

# 열간압연 스케줄변경에 따른 최적연삭조건 결정

배 용 환

안동대학교 기계교육학과

(2008. 2. 27. 접수 / 2008. 11. 10. 채택)

## Decision of Optimum Grinding Condition by Pass Schedule Change

Yong-Hwan Bae

Department of Mechanical Education, Andong National University

(Received February 27, 2008 / Accepted November 10, 2008)

**Abstract :** It is important to prevent roll failure in hot rolling process for reducing maintenance cost and production loss. The relationship between rolling pass schedule and the work roll profile will be presented. The roll wear pattern is related with roll catastrophic failure. The irregular and deep roll wear pattern should be removed by On-line Roll Grinder(ORG) for roll failure prevention. In this study, a computer roll wear prediction model under real process working condition is developed and evaluated with hot rolling pass schedule. The method of building wear calculation functions for center portion abrasion and marginal abrasion respectively was used to develop a work roll wear prediction mathematical model. The three type rolling schedule are evaluated by wear prediction model. The optimum roll grinding methods is suggested for schedule free rolling technique.

**Key Words :** hot rolling process, schedule free rolling, coffin schedule, pass schedule, wear prediction model, on-line roll grinder, edge spalling, stress amplification

### 1. 서론

최근 소비자의 다양성과 제품주기의 급속한 감소로 인한 생산설비의 유연성이 더욱 더 요구되게 되었다. 생산설비의 유연성 증가는 대신 시스템 설계자에게는 더욱더 많은 제약조건을 요구하며, 이러한 유연성의 증가로 인하여 설비고장을 유발할 수 있다. 최근 미국에서는 예상치 않는 설비의 고장을 방지하여 생산성의 극대화를 위한 방안으로 설비의 상태를 감지하여 손상정도를 예지하는 연구에 주력하고 있다<sup>1)</sup>.

특히 최근 복합시스템의 대표적인 생산시스템중의 하나인 압연설비에서 제품의 다양화 및 박물 제품의 증가, 강판 표면의 엄격화 등 자동차수요가 품질요구 수준이 엄격해지고 그에 따른 요구조건이 다양해짐에 따른 열연 롤 단위(pass schedule)가 다품종 소량생산시스템으로 변화됨에 따라 열연조건은 더욱 가혹해지고 있는 실정이다<sup>2)</sup>. 열간압연의 롤 단위편성은 압연 롤의 마모, 표면거칠, 국부마모 등으로 인하여 롤 스케줄 종류 및 크기 제한, 즉 동일

폭 압연량 제한, 박물 및 고강도강 연속 압연량 제한, 광폭에서 협폭으로 압연해야 하는 등의 제약사항들이 있다.

Fig. 1은 전형적인 열간압연시스템을 나타낸 것이다. 열연 사상 압연용 작업롤(work roll)은 롤단위 제약에 직접적인 영향을 미치므로, 롤재질로서는 다양한 합금원소 첨가에 의해 내마모성이 대폭 개선된 HSS(High Speed Steel)롤이 최근에는 널리 사용되고 있다. 따라서 압연설비의 연속적인 가동과 작업롤의 사용기술확보 및 롤 마모(roll wear)제거를 위한 ORG(On-line Roll Grinding)사용기술 개발 등은 열연 SFR(Schedule Free Rolling)을 달성하는데 매우 중요한 기술들이다<sup>3)</sup>.

본 연구의 관심은 사상압연공정(finishing mill train)에 국한되며, 열간압연시스템은 매우 복잡한 연속시스템으로 전체시스템 중 하나만 고장을 일으켜도 작업이 되지 않음을 알 수 있다. 수요자마다 요구하는 엄격한 사이즈와 납기를 맞추기 위하여 하나의 압연시스템에서 압연 스케줄을 설계하는 것은 보통 어려운 일이 아니다.

따라서 제조회사는 원하는 시점에 어떠한 강종

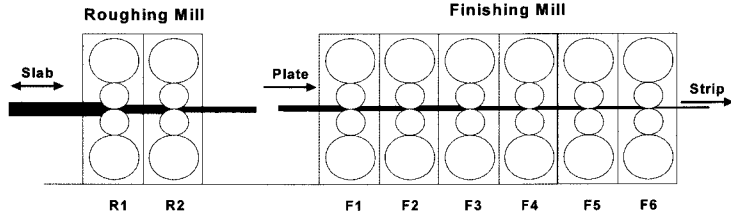


Fig. 1. Hot rolling process.

