

면적비와 위치변화가 점용접된 두 사각평판의 좌굴응력에 미치는 영향

한근조*, 안성찬**, 심재준**, 이현철**, 장활수**

The Effect of the Area Ratio and Change of Location on the Buckling Stress of Two Rectangular Plates Spot-welded

Geun Jo Han*, Sung Chan Ahn**, Jae Joon Shim**, Hyoun Chul Lee**, and Hwal Su Jang**

ABSTRACT

The stability of a thin plate structure is very crucial problem which results buckling. Because the buckling strength of thin plates is lower than the yield strength of the material, reinforcement plate must be used to increase the buckling strength. And, in this case, spot welding is commonly used, however, the spot welded joints are practically designed by experimental decisions, so it is inefficient and has the risks of buckling demolition. In this study, two parameters, such as the area ratio and the distance ratio of spot welding which have influence on the buckling strength, should be chosen. Under compressive and shearing load, the effect of two parameters on the critical stress is discussed.

Key Words : Spot-welding(점용접), Buckling(좌굴), Stability(안정성), Critical Stress(임계응력), Rectangular plate(사각평판), Buckling coefficient(좌굴계수), Aspect ratio(면적비), Distance ratio(거리비), Relative location(상대위치), Stress ratio(응력비)

기호설명

r = aspect ratio
 e = distance ratio
 Q = area ratio

1. 서론

평판구조물에 있어 가장 큰 문제는 안정성에 대

한 문제로써 주로 주름(wrinkle) 혹은 좌굴(buckling)이 그 원인이 되기 때문에 이런 좌굴에 대한 연구가 여러 각도로 이루어지고 있다. 평판에 압축 및 전단하중이 작용하는 경우에 평판의 좌굴강도는 재료의 인장·압축강도에 비해 매우 작기 때문에 좌굴강도를 증가시키기 위해서 주로 보강재를 이용한 방법을 사용하지만, 보강재와 평판을 전체 면적에 대해 용접한다는 것은 불가능하므로 대부분 점용접(spot welding)을 사용하여 접합하게 된다. 그러나 이런 평판과 보강판의 점용접 접합부에 관한 연구

2001년 2월 15일 접수
* 동아대 기계산업시스템공학부
** 동아대 대학원

는 전무한 실정이며, 실제로 점용접 접합부의 설계는 대부분 경험적인 판단에 의해 이루어지고 있으며 매우 비효율적일 뿐만 아니라 산업구조물의 좌굴붕괴사고의 위험성도 크다고 할 수 있다.⁶⁾

본 연구에서는 평판의 좌굴강도에 영향을 미치는 여러 인자 중 점용접 면적비, 거리비를 설계 파라메타로 선택하여 연구를 수행하였다. 두 사각평판이 점용접되었을 때 각각의 형상비에서 점용접 면적비가 변화함에 따른 임계하중(critical load)과 응력비의 변화를 살펴보고 그 관계식을 4차의 다항식으로 표현하여 필요한 용접점수의 선택을 용이하게 하고자 하였으며, 점용접의 거리비의 변화에 따른 좌굴강도의 변화를 살펴봄으로써 최대의 보강효과를 갖는 거리비를 선정하고자 하였다.

Table 1 Mechanical properties of STS 304

Material	STS304
Elastic modulus	2.13648× 10 ⁵ N/mm ²
Tensile strength	519.4 N/mm ²
Yield strength	205.8 N/mm ²
Poisson's ratio	0.29

Table 2 Dimensions of the rectangular plate

	Area ratio(Q)	Distance ratio(e)
Length of plate	80 ~ 200mm	160 ~ 400mm
Width of plate	100mm	200mm
Thickness of plate	1mm	1mm
Spot-welding pitch of x-direction	20mm	16 ~ 360mm
Spot-welding pitch of y-direction	20 ~ 50mm	20 ~ 180mm
Edge interval	10mm	8 ~ 140mm

연구에 사용되는 사각평판은 재질은 STS 304로서 두께가 1mm인 평판을 직경 8mm인 점용접을 사용하여 결합한 접판으로 기계적 특성은 Table 1에 나타내었고, JIS E 4049의 최소점용접피치를 고려하면 최소용접피치Pmin는 17mm 이상이어야 하며 평판의 치수는 Table 2에 나타내었다.

