

열간 압연에서 2 단 사이징 프레스 금형에 의한 슬래브의 변형거동 예측

이상호¹ · 김동환² · 변상민³ · 박해두³ · 김병민[#]

Deformation Behavior of Slab by Two-Step Sizing Press in a Hot Strip Mill

S. H. Lee, D. H. Kim, S. M. Byon, H. D. Park, B. M. Kim

(Received August 19, 2005)

Abstract

Extensive width reduction of slabs is an important technology for achieving continuous production between the steelmaking and hot rolling processes. However, the vertical horizontal rolling process has many disadvantages, e.g., large width deviations and less efficient width reduction. This study was carried out to investigate the deformation of slab by sizing press with two steps die. To do it, dog-bone and camber are discussed in width sizing process considering the deformation behavior according to the deviation of anvil velocity and the deviation of initial slab temperature. In this paper, the various causes of the sizing press phenomena are mentioned for the purpose of understanding of rolling conditions. As a result, the optimal anvil shape having a minimum-forming load is obtained by FE-simulation and ANN.

Key Words : Hot Strip Rolling, Sizing Press, Camber, Two-Step Die, FE-simulation, Neural Networks, Dog-bone

1. 서 론

압연강관의 품질관련 항목 중에서 치수 관리가 대단히 중요하며 그 중에서도 최근 폭 정밀도 개선에 관한 관심이 높아지고 있다[1~2]. 기존의 엷저 압연기(Vertical rolling edger)는 연주의 생산 능력을 저하하는 문제점이 있다. 이에 비하여 사이징 프레스(Sizing press)는 대폭 압하가 가능하고 생산력을 향상시킬 수 있다. 그러나 사이징 압하 공정에서 금형의 형상에 따라서 슬래브(Slab)의 변형거동에 차이를 유발하게 된다.

Fig. 1 에서 나타나듯이 평 금형에 의한 겹침 결함(Folding)을 줄이기 위하여 본 논문에서는 금형의 코너부를 경사지게 하고 슬래브의 국부적

인 변형을 줄이게 하는 경사형 금형을 제안하였다[3].

본 연구에서는 사이징 프레스 공정의 성형해석 기법을 수립을 위하여 상용 유한요소 코드인 DEFORM 3D를 이용하여 사이징 프레스의 성형해석을 수행하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 2단 경사부를 가지는 금형(Anvil)을 나타낸다. 엔빌은 한 쌍으로 슬래브의 폭 방향으로 타격을 하게 된다. 해석을 통하여 사이징 압하에 의한 슬래브의 변형거동을 예측 및 겹침 현상으로 인한 표면 결함을 관찰하였고, 도그 본(Dog-bone) 및 캠버(Camber)의 형상 예측 및 도그 본, 캠버의 최소화 방안, 최소 성형하중을 가지는 엔빌의 형상 예측에 대한 연구를 수행하였다[4~5].

1. 부산대학교 정밀기계공학과
2. 진주국제대학교 자동차공학과
3. POSCO 기술연구소 공정제어연구그룹
교신저자 : 부산대학교 기계공학부,
E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

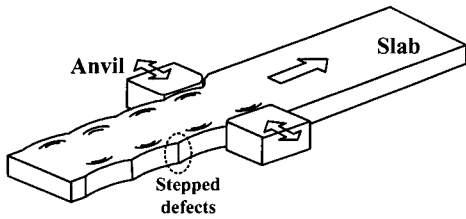


Fig. 1 Stepped defects according Anvil(Plate dies)

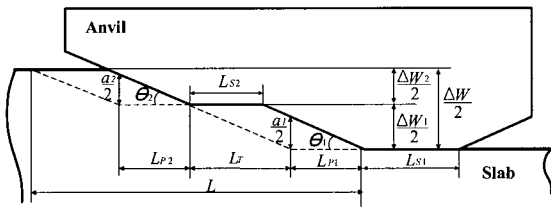


Fig. 2 Shape of two-step dies(Anvil)

