원소재의 미소 표면결함이 인발공정에 미치는 영향

남찬희¹ · 이익균² · 이종규² · 전만수[#]

Effect of Small Surface Defects in the Starting Material on Product Quality after Drawing

C. H. Nam, I. K. Lee, J. K. Lee, M. S. Joun

(Received December 4, 2013 / Revised March 25, 2014 / Accepted April 8, 2014)

Abstract

In the current study, the effect of small surface defects in the starting material including roughness, indentations, or scratches, which are perpendicular to the direction of drawing, on the product quality is investigated using the finite element method. An axisymmetric defect is assumed. Such defects are defined by a cylindrical defect area and two tapered regions connecting the defect area to the non-defective area of the material. Various conditions for these initial surface defects are considered, including defect depth, defect slope and defect length. To describe the plastic deformation of the defect in detail during the simulation, local remeshing is applied. Based on the finite element results, defect disappearance maps were generated. It was found that defect disappearance is significantly dependent on the defect depth and the defect length coupled with the defect slope.

Key Words : Initial Surface Defect, Drawing, Product Quality, Finite Element Analysis

1. 서 론

냉간단조용 소재는 대부분 인발공정을 통하여 완성된다. 열간압연에 의하여 생산된 원소재는 다단의 인발공정을 통하여 원하는 직경의 단조용 소재로 생산된다. 냉간단조용 코일재의 경우도 마찬가지다. 규격화된 냉간코일재는 일반적으로 냉간단조 직전에 인발공정을 거침으로써 소재의 직경을 단조공정에서 요구하는 값으로 변화시킨다.

인발공정에서 발생하는 결함은 손상도의 축적과 중심부위의 재료의 취약성에 기인하는 중심파괴 결함과 원소재 결함에 의한 내부결함 및 표면결함이 대부분이다. 인발공정에서 발생하는 중심파괴는 인

발공정의 설계에도 영향을 받지만, 원소재의 조성과 열처리 등에 보다 더 결정적인 영향을 받는다[1]. 인발공정 중 발생한 중심파괴는 대개 컵 모양을 하는 것이 특징이며, 이것은 압출공정 중 발생하는 셰브론 결함(chvron defect)과는 형상적 측면에서 다소 차이가 있다. 이에 관한 상세한 설명은 참고문헌[2]으로 대신한다.

인발공정 중 표면결함의 원인은 다양하다. 일반적으로 열간압연공정은 소재의 표면에 전단변형을 과하게 유발하며, 스케일 등으로 인하여 표면 거칠기 및 흠집 결함이 잔류할 수 있다. 그리고 초기소재의 제조 과정에서 발생한 표면 굴곡 및 주소(pinhole) 등의 주조 결함 등도 인발 제품의 표면결함에 영향을

1. 경상대학교

2. 동부특수강

Corresponding Author : School of Mechanical and Aerospace Engineering/Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

미칠 수 있다[3]. 그리고 열간압연된 소재의 이동 및 취급 과정에서도 흠집이 추가될 수 있으며[4, 5], 부분적으로는 산화 및 부식 등도 표면결함의 형태로 잔류할 수 있다.

따라서 이러한 결함적 요소는 인발공정을 통하여 제거될 수도 있고, 인발공정 중에 발생한 표면의 전단변형에 의하여 크랙 형태의 결함으로 잔류하여 단조공정 중 소재의 파괴를 유발하거나 제품 속의 결함으로 남을 수 있다. 이러한 인발 후에 잔류하는 결함은 최종적인 제품 결함으로 연결될 수 있으며, 소재의 생산자, 인발회사, 단조회사, 부품회사, 최종 제품 생산자 간의 분쟁으로 발전할 수가 있다.

따라서 선재의 경우, 표면결함의 허용 범위를 ASTM 규격으로 정하고 있다[6]. 이러한 결함의 발생 과정을 소재의 소성변형 관점에서 이해하는 것은 매우 중요하다. 일부의 연구자들이 내부 공극 결함에 관한 유한요소해석을 실시하였다[1]. Shinohara 와 Yoshida [4]와 Baek 등[5]은 표면결함의 변형에 관하여 연구하였다. Shinohara 와 Yoshida [4]는 초기결함을 상세히 소개하였고 체계적인 접근 방법을 확립한 반면, 3차원 유한요소법의 사용으로 인하여 실물 크기의 결함에 관한 연구로 발전하지 못하였다. Baek 등[5]은 3차원 유한요소법을 이용하여 미소 결함의 거동 특성을 가시화시키는 연구 결과를 얻었지만, 구조요소망을 사용함으로써 요소망 생성의 한계를 극복하지 못하였다.

