

내사고성이 우수한 냉간 압연용 단강 Roll 재질 개발

박세용, 이정훈, 원종철, 이우동, 윤종호*, 박영철**
주단소재기술팀, 주단BG, 두산중공업*
주단기술고도화팀, 주단BG, 두산중공업**

An Improved Alloy for Forged Rolls for Cold Rolling

S. Y. Park, J. H. Lee, J. C. Weon, W. D. Lee, J. H. Yoon*, Y. C. Park**

Materials Engineering Team, Casting & Forging Business Group*

Casting & Forging Technology Development Team, Casting & Forging Business Group**

Doosan Heavy Industries & Construction, Ltd

Abstract

The process of cold rolling is becoming more severe with the increase in the production of high tensile steel strip as a result of increased demand. Consequently, there is a need to develop work roll materials with better resistance to wear and roll failure.

DOOSAN has developed an improved in-house 5%Cr alloy, New HSR1, with properties superior to the existing in-house 5%Cr alloy, Old HSR1. Test alloys were designed with controlled amounts of Si and Mn based on Old HSR1 and an optimum alloy was chosen based on thermal shock tests. A Prototype work roll was manufactured with New HSR1, and properties of test specimens were evaluated. The results indicated that New HSR1 has better properties than Old HSR1. After application of New HSR1 work rolls, productivity increased due to advanced resistance to wear and roll failure.

Key Words : HSR1, Work Roll, Roll Failure, Wear Resistance

1. 서 론

철강 산업의 수요 변화에 따른 고기능성 제품의 요구가 증가함에 따라 새로운 압연공정의 개선 및 개발이 이루어지고 있으며, 압연강판의 품질을 결정하는 Roll의 품질 또한 강화되고 있다.

1970년대 이전에는 Bearing Steel과 같은 저합금강이 냉간 압연기에서 Work Roll의 재료로서 사용되어 왔지만, 압연기와 Roll 기술의 발전으로 High Cr Steel이나 High Speed Steel과 같은 고합금강이 Roll Material에 적용되고 있다. 이러한 고합금강 소재의 건전성 확보를 위해 제강, 정련공정의

발전과 함께 열처리 설비 또한 상당한 발전이 이루어진 상태다.

본 논문에서는 변화하는 압연 공정에 맞추어 내마모성 및 내사고성이 개선된 5%Cr 단강 Work Roll 재질의 개발과정 및 그 특성에 대해 설명하고 더불어 고객의 편의성을 돕고자 당사 Roll의 특성을 소개하고자 한다.

1.1 개발 배경

자동차 강판과 같은 고강도강(High Tensile Steel Strip) 생산 증가로 인해 지속적인 압연 조건의 악화가 예상된다.[1] 이에 대응하여 Work Roll 재질

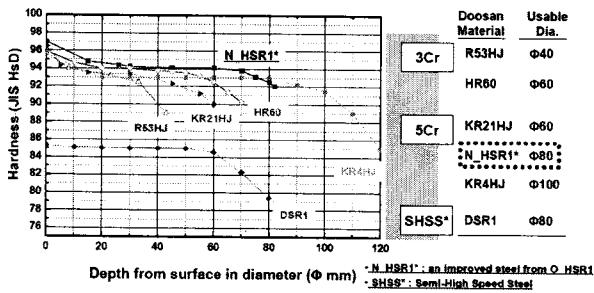
개선의 필요성이 제기되고 기존 5%Cr Work Roll의 재질인 HSR1의 개선이 이루어졌다. 기존 HSR1(이하 O_HSR1)에서 개선된 HSR1(이하 N_HSR1)은 압연조건의 악화에 대응하기 위해 내마모성과 내사고성을 향상시키는 방향으로 개발되었다.

1.2 두산중공업 Roll 재질 현황

Fig 1은 현재 당사에서 생산하고 있는 Work Roll의 경화심도 그래프와 유효경을 재질별로 나타낸 것이다.

