한국항해항만학회지 제26권 제1호(항해항만통합권 제1호), pp.43~49, 2002 (ISSN-1598-5725)
Journal of Korean Navigation and Port Research

점용접된 판 구조물의 면적비와 거리비에 따른 진동특성 연구

한동섭* · 안성찬* · 안찬우** · 한근조**

*동아대학교 기계공학과 대학원, **동아대학교 기계공학과 교수

A Study on Vibration Characteristics of Plate Structures Spot-Welded with respect to Area Ratio and Distance Ratio

*Dong-Seop Han** · *Sung-Chan Ahn** · *Chan-Woo Ahn*** · *Geun-Jo Han***

**Graduate school, Dept. Mechanical Engineering, Donga University, Busan 604-714, Korea*
***Professor, Dept. Mechanical Engineering, Donga University, Busan 604-714, Korea*

요 약 : 본 연구에서는 비감쇠 자유진동을 하는 점용접된 사각평판의 고유진동수를 수치해석을 통하여 살펴보고, 실험을 통하여 결과를 검증하였다. 설계변수로는 점용접에 미치는 여러 설계변수 중에서 점용접이 차지하는 면적을 사각평판의 면적으로 나눈 면적비와 점용접점 사이의 거리를 평판의 한 변의 길이로 나눈 거리비로 무차원화하여 사용하였으며, 목적함수로는 점용접으로 인한 두께효과를 진동수에 대한 처짐의 비로써 나타낸 등가두께로써 무차원화하여 정의하였다. 수치해석에는 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 사용하였고, 실험에는 B&K Data analyzer를 통하여 주파수분석을 수행하였다. 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 점용접의 면적비가 단지 4.52%인데 비해 점용접으로 인한 두께효과는 55%로써 매우 크게 나타났다.
2. 거리비에 따른 두께효과는 거리비가 0.4일 때 가장 크게 나타났다.

핵심용어 : 점용접, 고유진동수, 평판, 모드형상, 등가두께

Abstract : *In this paper, the mechanical behavior of two rectangular plates spot-welded under free vibration is investigated in detail. The focus of the analysis is to evaluate the effect of thickness of reinforced plates with equivalent thickness. The results of this the investigation are compared with detailed finite element analysis and experiments of the plates spot-welded for various parameters, such as aspect ratio, area ratio, and distance ratio of spot-welding points. The conclusions obtained are as followed :*

1. The effect of thickness due to spot-weld is very large, such as 55% in comparison with area ratio of spot-welding joint is just 4.52%.
2. The effect of thickness with respect to the distance ratio is maximized when the distance ratio is 0.4.

Key words : *Spot-welding, Natural frequency, Plate, Mode shape, Equivalent thickness*

기호설명

r = Aspect ratio of a rectangular plate
r_a = Area ratio of spot-welding points
r_d = Distance ratio of spot-welding points
T_{cf} = Equivalent thickness of frequency

Ⅰ. 서 론

항공기, 선박, 자동차, 산업 및 가정용품 등에서 판구조물의 대부분이 점용접(Spot-Welding; SW)기술을 사용하여 제작된다. 이렇게 점용접은 제작과정을 용이하게 하지만, 이에 대한 해석은 쉽지가 않다. 선박의 경우 선실 등 박판을 사용하는 부분에서 많은 점용접이 존재하는데, 선실의 구조적 강도와 진동에 대한 점용접 점들의 각각의 영향에 대한 정확한 계산을 위해서는 점용접부의 기하학적 연결방법과 경계조건에대한 고려가 필요하게 된다.[1]

일반적으로 점용접을 이용한 구조물 제작은 박판과 프레임의 결합 또는 보강법의 일환으로 결함이 발생한 판 구조물에 점용접을 이용하여 보강판을 본판에 결합하는 방법 등이 있는데, 이러한 판 구조물에서 진동에 대한 두께효과를 점용접 면적비와 형상비의 변화를 설계 파라메타로 하여 두께가 1mm인 평판에 대한 1차 고유진동수의 비로 무치원화하여 나타낸 등가두께로써 평가하고자 한다.[2]

