한국소성가공학회 2001년도 추계학술대회 논문집 pp.162~165

콕스밀에서 평균변형율, 압하력, 단면감소율에 대한 수식모델개발

제상현* · 황상무**

Development of Online Model for Mean Effective Strain, Roll Force and Area Reduction in Bar Rolling with Three Rolls

S. H. Je 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. on-line model which is relations of mean effective strain, roll force and area reduction is derived from finite element process simultion in bar rolling with three rolls.

Key Words : On-Line Model, Shape Rolling, Effective Strain, Roll force, Area Reduction, Finite Element Method

1. 서 론

선재 압연 공정은 형상 압연 공정중 비교적 간단한 형상의 가공 공정으로 잘 알려진 공정이다. 형상 압연 공정의 목적은 소재의 단면적을 줄여 원하는 형상의 단면 형상과 기계적 성질을 얻는 것이다.

80년대 이전까지 형상 압연에 관한 연구[1-4]는 주로 실험적 방법에 의해서 행해졌다. 이러한 연구에서 제시된 수많은 실험식은 압연되는 소재에 따라서 적용이 제한되어진다. 짧은 시간에 주어진 공정의 폭 퍼짐량을 계산할 수 있지만 실험식들은 폭 퍼짐량만을 제시하고 있기 때문에 소재의 형상에 대한 정확한 결과를 얻을 수 없는 문제점을 가지고 있으며 소재에서 발생하는 결함들에 대한 정보를 주지 못하는 문제점도 가지고 있다.

본 연구에서는 3차원 정상 상태 강소성 유한 요소법을 이용한 컴퓨터 코드를 이용하여 포항제철 제 2선재 압연 공정중 콕스밀 공정을 해석하였고, 콕스밀의 K1 공정의 수식모델 결과를 나타내었다.

2. 선재압연공정의 유한요소 수식화

2.1 소재의 소성 유동 유한요소 수식화

변형되고 있는 소재를 , 소재의 표면 경계을 Γ 로 나타낸다. 소재의 변형 속도 $u_i = \overline{u_i}$ 로 주어진 경계 Γ_{u_i} , 표면력이 h_i 로 주어진 경계 Γ_{h_i} , 롤과 소재가 접촉하는 경계를 Γ_c 로 나타낸다. 소재의 소성 유동과 관련된 경계치 문제는 다음과 같이 속도장 u_i 와 정수압 p 를 구하는 문제가 된다.

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과
** 포항공과대학교 기계공학과

▶ 평형 방정식

$$\sigma_{ij,j}+f_i=0 \tag{2.1}$$

▶ 구성 방정식

$$\sigma_{ij}=-p\delta_{ij}+\sigma_{ij}' \tag{2.2}$$

$$\sigma_{ij}'=\frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\varepsilon}}\delta_{ij} \tag{2.3}$$

여기서 온도에 대한 소성 변형의 유동 응력 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\sigma}=f(\bar{\varepsilon},\dot{\bar{\varepsilon}},T) \tag{2.4}$$

▶ 비압축성 조건

$$u_{i,i}=0 \tag{2.5}$$

▶ 경계조건

$$\sigma_{ij}n_j=h_i \quad on \quad \Gamma_{h_i} \tag{2.6}$$

$$u_i=\overline{u_i} \quad on \quad \Gamma_{u_i} \tag{2.7}$$

$$\sigma_n=-\xi(u_n-u_n^D) \quad on \quad \Gamma_c \tag{2.8}$$

$$\sigma_t=-\mu\sigma_n g(\Delta u^\mu) \quad on \quad \Gamma_c \tag{2.9}$$

여기서 n과 t는 각각 롤의 속도에 대한 소재의 상대속도 벡터 $\Delta\vec{u}$의 방향에 수직 성분과 접선 성분을 나타낸다. 식 (2.8)에서 수직 응력의 계산과 접촉 조건을 만족시키기 위해서 벌칙(penalty) 방법을 사용한다.
접촉면에서 정 마찰과 미끄럼 마찰을 처리하기 위해서 식 (2.9)에서 함수 g는 Chen과 Kobayashi에 의하여 제안된 식을 사용하였다. g에 대한 식은 다음과 같다.

$$g(\Delta u^\rho)=-\frac{2}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{|\Delta u^\rho|}{a}\right) \tag{2.10}$$

여기서 는 매우 큰 양의 상수이다.
위의 경계치 문제를 적분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_\Omega \sigma_{ij}'\omega_{ij}'d\Omega-\int_\Omega p\omega_{ii}d\Omega-\int_\Omega f_i\omega_i d\Omega-\int_\Omega u_{i,i}qd\Omega-\sum_\alpha\int_{\Gamma_{h_\alpha}}h_\alpha\omega_\alpha d\Gamma$$
$$-\int_{\Gamma_c}-\xi(u_n-u_n^D)\omega_n d\Gamma-\int_{\Gamma_c}\mu\xi(u_n-u_n^D)g(\Delta\vec{u})\omega_t d\Gamma=0 \tag{2.11}$$

