

점용접된 구조물의 좌굴하중해석

이현철* · 심재준* · 안성찬* · 한근조**

Buckling Load Analysis of Spot-Welded Structures

H. C. Lee · J. J. Shim · S. C. Ahn · G. J. Han

Key Words : 점용접(Spot Welding), 좌굴(Buckling), 안정성(Stability), 좌굴해석(Buckling Analysis), 사각평판(Rectangular Plate), 좌굴계수(Buckling Coefficient), 유한요소해석(Finite Element Analysis)

Abstract

This stability of a plate structure is very crucial problem which results in wrinkle and buckling. In this study, the effect of the pattern of spot-welding points of the two rectangular plates on the compressive and shear buckling load is studied with respect to the thickness, aspect ratio of plates and number of welding spots. Buckling coefficient of the plate not welded was compared with that of two plates with various thickness to extract the effect of thickness. The effect of number of welding spots are studied in two directions, longitudinal and transverse directions. The conclusions obtained were that the reinforcement effect was maximized when the aspect ratio was close to 1.75 at compressive load condition and that the effect of number of welding spots in transverse direction was larger than that in longitudinal direction at shearing load condition.

* 동아대학교 기계공학과 대학원

** 동아대학교 기계공학과

1. 서 론

현대산업은 고도의 성장과 더불어 다국적이고 대량의 무역교류를 필요로 하고 있어 이에 따른 산업구조물은 대형화·경량화 되고 있다. 따라서 평판을 이용한 구조물은 날로 증가하고 있는 추세이며 현재 평판을 사용하는 산업은 선박, 자동차, 철도차량 등이 있고, 또한 산업전반에 걸쳐 유용하게 사용되고 있으며 특히, 평판은 취급성과 성형성이 매우 우수하여 각종 형상으로 제작이 용이하므로 넓은 면적이나 대형용적의 구조용, 미관용 외판이나 차체 및 골조로서 사용이 가능하고 구조물 설계시에 필수적인 요소이다.

따라서 평판에 관한 연구가 국내외적으로 다양한 각도로 이루어져 왔으며, 1800년대에 평판에 관한 연구가 최초로 시작되어 여러 공학자들에 의해 이루어지고 있고, Wang(1995)⁶⁾은 균일한 면내 하중이 가해지는 단순지지된 원판과 다각형판에서의 평판이론을 연구하였다. 선박이나 차량 등의 실제적인 설계에 있어 사용조건과 가장 유사한 파괴양식 평가 및 재료거동의 이해가 먼저 이루어진 후에 평판의 형상과 재질이 선택된다. 다음에 평판의 응력 및 변형해석에 의해서 최종적으로 이상적인 설계가 이루어진다.

평판구조물에 있어 안정성에 대한 문제는 주로 주름(wrinkle) 혹은 좌굴(buckling)이 그 원인이 되며, 평판에 압축 및 전단하중이 작용하는 경우에 평판의 좌굴강도는 재료의 인장·압축강도에 비해 매우 작기 때문에 좌굴강도를 증가시키기 위해서 주로 보강재를 이용한 방법을 사용한다. 이때 점용접(spot welding)을 사용하는 것이 일반적이며 평판이 점용접 되었을 경우에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 평판에 보강판이 점용접될 때 보강부의 좌굴강도는 사용재료의 인장·압축강도보다 훨씬 더 크므로 평판과 보강판이 서로 용접되는 부분이 문제가 된다. 이런 평판과 보강판의 점용접 접합부에 관한 연구는 전무한 실정이며, 실제로 점용접 접합부의 설계는 대부분 경험적인 판단에 의

해서 설계가 이루어지고 있으며 매우 비효율적이며 좌굴붕괴사고의 위험성도 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 점용접된 두 사각평판의 점용접이 압축 및 전단임계하중에 미치는 영향 및 두께증가효과를 연구하기 위해서 설계인자를 설정하고 하중 작용시 설계인자 즉, 형상비 r (aspect ratio), 길이방향 및 폭방향 용접점수 α, β 가 등가두께(equivalent thickness) 및 임계하중(critical load)에 미치는 영향을 유한요소법(finite element method)을 이용한 구조해석 시뮬레이션을 통해 고찰해봄으로써 점용접된 두 사각평판의 좌굴강도에 예측하여 점용접부의 설계에 응용할 수 있는 중요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 본 론

