

기계적 프레스 접합법을 이용한 Al-5052 인장-전단 시험편의 강도 평가에 관한 실험적 연구

임두환⁺, 이병우⁺⁺, 류현호⁺⁺⁺, 김호경^{*}
(논문접수일 2002. 10. 15, 심사완료일 2002. 12. 4)

An Experimental Study on the Strength Evaluation of Al-5052 Tensile-Shear Specimens Using a Mechanical Press Joining Method

Lim, Doo-Hwan⁺, Lee, Byung-Woo⁺⁺, Rhyu, Hyun-Ho⁺⁺⁺, Kim, Ho-Kyung^{*}

Abstract

A mechanical press joining was investigated in order for joining Al-5052 sheets for automobile body weight reduction. Static tensile and fatigue tests were conducted using tensile-shear specimens for evaluation of fatigue strength of the joint. During Tox joining process for Al-5052 plates, using the current sheet thickness and punch diameter, the optimal applied punching force was found to be 32 kN under the current joining condition. For the static tensile-shear experiment results, the fracture mode is classified into interface fracture mode, in which the neck area fractured due to influence of neck thickness, and pull-out fracture mode due to influence of plastic deformation of the joining area. And, during fatigue tests for the Al-5052 tensile shear specimens, interface failure mode occurred in the region of low cycle. The fatigue endurance limit approached to 6 percents of the maximum applied load, considering fatigue lifetime of 2.5×10^6 cycles.

Key Words : Mechanical press joining(기계적 프레스 접합법), Tensile-shear specimen(인장-전단 시험편), Interface failure mode (관통 파단 모드), Fatigue strength(피로강도)

+ 서울산업대학교 자동차공학과 산업대학원
++ 경기기계공업고등학교
+++ 서울산업대학교 자동차공학과 산업대학원
* 주저자, 서울산업대학교 자동차공학과 (kimhk@snut.ac.kr)
주소: 139-702 서울시 노원구 공릉2동 172

1. 서 론

최근의 자동차의 연비향상과 배기가스의 감소 등에 관한 선진 진 각국의 규제에 대응하여 차량의 경량화를 위해 사용되는 재료로는 알루미늄, 마그네슘, 티타늄, 고장력강 등의 금속재료와 플라스틱, 세라믹 등이 많이 사용되고 있다. 이중 알루미늄은 경량성과 함께 높은 열전도, 주조성과 가공성, 대량생산 및 표면의 미려함 등 많은 장점을 가지고 있지만 강판보다 가격이 3~5배 비싸다는 단점이 있다. 또한, 알루미늄 판재를 차체에 적용할 경우 강판 차체의 접합방법에 적용되는 가장 보편화된 점용접(spot welding) 방법이 강판의 용접과는 많이 달라, 점 용접부의 강도 또한 떨어지고 용접부의 결합도 많다. 이러한 알루미늄의 점 용접성에 영향을 미치는 주요 문제점은 알루미늄 판재의 표면 산화와 용접 전극의 품질 저하이다⁽¹⁾. 그리고, 알루미늄 판재와 강판을 직접 용접시 두 재료의 용점차가 크고 결정 구조가 다르기 때문에 철과 알루미늄간의 금속간 화합물이 발생하여 용접부의 신뢰성 저하로, 피로 하중이 많이 작용하는 자동차 차체에 적용하는데 어려움이 있다⁽²⁾.

