

면적비와 거리비가 점용접된 두 사각평판의 굽힘강성에 미치는 영향

한근조[†]·안성찬*·심재준*·한동섭*

(2002년 5월 21일 접수, 2003년 2월 4일 심사완료)

The Effect of the Area Ratio and the Distance Ratio on Bending Stiffness of Two Rectangular Spot-Welded Plates

Geun-Jo Han, Sung-Chan Ahn, Jae-Joon Shim and Dong-Seop Han

Key Words: FEM(유한요소법), Bending Stiffness(굽힘강성), Spot-Welding(점용접), Equivalent Thickness(등가두께), Plate(평판)

Abstract

The mechanical behavior of two rectangular spot-welded plates under bending is investigated in detail. The equivalent thickness of spot-welded plates is introduced in this study and used in explaining the results. The focus of the analysis is to evaluate the effect of spot-welding from the view point of equivalent thickness. The investigation of deflection has been performed as comparing the result from finite element analysis with the measured data of the spot-welded plates for various parameters, such as aspect ratio, area ratio, and distance ratio of spot-welding points. The effect of spot-welding is as large as 62%(at $r=1.0$) when the area ratio of spot-welding point is just 4.52%.

기호설명

- r : 평판의 형상비
- A : 점용접점의 면적비
- D : 점용접점의 거리비
- T_e : 평판구조물의 등가두께

1. 서론

항공기, 선박, 자동차, 산업 및 가정용품 등에서 판 구조물의 대부분이 저항점용접(RSW) 기술을 사용하여 제작된다. 이렇게 점용접은 제작과정을 용이하게 하지만, 이에 대한 해석은 쉽지가 않다. 예를 들어 자동차 차체는 수천 개의 점용

접이 존재하는데, 차체의 구조적 강도(rigidity)와 하중 전달에 있어서 점용접 점들간의 영향을 정확히 계산하기 위해서는 점용접부의 기하학적 연결방법을 고려해야 한다. 그로 인해 주위 부분들의 접촉에 대한 고려가 필요하게 된다.

이러한 점용접에 대한 연구는 Deng⁽¹⁾ 등이 용접점의 인장 및 전단강도에 대한 유한요소해석과 실험을 병행하였으며, Lee⁽²⁾ 등이 점용접시 압흔 깊이를 감소시키기 위한 최적 용접조건에 관한 연구를 하였다. 그리고 Han⁽³⁾ 등은 점용접점이 보강된 평판구조물의 좌굴응력에 미치는 영향에 대하여 연구한 바 있다. 그러나 점용접점이 보강된 평판구조물의 굽힘응력에 미치는 영향에 대해서는 보고된 바가 없으며, 본 연구에서는 점용접을 이용하여 보강판을 본판에 결합하는 과정에서 굽힘하중이 작용할 때의 보강효과를 점용접 면적비와 형상비의 변화를 설계 파라메타로 선택하여 등가두께(Equivalent thickness)로서 평가하고자 한다.

점용접점이 평판 구조물의 처짐과 등가두께에

[†] 책임저자, 회원, 동아대학교 기계산업시스템공학부

E-mail : gjhan@daunet.donga.ac.kr

TEL : (051)200-7650 FAX : (051)200-7656

* 동아대학교 대학원 기계공학과

미치는 영향을 알아보기 위하여 점용접된 사각평판의 굽힘 조건에서 보강효과를 먼저 수치해석을 통하여 살펴보고, 다음으로 실험을 통하여 검증하였다. 수치해석에는 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 사용하였고, 등방, 등질의 재료로 가정하고 접촉요소를 적용하여 탄성조건에서 해석을 수행하였다. 실험에는 만능측정시험기인 INSTRON을 사용하여 굽힘시험을 수행하였다.

2. 용접조건 및 평판의 이론

2.1 용접조건

연구에 사용되는 사각평판의 재질은 연강으로서 두께가 1mm인 평판을 점용접으로 결합한 곁판으로 폭은 100mm이고 길이는 형상비에 따라 각각 100mm, 150mm, 200mm이다. 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다. KS B 0880의 최소용접피치를 고려하면 평판의 두께가 1mm일 때 최소용접피치는 15mm이상, 최소 가장자리간격은 7.5mm 이상이 되어야 하며, 전극팁의 끝지름은 $5\sqrt{t}$ (mm) 이상이 되어야 하므로 전극팁의 끝지름은 6mm를 사용하였다. 점용접은 Potable spot-welding(P.S.W)기를 사용하여 용접전류 9,000A, 전극가압력 270kgf/cm², 전극가압시간 0.82sec로서 수행하였다.

