

탄화물 강화 Ni-Grain Roll 개발

서용찬, 정봉호*, 이형철, 김윤기*
제품연구소, INI STEEL(주)
포항공장, INI STEEL(주)*

Development of the Carbide Reinforced Ni-Grain Roll

Y. C. Suh, B. H. Chung*, H. C. Lee and Y. K. Kim*
Research & Development Center, INI STEEL
Pohang Works, INI STEEL*

Abstract

In order to improve the productivity and quality of the hot rolled products, many modern mills have continuously required advanced roll materials. The introduction of HSS rolls in early stands of the Hot Strip Mill brought the excellent performance in wear resistance and surface roughness. Ni-grain rolls used in the later stands was needed to improve the roll performance. Therefore, the carbide reinforced Ni-grain roll was developed. The present paper will describe the development of carbide reinforced rolls made by INI STEEL and the results of mill tests. The wear resistance was increased upto 40% and the anti-accident ability was remarkably improved compared to the normal Ni-grain roll.

Key words : MC carbide, Ni-Grain roll, indefinite chilled roll, wear resistance, carbide reinforced

1. 서론

세계시장에서 경쟁력을 갖추기 위한 유일한 해법은 신제품개발이다. 특히 열연롤 시장은 신제품 개발에 따라 시장판도가 급격히 변화되어 왔다. 예를 들면, Fig. 1 의 열연롤 재질 변천과정에서와 같이, 1970년대 이전 정치주조법에 의해 구상흑연주철, Ni-Grain 과 Adamite 를 주로 생산해왔던 미국업체들은 1980년대 수직식 원심주조기를 이용한 원심주조 Hi-Cr Iron 과 Hi-Cr Steel 등장으로 유럽업체들에게 시장 주도권을 상실하였고, 반면 유럽업체들은 낙후된 압연설비와 신제품 개발 수요부족으로, 1990년대부터 다시 일본업체들에게 신제품 개발 주도권을 넘겨줬다. 일본업체들은 수평식 원심주조기의 개발과, 원심주조 HSS 개발, 최근에는 CPC HSS 개발 등 끊임없는 신제품 개발을 통해 열연롤 시장을 현재까지 주도하고 있다. 따라서 신제품 개발이 뒤쳐지는 것은 시장의 상실을 동반하기 때문에 롤메이커들은 새로운 제품을 개발하기 위해 R & D 분야에 집중적으로 투자하고 있다.

최근 열연롤의 신제품 개발은 철강업체들의 끊임없는 제품 품질 향상 및 생산성 증대를 위한 내마모성, 강도 및 인성, 열피로 특성등의 기본적인 물성이 더욱 향상된 새로운 롤재질에 대한 요구에 맞추어 급속히 발전하고 있다. 특히, 국내 열연업체의 경우, 2000년대 초반 사상전단의 HSS 적용이 안정되면서, 조압연의 HSS화가 진행되고 있으며, 사상압연도 3번 스탠드까지 사용하던 HSS 를 5번 스탠드까지 확대하여, 롤교체주기의 연장에 의한 생산성 향상을 도모하고 있다. 당사

