

CFRP 모델링 기법에 따른 CFRP-Al합금 SPR 접합공정의 수치해석 정확도 분석

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

Analysis of the Numerical Simulation Accuracy in the CFRP-Al Alloy SPR Joint Process According to the CFRP Modeling Method

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

(Received August 25, 2020 / Revised September 9, 2020 / Accepted September 11, 2020)

Abstract

The purpose of this paper is to analyze the numerical simulation accuracy according to the CFRP modeling method in the CFRP-Al alloy SPR (Self-Piercing Rivet) joint process. The mechanical properties of the CFRP, aluminum sheet are precisely obtained from the tensile test according to the loading direction. Additionally, the hardening curve of rivet was calculated from the inverse analysis of the machined rivet-ring compression test. For the CFRP-Al alloy SPR simulation, two kinds of the CFRP modeling methods were established based on the continuum and layer-by-layer approaches. The simulation results showed that the CFRP layer-by-layer modeling method can provide more reliable prediction shape of the fractured sheets and deformed rivet. This simulation technique can be used in evaluating the CFRP-Metal SPR performance and designing the SPR process conditions.

Keywords: Self-piercing Rivet, Multi-material Joint, Finite Element Analysis, Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)

1. 서론

최근 자동차 산업의 전기자동차 전환 가속화에 따라 주행거리 향상을 위한 경량화 요구가 증대되고 있다. 이를 위하여 자동차사에서는 기존의 철강 중심 차체에서 탈피하여 알루미늄, 마그네슘, 탄소 섬유강화플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) 등과 같은 다중소재 기반 고성능/경량 차체를 적극적으로 개발하고 있다. 하지만 다중소재를 적용에 따른 소재간 특성 차이로 인하여 일반적인 점용접

을 통한 차체 조립에 한계가 발생함에 따라 기계적 접합기법을 활용한 차체 조립기술 관련 연구가 활발히 수행되고 있다.

SPR(Self-Piercing Rivet)은 다중소재 간 접합을 위한 가장 대표적인 기계적 체결 방법으로 1990년대부터 현재까지 소재특성에 따른 접합성능 향상을 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 차체 경량화를 위한 대표 경량소재인 알루미늄 합금 적용 확대에 따라 강판-알루미늄합금[1-3], CFRP-알루미늄 합금[4-6] 조합에 대한 SPR 공정을 중심으로 많은 연구가 진행되었다.

1. 한국생산기술연구원 뿌리기술연구소

2. 인하대학교 기계공학과

3. ㈜오스텍

Corresponding Author : Korea Institute of Industrial Technology, Incheon Regional Division, E-mail: baegh@kitech.re.kr

이때 소재조합, 강도, 리벳형상 및 물성, 하부다이 형상 등과 같은 주요 공정인자에 따른 접합공정을 정밀하게 분석하기 위하여 유한요소해석을 적용하기 위한 노력이 지속되고 있다[7-9].

강판-알루미늄합금 조합의 SPR 공정 유한요소해석은 일반적인 금속판재의 물성평가 방법 및 해석 모델링 기술을 활용한다면 접합공정 분석에 요구되는 수준의 해석정밀도를 쉽게 확보할 수 있다. 하지만 CFRP-알루미늄합금 조합의 경우, CFRP 복합재 특성에 따른 정밀한 해석모델링 기술 부재로 인하여 공정분석이 가능한 수준의 해석정확도 확보에 어려움이 있다.

Hirsch 등[12]은 CFRP의 물성 및 파단특성을 고려하여 SPR 공정에서의 변형모드 및 파단경향을 조사하였다. 하지만 금속판재와 리벳(Rivet)의 정확한 물성을 고려하지 못하여 해석정밀도 확보에 한계를 보였다. 이와 같이 CFRP-금속판재 조합의 해석정확도 확보를 위해서는 CFRP, 금속판재, 리벳의 물성 및 파단특성을 동시에 정확히 반영할 필요가 있다.

