

2 냉연 신형상제어 시스템 개발 및 적용 Development and Application of the new ASC system in No. 2 Cold Rolling Mill

‘박남수’, 심민석

‘포항종합제철(주) 설비기술부 (Tel : 220-0347; Fax : 220-6861; E-mail : pc257666@smail.posco.co.kr)

‘포항종합제철(주) 설비기술부 (Tel : 220-1478; Fax : 220-6861; E-mail : pc531345@smail.posco.co.kr)

Abstracts Good shape on flat rolled product is necessary to meet today's customer quality requirement. To meet the increasing demand in quality of strip shape from downstream customers, POSCO has replaced the Automatic Shape Control(ASC) system with the existing one that had used noncontact type measuring system at No.2 Cold Rolling Mill, Pohang works in October, 1995.

The strip shape is influenced by the profile, roll crown, bending control, skew control system, as well as work roll cooling system. We have used ASC to adjust those factors in Cold Rolling Mill that could get a satisfactory result, almost less than ± 5 l-unit deviation from the target shape. However, the downstream customer(i. e. Continuous Annealing Line) wants a good shape not only at the moment of exit of roll bite, but after rolling without tension.

In this investigation, the difference will be discussed and how deal with this problem.

Keywords Shape, Flatness, Automatic Shape Control(ASC), Profile

1. 서론

냉간 압연 공정에 있어서 판 형상은 두께와 함께 압연 품질을 좌우하는 가장 중요한 품질지표의 하나이며, 형상 품질에 따라 후공정 생산성 및 수요가의 가공성 등에도 큰 영향을 미치고 있다. 기존의 형상제어 시스템(Automatic Shape Control : ASC)은 비접촉식 측정 시스템 및 산등법(山登法)에 의한 제어시스템으로 구성되어 있었다. 비접촉식 측정 시스템은 Sensor 오염에 따른 측정오차 발생, 박물 압연시 판 굽힘 발생 및 2초 측정 주기에 의한 측정 형상에 대한 신뢰성 저하 등의 문제를 가지고 있었고, 제어 시스템에 있어서도 6단 Stand 2 중 Bending 시스템의 문제점인 Work roll bending과 Intermediate roll bending 값이 동시에 급격히 상이한 방향으로 출력되는 현상이 발생되어 중박재(中薄材) 이하에서는 수동운전에 의한 형상제어가 불가피한 실정이었다. 이러한 측정오차 발생의 최소화 및 형상제어의 완전 자동화를 실현하여 최적 형상 품질 확보를 위해 접촉식 측정 시스템으로 Replace하고 제어시스템의 안정적인 자동제어를 위해 제어 시스템을 개조하였다.

그 특징은 제어 Loop를 개선하여 IMR Bending을 Support bending으로 제한하여 자동운전의 안정성을 확보하고, Spot cooling 방식의 Cooling 제어 시스템을 설치하여 국부형상제어능력을 향상시켰다. 또한, 목표형상의 설정과 압연 후 실제 판형상 변화에 대한 원인을 파악하기 위하여 후공정과 연계한 실험을 실시하였고, 그 결과에 따라 후공정 및 수요가들이 원하는 판형상을 생산할 수 있도록 하여 형상품질의 향상뿐 아니라 수요가 만족도를 크게 향상시켰다.

2. 형상제어시스템의 Replace

2.1 기존 형상제어의 문제점

기존 형상제어 시스템은 비접촉식 측정장치와 매 2 초마다

2.1 기존 형상제어의 문제점

기존 형상제어 시스템은 비접촉식 측정장치와 매 2 초마다 형상을 검출하여 검출 형상을 4차 근사화하여 Level, Work roll bending, Intermediate roll bending 값의 최적점을 예측하여 형상을 제어하는 장치로 구성되어 있었다.

비접촉식 형상측정장치는 접촉식에 비해 Slip mark 발생 방지 및 고장력 상태에서의 측정도 유지 등의 장점을 가지고 있으나, 박물 작업시 출력의 저장력 작업에 따른 판 진동 발생으로 표 1 과 같이 평균 ± 1 mm 상하 진동 발생시 출력 전류의 변화가 120 mV에 이르며 측정장치 표면이 압연유 등 기타 이물질에 의한 오염에 따라 측정전류가 변화하여 측정 정도가 저하된다.