이라도 쉽게 압연할 수 있는 기술인 SFR을 원한다. 그러나 이런 SFR을 실현하고자 한다면 정확한 판 형상제어와 롤 사고를 방지해야 하는데, 형상제어 및 롤 사고는 롤 마모프로파일과 아주 밀접한 관계를 가지고 있으며, 따라서 롤 사고를 제거하기 위해서는 롤 마모패턴을 제어할 필요가 있다. 이러한 롤 마모패턴을 제어하기 위한 방법의 하나로 등장한 것이 ORG기법이다. 이것은 압연도중 마모패턴을 예측하여 일정한 시기에 작업롤을 작업중에 연삭해 주는 장치이다<sup>4)</sup>. 그러나 실제 작업시에 각각의 다른 작업스케줄에 따라 알맞은 연삭조건을 설정해 주는 것은 매우 어려운 일이다.

본 연구에서는 기존의 롤단위 패턴인 코핀방식(coffin schedule)과 스케줄프리압연시 롤 마모패턴(roll wear pattern)비교를 통한 롤 사고를 예측하여 설비보전 인력의 정비시간을 줄임으로써 안전사고를 예방하고 설비보전비를 절감하여 생산단가를 줄이는데 목적이 있다. 또한 판 형상정밀도를 높이기 위하여 기존의 롤 스케줄패턴 제약을 벗어나 SFR이 가능도록 압연스케줄 패턴변화에 따른 연삭타입을 설정해 주는 기술을 개발코자 한다.

## 2. 이론적배경

### 2.1. 열간압연스케줄 패턴

열간압연시 매우 다양한 업체의 수요가 원하는 사이즈와 원하는 강종에 따라 원하는 납기일에 납품을 하기 위해서는 매우 치밀한 압연스케줄이 필요하다. 또한 열연강판 제조업체 측면에서는 가능한 열간압연기에서 최적조업이 이루어지도록 하는 것이 목표이다. 최근에 와서는 특히 자동차 분야에서 안전도 증가와 내부식성 요구 등과 같은 수요자의 품질에 따른 자동차 사양을 맞추기 위한 고급강종에 대한 요구가 거칠어지면서 열간압연기의 작업조건이 매우 까다로워졌다. 이러한 까다로운 조건을 맞추기 위해서는 기존 Fig. 2(a)와 같은 코핀방식의 열간 압연 스케줄이 요구되었다. 이러한 스

케줄은 그림에서 알 수 있듯이 압연폭과 두께가 일정한 패턴을 취하고 있다. 또한 이러한 압연스케줄 방식은 전반 대폭압연에서 후반 소폭압연으로 점점 폭과 두께를 감소해 나가면서 압연을 한다<sup>5)</sup>. 이것은 압연말기로 갈수록 롤이 많은 손상을 받아서 그만큼 롤 사고가 일어날 확률이 많음을 시사하므로 압연 후반기에는 반드시 소압하를 통한 압연부하를 감소시켜야 한다. 또한 이때에 압연롤의 형상은 볼록(convex)에서 오목(concave)으로 마지막에는 편평(flat)형상을 이용하는 것이 일반적인 조업형태이며, 이러한 제약은 열연강판 제조업자에게는 크나큰 제약이다.

이러한 제약을 방지하고 열연강판제조업자에게 압연스케줄을 짜는 것을 자유롭게 만들어 주기 위한 개념이 Fig. 2(b)와 같은 SFR(Schedule Free Rolling) 기술이다 앞에서 언급하였듯이 정밀한 형상제

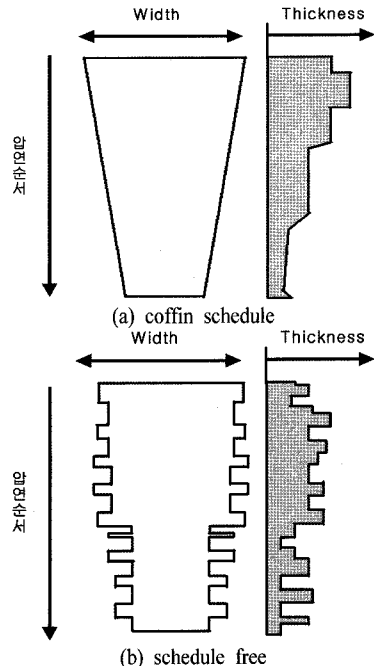


Fig. 2. Hot rolling schedule pattern.

