

3-Roll 선재압연에서의 결정립조대화 방지기술

임 규환, 김병홍, 김기환, 권정석
선재부, 포항제철소

The Technology for Reducing Abnormal Grain Growth in 3-Roll Type Wire Rod Rolling

K. H. Lim and B. H. Kim and K. H. Kim and J. S. Kuen
Wire Rod Rolling Dept., POSCO

Abstract

The abnormal grain coarsening in wire rod rolling induces detrimental defects, such as jagged size tolerance, severe bending after heat treatments and drawing troubles, in the following secondary processes. Neishi et al¹⁾ observed that there is a band type region where grain coarsening occurs in the plastic strain vs. deformation temperature plot. Based on the finding, we have investigated whether grain sizes and ferrite volume fractions are correlated to deformation strain with three kinds of wire rod diameters as for the different average deformation conditions. The samples were chosen from the No. 2 Wire Rod Mill of POSCO where 3-roll type of finishing mill stand are used. It was found in the present work that the grain size and ferrite volume fraction of the rolled and cooled microstructure were changed with rolling reduction and rolling temperature. Abnormally grown grains at various observed points were also found. To have homogeneously fine grains of microstructure from the No. 2 Wire Rod Mill, it will be easier to control finish rolling temperature at around 750°C rather than to find another rolling schedule..

Key words : wire rod, sizing mill, 3-roll, strain, grain size, ferrite volume fraction

1. 서론

본 논문은 최근 선재압연에서 치수 정밀도를 높이기 위해 최종 사상압연시 경압하에 의한 Sizing압연기(3-Roll 방식)에서 발생할 수 있는 결정립의 조대화 및 혼립발생의 정도 및 기술적 배경에 대한 내용을 조사하고 실시험을 통한 현장검증을 토대로 방지기술에 대한 검토를 기술적으로 한다.

선재압연에서 치수 정밀도를 높이기 위해 2-Roll 방식, 3-Roll 방식, 4-Roll 방식 등 여러 압연방식이 제시되고 있는데, 3-Roll 방식의 압연에서 일정온도 이상에서 Strain량이 적은 부분의 결정립이 조대화되어 혼립조직으로 발생하는 문제에 대해 문제점이 제기되어져 왔다¹⁾. 이러한 결정립의 조대화 및 혼립조직은 압연이후 선재를 가공하는 공정, 특히 신선 및 열처리 공정에서 잔류응력의 불균일한 분포로 인해 가공품의 치수정도 불량, 열처리후의 직진도의 불량 및 기계적 특성의 편차로 인한 문제점 발생등으로 결정립 조대화를 방지하는 경압하 Sizing 압연기술의 정립에 대한 필요성이 대두되었다.

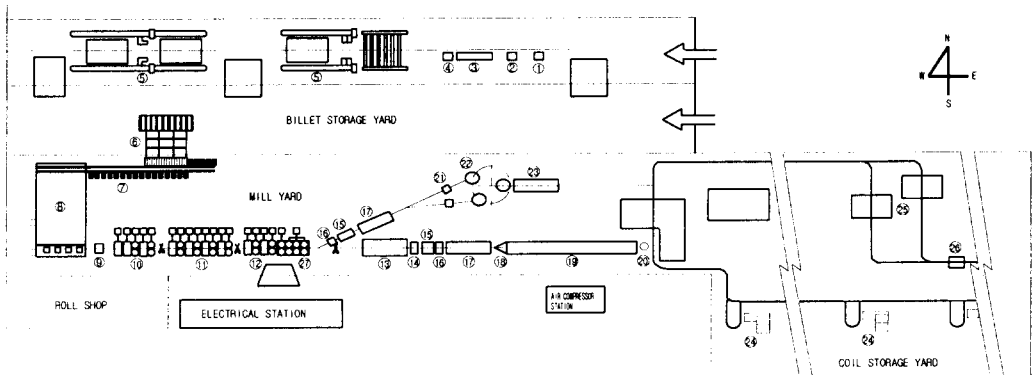
따라서 본 고에서는 '96년 당사 2선재공장에 설치 가동되고 있는 3-Roll방식의 Sizing압연기에 대해 각사에서 연구되어진 논문을 조사한 결과를 토대로 S45C와 SCM415에 대해 실제 결정립 조대화의 발생정도를 정량적으로 측정하고 그 결과를 토대로 방지대책에 대한 검토결과를 설명하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 당사 3-Roll 방식의 선재압연

