

유리섬유 강화 플라스틱과 알루미늄 합금 접합을 위한 유한요소해석

조해용^{*,†} · 김동범^{**}^{*}충북대학교 공과대학 기계공학부^{**}충북대학교 대학원 정밀기계공학과

Finite element analysis for joining glass fiber reinforced plastic and aluminium alloy sheets

Hae-Yong Cho^{*,†} and Dongbum Kim^{**}^{*}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 : hycho@cbnu.ac.kr

(Received April 14, 2015 ; Accepted April 29, 2015)

Abstract

Self-piercing rivet (SPR) is mechanical joining methods and which can be joining dissimilar materials. Unlike conventional riveting, SPR also needs no pre-drilled holes. During plastically deformation, SPR pierces upper sheet and joins it to under sheet. SPR has been mainly applied to the joining the automobile body and some materials, such as glass fiber reinforced polymer and aluminum alloy, which represent the sheet-formed materials for lightweight automobile. Glass fiber reinforced plastic (GFRP) has been considered as a partial application of the automobile body which is lighter than steels and stronger than aluminium alloys. It is needed SPR to join Al alloy sheets and GFRP ones. In this paper, in order to design the rivet and anvil, which are suitable for GFRP, the joinability was examined through simulations of SPR joining between GFRP and Al alloy sheets. For this study, AutoCAD was used for the modeling and the simulated using commercial FEM code DEFORM-2D. The simulated results for SPR process joining between GFRP and Al alloys were confirmed by the same conditions as experimental trials.

Key Words : Self-Piercing rivet, Dissimilar materials, Finite element method, Glass fiber reinforced plastic (GFRP)

1. 서 론

Self-piercing rivet (SPR)은 두 개 이상의 판재를 체결하는 기계적 접합법으로써, 용융점이 달라 용접이 어려운 이종재료 판재 접합에 사용된다. 또한 기존의 리벳팅 공법과 달리 상부판재를 스스로 피어싱 하고 하부판재와 소성 결합되므로 드릴링 공정이 불필요한 이점이 있다¹⁻³⁾.

SPR은 자동차의 차체접합에 주로 적용되고 있으며, 대표적인 접합조건으로는 알루미늄 합금과 스틸의 이종재료가 있다. 자동차의 연비향상을 위한 경량화로부터

시작된 하이브리드 차체는 기존의 강도와 강성에 만족되며 중량을 감소시키는 목적을 갖고 있다. 경량화를 위하여 여러 파트에 적용되고 있는 판재로는 알루미늄 합금을 비롯하여 최근에는 GFRP 등의 복합소재 적용에 대한 관심이 높아지고 있다. 이렇게 다양한 재질의 판재 접합은 용융온도 차이로 인하여 용접이 어려워 기계적 접합법인 SPR이 요구된다. 새로운 소재의 판재 접합조건은 SPR의 강도와 강성 및 형상의 설계가 요구되며, 최종적으로 실험을 통한 접합성 검토가 필요하다. 이때, SPR의 설계는 실험적 연구, 해석과 실험을 병행한 연구로 구분된다. 실험을 통한 연구는 리벳과 앤빌의 형상변경이 어렵고, 접합성 검토 시에 접합부의 단

면을 절단하여 관찰해야하는 문제가 있다. 반면에 해석과 실험을 병행한 연구는 리벳과 엔빌의 형상변경이 용이하고 접합성을 눈으로 쉽게 예측할 수 있다. 또한 GFRP와 같이 새롭게 적용되는 판재들은 실제 적용에 앞서 해석을 통한 접합성 검토가 필요하다⁴⁻⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 SPR 접합법으로 복합재료인 GFRP와 알루미늄합금의 접합 가능성을 찾기 위하여 해석과 실험이 병행된 연구를 하고자 하였다. 이에 따라 경도가 다른 리벳 소재와 GFRP 판재의 기계적 물성을 조사하여 해석에 적용하였고 리벳의 형상 변경을 통하여 이종재료 접합에 적합한 SPR을 설계하였다. 또한 리벳과 엔빌을 제작하고 접합 실험을 통하여 해석적 연구의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. SPR 유한요소해석

2.1 SPR 접합 해석 조건

SPR 접합 선행규칙은 실제 접합 시 적용되는 조건들을 유한요소해석에 적용하기 위해 제시되는 규칙으로써, 본 연구의 접합 조건에 적용된다⁹⁻¹⁰⁾.