어 압연을 하기 위해서는 압연소재의 온도, 재질(성분), 사이즈와 열간압연 롤의 형상 등 많은 요소를 고려하는 매우 복잡하고 어려운 일이다. 이것은 모든 압연요소가 서로 밀접한 영향을 미치는 것을 의미하고, 이들의 상호 연관성을 따져서 서로를 제어하는 것은 엄청 어려운 일이다. 특히 SFR기술에서 가장 까다로운 점은 롤 형상이 자유로워져 이것이 판 형상제어를 불가능하게 한다는 점이다.

이를 방지하기 위하여 항상 롤이 편평상태를 유지시킬 수 있는 형상예측제어 기술이 필요하고 이것을 바탕으로 판 형상제어 방법이 제시되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 여러 가지 스케줄 패턴에 따른 매 압연마다의 롤 마모프로파일을 예측하고, 이때 생길 수 있는 불규칙한 마모프로파일이 롤 손상에 미치는 영향에 대하여 살펴보고 이러한 손상을 방지하기 위한 최적연삭 조건을 개발하고자 한다.

### 2.1. 열압롤 마모이론

마모 프로파일 예측은 온라인 크라운 형상제어 모델에 없어서는 안 될 필수 불가결한 것이다. 롤 (the rolls)들은 응력변동, 열주기, 접촉마모와 다른 화학의 영향들을 받는다. 40년대초 이래로 기본적인 마모기구에 대한 연구가 많이 진행되었다. Sachs는 압연기로부터 일련의 워크롤과 백업롤의 마모 프로파일을 조사했다<sup>6)</sup>. 비록 마모 프로파일이 누적 생산량 분배와 밀접한 관계가 있다는 것을 알아냈지만 정성적인마멸에 관한 연구는 수행되지 못했다. Williams 등은 적철강(Hematite), 자철강(Magnetite) 등의 산화물의 연삭작용에 의한 롤의 마멸에 관한 연구를 수행하였으며<sup>7)</sup>, Kihara 등은 산화층이 압연재의 표면뿐만 아니라 롤의 표면에도 발생하여 다양한 마멸 현상이 롤에 발생한다는 것을 밝혔다<sup>8)</sup>. Onuki 등은 연삭작용이 활발한 초기의 사이클에서 압연하중이 클수록 롤의 마멸로 인한 손실이 더크다는 것을 증명하였다<sup>9)</sup>. Rogberg 등은 냉간 압연공정에서는 롤의 마멸보다 롤과 소재가 접촉하는 부분에서의 롤의 표면거칠기가 더 중요하다는 것을 밝혔다<sup>10)</sup>.

마모율을 감소시키고 롤 수명을 증진시키거나 혹은 균일한 마모 프로파일을 만들기 위한 방법으로 연구자들의 관심이 압연단위(campaign)를 확장해 이르렀다. 이와 더불어 윤활제들의 적절한 선택<sup>10)</sup>, 기름과 물의 혼합하는 방법<sup>11)</sup>, 롤 재료들<sup>12-14)</sup>, 롤냉각패턴들<sup>15,16)</sup>과 크라운 제어방법<sup>17,18)</sup> 등이 다양하게 연구되었다. ORG는 롤의 소비를 촉진시킨다. 그러

나 ORG는 균일한 롤 프로파일을 만들 수 있고 압연 스케줄을 늘릴 수 있게 하고, SFR을 가능하게 한다.

