

저탄소강 선재 압연의 주름성 결함

김학영, 권혁철*, 변상민*, 박해두*, 임용택
기계공학과, 한국과학기술원
공정제어연구그룹, 포스코 기술연구소*

Wrinkle Defect of Low Carbon Steel in Wire Rod Rolling

H. Y. Kim, H. C. Kwon*, S. M. Byon*, H. D. Park*, and Y. T. Im
Department of Mechanical Engineering, KAIST
Rolling Technology and Process Control Research Group
POSCO Technical Research Laboratories*

Abstract

This study examined the cause of the wrinkle defect which is frequently encountered in wire rod rolling of low carbon steel(C0.08~0.13wt.%). Even a small defect on the surface of rolled bars can easily develop into fatal cracks during cold heading process of low carbon steel, and it is therefore necessary to minimize inherent defects on the surface of hot rolled bars. Hot rolling process of low carbon steel was analyzed to identify the cause of the wrinkle defect in conjunction with FE analysis. The integrated analysis revealed that the wrinkle defect initiated in the first stage of rolling, and it was at the billet edge where severe deformation and drastic temperature drop were present. To elucidate the micro-mechanical mechanism of the wrinkle defect, hot compression tests were carried out at various temperatures and strain rates using Gleeble-3800. The surface profile of the each other compressed specimens was compared, and rough surface lines were observed at relatively low temperatures. Those surface defects can develop into wrinkles during multi-pass rolling. To control the wrinkle defect in rolling, it is necessary to design an adequate caliber which can minimize the loss of ductility, and thereby prevent flow localization. To use the result of this study for other steels, the quantitative measure of the wrinkle defect and flow localization parameter should be proposed.

Key words : Wire rod rolling, wrinkle defect, FEM, flow localization, processing map

1. 서론

냉간압조용 강은 2차 가공에서 압조 가공(upsetting)을 통해 볼트와 너트 등의 부품으로 가공된다. 따라서 성형성이 떨어질 경우 소재에 치명적인 결함으로 발전할 수 있으며 이는 실수율(實收率) 감소로 연계되므로 이런 결함을 최소화하는 것이 중요하다(1). 따라서 선재 압연중의 결함 요인을 정확히 규명하는 작업과 이를 개선할 수 있는 공정제어 기법을 개발하는 것이 필요하다.

열간 압연에서 발생하는 표면 결함은 1960년대부터 보고 되었으며 결함 저감을 위한 공형 설계 방안들이 제시되었으나 결함원인의 체계적인 분석은 적다. 국내 연구로 Kim 등(2)은 2상 스테

인레스강 압연에서 발생하는 크랙의 원인을 분석하였는데, 소재 측면부의 2차 인장응력 (secondary tensile stress)과 강종별 결함 정도를 분석하였다. 압축 방향과 직각 방향으로 작용하는 인장응력이 크랙을 유발하고 다단공정을 거치면서 연신되어 압연방향의 결함으로 잔존하게 되는 것으로 고찰하였다. 그러나 본 연구에서 다루는 저탄소강에서 발생하는 결함을 분석하고 결함 발생 메카니즘을 체계적으로 분석한 예는 찾기 어렵다.

열간 공정에서의 소재 성형성에 관한 체계적인 연구는 Mintz 등(7)에 의해 수행되었다. 열간 인장 실험으로 공정 온도와 화학 조성에 따른 소재의 연성(ductility) 변화를 분석하였다. 이 연구에서는 특히 상변태와 같은 재료현상이 발생하는 온도 영역대에서 소재의 연성이 급격히 감소하는 구간 (ductility trough)이 발생함을 밝혔다. 이를 바탕으로 연성감소 구간을 줄이기 위한 다양한 방안에 대해 고찰하였다.

Prasad 등(9)은 공정맵(Processing Map)을 제안하여 열간 성형성을 평가하는 기법을 제안하였다. 공정맵은 소재에 일정한 압축변형을 가할때 변형 속도와 변형 온도가 소재 변형에 어떤 영향을 미치는지를 분석한다. 이 때 동적모델링법(DMM, Dynamic Material Modeling)을 적용하여 불안정한 유동이 발생할 수 있는 공정 조건을 찾는 것에 초점을 맞추고 있다. 이 방법은 열간 공정의 불안정 유동(flow localization, flow instability)이 나타나는 구간을 예측하는 체계적인 분석기법으로 Park 등(10)은 DMM법을 이용하여 공정맵을 작성했다. 공정맵은 다양한 강종간의 열간 성형성을 비교/평가하는데 효과적으로 활용될 수 있다.

공정 인자가 소재 결함에 미치는 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 연구를 진행하였다. 본 연구의 대상인 저탄소강재 압연 공정의 조업 조건을 분석하였고 소재 내부의 세부적인 공정 조건을 분석하였다. 선재압연 공정의 변형 조건과 유사한 변형특성을 보이는 공정인 단순압축 실험을 통해 재료 거동을 규명하였고 결함이 발생하는 메카니즘을 제안하였다. 이를 통해 주름성 결함 저감을 위한 주요 공정 변수를 찾았으며 전반적인 공정제어 방향을 분석하였다.

