

다단 후판압연에서 평면형상 및 손실율 고찰을 위한 수치적, 실험적 연구[§]

변 상 민^{*†}

* 동아대학교 기계공학과

Numerical and Experimental Approach to Investigate Plane-view Shape and Crop Loss in Multistage Plate Rolling

Sang Min Byon^{*†}

* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.,

(Received April 5, 2013 ; Revised July 7, 2013 ; Accepted July 22, 2013)

Key Words: Plane-view Shape(평면형상), Plate Rolling(후판압연), Finite Element Model(유한요소모델), Pilot Rolling Test(파이롯트 압연 시험)

초록: 후판압연 중에 발생하는 소재의 평면형상과 손실량을 정확하게 고찰할 수 있는 유한요소해석에 기초한 접근법을 제시한다. 압연의 패스 수가 증가함에 따른 소재의 선, 후단부의 형상을 연속적으로 모사할 수 있는 3 차원 유한요소모델을 도입하였다. 본 모델의 가장 큰 특징은 다단 압연을 할 수 있도록 롤 갭이 순차적으로 감소됨에 따라 소재의 압연 방향을 바꾸면서 중단 없이 해석 가능하다는데 있다. 유한요소해석에서 요구되는 재료상수는 열간 인장시험에 의해서 실험적으로 얻어졌다. 제시된 유한요소모델의 유용성을 입증하기 위해서 파이롯트 열간 판압연 시험을 실시하였다. 제시된 유한요소모델로 계산된 평면형상과 손실량이 판압연 시험에서 실제 측정된 양과 매우 잘 일치하는 결과를 얻었다. 제시된 모델로 예측한 손실량과 판압연 시험에서 측정된 양 사이의 오차는 5% 이하로 나타났다.

Abstract: A finite element based approach that can be used to investigate the plane-view shape and crop loss of a material during plate rolling is presented. We employed a three-dimensional finite element model to continuously simulate the shape change of the head and tail of a plate as the number of rolling passes increases. The main feature of the proposed model lies in the fact that the multistage rolling can be simulated without a break because the rolling direction of the material is reversibly controlled as the roll gap sequentially decreases. The material constants required in the finite element analysis were experimentally obtained by hot tensile tests. We also performed a pilot hot plate rolling test to verify the usefulness of the proposed finite element model. Results reveal that the computed plane-view shapes as well as crop losses by the proposed finite element model were in good agreement with the measured ones. The crop losses predicted by the proposed model were within 5% of those measured from the pilot hot plate rolling test.

1. 서 론

후판(Plate)은 통상 6mm 이상의 두꺼운 강판을 말한다. 후판압연(Plate rolling)은 초기 소재인 슬래브(Slab)를 길이방향 뿐만 아니라 폭 방향으로도 압연을 하여 다양한 치수(두께: 6 ~ 150mm, 폭: 1.0

~ 4.5m, 길이: Max. 25m)의 제품을 생산하는 공정이다. 후판은 선박구조물, 일반 기계구조물, 용접 구조물, 보일러/압력용기, 군사설비의 소재로 광범위하게 사용된다.

후판압연시 판재의 불균일 소성변형으로 인해 선후단부에는 에지 크롭(Edge Crop), 측면부에는 측면 크롭(Side Crop)이 발생하여 후판 제품의 손실율을 크게 저하시키는 요인이 되고 있다.^(1,2) 크롭은 판에서 정상적인 치수로 가공되지 않은 형상 불량부를 말한다. 따라서, 압연조건 변화에 따른 크롭량을 고찰하기 위해서는 선후단부와 측면부를

[§] 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2013년도 춘계학술대회(2013. 3. 27.-29., 제주대) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, smbyon@dau.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

포함하는 판 평면형상을 정확하게 예측할 수 있는 수치적 모델을 개발하는 것이 중요하다.

후판은 압연으로 생산되는 다른 제품 즉, 열연재(Hot rolled product) 혹은 냉연재(Cold rolled product)와 다르게 두께, 폭, 길이의 비율이 크게 차이가 나지 않는다. 따라서, 후판의 압연 공정 해석은 기본적으로 삼차원 해석에 기초할 수 밖에 없다. 그러나, 삼차원 해석은 대용량 컴퓨터와 막대한 계산시간을 요구하기 때문에 어려움이 발생한다. 후판 압연 공정의 해석 시간을 줄이기 위해서 많은 근사해석 방법⁽³⁻⁵⁾이 개발되었다. 이 근사해석 방법의 특징은 경계조건을 만족하는 변형의 형상을 가정하고 이것에 근거한 변형율과 하중을 계산하는 방식이다.

본 연구에서와 같이 변형의 형상 자체가 중요한 경우에 있어서는 앞에서의 근사해석 방법은 적합하지 못하고 유한요소모델에 기초하여 정확한 형상을 예측할 수 있어야 한다. 실제의 후판 압연 공정은 다단 공정(Multi-stage process)이지만 계산의 복잡성과 해석시간의 문제점으로 인해 단일 패스 해석에 대한 결과⁽⁶⁻⁸⁾가 많이 발표되었다. 최근에 컴퓨터 성능의 급격한 발전으로 다단 패스 해석에 대한 결과^(9,10)도 문헌상에서 찾아볼 수 있다. 그러나, 판의 소성변형, 롤의 탄성변형, 판/소재의 열전달 거동 등 복잡한 현상이 서로 연계되어 있는 실제 다단의 후판 압연거동을 모두 고려하기 힘들기 때문에 효과적으로 실제 후판 압연 현상을 모사하기 위한 다양한 유한요소모델들에 관한 연구가 현재 이루어지고 있다.

