

유한요소해석을 이용한 공형 압연에서의 표면흠 발생 연구

나두현¹, 허종욱¹, 이영석[#]

A Study of Surface Defect Initiation in Groove Rolling Using Finite Element Analysis

D. H. Na, J. W. Huh and Y. Lee

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 inhibits the generation of surface defect.

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

1. 서론

선재압연(rod rolling)은 상부, 하부 롤이 원형(round shape), 타원형(oval shape), 상자형(box shape) 등으로 파여지고 소재가 그 사이를 순차적으로 압연되어 단면이 점점 작아지고 최종적으로 원하는 형상의 단면이 제조되는 공정이다. 이 공정에서 생산되는 철강재를 선재라 부른다. 최종 압연된 선재는 통상 5.5~42mm ϕ 직경의 강재가 코일(coil) 형태로 권취되며 14mm ϕ 이상의 선재는 제품의 직경의 차이 때문에 'bar in coil' 라고 불리기도 한다.

선재압연을 통하여 생산된 1 차 선재제품은 2 차 가공 공정을 거쳐서 스프링(spring), 볼트(bolt), 와이어줄(wire rope), 베어링(bearing), 용접봉, 철선, 못, 철조망 등 같은 일상 생활에 사용되는 제품, 부품으로 생산된다.

이러한 제품, 부품을 생산하는 압연 과정에서 소재에 표면흠(surface defect)이 발생하게 되고 이것을 억제하는 방안이 필요하다. 제품, 부품의 초기 표면흠 발생시 피로 파괴로 인해 파단(failure) 될 가능성이 크다. 등산에 사용되는 와이어줄(wire rope), 자동차 타이어에 사용되는 타이어 코드, 바퀴 조향 장치 용도의 봉(bar)은 사람의 생명과 밀접한 관련이 있다. 따라서 선재압연공정에서 소재 표면흠 발생 분석에 관한 연구는 매우 중요하다.

선재압연공정에서 표면흠 발생에 대한 연구는 예전부터 계속해서 수행되어 왔다. Eriksson 은 소재 표면에 매크로(macro)크기의 흠을 인위적으로 만들고 타원형 및 원형 공형 설계 변수 중에서 DS 와 OE 의 비(ratio)를 비교하여 그에 따라 소재 표면 균열(surface crack)의 폭과 깊이가 어떻게 변화하는지 실험 및 유한요소해석을 통해 연구하였다. 또한 이 소재 표면흠이 공형 형상과 감면률

1. 중앙대학교 기계공학부

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

등에 관련하여 어떻게 거동하는지 보고하였다[1]. Eriksson 은 공동연구자인 Filipovic, Overstam 와 함께 소재의 표면흠이 초기부터 어느 정도 있을 때와 없을 때 깊이 성장에 관한 비교 연구를 수행하였다. 유한요소법을 사용하여 표면흠의 성장에 대한 예측을 하였고 실험값과 계산값을 비교하였다[2]. Ervasti and Stahlberg 는 압연을 하기 전에 소재의 길이, 횡 방향으로 표면흠이 존재한다고 가정하고 요소생성을 하였다. 그리고 유한요소법을 사용하여 표면흠 성장거동에 대해 연구하였다. 마찰계수, 롤의 반지름, 표면흠의 초기 깊이에 따라 표면흠의 폭(width)과 깊이(depth)가 어떻게 변하는지 비교하였다[3,4].

하지만 상기 연구들은 초기 표면흠이 존재한다고 가정하고 유한요소해석을 하였다. 또한 실험할 때 소재 표면에 일정 깊이의 흠을 인공적으로 만들어 실험하였다. 이러한 가정은 현실과는 거리가 있기 때문에 문제해결에 큰 도움이 되지 못했다.

최근 연구된 결과 중에서 공형압연에서 발생하는 소재의 표면흠이 전단 변형률에 의해 발생한다고 발표되었다. 그 이유는 두 가지로 나뉘는데 공형압연에서 롤의 직경 변화에 따라 소재 표면 전단 변형률이 변화한다고 하였다. 두 번째로 롤 공형 형상에 따라 소재 표면에서 전단 변형률의 변화가 발생한다고 하였다. 이 두 성분으로 인해 전단 변형률이 높게 발생하는 소재의 표면 부분에서 소재가 찢어지게 되고 표면흠이 발생하게 된다고 연구하였다. 결과적으로 롤 형상을 변경하여 이를 억제하는 방안을 제시하였다[5].

본 연구에서는 선재압연 공정에서 표면흠 발생 원인을 고찰하고 분석한다. 나아가 이 기준을 포스코 선재압연 공정 라인에 적용하였다. 실제 현장에서는 소재가 동일한 공형에서 압연되는 조건에서도 강종의 종류에 따라 표면흠 발생이 다르게 나타난다. 어떠한 강종은 표면흠이 발생하는 반면 다른 강종은 표면흠이 발생하지 않는 경우가 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 소재의 응력-변형률 선도가 다르게 나타나기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 소재의 응력-변형률 선도가 다른 경우 표면흠 발생의 차이를 비교한다.

