

연속 6단 냉간압연기에서 Profile 및 형상제어 압연기술

박 해 두*

광양압연연구그룹, 포항제철기술연구소

Technology of profile and shape control in the 6-high Tandem Cold Rolling Mill

H. D. Park

Rolling Products Research Team, Technical Research Laboratories, POSCO

Abstract

Strip profile and shape control is one of the most important technologies in cold mill, especially for ultra-thin and wide cold strip. The 6-high mills, both of HCMW and UCMW mill, are known to be very effective for the shape controllability.

The optimized values of these factors for set-up scheduling were analyzed and found that excellent strip shape control would be possible by controlling the combination of the influencing factors according to hot coil profile. The important considerations for operation were discussed for individual stand.

Key Words : HCMW(High Crown Control Mill and Work Roll Shift), Shape Control, UCMW(Universal Crown Control Mill and Work Roll Shift), Cold Rolling

1 서론

냉간압연 후의 판 프로파일과 판 형상은 차 공정의 작업성에 크게 영향을 준다. 판 프로파일에서 판의 일부분의 두께가 두꺼워지면 Build-up을 발생시켜 냉연 Coil를 풀 때 웨이브를 발생시켜 불량을 일으킨다. 특히 판의 장력 제어에 장애를 주기 때문에 차 공정인 연속소둔라인에서의 판 파단에 영향을 주며 또 냉연 자체공정에서도 스탠드간 웨이브(wave) 발생은 사행, 판 파단, 판물림, 두께 불량 등을 발생시켜 냉연 작업성 자체에도 영향을 준다. 판 형상에 영향을 주는 인자들 중 소재성의 고 크라운(crown)은 중파를, 저 크라운은 양파를 발생시킨다. 하이스팟(hi-spot)은 판폭 방향의 국부적인 위치에 극심한 웨이브를 일으킬 수 있다. 웻지(wedge)는 편파를 일으키며 좌우 비대칭 압연법으로 해소시킬 수 있으나 큰 웻지 코일은 편파가 발생되지 않을 수 있다.

연속 냉간 6단 압연기에서 작업물과 중간물 밴더를 증대하고, 중간물 위치를 (-)방향으로 이송시키면 엷지 웨이브가 감소하게 되고, 중파가 발생될 때는 위의 조작단을 반대 방향으로 움직이면 된다. 작업물의 냉각수 유량은 롤 길이 방향의 롤 프로파일의 변화를 주게되며 냉각수 유량이 적은 곳은 롤 냉각이 되지 않으므로 불룩한 프로파일을 가지고 이때 판은 상대적으로 얇게 압연되므로 웨이브를 발생시킬 수 있다. 반대로 어느 특정 부위의 유량이 많으면 압연되는 부위는 두껍게 압연되므로 후 공정 즉, 조절압연기에서 웨이브를 일으킬 수 있다.

본 연구는 연속 6단 냉간압연공장의 압연 형상제어 기술을 개발하기 위해, 소재 3차원 압연해석 프로그램을 도입 및 냉연 6단 압연기의 롤 탄성변형을 해석하고, 실 압연 Data를 바탕으로 판 크라운 및 형상 예측 모델을 개발하였다. 그리고, 이를 바탕으로 판형상 제어 Logic을 개발하였다. 연속 냉간압연기에서 신형상제어 기술 개발을 위해 냉연 Crown 및 형상예측 Simulator를 개발하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 냉연 6단 압연기의 롤 탄성변형

연속 냉간 압연에서 사용되고있는 6단 압연기의 탄성 변형 해석은 Fig. 1과 같이 롤 분할모델법으로 압연기 탄성변형을 해석 할 수 있다. 6단 압연기는 상부 3개 하부 3개의 작업롤, 중간롤, 보강롤로 구성되어 있다. 롤 벤더장치에 의한 벤더력은 작업롤에서 구동축은 J_{wd} 와 작업축 J_{ww} 가 작용하고, 중간롤에서 각각 J_{id} 와 J_{iw} 가 작용한다. 소재 압연 선하중 $p(j)$ 이 작업롤에 작용하며, 작업롤과 중간롤 사이의 접촉압력 $q(j)$ 가 작용하고, 중간롤과 보강롤간에 접촉압력 $r(j)$ 가 작용한다고 가정한다. Fig. 1에서 중간롤의 이송(이송)량은 판의 왼쪽 엣지점을 영점으로 하여 왼쪽으로 이송하는 방향을 (+), 오른쪽으로 이송 하는 방향을 (-)로 한다. 이때 이 값을 $UC\delta$ 값으로 한다.

