

〈論 文〉

냉간압연 가공시 압연유와 조도변화에 관한 연구

전언찬* · 김순경**

(1994년 4월 30일 접수)

A Study on Coolant and Roughness Variation in the Cold Rolling

Eon-Chan Jeon and Soon-Kyung Kim

Key Words : Cold Rolling(냉간압연), Coolant(압연유), Surface Roughness(표면조도), Rolling Direction(압연방향), Separating Force(압하력)

Abstract

The research for variation of coolant film thickness and separating force has been investigated following the examination for friction profile of work roll and roughness change of strip surface in rolling mill producing actual commercial products. The obtained results are as follows ; (1) Coolant film thickness in cold rolling has been increased relative to the circumferential velocity of work roll, and formation of coolant films has decreased with the smaller diameter of work roll. (2) Separating force is related to the formation of coolant film, and large separating force is needed to the formation of coolant film but it is constant after formation of appropriate film. (3) Wear and roughness alleviation of work roll is larger in bottom-roll than in top-roll on cold rolling, and number of peaks is correspondent to roughness alleviation. (4) The roughness of strip surface is larger in the direction of width than in roll direction, and changes of roughness and strip surface hardness rarely occurred after 3 passes.

1. 서 론

냉간압연 가공시에 사용되는 Work roll과 Back up roll의 마멸은 제품의 품질 수준에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 압연가공시 Work roll의 조기 경면화현상이 발생되면 채터링(chattering) 및 슬립(slip) 등에 의한 판파단 사고가 발생된다. 특히 Work roll의 표면조도에 따라 냉간압연관의 형상 제어에 차이가 있으며 형상제어가 어려워 판의 형상이 나뉘는 경우 열처리과정에서 소부(sticking)현상이 발생하기 쉽다. 일반적으로 4단 가역 압연기에서는 Work roll의 표면에 별도로 조도를 부여하는 경우와 그렇지 않는 경우로 대별된다. 소폭이면

서 얇은 두께인 경우는 거의 Work roll 표면에 별도로 조도가공을 하지 않지만, 대폭이면서 두께가 두꺼운 경우는 약간의 조도를 부여하면 Roll 교환 주기를 연장시킬 수 있고 제품의 형상제어도 용이하게 되므로 조도가공을 하는 경우가 많다. 텐덤(Tendem) 압연기의 경우는 형상을 제어하는 최종 압연 스펀드의 Work roll만 조도가공을 하고 그 외의 Work roll은 조도가공을 하지 않는다.

압연 Roll의 조도저하에 큰 영향을 미치는 주요 원인은 압연가공시의 압하율, 압연속도와 열간압연 판면의 조도 등이 있고, 윤활역할을 하는 압연유의 성상, 농도 및 Scum 생성 등을 들 수 있다.^(1~3)

따라서 최근에는 냉간압연 가공시 Roll의 마멸과 조도관리의 정밀도가 점차 문제로 대두되어 자동차 공업이 발달한 독일과 미국에서는 수 년전부터 냉간압연 가공용 Work roll의 조도 부여방법의 개발

*정회원, 동아대학교 기계공학과

**연합철강공업(주)

에 박차를 가한 결과 Shot blasting 방법에서 방전 가공법으로 변화시켰으며, (4) 현재에도 Laser texturing 가공방법이 일본 등 선진국에서 활발하게 진행되고 있으나(5,6) 이 분야에 관한 연구결과는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 냉간압연 가공시 상·하 Work roll의 마멸상태와 냉간압연 판면의 조도변화를 조사하고 압연 Pass수에 따른 표면경도의 변화와 조도의 변화 등을 조사하였으며, 이때 압연속도가 윤활유의 유막두께와 마찰계수 변화에 미치는 영향 등을 연구하는 것을 목적으로 하였다.

2. Work Roll의 마멸현상

Roll의 조도를 정확하게 관리하기 위하여 Roll과 재료의 경계면에서의 Micro 접촉상황과 윤활기구를 이해해야 한다. 계면의 Micro 접촉에 관해서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 Roll과 재료가 미시적으로 접촉하는 경계윤활영역이 있고, 이 때 Roll과 재료의 접촉면에 생성되는 포켓(pocket)부에는 정압이 발생된다. 유체윤활영역 및 경계윤활영역이 혼합되어 있는 혼합윤활구역에서도 가공조건이 가혹해지면 경계윤활영역이 증가하여 국부적으로 금속접촉이 발생되고, 고체마찰영역이 나타난다. (8,9)

실제 압연기에서 냉간압연 가공을 할 경우 Roll

과 판의 접촉부분에는 압연속도가 크면 윤활유의 유입량이 많아 윤활유가 일정한 형태로 포화상태가 되지만, 압하율이 크면 접촉율은 크게되고 유막은 얇아진다. 따라서 접촉율의 크기에 따라 마찰력이 크게 되어 Roll 마멸을 촉진시킨다. 경계윤활상태에서는 Roll 마멸이 크게 되고 압연가공시 슬립현상이 발생되어 압연가공이 불안정하게 된다. 그리고 접촉호 내에서의 Roll 마멸은 판면조도도 관계되므로 매우 복잡하다.