‘R53HJ’와 ‘HR60’은 3%Cr Alloy이고 ‘KR21HJ’와 ‘N_HSR1’, ‘KR4HJ’는 5%Cr Alloy로서 냉간압연용 Work Roll 및 Intermediate Roll의 재질로 사용된다. 이중 ‘HR60’, ‘N_HSR1’, ‘KR4HJ’는 좀더 깊은 유효경을 확보한 재질이며, ‘DSR1’은 Semi High Speed Steel로서 Tandem Mill의 Intermediate Roll의 재질로만 사용된다.

당사의 5%Cr Alloy는 주로 고강도강의 생산에 사용되는 Roll 재질로, 변화하는 압연조건에 대응하여 개발된 개선 재질이 바로 N_HSR1이다.



[Fig 1. 재질별 경화심도 Graph]

1.3 내마모성

내마모성은 Roll Performance에 있어서 중요하게 인식되며 우수한 성질의 Strip 생산성과 Roll의 사용 시간을 증대시키기 위해 필수적인 요소이다. Roll의 내마모성은 모재경도와 카바이드 경도, 밀도, 분포 상태, 분율 등과 관련이 깊으며, 일반적으로 Cr 함량이 높아질수록 카바이드 경도 및 밀도는 증가하고 카바이드 크기는 줄어드는 경향이 있다.[2] 그래서 5%Cr 재질은 주로 고강도강의 생산에 사용되는 Roll 재질로 사용되며 N_HSR1 개발시 내마모성 개선이 중요하게 인식 되었다.

1.4 내사고성

지속적으로 악화되는 압연 조건에 의해 Roll 사고의 증가가 예상되므로 개선 재질의 개발에 있어서 내사고성 향상은 매우 중요한 사항이다.

내사고성은 Roll 파손이나 피로로 인한 사고가 발생할 때까지의 Roll 수명을 의미한다. 즉, Roll Crack 발생시 Crack 진전 저항성의 정도라고 할 수 있으며, 파괴인성의 측정값인 K_{Ic} 로 가늠할 수 있다. 그런데, 경도가 증가할수록 내마모성이 증가하는 반면 K_{Ic} 값은 감소하므로 내마모성과 내사고성은 서로 모순되는 성질을 지닌다. 내마모성 및 내사고성을 동시에 향상시키기 위해 화학 성분을 조정하고 열처리 온도 조건을 변화하여 최적의 조건을 찾고자 하였다.

2. N_HSR1 합금 설계 및 실험 방법

내마모성 및 내사고성 증가를 위해 고용 강화에 효과적인 Si와 Mn의 함량을 조정하여 합금을 설계하였다. 열충격 저항성을 예측하고자 Sub-Zero 온도를 변화시켜 템퍼링 수축시작온도를 측정하였다. 최종적으로 카바이드 분율, 크기 측정 및 열충격 실험을 통하여 최적의 합금을 선정하였다.

2.1 화학 조성

O_HSR1의 화학성분에서 Si와 Mn의 양을 조절하여 총 6개의 Test Alloy를 만들어 실험에 사용하였다.

A, B, C Test Alloy는 Mn 양을 일정하게 하고 Si 양을 조절하였고, D, E, F Test Alloy는 Si 양을 일정하게 하고 Mn 양을 조절하였다.

Test Alloy	Chemical Composition	
	Si	Mn
A	Low	Same as medium
B	Medium	
C	High	
D	Same as medium	Low
E		Medium
F		High

[Fig 2. Test Alloy의 화학 성분 조성]

2.2 실험 방법

2.2.1 Sub-Zero 온도에 따른 템퍼링 수축시작온도 측정

오스테나이트 온도에서 10분간 유지한 후 퀴칭한 시편을 상온, -40 °C, -60 °C, -80 °C, -100 °C, -120 °C의 온도에서 Sub-Zero[3] 및 템퍼링을 하였다. 시편을 1000°C까지 17°C/sec의 속도로 가열하고 100°C/sec로 냉각하여 선팅창량을 측정하였으며 가열시 템퍼링 수축 거동을 관찰하였다.

