

접착 및 기계적 프레스 접합부에서의 인장-박리 피로강도 평가

정 강·김호경^{*†}

전남대학교 기계·자동차공학부 · *서울산업대학교 자동차공학과
(2009. 3. 30. 접수 / 2009. 6. 4. 채택)

Fatigue Strength Evaluation of Tensile-Peel Loaded Adhesively Bonded and Mechanical Pressed Joints

Kang Jung · Ho-Kyung Kim^{*†}

Department of Mechanical Design and Automotive Engineering, Chonnam National University

^{*}Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology

(Received March 30, 2009 / Accepted June 4, 2009)

Abstract : The tensile and fatigue experiments were conducted with tensile-peel specimens for investigating on strength of adhesively bonded and mechanical press joints of aluminum sheet used in the field of the automobile industry. The combining epoxy adhesive bonding and mechanical press joining exhibits an increase in joining force as a result of interaction between static forces of the two joining methods. The fatigue strength of pure adhesive joint was measured as 91% of that of the combination of adhesive bond and mechanical press joint, suggesting that the interaction between the bonding and mechanical joining was about 9%.

Key Words : tensile-peel specimen, fatigue strength, adhesive bonding, mechanical press joining

1. 서론

현재 승용차 차체 접합 방법으로 가장 보편화된 접합법인 점용접(spot welding)은 알루미늄 판재를 차체에 적용할 경우 접합방법은 강판의 용접과는 많이 다르기 때문에 기존 용접기의 사용이 매우 어렵다. 또한 점용접을 할 경우에 알루미늄 판재의 표면 산화와 용접 전극의 품질 저하가 발생한다¹⁾. 또한 알루미늄과 철을 직접 용접하면 강철과 알루미늄의 용접차가 크고 결정 구조가 다르기 때문에 철과 알루미늄간의 금속간 화합물이 발생하여 신뢰성 있는 용접 연결부를 얻을 수가 없는 문제점이 있다²⁾. 이와 같은 문제점으로 인하여 접착접합(adhesive bonding)이 이에 대한 대체 접합법으로 유망하게 거론되어 그 적용기술이 활발히 연구되고 있다³⁾. 접착접합은 기계적 접합과 기본적으로는 유사한 형태이지만 기계적 체결방법에 비해 무게감소, 매끈한 표면상태, 기타 기계적 체결을 위한 구멍이나 별도의 가공이 필요가 없어 구조효율이 증가한

다. 또한 얇은 재료간의 체결 등에 특히 유리하며 접착체결 후에도 접착부재 간의 열 차단 효과 및 절연성을 얻는 등의 유리한 점이 있다. 그러나 접착접합부의 강도는 물성적 인자, 화학적 인자, 역학적 인자, 사용 환경 등이 상호 작용하여 결정되는 복잡한 문제이며, 특히 파손, 파괴가 발생하는 접합부는 구조적 불연속부가 되어서 해석상 어려움이 많다.

1980년대에 개발된 기계적 프레스 접합(mechanical press joining)⁴⁾은 Fig. 1과 같이 편치를 두 장의 금속 판재를 다이 쪽으로 밀어 붙이며, 이때 편치에 부가되는 가압력이 위쪽 판재를 아래쪽 판재 안쪽으로 소성 변형시켜 위쪽 판재가 아래쪽 판재를 빠져나오지 못하도록 재료를 밀어 넣어 상·하 재료가 맞물리게 하여 강력한 결합력을 제공하는 공정이다. 이 접합방법은 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 공기압 혹은 전기적인 힘만을 사용하여 접합이 가능하다. 이러한 장점들을 가지고 있기 때문에 기

[†]To whom correspondence should be addressed.
kimhk@snut.ac.kr

계적 프레스 접합 기술은 자동차 산업에서 잠재적으로 중요한 접합 방법이라고 할 수 있다.

