

## 열간 압연판재 제조기술의 최신동향

이준정

(포항산업과학연구원)

### Recent Trends in Flat Hot Rolling of Steel

Joon Jeong Yi

#### Abstract

Recent trend and future prospect of flat rolling of steel has been summarized based on the earlier reports. Key technology in the plate rolling is to have ultra fine microstructure having high resistance against crack propagation during application. Heavy accelerated cooling facility and high power rolling mill will be helpful to develop the high toughness steel. Precise modeling of property prediction based on deformation and transformation imposed on microstructure of steel during processing is highly anticipated. For the hot strip rolling process, new trend is lies on the production of ultra-thin gauged hot strip to substitute cold rolled strip. For the substitution of cold rolled strip into hot rolled strip widely, high formable property of hot strip is highly required. For the formability, the ferritic rolling of extra low carbon steel under high lubricated condition is essential. Recently introduced semi-continuous thin slab and rolling mill line is very plausible to develop those kinds of products easily in the view point of facility combination. New idea to modify the existing continuous hot strip mill line to produce the ultra thin-gauged hot strip in an economic way is suggested in this report.

**Key Words** : Hot Strip Rolling, Plate Rolling, Thin-Gauged Hot Rolled Strip, TMP, Property Prediction, Ultra Fast Cooling, Ferritic Rolling, Lubricated Rolling, Thin Slab Casting & Rolling.

#### 1. 서 론

압연가공이 철강의 대량생산에 적용된 것은 20세기 초엽 이후라고 알려져 있다. 압연기술이 중요한 생산기술로 자리를 잡게 된 것은 대형 모터가 개발된 이후라 해도 과언은 아닌 데 그 역사는 50년을 조금 넘는 정도라고 할 수 있다. 국내의 경우, 철강 압연판재를 생산하기 시작 한 것은 1970년 대 초엽 포스코의 후판 압연공장과 열간압연공장이 준공된 이후이므로 그 역사는 30 여년에 불과하다. 그러나, 매우 짧은 기간의 역사지만 21세기 초엽에서 본 국내 강판압연은 생산 규모나 기술적 수준에서 이미 세계 최고 수준에 달해 있다.

20세기 후반부터 불어닥친 경제한파와 철강제품의 가격파괴현상은 철강산업에서 생산원가를 절감이 얼마나 중요한 지를 여실히 보여 주고 있다. 이러한 원가절감요구는 대량생산 체제 하에서도 고품질 소량 다품종 생산이 가능한 기술로 압연기술의 발전을 유도하고 있다. 이를 위한 기술의 발전은 제조기술의 극한 도전이라고 표현해도 좋을 만큼 고도화되고 있는 실정이다.

이 글에서는 철강압연 공정 중에서도 열간 판재압연기술에 국한하여 각 분야 별 최근의 흐름을 조망해 보고 21세기에 국내기술들이 나아가 할 방향과 과제들을 제안해 보고자 한다.

## 2. 후판 열간압연기술

### 2.1 압연형상제어

후판 열간압연에서는 Fig. 1에서와 같이 슬래브를 길이 방향으로 압연하다가 90도 회전시켜 폭 방향 압연을 하고 다시 원 위치로 회전시켜 길이 방향으로 압연을 마무리하는 특성으로 인해 압연판을 위에서 바라 본 평면형상이 직각사변형 꼴을 갖지 못하므로 압연판의 가장자리를 최종적으로 곧게 잘라내야 하므로 압연 실수율은 압연기술의 척도로 인식되어 왔다. 이와 같은 압연판재의 평면형상을 제어하는 압연법으로 여러 가지 압연기술들이 개발되어 왔다.<sup>(1-4)</sup> 이들 기술들은 주로 압연 판 내에서 압연 중 롤 간격을 변화시켜 도그본 형태의 슬래브를 만들어 최종절단량을 줄이는 노력이 주종을 이루고 있으나 최근에는 근집 엣저(edger)를 이용하여 압에서와 차별화 시켜 압연하는 평면형상제어압연기술 (Fig. 2)로<sup>(5,6)</sup> 발전되어 왔다. 통상 폭압연 기술은 부속기술이라 인식되어 크게 발전하지 못 했는데 최근에는 폭압연의 정밀도가 압연기술의 척도가 되어, 강종 별 압연하중의 예측정밀도를 높여 압연된 판재의 폭을 주문 폭에 적중시키는 기술이<sup>(6)</sup> 매우 중요한 기술이 되었다.

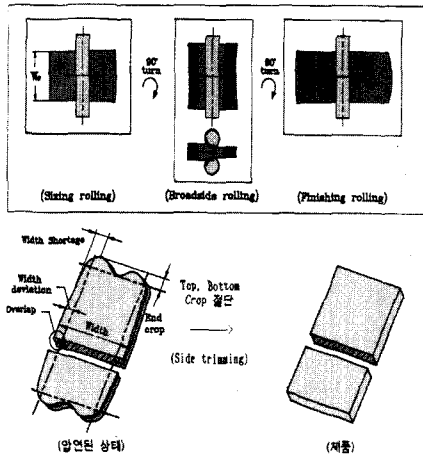


Fig. 1 Schematic process of plate rolling

후판 압연기는 롤 경에 비해 롤 길이가 길어 작업롤(work roll)의 벤더력에 의해 판형상을 제어하기 어렵다.

따라서 형상을 조정하려면 압하량을 줄여 압연하중을 낮추어 형상조정이 비교적 용이한 조건이 필요하였다. 즉 전반 패스에서 압하량을 크게 하지만 후반 패스에선 압하량을 낮추고 판형상을 조정하는 압연법이 통상 실시되어 왔다. 이럴 경우 압연패스 수가 늘어나게 되어 압연 생산성이 낮은 단점이 있다. 그러나 페어크로스(pair cross) 압연기를 채용하는 경우엔 압연롤 간의 교차각도를 증가시켜 롤 간격 변화가 가능하게 되므로 판 크라운(crown)을 압하량과는 독립적으로 변경시키기 쉬운 장점이 있어 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 압연판 형상을 고려하여 압연하중을 낮추어 마무리 압연을 실시하던 것을 마지막 패스까지 압연기의 하중능력 범위 내에서 고압하로 마무리 압연을 실시할 수 있어 총 압연 패스 수를 줄이고 생산성이 높아지는 장점이 있다.<sup>(7)</sup> 또한 대압하 압연을 실시하면 조직의 미세화도 촉진되어 강도와 인성이 향상되는 효과를 얻게 된다.