Fig. 1은 경계윤활과 유체윤활구역을 표시하고 판면과 Work roll이 접촉하는 Roll bite를 나타낸 것으로 S1은 판면과의 경계윤활에 의한 전단응력이 발생하는 부분이며 S2는 유체윤활이 이루어지는 구역이다. (10) 여기서, 경계윤활구역의 전단응력을 τ_b , 유체윤활구역의 전단응력을 τ_f 라 하고 혼합윤활상태의 것을 τ 라 하면 전단응력을 구하는 공식은 식(1), (2), (3)과 같다.

$$\tau_b = \mu_b \cdot P \tag{1}$$

$$\tau_f = \mu \cdot (V/h) \tag{2}$$

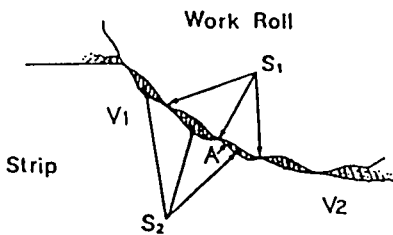
$$\tau = a \cdot \tau_b + (1-a)\tau_f \tag{3}$$

A 부분은 중립점으로서 Work roll과 판의 속도가 동일하여 슬립발생이 없으나 중립점을 경계로 입구측에서는 $V1 < V$ 이 되며 출구측에서는 $V2 > V$ 이 된다. (11) 따라서 중립점을 제외한 부분에서는 속도차가 발생하게 되며 이 속도차에 의하여 S1 부분에서 마멸작용이 발생하여 철분말이 생성된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험재료

본 실험에 사용한 재료는 냉간압연 가공에 많이



- S1 : Part of boundary lubrication
- S2 : Part of hydrodynamic lubrication
- a : Contact ratio
- h : Lubrication film thickness
- V : Rolling speed
- T : Lubricant temperature
- P : Contact pressure of roll
- μ_b : Coefficient of lubrication
- μ : Viscosity
- V1 : Entry speed of strip
- V2 : Delivery speed of strip
- A : Neutral point

Fig. 1 The micro contacting model of work roll bite

Table 1 Chemical compositions of specimen(wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S
SHP-1	0.05	0.009	0.25	0.010	0.010

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Hardness (H _R B)	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
SHP-1	70.00	25.00	38.50	40.00

사용되는 SHP-1(SAE1008)이며 화학적 성분은 Table 1과 같다. 두께는 2.75 mm, 폭은 1219 mm 인 열연강판을 열간압연시 판표면에 생성된 산화층을 산세공정에서 제거한 후, 본 실험에 사용하였다.

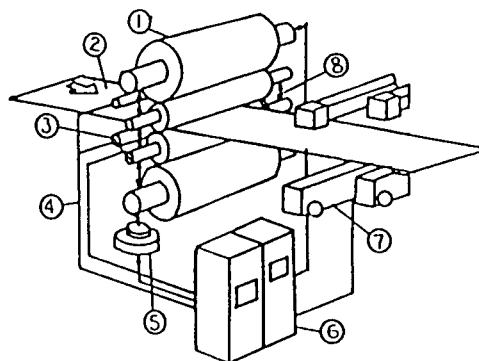
3.2 실험장치

본 실험에 사용된 냉간압연기는 Fig. 2와 같이 실제 냉간압연 제품을 생산하는 실압연기로서 4단 가역압연기의 압하용 유압 실린더가 Back up roll Chock 하부에 위치하고 있으며 압하력은 1,400톤 이하에서 압연가공을 행하였고, 판두께의 정밀도 향상을 위해 자동두께 제어장치(automatic gage control system : adaptive mass flow control)를 사용하였으며, 판의 조도에 영향을 미치는 자동형상 제어 장치(automatic flatness control system)도 동시에 사용하였다.

압연가공조건은 Table 3과 같으며 압연유의 사용조건은 Table 4와 같이 일정하게 두었다.

