

## FEM을 이용한 원형 자유단조의 공정인자 영향에 관한 연구

최성기\*, 김원태\*, 천명식\*\*, 문영훈\*

### Effect of Process Parameters on Cylindrical Open Die Forging

S.K. Choi, W.T. Kim, M.S. Chun, Y.H. Moon

#### Abstract

In the open die forging process, it is difficult to optimize process parameters such as die shape, initial ingot size, feeding pitch, rotation angle and other process parameters in the operational environments. Therefore in this study, 3D finite element analysis has been performed to obtain optimal process condition for open die forging process. FEM analyses at various feeding pitches and rotation angles provide process conditions to make round bar having precise dimensional accuracy,

**Key Words** : Finite Element Method, Open Die Forging, Feeding Pitch, Rotation Angle

#### 1. 서론

발전설비나 제철설비에 있어서 모터축(moter shaft), 터빈축(turbine shaft), 압연기 보강롤, 전단기(shear) 등은 필수적인 부품이다. 이러한 부품들 중 일부는 대형잉곳(ingot)을 평금형을 사용한 열간 자유단조방법에 의해 제조된다.

특히 지난 수십년 동안 화력 및 원자력 발전소의 터빈 및 발전기의 로타의 설계자들은 발전소의 효율과 신뢰성을 높이기 위하여 로타를 대형화하거나 일체형으로 만들고 있는 추세이다. 따라서, 주조공장에서는 대형강괴(steel ingot)의 제조가 요구되고 있으며, 단조공장에서는 고품질을 가지는 단조기술이 필요하게 되었다.

단조공정은 우선 잉곳에서 1차 팔각단면, 2차 16각

단면으로 제조한 후 최종 제품까지의 복잡한 공정으로 이루어져 있고, 조업방법이 운전자마다 다르며 단조피치, 단조순서, 패스당 압하량, 회전주기 및 압하패스 수 등의 단조방법의 관리가 운전자의 경험에 의존하고 있는 실정이다.

이에 본 연구는 유한요소해석을 통해 각 공정인자에 따른 성형품의 치수정밀도를 평가하여 최적의 단조 공정을 설계하고자 한다.

#### 2. 해석 방법

##### 2.1 해석 조건

본 연구에 사용된 소재는 SKD61이며 flow stress를 계산하기 위한 SKD61의 유동식은 다음과 같다.

\* 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공 연구센터

\*\* 포항산업과학연구원 압연프로세스연구팀

$$K_m = (0.009128 \cdot \varepsilon^{0.14294}) \exp\left(\frac{10052}{T}\right) \text{kg/mm}^2$$

또한, SKD61의 물성치를 table 1에 나타내었다.

### 2.1 공정 조건

주조된 잉곳을 원형바로 성형하는 공정은 대형 사각바를 적절한 크기의 사각바로 성형 후 평다이에 의해 8각바로 성형한다. 그 후 라운드형 다이로 원형으로 성형하는 1차단조와 보다 작은 단조피치로 치수정밀도를 높이는 2차단조의 과정을 거치게 된다.

본 연구에서는 250mm 직경의 원형바를 성형하기 위한 8각 빌렛의 성형에서 매니플레이터의 회전각과 다이의 이송거리에 따른 치수정밀도를 평가하였다.

## 3. 해석 결과

### 3.1 다이의 이송거리의 영향도

성형한 후의 표면의 길이방향으로의 반지름의 분포를 Fig. 1에 나타내었다. 성형이 시작되는 앞부분의 형상이 거의 차이가 없지만 뒤쪽으로 갈수록 이송거리의 영향에 따라 분포가 달라짐을 알 수 있다. 평탄도를 평가하기 위해 반지름의 분산을 이용하였다. Fig. 2에 나타난 것처럼 이송거리가 120mm일 때와 150mm 일때는 반지름의 분산이 비슷하였고, 이송거리가 180mm 이상일 때는 이송거리가 증가할수록 반지름의 분산이 커짐을 알 수 있다. 따라서 생산성을 고려할 때 이송거리가 120mm보다는 150mm로 하는 것이 바람직하며 이송거리를 180mm 이상으로 성형할 때는 이송거리가 늘어남에 따라 평탄도의 저하를 감수하여야 한다.