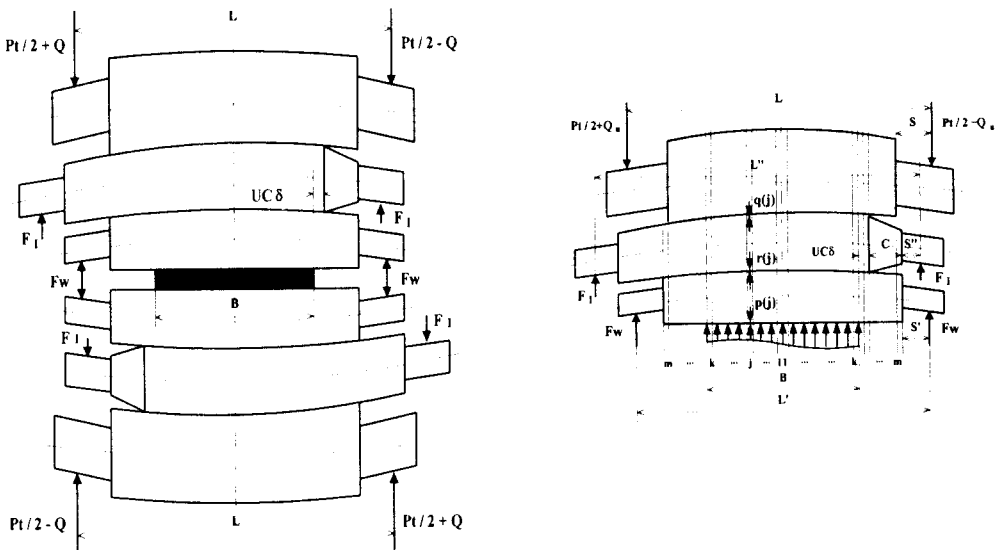


Fig. 1. Decomposition of loadings of the upper rolls in 6-high mill.

(1) 각 롤의 처짐량 계산

Fig. 1과 같이 압연 소재와 작업 롤 사이 선하중 $p(j)$, 작업 롤과 중간 롤 사이 선하중 $q(j)$, 중간롤과 작업롤 사이 선하중 $r(j)$ 이 작용할 때, 각 롤의 처짐은 롤의 굽힘 모멘트에 의한 처짐과 전단력에 의한 처짐의 합으로 하여 계산한다. 통상 압연 롤의 길이는 롤경에 비교하여 (통상 3 - 5 배) 별로 크지않기 때문에 전단력에 의한 처짐량도 고려해야한다. 작업롤 처짐 다음 식으로 구하며, 중간롤 보강롤도 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$E_w I_w \frac{d^4 \delta_w}{dX^4} = p(j) - q(j) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{3}{4} G_w A_w \frac{d^2 \delta_{ws}}{dX^2} = -(p(j) - q(j)) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$(\delta_w)_{ij} = + \sum_{j=N_2}^{N_1} P(j) \Delta x \alpha_{R(i,j)} - \sum_{j=N_1}^{2m+1} q(j) \Delta x \alpha_{R(i,j)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

여기서, E: 롤 탄성계수, ν : 프와송 비, G: 전단 탄성 계수, I: 롤의 단면 2차 모멘트, A: 단면적, $\alpha_R(i, j)$: 롤의 축심 변형 영향계수 이다.