그러나 기계적 프레스 접합은 현재까지도 접합 강도 및 피로 강도에 대한 신뢰성이 충분히 검증되지 못한 상태이다. 또한 인장상태에서 접합부의 버튼이 전단을 받는 인장-전단 (tensile-shear)에 의한 하중에는 비교적 강하나 십자-인장(cross-tension) 하중 방식이나 인장-박리 (tensile-peel) 하중 방식에는 하중에 대하여 버튼이 열리는 (open-up) 문제가 발생할 수 있으므로 이에 대한 추가적인 접착접합이 혼용되어 더욱 강력한 차체접합을 유지하도록 하는 방법이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 자동차 경량화를 위한 차체 판재로 고려중인 알루미늄 Al-5052 판재에 기계적 프레스 접합과 접착접합을 동시에 적용하여 결합된 시험편에 대한 접합강도를 평가하고자 한다. 이를 위하여 접착제는 에폭시 수지를 사용하여 시험편에 도포한 후 독일 TOX[®] 사⁵⁾에서 개발한 기계적 프레스 접합방법으로 접합한 인장-박리 형상의 시험편을 최적의 경화조건에서 경화시킨 후 인장실험을 실시하였다. 최고의 인장력을 가져오는 펀치 하중을 도출하여 시험편을 제작하였다. 최적의 펀치 작용하중을 결정하여 제작된 시험편을 이용하여 인장 및 피로시험을 실시하여 인장강도와 피로 강도를 측정하였다. 또한 기계적 프레스 접합을 하지 않고 접착 접합만을 한 시험편에 대하여 인장 및 피로실험을 실시하여 강도에 있어서 접착접합의 영향을 평가하였다.

2. 실험

2.1. 시험편 제작

본 연구에서 접착 및 기계적 프레스 접합법으로 시험편을 제작하였다. 사용한 접착재료로는 스위스 Ciba-Geigy사의 에폭시 구조 접착제로 수지 재료는

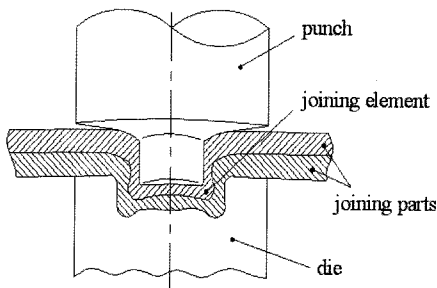


Fig. 1. Schematics of the mechanical press joining.

Araldite AW106, 경화제(hardner)는 HV953을 사용하였다. 수지재와 경화제의 최적의 접착조건을 가져오는 혼합비율은 제품사의 사용 매뉴얼에 따르면 중량비(Araldite : hardner)의 경우 100 : 80의 비율이며, 부피비율은 100 : 100이다. 본 연구를 위하여 비이커를 사용하여 부피 비율로서 1 : 1로 혼합하였다.

시험편 제작에 사용한 재료는 자동차 차체의 경량화를 위한 대체 재료로 주로 활용되고 있는 알루미늄 합금(Al-5052)으로서 그 기계적 성질과 화학적 성분은 각각 Table 1, 2와 같다. 본 연구에서는 기계적 프레스 접합에 관한 규격이 현재 정확히 정해진 바가 없으므로 점용접에 사용되는 인장-박리 시험편과 동일한 규격으로 점용접 시험편을 제작하였다. 시험편은 0.8mm 두께의 Al-5052를 W = 30, P = 30mm, Lh = 100mm로 제작하였으며 형상은 Fig. 2와 같다. 절단된 판재는 접착제 도포 전 접착성능 향상을 위하여 오염되지 않은 상태에서 접착하는 것이 중요하므로 아세톤으로 접착제 접촉면에 대하여 깨끗이 세척하고 대기 중에서 건조시켜 접착제 간 양호한 계면을 유지할 수 있도록 전처리를 하였다.

접착제의 도포는 전처리된 시험편에 깨끗한 붓을 이용하여 접착부위에 도포하여 사용하였으며, 접착 이후에는 기계적 프레스 접합을 쉽게 하기위하여 약 5분간 상온에서 건조한 후 독일 TOX[®]사의 버튼 형상의 라운드 크린치(round clinch) 기계적 프레스 접합을 하였다. 접합시 필요한 하중을 가하는 장치로는 Fig. 3의 서보유압제어 만능인장시험기 (universal testing machine, Instron 8516)를 사용하였다. 시험편 제작에 사용된 펀치는 직경과 버튼형태에 따라 다양하게 선택할 수 있으나, 본 연구에서는 직경 5.4mm의 라운드 형 펀치와 직경이 8.3mm인 다이를 사용하였으며 Fig. 3과 같이 장착하여 접합하였다. 접착 및 기계적 프레스 접합이 완료된 시험편은 전기로를 이용하여 최적의 경화조건인 150℃에서 5분간 경화하였으며, 경화시 접착제의 접착면을 균일한 압착을 위하여 C-형 클램프를 이용하여 압착상태에서 경화하였고 최종적으로 제작된 시험편은 각각 Fig. 4와 같다.

