

알루미늄 합금과 고장력 강판 접합을 위한 헬리컬 SPR의 설계

김원영* · 김동범* · 박진근* · 김도훈* · 김기호* · 이인환** · 조해용***

* 충북대학교 정밀기계공학과, ** 충북대학교 기계공학부

Design of Helical Self-Piercing Rivet for Joining Aluminum Alloy and High-Strength Steel Sheets

W.Y. Kim*, D.B. Kim*, J.G. Park*, D.H. Kim*, K.H. Kim*, I.H. Lee** and H.Y. Cho***†

* Dept. of Precision Mechanical Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.

** Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.

(Received February 26, 2014 ; Revised May 23, 2014 ; Accepted May 23, 2014)

Key Words: Self-Piercing Rivet(셀프 피어싱 리벳), Dissimilar Materials(이종재료), Finite Element Method(유한요소법), Forging Process(단조공정)

초록: Self-piercing rivet(SPR)은 이종재료 접합을 위해 사용되는 결합용 기계요소으로써, 대표적으로는 알루미늄 합금과 강판 등 용융점이 서로 다른 재료의 접합에 사용된다. SPR 접합은 일반 리벳접합과 달리 스스로 홀을 가공하며 삽입되기 때문에 사전의 홀 가공이 필요 없다.⁽¹⁾ 상부판재를 천공하고 하부판재와 함께 소성 변형되어 결합된다. 자동차의 차체 경량화를 위해서는 알루미늄 합금과 같은 경량소재가 사용되며, 부분적으로 스틸과 알루미늄 합금의 이종재료 접합이 요구된다. 그러나 알루미늄 합금과 강판은 용융점이 다르므로 기존의 차체 결합방법으로 이용되고 있는 저항 용접이 불가능하다. 이에 따라, 기계적 결합방법의 하나인 SPR 접합이 요구된다.⁽²⁾ 따라서 본 연구에서는 강소성 유한요소해석 프로그램을 이용하여 리벳과 판재의 접합 성형성을 검토하고, 고장력 강판을 접합할 수 있는 새로운 형상의 SPR을 설계하였다. 또한 해석결과와 실험의 비교를 통하여 해석의 신뢰성을 검증하였다.

Abstract: A self-piercing rivet (SPR) is a mechanical component for joining dissimilar material sheets such as those of aluminum alloy and steel. Unlike conventional rivets, the SPR directly pierces sheets without the need for drilling them beforehand. However, the regular SPR can undergo buckling when it pierces a high-strength steel sheet, warranting the design of a helical SPR. In this study, the joining and forging processes using the helical SPR were simulated using the commercial FEM code, DEFORM-3D. High-tensile-strength steel sheets of different strengths were joined with aluminum alloy sheets using the designed helical SPR. The simulation results were found to agree with the experimental results, validating the optimal design of a helical SPR that can pierce high-strength steel sheets.

1. 서 론

Self-piercing rivet(SPR)은 이종재료 접합을 위해 사용되는 기계부품으로써 알루미늄 합금과 강판 등 용융점이 서로 다른 재료의 접합에 사용된다. SPR 접합은 일반 리벳접합과 달리 스스로 홀을

가공하며 삽입되기 때문에 사전의 홀 가공이 필요 없이 상부판재를 천공하고 하부판재와 함께 소성 변형되어 결합된다.⁽¹⁾

차체의 경량화를 위해서는 알루미늄 합금과 같은 경량소재의 사용이 요구되며, 이에 따라 이종재료 접합 조건이 발생된다. 그러나 알루미늄 합금과 강판은 용융점이 다르므로 스틸 차체 결합방법으로 이용되고 있는 저항 용접으로는 접합이 불가능하다. 따라서 용융점이 다른 이종재료 접합에는 저항

† Corresponding Author, hych@chungbuk.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

점용접 방식이 아닌 기계적인 결합방법의 하나인 SPR 접합이 요구된다.⁽²⁾

강관을 고강도화 하게 되면 차체의 강성이 증가하여 안정성이 향상된다. 두께를 줄여도 강도를 유지할 수 있어 경량화가 가능하므로 고장력 강관의 사용이 요구되고 있다. 그러나 컵 형태의 일반적인 SPR은 SPFC780 이상의 고장력 강관 접합 시 리벳에서 좌굴이 발생하여 접합이 어렵다. 이에 따라 고장력 강관을 접합할 수 있는 새로운 형태의 SPR을 설계하였다. 새로운 SPR을 제작하기 위해서 냉간 단조 할 경우 형상이 복잡하므로 단일 공정으로 성형이 곤란하다. 따라서 예비성형을 포함하는 다단공정의 설계가 필요하다.⁽³⁾

이에 본 연구에서는 강소성 유한요소해석 프로그램을 이용하여 리벳과 판재의 접합 성형성을 검토하고, 고장력 강관을 접합할 수 있는 새로운 형상의 SPR을 설계하고자 하였다.^(4,5) 또한 설계된 리벳을 제작하기 위하여 단조 공정 및 금형을 설계하고자 하였다.⁽⁶⁾ 접합실험과 시뮬레이션 결과의 비교, 분석을 통해 신뢰성을 얻고 SPR설계 방법을 제시하고자한다.

