

열간 조압연공정에서 판 캠버 저감을 위한 사이드 가이드 동적설정에 관한 연구

변상민*.#

*동아대학교 기계공학과

A Study on the Dynamic Setup of a Side Guide to Reduce Bar Camber at the Roughing Train in a Hot Strip Rolling Mill

Sang-Min Byon*.#

*Department of Mechanical Engineering, DONG-A UNIV.

(Received 8 December 2015; received in revised form 21 January 2016; accepted 21 January 2016)

ABSTRACT

Bar camber is a phenomenon in which a material with a deformation gradient across its width is bent in the right or left direction in the roll gap. This paper proposes a dynamic setup approach for a side guide for reducing bar camber. A bar tracking scheme using a rotary encoder was adopted to fix an operation point for the side guide. The guiding pressure was utilized for measuring the actual width of the bar with camber. Based on the accurate position and width of the bar, the side guide was dynamically set and operated at the actual roughing train in a hot strip rolling mill. The amount of camber was reduced notably when the dynamic setup scheme was installed in the side guide. 78% of the bars tested had a camber in the range of ± 20 mm, which was an improvement of 27% in terms of production yield.

Key Words : Bar Camber(바 캠버), Side Guide(사이드 가이드), Dynamic Setup(동적설정), Hot rolling(열간압연)

1. 서 론

열간 판압연(Hot strip rolling)은 $1200^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 정도의 온도 상태에서 롤(Roll)을 이용하여 길이 방향으로 소재를 소성 변형시켜 판을 생산하는 공정이다. 초기의 소재는 두께와 폭의 편차가 크지 않

은 바(Bar) 형태인데, 조압연 공정(Roughing train)에서 이것의 두께를 대폭 줄여서 길이 방향으로 긴 형상으로 변형시킨다. 두께가 얇아지는 동안 폭 방향으로도 변형이 동시에 이루어진다. 폭 퍼짐이 발생하는 동안 폭 방향으로 온도 및 롤갭(Roll gap)의 편차 등이 발생하면, 소재가 폭 방향으로 휘게 되는데 이것을 '캠버(Camber)' 라고 한다.

실제 열간 판 압연 공정에서 캠버가 크게 발생하면 생산 중단을 초래하기 때문에 생산 현장에서는 큰 문제로 취급되어져 왔다. 이와 같이 판 압연 생

Corresponding Author : smbyon@dau.ac.kr

Tel: +82-51-200-7639, Fax: +82-51-200-7656

산성에 치명적인 영향을 미치는 캠버를 저감하기 위해서 다양한 연구들이 있었다. 폭 방향으로 소재의 두께 차가 있는 소재가 압연될 때 발생하는 캠버에 대해서 Shiraishi 등^[1]은 그 관계를 정량적으로 도출하였다. 다양한 압연인자 중에서 가장 캠버에 영향을 주는 인자를 파악하기 위해서 Biggs 등^[2]은 실험 계획법을 도입하였다. 폭 방향 온도 편차, 소재의 폭방향 비대칭, 톨갭 비대칭이 캠버에 미치는 연계 효과를 고찰하기 위해서 Hardy 등^[3]은 삼차원 유한요소모델을 개발하였다.

상기의 연구들은 압연되는 동안 압연 조건의 변동 없이 소재가 길이방향으로 일정하게 변형한다는 가정 하에서 압연조건과 캠버와의 상관 관계를 고찰하였다. 압연되는 동안 상관 관계가 일정하게 유지되므로 정적모델(Static model)로 분류할 수 있다. 이와 같은 정적모델은 통상적으로 정상적인 압연상태(Normal rolling condition)에서 압연기를 기동할 때 사용된다^[4-9]. 캠버와 같이 비정상적인 압연상태(Abnormal rolling condition)로 인해 발생하는 경우에 정적모델로는 완전한 설정(Setup)을 하기 힘들다. 소재가 길이방향으로 압연됨에 따라 설정을 순차적으로 변경하는 동적설정(Dynamic setup)이 캠버를 효과적으로 제어하기 위해서 필수적이다.

