

유한요소해석을 통한 Steel-Al합금 SPR 접합공정 주요인자 분석

김성호^{1,2}·박남수¹·송정환¹·노우람¹·박근영³·배기현^{1,#}

Parametric Study of Steel-Al Alloy SPR Joint Process via Finite Element Analysis

S.H. Kim, N. Park, J.H. Song, W. Noh, K.Y. Park, G. Bae

(Received October 19, 2020 / Revised October 29, 2020 / Accepted November 5, 2020)

Abstract

The parametric study of Steel-Al alloy SPR joint process is based on the FE simulation described by Kim et al. [10], which was validated by comparing experimental and simulation results for two kinds of steel-Al alloy combinations according to the lower sheet thickness. To analyze the SPR joint process, the friction coefficient, the lower sheet thickness, and the rivet length were selected as the main parameters. Based on FE simulations, the effect of main parameters was investigated by measuring the interlock and the bottom thickness at the cross-sectional shape of the SPR joint. The results of simulation facilitate the design of SPR joint process in various metal combinations.

Key Words: Self-Piercing Rivet, Multi-Material Joint, Finite Element Analysis, Mechanical Joining

1. 서론

최근 자동차 연비 및 차체 충돌 성능 향상에 대한 요구가 증대되고 있으며, 이러한 요구에 대응하여 차체의 강성을 높이는 동시에 무게를 감소시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 기존의 스틸 중심의 차체에서 벗어나 알루미늄, 마그네슘, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 등과 같은 고강도/경량 소재의 개발 및 차체적용이 증가하고 있다. 하지만 스틸과 알루미늄, 스틸과 복합재 등 다중 소재에 대한 접합에서 소재간 성질이 다르기 때문에 기존 차체 조립공정의 접합방법인 저항용접에 한계가 발생한다. 이에 대응하기 위하여 기계적 접합기술을 적용한 다중소재 접합에 대한 연구가 활발히 진행되고

있다.

대표적인 기계적 접합기술인 SPR(Self Piercing Rivet) 공법은 다중소재 접합에 있어 가장 현실적인 대안으로 평가되고 있으며, 1990년대부터 현재까지 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 차체 경량화를 위한 대표적인 경량화 소재인 알루미늄 합금 적용의 증가에 따라 Steel-Al합금 조합의 SPR 공정을 중심으로 많은 연구가 진행되었다[1~6]. 특히 SPR 접합공정의 정밀 분석을 위하여 유한요소해석을 적용하기 위한 연구가 지속적으로 시도되고 있다[7~9]. 유한요소해석을 통한 SPR 공정해석은 소재의 물성, 파단기준 및 소재의 두께, 리벳의 물성과 리벳 길이, 소재간 마찰계수 등과 같은 해석조건에 따라 SPR 공정해석 결과가 상이하게 달라진다. 따라서 신뢰성 있는 해석결과를 도출하기 위해서는 실험과의 비교를 통한 해석기법의 정확도 검증이 선행되어야 하며, 검증된 해석기법을 바탕으로 SPR 접합공정 주요 인자의 영향에 대한 연구가 수행되어야 한다.

1. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소, 학연협동과정
2. 인하대학교 기계공학과, 석사과정
3. ㈜오스텍 글로벌기술연구소, 사원
Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology, Incheon Regional Division, E-mail: baegh@kitech.re.kr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0015-4742>

본 논문에서는 유한요소해석을 통한 Steel-Al 합금 조합의 SPR 접합해석의 주요인자 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 Kim 등[10]이 제시한 GA 590DP 0.8t, Al5052-H32 1.2t, 리벳의 물성과 유한요소 해석 모델링 기법을 도입하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 상판 GA590DP 1.0t 와 하판 Al5052-H32 1.2t 및 2.0t 두 가지 두께에 대하여 실험과 해석의 비교를 수행하고 유한요소해석 기법의 신뢰성을 검증한다. SPR 접합 주요인자 영향을 분석하기 위하여 마찰계수, 하판두께, 리벳길이에 따른 SPR 공정해석을 수행한다 이를 통하여 SPR 접합공정에 대한 주요인자의 영향도를 분석하고, 접합성능 확보를 위한 설계방안을 제시한다.

2. SPR 공정해석 기법

본 연구에서는 SPR 접합공정 해석기법 검증을 위하여 상판 GA590DP 1.0t 와 하판 Al5052-H32 에 대하여 두 종류의 두께 1.2t/2.0t 를 검증대상으로 선정하였다. Kim 등[10]이 선행연구로 제시한 해석용 물성 및 유한요소 모델링 기법을 도입하고, 실험과의 비교를 통하여 해석기법의 신뢰성을 검증하였다.

