

곡률을 갖는 셀프-피어싱 리벳 접합시편의 피로수명 평가

김민건*, 조석수+, 김동열**

(논문접수일 2009. 09. 07, 심사완료일 2009. 12. 18)

Assessment of Fatigue Life on Curved Self-Piercing Rivet Joint Specimen

Min-gun Kim*, Seok-Swoo Cho⁺, Dong-youl Kim⁺⁺

Abstract

One of methods that accomplish fuel-efficient vehicle is to reduce the overall vehicle weight by using aluminum structure typically for cross members, rails and panels in body and chassis. For aluminum structures, the use of Self Piercing Rivet (SPR) is a relatively new joining technique in automotive manufacture. To predict SPR fatigue life, fatigue behavior of SPR connections needs to be investigated experimentally and numerically. Tests and simulations on lap-shear specimen with various material combinations are performed to obtain the joining strength and the fatigue life of SPR connections. A Finite element model of the SPR specimen is developed by using a FEMFAT SPR pre-processor. The fatigue lives of SPR specimens with the curvature are predicted using a FEMFAT 4.4e based on the liner finite element analysis.

Key Words : Self-Piercing Rivet(셀프 피어싱 리벳), Curved Plate(곡면판재), Fatigue Life(피로수명), FEM Fatigue Analysis(유한요소 피로해석), Fatigue Test(피로시험), Car Body(차체)

1. 서론

지구환경보전, 에너지 절약 등의 관점에서 각종 환경관련 법이 강화되고 있기 때문에, 선진 차량 제조사에서는 차량의 중량을 효율적으로 줄이기 위해 노력하고 있다. 이를 위해 노력하고 있다. 이를 위해 기존의 차체재료를 알루미늄으로

대체하고 있는 실정이며, 이미 아우디(Audi)의 A8에서는 알루미늄 스페이스 프레임을 대체품으로 사용함으로써 차체 중량의 약 10%를 경량화 하였다. 그러나 알루미늄은 높은 전기전도도와 산화피막으로 인해 기존의 점용접을 그대로 적용할 수 없다는 단점이 있다. 그래서 아우디의 경우, 알루미늄 재료를 결합하기 위해 점용접을 대체하는 수단으로 셀

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 (kmg@kangwon.ac.kr)

주소: 200-701 춘천시 강원대학길

+ 강원대학교 기계자동차공학부

++ 강원대학교 메카트로닉스공학부

프-피어싱 리벳(Self-Piercing Rivet ; SPR)과 본딩이 주로 사용되고 있다.^(1,2)

지금까지 자동차의 차체구조물 결합방법으로 점용접과 아크용접 등이 주로 사용되어 왔다. 실제로 승용차 한 대의 조립에는 차종에 따라 차이는 있지만, 보통 4,000점 정도의 점용접이 적용된다. 기존의 점용접은 그간의 기술축적으로 인해 어느 정도의 신뢰성이 확보되었지만, 하나의 결합을 이루기 위해서는 20 KW가 넘는 전력을 필요로 한다.^(3,4) 또한 작업환경의 안전성을 해치는 유해가스 및 아크의 발생이 필연적이며, 다공성으로 인해 강도적 측면에서 문제가 될 수 있다. 이에 비해 높은 에너지 효율, 이종 재질간의 용이한 결합, 결합부위의 열적 손상의 무결, 그리고 친환경적 결합 방법 등의 장점을 지니고 있는 SPR접합법이 향후 다양한 재질의 접합방법으로 광범위하게 활용될 것으로 예상된다.

일반 리벳의 경우에는 리벳구멍을 뚫는 선공정이 필요하지만, SPR은 이러한 전처리 공정이 필요 없다. 리벳은 벨트로 자동으로 공급되어 공정의 자동화가 용이하고, 접합시간이 상당히 짧은 것 또한 특징이다. 이런 공정상의 특징으로 인하여, 점용접이 어렵거나 불가능한 재료의 접합에 매우 요긴하게 사용될 수 있다. 특히 차세대 자동차로 최근 관심이 집중되고 있는 연료전지 자동차, 하이브리드 자동차 등의 개발에 일조할 것으로 기대된다.