연구에 사용되는 사각평판의 재질은 연강으로써 두께가 1mm인 평판을 점용접을 이용하여 결합한 겹판으로 폭은 100

* dshan@donga.ac.kr, 019-244-4425
scahn@otis.co.kr, 019-587-9868
** cwahn@mail.donga.ac.kr, 051)200-7643
정회원, gjhan@daunet.donga.ac.kr, 016-240-1494

mm이고 길이는 형상비에 따라 각각 100mm, 150mm, 200mm 이다. 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었고, KS B 0880의 최소용접피치를 고려하면 평판의 두께가 1mm일 때 최소용접피치는 15mm이상, 최소가장자리간격은 7.5mm이상이 되어야 하고, 전극팁의 끝지름은 $5\times\sqrt{t}$ (mm)이상이 되어야 하므로 전극팁의 끝지름은 6mm를 사용하여 해석을 수행하였다.[3),4)]

본 연구에서는 점용접된 사각평판의 자유진동 시 고유진동수를 수치해석을 통하여 살펴보고, 다음으로 시험을 통하여 검증하였다. 수치해석에는 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 사용하였고, 실험에는 B&K Data analyzer를 통하여 주파수분석을 수행하였다.

Ⅱ. 연구 방법

1. 평판에서의 진동이론

유한요소해석에서 비감쇠 자유진동에 대한 지배방정식은[5)]

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=\{0\} \tag{1}$$

이고, 선형계에서 자유진동은 $\{u\}=\{u_0\}\cos\omega t$ 형태의 조화거동을 보이므로 식(1)에 대입하면

$$([K]-\omega^2[M])\{u_0\}=\{0\} \tag{2}$$

이 된다. 식(2)에서 $\{u_0\}\neq 0$이므로, 모드형상은 $|[K]-\omega^2[M]|=0$이 되는 고유벡터 $\{u_0\}$를 계산하여 나타낼 수 있다.

사각평판에서 고유진동수 ω_n은[6)]

$$\omega_n=\frac{1}{a^2}\sqrt{\frac{D}{\rho t}}\,\Omega \tag{3}$$

이고, 여기서 a는 평판의 한 변 길이, t는 평판의 두께, ρ는 질량밀도, D는 평판의 강성계수로써 $Et^3/12(1-\nu^2)$이고, Ω는 무차원변수로서 구조물의 경계조건 등 형상함수에 의해 결정되는 고유치이다.[7),8)]

만약 평판의 변의 길이와 경계조건이 일정하다면, 식(3)에서 고유진동수는 오직 두께 t만의 함수가 되고, 나머지는 모두 상수가 되므로 등가두께(T_{ef})를 고유진동수의 비로써 무차원화시켜 나타내면

$$T_{ef}=\frac{t}{t_1}=\frac{\omega_n}{\omega_{n1}} \tag{4}$$

이 된다.

Table 1 Mechanical properties of mild steel

Material	SPC1-A
Elastic modulus	2.1×10^5 MPa
Tensile strength	275 MPa
Elongation	32 %
Poisson's ratio	0.29
Density	7850×10^{-9} kg/mm^3

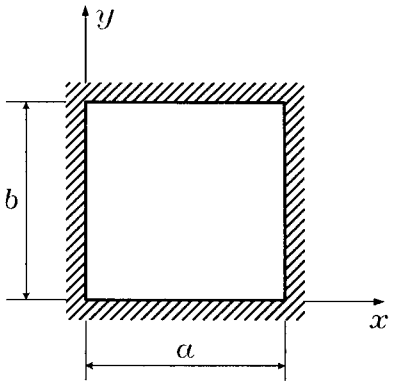

Fig. 1 Built-in edged a rectangular plate

2. 판 구조물의 모드해석

2.1 해석모델 및 방법

해석에 사용된 요소는 각 절점에서 세 개의 병진자유도(Ux, Uy, Uz)를 갖는 8절점 육면체요소를 사용하여 한변의 길이가 3mm보다 작게 되도록 모델링하였으며, Fig. 2에 면적비(4×4)에 대한 메시된 형상을 나타내었다.