2.1 재료의 기계적 특성

본 연구에 사용되는 사각평판의 재료는 STS 304로서 두께가 1mm인 평판을 직경 8mm인 점용접을 사용하여 결합한 접판으로 기계적 특성은 Table 1에 나타내었다. 호칭 판 두께가 1mm일 때 전극팁의 끝지름은 $5\sqrt{7}$ (mm) 이상이 되어야 하므로 8mm를 사용하였고, Fig. 1과 Table 2에 나타난 바와 같이 KS B 0880의 최소점용접피치를 고려하면 최소용접피치 S_{min} 는 15mm 이상이어야 하며 최소가장자리간격 E_{min} 은 7.5mm 이상이어야 하므로 사각평판의 여러 치수는 Table 3에 나타난 바와 같다.

Table 1 Mechanical properties of STS 304

| Material | STS304 |
|------------------|--------------------------------------|
| Elastic modulus | 2.14×10^5 N/mm ² |
| Tensile strength | 519 N/mm ² |
| Yield strength | 206 N/mm ² |
| Poisson's ratio | 0.29 |

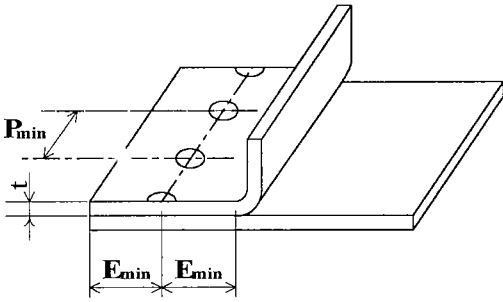


Fig. 1 The minimum welding pitch and minimum edge interval

Table 2 The minimum welding pitch and minimum edge interval(KS B 0880)

| Thickness of thin plate(t1) | Minimum welding pitch(Pmin) | Minimum edge interval(Emin) |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0.6mm | 10mm | 6.0mm |
| 0.8mm | 12mm | 6.5mm |
| 1.0mm | 15mm | 7.5mm |
| 1.2mm | 18mm | 8.0mm |
| 1.4mm | 25mm | 9.5mm |

Table 3 Dimensions of the rectangular plate

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

2.2 이론해석

평판이 평면상에서 길이방향 및 폭방향으로 단위 길이당 수직하중 N_x , N_y 및 단위길이당 전단하중 N_{xy} 을 받을 때 평판의 지배방정식은 식(1)과 같다.⁴⁾

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

2.2.1 압축하중 작용시

단순지지된 평판이 압축하중을 받는 경우는 식(1)에 $N_x = -\sigma_a t$, $N_y = \nu N_x$, $N_{xy} = 0$ 을 대입하여 식을 간단히 표시하면

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

을 구할 수 있다. 처짐식은

$$w = \sum_m \sum_n C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (3)$$

으로 가정할 수 있고, 이 식은 경계조건을 만족시키는 사인함수식이다. 재료의 탄성변형에너지와 외력이 한 일이 같으므로

$$N_x \frac{m^2 \pi^2}{a^2} + N_y \frac{n^2 \pi^2}{b^2} = D \left(\frac{m^2 \pi^2}{a^2} + \frac{n^2 \pi^2}{b^2} \right)^2 \quad (4)$$

가 구해지고,^{4,5)} 두계로 나누어 정리하면

$$\sigma_x \left(\frac{m^2 b^2}{a^2} + \nu n^2 \right) = \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \left(\frac{m^2 b^2}{a^2} + n^2 \right)^2 \quad (5)$$

와 같이 된다. 결국 길이 방향 임계응력은

$$\sigma_{cr} = k_c \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \quad (6)$$

으로 표현된다.^{1,2,3)} 식(6)의 k_c 는 좌굴계수(buckling coefficient)이고 D 는 휨강성(flexural rigidity)이며, $n = 1$ 인 경우에 k_c 및 D 는

$$k_c = \frac{\left(\frac{m^2 b^2}{a^2} + 1\right)^2}{\left(\frac{m^2 b^2}{a^2} + \nu\right)} \quad D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (7)$$

으로 표현된다.^{1,3,5)} $n = 1$ 일 때, m 의 변화에 따른 형상비와 좌굴계수의 관계는 Fig. 2에 나타내었고, 점용접되지 않은 사각평판의 7가지 형상비에 대한 좌굴계수는 Table 4에 나타내었다.