국내에서의 자동차 차체 접합기술에 관한 연구를 살펴보면, 대부분 점용접과 접착 그리고 일반리벳에 관한 연구 혹은 기계적 프레스 접합(Clinching)에 관한 연구가 대부분이다.⁽⁶⁻¹¹⁾ 아직까지 SPR결합의 구조강도 및 피로내구성 평가에 대한 논문^(12,13)은 많지 않다. 국외에서는 이미 SPR접합이 적용된 승용차가 출시되고 있으며, SPR 접합과 기존 점용접의 강도비교를 위한 실험적 연구⁽⁵⁾와 SPR공정개선을 위한 연구가 진행되고 있다. 또한, 최근 전산해석을 이용한 다양한 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

따라서 본 연구에서는, 자동차 차체의 경량화에 대비하여 실험적 방법 및 해석적 방법을 이용하여, SPR접합부의 피로 강도를 평가하여 비교 검토함으로써 사용된 수치 모델의 타당성을 검증하려고 한다. 그리고 차체의 대부분이 곡면판재를 사용하기 때문에, 평판에서의 SPR접합보다는 곡면 부위에서 SPR접합을 다수 수행하게 된다. 따라서 곡률을 가진 SPR접합시편을 연구대상으로 하여, 검증된 수치 모델을 적용하여 전산해석을 수행하여 피로수명을 예측평가 하려고 한다.

2. 시험재료 및 시험방법

연구에 사용된 시험편은 점용접이나 기타 접합부의 기본적인 강도를 측정하는데 일반적으로 사용되는 겹치기 이음 시험편이다. 시험편의 제작 형태를 Fig. 1에 나타내었다.

시편 재질의 기계적 성질을 Table 1에 제시했다. SPR접합 시편은 다양한 차체재료의 조합으로 동일재료와 이종재료로 구분하였으며, 각 시편 조합은 Table 2와 같이 판재 재질과 두께에 따라서 Series A, B, C, D, E로 구분하였다. 삽입된 리벳은 Series A 시험편의 경우는 알루미늄용을, Series

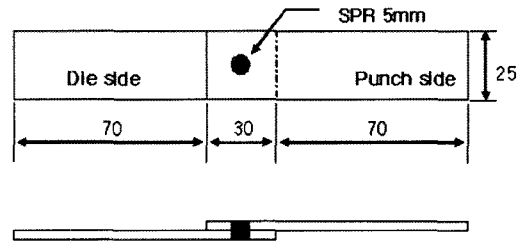


Fig. 1 Geometry of lap-shear specimen

Table 1 Mechanical properties of materials

| Material | Material properties | | | |
|----------|---------------------|---------------------|---------|--------------|
| | σ_{YS} (MPa) | σ_{TS} (MPa) | E (GPa) | δ (%) |
| 5J32 | 130 | 264 | 74 | 33 |
| SPC | 160 | 340 | 210 | 40 |
| SPCC | 143 | 394 | 210 | 38 |
| SAPH | 284 | 480 | 206 | 33 |

σ_{YS} : Yield Strength E : Young's modulus
 σ_{TS} : Ultimate Strength δ : Elongation

Table 2 Combinations of specimens

| Series | Material | | Sheet thickness(mm) | | Remark |
|--------|----------|------|---------------------|-----|-----------|
| | Punch | Die | Punch | Die | |
| A | 5J32 | 5J32 | 1.0 | 1.0 | Same |
| B | 5J32 | SPC | 1.0 | 1.0 | Different |
| C | 5J32 | SPCC | 1.0 | 0.8 | Different |
| D | SPCC | 5J32 | 0.8 | 1.0 | Different |
| E | 5J32 | SAPH | 1.0 | 2.3 | Different |

B, C, D, E는 합금강용을 사용하였다.

피로시험은 유압 서보식 피로 시험기를 사용하여 실온 대기 중에서 응력비 0.1, 10Hz로 수행하였으며, 시험조건은 Table 3에 나타내었다. 각 Series의 피로시험하중은 각 Series의 인장시험⁽¹⁴⁾으로부터 제시된 최대하중의 30% 정도 수준의 하중을 적용하였다.

Table 3 Load conditions of fatigue test

| Series | Meam Load (N) | Amplitude (N) | Fatigue Life (Cycle) |
|--------|---------------|---------------|----------------------|
| A | 1 | 539 | 842,346 |
| | 2 | 647 | 270,286 |
| B | 1 | 598 | 1,123,417 |
| | 2 | 676 | 326,868 |
| | 3 | 755 | 206,932 |
| C | 1 | 645 | 173,117 |
| | 2 | 755 | 72,083 |
| D | 676 | 549 | 739,703 |
| E | 1078 | 882 | 72,545 |

