

18Cr-10Mn-0.44N₂ 고질소강의 열연공정개발에 관한 연구

김영득¹ · 조종래[#] · 이종욱² · 배원병³

A Study on the Development of Hot Rolling Process for 18Cr-10Mn-0.44N₂

Y. D. Kim, J. R. Cho, J. W. Lee, W. B. Bae

(Received March 2, 2011 / Revised June 17, 2011 / Accepted June 21, 2011)

Abstract

The objective of this paper is to determine the effect of process parameters on the behavior of a 18Cr-10Mn-0.44N₂ nitrogen steel sample deformed by hot rolling. Compression tests were carried out at high temperatures to determine the flow stresses needed for a finite element(FE) analysis. The strain rate, ranging from 0.1 to 1.0s⁻¹, significantly affected the flow stress at temperatures higher than 1,000°C. Non-isothermal rolling simulations and laboratory rolling tests were performed with plate specimens 14.5mm thick, 135mm wide and 226mm long. A rolling reduction of 15% per pass leading to a cumulative rolling reduction of 60% was determined as optimal. The extension ratio of 176.5% in the length direction was about 30.4 times greater than the extension ratio of 5.8% in the width direction. Isotropic properties for tensile strength, microstructure and grain size were measured after mock-up hot rolling tests. The results from the mock-up tests were found to be in good agreement with those of the simulations.

Key Words : HNS(High Nitrogen Steel), High Temperature Flow Stress Curve, Hot Rolling Process, FE Simulation, Cumulative Rolling Ratio, Microstructure, Pressurized Vacuum Induction Melting

1. 서론

1930 년대 출현한 스테인레스강(SUS)은 기계적, 물리적 성질이 우수하고 특히 임계 내식성과 비자성 특성을 가지고 있어 산업용 구조물 및 각종 기계부품 등의 주요 소재로 사용되어 왔다[1]. 그러나, 21 세기에 들어서면서 지구 세계는 환경 친화형 소재를 요구하며 더 나아가 기존의 SUS 소재의 제반 특성을 만족함과 동시에 경제성을 갖춘 신소재를 주문하고 있다. 기존 SUS 의 주요 합금원소인 Ni 은 한정된 자원에 따른 경제적 불리함과 인체 알러르기 유발 및 재활용시 유해가스 방출이라는 문제점을 안고 있다. 이를 대체하고자

Ni 대신 다량의 질소를 함유시킨 고질소강(HNS, High Nitrogen Steel)이 대두되고 있다. 고질소강이란 대기압하에서 고용한계 이상으로 질소가 첨가된 강을 말하며 오스테나이트계에서 중량비 0.4% 이상의 질소를 함유한 강을 의미한다[2, 3]. 1988 년 프랑스에서 제 1 회 국제학술회 개최를 시작으로 점차 활발한 연구활동이 이루어지고 있다[4~9]. 국내는 스테인리스강의 특성향상을 목적으로 질소 첨가를 시도한 연구가[10~13] 이루어져 왔지만 본격적인 고질소강에 대한 연구는 시작단계라 볼 수 있다. 합금설계를 통해 개발된 소재에 대해 소성가공 기술을 접목한 제조공정 연구가 일부 이루어지고 있으나 유한요소 금속성형해석 기술분

1. 두산중공업 기술연구원 소재기술개발팀

2. 두산중공업 기술연구원 소재기술개발팀

3. 부산대학교 정밀기계공학과

교신저자: 한국해양대학교, E-mail: cjr@hhu.ac.kr

야는 아직 미미한 수준이다[14~16].

따라서, 본 연구에서는 제작된 18Cr-10Mn-0.44N₂ 고질소강 소재에 대해 열간성형 특성인자에 따른 고온유동응력 시험을 수행하여 기초 물성데이터를 구축하고 열간압연공정 FE 시뮬레이션을 수행하여 열간압연 공정인자를 도출하였다. 도출된 인자들은 압연하중 350 톤 규모의 실험실급 규모 열연설비를 구축하여 성형성 및 형상변형 특성 측면에서 Mock-up test 하여 검증하였고 열간압연 후 압연품에 대해 미세조직 상태를 비교, 분석 하므로써 최적 열간압연 공정을 제안하였다.