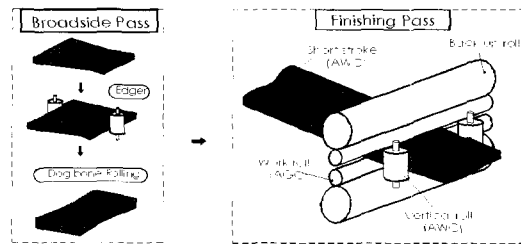


Fig. 2 Plane view pattern control and optimum width control by combined edging with AGC

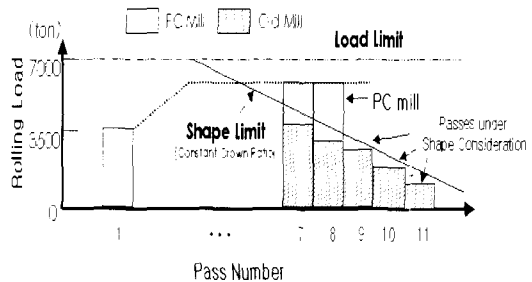


Fig. 3 Reduction of rolling pass number by the advantage of pair cross mill

### 2.2 Taper Plate 압연기술

후관을 이용하여 구조부재에서 위치 별로 저항 내력이 다르게 요구되는 경우 두께가 다른 강판을 서로 용접하도록 설계하여 구조물의 중량이 불필요하게 증가하는 것을 피하고 있다. 그러나 용접이음부가 많아지면 경비가 많이 발생하고 피로에 대한 취약부가 많아지는 단점이 생긴다. 이를 개선하는 방안으로 두께가 연속적으로 변하는 강판(tapered plate 또는 longitudinally profiled plate)이 개발되어 여러 분야의 강구조물에 사용되기 시작하였고 특히 강교량과 선박분야에서 두드러진 효과를 보고 있다.

압연방법은 초기 패스는 강압하를 하여 패스 수를 줄인 다음 경사압연패스(taper pass) 단계에 들어서면 일정한 기울기로 매 패스의 해당 압연력이 감소되도록 압하를 설정하는 방식이다. 압연판의 선단 부와 후단 부의 두께가 달라지므로 판내의 평탄도가 다르게 나타나며 평탄도를 동시에 제어하는 기술적 노력이 필요하다.<sup>(8)</sup>

### 2.3 가공열처리

후관압연에서의 가공열처리 (Thermo-mechanical Processing) 기술은 1960년대 말부터 고강도 석유수송용관용 원관의 제조에 널리 응용되기 시작하여 그 후에 개발된 가속냉각(Accelerated Cooling)이나 직접급냉(Direct Quenching) 기술과 접목되어 고기능후관의 대량제조에 없어서는 안될 중요기술로 발전하였다. 이 TMP기술로 처리하는 경우, 후관의 강도와 인성이 향상될 뿐만 아니라 용접성과 냉간 가공성이 우수하며 수소취성에 강하

Years	1970	1980	1990	2000
TMP	Controlled Rolling	Intercritical Rolling		
	Low T. Rolling	Low Temperature Reheating	Accelerated Cooling	Direct Quenching
Matrix Character	Grain Refining	(F+P) Precipitate Hardening	(F+B) Transformation Hardening	(TM, TB) Ultra-Fine Microstructure
Steel Grades	Line Pipe Steel X-52/60 X-65	X-70	X-80	X-100/120
		Anti-Sour Gas(X-60/65) Steel	Non-Tempered(600MPa)	TMCP(500MPa)
			DQ-T(600MPa)	(800) (1000)
			Low YS/TS Steel for Buildings	600MPa (DQ-T)/500MPa(TMCP)

Fig. 4 Plate steel grades developed by TMP

고 표면품질도 우수한 장점이 있어 석유수송용관 뿐만 아니라 최근에는 해양구조물, 교량, 건물, 선박, 압력용기 등 다른 용도로도 널리 사용되고 있다.

Fig. 4<sup>(9)</sup>은 후관의 가공열처리 기술발전과 함께 발전되어 온 강종의 변천을 나타낸 것이다.

같은 강종이라해도 압하스케줄을 조정하는 이외에 고압 가속냉각설비를 이용하여 다양한 강도의 제품을 제조할 수 있다. Fig. 5에서는 가속냉각능력을 증대시켜 X80 급 이상의 제품도 생산할 수 있는 있음을 설명하고 있는데, X100급 성분으로도 X120급 제품을 제조할 수 있다고 보고되고 있다<sup>(10)</sup>.

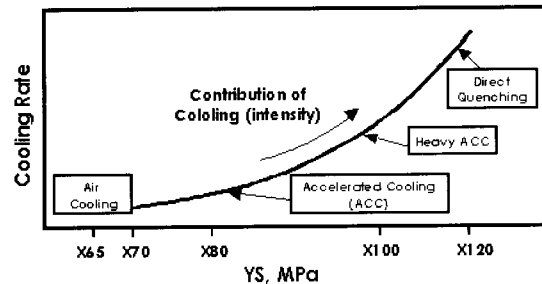


Fig. 5 Yield strength as function of cooling intensity for low carbon equivalent plate<sup>(10)</sup>

### 2.4 재질예측 모델

후관 압연재의 조직을 예측하는 모델은 크게 구분하여 슬래브 가열 시의 초기조직 모델, 열간압연 중의 오스테나이트( $\gamma$ ) 조직 변화모델, 그리고 냉각과정의 변태모델로 구분할 수 있다.<sup>(11)</sup> 한편, 프로세스모델은 압연, 냉각 과정 중에 발생하는 판두께 방향을 포함한 판내 온도변화 모델, 압연 중 각 지점에서의 변형량, 변형속도 및 변형저항식 등의 모델이 필요하다. 재질을 예측하기 위해서는 먼저 프로세스모델에서 예측된 온도변화 조건 하에서 주어진 화학성분의 강재에서 발생할 수 있는 미세조직의 변화를 예측하고, 이 결과로 얻어진 조직이 나타낼 기계적 특성을 예측하는 순서로 진행된다. 여러 가지 조직적 모델이 개발되어 왔으나 조직관찰에 의한 금속조직의 정량적 정확도가 기계적시험 치의 정확도에 비해 크게 낮다는 점에 문제가 있어 실용화되기에는 아직도 미흡한 수준에 있으나 재질변동을 최소화하기 위한 대책 수립, 신강종의 특성예측 등에는 크게 효용성이 있다.