본 연구에서는 후판압연시 판 평면형상을 적은 계산 시간으로 효과적이고 정확하게 모사할 수 있는 삼차원 유한요소해석 모델 개발 방법을 제시하였다. 모델에 고려된 가장 중요한 인자는 패스 라인(Path line)과 패스별 소재의 온도 변화이다. 파이롯트 열간 압연기를 대상으로 하여 해석모델을 개발하고 실제 압연을 실시하여 해석모델과 실험결과를 직접 비교하였다. 단일 패스(Single pass) 압연에 대해서 소재의 형상 및 실수율을 비교하였고, 5단 패스 압연에 대해서도 소재 형상 및 실수율을 비교하여 개발한 삼차원 후판압연 유한요소모델의 정합성을 검증하였다. 각 패스별 평면형상 면적과 실수율을 실험과 해석 결과에 대해 비교 분석하여 모델 정확도의 경향성을 검토하였다.

2. 후판압연공정에서 크롭과 실수율

Fig. 1(a)는 상·하 작업롤(Work roll)에 의해 압연되

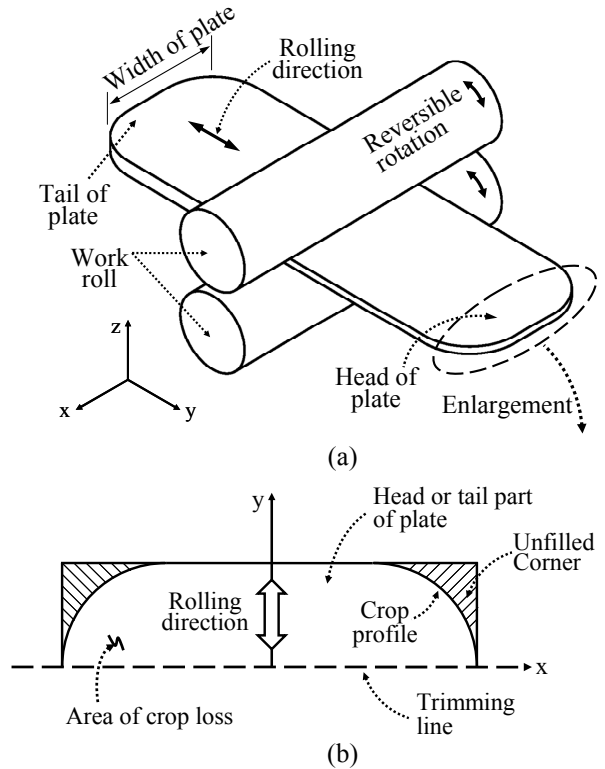


Fig. 1 Schematic of plate rolling process: (a) complete view of the head or tail of plate (b) plane-view shape of the head or tail of plate

고 있는 후판(Plate)을 보여주고 있다. 작업롤이 가역회전(Reversible rotation)하기 때문에 후판이 전·후로 움직이면서 패스 진행에 따라 점차적으로 판의 두께가 축소되어 목표 두께에 도달한다. 판의 선·후단(Head and tail of plate) 부를 고찰하면 직각이 아닌 둥근 모서리 형태를 가지는 형상 불량부 즉, 크롭이 발생하는 것을 관찰 할 수 있다.

판의 중심부에서의 변형은 폭방향으로 자유로운 양쪽 에지에서의 변형에 비해 변형이 구속되기 때문에 중심부에서 더 큰 압력이 발생한다. 이에 따라 중심부의 마찰력도 에지에서의 마찰력 보다 상대적으로 더 크다. 압연 중에 마찰력이 더 큰 중심부에서 소재를 길이 방향으로 더 크게 신장시키게 되는데, 이것이 판의 선·후단부에 크롭을 유발하게 된다. 압연 전 판의 폭 방향 두께가 일정하면 Fig. 1(a)의 크롭 형상과 같이 혀 모양(Tongue shape)이 발생하지만, 압연 전 판의 폭 방향 두께가 일정하지 않을 경우에는 물고기 꼬리 모양(Fish tail shape)이 발생하기도 한다.

Fig. 1(b)는 판의 선·후단부를 판의 상면에서 관찰할 때 얻어지는 평면형상이다. 판 폭방향으로 양 에지에 빗금친 부분이 소재로 채워지지 않은 크롭부이다. 이 부분은 판의 기준 폭을 만족하지

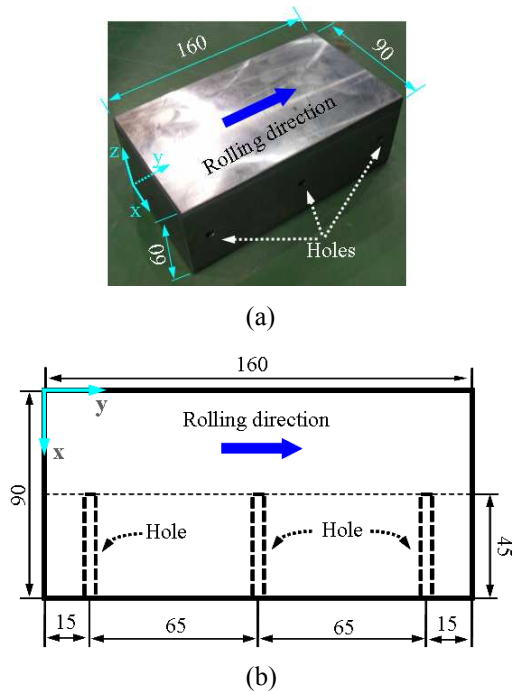


Fig. 2 Dimensions of specimen for pilot rolling test: (a) complete view of specimen (b) top view of specimen

못하기 때문에 제품으로 제공하기 힘들다. 따라서, 이 부분은 트리밍(Trimming) 공정에 의해 절단되고 판의 중심 부분만 제품으로 인정된다. 따라서, 판의 선·후단 부의 크롭부를 최소화 시키는 것이 후판 제품의 제조 효율을 높이는데 있어서 가장 핵심적인 부분중의 한 경우가 된다. 후판 압연시 실수율은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$Y_p = \frac{A_t - (A_{ch} + A_{ct})}{A_t} \times 100 \quad (1)$$

여기서, A_t 는 판의 선·후단 부를 포함하는 판의 전체 평면 면적을 나타내고, A_{ch} 와 A_{ct} 는 판의 선단부 크롭 손실 면적과 후단부 크롭 손실 면적을 각각 나타낸다.