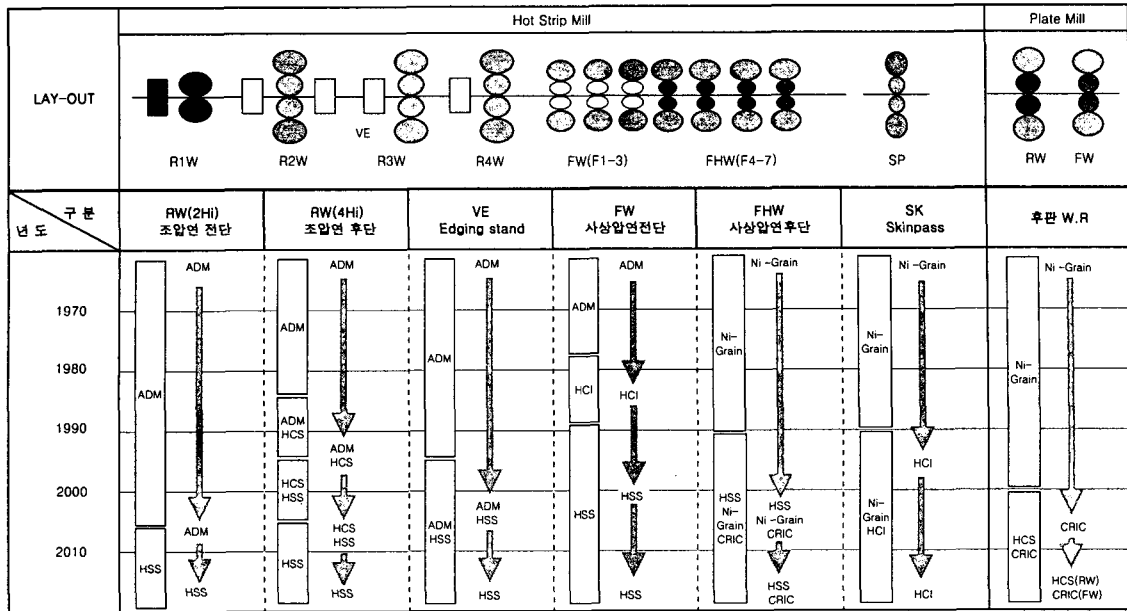


Fig. 1 The development history of roll materials in hot strip mill and plate mill

에서도 이와 같은 철강업체의 요구에 부응하고 일본업체와 비교하여 경쟁력을 확보하기 위하여, 최근 사상 HSS 개발, 조압연 HSS 개발, 조압연 SEMI-HSS 의 개발이 성공적으로 완료되어 양산되고 있다.

그러나 HSS 개발과 현장적용의 성공에도 불구하고, 사상 후단에 사용하는 Ni-grain roll 의 내마모성이 HSS roll 에 비해 현저히 떨어지는 단점 때문에, 열연생산성 향상을 위해 Ni-grain roll 의 내마모성 향상이 가장 큰 과제로 남아 있다. 90년대 중반 Ni-grain roll 의 내마모성 문제를 극복하고자, 일부 롤 메이커에 의해 Ni-grain roll 의 대체 신재질로 Hi-Cr iron roll 에 흑연을 정출시켜 Ni-grain roll 의 우수한 장점과 Hi-Cr iron roll 의 우수한 내마모성이 복합적으로 결합된 흑연정출형 Hi-Cr Iron roll 이 개발되었지만(1), 압연사고를 만날 때의 크랙 발생률이 높고 또한 크랙의 깊이가 깊게 진행되기 때문에, Ni-Grain roll 을 대체할 새로운 합금계의 롤을 후단에 적용하지 못하였다.

따라서 최근의 개발방향은 Ni-grain roll 이 갖고 있는 우수한 내사고성은 그대로 유지하면서, 기존 Ni-grain roll 의 M_3C 탄화물보다 경도가 높은 고경도 MC 탄화물을 일부 정출시켜 내마모성이 기존보다 약 10~20% 향상된 탄화물 강화 Ni-grain roll 의 개발(2,3)로 전환되었다. 당사에서 2001년부터 탄화물 강화 Ni-grain roll 의 개발을 착수하여, 최근 기존 탄화물 강화 roll 보다 내마모성이 대폭 향상된 차세대 탄화물 강화 roll 의 개발에 성공하였으며, 본 논문에서는 개발된 차세대 탄화물 강화 Ni-grain roll 의 특징에 대해 논하고자 한다.

2. 일반 Ni-Grain Roll 의 특징

2.1 응고특성

Ni-grain roll 은 Ni 함량이 높기 때문에 *Ni-Hard roll* 라고 말하고, Fig. 2 (a, b) 와 같이 기지내에 30~35%의 공정 탄화물과 2~5%의 공정흑연이 혼합된 조직으로 구성되어 *mottled cast iron* 혹은 *indefinite chilled roll* 이라고 한다. 이러한 조직 형성을 이해하기 위해서 아공정 주철의 응고과정을 설명하면 다음과 같다. 아공정 주철의 응고시 최초의 고상을 초정 오스테나이트 수지상정으로, 잔류액상이 공정조성을 가지는 공정온도에 도달할 때 까지 성장한다. 평형응고 조건하에서는 $\gamma+G$ 공정조직이 형성되지만, 흑연의 성장속도가 느리기 때문에 액상 전체가 $\gamma+G$ 공정으로 응고하기 위해서는 액상중에 충분한 양의 흑연핵이 존재하여 냉각이 정지될 만큼의 공

