

# SPR 접합법을 이용한 Al-5052 인장-전단 시험편의 피로강도

이만석 · 김택영 · 강세형 · 김호경\*

서울과학기술대학교 대학원 자동차공학과 · \*서울과학기술대학교 기계 · 자동차공학과  
(2013. 12. 26. 접수 / 2014. 6. 30. 채택)

## Fatigue Strength of Al-5052 Tensile-Shear Specimens using a SPR Joining Method

Man Suk Lee · Taek Young Kim · 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 26, 2013 / Accepted June 30, 2014)

**Abstract :** Self-piercing riveting (SPR) is a mechanical fastening technique which is put pressure on the rivet for joining the sheets. Unlike a spot welding, SPR joining does not make the harmful gas and CO<sub>2</sub> and needs less energy consumption. In this study, static and fatigue tests were conducted using tensile - shear specimens with Al-5052 plates for evaluation of fatigue strength of the SPR joints. During SPR joining process for the specimen, using the current sheet thickness and a rivet, the optimal applied punching force was found to be 21 kN. And, the maximum static strength of the specimen produced at the optimal punching force was 3430 N. During the fatigue tests for the specimens, interface failure mode occurred on the top substrate close to the rivet head in the most high-loading range region, but on the bottom substrate close to the rivet tail in the low -loading range region. There was a relationship between applied load amplitude  $P_{amp}$  and lifetime of cycle  $N$  for the tensile-shear,  $P_{amp} = 3395.5 \times N^{-0.078}$ . Using the stress-strain curve of the Al-5052 from tensile test, the simulations for fatigue specimens have been carried out using the implicit finite element code ABAQUS. The relation between von-Mises equivalent stress amplitude and number of cycles was found to be  $\sigma_{eq} = 514.7 \times N^{-0.033}$ .

**Key Words :** SPR joint, fatigue strength, tensile-shear, FEM analysis

### 1. 서론

최근 선진 각국은 환경에 대한 규제로 생산원가는 조금 더 상승하더라도 환경공해 문제를 덜 유발하며 연비효율이 높은 자동차 개발에 힘을 기울이고 있다. 따라서 무공해 자동차 개발에 대한 노력과 병행해서 기존 자동차의 연비 향상을 위해 더 많은 연구개발 투자되고 있다. 이를 위한 대책은 크게 차량의 재료경량화, 성능효율화, 주행저항감소의 3가지 방법으로 나눌 수 있다<sup>1)</sup>. 차량의 경량화를 위하여 다양한 재질에 대한 접합 기술이 요구된다<sup>2)</sup>.

셀프 피어싱 리베팅(self-piercing riveting, SPR) 방법은 상판에 피 접합재료를 리벳으로 관통시켜, 하부에 설치된 금형다이로 리벳이 접합되어 금형다이의 형상에 의해 리벳이 벌어지면서 상판과 하판을 접합하는

방법으로 2개 이상의 판을 고정시키는 냉간 접합처리 기술이다. 기존의 리베팅에 비해 가장 큰 장점은 예비 홀을 가공 후 리벳을 고정시키는 공정이 없이 단일 공정으로 고정시킬 수 있는 것이다. 이로 인하여 작업공정이 줄어들어 생산비용이 절감되는 것과 자동화 생산이 용이하다는 것이다<sup>3)</sup>.

국내·외에서 동일 재료 및 이종 재료를 이용한 SPR접합부에 대한 실험적 연구와 유한요소해석에 관한 연구가 진행되고 있다. 예로, Sun 등<sup>3)</sup>은 알루미늄-알루미늄, 알루미늄-철강을 재료로 한 SPR 접합부의 시험편에 대해 정적강도 평가에 관하여 연구하였다. Han 등<sup>4)</sup>은 알루미늄-알루미늄 SPR 인장-전단 접합부가 fretting에 의해 피로 파손이 발생했다는 연구를 발표하였다. 또한 fretting의 영향을 줄이기 위해 시험편의 계면에 윤활제를 도포하면 피로 수명이 상승되는

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

Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

결과를 도출하였다.