2.2.2 열충격 시험

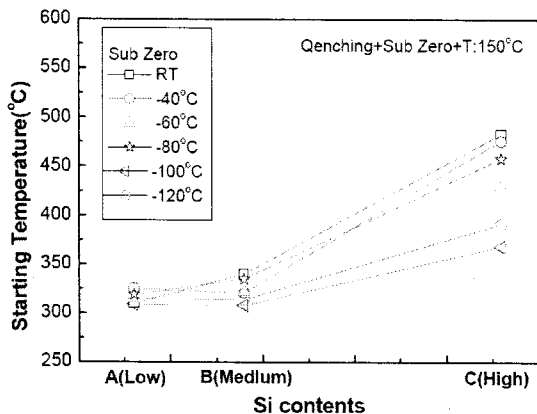
Test Alloy로 열충격 시편을 제작하여 오스테나이트 온도에서 90분간 유지후 퀴칭을 하였다. Sub-Zero 처리 없이 120°C, 180°C, 280°C에서 3시간동안 템퍼링을 한 후 경도를 측정하여 경도편차 여부를 확인하고 열충격 시험기를 이용하여 5kg의 부하에서 15초간 열충격을 가한 후 냉각수(상온)로 냉각하였다. Crack 깊이의 재현성을 위해 한 강종마다 4개의 시편을 만들어 유사한 경도를 얻은 후 열충격을 실시하였다.

열충격 시험 후 각각의 시편의 세로를 12등분한 후 절단면을 연마하였다. 연마면에 나타난 Crack 깊이를 마이크로미터로 측정하여 최대 깊이의 Crack을 기록하고 4개의 시험편에서 최대 Crack 깊이를 평균하여 최대 Crack 깊이를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Sub-Zero 온도에 따른 템퍼링 수축 시작온도 측정

Fig 3은 3.2.1의 결과를 Mn 함량이 일정한 A, B,

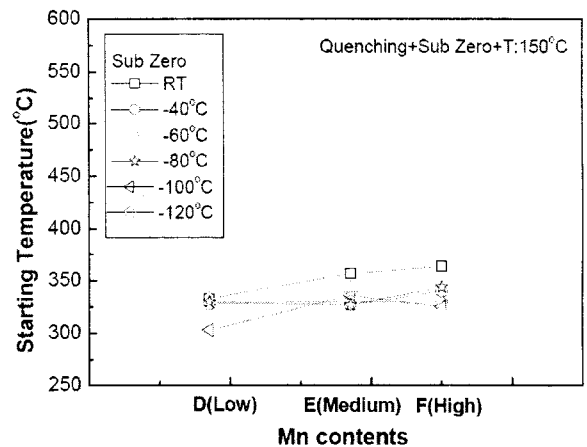


[Fig 3. 템퍼링 수축 온도의 Si 의존성 (A, B, C)]

C 강종별로 템퍼링 수축시작온도를 도식화 한 것이다.

Mn 함량이 일정할 경우 Si 함량이 증가할수록 수축시작온도가 비례하여 증가하는 경향이 있으며 A, B는 Sub-Zero 온도 의존성이 미미한 반면 C는 Sub-Zero 온도 의존성이 두드러지게 나타난다.

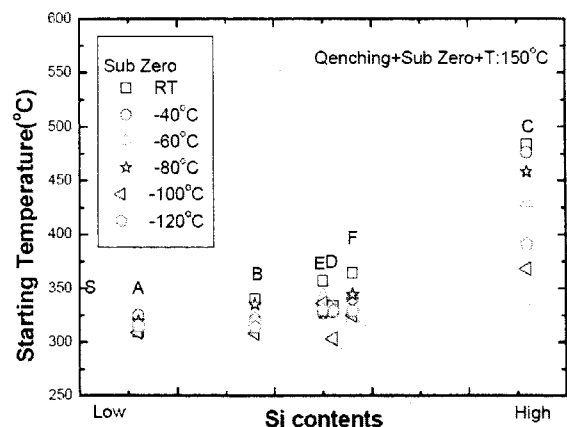
Fig 4는 같은 방법으로 D, E, F 강종별로 도식화 한 것이다.



