

유한 요소법을 이용한 형상 압연 공정의 공형 설계

김홍준* · 황상무**

Caliber Design in Shape Rolling by Finite Element Method

H.J. Kim and S.M. Hwang

Abstract

In industrial practice, caliber design in shape rolling depends on the designer's experience, which in general is obtained through costly trial-and error process. Demonstrated in this paper is an application of the finite element method to the determination of optimal caliber shapes in shape rolling of LM-Guide.

Key Words : Caliber Design, Shape Rolling, Finite Element Method

1. 서 론

형상 압연 공정의 목적은 소재의 단면적을 줄여 원하는 형상의 단면 형상과 기계적 성질을 얻는 것이다. 형상 압연 각 패스에서 소재는 길이 방향으로의 연신과 폭 퍼짐이 동시에 발생하여 복잡한 3차원 변형이 발생한다. 형상 압연 공정시 소재에 발생하는 변형을 예측하는 방법으로는 실험에 의한 수식모델⁽¹⁻⁶⁾과 유한 요소법⁽⁷⁻¹³⁾이 이용되고 있다.

형상 압연 공정은 소재의 형상, 제품의 형상, 패스 스케줄, 롤과 소재의 마찰, 소재의 온도, 롤 속도 및 소재의 물성등의 다양한 공정 변수에 의하여 공정 특성이 결

정된다. 그리고 형상 압연 공정시 생산 현장에서 가장 중요한 것은 수요자의 요구를 만족하는 공형 설계이다. 생산 현장에서는 주로 설계자의 경험에 의존하고 있으므로 상당한 회수의 시행착오를 동반한다. 이로 인하여 신제품의 개발에는 경제적 손실이 상당히 수반된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 형상 압연 공정시 발생하는 소재의 변형을 정량적으로 해석할 수 있는 3차원 유한 요소법⁽¹³⁾을 이용하여 자동화 기기에 사용되는LM-Guide의 공형 설계에 이용하였다.

2. 유한 요소 공정 모델

* 포항공과대학교 기계공학과

** 포항공과대학교 기계공학과

2.1 정상 상태 소성 변형 유한 요소 수식화

소재와 물이 접촉하는 부분은 쿨롱(Coulomb) 마찰 모델을 사용하였고 접촉 경계 조건을 처리하기 위해서 벌칙 유한 요소법(penalty finite element method)을 사용하였다.

변형중인 소재를 Ω , 소재의 표면 경계를 Γ 로 나타낸다. 소재의 변형 속도 $\mathbf{u}_i = \overline{\mathbf{u}}_i$ 로 주어진 경계 Γ_u , 표면력이 h_i 로 주어진 경계 Γ_h , 물과 소재가 접촉하는 경계를 Γ_c 로 나타낸다. 소재의 정상 상태 소성 유동에 관한 경계치 문제는 다음과 같다.

● 지배방정식

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

● 구성방정식

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \sigma'_{ij} \quad (2)$$

$$\sigma'_{ij} = \frac{2\overline{\sigma}}{3\varepsilon} \varepsilon'_{ij} \quad (3)$$

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

$$\overline{\sigma} = f(\overline{\varepsilon}, \dot{\overline{\varepsilon}}, T)$$

● 비압축성 조건

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

● 경계조건

$$\sigma_{ij} n_j = h_i \quad \text{on } \Gamma_h \quad (5)$$

$$u_i = \overline{u}_i \quad \text{on } \Gamma_u \quad (6)$$

$$\sigma_n = -\xi_2 (u_n - u_n^D) \quad \text{on } \Gamma_c \quad (7)$$

$$\sigma_t = -\mu \sigma_n g(\Delta \mathbf{u}) \quad \text{on } \Gamma_c \quad (8)$$

여기서 n 과 t 는 각각 $\Delta \mathbf{u}$ 의 법선 성분과 접선 성분을 나타낸다. 식 (8)에서 수직 응력의 계산과 접촉 조건을 만족시키기 위해서 벌칙 방법을 사용한다.

