

알루미늄 차체부품의 SPR 접합기술 동향

[요약문]

자동차 차체 경량화를 위해 알루미늄 스페이스 프레임 구조가 개발되고 있으나, 관재결합이 필요하기 때문에 기존의 저항 점용접이 적용되기 어렵다. 또한, 멤버와 멤버의 연결부에서는 철강재나 고강도 재료의 사용이 요구되므로 이종재료 접합기술이 필요하다. 알루미늄 및 이종재료 접합방법으로는 볼트체결, 클린칭, SPR 접합, 접착제 등이 있으나, SPR 접합은 기계적인 결합방법의 하나로, 일반 리벳공정과는 달리 별도의 홀이 필요없기 때문에 자동화에 용이하며 작업시간도 빠르다. 리벳의 압입 방식으로 판재의 열변형이 거의 없고 친환경적인 공법으로 사용되고 있으며, 소음이 적고, 용접이 불가능한 이종재료의 결합도 가능하다. 무엇보다 자동차 양산용 장비 적용이 용이하기 때문에 기존의 저항 점용접을 대체하기 편리하다. 따라서, 본 글에서는 알루미늄 차체 부품 접합을 위한 SPR 접합공법에 대한 국내의 기술개발 동향을 분석하고, 한국기계연구원에서의 최근 기술개발 내용을 소개하고자 한다.

1. 서론

자동차 차체 경량화를 위해서는 알루미늄과 같은 경량소재의 사용이 요구되고 있다. 차체 전체에 경량소재를 사용하는 것이 가장 좋은 방법이나 기존 스틸 차체의 강도나 강성을 만족시킬 수 없기 때문에 소재의 교체와 더불어 차체 또한 재설계되어야 하므로 기존의 스틸(steel) 모노코크(monocoque) 구조에서 알루미늄 도입이 가능한 스페이스 프레임(space frame) 구조가 개발되고 있다.

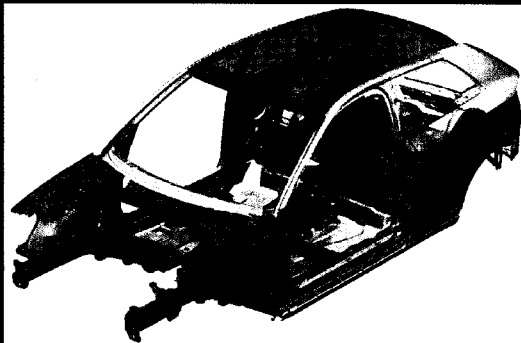


그림 1. 모노코크 차체 구조

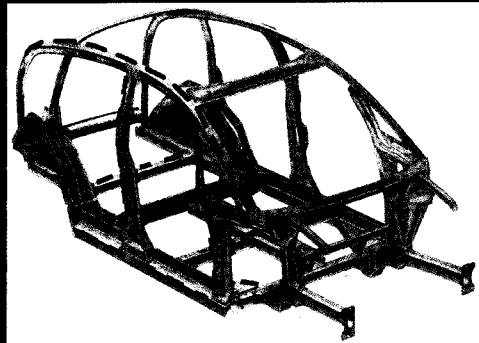


그림 2. 스페이스 프레임 차체 구조

스페이스 프레임 구성을 위해서는 압출재나 액압성형재 등의 관재 결합이 필요하기 때문에 기존의 저항 점용접 (spot welding) 같은 접합방법은 적용되기 어렵다. 또한, 멤버(member)와 멤버가 연결되는 곳에는 더 큰 강성과 강



도가 요구되기 때문에 기존의 철강재나 높은 강도를 가지고 있는 재료의 사용이 요구되므로 스페이스 프레임 구조에서는 판재 결합과 이종재료 결합이 가능한 접합기술이 개발되어야 하며, 선진국에서 많은 연구가 진행중에 있다.