2.1 해석용 물성

Kim 등[10]은 SPR 접합공정 해석기법 고도화를 위하여 GA590DP 0.8t 와 하판 Al5052-H32 1.2t 에 대한 접합해석용 물성평가를 수행한 바 있다. 본 연구에서는 두께에 따른 소재물성은 거의 동일하다는 가정하에 Kim 등[10]의 물성평가 결과를 도입하였다. 각 소재의 인장물성 평가를 위하여 ASTM E8M Sub-size 시편을 채취하여 인장시험을 수행하고, 이를 바탕으로 Table 1, 2 와 같이 해석용 물성을 구성하였다.

$$\sigma_{Swift} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}^p)^n \quad (1)$$

$$\sigma_{Voce} = A - B e^{-c\bar{\epsilon}^p} \quad (2)$$

또한 Drucker-Prager 항복기준 기반의 파괴모델을 도입하여 상판 GA590DP 0.8t의 응력삼축성에 따른 파단변형을 변화를 고려하였다.

$$\bar{\epsilon}_f^p = \left[\frac{b}{k(c\eta+1)} \right]^{1/n} - \epsilon_0 \quad (3)$$

이와 동시에 SPR 접합공정 해석기법의 정확도를 개선하기 위하여 리벳 압축시험을 수행하고 역해석 기법을 활용하여 Table 3과 같이 Voce식 기반 리벳

소성물성을 도출하였다.

2.2 유한요소해석 모델링 및 조건

본 연구에서는 Kim 등[10]이 제안한 SPR 공정 유한요소해석 기법을 도입하였다. SPR 공정해석을 위하여 ABAQUS/Explicit 프로그램을 사용하였고, 해석 시간 효율을 고려하여 2 차원 축대칭 모델을 구성하였다. 다이, 펀치, 홀더는 강체로 모델링 하였으며, 리벳과 상하판에는 앞절에서 제시한 해석용 물성을 적용하였다. 하판 소재의 과도한 변형으로 인한 요소왜곡(Element distortion) 현상을 고려하기 위해 상/하판에 리벳과 접합이 이루어 지는 부분에 Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 기법을 적용하였고, 해석 정확도를 고려하여 변형이 집중되는 부분의 요소 크기를 0.05 mm 조밀하게 모델링 하였다. 해석시간 개선을 위하여 mass scaling 기법을 적용하였고, 마찰계수는 Steel-Al 0.15, Steel-Steel 0.2 를 부여하였다. 홀더 가압력은 4 kN 으로 적용하였고, 이에 따른 유한요소 모델링 및 세부 경계조건은 Fig. 1 에 도시하였다.

2.3 유한요소해석 검증

유한요소해석 기법 검증을 위하여 상판 GA 590DP 1.0t 와 하판 Al5052-H32 의 두 가지 두께 1.2t/2.0t 에 대한 실험 및 해석을 수행하였다. Fig. 2 는 실험과 해석에 의한 SPR 접합부 단면형상을 비교한 것이며, 해석을 통한 SPR 접합부 예측 형상이 실제 실험결과를 매우 유사하게 모사하는 것을 확인할 수 있다. 정량적인 형상 비교를 위하여 Fig. 3 과 같이 체결량과 하판 잔여두께를 정의하였으며, Table 4 와 같이 측정결과를 비교하였다. 체결량과 리벳 잔여두께는 모두 최대 4% 이내의 오차범위에서 예측됨을 확인할 수 있다. 이를 통하여 Steel-Al 합금 SPR 공정해석의 신뢰성을 검증하였으며, 주요 공정인자에 따른 SPR 접합부의 분석기법으로 활용하였다.