2. 소재 특성분석 실험

2.1 소재제조

소재는 가압형 진공유도용해(PVIM, Pressurized Vacuum Induction Melting)에 의해 100Kg 짜리 VIM (Vertical Induction Melting) 원주형 강괴를 제조하였다.

Fig. 1 은 유도가열 용해법으로 가압형 유도용해 (PVIM) 장비(a)와 제조된 강괴 사진(b)이다. 강괴 사이즈는 직경 180×길이 460mm 이고 중량은 약 100kg 이다.

Table 1 은 사용 소재의 화학성분을 보여 주고 있다. ELTRA 사(독)의 ON-900 분석기를 이용하여 측정된 질소 농도값은 약 4,450ppm, 2.0Ni 로서 통상적인 스테인리스강의 Ni 함량 약 8~14% 기준하여[1] 평균 약 82% 정도 낮은 수준을 보인다.

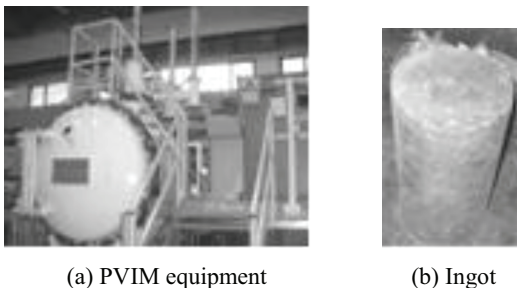


Fig. 1 Photograph of PVIM equipment and VIM ingot with weight of 100kg

Table 1 Chemical composition of the HNS alloy

(wt.%)						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	N(ppm)
0.024	0.4	10.0	18	2.0	1.01	4450

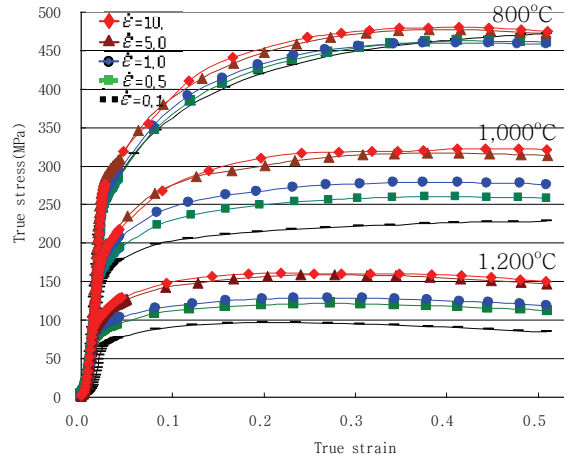


Fig. 2 Stress-strain curve according to strain rate($\dot{\epsilon}$ =s⁻¹) at temperature 800°C, 1,000°C and 1,200°C

2.2 고온유동 물성실험

고온에서의 소재유동특성분석을 위하여 제조한 VIM 강괴 중심에서 모재를 채취한 후 압축용 원주시험 직경 8×높이 12(mm)로 가공하였다. 시험설비는 HDS(Hot Deformation Simulator, Model: Thermecmaster_Z10)에서 수행되었다. 시험조건은 온도구간 800°C 에서 1,200°C 까지 100°C 간격으로 변형율속도($\dot{\epsilon}$)는 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 에 압하율은 평균 50% 목표로 수행하였다.