당사 2선재공장은 Fig.1 에서 보는 바와 같이 5.5mm ϕ ~13.0mm ϕ 까지 생산하는 Wire Rod Line 과 14.0mm ϕ ~42.0mm ϕ 까지의 Bar in Coil을 생산하는 Garret Line으로 구성되어 있다. 이중 Garret Line에서 생산되는 선재제품에 대해 사상압연을 3-Roll 방식의 Sizing압연을 '96년부터 도입 실시하고 있으며 주생산강종은 냉간압조용선재, 합금강선재, 베어링강, 스프링강, 기계구조용강, 고장력강이다.

Garret Line의 선재생산 공정을 간단히 살펴보면 Walking Beam 방식으로 160 \times 160mmSq. Billet를 1000~1250 $^{\circ}$ C로 가열한 후 조압연 중간압연을 거친후 사상압연기인 KOCKS사의 3-Roll 방식의 Sizing 압연기를 거친후 수냉대에서 일정온도로 냉각시킨 소재를 Pouring Reeler에서 Coil모양으로 권취하여 이후 공냉시키는 공정을 가지고 있다.



NO	NAME OF EQUIPMENT	NO	NAME OF EQUIPMENT	NO	NAME OF EQUIPMENT
1	CAMBER MEASURING DEVICE	10	ROUGHING MILL(5Std')	19	STELMOR AIR COOLING ZONE
2	SHOT BLAST	11	INTERMEDIATE ROUGHING MILL(8Std')	20	REFORMING TUB
3	DEFECT DETECT UNIT	12	INTERMEDIATE FINISHING MILL	21	GARRET LINE PINCH ROLL
4	ULTRASONIC TESTER	13	FINISHING BLOCK MILL(10Std')	22	REELER
5	BILLET GRINDER(4 sets)	14	COBBLE BOX	23	AIR COOLING ZONE
6	BILLET INCLINED ELEVATOR	15	EDDY CURRENT TESTER	24	UNLOADER
7	BILLET CHARGE ROLLER	16	BAR GAUGE METER	25	COMPACTING & BINDING MACHINE
8	REHEATING FURNACE	17	WATER COOLING BOX	26	COIL WEIGHER
9	DESCALER	18	LAYING HEAD	27	KOCKS 3-ROLL MILL(4Std')

Fig.1 POSCO 2선재공장 Layout

2.2 열간 선재압연시 결정립조대화 거동

2.1.1 재결정

선재압연은 압연속도가 빨라 그 결정립의 거동에 대한 연구가 실제적으로 적용하기 어려운 부분이 있다. 전통적인 선재압연은 일반적으로 오스테나이트상태에서 실시하는 열간압연 공정으로 이루어 지는데 오스테나이트는 열간압연을 연속적으로 하게되면 소성가공이후 회복(Recovery), 재결정(Recrystallization), 결정립성장(Grain Growth)가 반복해서 일어나면서 결정립의 미세화가 진행된다. 고온에서 압연이 진행되는 경우는 회복, 재결정이 동시에 일어나는데, 변형과 동시에 일어나는 회복, 재결정을 동적회복 동적재결정이라 부른다. Fig.2 는 고온변형 거동을 보여주고 있는데, 고온에서의 유동곡선은 Zener-Hollomon Parameter(Z)에 크게 의존한다.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q_d/RT)$$

