

접촉식 자동 형상제어 장치의 특성에 관한 연구

김문경,* 전언찬,** 김순경,***

A Study on Characteristics of Automatic Flatness Control System of Contact Type

Moon-kyung Kim,* Eon-chan Jeon,** Soon-kyung Kim***

ABSTRACT

The necessity for more accurate automatic flatness control(AFC) system has increased of customers' requirement for cold rolled steel sheet. Therefore, many cold rolling mills replaced its AFC system with a measuring roll of the contact type form the non-contact type.

In this paper, The performance of AFC system of contact type has been investigated under industrial conditions. It has two kinds of actuator: roll bender, spot cooling system.

The test results are as follows: The more strip thickness is thick, the smaller the I value, and the more it is thin, the bigger the I value. And, a complex distribution of strip tension was controlled, for example, not only a pocket wave but also a simple center wave and edge wave. Because the tension deviation is larger at acceleration speed and deceleration speed than steady speed, AFC system of contact type is better to adopt over 50 m/min. AFC system reduces rapidly large flatness deviation. The maximum I value of strip has been decreased to 13 I, and sticker, defects caused by poor flatness, have been decreased about 60%.

Key Words : Cold rolling mill (냉간 압연기), Automatic flatness control system (자동 형상제어 장치), Tension deviation (장력 편차).

1. 서론

최근 여러 분야의 산업이 급속도로 발달함에 따라 냉연 강판의 품질에 대한 수요자의 요구가 날로 다양해지는 추세에 있다. 냉간 압연 제품도 점차 廣幅과 薄板製品이 요

구되고 있어 壓延機의 많은 부분을 자동화하여 강판의品質向上에 많은 노력을 하고 있다. 광폭, 박판제품은 壓下率이 크고, 롤 간극의 수동제어가 곤란하여 강판의 形狀矯正이 매우 어려웠으나 최근에는 컴퓨터 분야와 자동화 기술의 발전으로 냉간 압연기의 자동화와 省力化가 급속

* 부산대학교 기계설계공학과 대학원.

** 동아대학교 기계공학과.

*** 동의공업전문대학 자동차과.

하게 이루어지고 있다.⁽¹⁻²⁾ 20-30년 전에 설치된 수동 제어방식의 압연기에서는 제품의 精密度와 生産性이 떨어질 뿐만 아니라 製造原價도 높기 때문에 경쟁력 강화를 위한 자동화가 많이 이루어지고 있고⁽³⁾, 최근에 설치되는 압연기의 경우는 가역식이나 탠덤 압연기 모두가 段數에 관계없이 냉연강판에서 가장 중요한 두께와 형상의 정밀도 향상을 위한 자동 두께제어 장치⁽⁴⁻⁵⁾와 자동 형상제어 장치⁽⁶⁻⁷⁾를 반드시 설치하고 있다.

자동 형상제어 장치는 강판과 측정장치가 접촉되는接觸式과 빛과 전자파 그리고 초음파 등을 이용하는非接觸式으로 분류되고 있으나, 최근에는 비접촉식 보다는 접촉식의 제어가 교정효과와 여러 가지 운용면에서 우수한 것으로 판명되어 주종을 이루고 있고, 종래에 설치된 비접촉식도 접촉식으로 교체되고 있다. 따라서 본 연구는 철강분야에 가장 많이 사용되는 접촉식 자동 형상제어 장치의 특성을 4단 가역 압연기에서 조사 연구하였다. 특히 형상 검출장치의 특성을 조사하고 형상교정을 실시하는 롤 Bending장치와 압연유에 의한 롤 냉각장치의 효과 등을 실제 현장에서 생산중인 압연기를 통하여 연구하고, 自動形狀矯正 前後의 不良 發生量 변화도 조사하였다.