(2) 각 롤의 편평량 계산

작업롤과 중간롤 사이의 편평량 및 중간롤과 보강롤 사이의 편평량은 (4)식과 같이 Hertz식에 의해 구하고, 판재와 작업 롤 사이의 편평량은 반무한 탄성체 해에 의해 구한다.

$$\delta_w = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi E} q(j) \ln \left[\frac{\pi E}{2(1-\nu^2)} \frac{R_w + R_l}{6} e^{2/3} \right] \quad \dots\dots\dots(4)$$

(2) 압연재와 작업롤 사이의 편평량

Fig. 2에서 보는 바와 같이 접촉투영길이 Ld, j는 압연하중이 작용되는 점이라 할 때, 롤 길이의 중앙에서 Xi 만큼 떨어진 점 A의 편평량을 다음과 같이 반무한체의 가정으로 계산한다.

$$\delta(i, j) = \frac{1-\nu_w^2}{\pi E_w} p(j) [F(Y_i) + F(Z_i)] \quad \dots\dots\dots(5)$$

여기서, F(Yi), F(Zi)는 반무한체 표면의 집중하중 함수이고, 하중 작용점의 위치 Yi와 Zi는 각각 아래와 같다.

$$Y_i = |X_i - \eta_j|$$

$$Z_i = X_i + \eta_j$$

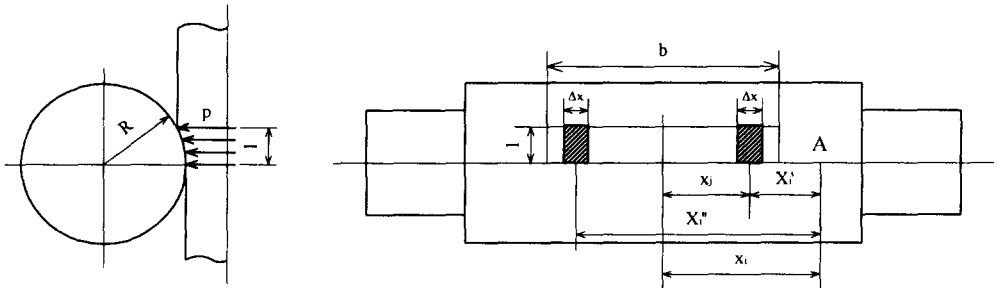


Fig. 2. Calculation model of flattening of roll surface.

위 식에서 대부분이 미지수이기 때문에 일부의 값을 계산할 수 있으며 접촉선하중과 각 롤의 처짐 및 편평량이 미지수이며 서로의 값에 영향을 미치므로 시행착오로 해를 구한다.

위 식에서 대부분이 미지수이기 때문에 일부의 값을 계산할 수 있으며 접촉선하중과 각 롤의 처짐 량 및 편평량이 미지수이며 서로의 값에 영향을 미치므로 시행착오법으로 해를 구한다.

되고 사행 및 편파를 일으킬 수 있다.

판의 폭 방향의 두께 분포 S(i)는 작업을 처짐량, 작업 롤 표면의 편평 변형량과 작업롤의 롤 크라운에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$S(i) = (\delta w)_{ij} + \delta(i,j) - CW(i)/2 \dots\dots\dots(6)$$

상하 좌우 대칭 압연인 경우 (즉, 좌의 벤더력이 같고, 판이 압연기 중앙부로 지날 경우)는 판 프로파일을 좌우 평균하여 2배한 것이 판두께 분포가 된다.

3. 연속 냉간압연기에서 Profile 및 형상제어 기술

3.1 Stand 수에 따른 Profile의 변화

Table. 1에서와 같이 4개의 Stand로 압연이 가능한 소재를 5 Stand로 압연할 때는 반드시 형상제어단의 조정이 필요하다. 통상 아래소재의 4 Stand로 압연 시 30mm정도 IMR위치를 선정하고 압연하며, 5 Stand에서는 압하율이 작은 상태로 압연이 가능하므로 하중이 작게 작용되고 이에 따라 IMR위치등 형상제어 단의 재 설정이 필요하며 이를 위해 엄밀 해석을 수행하였다.

Fig. 3은 폭 1229mm 소재두께 3.2mm 냉간압연 후의 두께 0.810mm일 때 IMR 위치가 첫 번째 20mm인 경우이고, 두 번째는 IMR Shift위치가 1-3 Stand는 300mm 이고 4번 Stand는 50mm, 5번 Stand는 20mm일 때의 압연 전후의 Profile를 나타내고 있다. 이때의 첫 번째 경우는 Edge build-up이 발생되고 이는 목적 외의 제품이나 불량제품으로 전환된다.

Table .1. Comparision rolling condition between 4 stand and 5 stand.

