[논문] 한국소성가공학회지, 제 29 권 제 5 호, 2020
Transactions of Materials Processing, Vol.29, No.5, 2020
http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2020.29.5.257

Self-Piercing Rivet 접합공정의 수치예측에 미치는 리벳 유동응력의 영향

김성호[1,2]· 배기현[1]· 송정한[1]· 박근영[3]· 박남수[1,#]

Influence of the Flow Stress of the Rivet on the Numerical Prediction of the Self-Piercing Rivet (SPR) Joining

S.H. Kim, G. Bae, J.H. Song, K.Y. Park, N. Park
(Received August 25, 2020 / Revised September 9, 2020 / Accepted September 11, 2020)

Abstract

This paper is concerned with the influence of the plastic property of the rivet on the numerical prediction of the Self-Piercing Rivet (SPR) Joining. In order to predict the plastic property of the rivet, a ring compression specimen was directly fabricated from the rivet used for the mechanical joining of dissimilar materials, and the FE analysis together with the ring compression test was iteratively carried out by changing the plastic property of the rivet. For reliable FE analysis, a friction coefficient was estimated based on a friction calibration curve, measuring the reductions in inner diameter and height of the ring specimen after the compression test. From each simulation result, the force−displacement curves were then compared from each other so as to obtain the rivet plastic property that shows good agreement with the experimental result. The SPR joining between GA590 1.0t and Al5052 2.0t was conducted, and the numerical prediction was performed with the use of the plastic property evaluated based on the inverse analysis and the one referred from Mori et al. [11]. Comparison of the experiment and the numerical predictions in terms of the interlock and bottom thickness revealed that the reliable evaluation of the plastic property of the rivet is necessary for the trustworthy numerical prediction of the SPR joining.

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

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 연비 및 충돌성능에 대한 규제를 강화하고 있으며, 이에 대응하기 위해 차체의 강성을 보강함과 동시에 차체 중량을 감소시킬 수 있는 고강도 경량소재 개발 및 적용에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 특히, 철강 소재 대비 무게가 가벼우면서 높은 강도를 유지할 수 있는 경량소재의 적용 확대에 따라 이종 소재 간 체결에 관한 연구가 최근 중점적으로 진행되고 있으며, 시험 및 해석을 기반으로 다중소재의 기계적 체결 거동 특성 분석이 점차적으로 이루어지고 있다.

다중 소재 간 접합을 위한 대표적인 기계적 체결 방법인 Self–Piercing-Rivet (SPR) 접합 방법은 1990년대부터 현재에 이르기까지 광범위하게 적용되고 있다. Sunday [1] 등은 알루미늄을 포함한 SPR 접합공정에 대한 연구를 진행하였고, SPR 접합강도와 연관되어 있는 공정변수들에 대한 분석을 진행하였다. Xu [2, 3]는 리벳 형상 변수에 관한 SPR 공정영향인자 분석을 진행하였고, 리벳길이가 길어질수록 인터락이 증가하며 하판잔여두께가 얇아짐을 입증하였

1. 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소
2. 인하대학교 기계공학과
3. ㈜오스템
Corresponding Author: Korea Institute of Industrial Technology, Shape Manufacturing R&D Department, E-mail: nspark@kitech.re.kr