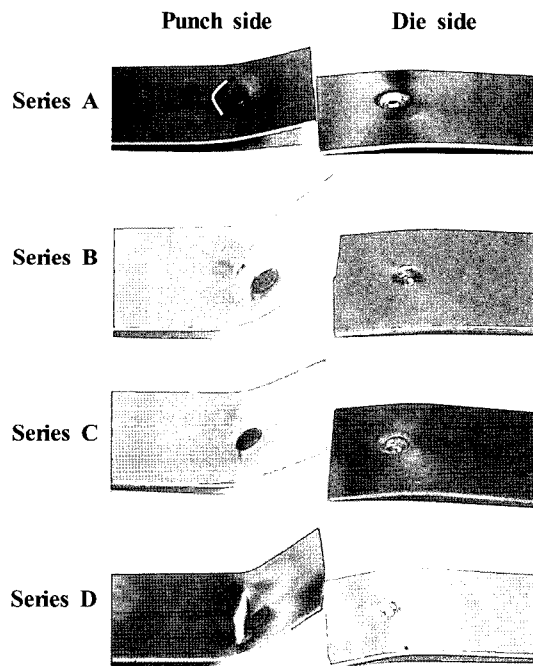


Fig. 2 Tested lap-joint specimens indicating the mode of failed rivet(fatigue test)

3. 결과 및 고찰

3.1 SPR 겹치기 이음 시험편에 대한 피로시험 결과

시험편의 피로파단 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

저자는 선행 연구⁽¹³⁾에서, SPR 겹치기 이음 시험편에 대한 인장시험을 수행하여 상판(Punch side)에서만 굽힘 현상이 발생함을 보고하였다. 그러나 본 피로시험에서는, 인장시험의 경우와는 달리 상판과 하판(Die side) 모두에서 굽힘 현상이 나타났다. 이 사실은 피로하중 하에서 하판도 상당부분 하중을 지탱하고 있어서, 하판의 재질과 두께에 따라서 피로수명이 달라질 수 있음을 시사하고 있다. 그리고 SPR 접합부를 기점으로 하중방향과 수직으로 피로균열이 발생했다. 대부분 리벳의 가장자리에서 균열이 생성되어 전파하는 현상을 보였다. 또한, Series A, B, C, D 시험편의 경우에는 인장시험과 동일하게 하판에 박힌 리벳이 빠진 형상이었지만, E 시험편은 리벳이 하판에 박힌 채로 상판이 찢겨져 나가는 양상을 보였다.

피로시험의 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 그림으로부터, 상판과 하판의 재료 및 두께 조합이 SPR 접합의 피로수명에 영향을 미침을 알 수 있다.

3.2 해석적 접근

3.2.1 1차원 체결요소 사용의 문제점

일반적으로 자동차 차체 점용접부의 구조강도 및 피로강도평가를 위해 1차원 체결 요소를 많이 사용한다. 그렇지만, 이러한 1차원 체결 요소의 사용은 Fig. 4와 같은 문제점들을 야기한다. 1차원 beam 또는 rigid 요소로 연결된 shell 요소

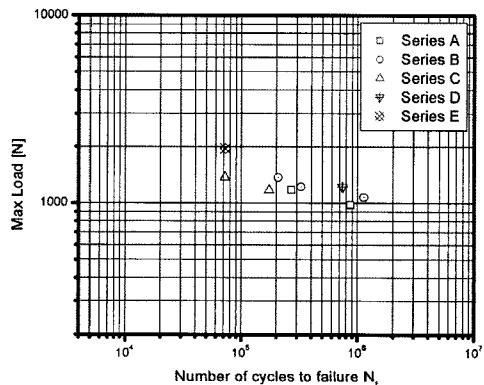
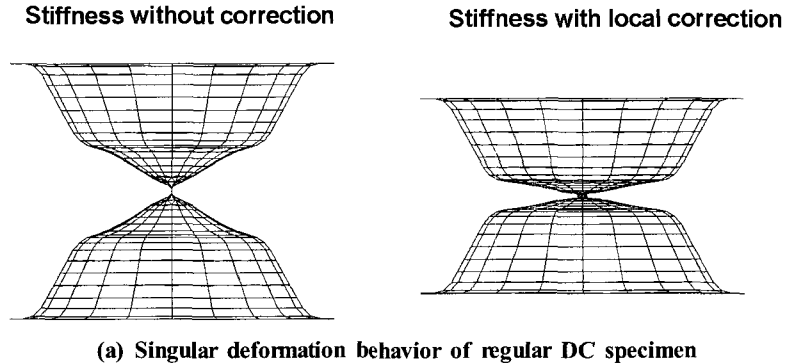
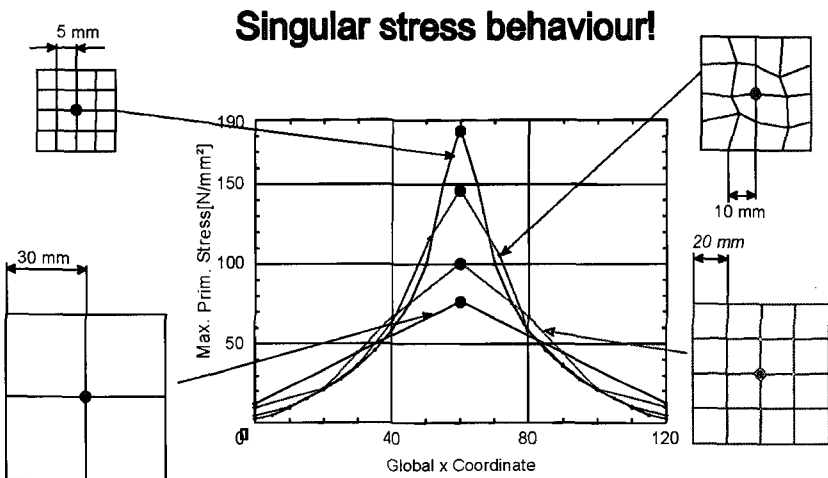


