[논문] 한국소성가공학회지, 제 21 권 제 5 호, 2012
Transactions of Materials Processing, Vol.21, No.5, 2012
http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2012.21.5.319

자유단조 공정 시 내부 기공 거동 예측을 위한 멀티스케일 유한요소해석 연구

곽은정[1] · 강경필[1] · 이경훈[#]

A Study of Multiple Scale FEM Modeling for Prediction of Inner Void Closing Behavior in Open Die Forging Process

E. J. Kwak, G. P. Kang, K. Lee

(Received June 13, 2012 / Revised July 3, 2012 / Accepted July 5, 2012)

Abstract

In order to predict the internal void closing behavior in open die forging process, multiple scale modeling has been developed and applied. The huge size difference between ingot and inner void makes it almost impossible to simultaneously model the actual loading conditions and the void shape. Multiple scale modeling is designed to integrate macro- and micro- models effectively and efficiently. The void closing behavior was simulated at 39 different locations in a large ingot during upsetting and cogging. The correlation between the closing behavior and variables such as effective plastic strain and maximum compressive strain was studied in order to find an efficient measure for predicting the soundness of the forging.

Key Words : Multiple Scale, Finite Element Method, Void Closure, Open Die Forging, Large Ingot

1. 서 론

선박, 플랜트, 풍력 발전 등의 산업 발전과 더불어 대형 단조품에 대한 수요가 증가하고 있다. 대형 단조품은 업세팅과 코깅 등에 의한 자유단조 공정을 통해 주조재인 대형 잉곳의 내부에 잔존하는 기공을 없애고, 편석을 감소시켜, 기계적 성질 향상을 도모하게 된다. 기존의 대형 단조품의 기공 폐쇄 연구는 기공의 폐쇄 정도와 기공 폐쇄에 영향을 주는 상태변수와의 관계를 규명하는데 있어 대형 제품과 내부 기공간의 스케일 차이로 인해 실제 모델에 대한 연구가 이루어지지 못하였다. 실험적으로는 잉곳의 내부에 원하는 크기의 기공을 인위적으로 생성하는데 어려움이 있어, 잉곳의 크기는 상대적으로 줄이고, 내부 기공을 열린 실린더 형태로 가공하여 단조 공정 변수에 따른 기공의 형상 변화를 살펴본 연구들이 있었다[1~3]. 또한 해석적으로도 실 제품 모델에 기공 결함을 부여하여 유한요소해석을 진행하는 것은 현 단계에서 사용할 수 있는 하드웨어 및 소프트웨어로는 막대한 계산 시간이 요구되므로 현실적으로 불가능하다. 이러한 한계로 인해 기공의 크기를 수 배 내지 수십 배로 모델링하여 공정 변수에 따른 기공 압착 거동 분석에 수치적으로 접근한 연구 사례가 있다[4~8].

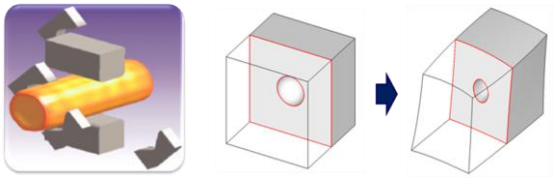
본 연구에서는 보다 현실적인 잉곳, 기공의 크기, 공정 등을 고려하기 위해 멀티스케일 유한요소해석 기법을 적용하였다. 또한, 자유 단조 공정(업셋팅 및 코깅) 중 대형 잉곳 내부기공의 형상 변화 거동을 분석하고, 기공 변화를 예측할 수 있는 거시 모델의 상태 변수를 찾고자 한다.

