

〈論 文〉

유한요소법에 의한 H형강 압연공정의 해석

신현우* · 김낙수** · 박종진**

(1992년 10월 5일 접수)

The Analysis of H-Shape Rolling by the Finite Element Method

Hyun-Woo Shin, Naksoo Kim and Jong-Jin Park

Key Words : H-Shape Rolling (H형강압연), Multi-Pass Process (다단공정), Breakdown Rolling (브레이크다운 압연), Finite Element Method (유한요소법), Slab Method (슬래브법)

Abstract

Shape rolling processes to produce H-section beams are numerically simulated by the simplified three-dimensional finite element method. The 2-dimensional finite element method, used for the generalized plane strain condition, is combined with the slab method. Computer simulation results of the 19-passes in H-section beam rolling in practice include the grid distortions, the cross-sectional area changes, the roll separating forces, and the roll torques. Also, the amount of side spread can be found during the multi-pass rolling simulations. The finite element mesh system is remeshed with I-DEAS whenever the billet distorts severely. This study would contribute to CAD/CAM of shape rolling process through the optimal roll pass schedule.

1. 서 론

압연가공은 균일한 단면형상을 가진 긴 제품을 만드는데 있어 그 경제성과 다양성으로 소성가공 분야에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 이 가공방법은 다른 소성가공에 비하여 작업이 신속하고 생산비가 저렴하여 대량생산에 적합하며, 소재 내부의 기공을 압착하며 적당한 소성 변형량을 가하여 균등하고 우수한 기계적 성질을 준다.

최근에는 연속주조법의 발달로 인해 형강 및 평판압연의 생산성이 증대되고 있으며 고부가가치 산업으로의 전환에 따라 다양한 합금과 형상의 소재를 경제적으로 압연할 방법을 강구하고 있다. 그러나 압연장치는 막대한 초기투자를 필요로 하고 압연 공정변수의 최적설계는 상당히 복잡한 문제들을 수

반한다. 국내적으로는 형강의 생산량이 증대되고 그에 따른 생산성의 제고가 시급히 요청되고 있으나, 이론적인 뒷받침없이 주로 현장에서의 경험에 의존하여 공정설계가 이루어지고 있어서 설계 및 생산의 조직화, 체계화, 전산화에 한계를 갖고 있다. 더욱이, 고부가가치산업 (예를 들면 자동차, 우주, 항공기산업)을 지향하는 현 시점에서 다양한 소재의 생산성 향상에 필요한 연구는 매우 시급하다고 하겠다.

평판압연에 대하여는 공정의 기하학적 단순성으로 인해 지금까지 실험적, 수치해석적 연구가 많이 행해져 왔으나, 구조용 형강(H-beam, I-beam, T-beam, 채널강 등)과 레일, 일반목적 및 특수목적용 각종 봉강등을 생산하는 형강압연에 대하여는, 공정의 복잡성으로 인해 체계적인 연구, 특히 수치해석적 연구가 매우 미미한 실정이다. 형강압연이 평판압연과 다른점은 압연 롤 사이에서 소재가 3차원적으로 복잡하게 변형한다는 것이다. 이러한 복

*정회원, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

**정회원, 홍익대학교 기계공학과

잡성에도 불구하고 공정의 설계가 정량적으로 이루어질 수 있으려면 소재의 변형과 소요동력이 미리 예측되어야 한다. 이를 위해서는 필수적으로 컴퓨터를 이용한 공정의 수치적 해석과 물리적 모형에 의한 실험적 검증이 수반되어, 보다 근본적으로 공정을 이해할 수 있어야 한다. 이와같이 검증된 수치해석방법을 근간으로 하여 압연공정 설계 및 생산의 CAD/CAM화를 시도할 수 있다.

압연에 관한 많은 이론들과 수치적 계산들은 대개 평면변형하에서 압연하중과 압연토크를 예측하는 것들이었으나 이러한 방법들은 평판압연인 경우에도 폭대 두께비가 10 : 1보다 작은 재료를 압연하는 경우에만 유효하며 폭방향으로의 변형, 즉 폭퍼짐 현상을 규명하지 못하는 제약이 있었다.

따라서 압연의 3차원적 소성변형현상에 관한 연구는 평판압연의 폭퍼짐을 계산하는 것으로부터 시작되었다. 완전강소성 재료에서의 극치정리(extremum principle)를 수치계산법에 적용하여 압연가공의 3차원적 소성변형이 해석되었다.⁽¹⁾ 그 이후 단순화된 3차원 강소성 유한요소법을 이용한 폭퍼짐 해석이 이루어졌다.⁽²⁾ 형강압연(shape rolling)은 재료의 유동이 매우 복잡하여 수치적 해석을 구하기보다는 실험적 연구들이 주로 이루어졌다.^(3~7) 최근 3차원 유한요소법을 이용한 형강압연의 해석이 이루어졌으나,^(8~10) 대개 다단공정으로 이루어지는 형강압연의 공정설계에의 적용에는 막대한 계산시간을 필요로 하는 단점이 있다.

최근 압연공정 중에 압연방향에 수직한 소재의 단면이 평면으로 유지된다는 가정하에 계산량이 대폭 감소된 3차원 해석기법이 개발되어 평판압연과 형강압연(H-형압연)이 수치해석된 바 있고,^(11,12) 이를 확장하여 다단 I-형강압연에 적용하고 이를 플라스틱성(plasticine)을 재료로 한 물리적 모형실험 결과와 비교분석 하였다.⁽¹³⁾

본 연구에서는 앞서 개발된 3차원 강소성 유한요소법⁽¹³⁾을 이용하여 H-형강 압연공정을 해석하여 그 타당성을 검토하고 이를 실제의 공정 설계에 이용할 수 있도록 하였다.

