

동특성 변경을 위한 구조물의 결합 위치 선정

Selection of Connection Position to Change Dynamic Characteristic of Structure

김 경 원[†] · 박 윤 식* · 김 성 훈** · 김 진 희** · 이 주 훈** · 황 도 순**

Kyung-Won Kim, Younsik Park, Sung-Hoon Kim, Jin-Hee Kim, Ju-Hun Rhee and Do-Soon Hwang

(2003년 8월 28일 접수 : 2003년 11월 24일 심사완료)

Key Words : Connection Position(결합위치), Modal-force Equation(모달힘방정식), Synthesizing(부분구조합성)

ABSTRACT

This research deals with how to select connection positions of two substructures to be synthesized. The goal of this research is to find optimal connection positions in order to maximize the fundamental natural frequency of the synthesized structure. The natural frequencies of a connected structure are obtained by modal-force equations. Optimal connection positions can be selected through optimization process. In the optimization process, the natural frequencies of a connected structure are set to object function value and connection positions become design variables. The method described above is applied to synthesis problems of plates, which is initially conducted for FE models and verified through experiments. Especially in experiments, FRF(frequency response function)s are obtained by means of the Modal Testing technique to be used in modal-force equations for synthesizing. Once the substructures are synthesized, the Modal Testing technique is again applied to spot-welded structure using the result from the optimization procedure. It is found that the fundamental natural frequency of the synthesized structure with the optimized result gives higher value than those with the initially given connection positions.

1. 서 론

과거에 비해 현대의 기계구조물에는 고기능, 고품질의 기술 뿐만 아니라, 저진동 저소음의 기술이 요구되고 있다. 이는 응력이나, 변형률을 연구하는 정적 해석 뿐 아니라 고유진동수나 모드를 연구하는 동특성 해석에 대한 연구가 많이 이루어지고 있음을 의미

한다. 구조물의 동특성에 대한 연구는 구조물의 동특성 자체에 대한 연구와 더불어, 구조물의 진동 및 소음의 저감과 같은 동특성을 변경하기 위한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 구조물 동특성 변경법은 기계 구조물 뿐 아니라 토목 구조물에 이르기까지 매우 다양한 분야에 적용되고 있다. 자동차의 경우, 자동차 엔진이나 기타 외부의 가진에 의해 차체 및 구조물에 공진 현상이 발생할 경우, 구조물에 다른 부가 구조물을 첨가하거나, 구조물의 일부분을 제거 또는 구조물의 형상을 변경시킴으로써 이를 방지할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 동특성 변경법을 바탕으로, 부분 구조물의 합성시 원하는 고유 진동수를 얻기 위한

[†] 책임저자 : 정희원, 한국항공우주연구원 위성본체그룹
E-mail : kwkim74@kari.re.kr

Tel : (042) 860-2086, Fax : (042) 860-2603

* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

** 한국항공우주연구원 위성본체그룹

합성 위치를 선정하게 된다. 이는 합성된 구조물의 고유 진동수를 높이거나 낮출 수 있는 적절한 합성 위치를 선정한다는 것을 의미한다. 이의 좋은 예로 Fig. 1과 같이 자동차의 부품으로 사용되는 B-pillar를 들 수 있다. B-pillar는 두 개의 평판 구조물이 점용접에 의해서 결합된 합성 구조물이며, 점용접은 B-pillar의 외부 둘레 부분에 시행되어 있다. Fig. 2에서는 Fig. 1에서의 점용접 부위를 좀 더 확대하여 나타내었다. 일반적으로 자동차 회사에서 가장 큰 관심을 갖는 부분은 자동차의 강성증가에 있다. 따라서, 각 부품들 또한 강성 증가를 목적으로 구조물 동특성 변경법이 많이 적용되고 있다. 이렇게 강성을 증가시키는 것은 고유 진동수를 최대한으로 올림으로써 가능하다. 따라서 본 논문에서는 합성된 구조물의 고유 진동수를 최대한으로 올림으로써 강성을 최대한으로 증가시키

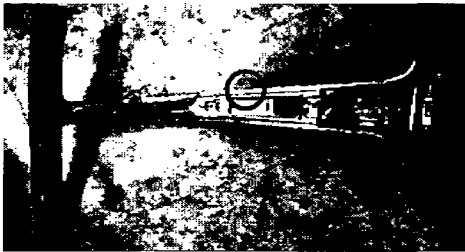


Fig. 1 The B-pillar of a car



Fig. 2 Spot welding of the B-pillar

는 최적의 합성 위치 선정을 목적으로 한다.