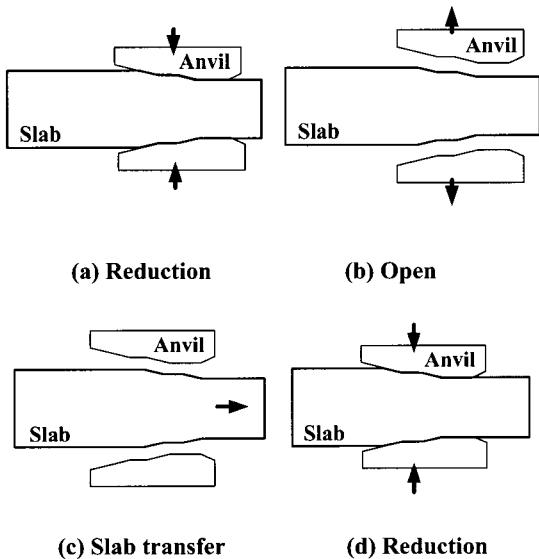


Fig. 3 Width reduction of sizing press

2. Sizing press 성형 해석

2.1 Two-step sizing press 해석조건

Fig. 2 는 본 연구에서 사용된 2 단 사이징 프레스 급형의 형상을 나타낸다. Fig. 3 은 사이징

Table 1 FE-simulation analysis condition for sizing process

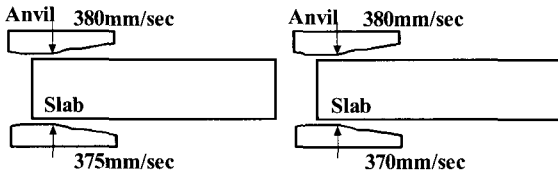
	Material	AISI 1010
Slab	Thermal conductivity	51.9 N/sec °C
	Emissivity	0.3
	Heat capacity	3.526 N/mm² °C
Anvil	Material	H 13
	Thermal conductivity	28.6 N/sec °C
	Emissivity	0.7
Sizing process conditions	Heat capacity	3.574 N/mm² °C
	Width reduction	100 mm
	Fiction factor(m)	0.3
Sizing process conditions	Interface heat transfer coefficient	11.3 N/sec mm °C
	Convection coefficient	0.02 N/sec mm °C
	Initial billet/Anvil temp.	1100 / 500 °C
	Anvil velocity	380 mm/sec

프레스 공정을 나타내고 있다. (a)는 엔빌에 의한 폭 압하하는 단계를 나타내고, (b)는 압하 후 엔빌이 열리는 단계를 나타낸다. (c)는 슬래브의 이송 단계, (d)는 다시 폭 압하를 연속적으로 수행하여 슬래브의 폭압하 공정이 이루어진다. 이에 따른 사이징 프레스의 성형 해석 조건은 Table 1 에서 나타내었다.

슬래브의 폭 압하는 100mm로 설정하였으며, 엔빌의 압하 속도는 380mm/s 로 일정하게 주었다. 슬래브의 이송길이는 380mm, 초기 엔빌과 슬래브의 온도는 각각 500°C와 1100°C로 설정하였다. 초기 접촉부(최초 사이징)에서는 10mm씩 나누어 5회에 걸쳐 총 50mm를 압하하고 난 후 슬래브의 이송이 이루어진다. 이후 공정에서는 50mm씩 압하하게 된다. 엔빌의 소재는 열간 금형강인 H-13을 사용하였으며, 슬래브의 소재는 AISI 1010을 사용하였다. 마찰상수(m)는 열간 성형에서 주로 사용되는 0.3으로 설정하였다. 또한 열전도율은 엔빌과 슬래브 각각 28.6w/m°C, 51.9 w/m°C로 설정하였다[6~8].