- 1) 판재의 형상은 접합에 관련 없는 영역을 제외하고 모두 모델링 한다.
- 2) 재료는 하중을 받아 변형되더라도 체적의 변화는 없다. (체적일정조건)
- 3) 엔빌, 펀치, 홀더는 강체로 접합과정 중 변형 및 파손이 없다.
- 4) 해석 중 펀치의 속도, 재료 물성치의 경계조건 변화는 없다.
- 5) 마찰상수는 SPR 접합공정에 적합한 0.12를 적용한다.
- 6) 소재간 열전달은 없으며, 해석 중 온도는 일정하다.
- 7) SPR 접합 과정에서 판재의 두께가 0.05 mm 이하로 감소되면, 전단되었다고 가정한다.
- 8) 판재접합은 단일 공정으로 이루어져야 한다.
- 9) SPR접합규격에 따라 판재접합의 성공 기준을 판단한다.

본 연구의 판재 접합조건은 GFRP와 알루미늄합금소재인 Al5052의 이종재료 접합으로서 조건은 Table 1

Table 1 Joining conditions

Upper sheet / thickness (mm)		Lower sheets / thickness (mm)	
GFRP	2.0	Al5052	2.0

과 같다.

2.2 리벳, 판재 소재의 물성

리벳의 소재는 SM45C로써 열처리가 쉽고 가공성이 우수한 기계구조용 탄소강이며 판재 소재는 GFRP와 Al5052이다. 인장시험을 통하여 리벳과 GFRP의 응력-변형을 관계를 조사하였다.

리벳 소재인 SM45C의 인장시험편은 KS규격의 봉재 14A호로 설계하였다¹¹⁾. 가공된 시험편은 열처리를 통하여 HV 350, HV 450의 경도를 얻고자 하였다. 시험편의 경도 HV 350, HV 450는 각각 소입과 소려온도 480℃, 350℃로 2시간 동안 유냉 하였다. 여기서 재료의 경도와 소려온도는 반비례하는 것을 알 수 있다. 열처리된 SM45 시험편의 인장시험 속도는 0.5 mm/min이며, 측정범위 25 mm의 연신율계를 이용하여 인장시험편의 변형을 측정하였다. 열처리된 시험편의 인장시험 결과로부터 얻은 기계적 물성을 Table 2에 정리하였다. GFRP의 인장시험편은 KS D 8508에 따라 설계하였다¹²⁾. 또한 인장하중의 방향에 대해서 Glass 섬

Table 2 Tensile test results of SM45C

Hardness of specimens	Tensile strength, Yield [MPa]	Tensile strength, Ultimate [MPa]	Elongation [%]
HV 350	682	982	15.7
HV 450	1490	1695	7.65

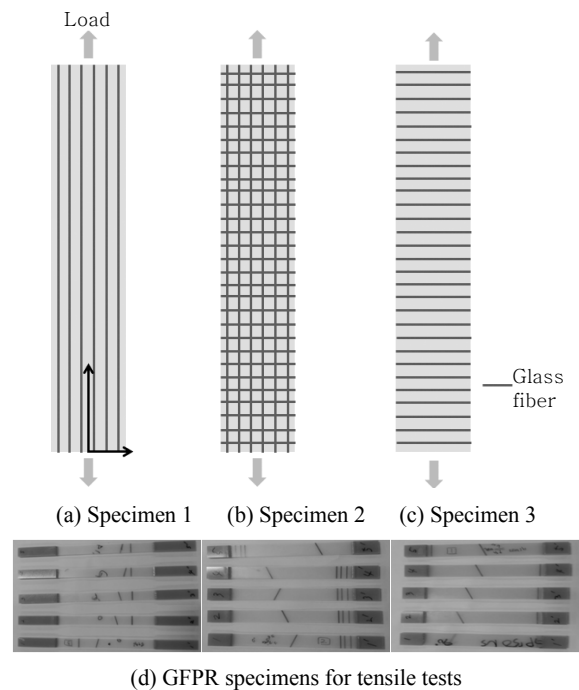


Fig. 1 Orientation of glass fiber in composite materials

Table 3 Specimens of GFRP sheets for tensile test

Orientation of glass fiber in specimens	Width [mm]	Length [mm]	Thickness [mm]
1 (0°)	12.55	132	1.15
2 (0°+90°)	24.10	122	2.50
3 (90°)	24.05	131	1.15

