

기계적 프레스 접합의 최적접합조건에 관한 연구

이용복* · 김태윤** · 정진성*** · 최지훈***
(1999년 4월 27일 접수)

A Study on the Optimum Joining Condition in a Mechanical Press Joint

Yong Bok Lee, Tae Yun Kim, Chin Sung Chung and Ji Hoon Choi

Key Words: Mechanical Press Joining(기계적 프레스 접합), Button Diameter(버튼 지름), Neck Thickness(목두께), Interface Failure Mode(관통 파단 형태), Pull-Out Failure Mode(분리 파단 형태)

Abstract

Mechanical press joining has been used in sheet metal joining processes because of its simple process and possibility of joining dissimilar metals, such as steel and aluminum. The strength of mechanical press joining varies with joining conditions. The optimum joining conditions considering tensile-shear and peel-tension strength have to be established to assure the reliability in the joining strength. Therefore, optimization of joining conditions has been investigated for improving joining strength of sheet metal. It is possible to obtain optimum strength from improvement on the joining strength of peel-tension mechanical press joint under multiaxial stress states.

1. 서론

자동차 차체의 일반적 접합방법으로 쓰이고 있는 점용접으로는 용접성이 불량한 이종재료 접합이 불가능한 실정⁽¹⁾이므로 차량구조물로서 알루미늄 합금 등 경량화 재료를 사용하게 될 경우, 점용접을 대체할 효과적인 접합방법이 요구되고 있다.⁽²⁾ 현재까지 개발된 효과적인 이종재료의 접합법 중, 기계적 프레스 접합은 비용절감의 측면에서 유리하므로 그 관심도가 증가하고 있다.^(3~5) 기계적 프레스 접합은 도장금속판이나 일반금속판 모두 접합 가능하며 깨끗하고 결합력이 일관된 접합부를 만들어 낸다.⁽⁶⁾ 접합된 모양을 보면 다이(die)측은 단추모양을 하고 펀치(punch)측은

밀려들어간 홈을 형성하게 되는데, 이 단추모양의 외형으로 접합상태를 판단할 수 있다. Fig. 1은 원형으로 된 컵 형상 내부에 재료를 밀어 넣은 후 360° 전 방향으로 전체직경을 처음의 컵형상 직경보다 더욱 크게 펼침으로써 상·하 재료가 맞물려 강력한 결합력을 만드는 접합과정을 나타낸다.

그러나 최근까지도 기계적 프레스 접합에 관한 체계적인 연구가 진행되지 못하여 접합강도에 대한

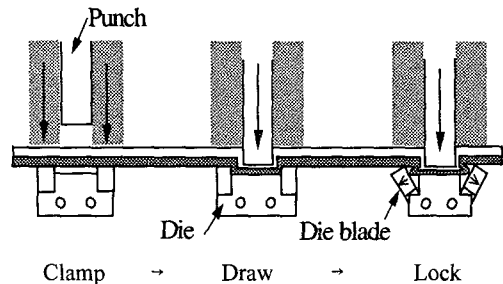


Fig. 1 Process of mechanical press joining method

* 회원, 홍익대학교 기계공학과
E-mail : yblee@wow.hongik.ac.kr
TEL : (02)320-1665 FAX : (02)322-7003

** 유니슨 산업 (주)

*** 홍익대학교 과학기술연구소

신뢰성이 확립되지 않은 상태이다. 본 연구에서는 기계적 프레스 접합법의 접합강도를 향상시키기 위한 최적접합조건에 관하여 연구함으로써, 기계적 접합법에 대한 정량화 된 기준을 제시하고자 한다.

2. 실험

실험에 사용한 재료는 자동차 차체로 많이 이용되고 있는 냉간압연강판(SPCC)과 알루미늄합금(Al-5052)으로 재료의 기계적 성질, 화학적 성분을 각각 Table 1, 2에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of the base metals

| Material | σ_u (MPa) | σ_y (MPa) | E (GPa) | Elongation (%) |
|----------|---------------------|---------------------|------------|-------------------|
| SPCC | 337.4 | 174.6 | 205 | 50.8 |
| Al-5052 | 273.6 | 213.8 | 78.3 | 12 |

Table 2 Chemical compositions of test specimens (wt.%)

| Material | C | Si | Mn | P | Ni | Al | Fe |
|----------|------|-------|------|------|------|-------|------|
| SPCC | 0.04 | 0.015 | 0.25 | 0.01 | 0.01 | 0.005 | bal. |

| Material | Mg | Mn | Fe | Cr | Si | Cu | Al |
|----------|-----|------|-------|------|-------|------|------|
| Al-5052 | 2.5 | 0.10 | 0.313 | 0.25 | 0.137 | 0.10 | bal. |

