

차체 셀프-피어싱 리벳 접합의 구조강성 및 피로수명 평가

김민건[†] · 이근찬* · 이병준**

(2004년 1월 19일 접수, 2004년 6월 10일 심사완료)

Assessment of Structural Stiffness and Fatigue Life in Self-Piercing Rivet(SPR) Joint of Car Body

Min-gun Kim, Kun-chan Lee and Byung-jun Lee

Key Words : SPR(셀프-피어싱 리벳), Stiffness(강성), Fatigue Life(피로수명)

Abstract

Recently, Self Piercing Rivet(SPR) has been spotlighted in the automotive industry as a substitutive resort of spot welding and has also been watched by the designer as lightening a car body due to their superior assembly processes. Fatigue behavior of SPR joint needs to be investigated experimentally and numerically to predict its structural stiffness and fatigue life. Testing of lap-shear specimens with various material combinations is performed to obtain the joining strength and the fatigue life of SPR connections. The simulation of SPR lap-shear specimens is also conducted to obtain the structural stiffness of SPR connections under different material combinations. A Finite element model of the SPR lap-shear specimen is developed using a FEMFAT SPR pre-processor. The fatigue life of SPR specimen is predicted using a FEMFAT 4.4e based on the liner finite element analysis.

1. 서 론

최근 자동차 업계에서는 무엇보다 고객의 요구를 최우선으로 고려하여 설계를 행하고 있다. 사용자의 편의성, 안정성, 성능 등의 요구가 점점 까다로워짐에 따라 각종 편의시설 및 안전을 위한 전자제품의 사용비중이 증가하고 있다. Audi, Jaguar의 조사에 따르면 매년 10-20kg 정도의 차량 무게가 각종 전자제품으로 인해 증가하고있다고 한다.

차량 중량증가분의 57%가 차체부분에서 발생하는데, 차체 중량이 증가하게 되면 그에 따라서 엔진출력도 향상되어야 하기 때문에 부수적으로

중량이 더욱 증가하게 된다. 그렇기때문에 차체의 중량을 효율적으로 줄이는 것이 최우선 과제라 할 수 있다. 또한 지구환경보전, 에너지 절약 등의 관점에서 각종 환경관련법, 규제 등이 강화되고 있기 때문에, 선진 차량 제조사에서는 효율적으로 차량의 중량을 줄이기 위해 노력하고 있다. 이처럼 시장의 요구적 측면과 환경적 측면에서 차체의 경량화가 요구되고 있으며, 이를 위해 기존 차체재료를 알루미늄으로 대체하고 있는 실정이다. 이미 Audi의 A8에서는 알루미늄 스페이스 프레임에 대체품으로 사용함으로써 약 200kg, 차체 중량의 약 10% 정도 경량화하였다.

알루미늄은 높은 전기전도도와 산화피막으로 인해 기존의 점용접을 그대로 적용할 수 없다는 단점이 있다. 그래서 Audi A8의 경우, 알루미늄 재료를 결합하기 위해 점용접을 대체하는 수단으로 SPR과 본딩이 주로 사용되었다.

지금까지 자동차의 차체구조물 결합방법으로 점용접과 아크용접 등이 주로 사용되어 왔다. 실제로 승용차 한 대의 조립에는 차종에 따라 차이

[†] 책임저자, 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

E-mail : kmg@kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6313 FAX : (033)250-6313

* 회원, 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학부

** 부산대학교 기계기술연구소

는 있지만, 보통 3,500~4,000점 정도의 점용접이 적용된다. 기존의 점용접은 그간의 기술축적으로 인해 어느 정도의 신뢰성이 확보되었지만, 하나의 결함을 이루기 위해서는 20kW가 넘는 전력을 필요로 한다.^(1,4) 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 결함, 결함부위의 열적 손상 무결, 그리고 친환경적 결함방법 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 일반 리벳에 관한 연구 혹은 기계적 프레스 접합(clinching)에 관한 연구이다.⁽⁵⁻¹²⁾ 아직까지 SPR 접

