



FEM을 이용한 셀프 피어싱 리벳 냉간압조 해석

이상철^a, 현재호^a, 홍승우^a, 원권희^a, 박희수^a, 현승균^a, 김상열^{a*}

Analyzing Cold Heading of Self-Piercing Rivet Using FEM

Sangchul Lee^a, Jaeho Hyun^a, Seung-Woo Hong^a, Kwon Hee Won^a, Heesoo Park^a,
Soongkeun Hyun^a, Sang-Yeol Kim^{a*}^a Manufacturing Innovation School, Inha University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	10	January	2022
Revised	19	January	2022
Accepted	7	February	2022

Keywords:

Self-piercing rivet
Finite element method
Dissimilar material
Cold heading
Tool wear
Metal flow lines

ABSTRACT

Self-piercing rivets (SPR) are manufactured using multistage cold heading of a constant length of steel wire rods. This study attempted to design molds for tolerable loading to material and make the metal flow of the SPR lines parallel and without cusp. During this process, beyond the existing virtual experiment, which was limited to the plastic deformation of the SPR material, the analysis of the molds' stress, elastic deformation, and wear were simultaneously performed. This study mainly aimed to mimic the multistage cold process of the heading machine for manufacturing SPR using DEFORM (commercial finite element method software) and minimize differences between with manufacturing sites. Furthermore, deviating from the existing mold development process (shape design with trial and error), the development efficiency was maximized by the reduction of both the mold development period and the mold cost. Finally, the hardness homogenization of the manufactured SPR with a tempering finished was verified.

1. 서론

1.1 연구배경

현재 시판되는 자동차에 대해 환경규제 및 충돌규제가 전 세계적으로 강화되고 있다. 따라서 국내외의 완성차 업체는 기존 단일소재의 차체 제작 대신 고강도의 소재와 가벼운 소재의 조합을 통해 차체의 경량화를 시도하고 있다¹⁾.

Self-piercing rivet(이하 SPR)은 이러한 이종 재료 간 접합에서 기존 용접의 대안으로서 중요성이 높아지고 있다. 기존 리벳 접합 방식과 달리 사전에 구멍을 뚫거나 열을 가할 필요가 없으므로 빠르게 접합할 수 있으면서도 용접과 비슷한 수준의 접합이 가능하다²⁾.

본 연구에서는 자동차용 이종소재 접합에 사용되는 SPR의 냉간 압조 공정에 대해서 다룬다. SPR의 제조 과정에서 냉간압조를 하므로 주조나 절삭가공 등에 비해서 경도와 강도가 높은 체결 요소 제품을 제조할 수 있다. 또한 자동차 부품 소재 간 체결을 목표로 하므로 자동차에 사용되는 소재의 종류나 특성에 맞는 규격 및 강성을 목표로 한다.

1.2 연구현황 및 내용

최근 FEM을 이용한 blind rivet이나 볼트, fastner 등의 압조공정에 대한 해석이 진행되고 있다^{3,4)}. 기존에는 소재의 특성은 강소성체로 하였기 때문에 탄소성체로 설정하여 탄성 회복을 반영한 해석은 드문 것이 현실이다. 또한 SPR의 압조 형상에 연구 목적을

* Corresponding author. Tel.: +82-32-720-9050

E-mail address: skyfgh@inha.ac.kr (Sang-Yeol Kim).

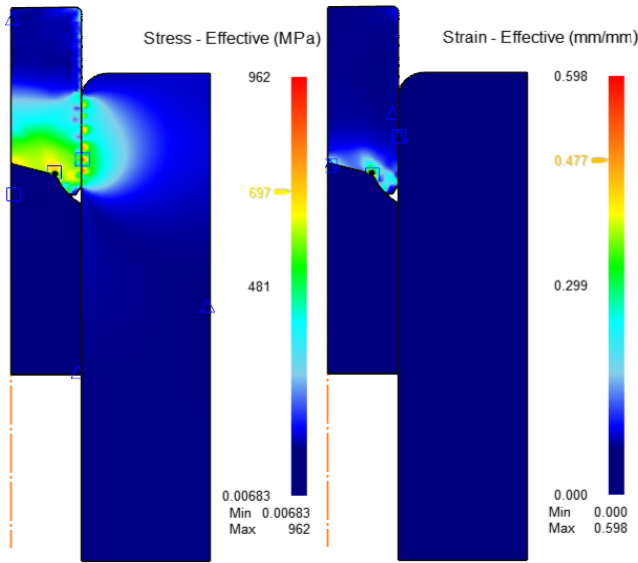


Fig. 1 Stress and strain phenomenon during discharge

두었기 때문에 금형은 변형이 일절 일어나지 않는 강체로 설정하는 경우가 대부분이다.

또한, SPR 냉간압조가 진행되면서 단류선이 형성되는데 이러한 단류선은 완성된 SPR의 체결 중에 진행되는 소성 거동 양상에도 영향을 미친다. 그러나 아직은 SPR의 단류선 변화에 관한 이론적 연구 및 공정 개선 시도 사례가 부족하다.