실수율은 압연전 판의 형상, 압하율, 소재의 종류, 롤의 직경, 압연 온도, 압연 속도 등 압연조건에 따라 민감하게 변화한다. 특히, 다단 압연에서 압연 패스 증가에 따라 실수율의 변화가 공통적으로 관찰되므로 이것에 관한 면밀한 고찰이 요구된다.

3. 파이롯트 후판압연 시험

3.1 후판압연 시편

Fig. 2 는 테스트에 사용된 압연 시편의 형상을

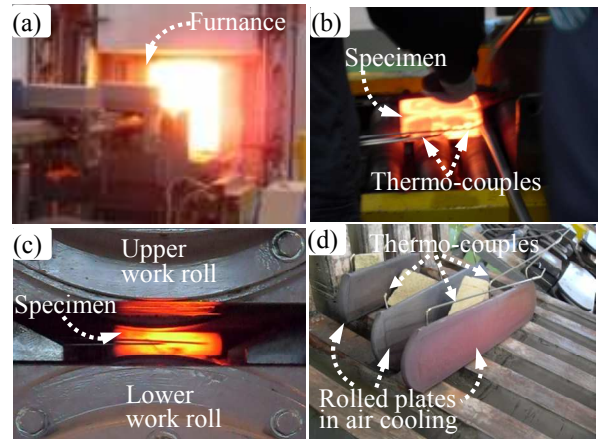


Fig. 3 Pilot rolling test: (a) heating by furnace (b) embedding thermo-couple into plate (c) deformation of plate at roll-bite (d) air cooling of rolled plate

나타낸 것이다. 압연방향, 폭방향, 두께방향 치수가 각각 160mm, 90mm, 60mm 인 직사각형 형태의 블록이다. 압연 중에 소재내의 온도이력을 직접 측정하기 위해서 시편의 선단부, 중심부, 후단부에 열전대(Thermo-couple)를 장착하기 위한 1 개씩의 홀(Hole)을 드릴링을 통해 가공하였다. 폭방향으로 중심부에서 온도를 측정하기 위해서 폭방향으로 중심부까지만 홀이 가공되어 있는 것을 알 수 있다. 열전대는 가열로에서 압연시편이 가열된 이후에 1 패스 압연되기 전에 장착된다.

3.2 파이롯트 후판압연 시험 절차

Fig. 3(a)~(d)는 파이롯트 후판 압연기를 통해서 다단 패스 압연시 판의 평면형상 및 판의 압연 온도를 측정하는 테스트 절차를 보여주고 있다. 테스트에 사용된 파이롯트 후판 압연기는 작업롤만 있는 2 단 가역식 압연기로써 최대 압연하중을 500 ton 까지 전달할 수 있도록 설계되어 큰 압연하중을 요하는 후판압연도 가능한 구조이다.

Fig. 3(a)는 압연 시편을 1200°C 에 도달해 있는 가열로(Furnance)에 잠입하는 과정을 보여주고 있다. 시편을 가열로에 잠입한 다음 30 분 정도 경과시켜 판의 전체 온도가 로내 온도까지 충분히 상승되도록 한다. 가열을 과도하게 하면 고온 스케일이 시편의 표면에 발생하기 때문에 판 전체가 균일 온도에 도달하는 시간을 사전에 확인한 다음, 이 시간을 준수하도록 하였다.

Fig. 3(b)는 가열로에서 나온 시편에 열전대를 시편 측면에 가공(Fig. 2)해 놓은 홀(Hole)에 장착하는 과정을 보여주고 있다. 홀이 시편의 선단부, 중심부, 후단부에 각각 1 개씩 있으므로 열전대를 3

Table 1 Details of the finite element model

Element	Element type	8-node linear brick element
	No. of elements	9288
	No. of nodes	10868
Contact surface (Plate / Rolls)	Friction model	Coulomb's friction model
	Friction coeff.	0.3
Material (Plate)	Analysis model	Elasto-plastic model
	Parameters representing material behavior (flow stress)	- Temperature (800 ^o ~ 1100 ^o C) - Strain rate (0.1 ~ 10.0 s ⁻¹) - Strain (0.0 ~ 1.25)

개 장착할 수 있다. 모든 시편이 동일한 온도에서 압연 테스트가 이루어지도록 하기 위해서 중심부 열전대에서 측정하는 온도가 1050^oC 가 될 때 압연이 시작되도록 대기 중에서 지연시간을 주었다.

Fig. 3(c)는 시편이 롤 바이트(Roll bite)내에 취입되어 압연되고 있는 과정을 보여주고 있다. 다만 압연 테스트 이기 때문에 한 패스 압연후 롤갭(Roll gap)을 줄이고 시편의 방향을 바꾸어 다음 패스 압연을 진행한다. 이 때, 중간 패스후 시편 형상을 얻기 위해서는 해당 패스까지만 압연 한 후에 시편을 채취해야 한다.