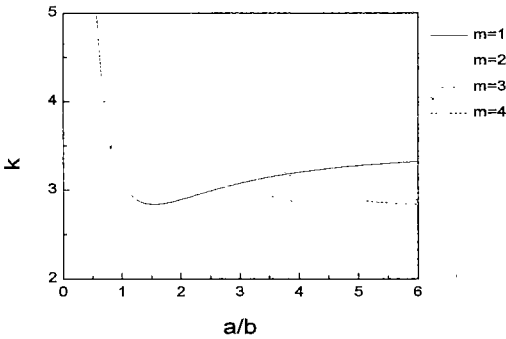


Fig. 2 The relation between aspect ratio and buckling coefficient

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

| r | 0.5 | 0.75 | 1.0 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k | 5.828 | 3.732 | 3.101 | 2.892 | 2.841 | 2.854 | 2.894 |

2.2.2 전단하중 작용시

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

$$\nabla^4 w = \frac{2\tau t}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (8)$$

을 구할 수 있다. 결국 전단하중을 받는 고정된 평판의 임계응력은^{2,4)}

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

으로 표현할 수 있다.

고정된 경계조건의 경우에 용접되지 않은 사각평판의 7가지 형상비에 대한 좌굴계수는 Table 5에 나타내었다.

Table 5 The values k_s of unwelded plates for seven aspect ratios

| r | 0.5 | 0.75 | 1.0 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2.0 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k | 31.38 | 18.94 | 14.58 | 12.56 | 11.47 | 10.81 | 10.38 |

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.

2.3.1 해석모델

압축하중을 받는 경우는 형상비(r)는 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2의 6종류를 사용하고, 각 형상비에 대해 길이방향 및 폭방향의 용접점수(α, β)는 3~5를 조합하여 54종류를 사용하였으며, $\alpha = 5$ 일 때 $r = 0.5, 1.5, 1.75, 2$ 인 경우에만 각각 $\beta = 3, 7, 8, 9$ 인 4종류의 평판을 추가하여 총 58종류의 평판을 사용한다. 전단하중의 경우에도 압축의 경우와 동일한 58종류를 사용하여 해석을 수행하였다.

해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.5를 사용하여 수행하였고, Fig. 3은 형상비 1, $\alpha = \beta = 3$ 인 모델의 메쉬된 형상을 보여주는데 사용요소는 각 절점이 3개 및 6개의 자유도를 갖고 있는 8절점 육면체요소(solid 45, solid 73) 및 5절점 contact요소(contact 49)를 사용하여 해석을 수행하였고, 해석에 사용된 요소수 및 절점수는 각각 4720~11456개 및 9828~23532개이다.