2. 실험장치

1) 냉간압연설비

본 연구에 사용된 냉간 압연기는 4단 가역식으로 1974년에 가동을 시작하여 1994년에 자동 형상제어 장치를 설치하였으며 압연기의 주요사양은 Table 1과 같다. 그리고 압연기의 하부에 압하용 유압 실린더가 설치되어 있는 Mass flow 방식의 자동 두께제어 장치가 설치되어 있어 제품의 두께편차는 $\pm 1\%$ 이하의 고정밀도를 유지할 수 있고 조작반은 중앙 집중식이다.

Table 1 Specification of cold rolling mill.

Type	4 Hi reversing mill
Rolled material	Mild steel
Line speed (max.)	720 m/min.
Product thickness	0.15 - 1.2 mm
Strip width	620 - 1219 mm
Separating force(max.)	1,000 ton

2) 자동형상제어장치

본 실험에 사용된 자동 형상제어 장치의 주요 구성품은

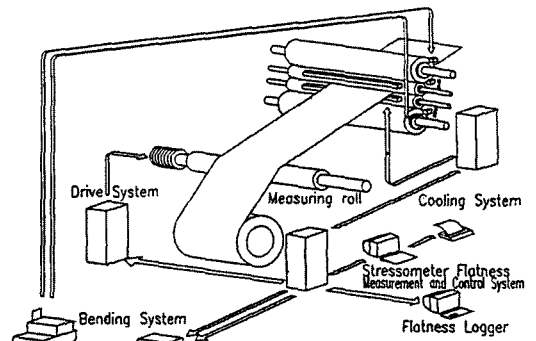


Fig. 1 Schematic diagram of automatic flatness control system.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 강판의 형상을 측정하는 측정롤과 측정된 값을 받아서 형상교정을 하는 롤 Bending 장치와 롤 냉각장치가 있고 전체를 제어하는 제어장치로 구성되어 있다. 그리고 판 폭 측정장치인 Strip scanner와 출측 Reel에 작용하는 장력 측정용 Load cell인 Tensiometer가 있다. 강판의 폭방향으로 보아 형상이 불량하면 26개의 측정롤에 작용하는 압력차가 발생하게 되고 이 압력차를 펄스로 변환시켜 컴퓨터로 전송된다. 이 값을 분석하여 중앙부위의 압력이 작으면 이 부분의 길이가 길게되어 Center wave가 발생되므로 롤 Bender가 롤 간극을 크게 해주어 강판의 길이를 같게 해주고, 반대로 양쪽 가장자리의 중앙부분 보다 압력이 작으면 이 부분에 해당하는 작업롤의 간극을 크게 해주어 강판의 길이를 같게 한다. 그러나 불규칙적으로 압력편차가 발생되면

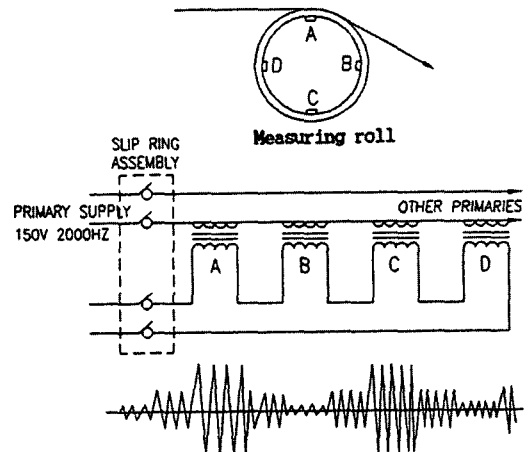


Fig. 2 Connection of transducers and typical output signal.

롤 Bender에 의한 제어가 불가능하므로 작업롤의 간극을 크게 해야할 부분에 압연유를 분사하여 롤 수축에 의한 롤 간극을 크게 하여 강판의 형상을 교정하며 교정된 강판의 형상값은 별도의 컴퓨터에서 정리되고 출력된다. 롤 Bender와 롤 냉각장치는 측정롤에서 측정된 강판의 형상값을 중앙 컴퓨터가 분석하고 판단하여 적절한 작동을 시킨다. 측정롤의 제원은 Table 2와 같고 측정원리는 Fig. 2에서 보는바와 같이 104개의 압력 측정 변환기가 26개의 슬립링에 90° 간격으로 4개씩 설치되어 있고 홈에 설치된 압력 측정 변환기와 슬립링과는 약간의 틈새가 있다. 1차적으로 압력 측정 변환기에는 150 V, 2,000 Hz가 공급된다. 식(1)은 강판에 의한 i번째의 슬립링이 받는 단위 응력과 평균치와의 차를 나타낸 것으로 Fig. 12에서와 같이 평균값을 기준으로 상하에 나타나며, 식(2)의 I값과는 반대부호를 가진다. 따라서 판 폭 방향으로 측정된 하중을 식 (1)과 (2)를 사용하여 延伸率 분포로 변환시킨다.

