

부분구조합성법을 이용한 판의 모우드해석

정재훈*, 지태한*, 박영필**

Modal Analysis of Plate by Substructure Synthesis Method

Jae-Hoon Jung*, Tae-Han Jee*, Young-Pil Park**

ABSTRACT

Various substructure synthesis methods, such as component mode synthesis, building block analysis and reduced impedance method, are studied for the determination of vibration characteristics of plate problems. Comparisons are made for each methods in terms of accuracy and computational efficiency. Following conclusions are made from the results of computer simulations and experiments. i) The computation time of component mode synthesis is much shorter than that of whole structure analysis. The natural frequencies of lower modes obtained from component mode synthesis are almost same as those obtained from whole structure analysis, but in higher modes the differences between those two methods are increased. ii) The transfer function obtained from building block analysis is same as that obtained from the finite element method. iii) Same transfer functions can be obtained by the reduced impedance method. The computation time of reduced impedance method is shorter than that of general finite element method, but for the solutions in broad frequency band it requires long calculation time.

Key-Words : Substructure Synthesis Method(부분구조합성법), Component Mode Synthesis(구분모우드합성법), Building Block Analysis(빌딩블럭법), Reduced Impedance Method(축소임피던스법), Transfer Function(전달함수)

1. 서론

기계구조물의 동특성을 해석하기 위하여 주로 유한요소법에 의한 수치해석방법과 진동실험에 의한 방법이

사용되어지고 있지만, 대부분의 실제 기계구조물은 여러개의 부분구조물들이 서로 결합되어진 복잡한 것이기 때문에 유한요소법이나 진동실험에 의하여 전체 기계구조물의 동특성을 해석하는 것은 쉽지 않다. 근래에 들

* 연세대학교 대학원

** 연세대학교 기계공학과

어 전자계산기의 급속한 발달에 의하여 유한요소법에 의한 진동문제의 해석이 용이하게 되었지만 기계구조물이 복잡한 경우에는 전자계산기의 기억용량, 계산시간 및 비용이 매우 많이 들게 되고, 진동실험에 의한 방법도 전체 계가 복잡하거나 대형구조물일 경우 결합부등에 의한 비선형성이 커지고, 다입력-다출력으로 실험을 행해야 되므로 실험이 곤란한 경우가 발생하게 된다. 이러한 문제들의 해결을 위하여 복잡한 전체 기계구조물(이하 전체라 한다)을 수치해석이 가능한 정도로 몇개의 부분구조(이하 분계라 한다)로 나누어 유한요소법 등의 수치해석방법을 적용한 후 다시 합성하는 방법이 제시되었으며, 실험에 있어서도 전체를 실험이 가능한 몇개의 분계로 나누어 따로 실험을 하여 각각의 분계에 대한 동특성을 파악한 후 다시 합성하는 방법들이 제시되었다.

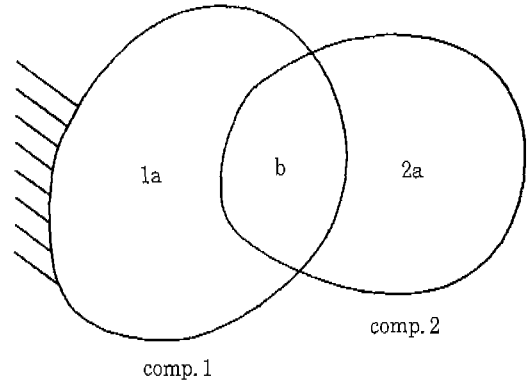
長松昭男등은 구분모우드합성법에 의하여 고유진동수와 고유모우드를 구하는 방법을 보이고 분계의 분할방법과 채용모우드수의 영향 및 강제진동에 대하여 연구하였으며^{[1],[2]}, 감쇠가 작은 경우에 대하여 빌딩블럭법에 의한 진동해석을 연구하였고^[3], 축소임피던스법에 의한 강제진동의 해석에 대하여 연구하였다^[4]. 또한, 박영필등은 구분모우드합성법을 이용한 연구를 수행하였다^[5].

이 방법들을 일반적으로 부분구조합성법이라 하며 본 논문에서는 판구조물을 모델로 하여 구분모우드합성법(Component Mode Synthesis:CMS)과 빌딩블럭법(Building Block Analysis:BBA) 그리고 축소임피던스법(Reduced Impedance Method:RIM)에 대하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 계산의 정확도와 계산시간 등을 비교하였다. 또, 실험과 FEM을 결합할 때 회전자유도의 처리때문에 6자유도결합(3개의 병진, 3개의 회전)에 대한 연구결과가 거의 없으므로, 빌딩블럭법에 대하여 6자유도결합의 기초단계로 1자유도결합에 대하여 연구하였다.

2. 이 론

2.1 구분모우드합성법

복잡한 기계구조물을 유한요소법에 의하여 정식화가 가능한 정도로 몇개의 분계로 나눈다. 분계의 분할방법에 있어서 분계의 형태나 갯수는 전혀 제한이 없으며, Fig. 1에서와 같이 구조물을 2개의 분계로 구성된 계로 생각할 수 있다.



