

혼합모드상태에서의 Al 5052-H32 셀프 피어싱 리벳 접합부의 피로강도 평가

곽진구 · 강세형 · 김호경**

서울과학기술대학교 대학원 자동차공학과 · *서울과학기술대학교 기계.자동차공학과
(2015. 12. 29. 접수 / 2016. 5. 12. 수정 / 2016. 6. 15. 채택)

Fatigue Strength Evaluation of Self-Piercing Riveted Al 5052-H32 Joints under Mixed Mode Loading Conditions

Jin Gu Kwak · Se Hyung Kang · Ho Kyung Kim**

Department of Automotive Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science & Technology

*Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology

(Received December 29, 2015 / Revised May 12, 2016 / Accepted June 15, 2016)

Abstract : In this study, static and fatigue tests on the self-piercing riveted (SPR) joint were conducted using cross-shaped specimens with aluminum alloy (Al-5052) sheets. Mixed mode loading was achieved by changing the loading angles of 0, 45, and 90 degrees using a special fixture to evaluate the static and fatigue strengths of the SPR joints under mixed mode loading conditions. Simulations of the specimens at three loading angles were carried out using the finite element code ABAQUS. The fatigue specimens failed in an interfacial mode where a crack initiated at the upper sheet and propagated along the longitudinal direction and finally fractured Maximum principal stress, von-Mises effective stress failed to correlate the fatigue lifetimes at three loading angles. However, the equivalent stress intensity factor was found to be appropriate to correlate the fatigue lifetimes at three loading angles.

Key Words : SPR joint, mixed mode loading, fatigue strength, FEM analysis

1. 서론

최근 들어 자동차의 연비향상을 위하여 자동차 산업에서는 자동차의 경량화가 활발히 진행되고 있다. 차량의 소재의 경량화방안으로 알루미늄 및 마그네슘 합금, 고장력강 등의 금속재료, 섬유강화 복합재, 엔지니어링 플라스틱 등과 같은 우수한 물성을 갖는 경량재료의 적용이 있다. 또한 최근 이들 경량 소재의 적용을 위하여 이들 재료의 접합에 대한 다양한 공법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

차량의 접합 방식으로 일반적으로 점용접(spot welding) 방식을 사용한다. 그러나 점용접 방식은 알루미늄과 철강재와 같은 이종재료를 접합 시 용융점의 차이가 크고 결정 구조가 달라 용접이 어려운 단점이 있다. 또한, 복합재나 플라스틱과 철강재를 접합할 시에는, 복합재나 플라스틱의 경우 전기 부도체로 인하여

여 일종의 저항 용접인 점용접이 불가능하다. 그러므로 이종재료 또는 점용접이 어려운 다양한 소재에 대한 접합기술이 요구된다. 이에 대응하는 접합 기술로 셀프 피어싱 리벳팅(self-piercing riveting, SPR) 접합법이 큰 관심을 받으며 활용이 증가되고 있는 추세이다.

SPR 접합법은 Fig. 1과 같이 접합할 2개 이상의 판재 중 상판에 해당하는 판재에 리벳을 일정이상의 압력을 가해 관통시킨다. 관통된 리벳은 판재의 하부에 위치한 금형다이의 형상에 의해 상판과 하판이 체결될 수 있도록 리벳이 벌어지면서 접합하는 방식이다. 이로 인해 기존의 리벳 접합방식과 달리 가공공정이 간단하여 생산성이 증대된다. 또한 냉간상태에서의 비열처리 접합 방식이므로 도장 및 도금된 판재에 손상을 가하지 않고 접합이 가능한 장점이 있다.

국내·외적으로 동일 재료 및 이종 재료의 SPR접합부의 피로강도에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 예

* Corresponding Author : Ho-Kyung Kim, Tel : +82-2-970-6348, E-mail : kimhk@seoultech.ac.kr

Department of Mechanical and Automotive Eng., Seoul National University of Science & Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

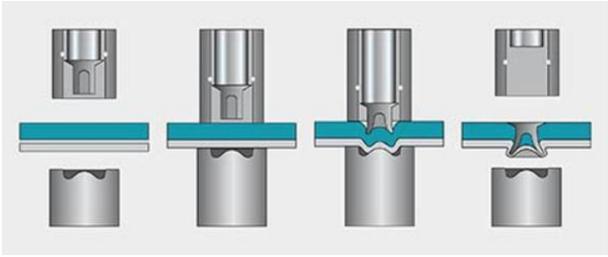


Fig. 1. Schematic representation of the SPR process.