Fig. 2 는 시험온도 구간 내에서 대표온도를 선정하여 변형율에 따른 응력-변형을 거동시험을 통하여 얻어진 선도이다. 영향 인자들 중 온도에 의한 영향이 가장 크며 상대적으로 낮은 온도인 800°C 부근에서는 변형율속도($\dot{\epsilon}$, s⁻¹)의 영향이 작지만 온도가 높은 1,000°C, 1,200°C 에서는 변형율속도가 증가함에 따라 응력이 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 낮은 변형율속도 구간인 0.1~0.5(1.0)에서는 영향이 크게 나타나며 변형율속도 5.0 이상에서는 응력변화의 폭이 미소함을 보인다. 이러한 결과는 고온 변형에서 변형속도를 임의 범위 내에서 크게 하여도 하중의 증가현상이 미소하다는 것을 의미한다.

3. 열연공정 시뮬레이션

3.1 해석조건

Fig. 3은 열간 압연해석을 위한 2-롤 타입의 3차

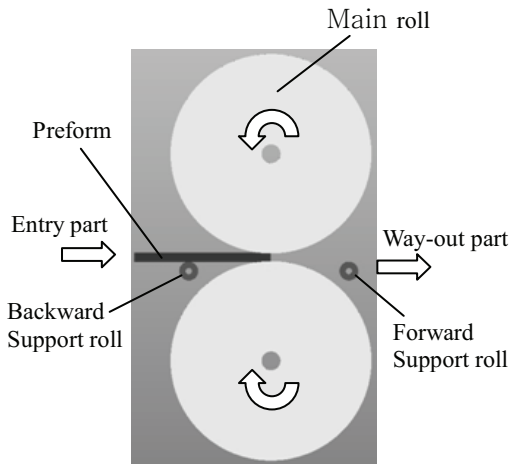


Fig. 3 Schematic modeling for hot rolling system

Table 2 Initial condition of roll and preform for hot rolling analysis (Size unit: mm)

Roll			Preform			
Dia. ϕ	Width B_0	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Width W_0	Thick. t_0	Length L_0	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)
320	250	25	134	14.5	217	1,250

원 모델형상이다. 구동롤의 구동과 동시에 진출입구 보조롤이 함께 회전하면서 압연되는 구조이다. 초기 롤속도 105mm/s, 마찰계수 0.7에 롤, 프리폼 소재 및 대기간의 열전달 고려는 프로그램에서 제공하는 계수값을 사용하였다. 열전달계수는 $50\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 이고 Emissivity는 0.25이다. 3-D 형상모델 프리폼소재의 내측($2t/3$, t :소재두께)은 FVM, 표면부($t/3$)는 FE기법 적용이 가능한 소성전용해석 프로그램인 Simufact. forming-8.1 압연모듈을 사용하였다. 실제 사용설비의 보조롤 역할을 묘사하기 위해 진입구 및 진출구 측의 보조롤 구동을 고려하였다.

Table 2는 열간압연 해석을 위한 롤과 판재 프리폼의 초기조건이다. 최종 압연 후 압연재의 목표 두께는 4.0mm이다.

3. 2 해석결과

Fig. 4는 1-Pass 압연시 실제 순간압연율($\text{ARR}\% = ((t_i - t_{i+1})/t_i) \times 100$, $t_i - t_{i+1} = t_f$, $i=1, 2, \dots, n$)에 따른 변형양상을 조사하였다. 10~15%까지는 폭, 두께 및 길이방향의 수평도가 모두 양호한 변형상태를 보인다. 그러나 20%에서 부터는 판끝단 이상변형과 길이방향 수평도에서 이상변형이 발생한다. 30% 압연 시

