

# 공압식 폐쇄다이세트 적용 정밀단조공정 설계 및 해석기술

이광석<sup>1#</sup>, 엄득하<sup>2</sup>, 강성훈<sup>1</sup>, 이정환<sup>2</sup>

## Design and Analysis of Precision Forging Process by Utilizing Pneumatically Operated Enclosed Die Set

K. S. Lee, D. H. Eom, S. H. Kang and J. H. Lee

### Abstract

This paper describes design and analysis techniques of cold forging process for precise producing of T-200 type spider made of SCr420H by utilizing pneumatically operated enclosed die set. Since deducing feasible closing force is an important factor to optimize entire pneumatically operated cold forging system, a series of FE analyses with varying the number of gas cylinders has been carried out to investigate the influence of closing force upon the direction of applied load at die surfaces. It also reveals the optimum distribution of the gas cylinders in terms of the flatness of upper/lower plates.

**Key Words** : Pneumatically operated enclosed die set, Precision forging process

### 1. 서 론

주로 냉간 및 온간성형에 적용되는 폐쇄단조(Enclosed die forging)는 정밀정형성형의 대표적인 예이다. 폐쇄단조기술의 목적은 절삭량의 최소화, 낮은 성형하중 및 에너지절약, 공정의 자동화 등에 있으며, 대표적인 단조품으로 Spider, CV Joint-  
inner race, Bevel gear, Helical gear, Scroll, Outer cone 등이 있다. 이와 같은 제품들을 정밀정형단조로 생산할 경우, 정밀도 및 강도 개선, 단조공정 단축, 단조품 내·외부 결함방지 등의 장점이 있기 때문에 품질과 가격 경쟁력에서 유리하다.

반면 정밀정형단조의 핵심기술 중 하나인 폐쇄단조기술은 일본 등 해외에 의존하고 있는 실정이며, 특허문제로 국내에서 제작이 불가능하여, 막대한 특허비를 부담하며 폐쇄다이세트를 수입하고 있는 실정이다. 이러한 높은 가격은 영세한 단조회사에 큰 부담이 되는 가격이기 때문에 보

급이 원활하지 않는 상태이다. 이로 인하여 기술 혁신의 속도가 매우 늦으며, 중국 등 후발국으로부터의 거센 도전에 직면해 있다. 폐쇄단조용 다이세트 관련 기술의 개발은 국내 단조산업의 발전에 필수적이다. 최근 전만수 교수님 연구팀에서는 특정 냉간단조 모델 공정을 설정, 분석하고, 이와 연결하여 폐쇄단조 조건을 예측한 바 있으나[1], 공압식 폐쇄단조 다이세트의 경우 보다 정밀한 최적 폐쇄력을 계산해야만 한다. 그 이유는 폐쇄하중의 발생원으로 유압을 사용할 경우, 폐쇄압력을 미세 조절하여 단조가 완성되는 순간 링크에 최소의 하중이 작용하도록 할 수 있는 반면에, 폐쇄하중의 발생원으로 가스스프링을 사용할 경우 폐쇄 하중을 미세 조절할 수 없고 단지 상·하부에 병렬식으로 장착할 가스실린더의 개수 및 위치만으로 폐쇄하중을 조절해야 하기 때문이다. 본 연구에서는 가스실린더 부착 공압식 폐쇄단조 공정을 적용, 강소성 이론에 바탕을 둔 T-200 Spider 부품 냉간단조공정 유한요소해석을 통

1. 재료연구소 융합공정연구본부  
2. 재료연구소 산업기술지원본부  
# E-mail: ksl1784@kims.re.kr

해 실제로 요구되는 최적 폐쇄력을 계산하고, 이를 위해 상하부 금형에 장착되는 공압식 가스실린더의 최적 개수를 제시하고자 하였다.

## 2. 공압식 다이세트 최적 폐쇄력 계산

### 2.1 성형하중에측

강소성 이론에 바탕을 둔 폐쇄단조 공정을 적용한 T-200 Spider 냉간 단조 유한요소해석을 다음과 같은 조건에서 실시하였다.

