

〈技術論文〉

## 열연 조압연 Work Roll의 피로 특성

이원호\* · 김상준\* · 이영호\* · 장준상\* · 이준정\* · 김종근\*\*

(1991년 10월 19일 접수)

### Fatigue Characteristics of Work Roll of Roughing Stand in Hot Strip Mill

W.H.Lee, S.J.Kim, Y.H.Lee, J.S.Jang, J.J.Yi and J.K.Kim

**Key Words:** Hot Rolling(열간압연), Roughing Mill(조압연기), Work Roll(작업 롤), Roll Fatigue(롤 피로), Roll Temperature(롤 온도), Thermal Stress(열응력), Surface Defect(표면흠)

#### Abstract

Investigations of the fatigue damage of roughing mill roll and its effect on hot steel strip were conducted theoretically and experimentally. By the computer simulation for analysing the stresses on the roll surface and experimental hot rolling, the following results were drawn: The cracks observed on the roll surface were initiated thermally in the initial stage of the rolling and propagated by repeated thermal and bending stresses. The size of the roll surface cracks smaller than 4.87mm could avoid the occurrence of tiny scab, surface defect of hot steel strip. Since the size of surface cracks observed on the roughing mill roll was very small, the fatigue damage of roll surface was found not to be the major factor for the formation of the scab.

#### 1. 서론

열간압연 조압연기(roughing mill)는 압연공장의 최종 생산제품인 열간 압연판(hot coil)의 제조단계중 초기에 사용되는 설비이다. 조압연기 중 소재와 직접 접촉하여 소재의 가공에 사용되는 공구인 작업 롤(work roll)은 사용시에 압연응력 부하는 물론 심한 열부하를 받고 있어서 롤의 표면에는 마모, 표면 거칠, 열 균열 등의 여러가지 복잡한 표면 손상이 일어나게 된다.

압연제품은 롤과의 접촉에 의해 생산되므로 롤의 표면상태는 압연판의 표면품질에 많은 영향을 끼치게 된다. 열연판의 표면결함중 미소 스킵(scab)이

라고 하는 압연길이 방향의 선상 표면 결함이 있다. 이러한 미소 스킵은 길이가 10mm정도로 선단부가 산모양으로 박리된 채 조그마한 딱지 형태로 발생되는데 품질관리 부서에서는 자체 조사를 통하여 조압연 작업 롤의 누적 압연량이 미소 스킵 발생과 밀접한 관계가 있다고 하였다. 동 조사 결과는 롤의 과다 사용에 의해 발생된 롤 표면의 열 피로 균열층이 압연판의 표면 결함을 유발시키는 인자라고 결론 맺고 있으나, 통계 자료에 의한 조사는 롤의 누적 사용량에 따른 롤의 손상에 대한 자세한 발생 기구를 알 수 없으므로 미소 스킵 발생원인 규명에 미흡한 점이 많다.

압연중 롤 표면이 손상되는 현상은 반복적으로 가해지는 부하에 의해 발생되므로 피로손상으로 생각할 수 있다. 조압연 작업 롤의 피로손상을 유발시키는 인자에는 열응력(thermal stress)과 굽힘응

\*정회원, 산업과학기술연구소 강재연구부

\*\*산업과학기술연구소

력(bending stress)이 있다.

열간압연 작업 롤은 1200°C 이상 가열된 고온 스톱(slab)를 압연하게 되므로 압연재와의 접촉시에는 롤 표면층이 600°C 이상 상승하고, 압연이 끝나게 되면 냉각수에 의해 40~50°C까지 냉각되는 현상이 되풀이 된다. 이와 같이 되풀이 되는 온도 변화는 불과 수초내에 급격히 일어나는데 비해 온도에 의한 롤의 변형은 순식간에 일어날 수 없다. 따라서 변형이 억제된 상태로 온도가 급격히 변화를 일으키므로 롤 내부에는 열응력이 발생하게 된다.

또 상하 두개의 작업롤로 구성된 조압연 작업 롤에는 압연소재로 부터 전달되는 압연 반력에 의해 롤이 1회전 압연하는 동안 인장응력과 압축응력을 번갈아 받는 소위 회전굽힘(rotary bending) 응력 상태가 된다. 이러한 회전굽힘 응력의 양이 클 경우에는 반경 방향의 균열길이를 상당히 진전시켜 롤 절손사고의 원인이 되기도 한다.

본 연구에서는 진술한 바와 같은 반복되는 압연 부하에 의한 롤의 피로특성을 규명하기 위해 열연 공장의 조압연기중 표본 작업 롤을 선정하고 일정 기간의 사용이력을 조사하였으며, 이를 토대로 롤 내부 온도 및 열응력 계산을 수행하여 압연중 발생되는 피로 균열의 크기를 정량화 시켜보았다. 또 표면 균열관찰 실험 및 롤 표면흠 대응 실험을 통해 피로균열이 압연판의 표면품질에 어떠한 영향을 미치는지 조사해보았다.