인발공정에서 소재 표면의 미소결함이 인발 제품의 품질에 미치는 영향에 관한 수치적 연구는 요소망의 재구성 등으로 용이하지 않다.

본 연구에서는 2차원 유한요소법과 국부요소망재구성기법을 이용하여 실제 산업현장에서 관심을 두고 있는 소재의 미소 결함이 인발공정에서 소성변형하는 과정을 상세하게 해석함으로써 원소재의 표면 미소결함이 인발공정에 미치는 영향을 분석한다.

2. 인발공정 중 발생한 결함의 소성변형

본 논문에서 연구 대상으로 삼은 결함은 원주방향으로 굽힌 자국이다. Fig. 1[4]에서 보는 바와 같이 원주 방향의 굽힘 결함은 비교적 길이가 길며, 양 끝에서 상대적으로 부드럽게 정상적인 부위와 연결된다. 이 경우, 결함의 중심부에서 결함의 수직 단면이 어떻게 변화하는지가 기술자의 주요 관심사

(a) Three-dimensional view [4]

(b) Concept of deformation of defect

Fig. 1 Defect perpendicular to drawing direction

중의 하나이다. 실제의 표면결함은 3차원적이지만 원주방향의 변형에 비하여 인발방향으로의 변형이 매우 크고, 요소망 생성에 의존적인 3차원 해석보다 2차원 해석으로부터 공학적으로 유의미한 결과를 얻을 수 있기 때문에 2차원 축대칭 해석이 적절하다고 사료된다. 유동응력은 인장시험으로부터 고변형률에 대한 유동응력 획득기법[7]을 사용하여 구하였으며, 마찰조건으로 Coulomb 마찰계수 0.025를 사용 하였다[8].

미소결함의 정교한 표현을 위하여 국부요소망재구성 기법을 사용하였다. 이 기법에서는 요소밀도 제어를 국부적으로 실시하며, 요소망재구성의 필요성이 발생했을 경우에는 최소한의 구간을 선정하여 요소망재구성이 실시된다[9].

물론 요소망재구성은 결과의 정확도에 부정적인 영향을 미칠 수 있으므로 불가피한 경우가 아니면, 요소망재구성을 실시하지 않았다.

Fig. 2는 본 연구에서 대상으로 삼은 가상의 인발공정을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 표면결함은 축대칭이며, 결함부의 반경은 일정하다고 가정

Fig. 2 Definition of process

Fig. 3 Global view of the predictions

Table 1 Information of numerical test cases studied

α (°)	60, 90, 120, 150
d (mm)	0.003125, 0.00625, 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1
l (mm)	0.02, 0.1, 0.2

하였다. 그리고 결함부와 정상부는 원추의 일부에 의하여 연결된 것으로 간주하였다. 원소재의 반경은 2.35mm이고, 인발금형의 출구는 2.15mm이며, 금형의 원추반각(Half conical angle)은 12° 이다. 이 공정 조건은 산업현장에서 사용하는 실제의 조건이다. 결함의 크기를 Fig. 2에서 보는 바와 같이 결함의 깊이

(a) $\alpha = 120^\circ$

(b) $\alpha = 90^\circ$

Fig. 4 The first case detailed view of Fig. 3

(a) $d = 0.0125$

(b) $d = 0.05$

Fig. 5 The second case detailed view of Fig. 3

d , 결함의 폭 l , 결함 경사각도 α 로 정의하였다.

본 논문에서는 $l = 0.02, 0.1, 0.2\text{mm}$, $d = 0.003125, 0.00625, 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1\text{mm}$, $\alpha = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 등의 조건에 대하여 조사하였다. 조사된 세부 사항을 Table 1에 정리하였다.

