

초고장력강과 알루미늄 합금의 판재 접합을 위한 헬리컬 SPR 설계

김 동 범* · 김 관 우* · 조 해 용*†

*충북대학교 공과대학 기계공학부

Design of Helical SPR for Joining Advanced High Strength Steel and Aluminum Alloy Sheets

Dongbum Kim*, Kwan-Woo Kim* and Hae-Yong Cho*†

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

†Corresponding author : hycho@chungbuk.ac.kr

(Received December 7, 2015 ; Accepted December 15, 2015)

Abstract

Self-piercing riveting (SPR) is a sheet-joining method that can be used for materials that are difficult or unsuitable for weld, such as aluminum alloys and other steel sheet metals. The increased application of lightweight materials has initiated many investigations into new SPR conditions for riveting dissimilar materials. However, buckling of the semi-tubular rivet occurs during the riveting of AHSS. In this study, a helical SPR was designed for the riveting of AHSS and Al-alloy. In addition, the reinforced helical SPR which has straight parts was designed. The riveting of AHSS and Al-alloy was simulated. Simulated results were verified by comparison with experimental ones.

Key Words : Self-piercing riveting (SPR), Helical SPR, Advanced high strength steels (AHSS), SILAFONT, Finite element analysis (FEA), CP1470

1. 서 론

SPR (self-piercing rivet)은 둘 이상 재료를 접합시키는 기계요소로서 용접이 어려운 이종재료 접합 등, 특히 자동차의 차체 접합에 적용된다¹⁻³⁾. 자동차의 연비향상을 위한 차체 경량화로부터 알루미늄 합금과 충돌 시 운전자의 안전을 확보하기 위해 보다 강도가 높은 초고장력강의 적용이 요구된다. 초고장력강의 인장강도는 500~1500 MPa 이상이며, 이상 또는 다상조직 등이 있다^{4,5)}.

한편 SPR은 세미 튜우블러 리벳이 주로 사용되고 있으며 형상은 헤드와 중공생크로 구분된다. 세미 튜우블러 리벳을 적용한 이종재료 접합에서 초고장력강의 접합을 포함한 연구가 활발하게 진행 중이다. Mori⁶⁾ 등은 초고장력강과 알루미늄 합금의 SPR 접합에 대한 유한요소해석과 실험으로부터 최적의 접합 조건을 선정하였

다. 또한 초고장력강과 알루미늄 합금 접합을 위해 세미 튜우블러 SPR과 중앙이 볼록한 앤빌을 적용하고 이들의 형상에 따른 접합성을 예측하였다. Cho^{7,8)} 등은 유한요소법을 이용하여 초고장력강과 알루미늄 합금의 판재와 SPR의 소성거동을 검토하고, 판재조건에 만족하는 헬리컬 SPR, 앤빌의 형상 등을 설계하였다. 여기서, 헬리컬 SPR은 인장강도가 높은 판재의 접합을 위해 고안된 형상으로 생크에 나선형 리브가 있어 판재의 피어싱과 체결이 기존의 세미 튜우블러 리벳보다 우수하다⁹⁾. 이상의 연구에서와 같이 SPR 설계를 위해 접합 해석 및 실험이 수행되었지만 대부분 접합 소재들은 인장강도가 1000 MPa 이하인 초고장력강과 알루미늄 합금에 대한 접합이다.

따라서 본 연구에서는 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17 %인 DP780, 인장강도가 1000 MPa 이상이고 연신율이 14 %인 DP980, 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7 %인 CP1470의 초고장력강판

과 알루미늄 합금의 접합이 가능한 헬리컬 SPR 설계를 하고자 하였다. 이를 위해 유한요소해석 프로그램인 DEFORMTM을 이용하여 초고장력강과 알루미늄 합금의 접합이 가능한 헬리컬 SPR을 설계하였다. SPR을 제작하여 접합시험 및 접합성 평가를 하여 설계된 헬리컬 SPR의 초고장력강 접합에 적용 가능성을 검토하였다.

