

# 치수 정밀도 향상을 위한 비대칭 정밀제품의 단조공정 설계

이선홍\*, 최창혁(경남대 대학원), 김성태(현대기공), 김용조(경남대 기계자동화공학부)

## Forging Process Design for Dimensional Accuracy of an Irregular Shape Product

S. H. Lee\*, C. H. Choi(Grad. School, Kyungnam Univ.), S. T. Kim(Hyundai Machinery Forging Co.),  
Y. J. Kim(Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.)

### ABSTRACT

A rear axle 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. This part should be therefore manufactured in dimensional accuracy. The practical manufacturing process of this irregular product requires the heat treatment process after hot forging and then the cold coining process for the dimensional accuracy. At the present study, the warm coining without the heat treatment process was proposed to employ the residual heat due to the hot forging process. And also the trimming and piercing process was designed using the rigid-plastic finite element method. The mechanical properties were discussed and also commented upon.

**Key Words :** Rear axle spider(후 차축 스파이더), Rigid-plastic finite element analysis(강소성유한요소해석), Warm coining(온간 코이닝), Piercing(피어싱)

### 1. 서론

자동차 산업이 발달함에 따라 부품제조의 고정밀화, 고품질화, 생산원가 절감 등이 요구되어왔다. 비대칭 형상 부품인 Rear axle spider는 대형 트럭 및 트레일러의 Brake drum을 고정하는 제동 장치에 사용된다. 차량의 제동 시 큰 비틀림 하중을 전달하기 때문에 높은 강도가 요구된다. 이의 일반적인 제조법으로는 열간단조 후 피어싱, 열처리, 냉간 코이닝 및 기계가공의 순서로 제조되어진다.

실제산업현장에서의 이런 제조공정은 설계자의 경험과 직관 및 실험에 의한 시행착오를 거쳐서 행하고 있다. 그러나 이러한 방법은 효과적이지 못하고 특히 정밀성형이 요구되는 경우에는 심각한 문제가 된다.<sup>1-3</sup> 이러한 현장 설계 방법의 해결을 위해 강소성유한요소법에 의한 공정 해석의 연구가 이루어져왔다.<sup>4-6</sup>

따라서, Rear axle spider 부품의 열간단조에 대한 최적의 성형공정과 단조한 후 기계가공시간을 단축하기 위해서 후가공을 생략하거나 최소화 할 수 있는 적절한 트리밍 및 피어싱 공정을 설계하는 것과

더불어 열처리 공정을 생략하고 최적 온간 코이닝의 조건을 설정하는 것이 본 연구의 목적이다.<sup>7-10</sup> 이러한 제조기술의 확립을 위해 산업현장의 경험적 설계 데이터를 바탕으로 DEFORM-3D를 사용하여 단조공정 설계를 위한 유한요소해석을 수행하였다. 또한 열간단조 후 잔열 상태에서 진행되는 트리밍 및 다수출 피어싱 공정과 온간 코이닝 공정에 대해서도 유한요소 해석하여 Rear axle spider 정밀 제품의 치수 정밀도 향상을 위한 단조공정 설계를 하고, 이의 결과를 바탕으로 제품을 성형하여 비교 검토하고자 한다.

본 연구에서는 강소성유한요소법을 이용하여 제안한 단조 공정을 해석하였다. 그리고 이를 바탕으로 단조금형과 트리밍/다수출 피어싱 금형 및 온간 코이닝 금형을 제작하였고 시제품을 생산하였다. 생산된 시제품과 기존 제품의 기계적 성질을 비교 검토하였다.