최근, 알루미늄 점용접 대체접합 방법 중 하나로 기계적 프레스 접합방법이 관심을 받고 있다. 1980년대에 개발된 기계적 프레스 접합(mechanical press joining)은 점용접 보다 에너지의 소모가 적어 생산비용이 절감되고, 코팅된 판재나 접착제와 함께 사용이 가능하며, 이종 재료 및 연성이 있는 평면 재료를 별도의 고정용 부품 없이 작은 공기압과 전기적인 힘만을 사용하여 접합이 가능하다. 또한 펀치(punch)와 다이(die)가 전극에 비해 비싸지만 수명이 길기 때문에 점 용접에 비해 생산 원가가 훨씬 적게 든다는 장점⁽³⁻⁵⁾으로 기계적 프레스 접합 기술은 자동차 산업에서 잠재적으로 중요한 접합 방법으로 알려져 있다. 현재 기계적 프레스 접합 방법은 국내 자동차에서는 적용 검토 단계에 있으나, 해외 자동차 업계에선 BMW, 아우디 등에서 적용하고 있다⁽⁶⁾. 그러나 점용접의 피로강도에 관한 연구⁽⁷⁾는 많으나 아직까지 국내·외를 막론하고 기계적 접합 강도 및 피로 강도에 대한 매우 제한적 연구⁽⁸⁻¹⁰⁾가 진행된 상태이다.

따라서 본 연구에서는 자동차 경량화를 위한 차체 재료로 고려중인 알루미늄 5052판재를 이용하여 기계적 프레스 접합방법으로 접합한 후 인장-전단 시험편(tensile-shear)을 사용하여 시험편 제작 시 최적의 펀치 작용하중을 결정하고자 한다. 또한, 최적의 펀치하중으로 제작된 시험편을 이용하여 피로시험을 실시하여 피로강도를 평가하고자 한다.

2. 기계적 프레스 접합 공정

기계적 프레스 접합에는 두 가지 기초적인 방법이 있다. 첫번째 방법인 절개구속 또는 크린치드(clinched) 방법은 위쪽 부재를 아래쪽 부재에 있는 틈새까지 관통하도록 금속 판을 잘라낸(shearing)후, 업셋(upset) 하여 접합하는 방법으로, 취성 알루미늄이나 스테인레스강 등에 사용되며 두 부재의 두께가 상당히 두껍거나 연신을 차가 심할 때 사용되는 방법이 있다. 두번째 방법은 본 연구에서 적용한 버튼(button) 또는 라운드 크린치(round clinch) 접합이라 불리는 방법이다. 이는 Fig. 1에서 여러 단계별 형상을 나타낸 바와 같이 두 판재를 관통하지 않고 두 장의 금속 판재를 다이쪽으로 밀어 붙이며, 이때 펀치에 부가되는 가압력이 위쪽 판재를 아래쪽 판재 안쪽으로 소성 변형시켜 위쪽 판재가 아래쪽 판재를 빠져나오지 못하도록 재료를 밀어 넣어서 상·하 재료가 맞물리게 하여 강력한 결합력을 만든다. 또한 라운드 크린치 접합 방법은 사용된 재료가 도금 강판일 경우에도 부식 방지용 도금 층은 모재와 함께 유동하기 때문에 점용접 때와 같이 열 영향부가 없어 부식되지 않고, 내식성 저하 요인도 제거되며⁽⁴⁾, 외관이 미려하며 누설 방지가 필요한 접합시 선호하는 방법으로서 자동차 차체의 접합 방법으로 대체가 가능하다.