1. ㈜솔루션랩
교신저자: ㈜ 솔루션랩, E-mail: klee@deform.co.kr

2. 멀티스케일 해석

2.1 멀티스케일 해석 기법 개요

멀티스케일 해석 기법은 관찰하고자 하는 영역과 전체 모델간의 스케일의 차이가 클 경우 Fig. 1에 보인 바와 같이 거시모델 해석과 미시모델 해석으로 나누어 해석을 진행하는 방법이다. 이를 사용하여 거시변수 변화에 따른 미시 영역의 거동을 효과적으로 예측할 수 있다. 거시모델은 외력 등의 경계조건이 작용하는 전체 모델을, 미시모델은 결함 인근만을 나타내는 모델을 의미한다. 거시 모델과 미시모델간의 연결은 다양한 형태로 이루어질 수 있다. Lee[9]등은 Periodic 경계조건을 적용한 RVE(represent volume element)에 변형률을 부과하는 방법을 사용 하였고, 본 저자의 이전 연구에서는 거시모델의 속도장을 사용하여 미시모델 외각면을 평면으로 구속하는 방법[10~11]을 사용하였다. 본 연구에서는 거시모델에서 보다 많은 절점의 이력을 추출하고 high order shaper function을 사용하여 모든 표면의 절점에 속도장을 직접 부여하는 방식을 사용하였다.



(a)macro model **(b)micro model**

Fig. 1 Illustration of multiple-scale process

이전 연구[11]에서는 미시모델의 표면은 육면체를 유지한다고 가정하고, 변형 이력은 육면체의 꼭지점에 해당하는 8개의 점 정보로부터 미시모델의 표면에 위치하는 절점들에서의 속도장을 계산하여 경계조건으로 부여하였다. 이번 연구에서는 Fig. 2와 같이 20 절점을 가지는 육면체 요소의 개념을 이용하여, 변형이력 추출을 육면체 꼭지점 외에도 각 변의 중심점도 포함한 20개 지점으로 확대하였다. 거시모델에서 추출한 20개의 좌표와 미시모델 표면에서의 임의의 절점 좌표 값을 이용하여, 고유 좌표계에 맵핑되는 (r_k, s_k, t_k) 값을 알 수 있고, 따라서, 각 절점에서의 속도장 $\vec{v}_k$ 을 식 1과 같이 계산할 수 있다.

여기에서 (r_{0i}, s_{0i}, t_{0i}) , $\vec{v}_{0i}$ 는 각각 20개 점 중

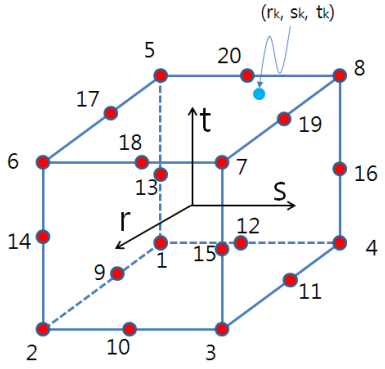


Fig. 2 Concept of brick element with 20 nodes

i번째 점에서의 표준 좌표 값과 속도장이고, N_i 는 형상함수이다. 이렇게 계산된 속도장은 매 스텝마다 순차적으로 새로운 속도장 경계조건이 되어 미시모델의 해석을 진행하게 된다. 거시모델/미시모델의 각 해석은 소성가공 전용 소프트웨어인 DEFORM-3D를 이용하여 진행하였다.

$$\vec{v}_k = N_i(r_k, s_k, t_k)\vec{v}_{oi} \tag{1}$$

$$N_i = \frac{1}{8}(1+r_{0i}r_k)(1+s_{0i}s_k)(1+t_{0i}t_k)(r_{0i}r_k + s_{0i}s_k + t_{0i}t_k - 2)$$

$$i = 1,2,3,4,5,6,7,8$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1-r_k^{\,2})(1+s_{0i}s_k)(1+t_{0i}t_k)$$

$$i = 9,11,17,19$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1-s_k^{\,2})(1+r_{0i}r_k)(1+t_{0i}t_k)$$

$$i = 10,12,18,20$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1-t_k^{\,2})(1+r_{0i}r_k)(1+s_{0i}s_k)$$

$$i = 13,14,15,16$$

2.2 해석 조건

본 연구에서 고려한 자유 단조공정은 업셋팅 공정과 사각 빌렛 제조를 위한 코깅 공정으로 이루어진다. 거시 모델의 잉곳 형상 및 크기는 Fig. 3에 나타내었다. 사각형 단조품이므로 대칭성을 이용하여 1/4모델로 해석을 진행하였다.

