

〈논문〉 SAE NO. 2000-03-0123

점용접된 두 사각평판의 형상비 및 용접점수에 대한 전단좌굴하중의 유한요소해석

Finite Element Analysis of the Shear Buckling Load with Respect to the Aspect Ratio and Number of Spots of two Rectangular Plates Spot-welded

한근조*, 전형용**, 이현철**
Geun Jo Han, Hyung Yong Jeon, Hyoun Chul Lee

ABSTRACT

The stability of a structural plate is a crucial problem which causes wrinkling and buckling. In this paper, the effect of the pattern of spot-welding points in the two rectangular plates on the shear buckling load is studied with respect to the thickness, the aspect ratio of plates, the number of welding spots. Buckling coefficient of the simple plate was compared with that of two plates with various conditions to extract the effect of buckling strength. The effect of the number of welding spots are studied in two directions, longitudinal and transverse directions. This concluded that the reinforcement effect was maximized when the aspect ratio was close to 1.5 and that the effect of number of welding spots in longitudinal direction was larger than that in transverse direction.

주요기술용어 : Spot-welding(점용접), Buckling(좌굴), Stability(안정성), Buckling Analysis(좌굴해석), Rectangular plate(사각평판), Buckling coefficient(좌굴계수), Finite element analysis(유한요소해석)

Nomenclature

a : length of plate, mm
b : width of plate, mm
t : thickness of plate, mm
A : spot-welding pitch of x-direction, mm
B : spot-welding pitch of y-direction, mm
r : aspect ratio

α : spot-welding point of x-direction
 β : spot-welding point of y-direction

1. 서론

최근에 산업이 고급화, 경량화됨에 따라 박판에 대한 관심이 높아지고, 그 활용범위도 항공기, 자동차, 철도차량, 선박 등 산업전반에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있으며, 특히 넓은 면적이거나 큰 용적의 구조용, 미관용 외판 구조물 설계시에 필수적인 요소로 자리잡고 있어, 평판에 관한 연구

* 회원, 동아대학교 기계공학과

** 회원, 동아대학교 대학원

가 국내외적으로 다양하게 연구되고 있다.

박판은 성형성과 취급성이 뛰어나고, 가볍기 때문에 아무리 복잡한 3차원 형상이라도 쉽게 성형이 가능하고 경량화를 이룰 수 있는 반면에, 작은 외력에도 쉽게 변형되어 외관을 손상시키는 문제점을 안고 있다. 이를 보완하기 위하여 일반적으로 두께를 증가시키거나 부분적으로 보강재를 사용하여 강성을 증가시키지만, 양자 모두 문제점을 안고 있다. 전자의 경우, 불필요한 부분까지 보강되어 전체적으로 두꺼워짐에 따라 중량이 증가되고, 후자의 경우, 결합방법 및 용접점수에 따라 좌굴강도가 변화되기 때문에 이를 결정하기에 많은 어려움이 있으나, 대체로 후자의 경우를 채택하고 있어 이에 대한 연구가 요구되고 있다.

평판 구조물에 있어 가장 큰 문제는 안정성이며, 주로 주름(wrinkle)이나 좌굴(buckling)이 그 원인이 되기 때문에 이런 좌굴에 대한 연구^{6,7)}가 여러 각도로 이루어져 많은 이론식이나 경험식들이 연구·개발되었지만, 점용접된 평판에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 평판에 전단하중이 작용하는 경우에 평판의 전단좌굴강도는 재료의 전단 및 압축강도에 비해 매우 작기 때문에 좌굴강도를 증가시키기 위해서 주로 보강재를 이용한 방법을 사용하지만, 보강재와 평판을 면적 전체에 대해 용접한다는 것은 불가능하므로 대부분 점용접(스폿용접)을 사용하여 접합하게 된다. 이때, 점용접 수량과 간격은 전체 작업량 변화에 지대한 영향을 끼치므로 점용접 수량은 작업량과 강도적인 측면에서 적절하게 조화되어 결정되어야 하는데 현재는 명확한 근거없이 점용접 수량과 방법을 경험적으로 선정하여 보강재를 붙이는 방법으로 설계하기 때문에 비효율적이고, 많은 시행착오를 범하게 된다.