기존의 SPR 다단 냉간압조 연구에서는 각 공정의 소재 장입부터 주 금형 하강 완료시까지만 해석을 진행하고 다음 공정으로 넘어갔으나 실제 공정에서는 각 공정 전후로 압조가 완료된 소재를 금형 캐비티로부터 빼내는 배출 및 다음 공정이 진행되는 금형으로의 소재 이송이 진행된다⁵⁾. 이 과정에서 발생할 수 있는 소재나 금형의 응력으로 인한 변형이 Fig. 1처럼 발생할 수 있는데 이러한 변수에 대한 고려가 부족할 경우 가상시험과 실제 공정 간의 괴리가 커지는 문제가 있다.

2. SPR 냉간압조 공정

2.1 SPR 냉간압조 공정 개요

SPR의 냉간압조 공정은 다음과 같은 공정을 거쳐 이루어진다.

첫째, 절단되어 장입된 선재의 위아래 단면을 평탄화한다. 이를 통해 절단 불량으로 매끈하지 않은 표면 상태나 편심된 채 장입되는 것을 바로잡아 불량 발생을 예방한다.

둘째, 하부 금형 캐비티 중간 부분에 단면적이 좁아지는 홈이 있는데 해당 부위로 소재를 냉간 압조함으로써 생크 형상을 생성한다⁶⁾.

셋째, 소재를 하부 금형에 고정된 채로 접촉면이 평평한 해머로

가격함으로써 소재 상부를 헤드 형상대로 소성변형 시키며 압조 공정을 마무리한다.

3. 유한요소해석 전처리

3.1 객체 정보 입력

본 연구에서는 2D 축대칭 형상 타입으로 해석을 시행하며 소재는 탄성 회복 현상으로 인한 압조 직후의 변형을 반영할 수 있도록 탄소성체로 한다. 금형은 압축응력에 따른 변형 및 마찰로 인한 마모 현상을 반영하여야 하므로 탄성체로 설정한다. 스텝은 등속운동을 하는 주 금형의 특성상 변위를 기준으로 하는 것이 적합하며 한 스텝 당 0.1 mm를 할당한다⁷⁾.

먼저 소재와 금형의 물성정보(선재는 Table 1, Table 2, 금형은 Table 3)를 DEFORM에 입력한다. 소재는 원기둥꼴 단순 형상으로 폭 2.28 mm (Φ 4.56), 높이 6.87 mm 로 하며 공정별 금형 형상을 각각의 객체 형상으로 입력한다. 이때 주 금형은 해머로 하며 움직임은 아래 방향으로 168 mm/s 으로 한다.

압조공정이 완료된 직후 실시되는 배출을 해석하기 위해서는 후속 공정으로 기존 압조 공정에서 해머 객체를 삭제한 후 주 금형을 핀으로 변경한 공정을 추가한다. 주 금형 속도 크기는 압조공정과 동일하면서 방향만 위쪽 방향으로 설정한다.

3.2 경계 조건 입력

별도의 경계 조건 입력이 필요 없는 강체와 달리 탄성체 객체는 경계 조건을 부여하지 않으면 외력을 받는 방향으로 금형이 이동하

Table 1 Mechanical properties of SWCH45F

Material	Tensile strength [MPa]	Yield strength [MPa]	Elongation length [%]	Reduction in area [%]	Hardness, Vickers
SWCH45F	564	343	22.5	58.5	174

Table 2 Chemical properties of SWCH45F

Material	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
SWCH45F	0.4718	0.188	0.697	0.0119	0.0067

Table 3 Mechanical properties of superhard alloy

	ISO	D10	D20	D30	D40	D50	D60	D70
	JIS	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
Hardness [HRA]		92	91.5	90.5	88.5	88	84	82
		93	92.5	91.5	90.5	90	86	84
Flexural strength [MPa]		Under 2,452	Under 2,550	Under 2,942	2,354	2,452	2,550	2,746

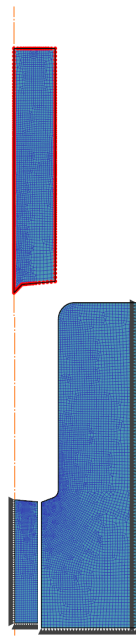


Fig. 2 Heading process boundary condition settings: movement setting for main die (red) and fix setting for fixed die (gray)

게 되므로 Fig. 2처럼 수동으로 경계 조건을 설정하여야 한다. 금형이 움직이지 않도록 지지받는 부위에는 속도의 크기를 0으로 설정해 줌으로써 해당 요소를 구속해야 한다. 또한 주 금형은 객체의 윤곽선에 움직임을 설정해 주어야 한다.

압조공정의 경우는 주 금형이 헤머이므로 움직임을 설정해 주며 핀은 아랫 방향으로 내려앉지 않도록 하부 요소에 y 방향 구속 조건을 부여한다. 다이의 경우는 y 방향 뿐만 아니라 추가로 바깥쪽에 또 다른 다이가 지지해 주고 있으므로 외경부 요소에 x 방향 구속을 한다.

배출 공정에서는 기존의 핀이 주 금형이므로 움직임을 설정하도록 한다.

3.3 접촉 조건 입력

본 해석에서 마찰계수는 금형과 소재 간 윤활 상황을 고려하여 전단 마찰계수 0.08을 부여한다. 금형 마모 모델은 응착 마모를 설정하여 Archard model로 하였다.