Tensile-shear

Peel-tension

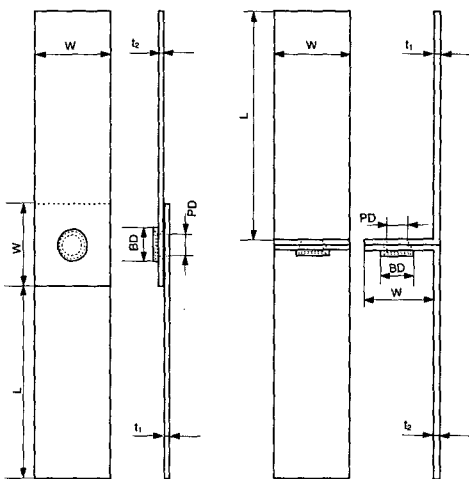


Fig. 2 Configuration of tensile - shear and peel - tension specimen

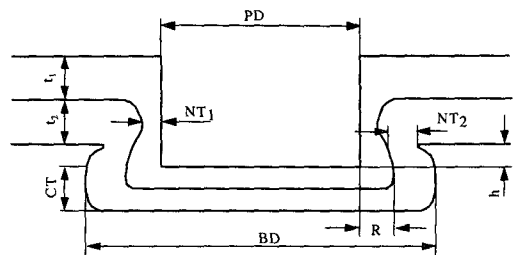
시편은 JIS Z3136에 의거하여 점용접 시편의 치수와 동일한 인장-전단(tensile-shear)시험편과 박리-인장(peel-tension)시험편⁽⁷⁾의 두 가지 형태로 제작하였으며 그 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

기계적 접합은 BTM사의 접합도구⁽⁸⁾(punch, die, air press)를 사용하여 Table 3의 접합조건으로 제작하였다. Fig. 3에 접합부의 단면형상 및 주요인자를 나타내었으며 Fig. 4는 실제 절단면을 사진 촬영한 것이다.

인장실험은 5 ton 용량의 만능 재료 시험기(Instron 8511)를 사용하여 변위 제어 방식으로 수행하였다.

Table 3 Joining conditions of specimens (unit:mm)

| Specimen No. | Punch Side Material | Die Side Material | t_1 | t_2 | W | L | PD |
|--------------|---------------------|-------------------|-------|-------|----|----|-----|
| #1 | SPCC | SPCC | 0.8 | 0.8 | 30 | 70 | 3.0 |
| #2 | SPCC | SPCC | 0.8 | 0.8 | 30 | 70 | 4.6 |
| #3 | SPCC | SPCC | 0.8 | 0.8 | 30 | 70 | 6.4 |
| #4 | SPCC | SPCC | 1.6 | 1.6 | 40 | 85 | 4.6 |
| #5 | SPCC | SPCC | 1.6 | 1.6 | 40 | 85 | 6.4 |
| #6 | Al-5052 | Al-5052 | 1.0 | 1.0 | 30 | 70 | 6.4 |
| #8 | Al-5052 | Al-5052 | 2.0 | 2.0 | 40 | 85 | 6.4 |
| #9 | SPCC | Al-5052 | 0.8 | 1.0 | 30 | 70 | 4.6 |
| #10 | SPCC | Al-5052 | 0.8 | 1.0 | 30 | 70 | 6.4 |
| #11 | SPCC | Al-5052 | 1.6 | 2.0 | 40 | 85 | 6.4 |
| #12 | Al-5052 | SPCC | 1.0 | 0.8 | 30 | 70 | 4.6 |
| #13 | Al-5052 | SPCC | 1.0 | 0.8 | 30 | 70 | 6.4 |
| #14 | Al-5052 | SPCC | 2.0 | 1.6 | 40 | 85 | 4.6 |
| #15 | Al-5052 | SPCC | 2.0 | 1.6 | 40 | 85 | 6.4 |



- PD : 펀치 직경
- BD : 단추모양으로 형성된 부분의 직경
- NT₁ : 상판의 목두께
- NT₂ : 하판의 목두께
- R : 상판과 하판이 맞물린 부분의 수평길이
- t₁ : 상판 소재의 두께
- t₂ : 하판 소재의 두께
- CT : Cap Thickness, 접합부 바닥의 두께

Fig. 3 Cross-section of mechanical press joint

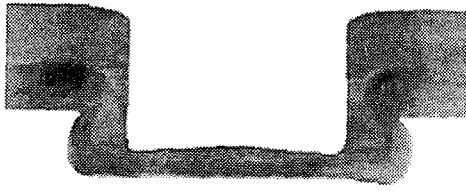


Fig. 4 A photograph showing cross section of mechanical press joint

3. 결과 및 고찰

3.1 접합 강도

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 인장-전단 시험편(T-S)과 박리-인장 시험편(P-T)에 대한 전형적인 인장실험 결과이며, Table 4에 15종의 시험편에 대한 최대 접합강도(peak load), 부하강성(load stiffness), 소성한계(plastic limit), 제하강성(unloading stiffness)의 3회 실험 평균값을 나타내었다.