$$\sigma_0 = \frac{T}{A}, \quad \bar{F} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n F_i$$

$$\Delta\sigma_i = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times \frac{T}{A} = \frac{F_i - F}{\bar{F}} \times \sigma_0 \quad (1)$$

$$\frac{\Delta L}{L} \times 10^5 = \frac{\Delta\sigma}{E} \times (-10^5) = I - unit(value) \quad (2)$$

F_i : i번의 張力值, \bar{F} : 平均 張力值, T : 全 張力, $\Delta\sigma_i$: 張力 分布, E : Young율, I_i : i 全 應力, A : 鋼板 斷面積, n : 슬립링수, L : 강판 길이, ΔL : 강판 길이 편차.

이 제어장치의 형상을 나타내는 방법은 형상을 검출하는 센서로부터 폭 방향의 연신율 β 를 판 폭 방향 좌표 X 의 직교함수 관계로 나타낸다. 여기서 0 부터 n 까지의 직교함수에 $\phi_0(X)$ 로 부터 $\phi_n(X)$ 까지의 값을 사용하여 β 를 나타내고 각 관계함수의 계수 A_0 부터 A_n 을 사용하여 형상을 나타내면 식 (3)과 같이 된다.⁽⁸⁾

$$\beta = A_0\phi_0 + A_1\phi_1 + A_2\phi_2 + \dots + A_n\phi_n \dots \quad (3)$$

$$\sum_i \phi_l \phi_m = 1 \quad (l = m)$$

$$= 0 \quad (l \neq m)$$

i : 판 폭 방향의 위치

이 형상을 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같은 형태로 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

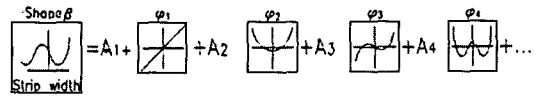


Fig. 3 Recognition of shape pattern.

3. 실험재료 및 방법

본 실험에 사용한 재료는 압연 가공에 많이 사용되는 SAE 1008이며 기계적 성질은 Table 3과 같다. 그리고 실험 재료는 냉간압연 가공후 전해탈지를 한 코일이며, 두께는 1.0 mm이고 폭은 914 mm 인 코일을 사용하였다.

Table 3 Mechanical properties of specimen.

Material	Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Hardness (H _u)	Elongation (%)
SAE1008	710.00	640.80	85, 80	4.20

본 실험에 사용되는 열연 강판은 산화층을 산세공정에서 제거하고 압연가공을 한 후, 강판의 형상교정효과를 비교하였다. 그러나 자동 형상제어 장치는 형상측정 장치가 출측에만 설치되어 있어 홀수 Pass에만 적용하였고 형상측정결과는 Data logging 장치에 의하여 판 폭 방향으로로는 슬립링별 I 값으로 나타내고, 길이 방향으로로는 300 m 간격으로 측정하였다.

4. 자동형상제어장치의 효과

1) 롤 Bending 장치의 효과

자동 형상제어 장치는 수동제어와는 다르게 작업롤의 Bender와 냉각장치를 이용하여 컴퓨터가 정확하고 신속하게 롤 간극을 변화시켜 강판의 형상을 제어한다.

Table 2 Specification of measuring roll for AFC system.