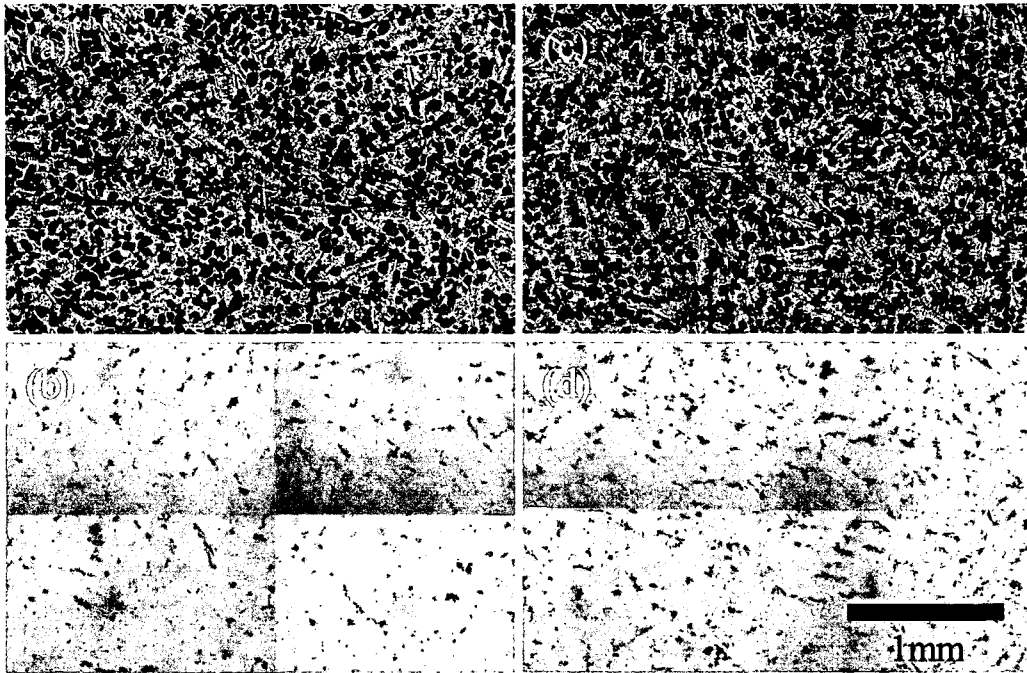


Fig. 2 Optical microstructures of roll surface in FEI roll(a,b) and CRIC roll(c,d)

정이 형성되어야 한다. 그러나 냉각속도가 증가하면 흑연핵의 성장이 저지되고 어떤 임계냉각속도 이상에서는 $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ 공정온도에 이르게 된다. 흑연의 느린 성장과는 달리 세멘타이트는 대단히 빨리 성장하기 때문에 세멘타이트가 한번 핵생성되면 잔류 액상은 주로 $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ 공정으로 응고한다.

Fig. 3 에 흑연 및 세멘타이트 공정이 응고되는 온도와 냉각속도와의 관계(4)를 표시하였다. 냉각속도가 U 이하일 때는 $\gamma + \text{G}$ 흑연공정이 형성되며, 그 이상의 냉각속도에서는 $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ 공정이 형성된다. 선 XY 의 위치는 용탕중 흑연핵의 밀도에 의존한다. 즉, 흑연핵의 밀도가 감소하면 선 XY 는 좌측으로 이동하여 낮은 냉각속도에서도 $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ 공정이 형성된다. 한편, 용탕중의 여러 합금원소는 $\gamma + \text{G}$ 공정온도인 T_G 와 $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ 공정온도인 T_{CE} 를 변화시킴으로서 공정응고 형성에 영향을 미친다. 일반적으로 Ni-grain roll 은 원심주조법에 의해 제조되고 있기 때문에, $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ 공정을 형성하기에 충분하며, 세멘타이트 공정의 응고시 백선화원소인 Cr, Mn 그리고 Mo 등은 탄화물로 편석하여 잔류 액상에는 이들 원소가 부족하다. 반면에 흑연화 원소인 Ni, Si 등은