3.4 유한요소해석 결과

전처리를 완료하고 해석을 진행한 결과 다음과 같이 응력 분포와 스트로크 그래프를 확인하였다.

Fig. 3은 각 압조공정이 완료된 순간의 유효응력(본 연구에서는 von Mises 응력) 분포이며 Fig. 4는 각 압조공정이 완료된 순간의 최소 주응력인 압축응력 분포이다. 압조공정이 진행될수록 복잡한 형상으로 압조되어야 하므로 요구되는 하중 크기와 최대 응력 크기

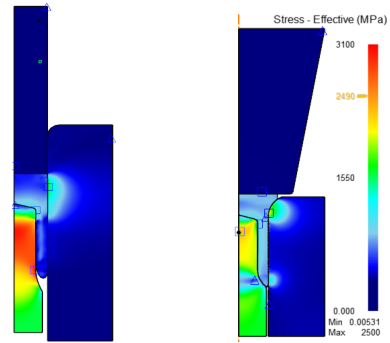


Fig. 3 Effective(von Mises) stress of SPR heading process (from left to right: shank and head heading process)

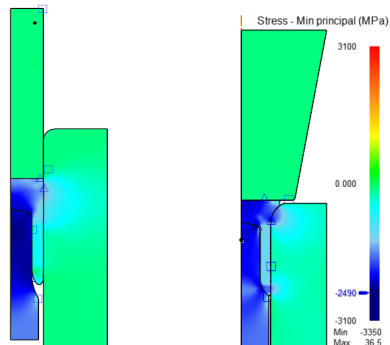


Fig. 4 Minimum principal stress of SPR heading process (from left to right: shank and head heading process)

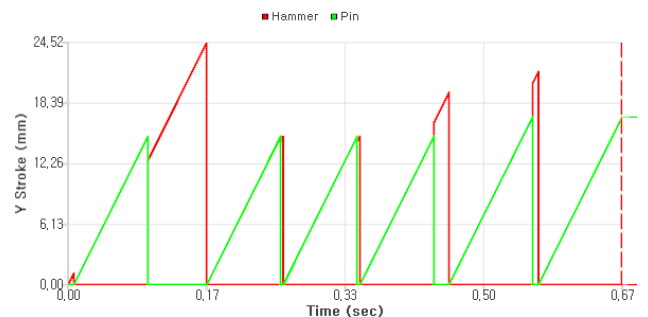


Fig. 5 Hammer and pin's vertical heading stroke graph of SPR manufacturing process

가 증가한다. 특히 핀에서 응력이 집중되면서 파단이 우려될 만한 수준의 응력 수치가 확인되었다.

Fig. 5는 헤머와 핀의 수직방향 압조 행정 도표이다. 주 금형이 일정한 선속도로 움직이므로 공정마다 기울기가 일정하다.

4. 압조공정의 장애 요인

4.1 소재 응력 및 하중

소재가 압조 불량 없이 원활하게 압조가 되기 위해서는 인장강도 이상의 응력이 걸리거나 특정 부위에 응력이 집중되면 안 된다. 전

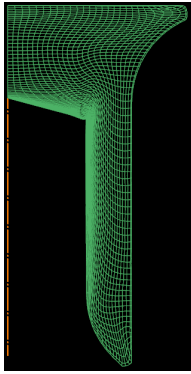


Fig. 6 Metal flow lines of heading finished SPR

자의 경우는 소재의 파단이 일어나게 되며 후자의 경우는 bur가 발생하거나 피로파괴의 원인이 될 수 있다⁸⁾.

소재는 근본적으로 해머에 의해 받는 하중에 의해 변형된다. 따라서 소성변형 중 소재의 거동 및 응력 분포의 변화 등 정성적, 정량적 특성을 분석하고 소재에 최적의 하중이 가해질 수 있도록 전처리 과정으로 돌아가 해머의 형상이나 정지조건 등을 수정하여야 한다.

4.2 소재 접힘과 단류선 왜곡

압조공정 진행 시 금속 조직이 응력의 수직방향으로 변형이 일어나게 된다. 변형된 금속 조직은 소재 바깥 윤곽선과 대체로 유사한 흐름으로 나타나는데 이를 단류선(metal flow lines)라고 한다. 외형상 양호하게 제품 압조가 완료되었을지라도 단류선이 비정상적으로 형성되면 SPR을 체결하는 과정에서 해당 부위에 좌굴 등의 불량 발생 수 있다⁹⁾.

본 연구에서 SPR의 단류선은 Fig. 6과 같이 형성이 되었다. 대체로 단류선이 소재 윤곽을 따라가나, 특히 캐비티와 인접한 부분에 밀도가 높게 형성되었다. SPR 최종 형상에서 캐비티 상부와 생크 내경부 경계 부근에서 단류선이 뭉친 모습이 발견되었는데 이는 Fig. 7처럼 헤드 압조에서 소재의 해당 부위가 하중을 받으면서 Fig. 8처럼 접힘 현상이 일어나기 때문이다.