한편, 기계적 프레스 결합부의 형상특성은 다이의 모양에 의해 결정되며 결합력을 내는 중요한 요체이다. Fig. 2는 기

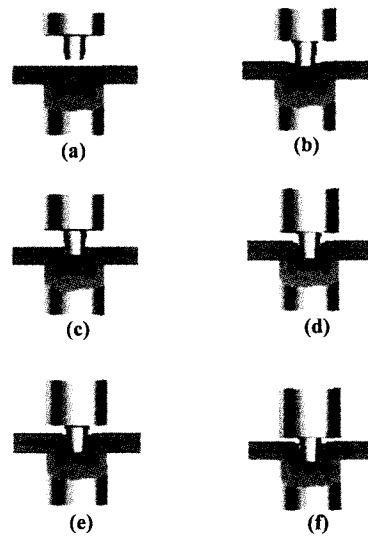


Fig. 1 Process of the mechanical press joining

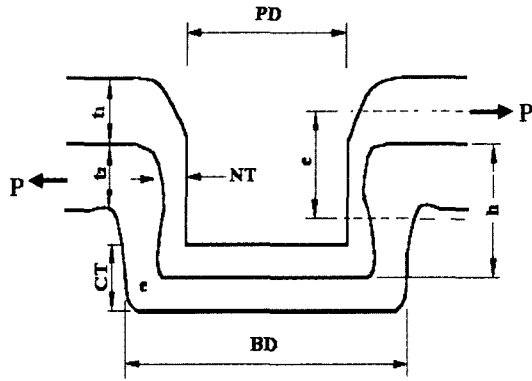


Fig. 2 Schematic depicting the cross-section of mechanical press jointing

계적 프레스 접합부의 주요 인자를 나타낸 것으로 접합부의 명칭에 사용된 용어를 정의하면 다음과 같다.

1. AD(anvil depth): 다이 블레이드의 끝단에서 부터 언빌까지의 깊이
2. BD(button diameter): 단추모양으로 형성된 부분의 직경
3. CT(cap thickness): 접합부 바닥의 두께
4. e(eccentricity): 하중(P) 작용 선상으로부터 상·하판 접촉면 길이중심까지의 거리
5. h(height): 접합부에서 상·하판의 접촉면 수직길이
6. NT(neck thickness): 목두께, 즉 두께가 가장 얇은 부분
7. PD(punch diameter): 펀치 직경
8. t1(punch side metal thickness): 상판 모재의 두께
9. t2(die side metal thickness) :하판 모재의 두께

3. 실험 방법

본 연구에서 기계적 프레스 접합법으로 시험편 제작에 사용한 재료는 자동차 차체의 경량화를 위한 대체 재료로 많이 활용되고 있는 알루미늄 합금(Al-5052)으로서 그 기계적 성질과 화학적 성분은 각각 Table 1, Table 2와 같다.

일반적인 점 용접 시험편은 KS규격에 의한 시험편을 제

Table 1 Mechanical properties of the base metal

Material	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	E(GPa)	Elongation (%)
Al-5052	273.6	213.8	78.3	12

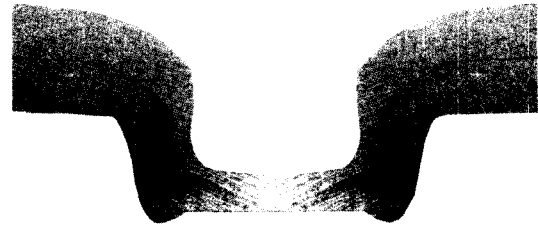


Photo. 1 A photograph showing cross-section of mechanical press jointing

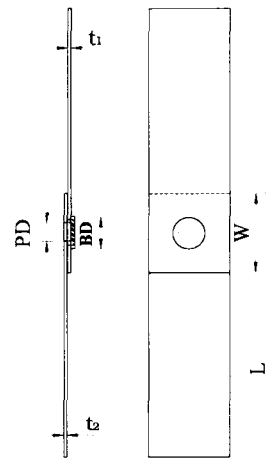


Fig. 3 Configuration of the tensile-shear specimen

작하여 사용한다. 본 연구에서는 기계적 프레스 접합에 관한 규격이 현재 제정된 바가 없으므로 점 용접에 사용되는 KS B0851에 의거하여 인장-전단(tensile-shear) 시험편과 동일한 규격으로 점 용접 시험편을 제작하였다. 시험편 형상은 Fig. 3과 같으며 치수는 $W = 30\text{mm}$, $L = 100\text{mm}$, $P = 30\text{mm}$, 두께 0.8mm 로 하였다.