잉곳 내부 기공 결함의 위치는 Fig. 3 우측에 점으로 표시하였다. 소재 중심으로부터 200mm 간격

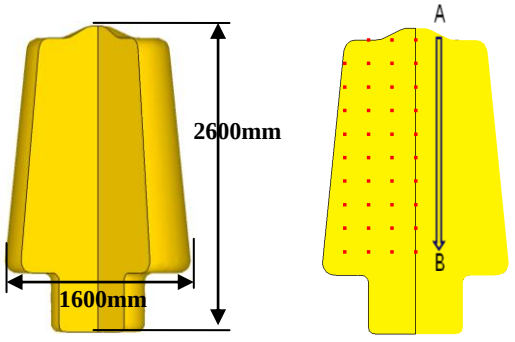


Fig. 3 Dimension of macro model and location of voids

Table 1 Simulation condition of multiple scale model

Macro model	
Initial temperature	1250℃
Ingot size(mm)	2600×1600
Die movement(mm/sec)	20
Friction	Shear 0.3
Upsetting ratio	46%
Material	AISI-1045
Micro model	
Model size(mm)	15×15×15
Void diameter(mm)	5
Shape of void	Sphere
Number of point tracking point	20

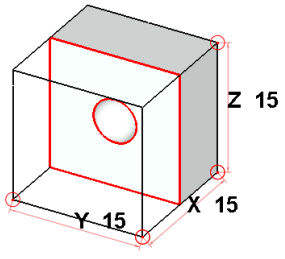
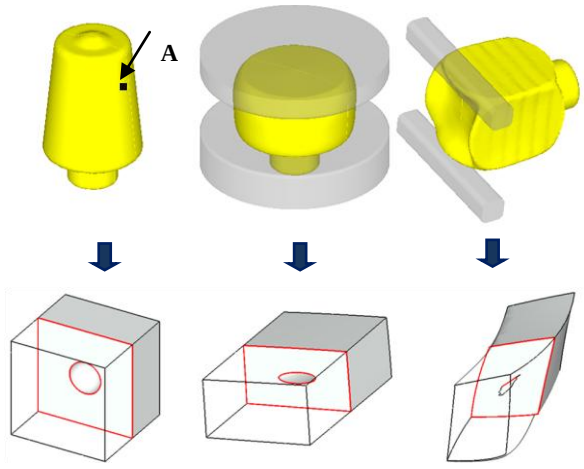


Fig. 4 Dimension of initial micro model(void diameter : 5mm)

으로 4개의 열로, 잉곳 바닥부터 상부까지 각 9~10점에 대해 총 39개 지점을 선정하였다.

미시모델 형상은 Fig. 4와 같이 정사각형 육면체 내에 직경 5mm의 구형 결함을 가지도록 하여 39개 지점에서의 기공폐쇄거동을 살펴보았다.

거시모델과 미시모델에 대한 해석조건은 Table 1에 나타내었다.



(a) Initial model (b) after upsetting (c)after cogging

Fig. 5 Void evolution during open die forging

3. 해석 결과

3.1 결함 위치에 따른 기공 폐쇄율 비교

Fig. 5에는 잉곳 표면인 A위치에서 기공 결함의 형상 변화를 각 공정 별로 나타내었다. Fig. 5(a)는 변형 전 형상이고, Fig. 5(b), (c)는 각각 업셋팅 공정, 코깅 공정이 종료된 후의 형상이다.

기공 폐쇄율(vcr)의 정의는 변형 후 초기 기공의 직경 대비 기공 변형량으로 Fig. 6과 같이 정의한다.

잉곳을 46% 업세팅 한 후와 코깅 공정 후의 잉곳의 위치별 내부 기공 폐쇄율은 Fig. 7에 나타내었다. 잉곳 중심의 기공은 업셋팅 공정만으로도 기공이 폐쇄되는 경우가 많았고, 표면부는 업셋팅 공정 시 열려 있던 부분이 코깅 공정이 진행됨에 따라 폐쇄되었다. 또한 많은 위치에서 업셋팅 공정에서 폐쇄되었던 기공이 코깅 공정이 진행됨에 따라 다시 열리는 현상도 관찰할 수 있었다.

3.2 기공 폐쇄율과 상태변수 비교

본 연구에서는 자유 단조 공정 후 잉곳 내부에서의 상태변수들과 기공 폐쇄율을 비교하여 분석하였다.