면적비변화의 경우 절점은 1458~16512개, 요소는 676~6912개를, 거리비변화의 경우 절점은 1401~2585개, 요소는 1328~2408개를 각각 사용하였고, 점용접점은 절점을 공유하였으며, 솔리드모델과 쉘모델에 많이 적용되는 Block lanczos 법을 이용하여 1차에서 4차까지의 고유진동수와 모드형상을 구

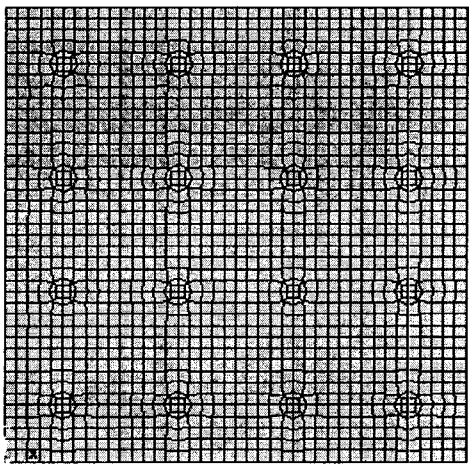

Fig. 2 Meshed shape of plates spot-welded

하였다. 경계조건은 상 · 하판 모두 네 측면 경계를 완전고정경계로 구속하였다.

2.2 설계 파라메타의 정의

2.2.1 면적비 변화

점용접 면적비가 변화함에 따라 진동에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 3종류의 형상비(r) 1.0, 1.5, 2.0에 대해 5종류의 면적비 0(non-SW;NSW), 0.0113(1row), 0.0226(2row), 0.0339 (3row), 0.0452 (4row)를 조합한 총 15가지의 모델과 등가두께 산출의 기준이 되는 두께가 1mm(1t), 2mm(2t)인 평판을 함께 사용하였다. 여기서 형상비(r)는 사각평판의 폭에 대한 길이의 비로써 r=a/b이고, 면적비(r_a)는 사각평판의 면적에 대한 총 점용접 면적의 비로써 나타내면

$$\text{면적비}(r_a) = \frac{\text{용접면적의 합}}{\text{판면적}} = \frac{n \times 9\pi}{a \times b} \quad (5)$$

이다. 여기서, n은 점용접점수이다. 형상비변화에 관계없이 한 종류의 면적비는 모두 동일하도록 하기 위해 길이방향의 점용접점수는 25mm 간격으로 1개씩 증가시켜가며 배치시켰다.

2.2.2 거리비 변화

점용접 거리비가 변화함에 따라 진동에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 점용접점수가 4개인 경우에서 3종류의 형상비(r) 1.0, 1.5, 2.0에 대해 7종류의 거리비 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8를 조합하여 총 21가지의 모델을 사용하였다. 여기서 거리비는 사각평판의 한변의 길이에 대한 점용접점 사이의 거리의 비로써 나타내면 다음과 같다.

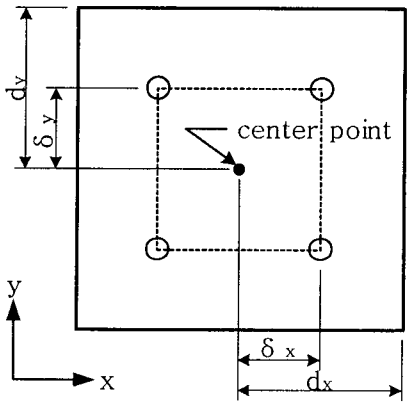

Fig. 3 Relative distance from the center point of plates spot-welded (r=1.0)

$$\text{거리비}(r_d) = \frac{\delta_x}{d_x} = \frac{\delta_y}{d_y} \quad (6)$$

형상비가 1.0인 경우에 면적비와 거리비의 용접된 형상을 Fig. 4에 나타내었다.

3. 판 구조물의 진동실험

3.1 실험장치

신호출력장치로는 모달용 가속도계 변환기를 사용하였고, 신호입력장치로는 힘 변환기가 내장되어 있는 충격망치를 사용하였다. 신호증폭장치로는 2채널 증폭기를 사용하여 입 · 출력신호를 증폭하였고, 신호처리장치로는 4채널 펄스를 사용하여 입력받은 두 신호를 고속 퓨리에 변환시킨 스펙트럼 값인 가진점에서의 충격 가진력과 응답점에서의 복소진폭의 크기 비로 전달함수를 계산하였다. 창함수는 가속도계 변환기의 경우 지수함수, 충격망치의 경우 전달함수를 사용하였으며, Fig. 5에 측정장비를 나타내었다.