따라서 본 연구를 통하여 얻은 결과를 토대로 박판 좌굴에 대한 점용접 수량의 적절한 선정으로 최적설계를 수행할 수 있다면 설계단계에서 불필요한 손실을 감소시킬 수 있고, 관련된 분야에 응용할 수 있을 것이다. 이를 위하여 본 연구는 박판 구조물이 하중을 받아 평판 내에 응력이

분포 될 때, 평판에 대한 전단임계하중을 구하고 나아가 점용접 수량 변화가 박판 좌굴강도에 어떻게 영향을 미치는 가를 연구하여, 박판 구조물의 좌굴강도 보강방법에 응용할 수 있도록 하고자 하였다.

본 연구에서는 두 사각평판의 점용접이 전단임계하중에 미치는 영향 및 두께증가효과를 연구하기 위해서 설계인자를 설정하고, 전단하중 작용시 설계인자 즉, 형상비 r (aspect ratio), 길이방향 및 폭방향 용접점수 α, β 가 등가두께 (equivalent thickness) 및 임계하중(critical load)에 미치는 영향을 살펴보고, 점용접된 두 사각평판의 좌굴강도를 예측하여 점용접부의 설계에 응용할 수 있는 중요한 기초자료를 제공하고자 한다.

연구에 사용되는 사각평판은 재질은 STS 304로서 두께가 1mm인 평판을 직경 8mm인 점용접을 사용하여 결합한 접판이며, 사용된 재료의 기계적 특성은 Table 1과 같다. 그리고 점용접 간격은 Fig. 1과 Table 2에 나타낸 JIS E 4049의 최소 점용접 피치를 고려하여 최소 용접피치(P_{min})는 17mm 이상으로 하였으며, 평판의 치수는 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of STS 304

Materials	STS304
Elastic modulus (E)	213.648 GPa
Tensile strength (σ_t)	519.4 MPa
Yield strength (σ_y)	205.8 MPa
Poisson's ratio (ν)	0.29

Table 2 Minimum welding pitch of spot-welding(JIS E 4049)

Thickness of thin plate(t_1)	Minimum welding pitch(P_{min})	
	$T < 2.5t_1$	$T \geq 2.5t_1$
0.8mm	14mm	18mm
1.0mm	17mm	21mm
1.2mm	19mm	24mm
1.5mm	22mm	28mm

Table 3 Dimensions of the rectangular plate

Length of plate (<i>a</i>)	120~480mm
Width of plate (<i>b</i>)	240mm
Thickness of plate (<i>t</i>)	1mm
Spot-welding pitch of x-direction (<i>A</i>)	31.2~238mm
Spot-welding pitch of y-direction (<i>B</i>)	54~108mm

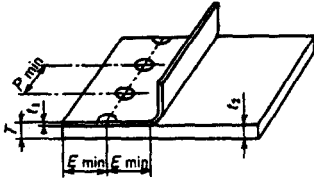


Fig. 1 Thickness and minimum welding pitch of spot-welding

2. 이론해석

평판의 가장자리를 따라 전단력(N_{xy})이 작용하여 평판의 전단좌굴이 일어나는 임계전단좌굴응력(τ_{cr})을 계산하기 위해서는 에너지 법을 사용하며, 가장자리의 경계조건은 좌굴된 평판의 처짐면을 고려해서 만족시켜야한다. 임계전단좌굴하중의 결정은 사각평판이 좌굴될 때, 변형에너지(ΔU)와 외력이 한 일(ΔT)가 같을 때($\Delta U = \Delta T$) 좌굴이 시작되므로 본 연구도 에너지 법으로 구하고자 한다.⁴⁾

2.1 이론해석의 결과

선박의 측면이나 철도차량의 측면 구조물들은 전단하중이 작용되어 좌굴이 발생하는 경우가 많다. 이런 전단하중은 평판의 대각방향으로 압축하중이 작용된 효과와 같으므로 이때 발생한 대각방향의 압축응력과 전단응력의 크기는 같으며,

좌굴되는 주름형상이나 임계하중은 형상비와 경계조건에 크게 의존한다.

