

강소성 유한요소법을 이용한 에지-평압연 공정의 삼차원 해석

이동재*, 오수익
서울대학교 기계설계학과

Three Dimensional Simulation of Edge-Plate Rolling Process Using Rigid Plastic Finite Element Method

D. J. Lee *, S. I. Oh

Dept. of Mech Design and Production Engng., Seoul National University

ABSTRACT

In the rolling process, keeping the accuracy of the slab width is a very important problem. So the edge rolling is used with the plate rolling. But in the edge rolling, a local contraction of width, called "width necking", occurs in the top and tail portion of a slab and becomes the cause of crop loss.

In this investigation, the three dimensional deformation behavior in the edge-plate rolling is simulated by rigid plastic FEM(PROLL). And the influence of the rolling condition on "width necking" and the accuracy of width is examined.

Keywords : edge-plate rolling, width necking, rigid plastic FEM

1. 서 론

열간 평압연 공정에서 제품의 폭치수를 정확하게 유지하는 것은 생산자와 사용자 모두에게 매우 중요한 문제이다. 평압연 과정에서 소재는 두께의 감소와 함께 폭방향으로 퍼짐이 일어나는데, 이 현상 때문에 폭치수를 정확하게 유지하기 어렵게 된다. 또한 소재의 측면 테두리 부에서는 압연조건에 따라 벌징 현상이 발생하여 압연 제품의 품질을 떨어뜨리는 요인이 된다. 이를 방지하기 위하여 Fig.1에서 보는 바와 같이 평압연과 함께 소재의 측면 테두리부를 압연하는 공정이 사용되며, 이와 같은 압연공정을 에지 압연(edge rolling)이라 한다.

그러나 에지 압연 공정에서는 소재의 폭 모서리부에 Fig.2에서 보는 바와 같은 도그본 형상(dogbone shape)이 나타나서 평압연 후 폭압연 효율 및 소재의 선단부와 후단부의 형상에 중대한 영향을 주게 되며, 소재의 선단부와 꼬리부에서는 Fig.3과 같이 소재의 폭이 줄어드는 고기 꼬리 형상(fish tail)이 발생하여 재료 손실의 원인이 되기도 한다. 본 연구에서는 다양한 공정조건하에서 에지-평압연 공정을 해석하여 제품의

형상에 영향을 주는 공정 인자를 고찰하고자 하였다.

2. 이론 해석

본 연구에서 압연공정의 해석에는 유한 요소 프로그램인 PROL을 사용하였다. PROL은 강소성 유한 요소법에 근거한 삼차원 해석 프로그램으로서 평압연 공정의 해석에 사용하여 그 신뢰성을 확인한 바 있다.[1] 강소성 유한 요소법은 피압연재가 변형할 때 탄성 영역을 무시하고 소성 영역만을 고려하는데 벌크성형의 해석 문제에 있어서 뛰어난 해석 정확도를 가지고 있으며 계산 효율이 우수한 것으로 알려져 있다. 강소성 재료에 있어서 응력은 오직 변형률 속도에만 관계가 있으며 그 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij}' = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

여기서 σ_{ij}' 는 편차응력, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도 성분이다. $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\epsilon}$ 는 유효응력과 유효 변형률 속도로서 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}'} \quad , \quad \bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} \quad (2)$$

위 식들을 근거로 강소성 유한 요소법에서 사용되는 변분 범함수의 구성은 다음과 같이 정의된다.

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_T} T_i \delta v_i dS = 0 \quad (3)$$

여기서 K 는 비압축성 조건을 위해 부피 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_v$ 를 벌칙화하는 상수이고, T_i 는 경계면에서의 표면 응력이다.

