

## 유한요소해석을 이용한 환봉 단조공정 최적화

최성기\* · 천명식\*\* · 문영훈\*  
(2003년 11월 18일 접수)

### Optimization of Round Bar Forging Process by Using Finite Element Analysis

S. K. Choi, M. S. Chun and Y. H. Moon

#### Abstract

Three-dimensional rigid-plastic finite element analysis has been performed to optimize open die forging process to make round bar. In the round bar forging, it is difficult to optimize process parameters in the operational environments. Therefore in this study, finite element method is used to analyze the practice of open die forging, focusing on the effects of reduction, feeding pitch and rotation angle for optimal forging pass designs. The soundness of forging process has been estimated by the smoothness and roundness of the bar at various combination of feeding pitches and rotation angles. From the test result, process conditions to make round bar having precise dimensional accuracy have been proposed.

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

#### 1. 서론

환봉(round bar) 자유단조공정은 잉곳에서 사각 단면형상과 8 각단면형상의 중간과정을 거쳐 최종적으로 원형단면형상을 갖는 환봉으로 제조되는데 최종 제품까지 다단계의 복잡한 공정을 거치게 된다.<sup>(1-4)</sup> 내부 기공이 제거된 사각바는 중간 단조공정인 8 각바를 거쳐 환봉으로 단조되게 되는데, 이때 단조피치, 단조순서, 패스당 압하량, 회전주기 및 압하패스 수 등의 단조공정인자에 따라 최종제품의 품질이 직접 영향을 받게 된다.<sup>(5-8)</sup> 이러한 주요 공정인자들의 영향도를 실제 조업공정을 통해 분석하기 위해서는 많은 공정수를 필요로 할 뿐만 아니라 공정인자간의 간섭효과로 체계적인 분석이 어렵다. 따라서 본 연구에

서는 환봉단조의 주요공정인자인 압하량, 다이 이송거리 및 매니플레이터 회전각을 주요변수로 유한요소 해석하고자 하며, 가능한 최소의 공정수를 거치면서 우수한 치수정밀도를 갖는 환봉을 얻을 수 있는 최적공정을 길이방향 반지름 편차와 단면 진원도 측면에서 평가하여 제시하고자 한다.

#### 2. 환봉 자유단조 해석조건

환봉 자유단조공정은 우선 잉곳에서 사각단면 및 8 각단면 등의 중간단조과정을 거쳐 최종적으로 원형 바(bar)를 제조하는 복잡한 공정으로 이루어져 있다. 환봉자유단조는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 잉곳의 한쪽 끝을 조정장치(manipulator)를 이용하여 전후로 움직여서 잉곳의 위치를 조정하고

\* 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공연구센터  
\*\* 포항산업과학연구원 압연프로세스연구팀

또 상하 및 좌우방향으로 회전해서 잉곳과 금형과의 접촉할 부분을 결정하고 금형을 이용하여 반복적으로 단조하여 최종 제품을 생산한다.

일반적으로 환봉 단조과정은 2 단계 공정을 거쳐 원하는 형상을 제조하게 된다. 1차 공정은 우선 잉곳의 절반을 조정장치로 잡지 않은 부분에서 중심부까지를 평 금형을 이용해서 5% 정도를 압하량을 가하고 조정장치를 이용하여 90° 회전시킨 후 다시 그 부분을 3~4회 정도 반복적으로 압하하여 앞쪽 절반부를 환봉 형태로 만든 다음 조정장치로 반대쪽을 잡고 압축하지 않은 부분을 전자와 같이 반복하여 환봉 형태로 만든다. Fig. 2 에는 라운드형 금형(round anvil)을 나타내었다.