1a:Interior region of the first component
2a:Interior region of the second component
b:Interior region

Fig. 1 Structural system composed of 2 substructures (I)

분계1과 분계2에 관한 자유진동의 운동방정식을 내부영역과 결합영역으로 나누어 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_{aa}^{(1)} & M_{ab}^{(1)} \\ M_{ba}^{(1)} & M_{bb}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_{1a} \\ \ddot{\delta}_{1b} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa}^{(1)} & K_{ab}^{(1)} \\ K_{ba}^{(1)} & K_{bb}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{1a} \\ \delta_{1b} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} O \\ F \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} M_{aa}^{(2)} & M_{ab}^{(2)} \\ M_{ba}^{(2)} & M_{bb}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_{2a} \\ \ddot{\delta}_{2b} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa}^{(2)} & K_{ab}^{(2)} \\ K_{ba}^{(2)} & K_{bb}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{2a} \\ \delta_{2b} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} O \\ -F \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, F 는 결합영역에 작용하는 내력이며, 상첨자 (1)과 (2)는 각각 분계1과 2를 나타낸다. 전체의 자유도를 결합영역의 변위만의 자유도로 축소하기 위하여, 관성항이 강성항에 비하여 무시할 수 있다고 가정하여, Guyan의 정축소^[6]를 적용한다.

분계1의 경우, 식 (1)의 관성항을 생략하고 Guyan의 정축소를 적용하면 정축소행렬 $[T_1]$ 을 구할 수 있으며, 이를 사용하면 전체의 변위를 결합영역의 변위로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \delta_{1a} \\ \delta_{1b} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \\ I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{1b} \end{Bmatrix}, [T_1] = -[K_{aa}^{(1)}]^{-1}[K_{ab}^{(1)}] \quad (3)$$

식(3)을 식(1)에 대입하고 앞에 $[T_1^T \ I]$ 를 곱하면 질량행렬과 강성행렬을 축소할 수 있다. 이를 각각 $[\bar{M}_1]$, $[\bar{K}_1]$ 라 나타내며, 위와 같이 분계2에 대하여 풀면 정축소행렬 $[T_2]$, 축소된 질량행렬 $[\bar{M}_2]$ 과 강성행렬 $[\bar{K}_2]$ 를 얻을 수 있다. 그러므로 각 분계에 대한 운동방정식은 결합영역의 자유도만으로 표시할 수 있다. 또 결합영역에서는 각 분계의 변위가 $\{\delta_b\} = \{\delta_{1b}\} = \{\delta_{2b}\}$ 이므로 $\{\delta_b\} = \{\delta_{bo}\}e^{i\omega t}$ 를 대입하면 다음과 같은 고유치 문제를 얻을 수 있다.

$$([\bar{K}_1 + \bar{K}_2] - \omega^2[\bar{M}_1 + \bar{M}_2])\{\delta_{bo}\} = \{0\} \quad (4)$$

식(4)에 의해 1차에서 l 차까지의 고유모우드를 구하고, 이들의 고유모우드로 모우드행렬 $[\phi_b]$ 를 구성하면 결합영역의 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$\{\delta_b\} = [\phi_b]\{\zeta_b\} \quad (5)$$

다음으로, 분계1에 대해서 $\{\delta_{1a}\} = \{\delta_{1ao}\}e^{i\omega t}$ 를 고려하면, 결합영역 b 를 고정하여 내부영역 $1a$ 만으로 관계된 질량행렬, 강성행렬에 대해서 다음과 같은 고유치 문제를 얻는다.

$$([K_{aa}^{(1)}] - \omega^2[M_{aa}^{(1)}])\{\delta_{1ao}\} = \{0\} \quad (6)$$

식(6)에 의해 1차에서 m 차까지의 고유모우드를 구하고, 그들에 의해 모우드행렬 $[\phi_{1a}]$ 를 구성한다. 분계1의 내부영역의 변위는 결합영역의 변위에 대한 내부영역의 변위와 경계를 고정했을 때의 내부영역의 변위의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\delta_{1a}\} = [T_1][\phi_b]\{\zeta_b\} + [\phi_{1a}]\{\zeta_1\} = [T_1 \ \phi_b \ \phi_{1a}]\begin{Bmatrix} \zeta_b \\ \zeta_1 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

분계2에 대하여도 $\{\delta_{2a}\} = \{\delta_{2ao}\}e^{i\omega t}$ 를 고려하면, 분계1과 같이 내부영역 $2a$ 만으로 관계된 고유치문제를 해석하고, 1차에서 n 차까지의 고유모우드를 구하여 모우드행렬 $[\phi_{2a}]$ 를 구성한다. 분계2의 내부영역의 변위는 분계1의 경우와 같이 다음과 같이 된다.

$$\{\delta_{2a}\} = [T_2][\phi_b]\{\zeta_b\} + [\phi_{2a}]\{\zeta_2\} = [T_2 \ \phi_b \ \phi_{2a}]\begin{Bmatrix} \zeta_b \\ \zeta_2 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

식(5), (7), (8)에 의한 전체의 변위는 다음과 같이 된다.

$$\begin{Bmatrix} \delta_b \\ \delta_{1a} \\ \delta_{2a} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_b & 0 & 0 \\ T_1\phi_b & \phi_{1a} & 0 \\ T_2\phi_b & 0 & \phi_{2a} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \zeta_b \\ \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{Bmatrix} = [A]\{\zeta\} \quad (9)$$

식(9)를 전체에 대한 물리좌표상의 운동방정식에 대입하고 각 항의 앞에 $[A]^T$ 를 곱하면 다음식을 얻는다.

