

# 공형 압연에서의 표면흠 성장 모델링 및 제어 방법 연구

나두현<sup>1</sup>, 이영석<sup>#</sup>

## Modeling and Controlling of Surface Defect Initiation and Growth in Groove Rolling

D. H. Na, Y. Lee

(Received October 7, 2008)

### Abstract

The groove rolling is a process that transforms the bloom or billet into a shape with circular section through a series of rolling. Inhibition of surface defect generation in groove rolling is a matter of great importance and therefore many research groups proposed a lot of models to find the location of surface defect initiation. In this study, we propose a model for maximum shear stress ratio over equivalent strain to catch the location of surface defect onset. This model is coupled with element removing method and applied to box groove rolling of POSCO No. 3 Rod Mill. Results show that proposed model in this study can find the location of surface defect initiation during groove rolling when finite element analysis results is compared with experiments. The proposed criterion has been applied successfully to design roll grooves which inhibit the generation of surface defect.

**Key Words** : Surface Defect, Control Method, Groove Rolling, Maximum Shear Stress, Finite Element Analysis

### 1. 서 론

선재압연(rod rolling)은 상하/부 룰이 원형(round shape), 타원형(oval shape), 상자형(box shape) 등으로 파여지고 소재가 그 사이를 순차적으로 압연되는 제조 공정이다. 압연이 되면서 소재의 단면이 점점 작아지고 최종적으로 원하는 형상이 생산된다. 이 공정에서 생산되는 철강재를 선재라 부른다. 최종 압연된 선재는 통상 5.5~42mm $\phi$  직경의 강재가 코일(coil) 형태로 권취되며 14mm $\phi$  이상의 선재는 제품의 직경 차이 때문에 'bar in coil' 라고 불리기도 한다. 선재압연과 공형압연은 동일한 생산공정이다. 선재압연을 통하여 생산된 1 차 선재제품은 2 차 가공 공정을 거쳐서 스프링(spring), 볼트(bolt), 와이어줄(wire rope), 베어링(bearing), 용접봉, 철선, 못,

철조망 등과 같은 일상 생활에 사용되는 제품, 부품으로 생산된다.

이러한 제품, 부품을 생산하는 압연 과정에서 소재에 표면흠(surface defect)이 발생하게 되는데 이것을 억제하는 방안이 필요하다. 왜냐하면 선재 제품에 표면흠이 존재하는 경우, 제품 사용시 피로 파괴로 인해 파단(failure)될 가능성이 크다. 예를 들면 등산에 사용되는 와이어줄(wire rope), 자동차 타이어에 사용되는 타이어 코드, 바퀴 조향 장치 용도의 봉(bar)은 사람의 생명과 밀접한 관련이 있기 때문에 선재압연공정에서 소재의 표면흠 발생 분석에 관한 연구는 매우 중요하다.

이전에 Eriksson 은 소재 표면에 매크로(macro)크기의 흠을 인위적으로 만들고 타원형 및 원형 공형 설계 변수 중에서 DS(radius of curvature of square

1. 중앙대학교 기계공학부  
# 교신저자: 중앙대학교 기계공학부, E-mail: ysl@cau.ac.kr

and/or oval groove)와 OE(edge height of cross section of incoming stock)의 비(ratio)를 비교였다. 그에 따라 소재 표면 균열(surface crack)의 폭과 깊이가 어떻게 변화하는지 실험 및 유한요소해석을 통해 연구하였다[1]. 또한 소재 표면흠이 공형 형상과 감면을 등에 관련하여 어떻게 거동하는지 보고하였다. Eriksson 은 공동연구자인 Filipovic, Overstam 와 함께 소재의 표면흠이 초기부터 어느 정도 있을 때와 없을 때 깊이 성장에 관한 비교 연구를 수행하였다[2]. 그들은 유한요소법을 사용하여 표면흠의 성장에 대한 예측을 하였고 실험값과 계산값을 비교하였다. Ervasti and Stahlberg 는 압연을 하기 전에 소재의 길이, 횡 방향으로 표면흠이 존재한다고 가정하고 요소 생성을 하였다. 그리고 그들은 유한요소법을 사용하여 표면흠 성장거동에 대해 연구하였다. 마찰계수, 롤의 반지름, 표면흠의 초기 깊이에 따라 표면흠의 폭(width)과 깊이(depth)가 어떻게 변화하는지 비교하였다[3~4].