본 연구에서는 동적설정에 의해 직접적으로 제어 가능한 사이드 가이드(Side guide)를 대상으로 하였다. 사이드 가이드는 압연기 출측에 설치되어 소재의 폭방향 휨이 더 이상 발생하지 않도록 지탱해 주는 역할을 수행한다. 본 논문에서 사이드 가이드를 동적설정하기 위해서 먼저, 소재가 어느 위치에 있는지 파악하기 위한 트래킹 방법을 기술하였다. 또한, 소재가 사이드 가이드 내에 있을 때, 발생한 캠버량까지 포함한 실폭 측정기법을 제시하였다. 소재가 사이드 가이드 내에서 원활이 진행하면서 최대한 캠버 억제를 하기 위한 적정 개도폭(Opening gap) 설정기술을 제시하였다.

2. 압연 공정 및 캠버

2.1 가역식 열간 조압연 장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 가역식 열간 조압연

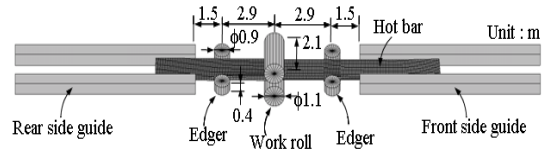


Fig. 1 Shapes and dimensions of roughing train in hot strip rolling mill

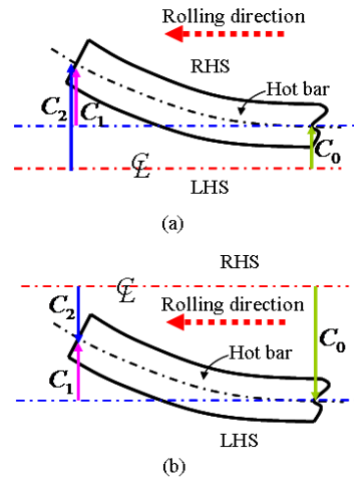


Fig. 2 Positions of the front end of hot bar when (a) C_2 becomes the camber and (b) C_0 becomes the camber (RHS: Right Hand Side, LHS: Left Hand Side)

장치를 나타내고 있다. 가역식 장치이므로 소재가 전진과 후진을 반복하면서 지속적으로 두께를 줄여 나가는 방식으로 운행된다. 작업롤(Work roll)은 소재의 두께를 줄이는 역할을 담당하고 있고 엡저(Edger)는 소재의 폭을 줄이는 역할을 담당한다.

사이드 가이드는 압연기 입측과 출측에 설치되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 소재의 폭방향 휨이 더 이상 발생하지 않도록 지탱해 주는 역할을 수행한다. 소재가 전진할 때와 후진할 때의 사이드 가이드의 입, 출측 역할이 서로 바뀌게 된다. 본 연구에서는 캠버를 제어하는데 더 효과적인 출측 사이드 가이드의 동적 설정에 연구의 초점을 두고 있다.

2.2 캠버의 정의

Fig. 2는 소재가 압연된 후에 소재의 선단부가 폭방향으로 휘어진 형상을 개략적으로 나타낸 그림이다. 여기서, C_0 는 소재가 압연기의 폭 방향 중심선에서 소재의 중심선이 벗어난 정도를 나타낸다. C_1 는 소재의 폭 방향 중심에서 소재의 선단부가 벗어난 정도를 나타낸다. C_2 는 압연기의 폭 방향 중심선에서 소재의 선단부가 벗어난 정도를 나타낸다.

압연중에 소재의 폭방향 거동이 다양하게 나타날 수 있는데, Fig. 2(a)는 소재의 폭 방향 중심이 압연기의 폭 방향 중심에서 어느 정도 벗어난 상태에서 그 벗어난 방향으로 폭 방향 휨이 발생한 경우이다. 이에 반해, Fig. 2(b)는 소재의 폭 방향 중심이 압연기의 폭 방향 중심에서 벗어난 방향과 폭 방향의 휨 방향이 서로 반대인 경우이다. 이 때, 사이드 가이드의 역할은 소재가 압연기 폭 방향 중심에서 최대한 떨어져 있는 위치를 기준으로 가이드를 수행해야 한다. 따라서, 본 연구에서 캠버(C)는 아래 식과 같이 압연기 폭 방향 중심에서 가장 멀리 떨어져 있는 양으로 정의하였다.