Table 4 Mechanical properties of GFRP sheets

Orientation of glass fiber in specimens	Modulus of elasticity [GPa]	Tensile strength, Yield [MPa]	Tensile strength, ultimate [MPa]	Elongation [%]
1 (0°)	36.98	740.15	1318.23	4.66
2 (0°+90°)	22.57	290.14	569.01	3.53
3 (90°)	10.46	50.25	62.50	0.72

유를 0°, 0° + 90°, 90° 방향으로 적용한 세 가지 판재의 인장시험편으로 인장시험 하였다. 섬유 방향 및 길이 제원에 대하여 Fig. 1과 Table 3에 나타내었다.

인장방향의 시험속도는 5 mm/min이며, 표점거리의 늘어난 길이를 측정하기 위하여 측정범위 50 mm의 연신율계를 이용하였다. GFRP의 인장시험의 결과 데이터를 정리하여 Table 4에 나타내었다.

2.3 해석 모델링 및 경계조건

2차원 설계 프로그램인 AutoCAD를 이용하여 SPR 접합 시뮬레이션에 필요한 부품들을 모델링 하였다. 이후 모델링 파일들을 확장자명을 *.DXF로 저장하고, 이를 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D에서 불러들이는 방법을 적용하였다. Fig. 2와 Fig. 3과 같이 리벳 설계는 길이를 5 mm, 6 mm로 달리하였고 앤빌은 중심부를 블록과 오목 형상으로 달리 모델링 하였다.

해석 경계조건은 해석결과에 큰 영향을 미치므로 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해서는 실제로 SPR 접합에서 적용되고 있는 경계조건을 해석에 정확히 적용해야 한다. 경계조건을 Table 5에 나타내었다. 축대칭 해석모드를 이용하여 리벳을 가하는 펀치의 속도는 7 mm/sec, 홀더 하중은 유압방식으로 최대 500 N으로 적용하였다.

Table 5 Boundary conditions for FEA

Item	Simulation mode	Velocity of punch (mm/sec)	Holder load (N limit)	Temperature (°)	Friction factor
values	Axisymmetric	7	Hydraulic press 500	20	0.12

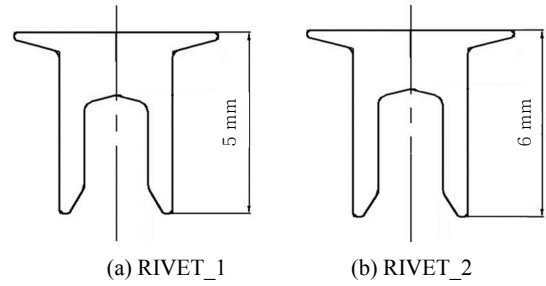


Fig. 2 Initial drawing of rivets

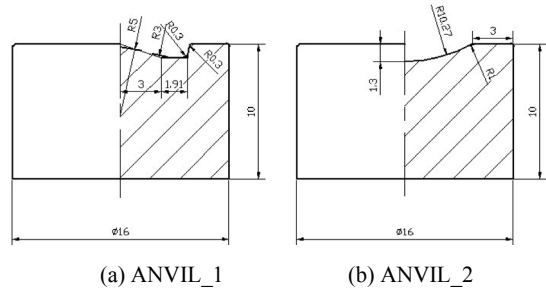


Fig. 3 Initial drawing of anvils

3. SPR 해석결과 분석

3.1 SPR 접합 해석 결과 분석 방법

접합성 분석을 위하여 Fig. 4와 같이 SPR 접합성 평가에 요구되는 주요 치수를 측정하였다⁷⁾. 여기서, X1은 리벳 생크부의 벌어진 직경, X2는 리벳이 하부판재로 침투한 깊이(interlock)이다. X1, X2는 판재간의 접합강도 측면에서 매우 중요한 인자들이다. 또한 Y는 중심부 하부판재의 두께, L은 리벳과 Anvil 사이의 최소두께, X1/R은 생크부의 최소 직경과 벌어진 최종 직경의 비이다. Y, L은 접합품질과 관련되며, 이들의 두께가 얇아질수록 하부판재에서 전단이 발생할 수 있다.

