

열간 조압연 공정에서 2단 사이징 프레스에 의한 크롭 최소화

허수진¹ · 이상호¹ · 이성진² · 이종빈² · 김병민[#]

Minimization of Crop Length by Sizing Press in Hot Rolling Mill

S. J. Heo, S. H. Lee, S. J. Lee, J. B. Lee, B. M. Kim

(Received October 13, 2008)

Abstract

In this study, design methodology to determine optimal shape of the anvil in sizing press process has been proposed to minimize crop length of the AISI 1010 slab in horizontal rolling after width reduction. Shape of anvil were selected to 12 cases by design of experiment, and the dog-bone shapes and the crop length were determined by FE-analysis. Also, the anvil shape, which has minimum crop length, were determined by artificial neural network(ANN). As a result of FE-analysis, it can be seen that the crop length was increased with increasing center thickness in the dog-bone shape after width reduction. The anvil shape which has minimum crop length, was estimated to $\theta_1=21^\circ$, $\theta_2=14^\circ$ by FE-analysis and ANN.

Key Words : Roughing Mill, Sizing Press, Anvil, Crop Length, ANN

1. 서 론

열간압연공정(Hot rolling process)중 조압연공정(Roughing mill process)은 중간 크기 바(Bar)를 제조하는 공정으로 슬래브 두께와 폭을 수요자가 원하는 형상으로 맞추는 공정이다. 조압연은 폭을 맞추기 위한 폭 압연(Vertical rolling)공정과 두께를 맞추기 위한 수평압연(Horizontal rolling)공정으로 구성되어 있다. Fig. 1은 폭압연기에 의한 도그-본(Dog-bone) 발생과 수평압연기에 의한 크롭(Crop)을 나타내고 있다.

Fig. 1(a)는 슬래브 폭 압하 공정 동안 발생하는 도그-본 변형을 나타낸 것이며 이것은 주로 슬래브의 중심부에서 발생한다. 크롭은 Fig. 1(b)에서와 같이 수평압연 이후 슬래브의 선단부와 후단부에 발생하는 비정상변형 부를 의미하며

전단기에 의해 절단되는 스크랩을 말한다. 일반적으로 폭압하 공정에서 도그-본 변형에 따라서 수평압연시 크롭양이 증가하는 것으로 알려져 있다[1~4].

기존의 폭 압연기인 수직 롤(Vertical roll) 타입은 폭 압하량이 커지면 슬래브의 중심부에서 도그-본 변형에 의해 선.후단부의 크롭이 증가한다. 따라서 크롭을 감소시키기 위해 슬래브 폭 압하 공정에서 도그-본 변형을 최소화 시킬 수 있는 공정개발이 무엇보다 중요하다.

수직 롤 타입의 문제점을 개선하기 위하여 도입된 것이 엔빌을 이용한 사이징 프레스(Sizing press) 방법이다. 사이징 프레스는 수직 롤 대신에 엔빌을 이용하여 슬래브 폭을 감소시키는 공정이다. 사이징 프레스 적용하면 동일한 폭 압하량에 대하여 슬래브의 변형거동은 길이방향으로 유동

1. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템

2. POSCO 기술연구소

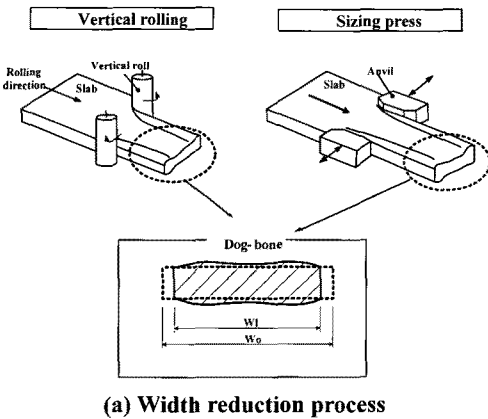
교신저자: 부산대학교 기계공학부, bmkim@pusan.ac.kr

하기 때문에 상대적으로 두께방향의 변형량이 작게 되면서 수평압연 실시되면 폭 방향으로의 회복량이 작아져 결국 폭 압하효율 측면에서 효과적이다[5~8].