상태변수로는 (a) 최대 압축 변형률(Min. principal strain), (b) 유효 변형율(Effective strain), (c)최대 압축 응력(Min. principal stress), (d)정수압 응력(Hydrostatic stress)를 고려하였다. Fig. 8에 나타내고 있는 변수 값은 최종 변형 후의 상태변수 값이 아니라 변형 이력 중에 발생한 각 변수의 최대값을

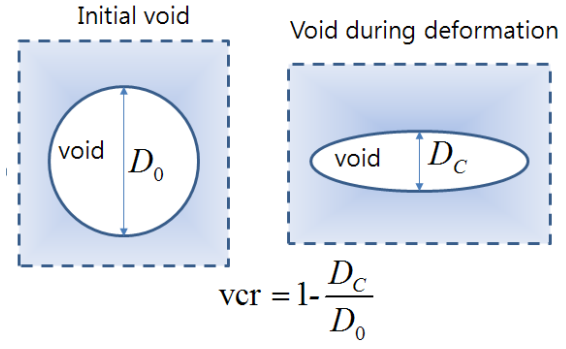


Fig. 6 Definition of void closing ratio (vcr)

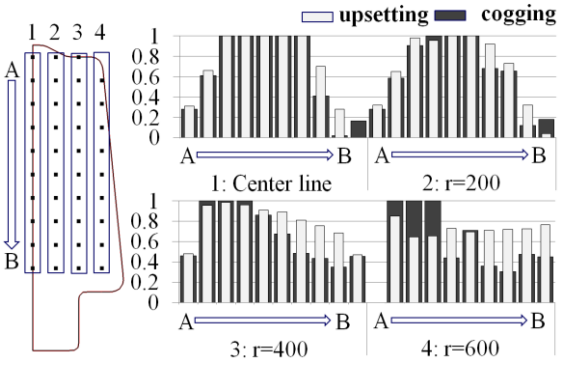
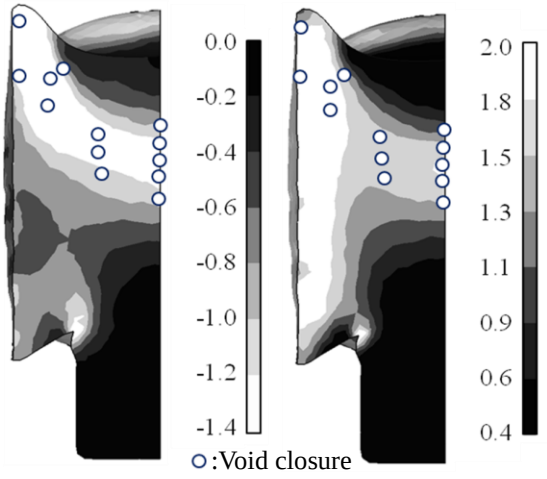


Fig. 7 Comparison of void closure ratio with respect to void position after upsetting and cogging

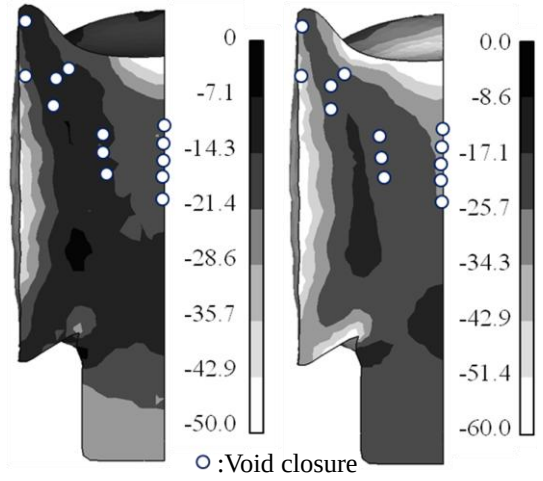
의미한다. 각 변수의 최대값은 DEFORM 후처리기 사용자루틴을 사용하여 추출하였다.