2. 이론해석

압연공정과 같은 동적 정상상태의 소성가공과정은 소재의 진행방향에 수직한 단면에 일반화된 평면변형조건(generalized plane strain condition)을

적용시켜 2차원 강소성 유한요소법을 사용하므로써 수치적으로 해석할 수 있다. 일반화된 평면변형조건이란 평면에 수직한 방향으로 일정한 변형률을 허용한다는 것을 의미한다. 다시 말해서 진행방향에 수직한 단면의 속도분포 혹은 변형률 속도분포가 일정하다고 보는 것이므로 평면이 변형 후에도 평면을 유지한다는 가정이다. 이러한 가정은 압연, 압출과 인발 공정의 해석에는 적용이 가능하나 무윤활이나 직각 다이에 의한 압출과 같이 소재의 진행방향으로 속도분포의 차가 큰 경우에는 매우 큰 오차를 수반하는 단점이 있다.

소재는 강소성체이며 Hill이 제안한 관련 유동법칙(associated flow rule)을 만족한다고 가정하였다. 한 점에서 마찰력은 접촉하고 있는 공구표면 상대속도와 반대방향을 가지며, 단위 면적당의 마찰력은 $\tau = mk$ 를 따른다고 가정하였으며, 여기서 k 는 순수전단 항복응력, m 은 마찰비정수(friction factor)로서 0과 1사이의 값을 가진다. Fig. 1에 보인 바와 같이 소재를 진행방향으로 몇 개의 슬래브 요소로 나누고, 각 슬래브 요소의 단면에 대하여 2차원 강소성 유한요소법을 적용시킨다. 슬래브 요소에서의 외력과 응력분포는 진행방향의 힘의 평형을 만족하여야 하며 그 식들은 변분식(variational formulation)으로부터 얻어진다. 소재와 공구 경계면의 3차원 형상을 고려하여 마찰력과 압력을 포함한 전 외력(total external force)이 계산된다.

표면 S 로 둘러싸인 체적 V 의 강소성체를 생각한다. 표면의 일부 S_f 에 단위 면적당 표면력 t^* 가

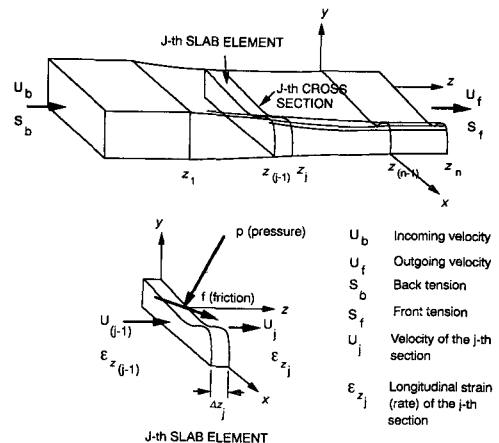


Fig. 1 Schematic presentation of the finite and slab element method to shape rolling analysis

작용하고 \$S_u\$에 속도가 알려져 있으면 강소성 경계치 문제로서 다음의 지배방정식을 만족한다.

평형방정식 : \$\sigma_{ij,j} = 0\$ in \$V\$ (1)

경계조건 : \$v_i = v_i^*\$ on \$S_U\$
 \$t_i = t_i^*\$ on \$S_F\$ (2)

구성식 : \$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij}\$ (3)

적합조건 : \$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i})\$ (4)

여기서 \$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}\$, \$\bar{\sigma} = \sqrt{(3/2) \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}}\$이며 \$\dot{\bar{\epsilon}}\$는 상당 변형률속도, \$\bar{\sigma}\$는 상당응력을 나타낸다.

식(1)과 식(2)의 약형식(weak form)을 취하면 다음과 같다.

$$\int_V \sigma_{ij,j} \delta v_i dV + \int_S (t_i^* - t_i) \delta v_i dS = 0 \quad (5)$$

식(5)를 식(1)~식(4)의 관계를 이용하여 정리하고 체적 불변성조건 \$\dot{\epsilon}_{ii} = 0\$을 부가하면 다음과 같이 된다.

$$\int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + k \int_V \dot{\epsilon}_{ii} \delta \dot{\epsilon}_{ii} dV - \int_{S_F} t_i^* \delta v_i dS = 0 \quad (6)$$

여기서 \$k\$는 벌칙상수(penalty constant)로서 큰 값 (\$10^5 \sim 10^6\$)을 가진다. 한편 식(6)은 \$x-y\$단면상에서 길이방향으로 속도와 변형률 속도가 일정하다는 가정에 의해서 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Delta z} \delta \bar{v}_T \left[\int_A \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \bar{v} dA + k \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{c} \mathbf{c}^T \mathbf{B} \bar{v} dA \right. \\ & \quad \left. + k \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{c} \dot{\bar{\epsilon}}_z dA - \int_{L_j} \mathbf{N}^T \mathbf{t}^* dL \right] dz \\ & \quad + \left[\int_{\Delta z} \int_A \left(\frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\bar{\epsilon}}_z + \sigma_m \right) dA \delta \dot{\bar{\epsilon}}_z dz \right. \\ & \quad \left. - \int_{\Delta z} \int_{L_j} t_z^* dL \delta v_z dz \right] = 0 \quad (7) \end{aligned}$$

위 식의 첫번째 항은 \$z=z_j\$와 \$z=z_{j-1}\$에서 \$\delta v_z = 0\$이므로 0이 되고 \$\delta \bar{v}\$와 \$\delta v_z\$는 서로 독립이므로 식(7)을 만족시키기 위해서는 다음 두 식을 동시에 풀어야 하다.