3. 해석 결과 및 토론

3.1 해석 내용 및 공정 조건

본 절에서는 에지 롤의 반경, 폭 압연량, 두께 압연량 등을 공정변수로 하여 해석을 수행하였으며, 그 해석 결과로부터 에지 압연후 도그본 형상, 에지-평압연후 폭제어 효율, 에지-평압연후 소재 선단부와 후단부의 형상, 에지-평압연후 소재 테두리부의 형상 등을 고찰하였다.

한편 소재의 재료는 AISI-1045 탄소강(유효응력: $\bar{\sigma} = 62.74 \bar{\epsilon}^{-0.16}$ Mpa)을 사용하였으며 소재는 직육면체 형상으로 크기는 $150 \times 100 \times 30$ (길이 \times 폭 \times 높이, mm)로 하였다. 해석 대상은 상, 하, 좌, 우 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만을 선택하였으며, $30 \times 8 \times 2$ (길이 \times 폭 \times 높이, 개)로 요소 분할하여 총요소수 480개, 총절점수 836개가 되도록 하

었다. 한편 소재와 롤사이의 마찰조건은 무윤활 마찰(마찰비=1)로 가정하였다.

3.2 해석 결과

● 폭제어 효율

폭제어 효율은 폭 압연량에 대한 폭 복원량의 비로 나타내며 이 값이 작을수록 폭제어 효율이 높다고 볼 수 있다. 폭제어 효율은 폭압연에서 나타나는 도그본 형상(Fig.2)에 의해 직접적인 영향을 받고 있는 것으로 보인다. 즉 도그본의 최대 높이(h_m)가 높을수록 폭제어 효율은 낮게 나타나고 있다.

Fig.4(a)는 에지롤경 변화에 따른 폭제어 효율을 보여주고 있다. 소재 폭에 비해 롤경이 커지면 롤과 소재사이의 접촉 넓이가 상대적으로 증가하게 되는데 이것은 소재와 롤사이의 마찰력을 증대시켜 도그본의 형성을 제한한다. 그러므로 롤경이 커질수록 폭방향의 제어효율이 높아짐을 알 수 있다. Fig.4(b)는 폭 압연량과 두께 압연량에 대한 폭제어 효율을 나타낸 선도이다. 폭 압연량이 증가하면 소재와 롤사이의 물림넓이가 증가하여 역시 도그본의 높이가 제한된다. 그러므로 폭제어 효율이 높아짐을 알 수 있다. 또한 동일한 폭압연량에서 두께 압하량이 클수록 폭제어 효율은 감소하고 있으며 두께 압연량이 큰 경우 폭압연량 증가에 따른 폭제어 효율 상승이 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다.

● 소재의 선단부와 꼬리부의 형상

Fig.3에서 보는 바와 같이 에지 압연 후에는 꼬리부와 선단부에서 폭의 기준 치수보다 줄어들거나 늘어나는 불균일 형상이 나타나는데, 이 곳은 완제품에서는 제거되어야 하므로 재료의 손실을 가져오는 부분이 된다. 그러므로 이 부분을 최소화하는 것이 필요하다. 이 불균일부의 형상을 표현하기 위해 다음의 형상계수를 사용하였다.

$$\text{선단부 형상계수} : \mu_{h1} = (W_h/W_m - 1) \times 100 (\%), \quad \mu_{L2} = (L_{h2}/W_m) \times 100 (\%)$$

$$\text{꼬리부 형상계수} : \mu_{L1} = (W_l/W_m - 1) \times 100 (\%), \quad \mu_{L2} = (L_{l2}/W_m) \times 100 (\%)$$