3.3 실험방법

열연판의 조도측정은 냉간압연 전 산세공정에서 열간압연시 생성된 산화층을 제거한 후에 측정하고, 냉연판은 냉간압연 가공후의 판표면의 조도를



- ① Back up roll
- ② Strip
- ③ Work roll
- ④ Coolant sprayer
- ⑤ Cylinder
- ⑥ Control panel
- ⑦ X-ray gage mater
- ⑧ Roll bender

Fig. 2 The schematic experimental apparatus

측정하였으며 판면의 조도측정부위는 전체 코일을 풀었을 경우 앞뒤 각각 끝부분에서 500 m되는 지점과 판의 가장자리에서 300 mm 되는 위치에서 측정하였다. 그리고 Work roll의 조도도 최초 압연 가공 전과 가공이 끝난 후에 측정하였고, 측정위치

Table 3 Cold rolling conditions for experiment

Mill type	4Hi reversing mill
Line speed	800 m/min.(max.)
Work roll dia.	450(mm)
Back up roll dia.	1360(mm)
Reduction power	920~1,300 Metric Ton
Thickness control	Automatic gage control system
Flatness control	Automatic flatness control system

Table 4 Compositions and properties of lubricants

Compositions(wt.%)					Properties				
Tallow (Base)	Fatty acid	Lubricity additives	Antioxidants	Etc.	Free fatty acid	Saponification NO.	Viscosity (100°F)	Specific gravity (60°F)	PH
90.5	2.5	2.0	1.0	4.0	10.5%	195	280SUS	0.900	5.0

는 전체 Roll 몸체의 1/4되는 지점에서 실시하였으며, 사용 후 Work roll 조도와 표면상태를 확인하기 위하여 휴대용 광학현미경을 사용하였다. 주사현미경을 사용하여 판면상태를 비교하였고, 가공경화에 따른 경도변화도 측정하였다. Work roll 표면의 조도는 상하 Roll을 구분하여 측정하였으며, 조도측정기는 휴대용 Hommel tester T1000을 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유막두께의 변화

냉간압연 가공시 Work roll과 판과의 사이에 압연유가 분사되어 마찰력을 감소시켜 주며 판면의 광택도를 증가시켜 주기도 한다. 그리고 냉간압연 가공시에 발생된 마찰열을 냉각시켜 주기도 하기 때문에 압연유의 역할은 매우 중요하다. 다른 압연 조건 보다 너무 압연유의 분사량이 많으면 슬립이 발생할 가능성이 있으며 너무 작으면 유막이 끊어져 순간적으로 과대 압하가 걸리면서 Roll 사고를 유발시키기 때문에 적절한 유량과 농도유지가 매우 중요하다. Fig. 3은 압연유가 판면에 부착되는 형태를 나타낸 것으로 판면에 친유기가 부착되어⁽¹²⁾ 윤활성을 좋게하는 것도 중요하지만 압연가공시 Roll에 작용하는 압하력에 견딜 수 있는 유막형성이 필요하다. 큰 압하력에도 유막이 견딜 수 있게 하기 위하여 압연유에 첨가제로 황(S)성분을 첨가하는데 압연가공시 황성분이 하는 역할은 Fig. 4에

서 보는 바와 같이 판면과 Roll 표면에는 황산철의 형태를 유지하며 압연유 표면에도 부착되어 극압제 역할을 하기 때문이다. 극압제는 유막의 형성에 매우 중요한 인자이며, 유막의 두께는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 Work roll의 직경보다는 속도에 더

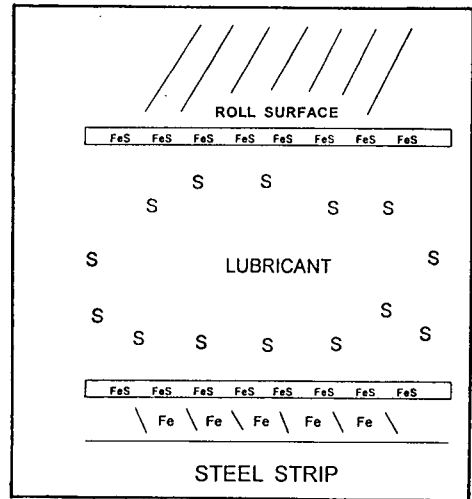


Fig. 4 Schematic diagram of extreme pressure lubrication between work roll and strip