하지만 상기 연구들은 초기에 표면흠이 존재한다고 가정하고 연구를 수행하였다. 또한 실험을 할 때 소재 표면에 일정 깊이의 흠을 인공적으로 만들어 실험하였다. 이러한 가정은 현실과는 거리가 있기 때문에 문제해결에 큰 도움이 되지 못했다.

최근 연구된 결과 중, 저자는 공형압연에서 발생하는 소재의 표면흠이 전단 변형률에 의해 발생한다고 유한요소해석을 통해 연구하였다[5]. 그 이유는 공형압연에서 롤 직경의 변화에 따라 소재 표면의 전단 변형률이 변화되기 때문이다. 이 성분으로 인해 소재의 표면 중 전단 변형률이 높게 발생하는 부분에서 표면흠이 발생한다고 보고하였다. 따라서 전단 변형률이 작게 발생하도록 롤 형상을 변경하여 이를 억제하는 방안을 제시하였다.

본 연구에서는 선재압연 공정에서 표면흠 발생 원인을 유한요소해석을 통해 고찰하고 분석한다. 실제 현장에서는 소재가 동일한 공형에서 압연되는 조건에서 강종의 종류에 따라 표면흠 발생이 다르게 나타난다. 어떠한 강종은 표면흠이 발생하는 반면 다른 강종은 표면흠이 발생하지 않는다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 소재의 응력-변형률 선도가 다르게 나타나기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 소재의 응력-변형률 선도가 다른 경우 표면흠 발생의 차이를 비교하고 표면흠을 억제할 수 있는 방안에 대해 제시한다. 나아가 이 기준을 포스코 선재압연 공정 라인에 적용하였다.

## 2. 표면흠 발생 분석

### 2.1 표면흠 발생 예측 모델

본 연구에서는 소재 표면에 발생하는 표면흠(surface defect)을 균열(crack)의 발생으로 간주하고 유한요소해석(FEA)을 통해 전산모사를 수행하였다. 해석 방법은 균열의 생성 및 전파를 모사하기 위해 요소 제거(element deletion) 방법을 사용하였다[6]. 소재의 파괴 기준은 전단 파괴 기준(shear damage criterion)을 사용하였다[7].

### 2.2 소재의 파괴 기준

전단 변형률에 의해 소재의 표면흠이 발생하게 된다는 최근 연구 결과는 본 연구에서 접근하는 전단 파괴 기준과 밀접한 관련이 있다. 유한요소해석에서 전단 파괴 기준은 최대 전단 응력(maximum shear stress)에 의해 요소가 파괴된다. 소재의 표면흠이 전단 응력 기준으로 발생한다고 가정하고 결과를 도출한다. 즉, 소재 단면에 발생하는 전단 응력이 가장 높게 나타나는 부위에서 표면흠이 발생된다고 가정하였다.

따라서 본 연구에서는 전단 파괴 기준을 적용하여 소재 표면에서 발생하는 흠을 해석하였다. 식 (1)에서 전단 파괴 기준식을 설명하였다.

$$\theta_s = \frac{(q + k_s p)}{\tau_{\max}} \quad (1)$$

$\theta_s$  : Shear stress ratio

$q$  : Mises equivalent stress

$k_s$  : Material parameter

$p$  : Pressure stress

$\tau_{\max}$  : Maximum shear stress

Hooputra 는 실험에서 알루미늄의 파괴 기준을 확인하였다. 실험을 통해 연성 파괴(ductile damage), 전단 파괴(shear damage)와 MSFLD 파괴(Müschelborn-Sonne forming limit diagram damage) 기준을 측정하였다[8]. 이 중에서 전단 파괴 기준은 순수 전단 시험(pure shear test)과 에릭슨 시험(Erichsen test)을 통하여 측정하였다. 실험을 통해 얻은 파괴 기준을 3점 굽힘(three point bending)과 수직 압축 시험(axial compression test)에 적용하여 실험과 유한요소해석 결과를 비교하였다.  $k_s$  의 경우 Hooputra 가 실험을 통해 알루미늄에서 0.3 인 것을 알아냈다.

