

유한 요소법을 이용한 다단 선재 압연의 3차원 정상 상태 변형 해석

김 흥 준, 김 태 효, 황 상 무

포항공과대학교 기계공학과

Finite Element Analysis of 3 Dimensional Steady State Deformation in Multi-stand Rod and Bar Rolling

H. J. Kim, T. H. Kim, S. M. Hwang

Department of Mechanical Engineering

Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

Abstract

Caliber design in bar and rod rolling depends on the designer's experience, which in general is acquired through costly trial-and-error process. As a prerequisite for developing a scientific approach to caliber design, we present a finite element model to simulate 3-D deformation of bars and rods occurring in multi-pass sequence. The results are compared with measurements obtained from POSCO for to assess the solution accuracy. The comparison shows that the simulation results agree well with experiments.

Key words : bar, rod, sequence, finite element model

1. 서론

선재 압연 공정은 형상 압연 공정중 비교적 간단한 형상의 가공 공정으로 비교적 잘 알려진 공정이다. 형상 압연 공정의 목적은 소재의 단면적을 줄여 원하는 형상의 단면 형상과 기계적 성질을 얻는 것이다. 형상 압연 각 패스에서 소재의 길이 방향으로의 연신과 폭 퍼짐이 발생하여 복잡한 3차원 변형이 발생한다.

생산 현장에서는 주로 경험에 의존하고 있으므로 상당한 회수의 시행착오를 동반한다. 이로 인하여 인적, 물적 손실이 상당히 수반된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 형상 압연 공정시 발생하는 소재의 변형을 정량적으로 해석할 수 있는 3차원 유한 요소법을 이용한 컴퓨터 코드의 개발이 필요하다.

형상 압연에 관해 실험적 연구가 Chitkara^[1,2]등에 의하여 행해졌다. 그리고 최초로 3차원 유한 요소법을 이용한 평판 압연에 관한 연구가 Oh^[3]에 의하여 행해졌다. 그 이후 많은 연구자들^[4-6]이 유한 요소

법을 이용하여 형상 압연 공정 해석을 수행했다.

본 연구에서는 3차원 정상 상태 강소성 유한 요소법을 이용한 컴퓨터 코드를 이용하여 5 패스 선재 압연 공정의 시뮬레이션 결과를 POSCO 실험 결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경

소재의 소성 유동에 관한 경계치 문제는 다음과 같다.

- 지배 방정식

$$\sigma_{ij,i} + f_i = 0 \quad (1)$$

- 구성 방정식

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \sigma'_{ij} \quad (2)$$
$$\sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}'_{ij}$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 고온에서 소재의 유동 응력이고 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (3)$$

- 비압축성 조건

$$u_{i,i} = 0 \quad (4)$$

• 경계조건

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}n_j &= h_i && \text{on } \Gamma_h \\ u_i &= \bar{u}_i && \text{on } \Gamma_u \\ \sigma_n &= -\xi(u_n - u_n^D) && \text{on } \Gamma_c \\ \sigma_t &= -\mu\sigma_n g(\bar{\Delta u}) && \text{on } \Gamma_c \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 n 과 t 는 각각 $\bar{\Delta u}$ 의 법선 성분, 접선 성분을 나타낸다.

식(5)에서 함수 $g^{[7]}$ 는 고찰 마찰과 미끄럼 마찰을 처리하기 위해 사용되었으며 다음과 같다.

$$g(\bar{\Delta u}) = -\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\bar{\Delta u}|}{a} \right) \quad (6)$$

여기서 a 는 매우 작은 상수이다.