Fig. 3(d)는 각 중간 패스 압연후 시편 및 최종 패스 압연후 시편을 공기 중에 서냉시키는 과정을 보여주고 있다. 압연 후에도 시편이 여전히 고온이므로 상온 상태로 서냉시킨 후에 시편의 형상 측정이 가능하다. 냉각 효율을 높이고 냉각시 변형을 막기 위해서 시편을 세운 상태로 냉각한다. 압연된 판의 전체 형상 및 판의 선후단부 크롭 형상을 투사지(Tracing paper)를 이용하여 발취한다. 발취된 형상은 스캐너 및 이미지 프로세서를 통해서 디지털 데이터로 저장한다.

4. 다단 패스 유한요소해석 모델

본 연구에서는 후판의 가역식 다단 패스 유한요소해석을 수행하기 위해서 ABAQUS[®]를 도입하였다. 판이 롤러 테이블 위에서 압연기 쪽으로 이송되고 또한 상·하 작업롤 사이에 취입되어 압연 및

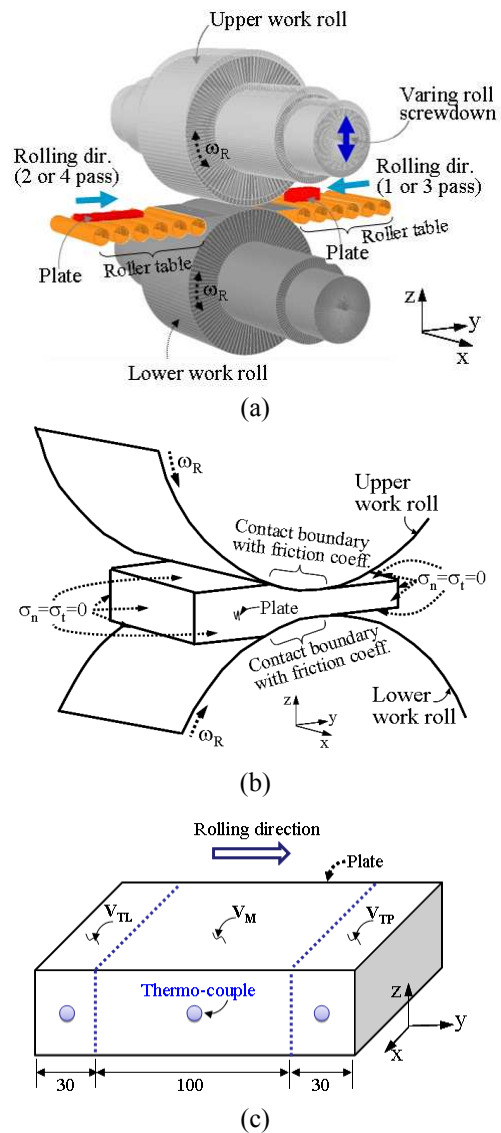


Fig. 4 Reversible multi-pass finite element model: (a) three dimensional geometry of plate and rolls (b) mechanical boundary conditions of plate at roll-bite (c) influence volumes around thermo-couple (V_{TL} : influence volume at tail, V_M : influence volume in the middle part, V_{TP} : influence volume at head)

유출하는 과정을 모사하기 위해서 비정상상태(Non-steady state) 해석을 실시하였다. Fig. 4는 본 해석에 사용된 공정기하학 및 유한요소모델을 보여주고 있다. Table 1에 유한요소모델의 상세한 내용을 요약하였다. 두께가 두꺼운 판재(후판) 압연시 작업롤의 탄성변형에 의한 소재 두께 변화 차이는 크지 않고 더욱이 소재가 고온일 때에는 그 영향성이 더욱 줄어들기 때문에 본 해석에서 작업롤은 강체로 모델링하였다.

Fig. 4(a)는 가역식 다단 패스로 해석되는 유한요

Table 2 Pass schedule used in pilot plate rolling

Pass No.	Entry thickness(mm)	Exit thickness(mm)	Reduction ratio(%)
1	60	48	20.0
2	48	34	29.2
3	34	23	32.4
4	23	16	30.4
5	16	12	25.0

소모델의 3 차원 기하학을 보여주고 있다. 작업롤과 판의 치수는 3 절에서 설명한 파이롯트 압연기(Pilot rolling mill)에 기초하였다. 가역적이므로 판의 압연방향이 교차로 바뀌어 지는데 홀수 패스(즉, 1 패스, 3 패스, 5 패스)에서는 오른쪽에서 왼쪽으로 그리고, 짝수 패스(즉, 2 패스 및 4 패스)에서는 왼쪽에서 오른쪽으로 압연이 이루어 지도록 모델링되었다. 한 패스 압연완료 후에 상·하 작업롤 사이의 물갭을 줄여 패스진행에 따라 점차적으로 판의 두께가 줄어들도록 모델링하였다.

Fig. 4(b)는 압연중인 판의 역학적 경계조건을 나타내고 있다. 상부 작업롤과 하부 작업롤로 이루어지는 롤 바이트(Roll bite)영역에서 판의 접촉경계가 형성된다. 이 영역에서는 압하력과 함께 쿨롱 마찰법칙에 의해 작업롤이 판에 마찰력을 가하는 경계부분이다. 판의 나머지 경계부분은 자유표면이므로 무 부하조건(Traction free condition; $\sigma_n = \sigma_t = 0$)이 주어졌다.