$$[\hat{M}]\ddot{\zeta} + [\hat{K}]\zeta = \{0\} \quad (10)$$

$$[\hat{M}] = [A]^T \begin{bmatrix} M_{bb}^{(1)} + M_{bb}^{(2)} & M_{ba}^{(1)} & M_{ba}^{(2)} \\ M_{ab}^{(1)} & M_{aa}^{(1)} & 0 \\ M_{ab}^{(2)} & 0 & M_{aa}^{(2)} \end{bmatrix} [A]$$

$$[\hat{K}] = [A]^T \begin{bmatrix} K_{bb}^{(1)} + K_{bb}^{(2)} & K_{ba}^{(1)} & K_{ba}^{(2)} \\ K_{ab}^{(1)} & K_{aa}^{(1)} & 0 \\ K_{ab}^{(2)} & 0 & K_{aa}^{(2)} \end{bmatrix} [A]$$

전체의 운동방정식의 자유도의 크기는 결합영역의 채용고유모우드수 l 과 분계1의 내부영역의 채용고유모우드수 m 과 분계2의 내부영역의 채용고유모우드수 n 의 합, 즉 $l+m+n$ 으로 된다.

식(10)을 고유치해석하면 전체에 대한 고유진동수를 얻을 수 있으며, 여기서 얻은 고유모우드 $\{\zeta\}$ 를 식(9)에 대입하면 전체의 물리좌표에서의 고유모우드를 구할 수 있다.

2.2 빌딩블럭법

빌딩블럭법은 유한요소법이나 실험에 의해서 각 분계의 모우드특성을 구하고, 이것을 사용하여 각 분계의 전달함수를 구성한 후, 이를 합성하여 전체의 동특성을 얻을 수 있는 방법이다. 이때 결합부의 내력과 변위를 구별하지 않고 미지수로 취급한다.

Fig. 2와 같이 전체를 2개의 분계로 분할하였을 때, 점1은 가진부, 점2와 점3은 결합부, 점4는 응답부를 나타낸다.

먼저 분계1에 대하여 점1에 작용하는 여진력을 F_1 , 변위를 x_1 라 하고, 결합부 점2에서 분계2에 의한 분계1에의 작용력을 F_2 , 점2의 변위를 x_2 라 하면 다음과 같은 식이 성립한다.

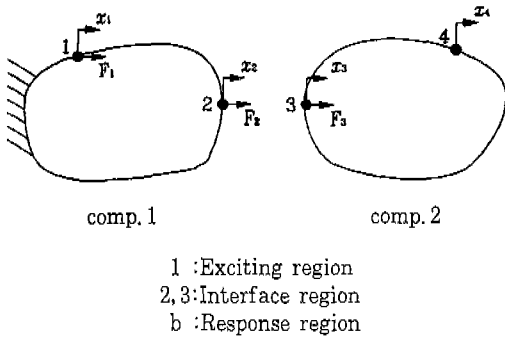


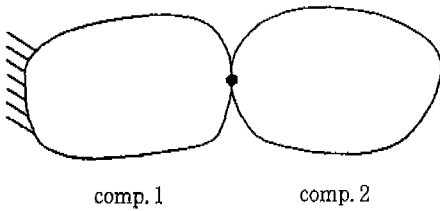
Fig. 2 Structural system composed of 2 substructures (I)

$$\begin{aligned} x_1 &= G_{11}F_1 + G_{12}F_2 \\ x_2 &= G_{21}F_1 + G_{22}F_2 \end{aligned} \quad (11)$$

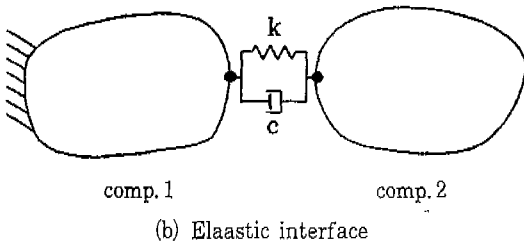
한편, 결합부 점3에서 분계1에 의한 분계2에의 작용력을 F_3 , 점3의 변위를 x_3 , 응답부 점4의 변위를 x_4 라 하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} x_3 &= G_{33}F_3 \\ x_4 &= G_{43}F_3 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, G_{ab} 는 점a와 점b사이의 전달함수를 나타낸



(a) Rigid interface



(b) Elastic interface

Fig. 3 Interfacing method of substructures

다.

Fig. 3(a)와 같이 결합부2와 3이 강결합이면 다음의 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} x_2 &= x_3 \\ F_2 + F_3 &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)을 이용하여 식(11)과 식(12)를 다음과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -G_{12} \\ 0 & 1 & 0 & -G_{22} \\ 0 & 1 & 0 & G_{33} \\ 0 & 0 & 1 & G_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_1 \quad (14)$$

식(14)를 정리하면 전계의 전달함수 G_{14} 를 각 분계에 대한 전달함수들의 항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{14} = \frac{x_4}{F_1} = \frac{G_{43} \cdot G_{12}}{G_{22} + G_{33}} \quad (15)$$

또한 Fig. 3(b)와 같이 결합부2와 3이 탄성결합인 경우는 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} (k + j\omega c)(x_3 - x_2) &= F_2 \\ F_2 + F_3 &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

식(16)을 식(11)과 식(12)에 대입하면 강결합의 경우와 마찬가지로 다음과 같이 전계의 전달함수를 각 분계에 대한 전달함수의 항으로 나타낼 수 있다.