전단 파괴 기준은 전단 응력비(shear stress ratio)로 되어 있고 변수는 등가 응력(von Mises equivalent

stress), 압력(pressure), 최대 전단 응력(maximum shear stress)으로 되어있다. 본 연구에서는 알루미늄의 물리적 거동과 고온에서의 철강의 물리적 거동이 비슷하다고 가정하였다. 철강이 알루미늄보다 등가 응력이 높으면 압력, 최대 전단 응력도 같이 높아지게 된다. 따라서 전단 응력비는 응력의 비(ratio)로 되어있기 때문에 알루미늄과 철강의 차이가 거의 없다고 가정할 수 있다.

파괴 변형률은 알루미늄과 철강이 동일하지 않기 때문에 그 기준을 변경하였다. 알루미늄은 고온의 철강에 비해 다소 취성 재료이기 때문에 철강보다 파괴 강도가 낮다. 따라서 철강의 파괴 강도가 알루미늄보다 더 높고 이 점을 통해 파괴 변형률을 가정하였다. Fig. 1에서 알루미늄, 철강의 파괴 변형률과 전단 응력비를 나타내었다.

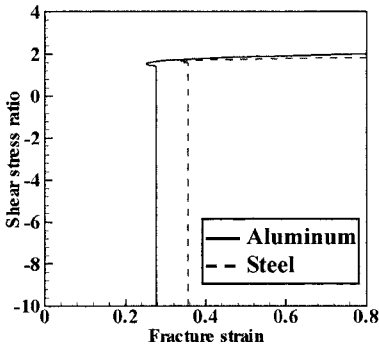


Fig. 1 Shear stress ratio of aluminum and steel

### 3. 유한요소해석

본 연구에서는 유한요소 프로그램 ABAQUS 6.7-1을 사용하여 압연공정을 해석하였다. 공형은 포스코 3 선재 압연의 상자형(box groove) 공형을 1/4 크기로 축소한 것이다(Fig. 2 참고). 해석 시간을 줄이기 위해 소재와 롤에 대해 1/4 대칭(symmetric) 기법을 사용하였다. 소재는 가로, 세로가 40mm 이고 길이가 100mm 이고 코너 반지름이 4mm 이다.

소재와 롤의 마찰은 0.3 이고 열전도계수는  $3.5\text{kW/m} \cdot ^\circ\text{C}$ , 대류 열전달 계수는  $4\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 로 가정하였다. 초기 소재의 온도는  $1050^\circ\text{C}$ 이고 열전달을 고려하였다. 롤의 직경은 310mm, 온도는  $20^\circ\text{C}$ 로 일정하게 두었고 속도는 2.4m/s로 설정하였다. Fig. 3은 유한요소해석에서 모델링한 소재와 상자형 공형(box type groove)의 형상을 나타내었다.

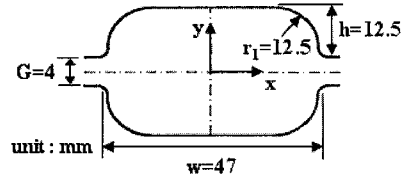
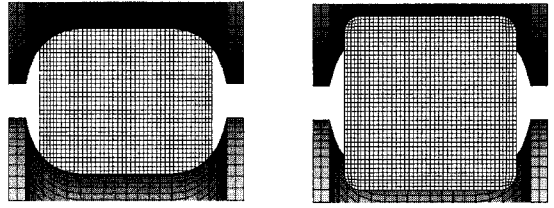