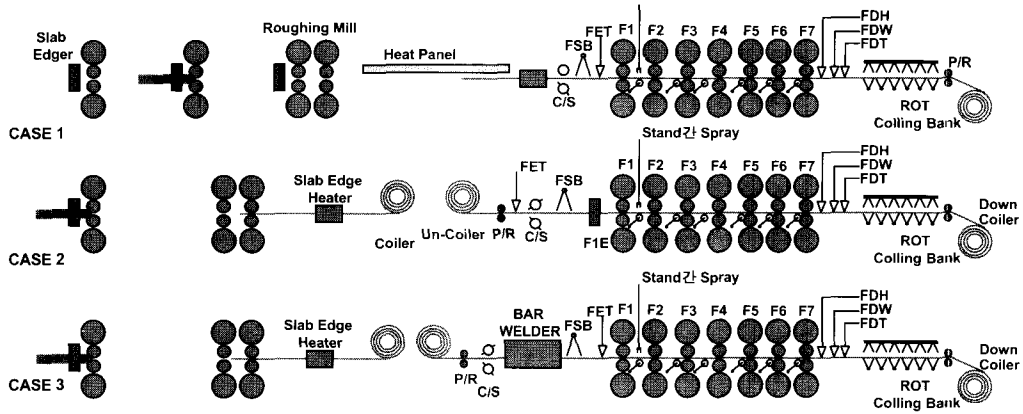


Fig. 6 Schematic representations of continuous hot strip mill lines : (Case 1) typical type, (Case 2) coil box type and (Case 3) continuous bar welder type

### 2.5 향후 전망

후판재는 내구성이 있는 구조물에 주로 응용되므로 신뢰성과 안전성이 매우 중요하게 요구된다. 최근 일본에서 개발된 표층부 초미세립강의 예를 들면 압연 중에 급냉을 하여 표층부에 페라이트 조직을 만든 후 표층부가 복열과정에서 압연을 재개하면 결정립 크기가 1~2 μm 인 초미세조직이 표층부에 얻어져서 균일 전파에 대한 저항이 매우 높은 강재가 된다.<sup>12)</sup> 이와 같이 재결정과정에서의 핵생성 위치를 극대화시키고 결정립 성장을 억제하여 초미세립강재의 가공열처리 기술의 개발이 요구된다. 이를 위해 새로운 개념의 냉각기술과 냉각과정에서 발생하는 불균일 냉각으로 인한 잔류응력 문제를 근본적으로 해결하는 노력이 필요하다.

제어압연과 제어냉각을 적용하는 데 있어 슬래브 두께나 기존 압연기 물경의 범위에서는 판두께 50 mm 이상의 판재를 가공열처리 기술을 적용하여 미세조직을 가진 강판으로 생산하기엔 한계가 있다. 따라서 완냉의 조건에서도 미세한 결정립이 얻는 방법을 합금설계, 가열조건 하에서의 결정립경, 압하스케줄, 냉각조건 등을 다각적으로 조합한 공법으로 개발할 필요가 있다.

한편, 제어압연 방식은 생산성이 낮아 대압하, 고속화로 총 압연패스 수를 줄이는 기술, 나아가서는 연속열간 압연공정처럼 압연기를 탄뎀배열화하는 방안도 새롭게 모색될 수 있다.

### 3. 박판 열간압연 기술

#### 3.1 연속열간압연 설비의 변천

종래에 박판 열간압연은 200 ~ 260mm 두께로 주조된 슬래브를 가열로에 장입하여 재가열한 후 조압연설비(Roughing Mill Train)에서 30 ~ 60 mm 두께의 쉬트-바(sheet bar)로 압연하여 마무리압연설비(Finishing Mill Train)에서 1.2-12mm 두께의 강판코일로 제조된다. 단중으로 보면 약 30~45톤 정도의 열연코일이 단속적으로 생산되는 방식이다.(Fig. 6) 이와 같이 단속적인 생산방식의 단점은 코일의 선단 부와 미단 부를 압연하는 동안에는 통판이 불안정하고 재질편차 발생 요인이 많다는 점이다.

이를 개선하고자 개발된 공정이 Fig. 6의 Case 3에 나타난 쉬트-바 용접방식에 의한 연속열간압연방식(Endless Hot Strip Mill Line)이다. 이 연속열간압연방식은 Table 1에 정리된 바와 같이 코일 전장 전폭에 걸쳐 치수 품질이 크게 향상되고 생산성을 20%정도 높이며 실수율에 치명적인 결함인 형상불량이나 판물림 등의 조업사고가 크게 줄어든 것으로 보고되고 있다.<sup>13)</sup>

용광로-전로-압연의 일관공정을 갖춘 종합제철소들만이 생산할 수 있었던 압연관재를 전기로 제강업체들이 생산 가능하게 한 설비는 바로 박스라브 직결압연설비이다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 박스라브 직결압연설비는

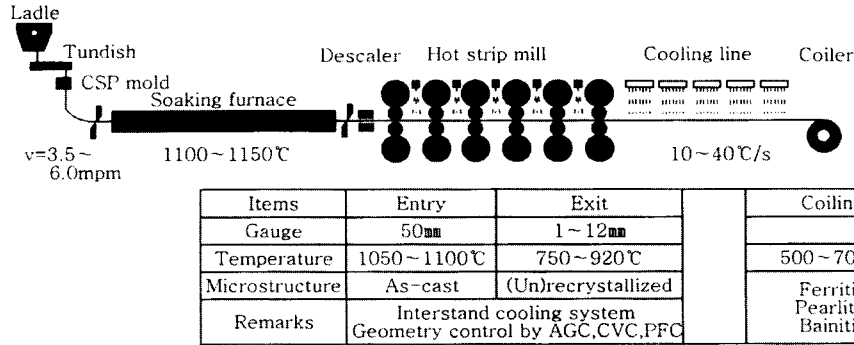


Fig. 7 Typical thin slab and hot strip mill line

기존의 열연설비와는 달리 주조설비가 압연설비와 직결되어 슬래브가 공급되도록 설계되어 있으며 슬래브 두께가 얇아 조압연설비가 거의 생략된 형태로 운용되고 있다. 생산능력이 연산 100만 톤 규모의 주조기 2기를 병렬로 연결하여 압연하여 약 200만 톤/년 규모로 건설되고 있다. 전기로 제강업체가 운영하는 미니밀 형태의 박스라브 직결열간압연설비에서는 대부분 고급 스크랩을 사용하지만 스크랩 중에 함유된 불순물들의 영향을 피할 수 없어 주로 조관용이나 경가공용 제품이 생산된다.

스크랩 대신에 불순물이 함유되지 않은 철산화물(Iron carbide)나 용광로에서 생산된 선철을 사용하고 제강 후 2차 정련을 실시하여 가공용 소재로 생산하는 경우도 있다. 박스라브 직결압연설비의 경쟁력은 균일한 품질에 있다고 할 수 있는데 특히 치수품질이 매우 우수하다.

그러나 반면에 단점은 자동차 외판재 소재와 같은 고품질의 제품을 제조하기에 부적합한 설비구성이라 할 수

있으며 특히 원가 경쟁력 면에서 스크랩 가격변동에 매우 민감한 영향을 받기 때문에 최근과 같이 시장에서 철강가격파괴가 일어나는 경우에 매우 어려운 여건에 놓일 수 있다.