$$C = \pm \max(|C_0|, |C_2|) \quad (1)$$

여기서, 양의 부호는 C_0 혹은 C_2 가 압연기 폭 방향

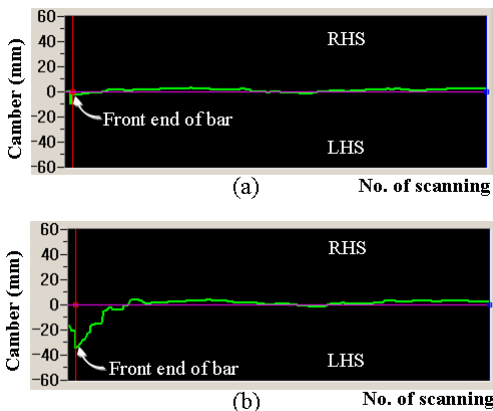


Fig. 3 Measured center lines of hot bar using a line scanner when (a) the camber is very small and (b) the camber is large

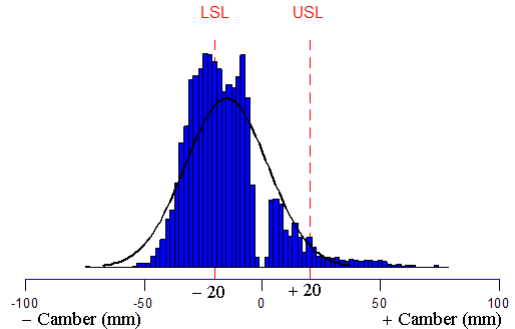


Fig. 4 Statistical analysis of measured cambers for 18,036 hot bars passing through roughing train (USL: Upper Specification Limit, LSL: Lower Specification Limit)

중심에서 압연 진행 방향에 오른쪽 (RHS)에 있을 경우를 나타내고 음의 부호는 왼쪽 (LHS)에 있을 경우를 나타낸다.

3. 캠버의 측정

3.1 소재 폭 방향 휨의 측정

Fig. 2 및 식 (1)에서 정의한 캠버를 계산하기 위해서는 소재의 폭 방향 전체 형상을 보전할 필요없이 소재의 중심선만 소재의 길이방향을 따라서 저장되면 된다. 본 연구에서는 주어진 길이 위치에서 폭 방향으로 라인 스캐닝(Line scanning) 방식으로 폭을 측정하고 다음 그 중심점을 결정하는 방법을 취하였다. 소재의 모든 길이에 대해 이와 같은 방법을 적용하면 소재 중심선의 형상이 결정된다.

Fig. 3은 본 방법으로 측정된 소재의 폭 방향 중심축의 형상을 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 소재 선단부의 캠버가 거의 없는 경우를 보여주고 있고, Fig. 3(b)는 LHS 쪽으로 선단부 캠버가 발생한 경우를 나타내고 있다. 압연기를 통과하는 많은 소재에 대해 이와 같은 방법으로 소재 중심축의 형상을 측정하였다.

3.2 캠버의 계산 및 통계적 분석

Fig. 3(b)에서 식 (1)에서 정의한 캠버를 계산할

수 있다. 즉, 압연기의 폭방향 중심선이 기준선이므로 선단부 캠버 C 는 -35.0 정도가 되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 본 압연기를 지나가는 많은 소재에 대해서 소재 중심축 형상으로부터 캠버를 계산할 수 있다.

Fig. 4는 본 연구를 적용하기 전에 압연기를 통과한 18,036개의 소재에 대해 측정 및 계산한 캠버 값을 통계 분석한 결과를 나타내고 있다. 캠버의 평균은 -15.2mm 가 나왔고, 표준편차는 17.5mm 가 나왔다. 현장에서 요구되는 캠버의 관리 기준은 상한치(USL)가 20mm 이고 하한치(LSL)가 -20mm 인데, 이것을 만족하는 수율은 51% 인 것으로 분석되었다.

