

강판압연의 트라이볼로지 기술

김철희 · 이준정

(산업과학기술연구소 철강제품연구본부)

1. 서 론

강판압연에 있어서의 원활의 목적은 적정하면서도 안정된 마찰계수의 확보를 통한 생산성의 향상과 롤의 마모나 그 표면거칠기를 일정하게 유지함으로써 소정의 표면 품질을 갖는 압연강판을 생산하는 데 있다.

압연에 있어 마찰이 너무 크면, 소요압연 동력이 증대하는 것은 물론, 압하력이 과다하게 되어 롤의 변형으로 인해 기대하는 치수의 강판을 얻기 어렵게 된다. 그리고 마찰열과 이에 따른 윤활유막의 파단으로 인해 롤과 재료가 늘어붙는 일이 일어나며, 판재표면에 흠을 내는 것은 물론, 판의 파단, 롤 파손 등의 중대한 문제까지도 일으킬 수 있다. 한편, 이와 반대로 마찰계수가 너무 작은 경우에는 롤과 재료와의 사이에 슬립이 일어나 판의 치입불량, 횡방향미끄러짐 등으로 인해 압연이 불가능하게 된다. 또한 판의 표면에 슬립흠, 채터마크 등이 생겨 표면상태가 악화되기도 한다. 압연가공에서는 이와 같은 마찰의 대소로 인한 효과와 미묘하게 나타나 압연판재의 표면품질, 롤 수명, 생산능률을 좌우하게 된다. 최근 그 수요가 급격히 늘고 있는 스테인레스강의 냉간압연의 경우를 보면, 생산성의 향상을 위하여 다단식 소경냉간압연기에서 4Hi밀 등의 탄뎀압연기에 의한 고속냉간작

업으로 바뀌어져 감에 따라 늘어붙음현상과 광택도의 제어문제가 새롭게 대두되고 있다. 이와 같은 제반 압연에서의 트라이볼로지문제를 해결하기 위해서는 롤, 압연유, 피압연재료의 3자로 구성되는 트라이볼로지적 조건을 종합적, 체계적으로 이해하고 제어하는 기술의 개발이 필요하다.

강판압연에 관한 트라이볼로지 문제 가운데 최대의 관심사는 롤의 양단을 지지하는 롤넥크베어링부와 롤이 재료를 물고 들어가면서 압연하는 소위 롤틈새 사이에서의 트라이볼로지문제이다. 롤넥크베어링은 비록 대형이며 고정도의 베어링으로서 매우 중요하지만, 문제의 성질상 베어링기술일반으로 분류하여 여기서는 압연작업에 있어서 롤과 재료간에 일어나는 마찰, 마모, 윤활에 대하여 살펴보기로 한다.

2. 강판압연의 트라이볼로지

일반적으로 강판압연의 트라이볼로지는 타 기계요소나 설비와는 다른 여러가지 특징을 가지고 있다.⁽¹⁾

(1) 압력이 매우 높다. 제반 기계의 베어링은 대개는 10기압 정도 수준, 특히 높은 경우라도 100~200기압 정도임에 비해, 압연에서는 연질금속인 경우가 수천기압, 경질금속인 경우에는 2~3만 기압 정도까지도 올라가, 100~1000배 이상 되는 고압이다.

기계부품 가운데 이 정도 큰 고압을 받는 예는 기어의 접촉면에서의 윤활밖에 없지만, 기어의 경우는 압연에 비해 접촉면적이 1/100~1/1000로 매우 작기 때문에 급유의 난이도가 압연의 경우에 비해 훨씬 덜하다.

(2) 윤활유의 사용온도가 매우 높은 경우도 있다. 강의 열간압연에서는 1250°C 정도의 고온재료와의 접촉면이 대상이 될 뿐만 아니라 그 접촉면에서의 마찰에 의한 온도 상승이 여기에 한몫한다.

(3) 롤틈새내의 발열이 극히 높다. 압연기는 대출력의 모터로 구동된다. 이 대동력은 모두 롤틈새내에서 재료의 변형일과 재료·롤간의 마찰일로 소비되어 열로 변한다. 따라서 2개의 롤사이에 에워싸인 좁은 공간에서 수십~수천kW의 큰 열량이 계속해서 공급되는 것이다. 그 결과 윤활해야할 면을 에워싸는 롤과 압연재료 뿐만이 아닌 윤활재료 그 자체도 급격하면서도 대량의 가열작용을 받는다.

(4) 압연가공에 의해 재료의 두께는 감소하고 길이는 늘어나기 때문에 롤에 접하고 있는 마찰면의 면적이 넓어진다. 늘어난 표면에는 당연히 새로운 결정이 출현한다. 이러한 신생면은 특히 활성이 크고 마찰계수가 크다.

(5) 신생면에 윤활제를 강제적으로 연속해서 공급하는 것은 불가능하기 때문에 어쩔수 없이 롤틈새의 입구로부터 자연적으로 빨려들어가는 것에 맡길 수밖에 없다. 일반적인 베어링에서는 베어링에 설치한 급기공으로부터 윤활면에 직접 강제급유할 수도 있지만, 회전하는 롤표면이나 새롭게 공급되는 압연소재에 급기공을 만든다는 것도 도저히 무리이다.

(6) 단일한 윤활제인 롤틈새부가 일반적인 베어링면으로서는 예를 찾아보기 힘들 만큼 넓다. 또한 단위면적당의 마찰에너지가 크기 때문에 전체로서의 발열열량이 크고 온도상승도 크다.