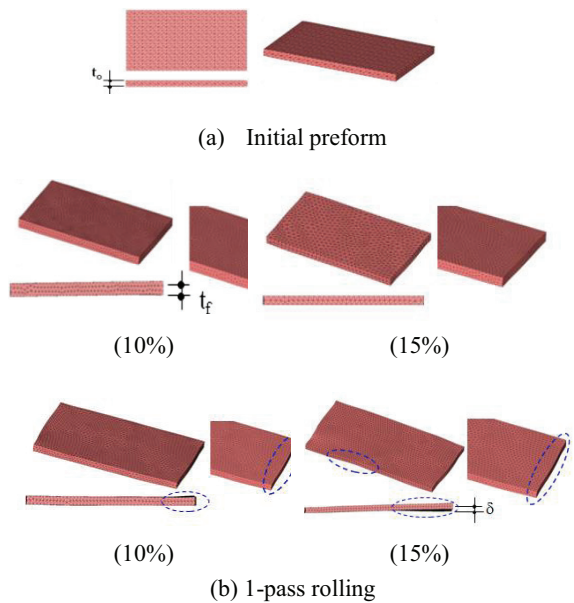


Fig. 4 State of deformation according to rolling reduction ratio(RR%) per one-pass rolling

진후면 끝단 비변형과 수평도가 심한 판재휨(δ) 문제가 발생한다. 따라서 작업성과 안정적인 변형 유도를 위한 초기 적정 압연율은 약 15%로 선정할 수 있다.

Fig. 5는 1-Pass, 압연율(ARR%) 15%에서 압연과정 진행에 따라 유효변형을 및 온도분포 변화를 살펴 보았다. 초기 진입하여 최종압연 후 진입부와 작업이 끝나는 끝단부에서 변형을 및 온도분포 차이가 발생한다. 변형을 및 온도분포 상태는 상대적으로 끝단부에서 크게 나타나고 있다. 이러한 결과들은 변형이 누적 될 경우 판재꼬임, 휘임, 주름 등의 문제발생과 이상변형 가능성이 커질 수 있음을 제시한다. 따라서 적절한 압연율과 재가열에 대한 공정설계, 분석이 필요하다.

초기 프리폼두께 $t_0=14.5\text{mm}$ 에서 누적압연율($\text{CRR}\% = (t_0 - t_f)/t_0 \times 100$) 최대 75% 즉, 최종두께 $t_f=3.6\text{mm}$ 까지이고, 순간압연율(ARR%)은 각 공정 단계 군에서 수번의 압연 해석 시험을 통해 최적 가능 압연율을 선정하였다. 압연해석 중 소재온도가 850°C 기준 이하로 떨어지면 1250°C 까지 시간당 70°C 의 승온속도로 재가열 후 열연공정을 수행하였으며 Table 3에 정리되어 있다.

Fig. 6은 누적압연율(CRR%)=70%까지 증가해 가면서 Table 3의 Rolling process 공정 중 각 단계에

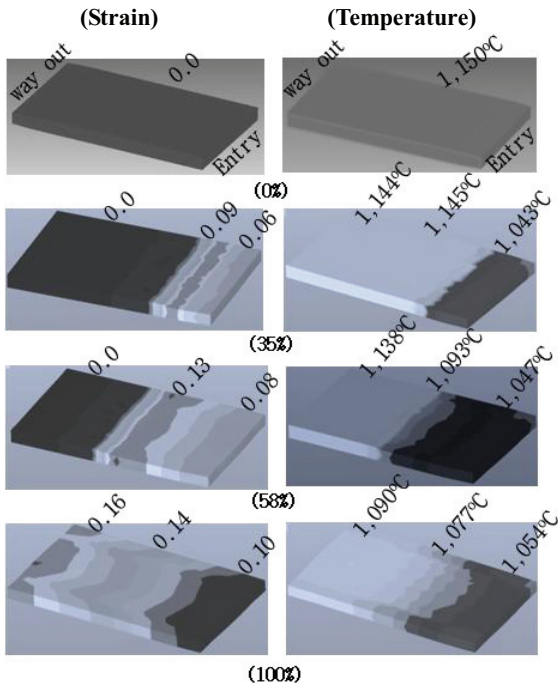


Fig. 5 Variation of effective strain and temperature according to 1-pass rolling advancing with RR=15%

Table 3 Rolling process for hot rolling

Process	Step1~4	Step5~8	Step9~10	Step11~12
Heating No.	1-heat	2-heat	3-heat	4-heat
CRR(%)	41	65	71	75
ARR(%)	15	13	7	5