식 (5)에서 함수 g 는 고착 마찰과 미끄럼 마찰을 처리하기 위하여 Chen과 Kobayashi에 의하여 제안된 식을 사용하였으며 다음과 같다⁽¹⁴⁾.

$$g(\Delta \mathbf{u}) = -\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\Delta \mathbf{u}|}{a} \right) \quad (9)$$

여기서 a 는 매우 작은 상수이다.

소재의 소성 유동에 관한 경계치 문제의 해는 경계 상에서 기하 경계 조건을 만족해야하며, 임의 함수에 대하여 아래 적분식을 만족한다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \sigma'_{ij} w'_{ij} d\Omega - \int_{\Omega} -\xi_1 \varepsilon'_{kk} w_{ii} d\Omega \\ & - \int_{\Omega} f_i w_i d\Omega - \sum_a \int_{\Gamma_a} h_a w_a d\Gamma \\ & - \int_{\Gamma_c} -\xi_2 (u_n - u_n^D) w_n d\Gamma \\ & - \int_{\Gamma_c} \mu \xi_2 (u_n - u_n^D) g(\Delta \mathbf{u}) w_t d\Gamma = 0 \quad (10) \end{aligned}$$

여기서 $w_{ij} = \frac{1}{2} (w_{i,j} + w_{j,i})$ 이고

$w'_{ij} = w_{ij} - \frac{w_{kk}}{3} \delta_{ij}$ 이다.

식 (7)을 \mathbf{u} 와 \mathbf{w} 에 대하여 유한요소 근사화하면 다음과 같다.

$$\mathbf{u} = N_L(\mathbf{x}) \mathbf{U}_L \quad (11)$$

$$\mathbf{w} = N_L(\mathbf{x}) \mathbf{W}_L \quad (12)$$

여기서 \mathbf{U}^L 과 \mathbf{W}^L 은 각각 절점 에서 계산된 값이다. 식 (11)과 (12)를 식(10)에 대입하면 \mathbf{U}^L 에 대한 비선형 대수 방정식을 얻는다. 비선형 대수 방정식은 직접 반복법(direct iteration method)이나 뉴튼랩슨 방법(Newton-Rhapson method)을 이용하여 해를 얻을 수 있다.

2.2 유선 추적법

정상 상태 소성 가공 공정 해석을 위해서는 소재의 내부와 소재 표면의 자유 표면을 정확하게 예측하는 유선 추적법이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 영역 사상법을 이용하여 형상 압연 공정을 해석할 수 있는 정상 상태 공정 모델을 사용하였다⁽¹³⁾. 본 연구에서 사용된 공정 해석 모델은 초기 격자 생성 부분, 소성 변형 해석 부분, 유선추적 부분, 자유 표면 보정 부분 및 해석 영역 내부의 절점 조정 부분으로 구성된다. 자유 표면의 예측을 위하여 반복적 방법을 사용하였다.

3. 해석 결과

3.1 초기 설계

LM-Guide는 자동화 기기에 사용되는 고부가 가치의 제품이다. S55C의 재질을 사용하는 압연 공정으로 전체 7 패스로 이루어져 있으며 해석은 4번째 패스부터 실시하였다. 사용된 물의 직경은 310mm이고 물 속도는 109rpm이다. 각 패스에 대한 소재의 온도와 해석 결과는 Table 1에서 보는 것과 같다. 현장 설계자에 의하여 제시된 초기 설계는 Fig. 1에서 보는 것과 같다. 각 패스에서의 입측 및 출측 단면 해석 결과는 Fig. 1에서 보는 것과 같다. 4번째 패스에서는 양쪽 상단 구석에서 소재가 덜 채워지는 현상을 보여주고 있으며 5 번째 패스에서 구현한 각 부분의 형상은 6번째 패스에서 사라지는 현상을 보여주고 있다. 그리고 최종 패스에서 왼쪽 측면 부분이 덜 채워지는 현상을 보여주고 있으며 소재의 중앙 부분이 안쪽으로 휘어진 현상을 보여주고 있다.

