

면적비와 거리비가 점용접된 두 사각평판의 굽힘강성에 미치는 영향

한근조*·안성찬**·심재준**·한동섭**

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

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 plates spot-welded under bending 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 investigation are compared from 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 study is carried out using the equivalent thickness of the reinforced plates spot-welded.

기호설명

r = Aspect ratio

A = Area ratio

D = Distance ratio

T_e = Equivalent Thickness

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 점용접이 존재하는데, 차체의 구조적 강도(rigidity)와 하중 전달에 있어서 점용접 점들의 각각의 영향

에 대한 정확한 계산을 위해서는 점용접부의 기하학적 연결방향을 고려해야 하고, 주위 부분들의 접촉에 대한 고려가 필요하게 된다.⁷⁾

본 연구에서는 여러 가지 점용접을 이용한 구조물 제작 중 결함이 발생한 평판 구조물의 보강시 점용접을 이용하여 보강판을 본판에 결합하는 과정에서 굽힘하중이 작용할 때의 보강효과를 점용접 면적비와 형상비의 변화를 설계 파라메타로 선택하여 등가두께(Equivalent thickness)로써 평가하고자 한다.

연구에 사용되는 사각평판의 재질은 연강으로써 두께가 1mm인 평판을 점용접을 이용하여 결합한 접판으로 폭은 100mm이고 길이는 형상비에 따라 각각 100mm, 150mm, 200mm이다. 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었고, JIS E 4049의 최소용접피치를 고려하면 평판의 두께가 1mm일 때 최소용접피치는 15mm이상, 최소가장자리간격은 7.5mm 이상이 되어야 하고, 전극팁의 끝지름은 $5 \times \sqrt{t}$ (mm) 이상이 되어야 하므로 전극팁의 끝지

* 동아대학교 기계공학과

** 동아대학교 기계공학과 대학원

름은 6mm를 사용하여 해석을 수행하였다.⁵⁾

Table 1 Mechanical properties of mild steel

| Material | mild steel |
|------------------|-----------------------|
| Elastic modulus | 2.1×10^5 MPa |
| Tensile strength | 550 MPa |
| Yield strength | 210 MPa |
| Poisson's ratio | 0.29 |

두께가 1mm인 평판 두 장을 단지 겹친 경우와 점용접을 이용하여 결합시켰을 경우의 처짐을 각각 구하여 두께가 1mm인 평판의 처짐을 기준으로 처짐의 비로써 얼마만큼의 두께효과가 있는지를 등가두께(T_e)를 통해 파악하고자 한다.

완전고정된 사각평판에서 형상비(r)가 1인 경우 ($a=b$) 최대 처짐식은 식(1)과 같다.^{1),2),3)}

$$w_{\max} = 0.00128 \frac{pa^4}{D} \quad (1)$$

여기서, D 는 휨강성계수이다.

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

위 식에서 처짐(w)은 오직 두께 t 만의 함수이고 나머지는 모두 상수이다. 따라서, 등가두께(T_e)를 최대처짐의 비로써 무차원화 시켜 나타내면 식(2)와 같다.^{4),6)}

$$T_e = \frac{t}{t_1} = \left(\frac{w_{1\max}}{w_{\max}} \right)^{1/3} \quad (2)$$

본 연구에서는 점용접된 사각평판의 굽힘 조건에서 보강효과를 먼저 수치해석을 통하여 살펴보고, 다음으로 시험을 통하여 검증하였다. 수치해석에는 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 사용하였고, 등방, 등질의 재료로 가정하고 접촉요소를 적용하여 탄성조건에서 해석을 수행하였다. 실험에는 만능측정시험기인 INSTRON을 사용하여 굽힘실험을 수행하였다.

2. 점용접된 평판의 유한요소해석

2.1 해석모델

해석에 사용된 요소는 각 절점에서 세 개의 병진자유도(U_x, U_y, U_z)를 갖는 8절점 육면체 요소를 사용하여 모두 육면체로써 한 변의 길이가 3mm보다 작게 되도록 모델링하였으며, Fig. 1에 $r=1, A=0.0452(4 \times 4)$ 인 모델의 메쉬된 형상을 나타내었다.

