

블라인드 리벳의 단조공정설계를 위한 유한요소해석

변홍석^{1*}

¹울산과학기술대학교 디지털기계학부

Finite Element Analysis for the Forging Process Design of a Blind Rivet

Hong-Seok Byun^{1*}

¹School of Digital Mechanics, Ulsan College

요약 리벳은 두 부품을 결합하는 중요한 체결 요소이다. 본 연구에서는 부품의 진동 등에서도 잘 견디고 강한 체결력을 가지는 블라인드 리벳 몸체의 제작을 위해 강소성 유한요소해석을 사용하여 최적의 공정설계에 관한 연구를 수행하였다. 제안된 공정설계규칙 및 유한요소해석 결과를 토대로 4단계의 단조공정을 제시하였고, 풀딩 및 금형으로부터 이탈과 같은 결함을 예측하여 최적의 공정설계를 제안하였다. 또한, 소재의 유동 형상, 변형률 분포, 단조하중 등을 비교 검토하여 블라인드 리벳 몸체의 단조공정의 유용성을 확인하였다. 이들의 결과는 금형 설계 및 공정설계에 유용한 자료로 활용될 것이다.

Abstract A rivet which can fasten two parts is one of an important mechanical elements. In this study, the process design of a blind rivet is implemented using finite element method in order to manufacture it which can resist high vibration and has strong coherence between two parts. Considering plastic flow, ease of manufacture, high strength, material loss, and so forth, an optimal four-stage process is proposed by finite element analysis and process design rules. In addition, the finite element simulation results such as shape of the forged rivet, strain distribution and forging load are investigated for the usefulness of the forging process of the blind rivet. These results will be contributed to the forging process design and the die design of the blind rivet.

Key Words : Blind Rivet, Process Design, Forging, Finite Element Analysis, Effective Strain, Load

1. 서론

리벳은 두 부품을 결합하는 중요한 체결 요소이다. 본 연구에서는 부품의 진동 등에서도 잘 견디고 강한 체결력을 가지는 블라인드 리벳 몸체의 제작을 위해 강소성 유한요소해석을 사용하여 최적의 공정설계에 관한 연구를 수행하였다. 제안된 공정설계규칙 및 유한요소해석 결과를 토대로 4단계의 공정을 제시하였고, 풀딩 및 금형으로부터 이탈과 같은 결함을 예측하여 최적의 공정설계를 제안하였다. 또한, 소재의 성형 형상, 변형률 분포, 단조하중 등을 비교 검토하여 블라인드 리벳 몸체의 단조공

정의 유용성을 확인하였다. 이들의 결과는 금형 설계 및 공정설계에 유용한 기초자료로 활용될 것이다.

최근에서 자동차산업에서 복잡한 몸체의 단면 구조에 부품을 서로 체결할 때 사전에 너트를 용접할 필요가 없는 블라인드 리벳이 사용되기 시작하여 자동차의 생산비용 절감에 공헌하고 있으며 이는 가전산업, 가구산업, 주택산업 등으로 확대 발전되어 오고 있다. 특히 자동차산업에서는 차체의 중량을 감소시키기 위해 알루미늄판이나 고장력 강판의 적용이 주목되고 있어서 용접이 곤란한 재료나 용접이 다른 이종금속간의 접합에 리벳이 각광을 받고 있다.

본 논문은 울산과학기술대학교 교내 학술비 지원에 의해 수행되었음.

*교신저자 : 변홍석(hsbyun@uc.ac.kr)

접수일 09년 07월 15일

수정일 (1차 09년 09월 22일, 2차 09년 10월 06일)

계재확정일 09년 10월 14일

리벳은 강철판 또는 플라스틱 등의 부품간의 영구적인 체결을 위해 사용되고 있으며 좁은 공간 및 폐공간 설계에 유용하게 사용할 수 있고, 일반적으로 연강으로 만들지만 용도에 따라 강을 비롯하여 스테인레스강, 알루미늄 등이 이용되고 있으며 최근에는 플라스틱 소재의 리벳도 제조되고 있는 추세이다.

