

〈論 文〉

후판 에지압연시 선후단부의 변형거동

천명식* · 황상무** · 이준정* · 김종근*

(1992년 2월 15일 접수)

An Investigation of Deformation Behavior of Plate Ends in Edge Rolling

M.S. Chun, S.M. Hwang, J.J. Yi, and J.G. Kim

Key Words : Trimming-free Plate(무전단 후판), Width Shortage(폭수축), Edging(에징, 수직 압연), Dog Bone Roll(도그 본 롤), Edger(에저, 수직압연기), Fishtail(피쉬테일)

Abstract

In plate rolling, it is desired to reduce the trimming loss by controlling the formation of defective end shapes. For this reason, edge rolling is frequently performed in the plate mill. In this paper, the effect of various process variables on the deformation of plate ends in edge rolling is examined by conducting experiments and finite element computer simulation. A focus is given to investigating the effect of edging on the width of the deformed plate trimming-free plate rolling.

1. 서 론

최근의 후판압연기술은 새로운 평면형상 제어압연법이 확립됨에 따라 판폭 및 판두께 정도항상이 두드러져 전단에 의한 실수율(제품무게/스라브 무게)저하도 크게 개선되었으며 압연한 그 자체가 제품화 되어가는 추세에 있다. 종래의 후판압연후의 날판은 다음과 같은 네가지 이유에 의해 절단을 필요로 하였다. 첫째는 판폭 측면부의 오버랩(overlap)발생에 의한 에지부 직각화 저하, 둘째는 선, 후단부의 폭수축(width shortage) 발생에 의한 평면형상의 사각화 저하, 셋째는 길이내기 압연시 판폭 단면부의 벌짐(bulging)에 의한 에지부의 직각화 저하이며, 넷째는 스킨드 마크(skid mark), 스카핑(scarfing), 스라브 자체의 치수부족 등에 의한 판폭정도 저하 등을 들 수 있다.

이러한 요인들에 의해 압연종료후의 날판은 수십 밀리 절단을 필요로 하였으나 에저(edger)라는 수

직압연기의 추가에 따른 새로운 압연법의 개발로 평면형상을 더욱 사각형에 가깝게 근사화하여 왔다^{1~4)} 그러나 판폭 측면부의 오버랩, 박판 압연시의 폭퍼짐에 의한 벌짐 그리고 압연중의 판폭 예측 부정확 등은 판 폭정도 항상에 최종까지의 문제로 거론되어 왔다. 그래서 최근 개발된 기술이 TFP(Trimming free plate) 압연법이다.^(5~6)

이 압연법은 조압연기 전면의 일체형에저(flat edger)에 그루브(groove)형을 추가시킨 복합형에저를 구성함으로써 판폭 측면부의 오버랩을 방지하고, 사상압연에서는 Fig. 1 에서와 같이 에저를(edger roll)과 동일산상에 도그 본 롤(dog bone roll), 좌굴방지 롤(center roll)을 설치하여 판폭

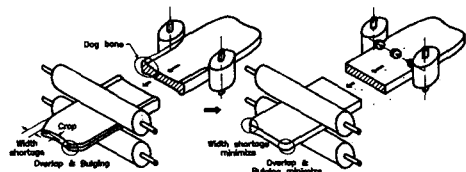


Fig. 1 Trimming free plate rolling

*정회원 산업과학기술연구소 압연연구실

**정회원, 포항공과대학 기계공학과

측면부의 벌징, 판길이 방향의 폭편차, 선후단부의 폭수축량을 제어 하게 된다. 또한 압연기 후단에는 폭계(width meter)를 설치하여 정확한 폭을 측정함으로써 판 폭정도를 향상시키며, 전단라인에서는 밀링 머시인(milling machine)에 의해 최종까지 남아 있는 미소 폭변동량을 제어절삭하여 경우에 따라서는 측면 전단공정의 생략이 가능한 공정이다. 이 압연법으로 선진 일본제철소의 실례를 보면 실수율이 최고 96~97% 수준으로 대폭 증가하였다.