2. 유한요소해석

2.1 해석모델 및 해석방법

해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS

5.6을 사용하여 해석을 수행하였고 사용요소는 각 절점이 6개의 자유도를 갖고 있는 8절점 육면체요소(solid element 73)를 사용하여 한 번의 크기가 4mm보다 작게 되도록 모델링하였고 사용된 요소 수 및 절점수는 각각 4720~11456개 및 9828~23532개이다. 용접점의 요소는 두 판 중앙에서 절점을 공유하였고, 다른 접촉면들은 절점력으로 변위를 조절하는 contact 요소를 사용하여 밀리는 효과를 주었다.

유한요소해석은 첫 번째 단계로 임의의 정하중에 대한 선형좌굴해석(linear buckling analysis)을 수행하고, 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 구한 고유치(eigen value, bifurcation point)를 사용하여 비선형해석(geometric nonlinear analysis)을 수행하였다.^{1),7),8)}

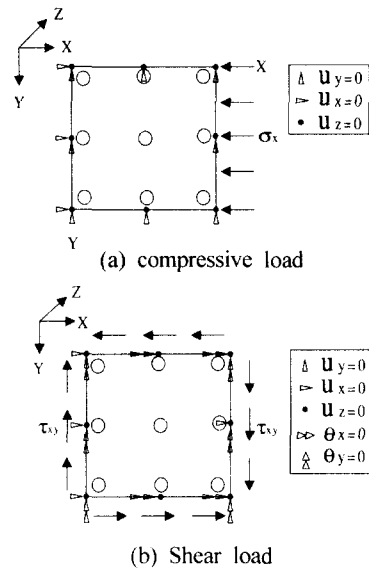


Fig. 1 The boundary condition and load condition of a rectangular plates

2.2 경계조건 및 하중조건

해석에 사용된 경계조건은 사각평판의 모든 모서리를 고정하였으며 하중조건은 압축하중과 전단하중을 받는 두 경우만을 사용하므로 Fig. 1에 나타냈듯이 압축하중을 받는 경우는 우측 모서리 부분에 -x 방향으로 압축하중을 가하였고, 전단하중을 받는 경우는 우측 모서리 부분에 y 방향으로 전단하중을 가하였다.^{4),5)}

3. 설계 파라메타 정의

3.1 점용접 면적비 변화(Q)

7종류의 형상비(r) 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0에 대해 5종류의 면적비(Q) 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125를 조합하여 총 35종류의 모델을 사용하였다.

형상비(r)가 1인 경우에 대해 5종류 중 2가지의 면적비에 대한 점용접 형상을 Fig. 2에 나타내었으며 형상비 변화에 관계없이 한 종류의 면적비는 모두 동일하도록 하기 위해 길이방향의 점용접 수는 형상비 0.2를 기준으로 0.2만큼 증가 할 때마다 1개씩 증가시켰고, 폭방향 점용접 수는 5종류의 면적비를 갖도록 각 형상비에 대해 폭방향으로 1~5로 증가시켰다.

각각의 형상비에서 두께 1mm인 두 사각평판의 점용접 점수를 변화시킴으로써 그 점용접 면적비가 변화하고, 그 변화에 따른 영향을 평가하기 위해 두께 2mm일 때의 임계응력 $\sigma_{cr,1-2}$ 을 기준으로 각 점용접 면적비에 대한 임계응력 $\sigma_{cr,Q}$ 의 비를 무차원화하여 나타내며, 이것을 응력비(stress ratio)라고 정의하였다.^{2),3)}

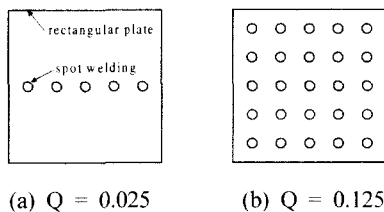


Fig. 2 The various shape of spot welding on the change of area ratio(r=1)