### 2. 단조공정 설계

Rear axle spider는 높은 강도와 치수 정밀도를 요

구하므로 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 초기 소재를 열간단조 한 후 피어싱하고 열처리 한 후 치수 정밀도를 높이기 위해 냉간 코이닝한다. 이후 Fig. 2(a)에 나타난 일부에서 밀링과 드릴링가공을 하고 마지막으로 구멍부의 치수 정밀도를 위해 보링가공한다. 이러한 제조공정으로는 대 용량의 프레스와 기계가공을 필요로 하기 때문에 경쟁력 확보를 위한 새로운 단조법이 필요하게 된다. 즉, 초기소재를 열간단조 한 후 트리밍과 다수 홀 피어싱을 동시에 할 수 있는 공정을 요구하게 된다. 따라서, Fig. 1(b)과 같은 공정을 제안하고 단조 후 Fig. 2 (b)에 표시된 부분의 치수 정밀도를 높이기 위해 상당한 잔류 단조열을 이용하여 온간 코이닝하고, 마지막 공정으로 홀 부분을 보링가공한다. 따라서, 다수 홀 피어싱 공정으로 인하여 기존의 드릴링가공을 생략하였다. 또한 온간 코이닝은 Fig. 2 (b)에 표시한 부분의 밀링가공 공정을 생략할 수 있었고 냉간 코이닝에 비해 적은 성형력을 필요로 하였다. 이와 같은 단조공정은 기존의 제조법보다 설비비와 생산시간을 감소시킬 수 있어 경쟁력을 확보할 수 있다.

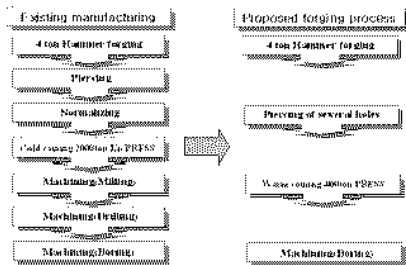


Fig. 1 The existed and the proposed manufacturing process

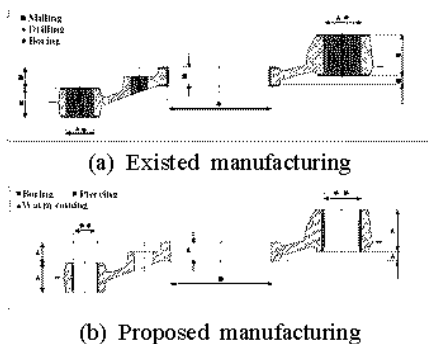


Fig. 2 Comparison of the forging processes

### 3. FEM에 의한 단조공정 해석

#### 3.1 해석 조건

새로운 단조공정 설계를 위해서 강소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 사용하였다. 시뮬레이션 조건은 Table 1에 나타내었다. 시뮬레이션에 사용된 금형의 소재는 AISI-H13이며, 재료의 물성치는

Table 2에 나타내었다. 온도조건은 등온으로 하였으며 소재의 온도를 1205℃, 금형의 온도를 150℃로 하였다. 금형과 소재의 접촉면에 발생하는 마찰은 일정전단마찰 법칙을 사용하였으며 마찰계수는 0.3이다. 유한요소해석에서 금형과 소재 사이의 접촉 조건(tolerance of contact)은 0.005mm로 일정하게 유지하였다.

Table 1 Conditions for FE simulation

Conditions	Value	
Material of die	AISI-H13(T=150℃)	
Material of billet	AISI-1025(T=1205℃)	
Friction	Constant shear friction 0.3	
Tolerance of contact	0.005 mm	
Condition of temperature	Iso-thermal	
Flow stress	20℃	$\bar{\sigma} = 744.63 \bar{\epsilon}^{0.2}$ MPa
	980℃	$\bar{\sigma} = 285.44 \bar{\epsilon}^{0.02}$ MPa
	1205℃	$\bar{\sigma} = 66.19 \bar{\epsilon}^{0.04}$ MPa

Table 2 Mechanical properties of AISI-H13(150℃)

Properties	Value
Yield Strength	1600 MPa
Modulus of Elasticity	191 MPa
Poisson's Ratio	0.3

#### 3.2 단조공정 시뮬레이션

초기소재는 환봉이며 치수는  $\phi 60$ mm으로 고정하여 시뮬레이션을 하였다. 단조 플래시량과 미충진 발생을 고려하여 최종 형상품의 체적을 기준으로 초기소재의 체적을 최종 제품보다 20% 더 큰 길이로 치수를 선택하여 시뮬레이션을 하였다.