무전단 후판압연중의 길이내기 압연은 판길이를 요구하는 제품 두께에 맞게 늘리는 공정으로 보통 8패스(pass) 이상이며 후단의 판두께가 얇은 마무리 패스를 제외하고는 주로 수직→수평→수평의 순으로 반복압연을 실시한다. 여기에서의 수평압연은 판두께를 압하하여 판길이를 늘리는 공정이고, 에징 또는 수직압연은 판폭을 압하하여 요구하는 제품폭에 맞게 판폭을 조정하며 또한 두께압하에 의한 판폭방향의 폭퍼짐량이나 판길이방향으로의 폭편차량을 제어함으로써 전단라인에서의 손실을 최소로 하는 공정이다. 그러나 에징시 판폭 양 에지부에는 소위 도그 본(dog bone)이라는 모양이 형성되는데 비정상부인 판의 선, 후단부와 정상부인 중앙부와는 그 형성되는 양이 서로 달라 그 다음 공정인 수평압연을 실시함에 따라 판폭방향으로 퍼지는 양도 차이가 생기므로 결국 선, 후단부에서는 물고기 꼬리모양(fishtail)으로 폭이 줄어드는 현상인 폭수축이 발생하여 실수율 저하를 초래하게 된다.

따라서 본 연구에서는 무전단 후판압연기술을 위한 요소기술로써 지난해에 게재한 오버랩연구⁽⁷⁾에 이어 모델압연 실험과 유한요소 해석을 이용한 에

징시 비정상부의 폭변형거동에 대한 연구결과를 보고한다.

2. 실험

본 과제를 수행하기 위해서 제작한 프라스티신(plasticine) 용 모델압연기는 실기압연기를 1/10로 축소하여 제작하였으며 Fig. 2와 같이 수평압연장치, 수직압연장치, 보조압연장치, 소재이송 테이블

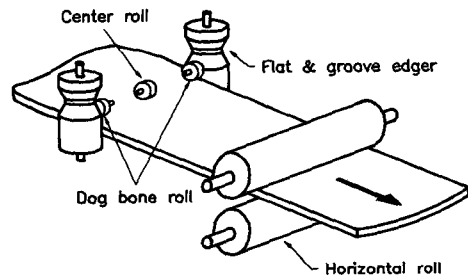


Fig. 2 A schematic diagram for plasticine model rolling simulator

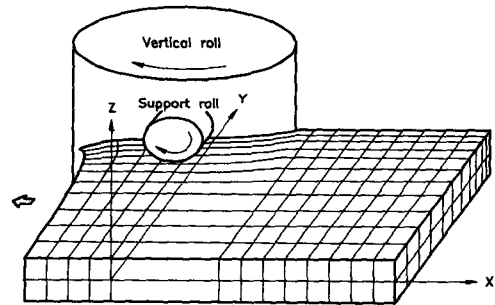


Fig. 3 Finite element meshes

Table 1 Process conditions used in plasticine rolling experiment

Material		Plasticine (CaCO ₃ + grease)
Model slab	Thickness	10, 12, 22 mm
	Width	160, 200, 240 mm
Edging amount		1~10 mm
Roll dia.	Vertical roll	Φ100×100 mm
	Horizontal roll	Φ100×500 mm
	Dog bone roll	Φ35×12 mm
Roll speed		20 mm/s

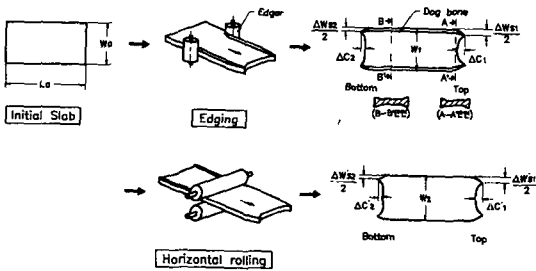


Fig. 4 Experimental method (Case I 1)

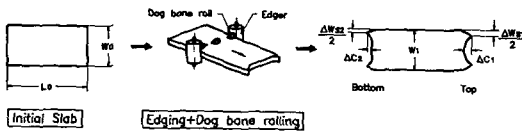


Fig. 5 Experimental method (Case I 1)

그리고 기타 보조설비로는 스�래브 제작용 압출기, 소재온도 유지용 항온항습조 등으로 구성된다.

수평압연장치는 상하를 각각에 모터를 별도 설치하여 등속 및 이주속 압연이 가능하며 수직압연장치는 복합형 에저 롤로 공압에 의해 상하이동이 가능하도록 하여 필요에 따라 선택할 수 있도록 제작하였다. 보조압연장치로는 도그본 압입 롤과 좌굴 방지용 압입 롤을 각각 에저 롤과 동일선상에 설치하여 수직압연과 동시에 도그 본 압연이 가능하다. 또한 소재이송 테이블은 콘베이어 벨트에 의해 소재가 롤로 치입되도록 구성하였다.

