

초고장력강과 알루미늄 합금의 접합을 위한 SPR 설계

김 동 범** · 추 연 근** · 조 해 용*†

*충북대학교 공과대학 기계공학부

**충북대학교 대학원 정밀기계공학과

Design of self-piercing rivet to joint in advanced high strength steel and aluminium alloy sheets

Dongbum Kim**, Yuangen Qiu** and Hae-Yong Cho*†

*Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 362-763, Korea

**Graduate School of Precision Mechanical Engineering, Chungbuk National University,
Cheongju 362-763, Korea

†Corresponding author : hych@chungbuk.ac.kr

(Received May 27, 2015 ; Accepted June 30, 2015)

Abstract

Self-piercing riveting is an joining method of advanced high strength steels (AHSS) and other dissimilar materials. It has attracted considerable interest from the automotive industry. The SPR has become an interesting alternative joining technique for difficult to weld materials such as steels and aluminium alloys. In this paper, self-piercing rivet and anvil for SPR were designed for the joining conditions with AHSS and aluminium alloy. Various conditions of SPR were simulated for the design of rivets and anvils. The simulated results were in good agreement with experimental ones. As a result, over HV500 rivet is desirable to joint SPFC780 AHSS and aluminum alloy.

Key Words : Self-piercing rivet(SPR), Advanced high strength steels(AHSS), SILAFONT, Dissimilar sheet metals, Finite element method(FEM)

1. 서 론

초고장력강(AHSS)은 열처리에 따른 상변태로 인한 비강도를 갖는 강재로써 마르텐사이트, 베이나이트, 잔류 오스테나이트 등의 미세조직으로 구성될 수 있다.¹⁾ 기계적 물성을 기준으로 항복강도와 인장강도가 각각 300 MPa, 600 MPa 이상인 초고장력강은 망간과 규소가 일반 강보다 많이 함유되어 강도와 인성이 높다.²⁾ 또한 기존의 고장력강(HSS)과 달리 강도와 강성뿐만 아니라 성형성, 연성도 높기 때문에 기존재료보다 무게 절감, 높은 충격 에너지 흡수 등을 기대할 수 있다.^{3,4)}

한편 Ultra-Light Steel Automotive Body-Advanced Vehicle Concept (ULSAB-AVC)에 의해 개발된 초고장력강은 자동차의 연비향상을 위한 차체

경량화, 충돌 시 탑승자의 안전성 등의 이점으로 알루미늄 합금과 마그네슘 합금 또는 복합재료와 같은 경량 소재와 함께 차체 적용에 대한 관심이 높아지고 있다.⁵⁾ 이러한 이유로 차체 조립 또는 접합 과정에서 용접이 어려운 초고장력강과 알루미늄 합금의 이종재료 접합이 요구된다. 따라서 결합력이 우수하고 재료의 열영향이 없는 self-piercing rivet(SPR)을 이용한 접합이 요구된다. SPR은 사전의 홀가공 없이 스스로 상부판재를 피어싱하고 하부판재와 소성 결합되므로 이종재료 접합에 용이하다.

초고장력강과 알루미늄 합금의 접합에서 K. Mori등⁶⁾은 SPFC980과 Al5052의 이종재료 접합을 위해 세미 튜우블러 리벳과 중앙에 볼록한 돌기가 있는 앤빌을 적용하여 앤빌의 형상에 따른 접합성을 연구를 하였다. 또한 L. Han등⁷⁾은 고강도저합금(HSLA)강과 알루미늄

높은 합금의 접합을 위한 SPR 연구가 있었지만 모두 초고장력강의 두께가 얇고 강도가 낮은 수준이다.

