

비대칭 형상제품의 단조공정에 관한 연구

정경빈*, 김현수(경남대 대학원), 최영순(현대기공), 김용조(경남대 기계자동차공학부)

An Investigation on the Forging Process of an Irregular Shape Product

K. B. Jung*, H. S. Kim(Grad. School, Kyungnam Univ.) Y. S. Choi(Hyundai Machinery Forging Co.),
Y. J. Kim(Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.)

ABSTRACT

A brake spider in an irregular shape, which is used as a part in the braking system of a vehicle like a big truck and a trailer, is subjected to a large torque and hence requires both strength and endurance over the brake heat. Manufacture of this product in practice is generally composed of hot forging processes and machining. At the present study, two or more processes were considered for the hot forging. With an initial circular billet, blocker and finisher processes were analyzed using the rigid-plastic finite element method and also in addition to the preforming process. Proper forging processes to manufacture an irregular product without forging defects, which are preforming, blocker and finisher, were discussed and commented upon.

Key Words : Irregular shape product(비대칭 형상 제품), Brake spider(브레이크 스파이더), Blocker process(블로커 공정), Finisher process(최종단조 공정), Folding(접침), Rigid-plastic finite element analysis(강소성유한요소해석),

1. 서론

Brake spider는 트럭 및 대형수송용 트레일러의 Axle shaft에 결합되어 Brake drum을 고정해주는 제동장치의 부품이다. 이 부품은 Axle shaft에 의한 비틀림 하중에 대해 충분한 내구성이 요구되고, 또한 축에 용접 시 변형이 발생하지 않아야 하는 특성을 지니고 있기 때문에 정밀제품으로 제조되어야 한다. 따라서 부품이 지녀야 할 기계적 특성을 충족시키며 제조원가를 절감할 수 있는 단조법이 많이 이용되고 있다.

단조법에 의한 부품은 기계적 강도가 우수하지만 설계자의 경험과 단조품의 특성에 따라 다른 설계 및 공정이 될 수 있으므로 많은 시행착오와 그에 따른 시간 및 경비의 낭비를 초래한다. 최근 컴퓨터를 이용하여 설계 시뮬레이션 함으로써 시행착오를 줄여 시간과 경비를 절감할 수 있는 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾

Ward등⁽⁴⁾은 열차바퀴의 다단 열간단조 공정에서

소재와 금형이 받는 열 영향을 DEFORM을 이용하여 해석하였으며, Qingbin등⁽⁵⁾은 ALSII045 디스크 고속 열간단조의 열적거동을 시뮬레이션 하여 금형온도와 단조속도의 영향에 관하여 연구하였다. Doege등⁽⁶⁾은 스퍼기어, 헬리컬기어, 및 커넥팅로드를 생산하기 위한 각기 다른 밀폐형 열간단조 금형에 대해 연구하였으며, Choi⁽⁷⁾등은 리브-웹 형태의 제품단조를 위한 브로커를 설계할 수 있는 자동화 시스템을 개발하였다. 그러나 이들 대부분은 축대칭 및 좌우대칭인 일반적인 것에 대한 연구이다. 최근 비대칭 및 비축대칭인 것에 대한 관심이 높아지고 있으나 아직까지 이와 관련된 연구는 찾아 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 비대칭 정밀 제품인 Brake spider의 최적 단조성형 공정설계를 위해 강소성 유한요소 해석(rigid-plastic finite element analysis) 프로그램으로 잘 알려진 DEFORM-3D를 이용하여 3차원 성형해석을 수행하였다.⁽⁸⁾ 소재의 손실을 최소화하고, 단조성형 중 발생할 수 있는 소재의 접침(folding) 현상을 분석하여 최종 제품에서의 결함을 사전 예측

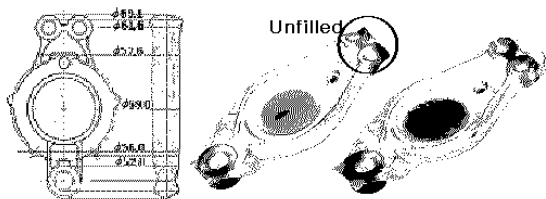
하고, 예측된 결함의 해소 방안을 모색하였다. 또한 실제 제품 형상과의 비교 및 검토를 통하여 유한요소 해석의 적합성 여부를 판단하였다.