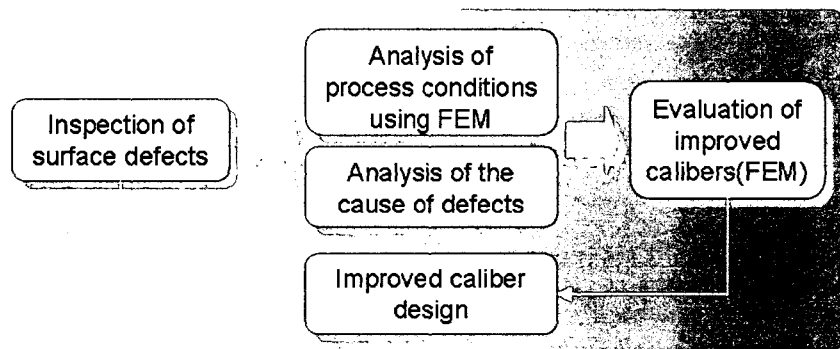


Fig. 1 Schematic diagram of current study.

2. 결함분석

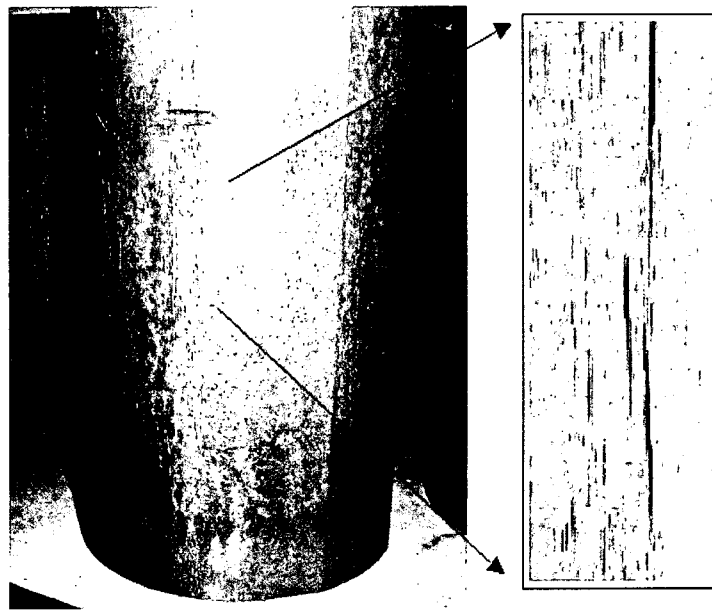
2.1 결함 발생 경향

주름성 결함은 30여단에 이르는 선재 공정의 초기 패스에서 발생하며 다단 패스 압연동안 그 깊이가 감소되지만 최종 소재의 직경이 큰 경우 압연 후에도 상당한 결함으로 남는다. 패스 수가 많을수록 단면적 감소가 커서 결함의 크기는 감소하게 된다. 그러나 냉간압조 과정에서 작은 크랙도 소재의 치명적 결함으로 발전할 수 있어 선재품의 주름성 결함을 찾는 것이 매우 중요하다. 현장에서는 잔존하는 소재 결함을 측정하기 위해 최종 코일을 부분 절단한 후 냉간 압조를 실시하여 결함 여부를 평가하고 있다.

본 연구에서 대상으로 하는 공정에서의 결함분석을 위해 최종 선재품의 냉간 압조시 나타난 결함과 압연 중간단계 크롭에서의 결함을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)에 압조된 선재품의 표면에



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 (a) Surface cracks after cold upsetting of rolled bars, (b) wrinkle defects on the surface of the crop in the 5th stand, and (c) micrograph of a defect in cross-section.

한줄의 깊고 길다란 흠이 나타난 것을 볼 수 있다. 이러한 결함은 한줄 혹은 두줄로 나타나게 된다. Fig. 2(b)는 압연 공정의 초기 패스인 5번 패스의 크롭(crop)을 추출한 결과에 해당한다. 주름 결함은 머리카락 모양으로 여러 갈래가 압연 방향으로 발생하며 다수의 얇은 결함과 소수의 깊은 결함이 동시에 나타나고 있다.

Fig. 2(b)의 주름성 결함을 상세하게 분석하기 위해 광학현미경을 이용하여 결함부 단면을 측정하였다. 결함의 형상은 크랙성의 터짐 결함이 아니라 주름에 의한 결함으로 보인다. 결함부의 단면이 날카로운 형상이 아니고 그림에서 점선으로 표시한 바대로 둥글둥글한 모양이기 때문이다. 결함부의 직경은 $100\mu\text{m}$ 정도로 보이며 다단패스에서 결함 깊이가 감소하더라도 냉간압조 공정에서 상당한 결함으로 발전할 수 있을 것으로 판단된다.

