한국소성가공학회 '96춘계학술대회 논문집 pp. 81~90

열간단조공정중 강의 재결정거동 유한요소해석

곽우진 *, 이경종 +, 권오준 ++, 황상무 **
* 포항공과 대학교 대학원, ** 포항공과 대학교
+ ++ 산업과학기술연구소

Prediction of Recrystallization behaviors in Hot Forging by the Finite Element Method

W.J. Kwak *, K.J. Lee +, O.J. Kwon ++, and S.M. Hwang **

* Graduate School, POSTECH
** Pohang University of Science and Technology (POSTECH)
+ ++ Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST)

ABSTRACT

In this paper, a finite element based system is presented for the prediction of the distributions of the recrystallized grain sizes in the workpiece in hot forging. The system adopts a fully coupled finite element thermo-mechanical model for predicting plastic deformation and heat transfer occurring in the workpiece, and employs existing metallurgical models relating the recrystallization behavior with the thermo-mechanical variables such as temperatures, strain, and strain rate. The system is applied to upsetting of cylindrical preform. The predicted grain sizes are compared with the measurements. It is further applied to forging of a complex-shaped product.

약어

d	=	Grain Size
Q	=	deformation activation energy
T	=	temperature
X	=	recrystallized volume fraction
Z	=	Zener-Holloman parameter
$\bar{\epsilon}$	=	effective strain
$\delta\epsilon$	=	residual strain after deformation
$\dot{\bar{\epsilon}}$	=	effective strain rate
$\dot{\epsilon}$	=	apparent strain rate (stroke rate)

서론

고온에서의 금속성형공정(metal forming)에서는 전위밀도의 증가로 인해서 가공경화가 증가하고, 재결정의 동적연화와 정적연화로 인해 가공경화가 감소한다. 결국 성형가공은 제품이 완성된후의 금속학적인, 기계학적인 성질에 영향을 준다. 이것은 또한 열간단조, 특히 합금이 포함된 정밀단조에서 재결정거동의 제어가 가장 중요한 요소임을 나타낸다.

재결정은 성형가공중 그리고 후의 열적-기계적 변수 – 온도, 변형률 그리고 변형률속도 – 들에의해 결정이 되므로, 재결정거동을 예측하고 제어하기 위해서는 공작물의 재료유동과 열전달을 예측할 수 있는 모델이 필요하다. 유동응력(flow stress)은 온도에 많이 의존하는 함수이므로, 공작물내의 온도분포는 재료유동에 영향을 준다. 다른 한편으로, 소성변형과 금형-공작물 접촉면에서의 마찰로 인한 열생성 그리고 접촉면을 통한 금형으로의 열손실은 공작물의 열전달에 영향을 준다. 결국 공작물의 재료유동, 공작물의 열전달 그리고 금형에서의 열전달은 모두 연계되어있다.

Hwang 등[1]은 스트립에서의 재료유동, 열전달 연계해석 그리고 롤에서의 열전달 해석을 할 수 있는 정상상태의 열간 압연모델을 개발하였다.

많은 연구그룹[2-6]들은 열적-기계적 변수들을 인자로써 수학적인 함수형태의 동적, 정적 재결정현상을 기술하는 금속학적인 모델을 개발하였다. 유한요소모델과 이러한 금

속학적인 모델을 결합시켜 성형가공중 그리고 후의 공작물내부의 상세한 미세구조를 밝힐 수 있다.

연계해석을 하기위한 반복기법에 촛점을 맞추어 본 논문에서는 열간단조에서 열적-기계적 변수들을 결정하기위한 유한요소모델을 간략하게 소개한다. 그런뒤, 열간단조에서 열적-기계적거동 그리고 재결정거동을 예측하기위한 유한요소기반 시스템을 소개한다. 이 시스템을 사용하여, 열간 실린더압축에 대한 일련의 공정 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 실험데이타를 사용하여 재결정거동에 관련된 예측 결과를 비교하였다.