여기서 W_m 은 평압연후 소재의 폭이 균일한 부분의 치수, W_l 와 W_h 는 꼬리부와 선단부에서의 폭치수를 나타내며, L_{l2} 와 L_{h2} 는 꼬리부와 선단부의 불균일 부의 길이를 나타낸다. Fig.5로부터 롤경이 커지면 선단부와 꼬리부에서 발생하는 불연속부(fish tail)의 크기가 점차 감소하는 경향을 보인다. 이것은 소재와 롤의 물림길이가 길어지면서 압연방향으로 소재의 유동이 제한되기 때문으로 생각된다. 한편 Fig.6은 폭압연량과 두께 압연량에 따른 소재의 꼬리부에서의 불균일 형상을 나타낸 것이다. 두께 압연량이 0, 10%일 때는 폭 압연량이 작을수록 꼬리부가 안쪽으로 점차 오므라드는 형상이 나타났으며, 20, 30%일 때는 폭 압연량을 크게 할수록 바깥쪽으로 벌어지는 형상이 나타나고 있다. 또한 꼬리부의 불연속 형상을 최소화하는 두께 압하량이 10~20% 사이에 존재함을 알 수 있었다. 소재 선단부의 모양은 두께 압연량이 동일할 경우 폭 압연량을 크게 할수록 선단부에서 불연속부가 심하게 나타났으며, 폭 압연량을 동일하게 하였을 경우에는 두께 압연량을 크게 하면 불연속부의 형상이 점차 감소함을 알 수 있었다.

4. 결 론

- 1) 삼차원 강소성 유한 요소 프로그램인 PROLL을 사용하여 에지-평압연 공정을 해석하였으며 에지물의 반경, 폭 압연량, 두께 압연량을 공정변수로 하여 소재의 폭제어 효율, 선단부와 꼬리부의 불균일 형상, 에지압연후 도그본 형상 등에 대해 고찰하였다.
- 2) 앞으로 보다 실제에 가까운 압연공정의 해석 결과를 얻기 위하여 열전달 해석을 보완 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 1996년도 포항제철 국내대학 위탁과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 포항제철 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 이동재, 오수익, 이원호, "강소성 유한요소법을 이용한 평판압연공정의 삼차원 해석", 제2회 압연 심포지엄(1996), pp 103-119