(7) 마찰면의 상대미끄럼속도가 일정하지 않고, 특히 중립점에서 미끄럼방향이 역전한다. 이것은 유막윤활의 성립을 기대하기에는 불리한 조건으로 작용한다. 압연윤활의 특징을 Table 1에 정리하여 나타낸다.⁽²⁾

이와 같이 일반적으로 베어링에 비해 압연윤활에서는 윤활을 어렵게하는 조건이 매우 많이 존재하고 있다.

2.1 냉간압연의 트라이볼로지^(3~9,11,23~25)

(1) 윤활기구

강관의 압연공정과 표면성상은 윤활기구의 변화에 크게 의존한다. 또한 압연작업이 차지하는 경제적인 중요성 때문에 압연윤활에 관한 연구는 일찍부터 많이 연구되기 시작하였다. 강관제조공정의 순서로 하면 열간압연공정이 냉간압연공정 전에 오지만, 압연윤활에 관한 연구는 냉간압연에서부터 먼저 시작되었기 때문에 냉간압연윤활에서부터 살펴보기로 한다.

일반적으로 냉간압연은 2mm 내외의 열연코일을 지름 150mm 이상의 압연롤, 최대속도 2500mpm, 1패스당 최대압하율 50%의 압하율인 조건에서 행해진다. 따라서, 물림각이 작고 또한 고속의 작업조건으로 인해 유체윤활조건이 형성되기 쉽다. 그러나 작업의 안정성확보 및 제품표면성상, 소둔에서의 녹생성 문제 등의 측면에서, 실제로는 유체윤활이 잘 되지않는 윤활제를 선택하고 있다. 이 때문에 경계윤활 혹은 심지어는 롤과 가공물사이에 금속간접촉으로 인한 응착이 일어나 가공재가 롤에 달라붙는 픽업(pick up)현상도 발생한다. 냉간윤활의 가장 지배적인 윤활형태로서 유체윤활과 혼합윤활이 고려되고 있으며, 그 중에서도 혼합윤활이 가장 지배적인 것으로 알려져 있다.

• 유체윤활 — 냉간압연에 있어서의 마찰에 대한 수학적인 모델로서 Nadai는 소성 유체윤활(Plasto Hydrodynamic Lubrica-

Table 1 압연운환의 특징

	소성가공	기계요소	
	압 연	베 어 링	기 어
운동형태	· 구름, 미끄럼 공존	· 구름 · 미끄럼	· 구름, 미끄럼 공존
운동방향	· 중립점에서 상대미끄럼속도가 0, 방향 역전 입구측 : 물 > 판 출구측 : 물 < 판	· 한방향	· 한방향
접촉형태	· 일회성(반복해서 접촉하지 않음) 신생면의 출현	· 동일점(면)의 연속 접촉 · 주기적으로 동일점(면)과의 접촉을 반복	· 주기적으로 동일점(면)과의 접촉을 반복
부하, 힘장	· 재료의 항복점 이상의 힘, 소성변형	· 재료의 탄성변형내의 힘	
접촉면적	크다(접촉면적의 확대)	작다	
발 열	· 소성가공열 ≫ 마찰열	· 마찰열(교반열)	
기 타	· 흡착, 반응이 일어나기 쉽다.	-	

tion : PHL)에 기초하여, 유막두께를 우선 먼저 가정하여 마찰력으로 인한 계면에서의 전단응력에 대한 해를 제안하였다. Cheng은 EHL이론으로부터, Walowit는 레이놀즈 방정식을 롤입구영역에 적용하여 유막특새를 구하였다.

Cheng은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이, 유체윤활이론에 의해 지배되는 유막내에서 강소성체의 재료가 압연되는 경우에 대하여 압연압력분포를 계산하고 이를 건조마찰의 경우와 비교하였다.⁽⁴⁾ 그림에서 압연압력분포는 건조마찰에서와 같은 중립점에서의 뾰족점은 사라지고 압력피크치는 물림측으로 이동함을 알 수 있다. 한편, 그 때의 유막특새 h 는 일반적으로 다음과 같이 주어진다.

$$h = \frac{6\eta V}{2k \tan \theta}$$

여기서, η = 윤활제의 점도

V = 롤속도 혹은 (롤속도 - 판출구측 속도)

$2k$ = 항복응력

θ = 롤 바이트 각

한편, 완전 유체윤활상태에서는 전방미끄럼(forward slip)이 감소되어 롤 미끄러짐(skidding)의 가능성이 증대되는 등, 조업의 불안정성을 야기할 수 있기 때문에 실제적인 압연은 혼합윤활영역에서 행해진다. 그러나 압연조건에 대한 윤활의 효과를 이해하는데 있어 윗식은 매우 도움이 된다.