그러나 지금까지 국내·외를 막론하고 SPR 시험편의 피로 강도평가에 대한 연구는 아직 미비하다. 따라서 연구에서는 자동차 경량화를 위해 차체 재료로 사용되는 알루미늄 5000계열 판재를 선정하여 SPR 접합 방법으로 접합한 후 인장-전단(tensile-shear) 시험편의 최대 인장하중을 찾는 방법으로 최적의 펀치하중을 결정하였다. 피로강도 평가를 위하여 유한요소법 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 피로시험편에 대한 구조해석을 수행하여 피로수명 평가를 시도하였다. 또한 피로 시험편의 파면을 SEM으로 관찰하여 균열의 발생 위치와 발생 기구를 규명하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 재료 및 시험편 제작

연구에서 SPR 접합부의 시험편에 사용한 재료로 Al-5052 H32를 적용하였다. SPR 접합부에 대한 유한요소해석을 위한 기계적 물성치를 확보하기 위하여 KS B 801<sup>5)</sup>에 의거하여 알루미늄에 대한 인장시험편을 제작하였다. 인장 속도는 3 mm/min으로 인장시험을 실시하였다. 재료에 대한 인장시험 결과 기계적 물성치는 Table 1과 같다.

일반적인 점용접 시험편은 KS규격에 의거하여 시험편을 사용하지만 현재까지 연구와 관련된 SPR 접합부 시험편의 규격이 없다. 따라서 점용접에 사용되는 KS 규격<sup>5)</sup>을 참고로 하여 Fig. 1과 같은 인장-전단의 SPR 접합부 시험편을 제작하였다.

연구에 사용된 SPR의 리벳은 Henrob사의 C50541로 꼬리부분의 지름과 길이는 모두 5 mm이고 중탄소강(0.35 wt.% C)으로 제작되었으며 알루미늄 표면처리(Almac)된 제품이다.

Table 1. Mechanical properties of the Al-5052 H32

Material	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	E (GPa)	Elongation (%)
Al-5052 H32	251.7	186.7	78.3	10.1

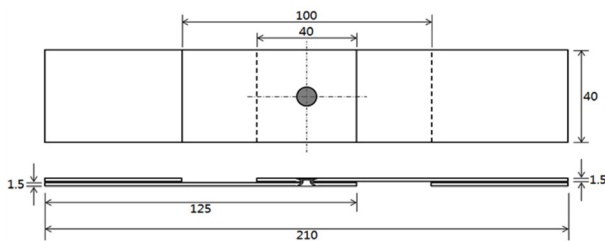


Fig. 1. Geometry of the SPR tensile-shear specimen (mm).

### 2.2. 정적 및 피로강도 실험 방법

SPR 접합부의 정적 강도를 측정하기 위한 실험과 피로 강도를 평가하기 위한 실험에는 10ton 용량의 전기 유압식 만능 재료 시험기(Instron 8516)를 사용하였다. 인장-전단 시험편에 다양한 크기의 접합하중을 가한 시험편에 대하여 인장 실험을 한 결과 최대 인장하중 측면에서 21 kN의 접합하중을 가한 시험편이 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서 21 kN의 접합하중으로 인장-전단 시험편을 제작하여 정적강도 평가 및 피로시험을 수행하였다. 피로시험은 응력비 ( $R = P_{min}/P_{max}$ )가 0.1인 정현파형(sine wave form)의 반복하중을 일정하게 가하여 수행하였다.

### 2.3. 인장-전단 시험편에 관한 유한요소해석

SPR 접합부 시험편의 상판, 상판에서 분리된 조각, 하판, 리벳에 관한 접촉 해석을 위하여 3차원 유한요소 모델을 사용하였다. Fig. 2는 SPR 접합부 시험편 중앙 부분의 단면이다. 3차원 디자인 프로그램인 CATIA에서 sketch tracer 기능을 사용하여 실제와 같은 치수의 형상을 표현하였다. 그러나 회전축을 중심으로 완전히 대칭이 아니므로 회전축을 중심으로 양 끝단의 치수를 각각 측정하고 평균값을 계산하여 단면을 완성하였다. 이 단면을 사용하여 SPR 접합부 부분을 축 회전 기능으로 표현하였다. Fig. 3은 해석이 수행된 인장-전단 시험편에 대한 3차원 유한요소해석 모델이다.