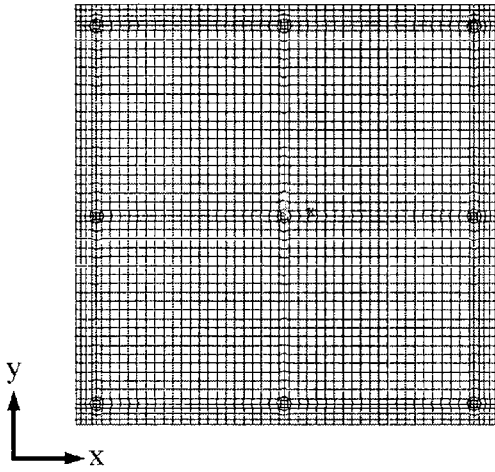


Fig. 3 Finite element meshes of a rectangular plate model

2.3.2 경계조건 및 해석방법

하중조건 및 경계조건은 압축하중 작용 시에는 Fig. 4에서 보여주듯이 단순지지로 좌측 모서리 모든 절점의 x, y, z방향 병진변위를 구속하였고 나머지 모서리 모든 절점의 y, z방향 병진변위를 구속하며 우측 모서리 부분에 -x방향으로 압축하중을 가하였고, 전단하중 작용 시에는 Fig. 5에서 보여주듯이 좌측 모서리 모든 절점의 x, y, z방향 병진변위 및 y축에 대한 회전변위를 구속하였고 상하단 모서리 모든 절점의 x, z방향 병진변위 및 x축에 대한 회전변위를 구속하였으며 우측 모서리 모든 절점의 x, z방향 병진변위 및 y축방향에 대한 회전변위를 구속하였다. 하중은 우측 모서리 부분에 y 방향으로 전단하중을 가하였다.

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 비선형좌굴해석(nonlinear buckling analysis)을 수행함으로써 정확한 임계하중 및 응력분포상태를 구한다. 비선형해석시 5절점 contact요소를 두 사각평판의 접촉부분에 생성시킨 후 해석을 수행한

후 contact요소의 gap을 조사하여 허용치 즉, 시편의 표면조도(두께의 약 1/100)이하인지를 판단하고 gap이 허용치내일 경우 하중과 변위에 대한 그래프를 통해 정확한 좌굴점을 판단하게 되며, 선형해석과 비선형해석상의 좌굴하중 관계는 Fig. 6에서 표현하듯이 작용하중과 모델 중앙부 절점의 z방향(두께방향) 변위와의 관계를 통해 구한 임계하중보다 선형좌굴해석을 수행하여 구한 값이 더 크다.

2.4 해석 결과 및 고찰

2.4.1 형상비(r)의 변화

식(6)과 같이 사각평판의 임계압축응력 σ_{cr} 및 임

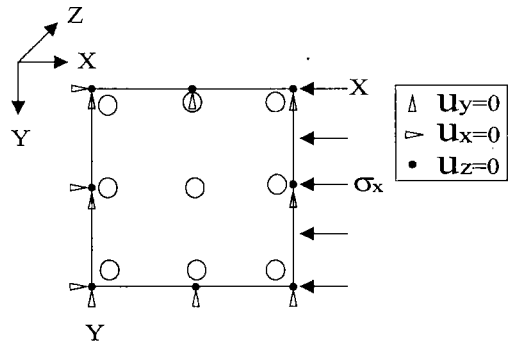


Fig. 4 The boundary condition under compressive load

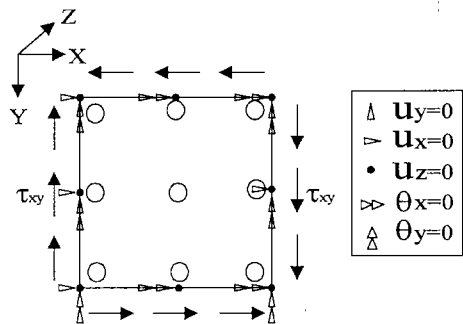


Fig. 5 The boundary condition under shearing load

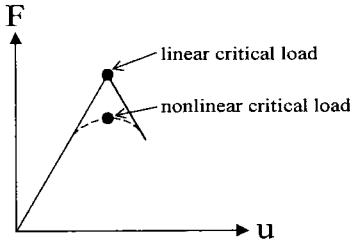


Fig. 6 The critical load by linear analysis and nonlinear analysis

계전단응력 τ_{cr} 은 각각 좌굴계수(buckling coefficient) k_c 및 k_s 로 표현할 수 있고, 이는 경계조건에 의존하는 값으로 적용되지 않은 평판의 경우에는 여러 경계조건에 대해서 그 값은 이미 알려져 있으며,^{2,4)} 압축 및 전단하중을 받는 경우에 해석에 사용된 7가지 형상비에 대한 길이방향 및 폭방향 용접점수와 임계하중은 각각 Table 6 및 Table 7에 나타난 바와 같다.