2. 단조공정 시뮬레이션

Brake spider는 형상이 복잡하고 제품의 크기에 비해 살 두께가 얇으며 제품의 중앙부가 넓고 양 끝단의 폭이 다소 좁은 형상이다. 본 연구에서는 이러한 제품의 특성을 고려하여 DEFORM-3D를 통한 유한요소 해석을 수행하였으며, 이를 통해 결함없는 최종단조품을 얻기 위한 Blocker공정의 최적 금형형상 설계 및 초기소재의 치수결정에 대해 중점 시뮬레이션 하였다.

2.1 초기소재 치수 결정

형단조 성형 시 초기소재는 주조 성형을 통해 얻어지는 기본형상인 환봉소재이다. 소재 지름의 경우, 3차원 모델링 형상을 통해 단면 지름을 고려해 보면 Fig. 1(a)와 같이 단면 지름이 평균 $\phi 60\text{mm}$ 미만이며 상단에만 국부적으로 $\phi 60\text{mm}$ 를 초과한다. 지름을 크게 하여 공정설계에 적용하면 성형은 가능하지만 그에 따른 Flash가 체적에 비례하여 증가하게 된다. 따라서 재료 회수율을 고려하여 $\phi 60\text{mm}$ 의 환봉을 사용하면 소재의 성형이 가능할 것으로 예측되어 초기소재는 $\phi 60\text{mm}$ 로 공정 설계에 적용하였다. 소재 길이의 경우, 적당한 Flash량을 고려하기 위해 Fig. 1(b), (c)와 같이 소재의 체적을 최종 제품 보다 10%와 20%로 크게 적용하여 예비 시뮬레이션 하였다. 예비 시뮬레이션 결과 초기소재를 최종 제품의 체적보다 10% 크게 하였을 경우 제품의 가장자리부분에 미충진 현상이 발생하며 Flash량도 부족하였고, 제품 체적의 20%의 경우 거의 모든 부분에 충진이 이루어지며 Flash량도 적당하다. 따라서 제품 체적의 20% 이상은 미충진이 없는 성형이 가능할 것으로 예측되므로 초기소재는 제품 체적의 20%로 하여 공정설계에 적용하였다. 따라서 초기 소재는 지름 $\phi 60\text{mm}$, 길이 360mm 로 하여 시뮬레이션 하였다.



(a) Top view (b) $\phi 1 \times 330$ (10%) (c) $\phi 1 \times 360$ (20%)
Fig. 1 Blocker product according to dimension of the initial billet

2.2 공정 해석 조건

Brake spider의 시뮬레이션에서 소성가공 공정에의 수식화에 대한 구체적 내용은 참고문헌으로 대신 하며^[24] 이 때의 유한요소 해석 조건은 Table 1과 같다.

금형과 소재의 접촉면에 발생하는 마찰은 일정 전단마찰 법칙을 적용하였으며 금형과 초기 소재의 온도 및 재료는 실제 Brake spider의 제조에 사용되는 조건과 동일하게 적용하였다.^[24] 또한 해석 결과의 신뢰도를 확보하기 위하여 격자수를 20,000 ~ 30,000개 정도가 될 수 있도록 미세분할(fine mesh)하였고 소재온도 1200°C 일 때의 변형거동 식을 사용하였다.

Table 1 Conditions for FE simulation

Item	Description
Material	SM30C
Material temperature	$1200 \pm 5^{\circ}\text{C}$
Mesh	20,000 ~ 30,000
Die temperature	150°C
Friction	Constant shear friction ($m=0.3$)
Initial billet diameter	$\phi 60\text{mm}$
Flow stress	$\bar{\sigma} = 9.6 \bar{\epsilon}^{0.04} \text{ksi}$

2.3 단조공정 해석

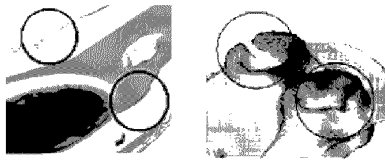
단조된 성형품의 외관에 결함이 발견되지 않더라도 내부에 부적절한 유동이 발생하여 부품결함을 초래할 수 있으므로 시뮬레이션을 통한 검토가 중요하다. Brake spider의 2단계 단조공정설계를 위한 시뮬레이션에서 제품의 요구특성과 사용목적에 부합한 결과를 얻지 못하여 단조결함 해소 방안을 제안하였다.

