatrix} u \\ \lambda \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서

$D(w) = (K - w^2 M) = H^{-1}(w)$ 는 동적 강성을 말한다. 합성된 구조물의 고유 진동수가, 부분 구조물 자체의 고유 진동수와 일치하지 않는다고 가정한다면, 위의 식 (24)은 좀더 간단한 형태로 만들 수 있다. 식 (24)의 첫번째 행으로부터

$$D(w)u = (f + C^T \lambda) \quad (25)$$

동적 강성의 역이 존재하므로 역행렬을 취하면

$$u = H(w)(f + C^T \lambda) \quad (26)$$

위 식 (26)을 식 (24)의 두 번째 행에 넣으면

$$-H_{bb} \lambda + C_b B_b u_b = CHf \quad (27)$$

여기서 밑 첨자 bb 는 구조물의 경계 자유도를 이야기 하며, $H_{bb}(w) = CD^{-1}C^T = CHC^T$ 는 부분 구조물의 경계 자유도에 대한 주파수 응답 함수를 대각 성분으로 하는 대각 행렬이다. 식 (24)와 식 (27)로부터 줄어든 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} -H_{bb} & C_b B_b \\ (C_b B_b)^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CHf \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

합성된 구조물의 자유 진동에 대한 고유 진동수 ω_r 는 외력 f 을 영으로 했을 때, 위 식의 행렬식이 영이 되어야 함을 이용한다.

$$\det(H_{bb}) \det((C_b B_b)^T H_{bb}^{-1}(w_r) C_b B_b) = 0 \quad (29)$$

그리고, 합성된 구조물의 고유 진동수가, 부분 구조물 자체의 고유 진동수와 일치하지 않는다고 가정했으므로, $\det(H_{bb}) \neq 0$ 이라고 말할 수 있으며, 위의 고유치 탐색법은 다음과 같이 줄어들 수 있다.

$$\det G(w_r) = \det((C_b B_b)^T H_{bb}^{-1}(w_r) C_b B_b) = 0 \quad (30)$$

합성된 구조물의 고유 진동수를 알아내기 위해서는 부분 구조물의 경계 자유도에서 주파수 응답 함수를 측정함으로써 전체 구조물의 고유 진동수를 구할 수 있다.

전체 구조물의 고유 벡터는 다음과 같이 구할 수 있다. 행렬식 탐색법으로 구한 전체 구조물의 고유 진동수를 ω_r 라 했을 때, 식(28)의 두 번째 행으로부터 u_b 는 다음식을 만족해야 한다.

$$(C_b B_b)^T H_{bb}^{-1}(w_r) C_b B_b u_b = G(w_r) u_b = 0 \quad (31)$$

경계 변위 u_b 는 행렬식 탐색에 사용된 $G(\omega_r)$ 의 영공간이 된다. 또한, 식 (28)의 첫번째 행으로부터 라그랑지 승수는 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda = H_{bb}^{-1}(\omega_r) C_b B_b u_b \quad (32)$$

전체 구조물의 고유 벡터는 식(26)으로부터 구할 수 있다.

$$u = H_b(\omega_r)\lambda = \begin{bmatrix} H_{bb}(\omega_r) \\ H_{bb}(\omega_r) \end{bmatrix} \lambda \quad (33)$$

여기서 H_{bb} 는 부분 구조물이 경계에 접하는 점에서 가진을 하고 부분 구조물의 내부의 점에서 측정된 주파수 응답함수이고, H_{bb} 는 경계에 접하는 점에서 가진하고 그 점에서 측정된 주파수 응답함수이다.

4. 비부합 절점을 갖는 구조물 변경법

4.1 고유치 민감도

위에 기술한 바와 같이 합성된 전체 구조물의 고유치는 실험에서 구한 부분 구조물의 경계 주파수 응답함수로부터 구할 수 있다. 그러므로 유한 요소 법에서 구한 모델을 이용하는 방법에 비해서 모델 개선과 같은 과정이 필요 없는 장점을 가지고 있다.

구조물의 고유치를 변경하기 위해서 디자인 변수에 대한 고유치의 민감도를 계산할 필요가 있다. 위의 지배 방정식 식(28)로부터 r 번째 고유 진동수 ω_r 에 대해, 식(28)에 $[\lambda^T \ u_b^T]$ 을 앞 뒤로 곱하면 다음과 같은 스칼라 함수를 얻을 수 있다.

$$-\lambda^T H_{bb}(\omega_r)\lambda + 2\lambda^T (C_b B_b) u_b = 0 \quad (34)$$

위식을 디자인 변수 d_i 에 대해 미분을 취하면

$$-\lambda^T \frac{dH_{bb}(\omega_r)}{dd_i} \lambda + 2\lambda^T \frac{dC_b B_b}{dd_i} u_b = 0 \quad (35)$$

그리고 디자인 변수는 고유 진동수와 주파수 응답 함수에 영향을 미치므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dH_{bb}(\omega_r)}{dd_i} = \frac{\partial H_{bb}(\omega_r)}{\partial d_i} + \frac{\partial H_{bb}(\omega_r)}{\partial \omega_r} \frac{\partial \omega_r}{\partial d_i} \quad (36)$$

그러므로 위식을 (35)을 식(36)에 넣으면 다음과 같은 고유치에 대한 디자인 변수의 민감도 식을 구할 수 있다.

$$\frac{d\omega_r}{dd_i} = \frac{-\lambda^T \frac{\partial H_{bb}(\omega_r)}{\partial d_i} \lambda + 2\lambda^T \frac{dC_b B_b}{dd_i} u_b}{\lambda^T \frac{\partial H_{bb}(\omega_r)}{\partial \omega_r^2} \lambda} \quad (37)$$

4.2 구조물 변경법 절차

본 연구에서는 디자인 변수에 대한 고유치 민감도 식을 이용하여 구조물의 고유 진동수를 원하는 값으로 변경하는 것에 목적을 두었다. 위에서 구한 민감도 식을 사용하여 가장 민감한 방향을 찾는데 사용한다. 그러므로 현재의 디자인 값에 대해 부 최적 값을 구할 수 있다. 디자인 변수에 대한 고유치의 비선형성으로 인해 최적 값은 반복적인 방법을 통해서 구할 수 있다. 구조물 변경 법에 사용되는 절차를 간단히 서술하면 다음과 같다.