알루미늄 및 이종재료 접합에 사용되는 방법으로는 볼트 체결, 클린칭, SPR(Self Pirecing Rivet) 접합, 접착제 등이 있으며, 이 외에도 다양한 접합방법들이 개발되고 있다. 이 중에서 SPR 접합은 기계적인 결합방법의 하나로, 일반 리벳공정과는 달리 별도의 홀(hole)이 필요없기 때문에 자동화에 용이하며 작업시간도 빠르다. 리벳의 압입 방식으로 판재의 열변형이 거의 없고 친환경적인 공법으로 사용되고 있으며, 소음이 적고, 용접이 불가능한 이종재료의 결합도 가능하다. 무엇보다 자동차 양산용 장비 적용이 용이하기 때문에 기존의 저항 점용접을 대체하기 편리하다.

따라서, 본 글에서는 알루미늄 차체 부품 접합을 위한 SPR 접합공법에 대한 국내의 기술개발 동향을 분석하고, 한국기계연구원에서의 최근 기술개발 내용을 소개하고자 한다.

2. SPR 접합 공법의 개념

SPR 접합기술은 금형을 이용하여 박판을 기계적으로 접합시키는 기술이다. 재료층들은 pre-drilling이나 소음없이 맞물린 마찰 joint를 생성하는 것과 보조를 맞추어 rivet에 의해 연결된다. Rivet은 상위 재료를 통과하도록 설계되어 있고, 하위 재료 아래에 위치한 die로 향한다. 하위 재료는 관통되지 않았기 때문에, 결과적인 joint는 가스나 액체가 통하지 않는다. 전체 두께에 따라 두가지 이상의 재료의 층이 연결될 수 있으며, 연결되는 재료들은 setting head 와 die 사이에 위치한다.

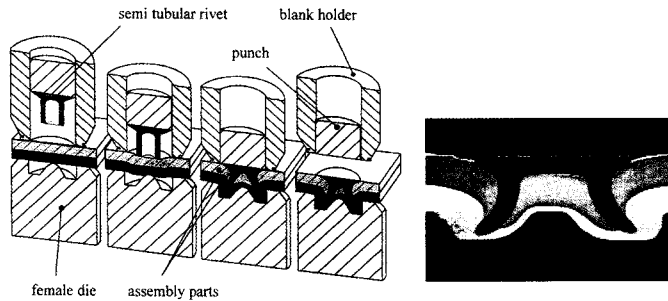


그림 3. SPR 프로세스

그림 3은 SPR의 접합공정을 단계별로 나타내었다. 첫 번째 공정은 피딩장치에 의해 리벳이 자동 공급이 되며 두 번째 공정은 유압 혹은 서보 모터의 힘으로 리벳을 판재에 압입을 시키며, 세 번째 공정은 상부 판재를 관통하고, 하부 판재는 관통하지 않으며 마지막 공정은 하부 앤빌(anvil)의 형상에 의해 성형되어 리벳팅이 완료된다. SPR 공정의 장·단점 및 기술표준을 표 1에 나타내었다.

표 1. SPR 공정 장·단점 및 기술표준표

장점	단점
<ul style="list-style-type: none"> 리벳팅과 피어싱이 동시에 이루어져 별도의 홀 가공이 불필요 리벳의 압입 방식으로 판재의 열 변형이 없음 용접이 불가능한 이종 재료의 결합가능 친 환경적 결합방법 소음이 적음 빠른 작업(A/N/C/T: 0.7s ~ 2.5s) 열 발생이 없어 접착제의 적용가능 발생 열이 없어 부식 방지를 위한 아연도금층 보호 	<ul style="list-style-type: none"> 소모품 리벳필요 가압력이 최대 6.2Ton 0에서 C-Frame 설계시 가변 하중을 견디기 위해 Tool의 동량이 큼(약100Kg) 압입시 C-frame의 형상에 의해 용접 결근상이 재현될 수 있음

SPR 기술 표준

- 1. A, B 부분은 Symmetrical formation 되어야 하고 리벳과 하부 모재의 끝 표면과의 최소 0.5mm 이상 되어야 한다.
- 2. 이상적인 가이드 리인은 $x/r = 0.33$ 이 되면 이상적이다.
- 3. 리벳의 헤드부분과 모재 사이가 완전히 밀착되어야 한다.
- 4. 리벳 끝부분 주위에 Crack 이나 결함이 발생하지 않아야 한다.