로, Sun 등은 11종류의 Al-Al, Al-steel SPR 접합부의 인장-전단, 십자-인장, 인장-박리 시험편에 대한 피로 강도에 관하여 연구하여 Al 5182의 피로강도는 점용 접을 이용한 접합 방식에 비해 거의 100% 증가함을 보고하였다¹⁾. Fu 등은 Al-Al SPR의 정적강도가 접합 압력이 증가 할수록 일정 압력까지는 증가하는 경향을 보이지만 그 이상의 압력을 가하면 높아지지 않으며, SPR의 접합 압력이 증가하더라도 피로 강도 측면에서는 큰 영향이 없음을 보고하였다²⁾. Miyashita 등은 Mg 판재만을 겹친 SPR접합부와 접합부에 에폭시 접착제를 추가한 시험편에 대해 강도 시험을 하여 SPR접합부의 정적 강도 및 피로강도가 접착제를 추가한 시험편이 일반 시험편에 비해 월등히 높다고 발표하였다³⁾. 한편, Han 등은 Al-Al SPR 인장-전단 접합부의 프레팅에 의해 피로 파손이 발생하며, 프레팅의 영향을 줄이기 위해 시험편의 계면에 폴리염화수지 판을 삽입하면 피로 수명이 감소하는 반면 윤활제를 도포하면 피로 수명이 향상되는 결과가 있다고 보고하였다⁴⁾. Liu 등은 일반 마그네슘 합금을 이용하여 SPR 접합을 하게 될 경우 리벳팅 부분에 균열이 생기게 되는데 이를 개선하고자 180℃ 이상의 환경에서 열처리한 마그네슘 합금을 사용하여 접합을 한 결과 접합부에서 균열이 생성되지 않는 것을 발표하였다⁵⁾. Kang 등⁶⁾은 Al-5052 SPR 접합부의 다양한 하중 시험편에 대한 피로강도를 평가하여 이를 다양한 다축피로수명 매개변수로 피로 수명을 평가하였다. 평가결과 점용접부의 피로수명 예측에 적용된 유효응력확대계수가 적절하다는 사실을 보고하였다.

그러나 지금까지 많은 SPR 접합부에 대한 많은 연구가 진행되어 왔지만, 아직까지 SPR 시험편의 각 하중모드에서 피로강도를 평가하는 연구는 아직 미비하다. 통상적으로 SPR 접합부의 피로수명 및 피로강도를 평가하기 위하여 인장-전단, 십자-인장, 인장-박리 시험편 등을 적용하여 평가하고 있다. 대부분의 SPR 접합부에 대한 피로강도 평가의 경우 통상적으로 하중 진폭을 매개변수로 평가하고 있다. 그러나 하중 진폭의

경우 시험편의 크기, 두께, 시험편 형상이 다를 경우 서로 비교하는데 어려움이 있다. 따라서 시험편의 형상, 시험 두께 등에 상관없이 이들 SPR 접합부의 피로 강도를 평가할 수 있는 통일된 매개변수가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 SPR 접합부에 대하여 오직 십자형 시험편만을 적용하여 혼합모드 하중 지그로 하중 각도를 변화시키면서 다양한 하중 조건에서 피로 강도를 평가하고자 한다. 이를 위하여 알루미늄 5052판재로 제작한 십자형 시험편에 하중 각도를 0, 45, 90도로 가하여 시험편에 대한 인장 및 피로실험을 실시하여 정적강도와 피로강도를 평가하였다. 또한, 유한요소법(FEM, Finite Element Method) 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 각각의 하중 각도에 대하여 구조 해석을 수행하였다. 세 종류의 하중 각도에 대한 시험편의 피로수명 평가를 위하여 응력확대계수를 적용하여 피로수명을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편 재료 및 제작

본 연구에서 SPR 접합부의 시험편에 사용한 재료는 Al-5052 H32이며, Fig. 2와 같이 점용접 시험편의 인장-십자 시험편과 유사한 십자형 시험편을 제작하였다. 시험편 접합용 리벳은 Henrob사의 C50541로 중 탄소강(0.35 wt.%)을 주재료로 하며 알루미늄 표면처리(Almac) 되었으며, 꼬리부분의 지름과 길이는 모두 5.3 mm이다.

SPR 접합부의 접합강도는 판의 두께, 리벳의 직경, 다이의 형상 등과 리벳팅 시 편치의 작용하중에 따라

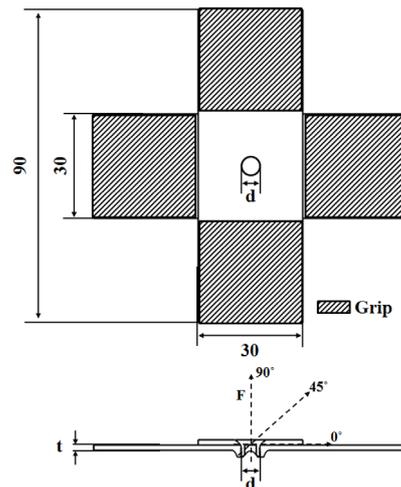


Fig. 2. Geometries and dimensions of the cross shaped SPR specimens.