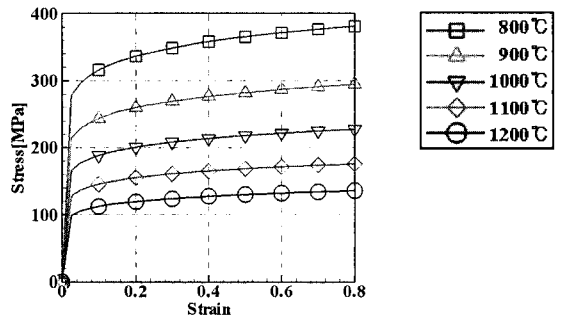
Fig. 2 Design of box roll groove



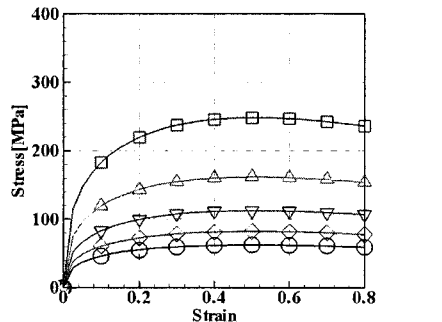
(a) Front view (b) Back view  
Fig. 3 Shape of specimen and roll groove

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 소재의 응력-변형률 선도 변화에 따른 표면흠 발생 거동



(a) Hensel-Spittel's equation



(b) Shida's equation (0.5%C)

Fig. 4 Stress-strain curve

소재의 응력-변형률 선도(stress-strain curve)는 Hensel-Spittel 식[9]과 shida 식[10]을 사용하여 구하였다. Fig. 4 에서 소재의 응력-변형률 선도에 대해 나타내었다. 그래프를 비교해보면 Shida 식을 사용한 경우 소재의 응력값이 더 작은 것을 알 수 있다. 이러한 응력 차이가 결과적으로 표면흠에 어떠한 결과를 미치는지 Fig. 5 에서 확인하였다.

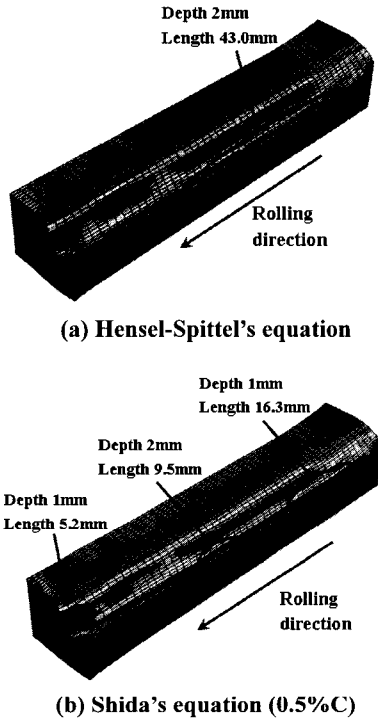


Fig. 5 Initiation and growth of surface defect

공형의 형상은 동일하고 소재의 응력-변형률 선도는 변경하여 결과를 비교하였다. Hensel-Spittel 식을 사용한 경우 소재에 표면흠 발생 후 지속적으로 발생하는 경향이 나타났지만 Shida 식을 사용한 경우 부분적으로 표면흠이 발생하는 경향이 나타났다. 결과적으로 표면흠 발생이 다르게 나타났고 이 결과는 소재의 응력-변형률 선도에 따라 표면흠 발생 정도가 차이 난다는 것을 보여준다. 표면흠 발생 위치는 실제 생산 현장에서 발생하는 소재 코너 하단 부분과 동일하게 유한요소해석에서도 소재 코너 하단 부분에서 나타났다. 따라서 유한요소해석에 적용한 전단 파괴 기준이 실제 소재의 거동과 거의 비슷한 것을 알 수 있다.