- 초기빌렛소재: SCr420H,  $\phi 30\text{ mm} \times 49.6\text{ mm}$  height
- 유한요소해석 프로그램: Deform-3D
- 마찰조건: 0.1~0.3, 펀치하강속도: 10.0 mm/sec
- 금형: 강재, 소재: 소성체
- 소재의 유동응력 및 영률: 소재 압축시험 DB 직접입력

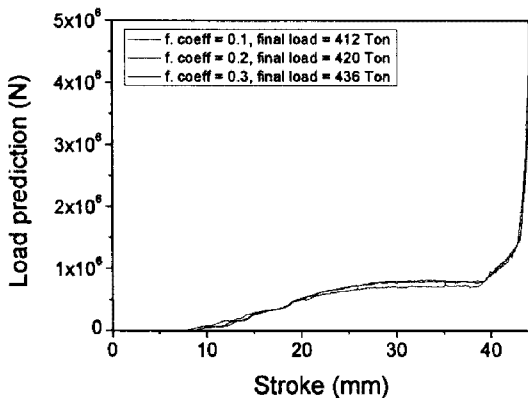


Fig. 1. Applied load prediction as a function of stroke with varying different friction coefficient.

일반적인 냉간 단조 공정해석에 적용하는 마찰계수  $f$  는 0.1~0.3사이의 값을 갖는 것으로 알려져 있는 관계로,  $f=0.1, 0.2, 0.3$ 으로 각각 달리하여 펀치에 걸리는 하중을 예측한 결과는 그림 1과 같다. 마찰계수가 증가하면 동일 스트로크 변위 조건에서의 응력값이 다소 증가하는 것으로 예측되었다. 실제 spider 폐쇄 단조시 평균 종기하중으로 측정된  $400 \pm 5\text{ Ton}$  과 가장 가까운 하중 예측치를 보인  $f=0.1$ 을 최적마찰계수로 선정된 뒤 성형해석 결과는 그림 2와 같으며, 이 경우 burr 발생에 의한 과대 응력 계산을 무시하면 전체적으로는 SCr420H 인장강도( $\sim 840\text{ MPa}$ )보다 다소 낮은

응력값인 800 MPa 전후로 충분한 냉간 단조가 가능함을 확인하였으며, 최대 프레스 하중은 하부 금형에 걸리는 좌하부의 하중 예상 곡선으로부터 412 Ton으로 계산되어, 실측치와 거의 유사함을 확인할 수 있다.

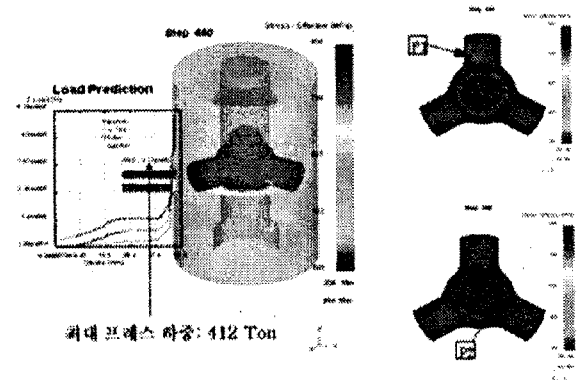


Fig. 2. FE analysis result of T-200 spider when  $f=0.1$ .

### 2.2 마찰조건 변화에 따른 T-200 Spider 성형해석

마찰계수 변화에 따른 유효 응력 및 유효 변형을 변화는 그림 3 및 4와 같다. 최대응력이 필요한 부분은 그림 3으로부터 spider의 3개의 원기둥이 빠져나가면서 금형과 접하는 부분 및 폐쇄압력이 직접적으로 부가되는 센터 부분이었으며, 마찬가지로 같은 위치에서 최대 변형률이 적용됨을 그림 4로부터 확인할 수 있다.