고정된 평판이 평면상에서 단위길이당 하중 N_x, N_y, N_{xy} 를 받고 있을 때, 평판의 지배방정식은

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left(N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (1)$$

과 같고, 전단하중만이 작용하는 경우는 식(1)에 $N_{xy} = -\tau t, N_x = N_y = 0$ 를 대입하면

$$\nabla^4 w = \frac{2\tau t}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2)$$

을 구할 수 있다. 여기서 D 는 휨강성 (flexural rigidity)으로

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

와 같이 표현된다.^{1,3,5)}

가장자리의 경계조건은 좌굴된 평판의 처짐면을 고려해서 만족시켜야하며 이때, 처짐 방정식은

$$\omega = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (4)$$

과 같은 이중급수식을 사용하게 되며⁴⁾ 좌굴된 평판의 굽힘 변형에너지는

$$\Delta U = \frac{D}{2} \frac{\pi^4 ab}{4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn}^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 \quad (5)$$

이다. 좌굴이 일어나는 동안 외력이 한 일은

$$\Delta T = -N_{xy} \int_0^a \int_0^b \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} dx dy \quad (6)$$

이다. ω 대신 식(4)를 대입하면

$$\int_0^a \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{P\pi x}{a} dx = 0 \quad (m \pm P \text{가 짝수일 때})$$

$$\int_0^a \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{P\pi x}{a} dx = \frac{2a}{\pi} \frac{m}{m^2 - P^2} \quad (m \pm P \text{가 홀수일 때})$$

이므로

$$\Delta T = -4 N_{xy} \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q \frac{a_{mn} a_{pq}}{(m^2 - p^2)(q^2 - n^2)} \quad (7)$$

이 된다. 여기서 m, n, p, q는 m±p와 n±q가 홀수인 정수이다.

임계 전단하중값을 결정하기 위하여 변형에너지 식(5)와 외력이 한 일 식(6)이 같다고 하면, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$N_{xy} = -\frac{abD}{32} \frac{\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn}^2}{\sum_m \sum_n \sum_p \sum_q a_{mn} a_{pq}} \frac{\left(\frac{m^2 \pi^2}{a^2} + \frac{n^2 \pi^2}{b^2}\right)^2}{\left\{ \frac{mnpq}{(m^2 - P^2)(q^2 - n^2)} \right\}} \quad (8)$$

이 식에서 N_{xy}가 최소가 되도록 상수 a_{mn} 과 a_{pq}를 선택하는 것이 필요하다.

결국 전단하중을 받는 고정된 평판의 임계응력은

$$\tau_{cr} = k \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \quad (9)$$

으로 표현된다. 식(9)의 k는 전단좌굴계수(shear buckling coefficient)이다.

단순지지된 경우, 전단좌굴계수(k_s)의 근사식은

$$k_s = 5.35 + 4\left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (10-a)$$

와 같고, 4변이 모두 클램프로 고정된 경우의 전단좌굴계수(k_c)의 근사식은

$$k_c = 8.98 + 5.6\left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (10-b)$$

와 같다.²⁾

3. 유한요소해석

유한요소해석을 사용하여 점용접된 사각평판에 대한 점용접의 영향을 평가하는데 있어 형상비(r) 및 용접점수(α, β)의 변화가 두께증가효과 및 임계하중에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

3.1 해석모델

0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2의 6종류의 형상비(r)에 대하여 길이방향 및 폭방향의 용접점수(α, β)를 각 형상비에 대해서 각각 3~5를 조합한 54종류의 모델과 r = 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2인 경우에 대해서 용접되지 않은 두께 1mm × 2개, 두께 2mm × 1개인 14종류의 모델 그리고 β = 5일 때, r = 0.5, 1.25, 1.5, 1.75, 2인 경우에만 각각 α = 3, 6, 7, 8, 9인 5종류 β = 3, 4일 때, , r = 1.5, 1.75, 2인 경우에만 각각 α = 6, 7, 8인 6종류의 모델을 추가하여 총 79종류의 평판모델을 사용하였다.