다. Khezri [4] 등은 가공이 진행된 리벳 머리, 꼬리부분을 절단한 후 압축실험을 수행하여 리벳의 기계적 성질을 평가한 바 있으며, Mucha [5]는 SPR 공정 해석에서 마찰계수의 변화가 펀치의 하중변위 선도에 미치는 영향을 분석하였다. Haque [6]등은 접합 판재 두께 및 리벳의 경도를 펀치의 하중-변위 선도와 연관 지어 분석하였고, Porcaro [7-9] 등은 상업용 유한요소해석 프로그램인 LS-Dyna를 이용하여 SPR 공정해석 연구를 진행하였다. 유한요소해석을 통한 SPR 공정조건해석은 기존 시험 평가와 더불어 소재 간 조합, 강도, 리벳의 형상 및 물성, 하부 다이 형상 등과 같은 여러 공정변수들이 접합 품질에 미치는 영향에 대한 물리적 거동을 가능하게 하여, 각 공정인자의 영향에 대한 연구 가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 SPR 접합해석에서 리벳물성이 접합 특성에 미치는 영향을 연구하기 위해 리벳에서 직접 시험편을 채취하여 단순 압축시험을 진행하였다. 압축시험을 통해 획득한 높이감소율과 내경감소율로 바탕으로 마찰계수 평가를 진행하였고, 역해석을 통해 압축시험 및 해석결과 간의 하중-변위선도를 비교하여 리벳의 소성 물성을 도출하였다. 최종적으로 도출한 리벳물성을 적용한 해석 결과와 시험결과 간 인터락, 하판 잔여두께 등의 단면 주요치수를 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다.

2.1 접합대상 금속판재 기초물성 평가

2.1.1 접합대상소재 인장시험

본 연구의 SPR 공정에 사용되는 대상 금속 판재는 GA590DP 0.8t 와 Al5052-H32 1.2t 로 ASTM E8M Subsize 규격으로 인장시험을 진행하였다. 이방성 물성 평가를 위해 대상 소재는 0°(RD), 45°(DD), 90°(TD) 방향으로 시편을 채취하여 시험을 수행하였고, 시편 표면의 길이, 폭 방향 변형률은 Fig. 1에 제시한 Digital Image Correlation (DIC) system을 이용하여 평가하였다. 인장시험은 MTS810 만능시험기를 이용하여 0.025 mm/s의 크로스-헤드 속도로 준정적 시험 조건을 가정하여 물성평가를 진행하였다. 인장 시험 결과, Al5052-H32 소재와 달리 GA590은 소재 이방성 특성을 거의 보이지 않아, 등방성으로 가정하여 소성 물성을 정의하였다.

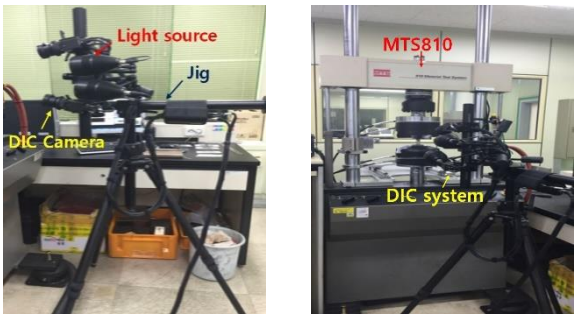


Fig. 1 MTS810 with the DIC system

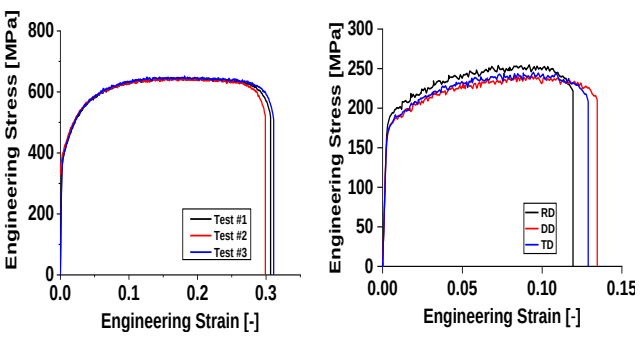
2.1.2 인장물성평가

시험을 통해 획득한 각 판재의 공칭응력-공칭 변형률 선도는 Fig. 2에 제시하였고, 탄성계수, 푸아송비, 항복응력, 최대인장강도의 기계물성은 Table 1에 정리하였다. 인장시험은 각 시험조건에 따라 3회씩 반복 수행하여 평가한 물성의 재현성을 확보하였다.