Outside dia.	φ 313 ± 0.5 mm
Measuring zone width	52 mm
Surface hardness	54 ± 2 HRC
Surface roughness	Ra 0.4 μm

수동제어의 경우는 작업자가 강판의 형상을 확인하고 작업롤의 크라운만을 조절하기 때문에 응답성이 낮고 정확한 롤 간극 유지가 어렵지만, 자동제어 장치는 형상교정량 만큼 신속하고 정확하게 롤을 Bending 시키고 냉각시켜 전체적인 강판의 형상제어를 자동적으로 행한다.

측정롤에서 측정된 응력은 식(1)과 (2)에서 형상교정량으로 변환시켜 1차적으로 응답성이 가장 빠른 롤 bender에서 교정을 실시하고, 충분한 형상교정이 되지 않을 경우 압연유 분사량을 조절하는 롤의 냉각장치에 의하여 롤 간극을 변화시켜 형상을 교정한다.

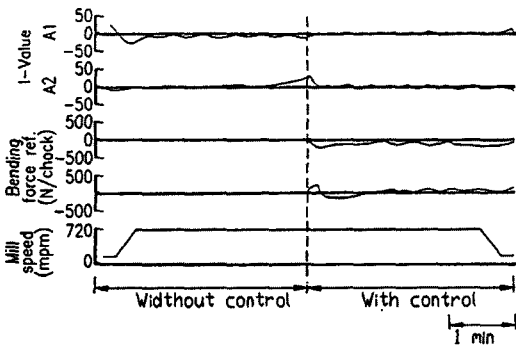
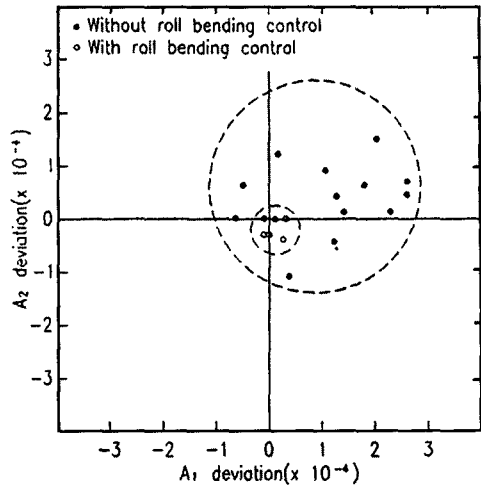


Fig. 4 Example of roll bending control system.

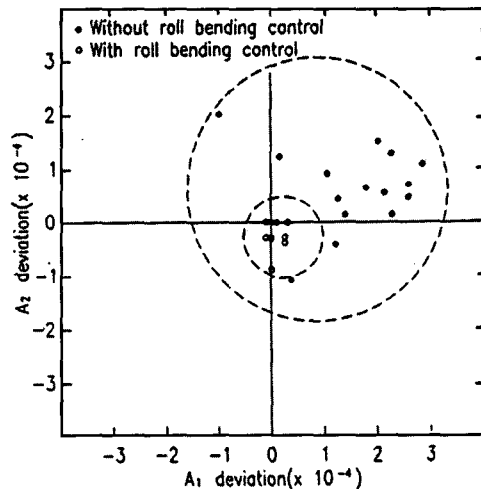
Fig. 4는 롤 Bender에 의한 형상교정 효과를 나타낸 것으로 롤 Bending장치를 사용하지 않았을 때는 한쪽 부분의 연신을 나타내는 A_1 값의 변화를 통하여 알 수 있고, 단순한 Center wave를 나타내는 A_2 값도 시간의 경과에 따라 변함을 알 수 있다. 그러나 롤 Bending장치를 사용할 경우는 Wave를 나타내는 A_1 과 A_2 의 값이 0 근처로 제어되어짐을 볼 수 있다.

강판 두께가 1.2mm에서는 Fig. 5의 a)에서와 같이 A_1 과 A_2 의 값이 집중되어 있어 박판인 Fig. 5의 b)보다 형상교정이 용이함을 나타내고 있다.