합의 구조강도 및 피로내구성 평가에 대한 자료는 찾아보기가 어려워 이 분야의 연구는 시작단계라고 할 수 있다. 국외에서는 이미 SPR접합이 적용된 승용차가 출시되고 있으며, SPR 접합과 기존 점용접의 강도비교를 위한 실험적 연구와 SPR공정개선을 위한 연구가 행해지고 있다. 또한, 최근 전산해석을 이용한 다양한 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 따라서, 본 연구에서는 자동차 차체의 경량화에 대비하여 실험적 방법과 해석적 방법을 이용하여 SPR접합부의 구조강성 및 피로강도를 평가하였다. 또한, 해석결과를 시험결과와 비교 검토함으로써 사용된 수치모델의 타당성을 검증하였다. 그리고 검증된 수치모델을 적용한 가상의 SPR 구조물에 대해 피로수명을 예측하였다.

2. SPR 겹치기이음 시험편의 실험

SPR은, Fig. 1과 같이 리벳재질의 강도와 펀치의 작용으로 바로 상판을 뚫게 되고, 다이의 작용으로 하판을 박히게 된다.

2.1 인장시험

본 시험에 사용된 SPR접합 시험편은, 점용접이나 기타 접합부의 기본적인 강도를 측정하는데 일반적으로 사용되는 겹치기이음 시험편이며, 시험편의 제작 형태는 Fig. 2에 나타내었다.

SPR접합 시험편은 알루미늄합금과 합금강으로, 다양한 차체재료의 조합으로 동일재료와 이종재료로 구분하였으며, 각 판재 재질의 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 각 시험편 조합은 Table 2와 같이 판재재질과 두께에 따라서 A, B, C, D, E로 구분하였다. 시험기는 UTM을 사용하였으며, 하판을 고정 상판을 인장시켰다. 인장속도는 2mm/min으로 하였다.

SPR의 종류도 여러 가지가 있는데, 시험편의 종류에 따라서 각기 달라서, 기본적으로 알루미늄 판재와 알루미늄 판재의 결합에 사용된 것은 알루미늄 결합용이며 알루미늄과 철강재료의 결합에 사용된 것은 철강재료용으로 시험편을 제작하였다.

2.2 피로시험

본 시험에 사용된 SPR 겹치기이음 시험편은 인장 시험에 사용된 것과 동일한 두께 및 재질의 조합이다. 피로시험은 유압 서보식 피로시험기를 사용하여 실은 대기 중에서 응력비 0.1, 10Hz로 시험을 수행하였으며, 하중은 인장시험으로부터 제시된 최대하중의 30% 정도 수준의 하중을 적용하였다.

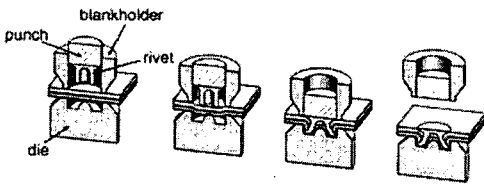


Fig. 1 Schematic representation of the self-piercing riveting process

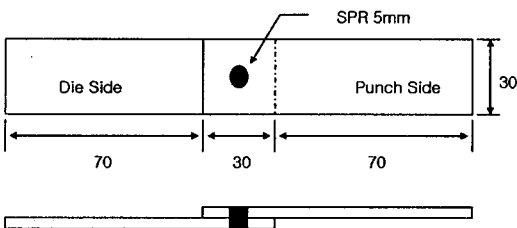


Fig. 2 Geometry of lap-shear specimen^(1,4)
(All dimensions in mm)

3. 결과 및 고찰

3.1 시험결과

SPR 겹치기 이음 시험편에 대한 인장시험을 수행한 결과 A, B, C, D, E 시험편은 모두 리벳이 상판을 관통하여 하판에 박혀 있었다.

시험편의 파단은 A, B, C, D 시험편의 경우, 상판에 상당량의 굽힘모멘트가 발생하면서 삽입된 리벳이 하판에서 분리되는 양상을 보였다. E 시험편의 경우에는 리벳이 분리되지 않고, 상판이 찢겨져 나가는 양상을 보였다. 이는 하판이 두꺼울수록 삽입된 리벳뿌리가 깊게 자리잡기 때문인 것으로 생각된다.