면적비 변화의 경우 절점은 1458~16512개, 요소는 676~6912개를, 거리비 변화의 경우 절점은 1401~2585개, 요소는 1328~2408개를 각각 사용하였고, 점용접점은 절점을 공유하였으며, 나머지 접합면은 3D Surface-to-Surface 접촉요소를 사용하여 밀리는 효과를 주었다.

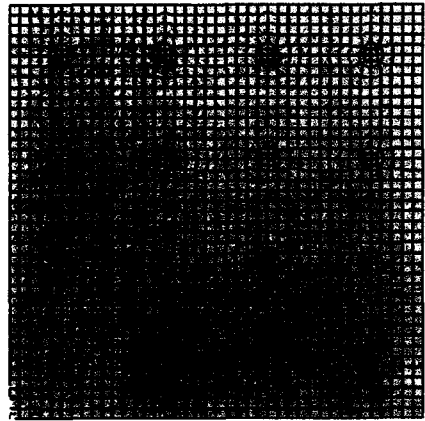


Fig. 1 Meshed shape of model ($r=1, A=0.0452$)

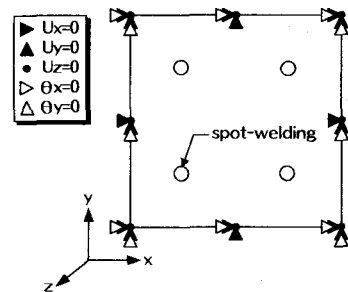


Fig. 2 Boundary condition of a rectangular plate spot-welded

굽힘에 대한 등가두께(T_e)는 오직 두께 t 만의 함수로써 하중과는 무관하므로 처짐을 가시화 할 수 있는 하중으로 집중하중 200N을 평판의 중심에 적용하였으며, 경계조건은 완전고정경계로

상·하판의 네 변에 있는 모든 절점의 자유도를 구속하였으며, Fig. 2에 경계조건을 나타내었다.

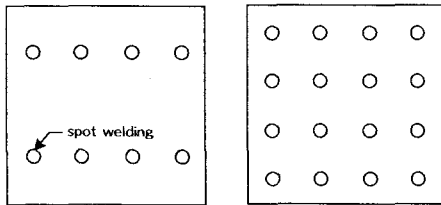
2.2 파라메타의 정의

2.3.1 면적비 변화

점용접 면적비가 변화함에 따라 굽힘에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 3종류의 형상비(r) 1.0, 1.5, 2.0에 대해 3종류의 면적비(A) 0(non-RSW), 0.0226(2×4), 0.0452(4×4)를 조합하여 총 9종류의 모델을 사용하였다. 여기서 면적비는 사각평판의 면적에 대한 총 점용접점 면적의 비로써 식(3)과 같다.

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

여기서, n 은 점용접 개수이다. 형상비가 1인 경우에 대해 두 가지의 면적비에 대한 점용접 형상을 Fig. 3에 나타내었으며, 형상비 변화에 관계없이 한 종류의 면적비는 모두 동일하도록 하기 위해 길이방향의 점용접 점수는 25mm 간격으로 1개씩 증가 시켜가며 배치시켰다.



(a) $A=0.0226(2 \times 4)$ (b) $A=0.0452(4 \times 4)$

Fig. 3 Various shape of spot-welding with the change of the area ratio ($r=1$)

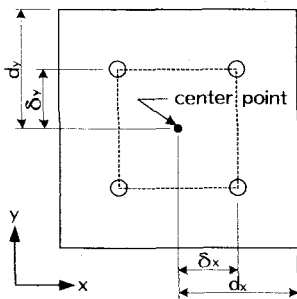


Fig. 4 The relative distance from the center point of the plate spot-welded ($r=1$)

2.3.2 거리비 변화

점용접 거리비가 변화함에 따라 굽힘에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 점용접점수가 4개인 경우에 3종류의 형상비(r) 1.0, 1.5, 2.0에 대해 3종류의 거리비(D) 0.2, 0.5, 0.8을 조합하여 총 9종류의 모델을 사용하였다. Fig. 4에 $r=1$ 일 때 점용접점이 4개인 모델을 나타내었다. 여기서 거리비는 사각평판의 한번의 길이에 대한 점용접점 사이의 거리의 비로써 식(4)과 같다.

