

이종재료 접합을 위한 Self-Piercing Rivet의 단조공정설계

김동범¹ · 이문용² · 박병준³ · 박종권⁴ · 조해용[†]

(원고접수일 : 2012년 5월 22일, 원고수정일 : 2012년 7월 12일, 심사완료일 : 2012년 9월 7일)

Forging Process Design of Self-Piercing Rivet for Joining dissimilar Sheet Metals

Dong Bum Kim¹ · Mun Yong Lee² · Byung Joon Park³ · Jong kweon Park⁴ · Hae Yong Cho[†]

요 약 : SPR(Self-piercing rivet)은 판재 접합법으로서 스틸과 알루미늄 합금 등의 이종재료 접합에 사용되고 있다. 접합 공정은 피어싱을 포함한 소성변형이 함께 이루어진다. 프레스에서 펀치의 아래에 있는 리벳은 상부판재를 피어싱하고 하부 판재와 기계적으로 맞물리며 소성변형되어 결합된다. 본 논문에서는 SPR을 제작하기 위한 단조공정을 설계하였고, 이를 위하여 상용 유한요소해석 코드인 DEFORM-2D를 이용하여 해석하였다. 리벳 제작을 위한 단조공정의 설계에서 공정 순서, 성형성, 단조하중, 응력과 변형률 분포 등을 조사하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 통하여 적합한 단조공정을 설계하였다. 설계된 공정은 업 세팅, 헤드부 성형, 후방압출, 두 번째 챔퍼링의 네 단계로 구성된다. 그리고 단조공정에 대한 시뮬레이션 결과는 같은 조건을 적용한 실험 결과를 통하여 검증하였다.

주제어 : 셀프피어싱 리벳, 단조공정, 유한요소법, DEFORM-2D

Abstract: Self-piercing rivet is sheet joining method. It is being used more to join aluminum alloy sheets. Self-piercing riveting is a large-deformation process that involves piercing. The self-piercing rivet, under the press from the punch, pierces the top sheet and forms a mechanical interlock with the bottom sheet. In this study, forging process was designed for manufacturing self-piercing rivet. The forging process has been simulated by using commercial FEM code DEFORM-2D. In simulation of forging process for manufacturing rivet, process sequence, formability, forging load, and distributions of stress and strain were investigated. The suitable forging process could be designed by comparisons of simulation results. The developed process consists of four stages: upsetting, first chamfering, back extrusion, and second chamfering. The simulated results for forging process were confirmed by experimental trials with the same conditions.

Key words: Self-piercing rivet, Forging process, Finite Element Method, DEFORM-2D

1. 서 론

SPR(Self-piercing rivet)은 천공과 리벳 접합을 동시에 행하는 판재 접합법으로써 용접이 난해한 이종재료, 특히 자동차의 차체결합 등에 유용하게

적용된다.[1] SPR 공법은 기존의 리벳접합과 달리 자체적으로 홀을 가공하며 삽입되기 때문에 사전의 드릴작업이 필요하지 않다. 즉, 리벳이 상부판재를 피어싱하고 하부판재와 함께 소성변형되어

† 교신저자(충북대학교 기계공학부, E-mail:hycho@cbnu.ac.kr, Tel: 043-261-2464)

1 충북대학교 대학원 정밀기계공학과(E-mail:kdb@cbnu.ac.kr, Tel: 043-261-2464)

2 성우하이텍(E-mail:mylee@swhitech.com, Tel: 070-7477-5550)

3 성우하이텍(E-mail:becoming98@swhitech.com, Tel: 070-7477-5550)

4 한국기계연구원(E-mail:jpark@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7116)

결합된다.