본 연구에서는 기계적 프레스 접합방법으로 많이 사용되는 독일 TOX^R사⁽¹¹⁾의 버튼(button) 형상의 라운드 크린치(round clinch) 기계적 프레스 접합 방법을 선택하였다. 접합시 필요한 하중을 가하는 장치로는 10ton 용량의 전기 유압식 만능 재료 시험기(Instron 8516)를 사용하였다. 시험편

Table 2 Chemical compositions of the base metal (wt. %)

Material	Mg	Mn	Fe	Cr	Si	Cu	Zn
Al-5052	2.8	0.10	0.40	0.35	0.25	0.10	0.1

제작에 사용된 펀치(punch)는 직경과 버튼(button)형태에 따라 다양하게 선택할 수 있으나, 본 연구에서는 두께 0.8 mm 판재에 사용되는 직경 5.4mm의 라운드형(round-type) 펀치(punch)와 직경이 8.3mm인 다이(die)를 사용하여 상·하판의 재질은 모두 Al-5052로 시험편을 제작하였으며 Photo. 1은 제작한 시험편의 버튼에 해당하는 접합부 단면을 나타내고 있다. 한편 기계적 접합시 최적의 접합하중을 구하기 위한 조건으로 여러 접합하중에서 인장-전단 시험편을 제작하여 인장실험을 실시하였다.

기계적 프레스 접합부의 정적 강도를 측정하기 위한 인장 실험과 피로 강도를 평가하기 위하여 전기 유압식 만능 재료 시험기(Instron 8516)를 사용하였고, 인장실험은 변위 제어방식으로 2mm/min의 속도로 수행하였다. 여러 접합하중 시험편 중에서 인장 실험을 한 결과 32kN의 접합하중을 가한 시험편이 최대인장강도로 가장 우수한 것으로 나타났기 때문에 32kN의 접합하중을 적용하여 제작한 시험편으로 피로시험을 수행하였다. 피로시험은 응력비($R=P_{min}/P_{max}$)가 0.1인 30Hz의 정현파형(sine wave form)의 반복 하중을 일정하게 가하여 수행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 최적 펀치 작용하중 및 정적인장 강도

기계적 접합부의 인장-전단 시험편을 이용한 접합강도는 판의 두께, 펀치직경 등과 같은 치수와 실제 시험편 제작시 펀치의 작용하중의 크기와 관계한다. 본 연구에서는 정해진 판 두께와 펀치직경, 인장강도 측면에서의 최적의 펀치작용

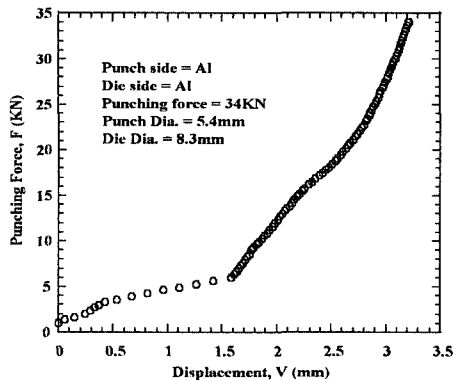


Fig. 4 Punching force against displacement for the Al-5052 tensile-shear specimen during TOX[®] jointing

하중을 결정하기 위하여 펀치 작용하중을 변화시킨 각각의 시험편을 이용하여 인장실험을 하였다. Fig. 4는 상판 및 하판의 재질을 Al-5052를 이용한 시험편에 대한 접합시 펀치 작용하중에 대한 수직 변형량을 나타낸 것이다. 본 그림은 기계적 프레스 접합시의 통상적 하중-수직 변형량 선도⁽¹¹⁾를 나타내는 Fig. 5와 유사하다. Fig. 4에서 수직 변형량이 약 1.6mm까지 가해지는 단계는 초기 전단 삽입 및 압착 피집공정으로 펀치 힘이 국부적 함몰을 일으키며 펀치가 소재의 일정부분을 눌러 축방향의 압착으로 소재두께가 감소하며 동시에 다이 형상부 위에 있는 소재는 다이부의 마루면 쪽으로 눌러 당겨 된다. 이때 삽입공정동안 펀치와 다이의 간극에 의한 성형구역이 존재하며 소재 일정량이 다이측 마루부에 당겨 되면서 압착이 시작되어 재료를 다이 원통 그루부(ring groove)에 접근한다. 두 번째 단계로 수직 변위가 약 2.5mm에 해당하는 단계는 다이 상부로의 함입단계로 펀치를 감싸고 있는 다이 공간으로 펀치 가압력의 선형증가를 유발하는 단계이다. 한편 2.5mm 이상에서는 재료가 원통 그루부까지의 함몰하는 단계로 펀치 가압력이 가파른 증가를 보이며 이때 원통 그루부에서의 소재의 유동 저항이 계속적으로 커지게 되고 이 단계에서 최대의 응력부하가 다이에 작용하며 이때의 급속한 힘의 증가는 냉간 폐쇄단조공정에서 나타나는 가압력 형태와 유사한 공정이다.