2. SPR 접합 유한요소해석

2.1 SPR 모델링

Fig. 1은 SPR의 형상 및 도면을 나타낸 것이다. Fig. 1(a)와 같은 컵 형태의 SPR은 높은 강도의 판재를 피어싱하기 어려운 문제점이 발생하므로 고장력 강관을 접합할 수 있는 새로운 SPR을 설계하였다. Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)와 같이 나선형의 리브를 모델링하여 새로운 형상의 헬리컬 SPR을 설계하였다.

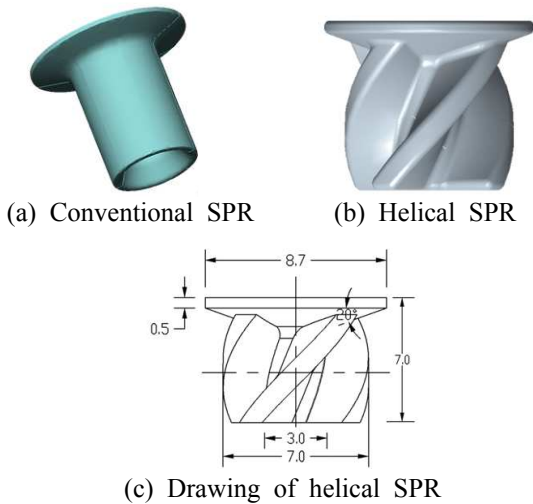


Fig. 1 Shape of SPR

헬리컬 SPR에서는 리브의 리드각이 클수록 결합력이 크지만 리브의 좌굴이 발생할 수 있다. 따라서 적절한 리드각을 결정하기 위하여 Fig. 2와 같이 15° 간격으로 모델링 하였다. Fig. 2(a)는 리드각 30°, Fig. 2(b)는 리드각 45°, Fig. 2(c)에 리드각 60°의 리벳을 나타내었다.

2.2 판재의 접합조건

판재의 접합조건은 경량화의 요구로 인해 자동차 판재에 적용되고 있는 소재로 선정하였다. 자동차용 냉간압연 고장력 강관과 알루미늄 합금을 이용하여 판재의 강도에 따른 접합 성형성을 예측하고자 하였다. 판재 접합 조건은 Table 1과 같이 총 3가지이며, 모두 이중재료 접합 조건이다.

2.3 리벳과 판재의 소재물성

유한요소해석을 통하여 실제 소재의 유동과 거의 유사하게 구현하기 위해서는 재료의 기계적 물성치를 알아야 한다. 리벳의 소재는 열처리가 쉽고 가공성이 우수한 AISI 4115로 선정하였다. 리벳을 열처리한 후 인장시험하여 기계적 성질을 분류하고 접합조건을 만족하는 정도를 결정하였다.

Table 1 Joining condition of sheets

Upper sheets/thickness	Lower sheets/thickness
SPFC440 / 1.6 mm	SILAFONT / 3.0 mm
SPFC590 / 1.6 mm	
SPFC780 / 1.6 mm	

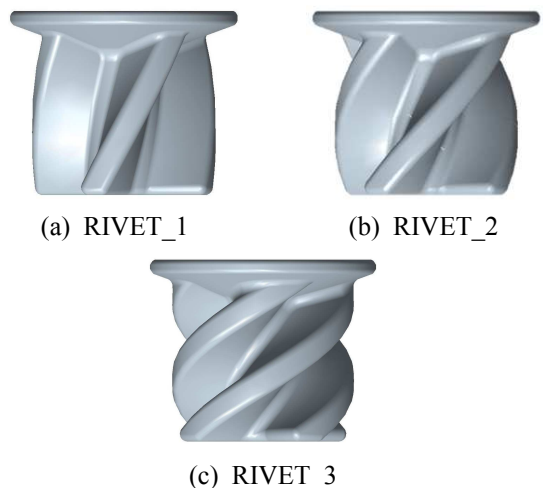


Fig. 2 Shape of SPR for each different lead angle

Table 2 Tensile test results of materials

Specimen	Tensile strength, Yield (MPa)	Tensile strength Ultimate (MPa)	Elongation(%)
AISI 4115	1141	1508	3.3
SPFC440	299	538	39
SPFC590	480	684	26
SPFC780	514	890	11
SILAFONT	107	223	23

