

유한요소법에 의한 열간단조공정에서 강의 미세조직변화 예측

Prediction of microstructural evolution in hot forging of steel by finite element method

장용순(부산대원), 고대철(부산대 기계기술연구소), 김병민, 최재찬(정밀정형 및 금형가공 센터)
Y.S. Jang(Graduate school, PNU), D.C. Ko(RIMT, PNU), B.M. Kim, J.C. Choi(ERC for NSDM, PNU)

ABSTRACT

The objective of this study is to demonstrate the ability of a computer simulation of microstructural evolution in hot forging of C-Mn steels. The finite element method is applied to the prediction of the microstructural evolution, and it should be coupled with heat transfer analysis to consider the change of thermomechanical properties during the deformation. In this study, Yada's recrystallization model and rigid-thermoviscoplastic finite element method were employed in order to analyze microstructural evolution during hot forging process. To show the validity and effectiveness of the proposed method, the experiment of hot compression process was accomplished and the results of experiment were compared with those of simulation. Consequently, this approach shows a good agreement with experimental results.

Key Words : Microstructural evolution(미세조직변화), Dynamic recrystallization(동적재결정), Static re-crystallization(정적재결정), Grain growth(입자성장)

1. 서 론

소성가공분야 중에서 단조가공의 분야에서는 정밀정형, 즉 정도가 우수한 정밀제품을 보다 효율적으로 제조할 수 있는 연구가 진행되어 왔으며, 최근의 컴퓨터의 급속한 발달과 유한요소법을 비롯한 해석방법의 진보로 인해 단조가공분야의 기술이 급속하게 발전할 수 있었다^(1,2,3). 그러나 최근에는 형상이나 치수가 정밀한 제품 뿐만 아니라, 저비용으로 우수한 재질을 가진 제품을 제조하려는 욕구가 증가해 가고 있다. 특히, 고온에서의 급속성형은 재결정에 의한 재료의 연화현상이 유발되어 유동응력이 변하므로, 열간성형에서 재료의 미세조직변화는 재료의 기계적 성질에 영향을 미친다. 따라서 열간성형에서 제품의 기계적성질을 개선시키기 위해서는 성형중의 재료의 열적·기계적변수 및 공정변수가 재료의 미세조직변화에 미치는 영향을 정량화하는 것이 필수적이다. Rebelo와 Kobayashi⁽⁴⁾는 비정상상태인 열간업셀팅 공정에서의 온도장과 속도장을 연계해석하는 유한요소모형을 개발하였고, Yada⁽⁵⁾등은 Mn이 1% 미만 함유된 탄소강의 동적재결정, 정적재결정, 그리고 입

자성장을 고려해서 미세조직변화를 모델링하였다. Xu⁽⁶⁾은 링 롤링(ring rolling)에서의 탄소강의 정적재결정거동을 해석하였다. 열간압연에서 열간변형 저항은 압연기의 설계에서 압하스케줄을 작성하는데 중요한 인자이기 때문에 예전부터 많은 연구가 있어 왔다. 열간압연에서는 압하율이 20%정도로 그리 변형이 크지 않기 때문에 동적재결정거동은 무시할 수 있었다. 그러나 일반 열간단조공정은 변형이 커서 동적재결정을 무시할 수 없다. Ishikawa⁽⁷⁾는 변형이 심한 열간단조공정에서 재료의 미세조직변화를 해석하기 위해서 상용유한요소프로그램 DEFORM를 이용하여 재결정거동을 해석하였다. Kwak⁽⁸⁾은 열간단조공정중의 강의 재결정거동을 유한요소해석하였다. 본 연구에서는 강열점소성 유한요소프로그램과 Yada등이 제안한 재결정모형을 사용해서 재료의 미세조직변화를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램의 효용성을 입증하기 위해서 열간단조업셀팅실험을 수행하였으며, 계산결과와 실험결과를 비교하였다.