Table 1. Mechanical properties of the Al-5052 alloy

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

Table 2. Chemical compositions of the Al-5052 alloy, (wt. %)

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

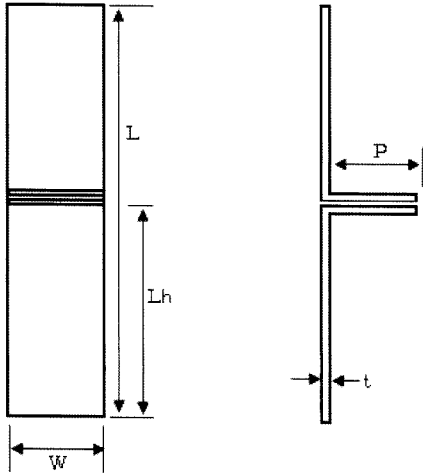


Fig. 2. Configuration of the tensile-peel specimen.



Fig. 3. Dynamic universal testing machine used for the mechanical press joining and fatigue tests.

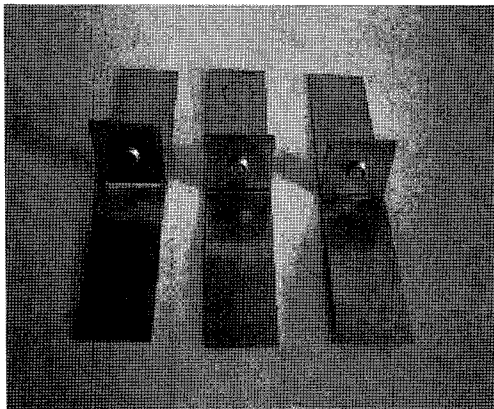


Fig. 4. Bonded and mechanical press joint specimens.

2.2. 인장 및 피로시험

접착 및 기계적 프레스 접합부의 정적 강도 및 피로 강도를 평가하기 위한 인장 및 피로시험에는 Fig. 3의 10ton 용량의 서보 유압식 만능 재료 시험기(Instron 8516)를 사용하였고, 인장시험은 변위 제어 방식으로 10mm/min의 속도로 수행하였다. 접착제 도포 후 프레스 접합시 최적의 편치하중을 찾기 위하여 10~34kN까지 2kN단위로 편치작용하중 상승하면서 시험편을 제작하였다. 그리고 각 각의 시편에 대하여 인장하중을 시험한 결과 20kN이 최고의 인장강도를 나타내므로, 20kN으로 표준시편으로 결정하고 제작하였다. 그리고 표준시편에 대해서 동일 조건(인장하중 조건)으로 인장 시험을 실시하였다. 또한 기계적 프레스 접합의 영향이 미치는 정도를 확인하기 위하여 접착접합만을 실시한 시편과 기계적 프레스 접합만을 수행한 시편을 각각 제작하여 인장시험을 실시하였다. 기계적 프레스 접합 시편에 대해서는 시험하중이 피로시험기의 제어 가능한 하중보다 낮은 관계로 피로시험은 접착과 20kN의 편치작용하중으로 제작한 시편과 접착제만으로 제작한 시편에 대하여 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 접착 및 기계적 프레스 접합부의 정적강도

접착 및 기계적 프레스 접합부의 인장-박리 시험편을 이용한 접합강도는 기계적 접합부의 강도와 접착 접합부의 강도를 좌우하는 두 가지의 요인으로 나눌 수 있다. 기계적 접합부의 강도를 좌우하는 인자에는 판의 두께, 편치직경 등과 같은 치수와 실제 시험편 제작시 편치의 작용하중의 크기가⁶⁾다. 또한 접착 접합부의 강도를 좌우하는 인자로는 접착제의 접착면 인장강도로 접착제의 두께이다. 일반적으로 인장-전단 시험편에서 접착제의 두께는 얇을수록 강도가 증가하며 본 연구와 같은 인장-박리 형상의 시험편의 경우 박리 접착강도는 접착제의 두께가 두꺼울수록 강도가 증가하는 것으로 알려져 있다⁷⁾.