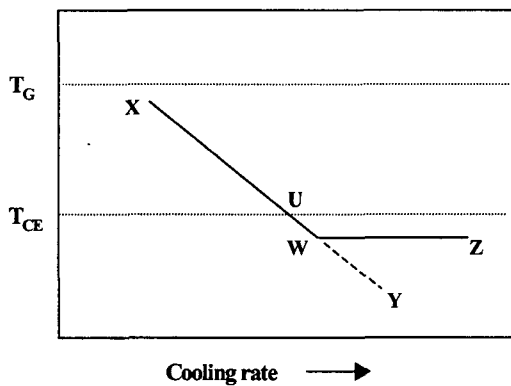


Fig. 3 Conditions for the formation of gray and white iron

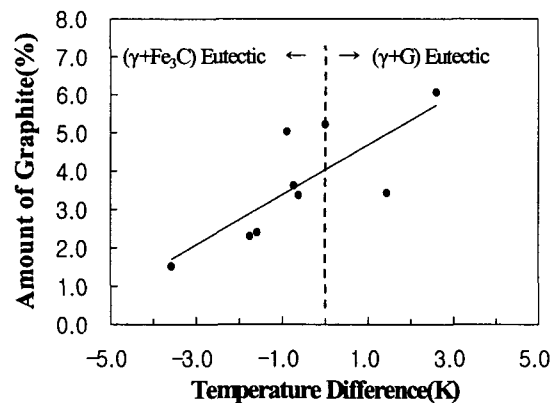


Fig. 4 Relation between temperature difference and amount of graphite

잔류액상에 편석되어 T_G 와 T_{CE} 의 변화로 인해 최종응고부에서 $\gamma+G$ 이 형성된다. 따라서 Fig. 4 과 같이 흑연화원소(Si, Ni)와 백산화원소(Cr, Mo, Mn)의 비율에 의한 ΔT (T_G-T_{CE}) 의 변화로 흑연량의 조절(5)이 가능하다.

2.2 후단롤의 요구특성

마무리 압연의 과정은 7 단계로 나뉘어 진다. F1~F3 까지의 압연롤을 전단롤이라 하며, F4~F7 까지의 압연롤은 후단롤이라고 한다. 후단 압연롤은 전단 압연롤에 비해 마모손상 및 표면거침이 제품의 치수형상과 표면품질에 더욱 큰 영향을 미치기 때문에, 후단 압연롤에 사용되는 롤재질은 매우 우수한 내마모성과 내거침성이 요구된다. 특히, F5 이후의 후단으로 진행할수록 압연속도가 빠르기 때문에 판꼬임 사고의 발생빈도가 높으며, 만약 이들 사고가 발생하면 정상적인 조업 이상의 압연에 의한 마찰발열, 가공발열에 의해 롤 표면온도가 국부적으로 상승하고, 수냉되었을 때의 열충격에 의해 롤 표면에 크랙이 발생한다. 만약 이들 표면크랙의 존재를 발견하지 못하고 바로 롤을 재사용하기 시작하면 그 표면크랙을 기점으로 하여 크랙이 진전하고 롤의 스폐링(spalling)사고를 일으킬 위험이 있다. 이 경우 라인을 수 십 시간 멈추지 않으면 안되어 큰 손실을 초래하기 때문에 내사고성도 동시에 요구된다.

사상 압연기 후단의 work roll 로서 주로 사용되고 있는 Ni-Grain roll 은 표층부에 소량의 정출흑연을 함유하며 열전도성, 윤활성이 우수하기 때문에 내열피로성 및 내소착성이 우수하다(6). 일반적으로 조직 중에 흑연을 함유한 재료는 열전도율이 높으며, 흑연이 응력집중원으로 변형을 흡수할 수 있기 때문에 응력완화 효과를 제공할 뿐 아니라 탄성계수를 저하시켜 발생응력이 낮은 특성등을 가지고 있기 때문에 열간균열에 대한 저항성이 높다. 또한 흑연은 그 자체가 고체 윤활제로서 작용하기 때문에 정출 흑연이 접촉 표면에 노출하면 마찰을 경감시켜 내마멸성의 향상에 기여한다.