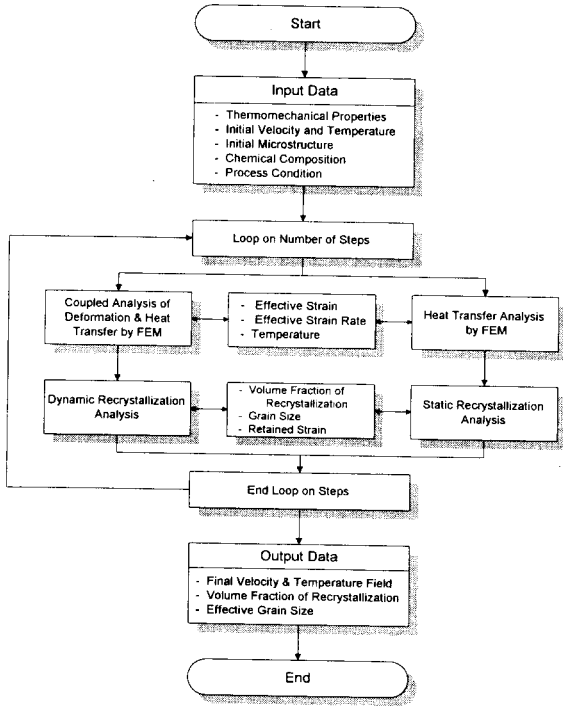


Fig.1 Numerical analysis procedure to predict microstructural evolution in hot forging.

2. 유한요소모델

2.1 강점소성 유한요소방정식의 정식화

본 논문에서는 열간단조공정의 변형해석을 위해서 강-열점소성 유한요소해석을 이용하였다. 이의 수식화 과정은 이미 많은 문헌에 잘 알려져 있으므로 여기서는 간략하게 언급한다. 강-점소성재료에 대한 범함수(functional), Π 는 다음과 같다.

$$\Pi = \int_V E(\dot{\epsilon}_{ij}) dV - \int_{S_f} F_i v_i dS dV \quad (1)$$

여기서, E 는 점소성 포텐셜, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률속도, F_i 는 표면력, v_i 는 절점속도이다.

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수 K 를 도입하면, 위의 (1)식에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta\Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta\dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} F_i \delta v_i dS \quad (2)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}$ 는 유효 변형률속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률속도, δv_i 는 임의의 변분이고, $\delta\bar{\epsilon}$ 와 $\delta\dot{\epsilon}_v$ 는 δv_i 로부터 유도되는 변형률속도의

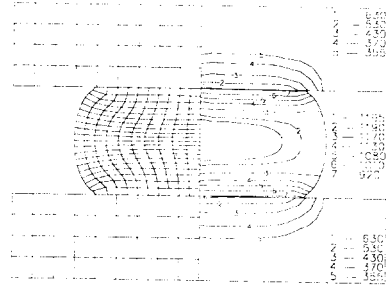


Fig. 2 Deformed mesh and temperature distribution at 40% reduction.

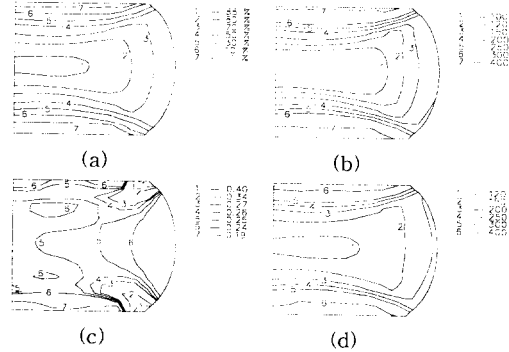


Fig. 3 Distribution of (a) fraction of dynamic recrystallization; (b) grain size(μm); (c) retained strain; (d) grain size(μm) at 40% reduction.

변분이다. (2)식은 유한요소 이산화과정을 거쳐서 비선형 대수방정식으로 변화되며, 비선형 대수방정식을 풀기 위해서 뉴우튼-랫슨법이, 그리고 뉴우튼-랫슨법의 초기해를 결정하기 위해서 초기 속도장은 직접반복법을 이용하여 구한다.

2.2 열전달방정식의 유한요소 정식화

온도해석의 지배 방정식은 다음과 같이 표현되는 에너지 평형방정식이다.

$$xT_{,ii} + \dot{q} - \rho c \dot{T} = 0 \quad (3)$$

여기서 $xT_{,ii}$ 는 열전달율, \dot{q} 는 열발생율, $\rho c \dot{T}$ 는 내부에너지율이다.

위의 식(3)을 약적분형(weak integral form)을 이용해서 정리하면 다음과 같다.

$$\int_V xT_{,i} \delta T_{,i} dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_V K(\bar{\sigma}) \delta T dV - \int_S q_n \delta T dS = 0 \quad (4)$$

여기서, T 는 온도, \dot{T} 는 온도변화율, ρ 는 밀도, c 는 비열, x 는 총에너지가 열로 바뀌는 비율

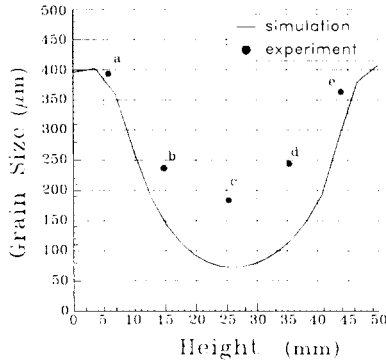


Fig. 4 Comparison between measured grain size along axial direction and calculated results.