본 연구에서는 단조 공정을 초기 소재를 굽힘(bending)시키면서 업셋(upset)하는 예비성형체 공정(preforming)과 최종 제품에 가까운 형상을 단조하는 Blocker 공정, 최종 제품형상을 성형하는 Finisher 공정으로 선택하고 각 공정의 적절한 금형형상 설계를 위한 유한요소해석을 하였다.

#### 3.3 트리밍/다수 홀 피어싱 공정 시뮬레이션

일반적으로 열간 단조 후 다음 공정에서 900℃ 이상의 잔류단조열을 이용하기 위해서는 단시간에 완료되어야 한다. 따라서 단조 후 제품의 플래시를 제거하기 위한 트리밍 공정과 제품 내부의 다수개의 구멍 부분을 제거하기 위한 피어싱 공정을 동시에 수행하는 공정으로 변경하였다. 트리밍 및 다수 홀 피어싱 공정에 대한 유한요소해석을 위해서 공정 후 제거되어야 하는 부분을 삭제하고 변경된 형상을 격자재구성(remeshing) 하였다. 그리고 앞 공정에서 변위, 유효변형률, 온도, 노드(node) 및 엘리먼트(element) 등의 정보는 내삽(interpolation)하였다.

### 3.4 온간 코이닝 공정 시뮬레이션

제품의 진직도, 치수 정밀도 등을 향상시키고 윗면과 아래 면의 평행도를 향상시킬 수 있는 온간 코이닝 공정을 시뮬레이션 하였다.

Fig. 2(b)에 표시한 부분의 치수 정밀도를 높이기 위한 온간 코이닝의 유한요소해석에서는 트리밍 및 다수 홀 피어싱 공정에서 얻어진 형상과 해석결과를 소재의 특성으로 사용하였다. 열간단조 후 트리밍 및 다수 홀 피어싱 공정을 거치면서 낮아진 온도를 감안하여 등온조건으로 하고 소재의 온도는 980℃로 사용하였다. 이때 소재의 유동응력식은 Table 1의 값을 사용하였다. 또한 온간 코이닝과의 성형하중을 비교하기 위해서 기존의 냉간 코이닝 공정을 유한요소해석 하였는데, 열간단조의 최종 형상을 초기 소재로 사용하고 열처리 후 냉간 코이닝 공정을 해석하기 위해서 소재의 온도는 20℃로 사용하였으며 그때 소재의 유동응력식은 Table 1의 값을 적용하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 열간단조 공정

본 연구에서 제안된 열간 단조 공정으로서 Preform 공정, Blocker 공정 및 Finisher 공정에서 소재의 변형 정도를 알아보기 위해 변형률 분포를 검토하였으며, 유효변형률 분포를 Fig. 4에 나타내었다. Blocker 공정인 Fig. 4(b)에서는 플래시 부분에서 유효변형률이 가장 크게 나타났으며 제품이 될 부분에서는 유효변형률이 거의 균일하게 나타났다. Finisher 공정인 Fig. 4(c)에서는 Blocker 공정과 마찬가지로 플래시 부분에서 유효변형률이 크게 발생하였고 피어싱 공정에서 제거될 커다란 구멍 부위에서 가장 큰 유효변형률이 나타났다. Finisher 공정에서도 역시 제품이 될 부분에서는 유효변형률이 거의 균일하게 나타났다. 시뮬레이션을 통해 얻은 Blocker 공정과 Finisher 공정에서의 제품형상을 실제 생산된 제품의 형상과 비교하였고 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었으며, Fig. 5에 나타내었다.