본 연구에서는 범용 해석프로그램인 ABAQUS<sup>6)</sup>와 HyperMesh를 연동하여 수행하였다. 전처리 과정은 HyperMesh를 이용하여 전체 모델에 SOLID요소인 C3D6, C3D8 요소를 적용하고 경계조건을 생성하였다. 인장-전단 모델의 절점 수와 요소 수는 각각 57161개와 47576개로 구성되었다. 본 연구에서는 접촉 해석시 발산을 방지하고 수렴성 향상을 위한 Stabilize 기능을 적용하여 정적해석을 수행하였다. 리벳과 판재 사이의 마찰계수는 0.2, 판재 사이의 마찰계수는 0.15로 설정하였다<sup>7)</sup>. 하중은 상판에 작용하도록 하고 하판은 고정하도록 설정하였다.

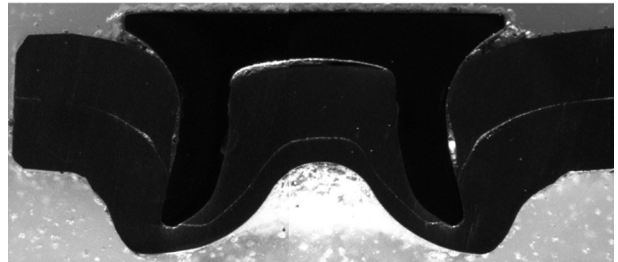


Fig. 2. Cross section of the SPR joint.

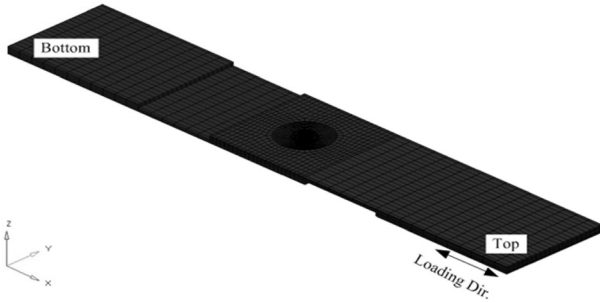


Fig. 3. 3-D FEA models of SPR joint.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. 인장-전단 접합부의 정적강도

SPR 접합부의 인장-전단 시험편을 이용한 접합강도는 판의 두께, 리벳의 직경, 다이 등의 치수와 실제 시험편 제작 시 펀치의 작용하중의 크기에 따라 변한다. 본 연구에서는 상, 하판의 두께가 각각 1.5 mm인 판재와 직경 5.0 mm의 리벳을 사용하였다. 인장-전단 형상의 시험편을 기준으로 인장강도 측면에서 최적의 펀치 작용하중을 결정하기 위해 펀치하중을 변화시키면서 각각의 시험편에 대한 인장실험을 수행하였다.

Fig. 4는 각각의 인장-전단 시험편의 펀치작용하중에 대한 최대 인장하중을 나타낸 것이다. 펀치 작용하중이 20 kN까지는 접합이 충분히 이루어지지 않았기 때문에 21 kN이상의 시험편에 비하여 최대 접합하중이 낮게 측정된 것으로 판단된다. 정해진 판 두께와 리벳의 직경에 대하여 펀치 작용하중이 21 kN이상으로 증가할수록 최대 인장강도가 감소하는 경향으로 나타나기 때문에 본 시험편에 대한 최적의 펀치 작용하중은

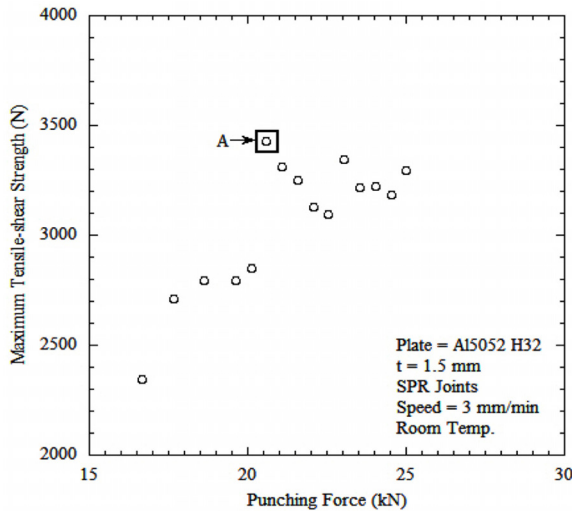


Fig. 4. Punching force against maximum tensile-shear strength for SPR specimens.

