

스탠드간 장력프로파일을 이용한 열연판 평탄도 제어시스템

홍 완 기, 이 준 정

압연프로세스연구팀, 포항산업과학연구원

Flatness Control System of the Hot Strip by Using Tension Profile between Stands

W. K. Hong and J. J. Yi
Rolling Process Research Team, RIST

Abstract

To have high flatness quality of hot rolled strip in the hot strip finishing mill train, a new inter-stand tension profile measuring device of segmented looper roll type (coined as **Flatness Sensing Inter-stand Looper, FlatSIL**) and a new flatness control system have been developed in this study. The device measures the strip tension profile across the strip width and informs the strip wave pattern to new flatness control system where work roll bending mode to relieve the strip wave is determined. The existing automatic shape control system which uses laser type shape-meter installed at the outlet of the last finishing mill stand usually works only for the strip head of about 100 m length since the latent wave concealed by the strip tension between down coiler and last finishing mill stand cannot be measured by the laser distance-meter. Thus the existing shape control system is not able to control the flatness through the full strip length. The new flatness control system, however, works for full strip length during strip rolling as far as the tension profile measuring device and work roll bender are on. With the new flatness control system, work roll bender is automatically controlled to minimize the latent wave of the running strip and the flatness quality as well as strip travelling stability has been noticeably improved from strip head through body to tail.

Key words : Flatness, Segmented Roll, Shape, Tension, Looper

1. 서론

열간압연판의 평탄도는 열연제품의 품질을 좌우하는 주요 항목중의 하나로써 수요가 가공 시 최종제품의 품질과 직결됨은 물론, 냉간압연 등 후 공정의 작업성에도 큰 영향을 미치게 된다. 열간압연 시 최적의 평탄도를 유지하기 위해서는 사상압연 스탠드에서의 롤갭 설정이 압연재의 폭 방향 두께프로파일과 일정 비율 이내로 유지되어야 함은 물론, 스탠드 사이의 스트립 장력이 압연기의 중심 축으로부터 대칭적이어서 판의 사행이 없어야 하는데, 이는 연속압연 공정에서의 수많은 영향인자들에 의해 변할 수 있기 때문에 영향인자들을 모두 최적의 조건으로 유지시키기는 현

실적으로 매우 어려운 문제이다. 통상적으로 사상압연기 출측에는 판 평탄도 측정장치가 설치되어 있으나 비접촉식 방식으로 판과의 거리를 측정하여 평탄도로 환산하기 때문에, 판의 굴곡면이 드러난 평탄도 불량만을 인식할 수 있을 뿐이고 판에 장력이 부여되어 탄성변형에 의해 감춰진 평탄도 불량은 인식할 수 없는 단점이 있어 장력압연 중에는 인식되지 않았던 평탄도 불량이 코일을 풀어보면 실제로 크게 나타나는 문제점이 있다. 열연판에서 평탄도 수준을 25 I-Unit 이내로 관리한다고 볼 때 압연 중에 압연판의 평탄도를 정확히 측정하고 이를 이용하여 형상제어를 실시하는 기술이 매우 중요하다. 압연 판장력에 의해 감춰진 평탄도 불량을 측정하는 효과적인 방법은 접촉식 평탄도 측정방식이다. 따라서 최종 압연기 입측에 설치되어 있는 루퍼롤에서 판이 접촉된 상태로 폭 방향 장력 분포를 측정하고 이를 판의 평탄도로 환산하여 인식하는 방법을 본 연구에 선택하였다.

한편, 기존에 개발된 접촉식 평탄도 측정기기로는 냉간압연에서 널리 사용되어온 바와 같이 통판 드프렉타롤을 폭방향으로 분할하여 각 분할롤에서 측정되는 장력치를 폭방향으로 비교하여 폭방향 장력분포로부터 평탄도 불량의 형태를 해석해 내는 방법이 있다. 열간압연에서도 이와 유사한 방법의 평탄도 측정장치가 개발되어 압연기 스탠드 사이의 루퍼롤을 분할하여 장력분포를 측정하는 방법들이 보고되어 왔다. 그러나 기존의 방법들은 폭방향 장력의 세부분포를 정밀하게 측정하는 데 주안점을 두어 루퍼롤을 너무 세분하게 되고 이는 열간압연과 같은 고온조업에선 측정기능이 쉽게 손상되어 내구성이 나쁜 단점을 지니고 있다. 본 연구에서는 압연기간에 설치된 루퍼롤을 판 폭 방향으로 분할하는 방법은 동일하나 분할롤의 수를 적게 하여 장력의 근사 프로파일만을 인식할 수 있도록 하되 측정기기의 내구성을 강화하는 데 주력하고 자 하였다. 동시에 장력 근사 프로파일만 가지고도 압연기에 설치된 롤 벤더력을 이용하여 판 평탄도를 실시간으로 제어할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다.