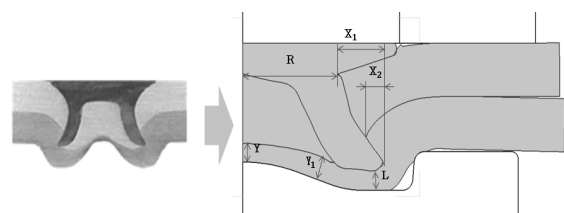


Fig. 4 Method of measurement for the simulation results of self-pierce riveting

3.2 SPR 접합 해석 결과

상부 판재의 두께가 2 mm 인 GFRP와 하부판재 두께가 2 mm 인 Al5052의 판재조건을 적용한 리벳 길이 5 mm와 6 mm, 리벳 경도 HV 350과 HV 450, Anvil_1형상과 Anvil_2형상별 해석결과를 Fig. 5, Fig. 6에 나타내었다. 분석결과 리벳의 길이가 5 mm, 경도가 HV 450 그리고 Anvil_2형상을 적용할 경우 판재의 접합이 어려운 것으로 판단된다. 반면 리벳의 경도가 HV 350일 때, 모든 리벳과 앤빌은 접합성이 좋은 것을 볼 수 있다. 또한 리벳길이가 6mm, 경도가 HV 450 그리고 Anvil_1 형상을 적용한 해석결과도 접합 가능성을 확인하였다. 여기서, 리벳의 경도는 강도와 관련되며 접합강도 측면에서 볼때, 리벳의 경도가

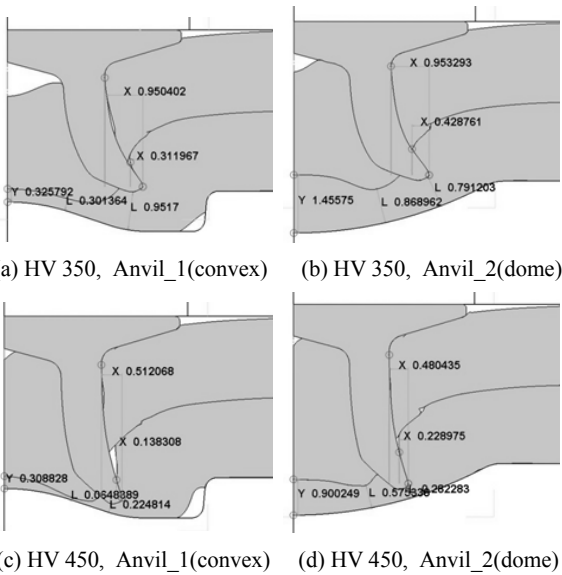


Fig 5 Simulated results for rivets-5 mm

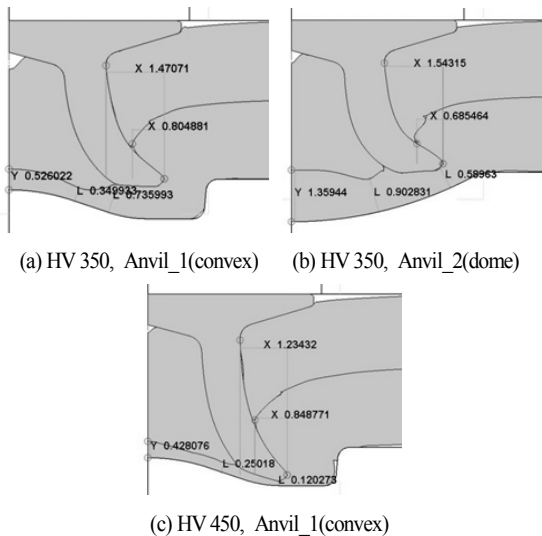


Fig. 6 Simulated results for rivets-6 mm

Table 6 Joining simulation results(Rivet 5mm)

