

열간압연용 고속도공구강롤의 열피로 및 마모특성

류재화* · 박종일*

(1996년 9월 12일 접수)

Thermal Fatigue and Wear Properties of High Speed Steel Roll for Hot Strip Mill

Jae-Hwa Ryu and Jong-Il Park

Abstract

The thermal fatigue and wear properties of high speed steel roll which was recently developed were investigated by observing microstructure, by measuring mechanical and physical properties, by conducting thermal fatigue testing, and by measuring the amount of wear in actual mill. High speed steel roll had better thermal fatigue life than high chromium iron roll, which was due to lower carbide content, higher strength, and higher thermal conductivity. The amount of wear of high speed steel roll was nearly the same as that of high chromium iron roll in the first finishing stand, which was due to the oxide formation on the roll surface. However, in the third finishing stand, the wear resistance of high speed steel roll was 2~3 times as good as that of high chromium iron roll because the former had higher hardness at high temperature.

Key Words : High Speed Steel Roll, High Chromium Iron Roll, Thermal Fatigue, Wear

1. 서론

열간압연공장에서 사용되는 롤은 종류도 많고 요구되는 특성도 다양하지만 공통적으로 요구되는 성질은 내표면거침성, 내마모성 및 내사고성이다. 좀 더 구체적으로 주어진 스탠드에 어떤 재질의 롤을 사용할 것인가는 각 스탠드의 열적·기계적 부하상태, 제품의 품질에 미치는 영향도 및 1회당 사용시간 등을 고려하여 결정해야 한다. 제품의 표면품질과 치수·형상에 직접 영향을 미치는 마무리압연 스탠드에는 전단과 후단에 사용하는 롤의 재질이 다른데, 전단은 압연관의 온도가 높고 접촉시간이 길고 전단롤의

표면거침이 제품표면 품질에 직접 영향을 주기 때문에 내마모성보다는 내거침성이 우수한 재질이 요구된다. 마무리압연 전단용 롤재질로는 고크롬 주철롤(이하 Hi-Cr롤이라 함)이 보편적으로 사용되고 있었는데, 최근에는 압연조건이 가혹해지고 품질요구 조건이 엄격해지며 따라 Hi-Cr롤보다 내거침성이 우수한 고속도강계 주강롤(이하 HSS롤이라 함)이 개발되어 열연공장에서 사용중인 것으로 알려져 있다.^(1~3) 마무리 압연 후단은 전단에 비해 압연온도가 낮고 압연속도가 빠르고, 롤 회전수가 많으므로 내거침성보다는 내마모성이 우수한 재질이 요구된다. 이에 더하여 마무리압연 후단으로 갈수록 압연판이 얇아

* 포항종합제철(주)

아주 작은 부분이며, 이 부분이 주위의 큰 부분에 의해 구속되어 있기 때문이다.⁽⁸⁾ 파단된 시편의 파단면은 주사전 자현미경으로 관찰하였으며, 일부 시편은 길이 방향으로 절단하여 열피로 균열의 발생 위치 및 표면균열수 등을 조사하였다.

롤재의 마모특성은 두종류의 롤을 열연 마무리 압연 첫 번째 스탠드(F1)과 세번째 스탠드(F3)에 사용하여 열간 압연을 행한 후 교체된 롤을 완전히 냉각시킨 후 롤 형상 측정기를 이용하여 롤중양부의 마모깊이를 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 롤재질의 미세조직 및 기계적 성질