각 시험편에 대한 파단형상을 Fig. 3에 나타내었다. 이음강도는 E 시험편이 가장 높았으며, 알루미늄 합금만으로 구성된 A 시험편 보다는 알루미늄 합금과 합금강으로 구성된 B, C, D, E 시험편이 최대 50% 이상 더 높았다. 또한, 양쪽 판재의 두께가 두꺼울수록 이음강도가 높았다. 그리고 C와 D 시험편은 상판의 종류에 관계없이 유사한 거동을 보였다.

인장시험의 경우, 상판에서만 굽힘 현상이 나타난 것에 반해 피로시험에서는 대부분 상판과 하판 모두 굽힘 현상이 나타났다. 그리고 SPR 접합부를 기점으로 하중방향과 수직으로 균열이 나타났다. 또한, A, B, C, D 시험편의 경우에는 인장시험과 동일하게 하판에 박힌 리벳이 빠진 형상이었지만, E 시험편은 리벳이 하판에 박힌채로 상판이 찢겨져 나가는 양상을 보였다. 이것 역시 하판에 삽입된 리벳뿌리가 깊게 자리잡기 때문인 것

으로 생각된다. 시험편의 파단 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 대부분 그림에서와 같이 리벳의 가장자리에서 균열이 생성되어 전파하는 현상을 나타내었다.

3.2 해석적 접근

3.2.1 1차원 체결요소 사용의 문제점

일반적으로 자동차 차체 점용접부의 구조강도

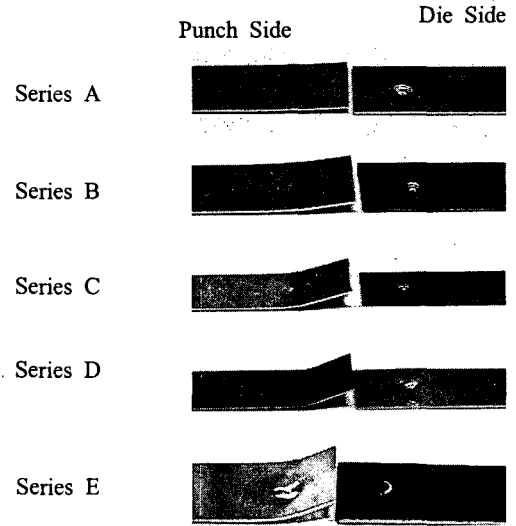


Fig. 3 The monotonic tested lap-joint specimen indicating the mode of the failed rivet

Table 1 Mechanical properties of material

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

Table 2 The combinations of specimens

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

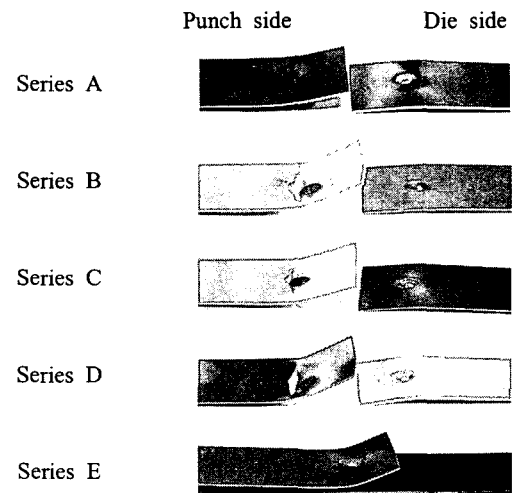
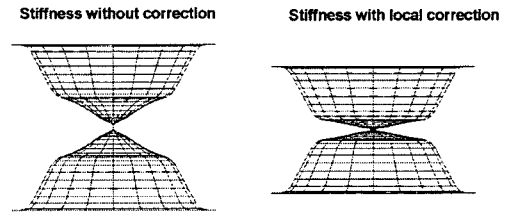


Fig. 4 The fatigue tested lap-joint specimen indicating the mode of the failed rivet