2차 단조에서 성형한 후의 표면의 평탄도를 평가하기 위해서 길이방향으로의 반지름의 분포를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 4는 이송피치에 따른 반지름의 분산을 나타낸 것으로 점선은 각각의 점이 120mm, 150mm, 180mm의 이송거리일 때의 1차단조 공정 후의 반지름의 분산을 2차단조의 분산과 비교하기 위하여 도시한 것이다. 1차단조에 비해 2차단조에서 반지름 분산이 현

Table 1 Material Property of SKD61

Thermal conductivity	24.3~24.7 W/m·k
Heat capacity	3.588 N/mm <sup>2</sup> °C
Thermal transfer coefficient	0.004 N/sec·mm <sup>2</sup> °C
Shear friction coefficient	0.3
Temperature	1000°C

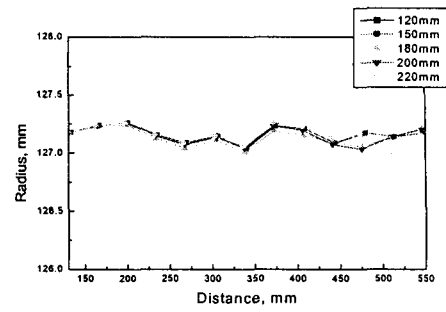


Fig. 1 Longitudinal radius profile (1st press)

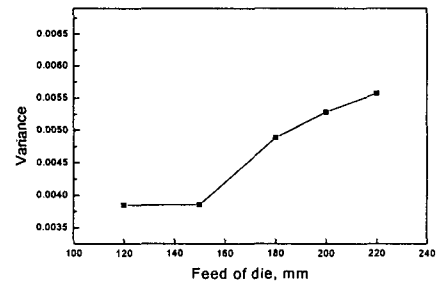


Fig. 2 Radius variance at various feeding pitch (1st press)

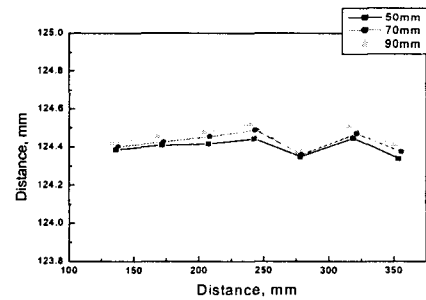


Fig. 3 Radius profile in longitudinal direction (2nd press)

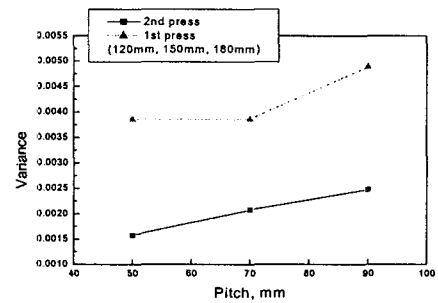


Fig. 4 Radius variance at various feeding pitch (2nd press)

격히 줄어들었으며 2차단조에서 이송피치가 증가할수록 반지름의 분산이 커짐을 알 수 있다.

### 3.2 메니플레이터의 회전각의 영향도

Fig. 5은 각각 회전각 90°, 120°로 성형할 때의 압하 패스 후 단면의 반지름 분포를 나타내는데 초기 빌렛의 형상이 8각이기 때문에 8개의 파형모양으로 보이다가 압하패스가 진행됨에 따라 목표 반지름인 125mm 부근으로 성형되어 간다.

회전각이 90°인 경우와 120°인 경우, 두 번째 압하 패스부터 90°의 회전각으로 성형하는 경우가 120°의 회전각으로 성형하는 경우보다 반지름의 분포가 125mm에 더 가까이 분포하여 목표 치수에 빨리 접근함을 알 수 있다. 이 결과로 세 번째 압하패스 후에는 회전각 90°의 경우가 반지름의 분포가 고르게 나타나며 따라서 회전각이 90°인 경우가 회전각 120°인 경우보다 성형품의 진원도가 우수하다고 판단된다.