2. SPR 접합의 유한요소해석

2.1 헬리컬 SPR 모델링

세미 튜우블러 SPR은 초고장력강의 피어싱 때, 중공 생크의 좌굴로 접합이 어려운 문제가 있다. 따라서 좌굴 없이 피어싱 가능한 새로운 형상의 SPR이 필요하다. 세미 튜우블러 SPR의 생크에 나선형의 리브를 추가하여 새로운 형상의 헬리컬 SPR을 설계하였다. 또한 Cho⁹⁾의 연구결과를 적용하여 리브에 직선부를 보강하였다. 두가지 헬리컬 SPR을 Pro/ENGINEER를 이용하여 Fig. 1 과 같이 모델링 하였다. 그림에서 (a)는 헤드와 나선의 리브가 있는 생크로 구분되며 (b)는 헤드와 리브 간에 직선부로 보강된 형상을 볼 수 있다. 이는 초고장력강의 접합 시에 리브의 좌굴방지를 기대할 수 있다. 앤빌은 헬리컬 SPR의 형상에 맞는 중심이 오목한 앤빌을 해석에 적용하기 위해 모델링 하였다.

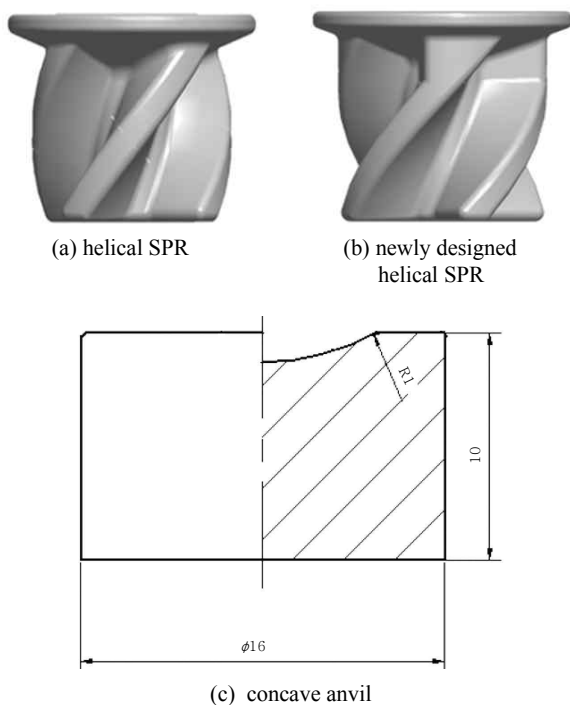


Fig. 1 Shapes and schematics modeling of new helical SPR and anvil

Table 1 Mechanical properties of AHSS and SILAFONT

Mater-ials	Young's Modulus [GPa]	Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elong-ation [%]
DP780	206.9	534.2	948.1	17.21
DP980	204.5	885.2	1036.6	14.84
CP1470	208.9	1124.8	1523.3	7.05
SILAFONT	39.1	77.3	219.3	20.80

2.2 소재의 기계적 물성

판재의 인장시험편은 ASTM E8의 판재 형상에 따라 설계하였다. 초고장력강판인 DP780, 980, CP1470과 알루미늄 합금인 SILAFONT판재를 대상으로 인장시험하였다. 인장방향의 시험속도는 0.5 mm/min이며, 표점거리의 늘어난 길이를 측정하기 위하여 표점거리 25 mm의 연신율계를 이용하였다. 초고장력강과 알루미늄 합금의 인장시험 결과를 Table 1에 정리하였다.

2.3 헬리컬 SPR 접합해석 경계조건

Fig. 2는 유한요소해석을 위한 경계조건으로 각 부품의 접합 전 위치와 형상을 나타내었다. 냉간 공정이므로 온도를 20 °C로 적용하였고 시뮬레이션 동안의 온도변화에 따른 소재들의 물성 변화와 열전달은 없다고 가정하였다. 펀치의 속도는 프레스의 속도와 같은 10 mm/s이며, 리벳과 판재 사이의 마찰상수는 0.12로 적용하였다. 리벳과 판재는 소성변형이 이루어져야 하므로 강소성체로 적용하였고, 나머지 부품인 펀치, 앤빌은 변형되지 않는 강체로 설정하였다. 요소는 DEFORM-3D에서