재결정거동 예측 시스템

열간단조에서의 재결정거동을 예측하기 위해 앞에서 기술한 열적-기계적 변수의 이력을 예측하는 유한요소모델과 금속학적 모델을 결합시키고있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 이 시스템은 세가지의 컴퓨터 프로그램으로 구성되어 있다. 이들은 성형공정중 공작물 내부의 변형과 열전달의 연계해석 프로그램, 가공과 가공사이 공작물 내의 열전달해석 프로그램 그리고 재결정해석 프로그램들이다. 여기에서 주목할 만한 점은 여러 성형가공 작업을 포함하는 단조작업을 해석할 수 있다는 것이다.

탄소 망간 강(C - Mn steel)에 대한 Sellars[2], Senuma 와 Yada[5] 그리고 Kwon 등[6]의 금속학모델은 프로그램으로 구현이 되어있다. 이때 동적재결정 크기, 정적재결정 크기 그리고 재결정이 일어나지(진행되지) 않은 결정들의 크기를 가중평균으로써 결정크기를 계산하였다. 금속학 모델에서는 여러가지 수식함수값을 계산하기 위해서 T와 $\dot{\epsilon}$ 값을 필요로한다. 이때 T와 $\dot{\epsilon}$값은 시간에 따른 연속적인 함수이므로 다음과 같은 평균적인 값을 사용하여 계산하였다.

$$A_{mean} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A \, dt \tag{1}$$

이때 t_1 과 t_2는 계산하고자하는 수식함수에 사용될 적절한 시간간격을 나타낸다.

실린더 압축

실험조건

S45C(0.45 wt % C - 0.8 wt % Mn - 0.2 wt % Si) 강종의 원통형 재료를 평판금형으로 압축을 한뒤 결정크기를 측정한다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 모든 예비성형체(preform)는 균일화를 위해 1100 ^oC에서 30분동안 열을 가해준다. 그런후 목적온도에서 등온처리를 한뒤, 동일 온도에서 50 % 압축을 한다. 가공 후에 시편은 최대 100초 동안 노(furnace) 속에서 어닐링(annealing)을 한뒤 담금질(quenching)을 한다. 본 실험에서는 850 ^oC와 1000 ^oC의 등온 온도를 사용하였다. 예비성형체의 지름은 20 mm, 높이는 25 mm이다. 변형중에 겉보기 변형률 속도값($\dot{\epsilon}$)이 10 $\sec^{-1}$이 되도록 상부금형의 속도를 제어한다. 이때 속도는 다음과 같은 시간의 함수로 표시할 수 있다.

$$u_n(t) = -\dot{\epsilon}\, h_o \exp\left(-\dot{\epsilon}\, t\right) \ \ (mm/s) \tag{2}$$

여기에서 h_o는 예비성형체의 초기 높이를 나타낸다.

그림 3에서 볼 수 있듯이 변형된 성형체의 단면 4군데 점에서 결정크기를 측정하였다.

계산조건

본 연구에서는 850 ^oC, 1000 ^oC그리고 1200 ^oC의 세가지 등온온도에서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 변형전 금형과 예비성형체의 온도는 등온이라고 가정한다. 각각의 등온변형 실험당 세가지의 겉보기 변형률속도 — 2.0 $\sec^{-1}$, 10 $\sec^{-1}$, and 20 $\sec^{-1}$를 사용하였다. 예비성형체와 금형에 사용된 유한요소 격자시스템은 그림 4과 같다. 이때 공정의 대칭성을 고려해서 4분의 1영역만 해석하였다. 노출된 예비성형체와 금형의 표면은 대류와 방사열전달이 일어나는 경계조건으로 처리를 하였다. 시뮬레이션의 금형-시편에 사용된 대류와 방사열전달 계수와 접촉열전달 계수는 다음과 같다.

$$h = 0.295 \cdot 10^{-5}\,(W/mm^2K) \tag{3}$$

$$\sigma\varepsilon = 396.83 \cdot 10^{-16}\,(N/smmK^4) \tag{4}$$

$$h_{lub} = 0.03\,(W/mm^2K) \tag{5}$$

금형-시편 접촉면에 적용되는 쿨롱마찰계수를 결정하기위해 다음과 같은 일련의 예비시뮬레이션을 수행하였다. 실험에서 얻어진 변형된 표면형상과 임의의 쿨롱마찰계수를 사용 시뮬레이션을 수행하여 구한 표면형상을 비교한다. 이때 두가지의 형상이 가장 가까이 일치할 때의 μ 값을 찾을 수 있다. 850 ^{o}C에서는 $\mu = 0.22$ 그리고 1000 ^{o}C에서는 $\mu = 0.18$의 쿨롱마찰계수값을 구할 수 있었다.