두께가 0.3 mm 인 박판에서는 Fig. 5의 b)에서와 같이 롤 Bending장치를 사용할 경우 A_1 과 A_2 의 값이 0 근처에 집중되어 있지만 사용하지 않을 경우는 산만하게 분포되어지므로 자동 롤 Bending 장치의 효과를 큼을 알 수 있다. 따라서 얇은 박판일수록 형상교정이 어렵고 두꺼운 후판일수록 교정이 잘 이루어짐을 알 수 있고 대칭형인 Wave 교정에서는 롤 Bending의 효과가 가장 크게



a) Thin gauge, Narrow width (Thickness : 1.2 mm, Width : 914 mm, Total reduction ratio : 56.5%).



b) Thick gauge, Wide width (Thickness : 0.3 mm, Width : 760 mm, Total reduction ratio : 83.3%).

Fig. 5 Effect of work roll bending control system.

됨을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 두께의 영향은 강판의 두께가 두꺼울수록 압하율이 작아 롤 간극의 조절이 박물보다 정확하게 이루어지기 때문에 형상교정의 효과가 크다고 판단된다.⁽⁹⁻¹⁰⁾ 그리고 자동 형상제어 장치에서 정상적인 형상교정이 이루어지기 위한 기본적인 조건은 가감속이 $2m/s^2$ 이하가 되어 강판에 작용하는 장력의 변화가 적고, 강판의 장력이 정상적으로 측정롤에 작용하는 강판의 속도인 50m/min. 이상에서 실시되는 것이 좋다.

2) 롤 냉각장치의 효과

롤의 냉각장치는 마찰열에 의하여 불규칙적으로 팽창된 작업롤의 표면에 압연유를 분사시켜 롤의 직경변화에 의한 롤 간극을 조절하여 강판의 형상을 제어하는 장치이며, 롤의 표면조도 감소와 롤의 마멸은 강판의 재질, 압하량과 압하율 등 압연 가공조건에 따라 영향을 받지만,⁽¹¹⁻¹²⁾ 본 실험에서는 이와 같은 조건은 동일하다고 가정하고 실험을 하였다. 수동 형상교정시 압연유 분사노즐 Bar를 3 등분하여 제어하는 Zone 냉각법을 사용하여 왔으나, 본 실험에서는 Fig. 6에서 보는바와 같이 기본적으로 윤



Fig. 6 Outline of a two row header with standard valves.

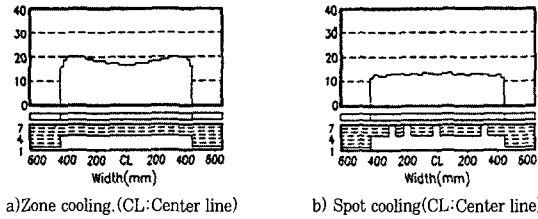
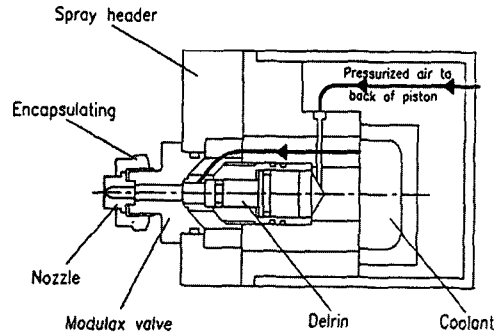


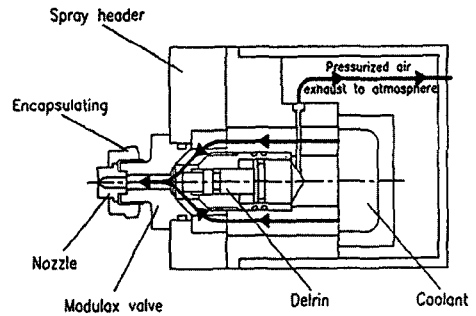
Fig. 7 Comparison of zone cooling and spot cooling for delivery side.