3. 탄화물 강화 Ni-Grain Roll 의 개발

3.1 내마모성 향상기술

일반적으로 롤의 내마모성은 기지의 경도와 탄화물의 종류에 의해 좌우된다. 그러나 기존 Ni-grain roll 에서 내마모성을 향상을 위해 탄화물의 부피를 증가시키면 비례적으로 흑연부피가 감소한다. 흑연부피가 2% 이하로 감소하는 경우에는 Fig. 5 와 Fig. 6 에서와 같이 roll 의 열충격 저항성이 감소되고(7,8), 마찰계수가 증가되기 때문에 기존 Ni-grain roll 의 우수한 특성을 상실하게 된다. 또한 반대로 흑연부피가 5% 이상일 경우에는 내마모성이 떨어지게 된다. 따라서 흑

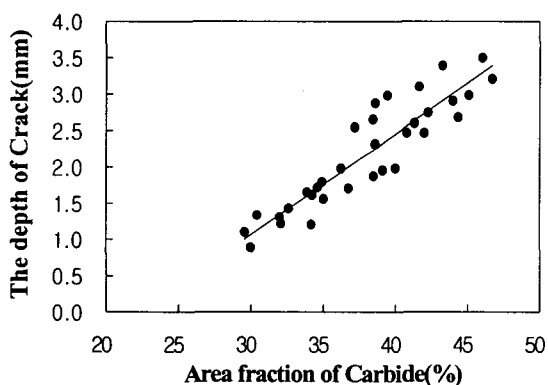


Fig. 5 Relation between surface crack and amount of cementite

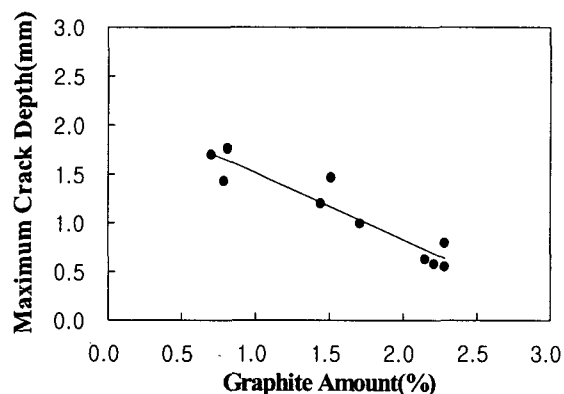


Fig. 6 Relation between surface crack and amount of graphite

Table 1. The chemical composition range and transition temperature of carbide reinforced Ni-grain roll

분류	Chemical composition(wt.%)							Temperature(°C)	
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mn	ΣX	T _L	T _{CE}
Ni-grain roll	3.00	0.50	0.50	3.00	1.00	0.10	-	1281	1107
	4.00	2.00	2.00	5.00	3.00	2.00			
Carbide reinforced Ni-grain Roll(CRIC)	3.00	0.50	0.50	3.00	1.00	0.10	< 5.0	1238	1109
	4.00	2.00	2.00	5.00	3.00	2.00			

연부피를 일정하게 유지하면서 고경도 MC 탄화물 함량을 증가시키는 것이 합금설계의 가장 중요한 요소(2)이다.

본 개발에서는 Table 1 와 같이 기존 Ni-grain roll 이 갖고 있는 Fe₃C 탄화물 이외에 내마모성을 향상시키기 위해, 경도가 가장 높은 고경도 MC 탄화물을 약 1% 이하로 정출시키고자 특수 첨가원소(ΣX)을 첨가하였으며, 또한 Si, Ni 및 Cr, Mo 함량을 적절히 조절하여 그림 2(d) 와 같이 기존의 Ni-grain roll 보다 약 1~2% 많은 흑연을 정출시켰다.

3.2 조직 미세화 기술

당사는 1999년 주입변수 조절 및 특수 접종처리에 의해 FEI(Fully Equiaxed Indefinite) roll 을 개발하였다. FEI 롤은 기존 롤의 조대한 수지상정을 등축정 혹은 미세한 수지상정 조직으로 변화시켜 폐기경 까지도 균일한 조직이 유지되도록 미세조직을 개선한 롤이다. 대부분의 롤은 냉각속도가 가장 빠른 초기경을 F7 스탠드에 적용한 후, 사용경이 증가할수록 F6-F5-F4 스탠드 순으로 이동한다. 이것은 폐기경으로 갈수록 느린 냉각에 의해 발생하는 조직 편석이 최종제품에 영향을 미치지 못하도록 사용조건을 제약하였지만, 최근에는 F4 와 F5 스탠드까지 HSS 가 적용되면서 Ni-grain roll 은 F6 스탠드 까지만 적용할 수 없기 때문에 폐기경까지 조직편석부위가 롤에 존재하지 않아야 한다. 따라서 당사의 탄화물 강화롤은 기존의 FEI 에 적용된 생산기술을 적용하여 Fig. 2 (c, d) 와 같이 폐기경까지 조직편석이 발생하지 않도록 조직을 치밀화 시켰다.