결과와 고찰

변형중의 소성일로 인해서 계속적으로 열이 발생해서, 변형중 평균온도는 초기 등온온도보다 높아진다. 온도의 최고점을 나타내는 모서리 b 점과 중심c 점은 변형이 가장 심한 부분과 일치한다. 금형의 속도가 높아질수록 평균온도가 높아진다. 즉, 변형에 소요되는 시간간격이 짧을 수록 변형중에 발생하는 전체열량은 많아진다. 그러나 그 차이는 미미하게 작다. 변형률의 분포는 금형속도에 거의 영향을 받지 않는다. 또한 변형률의 분포는 주어진 등온온도값에 거의 영향을 받지 않고 있다.

850 ^{o}C에서는 변형된 시편의 내부에서 정적재결정이 두드러지게 나타나는데에 반해 1000 ^{o}C에서는 동적재결정이 두드러지게 나타나고 있다. 그림 5와 그림 6에서는 3가지의 다른 재결정모델을 사용하여 어닐링 시간에따른 결정크기의 변화를 나타내었다. 정적재결정이 두드러진 850 ^{o}C에서는 Sellar와 NSC의 재결정모델을 사용했을때는 측정값보다 더 크거나 작은 값을 나타내는 반면에 POSCO모델을 사용하여 예측한 결과는 잘 맞음을 알 수 있다. 1000 ^{o}C에서는 Sellar의 모델을 사용했을때 b,c 그리고 d 점에서의 예측된 동적재결정크기와 결정성장이 잘 맞음을 알 수 있다. 그러나 정적재결정이 일어나는 a 점에서는 POSCO 모델이 보다 실험치와 근접함을 알 수 있다. 즉, 여러가지의 열적-기계적 변수의 조합에서 한가지의 모델식만으로는 정밀하게 예측할 수 없다는 결론을 얻을 수 있다. 그럼에도 불구하고, 예측된 결과는 대부분의 측정치 범위에 있음으로 미루어, 본연구의 재결정거동 예측 시스템의 유효성을 확인해 준다. 본연구의 공정에서는 겉보기 변형률속도와 금형속도의 결정크기로의 영향이 작음을 알 수 있었다. 이는 재결정거동을 결정하는 2가지의 열적-기계적 변수인 온도와 변형율속도 값에 거의 영향을 주지 않음에서도 이미 확인했었다.

결론

열간단조에서는 목적하는 제품을 결함없이 성공적으로 성형가공을하는 최적 공정조건을 찾는것이 중요하다. 그리고, 생산품의 질적인 면 특히 제품의 기계적인 성질을 높이

기위한 최적공정조건을 찾는것 또한 중요하다. 이를 위해서는 공작물내의 재결정거동을 예측하는 능력을 구비하여야 한다. 재결정거동예측을 위해서는 변형중의 열적-기계적 변수들의 이력 정보를 알아야한다. 그러므로, 앞에서 이미 소개한 바와 같이 재료유동과 열전달의 연계해석 유한요소모델을 기반으로하는 시스템의 개발은 당연한 과정일 것이다.

금속학모델은 동일(constant)온도, 동일 변형률속도값에 대한 식이므로 시간에 따른 재료내부의 온도와 변형률 속도의 변화는 재결정 모델 적용에 어려움을 주고있다. 본 연구에서 사용한 '평균값' 대신에 additivity rule과 같은 방법을 적용할 수도 있다. 그럼에도 불구하고, 결정크기 예측값은 열간 실린더압축 실험의 측정값과 잘 일치하고있어 본 시스템의 유효성을 입증하고있다. 또한 본 시스템은 복잡한 형상 제품의 단조공정중의 자세한 열적-기계적 그리고 재결정 거동을 밝힐 수 있었다. 본 시스템은 열간단조공정의 최적화 또는 제어를 함에 있어서 off-line 도구로써 사용될 수가 있을 것이다.

참고문헌

1) S. M. Hwang, M. S. Joun, and Y. H. Kang : ASME Trans. J. Eng. Ind., Vol. 115, pp. 290-298 (1993).