소재의 소성 유동에 관한 경계치 문제의 해(속도와 정수압)는 경계 Γ_u 상에서 기하 경계 조건을 만족해야하며, 임의함수(test function) q 와 Γ_u 경계 상에서 영의 값을 가지는 임의 함수 ω_i 에 대하여 아래 적분식을 만족한다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \sigma'_{ij} \omega'_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} p \omega_n d\Omega \\ & - \int_{\Omega} f_i \omega_i d\Omega - \int_{\Omega} u_{i,i} q d\Omega \\ & - \sum_{\alpha} \int_{\Gamma_h} h_{\alpha} \omega_{\alpha} d\Gamma - \int_{\Gamma_c} -\xi(u_n - u_n^D) \omega_n d\Gamma \\ & - \int_{\Gamma_c} \mu \xi(u_n - u_n^D) g(\bar{\Delta u}) \omega_t d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(\omega_{i,j} + \omega_{j,i})$ 이고 $\omega'_{ij} = \omega_{ij} - \frac{\omega_{kk}}{3} \delta_{ij}$

이다.

식(7)을 x_p, u_p, p, T, ω_i 및 q 에 대하여 유한 요소 근사화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_i &= N_{iL} X_L \\ u_i &= N_{iU} V_L \\ p &= H_M P_M \\ T &= N_K T_K \\ \omega_i &= N_{iL} W_L \\ q &= H_M Q_M \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 N_{iL}, H_M 및 N_K 는 기본 함수(basis

function)이고 X_L, V_L, P_M, T_K, W_L 및 Q_M 은 절점 과 요소에서의 값이다.

식(8)을 식(7)에 대입한후 정리하면 다음과 같은 비선형 대수 방정식을 얻는다.

$$h(X, \bar{\epsilon}, \bar{\epsilon}, V, P, T, d) = 0 \quad (9)$$

여기서, 벡터 V 는 속도, P 는 정수압, 기하학은 X , 공정 조건은 d , 유효 변형율은 $\bar{\epsilon}$, 유효 변형율 속도는 $\bar{\epsilon}$ 이다.

소재의 변형을 정상 상태로 해석때 변형 형상을 미리 알 수 없으므로, 자유 표면을 가정하여 해석을 수행한후 해석 결과를 바탕으로 자유 표면을 보정하고 자유 표면이 수렴할 때까지 반복 계산을 수행한다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 5 패스 롤의 형상을 Fig.1 에서 보는 것과 같다. 1 패스에서 3 패스까지는 직경이 600mm 인 롤을 사용하였고 4, 5 패스에서는 550mm 인 롤을 사용하였다. 초기 빌릿(billet)은 탄소 함유량이 0.37Wt%인 160 각(R22)을 사용하였다. 각 패스에 사용된 공정 속도는 Table 1 에서 보는 것과 같다.

| Pass No. | Roll Speed (rpm) |
|----------|------------------|
| 1 | 3.19 |
| 2 | 3.63 |
| 3 | 4.68 |
| 4 | 6.49 |
| 5 | 6.94 |

Table 1 Working Speed.

시뮬레이션 수행시 2058 개의 절점과 1600 개의 요소를 사용하였다. Fig. 2 에 사용한 mesh system 과 유효 변형율 분포를 나타내었다. 소재의 온도는 1100°C 를 사용하였으며 5 패스 모두 같은 온도를 사용하였다. 또한 마찰조건은 쿨롱 마찰을 사용하였고 마찰계수는 5 패스 모두 0.35 를 사용하였다.

시뮬레이션과 실험결과의 비교를 Fig. 3 에 나타내었고 소재의 변형후 단면 형상은 Fig. 4 에 보는 것과 같다. Fig. 3 에서 시뮬레이션 결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하는 것을 보이고 있다. 그리고 전체적으로 시뮬레이션 결과가 실험결과보다 큰 폭 퍼짐을 나타내고 있다. 이러한 결과는 5 패스 모두 같

은 온도를 사용하였기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 보다 정확한 다단 패스의 변형 결과는 소재의 온도 변화를 고려하면 가능할 것으로 생각된다.

4. 결론

- (1) 다단 패스 시뮬레이션 결과는 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.
- (2) 정확한 다단 패스 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 소재의 온도변화를 고려해야 한다.