• 혼합윤활 — Mizuno⁽²³⁾는 혼합윤활의 적용을 위해 윗식을 변형하여 다음과 같이 나

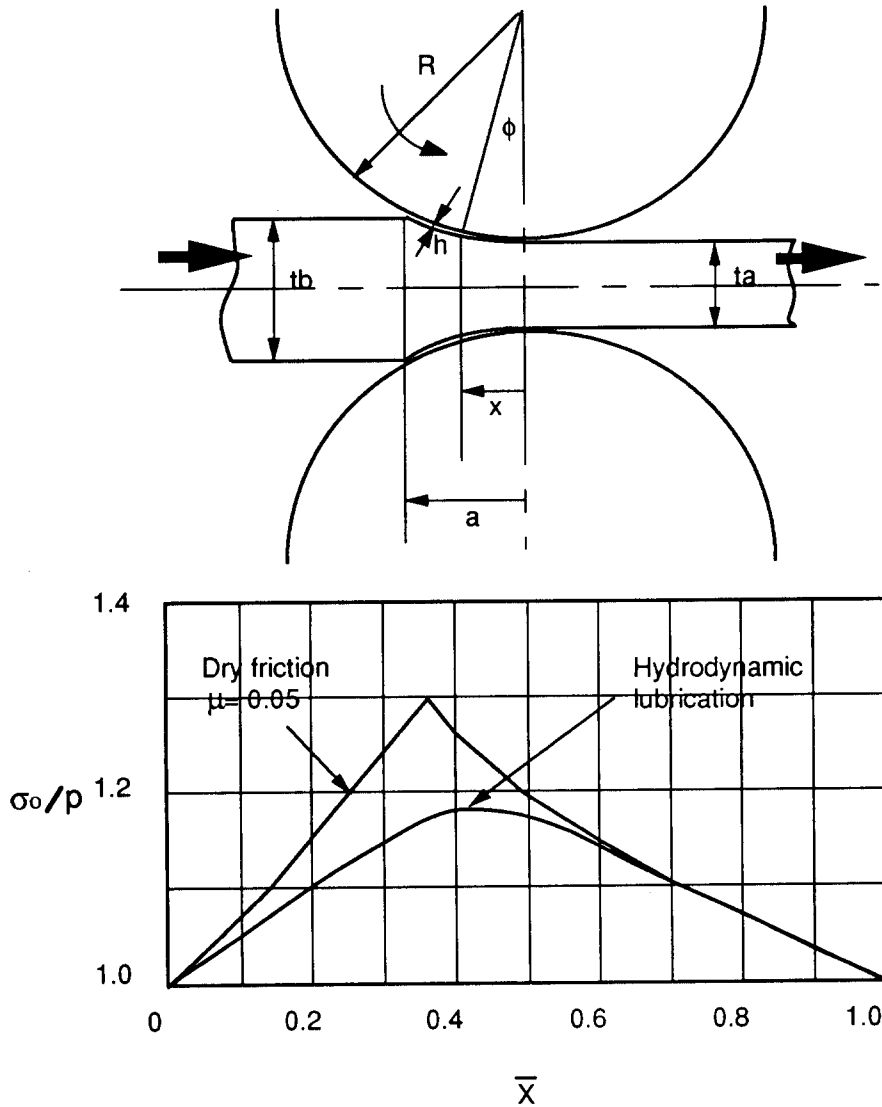


Fig. 1 유체윤활이론에 의한 압연압력분포와 건조마찰에서의 압연압력분포와의 비교

타내었다.

$$h = \frac{6\eta V}{2k \tan \theta} (1 - 2r/3)$$

여기서, r = 패스당 압하율

롤과 재료 사이의 유막 틈새가 롤과 재료의 표면거칠기와 같거나 그보다 작은 경우의 접촉에서는 경계윤활과 유체윤활이 혼재하는 혼합윤활영역으로 된다. 이러한 혼합윤활영역에서의 접촉상태를 그림으로 나타

낸 것이 Fig. 2이다. 이때의 마찰계수 μ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\mu = \frac{\tau}{P} = \frac{\tau_f C + \tau_f (1 - C)}{P_f C + q (1 - C)}$$

여기서, P 는 평균면압, τ 는 평균마찰응력, C 는 접촉율을 나타낸다.

$$q = 0, \mu = \tau_f / P_f : \text{경계윤활}$$

$$q > 0, 0 < C < 1 : \text{혼합윤활}$$

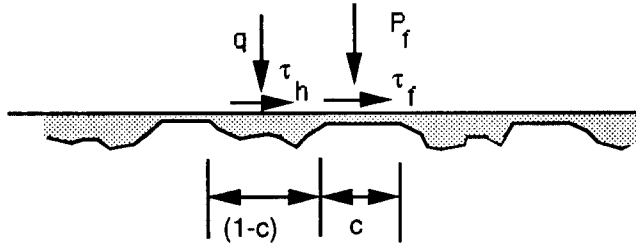


Fig. 2 혼합윤활상태의 모델

일련의 연구들은 윤활제의 점도가 높아지면 평균유막두께가 증가하여 유체윤활이 지배적인 형태로 됨을 보였다. 또한 압연속도도 유막에 큰 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. 저속에서의 경우, 윤활제의 대부분은 모두 빠져 달아나버려, 롤과 스트립의 틈새 사이에는 얇은 유막만이 형성되게 된다. ηV 의 값이 작은 영역에서는 경계윤활이 지배적이지만, ηV 가 증가하면 유막두께가 보다 두꺼워지는 혼합윤활영역으로 이동한다.

(2) 냉간압연유⁽⁵⁾

연속소둔라인의 보급에 따라 냉간압연되는 강판의 대부분에 대해서는 소둔전에 알칼리세정을 하기 때문에, 냉간압연시에는 종래의 광유계 밀클린 압연유 대신 윤활성을 중시하는 우지 등의 동식물유지를 기유로 하는 압연유가 순환방식으로 사용되고 있다.

또한, 자동차용 냉연강판의 청정도가 점점 중요시됨에 따라 압연기에 부착한 오물(스컴)의 비산이나 냉각수와 혼입에 의한 흠을 방지하기 위하여 압연기의 세정성과 냉각수의 여과성이 양호한 카티온계의 분산제나 유화제가 사용되는 한편 용점을 낮은 동식물성유지가 기유로서 사용되고 있다.

더욱, 강판의 청정도를 향상시키고 압연유의 윤활성 및 냉각수성상의 고안정성도도모하기 위해 합성에스테르계 압연유가 적용되고 있다. Table 2에 냉간압연유의 변천과정을 나타낸다.