실험소재는 프라스티신을 사용하였는데 압출기를 이용하여 1차로 제작한 스투브를 규격에 맞게 절단한 후 20°C 상태의 항온항습조내에서 물성의 균일성을 위해 24시간이상 유지시켰다. 실험은 실기의 1/10조건으로 하여 Table 1에서와 같이 스투브크기를 변화하였다.

실험은 Fig. 4, Fig. 5와 같이 2가지 방법으로 실시하였는데 에징(edging 또는 vertical rolling)과 도그 본 압연(dog bone rolling)을 각각 분리하여 실시하는 경우와 에징과 도그 본 압연을 동시에 실시하는 경우로 구분하였으며 항온항습 조건에서 실험하였다. 실험후 선, 후단부의 폭주축 및 크롭축정은 투명 모눈종이와 0.1 mm 스케일의 콤포레이터(comparator)를 이용하였다.

3. 유한요소 해석

후판제품은 2~3패스(pass)의 고르기압연(siz-

ing), 3~8패스의 폭내기압연(broadside rolling) 그리고 8패스이상의 마무리압연(finish rolling)의 세공정을 거쳐 얻어지게 된다. 가열로에서의 스투브(slab) 추출온도는 강종에 따라 각각 다르지만 일반강의 경우 대략 1250°C로 조압연기(roughing mill), 사상압연기(finishing mill)까지의 스투브 이동시의 대류및 복사에 의한 열전달, 압연시의 소성발열, 마찰열 그리고 롤 냉각시의 열전달현상등 복잡한 실기조건을 고려한 이론적인 접근은 어려운 실정에 있다.

따라서 본 논문에서는 열간강의 1000°C 온도조건과 프라스티신의 20°C 온도조건일때 물성이 가장 상사하다는 조건¹²⁾을 이용하여 프라스티신을 소재로 모델압연을 실시하였다. 그러나 모델 압연실험으로는 강종, 각 압연공정의 온도효과 등 많은 공정 변수들을 고려할 수 없으므로 이들의 영향을 고려하기 위한 1단계 연구로 우선 모델 압연실험과 동일한 조건의 유한요소법을 이용하여 해석하고 이를 실험결과와 비교검토한 후 열간강으로 확장하였다. 유한요소법을 이용한 판재압연의 변형해석을 살펴보면 다음과 같다.

수평압연에 대한 비정상상태의 변형해석과 정상상태의 변형해석에 관해서는 H. Nikaido 와 H. Takuda 등 많은 논문이 발표된바 있으며⁽⁸⁻⁹⁾ 특히, 강소성 유한요소법(Rigid-plastic FEM)을 이용한 수직압연시의 선, 후단부의 비정상변형 해석은 K. Mori 등에 의해 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 수직압연과 동시에 도그 본 압연이 실시되는 공정이므로 판 두께방향으로의 소성변형을 무시한 2차원 평면변형문제로 간주하였고, 소재의 대칭성을 고려하여 1/2만을 해석범위로 하였다(Fig. 3).

해석에 사용된 시뮬레이션 코드는 POSTEC 소성가공실에서 개발한 강소성 유한요소 해석용 소프트웨어를 이용하였으며⁽¹¹⁾ 계산조건은 Table 2와 같이 실기조건을 고려하여 열간강의 압연조건에도 확장하였다. 여기에서 유동응력식은 프라스티신의 경우 온도 253~323°K, 변형도 0.02~0.3 그리고 변형도율 $10^{-2} \sim 10^0$ 1/sec의 범위에서 얻은 식⁽¹²⁾으로 20°C의 온도조건으로 환산한 식이다. 또한 열간강에 대한 유동응력식은 온도 1023~1473°K, 변형도 0.5이하, 변형도율 20~200 1/sec 그리고 탄소 함유량 1.2%이하의 범위에서 얻은 식⁽¹²⁾을 사용하였는데 프라스티신의 물성치와 가장 상사한 1000°C