(a) While folding (b) While folding (c) Finished with folding
Fig. 7 Folding of material during head heading

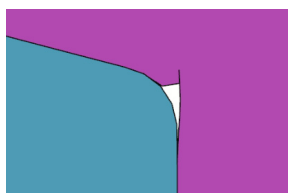


Fig. 8 Folding point detail

4.3 금형 마모

공정이 진행되면 필연적으로 소재와 금형의 접촉부에는 마찰이 발생하고 이는 금형의 마모로 이어진다. 금형의 마모량이 0.1 mm 이상이 되면 압조되는 SPR의 공차를 벗어나게 되므로 더는 사용할 수 없게 된다. 따라서 압조 과정에서 발생하는 금형의 마모량을 최소화하는 것이 금형 교체 주기를 길게 할 수 있고 궁극적으로는 제조단가 절감을 크게 좌우한다.

이때 절대적인 마모 깊이를 알게 하는 것과 더불어 특정 부위가 집중적으로 마모되지 않도록 하는 것이 필요하다¹⁰⁾. 특정 부위가 집중적으로 마모되는 것은 적은 압조 횟수에도 불구하고 SPR의 공차가 큰 폭으로 증가한다는 것을 의미하기 때문에 공정 효율에 있어 매우 치명적이다.

5. 압조 결과 분석 및 개선

5.1 압조공정횟수 감축

만일 품질의 저하 없이 압조 공정을 줄일 수 있으면 금형 제작비용이 줄어들고 제조 속도가 빨라지면서 동시에 성형기 유지비나 인건비 절감 역시 달성할 수 있다.

중간 압조 공정의 일부가 수정되더라도 최종 SPR 형상이 양호하게 나올 수 있으면 가능한 공정을 최소화하는 것이 능률적이다.

5.2 금형 형상 변형

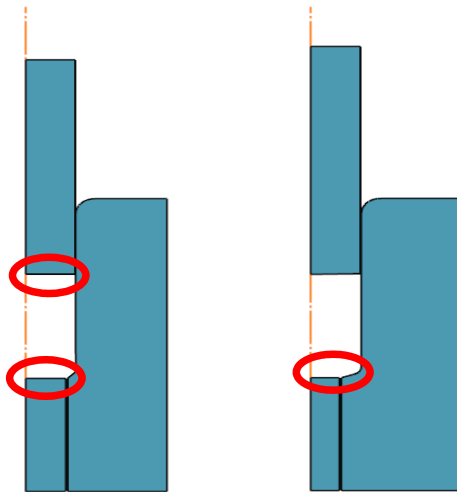
압조공정에서 불완전성형이나 마찰로 인해 거동이 방해받는 문제는 금형 형상의 변형을 통한 개선이 가능하다.

우선 침점을 최소화해야 한다. 일반적으로 센터펀치를 위해 중심 축 상에 금형이 뾰족한 형상을 가지는데 침점이 예리할 경우 이후 공정에서 해당 부분에 불완전성형이 일어나면서 접힘 불량이 발생할 수 있다.

또한, 하중이 침점에 집중이 되면서 과도한 수직응력으로 파단이 일어날 수 있다¹¹⁾. 따라서 센터펀치라는 본래의 목적에 부합하면서 이후 공정에서 불완전성형을 최소화하고 항절점 이상의 응력이 걸리지 않도록 형상의 개선이 필요하다.

5.3 금형 정지거리 조정

일반적으로 금형 정지거리를 줄일수록 상, 하부 금형 캐비티와 더욱 유사한 형상으로 압조가 된다. 그러나 정지거리가 과도하게 가까우면 과다 하중으로 금형의 파손이 일어나거나 금형 사이의 빈틈으로 bur가 발생한다. 따라서 정지거리를 여유 있게 설정하는 것이 좋다¹²⁾. 먼 정지거리로 인한 불완전성형에도 불구하고 최종 공정에서 설계상 SPR 형상대로 압조가 이루어지도록 하는 것이



(a) Upper side flattening process (b) Lower side flattening process

Fig. 9 Optimization of molds for flattening

관건이다. 추가로 bur가 발생하지 않아야 하며 항절력 이상의 응력이 금형에 걸리지 않아야 한다.

5.4 압조공정 개선 시도

위와 같은 원칙에 따라 기존 압조공정 개선을 시도하였다.

먼저, 기존 금형의 요철로 인한 불완전성형 문제 해결을 위해 Fig. 9처럼 첫 번째 평탄화 공정 해머와 첫 번째와 두 번째 평탄화 공정 핀 형상을 평평하게 하였다. 또한 평탄화 공정 다이 내경 치수는 그대로 유지한 채 형상을 서로 바꾸었다.

다음으로 기존에 두 차례에 걸쳐 진행되던 생크부 압조 전처리단계가 한 차례로도 충분하다고 판단하여 압조공정 하나를 삭제하고 남은 공정의 금형 정지거리를 줄이는 방식으로 생크부 압조량을 늘려주어 헤드 압조 시 소재 생크부 형상 불완전성형 문제 해결을 시도하였다.