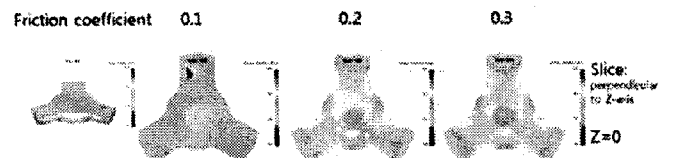


Fig. 3. Comparison of the effective stress distribution for different friction coefficient.

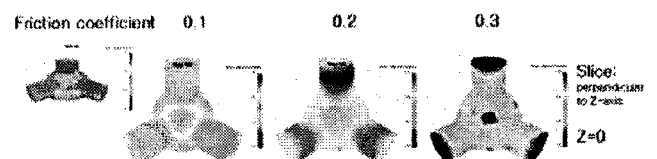


Fig. 4. Comparison of the effective strain distribution for different friction coefficient.

### 2.3 폐쇄단조 성형 밀폐력 해석

Safety factor를 고려해 1 gas cylinder당 최대 하중이 10 Ton으로 가정한 가스실린더 (a) 2개, (b) 8개, (c) 9개를 설치한 폐쇄다이세트를 가정했을 때의 금형의 Z축 방향으로 들리는 현상 발생 여부를 예측하기 위한 탄성 해석 결과는 그림 5와 같다. 두 개의 실린더만 적용한 경우 상금형이 전체적으로 +Z(위쪽) 방향으로 들렸으며, 8개의 실린더를 적용한 경우 상금형이 spider와 접촉하는 P3 부분 및 상하부 금형이 접촉하는 P4 부분 모두 탄성력에 의해 +Z 방향의 변위가 발생하였다. 반면 폐쇄력이 90 Ton (9 cylinders) 일 때는 P5 부분은 탄성력에 의해 +Z 방향의 변위가 발생하나, 상하부 금형이 접촉하는 상하부 die 표면, 즉 P6 부분은 -Z 방향의 변위가 발생하여 상하부 금형이 완전히 폐쇄됨을 알 수 있었다.

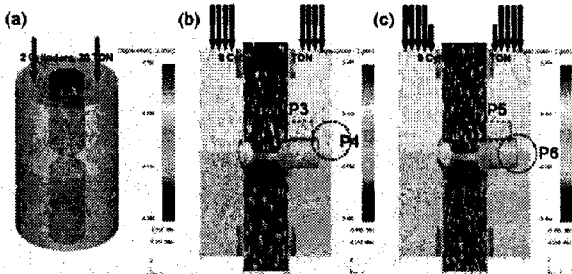


Fig. 5. Z-axial elastic analysis results for (a) 2, (b) 8 and (c) 9 gas cylinders considering safety factor.

또한 safety factor를 고려하지 않고 1 gas cylinder당 하중이 11.2 ton인 가스실린더 (a) 7개, (b) 8개를 설치한 폐쇄다이세트를 가정했을 때의 금형의 Z축 방향으로의 움직임을 예측하기 위한 탄성해석 결과는 그림 6과 같다. 그림 6(a)와 같이 탄성력이 78.4 Ton일 때는 P7 부분에서 +Z 방향의 변위가 발생하였다. 반면 그림 6(b)와 같이 탄성력이 89.6 Ton (8 cylinders) 일 때는 P8 부분은 -Z 방향의 변위가 발생하여 상하부 금형이 완전히 폐쇄될 것으로 예측된다. 이와 같은 최적 폐쇄력 계산 결과를 바탕으로, 실제 폐쇄 단조시에는 하부에 상부 대비 20% 정도의 가압 조건 및 상하부 금형의 Z 방향으로 동시 비구속 조건을 고려하면, 상부에 8개, 하부에 10개의 gas cylinder를 배치하면 최적 폐쇄력을 얻을 수 있으리라 판단된다.