## 2. 실험 및 계산 방법

### 2.1 작업 롤의 물성치 측정

조압연 작업 롤로 사용되고 있는 롤의 재질은 급격한 열부하 및 압연응력에 견딜 수 있도록 내절손성, 내열성 및 내열피로성을 강화시킨 아다마이트(adamite) 재질을 사용하고 있다. 온도계산 및 열응력 계산에 필요한 아다마이트 롤의 열전도도 및 비열등을 열정수 측정장치로 측정하였으며, 이밖에도

롤 재료의 피로특성을 파악하기 위해 고온 인장 실험 및 균열진전 시험등을 실시하였다. Table 1은 조압연 작업롤의 사용온도인 520°C에서 측정된 동 재료의 물성치이다.

### 2.2 작업 롤 내부의 온도 및 열응력 계산

#### (1) 작업 롤 내부온도 계산식

대부분의 연구자들<sup>(1-2)</sup>은 롤 내부의 온도를 계산하기 위해 롤 표면의 온도를 일정하게 하거나 압연재로 부터 일정량의 열량이 롤로 유입되는 것으로 가정하고 롤 자체만을 대상으로 시뮬레이션(simulation)하였다. 그러나 본 연구에서는 압연중 롤의 온도 변화를 보다 정확하게 계산하기 위해 압연재와 롤을 일체로 하여 압연중 소재내에서 생기는 발열량을 포함하는 온도계산 방법을 채택하였다.

롤을 Fig. 1과 같이 원주방향으로 53개, 반지름 방향으로 19개의 미소요소로 분할한 뒤 유한차분 해석법(finite difference method)을 이용하여 롤의 온도를 계산하였다. 롤 및 압연재의 내부 온도는 1차원 열전도 방정식을 기초로 한 FDM 수치해석 방법을 사용하였으며 압연중 발열과 압연후의 냉각으로 나누어 각각에 대한 계산식을 다음과 같이 적용하였다.

#### (가) 압연중 발열 현상

압연중 롤 갭(roll gap) 내에서는 소성가공에 의한 발열 및 롤과 압연판의 계면에서 마찰발열이 생긴다. 롤 갭 내에서의 소성변형이 균일하며 모든 소성변형 에너지가 열로 바뀐다고 가정하면, 소성 발열에 의해 상승된 온도는 다음과 같다.

$$\Delta T_{\text{deform}} = \frac{km}{\rho \cdot C} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (1)$$

여기서  $h_1$ ,  $h_2$ 는 각각 압연기 입출측에서의 판 두께이며,  $km$ 은 압연소재의 변형저항(flow stress)이다.

압연중에는 중립점을 중심으로 압연기 출구에서

Table 1 General properties of roll material

Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Thermal expansion coef. (×10 <sup>-6</sup> /°C)	Specific heat (cal/cm <sup>3</sup> ·°C)	Thermal diffusivity (×10 <sup>-2</sup> cm <sup>2</sup> /s)	Thermal conductivity (×10 <sup>-2</sup> cal/cm·s°C)
65.0	13.3	1.34	4.8	6.5

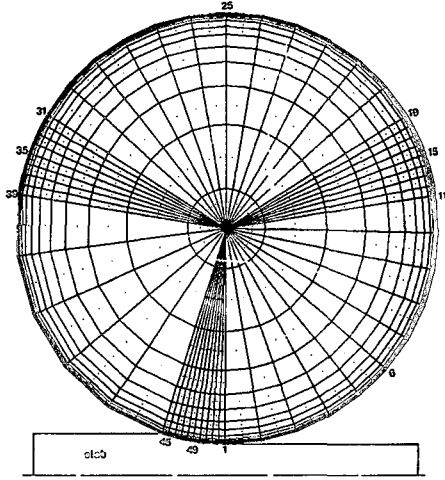


Fig. 1 Finite Difference Method mesh used for roll temperature calculation

는 압연소재의 속도가 롤 보다 빠르고, 입구측에서는 압연소재가 롤의 속도보다 느리게 된다. 이와 같은 롤과 압연재의 상대적인 속도차에 의해 마찰 발열이 생기게 되는데 상대속도로 부터 계산된 마찰 발열량은 다음식과 같다.

$$q_F = V_r \cdot \mu \cdot P \quad (2)$$

여기서  $V_r$ ,  $\mu$ ,  $P$ 는 각각 상대 미끄럼 속도, 마찰계수, 그리고 압연하중을 의미한다.