최근에 산업에서 이용되고 있는 리벳 공법은 구멍을 가진 부품 또는 판재가 일측으로만 접근을 하여도 부품 또는 판재를 체결할 수 있는 블라인드 리벳이 널리 사용되고 있으며 이 리벳은 몸체와 맨드릴 두 개의 부품이 하나로 조립되어 사용되는데, 그 특징은 미숙련공이라도 작업하기 쉽고, 육안검사가 가능하며, 소재선택이 자유롭다. 또한, 이종 재질의 조립에 적합할 뿐만 아니라 접합 범위가 넓고 체결강도가 매우 뛰어나다는 특징이 있다.

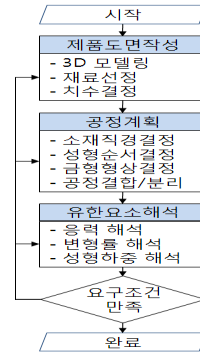
일반적으로 리벳은 절삭에 비해 재료 손실이 적고 기계적 성질이 우수하여 냉간 단조 공정에 의해 주로 생산된다. 리벳을 포함한 다양한 정밀부품들을 제조할 때 단조 등의 금속성형공정은 전문가의 지식을 바탕으로 경험에 의존하여 발달되어 왔으나, 금형이 고가이고 개발기간 단축을 위해 시행착오적인 실험을 통해 설계하기에는 한계가 있다[1].

본 연구에서는 블라인드 리벳의 국산화 개발에 소요되는 제품의 개발기간을 단축하고 시행착오적 실험을 통해 발생하는 비용을 최소화할 수 있도록 하기 위해 블라인드 리벳의 단조 공정을 강소성 유한요소법을 적용하여 성형공정 해석을 수행하고, 그 결과를 향후 블라인드 리벳 개발에 최적의 공정설계 및 금형설계를 위한 기초 자료로서 제공하고자 한다.

2. 공정설계

2.1 압축길이 및 설계규칙

본 연구에서 공정설계에 대한 설계 규칙은 제품의 압축율과 성형한계를 기초로 하여 숙련자의 경험, 관련 연구 결과 데이터, 소성이론 등[2-5]을 바탕으로 일반적이고 이론적으로 모순이 없는 사항에서 리벳의 단조 공정설계 규칙을 제안하였다. 그림 1은 리벳 단조의 공정설계 절차를 보여주고 있다.



[그림 1] 블라인드 리벳 공정설계 절차

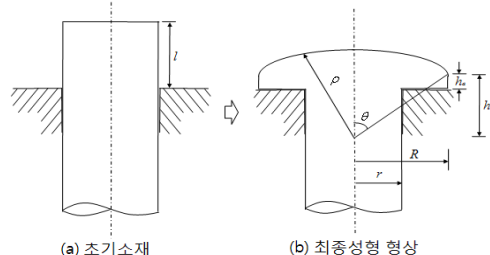
2.1.1 초기 압축길이 결정

초기 소재에서 리벳 머리 생성을 위한 초기 압축길이 (l)를 유도하기 위해서 체적일정조건을 고려하여 계산한다. 그림 2(a)의 초기 소재가 엷은 단조를 거쳐서 그림 2(b)와 같이 리벳 머리로 변형되었을 때 리벳 머리 상단은 임의 반지름을 가지는 구면이고 재료 유동이 일어나는 측면 부분은 벌징(Bulging)이 발생하는데 이는 매우 작으므로 무시하여 전체적으로 원통형상이라고 보면 압축길이는 초기소재와 변형된 최종형상의 체적이 같다는 체적일정조건[3]에 따라 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$l = \frac{1}{r^2} [R^2 h_a + \rho h^2 - \frac{h^3}{3}] \quad (1)$$

$$\rho = \frac{R}{\sin \theta}, \quad h = \rho \cos \theta$$

여기서, l 는 압축길이, r 은 초기 소재 반경이고 R 은 리벳 머리 반경이며, h_a 는 재료가 유동하는 측면 부위 높이이다. 그리고, θ 는 소재 중심선과 리벳 머리부의 곡률 발생 시점까지 이루는 각을 나타내고, ρ 는 리벳 머리부의 곡률이며, h 는 리벳 머리부 곡률 중심에서 리벳 머리부 곡률 발생 시점까지 높이를 나타낸다. 따라서 압축길이는 요구되는 최종성형 제품의 치수(r, R, h_a, θ)이 결정되면 식(1)로부터 계산할 수 있다.