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

3. 점용접된 평판의 굽힘시험

3.1 실험방법

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

측정은 탄성영역 내에서 이뤄졌으며, 하중을 0에서 200N까지 일정속도로 증가시켜 하중-변위선도를 얻고, 이 그래프에서 나타난 선도의 기울기를 통해 200N에서의 처짐을 계산하게 된다.

3.2 실험조건

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



Fig. 5 Measurement system of bending test with fixed boundary

면적비 변화와 거리비 변화에 대해 각각 유한요소해석과 동일한 9가지의 종류에 대해서 시험

을 하였고, 등가두께를 계산하기 위한 기준이 되는 두께가 1mm, 2mm인 평판에 대해서도 측정을 하였다. 시편은 각 종류에 대해 3개씩의 시료를 준비하여 총 72가지의 경우에 대해 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유한요소해석 결과

4.1.1 면적비 변화에 따른 굽힘강성

각 형상비에서 면적비 변화에 따른 점용접된 두 사각평판의 최대처짐과 등가두께(T_e)를 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

형상비가 증가할수록 처짐이 증가하나 형상비가 1.5를 기준으로 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 집중하중의 영향에 대한 부분이 폭의 1.5 배를 넘지 않기 때문이다. 등가두께는 형상비

Table 2 Deflection with respect to the change of the aspect ratio and area ratio (unit:mm)

| r \ A | 0 (non-RSW) | 0.0226 (2×4) | 0.0452 (4×4) |
|-------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1.0 | 0.281 | 0.187 | 0.133 |
| 1.5 | 0.355 | 0.211 | 0.158 |
| 2.0 | 0.364 | 0.213 | 0.162 |

Table 3 Equivalent thickness with respect to the change of the aspect ratio and area ratio

| r \ A | 0 (non-RSW) | 0.0226 (2×4) | 0.0452 (4×4) |
|-------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1.0 | 1.26 | 1.44 | 1.62 |
| 1.5 | 1.26 | 1.50 | 1.65 |
| 2.0 | 1.26 | 1.51 | 1.65 |

Table 4 Deflection with respect to the change of the aspect ratio and distance ratio (unit:mm)

| r \ D | 0.2 | 0.5 | 0.8 |
|-------|-------|-------|-------|
| 1.0 | 0.181 | 0.225 | 0.283 |
| 1.5 | 0.241 | 0.310 | 0.358 |
| 2.0 | 0.266 | 0.345 | 0.370 |

Table 5 Equivalent thickness with respect to the change of the aspect ratio and distance ratio

| r \ D | 0.2 | 0.5 | 0.8 |
|-------|------|------|------|
| 1.0 | 1.46 | 1.36 | 1.26 |
| 1.5 | 1.43 | 1.32 | 1.26 |
| 2.0 | 1.40 | 1.28 | 1.25 |

가 증가함에 따라 조금씩 증가하나 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다.

면적비 변화에 따른 영향을 살펴보면 두께효과는 A=0에 비해 A=0.0226인 경우 최대 25%, A=0.0452인 경우 최대 39%까지 증가하였다.

4.1.2 거리비 변화에 따른 굽힘강성

각 형상비에서 거리비 변화에 따른 점용접된 두 사각평판의 최대처짐과 등가두께(T_e)를 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

형상비가 증가할수록 처짐의 증가는 면적비와 비슷한 경향을 보이지만, 등가두께는 오히려 감소하는 결과를 보였다. 또한, 거리비에 따른 두께효과는 대칭균등조건인 D=0.5에 대해 D=0.2인 경우 최대 12% 증가, D=0.8인 경우 최대 10% 감소하였다.