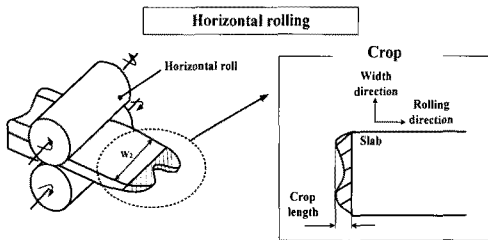
Nikaido 등은 열간압연에서 대폭 압하를 위한 사이징 프레스 개발에 대하여 연구를 시작으로 Muller 등은 대폭 폭압시 사이징 프레스에 의한 슬래브 변형거동에 대하여 연구를 하였다. 또한 Forouzan 등은 사이징 프레스와 수직 롤 해석을 이용하여 폭 압하시 슬래브의 변형거동을 비교 연구 하였다[3, 4, 8].

Chun 등은 유한요소해석을 이용하여 슬래브의 폭 압하 공정에서 동일한 압하량에 대해 사이징 프레스 타입은 수직 롤 타입과 비교하여 도그-본 변형 발생량이 적고 폭 압하 효율이 우수한 것으로 보고했다[6, 7].

Lee 등은 2 단 엔빌을 이용한 사이징 프레스에서 슬래브의 변형양상을 평가하여 도그-본과 캠버(Camber), 성형하중을 최소화하는 최적의 엔빌 경사부 각도를 제안하였다[9].



(a) Width reduction process



(b) Horizontal rolling process

Fig. 1 Layout of hot strip rolling

본 연구에서는 먼저 사이징 프레스에 의한 폭 압하 공정 후의 슬래브 형상이 수평압연 후의 크롭 크기에 미치는 영향을 조사 하였다.

도그-본 및 크롭 크기에 대한 평가는 실험계획법(Design Of Experiment)을 이용하여 사이징 프레스 형상 변수를 설정하였으며, 유한요소해석을 이용하여 도그-본 형상 및 크롭 크기를 구하였다. 그리고 인공신경망(Artificial Neural Networks, ANN)을 통하여 최소 크롭 길이를 가지는 사이징 프레스의 형상을 결정하였다.

2. 공정조건 및 해석절차

2.1 사이징 프레스 공정

Fig. 2 는 사이징 프레스에 의한 폭 압하 공정을 나타낸 것이다. (a)는 슬래브가 정지된 상태에서 사이징 프레스에 의해 폭이 압하되는 단계이고, (b)는 압하 후 사이징 프레스가 열리는 단계이다. (c)는 슬래브의 이송단계, (d)는 다시 폭 압하가 이루어지는 단계이다. 이러한 과정은 슬래브의 선단부에서 후단부까지 연속적으로 진행된다.

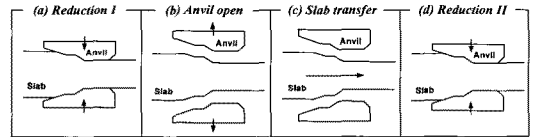


Fig. 2 Width reduction cycle in the sizing press

Table 1 Process condition of sizing press used in FE-analysis

Condition	Value
Slab thickness(mm)	200
Slab width(mm)	1000
Slab length(mm)	5000
Width reduction(mm)	300
Friction factor(m)	0.6
Anvil angle (°)	$\theta_1 = 10 \sim 25,$ $\theta_2 = 12 \sim 20$
Transfer pitch(mm)	380
Slab material	AISI 1010
Slab temperature (°C)	1100
Slab thermal conductivity ($w/m^{\circ}C$)	51.9
Anvil temperature(°C)	500
Anvil thermal conductivity($w/m^{\circ}C$)	28.6

사이징 프레스에 의한 폭 압하 공정해석 조건을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에 사용된 슬래브는 기계 구조용 탄소강인 AISI 1010이며 식(1)은 Shida의 식[8]을 기본으로 한 구성방정식이다. 초기 슬래브의 형상은 두께(H_0)는 200mm, 폭(W_0)은 1000mm이다.

$$\sigma_{10c} = 9.99 \left[1.3 \left(\frac{\epsilon}{0.2} \right)^{0.403} - 0.3 \left(\frac{\epsilon}{0.2} \right) \right] \left[\frac{\dot{\epsilon}}{10} \right]^{0.128} \quad (1)$$

사이징 프레스에 의한 폭 압하량(ΔW)은 300mm로 설정하였고, 사이징 프레스 엔빌은 열간 급형강인 AISI H13을 사용하였으며, 해석은 상용 유한요소 코드인 DEFORM 3D를 이용하였다.

Fig. 3은 사이징 프레스에 의한 폭 압하공정의 유한요소 모델을 나타내는 그림이다. 폭 압하공정에 의하여 슬래브의 단면은 초기(a)의 직사각형에서 (b)의 도그-본 형상으로 변형하게 된다.