Table 1 Material properties of GA590DP 0.8t

| Parameter of the Swift model | | | | |
|--|------------------|-------|----------|-------|
| K [MPa] | ϵ_0 [-] | n [-] | | |
| 1061.8 | 0.003 | 0.179 | | |
| Parameter of the Drucker-Prager fracture model | | | | |
| k | ϵ_0 | n | b | c |
| 1061.75 | 0.0029 | 0.179 | 1046.740 | 0.157 |

Table 2 Material properties of AI5052-H32 1.2t

| Voce parameter | | | Anisotropic Properties for Hill's 48 | | | |
|----------------|----------|----------|--------------------------------------|-------|----------|----------|
| <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | σ_0 | r_0 | r_{45} | r_{90} |
| [MPa] | [MPa] | [-] | [MPa] | [-] | [-] | [-] |
| 288.1 | 96.3 | 23.5 | 190 | 0.54 | 0.66 | 0.83 |

Table 3 Material properties of rivet

| <i>E</i> [GPa] | Poisson's ratio [-] | σ_y [MPa] | Parameters of the Voce model | | |
|-------------------|------------------------|---------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|
| | | | <i>A</i> [MPa] | <i>B</i> [MPa] | <i>C</i> [-] |
| 173 | 0.3 | 1065 | 1520 | 455 | 95 |

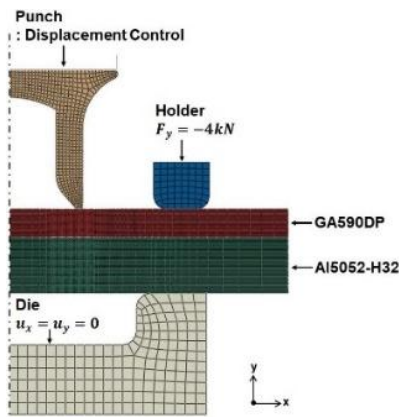


Fig. 1 FE modeling for the SPR joining analysis

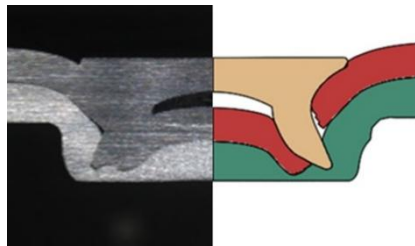


Fig. 2 (a) Cross-sectional comparison of experiment and analysis results: AI5052-H32 1.2t

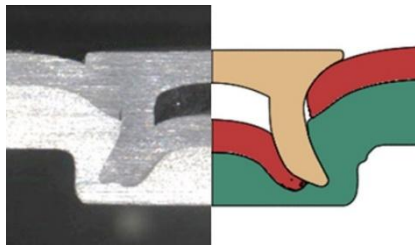


Fig. 2 (b) Cross-sectional comparison of experiment and analysis results: AI5052-H32 2.0t

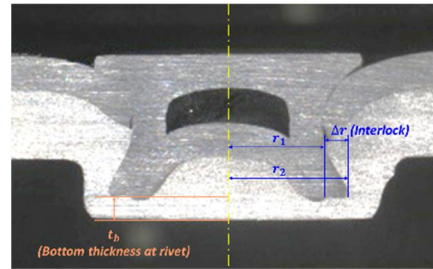


Fig. 3 Measurement of major dimensions in the cross-section of the SPR joint

Table 4 Measurement of SPR dimensions from the experiment and simulation

| Dimension | Experiment | | Simulation | |
|-----------------|-----------------------|-------|-----------------------|-----------------|
| | Bottom thickness [mm] | | Bottom thickness [mm] | |
| | 1.2 | 2.0 | 1.2 | 2.0 |
| r_1 [mm] | 4.000 | 3.426 | 3.939 (1.5%) | 3.467 (1.2%) |
| r_2 [mm] | 3.670 | 2.740 | 3.605 (1.8%) | 2.784 (1.6%) |
| Δr [mm] | 0.330 | 0.686 | 0.334 (1.2%) | 0.683 (0.4%) |
| t_b [mm] | 0.404 | 0.621 | 0.397 (1.7%) | 0.600 (3.4%) |
| Avg. error [%] | - | - | 1.6 | 1.7 |

3. SPR 공정 주요인자 분석

상관 소재를 결정한 상태에서 SPR 공정을 수행할 경우, 마찰계수, 하판두께, 리벳길이는 SPR 체결부의 품질을 결정하는 주요 공정변수가 된다. 따라서 본 논문에서는 위의 대표적인 세 가지 공정변수 변화에 따른 유한요소해석을 수행하고 SPR 체결부 단면형상에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 SPR 접합부 품질확보 방안을 검토하였다.