Table 6 The number of spot-welds and compressive critical load for seven aspect ratios

| r | 0.5 | 0.75 | 1 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha \times \beta$ | 3×5 | 4×5 | 5×5 | 6×5 | 7×5 | 8×5 | 9×5 |
| F_{cr} (kN) | 23.56 | 16.48 | 14.52 | 14.13 | 14.35 | 14.54 | 14.06 |

Table 7 The number of spot-welds and shearing critical load for seven aspect ratios

| r | 0.5 | 0.75 | 1 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha \times \beta$ | 3×5 | 4×5 | 5×5 | 6×5 | 7×5 | 8×5 | 9×5 |
| F_{cr} (kN) | 85.27 | 50.64 | 35.73 | 29.29 | 26.30 | 24.86 | 24.12 |

모든 용접피치는 54mm로 동일하며, 두께 1mm

의 두 사각평판이 단순히 접촉되어 있을 경우 등가두께 t_e 는 1.26mm이며, 일정한 용접피치로 용접되었을 때 두께증가효과에 의한 등가두께 t_e 는 식(10)에 의하여 구할 수 있다. Table 8과 Fig. 7에서 보듯이 단순지지된 평판이 압축하중을 받는 경우 t_e 는 $r=0.5$ 에서 최소가 되며, r 이 증가함에 따라 증가하다가 $r=1.75$ 에서 최대가 되고, $r=2$ 일 때는 다시 감소함을 알 수 있으며, $r=1.75$ 에서 1.854mm로 가장 크고 $r=0.5$ 의 1.716mm 보다 약 8% 더 크다는 사실을 알 수 있다. 고정평판에 전단하중이 가해지는 경우는 Table 9와 Fig. 8에서 보여주듯이, 등가두

Table 8 The equivalent thickness of welded plates under compressive load for seven aspect ratios

| r | 0.5 | 0.75 | 1 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t_e (mm) | 1.716 | 1.768 | 1.803 | 1.828 | 1.848 | 1.854 | 1.825 |

Table 9 The equivalent thickness of welded plates under shearing load for seven aspect ratios

| r | 0.5 | 0.75 | 1 | 1.25 | 1.5 | 1.75 | 2 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t_e (mm) | 1.504 | 1.495 | 1.452 | 1.429 | 1.421 | 1.422 | 1.427 |

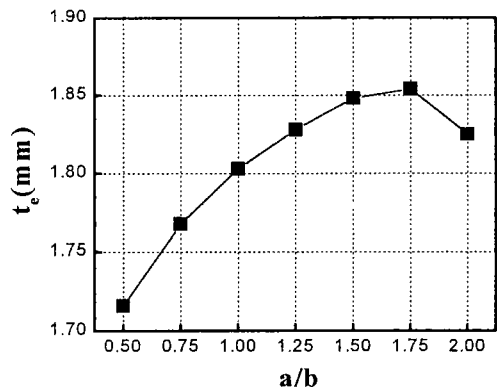


Fig. 7 The relation between aspect ratio and equivalent thickness under compressive load(A=B=54mm)

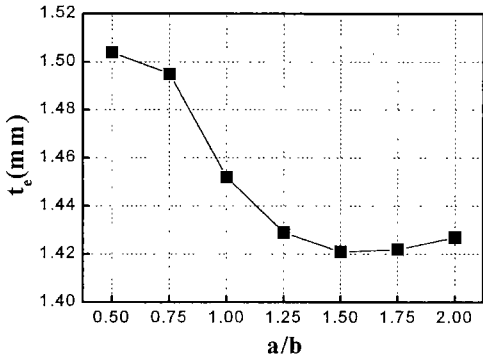


Fig. 8 The relation between aspect ratio and equivalent thickness under shearing load(A=B=54mm)

계 t_e 는 $r=0.5$ 에서 최대가 되며, r 이 증가할수록 점점 작아지다가 $r=1.5$ 에서 최소가 되고, r 이 1.5 보다 커지면 점차 커짐을 알 수 있다. 따라서 평판이 받고 있는 하중에 따라서 형상비를 선택해야 할 것이라고 판단된다.

$$t_e = \sqrt[3]{\frac{12(1-\nu^2)F_{cr} \cdot b}{\pi^2 E k}} \quad (10)$$

2.4.2 용접점수 (α, β)의 변화

점용접된 두 사각평판은 형상비가 일정할 경우에 길이방향 및 폭방향 용접점수에 의해서 임계하중이 변화하고, Fig. 9~14의 α, β 는 변화하는 변수이며, 변하지 않을 경우는 모두 3으로 고정하여 해석을 수행하였다.