Table 6 Deflection with respect to the change of the aspect ratio and area ratio (unit:mm)

| r \ A | 0 (non-RSW) | 0.0226 (2×4) | 0.0452 (4×4) |
|-------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1.0 | 0.280 | 0.222 | 0.166 |
| 1.5 | 0.374 | 0.264 | 0.194 |
| 2.0 | 0.377 | 0.289 | 0.195 |

Table 7 Equivalent thickness with respect to the change of the aspect ratio and area ratio

| r \ A | 0 (non-RSW) | 0.0226 (2×4) | 0.0452 (4×4) |
|-------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1.0 | 1.29 | 1.39 | 1.53 |
| 1.5 | 1.22 | 1.37 | 1.52 |
| 2.0 | 1.22 | 1.33 | 1.52 |

Table 8 Deflection with respect to the change of the aspect ratio and distance ratio (unit:mm)

| r \ D | 0.2 | 0.5 | 0.8 |
|-------|-------|-------|-------|
| 1.0 | 0.194 | 0.295 | 0.366 |
| 1.5 | 0.242 | 0.372 | 0.407 |
| 2.0 | 0.288 | 0.407 | 0.404 |

Table 9 Equivalent thickness with respect to the change of the aspect ratio and distance ratio

| r \ D | 0.2 | 0.5 | 0.8 |
|-------|------|------|------|
| 1.0 | 1.46 | 1.27 | 1.18 |
| 1.5 | 1.41 | 1.22 | 1.19 |
| 2.0 | 1.34 | 1.19 | 1.19 |

4.2 실험 결과

시편의 두께가 일정하지 않으므로 각각의 종류에 대해 3번의 실험을 통해 얻어진 결과를 동일한 두께로 보상을 하여 값을 정리한 후 낙도법을 이용하여 동떨어진 값을 제외한 나머지 2번의 결과를 놓고 평균을 취하여 계산을 하였다.

4.2.1 면적비 변화에 따른 굽힘강성

각 형상비에서 면적비 변화에 따른 점용접된 두 사각평판의 최대 처짐과 등가두께(T_e)를 Table 6과 Table 7에 나타내었다.

형상비가 증가함에 따라 처짐은 일정한 값에 수렴하였고, 등가두께는 감소하는 경향을 보였다. 면적비의 변화에 따른 영향을 살펴보면 두께효과는 $A=0$ 에 비해 $A=0.0226$ 인 경우 최대 15%, $A=$

0.0452인 경우 최대 30% 증가하였다.

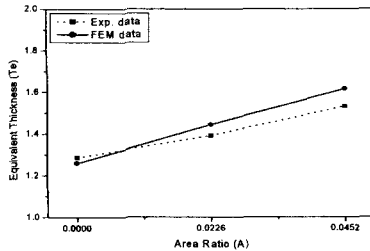
4.2.2 거리비 변화에 따른 굽힘강성

각 형상비에서 거리비 변화에 따른 점용접된 두 사각평판의 최대 처짐과 등가두께(T_e)를 Table 8과 Table 9에 나타내었다.

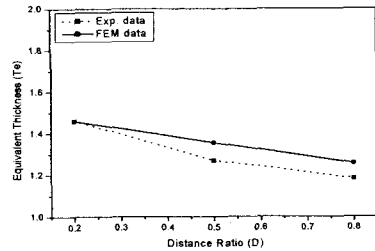
거리비에 따른 두께효과는 대칭균등조건인 $D=0.5$ 에 비해 $D=0.2$ 인 경우 최대 19% 증가, $D=0.8$ 인 경우 최대 9% 감소하였다.

4.3 유한요소해석 결과와 실험 결과의 비교

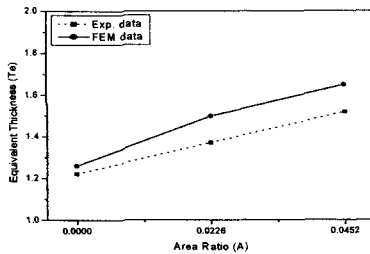
면적비 변화와 거리비 변화에 따른 점용접된 두 사각평판의 등가두께에 대한 유한요소해석의 결과와 실험의 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 비교하여 나타내었다.