이와 같은 관점에서 본 연구에서는 초고장력강과 알루미늄 합금의 접합을 위한 SPR 설계를 하고자 하였다. 이에 따라 초고장력강인 SPFC440, 590, 780과 다이캐스팅 알루미늄 합금인 SILAFONT의 이중재료 접합조건으로 설정하였다. 시뮬레이션으로부터 접합 시에 리벳과 판재의 소성거동을 예측하여 세가지 조건 모두 접합이 가능한 리벳과 앤빌을 설계하고자 하였다. 이를 위해 리벳과 판재소재의 기계적 물성을 인장시험을 통하여 조사하고 해석에 적용하였다. 또한 설계된 리벳과 앤빌을 제작하여 접합실험을 하였고 접합부의 단면검사 및 전단시험을 통하여 리벳과 앤빌설계를 검증하고자 하였다.

2. SPR 접합 유한요소해석

2.1 SPR 재료의 기계적 물성

리벳과 판재의 기계적 물성을 조사하기 위하여인장시험방법 KS B 0801⁸⁾과 시험편은 KS B 0802⁹⁾를 참조하였다. 이때 리벳 소재는 열처리를 통해 기계구조용 탄소강인 SM45C를 사용하였고 경도는 HV450, HV500이다. 조사된 SPR 접합소재의 기계적 물성을 Table 1에 나타내었다.

2.2 상부판재와 리벳의 관계 조건식

SPR 기구에서 리벳은 상부판재를 피어싱하고 하부판재와 소성결합이 된다. 이때 초고장력강이 상부에 위치할 때, 리벳의 생크는 압축으로 인한 길이감소, 파단, 굽힘 및 접힘 등이 발생할 수 있다.⁶⁾ 따라서 실험과 해석 전에 리벳의 강도와 상부판재의 강도 및 두께로부터 접합 가능 여부를 조사하기 위해 관계식을 제시하고자 하였다.

Table 1 Mechanical properties of rivet and sheets

Specimens	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_f (%)
SM45C(HV450)	1490	1695	7
SM45C(HV500)	1630	1871	6
SPFC440	337	557	28
SPFC590	478	706	23
SPFC780	534	948	17
SILAFONT	107	223	23

접합 시에 판재의 전단응력 계산은 von-Mises의 항복이론을 기준으로 판재의 인장강도를 적용하였다.

$$\frac{\sigma_{u\ of\ sheets}}{\sqrt{3}} = \tau_{sheets} \tag{1}$$

여기서 $\sigma_{u\ of\ sheets}$ 는 판재의 최대인장강도, τ_{sheets} 는 판재의 전단강도이다.

판재의 전단면적은 리벳에 의해 상부판재가 전단되는 부분, 즉 원 둘레 길이와 상부판재의 두께이다.

$$A_{sheets} = \pi \times D_{piercing} \times t_{sheets} \tag{2}$$

접합 시에 요구되는 판재의 전단하중은 판재의 전단응력과 전단면적을 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{sheet} \times A_{sheet} = P_{piercing} \tag{3}$$

판재의 전단하중은 리벳에 압축하중으로 가해지며 리벳 생크의 단면적으로 나누어 압축강도 σ_c 를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{P_{piercing}}{A_{rivet}} \tag{4}$$

식 (4)를 이용하여 본 연구에 적용된 상부판재의 전단강도로부터 접합에 필요한 리벳의 압축강도를 계산하여 Table 2에 나타내었고, 이를 리벳소재의 항복강도와 비교분석하여 접합가능 여부를 판단하였다.

SPFC440과 SPFC590은 경도 HV450인 리벳으로 접합 가능할 것으로 예측되었으며, SPFC780은 HV500 이상부터 접합이 가능하다고 예측되었다. 이를 Fig. 1와 같이 접합해석으로 타당성을 검증하였으며 (a)를 (b)와 비교할 때, 리벳 생크의 압축으로 인한 길이 감소를 볼 수 있다. 따라서 SPFC440과 SPFC590의 접합해석에서는 리벳의 경도를 HV450으로, SPFC780의 접합해석에서는 리벳의 경도를 HV500으로 적용하였다.