#### 4.2 AISI 4140 강종의 소재 표면흠 발생 및 억제 방안

실제 현장에서 제품으로 생산하고 있는 강종을 인장시험하여 응력-변형률 선도를 구하였다[11]. 강종의 종류는 포스코 3 선재 압연 공장에서 소재의 표면에 흠이 발생하는 AISI 4140 강종이다. Fig. 6 에서는 AISI 강종이 800℃, 900℃, 1000℃일 때 인장시험을 통하여 측정(measured)한 값과 shida 식[10]으로 예측(predicted)한 값을 비교하였다. 측정과 예측값의 전체적인 경향이 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 4.1 절에서 결과는 소재의 응력-변형률 선도를 식으로 구한 값으로 유한요소해석에 적용하여 얻은 결과이다. 하지만 4.2 절에서 결과는 AISI 4140 강종의 실험데이터를 유한요소해석에 입력하여 결과를 얻었다.

Fig. 7 에서는 AISI 4140 강종의 실험데이터를 입력한 유한요소해석 결과이다. 소재의 코너 하단 부위에서 요소가 파괴되어 표면흠이 발생한 것을 확인할 수 있다. 소재의 파괴된 요소 수는 259 개이다. 따라서 공형에서의 변수를 변경하여 파괴된 요소 수를 줄일 수 있는 방안, 즉 표면흠이 발생하지 않는 방안에 대해 본 연구에서 제시한다. Table 1 에서는 표면흠 발생을 억제하는 3 가지의 공형 설계 방안에 대해 나타내었다. 각각의 경우에 대해 유한요소해석에 적용하여 그 결과를 확인하였다.

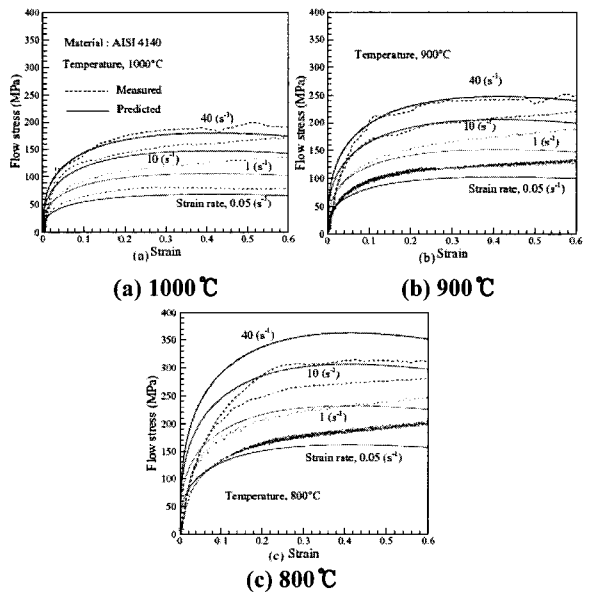


Fig. 6 Measured and predicted constitutive relations for AISI4140 steel[11]

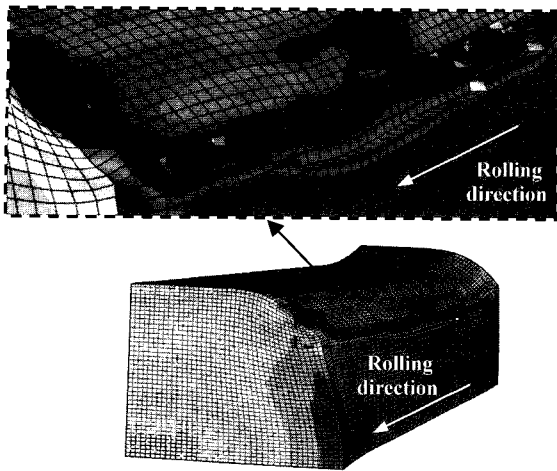


Fig. 7 Initiation and growth of surface defect in workpiece

Table 1 Present design and modified design parameter of box groove

	Present design	Modified design
Case 1	$r_1=12.5\text{mm}$	$r_1=10.0\text{mm}$ $r_1=8.0\text{mm}$
Case 2	$w=47.5\text{mm}$	$w=49.5\text{mm}$
Case 3	Temp 1050℃	Temp 1150℃