마모에 의한 작동롤 프로파일을 예측하기 위한 마모예측식은 실험식에 조업에서 측정된 마모량 분포를 도입하여 보완하면 거시적인 예측모델식으로 작성될 수 있다<sup>19)</sup>. 작동롤에서 발생하는 마모프로파일은 사다리꼴을 이루며, 에지부분에서의 마모량이 크게되는 경우가 많다. 압연판 I매를 압연했을 때 형성되는 마모형태를 기본으로 할 때 마모윤곽선의 기본형은 판 단부에서의 돌기형상을 고려하여 Fig. 3과 같이 I, II, III의 영역으로 구성될 수 있다. 이들 영역에 있어서 마모량  $W_r$ 는 마모 프로파일 함수  $W_p(x)$ 를 이용하여, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$W_r = W_c \cdot W_p(x) \tag{1}$$

여기서

$$W_p(x) = \begin{cases} 1.0 & \text{영역 I} \\ \frac{(k-1)}{l_2-l_1} (\pm x - (\frac{W}{2} - l_2) + 1) & \text{영역 II} \\ k & \text{영역 III} \\ 0.0 & \text{나머지 영역} \end{cases} \tag{2}$$

$$W_c = C_f \frac{P}{B \cdot l_d} \frac{L}{\pi D_w} \tag{3}$$

$C_f$ 는 롤 재질계수이고  $P$ 는 압연하중  $L$ 은 압연 길이  $B$ 는 판폭  $l_d$  접촉투영길이  $D_w$ 는 롤 직경이다. 식 (2)의  $k$ 는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 센터부분 마모깊이( $W$ )의 배수임을 알 수 있다.

본 연구에서는 현장에서 채취한 마모데이터를 이용하여 식 (2)의 각 계수를 구하고 현장작업조건에서 (3)식의 값을 계산한 뒤 식 (1)에서 마모량  $W_r$ 을 예측하였다. 열간 압연중에 롤의 스펀링은 마모에 의한 에지부에 집중된 압연부하에 의하여 연속적인

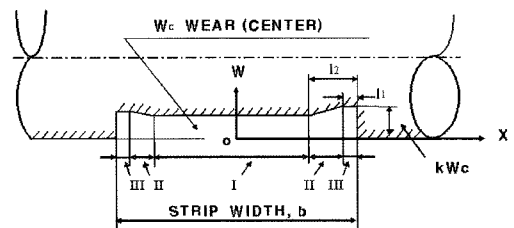


Fig. 3. Basic wear model for wear calculation.

피로누적에 의하여 발생한다고 보고하고 있으므로 롤 사고를 방지하기 위해서는 피로도를 관리하는 것도 필요하다.

### 2.3. 온라인 롤 연삭메카니즘

일반적으로 온라인 롤 연삭기(ORG)는 열간압연 기내에 장착된 연삭장치로서 열간압연 작업물의 표면조도를 교정하고 보상하는 장치이다. 이 장치의 궁극적인 목적은 열간압연시스템에서 롤의 교체시기를 줄이고 강판의 표면형상을 향상시키고 스케줄프리아연(SFR)을 가능하게 하기 위한 기술이다. 이 장치는 또한 롤 교정작업에 들어가는 인력을 줄이고 생산효율을 향상시킨다. 따라서 ORG기술은 빠른 시간내 전세계적으로 연구자들의 뜨거운 쟁점이되어, 집중적으로 연구되고 있으며 전세계 제철소에 의하여 많은 주목을 받고 있다. 현재에 ORG장비는 크게 3종류로 분류된다. 원통연삭장치와 컵형태의 CBN휠을 장착한 평면연삭장치, 그리고 탄성숫돌을 장치한 평면연삭장치 등이다. 일반적으로 CBN휠과 탄성숫돌이 가장 널리 이용되고 있다. 그러나 이와같은 장치는 열간압연기내에만 사용되는 장치이므로 전통적인 연삭과는 크게 다르다. Fig. 4는 ORG 시스템의 연삭메카니즘을 나타낸 것이다.