SPR 공법은 이종재료인 AI 과 스틸의 접합에 사용될 수 있으며, 재료의 접합 방향에 따라 접합강도가 달라지게 된다. 또한, 접착제와 함께 사용하는 hybrid joining도 새로운 접합기술로 대두되고 있다. 그림 4는 고장력강판과 AI 압연강판의 SPR 접합 실험결과를 보여주고 있다. 80kgf/mm² 1.2mm의 고장력강판과 30kgf/mm² 1.5mm의 AI 압연강판을 고장력강판 방향에서 AI 압연강판에서 각 실험하여 리벳의 성능이 고장력강판을 관통하여 알루미늄 강판 속에서 리벳이 벌어질 때 인장강도를 발휘됨을 알 수 있다.

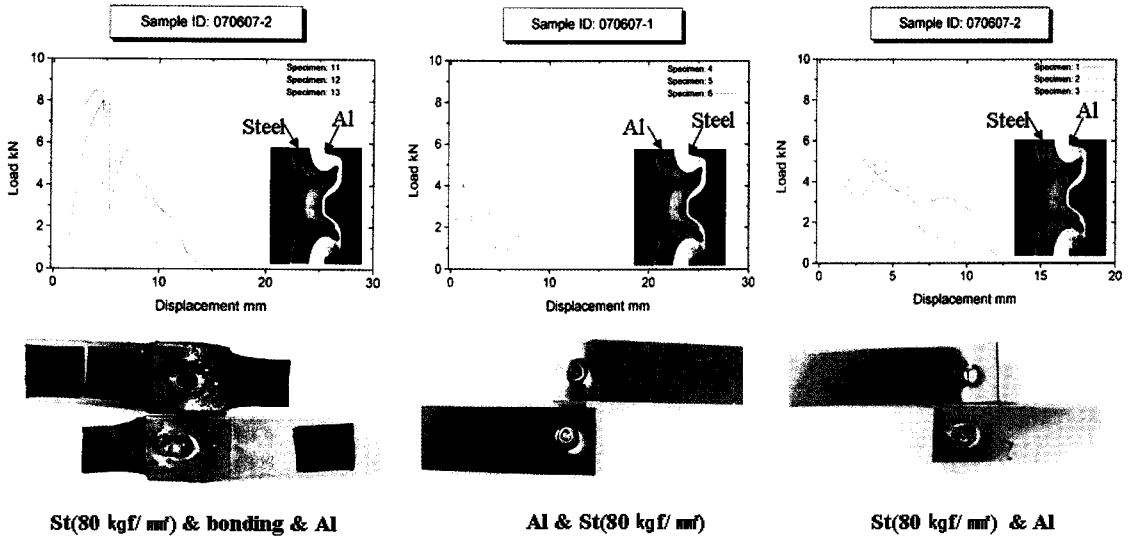


그림 4. 본딩과 병행시 접합강도와 SPR의 접합방향에 따른 접합강도 변화

그림 4의 맨 왼쪽그림은 접착제를 적용한 하이브리드 SPR 공법으로 접착제 적용효과가 나타남을 알 수 있다. 리벳 지름 $\phi 4.7\text{mm}$ 를 고려하면 AI5J32 최대강도는 285MPa 이며, 본딩없이 SPR시의 접합강도(맨오른쪽 그림)는 289MPa 임을 알 수 있다.

3. 국내 관련기술의 현황

서울대, 연세대(대우자동차), 숭실대학교 등에서 접착제, SPR 등을 이용한 AI 합금 접합 특성을 연구해 왔으나, 단순시편(부재)을 이용한 수준이며, 상용화된 공법이지만 국내 자동차 차체에 적용된 사례는 극히 드물고 경량 자동차 차체에 적용하기 위해 연구를 진행중이다. 현대자동차에서는 알루미늄 판재 제품인 Truck Lid의 접합공법으로 검토와 연구를 진행하고 있다.