한편 Fig. 1의 실제 B-pillar를 이용하여 최적 합성 위치를 선정할 경우, B-pillar에 대한 실험이나 정확한 FEM 모델이 필요로 하게 되고, 이는 많은 시간과 노력을 필요로 하게 된다. 따라서 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 B-pillar와 유사한 형태의 테스트용 평판 구조물을 만들어 고유 진동수를 최대한으로 높이는 최적 합성 위치를 선정하도록 한다. 이 때 합성된 구조물의 고유 진동수는 각 테스트용 구조물의 리셉턴스를 이용하여 모달-힘 방정식으로 구하게 되며, 최적 합성 위치는 최적화 과정을 이용하여 구하게 된다. 즉 합성된 구조물의 고유 진동수를 목적함수로, 합성 위치를 설계 변수로 최적화를 하게 된다. 이 때 최적화 알고리즘은 순차적 이차 계획법을 이용한다. 최적화 결과가 나오면, 최적화 이전의 위치에서 두 테스트용 구조물을 점용접 한 것과 최적화 위치에서 점용접 한 것, 이렇게 두 경우에 대해서 각각 고유 진동수를 구함으로써 본 논문의 유용성에 대해서 알아본다.

2. 기본 이론

모달-힘 방법은 구조 변경을 기존 구조물과 부가되는 변경 구조물간의 구조 합성의 관점에서 다른 구조 합성법의 일종으로 Kron⁽¹⁾과 Simpson⁽²⁾에 의해서 연구가 시작 되었다. 구조변경은 구조물간의 결합으로 간주할 수 있으며, 각 구조물은 연결 부위에서 변위 구속조건과 힘 구속 조건을 갖는다. 이들 구속 조건을 이용하면 결합된 구조물의 고유 진동수를 구하는 방정식을 얻을 수 있다. 이 때, 지배방정식의 자유도는 부분 구조물간의 연결 자유도와 같으므로 비교적 적은 계산으로 합성된 구조물의 고유 진동수를

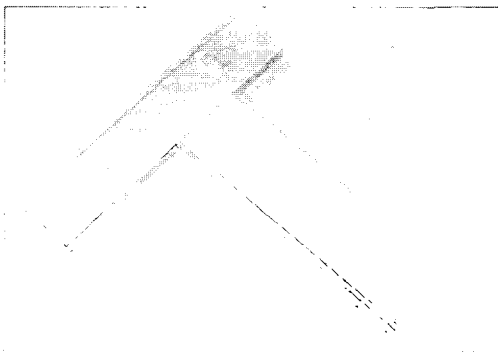


Fig. 3 Upper test pillar

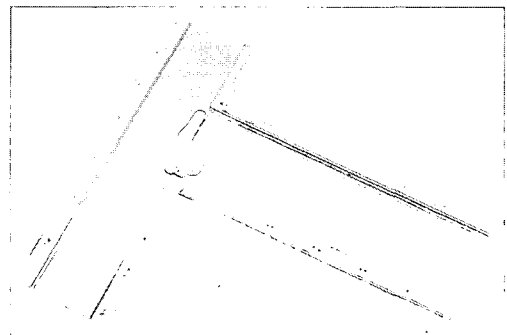


Fig. 4 Lower test pillar

구할 수 있다.

Fig. 5 를 이용하여 실제 모달-힘 방정식을 유도해 보자. Fig. 5와 같이 A와 B 두 구조물이 강성에 의해서 연결되어 있을 경우 두 구조물의 리셉턴스는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{X_{A_j}\} = \{\alpha_{ij}\}^T \{F_{A_j}\}, \quad \{X_{B_j}\} = \{\beta_{ij}\}^T \{F_{B_j}\} \quad (1)$$

또한 강성에 의해서 연결되는 부분은 다음과 같은 힘 평형식과 변위 적합성이 성립하게 된다.

$$\{F_{A_j}\} = k_i \{X_i\}, \quad \{X_i\} = \{X_{B_i}\} - \{X_{A_i}\} \quad (2)$$