[Fig 4. 템퍼링 수축 온도의 Mn 의존성 (D, E, F)]

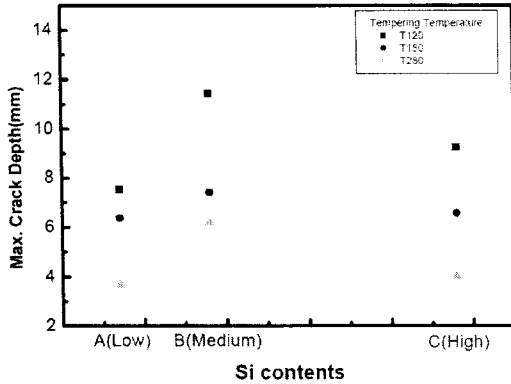
Si 함량이 일정할 경우 Mn 함량과 템퍼링 수축 시작온도와의 상관관계는 없음을 알 수 있다.

Mn의 영향력이 미미하므로 전 강종별로 Si 함량만을 변수로 템퍼링 수축시작온도를 도식화 하면, (Fig 5) Si 함량의 증가에 따라 템퍼링 수축시작온도는 비례하는 경향을 가지며 강종 D를 기점으로, Sub-Zero 온도 의존성이 발생한다.



[Fig 5. 템퍼링 수축 온도의 Si 의존성 (A~F)]

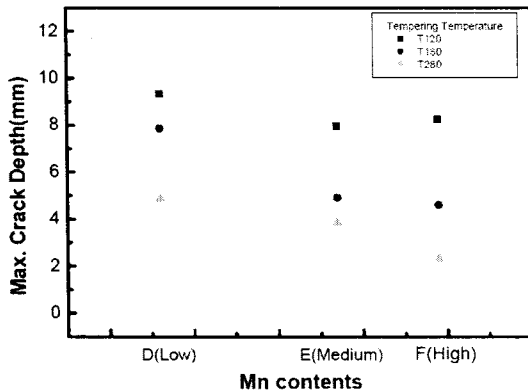
3.2 열충격에 의한 최대 Crack 깊이 측정
 템퍼링 온도를 120°C, 180°C, 280°C로 설정하고
 Mn 함량이 일정할 때 Si 함량이 최대 Crack 깊이
 에 미치는 영향을 측정하였다. (Fig 6)



[Fig 6. 최대 Crack 깊이의 Si 의존성]

A를 제외하고, Si 함량이 증가할수록 최대 깊이는
 짧아지는 경향을 보인다.

Si 함량이 일정할 때 Mn 함량에 따른 최대
 Crack 깊이를 측정하면, Mn 함량이
 증가할수록 최대 깊이가 짧아지는 경향을 보이고
 있다. (Fig 7)



[Fig 7. 최대 Crack 깊이의 Mn 의존성]

이상의 결과를 종합해 볼 때, A, E, F에서 최대
 Crack 깊이가 짧게 관찰 되어 진다. 즉, 강종 A,
 E, F의 열충격 특성이 상대적으로 우수하다.

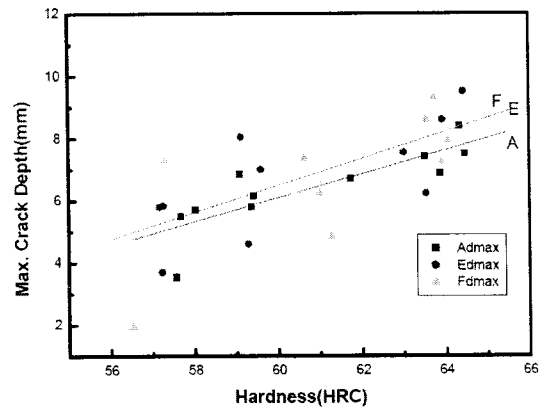
3.3 최적 Alloy 선정

Si 함량이 증가할수록 템퍼링 수축 시작 온도가
 비례적으로 증가하기 때문에 (Fig 3) 강종 C가
 열충격 특성이 우수할 것으로 판단하였지만,
 열충격 실험 결과 C보다는 A, E, F가 열충격

특성에 우수하다고 판명되었다.