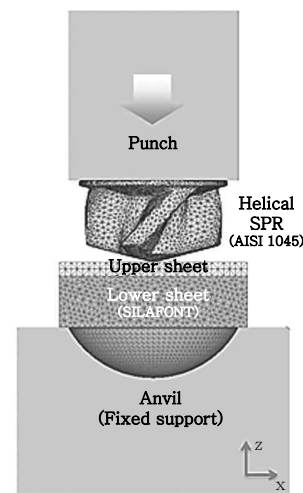


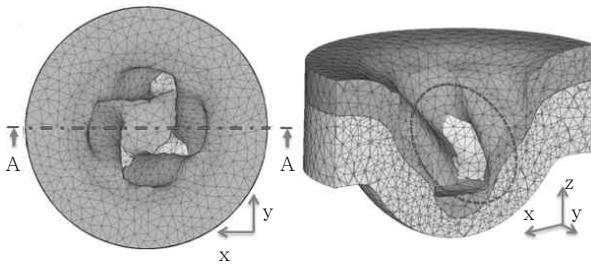
Fig. 2 Boundary condition for joining AHSS and aluminum alloy with helical SPR

제공되는 자동요소분할을 이용한 사면체로 분할하였다.

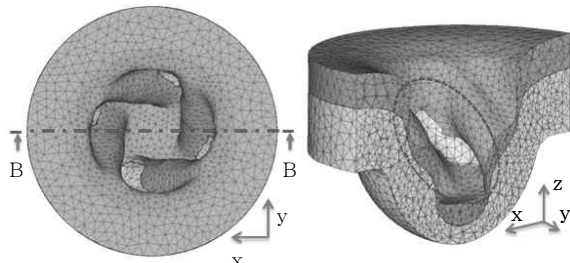
3. 유한요소해석 결과

3.1 DP780과 SILAFONT 접합

헬리컬 SPR의 길이에 따른 접합성을 예측하기 위하여 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17%인 두께 1.6 mm의 상판과 두께 3 mm인 SILAFONT 하판의 접합을 해석하였다. 해석에 적용한 헬리컬 SPR의 길이는 각각 6, 7 mm이며 경도는 HV550이다. Fig. 3 (a)는 길이가 6 mm인 헬리컬 SPR, (b)는 7 mm의 헬리컬 SPR을 적용한 해석 결과이다. 판재의 변형을 관찰하기 위해 평면과 단면으로 나타내었다. 그림에서 길이가 6 mm의 헬리컬 SPR보다 7 mm의 헬리컬 SPR로 접합하였을 때, 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17%인 상판은 쉽게 전단되어 SPR과 하부판재의 인터락(interlock)이 크게 발생되었고 결합력이 높을 것으로 예측된다. 헬리컬 SPR의 길이가 증가한 만큼 접합 시에 SPR의 회전각이 증가하여 인터락이 크게 발생한 것으로 생각된다. 따라서 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17%인 두께 1.6 mm의 상판과 두께 3 mm인 SILAFONT 하판의 접합에서 헬리컬 SPR의 길이는 7 mm가 적합하다.



(a) joining DP780 and SILAFONT with helical SPR-high 6 mm

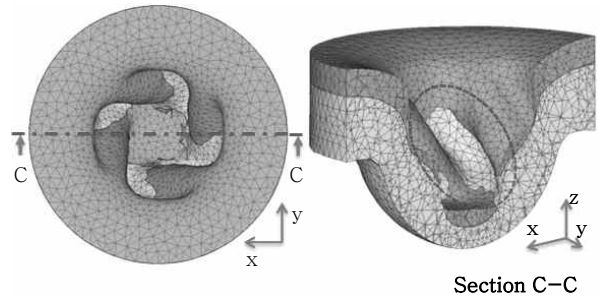


(b) joining DP780 and SILAFONT with helical SPR-high 7 mm

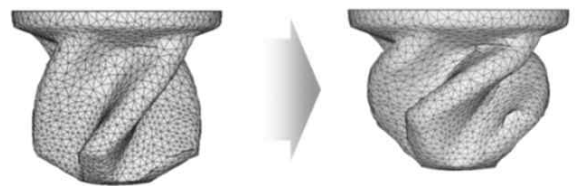
Fig. 3 Simulated results of various high of helical SPR for joining DP780 and SILAFON