식 (1)에서 X_{A_j} 는 변위 (또는 기울기)의 크기이고 F_{A_j} 는 주기적인 힘(또는 모멘트)의 함수의 크기를 나타낸다. 또한 α_{ij} , β_{ij} 는 주기적인 힘이나 모멘트 입력에 대한 변위나 기울기의 응답비로서 리셉턴스(receptance)라 한다. 이 때 i 와 j 는 각각 변위(또는 기울기)와 주기적인 힘(또는 모멘트)의 합성되는 좌표를 의미한다. 식 (1)과 식 (2)를 결합한 후, 물리적 좌표를 제거하면 다음의 모달-힘 방정식이 나온다.

$$[I + k_j(\alpha_{ij} + \beta_{ij})] \{F_{A_j}\} = 0 \quad (3)$$

고유치는 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$|I + k_j(\alpha_{ij} + \beta_{ij})| = 0 \quad (4)$$

식 (4)에 사용되는 α_{ij} , β_{ij} 는 모드 실험을 할 경우에는 측정된 주파수 응답 함수(frequency response function)로부터 직접 얻을 수가 있고, FEM 데이터의 경우에는 고유 진동수와 모드로부터 이를 유도할 수가 있다. 한편 두 테스트용 필라는 서로 점용접에 의해서 결합되어 있으므로 서로 단단히(rigid) 연결되

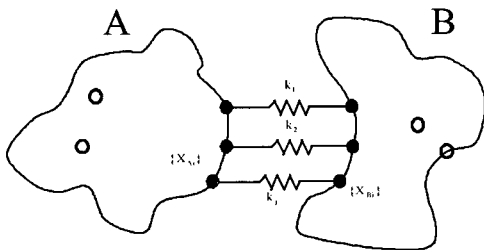


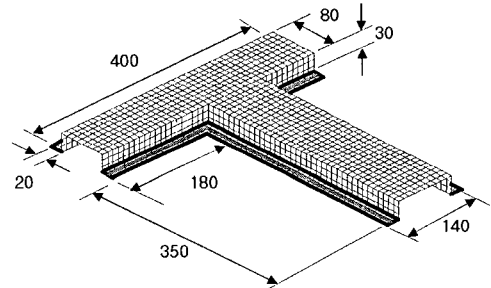
Fig. 5 Elastic connection of two subsystems

어 있다고 가정 한다.

3. 실험

3.1 구조물의 물성치

실험에 사용할 두 테스트용 필라는 Fig. 3과 Fig. 4와 같다. 두 구조물은 스테인레스 스틸로 제작이 되었고, 두께는 모두 2 mm 이다. Fig. 3의 테스트용 필라의 크기와 물성치는 Fig. 6과 같고, 두 테스트용 필라의 물성치는 모두 동일하다. 두 테스트용 필라의 차이점은 상부 테스트용 필라(upper test pillar)의 경우 구조물의 높이가 30 mm인 반면, 하부 테스트용 필라(lower test pillar)는 구조물의 높이가 10 mm 이며 그 방향이 반대이다. 테스트용 필라의 수는 각각 2개씩 총 4개를 준비하였다. 그 이유는 초기 위치에서 점용접을 실시하여 구한 고유 진동수와 최적 위치에서 점용접을 실시하여 구한 고유 진동수를 서로 비



Properties	Upper test pillar
Thickness	2 mm
Young's modulus(E)	190 GPa
Poisson's ratio(ν)	0.3
Density(ρ)	7920 kg/m ³

Fig. 6 Properties of the upper test pillar

Table 1 Errors of the natural frequencies between FEM and experiment result

	FEM	Upper test pillar (1) (Hz)	Error (%)	Upper test pillar (2) (Hz)	Error (%)	FEM	Lower test pillar (1) (Hz)	Error (%)	Lower test Pillar (2) (Hz)	Error (%)
1	66.311	64.813	2.31	64.36	3.03	66.11	63.61	3.97	64.89	1.88
2	117.14	112.03	4.55	114.46	2.34	119.45	116.07	2.90	111.39	7.24
3	163.15	152.67	6.87	159.61	2.21	178.72	171.71	4.67	164.45	9.28
4	201.31	189.26	6.36	197.72	1.81	200.29	200.46	0.09	202.62	1.15
5	324.45	305.71	6.12	300.60	7.93	312.45	323.96	3.55	328.54	4.90
6	367.12	341.39	7.53	353.83	3.75	414.62	457.87	9.45	466.49	11.11
7	447.50	411.59	8.72	420.61	6.39	464.64	472.44	1.65	484.81	4.16

교하기 위해서이다.