Table 2 Thickness and shear strength of sheets, compressive strength of rivets

Specimens	t_{sheets} (mm)	τ_{sheets} (MPa)	σ_c (MPa)
SPFC440	0.6	321.82	343.59
SPFC590	1.0	408.01	726.02
SPFC780	1.6	547.40	1558.49

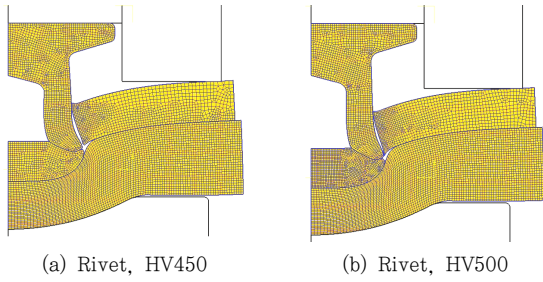


Fig. 1 Simulated results for joining SPFC780 and SILA-FONT with strength of rivet

2.3 SPR 접합 조건

SPR 접합에 필요한 부품들은 모두 축대칭형상이므로 2D 해석이 가능하며 AutoCAD를 이용하여 SPR을 모델링하고 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

본 연구에 적용된 판재는 초고장력강과 알루미늄 합금으로써 이종재료 접합조건을 Table 3에 정리하였다. 알루미늄 합금인 SILAFONT와 접합되는 초고장력강인 SPFC440은 접합조건 1, SPFC590은 접합조건 2 그리고 SPFC780은 접합조건 3으로 설정하였다. 그리고 길이가 6.5 mm인 리벳을 rivet_1, 6.2 mm인 리벳을 rivet_2, 6.0 mm인 리벳을 rivet_3으로 설정하고 Fig. 2와 같이 모델링 하여 해석에 적용하였다.

Table 3 Joining condition of sheets for SPR

No.	Upper sheet / thickness [mm]	Lower sheet / thickness [mm]
1	SPFC440 / 0.6	SILAFONT / 3.0
2	SPFC590 / 1.0	
3	SPFC780 / 1.6	

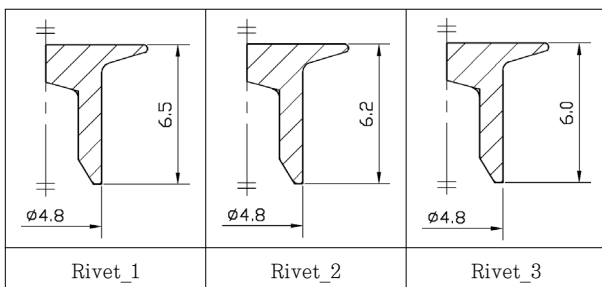


Fig. 2 Cross-section view of semi-tubular rivets

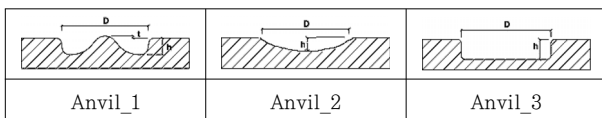


Fig. 3 Cross-section view of anvils

앤빌은 Fig. 3과 같이 단면형상의 중심부가 볼록한 앤빌을 anvil_1, 오목한 앤빌을 anvil_2 그리고 평평한 앤빌을 anvil_3으로 모델링하여 해석에 적용하였다. 따라서 앤빌에 따른 접합성을 비교하여 초고장력강과 알루미늄 합금에 적절한 형상을 제시하고자 하였다. 판재 접합조건 3개, 리벳 형상 3개 그리고 앤빌 형상 3개에 따른 조건을 조합하여 시뮬레이션 하였다.

2.4 SPR 접합 해석 결과 측정 방법¹⁰⁻¹²⁾

접합성 분석을 위하여 Fig. 4와 같이 SPR 접합성 평가에 요구되는 주요 치수를 측정하였다. 여기서 X₁은 리벳 생크부의 벌어진 직경, X₂는 리벳이 하부판재로 침투한 깊이(interlock)이다. X₁, X₂는 판재간의 접합 강도 측면에서 매우 중요한 인자들이다. 또한 A는 리벳과 앤빌 사이의 최소두께, B는 상부판재와 앤빌 사이의 최소두께 그리고 C는 중심부 하부판재의 두께이다.

