

스테인레스강의 열간변형저항

김 영환*, 정 병완**

기술연구소 스테인레스연구그룹, 포항제철*

후판부 후판기술팀, 포항제철**

High Temperature Deformation Resistance of Stainless Steels

Y.-H. KIM* and B. W. CHUNG**

Technical Research Laboratories, POSCO*

Dept. Plate, POSCO**

Abstract

The deformation behavior of commercial stainless steels under hot rolling conditions was investigated by means of hot compression tests performed in the temperature range 800 °C to 1200 °C. The measured flow stress-strain curves were analyzed by using a simple flow stress model. It was found that the reference strength of stainless steels are much higher than that of carbon steel and that nitrogen and molybdenum alloying greatly increases flow stress of austenitic stainless steel. Ferritic and duplex stainless steel showed comparatively low flow stresses. The flow stress model, which correlates the flow stress with temperature and strain rate, was applied to predict roll forces during hot-plate rolling of stainless steels.

Key words : hot deformation resistance, stainless steel, plate rolling, roll force

1. 서론

열간압연 중 압연하중 정확한 예측을 위해서는 압연소재의 변형저항특성이 잘 반영된 압연 하중 모델을 사용하는 것이 필요하다. 그러나 대부분의 상업적인 후판 압연 밀들에서는 탄소강과 합금강, 스테인레스강 등 고온변형 특성이 현격히 다른 매우 다양한 종류의 소재를 압연하고 있기 때문에 모든 강종에 대한 모델 계수 값들을 별도로 운용하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 많은 밀들에서 탄소강의 변형 거동에 기초한 변형저항 예측식을 기본으로 사용하면서 합금강이나 스테인레스강의 경우에 불가피하게 발생하는 오차에 대해서는 통계적 회귀분석에 의해 모델을 조정하거나 학습 모델을 이용해서 보정하고 있다. 그러나 조업 실적의 통계적 회귀분석 방법에 의해서는 모델 구성요소의 물리적 의미가 모호하여 강종 특성을 실험적으로 측정, 반영하기가 어려워지며 또한, 학습보정에 대한 의존성이 커지면 안정적인 압하량 설정이 어렵기 때문에 전반적으로 압연 두께의 정확성이 낮아짐과 동시에 조업 안정성이 저해된다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 실기 후판압연 하중예측 모델에 스테인레스강의 변형저항 특성을 반영하기 위한 기초자료로서 상업적으로 생산되는 다양한 종류의 스테인레스강에 대해 실제 열간압연 공정에 해당하는 조건에서의 변형저항 데이터를 제공하고자 하였다. 이 조건에서 측정된 고온유동곡선을 이용하여 실기 압연하중 모델에서 간단히 참조할 수 있는 단순한 형태의 변형저항 모델을 구성하였으며, 이를 실기 후판압연 하중예측 모델에 활용함으로써 스테인레스강의 압연하중 예측 정확도를 개선하고자 하였다.

2. 변형저항

2.1 유동곡선

Table 1은 본 연구에서 대상으로 한 스테인레스 9 강종의 화학조성을 나타낸 것이다. 본 연구와 이전 연구에서 이들 강종에 대해 변형률속도 $0.1 \sim 100 \text{ sec}^{-1}$, 온도 $800 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 실제 열간압연과 상응하는 조건에서의 고온압축시험을 행하였으며, 시험결과[1-3]중 대표적인 오스테나이트계 강인 STS 304강과 페라이트계 STS 430, 그리고 2상 스테인레스강인 Type 2205강에서 측정된 고온 유동응력-변형률 곡선들을 Fig. 1에 나타내었다. 대체로 304강은 다른 두 강종에 비해 유동응력이 높으며, 유동곡선은 가공경화에 이은 포화거동을 보인다. 동적 재결정에 의한 연화는 Fig. 1(a)에서 보여지는 것처럼 변형률 속도가 1 sec^{-1} 이하로 매우 느리고 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 이상의 고온에 한해 관찰된다. 페라이트계 430강의 경우에는 유동응력이 가장 낮으며, 주로 동적회복에 의한 복구과정이 나타남으로 인해 변형초기부터 거의 일정한 유동응력을 보인다. Type 2205 2상 스테인레스강의 유동응력은 변형초기에 빠르게 증가하나 최대 값을 보인 후 서서히 감소한다. 이 때의 최대 응력이 나타나는 변형률이 온도와 변형속도에 따라서 변화하는 경향은 오스테나이트계 강에서 관찰되는 동적 재결정에서와는 다른 양상을 보이는데, 이는 변형과정에서 고온에서 상대적으로 경질인 오스테나이트 상으로부터 연질인 페라이트 상으로의 변형 전이에 의한 것으로 판단되고 있다. Fig. 1은 또한, 2205강이 304강과 430강에 비해 유동응력의 온도 및 변형속도 의존성이 큼을 보여준다.