HSS롤재와 Hi-Cr롤재의 광학현미경 조직사진을 Fig. 2에 나타내었는데, 사진에서 회색은 기지이고, 흰색은 탄

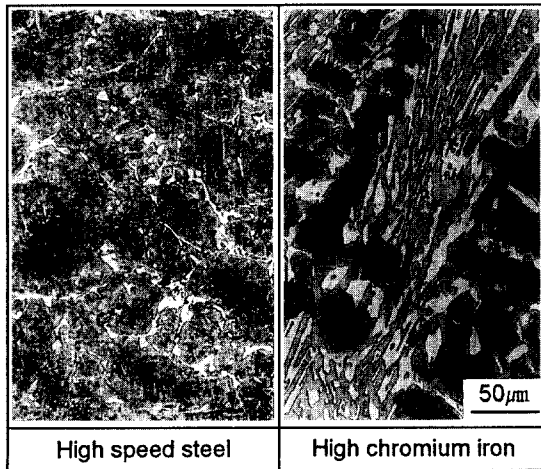


Fig. 2 Microstructures of roll materials

화물이다. 롤을 열처리할 때 재고용화처리후 템퍼링을 행하였기 때문에 기지조직은 템퍼드 마르텐사이트 (tempered martensite) 이다. 탄화물은 Table 1에 나타난 바와같이 각 재질에 첨가되는 합금원소의 종류 및 량이 다르기 때문에 생성되는 탄화물 종류 및 량이 다르다. Hi-Cr롤재에는 Cr이 많이 첨가되어 있기 때문에 주로 Cr계 M_7C_3 형 탄화물이 존재한다. HSS롤재에는 탄화물 형성 원소인 Cr, V, Mo, W 등이 있기 때문에 형성되는 탄화물의 종류도 다양하다. 입계에 비교적 조대하게 존재하는 탄화물은 Cr계인 M_7C_3 이고, 입계를 따라 가늘고 길게 존재하는 탄화물이 Mo계인 M_6C 이고, 입내에 존재하는 구상인 탄화물이 V계인 MC 탄화물이다. 영상분석기를 이용하여 각 탄화물량을 분석한 결과를 Table 2에 나타내었는데, HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 탄화물량이 적다. 그리고 HSS롤재에 존재하는 탄화물량 11.6%중에서 약 6.6%가 입계를 따라 존재하는 것을 알 수 있다.

탄화물 및 기지의 경도는 Table 2에 나타난 바와 같다. HSS롤재에서는 탄화물 형태에 따라 경도가 다른데, MC의 경도가 가장 높고, M_6C 가 가장 낮다. 기지의 경도는 Hi-Cr롤재에 비해 HSS롤재의 경도가 상당히 높음을 알 수 있다. 탄화물과 기지를 포함한 전체경도는 HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 높는데, 이것은 HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 탄화물량은 적지만 탄화물 및 기지의 경도가 높기 때문이다.

인장강도는 Table 2에 나타난 바와 같이 HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 높는데, 이러한 결과는 경도의 경향과 잘 일치한다.

3.2 롤재의 열피로 거동

HSS롤재와 Hi-Cr롤재의 열피로 수명을 Fig. 3에 나타

Table 2 Microstructure, hardness, and tensile strength of roll materials

Roll material	Carbide		Matrix		Bulk hardness (Hv)	Tensile * strength (kg/mm ²)
	type (vol %)	hardness (Hv)	micro-structure	hardness (Hv)		
High speed steel roll	MC (5)	3054	tempered martensite	646	702	98.4
	M_7C_3 (5.1)	1698				
	M_6C (1.5)	1478				
High chromium iron roll	M_7C_3 (26.5)	1624	tempered martensite	513	558	86.7