활에 필요한 압연유는 항상 분사되고, 선택노즐은 노즐마다 비례제어밸브가 부착되어 있어 형상측정장치에서 검출된 값에 의하여 노즐의 개폐여부와 개폐정도를 결정하여 작업롤의 표면에 압연유를 분사하는 Spot 냉각장치를 사용하였다. Fig. 7은 이 두 가지 방법을 사용하여 압연 가공된 강판의 형상을 나타낸 것으로 I 값이 20 정도인 Zone 냉각법보다는 I 값이 13 이하인 Spot 냉각법이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 Pocket wave는 비대칭형으로 발생되므로 롤 Bender에 의한 교정이 불가능하고 롤의 팽창된 부분만 냉각시켜 수축시켜줄 수 있는 Spot 냉각법에 의해서만 교정이 가능하다. 이때 사용되는 선택노즐은 Fig. 8에서와 보는바와 같이 비례제어 밸브이고 a)와 b)는 關閉狀態를 나타낸 것이다. 이 밸브의 개폐는 공기압에 의하여 피스톤이 노즐을 막아주게되면 Fig. 8의 a)와 같이 분사가 되지 않고, 공기압이 작용하지 않으면 b)에서와 같이 압연유가 분사되며, 분사량은 피스톤에

작용하는 공기압에 의하여 결정된다.



a) Coolant spray nozzle closed (Air pressure on).



b) Coolant spray nozzle open (Air pressure off).

Fig. 8 Outline of coolant spray nozzle.

3) 자동 형상제어의 효과

롤 Bender와 냉각장치를 동시에 사용하는 접촉식 자동 형상제어 장치의 제어방법은 식(3)과 같이 여러 형태의 곡선을 나타내는 각 항의 ϕ 값을 강판의 실제형상에 가장 가깝게 조합하여, 이 곡선에 대한 수정명령을 종합 제어반에서 롤 Bender와 냉각장치를 작동시켜 형상교정을 하므로 교정효과가 우수하다. 형상 교정효과는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 수동형상제어에서는 A_4 값보다도 A_2 값 방향의 편차가 크게 분포되지만, 롤 Bending 장치를 사용하면 A_2 값의 편차는 작게되고 A_4 값의 편차는 반대로 크게 된다. 그러나 롤 bender와 Spot 냉각장치를 동시에 사용하면 A_2 값과 A_4 값의 편차와 절대값이 원점근처에 집중적으로 분포되어져 Wave가 교정되어 평탄도의 개선효과가 매우 크게됨을 알 수 있다.

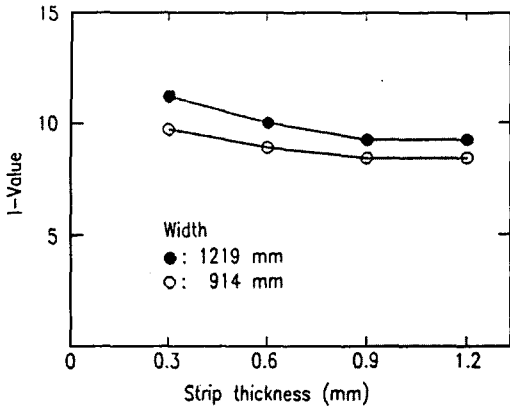


Fig. 9 Effect of automatic flatness control system.

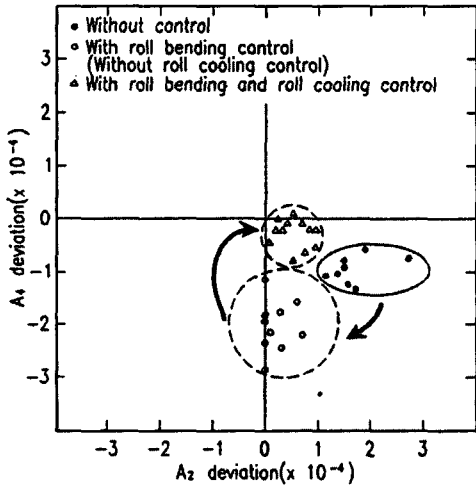


Fig.10 Relationship between strip thickness and I value.