기계적 프레스 접합부의 접합강도는 판의 재질과 목두께의 영향뿐만 아니라 파단모드에 따라서도 변화한다. 기계적 프레스 접합부의 박리-인장 실험 결과, 접합부의 파단모드는 세 가지로 구별되었다. 즉, Fig. 7의 (a)와 같이 상판의 목두께(NT₁)에서 파단이 발생한 관통파단형태와, (b), (c)와 같이 결합을 이루는 부분 중 상판 또는 하판이 항복되어 두판이 분리되는 분리파단형태이다. Fig. 8은 세 가지 파단모드를 보여주는 사진이다. Fig. 8(a)는 관통파단형태로 상판 목두께(NT₁)에서 파단 되었고, (b), (c)는 분리파단 된 형태로 (b)의 경우 기계적 프레스 접합부의 상판이 심하게 소성변형 되어 분리파단 되었으며, (c)의 경우 상판의 변형보다는 하판이 소성변형 되면서 분리파단 되었다. P-T 실험결과 #1, #2, #3, #9, #10, #12, #13, #15는 분리파단형태로 분리되었으며, 나머지는 모두 관통파단형태로 파단 되었다.

파단모드는 판두께, 펀치직경, 기계적 프레스 접합시 형성되는 상판의 목두께 및 하중부하방식에 의하여 결정되며, 파단모드에 따라 접합강도도 변화한다. 그러므로 판두께에 따라서 펀치직경(PD)과 버튼직경(BD) 등의 접합조건이 달라질 경우 목두께(NT₁)가 변화하여 파단모드에 영향을

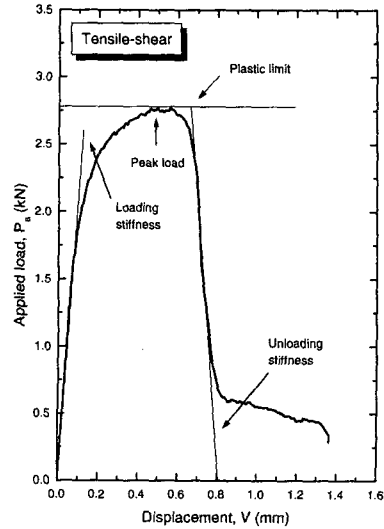


Fig. 5 Typical load - displacement curve of mechanical press joint for tensile - shear specimen

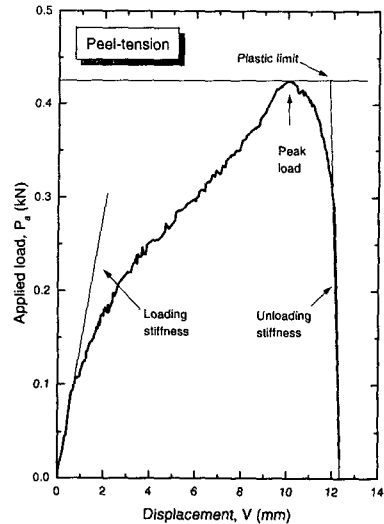
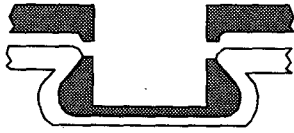
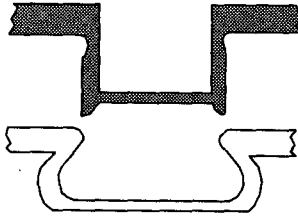


Fig. 6 Typical load - displacement curve of mechanical press joint for peel - tension specimen

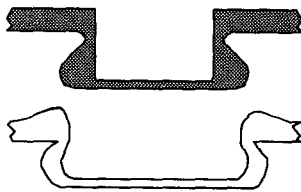
미치게 된다. 따라서 판두께 및 목두께의 영향으로 다르게 나타나는 파단모드와 접합강도를 고려함으로써 최적접합조건을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Interface-failure mode



(b) Yielded upper sheet pull-out failure mode



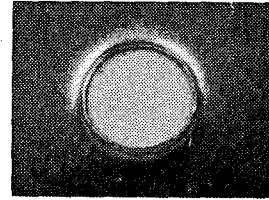
(c) Yielded lower sheet pull-out failure mode