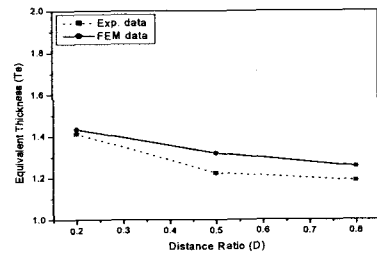
(a) $r = 1.0$



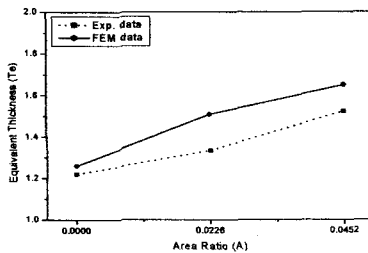
(a) $r = 1.0$



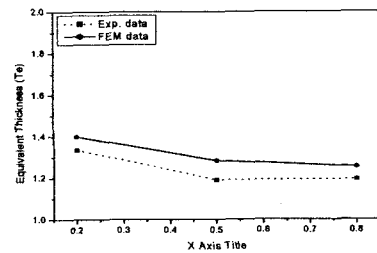
(b) $r = 1.5$



(b) $r = 1.5$



(c) $r = 2.0$



(c) $r = 2.0$

Fig. 6 Comparison of experiment and FEM results with respect to area ratio(A)

Fig. 7 Comparison of experiment and FEM results with respect to distance ratio(D)

Fig. 6에서 면적비가 0(non-RSW)인 경우는 형상비와 관계없이 실험 값과 FEM 값이 거의 일치하였으나, 점용접이 이뤄진 부분에서는 형상비에 따라 등가두께가 조금씩 차이를 보이임을 알 수 있다. 이는 점용접점의 해석 시 단순 접합이 아닌 용접으로 인한 열영향으로 강도가 바뀌게 되기 때문이라 분석된다. 형상비가 1.0인 경우 면적비의 증가에 따라 등가두께의 증가가 선형적으로 나타났고, 형상비가 증가할수록 비선형적으로 변하는 경향을 보였다. 전체적으로 실험 값이 FEM 값보다는 두께효과가 작게 나타났다.

Fig. 7에서 거리비 변화에 따른 등가두께의 영향을 보면, 절대 값의 차이는 있지만 실험 값과 FEM 값이 유사한 경향으로 변하였으며, 점용접점이 같은 개수에서도 대칭균등조건인 $D=0.5$ 에 대해서 중심으로 갈수록 굽힘에 대한 보강효과의 증가폭이, 경계로 갈수록 작아지는 감소폭보다 더 크다는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 점용접을 이용하여 보강하는 평판구조물의 굽힘조건에서 등가두께로서 면적비와 거리비 변화에 따른 보강효과를 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 단변의 영향으로 더 이상 증가하지 않고 거의 일정하게 되며, 따라서 형상비가 1.5 이상이 되면, 일정한 값에 수렴하게 된다.
2. 면적비 변화에 따른 영향을 살펴보면, 유한요소해석의 경우 두께효과는 $A=0$ (non-RSW)에 비해 $A=0.0226(2 \times 4)$ 인 경우 최대 25%, $A=0.0452(4 \times 4)$ 인 경우 최대 39% 증가하였고, 실험의 경우 두께효과는 $A=0$ (non-RSW)에 비해 $A=0.0226(2 \times 4)$ 인 경우 최대 15%, $A=0.0452(4 \times 4)$ 인 경우 최대 30% 증가하였다.
3. 거리비 변화에 따른 영향을 살펴보면, 유한요소해석의 경우 두께효과는 대칭균등조건인 $D=0.5$ 에 비해 $D=0.2$ 인 경우 최대 12% 증가, $D=0.8$

인 경우 최대 10% 감소하였고, 심험의 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.

참고문헌

- (1) S. P. Timoshenko and J. M. Gere, 1961, "Theory of Elastic Stability," McGraw-Hill, pp. 319~347.
- (2) S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, 1959, "Theory of Plates and Shells," McGraw-Hill, pp. 180~228
- (3) A. C. Ugural, 1981, "Stresses in Plates and Shells," McGraw-Hill, pp. 153~173.
- (4) 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.
- (5) 서승일, 이재호, 장상길, 차병우, 1996, "점용접시 압흔 깊이 감소를 위한 최적 용접조건 선정에 관한 연구," 대한용접학회지, 제14권, 제2호.
- (6) 한근조, 안성찬, 심계준, 장활수, 2000, "보강판의 설계변수 변화에 따른 평판구조물의 보강효과에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp. 807~812.
- (7) X. Deng, W. Chen, G. Shi, 2000, "Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Mechanical Behavior of Spot Welds," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 35, pp. 17~39.