3.1 마찰계수

SPR 접합공정은 소재간 고압의 마찰조건 하에서 수행된다. 따라서 접촉조건 및 소재의 코팅조건 등에 따라 마찰계수가 달라질 수 있으며, 본 논문에서

는 이를 고려하여 마찰계수에 따른 SPR 접합부 형상 변화를 분석하고자 한다. 기존의 해석기법은 Steel-Al 0.15, Steel-Steel 0.2 의 마찰계수를 적용한다 [10]. 접촉조건 및 소재의 코팅조건에 따른 마찰계수 영향을 분석하기 위하여 금속판재 간 가혹한 마찰조건을 고려하여 Steel-Al 0.3, Steel-Steel 0.3 으로 동일하게 증가시킨 후 해석결과를 비교하였다. Fig. 4 는 마찰계수에 따른 SPR 접합부 단면형상을 도시한 것이다. 해석결과 마찰계수가 커짐에 따라 리벳 체결 시 리벳 거동에 대한 변형저항력 증가로 인하여 체결량 감소하게 되었고, 이로 인하여 리벳 다리의 휨이 상대적으로 작게 발생되어 하판 잔여두께 감소를 유발하였다. 이와 더불어 리벳에 의한 상판 피어싱부의 과도한 변형으로 Fig. 4(b)에 도시한 것과 같은 추가 파단도 예측되었다. Table 5 은 마찰계수에 따른 SPR 단면 주요치수를 산출한 결과이다.

이와 같이 마찰계수 증가 시에는 리벳의 유동성이 저하되면서 SPR 체결부가 원활히 형성되지 않는다. 체결부 감소는 리벳과 판재 사이의 지지영역 감소를 의미하므로 접합강도 저하로 이어져 접합부 품질 불량을 야기할 수 있다. 따라서 SPR 접합공정 설계 시에는 가급적 마찰조건을 완화할 수 있는 방향으로 접합조건을 수립하는 것이 접합성능 향상에 유리할 것으로 판단된다.

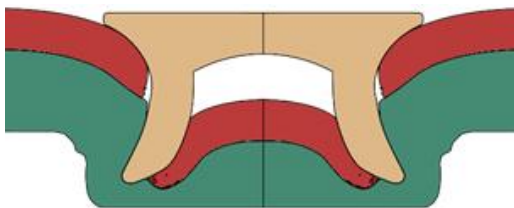


Fig. 4 (a) Simulation results according to the friction coefficient: Steel-Al 0.15, Steel-Steel 0.2

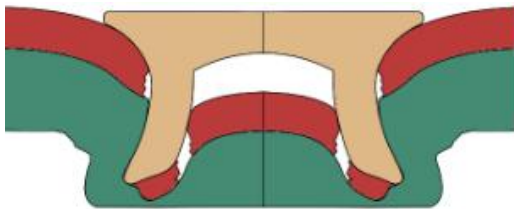


Fig. 4 (b) Simulation results according to the friction coefficient: Steel-Al 0.3, Steel-Steel 0.3

Table 5 Measurement of SPR dimensions according to the friction coefficient

| Dimension | Friction coefficient | |
|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|
| | Steel-Al 0.15 Steel-Steel 0.2 | Steel-Al 0.3 Steel-Steel 0.3 |
| r_1 [mm] | 3.467 | 3.412 |
| r_2 [mm] | 2.784 | 2.806 |
| Δr [mm] | 0.683 | 0.606 |
| t_b [mm] | 0.600 | 0.570 |

3.2 하판두께

SPR접합공정의 하판두께에 따른 영향을 분석하기 위하여 Al5052-H32 하판의 두께를 1.2t, 1.5t, 2.0t로 변경하며 해석을 진행하였고, 리벳 적용기준에 따라 리벳길이를 4.0, 4.5, 5.0 mm로 선정하였다. Fig. 5는 하판두께에 따른 실험과 해석의 비교를 도시한 것이며, Table 6에 주요치수 측정 결과를 제시하였다. 해석결과를 확인해보면, 하판두께가 증가할수록 체결량 및 하판 잔여두께가 증가하는 경향을 보인다. 결과적으로 하판두께가 두꺼워질수록 GA590DP와 Al5052-H32 간 체결량이 증가하므로 본 소재간 접합시 하판두께의 증가는 접합강도 확보에 비교적 유리하게 작용할 것으로 판단된다. 반대로 하판두께가 얇은 경우에는 적합한 리벳길이를 선정함으로써 접합강도 확보에 유의할 필요가 있다.