본 논문에는 정밀 CFRP 모델링 기법 및 실측 리벳 물성을 바탕으로 CFRP-알루미늄합금의 SPR 접합공정 유한요소해석 기술을 확보하고자 한다.

이를 위하여 프리프레그(Prepreg)를 단일방향 4층으로 적층한 CFRP 1.0t 소재와 Al5052-H32 1.2t 소재의 방향별 인장시험을 수행하여 이방성을 고려한 물성 모델링을 수행하였다. 리벳 물성 확보를 위하여 링 압축시험(Ring Compression Test) 및 역해석 기반의 소성물성을 적용하였다. CFPR 모델링 기법에 따른 수치해석 정확도 분석을 위하여 CFRP [0/90/0/90]_s 1.8t 상판과 Al5052-H32 2.0t 하판을 SPR 공정 대상 소재 조합으로 선정하였다. CFRP 모델링 기법에 따른 SPR 공정해석을 수행하였으며, 그에 따른 SPR 형상예측 결과를 실험과 비교하였다. 이를 통하여 CFRP-알루미늄합금 조합의 SPR 접합공정 정밀분석을 위한 수치해석 고도화 기법을 확보하였다.

2 물성평가 및 해석용 물성모델링

본 연구에서는 CFRP-알루미늄합금의 SPR 접합공

정 해석용물성 확보를 위하여 프리프레그를 단일방향 4층으로 적층한 CFRP 1.0t 소재와 Al5052-H32 1.2t 소재를 평가대상 소재로 선정하였다. 대상소재의 방향별 인장시험을 수행하고 이를 바탕으로 소재 특성을 고려한 해석용 물성 모델링을 수행하였다.

2.1 Al5052-H32

본 논문에서는 Al5052-H32 소재의 이방성 물성을 고려하기 위하여 Kim 등[10]의 물성평가 결과를 활용하였다. Al5052-H32 소재는 압연에 따른 이방성을 고려하기 위해 0° (RD), 45° (DD), 90° (TD) 방향으로 ASTM E8M Subsize 규격시편을 채취하였다.

MTS810 만능시험기를 이용하여 2 mm/min의 준정적 인장속도로 시험을 진행하였으며, 이미지 상관법(Digital Image Correlation) 시스템을 이용하여 변형률 및 r값을 측정하였다. 인장시험의 재현성 검증을 위하여 총 3회의 반복시험을 수행하였다. 방향별 인장시험에 따른 공칭응력-공칭변형률 선도를 Fig. 2에 도시하였다. 소재의 이방성은 Hill's 48 항복함수를 이용하여 근사하였으며, 유동응력선도는 알루미늄합금의 경화거동 표현에 적합한 Voce식을 사용하여 근사하였다. 수치해석에 적용한 Al5052-H32의 이방성 물성 및 경화식의 계수는 Table 1에 제시하였다.

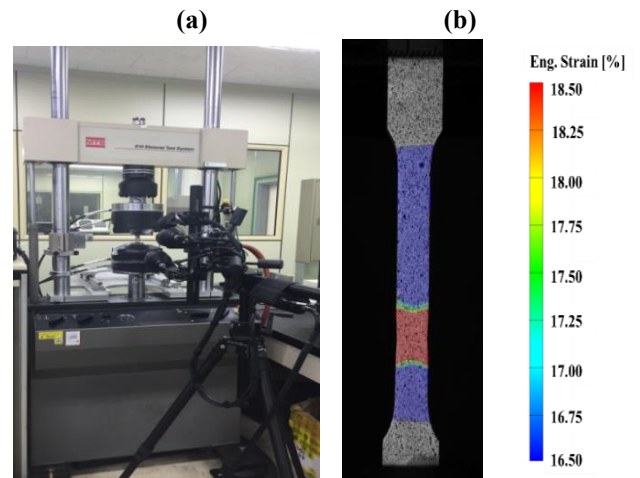


Fig. 1 Tensile test of Al5052-H32 with DIC system: (a) MTS810 with DIC system; and (b) DIC analysis result after necking