Fig. 6은 회전각이 각각 90°와 120°인 경우 반지름의 분산을 도시하였다. 초기 빌렛과 첫 번째 압하패스는 동일한 공정이기 때문에 차이가 없으며, 두 번째 압하패스는 반지름 분포에서 관찰할 수 있는 것처럼, 회전각 90°의 경우가 120°보다 반지름 분산이 작다. 세 번째 압하

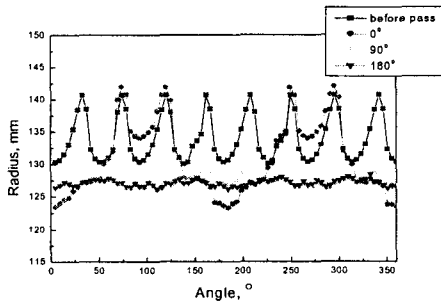


Fig 5 (a) Radius profile at various rotation angle (90°, 1st press)

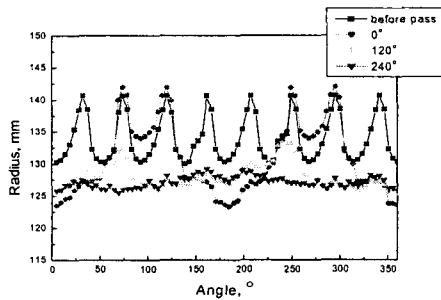


Fig 5 (b) Radius profile at various rotation angle (120°, 1st press)

패스에서의 반지름 분산은 회전각 90°가 120°의 경우보다 다소 작은 것을 알 수 있다. 반지름 분포에서는 회전각 90°의 경우는 반지름 오차가 균등하게 분포되어 있는데 반해 회전각 120°의 경우는 특정한 각도에서 부풀어 오른 형상을 관찰할 수 있어 진원도가 90°에 비해 떨어짐을 알 수 있다.

Fig. 7에 볼 수 있듯이 회전각 120°로 성형하였을 때, 빌렛의 앞부분과 뒷부분이 비틀어져 있다. 회전각 120°의 경우, 세 번째 압하 패스의 성형시 빌렛의 단면 형상이 좌우 대칭이 아니기 때문에 한쪽으로 비틀리는 현상이 일어난다. 이런 비틀림 현상이 성형품의 진원도를 유지하는데 좋지 않은 요인으로 작용할 것으로 사료된다.

Fig. 9는 단면의 반지름의 분포를 나타낸다. 회전각이 45°일 때와 120°일 때 대체로 균일한 반지름 분포를 나타내며 회전각이 90°의 경우는 오히려 진원도가 떨어짐을 알 수 있다. 45°와 120°의 경우는 압하한 후 부풀어 오르는 부위를 다음 압하패스에서 압하해 주는데 반해 회전각 90°의 경우는 반복해서 압하한 부위를 재차 압하를 하면서 압하패스가 진행되어도 진원도를 향상시키지 못한다.

Fig. 10에서 나타나듯이 반지름의 분산은 회전각 90°의 경우가 가장 높고 회전각 45°와 120°는 근소한 차이로 45°의 분산이 낮은 것으로 나타난다.

회전각 45°로 성형할 때, 네 번째 압하패스와 다섯 번째 압하패스와의 분산의 차이가 거의 없기 때문에 45°의 회전각으로 2차단조를 할 경우 네 번의 압하패스로

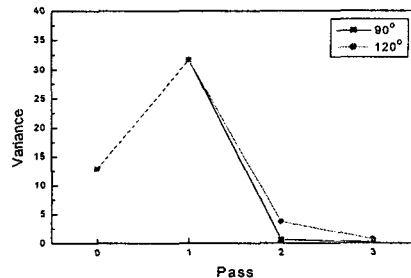


Fig. 6 Radius variance with different rotation angles (1st press)