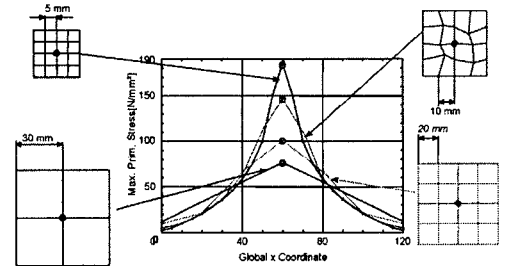
및 피로강도평가를 위해 1차원 체결 요소를 많이 사용한다. 그렇지만, 이러한 1차원 체결 요소의 사용은 Fig. 5에 나타낸바와 같이, 1차원 beam 또는 rigid 요소로 연결된 shell 요소의 크기와 형상의 정도가 국부적인 변위 거동에 영향을 미친다. 또한, 결합부의 정확한 위치 지정 및 수정을 위해서는 각각의 판재 결합부에 절점이 위치해 있어야만 한다. 그리고 1차원 체결요소는 양쪽 판재 사이에서의 하중 유동에 관한 정보만을 제공할 뿐, 결합에 의한 결합하중에 관한 정보는 제공하지 않는다. 그렇기 때문에 실제적인 균열발생의 잠재적 위치임에도 불구하고 정확한 해석을 수행할 수 없다. 이런 문제점들은 점상결합이기 때문에 SPR접합의 경우도 같다.⁽¹³⁾

3.2.2 SPR 접합부의 모델링

SPR 접합과정에서 삽입되는 리벳은 냉간소성 가공공역을 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 실제 공정상의 특성들이 반영된 유한요소모델의 사용이 요구되고있다. 따라서, 본 연구에서는 SPR 접합 공정의 특성을 반영하고, 1차원 체결요소를 사용함으로써 야기되는 문제점들을 보완하기 위하여 피로해석 전용 솔루션인 FEMFAT(14)에서 제안하는 모델링 가이드 라인에 따라 유한요소모델을 생성한 후, FEMFAT SPR 전처리 과정을 수행하여 최종적으로 해석에 이용되는 SPR접합 시험편의 유한요소모델을 생성하였다. FEMFAT으로 해석모델을 생성하게되면 Fig. 6과 같이 SPR접합부에서 국부적으로 모질한 요소와 절점들이 새롭게 생성된다. 또한, MAT_1 영역의 탄성계수는 모재 탄성계수의 40배, MAT_2 영역은 6배가 적용되며,^(1,14) beam 요소의 탄성계수는 모재의 탄성



(a) Singular deformation behavior



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

Fig. 5 The influence of one-dimensional beam or rigid elements

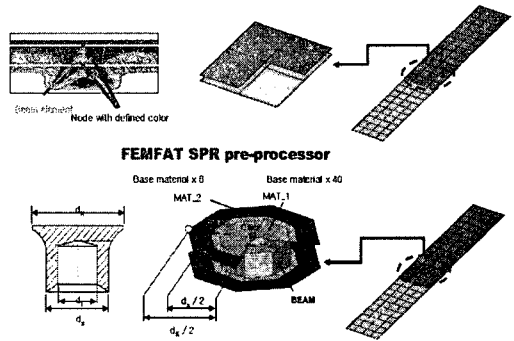


Fig. 6 Schematic of the FEMFAT modeling guideline

계수와 판재의 두께에 따라서 보간법에 의해 구해진다.

3.2.3 구조강성해석

해석에 사용된 모델은 145개의 요소와 182개의 절점으로 구성되어 있으며, 실험에서 제공한 시험편과 동일한 치수와 형상을 가지고 있다.

구조강성해석은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 Die side 끝단을 고정하고

Punch side 끝단을 2mm 인장시키면서 고정단에서의 반력을 측정하여 시편의 강성을 평가하였다. 실험이 수행된 모든 시험편에 대해 해석을 수행하였다. 이것으로부터 굽힘 모멘트의 작용을 확인할 수 있었다. A 시험편에 대한 모델의 변형 및 변형을 분포를 Fig. 7에 나타내었으며, 해석으로 구한 각 모델별 하중-변위 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 A 시험편의 이음강도가 가장 낮고 다음으로 C, D, B, E 순으로 이음 강도가 높았다.