Fig. 7 Failure modes in static tensile test

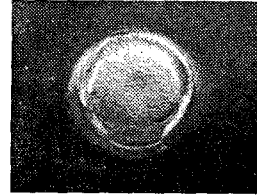
Table 4 Tensile test results

| No. | Peak Load (kN) | | Loading Stiffness (kN/mm) | | Plastic Limit (mm) | | Unloading Stiffness (kN/mm) | |
|-----|----------------|------|---------------------------|------|--------------------|-------|-----------------------------|------|
| | T-S | P-T | T-S | P-T | T-S | P-T | T-S | P-T |
| 1 | 1.01 | 0.35 | 13.40 | 0.10 | 0.58 | 19.40 | 1.77 | 0.02 |
| 2 | 1.51 | 0.47 | 16.70 | 0.09 | 0.70 | 23.91 | 2.74 | 0.02 |
| 3 | 3.22 | 0.67 | 18.65 | 0.16 | 2.67 | 22.75 | 1.21 | 0.03 |
| 4 | 2.41 | 1.07 | 25.18 | 0.35 | 0.66 | 19.71 | 3.69 | 0.05 |
| 5 | 4.21 | 1.84 | 32.66 | 0.86 | 1.10 | 17.33 | 3.85 | 0.11 |
| 6 | 1.73 | 0.33 | 10.91 | 0.12 | 0.42 | 14.51 | 4.16 | 0.02 |
| 7 | 1.37 | - | 19.57 | - | 0.44 | - | 3.11 | - |
| 8 | 2.06 | 0.59 | 18.89 | 0.45 | 0.46 | 2.34 | 4.47 | 0.27 |
| 9 | 1.76 | 0.45 | 14.05 | 0.11 | 0.60 | 17.44 | 2.95 | 0.03 |
| 10 | 3.07 | 0.56 | 14.64 | 0.14 | 1.35 | 16.16 | 2.29 | 0.04 |
| 11 | 3.81 | 1.00 | 23.82 | 0.37 | 0.82 | 15.73 | 4.65 | 0.06 |
| 12 | 1.12 | 0.47 | 11.54 | 0.10 | 0.42 | 14.50 | 2.71 | 0.04 |
| 13 | 2.19 | 0.43 | 12.73 | 0.15 | 0.67 | 13.07 | 3.28 | 0.02 |
| 14 | 1.61 | 0.64 | 21.47 | 1.41 | 0.44 | 2.93 | 3.71 | 0.22 |
| 15 | 2.76 | 1.10 | 20.99 | 0.26 | 0.69 | 20.00 | 4.02 | 0.06 |

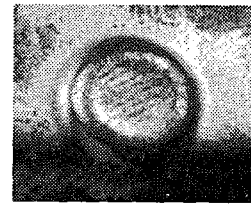
T-S : Tensile-shear / P-T : Peel-tension



(a) Interface-failure mode



(b) Yielded upper sheet pull-out failure mode



(c) Yielded lower sheet pull-out failure mode

Fig. 8 Photographs showing three failure modes in peel - tension static test

3.2 접합 강도에 미치는 접합조건에의 영향

현재 기계적 프레스접합에 대한 신뢰성 평가는 판두께에 따라 적정편치를 선택하여 접합하고, 이때 형성되는 버튼지름을 측정하는 방식을 택하고 있다. 그러나 이러한 기준은 인장-전단강도에 국한된 것으로, 실제 박판 구조물에 있어서 기계적 프레스 접합부는 인장-전단뿐 아니라 복합적인 하중상태에 놓이게 되며, 특히 취약한 인장-굽힘 하중하의 접합강도를 고려하지 못하고 있다. 그 결과 신뢰성 있는 접합강도를 획득하기 위한 최적의 접합조건을 제시하지 못하였다. 따라서 본 실험결과와 문헌상의 실험자료⁽⁸⁾를 비교하여 접합조건에 따른 파단모드와 최적접합조건에의 정량화 된 기준을 제시하고자 한다.

Fig. 9는 하판두께(t_2)와 편치직경(PD)이 일정한 상태에서 상판두께(t_1)의 변화에 따른 버튼직경과

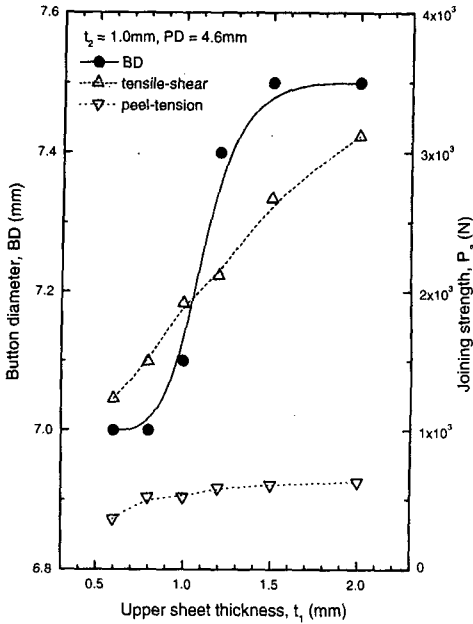


Fig. 9 Effect of upper sheet thickness on the button diameter and joining strength