결함이 발생한 시편을 분석한 결과 결함은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 네 방향으로 나타났으며 5번 패스의 롤갭부와 직각인 축을 기준으로 좌/우 35도 ($70^\circ/2$)의 간격으로 발생하였다. 결함은 중심축을 기준으로 편심된 방향에서 나타났다. 이는 다단 패스 압연중 소재 뒤틀림 현상에 의해 발생한 문제로 보이며 이러한 편심 현상은 라운드-오발-라운드 공정에서 나타난 것으로 추정된다.

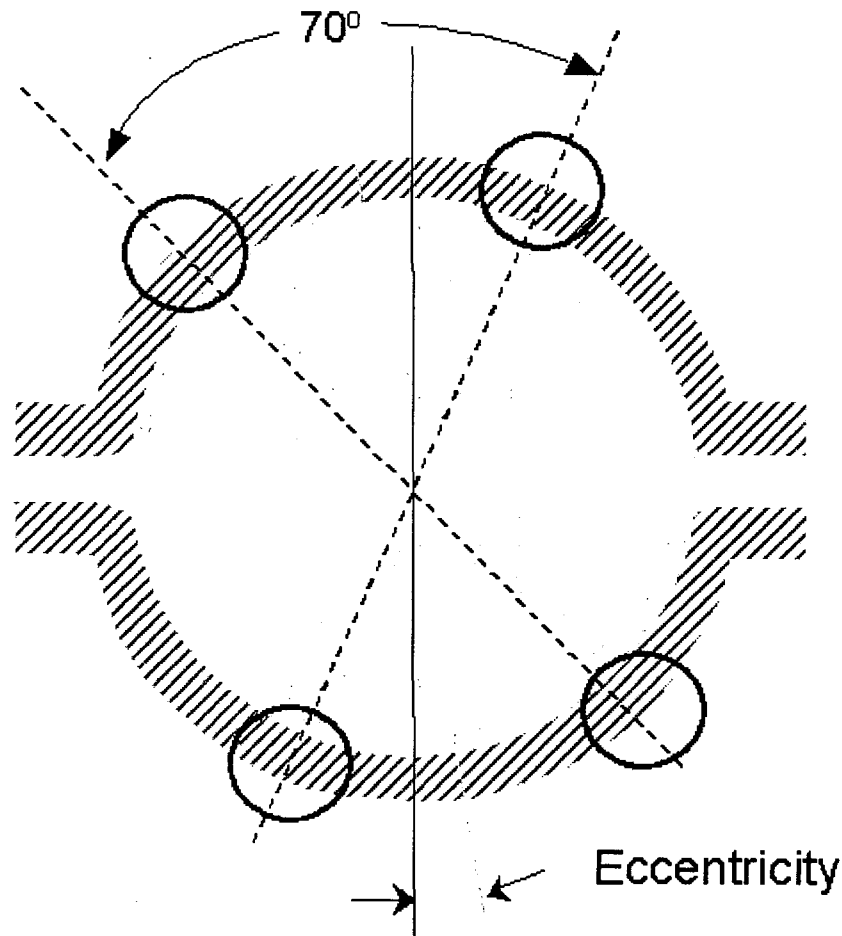


Fig. 3 Location of surface defects in cross-section of the crop in the 5th stand.

결함 원인 규명을 위해 (1)공형 형상과 (2)소재의 형상을 변경하였을 때의 결함 경향과 형상을 분석하여 Fig. 4에 나타내었다. 초기 소재는 연속주조(continuous casting)로 생산되는 연주재와 강편밀(billet mill)로 생산되는 강편재가 있다. 연주재는 모서리부의 필렛 반경이 작은 모난 형상이며 강편재는 필렛 반경이 크며 상대적으로 둥글둥글한 단면 형상을 갖는다. 새로운 공형은 그림에 나타낸 것처럼 필렛 반경은 유지하면서 기존 공형보다 폭을 넓힌 공형에 해당한다. 결함 경향은 다음과 같다.

- (a) 기존 공형으로 연주재를 압연할 때 깊은 주름성 결함이 나타난다.
- (b) 그라인딩으로 연주재의 모서리 반경을 증가시킬 때 결함 깊이가 대폭 감소한다.
- (c) 수정 공형으로 연주재를 압연할 때는 결함 깊이가 얕아지나 결함은 잔존한다.
- (d) 강편재 압연 시 소재 표면에 결함이 거의 발생하지 않는다.