3.2.4 피로해석

부품의 내구강도 설계기술은 시작부품의 제작 및 실험평가를 수행한 후 그 결과를 설계에 반영하는 것으로, 실험이전에는 구조적인 문제 파악이

어렵다. 그렇지만 최근, 자동차 및 기계산업의 발달과 사용환경 및 제품수명의 변화로 인해, 이러한 단점을 보완하는 방법으로 전산해석을 이용한 내구강도 해석기술이 활용되고 있다. 본 연구에서는 피로내구해석 전용 프로그램인 FEMFAT을 이용하여, SPR접합 시험편의 피로수명을 예측하였다. 해석에 사용한 하중은 실험에서 구한 최대 인장하중의 30% 수준의 하중을 적용하였다. 또한, 응력비 0.1로 10,000회의 반복수를 적용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 구조강성해석 모델과 동일하다. 해석결과 Fig. 9와 같은 손상분포를 나타내었으며, 각 시험편에 대한 해석결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Displacement



Strain



Max. damage



Fig. 7 Contour and deform shape of SPR FE-model (Series A)

Fig. 9 Contour of max. damage (Series A)

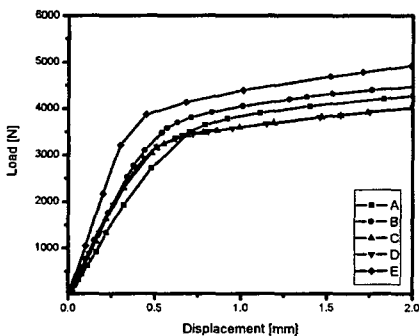


Fig. 8 Load vs. displacement plot for a CAE results

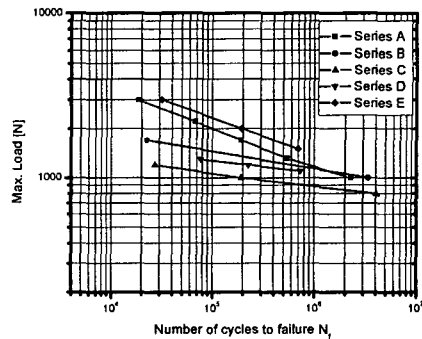


Fig. 10 Load vs. number of cycle plot for a FEM-FAT analysis results

4. 수치모델의 검증

본 해석에 사용된 겹치기 이음형태의 시편은 양쪽 판재의 하중 작용점 편심에 의해 접합면을 회전중심점으로 하는 모멘트가 작용하게 되고, 두 판재의 접합면과 하중 작용면내에서 일치하려는 현상이 발생한다. 따라서 SPR 접합부가 회전하게 되고 전단하중이외에 인장하중도 받게 된다. 이러한 메카니즘에 의해 SPR 접합부 주위에서는 복잡한 응력분포가 발생하게 되고 응력집중이 초래되며 결국 이러한 응력집중부에서 파단이 일어난다.⁽¹⁵⁾ Fig. 11에서와 같이, 해석에서의 최대 응력 발생위치와 피로시험후 파단된 위치가 일치함을 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 12에 제시한 것과 같이, 실험결과와 해석결과가 정확하게 일치하지는 않았지만 하중, 변위, 강성 그리고 피로수명이 유사한 경향을 보였다. 피로해석은 일반적인 CAE해석과는 달리 오차 범위가 큰 것이 특징이다. 그리고, 피로현상 자체도 여러 가지 시험조건에 따라 데이터의 분산폭이 크기 때문에 확실적인 검토를 병행하는 것이 일반적이다. 본 연구에서 피로파단수명을 기준으로 시험결과와 해석결과를 비교해 볼 때, 크게는 약 80%부터 작게는 20%정도까지의 오차가 발생했다. 평균적으로 약 40% 정도의 오차범위 내에 해석결과가 존재하였으며, 이 정도의 오차범위는 앞서 설명한 전산피로해석의 허용오차 범위 내에 존재한다고 생각한다.⁽¹⁷⁾

또한, SPR 접합부의 피로특성을 규명하기 위해 파면관찰을 수행하였다.