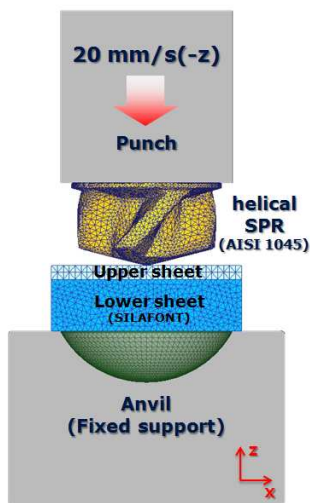
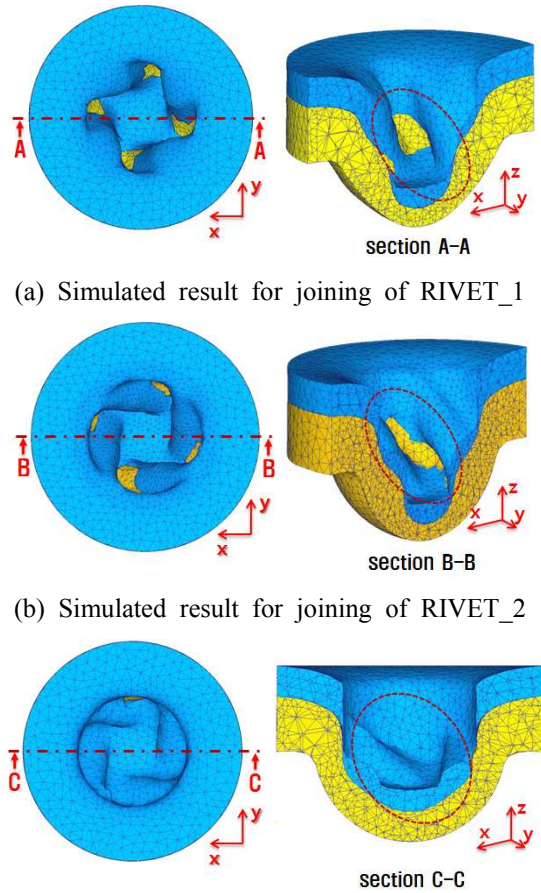


Fig. 3 Boundary condition for joining of rivet

상부 판재의 소재는 자동차 판재에 적용되고 있는 냉간 압연 고장력 강판이며, 하부판재는 알루미늄 다이캐스팅 합금인 SILAFONT이다. 이에 해당하는 기계적 물성치를 DEFORM-3D에 적용하였다. 리벳과 판재의 인장시험 결과를 정리하여 Table 2에 나타내었다.

2.4 해석 경계조건

해석 경계조건은 Fig. 3과 같이 나타내었다. 냉간 공정이므로 가공온도는 20 °C를 적용하였으며, 소재의 온도, 물성 변화 및 열전달은 없다고 가정하였다. 펀치의 속도는 SPR접합기와 같은 속도인 20 mm/s이며, 리벳과 판재 사이의 마찰상수는 0.2를 적용하였다. SPR의 부품 중 리벳과 판재는 소성변형이 이루어져야 하기 때문에 강소성체로 적용하였고, 나머지 부품들은 변형이 되지 않는 강체로 설정하였다. 리벳의 요소 수는 30,000개이고, 판재의 요소 수는 두께에 따라 20,000~30,000개로 분할하였다.



(a) Simulated result for joining of RIVET_1

(b) Simulated result for joining of RIVET_2

(c) Simulated result for joining of RIVET_3

Fig. 4 Simulated results of joining for each different lead angle

2.5 유한요소해석 결과

2.5.1 리드각을 결정하기 위한 접합 해석

리드각이 커질수록 리브와 직각인 성분의 힘이 커지기 때문에 리브의 좌굴이 발생하기 쉽다. 이에 따라 헬리컬 리브의 적절한 각도를 찾기 위하여 SPFC440 1.6 mm와 SILAFONT 3.0 mm의 동일한 접합조건에서 Fig. 2의 리드각 30°, 45°, 60° 리벳을 적용하여 접합 해석을 하였다. Fig. 4(a)는 리드각 30°의 리벳을 접합한 해석결과를 나타낸 것이다. 리벳이 하부판재와 결합이 되었지만, 리벳의 회전각에 따라 접합강도가 결정되므로 접합강도가 낮을 것으로 예측된다. Fig 4(b)는 리드각 45°의 리벳을 적용한 해석결과를 나타낸 것이다. 좌굴이 발생하지 않고 리벳이 회전하면서 접합된 것을 볼 수 있다. Fig. 4(c)는 리드각 60°를 적용한 해석 결과를 나타낸 것이다. 리드각이 크므로 좌굴이 발생하여 접합되지 않는 것을 볼 수 있

