

## 열간압연용 Work Roll의 특성 및 기술동향(Ⅱ) -열간압연용 Work Roll 제조의 기술동향-

최진원\*, 김동규\*\*, 장삼규\*, 정병일\*\*\*, 한희승\*\*\*

### Characteristics and Development of Work Rolls for Hot Strip Mill(Ⅱ)

J. W. Choi\*, D. G. Kim\*\*, S. K. Chang\*, P. I. Jung\*\*\* and H. S. Han\*\*\*

#### 1. 서 론

최근 열연강판의 두께정도 향상, 고압하압연에 의한 생산성 향상 및 energy saving 등에 대한 요구가 증가됨에 따라 종래의 4-Hi 압연기는 6-Hi 압연기로 개발, 대체되고 있다. 이러한 6-Hi 압연기에서 열연강판의 형상을 제어하기 위해서는 중간 roll을 판폭방향으로 이동시키면서 bending력을 가해야 하며 이러한 압연조건에 적용가능한 내마모성, 내사고성, 내표면거칠음성 및 높은 축부굽힘강도를 동시에 가지는 복합주조 roll의 개발이 시급한 실정이다.

본 내용의 전반에서는 열간압연용 work roll의 제조방법 및 재질개발에 대한 최근의 기술동향을 기술하고 후반에는 열연사상압연용 work roll의 절손특성 및 표면손상에 관한 mechanism을 상술하고자 한다.

#### 2. Hi-Cr Roll

종래에 일반적으로 사용되어온 Adamite roll을 대체하여 고경도, 내면압성이 우수한 Hi-Cr roll이 널리 적용되고 있다<sup>1~3)</sup>. Hi-Cr roll은 내마모성이 우수하며 종래의 최대문제점이던 표면내거칠음성을 해결하였다.

##### 2.1 Hi-Cr 주철 Roll

Hi-Cr roll의 최대특징은  $M_7C_3$ 형의 단단한 Cr

탄화물과 소입성이 양호한 기기조직을 가지므로 용이하게 경도를 향상시킬 수 있으며 내마모성, 내면압성이 우수한 것이다<sup>4~5)</sup>. 현재 가장 널리 이용되고 있는 roll은 열간압연공정의 사상압연 전단용으로서 shell층의 화학성분은 표 2에 나타내었으며 Shore 경도는 75 정도이다. Hi-Cr roll은 원심주조법에 의해 Shell층을 먼저 주입한 후에 구상흑연주철 등의 인성이 우수한 core재를 주입하여 복합roll로 제조된다.

##### 2.2 Hi-Cr Steel Roll

Hi-Cr 주철 roll을 조압연기용으로 사용하며 대압하압연조건에서의 내slip성 및 고온부하에 의한 내crack성, 내표면거칠음성 등이 열화된다. 이를 개선하기 위해 중탄소형 steel roll이 개발되었다. Hi-Cr steel roll은 Hi-Cr 주철 roll의 특징인  $M_7C_3$ 형 탄화물과 소입성이 우수한 기기조직을 유지하면서 탄화물의 양을 감소시켜 상기 결점을 개선시키며 C : 1.0~1.5%, Cr : 10~15% 및 Ni, Mo, V 등의 합금원소가 조합되어 제조된다.

##### 2.3 소착 및 흑연정축 Hi-Cr Roll

###### 2.3.1 소 착

압연재와 접하는 roll의 shell재는 내마모성의 향상을 위해 탄화물을 다량 함유한 고 Cr주철<sup>6~7)</sup>이나 고합금 Grain주철 등이 사용되고 있다. 그러나 압연하중이 높고, 변형저항이 큰 재료나 내

\* 산업과학기술연구소 박판연구실

\*\* 동아대학교 금속공학과

\*\*\*강원산업주식회사

산화성이 높은 재료의 열간 압연시에는 roll 표면의 마멸은 물론, 표면의 거칠음, 특히 소착이 발생하여 압연제품의 품질을 현저히 저하시킬 뿐만 아니라 roll의 조기교체로 인한 roll 단위의 저하 등 압연효율의 저하를 수반하게 된다. 이 표면거칠음은 압연재가 roll 표면에 소착하는 것이 주원인이며, 소착이 진전되어 일정한 크기로 되면 roll 표면과 함께 박리하여 roll 표면이 손상된다. 또한 소착물 자체의 존재나 압연도중 소착물이 단독으로 박리한 것에 의해서도 제품품질은 현저히 손상된다.

열간압연시 피가공재와 roll과의 접촉상태는 고온하에 있으며 산화피막을 가지고 있기 때문에 냉간압연시의 윤활유 등이 존재하는 혼합윤활 상태의 마찰형태와 다르다.

즉 열간압연시의 소착은 마찰의 초기단계에서 발생하며 한번 소착이 발생하면 roll의 표면은 이착된 압연재로 덮히게 된다. 또한, 소착의 발생은 roll과 압연재의 속도차의 비율인 마찰률이 클수록, 양자간의 접촉면압이 높을수록 증가하는 경향을 나타낸다<sup>8)</sup>.

### 2.3.2 흑연정출 Hi-Cr주철 Roll

사상압연기 전단의 work roll로서 주로 사용되고 있는 고 Cr주철은 고경도의 Cr 탄화물( $Cr_7C_3$ )을 다량으로 함유하고 있기 때문에 마멸성은 우수하나 열전도성이 나쁘기 때문에 소착이 발생하기 쉽다. 그러나 고합금 Grain주철은 소량의 정출흑연을 함유하며 열전도성, 윤활성이 우수하기 때문에 소착은 경감되지만 조직중에 형성되는 탄화물이 cementite이기 때문에 고 Cr주철보다 내마멸성이 적다<sup>6)</sup>. Kato 등<sup>8)</sup>은 열간에서의 마찰 조건을 모사가능한 열간마모시험기를 사용하여 roll 재료로 널리 사용되는 Adamite, Grain, 고 Cr주철의 소착성을 평가하였으며, 그 결과 고 Cr주철의 경우가 소착이 가장 심하였고, Grain roll의 경우 가장 소착이 적은 것으로 보고하였다. 이와 같이 내마모성의 측면에서는 고경도 탄화물을 함유한 고 Cr주철이 우수하지만 내소착성의 면에서는 흑연이 정출된 재료가 roll의 shell층 재료로 유리하다<sup>9~10)</sup>.

일반적으로 조직중에 존재하는 정출흑연의 마찰경감효과와 내소착성 향상에 미치는 영향은 다음과 같이 설명할 수 있다. 조직중에 흑연을 함

유한 재료는 일반적으로 열전도율이 높으며, 흑연이 응력집중원으로 변형을 흡수할 수 있기 때문에 응력완화효과를 제공할 뿐 아니라 탄성계수를 저하시켜 발생응력을 적게 하는 등의 특성을 가지고 있기 때문에 열간균열에 대한 저항이 높다<sup>11)</sup>. 또한 흑연은 그 자체가 고체윤활제로서 작용하기 때문에 정출흑연이 접촉표면에 노출하면 마찰을 경감시켜 내마모성 향상에 기여한다<sup>12~13)</sup>.

한편, 흑연형상에 따른 내소착성을 비교하면 기지가 동일한 경우, 정출흑연의 형태가 편상인 경우가 가장 소착량이 적으며, C/V(vermicular) 흑연, 구상흑연의 순으로 소착량은 증가한다<sup>14)</sup>. 그리고 동일 흑연형태에서는 pearlite량이 적을수록 내소착성은 증가한다. Uchida 등<sup>14)</sup>은 소착이 일어난 roll 표면의 현미경조직을 관찰하여 흑연이 존재하는 부분에서는 소착물이 존재하지 않음을 보고하고 있다. 이는 흑연의 접착성이 나쁘기 때문에 압연재의 소착이 어렵고 흑연 위를 압연재가 피복하여도 박리하기 쉽기 때문인 것으로 사료된다. 또한 흑연형태에 따른 내소착성의 차이는 동일 흑연면적률에서도 흑연의 형태에 따라 정출흑연의 분포가 다르기 때문이다. 즉, 정출흑연의 형태가 편상인 경우에는 흑연의 기하학적 현상인 roll과 압연재의 접촉면을 채우기 용이한 반면, 구상의 경우에는 한 개의 구상흑연의 면적만 클 뿐, 접촉면 전체를 채우기 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

최근 Kubota<sup>15~16)</sup>와 Sumitomo<sup>17)</sup>에서는 전술한 정출흑연을 가진 고 Cr주철의 개발과 실용화를 위해 많은 연구를 하고 있으며, 내마모성과 내소착성을 함께 구비한 열간압연 roll이 기존의 고 Cr roll을 빠른 기간내에 대체할 것으로 예상된다. Kubota에서 개발된 흑연정출 고 Cr주철 roll의 화학조성은 C 2.4~3.4, Si 2.0~3.4, Mn 0.5~1.5, P 0.1이하, S 0.08 이하, Ni 4.5~10, Cr 5~10, Mo 0.4~1.5%<sup>15)</sup>로서 기존 roll의 화학조성과는 차이가 있으며 특히 C, Si, Ni, Cr 조성의 차이는 현저하다. 이 재료는 외각재인 고 Cr주철중에 흑연을 정출시킴으로써 전술한 고 Cr주철의 단점을 개선하고 있다. 즉, 고 Cr주철은 전술한 바와 같이 열전도성이 나쁨에 따라 압연재와 접촉하는 roll 표면의 온도상승이 크고, roll 표면과 내부의 온도차가 발생함에 따라 내표면거

침성, 내마모성, 내crack성 그리고 내소착성 등이 저해된다. 이러한 결점을 해결하기 위한 방법으로 가능한한 Cr량을 줄이는 것으로 고려할 수 있으나, 탄소 함유량과의 관계에서 탄화물이 감소하여 고 Cr주철 본래의 우수한 내마모성을 유지하기 어렵기 때문에 한계가 있다.

일반적으로 고 Cr주철에 있어서는 조직중에 Cr 탄화물만 존재하고 흑연은 정출되지 않는다. 그러나 화학조성의 변화와 접종을 통하여 주방상태에서 흑연의 정출을 가능하게 할 수 있다. 주방상태에서 미세흑연이 정출된 고 Cr주철은 내마모성과 내소착성을 향상시킬 뿐 아니라 crack의 전파를 저지하여 내crack성도 향상시킨다. 또한, 외각재중의 Cr 함량이 낮기 때문에, 복합roll의 제조시 문제가 되는 Cr의 내각재로의 혼입이 경감되어 내각재의 강인성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. HSS Roll

#### 3.1 개요

선진 roll maker들은 철강압연 roll의 내마모성, 내fire crack성 및 강인성 등의 요구가 고도화됨에 따라 이에 대응할 수 있는 roll의 개발에 주력하고 있다. 열연사상압연 전단용 roll은 Adamite에서 Hi-Cr roll로 대체되었고, 사상중단용 roll로는 흑연정출 Hi-Cr주철로 개선된 roll이

실용화되었다. 특히 HSS roll이 개발되어 열간압연의 FM용 roll로서 사용되고 있다.