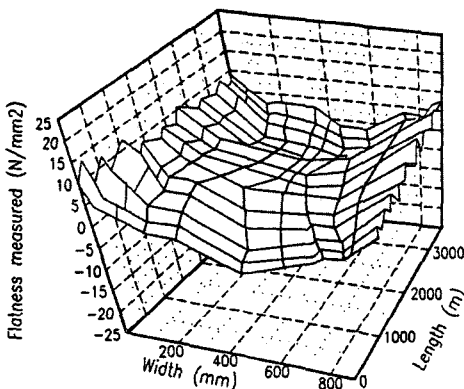


Fig.11 Three-dimensional graph on the stress distribution of strip.
(Strip thickness : 0.3 mm, Width : 850 mm)

Fig. 10은 강판의 두께와 폭에 따른 형상교정의 효과를 나타낸 것으로 두께가 얇고 폭이 클수록 자동형상교정 효과가 작은 것은 Fig. 5에서 설명한바와 같이 롤 간극의 조정이 어렵기 때문으로 판단된다. Fig. 11은 일반적으로 판면에 작용하는 응력을 나타낸 것으로 Edge부에 응력이 많이 작용하는 것은 압연가공시 안정된 장력을 유지하기 위하여 Center wave형태가 되도록 Fig. 12와 같이 압연가공조건을 설정하기 때문이며, 이 부분은 燒鈍處理時 열변형에 의한 하중이 집중적으로 작용하게 되어 스티킹현상이 발생되고 그 부분을 SEM으로 확대해 보면 Fig. 13에서와 같이 결정입자의 확산이 일어나 하나의 결정으로 변하는 현상을 볼 수 있다. 이와 같은 스티킹 발생량을 조사해본 결과 Fig. 14에서 보는 바와 같이 두께 0.3mm에서는 약 40% 정도 감소되었지만, 두께 1.2mm에서는 70% 이상 감소되어 후판에서의 효과가 더 큼을 알 수 있다. 자동 형상제어 장치를 사용해도 잔존하는 스티킹 불량은 소둔조건 이나 기타 여러 가지 요인에 의하여 발생하는 것으로 판단된다.

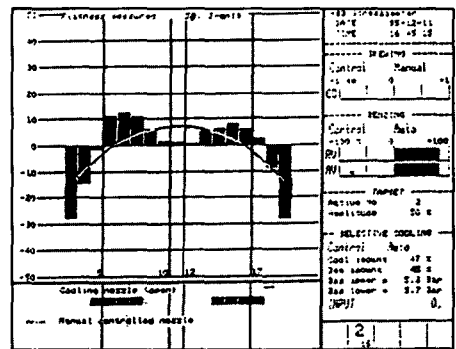


Fig.12 Operator's display on strip flatness under automatic flatness control system.
(Strip thickness : 0.5 mm, Width : 1219 mm)

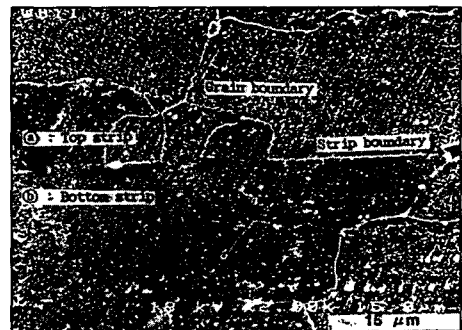


Fig.13 Photograph on sticking part of after annealing.
(Strip thickness : 0.5 mm, Width : 1219 mm)

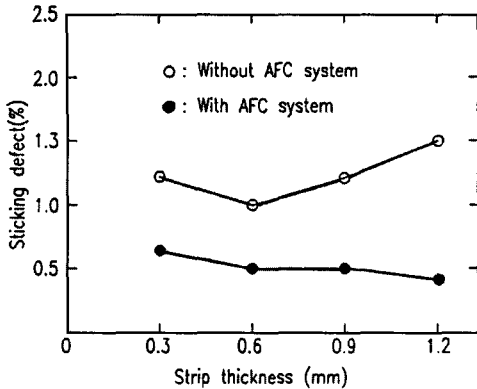


Fig.14 Effect of automatic flatness control system on sticking defect.