한편 펀치 작용하중에 대한 최대 수직 변형량 및 접합정도를 나타낸 그림은 Fig. 6과 같다. 최대 변형량은 펀치하중이 28kN ~ 33kN 구간에서 펀치 작용하중과 거의 선형으로 비례하나 그 이후에는 하중이 증가하여도 변형량이 둔화됨을 알 수 있다. 펀치 작용하중에 대한 접합 정도를 관찰한

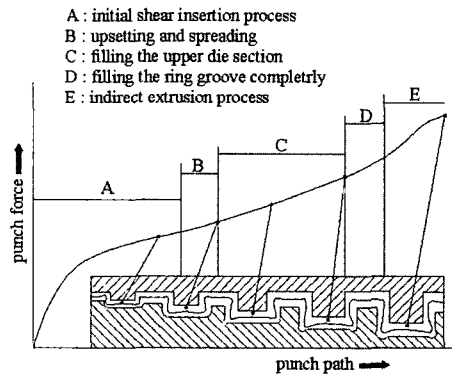


Fig. 5 The Tox-jointing process

결과 30kN 이후부터 접합정도가 양호한 것을 알 수 있다. 특히 펀치 작용하중이 34kN인 경우 거시적으로 상판과 하판의 틈새가 거의 없는 것으로 나타났다.

각각의 펀치 하중당 3개의 인장-전단 시편을 제작하여 정적 강도시험을 실시하여 정적강도 측면에서의 최적의 펀치 하중을 결정하였다. Fig. 7은 펀치 하중을 29kN으로 작용시켜 제작한 3개의 전단-인장 시편에 대한 인장시험의 결과로 인장하중과 변위량을 나타내고 있다. 시험편 모두 최대하중이 약 1040N에서 정점을 이루며 최대 작용 하중 점에서 균열이 발생하고 그 후 접합부에서 상판이 하판과 부분적으로 분리되면서 끌려 올라가는 현상이 일어난다. 바로 이러한 현상 때문에 최대 하중점에서 균열 발생 후 곧바로 하중이 감소하지 않고 약간의 하중이 일정 시간 유지되는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 통상적으로 상판의

재질에 따라 달라지는데, 이는 상판이 두껍고 연성거동을 보이는 재료일 경우 뚜렷하게 나타나고, 얇고 취성 거동을 보이는 재료는 이러한 거동을 보이지 않는다⁽⁹⁾. 그 이유는 두껍고 연성 거동을 보이는 재료를 상판으로 사용하는 시험편일 경우에, 접합부에서 가장 취약한 부분인 목두께(NT)가 일정한 강도를 유지하도록 충분한 두께를 가지고 있고, 인장시 시험편이 서서히 늘어남과 동시에 버튼부가 서로 부분 분리되면서 접촉면 반대편이 들러 올라가면서 빠지는 현상이 일어난다. 반면에, 얇고 취성거동을 보이는 재료의 경우에는 목두께(NT)가 상대적으로 얇아서 하중 작용시 이 부분에서 급작스러운 전단 파괴를 일으키기 때문이다⁽⁹⁾.