본 연구의 경우 접착제를 도포 후 기계적 프레스 접합으로 시험편을 제작하는 관계로 프레스 접합 하중과 접착제의 두께와는 서로 상관관계가 존재한다고 판단된다. 또한 동일한 두께, 재료 및 편치를 사용한 단순 기계적 접합 연구의 경우 최적의 프레스 접합하중이 34kN으로 알려져 있다⁶⁾. 그러나 본 연구와 같이 접착 접합과 기계적 프레스

접합의 경우 접착제에 의하여 접합 강화메커니즘이 달라질 수 있다. 또한 프레스 하중에 따라 접착제의 두께가 달라지는데 단순히 프레스 하중의 증가가 접착제 두께를 얇게 할 수는 있으나 인장-박리 시험편의 경우 접착제의 두께가 두꺼울수록 유리하다는 연구⁷⁾를 토대로 기계적 접합과 접착 접합이 복합적으로 작용하는 시험편에 대한 최적의 접합조건을 도출하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 접착제의 두께를 인위적으로 조절하기가 어렵고 이 두께는 기계적 프레스 하중에 영향을 받으므로 접착제를 도포한 상태에서 프레스 하중을 10~34kN 까지 변화시키면서 가장 큰 인장 저항력이 발생하는 프레스 하중 조건을 도출하였다.

Fig. 5는 접착접합 후 펀치 하중을 18~24kN까지 가한 시험편에 대하여 10mm/min의 속도로 인장시험을 실시하여 인장 저항력을 평가한 결과의 예를 나타내고 있다. 변위가 증가하면서 하중이 증가하여 정점에 이른 후 하중이 완만하게 저하함을 알 수 있다. 이는 알루미늄 판재가 분리되며 결과적으로 예리한 노치 내지는 균열이 발생하여 응력이 급속하게 집중되어 판재의 분리가 지속적으로 발생하나 또 다른 기계적 접합이 존재하여 하중을 지탱하기 때문으로 판단된다. 펀치하중 20kN으로 제작한 시험편에서 최고 인장 저항력이 나타났으며, 이때 변위량은 0.37mm로 확인되었다.

Fig. 6은 접착 접합과 기계적 프레스 하중을 실시하여 각 하중조건에 대한 접합부의 최대 인장하

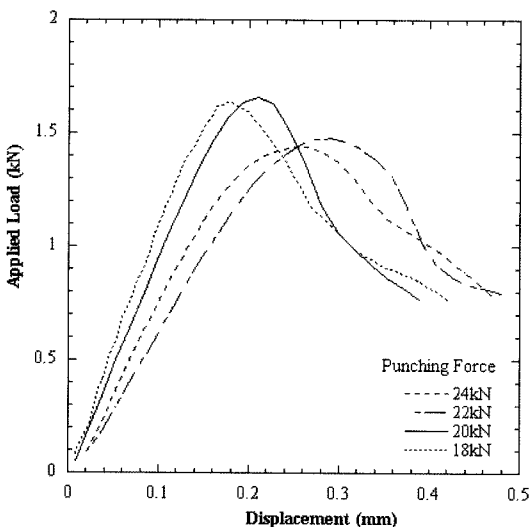


Fig. 5. Applied load against displacement of the peel-tension specimens produced with different punching forces.

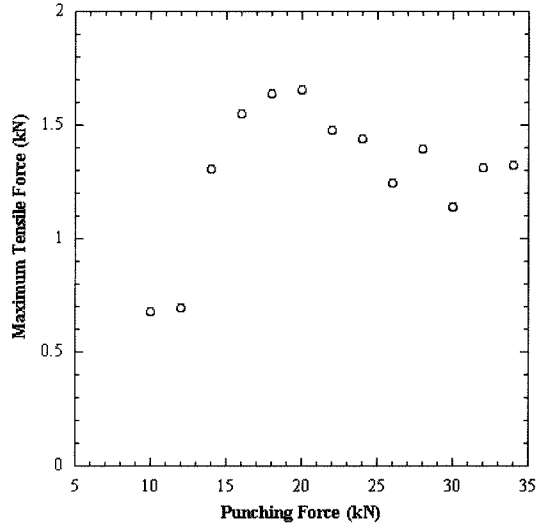


Fig. 6. Maximum tensile force against punching force of the bonded and mechanical press joints.