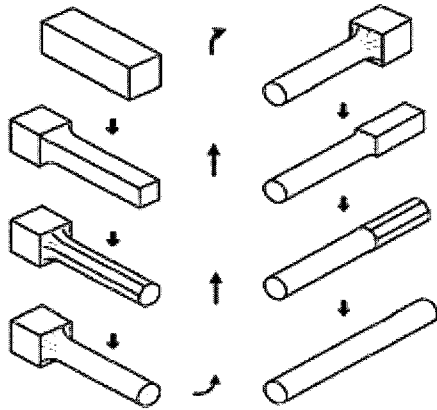


Fig. 1 Process sequence for round bar forging

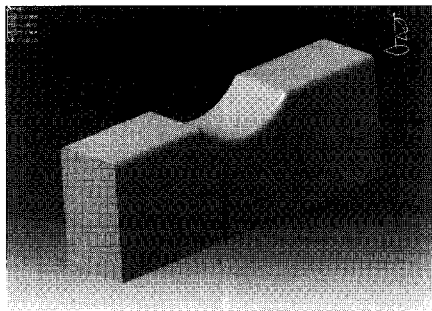


Fig. 2 Schematic drawing of round shape anvil

본 연구에 사용된 소재는 SKD61 이며 고온인장 실험을 통해 얻은 변형저항( $Km$ ) 예측식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$Km = (0.009128 \epsilon^{0.14294}) \exp\left(\frac{10052}{T}\right) \text{kg/mm}^2 \quad (1)$$

해석을 위한 입력치를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Input values for finite element analysis

thermal conductivity	24.3~24.7 W/m·k
heat capacity	3.588 N/mm <sup>2</sup> °C
heat transfer coefficient	0.004 N/sec·mm °C
shear friction factor	0.3
temperature	1000 °C

성형하고자하는 환봉의 목표직경은 250mm 로서 초기유한요소격자 형상은 Fig. 3 에 나타내었다.

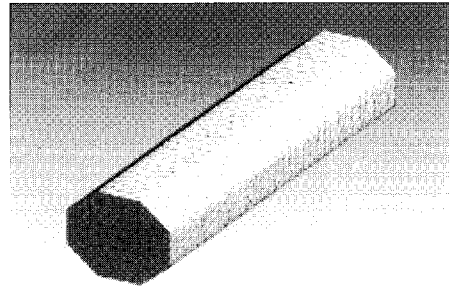


Fig. 3 Modeling of round bar for FEM analysis

### 3. 8 각 바의 환봉 단조공정해석

#### 3.1 압하량의 계산

8각바를 환봉으로 단조하기 위해 필요한 압하량( $r$ )은 식 (2)를 이용하여 근사적으로 계산할 수 있다. 원형 바를 성형하는데 필요한 최소 압하량은 Fig. 4에서 기하학적으로 8각 바의 내접원과 같은 지름의 환봉으로 성형된다고 가정하여( $S=D_0$ ) 근사적으로 정할 수 있다.

$$r = S / \cos 22.5^\circ - D_0 \quad (2)$$

여기서 :  $S$  는 내접원의 지름

$D_0$  는 목표 지름

Fig. 4에서 내접원이 250mm인 8각 빌렛을 250mm의 환봉로 성형하려면 최소 압하량이 20.6mm가

된다. Fig. 5에 유한요소해석을 통해 얻어진 250mm 원형 바를 얻기 위한 패스별 압하량을 나타내었다. 최소 압하량을 판단하는 기준은 8각 바가 다이의 표면에 고르게 접촉하여 원형의 형상으로 성형되며, 두 번째 패스부터는 추가로 빌렛의 높이와 폭이 같아지는 시점에서의 압하량으로 산출하였다.

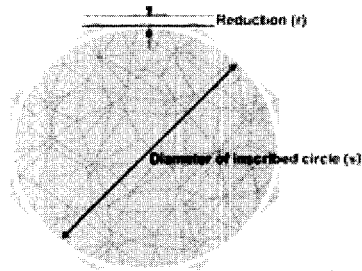
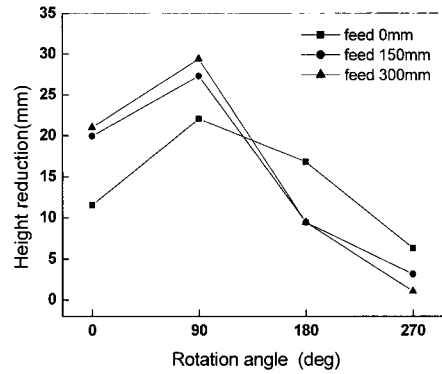


