[논문] 한국소성가공학회지(2003), 제 12 권 제 7 호
Transactions of Materials Processing Vol. 12, No. 7, (2003)

열간압연 폭압하시 슬래브 변형거동의 유한요소해석

천명식 *· 정제숙 *· 안익태 **· 문영훈 **

(2003 년 9 월 5 일 접수)

Finite Element Analysis of Slab Deformation under the Width Reduction in Hot Strip Mill

M. S. Chun, J. S. Cheong, I. T An and Y. H. Moon

Abstract

Rigid-plastic finite element analyses on the deformation of slabs at various width reductions have been performed. By using commercial finite element code, dog-bone profile, crop profile and the longitudinal width profile after edging and horizontal rolling have been analysed. The deformation behavior of slab for the heavy edger mill has also been compared with that for the sizing press. From the deformation analyses, it was found that the sizing press-horizontal rolling method is more efficient in width reduction than that of heavy edger mill-horizontal rolling. The results of finite element analyses for the deformation of slab were well confirmed by the actual operational data. It was found that the amount of width variation after sizing and rolling is about 5~10mm

Key Words : Edger Mill, Heavy Edger Mill, Sizing Press, Width Reduction, Hot Strip Mill

1. 서 론

열간 판압연공정에서의 조압연공정은 폭압연기(edger mill, 또는 vertical mill)) 또는 사이징프레스(sizing press)에 의한 폭 압하를 실시하여 목표로 하는 판 폭을 맞추고 일정한 두께까지 수평압연하여 중간크기의 바(bar)를 제조하는 공정이다. 통상, 열연공정의 조압연공정에서의 바 치수는 최종 제품인 코일치수에 따라 다르나 대략 두께 28~40 mm, 폭 800~1800mm 를 제조한다. 조압연공정은 폭압연기와 수평압연기의 조합으로 이루어지며 압연기의 배열에 따라 반가역식(semi-continuous), 가역식(reversing), 쌍가역식(twin rever sing) 그리고 연속식(full continuous)으로 구분된다.

수평압연기 전면에는 폭을 맞추기 위한 폭압연기가 설치되어 있는데 통상적으로 100mm 이하의 폭 변경능력(슬래브 폭에서 코일 폭으로 변경하는 양)의 제약에 의해 많은 수의 슬래브 폭을 공급해야 하는 연주공정의 생산성이 저하되는 문제가 있다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 최대 300m 의 폭압연능력을 갖춘 대폭압연기(heavy edger mill)가 사용되기도 하지만 폭압연량을 증대하는 경우 좌굴 및 뒤틀림 현상이 발생하여 실기공정에서의 그 적용범위에 있어서 제한을 받는다.

대폭압연기를 사용한 폭압연공정은 한계가 있는바 최근에는 폭압연능력을 증대하여 연주 공정

* 포항산업과학연구원 압연프로세스연구팀
** 부산대학교 정밀기계공학과/ 정밀정형 및 금형가공 연구센터

의 생산성과 열연공정에서의 실수율 향상을 목적으로 조압연공정 전면에 사이징프레스 압하설비를 신설하는 추세에 있다.[1~6]

본 연구에서는 이와 같은 열간 조압연공정에서의 폭압연기에 의한 슬래브의 변형거동을 대폭압연기와 사이징프레스 등의 폭압연기의 형식에 따라 유한요소해석을 통해 비교 검토하고 실기실험결과를 통하여 그 정확도를 평가하고자 한다.

2. 폭 압연공정 해석

2.1 폭 압연공정의 개요

Fig. 1 열연코일을 생산하는 가역식 조압연공정에 대한 개념도를 나타낸 것이다.