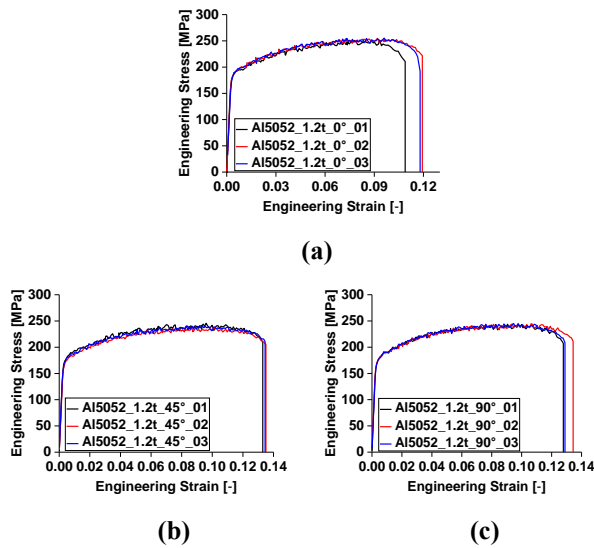


Fig. 2 Engineering stress–Engineering strain curves of Al5052-H32 1.2t material: (a) 0°(RD); (b) 45°(DD); and (c) 90°(TD)

Table 1 Anisotropic properties for the Hill's 48 yield function and the coefficients of Voce hardening equation of Al5052-H32 1.2t

Anisotropic Properties				$\sigma_{Voce} = A - Be^{-c\bar{\epsilon}^p}$		
σ_0	r_0	r_{45}	r_{90}	A	B	C
[MPa]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]
190	0.54	0.66	0.83	288.1	96.3	23.5

2.2 CFRP

CFRP 물성확보를 위하여 단일방향으로 정렬된 프리프레그를 4층으로 적층 후 경화시킨 소재를 평가 대상 소재로 선정하였다. 복합재의 방향별 물성을 평가하기 위하여 탄소섬유 배열방향을 기준으로 0°, 45°, 90° 방향에서 ASTM D3039 규격시편을 채취하였다. 인장시험은 SIMADZU 만능시험기를 이용하여 동일규격 권장속도인 2 mm/min에서 수행하였다. 시편의 파손 방지를 위하여 시편 그림부에 유리섬유강화플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic) 소재의 탭을 Araldite 2014-1로 접착하였다. 변형률은 알루미늄합금 판재와 동일하게 이미지 상관법 시스템을 활용하여 측정하였다. Fig. 3은 CFRP 인장시험

장치 및 방향별 시편형상을 보여준다. 재현성 검증을 위하여 3회 반복시험을 수행하였으며, 공칭응력–공칭변형률 선도를 Fig. 4에 제시하였다. 0° 방향은 1,900 MPa 시점부터 섬유가 끊기기 시작하며, 2,100 MPa 인장강도에 도달하는 1.7 % 변형률에서 파단이 일어났다. 45°, 90° 방향 인장강도는 0° 방향 비해 상당히 낮은 60, 50 MPa에 파단이 일어났고 섬유의 끊김없이 섬유 수직방향으로 파단이 일어났다. 결과적으로 CFRP는 섬유방향의 강성이 매우 강하며, 이외 방향에서는 강성이 상대적으로 많이 낮은 것을 확인할 수 있다. 시험결과를 기반으로 횡 등방성(Transversely isotropic)을 고려한 선형탄성 모델 채택하였고, Hooke's law에 따라 CFRP 강성행렬을 도출하였다.