3.2 실험방법

유한요소해석 결과의 검증을 위해 형상비 1.0에서 3종류의 면적비 0(NSW), 0.0226(2row), 0.0452 (4row)와 3종류의 거리비 0.2, 0.5, 0.8의 6가지의 경우에 대해 각각 3개의 시료를 사용하여 총 18번의 실험을 실시하였다.

모달용 가속도계 변환기를 완전고정된 평판의 임의의 한 위치에 부착하고, 충격망치로 평판의 4점을 각각 5회씩 가진시킨 후 가진점의 전달함수를 진동수 0~3200 Hz 범위에 걸쳐서 측정하였다.

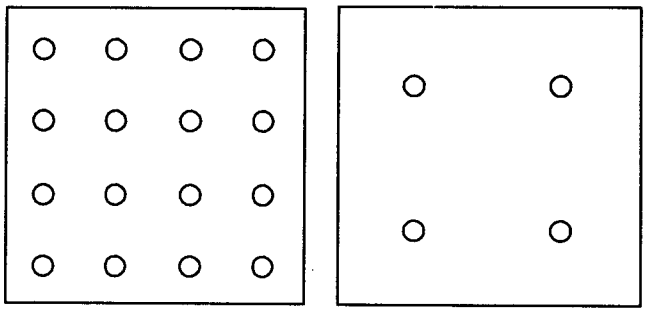

Fig. 4 Shapes of plate structures spot-welded for two parameter; (a) area ratio(ra= 0.0452), (b) distance ratio (rd=0.5)

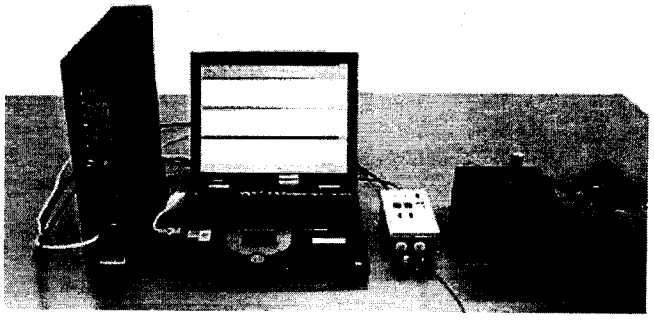

Fig. 5 Measurement system of modal test (B&K)

Ⅲ. 해석결과 및 고찰

1. 실험 및 유한요소해석 결과의 비교

유한요소해석의 결과의 검증을 위하여 면적비와 거리비에 따른 진동실험 결과를 해석결과와 비교하여 Table 2와 3에 각각 나타내었다. 면적비의 경우 2t를 제외하고는 1차 모드에서는 4% 이내, 2차 모드에서는 7% 이내의 오차를 보였다. 거리비의 경우 1차 모드에서는 r_d=0.2를 제외하고 2% 이내, 2차 모드에서는 7% 이내의 오차를 보였다. 이를 통해볼 때, 본 연구에서 유한요소해석의 결과를 충분히 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

2. 면적비변화에 따른 진동특성

각 형상비에서 면적비변화에 따른 점용접된 두 사각평판의 고유진동수를 4차까지 Table 4에 나타내었고, 1차 고유진동수에 대해 두께가 1mm인 평판을 기준으로 등가두께(T_{ef})를 계산하여 Table 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

Table 2 Comparison with natural frequency of experiment and FEM with respect to area ratio

Mode	r_a	Exp.	FEM	Difference
1st	1t	858	894	4.1 %
	NSW	890	896	0.6 %
	2row	1172	1162	0.9 %
	4row	1362	1337	1.9 %
	2t	1573	1783	11.8 %
2nd	1t	1692	1826	7.3 %
	NSW	1720	1833	6.1 %
	2row	2059	2019	2.0 %
	4row	2469	2516	1.9 %
	2t	3176	3632	12.6 %

Table 3 Comparison with natural frequency of experiment and FEM with respect to distance ratio

Mode	r_d	Exp.	FEM	Difference
1st	0.2	1117	994	12.5 %
	0.5	1060	1051	0.8 %
	0.8	884	904	2.2 %
2nd	0.2	2153	2018	6.7 %
	0.5	1958	1947	0.6 %
	0.8	1724	1856	7.1 %