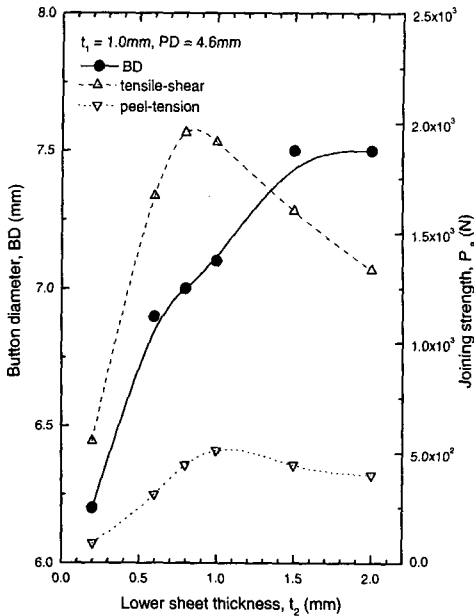


Fig. 10 Effect of lower sheet thickness on the button diameter and joining strength

접합강도와와의 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 상·하판 동일재료로 접합한 경우, 상판두께가 증가함에 따라 버튼직경이 증가하며, 버튼직경이 증가할수록 인장-전단(T-S) 강도는 비례적으로 증가하나 박리-인장(P-T) 강도는 그 증가폭이 완만하였다. 즉, 상판두께가 1.5 mm에서 2.0 mm로 증가하여도 버튼직경은 크기가 일정한 구간이 존재하며 또한, 박리-인장강도는 인장-전단강도에 비해 증가폭에 큰 변함이 없음을 볼 수 있다. 이것은 박판의 기계적 접합시 펀치직경과 하판두께가 일정하게 고정될 경우, 인장-전단강도와 박리-인장강도의 종합적인 평가를 위해선 상판두께에 제한이 있으며 접합 가능한 상판두께의 범위가 존재함을 의미한다.

Fig. 10은 상·하판이 동일한 재료로 접합한 경우의 상판두께와 펀치직경이 일정한 상태에서 하판두께의 증가에 따른 버튼직경과 접합강도의 변화를 나타내고 있다. 하판두께가 증가할수록 버튼직경은 증가하는 경향을 보이는 반면, 인장-전단(T-S)과 박리-인장(P-T)의 접합강도는 하판두께가 1.0 mm를 기준으로 감소하는데, 이것은 하판두께가 1.0 mm를 기준으로 파단모드의 변화가 발생함을 나타낸다. 관통파단이 발생하는 하판두께 1.0 mm이상에서 점차 접합강도가 감소하는 현상은 접합시 하판두께가 증가할수록 상판이 하판 속으로 더 많이 밀려들어가 목두께(NT_1)가 점차 얇아지기 때문이다. 즉, 상판두께와 펀치직경이 고정될 경우, 접합강도를 결정짓는 파단모드가 판두께와 밀접한 관련이 있으며 기계적 접합시 일정 두께의 상판에 대해 하판두께에 제약이 있음을 나타낸다.

Fig. 11은 상·하판 두께가 1.0 mm로 동일한 경우, 펀치직경의 변화에 따른 버튼직경 및 접합강도의 변화를 나타낸다. 펀치직경이 증가할수록 버튼직경은 선형적 증가를 보이며 인장-전단(T-S) 강도는 큰 증가폭을 보인 반면, 박리-인장(P-T) 강도는 낮은 증가폭을 보였다.

Fig. 12는 상판 목두께(NT_1)가 1.5 mm, 펀치직경(PD)이 4.6 mm, 버튼직경(BD)이 7.5 mm로 일정한 경우에 하판두께와 접합강도의 관계를 나타낸다. 하판두께가 1.0 mm에서 1.5 mm로 증가할 경우, 인장-전단(T-S) 강도는 감소하고 박리-인장(P-T) 강도는 1.2 mm부근에서 최고 값을 나타내었다.