Fig. 3 Plot of load vs. failure cycle for fatigue test



(a) Singular deformation behavior of regular DC specimen



(b) Stress results in the joint area before preprocessing for different FE-mesh size and quality

Fig. 4 Influence of one-dimensional beam or rigid elements

의 크기와 형상의 정도가 국부적인 변위 거동에 영향을 미친다. 또한, 점용접부의 정확한 위치 지정 및 수정을 위해서는 각각의 판재 점용접부에 절점이 위치해 있어야만 한다. 그리고 1차원 체결요소는 양쪽 판재 사이에서의 하중 유동에 관한 정보만을 제공할 뿐, 점용접에 의한 용접하중에 관한 정보는 제공하지 않는다. 그렇기 때문에 실제적인 균열발생의 잠재적 위치임에도 불구하고 정확한 해석을 수행할 수 없다. 이런 문제점들은 점상결합이기 때문에 SPR접합의 경우도 마찬가지이다.

3.2.2 곡률을 가진 SPR 겹치기 이음 시험편의 유한 요소 모델링

해석에 사용한 모델의 형상은 Fig. 5에 나타내었다. 곡률을

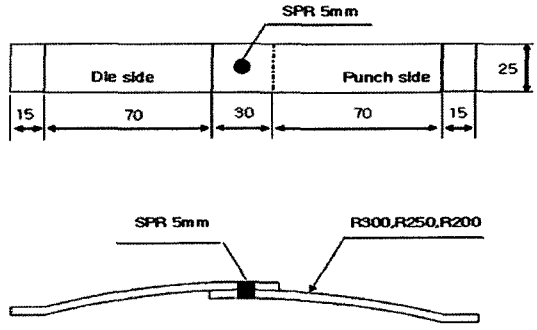


Fig. 5 Geometry of specimen with curvature

가진 SPR접합 시험편의 재료의 조합은 앞서 제시한 Table 2와 같으며, 다만 판재의 곡률반경만 300, 250, 200, ∞의 변화를 주었다.

SPR 접합과정에서 삽입되는 리벳은 냉간 소성가공공역을 발생시켜 리벳주변 모재의 기계적 성질을 변화시킨다. 그러므로 SPR 접합시편은 비균일한 기계적 특성을 보이게 된다. 따라서 SPR 접합부의 역학적 거동을 실제적으로 구현하기 위해서는 이러한 공정상의 특성들이 유한요소모델에 반영되어야 한다. 지금까지의 점용접 시편 혹은 자동차 차체해석 모델의 경우, 단순한 리지드 링커 혹은 전체적인 솔리드 모델링을 수행함으로써 점용접 접합부를 표현하였다. 그렇지만 비교적 규모가 큰 자동차 차체 혹은 실제적인 구조물을 해석할 경우 이와 같은 유한요소모델의 사용은 비효율적이며, 모델링 시간 및 해석 시간을 많이 소비하게 된다. 따라서 보다 간결하면서 실제공정상의 특성들이 반영된 유한요소모델의 사용이 요구된다.

본 연구에서는, SPR 접합공정의 특성을 반영하고 1차원

체결요소를 사용함으로써 야기되는 문제점들을 보완하기 위하여, 피로해석 전용 솔루션인 FEMFAT⁽¹⁴⁾에서 제안하는 모델링 가이드라인에 따라 유한요소모델을 생성한 후, FEMFAT SPR 전처리 과정을 수행하여 최종적으로 해석에 이용되는 SPR접합 시편의 유한요소모델을 생성하였다.