(3) 냉간압연에서의 불량현상^(7~9)

• 히트 스트리크(Heat Streak)

히트 스트리크(히트 스크래치(heat scratch)라고도 함)는 고압하울, 고압연속도, 냉각수유량부족 및 롤의 표면거칠기가 클 경우에 롤접촉호내의 경계온도가 높아져, 재료가 롤에 눌러붙는 현상이다. 히트 스트리크는 롤연삭시에 발생하는 스크래치를 기점으로 고압하울, 고압연속도로 되는 경우에 많이 발생하는 것으로 알려져 있다. 롤표면에는 이와 같은 연삭스크래치는 무수하게 관찰된다. EHL(Elasto Hydrodynamic Lubrication)이론에 의해 이에 대한 발생 메카니즘을 검토한 결과가 보고되었다.⁽⁴⁾

롤표면에 스크래치가 존재할 경우에는 흠의 양단에서는 유막의 두께가 감소하고 유막의 압력과 온도는 급격히 상승한다. 이로부터 롤표면에 연삭스크래치 등의 흠이 있으면, 그 부분에서 국부적으로 압력과 온도가 상승하여 유막을 파단함으로써 눌러붙게 되는 것으로 추정된다. 단단한 이물질이 튀어들어 오는 그러한 경우를 생각하면 볼록한 흠인 경우는 흠의 정점에서 압력이나 온도가 최대되어 오목한 흠에 비해 큰 값이 되어 히트 스트리크가 발생하기 쉽다. 히트 스트리크를 방지하기 위해서는 (1) 롤연삭 스크래치를 되도록 작게 하며, (2) 이물질의 혼입을 방지하고, (3) 내압력, 내온도특성이 우수한 윤활특성을 가진 압연유를 선택, 개발하며 (4) 롤냉각수의 냉각성능을 향상시킬 필요가 있는 것으로 알려지고 있

Table 2 냉간압연유의 변천

		1900	1925	1950	1975	2000(년)		
박 물 용	직접방식		● (1930)			팜유 에멀션		
	순환방식			● (1943)	● (1955)		우지계 에멀션	
					● (1946)		우지계 에멀션	
						● (1967)	(극압첨가제 사용)	
						● (1972)	(지방산 사용)	
						● (1975)	(저용점형)	
							● (1982)	(카티온 분산형)
					● (1965)		(합성에스테르계 에멀션)	
		스트레이트형	● (1892)				광유+동식물유	
		시 트 개 이 지 용	에멀션형				● (1970)	광유+합성에스테르
				● (1940)		광유계 에멀션		
					● (1968)	(밀 클린 시트유) 광유+동식물유 에멀션		
					● (1970)	(고윤활 밀클린 시트유) 광유+합성에스테르 에멀션		
						● (1985)	(완전밀클린시트유) 합성에스테르 에멀션	

다.⁽¹⁰⁾

• 채터링(Chattering)^(8,9)

채터링은 압연기의 진동현상으로, 수십 Hz에서 500~600 Hz까지 걸쳐 있으며, 여러 종류의 현상이 있다. 이 가운데서 백수십 Hz~200 Hz의 채터링은 박물연속주조재와 같이 변형저항이 매우 큰 압연의 경우에 발생하고, 압연유의 유화특성과 윤활성이 직·간접으로 관여하고 있는 것으로 추정되

고 있다.

이에 대한 대책으로써, 4질량-스프링법을 토대로 한 진동의 안정판별결과로부터 감쇄 계수(유압책 등)를 크게 하거나, 밀강성이 큰 압연기가 필요하며, 또한 압연중의 소성 계수를 작게 하는 것이 바람직한 것으로 밝혀졌다.

• 슬립현상(Slip)^(8,9)

연주Al-킬드강의 냉간압연시, 물과 재료

와의 사이에 슬립이 일어나 스트립의 파단을 불러 일으키는 일이 종종 있다. 이것은 롤의 압연초기에 있어서의 이상마모에 의한 평활화, 즉 롤표면거칠기의 저하(표면거칠기 $0.2 \mu\text{mRa}$)에 의한 것으로 보여지고 있다. 롤표면거칠기의 저하는 마찰계수를 작게 하여 슬립의 발생을 초래하는 것으로 된다.

연주Al-킬드강에서 두드러지게 볼 수 있는 이 현상의 메카니즘으로서, (1) 강판 표면에 다량으로 존재하는 경도가 높은 FeAl_2O_4 나 Mn_2AlO_4 등의 개재물이 롤을 연마한다. (2) 강판중의 Al이 마모분의 롤면에서의 부착응착을 조장하고 백열롤로서의 전착경화와 더불어 작동롤면의 거칠기를 평활화한다는 두 설이 유력하다. 이 대책으로서는 진술한 개재물의 생성을 억제하기 위해 (1) 슬라브 가열온도를 낮출 것, (2) 강중의 Al량을 저감하고 생성되는 산화물을 연화시키는 것 등이 유효한 것으로 알려져 있다.⁽¹²⁾

• 모틀링(Mottling)^(8,9)

압연유의 유화상태에 기인하는 불량현상으로, 압연재의 표면에 생기는 하얀 반점모양의 결함을 말한다. 특히, 크롬도금용 강판(tin free steel plate)의 경우에 문제가 되는 것으로 알려져 있다. 이러한 하얀반점은 눈으로도 볼 수 있을 정도의 크기를 가진

오일피트가 여기저기 많이 분포하기 때문에, 이는 입경이 큰 에멀션이 압연재 표면에 충돌했을 때 붕괴하여 큰 기름방울이 되어 롤접촉호내로 끌려들어가 형성되는 것으로 추정되고 있다. 이에 대한 대책으로서, 우선 가능한 범위내에서 에멀션의 입자경을 작게 하는 것이 효과가 있을 것으로 생각되지만, 에멀션의 입자경이 작으면 운활성이 저하하기 때문에 모틀링의 억제와 운활성의 향상이라는 상충되는 성질을 조정할 필요가 있는 것으로 알려져 있다.