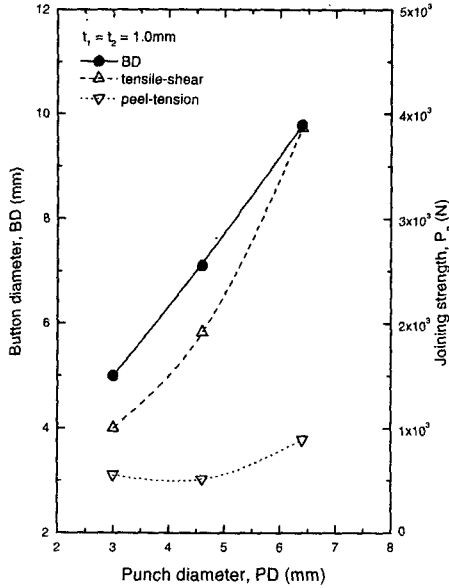


Fig. 11 Effect of punch diameter on the button diameter and joining strength

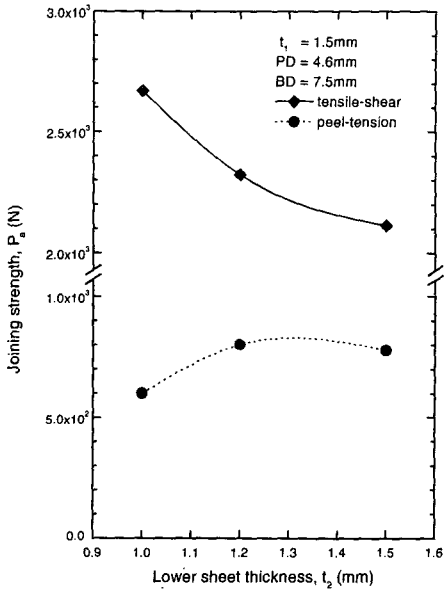


Fig. 12 Relationship between lower sheet thickness and joining strength

이상과 같이 기계적 접합부의 강도는 판두께, 펀치직경 등과 같은 접합조건간의 상호관계에 의해 결정되며, 따라서 접합조건들의 최적화를 통해

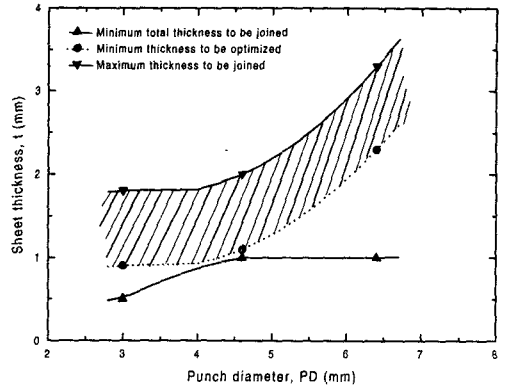


Fig. 13 Limited range of sheet thickness for mechanical press joining according to punch diameter

기계적 접합법의 정량화 된 기준을 찾을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 13는 펀치직경에 따른 접합가능 판두께의 영역과 최적화가 가능한 판두께의 영역을 나타내고 있다. 여기서, 접합가능이란 상·하판이 외관상의 적절한 상호접합이 이루어질 수 있는 상태를 뜻하며, 최적화가 가능한 판두께의 하한선은 박리-인장실험에서 항복에 의한 분리파단(Pull-out failure)이 발생하지 않는 최소 판두께의 하한선을, 빗금 친 영역은 최적화가 가능한 영역을 나타내며 또한, 펀치직경이 정해질 경우 기계적 프레스 접합이 가능한 상·하판의 상호관계를 알 수 있다. 따라서, 최적화 가능한 판두께의 영역에서 최적접합조건을 구할 수 있다.

3.3 최적접합조건에의 정량화

가능한 매개변수와 미지수를 서로 독립적인 설계변수로 고려하고 다양한 파손기준을 제약조건으로 간주하여 과도한 설계변수는 제한하여야 한다. 설계작업시의 수학적 모형의 제작원리를 바탕으로 기계적 접합부의 복합적 하중상태를 고려할 경우, 펀치직경과 판두께에 따라 변화하는 인장-전단과 박리-인장강도에 대한 평가가 동시에 이루어져야 한다는 제한조건과 판두께비(t_R), 직경비(d_R)의 무차원화한 값을 사용하여 설계변수를 정할 수 있다.

일반적으로 본 연구에서와 같이 함수의 구조가 알려지지 않은 경우는 제2차 Tschebycheff 다항식에 대하여 최적화 알고리즘을 사용하여 목적함수에 알맞은 다항식의 계수를 구함으로써 주어진 데이터를 근사 시킬 수 있는 최적곡선의 흐름을 구할 수 있다.^(9,10) 강도비(θ)는 판두께비(t_R), 직경비(d_R), 그리고 구하려는 계수, c_{ij} 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta(c_{ij}, t_R, d_R) = [c_{00}T_0(t_R) + c_{01}T_1(t_R) + \dots + c_{0n}T_n(t_R)]T_0(d_R) + [c_{10}T_0(t_R) + c_{11}T_1(t_R) + \dots + c_{1n}T_n(t_R)]T_1(d_R) + \dots + [c_{m0}T_0(t_R) + c_{m1}T_1(t_R) + \dots + c_{mn}T_n(t_R)]T_m(d_R)$$

혹은

$$\theta(c_{ij}, t_R, d_R) = [\underline{C} \cdot \underline{T}(t_R)]^T \underline{T}(d_R)$$

여기서 t_R 는 판두께비, d_R 는 직경비를 나타내며 t_R 혹은 d_R 의 위치에서 Tschebycheff 다항식의 함수 값은 다음과 같이 계산된다.