FEMFAT으로 해석모델을 생성하게 되면 Fig. 6과 같이 SPR접합부에서 국부적으로 조밀한 요소와 절점들이 새롭게 생성된다. 또한, MAT_1 영역의 탄성계수는 모재 탄성계수의 40배, MAT_2 영역은 6배가 적용되며, 빔(Beam) 요소의 탄성계수는 모재의 탄성계수와 판재의 두께에 따라서 보간법에 의해 구해진다. 해석을 위해 생성된 모델의 종류와 판재두께들을 Table 4에 나타내었다.

FEMFAT SPR 전처리 과정을 위해서는 다음과 같은 추가적인 작업수행이 요구된다.

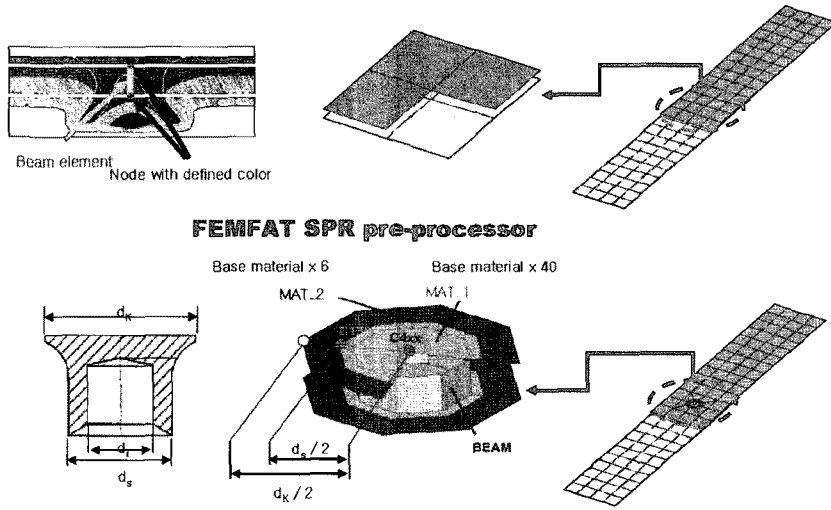


Fig. 6 Schematic of FEMFAT modeling guideline

Table 4 Young's modulus of SPR lap-shear specimens

| Series | Material | | Young's Modulus [MPa] | | | | |
|--------|------------|----------|-----------------------|----------|---------|---------|----------|
| | Punch-side | Die-side | Punch-side | Die-side | MAT 1 | MAT 2 | Beam MAT |
| A | 5J32 | 5J32 | 74000 | 74000 | 2960000 | 444000 | 6108.92 |
| B | 5J32 | SPC | 74000 | 210000 | 2960000 | 444000 | 7520.17 |
| C | 5J32 | SPCC | 74000 | 210000 | 2960000 | 444000 | 5975.73 |
| D | SPCC | 5J32 | 210000 | 74000 | 8400000 | 1260000 | 5975.73 |
| E | 5J32 | SAPH | 74000 | 206000 | 2960000 | 444000 | 23293.20 |
| F | SPC | SAPH | 210000 | 206000 | 8400000 | 1260000 | 22057.3 |

1) 유한요소 모델의 수정

FEMFAT 가이드 라인에 따라 유한요소 모델 생성 후, 정확한 SPR접합부 위치의 정의 및 수정을 위한 전처리 과정을 수행하면 자동적으로 체결요소 주변의 요소들이 지워지고 새로운 요소들이 생성된다.

2) 강성의 수정

1차원 체결 요소로 연결된 셸(Shell) 요소의 강성은 비정상적인 거동을 보이기 때문에, 체결요소 주변의 셸요소의 강성이 자동적으로 수정된다.

3) 유한요소 해석

일반적인 선형해석을 수행한다. 이 단계는 다음의 피로수명계산 단계에서 입력될 응력분포를 생성하기 위한 것이다.

성치를 입력하여 해석을 수행하며, 제작공정 상의 여러 가지 영향인자들을 적용하여 수치모델의 요소, 절점에 대한 피로수명을 예측한다. 따라서 본 연구에서는 피로내구해석 전용 프로그램인 FEMFAT을 이용하여, 다양한 재료(동종 및 이종재료)로 구성된 SPR접합시편의 피로수명을 예측하였다.