박스라브 직결열간압연설비들 중에서도 최근에 건설된 설비들은 두께 1 mm이하의 초극박 열연판재를 생산할 수 있도록 설계된 것이 특징이다.<sup>(14, 15)</sup> 열간압연관의 두께가 1 mm 이하 수준까지 내려간다면 많은 양의 냉간 압연관을 열연강관으로 대체할 수 있다는 관점에서 이 새로운 설비들은 주목을 받고 있다. 냉간압연관을 대체해야 한다는 관점에서 열간 압연만으로도 성형가공성이 우수한 제품을 생산해야 할 필요성이 크게 대두되어 열간압연을 페라이트 저온역에서 고윤활조건으로 압연할 수 있는 기술의 발전을 추구하고 있다.<sup>(16)</sup> 한 가지 설비 예를 Fig. 8에 나타내었는데, 마무리 압연 이전에 스위트-바의 온도를 페라이트 온도역까지 냉각을 시켜야 되므로 마무리압연설비 앞쪽에 강냉설비를 배치하고 스위트-바 온도를 페라이트 온도역까지 낮출 수 있도록 설계하였다. 그리고 고윤활 압연을 실시하려면 압연 중에 판에 장력이 걸려 있어야 되기 때문에 스위트-바를 주조상태에서 절단하지 않고 래들 전 용량을(약 32톤) 한 개의 스위트-바(길이 약 300 m)로 제조하여 이를 연속적으로 압연하여 최종 냉각하여 권취하기 직전에 여러 개의 코일로 분할하여 권취하는 개념으로 설계된 일종의 연속 압연설비 (Semi-continuous Hot Strip Mill Line)가 등장하였다. 특히 이 설비에선 약 0.7 mm 두께의 초극박재를 제조할 수 있어 압연 후 냉각설비를 종전의 라미나(Laminar) 냉각방식이 아닌 새로운 WPC(Water Pillow

Table 1. Merits of endless hot strip mill line.

		Batch.	Endless
Quality	On-gauge ratio	96%	99.5%
	Width Margin	6 mm	3 mm
	CT Deviation	+/- 30	+/- 15 °C
Productivity		100%	120 %
Yields	Shape Rejects	100%	20 %
	Pincher Marks	100%	10 %

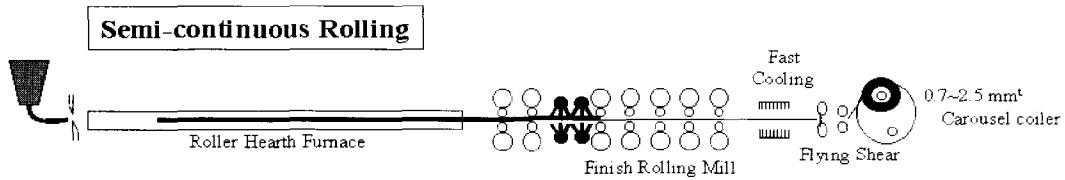


Fig. 8 A schematic representation of semi-continuous thin-slab & hot strip mill line

Cooling) 방식의<sup>(17)</sup> 초급냉설비를 배치하고 권취기도 박물을 고속으로 권취할 수 있는 캐로셀(Carousel) 형식의 권취기를 채용하고 있다.

### 3.2 초극박재 압연기술

연속열간박판압연공정에서 통상적으로 생산할 수 있는 초극박재의 두께는 설비능력으로는 1.2 mm 정도이나 실제로는 1.5 mm 정도다. 이 보다 판이 얇으면 압연 후에 판이 허공에 날리거나 과냉으로 인해 재질이 만족스럽지 못하게 된다.

기존의 열연고정에서 생산되는 열연판과 냉연판의 가격경쟁력을 비교한다면 Fig. 9과 같이 어떤 두께이하에서는 열연판 보다도 오히려 냉간압연과 소둔공정이 추가되는 냉연판이 보다 가격경쟁력이 있을 수 있는데 초극박열연판의 경우에는 그 가격분기점이 제조공법이나 품질의 수준에 따라서 보다 낮은 두께에서 형성될 수 있다. 현재 보고된 바에 의하면 최근에 신규로 설계된 박스라브직결압연설비는 대부분 1 mm 두께의 제품을 생산할 수 있고 멕시코 Hylsa의 설비는 0.91 mm 까지 생산하고 있다.<sup>(18)</sup> 일본 카와사키 Chiba 3열연공장에 설치된 연연속압연설비에서는 0.8 mm까지 생산할 수 있다고 보고되고 있으며<sup>(13)</sup> 네덜란드 코러스 IJMuiden공장에 설치된 박스라브직결압연설비는 0.7 mm<sup>(16)</sup>, 독일 티센스틸 부르크하우센공장의 박스라브직결압연설비는<sup>(19)</sup> 0.8 mm를 최소압연두께로 설계하였다.

초극박열연강판의 주요 용도로서 쉽게 생각할 수 있는 것은 표면품질이 크게 문제되지 않는 구조재, 조판재, 자동차의 내판재 등이다.<sup>(20)</sup> 그러나 앞서서도 설명했듯이 초극박열연재의 궁극적인 목표는 냉연가공용 제품을 대체할 수 있는 가공용 열연제품이다. 이를 위해서 설비적으로 반드시 갖춰야 할 조건으로는 페라이트역 압연을 두께 감소율로 60%이상 실시 가능한 설비, 마찰계수가 0.15 수준이하의 고윤활압연이 가능하도록 장력압연이

가능한 설비라고 할수 있다. 이러한 관점에서 보면 Fig 8에 예를 든 바와 같은 형식의 박스라브직결 열간압연설비가 가장 효율적인 설비배치라고 생각 된다.

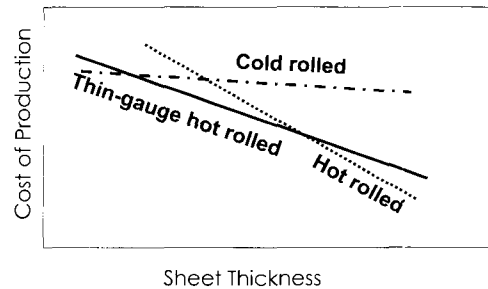


Fig. 9 Cost performance of thin gauged hot strip compared to cold rolled strip

이밖에도 기존 압연설비를 이용하여 초극박재를 생산하는 방식으로 제안할 수 있는 방식으로 Fig. 10에 나타난 방법들이 가능하다. 이 방법들은 기존의 연속열간 압연설비를 개조하여 고압하능력을 갖춘 별도의 가역식 열간 압연설비를 기존설비와 병렬로 설치하는 방법 (Off line Thin Gauge Hot Strip Mill)과 라미나 냉각대에 기존 마무리압연설비와 일정간격만큼 떨어진 위치에 고압하능력을 갖춘 초극박전용압연설비 (In-Line Thin Gauge Hot Strip Mill)를 설치한 방법으로, 기존설비에서는 1.5 mm두께까지만 압연하고 초극박 압연설비 입구까지 이송되는 동안에 페라이트온도역까지 스트립을 냉각시켜 페라이트역에서 장력을 부가한 상태로 고윤활압연을 실시하는 방법들이다.<sup>(21)</sup>