$$\begin{aligned} \Psi(\bar{v}) &= \int_A \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \mathbf{B} \mathbf{D} \mathbf{B} \bar{v} dA + k \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{c} \mathbf{c}^T \mathbf{B} \bar{v} dA \\ & \quad + k \int_A \mathbf{B}^T \mathbf{c} \dot{\bar{\epsilon}}_z dA - \int_{L_j} \mathbf{N}^T \mathbf{t}^* dL = 0 \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi(\dot{\bar{\epsilon}}_z) &= \left[\int_A \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\bar{\epsilon}}_z dA + \int_A \sigma_m dA \right]_{z_{j-1}}^{z_j} \\ & \quad + \int_{\Delta z} \int_A t_z^* dL dz = 0 \quad (9) \end{aligned}$$

식(8)은 일반화된 평면변형조건 2차원 유한 요소식이 되고 식(9)는 슬래브법에 의한 \$z\$방향 힘의 평형조건을 나타내게 된다. 여기서 변형률 행렬 \$\mathbf{B}\$에는 일반적인 평면 변형수식화에 의해 만들어지는 항에 별도의 부가적인 항들이 포함된다.

식(9)로부터 길이방향 변형률 속도 \$\dot{\bar{\epsilon}}_z\$는 다음과 같이 결정된다.

식(9)를 \$\sigma_z = \sigma_m + \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\bar{\epsilon}}_z\$를 이용하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Pi(\dot{\bar{\epsilon}}_z) &= (\dot{\bar{\epsilon}}_z)_j \int_{A_j} \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} dA + \int_{A_j} \sigma_m dA \\ & \quad - \int_{A_{j-1}} \sigma_z dA + \int_{\Delta z} \int_{L_j} t_z^* dL dz = 0 \quad (10) \end{aligned}$$

위 식은 함수 \$\Pi(\dot{\bar{\epsilon}}_z)\$가 \$(\dot{\bar{\epsilon}}_z)_j\$에 비선형적으로 의존함을 나타낸다. 이것을 풀기 위해 Newton-Raphson 방법을 적용시키면 다음과 같이 된다.

$$\Pi(\dot{\bar{\epsilon}}_z) + (\Delta \dot{\bar{\epsilon}}_z) \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{\bar{\epsilon}}_z} = 0 \quad (11)$$

식(11)로부터

$$\begin{aligned} (\Delta \dot{\bar{\epsilon}}_z)_j &= \frac{\int_{A_j} \sigma_z dA - \int_{A_{j-1}} \int_{L_j} t_z^* dL dz - \int_{A_j} \sigma_m dA - (\dot{\bar{\epsilon}}_z)_j \int_{A_j} \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} dA}{\int_{A_j} \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} dA + \int_{A_j} \frac{4}{9} \frac{1}{\bar{\epsilon}^2} \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}} - \bar{\sigma} \right) \bar{\epsilon}_z^2 dA} \quad (12) \end{aligned}$$

가 얻어진다. 이로부터 \$\Delta \dot{\bar{\epsilon}}_z\$를 구하여

$$(\dot{\bar{\epsilon}}_z)_j^{new} = (\dot{\bar{\epsilon}}_z)_j^{old} + \beta (\Delta \dot{\bar{\epsilon}}_z)_j \quad (13)$$

와 같이하여 \$\dot{\bar{\epsilon}}_z\$를 보정한다. 여기서 \$\beta\$는 감속계수로서 해의 발산을 방지하기 위하여 0.1~0.2로부터 시작하여 1까지 차츰 증가시킨다.

전체적인 계산 순서는 다음과 같다. 먼저 \$\dot{\bar{\epsilon}}_z\$를 가정하여 식(8)을 유한요소법을 이용하여 풀고, 여기서 계산된 속도분포와 외력 등을 식(9)에 적용하여 \$Z\$방향 힘의 평형식을 만족하도록 \$\dot{\bar{\epsilon}}_z\$를 구한다. 즉, 식(10)~식(13)을 통해서 구한 \$\dot{\bar{\epsilon}}_z\$는 다시 식(8)에 대입되어 \$x-y\$방향의 속도분포가 계산된다. 이러한 반복과정을 거치면서 속도분포가 식(8)과 식(9)를 동시에 만족시킬 때 해가 수렴되었다고 판

단하며, 반복회수는 각 단면마다 대개 20회 미만이다.

3. 유한요소해석

직사각형 빌렛으로부터 H형강을 생산하는 압연 공정은 크게 세 부분으로 나뉘어진다. 먼저 직사각형의 빌렛으로부터 어느 정도의 H형상을 만드는 브레이크다운 압연(break down rolling)공정과 여기서 만들어진 중간 소재를 가지고 거친 만능압연(roughing universal rolling)공정, 다듬질 만능 압연(finishing universal rolling)공정을 거쳐 완성된 제품이 나오게 된다. 이중 브레이크다운 압연공정은 상하 두개의 롤로써 압연을 수행하는 압연공정으로서 브레이크다운 압연공정에서 중간 소재가 적절히 만들어졌을 경우에는 그다지 큰 문제없이 압연이 수행된다. 그러므로 최초의 직사각형 빌렛으로부터 만능 압연공정을 위한 중간 소재를 제조하는 공정은 재료의 변형을 적절히 분배하는 공형의 형상, 압하량의 조절, 구동모터의 능력을 고려한 압연 토크를 감안하여 공정설계를 하여야 한다.