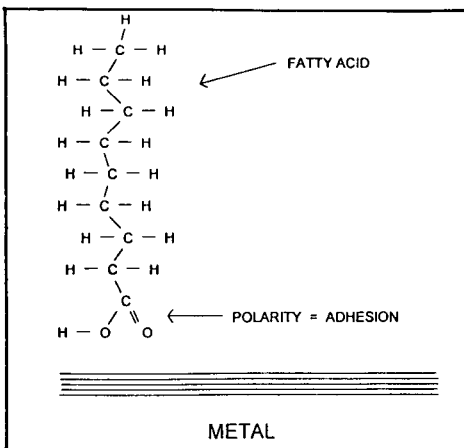


Fig. 3 Relationship of strip and coolant at boundary lubrication condition

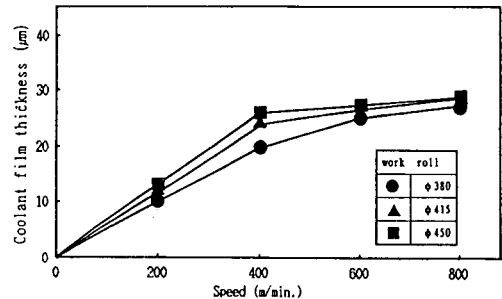


Fig. 5 Relationship between strip speed and coolant film thickness

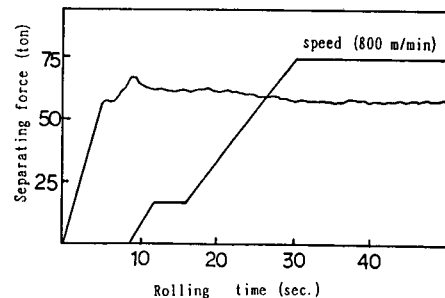


Fig. 6 Relationship between strip speed and separating force

큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.⁽¹³⁾ Fig. 6은 속도에 따라 압하력이 변하는 것을 나타낸 것인데, 여기서 유막이 형성되지 않는 저속일 때보다 유막이 일정 두께를 유지하는 고속에서 적은 압하력이 소요됨을 나타냈다.⁽¹⁴⁾

실제 냉간압연 가공시 Work roll과 판면 사이에서는 경계유회와 유체유회구역이 공존하는 혼합유회의 형태로 되므로 경계유회에서는 식(1)에서와 같이 압하력이 클수록 전단응력이 크게 되지만, 유체유회구역에서는 식(2)에서와 같이 속도가 클수록 전단응력이 크게되고 유막의 두께가 클수록 전단응력은 작게된다. 유체유회와 경계유회가 동시에 존재하는 혼합유회구역에서는 속도가 클수록 τ_r 는 다소 증가하지만 τ_b 는 크게 감소하게 되어 전체적으로 보면 τ 는 감소하게 된다. 따라서 속도가 증가할수록 유막의 두께가 증가하게 되어 전단응력(τ)은 감소되고, Work roll의 직경은 클수록 마찰계수가 감소되어 유막의 형성이 빠르게 이루어진다.

4.2 Work roll의 마멸상태

Work roll과 철판이 접촉되는 현상을 나타낸 Fig. 1에서 경계유회 부분이 많을수록 산(peak)의 마멸에 의한 경면화현상이 나타나고, 이 때 생성된