2.2 타격지연 영향 평가

사이징 프레스 공정에서 타격지연으로 인하여 오프 센터(Off center)가 발생하게 된다. 양 쪽의 엔빌로 슬래브를 폭 압하를 실시할 때 슬래브의



(a) 5mm/s (b) 10mm/s
Fig. 4 The deviation of anvil velocity

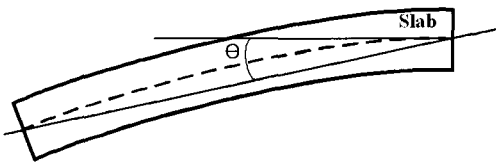


Fig. 5 Measurement of camber

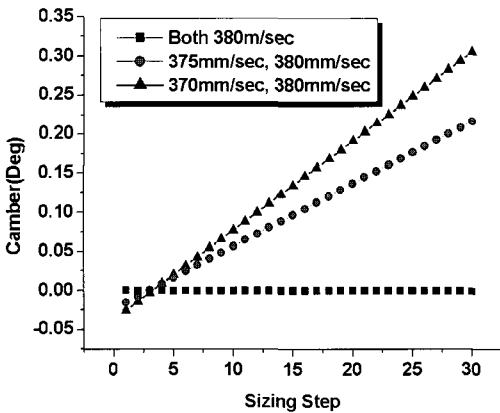


Fig. 6 Distribution of camber of slab by anvil velocity

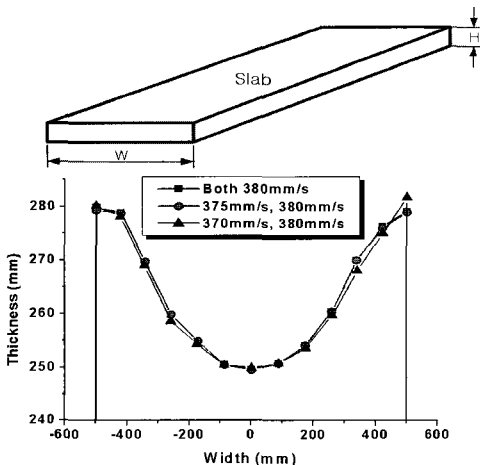


Fig. 7 Dog-bone profile according to anvil velocity

변형거동을 평가하기 위하여 연구를 수행하였다.

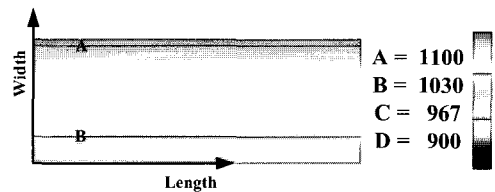
Fig. 4에서 나타나듯이 사이징 프레스 공정조건에서 각 엔빌의 속도를 한 쪽을 380mm/s 와 다른 쪽을 375mm/s와 370mm/s의 두 가지 경우로 각각의 엔빌의 속도차를 5mm/s 와 10mm/s로 두고 DEFORM 3D를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 두 가지 경우와 편차가 없는 정상상태의 사이징 공정에서의 슬래브에 발생하는 캠버와 도그 본의 형상을 비교하였다. Fig. 5는 캠버를 측정하는 방법에 대하여 나타내고 있다.

Fig. 6 은 엔빌의 속도차에 따른 슬래브의 캠버를 스텝 수에 따라서 나타내는 그림이다. 엔빌의 속도차가 클수록 슬래브의 캠버량이 커지는 것으로 나타났으며, 공정이 진행됨에 따라 캠버량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 7 은 사이징 공정 후 슬래브의 폭 방향으로 두께 변화, 즉 도그 본의 형상을 나타낸 결과로써 엔빌의 속도차에 의해 발생하는 타격지연은 도그 본 형상의 변화에 영향이 매우 적은 것을 알 수 있다.

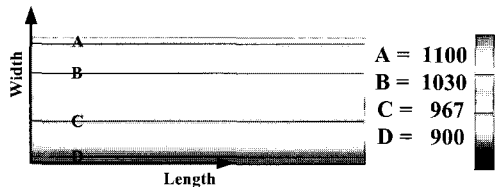
2.3 Slab 온도 편차에 의한 영향 평가

슬래브의 초기 온도분포가 폭 방향으로 차이가 있을 때, 사이징 프레스 공정에서 슬래브에 어떤 영향이 있는지 연구를 수행하였다. 엔빌의 속도는 양 쪽 380mm/s로 동일하게 하였으며 이때 사이징 공정 이전의 슬래브의 온도 분포는 Fig.8에서 보여지듯이 폭방향으로 온도 편차를 주었다.