식 (1)과 (2)의 Swift 및 Voce 경화식을 이용하여 GA590DP 0.8t 와 Al 5052-H32 1.2t 각 소재의 네킹 이후 소성물성을 예측하였고, 획득한 경화식의 계수값은 Table 2 에 제시하였다.

$$\sigma_{Swift} = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n \quad (1)$$

$$\sigma_{Voce} = A - Be^{-C\bar{\varepsilon}^p} \quad (2)$$



(a) (b)

Fig. 2 Engineering stress–Engineering strain curve: (a) GA590DP 0.8t; and (b) Al5052-H32 1.2t

Table 1 Mechanical properties

Material	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]	Yield strength [MPa]	UTS [MPa]
GA590DP	177	0.3	373	650
Al5052-H32	63	0.33	190	253

Table 2 Model parameters of the strain hardening models for the target materials

Material	Swift parameter			Voce parameter		
	K [MPa]	ε_0 [-]	n [-]	A [MPa]	B [MPa]	C [-]
GA590DP 0.8t	1061.8	0.003	0.179	760.5	344.2	19.5
Al5052-H32 1.2t	419.5	0.011	0.174	288.1	96.3	23.5

Al5052-H32 1.2t 소재의 경우, 이방성 평가를 위해 각 하중 방향(0°, 45°, 90°) 별 r-value 를 측정하였다. 소성비압축성 가정 하에 r-value 는 식 (3)과 같이 축 및 폭방향의 변형률로 정의될 수 있으며, 본 연구에서는 DIC system 을 통해 시간에 따른 변형률 이력을 평가하여 r-value 를 측정하였다. 시험을 통해 획득한 r-value 값과 항복응력은 Table 3 에 제시하였다.

$$r = \frac{d\varepsilon_w}{d\varepsilon_t} = -\frac{d\varepsilon_w}{d\varepsilon_w + d\varepsilon_l} \tag{3}$$

Table 3 r-value and yield stress of Al5052-H32 1.2t according to the loading direction

Loading Direction [°]	r-value [-]	Yield Stress [MPa]
0	0.54	189.94
45	0.66	177.28
90	0.83	177.65

여기서 $d\varepsilon_w$, $d\varepsilon_l$, $d\varepsilon_t$는 폭, 길이, 두께 방향의 변형률 증분을 정의한다. Al5052-H32 1.2t 소재의 물성 이방성은 Hill's 48 항복함수를 사용하여 기술하였다. Hill's 48 이방성 항복함수는 식 (4)와 같이 정의되며 항복함수 계수값은 식 (5)를 통해 계산하였다. 획득한 Hill's 48 항복함수의 계수는 Table 4에 제시하였다.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(G+H)\sigma_{xx}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + (H+F)\sigma_{yy}^2 + 2N\sigma_{xy}^2} \tag{4}$$

$$F = \frac{r_0}{(1+r_0)r_{90}}, \quad G = \frac{1}{1+r_0} \tag{5a}$$

$$H = \frac{r_0}{1+r_0}, N = \frac{(2r_{45}+1)(r_0+r_{90})}{2r_{90}(r_0+1)} \tag{5b}$$

Table 4 Parameters of the Hill's 48 yield function for Al5052-H32 1.2t

F	G	H	N
0.4266	0.6473	0.3527	1.2445

3. 리벳 소성물성 예측

3.1 리벳 압축시험

이종소재 SPR 접합에 사용된 리벳은 볼호프사(Bollhoff)의 C-type 리벳이며, 보론강을 이용하여 가공된 기계적 체결용 부품이다. 가공 후 리벳 부품의 소성물성 예측을 위해 Fig. 3과 같이 리벳의 머리 및 꼬리 부분을 제거 후 리벳 중간 부분에서 링형태의 시험편을 채취하여 단순 압축시험을 진행하였다. 채취한 시험편의 치수는 Table 5에 나타내었다. 압축시험은 MTS810 만능시험기를 이용하여 수행하였고, 링 시험편의 압축 변위는 ARAMIS DIC system을 이용하여 측정하였다. 준정적 시험 조건을 고려하여 Cross-head 속도는 0.002 mm/s로 설정하였고, 압축봉과 링 시험편 사이의 마찰력을 최소화하기 위해 접촉부에 윤활제를 도포하였다.