21 kN으로 결정하였다. 그러므로 정적 강도 및 피로 실험을 위한 SPR 시험편은 모두 21 kN의 펀치하중으로 제작하였다.

#### 3.2. 인장-전단 접합부의 피로강도

접합 하중 21 kN으로 제작된 인장-전단 피로시험편에 대하여 응력비 0.1로 피로시험을 수행하였다. Fig. 5는 피로 시험의 파단 형태로 정적강도 평가에서 나타난 파단 형태인 리베팅 부분에서의 상·하판이 심하게 소성 변형하여 분리되는 형태와는 달리 대부분 리베팅 주위의 알루미늄 판재에서 균열이 발생되고 전파되는 관통파단의 형태가 되었다. Fig. 5(a)는 인장-전단 피로 시험의 고하중 구간 ( $P = 1273.8 < P_{amp} < P = 1420.4$  N)의 시험 결과를 대표하는 그림으로 하중진폭( $P_{amp}$ )이 1389.6 N인 시험편이다. 이는 SPR 접합부에서 일반적으로 발생하는 눈썹모양 형태의 균열이다<sup>8)</sup>. 10만회 이하의 저주기 피로 영역에서는 균열의 발생이 관찰되지 않고 분리 파단의 형태가 관찰되었다. 10만회 이상에 대한 고하중 구간의 피로 파손에서는 리베팅 주변에서 상판과 하판이 접촉하는 부분 중 상판의 아랫면에서 균열이 발생되어 관통파단이 되었다. 그리고 Fig. 5(b)는 저하중 구간( $P = 1003.6 < P_{amp} < P = 1188.8$  N)의 시험 결과를 대표하는 그림으로 하중진폭( $P_{amp}$ )이 1003.6 N인 시험편이다. 대부분의 저하중 구간의 시험은 리베팅 부분 중 리벳의 꼬리 부분과 하판의 버튼 안쪽 부분에서 발생하는 fretting으로 인해 하판에서의 균열이 발생하여 관통파단이 되었다.

Fig. 6은 하중 진폭( $P_{amp}$ )과 수명(N)과의 관계를 각각 나타내었다. 피로 파단은 상판 또는 하판에서 균열이 발생한 후 상판 또는 하판이 파단 되어 분리가 일어날 때를 기준으로 설정하였다. 피로시험 결과 수명이 100만회일 때를 기준으로 피로한도 하중진폭은 1150 N이며 정적 강도( $P = 3430$  N)의 약 34%이다. SPR 접합 공

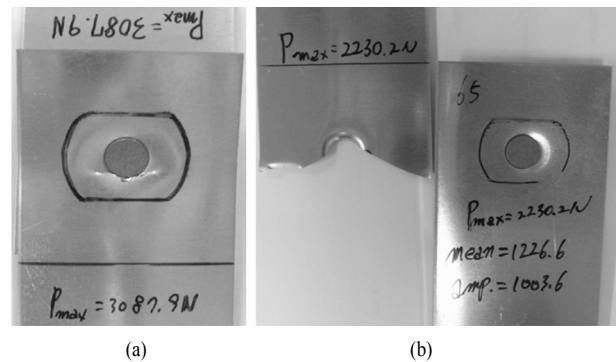


Fig. 5. Fatigue fractured specimens.