국내에서 기계적 접합은 파워트레인 등 타 자동차 부품에 널리 사용되고 있는 반면, 차체 분야는 적용사례가 거의 미미한 실정이다. 이러한 원인은 국내 완성차 업계에서 알루미늄 차체의 양산화를 구현한 사례가 없으므로 이종재료 및 난용접성 소재의 접합기술로 사용되는 기계적 접합을 차체에 적용할 기회가 없었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 국내 자동차 업계도 경량소재의 활용을 점차 증가하고 있는 상황이므로 기계적 접합의 차체 적용은 조만간 이루어질 것으로 예상되며, 이를 위해 기계적 접합에 대응하는 강도, 내구 등 차체 성능에 미치는 영향의 규명 및 차체 설계기술의 확보가 이루어져야 할 것이다. SPR 관련 국내특허를 소개하면 다음과 같다.

표 2. 최근 자동차에서 사용되는 접합공법

Model	Joining methods	Lengths
Ford Contour (Steel monocoque)	Spot welding	2630 points
Audi A8 (Al, spaceframe)	Spot welding	400 points
	MIG welding	65 meters
	Self-piercing rivet	1000 rivets
	Clinch	150 clinches
GM Precept (Al, spaceframe)	Spot welding	1600 points
	MIG welding	15 meters
	Self-piercing rivet	600 rivets
Audi A2 (Al, spaceframe)	Laser welding	35 meters
	MIG welding	25 meters
	Self-piercing rivet	1800 rivets

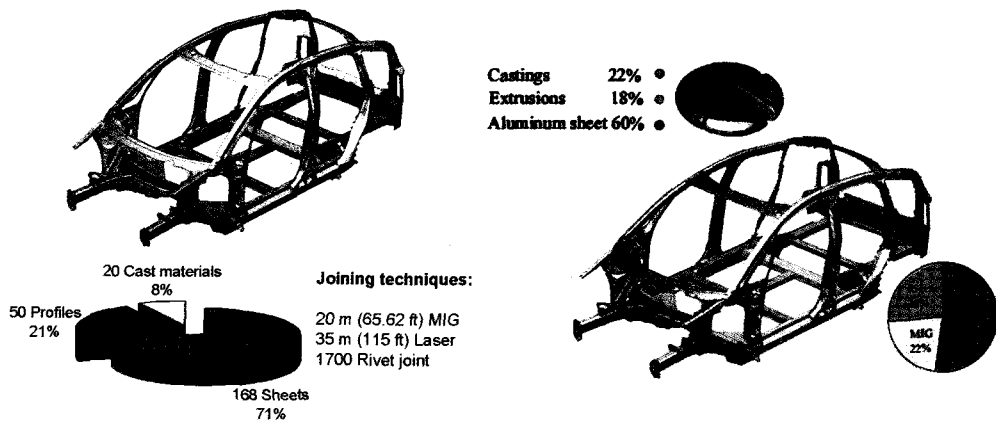


그림 5. Audi A2 스페이스 프레임

연료전지 자동차의 경량 차체 적용에는 더욱 활발하게 적용 가능한 기술이다. 그림 6은 SPR를 적용한 자동차 부품의 예이다.