여기서, $\dot{\epsilon}$: 변형속도

Q_d : 변형활성화 에너지

Z가 크면, 즉 온도가 낮거나 가공속도가 큰 경우에는 동적 재결정에 의한 연화가 가공경화보다 적어 변형이 증가함에 따라 응력이 증가하게 된다. 그러나 Z가 적은 경우, 즉 온도가 높거나 변형속도가 느린 경우에는 재결정이 변형과 동시에 일어나 유동곡선이 최대치를 보인후 감소하다가 정상상태에 이르게 되는 동적재결정이 일어난다. 그러나 선재압연의 경우 초기 조압연에서는 온도는 높지만 변형속도가 어느정도 높기 때문에 변형직후 재결정이 일어나는 Meta-Dynamic 재결정이 일어나며, 사상압연의 경우는 비록 변형속도는 높지만 압하량 누적 및 가공발열에 의한 온도상승으로 Meta-Dynamic이 일어나는 것으로 생각되어지고 있다²⁾³⁾. 동적재결정립의 크기는 다음과 같이 Z에 의존하게 되고 정적재결정의 경우 Strain과 초기결정립 그리고 Z에 의존하게 된다.

$$d_{DRX}^{-1} \propto \log Z$$

$$d_{SRX}^{-1} \propto \epsilon^{-0.5} d_0 Z^{-0.06}$$

열간압연시 대부분의 Stand에서는 압하량이 충분하지 않고, 변형속도가 커서 동적 재결정이 일어나기 쉽지 않다. 이 경우에는 정적재결정에 의해 결정립이 미세화되는데 이러한 정적재결정 과정을 Fig.3 에 모식화하였다. 이때 정적 재결정이 일어나는 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = 1 - \exp[-k(t/t_{0.5})^n]$$

$$t_{0.5} = BD_0^b \epsilon^c Z^d \exp(-Q_R/RT)$$

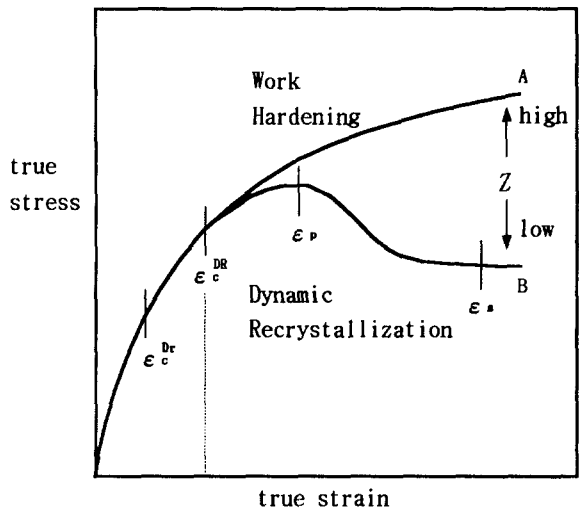


Fig.2 Typical flow curves during hot deformation

이 식에서 X는 재결정율, $t_{0.5}$ 는 50% 재결정에 필요한 시간, ϵ 는 변형량, Q_R 는 재결정 활성화 에너지, 그리고 k, n, B, b, c, d는 상수이다.

재결정속도는 강의 열간압연시 중요한 요소다. 왜냐하면 Interpass Time동안 재결정이 일어나는냐에 따라 결정립의 크기가 달라지기 때문이다.

결론적으로 재결정입자의 크기는 일반적으로 압연온도가 동일한 경우에는 압하율(Strain)이 클수록 더 미세한 재결정 입자를 얻을 수 있고, 압하율(Strain)이 같은 경우에는 온도가 낮을수록 더 작은 결정립이 된다. 이것은 압하가 클수록, 온도가 낮을수록 소재내의 에너지가 더 높은 상태로 되어 안정한 상태로 가려는 구동력이 크기 때문이다.