3.2 점용접 거리비 변화(e)

두 사각평판을 점용접할 경우에 점대칭형의 점용접 위치가 변화함에 따른 좌굴강도의 영향을 고찰하기 위해서 Fig. 3에서와 같이 형상비(r)가 1인 경우에 대해서 평판의 중앙점으로부터 가장자리까지의 거리에 대한 용접점까지의 거리비(e)를 정의하고 무차원화된 거리비(e)의 변화에 따른 좌굴강도의 변화를 고찰하고자 하였으며 거리비는 다음 식(1)과 같이 표현 가능하다.

$$e = \frac{\delta_x}{d_x} = \frac{\delta_y}{d_y} \quad (1)$$

본 연구에 사용한 형상비(r)는 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0으로 모두 7종류를 고려하였고, 용접점 수 4개인 경우 e는 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9로 5종류, 용접점 수 8개인 경우 e는 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9로 5종류, 용접점 수 12개인 경우 e는 0.3, 0.5, 0.7, 0.9로써 4종류를 사용하였으며 용접점수는 평판의 중앙점에 대해 대칭을 유지하도록 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 4, 8, 12개의 3종류-각각 case I, case II, case III로 정의-를 사용하여 총 98종류의 모델을 사용하여 해석을 수행하였다.

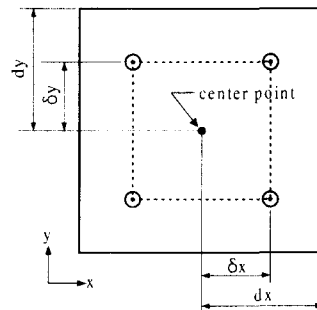


Fig. 3 The relative distance from the center point to spot welds(r=1, case I)

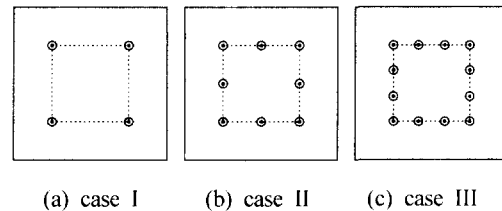


Fig. 4 The shape of spot welding at each case (r=1)

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 면적비의 변화(Q)

해석을 수행한 결과 7종류의 형상비와 5종류의 면적비를 조합한 각 지점에서 압축임계하중을 구하였다. 최소자승법(least-squares method)을 사용하여 각 형상비에 대해서 점용접 면적비와 응력비의 관계식을 도출하기 위해서 종속변수인 응력비(Q)를

독립변수인 점용접 면적비Q를 사용한 4차의 다항식으로 가정하면, 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(Q) = A_0 + A_1Q + A_2Q^2 + A_3Q^3 + A_4Q^4 + e \quad (2)$$

여기서 e는 5차 이상의 항을 대치하기 위한 오차이다. 이 식은 Q가 0일 때 f(0)은 0.25이고, Q가 1일 때 f(1)은 1이라는 조건을 반드시 만족해야 하므로 식(3)과 같이 된다.

$$f(Q) = 0.25 + A_1Q + A_2Q^2 + A_3Q^3 + \{0.75 - (A_1 + A_2 + A_3)\}Q^4 + e \quad (3)$$

고정된 평판이 압축하중을 받는 경우 Levy⁵⁾가 제시한 좌굴계수를 사용하여 두께 2mm일 때의 임계응력 $\sigma_{cr,2}$ 을 구하고, 이 값을 사용하여 각 형상비에서 점용접 면적비와 응력비의 관계를 구하였다. 그 결과 응력비는 r이 0.8일 때 0.232~0.448, r이 1일 때 0.236~0.490, r이 1.2일 때 0.243~0.518, r이 1.4일 때 0.261~0.544, r이 1.6일 때 0.273~0.565, r이 1.8일 때 0.274~0.576, r이 2일 때 0.277~0.587로 구해졌으며, 그 관계는 Fig. 5에 나타내었고, 관계식의 미정계수 A1, A2, A3 및 표준편차는 Table 3에 나타낸 바와 같으며 표준편차가 0에 가까운 근사식을 도출할 수 있었다.