Fig. 5 (a) Simulation results according to the initial thickness of the lower sheet: 1.2t

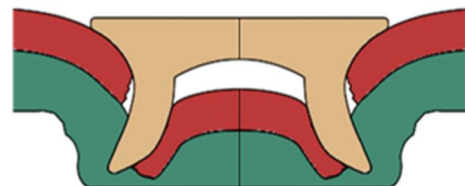


Fig. 5 (b) Simulation results according to the initial thickness of the lower sheet: 1.5t

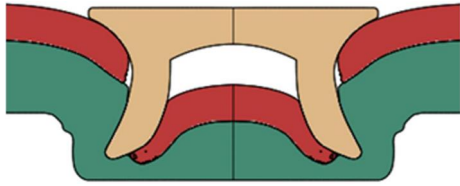


Fig. 5 (c) Simulation results according to the initial thickness of the lower sheet: 2.0t

Table 6 Measurement of SPR dimensions according to the initial thickness of the lower sheet

| Dimension | Bottom thickness [mm] | | |
|-----------------|-----------------------|-------|-------|
| | 1.2 | 1.5 | 2.0 |
| r_1 [mm] | 3.939 | 3.974 | 3.467 |
| r_2 [mm] | 3.605 | 3.378 | 2.784 |
| Δr [mm] | 0.334 | 0.596 | 0.683 |
| t_b [mm] | 0.397 | 0.383 | 0.600 |

3.3 리벳길이

SPR 접합공정에서 리벳길이에 대한 영향을 분석하기 위하여 상판 GA590DP 1.0t 하판 AI5052-H32 2.0t 소재 조합기준에 대하여 리벳길이를 4.5, 5.0, 5.5 mm로 변경하며 해석을 진행하였다. Fig. 6은 리벳길이에 따른 SPR 단면형상을 비교하였으며, 정량적 분석을 위하여 Table 7에 체결량 및 하판 잔여두께를 제시하였다. 리벳길이가 증가함에 따라 체결량이 급격히 증가하는 경향을 보이나, 하판 잔여두께는 체결량 대비 감소치가 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 6에서와 같이 하판의 다이 내부 충전여유가 존재함에 따라 리벳길이 증가 시 체결량이 급격하게 증가하는 것으로 판단된다. 하지만 하판 잔여두께는 하부다이와 리벳 사이에 하판이 충분히 채워진 상태이므로 잔여두께 감소가 급격히 진행되는 어렵다. 따라서 리벳길이 증가는 SPR 접합하중 증가에 효과적일 것으로 판단된다. 하지만 리벳길이가 과도하게 증가하게 되면 하판 잔여두께의 지속적으로 감소하여 관통 현상이 발생할 수 있으므로 이에 대한 주의가 필요하다. 결론적으로 체결량과 하판 잔여두께의 적절한 확보를 위한 최적 리벳길이 선정이 중요할 것으로 판단된다.

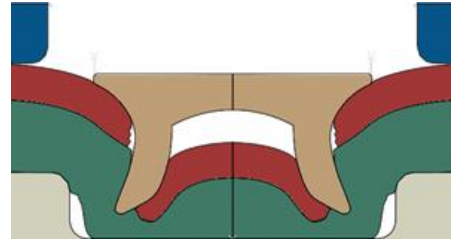


Fig. 6 (a) Simulation results according to the rivet length: 4.5 mm

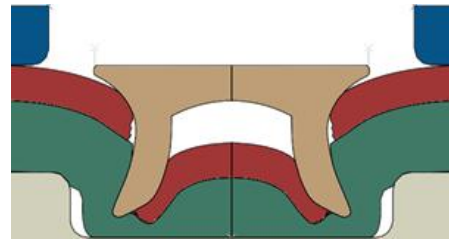


Fig. 6 (b) Simulation results according to the rivet length: 5.0 mm

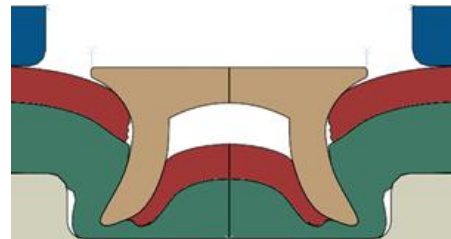


Fig. 6 (c) Simulation results according to the rivet length: 5.5 mm

Table 7 Measurement of SPR dimensions according to the rivet length

| Dimension | Rivet length [mm] | | |
|-----------------|-------------------|-------|-------|
| | 4.5 | 5.0 | 5.5 |
| r_1 [mm] | 3.304 | 3.467 | 3.640 |
| r_2 [mm] | 2.806 | 2.784 | 2.778 |
| Δr [mm] | 0.498 | 0.683 | 0.862 |
| t_b [mm] | 0.666 | 0.600 | 0.366 |