[그림 2] 성형 전후 재료 형상

2.1.2 공정설계에 대한 규칙

- 규칙 1. 중간단계의 예비성형체의 치수를 결정하려면 체적 일정법칙을 사용한다.
- 규칙 2. 다음단계의 형상이 성형되어야 한다면 앞단계의 예비성형품은 변형되는 영역과 변형되지 않는 영역으로 구성된다.
- 규칙 3. 소재 직경은 최종제품의 기계적 성질을 만족하며 제품이 생산될 수 있도록 선택한다.
- 규칙 4. 제품에서 제품직경이 소재직경보다 크면 업셋팅한다.
- 규칙 5. 업셋팅과 압출은 동시에 할 수 없다.
- 규칙 6. 중공제품의 공정 순서는 먼저 업셋팅 공정을 하고 압출공정을 한다.
- 규칙 7. 2회 업셋팅을 수행할 경우 1차 업셋팅에서 원추형 예비성형체를 성형한다.
- 규칙 8. 압출에 의해 중공제품 가공시 제품 상단에 구속 다이를 둔다.
- 규칙 9. 구속전방압출에서 다이벽면과 소재사이의 간격은 0.02mm~0.05mm이다.
- 규칙 10. 중실업셋팅 길이대 직경비(ULDR) ≤ 2.25이면 한번에 자유업셋팅된다.
- 규칙 11. 업셋팅 성형후의 지름은 성형전 지름의 2.2배를 초과하지 못한다.
- 규칙 12. 다단 업셋팅은 업셋비가 2.3보다 작은 경우에 한하여 수행한다.

2.2 공정설계

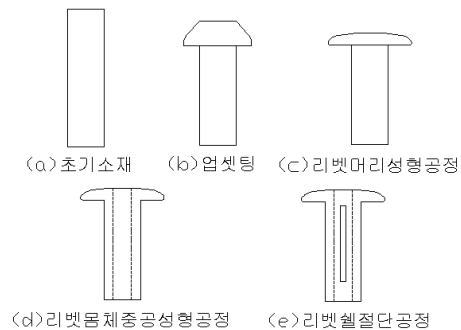
일반적으로 우수한 단조품을 생산을 위해 적합한 재료 선정, 금형설계 기술, 성형공정기술, 운환기술 및 열처리 기술 등과 관련기술이 종합적으로 이루어져야 한다. 밀폐 단조 공정이나 재료의 변형이 심한 공정에서는 급격한 공정변경이나 성형한계영역을 넘어서는 경우에 하중 증가나 제품 또는 금형의 조기 파손을 초래할 수 있으므로 보유장비, 금형 수명 등을 고려하여 공정 분할이 적절하게 이루어져야 한다. 이러한 공정 분할은 소재의 충전정도 소성류의 적절한 생성 및 제어 등을 고려하여 설계되어야 하는데 종래에는 경험에 의한 시행착오법에 의해 이루어져 왔다. 최근에는 이러한 종래방법을 유한요소해석을 통해 대체함으로써 개발기간을 단축하고 최적의 공정분할을 도달하려고 노력하고 있다[1,6-7].