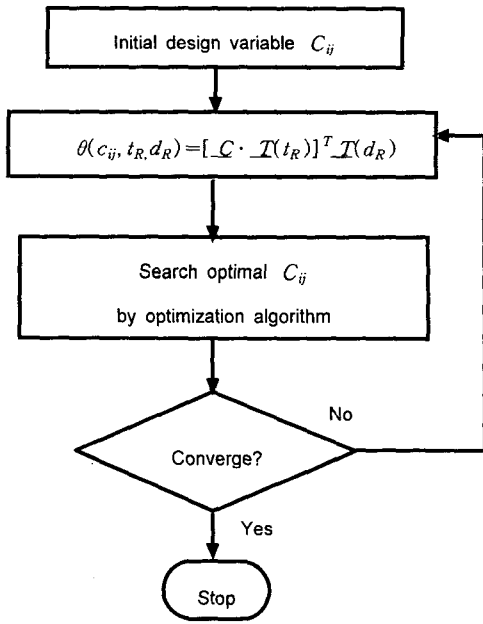


Fig. 14 Algorithm for optimal flow curve using Tschebycheff polynomial

$$T_0 = 1; T_1 = 2 \frac{t-t_a}{t_b-t_a}$$

$$T_2 = 2T_1 \cdot T_1 - T_0; \dots$$

$$T_n = 2T_1 \cdot T_{n-1} - T_{n-2}$$

(t_a = 왼쪽 경계 값, t_b = 오른쪽 경계 값)

주어진 문제에서는 $n \times m$ 차의 근사 다항식 $\theta(c_{ij}, t_R, d_R)$ 가 최소 2차 면적의 원리에 따라 k 개의 점을 통해 주어진 곡면에 근접해야 한다. 그러므로 Tschebycheff 다항식 $T_i(t_R); i=1, \dots, m$ 과 $T_j(t_R); j=1, \dots, n$ 으로 구성된 근사 다항식 $\theta(c_{ij}, t_R, d_R)$ 가 주어진 지점들에서 2차의 편차함의 최소가 되는 계수, c_{ij} 를 구해야 한다. 최소의 비용함수값, 즉 주어진 지점들에서의 2차 편차의 최소 값을 만족시키는 계수, c_{ij} 는 Fig. 14에서와 같이 최적화 알고리즘을 사용하여 구할 수 있다.

Fig. 15는 기계적 프레스 접합이 가능한 영역 내에서 주어진 데이터의 형태를 고려하여 $n = m = 3$ 인 함수를 사용하여 구한 Tschebycheff 다항식 결과로써, 복합 하중하의 강도 유지를 위한 접합조건간의 관계를 나타내고 있다. 기계적 프레스 접합부에서 상대적으로 취약한 박리-인장에 대한 접합강도는 상·하판의 두께비와 버트과 펀치의 직경비에 따라 변하며, 이때 최적 강도비를 갖는 영역이 존재한다. 이 영역을 벗어날수록 인장-전단에 대한 박리-인장의 강도비가 감소하고 있다.

Fig. 16은 Fig. 15에서 직경비 축으로 투영된 상·하판의 두께비의 변화에 따른 직경비와 강도비의 변화를 나타내고 있다. 두께비에 따라 강도비가 변화하며, 일정 두께비에 대한 최적강도비를 유지하기 위해선 최적직경비가 존재함을 알 수 있다.

Fig. 17은 Fig. 15에서 두께비 축으로 투영된 직경비에 따른 두께비와 강도비의 변화를 나타내고 있다. 직경비에 따라 강도비가 변화하며 특히, 일정 직경비에 있어 두께비가 달라질 경우, 강도비가 감소하는 구간도 존재하고 있다. 즉 직경비가 정해질 경우 최적강도비를 갖기 위한 직경비에 대한 최적 두께비를 알 수 있다.