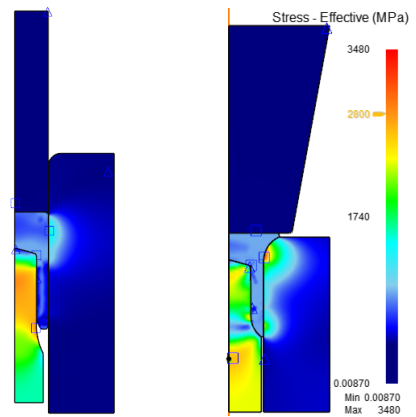
또한, 항절력 이상의 응력이 걸리지 않도록 금형 정지거리를 적절히 상향하였다.

5.5 압조공정 개선 결과

해석 결과, Fig. 10 및 Fig. 11에서처럼 금형에 걸리는 응력의 크기가 줄어들고 불완전성형이 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 Fig. 12의 시간-Y 스트로크 그래프를 확인한 결과 공정 하나가 생략된 만큼 한 사이클의 주기가 0.13 초 줄어들었다.

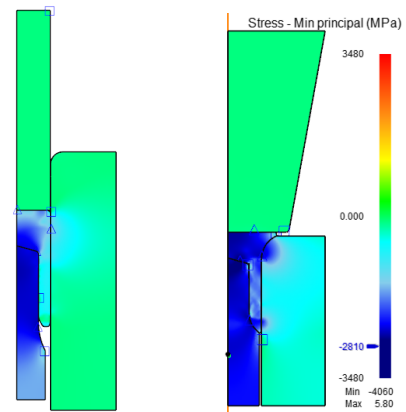
5.6 생크부 압조공정 Pin R값 변화에 따른 응력과 마모 깊이 변화

생크 압조 과정에서 마찰로 인한 불완전성형 문제를 해소하기 위해서는 하부 금형의 캐비티 상부와 생크부의 경계 R값을 높여줌으로써 수평 방향 마찰을 억제하고 수직 방향으로 더욱 원활한 거



(a) Shank heading (b) Head heading

Fig. 10 Effective(von Mises) stress of optimized SPR heading process



(a) Shank heading (b) Head heading

Fig. 11 Minimum principal stress of optimized SPR heading process

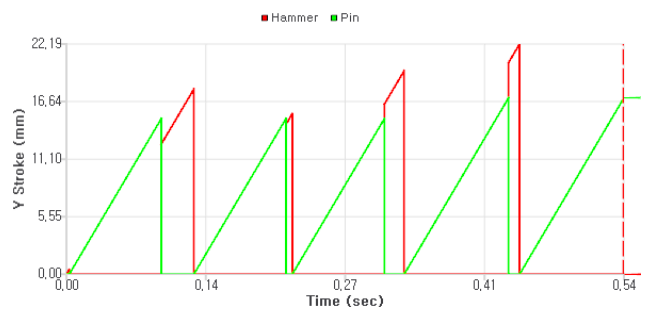


Fig. 12 Hammer and pin's vertical heading stroke graph of optimized SPR manufacturing process

동이 일어날 수 있도록 하여야 한다.

이를 위해 SPR 생크부 압조를 담당하는 공정 핀의 상부와 생크부의 경계 R값을 기존의 R0.3에서 시작하여 설계상 줄 수 있는 최댓값인 R2.3까지 변화시켜가면서 해석을 진행 하고 금형에 걸리는 응력의 크기와 마모 깊이를 분석하였다.

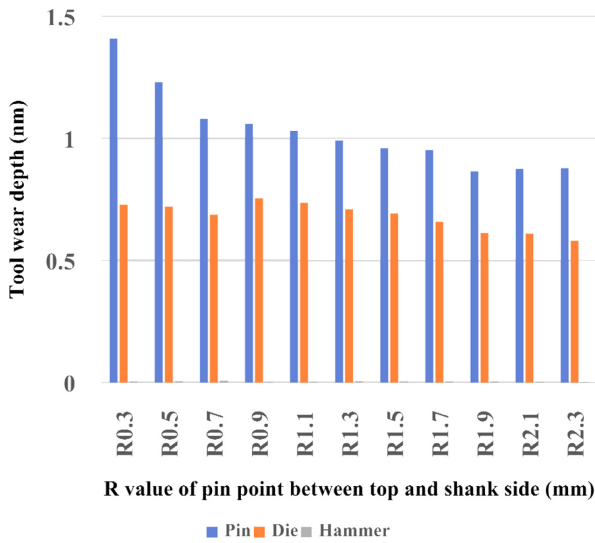


Fig. 13 Tool wear depth of molds of shank heading process

Fig. 13처럼 핀 상부와 생크부의 경계 R값이 커질수록 마모 깊이가 얕아지는 패턴을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 14에서 볼 수 있듯이 핀의 유효응력과 최소 주응력 간의 격차가 R1.1까지는 큰 차이가 나지 않다가 이후에는 큰 폭으로 벌어졌다. 이는 R1.1 이하에서는 핀에 압축응력이 주로 작용하며 그 이상에서는 인장응력이 작용함을 의미한다.

R1.1에서 가장 큰 하중을 받는 핀의 응력 수치가 가장 작으므로 파손 위험이 낮을 것으로 판단된다. 또한, 유효응력이 작아지면 마모 깊이가 감소로 이어지면서 금형의 기대수명이 늘어나게 된다. 그러나 R값이 과도하면 하중이 특정 부위에 집중되면서 최소 주응력 값이 커지게 되기 때문에 조기에 피로파괴가 일어날 가능성이 커지므로 전반적 상황과 목표에 따라 적절한 R값을 주어야 한다.