3.2 DP980, CP1470과 SILAFONT 접합

다음은 인장강도가 1000 MPa 이상이고 연신율이 14 %인 DP980, 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7 %인 CP1470과 SILAFONT를 길이가 7 mm인 헬리컬 SPR로 접합한 해석결과이다. 인장강도가 1000 MPa 이상이고 연신율이 14%인 두께 1.2 mm인 상판과 두께 3 mm인 SILAFONT 하판의 접합한 해석 결과를 Fig. 4 (a)에 나타내었다. 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17 %인 판재의 접합보다 인터락이 큰 것을 볼 수 있다. 연신율이 낮은 판재일 경우 전단이 잘 되므로 SPR과 하부판재의 결합부위가 커지게 되어 결합력이 높을 것으로 생각된다. 또한 (b)는 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7%인 두께 1.2 mm인 상판과 두께 3 mm인 SILAFONT 하판을 접합한 해석결과이다. 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7%인 강은 강도가 너무 높아 헬리컬 SPR 리브의 좌굴이 예측되었다. 따라서 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17%인 판재와 인장강도가 1000 MPa 이상이고 연신율이 14%인 판재에서는 강도가 높을수록



(a) joining DP980 and SILAFONT



(b) joining CP1470 and SILAFONT

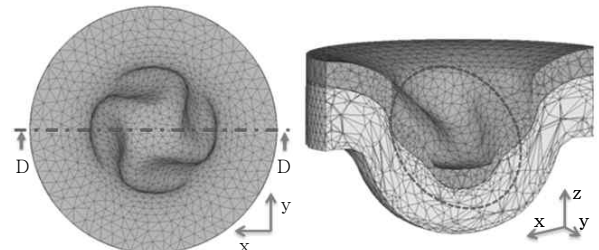


Fig. 4 Simulated results for riveting AHSS and SILAFONT with helical SPR-high 7 mm

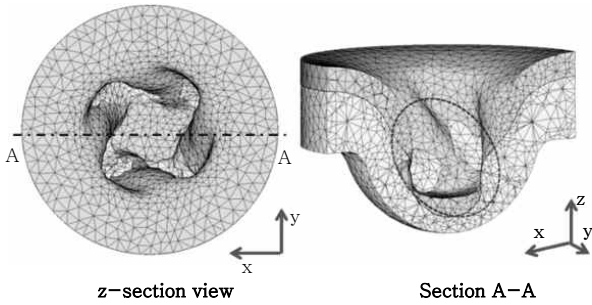


Fig. 5 Simulated result for riveting CP1470 and SILAFONT with newly designed helical SPR

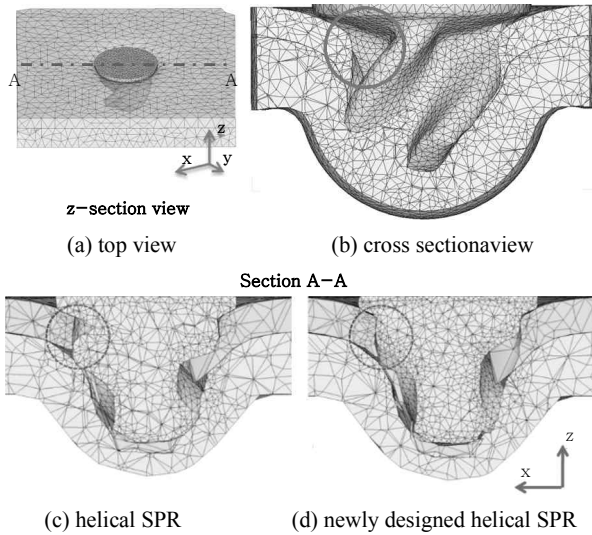


Fig. 6 Comparison of joinability for shape of helical SPR

접합이 잘 되었지만 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7%인 강판의 접합은 불가능하므로 이를 접합하기 위하여 추가적인 SPR 설계가 요구된다.