2.2 평판 구조물의 등가두께

한변의 길이가 a인 완전고정된 사각평판에 등분포 면압 p가 작용할 때, 형상비(r)가 1인 경우 최대 처짐은

$$w_{max} = 0.00126 \frac{pa^4}{D} \tag{1}$$

이고, 여기서 D는 휨강성계수이다.⁽⁴⁾

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

Table 1 Mechanical properties of mild steel

Material	mild steel
Elastic modulus	206 GPa
Tensile strength	550 MPa
Yield strength	210 MPa
Poisson's ratio	0.29

위 식에서 처짐(w)은 오직 두께 t만의 함수이고 나머지는 모두 상수이다. 따라서, 등가두께(T_e)를 평판 한 장의 최대 처짐(W_{0max})에 대한 평판구조물의 최대 처짐(w_{max})의 비로서 나타내면

$$T_e = \left(\frac{W_{0max}}{w_{max}} \right)^{1/3} t_0 \tag{2}$$

이고, 여기서 t₀는 기준 평판의 두께이며 기준 평판으로 두께가 1mm인 평판을 사용하였다.⁽⁵⁾

3. 점용접된 평판의 유한요소해석

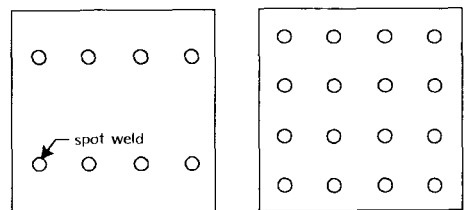
3.1 파라메타의 정의

3.1.1 면적비 변화

점용접 면적비의 변화가 평판의 굽힘에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 3종류의 형상비(r) 1.0, 1.5, 2.0에 대해 5종류의 면적비(A) 0(non-RSW), 0.0113(1×4), 0.0226(2×4), 0.0339(3×4), 0.0452(4×4)를 조합하여 총 15종류의 모델을 사용하였다. 여기서 면적비는 사각평판의 면적에 대한 총 점용접점 면적의 비로서 식 (3)과 같다.

$$\text{면적비}(A) = \frac{\text{총점용접면적}}{\text{평판의면적}} = \frac{n \times 9\pi}{a \times b} \tag{3}$$

여기서, n은 점용접 개수이다. 형상비가 1인 경우에 대해 두 가지의 면적비에 대한 점용접 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 형상비 변화에 관계없이 한 종류의 면적비는 모두 동일하도록 하기 위해 길이방향의 점용접 점수는 25mm 간격으로 1개씩 증가 시켜가며 배치시켰다.



(a) A=0.0226(2×4) (b) A=0.0452(4×4)

Fig. 1 Various arrangements of spot-welds with changing the area ratio (r=1)

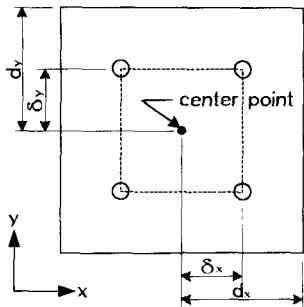


Fig. 2 The relative distance from the center point of the spot-welded plate ($r=1$)

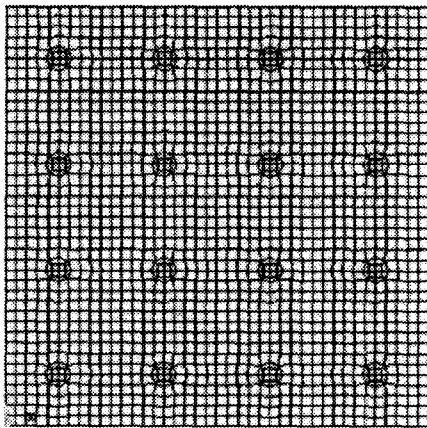


Fig. 3 Meshed shape of model ($r=1, A=0.0452$)

3.1.2 거리비 변화

점용접 거리비의 변화가 평판의 굽힘에 미치는 영향을 점용접점수가 4개인 점용접된 사각평판에 대하여 살펴보았다. 3종류의 형상비(r) 1.0, 1.5, 2.0에 대해 7종류의 거리비(D) 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8을 조합하여 총 21종류의 모델을 사용하였다. Fig. 2에 $r=1$ 일 때 점용접점이 4개인 모델을 나타내었다. 여기서 거리비는 사각평판의 한변의 길이에 대한 점용접점 사이의 거리의 비로서 식(4)과 같다.