$$G_{14} = \frac{x_4}{F_1} = \frac{G_{43} \cdot G_{12}}{G_{22} + G_{33} + \frac{1}{k + j\omega c}} \quad (17)$$

2.3 축소임피던스법

Fig. 4와 같이 분할된 구조물에서 각 분계에 인접하고 다른 분계와 결합하는 영역을 영역b라 한다. 또한, 외부로부터의 강제진동이 작용하는 부분과, 그것에 대하여 응답을 구하고자 하는 부분은 모두 영역b에 포함시킨다. 각 분계로부터 영역b를 제외한 부분을 영역a라 한다. 하나의 분계에 대해 유한요소법등을 적용하여 운동방정식을 작성하면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F\} \quad (18)$$

여기서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 나타내며 $\{F\}$ 및 $\{\delta\}$ 는 본계의 변위 및 작용력을 나타내는 벡터이다. $\{F\} = \{F_o\}e^{j\omega t}$, $\{\delta\} = \{\delta_o\}e^{j\omega t}$ 를 대입하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$[A]\{\delta_o\} = \{F_o\}, ([A] = [K] + j\omega[C] - \omega^2[M]) \quad (19)$$

식(19)를 영역a와 영역b로 나누어 표시하면, 영역a에서는 힘이 작용하지 않으므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{oa} \\ \delta_{ob} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_{ob} \end{Bmatrix} \quad (20)$$

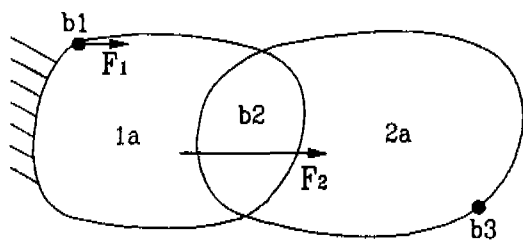
식(20)에서 영역a에 대한 자유도까지 부분적으로 Gauss소거법을 적용하면 $[A_{ba}]$ 부분을 $[0]$ 행렬로 할 수 있으므로 위의 식의 하반부에서 영역b에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$[Z]\{\delta_{ob}\} = \{F_{ob}\}, ([Z] = [A'_{bb}]) \quad (21)$$

모든 본계에 대하여 위와 같이 축소임피던스를 구하고 다음과 같이 이들을 합성한다.

Fig. 4와 같은 구조물에서는 전체를 2개의 본계로 분할하였는데, 본계1, 본계2의 내부영역을 각각 1a, 2a로 나타내고 가진부를 b1, 결합부를 b2, 응답부를 b3로 나타낸다.

식(21)에서 본계1을 살펴보면 영역b는 여진부 b1과 결합부 b2로 나눌 수 있고, 본계2의 경우도 영역b는 결합부 b2와 응답부 b3로 나눌 수 있다. 이 두 본계의



comp. 1 comp. 2
 1a:Interior region of the first component
 2a:Interior region of the second component
 b1:Exciting region
 b2:Interface region
 b3:Response region

Fig. 4 Structural system composed of 2 substructures (III)

경우를 합하고 결합부에 대한 자유도까지 부분적으로 Gauss소거법을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} (Z'_{b2b2}^{(1)} + Z'_{b2b2}^{(2)}) & Z'_{b2b1}^{(1)} & Z'_{b2b3}^{(2)} \\ 0 & Z'_{b1b1}^{(1)} & Z'_{b1b3}^{(1)} \\ 0 & Z'_{b3b1}^{(2)} & Z'_{b3b3}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{ob2} \\ \delta_{ob1} \\ \delta_{ob3} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_{ob1} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (22)$$

식(22)의 하반부에서 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Z'_{b1b1}^{(1)} & Z'_{b1b3}^{(1)} \\ Z'_{b3b1}^{(2)} & Z'_{b3b3}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{ob1} \\ \delta_{ob3} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{ob1} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

식(23)을 정리하면 여진부의 $\{F_{ob1}\}$ 과 응답부의 $\{\delta_{ob3}\}$ 에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$[Z_c]\{\delta_{ob3}\} = \{F_{ob1}\}, \quad (24)$$

$$([Z_c] = [Z'_{b1b3}^{(1)}] - [Z'_{b1b1}^{(1)}][Z'_{b3b1}^{(2)}]^{-1}[Z'_{b3b3}^{(2)}])$$

그러므로, 응답부 b3는

$$\{\delta_{ob3}\} = [Z_c]^{-1}\{F_{ob1}\} = [G_{13}]\{F_{ob1}\} \quad (25)$$

의 형태로 얻어진다. 식(25)의 우변의 $[G_{13}]$ 은 여진부 b1과 응답부 b3사이의 전달함수를 나타내는 행렬이다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션은 유한요소법^[7]을 이용하여 MS-FORTRAN으로 프로그램을 직접 작성하여 수행하였으며, 실험은 임팩트실험을 행하였다. 시뮬레이션에서 유한요소로는 4절점, 12자유도의 4각형요소를 사용하였으며, 프로그램에 사용된 물성치는 강판에 대한 값을 사용하였고, 그 값들은 Table 1과 같다.

또한 실험장치의 전체구조는 Fig. 5와 같고, 실험데이터처리하는 샘플링간격을 7.8125×10^{-4} 초로 4,096개씩 입력데이터와 출력데이터를 받아 이 데이터들을 소프트웨어로 Fourier 변환하여 전달함수를 구하고, 이 실험에 의한 전달함수를 편반분복법에 의하여 파라미터동정을 한 후, 이들 파라미터에 의하여 전달함수를 재구성한다^[6].