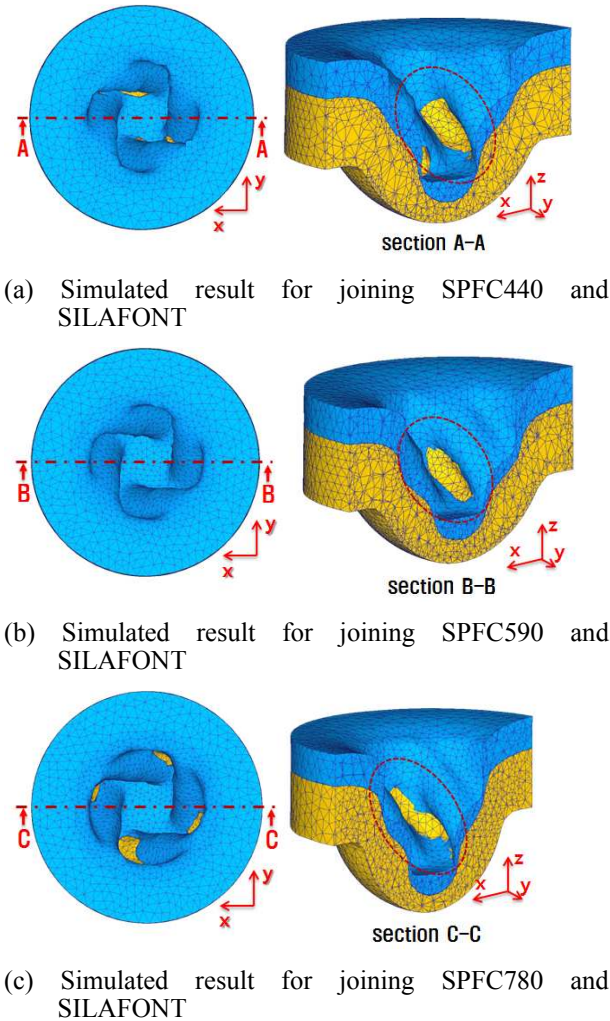


Fig. 5 Simulated results of sheets

다. 따라서 45° 전후의 리드각이 적당하다.

2.5.2 판재강도에 따른 접합 해석

판재강도에 따른 접합 결과를 예측하기 위하여 다양한 강도의 판재와 SILAFONT를 접합하였다.

Fig. 5(a)는 상부판재 SPFC440 1.6 mm와 하부판재 SILAFONT 3.0 mm를 접합한 해석 결과를 나타낸 것이다. SPFC440판재는 연신이 잘 발생하여 결합부위가 작아지게 되어 결합력이 낮을 것으로 예측된다. Fig. 5(b)는 SPFC590 1.6 mm와 SILAFONT 3.0 mm를 접합한 해석 결과를 나타낸 것으로 SPFC440과 마찬가지로 연신이 잘 되어 결합부위가 작기 때문에 결합력이 낮을 것으로 예측된다. Fig. 5(c)는 SPFC780 1.6 mm와 SILAFONT 3.0 mm를 접합한 해석 결과를 나타낸 것이다. 강도가 높은 판재일 경우 전단이 잘되므로 리벳과 하부판재의 결

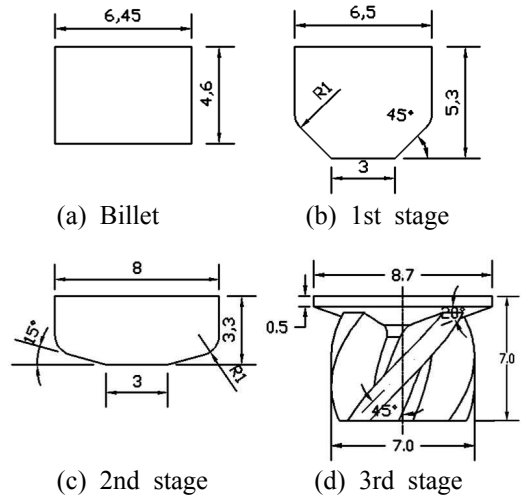


Fig. 6 Process design of SPR

합부위가 커지게 되어 결합력이 높을 것으로 예측된다. 따라서 헬리컬 SPR로는 SPFC780판재의 접합이 가능하다는 것을 예측할 수 있다.