5. 참고문헌

[1] N.R. Chitkara and G.M. Hardy, "Rolling of I-section beams using lead as a model material: Some experimental result," *Int. J. Mech. Sci.*, **19**(1977) pp.575-594.
 [2] R.L. Bodnar, D.C. Ronemus, B.L. Bramfitt,

and D.C. Shah, "Physical modeling of hot-deformation process-Using plasticine," *Trans. ISS*, **8**(1987) pp.11-22.
 [3] S.I. Oh and S. Kobayashi, "An approximate method for a three-dimensional analysis of rolling," *Int. J. Mech. Sci.*, **17**(1975) pp.293-305.
 [4] M. Kiuchi and J. Yanagimoto, "Computer Simulation of Shape Rolling Processes," *Pro. Of 16th NAMRC*, pp.34-40, 1988.
 [5] J.J. Park and S.I. Oh, "Application of three dimensional finite element analysis to shape rolling processes," *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, **12**(1990) pp.-36-46.
 [6] W. Shin, S.M. Lee, R. Shivpuri and T. Altan, "Finite-slab element investigation of square-to-round multi-pass shape rolling," *J. Mater. Proc. Tech.*, **33**(1992) pp.141-154.
 [7] C.C.Chen and S. Kobayashi, "Rigid plastic finite element analysis of ring compression," *ASME AMD*, **28**(1978) pp. 163-174.

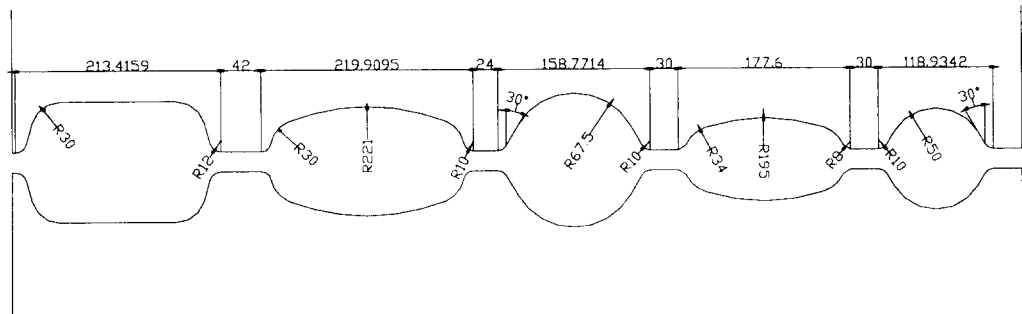
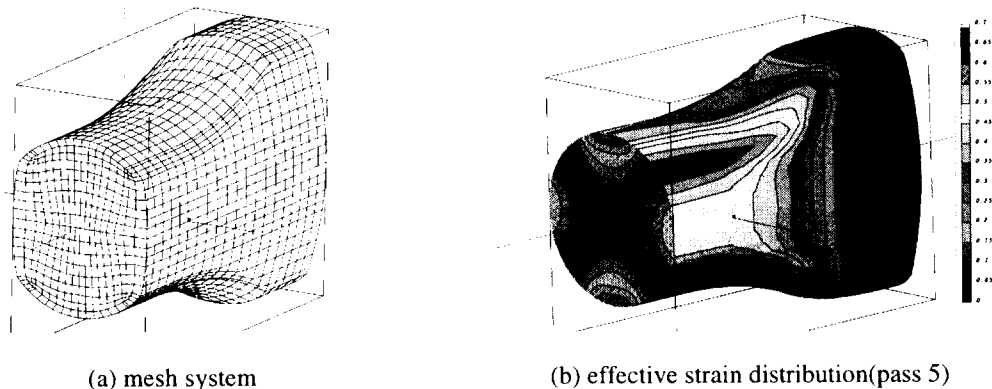


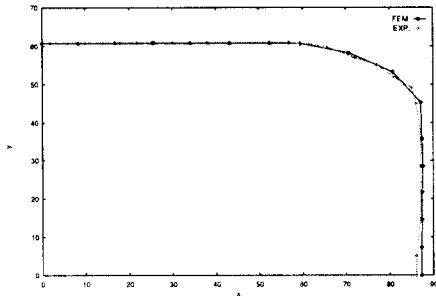
Fig. 1 The geometry of the five pass grooved rolls.