2. 시스템 설계 및 적용

2.1 평탄도 검출루퍼의 개발

기존의 루퍼롤을 분할하는 구조로 설계된 평탄도 검출루퍼(Flatness Sensing Inter-stand Looper, FlatSIL)는 압연 중 열연판의 폭 방향 장력 프로파일을 검출하는데 그 목적이 있다. 따라서 이 장치는 열연공장의 열악한 환경하에서도 안정적으로 수명을 유지하고, 장력 프로파일을 검출할 수 있어야 한다. 또한 조업에 직접적인 영향을 주기 때문에 설비의 안정을 필요하다.

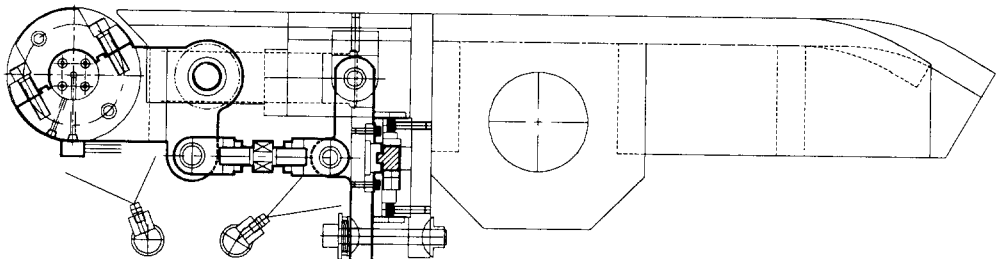


그림 1. 평탄도 검출루퍼의 측면도

그림 1에는 평탄도 검출루퍼의 측면도를 나타내었다. 분할루퍼롤 양단 축지지 support를 분리

가 가능한 구조로 설계하였다. 양단의 체결용 볼트 2개씩만 해체하면 분할루퍼롤의 분리 교체가 손쉽게 가능하다. 분할루퍼롤 사이의 수평 또는 높이가 불량하면 평탄도 검출신호가 왜곡될 수 있고, 이 왜곡된 신호는 전체 제어시스템의 성능을 저해할 수 있기 때문에, 분할루퍼롤 사이의 수평 높이를 조정하는 것이 쉬워야 한다. 이러한 요구에 부합할 수 있도록 각각의 분할롤에 대하여 초기위치를 조절이 가능한 구조로 설계하여 미세 조정이 가능하도록 하였다. 하중센서를 주위 환경으로부터 보호하기 위하여 하우징 블록을 설치하였고, 루퍼의 승하강시 발생하는 충격하중으로부터 보호하기 위한 충격흡수장치도 설치하였다. 또한 진동시 하중의 불규칙적인 변화를 예방하기 위해 초기 예압을 부여할 수 있는 장치를 도입하였다. 이러한 평탄도 검출장치의 설계원리는 기본적으로 기존의 루퍼 제어시스템의 응답특성을 변화시키지 않기 위하여 기본 토크와 GD^2 를 고려하여 설계되도록 하였다.

2.2 장력계산 알고리즘

분할루퍼롤에 작용하는 하중에는 소재장력에 의한 하중뿐만 아니라 소재의 무게, 벤딩력, 원심력, 가속관성에 의한 하중 등으로 이루어져 있다. 그림 2에는 분할루퍼롤에 작용하는 하중으로부터 판에 작용하는 순수한 장력을 계산하기 위하여 작용하는 하중을 접선방향과 법선방향으로 구분하였다.