표 1. Gap 변화에 따른 측정 출력값 변화

Table 1.Deviation of measurement due to the gap change

Gap (mm)	8	9	10	11	13	평균변화
출력변화 (mV)	150	60	0	-50	-100	60 mV/mm

또한 측정 주기 및 제어 주기가 2 초이므로 판속 600 mpm 압연시 매 20 m 마다 한 번 제어하게되어 측정 및 제어의 신뢰성이 저하되었었다. 또한 중박재(0.6 mm)의 경우 형상측정기에 의한 전산 실적과 후공정에서의 실측 형상 실적사이에 약 4 배 이상의 품질 편차가 발생하였다. 제어기능에 있어서, 산등법(山登法)에 의한 최적점을 찾는 과정에서 대칭형상 불량제어에 사용되는 특성이 유사한 Work roll bending과 IMR Bending 값이 상호 상이한 방향으로 움직이게 되어 서로의 기능이 상쇄됨은 물론 급격한 bending 변화에 의해 중박재 이하에서는 자동형상 기능을 사용할 수 없었다. 형상 교정장치에 있어서도 Work roll Cooling 제어 시스템이 좌우 대칭구조로 되어 있어 비대칭 및 국부

형상불량에 대한 제어능력이 불가하여 국부형상불량 발생시 압연 속도의 감소에 따른 생산성 저하의 원인이 되어왔다.

2.2 신형상제어 시스템

포항제철소 2 냉연에 설치된 형상제어 시스템의 주요 기능 구성은 그림 1 과 같다.

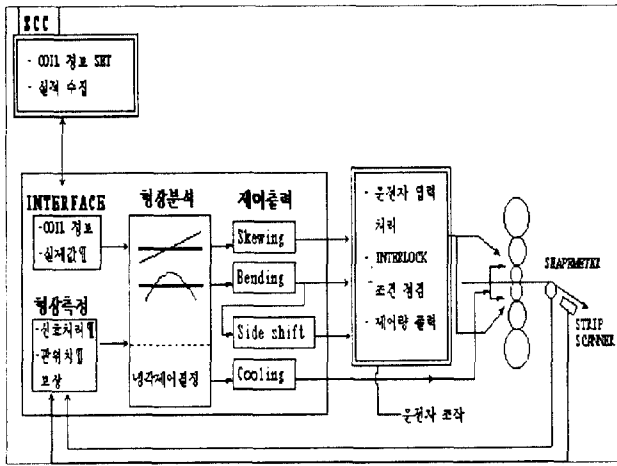


그림 1. 형상제어 시스템 Software 기능 구성도
Fig. 1. Software block diagram of ASC system

형상측정 시스템은 기존의 비접촉식에서 스웨덴의 ABB사의 Stressometer를 채용한 접촉식 시스템, 신호 처리 및 형상제어 기능 구현을 위해 MP200 시스템으로 구성하였다. 또한 기존 설비 안정성 확보 및 개조범위의 최소화를 위하여 기존 시스템을 개조하여 운전자 입출력 처리 기능 및 다른 시스템과의 각종 Interlock 조건 등을 점검하도록 구성하였으며, 상위 컴퓨터와의 serial link를 이용한 Interface를 통하여 각 coil 정보 및 초기 값의 설정, 각 coil 별 형상실적의 수집 기능을 구현하였다.

ABB사의 MP200 시스템으로 구성된 형상제어시스템의 Software의 중요 기능은 형상측정, 형상제어 및 형상 값에 대한 보상 기능으로 구별할 수 있다. 형상 측정기능은 측정 Roll의 각 zone에 인가되는 힘을 측정하며 Hardware test 기능 등을 제공한다. 형상측정 기능에서 측정된 판형상 신호는 N/mm 단위로 측정되어 각 Channel의 평균값의 편차 값을 형상 값으로 가지게 된다. 이러한 실제 측정값은 측정 보상기능을 적용한 값이며, 측정형상과 목표형상과의 차에서 형상오차를 계산한다. 이와 같이 얻어진 형상오차는 수학적 모델을 통하여 최종적인 제어 값으로 출력된다. 수학적 제어모델은 아래와 같다.