2.1.2 결정립성장

재결정이 끝난 오스테나이트는 입성장이 일어난다 입성장을 일으키는 구동력은 계면을 줄임으로서 전체에너지를 낮추려는 것이다. 결정립성장은 주로 온도와 화학성분의 함수로써, 온도가 높을수록 빠르게 성장하며 합금원소가 첨가되면 지연되고 재결정의 기구에 따라 DRX, MRX, SRX에 따라서도 다르다고 언급되어지고 있다. 입성장이후의 결정립 크기(D_{gg})는 다음과 같다.

$$D_{gg}^n = D_0^n + Ct^n(-Q_{gg}/RT)$$

따라서, 특히 온도가 높으면 빠르게 성장하므로 압연온도가 높으면 강압하를 하더라도 미세한 입자를 얻기 쉽다.

2.3 3-Roll방식의 마무리 압연에서 결정립거동

선재압연의 마무리 압연은 치수정도를 높이기 위해 여러가지 압연방식이 채택되고 있다. 2Roll 방식, 3Roll 방식, 4Roll 방식등이 있다. Sizing압연기는 일부 치수에 대해 치수정도를 높이기 위해 Skin Pass정도의 경압하를 주는 경우도 있고, Mill별 Pass Schedule에 따라 어쩔수 없이 경압하가 실시되는 경우, 그리고 Sizing Mill의 고정된 기어비로 인해 압하량의 변화가 불가능한 경우에 경압하가 실시된다. 그리고 일부 중압하라 하더라도 공형 압연 특성상 부위별 Strain의 차이로 인해 일부분에 대해 Strain이 적게 되는 경우도 있다. 일부 논문¹¹⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾에서는 이러한 문제점을 정량적으로 분석하기 위해 부위별 Strain을 FEM방식으로 압연온도에 따라 분석하고(Fig.4, Fig.5) 이에 대한 변태조직의 결정립도를 측정함으로써 그 상관성을 Fig.5 에 나타내었다.