3.2 구조물의 모드 해석 결과

모드 실험에 사용된 장비는 다음과 같다. 가진 은 충격 망치를 이용하였으며, 측정은 3축 가속도계를 이용하여 측정하였다. 모드 해석은 LMS CADA-X 를 이용하여 수행하였고, 가진 위치는 Fig. 7의 3번 위치이며, 응답을 받은 위치는 28포인트 전체이다. 실험에서 구한 결과가 어느 정도 정확한지를 알아 보기 위해서 FEM을 이용하여 구한 모드 해석 결과와 비교해 보았다. 이렇게 FEM 모델이 필요한 이유는 위의 이유뿐이 아니라 실험시 정확히 측정하기 어려운 강제 운동(rigid body motion)을 구하기 위해서이다. 만약 강제 운동 부분이 구조물 합성시 반영되지 않으면 합성된 구조물의 고유 진동수를 정확하게 구할 수가 없게 된다. 실험 데이터와 FEM 데이터를 비교하기 위해서 고유 진동수 오차와 MAC (modal assurance criterion) 값을 사용하였다. 고유 진동수 오차와 MAC 값은 다음의 식으로 표현된다.

$$\text{고유 진동수 오차} = 100 * \frac{|\{f\}_{exp} - \{f\}_{fem}|}{\{f\}_{exp}} \quad (5)$$

$$MAC(\{\phi_x\}_i, \{\phi_A\}_j) = \frac{|\{\phi_x\}_i^T, \{\phi_A\}_j|^2}{(\{\phi_x\}_i^T, \{\phi_A\}_i)(\{\phi_x\}_j^T, \{\phi_A\}_j)} \quad (6)$$

FEM과 실험 데이터간의 고유 진동수 오차를 나타낸 것이 Table 1 이며, MAC 값을 나타낸 것이 Table 2 이다. 표의 (1)이 나타내는 것은 초기위치 합성에 사용할 테스트용 필라를 나타내고 (2)는 최적

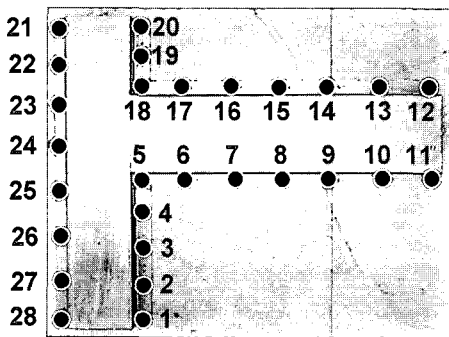


Fig. 7 Measurement points of the upper test pillar

위치 합성에 사용할 테스트용 필라를 나타낸다. 실험 결과를 비교해 보면 고유 진동수의 경우 6~8% 정도의 오차가 있었고, MAC 값의 경우에는 고차의 경우에는 낮지만 저차의 경우에는 매우 높다는 것을 알 수 있다.

3.3 합성 개수와 초기 위치 선정

최적화 과정을 수행하기 위해서는 먼저 합성 개수와 초기 위치를 선정하여야 한다. 설계 변수인 합성 개수는 11개로 선택하였고, 초기 합성 위치는 Fig. 8과 같이 정하였다. Fig. 8에서 보이는 각 격자는 가로 세로 모두 1cm의 정사각형 격자를 의미한다. Fig. 8에 나타낸 영역 1에서 5는 합성 위치가 움직일 수 있는 제한 영역을 나타내는 것이다. 이렇게 각각의 합성 위치를 x나 y의 한 방향으로만 움직이게 함으로써 합성 위치 하나당 설계 변수 하나만을 부여 할 수 있게 되었다. 만약에 이렇게 영역을 지정해놓지 않는다면 합성 위치는 x와 y 두 방향으로 모두 움직일 수 있으므로, 합성 위치 하나당 두 개의 설계 변수를 부여해야 하므로 합성 위치가 증가할 시 최적화 과정에 여러 어려움이 발생한다. 또한 실제 B-pillar의 경우도 점용접이 Fig. 8과 같이 외곽선을 따라서 실시 되어 있기 때문에, 이와 같이 영역을 제한하는 것은 효과적이라고 할 수 있다.