본 연구에서는 250 mm×250 mm 규격의 H형강 제조를 위한 초기 브레이크다운 압연공정을 해석하여 단면의 격자형상, 단면적 변화, 압하력, 압연 토오크, 상당 변형률 및 상당 변형률 속도의 분포 등을 구하여 설계과정에 직접 응용할 수 있도록 하였다. 이 초기 브레이크 압연공정은 모두 19개의 연속된 압연공정으로 이루어져 있으며 Fig. 2와 같이 서로 형상이 다른 4쌍의 형상을 적절히 사용하여 압연을 수행하게 된다. 소재는 초기 단면이 350 mm×480 mm인 직사각형 빌렛이며 재료는 탄소강 SS41로서 1200°C의 열간임을 고려하여 응력-변형률 관계는 $\bar{\sigma} = 9.039 \dot{\epsilon}^{0.1475} \epsilon^{0.175} (\text{kgf/mm}^2)$ (14)을 내삽법을 이용하여 얻었으며, 로울과 재료사이의 마

찰비정수는 $m=0.5$ 라고 가정하였다. 소재의 단면 형상이 직사각형이고 해석의 대상이 상하좌우 대칭이므로 전체빌렛의 1/4를 택하여 요소수 132개, 절점수 156개로 유한요소해석을 수행하였다.

1번 공정에서는 소재 단면의 높이가 최초의 480 mm에서 460 mm로 압하되고, 2번 공정에서는 420 mm로, 3번 공정에는 380 mm로, 4번공정에서는 350 mm로 압하된다. 1번부터 4번까지의 공정은 모두 K3 공형에서 수행되는데 이는 모두 평압연에 해당한다. 4번 공정이 끝난 후 재료는 압연방향을 중심으로 90°회전된 후 5번 공정인 K1공형에서 압하된다. 5번 공정에는 웨브(web)가 250 mm로 압하되며, 6번 공정에서는 190 mm로, 7번 공정에서는 148 mm로, 8번 공정에는 120 mm로 압하된다. 5번부터 8번 공정까지는 모두 K1공형에서 수행된다. 9번, 10번 공정은 K2 공형으로 압하되는데 웨브 부분은 성형되지 않고 주로 플랜지의 폭을 좁히고, 웨브부분을 좌우로 확장하는 공정이 된다. 5번부터 10번 공정을 거치면서 소재가 플래시 부분으로 많이 밀려 나가게 되며 이를 완화시키기 위해 다시 소재를 압연방향을 중심으로 90° 회전시켜 K3 공형을 이용하여 평압연을 수행한다. 이것이 11번, 12번 공정이다.

13번 공정부터는 플랜지 부분이 K1 보다 좁은 K2 공형을 이용하여 압연하게 된다. 이미 1번~12번 공정을 거치면서 소재가 심한 변형을 받았기 때문에 유한요소 해석을 지속시키기 위해서는 요소망 재구성이 필수적이다. 본 연구에서는 심하게 변형된 요소들의 요소망 재구성은 상용 프로그램인 I-DEAS의 요소망 자동 생성 모듈을 이용하였다. 주 프로그램의 출력을 I-DEAS의 universal file로 바꾸어 소재 단면의 경계 요소점의 좌표를 I-DEAS로 읽어들이고 후 요소망 생성을 수행한다. 적절한 요소망이 생성되었다고 판단되었을 때 이것을 다시 새로운 입력 데이터로 바꾸어 주 프로그램을 수행시키게 된다.

13번, 14번 공정에서는 K2 공정을 이용하여 양쪽 플랜지 사이의 간격을 넓히고 플랜지의 폭을 좁힌다. 또한 웨브의 두께는 13번 공정에서 113 mm, 14번 공정에서는 88 mm로 얇아진다. 15번, 16번 공정은 11번, 12번 공정과 마찬가지로 소재를 90° 돌려서 K3 공형을 이용하여 평압연을 수행하여 플래시로 나온 부분을 다시 줄여준다. 17번, 18번 공정에서는 소재를 90° 돌린 후 다시 K2 공형을 이

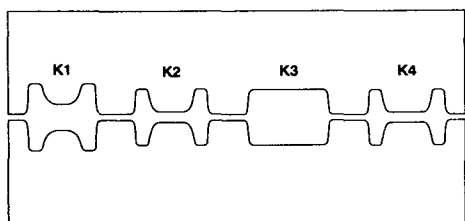
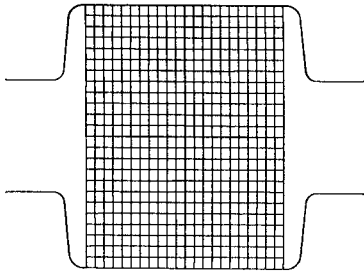
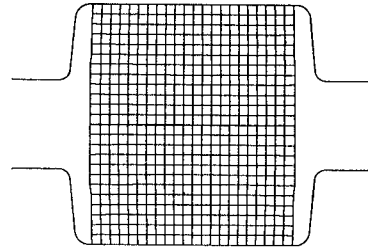