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

유한 요소 근사화 과정에서 xi, ui, p, T, ω_i 와 q는 다음 과 같이 근사화된다.

$$x_i=N_{iL}X_L \tag{2.12}$$
$$u_i=N_{iL}V_L \tag{2.13}$$
$$p=H_MP_M \tag{2.14}$$
$$T=N_kT_k \tag{2.15}$$
$$\omega_i=N_{iL}W_L \tag{2.16}$$
$$q=H_MQ_M \tag{2.17}$$

여기서 NiL, HM와 NK는 기본 함수(basis function)이고 XL, VL, PM, TK 및 QK는 절점값 및 요소값을 나타낸다. 식(2.12)-(2.17)을 식(2.11)에 적용하면 다음과 같은 비선형 대수 방정식으로 나타난다.

$$h_1(X,\bar{\varepsilon},\dot{\bar{\varepsilon}},V,P,T,d)=0 \tag{2.18}$$

여기서 X, V, P, T는 각각 XL, VL, PM, TK이다. 와 는 유효 변형률과 유효 변형률 속도 벡터를 나타내고 d는 공정 변수를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 POSCO 제 2 선재 공장에서 생산되는 제품중 ϕ 30 공정의 콕스밀 공정을 해석하였다. 콕스밀의 4개의 스탠드중 K1 스탠드에 대해서 단면감소율에 대한 변형율과 압하력 수식모델을 개발 하였다.

3.1 ϕ 30 공정중 콕스밀 공정 해석

개발된 다단 선재 공정 유한요소 코드를 이용하여 최종직경이 ϕ 30 인 제품의 공정중 3개의 롤을 가지는 콕스밀 공정을 해석하였다. 해석에 사용된 공정조건은 Table 1에서 보는 것과 같다.
해석결과로 얻어진 단면형상은 Fig 1에서 보는 것과 같고 유효 변형율 분포는 Fig 2에서 보는 것과 같다.

3.2 K1 스탠드에서 수식 모델 개발

3.2.1 입력 크기 변화

K1 스탠드의 공정조건 중 다른 조건은 고정시키고 입력 크기만 기존의 36.5 mm에서 변화를 주어 나온 결과를 이용하여 수식모델을 개발하였다. 입력 크기를 33mm에서 40mm까지 1mm 씩 변화 시켜가며 해석해 보았다.

해석결과는 Table 2와 같다. 해석결과에서 단면 감소율에 대한 평균 유효 변형율과 압하력 수식이 각 각 일차식의 함수관계를 가지는 것을 알 수 있고 Data Linear Fit을 통해 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\bar{\varepsilon} = a \times A + b \quad (a = 0.01789,\ b = 0.01885)$$

$$F = a \times A + b \quad (a = 8.08454,\ b = 3.13202)$$

A: 단면감소율 $\bar{\varepsilon}$:평균유효변형율 F: 압하력

3.2.2 롤의 위치 변화

K1 스탠드의 공정조건 중 다른 조건은 고정시키고 롤의 위치 즉, 소재 중심에서 롤 중심까지의 거리를 기존의 157 mm에서 변화를 주어 나온 결과를 이용하여 수식모델을 개발하였다. 그 크기는 156mm 에서 159mm 까지 0.5mm 씩 변화 시켜가며 해석해 보았다.

해석결과는 Table 3와 같다. 해석결과에서 단면 감소율에 대한 평균 유효 변형율과 압하력 수식이 각 각 일차식의 함수관계를 가지는 것을 알 수 있고 Data Linear Fit을 통해 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\bar{\varepsilon} = a \times A + b \quad (a = 0.01791,\ b = 0.02024)$$

$$F = a \times A + b \quad (a = 6.74512,\ b = 14.74405)$$

A: 단면감소율 $\bar{\varepsilon}$:평균유효변형율 F: 압하력

Fig 3의 (a) 에서 보는 것과 같이 평균 변형율에 관한 수식이 3.2.1에서 구한 것과 거의 같음을 알 수 있다. 즉 서로 다른 변수를 가지는 공정에서 단면감소율에 대한 평균 유효 변형율 곡선이 일치했다는 말은 콕스밀 K1 공정에서 평균 유효 변형율은 단면감소율의 함수임을 알 수 있다. 이는 ϕ 50 공정에서 적용하여 확인해본 결과 상당히 정확한 식이라는 것을 Fig 4 에 잘 나타나 있다. Fig 4의 (a) 는 ϕ50 공정의 입력 크기 변화에서 수식을 이용한 결과와 FEM 해석 결과를 비교해본 것이고, (b) 는 ϕ50 공정의 롤 위치 변화에서 결과를 수식을 이용한 결과와 FEM 해석 결과를 비교해본 것이다.