압축하중이 작용하는 경우에 각 형상비에서 $\beta=3$ 으로 고정, α 가 3~4, 4~5로 변할 때와 $\alpha=3$ 으로 고정, β 가 3~4, 4~5로 변할 때의 임계하중 증가율($\Delta F/\Delta \alpha, \Delta F/\Delta \beta$) 및 평균증가율(N/number)은 Table 9와 Fig. 9~10에 나타내었으며, 각 형상비에서 용접점수 α 가 4, 5일 때 임계하중(F_c)에 대한 임계하중의 차($F_\beta - F_\alpha$)의 비를 백분율로 표시하여 Table 9와 Fig. 11에 나타내었다. 대체로 용접점수에 대한 임계하중의 증가 비율은 r 이

작을수록 크고, r 이 커질수록 감소함을 알 수 있으며, α 혹은 β 가 4이고 r 이 1.5일 경우를 제외한 모든 r 과 α 혹은 β 가 5이고 r 이 0.75, 1일 경우는 α 의 증가보다 β 의 증가가 임계하중의 증가에 미치는 영향이 더 크고, α 혹은 β 가 4이고 r 이 1.5일 경우 및 α 혹은 β 가 5이고 r 이 1.25, 1.5, 1.75, 2일 경우는 β 의 증가보다 α 의 증가가 임계하중의 증가에 미치는 영향이 더 크다.

전단하중의 경우에는 각 형상비에서 $\beta=3$ 으로 고정, α 가 3~4, 4~5로 변할 때와 $\alpha=3$ 으로 고정, β 가 3~4, 4~5로 변할 때의 임계하중 증가율($\Delta F/\Delta \alpha, \Delta F/\Delta \beta$) 및 평균증가율(N/number)은 Table 10와 Fig. 12~13에 나타내었으며, 각 형상비에서 용접점수 α 가 4, 5일 때 임계하중(F_c)에 대한 임계하중의 차($F_\beta - F_\alpha$)의 비를 백분율로 표시하여 Table 10과 Fig. 14에 나타내었다. 용접점수에 대한 임계하중의 증가 비율은 압축의 경우와 비슷하게 r 이 작을수록 크고, r 이 커질수록 감소함을 알 수 있으며, 동일한 형상비에서 α 의 증가가 β 의 증가보다 임계하중의 증가에 미치는 영향이 더 크며, r 이 1.5일 때 α 의 증가가 임계하중의 증가에 미치는 영향이 가장 크고 r 이 1.5에서 멀어질 수록 그 영향이 작아진다는 사실을 알 수 있다.

Table 10 The increase ratio of critical load(N/number) and the ratio of a difference of critical load($F_\beta - F_\alpha$) with respect to critical load(F_c) under compressive load

| r | $\Delta F/\Delta \alpha (\beta=3)$ | | | $\Delta F/\Delta \beta (\alpha=3)$ | | | $\Delta F_{\beta-\alpha}/F_c$ | |
|------|------------------------------------|-----|------|------------------------------------|-----|------|-------------------------------|-------|
| | 3~4 | 4~5 | mean | 3~4 | 4~5 | mean | 4 | 5 |
| 0.75 | 955 | 603 | 779 | 1464 | 913 | 1189 | 398%↑ | 612%↑ |
| 1 | 787 | 540 | 663 | 892 | 514 | 703 | 097%↑ | 070%↑ |
| 1.25 | 689 | 456 | 572 | 605 | 335 | 470 | 082%↓ | 191%↓ |
| 1.5 | 246 | 715 | 481 | 408 | 231 | 319 | 164%↑ | 303%↓ |
| 1.75 | 386 | 759 | 573 | 942 | 173 | 558 | 614%↑ | 030%↓ |
| 2 | 353 | 739 | 546 | 722 | 141 | 432 | 423%↑ | 244%↓ |