3.2 구분모우드합성법에 대한 시뮬레이션과 결과 해석방법의 계산정확도등을 검토하기 위하여 두계3

Table 1 Simulation parameters

Item	Value
Elastic modulus	$2.1 \times 10^4 \text{ Kgf/mm}^2$
Poisson's ratio	0.3
Density	$7.89 \times 10^{-10} \text{ Kgf}\cdot\text{sec}^2/\text{mm}^4$

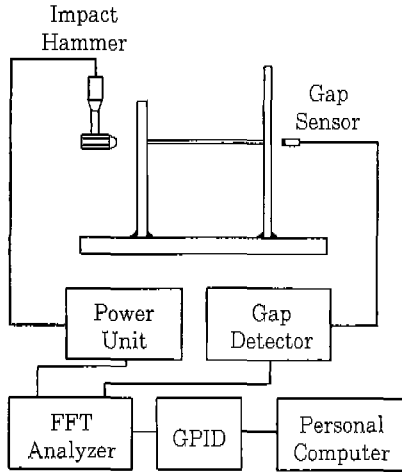


Fig. 5 Schematic diagram of experimental set-up

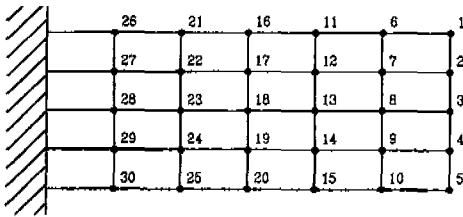


Fig. 6 Nodes & elements of rectangular cantilever plate

mm, 길이300mm, 폭120mm의 한쪽면이 고정된 평판을 택하여 이 방법을 적용한다. 시뮬레이션을 하기 위해서 요소와 절점은 Fig. 6과 같이 하며, 유한요소의 분할은 모든 분할방법에서 동일하게 한다. 또한 평판을 길이방향으로 6등분, 폭방향으로 4등분을 하여 총절점의 수는 30개로 한다(고정된 부분의 절점은 제외한다.)

구분모우드합성법의 분할방법은 Fig. 7과 같이 Case1~Case5까지 2개에서 4개의 분계로 분할하였다. Fig. 7에서의 각 분할방법에 대한 고유진동수의 비교를

Table 2 Natural frequency (Hz):component mode synthesis

Mode	Exact	FEM	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
1	28	28	28	28	28	28	28
2	149	149	149	149	149	149	149
3	177	178	178	178	178	178	178
4	476	475	475	475	475	475	475
5	497	503	504	503	503	503	503
6	880	879	882	879	880	882	879
7	978	992	1,004	994	994	1,503	992
CPU time		507 sec (100%)	200 sec (39.4%)	177 sec (34.9%)	114 sec (22.5%)	127 sec (25.0%)	121 sec (23.5%)

Table 2에서 보여주고 있으며, 각 분할방법에 대하여 결합영역의 채용모우드수는 7, 내부영역의 채용모우드수는 5으로 하였다. Table 2에서 Exact는 판이론에 의한 결과이며^{[9][10]}, FEM은 분계로 분할하지 않고 전

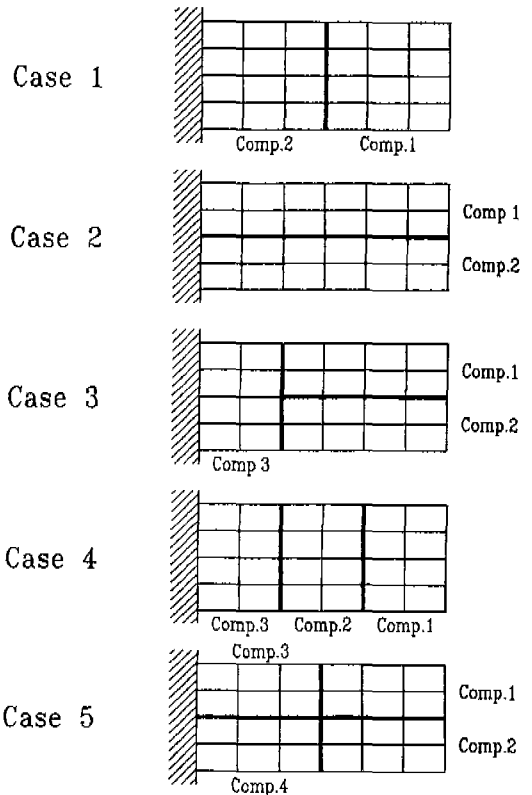


Fig. 7 Division of rectangular cantilever plate

계에 대한 유한요소법에 의한 결과이고, Case1~Case5는 Fig. 7과 같이 분할하여 구분모우드합성법으로 구한 것이며, CPU time은 데이터입력이 끝난 후 전계의 고유진동수가 계산될 때까지 걸린 시간이다. 그리고, Case1이 Case4보다 채용모우드수가 훨씬 작은데도 불구하고 계산시간이 더 오래 걸린 것은 각 분계마다의 채용모우드를 선택할 때, 각 분계 전체 자유도의 고유치해석을 행한 후 채용모우드를 선택했기 때문이다. 이중 Case3에 대한 절점1에서의 전달함수의 유한요소법에 의한 결과와 구분모우드합성법에 의한 결과의 비교를 Fig. 8에 나타내었다.