리벳 단조의 공정설계는 금형설계시 공정설계를 기초로 하여 금형설계가 이루어져야 하고, 유한요소해석의 다단 성형 공정 해석시 공정설계 절차대로 해석이 순차적으로 진행되므로 반드시 선행으로 이루어져야 하는 단조

공정 작업 이라고 할 수 있다. 그리고 소재의 원활한 소성류 유동 및 충전성, 제조 공정의 단순화, 플래쉬 제거, 소재 변형의 한계성, 재료의 손실, 제품의 고강도 등을 고려하고 이러한 강점을 살리기 위해서는 공정설계가 수행되어야 한다. 또한 공정 설계는 설계 프로세스의 공정 계획 수립 및 제조 공정 순서를 결정하고, 금형의 형상을 결정하는 등 다양한 설계가 이루어지는데 이러한 공정설계 결과는 유한요소해석시 소재 및 금형 형상 모델, 단조 공정 해석의 순서, 소재의 변형, 결함 발생 등과 상호 밀접한 관계가 있으므로 공정 설계는 최종제품의 형상을 고려하여 적절히 수행되어야 한다.

본 연구에서는 리벳몸체 제작을 위해 냉간단조공정을 바탕으로 하여 단조공정을 분할하였고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그림 3과 같이 공정을 결정하였다.

1단계 공정(a)에서는 금속 선형 소재를 절단하는데 최종 제품의 체적을 고려하여 치수를 결정하였다. 2단계 공정(b)에서는 리벳 생성 초기 단계로서 업셋팅을 수행하고, 3단계 공정(c)에서는 최종 리벳 머리를 생성한다. 4단계 공정(d)은 맨드릴이 결합될 중공을 내는 단계이며, 5단계 공정(e)은 최종단계로서 리벳 몸체 쉘을 절단하는 공정이다.



[그림 3] 블라인드 리벳의 단조공정순서

3. 강소성 유한요소해석

3.1 유한요소해석 및 전처리

일반적으로 금속재료의 소성가공시 발생하는 변형률은 매우 작으므로 소성가공문제 해석시 탄성변형률을 무시한다. 따라서 소재를 강소성(rigid-plastic)으로 가정할 수 있다.

본 연구에서 블라인드 리벳의 단조공정해석을 위해 강소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D™를 사용하였다. 이 프로그램은 금속 성형 해석을 위해 범용적으

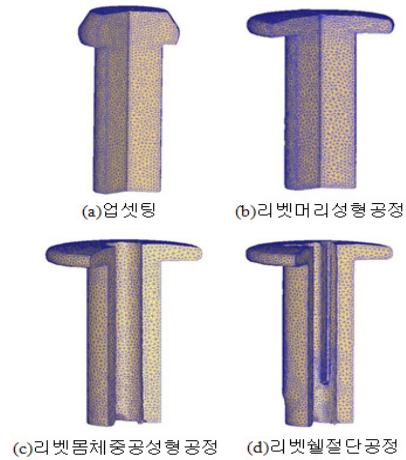
로 사용되는 소성변형 해석 도구이다[2,8]. 초기소재 및 금형의 모델링은 3D 캐드 모델러인 SolidWorks을 사용하여 모델을 생성하고 STL화일로 저장하여 DEFORM-3D에서 읽어 들인 다음에 3차원 요소(element)를 분할 생성하고 재료의 소성 변형 해석을 수행하였다.

3차원 유한요소 단조 시뮬레이션에 사용된 가정은 다음과 같다. (1) 펀치와 다이면에서는 마찰조건이 일정하고, (2) 금형의 속도 등은 모든 공정에 동일하며, (3) 금형은 강체이고 소재의 변형중 탄성영역은 무시한다. 단조 공정에서는 소재의 변형이 심할 경우에는 소재 유동을 원활하게 하고 펀치의 하중을 감소시키기 위해 윤활제를 사용한다. 본 해석에서는 금형면과 소재면 사이에 일정전단마찰(constant shear friction)이 작용하는 것으로 하였으며, 마찰계수는 0.1로 선택하였다. 또한 소재와 금형사이의 간격을 0.001mm이하가 되면 접촉된 것으로 하였고, 3차원 요소분할은 자동 생성되도록 하고 균일하게 격자가 분포되도록 하였다. 본 해석의 블라인드 리벳 형상은 축대칭이므로 세 갈래의 절단된 홈을 기준으로 1/3형상에 대해서만 해석을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 재료는 AI5056으로 선택하였다.