해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.5를 사용하여 수행하였고, Fig. 2는 형상비 1, α = β = 3인 모델의 메쉬된 형상을 보여주는데 사용요소는 각 절점이 3개의 자유도를 갖고 있는 8절점 육면체요소와 5절점 contact 요소를 사용하였으며 사용된 요소수 및 절점수는 각각 4720~11456개 및 9828~23532개이다. 용접점의 요소는 두 판 중앙에서 절점을 공유하였고, 다른 접촉면들은 contact 요소를 사용하여 밀리는 효과를 주었다.

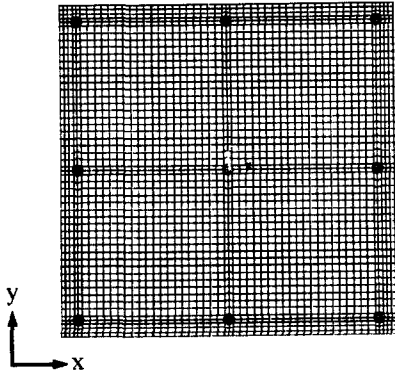


Fig. 2 Finite element meshes of a rectangular plate model

3.2 경계조건 및 해석방법

전단하중 작용시 하중조건 및 경계조건은 Fig. 3에서 보여주듯이 좌측 모서리 부분의 모든 절점에 대해 x, y, z축방향 병진변위 및 y축에 대한 회전변위를 구속하였고 상하단 모서리 부분의 모든 절점에 대해서는 x, z축방향 병진변위 및 x축에 대한 회전변위를 구속하였으며 우측 모서리 부분의 모든 절점에 대해서는 x, z축방향 병진변위 및 y축방향에 대한 회전변위를 구속하였다. 하중은 우측 모서리 부분에 y방향으로 전단하중을 가하였다

유한요소해석은 첫 번째 단계로 임의의 정하중에 대한 선형좌굴해석(linear buckling analysis)을 수행하고, 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 구한 고유치(eigenvalue, bifurcation point)를 기초로 매크로를 이용한 초기기하학적 결함(initial geometric imperfection)을 만들어 비선형해석(geometric nonlinear analysis)을 수행함으로써 정확한 임계하중 및 응력분포상태를 구한다. 그러나 실제로 선형과 비선형해석의 결과치는 근사하다. 비선형해석시 5절점 contact요소를 두 사각평판의 접촉부분에 생성시킨 후 해석을 수행한 후 contact요소의 gap을 조사하여 허용치 즉, 시편의 표면조도(두께의 약 1/100)이하 인지를 판단하고 gap가 허용치 이내일 경우 하

중과 변위에 대한 그래프를 통해 정확한 좌굴점을 판단하게 된다.

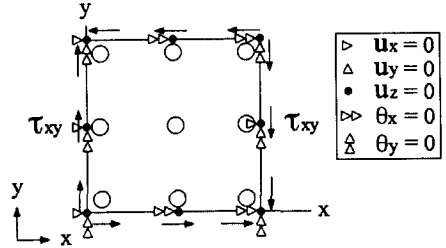


Fig. 3 The boundary condition under shear load

4. 결과 및 고찰

4.1 형상비의 변화(parameter r)

사각평판의 임계응력 τ_{cr} 은 식 (8)과 같이 좌굴계수(buckling coefficient) k 로 표현할 수 있고, 이는 경계조건에 의존하는 값으로 점용접되지 않은 평판의 경우에는 여러 경계조건에 대해서 그 값은 이미 보고되어 있다.^{2,4)}

단순지지 및 클램프로 고정된 경계조건과 용접되지 않은 사각평판에 대한 본 실험에서 경계조건의 전단좌굴계수를 Fig. 4와 Table 4에 나타내었다.