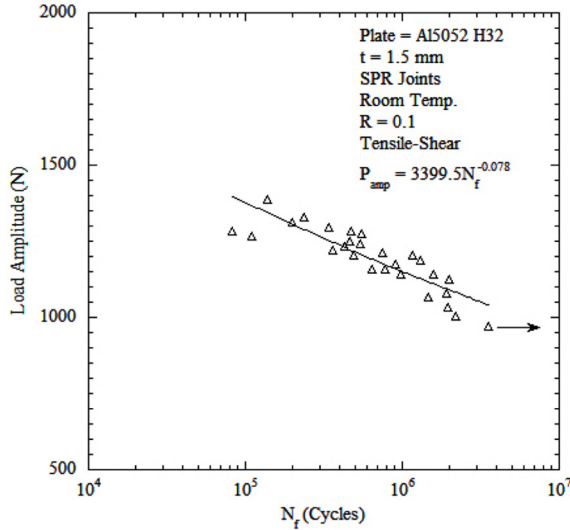


Fig. 6. Load amplitude against number of failure cycles for SPR joints.

법과 함께 이중재 접합에 적용되는 기계적 프레스 접합법(clinch)을 적용하여 Al-5052 인장-전단 시험편에 대한 피로시험 결과 수명이 100만회일 때를 기준으로 피로한도 진폭하중은 17.5 N이며 정적 강도( $P_{max} = 1040$  N)의 1.7% 수준이었다<sup>9)</sup>. 따라서 기계적 접합 방식에 비해 SPR 접합 방식이 정적 강도에 대한 피로한도 하중진폭의 비율을 기준으로 약 20배 이상 증가 하는 것을 확인 할 수 있다. 즉 기계적 접합법에 비하여 피로강도가 대단히 향상되는 것을 입증하고 있다. 그리고 상판은 알루미늄으로 하고 하판은 강판으로 SPR 접합한 시험편의 피로시험 결과 수명이 100만회일 때를 기준으로 피로한도 진폭하중은 약 1.6 kN이며 정적 강도( $P_{max} = 4071$  N)의 40% 수준이었다<sup>10)</sup>. 이는 알루미늄 하판을 강도가 높은 강판으로 대체함으로써 최대 정적 강도에 대한 피로강도의 비가 향상되는 것을 암시한다. SPR 접합부에 대한 하중진폭( $P_{amp}$ )과 반복수( $N$ )와의 관계는  $P_{amp} = 3395.5 \times N_f^{-0.078}$  으로 나타났다.

### 3.3. 인장-전단 접합부의 구조해석

연구에서는 인장-전단 시험편에 관하여 실제 실험에 적용한 최대 하중에 해당하는 하중 2161.5 N ~ 2950.7 N의 범위가 작용할 때에 대한 구조해석을 수행하여 최대 von Mises 응력 분포를 분석하였다.

Fig. 7은 인장-전단 시험편에 2652.8 N의 하중 작용 시 구조해석 결과로서 접합부의 위치에서의 von Mises 응력분포를 나타낸 결과이다. 하중 2652.8 N이 작용할 때 최대응력은 328.6 MPa로 나타났다. 최대 응력의 위치는 리벳 머리의 아랫면과 상판 안쪽의 윗면에서 접

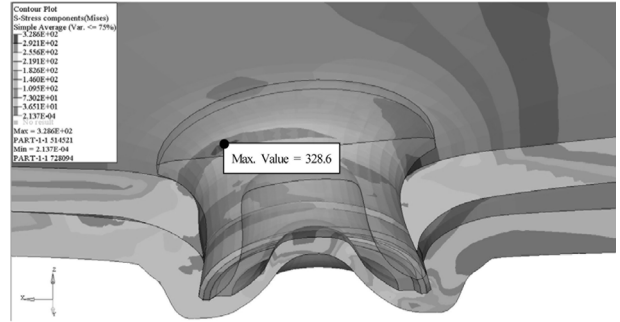


Fig. 7. Maximum von Mises stress of SPR joint for  $1.0 \times 10^6$  fatigue life.

촉을 하는 부분에서 발생하였다. 이때 최대응력은 인장강도 251.7 MPa를 초과하게 된다. 이와 같은 이유 중 하나로 기계적 접합시에 소성변형으로 인해 압축잔류응력과 같은 추가적인 강화효과로 인해 본 접합부의 피로 강도가 증가되었을 것으로 판단된다. 이에 관한 세밀한 추가적인 분석이 필요하다.