일반적으로 조직 치밀화를 위해서는 응고시 냉각능을 향상시키는 것이 가장 효과적인 방법이다. 실제 롤을 생산하는데 있어 냉각능 향상의 방법으로는 주입온도 감소와 원심력 증가, 두 가지 방법밖에 없다. FEI 와 탄화물 강화롤은 Fig. 6 과 Fig. 7 에서와 같이 일정한 원심력하에서 주입온도 감소로 수지상정을 미세화 시켰으며, 냉각능 향상에 의한 흑연량 감소는 특수 용탕처리와 접종방법 개선에 의해 흑연의 핵생성 증가에 의해 흑연감소분을 상쇄시켰다.

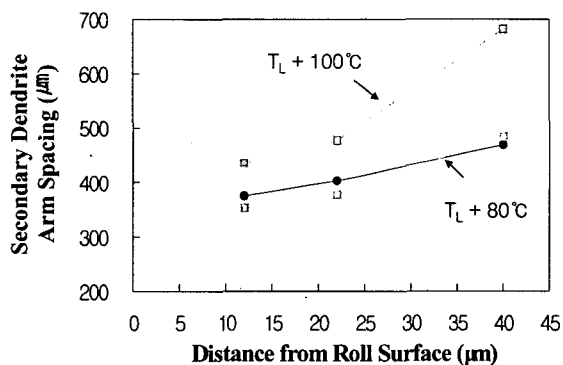


Fig. 6 Variation of secondary dendrite arm spacing with pouring temperature

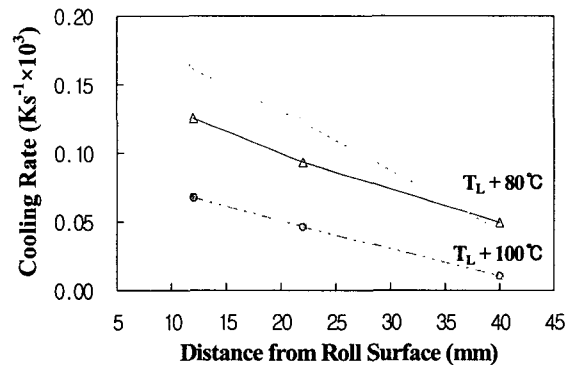


Fig.7 Effect of cooling rate on pouring temperature

4. 탄화물 강화 Ni-Grain Roll 의 열간압연 적용 결과

4.1 내마모성

일반적으로 롤의 내마모성을 결정하는 인자는 롤의 표면온도이다. 마모는 롤의 표면온도가 550°C 이하에서는 Abrasive 마모, 그 이상의 온도에서는 산화마모가 발생한다고 알려져 있다(9). 후단롤로 사용하는 Ni-grain roll 은 압연재와의 접촉부위에서 약 600°C 까지 증가하기 때문에, Abrasive 마모와 산화마모가 동시에 발생한다고 할 수 있다. Abrasive 마모는 기지의 경도와 탄화물의 종류 및 분포에 의해 좌우되며, 산화마모는 롤의 표면에 형성된 흑피의 생성과 박리, 반복적인 열응력 및 contact stress 등에 영향을 받는다고 보고되고 있지만, 아직까지 정확한 마모기구에 대해서는 알려져 있지 않다.

당사가 개발한 탄화물 강화 Ni-grain roll 은 Fig.8 과 같이 기존의 Ni-Grain roll 과 동일한 roll 경도하에서 기지내에 고경도 MC 탄화물을 분산시켜, Abrasive 마모 저항성을 향상시켰다. 특히 MC 탄화물은 첨가원소 X 에 의해 부피가 결정되며, 첨가량이 증가할수록 MC 탄화물 부피 증가로 내마모성이 향상된다(10). 또한 Fig. 9 와 같이 X 첨가량을 달리한 경우(I, II), 실제 압연 실적은 I 형이 기존 FEI Ni-grain roll 보다 약 10%, II 형이 약 40% 까지 내마모성이 향상되었으며, 타사 탄화물 강화 Ni-grain roll 보다 약 20% 우수한 내마모성을 나타내고 있다. 이것은 Fig. 10 와 같이 압연후 마모 profile 로부터, roll 중앙부의 마모량에서 있어서 탄화물 강화 Ni-grain roll 이 FEI Ni-grain roll 보다 적기 때문에, 최종 연삭량이 감소된다는 것을 의미한다.