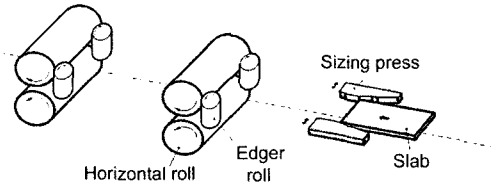

Fig. 1 Conventional roughing mill layout

조압연기 전면 또는 전후면에 슬래브의 폭을 압연하는 폭압연기가 배치되어 목표로 하는 폭을 맞추는 기능을 한다. 이와 같은 폭압연기는 조압연기 배열과 조업스케줄에 따라 평 에저롤(flat edg -er) 또는 그루브형 에저롤(grooved edger)을 사용하게 되는데 통상적으로 그루브형 에저롤은 폭압하량의 증대가 가능한 조압연공정 전면에 배치되고 평 에저롤의 경우는 후단에 위치하도록 구성된다. 그러나 앞서 언급하였듯이 상기와 같은 조압연공정의 구조는 연주공정의 생산성 저하, 열연공정개선의 필요성, 코일내 폭 품질저하 등 문제점이 있을수 있으므로 이에 대응하여 조압연기 전면에 그루브형 에저롤의 롤경을 크게 하여 폭압연능력을 증가시키는 대폭압연기를 채택하는 경우도 있다.

2.2 폭 압연공정 해석방법

폭압연기를 이용한 조압연공정해석은 평 에저롤과 그루브형 에저롤로 구분하였으며 대폭압연기를 이용한 해석에서도 폭압연량의 변화만 주어 비교 해석하였다. Fig. 2는 해석에 사용된 대폭압연기의 에저롤 형상을 나타낸 것이다. 그루브타입으로 중심부는 크라운(crown)형상이며 플랜지의 각도는 14° 로 가정하여 시뮬레이션하였다.

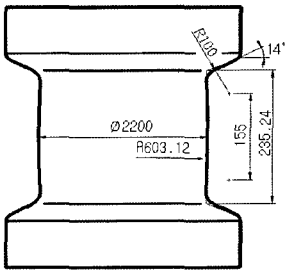

Fig. 2 Roll shape for heavy edger mill

Table 1 Rolling conditions used in FEM analysis

Slab	Thickness mm)	203,230
	Width (mm)	900, 1850
Width reduction (mm)		50～150
Roll diameter (mm)	Edger mill	ϕ1000
	Heavy edger mill	ϕ2200
Friction coefficient		μ = 0.3
Roll speed (mm/s)		330
Flow stress (Kg/mm^2)		Shida model

에저롤을 이용한 폭압연공정에 대한 유한요소코드는 MARC를 사용하였으며 계산조건은 Table 1에 나타내었다. 에저롤의 형상은 평타입과 그루브타입으로 구분하였으며 롤의 직경도 변화하였다. 해석에 사용한 응력-변형률 관계식은 일반탄소강에 적합한 시다(Shida)모델[7]을 사용하였는데 슬래브의 초기온도를 1200°C로 균일하다고 가정하여 수식을 간이화하였다.

3. 사이징 프레스 압하공정 해석

3.1 사이징 프레스 압하공정 개요

Fig. 3은 사이징 프레스를 이용한 슬래브의 폭압하방법의 개념도를 나타낸 것이다.

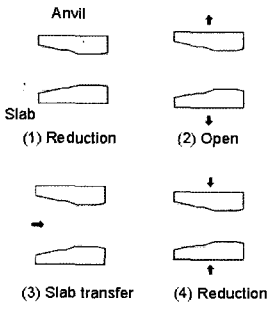

Fig. 3 slab sizing press

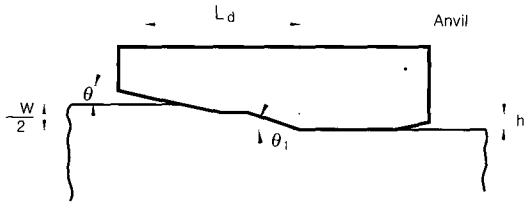

Fig. 4 Geometrical relationship between anvil and slab

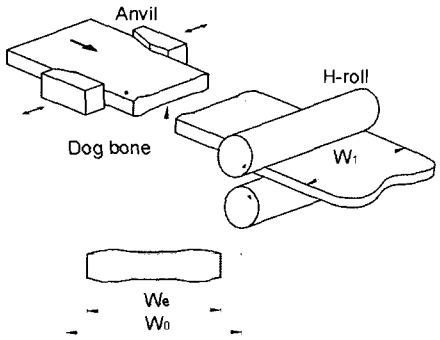

Fig. 5 Configuration of slab deformation by sizing press-horizontal rolling

사이징프레스에 의한 압하방법은 슬래브의 이동→가압→오픈 등 반복적인 사이클에 의해 일정한 이송피치로 폭을 압하해 가는 방식이다. 패스 당 폭 압하량이 최대 350mm까지 가능하도록 설계되어 있어 종전의 에징(edging)-수평압연방법보다 폭변경능력이 우수하다.[5~6]

Fig. 4는 사이징프레스 압하시 슬래브와 엔빌간의 기학학적 관계를 나타내는 개념도이다.