### 3.3 치수 및 형상제어기술

연속열간박판압연공정에서 생산제약을 받는 가장 큰

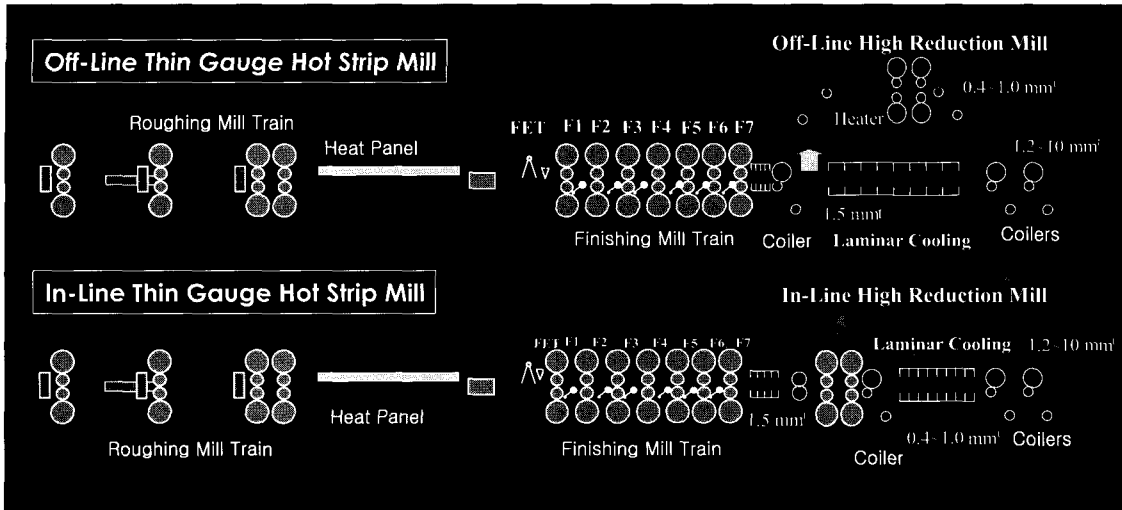


Fig. 10 New ways to produce thin gauge hot strip using modified conventional continuous hot strip mill line: Off-line thin gauge hot strip mill and in-line thin gauge hot strip mill line

요소는 압연기 작업률 마모에 의한 물고체 작업이다. 고온에 고압조건으로 가공이 진행되기 때문에 물의 열팽창량과 물 마모량, 그리고 압하력에 의한 물변형 등이 계속해서 변하기 때문에 매 코일 압연할 때마다 물갭의 프로파일을 예측할 수 있어야만 한다. 또 한편으로는 고객이 원하는 제품의 종류와 치수는 매우 다양하기 때문에 압연하는 조건들이 매번 변할 수밖에 없다. 이렇듯 다양한 제품들을 주어진 물의 마모형태로 목표로 하는 판의 폭방향 두께프로파일 즉 크라운을 얻기 위해서는 고도의 물프로파일 예측기술과 함께 물의 프로파일을 가변시킬 수 있는 형상제어압연기가 필요하게 된다. 그 대

표적인 압연기들이 CVC압연기, pair cross 압연기 등이다. 이들 압연기들의 롤크라운 제어능력을 이용하여 주어진 판재의 판크라운을 목표치에 맞게 압연하기 위하여 정확한 롤크라운예측모델과 판크라운예측모델을 개발하여 컴퓨터제어를 실시하는 것이 요즈음 방식이다. 한편 요즈음은 시장에서 요구하는 두께 정밀도는 개략적으로 규격 허용치의 1/4구간 이내에 모두 포함되는 품질이라고 할 수 있다.(Fig. 11)<sup>(22)</sup> 이를 달성하기 위한 방안으로 최근에는 유압 압하는 물론이고 압연기의 변형특성을 정확하게 반영한 게이지미터(gaugemeter)식을 활용하여 아래와 같은 게이지미터 두께를 일정하게 제어하는 절대치 AGC 등이 적용되는 추세다.

게이지미터 두께  $h_{GM}$ 는,

$$h_{GM} = S + \alpha \cdot M_e - \Delta S_{OF} - \Delta S_{RT} - \Delta S_{RE} - \Delta S_{GC}$$

여기서, S : 물 개도량

$M_e$  : 압연기 연신량

$\alpha$  : 크기 인자

$\Delta S_{OF}$  : 유막두께보상량

$\Delta S_{RT}$  : 물 열팽창 보상량

$\Delta S_{RE}$  : 물 편심보상량

$\Delta S_{GC}$  : 게이지미터 상수

AGC동작에 의해 발생하는 압연하중변동에 기인하는 판 형상이나 크라운의 변화는 작업률 밴더와 압하조절에

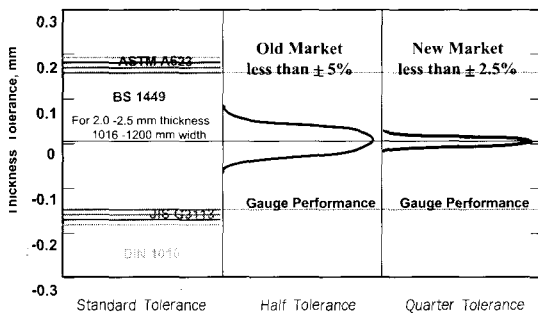


Fig. 11 Recent trend in thickness tolerance

의해 제어하는 데, 각 제어인자들 간의 상호간섭을 배제하는 비간섭 제어기술도 매우 중요한 기술로 인식된다. 또한 인접한 스탠드간에 속도 불안정으로 인해 스탠드간에 급격한 장력변동이 발생한다거나 하면 두께제어의 외란으로 작용되므로 체적일정(mass flow constant) 보상 제어도 실시하고 있다.

판형상제어는 판크라운 제어와 밀접한 관계가 있지만 판크라운을 제어한 상태에서도 여러 가지 다른 압연인자들의 변동 요인에 의해 압연판 길이 방향으로 형상이 계속해서 변하고 있는 데 열간에서 판형상의 변동을 직접 측정하여 벤더를 이용하여 최종적으로 조정하는 기술이<sup>(23)</sup>(Fig. 12) 특히 압연조건의 변화에 민감하게 반응하는 초극박 열간압연판 제조와 관련해서 최근 주목을 받고

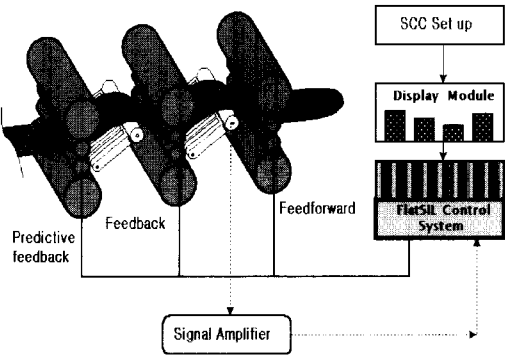


Fig. 12 Concept of dynamic shape control in the finishing mill stands using FlatSIL<sup>®</sup>

있다.