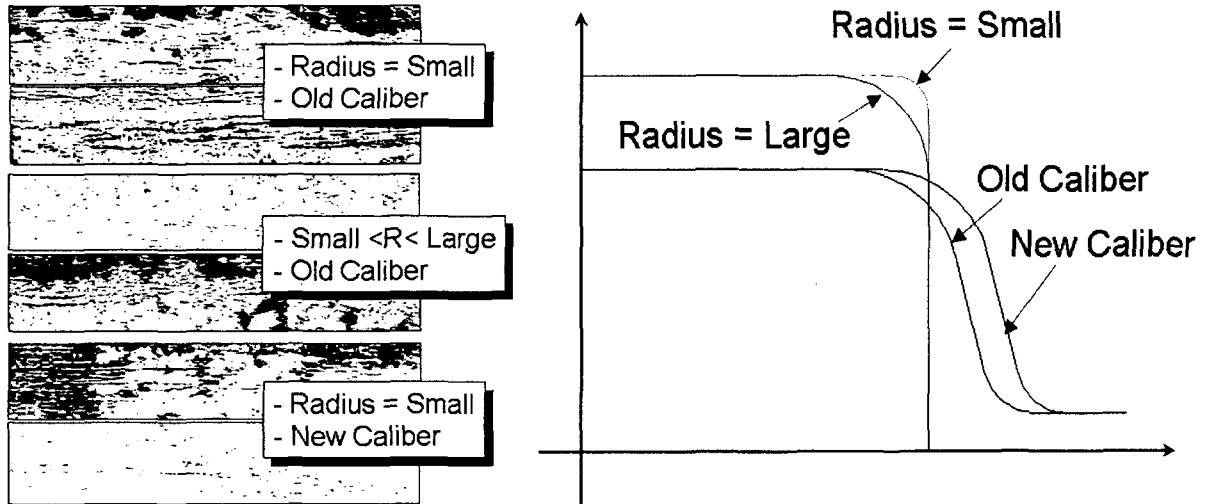


Fig. 4 Wrinkle defects according to specimen shapes and roll calibers.

이러한 결과로부터 소재의 형상과 롤 공형의 형상에서 겹치는(overlap) 부분이 큰 경우(변형량이 큰 경우)에는 결함 경향이 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 초기소재에 따라서 1번 패스의 공형 형상을 변경할 경우 결함 발생률을 조절할 수 있을 것이다. 이로부터 1번 패스에서 현재의 결함이 발생하는 것으로 보고 5번 크롭에서의 결함이 1번 패스에서 시작되었을 경우 어느 위치에서 발생하는지를 역 추적하였다. 이를 위해 1번 패스에서 5번 패스까지의 다단패스 유한요소해석을 수행하였으며 결함 발생이 가능한 지점은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 모서리부(Edge)로 예측되었다.

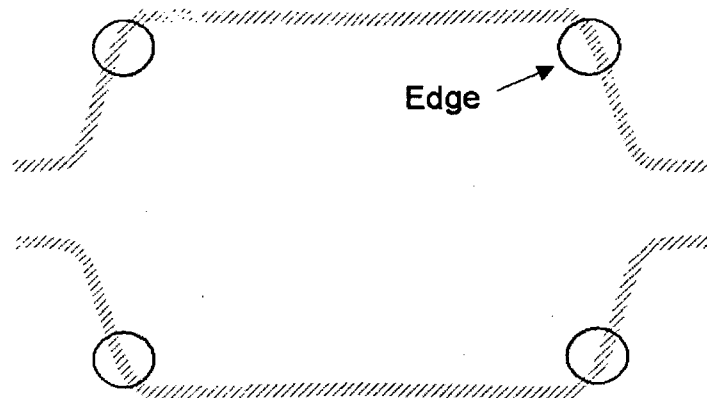


Fig. 5 Traced location of defects in the 1st stand.

2.2 결함부의 공정 조건

결함 예상 지점의 공정조건을 분석하였다. 이때 유한요소해석을 이용하였으며 온도 모델링을 위해서는 비접촉식 온도측정기 (pyrometer)를 이용하여 압연전후의 소재 표면의 온도 분포를 측정하였다. 소재 표면부에 해당하는 모서리부와 중심부에서의 변형량과 온도이력을 Fig. 6에 정리하여 나타내었다. 물과 접촉하게 되는 소재 모서리부는 압연 중에 온도가 급격하게 감소하였다가 출측에서 회복되나 초기 온도보다는 많이 떨어진다. 이에 반해 소재의 좌우측 자유표면부(Center)는 소성발열에 의해 약 20°C의 온도 상승이 발생하다가 서서히 감소한다. 소재의 모서리부는 저온 상태에서 과도한 변형이 이루어지므로 공정조건이 열악한 상태임을 알 수 있었다. 따라서 열간 압축 실험을 통해 이러한 공정 조건하에서의 소재 거동을 분석하였다.

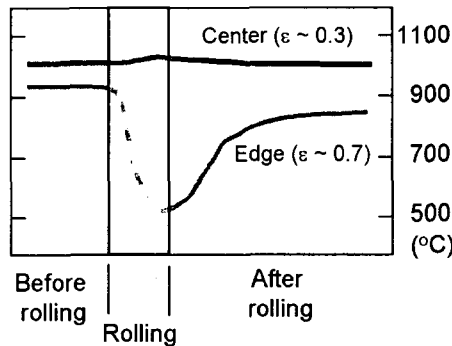


Fig. 6 Strain and temperature history in the edge and in the center of a billet.