Table 4 Natural frequency with respect to aspect ratio and area ratio (unit:Hz)

r	r_a	1st	2nd	3rd	4th
1.0	1t	894.4	1825.7	1825.7	2691.1
	NSW	895.6	1832.6	1832.6	2706.0
	1row	1045.2	2023.5	2142.6	2866.8
	2row	1161.5	2018.6	2153.7	3147.1
	3row	1257.3	2364.0	2464.6	3348.4
	4row	1337.1	2516.0	2516.1	3538.3
	2t	1783.4	3632.0	3632.0	5341.5
1.5	1t	671.1	1036.4	1645.4	1654.1
	NSW	671.9	1038.5	1651.2	1660.2
	1row	742.9	1226.2	1845.7	1951.6
	2row	928.9	1317.4	1765.3	1975.8
	3row	977.8	1442.4	2173.6	2286.8
	4row	1036.7	1535.1	2295.4	2315.5
	2t	1339.2	2066.2	3275.2	3293.1
2.0	1t	610.9	790.8	1112.5	1574.2
	NSW	611.5	791.9	1115.0	1579.7
	1row	651.1	910.4	1322.7	1792.6
	2row	865.8	1057.0	1401.8	1691.7
	3row	896.5	1138.2	1541.4	2086.3
	4row	949.7	1207.9	1641.4	2223.6
	2t	1219.2	1577.6	2217.7	3135.2

Table 5 Equivalent thickness with respect to aspect ratio and area ratio

r_a \ r	1.0	1.5	2.0
1t	1.00	1.00	1.00
NSW	1.00	1.00	1.00
1row	1.17	1.11	1.07
2row	1.30	1.38	1.42
3row	1.41	1.46	1.47
4row	1.49	1.54	1.55
2t	1.99	2.00	2.00

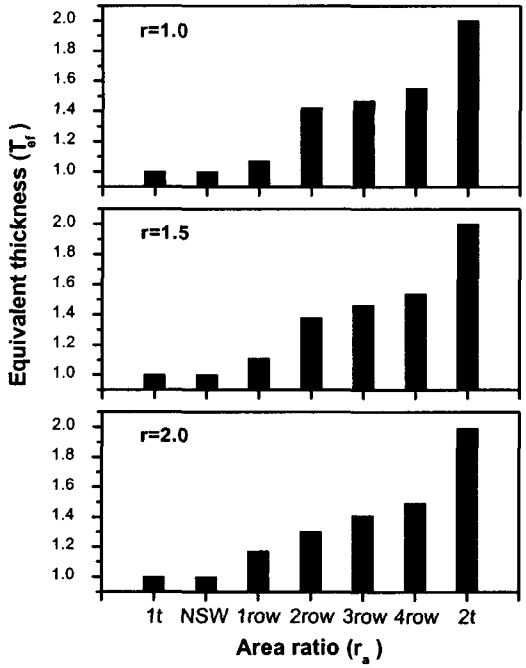

Fig. 6 Equivalent thickness with respect to aspect ratio and area ratio

면적비 r_a=0일 때, 즉 두께가 1mm인 평판 2개를 점용접하지 않고 겹쳐만 놓았을 때의 고유진동수는 두께가 1mm인 평판 1개의 고유진동수와 거의 같고, 면적비가 증가할수록 점점 증가하였다. 형상비가 증가함에 따라 등가두께는 면적비 r_a=0.0113 (1row)인 경우 점점 감소하였으며, r_a=0.0226(2row), 0.0339 (3row), 0.0452(4row)는 증가하다가 각각 1.42, 1.47, 1.55에 수렴하였다. 면적비가 커짐에 따른 증가폭은 2줄 배열일 때가 가장 크게 나타났으며, 면적비가 더 증가할수록 현저히 줄어들었다.

3. 거리비변화에 따른 진동특성

각 형상비에서 거리비변화에 따른 점용접된 두 사각평판의 고유진동수를 4차까지 Table 6에 나타내었고, 1차 고유진동수에 대해 두께가 1mm인 평판을 기준으로 등가두께(T_{ef})를 계산하여 Table 7과 Fig. 7에 각각 나타내었다.

등가두께는 형상비가 증가함에 따라 일정하게 감소하였고, 거리비가 증가함에 따라 형상비와 관계없이 모두 r_d=0.4까지는 증가하였다가 감소하는 경향을 보였으며, 거리비가 0.4일 때, 각각 1.21, 1.17, 1.13으로써 가장 높은 값을 보였고, .거리비가 0.7이상에서는 보강효과가 거의 없음을 알 수 있었다.