Table 2 Process conditions used in finite element simulations

Material	Plasticine	Steel
Slab size (WxL)	200 × 240 mm	2000 × 2400 mm
Edging amount	2 ~ 10 mm	20 ~ 80 mm
Roll diameter	∅100	∅1000
Roll speed	200 mm/s	2000 mm/s
Friction	sticking	
Flow stress (Kg/mm ²)	0.01963 $\bar{\epsilon}^{0.085} \dot{\epsilon}^{0.12}$	12.44 $\bar{\epsilon}^{0.21} \dot{\epsilon}^{0.13}$

의 온도조건에서 계산한 식이다. 에지량의 범위는 20 mm에서 최대 80 mm 까지 10 mm 간격으로 계산하였으며 마찰계수는 열간압연시 고착영역(sticking zone)과 슬립 영역(slip zone)이 동시에 존재하므로 실험에 의해 얻은 값을 사용하여야 하나 이번 계산에서는 모델압연조건과 근사화 하기 위해서 고착조건으로 간략화하였다. 향후 강종, 온도영향을 고려한 3차원 변형해석에는 측정값을 사용할 예정이다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 판두께 12 mm, 판폭 160 mm인 경우의 에지량의 변화에 대한 선, 후단부의 폭수축 결과이다. 그림에서 에지량의 변화에 따라 폭수축량은 선단부와 후단부 모두 증가하며 선단부는 급격한 증가현상을 보이는 반면에 후단부는 아주 작은편이다. 또한 에지만 실시한 경우에 비교하여 도그 본

압연까지 실시한 경우가 폭수축량이 더 커짐을 알 수 있는데 이러한 현상은 정상부와 비정상부간의 도그 본 발생량의 차이 때문이다. 즉, 에지후 정상부에서는 도그 본의 폭과 높이에 있어서 일정량을 유지하지만 선단이나 후단으로 향할 수록 그 값은 점점 작아진다. 따라서 그 다음 공정인 수평압연을 실시하면 도그 본 발생량의 차이에 따라 판폭방향으로의 퍼짐량이 비정상부에 비해 정상부쪽이 많아서 결국 폭수축량을 증가시키게 된다.

Fig. 7은 판두께를 일정하게 놓고 판폭만 변화하였을 경우의 에지량에 대한 폭수축량을 나타낸 결과이다. 이 그림에서 보면 폭수축량은 판폭에 따라 거의 영향이 없으며 에지량이 증가할 수록 증가경향을 갖음을 알 수 있다. 또한 에지만 실시한 경우보다 도그 본 압연까지 실시한 경우가 폭수축량이 증가한다는 사실도 확인할 수 있다. Fig. 8, Fig. 9는 위의 경우와 동일한 조건에서의 선, 후단부의 크롭길이 결과이다. 이 경우도 마찬가지로 에지량

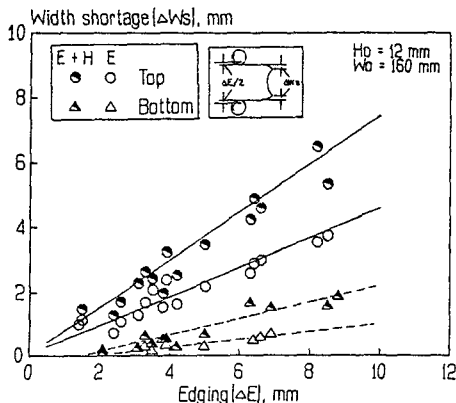


Fig. 6 Relation between width shortage and amount of edging

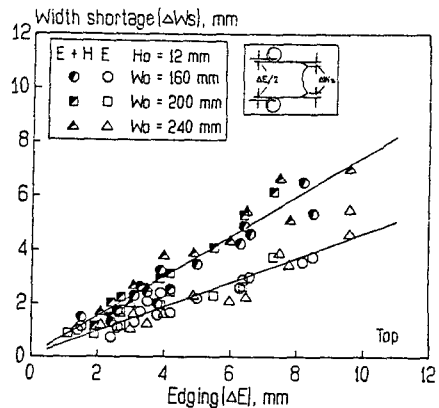


Fig. 7 Effect of edging on width shortage

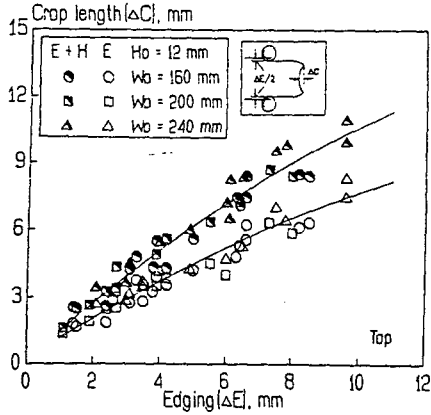


Fig. 8 Effect of edging on crop length (I)