* : tensile strength at 200 °C

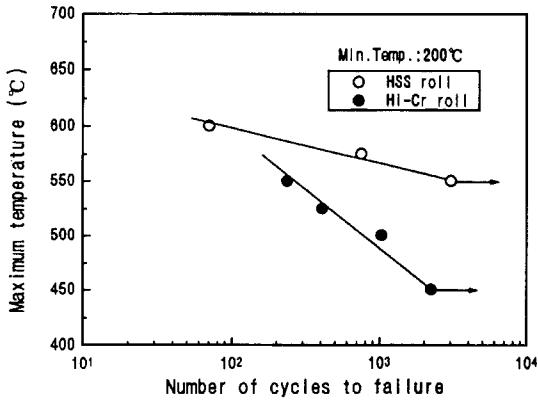


Fig. 3 Thermal fatigue life of roll materials

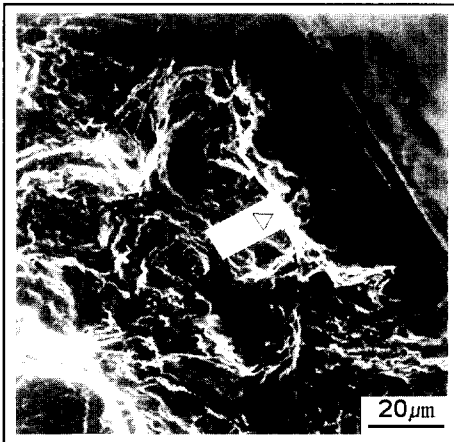


Fig. 4 Fracture surface of thermal fatigued high speed steel

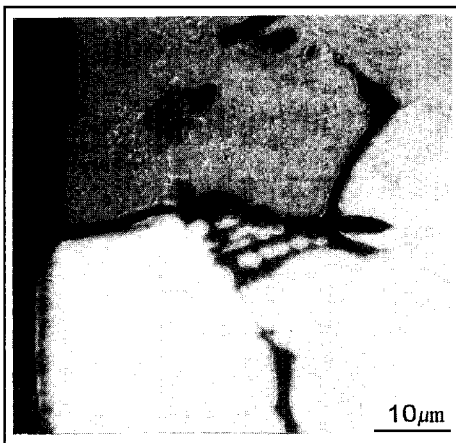


Fig. 5 Surface crack in thermal fatigued high speed steel

내었다. 동일한 온도에서 HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 피로수명이 훨씬 길었다. 그리고 각 롤재질에 있어 최대온도가 높아짐에 가해지는 피로수명이 감소하는데, 이것은 최대온도가 높아짐에 따라 열응력이 증가하기 때문이다.

열피로를 마친 시편의 파단면을 Fig. 4에 나타내었다. 파단면상에서 화살표로 표시된 검게 산화된 부분이 열피로에 의해 발생된 균열이며, 나머지 부분은 이 균열이 급격하게 진전되어 파단된 것이다. 파단면상에서 나타난 바와 같이 롤소재에서는 작은 피로균열이 발생해도 급격히 성장해서 파단에 이른다라는 것을 알 수 있으며, 이런 관점에서 롤소재의 열피로수명은 주로 균열생성에 의해 지배된다고 할 수 있다. 이것은 롤소재가 강도가 높은 반면 연성이 거의 없어 노치 민감도가 아주 크기 때문인 것으로 생각된다.

열피로시 균열의 발생위치를 조사하기 위해 파단된 시료를 절단하여 표면을 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 피로균열은 시료표면에 존재하는 탄화물에서 생성되고 탄화물을 따라 성장함을 알 수 있다. 탄화물은 Table 2에 나타난 바와 같이 기지에 비해 경도가 매우 높고 연성이 없기 때문에 열피로균열의 생성 및 성장경로가 된다. 균열의 생성위치로 작용하는 탄화물은 주로 입계에 길게 연결되어 존재하는 탄화물이나 또는 조대한 탄화물이다.

3.3 롤재의 마모

HSS롤의 마모량을 현재 열연 마무리압연 전단 스탠드에 사용중인 Hi-Cr롤과 비교하여 살펴보았다. Fig. 6에는 두께가 얇은 압연재를 1550톤 압연한 후 교체한 F3 스탠드 롤의 마모형상을 나타냈다. 동일한 압연톤수에서 HSS롤이 Hi-Cr롤에 비해 마모량이 상당히 적음을 알 수 있다.

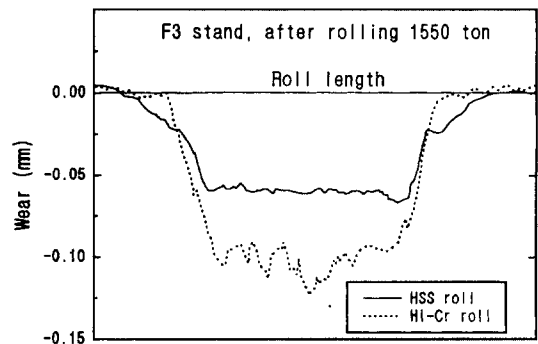


Fig.6 Wear profile of F3 work rolls

일반적으로 마모량은 물재질이 동일할 경우에는 가해진 압연하중과 압연길이에 의존하는데, 실제 여러대를 압연하는 경우에는 압연되는 판폭과 압하량이 다르기 때문에 이를 고려하여 압연롤의 마모량은 다음식을 사용하여 나타낼 수 있다.

$$W = K \cdot \sum_{i=1}^m \frac{P_i \cdot R_i}{B_i \cdot C_i} \quad (1)$$

여기서 W : 압연재 m 대 압연후의 마모량, K : 마모상수, m : 압연대수, P_i : i 번째 압연재의 압연하중, R_i : i 번째 압연재의 압연시 롤 회전수, B_i : i 번째 압연재의 폭, C_i : i 번째 압연재의 접촉장이다.