연삭휠은 컵형태를 취하고 있고 롤러의 축과 휠 축은 각각 H만큼의 축과  $\alpha$ 만큼 기울어져 작동된다. 통상의 ORG 시스템은 롤 마모 프로파일의 에지부를 연삭하여 롤 사고를 예방하는데 있다. 일반적으로 실제 압연에 있어서 최적의 연삭조건을 알기 위해서는 온라인 롤 프로파일 장치가 필요하고 복잡한 연삭알고리즘이 필요하다. 그러나 이와 같은 알고리즘에 관한 연구는 아직까지 연구된 적이 없으며, 롤의 재질이나 기계적 특성, 피로특성 등이

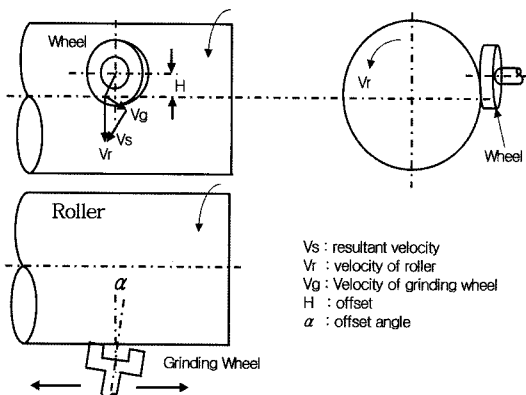


Fig. 4. ORG grinding wheel and roller mechanism.

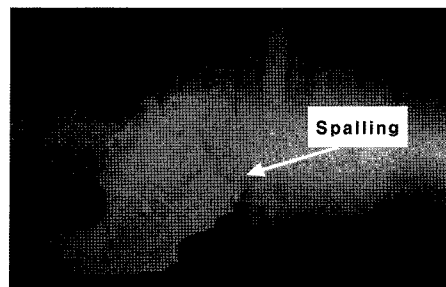
연관된 문제이므로 매우 신중히 결정하여야 한다. 또한 연삭입자가 압연 중에 강판위로 떨어져 표면완전성을 저하시키므로 실제 적용은 신중히 고려해야 한다.

## 3. 본 론

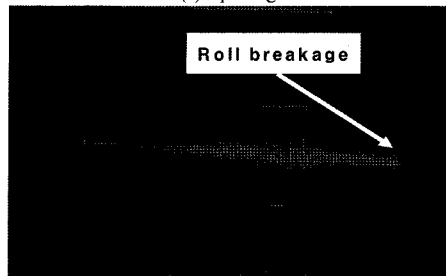
### 3.1. 작동롤 손상형태

Fig. 5는 롤 사고의 형태를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 에지스폴링(edge spalling)으로서 롤바렐 단부(roll barrel edge)에서 W/4지점에서 주로 발생되며, 이러한 형태의 롤 사고는 스폴링 사고의 80% 이상을 점유하고 있다.

Fig. 5(b)는 롤 절손을 나타낸 것이다. 롤 절손은 전체 롤사고의 20% 미만이지만 절손부가 롤 단부로부터 W/4지점에 발생하는 것이 특징이다. 보강롤 소부현상은 주로 작동롤의 마모심화로 인하여 에지부분 백업롤과 접촉되는 부분에 나타난다. 특히 마모로 인하여 에지부분에 응력이 증폭되면 나타나는 피로현상으로서 여기서 우리는 보강롤과 작동롤의 사고부위가 동일하게 롤단부 W/4지점에서 발생된다는 사실을 알 수 있었고, 이러한 원인은 열간압연기의 구조 및 작업조건과 밀접한 상관성이 있을 것으로 생각되었다. 실제로 열간압연시스템에서 사고 발생률을 보면 압연기 후단으로 갈수록 롤 사고가 많이 관찰된다. 이것은 압연기 후단으로 갈



(a) spalling



(b) breakage

Fig. 5. Picture of roll failure(spalling, breakage).

수록 비록 압연하중은 적을지 몰라도 롤 회전수가 많기 때문에 마모깊이가 깊어지면서 발생하는 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서의 마모프로파일은 F6 스텐드에만 적용한다.

### 3.2. 압연스케줄 패턴변경과 마모프로파일 패턴

먼저 본 연구에서 시험할 압연스케줄 패턴은 1) 코핀(coffin)방식 2) 랜덤(random)방식 3) 삼각형(triangle)방식 3가지로 제한한다(Fig. 6).