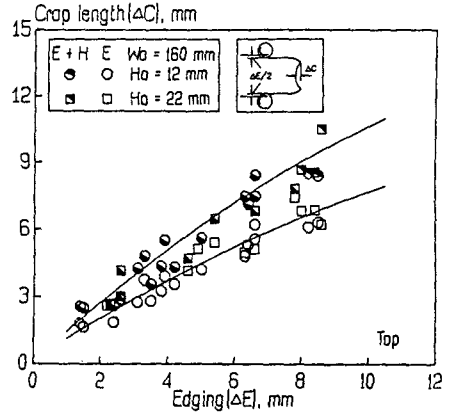


Fig. 11 Effect of plate thickness on crop length at top end

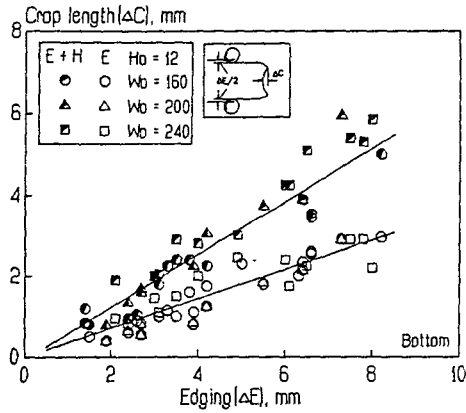


Fig. 9 Effect of edging on crop length (I I)