4. 동적 설정 방법

4.1 소재 진행 위치에 따른 동적 설정

동적으로 사이드 가이드의 개도폭을 설정하기 위해서 소재가 사이드 가이드의 어느 위치에 도달했는지 정확하게 먼저 파악해야 한다. 소재는 테이블 롤러(Table roller)의 회전을 통해서 이송된다. Fig. 5는 회전 엔코더(Encoder)가 장착된 롤러의 측면 형상을 나타내고 있다. 엔코더는 테이블 롤러의 축과 직접 연결되어 롤러의 회전량을 직접적으로 센다. 테이블 롤러의 회전량으로부터 소재의 이송거리를 계산하여 소재의 정확한 위치를 제공하도록 하였다.

Fig. 6은 소재의 위치를 감지하고 사이드 가이드를 동적으로 작동하는 방법을 순서대로 나타낸 것이다. 소재가 해당 압연기에 들어왔다는 신호를 HMD(Hot metal detector)로부터 받으면 엔코더가 작동을 시작하여 롤러 회전량 및 이송거리를 계산한다. 계산한 이송거리가 목표 이송 거리에 도달했는지 판단하여 도달하지 않았으면 계속해서 엔코더를 통해 이송거리를 누적하고 도달하였으면 사이드 가이드를 작동시키는 동적거동을 하도록 설정하였다.

4.2 소재 실제 폭에 따른 동적 설정

소재가 사이드 가이드의 적정 위치에 도달하여

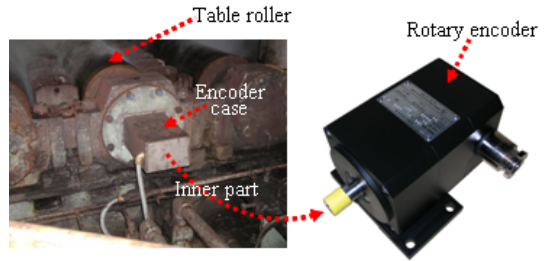


Fig. 5 Rotary encoder installed on the side of table roller

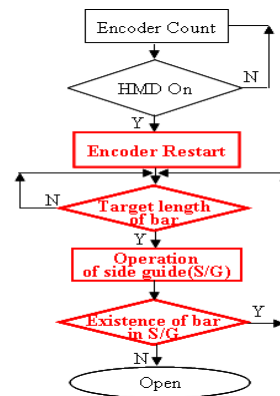


Fig. 6 Flow chart for a dynamic setup based on the rotary encoder installed on table roller

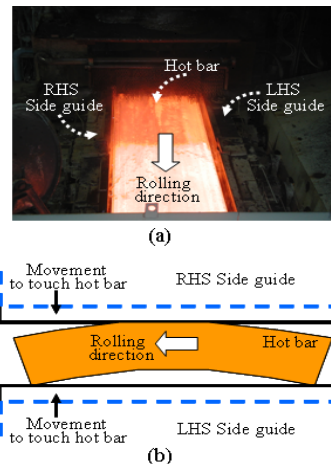


Fig. 7 Contact shapes between hot bar and side guides when they are shown in (a)complete view and (b) top view

작동이 이루어지고 난 후에 소재 실제 폭에 기초하여 제어가 이루어져야 정확한 가이드링 효과를 거둘 수 있다. Fig. 7 (a)는 실제 폭을 측정하기 위해 사이드 가이드가 소재 측면에 닿는 실제 모습을 나타내고 있다. Fig. 7 (b)는 이 순간에 소재의 형상을 개략적으로 나타내고 있다. 대부분의 경우 소재가 일직선이 아니고 폭 방향 비대칭 압연 요인으로 인하여 캠버가 존재하기 때문에 곡선으로 나타난다. 따라서, 사이드 가이드에 닿는 소재의 위치가 양쪽에서 다른 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 소재의 폭을 감지하고 사이드 가이드를 동적으로 작동하는 방법을 순서도로 나타낸 것이다. 소재의 진입 모니터링을 통해 소재가 사이드 가이드 길이의 절반 이상 들어오면 사이드 가이드가 작동되도록 하였다. 사이드 가이드가 내측으로 움직이면서 사이드 가이드에 걸리는 압력을 지속적으로 모니터링을 실시한다. 사이드 가이드 압력이 주어진 한도치를 넘어서면 사이드 가이드가 소재의 측면에 완전히 닿았다고 판단하고 이때의 사이드 가이드 개도폭을 소재의 실제 폭으로 인식한다.