Table 1. Mechanical properties of the Al-5052

Material	σ_u (MPa)	σ_Y (MPa)	Elongation (%)
Al-5052 H32	234.4	161.8	9

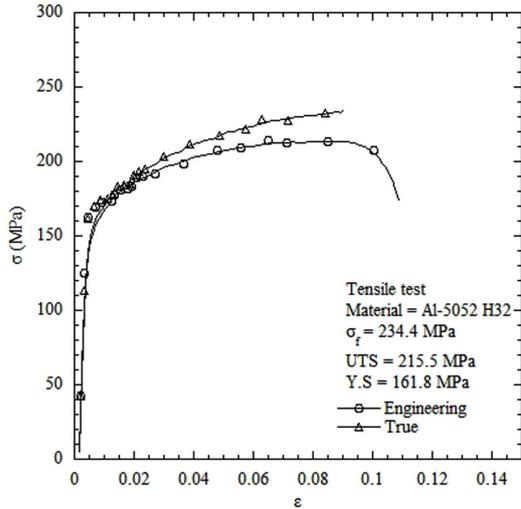


Fig. 3. Tensile stress-strain curve for the Al-5052 H32 sheet.

변한다. 본 연구에서는 두께 1.5 mm의 상, 하판과 직경 5.3 mm의 리벳을 사용하였다. 이전의 동일한 두께의 동일 재질로 제작한 인장-전단 형상의 시험편에 대하여 최적의 펀치작용하중을 결정한 연구결과⁷⁾에 의거하여 SPR 피로시험편은 21 kN의 펀치 작용하중으로 제작하였다.

SPR 접합부의 유한요소해석을 위한 기계적 물성치 측정을 위하여 인장 시험편을 제작하여 인장 실험을 수행하였다. 인장 실험에 대한 결과로 나타난 응력-변형률 선도는 Fig. 3과 같으며 물성치 결과는 Table 1과 같다.

2.2 시험지그 및 피로실험

십자형 시험편에 대하여 하중 각도 0, 45, 90도에서 피로실험이 가능하도록 혼합모드 시험 지그를 Fig. 4 및 Fig. 5와 같이 설계 제작하였다. 여기서 하중 각도 0도 일 경우 점용접 시험편의 인장-전단 시험편 하중 형태와 유사하며, 하중 각도 90도일 경우에는 점용접 시험편의 십자-인장 시험편과 매우 유사한 하중 형태이다.

SPR 접합부의 정적 강도 및 피로 강도를 평가하기 위하여 유압식 만능재료 시험기 (Instron 8516)를 사용하였다. 피로실험은 응력비 ($R = P_{min} / P_{max}$)가 0.1인 정현파형(sine wave form)의 반복하중을 가하여 주파수를 2~5 Hz 범위에서 수행하였다.

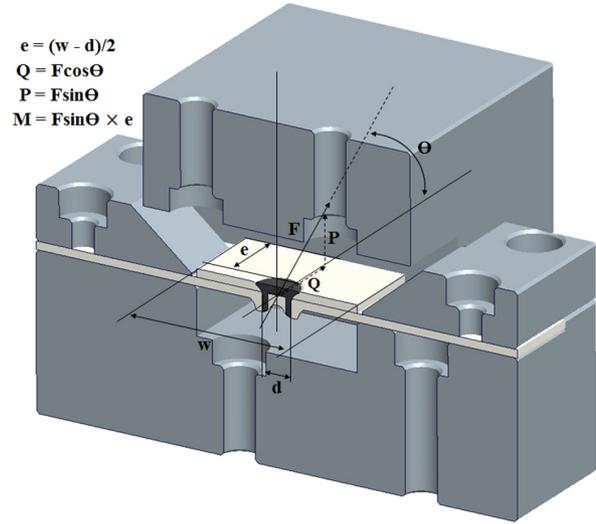


Fig. 4. Resolved components P, Q and M at the SPR joint for a general applied load F.

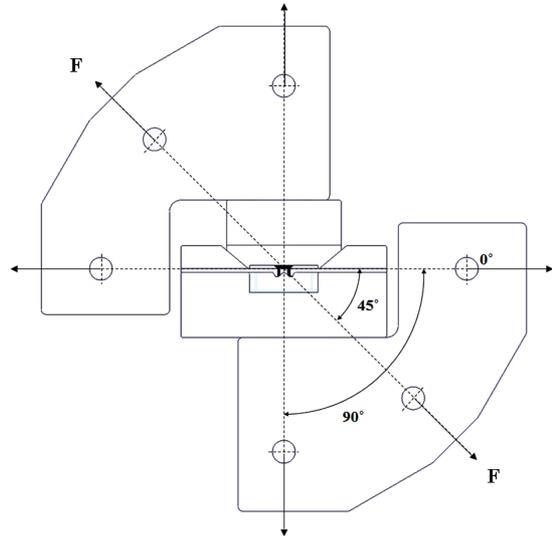


Fig. 5. Loading angle for the SPR joint.