	HV 350 Anvil (convex)	HV 350 Anvil (dome)	HV 450 Anvil (convex)	HV 450 Anvil (dome)
X ₁	0.950	0.953	0.512	0.480
X ₂	0.312	0.429	0.138	0.229
Y	0.326	1.456	0.389	0.900
Y ₁	0.301	0.869	0.065	0.575
L	0.952	0.791	0.225	0.282

Table 7 Joining simulation results(Rivet 6mm)

	HV 350 Anvil (convex)	HV 350 Anvil (dome)	HV 450 Anvil (convex)
X ₁	1.471	1.543	1.234
X ₂	0.805	0.685	0.849
Y	0.526	1.359	0.428
Y ₁	0.350	0.903	0.250
L	0.736	0.600	0.120

높을수록 유리할 수 있다. 따라서 리벳의 경도는 HV 450 이 적절하다. 해석결과에서 주요 치수를 측정하여 Table 6과 Table 7에 정리하였다.

4. 접합 실험

Fig. 7은 접합 실험을 위해 사용된 SPR 전용 프레스이다. 프레스는 앤빌이 장착되어 있고, 펀치는 유압 이용해 리벳을 가압한다. 펀치의 속도는 시물레이션과 동일한 7 mm/s이고 최대 가용 하중은 50 kN이다.

SPR 설계과정에서 리벳은 두 가지 길이의 변수를 적용하여 설계하였으나 실제 제작이 용이한 조건의 리벳의 형상인 RIVET_1을 적용하였다. 실험에서 리벳의 소재는 SM45C를 사용하였다. 리벳은 열처리를 통하여 경도 HV 450으로 제작하였다. 리벳의 경도는 강도측면에서 유리한 HV 450으로 제작하고 접합 실험하였으며, 유한요소해석 결과와 비교, 분석을 통해 실험 결과를 검증하고자 하였다. Fig. 8은 접합조건인 GFRP, 두께 2.0 mm와 Al5052, 두께 2.0 mm의 시물레이션 및 실험 결과를 비교 하여 나타내었다. 또한 실험의 결과와 시물레이션 결과를 비교할 수 있도록 주요치수를 측정하여 Table 8에 정리하였다.

해석결과와 미미한 오차가 발생하였으나, 실험과 시물레이션은 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 오차 원인은 실험에서 접합과 절단 시에 편심의 발생과 측대



Fig. 7 Press for self-piercing riveting

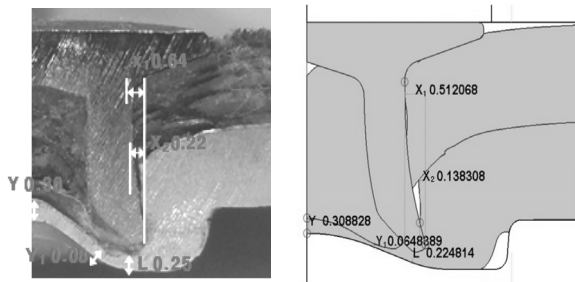


Fig. 8 Comparisons of experiment results with simulated results for a joining condition of GFRP and Al5052

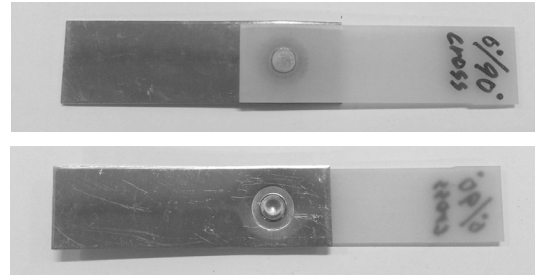
Table 8 Analysis of joining simulation results and joining experiment results

Rivet	Joining considers of sheets	X ₁ (mm)	X ₂ (mm)	Y (mm)	Y ₁ (mm)	L (mm)
RIVET_2_HV 350 (simulated results)	GFRP-2.0 mm and Al5052-2.0 mm	0.64	0.22	0.36	0.08	0.25
RIVET_2_HV 350 (experiment results)	GFRP-2.0 mm and Al5052-2.0 mm	0.51	0.14	0.31	0.06	0.22