소재의 측면과 사이드 가이드 사이에 압력이 작용하면 마찰력이 가해져서 소재가 진행하기 힘들기 때문에 약간의 간극을 주는 설정을 실시하였다. 소재가 진행되는 동안 소재의 휨이 더 발생하여 소재와 사이드 가이드 사이에 과도한 압력이 또 걸리는 경우에는 약간의 간극을 추가적으로 부가하였다. 이와 같이 소재 진행에 따라 동적 설정을 내리는 방식을 적용하여 소재 진행을 원활히 유지하면서도 최대한 소재의 캠버를 제어할 수 있도록 하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 소재 진행 위치의 분석

Fig. 9는 테이블 롤러 측면에 부착된 회전 엔코더에서 나오는 펄스(Pulse)를 그래프로 나타낸 것이다. 횡축이 시간을 의미하고 종축이 펄스의 크기를 의미한다. 단위 펄스 하나가 1회전을 나타낸다. 횡축에서 10초 구간동안 5~6개의 펄스가 관찰

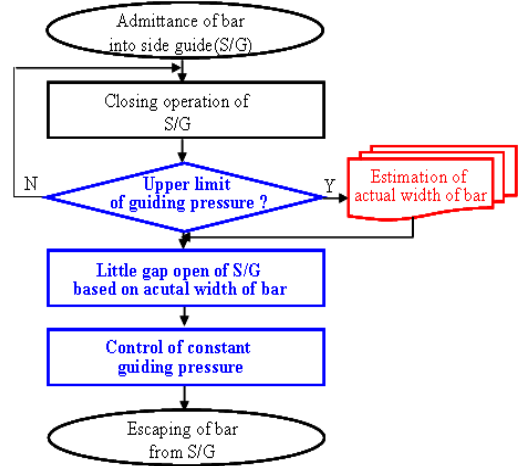


Fig. 8 Flow chart for a dynamic setup based on the actual width of bar estimated by guiding pressure

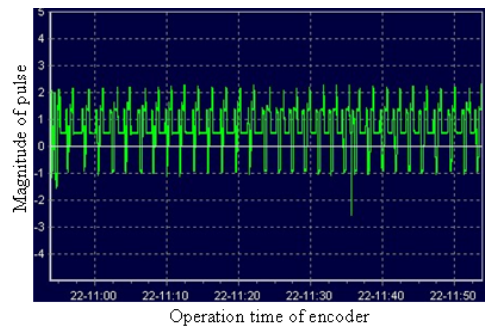


Fig. 9 Pulse signals transmitted from the rotary encoder

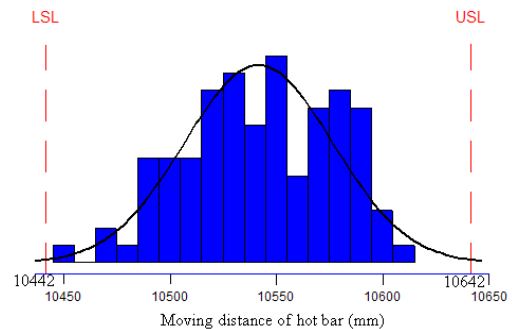


Fig. 10 Statistical analysis of measured moving distances for 100 hot bars

되므로 롤러의 회전속도는 0.5~0.6 rev/sec 인 것을 알 수 있다. 이 회전속도에 롤러의 반경을 곱해서 롤러의 선속도를 계산하였고 선속도가 지속된 구간의 시간을 곱해서 소재의 이동거리를 계산하였다.