전단하중을 받는 경우 응력비는 r이 0.8일 때 0.337~0.614, r이 1일 때 0.293~0.569, r이 1.2일 때 0.262~0.535, r이 1.4일 때 0.241~0.515, r이 1.6일 때 0.228~0.505, r이 1.8일 때 0.220~0.503, r이 2일 때 0.215~0.505로 나타냈으며, 그 결과는 Fig. 6에 나타내었으며, 미정계수 및 표준편차를 Table 4에 나타내었다.

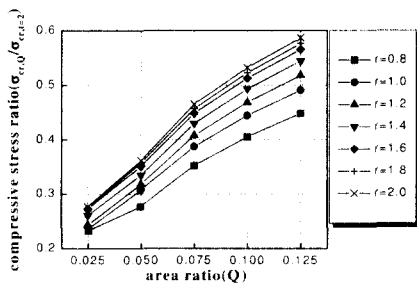


Fig. 5 The relation between compressive stress ratio and area ratio

Table 3 The coefficients of the unknowns and standard error for compressive stress ratio

Aspect ratio(r)	Unknown coefficients			Standard error(s)
	A1	A2	A3	
0.8	-2.226	74.390	-392.371	4× 10 ⁻⁵
1.0	-1.940	80.374	-443.065	13× 10 ⁻⁵
1.2	-1.745	82.235	-458.014	11× 10 ⁻⁵
1.4	-0.931	71.561	-405.553	7× 10 ⁻⁵
1.6	-0.296	63.969	-371.025	6× 10 ⁻⁵
1.8	-0.243	65.692	-384.204	7× 10 ⁻⁵
2.0	-0.160	66.404	-390.479	8× 10 ⁻⁵

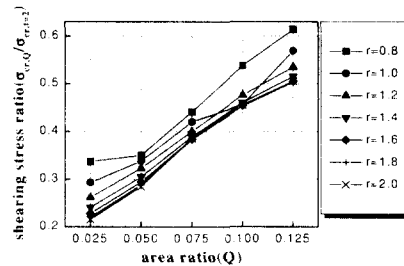


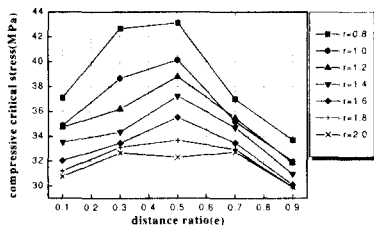
Fig. 6 The relation between shearing stress ratio and area ratio

Table 4 The coefficients of the unknowns and standard error for shear stress ratio

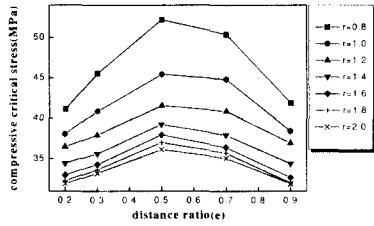
Aspect ratio(r)	Unknown coefficients			Standard error(s)
	A1	A2	A3	
0.8	2.580	-5.511	77.591	74× 10 ⁻⁵
1.0	1.907	-4.583	85.798	35× 10 ⁻⁵
1.2	-0.670	55.669	-285.743	0.3× 10 ⁻⁵
1.4	-1.883	78.287	-413.210	4× 10 ⁻⁵
1.6	-2.712	94.813	-507.629	6× 10 ⁻⁵
1.8	-3.232	105.627	-568.421	9× 10 ⁻⁵
2.0	-3.582	113.619	-613.874	11× 10 ⁻⁵

4.2 점용접 거리비의 변화(e)

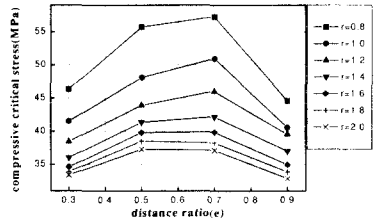
세 종류의 용접점수 4, 8, 12개를 갖는 각각의 경우를 case I, case II, case III로 하여 7종류의 형상비에 대해서 거리비의 변화에 따른 임계응력(critical stress)의 변화를 고찰해 본 결과 case I의 형상비 2인 경우 거리비 0.7일 때 최대임계응력을 가지며, 거리비 0.5일 때 최대임계응력 32.3 MPa은 거리비 0.7일 때 최대임계응력 32.7 MPa 보다 약