3. SPR 단조 유한요소해석

3.1 냉간 단조 공정설계

SPR 접합 해석 결과를 바탕으로 설계된 리벳의 형상을 제작하기 위하여 단조 공정설계를 하였다. SPR은 복잡한 형상을 가지고 있으므로 단일 공정으로 성형하기 어렵고 예비성형을 거치는 다단공정이 고려되어야 한다. 공정 수는 예비성형공정과 다단 포머 장비를 고려하여 3단으로 결정하였다. 1단 공정은 선재를 절단한 초기 형상을 가지고 다음 공정을 위한 예비성형으로 일부분이 압출된다. 2단 공정은 최종형상을 성형하기 위한 업세팅 공정이 이루어진다. 3단 공정은 최종치수로 성형하기 위한 공정으로써 헬리컬 리브와 헤드부를 동시에 성형하기 위한 최종 공정이 다. Fig. 6에 단조 공정 도면을 나타내었다.

3.2 해석 경계조건

Fig. 7은 단조해석을 위한 경계조건으로써 소재, 펀치, 금형을 나타내었다. 모델링된 초기의 소재와 펀치 그리고 금형을 적용하고, 위치를 실제와 같이 재설정하였다. 소재를 제외한 펀치와 금형은 강체로 가정하였다. 펀치의 이동속도는 실제 단조 포머의 움직임과 같은 200 mm/s이다. 일반적으로 냉간 단조시 인산 아연계 윤활제 또는 오일로 윤활할 때 마찰상수의 범위가 0.05~

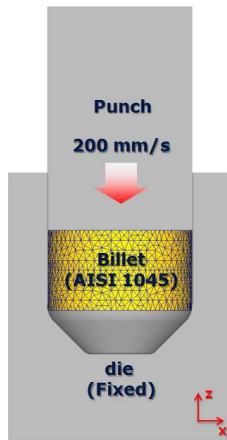


Fig. 7 Boundary condition for forging of rivet

0.15이다. 따라서 소재와 금형 사이에 일정한 전단마찰이 작용한다고 가정하여 전 공정에 대해 마찰상수는 0.08로 정하였다.

소재의 요소분할은 프로그램에서 자동분할로 적용하였고, 요소 수는 30,000 개로 분할하였다.

3.3 단조 공정 해석 결과

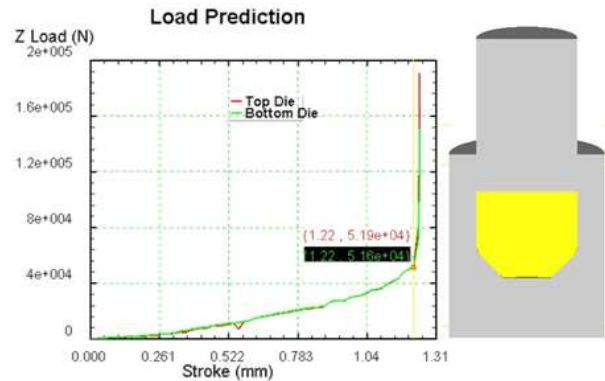
1단 공정은 다음 공정을 위한 예비 성형으로 하중을 낮추고 성형성을 높이기 위해 일부분을 압출하여 형상을 다지는 공정이다. Fig. 8(a)에 결과형상과 예측된 하중을 나타내었다. 성형하중은 51.9 kN으로 예측되었다. 2단 공정은 최종 형상을 위해 업세팅 성형을 하는 공정이다. Fig. 8(b)에 결과형상과 성형하중을 나타내었으며, 성형하중은 45.9 kN으로 예측되었다. 마지막 3단 공정은 최종치수로 성형하기 위한 공정으로 Fig. 8(c)에 결과를 나타내었다. 헬리컬 리브와 헤드부를 동시에 성형하는 공정으로 소재가 금형의 형상에 따라 양호하게 성형된 것을 볼 수 있다. 이번 공정에서의 예상 성형하중은 102 kN이다.

첫 번째에서 최종 공정까지의 유한요소해석 결과, 형상과 치수를 만족하고, 전체 성형하중은 200 kN으로 예측되었다.