2. 표면흠 발생 분석

2.1 표면흠 발생 분석 모델

본 연구에서는 유한요소해석(FEA)을 통해 소재

표면에 발생하는 표면흠(surface defect)을 균열(crack)의 발생으로 간주하고 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

최근 발표된 전단 변형률에 의해 소재의 표면흠이 발생하게 된다는 연구 결과는 본 연구에서 접근하는 전단 파괴 기준과 밀접한 관련이 있다. 전단 파괴 기준은 최대 전단 응력(maximum shear stress)에 의해 요소가 파괴된다. 전단 변형률에 의해 소재의 표면흠이 발생한다는 연구 결과를 전단 응력으로 적용하여 발생 원인을 도출한다. 실제로 본 연구에서 적용한 모델의 전단 응력 성분 중 소재 단면에서 발생하는 전단 응력이 가장 높게 나타나 표면흠 발생의 원인이 되었다.

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

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

θ_s : Shear stress ratio

q : Mises equivalent stress

k_s : A material parameter

p : Pressure stress

τ_{\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. 이 중에서 전단 파괴 기준은 순수 전단 시험(pure shear test)과 에릭센 시험(Erichsen test)을 통하여 측정하였는데 실험을 통해 얻은 파괴 기준을 3 점 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[8].

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. 물리적 거동은 알루미늄과 철이 비슷하게 거동하기 때문에 전단 응력비는 거의 동일하다고 가정하였다. 왜냐하면 철이 알루미늄보다 등가 응력이 높다고 하면 압력, 최대 전단 응력도 같이 높아지기 때문에 전단 응력비에서는 거의 차이가 생기지 않는다.

파괴 변형률은 알루미늄과 철이 동일하지 않기 때문에 그 기준을 변경하였다. 알루미늄은 철에 비해 다소 취성 재료이기 때문에 철보다 파괴 강도가 낮다. 따라서 철의 파괴 강도가 알루미늄보다 더 높고 이 점을 통해 파괴 변형률을 가정하였다. 그림 1 에서 알루미늄과 철의 파괴 변형률과 전단 응력비를 나타내었다.

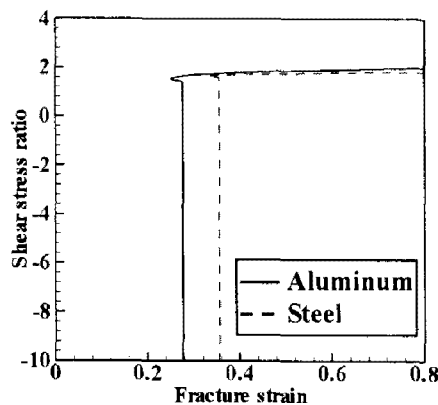


Fig.1 Shear stress ratio of aluminum and steel

3. 유한요소해석

본 연구에서는 유한요소 프로그램 ABAQUS 6.7-1 을 사용하여 선재압연공정을 해석하였다. 소재와 공형은 포스코 3 선재압연의 상자(box) 공형을 1/4 크기로 축소한 모델이다. 해석 시간을 줄이기 위해 소재와 롤에 대해 1/4 대칭(symmetric) 기법을 사용하였다. 소재의 크기는 가로, 세로가 40mm 이고 길이가 100mm 이다.

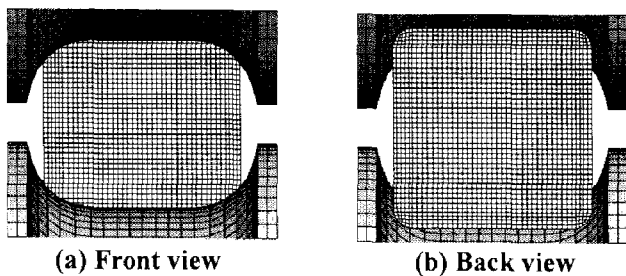


Fig. 2 Shape of specimen and roll groove

소재와 롤의 마찰은 0.3 이고 열전도계수는 $3.5\text{ kW/m} \cdot \text{ }^\circ\text{C}$, 대류 열전달 계수는 $4\text{ W/m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}$ 로

가정하였다. 롤의 직경은 310mm 이고 초기 소재의 온도는 $1050\text{ }^\circ\text{C}$ 이고 열전달을 고려하였다. 롤의 온도는 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 로 일정하게 해석하였고 속도는 2.4 m/s 이다. 그림 2 에서 유한요소해석에서 모델링한 소재의 단면형상과 상자형 공형(box type groove)을 나타내었다.

4. 결과 및 토의

소재의 응력-변형률 선도(stress-strain curve)는 Hensel-Spittel 식과 shida 식을 사용하여 결과를 비교하였다[7,8]. 그림 3 에서 소재의 응력-변형률 선도에 대해 나타내었다.