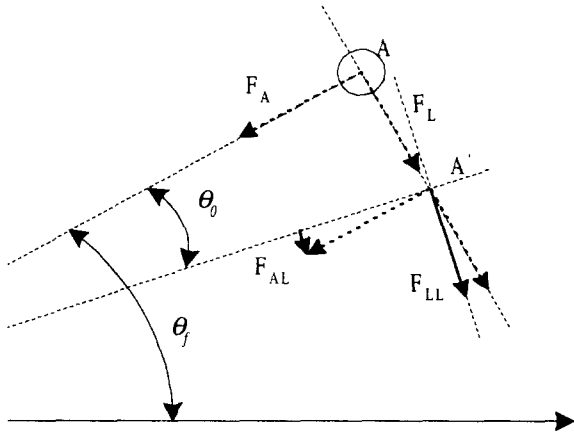


그림 2. 분할형 루퍼롤에 작용하는 하중분력도

상기의 그림 2에서와 같이 기하학적 방법으로 분석한 후, 검출된 하중으로부터 장력에 관한 수식으로 유도했다. 먼저 분할루퍼롤 양단에 작용하는 하중을 더하여 하나의 하중으로 계산한다. 분할루퍼롤에 작용하는 하중 중에서 가속관성의 영향은 정상상태에서 영향도가 미미하므로 생략하였다. 따라서, 다음과 같은 장력 관련식으로 나타낼 수 있다. 이때, θ_0 는 열연판이 진행되는 pass line과 분할루퍼롤의 하중센서 측정부가 이루는 각도이다.

$$T_{seg} = \frac{K_i \times F_{LC} \times (K_j \sin \theta_f + K_k \cos \theta_f) \times (F_1 - F_2)}{W_{seg} \times h_5} \tag{1}$$

T	Unit tension (kgf/mm ²),	θ_f	Looper angle (deg)
F _l	Load of strip bending and weight	F ₂	Centrifugal force of strip
K _l	Variable related to looper angle	K _j , K _k	Constants related to looper angle
W _{seg}	Strip Width on the segmented roll	h _s	Exit thickness of the #5 stand

상기 식 (1)에서, 압연판에 작용하는 순수한 판 장력은 소재의 무게와 굽힘하중, 소재의 원심력에 의한 영향을 가장 크게 받고 있음을 알 수 있다. 또한 평탄도 제어 시 사용하게될 장력값은 루퍼각도가 지정된 범위내의 안정된 상태에서 제어가 가능하기 때문에 동적하중 부분은 모두 0으로 나타날 것으로 판단하여 단순화하였다.

2.3 형상결정 알고리즘

압연하는 동안에 평탄도를 제어하기 위하여 종전의 방법들은 폭방향 판 장력을 세분하여 9 ~ 11개의 측정점을 사용하였으나, 제어적인 관점에서 보면 폭방향 장력분포를 제어할 수 있는 수단은 대칭성을 가진 롤 밴더와 폭 양단에서 물집의 차이를 조절할 수 있는 롤갭 조절기능 뿐이다. 따라서 정밀한 폭방향 장력분포를 인식해도 이를 기초로 제어하는 정밀한 수단이 없다는 측면에 착안하여 본 연구에선 분할롤 구조를 간단하게 3개 영역으로 구분되 각 분할롤의 양단에서 하중을 인식할 수 있도록 설계함으로써 폭방향 장력 프로파일을 인식할 수 있도록 하였으며 이를 기준으로 열연 판의 평탄도 수준과 상관성을 나타낼 수 있는 방안을 모색하였다.