탄소섬유가 단일방향으로 적층된 CFRP의 경우 횡 등방성을 보이게 되며, 섬유방향에 대한 두께방향과 폭 방향 물성이 동일한 것으로 가정할 수 있다. 따라서 0°, 90° 방향의 인장시험을 통해 CFRP 컴플라이언스 행렬(Compliance Matrix) 3가지의 독립 성분 S_{11}, S_{12}, S_{22} 을 구할 수 있다. 또한 45° 방향 인장시험에서의 응력, 변형률을 45° 회전 변환하여 전단성분으로 표현함으로써 S_{66} 을 구할 수 있다. S_{23} 은 90도 방향 인장시험 결과와 Inada 등[11]이 제시한 포아송비를 기준으로 산출하였다. 최종적으로 인장시험을 통해 얻은 독립성분으로 컴플라이언스 행렬을 구성하였고, 역행렬을 통해 Figs. 5(a), 5(b)와 같이 CFRP 섬유방향 별 강성행렬(Stiffness Matrix)를 구성하였다. CFRP 연속체 모델의 물성은 0°, 90° 방향의 강성행렬을 평균하여 Fig. 5(c)와 같이 균질화 강성행렬(Homogenization Stiffness Matrix)을 구성하였다.

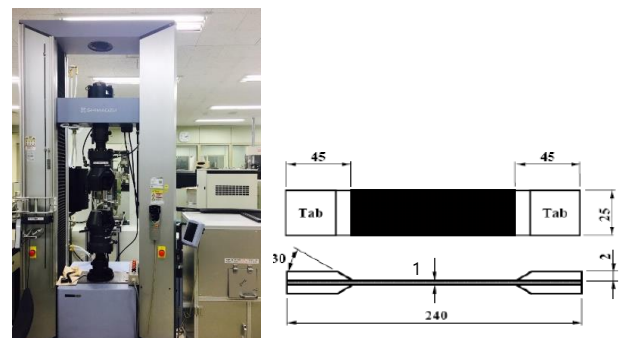


Fig. 3 Tensile testing machine and test specimen with anti-fracture tabs

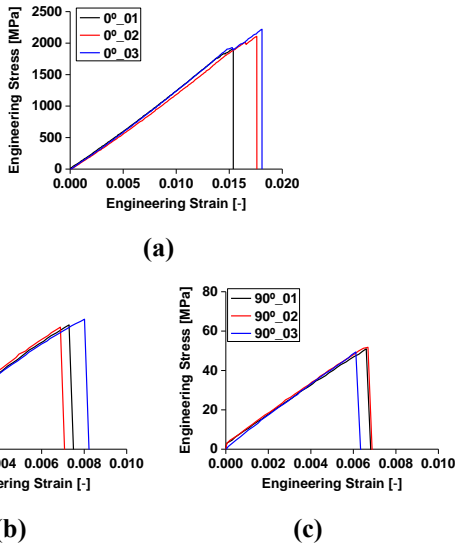


Fig. 4 Engineering stress–Engineering strain curve: (a) CFRP 1.0t 0° direction; (b) CFRP 1.0t 45° direction; and (c) CFRP 1.0t 90° direction

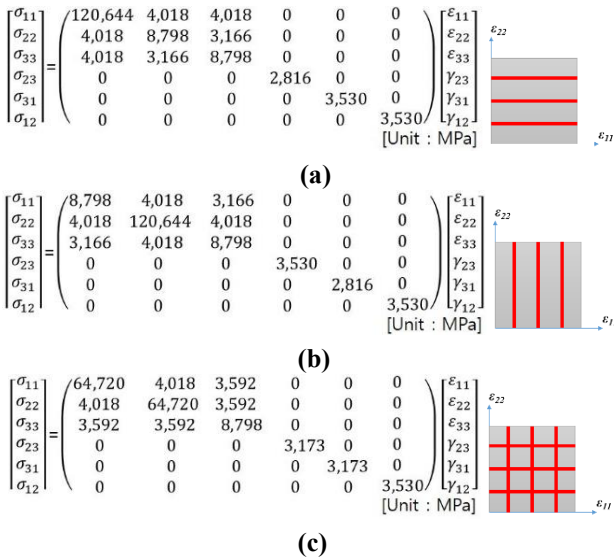


Fig. 5 CFRP stiffness matrix: (a) 0° Fiber direction; (b) 90° Fiber direction and (c) Homogenization stiffness matrix