3. 압축 실험

선재 압연에서 소재의 좌우측 자유표면은 압하방향의 압축력과 직각방향으로 발생하는 2차 인장력(secondary tensile stress)을 받으면서 2차원 응력상태에 놓이게 된다. 이러한 응력 상태는 단순 압축 실험에서 발생하는 응력 상태와 유사하다. 변형이력을 완전히 동일하게 설정하기 위해서는 시편 형상의 변경이 요구되지만 단순 원형 시편으로도 변형이력을 어느 정도 모사할 수 있다.

3.1 실험방법

압축실험은 Gleeble-3800을 활용하였으며 직경과 높이가 10mm와 15mm인 시편을 사용하였다. 소재 변형량은 60%로 설정하였으며 변형률속도는 0.1에서 10(1/s)까지 변화시켰다. 최초 소재 가열시 초당 10°C씩 온도를 증가시켰으며 변형전 60초 동안 균질화(homogenization) 구간을 두었다. 그리고 변형 온도는 500°C에서 1000°C까지 100°C간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

Table 1 Experimental conditions

Parameters	Levels	Thermal history
Reduction in height	60 (%)	
Strain rate	10.0, 5.0, 1.0, 0.5, 0.1 (1/s)	
Temperature	500, 600, 700, 800, 900, 1000 (°C)	
Specimen dimension	10mm×15mm (Diameter×Height)	

3.2 실험 결과

압축 실험 결과 소재 표면부의 형상이 공정조건에 따라 다르게 발생하였다. 결과 분석을 위해 압축된 소재를 반으로 절단하고 표면부를 광학현미경으로 관찰하여 Fig. 7에 나타내었다. 고온부(900, 1000°C)에서는 표면이 매끈하게 변형된 반면 500, 600, 700°C 구간에서는 거칠게 변형되었다. 그리고 800°C의 경우에는 중간 정도의 거칠기로 변형이 되었으며 500°C에서 소재 표면이 울퉁불퉁해지는 현상이 두드러졌다. 그러나 현재의 공정 조건에서는 변형률 속도가 소재의 표면 형상에 미치는 영향은 크지 않다.

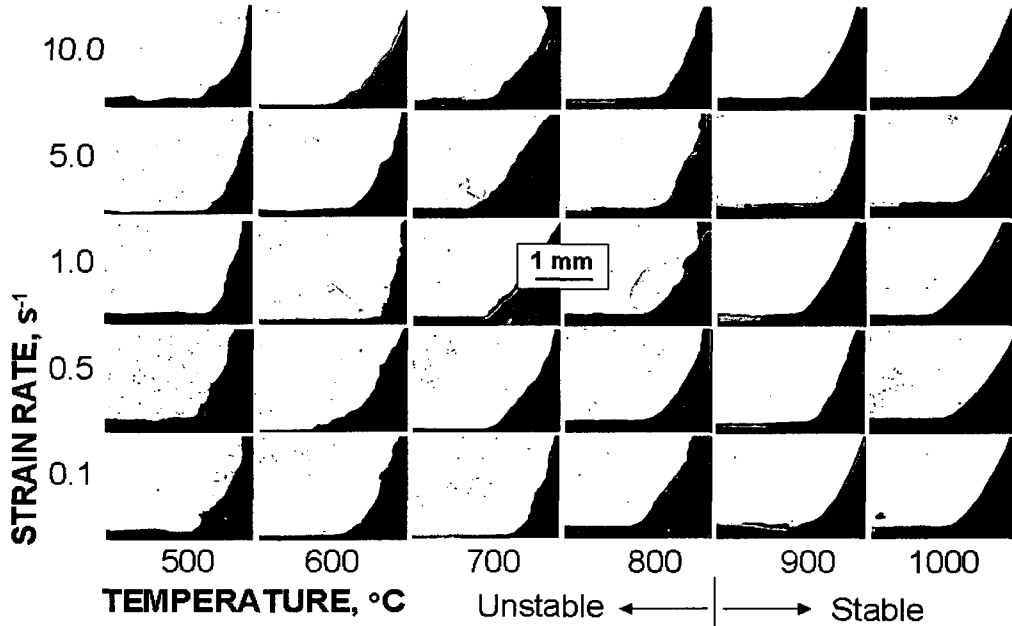


Fig. 7 Surface profile change according to temperatures and strain rates.