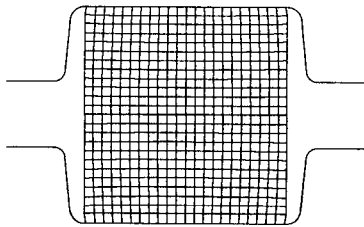
Fig. 2 Roll shapes used in the analysis



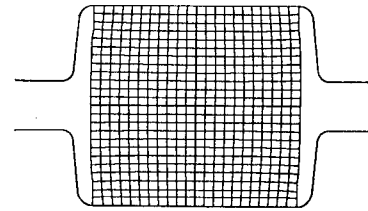
(a) 1-st pass



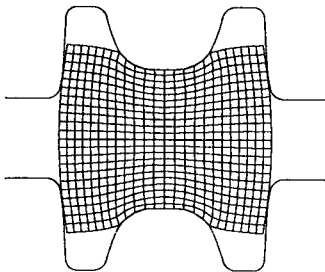
(b) 2-nd pass



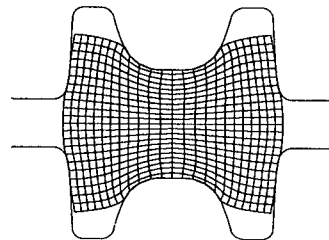
(c) 3-rd pass



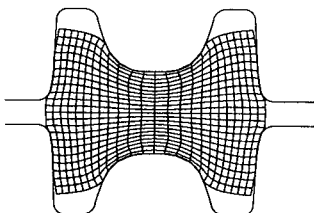
(d) 4-th pass



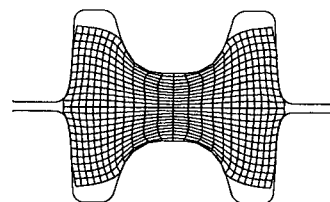
(e) 5-th pass



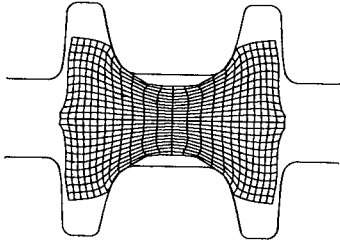
(f) 6-th pass



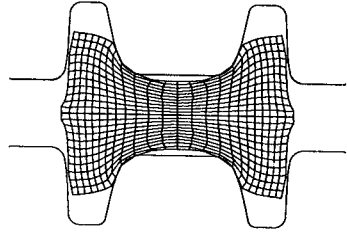
(g) 7-th pass



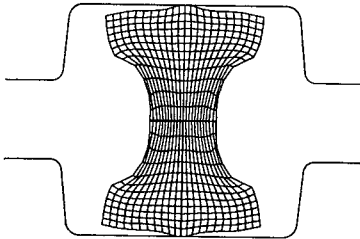
(h) 8-th pass



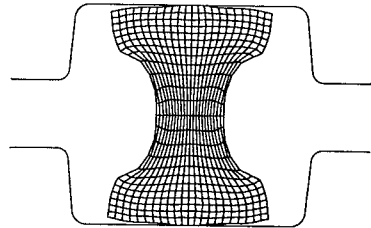
(i) 9-th pass



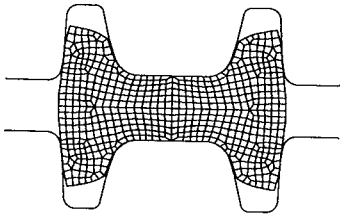
(j) 10-th pass



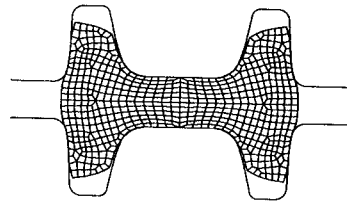
(k) 11-th pass



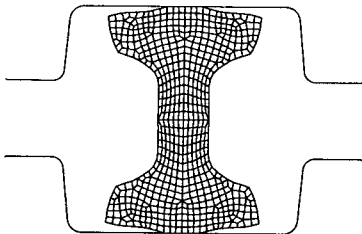
(l) 12-th pass



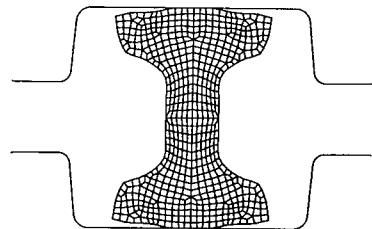
(m) 13-th pass



(n) 14-th pass



(o) 15-th pass



(p) 16-th pass

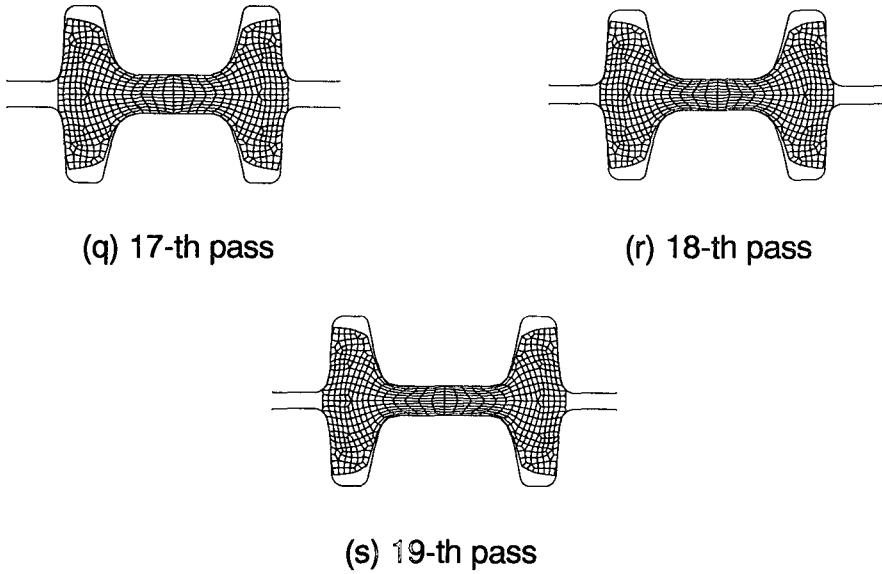


Fig. 3 Grid distortion on cross-sections

용하여 웨브를 얇게하면서 플랜지의 높이를 높여준다. 17번 공정에서는 웨브두께가 68 mm, 18번 공정에서는 55 mm가 된다.