식(1)의 우측항에서 $\{P_i/(B_i \cdot C_i)\}$ 은 i 번째 압연재의 압연압력이므로 롤재의 마모량은 압연압력과 롤회전수의 곱(이하 마모인자값이라고 칭함)이 된다. 즉, 압연압력이 증가하거나 롤회전수가 많아지면 마모량이 증가함을 알 수 있다.

식(1)을 이용하여 열연 마무리압연 F1과 F3 스탠드의 마모량을 Fig. 7에 나타내었다. 마모인자값이 작은 F1 스탠드에서는 HSS롤과 Hi-Cr롤의 마모량 차이는 거의 없지만 마모인자값이 큰 F3 스탠드에서는 HSS롤이 Hi-Cr롤에 비해 내마모성이 2~3배 우수해짐을 알 수 있다.

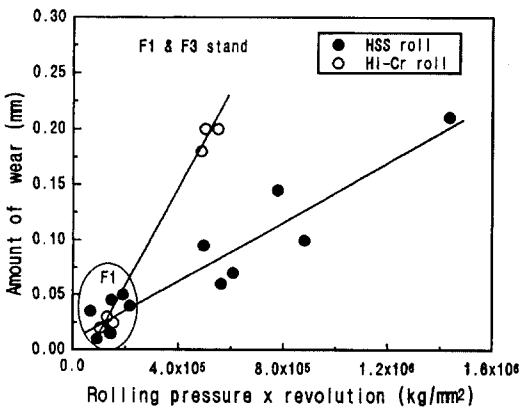


Fig. 7 Wear of roll materials

4. 고찰

4.1 HSS롤재의 열피로 특성

소재의 열피로 특성에 미치는 인자들은 미세조직, 기계적 성질 및 물리적 성질 등을 들 수 있다. 미세조직은 피

로균열의 생성위치로 작용하는 탄화물이 적을수록 좋다. 기계적성질은 과단이 인장시에 발생하므로 인장강도가 높고, 고온에서 쉽게 변형이 되지 않도록 고온압축강도가 높을수록 좋다. 물리적 성질로는 열팽창계수와 Young's modulus가 작고 열전도도가 클수록 좋은 것으로 알려져 있다.⁹⁾ 이러한 관점에서 Fig. 3에 나타난 HSS롤재의 열피로 특성을 Hi-Cr롤재와 비교하여 고찰해보고자 한다.

HSS롤재와 Hi-Cr롤재의 미세조직은 Table 2에 나타난 바와 같이 Hi-Cr롤재에 비해 HSS롤재에서 열피로 균열의 생성위치로 작용하는 탄화물량이 적다. 이에 더하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 열피로 균열은 주로 입계를 따라 존재하는 조대하고 긴 탄화물에서 발생하는데, HSS롤재의 탄화물중 열피로 균열 생성 위치로 작용하는 탄화물은 주로 M_7C_3 와 M_6C 로서 그 량은 6.6% 정도이므로 Hi-Cr롤재의 탄화물인 M_7C_3 의 26.5%에 비해 탄화물량이 매우 적다. 탄화물량과 균열생성 위치와의 상관성을 살펴보기 위해 열피로 실험후 시편 표면에서 피로균열수를 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 피로균열수가 적으며, 이것은 탄화물량과 균열생성 위치가 직접적인 관계가 있음을 보여준다. 또한 온도변화가 클수록 발생하는 열피로균열수가 증가하였는데, 이것은 온도변화가 클수록 시편에 걸리는 열응력이 크기 때문이다. 열피로 실험후 관찰한 과단면을 보면 Fig. 4에 나타난 바와 같이 작은 피로균열이 존재해도 급격히 과단이 일어나기 때문에 열피로균열이 많이 존재할수록 과단이 조기에 발생할 것으로 생각된다. 따라서 미세