3.3 빌딩블럭법에 대한 시뮬레이션 및 실험결과

Fig. 9에서 보여주는 것과 같이 두개의 판으로 이루어져 있으며, 이들 평판의 하단부를 고정하고 각 판에서 절점을 한개씩 택하여 결합한 간단한 2중 판구조물에 대하여 빌딩블럭법을 적용한다. Fig. 9에서 1은 여진부를, 2는 결합부를, 3은 응답부를 나타낸다. Fig. 9의 구조물에 대한 유한요소 분할은 Fig. 10과 같다.

결합부를 강결합으로 한 경우의 고유진동수는 Table 3에 나타내었으며, 여기서, Case5의 6차모우드가 나오지 않은 이유는 응답점이 절점이었기 때문이라 생각된다. 실험에서 결합부는 가는 강선으로 결합하였다. 본계의 전달함수를 얻는 방법에 대한 전계의 전달함수를 유한요소법으로 구한 결과와 비교하여 Fig. 11에 나타

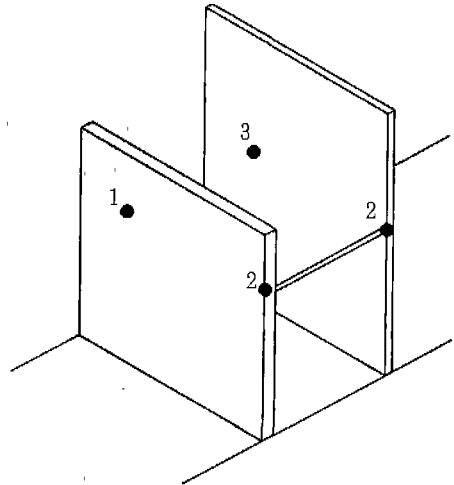


Fig. 9 Structure composed of 2 plates

내었다. 결합부에 고무를 사용하여 탄성결합한 경우의 고유진동수는 Table 4에 나타내었다. 여기서, Case2와 3의 5차모우드가 계산되지 않았는데 5차모우드의 공진봉이 4차모우드의 공진봉에 겹쳐졌기 때문이라 여겨진다. 사용된 고무의 스프링상수k는 고무에 질량을 달

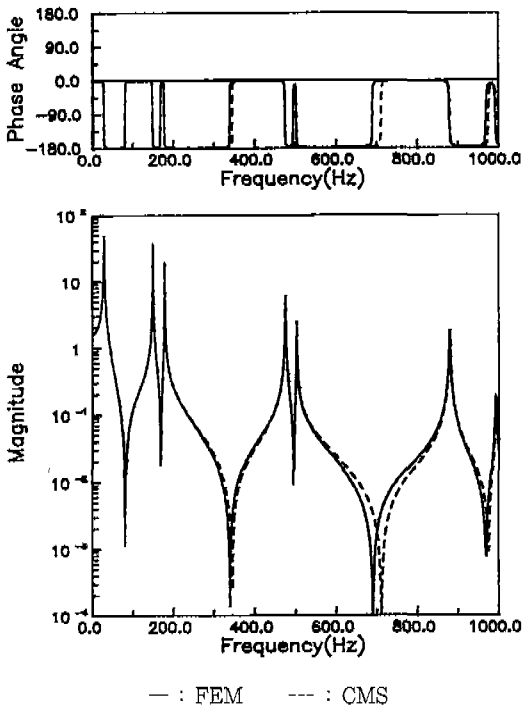


Fig. 8 Transfer function:component mode synthesis

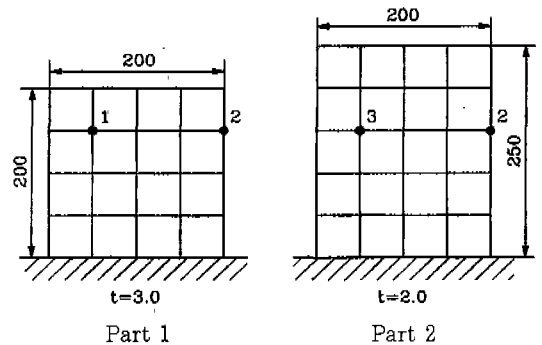


Fig. 10 Finite element of substructure 1 & 2

Table 3 Natural frequency (Hz):building block analysis (rigid interface)

Mode	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
1	35	35	38	33	35
2	69	71	69	71	72
3	116	117	123	109	120
4	168	160	159	170	160
5	235	233	222	248	223
6	291	283	283	292	.
7	386	373	397	355	383

Case 1 : substructure 1(FEM)+substructure 2(FEM)
 Case 2 : substructure 1(EXP)+substructure 2(EXP)
 Case 3 : substructure 1(FEM)+substructure 2(EXP)
 Case 4 : substructure 1(EXP)+substructure 2(FEM)
 Case 5 : experiment of whole structure

Table 4 Natural frequency (Hz):building block analysis (elastic interface)

Mode	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
1	28	26	26	28	25
2	65	66	65	66	66
3	81	88	88	81	93
4	159	160	159	161	159
5	172	.	.	173	168
6	279	280	280	279	241
7	311	291	292	311	291

Case 1 : substructure 1(FEM)+substructure 2(FEM)
 Case 2 : substructure 1(EXP)+substructure 2(EXP)
 Case 3 : substructure 1(FEM)+substructure 2(EXP)
 Case 4 : substructure 1(EXP)+substructure 2(FEM)
 Case 5 : experiment of whole structure

아 힘·변위 관계에서 처짐을 구해서 얻었고, 감쇠계수 c 는 임팩트실험을 하고 파라미터동정에 의해 구하였으며, k 는 0.14kgf/mm, c 는 0.0001kgf·sec/mm이다. 분계의 전달함수를 얻는 방법에 대한 전체의 전달함수를 유한요소법으로 구한 결과와 비교하여 Fig. 12에 나타내었다.