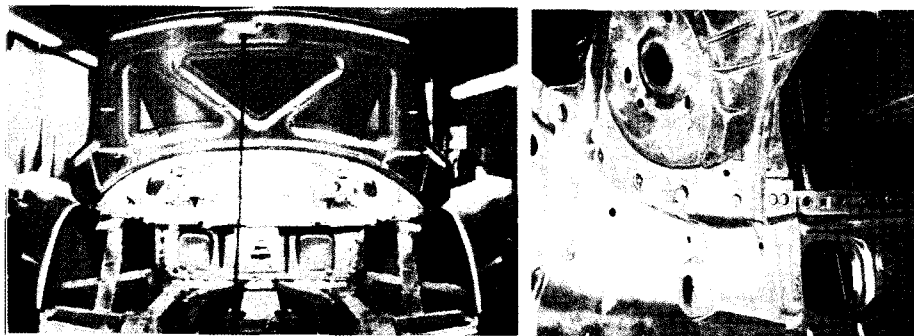


그림 6. Self-piercing riveting 적용 차체



5. 한국기계연구원에서의 연구개발 현황

SPR 접합에서 리벳과 판재들간의 소성거동을 검토하기 위해 유한요소법(Finite Element Method)으로 시뮬레이션 기법을 개발하였다. 유한요소 프로그램 DEFORM-2D를 이용하여 SPR 접합 성형성을 예측하고 SPR 접합에 만족하는 리벳과 엔빌의 형상설계를 할 수 있었다. 그림 7은 국산 자동차용 강판 SGARC340과 알루미늄 주조 합금 강판 SILAFONT의 접합공정을 해석한 결과이다. 해석결과에서 1 rivet과 SHEET_1 사이에서 빈공간이 있는 것을 볼 수 있으며, 이는 rivet 접합부에서 부식 또는 접합강도에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있음이 예측되었다.

RIVET	Original Rivet
SHEET1	SGARC 340 [0.8mm]
SHEET2	SILAFONT [3mm]
ANVIL	SMPL_1003

그림 7. SGARC440 & SILAFONT 접합 해석 결과

Shank부를 재설계하여 양호한 성형성을 가지는 것을 알 수 있었으며, 이 결과로부터 그림 8과 같이 SPR 접합규격에 만족되는 rivet형상과 anvil형상을 결정할 수 있었다. 본 결과를 활용하여 SPR rivet 국산화를 위한 기초 데이터 확보가 가능하였다.

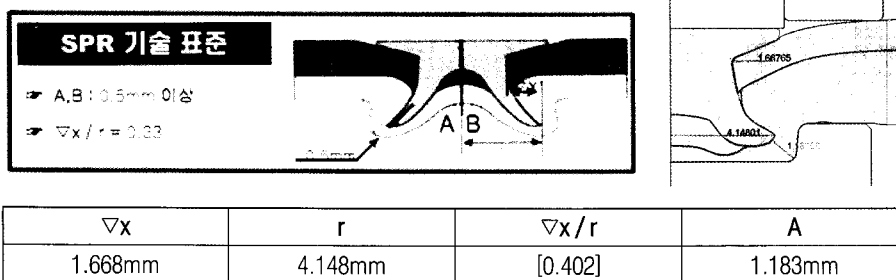


그림 8. 표 1의 SPR 접합규격 FEM 시뮬레이션 결과의 비교

SPR 접합강도 및 피로수명 분석을 위해 그림 9와 같이 일반적으로 사용되는 겹치기 이음시편을 제작하였다. 시편 규격은 가로 100mm, 세로 30mm 이고 두께는 1.8mm 인 I형 겹치기 시편이며, 실험에 사용한 리벳은 그림 10과 같이 내경, 외경은 각각 4.8, 8.7mm 이고, 높이는 5.5mm인 아큐먼트사 Ø4.8mm으로서 재료는 카본 스틸(carbon steel)로 경도(Vickers hardness)는 490Hv이다.

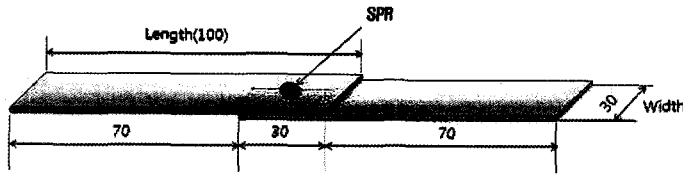


그림 9. A15182와 리벳 겹치기 접합 시편 형상

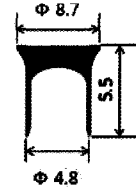


그림 10. 리벳형상

그림 11은 수입 SPR 리벳과 개발 SPR 리벳, Deltaspot 이용한 접합판재의 강도차이를 보여주고 있다. 수입 SPR 리벳의 경우 접합강도는 5.27kN이었고, 개발 SPR 리벳의 경우 6.4kN이었다. SPR과 접착제를 이용하였을 때는 수입 SPR 리벳의 경우 11.04kN, 개발 SPR리벳의 경우 11.62kN이었다. 또한, Deltaspot을 이용한 접합강도는 5.14kN이었다. 개발된 리벳의 접합강도가 가장 우수함을 알 수 있다.