2.3.1 2단계 단조공정 해석

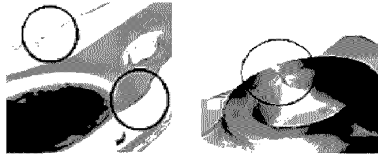
2단계 공정으로 Brake spider 제품을 성형할 경우의 공정도는 Fig. 2와 같다. 2단계 공정의 시뮬레이션 결과 Fig.3에서와 같이 Blocker 공정에서 제품의 리브(rib) 부분과 제품 끝단의 피어싱 홀 부분에서 약간의 미충진이 발생하였으나 Fig. 4에서 도시된 바와 같이 Finisher 공정에서 리브 부분의 미충진 현상은 완전히 해소되었다. 그러나 끝단부의 피어싱 홀 부분에서는 겹침 결함이 발생하였다.



(a) Billet (b) Blocker process (c) Finisher process
Fig. 2 Two forging processes for hot forging of the brake spider



(a) Rib part (b) End part
Fig. 3 Defect consideration in the blocker process



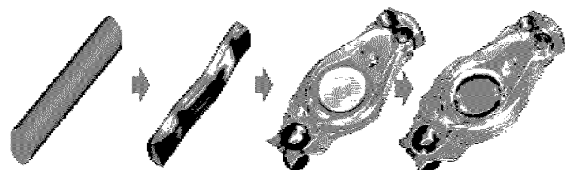
(c) Rib part (d) End part
Fig. 4 Defect consideration in the finisher process

2.3.2 단조 결함 해소 방안

Brake spider 제품은 크기에 비해 살 두께가 얇고 중앙부가 넓고 양 끝단이 좁은 형상이다. 특히 단면 직경이 큰 상단부분의 경우 가장자리 쪽으로 체적의 중심이 이동해 있다. 따라서 환봉 소재를 사용할 경우 단면직경이 큰 부분에서 Blocker 공정에서의 결속에 의해 소재가 양쪽으로 밀려 올라오면서 결함이 발생된다. 그러므로 소재의 유입량을 증가시켜 가장자리 부의 결속을 해소하고자 하였다.

소재 직경을 증가시킬 경우, 직경의 증가에 따라 가장자리 부에서의 결속이 해소되었으나 소재 회수율이 현저한 감소를 보이기 때문에 경제적인 관점에서 소재의 지름을 증가시키기 어렵다. 소재 길이를 증가시킬 경우에는 Finisher 공정에서 체적의 20%크게 고려하였을 때와 마찬가지로 결속이 발생하였다. 그러나 소재의 길이를 계속 증가시키면 상단과 하단 부분의 Flash의 량만 증가하였다. 그러므로 소재의 지름과 길이를 변화시키는 것만으로는 Blocker 공정에서의 결속을 해소하기 어렵다.

따라서 결함해소방안으로 전처리공정(preforming) 즉, Blocker 공정 전에 초기소재를 밴딩(bending)하면서 업셋(upset)하는 공정을 추가하여 시뮬레이션 하였다. 전처리공정을 추가하여 소재를 가장자리 방향으로 체적 이동시키고자 하였으며, 공정도는 Fig. 5와 같다.



(a) billet, (b) Preform, (c) Blocker, (d) Finisher
Fig. 5 Three forging processes for hot forging of the brake spider

Preforming공정을 추가한 3단계의 단조공정에 대한 시뮬레이션 결과 초기소재의 업셋량에 따라 Blocker 공정에서의 결속을 예방하여 최종공정에서의 결함을 해소할 수 있었다. 결함발생을 억제할 수 있는 가장 적절한 업셋량으로는 25mm 이상이었으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다.

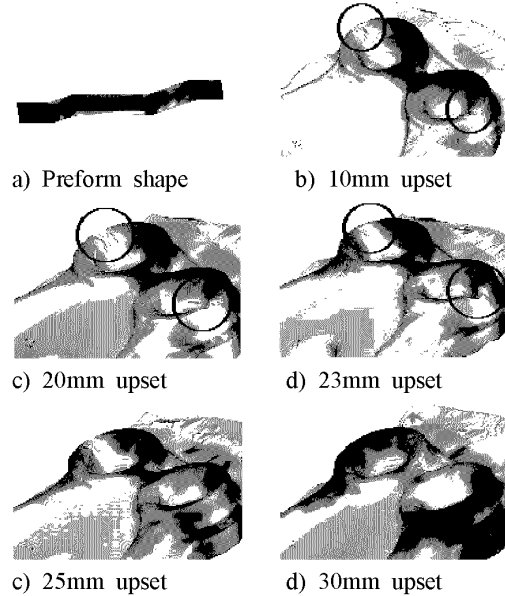
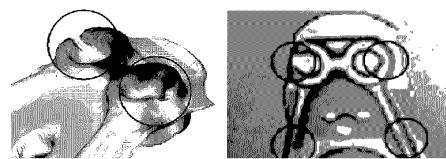