Table 1. Chemical compositions of the stainless steels investigated(wt.%).

Steel	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	N	Structure
301L	0.05	0.5	1.0	18.2	7.3	-	-	0.12	γ
304	0.05	0.56	1.04	18.4	8.6	-	-	0.04	γ
304N1	0.05	0.66	1.10	19.2	8.1	-	-	0.15	γ
310S	0.05	0.49	1.58	24.6	17.3	-	-	0.03	γ
316L	0.03	0.62	0.84	17.2	12.1	2.4	-	0.02	γ
316LN	0.03	0.5	1.0	17.1	12.0	2.5	-	0.14	γ
317L	0.03	0.47	1.27	18.3	13.5	3.2	-	0.03	γ
317LN	0.03	0.5	1.0	18.5	13.2	3.4	-	0.15	γ
321	0.05	0.5	1.0	18.2	10.3	-	0.5	0.03	γ
430	0.05	0.50	0.4	16.3	-	-	-	0.03	α
2205	0.01	0.46	1.48	22.3	5.8	3.1	-	0.18	$\alpha + \gamma$

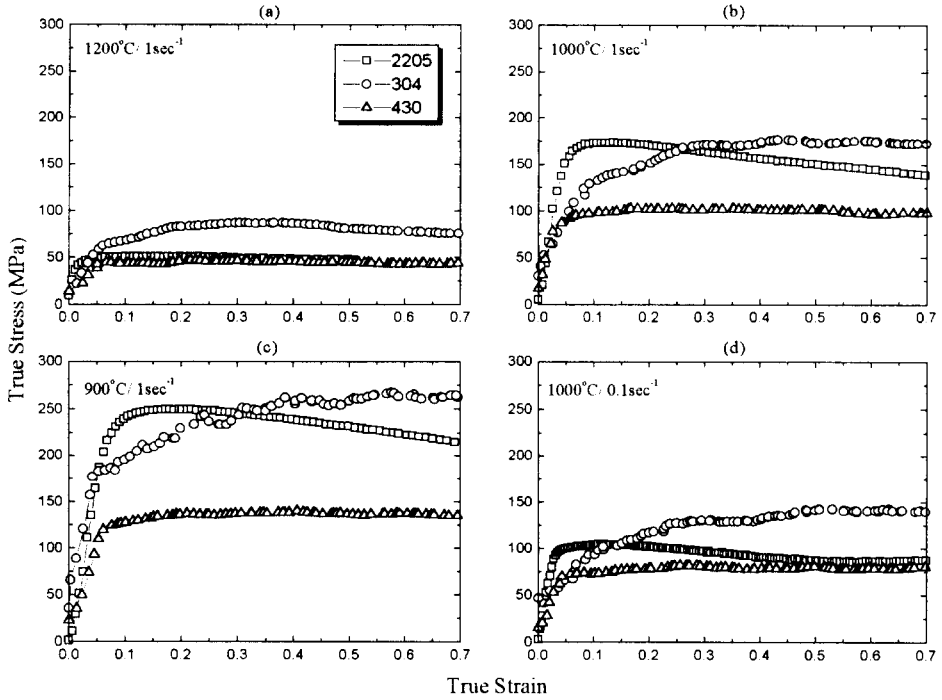


Fig. 1. The flow curves of the three steels measured at (a) 1200°C and 1 sec⁻¹, (b) 1000°C and 1 sec⁻¹, (c) 900°C and 1 sec⁻¹ and (d) 1000°C and 0.1 sec⁻¹.