100N의 단위하중을 적용하여 정적 응력해석을 수행한 결과, Fig. 7과 같이 MAT 1와 MAT 2 영역 사이에서 최대 응력이 나타났다. 이 결과를 FEMFAT으로 불러들여 내구해석을 수행하게 된다. 내구성평가에 사용한 하중은 인장시험에서 구한 최대인장하중의 30% 수준의 하중을 적용하였다. 또한 응력비 0.1로 10,000회의 반복수를 적용하여 해석을 수행하였다. 해석 모델에 따른 하중조건을 Table 5에 나타내었다.

3.2.3 곡률을 가진 SPR 겹치기 이음 시험편의 피로 내구 해석

최근, 자동차 및 각종 기계의 내구설계에 전산해석을 이용한 내구강도 해석기법이 활용되고 있다. 실험을 통해 수행해오던 내구해석을 전산해석으로 대체함으로써, 부품의 초기 개발단계부터 경량화 및 고 안전 구조를 실현할 수 있게 되었다.

FEMFAT은 구조물에 대한 FEM 해석에서 산출되는 응력, 변형률, 힘 등을 바탕으로, 정·동하중이력 및 재료의 피로 물

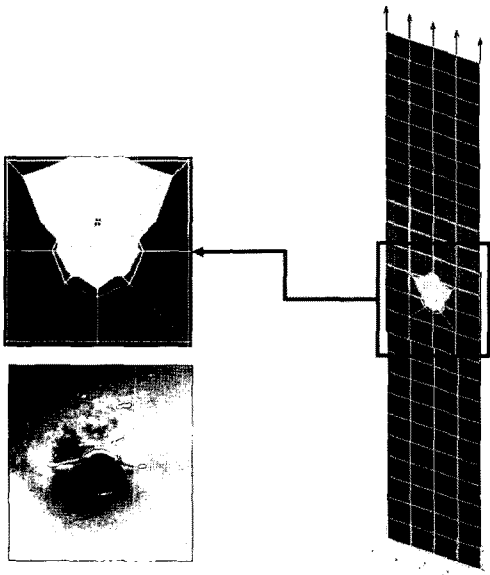


Fig. 7 Von-Mises stress contour of SPR specimen

Table 5 Load conditions of fatigue analysis

| | Amplitude(N) | Mean Load(N) | Stress Ratio |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| Series A | 450 | 550 | 0.1 |
| | 594 | 726 | |
| | 765 | 935 | |
| | 990 | 1,210 | |
| | 1,350 | 1,650 | |
| Series B | 450 | 550 | 0.1 |
| | 495 | 605 | |
| | 585 | 715 | |
| | 675 | 825 | |
| | 765 | 935 | |
| Series C | 360 | 440 | 0.1 |
| | 450 | 550 | |
| | 540 | 660 | |
| | 585 | 715 | |
| Series D | 450 | 550 | 0.1 |
| | 495 | 605 | |
| | 540 | 660 | |
| | 585 | 715 | |
| Series E | 450 | 550 | 0.1 |
| | 675 | 825 | |
| | 900 | 1,100 | |
| | 1,350 | 1,650 | |

FEMFAT을 이용한 피로내구해석 결과, 각 Series에서 나타난 피로손상(Fatigue damage)의 전형적인 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 최대손상은 리벳 주위의 가장자리 재료에 발생하고 있다. 곡률반경에 따른 각 시험편의 피로 수명을 Fig. 9에 나타내었다. 또한 Series B를 일례로 하여, 곡률반경의 변화에 따른 피로수명을 재정리하여 Fig. 10에 나타내었으며, 여기에는 Fig. 3에서 구한 실험 데이터도 비교하여 표기하여 놓았다.

Fig. 9, Fig. 10으로부터, 곡률이 있는 시험편인 Series A, B, C, D의 경우, 상, 하판두께 0.8~1.0mm 범위 내에서 곡률반경이 작아질수록 피로 수명이 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 하판이 2.3mm로 두꺼운 시험편인 Series E의 경우에는, 곡률반경의 변화가 피로 수명에 거의 영향을 미치지 못하였다.

또한 Fig. 9로부터, 피로수명은 하판의 두께가 가장 두꺼운 시험편 E에서 가장 높았으며, 하판두께가 가장 얇은 시험편 C에서 가장 낮게 나타났다. 이 결과는 리벳이 박히는 하판의 두께에 따라서 리벳 주위의 응력분포가 달라지고, 거기에 따른 피로수명의 변화를 시사하고 있다.