Fig. 4 Calculation of target reduction by using inscribed circle

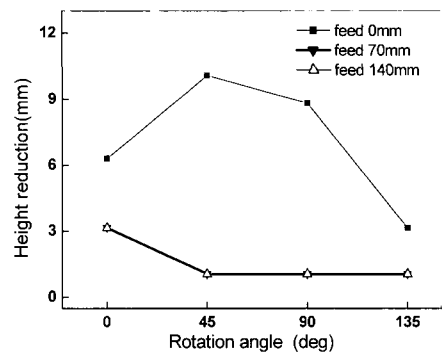
Fig. 5(a)의 환봉 단조에서는 90° 에서 압하량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 0° 압하에 의해 폭방향으로 8각 바가 부풀려 졌기 때문이며, 압하와 회전이 진행되면서 압하량은 감소하여 수렴하게 된다. Fig. 5(b)의 마무리 단조의 초기상태(0mm 이송거리)에서도 환봉단조와 유사한 경향을 보이며 이후 이송거리가 늘어남에 따라 압하량이 현저히 줄어들어 70mm와 140mm는 압하량이 동일하게 나타났다. 환봉단조시 이미 원형형태에 근접한 형태가 얻어진 상태에서 마무리 단조를 하게 되므로 실제 압하량은 환봉단조에 비해 작음을 알 수 있다. 따라서 식 (2)에서 계산되어진 압하량은 실제 단조공정시 이전 패스에서의 비대칭 변형 때문에 실제단조에서의 최적 압하량과는 차이를 보이게 된다.

3.2 다이 이송거리(Feeding pitch)의 영향

환봉단조 후 길이방향으로의 환봉 반지름의 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 성형이 시작되는 앞부분의 형상은 거의 차이가 없지만 뒤쪽으로 갈수록 이송거리의 영향에 따라 분포가 달라짐을 알 수 있다. 길이방향의 반지름 편차를 평가하기 위해 반지름의 분산을 이용하였다. Fig. 7에 나타난 것처럼 이송거리가 120mm 일때와 150mm 일때는 반지름의 분산이 비슷하였고, 이송거리가 180mm



(a)



(b)

Fig. 5 Minimum reduction for (a) round and (b) finish forging by using FEM

이상일 때는 이송거리가 증가할수록 반지름의 분산이 커짐을 알 수 있다. 따라서 생산성을 고려할 때 이송거리가 120mm 보다는 150mm로 하는 것이 바람직하며 이송거리를 180mm 이상으로 성형할 때는 이송거리가 늘어남에 따라 길이방향의 반지름 편차의 저하를 감수하여야 한다. 따라서 최종 목표환봉의 직경 대비 0.6배 정도가 적절한 이송거리로 판단된다.

마무리 단조에서 성형한 후의 표면의 길이방향의 반지름 편차를 평가하기 위해서 길이방향으로의 반지름의 분포를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 9는 이송피치에 따른 반지름의 분산을 나타낸 것으로 환봉단조에 비해 마무리단조에서 반지름 분산이 현격히 줄어들었으며 마무리단조에서 이송피치가 증가할수록 반지름의 분산이 커짐을 알 수 있다.

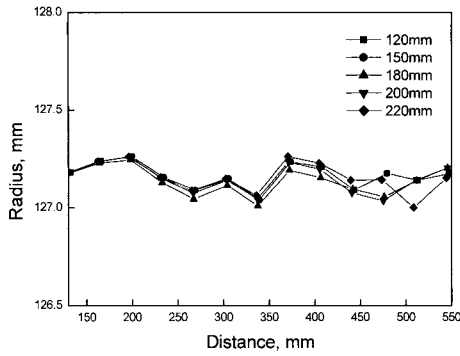


Fig. 6 Longitudinal radius profile(round forging)

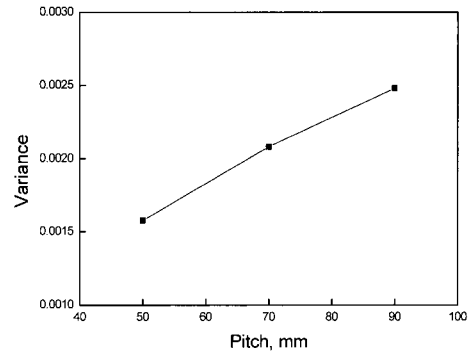


Fig. 9 Radius variance at various feeding pitch (finish forging)

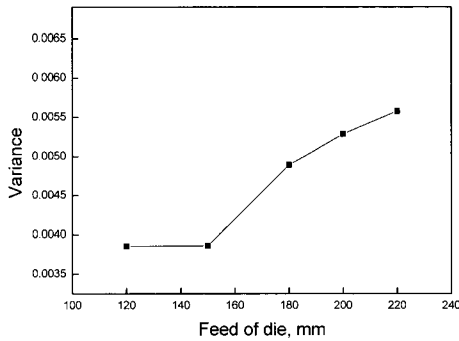


Fig. 7 Radius variance at various feeding pitch (round forging)