19번 공정은 브레이크 다운 압연기로 압연하는 가장 마지막 공정으로서 만능 압연기로 들어가는 최종형상을 조정해 준다. 웨브의 두께는 50 mm이며 Fig. 3 (s)에서 볼 수 있듯이 플랜지 부분이 팽차지는 않는다. 이것은 정량적인 차이는 있겠지만 실제 생산공정과도 동일한 형상인데 그 이유는 이것이 최종제품이 아니므로 공형에 팽차게 압연하여 동력을 소모할 필요가 없기 때문이다.

단면의 형상변화에서 폭퍼짐(side spread)은 압연 공정 설계에 있어서 매우 중요한 정보이다. 폭

퍼짐이 크면 5번~8번공정 사이에 플래시가 많이 발생하게 되고 계속 공정이 진행되어 11번, 12번 공정에 이르러서는 소재가 겹치는 결함이 발생할 가능성이 매우 높다. 이러한 결함을 방지하기 위해서는 초기 빌렛의 크기, 롤의 형상, 압하율의 조절 등이 매우 중요하다.

Fig. 4는 공정이 진행함에 따라 단면적이 어떻게 변화하는가를 나타내는 것이며 1번 공정부터 8번 공정까지는 계속 단면적이 감소하여 최초 단면적의 약 반이 된다. 9번 공정부터 12번 공정까지는 전체적으로 단면의 형상을 조정하는 공정이므로 단면적의 변화는 심하지 않다. 13번, 14번 공정을 거치면서 단면적이 약간 감소되며 다시 15번, 16번 공정

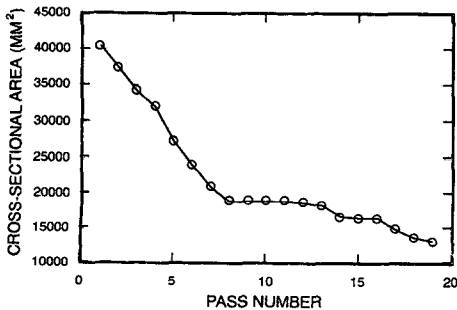


Fig. 4 Reduction of cross-sectional area

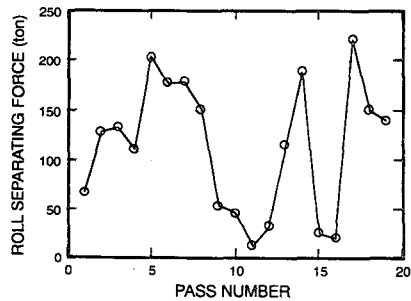


Fig. 5 Variation of roll separating force

으로 형상이 조정된 후 17번~19번 공정으로 최종 형상으로 압연된다. 1번~19번 공정까지의 단면적은 초기로부터 약 68.8%가 줄어들며, 이것은 초기 빌렛의 길이는 19개의 공정을 거치면서 약 3.2배로 늘어난다는 것을 나타낸다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 압하력은 대개 100~200 ton 정도로 압연이 수행되며 단면이 감소되기보다는 단면 형상의 조정이 이루어지는 공정 즉 9번~12번 공정, 15번, 16번 공정에서는 아주 작은 압하력이 계산된다.

토크와 동력의 크기는 압연 롤의 구동모터 용량과 관계된 것으로서 압연 설비의 능력에 따라 조정해야 할 주요한 설계 변수이다. 압연 토크는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 압하력과는 조금 다른 양상을 나타내고 있는데 이는 토오크가 주로 접촉면에 비례하여 증가하기 때문이다. 즉 형상을 조정하는 9번~12번 공정이나 15번, 16번 공정에서는 토오크가 매우 작고, 단면적의 변화는 심하지 않아도 형상의 변화를 위하여 접촉부위가 넓은 공정, 즉 1번~8번 공정, 17번~19번 공정에서는 상당히

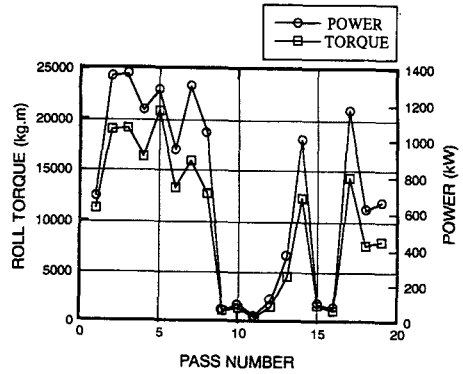


Fig. 6 Variation of roll torque and power

큰 토크를 나타낸다. 각 공정에 따라 롤 속도가 60~80 rpm으로 각각 다르기 때문에 토크와 동력이 약간 다른 경향을 보이고 있다.