3.4 보간법

FEM 모델을 이용하거나, 혹은 실험 데이터를 이용할 경우에는 해당 노드나 측정된 곳에서의 리셉턴스 값만 알 수가 있다. 또한 두 구조물이 서로 노드가 맞지 않는 경우 즉 비부합 문제(nonmatching problem)에도 합성에 필요한 리셉턴스를 구할 수가 없다. 최적화 과정을 수행하기 위해서는 합성이 가능

Table 2 Mac values of upper test pillar and lower test pillar

Mode	Upper test pillar (1)	Lower test pillar (1)	Upper test pillar (2)	Lower test pillar (2)
1	0.966	0.926	0.987	0.903
2	0.959	0.926	0.978	0.910
3	0.947	0.930	0.959	0.941
4	0.921	0.727	0.929	0.839
5	0.943	0.900	0.958	0.952
6	0.921	0.566	0.924	0.612
7	0.843	0.200	0.819	0.301

한 모든 위치에서의 리셉턴스를 알아야 하는데, 이를 해결하기 위해서 보간법을 이용하여 노드가 아닌 곳에서의 리셉턴스를 구하게 된다. 본 논문에서 사용한 보간법은 곱선형 보간법(bilinear interpolation)이다. 곱선형 보간법은 Fig. 9의 사각형 요소의 꼭지점 노드에서의 정보를 이용하여 요소 내를 보간하게 된다.⁽³⁾

3.5 회전 자유도

두 구조물의 합성에 필요한 리셉턴스는 실험과 FEM 모델로부터 구할 수 있다. 본 논문에서는 실험을 통해서 리셉턴스를 구할 시 회전 자유도를 고려하지 않았다. 일반적으로 실험을 통해서 회전 자유도를 측정하는 것은 매우 힘든 일로 알려져 있다. 따라서, 병진 자유도만을 측정 후 이를 이용하여 회전 자유도를 보간하는 방법이 많이 이용이 된다. 하지만, 본 논문에서는 측정되지 않은 병진 자유도를 측정된 병진 자유도로 보간을 하게 된다. 이렇게 보간된 병

진 자유도를 이용하여 다시 회전 자유도를 보간하게 된다면 큰 오차가 유발될 가능성이 매우 높아진다. 따라서, 회전 자유도를 무시하더라도 두 구조물의 합성시 큰 오차가 없는 경우를 선택해야만 한다.

합성 위치에서의 병진 자유도만을 이용하여 합성시, 회전 자유도를 모두 고려한 경우와 비슷해지기 위해서는 상부 테스트용 필라의 모드 형상과 하부 테스트용 필라의 모드 형상이 비슷해야만 한다. 합성 개수가 작을 경우에는 상부 테스트용 필라의 모드 형상과 하부 테스트용 필라의 모드 형상이 다를 가능성이 많아지게 되고, 이 때 회전 자유도를 무시할 경우 오차가 많이 유발될 수 있다. 따라서, 합성 개수를 많이 늘림으로써 이러한 오차를 줄일 수가 있다.

3.6 최적화 결과

최적화는 FEM 데이터만을 이용하는 경우와 실험 데이터와 FEM 데이터를 함께 이용하는 경우의 2가지에 대해서 알아 본다. 실험 데이터의 이용시 FEM 데이터도 필요한 이유는 앞서서도 언급한 바와 같이 강제 운동 부분을 반영하기 위해서이다.

(1) FEM 데이터만을 이용한 경우

초기 합성 위치는 Fig. 8과 같다. 먼저 FEM 데이터로 모드 해석을 실시하여 고유 진동수와 모드 형상을 획득하고, 이를 이용하여 리셉턴스를 재생성하여 모달 힘 방정식으로부터 고유 진동수를 구하게 된다. Fig. 10은 최적화의 결과를 Fig. 11은 반복 회수에 따른 고유 진동수를 나타낸다. 이 결과를 보면 합성된 구조물의 첫 번째 고유 진동수는 초기 277.26 Hz에서 282.84 Hz로 5.58 Hz가 증가하였다

(2) 실험 데이터와 FEM 데이터를 함께 이용한 경우

FEM 데이터와 실험 데이터를 함께 이용할 경우에는 먼저 두 데이터들간의 크기를 맞추어 주어야 한다. 이를 위하여 식 (7)과 같은 MSF(modal scale factor)를 이용한다.

$$MSF(\{\phi_x\}, \{\phi_A\}) = \frac{|\{\phi_x\}^T, \{\phi_A^*\}|}{\{\phi_A\}^T, \{\phi_A^*\}} \quad (7)$$

MSF는 모드간의 크기비를 나타내는 것으로 이를 이용하면 FEM에서 구한 모드와 실험에서 구한 모드의 크기를 맞출 수가 있다.