각 측정 channel i에 대하여 형상측정값 $F(i)$ 는 각 형상제어 actuator들의 모델들의 함수로 표현 될 수 있다. 즉, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$F(i) = C_1 \times \Psi_1(i) + C_2 \times \Psi_2(i) + C_3 \times \Psi_3(i) \quad (1)$$

여기서, $F(i)$ 는 각 channel i의 측정값이며, $\Psi_1(i)$ 에서 $\Psi_3(i)$ 은 skew, bending 등의 제어 모델이다. 식 (1)에서 형상오차 제어의 문제해결 방법은 가장 적당한 각 제어 모델의 계수값, 즉, C를 찾는 것이다. 계수값 찾는 방법으로는 최소자승법이 사용된다. 이를 행렬식으로 나타내면 아래와 같다.

$$F = [f(1)f(2)f(3)\dots f(n)], C = [C_1 C_2 C_3]$$

$$A = \begin{bmatrix} \Psi_1(1) & \Psi_2(1) & \Psi_3(1) \\ \Psi_1(2) & \Psi_2(2) & \Psi_3(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Psi_1(n) & \Psi_2(n) & \Psi_3(n) \end{bmatrix}$$

$$F = AC \quad (2)$$

$$A'F = A'AC \quad (3)$$

$$C = (A'A)^{-1}A'F \quad (4)$$

여기서, n은 측정 Roll Zone의 개수이며, Cn은 형상교정시스템 종류의 개수이다. 식 (4)의 행렬식에 의하여 형상제어에 필요한 가장 적당한 계수 행렬 C의 값이 정해진다. 그림 1의 형상제어 블록에서 볼 수 있듯이 각 제어모델에서 교정될 수 없는 잔여 형상오차는 Work Roll Cooling에 의해서 제어된다. 이상과 같이 얻어진 각 Actuator의 Control error값은 형상교정 Actuator의 물리 오차 값을 만들기 위하여 Material factor 및 단위 변환상수 등의 값들이 곱해진다. Material factor는 압연소재의 변형저항을 나타내는 상수로서 두께와 소재경도의 영향을 받는다. Efficiency factor는 압연 소재의 판 폭에 따라 결정되는 것으로 폭이 커질수록 계수값은 작아진다. 즉, 폭이 작을수록 각 Actuator들이 효과적으로 움직인다는 것을 알 수 있다. 단위 변환 상수는 각 Actuator들의 동작단위에 출력량을 일치시키기 위한 상수 값이다.

3. 압연후의 실제형상 변화

3.1 압연후 형상변화 Test

후공정 및 수요가들은 압연시의 형상품질 뿐만 아니라 수요가의 손에서 작업되어지는 시점에서의 coil이 원하는 형상품질을 가지고 있기를 원한다. 또한 수요가의 요구는 단순히 평평한 coil만을 원하는 것이 아니라 해당 공정의 작업성을 극대화 할 수 있는 각 강종별 혹은 치수 별로 특정한 형상을 요구하기도 한다. 이러한 형상품질에 대한 요구를 만족시키기 위하여 두께 1.0 mm이상의 판에 대하여 후공정의 소둔 공정과 연계한 압연후 형상변화 Test를 실시하였다.

두께 1.0 ~ 1.4 mm의 판을 압연시 형상목표를 약한 Edge wave를 가지도록 설정하고 운전자가 관측하였을 때 형상은 출측에 인가되는 장력에 의하여 Flat으로 관측됐으나 소둔 공정에서는 운전자에 의해 Edge 편파가 관측되었으며, 두께 1.4 mm 이상의 판은 압연시 목표형상의 Edge wave 값을 더 크게 하여 압연한 결과 압연과정에서 운전자에 의하여 약한 Edge wave가 관측되고 소둔 공정에서는 wave가 관측되지 않는 Flat한 형상을 가진 것으로 관측되었다.

그러나 고장력강 및 구조용 강에서는 압연에서의 목표형상과 후공정에서의 관측형상이 일치함을 알 수 있었다.

이와 같은 실험결과에 대하여 Roll bite에서의 형상과 후공정에서의 실제 형상과는 차이가 있으며, 측정 시에도 여러 가지 원인에 의하여 형상오차가 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 이에 대한 것은 아래에서 상세히 논의하고 어떻게 다를 수 있는가에 대하여 논의하고자 한다.

3.2 측정 오차 발생

측정오차 발생원인으로는 다음과 같다.