2.2 변형저항 모델

전술한 스테인레스강의 강종별 고온유동특성을 정량화하기 위한 모델링을 수행하였다. 일반적으로 고온유동응력과 온도 및 변형률속도와의 상관성은 다음과 같은 Sellars와 Tegart 식[4]으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = A (\sinh \alpha \sigma)^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

열간 압연에서와 같이 비교적 응력이 높은 조건에서는 식(1)은 유동응력에 대해 다음 식과 같이 단순화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{1}{\beta} \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{\beta RT} - A' \\ &= \frac{\ln Z}{\beta} - A' \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 β , Q , A' 는 재료상수이고, $1/\beta$ 과 Q/β 는 각각 유동응력의 변형률속도 및 온도의 의존성을 나타낸다.

본 연구에서는 시험범위 내에서의 유동곡선이 대체로 포화되는 경향을 보이고 동적재결정이 일어나는 조건에서도 그로 인한 연화량이 크지 않으므로 유동곡선 상에서의 최대응력 또는 포화응력을 소재의 변형저항으로 취하였다. Fig. 2는 상업 생산되는 9개종의 스테인레스강에 대한 측정결과를 이용하여 변형저항과 Zener-Hollomon parameter와의 관계를 도시한 것으로서 본 실험 조건에서 식(2)의 관계가 비교적 무리없이 적용될 수 있음을 보여준다.

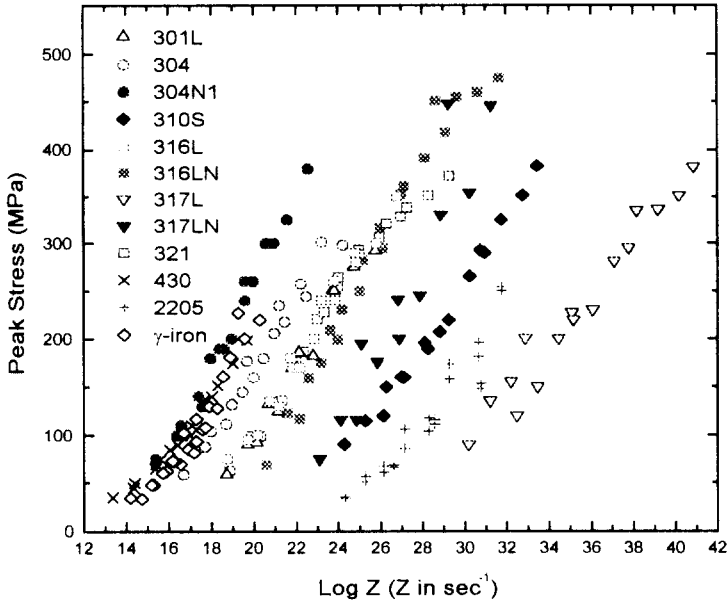


Fig. 2. Dependence of peak stress on the Zener-Hollomon parameter.

Table 2는 식(2)를 사용하여 스테인레스강과 γ 철[5]의 변형저항의 온도 및 변형속도의 의존성을 해석한 결과이다. 우선, 오스테나이트계 강에서 Cr, Mo, Ni 등의 치환형 합금원소와 소량의 N 첨가가 변형저항의 온도 의존성을 심화시킴을 알 수 있다. 18Cr-8Ni 조성의 대표적인 오스테나이트계강인 304강은 γ 철에 비해 변형저항의 온도 의존성이 비교적 높으며, 304강에 비해 Cr, Mo, Ni 등의 치환형 원소의 합금량이 많은 310S, 316L, 317L 등의 고합금강들에서는 변형저항의 온도 의존성이 더욱 증가함을 보여준다. 또한 304강의 조성에서 약 0.1% 정도의 N이 첨가된 304N1 및 301L강의 경우 304강에 비해 온도 의존성이 증가하여 소량의 N 첨가가 변형저항의 온도 의존성을 현저히 증가시킴을 알 수 있다. N 첨가의 효과는 Mo 첨가강에서 더욱 심해져서 316L에 비해 316LN이, 그리고 317L에 비해 317LN이 현저하게 심한 온도 의존성을 보인다. Ti 첨가 321강의 경우에는 대부분의 Ti가 고용상태 보다는 석출물 형태로 존재하기 때문에 변형저항의 온도 의존성은 304와 유사한 수준을 보인다. 표에서는 또한 전술한 치환형 합금원소가 변형저항의 변형속도 의존성에는 큰 영향을 미치지