Fig. 8은 SPR 시험편 접합부의 최대 von Mises 응력( $\sigma_{eq}$ )과 피로 수명과의 관계를 나타낸다. 그리고 동일한 알루미늄 5052 재질에 대하여 기계적 프레스 접합부(clinch)에 관한 해석한 결과<sup>11)</sup>를 비교하였다. 이를 통하여 SPR 시험편 접합부에 대하여  $\sigma_{eq} = 514 \times N_f^{-0.033}$  과 같은 관계식을 도출하였다. 피로 수명 100만회에 해당하는 하중이 작용할때 SPR 접합부는 325.8 MPa의 응력이 작용하고 기계적 프레스 접합부는 22.7 MPa의 응력이 작용한다. 따라서 기계적 프레스 접합부에 비하여 SPR 접합부가 대단히 높은 피로강도를 갖는 것을 확인할 수 있다.

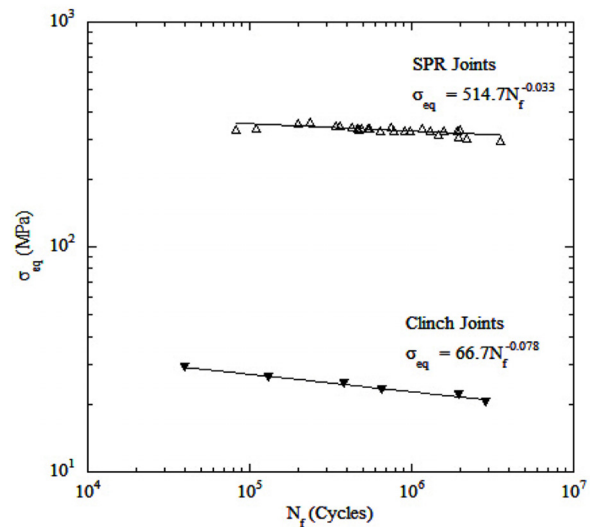


Fig. 8. Equivalent stress amplitude against fatigue test lives for clinch<sup>10)</sup> and SPR joints.

### 3.4. 인장-전단 접합부의 파면 분석

Fig. 9의 빗금친 부분은 저하중 구간에서 fretting이 발생하는 위치 중에서 균열의 생성에 크게 작용하는 부분이다. 저하중 구간의 시험편에서는 리벳과 하판의 버튼 부분의 fretting에 의해 하판의 버튼 안쪽부분에서부터 균열이 생성된다. 그리고 이 미세한 균열에 응력이 집중되어 균열이 전파된 후 관통파단에 이르는 것으로 판단된다. Fig. 10(a)는 저하중 구간에서 파단된 시험편을 아랫면에서 관찰한 것이다. Fig. 10(b)의 (1)은 fretting에 의해 생성된 균열 중 하나이다. 이는 미세한 균열이 성장하는 과정에서 하중을 지지하는 구조가 변함에 따라 응력이 집중되는 부분이 바뀌기 때문에 균열이 더 이상 성장되지 못한 상태로 존재하는 것으로 판단된다. 리벳과 알루미늄 사이의 fretting으로 인해 생성된 균열이 버튼의 바깥 부분으로 진행되는 과정에서 Fig. 10(b)의 (2)와 같이 국부적으로 지지하던 부분은 층상분리가 일어난 것으로 판단된다.

Fig. 11의 빗금친 부분은 고하중 구간에서 fretting이 발생하는 위치 중에서 균열의 발생에 크게 작용하는 부분이다. 고하중 구간의 시험편에서는 리벳 주위

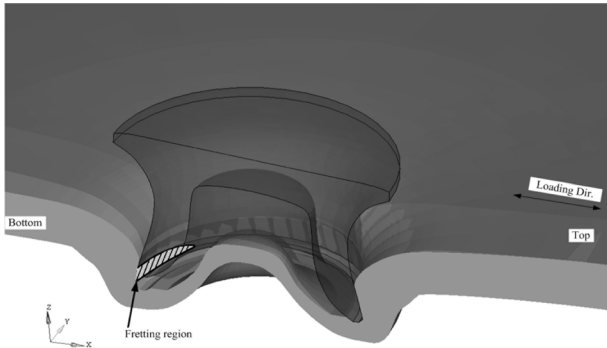


Fig. 9. Fretting configuration for SPR joint under low-loading condition.