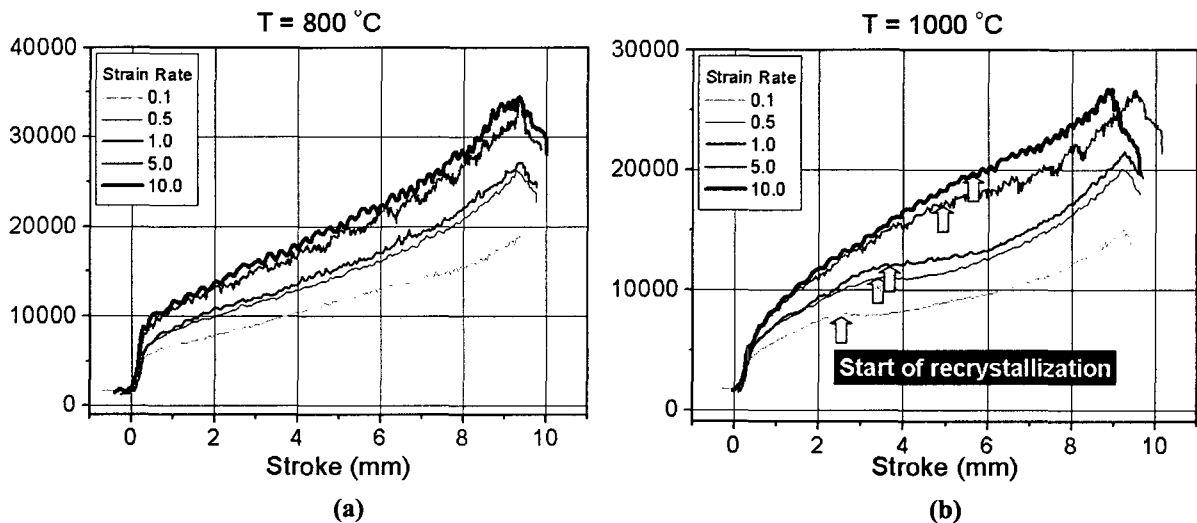


Fig. 8 Load-stroke curves: (a) 800°C and (b) 1000°C.

실험결과중 800°C와 1000°C에서 측정된 성형 하중 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 일반적으로 낮은 온도에서는 변형시 축적된 변형 에너지가 대부분 형상 변화와 열 방출로 소모된다. 하지만 높은 온도에서는 재료에 축적된 에너지의 일부가 재결정 현상으로 사용되고, 이러한 재결정 현상은 재료의 연성을 증가 시키게 된다. 온도가 1000°C인 경우 그림에 나타낸 것처럼 여러 변형속도 하에서 재결정현상이 나타남을 하중의 연화정도에서 확인할 수 있다.

3.3 공정맵

압축실험에서의 응력, 변형률 값을 이용해서 공정맵을 작성하기 위해 동적모델링법(DMM, Dynamic Material Modeling)을 이용했다. DMM법에 의하면 소성변형이 일어나는 동안 재료에 저장된 에너지는 소성일과 재료현상에 의해서 소산(dissipation)된다. 이것은 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \bar{\sigma} \dot{\epsilon} = \int_0^{\dot{\epsilon}} \bar{\sigma} d\dot{\epsilon} + \int_0^{\dot{\epsilon}} \bar{\sigma} d\dot{\epsilon} = J + G \quad (1)$$

(1)식에서 J 는 재료현상에 의한 에너지 소산을 나타내고, G 는 소성일에 의한 에너지 소산을 의미한다. 일반적으로 대부분의 에너지는 소성일에 의한 발열의 형태로 소산되고, 재료 현상에 의한 에너지 소산은 매우 작다. 여기서 J 와 G 의 순간적 변화량의 비를 (2)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\epsilon} d\bar{\sigma}}{\bar{\sigma} d\dot{\epsilon}} = \frac{d(\log \bar{\sigma})}{d(\log \dot{\epsilon})} = m \quad (2)$$

(2)식에서 m 은 변형률 속도 민감도 이고, $\bar{\sigma} = K\dot{\epsilon}^m$ 으로부터 (3)식을 얻을 수 있다.

$$J = \frac{m\bar{\sigma}\dot{\epsilon}}{m+1} \quad (3)$$

이상적인 경우에 $m = 1$ 이 되고, 이때 $J = J_{\max}$ 가 된다. J 와 J_{\max} 의 비를 수식화 하면 (4)식

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (4)$$

이 된다. η 는 에너지 소산 효율(efficiency of power dissipation)이라 불리는 값으로 온도와 변형률 속도의 함수이고, 소재 변형 시 내부 엔트로피 증가의 상대적 비율을 나타내며 재료의 미세조직 변화를 위해 소산되는 에너지와 관련된다.

변형률 속도와 온도의 변화에 따른 에너지 소산 효율(η)을 각기 다른 변형률에 대해 Fig. 9에 나타내었다. 변형률 값이 다를 경우 η 값이 조금씩 다르긴 하지만 전체적인 경향은 비슷하다. 즉 800°C부근을 기점으로, 낮은 온도에서는 η 값이 낮고, 높은 온도에서는 η 값이 높다. 앞의 Fig. 7에서도 800°C를 전후로 압축 시편의 표면 형상에 확인한 차이가 있었는데, 이것은 η 값이 소재 표면 형상과 관련이 있음을 나타낸다. 실제로 η 값은 재료의 미세조직과 관련된 값으로 변형중인 소재가 미세조직 변화를 통해 얼마나 효율적으로 에너지를 소산 시키는지를 나타낸다. 다시 말하면 η 값의 높고, 낮음에 따라서 재료의 미세조직의 변화가 다를 것이고, 이는 재료의 표면형상에도 영향을 줄 수 있다. 따라서 η 값(공정맵)을 잘 활용하면 특정 강종에 대한 최적의 공정 조건을 찾을 수 있을 것이다.