중을 나타내고 있다. 접착제와 기계적 접합을 혼합한 경우 펀치 하중이 증가하면서 인장 저항력이 증가하여 펀치하중이 20kN에서 가장 높은 인장 저항력을 나타내었으며 이후 다소 편차는 있으나 전반적으로 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 접착제 및 기계적 접합을 결합한 본 연구의 경우 최적의 펀치하중은 20kN으로 나타났으며 따라서 모든 피로 시험편은 20kN으로 접합하였다. 또한 이때 본드의 두께 0.15mm로 측정되었다.

Fig. 7은 기계적 프레스 접합이 없이 접착 접합만을 적용한 상태의 인장-박리 시험편 3개의 인장 저항력과 변위량의 관계를 나타내고 있다. 변위가 증가하면서 인장 저항력이 선형으로 증가함을 알 수 있으며 정점에 도달한 후 급격히 하중이 감소함을 알 수 있다. 하중이 정점에 이른 후 완만하게 하중이 감소하는 Fig. 5의 접착 및 기계적 접합부의 경우와 다른 거동을 나타낸다. 본 순수 접착 접합의 경우 정점에 도달한 직후 하중이 급격히 감소하는 순간에 접착이 알루미늄 판재와 분리되며 결과적으로 예리한 노치 내지는 균열이 발생하여 응력이 급속하게 집중되어 중간에 균열을 억제하는 기계적 접합과 같은 장애물이 없이 판재의 분리가 지속적으로 발생하기 때문이다. 균열이 진전된 후 접합부의 인장 저항력인 약 10N에 도달하며 접합부로서의 기능이 끝나는 파단에 이른다. 3개의 시험편의 평균 인장강도는 0.98kN으로 나타났으며 최대 정점 하중을 나타내는 변위량은 약 0.25mm로 측정되었다.

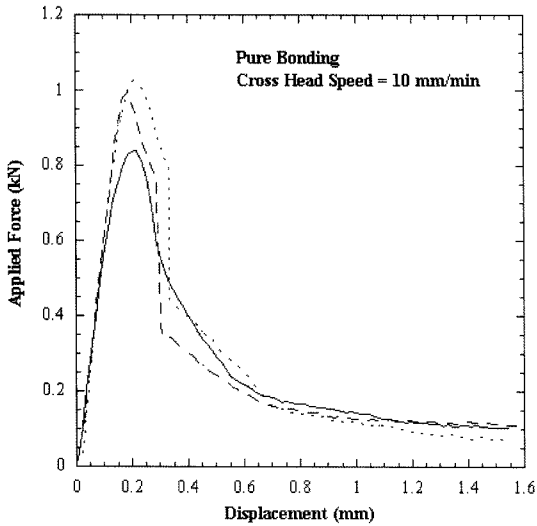


Fig. 7. Maximum tensile force against displacement of the pure bonded specimens.

Fig. 8은 전단-인장강도가 최대로 나타나는 32kN의 펀치하중으로 제작한 순수 기계적 프레스 접합의 인장-박리 시험편을 인장 시험한 결과를 나타낸 그래프이다. 평균 최대 인장 저항력은 0.18kN으로 나타나 단순 접착제만을 사용한 접착 시험편의 인장 저항력인 0.98kN의 18%에 해당하는 매우 낮은 것으로 나타났다. 약 5~6mm의 변위가 발생한 후에 저항 하중이 급격히 저하하는데 이는 버튼이 열리면서(open-up) 상판과 하판이 분리되기 때문이다. Fig. 7의 단순 접착제만을 사용한 접착 시험편의 강

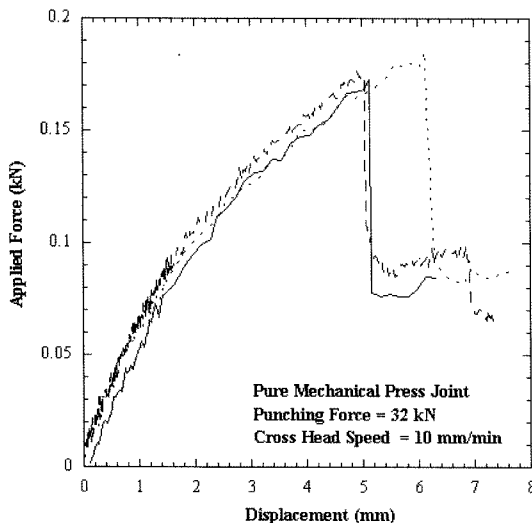


Fig. 8. Maximum tensile force against displacement of the pure mechanical press joints.

