논문 한국정밀공학회지 제15권 제7호 (1998년 7월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 7, July 1998.

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

유한요소법에 의한 열간성형공정에서 강의 미세조직변화 예측

장 용 순*, 고 대 철**, 김 병 민***

Prediction of Microstructural Evolution in Hot Forging of Steel by the Finite Element Method

Yong-Soon Jang*, Dae-Cheol Ko** and Byung-Min Kim***

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 development of microstructure is strongly dependent on process variables and metallurgical factors that affect time history of thermodynamical variables such as temperature, strain, and strain rate during deformation. Then finite element method is applied for the prediction of microstructural evolution, and it should be coupled with heat transfer analysis to consider the change of thermodynamical properties during forming process. In this study, Yada's recrystallization model and rigid-thermoviscoplastic finite element method are employed in order to analyze microstructural evolution during hot forging process. To show the validity and effectiveness of the proposed method, experiments are accomplished and the results of experiments are compared with those of simulations.

Key Words : Dynamic Recrystallization(동적재결정), Static Recrystallization(정적재결정), Grain Growth (결정립성장), Volume Fraction of Recrystallization (재결정률), Rigid-Thermoviscoplastic Finite Element Method(강열점소성 유한요소법)

1. 서 론

기계가공분야에서 많은 비중을 차지하고 있는 소성가공은 대량생산과 고속가공에 의한 제조비용의 절감효과 때문에 널리 사용되고 있다. 최근에는 기계정도의 향상, 새로운 재료의 개발 및 여러 가지 새로운 가공법의 등장으로 소성가공의 비용절감 효과 이외에 고정도의 가공이 용이하게 되었다. 소성가공분야 중 단조가공으로 정밀정형(net shape or near net shape), 즉 정도가 우수한 제품을 보다 효율적으로 제조할 수 있는 연구가 진행되어 왔으며, 최근 컴퓨터의 발달과 유한요소법을 비롯한 해석방법의 진보로 인해 단조가공분야의 기술이 급속하게 발

* LG전자 PCB OBU 기술개발팀
** 양산대학 메카트로닉스과
*** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

전할 수 있었다[1-2]. 그러므로 정밀제품을 제조할 수 있는 환경을 보다 신속하게 갖출 수 있게 되어 현재의 다품종 소량생산에 충분히 대처할 수 있을 뿐만 아니라, 제품의 제조비용절감에 상당한 기여를 할 수 있게 되었다[3-5].

그러나 최근에는 형상이나 치수가 정밀한 제품 뿐만 아니라, 저비용으로 우수한 재질을 가진 제품을 제조하려는 욕구가 증가하고 있다. 그러므로 제품의 정도 뿐만아니라 기계적 성질을 향상시키기 위해서는 재료의 초기조건 및 성형조건 등을 수정하여 재료의 조직을 변화시키므로써 보다 나은 기계적 성질을 얻고자 하는 노력이 진행되고 있다. 이러한 노력의 일환으로 재료의 기계적 성질을 파악할 수 있는 조직예측 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[6-9].

Rebelo와 Kobayashi[10,11]는 비정상상태 열간업셋팅공정에서 온도장과 속도장을 연계해석하는 유한요소모델을 개발하였고, Yada와 Senuma[12]는 Mn이 1%미만 함유된 탄소강에 있어서 재료의 정적 · 동적재결정 및 변형후 결정립성장을 고려하는 모델을 제안하였다. Xu 등[8]은 링 압연에서 강의 정적재결정 거동을 해석하였으며, Cho 등[9]은 연속적인 변형을 받는 열간연속압연에서 발생하는 재료의 정적재결정과 결정립성장에 대해 스텐드사이의 거리와 이송시간을 고려한 시뮬레이션을 수행하였다. 그러나 열간압연공정에서 이러한 연구들은 압하율이 비교적 작고, 변형이 심하지 않아서 동적재결정현상이 무시될 수 있기 때문에 재료의 정적재결정거동과 결정립성장을 주로 다루고 있다. Kwak 등[13]은 Yada 등이 제안한 재결정거동 모델을 수정하여 열간업셋팅공정에서 강의 재결정거동을 해석하였다. 압연과 업셋팅공정에 대한 미량원소첨가강과 합금강의 재결정거동은 여러 연구자들[6,14,15]에 의해 해석적으로 수행되었으나, 합금원소에 대한 영향, 상변태와 재료 미세구조의 변화에 대한 일반적인 수식은 아직 제안되지 않고 있다.