이는, 열충격 시험시 승온과정에서 템퍼링
 부분의 열팽창이 주변의 구속을 받아서
 발생시키는 소성 압축변형이 Crack 발생에
 작용하는 인장응력의 주요 원인이기 때문으로
 생각된다. [4], [5]

Fig. 8은 강종 A, E, F의 경도별 최대 Crack
 깊이를 나타낸 것이다.



[Fig 8. 경도에 따른 최대 Crack 깊이 (A, E, F)]

A는 모든 경도 구간에 걸쳐서 최대 Crack
 깊이의 산포가 상대적으로 작은 반면 E, F는
 산포가 크고 불안정한 양상을 띄고 있다. 따라서
 A가 내사고성이 우수한 재질로 판정된다.

강종 A는 퀴칭 후 잔류압축응력이 없는
 상태에서 HRc 67.5(Hs 99)를 얻을 수 있고, 잔류
 오스테나이트 양 또한 5% 미만이며 유효경
 $\Phi 80\text{mm}$ 까지 펄라이트 생성이 되지 않았다.
 카바이드 평균 크기는 0.5~0.6 μm 이며, 카바이드
 분을 또한 약 12%(E, F는 약 8%)로 내마모성
 또한 우수할 것으로 판단된다. (Fig 9)



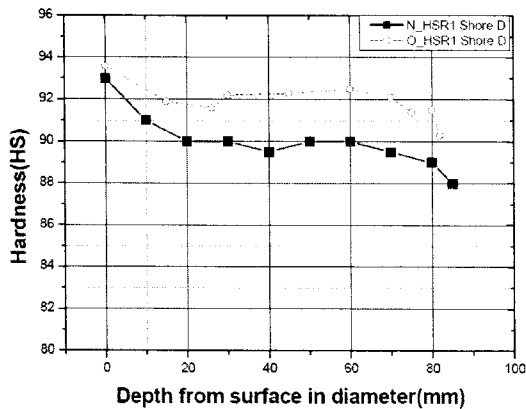
[Fig 9. 카바이드 Morphology (A, E, F)]

4. N_HSR1 시제품 특성 평가

강종 A(N_HSR1)를 이용하여 Work Roll을 제작하여 기존 O_HSR1 Work Roll과 특성별로 비교하여 평가하였다.

4.1 경화심도

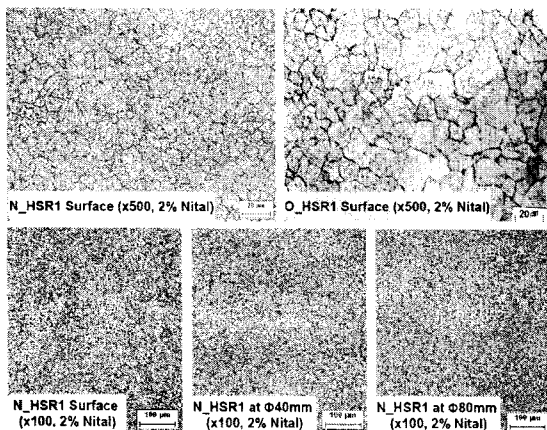
깊이에 따른 경도 변화가 작아야 고심도 Roll의 재질로 적합하다. 유효경 $\Phi 80\text{mm}$ 를 기준으로 일반적으로 고객이 요구하는 경도 저하는 HsD 3~7인데 N_HSR1 Work Roll은 경도 저하값이 HsD 4로서 고객의 요구사항을 잘 만족하고 있다.