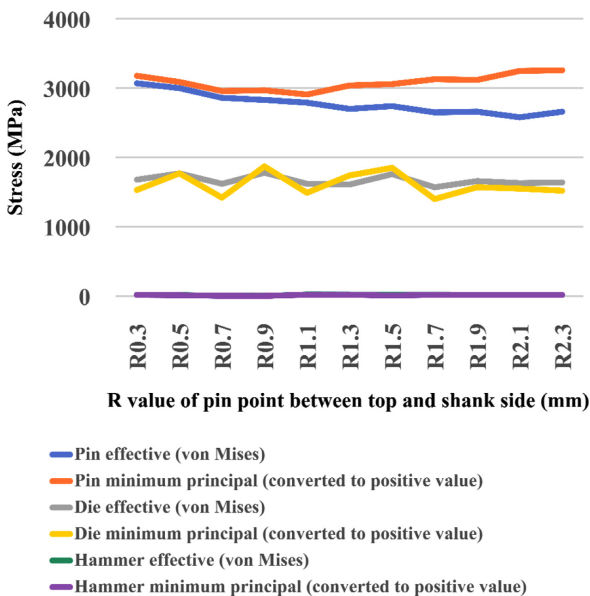


Fig. 14 Stress of molds of shank heading process

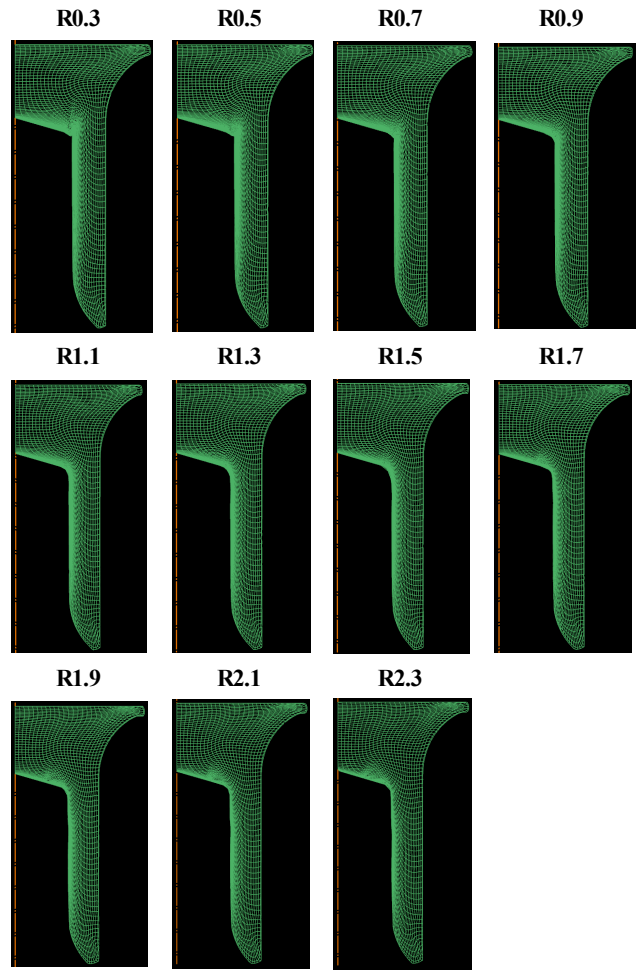


Fig. 15 The analysis of SPR's metal flow lines

5.7 생크부 압조공정 Pin R값 변화에 따른 SPR 단류선 변화

Fig. 15에서 볼 수 있듯이 원칙적으로 핀의 R값이 커질수록 기존에 발생하였던 접힘이 개선되면서 단류선이 외형과 나란하게 변화하였다. 그러나 R1.3을 초과하면 소재의 소성거동이 불균일해지면서 단류선 형상이 불량해지므로 최선의 단류선 품질을 위해서는 생크부 압조공정 핀 상부와 생크부의 경계 R값 치수를 R1.3으로 하는 것이 이상적이다.

6. SPR 시제작 및 검증

6.1 SPR 시제작

형상을 개선한 금형 세트를 이용하여 냉간압조 고속성형기로 SPR의 시제작을 진행하였다. Fig. 16과 같이 최종 압조가 완료된 SPR을 육안 및 측정기기를 이용하여 해석 결과와 비교해 보았다. 이를 통해 압조공정 개선을 위한 가상시험의 타당성을 확인할 수 있었다.



Fig. 16 Heading finished SPR

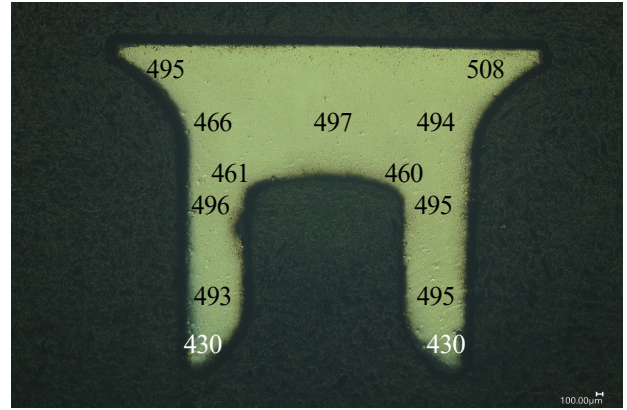


Fig. 18 HV distribution of tempering finished SPR specimen

6.2 열처리와 경도 측정

압조공정이 완료된 SPR은 소려(tempering)를 하여 잔류응력을 제거하여 경도를 높게 된다. 이때 기존의 단류선 역시 풀리게 되면서 경도가 균일해진다^[13].