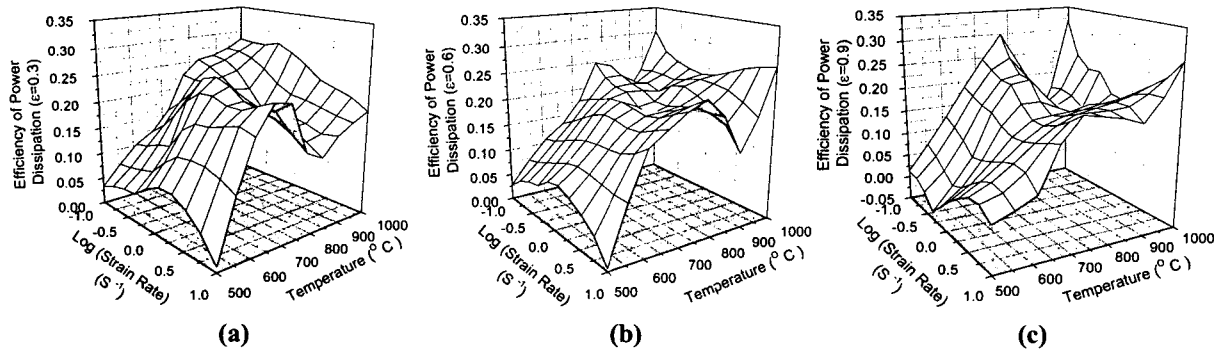


Fig. 9 Efficiency of power dissipation: (a) $\epsilon = 0.3$, (b) $\epsilon = 0.6$, and (c) $\epsilon = 0.9$.

4. 공정 분석 및 개선 방향

4.1 공정 분석

지금까지의 연구를 통해 온도와 변형량이 소재결합의 중요한 인자임을 알 수 있었고, 온도와 변형량을 동시에 고려하기 위해 소성일 관점에서 공형안을 비교 분석 하였다. 유한요소 해석을 위해 한국과학기술원에서 개발된 CAMProII(19)코드를 이용했다. CAMProII코드는 강열점소성 유한요소법을 기반으로 한 프로그램으로 삼차원 변형 해석 및 온도 해석이 가능하다.

현장에서 시도되고 있는 범위 내에서 공형을 변경시키며 다양한 공형안에 따른 결합 발생 가능성을 최대소성일 관점에서 분석하였다. 우선 공형 형상을 정의하기 위해서는 다양한 인자가 필요하나, Fig. 10(a)에 나타낸 것과 같이 공형폭과 모서리부의 필렛반경 두 가지를 형상 인자로 선정하였다. 이외에도 1번 패스 공형을 정의하는 인자로 좌우측면의 경사각을 선정할 수 있다. 그러나 경사각은 고정시키고 공형폭과 필렛반경을 변화시키면서 소성일 분포를 분석하여 결합 가능성을 고찰하였다.

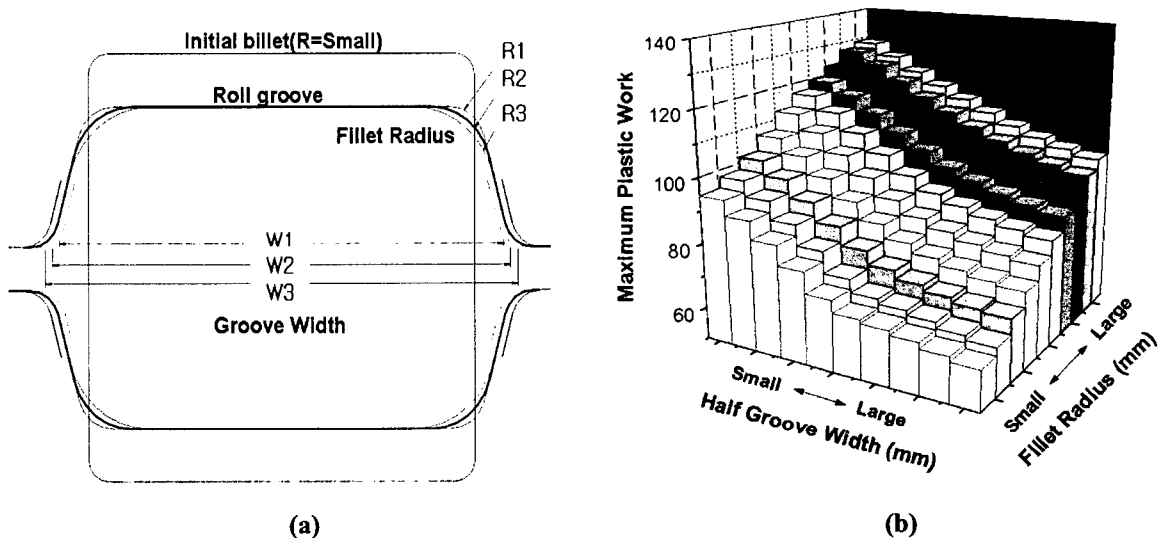


Fig. 10 (a) Roll grooves and billet geometry and (b) maximum plastic work.