나. 압연후의 냉각

압연후에는 롤이 소재와 이탈되는 순간 부터 공기와의 접촉에 의한 공냉과 더불어 냉각 노즐 (nozzle)로 부터 분사되는 냉각수에 의한 수냉이 있어서 롤의 표면은 급격히 냉각될 것이다. 롤의 냉각시에는 열전달 계수를 사용한 다음과 같은 열전달 방정식을 사용하여 롤로 부터 방출되는 열량을 구하게 된다.

$$q_c = H \cdot (T_r - T_w) \quad (3)$$

여기서  $T_r$ 과  $T_w$ 는 각각 롤 및 냉각수의 온도이며,  $H$ 는 열전달 계수이다.

(2) 열응력의 계산

열응력의 계산은 FINESSE(finite element system)라고 하는 FEM 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다. FEM 계산에 사용된 롤의 내부 분할 형태는 온도계산과 동일하다. 아다마이트 롤 재의 인장강도 실험결과 600°C의 고온에서도 거의 상온에서

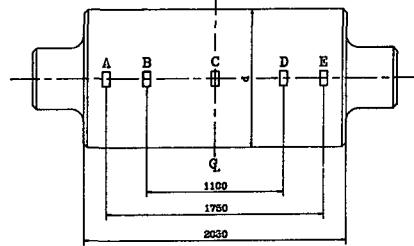


Fig. 2 Sampling positions of test pieces for observing micro crack on the roll surface

와 같은 형태의 변형거동을 나타내고 있어서 압연중 롤은 탄성변형을 하는 것을 알 수 있었다. 따라서 조압연 작업 롤은 소성변형이 없을 것으로 판단되어 탄성변형 해석만을 실시하였다.

(3) 계산 조건

기본 압연조건으로는 소재인 스텔의 두께는 250mm이고 압하율은 24% 스텔의 가열온도는 1200°C로 하였다. 압연조건에 변경에 따른 롤의 온도 변화를 알아 보기 위해, 압하율, 판폭, 냉각수량, 압연속도등을 변화시켜 가면서 계산 하였다. 열응력 계산은 FDM으로 계산된 롤 내부의 온도를 갖고 FEM 해석을 수행하게 된다.





### 2.3 작업 롤 표층부 균열 관찰

표층부 균열형태 및 균열발생 기구를 파악하기 위해 광학 현미경에 의한 균열 길이 및 균열 형상 측정과 SAM(scanning auger microscope)에 의한 표층부 흑피층의 성분분석을 실시하였다. 이와 같은 실험을 하기 위해 정상적으로 압연을 마친 롤의 표층부로 부터 Fig. 2와 같이 길이 방향으로 5군데에서 각각 25'×25"×100'mm 크기의 시편을 채취하였다.

### 2.4 롤 표면흠 대응 실험

롤 표면에 생성된 피로 균열흠이 압연중 판표면으로 전사(print) 되어 발생되는 롤 마크(roll mark) 결함의 영향을 규명하기 위해 실험압연용 롤에 여러가지 형태의 인공결함을 가공하였으며, 인공흠의 형태와 크기는 Table 2와 같다. 인공흠을 가진 롤을 사용하여 1200°C로 가열된 스텔을 압연하게 되면 롤 표면에 있던 흠의 형태가 판으로 전사될 것이다. 인공흠이 전사된 압연판을 여러 패스 압연함에 따라, 롤 마크가 후공정을 거치면서

**Table 2** Types and size of artificial defects on the roll surface (unit : mm)

Type	Size
	2D×2T, 2D×4T 4D×2T, 4D×4T 4D×6T, 6D×2T 6D×4T, 6D×6T
	10L×2W×2T, 10L×1W×2T 5L×2W×2T, 5L×2W×4T 5L×1W×4T
	10L×2W×2T, 10L×1W×2T
	10L×2W×2T, 10L×1W×2T

어떻게 변화되어 가는 지를 조사해 보았다.

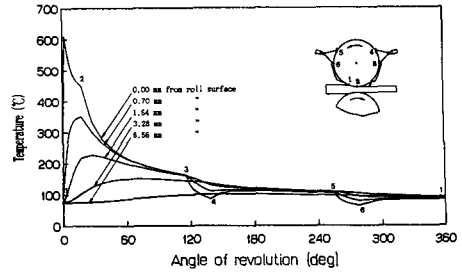
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 작업 롤 내부 온도변화

##### (1) 롤 1회전시 온도변화

Fig. 3은 압연 1회전 동안 롤 내부의 온도 변화를 나타내는 계산 결과이다. 롤의 표면은 압연의 시작과 함께 1200°C의 고온 스톱과 접촉하게 되므로 급격히 온도가 상승하여 최고 온도에 도달하게 되지만 압연이 진행되면서 표층부의 열이 롤 내부로 전달됨에 따라 온도는 감소하게 된다. 압연이 종료된 후 스톱과 이탈된 롤은 2~3 구간에서 롤을 따라 흘러내린 냉각수에 의해 롤 표면은 서서히 냉각되다가 냉각수와 직접 충돌하게 되는 3~4 구간에서는 급격히 냉각되게 된다.