2.5 접합 해석결과

SPR 해석결과는 접합 조건에 따라 다음과 같이 정리하였다. Fig. 5는 anvil_1, Fig. 6은 Anvil_2, Fig. 7은 anvil_3을 적용한 해석결과이다.

Anvil_1을 적용한 해석결과 Fig. 5에서 접합조건 1

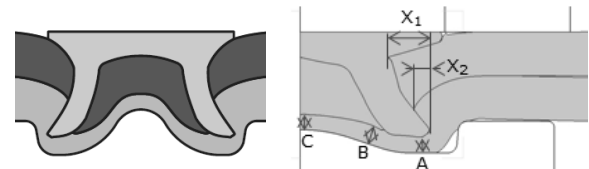


Fig. 4 Methods of measurement for the simulation results of joining

Condition	Rivet_1	Rivet_2	Rivet_3
Condition of sheets 1	1.05, 0.82, 2.78, 1.35, 0	1.41, 1.20, 1.57, 0.76, 0.22	0.93, 0.76, 1.48, 0.65, 0.43
Condition of sheets 2	0.39, 0.15, 2.97, 1.47, 0	1.19, 0.87, 1.44, 0.44, 0.19	0.77, 0.69, 1.37, 0.48, 0.44
Condition of sheets 3	1.74, 0.89, 0.13, 0.43, 1.35	1.18, 0.60, 0.06, 0.42, 1.17	0.96, 0.15, 0.25, 0.53, 1.85

Fig. 5 Riveting results of shape conditions anvil_1

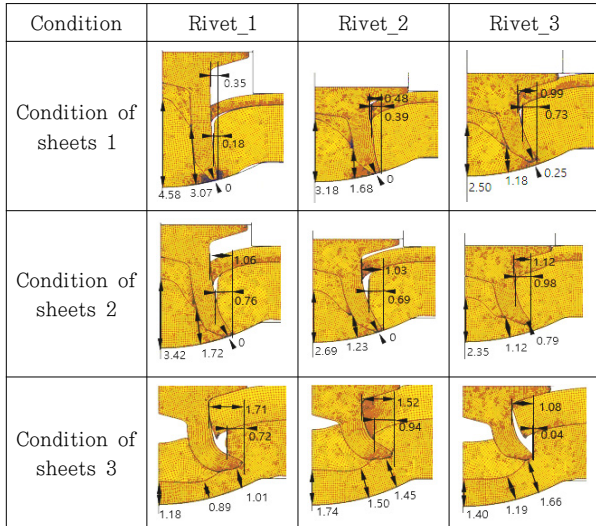


Fig. 6 Riveting results of shape conditions anvil_2

과 2에 길이가 6.5 mm인 rivet_1로 접합할 경우 하부판재가 피어싱 되어 접합이 불가능할 것으로 판단된다. 그리고 접합조건 3의 해석결과에서 rivet_1과 rivet_2로 접합 시 하부판재의 최소 두께가 각각 0.13 mm와 0.06 mm로 하부판재에서 전단이 예측되고, rivet_2로 접합 시 interlock이 0.15 mm로 리벳과 하부판재와의 결합이 어려울 것이다. 따라서 접합조건 1과 2에서는 rivet_2와 rivet_3으로 접합이 가능하지만 접합조건 3에서 접합이 어려울 것이다.

Anvil_2을 적용한 해석결과 Fig. 6에서 접합조건 1과 2에 각각 길이가 6.5 mm인 rivet_1과 6.2 mm인 rivet_2로 접합할 경우 하부판재가 피어싱 되어 접합이 불가능할 것이다. 또한 접합조건 3에서 길이가 6 mm인 rivet_3으로 접합할 경우 interlock은 0.04 mm이며 리벳과 하부판재가 결합이 어려울 것으로 판단된다. 따라서 접합조건 1과 2에서는 rivet_3으로 접합이 가능하고 접합조건 3에서는 rivet_1과 rivet_2로 접합이 가능하다.