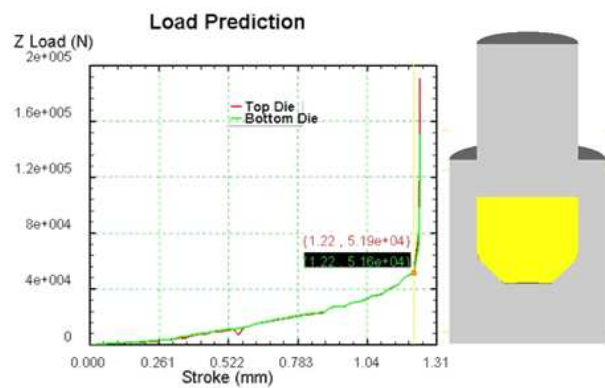
3.4 SPR 단조 공정 실험

3.4.1 단조 실험 장비

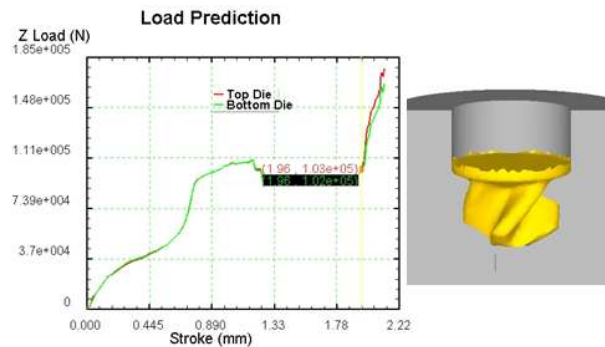
유한요소해석 결과를 검증하기 위하여 시뮬레이션과 동일한 조건으로 실험하였다. 리벳 단조 시뮬레이션에서 예측한 하중과 공정설계를 바탕으로 실험하였다. Fig. 9(a)는 제작된 금형이 장착



(a) Simulated result for forging in 1st stage



(b) Simulated result for forging in 2nd stage



(c) Simulated result for forging in 3rd stage

Fig. 8 Simulated results of rivet forging

된 다단 포머로써 단조공정에서 펀치의 속도는 시뮬레이션과 동일한 200 mm/s이다. Fig. 9(b)는 리벳 단조를 위하여 공정설계를 바탕으로 제작된 금형과 펀치를 나타낸 것이다. 리벳 단조 후 녹아아웃 할 때 리벳이 쉽게 빠지지 않으므로 금형에 베어링을 적용한 회전금형을 제작하여 리벳을 분리하였다. 금형의 재질은 AISI D2이며 기계적 특성을 Table 3에 정리하여 나타내었다.

3.4.2 단조 실험 결과

리벳 단조 실험은 시뮬레이션 결과를 바탕으로

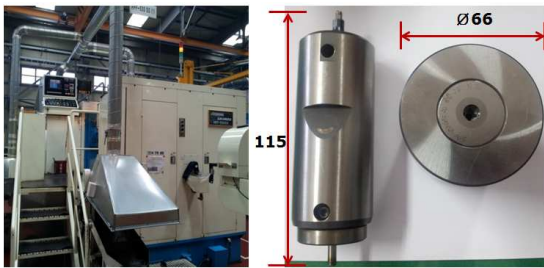
Table 3 Mechanical and properties of AISI D2

Material	AISI D2
Properties	
Tensile strength, Yield [MPa]	2200
Modulus of Elasticity [GPa]	210
Hardness [HRC]	63
Heat Capacity [J/g·°C]	0.460
Thermal Conductivity [W/m·K]	20



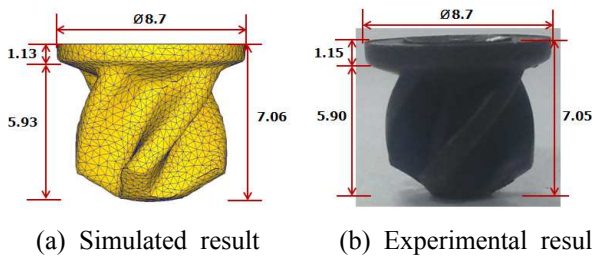
(a) Press for joining experiment (b) Zig for joining experiment

Fig. 11 Experimental equipments for joining of rivet



(a) Multi-stage former (b) Punch and die

Fig. 9 Experimental equipment for forging of rivet



(a) Simulated result (b) Experimental result

Fig. 10 Comparisons of simulated results and experimental ones for SPR forging of AISI 4115

충분한 하중 용량을 가진 다단 포머를 선정하고 금형을 제작하여 실험하였다. 실험에 적용된 리벳의 소재는 AISI 4115이며, 해석과 실험에 사용된 소재는 동일하다.

Fig. 10는 시뮬레이션과 실험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 시뮬레이션에 대한 결과이며 Fig. 10(b)는 실험에 대한 결과이다. 리벳의 길이에서 0.01 mm의 오차가 발생하였으나, 실험과 시뮬레이션 결과를 비교·분석하였을 때 형상과 치수가 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 제시된 공정 설계안으로 리벳을 제작하는 것이 적합하다고 판단된다.