- 최대 접촉길이

$$L_d = \frac{\Delta W}{2\tan\alpha} + L \qquad (1)$$

- 이송피치

$$L_p = \frac{h}{2\tan\alpha} \qquad (2)$$

- 최대하중

$$P = Q \cdot K_m \cdot H_0 \cdot L_d \qquad (3)$$

엔빌의 경사각에 따라 접촉길이와 이송피치가 변화하게 되고 사이징프레스에 작용하는 하중이 증가한다. 또한 사이징압하후의 슬래브 폭 프로파일과 폭압하효율에도 영향을 준다. 사이징프레스의 폭압하효율(η)은 엔빌에 의해 폭 압하후 두께방향으로 부풀어 오른 도그 본(dogbone)형상이 후속공정인 수평압연을 실시하였을 경우 폭 방향으로의 미 회복률을 나타내며 하기의 수식으로 표현된다

$$\eta = \frac{W_0 - W_1}{W_0 - W_e} = \frac{W_0 - W_1}{\Delta W} \qquad (4)$$

Fig. 5는 사이징프레스 압하공정과 수평압연공정에 있어서 슬래브의 변형형상에 대한 개념도를 나타낸다.

Table 2 Process conditions used in FEM analysis

Slab thickness (mm)	203, 250
Slab width (mm)	1000～2000
Width reduction (mm)	50～300
Friction coefficient	$\mu = 0.3$
Anvil speed (mm/s)	330
Anvil angle	$\theta=12^\circ$, $\theta_1=18^\circ$
Transfer pitch (mm)	386
Flow stress (Kg/mm^2)	Shida model

3.2 사이징 프레스 압하공정 해석방법

사이징프레스를 이용한 압하방법은 여러가지 방법이 있으나 본 연구에서는 일방향 압하방법에 대하여 슬래브의 변형거동을 고찰하였다. Table 2는 사이징프레스공정에 대한 해석조건이다. 슬래브두께 2조건, 슬래브 폭 5조건 그리고 폭압하량 6조건으로 60조건에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. Fig. 6은 프레스의 압하개시 위치를 나타내는 개념도이다. 폭 압하량이 160mm 이하조건의 경우 1단 경사부에 접촉하게 되고 폭 압하량이 160mm 이상조건의 경우 슬래브의 위치검출 센서로부터 1045mm 통과한 위치에서 압하가 진행되므로 1회 압하에서는 슬래브의 일부만 예성형되며 3회압하부터는 1단경사부와 2단경사부가 동시에 슬래브와 접촉하게 된다. 시뮬레이션에 사용한 슬래브길이는 압하횟수가 6~8회 정도 압하될 수 있도록 슬래브 길이를 충분히 설정하였다.

3.3 사이징과 수평압연 연계공정 해석

사이징 프레스를 통과한 슬래브는 후속공정인 수평압연을 실시하게 되며 이후 폭압연공정과 수평압연공정이 몇 패스 반복하여 제품의 폭과 일

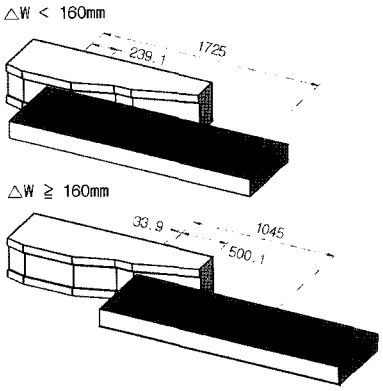

Fig. 6 Width reduction method by sizing press

Table 3 Production mill test conditions

Slab size (mm)	Thickness	203～250
	Width	1000～1850
	Length	8300～9720
Initial temperature (° C)		1230
Sizing press	Width reduction (mm)	50～350
	Transfer pitch (mm)	300～380
	Anvil speed (mm/s)	330
Horizontal Roll	Roll diameter (mm)	880
	Roll speed (mpm)	175