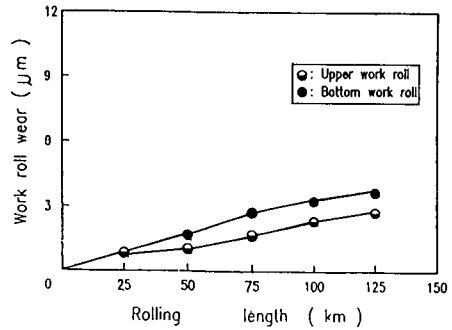


Fig. 7 Relationship between work roll wear and rolling length of strip

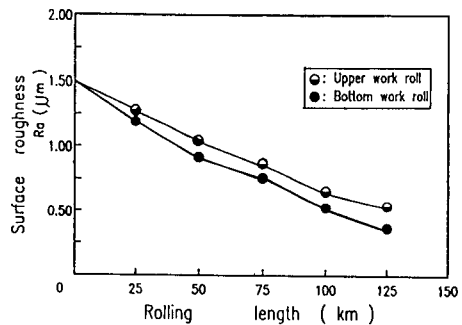
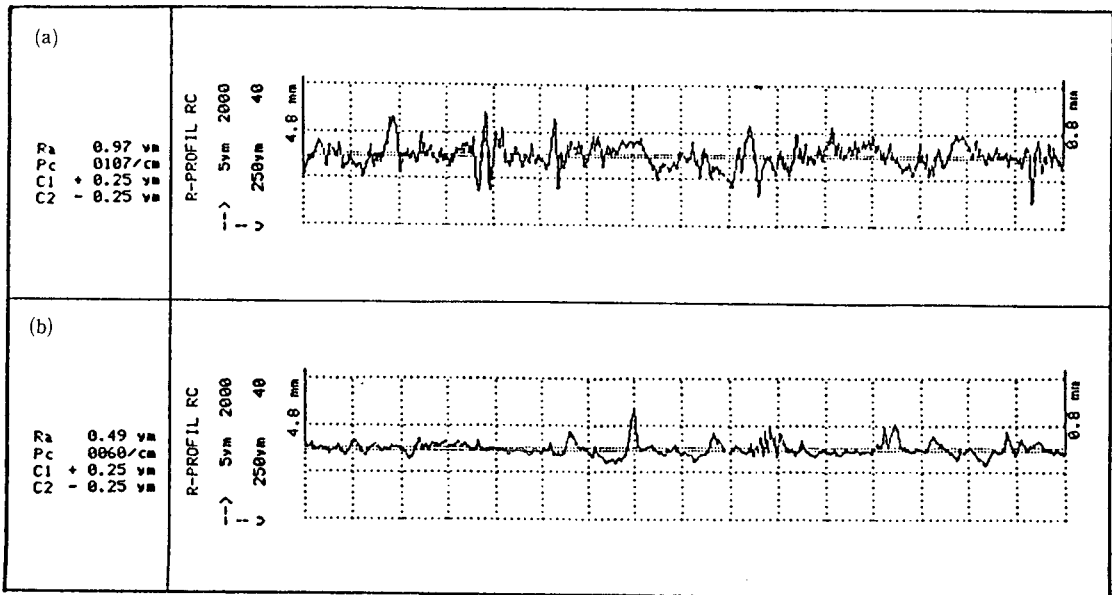


Fig. 8 Relationship between work roll roughness and rolling length of strip



(a) Before rolling
(b) After rolling

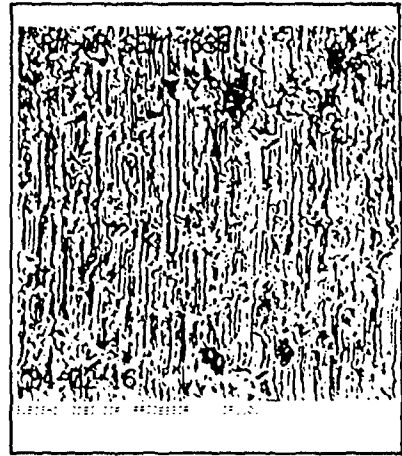
Fig. 9 Variation for the surface roughness of work roll

철분말이 Work roll 표면에 부분적으로 응착되어 Work roll 표면의 경면화를 촉진시키므로 슬립 발생 가능성이 커진다.^(2,3) Work roll의 전체적인 마멸량은 하Roll이 상Roll보다 많으며 광폭재의 고부하압연에서는 Roll bending에 의하여 roll 양단의 압력이 중앙보다 크게되므로 식(3)에서 보면 ω 값이 증가하여 Roll의 국부적인 마멸현상이 발생된다. Fig. 7은 Work roll의 마멸량을 나타낸 것으로 100 km부터는 마멸량이 둔화됨을 알 수 있는데 이는 Roll 표면의 산이 마멸되어 일정한 접촉면을 유지하면서 마멸보다는 평면화된 부분이 경면화현상을 나타내기 때문이며, 전체적으로 보면 하Roll은 상Roll보다 마멸량이 큼을 알 수 있다. Fig. 8은 마멸량이 클수록 조도저하도 빠름을 나타낸 것이며, 하Roll이 상Roll보다 마멸량이 큰 이유는 압연유 분사방법에 기인하는 것으로 하Roll은 접촉호 내에서 충분한 압연유의 포켓을 형성하지 못하여 유체 윤활부가 적고 경계윤활부분이 많이 형성되기 때문인 것으로 판단되며, 하Roll을 구동시키는 동력도 상Roll보다는 많이 소모된다.

Fig. 9는 압연가공 전과 후의 Roll 표면조도를 나타낸 것으로 사용전에는 산 수(PC: peak count per cm)가 107개였으나 사용후에는 60개로 줄어들었고 Roll 표면조도의 Ra값도 반으로 저하되었다. 압연전에는 산 수가 많을 뿐 아니라 중심선을 기준으로 상하에 고르게 분포되어 있으나 압연후에는 마멸과 응착에 의해 거의 평면화되었음을 알 수 있다. 또한 Roll의 초기 평활화 마멸은 압연 가공시 발생된 철분말이 Roll 표면에 전착되고 Back up roll과의 높은 접촉압력에 의해 응착되어 Roll 표면의 산 수를 적게하고 산의 상부를 마멸시켜 조도가 저하된다. Fig. 10은 Work roll의 사용전과 사용후의 표면을 확대한 사진으로서 압연전에는 Roll 표면의 표면조도의 형상이 분화구 형태로 존재해 있는 것을 볼 수가 있으나, 압연후에는 그 형태가 거의 마멸되어 없어지고 슬립 흔적만 남아 있음을 알 수 있다.