Fig. 7은 4번, 8번, 14번, 19번 공정의 변형 양상을 3차원적으로 나타낸 것으로서 1번부터 4번 공정까지는 약간의 폭퍼짐이 발생한다. 8번 공정에서는 주로 웨브부분이 성형되며 약간의 플래시가 발

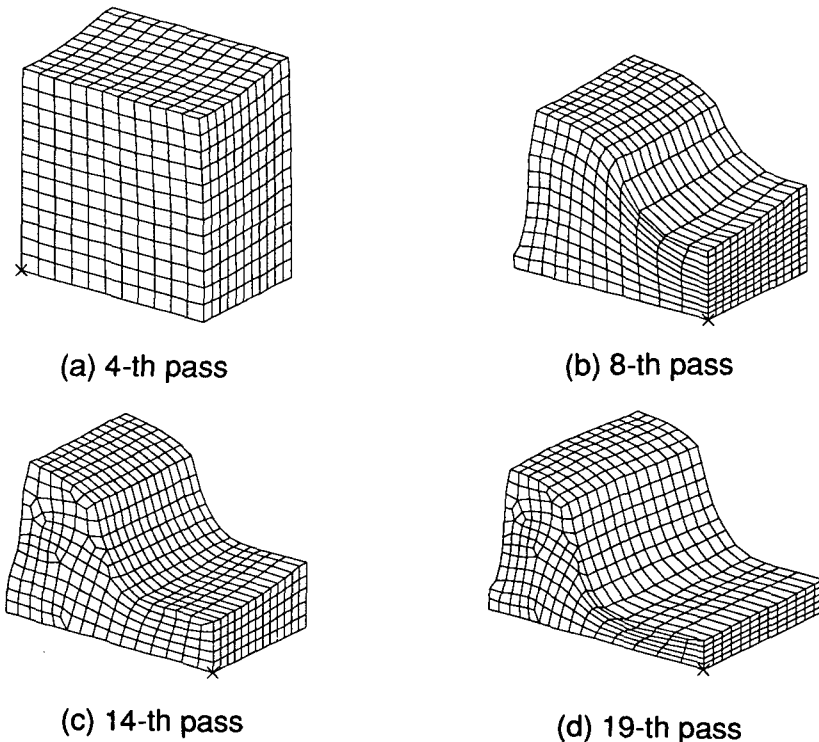


Fig. 7 Three-dimensional views of the grid distortions (One quarter of the billet is shown)

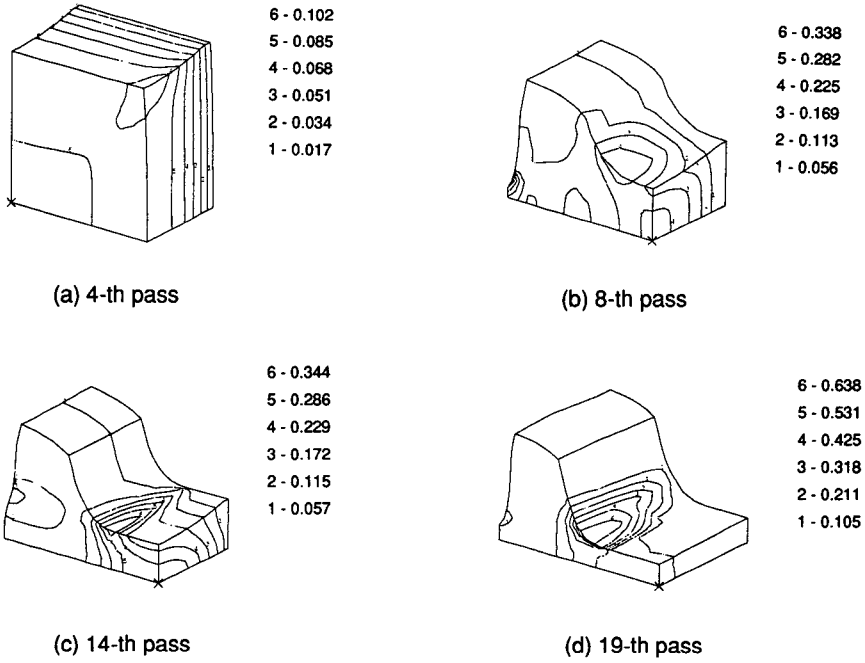


Fig. 8 Distributions of the effective strain

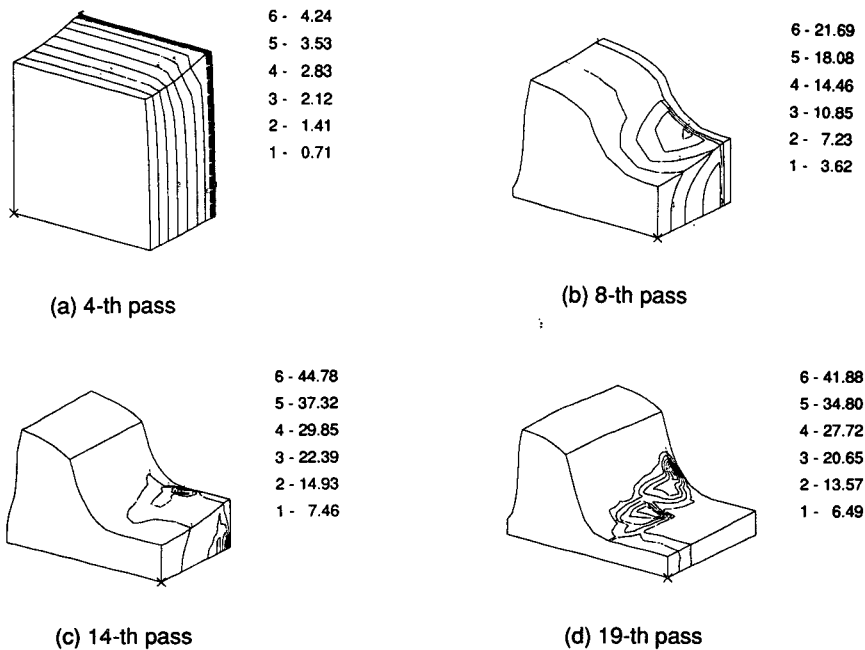


Fig. 9 Distributions of the effective strain rate

생한다. 14번 공정에서는 리브와 웨브가 동시에 성형이 되며, 19번 공정에서는 웨브보다 리브쪽이 주로 성형된다.