SPR의 집합부는 리벳, 그리고 리벳을 통해 결합되는 상부판재, 하부판재로 구성된다. 집합 장치는 리벳에 하중을 가하는 펀치, 결합되는 판재를 고정시키는 홀더와 앤빌로 구성되어 있다. 여기서, 앤빌은 일반적으로 형단조의 다이 역할과 같으며 앤빌의 형상으로부터 하부판재의 형상이 소성변형되고, 리벳의 집합 성형성에도 영향을 끼친다[2].

SPR의 형상은 기존의 리벳과 달리 헤드부와 생크부로 구분되며 생크부에는 홀이 있다. 또한 하단부는 피어싱을 하기위하여 테이퍼 형상으로 이루어져 있다. 이러한 복잡한 형상을 냉간 단조하기 위하여 성형하중 예측과 다단 공정설계가 요구된다[3].

따라서 형상이 복잡한 리벳을 생산하기 위하여 유한요소법을 이용한 공정 설계 연구가 활발히 진행되고 있다. Byun[4]은 해석을 통하여 블라인드 리벳의 단조공정을 설계하였고, Park[5]등은 다단 포머 볼트성형을 위한 공정 및 금형설계를 하였다. Han[6]등은 너트의 단조공정 설계를 하였다. 형상이 복잡한 리벳을 냉간 단조 할 경우 단일 공정으로 성형이 곤란하므로 예비성형 및 형상 일부분의 성형공정을 포함하는 다단공정을 선택하였다.

이를 위하여, 유한요소법을 이용한 다단공정 설계에서는 리벳의 형상을 고려하여 단조 공정 수를 결정하고자 하였다. 또한 각 공정의 소요되는 하중을 예측하여 단조 포머의 용량을 결정하고 실험과 비교, 분석을 통해 시뮬레이션의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

2. 해석 방법

실제의 냉간 단조 조건들을 유한요소해석에 적용하기 위하여 적용되는 규칙을 다음과 같이 제시하였다. 따라서 본 연구에서의 해석 및 실험은 다음의 규칙을 만족해야 한다.

2.1 일반규칙

- (1) 재료가 변형을 받아도 체적의 변화는 없다.
(체적일정조건)
- (2) 단조 전 초기 형상은 봉재를 사용한다.

- (3) 금형, 펀치는 단조 과정 중 변형 및 파손이 없다.
- (5) 마찰상수는 냉간 단조의 경우 일반적으로 사용하는 0.08을 적용한다[3].
- (6) 해석 중 펀치의 속도, 경계조건, 소재의 물성치는 일정하다.
- (7) 단조실험 시 다단포머의 유효하중은 각 성형 단계에 소요되는 성형하중의 총합보다 크다.
- (8) 해석 중 온도는 일정하며, 소재와 금형간의 열전달은 없다고 가정한다.

2.2 설계규칙

- (1) 기본 공정은 빌렛, 예비 성형체, 최종형상의 순서로 진행한다.
- (2) 여러 단이 업세팅되려면 제일 작은 직경부터 순차적으로 업세팅한다.
- (3) 예비 업세팅과 원통 업세팅은 복합가공 할 수 없다.
- (4) 구속전방압출과 업세팅은 복합 가공할 수 없다.
- (5) 동시에 양 끝단의 구속 전방압출은 복합 가공할 수 없다.
- (6) 소재의 어느 부분이 1회 압출 시 연속적으로 2번 이상 구속압출을 받을 수 없다.
- (7) 공정 수를 최소로 줄이기 위해 성형 시에는 각 작업에서 가능한 최대성형한계까지 가공한다.
- (8) 단조로 인한 소재의 가공경화는 없다고 가정한다.

2.3 냉간 단조 공정설계

리벳 단조 금형은 공정설계 선행규칙을 바탕으로 설계하였다. Figure 1은 SPR의 형상과 최종형상의 도면을 나타낸 것이다. 공정 수는 예비성형 공정과 다단 포머 장비를 고려하여 4단 으로 결정하였다. 보통 선재를 절단한 초기 형상을 가지고 1단 공정에서 다음 공정을 위한 업세팅이 이루어진다. 2단은 리벳의 헤드부 형상을 다지는 공정으로서, 리벳 단조에서 헤드부를 가장 먼저 성형하였다. 3단 공정에서는 후방압출로 생크부와 홀을 성형하게 된다. 마지막 4단은 최종 치수로 성형하기 위한 공정으로써 형상을 다지는 공정이다.