종래의 roll재는 net work상의 탄화물과 기지조직 경계에서 crack이 발생되어 표면이 탈락되거나 기지조직이 탄화물보다 우선적으로 마모되어 roll 표면거칠음을 유발시키는 취약점이 있었다. 이와 같은 취약점을 보완하기 위해 HSS roll은 탄화물을 입상화시켜 표면탈락을 방지하며 경도가 우수한 MC 및 M<sub>6</sub>C계 탄화물을 형성하여 내마모성을 향상시키며 Mo, W 및 Cr 등의 합금원소를 첨가하여 기지조직을 강화시키며 정출탄화물의 부피분율을 15% 이하로 제한하여 fire crack 발생을 억제하는 기본 설계개념을 갖는다.

#### 3.2 HSS Roll의 제조법

##### 3.2.1 HIP(Hot Isostatic Pressing)법

분말 HIP법은 기본원리의 관점에서 몇가지의 특징이 있다. 첫째, 강인강을 core재로 사용하여 복합화가 가능하며 둘째, shell층은 2 $\mu$ m 이하의 미세한 석출 및 정출물을 이용하여 roll 구경에 구애됨이 없이 균일하게 제작이 가능하며 셋째, shell층의 고합금화 및 ceramic 등의 혼합제조가 가능하다. 그림 1은 HIP법에 의한 HSS roll의 제조공정을 간략히 나타낸 것으로 현재 사용되고 있는 방법이다<sup>18)</sup>.

##### 3.2.2 주조법

Roll은 내마모성이 우수한 shell층과 인성이 뛰

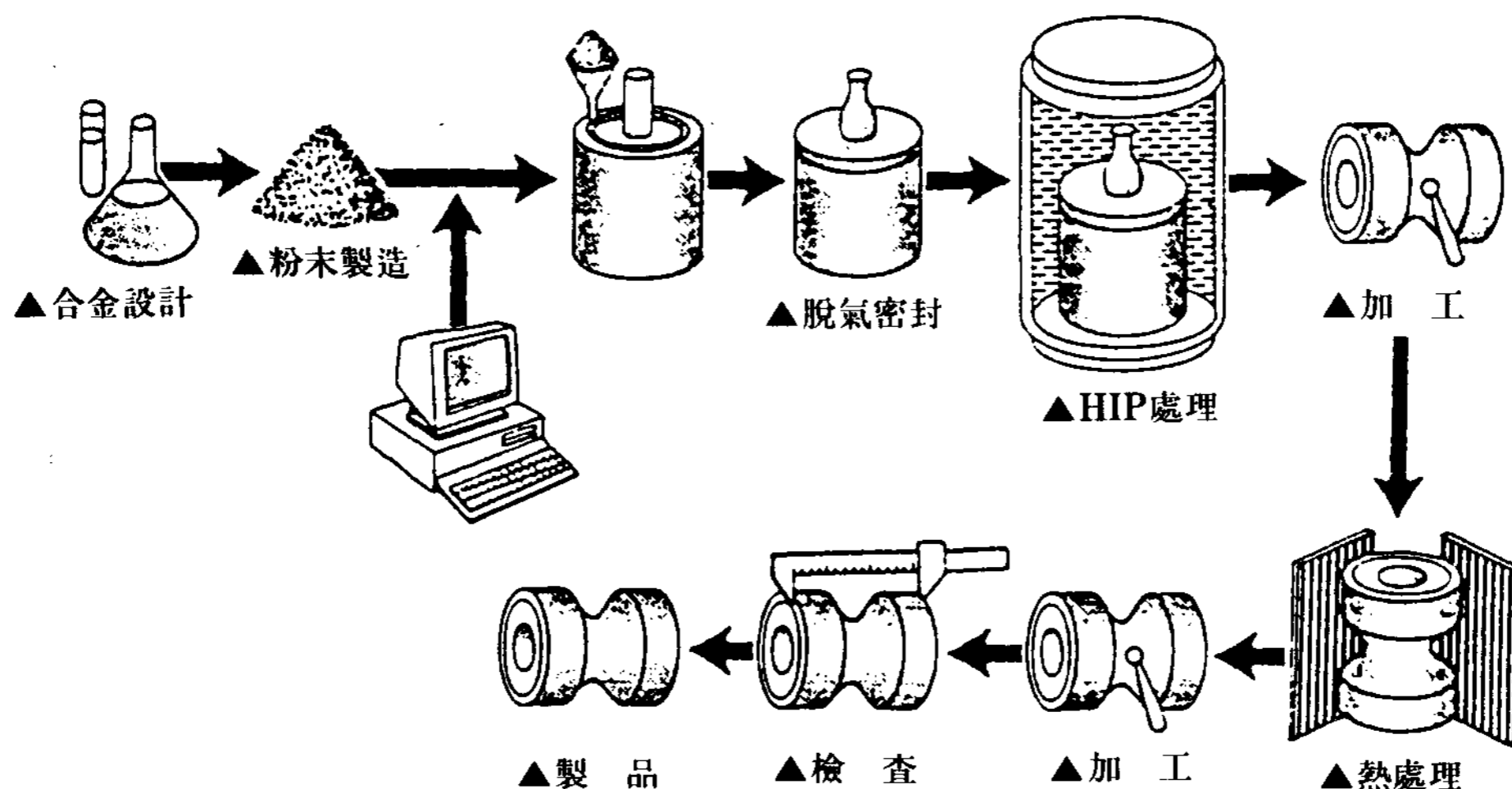


그림 1. HIP법에 의한 HSS roll의 제조공정

어난 core부의 상반되는 특성이 요구되는 제품이 다. 이러한 복합적인 성질을 가지는 roll을 제조하는 방법으로 원심주조법이 채용되고 있다. 원심주조법은 shell층을 먼저 주조한 후, core재를 주입하는 방법이다. Shell층은 응고도중에 원심력에 의해 개재물 및 산화물 등이 액상에서 분리되어 건전한 응고조직으로 된다. 또한 shell층만을 먼저 주조하므로 shell층 내외부의 조직차이가 거의 없어 경도가 일정한 shell층을 얻을 수 있으므로 현재 roll 제조법에 널리 이용되고 있다. 또한 다른 제조법(HIP법, CPC법, ESR법)에 비해 가장 경제적이다. 현재 개발된 shell층이 고합금화되어 있는 HSS roll의 제조에도 널리 사용되고 있다. 현재 원심주조법에서는 구상흑연주철 내각재가 사용되고 있으나, 더욱 가혹한 조건하에서도 사용할 수 있는 내각재의 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 원심주조법에는 수직형 원심주조법과 수평식 원심주조법이 있으나 현재 우리나라에서는 수직형 원심주조법이 주로 사용되고 있다.

3.2.3 CPU법

강판 edge drop의 저감 및 crown, 형상제어를 목적으로 하는 극소경 열간 압연기용 work roll이 채용됨에 따라 HSS roll이 개발되기 시작하였다. 소경 roll은 수평축 강도와 고면압하에서의 전동수 증가 때문에 내마모성, 내표면거칠음성을 겸비한 roll이 요구된다. CPC법은 그림 2에서와 같이 이미 제조된 core재의 주위에 shell재의 용탕을 공급하여 core재와 용착, 응고시켜 복합 roll을 제조한다. CPC법의 주요특징으로는 core

재로 강인한 steel계 재료를 사용할 수 있는 것과 shell재의 합금화가 용이하다는 것이다. 그러므로 shell재는 내마모성을, core재는 강인성을 부여할 수 있다. 또한 종래제조법에 비해 응고속도의 조절이 용이하므로 치밀한 미세조직을 얻을 수 있을 뿐 아니라 냉각능력을 강화시킴으로써 초정탄화물의 편석 문제를 해결할 수 있다. 표 1에는 CPC법의 설비의 기본사양을 나타내었다.

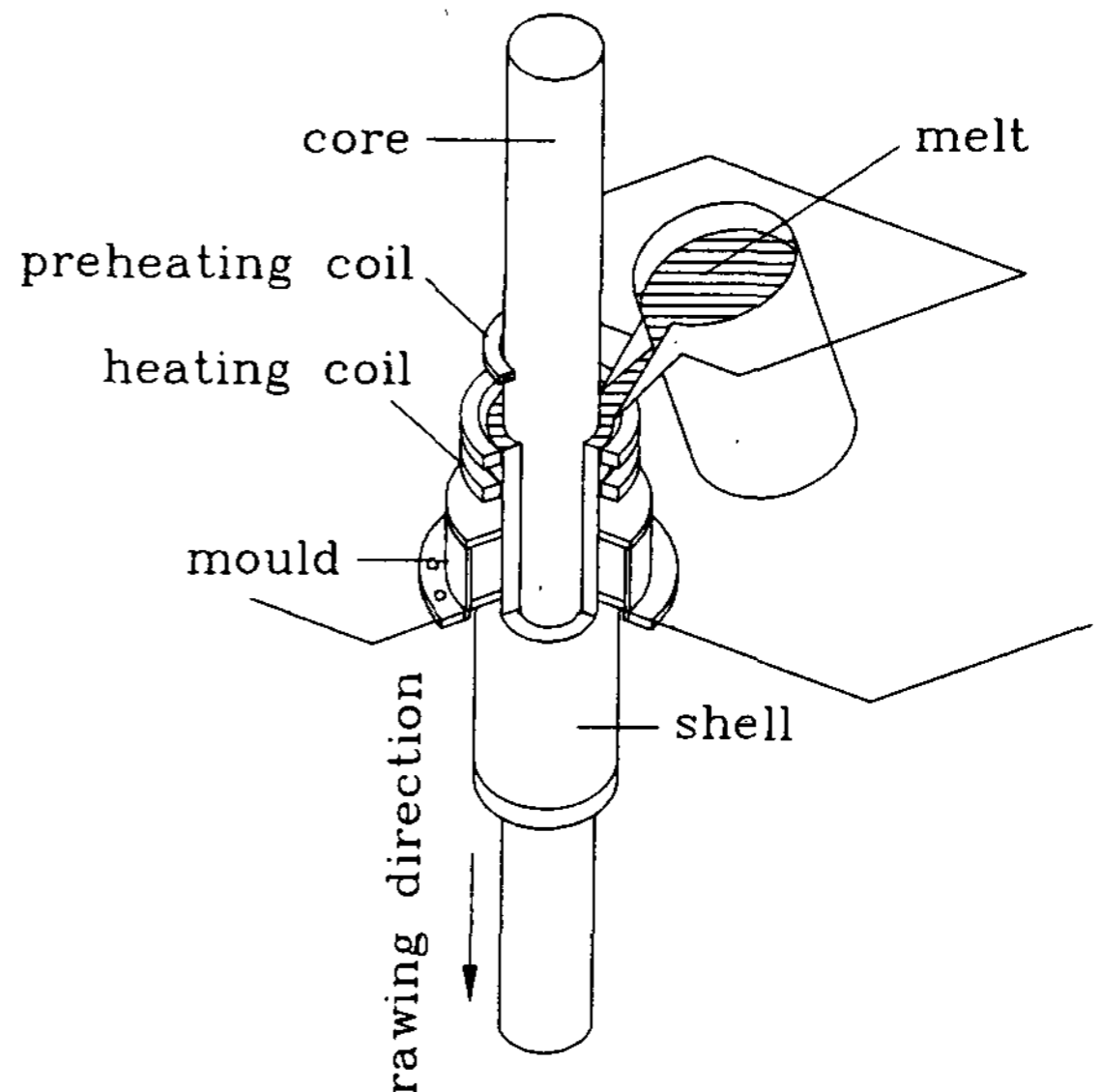


그림 2. CPC법의 장치 개략도

3.2.4 HSS계 Roll의 재질 특성

HSS roll에 첨가되는 주요합금원소는 Cr, Mo, W, V 및 Co 등이다. 급속승온 austenite화한 후 초급냉처리하여 tempering하는 열처리공정을 거