인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7%인 CP1470 판재의 강도가 너무 높아 헬리컬 SPR의 리브에 좌굴이 발생하여 피어싱하지 못하였다. 이에 따라 Fig. 1 (b)과 같이 리브에 직선부를 보강한 새로운 헬리컬 SPR을 적용하여 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7%인 상판과 SILAFONT 하판의 접합에 대해 성형해석하였다. Fig. 5와 같이 접합 시에 SPR이 회전하면서 강도가 높은 상부판재를 피어싱하고 하부판재에 결합된 것을 볼 수 있다. 따라서 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7%인 두께 1.2 mm인 상판과 두께 3 mm인 SILAFONT 하판의 접합에서는 리브에 직선부가 보강된 헬리컬 SPR 적용이 가능할 것이다.

Fig. 5는 헬리컬 SPR 접합부를 나타내었다. 그림에서 접합성 조사를 위해 (a)접합부의 단면을 관찰하였다. (b), (c)는 헬리컬 SPR로 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17%인 상판과 SILAFONT 하판의

접합 해석결과로써 접합 후에 SPR과 판재 간의 빈 공간은 결합력에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나 (d)와 같이 새로운 헬리컬 SPR로 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7%인 상판과 SILAFONT 하판을 접합한 해석결과에서는 SPR과 판재 간의 빈 공간이 감소되므로 접합성이 우수할 것이다.

4. 접합성 평가

리브에 직선부가 보강된 SPR의 접합강도를 조사하기 위해 ISO 14273에 따라 전단 시험편을 제작하고 INSTRON[®]사의 8801 인장시험기를 이용하여 2 mm/min 속도로 전단 시험하였다.

Fig. 7은 접합부의 전단시험 후의 파단 형상으로써 윗면과 아랫면을 나타내었다. 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17%인 강판, 인장강도가 1000 MPa 이상이고 연신율이 14%인 강판, 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7%인 강판과 SILAFONT의 접합조건에 대한 전단시험 결과를 Table 2에 정리하였으며 최대하중은 각각 3.6, 4.6, 6.2 kN이다. 따라서 초고장력강과 알루미늄 합금의 이종재료 접합에는 직선부로 보강된 헬리컬 SPR이 적합하다.

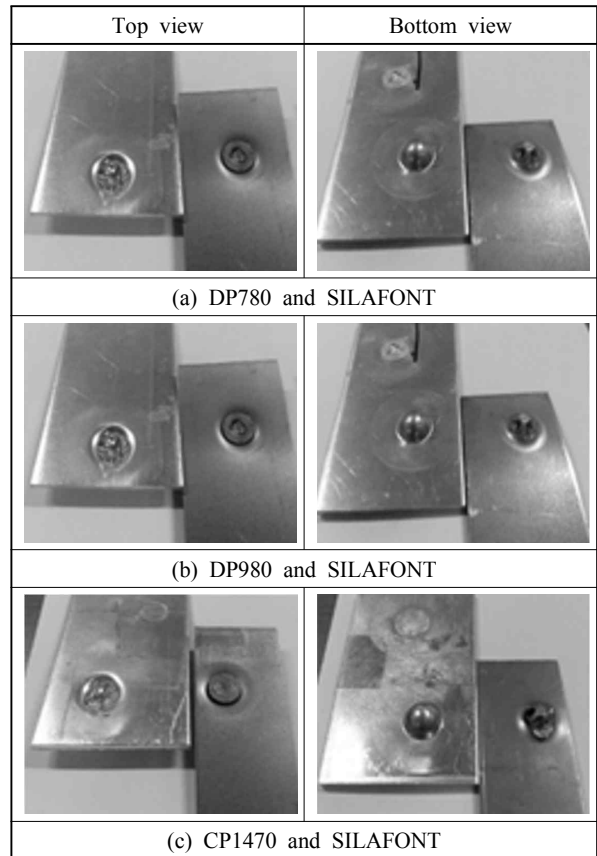


Fig. 7 Photographs of lap-shear tested specimens

Table 2 Lap-shear load for joining DP780, 980, CP1470 and SILAFONT

Riveting conditions-thickness [mm]	Lap-shear loads [kN]
DP780-1.6 and SILAFONT-3.0	3.6
DP980-1.2 and SILAFONT-3.0	4.6
CP1470-1.2 and SILAFONT-3.0	6.2