2.3 유한요소해석 모델링

SPR 접합부 시험편은 상판, 하판, 리벳과 SPR 접합 시 상판에서 분리된 조각으로 구성되어 있다. 이에 대한 구조해석을 위하여 3차원 유한요소 모델을 사용하였다. SPR 접합부의 단면에 대하여 리벳을 실측하여 촬영한 단면사진에 대한 스케일 값을 적용하였다. 이를 기준으로 Fig. 6과 같이 접합부를 모델링하였으며, 최종적으로 Fig. 7과 같은 십자형 시험편의 중앙부분에 해당하는 SPR 접합부의 3차원 모델을 완성하였다.

본 연구에서는 Pre-processor와 Post-processor로 HyperMesh를, Solver는 ABAQUS를 연동하여 해석을 수행하였다. 모델은 SOLID요소인 C3D6, C3D8 적용하

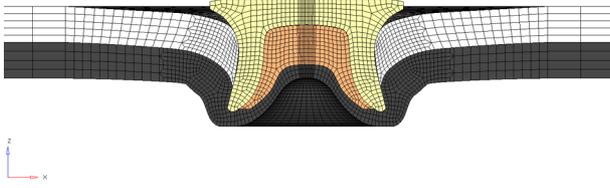


Fig. 6. Cross-section of a SPR joint 3-D FEA model.

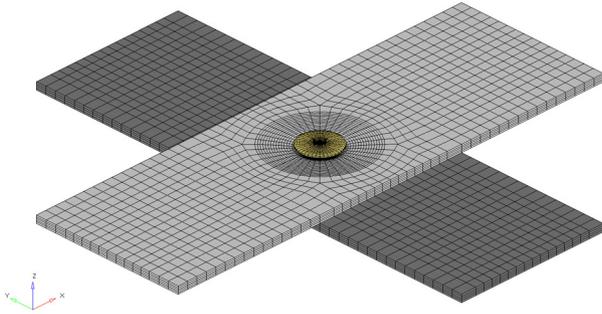


Fig. 7. 3-D FEA models of a SPR joint specimen.

고 0도, 45도, 90도의 각 하중각도에 대한 경계조건을 생성하였다. 십자형 시험편 모델의 절점 수와 요소 수는 각각 52840개와 43904개로 구성되었다. 리벳과 판재가 접촉되는 경계면의 마찰계수는 0.2, 판재와 판재가 접촉되는 경계면의 마찰계수는 0.15로 설정하였다. 하중은 하판에 적용하였고 상판은 고정하여 해석을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 SPR 접합부의 정적강도

십자형 SPR 시험편에 대한 하중 각도 0, 45, 90도에 대한 정적강도 실험의 결과를 정적하중과 변위량을 Fig. 8에 나타내었다. 하중각도 0, 45, 90도에서의 최대 하중은 각각 3571 N, 1850 N, 1503 N으로 나타났으며 정점에 이룬 후에 접합부의 상판과 하판이 분리되는 현상이 발생하였다. 또한 하중각도가 증가하면서 강도가 낮아지는 것으로 나타났다. 하중각이 0도에서 45도 90도로 증가하면서 각각 48% 및 58%씩 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 사실은 하중각이 증가하면서 시험편의 양끝단의 하중 성분으로 인하여 SPR 리벳부에 모멘트가 발생하여 이로 인하여 강도가 낮아지는 것으로 판단된다. 하중각이 0도인 경우 점용접부 인장-전단(tensile-shear) 시험편과 매우 유사한 구조로 강도가 가장 높다. 또한, 하중각이 90인 경우 점용접부 십자-인장(cross-tension) 시험편과 매우 유사한 구조로 점용접부와 마찬가지로 이와 같이 SPR 리벳의 축방향에 해당하는 하중형태에 매우 취약함을 나타내고 있다.

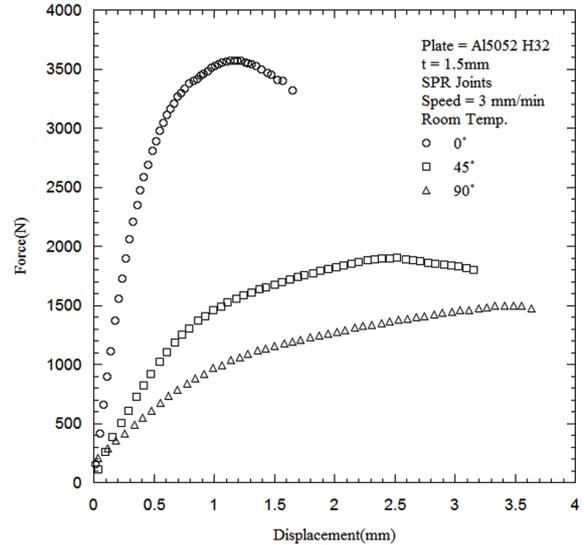


Fig. 8. Comparison of static load versus displacement curves for the SPR specimens at different loading angles.

3.2 SPR 접합부의 피로강도

하중 각도 0, 45, 90도에서의 십자형 시험편에 대하여 하중진폭을 변화시키면서 피로시험을 수행하였다. 피로 파단의 기준은 리벳팅 주위로 균열이 5 mm 정도 발생될 때를 기준으로 하였다. Fig. 9는 하중각도 0, 45, 90도에 대한 하중 진폭(P_{amp})과 수명과의 관계를 각각 나타내었다.