2.3 리벳

본 연구에서 사용한 SPR용 리벳은 Bollhoff사의 C-type 리벳으로 보론강 소재에 Al-Mg 코팅처리가 되어있다. Kim 등[10]은 리벳 소재의 정확한 물성 확보를 위하여 리벳의 원통형 부분을 채취한 후 Fig. 6 과 같이 이미지 상관법을 활용한 링 압축시험을 수

행하였다. 이때 채취한 시편의 사이즈는 외경 5.4 mm, 내경 3.4 mm, 높이 2.0 mm이다. MTS810 만능시험기를 이용하여 준정적 변형률 속도인 2 mm/min 에서 압축시험을 수행하였다. 최종적으로 압축시험의 유한 요소해석을 통하여 리벳의 소성물성을 Voce식으로 결정하였으며, 이를 Table 2에 제시하였다.

3. CFRP–AI SPR 접합공정 해석

3.1 해석조건 및 CFRP 모델링

본 논문에서는 SPR 접합공정 해석정밀도 분석을 위하여 CFRP[0/90/0/90]_s 1.8t 상판과 Al5052-H32 2.0t 하판을 대상소재 조합으로 선정하였다. 이때 CFRP는 0도와 90도 방향으로 교차 적층되어 있으며, 대칭성을 고려하여 총 7층으로 구성되어 있음을 의미한다.

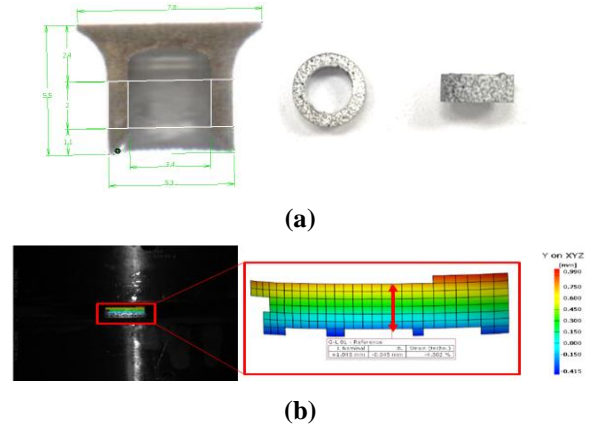


Fig. 6 Rivet ring compression test with DIC system: (a) Machined rivet specimen; and (b) Ring compression test (Kim et. al [10])

Table 2 Rivet properties predicted by the inverse analysis

E [GPa]	Poisson's ratio [-]	σ_y [MPa]	$\sigma_{Voce} = A - Be^{-C\bar{\epsilon}^p}$		
			A [MPa]	B [MPa]	C [-]
173	0.3	1,065	1,520	455	95

SPR 접합공정 해석은 상용해석프로그램인 ABAQUS/Explicit을 사용하였다. Fig. 7와 같이 해석효율 향상을 목적으로 SPR 공정의 대칭성을 고려하여 1/4모델을 사용하였으며, SPR 공정의 앤빌/홀더/편치는 강체로 모델링하였다. 연속체 모델과 다층구조

모델의 총 요소수는 각각 72,011개와 164,855개이다. 기계적 접합을 위한 리벳의 변위는 6 mm이다. 소재와 금형 사이의 마찰계수는 CFRP-금속 0.15, 알루미늄합금-강재 0.2로 적용하였다.

CFRP 복합재의 가장 간편한 모델링 방법은 연속체 가정으로, SPR 공정해석 정확도 확보가 가능하다면 가장 효율적인 해석방법일 것이다. 하지만 복합재 특성상, 연속체 모델링은 다층 구조의 특성을 반영할 수 없다. 따라서 해석정확도 확보를 위하여 각 층별 방향성을 고려한 다층구조 모델링이 효과적일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 8과 같이 연속체 및 다층구조 모델링 기법에 따른 해석정확도를 검토하였다. 연속체 모델은 균질화 강성행렬을 적용하였으며, 다층구조 모델은 프리프레그 적층 방향을 고려하여 층별 0°/90° 강성행렬을 적용하였다. 이때