정두께를 제조한다. 사이징프레스 압하에 의해 소성변형된 슬래브가 수평압연시 몇 % 폭방향으로 회복되는지가 폭 치수품질에 중요하다. 따라서 해석범위를 후속공정인 수평압연해석까지 포함하였다. 수평압연공정에 대한 해석에서 수평 롤의 갭은 초기 슬래브두께와 동일하게 유지하고 사이징프레스에 의해 두께방향으로 변형된 도그 본 발생부만을 압연하도록 하였다.

4. 실기실험

실기실험은 유한요소해석 해석을 통하여 예측한 결과들을 검증하기 위하여 수행되었다.
실기실험 방법은 사이징프레스에 의한 압하공정만 실시한 경우와 사이징프레스 압하후 수평압연과 연계하여 실시한 경우로 구분하였다. 실기실험에 사용한 실험조건은 Table 3과 같다. 슬래브의 변형형상은 자체 제작한 측정장비를 이용하여 슬래브를 공냉시킨 후 폭방향으로 10mm 간격으로 유지하며 측정하였다. 또한, 슬래브 폭은 길이방향으로 50～100mm 간격으로 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 도그본 프로파일

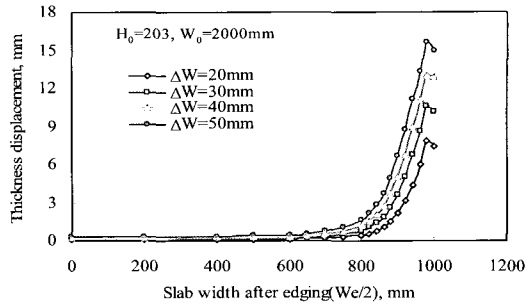

Fig. 7 Dog bone profile of vertical rolling

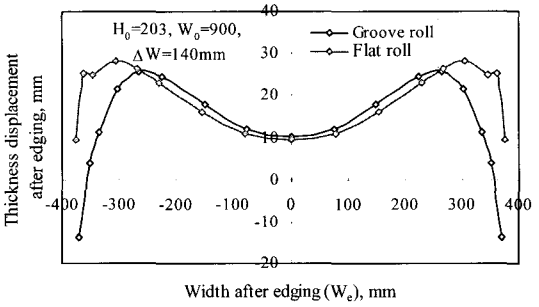

Fig. 8 Comparison with flat edger and grooved edger *for thickness displacement*

Fig. 7은 평 에저롤을 사용하여 폭압연을 실시한 경우의 슬래브 두께방향 변위분포를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보듯이 슬래브 에저부에 국부적인 변형이 발생하나 중심부에는 폭압연량(edging)이 증가하여도 크게 영향을 받지 않는다. 이와 같은 변형형상은 후속공정인 수평압연을 실시하게 되면 대부분 폭방향으로 변형을 하게 된다. Fig. 8은 슬래브두께 203mm, 폭 900mm, 폭압연량 140mm 조건에서 평 에저와 그루브형 에저를 사용하여 폭압연공정을 해석한 경우 슬래브의 두께방향 변위분포를 비교한 것이다. 결과에서 보듯이 도그본의 최대변위 발생위치가 평 에저를 사용하는 조건보다 그루브형 에저를 사용하는 조건이 엣지부로부터 중심부 쪽으로 더 이동되는 현상을 보인다. 즉 그루브형 에저를 사용하는 경우 폭압연시 에저롤의 플랜지(flange)부에 구속을 받아 슬래브를 내측으로 유도하기 때문이며 이와 같은 중심부쪽으로의 이동은 후속 수평압연에 의해 폭방향으로 회복되는 양이 작아져 폭압연효율을