각각의 펀치작용하중에 대한 최대인장하중은 Fig. 8과 같다. 펀치작용하중은 하중이 증가하면 인장하중도 증가하고, 32kN이후에는 다시 감소하는 것으로 나타나서 정해진 판

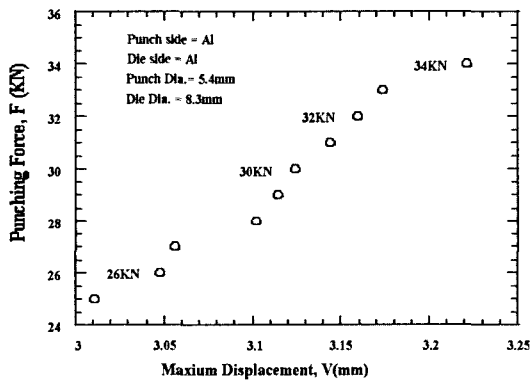


Fig. 6 Punching force against maximum displacement during TOX[®] jointing

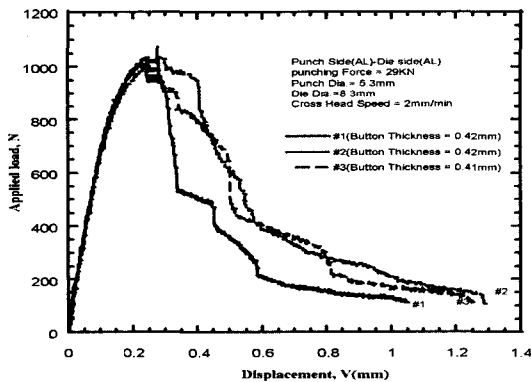
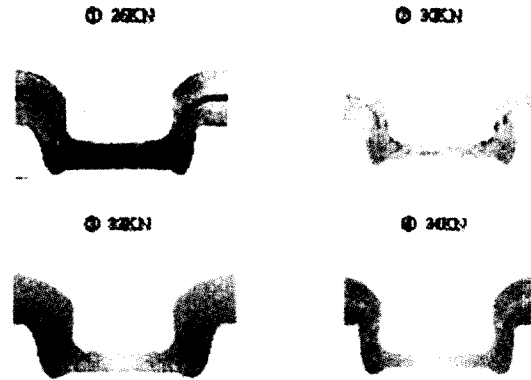


Fig. 7 Displacement against applied load curves for tensile-shear specimen

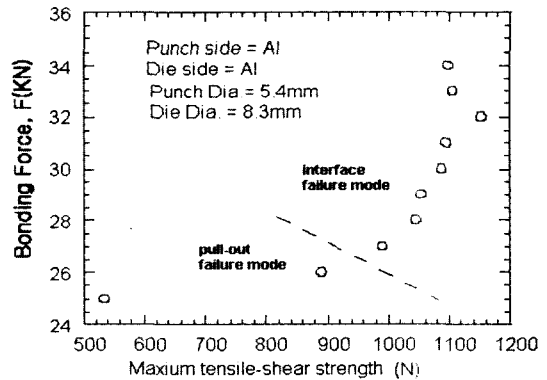


Fig. 8 Punching force against maximum tensile-shear strength for the mechanical press joining specimens

두께와 펀치직경에서의 인장-전단 시험편에 대한 최적의 펀치 작용하중은 32kN으로 나타났다. 그러므로 피로 실험을 위한 시험편은 모두 32kN의 펀치 작용하중을 적용하여 제작하기로 하였다. 인장-전단의 정적시험 결과 관통 파단과 분리 파단의 두가지 파단 모드가 관찰되었다. 관통 파단 형태(interface failure mode)는 목두께(NT)부분에서 균열이 발생하고 그 면을 따라 균열이 전파되어 파단이 일어나는 경우이며, 분리 파단 형태(pull-out failure mode)는 버튼(BD) 위 상판 모재에서 균열이 발생하고 이후 취약한 목두께(NT) 주변을 따라 전파하면서 접합부 버튼의 상·하판이 분리되는 형태의 파단이다. 본 인장 시험 결과는 Fig. 8에서 보는 바와 같이 펀치 작용하중이 26kN이하의 경우 분리파단 파괴 형태가 나타나고 있는데, 이는 작용하중이 충분하지 않기 때문에 상·하판이 분리된 것으로 판단된다. 그러나 27kN이상의 경우 파단형태는 관통파단으로 나타났다. Photo. 2와 Photo. 3은 시험편의 두 파단 형태를 보여준다.