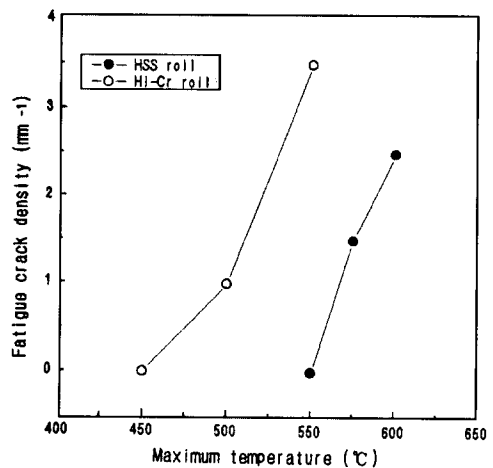


Fig. 8 Surface crack density in thermal fatigued specimens

조직상으로는 HSS롤재에서 열피로 균열 생성 위치로 작용하는 탄화물량이 Hi-Cr롤재에 비해 적기 때문에 열피로 수명이 증가되는 것으로 생각된다.

인장강도는 Table 2에 나타난 바와 같이 HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 높고, 압축강도도 HSS롤재가 높은 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾ 따라서 HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 인장강도 및 고온압축 강도가 높기 때문에 열피로 수명이 증가하게 된다.

물리적 성질은 열팽창계수, 열전도도, Young's modulus 등을 고려해야 하는데, 이들의 효과를 복합적으로 고려하여 작성된 Eichelberg quality factor (내열인자)로 비교해 볼 수 있다.⁽⁹⁾

$$\text{Eichelberg quality factor} = \frac{\{(1-\nu) \cdot k \cdot \sigma_u\}}{E \cdot \alpha} \quad (2)$$

여기서 ν : Poisson's ratio, k : 열전도도, σ_u : 주어진 온도에서 인장강도, E : Young's modulus, α : 열팽창 계수

위의 식에서 내열인자값이 클수록 열에 잘 견딜 수 있는데, 이를 위한 물리적 성질로는 열전도도는 크고, Young's modulus 및 열팽창 계수는 작을수록 내열인자값이 커진다. 본연구에 사용된 롤재의 물리적 성질과 식(2)를 이용하여 계산한 내열인자값을 Table 3에 나타내었다. HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 열전도도가 크고, 인장강도가 높기 때문에 내열인자값이 크게 됨을 알 수 있다.

이상의 미세조직, 강도 및 물리적 성질 측면에서 종합적으로 HSS롤이 Hi-Cr롤에 비해 우수하기 때문에 열피로 수명이 우수한 것으로 생각된다.

4.2 HSS롤의 마모특성

압연롤의 마모량은 압연조건 (압연하중, 압연길이)과 롤재질의 경도와 다음과 같은 상관성이 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾

$$W = K \frac{P \cdot L}{H_s} \quad (3)$$

여기서 W : 마모량, K : 마모상수, P : 압연하중, L : 압연길이, H_s : 롤 표면경도

위의 식에서 압연조건이 일정할 때 롤의 마모량은 표면경도에 의해 지배된다. 열간압연롤에서는 압연재와의 접촉시에 롤표면 온도가 급속히 온도가 높아지기 때문에 롤의 고온경도값이 마모에 직접 영향을 미치게 된다. 실제 HSS롤재와 Hi-Cr롤재의 온도에 따른 기지의 경도변화를 Fig. 9에 나타내었다. HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 고온에서의 경도값이 매우 높은데, 이것은 용체화처리시 HSS롤재의 기지에 존재하는 Mo 및 Cr이 템퍼링시 미세하고 경도가 높은 2차 탄화물의 석출에 기인하는 것으로 알려져 있다.⁽⁷⁾

HSS롤과 Hi-Cr롤의 마모량을 비교한 Fig. 7을 보면 마모인자값이 큰 F3 스탠드에서는 두 재질간의 마모량의 차이가 크지만 F1 스탠드에서는 두 재질간의 차이가 거의 없다. 이는 마무리압연 스탠드의 롤표면에 생성되는 산화막과 직접적인 관계가 있다. F1 스탠드에서는 롤표면에 산화막이 쉽게 생성되므로 롤표면과 압연재의 직접 접촉이 일어나지 않고 산화막과 압연재와의 접촉에 의해 마모