4.3 판면조도의 변화

냉간압연 가공시 Pass 수에 따라 판면조도가 변하는 과정을 주사전자현미경을 사용하여 Fig. 11에 나타냈으며, 냉간압연 가공전에 열연판의 조도는 열간압연 후에 생성된 표면 스케일을 제거하고 측정하였다. 이 값과 판면상태는 열연조건이나 산세



(a) Before rolling



(b) After rolling

Fig. 10 Photo of work roll surface($\times 175$)

조건에 따라 그 변화의 폭이 크다. Fig. 12와 Fig. 13에서 보는 바와 같이 냉간압연 가공시의 판면조도는 측정하는 부위나 측정방향에 따라 그 차가 매우 큰 것으로 나타났는데 압연가공 방향보다 폭 방향의 표면조도가 더 큼을 알 수 있다. 이는 압연가공 전에는 전체적으로 조도가 높고 균일하지만 압연 후에는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 중립점 전후에서는 판과 Roll 표면의 속도가 다르며 이 속도차에 의해 슬립이 발생되기 때문이다.⁽¹¹⁾ 냉간압연 가공 방향의 조도변화는 Fig. 12에서와 같이 판의 양쪽 가장자리 부분의 조도는 거의 유사한 형태로 변하지만 판 중앙부의 조도는 압연 Pass 수의 증가에 따라 점차 떨어지면서 가장자리의 조도와 유사하게 변하게 된다. 이렇게 변하는 원인은 냉간압

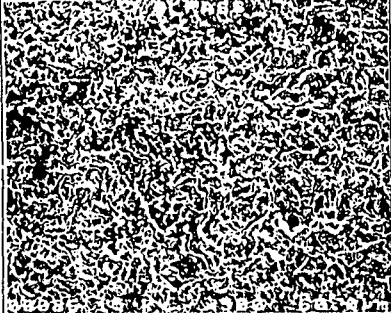


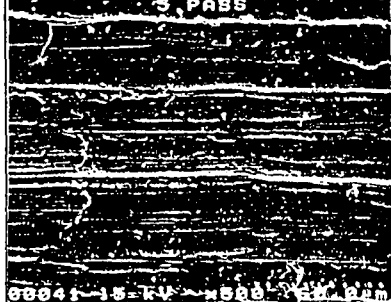
Hot Coil		<ul style="list-style-type: none"> · Strip thickness: 2.0 mm · Work roll roughness: 0.70 Ra μm · Strip surface roughness : 1.40 Ra μm
1 PASS		<ul style="list-style-type: none"> · Strip thickness: 1.48 mm · Reduction rate: 26 % · Line Speed: 300 mpm · Strip surface roughness : 0.71 Ra μm
3 PASS		<ul style="list-style-type: none"> · Strip thickness: 0.83 mm · Reduction rate: 26 % · Line Speed: 600 mpm · Strip surface roughness : 0.45 Ra μm
5 PASS		<ul style="list-style-type: none"> · Strip thickness: 0.47 mm · Reduction rate: 26 % · Line Speed: 600 mpm · Strip surface roughness : 0.45 Ra μm

Fig. 11 Variation of strip surface according to pass number($\times 500$)

연 방향으로 Fig. 11에서 보는 바와 같이 줄무늬 형태의 돌기부가 형성되기 때문이다. 철판의 폭방향의 조도변화는 Fig. 13에서와 같이 열간압연관의 조도를 유지하다가 마지막 Pass에서는 약간 올라가게 된다. 이 같은 현상도 Fig. 11을 보면 가공방향의 줄무늬 형태의 돌기부가 첫 Pass 때에는 다

소 흐릿하게 나타났지만 점차적으로 선명하게 나타나기 때문이다. 산세가 끝난 상태에서는 폭방향의 조도가 압연방향보다 약 7% 정도 높았으나, 2 Pass 후에는 약 15% 정도로 그 차가 크게 되었지만 그 다음부터는 거의 일정한 차를 유지하였고 전체 조도도 큰 변화가 없음을 알 수 있다. Fig. 14