링 압축 시험 중 DIC system의 가상신율계를 이용하여 Fig. 4에 제시한 것과 같이 시험편 중간부 1 mm 구간에 대해 압축 변위를 평가하였고, 장비에서 측정된 하중과 동기화하여 Fig. 5에 나타낸 압축 하

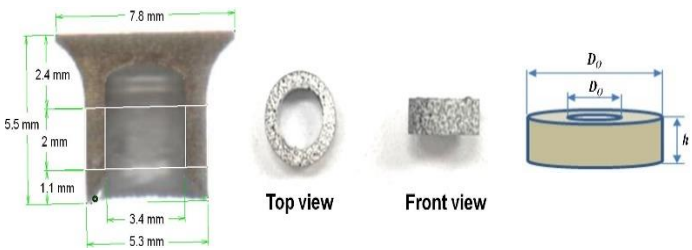


Fig. 3 Specimen fabricated from the rivet for a ring compression test

Table 5 Dimensions of the ring specimens (Unit: mm)

Specimen	Outside diameter [D_o]	Inside diameter [D_i]	Height [h]
#01	5.38	3.42	2.04
#02	5.40	3.40	2.12

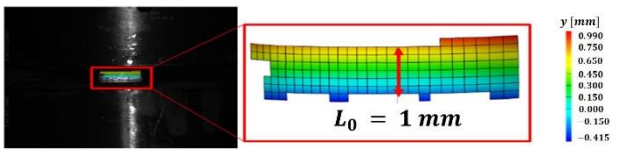


Fig. 4 Evaluation of the compressive displacement using the virtual extensometer of the DIC system

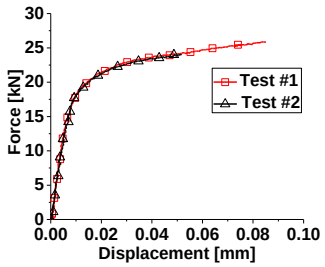


Fig. 5 Load–Displacement curve obtained from the ring compression test

중–변위 곡선을 획득하였다. 획득한 하중–변위 곡선은 3.3절에서 역해석을 통한 리벳 소성물성 평가 시 해석결과와의 비교군으로 이용하고자 한다.

3.2 리벳 마찰계수 평가

리벳의 마찰계수는 소재 마찰계수 측정에 보편적으로 이용되는 링 압축 시험편 마찰계수 도출법을 적용하여 추정하였다. Table 6에 제시한 압축 시험 후 링 시험편의 높이감소율, 내경감소율과 Fig. 6에 나타낸 마찰보정곡선의 비교를 바탕으로 본 연구에서 사용된 리벳의 마찰계수(μ)는 0.1로 도출되었다. 획득한 마찰계수는 리벳 소성물성 평가를 위한 링 압축 시험 역해석에 적용하였다.

Table 6 Reduction ratios of the height and inner diameter after the ring compression test

Specimen	Height reduction ratio [%]	Inner diameter reduction [%]
#01	5.88	0.88
#02	15.57	1.47

3.3 역해석을 통한 리벳 소성물성 평가

리벳의 소성물성 예측을 위해 3.1절에서 진행한 리벳 링 압축 시험의 역해석은 Abaqus/Standard를 이용하여 진행되었다.