Fig. 9의 유효 변형율 분포와 Fig. 10의 유효 응력 분포에서 보여지듯이 온도가 높은 쪽에서 변

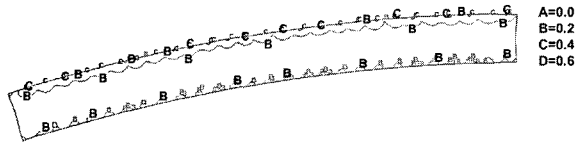


(a) 1000 ~ 1100 °C

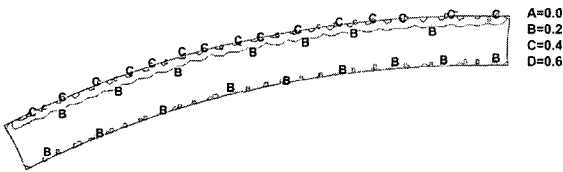


(b) 900 ~ 1100 °C

Fig. 8 Distribution of temperature



(a) Initial temperature 1100 °C~1000 °C



(b) Initial temperature 1100 °C~900 °C

Fig. 9 Distribution of effective strain

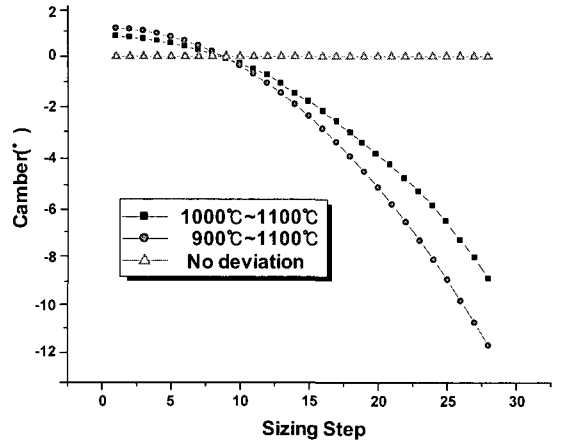
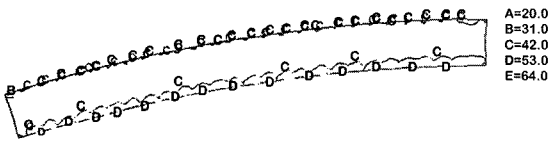
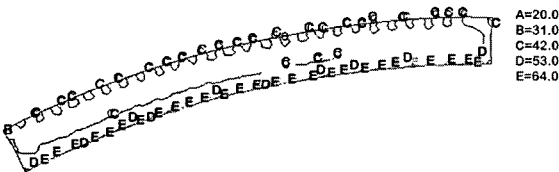


Fig.11 Dependency of camber on the slab temperature



(a) Initial temperature 1100 °C~1000 °C



(b) Initial temperature 1100 °C~900 °C

Fig.10 Distribution of effective stress

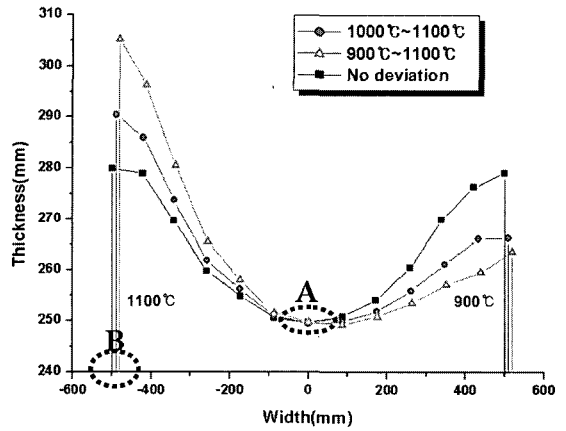


Fig.12 Profile of dog-bone according to slab temperature

형율이 크고 응력이 집중되는 것을 알 수 있다. 따라서 변형이 상대적으로 온도가 낮은 방향으로 슬래브가 휘는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11 에서 보면 사이징 공정이 끝났을 때, 슬래브의 폭 방향 온도차 100 °C에서 캠버는 약 8.85° 나타났으며, 온도차 200 °C일 때에는 약 12.13°의 캠버가 나타났다. 온도차가 클수록 캠버가 커지며, 온도 편차를 줄일수록 슬래브에 발생하는 변형 거동을 줄일 수 있다. 따라서 슬래브의 폭

방향으로 등온을 유지할 때 캠버를 최소화할 수 있다.