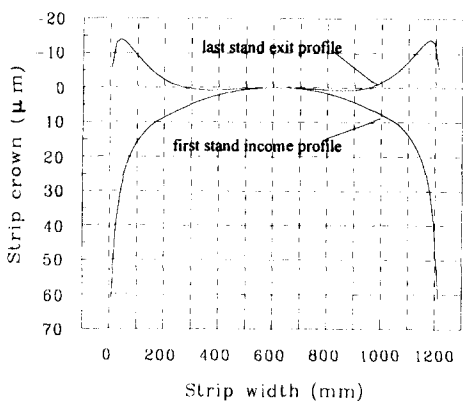
	1 Stand	2 Stand	3 Stand	4 Stand	5 Stand
4 Stand : 4.0mm -->	1.207 mm		Width: 1267mm		
5 Stand : 4.5mm--->	1.215 mm		Width: 1268mm		
4 Stand 압하율(%)	33.8	33	28.4	4.7	
5 Stand 압하율(%)	29.5	28.7	27.2	21.3	2.9
4 Stand 압연하중(ton)	1172	1112	975	642	
5 Stand 압연하중(ton)	1334	1224	1013	806	776

Case 1.

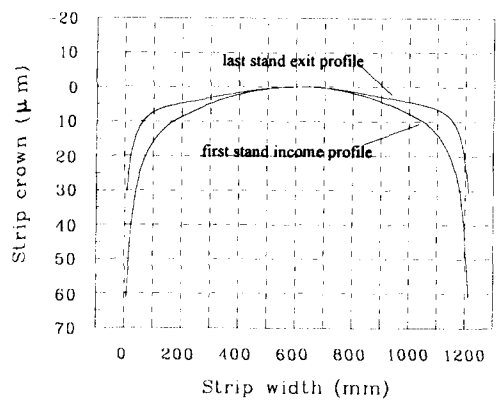
	Stand	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
incoming hot strip size, mm		3.200	1228			
exit strip thickness, mm		2.240	1.551	1.090	0.828	0.810
front tension, kgf / mm ²		10.9	14.2	17.2	16.7	9.0
back tension, kgf / mm ²		5.6	10.9	14.2	17.2	16.7
rolling force, ton		1044	1376	1178	1120	642
WR bending force, ton/chock		60.0	60.0	60.0	60.0	21.0
IMR bending force, ton/chock		58.4	56.8	49.6	48.0	31.2
IMR shift, mm		20	20	20	20	20

Case 2

	Stand	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
incoming hot strip size, mm		3.200	1228			
exit strip thickness, mm		2.240	1.551	1.090	0.828	0.810
front tension, kgf / mm ²		10.9	14.2	17.2	16.7	9.0
back tension, kgf / mm ²		5.6	10.9	14.2	17.2	16.7
rolling force, ton		1044	1376	1178	642	
WR bending force, ton/chock		41.4	37.8	31.2	24.6	21.0
IMR bending force, ton/chock		58.4	56.8	49.6	48.0	31.2
IMR shift, mm		300	300	300	50	20



Case 1



Case 2

Fig. 3. Strip profile according to IMR shifting position.

3.2 냉연 Crown 및 형상예측 모델

연속 냉간압연시에 형상제어는 입측 소재의 프로파일을 산세 입측에서 2번 혹은 3번 측정하여 크라운량에 따른 각 스탠드의 출측 크라운을 예측하고, 각 스탠드의 압연 전후의 크라운량의 변화로 형상을 예측 할 수 있고, 또한 마지막 스탠드의 형상이 마지막 스탠드 단독으로 제어가 불가능 할 때 전단 스탠드에서 부터 제어 할 수 있게 하여 양호한 형상을 만들 수 있다.