판과 롤 사이의 열전달해석을 수행하기 위해서는 각종 열전달계수 즉, 판과 롤 사이의 접촉열전달 계수, 판의 온도에 따른 열전도계수 및 열용량 계수, 판과 외부 대기와의 대류 열전달계수와 복사 열전달계수 그리고 롤의 냉각 대류 계수 등이 실험적으로 알려져야 한다. 이러한 열전달 관련 계수를 실험적으로 결정하기 위해서는 막대한 시간과 노력이 소요되므로 본 모델에서는 파이롯트 압연 테스트에서 시편 내부에 장착한 열전대(Thermo-couple)에서 측정된 실제 온도를 판의 소성변형해석에 입력으로 제공하는 방식으로 열전달 해석을 대체하였다.

Fig. 4(c)는 판에 장착되었던 열전대의 위치와 각 열전대의 영향체적(Influence volume)을 표시하였다. 체적은 크게 중심부와 선·후단부로 나뉘어 지는데, 중심부의 길이(100mm)는 판이 롤 바이트의 중심에 위치해 있을 때 판과 롤 사이의 접촉 투영길이

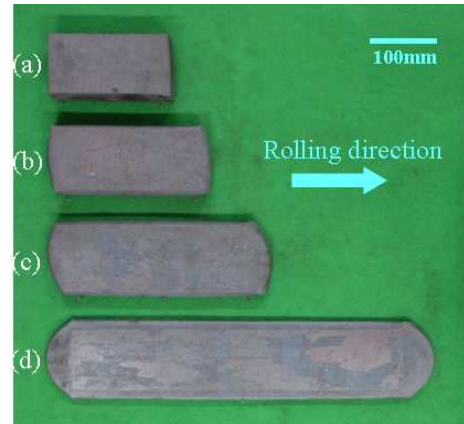


Fig. 5 Plane-view shape of plate rolled by pilot rolling test: (a) specimen after the 1st rolling pass (b) specimen after the 2nd rolling pass (c) specimen after the 3rd rolling pass (d) specimen after the 5th rolling pass

를 기준으로 설정되었다. 선·후단부의 길이(30mm)는 중심부 길이를 제외한 나머지 길이를 등분하여 설정하였다.

롤 바이트 내에서 판의 체류 시간이 순간적이고 측정된 판의 온도 갯수가 많지 않기 때문에 판에 연속적으로 온도를 입력하는 것은 합리적이지 않다. 따라서, 본 모델에서는 가중 체적법에 의해서 계산된 아래와 같은 판의 평균온도(T_{AG})를 롤 바이트 내에서 사용하였다.

$$T_{AG} = (T_{TL} \cdot V_{TL} + T_M \cdot V_M + T_{TP} \cdot V_{TP}) / V_T \quad (2)$$

여기서, T_{TL} , V_{TL} 은 판의 뒷 부분(Tail)에서의 측정온도와 영향체적을 T_M , V_M 은 판의 중간 부분(Middle part)에서의 측정온도와 영향체적을 T_{TP} , V_{TP} 는 판의 앞 부분(Head)에서의 측정온도와 영향체적을 각각 나타낸다. 그리고, V_T 는 판의 전체 체적을 나타낸다.

5. 결과 및 고찰

5.1 파이롯트 압연에 의한 소재 거동 도출

본 파이롯트 압연에 사용된 소재는 0.15% 탄소강이었고 총 5 패스에 걸쳐서 압연되었다. Table 2에 각 패스별 시편의 입측 두께와 출측 두께 및 압하율을 요약하였다. Fig. 5는 압연한 후 소재의 평면형상을 나열한 것이다. Fig. 5(a) ~ 5(d)는 각각 1 패스 압연 후, 2 패스 압연 후, 3 패스 압연 후 및 5 패스 압연 후 시편의 평면형상을 나타낸 것이다. 패스가 진행됨에 따라 시편의 선·후단부의 크롭 영역이 점차적으로 커지고 따라서 시편의 정상적인 치수 영역이 상대적으로 작아지는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 6 은 시편이 가열로에서 나온 다음 열전대가 장착되고 난 이후부터 5 패스 압연 후에 공랭되는 과정(Fig. 3(b)~(d))까지 열전대에서 측정된 온도 이력을 나타낸 것이다. 각 압연 패스에서 소성 발열에 의한 온도 상승이 관찰되는 것을 알 수 있다. 패스와 패스 사이에 온도 강하는 다음 패스 진행하기 전까지 지연되는 동안 공랭에 의한 냉각이 나타난 것이다. 선단부(Head)와 후단부(Tail)에서의 온도 거동은 거의 같고 열전달 영역이 한정되어 있는 중심부(Middle part)에서는 대체적으로 온도가 75°C 정도 높은 것을 알 수 있다. 중심부, 선단부, 후단부의 3 군데에서 측정된 온도값은 유한요소 모델의 평균온도(식 (2)) 계산 시에 반영된다.

Fig. 6 에서 소재가 압연중에 거치는 온도 이력

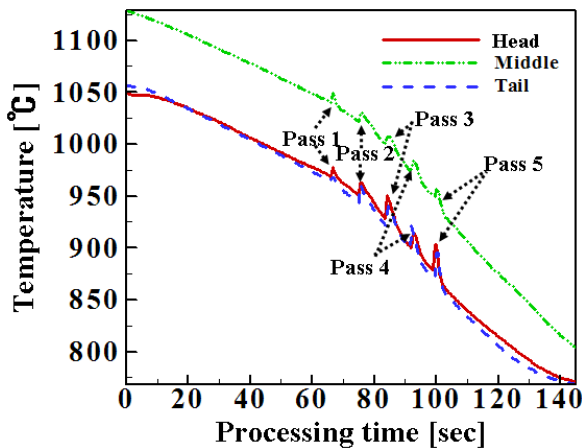


Fig. 6 Temperature history of plate measured from three thermo-couple during rolling and idle time