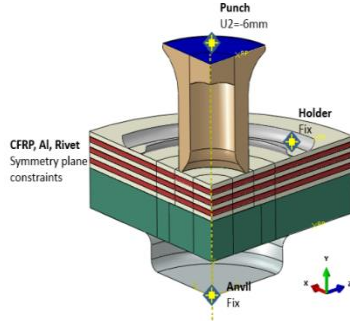


Fig. 7 SPR process analysis boundary conditions

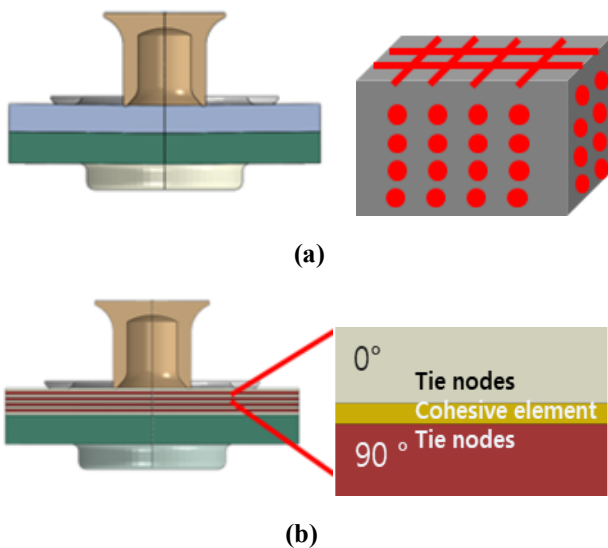


Fig. 8 Shape comparison according to the CFRP modeling method: (a) Continuum model; and (b) Layer-by-layer model

층간 접착제 경화층을 응집 요소(Cohesive Element)로 모델링하고, Tie 기능을 활용하여 공유노드를 구속하였다[12]. 이때 계면 박리 모사를 위하여 응집 요소에 참고문헌과 동일한 접착 분리 조건을 적용하였다. CFRP의 파단은 방향별 파단변형률을 기준으로 적용하였다. 사용된 요소는 C3D8R로 8절점 저감적분 요소이다. 해석정확도 향상을 위하여 리벳과 접촉발생 영역의 요소 사이즈는 0.1 mm로 부가하였다.

3.2 SPR 해석결과 및 리벳형상 분석

CFRP 모델링 기법에 따른 SPR 공정해석을 수행하였으며, 실험과의 파단형태 및 리벳형상을 비교 및 분석하였다. Fig. 9는 CFRP 모델링 기법에 따른 SPR 공정해석 결과를 비교한 것이다. 리벳이 침투하여 파단변형률에 도달하게 되면 상판에 파단이

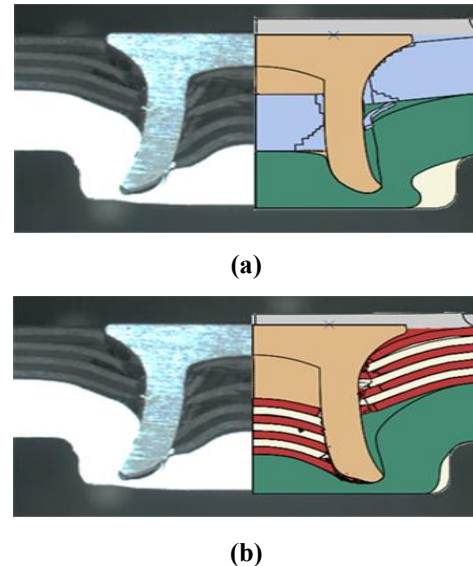


Fig. 9 Comparison of the SPR joint shape according to the CFRP modeling method: (a) Continuum model; and (b) Layer-by-layer model