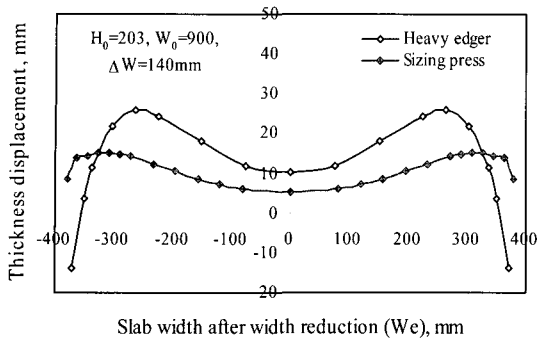

Fig. 9 Comparison with heavy edger and sizing press for thickness displacement

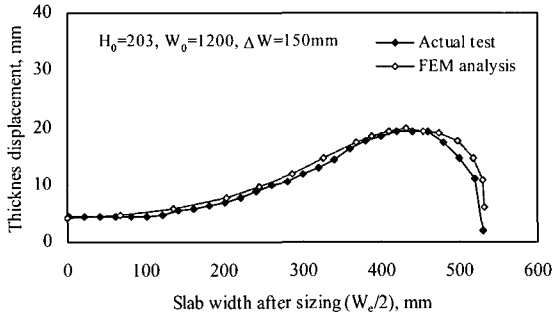

Fig. 10 Comparison of test results with FEM results for dog bone profile

증가시키는 장점이 있다. Fig. 9는 대폭압연공정과 사이징프레스 압하공정과의 슬래브 두께방향 변위분포를 비교한 것이다. 대폭압연에 의한 두께방향의 변형량이 사이징프레스의 변형량보다 더 크다. 즉, 대폭압연에 의한 슬래브의 변형거동은 대부분 두께방향으로 변형을 하지만 사이징프레스에 의한 변형거동은 슬래브 길이방향으로 유동하기 때문에 상대적으로 두께방향의 변형량이 작아짐을 알 수 있다. 따라서 두께방향의 변형량이 상대적으로 작은 사이징프레스의 경우가 후속공정인 수평압연을 실시하게 되면 폭방향으로의 회복량이 작아져 결국 폭압하효율 측면에서 효과적이라 평가할 수 있다. Fig. 10은 정상구간에서의 사이징프레스 압하 후 두께방향 변위분포를 실기실험결과와 비교한 것이다. 슬래브 길이방향에 따라서 차이가 있어 엄밀히 비교하기에는 어려움이 있으나 유사한 위치에서의 두께방향 프로파일을 비교한 것이며 그 결과 실기실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