성도(=하중/변위)와 비교하여 낮음을 알 수 있다. 이는 기계적 접합의 경우 하중이 인장으로 작용하는 T자형 연결부위가 하중을 적절히 유지하기 어렵고 단순히 접합부가 구속된 상태에서 일종의 외팔보 거동을 보이기 때문이다. 따라서 이와 같은 인장-박리 하중 방식에서의 기계적 접합부의 문제점인 버튼이 열리는 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 접착 접합과의 혼합된 접합방식을 적용하였다. 결론적으로 두 접합 방식이 결합된 경우 최대 인장저항력이 1.7kN으로 순수 기계적 접합의 강도인 0.18kN과 순수 접착 접합의 0.98kN의 합인 1.16kN에 비하여 47% 증가함을 알 수 있다. 이 47%가 두 접합 방식의 혼합에 의한 정적강도에 있어서의 상호효과로 평가된다.

3.2. 접착 및 기계적 프레스 접합부의 피로강도

자동차의 차체는 운행 중에 정적하중뿐 아니라 지속적인 반복하중을 받게 된다. 이러한 접착 및 기계적 프레스 접합법을 자동차 차체 접합에 사용할 경우, 자동차 차체가 받는 반복 하중 상태와 유사한 실험과 해석을 통해 보다 유용한 정보를 얻을 수 있으므로 반복 하중 하에서의 접착 및 기계적 프레스 접합부의 피로 시험을 실시하고, 이에 대한 평가 및 예측을 하였다. 또한, 접착 및 기계적 접합을 동시에 적용하여 제작한 시험편과 순수 접착제를 사용하여 접합한 시험편의 피로 강도를 비교 평가하여 접착 및 기계적 접합의 피로강도에 있어서 각 접합의 상호효과에 관하여 검토하였다.

Fig. 9는 상·하판을 두께 0.8mm, 접착제 두께 0.25mm의 Al-5052 합금으로 제작한 접착 및 기계적 접합을 동시에 적용하여 제작한 시험편과 순수 접착제를 사용하여 접합한 시험편의 피로 강도를 나타낸 그래프이다. 피로수명 1×10^6 회를 기준으로 피로강도가 접착 및 기계적 접합부 경우와 순수 접착 접합의 경우 각각 680N 및 620N으로 평가되었다. 이 값은 접착 및 기계적 접합부 경우 정적강도 1.7 kN의 약 4%에 해당하며 순수접착 접합부 경우 정적강도 0.98kN의 약 6%에 해당하는 낮은 값이다. 이는 인장-박리 하중에 대하여 접착 및 기계적 프레스 접합부가 매우 취약함을 암시한다. 리벳 접합에 에폭시 접착제로 보강한 인장-박리 시험편에 대하여 피로시험의 결과 최대 인장하중 대비 피로 한도가 45%로 보고⁸⁾되어 이 값에 비하면 대단히 낮은 수치이다. 또한, 순수 접착 접합부의 피로강도가 접착 및 기계적 접합부의 피로강도의 91%에 해

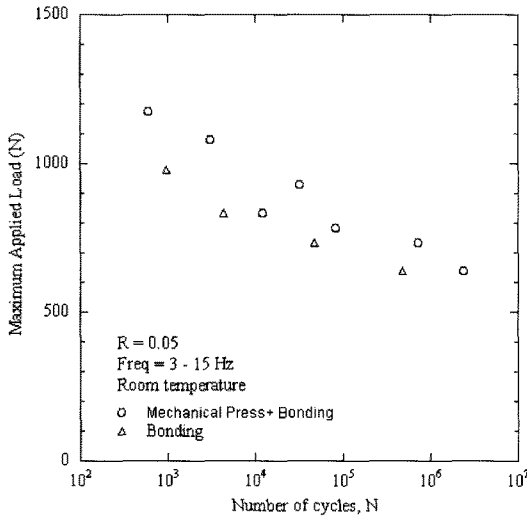


Fig. 9. Maximum applied load vs. number of cycles for mechanical press and bonded joint and bonded joints.