- Edge 측정값의 보상에 있어서의 오차
- 측정 Roll 및 주변 Deflector Roll 등의 기계적인 정렬 불량
- 판 Profile 변화에 의한 신장내력 변화에 의한 영향

Edge 측정값의 보상에 있어서의 오차 발생은 그림 2. 압연중 판 위치의 변화에서 볼 수 있듯이 실제 압연중인 Coil은 Mill 중심으로부터 Skew 기능 등 여러 가지 원인에 의해 좌우로 Off-center가 발생하게된다.

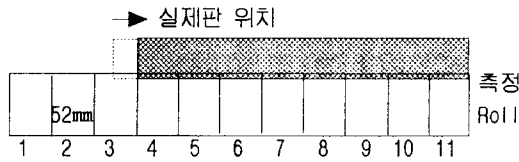


그림 2. 압연중 판 위치 변화
Fig. 2. Side shifting of strip during rolling.

표 2. 약 10 mm 이동시 보상 오차 발생

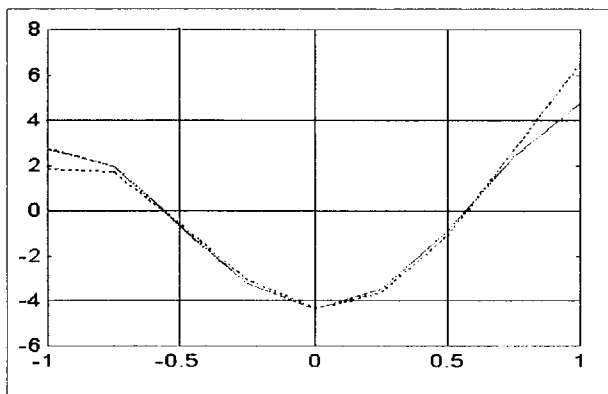
Table. 2. Compensation error due to the side shifting

Zone 구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	보상값
측정값 (1-unit)	0.75	3.0	-2.0	-3.0	-4.0	-3.0	-2.0	3.0	3.25	
계산 보상	1.5	3.0	-2.0	-3.0	-4.0	-3.0	-2.0	3.0	6.5	1:50 % 9:50 %
실측 보상	2.5	3.0	-2.0	-3.0	-4.0	-3.0	-2.0	3.0	4.64	1:30 % 9:70 %

표 2. 의 경우는 52 mm Zone × 9 EA로 구성된 측정 Roll에서 판이 Mill 중심에서 약 10 mm 이동시 Edge 위치 보상에 의한 형상오차 발생 예를 나타낸 것이다. 계산에 의한 보상에서는 실제 현위치의 고려 없이 초기 설정된 판 폭에 대하여 이상적으로 Mill 중심에 대하여 대칭으로 존재한다고 생각하여 측정값에 대하여 50 % 만큼의 값을 보상하여 즉, 측정값의 2 배를 Edge zone의 형상 값으로 인식하여 전체적인 형상 오차를 계산한다. 이 경우에 최소자승법에 의하여 근사화된 4 차 근사 함수는 식 (5)와 같다. 같은 조건에서 Edge 위치를 실측하여 보상하면 Zone 1의 경우 30 %, Zone 9의 경우 70 %의 해당 Zone의 점유율에 대한 보상값을 적용하여 형상 값을 인식하고 이에 대한 근사 함수는 식 (6)과 같으며 두 식을 그림 3 과 같이 나타낼 수 있다.

$$-7.1608x^4 + 3.7710x^3 + 15.6643x^2 - 1.4478x \quad (5)$$

$$-8.0589x^4 + 1.6140x^3 + 16.1695x^2 - 0.6197x \quad (6)$$



— : 실측에 의한 보상
- - - : 계산에 의한 보상
그림 3. 보상오차에 의한 4차근사

Fig. 3. Approximation result due to compensation error

식 (5) 와 식 (6)을 그림 3 에서 비교하면 실제적으로 좌우 대칭인 실제 형상을 실측에 의한 보상보다 계산에 의한 보상의 경우 1 차 및 3 차 계수의 값이 크게 평가되어 형상제어시 Skew 성분에 의한 Edge편파를 발생시킬 수 있다. 이와 같은 형상 오차를 줄일 수 있는 방법으로는 측정 Roll의 Edge 부분 Zone의 크기를 26 mm 혹은 그 이하의 크기로 세분화하는 Mixed type으로 사용하여 Edge 부분의 형상오차를 개선하는 방법과 측정 Roll 전단 또는 후단에 현재의 판 Edge 위치를 측정할 수 있는 측정 시스템을 설치하는 방법이 있다. 이에 대하여 2 냉연에서는 판 폭을 On-line에서 측정하여 형상 값을 보상할 수 있는 Strip Scanner를 설치하여 위와 같은 측정오차를 줄일 수 있도록 했다.