Fig. 10으로부터 곡률반경이 무한대인 즉 곧게 펴진 시험편의 경우, 하중의 크기가 1000~2000N에서, FEMFAT을

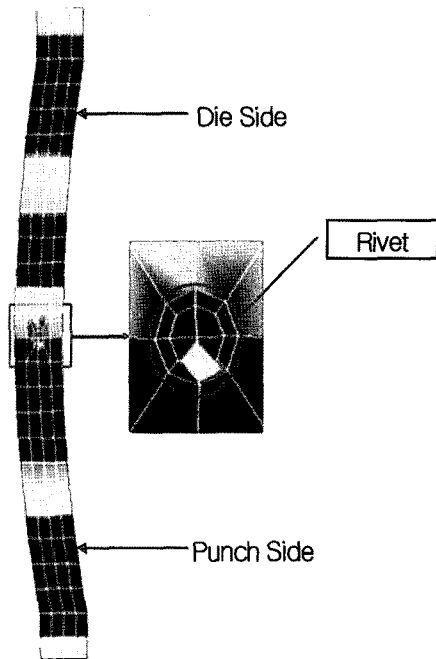


Fig. 8 Max. damage contour of SPR specimen

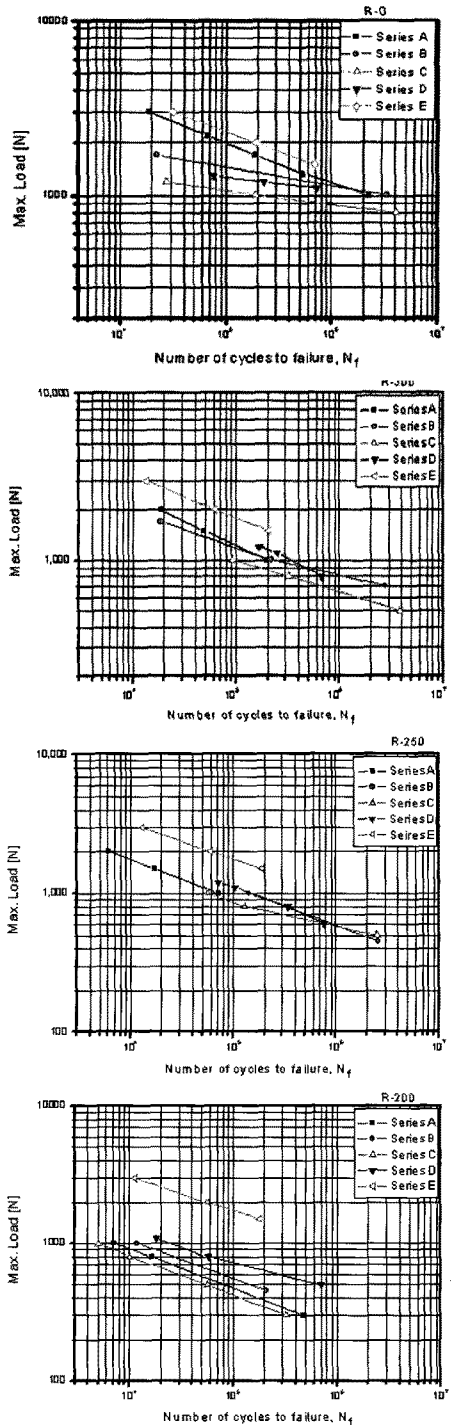


Fig. 9 Simulated fatigue life for each series

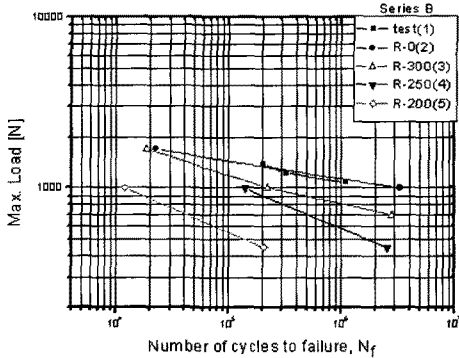


Fig. 10 Fatigue life depending on the change of curvature radius

이용한 전산피로수명해석과 실제 실험결과(Fig. 3)가 서로 유사하게 나타나고 있다. 이 사실은 전산을 이용한 피로해석이 유용한 기법임을 보여주고 있다.