Fig. 4는 2단 사이징 프레스 형상으로서 주요 설계변수 (θ_1 , θ_2)를 나타낸 것으로 접촉길이(L_d)는 경사부 길이(L_{i1} , L_{i2})와, 이송길이(L_s), 수평부 길이(L_{h1} , L_{h2})의 합으로 정의한다. 경사부 각도에 따라 접촉길이는 달라지고 길어질수록 하중이 커지게 된다. 따라서 사이징 프레스의 경사부 각도와 폭 압하량은 슬래브의 형상을 결정하는 중요한 변수가 된다.

슬래브는 폭 압하시 θ_2 경사부에 의해 먼저 성형된 이후 θ_1 경사부에 의해 성형되기 때문에 두께 방향으로 소재의 유동을 압연방향으로 분산시키는 효과를 가져오게 된다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구[10]에서의 2개 경사부에 의하여 압연 방향으로 분산수준 9 조건의 θ_1 과 θ_2 범위를 참고하여 θ_1 은 $10^\circ \sim 25^\circ$, θ_2 는 $12^\circ \sim 20^\circ$ 설정하였다.

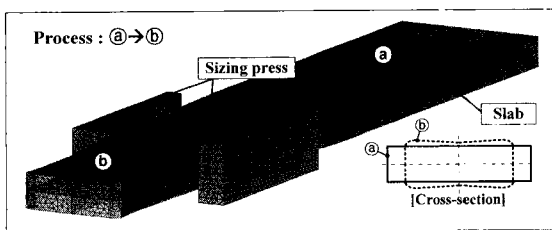


Fig. 3 Simulation model of width reduction using sizing press

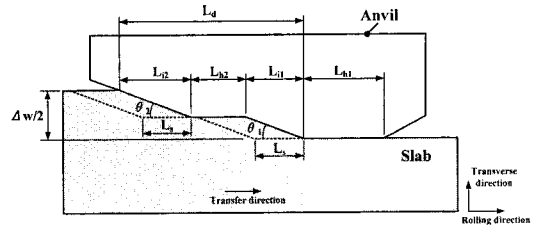


Fig. 4 Design parameters of the anvil shape in the sizing press process

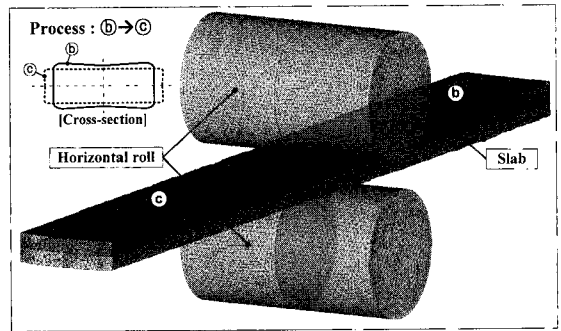


Fig. 5 Simulation model of rolling process using horizontal roll

Table 2 Process condition of horizontal rolling used in FE-analysis

Condition	Values
Roll diameter (mm)	1000
Rolling speed (rad/sec)	1.851
Fiction factor (m)	0.6
Initial roll Temperature ($^\circ\text{C}$)	500
Roll type	2 High mill

2.2 수평 롤에 의한 압연 공정

사이징 프레스에 의하여 폭 압하 공정을 거친 슬래브는 후속공정인 수평압연을 실시하게 된다.

Fig. 5는 사이징 프레스에 의하여 폭 압하된 슬래브가 수평 압연롤을 이용하여 열간압연되는 공정을 나타낸다. 이 때 슬래브의 단면은 (b)에서 (c)로 변형하게 된다. 사이징 프레스 압하에 의해 소성 변형된 슬래브가 수평 압연시 몇 % 폭 방향으로 회복되는지가 폭 치수 품질에 중요하다[6, 7].

Table 2는 열간 수평 압연시 공정해석 조건을 나타낸다. 열간 수평압연 공정시 사용한 롤의 직경은 1050mm이며, 롤의 초기 온도는 500°C 로 설정하였다. 롤의 회전속도는 1.851rad/sec이며 롤

과 슬래브 사이의 마찰 상수(m)는 열간 무윤활 조건인 0.6을 적용하였다[9].