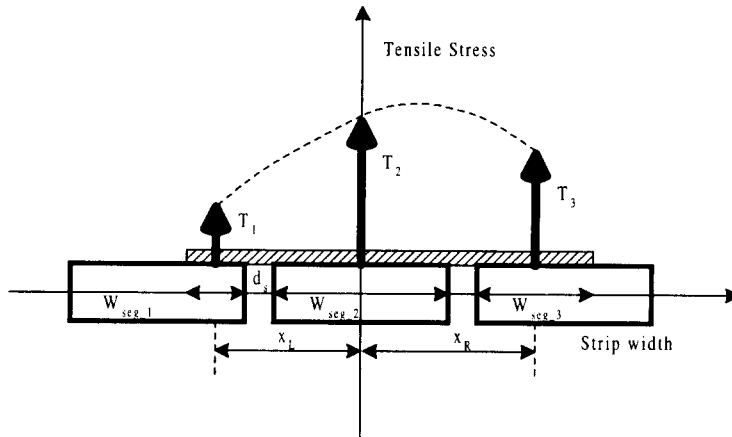


그림 3. 분할형 루퍼롤 위의 장력 프로파일

그림 3에는 분할루퍼롤 위의 장력 프로파일을 묘사하기 위한 개략도를 나타내었다. 점선으로 나타난 장력 프로파일을 구하기 위하여 분할루퍼롤 위의 소재 폭, 장력 등을 이용하여 2 차식으로 곡선화하였다. 이러한 장력 프로파일을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = A + BX + CX^2 \quad (2)$$

식 (2)에서 X는 판폭을 의미한다. 장력 프로파일을 용이하게 구하기 위하여 좌표계를 가운데 위치한 분할루퍼롤의 중심부에 기준을 두고 각각의 분할루퍼롤 위의 폭과 장력값을 이용하여 장력에 관한 2차식의 계수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \frac{1}{X_R - X_L} \left\{ \frac{X_R}{X_L} (T_1 - T_2) - \frac{X_L}{X_R} (T_3 - T_2) \right\} \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{X_R - X_L} \left\{ -\frac{1}{X_L} (T_1 - T_2) + \frac{1}{X_R} (T_3 - T_2) \right\} \quad (4)$$

상기의 식 (3)과 (4)에서 B값은 장력프로파일 식의 선형계수로써 판 폭 방향으로 양단의 장력 차이를 균일하게 조정하는 근거로 이용할 수 있고, C값은 2 차원으로 중앙부와 양단의 장력 차를 균일하게 조정하는 데 이용할 수 있다. 즉, B, C를 각각 0으로 제어할 수 있다면 평탄한 열연 판을 얻을 수 있다.

2.4 평탄도 제어시스템의 개발

평탄도 제어시스템은 열연 판에 대한 설정치 정보를 상위의 컴퓨터(SCC)로부터 직접 전송받고, 평탄도 검출루퍼로부터 폭 방향 하중분포를 이용하여 평탄도 제어량으로 환산하여 압연기의 롤 벤더와 AGC로 각각 전송한다. 그림 4에는 이러한 제어시스템간의 상호관계를 나타내는 구성도를 나타내었다.

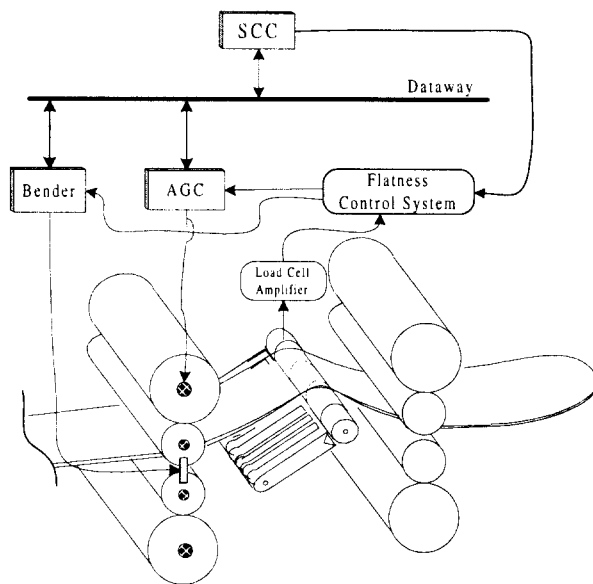


그림 4. 평탄도 검출루퍼 및 제어시스템 구성도

평탄도 검출루퍼로부터 검출된 열연 판 폭 방향 하중 분포값은 평탄도 제어시스템에서 장력계산 알고리즘과 형상결정 알고리즘을 거쳐 평탄도로 환산된다. 이렇게 환산된 평탄도 정보를 이용하여 벤더와 롤갭 제어 알고리즘에서는 Bender와 AGC 제어계로 평탄한 판을 얻기 위하여 제어량을 개입하게 된다. 이러한 평탄도 제어방법은 압연기 사이에 설치된 평탄도 검출루퍼의 출력신호를 이용하기 때문에 열연 판이 압연기 사이에 존재하는 한, 열연 판 전장에 걸쳐 평탄도 제어가 가능하게 된다.