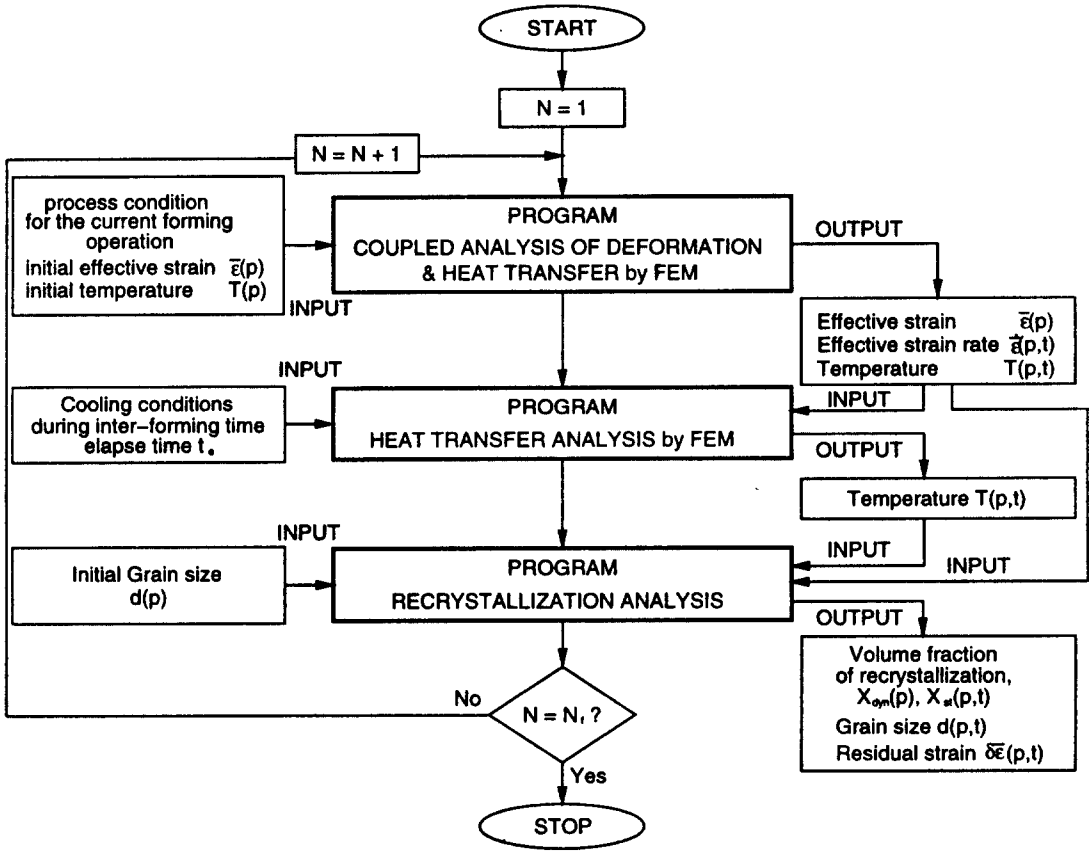
2) C. M. Sellars : Hot Working and Forming Processes, Ed. by C. M. sellars and G. J. Davis, Met. Soc. London, p. 3 (1980).

3) W. Roberts and A. Sanberg, T. Siwecki , and T. Werlefors, Proc. Int. Conf. Technology and application of HSLA Steels, Philadelpia, USA, p.67 (1983).

4) P. Choquet, A. Le Bon, and Ch. Perdix : Proc. 7th ICSMA, Montreal, Canada, p. 1025 (1985).

5) T. Senuma and H. Yada, Proc. 7th Ris0 Int. Symp. Metallurgy and Materials Science, Roskilde, Denmark, p. 547 (1986).