4~5 구간에서는 공기와 접촉에 의해 공냉되고, 5지점에 이르러서는 입측 냉각수에 의해 또다시 급냉되게 된다. 6~1 구간은 흘러내린 냉각수에 의해 롤의 냉각이 이루어지지만 롤 내부로부터 표면으로의 복열에 의해 롤 표면의 온도는 오히려 상승하는 현상을 보이고 있다.

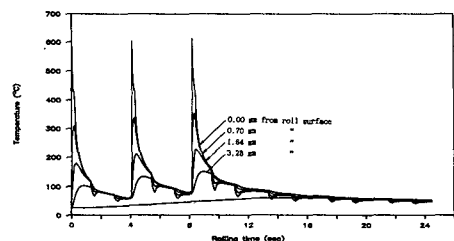


**Fig. 3** Variation of roll temperature during last roll revolution

한편 롤의 표층부 아래 지점 즉, 5mm이상의 내부 온도는 압연 1회전 동안 가열, 냉각을 반복하는 열 사이클(heat cycle)을 거처도 표층부와 같은 민감한 온도 변화는 없다. 따라서 그림에서 보는 바와 같이 표층부에 가까운 지점은 롤 갭내에서는 표층부 보다 온도 상승이 느린 반면, 냉각될 때는 오히려 표면 온도보다 높은 온도 변화를 보이고 있다. 이와같이 표층부와 내부의 온도 변화추이가 다르기 때문에 롤이 1회전 하는 동안 온도 변화가 심한 롤 표층부에는 압축-인장응력이 반복적으로 발생하게 되어 롤의 피로 균열을 진전시키게 된다. 롤 표면으로 부터 상당히 깊이 위치한 지점의 온도 변화는 전체적인 롤의 온도 변화에 따라 조금씩 상승하지만 변화폭은 크지 않다.

##### (2) 압연중 롤 표면 온도 변화 추이

연구대상인 해당 작업 롤은 동체 길이에 비해 직경이 대단히 큰편이다. 그러므로 길이가 9m인 스톱을 압연 하더라도 약 3바퀴 반 밖에 회전하지 못한다. 따라서 롤은 압연중 Fig. 4와 같은 3회의 열 사이클을 거치게 될 것이다. 압연시간이 불과 14초 정도인데 반해 다음 스톱 압연까지의 시간, 즉 피치시간(pitch time)은 평균 2분 10여초 정도 이므로 계속되는 냉각수의 공급에 따라 롤은 거의



**Fig. 4** Variation of roll temperature during roll revolutions

완전히 냉각 되어 초기 온도 혹은 냉각수 온도까지 강해된다.

(3) 열균열(heat crack)의 발생 임계온도

압연조건에 따라 열 균열 깊이가 어떻게 변화 되는가 추정해 보기 위해서는 열 균열 발생의 임계온도 설정이 필요하다. Stevens 등<sup>(3)</sup>은 아다마이트 롤 재가 300~340°C의 고온으로 되면 경도는 상온 경도에 비해 약 15% 저하됨을 밝혔으며, 이 온도에서 열 피로 균열이 발생된다고 주장하였다. 關本 등<sup>(4)</sup>도 같은 온도를 임계온도로 규정하였다. Fig.5는 열간압연 롤 재료의 온도에 따른 경도치의 변화를 나타내는 그림이다.

본 연구에서는 위의 연구결과를 전제로 작업 롤의 열균열 발생깊이를 추정해 보았다. Fig. 6은 롤의 원주방향 임의의 위치에서 반경방향으로의 온도 변화를 나타내는 계산결과로써 아다마이트 롤의 열균열 발생임계 온도가 300°C라고 한다면 내부온도가 300°C에 도달한 깊이가 롤 표면으로부터 약 1.1mm 지점이므로 열균열의 크기, 즉 초기 균열 길이는 약 1.1mm라고 생각할 수 있다.

이와 같은 초기 균열을 갖고 압연을 하게 되면 압연-냉각-압연의 극심한 온도 변화에 의한 열응력 발생으로 초기에 생성된 열 균열은 계속 진전하게 될 것이다. 따라서 롤 표면의 열균열을 최소화 하기 위해서는 롤의 표면 온도를 낮출 수 있는 냉각 설비가 중요함을 알 수 있다.