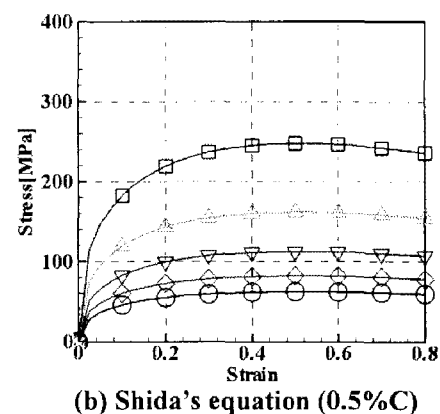
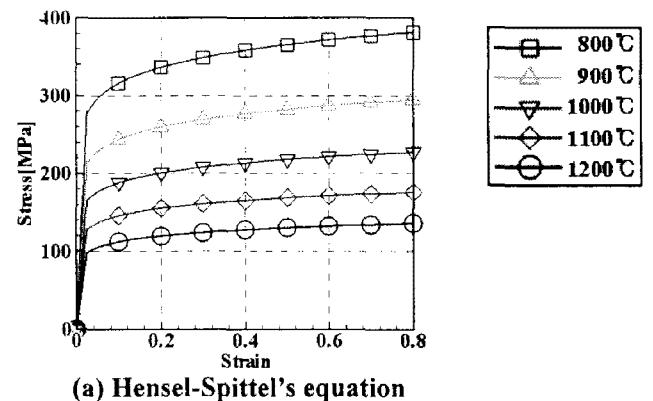
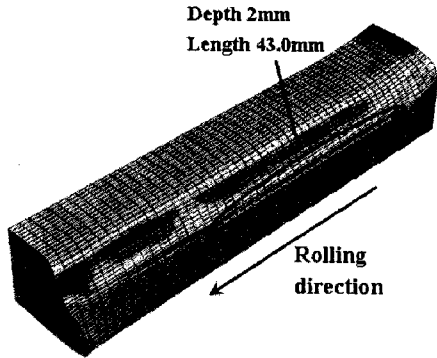


Fig. 3 Stress-strain curve

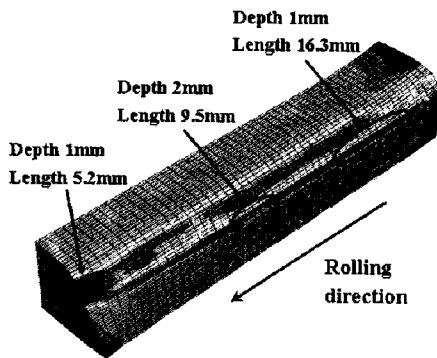
그래프를 비교해보면 Shida 식을 사용한 경우 소재의 응력값이 더 작은 것을 알 수 있다. 이러한 응력 차이가 결과적으로 표면흠에 어떠한 결과를 미치는지 그림 4 에서 확인하였다.

동일한 전단 파괴 기준을 사용한 경우 Shida 식에서 소재의 표면흠이 일정하게 발생하였지만 Hensel-Spittel 식을 사용한 경우 부분적으로 표면흠이 발생하는 경향이 나타났다. 결과적으로 shida 식을 사용했을 때 소재의 표면흠 길이와 깊이가 더 많이 발생하기 때문에 더 위험한 것을 확인하

였다. 소재의 응력-변형률 선도에 따라 표면흠 발생이 다르게 나타났지만 발생하는 위치는 실제 생산 현장과 동일하게 소재 코너 하단 부분에서 나타났다. 따라서 적용한 전단 파괴 기준이 실제 소재의 거동과 동일한 것을 알 수 있다.



(a) Hensel-Spittel's equation



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

Fig. 4 Initiation and growth of surface defect

5. 결론

본 논문에서는 선재 압연에서의 소재 표면흠 발생을 분석하기 위해 유한요소해석을 수행하였고 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 개발된 표면흠 발생 예측모델이 선재압연공정에 적용되었을 때 실제 소재의 표면흠이 발생하는 것을 확인하였다. 개발된 표면흠 발생 예측모델을 가지고 소재 표면흠이 발생하지 않는 공형 설계를 하여 실제 현장에 적용하면 소재 표면흠 발생이 감소할 것으로 판단된다.

(2) 초기 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.

(3) 개발된 모델은 컴퓨터에 제약이 없으면 여

러 변수를 한꺼번에 적용하여 개선 방안을 연구하는데 시간을 단축할 수 있다. 따라서 유한요소 해석을 통해 최적의 설계 조건을 찾을 수 있다.

후 기

본 연구는 2 단계 두뇌한국사업의 지원으로 수행되었고 지원에 감사 드립니다.

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] 나두현, 조오영, 이종호, 이용희, 이영석, 2008, 한국소성가공학회, 공형압연에서 소재 주름흠 발생 감소를 위한 유한요소해석, Vol. 17, No.5, pp.328~336
- [6] Tvergaard, V., 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, H. Gese, H. dell, H. Werner, 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
- [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