Table 4 The values k of unwelded plates for seven aspect ratios

r	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	remarks
k_s	21.35	12.461	9.35	7.91	7.128	6.656	6.35	simple
k_c	31.38	18.94	14.58	12.564	11.47	10.81	10.38	clamped
k_f	40.474	20.453	12.610	9.339	7.861	7.09	6.718	FEM

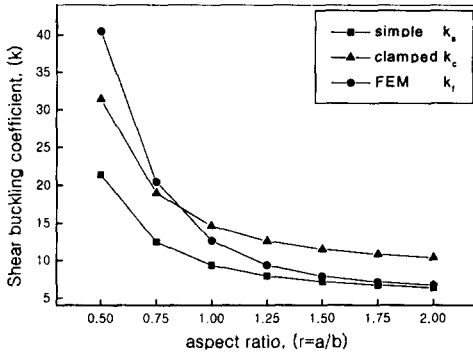


Fig. 4 The relation of shear buckling coefficient for theoretical approximation and FEM analysis (k_s for simple support, k_c for clamped edge, k_f for FEM)

Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 유한요소해석의 경계조건이 단순지지 및 클램프로 고정된 경계조건보다 세장비가 0.75이하에서는 유한요소 해석의 결과가 단순지지 및 클램프로 고정된 경계조건에 의한 결과보다 전단좌굴계수가 크고, 세장비가 커짐에 따라 급격한 구배로 감소하여 넓은 범위의 값을 나타내고 있다.

단순지지된 경우 (k_s) 와 클램프로 고정된 경계조건인 경우 (k_c), 전단좌굴계수의 근사식은 (10-a)와 (10-b)으로 나타나고²⁾, 본 해석의 경계조건 (k_f)에서의 전단좌굴계수는 유한요소해석으로 산출된 임계하중 값으로부터 최소자승법을 이용하여

$$k_f = 4.2 + 9.05 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad (10-c)$$

으로 표현될 수 있다.

유한요소해석에 사용된 각 형상비의 길이방향 및 폭방향 용접점수에 대한 임계하중은 Table 5에 나타난 바와 같다. 이때 $t_1 \times 2$ 는 1mm 두께의 판을 2개 단순히 겹쳤을 때의 좌굴하중이고 $t_2 \times 1$ 은 2mm 두께의 판을 1장에 대한 좌굴하중이다.

Table 5 The number of welding spots and critical load for seven aspect ratios

condition	welding spot pattern(mm)			t1	t2
	$\alpha \times \beta$	54×54	66×66		
0.50	$\alpha \times \beta$	3×5			
	Fcr(N)	85267			64709 258835
0.75	$\alpha \times \beta$	4×5	3×4	3×3	
	Fcr(N)	50637	38667	34340	32786 130797
1.00	$\alpha \times \beta$	5×5	4×4	4×3	
	Fcr(N)	35732	28477	25764	20201 80643
1.25	$\alpha \times \beta$	6×5	5×4	5×3	
	Fcr(N)	29289	23967	20921	14958 59724
1.50	$\alpha \times \beta$	7×5	6×4	6×3	
	Fcr(N)	26300	21832	18891	12538 50269
1.75	$\alpha \times \beta$	8×5	7×4	7×3	
	Fcr(N)	24863	20807	18110	11351 45338
2.00	$\alpha \times \beta$	9×5	8×4	8×3	
	Fcr(N)	24125	20261	17649	10756 42964

여기서 모델의 용접피치는 가로×세로 : 54×54mm, 66×66mm, 66×99mm로 하여 동일한 경계조건하에서 용접된 평판에 대해 나타내었다. 사각평판에 대한 등가두께는 좌굴하중에 관한 식^{1,3,5)}을 변형한 다음 식과 같이

$$t_e = 3 \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)F_{cr} \cdot b}{\pi^2 E k}} \quad (11)$$

을 사용하여 구할 수 있으며, 여기서 b는 하중이 작용하는 면의 폭이고, F_{cr} 은 실험에서 구한 좌굴하중, k는 좌굴계수이다. 두께 1mm의 두 사각평판이 단순접촉되어 있을 경우, 등가두께(t_e)는 모든 형상비에서 1.26mm이며, 각 형상비에서 상기 3가지 방법으로 용접되었을 때, 두께증가효과에 의한 등가두께(t_e)는 Table 6과 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 이 결과에서 점용접된 사각평판의 임계하중은 모든 형상비에서 점용접되지 않은 1mm 사각평판 2개와 2mm 사각평판 1개의 임계하중 사이에 있어, 점용접 수량에 따라 임계하중이 증가됨을 알 수 있다. 동일간격의 용접피치에 대해서는 형상비 2, 용접피치 54×54mm에서 등가두께(t_e)가 1.650mm로 가장 크고, 형상비 0.5