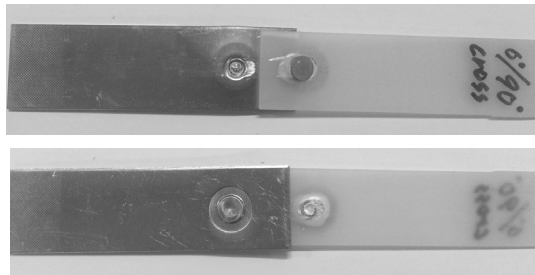
칭 시뮬레이션의 차이에서 비롯되었다고 생각된다. 따라서 유한요소법을 활용하여 제품을 설계하고, 설계된 제품을 생산한다면 많은 시간과 비용이 절감되는 효과를 기대 할 수 있을 것이다.

5. 접합부 전단 시험

GFRP와 Al5052 판재 간의 SPR 접합력을 조사하기 위해 KS B 0851과 같이 전단시험편을 제작하고 NSTRON사인 8801을 이용하여 2 mm/min 속도로 전단 시험하였다¹³⁾. 전단시험 전, 후 시험편과 시험 중을 Fig. 9와 10에 나타내었다.



(a) Top and bottom views of Specimens before shear tests.



(b) Top and bottom views of Specimens after shear tests.

Fig. 9 Specimens for shear tests of self-pierce riveted zone



Fig. 10 Shear testing for self-pierce riveted zone of GFRP and Al5052 sheets

Fig. 11은 전단 시험 결과를 하중과 변위 선도로 나타낸 것이다. GFRP와 Al5052 판재 간에 SPR 접합된 부분의 최대 전단하중은 하중방향으로 1.84 mm 인장되었을 때 3.6 kN으로 조사되었으며 전단하중과 시험편의 인장으로부터 계산된 에너지는 10.7 N-mm이다. 여기서 고강도 스틸과 알루미늄 합금의 SPR 접합된 전단하중은 약 4.5 kN ~ 5.0 kN 정도이다¹⁴⁾. 본 연구에서 SPR 접합에 적용된 GFRP와 Al5052는 일반 스틸과 알루미늄 합금의 최대 전단하중보다 낮았으며 그 원인은 재료의 강도차이에서 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 11의 그래프에서 하중 감소가 빠르게 진행된 영역을 볼 수 있다. 이는 전단 시험과정에서 판재와 수직하게 접합되었던 SPR이 기울어지며, 이로 인해 SPR

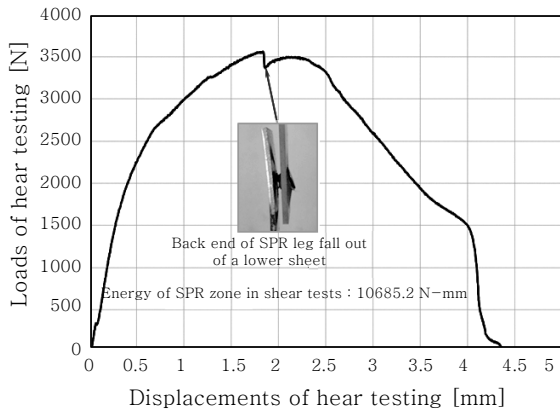


Fig. 11 Plot of loads versus displacements for shearing tests of self-pierce riveted GFRP and Al5052 sheets

이 기우는 방향의 반대쪽인 SPR 다리 일부가 하부판재와 분리되어 하중이 빠르게 감소된 것이라 판단된다. 또한 하중 감소 이후에 다시 하중의 증가와 완전분해되지 않은 것을 볼 수 있다. 그 원인은 SPR의 기울어진 방향의 다리가 여전히 하부판재와 결합되어 있으며 리벳다리와 하부판재의 변형에 따른 가공경화가 발생한 것으로 생각된다.