각 구조물의 강제 운동을 정확히 반영하기 위해서

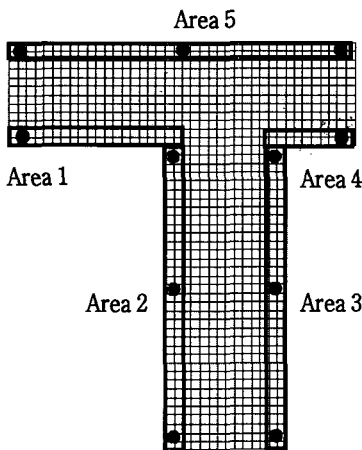


Fig. 8 Initial connection positions

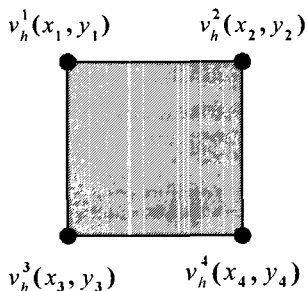


Fig. 9 Bilinear interpolation

다음과 같이 두 영역으로 모드와 고유 진동수를 나누었다.

- FEM에서 구한 모드와 고유 진동수를 이용하여 주파수 응답 함수 재합성
- 실험에서 구한 모드와 고유 진동수를 이용하여 주파수 응답 함수 재합성

첫번째 영역의 경우에는 FEM에서 구한 강제 운동 부분의 고유 진동수와 모드만을 이용하여 주파수 응답 함수를 재생성 하였고, 두번째 영역의 경우는 실험에서 구한 고유 진동수와 모드를 각각 20개씩 사용하여 주파수 응답 함수를 재생성하였다. 이를 이용하여 최적화를 실시하면 Fig. 12의 최적화의 결과를, Fig. 13의 반복회수에 따른 고유 진동수를 얻을 수

있다. 최적화를 실시한 결과, 합성된 구조물의 첫번째 고유 진동수는 261.66 Hz 에서 266.82 Hz 로 5.16 Hz 증가하였다. 이는 고유 진동수의 절대적인 크기면에서는 차이가 있지만, 고유 진동수의 증가량면에서는 거의 동일하게 나왔다는 것을 알 수 있다.

3.7 실제 구조물의 실험 결과

최적 위치가 선정이 되었으므로, 실제 구조물에 대해 초기 위치와 최적화 위치에서 점용접을 실시하여 고유 진동수를 알아 보자. 초기 위치는 Fig. 8에 나타난 위치를 이용하고 최적 위치는 Fig. 12에 나타난 위치를 이용하였다. Fig. 14에는 초기 위치에 점용접된 테스트용 필라가 나타나 있으며, Fig. 15에서는 점용접부위를 확대한 그림이 나타나 있다. 초기 위치에