2.4 모델링 및 소재 물성

유한요소해석을 위하여 리벳, 펀치 그리고 금형을 모델링 하였다. 이들의 형상은 모두 축대칭이므로 1/2형상의 2차원으로 설계하였다. 설계 프로그램은 AutoCAD를 사용하였으며, 파일은 *.DXF 형식으로 저장하여 강소성 유한요소 해석프로그램인 DEFORM-2D에 적용하였다.

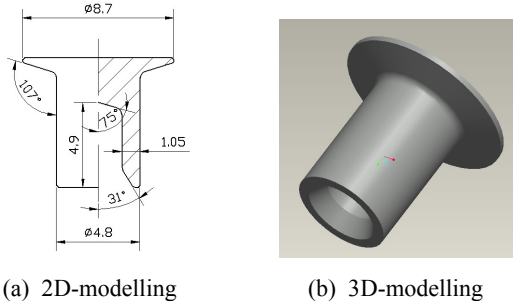


Figure 1: Shape of rivet for the SPR

리벳 소재는 열처리가 쉽고 가공성이 우수한 기계구조용 탄소강인 SM45C이다. 이 소재의 물성은 해석 프로그램에 내장되어 있는 값을 적용하였다. 소재의 화학적 조성과 기계적 특성은 각각 Table 1 과 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 1: Chemical compositions of SM45C

component property	Unit(Wt.%)				
	C	Fe	Mn	P	S
SM45C	0.45	98.5 ~98.9	0.60~ 0.9	<=0.04	<=0.05

2.5 해석 경계조건

모델링된 소재와 펀치 그리고 금형을 해석에 적용하고, 위치를 실제와 같이 재설정 하였다.

소재를 제외한 펀치와 금형은 강체로 가정하였다. 냉간 단조 공정이므로 가공온도는 20℃로 가정하였으며, 선행규칙에 따라 소재의 온도, 물성 변화 및 금형과의 열전달은 없다고 가정하였다.

마찰상수는 일반적으로 냉간 단조에 적용되는 0.08로써 소재와 금형 및 펀치에 모두 적용하였다. 펀치의 이동속도는 실제 단조 포머의 움직임과 같

은 600 mm/s이며 1 step 당 0.02 mm 이동한다.

Table 2: Mechanical properties of SM45C

Material	SM45C
Tensile strength, Ultimate [MPa]	625
Tensile strength, Yield [MPa]	530
Modulus of Elasticity [GPa]	205
Bulk Modulus [GPa]	140
Shear Modulus [GPa]	80
Poisson Ratio	0.29
Hardness [HRB]	88
Hardness, Vickers	188
Heat Capacity [J/g · °C]	0.486
Thermal Conductivity [W/m · K]	50

소재의 요소분할은 프로그램 메뉴에서 자동분할로 적용하였다. 형태는 사각형과 부분적으로 삼각형이며, 요소 수는 1000개로 분할하였다. 자동분할은 프로그램이 자체적으로 요소를 분할하며, 금형과 근접한 경우 상대적으로 요소크기가 작아진다. 이는 소재에서 금형에 의하여 변형이 심한 부분에 집중적으로 요소를 분할시켜 보다 정확한 해석결과와 해석시간이 함께 고려된 방법이다.