2.2 열간압연의 트라이볼로지^(3,13,14,23~25)

(1) 열연운활의 효과

1980년 포항제철 제2열연공장 준공시 전 스탠드에 열연운활(유압연)설비가 채용되었고, 수차례의 시험생산을 통해 개발된 기술을 토대로 1987년에는 포항1열연에, 1991년에는 포항2열연에 각각 개선된 설비를 설치, 운영하고 있다. 또한, 1987년 이후 준공된 광양열연의 전설비에 대해서도 열연운활설비를 채용, 운용하고 있다.

열간운활압연의 효과로는 Fig. 3에 보이는 바와 같이, 압연하중의 감소, 압연동력의 감소, 롤마모의 감소, 판크라운의 감소, 대압하압연, 메탈플로우의 개선 이외에도 스트립의 표면성상이나 프로필의 개선을 들 수 있다.^(7,8) 즉, 열간압연운활의 목적은,

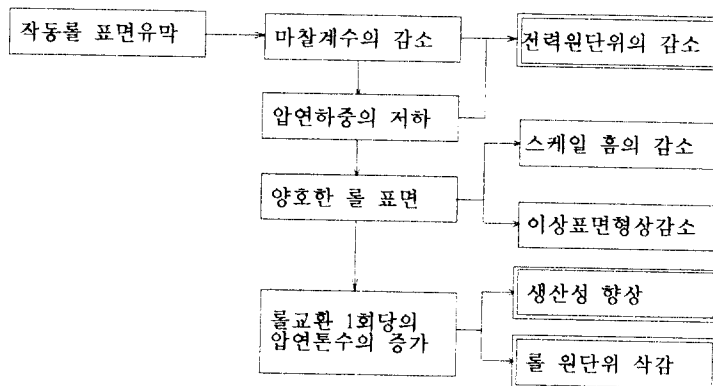


Fig. 3 열간운활압연의 효과

롤마모의 방지를 통한 롤원단위 절감과 롤마모프로필의 적정화에 의한 스케줄 프리압연의 실현으로 생산성을 향상시키는데 있다.

한편, 과제로서는 롤중심부와 엣지부에 대한 균일마모실현, 과유허 내지는 불균일한 압연유 분사에 의한 슬립 및 사행방지(안정된 통관성 확보), 압연유 분사노즐에 대한 보수점검, 페라이트역 열간압연기술과 유허, 신재질물과 압연유의 적합성, 스케줄 프리압연과의 관련기술 등이 검토되고 있다.

(2) 열간압연유허기구^(7,8)

열간압연의 유허기구에 대해서는 아직도 분명하게 밝혀지지 않은 부분이 많이 남아 있다. 그러나 혼합유나 에멀션이 롤바이트에 공급되는 대부분의 열간압연의 경우에 있어, 혼합유허형태가 지배적인 것으로 알려져 있다. 열간압연에서 보통 기름은 그 사용온도보다 훨씬 고온에서 사용되기 때문에 금속간 접촉은 불가피하다. 그럼에도 불구하고 유허효과가 나타나는 이유는, 롤바이트에 공급되는 기름의 대부분은 타서 없어지지만 고온강판과 롤이 접촉하는 시간이 1/100 이하로 매우 짧기 때문에, 타고 남은 일부의 압연유와 접촉에서 생긴 반응생성물, 그 밖에 잔재들의 혼합물에 의한 유허효과 때문인 것으로 추정되고 있다.

(3) 열간압연유⁽¹³⁾

열간압연유의 조건으로서 (1) 롤표면에 대한 부착성과 내수세성, (2) 내열성, (3) 열간유허성 등을 들 수 있다.

초기의 열간압연유로서는 천연유지가 대부분을 차지하였으나, 현재는 광유-유지계의 기유에다 지방산, 인산에스테르를 첨가한 기름이 주종을 이루고 있다. 최근에는 합성에스테르가 사용되기도 한다.

공급되는 압연유가 롤냉각수에 씻겨내려가 버려 유허효과를 낼 수 없게 된다거나, 스트립압연후에도 롤표면에 압연유가 계속

남아 있어 다음번 스트립에 대한 치입불량 등이 일어나는 것을 방지하기 위하여 고체유허제나 그리이스를 적용하는 시도가 행해지고 있다. Table 3에 열간압연유의 변천과정을 나타낸다.⁽⁷⁾

(4) 압연유공급방식⁽¹³⁾

열간압연유의 공급은 냉간압연에서와는 달리 열간압연에서만 다음과 같은 조업의 특수성으로 인해 냉간압연유의 공급과는 다른 방식을 취한다.

- 롤을 냉각하기 위해 열간작업에서 사용하는 냉각수 안에는 냉간작업에서와는 달리 다량의 스케일이 함유되어 있어 순환방식으로 여과하여 사용하기가 어렵고,

- 압연되는 판재가 연속냉간압연에서와 같이 전후방장력에 의해 충분한 구속을 받지 못하는 상태에서 압연롤에 이송되어 작업이 진행됨으로써 미끄럼, 사행 등을 제어하기가 매우 어렵고,

- 압연재료의 변형저항이 적고 마찰계수가 큰 조건(냉간압연의 수배)에서의 압연이기 때문에 마찰이 압연하중의 큰 부분을 차지하는 등이 그것이다.