서 선정하여 판재의 변형 및 소재거동형상을 살펴보았다. CRR=50%까지는 길이 및 폭방향에서 비교적 양호한 변형양상을 보이지만 누적압연율 62%부터는 표시한 원형점선에서와 같이 끝단부에서의 불균일변형, 길이방향으로의 수평도 불량 발생하기 시작한다. 70%부터는 길이방향 전면에 걸쳐 두께변형 불균일과 휨 현상이 과도하게 나타난다. 따라서, 본 소재의 경우 적절한 최대가능 압연율은 약 60%로 분석된다.

Fig. 7 은 압연율증가에 따른 압연판재의 길이방향 신장율(LR%= $L_f/L_o \times 100$)와 폭방향 신장율(WR%= $W_f/W_o \times 100$) 거동을 조사하였다. 누적압연율(CRR%)이 증가함에 따라 신장비는 증가하지만 LR%가 상대적으로 크며 WR%는 최종공정까지 큰 변화가

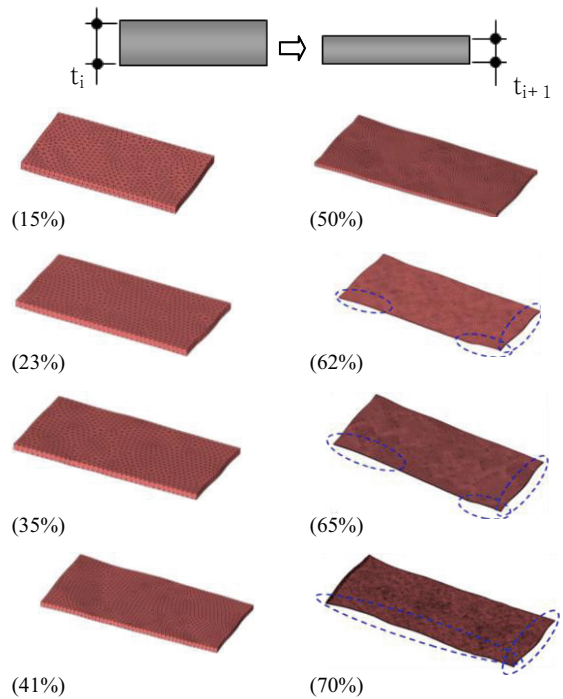


Fig. 6 Behavior of plate deformation according to increasing of cumulative rolling ratio(CRR%)

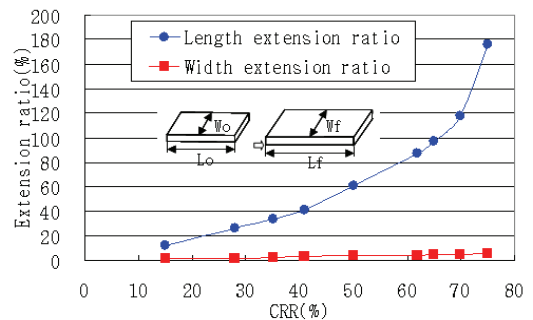


Fig. 7 Behavior of length & width direction extension ratio(LR% & WR%) according to rolling reduction ratio

없다. LR%는 압연율 약 40%까지는 일정비로 증가하며 67%까지 좀 더 빠른 증가를 보이다가 70% 이후 급격한 신장율 증가가 발생한다. LR%는 최대 176.5%, WR%는 최대 5.8%로서 약 30.4 배 LR%가 크다. 이러한 변형거동은 효율적인 압연품 생산에 유리한 공정효과를 제공한다.