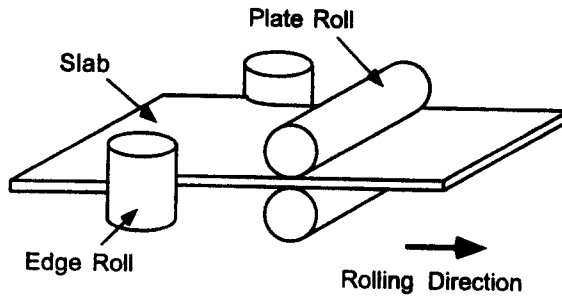


Fig.1 Configuration of the edge-plate rolling process

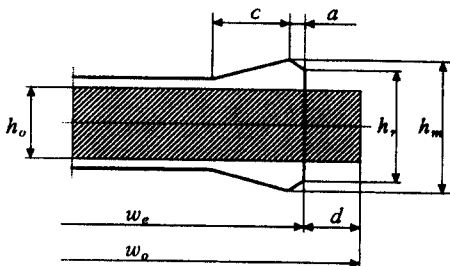


Fig.2 Dogbone shape

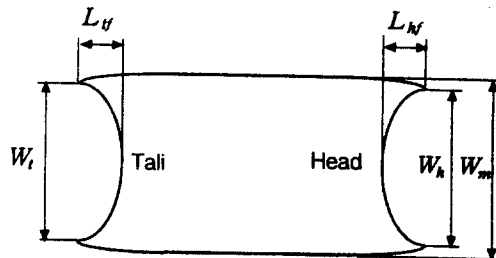


Fig.3 Top view of the slab

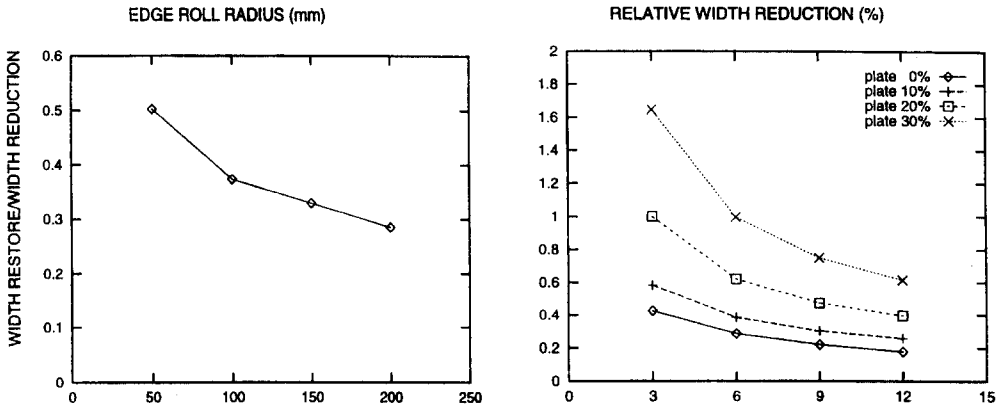


Fig.4 Effects of roll radius and reduction on the width control efficiency

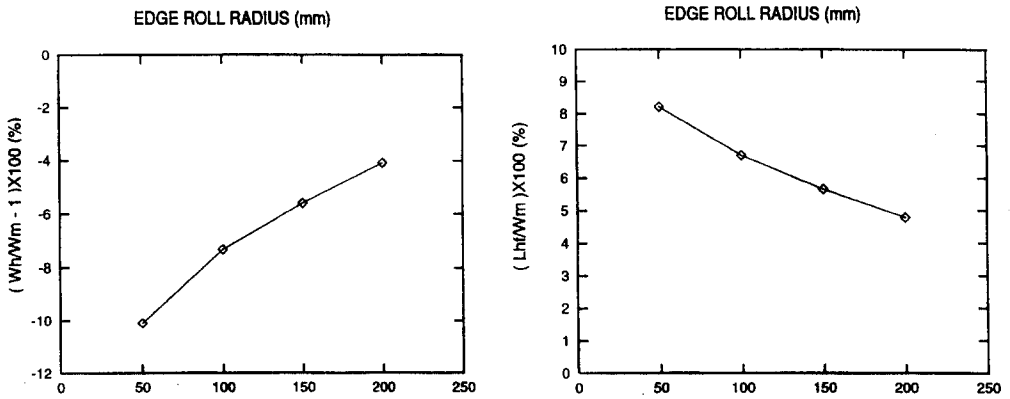


Fig.5 Effects of roll radius on head and tail shape of the slab

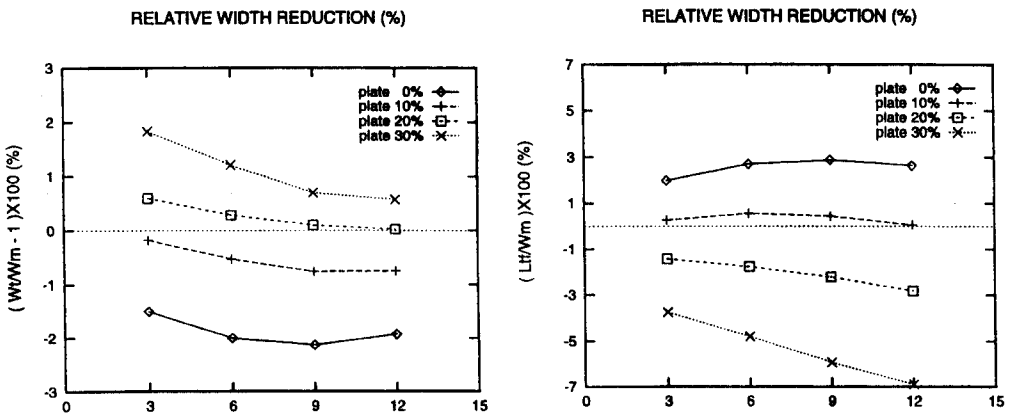


Fig.6 Effects of width and thickness reduction on head and tail shape of the slab