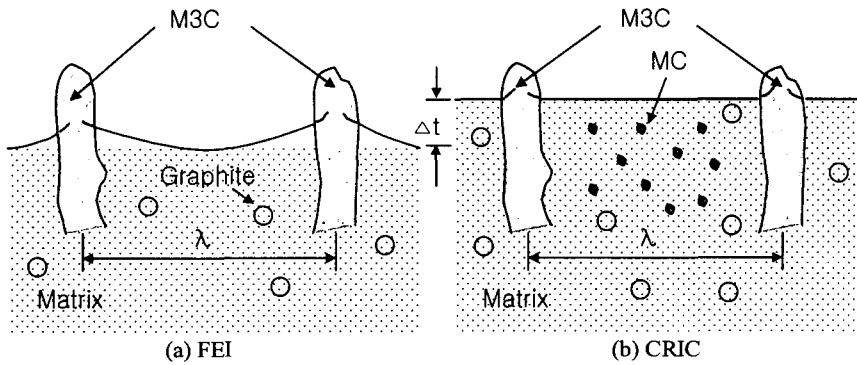


Fig. 8 Schematic diagrams of microstructure difference between FEI and CRIC

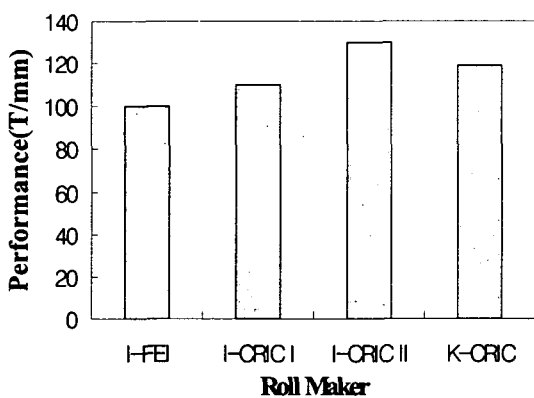


Fig. 9 Overall performance comparison of a Ni-Grain roll and thress CRIC roll grades in last finishing stands

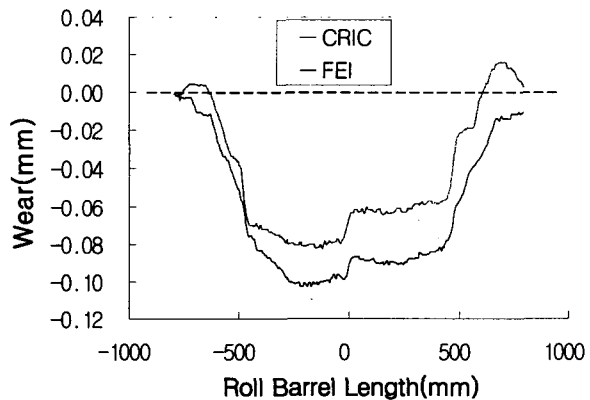


Fig. 10 Wear profile of the last finishing work rolls

4.2 내사고성

후단용 Ni-grain roll 에서 자주 관찰되는 work roll 의 손상은 roll 표면의 조직편석(탄화물 편석, 혹은 흑연편석)에 기인하여 압연재에 흔적을 남기는 cat mark, work roll 표면의 급격한 온도변화(50↔600℃)에 의한 heat crack(혹은 fire-crack)과 표면거침(surface deterioration), 압연재 tail 부의 겹침이나 변형저항이 큰 압연재 tail 부 등의 외부 물질 치입에 의해 발생하는 indentation 이 있다. Cat mark 를 제외한 다른 손상들은 열피로에 의해 발생하는 heat crack 이 압연하중이나 work roll 과 back up roll 간의 접촉에 의해 발생하는 응력에 의해 진전된다. 이러한 heat crack 은 통상적으로 0.15 mm 이내에 존재하기 때문에 연삭과정에서 대부분 제거되나, heat crack 이 완전히 제거되지 않은 상태에서 roll 을 재사용하던가 혹은 외부 충격에 의한 heat crack 의 급격히 진파되면 spalling 과 같은 대형사고로 연결되기 때문에, Ni-grain roll 의 열저항성은 신재질 개발에서 평가되어야 할 중요한 물성이다.