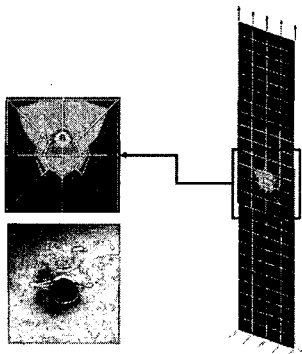
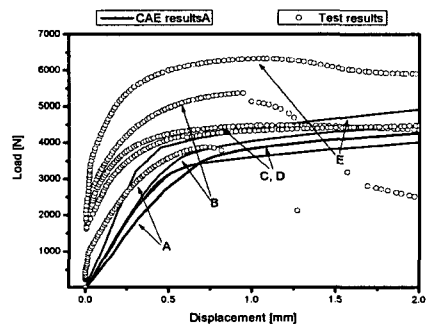
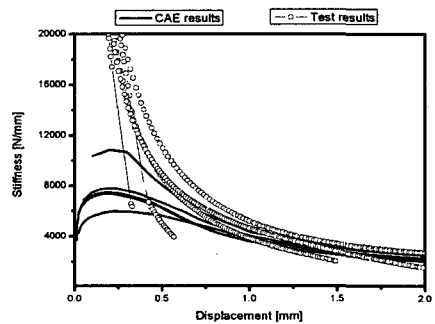


Fig. 11 Comparison CAE results and test one

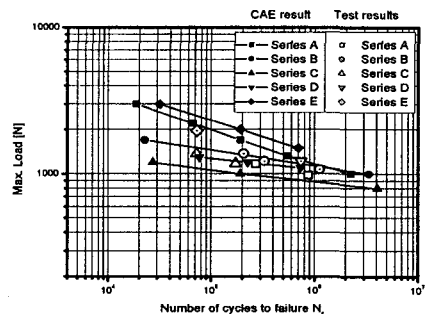
10⁵회 이상의 반복하중을 견디고 파단한 시험편에 대하여 SEM에 의한 피로파면 관찰결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13을 참고하면, 초기 균열발생지점으로 예상되는 (a)지점에서는 연성재료임에도 불구하고 취성파면의 특징을 나타내었다. 이는 SPR과정에서 발생하는 소성변형에 의해 리벳주위가 현저하게 가공경화되었기 때문이라 생각된다. 판재 중심에서 약간 떨어진 (b)지점에서는 취성파면과 스트라이에이션이 혼재하는 양상을 보였으며, 가장 멀리 떨어진 (c)지점에서는 뚜렷한 스트라이에이션을 관찰되었다.