4.3 피로 수명 평가

기계적 프레스피로 시험 결과 파단 형태는 정적 강도 평가에서 나타난 2가지 파단 모드 중에서 상·하판이 심하게 소성

변형하여 분리 파단 되는 형태는 나타나지 않았고, 하중 작용선에서 가장 가까운 목두께(NT1)에서 발생한 균열이 목두께면으로 전파하여 관통 파단 형태로 파단되었다.

Fig. 9는 접합하중 32kN 일 때, 하중 폭과 수명과의 관계를 나타내었다. 본 실험의 최대 피로 파단 반복수인 2.5×10^6 을 기준으로 최대 접합하중에 대한 피로강도의 비는 약 6%로 나타났으며, 접합하중 기준으로 대단히 낮음을 알 수 있다. 한편, 시편의 주요 치수가 변할 경우 최대하중 또는 하중 폭은 피로수명 평가 매개변수로써 적용에 어려움이 있다. 따라서, 파단 형태에 따라 결정된 등가 응력이 시편의 각 치수를 고려할 경우 피로수명의 정량적 평가가 가능하다고 판단되어 등가 응력을 사용하여 수명을 예측하였다. 이 때 피로 시험 결과 파단 모드가 모두 관통형이었으므로 인장-전단 시험편의 버튼 지점중에서 등가 응력 σ_{eq} 가 최대가 되는 하중접에 가장 가까운 위치에서의 다음과 같은 식을 이용하였다⁹⁾.

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3} V}{\pi \left(\frac{PD+NT}{2} \right) NT}$$

여기서, V는 인장하중, PD 및 NT는 앞 절에서 언급한 편

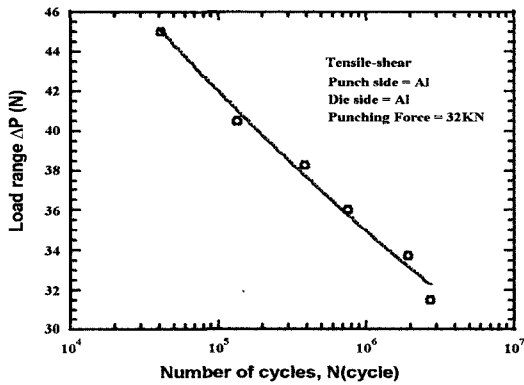


Fig. 9 Load range against number of cycles for the mechanical press joining specimens

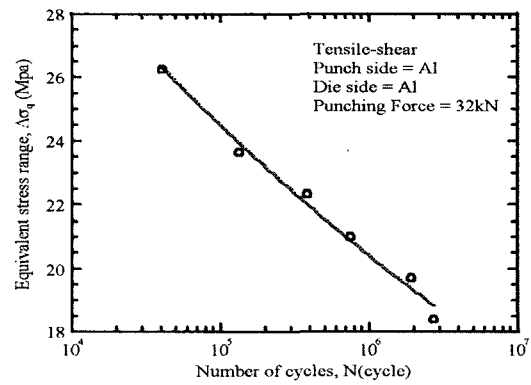


Fig. 10 Equivalent stress range against number of cycles for the mechanical press joining specimens



Photo. 2 Surface of pull-out failure mode



Photo. 3 Surface of interface failure mode

치 직경과 목두께이다. 그 결과는 Fig. 10과 같다.