Anvil_3을 적용한 해석결과 Fig. 7에서 접합조건 1과 2에 각각 rivet_1과 rivet_2로 접합할 경우 하부판재가 피어싱 되어 접합이 불가능할 것으로 판단된다. 접합조건 3에서 rivet_3을 적용한 해석결과에서는 interlock이 0.21 mm이고 이는 상부판재와 하부판재가 접합은 가능할 것으로 예측된다. 따라서 접합조건 1과 2에서는 rivet_3으로 접합이 가능하고 접합조건 3에서는 rivet_1과 rivet_2로 접합이 가능하다.

전체 해석결과에서 rivet_1을 적용한 경우 접합조건 1, 2에서 하부판재가 전단되었지만 접합조건 3에서는 접합이 양호하였다. 그 원인은 리벳의 길이가 접합판재의 전체두께에 비해 길게 설계된 것을 알 수 있다. 또한 접합조건 3에서 rivet_3을 적용한 해석결과에서 리

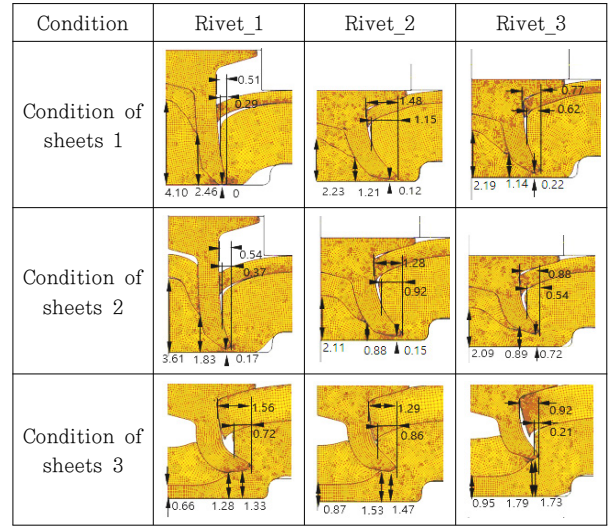


Fig. 7 Riveting results of shape conditions anvil_3

벳의 interlock이 매우 작으며 접합이 어렵다. 이는 접합조건 3과 같이 상부판재의 두께가 1.6 mm일 때 길이가 6 mm인 rivet_3의 길이가 부족한 것을 알 수 있다. 측정된 해석결과는 Table 4에 정리 하였다.

Table 4 Simulated results of SPR joining

Anvil/ Condition of sheets/ Rivet		X ₁	X ₂	A	B	C	
1	1	1	1.05	0.18	0	1.34	2.78
		2	1.41	1.20	0.22	0.76	1.57
		3	0.93	0.76	0.43	0.65	1.48
	2	1	0.39	0.15	0	1.47	2.97
		2	1.19	0.87	0.19	0.44	1.44
		3	0.77	0.69	0.44	0.48	1.37
	3	1	1.74	0.89	1.35	0.43	0.13
		2	1.18	0.60	1.17	0.42	0.06
		3	0.96	0.15	1.85	0.53	0.25
2	1	1	0.35	0.18	0	3.07	4.58
		2	0.48	0.39	0	1.68	3.18
		3	0.99	0.73	0.21	1.18	2.50
	2	1	1.06	0.76	0	1.72	3.42
		2	1.03	0.69	0	1.23	2.69
		3	1.12	0.98	0.79	1.12	2.35
	3	1	1.71	0.72	1.01	0.89	1.18
		2	1.52	0.94	1.45	1.50	1.74
		3	1.08	0	1.66	1.19	1.40
3	1	1	0.51	0.29	0	2.46	4.10
		2	1.48	1.15	0.12	1.21	2.23
		3	0.77	0.62	0.28	1.14	2.19
	2	1	0.54	0.37	0.17	1.83	3.61
		2	1.28	0.92	0.2	0.88	2.11
		3	0.88	0.54	0.72	0.89	2.09
	3	1	1.56	0.72	1.33	1.28	0.66
		2	1.29	0.86	1.47	1.53	0.87
		3	0.92	0.21	1.73	1.79	0.95