6) O. Kwon, K. J. Lee, K. B. Kang, J. K. Lee, and D. Lee, Journal of Korean Institute of Metal and Materials, Vol. 30, p. 1335 (1992)



N = current forming operation No.
N_f = finish forming operation No.
p : Number denoting a material point in the workpiece
p = 1,2 ... n

Fig. 1 Structure of the system for the analysis of the thermo-mechanical and recrystallization behavior in multi-step forging

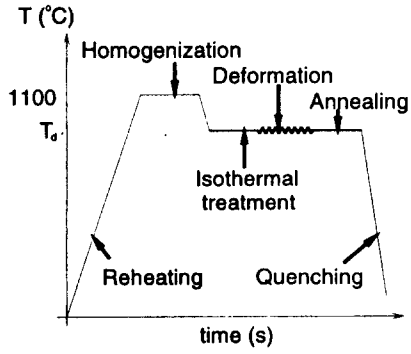


Fig. 2 Temperature control during the hot upsetting experiment

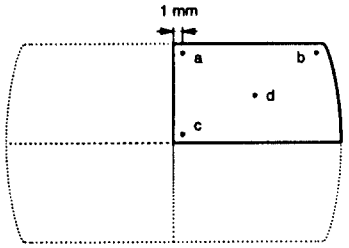


Fig. 3 Locations of the material points where the grain sizes were measured

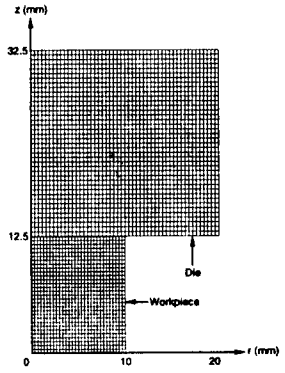
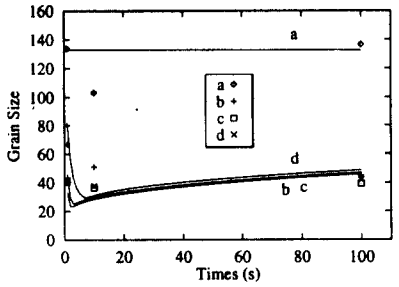
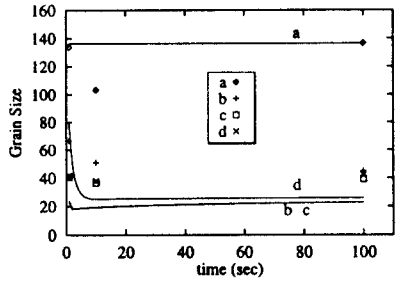


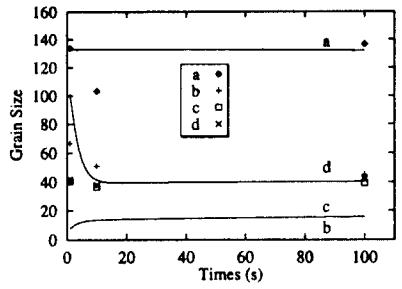
Fig. 4 Finite element meshes for the preform and the die, used for process simulation



(a)

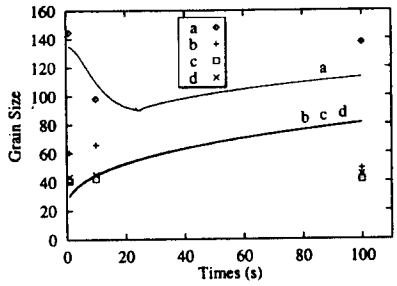


(b)

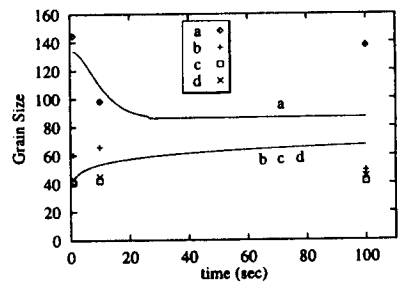


(c)

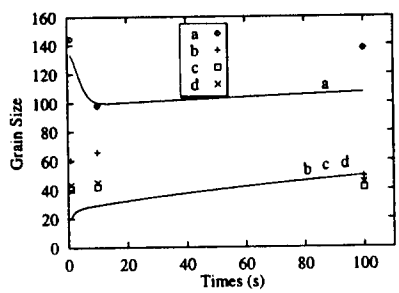
Fig. 5 Variation of the grain size with annealing time. $\dot{\epsilon} = 10$, T = 850 ^{o}C
(a) POSCO, (b) Sellars, and (c) NSC



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Variation of the grain size with annealing time. $\dot{\epsilon} = 10$, T = 1000 $^{\circ}C$
(a) POSCO, (b) Sellars, and (c) NSC