하중진폭과 반복수(N)와의 관계는 하중각 0도인 시험편의 경우 $P_{amp} = 1997.4N_f^{-0.029}$, 45도인 시험편의 경우 $P_{amp} = 2791.1N_f^{-0.152}$, 90도인 시험편의 경우 $P_{amp} =$

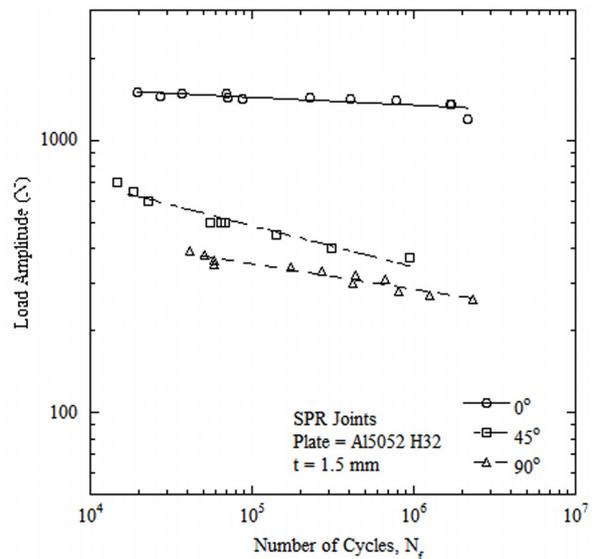


Fig. 9. Comparison of load amplitude against number of failure cycles plots for SPR joints at different loading angles.

$1022.9N_f^{-0.093}$ 으로 나타났다. 피로 한도에 해당하는 하중진폭은 수명이 10^6 cycle 기준으로 하중각 0, 45, 90도 인 경우 피로한도 하중진폭은 각각 1338 N, 342 N, 283 N이다. 이는 정적강도를 기준으로 하중각 0도의 경우 정적 강도 ($P = 3571$ N)의 37%에 해당한다. 하중각 45도의 경우 피로한도 하중진폭은 정적 강도 ($P = 1850$ N)의 약 18%이며, 하중각 90도의 경우 피로한도 하중진폭은 정적 강도 ($P = 1503$ N)의 약 19% 수준이다.

3.3 SPR 접합부의 구조해석 결과

십자형 시험편의 하중각 0, 45, 90도에 대하여 구조해석을 실시하였다. Fig. 10은 하중각 0도에서 피로수명 10^6 cycles에 해당하는 최대하중(P_{max})이 작용하는 상태에서의 최대 von-Mises응력 분포를 나타낸 예이다. Fig. 10을 통하여 최대응력크기가 278 MPa인 것을 확인하였다. 이 응력크기는 본 재료의 항복강도(= 161.8 MPa)를 초과하는 값으로 본 재료의 인장강도(= 234.4 MPa)을 초과하는 크기이다. 이를 통하여 본 재료의 경우 리벳팅 시 소성으로 인한 가공경화로 인하여 접합부의 강도가 증가한 것으로 판단된다. 또한 최대값이 발생하는 위치는 리벳과 상판이 접촉하는 위치로 위치의 경우 하중각이 증가하면서 리벳 헤드 방향으로 이동하는 것을 알 수 있다. 최종적으로 각도 90도의 경우 리벳 헤드와 상판이 접촉하는 위치이다. 한편, 하중 45, 90도의 경우 최대응력은 각각 265 MPa, 207 MPa로 하중각이 증가하면서 응력값이 감소하는 것을 확인하였다.

3.4 SPR 접합부의 피로수명 평가 매개변수

SPR의 다축 피로수명을 평가하기 위하여 하중각 0, 45, 90도에서 시험편에 대한 유한요소 해석 결과로부터 최대주응력과 von-Mises 응력을 매개변수로 피로수명을 평가하였다. 하중각 0, 45, 90도에 대하여 십자형 시험편에 대한 유한요소 해석의 주요 결과 및 최대주응력 및 von-Mises 응력을 매개변수로 피로수명을 평가한 결과는 각각 Fig. 11, Fig. 12와 같다. 이들 그래프

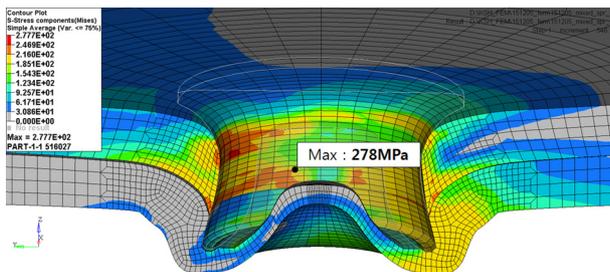


Fig. 10. Maximum von-Mises stress distribution of the SPR joints at 106 cycles at $\Theta = 0$ degree.