그리고 이러한 패턴에 따른 20매(마지막 26매) 단위로 압연이 진행될 때 마다의 마모패턴을 비교하고, 이러한 마모패턴이 롤 마모손상에 미치는 영향에 대하여 살펴보고, 또한 이를 방지하기 위한 최적 연삭조건을 설정하여 압연시간을 늘리고 또한 작업의 생산성 향상을 기여하고 인건비를 절감하고자 한다. 식 (2), (3)으로부터 식 (1)에서 마모량  $W$ 를 구할 수 있다. 식 (2)와 (3)에 현장의 마모프로파일로부터 구한 계수값( $C_f = 1.6 \times 10^{-6}$ ,  $k = 1.15$ ,  $l_1 = 25$ ,  $l_2 = 100$ )을 입력하고 나머지는 작업조건에서 구할 수 있다. 이렇게 구한 마모프로파일은 Fig. 3과 같은 형태이며 축  $W$ 에 대칭이다. 따라서 위의 세 가지 스케줄 패턴에 따른 반쪽 마모프로파일 형태를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 주의 깊게 관찰할 것은 코핀 방식의 경우 마모프로파일은 랜덤방식이나 삼각형방식에 비하여 초기 마모프로파일은 약 2um 정도 밖에 되지 않는 반면에 랜덤의 경우는

마모깊이가 10um 정도이고 삼각형의 경우는 20um 입을 알 수 있다. 또한 코핀방식의 경우는 에지부의 마모패턴이 급격히 변화하지 않으나 삼각형방식 경우는 매우 요동치며 변화함을 알 수 있다. 따라서 압연시에 압연스케줄을 어떻게 구성하는가에 마모프로파일이 달라지고 또한 이것은 초기 롤 사고와 밀접한 연관이 있다.

### 3.3. 마모프로파일패턴과 최적연삭패턴

Fig. 7의 압연스케줄 중에서 사용된 코핀 방식으로 압연했을때 마모패턴은 20매 압연시 초기 마모깊이는 매우 작다. 에지부 즉 W/4 지점의 마모패턴도 응력집중이 많이 일어나지 않는 편평(flatten)형상을 나타낸다. 또한 매 20매 단위로 마모깊이 진행률이 비슷함을 알 수 있다. 이중 랜덤 방식이나 삼각형 방식은 초기 20매 압연깊이가 코핀 스케줄 패턴에 비하여 매우 깊음을 알 수 있다. 이중에서도 특히 삼각형 스케줄패턴은 초기20매 마모깊이가 월등히 깊고 에지부 W/4지점의 마모패턴이 급격한 변화를 취하고 후단으로 갈수록 깊이가 작아진다. 특히 코핀 초기에 마모깊이와 에지부의 마모패턴이 응력집중이 많이 일어나지 않는 형태를 취하고 있다. 그러나 압연이 진행됨에 따라 에지부 W/4지점에  $\Delta$ 타입의 마모홈이 지속적으로 변화지 않고 유지됨을 알 수 있다.

또한 모든 스케줄 패턴이 60매 압연 이후로는 에지부 마모패턴이 변형된  $\Delta$ 타입으로 응력집중이 일어나기 쉬운 형태이며, 실제로 현장의 롤사고도 압연 후반으로 갈수록 많아짐을 알 수 있다. 결과적으로 106매의 스트립을 압연한 누적마모는 같지만 중간에 진행되는 마모프로파일은 많은 차이를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 최적의 연삭패턴은 실제적으로 코핀방식의 경우는 40매 압연 후 15um 정도로 양 에지부를 연삭 해주는 것이 초기 롤 사고 방지와 판 형상 제어에 유익하며, 랜덤 방식의 경

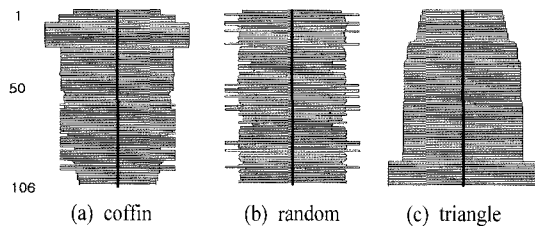


Fig. 6. Rolling schedule pattern type.