열간압연유허의 급유방식으로서 워터인젝션 방식과 스팀 어토마이저 방식이 있으나 전세계적으로 90% 이상이 전자의 방식을 채택하고 있다.

급유장소로서는 작동롤, 보강롤, 스트립의 입출측 등으로 각 제철소마다 제각기 서로 다르다.

3. 강판압연롤과 트라이볼로지^(3,6,7,14,15~25)

3.1 냉간압연롤⁽¹⁵⁾

냉간압연작업에서는 안정조업이 무엇보다도 중요시되며, 여기에 냉연강판에 대해서는 박물화, 고강도화는 물론 치수형상 정도에 대한 요구 역시 보다 엄격해지고 있다. 이같은 상황하에서 냉간압연롤에 가해지는 요구 또한 더욱더 가혹해져 이에 대한 대응

Table 3 열간압연유의 변천

	1960	1970	1980	1990	1995(년)	
박 관 압 연		●	열간압연윤활개시(유지계(고온중합형) (고온접촉시 롤표면에 유기피막형성))			
			●	에스테르계(비중합형)압연유 (고속, 고부하압연시의 롤냉각성 향상)		
			●	고체윤활제의 이용 (고속, 고부하압연시의 윤활성 향상)		
			●	그리스윤활제의 이용 (부착성향상, 고체윤활제의 적극적 이용)		
				●	고크롬주철용 압연유 (E.P.제의 첨가 윤활성 향상)	
				●	HSS계 롤용 압연유 (롤의 살거침어짐 방지)	
				●	스텐레스강관압연 (눌어붙음 방지)	
				●	RM, FM 압연유 구분 사용 (롤재, 압연조건 등에 따른 압연유 사용 구분)	
	후 관 압 연		●	열간압연윤활개시(유지계 압연유) (1980년대 후반부터 롤의 고크롬화, 시프트화로 인한 전폭압연 윤활중지)		
					●	스텐레스강윤활압연 (눌어붙음 방지)

으로써, 고성능롤의 개발과 롤사용기술의 개선이 행해지고 있다. Table 4에 냉간압연롤에 요구되는 특성을 나타낸다.⁽⁷⁾ 여기서는 냉간압연롤의 중요한 특성인 내마모성, 내사고성에 더하여 최근 주목받고 있는 롤표면개질, 롤코팅에 대하여 설명한다.

(1) 내마모성

냉간압연에 있어서 압연능률의 향상 및 비용절감을 위해서는, 장기간 연속적으로 사용할 수 있도록 내마모성이 뛰어난 작동

롤이 필요하며, 이를 위한 수단 중의 하나로서 고크롬롤이 사용되고 있다. 이러한 내마모성의 향상은 크롬첨가에 의한 기지조직의 강화 및 경질탄화물의 미세석출에 의한 것으로, 크롬의 함유량이 많을수록 그 효과가 큰 것으로 알려져 있다.

최근에는 내마모성의 개선을 위해 10% 크롬단강롤이 실용화되어 압연처리량은 3%크롬단강롤의 3배, 5%크롬단강롤의 2배로 향상하고 있다.⁽¹⁶⁾ 한편, 고크롬롤의 고가격,

Table 4 압연기술의 진보와 압연롤의 변천

		1960	1970	1980	1990
압연기술의 진보	압연공정	(열간압연) (냉간압연) (밀의 종류)	대형화 대형화, 고속화, 연속화, HR, PC, WR Shift	컴팩트화 컴팩트화	
	품질향상		HC, PC, VC, FFC, CR	슬라브의 저온가열압연 사상압연입축판두께의 증대 고부하압연	
	생산성 개선		열간압연유효 냉간압연유효		
열간압연용롤	롤에 대한 요구조건	내결손, 내마모롤	내피로, 내손상롤 롤원단위의 절감 에너지 절약, 소경화		
	롤재질	고Ni그레인롤, 원심주조복합롤 칠드루철롤	고크롬주철롤(Hi-Cr)		고속도공구강계롤(HSS)
냉간압연용롤	롤에 대한 요구조건	내사고성, 내기황성롤	고심도소입롤 고품질, 대입하		
	롤재질	0.8C-2.2Cr 단강	0.8C-5Cr 단강, 고크롬주철 단조고합금강	다이스, 세미하이강	
	표면재질		Cr도금		TD, PVD
	롤제조법		진공탈가스법, 진공주조 ESR	고온화산법	
	중주과가열열처리			저주과가열열처리 서브제로열처리	

난연삭인 점에서 종래의 5%크롬단강롤에 미량의 Ti을 첨가하여 내마모성을 향상시킨 결과가 보고되었다.⁽¹⁷⁾

(2) 내사고성

냉간압연롤에 요구되는 특성 가운데 특히 중요한 것으로서, 앞서의 내마모성 이외에

내사고성이 있다. 이 내사고성에 대한 평가로서 히트 크랙의 깊이, 전동피로강도, 롤재의 인성이 있으며, 각각에 대하여 자세한 검토결과가 보고되고 있다.^(18,19)

(3) 표면개질

냉간압연롤의 표면개질로서 Cr도금, 용

사, PVD, CVD, TD 등의 피막을 형성하는 방법과 이온주입, 이온질화, 레이저조사 등과 같이 표면 그 자체에 대한 개질이 있으나, 현재는 주로 Cr도금이 행해지고 있다.