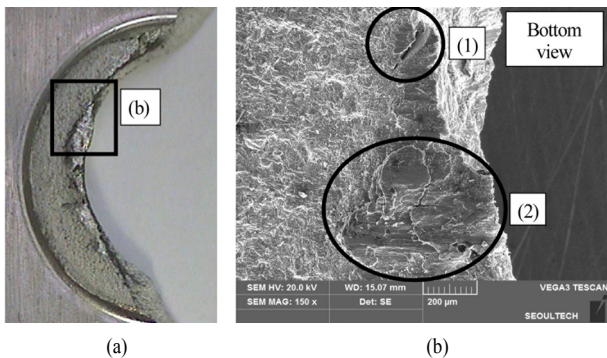


Fig. 10. Bottom view of fracture surface about tensile-shear experiment specimen under low-loading condition ( $P_{max} = 2230.2 \text{ N}$ ).

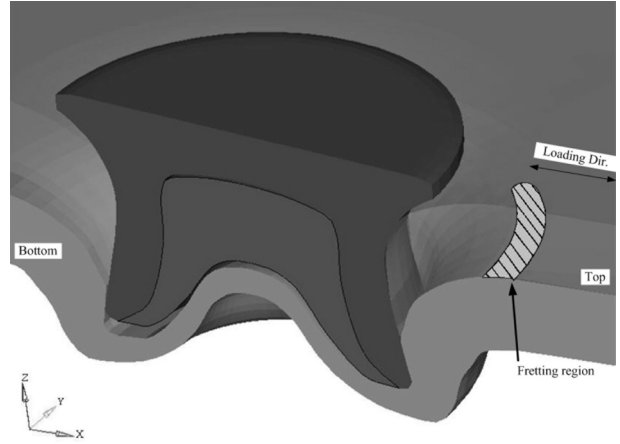


Fig. 11. Fretting configuration for SPR joint under high-loading condition.

중에서 상판의 아랫면과 하판의 윗면이 서로 맞닿는 부분에서 fretting이 발생하여 상판의 아랫면에서 균열이 생성된다. 그리고 이 미세한 균열에 응력이 집중되어 균열이 전파된 후 관통파단에 이르는 것으로 판단된다.

Fig. 12(a)는 고하중 구간의 파단된 시험편을 측면에서 관찰한 것이다. Fig. 12(b)의 (1)은 상판의 아랫면과 하판의 윗면에서 fretting이 일어나 초기에 생성된 균열이다. 초기에 생성된 미세 균열이 성장함으로써 리벳 부분에서 하중을 지지하는 구조가 미세하게 바뀌게 되어 응력이 집중되는 곳이 바뀌게 된다. 그렇기 때문에 파단면 주위의 일부 미세 균열은 성장되지 못하고 다양한 크기로 존재하게 된다. fretting이 발생하는 면뿐만 아니라 리벳 부분 중에서 리벳의 옆면에 지지되는 상판의 뾰족한 부분에 응력이 집중되어 균열이 발생하였다. 그러나 상판과 하판의 fretting에 의해 생성된 균열에 집중된 응력이 균열의 성장에 더 큰 영향을 주었기 때문에 fretting이 발생한 곳에서 파단이 진행된 것으로 사료된다.

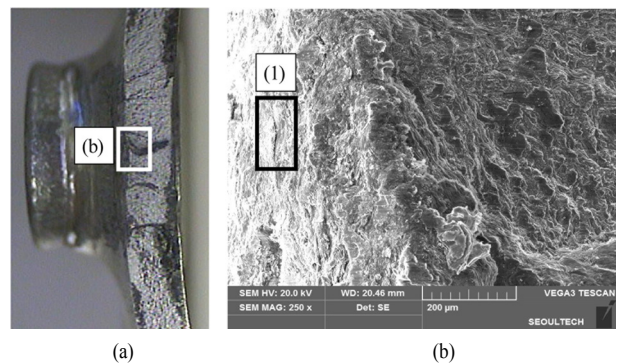


Fig. 12. Side view of fracture surface about tensile-shear mode specimen under high-loading condition ( $P_{max} = 2882.0 \text{ N}$ ).