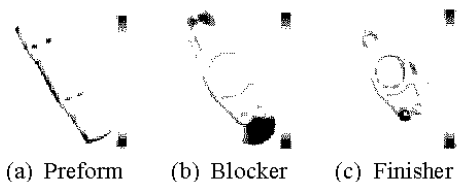
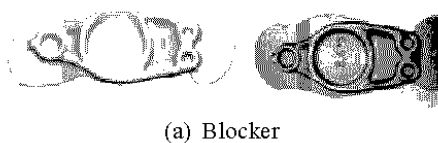
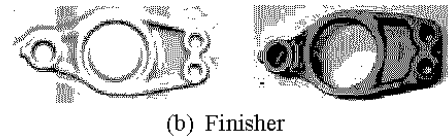


Fig. 4 Effective strain



(a) Blocker



(b) Finisher

Fig. 5 Blocker and finisher products by FE simulation and experimental

각 열간 단조 공정에 대한 시뮬레이션 결과로부터 최종 성형단계까지 단조하중을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Preform 공정에서 최대 힘은 3300kN 이었고 Blocker 공정에서는 6504 kN 이었으며 마지막 공정인 Finisher 공정에서는 36350 kN 의 힘을 얻을 수 있었다.

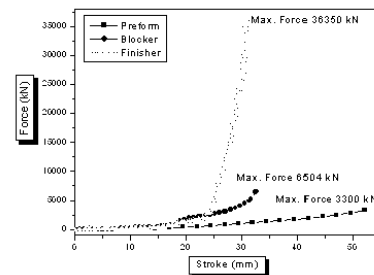
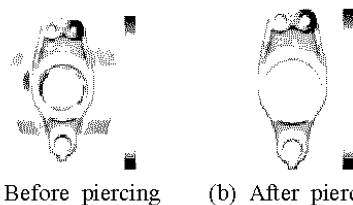


Fig. 6 Forging loads for each of forging processes

### 4.2 트리밍/다수 홀 피어싱

트리밍 및 다수 홀 피어싱 공정에서 유효변형률을 비교하였으며 Fig. 7에 나타내었다. 단조공정의 Finisher 공정에서의 유효변형률에서 알 수 있듯이 플래시 부분과 피어싱 공정을 통해 제거될 구멍 부위에서 유효변형률이 크게 나타났다. 따라서 플래시 부분을 제거하는 트리밍과 내부의 다수 홀을 피어싱으로 인하여 유효변형률이 크게 나타난 부분이 제거되어 Fig. 7(b)와 같은 형상으로 성형되고 모든 부분에서 거의 유사한 유효변형률을 가지는 것을 확인할 수 있다.



(a) Before piercing (b) After piercing

Fig. 7 Effective strains in the piercing process

### 4.3 온간 코이닝

기존 공정의 냉간 코이닝과 제안된 온간 코이닝에 대한 성형력을 비교하기 위해 금형의 하중을 시뮬레이션 하였고 Fig. 8에 나타내었다. 냉간 코이닝에서는 최대 힘이 10588 kN 이었으며 그에 비해 온간 코이닝은 최대 힘이 877 kN 으로 아주 적은 힘이 필요함을 알 수 있다.

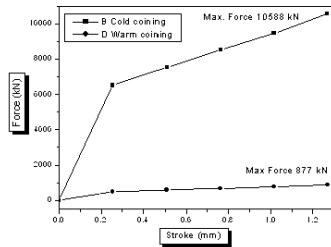


Fig. 8 Forming loads in cold and warm coining

#### 4.4 기계적 특성의 분석 결과

##### (1) 인장강도

제안된 단조공정으로 제작된 Rear axle spider의 기계적 성질의 향상 정도를 분석하기 위하여 시험편을 가공하여 인장실험을 실시하였다. 열간 단조 후 온간 코이닝한 제품과 기존의 열간 단조 후 열처리한 제품에 대한 항복강도, 인장강도 및 연신률을 분석하였고 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Tensile test results

Product	Tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation (%)
AISI-1025	481 or over	315 or over	27
Forging → Normalizing	645.6~645.9	456.2~465.5	24.3~28.3
Forging → Warm coining	684.1~685.6	446.7~447.3	23.7~24.7

##### (2) 경도

온간 코이닝 후 제품 내부의 경도값을 측정하기 위해 브리넬 경도시험을 이용하였다. 경도시험은 제품을 길이방향으로 절단하여 중요부분에 대한 경도치를 측정하였다. Rear axle spider 제품의 경도시험 위치는 Fig. 9에 나타내었으며, 시험 결과는 Table. 4에 나타내었다.