$$\text{거리비}(D) = \frac{\delta_x}{d_x} = \frac{\delta_y}{d_y} \quad (4)$$

3.2 해석모델

해석에 사용된 요소는 각 절점에서 세 개의 변위자유도(U_x, U_y, U_z)를 갖는 8절점 육면체 요소를 사용하여 모두 육면체로서 한 변의 길이가

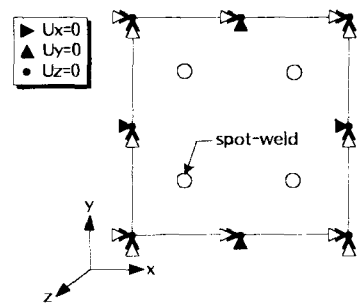


Fig. 4 Boundary condition of a rectangular spot-welded plate

3mm보다 작게 되도록 모델링하였다. Fig. 3에 $r=1, A=0.0452(4 \times 4)$ 인 모델의 매쉬된 형상을 나타내었다.

면적비 변화의 경우 절점은 1458~16512개, 요소는 676~6912개, 거리비 변화의 경우 절점은 1401~2585개, 요소는 1328~2408개를 각각 사용하였다. 점용접점은 절점을 공유하였으며, 나머지 접합면은 3D Surface-to-Surface 접촉요소를 사용하여 유한요소해석을 수행하였으며, 접촉요소에 연강 대 연강의 마찰상수 0.5를 고려하였다.

굽힘에 대한 등가두께(T_e)는 오직 두께 t 만의 함수로서 하중과는 무관하다. 따라서 해석모델 중 가장 취약한 경우인 두께가 1mm이고 평판의 길이가 $100 \times 100\text{mm}$ 일 때 소성변형을 일으키지 않는 임계하중 200N을 평판의 중심에 적용하여 처짐을 가시화 하였다. 경계조건은 완전고정경계로 상·하판의 네 변에 있는 모든 절점의 자유도를 구속하였으며, Fig. 4에 경계조건을 나타내었다.

4. 점용접된 평판의 굽힘시험

4.1 실험방법

변위측정은 만능시험기인 INSTRON을 이용하여 압축시험으로 굽힘조건을 설정하였다. 결과의 신뢰도를 높이기 위해 정적 변위 및 응력측정기인 UCAM을 이용하여 작용하중을, dial gauge를 이용하여 변위를 검증하였다.

측정은 탄성영역 내에서 이뤄졌다. 즉, 하중을 0에서 200N까지 일정한속도로 증가시켜 하중-변위 선도를 얻고, 이 그래프에서 나타난 선도의 기울기를 통해 200N에서의 처짐을 계산하였다.

4.2 실험조건

유한요소해석과 동일한 조건으로 실험을 하기 위해 형상비가 1.0, 1.5, 2.0이 되도록 세 가지의 jig를 제작하여 완전고정의 경계조건을 부여하였고, 하중은 집중하중을 평판의 중앙에 작용하였다. Fig. 5는 굽힘시험을 통해 처짐을 측정하는 측정과정 및 장치를 나타내었다.

시편은 3종류의 면적비 0(non-RSW), 0.0226(2×4), 0.0452(4×4), 3종류의 거리비 0.2, 0.5, 0.8을 각각 준비하여 각각 9종류에 대해서 실험하였다. 등가두께를 계산하기 위한 기준이 되는 w_{max} 를 얻기 위해 두께가 1mm, 2mm인 평판에 대해서도 측정하였다. 시편은 각 종류에 대해 3개씩의 시료를 준비하여 총 72가지의 경우에 대해 측정하였다.