판 Crown 예측 모델을 개발하기 위해 현장으로부터 입측소재의 크라운과 TCM 출측 크라운, 각 스탠드의 작업률 및 중간롤 벤더력, 중간롤 이송량, 압연하중 Data 를 수집하였다. 그리고 신뢰성 있는 Data를 수집하여 아래의 식과 같이 회귀 분석하여 구하였다.

$$C_{hi} = aP_i + bF_{wi} + cF_{fi} + dUC\delta + eC_{hi-1} + f\epsilon_i + gTh + h \dots\dots\dots(7)$$

여기서 P : 압연하중(ton), Fw : 작업률 벤더력, FI : 중간롤 벤더력, UC δ : 중간롤 위치, Ch-1 : 입측 크라운, ε : Δh/h, 압하율 Th : 압연 출측두께이며, i : 스탠드 번호, a,b,c,d,e,f,g,h는 Table 5.1과 같이 주어진다

stand 1에서 각 스탠드 출측 크라운과 (7)식에서 구한 값을 비교하면 R-square 값은 대부분 0.99 이상 이며, 비교 Data는 1130개정도 이다. 1 stand의 출측 Crown은 5 μm 부터 60μm까지 변화되는 것을 나타내고 있다. 그리고 5 stand의 출측 Crown은 2 μm 부터 28μm까지 변화되었다.

3.4 Off-line Profile 및 형상제어 Simulator 개발

기존의 냉연의 형상제어 압연방법은 형상제어단의 초기 Set-up은 강종 x 폭 x 두께 층별 Table Data로 전 Stand Work Roll, IMR Bender력, IMR Shifting Position, Zone Coolant rate 설정이 되며, 열연 Coil의 Profile에 따른 대응이 불가하다. 또한 마지막 Stand는 ASC에만 의존하므로 제어영역이 벗어나는 경우에 형상 제어가 불가능하다. 특히 극단파의 Edge wave와 Center wave가 동시에 발생하는 복합형상제어는 마지막 Stand 단독으로 제어가 불가능 하며, 이 때 전 Stand의 동적형상제어가 되어야 하며, 이와 같은 logic을 구성하였다.

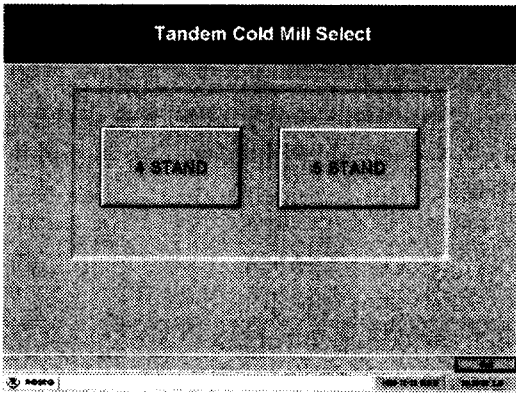
Shapemeter에서 판의 Edge부분의 형상을 정확히 측정하고, 형상 Pattern 을 인식 하더라도 기존의 형상제어 압연기로는 상기의 복합파를 제어 할 수 없다. 이유는 작업자가 Edge wave를 없애기 위해 Bender를 올리면, Edge wave는 조금 감소되지만 극심한 Center wave 가 발생되게 된다. 이는 중박 Dull 조도 압연시 특히 발생되며 광폭재 연속냉간압연에서 가장 치명적인 형상의 문제점이다.

이들을 해소하기 위하여 본 연구에서는 광폭재 형상제어 방법을 유도하였다.

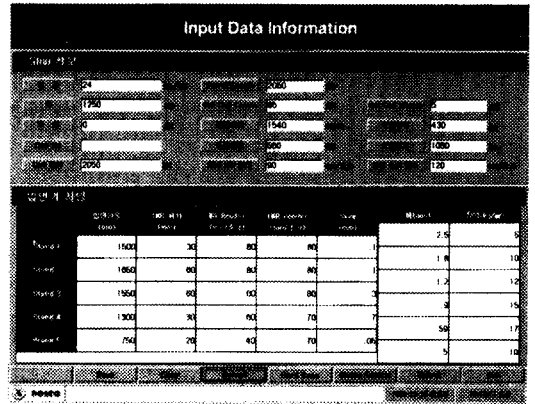
(7)식에서 판 Crown 예측모델 개발을 개발하였고, 이를 이용하여 전 스탠드 형상제어 logic을 개발하였다. 형상제어단 초기 Set-up 방식을 stand간 Wave가 발생하지 않고 마지막 Stand의 형상제어 범위 최대 확보할 수 있는 방식으로 유도하였다.