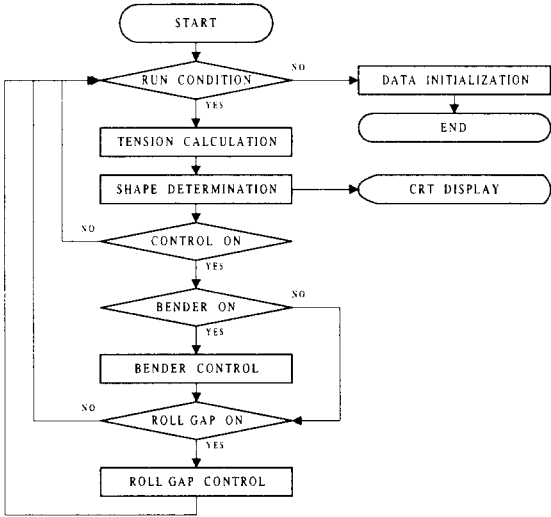


그림 5. 개발된 평탄도 제어시스템 flow chart

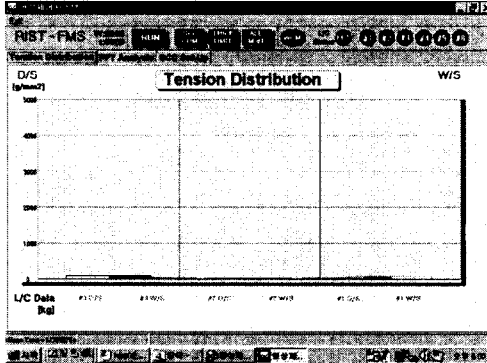
그림 5에는 평탄도 검출루퍼를 이용한 판 평탄도 제어시스템의 순서도를 나타내었다. 평탄도 제어시스템은 평탄도 검출루퍼의 하중분포를 이용하여 장력계산 알고리즘과 장력분포를 형상으로 나타내는 형상결정 알고리즘, 결정된 형상으로부터 벤더 및 롤갭을 제어하는 알고리즘 등이 포함되어 있다. 장력계산 알고리즘과 형상결정 알고리즘으로부터 얻어진 장력프로파일은 실시간으로 모니터에 표시하므로써 수동개입 운전이 용이하게끔 설계되었다. 또한 운전자가 평탄도 제어유무를 결정할 수도 있고, 양파 또는 중과제어를 위한 벤더제어와 편과제어를 위한 롤갭제어를 개별적으로 선택할 수 있도록 하였다.

2.5 데이터 수집 및 감시시스템 개발

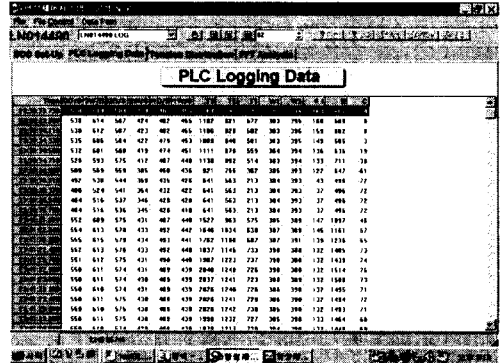
데이터 수집 및 감시시스템은 조업 데이터에 대한 On-line 감시기능과 Off-line 분석기능을 가지고 있다. On-line 감시기능은 실시간으로 평탄도 제어시스템과 평탄도 검출루퍼의 상태를 감시할 수 있으며 조업 데이터를 저장할 수 있다. 제어시스템의 상태를 표시하는 기능을 아래 그림 6(a)의 상단 메뉴 사각형의 버튼과 원형 버튼으로 나타내었다. 사각 버튼은 적색이면 정상동작이고 녹색이면 fault이다. 원형 버튼은 센서의 상태를 표시하므로 반대이다. 이 버튼의 기능은 열연 판의 정보, SCC와 평탄도 제어장치와의 통신상태, 열연 판의 치입상태, 평탄도 제어시스템의 평탄도 제어유무, 사상압연기 후단의 폭계 상태, 평탄도 검출루퍼를 회전부위 베어링의 회전상태, 평탄도 검출센서의 이상유무 등을 나타낸다.