2.3 해석 절차

Fig. 6은 크롭 최소화를 위한 사이징 프레스의 설계 절차를 나타낸 그림이다. 사이징 프레스의 설계변수를 실험계획법에 의해 설정하고, 폭 압하 공정을 수행하기 위하여 사이징 프레스를 모델링하여 유한요소 해석을 한다. 여기서 도그-본 프로파일을 획득할 수 있으며 차후 공정인 수평압연 공정 해석 후에는 크롭의 형상과 크기를 예측할 수 있다. 예측된 크롭의 크기는 신경망[10~11]을 이용하여 최소 크롭을 가지는 변수의 조합을 구한다. 그리고 신경망해석에 의해 도출된 최적 변수를 검증하기 위하여 유한요소해석을 실시한다.

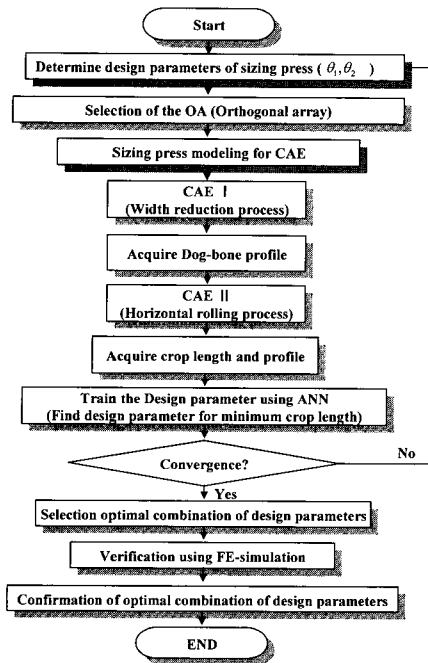


Fig. 6 Flowchart of parameter design of sizing press for minimum crop

3. 해석 결과

3.1 사이징 프레스에 의한 도그-본 발생

Fig. 7은 θ_1 과 θ_2 의 사이징 프레스 형상변수의 조합에 따른 폭 압하 공정후 슬래브의 단면을 나타낸 그림이다. 사이징 프레스 형상 변수 θ_1 (10°,

15°, 21°, 25°)과 θ_2 (12°, 16°, 20°)를 실험계획법에 의하여 설정하였다.

도그-본의 발생량은 θ_1 의 경사부 각도가 높은 15°, 21°에서 작게 발생하였다.

Fig. 7(a)의 $\theta_1=10^\circ$ 인 경우 θ_2 경사부가 증가할수록 슬래브는 엣지(Edge)부 두께 방향으로 유동이 증가하여 도그-본이 커지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(b), (c), (d)의 $\theta_1=15^\circ, 21^\circ, 25^\circ$ 에서는 θ_2 경사부가 증가할수록 슬래브가 엣지부 두께 방향으로 유동이 대체로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

$\theta_1=10^\circ$ 일 때 θ_2 경사부에 의한 1차 압하에서는 θ_2 경사부가 커질수록 소재유동이 두께방향으로 증가하여 도그-본 발생량 또한 증가한다.

2차 압하시 1차 압하에서 θ_2 경사부에 의해 성형되어 있던 슬래브 엣지부를 θ_1 경사부가 성형하게 되므로 이러한 도그-본 발생량은 비례적으로 증가한다. 반면에 $\theta_1=15^\circ, 21^\circ, 25^\circ$ 일때는 θ_2 경사부에 의한 압하시 두께방향의 소재유동과 길이방향 소재 유동이 동시에 일어나므로 비교적 작고 균일한 도그-본이 생성되는 것을 알 수 있다.

3.2 수평압연에 의한 크롭발생

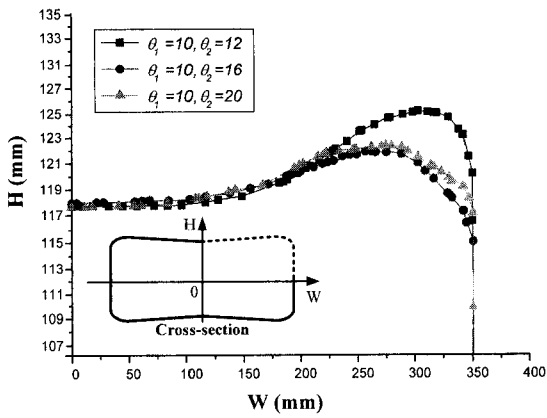
사이징 프레스 공정 해석후 12 가지 Case에 대하여 모두 수평압연 공정 해석을 하였다. 슬래브를 수평압연시 Fig. 8과 같이 도그-본 부분이 압연되면서 폭 방향으로 퍼짐이 발생하고, 슬래브는 압연방향으로 유동되어 슬래브 선단부와 후단부에 크롭이 발생하게 된다. 크롭 측정은 Fig. 8과 같이 선.후단부의 크롭크기를 합한 전체 크롭의 크기로 설정하였다. 12 가지 경우에 대한 크롭의 크기를 유한요소 해석값과 신경망 값을 비교하여 Table 3에 나타내었다. Case 8의 $\theta_1=21^\circ, \theta_2=16^\circ$ 에서 선.후단부의 크롭 크기가 가장 작게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 압연시 $\theta_1=21^\circ$ 에서 폭 방향으로의 퍼짐 현상은 $\theta_1=10^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ 와 비교시 작게 나타나며, 10~15mm의 폭 방향으로의 퍼짐량 차이가 난다.