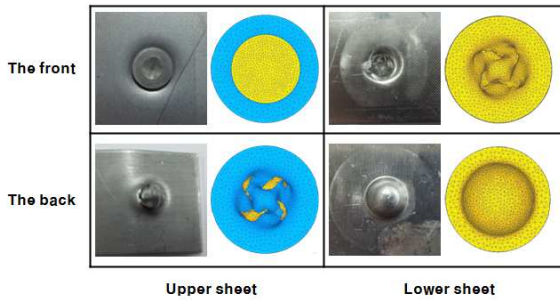
4. 판재 접합 및 전단실험

4.1 SPR 접합 실험 장비

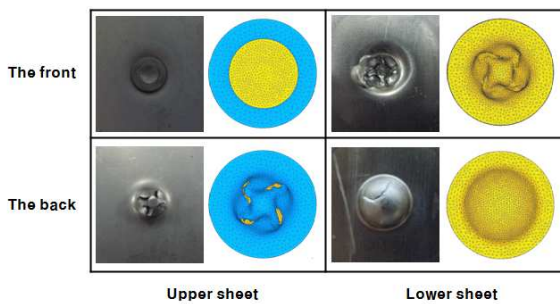
Fig. 11(a)는 판재 접합에 사용된 프레스를 나타낸 것으로 시험속도는 20 mm/s이며 최대 가용 하중은 100 kN이다. Fig. 11(b)는 접합용 지그를 나타낸 것으로 접합실험을 하기 위하여 자체적으로 접합용 지그와 앤빌을 제작하였다. 접합용 지그는 펀치와 홀더의 역할을 하는 부분으로 이루어져 있다. 펀치와 홀더 사이에 우레탄을 적용하여 홀더가 판재에 적정하중을 가할 수 있도록 설계하였다. 프레스가 하강하면 중간에 위치한 우레탄이 눌러 홀더부에 힘을 가하게 되고 판재를 고정하게 된다.

4.2 SPR 접합 실험 결과

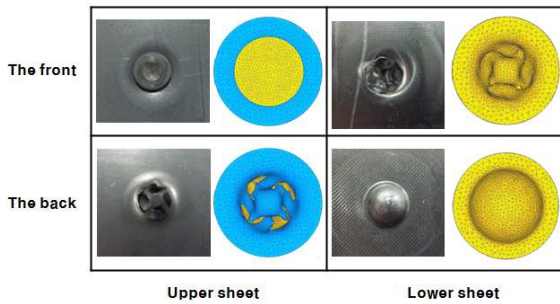
단조 실험에서 제작된 리벳을 시뮬레이션과 동일한 세 가지 조건으로 접합 실험하였다. Fig. 12(a)는 AISI 4115의 리벳을 침탄 후 퀴칭하여 SPFC780 1.6 mm와 SILAFONT 3.0 mm를 접합한 실험 결과를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 SPFC440판재의 연신율이 크기 때문에 피어싱하지 못하였으므로 SPFC440판재는 컵 형태의 SPR로 접합하는 것이 유리하다. Fig. 12(b)는 SPFC590 1.6 mm와 SILAFONT 3.0 mm를 접합한 실험 결과를 나타낸 것이다. SPFC440판재와 마찬가지로 연신이 발생하여 리벳과 하부판재의 접합부위가 작아지게 되어 결합력이 낮다. SPFC590판재의 경우에도 컵 형태의 SPR로 접합하는 것이 유리하다. Fig. 12(c)는 SPFC780 1.6 mm와 SILAFONT 3.0 mm를 접합한 해석 결과를 나타낸 것이다. SPFC780판재는 강도가 높아 전단이 잘 되어 리벳이 하부판재까지 결합이 된 것을



(a) Experimental result for joining of SPFC440 and SILAFONT



(b) Experimental result for joining of SPFC590 and SILAFONT



(c) Experimental result for joining of SPFC780 and SILAFONT

Fig. 12 Experimental results for joining of rivet

볼 수 있다. 따라서 컵 형태의 SPR은 SPFC780판재를 접합하지 못하므로 새로운 형상인 헬리컬 SPR로 접합하는 것이 좋다.

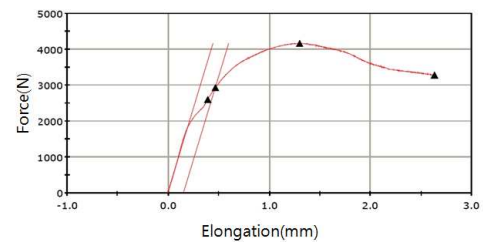
실험과 해석결과의 비교를 위해 Table 4에 접합 전, 후의 나선각의 변화량에 대한 결과를 정리하여 나타내었다. 실험과 시뮬레이션의 결과를 비교분석한 결과 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

4.3 판재 전단시험

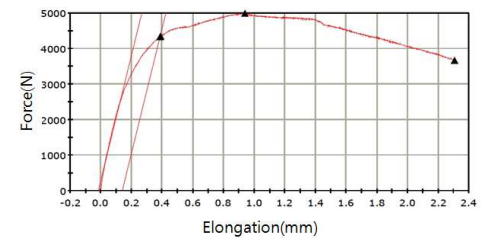
리벳이 접합된 판재의 전단강도를 측정하기 위하여 인장시험기를 이용하여 전단시험 하였다.