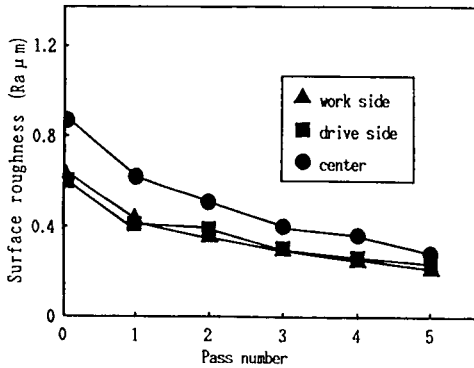


Fig. 12 Relationship between strip surface roughness and pass number at the rolling direction of strip

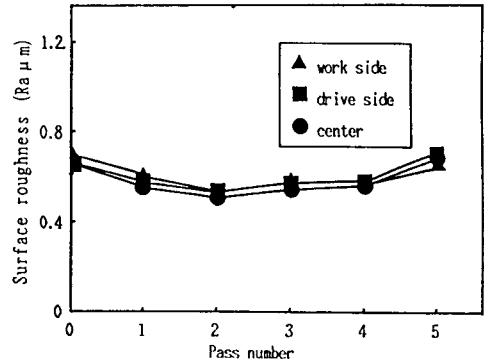


Fig. 13 Relationship between strip surface roughness and pass number at the cross direction of strip

는 Pass 수가 증가함에 따른 판표면의 경도변화를 나타낸 것으로 1 Pass때 가공경화에 의한 경도상승 폭이 가장 크고 그 다음부터는 거의 일정한 폭으로 증가되어 압연가공 후의 표면경도는 압연가공 전보다 약 45% 정도 상승되었음을 알 수 있다.

냉간압연 판면의 조도의 형태변화를 가공전과 후로 비교해 보면 Fig. 15에 나타난 바와 같이 냉간압연 가공전에는 열연 산화층을 제거한 판면이 조도가 상당히 높고 중심선 상하로 균일하게 분포되

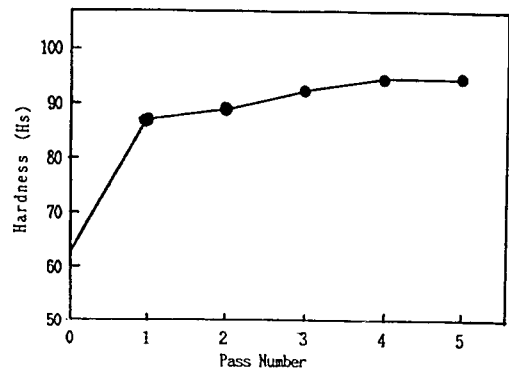
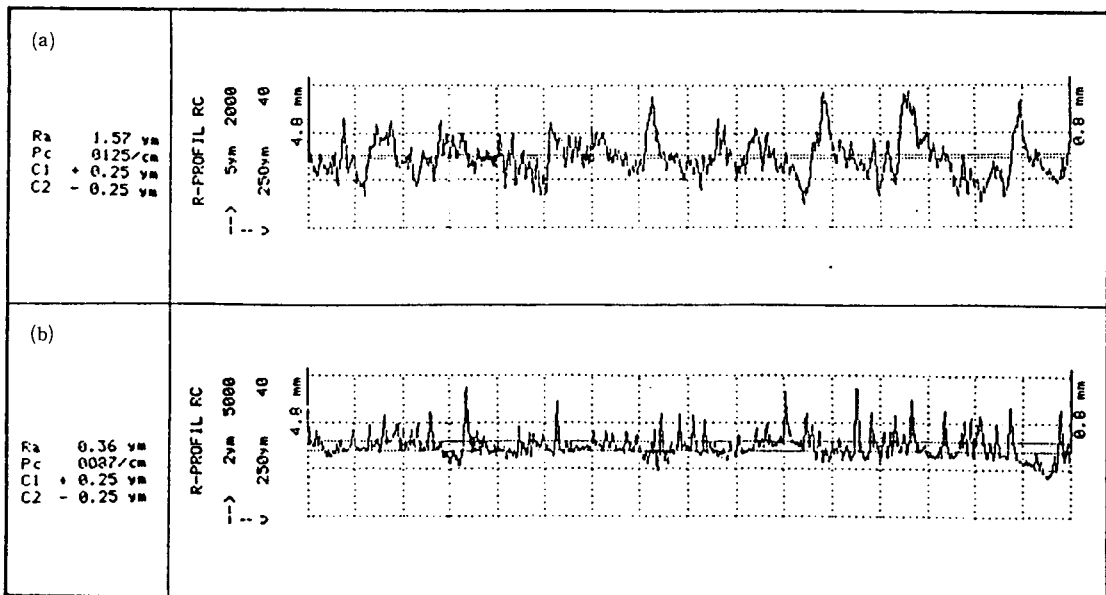


Fig. 14 Relationship between surface hardness of strip and pass number



(a) Before rolling (rolling length : 0 km)

(b) After rolling (rolling length : 125 km)

Fig. 15 Variation for the surface roughness of strip

어 있으며 산 수도 많다. 그러나 냉간압연 가공 후에는 표면조도와 산 수가 감소되며 산이 중심선 위에 대부분 분포되어 있는데 이는 Work roll의 표면조도가 전사되어진 것이다.