열간압연에서의 커다란 과제는 판폭의 정밀제어기술인데 연속주조를 통해 공급되는 열연용 슬래브는 판폭 변경이 어려운 반면에 고객이 원하는 압연폭은 매우 세분되어 있기 때문에 압연 중에 판폭을 변화시키는 판폭압연기술이 중요하게 요구된다. 최근에는 판폭 300mm 정도까지 유압 사이징프레스(Sizing Press)나 대폭압연설비(Edger)를 이용하여 변경할 수 있게 되었는데 폭변경 효율 측면에서 사이징프레스가 유리하며 강종에 따라 프레스 앤빌(Anvil)을 가변시키는 장치까지 응용되고 있다.<sup>(24)</sup> 판폭을 정밀하게 제어하는 것은 제품의 실수율과도 직결되기 때문에 최근에는 마무리 압연기의 루퍼장력을 이용한 판폭제어기술도 적용되며 제품 폭 대비 여유폭을 6mm 이내로 엄밀하게 관리하는 수준까지 도달 되

어 있다.<sup>(25)</sup>

### 3.4 조직 및 재질예측기술

연속열간박판압연공정에서의 조직과 재질을 예측하는 연구는 오랫동안 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. 강재의 성분과 제조조건들을 기초로 제품의 기계적특성들을 예측한다는 것은 여러 가지 이점을 가져다 준다. 첫째로 재질시험편 채취가 필요 없게 되고 제품의 납기가 단축되는 효과가 예상된다. 또 합금첨가량을 줄이고 공정변수들을 조절하여 품질을 향상시킬 수도 있다. 그리고 조직예측모델을 품질보증과 새로운 압연공정을 설계한다는 관점에서 조업과 설계에 모두 응용할 수 있다.

강재의 성분과 제조조건들을 기초로 일반적으로 기계적특성의 예측은 조직변화예측과 조직강화기구에 따른 강도의 예측을 조합하여 실시하고 있다. 즉, 연속열간압연공정에서 발생하는 조직적 변화는 대략 Fig. 13와 같다. 이와 같은 조직변화를 모델화하여 열간가공조직예측모델, 고용석출예측모델, 변태예측모델 등으로 구성된 다음 조직과 재질과의 상관성을 예측하는 모델을 이용하여 재질을 예측한다.

재질예측모델은 변태예측모델에서 구한 각 상의 미세조직 분률과 각 변태온도에서 얻어진 조직에서 구한 경도의 곱을 가중평균하여 재료의 평균경도를 구하고 경도와 강도의 상관관계를 이용하여 재료의 강도를 구하는 것이 보통이다. 재질예측모델의 정도는 탄소강의 경우 대략 +20 MPa 이내로 보고되고 있다.<sup>(26)</sup>

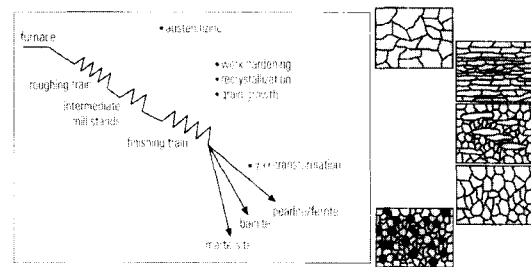


Fig. 13 Microstructural processes taking place when low-carbon manganese steels are hot rolled

여러 가지로 형태로 개발된 조직 재질예측 모델들의 기본구성은 대략 비슷하지만 실 생산에서 얻어진 제품의 측정치와 대비하여 최종적으로 구성된 수식들은 각 철강회사 별로, 설비 특성별로 각기 다른 특성을 가질 수밖



에 없다. 심지어는 동일공장에서 동일 제품을 생산하는 경우라도 계절에 따라서도 재질이 달라질 수 있다. 이러한 변동요인들을 제거하는 수단으로 학습모델들을 도입하는 데 최근에는 신경망모델을 도입하여 복잡한 상관인자들 간의 관계를 스스로 분석하고 계수를 조정하는 기법을 활용하여 상당히 효과를 보고 있다.(Fig. 14)<sup>(27)</sup>

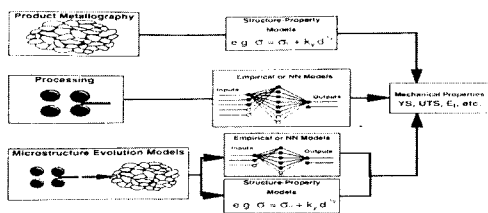


Fig. 14 A hybrid model combined both of physical model and artificial neural network model

### 3.5 페라이트역 고윤활압연기술

열간압연과 냉간압연이 크게 다른 점은 압연온도와 함께 압연 시 강판과 볼표면과의 마찰계수라 할 수 있다. 냉간압연에서는 통상 다량의 압연유를 사용하여 마찰계수가 0.1이하로 극히 낮지만 열간압연의 경우는 마찰계수가 0.2 ~ 0.3 정도로 높다. 종래의 공정에서 열간압연을 오스테나이트 온도구간에서 실시하는 경우 재료의 특성에 미치는 마찰계수의 영향은 매우 적다. 그러나 페라이트 온도역에서 마찰계수가 압연조직에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 관찰되고 있다.<sup>(28)</sup> 무윤활압연을 하는 경우엔 압연재 표층부에 과도한 전단변형을 받게되는 반면에 고윤활압연의 경우에는 두께방향으로 비교적 고르게 변형을 받는 것으로 보고되고 있다.

열연판의 랭크포드치(Lankford value) r값에 미치는 압연온도와 윤활의 영향은 Fig. 15에 나타난 바와 같다. 윤활을 하지 않은 경우엔 r값이 1.0 미만으로 낮지만 700 °C이하의 저온에서 열간압연을 하면 r값이 얻어지는 반면에 무윤활압연의 경우엔 500 °C까지 압연온도를 낮추어도 1.2정도에 머무른다.<sup>(29)</sup>

고가광용 열연강판을 제조하기 위한 열간압연조건은 마무리압연시에 윤활압연을하여 표층부에 형성되기 쉬운 전단변형력을 줄이고 조압연을 Ar3변태 온도 직상에서 실시하여 마무리압연전의 결정립크기를 미세하게 하며 마무리압연을 페라이트온도역에서 냉간압연과 같은양만

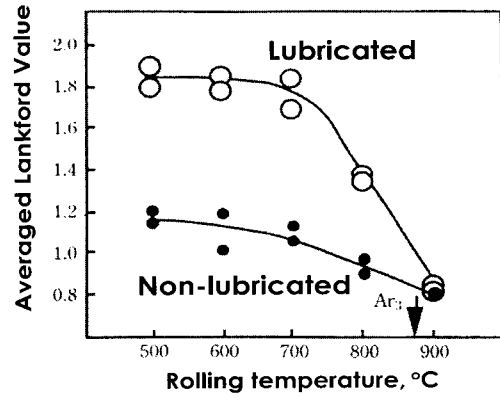


Fig. 15 Effect of finishing temperature and lubrication on drawability of hot strip. Chemistry : 0.002C-0.007Ti-0.015Nb Finish Rolling 700 °C, Reduction 65% Annealing 750 °C5hr

큼의 가공변형량을 주도록 하는 점이 중요하다.