형상측정 Roll 및 주변 Deflector roll 등의 기계적인 정렬 불량인 경우 발생하는 측정 오차는 Wedge 보상기능에 의하여 보상해줄 수 있다. Wedge 보상기능은 측정 Roll 설치시 측정 Roll과 후단 Deflection roll과의 평행성이 ± 0.05 mm를 벗어날 경우 N/mm의 단위로 입력하여 측정시 오차를 줄일 수 있는 기능으로 화면에 표시되는 형상과 숙련된 운전자의 관측에 의한 형상과의 차이를 없게 할 수 있는 값을 입력하여 Test함으로써 그 값을 정할 수 있다.

두께 Profile 변화에 의한 신장내력 변화에 의한 영향은 판이 완전하게 평평하다면, 압연기의 장력에 의해 판의 신장내력은 판폭방향에 대해 같다고 할 수 있다. 만약 판의 두께가 판폭방향으로 일정하지 않고 변화한다면, 단위 폭에 대한 신장내력(Tensile force)은 변화하게 된다. 그러므로 형상측정 Roll의 각 Zone에 인가되는 힘은 달라지고 외견상의 형상 Error가 검출된다. 이와 같은 두께 Profile에 의한 형상측정 오차는 아래와 같이 계산되어진다. 일반적으로 형상의 검출은 아래의 식 (7)에 의하여 계산된다.

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \sigma}{E} = \frac{F_i - F}{F} \times \frac{\sigma}{E} \quad (7)$$

여기서 F_i 는 각 Zone에서 측정되는 힘이며 F 는 각 Zone의 평균값이다. 두께 Profile을 고려한 판에 있어서 측정 Roll 각 Zone에 측정되는 힘은 $\sigma W h_i$ 에 비례한다. h_i 는 Zone i에서의 두께이며, W 는 각 측정 Zone의 너비로 52 mm로 고정되어 있다. 즉, 측정되는 평균 힘은 $\sigma W h$ 에 비례한다. h 는 판폭방향 평균 두께이다. 이와 같은 비례관계에 의해서 다음 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{F_i - F}{F} = \frac{h_i - h}{h} = \frac{\Delta h}{h} \quad (8)$$

즉, 폭방향 두께 변화에 따른 외견상의 형상 Error는 식 (7)과 식 (8)의 관계에 의해 아래 식 (9)에 의해 정의된다.

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta h}{h} \times \frac{\sigma}{E} \quad (9)$$

형상 품질의 확보를 위해서 현재 두께 Profile의 변화량을 2 % 이내에서 관리하고 있으므로 위 식 (9)에의하여 두께변화가 평균 2 % 변화시의 대하여 장력이 50 N/mm 일 경우 식 (9)에 대하여 결과를 계산해보면, Young's Modulus가 철의 경우 약 200,000 N/mm² 이므로 식(10) 과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta L}{L} = 0.02 \times \frac{50}{200,000} = 0.5 \text{ l-unit} \quad (10)$$

위 값은 작은 값으로 판폭방향으로 두께 변화가 평균 2% 미만으로 관리된다면 그 오차는 무시할 수 있다.

3.3 압연후의 형상변화

압연후의 형상변화 원인으로는 판폭방향 불균일 온도 편차가 있으며, 압연중의 온도 편차가 권취후 균일해지면서 1 °C 당 1.2 l-unit의 형상편차를 일으키는 것으로 보고되고 있다. 이러한 변화는 압연 중에는 변화가 없으나 압연후 후공정에 영향을 줄 수 있다. 이것은 아래의 식 (11)에 의해 표현된다.