5.2 폭압하효율

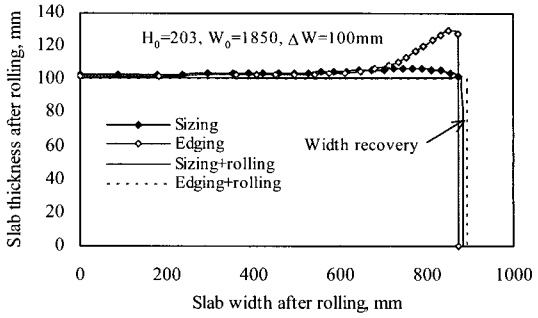

Fig. 11 Comparison with V-H rolling and S-H rolling for width spread

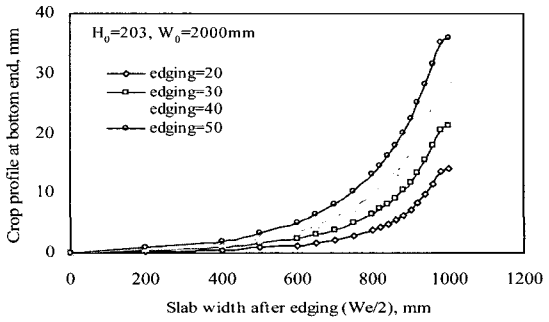

Fig. 12 Crop profile distribution at bottom end after vertical rolling

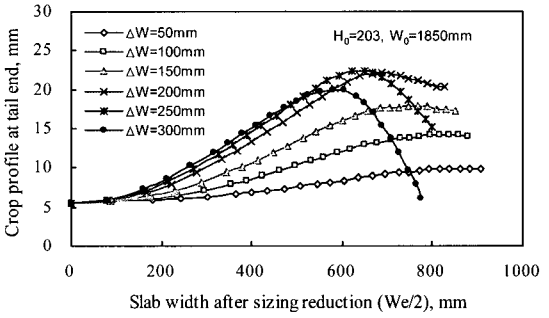

Fig. 13 Crop profile distribution at tail end after sizing reduction

Fig. 11 은 에저압연-수평압연(V-H)과 사이징프레스-수평압연(S-H)간의 폭 회복량에 대한 결과를 비교한 것이다. 여기서 폭 회복량이라 함은 폭압연 시 두께방향으로 부풀어 오른 도그 본 형상이 후속공정인 수평압 연 후 폭방향으로 회복되는 양을 의미한다. 결과에서 보듯이 에저압연-수평압

연가 사이징프레스-수평압연공정보다 폭 회복량이 더 증가함을 알 수 있다. 따라서 폭회복량이 작은 사이징프레스에 의한 폭압하공정이 폭압하효율측면에서 우수함을 보인다.

5.3 크롭(Crop) 프로파일

Fig. 12는 에저롤에 의한 폭압연후 후단부에 대한 크롭길이분포를 나타낸 것이다. 결과에서 보듯이 엣지부에만 국부적인 변형이 발생하기 때문에 슬래브 길이방향의 경우도 중심부 대비하여 엣지부의 변형이 증가하는 피쉬테일(fishtail)형 모양을 갖는다. Fig. 13은 사이징 프레스에 의한 압하 후의 판폭에 따라 후단부에 대한 크롭길이 분포를 나타낸 것이다. 사이징 프레스의 경우는 에저롤의 경우와 같이 피쉬테일형 크롭형상을 보이나 동일한 폭압하조건에서 비교해 보면 에저롤의 경우보다 평균크롭 길이가 작다.

Fig. 14는 사이징 프레스에 의한 유한요소해석 해석결과와 실기실험결과의 평균 크롭길이를 비교한 것이다. 여기서 평균 크롭길이는 크롭발생부의 면적을 폭으로 나눈 값으로 정의한다. 이 결과에서 보듯이 유한요소해석 해석결과와 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 폭압하량이 증가함에 따라 평균 크롭길이도 상대적으로 증가하는데 그 값은 대략 5~20mm 범위이다.

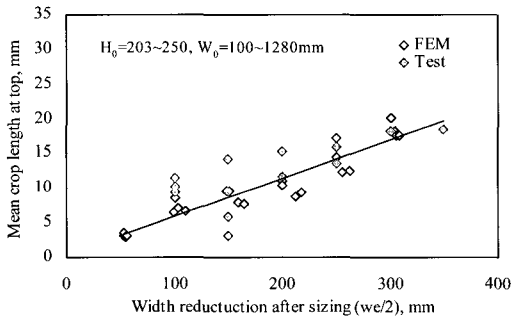

Fig. 14 Comparison of test results with FEM analysis

5.4 슬래브 길이방향 폭변화 거동

앞서 언급하였듯이 프레스압하의 문제점은 일정한 이송피치로 소재를 압축성형하는 공정이므로 이송피치간 슬래브길이방향으로 폭방향의 주기적인 편차(이하, 엔빌 이송피치내 최대 폭과 최소 폭과의 편차를 단차라 함)가 발생하게 된다. 단차발생에 대한 거동을 사이징 프레스 압하공정과 후속공정인 수평압연공정으로 나누어 해석을 실시하였다. Fig. 15는 사이징프레스 압하와 후속공정인 수평압연을 실시한 경우의 슬래브길이에 따라서 폭변화량을 나타낸 것이다. 결과에서 보듯이 엔빌피치마다 주기적인 폭 편차가 발생함을 알 수 있는데 본 연구에서 사용한 엔빌 형상조건에서는 폭압하량조건에 따라서 차이가 있으며 5~10 mm 범위를 보였다. Fig. 16은 실기실험에 의해 측정한 결과를 나타낸 것이다. 폭 압하량이 100mm 조건일 때 평균 6mm 정도의 단차가 발생한다. 이와 같은 단차발 생량을 줄이기 위해서는 엔빌형상에 대한 변화와 압연방법에 대한 개선이 필요하다.