일반적으로 기계적 프레스 접합부의 정적 강도는 점용접 부에 비해 낮으나 피로강도는 거의 대등한 강도를 나타내는 것으로 알려져 있다⁽⁹⁾. 이는 점용접부의 경우 취성의 열영향 부가 예리한 노치역할을 하는 너겟 선단에 있어 균열의 성장을 촉진하지만 기계적 접합부의 경우 열영향부가 없고 응력집중도도 낮은 관계로 피로수명 향상 효과가 있다. 한편, 냉간 압연강판의 경우 기계적 접합부의 정적 강도가 점용접부의 약 30% 정도이나 피로강도는 대등한 것으로 알려져 있다⁽⁹⁾. 그러나 본 기계적 접합법의 경우 동일한 재질의 점용접부의 피로강도에 관한 시험 데이터가 없는 관계로 직접적 비교는 불가능하지만 본 기계적 접합부의 경우 피로강도가 수명이 2.5×10^6 cycle 기준으로 최대 접합 하중의 약 6% 정도로 낮아 만일 본 접합법을 이용하여 반복하중을 받는 구조물을 제작시 접착제를 동시에 사용하거나 타점수를 증가시켜 피로 강도를 증가시키는 것이 바람직하다. 또한, 기계적 접합부의 경우 타점수를 증가시킬 경우 피로 강도가 대단히 증가하므로 피로강도 측면에서의 타점수 및 타점 간격의 영향에 관한 연구가 추후 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

두께 0.8mm의 Al-5052를 상·하판으로 제작한 기계적 프레스 접합부의 제작 시에 요구되는 최적의 작용하중을 결정하고 피로 강도를 평가하기 위하여 인장-전단 시험편을 사용하여 정적 인장 실험과 피로 실험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에 사용된 판 두께와 펀치직경으로 상·하판을 Al-5052로 접합시 최대 변형량은 펀치하중이 28kN~33kN 구간에서 펀치 작용하중과 거의 선형으로 비례하나 그 이후에는 하중이 증가하여도 변위량의 증가가 완만하며, 인장 강도 측면에서의 최적의 펀치작용하중은 32kN으로 나타났다.
- (2) 기계적 접합부의 인장 시험시 파괴 형태는 접합 조건에 따른 목두께의 영향으로 인해 목 두께부가 파단되는 관통 파괴 형태와 접합부의 소성 변형에 의한 분리 파괴 형태로 나타났다.
- (3) 상·하판을 Al-5052으로 제작한 기계적 접합부의 피로 실험시 저하중 영역에서는 관통파괴 형태가 나타났으며, 피로수명을 2.5×10^6 사이클 기준으로 가정하여 피로강도는 최대 접합하중의 6% 정도로서 대단히 낮음을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 서울산업대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) 박황호, "미래의 자동차 용접기술", 대한용접학회지, 제15권, 제2호, pp. 24~35, 1997.
- (2) M.C. Thornton, C.J. Newton, B.F.P. Keay, P.G. Sheasby and J.T. Evans, "Some Surface Factors that Affect the Spot Welding of Aluminium", Trans. IMF, Vol. 4, No. 75, pp. 165~170, 1997.
- (3) P.L. Hanns, B. Jan and B. Rainer, "Connecting Sheet Metal by Press Joining", Bänder Bleche Rohre, Vol. 25, No. 9, pp. 240~244, 1984.
- (4) J.M. Sawhill and S.E. Sawdon, "A New Mechanical Joining Technique for Steel Compared with Spot Welding", SAE paper 830128, pp. 1~12, 1983.
- (5) S.J. Muraski, "American Autos in the Clinch", Machine Design, pp. 48~54, 1990.
- (6) J.K. Larsson, "Clinch Joining; A Effective Joining Technique for Body in White Assembly", Advanced Technique & Processes, IBEC'94, pp. 140~145, 1994.
- (7) 이용복, 정진성, 김영훈, 김호경, "인장-전단 하중을 받는 점용접부의 피로균열 전파거동에 관한 연구", 한국공작기계기술학회지, Vol. 6, No. 4, pp. 27~33, 1997.
- (8) A.R. Krause and R.A. Chernenkoff, "A Comparative Study of the Fatigue Behavior of Spot Welded and Mechanically Fastened Aluminum Joints", SAE Paper 950710, pp. 1~7, 1995.
- (9) S. Gao and L. Budde, "Mechanism of Mechanical Press Joining", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No. 5, pp. 641~657, 1994.
- (10) 권용우, 권순용, 박석원, "차체용 알루미늄판 접합부 피로특성", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 983~987, 1997.
- (11) Tox Corporation, Tox® System User's Guide.