를 통하여 데이터들이 산재하여 즉 상관성이 결여되어 최대 주응력과 von-Mises 응력은 SPR 접합부의 혼합모드 하중상태에서의 피로강도를 평가하는데 적절하지 못한 것으로 나타났다.

Swellam 등은 작용하중 F가 작용하는 점용접부 너겟 주위에서의 응력확대계수를 다음과 같은 식으로 유도하였다⁸⁾.

$$K_{axial} = \frac{P}{2r\sqrt{\pi r}} \quad (1)$$

$$K_{moment} = \frac{3M}{2r^2\sqrt{\pi r}} \quad (2)$$

$$K_{shear} = \frac{Q}{2r\sqrt{\pi r}} \quad (3)$$

여기서 r은 너겟 반경, P는 작용하중의 수직하중 성분, Q는 작용하중의 전단하중 성분, M은 작용하중으로 발생하는 너겟 중앙에서의 굽힘 모멘트이다. 한편, 점용접부에서의 응력확대계수는 선형 중첩원리를 적용하여 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$K_I = K_{axial} + K_{moment} \quad (4)$$

$$K_{II} = K_{shear} \quad (5)$$

$$K_{leq} = \sqrt{K_I^2 + \beta K_{II}^2} \quad (6)$$

여기서 K_{leq} 는 모드 I에서의 등가응력확대계수이며 β 는 모드 II의 영향을 고려한 재료상수로 저탄소강의 재료상수 β 는 2로 알려져 있다.

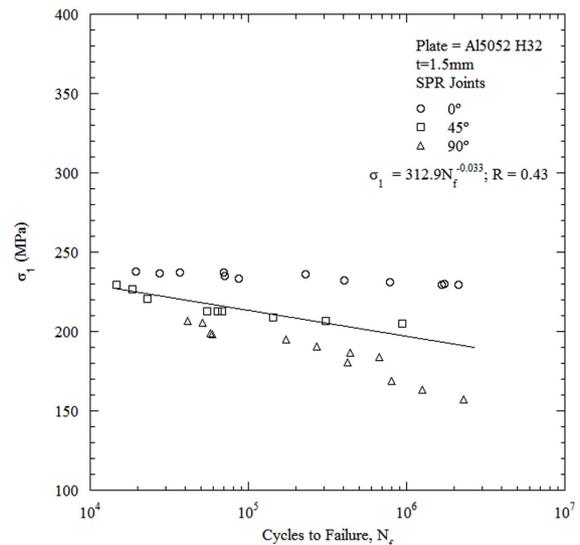


Fig. 11. Fatigue life as a function of maximum principal stress.

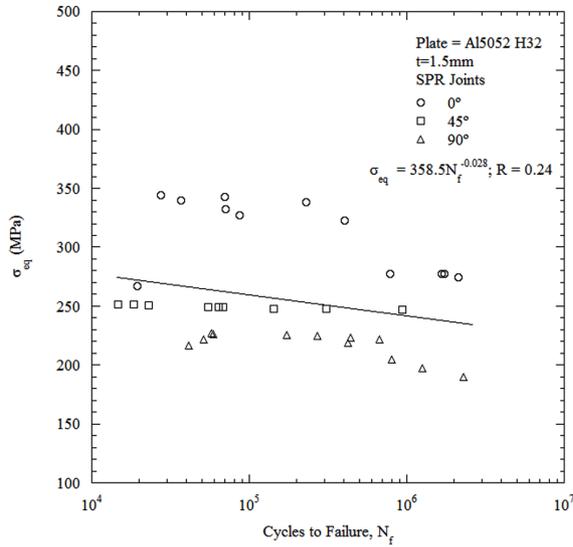


Fig. 12. Fatigue life as a function of von-Mises stress.

본 연구에서 각도 90도 일 경우 리벳 기둥의 축방향 하중 P로 인한 효과와 십자형 하중 형태로 인한 모멘트 효과를 고려하여야 한다. 축방향 하중 P에 의한 응력확대계수 K는 식(1)에 따라 $K_{axial} = P / (2r\sqrt{\pi r})$ 으로 결정하였다. 여기서 F = P에 해당하며, r은 리벳팅 직경 5.3 mm의 절반에 해당하는 2.65 mm이다. 십자형 하중 형태로 인한 모멘트 효과로 인한 응력확대계수 K는 식(1)에 따라 $K_{moment} = 3M / (2r^2\sqrt{\pi r})$ 으로 결정하였다. 모멘트 $M = P \times e$, $e = (W - d) / 2$ 이며, $W = 30$ mm, $d = 5.3$ mm이므로 $e = 12.35$ mm로 결정하였다. 따라서 두 하중 효과에 의한 모드 I에서의 응력확대계수는 식(4)에 따라 $K_I = K_{axial} + K_{moment}$ 로 계산하였다. 최종적으로 한편 모드 I에서의 등가응력확대계수 K_{Leq} 는 식(5)에 따라 $K_{Leq} = K_I$ 으로 결정하였다.