4. 모드형상

형상비 r=1.0인 경우에 대하여 두께가 1mm인 단순 사각평판과 면적비와 거리비 중 대표적인 4가지 경우에 대한 모드형상을 각각 1차에서 4차 모드까지 Table 8에 나타내었다. 1차와 4차 모드는 모두 비슷하지만, 2차와 3차 모드는 순수평판(1t,

Table 6 Natural frequency with respect to aspect ratio and distance ratio (unit:Hz)

r	r_d	1st	2nd	3rd	4th
1.0	0.2	993.5	2017.9	2017.9	2910.7
	0.3	1053.2	1964.5	1964.5	2870.5
	0.4	1079.8	1934.3	1934.3	2780.7
	0.5	1051.2	1946.8	1946.8	2789.8
	0.6	991.9	1952.6	1952.6	2886.3
	0.7	935.1	1908.9	1909.0	2889.1
	0.8	904.0	1856.0	1856.1	2782.4
1.5	0.2	734.8	1132.1	1788.1	1879.6
	0.3	769.9	1120.6	1730.8	1916.5
	0.4	784.7	1134.0	1693.4	1821.0
	0.5	764.6	1154.1	1695.6	1751.0
	0.6	727.5	1144.6	1704.2	1750.3
	0.7	694.3	1097.5	1687.1	1731.9
	0.8	676.7	1055.3	1663.0	1688.9
2.0	0.2	658.7	847.1	1231.9	1615.4
	0.3	683.9	856.9	1152.7	1637.6
	0.4	692.2	882.9	1210.9	1623.6
	0.5	675.4	902.5	1199.2	1624.8
	0.6	648.6	885.5	1211.1	1630.4
	0.7	626.9	841.0	1186.3	1621.8
	0.8	614.8	804.9	1139.6	1605.3

Table 7 Equivalent thickness with respect to aspect ratio and distance ratio

r_d \ r	1.0	1.5	2.0
0.2	1.11	1.10	1.08
0.3	1.18	1.15	1.12
0.4	1.21	1.17	1.13
0.5	1.18	1.14	1.11
0.6	1.11	1.08	1.06
0.7	1.05	1.03	1.03
0.8	1.01	1.01	1.01