5. 결론

본 논문은 유한요소해석을 통하여 SPR 접합공정 주요인자들의 영향 분석을 위해 실험과 해석 비교를 통한 유한요소해석 기법을 검증하였다. 이를 바탕으로 주요인자에 따른 SPR 접합공정 해석결과를 검토

하였고, 소재 및 리벳의 물성데이터를 정확히 고려할 경우 SPR 단면형상은 평균 2% 이내의 우수한 예측정확도를 보이는 것을 확인하였다. SPR 공정의 주요인자로 마찰계수, 하판두께, 리벳길이를 선정하였고, 이 중 마찰계수는 리벳과 소재간의 저항력 변화에 매우 민감한 인자임을 확인하였다. 마찰계수가 높을수록 리벳의 유동을 억제함으로써 체결이 원활히 이루어지지 않으며, 과도한 마찰계수는 상판의 2차파단까지 야기할 수 있음을 확인하였다. 따라서 SPR 체결성을 높이기 위해서는 마찰계수를 가급적 낮게 관리하는 것이 유리할 것으로 기대된다. 하판두께와 리벳길이의 증가는 체결량의 증가를 가져올 수 있으나, 상대적으로 과도한 리벳길이를 적용할 경우 관통현상이 발생할 있으므로 사전에 공정상의 관리기준을 수립하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 본 논문에서 제시한 Steel-Al 합금 SPR 공정해석 기법 및 주요인자 분석 결과는 향후 금속판재 간의 SPR 공정분석 및 설계가이드라인 수립에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국생산기술연구원 기관주요사업(kitech EO-20-0017)과 월드클래스 300 프로젝트(S2482274)의 지원으로 수행한 연구입니다.

REFERENCES

- [1] Y.W. Ma, M. Lou, Y.B. Li, and Z.Q. Lin, M.S.Uddin, G.Littlefair, A.R.Dixit, S.Chattopadhyaya, 2018, Effect of rivet and die on self-piercing rivetability of AA6061-T6 and mild steel CR4 of different gauges, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 251, pp. 282-294, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.020>
- [2] H. Jiang, L. Sun, J. Liang, G. Li, and J. Cui, 2019, Shear failure behavior of CFRP/Al and steel/Al electromagnetic self-piercing riveted joints subject to high-speed loading, *Compos. Struct.*, Vol. 230, No. 111500, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111500>
- [3] S. P. Sunday, 1983, Self-piercing rivets for aluminum components, SAE Technical Paper, No. 830526, <https://doi.org/10.4271/830526>
- [4] Y. Abe, T. Kato, K. Mori, 2009, Self-piercing riveting of high tensile strength steel and aluminium alloy sheets using conventional rivet and die, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, pp. 3914-3922, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.007>
- [5] Y. Abe, T. Kato, K. Mori, 2006, Joinability of aluminium alloy and mild steel sheets by self piercing rivet, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, pp. 417-421, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.029>
- [6] D. Li, A. Chrysanthou, I. Patel, G. Williams, 2017, Self-piercing riveting-a review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 92, pp. 1777-1824, <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0156-x>
- [7] R. Porcaro, A. G. Hanssen, M. Langseth, A. Aalberg, 2006, The behaviour of a self-piercing riveted connection under quasi-static loading conditions, *Int. J. Solid Struct.*, Vol. 43, pp. 5110-5131, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.10.006>
- [8] R. Porcaro, A. G. Hanssen, M. Langseth, A. Aalberg, 2006, An experimental investigation on the behaviour of self-piercing riveted connections in aluminium alloy AA6060, *Int. J. Crashworthiness*, Vol. 11, pp. 397-417, <https://doi.org/10.1533/ijcr.2005.0108>
- [9] W. G. Drossel, R. Mauermann, R. Grutzner and D. Mattheß, 2013, Numerical and Experimental Analysis of Self Piercing Riveting Process with Carbon Fiber-Reinforced Plastic and Aluminium Sheets, *Key Eng. Mater.*, Vol. 554, pp. 1045-1054, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.554557.1045>
- [10] S.H. Kim, G. Bae, J.H. Song, K.Y. Park and N. Park, 2020, Influence of the flow stress of the rivet on the numerical prediction of the Self-Piercing Rivet (SPR) Joining, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, Vol. 29, No. 5, pp. 257-264, <https://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2020.29.5.257>