Fig. 10은 소재 100매를 대상으로 소재가 약 10m 이동하는 동안 회전 엔코더에 의한 소재 진행 위치 예측의 정도를 파악한 통계 그래프이다. 예측이 정확한지 아닌지 결정하기 위한 예측 편차는 소재의 통상적 이동거리 10m의 백분의 일인 $\pm 10\text{cm}$ 를 상한치(USL) 및 하한치(LSL)로 설정하였다. 소재 100매의 소재 진행 통계분석 결과로 평균 이동거리는 10542mm가 나왔고 모든 데이터가 상한치 10642mm 및 하한치 10442mm 안에 모두 들어가는 것으로 나왔다. 이것으로부터 회전 엔코더를 이용한 소재 진행 위치 파악은 잘 이루어짐을 알 수 있다.

5.2 소재 실제 폭의 분석

Fig. 11은 사이드 가이드의 압력으로부터 소재의 실제 폭을 측정하는 방법을 나타낸 그래프이다. Fig. 11(a)는 시간에 따른 사이드 가이드의 압력의 변화를 나타내고 있다. 압력이 거의 없이 일정하게 유지되다가 어떤 시점에서 피크(Peak)가 발생하는 것을 알 수 있다. 이때 소재의 측면과 사이드 가이드가 닿았다는 것을 알 수 있다. 실선은 왼편에 있는 사이드 가이드에 걸리는 압력을 나타내고 점선은 오른편에 있는 사이드 가이드의 압력을 나타낸다. 왼편과 오른편 사이드 가이드는 같이 작동되기 때문에 압력이 높게 걸리는 사이드 가이드 쪽으로 소재의 캠버가 발생하여 휘어져 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11(b)는 시간에 따른 사이드 가이드의 개도폭을 나타내고 있다. A-B 구간은 소재가 사이드 가이드에 들어가기 전의 단계를 나타내고 있다. 이 구간에서는 사이드 가이드의 개도폭을 소재의 폭보다 크게 유지하고 있다가 소재가 사이드 가이드에 진입한 B시점부터 폭을 줄이기 시작한다(B-C 구간). Fig. 11(a)에 있는 압력 그래프와 비교해 보면, 압력이 약간 걸리기 시작하는 시점과 폭 줄임 시점이 일치하는 것을 알 수 있다.

개도폭을 더 줄여서 C시점에 도달하면 가이드 압력이 설정해 놓은 최대 압력에 도달하게 된다. 이 시점이 사이드 가이드와 소재가 완전히 밀착하게 되어 개도폭으로부터 소재의 실제 폭을 파악할 수 있다. C-D 구간에서 사이드 가이드와 소재가 밀착되어 가이드잉이 이루어진다. 밀착 상태를 오래 지속하면 소재의 진행을 방해하므로 약간의 추가

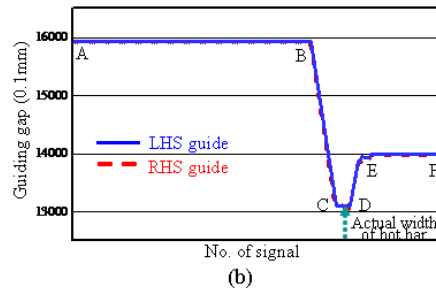
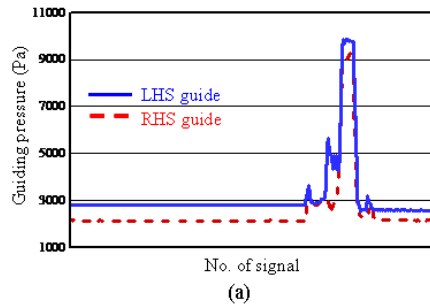


Fig. 11 Relationship between (a) the guiding pressure and (b) the guiding gap during bar movement

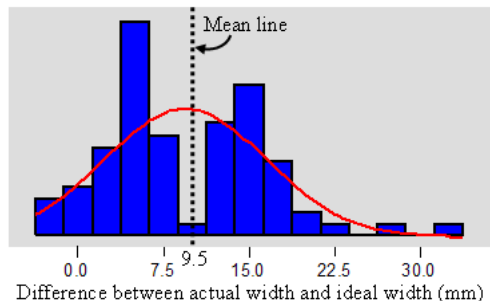


Fig. 12 Statistical analysis of difference between actual width and ideal width for 72 hot bars