3.2 압연중 롤 내부의 응력 변화

FINESSE를 사용한 롤 내부의 열응력 계산 결과를 요약해 보면 다음과 같다. 롤의 초기 균열발생 조건을 응력발생지점의 유효응력(effective stress)이 소재의 인장강도를 초과하는 값을 가지는 것으로 가정하였다. 유효응력은 Mises<sup>(6)</sup>가 제안한 다음과 같은 응력을 쓰고 있다.

$$\sigma_e = [(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 - 6\tau_{r\theta}^2]^{1/2} / \sqrt{2} \quad (4)$$

Fig. 7은 FEM 계산결과로써, 롤의 표면에 발생된 열응력 계산값을 후처리 프로그램(post-processor)으로 표면부를 확대 처리한 응력 분포곡선이며, 소재가 롤을 빠져나가는 순간의 응력분포를 나타낸다. 아다마이트 롤의 인장강도가 65kgf/mm<sup>2</sup>이고, 롤의 내부에서 인장강도에 가까운 응력

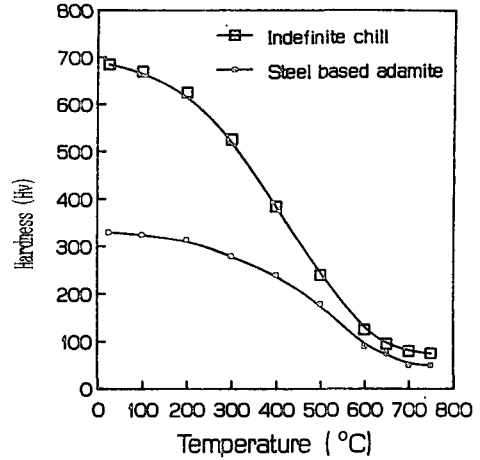


Fig. 5 Variation of hardness of roll materials with temperature

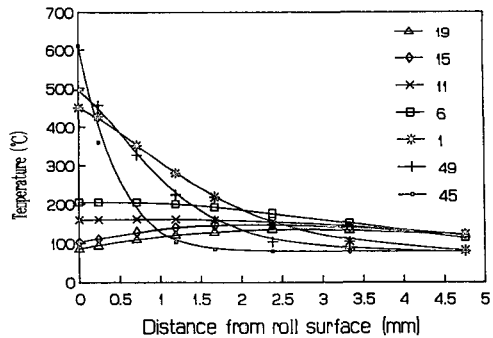


Fig. 6 The calculated temperature distributions in the direction of the roll radius

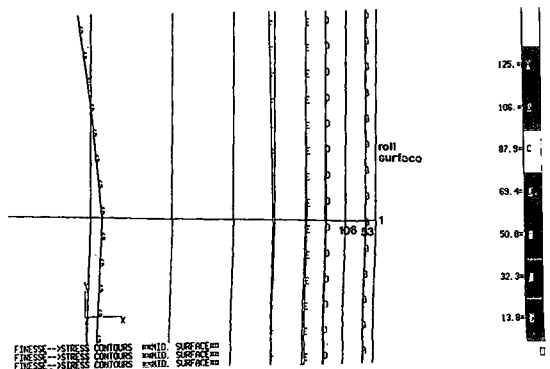


Fig. 7 Magnified contour plot of effective stress in roll surface

값을 갖는 위치는 표면으로 부터 약 1.2mm 정도의 깊이이다. 이러한 열응력 계산결과는 앞서 재료의 경도저하를 기준으로 추정된 열균열 발생깊이 1.1mm와 일치하는 결과이다. 그러나 재료의 파괴 파괴 강도는 인장강도 보다 낮은 값을 감안한다면 실제의 초기균열 깊이는 이보다 작을 가능성이 크고, 이에 대한 좀더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

한편 초기 열균열 선단인 1.2mm 깊이에서의 원주방향 열응력  $\sigma_t$ 는 7.98kgf/mm<sup>2</sup>로써 반복되는 이 열응력에 의해 균열은 진전될 것으로 생각된다.

### 3.3 굽힘응력에 의한 균열진전

전술한 바와 같이 조압연 작업 롤은 2단으로 구성되어 있으므로 굽힘 모멘트를 받게 된다. 롤을 길이방향으로 균일 분포하중을 받는 단순보로 생각하면 굽힘응력은 롤의 중심부 표면에서 최대 값을 가지며 그 크기는 다음과 같다.

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{4wb}{\pi \cdot D} (2L - b) \quad (5)$$

여기서  $w$ ,  $b$ ,  $L$ 은 각각 압연반력, 판폭, 및 롤 지지점간 거리를 의미한다.