3. SPR 시험

3.1 SPR 접합시험

SPR 접합 시뮬레이션을 검증하고자 SPR 접합해석과 동일조건으로 접합시험 하였다. Anvil_2를 적용하여 접합시험 하였으며 접합시험결과는 Fig. 8에 나타내었다. 또한 SPR 접합시험결과의 X_1 , interlock X_2 ,

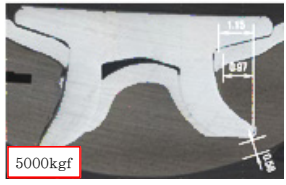
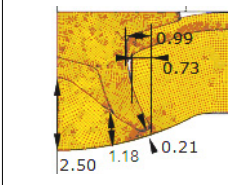
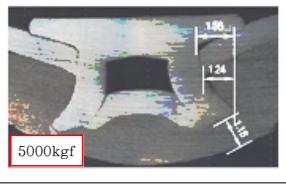
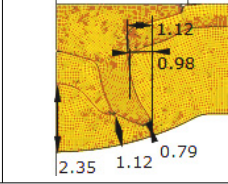

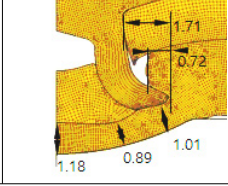
Experimental results	Simulated results
	
Rivet_3 with SPFC440 and SILAFONT	
	
Rivet_3 with SPFC590 and SILAFONT	
	
Rivet_1 with SPFC780 and SILAFONT	

Fig. 8 Analysis of simulated results and experimental ones of SPR joining

Table 5 Analysis of simulated results and experimental ones of SPR joining

Rivets hardness	Condition of sheets	X_1 (mm)	X_2 (mm)	A (mm)
HV450	SPFC440 / 0.6t and SILAFONT / 3.0t	1.15	0.97	0.58
	SPFC440 / 0.6t and SILAFONT / 3.0t (simulated result)	0.99	0.73	0.21
	SPFC590 / 1.0t and SILAFONT / 3.0t	1.56	1.24	1.18
	SPFC590 / 1.0t and SILAFONT / 3.0t (simulated result)	1.12	0.98	0.79
HV500	SPFC780 / 1.6t and SILAFONT / 3.0t	0.83	0.77	0.94
	SPFC780 / 1.6t and SILAFONT / 3.0t (simulated result)	1.71	0.72	1.01

Table 6 Shearing test results of SPR joint

Rivets hardness	Condition of sheets	Loads of shearing tests (N)
HV450	SPFC 440 / 0.6t and SILAFONT / 3.0t	4141.5
	SPFC 590 / 1.0t and SILAFONT / 3.0t	5778.4
HV500	SPFC 780 / 1.6t and SILAFONT / 3.0t	7272.2

리벳과 앤빌 사이의 최소두께인 A를 측정하고 해석결과와 비교하기 위하여 Table 5에 정리하였다. SPR 접합시험과 시뮬레이션에서 X_1 과 A의 측정결과는 미미한 오차가 발생하였다. 이는 시험편의 절단면이 편심 되었거나 접합 시 리벳이 기울어졌기 때문이라고 생각된다.

3.2 SPR 접합후 전단시험

SPR 접합강도를 조사하기 위해 전단시험편을 제작하고 INSTRON 8801 인장시험기를 이용하여 2 mm/min 속도로 전단 시험하였다.¹³⁾ 전단시험편과 시험하중을 Table 6에 나타내었다.

접합부의 전단시험 결과에서 SPFC440과 SILAFONT 판재의 접합조건에서는 4141.5 N으로 조사되었고 SPFC590과 SILAFONT 판재의 접합조건에서는 5778.4 N으로 조사되었으며 SPFC 780과 SILAFONT 판재의 접합조건에서는 7272.2 N으로 조사되었다. 이는 판재의 강도가 높아짐에 따라 전단하중도 증가하는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 판재의 강도와 접합부의 전단하중은 비례 관계가 있다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 초고장력강과 알루미늄 합금의 접합을 위한 SPR 조건을 제시하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D를 이용하였다. SPR 접합 시뮬레이션과 시험결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 두께가 1.6 mm인 초고장력강 SPFC780과 두께가 3.0 mm인 SILAFONT의 SPR 접합에서 리벳의 경도가 HV500 이상일 때, 접합이 가능하며 길이가 6.2 mm 인 rivet_2 형상이 적합하다.