적인 꺾을 주게 된다 (D-E 구간). 이 구간에서 압력은 최대가 되었다가 다시 떨어지는 것을 알 수 있다. E시점에서 소재가 사이드 가이드를 빠져나가기 시작한다. 이것으로부터 4.2 절에 기술된 소재 실제 폭에 따른 동적 설정이 잘 적용이 되고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 소재 72매를 대상으로 비대칭 변형이 없는 정상 압연으로 가정하여 계산한 이론 폭과 본 연구에서 실시한 동적 설정으로 파악된 실제 폭과의 편차 정도를 파악한 통계 그래프이다. 다음은 통계 분석에 사용한 편차식이다.

$$\Delta W = W_a - W_i \quad (2)$$

여기서, ΔW 는 실제 폭과 이론 폭의 편차를 나타낸다. W_a 및 W_i 는 각각 실제 폭과 이론 폭을 나타낸다. 통계결과를 보면 ΔW 의 평균이 9.5mm가 나왔고 표준편차가 7.0mm가 나왔다. ΔW 의 값이 양의 수가 나온다는 것은 실제 폭 W_a 가 이론 폭 W_i 보다 크다는 것을 의미한다. 즉, 실제 폭은 압연 중 발생하는 캠버의 영향으로 이론 폭보다 크게 나타나게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 제시한 사이드 가이드의 동적 설정으로 파악되는 실제 폭을 근거로 사이드 가이드의 제어가 이루어져야 가이딩의 효과를 충분히 거둘 수 있을 것으로 판단된다.

5.3 동적 설정 적용 후 캠버 저감 분석

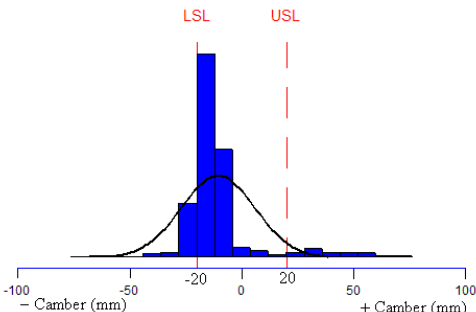


Fig. 13 Statistical analysis of measured cambers for 357 hot bars after the proposed dynamic setup is applied

Fig. 13은 소재 357매를 대상으로 본 연구에서 제시한 사이드 가이드 동적 설정을 적용한 후의 캠버량을 통계적으로 분석한 그래프이다. 본 통계에 사용한 캠버는 식 (1)에 정의되어 있다. 캠버의 평균은 -10.6mm가 나왔고 표준편차는 16.5mm가 나왔다. 현장에서 요구되는 캠버의 관리 기준이 ± 20 mm이므로 상한치(USL)은 20mm, 하한치(LSL)은 -20mm로 설정하였다.

동적 설정 적용 전의 캠버 결과인 Fig. 4와 비교하면 평균은 -15.2mm에서 -10.6mm로 약 5mm 정도의 저감효과가 있는 것으로 나타났고 표준편차는 17.5mm에서 16.5mm로 약간의 개선이 있었다. 본 연구의 가장 중요한 평가는 현장에서 요구되는 캠버 관리 기준인 ± 20 mm 내에 얼마나 많은 소재가 들어가는지 여부이다. 본 통계 그래프에서 캠버 관리 기준 내에 들어가는 비율은 78% 정도로 나왔다. 동적 설정 적용 전의 비율인 51% 보다 27%의 비율 개선 효과가 있는 것으로 나타났다.

기존의 사이드 가이드 적용방식은 압연중인 소재의 실제 폭과 정확한 진행 위치를 모르기 때문에 사이드 가이드와 소재가 충돌하지 않도록 사이드 가이드 폭을 충분히 열어둔 상태에서 이것을 일정하게 유지하는 것이었다. 따라서, 가이딩 효과는 캠버가 매우 큰 소재에만 한정되고 정밀 캠버 제어가 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 움직이고 있는 소재의 실제 폭을 사이드 가이드 압력을 이용하여 정확히 측정하였기 때문에 밀착 가이딩이 가능하였다. 또한, 엔코더를 이용하여 소재의 정확한 위치를 파악하였기 때문에 소재 움직임에 따라 동적으로 가이딩 시점을 잡을 수 있었다. 이러한 요인들이 캠버 관리 기준 내에 들어가는 소재의 비율을 향상시키는데 중요한 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구는 열간 조압연 공정에서 판 캠버를 저감하기 위해서 사이드 가이드를 동적으로 설정하는 방법을 제시하고 있다. 첫 번째 동적설정 방법은