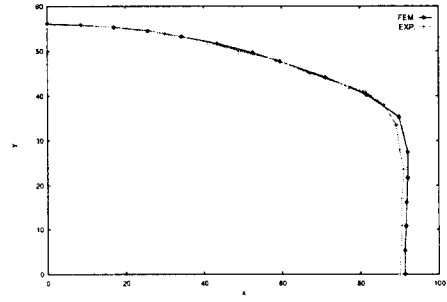
(a) mesh system

(b) effective strain distribution(pass 5)

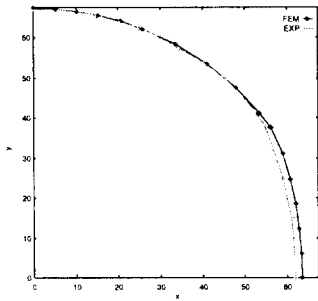
Fig. 2 Mesh system and effective strain distribution.



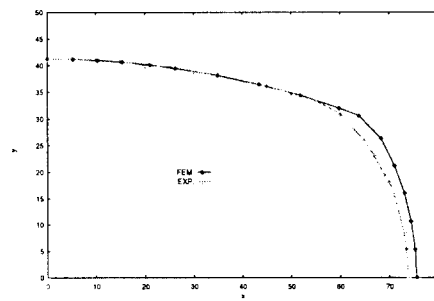
(a) Pass 1



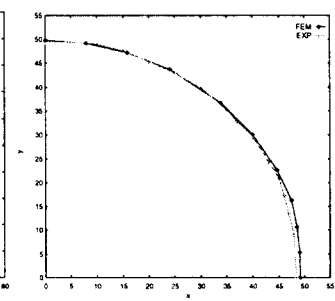
(b) Pass 2



(c) Pass 3



(d) Pass 4



(e) Pass 5

Fig.3 Comparison of the five pass rolling results.

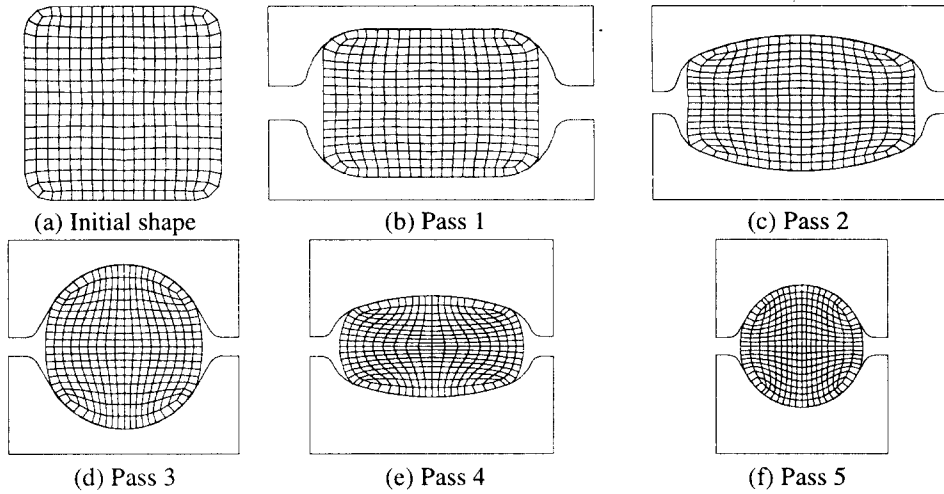


Fig. 4 Cross section after each of the five passes.