의 1.381mm 보다 약 19.5% 더 크다는 사실을 나타내고 있어 형상비가 클수록 두께증가효과는 증가함을 알 수 있으며, 그 증가특성은 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 형상비가 작은 0.5에서 두께증가의 폭이 커지다가 점점 낮아지는 양상을 나타내는데, 이런 양상은 용접간격이 늘어나더라도 그대로 유지되면서 등가두께만 얇아지고 있다. 그러나 동일 형상비에서 점용접 간격이 좁아짐에 따라(점용접 수량증가) 임계하중과 등가두께가 거의 일정한 간격으로 증가하고 있다. 이는 동일한 용접간격의 경우, 형상비 증가에 따른 용접수 증가효과가 임계하중과 등가두께를 증가시키고 있으며, 각 형상비에서 동일 용접수에 대한 임계하중과 등가두께 증가효과는 거의 비슷하다고 판단된다.

Table 6 The equivalent thickness of two welded plates for seven aspect ratios

condition r	Interval of spot-welding (mm)			t1
	54×54	66×66	66×99	
0.50	1.381			1.26
0.75	1.458	1.332	1.281	
1.00	1.525	1.414	1.367	
1.25	1.577	1.475	1.410	
1.50	1.611	1.515	1.443	
1.75	1.637	1.543	1.473	
2.00	1.650	1.556	1.487	

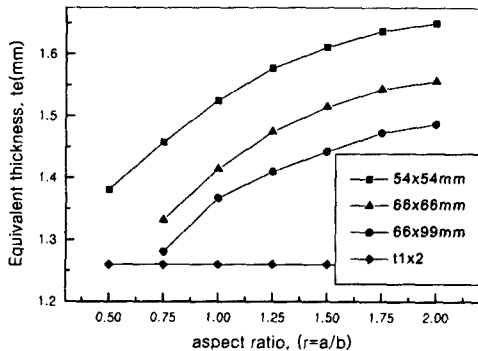


Fig. 5 The relation between aspect ratio and equivalent thickness for 4 simulation models

4.2 용접점수의 변화(parameter α, β)

점용접된 두 사각평판은 형상비가 일정할 경우에 길이방향 및 폭방향 용접점수에 의해서 임계하중이 변화하며, Table 7은 각 형상비의 점용접수량 변화에 대한 임계전단좌굴하중의 변화를 나타낸 것이다.

각 형상비에서 $\beta=3$ 으로 고정되고, α 가 3~5로 변할 때, 임계하중의 증가율 및 평균증가율(N/welding spot)은 Fig. 6에서 보여주듯이 r 이 0.75일때 5613.76, 1679.04 (3646.40), r 이 1일때 4481.68, 1358.92 (2920.30), r 이 1.25일때 3860.74, 1084.59 (2472.67), r 이 1.5일때 3392, 902.70 (2147.35), r 이 1.75일때 1944.46, 1682.86 (1813.66), r 이 2일때 932.37, 2004.46 (1468.42)로 임계하중의 평균증가율은 r 이 증가함에 따라 3646.40에서 1468.42로 감소하고 있다.

그리고 각 형상비에서 $\alpha=3$ 으로 고정이고, β 가 3~5로 변할 때 임계하중의 증가율 및 평균증가율(N/welding spot)은 Fig. 7에서 보여주듯이 r 이 0.75일때 4326.76, 4614.72 (4470.74), r 이 1일때 3266.08, 1500.24 (2383.16), r 이 1.25일때 2009.64, 923.86 (1466.75), r 이 1.5일때 1442.81, 655.50 (1049.16), r 이 1.75일때 1145.40, 515.51 (830.46), r 이 2일때 967.43, 431.14 (699.29)로 임계하중의 평균증가율은 r 이 증가함에 따라 4470.74에서 699.29로 감소하고 있다.