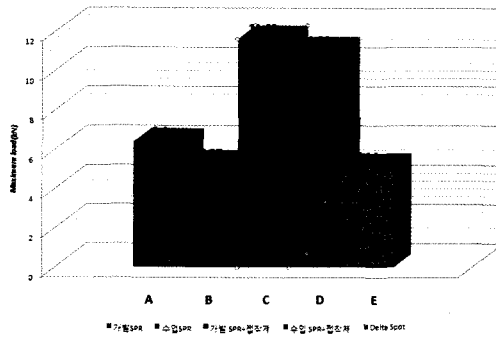


그림 11. 수입 SPR 리벳과 개발 SPR 리벳, Deltaspot을 이용한 A15182 접합판재의 강도

그림 12는 수입 SPR 리벳과 개발 SPR 리벳, Deltaspot을 이용하여 접합판재의 내구한도(피로강도) 차이를 보여주고 있다. 수입 SPR 리벳의 경우 피로강도는 1.84kN이었고, 개발 SPR 리벳의 경우 1.92kN이었다. SPR과 접착제를 이용하였을 때는 수입 SPR 리벳의 경우 3.48kN, 개발 SPR 리벳의 3.61kN이었다. Deltaspot을 이용하였을 경우는 0.8kN이었다. 개발된 리벳의 피로강도도 가장 우수함을 알 수 있다.

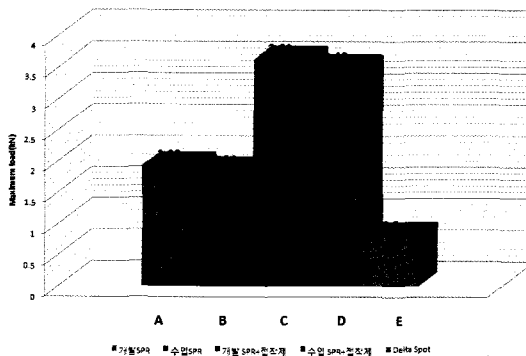


그림 12. 수입 SPR 리벳과 개발 SPR 리벳, Deltaspot을 이용한 A15182 접합판재의 피로강도



6. 결 언

본 글에서는 자동차 경량화를 위하여 알루미늄 차체 부품 접합을 위한 SPR 접합공법에 대한 국내의 기술개발 동향을 분석하였으며, 또한 한국기계연구원에서의 최근 기술개발 내용을 소개하였다.

- (i) 선진국 자동차 메이커인 Sudi, GM 등에서는 알루미늄 경량차체를 개발하였으며, 여기에 SPR 접합공법이 적용되고 있다. 국내에서도 SPR 접합기술을 상용화하기 위해 접합장비 및 공정 등에 대한 특허를 확보하고 있으나, 핵심부품인 리벳은 개발되지 못하고 전량 수입되고 있는 실정이다.
- (ii) 한국기계연구원, 성우하이텍, 충북대 등은 SPR 리벳 국산화 개발을 위해 접합 시뮬레이션을 통해 리벳과 엔빌 형상을 도출하였다. 이에 근거하여 리벳 가공업체에서 리벳을 제작하고 이를 활용하여 알루미늄 판재를 접합하였다. 접합강도 및 피로강도를 분석한 결과, 수입 리벳보다도 우수한 특성을 가짐을 확인하였다.