Fig. 7 Twist effect of billet rotated by 120°

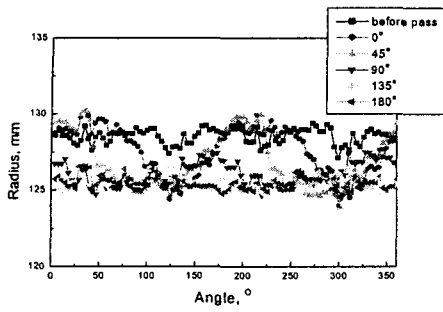


Fig. 9 (a) Radius profile at various rotation angle (45°, 2nd press)

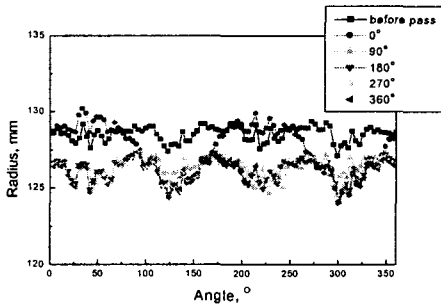


Fig. 9 (b) Radius profile at various rotation angle (90°, 2nd press)

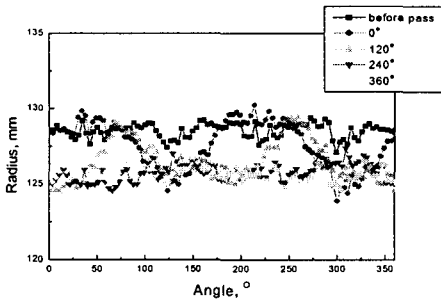


Fig. 9 (c) Radius profile at various rotation angle (120°, 2nd press)

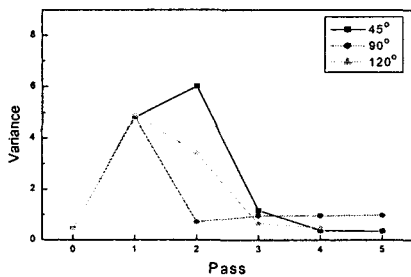


Fig. 10 Radius variance with different rotating angle (2nd press)

도 충분하며 또한 회전각 120°로 네 번의 압하패스를 하는 경우도 45°의 성형한 경우의 진원도와 유사할 것으로 예상된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 오픈 다이를 이용한 8각바를 원형바로 성형하는 공정을 3차원 유한요소해석을 통하여 최적 압하조건을 구하기 위해 수행되었으며 250mm 직경의 원형 바 단조조건을 기준으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 1차단조에서 이송거리 150mm 이상에서 이송거리가 많을수록 평탄도는 떨어지며, 2차단조에서도 이송거리가 많을수록 평탄도가 떨어진다.

(2) 1차단조에서의 회전각은 120°보다 90°의 진원도가 높았으며, 2차단조에서는 회전각은 45°, 120° 90°의 순서로 진원도가 높다.

#### 참고 문헌

- (1) 조종래, 김동권, 이부윤, 양동열, 1995, "평다이를 사용하는 자유 단조 공정의 최적 단조 조건에 관한 연구", 한국소성가공학회지 제4권 제2호, pp. 141~150
- (2) 이경호, 조종래, 배원병, 1997, "평다이를 이용한 대형로타의 자유단조에 관한 연구", 한국소성가공학회지 제6권 제3호, pp. 203~212
- (3) 박승희, 윤성만, 신상엽, 1999, "대형 Ingot의 Upset 단조기술에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제8권 제1호, pp.101~107
- (4) 박치용, 조종래, 양동열, 1990, "열간 반경 단조의 2차원 유한요소해석", 대한기계학회논문집 제14권 제5호, pp. 1166~1180
- (5) A.R. Ragab, 2002, "Fracture limit curve in upset forging of cylinders", Materials Science and Engineering A334, pp. 114~119
- (6) J.R. Cho, W.B. Bae, Y.H. Kim, S.S. Choi, D.K. Kim, 1998, "Analysis of the cogging process for heavy ingots by finite element method and physical modelling method", Journal of Materials Processing Technology 80~81, pp. 161~165
- (7) Joseph P. Domblesky, Rajiv Shivpuri, 1995, "Development and validation of a finite-element model for multiple-pass radial forging", J. of Materials Processing Tech. 55, pp. 432~441