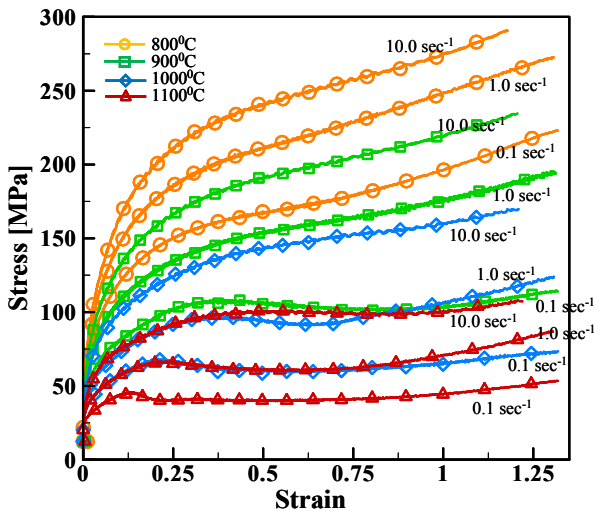


Fig. 7 Flow stress – strain curves of 0.15% carbon steel for various temperatures and strain rates

이 800°C~1100°C 인 것을 알 수 있다. 유한요소모델에 소재의 소성 변형저항 즉, 유동응력식을 온도, 변형율 속도 및 변형율의 함수로 입력하기 위해서 GLEEBLE® 테스트를 실시하였다. 온도가 800°, 900°, 1000°, 1100°C 의 네 가지 경우에 대해서 변형율 속도는 0.1, 1.0, 10.0 sec⁻¹의 세가지 경우를 조합하여 응력-변형율 그래프를 도출하였다. Fig. 7 에 각각의 온도와 변형율 속도 조합에 대해서 응력-변형율 거동이 도시되어 있다. 온도가 강해질수록 유동응력이 크게 상승하고 변형율 속도가 커질수록 유동응력이 높아지는 것을 알 수 있다.

5.2 패스라인(Path line)에 의한 후판의 형상 거동

후판 압연시 압연중의 경감과 판의 선단부 굽힘을 제어하기 위해서 Fig. 8(a)에서 도시된 것과 같이 패스라인을 압연기에 주고 있다. 본 파이롯트 압연기에서도 20mm 의 패스라인이 형성되어 있다. 패스라인이 존재하면 판과 상·하 작업롤 사이의 접촉이 상·하 비대칭이 되기 때문에 판의 두께 방향으로 비대칭 변형이 발생한다. Fig. 8(b)는 패스라인을 고려하지 않고 해석시에 얻어지는 소재 단면을 나타내고, Fig. 8(c)는 패스라인을 고려하여 얻어진 소재의 유한요소해석 단면을 나타내고 있다. 실제 파이롯트 테스트를 통해서 얻어진 시편의 두께 방향 단면을 나타내는 Fig. 8(d)와 비교해 보면, 상·하 작업롤 사이의 접촉 비대칭에 의해 발생한 판의 두께 방향으로의 비대칭 변형이 올바른 해석결과임을 알 수 있다.

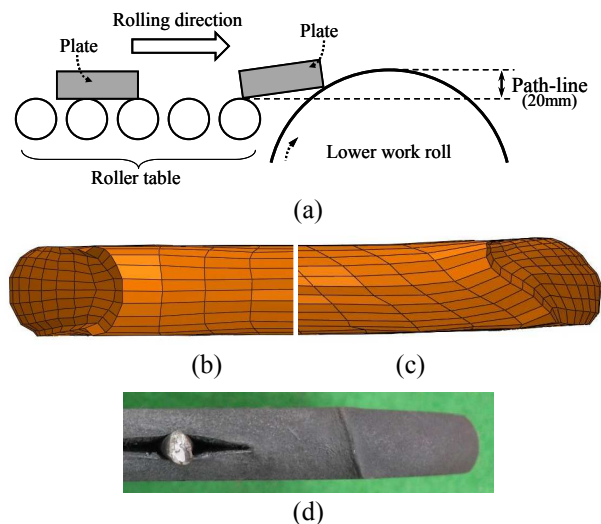


Fig. 8 Inhomogeneous deformation on the cross section of plate due to path-line: (a) definition of path-line (b) FE results in case of zero path-line (c) FE results in which path-line is 20 mm (d) actual cross section of plate obtained from pilot rolling test

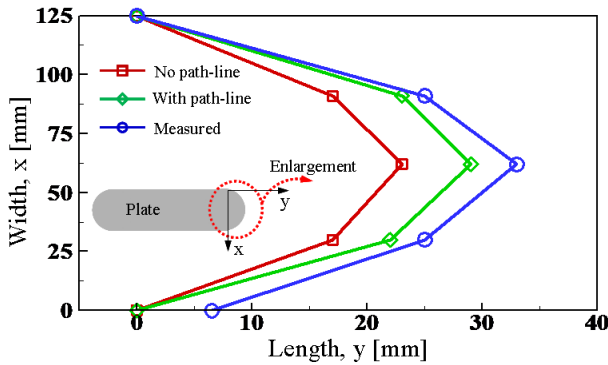


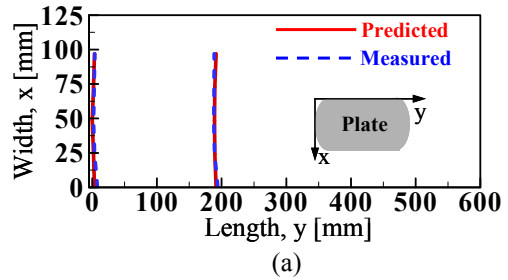
Fig. 9 Variation in crop profile of plate whether path-line is considered

일반적인 압연해석을 수행할 때는 패스라인에 의해 상·하롤과의 비대칭 접촉으로 인해 발생하는 접촉면 수렴시간 상승을 막기 위해서 패스라인이 없다고 가정하고 해석하는 것이 일반적이다. 패스라인이 고려될 경우에 해석시간은 패스라인이 고려되지 않을 때에 비해 2 배 이상 걸린다. 그러나, 본 연구의 목적인 후관 압연시 판의 평면형상을 정확하기 예측하기 위해서 패스라인을 반드시 고려해야 하는지 여부는 필수적으로 고찰해야 한다.