(a) Load vs. displacement

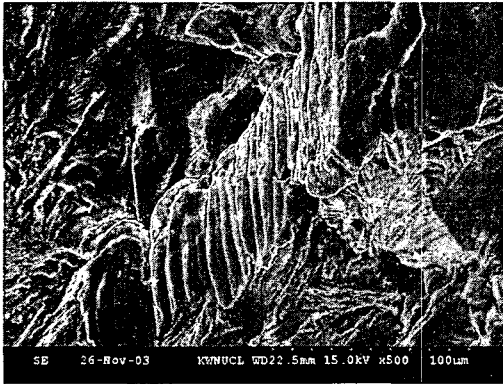


(b) Stiffness vs. displacement

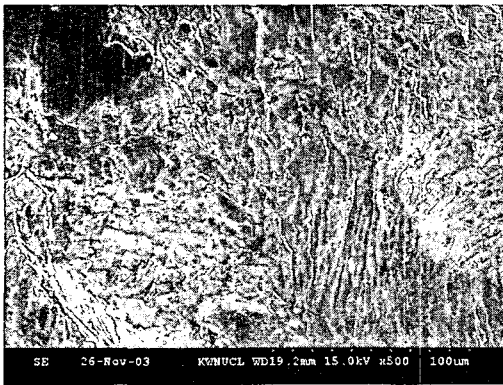


(c) Max. load vs. number of cycles

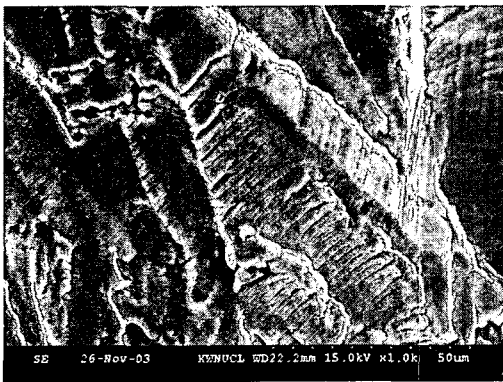
Fig. 12 Comparison between CAE results and test one



(a) Magnification of (a)



(b) Magnification of (b)



(c) Magnification of (c)

Fig. 13 SEM photographs of fracture surface (Series B)

5. SPR 수치모델의 응용

앞서 검증된 수치모델을 가상의 구조물에 적용하여 구조해석을 수행하고, FEMFAT을 이용하여 피로하중에 대한 손상률과 피로수명을 예측하였다. Fig. 14에 나타난 가상모델은 8점의 SPR접합으로 결합되어있고 두께 1mm의 5J32와 0.8mm의 SPCC로 구성되어 있다. 해석모델은 대칭조건으로 1/4만을 모델링하였다.

구조해석결과 Fig. 15와 같은 변형을 보였다. 그리고 진폭하중 1,300N, R=0의 피로하중으로 반복수 10,000회를 적용하여 내구해석을 수행한 결과, A번 SPR 접합에서 최대 10.4의 손상율을 나타내었다. Miner의 법칙⁽¹⁶⁾에 따라 계산된 피로수명은 960회였다.

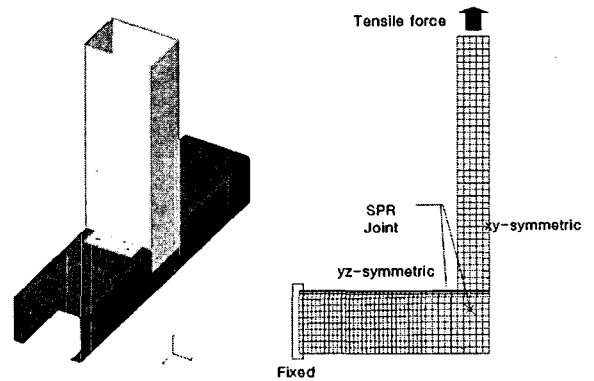


Fig. 14 Shape of SPR Virtual structure

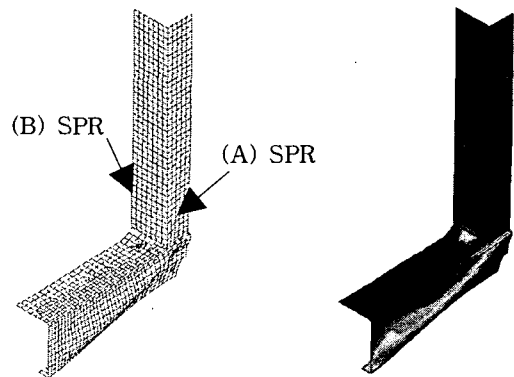


Fig. 15 Contour and deformed shape of SPR FE-model

6. 결 론

본 연구에서는, 자동차 차체의 경량화에 대비하여 실험과 전산해석방법을 통해 SPR접합부의 구조강성 및 피로수명에 대한 평가를 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

실험을 통해 SPR 겹치기 이음 시험편의 강성 및 피로거동을 고찰한 결과, 강성은 유사해도 재료의 종류 및 두께의 조합에 따라서 피로수명이 다를 수 있었다.

강성은 알루미늄 5J32로만 구성된 A 시험편이 가장 작았고, 5J32와 SAPH로 구성된 E 시험편이 가장 컸다. 전산해석 결과도 유사한 경향을 나타내었다.