4. 결 론

선재 압연 공정중 콕스밀 공정 부분의 해석을 하였다. 사용된 시뮬레이터의 예측정밀도는 이 연구 이전에 시뮬레이터 개발자의 연구[5]에서 검증이 된 바 있다. 각 공정에서 단면 감소율에 대한 평균 변형율, 압하력 등이 선형으로 나타났다. 단면 감소율과 평균 변형율에 대한 수식을 다른 공정에 적용하여 평균 변형율을 상당히 정확하게 예측하였다. 현재 포항제철의 실제 공정의 실측치를 정확하게 예측하는 온라인 모델 개발 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

(1) L.G.M. Sparling, "Formulation for spread in hot flat rolling." Proc. Inst., Mech. Engrs, 175(11),pp.604-617, 1961.

(2) J.G.Beese, "Ratio of lateral strain to thickness strain during hot rolling of steel slabs," J. of Iron and Steel Institute, pp.433-436,1972

(3) T. Sheppard and D.S. Wright, "Parameter affecting lateral deformation in slabbing mills," Metals Technology, 8(1), pp.46-57,1981

(4) N. Raghunathan and T. sheppard, "Lateral spread during slab rolling," Materials Science and Technology, 5(10),pp1021-1026,1989.

(3) Kim, H. J., Kim, T. H., and Hwang, S. M., 2000, J. of Materals Processing Tech., accepted for publication.

Table. 1 conditions for schedule

공정조건	
소재	탄소강(C=0.1%)
온도	1000도
마찰계수	0.35
Input Size (지름)	36.5 mm (K1)
Stand	K1, K2, K3, K4
롤 회전속도	248 rpm(K1,K2) 446 rpm(K3,K4)
롤 중심에서 input 중심까지	157 mm

Table. 2 result of simulations

Input size	단면감소율 (%)	압하력 (kN)	평균유효변형율
33 mm	2.82%	27.8659	0.06821
34 mm	4.65%	42.7753	0.10629
35 mm	6.69%	56.3279	0.13667
36 mm	8.68 %	71.6748	0.17373
37 mm	10.63 %	86.1602	0.20807
38 mm	12.83 %	104.8997	0.24775
39 mm	14.87 %	121.9234	0.28228
40 mm	17.03 %	145.6914	0.32690

Table. 3 result of simulations

Die center (mm)	단면감소율 (%)	압하력 (kN)	평균 유효 변형율
159	1.667096	24.66562	0.29322
158.5	3.443882	38.39478	0.24153
158	5.39004	51.7324	0.19795
157.5	7.550002	66.31452	0.15563
157	9.893714	81.7093	0.11738
156.5	12.43869	98.8566	0.08221
156	15.21278	116.5381	0.04937

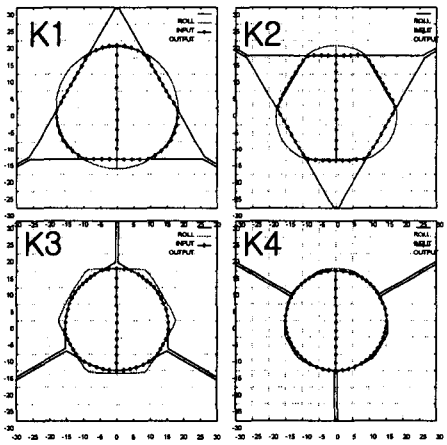


Fig. 1 Schedule of Kocks mill (K1, K2, K3, K4)

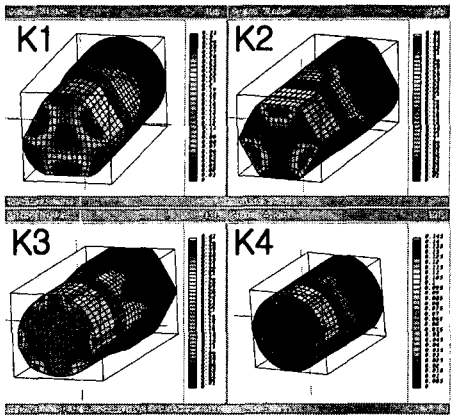
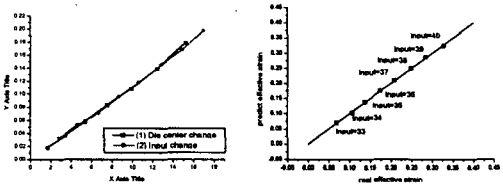
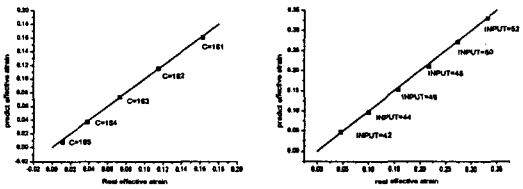


Fig. 2 effective strain of each stand



(a) (b)

Fig. 3 on-line model (a) comparing 2 model (b) prediction for ϕ 30



(a) (b)

Fig. 4 prediction for ϕ 50 (a) changing of Input size (b) changing roll position