소려 전후의 SPR 경도 변화를 확인하기 위해 소려 전후의 SPR을 직경을 따라 절단하여 시편을 제작한 후 Micro Vickers 경도 측정기를 이용하여 HV2 (1,961 N) 하중으로 5초 간 압입을 하였다^[14].

소려 이전의 SPR 시편은 Fig. 16에서 볼 수 있듯이 단류선이 집중된 부분의 경도가 상대적으로 높으며 외곽으로부터 떨어진 쪽은 상대적으로 경도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 그러나 측정치 평균은 HV로서 일반적인 SWCH45F의 Vickers 경도 수치와 거의 비슷하다.

소려 이후의 SPR 시편은 Fig. 17처럼 부위별 Vickers 경도가 소려 이전의 SPR 시편보다 높아진 것을 볼 수 있다.

Table 4의 경도 통계를 보면 소려 이후로 평균은 상승하고 표준편차와 변동계수는 하락한 것을 확인할 수 있다.

이는 SPR 소려의 효과로서 경도 분포의 부위별 실질적 격차가 줄어들고 기계적 특성이 비슷해지는 것을 의미한다. 이를 통해 체결 중 균일한 거동이 일어날 수 있게 하면서 좌굴 등 체결 불량을

Table 4 Statistics of SPR specimen's Vickers hardness

Specimen	Average [HV]	Standard division [HV]	Variation coefficient
Heading finished	247.4	31.2	12.61
Tempering finished	478.5	25.3	5.28

예방할 수 있게 되었다.

공통적으로 경도 분포가 두 시편 모두 좌우대칭을 보이지 않는데 이는 압조 과정에서 선제 절단 동심도 오차, 압조다이 공차 등의 원인으로 불균일하게 소성거동이 일어나 압입 부위가 완전한 좌우대칭을 이루지 못하기 때문으로 판단된다.

7. 결과 분석

금형 파손 위험을 최소화하고 압조공정의 효율성을 높이려면 압축응력의 크기가 작아야 하는데 압축응력의 크기에 해당하는 최소주응력의 절대값이 가장 적은(기존 형상에 비해 9% 감소) R1.1의 경우가 파손 위험이 가장 적다.

생크 압조 공정에서 핀 상부와 생크부의 경계부 R값이 R1.3일 때 겹침현상이 개선되면서 단류선이 가장 이상적으로 형성되었다.

생크 압조 공정 핀의 마모량과 유효응력 크기는 핀 상부와 생크부의 경계부 R값이 커질수록 지속해서 감소한다. 금형의 파손 위험이 가장 적은 R1.1의 경우는 기존 형상과 비교하면 마모량은 27%, 유효응력은 9% 감소하였으며 단류선이 가장 이상적으로 형성된 R1.3의 경우는 마모량은 30%, 유효응력은 12% 감소하였다. 설계상 허용 가능한 최대 R값(R2.3)의 경우는 마모량은 38%, 유효응력은 13% 감소하였다.

압조공정이 완료된 후, SPR을 소려함으로써 압조공정 이후에 남아있던 잔류응력을 제거하였으며 결과적으로 부위별 경도가 상향

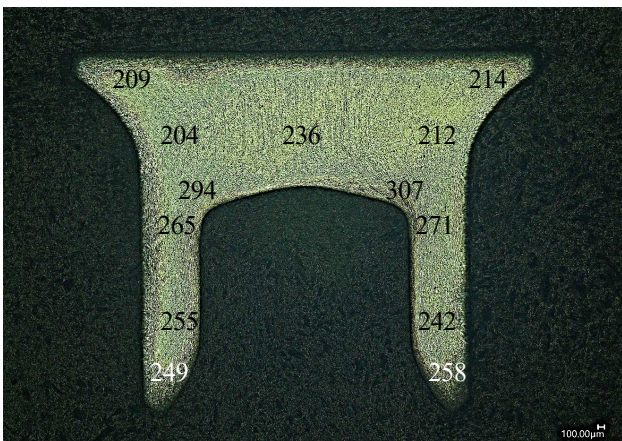


Fig. 17 HV distribution of heading finished SPR specimen

균질화 되었다. 이를 통해 이종소재에 체결 시 SPR 거동이 균일해지면서 양호한 접합 품질을 기대할 수 있게 되었다.

8. 결론

본 연구에서는 다단 냉간압조 공정을 통한 SPR 제조 공정의 유한요소해석 및 제조된 SPR의 단류선을 분석하였다.

해석 과정에서 금형과 관련하여 더욱 정확하고 다양한 정보를 얻기 위해서는 금형은 탄성체로 설정하고 요소를 생성하여 연계 해석을 하여야 한다.