3.4 축소임피던스법에 대한 시뮬레이션과 결과

이 방법의 시뮬레이션은 Fig. 9의 판구조물에 대하여 강결합을 한 경우에 행하였으며, Fig.10과 같이 분할하였다. 여기서, 축소임피던스법에 의한 전달함수는 i) 주파수간격을 5Hz로 하여 0~500 Hz까지, ii) 주파수간격을 1 Hz로 하여 0~500 Hz까지 구하였다. 전체

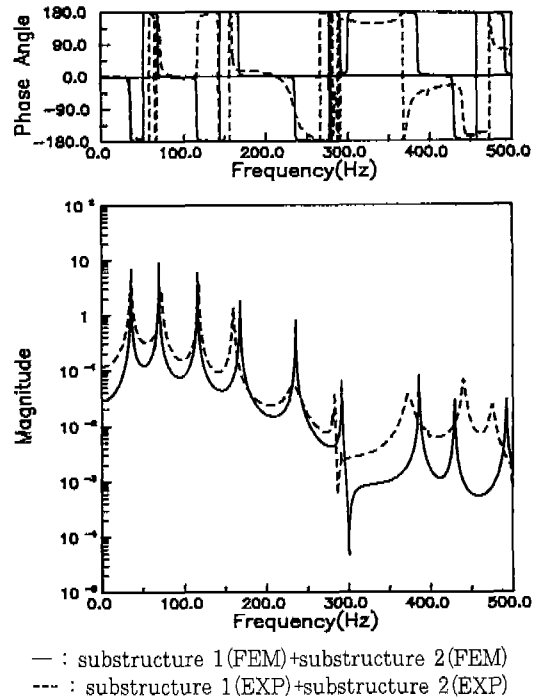


Fig. 11(a) Transfer function:building block analysis (rigid interface)

Table 5 Natural frequency (Hz):reduced impedance method

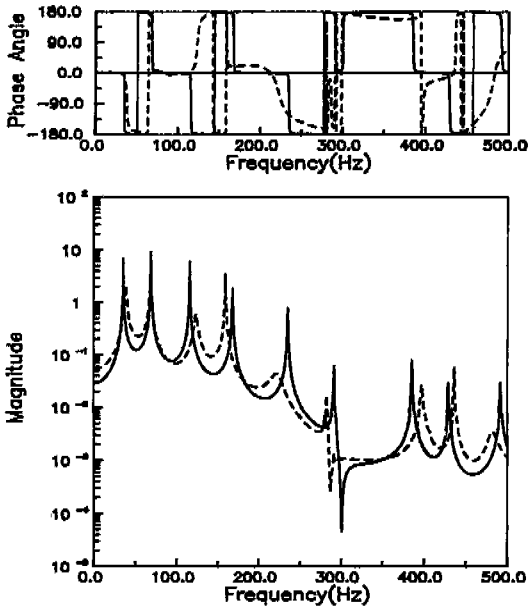
Mode	FEM	RIM(FR = 5 Hz)	RIM(FR = 1 Hz)
1	35	35	35
2	69	69	69
3	116	116	116
4	168	168	168
5	235	235	235
6	291	291	291
7	386	386	386
CPU time	3,340sec(100%)	1,052sec(31.5%)	5,520sec(165.3%)

FR:frequency resolution

에 대한 유한요소법과 축소임피던스법에 의한 고유진동수의 비교는 Table 5에 나타내었으며, 주파수간격 5 Hz에 대한 전달함수의 비교를 Fig. 13에 나타내었다.