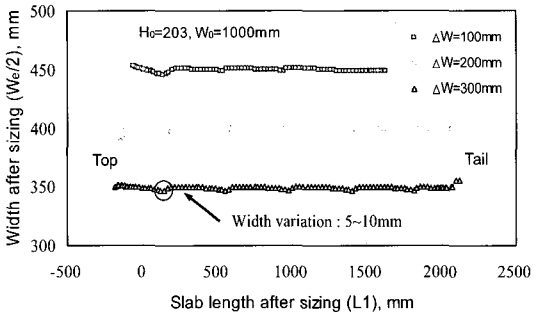

Fig. 15 FEM results of width profile after sizing and horizontal rolling

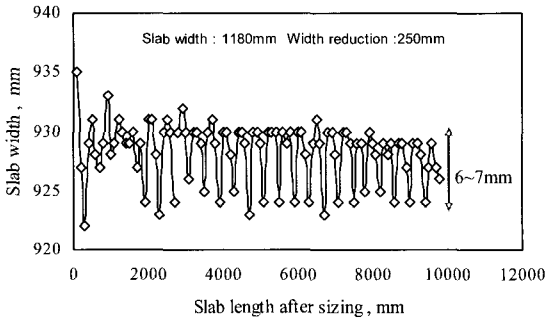

Fig. 16 Test results of width profile after sizing

6. 결 론

열간압연 폭압연공정에 대한 슬래브의 변형거동을 에저압연을 이용하는 경우, 대폭압연기를 이용하는 경우 및 사이징 프레스를 이용하는 경우로 구분하여 강소성 유한요소해석 해석을 실시하여 비교 검토하였으며 사이징프레스에 의한 해석결과와 실기실험결과와의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다

(1) 그루브형 에저롤의 조건이 평에저 롤에 의한 폭압연방법보다, 그리고 S-H 폭압연방법이 V-H 폭압연방법보다 폭압연능력이 우수하다.

(2) S-H 폭압연방법이 V-H 폭압연방법보다 폭압하효율이 우수하며 유한요소해석결과가 실기실험결과와 잘 일치한다.

(3) S-H 폭압연방법이 V-H 폭압연방법과 비교하여 선후단부 크롭발생량을 저감하는 효과가 있으며 유한요소해석결과가 실험결과와 잘 일치한다.

(4) 유한요소해석을 통해, 사이징프레스 압하 후 스래브길이방향으로 5～10mm 범위의 단차가 발생하였으며 실기실험을 통하여 그 결과를 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Nikaido, H., Fuziwara, K., Abe, H. and Nihei, M., 1984, "Development of slab sizing press for heavy width reduction in hot strip mills", Iron and Steel Engineer, Vol.21, pp. 48～53.

(2) Mougenez, Codur, Y., Roux, G. and Alberny, R., 1999, "Development of sizing press at Sollac Fos", Ironmaking and Steelmaking, Vol.26, No.1, pp. 27～30.

(3) Hira, T., Isobe, H., Abe, H., Nikaido, H. Fujisu, T. and Zuyzma, S., 1990, "Minimization of crop control and width control of hot rolling slabs of width by sizing press", Kawasaki Steel Tech. Rep., No.22, pp. 32～40.

(4) Muller and Rohde W., 1992, "Behaviour of slabs under deformation in a sizing press with large width reductions", SMS Technical Report Rolling Mill, Vol.15, No.5, pp. 139～148.

(5) 천명식, 정제숙, 2002, "Deformation behaviour of slab sizing press in hot strip mill", 한국소성가공학회, 2002 년 추계학술대회논문집, Vol.1, pp. 183~186

(6) Ginzburg V.B., 1989, "Width change of flat rolled products", Rolling Mill Technology series, Vol.3, pp. 1~33.

(7) Shida S., 1974, "Effect of carbon content, temperature and strain rate on compression flow stress of carbon steels", Hitachi Research Lab. Report, pp. 1～9.