Fig. 8 은 4 회 가열에서 수행한 압연율 각 단계에서 압연 판재면의 길이방향(x)과 폭방향(y)으로 위치별 유효변형률 상태를 조사하였다. 가열회수

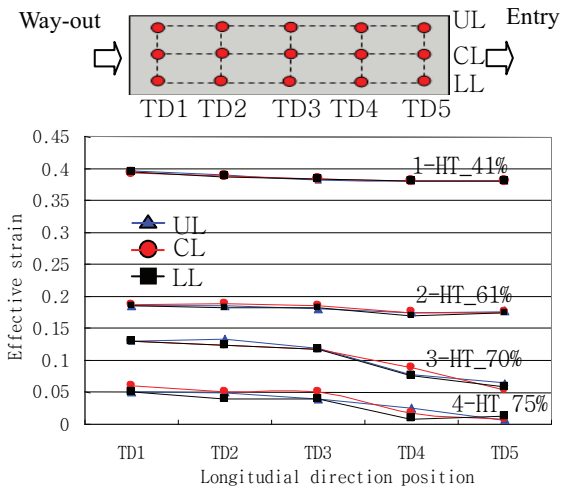


Fig. 8 Effective strain at thickness direction with rolling ratio(CRR%) & heating number

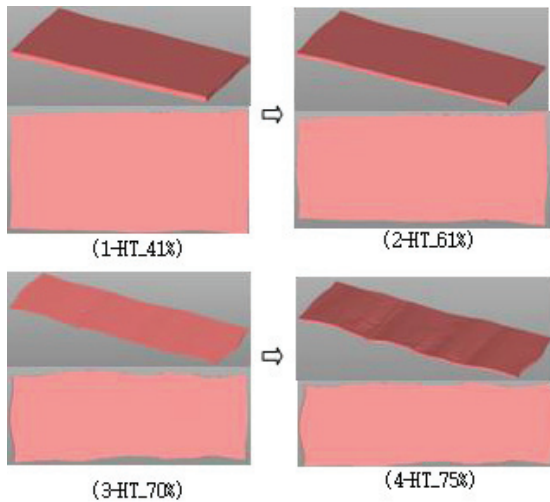


Fig. 9 Behavior of length & width direction extension ratio(LR% & WR%) according to rolling reduction ratio

가 증가하면서 절대 유효변형율의 값은 작아지고 있다. 이는 가열로 인해 소재 내부변형율이 초기화 되고 후공정으로 갈수록 1 회당 압연량이 작아지면서 나타나는 현상이다. 1-HT-41%에서 변형률 분포는 압연판 전면에 걸쳐 균일한 상태를 보이며, 2-HT- 61%에서도 비교적 양호하다. 그러나, 3-HT-70%부터 입구측(TD5)과 출구측(TD1)간의 변형률 차이가 크게 발생하며 마지막 단계인 4-HT-75%에서는 입, 출구측뿐 아니라 폭방향으로의 분

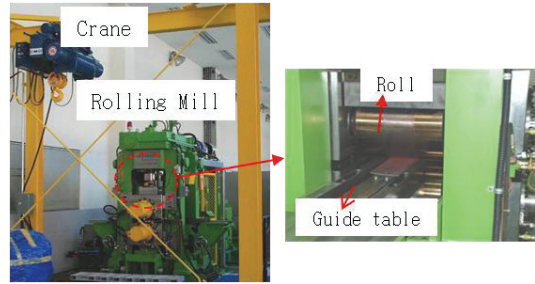


Fig.10 Photograph of rolling equipment for hot rolling test(Max. rolling force=350ton)

포값도 불균일해 지고 있다. 따라서, 본 소재에서 균일변형을 얻기 위한 최대 누적압연율은 약 60%임을 재확인할 수 있다.

Fig. 9 는 각 가열횟수와 압연율에서의 열간압연품의 변형상태를 보여주는 그림이다. 2-HT-61%까지는 열연품의 길이, 폭, 두께방향 형상이 비교적 균일한 형태를 보이지만, 3-HT-70%와 4-HT-75%에서는 심한 주름현상과 불균일 형상이 나타나는데 이는 본 소재의 적정 압연율은 약 60%가 됨을 가시적으로 증명하고 있다.