표 1. CPC 설비의 능력 및 기본사양

항 목		능력 및 사양	특 징	
설비 능력	Roll 경	250~850mm	열간압연의 FM용 roll 제작 가능	
	Clad 길이	max. 3000mm		
	Clad 두께	max. 100mm		
	Roll 전장	max. 5700mm		
	Roll 단중	max. 15ton		
기본 사양	용 해 로 (주탕로)		고주파 유도가열방식임	
	유 도 가 열	가 열		1300kW
		예 열		600kW
	인발속도			3~140mm/min (상용 10~35mm/min)

친 roll은 미세한 초정 MC형 탄화물( $H_v$  3000, 주로 VC)과 미세하게 결정입계에 분포된 공정  $M_6C$ 탄화물( $H_v$ 1500, 주로 Cr, Mo, W) 그리고 tempered martensite 및 lower bainite 기지조직으로 구성된다<sup>19,20</sup>). 사진 1에 HSS roll의 shell층의 대표적인 미세조직을 나타내었다. 또한 고온 석출강화 효과로 고온경도 및 강도를 확보하기 위해서 Mo, Cr 및 Co를 첨가한다. HSS roll의 화학성분의 예를 표 2에 나타내었다. HSS roll의 표면에서 깊이방향으로의 경도변화를 그림 3에 나타내었다. HSS roll의 표면경도는  $H_s$  80~90이며 표면에서 50mm 깊이 지점인 경계층에서는 경도가  $H_s$  3 정도가 저하된다<sup>20</sup>). 그리고 HSS roll의 기계적 및 물리적 성질의 예를 표 3에 나타내었다.

#### 4. 열연 Work Roll의 절손

##### 4.1 사상압연 전단용 Work Roll 절손의 특징과 상관인자

열간압연공정에서 pitch 증가에 의해 roll은 과부하를 받게 된다. 사진 2에 대표적인 절손예를 나타내었다. 이러한 절손은 roll 제조시에 존재하는 주조결함 등을 기점으로 하여 중심부에서 표면쪽으로, 혹은 표면열충격에 의해 표면에서 중심으로 파괴가 진행되는 일종의 취성파괴형태이다. 절손된 roll의 특성으로는 비절손 roll에 비해 core층의 파괴인성치가 낮으며 shell층의 표면압축잔류응력이 크다. 즉, core층의 인장잔류응력이 클수록 절손의 발생빈도는 높아진다. 한편 roll 상용측면에서 roll 냉각수 등의 설비상 trouble에 의해 roll에 과대한 열응력이 발생할 때는 물론이지만, 압연조업상 이상이 없는 경우에도 열응력이 절손의 parameter가 될 수 있다. Roll 절손시까지의 압연분수에 대한 통계와 roll 중심부의 축방향 열응력 변화의 계산결과에 의하면 roll 중심부의 인장열응력이 최대가 되는 10~20

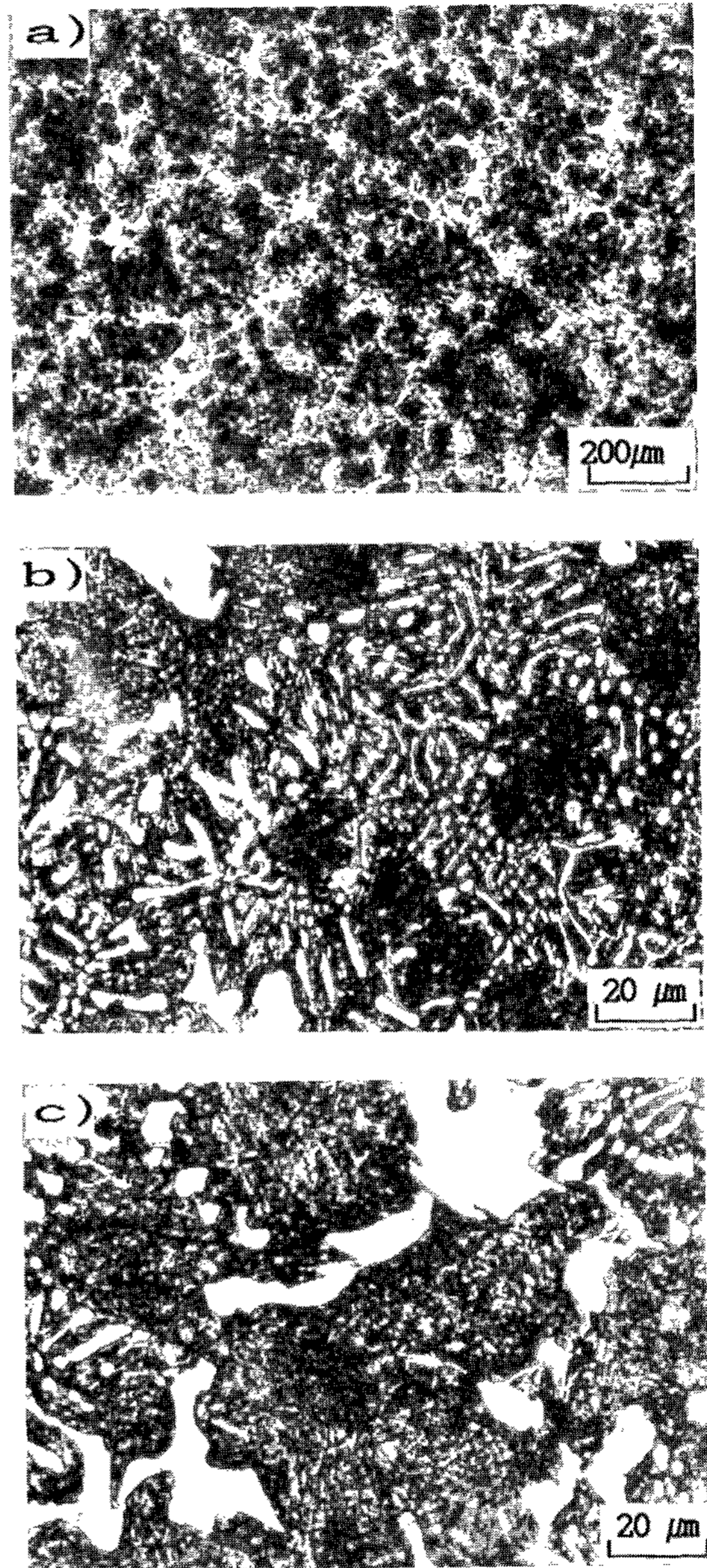


사진 1. HSS roll의 shell층 미세조직  
(a) 탄화물 분포 (b) 'A' type 석출물 형태  
(c) 'B' type 석출물 형태

표 2. HSS roll의 화학성분의 예

구 분	Chemical Composition(wt.%)							Core재
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	
Maker A	1.8~2.4	<1.0	<1.0	5.0~10	Mo+V+W : 10~20			DCI
Maker B	0.5~1.5	0.5~3.0	<1.5	2.0~7.0	1.0~5.0	0.5~2.0	2.0	SCM, SNCM