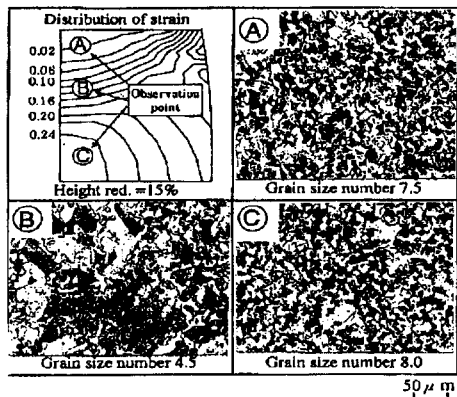


Fig.4 850℃에서의 Strain과 결정립도와의 관계¹¹⁾

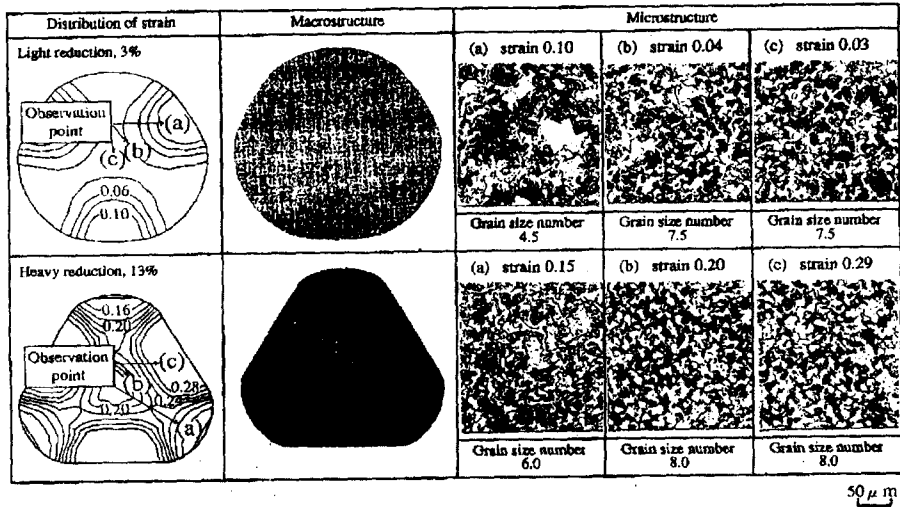


Fig.5 예측된 Strain과 압연후 결정립도와와의 관계¹⁾

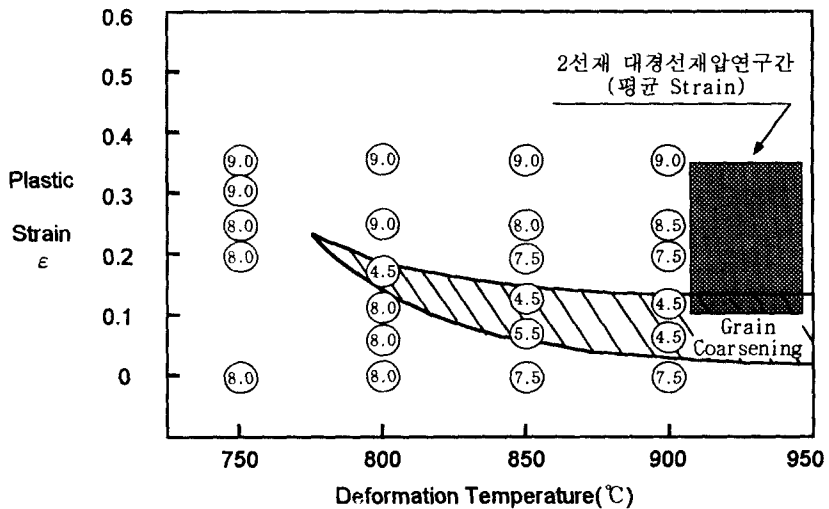


Fig.5 압연온도와 Strain에 따른 결정립도¹⁾

Fig.4 의 좌상의 그림은 Hot deformation Simulator로 시험한 시편의 strain값이 같은 부분을 선으로 연결하여 등Strain선이고 각 부분의 미세조직을 현미경으로 관찰하여 결정립도를 분석한 것이 나머지 부분에 나타나 있다. 이렇게 분석된 기본 Data를 토대로 Strain 예측모델을 만들고 각 부위의 조직을 분석한 결과 예측 모델이 잘 맞고 있는 것이 확인되었다.

Fig.5 는 위에서 시험하고 예측된 data를 토대로 온도별, Strain별 결정립도에 대한 그림으로 압연온도가 낮을수록, Strain이 클수록 결정립은 미세하게 된다.

3. 2선재공장 실적용 결과 및 고찰

3.1 당사 2선재공장 3Roll Sizing Mill의 압연조건

당사 2선재공장은 14.0mm ϕ ~42.0mm ϕ 까지 압연시 마무리 압연기로 '96년 도입된 독일 KOCKS사의 3Roll Sizing Mill을 사용하고 있다. 압연온도는 Fig.6 에 나타낸데로 960 $^{\circ}$ C 부근이고 Size 별 감면율과 평균 Strain은 Table 1. 에 나타내었다.