4. 열간압연 실험

4.1 실험조건

Fig. 10 은 열간압연롤의 실험장치 및 구조이다. 압연력 최대 35 톤, 롤크기는 $\phi 320 \times L250(\text{mm})$ 인 2-Roll 구동방식이다. 열간압연용 관재프리폼 크기는 $t_0 14.5 \times w_0 134 \times L_0 217(\text{mm})$, 초기온도 $1,250^\circ\text{C}$ 이고, 롤의 초기온도는 상온하에서 롤의 평균속도 108.3mm/s , $t_f=4\text{mm}(\text{CRR}=72\%)$ 로 작업하였다. 압연프로세스는 시뮬레이션을 통해 얻어진 공정을 기준하였다. 작업 중 관재 중심부 표면온도를 Pyrometer(Model: RayTemp TM38, $-60 \sim +1,000^\circ\text{C}$)로 측정하여 약 900°C 미만이 될 경우 재가열 하였다.

4.2 실험결과 및 검토

Fig. 11 은 가열된 프리폼을 가지고 압연롤 입구측에서의 인입과 최종 출구측에서의 인출 후 관재압연 작업광경을 보여주는 사진이다.

Fig. 12 는 목표압연율 60%와 75%기준하여 해석과 실험실급 규모의 실험결과를 비교하였다. 열간압연 작업공정은 해석에서 도출된 기본공정에 준해 실험하였다. CRR=60% 에서는 해석 및 실험 모

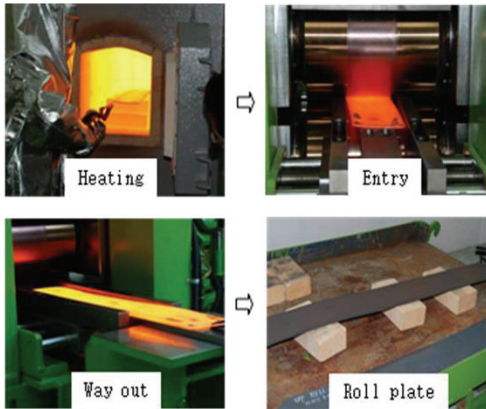


Fig.11 Photograph of rolling work process for hot rolling test

CRR%	Analytical product	Experimental product
Target 60%		
	Realvalue: 61%	Realvalue: 60%
Target 75%		
	Realvalue: 75%	Realvalue: 73%

Fig.12 Comparison of analysis and experimental results after hot rolling

Items	Before H. Rolling	After H. Rolling	
Micro Structure		0°	
		90°	
Ts (Ys) [Mpa]	960 (705)	963 (750)	
Hardness (HV)	268	275	
Grain size	6.5	6.5	

Fig.13 Results of mechanical properties & micro-structure after hot rolling test

두 비교적 균일변형된 압연품 결과가 얻어졌다. 이는 앞에서 제시한 최대가능 누적압연율 60%와 일치함을 알 수 있다. 목표 75%의 경우 원형접선에서 보듯이 해석품에서 소재주름과 불균일 변형 휨현상이 발생하였으며 실험결과에서도 역시 유사한 주름 및 휨현상이 발생하여 상호검증을 확인 하였다.

Fig. 13은 열간압연 전, 후의 미세조직과 기계적 성질에 대해 살펴보았다. 압연 전후 인장강도, 항복강도특성은 큰 변화가 없으며 경도증가 역시 미미하다. 입자크기의 경우도 전혀 변화가 없다. 이러한 이유는 미세조직 사진에서 보듯이 압연 중 재가열로 변형이력이 남아있지 않고 해소되기 때문이다. 0°, 90° 방향간의 조직이 유사한데 이는 950°C~1,200°C 부근의 오스테나이트 조직을 나타내고 있다.

4. 결 론

18Cr-18Mn-0.4N 고질소강재에 대해 열간 하에서의 소재특성 시험분석과 FE 시뮬레이션 및 실험실규모의 압연모사실험을 수행한 결과는 다음과 같다.