6. 결 론

본 연구에서는 GFRP와 알루미늄 합금 판재간의 SPR 해석을 통하여 접합성을 검토하고 접합에 적합한 리벳과 앤빌을 설계하였다. 이를 위해 SPR 모델링은 Auto CAD, 접합 시뮬레이션은 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D를 이용하였다. 위와 같은 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) GFRP와 알루미늄 합금 판재의 접합조건에서 리벳의 길이가 5 mm, 경도가 HV 450 그리고 Anvil_2 형상을 적용할 경우 판재의 접합이 어려운 것으로 판단된다. 반면 리벳의 경도가 HV 350일 때, 모든 리벳과 앤빌은 접합성이 좋은 것을 볼 수 있다. 또한 리벳길이가 6 mm, 경도가 HV 450 그리고 Anvil_1 형상을 적용한 해석결과도 접합 가능성을 확인하였다. 여기서, 리벳의 경도는 강도와 관련되며 접합강도 측면에서 볼 때, 리벳의 경도가 높을수록 유리할 수 있다. 따라서 리벳의 경도는 HV 450이 적절하다.

2) 리벳 길이 6 mm, 리벳경도 HV 350 그리고 dome 형상인 ANVIL_2 조건에서 interlock인 X2가 가장 큰 것을 알 수 있다. 리벳의 경도 요구수준에 HV 350 이하일 경우 적합한 형상이다.

3) 실험과 시뮬레이션을 비교한 결과 주요치수 및 접합부의 단면 형상이 대체적으로 잘 일치함을 확인할 수 있다. 축대칭의 시뮬레이션과 실험에서 접합부의 편심진 절단으로 인해 X1이 0.13 mm, X2에서 0.09 mm의 오차가 발생하였으나, 해석과 실험의 접합 후 단면 형상은 잘 일치 하였다.

4) 유한요소법을 활용하여 SPR의 형상을 설계하고, 설계된 제품을 생산한다면 많은 시간과 비용의 절감효과를 기대 할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 복합재료와 다양한 소재의 접합을 위한 SPR의 형상설계 연구에 많은 기여가 될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 출연금으로 수행한 산학 융합지구조성사업의 연구결과입니다.

References

1. K. Mori, T. Kato, Y. Abe and Y. Ravshanb : Plastic Joining of Ultra High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets by Self Piercing Rivet, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 55(1) (2006), 283- 286
2. Xinmin Fan and Iain Masters : Dimensional Variation in Self-Piercing Riveting, SAE, 2006-01-0776 (2006)
3. H. Y. Cho, D. B. Kim and K. W. Kim : Shape Design of Self-Piercing Rivet for Joining similar Sheet Metals", *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, 14(3) (2012), 93-99 (in Korean)
4. N. H. Hoang, R. Porcaro, M. Langesth and A. G. Hanssen : Self-piercing riveting connections using aluminium rivets, *International Journal of Solids and Structures*, 47 (2010), 427-439
5. E. Atzeni, R. Ippolito and L. Settineri : Experimental and numerical appraisal of self-piercing riveting, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58 (2009), 17-20
6. Robert Cacko : Review of different material separation criteria in numerical modeling of the self-piercing riveting process-SPR, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8(2) (2008), 21-30
7. 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
8. Toru Kato, Yohei Abe, Ken-ichiro Mori and Shingo Sakai : Joining of Three Aluminium Alloy and Mild Steel Sheets with Self-Piercing Rivet, *Journal of the JSTP*, 49(568) (2008), 419-423
9. D. B. Kim : Design of Self-Piercing Rivet for Joining Dissimilar Sheet Metals, *A thesis for the degree of Master*, (2011), (in Korean)

10. Scientific Forming Technologies Corporation : DEFORM™ Version 10 User's Manual
11. KS B 0801 : Test pieces for tensile test for metallic materials, *Korean Standard Information Center* (2011), (in Korean)
12. KS D 8508 : Test method for tensile properties of fiber reinforced metals, *Korean Standard Information Center* (1997), (in Korean)
13. KS B 0851 : Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot and embossed projection welded joints (2006), (in Korean)
14. H. Y. Cho : Design of Helical Self-Piercing Rivet for Joining Aluminum Alloy and High-Strength Steel Sheets, *Korean Soc. Mech. Eng. A*, 38(7) (2014), 735-742 (in Korean)