발생하며, 이후 하판을 변형시키면서 최종 SPR 접합부가 형성된다. 해석결과를 비교해보면 CFRP 연속체 모델은 상판의 파단형태 및 하판의 변형형상을 정확히 예측하지 못하고 있으며, 이로 인하여 리벳의 변형 형상이 실험과 일치하지 못하는 결과를 보인다. 반면, CFRP 다층모델은 상판의 순차적 파단형태와 계면에서의 파단을 유사하게 표현하고 있으며, 상대적으로 하판 및 리벳의 변형 형상을 유사하게 예측하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 해석결과의 외곽선을 추출하여 SPR 접합부와 비교한 것이

다. 이를 통하여 CFRP 다층모델이 실제 SPR 접합부 형상을 잘 묘사함을 명확히 확인할 수 있다. 해석 결과를 보다 정량적으로 분석하기 위하여 Fig. 11과 같은 기준을 바탕으로 리벳 형상을 측정하였다. 이를 통하여 Table 6에 실험과 해석기법에 따른 리벳 형상 측정결과를 제시하였다. 해석에서 측정된 치수 별로 실험의 좌우에서 측정한 평균치수와의 오차를 산출하였으며, 최종적으로 오차의 평균을 계산하였다. 이때 CFRP 연속체 모델과 다층모델의 평균 오차는 각각 약 19.0%, 7.3% 수준으로 다층모델이 수치적으로도 최종 리벳 형상을 우수하게 예측하고 있는 것으로 판정할 수 있다. 따라서 CFRP를 포함한 SPR 공정의 수치해석 신뢰성 확보를 위해서는 CFRP의 다층구조를 정확히 반영하여 모델링함과 동시에 방향성을 고려한 물성치를 층별로 적용하는 것이 필수적임을 확인할 수 있다. 하지만 현재의 모델링 기법도 인터락 지점에서의 소재변형 및 중앙부 CFRP 소재의 계면파단 현상 등을 정확하게 표현에는 한계가 있는 것으로 파악된다. 이는 CFRP의 응집 요소 및 층별 요소의 이방성 등을 고려한 파단조건을 정확히 반영하지 못한 결과로 예상된다. 따라서 향후에는 정확한 CFRP의 파단특성을 반영한 SPR 공정해석으로 추가적인 수치해석 정확도 개선이 가능할 것으로 기대된다.

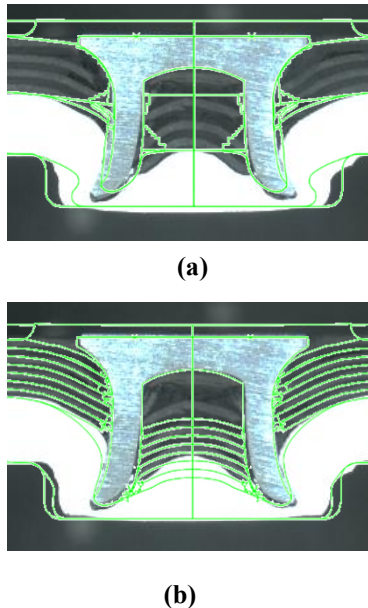


Fig. 10 Outlines of the SPR joint according to the CFRP modeling method: (a) Continuum model; and (b) Layer-by-layer model

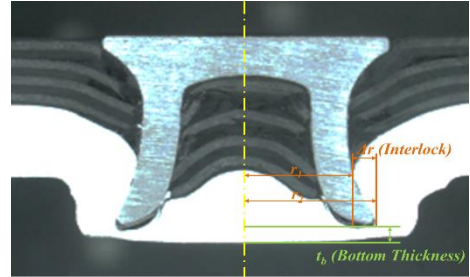


Fig. 11 Measurement of deformed rivet dimensions

Table 3 Dimensional accuracy of the rivet shape according to the CFRP modeling method

Dimension	Continuum model	Layer-by-layer model	Experiment		
			Left	Right	Avg.
r_1 [mm]	2.673 (14.9%)	2.737 (12.9%)	3.142	3.140	3.141
r_2 [mm]	3.152 (15.7%)	3.330 (11.0%)	3.709	3.773	3.741
Δr [mm]	0.479 (20.2%)	0.593 (1.2%)	0.569	0.631	0.600
t_b [mm]	0.472 (25.4%)	0.361 (4.1%)	0.365	0.388	0.377
Avg. error [%]	19.0	7.3	-	-	-