(1) 열간압연시 불균일변형, 수평도불량, 판꼬임, 휨현상 발생방지가 가능한 1 회당 최대 압연율은 15%이며 최대 누적압연율은 60%이다.

(2) 폭신장율(WR) 5.8%, 길이신장율(LR)은 176.5%로서 길이신장율이 약 30.4 배 크게 나타나며 압연 생산공정에 유리한 효과를 제공한다.

(3) 실험실규모의 압연모사장비를 구축하고 열간 압연공정 시뮬레이션에서 도출한 공정인자에 기초하여 성형성 및 형상측면에서 검증실험하므로써 제시한 압연공정인자에 대한 타당성을 확인 하였다.

(4) 열간압연 후 방향성은 거의 없으며 인장강도, 경도(HB), 입자크기 등은 유사함을 보여 오스테나이트조직의 특성을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] D. Peckner & I. M. Bernstein, 1987, Handbook of stainless steel, McGraw Hill Inc., New York, NY.
 [2] M. O. Speidel, 1989, Properties and applications of high nitrogen steels, J. Foct. and A. Hendry, HNS 88, Lile, France, MAY 1988, The Institute of

- Metals, pp. 92~97.
- [3] T. H. Lee, S. J. Kim, 1997, The properties and development presents situation of nitrogen addition steel, Machine and Materials, Vol. 9. 4, pp.72~83.
- [4] M. Kikuchi, M. Kajihara, K. Frisk, 1989, High nitrogen steels, Proc. of 1st Int. Conf. high nitrogen steels, J. Foct. & A. Hendry, HNS 88, Lile, France, May 1988, The Institute of Metals, pp. 63~67.
- [5] M. L. G. Byrnes, M. Grujicic, W. S. Owen, 1987, Acta Metallurgy, 35 pp. 1853~1858.
- [6] E. Werner, 1988, Material Science Engineering A101, pp. 93~97.
- [7] R. P. Reed, 1989, J. Metals, pp. 16~20
- [8] M. O. Speidel, R. M. Pedrazzoli, 1992, Materials Perform., 31 pp. 59~65.
- [9] J. W. Lee, J. T. Kim, 2007, The effect of Co-N addition on mechanical properties, microstructure and erosion of 17Cr steel, The Iron and steel Insti. of Japan, Vol. 48, No. 1, pp. 114~119.
- [10] Y. G. Go, W. G. Kim, G. T. Park, 2006, Strain hardening behavior of ultra fine grained STS steel, The Korean Ins. of Metal and Materials, Vol. 44, No. 5, pp. 48~53.
- [11] S. T. Kim, T. H. Lee, C. S. Oh, 2006, Deformation behavior of high nitrogen austenite phase with Fe-18Cr-14Mn-4Ni-3Mo-N, Kor. Mat. Conference, pp. 662~668.
- [12] H. J. Bang, T. H. Lee, C. S. Oh, 2007, High temperature extraction behavior of high nitrogen austenite phase stainless steel, The Korea Institute of Metal and Materials, p. 269~276.
- [13] S. T. Kim, T. H. Lee, C. S. Oh, 2006, Deformation behavior investigation of Fe-18Cr-3Mo-14Mn-4Ni-N austenite-phase high nitrogen steel by using EBSD and TEM, The Korea Institute of Metal and Materials, pp. 124~128.
- [14] J. W. Lee, D. S. Kim, B. K. Kim, 2007, Compression deformation properties of high nitrogen austenite-phase stainless steel, The Korean Society for Technology of Plasticity, pp. 139~141.
- [15] M. Y. Lee, J. W. Lee, Y. D. Kim, 2008, Hot and cold rolling characteristic with high-nitrogen steel of austenite stainless, pp. 99~101.
- [16] M. Y. Lee, J. W. Lee, Y. D. Kim, May 2009, Forging materials properties and cold rolling experiment of high nitrogen steel with TP304-phase, The 7th Rolling Symposium, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp. 37~46.