Fig. 8에서는 공형의 코너 반지름(corner radius)을 변경하여 그 결과를 확인하였다. 공형의 코너 반지름에 따라 압연되는 소재에 표면흠 발생이 다르게 나타난다. 그 이유는 코너 부분의 반경이 크면 롤의 각속도 차이가 크기 때문에 소재의 전단 응력이 높아지게 된다. 이러한 원인으로 인해 소재의 표면흠이 많이 발생하게 된다. 하지만 공형의 코너 반지름이 작으면 롤의 각속도 차이가 작기 때문에 소재의 전단 응력이 작아지게 된다. 즉, 상대적으로 전단에 의한 변형이 적다. 따라서 소재의 표면흠이 적게 발생하게 된다. 참고로 소재의 코너 반경은 4mm 이다. 유한요소해석 결과에서 보면 코너 반지름이 10.0mm 인 경우 소재의 요소가 14 개만 파괴된 것을 확인할 수 있다. 기존 파괴된 요소 수가 259 개에서 14 개로 줄어든 것을 보면 공형의 코너 반지름이 표면흠 발생에 크게 기여하는 것을 알 수 있다. 공형의 코너 반지름이 8.0mm 의 경우에는 표면흠이 발생하지 않았다. 따라서 공형의 코

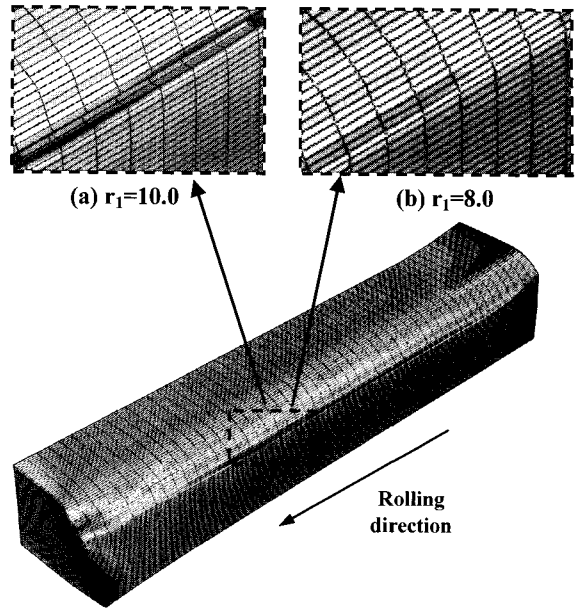


Fig. 8 Initiation and growth of surface defect in workpiece on modified corner radius(Case 1)

너 반지름이 소재의 코너 반지름보다 2 배 이상 크면 표면흠이 발생하는 것을 확인하였다.

Fig. 9에서는 공형 폭(groove width)을 변경하여 그 결과를 확인하였다. 공형 폭을 현재 47.5mm 에서 49.5mm 로 넓힌 결과, 파괴된 소재의 요소 수가 259 개에서 115 개로 줄어들었다. 이러한 이유는 소재가 공형 형상에 의해 압연 중 구속을 받게 되기 때문이다. 판 압연(flat rolling)의 경우 압연 중에 소재의 폭퍼짐에 대한 구속이 약하기 때문에 비교적 소재가 자유롭게 압연된다. 따라서 소재의 코너 부위에서 전단 응력이 작게 발생하게 되어 표면흠 발생 가능성이 낮다. 공형 폭을 넓히면 다소 판 압연과 비슷하기 때문에 소재의 구속이 완화되고 전단 응력이 작아진다. 따라서 Table 1 에서의 case1, 2 번의 결과는 최근 발표된 연구 결과와 일치한다[5].

Fig. 10에서는 초기 소재 온도를 1050℃에서 100℃ 올린 1150℃의 결과를 확인하였다. 소재의 온도가 올라가면 소재는 연성의 성질이 커진다. 따라서 더 많은 소성 변형을 하게 되고 소재의 파괴는 늦어지게 된다. 해석 결과에서도 소재의 요소 파괴가 줄어들었고 파괴된 요소 수는 120 개이다. 결과적으로 소재의 온도를 올리는 것이 표면흠 발생을 억제하는 방안임을 확인하였다.