2.6 해석 방법

Figure 2는 해석을 위한 구성요소로서 소재, 펀치, 금형으로 구성된다. 초기 소재의 직경은 5 mm이고, 길이가 6 mm인 봉재를 이용하여 최초 해석을 진행하였다. 각 공정별로 성형된 소재의 형상은 다음의 공정에 적용되는 방식을 택하였다. 여기서, 변형된 소재는 가공경화가 적용되지 않으며, 초기 물성을 가지고 있다. 이러한 방법으로 해석을 진행하여 각 공정별 적용되는 금형을 설계 하였으며, 소재의 형상변화, 성형하중 등을 예측하였다.

해석결과를 바탕으로 리벳단조에 필요한 단단 포머의 용량을 결정하고, 실험과 해석결과와의 비교, 분석을 통하여 공정설계의 타당성을 검증하고자 하였다.

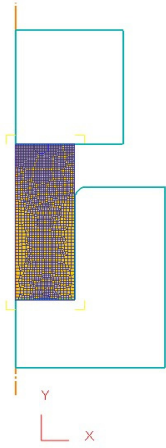


Figure 2: Billet of rivet forging

3. 해석 및 실험결과

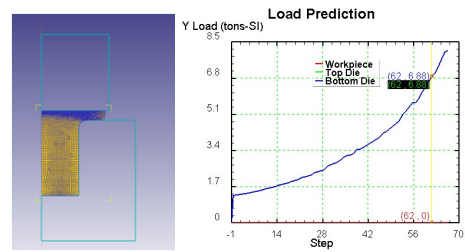
본 논문에서는 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D를 이용하여 리벳을 단조로 최종형상까지 가공하고 이를 위하여 요구되는 각 공정에 대한 금형을 설계하고자 하였다. 또한 시뮬레이션의 결과를 분석하여 가공에서 소요되는 다단 포머의 하중을 예측하였다. 해석결과를 검증하기 위하여 동일한 조건의 실험결과와 비교, 분석 하였다.

3.1 해석결과

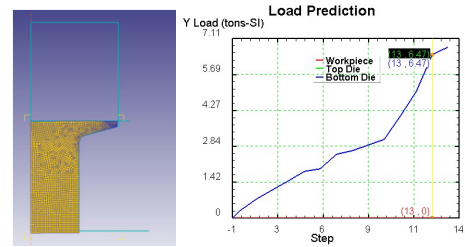
1단 공정은 다음 공정을 위해 예비 업세팅 성형을 하며 Figure 3 (a)에서 결과 형상을 나타내었다. 업세팅 과정에서의 업세팅율은 70%로 이루어 졌다. 금형의 높이에 따라 업세팅율이 달라지며, 이는 리벳 헤드부의 체적에 관련되므로 체적계산을 통하여 금형을 설계하였다. 성형하중은 6.88 ton으로 예측되었다.

2단 공정은 리벳의 헤드부 형상을 다져주는 공정이며, Figure 3 (b)에 결과를 나타내었다. 최종 치수에 따라 양호하게 성형되었음을 볼 수 있다. 이번 공정에서의 예상 하중은 6.47 ton이다.

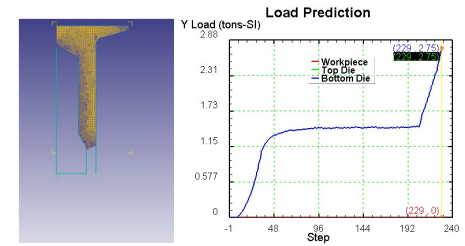
3단 공정은 후방압출을 통해 리벳의 생크부 홀을 성형하였고, Figure 3 (c)에서 결과를 나타내었다. 여기서, 펀치가 들어가는 깊이에 따라 생크부의 길이와 연관되며, 설계를 통하여 펀치의 위치를 알아내고 이를 적용하였다. 성형하중은 2.75 ton으로 예측되었다.