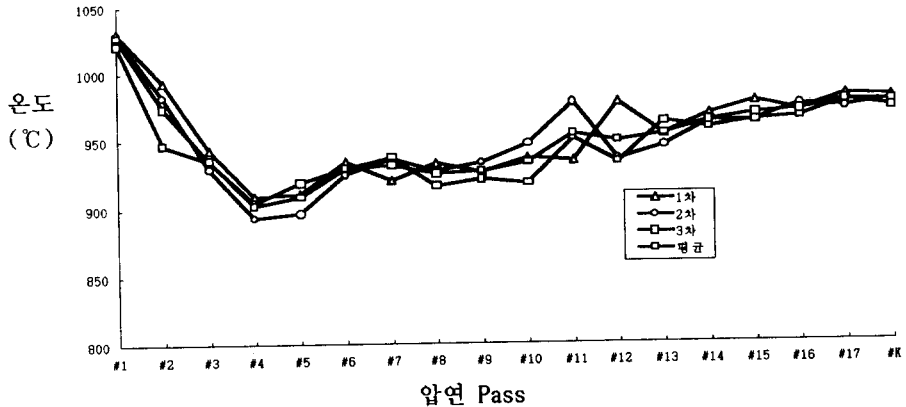


Fig.6 2선재공장 Pass별 압연온도이력

Table 1. 2선재 Sizing Mill의 칫수별 감면율 및 평균 Strain

칫수	Ingoing		감면율						평균 Strain (Ln(A0/A1))
	면적	면적	K1	K2	K3	K4	누적		
14	615.4	18.00	1017.4	16.91	14.89	8.68	6.33	39.51%	0.503
15	706.5	19.02	1135.9	14.82	14.73	8.62	6.29	37.80%	0.475
16	803.8	19.02	1135.9	8.53	9.52	8.70	6.35	29.23%	0.348
17	907.5	19.02	1135.9	3.37	3.41	8.65	6.31	20.11%	0.225
18	1017.4	21.18	1408.6	7.81	8.39	8.68	6.34	27.77%	0.325
19	1133.5	21.18	1408.6	3.00	3.04	8.66	6.32	19.53%	0.217
21	1384.7	24.93	1951.5	8.87	9.06	8.68	6.33	29.04%	0.343
23	1661.1	24.93	1951.5	0.25	0.25	8.67	6.33	14.88%	0.161
25	1962.5	31.92	3199.3	16.10	14.51	8.69	6.34	38.66%	0.489
27	2289.1	31.92	3199.3	8.64	8.46	8.67	6.33	28.45%	0.335
30	2826.0	35.98	4060.4	9.05	10.57	8.66	6.32	30.40%	0.362
34	3629.8	36.95	4287.0	0.00	7.28	6.21	2.65	15.33%	0.186
35	3846.5	42.00	5539.0	9.41	10.74	8.68	6.33	30.56%	0.365
36	3846.5	36.95	4287.0	0.00	2.11	6.21	2.65	10.28%	0.108
36	4089.4	42.00	5539.0	6.94	8.07	8.68	6.33	26.53%	0.308
36	4089.4	39.05	4788.2	0.00	7.28	6.21	2.65	15.01%	0.183
37	4298.7	42.00	5539.0	4.78	5.09	8.68	6.33	22.39%	0.254
37	4298.7	39.05	4788.2	0.00	2.06	6.21	2.65	10.22%	0.108
38	4534.2	42.00	5539.0	0.00	10.69	6.21	2.65	18.14%	0.200
39	4775.9	42.00	5539.0	0.00	5.93	6.21	2.65	13.78%	0.148
40	5024.0	44.33	6170.6	0.00	1.05	6.21	2.65	18.58%	0.206
41	5278.3	44.33	6170.6	0.00	6.68	6.21	2.65	14.46%	0.156
42	5539.0	44.33	6170.6	0.00	2.07	6.21	2.65	10.24%	0.108

Table 2. 분석대상재

규격	대상칫수	가열조건	냉각조건	비고
SCM415H	30, 34, 38	1080±50℃	크서냉	총 6EA시편
S45C		1050±50℃	조정급냉	총 6EA시편

Table 1. 에서 보듯이 2선재공장의 Sizing Mill의 평균 Strain은 0.10~0.5까지 칫수별로 다양하게 운영되고 있고, 그중 일부 칫수는 Fig.5에 나타낸 바와 같이 Stock내 일부분에서 Strain이 작은 부위가 발생할 가능성이 높고 그 부분에서 결정립의 비정상적 성장으로 인한 이상조직으로 발전할 가능성이 있다.

3.2 2선재 압연재 분석결과

3.2.1 분석방법

위의 이상조직 발생가능성에 대한 확인을 위해 Table 2. 와 같이 2선재공장에서 연속압연된 소재를 임의로 채취하여 그 미세조직을 분석하였다. 현미경을 통해 단면의 부위별 결정립도를 측정하였고, 부위별 ferrite volume fraction을 측정함으로써 오스테나이트에서의 결정립도를 간접적으로 비교해 보았다 (Fig. 7).