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T \quad (11)$$

여기서, α 의 값은 철의 경우 1.2, Aluminium의 경우는 2.40이며, ΔT 는 판폭방향 온도 편차이다. 온도 편차는 항상 일정한 형태를 가지고 있지 않고 압연 조건과 판의 Profile에 의해서 변화한다. 이러한 형상편차를 줄이기 위한 방법으로는 출측에 온도 Profile meter를 설치하여 목표형상을 보상하는 방법이 제안되고 있다.

위의 원인 외에 형상변화 원인으로 더 큰 영향을 주는 원인은 Coiling 효과이다. Coiling 효과의 원인 즉, 불 균일한 장력분포의 원인은 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, Reel 축의 휨 현상으로 Skew와 같은 효과를 일으킨다.

둘째, 판의 Wedge 또는 High spot 등의 원인으로 인한 Build up 현상으로 국부적인 연신 또는 축정시 형상 오차를 발생시키기도 한다.

냉간 압연에서는 출측에서의 압하율이 50 %이상이기 때문에 변형저항이 충분히 높아 Coiling에 따른 효과가 소둔 공정 등에 비하여 상당히 적다고 할 수 있다. 그러나 박물의 경우 선단 부에 비하여 후단 부에서 형상불량이 크게 발생되는 것으로 Build-up 현상에 의한 국부적인 연신량의 변화가 있음을 추정할 수 있다. 이러한 Coiling 효과는 독일의 BFI-VDEh-INSTUTE에서 발간된 E Neuschütz, P.D Pätz and G Mücke의 연구 보고서중 그림 4.에 나타난 결과에 의하면 가역식 냉간압연 Mill에서 실험된 형상 변화가 20 l-unit 이상 변화하는 것을 알 수 있다.

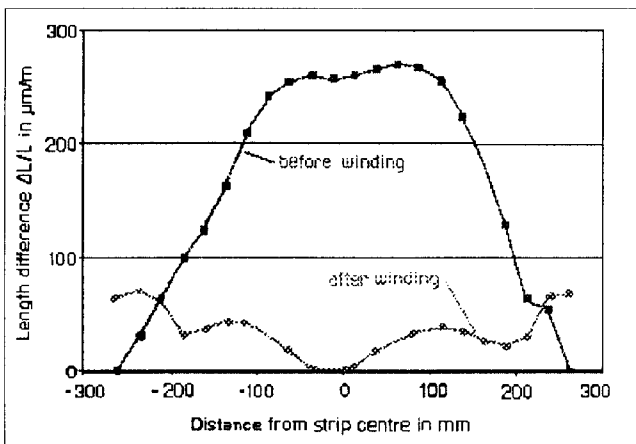


그림 4. Tension bridle에서의 권취 전후 연신 변화

Fig. 4. Length distribution of a strip before and after winding in a tension bridle.

4. 결론

이상과 같이 압연후의 형상변화 원인에 대한 후공정과 연계 Test를 통하여 신형상제어 시스템에 있어서 형상오차를 최소화할 수 있는 시스템을 구현하고 적절한 목표 형상의 설정 등을 통하여 기존 형상 실적에서 압연후 장력을 제거한 상태에서 실측한 결과 급준도 기준으로 48.2 %의 개선 결과를 나타냈으며, 후공정에서 필요로 하는 형상으로의 개선을 통하여 소둔 공정에서의 생산성 향상과 연계되는 효과가 있었다.

즉, 고품질의 형상을 가진 제품은 압연시에 수치적으로 나타나는 대표 값뿐 아니라 후공정 즉, 수요가가 원하는 형상을 예측하고 불량 원인을 제거하여 수요가가 만족할 수 있는 제품을 만드는 것이 중요하다고 할 수 있다.

참고문헌

- [1] Eberhard Neuschütz, Paul-Dieter Pätz and Gert Mücke, "Strip flatness and tensile stress distribution in cold reversing mills and recoiling lines"
- [2] Roger Davidson, 1986, "Automatic flatness control system", Iron and Steel Engineer, pp44 - 48, 1986
- [3] S.I. Chen, J.H. Lin, 1993, "The Application of Auto Flatness Control System in CSC's Temper Mill", Symposium on Steel Production Technology pp327 - 339, 1993
- [4] 이준정, "최근 냉연 Mill의 형상제어기술 동향", 압연연구실, 강재연구부, 산업과학기술연구소