3.2 최적 설계

유한 요소법을 이용하여 초기 설계의 문제점을 파악하고 이러한 문제점을 해결한 최적의 설계 공형에 대한 해석 결과는 Fig. 2에서 보는 것과 같다. 4번째 패스에서는 초기 설계 공형을 그대로 사용하였다. 그러나 5번째 패스에서는 최종 형상의 비대칭성을 고려한 면적 분할을 위하여 비대칭 형상의 공형을 설계하였다. 면적 분할시 최종 형상의 면적비를 기준으로 설계했으며 기울어진 각도는 다음 패스에서 작업시 변형되어지는 양을 고려하여 설정하였다. 그리고 기울어진 각도를 정확히 설계하지 않을 경우 최종 패스에서 물과 소재의 접촉이 한점으로 이루어져 소재를 안정적으로 생산하기 힘들다. 6번째 패스에서 초기 설계시 사용했던 불필요한 곡률을 제거하고 완만한 곡률을 사용하였으며 최종 패스의 공형 기울기의 대표치를 사용하여 곡률 설계의 기준으로 사용하였다. 최종 패스에서는 양쪽 측면의 폭 피침이 원하는 치수를 얻었으며 전체적으로 최적의 제품 형상을 얻은 것을 알 수 있다.

Fig. 3에서는 최적 설계를 기준으로 작업한 현장 실험 결과를 나타내었다. 4번째 패스에서는 현장에서 예측한 입측 단면의 형상과 다소 차이를 보이는 비대칭 형상의 소재가 가공되어 유한 요소법으로 예측된 결과와 다소 차이를 나타내고 있다. 5번째 패스에서는 소재가 정확히 롤 치입되지 않은 것을 알 수 있다. 이로 인하여 설계시 고려된 면적 분할을 얻을 수 없었다. 최종 패스에서 소재가 좌측 상하단 부분을 다소 채우지 못하는 현상

이 발생하였다. 그러나 최종 제품의 경우 최종 패스가 공후 이발로서 공정을 마침으로 약간의 여유 치수를 가지고 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 형상 압연 공정의 공형 설계시 유한 요소법을 이용하여 최적의 공형 설계를 얻을 수 있는 가능성을 제시하였다.

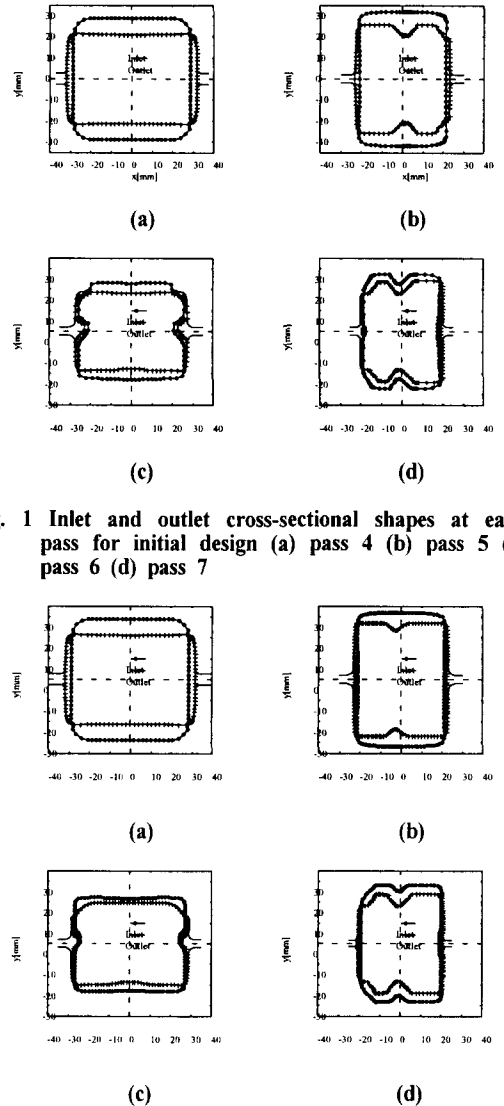


Fig. 1 Inlet and outlet cross-sectional shapes at each pass for initial design (a) pass 4 (b) pass 5 (c) pass 6 (d) pass 7