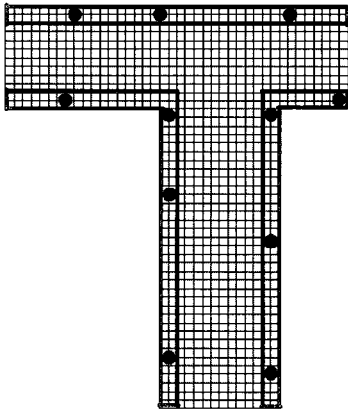


Fig. 10 Result of optimization using FEM data

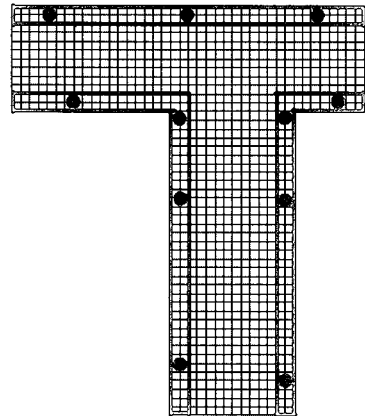


Fig. 12 Result of optimization using FEM and experimental data

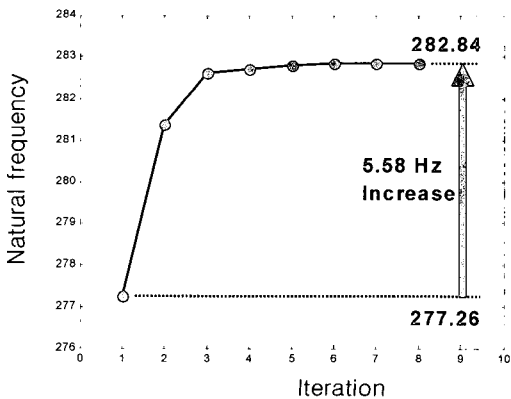


Fig. 11 Change of fundamental natural frequency when optimizing

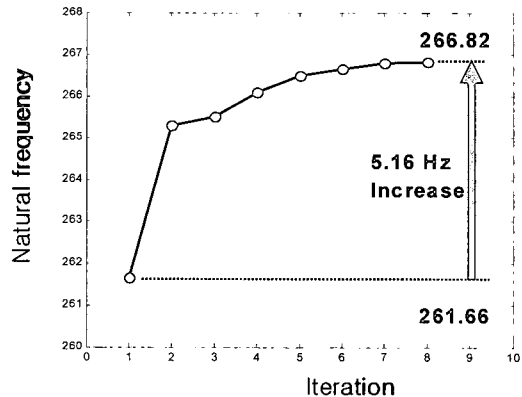


Fig. 13 Change of fundamental natural frequency when optimizing

서 점용접 후 첫번째 고유 진동수를 구하면 252 Hz가 나온다. 그리고 최적 위치에서는 257.3 Hz를 얻을 수가 있다. 이 값은 FEM 데이터와 실험 데이터를 혼합하여 사용한 경우보다 약 9 Hz 정도 작게 나왔지만 고유 진동수의증가량은 5 Hz 내외로 거의 동일함을 알 수가 있다.

3.8 모드 자름 오차

이렇게 합성된 테스트용 필라의 실제 첫번째 고유 진동수와 최적화를 이용하여 예측한 첫번째 고유 진동수가 다른 가장 큰 원인은 모드 자름 오차(modal truncation error)를 들 수가 있다. 일반적으로 모드 자름 오차는 제한된 고유 진동수와 모드로부터 리셉턴스를 재생성할 때 발생하게 된다. 실험을 통하여 리셉턴스를 구할 경우에는 이러한 모드 자름 오차가 없기 때문에 이를 고려하지 않아도 된다. 하지만 본 논문에서는 모달-힘방정식에 필요한 리셉턴스를 실험에 의해서 모두 구할 수 없었기 때문에, 일부 측정된 주파수 응답 함수로부터 고유 진동수와 모드 형상을 구한 후에, 이를 이용하여 다시 리셉턴스를 재생성하였다. 따라서 모드 자름 오차가 발생하게 된 것이다.

일반적으로 관심 주파수의 2~3배 정도의 고유 진동수와 모드를 이용하여 리셉턴스를 재생성하면 모드 자름 오차가 많이 줄어든다고 알려져 있다. 하지만 여러 문헌^(4,5)을 통해서 관심 주파수의 10배 이상의 고유 진동수와 모드를 이용하더라도 모드 자름 오차가 크게 나타날 수도 있다는 것을 알 수 있었다. 본 논문에서는 이러한 모드 자름 오차의 영향을 알아보기 위해서 FEM 데이터만을 이용하여 리셉턴스 합성에 사용된 모드 수와 합성 개수에 따른 고유 진동수를 조사하였다. Table 3을 보면 합성 개수가 작을 경우에는 리셉턴스 합성에 사용한 모드 수가 작더라도 고유 진동수의 차이가 거의 나지 않음을 알 수 있다. 하지만 합성 개수가 증가하면 모드 수에 따른 오차가 심하게 발생함을 알 수가 있다. 이는 합성 개수가 작을 경우에는 합성된 구조물의 고유 진동수를 구할 때 필요한 리셉턴스의 수가 작기 때문에 모드 자름 오차가 큰 영향을 미치지 못하지만, 합성 개수가 많을 경우에는 리셉턴스의 수가 많기 때문에 그 영향이 크게 나타난다.