[Fig 10. 경화심도 비교 (N_HSR1, O_HSR1)]

4.2 미세조직

N_HSR1 Work Roll 과 O_HSR1 Work Roll의 표면에서의 미세조직(500배)와 N_HSR1의 $\Phi 40\text{mm}$, $\Phi 80\text{mm}$ 에서의 미세조직(100배)을 살펴보면, O_HSR1의 표면에서 결정립 크기가 조대하고 불균일한 반면, N_HSR1의 표면에서 결정립 크기는

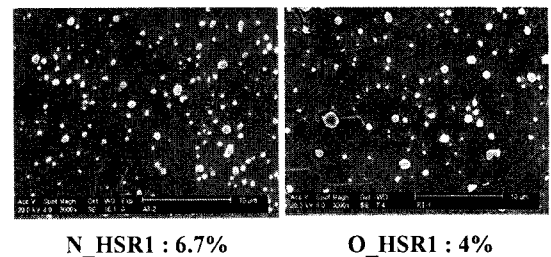


[Fig 11. 미세조직 (N_HSR1, O_HSR1)]

큰 변화 없이 미세하고 균일함을 알 수 있다(Fig 11). N_HSR1은 표면 뿐만 아니라 $\Phi 40\text{mm}$, $\Phi 80\text{mm}$ 에서 또한 결정립이 미세하고 균일하다. 이런 조직은 Work Roll이 높은 조도성과 높은 내마모성을 가지는데 도움을 준다.

4.3 카바이드 분포

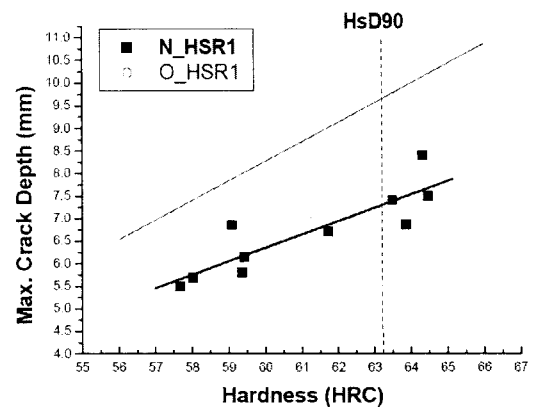
Fig 12는 N_HSR1 Work Roll 과 O_HSR1 Work Roll의 카바이드 분포 상태를 나타낸 것으로, 카바이드 크기와 분포를 비교해 보면 N_HSR1은 O_HSR1과 큰 차이를 보이고 있지는 않으나 카바이드 분율을 따져볼 때 N_HSR1이 약 2.7%가 높게 나옴을 알 수 있다. 이는 2.2에서 설명한 바와 같이 제품의 내마모성에 영향을 주어 Strip의 품질을 월등히 높이는 데 기여할 수 있다.



[Fig 11. 미세조직상의 카바이드 분율]

4.4 열충격 저항성

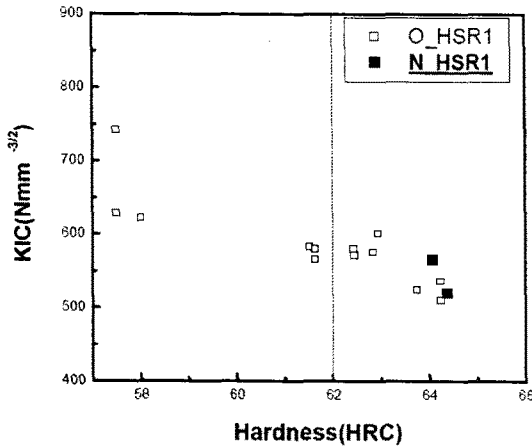
열충격시 발생하는 최대 Crack의 깊이가 얕을수록 내사고성이 향상된 것을 의미한다. 또한 연마량이 줄어들어 제품 수명이 길어질 것으로 예상된다. N_HSR1과 O_HSR1의 최대 Crack 깊이를 비교해보면 N_HSR1 Work Roll의 내사고성이 향상되었음을 알 수 있다. (Fig 12)