Fig. 12에 온도 편차에 따른 도그 본의 형상을 나타내었다. 유효 변형율의 분포에서 보여지듯이 1100 °C인 슬래브 끝 단에서의 변형과 다른 쪽의 1000 °C와 900 °C에서의 변형을 비교할 때 1100 °C에서 변형율 값이 상대적으로 크므로 도그 본의 형상에 큰 차이를 보였다.

Fig. 12의 A 지점에서 알 수 있듯이 중심부에서의 변형을 보면 온도 편차가 있을 때와 없을 때의 H 값의 차이가 크지 않았다. 이는 슬래브의 초기 온도 분포 값이 중심 지점에서 거의 같아 변형율 값이 비슷하다. 따라서 중심에서의 변형이

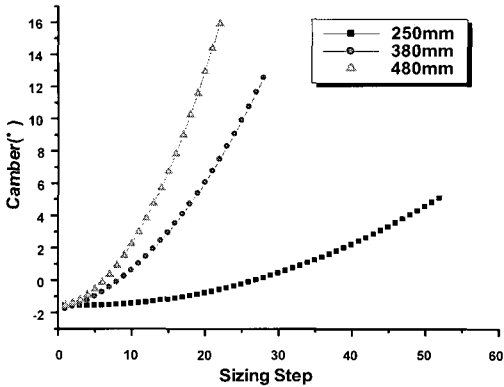


Fig.13 Distribution camber according to the transfer length of slab

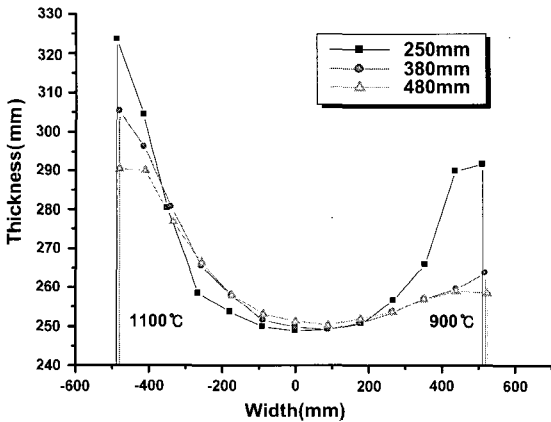


Fig.14 Dog-bone profile according to the transfer length of slab

균일함을 알 수 있었다. 그러나 슬래브의 끝 단에서 온도의 차가 크게 날수록 도그 본의 형상에서 높이 차이가 컸으며, 사이징 공정 후의 전체 폭은 일정하지만, 온도가 높은 쪽에서 폭의 감소가 약간 더 큰 것을 Fig. 12의 B 부분에서 확인하였다. 해석 결과로 볼 때, 온도가 사이징 프레스 공정에서 슬래브의 캠버 현상과 도그 본의 형상에 매우 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

2.4 슬래브 이송거리에 따른 영향 평가

사이징 프레스 공정에 있어서 엔빌의 슬래브 압하 공정 후 슬래브의 이송이 이루어진다. 이송 거리에 따라 슬래브 내부에 전해지는 단조효과에 의해 슬래브 변형거동에 많은 영향을 끼친다. 따

라서 이송거리에 따른 슬래브의 변형거동을 파악하고자 한다.