조질압연롤에 크롬도금을 적용한 결과, 도금을 하지 않았을 때는 80 km 정도의 압연에서 롤마모에 의한 거칠기 저하가 두드러지게 나타나는데 비해, 크롬도금롤에서는 거칠기의 저하가 작고, 보통롤의 7배 정도의 수명을 가지고 있음이 보고되었다. 또한, TD처리롤에서의 윤활성평가결과에서는 베어링강 크롬도금롤과 비교하여 약1/2의 마찰계수를 나타내고, 고윤활성을 얻음과 동시에 늘어붙음한계가 높아진다는 것도 보고되었다.

(4) 롤코팅

냉간압연에 있어서 작동롤 표면이 모재와 서로 다른 물질로 피복되어 있는 상태를 보통 롤코팅이라 부르며, 스텐레스강의 냉간압연에서도 롤코팅이 제품의 표면광택에 영향을 미친다는 것이 경험적으로 알려져 있다. 이 코팅층은 옅은 흑갈색의 평활한 층으로 산소농도가 높은 것이 그 특징이다.

3.2 열간압연롤

RM(Roughing Mill, 조압연밀)과 FM(Finishing Mill, 사상압연밀)의 전단의 작업롤에는 아다마이트주철롤, FM후단에서는 니켈그레인롤이 주로 사용되어 왔다. FM전단의 아다마이트롤에는 압연중에 작은 거북이등 모양의 크랙이 수없이 생겨나지만, 이 상태가 적절한 경우 오히려 표면의 열충격을 완화하여 롤파손을 막는 이외에도 표면에 마그네타이트를 주성분으로 하는 피복이 형성되어 마모를 방지하고 있다. 이 피복의 색깔이 검기때문에 흑피라 불리고 있다. 그후 내마모성이 우수한 열간압연용 주철롤로서 개발되어 활발히 사용되게 된 것이 고크롬주철롤이다. 또한 최근에는 이보다 더욱 내마모성이 개선된 고속도공구

강계 롤(HSS Roll)이 개발되어 그 적용이 전세계적인 주목을 받고 있다.

열간압연롤은 기계적인 부하에다 열적인 부하도 함께 받기 때문에 강인성, 내마모성, 내사고성이 요구된다. 이제까지 롤재질에 대해서는 복합화, 고합금화쪽으로, 사용기술에 대해서는 롤냉각, 윤활 등의 개선이 행해져왔다. Table 4에 열간압연롤에 요구되는 특성을 정리하여 나타낸다. 여기서는 내표면거칠어짐성, 내마모성에 대하여 설명한다.

(1) 내표면거칠어짐성

열연용롤의 표면거칠어짐현상은 롤표면에 반복해서 작용하는 열적, 기계적 부하에 의해 발생하는 롤표층부의 국부적인 결함현상이다. 표면거칠어짐의 형태로부터 유성흔, 밴딩, 배살갓 등으로 분류하고 있다. 롤표면의 표면거칠어짐은 제품의 표면품질에 직접적인 악영향을 미칠뿐 아니라 롤교체주기가 빈번해짐으로서 생산성에도 영향을 준다. 그 발생 메카니즘에 대해서는 오래전부터 연구가 되어 왔으며, 마모 이외에도, 진동피로, 소성유동 및 늘어붙음 등의 손모현상이 관여하는 것으로 알려져 있다.

• 늘어붙음(소부, Scuffing)

스텐레스강관, 특히 페라이트계 스텐레스강관의 열간압연에 있어서는 종래부터 롤의 표면거칠어짐현상이 문제시되고 있으나, 이것은 스텐레스강관이 롤쪽에서의 늘어붙음에 의한 것으로 추정되고 있다. 이러한 늘어붙음현상은 시물레이션실험에 의하면, 강관의 표면소성유동에 의해 발생한 박편상입자가 롤표면에 부착하는 것에 의해 분명해졌다. 더욱, 늘어붙음현상이 성장하는 것은 한번 늘어붙은 곳에 계속 덧쌓이는 것처럼 박편이 늘어붙으면서 폭, 길이 모두가 성장하는 모델로 설명되고 있다.

• 롤흑피

열간압연의 사상압연 전단에 있어서의 작동롤에는 흑피라 불리는 산화물이 생성되어

내마모성을 현저하게 향상시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 이 흑피를 조기생성하여 롤표면을 보호하고, 또한 장기적으로 지속 되도록 하는 것이 무엇보다도 요망된다. 압연시물레이터의 실험에 의해, 가열중에 압연재 표면에 생성된 산화스케일(FeO)이 압연중에 롤표면에 이착하여 이것이 Fe₃O₄로 변환하는 것이 확인되었고, 더욱 4중압연기의 경우, 흑피생성에는 적절한 온도범위가 존재하며 백얼롤에 의해 이착한 FeO가 작동롤표면에 압착되어 평활하고 안정된 흑피로 되어가는 것이 판명되었다. 한편, 흑피가 너무 두꺼워지면 부분적인 박리가 일어나 늘어붙기까지 하기 때문에 두께를 적정하게 할 필요가 있다.

(2) 내마모성

현재 열간압연에 있어서는 일반적으로 전단에는 아다마이트, 고크롬주철롤, 후단에 Hi-Ni Grain, 고크롬주철롤이 사용되고 있으나, 최근 새롭게 고부하, 고속화에 부응하는 내마모성이 뛰어난 롤로서 고속도공구강계 롤(HSS계 롤 : 일명 하이스롤)이 개발되어 사용되기 시작함으로써 큰 주목을 받고 있다. 실기에서의 적용결과에서는 사상 후단의 경우, 고크롬주철롤에 비해 3배, 고니켈그레인롤에 비해 5배 이상 내마모성이 향상된 것으로 나타나고 있다.