θ_2 경사부가 증가할수록 $\theta_1=15^\circ, 25^\circ$ 에서 크롭이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

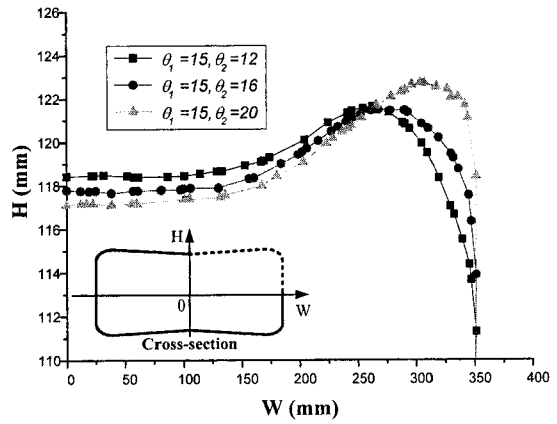
크롭의 형상은 모두 혀(Tongue)형상을 나타내며 θ_1 의 경사부가 25°인 경우는 복합형 형상(Tongue shape with fishtail)이지만 혀형상에 가깝다.

Fig. 9 그래프는 조합변수 θ_1 과 θ_2 중 어느 경사부 각도에서 크롭 크기에 영향을 더 크게 주는지 분석하여 나타낸 그래프이다. 레벨(Level) 1, 2, 3, 4

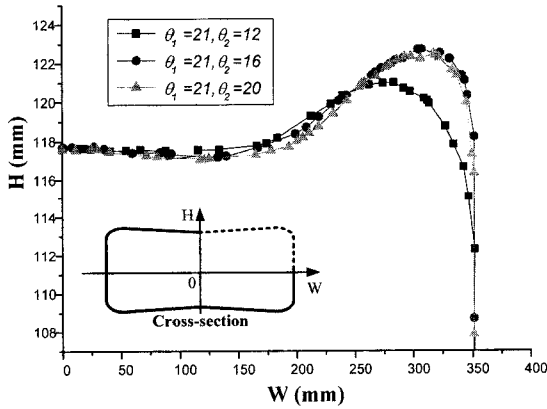
열간 조압연 공정에서 2단 사이징 프레스에 의한 크롭 최소화



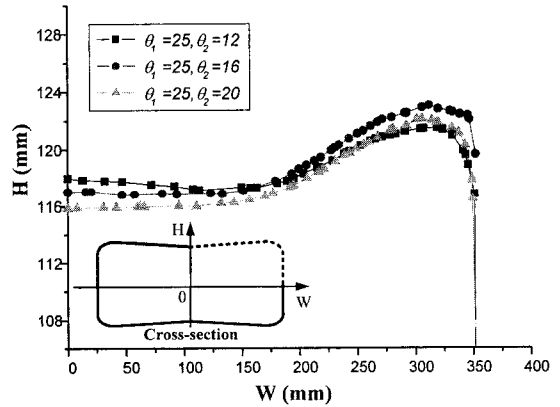
(a) $\theta_1 = 10^\circ$



(b) $\theta_1 = 15^\circ$



(c) $\theta_1 = 21^\circ$



(d) $\theta_1 = 25^\circ$

Fig. 7 Dog-bone profile according to θ_1 after sizing press

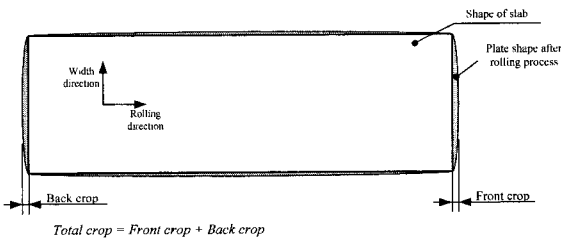


Fig. 8 Measured of crop length

는 θ_1 의 경사부 각도 10° , 15° , 21° , 25° 그리고 θ_2 의 경사부 각도 12° , 16° , 20° 를 의미한다.