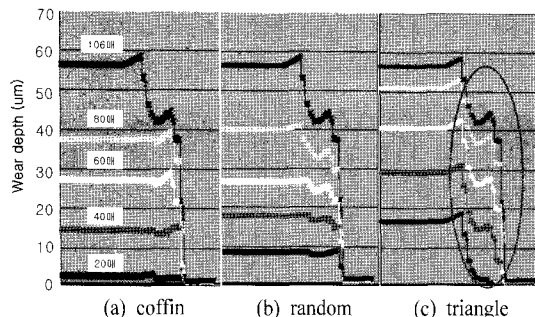


Fig. 7. Wear profile pattern by rolling schedule pattern.

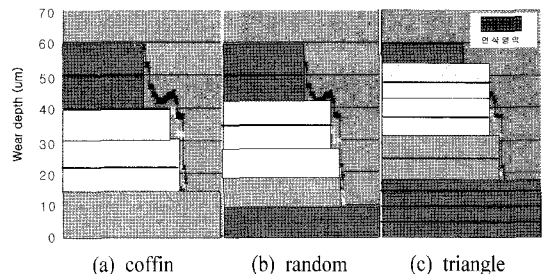


Fig. 8. Grinding pattern by rolling schedule pattern.

우도 20매 압연후 10um 정도로 양 에지부를 해주면 좋겠고, 삼각형 방식의 경우는 에지부에서  $\wedge$ 형상이 뚜렷이 나타나 응력집중에 의한 롤 사고 발생확률이 높으므로 실제로 압연이 시작하면서 대략 5매 마다 연삭을 해주는 것이 롤 사고와 판 형상 제어에 유의함을 알 수 있다. 그리고 코핀 방식은 후반부 80매 압연 이후에 많은 양의 연삭을 해준다(Fig. 8).

마모패턴에 근거한 연삭횟수를 살펴보면 대략 코핀 방식이 6번, 랜덤방식이 7번, 삼각형방식이 11번 정도해 주는 것이 좋다. 특히 여기서 삼각형 방식에서 자주 연삭을 해 주는 이유는 Fig. 7에서 알 수 있듯이 에지부의 마모프로파일 변화가 아주 자주 급격하고 예리하게 변하기 때문에 자주 연삭해주는 것이 좋다.

그러나 열연재 생산자의 관심은 롤을 오랫동안 사용하는 것으로 굳이 롤 사고가 일어나지 않는 마모 프로파일에서는 가능한 연삭을 하지 않는 것이 좋다. 왜냐하면 연삭은 롤 사고 방지와 판 형상은 향상시킬 수 있으나 롤 소비를 지나치게 촉진시켜서 롤 구입비용을 증대시킨다. 따라서 롤 재질마다의 크랙전파 특성값과 피로 특성값을 조사하여 초기 임계 마모깊이와 롤 사고가 일어나지 않는 에지부 마모형태를 설정해 두는 것이 매우 중요하다. 이것은 압연작업을 하면서 현장의 마모프로파일을 실제 측정하면서 롤 사고와 연관성을 분석하여 데이터를 확보해야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 열간압연스케줄 변경이 마모프로파일을 어떻게 변화시키는지를 고찰하였고 이를 통하여 롤 사고와 생산성 향상을 위한 최적의 연삭 조건에 대하여 연구하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 일반적으로 온라인 롤 연삭이 없는 상태에서는 초기에 코핀방식의 압연스케줄이 가장 마모깊이가 적고, 또한 초기 롤 사고가 일어날 확률이 적다. 따라서 코핀방식은 20매 압연까지는 연삭이 필요 없다. 그러나 압연말기 80매 압연 이후부터 마모깊이가 급격히 깊어지므로 후반에 연삭을 자주해 줄 필요가 있다.

둘째, 랜덤방식은 경우에 따라서는 마모패턴이 매우 불규칙적으로 나타날 수 있으므로 가능한 피하는 것이 좋고, 대략 압연스케줄에 맞추어 균일한

간격으로 연삭해 주는 것이 좋다.