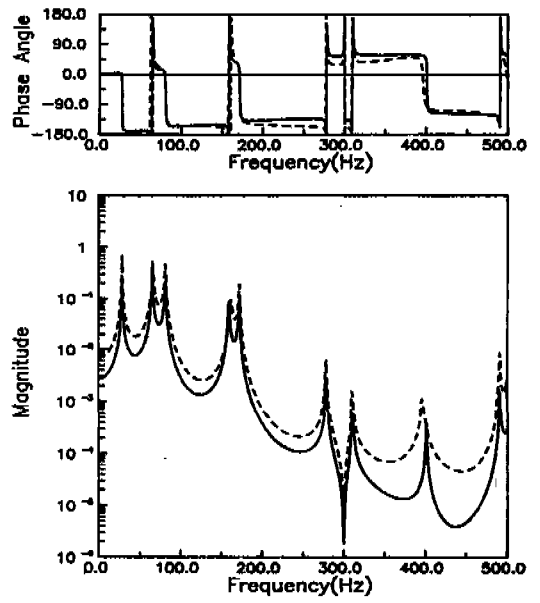
4. 결 론

부분구조합성법의 적용을 위하여 프로그램을 개발하



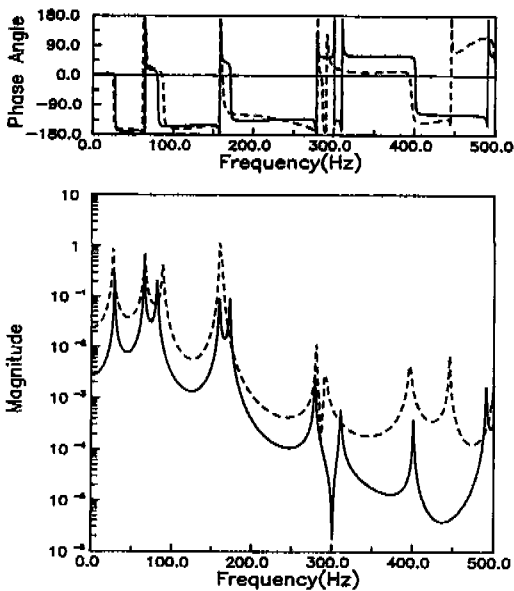
— : substructure 1(FEM)+substructure 2(FEM)
 --- : substructure 1(FEM)+substructure 2(EXP)

Fig. 11(b) Transfer function: building block analysis (rigid interface)



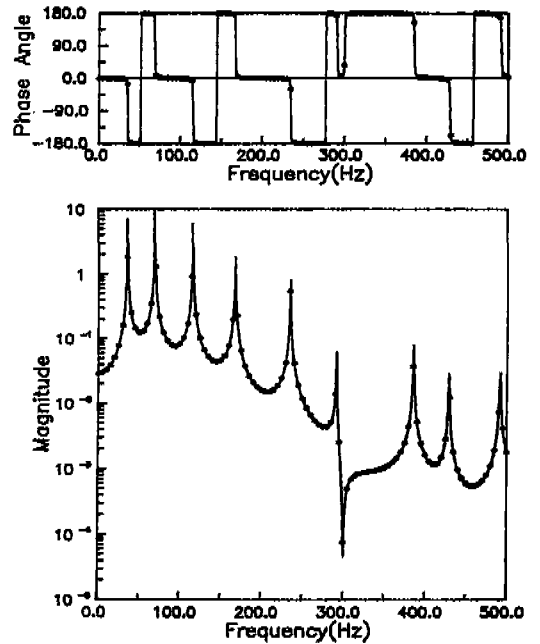
— : substructure 1(FEM)+substructure 2(FEM)
 --- : substructure 1(EXP)+substructure 2(EXP)

Fig. 12(b) Transfer function: building block analysis (elastic interface)



— : substructure 1(FEM)+substructure 2(FEM)
 --- : substructure 1(EXP)+substructure 2(EXP)

Fig. 12(a) Transfer function: building block analysis (elastic interface)



· : RIM · : CMS

Fig. 13 Transfer function: reduced impedance method

고 시뮬레이션과 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구분모우드합성법의 경우 계산시간에 있어서 전계를 유한요소법으로 계산한 것보다 매우 적게 걸리지만 이 방법으로 구한 고유진동수는 저차에서는 거의 일치하는데 반해 고차로 갈수록 오차가 증가하며, 이는 채용모드수에 의한 영향때문이라 생각된다.

2. 빌딩블럭법의 경우 전계를 몇개의 분계로 분할하고 유한요소법과 실험으로 각각의 분계에서 얻은 전달함수를 이 방법으로 합성한 전계의 전달함수와 전계에서 직접 얻은 전달함수가 근사하게 일치함을 알 수 있다.

3. 축소입피던스법의 경우 유한요소법과 일치하는 전달함수를 짧은 계산시간에 얻을 수 있지만 전 과정을 각 진동수마다 반복하여야 하므로 넓은 주파수대역의 해를 세밀한 주파수간격으로 얻기 위해서는 짧은 계산시간이 걸리게 된다. 따라서, 넓은 주파수간격으로 전체해석대역의 전달함수를 구한 후, 공진봉부근에서만 세밀한 주파수간격으로 해를 구하면 효율적일 것이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 장기기초연구(ADD-90-5-007)의 일부로서 수행되었음.

참고문헌

1. 大態政明, 長松昭男, “區分モード合成法たよる振動

解析(第4報, 固有振動數と固有モード, その2)”, 日本機械學會論文集(C編), 49卷, 443號, pp.1120~1127, 1983.

2. 大態政明, 長松昭男, “區分モード合成法たよる振動解析(第5報, 強制振動, その2)”, 日本機械學會論文集(C編), 49卷, 437號, pp3~11, 1983.

3. 長松昭男, 中尾章裕, 岩本敏孝, 長地勝 “部分構造合成法たよる振動解析(第1報, 基礎的檢討)”, 日本機械學會論文集(C編), 49卷, 443號, pp.3~11, 1983.

4. 長松昭男, 大態政明, “縮小イソピーダンス合成法たよる強制振動の解析(第1報, 解訴方法の説明と基礎的檢討)”, 日本機械學會論文集(C編), 46卷, 407號, pp.703~712, 1980.

5. 정재훈, 유원희, 박영필, “구분모우드합성법을 이용한 판의 모우드해석”, 연세대학교 산업기술연구소 논문집, 1991.

6. 長松昭男, 모드解析, 培風館, 1985.

7. 谷口修, 振動工學ハンドブック, 養賢堂, 1981.

8. 유진형, “모우드해석에 의한 계의 동특성 추정”, 연세대학교 공과대학 기계공학과 석사학위 논문, 1990.

9. A. W. Leissa, Vibration of Plates, National Technical Information Service.

10. R. D. Blevins, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Van Nost-rand Reinhold, 1979.