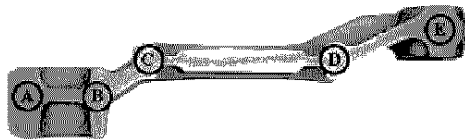


Fig. 9 Positions to measure the hardness

Table 4 Measured hardness values

Product	Measured position(hardness : HB)					Average
	A	B	C	D	E	
Forging → Normalizing	146.5	150.3	147.7	145.3	142.9	146.36
Forging → Warm coining	169.2	164.6	166.9	161.9	161.3	165.38

#### 5. 결론

본 연구에서는 비대칭 정밀 부품인 Rear axle spider의 최적 단조공정 설계에 목적을 두고, 열간단

조, 트리밍/다수홀 피어싱, 온간 코이닝 공정에 대한 유한요소 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 결과를 비교 검토하여 공정 설계의 적합성을 판단하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Preform 공정, Blocker 공정, Finisher 공정, 온간 코이닝 공정 등에 관한 유한요소해석을 통해 제안된 단조공정 및 금형형상의 유용성을 확인하였다.

(2) 기존의 기계가공 공정을 최소화하기 위해 트리밍/다수 홀 피어싱 공정의 금형설계를 위해 시뮬레이션 하였으며 유효변형률 분포를 검토하여 적절한 공정을 제시하였다.

(3) 최종 단조품의 치수 정밀도 향상을 위한 온간 코이닝 공정을 해석하였고, 기존의 냉간 코이닝 공정과 성형하중을 비교하였으며 상당한 하중의 감소를 확인하였으며, 제품의 기계적 성질도 상당히 개선되었다.

#### 후기

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

#### 참고문헌

- Lange, k., 1958, "Closed-Die Forging of Steel," Springer-Verlag GmbH & Co. KG.
- Altan, T., Boulger, F.W., Becker, J. R., Akgegan, N. and Henning, H J., 1973, "Forging Equipment, Materials, and Practices", MICH-HB-03, Battelle Columbus Laboratories, Columbus, Ch.
- Van Tyne, C.J. and Abitzur, B., 1983, "Production to Near Net Shape," ASM, Metals Park, Oh.
- Surdon, G. Chenot, J.L., 1987, "Finite Element Calculation of Three-Dimensional Hot Forging", Int. J. Mum. Mech. in Engng., Vol. 24, ppl2107~2117.
- Kobayashi, S., Oh, S.I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite-Element Method", Oxford Univ. Press
- Ch, S. I., 1982, "Finite Element Analysis of Metal Forming Processes with Arbitrarily Shaped Dies," Int. J. Mech. Sci., Vd.24, pp. 479-493.
- B. S. Kang, N. S. Kim, and S. Kobayashi, "Computer-Aided Preform Design in Forging of an Airfoil Section Blade", Int. J. Mach. Tool Manufact., Vol.30, No.1, pp.43-52
- Park, J. J., Rebelo, N and Kobayashi, S., 1983, "A New Approach to Preform Design in Metal Forming with the Finite Element Method," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, No. 1, pp.71~79
- 최재찬, 김병민, 조해용, 김철, 1997, "스테이터 및 로터의 블랭킹 및 피어싱에 관한 자동화된 금형설계 시스템", 한국정밀공학회지, 제14권, 제5호, pp.22~33.
- Sun, S. and Luan, Y. G., 1992, "Preform Design of Axisymmetric Forging Based on Reverse Simulation Technique of Die Forging Process," J. of Materials Processing Technology, Vol.34, pp.349~356.