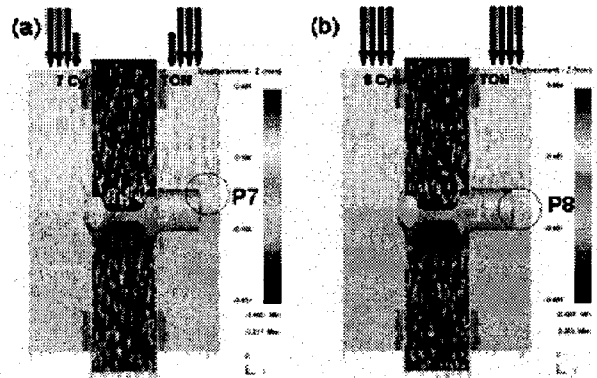


Fig. 6. Z-axial elastic analysis results for (a) 7 and (b) 8 gas cylinders having maximum final load value.

### 3. 폐쇄 다이세트 편평도 해석 결과

가스실린더를 상부에 5개, 하부에 6개를 그림 7(a)(b)와 같이 upper 및 lower middle plates에 최외각 배치한 뒤 각 plate들의 휨 정도를 600배 과장해서 도시한 결과는 그림 7(c)-(f)과 같다.

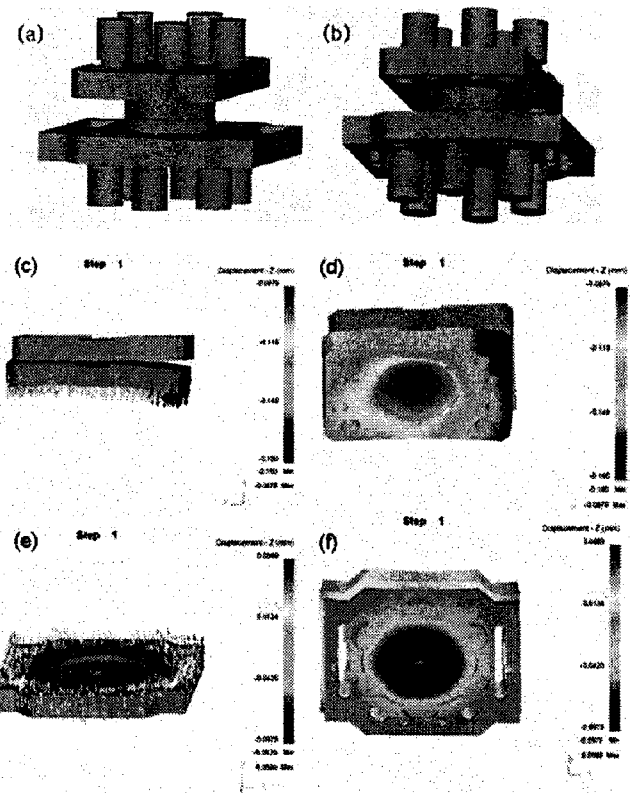


Fig. 7. (a)(b) Schematics of the gas cylinder distributions at outer parts of the upper/lower middle plates. Flatnesses of the upper middle and lower middle plates are illustrated in Figs. 7(c)(d) and (e)(f).

7(e)(f), respectively.

여기서 상부 가스 실린더에는 각 cylinder당 26 MPa의 면압을 부가하였으며, 이 때 upper middle plate에는 z 방향으로 최소 -0.088, 최대 -0.180, 총 0.092 mm의 변위차가 발생하였다 (그림 7(c)(d) 참조). 또한 lower middle plate에는 최소 -0.098, 최대 0.069, 총 0.167 mm의 변위차가 발생하여, 전체적인 편평도가 매우 저하되어 T-200 정밀 냉간 단조를 위한 최적 편평도인 0.05 mm 이하를 만족하지 못함을 예측할 수 있다.