또한 압조공정뿐만 아니라 이후 배출공정까지 해석에 포함함으로써 배출공정 중 금형과 소재 간 작용으로 인한 탄성 또는 소성변형에 대해서도 해석을 진행할 수 있었다.

소재의 타입을 탄소성체로 설정하면 배출공정이 시작될 때 잔류응력이 사라지면서 탄성 회복으로 인한 소재의 변형이 일어나는 것을 반영할 수 있다.








위와 같은 방법으로 기존 다단 냉간압조공정 유한요소해석 연구의 한계점들을 상당 부분 보완할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2021년도 정부(중소벤처기업부)의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(S3073212, 2021년 중소기업기술혁신개발사업)

References

- [1] Park, K.Y., 2020, Evaluation of Self-Piercing Rivet Joint Quality for Various Materials Using FEM, Master Thesis, Inha University, Republic of Korea.
- [2] Jeon, N.-K., 2019, A Study of CFRP-Metal Dissimilar Joint with Self-piercing Riveting, Master Thesis, Hanyang University, Republic of Korea.
- [3] Byun, H.-S., Kim, Y.-H., 2011, A Study on the Manufacturing Technology of a Folding Blind Rivet, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 20:1 67-73.
- [4] Kim, D. B., Lee, M. Y., Park, B. J., Park, J. K., Cho, H. Y., 2012, Forging Process Design of Self-Piercing Rivet for Joining Dissimilar Sheet Metals, J. Korean Soc. Marine Eng., 36:6 802-807, <https://doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.6.802>.
- [5] Epler, M. E., Misiolek, W. Z., 2006, Experimental Evaluation Method for Determination of Friction Characteristics and Performance of Cold Heading Coatings, Wear, 260:7-8 909-914, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.06.016>.
- [6] Cho, H. Y., Lee, I. H., Kim, K. W., Kim, D. B., Shin, H. S., 2012, Dies Design of SPR Forging Using Finite Element Method, Journal of Industrial Science and Technology Institute, 26:2 13-18.
- [7] Lee, S. C., 2022, A Computational Study on Shape Design and Forming of Self-Piercing Rivet for High-Strength Steel and Aluminum Alloy Sheet, Master Thesis, Inha University, Republic of Korea.
- [8] Kim, J., Kim, C., 2010, Analysis of Filling and Stresses in the Hot Forging Process Depending on Flange Die Shapes, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 34:4 423-430, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2010.34.4.423>.
- [9] Choi, M. H., Jin, H. T., Joun, M. S., 2015, Effect of Flow Stress, Friction, Temperature, and Velocity on Finite Element Predictions of Metal Flow Lines in Forgings, Transactions of Materials Processing, 24:4 227-233, <http://doi.org/10.5228/KSTP.24.4.227>.
- [10] Kim, Y. S., Park, K. C., Nam, J. B., Lee, B. H., 2015, Die Materials and their Wear Evaluation for Press Forming of High Strength Steels, Transactions of Materials Processing, 24:2 138-146.
- [11] Ann, K. H., Cho, H. Y., Heo, S. J., Kang, J. H., 2019, A Study on the Cold Forging Die Design for the Adapter of Automobile Engine Mount considering Tool Service Life, J. Korean Soc. Precis. Eng., 36:12 1107-1115, <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.12.1107>.
- [12] Ann, K.-H., Kang, J.-H., Heo, S.-J., Shin, T.-S., Cho, H.-Y., 2020, Multistage Cold Forging Process Design of Al6082 Considering Forming Limit, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 19:9 93-99, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.09.093>.
- [13] Xie, B., Cai, Q., Yu, W., Cao, J., Yang, Y., 2014, Effect of Tempering Temperature on Resistance to Deformation Behavior for Low Carbon Bainitic YP960 Steels, Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process., 618 586-595, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.09.054>.
- [14] Yoo, H., Yoo, S., Lee, S., 2003, Material Test, Chunggho Publishing, Republic of Korea.

	<p>Sangchul Lee Master. candidate of Manufacturing Innovation School, Inha University. His research interest is Mechanical Engineering. E-mail: charles@inha.edu</p>		<p>Heesoo Park Master. candidate of Manufacturing Innovation School, Inha University. His research interest is Mechanical Engineering. E-mail: 2012mepark@gmail.com</p>
	<p>Jaeho Hyun Master. candidate of Manufacturing Innovation School, Inha University. His research interest is Mechanical Engineering. E-mail: hyun0721@inha.edu</p>		<p>Soongkeun Hyun Professor of Manufacturing Innovation School, Inha University. His research interest is Material Science and Engineering. E-mail: skhyun@inha.ac.kr</p>
	<p>Seung-Woo Hong Master. candidate of Manufacturing Innovation School, Inha University. His research interest is Mechanical Engineering. E-mail: dadahon1995@inha.edu</p>		<p>Sang-Yeol Kim Professor of Manufacturing Innovation School, Inha University. His research interest is Mechanical Engineering. E-mail: skyfgh@inha.ac.kr</p>
	<p>Kwon Hee Won Master. candidate of Manufacturing Innovation School, Inha University. His research interest is Mechanical Engineering. E-mail: wkh2653@naver.com</p>		