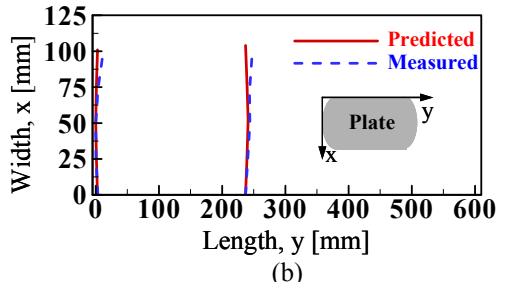
Fig. 9 는 패스라인이 고려될 때, 고려되지 않을 때 그리고 실제 파이롯트 압연 테스트로부터 측정된 판의 단면 형상을 비교하여 놓은 것이다. 패스라인이 고려되지 않은 경우의 해석결과는 패스라인이 고려된 경우와 많이 벗어나 있고 테스트에서 측정된 형상과도 더 큰 차이가 나는 것으로 알 수 있다. 패스라인이 고려되어 해석되어야만 실제 판 평면형상과 유사한 결과를 도출할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5.3 패스별 후관의 평면형상과 실수율

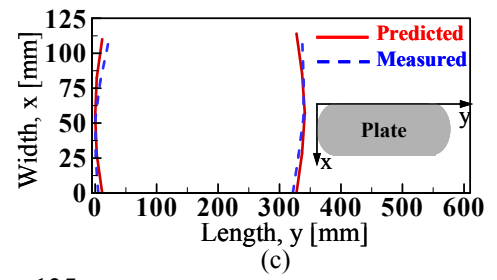
Fig. 10 은 본 연구에서 제시한 유한요소모델로 예측한 판의 평면형상과 파이롯트 테스트에서 얻어진 시편에서 측정된 평면형상을 비교하여 놓은 것이다. Fig. 10(a)~(d)는 1 패스, 2 패스, 3 패스 및 5 패스 후에 실제 측정된 판의 평면형상과 유한요소 모델로 예측한 평면형상을 각각 비교하여 놓은 것이다. 네 가지 패스에서 모두 예측한 형상과 측정된 형상이 전반적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 예측한 형상은 폭 방향 중심축에 대해서 대칭인 반면, 측정된 형상은 약간의 회전이 있는 것을 알 수 있다. 해석에서는 마찰계수를 접촉면 전체에 걸쳐 일정한 값을 입력으로 주지만, 실제 테스트에서는 마찰계수의 편차가 존재하기 때문에 이상적인 대칭형상으로 나오지 않는 것을 알 수 있



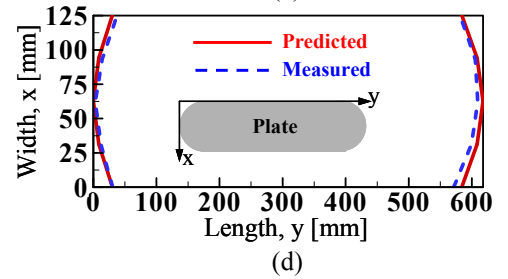
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10 Comparison of plane-view shape of plate between prediction and measurement: (a) after the 1st rolling pass (b) after the 2nd rolling pass (c) after the 3rd rolling pass (d) after the 5th rolling pass

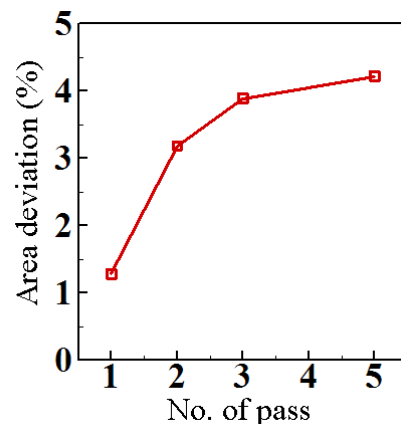


Fig. 11 Difference in plate area between predicted shape and measured shape

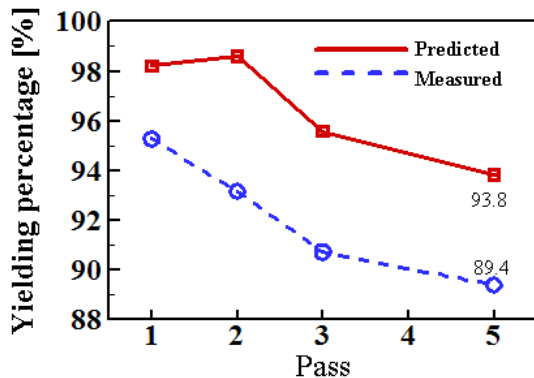


Fig. 12 Comparison of yielding percentage of plate between prediction and measurement

다.

Fig. 11 은 본 연구에서 제시한 유한요소모델로 예측한 판의 평면형상 면적과 파이롯트 테스트에서 얻어진 시편에서 측정된 평면형상 면적 사이의 편차를 패스 진행에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 패스가 진행함에 따라 실제 테스트와 모델 사이의 조건의 차이가 누적되므로 그 편차가 증대하는 경향을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 그 편차는 5 패스에서 4% 정도인 것을 알 수 있다.