#### 4. 결론

연구에서는 SPR 접합부의 제작 시에 요구되는 최적의 작용 하중을 결정하고 신뢰성 확보 차원에서 접합부의 피로 강도를 평가하기 위하여 두께 1.5 mm의 Al-5052 판재를 적용하여 인장-전단 시험편을 사용하여 정적 인장 실험과 피로 실험 및 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 상·하판을 SPR 접합법으로 접합시 인장-전단 시험편의 인장강도 측면에서 최적의 접합하중이 21 kN에서 최대 인장 강도는 3430 N으로 나타났으며 리베팅부의 상판과 하판이 분리파괴의 형태를 보였다.

2) 하중진폭( $P_{amp}$ )과 반복수(N)와의 관계는  $P_{amp} = 3995.5 \times N_f^{-0.078}$ 으로 나타났으며 최대 von Mises 응력( $\sigma_{eq}$ )과 반복수와의 관계는  $\sigma_{eq} = 514.7 \times N_f^{-0.033}$ 으로 나타났다.

3) 피로 한도에 해당하는 진폭하중은 수명이 100만 회 기준으로 1150 N이며 정적 강도(= 3430 N)의 약 34%이다.

4) 인장-전단 피로 시험편에 대하여 저하중 구간에서는 리벳과 하판의 버튼 안쪽 부분에서 fretting이 발생하여 균열이 발생되었다. 반면, 고하중 구간에서는 리베팅 부분에서 상판의 아랫면과 하판의 윗면에서 fretting에 의해서 균열이 발생하여 관통파괴가 되는 것으로 판단된다.

**감사의 글:** 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

- 1) I. M. Park and N. J. Kim, "Developments in Metal Matrix for Automotive Parts", The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 16, No. 4, pp. 23~31, 1994.
- 2) C. Westerberg, "Finite Element Simulation of Crash Testing of Self-Piercing Rivet Joints, Peel Specimen", Master's Thesis, LUND University, Sweden, pp. 7~11, 2002.
- 3) X. Sun and M. A. Khaleel, "Performance Optimization of Self-Piercing Rivets through Analytical Rivet Strength Estimation", J of Manufacturing Processes, Vol. 7, No. 1, pp. 83~93, 2005.
- 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) KS B 0851, "Specimen Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot and Embossed Projection Welded Joints", 2006.
- 6) ABAQUS User Manual Version 6.10.
- 7) R. Porcaro, A. G. Hanssen, M. Langseth and A. Aalberg, "The Behaviour of a Self-Piercing Riveted Connection under Quasi-Static Loading Conditions", International Journal of Solids and Structures, Vol. 43, pp. 5110~5131, 2006.
- 8) X. Sun, E. V. Stephens and M. A. Khaleel, "Fatigue Behaviors of Self-Piercing Rivets Joining Similar and Dissimilar Sheet Metals", International Journal of Fatigue, Vol. 29, No.2, pp. 370~386, 2007.
- 9) D. H. Lim, "An Experimental Study on the Fatigue Strength Evaluation of Mechanical Press Joints", Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Korea, pp. 30~43, 2001.
- 10) Z. Huang, Z. Zhou and W. Huang, "Mechanical Behavior of Self-Piercing Riveting Joining Dissimilar Sheets", Manufacturing Science and Engineering I, Advanced Materials Research Vol. 97~101, pp. 3932~3935, 2010.
- 11) D. H. Lim, B. W. Lee, H. H. Rhyu and H. K. Kim, "An Experimental Study on the Strength Evaluation of Al-5052 Tensile-Shear Specimens Using a Mechanical Press Joining Method", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 12, No. 1, pp. 58~64, 2003.