조압연 작업 롤의 크기와 해당 압연기에 작용되는 압연하중을 고려하여 굽힘응력을 구해본 결과 최대 굽힘 응력은  $\sigma_b = 4.1\text{kgf/mm}^2$ 이었다.

### 3.4 균열 진전량의 추정

열응력에 의해 형성된 초기 균열을 갖고 응력  $\sigma$

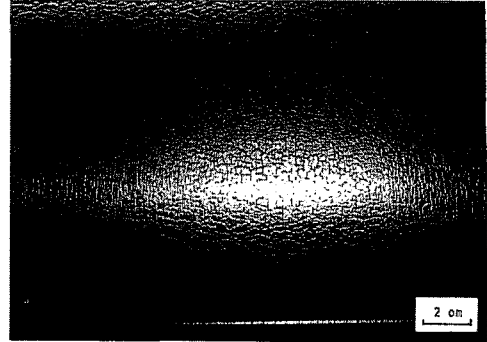


Fig. 8 Photograph of typical surface crack appearance of hot rolling mill roll

를  $N$ 회 반복적으로 받은 후의 부재에 존재하는 균열길이는 Prais<sup>(6)</sup>가 제안한 균열진전 속도식으로 부터 구할 수 있으며, 아다마이트 롤에 대한 균열진전 속도식은 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = 1.33 \times 10^{-11} \cdot (\Delta K)^{3.74} \quad (6)$$

조압연에서의 통상적인 작업조건으로 80000톤 압연한 경우에 대해 균열진전 길이를 계산해 본 결과 진전된 최종 균열길이는 1.39mm 였다. 이때 롤에 반복적으로 가해지는 응력은 초기 열균열 선단에 작용하는 인장응력으로써, 앞서 계산된 열응력과 굽힘응력을 사용하였다. 이렇게 추정된 균열진전 길이는 롤 표면에서 채취된 시편을 통해 측정된 균열길이 1.5mm와 거의 비슷한 결과를 보여주고 있다.

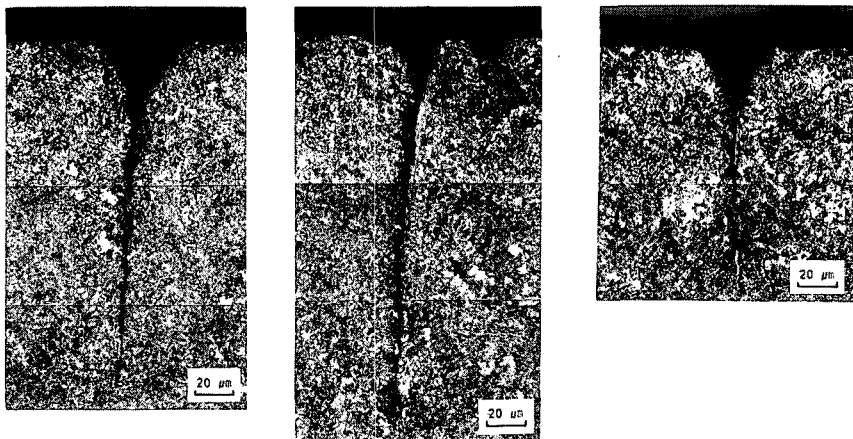


Fig. 9 Optical micrographs showing surface crack in work roll : Nital 2% etched surface,  $\times 50$

3.5 롤 표층부 균열관찰

(1) 광학 현미경에 의한 균열형상 관찰

Fig.8은 롤 표면에 형성된 거북등 모양의 열균열을 보여주는 사진으로서 급격히 가해지는 열부하에 의해 심하게 손상된 형태를 나타내고 있다. Fig.9는 작업롤 표면에 형성된 균열의 단면 형상이며 롤의 단부(edge)에 가까운 곳에서 채취된 시편인 (a)와 (c)보다 스라브와의 접촉이 많은 중심부에서 채취된 (b) 시편의 균열길이가 크게 나타나고 있다. 예상했던 바와 같이 압연량이 많으면 균열길이가 길어진다는 것을 알 수 있다. 압연 초기에만 스라브와 접촉되었던 부위의 균열길이를 측정할 결과 약 1.0~1.2mm로 전술한 초기균열길이에 대한 해석된 결과와 일치하고 있다.