### 3.6 초고속냉각(Ultrafast Cooling) 기술<sup>(30)</sup>

열연제품은 냉각에 의해 다양하게 재질을 변화시킬 수 있다는 점에서 가능성이 많은 공정이다. 주로 압연 후 냉각공정에 채용하는 냉각방식을 라미나 냉각 방식이나 스프레이 냉각방식을 보편적으로 채용하고 있다. 그러나 최근 WPC(Water Pillow Cooling)법을 응용한 초고속냉각방법이 실 조업에 채용되면서 주목을 받기 시작하였다. 이 방법에서 초대 냉각수량밀도는 약 65 l/m<sup>2</sup>·sec, 냉각최대능력은 5.0 MW/m<sup>2</sup>로 라미나냉각보다 월등하다.

예를 들면 4 mm 두께의 열연판을 300 °C/sec의 냉각속도로 냉각을 하여 냉각대의 길이가 7-12 m이고 냉각대에 소요되는 총 수량을 환산하면 1000 m<sup>3</sup>/h/m 로 압연기 후단이나 권취기 전단에 설치하여 강력한 냉각능력을 구사할 수 있는 설비로 알려지고 있다. 특히 이 초고속냉각설비를 기존의 라미나냉각설비와 조합하는 경우에 기존의 성분-강도관계를 초월하는 다양한 강종을 단순한 성분으로부터 제조할 수 있는 가능성이 높다고 보고되고 있다.

### 3.7 고속도공구강(High Speed Steel) 롤의 적용

열간박판압연용 설비에 고속도공구강 롤을 채용하면서 롤 내마모특성이 기존의 고크롬 롤에 비해 크게 향상되

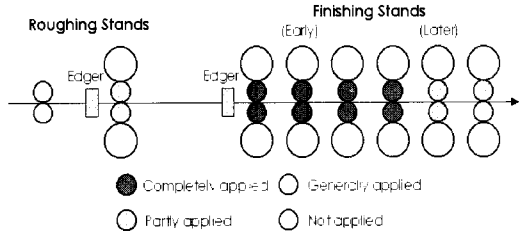


Fig. 16 Recent trend of high speed steel roll usage in the hot strip mill line

어 열연 스케줄 완화에 크게 기여하였다. 다만, 고속도공구강은 탄소물의 강도가 기지조직의 강도보다 월등하여 마모가 되면 탄화물들이 돌출 되어 압연 마찰계수가 높아 전단에서 압연하중이 높아지는 단점이 있고, 후단부에서는 코일접힘 사고 등이 발생하는 경우에 풀이 균열되어 파손되는 사고가 발생하기 쉬운 점이 지적된다. 이에 대한 대책으로 기지조직의 강도를 강화시킨 내 마찰계수형 고속도공구강롤이 개발되고 내 균열특성이 향상된 풀이 개발되어 활용되고 있다. 최근에는 전 세계적으로 마무리압연전단은 물론이고 후단에도 채용하는 사례가 급격히 증가되고 있다(Fig. 16).<sup>(11)</sup>

### 3.8 향후 전망

열간 박관압연설비의 발전은 초극박전용박스라브직결 압연설비의 등장으로 새로운 국면을 맞이하고 있다고 해도 과언이 아니다. 최근에 설치된 이들 설비들은 전로에서 제강된 고품위의 용강을 사용하여 주조압연하여 자동차용 고가공성강관이나 극박 용기용 강관을 공급할 준비를 하고 있다. 페라이트역 고윤활압연기술은 실험실적으로는 이미 완성된 기술이기 때문에 생산기술 측면에서도 머지 않아 실현될 것으로 판단된다. 이런 관점에서 새 질예측모델들이 주로 오스테나이트역 압연을 대상으로 발전해 왔는데 앞으로는 페라이트역 압연을 대상으로 한 모델의 발전이 기대된다. 이러한 추세는 열연강관의 상당량이 냉연강관으로 대체될 수 있는 기술적 환경을 만들 것이다. 특히 초고속냉각설비의 등장은 지금까지의 라미나 냉각에 의존하여 생산되는 열연강관의 강도-성분 관계를 새로운 형태로 발전시킬 것이다. 여러 가지 형태로 개발되어 온 조직 및 재질예측 모델들은 이러한 새로운 강제 개발에 커다란 역할을 할 수 있을 것이다. 이에 대비한 종전의 연속열간압연설비들은 초극

박생산이 가능한 설비로 합리화를 추진하고 초고속냉각 설비를 채용한 신제품개발 노력이 크게 요구된다고 할 수 있다.

압연치수의 정밀도를 높이기 위해 압연조업변수들의 설정(set-up)모델들을 기존의 단순학습방식을 벗어나 신경망이론이나 퍼지이론을 융합한 자율학습모델 방식으로 치환하는 노력이 확산될 것이며<sup>(12)</sup> 최적의 설정기술과 함께 동적제어기술이 조합되어 컴퓨터에 의한 완전자동화 운전이 일반화 될 것이다.

## 4. 결 론

철강제조기술의 핵심기술인 열연판재 제조기술의 최신 동향을 요약하여 정리하였다. 후관압연기술의 향후 추세는 균열진과 저항능력이 매우 큰 초세립 강재의 개발이 요구되며 이를 위한 설비개선과 재질제어기술이 지속적으로 개발될 것이다. 예를 들면 용접성을 좋은 저탄강을 기본으로 할 때 후물을 균일하게 초고속으로 균일하게 냉각할 수 있는 설비기술의 개발이나 제어압연의 생산성 저하를 극복하기 위한 탄담압연의 등장도 기대할 수 있다. 박관압연기술의 추세는 냉연 제품을 대체할 수 있는 초극박 고가공용 제품의 개발을 위한 설비개조 및 재질제어기술이 추구될 것이다. 특히 초극박재 생산을 위해 설계된 박스라브직결압연 설비에 대응하여 기존의 연속열간압연설비에서도 초극박재를 경제적으로 제조할 수 있는 새로운 설비구상이 필요한 시점이다.