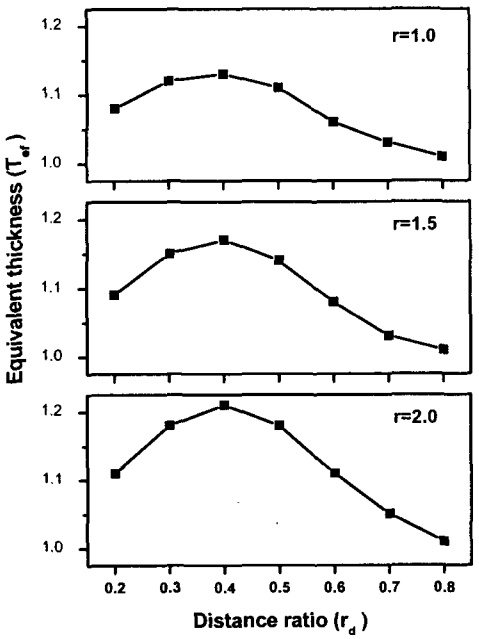

Fig. 7 Equivalent thickness with respect to aspect ratio and distance ratio

2t)과 점용접된 보강평판이 확연히 다른 경향을 보였다. 즉, 1t는 2차 모드의 경계면이 수직에서 30°쯤 돌아간 순수평판의 특성을 보이며, 점용접된 평판의 경우 2차 모드의 경계면이 수직인 보강판의 특성을 보이고 있다. 그런데, 면적비 r_a=0.0452인 경우는 2차 모드의 경계면이 수직에서 20°쯤 돌아간 상태이며, 이는 등가두께가 1.5를 넘어서면 상·하판이 일체가 되어 순수평판과 같은 거동을 하게 됨을 알 수 있다. 또한 거리비변화에 따른 영향을 살펴보면, 거리비 r_d=0.4인 경우에 2차 모드의 경계면이 수직에서 30°쯤 돌아간 순수평판의 거동과 같은 거동을 보임으로써 등가두께가 1.5 이하에서도 등간격으로 점용접을 행할 때 진동에 효과적임을 알 수 있다. 거리비 r_d=0.8인 경우 2차 모드의 경계면이 수직에서 45°쯤 돌아갔는데, 이는 점용접이 평판의 고정단에 인접하게 되어 점용접의 영향이 전혀 나타나지 않음을 보여주고 있다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 점용접을 이용하여 보강된 판 구조물의 비감쇠 자유진동에 대한 진동특성을 유한요소해석과 실험을 통하여 살펴보았으며, 고유진동수에 대한 등가두께로써 면적비와 거리비에 따른 보강효과를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험을 통하여 유한요소해석의 결과를 비교하면, 면적비의 2t의 경우를 제외하고, 1차는 4% 이내, 2차는 7% 이내의 오차를 보였으며, 거리비의 경우 1차 모드는 0.2를 제외하고 2% 이내, 2차는 7%이내의 오차를 보임으로써 해석결과를 충분히 신뢰할 수 있음을 알 수 있었다.

Table 8 Mode shapes of a rectangular plates spot-welded with respect to area ratio and distance ratio (r=1.0)

Design parameter		1st	2nd	3rd	4th
Area ratio (r_a)	1t				
	0.0226 (2row)				
	0.0339 (3row)				
	0.0452 (4row)				
Distance ratio (r_d)	0.2				
	0.4				
	0.6				
	0.8				

2. 형상비가 증가할수록 면적비에 따른 등가두께는 1줄 배열일 때 점점 감소하였고, 2줄, 3줄, 4줄 배열은 점점 증가하다가 각각 1.42, 1.47, 1.55에 수렴하였으며, 면적비가 증가할수록 등가두께 증가폭은 2줄 배열일 때가 가장 크게 나타났으며 3줄 이상이 되면 현저히 줄어들었다.
3. 형상비가 증가할수록 거리비에 따른 등가두께는 모두 감소하는 경향을 보였으며, 각각의 형상비에서 거리비가 0.4까지 증가하였다가 감소하였다. 두께효과는 거리비가 0.4일 때 각각 1.21, 1.17, 1.13으로 가장 크게 나타났으며, 거리비가 0.7이상이 되면 점용접의 효과는 거의 없는 것으로 나타났다.
4. 모드형상은 1차와 4차 모드는 모두 같은 경향을 보였고, 2차와 3차 모드는 점용접 형태에 따라 다르게 나타났다. 즉, 등가두께가 1.5 이상이 되는 면적비 r_a=0.0452인 경우에 진동에 효과적이었으며, 면적비와 관계없이 등 간격으로 점용접을 행할 때 진동에 효과적임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] X. Deng, W. Chen, and G. Shi, "Three- Dimensional Finite Element Analysis of the Mechanical Behavior of Spot Welds," Finite Elements in Analysis & Design, Vol. 35, pp. 17-39, 2000.

[2] Demeter G. Gertis and Chin T. Lee, "Elastic and Inelastic Analysis of Vibriable Thickness Plates, Using Equivalent System," Mech. Struct. & Mach., Vol. 12, No. 2, pp. 201-236, 1993.

[3] 서승일, 이재호, 장상길, 차병우, "점용접시 압흔 깊이 감소를 위한 최적용접조건 선정에 관한 연구," 대한용접학회지, 제14권, 제2호, 1996.

[4] 이현철, 심재준, 안성찬, 한근조, "점용접된 구조물의 좌굴하중해석," 한국항만학회지, 제14권, 제1호, pp. 87-95, 2000.

[5] D. Mohan and H. B. Kingsbury, "Free Vibration of Generally Orthotropic Plates," J. of Acoustical Society of America, Vol. 50, pp. 266-269, 1971.

[6] Osama K. Bedair and M. S. Troitsky, "A Study of the Fundamental Frequency Characteristics of Eccentrically and Concentrically Simply Supported Stiffened Plates," Int. J. Mech. Sci., Vol. 39, No. 11, pp. 1257-1272, 1997.

[7] S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, "Theory of Plates and Shells," McGraw-Hill, pp. 319-347, 1959.

[8] A. C. Ugral, "Stresses in Plates and Shells," McGraw-Hill, pp. 90-95, 1981.

원고접수일 : 2001년 11월 23일
원고채택일 : 2002년 01월 06일