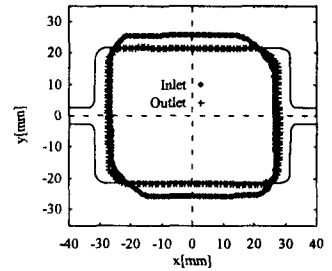
Fig. 2 Inlet and outlet cross-sectional shapes at each pass for optimal design (a) pass 4 (b) pass 5 (c) pass 6 (d) pass 7

참 고 문 헌

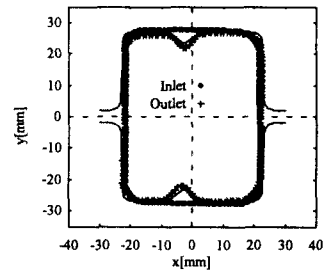
- (1) Wusatowski, Z., 1945, Iron and steel, pp. 49-54.
- (2) Sparling, L.G.M., 1961, Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 175(11), pp. 604.
- (3) Helmi, A. and Alexander, J. M., 1968, J. of Iron and Steel Institute, pp. 1110.
- (4) Beese, J. G., 1972, J. of Iron and Steel Institute, pp. 433.
- (5) Raghunathan, N. and Sheppard, T., 1989, Materials Science and Technology, Vol. 5(10), pp. 1021.
- (6) Shinokura, T. and Takai, K., 1982, J. of Applied Metalworkings, Vol. 2(2), pp. 94.
- (7) Kiuchi, M. and Yanagimoto, J., 1987, Proc. 16th NAMRC, SME, Dearborn, Michigan, pp. 34.
- (8) Mori, K. and Osakada, K., 1989, NUMIFORM 89, Balkema, pp. 337.
- (9) Kim, N., and Altan, T., 1990, ERC/NSM-B-90-01, ERC for Net Shape Manufacturing, the Ohio State University.
- (10) Park, J. J. and Oh, S. I., 1990, J. Eng. Ind. ASME Trans., Vol. 112, pp. 36.
- (11) Bertand-Corsini, C., Montimtonnet, P. and Chnot, J. L., 1989, NUMIFORM 89, Balkema, pp. 303.
- (12) Lee, Y. S. Dawson, P. R., and Dewhurst, T. B., 1989, NUMIFORM 89, Balkema, pp. 323.
- (13) Kim, H. J., Kim, T. H., and Hwang, S. M., 2000, J. of Materials Processing Tech., accepted for publication.
- (14) Chen, C. C. and Kobayashi, S., 1978, ASME Publication, AMD, Vol. 28, pp. 163.

Table 1 Analysis results for initial design

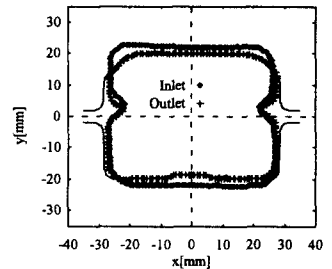
Pass No.	4	5	6	7
Temperature [$^{\circ}C$]	1090	1070	1055	1020
Reduction Ratio[%]	17.43	17.16	13.23	9.89
Max. width [mm]	63.76	46.05	54.70	39.92
Max. height [mm]	42.94	51.47	37.32	48.39
Average Effective Strain	0.3629	0.3498	0.2627	0.2199
Roll Force [kN]	282.55	221.35	192.81	150.70



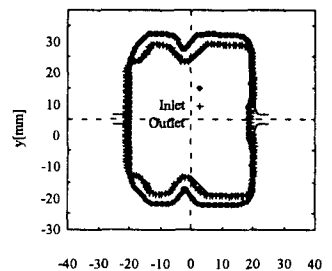
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Inlet and outlet cross-sectional shapes at each pass for experimental result (a) pass 4 (b) pass 5 (c) pass 6 (d) pass 7