Table 1는 본 논문에서 사용된 네 가지의 샘플링된 α , 여섯 가지의 샘플링된 d , 세 가지의 샘플링된

l 를 나타내고 있으며, 해석은 이 샘플링된 세 변수의 조합, 즉 $72(=4*6*3)$ 개의 경우의 수(Table 2-5 참조)에 대하여 실시되었다. 본 논문에서는 $d = 0.1\text{mm}$, $l = 0.1\text{mm}$, $\alpha = 90^\circ$ 또는 120° 일 때와 $\alpha = 120^\circ$, $l = 0.02\text{mm}$, $d = 0.0125$ 또는 0.05mm 일 때의 유한요소 예측결과에 관하여 상술한다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 미소결함의 변형 과정을 상세하게 추적하기 위하여 결함 주위의 유한요소 밀도를 사용자 개입 기능을 이용하여 크게 증가시켰다.

Fig. 3은 전반적인 소성유동 예측결과를 나타내고 있다.

Fig. 4는 Fig. 3의 결과를 결함의 소성변형 관점에서 상세하게 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)는 결함이 소멸하는 과정을 나타내며, Fig. 4(b)는 결함이 잔류하는 과정을 나타낸다. Fig. 4는 결함의 각도가 작을수록 결함이 잔류할 가능성이 많다는 당연한 사실을 강조하고 있으며, 결함의 잔류 여부는 결함의 각도에 민감하게 영향을 받을 수 있다. 결함이 잔류하게 되는 경우, 결함의 각도가 감소하기 때문에 후속된 공정에서도 결함으로 발생할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

Fig. 5는 Fig. 3의 결과를 결함의 소성변형을 강조하여 나타낸 것이며, 결함의 소멸 또는 발전 과정을 나타내고 있다. Fig. 5(a)는 결함이 소멸하는 과정을 나타내며, Fig. 5(b)는 결함이 잔류하는 과정을 나타내었다.

$\alpha = 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 일 때의 결함의 소멸 및 겹침 결함으로의 발전 여부를 각각 Table 2, Table 3, Table 4, Table 5에 정리하였다. 표에서 O표시는 결함이 소멸된 경우를 의미하고, X 표시는 결함이 잔류하는 것을 의미한다.

이 표로부터 결함의 소멸 여부는 결함의 폭, 결함의 깊이, 결함의 경사각도 등에 직접적인 영향을 받을 수 있다. 특히 경사각에 결함의 잔류 여부가 크게 영향을 받는다.

결함의 경사각이 150° 일 때의 경사각은 모두 사라진 반면, 경사각이 60° 인 경우에는 결함의 깊이가 작고 결함의 폭이 클 경우에만 결함이 소멸되고 다른 경우에는 모두 결함이 잔류하는 것으로 나타났다. 잔류된 대부분의 결함은 Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 바와 같이 경사각이 작아져서 추가적인 인발공정으로 소멸시키기에는 형상적으로 불가능한 것으로 나타났다.

Table 2 For defect slope angle of 60°

$d \text{ mm} \backslash l \text{ mm}$	0.003125	0.00625	0.0125	0.025	0.05	0.1
0.02	X	X	X	X	X	X
0.1	O	O	O	X	X	X
0.2	O	O	O	X	X	X

Table 3 For defect slope angle of 90°

$d \text{ mm} \backslash l \text{ mm}$	0.003125	0.00625	0.0125	0.025	0.05	0.1
0.02	X	X	X	X	X	X
0.1	O	O	O	O	X	X
0.2	O	O	O	O	X	X

Table 4 For defect slope angle of 120°

$d \text{ mm} \backslash l \text{ mm}$	0.003125	0.00625	0.0125	0.025	0.05	0.1
0.02	O	O	O	O	X	X
0.1	O	O	O	O	O	O
0.2	O	O	O	O	O	O

Table 5 For defect slope angle of 150°

$d \text{ mm} \backslash l \text{ mm}$	0.003125	0.00625	0.0125	0.025	0.05	0.1
0.02	O	O	O	O	O	O
0.1	O	O	O	O	O	O
0.2	O	O	O	O	O	O

3. 결 론

이 논문에서는 소재의 표면결함이 인발공정 중 발생한 소성변형에 의하여 소멸하거나 겹침결함으로 발전하는 과정을 유한요소법을 이용하여 해석하여 그 영향을 규명하였다.