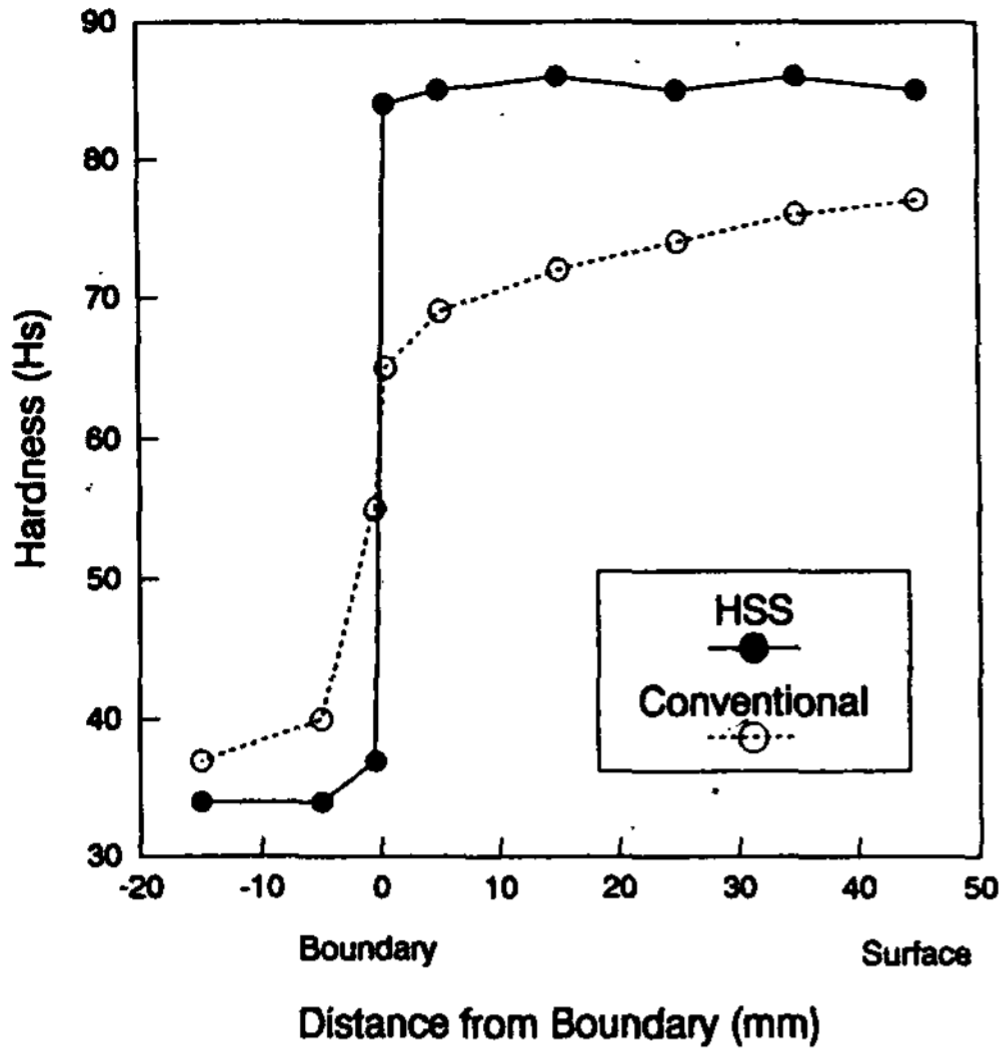


그림 3. HSS roll의 경도변화

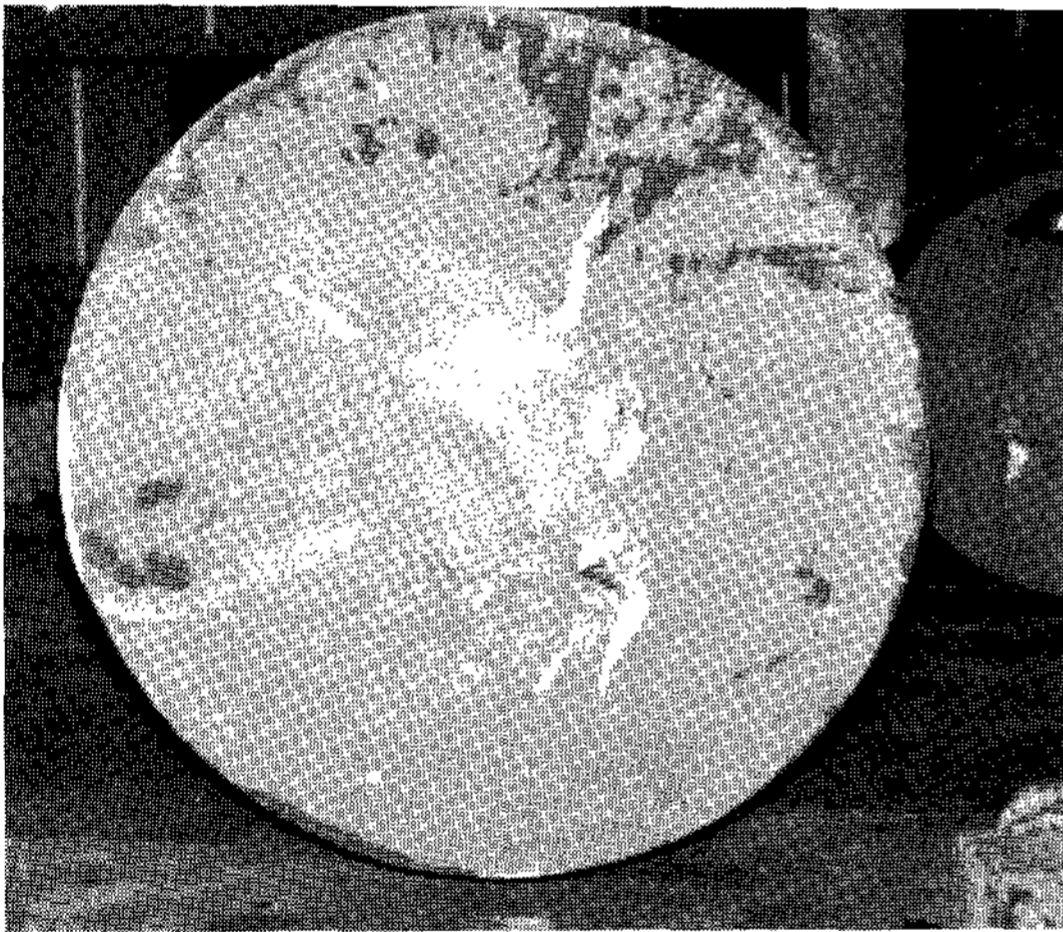


사진 2. 열연용 work roll의 절손형태

본 압연후 그리고 열응력이 높아지는 동계에 절손빈도가 높다.

이상과 같이 사상압연 전단용 work roll의 절손에는 열응력, 잔류응력, 주조결함, roll재료의 파괴인성 등이 주요인자이다<sup>21~27</sup>). 그림 4는 이러한 4개의 parameter와 절손특성의 상관성<sup>28</sup>)을 고찰한 모식도이다. 절손 crack 발생조건은 아래 식과 같다.

$$f \cdot \sigma \cdot (\pi C)^{1/2} \geq K_{IC} \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma \geq \sigma_B \dots \dots \dots (2)$$

여기서

$\sigma$  : roll의 core층 부하응력

(= 열응력 + 잔류응력)

2C : 주조결함크기

f : 계수

$K_{IC}$  : roll core층 파괴인성치

$\sigma_B$  : roll core층 인장강도

종래, 열연 work roll의 절손원인으로는 roll의 잔류응력 과다, 압연 trouble 등에 의한 열응력 과다, roll 제조시 shell-core 부정합에 의한 결함 그리고 roll의 재질부족 등이었으나 그림 4의 model에서 각각의 상관성을 정립시킴으로써 절손을 방지할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4.2 Roll 재질과 절손

고합금화한 Adamite roll과 고경도 Adamite roll은 절손이 용이한 경향이 있다. 그것은 고합금 또는 고경도화에 의한 roll 중심부의 잔류응력 및 경도증가가 주원인이며 또한 고합금화에 의한 열전도율의 저하에 의한 열응력 증가에도

표 3. HSS roll의 기계적 및 물리적 성질

항 목		Shell재	Core재
기계적 성 질	인장강도(Kgf/mm <sup>2</sup> )	100~110	70~90
	연신율(%)	0.40	0.33~0.36
	Young률(Kgf/mm <sup>2</sup> )	22400~22500	18000~18500
	압축강도(Kgf/mm <sup>2</sup> )	340.5	
	Bending강도(Kgf/mm <sup>2</sup> )	129.5	
	파괴인성치(Kgf/mm <sup>1.5</sup> )	79.9	
	Charpy충격치(Kgf/cm <sup>2</sup> )	0.70	
물리적 성 질	열전도율(at R. T) (X10 <sup>-2</sup> cal/cm·sec·°C)	5.17	
	선팅창률(50~400°C) (X10 <sup>-6</sup> /°C)	11.9	

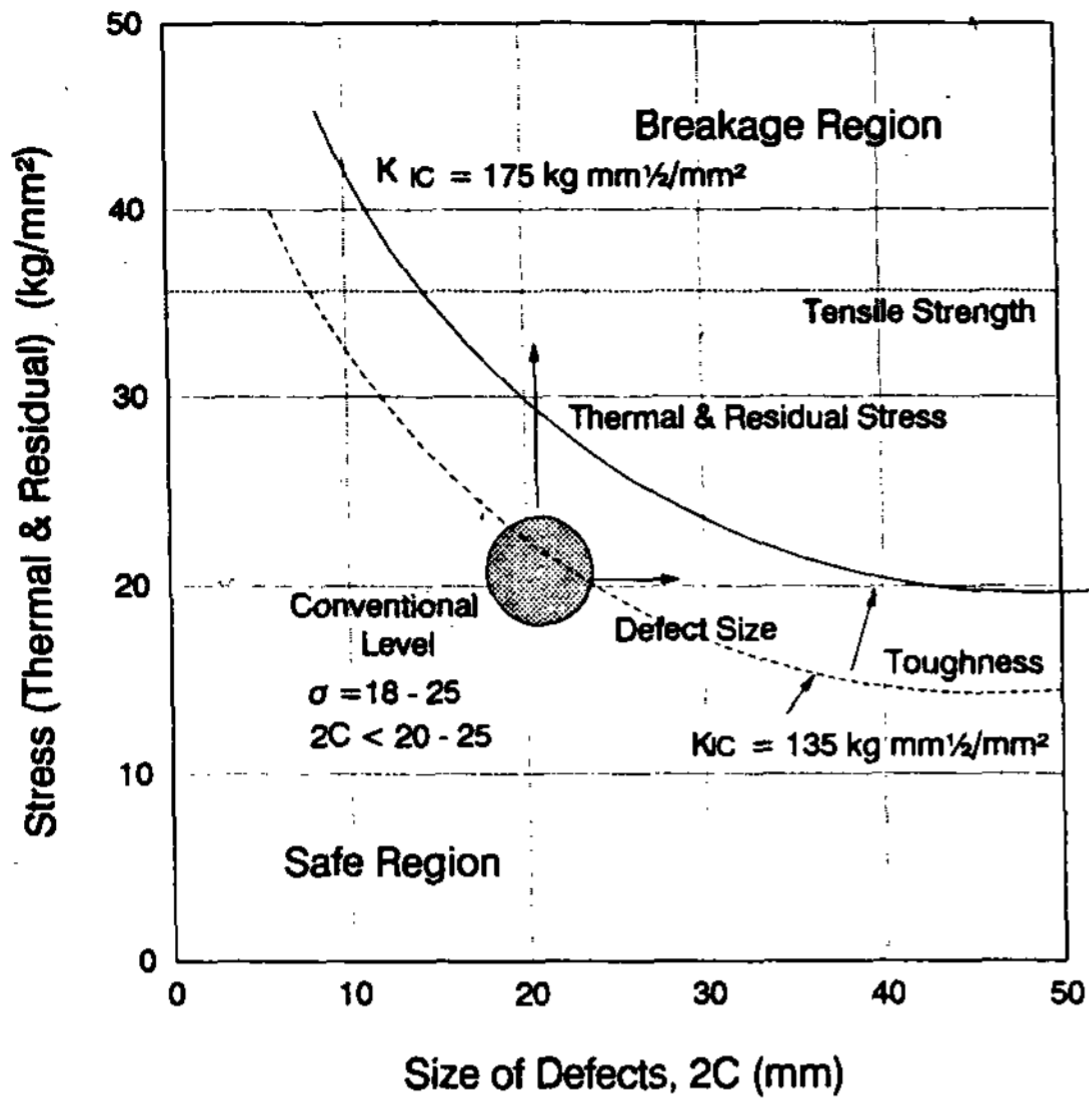


그림 4. Work roll 절손인자의 상관성

기인된다. 그러므로 고품금, 고경도 roll은 잔류 응력을 낮추고 내부결함 발생을 억제시키며 복합 주조법으로 내부인성을 높이는 것이 바람직하다. Hi-Cr roll에서는 shell층에 다량 함유되어 있는 강한 탄화물형성화 원소인 Cr이 주조시 core로 확산됨으로써 경계층에 가까운 core층에서 graphite 형성을 저해하며 primary Cr 복합탄화물을 형성 시킴으로써 조대한 탄화물과 pearlite 기지조직 경계에서 microcrack을 유발시킬 수 있다. 그 예를 사진 3에 나타내었다. 또한 core층의 흑연구상화 및 집중처리의 부적절로 인하여 흑연형상이 구상이 아닌 C/V흑연이 형성됨으로써 압연하중 시에 graphite tip에서의 stress 집중현상으로