소재의 진행 위치를 트래킹하고 사이드 가이드 내에 적정 위치에 도달하였을 때 사이드 가이드가 동적으로 작동되도록 하는 것이었다. 두 번째 동적설정 방법은 사이드 가이드를 이용하여 소재의 실제 폭을 측정하고 이것으로부터 사이드 가이드의 갭을 동적으로 설정하도록 하는 것이었다. 본 동적설정 방법을 실제 압연 공정에 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 회전 엔코더를 이용하여 소재 100매가 10m 이동하는 동안 소재의 진행위치를 분석해 본 결과, 백분의 일의 공차 안에 모든 소재가 위치하는 것으로 파악되었다.
2. 사이드 가이드에 작용하는 압력을 이용하여 소재에 발생한 실제 폭을 소재 72매에 대해 측정해 본 결과, 평균이 9.5mm 그리고 표준편차가 7.0mm로 이론 폭 보다 큰 것으로 나타났다. 이것으로부터 실제 폭은 압연 중 발생하는 캠버의 영향으로 이론 폭 보다 항상 크다는 것을 알 수 있었다.
3. 본 사이드 가이드 동적 설정 방법을 적용하여 생산현장에서 요구하는 캠버량 $\pm 20\text{mm}$ 관리 기준을 만족하는 수율을 적용 전 51%에서 적용 후 78%로 향상시켜 27%의 수율 개선 효과를 얻을 수 있었다.

후 기

“이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Shiraiishi, T., Ibata, H., Mizuta, A., Nomura, S., Yoneda, E. and Hirata, K., "Relation between Camber and Wedge in Flat Rolling under Restrictions of Lateral Movement," ISIJ International, Vol. 31, No. 6, pp. 583-587, 1991.
2. Biggs, D. L., Hardy, S. J. and Brown, K. J., "Influence of Process Variables on Development of Camber during Hot Rolling of Strip Steel," Ironmaking and Steelmaking, Vol. 27, No. 1, pp. 55-62, 2000.
3. Hardy, S. J., Biggs, D. L. and Brown, K. J., "Three-dimensional Hot Rolling Model for Prediction of Camber Generation," Ironmaking and Steelmaking, Vol. 29, No. 4, pp. 245-252, 2002.
4. Moon, C. H. and Lee, Y., "The Effects of Rolling Method Changes on Productivity in Thick Plate Rolling Process," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, No. 14, pp. 1844-1851, 2010.
5. Sikdar, S. and Mukherjee, I., "A Holistic Framework for Multiple Response Optimization of Hot Strip Rolling Process," Materials and Manufacturing Processes, Vol. 26, No. 11, pp. 1393-1403, 2011.
6. Cao, J., Liu, S., Zhang, J., Song, P., Yan, T. and Zhou, Y., "ASR Work Roll Shifting Strategy for Schedule-Free Rolling in Hot Wide Strip Mills," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 211, No. 11, pp. 1768-1775, 2011.
7. Rath, S., Singh, A. P., Bhaskar, U., Krishna, B., Santra, B. K., Rai, D. and Neogi, N., "Artificial Neural Network Modeling for Prediction of Roll Force during Plate Rolling Process," Materials and Manufacturing Processes, Vol. 25, No. 1-3, pp. 149-153, 2010.
8. Vladimír, P., Ronald, G., John, S., Stephen, D., Roberts, S. and Gregory, F., "Causes of Chatter in A Hot Strip Mill: Observations, Qualitative Analyses and Mathematical Modelling," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, No. 4, pp. 954-961, 2012.
9. Agarwal, K. and Shivpuri, R., "An On-line Hierarchical Decomposition based Bayesian Model for Quality Prediction during Hot Strip Rolling," ISIJ International, Vol. 52, No. 10, pp. 1862-1871, 2012.