공형폭은 W1, W2, W3로 변화시켰으며, 필렛반경은 R1, R2, R3로 변화시켜 총 9가지 공형안에 대한 소성일 분포를 분석하였다. 공형폭과 필렛반경이 각각 W1과 R3인 경우에 가장 큰 값이 예측되었으며, W3와 R1인 경우에 최대소성일이 61로 가장 작게 예측되었다. 이상의 결과를 Fig. 10(b)에 나타내었다. 현재의 공형안 범위 내에서 볼 때, 공형폭이 클수록 그리고 필렛반경이 작을수록 최대소성일 값이 작고, 따라서 결합 발생 가능성이 낮아질 것으로 추정된다.

4.2 공정 개선 방향

지금까지의 연구에 의하면 변형 집중 감소 및 온도 증가를 통해 공정을 개선할 수 있다.

- (1) 압연 직전에 소재의 모서리부를 네 방향에서 미리 압연하여 소재의 형상을 강편재와 비슷한 형상으로 변형시킨 후 1번 패스를 통과시킨다.
- (2) 1번 패스의 공형 형상을 최적화하여 압연되는 과정에서의 국부적인 변형량을 최소화 시킨다.
- (3) 1번에서 5번 패스까지의 공형설계를 수정하여 1번 패스의 변형량 집중을 방지할 수도 있다.
- (4) 모서리부의 온도 감소가 소재의 연성 감소에 큰 역할을 하므로 모서리부의 열손실을 최소화할 수 있는 방안을 찾거나, 모서리부를 가열하는 방법을 적용할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 저탄소강 선재 압연 공정의 주름성 결함 원인을 분석하고 결함 저감을 위한 공정설계 방안을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다:

- (1) 소재 표면에 발생하는 결함은 머리카락 형태이며 이는 1번 패스 모서리부에서 온도가 급격히 감소한 상태에서 변형량이 집중되면서 발생한다.
- (2) 결함 규명을 위해 고온 압축실험을 수행하여 소재가 저온에서 과 변형될 때 불안정한 유동을 보이며 다단 패스 압연 동안 겹침성 결함으로 발전한다.
- (3) 결함 저감을 위해서는 국부 변형량 분배 및 소재 모서리부의 열손실을 최소화 할 수 있는 공정개선이 이루어져야 한다.

현 연구를 바탕으로 향후에는 결함 발생 원인의 정밀한 분석이 필요하다. 이를 위해서 우선 현장 실험으로 1번 크롭의 결함 형태와 위치를 정확하게 조사하고, 모사 압연 실험으로 결함을 유발하는 공정 인자의 영향을 체계적으로 분석해야 한다.

후기

본 연구는 POSCO-BK21 과제로서 포스코의 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. J. Y. Kim et al., The 2nd Rolling Conference, (1996).
2. Y. H. Kim et al., The 4th Rolling Conference, pp. 500-509(2001).
3. A. G. Atkins, Journal of Materials Processing Technology, vol. 56, pp. 609-618(1996).
4. H. S. Kim et al., Transactions of ASME (Journal of Manufacturing Science and Engineering), vol. 121, pp.336-344(1999).
5. R. Kopp et al., Advanced Technology of Plasticity, vol. 2, pp. 1147-1152(2002).
6. N. Ogawa et al., International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 42, pp. 607-614(2002).
7. B. Mintz, ISIJ International, vol. 39, no. 9, pp. 833-855(1999).
8. S. Venugopas et al., Journal of Materials Processing Technology, vol. 59, pp.343-350(1995)
9. Y. V. R. K. Prasad et al., Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps, ASM International Park, OH, (1997).
10. N. K. Park et al., Journal of Materials Processing Technology, vol. 130-131, pp. 540-545(2002).
11. J.A. Schey, Journal of the Institute of Metals, vol. 94, pp. 193-200(1966).
12. G. Gusminsky et al., Journal of the Institute of Metals, vol. 95, pp. 33-37(1967).
13. J. A. Schey, Journal of Applied Metalworking, vol. 1, no. 2, pp. 48-58(1980).
14. R. Topno et al., Scandinavian Journal of Metallurgy, vol. 31, pp. 20-34(2002).
15. K. N. Barlow et al., Metals Technology vol. 11, pp. 14-19(1984).
16. Y. H. Kim et al., The 2nd Rolling Conference, pp.135-144(1996).
17. H. Ortiz et al., "Modeling for Prediction on Edge Cracking in Bar Rolling," Unknown Source, pp. 237-251.
18. G. Fitzsimons et al., Metallurgical Transactions A, vol. 15, pp. 1837-1847(1984).
19. S.Y. Kim et al., Journal of Materials Processing Technology, vol. 127, no. 1, pp.57-63(2002).