(a) case I



(b) case II



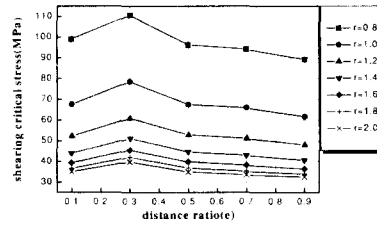
(c) case III

Fig. 7 The compressive critical stress according to the change of aspect ratio and distance ratio

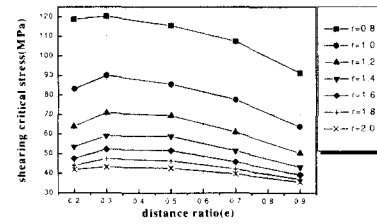
Table 5 The distance ratio with maximum critical stress and increase ratio of maximum critical stress with respect to minimum critical stress under compression

	e	$\Delta \sigma \text{ max-min} / \sigma \text{ min}(\%)$						
		0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
case I	0.5	28.0	25.6	21.8	20.3	18.0	12.7	9.5
case II	0.5	26.9	19.5	14.0	14.1	16.1	15.6	13.2
case III	0.7	28.5	25.5	19.6	17.0	15.1	13.0	13.0

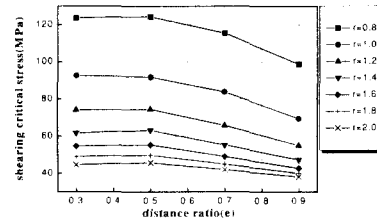
1.3% 작고, case III의 형상비 1.8, 2인 경우 거리비 0.5일 때 최대임계응력을 가지며, 거리비 0.7일 때 최대임계응력 38.3, 37.1 MPa은 거리비 0.5일 때 최대임계응력 38.5, 37.3 MPa 보다 약 0.7, 0.4% 작기 때문에 이 차이를 무시한다면 용접점수가 4개인 case I의 경우는 거리비가 0.5일 때 최대임계응력



(a) case I



(b) case II



(c) case III

Fig. 8 The shearing critical stress according to the change of aspect ratio and distance ratio

Table 6 The distance ratio with maximum critical stress and increase ratio of maximum critical stress with respect to minimum critical stress under shear

	e	$\Delta \sigma \text{ max-min} / \sigma \text{ min}(\%)$						
		0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
case I	0.3	24.0	27.2	27.0	26.2	25.2	23.8	22.5
case II	0.3	31.7	41.1	40.9	36.8	33.2	28.6	21.5
case III	0.5	25.9	33.2	35.3	33.6	29.2	24.2	19.9

32.7~43.1 MPa로써 최소임계응력 29.9~33.7 MPa 보다 9.5~28.0%가 더 증가했으며, 용접점수가 8개인 case II의 경우는 거리비가 0.5일 때 최대임계응력 36.1~52.2 MPa로써 최소임계응력 31.9~41.2 MPa 보다 13.2~26.9%가 더 증가했고, 용접점수가 12개인 case III의 경우는 거리비가 0.7일 때 최대임

계응력 37.3~57.3 MPa로써 최소임계응력 32.9~44.6 MPa 보다 13.0~28.5% 더 증가했다. case I, case II 그리고 case III는 Fig. 7에 각각 나타냈으며, 세 가지 경우에 대해 최대의 보강효과를 가지는 거리비와 각 형상비에서 최소임계응력에 대한 최대임계응력의 증가율을 Table 5에 나타내었다.