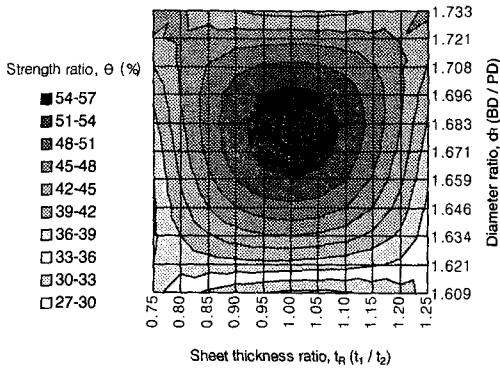


Fig. 15 Strength ratio distribution according to sheet thickness ratio and diameter ratio

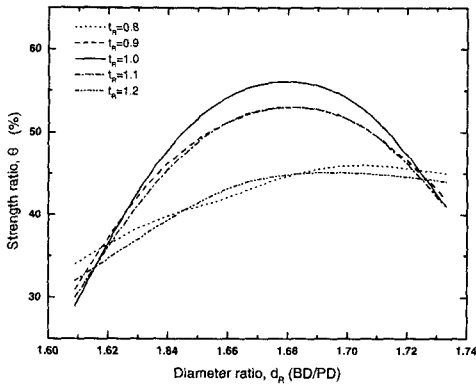


Fig. 16 Change of strength ratio according to diameter ratio at constant thickness ratio

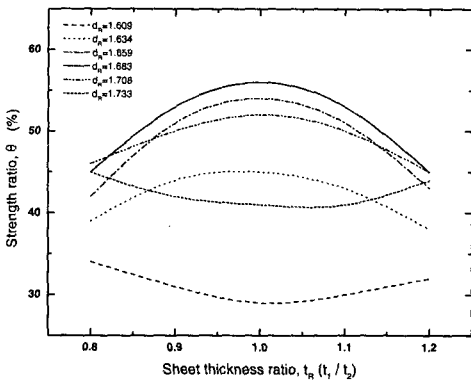


Fig. 17 Change of strength ratio according to sheet thickness ratio at constant diameter ratio

본 연구에서는 판두께비가 1.0, 직경비가 1.683에서 최적강도비를 나타내었다. 이와 같이 박판 구조물의 설계에 기계적 프레스 접합법을 적용시에 인장-전단과 박리-인장을 동시에 받는 접합부의 접합강도 향상을 위한 접합조건 최적화는 판두께비와 직경비의 상호관계에서 박리-인장강도를 향상시킴으로써 가능하다.

4. 결 론

- (1) 최대접합강도, 부하강성, 소성한계, 제하강성 등으로 나타낼 수 있는 기계적 접합부의 정적특성은 부하방식, 펀치직경, 판의 조합, 상·하판의 두께의 접합조건에 따라 다양하게 변화한다.
- (2) 기계적 접합부의 파단 형태는 접합조건에 따른 목두께의 영향으로 목두께부가 파단 되는 관통파단형태(Interface failure mode)와 접합부의 소성변형에 의한 분리파단형태(Pull-out failure mode)로 구별되며, 강도 평가시에 반드시 고려되어야 한다.
- (3) 복합적 하중상태를 고려한 기계적 접합부의 최적접합조건은 판두께비와 직경비의 상호관계에서 접합강도비를 최적화 함으로써 얻을 수 있다.

참고문헌

- (1) 손병천, 우승엽, 이재범, 최용범, 장희석, 1996, "이종재료(알루미늄합금-강판)의 저항 점용 접에 관한 연구," 대한용접학회지, 제15권, 제4호, pp. 268~288.
- (2) 권용우, 권순용, 박석완, 1997, "차체용 알루미늄판 접합부 피로특성," 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 983~987.
- (3) Larsson, J. K., 1994, "Clinch Joining - A Effective Joining Technique for Body - in - White Assembly," *Advanced Technique & Processes, IBEC'94*, " pp. 140~145.
- (4) Muraski, S. J., 1990, "American Autos in the Clinch," *Machine Design*, pp. 48~54.
- (5) Krause, A. R. and Chernenkoff, R. A., 1995, "A Comparative Study of the Fatigue Behavior of Spot Welded and Mechanically Fastened Aluminum Joints," *SAE Paper 950710*.

- (6) Liebig, H. P. and Beyer, R., 1987, "Press Joining of Especially Coated Steel and Aluminium Sheets," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol. 2, pp. 933~940.
- (7) 정원욱, 정연수, 강성수, 1998, "저항 점용접과 CO2 플러그용접의 피로거동 연구," 대한기계학회 논문집 A, 제22권, 제3호, pp. 554~561.
- (8) BTM Corporation Tog-L-Loc® System User's Guide.
- (9) Brent, R. P., 1973, "Algorithms for Minimization without Derivatives," Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- (10) Powell, M. J. D., 1964, "An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables Without Calculating Derivatives," *Computer Journal*, Vol. 7, No. 2, pp. 155~162.