슬래브의 이송거리에 따른 캠버 및 도그 본의 영향을 비교하기 쉽게 평가하기 위하여 슬래브의 폭 방향으로 온도 분포를 Fig. 8(b)와 같이 주었으며, 양쪽 엔빌의 속도는 380mm/sec로 동일하게 설정하였다. Fig. 2에서 L_T 는 슬래브의 이송거리를 나타내고 있다. 본 연구에서는 슬래브의 이송거리를 250mm, 380mm, 480mm로 나누어 해석을 수행하였다. 사이징 횟수가 클수록 엔빌의 수명 감소 및 공정시간이 늘어나게 되어 생산성을 떨어뜨리는 효과를 가져온다. 이송거리에 따라 슬래브의 압하 횟수는 250mm일 때 53회, 380mm일 때 28회였으며 480mm일 때가 22회로 가장 적었다. Fig. 13는 이송 거리에 따른 캠버를 스텝 수에 따라서 나타낸 그림이다. 캠버는 스텝 수가 가장 적게 나타난 이송 거리 480mm에서 15.89°로 가장 컸으며, 380mm는 12.56°, 250mm는 5.95°로 가장 낮게 나타났다. Fig. 14는 슬래브의 이송거리에 따른 도그 본의 형상을 나타내었다. 폭 방향에서 볼 때 1100°C인 곳에서 900°C보다 도그 본의 형상이 크게 나타났다. 그리고 이송거리에 따라서 사이징 횟수가 많은 것에서 폭 방향 끝 단 쪽이 변형이 컸다. 즉, 이송거리가 적을수록 끝 단에서 변형이 많아 도그 본의 형상에 많은 영향을 미친다고 할 수 있겠다. 따라서 이송거리가 커짐에 따라 캠버에 대한 영향을 적으나 도그 본의 형상을 결정함에 있어 많은 영향을 주었다.

3. 최소 성형하중을 가지는 엔빌 형상 예측

본 연구에서는 엔빌의 형상에 따른 최소 성형하중을 고려하기 위하여 자기 학습 능력을 가지고 있는 다층 퍼셉트론(Multi-layer perceptron) 인공신경망(ANN)과 유한요소법을 이용하였다. 유한요소해석을 통하여 성형하중값을 구하고 신경망을 통하여 설계 변수조합과 성형하중값을 학습시켜 최소 성형하중값을 가지는 엔빌의 형상변수를 구하였다[9].

성형하중에 영향을 미치는 형상설계변수로는 θ_1 , θ_2 , w_2/w_1 로 설정하였으며, 각 변수는 서로 연관되어 있음을 Fig. 2의 엔빌의 형상에서 보여준다. 각 변수의 범위는 θ_1 와 θ_2 는 7~21°, w_2/w_1 는 0.7~1.3의 범위로 설정하였다. Table 2에는 직교배열표를 이용한 신경망의 학습데이터와 그 출력값

Table 2 OA table for FE-simulation

FEM No.	Geometric parameters			Load(kN)	
	θ_1	θ_2	w_2/w_1	FEM	ANN
1	7°	7°	0.7	6.04	6.04
2	7°	14°	1	5.98	5.98
3	7°	21°	1.3	5.67	5.67
4	14°	7°	1	5.92	5.91
5	14°	14°	1.3	5.33	5.32
6	14°	21°	0.7	5.1	5.09
7	21°	7°	1.3	5.82	5.81
8	21°	14°	0.7	4.96	4.96
9	21°	21°	1	4.9	4.89

Table 3 Verification of ANN results

Case	θ_1	θ_2	w_2/w_1	Load(kN)	
				FEM	ANN
Min. load	21	20	0.9	4.83	4.80
Max. load	7	7	1.3	6.06	6.09

을 나타내었다. Table 2에서 알 수 있듯이, 신경망이 학습으로 얻어진 출력값은 DEFORM 3D를 이용하여 해석을 수행한 결과 얻어진 목적값 즉, 성형하중값과 거의 일치하였으며 신경망의 학습이 잘 되었음을 확인할 수 있다.

신경망을 통하여 얻어진 최소 성형하중을 가지는 형상설계변수는 $\theta_1=21^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $w_2/w_1=0.9$ 로 나타났다. 유한요소 해석을 통하여 최소 성형하중값을 가지는 성형설계변수를 적용한 엔빌을 이용하여 슬래브의 폭 압하를 실시하였다. Table 3은 최소 성형 하중과 최대 성형하중을 가지는 형상설계변수에 대하여 신경망을 통한 결과와 유한요소해석의 결과를 나타내었다. 결과에서 볼 수 있듯이 신경망에 의하여 예측한 결과와 유한요소해석을 통하여 얻은 값의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 2 단 사이징 프레스 금형에 의해 슬래브에 발생하는 변형 거동 현상을 분석하고 평가하였다. 슬래브의 오프 센터 및 엔빌의 타격 지연의 영향 평가, 슬래브의 온도 편차에 의한 영향 평가와 슬래브 이송거리에 따른 영향 평가, 최소 성형하중을 가지는 엔빌의 형상을 예측하였다.