이 시스템의 주 기능인 동작기능으로는 장력프로파일, SCC 설정치 정보표시, 평탄도 검출루퍼를 베어링의 이상유무를 판별하는 FFT 분석기 등을 실시간으로 감시할 수 있다.

Off-line 분석기능은 On-line 감시시스템의 장력프로파일, SCC 설정치 정보 표시, FFT 분석기 등의 기능을 공유하며 Data 저장기능도 가진다. 그림 6 (b)에 나타난 것처럼 데이터가 수집된 시간, 하중검출신호, 판폭 방향 장력 프로파일, 평탄도 검출루퍼를 위의 소재 폭, 평탄도 검출루퍼 각도, 형상계수등을 저장하여 Off-line으로 분석이 가능하게 한다.



(a) On-line 감시 및 상태 표시창



(b) Off-line 분석용 데이터 저장 표시창

그림 6. Data Acquisition & Monitoring System 기능도

3. 평탄도 현황 및 제어시스템 적용

3.1 스탠드간 평탄도 현황

개발된 데이터 수집시스템으로부터 수집된 데이터를 분석하기 위하여 폭 구분은 900미만, 1100미만, 1350 미만, 1350 이상 4구분으로, 길이방향으로는 선단부(top), 중심부(middle), 미단부(tail) 등 세 구분으로 분류하였다. 또한 평탄도 분석방법은 장력 프로파일식의 2차 계수(C)의 크기를 기준으로 구분범위를 20구분으로 분류하였다. 표 1에는 평탄도 구분범위를 나타내었다. 구분범위의 의미는 10, 11구분을 중심으로 하여 1구분으로 치우칠수록 양과성이 강해지고, 20구분으로 치우칠수록 중과성이 강해짐을 의미한다. 평탄도 적중을 범위는 구분범위 10~11 구분으로 정의하였다. 이때 수집된 데이터는 총 1,003 매였다.

표 2에는 수집된 데이터에 대해 평탄도 적중율을 분석한 결과로 그 현황을 top, middle, tail 부로 구분하여 나타내었다. 표 2에서 알 수 있듯이, 기존의 평탄도 제어시스템의 성능은 top부에서 tail부로 진행함에 따라 평탄도 적중율이 저하되는 경향을 나타내고 있으며, 폭이 작아질수록 평탄도 적중율이 저조한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 흔히 열연 판 후단부 압연시 꼬임(cobble)을 발생시키는 요인이 될 수도 있다. 기존의 평탄도 제어는 사상압연기 후단의 shape-meter에 의해 평탄도가 측정되기 때문에 권취기가 판을 감기 시작한 이후에는 측정의 정밀도가 저하되는 것과 관련이 있으리라 판단된다.

3.2 밴더 제어 알고리즘 개발 및 적용

평탄도를 제어하기 위하여 밴더의 압력을 제어하는 방법으로 PID 제어계를 채택하였다. 밴더 제어 알고리즘은 장력계산 알고리즘과 형상결정 알고리즘으로부터 유추된 평탄도 계수, C를 피드

백으로 입력받아 평탄도 목표치와의 비교를 통하여 벤더제어 개입량을 산출하며 벤더의 유압액추에이터로 압력을 전달하여 열연 판의 평탄도를 개선하고자 한다. 먼저 제어계에 사용될 제어계인을 조정하기 위한 off-line 시험을 수행한 결과를 아래 그림 7에 나타내었다.

표 1. 평탄도 구분범위.

구분	1 구분	2 구분	3 구분	4 구분	5 구분	비 고
범위	-450~-406	-405~-361	-360~-316	-315~-271	-270~-226	1구분 ~ 10구분범위는 양과성이고, 11구분 ~ 20구분범위는 중과성이다.
	6 구분	7 구분	8 구분	9 구분	10 구분	
	-225~-181	-180~-136	-135~-91	-90~-46	-45~0	
	11구분	12구분	13구분	14구분	15구분	
	0 ~ 45	46 ~ 90	91 ~ 135	136 ~ 180	181 ~ 225	
	16구분	17구분	18구분	19구분	20구분	
	226 ~ 270	271 ~ 315	316 ~360	361 ~ 405	406 ~450	