4. 결론

본 논문은 두 구조물의 합성시 고유 진동수를 최대한 높일 수 있는 최적 합성 위치를 찾는 데 목적이 있다. FEM 모델링을 하거나 실제 대상물의 경우에는 일단 합성 위치를 선정하고, 그때마다 모델링이나 실험을 반복해야 하기 때문에 시간과 노력이 많이 들고, 또한 최적 위치를 찾는 데 어려움이 많았다. 또한 FEM 모델링의 경우에는 두 구조물의 노드가 일치하는 곳만 합성을 할 수 있으므로, 합성 위치 선정시 어려움이 따른다. 이를 해결하기 위해서 본 논문은

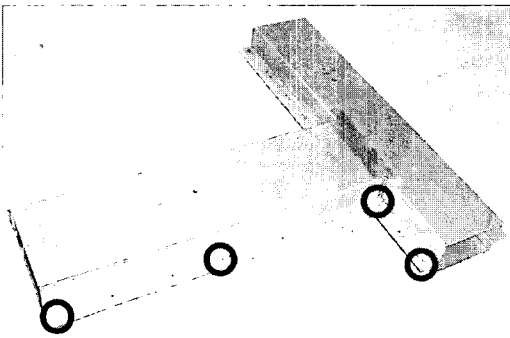


Fig. 14 Spot welded structure

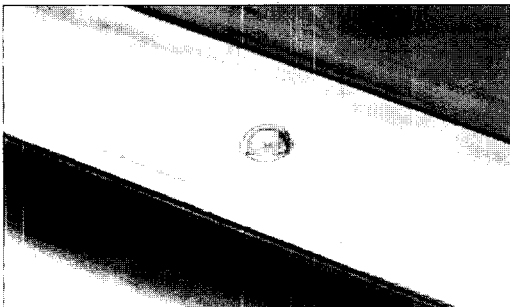


Fig. 15 Spot welding point

Table 3 Fundamental natural frequency of synthesized structure when changing mode numbers and numbers of connection position

Mode	Numbers of connection position			
	4	6	9	11
20	72.54	91.23	273.12	301.85
30	72.32	90.12	267.32	287.32
50	72.12	89.78	261.32	279.26

모달-힘 방정식을 이용하여, 합성되기 전의 구조물의 리셉턴스만으로 합성된 구조물의 고유 진동수를 구하였으며, 이때 첫 번째 고유 진동수를 최대한으로 높이는 최적 합성 위치를 선정하였다. 또한 보간법을 이용하여 노드가 일치하지 않는 부분도 합성이 가능하도록 하였다.

본 논문은 먼저 부분 구조 합성법에 필요한 이론을 전개한 후, 실제 구조물에 이론을 적용하여, 실험 데이터와 FEM 데이터를 함께 사용하여 최적 위치를 선정하였다. 이러한 최적화가 잘 되었는지를 확인하기 때문에 실제 두 구조물을 점용접하여 고유 진동수를 구하였다. 실험 결과는 252 Hz 에서 257.3 Hz 로 5.3 Hz 의 고유 진동수 증가를 가져옴으로써 만족스러운 결과를 얻을 수가 있었다.

참 고 문 헌

(1) Simpson, A. and Tabarrok, B., 1968, "On Kron's Eigenvalue Procedure and Related Methods

of Frequency Analysis," The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. XXI, pp. 1~39.

(2) Simpson A., 1973, "Kron's Method: A Consequence of the Minimization of the Primitive Lagrangian in the Presence of Displacement Constraints," Journal of Sound and Vibration, Vol. 27, No. 3, pp. 377~386.

(3) Eric, B. Becker, and Graham, F. Carey, and J. Tinsley, Oden., 1981, "Finite Elements An Introduction Volumn 1," Prentice-Hall.

(4) Duarte, M. L. M., 1996, "Experimentally derived Structural Models for Use in Further Dynamic Analysis," Ph. D. Thesis, Imperial Colleague, University of London.

(5) 김경호, 박윤식, 2002, "주파수 응답함수를 이용한 부분구조 합성에서 모드차름 오차 보정에 관한 수치적 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 4 호, pp. 302~309.