광폭재 압연 시(폭 1569mm) 동적 형상제어를 하지 않은 상태 출측 형상은 극심한 Center wave와 일부 Quarter wave가 나타나고 있다. 전 스탠드로 Simulation 하면 형상 판단 Parameter는 양호하게 되었다.

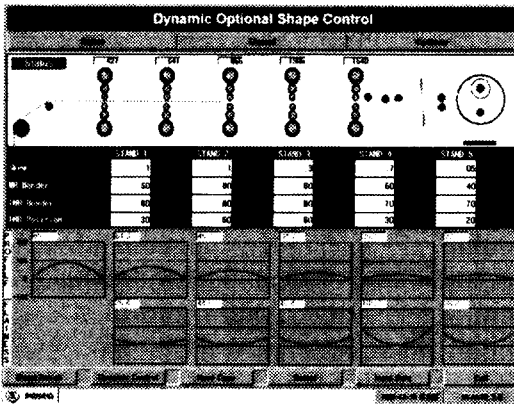
위의 기본 Logic을 바탕으로 Off-line Profile 및 형상제어 Simulator를 개발하였다. Fig. 4는 일반 Personal computer에서 기동할 수 있는 Simulator의 개요를 나타낸 것으로 (a)는 4개 및 5개의 Stand에 따른 공장의 선택이며, (b)는 형상제어 Simulation을 위한 Input data를 넣는 것으로 통상 Default로 값이 들어있고, 수정이 가능하도록 만들었다. 그리고, (c)는 Off-line으로 실제 형상제어단을 바꾸었을 때 Profile과 형상의 변화를 계산하도록 하였고, (d)는 계산결과를 Stand별로 나타내거나, 형상제어 결과가 나타나도록 하였다.



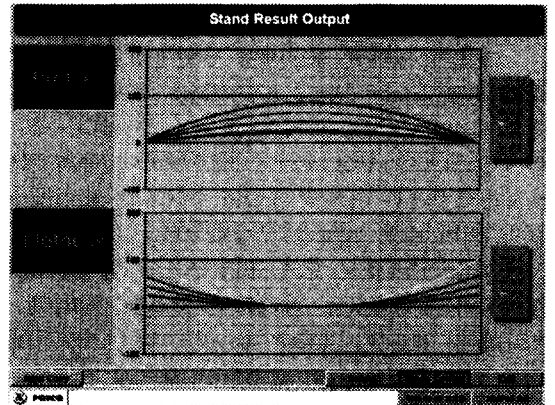
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4. Off-line profile and shape simulator.

4. 결 론

- 1) 4개의 Stand로 압연이 가능한 소재를 5 Stand로 압연할 때는 최적의 형상제어단의 조정이 필요하여 IMR위치 등 형상제어 단의 제 설정이 필요하며 이를 위해 엄밀 해석을 수행하였다.
- 2) 연속 냉간압연기에서 냉연 판 Crown 및 형상의 상관 관계를 규명하고 관련 모델을 유도하였다.
- 3) 상기 판 Crown 예측모델을 이용하여 전 스탠드 형상제어방식을 유도하여, 형상제어단 초기 Set-up 방식을 stand간 Wave가 발생하지 않고 마지막 Stand의 형상제어 범위를 최대로 확보할 수 있는 방식으로 유도하였다.
- 4) Off-line Profile 및 형상제어 Simulator를 개발하였다

참고문헌

- 1) 川竝高雄, 松本紘美, 1983, “薄鋼板 壓延に おいて 各種の 形状 および Crown制御法の 發展”, 鐵と鋼, Vol.69, No.3, pp. 348-356.
- 2) 日本 鐵鋼 協會 壓延 理論 部會篇: ‘板 壓延 理論と 實際’, 1983
- 3) 安田健一, 志田 茂, 1980, “冷間 Tandemの 形状制御 Simulation”, 塑性と加工, Vol.21, No.230, pp. 225-233.
- 4) 西 英俊, 芳村泰嗣, 吉本健一, 1982, “板形状 特性の 解析法と 従來型 壓延機 の 制御技能“, 塑性と加工, Vol.23, No. 236, pp. 1209 - 1251.
- 5) 河野輝雄, 美坂佳助, 1981, “Cold Tandemに おいて 板 Profile, 板形状 豫測 Model”, 鐵と鋼, 第15號, pp. 286-294.