## 참 고 문 헌

- (1) Yanazawa, T, et. al., 1984, "Development of New Plan View Pattern Control System in Plate Rolling," Kawasaki Steel Corp. Publication, April.
- (2) Haga, Y, et. al., 1983, "Development of New Plan View Control Technique in Plate Rolling (NKK-DBR)", Nippon Kokan Technical Report, No. 39, pp. 21~30.
- (3) Wakatsuki K, et. al., 1987, "Development of Plate Rolling Technology at NSC Oita Works," Proceedings of the 4th International Steel Rolling Confer

- ence: The Science and Technology of Flat Rolling, Vol. 1 Dauville, France, June 1-3, pp. C3.1~C3.2.
- (4) Chun, M. and Yi, J. J., 2000, "Development of High-Accuracy Plan View Pattern Control in Plate Rolling", The 2nd European Rolling Conf. Rolling 2000. Västerås, Sweden, May 23-26.
- (5) Furukawa, H. et. al, 1998, "Optimal Plan View Pattern Control with Hydraulic Edger in Plate Rolling", Proc. of the 7th Int. Steel Rolling Conf., Makuhari, Japan, Nov. 9-11, pp. 583~588.
- (6) Chun, M. S., et. al., 2001, "Improvement of Width Control Using Edger Roll Force in Plate Mill", Proc. of the 4th Rolling Conf., Cheju, Korea, KSTP & KIMM, June 7-9, pp. 329~335(Korean).
- (7) 西岡 潔 等, 1994, "Precise and Efficient Plate Rolling Technology on Pair Cross Mill", Proceeding of Memorial Symposium of 100th Rolling Theory Committee, Development and Prospect of Theory and Technology of Sheet Rolling, pp. 69~78.
- (8) Lee, J. H. et. al., 2000, "Development of Manufacturing Technologies of Tapered Plate", Proc. of the 4th Rolling Symposium, ed. Hwang, S. M. and Yi, J. J., Cheju, Korea, June, pp. 287~296.
- (9) Ouchi, C., 1999, "Progress of TMP and Property Prediction Modeling in Plate Rolling", Journal of the JSTP, vol. 40, no. 467, pp. 1135~1140.
- (10) Schütz et. al., 2001, "Extended property combinations in TMCP steels", Ironmaking and Steelmaking, vol. 28, no. 2, pp. 180~184.
- (11) Ouchi, C., 1994, "Numerical Prediction of Deformation Processes and Behaviour of Real Materials", Proc. RISO Int. Symp. on Material Science, ed. by S. I. Andersen and J. B. Bilde-Sorensen, RISO National Lab., pp. 87~98.
- (12) 野見山裕治 et. al., 1994, CAMP-ISIJ, no.6, p. 1834.
- (13) Yanagishima, F., 1998, "Development of Endless Rolling Technology for the Hot Strip Mill", Proc. of the 7th Int. Steel Rolling Conf., Chiba, Japan ISIJ, pp. 717~726.
- (14) Minami, K. et. al., 1998, "Hot Rolling of Thin Gauge Strip at Trico Steel", Proc. of the 7th Int. Steel Rolling Conf., Chiba, Japan ISIJ, pp. 739~744.
- (15) Batis, M. et. al., "New Development in Equipment Design for Ultra Thin Hot Rolled Strip", Presented at the ISS Advanced Technology Symposium on 'Hot Rolling of Thin Gauge Sheet Steel', April 30-May 2, 2000, Toronto, Canada.
- (16) Smith, T., 2000, "Corus opens IJmuiden thin slab plant", Steel Times, vol 228, no. 5 May, pp.186 ; van Es, M. A. H., 2001, "Direct Sheet Plant of Corus, IJmuiden", Presented at the Cleveland Institution of Engineers, Redcar, England, 2 April; Comellisen, M., 2000, Private Communication, Corus.
- (17) Simon, P. et.al., 1966, Rev. Métall., Cah. Inf. Tech., pp. 409~415.
- (18) Eckelsbach, K. et. al., "Innovative Technologies of Thin Gauge Hot Rolled Sheet", Presented at the ISS Advanced Technology Symposium on 'Hot Rolling of Thin Gauge Sheet Steel', April 30-May 2, 2000, Toronto, Canada.
- (19) Hendricks, C. et. al., 1999, "The Casting Rolling Plant of Thyssen Krupp Stahl AG", Proc. of Int. Conf. on New Developments in Metallurgical Process Technology (METEC Congress 99), Düsseldorf, June, VHEh, pp. 286~294.
- (20) Perry, A. C., "An Overview of Hot Rolling of Thin Gauge Sheet Steel", Presented at the ISS Special Symposium on 'Hot Rolling of Thin Gauge Sheet Steel', April 30-May 2, 2000, Toronto, Canada.
- (21) Yi, J.J., 1999, "초극박 열연강판 생산 겸용 연속열간 압연장치 및 이를 이용한 초극박 열연강판의 제조방법", Patent pending, Korea.
- (22) Shaw, D.A., "New Concepts in the Specification of Strip Production Guarantee Requirements", Proc. AISE 1997 Annual Convention, September 29-30, Cleveland, Ohio, vol. 1, pp.489-493.

- (23) Yi, J.J. and Hong, W. K., 2000, "Flatness Control Using a Contact Type of Shapemeter for Continuous Hot Strip Rolling", *Steel Times International*, Nov. 28-33.
- (24) Chun, M.S., 2001. "Sizing Press 적정운용기술개발", internal report, RIST.
- (25) Imanari, H. et. al., "Application of ILQ Control Theory to Steel Rolling Processes", *Proc. of the 7th Int. Steel Rolling Conf., Chiba, Japan ISIJ*, pp. 36~41.
- (26) Senuma, T. and Suehiro, M., 1999, "熱延薄板の材質・組織制御の現状", *J. of the JSTP*, vol. 40, no. 467, pp. 1146~1152.
- (27) Trowsdale, A. J. et. al., 2001, "MetModel: microstructural evolution model for hot rolling and prediction of final product properties", *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 28, no. 2, pp. 170~174.
- (28) 松岡才一 等, 1997, *鐵と鋼*, vol. 83, no. 2 pp. 127~132.
- (29) Kami, C. et. al., 1999, "熱間壓延技術適用による超高値冷延鋼板の開発", *J. of the JSTP*, vol. 40, no. 467, pp. 1153~1157.
- (30) Herman, J. C., 2001, "Impact of new rolling and cooling technologies on thermomechanically processed steels", *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 28, no. 2, pp. 159~163.
- (31) Hashimoto, M and Shibao, S., "Recent technical Trends of Hot Strip Mill Rolls at Nippon Steel Corporation", 1996, *Conf. Proc. of 'Rolls 2000'*, March, Birmingham, IOM, pp. 76~89.
- (32) Simon, W., 2001, "Advanced Automation Concepts for Steel-works and Rolling Mills" *MPT International*, no. 4, pp. 56~62.