을 나타내는 상수, q_n 은 경계면, S_q 를 가로지르는 열유동을 나타낸다.

위의 식(4)를 유한요소 이산화과정을 거친 뒤 유한차분근사에 의해 선형화 해서 온도장을 구한다. 온도변화는 재료의 성질에 영향을 미치므로 열해석과 변형해석이 서로 연계되어 계산된다.

3. 재료의 미세조직 변화

3.1 동적재결정

동적재결정은 금속조직(특히 재결정입자의 크기)의 조정, 미세화, 열간변형저항, 입계분할의 억제에 의한 열간변형능의 향상 등 여러 가지 점에서 열간변형과 관계가 많기 때문에, 최근 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. Yada등은 Mn이 1%이하 함유된 탄소강에서 재료의 동적재결정, 정적재결정과 입자 성장을 고려할 수 있는 다음과 같은 수식을 제안하였다⁽³⁾.

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= 4.76 \times 10^{-4} \exp\left(\frac{8000}{T}\right) \\ d_{dyn} &= 22600 Z^{-0.27} \\ X_{dyn} &= 1 - \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0.5}}\right)^2\right] \\ \varepsilon_{0.5} &= 1.144 \times 10^{-5} d_0^{0.28} \dot{\varepsilon}^{0.05} \exp\left(\frac{6420}{T}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

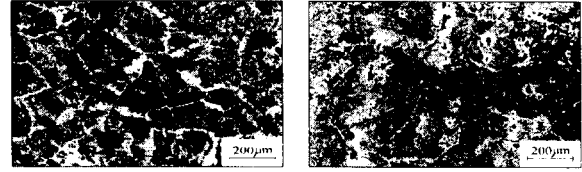
여기서 Z 는 Zener-Holloman parameter이며, 동적재결정은 임계이상의 변형을 받을 경우($\varepsilon \geq \varepsilon_c$)에 일어나는 것으로 가정하였다.

3.2 정적재결정

정적재결정은 변형을 수반하지 않고, 온도, 시간, 잔여변형률과 변형률속도 등에 영향을 받는 재결정

Table 1 Experimental conditions.

Condition	value
Dimension of workpiece	∅85 x h 85
Material of workpiece	AISI 1030
Material of die	SKD 61
Heating time	30min (1200℃)
Transfer time	10sec
Dwell time	4sec
Ram speed	10mm/s
Forming time	3.4sec



(a) central part

(b) edge part

Fig.5 Microstructure at 40% reduction in height.

현상을 말하며, 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_{st} &= 1 - \exp\left[-0.693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^2\right] \\ t_{0.5} &= 2.2 \cdot 10^{-12} S_v^{-0.5} \dot{\varepsilon}^{-0.2} \cdot \exp\left(\frac{30000}{T}\right) \\ S_v &= \frac{24}{\pi d_0} (0.419e^\varepsilon + 0.155e^{-\varepsilon} + 0.1433e^{-3\varepsilon}) \\ d_{st} &= \frac{5}{(S_v \cdot \varepsilon)^{0.6}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 X_{st} 는 정적재결정을, $t_{0.5}$ 는 50%의 재결정이 일어날때까지의 시간, S_v 는 단위체적당 차지하는 입자경계면적, d_{st} 는 정적재결정이 일어난 입자크기(μm)를 나타낸다.

3.3 입자성장

재결정이 진행되면 조직이 미세화되어 이를 유지하기 위해서는 높은 에너지가 필요하다. 그러므로 재결정후 입자경계면을 최소화하기 위해 입자성장이 일어난다.

$$d = d_{dyn} + 1.1 y (d_{pd} - d_{dyn}) \quad \text{for dynamically recrystallized grain} \quad (7a)$$

$$d^2 = d_{st}^2 + 1.44 \cdot 10^{12} \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad \text{for statically recrystallized grain} \quad (7b)$$

열간단조에서의 미세조직변화를 예측하기 위해, 강열점소성 유한요소법과 미세조직변화 예측모델을 연계해야하며, 해석순서는 Fig. 1에 나타내었다. 성형 중에는 변형이 크기 때문에, 동적재결정과 입자 성장만을 고려해서 강열점소성 유한요소법과 연계하여 재료의 미세조직변화를 해석하였다. 성형이 끝난 후 무부하에서 냉각조건 및 시간에 따라 변하는 조직변화를 해석하기 위해서 열전달과 연계해서 정적 재결정 및 입자성장에 대해서 모델링하였다.