표 2. 평탄도 적중율 현황(1,003 매)

길이구분 폭 구분	Top 부 적중율	Middle 부 적중율	Tail 부 적중율	데이터 수집매수 (분포율)
900 미만	0.0	4.1	5.5	73 (7.28 %)
900 이상 1100 미만	8.9	7.9	5.5	382 (38.09 %)
1100 이상 1350 미만	30.0	27.7	22.0	469 (46.76 %)
1350 이상	57.0	49.4	41.8	79 (7.88 %)

그림 7에 나타난 것처럼, 운전자 벤더 수동개입에 따라 평탄도 계수가 정(+)의 방향으로 변화함을 알 수 있고, 그 비율은 벤더 설정치 변화량이 48 kgf/cm²일 때, 평탄도 계수가 110 kgf/cm³이므로 벤더 제어용 P 계인의 기울기 값은 약 0.43으로 설정하여 제어계 tuning을 시작할 수 있다. 참고적으로 운전자 수동 개입량과 ASC 제어 개입량과는 제어방향이 반대로 나타남을 알 수 있다.

3.3 평탄도 제어시스템 On-Line 적용

개발된 평탄도 검출루퍼의 출력신호를 이용하는 제어시스템을 실제공장에 실시간으로 적용한 후, 데이터 수집시스템을 이용하여 수집한 조업 데이터 1,004매를 비교 분석하였다. 그 결과를 표 3에 나타내었다.

표 3에서 알 수 있듯이, 평탄도 제어시스템을 가동하면 험폭재를 제외하고는 전장에 걸쳐 평탄도 적중율이 크게 개선됨을 알 수 있다. 특히, 후단부로 진행할 수록 적중율이 저조했던 기존의 제어시스템과는 달리, 전장에 걸쳐 고른 적중율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 폭 구분에 따른 적중율이 저하되는 경향은 여전히 존재하고 있으며, 이를 해소하기 위해서는 제어계인을 폭 구분별 세분화할 필요가 있었다.

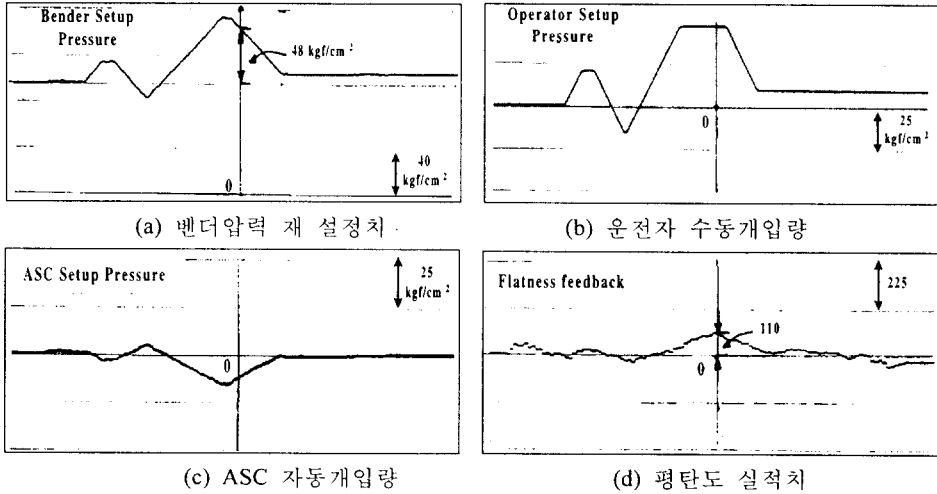


그림 7. 벤더력과 평탄도 계수와의 상관관계

표 3. 개발된 평탄도 제어시스템 적용 후 평탄도 적중율 현황(1,004 매)

폭 구분 \ 길이구분	Top 부 적중율	Middle 부 적중율	Tail 부 적중율	데이터 수집매수 (분포율)
900 미만	0.0	0.0	3.5	57 (5.68 %)
900 이상 1100 미만	16.8	24.8	26.4	322 (32.07 %)
1100 이상 1350 미만	57.7	60.6	53.8	591 (58.86 %)
1350 이상	70.6	82.4	85.3	34 (3.39 %)