않는 반면, N 첨가는 변형속도 의존성을 현저히 심화시킴을 알 수 있다. 이러한 결과를 종합하면, 대체로 고용강화 효과를 주는 치환형 원소들은 변형저항의 온도 의존성에 영향을 주는 반면, 소량의 N는 변형저항의 온도 및 변형속도 의존성 모두를 심화시킴을 알 수 있다.

페라이트계 430강은 대상 강종들 중 변형저항의 온도 의존성과 변형속도 의존성이 가장 낮다. 그러나 페라이트상과 오스테나이트상이 약 50 : 50으로 혼재하는 2205 2상 스테인레스강은 매우 심한 변형저항의 온도 및 변형속도 의존성을 나타낸다. 이러한 거동은 현재로서는 정확한 원인을 알 수 없으나 대체로 2상 스테인레스강의 고온변형 중 오스테나이트상에서 페라이트상으로의 변형 전이와 관련된 것으로 판단된다. 즉, 온도가 낮아지고 변형속도가 빨라짐에 따라 페라이트상과 오스테나이트상의 고온 강도의 차이가 더 심해짐에 따라서 변형이 페라이트상으로 더욱 집중되어 일어날 가능성이 있다.

Table 2. Values of the constants in equation 2.

Steel	Q (kJ/mole)	A' (MPa)	1/β (MPa)
301L	555.5	654.6	15.68
304	498.6	545.3	15.51
304N1	461.9	630.3	19.6
310S	712.8	719.5	14.2
316L	556.5	580.2	15.05
316LN	608.7	745.9	17.4
317L	879.6	851.7	13.19
317LN	679.3	1047.8	20.22
321	560.3	520.4	13.7
430	405.1	336.3	11.5
2205	678.8	960	17.66
γ-iron	427.9	476.5	14.8

3. 압연하중 예측

본 연구에서는 전술한 스테인레스강의 변형저항 해석 결과를 후관 압연 시의 압연하중 예측에 활용하였다. 압연하중 예측을 위한 기본적인 모델은 다음과 같다.

$$P = K_m \cdot W \cdot L_p \cdot Q_p \quad (3)$$

여기서 P 는 압연하중, L_p 는 롤접촉호의 투영길이, Q_p 는 압하력함수다. K_m 은 평면변형 변형저항으로서 일축하중 조건과는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$K_m = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma \quad (4)$$

압하력 함수에 대해서는 다양한 해석적 모델들이 제안되어 있으나 본 연구에서는 다음과 같은 Denton과 Crane의 슬립선장 해[6]를 사용하였다.

$$Q_P = 0.655 + 0.265 \cdot \frac{L_p}{h_m} \quad (5)$$

여기서 h_m 은 평균 소재두께이다.

실기 압연하중 예측모델에 적용하기 위하여 변형저항의 온도 및 변형속도 의존 관계를 다음과 같이 기술하였다.

$$\sigma = C_T \cdot C_v \cdot \sigma_R \quad (6)$$

여기서 C_T 는 온도 영향인자, C_v 는 속도 영향인자, σ_R 은 기준 온도(1000 °C) 및 기준 변형속도(10 sec⁻¹)에서의 소재의 기준강도이다. 온도 영향인자는 기준 온도에서의 변형저항에 대한 임의 온도에서의 변형저항의 비로써 얻을 수 있으며, 속도 영향인자도 유사한 방법으로 얻을 수 있다.