이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 2 단 경사형 금형은 평 금형과는 달리 접침 결함을 발생시키지 않고 폭 압하를 가능하게 하였다.

(2) 엔빌의 속도 편차에 의한 오프 센터 및 타격지연의 영향을 평가하였다. 속도 편차가 일어남에 따라 슬래브의 캠버 현상이 미소하지만 발생하였다. 속도 편차의 크기가 클수록 캠버의 크기가 컸으며, 캠버의 방향은 엔빌의 속도가 큰 쪽으로 휘어졌다.

(3) 슬래브의 폭 방향으로 온도의 차가 클수록 도그 본의 형상에서 폭 방향 끝 단 부에서의 높이 차이가 컸으며, 온도분포가 높은 쪽에서 폭의 감소가 약간 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 온도 편차는 사이징 프레스 공정에서 슬래브에 나타나는 캠버 현상과 도그 본의 형상에 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

(4) 슬래브의 이송거리에 따라서 사이징 프레스 공정 후 슬래브이 변형을 살펴보면 이송거리가 커짐에 따라서 캠버에 큰 영향을 주었으나 도그 본 형상에 대하여 영향이 적게 나타났다.

(5) 신경망과 유한 요소해석을 통하여 엔빌의 형상에 따른 최소 하중값을 예측하였다. 형상설계 변수는 $\theta_1=21^\circ$, $\theta_2=20^\circ$, $w_2/w_1=0.9$ 에서 최소 하중값을 가지는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] T. Hira, K. Isobe, H. Abe, H. Nikaido, T. Fujisu, S. Zuyama, 1990, Deformation of Slab under Heavy Reduction of Width by Sizing Press, Kawasaki Steel Technical Report, No.22, pp. 32~40.
- [2] T. Fujitsu, T. Fujimoto, H. Nikaido, M. Nihei, 1989. Development of a slab sizing press for extensive slab width reduction, STEEL TIMES MAY, pp. 266~270.
- [3] H. Nikaido, K. Fuziwaru, H. Abe, M. Nihei, 1984, Development of Slab Sizing Press for Heavy Width Reduction in Hot Strip Mills, Iron and Steel Engineer, Vol. 21, pp. 48~53.
- [4] Müller, W. Rohde, 1992, Behavior 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] Mougenez, Y. Co, G. Roux, R. Albery, 1999, Development of Sizing Press at Sollac Fos, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 26, No.1, pp. 27~30.
- [6] "DEFORMTM-3D," SFTC, 1995.
- [7] D. H. Kim, B. M. Kim, Y. Lee, 2003, Prediction of Wear Profile of Roll Groove in Rod Rolling using Incremental Form of Wear Model, Proc. Instn. Mech. Engrs Part B: J. Engineering Manufacture.
- [8] D. H. Kim, B. M. Kim, Y. Lee, 2003, Adjustment of Roll Gap for the Dimension Accuracy of Bar in Hot Bar in Hot Bar Rolling Process, International Journal of the KSPE, Vol 4, pp. 56~62.
- [9] D. H. Kim, D. J. Kim, B. M. Kim, 1999, The Application of Neural Networks and Statistical Methods to Process Design in Metal Forming Processes, Int. J. of Adv. Manuf. Tech., Vol. 15, pp. 886~894.
- [10] M. S. Chun, J. S. Cheong, I. T. An, Y. H. Moon, 2003, Finite Element Analysis of Slab Deformation under the Width Reduction in Hot Strip Mill, Transactions of Material Processing, Vol. 12, No. 7, pp. 668~674.
- [11] B. M. Kim, D. H. Kim, 2003, Estimation of Die Service Life for Die Cooling Method in Hot Forging, Transactions of Material Processing, Vol. 12, No. 4, pp. 408~413.