한편 롤 표면에서 측정가능한 균열크기인 균열 개구폭을 측정할 결과 균열길이와는 반대로 (a), (c) 시편쪽이 컸다 이것은 롤의 중심부인 (b) 부위는 압연 중 모든 스라브와 접촉하게 되므로 표면에서의 마멸로 인해 개구폭이 좁아진 것으로 설명

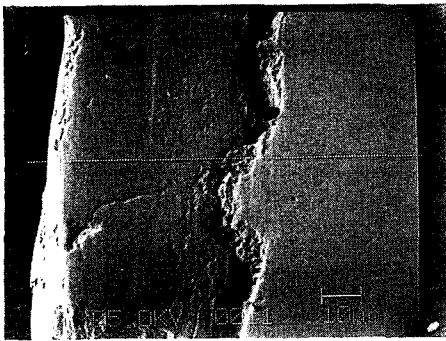


Fig. 10 SAM photograph of black skin scale on roll surface

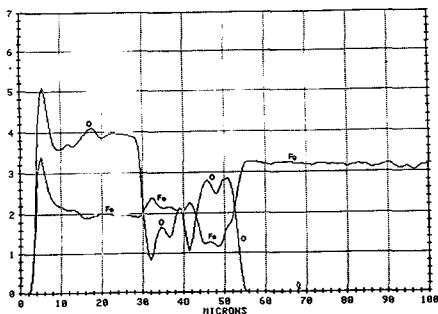
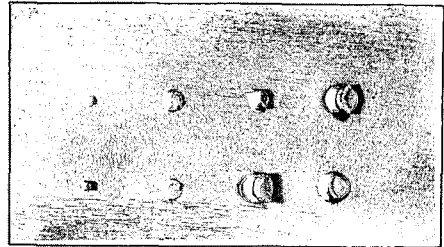


Fig. 11 Result of SAM line analysis of roll black skin scale in roll surface

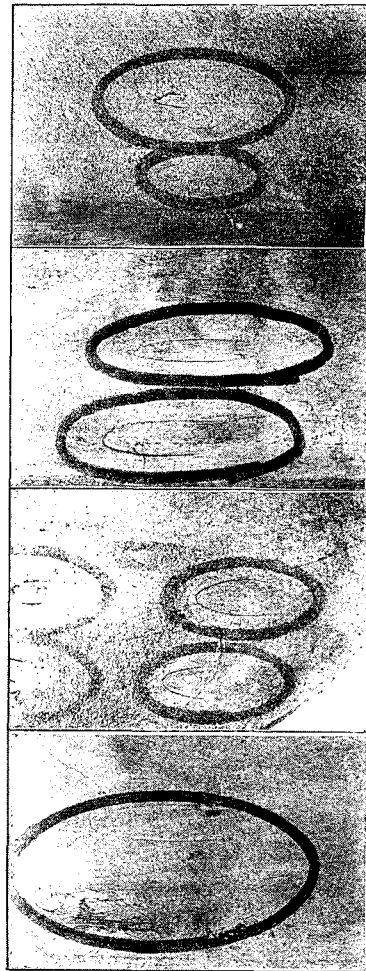
할 수 있다.

(2) SAM에 의한 표층부 흑피층 분석

Fig. 10은 롤의 SAM 분석사진으로써 흑피층과 기지층(matrix)의 경계가 뚜렷이 드러나는 것을



(a)



(b)

Fig. 12 Roll marks printed on test slab and their deformed appearances after hot rolling

볼 수 있다. 또 Fig. 11은 같은 시편의 선분석(line analysis)을 통해 얻어진 Fe와 O의 농도 분포로서 표층으로부터 50 $\mu$ m 정도가 흑피층임을 알 수 있었다. 이러한 흑피층은 롤 표면의 내마모성을 향상시켜 주는 것으로 알려져 있다.

3.6 롤 표면흙 대응실험 결과

인공흙을 가진 롤을 사용하여 열간압연한 결과 Fig.12와 같은 압연판을 얻었다. 다양한 크기와 모양을 가진 인공흙에 의해 Fig.12의 (a)와 같이 압연판에 롤 마크가 전사되었으며, 이 압연판을 계속 압연하게 되면 최종적으로 Fig.12의 (b)와 같은 형태의 표면을 갖는 압연판이 얻어진다. 크기가 다른 여러가지 형태의 롤 마크가 전사된 압연판을 압하율을 변경시켜 가면서 여러 패스 압연을 실시하여 Fig.13와 같은 실험결과를 얻었다.

그림에서  $H_o/(H_o+T_o)$ 는 압연중 초기균열의 소멸조건을 찾기위해 정의된 지수로써, 초기 두께  $T_o$ 인 스톱에 깊이  $H_o$ 의 균열로부터 전사된 롤 마크를 갖는 압연판으로 실험한 것을 의미한다. 그림으로 부터 압하율과 관계없이 롤 마크가 후공정 압연중에 소멸되기 위해서는  $H_o/(H_o+T_o)$ 가 약 0.025 이하가 되어야 함을 알 수 있다. 그러므로 실제 열연공정에서 조압연 작업 롤로 두께 250mm의 스톱브를 190mm로 압연할 때 롤 마크가 최종 제품인 열연판에 결함으로 존재하기 위해서는 롤 표면의 균열크기가 최소한 4.87mm가 되어야 함을 알 수 있다.