결함의 세밀한 유한요소 표현을 위하여 2차원 해석에 의존하였다. 따라서 표면결함은 축대칭으로 가정하였고, 결함의 깊이, 결함의 폭, 결함의 경사각도 등으로 표현되었다. 원소재의 미소결함을 고정확도로 표현하기 위하여 결함 주위의 요소밀도를 크게 증가시켜서 해석을 수행하였다.

다양한 조건의 원소재 미소결함을 고려하였으며, 결함의 변수에 따른 결함 소멸 여부를 조사하였다. 조사 대상의 공정에 대한 분석결과, 결함의 깊이, 결함의 폭, 결함의 경사각도의 조합이 결함 소멸과 직결되어 있다.

결론적으로 인발 방향에 수직한 결함의 단면이 평탄부와 경사부로 구성되어 있다고 가정할 경우,

결함이 경사부의 각도에 크게 영향을 받는다. 양 측면의 경사부가 이루는 경사각이 150° 일 경우, 조사된 경사의 깊이($0.003125\text{mm} \sim 0.1\text{mm}$)와 평탄부의 길이에 상관없이 결함이 소멸되었다. 그러나 경사각이 60° , 90° 일 경우, 평탄부의 길이가 0.02mm 로 매우 작을 경우 조사된 결함의 깊이에 상관없이 결함이 잔류하였다. 경사각이 일정 이하의 값이고 결함의 깊이가 클 경우, 평탄부의 길이와는 상관없이 결함이 잔류하였다. 결함의 깊이가 작을 경우에는 비록 경사각이 90° 내외의 크지 않는 값일지라도 결함은 사라질 수 있으며, 이 경우에는 평탄부의 길이에 비교적 큰 영향을 받는다.

그리고 첫 패스에서 잔류된 결함은 대체적으로 경사각이 작아지는 방향으로 변형되기 때문에 후속 공정에서 결함으로 발전할 가능성이 매우 높다고 사료된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업과 BK PLUS사업의 지원을 받아 수행한 연구임.

REFERENCES

- [1] S. Norasethasopon, K. Yoshida, 2008, Prediction of Chevron Crack Initiation in Inclusion Copper Shaped-Wire Drawing, Eng. Fail. Anal., Vol. 15, No. 4, pp. 378~393.
- [2] M. S. Joun, M. C. Kim, D. J. Yoon, H. J. Choi, Y. H. Son, 2011, Proc. ASME 2011 Int. Manu. Sci. Eng. Conf., ASME, Oregon, USA, pp. 169~174.
- [3] B. G. Thomas, M. S. Jenkins, R. B. Mahapatra, 2004, Investigation of Strand Surface Defects using Mould Instrumentation and Modeling, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 31, No. 6, pp. 485~494.
- [4] T. Shinohara, K. Yoshida, 2005, Deformation Analysis of Surface Crack in Rolling and Wire Drawing, JSME Int. J. A-Solid. Mech. Mater. Eng., Vol. 48, No. 4, pp. 335~340.
- [5] H. M. Baek, Y. G. Jin, S. K. Hwang, Y. T. Im, I. H. Son, D. L. Lee, 2012, Numerical Study on the Evolution of Surface Defects in Wire Drawing, J. Mater. Process. Technol., Vol. 212, No. 4, pp. 776~785.
- [6] ASTM Committee F16.93, 2009, F2282-03: Standard Specification for Quality Assurance Requirements for Carbon and Alloy Steel Wire, Rods and Bars for Mechanical Fasteners.
- [7] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. lee, 2008, A New Method for Acquiring True Stress-strain Curves over a Large Range of Strains using a Tensile Test and Finite Element Method, Mechanics of Material, Vol. 40, No. 7, pp. 586~593.
- [8] M. S. Joun, H. G. Moon, I. S. Choi, M. C. Lee, B. Y. Jun, 2009, Effects of Friction Laws on Metal Forming Processes, Tribol. Int., Vol. 42, No. 2, pp. 311~319.
- [9] G. H. Shim, J. G. Eom, M. S. Joun, 2012, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 235~238.