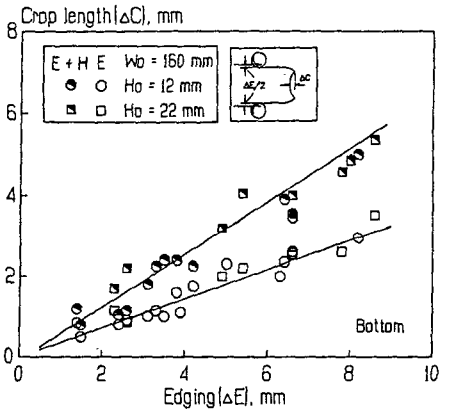


Fig. 12 Effect of plate thickness on crop length at bottom end

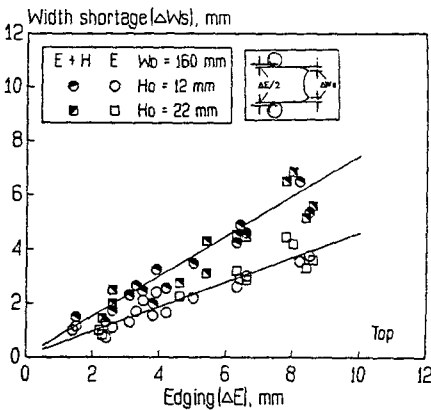


Fig. 10 Effect of plate thickness on width shortage at top end

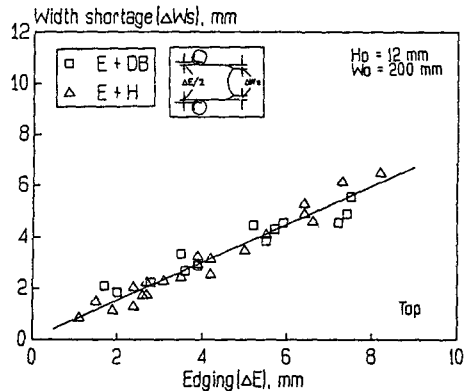


Fig. 13 Effect of edging schedules on width shortage

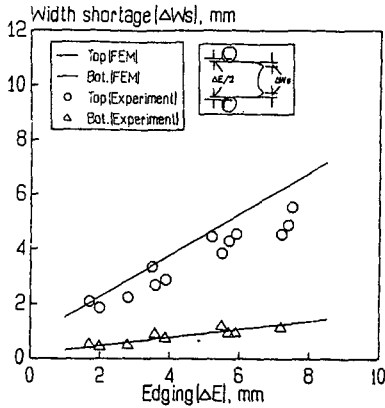


Fig. 14 Width shortage, comparison of FEM and experiment

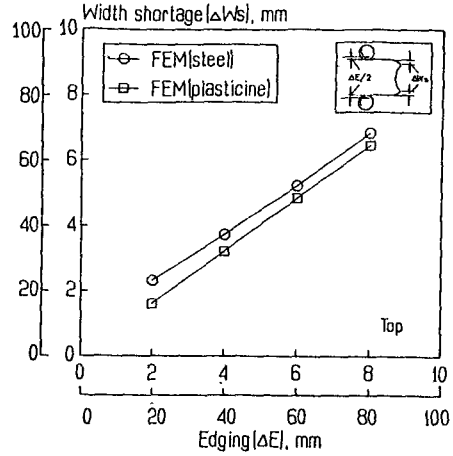


Fig. 16 Comparison of plasticine and steel effect of material property on width shortage

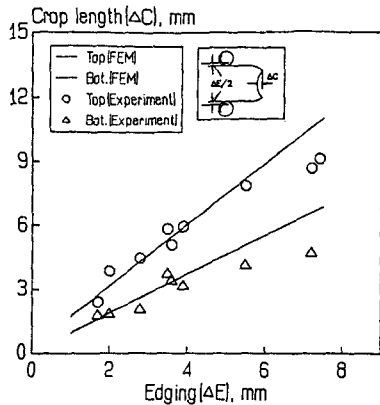
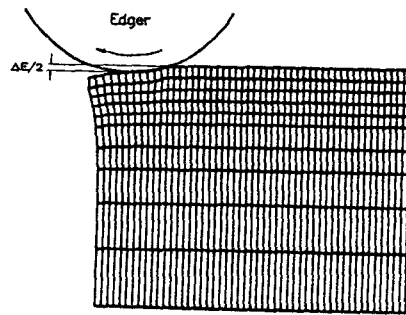


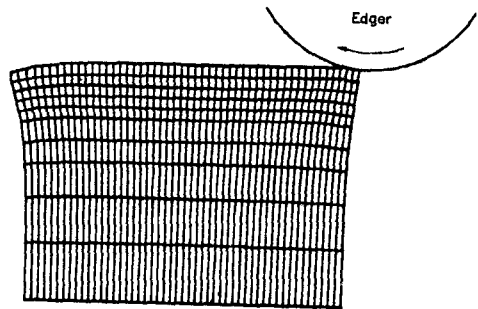
Fig. 15 Crop length, comparison of FEM and experiment

의 증가에 따라 크롭길이의 증가현상을 보이는데 판폭의 영향은 거의 미미함을 알 수 있다. 또한 예정량의 증가에 따라 선단부에서는 포물선의 형태로 그리고 후단부에서는 거의 직선적으로 폭수축량이 증가하며 예정만 실시한 경우보다 도그 본 압연까지 실시한 경우가 더 크다.

Fig.10 은 판폭을 일정하게 놓고 판두께만 변화하였을 경우의 예정량에 대한 폭수축량을 나타낸 결과이다. 이 그림에서 보면 두께의 영향은 거의 없으며 어느 경우이든 예정량의 증가에 따라 폭수축량이 증가함을 알 수 있다. Fig. 11, Fig.12는 위의 경우와 동일한 조건에서의 선, 후단부 크롭길이 결과이다. 이 경우도 마찬가지로 예정량의 증가에 따라 크롭길이가 증가하는 현상을 보이며 판두께의 영향은 거의 없음을 알 수 있다.



(a) top



(b) bottom

Fig. 17 Predicted deformed shapes at top and bottom end

Fig.13은 예정과 도그 본 압연을 분리하여 실시한 경우와 동시에 실시한 경우에 대한 폭수축량을 비교하여 나타낸 결과로 두 경우 거의 비슷한 경향을 보인다. 그러나 예정후 도그 본 압연을 실시하

는 경우는 도그 본 발생부가 다시 원래의 폭방향으로 폭퍼짐이 일어나 목표 판폭을 넘게 되므로 측면 전단손실을 증가시킨다. 반면에 에징과 동시에 도그 본 압연을 실시하는 경우는 도그 본 형성부가 출구 근방에서 에저롤과 도그 본롤에 구속을 받고 판길이방향으로 유동함으로써 목표 판폭 유지는 물론 판길이가 증가하여 결국 실수율을 향상시키게 된다.