4. 결론

자동차 차체의 경량화의 일환으로 개발된 셀프-피어싱 리벳(SPR)을 대상으로, 실험과 전산해석을 통하여 SPR 접합부의 피로수명에 대한 평가를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전산해석에서 밝혀진 최대응력의 발생위치는 리벳 주위의 가장자리로, 피로시험 후 파단 된 위치와 서로 일치한다.
- (2) 피로수명은 상, 하판두께 0.8~1.0mm 범위 내에서 곡면판재의 곡률반경이 작을수록 감소한다. 또한 곡률반경이 무한대인 시험편의 경우, 하중의 크기가 1000~2000N에서, FEMFAT을 이용한 전산피로해석과 실제 실험결과가 서로 유사하다.
- (3) 재질의 조합은 다르지만, 피로수명은 하판(Die side)의 두께가 가장 두꺼운 Series E에서 가장 크고, 하판의 두께가 가장 얇은 Series C에서 가장 작다.
- (4) 재질의 조합이 서로 같은 시험편인 Series C와 D의 경우, 상판(Punch side) 재질의 정적강도가 크면 피로수명도 크다.
- (5) 이상의 결과로부터, 사용된 수치모델이 차체 SPR 접합부의 피로수명 평가 시 실물실험을 대체할 수 있는 대안이라고 판단되며, 재료의 조합과 두께 변화의 최적화를 통하여 피로수명을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Agrawal, H., Li, W., Bollimunta, S., Potty, K., and Blows, A., 2003, "Fatigue life of Self Pierced Rivets (SPR) in Car Body," *SAE*, Document Number 2003-01-0914.
- (2) Iguchi, H. and Ohmi, Y., 2003, "Joining Technologies for Aluminum Body-Improvement of Self-piercing Riveting," *JSAE*, 20037065.
- (3) Booth, G. S., Olivier, C. A., Westgate, S. A., Liebrecht, F., and Braunling, S., 2000, "Self-Piercing Riveted Joints and Resistance Spot Welded Joints in Steel and Aluminium," *SAE*, Document Number 2000-01-2681.
- (4) Ronald, S., William, G., Hari, A., and Sreenivasa, B., 2003, "Fatigue life Reliability and Robustness of Aluminum Car Body U-Box Structure with Self-Piercing Riveted Joints," *SAE*, Document Number 2003-01-0468.
- (5) Brenner, C. E., Unger, B., Gaier, C., Steinwender, G., and Eichseder, W., 2000, "Fatigue Assessment of Welding Seams and Spot Joints Based on FEA," *SAE*, Document Number 2000-01-0780, Joints Based on FEA, *SAE*, Document Number 2000-01-0780.
- (6) Sohn, I. S. and Bae, D. H., 1999, "Statistical Investigation on Fatigue Life Prediction of the Spot Welded Lap Joint(I)," *Transactions of the KSAE*, Vol. 7, No. 6, pp. 214~221.
- (7) Sohn, I. S. and Bae, D. H., 1999, "Statistical Investigation on Fatigue Life Prediction of the Spot Welded Lap Joint(II): to verify reliability of fatigue strength estimation method," *Transactions of the KSAE*, Vol. 7, No. 7, pp. 242~249.
- (8) Chung, K. and Kim, H., 2001, "A Study on the Fatigue Life Evaluation of Spot Welded Joints under Tensile-Shear Loading," *Journal of the Korea Society for Power System Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 80~88.
- (9) Lee, K. Y., Kim, J. B., Choi, H. S., and Woo, H. P., 1997, "Strength Evaluation of Adhesive Bonded Joint for Light Weight Structure by Single-Lab Joint

- Test,” *Transactions of the KSAE*, Vol. 5, No. 2, pp. 87~93.
- (10) Lee, K. Y., Kim, J. S., Kong, B. S., and Woo, H. P., 1998, “Strength Evaluation of Adhesive Bonded Joint for Car Body,” *Transactions of the KSAE*, Vol. 6, No. 1, pp. 143~150.
- (11) Yu, H. S., Yang, S. M., Kang, H. Y., Kim, H. G., and Kim, K. S., 2008, “Fatigue Life Analysis of Spot Weldment of Cold Rolled and High Strength Steel Using FEM,” *Journal of KSMTE*, Vol. 17 No. 5, pp. 58~63.
- (12) Kim, M. G., Kim, J. H., Lee, K. C., and Yi, W., 2005 November, “Assessment of Structural Stiffness and Fatigue Life on Self-Piercing Rivet of Car Bodies,” *Key Engineering Materials*, Vols. 297~300, pp. 2519~2524.
- (13) Kim, M. G., Lee, K. C., and Lee, B. J., 2004, “Assessment of Structural Stiffness and Fatigue Life in Self-Piercing Rivet Joint of Car Body,” *Transactions of the KSME A*, Vol. 28, No. 8, pp. 1174~1182.
- (14) Steyr-Daimler-Push, 2003, *FEMFAT4.4 User's Manual*, Magna-Steyr, FEMFAT SPOT, Austria.