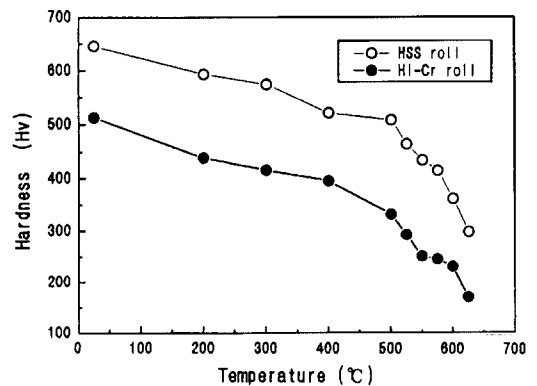


Fig. 9 Hardness of roll materials with temperature

Table 3 Physical properties and calculated Eichelberg quality factor of roll materials

Roll material	ν^*	k^* (W/m·K)	σ_u (kg/mm ²)	E^* (kg/mm ²)	α (10 ⁻⁶ /K)	Eichelberg quality factor
High speed steel roll	0.27	25.5	98.4	23500	14.0	5567
High chromium iron roll	0.3	20.0	86.7	22000	14.1	3913

* : ref (7)

가 일어난다. 산화막의 조성이 HSS롤과 Hi-Cr롤이 동일한 것으로 알려져 있기 때문에 F1 스탠드에서는 롤재질에 따른 마모량의 변화는 거의 없는 것으로 생각된다.⁽¹¹⁾ 그러나 F3 스탠드에서는 롤표면에서 산화막 생성이 어렵기 때문에 주로 압연재와 롤표면의 접촉에 의해 마모가 일어나고, 이에 따라 Fig. 9에 나타난 바와 같이 고온경도가 높은 HSS롤이 Hi-Cr롤에 비해 내마모성이 우수하게 되는 것으로 생각된다.

5. 결 론

(1) HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 열피로수명이 우수하였는데, 이것은 열피로 균열의 생성 위치로 작용하는 탄화물량이 적고, 인장강도 및 압축강도가 높고, 열전도도가 크기 때문이다.

(2) HSS롤의 마모량은 롤표면에 산화막이 생성되는 F1 스탠드에서는 Hi-Cr롤과 유사하지만 산화막이 생성되지 않는 F3 스탠드에서는 HSS롤재가 Hi-Cr롤재에 비해 고온 경도가 높기 때문에 내마모성이 2~3배 우수하였다.

참고 문헌

- (1) JC Arnaud, 1996, "Trials of high speed steel rolls in Solac hot strip mills", 37th MWSP Conf. Proc., Vol.XXXIII, pp.261~265.
- (2) R.Webber, 1996, "The performance of high speed steel rolls at Dofasco", 37th MWSP Conf. Proc., Vol.XXXIII, pp.267~269.
- (3) D.R.Barzan, 1996, "The use and performance of HSS rolls at Inland's 80" hot strip mill", 37th

MWSP Conf. Proc., Vol.XXXIII, pp.271~273.

- (4) J.J.deBarbadillo and C.J.Trozzi, 1981, "Mechanism of banding in hot strip mill work rolls", Iron and Steel Engineer, Vol.58, pp.63~72.
- (5) 原 千里, 1993, "Recent technical development on rolls for hot strip mill", Tribology in rolling process, 第148回 西山記念技術講座, 日本鐵鋼協會, pp.135~161.
- (6) R.V.Williams and G.M.Boxall, 1965, "Roll surface deterioration in hot strip mills", JISI, Vol.203, pp.369~377.
- (7) M.Hashimoto, S.Otomo, K.Yoshida, K.Kimura, R.Kurahashi, T.Kawakami, T.Kouga, 1992, "Development of high-performance roll by continuous pouring process for cladding", ISIJ Inter., Vol.32, No.11, pp.1202~1210.
- (8) J.H.Ryu, O.Kwon, P.J.Lee, and Y.M.Kim, 1992, "Evaluation of the finishing roll surface deterioration at hot strip mill", ISIJ Inter., Vol.32, No.11, pp.1221~1223.
- (9) J.C.Radon, D.J.Burns, and P.P.Benham, 1966, "Push-pull low-endurance fatigue of cast iron and steels", JISI, Vol.204, pp.928~935.
- (10) 水谷, 1993, "Fundamentals on wear of materials", Tribology in rolling process, 第148回 西山記念技術講座, 日本鐵鋼協會, pp.109~130.
- (11) S.I.Araya et al., 1991, "Analysis of wear and oxide layer of roll materials in hot rolling", CAMP-ISIJ, Vol.4, p.1570.