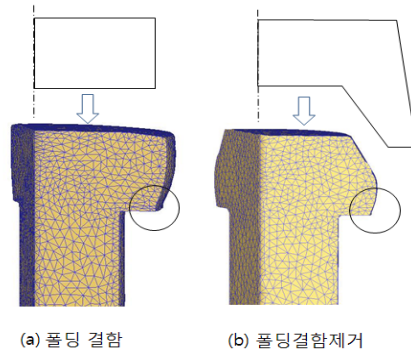
4. 해석결과 및 고찰

4.1 리벳의 성형

리벳 초기 소재 치수는 완성품의 체적을 고려하여 결정하였으며, 네 단계의 공정을 거치면서 최종 완제품이 나오게 된다. 업셋팅 공정은 리벳 생성을 위한 초기 단계이고, 1차, 2차 예비 단계 공정은 리벳 머리 성형 및 중공 성형을 위한 공정이며, 마지막 최종 단계는 리벳 몸체의 셸(shell)을 홈 가공하는 최종 공정을 말한다. 이들 네 단계 공정에 대해서 유한요소 시뮬레이션을 수행하였고 성형공정 단계별 변형 형태를 그림 4에서 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과 각 공정별로 소성류에 의한 재료의 접힘 현상(folding)이나 소재의 파손 등이 보이지 않으며 적절하게 성형이 이루어지는 것을 볼 수 있었다. 그러나, 리벳 머리 생성을 위해 예비단계인 업셋팅 공정과 리벳 머리 생성을 위한 단조시 그림 5(a)와 같이 소재가 접히는 폴딩(folding)현상이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이를 제거하기 위해서는 업셋팅시 상부 다이를 수정하여 측면으로의 소성류 이동을 제어할 수 있도록 할 필요가 있다. 따라서 상부 다이에서 측면 소성류 제어를 위한 구속을 주는 그림 5(b)와 같이 다이 수정을 통해 폴딩 결함을 제거하였다.

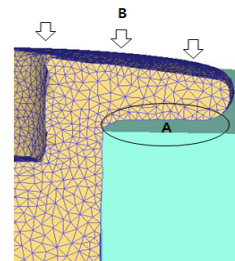


[그림 4] 4단계 공정에 의한 성형 패턴



[그림 5] 재료의 폴딩(folding) 결함과 수정 다이를 통한 결함이 제거된 형상

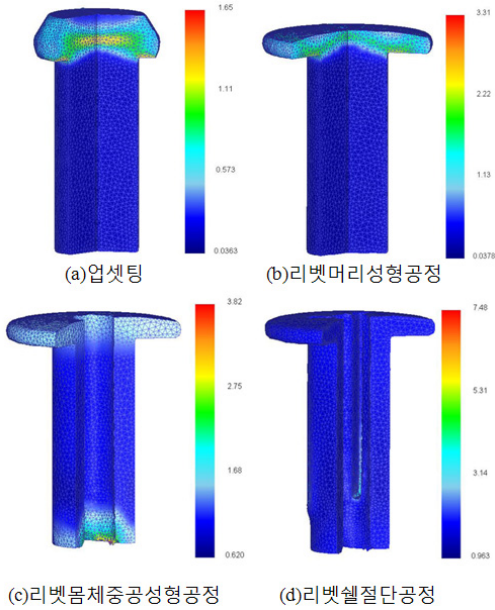
그리고 압출을 통해 재료를 밀어내면서 몸체부에 중공을 생성할 때 펀치핀 측면의 재료는 후방압출 동안 재료 유동같이 펀치 이동방향에 반대방향으로 흐르기 때문에 리벳 머리와 하부다이와 맞닿아 있는 부위(A)가 다이로부터 분리되는 현상이 발생하게 된다(그림 6). 이러한 현상을 제거하기 위해서는 리벳 머리를 고정(B)시키는 상부 구속 다이가 요구된다.



[그림 6] 재료 유동에 의한 소재의 금형이탈 현상

4.2 변형률 분포

공정 단계별 블라인드 리벳 몸체의 변형률 분포를 그림 7에 나타내었다.