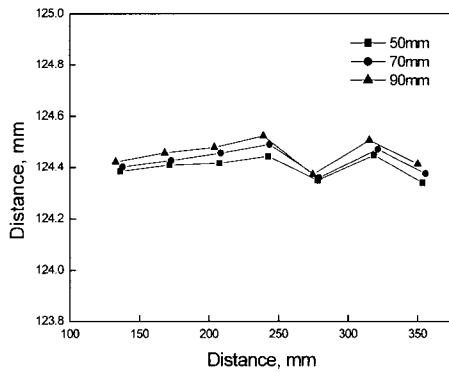


Fig. 8 Radius profile in longitudinal direction (finish forging)

### 3.3 매니플레이터의 회전각(rotation angle)의 영향

Fig. 10에 매니플레이터의 회전각이 90° 일 때 250mm 환봉을 성형되는 과정을 나타내었다. 이때의 이송거리는 150mm이다.

Fig. 11은 각각 회전각 90° (a)와 120° (b)로 성형할 때, 각 압하 패스 후의 단면 형상의 변화를 나타내었다.

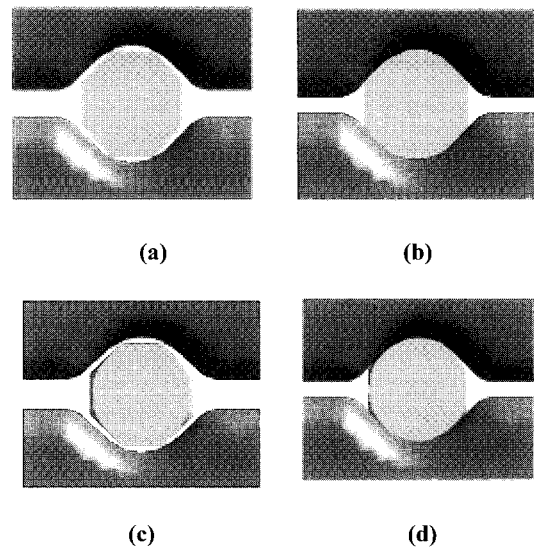


Fig.10 Deformation at various rotation (round forging)  
(a) 0° die open (b) 0° forging (c) die open - 90° turn (d) 90° forging

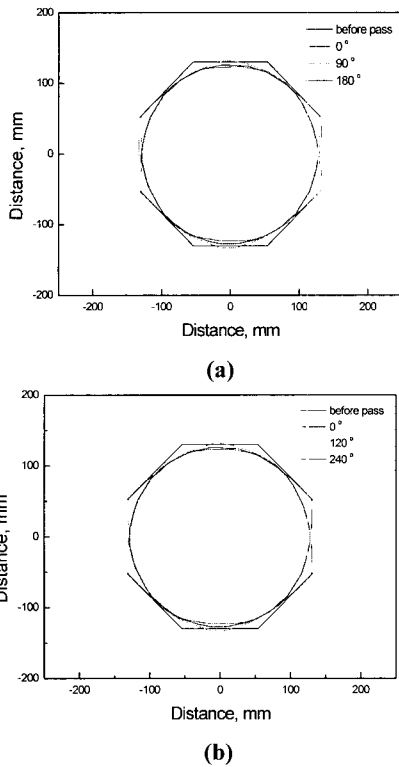


Fig. 11 Cross sectional view for rotational angle of (a) 90° and (b) 120° (finish forging)

Fig. 12는 각각 회전각 90°, 120°로 성형할 때의 압하 패스 후 단면의 반지름 분포를 나타내는데 초기 빌렛의 형상이 8각이기 때문에 8개의 곡형 모양으로 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 압하 패스 후에는 회전각 90°의 경우가 반지름의 분포가 균일하게 나타나며 따라서 대칭변형이 가능한 회전각 90°인 경우가 회전각 120°인 경우보다 성형품의 진원도가 우수하다.

Fig. 13은 회전각이 각각 90°와 120°인 경우 환봉 단조를 통해 얻어진 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 압하패스에서의 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.