4. 결 론

냉간압연 제품의 형상개선을 위한 접촉식 자동 형상제어 장치를 4단 가역 압연기에 설치하여 롤 Bender와 냉각장치를 별도로 각각 사용하여 형상교정 정도와 특성을 비교하고, 같이 사용했을 때의 평탄도 개선효과와 특성에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 접촉식 형상 측정틀을 사용할 경우 롤 Bending장치는 Edge 와 Center wave의 교정에 효과가 크다.
- 2) 압연유의 분사량과 분사위치에 의하여 형상을 교정하는 롤 Spot 냉각장치는 롤의 직경차이에 의하여 발생되는 Pocket wave의 교정에 적합하다.
- 3) 롤 Bender와 냉각장치를 동시에 사용하면 냉연강판의 세 가지 Wave를 동시에 개선 할 수가 있다.
- 4) 냉연강판의 형상교정에서 롤 냉각장치보다는 롤 Bending 장치의 응답성이 빠르다.
- 5) 냉간압연 가공시 접촉식 자동 형상제어 장치를 사용할 경우 소둔시 고온에서 발생하는 스티킹의 발생율이 약60% 정도 감소되었다.
- 6) 접촉식 자동 형상제어 장치의 형상 교정효과는 강판의 폭이 좁고 두꺼울수록 크다.

참 고 문 헌

1. V. N. Vydrin, V. G. Dukmasov, d. a. Platonov, P. I. Gurkalov, "Hydraulic automatic gauge control system for 800 strip mill", pp. 118-119, 1981.

2. Katsuya Kondo, kanji yoshida, Kenji Morita , "Development of a new AGC system for a tandem cold mill", Iron and Steel Engineer, june, pp. 43-48, 1981.
3. 井浦輝生, 福山 敏, "板壓延の理論と實際", 日本鐵鋼協會, pp 201-220, 1983.
4. Katsuya Kondo, yoshisuke Misaki, Masaki Okamoto, Yasuno Matsumori, Toshimitsu Miyagi, "A new automatic gauge control system for a reversing cold mill", Technical report , Transactions ISIJ , vol. 28, pp. 507- 513, 1988.
5. 松宮克行, 西森邦彦, 中山忠雄, 下村雅一, "定間隙 AGC 시스템と FF-AGC시스템", R&D 神戶製鋼技報, vol. 33, no. 2, pp. 56-59, 1983.
6. Roger davidson, " Automatic flatness control system", Iron and Steel, October, pp.44-48, 1986.
7. Takeo Nishino, Shoichi Iyama, Toshikazu Kimura, Masaaki Okamoto, Yoshiro Matsumoto, "Automatic Shape Control for Tandem Cold Mill", The Sumitomo Serch No. 41, January pp. 59-70, 1990.
8. Teruhiro Saito, Takeo Ohnishi, Tomio Komatsu, Sadayuki Miyoshi, Hedeki Kitamura, Masanori Kitahama, " Automatic Flatness Control System in Tandem Cold Rolling Mill for Ultrathin Gauge Strip", Kawasaki Iron and Steel Report, vol.22, no.1, pp. 19-23, 1990.
9. 近藤勝也, 大井俊哉, 小峰一晃, 竹本裕, 伊山彰一, "冷間壓延機の自動形狀制御 시스템의 開發", Journal of the JSTP, vol. 33, no. 374, pp. 241-246, 1992.
10. 安全健一, 成田健次郎, 志田 二瓶充雄, " UC ミルの形狀制御用數式モデル모델", Journal of the JSTP, vol. 27, no. 303, pp. 533-538, 1986.
11. 전연찬, 김순경, "냉간압연가공시 Work roll마멸과 판면조도에 관한 연구" 한국정밀공학회지, 제8권, 제4호, p. 2. 1991.
12. 전연찬, 김순경, 김문경, "냉간압연가공시 압연재료와 Work roll 마멸에 관한 연구" 한국정밀공학회지, 제10권, 제4호, pp.128-129, 1993.