전단하중을 받는 경우도 압축의 경우와 유사하게 임계응력(critical stress)의 변화를 고찰해 본 결과 case III의 형상비 1인 경우 거리비 0.3일 때 최대임계응력을 가지며, 거리비 0.5일 때 최대임계응력 91.7 MPa은 거리비 0.3일 때 최대임계응력 92.6 MPa 보다 약 1% 작기 때문에 이 차이를 무시하고, 용접점수가 4개인 case I의 경우는 거리비 0.3일 때 최대임계응력 39.8~110.6 MPa로써 거리비 0.9일 때 최소임계응력 32.5~89.2 MPa 보다 22.5~27.2%가 더 증가했으며, 용접점수가 8개인 case II의 경우는 거리비 0.3일 때 최대임계응력 43.2~120.3 MPa로써 거리비 0.9일 때 최소임계응력 35.6~91.3 MPa 보다 21.5~41.1%가 더 증가했고, 용접점수가 12개인 case III의 경우는 거리비가 0.5일 때 최대임계응력 45.7~124.3 MPa로써 거리비 0.9일 때 최소임계응력 38.1~98.7 MPa 보다 19.9~35.3% 더 증가했다. case I, case II, case III 각각의 거리비 변화에 따른 각 형상비에 대한 임계응력의 관계는 Fig. 8에 나타냈으며, 최대의 보강효과를 가지는 거리비와 각 형상비에서 최소임계응력에 대한 최대임계응력의 증가율을 Table 6에 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 보강된 사각평판의 점용접 접합부의 강도를 예측하여 설계에 응용하고자 점용접 면적비, 거리비 및 상대위치를 설계 파라메타로 선정하여 각각의 설계 파라메타의 임계하중, 응력비, 임계응력 등에 미치는 영향을 선형좌굴해석, 비선형좌굴해석 및 치수최적화 등과 같은 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두 가지 하중조건에 대한 각 형상비에서 면적비의 변화에 따른 임계하중과 응력비의 변화를 살펴본 결과 응력비와 면적비는 선형적인 관계가 아님을 알 수 있었고, 최소자승법(least-squares method)을 사용하여 그 관계를 표준편차가 0에 가까운 4차 다항식의 근사식으로 표현하였다.

2. 두 사각평판이 점대칭 형태로 용접되었을 때 거리비 변화에 따른 임계응력의 변화를 살펴보면 압축하중의 경우 case I과 case II는 중심부와 모서리부의 가운데 지점($e=0.5$)에 점용접이 위치할 때, case III는 중심부와 모서리부의 가운데 지점에서 약 20% 바깥쪽($e=0.7$)에 점용접될 때 최대의 보강효과를 가지고, 전단하중의 경우 case I과 case II는 중심부와 모서리부의 가운데 지점에서 중심부로 약 20% 안쪽($e=0.3$)에 점용접이 위치할 때, case III는 중심부와 모서리부의 가운데 지점($e=0.5$)에 점용접될 때 최대의 보강효과를 가진다.

후 기

이 논문은 2000학년도 동아대학교 학술연구조성비(장보과제)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. S. P. Timoshenko and J. M. Gere, "Theory of Elastic Stability," McGraw-Hill, pp. 319-439, 1961.
2. A. C. Ugural, "Stresses in Plates and Shells," McGraw-Hill, pp. 153-173, 1981.
3. S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, "Theory of Plates and Shell," McGraw-Hill, pp. 181-228, 1959.
4. J. L. Maulbetsch, "Buckling of Compressed Rectangular Plates with Built-In Edges," Trans. ASME, J. Appl. Mech., 4, pp. 52-62, 1936.
5. S. Levy, "Buckling of Rectangular Plates with Built-In Edges," Trans. ASME, 64, p. A171, 1942.
6. Owen F. Hughes, "Ship Structural Design," John Wiley & Sons, pp. 404-439, 1983.
7. Z. P. Bazant and Luigi Cedolin, "Stability of Structures," Oxford Uni. Press, pp. 431-440, 1991.
8. 전형용, 한근조, 이현철, "점용접된 두 사각평판의 형상비 및 용접점수가 압축좌굴하중에 미치는 영향의 유한요소해석에 의한 연구," 한국정밀공학회지, 16권, 11호, pp. 191-196, 1999.