반면 그림 8(a)(b)와 같이 upper 및 lower middle plates에 축대칭을 유지한 채 최내각 배치한 뒤 각 plate들의 휨 정도를 600배 과장해서 도시한 결과는 그림 8(c)~(f)과 같다. 그림 7과 대비해서 최내각 배치시 편평도가 현저히 개선되었는데, upper plate의 경우 변위차가 0.04 mm, lower plate의 경우 0.05 mm의 변위차가 발생하여, T-200 정밀 냉간 단조를 위한 최적 편평도인 0.05 mm 이하를 만족할 수 있음을 예측할 수 있다.

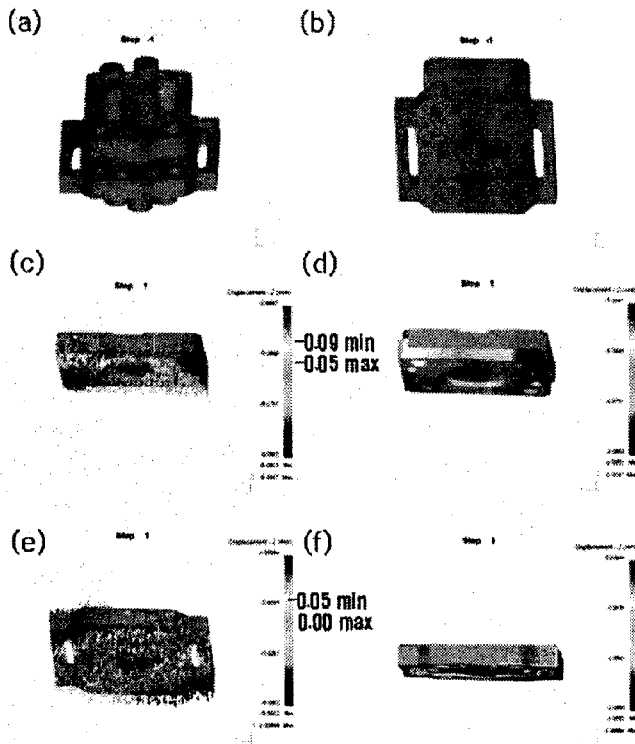


Fig. 8. (a)(b) Schematics of the gas cylinder distributions at inner parts of the upper/lower middle plates. Flatnesses of the upper middle and lower middle plates are illustrated in Figs. 8(c)(d) and 7(e)(f), respectively.

따라서 전체 공압식 폐쇄 다이세트의 폐쇄 압력을 균일하게 유지하고 편평도를 높이기 위해서는 가능하면 축대칭 조건하에서 상하부 가스실린더를 내각으로 이동, 배치시킬 것을 제안할 수 있다.

#### 4. 공압식 폐쇄단조품 조직 및 기계적 특성

그림 9는 위의 2 및 3장에서 언급한 해석결과를 바탕으로 설계된 가스실린더 부착 공압식 폐쇄 다이세트가 장착된 press 사진 및 폐쇄 단조된 T-200 spider 예이다.

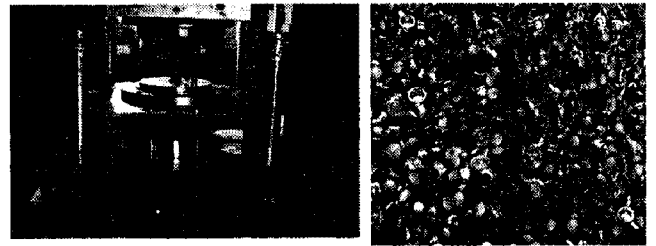


Fig. 9. Enclosed die set attached with gas cylinders and the feature of the cold forged T-200 samples.

SCr420H 원소재 billet을 2 % nital로 에칭한 뒤 광학현미경으로 관찰한 결과 전형적인 페라이트-펄라이트 이상조직을 보였으며, 그 조직은 그림 10-A point의 그것과 매우 유사하였다. 그림 10은 spider를 Z=0에서 Z축에 수직하게 절단하여 몇몇 부분에서의 유동 특성을 보여주는 미세 조직 사진으로, 가장 변형률이 낮은 A point에서의 미세 조직은 billet과 큰 차이가 없었다. B-C point로 이동하면서 유효변형률이 증가하나, 주로 Z축 방향으로의 금속유동이 많고 XY평면상에서의 금속 유동 특성은 일부만 관찰되었다.