Fig. 12 는 식 (1)에서 정의된 판의 실수율 측면에서 유한요소모델로 예측한 값과 실제 압연 판에서 측정된 값을 각 압연 패스별로 비교하여 나타낸 것이다. 예측치와 측정치 모두 압연 패스가 진행됨에 따라 실수율이 점차적으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 즉, 패스가 진행됨에 따라 판의 폭방향 비균질 변형으로 인해 판의 선·후단부에서 크롭이 많이 발생하는 것을 나타내고 있다. 예측 실수율과 측정 실수율의 편차는 패스에 관계없이 거의 비슷한 오차를 보여주고 있는데 약 5%의 오차가 있는 것으로 파악된다. 유한요소모델에 반영하기 힘든 파이롯트 압연에서의 많은 국소 인자가 존재하는 사실을 고려하면, 본 논문에서 제시한 유한요소모델이 후판 압연시 판의 실수율을 평가하는데 있어서 매우 높은 정밀도를 가진다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서 후판압연 중에 발생하는 소재의 평면형상과 실수율을 정확하게 예측할 수 있는 유한요소모델을 제시하였다. 본 모델은 다단 및 가역적으로 이루어지는 후판압연 공정을 연속적으로 해석할 수 있고 실제 후판압연기에 설정되어 있는 패스라인의 효과를 반영하여 실제 판변형 형태와 유사한 변형을 예측할 수 있다는 특징을 가지고

있다. 또한, 본 모델은 실제 후판 압연시 발생할 수 있는 여러가지 열전달 문제를 실제 판의 온도 측정 및 대표온도 모델을 통해서 간단하면서도 효과적으로 모델에 반영하고 있다. 이러한 특징을 가진 본 모델을 파이롯트 후판압연 공정에 적용하여 다음과 같은 몇 가지 결론을 도출하였다.

첫번째로 후판압연시 판의 평면형상 및 크롭부형상은 패스라인에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서, 패스라인 반영에 의해 비대칭 접촉면적 형성 및 이로 인한 해석시간이 크게 증대되지만 정확한 판의 평면형상 및 실수율 예측을 위해서는 반드시 유한요소모델에 패스라인을 반영해야 한다.

두번째로 판의 평면형상 예측시에 영향을 미칠 수 있는 열전달 현상을 고려하여 해석에 반영하기 위해서는 각종 열전달 계수를 실험적으로 측정해야 하는 문제점이 발생한다. 이것을 극복하기 위해서 판의 온도를 직접 측정하고 또한 대표온도를 사용하였다. 이것을 판의 평면형상 예측 모델에 반영함으로써 큰 오차 없이 정확한 평면형상 및 실수율을 예측할 수 있었다. 실수율 측면에서 본 연구에서 제시한 예측모델로 계산한 값과 실제 평면형상을 측정된 값 사이의 오차는 5% 이내로 평가되었다. 본 비교는 유한요소모델에 의한 다단 후판압연 중 발생하는 소재의 평면형상 및 실수율 예측 결과를 파이롯트 열간 판압연 시험을 통한 직접적인 방법으로 검증한 새로운 시도이다.

후 기

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Yanazawa, T., 1979, "Plane View Control Technique in Plate Rolling," *KSC Technical Report*, Vol. 11, No. 2, pp. 169~181.
- (2) Haga, Y., 1983, "Development of New Plane View Control Technique in Plate Rolling (NKK-DBR)," *NKK Technical Report*, Vol. 39, pp. 21~30.
- (3) Liu, H. M. and Wang, Y. R., 2003, "Stream Surface Strip Element Method for Simulation of the Three-Dimensional Deformations of Plate and Strip Rolling," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 45, pp. 1541~1561.
- (4) Sezek, S., Aksakal, B. and Can, Y., 2008, "Analysis of Cold and Hot Plate Rolling using Dual Stream Functions," *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 584 ~ 596.

- (5) Zhang, J. L. and Cui, Z. S., 2011, "Prediction of Velocity and Deformation Fields During Multipass Plate Hot Rolling by Novel Mixed Analytical-Numerical Method," *J. Iron Steel Res.*, Vol. 18, pp. 20~27.
- (6) Trull, M., McDonald, D., Richardson, A. and Farrugia, D.C.J., 2006, "Advanced Finite Element Modelling of Plate Rolling Operations," *J. Mat. Process. Tech.*, Vol. 177, pp. 513~516.
- (7) Li, X. T., Wang, M. T. and Du, F. S., 2008, "Coupling Thermomechanical and Microstructural FE Analysis in Plate Rolling Process," *J. Iron Steel Res.*, Vol. 15, pp. 42~50.
- (8) Deng, W., Zhao, D.W., Qin, X.M., Du, L.X., Gao, X.H. and Wang, G.D., 2009, "Simulation of Central Crack Closing Behavior During Ultra-Heavy Plate Rolling," *Comput. Mat. Sci.*, Vol. 47, pp. 439~447.
- (9) Yu, H.L., Liu, X.H., Zhao, X.M., Wu, D. and Kusaba, Y., 2006, "Explicit Dynamic FEM Analysis of Multipass Vertical-Horizontal Rolling," *J. Iron Steel Res.*, Vol. 13, pp. 26~30.
- (10) Zhang, J.L. and Cui, Z.S., 2011, "Continuous FEM Simulation of Multi-Pass Plate Hot Rolling Suitable for Plate Shape Analysis," *J. Cent. South Univ. Technol.*, Vol. 18, pp. 16~22.