4. 실험 및 해석결과

열간단조공정에서 재료의 미세조직 변화를 관찰하기 위해서 열간단순 업셋팅실험을 실시하였으며, 실험조건은 Table 1에 나타내었다. 우선 시편의 초기 온도와 입자크기를 균일하게 하기 위해, 유도가열로에서 1200℃의 온도로 30분간 가열하였다. 그런다음 소재를 노에서 프레스로 이송하여 열간단순업셋팅실험을 실시하였다. 이때, 노에서 프레스까지의 이송시간은 10초이며, 드웰시간은 4초이다. 10mm/s의 속도로 40%의 높이감소율까지 성형한 뒤 차가운 물에 급냉시킨 뒤 입자크기를 측정하였다.

본 연구에서는 소재의 이송시간과 드웰시간을 고려해서 해석하였으므로 축대칭제품의 1/2단면을 해석대상으로 하였다. Fig. 2는 40%의 높이감소율로 성형했을 때의 소재와 금형의 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)~(c)는 성형직후의 소재내부의 재결정율, 입자크기, retained strain값의 분포를 나타낸 것이며, Fig. 3(d)는 성형후 60초간 공기중에서 냉각했을 때의 소재내부의 입자크기분포를 나타낸 것이다. 이것을 보면, 변형을 심하게 받는 재료내부에서의 재결정율이 가장 높으며, 재결정에 의한 입자의 미세화가 빠르게 진전되었음을 볼 수 있다. Fig. 4는 소재중심영역에서 축방향으로 입자크기 분포를, 실험에서의 측정치와 컴퓨터 시뮬레이션에서의 해석치를 비교한 것이다. 오차는 소재의 중심부로 갈수록 커지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 담금질효과가 소재의 중심부에서 크게 떨어져 입자성장이 지속된 것으로 생각된다. 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하면, 그 경향이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 40%의 높이감소율로 성형했을 때, 소재의 중심영역(Fig. 5(a))와 소재와 금형이 접촉하는 영역(Fig. 5(b))에서의 미세조직을 나타낸 것이다.

5. 결론

단조가공의 분야에서는 치수정밀도가 높고, 재질이 우수한 제품을 만들기 위한 최적의 공정조건을 찾는 것이 중요하다. 특히 열간단조공정에서 변형이

력, 열이력, 미세조직변화 등은 재료의 기계적성질에 영향을 미치므로 제품의 기계적성질을 개선시키기 위해서는 성형공정 동안 재료내부의 미세조직변화에 대한 열적-기계적변수들의 이력과 미세조직변화에 대한 상호관계를 알아야 할 필요가 있다. 그러므로 유한요소법을 이용한 재료내부의 미세조직변화에 대한 모델의 개발은 필수적이다. 본 연구에서는 재료의 미세조직변화에 대한 영향을 고려하기 위해서 실험과 시뮬레이션을 수행하였으며, 실험결과와 시뮬레이션결과를 비교하여 그 경향이 잘 일치함을 알 수 있었다. 지금까지 미세조직변화에 대한 많은 연구가 있어왔지만 일반적인 수식이 제안되어져 있지 않으며, 변태와 합금원소 첨가에 대한 영향을 고려하기에는 많은 어려움이 있기 때문에 앞으로 많은 연구가 있어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. T.A. Dean, "Progress in Net Shape Forging", 4th ICTP., pp. 103-1040, (1993).
2. H. Kudo, "Towards Net-Shape Forming", J. Mater. Process. Technol., Vol. 22, pp. 307-342, (1990).
3. M.H. Sadeghi and T.A. Dean, "Analysis of dimensional accuracy of precision forged axisymmetric components", Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 205, pp. 171-178, (1991).
4. N. Rebelo and S. Kobayashi, "A Coupled Analysis of Viscoplastic Deformation and Heat Transfer - I, Theoretical Considerations", Int. J. Mech. Sci., Vol. 22, p. 699-705, (1980).
5. H. Yada and T. Senuma, "Resistance to Hot Deformation of Steel", J. JSTP, Vol. 27, pp. 34-44, (1986).
6. S.G. Xu and Q.X. Cao, "Numerical simulation of the microstructure in the ring rolling of hot steel", J. Material Process. Technol. Vol. 43, pp. 221-235, (1994).
7. T. Ishikawa, "Modelling the Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Forged Parts", 鑄鍛造と熱處理 pp. 29-35, (1995).
8. 박우진, 이경중, 권요준, 황상무, "열간단조공정중의 강의 재결정거동 유한요소해석", 한국소성가 공학회지, 제5권, pp. 305-319, (1996).