2) 두께가 0.6 mm두께인 SPFC440 및 1.0 mm인 SPFC590 상부판재와 두께가 3.0 mm인 SILAFONT 하부판재의 접합조건에서 경도가 HV450이고 길이가 6.0 mm인 rivet_3 리벳으로 접합이 가능하며 anvil_2, anvil_3 형상의 앤빌을 적용 시 접합이 우수할

것으로 예측된다.

3) 고장력강과 알루미늄 합금의 접합을 위한 SPR 접합시험과 해석결과를 비교, 분석하였을 때 잘 일치하므로 해석결과와 타당성을 확인하였다. 따라서 초고장력강과 알루미늄 합금의 SPR 접합을 위한 리벳과 엔빌 설계 연구에 많은 기여가 될 것으로 기대된다.

4) 초고장력강과 알루미늄 합금의 SPR 접합부 전단 시험 결과에서 상부판재의 강도 및 두께가 증가함에 따라 전단하중도 커지는 경향을 알 수 있다. 이를 토대로 요구되는 강도에 맞는 접합조건 설정이 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 2013년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

References

1. Z. Xiaodog, M. Zhaohui and W. Li, Current Status of Advanced High Strength Steel for Auto-making and its Development in Baosteel, *Baosteel Research Institute*, Shanghai, China (2007)
2. R. KUZIAK, R. KAWALLA and S. WAENGLER, Advanced high strength steels for automotive industry, *ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING.*, 8(2) (2008), 103-117
3. Yukihiisa Kuriyama, Manabu Takahashi Hiroshi Ohashi, Trend of Car Weight Reduction Using High-strength Steel, *Automatic vehicle technology*, 55(4) (2001), 51-57
4. Takehide SENUMA, Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel Sheets, *ISIJ International*, 41(6) (2001), 520-532
5. ULSAB-AVC Body Structure Materials, Technical Transfer Dispatch No. 6, May, (2001)
6. K. Mori, T. Kato, Y. Abe and Y. Ravshanbek, Plastic Joining of Ultra High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets by Self Piercing Rivet, *Ann. CIRP*, 55(1) (2006), 283-286

7. L. Han and A. Chrysanthou, Evaluation of quality and behaviour of self-piercing riveted aluminium to high strength low alloy sheets with different surface coatings, *Materials and Design*, 29 (2008), 458-468
8. KS B 0801, Test pieces for tensile test for metallic materials, Korean Standard Information Center (2013)
9. KS B 0802, Method of tensile test for metallic materials, Korean Standard Information Center (2013)
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*, 209 (2009), 3914-3922
11. D. B. Kim, Design of Self-Piercing Rivet for Joining Dissimilar Sheet Metals, A thesis for the degree of Master, (2011) (in Korean)
12. H. Y. Cho and D. B. Kim, Finite element analysis for joining glass fiber reinforced plastic and aluminium alloy sheets, *Journal of Welding and Joining*, 33(2) (2015), 78-84 (in Korean)
13. KS B 0851, Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot and embossed projection welded joints (2006)

부 록

σ_u of sheets	: 판재의 인장강도
$P_{piercing}$: 리벳이 받는 압축하중
A_{rivet}	: 리벳 생크의 단면
A_{sheets}	: 판재의 전단면적
$D_{piercing}$: 피어싱 부분 직경
t_{sheets}	: 상부판재의 두께
τ_{sheets}	: 판재의 전단강도
σ_c	: 리벳의 압축강도
σ_y	: 항복강도
σ_u	: 인장강도
ϵ_f	: 연신율