압축 해석에서 링 시험편과 압축봉 간 마찰계수는 3.2 절에서 평가한 바와 같이 0.1로 설정하였고, 압축봉은 강체로 모델링하였다. 리벳의 포아송비는 0.3으로 가정하였고, 시험에서 평가한 하중–변위선도를 예측하기 위해 링 시험편의 소성물성을 변화시켜가며 반복해석을 수행하였다. 소성물성은 Swift 경화식과 Voce 경화식의 계수를 바꿔가며 해석에 적용하였고, 링 압축 시험과 동일한 위치에서 압축변위를 평가하여 하중–변위 곡선을 추출 및 시험결과와 비교하였다. 리벳 소성물성으로 Swift 경화식을 이용한 경우 Voce 경화식을 적용한 하중–변위 예측 대비 오차가 크게 평가되었고, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 평가 구간 내에서 전체적으로 평균 1% 이내의

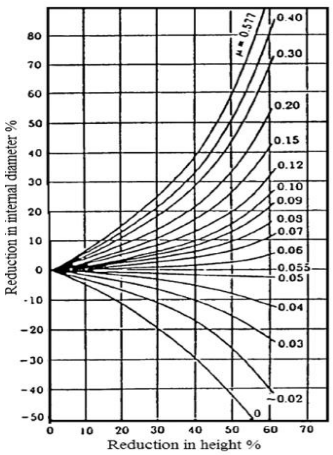
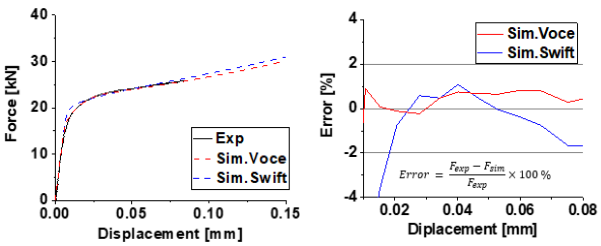


Fig. 6 Assessment of the friction coefficient of the rivet from a ring compression test [10]



(a) (b)

Fig. 7 Comparison of the experimental result with the predictions: (a) Load–Displacement curve; and (b) Percent error evaluated from each analysis case

Table 7 Rivet properties predicted based on the inverse analysis

E [GPa]	Poisson's ratio	σ_y [MPa]	Voce parameter		
			A [MPa]	B [MPa]	C [-]
173	0.3	1065	1520	455	95

오차율을 보이며 실제 시험결과를 잘 모사함을 확인하였다. 최종적으로 Voce 경화식 기반의 역해석 방법을 통해 도출한 리벳 소성물성을 Table 7에 나타내었다.

리벳의 실제 소성물성 획득의 한계로 기존 SPR 접합 공정의 해석적 평가는 Mori 등[11]의 연구에서 제공된 리벳 물성치를 주로 참조하였으나, 본 연구에서는 링 압축 시험 역해석을 통해 물성 평가를 수행하여 실제 리벳 소성물성을 추정하였다. Fig. 8은 위 참고논문에서 제공된 물성과 역해석을 통해 획득한 물성을 나타낸다. 참고논문에서 사용된 리벳 역시 보론강 기반의 C-type (Ø5.3 x 5.0 mm) 리벳으로 본 연구에서 적용된 리벳과 유사하나, 제시된 리벳 물성은 역해석을 통해 도출한 리벳 물성보다 더 높은 강도로 평가되었다. 본 연구의 4절에서는 리벳 물성이 SPR 접합에 미치는 영향을 살펴보기 위해 참고논문 및 역해석을 통해 획득한 물성을 적용하여 시험 및 유한요소해석 결과간 비교분석을 진행하였다.

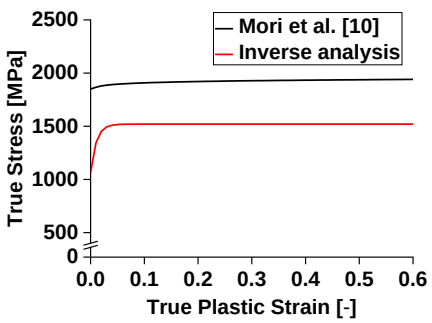


Fig. 8 Comparison between the flow stress curves of the rivets used in the FE analyses