3.7 조압연 롤의 손상이 압연판 표면결함에 미치는 영향

이상의 결과들로부터 조압연 작업 롤에 발생되는 피로균열 생성기구는 Fig 14와 같이 설명할 수 있다.

- 단계 1 : 표면 흑피층의 생성 및 균열
- 단계 2 : 초기 열균열의 발생
- 단계 3 : 반복 부하에 의한 균열의 진전

전술한 바와 같이 여러가지 시뮬레이션과 광학현미경을 이용하여 관찰된 결과를 종합해 보면, 정상적으로 압연을 마친 롤에 발생된 피로균열의 크기는 길이가 약 1.5mm, 개구폭이 약 0.5mm정도이다.

한편 롤 표면흙 대응 실험을 통해 분석된 압연판의 손상 가능 균열은 최소 길이가 4.87mm 이어야

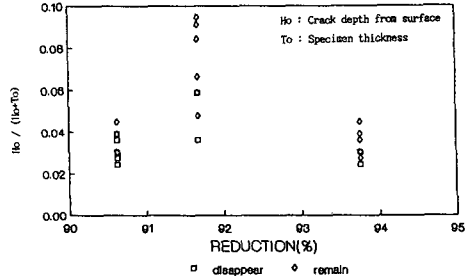
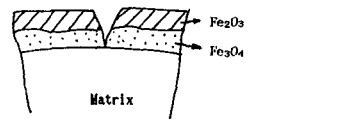
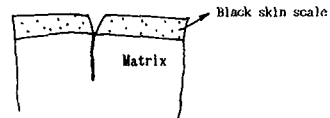


Fig. 13 Relation between reduction ratio and defect size

Stage I : Formations of black skin scale and heat cracking



Stage II : Initiation of thermal fatigue



Stage III : Propagation of fatigue crack

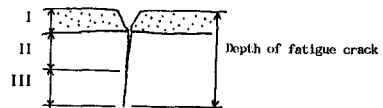


Fig. 14 Schematic diagram showing formation and propagation of heat crack on roll surface of hot work roll

하고, 충분히 넓은 개구폭을 가져야 한다. 그러나 작업 롤 표면에 존재하는 균열은 길이 1.5mm, 개구폭 0.5mm의 대단히 작은 균열이므로 스톱브 표면에서 손상을 일으킨다는 것은 거의 불가능한 일로 생각되며 실령 스톱브 표면에 손상이 전사되었다 하더라도 그 크기가 대단히 작아, 후공정 압연을 거치면서 대부분 소멸되어 판 표면에 흙으로 잔류되지 않을 것으로 판단된다.

4. 결론

조압연기 작업 롤의 피로특성을 규명하기 위한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 표면부 피로균열은 롤이 압연 1 사이클 동안에 받는 급격한 열부하에 의해 표면에 발생되는 균



열현상으로써, 아다마이트 롤의 열균열 생성 온도는 약 300°C이며 이를 기준으로 초기 열균열 발생 깊이를 계산해보면 약 1.1mm 정도이며 이는 실측된 결과와 잘 일치하고 있다.

(2) 압연 초기에 생성된 열균열은 압연의 진행과 함께 열응력과 굽힘응력에 의해 진전된다.

(3) 롤 표면흠 대응실험 결과 롤 표면에 생성된 균열크기가 4.87mm 이상이어야 만 열연 판의 표면에서 결함으로 잔존된다.

(4) 열응력의 계산과 롤 표면에서 채취된 표층부 균열 크기를 분석해 본 결과, 롤 표면에 발생되어 있는 작은 크기의 피로균열이 열간 압연판의 표면 결함을 유발시키는 요소가 된다고 보기는 힘들 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- (1) 河原, 1951, 日立評論, Vol. 33, No.9, p. 123.
- (2) Cerni, S. et al., 1963, Iron and Steel Engineer, Vol. 44, No. 9, p. 165.
- (3) Stevens, G. G, et al, 1971, Journal of The Iron and Steel Institute, p. 1.
- (4) 關本 靖裕 : 鐵と鋼 ; 第61年, Vol.10, p. 19.
- (5) Johnson, W. and Mellor, P.B., 1980, Engineering Plasticity, p. 71.
- (6) Rolfe, S.T., and Barson, J.M., 1977, Fracture and fatigue control in structures, p. 232.