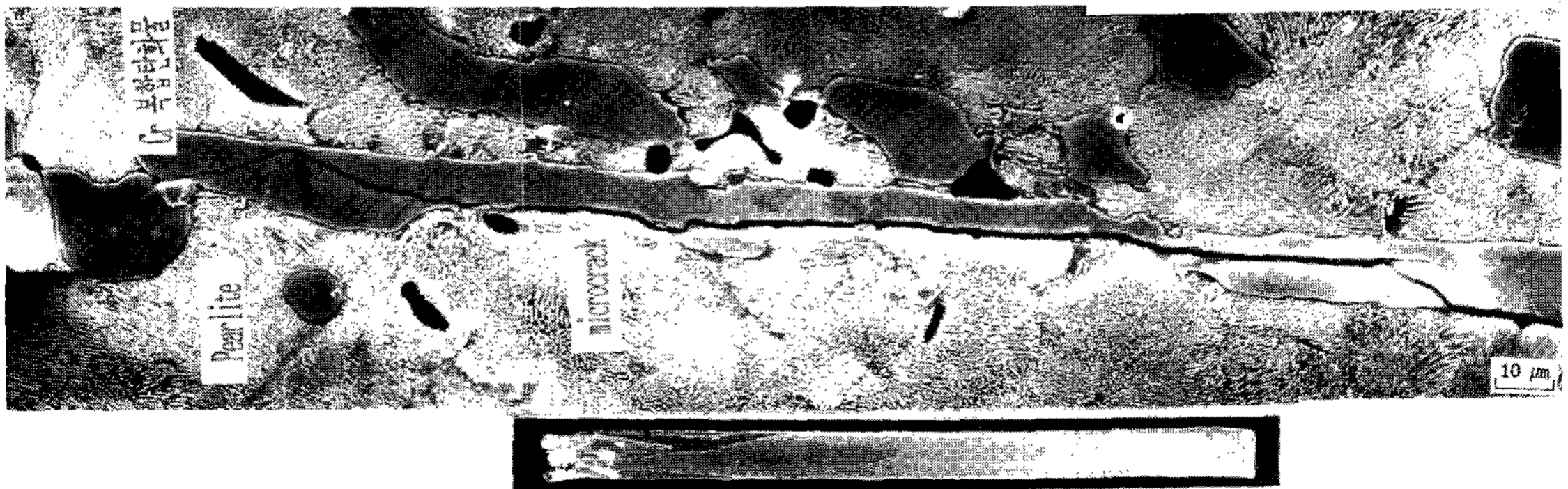


사진 3. Hi-Cr 주철 roll 경계층에 형성된 탄화물

micro-crack이 발생하는 예를 사진 4에 나타내었다. 이와같은 요인의 방지는 shell층의 화학조성을 변경시키거나 집중처리온도 및 방법을 변경시킴으로써 해결가능하다.

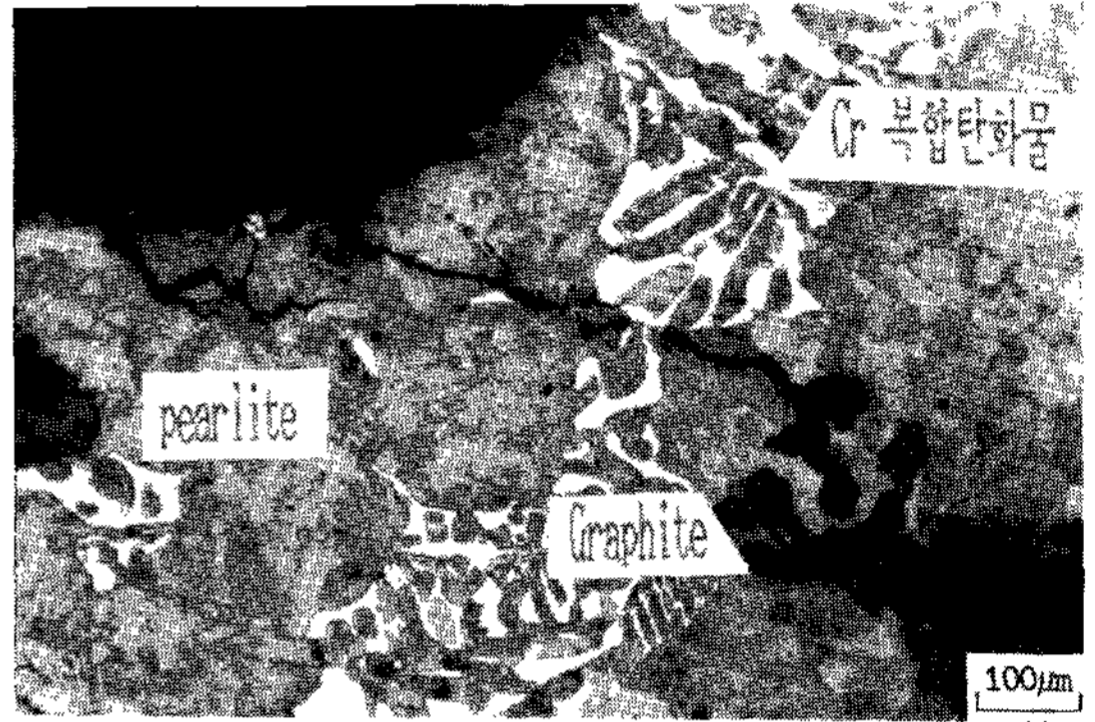


사진 4. C/V흑연에서의 crack 발생

### 4.3 입연조건과 절손

Roll 초기온도, roll 냉각수온도, 압연 pitch비와 roll core층에서 발생하는 열응력과 상관성<sup>28)</sup>을 그림 5 및 6에 나타내었다. Roll 초기온도가 낮을수록 압연 pitch비가 클수록 core층의 열응력은 증대된다. 이러한 이유로 인하여 roll재의 인성치가 저온에서 저하되고 동계에 절손이 많아지며 압연개시때 roll의 warming up이 필요하게 된다.