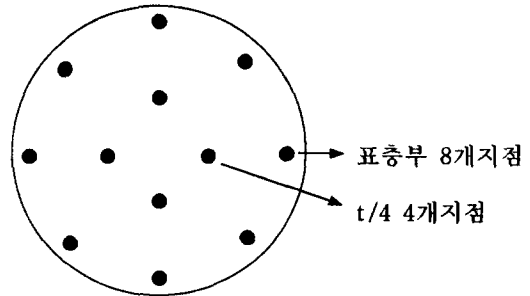


Fig.7 선재단면내 결정립도 측정 및 ferrite volume fraction 측정위치

3.2.2 분석결과

각 칫수별 평균 Strain에 따른 압연제품의 결정립도 및 ferrite volume fraction을 분석한 결과를 Table 3. 과 Fig.8 에 나타내었다. Table 3. 에 나타낸 바와 같이 평균 Strain이 큰 제품일수록 결정립도 및 ferrite volume fraction이 크다. 따라서 Strain이 클수록 결정립은 미세화되어진다는 것이 확인되었다. 그리고 S45C 30.0mm ϕ 의 경우 결정립도가 3point의 차이가 발생하고 있어 Strain이 적은 부분에서 결정립의 조대화가 이루어진 것으로 판단된다. 특히 Strain의 편차가 심한 표층부가 S45C, SCM415 구분없이 결정립도 및 ferrite volume fraction의 차이가 심한 것으로 나타났다. 또한 특이할 사항은 ferrite volume fraction이 S45C의 경우 결정립이 미세할수록 커지는 반면 SCM415의 경우 결정립이 미세한 경우 작아지는 경향을 나타내었다.

4. 결론

선재 공형압연의 특성상 stock에서의 부위별 strain의 차이는 발생하지 않을 수 없는데 strain이 작은 부위에서는 재결정이 재결정이 일어나는 활성화에너지가 작아 결정립이 미세화되지 않고 조대화되어 stock 단면내에 비정상적인 조직을 나타낼 수 있다. 당사 2선재공장에 설치 가동되

Table 3. 시험편 부위별 결정립도 및 ferrite volume fraction

구분	S45C						SCM435					
	30		34		38		30		34		38	
	입도	F%	34	F%	38	F%	30	F%	34	F%	38	F%
S-1	10	18.4%	6	16.9%	6	31.0%	8	64.1%	7	60.0%	9	64.6%
S-2	9	35.1%	6	18.8%	6	25.6%	8	63.9%	8	71.7%	8	65.6%
S-3	9	33.2%	9	28.4%	6	23.6%	8	61.6%	7	70.3%	7	63.3%
S-4	10	32.8%	6	17.9%	7	23.6%	8	65.3%	8	72.2%	7	61.5%
S-5	10	28.4%	6	15.1%	7	19.6%	8	64.9%	8	73.5%	9	65.8%
S-6	9	26.4%	6	17.6%	7	27.3%	8	61.1%	8	70.5%	8	67.1%
S-7	7	22.9%	7	20.9%	7	31.8%	8	64.6%	8	67.5%	8	65.2%
S-8	8	22.4%	7	22.5%	7	28.1%	7	61.0%	8	66.0%	8	64.7%
표면평균	9.00	27.5%	6.63	19.8%	6.63	26.3%	7.88	63.3%	7.75	69.0%	8.00	64.7%
t/4-1	7	32.0%	7	33.4%	8	38.0%	7	60.1%	6	64.4%	6	63.5%
t/4-2	7	31.4%	7	30.7%	7	36.8%	7	59.9%	6	65.2%	6	64.4%
t/4-3	7	33.7%	7	33.4%	7	31.9%	7	64.0%	6	62.0%	6	62.5%
t/4-4	7	31.0%	7	32.2%	7	37.3%	7	64.2%	6	65.8%	6	64.5%
t/4평균	7.00	32.0%	7.00	32.4%	7.25	36.0%	7.00	62.1%	6.00	64.4%	6.00	63.7%
전체평균	8.33	29.0%	6.75	24.0%	6.83	29.6%	7.58	62.9%	7.17	67.4%	7.33	64.4%