Fig. 5 Measurement system of bending test with fixed boundary

Table 2 Comparison of maximum deflection of FEA and experiment with respect to the change of aspect ratio(r) and area ratio(A)

r	A	Exp. data [mm]	FEA data [mm]	Difference [%]
1.0	t = 1mm	0.617	0.561	9.98
	0 (non-RSW)	0.289	0.281	2.85
	0.0226 (2×4)	0.221	0.187	18.18
	0.0452 (4×4)	0.174	0.133	30.83
1.5	t = 2mm	0.095	0.071	33.80
	t = 1mm	0.705	0.709	-0.56
	0 (non-RSW)	0.364	0.355	2.54
	0.0226 (2×4)	0.267	0.211	26.54
2.0	0.0452 (4×4)	0.194	0.158	22.78
	t = 2mm	0.121	0.089	35.96
	t = 1mm	0.711	0.728	2.34
	0 (non-RSW)	0.371	0.364	1.92
2.0	0.0226 (2×4)	0.271	0.213	27.23
	0.0452 (4×4)	0.197	0.162	21.60
	t = 2mm	0.120	0.091	31.87

5. 결과 및 고찰

5.1 유한요소해석 결과와 실험 결과의 비교

실험결과 처리는 시편의 두께가 일정하지 않으므로 각 종류에 대해 3번의 실험을 통해 얻어진 값을 동일한 두께로 보정한 후 결과를 평균하여 계산하였다. 이때 최대 표준편차는 면적비의 경우 형상비가 1.5이고 면적비 A=0.0226(2row)일 때 2.268%, 거리비의 경우 형상비가 1.0이고 거리비가 0.8일 때 2.741%로 나타났으나, 대부분 0.5% 이내로 나타났다.

5.1.1 면적비 변화에 따른 최대 처짐

각 형상비에서 면적비 변화에 따른 점용접된 두 사각평판의 최대 처짐에 대한 유한요소해석(FEA)과 실험(Exp.)의 결과를 Table 2에 비교하여 나타내었다.

Table 2에서 면적비가 0(non-RSW)인 경우는 형상비와 관계없이 실험 값과 FEA 값이 3% 이내로 거의 일치하였으나, 점용접이 이뤄진 부분에서는 18~30%까지 차이가 남을 알 수 있다. 이는 점용접점의 해석 시 단순 접합으로 놓고 해석하였고 용접으로 인한 잔류응력을 고려하지 않았기 때문이라 분석된다. 전체적으로 실험 값이 FEA 값보다는 최대 처짐값이 크게 나타났으나 면적비 변화에 따른 경향은 유사하게 나타났다.

5.1.2 거리비 변화에 따른 최대 처짐

각 형상비에서 거리비 변화에 따른 점용접된

Table 3 Comparison of maximum deflection of FEA and experiment with respect to the change of aspect ratio(r) and distance ratio(D)

r	D	Exp. data [mm]	FEA data [mm]	Difference [%]
1.0	0.2	0.185	0.181	2.21
	0.5	0.283	0.225	25.78
	0.8	0.345	0.283	21.91
1.5	0.2	0.234	0.241	-2.90
	0.5	0.355	0.310	14.52
	0.8	0.388	0.358	8.38
2.0	0.2	0.271	0.266	1.88
	0.5	0.372	0.345	7.83
	0.8	0.392	0.370	5.95

Table 4 Equivalent thickness with respect to the change of aspect ratio(*r*) and area ratio(*A*) [mm]

A \ r	1.0	1.5	2.0
t = 1mm	1.00	1.00	1.00
0 (non-RSW)	1.26	1.26	1.26
0.0113 (1×4)	1.42	1.37	1.35
0.0226 (2×4)	1.44	1.50	1.51
0.0339 (3×4)	1.53	1.55	1.55
0.0452 (4×4)	1.62	1.65	1.65
t = 2mm	2.00	2.00	2.00

Table 5 Equivalent thickness with respect to the change of aspect ratio(*r*) and distance ratio(*D*) [mm]

D \ r	1.0	1.5	2.0
0.2	1.46	1.43	1.40
0.3	1.46	1.41	1.36
0.4	1.42	1.37	1.32
0.5	1.36	1.32	1.28
0.6	1.31	1.28	1.26
0.7	1.27	1.26	1.26
0.8	1.26	1.26	1.25

두 사각평판의 최대 처짐에 대한 유한요소해석과 실험의 결과를 Table 3에 비교하여 나타내었다.

Table 3에서 거리비의 경우 실험값과 FEA 값이 최대 25% 차이가 났으며, 형상비 *r*이 증가할수록 최대 14%, 7%로 차이가 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 절대 값의 차이는 있지만 실험 값과 FEA 값이 유사한 경향을 나타내었다.

면적비와 거리비 모두 실험과 FEA이 결과가 절대값은 차이가 나지만 변화에 따른 경향은 유사하게 나타나므로 FEA이 값을 신뢰할 수 있었다.