## 5. Spalling

### 5.1 Spalling의 발생경과

Roll에 발생하는 대표적인 spalling을 사진 5에

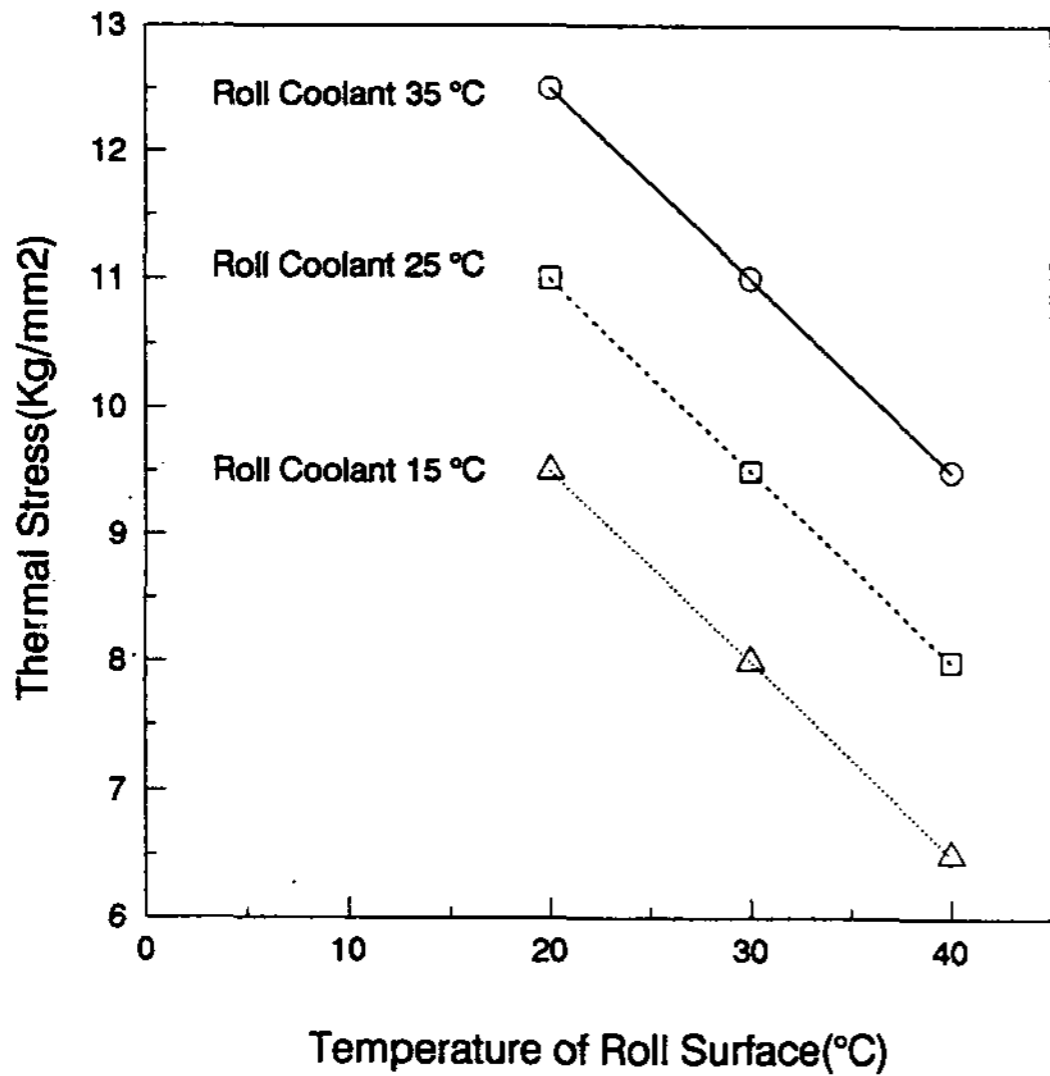


그림 5. Roll 표면온도와 열응력의 상관성

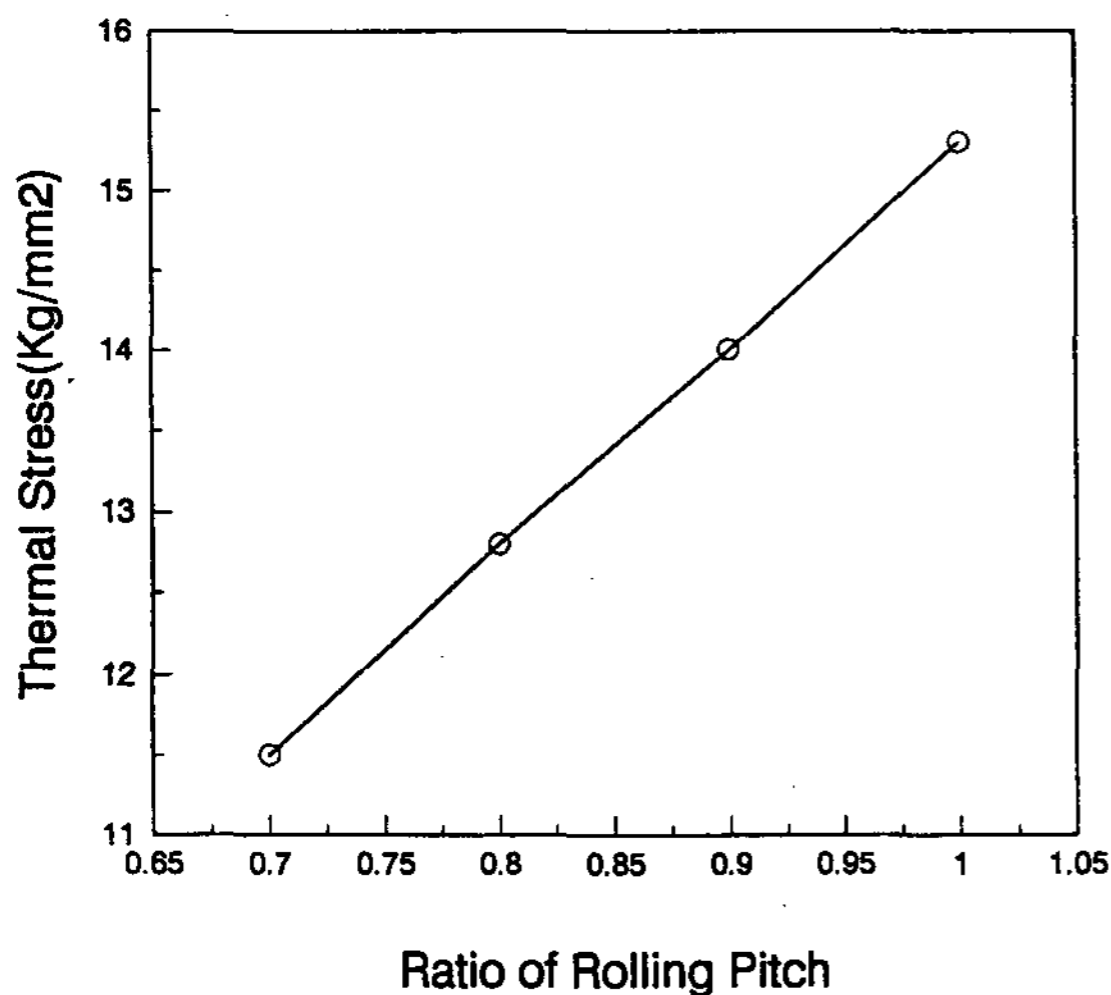


그림 6. 압연 pitch와 열응력의 상관성

나타내었으며 이러한 spalling 발생은 전동피로에서 발생하는 pitting과 동일한 것으로 생각된다<sup>29)</sup>.

西原<sup>30)</sup>은 2개의 원통을 접촉시킨 윤회시험에 의한 접촉표면의 변화를 다음과 같이 3가지로 설명한다.

1) 제1기 마모

사상표면의 작은 돌기부가 서로 부딪혀 탈락되는 마모

2) 제2기 마모

제1기의 마모에 의하여 표면은 더욱 매끄러워

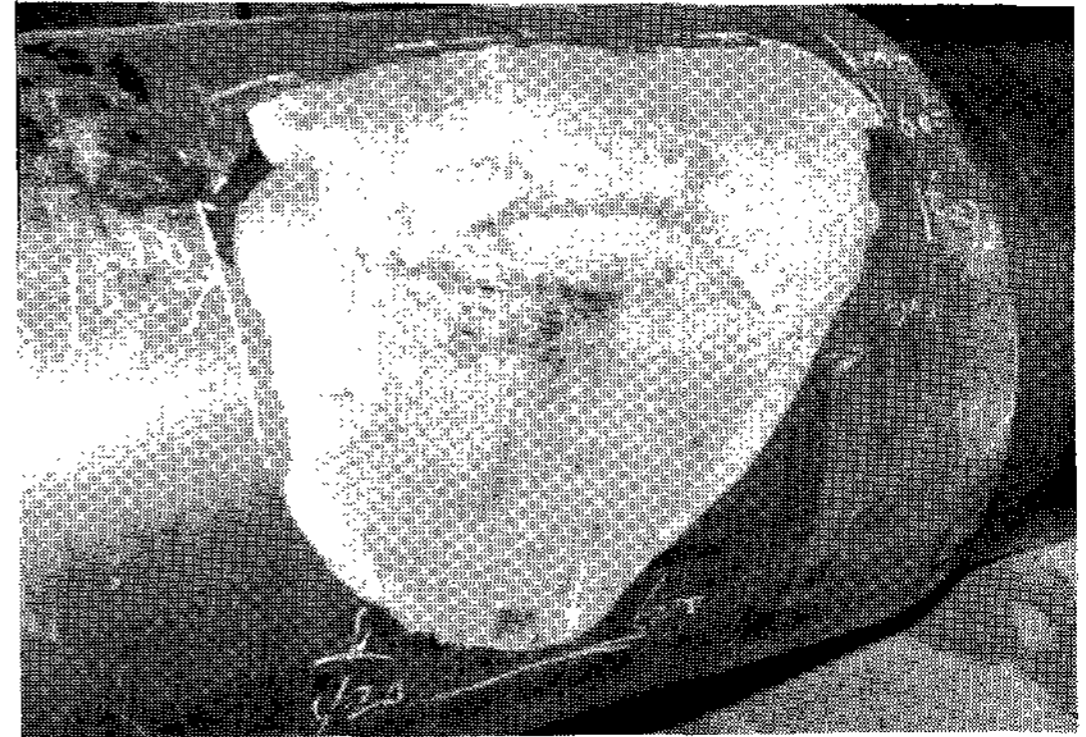


사진 5. 열연용 work roll의 spalling

지고, 이 기간 중에는 극히 작은 마모를 나타낸다.

3) 제3기 마모

접촉압력이 어떤 한도를 초월할 경우에만 일어나는 '반점형태마모(pitting)'로 제2기 도중에 급하게 일어난다.

그림 7에 나타낸 전동수에 의한 마찰계수 및 마모량의 결과에서 제1기는 마찰계수가 일정하게 저하하는데까지 단기간이 걸리고, 이 기간에 작은 양의 마모가 일어나 표면이 매끄러워진다. 제2기에는 마찰계수가 일정하게 되어 마모량이 적게되는 정상상태를 표시한다. 제3기는 반점마모가 발생하는 기간으로 마모량이 급격하게 증가한다. 반점마모 발생까지의 회전수는  $2 \times 10^6$  정도이다. 압연반복하중에 의하여 표면층에 소성변형이 생겨 가공경화되기 때문에 압연횟수가 증가할수록 표면층의 경도는 상승하게 된다. 그리고

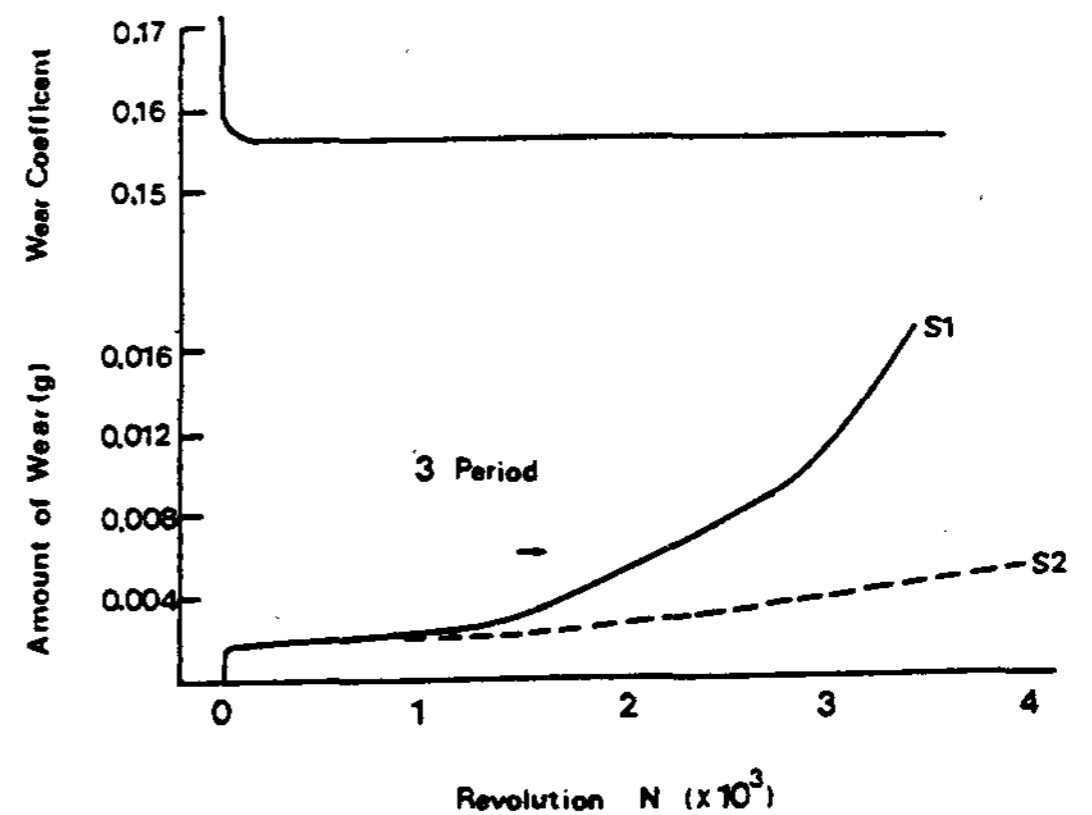


그림 7. Roll회전수에 따른 마모량 및 마모계수의 변화



토크는 점차 낮아지다가 파괴적 pitting이 발생하면 증가된다.

Roll의 spalling은 소형시험기에 의한 반점마모와 파괴적 pitting에 상응하는 것으로서 roll의 경우 표면경화가 일어나면서 피로가 가중되어 표면에 균열이 발생하여 내부로 진전되어 spalling이 일어나는 경우가 많다<sup>31)</sup>.