Fig. 6 Unfilled defects according to the upsetting quantities in preforming

3 단조실험

시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실제 금형을 제작하여 단조실험을 실시하였다. 실제 단조공정에서의 단조 조건은 시뮬레이션 조건과 같으며, 이때 단조를 위해 유압프레스를 사용하였다. 실제 단조 성형된 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 2단계 단조공정으로 성형된 제품의 경우 Blocker 공정에서 미충진이 발생하였고 이는 시뮬레이션 결과와 일치한다. 그러나 Finisher 공정에서는 겹침 결함이 외부에 나타나지 않았으나 시뮬레이션 결과에 비추어 볼 때 내부 결함이 발생하였을 것으로 예측된다. 유한요소 해석 결과와 실제 단조성형된 제품이 거의 일치함을 볼 수 있다. 따라서 유한요소 해석을 통해 단조공정 및 금형형상을 설계할 수 있었다.



(a) FE analysis (b) Forged product
Fig. 7 An unfilled defect in the blocker process



(a) FE analysis (b) Forged product
Fig. 8 An unfilled defect in the finisher process

4. 결과 및 검토

본 연구에서는 비대칭 형상 정밀 부품인 Brake spider의 최적 단조성형공정 및 금형 설계를 위해 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 이를 바탕으로 단조실험 하였고 해석결과와 비교 및 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 2단계 단조공정에서는 Blocker 공정에서의 결속으로 인해 Finisher 공정의 결함이 발생하였으며, 이를 해소할 수 있는 최적 Blocker 공정은 찾을 수 없었다.

2) Preforming 공정을 추가한 3단계 공정에서는 초기소재의 업셋량에 따라 제품이 미충진 없이 완전한 형상으로 성형되었다. 즉, 소재의 업셋량이 25mm 이상일 때 Blocker 공정에서의 결속을 해소하였고 Finisher 공정에서 결함 없이 제품을 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 경남대학교 BK21사업을 통하여 산업자원부에서 시행한 산업기술 개발사업에 의한 것입니다.

참고문헌

- Rodrigues, J. M. C. and Martins, P. A. F., "Finite Element modeling of the initial stages of a hot forging cycle", Finite Element in Analysis and Design, Vol. 38, pp.295~305, 2002.
- Fujikawa, S., "Application of CAE for hot forging of automotive components", J. of Materials Processing Technology, Vol. 98, pp. 176~181, 2000.
- Guo, Y. M. and Nakanishi, K., "A hot forging simulation by the volumetrically elastic and deviatorically rigid-plastic finite-element method", J. of Materials Procdeeing Technology, Vol. 89, pp.111~116, 1999
- Ward, M. J. and Miller, B. C., 1998" Simulation of a multi-stage Railway Wheel and forming Proceed". J. of Materials Processing Technology, Vol.80~81, pp. 206~212, 1998.

- Qingbin, L. and Zengxing, F., "Coupled thermo-mechanical analysis of the high-speed hot-gorging processes", J. of Materials processing Technology, Vol. 69, pp. 190~197, 1997.
- Doege, E. and Bohnsack, R., "Closed die technologies for hot forging", J. of Materials processing Technology, Vol. 98, pp. 165~170, 2000.
- Choi J. C., Kim B. M. and Kim S. W. "Computer-aided design of blockers for rib-web type forgings", J. of Materials processing Technology, Vol. 54, pp. 314~321, 1995.
- Scientific Forming Technologies Corporation, Deform-3D User Manual, V4.0, SFTC.
- Hwang S. M., Joun M. S. and Park J. S., "A Penalty Rigid-Plastic Finite Element Method for the Determination of Stress Distributions at the Tool-WorkPiece in Metal Forming", Trans. of NAMRI of SME, Vol. XVIII, pp. 13-19, 1990.
- 전만수, 문호근, 황장무, "체적 소성가공에서 마찰 법칙이 유한요소 해석 결과에 미치는 영향에 관한 고찰", 한국 정밀 공학회지, 제13권 제2호, pp.102-109.
- 이동녕, "塑性加工學 문운당, 2002.