5. 결 론

실제품을 생산하는 압연기에서 Work roll의 마멸상태와 판면의 조도변화를 조사하고 압연유의 유막 두께와 압하력 등의 변화를 연구해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉간압연 가공시 유막의 두께는 Work roll의 원주 속도가 클수록 크며, Work roll의 직경이 작을수록 유막형성이 늦다.
- (2) 압하력은 유막의 형성과 관계가 있고 유막형성시까지의 큰 압하력이 필요하지만 적절한 유막이 형성된 후에는 일정하다.
- (3) 냉간압연 가공시 Work roll의 마멸과 조도저하는 윤활상태가 좋지 않은 하Roll이 상Roll보다 크고, 산 수는 조도와 같이 감소 됨을 알 수 있다.
- (4) 냉간압연 가공후 판면의 조도는 폭방향이 압연 방향보다 크며, 3 Pass 이후부터는 판표면의 경도와 조도의 변화가 거의 없다.

참고문헌

- (1) 大貫 輝, 菊池 勁, 川竝 高雄, 1982, “冷間壓延 ワ-ク ロ-ルの 摩耗に關する 研究,” 塑性と加工, Vol. 23, No. 261, pp. 991~995.
- (2) 大原 諄二, 萬羽 昭夫, 1987, “鋼板の 冷間壓延における 로-ルの 粗度低下に 關する 檢討,” 鐵と鋼, 第73年, 第3號, pp. 132~133.
- (3) 岩藤 第一, 園田 榮, 1989, “冷間壓延における ワ-ク ロ-ル 摩耗メカニスムの 檢討,” 鐵と鋼, 第75年, 第11號, pp. 108~110.
- (4) El-Menshawn, F., 1991, “Advances in Electro-Discharge Texturing for Cold Mill Work Rolls,”

Iron and Steel Engineer, Vol. 68, No. 8, pp. 57~59.

- (5) Jagues, A. Defourny., Vincent, M. Leroy. and Paul, E. Nilles., 1991, “Updata of Developments in Lasertex Technology,” *Iron and Steel Engineer*, Vol. 68, No. 8, pp. 39.
- (6) Naohiko, Soeda., Shin, Ujihara. and Masahide, Nagaoka., 1991, “Development of High Image Clarity Steel Sheet by Laser Texturing,” *Iron and Steel Engineer*, Vol. 68, No. 8, pp. 46.
- (7) Nilan, T. G., Perfetti, B. M. and Scialabba, B. J., 1977, “Relationship of Sheet Surface-Roughness Texture to Painted Sheet Appearance,” *Proceeding 19th Congress on Mech., Working and Steel Processing Pittsburgh, Pa.*, June, pp. 148~157.
- (8) 北村 邦雄, 北浜 正法, 鎗田 征雄, 1983, “冷間壓延における ヒ-トストリ-ク 現象,” 潤滑, 第28卷, 第9號, pp. 10~11.
- (9) 小豆島 明, 1992 “塑性加工における 最近のトライボロジ 技術,” 鐵と鋼, 第78號, pp. 18.
- (10) Kobasa, D. and Schultz, R. A., 1968, “Experimental Determination of the Arc of Contact in Cold Rolling,” 1968, *Iron and Steel Engineering*, Vol. 45, pp. 97.
- (11) Arvind, At. Reya., John, G. Lenard., 1979, “A Study of Cold Strip Rolling,” *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 111, pp. 129~130.
- (12) 村川 亨男, 1969, “金屬表面化學と潤滑劑,” 潤滑, 第141卷, 第4號, pp. 36.
- (13) 小豆島 明, 1993 “壓延における トライボロジ-,” *Journal of the JSTP*, Vol. 34, No. 393, pp. 1108.
- (14) 加藤 健三, 左海 哲夫, 1979, “高速冷間壓延における 流體潤滑および 混合潤滑,” 塑性と加工, Vol. 20, No. 227, pp. 1089~1093.