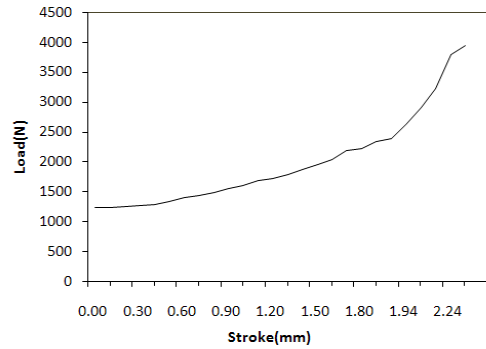


[그림 7] 유효변형률 분포

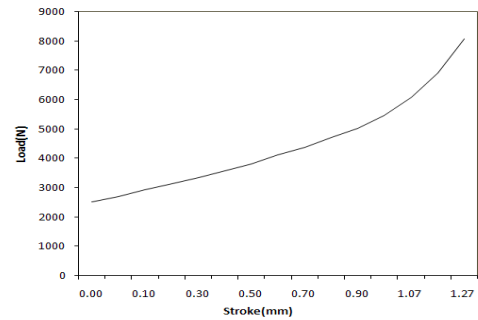
유효변형률은 리벳 몸체의 머리 부위, 몸체 셀의 하단 부위 및 세갈래의 절단 부위에서 크게 나타났다. 예측대로 심하게 변형되는 부위에서 가장 크게 나타나고 있다. 그리고 몸체 부위 보다는 상부 펀치와 재료가 닿는 부위에서 변형률이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 세 번째 단계의 리벳 몸체 중공 성형 공정에서 몸체 셀 하단 부위에서 변형률이 심하게 발생하는 것을 알 수 있는데 이것은 재료가 떨어져 나가는 부위이기 때문이며 재료의 미세한 버(burr) 또한 발생 우려가 있으므로 실제 제작공정에서는 버 제거를 위한 바렐 등의 공정 작업이 필요하다고 판단된다.

4.3 단조하중

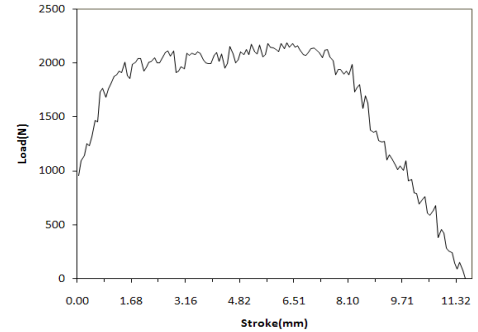
강소성 유한요소해석을 통해 각 단계별 성형공정에 대하여 예측된 단조하중을 Fig. 8에서 나타내었다. 여기서, Stroke은 각 단계별 성형공정에서 상부 다이(펀치)의 하강거리를 의미한다.