분석결과 θ_1 의 영향도는 최하 레벨 3 과 최고 레벨 4 의 목적 값 차이는 18.0mm 가 나고, θ_2 의 목적 값은 6.2mm 차이가 난다. 여기서 알 수 있는 것은 θ_2 의 레벨의 평균값이 6.2mm 범위 내에

Table 3 Comparison of the crop length between FE-analysis and ANN

Case	θ_1	θ_2	Crop (mm)	
			FEM	ANN
1	10	12	82.60	82.48
2	10	16	84.98	84.85
3	10	20	79.98	79.78
4	15	12	91.25	93.63
5	15	16	88.94	88.85
6	15	20	78.78	78.59
7	21	12	71.73	73.91
8	21	16	67.52	67.28
9	21	20	76.64	76.85
10	25	12	97.69	97.68
11	25	16	89.14	86.05
12	25	20	83.18	83.04

서 변경할 수 있고 θ_1 의 평균값은 18.0mm 로 더 넓은 범위에서 변경이 가능한 것을 알 수 있다.

도그-본 측정에서 엔빌의 경사부에 따른 영향을 보면 슬래브는 2 번에 걸쳐 압하부가 눌러지며, θ_1 이 있는 경사부에 의하여 먼저 성형되고 난 이후 θ_2 에 의하여 재압하 된다. 재압하되는 과정에서 θ_1 방향으로 이동하는 소재가 θ_1 경사부에 닿 으면서 소재는 중심부나 엣지부로 이동되는 것을 볼 수 있다.

그러므로 θ_1 의 경사부 각도가 θ_2 경사부 각도 보다 크름 크기에 끼치는 영향이 더 큰 것으로 볼 수 있다. 3 레벨인 θ_1 의 경사부 각도는 21°에서 영향이 높고, θ_2 의 경사부 각도는 레벨 평균 값 범위내에서 증가할수록 크름 크기는 줄어드는 것으로 분석된다.

Fig.10 은 수평압연공정에서 단계별 슬래브의 폭 방향 소재의 유동 속도를 나타낸 그림이다.

소재 유동 순서는 (1)의 순서로 진행되며 초기 도그-본 형상에서 1→2step 에서 도그-본 피크(Pick)의 소재가 중심부와 엣지로 이동하게 된다. 그러나 도그-본의 크기는 두께(200mm)의 6.05~ 12.21%로 작기 때문에 중심부와 엣지부로의 유동은 그리 크지 않다. 3→5step 에 이르면 (2)의 순서로 진행되며 도그-본 중심부의 소재는 압연방향과 엣지 방향으로 이동한다. 이때 이동하는 소재의 양은 두께의 15.61~17.35%로 도그-본에 의한 양보다 크다.

크름의 크기는 슬래브가 압연방향으로의 유동이 클수록 증가하기 때문에 사이징 프레스에 의하여 성형된 도그-본 형상에서 중심부의 두께의 영향이 큰 것으로 판단된다.

도그-본 중심부의 두께가 작고 엣지부 두께가 큰 도그-본 형상을 가지게 되면 폭 방향으로의 유동이 증가하게 되어 생산량의 감소를 가져오게 된다. 따라서 중심부 두께와 엣지부 두께의 일정한 비율을 유지하는 것이 크름 크기를 줄일 수 있는 방법이다.

Fig. 11 은 수평압연에 의한 크름 크기와 도그-본 형상비(Shape ratio, H_{max}/H_c)의 관계를 나타낸 그림이다. 크름 크기와 도그-본 형상비는 반비례하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 $\theta_1=21^\circ$, $\theta_2=16^\circ$ 에서 67.53mm의 크름을 가지며, 이때의 도그-본 형상비는 1.0569 를 가진다. 최소 크름을 가지는 도그-본 형상비는 1.0569 와 유사한 정도를 가질 것으로 예상된다.