일반적으로 Fig. 5 와 Fig. 6 와 같이 탄화물 분율이 높던가, 흑연량이 적을 경우 Ni-grain roll에서 열저항성이 감소된다. 당사에서 개발한 탄화물 강화 Ni-grain roll 은 기존의 FEI Ni-grain roll 보다 탄화물의 분율이 약 2~5% 적은 반면 흑연은 약 1~2% 높게 설계되었다. 따라서 열충격 저항성은 기존 roll 보다는 높고, 조직 미세화 기술을 적용하였기 때문에 폐기경까지 cat mark 가 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. Fig. 11 과 Fig. 12 는 개발된 탄화물 강화 Ni-grain roll 의 열충격 저항성 평가를 위한 측정방법과 결과로서, 열충격에 의한 heat crack 침투 깊이가 기존 roll 에 비해 적은 것을 알 수 있다.

5. 결론

당사가 개발한 carbide reinforced Ni-grain roll 은 화학성분 및 MC 탄화물 형성원소 첨가에 의해 내마모성이 약 40% 증가하였으며, 특히 외자 업체보다 뛰어난 성능을 나타내었다. 또한 특수 접종처리 및 화학성분 조정에 의해 흑연량을 소량 증가시켜 내사고성이 대폭적으로 향상되었다. 따라서 이들 roll 의 현장적용시 기존과 동일한 압연조건하에서 사용이 가능하며, 내마모성 향상에 의해 roll 원단위의 감소가 기대된다.

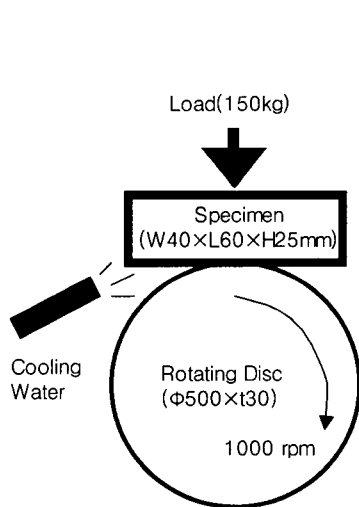


Fig. 11 Schematic diagram of thermal shock tester

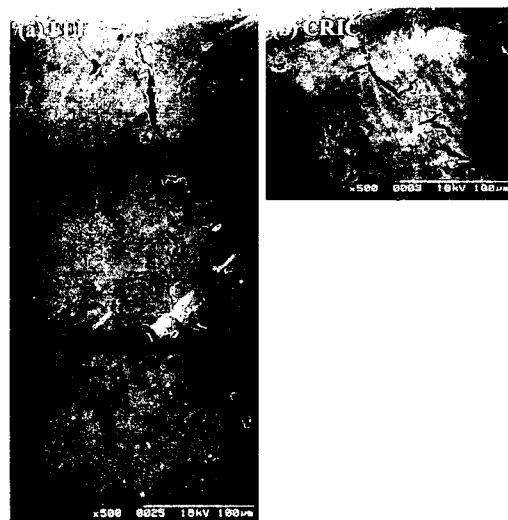


Fig. 12 SEM microstructures showing the propagation of cracks at two Ni-grain grade rolls

참고문헌

1. Japan Patent No.61-16415(1986), No.2-93040(1990)
2. T.Nylen et al. Proceedings of Roll 2000+ Conference, Birmingham, UK, pp.121-128(1999).
3. G.Huang, Proceedings of Roll 2003+ Conference, Birmingham, UK, pp.1-10(2003)
4. A.Becroft, Solidification Technology in the Foundry and Casthouse, Mid-County Press, pp.216.
5. T.Himeniya et al, ISIJ International, vol. 32, no. 11, pp1141-1149(1992)
6. 衫村幸彦, 鑄物 Note, vol. 47(1982), pp.27
7. Yodogawa Corp., The Work Roll Materials of the Plate Mill, 2004
8. Y.Konno et al, CAMP-ISIJ, vol. 15. no. 4, pp. 998(2002)
9. 原千里, 西山記念技術講座, pp. 131-161(1994)
10. K.Ichino et al, CAMP-ISIJ, vol. 16. no. 4, pp. 1146(2003)
11. J.W.Choi, ISIJ International, vol. 39, no. 8, pp. 823-828(1999)