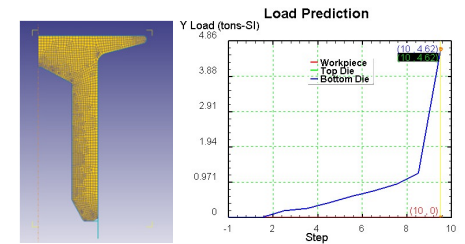
(a) The process of 1st stage



(b) The process of 2nd stage



(c) The process of 3rd stage



(d) The process of 4th stage

Figure 3: Simulated results of rivet forging

마지막 4단 공정은 리벳 하단부의 형상을 다져주는 공정이며, 피어싱공정이 잘 이루어지도록 정밀한 치수가 요구되어진다. Figure 3 (d)에 결과를 나타내었다. 양호한 성형 결과를 볼 수 있으며, 성형하중은 4.62 ton으로 예측되었다.

첫 번째에서 네 번째까지의 유한요소해석결과는 형상과 치수를 만족하고, 전체 성형하중은

20.72 ton으로 예측되었다. 가장 적은 하중이 요구되는 공정은 후방압출로 리벳의 홀을 성형하는 3단 공정이며, 하중이 가장 높게 요구되는 공정은 1단 공정으로서 예비 업세팅 공정이다.

3.2 실험방법 및 결과

유한요소해석 결과를 검증하기 위하여 동일조건으로 실험을 실시하였다. 실험은 다단 포머를 이용한 리벳 단조를 하였다. 리벳 단조 시뮬레이션에서 예측되어진 하중과 공정설계를 바탕으로 실험하였다. 실험과 해석 결과의 비교, 분석을 통하여 공정설계 및 해석의 신뢰성을 검증하고자하였다.

3.2.1 실험방법

Figure 4 (a)는 제작된 금형이 장착된 다단 포머로서 단조공정에서 펀치의 속도는 시뮬레이션과 동일한 600 mm/s이다. Figure 4 (b)는 리벳 단조를 위하여 설계를 바탕으로 제작된 금형을 나타낸 것이다. 금형의 재질은 STD11이며 시뮬레이션에 적용된 형상과 동일하다.



(a) Multi-stage former (b) dies

Figure 4: The equipment for experiment

3.2.2 실험 결과

리벳 단조 실험은 유한요소해석 결과를 바탕으로 성형 하중이 가능한 포머를 선정하고 금형을 제작하여 실시하였다. 해석에 적용된 리벳의 소재는 SM45C이며, 실험에 사용된 소재와 동일하다.



(a) Result of experiment (b) Result of simulation

Figure 5: The cold forging of self-piercing rivet

Figure 5는 시뮬레이션과 실험 결과를 비교하여 나타내었다. Figure 5(a)는 리벳 단조에 대한 결과이다. 주요 치수부분인 생크부 두께 및 홀 깊이가 Figure 5(b)의 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

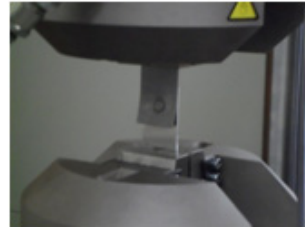
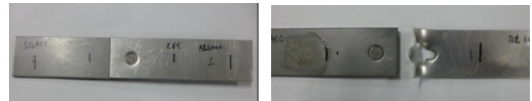


Figure 6: Tensile test for SPR joining sheets

Figure 6은 제작된 리벳으로 접합된 판재의 인장 시험을 나타낸 것이다. 접합에 사용된 판재는 상부 판재가 Al6000으로 두께는 1.0 mm이고 하부판재가 SGACC으로 두께는 1.6 mm이다. 시험에 사용된 판재는 가로 150 mm, 세로 30 mm로 접합으로 겹쳐진 길이는 30 mm이다.



(a) before (b) after

Figure 7: Fracture of SPR joining sheets

Figure 7은 인장시험에 사용된 시험편의 실험 전, 후 모습을 나타낸 것이다. 실험결과를 살펴보면 리벳은 파손되지 않고 상부판재에 파단이 일어나는 것을 볼 수 있다.