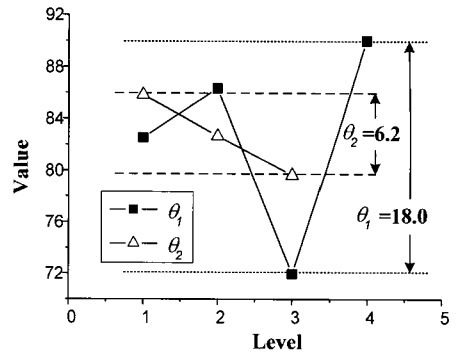


Fig. 9 Analysis of parameters influence on the crop length

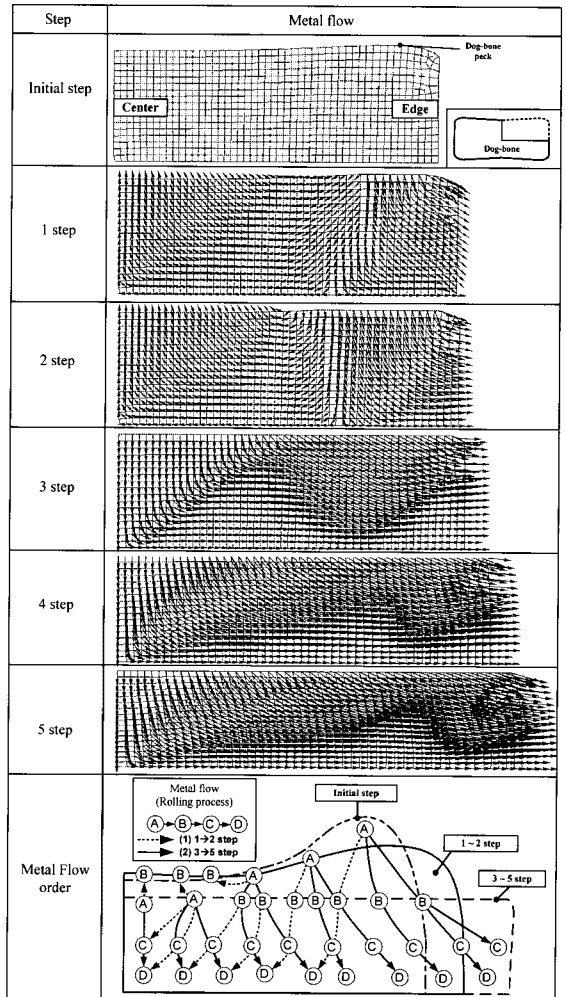


Fig.10 Metal flow in width direction at horizontal rolling process

4. 결론

본 논문은 폭 압하 후 수평압연에서 슬래브의 크롭을 최소화 시키기 위하여 최적의 사이징 프레스 형상을 설계하는 방법을 제시하였다. 기계구조용 탄소강 소재에 대해 최적의 엔빌 형상을 제안하기 위해 유한요소 해석법을 이용하였고, 해석 결과는 인공 신경망을 이용하여 최소 크롭 크기를 위한 사이징 프레스의 형상을 도출하였다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 사이징 프레스에 의한 폭 압하후 수평압연 공정에서 발생하는 크롭의 형상은 대부분 혀형상으로 나타났다. 따라서 폭 압하후 얻어진 도그-본 형상에서 중심부 두께부가 증가할수록 크롭이 증가하는 경향을 가지는 것으로 나타났다.

(2) 하지만, 폭 압하후 도그-본 중심부의 두께가 작고 엣지부 두께가 큰 도그-본 형상을 가지게 되면, 슬래브 폭 방향으로의 유동이 증가하게 되어 생산량의 감소를 가져오게 된다. 그러므로 최소 크롭은 중심부 두께와 엣지부 두께의 비율인 도그-본 형상비에서 결정된다.

(3) 탄소강 소재(AISI1010)에 두께(200mm), 폭(1000m), 길이(500mm)인 조건에서는 사이징 프레스 형상이 $\theta_1=21^\circ$, $\theta_2=14^\circ$ 에서 61.61mm 의 최소 크롭을 가지는 것으로 나타났으며, 이때의 도그-본 형상비는 1.05152 로 나타났다. 따라서 도그-본 형상비가 1.05152 에서 가장 작은 크롭을 가진다.

후 기

본 연구는 POSCO 석좌교수 연구지원 및 교육과학기술부 / 한국과학재단 국가핵심연구센터사업 (R-15-2006-022-03003-01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] N. Egawa, H. Ishizuka, T. Hiruta, 1999, Hot Rolling Technology for Producing High Quality Stainless Steel at No. 3 Hot Mill in Chiba Works, Kawasaki Steel Technical Report, No. 40, p. 16.
 [2] T. Hira, K. Isobe, H. Abe, H. Nikaido, T. Fujitsu, S. Zuyama, 1990, Deformation of Slab under Heavy Reduction of Width by Sizing Press, KAWASAKI STEEL TECHNICAL REPORT, No. 22 May, pp,