Fig. 8은 4번, 8번, 14번, 19번 공정의 변형률 분포를 나타낸 것으로 변형률 크기 및 분포는 해당 공정에만 국한하여 계산된 것이다. 4번 공정에서는 전체적으로 롤 출구 쪽이 고르게 변형하며, 8번 공정에서는 리브와 만나는 모서리 부분과 플래시 부분에서 많은 변형이 이루어진다. 14번, 19번, 공정에서는 리브와 웨브가 만나는 모서리 부분에서 많은 변형이 발생한다.

Fig. 9는 4번, 8번, 14번, 19번 공정의 변형률 속도 분포를 나타낸 것으로써 4번 공정에서는 초기 롤의 접촉 부분, 8번, 14번, 19번 공정에서는 입구 쪽의 롤과 빌렛이 처음 접촉하여 압연이 시작되는 곳, 즉 공형의 모서리 부분과 접촉하는 리브와 웨브 부분에서 큰 수치가 나옴을 알 수 있다.

4. 결 론

직사각형 빌렛으로부터 H형강을 압연하는 공정 중 초기 브레이크다운 압연의 19개 공정을 단순화된 3차원 강소성 유한요소법을 이용하여 재료의 유동, 압하력, 압연 토크, 단면적의 변화 등을 계산하였다.

브레이크다운 압연을 수행하는데에는 상하 대칭인 롤로써 많은 공정이 연속적으로 이루어지기 때문에 소재의 단면에서 폭퍼짐의 조절이 계속적인 가공과 제품의 결함을 방지하기 위하여 매우 중요하다는 것을 알 수 있었다. 또 전체적인 설비 능력을 고려하여 공정 수와 각 공정에서의 압하율 등을 조절 할 수 있는 자료를 제공하였다.

다단 압연의 경우 공정수가 많아질수록 수치해석적인 오차가 누적되기 때문에 소재의 기계적, 물리적 성질을 정확하게 평가하는 것이 중요하며, 고온에서의 공정이므로 열적인 문제도 고려해야 할 주요한 변수이다. 따라서 열변형과 열전달을 고려할 수 있는 수치해석적 방법의 개발이 향후의 주요한 과제이다.

이러한 연구는 앞으로 철강산업의 정밀화, 고품질화, 그리고 고부가가치 산업용 특수소재의 형강 압연을 수행하기 위한 압연공정의 CAD/CAM화에 기여할 수 있으리라 생각된다.

후 기

이 논문은 1991년도 한국학술진흥재단의 학술연구조성비의 지원으로 이루어진 것으로 이에 관계자 여러분께 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) Oh, S.I. and Kobayashi, S. 1975, "An Approximation Method for a Three Dimensional Analysis of Rolling," Int. J. Mech. Sci., Vol. 17, pp. 293~305.
- (2) Li, G.J. and Kobayashi, S. 1982, "Spread Analysis in Rolling by the Rigid-Plastic Finite Element Method," Proc. Num. Methods Ind. Forming Process, Swansea, p. 777.
- (3) Yanazawa, T., Tanaka, T., Yamashita, M., Okumura, H. and Kusaba, T. 1981, "A New Rolling Method of Slab into Beam Blanks for Large H-Shapes," Kawasaki Steel Tech. Report, No. 3.
- (4) Kusaba, T. and Sasaki, T. 1982, "Beam Blank Deformation Characteristics During Open Pass Web Rolling," Kawasaki Steel Tech. Report, No. 5, May.
- (5) Bodnar, R.L., Ronemus, D.C., Bramfitt B.L. and Shah, D.C. 1986, "Physical Modeling of Hot-Deformation Processes-Using Plasticine," Trans. ISS, pp. 35~46.
- (6) Chitkara, N.R. and Hardy, G.M. 1977, "Rolling of I-section Beam Using Lead as a Model Material: Some Experimental Result," Int. J. Mech. Sci., Vol. 19, pp. 575~594.
- (7) Soo, K.J., Hoggart J.S. and Whitton, P.W. 1975, "Spread of Bars in Aluminium Rod Rolling," Int. J. Mech. Sci., Vol. 17, pp. 435~443.
- (8) Mori, K. and Osakada, K. 1989, "Finite Element Simulation of Three-Dimensional Deformation in Shape Rolling," Numiform 89, Thompson et al.(eds), Rotterdam, pp. 337~342.
- (9) Bertand-Corsini, C. Montimiton net P. and Chenot, J.L. 1989, "A Three Dimensional Analysis of Hot Rolling with a Steady State

- Thermo-mechanical Approach," Numiform 89, Thompson et al(eds), Rotterdam, pp. 303~308.
- (10) Park, J.J. and Oh, S.I. 1990, "Application of Three Dimensional Finite Element Analysis to Shape Rolling Processes," Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 112, pp. 36~46.
- (11) Kiuchi, M. and Yanagimoto, J. 1987, Computer Aided Simulation of Shape Rolling Process," Proceeding of 16th NAMRC, pp. 34~40.
- (12) Kim, N. and Altan, T. 1990, Three Dimensional Analysis and Computer Simulation of Shape Rolling by the Finite and Slab Element Method, ERC/NSM-B-90-10, The Ohio State Univ.
- (13) Shin, H.-W., Kim, D.-W. and Kim, N. 1992, "A Study on the Rolling of I-section Beams," Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Accepted.
- (14) T. Altan, S.I. Oh and H.Gegel, 1983, Metal Forming, ASM, Ohio, pp. 60~64.