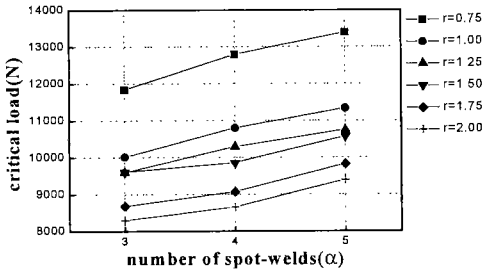


Fig. 9 The relation between number of spot-welds in longitudinal direction(α) and critical load(β=3)

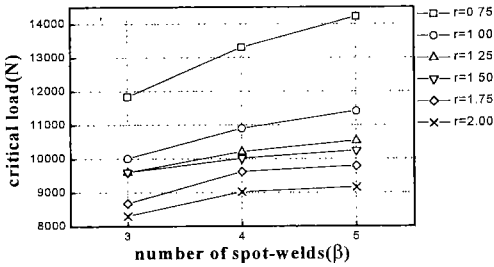


Fig. 10 The relation between number of spot-welds in transverse direction(β) and critical load(α=3)

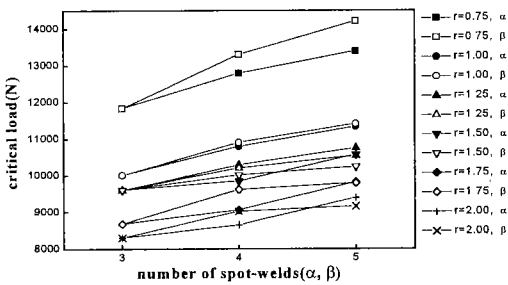


Fig. 11 The relation between number of spot-welds in two directions(α,β) and critical load

Table 11 The ratio of increase of critical load(N/number) and the ratio of a difference of critical load($F_{\beta}-F_{\alpha}$) with respect to critical load(F_{α}) under shearing load

| r | $\Delta F / \Delta \alpha (\beta=3)$ | | | $\Delta F / \Delta \beta (\alpha=3)$ | | | $\Delta F_{\beta-\alpha} / F_{\alpha}$ | |
|------|--------------------------------------|------|------|--------------------------------------|------|------|--|-------|
| | 3~4 | 4~5 | mean | 3~4 | 4~5 | mean | 4 | 5 |
| 0.75 | 5614 | 1679 | 3647 | 4327 | 4615 | 4471 | 32%↓ | 40%↑ |
| 1 | 4482 | 1359 | 2920 | 3266 | 1500 | 2383 | 47%↓ | 40%↓ |
| 1.25 | 3861 | 1085 | 2473 | 2010 | 924 | 1467 | 93%↓ | 96%↓ |
| 1.5 | 3392 | 903 | 2147 | 1443 | 656 | 1049 | 115%↓ | 123%↓ |
| 1.75 | 1944 | 1683 | 1814 | 1145 | 516 | 830 | 56%↓ | 123%↓ |
| 2 | 932 | 2004 | 1468 | 967 | 431 | 699 | 03%↑ | 104%↓ |

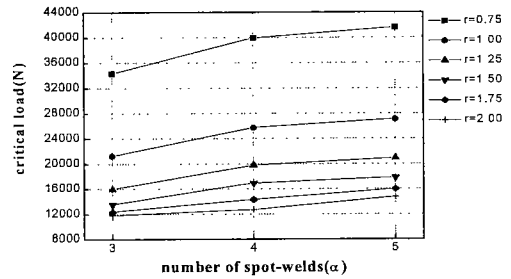


Fig. 12 The relation between number of spot-welds in longitudinal direction(α) and critical load(β=3)

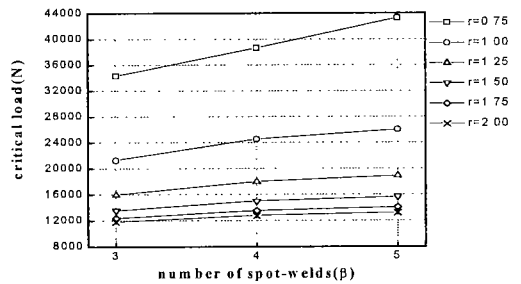


Fig. 13 The relation between number of spot-welds in transverse direction(β) and critical load(α=3)