또한, 각 형상비에서 용접점수가 4, 5일 때 α 의 변화를 기준으로 β 의 변화에 따른 임계응력의 변화율(%)은 Fig. 8에서 보여주듯이 r 이 0.75일때 3.22% 감소, 3.96% 증가, r 이 1일때 4.72% 감소, 3.96% 감소, r 이 1.25일때 9.33% 감소, 9.62% 감소, r 이 1.5일때 11.50% 감소, 12.30% 감소, r 이 1.75일때 5.57% 감소, 12.26% 감소, r 이 2일때 0.28% 증가, 10.43% 감소하고 있다. 이것을 고찰해 보면, β 보다 α 를 증가시켜 점용접으로 형성되는 내부 사각형이 형상비가 적을수록 일반적으로 보강효과가 더 크고, r 이 1.5에서 가장 크다는 것을 알 수 있다.

따라서 동일한 형상비에서 α 의 증가가 β 의 증가보다 임계하중의 증가에 미치는 영향이 더 크며, r 이 1.5로 부터 멀어질수록 그 영향이 작아진다는 사실을 알 수 있다. 이런 사실에서 사각형의 전단좌굴강도가 증가되는 것은 우선 전체 사각형 내에 점용접수량 증가에 의하여 형성된 사각형의 수량증가가 가장 큰 영향을 끼치며, 전체 사각형 내에 동일 수량의 사각형이 있을 때는 점용접으로 형성되는 사각형의 형상비가 작을수록, 그리고 형상비가 아주 작은 사각형과 정사각형에 근접하는 사각형과에서는 정사각형에 근접하는 것이 전단좌굴강도가 더 크게 증가된다고 판단된다.

Table 7 The critical shear buckling load(Fcr) for the number of welding spots in six aspect ratios and percentage increment(Δ %) with respect to that of t_1

r	β	$\alpha = 3$		$\alpha = 4$		$\alpha = 5$		$t_1 \times 2$	$t_2 \times 1$
		Fcr (N)	Δ (%)	Fcr (N)	Δ (%)	Fcr (N)	Δ (%)		
0.75	3	34,340	47	39,954	21.9	41,633	27	32,786	131,797
	4	38,657	17.9	45,634	39.2	49,152	49.9		
	5	43,281	32	50,637	54.4	56,608	72.7		
1.00	3	21,283	5.4	25,764	27.5	27,123	34.3	20,201	80,643
	4	24,548	21.5	28,477	41	31,906	57.9		
	5	26,049	28.9	31,388	55.4	35,732	76.9		
1.25	3	15,976	6.8	19,836	32.6	20,921	39.9	14,958	59,724
	4	17,985	20.2	21,515	43.8	23,967	60.2		
	5	18,909	26.4	23,464	56.9	26,555	77.5		
1.50	3	13,561	8.2	16,953	35.2	17,866	42.4	12,538	50,269
	4	15,005	19.7	18,175	45	20,065	60		
	5	15,660	24.9	19,616	56.5	22,008	75.5		
1.75	3	12,406	9.3	14,350	26.4	16,033	41.2	11,351	45,338
	4	13,552	19.4	16,141	42.3	17,810	56.9		
	5	14,067	23.9	17,029	50	19,342	70.4		
2.00	3	11,812	9.8	12,744	18.5	14,747	37.1	10,756	42,964
	4	12,780	18.8	14,197	32	16,336	51.9		
	5	13,211	22.8	14,883	38.4	17,566	63.3		

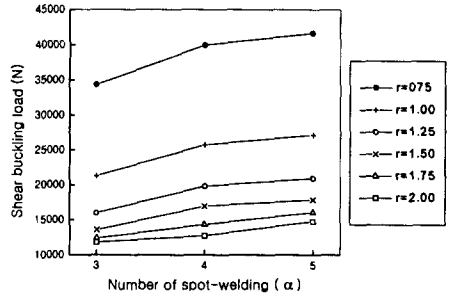


Fig. 6 The relation between number of welding-spots(α) and critical load for 7 aspect ratios ($\beta = 3$)