4. 결 론

압연가공에 있어서의 트라이블로지의 문제는 에너지절약, 자원절약(원단위 절감)의 면에서 뿐만이 아니라 압연재의 표면품질향상이나 공정을 개선한다는 면에서도 더욱 더 중요시되고 있다. 압연시에 재료의 표면 거칠기, 표면광택, 색조 등을 제어할 수 있고, 또한 표면흠을 대폭적으로 억제할 수 있다고 한다면 정정라인 등의 후공정처리를 대폭적으로 축소할 수 있게 된다. 이러한 관점에서 향후의 전망으로서는,

• 냉간박판압연의 경우,

- (1) 압연재에 대한 보다 우수한 고품질의 요구에 부응하기 위하여 표면거칠기, 광택도, 백색도에 대한 제어기술의 향상, (2) 표면결함을 억제하기 위해 스킴이 발생하기 어려운 저응점 압연유의 개발, (3) 다품종 소량생산의 증가에 따른 압연유의 통일, (4) 롤재질의 고합금화 및 고속도공구강계 롤, 또는 세라믹 롤으로의 진전과 롤표면개질기술, (5) 소망하는 롤표면을 가공하는 연삭기술 등을 들 수 있다.

• 열간박판압연의 경우,

- (1) 고속도공구강계 롤의 저마찰화, 저가 격화로 사용확대 및 윤활기술의 향상, (2) 고윤활성 압연유의 개발과 통판안정성의 향상, (3) 롤의 표면거칠어짐, 롤 흠이나 스케일 등에 의한 압연재의 표면흠 억제기술 등이 중요과제로서 그 발전이 기대되고 있다.

참고문헌

- (1) Suzuki, H., 1994, Kikai no Kenkyu, Vol. 46, No. 2, pp. 285~289.
- (2) Iino, M., 1994, "The Recent Trends of Lubrication and Lubricants for Cold Rolling of Stainless Steel and Aluminum," Tribology in Rolling Process, Nishiyama Memorial Lectures 148, 149th ISIJ.
- (3) Schey, J. A., 1984, Tribology in Metal Working : Friction, Lubrication and Wear, ASM, Metals Park, Ohio, pp. 249 ~341.
- (4) Cheng, H. S., 1966, Friction and Lubrication in Metal Processing, 69, ASME.
- (5) Iwao, H., 1994, "Recent Trends in Cold Rolling Oil for High Speed Rolling of Thin Gauge Sheet Steels," Tribology in Rolling Process, Nishiyama Memorial

- Lectures 148, 149th ISIJ.
- (6) Robert, W. L., 1979, Cold Rolling of Steel, Marcel Dekker, New York and Basel.
- (7) Yarita, I., Azushima, A., Ikeda, A., Yamada, H. and Kenmochi, K., 1994, "Tribology in Rolling Process," Memorial Symposium of 100th Rolling Theory Committee, Development and Prospect of Theory and Technology of Steel Rolling, ISIJ.
- (8) Yarita, I. and Ito, K., 1993, "Friction and Lubrication," Theory and Practice of Flat Steel Rolling, ISIJ.
- (9) Kawanami, T. and Shibata, Y., 1985, "Progress in Tribology of Rolling Process," History and Recent Development in Technology of Rolling Process, ISIJ.
- (10) Yarita and Kitamura, et. al., 1981, Tetsu to Haganae, 67, 14, p. 2152.
- (11) Yarita, I., 1983, "Friction, Lubrication in Rolling Process and Roll Materials," Recent Development in Strip Rolling Process and Rolling Mills," Nishiyama Memorial Lectures 92, 93rd, ISIJ.
- (12) Yasuda and Karoyama, et. al., 1981, Tetsu to Haganae, 67, 12, s1203.
- (13) Ataka, K. and Inoue, T., 1994, "Recent Studies on Lubrication in Hot Strip Rolling," Tribology in Rolling Process, Nishiyama Memorial Lectures 148, 149th ISIJ.
- (14) Robert, W. R., 1983, Hot Rolling of Steel, Marcel Dekker, New York and Basel.
- (15) Kitahama, M., 1994, "Recent Trends of Rolls for Cold Rolling," Tribology in Rolling Process, Nishiyama Memorial Lectures 148, 149th ISIJ.
- (16) Mori, T. et. al., 1991, Materials and Process 4, ISIJ, p. 474.
- (17) Kobayashi, M. et. al., 1991, Ibid. 4, ISIJ, p. 470.
- (18) Obashi, H. et. al., 1981, Tetsu to Hanganae, ISIJ, p. S387.
- (19) Kwashima, S. et. al., 1987, Mechanical Working and Steel Processing, 24, p. 49.
- (20) Hara, S., 1994, "Recent Technical Development on Rolls for Hot Strip Mill," Tribology in Rolling Process, Nishiyama Memorial Lectures 148, 149th ISIJ.
- (21) Sano, Y., 1994, "Recent Trend and Future Step of Roll Technology," Tribology in Rolling Process, Nishiyama Memorial Lectures 148, 149th ISIJ.
- (22) Spuzic, S. and Strafford, K. N. et al., 1994, "Wear of Hot Rolling Mill Rolls: An Overview," Wear, 176, pp. 261~271.
- (23) Process Tribology: Lubrication in Metal Working, 1993, JSTP, Corona Pub., Tokyo.
- (24) Flat Rolling Process, 1993, JSTP, Corona Pub., Tokyo.
- (25) Recent Development in Tribology of Metal Working Process, 1993, The Journal of JSTP, Vol. 34, No. 393, 1993-10, JSTP.