5. 결 론

본 연구에서는 초고장력강과 알루미늄 합금의 이종재료 접합을 위한 헬리컬 SPR을 설계하고자 하였다. 이를 위해 초고장력강에 해당되는 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17%인 판재, 인장강도가 1000 MPa 이상이고 연신율이 14%인 판재, 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7%인 판재와 SILAFONT 판재의 접합 해석과 실험을 하였다. 또한 겹치기 이음부 전단 시험을 통하여 새롭게 설계된 헬리컬 SPR의 접합성을 평가하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 헬리컬 SPR의 길이에 따른 접합성을 예측하기 위하여 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17%인 두께 1.6 mm의 상판과 두께 3 mm인 SILAFONT 하판의 접합을 해석하였다. 6 mm의 헬리컬 SPR보다 7 mm의 헬리컬 SPR로 접합하였을 때, 인장강도가 1000 MPa 정도인 상판은 쉽게 전단되어 SPR과 하판의 인터락이 크게 발생되었고, 결합력이 높을 것으로 예측되었다. 따라서 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17%인 두께 1.6 mm의 상판과 두께 3 mm인 SILAFONT 하판의 접합에서 헬리컬 SPR의 길이는 7 mm가 적당하고, 상판과 하판의 두께에 따라 SPR의 적당한 길이를 결정해야 된다.

2) 인장강도가 1000 MPa 이상이고 연신율이 14%인 두께 1.6 mm인 상판과 두께 3 mm인 SILAFONT 하판에 대해 길이 7 mm인 헬리컬 SPR로 접합 해석하였다. 해석결과에서 인장강도가 1000 MPa 이하이고 연신율이 17%인 상판과의 접합보다 인터락이 큰 것으로 조사되었다. 따라서 연신율이 낮은 판재일 경우 전단이 잘되므로 SPR과 하부판재의 결합부위가 커지게 되어 결합력이 우수할 것이다. 그러나 보통 연신율이 낮은 만큼 접합 판재의 인장강도가 커지기 때문에 접합에 있어 더 큰 강도의 SPR이 요구될 수 있다.

3) 인장강도가 1500 MPa 이상이고 연신율이 7%인 두께 1.6 mm의 상부 판재는 강도가 너무 높아 접합 중 인장강도 1000 MPa 이상, 연신율 14%인 강판 접합에 사용했던 헬리컬 SPR의 리브에 좌굴이 발생하여 상판을 피어싱하지 못하였다. 이에 리브에 직선부를 보강한 새로운 헬리컬 SPR을 적용하였고, 상판 피어싱이 잘 됨을 확인할 수 있었다. 다양한 인장강도를 갖는 강판들의 접합 시험을 하고 그 결과를 비교분석한 결과 소재의 인장강도가 1000 MPa 이하의 소재 접합에는 세미 튜우블러 SPR의 적용이 가능하고 인장강도가 1000 ~ 1500 MPa인 소재 접합은 나선형 헬리컬 SPR으로 가능하며 인장강도 1500 MPa 이상인 판재의 접합에는 헬리컬 리벳 리브에 직선부를 두어 강도를 보강한 새로운 헬리컬 SPR을 적용해야 할 것이다.

Reference

1. X. Sun, Self-piercing riveting Properties, processing and applications, WOODHEAD PUBLISHING, *Joining Technologies*, 82 (2014), 1-7
2. H. Y. Cho, 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)
3. D. B. Kim, Design of SPR Considering Mechanical Properties of Sheet Metals, *A thesis for the degree of Doctor*, (2015), (in Korean)
4. 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
5. ULSAB-AVC Body Structure Materials, *Technical Transfer Dispatch*, 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, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 55 (1) (2006), 283-286
7. H. Y. Cho, D. B. Kim, Y. Qiu, Design of self-piercing rivet to joint in advanced high strength steel and aluminium alloy sheets, *Journal of Welding and Joining*, 33 (3) (2015), 75-80 (in Korean)
8. H. Y. Cho, W. Y. Kim, D. B. Kim, Design of Helical Self-Piercing Rivet for Joining Aluminum Alloy and High-Strength Steel Sheets, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, A 38 (7) (2014), 735-742
9. H. Y. Cho, SELF PIERCING RIVET, (2015) KR-B-10-1516357