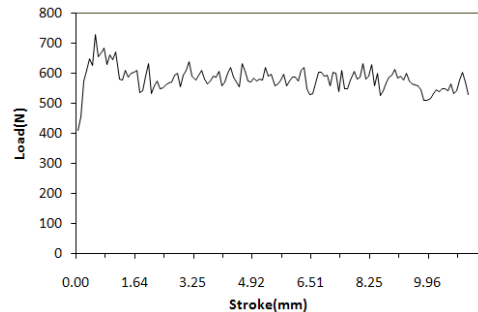
(a) 업셋팅 공정



(b) 리벳머리 성형공정



(c)리벳몸체 중공성형공정



(d)리벳 셀 절단공정

[그림 8] 유한요소시뮬레이션에 의해 예측된 블라인드 리벳의 단조하중

업셋팅 공정일 경우에는 초기에 점차로 하중이 증가하다가 후기에는 빠르게 하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 소재의 변형량이 갈수록 증가하기 때문일 것이다. 리벳 몸체 머리 성형 공정의 경우에도 마찬가지로 단면 감소율이 스트로크에 따라 증가할수록 다이에 접촉되는 재료의 면적이 커지고 재료의 변형량이 증가함으로 단조 하중이 중간이후에 빠르게 증가하는 것을 볼 수 있다. 리벳 몸체의 중공 압출 공정의 경우 단조 중기까지는 재료 관통을 위해 일정한 하중이 요구되지만 압출이 될수록 즉, 단조후기로 갈수록 재료의 전단면이 작아지므로 점차로 단조하중이 감소되는 것을 볼 수 있다. 마지막 공정인 리벳 몸체 셸의 절단홈 가공 공정은 셸 절단에 요구되는 단조하중은 균일하게 일정한 하중을 요구하는 것을 알 수 있었다. 유한요소해석에서 예측된 각 공정의 단조하중은 최소 100kgf에서 최대 1,000kgf 범위라고 사료되며 이 범위의 하중이 적절한 단조하중이라 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 박판 또는 부품의 체결을 위해 사용되는 블라인드 리벳 몸체의 단조 공정 설계를 위해 강소성 유한요소법을 사용하였으며 단조공정 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단조공정해석을 통해 리벳 제조를 위한 단계별 성형공정(업셋팅 공정, 1차 예비 공정(리벳 머리 성형 공정), 2차 예비 공정(리벳 몸체 중공 성형 공정) 및 리벳 몸체 셸 홈 가공 공정)을 제안하였다.
- 2) 업셋팅시 폴딩 제거 방법, 각 공정의 성형과정, 유효변형률 분포 및 단조하중 등을 검토·분석하였다.
- 3) 단조공정해석 및 리벳 제조를 위한 공정 설계 규칙을 제안하였다.
- 4) 수행된 해석 결과들은 리벳의 단조 공정 설계 및 금형 설계에 유용한 자료로 활용될 것이다.

향후연구에서는 본 연구의 결과를 토대로 단조공정설계 및 금형설계를 수행하고, 실험을 통해 획득한 데이터와 해석결과를 비교 분석하여 그 유용성 및 타당성을 고찰하고자 한다.

참고문헌

[1] 김용조, 박성대, “베벨기어의 밀폐단조 공정설계를 위한 유한요소해석”, 한국기계공학회지, 제2권, 제1호,

pp. 92-99, 2003.

- [2] 박철우, “다단-포머를 이용한 오토트랜스 미션용 솔레노이드 밸브 공정설계 및 유한요소해석”, 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제1호, pp. 97-103, 2009.
- [3] 박철우, 강정훈, 이준호, 김철, 김문생, 최재찬, “다단 포머-볼트류 공정 및 금형설계 자동화 시스템”, 한국정밀공학회지, 제20권, 제4호, pp. 29-38, 2003.
- [4] 박종욱, 이준호, 정성윤, 김철, 김문생, “준축대칭 제품의 냉간단조 공정설계 및 금형설계 자동화 시스템 개발”, 한국정밀공학회지 제19권, 제1호, pp. 107-118, 2002.
- [5] 최재찬, 김성원, 조해용, 김형섭, “축대칭 다단 냉간 단조 금형설계에 관한 연구”, 한국정밀공학회지 제7권, 제2호, pp. 95-104, 1990.
- [6] 한규택, 추덕열, “유한요소해석에 의한 승용차용 플레어 너트 단조공정의 최적설계”, 한국박용기관학회지 제28권, 제1호, pp. 83-89, 2004.
- [7] 민규영, 김태범, 박용복 “자동차용 에어컨 호스 제조를 위한 스웨이징 공정 유한요소해석”, 한국산학기술학회논문지 제9권, 제5호, pp. 1102-1106, 2008.
- [8] 왕창범, 송두호, 박용복, “HDTE관의 TEE 성형에 대한 유한요소해석”, 한국산학기술학회논문지, 제7권, 제3호, pp. 298-307, 2006.

변 흥 석(Hong-Seok Byun)

[정회원]



- 1999년 2월 : 부산대학교 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 광주과학기술원 기전공학과 (공학박사)
- 2005년 2월 ~ 2008년 2월 : 국방과학연구소(ADD) 근무
- 2008년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술 대학 디지털기계학부 조교수

<관심분야>

패속조형, 소성가공, CAD/RE