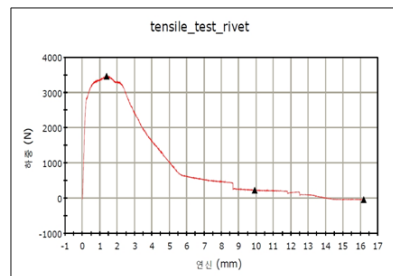


Figure 8: Load of tensile test

Figure 8은 인장시험 동안 작용하는 하중을 나타낸 것이다. 이는 리벳의 강성이 판재보다 더 크기 때문에 발생된 것으로 공정설계를 통한 리벳 제작이 양호한 것을 알 수 있다.

따라서 유한요소법을 활용하여 리벳과 금형을 설계하고, 금형을 제작하여 리벳을 생산한다면 많은 시간과 비용이 절감될 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 Self-piercing rivet의 냉간 단조 성형을 위한 공정설계를 하였다. 이를 위해 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D를 이용하여 해석하였다. 공정설계의 신뢰성을 검증하기 위하여 금형 제작 및 실험하였고, 실험결과와 시뮬레이션 결과의 비교, 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소법을 이용하여 SPR의 단조 공정을 설계하였다. 이때 예비성형 공정은 헤드부를 성형하는 순서가 적합하며, 최종치수로 성형하는 공정은 정밀한 치수가 요구되므로 밀폐 공정이 적합하다.

(2) 금형수명과 하중분배 등을 고려하여 리벳 단조는 총 4단 공정을 제시하였다. 1단 공정은 업세팅으로 헤드부를 예비성형하며 2단은 헤드부의 최종형상을 단조한다. 3단 공정은 후방압출로 리벳의 홀 부분을 가공하며 마지막 4단 공정은 최종치수를 얻기 위하여 리벳의 하단부에 챔퍼링 공정이 적합하다.

(3) 제시된 공정설계안을 통해 SPR을 성형하기 위해서는 총20.72ton이 필요한 것으로 예측되었고, 이를 통해 단조 포머 장비의 용량을 결정할 수 있다. 따라서 불필요한 동력소모를 줄임으로써 생산 원가 및 시간절감 효과를 기대할 수 있다.

(4) 실험과 시뮬레이션 결과를 비교, 분석하였을 때 비교적 잘 일치함을 알 수 있으며 제시된 공정설계안을 현장에 적용시킬 경우 금형설계 및 제품 생산 시에 시간과 비용을 절감할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업원천기술개발사업 "Eco/Bio 산업의 기능성 부품 생산용 차세대 융복합 가공시스템 개발, No. 10039982"과제의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Hae-Yong Cho, "Shape design of self-piercing rivet for joining dissimilar sheet metals", Journal of Korea Society of Mechanical Technology, vol. 14, no. 3, pp. 93-99, 2012.
- [2] Dong-Bum Kim, Design of Self-Piercing Rivet for Joining Dissimilar Sheet Metals, Department of mechanical engineering, Chungbuk National University A master's thesis, 2011.
- [3] Byung-Gu Lee, Precision Forging Process Design of Computer Hard Disk Hub by using Finite Element Method, Department of mechanical engineering, Chungbuk National University, A master's thesis, 2011.
- [4] Hong-Seok Byun, "Finite element analysis for the forging process design of a blind rivet", Journal of Korea Academia Industrial Cooperation Society, vol. 10, no. 10, pp. 2577-2582, 2009.
- [5] Chul Woo Park, Jung Hun Kang, Joon Ho Lee et al. "A study of automated process planning and die design for multi former-bolt products", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, vol. 20, no. 4, pp. 29-38, 2003.
- [6] Kyu-Taek Han and Duk-Ryol Chu, "Optimal design of the forging processes of flare nut for automobiles using finite element analysis", Journal of the Korean Society of Marine Engineers, vol. 28, no. 1, pp. 83-89, 2004.