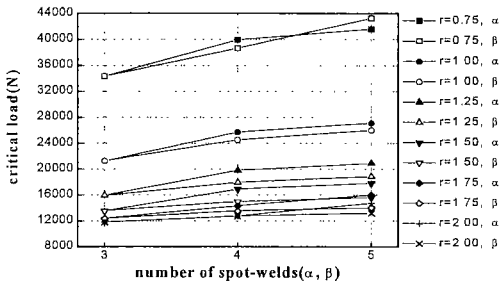


Fig. 14 The relation between number of spot-welds two directions (α, β) and critical load

3. 결론

점용접된 두 사각평판의 점용접이 압축 및 전단 좌굴하중 및 등가두께의 증가에 미치는 영향을 평가하기 위해서 설계파라메타를 정의하고 유한요소 해석을 이용하여 각각의 파라메타에 대한 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 압축하중을 받는 용접되지 않은 평판에 x방향으로 하중이 가해질 때 하중이 가해지는 모서리는 단순지지되고 나머지 모서리는 힌지로 연결된 경계조건 하에서 이론적 해석을 통하여 임계응력 σ_{cr} 및 좌굴계수 k 를 구하였으며, 고정평판이 전단 하중을 받는 경우는 근사식을 사용하여 임계응력 및 좌굴계수를 구하였다.

2) 두 사각평판이 점용접 되었을 때 두께증가 효과를 살펴보기 위해서 등가두께(equivalent thickness)를 정의하였고, 두께가 동일한 두 사각평판이 단순접촉된 경우에 두께증가효과는 1.26배이며, 용접 피치가 54mm로 일정할 때 압축하중을 받는 경우 t_e 는 $r=1.75$ 에서 1.854mm로 가장 크고 $r=0.5$ 의 1.716mm 보다 약 8% 더 크다는 사실을 알 수 있다. 또한, 평판이 받고 있는 하중에 따라서 형상비를 선택해야 할 것이라고 판단된다.

3) 전체적으로 용접점수에 대한 임계하중의 증가 비율은 r 이 작을수록 크고, r 이 커질수록 감소함을 알 수 있으며, 전단의 경우는 동일한 형상비에서 β 의 증가보다 α 의 증가가 임계하중의 증가에 미치는 영향이 더 크고, r 이 1.5일 때 α 에 대한 β 의 증가가 임계하중의 증가에 미치는 영향은 11.5%, 12.3% 감소함으로 α 의 영향이 가장 크고 r 이 1.5에서 멀어질수록 그 영향이 작아짐을 알 수 있었다.

4) 두께가 동일한 두 사각평판을 점용접할 경우에 작용하는 하중에 따라서 등가두께의 증가효과는 서로 다르게 나타났으며, 전단의 경우는 큰 형상비를 선택하고, 폭방향보다 길이방향 용접점수를 더 증가시키면 가장 큰 보강효과를 얻을 수 있다.

참고문헌

- 1) Z. P. Bazant and Luigi Cedolin. (1991). "Stability of Structures," Oxford Uni. Press, pp. 431-440, 1991.
- 2) Owen F. Hughes. (1983). "Ship Structural Design," John Wiley & Sons, pp. 404-439.
- 3) A. C. Ugural. (1981). "Stresses in Plates and Shells," McGraw-Hill, pp. 153-173.
- 4) S. P. Timoshenko and J. M. Gere. (1961). "Theory of Elastic Stability," McGraw-Hill, pp. 348-439.
- 5) S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger. (1959). "Theory of Plates and Shell," McGraw-Hill, pp. 181-228.
- 6) Wang, C. M. (1995). "Allowance for prebuckling deformations in buckling load relations hip between Mindlin and Kirchhoff simply supported plates of general polygonal shape." Engrg. Struct., 16(6), pp. 413-418.