**5.2 Spalling과 응력과 관계**

균열을 발생시킬 수 있는 주요응력은 표면의 압축응력과 표면직하층에 작용하는 전단응력이다. Roll의 접촉응력 분포를 나타낸 그림 8에서 압축응력은 접촉면에서 최대  $-P_{max}$ 로 되고, 응력진폭은  $0 \sim -P_{max}$ 이나 片振압축응력에 의하여 표면균열이 발생하고, 내부로 진전되어 spalling을 야기시킨다고 알려져 있으며 이때  $P_{max}$ 와 압축피로강도는 일치한다. 탄소강에 대한 실험결과에 의하면 pitting의 발생한도는  $P_{max}$ 와 발생피로한(dgree of fatigue damage)에 비교적 잘 일치하였다. 또한 pitting 내구한은 표면에서 깊이 0.05~0.06mm까지의 응력평균치에 상당한다고 하며 응력구배를 고려하지 않는다면  $P_{max}$ 가 압축피로도 이상으로 될 때 pitting이 발생한다고 한다. 그러므로 roll의 spalling은 표면의 압축응력이 주요원인이 된다고 생각되나 pitting의 깊이가 전단응력의 최대위치에 거의 일치하는 것으로부터 전단응력이 pitting의 원인이라는 주장도 있다. 전단응력중  $\tau_{45}$ 는 표면하 0.786b의 위치에서 최대로 되고 그 크기는  $0.301P_{max}$ 이므로  $\tau_{45}$ 가 pitting의 원인이라고 고려하는 경우도 있다. 한편  $\tau_{xy}$ 는 깊이 0.5b에서 최대, 최소로 되고 그 크기는  $\pm 0.25P_{max}$ 로 양진응력진폭을 가지고, 이 둘중에서 어느 것이 pitting의 원인이 되는지에 대해서는 다음과 같이 검토된다.

즉, 전단피로강도는 평균응력의 영향이 적어 응력진폭의 문제로 되기 때문에 양자를 비교하면 평균응력은  $(\tau_{45})_m = 0.113P_{max}$ ,  $(\tau_{xy})_m = 0$ , 응력진폭은  $(\tau_{45})_r = 0.188P_{max}$ ,  $(\tau_{xy})_r = 0.256P_{max}$ 로 되어  $\tau_{xy}$ 쪽의 응력진폭이 크기 때문에  $\tau_{45}$ 에 비하여 pitting을 유발시킬 위험이 크다. 이외에도 최대 전단비틀림에너지설이 있으나 이것은 전단비틀림에너지의 최대위치에 피로균열이 발생하여 표면까지 진전되어 pitting으로 된다는 것으로 최

대전단응력과 동일한 경향을 나타낸다. 접선응력이 작용할 경우에는 마찰계수( $\mu$ ) > 1/9에서 압축응력 및 전단응력은 표면에서 최대가 되기 때문에 표면에 균열이 발생한다. 그러나 전동피로는 미끄럼 없이 마찰계수가 적어도 표면에 균열이 발생하는 경우가 많다. 최대전단응력을 설명하는데는 다른 인자를 고려하지 않으면 안된다. 표면에 발생하는 균열은 접선에 대하여 30~50°의 각도를 가지고 내부로 진전하는 경우가 많다.

강탄성 실험에서 균열의 존재에 따라 큰 응력장의 변화는 없지만 균열의 선단에 전단응력이 작용하고 마찰력이 큰 경우에는 전단응력은 더욱 증폭된다. 그러므로 내부로 진전하는 균열은 최대전단응력이 작용하는 위치의 부근에서 접선방향으로 평행하게 진전하여, 하중의 반복과 더불어 가중되며 미끄럼이 있는 경우에는 깊게 진전한다.

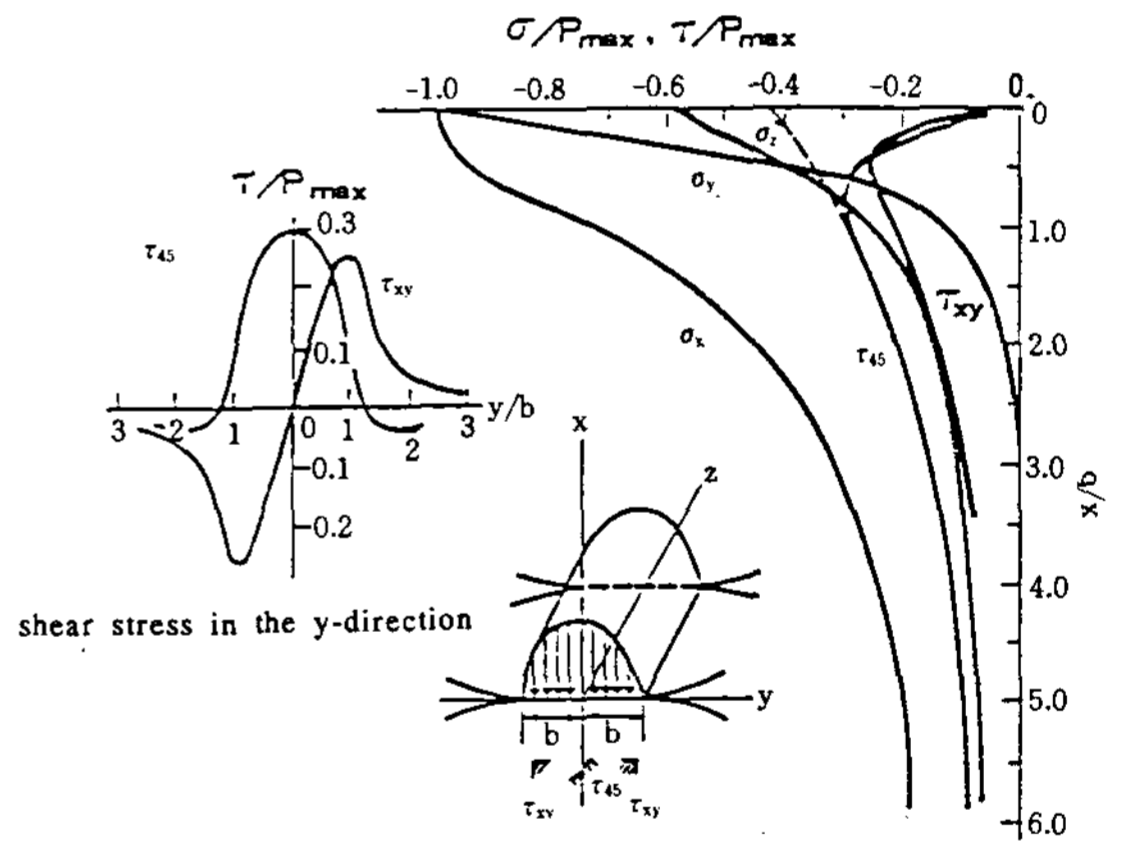


그림 8. Work roll의 응력 분포

**5.3 Spalling 방지를 위한 연삭량의 설정방법**

Spalling은 롤간의 굴림접촉에 의한 전단응력이 표층부에 반복작용함으로써 피로가 축적되어 균열이 발생, 진전하여 박리되는 현상이라고 생각되며 모식도를 그림 9에 나타내었다. 파괴(rupture)가 일어나기 전에 피로한을 정확하게 정하는 것은 어렵지만 그림 10에서 Miner 법칙으로 설명될 수 있다.

그림 11은 피로한(fatigue limit)  $\tau_f$ , 전단응력  $\tau_{45}$ 와 피로도 F의 관계를 나타내고 있다. 피로는  $\tau_{45} > \tau_f$ (표면아래 X1-X2)에서 일어나고 피로도