Fig. 14는 프라스티신의 실험조건과 동일한 조건으로 놓고 시뮬레이션 한 선, 후 단부의 폭수축량이다. 선단부는 실험과 다소 차이는 보이나 후단부 쪽은 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 15는 선, 후단부의 크롭길이를 나타낸 것으로 실험결과보다 다소 증가경향을 보인다. 그러나 실제 현장조건을 고려해 볼 때 길이내기 후단패스에서는 좌굴한계를 생각하여 에징의 범위가 30 mm 이내라는 점을 감안하면 결산결과가 전반적으로 양호하다고 볼 수 있다. Fig. 16은 실제 열간강의 시뮬레이션 결과와 프라스티신의 시뮬레이션 결과와의 비교이다. 강의 결과가 프라스티신의 결과 보다 폭수축량이 작은 경향을 보이는데 이러한 현상은 실제로 프라스티신의 변형이 열간강보다 다소 크기 때문이라 생각된다. Fig. 17은 유한요소해석에 의한 선단부, 후단부의 변형형상을 나타낸 결과이다.

5. 결 론

무전단 후판압연을 위한 요소기술로써 후판 에저압연시 비정상부의 선후단부에 발생하는 폭수축현상을 영향인자별로 조사하고 후속의 폭수축제어 방법에 필요한 기초적인 데이터를 확보키 위해 실시한 모델압연 실험과 유한요소 해석을 통해서 다음과 같은 결론을 요약할 수 있다.

(1) 폭수축발생 정도는 판폭 및 판두께에 관계없이 에징량이 증가할 수록 증가하며 선단부에 비해 후단부는 아주 작은편이다.

(2) 크롭길이는 에징이 증가할 수록 증가하고 도그 본 압연까지 실시하면 더욱 증가한다. 또한 판폭 및 판두께의 영향은 미미하다.

(3) 에징과 도그 본 압연을 동시에 실시한 경우와 분리하여 실시한 경우와의 비교에서는 폭수축발생량의 차이는 거의 없다.

(4) 모델압연실험과 유한요소 해석결과와의, 비교

에서는 에징량이 큰 범위에서는 다소 차이를 보이나 작은 범위에서는 잘 일치하며 열간강 보다 프라스티신의 변형이 크게 나타났다.

참고문헌

- (1) 少林芳平 外, 1981, "厚板 Edger 에 의한 平面形狀 開善", 鐵と鋼, S1025, p. 375.
- (2) 笹治 峻 外, 1981, "Edger法에 의한 厚板의 高實收率 壓延法의 開發", 鐵と鋼, pp. 139~148.
- (3) 西岐 允 外, 1981, "Edger法에 의한 厚板의 高實收率 向上", 鐵と鋼, pp. 149~155.
- (4) 池谷尙弘 外, 1981, "厚板壓延의 新 平面形狀의 制御方法의 開發", 鐵と鋼, pp. 457~460.
- (5) Inoue, M. etc., 1987, "Development of a process for Manufacturing TFP(Trimming Free Plate)- I, II, III," Trans. ISIJ, Vol.27, B51~53.
- (6) Inoue, M. etc., 1988, "Development of a process for Manufacturing Trimming Free Plates," Trans. ISIJ, Vol.28, pp. 448~455.
- (7) 천명식 외, 1991, "후판압연에서의 오버랩제어에 대한 실험적연구", 대한기계학회논문집 제15권, 제1호, pp. 376~385.
- (8) Nikaido, H. etc., 1983, "FEM Simulation of Non-Steady Deformation in Edge Rolling," 塑性と加工, Vol.24, No.268, pp. 486~492.
- (9) Takuda, H. etc., 1982, "Experiment and Finite Element Analysis of Hot Rolling of Slab in Width Direction with Flat Roll," 塑性と加工, Vol.23, No.262, pp. 1103~1108.
- (10) Mori, K. etc., 1987, "Finite Element Simulation of Non-Steady State Deformation in Rolling of Slab and Plate," 4th International Steel Rolling Conference, F6, 1~F6, 8.
- (11) 황상무 외, 1989, "고온 후판압연공정 Simulation을 위한 FEM Computer Code 개발, 산업과학기술연구소 연구결과보고서."
- (12) Chijiwa, K. etc., 1981, "Characteristics pf Plasticine Used in the Simulation of Slab in Rolling and Continuous Casting," Trans. ISIJ, Vol.21, pp. 178~185.