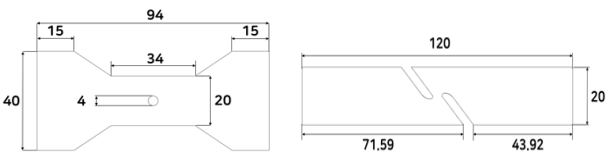
4. 이종소재 SPR 접합해석

4.1 유한요소해석 모델링

SPR 공정해석을 진행하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus/Explicit을 이용하였다. 공정해석 모델은 해석시간을 고려하여 2차원 축대칭 요소를 기반으로 정립되었다. 리벳의 유한요소 모델링을 위해 시험에서 사용된 Bollhoff 사의 C-type 리벳의 단면을 잘라 각 부위의 치수를 정밀하게 측정하여 모델링을 진행하였고, 하부 다이, 펀치 및 홀더는 강체로 정의하였다.

접합 소재의 상판 및 하판은 GA590DP 0.8t와 Al5052-H32 1.2t 소재로 모델링하였고, 리벳의 소재 관통 현상을 모사하기 위해 Fig. 9에 제시한 Center hole 및 in-plane shear 시편의 인장시험을 수행하여 GA590DP의 단축인장 및 전단하중경로에 대한 파괴변형률을 평가하였다. 시험결과는 식 (6)의 Drucker–Prager 항복기준 기반 파괴모델의 계수 평가에 적용하였고, 획득한 모델 계수는 Table 8에 나타내었다.

$$\bar{\varepsilon}_f^p = \left[\frac{b}{k(c\eta+1)}\right]^{1/n} - \varepsilon_0 \tag{6}$$



(a) (b)

Fig. 9 Specimen Dimension of the fracture test: (a) Center-hole; and (b) In-plane shear specimens [unit: mm]

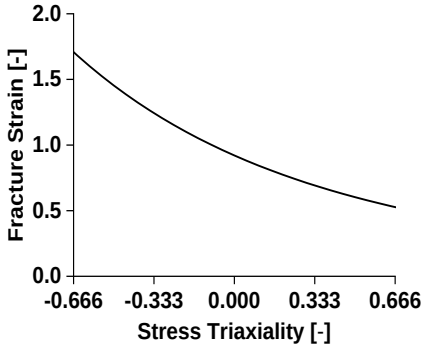


Fig. 10 Fracture strain of GA590DP 0.8t according to the stress triaxiality

Table 8 Coefficients of the fracture model for GA590DP 0.8t

k	ε_0	n	b	c
1061.75	0.0029	0.179	1046.740	0.157

위 파괴모델로부터 Fig. 10에 제시한 응력삼축성에 대한 파괴변형률을 계산하여 SPR 접합해석에 적용하였다. 접합해석 시, 하판부 소재 대변형에 따른 요소왜곡(Element distortion) 현상을 고려하기 위해 Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE) 기법을 적용하였고, 해석 정확도를 고려하여 리벳 관통 및 대변형이 예상되는 변형 집중부의 요소크기를 0.05 mm로 조밀하게 설정하였다. SPR 공정해석 시 리벳과 소재, 상/하판 간 마찰을 고려하기 위해 상/하판 소재 간 마찰계수는 0.15를 적용하였고, 이외 접촉에 대해서는 마찰계수를 0.2로 설정하였다.

접합해석 시 상/하판 소재 지탱을 위한 지지력(Holding force)은 4 kN으로 시험과 동일하게 설정하였고, 리벳은 전체 5 mm 를 이동하도록 변위 경계조건을 부여하였다. Fig. 11에 어셈블리 된 모델과 경계조건을 나타내었다. 변형 집중부의 작은 요소크기로 인한 해석소요 시간을 줄이기 위해 Mass scaling 기법을 적용하여 해석을 수행하였고, 해석결과에 영향을 미치지 않는 선에서 Mass scaling factor를 100으로 부여하였다.