절차 1: 선택된 경계 자유도에서 주파수 응답 함수를 측정한다. 그리고 디자인 변수의 초기값 d 을 설정한다.

절차 2: 현재의 초기값에서 식(30)을 이용해 행렬식 탐색법으로 구조물의 고유 진동수 ω_r 을 구하고, 식(32)로부터 라그랑지 승수 λ 를 구한다.

절차 3: 식(37)로부터 고유치 민감도를 계산하여 가장 기울기가 큰 방향을 찾는다.

절차 4: 최적 값인지를 확인하고, 만족하지 않으면 디자인 변수를 좀더 향상된 값에서 최적 절차를 수행한다.

4.3 수치적 시뮬레이션

그림 4 와 같이 한 쪽이 고정된 평판에 대해 시뮬레이션 해 보았다. 넓이 600mm* 450mm, 두께 2mm 의 치수를 갖는 평판 위에 17 개의 빔 부분 구조물이 평판의 고유 진동수를 변경하기 위해 부착된다. 이 평판은 유한 요소법을 사용하여 48 개의 판 요소로 나누어 질량 행렬과 강성 행렬을 만들었다. 판 요소는 절점 당 한 개의 병진 자유도와 두개의 회전 자유도를 갖는다. 이 평판 위에 부착되는 빔은 길이 150mm, 높이 10mm 의 치수를 가지며, 한 개의 빔은 유한 요소법으로 3 개의 빔요소로 모델링했으며, 그림과 같이 빔과 평판의 절점이 서로 맞지 않게 접하고 있다. 각 빔의 폭을 디자인 변수(초기값 5mm)로 하였다. 이 예제의 목적은 이 평판의 고유 진동수를 29.4rad/sec 에서 40rad/sec 로 올리는 것으로 하였다. 최적 과정을 수행 할 때 17 개의 디자인 변수에 대한 상한선을 고려하여 20mm 가 넘지 않도록 하였으며, 총 질량 1kg 이하에서 최적값을 구해 보았다. 최적 문제는 다음과 같이 쓸 수 있다.

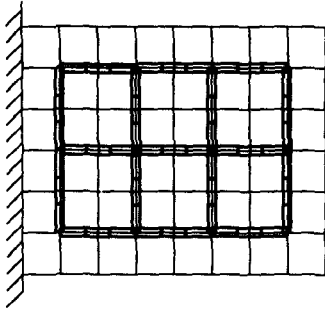


Figure 4: Layout of plate and beam stiffener

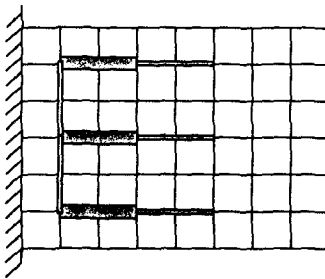


Figure 5: Result of optimization

$$\text{objective: } \min \left(\frac{\omega_1}{\omega_{1ref}} \right)$$

$$\text{subject to: } m = \sum_{j=1}^{17} \rho_j L_j H_j \leq M_{\max} = 1kg$$

$$0 \leq d_j \leq d_{\max} = 20mm \quad j=1, \dots, 17$$

본 연구에서 로젠(Rosen)의 기울기 투영방법(Gradient Projection Method)을 사용하여 조건이 있는 최적 문제를 수행하였다. 빔 폭에 대한 최적값 결과는 그림 5 와 같다.

5. 결론

본 연구에서는 부분 구조물 합성을 기초로 해서 구조물 변경법을 수행했다. 부분 구조물을 합성시 발생하기 쉬운 비부합 절점의 문제를 가상의 경계 기준면을 접하는 영역에 설치함으로써 해결했다. 또한, 유한 요소 모델 기초가 아니라 실험에서 측정 가능한 주파수 응답 함수 기초이므로 모델 개선과 같은 부가적인 노력이 필요 없다. 또한 구조물을 변경하기 위해 고유치를 계산할 때 경계 절점에서만 주파수 응답함수를 구하면 되므로 계산상의 효율성을 높일 수 있었다. 비부합 절

합을 이용하여 평판의 고유 진동수를 높이기 위해 빔을 부착함으로써 구조물 변경을 시뮬레이션 해 보았다.

후 기

본 연구는 국가지정연구사업 "진동 저감을 위한 동특성 변경기술(M1-0001-00-0139)"의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) C. Farhat and M. Geradin, "On a Component Mode Synthesis Method and its Application to Incompatible Substructures", *Computer & Structure* Vol. 51, No.5, pp. 459-473, 1994.
- (2) K. C. Park, C. A. Felippa, U. A. Gumaste, "A Localized Version of the Method of Lagrange Multipliers and its Applications", *Computational Mechanics*, 24, pp. 476-490, 2000.
- (3) K. C. Park and Carlos A. Felippa, "A Variational Principle for The Formulation of Partitioned Structural Systems", *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 47, pp. 395-418, 2000.
- (4) 정의일, 박윤식, "On a substructure synthesis having non-matching nodes", 한국 소음 진동 공학회 2001년도 추계 학술 대회 논문집, pp. 155~160.