4. 결론

본 논문에는 CFRP-알루미늄합금 소재 조합의 SPR 공정해석을 수행하고 CFRP 모델링 기법에 따른 정량적 해석정확도 평가 및 신뢰성 확보 방안을 제시하였다. SPR 공정해석을 위하여 단일방향 4층 적층 CFRP 1.0t 소재와 AI5052-H32 1.2t 소재의 0°, 45°, 90° 방향에서 시편을 채취하여 인장시험을 수행하고 해석용 물성모델을 확보하였다. 추가적인 해석 정확도 향상을 위하여 링 압축시험의 역해석을 통하여 도출한 리벳 물성을 적용하였다. 이를 통하여 SPR 공정해석에 필요한 CFRP, 알루미늄합금, 리벳의 물성DB를 확보하였다. 일반적인 SPR 공정해석 및 CFRP 복합재 특성을 고려하여 연속체 및 다층 모델을 이용한 CFRP 모델링 기법을 제안하였으며, 측정된 물성을 바탕으로 SPR 공정해석 기법을 정립하였다. CFRP 모델링 기법에 따른 SPR 공정해석을 수행하고 단면 체결형태 및 리벳 변형형상을 분석한 결과, 다층모델을 이용한 CFRP 모델링 기법이

CFRP-알루미늄합금 SPR 공정해석에 보다 적합한 것을 확인하였다. 이는 CFRP의 층별과단 및 계면과단 현상을 보다 실제와 유사하게 표현할 수 있기 때문으로 분석된다. 추가적으로 응집 요소 및 층별 요소의 과단특성을 보다 정확히 반영한다면 SPR 공정해석 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구를 통하여 CFRP, 알루미늄판재, 리벳의 물성을 해석에 고려한다면, 실제 SPR 공정의 과단 및 변형 특성을 비교적 정확히 모사할 수 있는 것을 확인하였다. 이와 같이 CFRP 다층모델 기반 SPR 접합해석은 향후 다중소재 적용 추세에 따른 경량차체 개발 시에 접합성능 분석 및 접합공정 설계를 위한 핵심기술로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업소재핵심기술개발사업(과제번호: 20002809)의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

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, 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] A. Pramanik, A.K. Basak, Y. Dong, P.K. Sarker, 2017, Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys—A review, *Composites Part A, Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf.*, Vol.101, pp. 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.007>
- [5] H.M. Rao, J. Kang, G. Huff, K. Avery, 2018, Impact of specimen configuration on fatigue properties of self-piercing riveted aluminum to carbon fiber reinforced polymer composite, *Int. J. Fatigue*, Vol. 113, pp. 11-22
- [6] J. Liang, H. Jiang, J. Zhang, X. Wu, X. Zhang, G. Li, J. Cui, 2019, Investigations on mechanical properties and microtopography of electromagnetic self-piercing riveted joints with carbon fiber reinforced plastics/aluminum alloy 5052, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, Vol. 19, pp. 240-250, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.11.001>,
- [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., [10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1045](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.1045)
- [10] S.H. Kim, G. Bae, J.H. Song, K.Y. Park and N. Park, 2020, Influence of the plastic property of the rivet on the numerical prediction of the Self-Piercing Rivet (SPR) Joining, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, Vol. 00, No. 0, <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP>.
- [11] T. Inada, Y. Shimamura, A. Todoroki and H. Kobayashi, 2004, Development of the two-step delamination identification method by resonant and anti-resonant frequency changes, *Key Eng. Mater.*, Vol. 270, pp. 1852-1858, DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.1852](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.1852)
- [12] F. Hirsch, S. Muller, M. Machens, R. Staschoko, N. Fuchs and M. Kastner, 2017, Simulation of self-piercing rivetting processes in fiber reinforced polymers: Material modelling and parameter identification, *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 241, pp. 164-177, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.010>