[Fig 12. 경도에 따른 최대 Crack 깊이]

4.5 파괴 인성

내사고성 향상 여부를 확인하기 위하여 추가적으로 파괴인성을 측정 하였으며, 값이 클수록 우수한 내사고성을 의미한다.[6] Fig 13은 N_HSR1 Work Roll과 O_HSR1 Work Roll의 경도에 따른 파괴 인성을 측정한 값으로, 동일 경도(HRC 64)에서 N_HSR1의 인성값이 높음을 보여준다. 압연 중에 발생한 Crack에 의한 Roll 사고 발생율은 O_HSR1 Work Roll에 비해 향상될 것으로 예상된다.

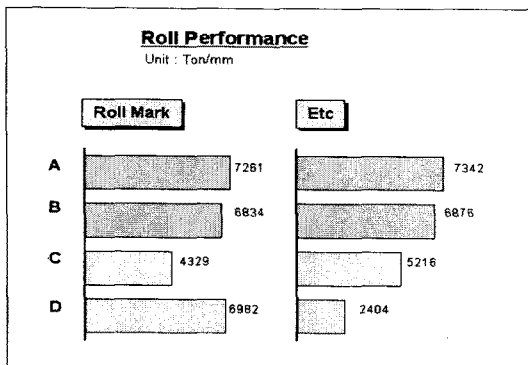


[Fig 13. 경도에 따른 파괴인성]

4.6 Roll Performance

N_HSR1 Work Roll 을 실조업에 적용하여 O_HSR1 Work Roll 및 타사 제품의 사용 실적 (Ton/mm)을 비교하였다.(Fig 14) A, B 는 N_HSR1 으로 제작된 Work Roll 의 생산량을 나타낸 것이며, C 는 경쟁사, D 는 O_HSR1 의 경우를 의미한다.

N_HSR1 의 생산량이 나머지 제품에 비해 월등히 높으며, Roll Mark 등에 대한 저항성 또한 우수함을 알 수 있다.



[Fig 14. Roll Performance]

5. 결론

- 1) 변화하는 압연 조건에 대응하여 내마모성 및 내사고성이 우수한 재질(N_HSR1)을 개발하였다.
- 2) 템퍼링 수축온도는 Mn 함량에 관계없이 Si 함량에 따라 비례적으로 증가하였으며, Si 함량이 낮을수록 Sub-Zero 온도와의 상관관계는 발견되지 않았다.
- 3) N_HSR1 재질은 오스테나이트 온도에서 랜칭시 경도는 HRC 67.5 (HS 99), 잔류 오스테나이트가 5%이하이며 표면에서 깊이 Φ80mm까지 펄라이트 조직이 생성되지 않았다. 카바이드 평균 크기는 0.5~0.6μm 이며 카바이드 분율은 12% 였다.
- 4) N_HSR1 Work Roll의 표면에서 깊이 Φ80mm까지 경도저하는 HsD 4에 불과하며 미세하고 균일한 결정립이 관찰된다.
- 5) N_HSR1 Work Roll은 기존에 비해 열충격 저항성 및 파괴 인성이 향상되었으며, 실조업시 생산성 또한 우수하다고 판단된다.

참고 문헌

- [1] P. J. Belanger, M. Milititsky, The 10th steel symposium processing, KIMM, 2001, pp19~36
- [2] Gene E. Lee, "The Metallurgy of Forged Steel Rolls" Rolls for the Metalworking Industries, ISS, 2002, pp.49~50.
- [3] J. W. Lee, "Sub-Zero Heat Treatment" The Experiments of Heat Treatment, 2002
- [4] 佐藤和紀, 竹内秀光, 三浦藤重, 坂下修一, 塑性与加工, 10(1969), pp.405
- [5] 林康代, 日野昇一, 溝口孝遠, 豊田裕至, 新戸製鋼技報 R&D, 33 (1983) 3, pp.21
- [6] Robert B. Corbett, "Testing" Rolls for the Metalworking Industries, ISS, 1990, pp.179~180.