Table 4 Analysis of simulated results and experimental ones for joining

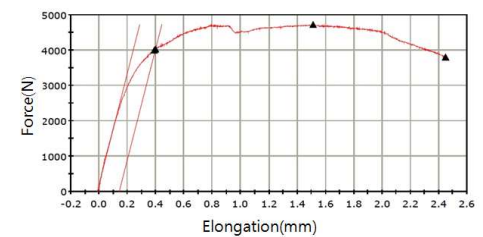
Joining conditions	Variation of helix angle (°)	
	Simulated results	Experimental results
SPFC440 and SILAFONT	35.5	34.6
SPFC590 and SILAFONT	31.5	29.4
SPFC780 and SILAFONT	31.6	31.2



(a) Shear test result of SPFC440 and SILAFONT



(b) Shear test result of SPFC590 and SILAFONT



(c) Shear test result of SPFC780 and SILAFONT

Fig. 13 Shear test results of sheets

Fig. 13(a)는 접합조건 SPFC440과 SILAFONT의 전단시험에 대한 하중을 나타낸 것이다. 최대하중은 4.2 kN으로 적정요구하중인 4.5 kN에 미치지 못하였다. 따라서 접합이 불량하다는 것을 알 수 있다. Fig. 13(b)는 SPFC590과 SILAFONT의 전단시험 결과를 나타낸 것이다. 판재 전단 시험 결과 최대 하중이 5.0 kN으로 적정 요구하중을 만족하였지만, SPFC590판재의 연신이 발생하여 리벳과 하부판재의 접합부위가 작아 결합력이 낮을 것으로 생각된다. Fig. 13(c)는 SPFC780과

SILAFONT의 전단시험 결과로 최대하중은 4.6 kN으로 적정 요구하중을 만족한 것을 볼 수 있다. 따라서 고장력 강판과 알루미늄 합금의 접합이 가능하고, 접합 품질에 만족하는 최적의 SPR을 설계할 수 있었다. 헬리컬 SPR은 고장력 강판과 알루미늄 합금의 접합에 유용하게 사용될 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 고장력 강판과 알루미늄 합금의 접합을 위한 헬리컬 SPR을 설계하였다. 이를 위해 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 해석하였다. 최적의 형상을 찾기 위해서 리벳의 형상을 수정하며 시뮬레이션을 반복하였다. 실험결과와 시뮬레이션 결과의 비교, 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 헬리컬 SPR의 리드각을 30°, 45°, 60°로 적용한 접합 해석 결과, 리드각이 작은 30°의 리벳은 접합성이 좋지 않으며, 리드각 60°의 리벳은 좌굴이 발생하였다. 따라서 45° 전후의 리드각이 적당하다.

(2) 단조 시뮬레이션 결과에서 성형하중은 200 kN으로 예측되었다. 금형수명과 하중분배 등을 고려하면 3단 공정으로 리벳을 단조해야 한다.

(3) 기존의 컵 형태의 SPR로는 고장력 강판의 접합이 불가능하므로 SPFC780이상 고장력 강판의 접합에서는 헬리컬 SPR을 사용하는 것이 바람직하다.

후 기

본 연구는 충북대학교의 교내 연구비 지원에 의해 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Mori, K., Kato, T., Abe, Y. and Ravshanbek, Y., 2006, "Plastic Joining of Ultra High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets by Self Piercing Rivet," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 55, Issue 1, pp. 283~286.
- (2) Cho, H. Y., Kim, D. B. and Kim, K. W., 2012, "Shape Design of Self-Piercing Rivet for Joining Dissimilar Sheet Metals," *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 93~99.
- (3) Kim, D. B., Cho, H. Y., Lee, M. Y., Park, B. J. and Park, J. K., 2012, "Forging Process Design of Self-Piercing Rivet for Joining dissimilar Sheet Metals," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 36, No. 6, pp. 802~807.
- (4) Hoang, N. H., Porcaro, R., Langesth, M. and Hanssen, A.-G., 2010, "Self-Piercing Riveting Connections Using Aluminium Rivets," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, pp. 427~439.
- (5) Atzeni, E., Ippolito, R. and Settineri, L., 2009, "Experimental and Numerical Appraisal of Self-Piercing Riveting," *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, Vol. 58, pp. 17~20.
- (6) Byun, H. S., 2009, "Finite Element Analysis for the Forging Process Design of a Blind Rivet," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 10, No. 10, pp. 2577~2582.