가장 일반적으로 많이 사용되는 유효변형률의 경우 업셋팅 공정 후에는 폐쇄율과 양호한 상관관계를 보였지만 압축과 수직방향으로 진행된 코깅 공정 후에는 Fig. 8(b)에 보이는 바와 같이 폐쇄가 이루어지지 않은 위치에서도 단조비 3에 해당하는 유효 변형률 값인 1.1 이상이 되어 폐쇄율과의 상관관계를 보여주지 못하고 있다. Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)에 보여진 최대 압축 응력과 정수압 응력 또한 일부의 위치에서만 폐쇄율과 양호한 관계를 보여주었다. 한편 최대 압축 변형률을 나타낸 Fig. 8(a)를 보면 그 값이 높은 위치와 기공폐쇄가 이루어지는 위치가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

본 연구와 같이 복합 변형 조건(업셋팅+코깅)에서는 일반적으로 기공 폐쇄를 판단하는 것으로 알려진 상태 변수들의 적용에는 한계가 있음을 알 수 있었다. 기공폐쇄는 누적된 유효 변형률 보다는 변형 이력 중에 발생한 최대 압축 변형률에 더욱 밀접히 연관됨을 알 수 있었다.



(a) Min. principal strain **(b) Effective strain**



(c) Min. principal stress **(d) Hydrostatic stress**

Fig. 8 Comparison of void closure with various state variable(stress unit: MPa)

4. 결 론

멀티스케일 접근법을 이용하여 실제 자유 단조품의 크기와 결함을 구현하여 공정에 따른 결함의 형상변화를 예측하였다. 본 연구에서는 20절점을 가지는 육면체 요소 개념을 활용하여, 기존 연구에서의 8개 지점보다 많은 20개 지점에서 변형이력을 추출하였다. 이에 따라 미시 모델 표면의 형상이 공정이 진행됨에 따라 보다 유연하게 바뀌는 것을 관찰하였고 이전 방법과 비교하여 보다 높은 폐쇄율을 관찰할 수 있었다.

미시모델 거동을 예측할 수 있는 거시 모델 상

태변수를 구하는 연구에서는 일반적으로 알려진 유효 변형률보다 최대 압축 변형률로 기공의 폐쇄 유무를 판단 하는 것이 더 명확하다는 것을 확인하였다.

추후 연구에서는 기공의 크기, 기공의 모양, 방향, 기공의 군집도에 따른 기공 결함 형상 변화를 예측하고 거시모델 변수와의 상관관계를 파악하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] I. J. Choi, H. J. Choi, H. J. Park, S. Choi, T. W. Jung, D. K. Park, S. K. Choi, S. J. Lim, 2009, An Experimental Study on Void Closure Behavior with Respect to Reductions in Height, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 114~117.

[2] M. C. Song, I. K. Kwon, Y. G. Park, 2007, A study on the Parameters Determining the Void Crushing Ratio in the Cogging Process of Large Forged Products, Trans. Mater. Process., Vol.16, No.7, pp.504~508.

[3] I. J. Choi, H. J. Choi, D. W. Kim, S. Choi, S. J. Lim, 2010, Void Closing Conditions of Large Ingot by Path Schedules, Trans. Mater. Process., Vol.19, No.8, pp.481~485.

[4] K.J. Lee, W. B. Bae, J.R. Cho, D. K. Kim, J. T. Kim, 2005, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 406~409.

[5] K. J. Lee, W. B. Bae, J. R. Cho, D. K. Kim, Y. D. Kim, FE Analysis for the Prediction of Void Closure on the Free Forming Process of a Large Rotor, Trans. Mater. Process., Vol. 16, No. 2, pp. 126~131.

[6] Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee, S. W. Lee, N. S. Kim, 2008, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 57~60.

[7] S. H. Kim, M. C. Lee, S. M. Jang, J. G. Eom, M. S. Joun, 2010, Comparative Study on Pore Closing in Open Die Forging by Conventional Forging Press and Radial Forging Machine, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 7, pp.399~404.

[8] M. S. Chun, J. S. Ryu, Y. H. Moon, 2004, FEM Analysis of Void Closure Behavior during Open Die Forging of Rectangular Billets, Trans. Mater. Process., Vol. 13, No. 2, pp. 143~147.

[9] K. H. Lee, S. Moorthy, S. Ghosh, 1999, Multiple Scale Computational Modeling for Damage in Composite Materials, Comput. Mathods appl. Mech. Engrg. Vol. 172, No.1-4, pp. 175~201

[10] I. H. Son, K. H. Lee, 2012, Shape Evolution of Pinholes in Bloom with Multi-Scale Finite Element Technique, Adv. Mater. Res., Vol. 445, pp. 45~50

[11] E. J. Kwak, G. P. Kang, K. H. Lee, I. H. Son, 2009, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 169~172.