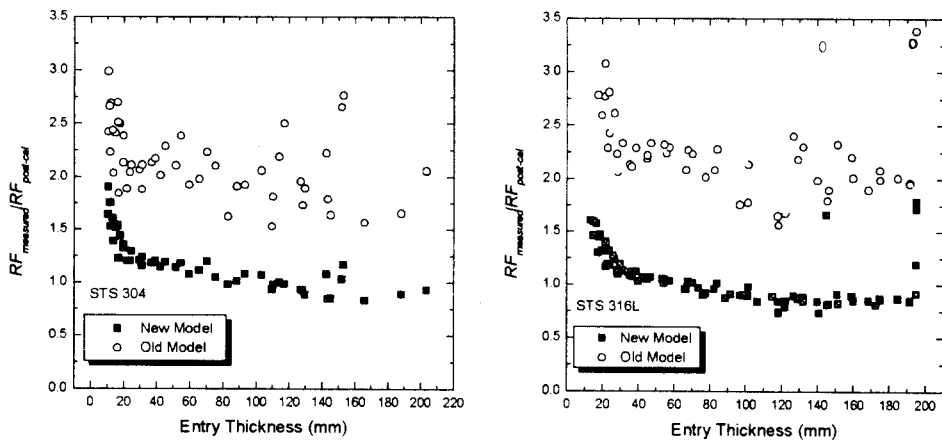


Fig. 3. Measured and predicted roll force during hot plate rolling of stainless steels.

Fig. 3은 본 연구에서의 스테인레스강의 변형저항 모델을 이용하여 실기 후판압연 시 압연하중을 예측한 결과를 기존에 탄소강에 기초한 Siemens 모델과 비교하여 나타낸 것이다. 예측 값 대비 실측 하중의 비가 대체로 1에 가까운 비교적 우수한 예측정도를 보여준다. 다만, 사상압연 마무리 단계에서의 고르기 압연 과정에서 압연하중이 과소 예측되는 점은 향후 개선된 압하력함수를 적용하고 강종별 재결정 거동을 정량화하여 저온 영역에서의 미세결정에 의한 누적압하 효과를 도입함으로써 보완할 필요가 있다.

4. 결 론

- 1) 압연하중 예측을 위한 기초자료로서 상업 생산되는 스테인레스강 9 강종에 대한 변형저항 data를 모델링하여 실기 후판압연 모델에 스테인레스강의 강종특성 도입 체계를 구축하였다.
- 2) 오스테나이트계 스테인레스강의 경우 고용강화 효과를 주는 Cr, Mn, Ni 등의 치환형 원소들은 변형저항의 온도 의존성을 증가시키고, 소량의 N는 변형저항의 온도 및 변형속도 의존성 모두를 현저히 증가시킨다.
- 3) 페라이트계 430강의 경우에는 변형저항의 온도 및 변형속도 의존성이 작았으나, 2205 2상 스테인레스강에서는 매우 심한 온도 및 변형속도 의존성을 보인다.
- 4) 변형저항 해석결과를 이용하여 실기 후판압연 시의 압연하중을 예측한 결과, 마무리 압연 단계를 제외하고는 대체로 실측 압연하중에 유사한 결과를 얻었다.

참고문헌

1. 김 영환, 심 상대, 대한금속학회지, 제35권, 10호, pp1407-1414(1997)
2. Y. H. Kim et al., International Congress Stainless Steel '99, Vol 3, AIM, pp.285-293(1999)
3. 김 영환, 김 광태, POSCO 기술연구소 연구보고서, 98P319(1999)
4. C. Sellars and W.J. McG. Tegart, Mem. Sci. Rev. Metall., Vol 63, p731(1966)
5. Y.V.R.K. Prasad and S. Sasidhara, Hot Working Guide, ASM, p267
6. B.K. Denton and F.A.A. Crane, J. Iron and Steel Inst., Aug. p.606(1972)