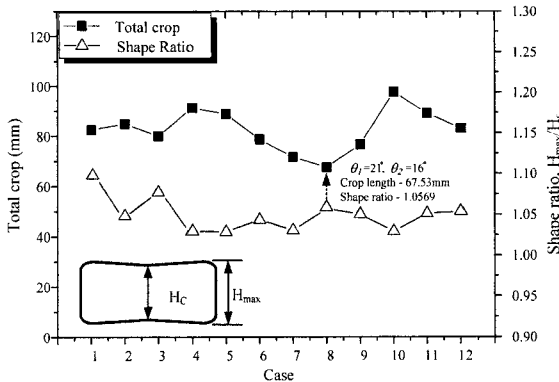


Fig.11 Relation of total crop and shape ratio

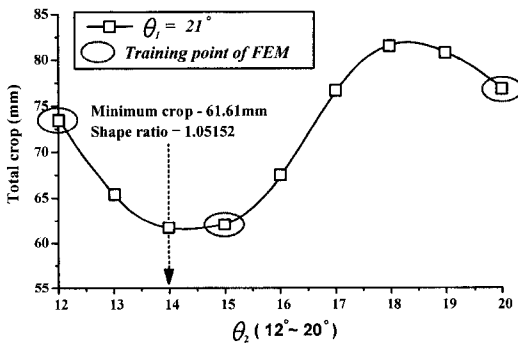


Fig.12 The minimum crop length by artificial neural network

3.3 인공 신경망을 이용한 크롭 최소화

앞선 결과에서 크롭의 크기는 도그-본 중심부 두께에 비례하는 것으로 나타났다. 또한 최소 크롭을 가지는 사이징 프레스 형상은 도그-본 형상비에 의하여 정해짐을 알 수 있다.

따라서 인공 신경망을 통하여 최소 크롭을 가지는 사이징 프레스 형상을 결정하고, 이때의 도그-본 형상비를 예측한다.

Fig. 12 는 인공 신경망을 통해 얻어진 θ_1 과 θ_2 에 의해 발생하는 크롭 크기를 나타내는 그래프이다. $\theta_1=21^\circ$, $\theta_2=14^\circ$ 에서 61.61mm 의 크롭을 가지는 것으로 나타났으며, 이때의 도그-본 형상비는 1.05152 로 나타났다.

따라서 기계구조용 탄소강 소재로 두께(200mm), 폭(1000m), 길이(500mm)인 조건에서는 1.05152 의 형상비를 가질 때 최소 크롭을 가지는 것으로 판단된다.

- 188~194.
- [3] H. Nikaido, K. Fujiwara, H. Abe, M. Nihei, 1990, Development of slab sizing press for heavy width reduction in hot strip mills, *Iron and Steel Engineer*, pp. 21~26.
- [4] Heinz-Adolf Muller, Wolfgang Rohde, SMS Schloemann-Siemag, Aktiengesellschaft, Dusseldorf, Hilchenbach, 1992, Behaviour of slabs under deformation in a sizing press with large width reductions, *Metallurgical Plant and Technology International*, pp. 60~69.
- [5] Processes, *Int. J. of Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 15, pp. 886~894.
- [6] M. S. Chun, J. S. Cheong, 2002, Deformation behavior of slab sizing press in hot strip mill, *KSTP conference proceedings*, Vol. 1, pp. 189~186.
- [7] M. S. Chun, J. S. Cheong, T. An, Y. H. Moon, 2003, Finite Element Analysis of slab deformation under the width reduction in hot strip mill, *J. KSTP*, Vol. 12, No. 7, pp. 668~674.
- [8] Mohammand Reza Forouzan, Iman Salehi, Amir hossein Adibi-sedeh, 2008, A comparative study of slab deformation under heavy width reduction by sizing press and vertical rolling using FE analysis, *Journal of materials processing technology*.
- [9] S. H. Lee, D. H. Kim, S. M. Byon, H. D. Park, B. M. Kim, 2005, Deformation Behavior of Slab by Tow-Step Sizing Press in a Hot Strip Mill, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 14, No. 9, pp. 791~797.
- [10] D. H. Kim, D. C. Ko, B. M. Kim, J. C. Choi, 1998, Mechodology of perform Design Considering Workability in Metal Forming by the Artificial Neural Network and Taguchi Method, *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 80, pp. 487~492.
- [11] D. H. Kim, D. J. Kim, B. M. Kim, 1999, The Application of Neural Networks and Statistical Methods to Process Design in Metal Forming.