4. 평탄도 제어시스템 성능평가

평탄도 검출루퍼의 출력을 이용하는 새로운 평탄도 제어시스템을 On-line 적용 전과 후의 데이터를 비교, 분석하였다. 평탄도를 좀더 상세히 분석하기 위하여 전체 압연 매수중 85% 이상을 차지하고 있는 중폭재에 대해서 분석하였다. 중폭재는 평탄도 제어시스템을 적용하지 않은 조업에서 수집된 1003 매중 851매 (84.85%)가 해당되었고, 평탄도 제어시스템을 적용한 1004매중 913매 (90.94%)가 해당되었다. 이 중폭재의 경우에서 평탄도 적중율을 제어 전, 후로 비교, 분석한 결과를 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서는 중폭재(900 이상 1350 미만)에 대한 Top, Middle, Tail부의 평탄도 적중율을 비교하였는데 제어전의 Top, Middle, Tail의 평탄도 적중율은 Tail부로 진행될수록 저하됨을 알 수 있다. 이는 기존의 평탄도 검출장치가 Top부 이후에서는 검출이 불가능하여 열연판의 평탄도를 제어할 수 없다는 것과 후단으로 갈수록 압연판 온도가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 평탄도 검출루퍼를 현장에 설치하고, 그 출력을 이용하는 제어시스템을 적용한 결과, 평탄도 적중율은 Top, Middle, Tail부 모두에서 크게 개선되었다. 이는 열연 판 전장에 걸쳐 평탄도가 크게 개

선되고 있다는 점이 지적될 수 있으며, 이러한 평탄도 개선효과는 기존의 방법에서 겪었던 평탄도 불량으로 인한 압연 통관성 불안정 현상이 크게 완화되는 효과로 나타났다.

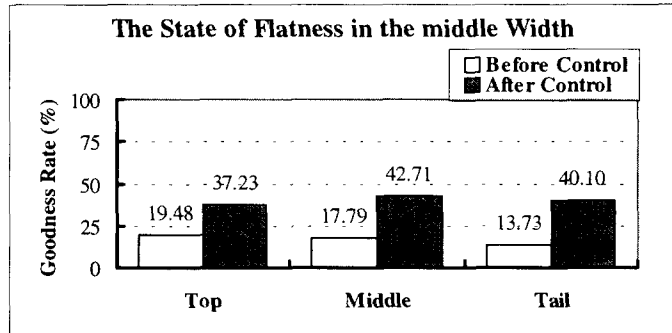


그림 8. 평탄도 검출루퍼 출력을 이용하는 제어시스템 On-Line 적용 전, 후의 비교

5. 결론

기존의 루퍼를 분할형으로 하여 설계된 평탄도 검출루퍼와 제어시스템을 개발하여 포항제철 주식회사 광양제철소 2열연 공장 사상압연기 5~6호간에 설치하여 실기, 적용한 결과, 다음과 같은 효과를 얻었다.

1. 사상압연 스탠드간 장력 프로파일을 검출할 수 있는 열연 판 평탄도 검출루퍼와 전장에 걸쳐 평탄도를 제어할 수 있는 제어시스템을 개발하였다.
2. 조업상황 감시 및 데이터 수집시스템을 개발하여 대규모 데이터를 저장하고 이를 분석하여 현장의 측정기기의 이상유무를 감시할 수 있도록 하였다.
3. 개발된 평탄도 제어시스템을 실기에 적용한 결과, 압연판의 선단부, 중심부, 미단부 각각 평탄도 적중율이 두배 이상 향상되었다.

참고문헌

1. Y.H. Moon, J.J. Yi, Journal of Materials Processing Technology. pp 469~475, 1994.
2. Herrmann J. Kopineck, Wilhelm H. Tappe, Hot Strip Mill Profile and Flatness seminar, Pittsburg, Pennsylvania. Nov. 2~3, 1988.
3. George F. Kelk, Iron and Steel Engineer, pp48~56, August, 1986.
4. Wolfgang Fabian et., Metallurgical Plant and Technology, pp 68~75, 1985,
5. K.H. Shin, W.K. Hong, KSME International J. Vol.12, No.1, pp.12-21, 1998.