5.2 점용접된 평판 구조물의 등가두께

5.2.1 면적비 변화에 따른 등가두께

각 형상비에서 면적비 변화에 따른 점용접된 두 사각평판의 등가두께(*T_e*)를 Table 4에 나타내었다.

등가두께는 형상비가 증가함에 따라 조금씩 증가하나 그 증가량은 형상비가 1.0~1.5구간에서 보다 1.5~2.0구간에서 더욱 작게 나타났다. 면적비 변화에 따른 영향을 살펴보면 점용접의 효과는 A=0에 비해 A=0.0226인 경우 최대 25%, A=0.0452인 경우 최대 39%까지 증가하였다. 또한 점용접 면적이 평판의 4.52%인데 비해 용접으로 인한 두께효과는 형상비 1.0일 때 62%로서 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

5.2.2 거리비 변화에 따른 등가두께

각 형상비에서 거리비 변화에 따른 점용접된 두 사각평판의 등가두께(*T_e*)를 Table 5에 나타내었다.

형상비가 증가할수록 등가두께는 감소하는 경향을 보였다. 또한, 거리비에 따른 두께효과는 대칭균등조건인 D=0.5에 대해 D=0.2인 경우 최대 12% 증가, D=0.8인 경우 최대 10% 감소하였다. 이는 상판에 하중이 가해지면 용접점들 간의 피치가 커질수록 용접점을 통한 힘의 전달이 평판의 경계로 이동하게 되어 평판구조물의 점용접을 통한 보강효과가 줄어들게 됨을 나타낸다. 따라서 판과 판사이의 접촉에 의한 힘의 전달보다는 용접점을 통한 전달이 평판구조물의 처짐에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 점용접을 이용하여 보강하는 평판구조물의 굽힘조건에서 면적비와 거리비 변화에 따른 보강효과를 등가두께로서 나타내었으며, 유한요소해석과 실험을 병행하여 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 중심에 집중하중이 작용할 경우 처짐은 장변(長邊)이 단변(短邊)의 1.5배 이상이 되면 형상비에 따른 처짐의 변화량이 현저히 줄어들게 된다.
- (2) 면적비 변화에 따른 영향을 살펴보면, 유한요소해석의 경우 두께효과는 A=0(non-RSW)에 비해 A=0.0226(2×4)인 경우 최대 25%, A=0.0452(4×4)인 경우 최대 39% 증가하였고, 실험의 경우 두께효과는 A=0(non-RSW)에 비해 A=0.0226 (2×4)인 경우 최대 15%, A=0.0452(4×4)인 경우 최대 30% 증가하였다.
- (3) 거리비 변화에 따른 영향을 살펴보면, 유한

요소해석의 경우 두께효과는 대칭균등조건인 $D=0.5$ 에 비해 $D=0.2$ 인 경우 최대 12% 증가, $D=0.8$ 인 경우 최대 10% 감소하였고, 심함의 경우 두께효과는 대칭균등조건인 $D=0.5$ 에 비해 $D=0.2$ 인 경우 최대 19% 증가, $D=0.8$ 인 경우 최대 9% 감소하였다.

(4) 전체적으로 유한요소해석 결과와 실험 결과는 유사한 경향을 보였으며, 면적비와 거리비 변화에 따라 처짐은 실험 값이 FEM 값보다 크게 나왔으며, 따라서 두께효과는 실험 값이 FEM 값보다 작게 됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 동아대학교 지능형통합항만관리연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

(1) Deng, X., Chen, W. and Shi, G., 2000, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the

Mechanical Behavior of Spot Welds," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 35, pp. 17~39.

(2) Lee, J. K., Seo, S. I., Jang, S. K. and Cha, B. W., 1996, "A Study on the Optimum Welding Conditions for Reducing the Depth of Indentation of Surface in Spot Welding," *Jour. of KWS*, Vol. 14, No. 2, pp. 57~64.

(3) Han, G., Ahn, S., Shim, J., Lee, H. and Jang, H., 2001, "The Effect of the Area Ratio and Change of Location on the Buckling Stress of Two Rectangular Plates Spot-welded," *Jour. of KSPE*, Vol. 18, No. 12, pp. 54~59.

(4) Ugural, A. C., 1981, "Stresses in Plates and Shells," McGraw-Hill, pp. 153~173.

(5) Demeter G. Gertis and Chin T. Lee, 1993, "Elastic and Inelastic Analysis of Variable Thickness Plates, Using Equivalent System," *Mech. Struct. & Mach.*, Vol. 12, No. 2, pp. 201~236.