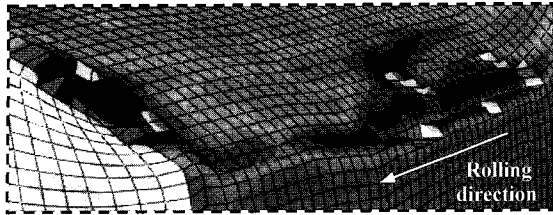


Fig. 9 Initiation and growth of surface defect in workpiece on modified groove width(Case 2)

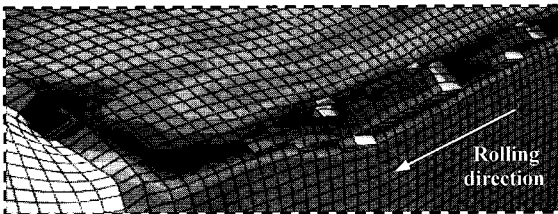


Fig.10 Initiation and growth of surface defect in workpiece on modified temperature(Case 3)

## 5. 결 론

본 논문에서는 공형 압연에서의 표면흠 성장 및 제어 방법을 연구하기 위해 유한요소해석을 수행하였고 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 개발된 표면흠 발생 예측모델이 공형압연 공정에 적용되었을 때 소재의 표면흠이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 개발된 표면흠 발생 예측모델을 가지고 소재 표면흠이 발생하지 않는 공형 설계를 해야 한다. 이러한 공형 설계를 실제 현장에 적용하면 소재 표면흠 발생이 감소할 것으로 판단된다.

(2) 상자형 공형에서 공형의 코너 반지름을 작게 하고 폭을 넓히는 것이 소재의 표면흠 발생을 억제하는 방안을 확인하였다. 또한 소재의 온도를 높이는 방안도 표면흠 발생을 억제할 수 있다.

(3) 압연 전 인장 시험을 통해 소재의 응력-변형률 선도를 얻는다면 개발된 모델에 적용하여 소재의 표면흠 발생을 예측할 수 있다. 따라서 불량 제품 생산을 최소한으로 줄임으로써 실제 산업 현장에서의 생산 비용을 절감할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 중앙대학교 우수연구자연구비 지원에 의한 것임.

## 참 고 문 헌

- [1] C. Eriksson, 2004, Surface Cracks in Wire Rod Rolling, steel research int., vol. 75, No. 12, pp. 818~828.
- [2] M. Filipovic, C. Eriksson, H. Overstam, 2006, Behaviour of surface defects in wire rod rolling, steel research int., vol. 77, No. 6, pp. 439~444.
- [3] E. Ervasti, U. Stahlberg, 1998, Behaviour of longitudinal surface cracks in the hot rolling of steel slabs, Journal of Materials Processing Technology, vol. 94, pp. 141~150.
- [4] E. Ervasti, U. Stahlberg, 1999, Transversal cracks and their behaviour in the hot rolling of steel slabs, Journal of Materials Processing Technology, vol. 101, pp. 312~321.
- [5] D. H. Na, O. Y. Cho, J. H. Lee, Y. H. Lee, Y. Lee, 2008, The Korean Society For Technology of Plasticity, Finite element analysis to reduce the wrinkle initiation of workpiece in groove rolling, Vol. 17, No.5, pp. 328~336.
- [6] V. Tvergaard, 1982, Influence of void nucleation on ductile shear fracture at a free surface, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 30, pp. 399~425.
- [7] ABAQUS Version 6.7 Document, Abaqus Analysis User's Manual.
- [8] H. Hooputra et al., 2004, A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminum extrusions, Vol. 9, No. 5, pp. 449~463.
- [9] A. Hensel, T. Spittel, 1978, Kraft-und arbeitsbedarf bildsamer formgebungsverfahren, VEB Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, Leipzig, Vol. 1, pp. 85, 88 and 95.
- [10] S. Shida, 1969, Empirical formula of flow stress of carbon steels resistance to deformation of carbon steels at elevated temperature, Japan Society for Technology of Plasticity, Vol. 10, pp. 610~617.
- [11] Y. Lee, 2005, Constitutive Relation of Alloy Steels at High Temperatures, International journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 6, No. 4, pp. 55~59.