각도 45도일 경우 시편에 작용한 하중 F는 Fig. 4와 같이 축방향의 하중 P와 시편의 표면 방향의 하중 Q로 나누어진다. 하중 P와 Q는 $P = F \sin 45^\circ = 0.707F$, $Q = F \cos 45^\circ = 0.707F$ 이며, $K_{shear} = Q / (2r\sqrt{\pi r})$ 이다. 하중 P로 인하여 식(1), (2)를 각각 적용하여 K_{axial} 과 K_{moment} 를 결정하였다. 또한, 하중 Q로 인한 응력확대계수는 식(3)을 통하여 K_{shear} 를 결정하였다. 모드 I에서의 응력확대계수는 식(4)에 따라 $K_I = K_{axial} + K_{moment}$ 로 계산된다. 또한, 모드 II에서의 응력확대계수는 식(5)에 의해 $K_{II} = K_{shear}$ 로 결정된다. 최종적으로 모드 I에서의 등가응력확대계수 K_{Leq} 는 식(6)에 따라 $K_{Leq} = \sqrt{K_I^2 + 2K_{II}^2}$ 로 결정하였다.

각도 0도 일 경우 식(3)에 따라 $K_{shear} = Q / (2r\sqrt{\pi r})$ 으로 결정하였다. 여기서 F = Q에 해당하며, 피로가 초기에

발생하는 점의 경우 리벳 머리의 하단부로 알려져 있다. 시편 평면상의 하중 Q로 인하여 이들 지점에 대하여 두께 약 1/2 길이에 해당하는 모멘트가 작용한다. 이 크기를 $M = Q \times 0.5t$ 로 가정하여 모멘트 효과로 인한 응력확대계수 K는 식(2)에 따라 $K_{moment} = 3M / (2r^2\sqrt{\pi r})$ 으로 결정하였다. 이 모멘트 효과에 의한 모드 I에서의 응력확대계수는 식(3)에 따라 $K_I = K_{moment}$ 로 계산하였다. 따라서 이를 한편 모드 I에서의 등가응력확대계수 K_{Leq} 는 식(6)에 따라 $K_{Leq} = \sqrt{K_I^2 + 2K_{II}^2}$ 로 결정하였다.

하중각 0, 45, 90도에서 십자시험편의 피로수명 결과를 Swellam 등⁸⁾의 응력확대계수로 정리하여 Fig. 13에 나타내었다. 비록 하중진폭이 높을 경우 상관관계가 낮지만 하중진폭이 낮은 값에서는 비교적 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 이는 매개변수인 응력확대계수의 경우 선형탄성에 기초한 파괴역학의 매개변수로 하중진폭이 클 경우 균열이 발생하여 성장하는 SPR접합부의 응력 상태가 선형탄성이 아닌 비선형인 관계로 잘 맞지 않는 것으로 판단된다. 그러나, 일부 구간을 제외하고 전반적으로 시험편의 형상, 작용하중, 리벳의 크기 등을 사용하여 계산하는 응력확대계수를 적용하여 다양한 하중각도에서 시험편에 대하여 나타난 결과 각각의 시험편이 유사하게 나타났다. 따라서 피로수명을 평가하는데 응력확대계수를 매개변수로 하는 것이 적절하다고 판단된다. 유효응력확대계수 하중진폭 $\Delta K_{eq} / 2$ 와 반복수 N과의 관계는 $\Delta K_{eq} / 2 = 13.5N_f^{-0.08}$ 과 같다. Fig. 14는 Fig. 13에서 결정한 선도를 이용하여 예측한 피로수명과 실제 실험에서 결정한 피로수명과의

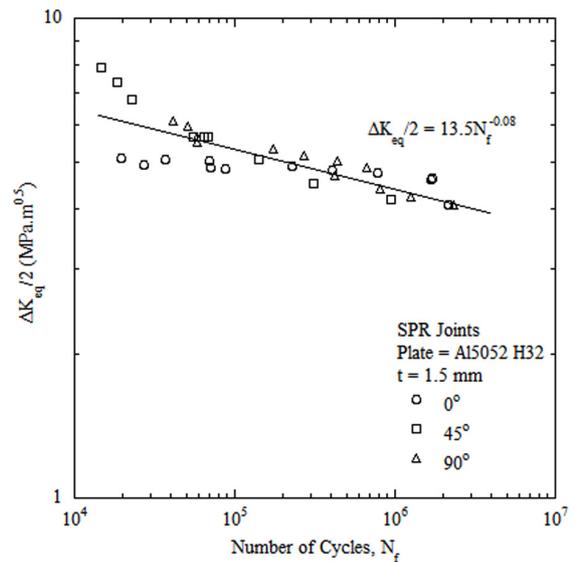


Fig. 13. Fatigue life as a function of equivalent stress intensity factor amplitude.