셋째, 삼각형 방식은 초기의 마모깊이가 매우 깊고, 에지부분의 마모패턴이 매우 불규칙하게 변화하므로 초기에 집중적으로 여러번에 걸쳐 연삭을 해 주는 것이 좋고 압연말기 80매 이후에는 한번만 연삭하지만 이와 같은 스케줄은 가능한 피하는 것이 좋지만 SFR의 하나의 패턴으로 생각되므로 이를 구현하기 위해서는 반드시 제시된 연삭패턴을 준수해야 한다.

마지막으로 본 연구를 통하여 스케줄변경에 따른 연삭조건을 설정하였으며 향후 열간압연에서 스케줄 변경에 따른 롤 사고의 예측과 연삭조건을 사전에 평가할 수 있는 도구로 유용할 것이다.

#### 참고문헌

- 1) J. Lee, "Modern Computer-aided Maintenance of Manufacturing Equipment and Systems: Review and Perspective", Computers ind. Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 793~811, 1995.
- 2) H. Okano, A. J. Davenport, M. Trumbo, C. Reddy et al., "Finishing Line Scheduling in the steel industry", IBM Journal Research and Development. Vol. 48, No. 5, pp. 811~830, Sep. 2004.
- 3) 한국과학기술정보연구원, 2002 기계기술 II, 자체 보고서, pp. 222~223, 2002.
- 4) S. Mori, S. Kondoh, T. Nishino, Y. Yoshimura et al., "Rolling mill equipped with on-line roll grinding system and grinding wheel," US patent No. 6616511, Sep. 9, 2003.
- 5) Nippon Steel Co., "Nippon Steel news : Schedule-free Rolling", No. 315, April 2004.
- 6) G. Sachs et al., "Roll wear in finishing trains of hot strip mills", Iron and Steel Engineer, Vol, 38, pp. 71~92, 1961.
- 7) R.V. Williams, G.M. Boxall, "Roll surface deterioration in hot strip mills", J. of The Iron and Steel Institute, Vol. 4, pp. 369~377, Apr. 1965.
- 8) J. Kihara et al., "Roll wear in hot strip mill", "Iron and Steel", Vol. 68, No. 4, pp. 62~69, 1983.
- 9) A. Ohnuki, "Wear and deterioration of rolling roll and procedure of anti-wear", J of Japan Soc. Lubr. Eng., Vol. 32, pp. 621~626, 1987.
- 10) R. Rogberg, "Experience gained on the 5-stand cold rolling mill at SSAB with a 6-high stand using CVC technology", Metall. Plant Tech. Int., Vol. 13, pp. 58~

- 67, 1990.
- 11) A. Azushima, "Lubrication in steel strip rolling in Japan", Tribology International, Vol. 20, No. 6, pp. 316~321, Dec. 1987.
  - 12) F. J. Sazama, "Production usage of high chromium work rolls", Mechanical Working and Steel Processing XII, Dolton, Illinois, pp. 23~24, Jan. 1974.
  - 13) K. Edsmar, "Experience with carbide rolls for hot rolling of rods", Iron and Steel Engineers, Vol. 52, No. 2, pp. 80~88, Apr. 1975.
  - 14) S. E. Lundberg, "A new high-temperature test rig for optimization of materials for hot-rolling rolls", J. of Materials Processing Technology, Vol. 36, pp. 273~301, 1993.
  - 15) F. H. Lin, "Modeling of thermo-mechanical behavior of work rolls in steel rolling", Ph. D dissertation, Drexel University, June 1992.
  - 16) A. A. Tseng et. al., "Roll cooling and its relationship to roll life", Metall. Trans., Vol. 20, No. 11, pp. 2305~2320, Nov. 1989.
  - 17) R. Rogberg, "Experience gained on the 5-stand cold rolling mill at SSAB with a 6-high stand using CVC technology", Metall. Plant Technol., Int., Vol. 13, No. 1, pp. 58~67, 1990.
  - 18) S. A. Tulupov, "An investigation of roll wear in profile-bending mills", STAL, Vol. 6, pp. 56~58, June 1985.
  - 19) 宮本,井上, "熱間壓延補強ロールのスポーリングに関する検討", 鐵と鋼, Vol. 73, No. 6, pp. 107, 1987.