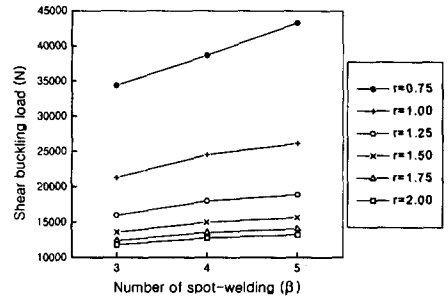


Fig. 7 The relation between number of welding-spots(β) and critical load for 7 aspect ratios ($\alpha = 3$)

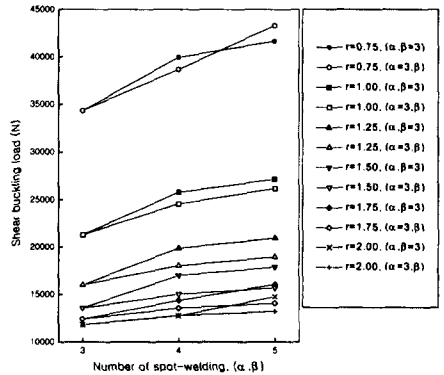


Fig. 8 The relation between number of welding-spots(α, β) and critical load for aspect ratios

5. 결론

점용접된 두 사각평판의 점용접이 압축좌굴하중에 미치는 영향을 평가하기 위해서 설계파라메타를 정의하고, 유한요소해석을 이용하여 각각의 파라메타에 대한 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 두께가 동일한 두 사각평판이 단순접촉된 경우에 두께증가효과는 1.26배이며, 이러한 두 사각평판이 일정 간격으로 점용접되었을 때, 두께증가 효과는 형상비가 클수록 증가하나, 그 상승폭은 점점 둔화된다.

2) 동일 형상비에서 점용접의 간격이 좁아질 경우, 거의 일정한 간격으로 보강효과가 증가되나, 점용접 수량으로 볼 때, 보강효과의 상승폭은 점점 둔화되며, 궁극적으로 점용접이 최소화치로 이루어질 때는 어느 임계하중에 수렴할 것으로 예측된다.

3) 각각의 형상비에서 동일 용접패턴(pattern)의 용접수에 대한 보강효과는 거의 비슷하나, 용접점수 증가는 β 의 증가보다 α 의 증가가 임계하중의 증가에 미치는 영향이 더 크다. α 에 대한 임계하중의 증가율은 $R=1.5$ 일 때 가장 크고 (42.45%), β 에 대한 임계하중의 증가율(24.9%)보다 17.5% 더 크다. 그리고 r 이 1.5에서 멀어질수록 그 영향이 작아진다.

4) 4개의 용접점에 의해서 형성된 사각형의 수

량이 사각형의 전단좌굴강도 변화에 가장 큰 영향을 끼치며, 동일 수량의 사각형이 있을 때는 사각형의 형상비가 작을수록, 그리고 형상비가 아주 작은 사각형과 정사각형에 근접하는 사각형에서는 용접점에 의해서 형성된 사각형이 정사각형에 근접할 때 전단좌굴강도의 보강에 더 큰 효과를 얻을 수 있다.

참고 문헌

- 1) Z. P. Bazant and Luigi Cedolin, "Stability of Structures," Oxford Uni. Press, pp.431-440, 1991.
- 2) Owen F. Hughes, "Ship Structural Design," John Wiley & Sons, pp.404-439, 1983.
- 3) A. C. Ugural, "Stresses in Plates and Shells," McGraw-Hill, pp.153-173, 1981.
- 4) S. P. Timoshenko and J. M. Gere, "Theory of Elastic Stability," McGraw-Hill, pp.348-439, 1961.
- 5) S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, "Theory of Plates and Shell," McGraw-Hill, pp.181-228, 1959.
- 6) 김효진, "층간 분리가 존재하는 복합재 적층판의 좌굴 및 좌굴후 거동 해석", 한국과학기술원 박사학위논문.
- 7) 이인철, "보강된 복합적층 패널의 좌굴 및 좌굴후 거동", 한국과학기술원 박사학위논문.