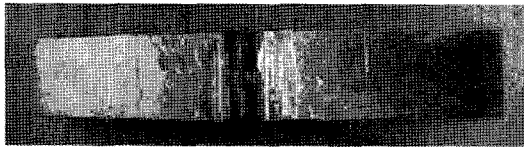


Fig. 10. Peel-tension specimen with pull-out failure mode after fatigue test.

당하며 결과적으로는 나머지 9%는 순수 기계적 프레스 접합 내지는 두 접합의 상호작용 효과로 판단된다. 순수접합의 정적 인장 저항력이 두 접합 방식이 결합된 경우의 68%인 정적 인장 저항력을 고려할 경우 피로강도 측면에서 접착 접합의 역할이 높으며 상대적으로 기계적 접합의 역할은 낮아진다고 평가된다. 접착제 및 기계적 접합부의 피로 실험시 전체 하중 영역에서 파단형태는 Fig. 10과 같이 버튼이 분리되는 분리 파괴형태(pull-out failure mode)로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 에폭시 접착제를 이용한 접착 및 기계적 프레스 접합에서의 최적의 프레스 펀치 하중을 결정하고, 신뢰성 확보 차원에서 강도를 평가하기 위하여 인장-박리 시험편을 사용하여 정적 인장 실험과 피로 실험을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 두께 0.8mm의 알루미늄 Al-5052 판재에 버튼 직경 8.3mm로 기계적 접합과 에폭시 접착제를 사용하여 접합할 경우 인장강도 측면에서의 최적의 펀치작용하중은 20kN으로 나타났다.

2) 두 접합 방식이 결합된 경우 최대 인장저항력이 1.7kN으로 순수 기계적 프레스 접합의 강도인 0.18kN과 순수 접착 접합의 강도인 0.98kN의 합인 0.16kN에 비하여 47% 증가함을 알 수 있다.

3) 피로수명 10⁶회를 기준으로 접착 및 기계적 접합을 동시에 적용한 시편과 순수 접착으로 제작한 시편에서 피로강도가 각각 680N 및 620N으로 나타났으며 이 값은 정적강도를 기준으로 접착 및 기계적 접합의 경우 4%와 순수 접착접합의 경우 6%로 매우 낮은 값으로 나타났다.

4) 순수 접착접합부의 피로강도가 접착 및 기계적 프레스 접합부 피로강도의 91%이며, 순수 접착의 정적 인장 저항력이 두 접합이 결합된 경우의 정적 인장 저항력의 68%임을 고려할 경우 접착접합의 역할이 정적강도 측면보다도 피로 강도 측면에서 상대적으로 크게 작용하였다.

참고문헌

- 1) 박황호, “미래의 자동차 용접기술”, 대한용접학회지, 제15권, 제2호, pp. 24~35, 1997.
- 2) 조재홍, “자동차용 냉연강판 품질 특성”, 한국소성가공학회지, 제5권, 제3호, pp. 195~196, 1996.
- 3) 유영철, 오승규, 이원, “자동차용 구조접착 접합이음의 응력해석과 강도평가에 관한 연구”, 숭실대학교 대학원교육부 학술연구 논문집, 1997.
- 4) 권용우, 권순용, 박석원, “차체용 알루미늄판 접합부 피로특성”, 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 983~987, 1997.
- 5) Tox corporation Tox[®] System user's guide.
- 6) 임두환, “기계적 프레스 접합부의 피로강도 평가에 관한 실험적 연구”, 서울산업대학원 논문, 2001.
- 7) 윤병현, 권영각, “자동차용 강판의 접착특성”, 대한용접학회지, 제13권, 제2호, pp. 106~114, 1995.
- 8) Fatemi B. Li, “An experimental investigation of deformation and fatigue behavior of coach peel riveted joints”, International Journal of Fatigue, Vol. 28, pp. 9~18, 2006.