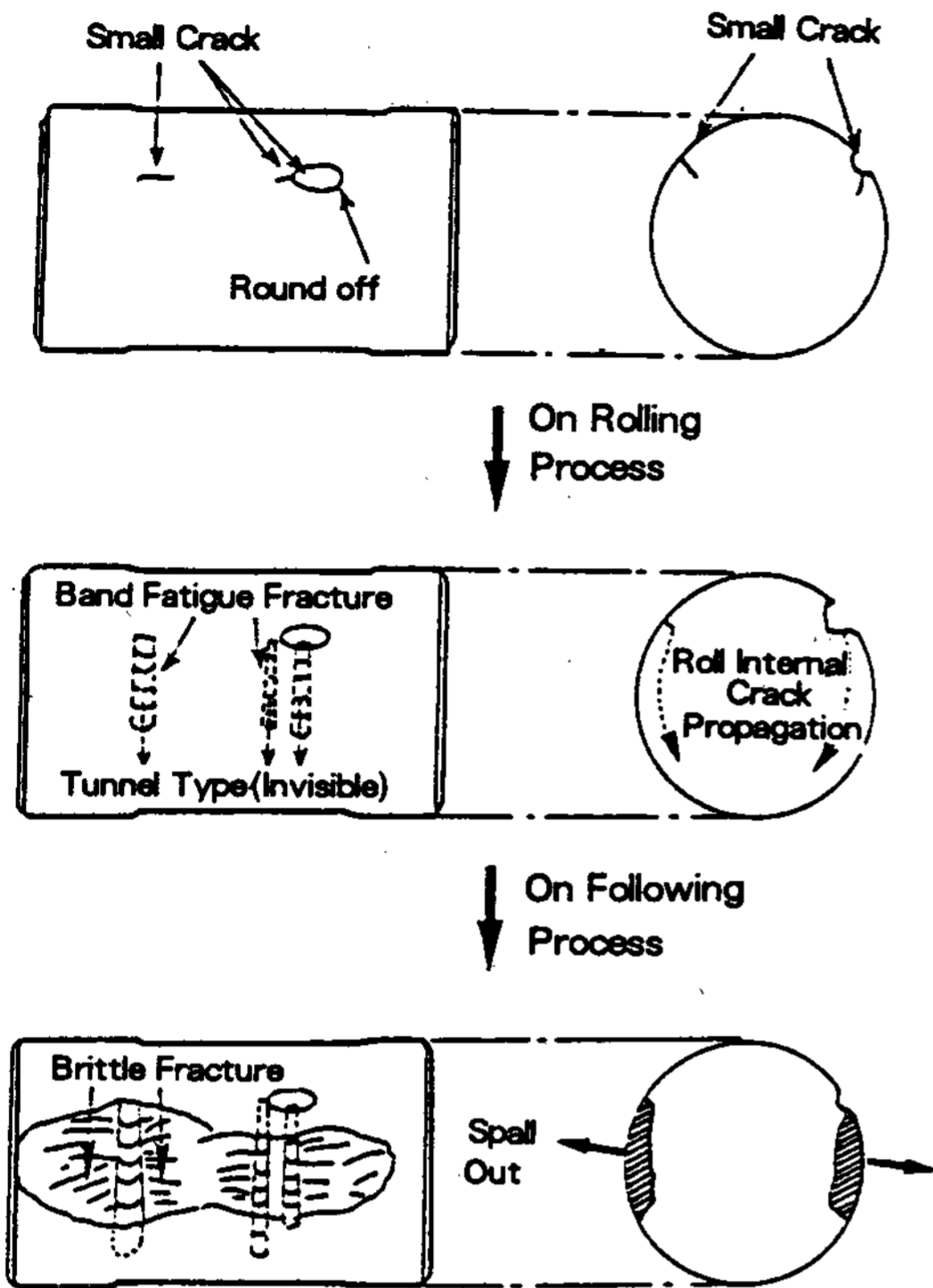


그림 9. Work roll의 spalling 기구

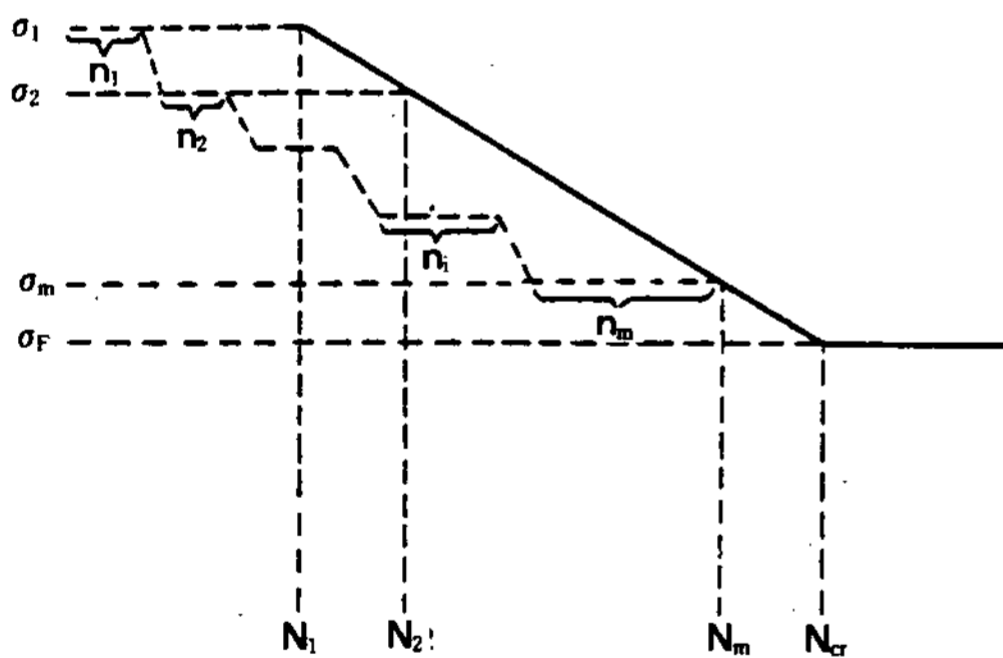


그림 10. Miner 법칙

$F_1$ 은  $f_1(x)$ 이다.  $2\Delta r$ 을 개삭(dressing)한 후에 사용된 롤의 피로도  $F_2$ 는  $f_2(x)$ 이다. 일반적으로  $\Delta r$ 는  $x_2$ 보다 작기 때문에 피로는 축적되어 두번 사용후에 피로도는  $F_1 + F_2 = f_1(x + \Delta r) + f_2(x)$ 이다. 따라서 같은량( $2\Delta r$ )을 개삭하고  $n$ 번 사용후에 피로도는 아래와 같다.

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n f_i\{X + (n-i)\Delta r\} \dots \dots \dots (3)$$

Spalling은 피로도  $F$ 가 항상 1보다 적게 될 수 있도록  $\Delta r$ 을 설정함으로써 이론적으로 방지할 수 있다. 피로도  $F$ 를 연삭량에 따라서 수식화하면 다음과 같다.

$$\tau_{45} = \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{(1 + (Z/b)^2)^{1/2}} \frac{((1 + (Z/b)^2)^{1/2} - (Z/b))}{(1 + (Z/b)^2)^{1/2}} \right] (b/\Delta)$$

$$= (z/b) \{1 - (z/(z^2 + b^2)^{1/2})\} (b/\Delta) \dots \dots (4)$$

$$= P_0(z/b) \{1 - (z/(z^2 + b^2)^{1/2})\} \dots \dots \dots (5)$$

굴림의 S-N 곡선에서 전단응력과 반복횟수를 표시하면,

$$1/N = C \cdot \exp(\alpha \cdot \tau_{45}) \dots \dots \dots (6)$$

여기서,  $C$ 와  $\alpha$ 는 실험상수이다.

$n$ 회전할 때의 직경방향의 피로도 분포는 아래식과 같다.

$$F(y) = n/N = C \cdot n \cdot \exp[\alpha P_0(y/b) \{1 - (y/(y^2 + b^2)^{1/2})\}] \dots \dots \dots (7)$$

또 여러 하중상태에서 1회 사용되면 다음식과 같다.

$$F(i, y, M) = C \sum_{i=1}^M n_i \exp[\alpha P_0(y/b_i) \{1 - (y/(y^2 + b_i^2)^{1/2})\}] \dots \dots \dots (8)$$

매회 같은량  $\Delta r$ 로 연삭할 때  $M$ 회 연삭해서  $(M+1)$ 회 사용후의 피로도는 다음과 같다.

$$F(i, y, M) = C \sum_{i=1}^W \sum_{i=0}^M n_i \cdot \exp[\alpha P_0((y + j\Delta r)/b_i) \{1 - (y + j\Delta r)/((y + j\Delta r)^2 + b_i^2)^{1/2}\}] \dots \dots \dots (9)$$

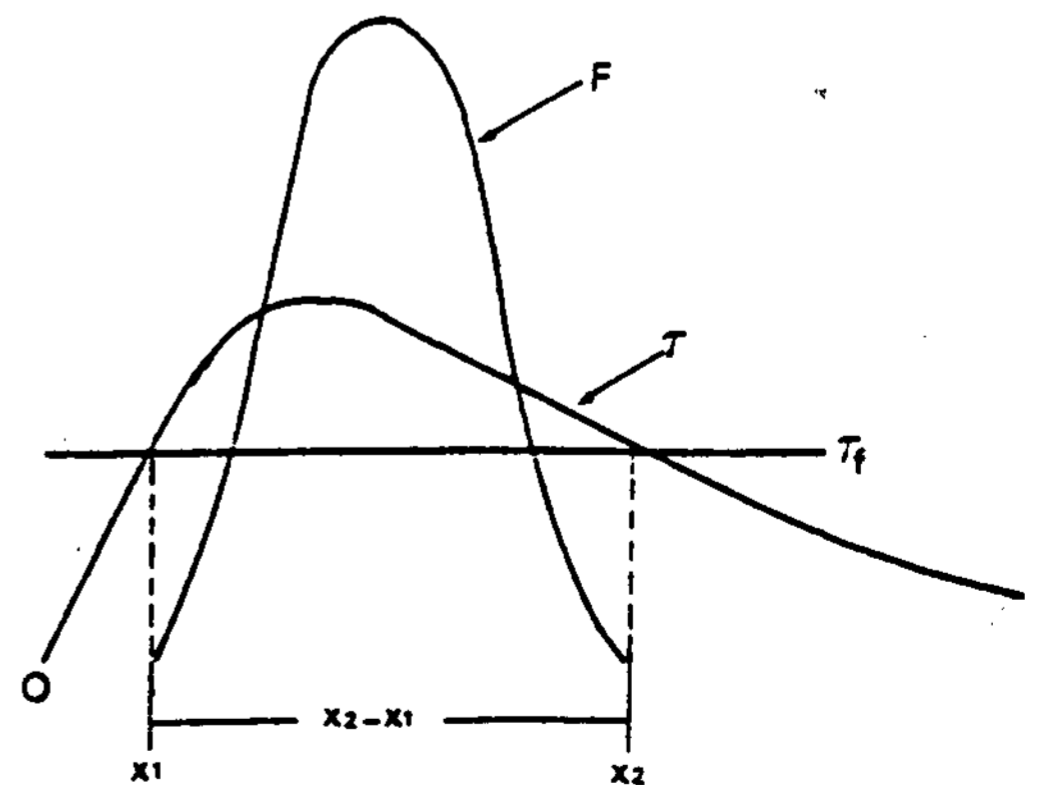


그림 11. 피로도, 전단응력 및 피로한도의 상관성

## 6. 결 론

철강산업에서 압연공정은 '양에서 질' 그리고 'process혁신'의 시대로 발전되고 있다. 여기에 대응하여 압연기술에 직접적인 영향을 주는 work roll 품질혁신의 필요성이 점점 대두되어 왔다. 최근에 개발된 신복합 roll은 종래의 roll에 비해 몇배의 내마모성을 가질 뿐아니라 shell-core 경계층의 강도도 1.5배 이상 높다. 또한 shell층에 큰 압축잔류응력을 부여할 수 있으므로 내열 crack성을 향상시킬 것이다. 이와같은 이점을 열간압연공정에서 충분히 활용하기 위해서는 압연공정 중에서 발생가능한 이상압연에 대해서 roll 재질 및 압연기술 측면에서 예방함과 동시에 검사방법 및 적정 roll 관리기준 등을 정립시킬 수 있도록 maker와 user의 긴밀한 공동 연구, 협력체제가 구축되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. K. Emori et al : SEISI Conference, 1 (1987)
2. 橋本 降ほか : 鑄物, 63 (1990) 672
3. W. Patt : AISE(1987), Fall Conference
4. R. S. Jackson : JISI, 63 (1970) 208
5. K. Bungardt et al : Arch Eisenhüttenwes, 29 (1958) 93
6. T. Hashimoto et al : Kubota Technical Report, 7(1972) 21
7. 梅本純生ほか : 鐵と鋼, 70 (1984) 138
8. 加藤治ほか : 塑性と加工, 28 (1987) 314, 264
9. A. D. Sarkar : 'Wear of Metals', Pergamon Press, (1976) 140
10. 甲賀孝顔ほか : 鐵と鋼, 73 (1987) 364
11. 衫村幸顔 : 鑄物ノート, 47 (1982) 27
12. 衫下潤二ほか : 塑性加工連合講演會 (1979) 513
13. 衫下潤二ほか : 潤滑, 24 (1979) 47
14. S. Uchida et al : Imono, 61 (1989) 787
15. Japan Patent No. 61-16415 (1986)
16. Japan Patent No. 2-93040 (1990)
17. 後藤邦夫ほか : 鐵と鋼, 77 (1991) 107
18. 夕保田 技術説明資料 No. KS1991-2-6
19. O. Shitamura et al : Hitachi Review, 39 (1990) 231
20. 佐野義一ほか : 日立金屬技報, 4 91
21. 河原 ほか : 日立評論, 鐵鋼特輯號, 33 (1941) 794
22. C. F. Peck et al : Iron and Steel Engineer, 31 (1954) 45
23. 關本 ほか : 日立評論, 金屬特輯號, 42 (1961) 43
24. 新山 ほか : 鐵と鋼, 53 (1967) 37
25. J.M.Dugan : ISE, 43 (1966) 93
26. 前川 ほか : 鑄物, 40 (1968) 597
27. 楠本 ほか : 日立評論, 鐵鋼特輯號, 33 (1941) 78
28. 矢中様二ほか : 製鐵研究, No. 308 (1982) 104
29. 河田 2ほか : 鐵と鋼, 50 (1964) 2059
30. 西原 ほか : 機械學會論文集, 3 (1937) 290
31. Y. Ohkomori et al : Trans. ISIJ., 28 (1988) 68