피로수명의 경우에는 유사한 강성거동을 보이는 시험편이라 할 지라도 차이가 있었으며, 해석결과와 유사한 경향을 보였다.

이상의 결과로부터, 본 연구에서 사용된 수치모델이 차체 SPR 접합부의 구조강성 및 피로수명 평가시 실물실험을 대체할 수 있는 대안이라고 판단되며, 향후 다양한 접합부의 강도평가와 모델링기법 개발의 기초자료로 사용될 수 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지정 한양대학교 신뢰성 분석연구센터 2차년도 사업의 지원을 받아 수행되었다.

참고문헌

- (1) 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*.
- (2) Hiroyuki Iguchi, Yasuaki Ohmi, 2003, "Joining Technologies for Aluminum Body-Improvement of Self-piercing Riveting," *JSAE 20037065*.
- (3) Ronald Salzman, William Gryc, Hari Agrawal and Sreenivasa Bollimunta, 2003, "Fatigue Life Reliability and Robustness of Aluminum Car Body U-Box Structure with Self-Piercing Riveted Joints," *SAE, Document Number 2003-01-0468*.
- (4) Hari Agrawal, Wayne Li, Sreenivasa Bollimunta, Kesava Potty and Andrew Blows, 2003, "Fatigue Life of Self Pierced Rivets(SPR) in Car Body," *SAE, Document Number 2003-01-0914*.
- (5) Sohn, I. S., Bae, D. H., 1999, "Statistical Investigation on Fatigue Life Prediction of the Spot Welded Lap Joint(I) : Application of Weibull Probability Distribution Function," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 7 No. 6, pp. 214~221.
- (6) Sohn, I. S., Bae, D. H., 1999, "Statistical Investigation on Fatigue Life Prediction of the Spot Welded Lap Joint (II) : to Verity Reliability of Faigue Strength Estimation Method," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 7 No. 6, pp. 214~221.
- (7) Sohn, I. S., Bae, D. H., 1999, "Fatigue Strength Evaluation of In-plane Bending Type Single Spot Welded Lap Joint by Strain Energy Density," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol. 23, No. 9, pp. 1435~1441.
- (8) Chu, S.J., 2002, "Study on the Prediction of Fatigue Life of Multi-Spot Welded Joints," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol. 26 No. 3 pp. 471~478.
- (9) Lee, K. Y., Kim, J. B., Choi, H. S., Woo, H. P., 1997, "Strength Evaluation of Adhesive Bonded Joint for Light Weight Structure by Single-Lab Joint Test," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 5 No. 2, pp. 87~93.
- (10) Lee, K. Y., Kim, J. S., Kong, B. S., Woo, H. P., 1998, "Strength Evaluation of Adhesive Bonded Joint for Car Body," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 6 No. 1, pp. 143~150.
- (11) Lim, D. H., Lee, B. W., Rhyu, H. H., Kim, H. K., 2003, "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.
- (12) Lee, Y. B., Park, Y. K., Chung, C. S., Kim, H.

- K., "An Experimental Study on the Strength Evaluation of Mechanical Press Joint," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol. 24 No. 2, pp. 438~447.
- (13) Brenner, C. E., Unger, B., Gaier, C., Steinwender, G. and Eichlseder, W., 2000, "Fatigue Assessment of Welding Seams and Spot Joints Based on FEA," *SAE, Document Number 2000-01-0780*.
- (14) Steyr-Daimler-Push, 2003, "FEMFAT4.4 User's Manual," *Magna-Steyr, FEMFAT SPOT*.
- (15) Radaj, D., 1990, "Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures," *Abington publishing*, pp. 299~342.
- (16) Miner, M.A., 1945, "Cumulative Damage in Fatigue," *ASME*, Vol. 67, pp. A159~A164.
- (17) Jong, W. S., Bae, D. H., 2003, "Fatigue Analysis of Spot-welded Multi-Lap Joint of STS301L Using the Maximum Stress," *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 16 No. 6, pp. 101~107.