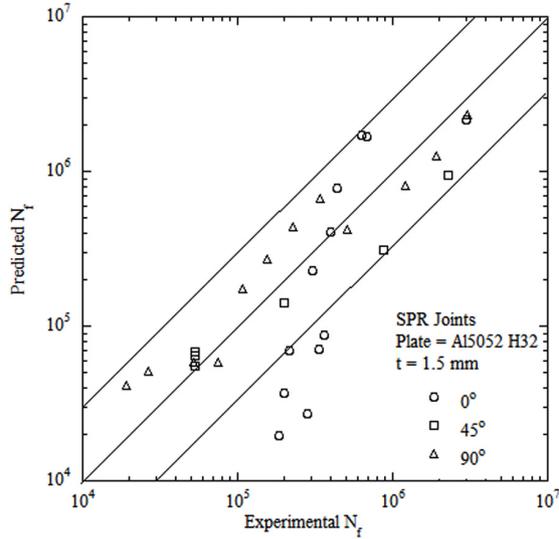


Fig. 14. Estimated fatigue lifetimes using the equivalent stress intensity factor amplitude versus the experimental fatigue lifetimes for the SPR joints.

상관관계를 나타낸 그래프로 하중진폭이 큰 경우 오차가 증가하나 전반적으로 3배 이내에서 적절히 피로수명을 예측할 수 있음을 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 합금(Al5052-H32)을 이용한 십자형 형상의 SPR 접합부 시험편에 대하여 하중각 0, 45, 90도에서의 피로강도를 평가하였다. 또한, SPR 접합부의 피로수명을 평가하는데 가장 적합한 피로 수명 매개변수를 도출하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 하중 각도 0,45, 90도에서의 정적강도 실험 결과 최대하중은 각각 3571 N, 1850 N, 1503 N으로 나타났으며 정점에 이룬 후에 접합부의 상판과 하판이 분리되는 현상이 발생하였다.
2. 하중진폭과 반복수(N)와의 관계는 하중각 0도인 시험편의 경우 $P_{amp} = 1997.4N_f^{-0.029}$, 45도인 시험편의 경우 $P_{amp} = 2791.1N_f^{-0.152}$, 90도인 시험편의 경우 $P_{amp} = 1022.9N_f^{-0.093}$ 으로 나타났다.
3. 피로 한도에 해당하는 하중진폭은 수명이 10^6 cycle 기준으로 하중각 0, 45, 90도인 경우 피로한도 하중진폭은 각각 1338 N, 342 N, 283 N이다. 이는 정적강도를 기준으로 하중각 0도, 45도 90도의 경우 각각 37%, 18%, 19%에 해당하는 값이다.

4. 하중각 0,45, 90도에서 피로시험편에 대한 피로수명을 최대주응력, von-Mises 유효응력, 유효응력확대계수를 적용하여 평가한 결과 유효응력확대계수가 피로수명을 적절히 평가가 가능하였다. 유효응력확대계수 하중진폭 $\Delta K_{eq}/2$ 와 반복수 N과의 관계는 $\Delta K_{eq}/2 = 13.5N_f^{-0.08}$ 과 같다.

References

- 1) X. Sun, E. V. Stephens and M. A. Khaleel, "Fatigue Behaviors of Self-piercing Rivets Joining Similar and Dissimilar Sheet Metals", Int. J. of Fatigue, Vol. 29 pp. 370-386, 2007.
- 2) M. Fu and P.K Mallick, "Fatigue of Self-piercing Riveted Joints in Aluminum Alloy 6111", Int. J. of Fatigue, Vol. 25, pp. 183-189, 2003.
- 3) Y. Miyashita, Y.C.K. Teow, T. Karasawa, N. Aoyagi, Y. Otsuka and Y. Mutoh, "Strength of Adhesive Aided SPR Joint for AM50 Magnesium Alloy Sheets", Procedia Eng. Vol. 10, pp. 2531-2537, 2011.
- 4) L. Han, A. Chrysanthou and J.M. O'Sullivan, "Fretting Behaviour of Self-piercing Riveted Aluminium Alloy Joints under Different Interfacial Conditions, Materials and Design, Vol. 27, pp. 200-208, 2006.
- 5) Z. X. Liu, P. C. Wang and J. W. Wang, "Investigation to Self-piercing Riveting of Wrought Magnesium AZ31 Sheets", Adv. Material Research, Vol. 472-475, pp. 1188-1191, 2012.
- 6) S. H. Kang and H.K. Kim, "Fatigue Strength Evaluation of Self-piercing Riveted Al-5052 Joints under Different Specimen Configurations", Int. J. of Fatigue, Vol. 80, pp. 58-68, 2015.
- 7) M. S. Lee, "Fatigue Strength Evaluation of Self-piercing Riveted Al-5052 Joints, Master's Thesis, Seoul National Univ. of Sci. and Tech., 2014.
- 8) M. H. Swellam and F.V. Lawrence, "A Fatigue Design Parameter for Spot Welds", Fracture Control Program Report No. 157, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1991.