❁ 참고 문헌

- [1] Hiroyuki Iguchi, Yasuaki Ohmi, "Joining Technologies for Aluminum Body-Improvement of Self-piercing Riveting", JSAE, 20037065, 2003
- [2] 이강용, 김준범, 최홍섭, 우형표, "단면접치기 이음 시험에 의한 경량구조물용 접착 이음강도의 평가", 한국자동차공학회논문집, 제5권, 제2호, pp. 87-93, 1997
- [3] 이강용, 김종성, 공병석, 우형표, "차체접합과 관련한 접합 강도 평가", 한국자동차공학회논문집, 제6권, 제1호, pp. 143-150, 1998
- [4] K. Mori, T. Kato, Y. Abe and Y. Ravshanbek, "Plastic Joining of Ultra High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets by Self Piercing Rivet", *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No.1, 2006
- [5] G. S. Booth, C. A. Olivvier, S. A. Westgate, F. Liebrecht, and S. Braunling, "Self-Piercing Riveted Joints and Resistance Spot Welded Joints in Steel and Aluminium", SAE, 2000-01-2681, 2000
- [6] Xin Sun, V. Stephens, A. Khaleel, "Fatigue behaviors of self-piercing rivets joining similar and dissimilar sheet metals", *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 370-386, 2007
- [7] P. Briskham, N. Blundell, L. Han, R. Hewitt, K. Young and D. Boomer "Comparison of Self-Pierce Riveting, Resistance Spot Welding and Spot Friction Joining for Aluminium Automotive Sheet", SAE, 2006-01-0774, 2006
- [8] Xiacong He, Ian Pearson, Ken Young "Self-pierce riveting for sheet materials: State of the art", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, pp. 27-36, 2008
- [9] E. Atzeni, R. Ippolito and L. Settineri "Experimental and numerical appraisal of self-piercing riveting", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58, pp. 17-20, 2009
- [10] Y. Abe, T. Kato and K. Mori "Self-piercing riveting of high tensile strength steel and aluminium alloy sheets using conventional rivet and die", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 3914-3922, 2009
- [11] Dezhi Li, Li Han, Martin Thornton and Mike Shergold "An Evaluation of Quality and Performance of Self-Piercing Riveted High Strength Aluminium Alloy AA6008 for Automotive Applications", SAE, 2010-01-0223, 2010

- [12] L. Han, K. W. Young, R. Hewitt, M. R. Alkahari and A. Chrysanthou "Effect of Sheet Material Coatings on Quality and Strength of Self-Piercing Riveted Joints", SAE, 2006-01-0775, 2006
- [13] Xinmin Fan and Iain Masters, "Dimensional Variation in Self-Piercing Riveting", SAE, 2006-01-0776, 2006
- [14] Maofeng Fu and P. K. Mallick, "Effect of process variables on the static and fatigue properties of self-piercing riveted joints in aluminum alloy 5754", SAE, 2001-01-0825, 2001
- [15] N.-H. Hoang, R. Porcaro, and M. L. Hanssen, "Self-piercing riveting connections using aluminium rivets", International Journal of Solids and Structures, Vol. 47, pp. 427-439, 2010
- [16] Hari Agrawal, Wayne Li, Sreenivasa Bollimunta, Kesavan Potty and Andrew Blows "Fatigue life of self-pierced rivets (SPR) in car body", SAE, 2003-01-0914, 2003
- [17] Helmut dannbauer, Christian Gaier and Csaba Halaszi "Development of a model for self-piercing rivets to predict stiffness and fatigue life of automotive structures", SAE, 2003-01-2857, 2003
- [18] G. Casalino, A. Rotonda and A. Ludovico "On the numerical modelling of the multiphysics self piercing riveting process based on the finite element technique", Advances in Engineering Software, Vol. 39, pp. 787-795, 2008
- [19] 전재주, "차체 셀프-피어싱 리벳 접합의 구조강성 및 피로수명 평가", 강원대학교 대학원, 기계메카트로닉스 공학과, 공학석사학위논문, 2004



서 정

- 한국기계연구원 나노융합시스템연구본부
- 광응용기계연구실장 책임연구원
- 관심분야 : 레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및 시스템
- E-mail : jsuh@kimm.re.kr



강 희 신

- 한국기계연구원 나노융합생산시스템연구본부
- 광응용기계연구실 선임연구원
- 관심분야 : 레이저용접, 전자빔용접, 용접공정, 용접자동화
- E-mail : khs@kimm.re.kr



이 문 웅

- (주)성우하이텍 기술연구소 연구소장(전무이사)
- 관심분야 : 레이저 용접, 소성가공, 자동차 부품 개발
- E-mail : mylee@switech.co.kr



조 해 웅

- 충북대학교 기계공학부 교수
- 관심분야 : 재료역학, 기계설계, 소성가공, 유한요소해석
- E-mail : hycho@chungbuk.ac.kr