인장 시험 결과, 원소재 billet의 인장 강도는 648 MPa, 연신율은 44 %인데 반해, 가스실린더식 공압 폐쇄단조 이후 T-200 spider 단조품의 인장강도는 1,053 MPa로 증가하는 반면 연신율은 14 %로 감소하였다. 최종 단조품의 Vickers 경도 측정 결과는 그림 11과 같았는데, 냉간 단조 후 billet 경도가 위치별로 다르지만 Hv 기준으로 100 이상 증가하였다. 특히 변형률이 가장 높았던 C, D points에서 상대적으로 280 Hv 이상의 경도 값을 보였는데, 이는 전형적인 strain hardening 효과로 판단된다.

## 5. 결론

공압식 폐쇄다이세트 적용 T-200 spider 정밀단조 공정 설계 및 해석 기술에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 마찰계수  $f=0.1$ 일 때가 실제 하중과 유한요소 해석 결과간 가장 오차가 적었다.
- (2) 실제 폐쇄 단조시에는 상부에 8개, 하부에 10개의 gas cylinder를 배치하면 최적 폐쇄력을 얻을 수 있으리라 판단된다.
- (3) 가스실린더의 위치를 공간이 허락하는 한 최대한 내각으로 이동시킴으로써 다이세트 전체의 편평도를 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 창원클러스터 추진단에서 시행한 현장 맞춤형 기술개발 사업의 지원으로 수행된 결과의 일부로, 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. Y. Jun, R. H. Park, J. G. Eom, M. S. Joun, 2006, Criterion on Enclosed Die Forging with a Double-Action Link-Type Hydraulic Die Set, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., pp. 391~394.

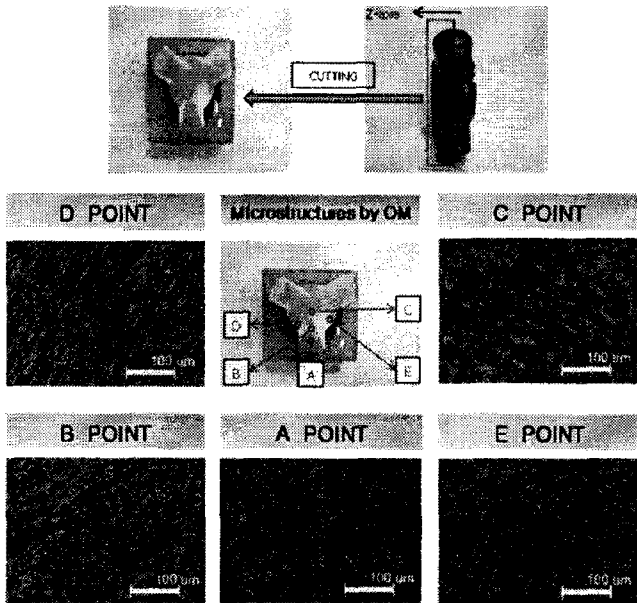


Fig. 10. Representative microstructures of the cold forged T-200 spider obtained by OM.

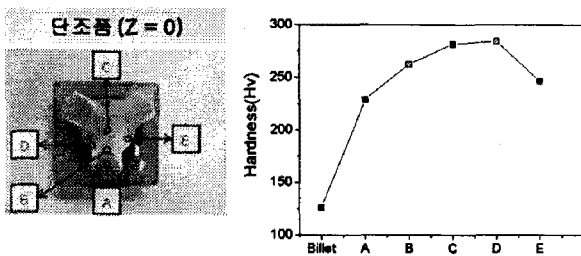


Fig. 11. Results of the micro-Vickers hardness test for cold-forged T-200 spider.