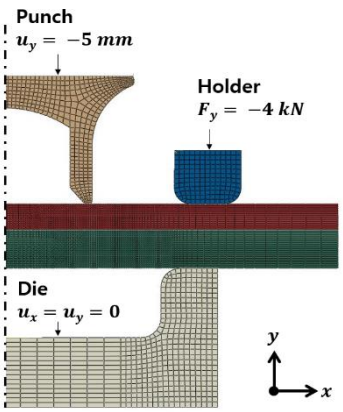


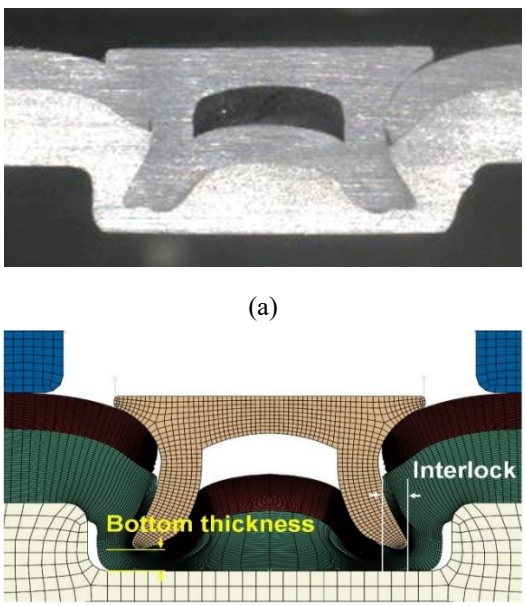
Fig. 11 FE modeling for the SPR joining analysis

4.2 SPR 접합해석 결과

4.1절에서 역해석을 통해 획득한 리벳 소성물성을 적용한 SPR 접합해석 및 실제 시험 결과 비교를 위해 각 검토 결과에서 단면형상을 추출하여 Fig. 12에 제시하였다. SPR 접합해석의 예측도 평가를 위해 하판잔여두께(Bottom thickness) 및 인터락(Interlock)을 비교하였고, 기존 Mori 등[11]에서 참조한 리벳 소성물성을 적용한 해석결과와 함께 Table 9에 정리하였다. 역해석을 통해 도출한 리벳 소성물성 적용 시, 하판잔여두께 및 인터락은 시험 대비 96.1%, 96.6%

Table 9 Comparison between the FE analyses and the experiment in terms of the interlock and the bottom thickness

Comparison factor	Experiment	Rivet plastic property	
		Inverse analysis	Mori et al. [11]
Interlock [mm]	0.670	0.644	0.523
Bottom thickness [mm]	0.466	0.450	0.360



(a)

(b)

Fig. 12 Comparison of the cross-section between the FE analysis and the experiment: (a) Experiment; and (b) Simulation

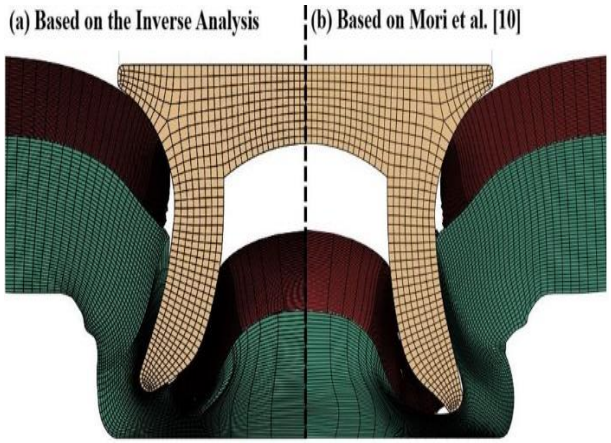


Fig. 13 Comparison of the FE prediction using the rivet plastic property based on (a) the inverse analysis and (b) Mori et al. [11]

의 높은 예측 정확도를 보였고, 그에 반해 Mori 등[11]에서 참조한 리벳 소성물성을 적용한 경우에는 각 평가 인자에 대해 78.1%, 77.3%의 다소 부정확한 예측도를 보였다. 역해석을 통해 예측한 리벳 소성물성은 Mori 등[11]에서 제시된 소성물성에 비해 강도가 작아 SPR 접합해석 시 리벳 다리부의 추가적인 소성변형을 초래하였고, 이러한 결과가 SPR 접합해석 시 단면형상예측에 주요한 영향을 끼침을 확인하였다.