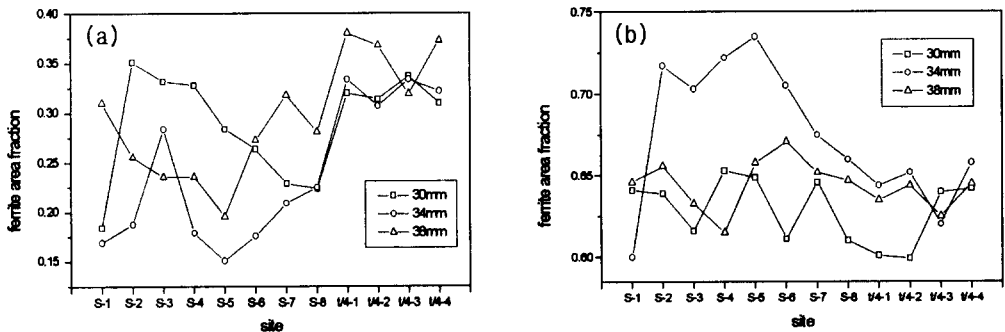


Fig.8 선재치수별 · 부위별 Ferrite volume fraction (a)S45C, (b)SCM415

고 있는 3-Roll 방식의 Sizing mill은 일부 치수에서 경압하로 압연하여 이러한 현상을 더욱 가속화시킬 가능성이 있다. 따라서 이러한 현상을 정량적으로 측정 분석한 결과 제품치수별 평균 Strain에 따라 결정립도 및 변태후 ferrite 분율이 영향을 받고, 부위별 strain의 차이로 인해 결정립이 다소 조대한 부분이 확인되었다.

4.1 방지방안

선재 공형압연은 판재압연대비 압연 Pass수도 많고 공형형상도 복잡하여 압하율을 병정하는 작업은 그리 쉽지않다. 또한 당사 2선재공장의 KOCKS Sizing Mill은 일정한 기어비로 기동이 되기 때문에 Ingoing Stock을 변경시켜 감면율을 증대시키는 방법에도 문제가 있다. 따라서 Sraing량의 증대를 통한 결정립조대화 및 혼립발생 방지는 상당한 설비 및 기술적 지원을 필요로 하게 되어 현실적인 개선안으로 수용하기는 어렵다. 그러나 압연온도의 하향조정은 고객사의 열처리생략이라는 효과를 위해 여러 선재 Mill에서 도입 적용하고 있으며, 당사 2선재공장에서 Sizing Mill의 마무리 압연온도를 750℃까지 하향관리할 수 있도록 검토할 예정이다. 따라서 압연온도의 하향조정으로 전술한 바와 같이(Fig.5 참조) 800℃이하에서는 어떠한 Strain에서도 결정립 조대화가 일어나지 않으므로 결정립조대화 및 혼립은 발생하지 않을 것으로 기대된다.

4.2 향후계획

향후 선재압연에서 결정립조대화 및 혼립발생을 억제하여 보다 미세하고 균일한 조직으로 만들기 위해 각 강종별, 칫수별 최적의 Sizing 마무리 압연온도를 도출함으로써 2차 가공시 Bending 및 칫수불량등의 문제들을 개선하여 고객을 만족시키고 선재기술력을 한층 진보시킬 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) Y. Neishi외: JSTP, vol.38, no.438, pp. 637-641(1997).
- 2) 이덕락, 최상우: 선재제어압연을 위한 수냉설비 능력평가 및 합금원소 효과분석 pp.2-12(1997)
- 3) 이덕락, S.Yue: Austenite Refinement to Minimize As-Hot Rolled Strength of AISI4135 Steel Rolled at POSCO's Wire Rod Mill (1999)
- 4) Y. Neishi외: JSTP, vol.39, no.454, pp. 1134-1138(1998).
- 5) T. Ishikawa: JSTP, vol.39, no.450, pp. 22-25(1998).
- 6) T. Okui외: JSTP, vol.38, no.432, pp. 76-80(1998).