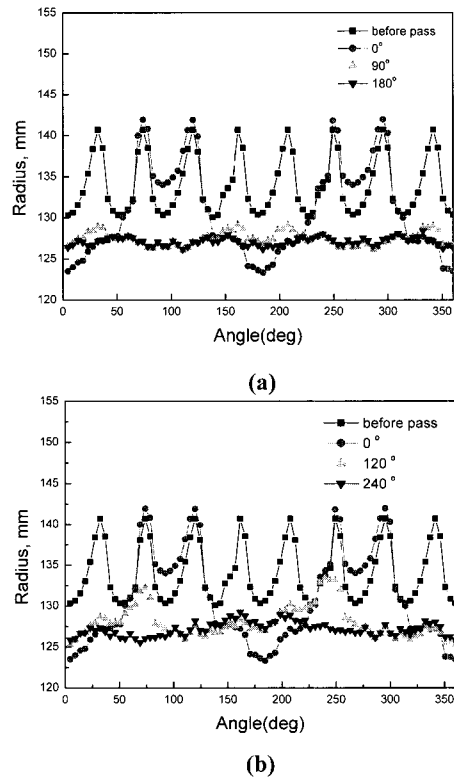


Fig. 12 Radius profile at rotation angle of (a) 90° and (b) 120° (round forging)

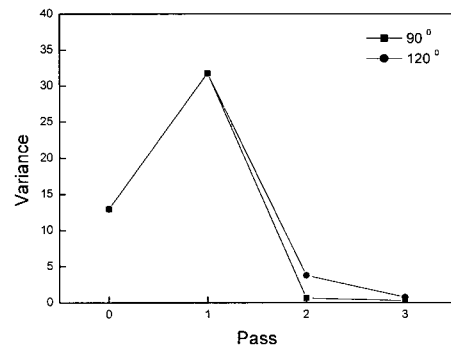


Fig. 13 Radius variance with different rotation angles (round forging)

Fig. 14는 회전각이 각각 45°, 90°, 120° 인 경우 마무리 단조를 통해 얻어진 반지름의 분산을 환봉단조의 경우와 동일하게 구하여 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 반지름의 분산은 회전각 90°의 경우가 가장 높고 회전각 45°와 120°는 근소한 차이로 45°의 분산이 낮은 것으로 나타난다. 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. 회전각 45°로 성형할 때, 네 번째 압하패스와 다섯 번째 압하패스와의 분산의 차이가 거의 없기 때문에 45°의 회전각으로 마무리 단조를 할 경우 네 번의 압하패스로도 충분하며 또한 회전각 120°로 네 번의 압하패스를 하는 경우도 45°의 회전각으로 성형한 경우의 진원도와 유사할 것으로 예상된다.

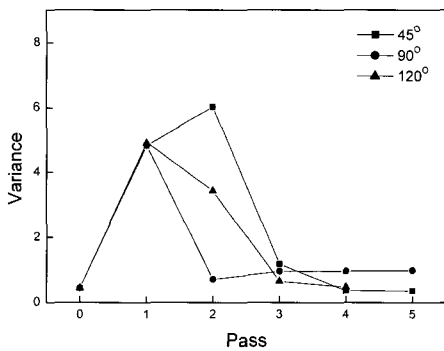


Fig. 14 Radius variance with different rotating angle(finish forging)

#### 4. 결론

본 연구에서는 자유단조법을 이용하여 8각바를 환봉으로 성형하는 공정을 3차원 유한요소해석 하였으며 최적 공정조건을 구하기 위해 수행된 250mm 직경의 환봉단조해석 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 원형봉을 성형하기 위한 각 공정에서의 최소 압하량은 이전 압하에서의 변형량을 고려하여 각 패스별로 다르게 설정하는 것이 바람직하다.
- (2) 길이방향의 반지름 편차는 다이 이송거리가 증가함에 따라 증가한다. 환봉단조에서 이송거리는 단조생산성과 제품품질을 고려할 때 환봉목표 직경의 0.6배 정도가 적정하다.
- (3) 환봉단조에서의 회전각은 대칭변형이 가능한 90°에서 가장 우수한 진원도를 얻을 수 있다.
- (4) 마무리단조에서는 45° 또는 120° 회전각에서 4 패스만으로도 0.5mm 이하의 진원도 편차를 얻을 수 있다.

#### 참고 문헌

- (1) K. Nakajima, K. Watanabe, S. Watanabe and I. Tamura, 1981, "Characteristics of Internal Deformation in Hot Free Forging of Heavy Ingots", Journal of the JSTP, Vol.22, No.246, pp. 697~703.
- (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) A.R. Ragab, 2002, "Fracture limit curve in upset forging of cylinders", Materials Science and Engineering A334, pp. 114~119.
- (5) J. R. Cho, W. B. Bae, Y. H. Kim, S. S. Choi and 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.
- (6) P. Joseph, 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.