한편, 리벳 소성물성에 따른 접합해석 비교를 통해 리벳부의 강도가 커지게 되면, SPR 접합 시 상판부의 국부적인 변형영역의 변화를 초래하고 이에 따라 상판부 손상영역의 변화를 유발하여 파괴 시점, 즉 해석에서의 요소 삭제 시점과 위치에 영향을 주는 것으로 확인되었고, 해당 해석의 비교결과는 Fig. 13을 통해 확인할 수 있다.

4. 결 론

리벳의 유동응력이 SPR 접합공정해석에 미치는 영향을 검토하기 위해 역해석을 통해 예측한 리벳의 유동응력과 더불어 기존 Mori 등[11]에서 참조한 리벳 유동응력을 해석에 적용하여 실제 시험과 유한요소해석 결과를 비교 분석하였다. 역해석을 통해 도출한 리벳의 유동응력을 적용한 해석의 경우 접합단면 주요 형상 치수인 인터락 및 하판잔여두께에 대한 시험결과를 잘 예측한 반면, Mori 등[11]에서 참고한 소성물성을 적용한 해석은 상대적으로 높은 리벳 유동응력으로 인해 리벳의 상판 관통 시 리벳 소재의 큰 변형없이 접합부 요소삭제가 상대적으로 넓게 진행되었고, 이로 인해 인터락 저하와 더불어 하판잔여두께의 부정확한 예측을 초래하였다. 따라서, 본 연구에서 검토한 리벳 링압축 시험의 역해석 방안과 리벳 유동응력 예측을 SPR 접합공정해석에 적용한다면 실제 사용된 리벳의 변형거동을 고려한 예측이 진행되므로 SPR 접합공정의 해석 신뢰도를 보다 높일 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업소재핵심기술개발사업(과제번호: 10063579)의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

[1] S. P. Sunday, 1983, Self–piercing rivets for aluminum components, SAE Technical Paper, No. 830526, pp. 16 https://doi.org/10.4271/830526

[2] Y. Xu, 2006, Effects of factors on physical attributes of self-piercing riveted joints, Sci. Technol. Weld. Join., Vol.11, pp. 666~671. https://doi.org/10.1179/174329306X131866

[3] Y. Xu, 2006, A close look at self-piercing riveting– computer simulation is a noteworthy alternative to physical testing of joints. https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/stamping/a-closer-look-at-self-piercing-riveting

[4] R. Khezri, E. Sjöström, A. Melander, 2000, Self–piercing riveting of high strength steel, Swedish Institute for Metal Research, Report No. IM-2000-554.

[5] J. Mucha, 2011, A study of quality parameters and behaviour of self-piercing riveted aluminium sheets with different joining conditions, Strojniški vestnik-J. of Mech. Eng, Vol. 57, pp. 323~333. https://doi.org/10.5545/sv-jme.2009.043

[6] R. Haque, J. H. Beynon, Y. Durandet, 2012, Characterisation of force–displacement curve in self-pierce riveting, Sci. Technol. Weld. Join., Vol. 17, pp.

476~488.https://doi.org/10.1179/1362171812Y.0000000036.

[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] R. Porcaro, A. G. Hanssen, M. Langseth, A. Aalberg, 2006, Self–piercing riveting process: An experimental And numerical investigation, J. Mater. Process. Technol., Vol. 171, pp.10~20. http:// doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.048

[10] F. Barati, 2015, A numerical approach for behavior of determination of flow curve and evaluation of frictional AZ61 magnesium alloy under elevated temperature forming conditions, Measurement, Vol. 74, pp. 1~10. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.001

[11] K. Mori, Y. Abe, T. Kato, 2012, Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminium alloy sheets joined by mechanical clinching and self-pierce riveting, J. Mater. Process Technol. Vol. 212, pp. 1900~1905.https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.04.017