재료의 조직변화에 영향을 미치는 금속적 · 기계적 주요인자는 재료의 초기결정립크기, 온도, 변형률 및 변형률속도 등이 있으므로[7], 재료의 미세조직변화(microstructural evolution)를 해석하기 위해서는 가열 및 냉각조건, 성형조건 등과 같은 제품의 제조공정조건과 미세조직변화에 대한 정량적인 비교를 통한 공정변수와의 상관관계를 명확히 규명해야 한다. 공정변수와 조직변화의 상관관계를 보다 효율적으로 파악하기 위해서 컴퓨터를 이용한 수치해석방법이 필요하며, 이를 위해서는 재료의 변형과 열전달을 연계해서 해석해야 한다. 그러므로 현재 널리 사용되고 있는 해석방법인 강열점소성 유한요소법과 조직예측 알고리즘을 결합한 해석방법이 요구된다. 따라서 본 논문은 비정상상태 열간성형공정에서 강의 미세조직변화를 예측하기 위하여 강열점소성 유한요소법과 조직예측 알고리즘을 연계한 프로그램을 개발하고, 이를 열간단순업셋팅공정에 적용해 보았다. 또한 시뮬레이션 결과를 실험결과와 정량적, 정성적으로 비교하여 개발된 프로그램의 유용성을 평가해 보았다.

2. 강열점소성 유한요소법

2.1 강점소성 유한요소방정식의 정식화

대부분의 금속성형공정에서는 변형이 크기 때문에 재료의 탄성변형을 무시할 수 있다. 그러므로 정도와 계산상의 효율이 만족할 만한 강소성 유한요소해석이 금속성형공정의 해석에 많이 사용된다. 본 논문에서는 열간단조공정의 유한요소해석을 위해서 강열점소성 유한요소법을 이용하였으며, 이의 수식화 과정은 이미 많은 문헌[16]에 잘 알려져 있으므로 여기서는 간략하게 언급한다.

강점소성재료에 대한 범함수(functional), Π는 다음과 같다.

$$\Pi = \int_V E(\dot{\varepsilon}_{ij})dV - \int_{S_F} F_i v_i dS \; dV \qquad (1)$$

여기서, E는 점소성 포텐셜, $\dot{\varepsilon}_{ij}$ 는 변형률속도, F_i는 표면력, v_i 는 절점속도를 나타낸다.

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(penalty function), K를 도입하면, 위의 식(1)에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta\Pi = \int_V \bar{\sigma}\delta\dot{\bar{\varepsilon}}dV + K\int_V \bar{\sigma}\delta\dot{\varepsilon}_v dV - \int_V F_i\delta v_i dS = 0 \quad (2)$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 는 유효 변형률속도, $\dot{\varepsilon}_v$ 는 체적 변형률속도, δv_i 는 임의의 변분이고, $\delta\dot{\varepsilon}_v$ 와 δv_i 는 v_i 로부터 유도되는 변형률속도의 변분이다. 식(2)는 유한요소 이산화과정을 거쳐서 비선형 대수방정식으로 변환되며, 비선형 대수방정식을 풀기 위해서 뉴우튼-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하였다. 또한 뉴우튼-랩슨법의 초기해는 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구하였다.

2.2 열전달방정식의 유한요소 정식화

온도해석의 지배방정식은 다음과 같이 표현되는 에너지 평형방정식이다.

$$\chi T_{,ii} + \dot{q} - \rho c \dot{T} = 0 \tag{3}$$

여기서 $\chi T_{,ii}$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.

$$\int_V \chi T_{,i} \delta T_{,i} \, dV + \int_V \rho c \dot{T} \delta T dV - \int_V k(\bar{\sigma}\, \bar{\dot{\varepsilon}}) \delta T dV - \int_{S_q} q_n \delta T dS = 0 \tag{4}$$

여기서, T는 온도, $\dot{T}$는 온도변화율, ρ 는 밀도, c는 비열, k는 총에너지가 열로 바뀌는 비율을 나타내는 상수, q_n은 경계면, S_q를 가로지르는 열유동을 나타낸다.

위의 식(4)는 유한요소 이산화과정을 거친 뒤 유한차분 근사에 의해 선형화하여 온도장을 구하였다. 온도변화는 재료의 성질에 영향을 미치므로 열해석과 변형해석을 서로 연계하여 계산하였다.

3. 미세조직변화

열간성형공정에서 재료가 변형을 받거나 다량의 열에너지를 받게 되면 재료내부의 자유에너지가 높아져 불안정한 상태로 된다. 그러므로 자유에너지를 낮추어 보다 안정한 상태로 변화하기 위해서 재료내부에 조직변화가 생기며, 그 중에서 변형에너지에 의해 이러한 변화가 발생하는 현상을 동적재결정이라 한다. 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. Yada와 Senuma[12]는 Mn이 1%이하 함유된 탄소강에서 재료의 동적재결정, 정적재결정과 결정립성장을 고려할 수 있는 수식을 제안하였다. 본 연구에서는 참고문헌 [12]에 제시된 수식을 사용하여 열간공정에서 재료의 미세조직변화를 모델링하였으며, 그 관계는 다음과 같다.

3.1 동적재결정

동적재결정은 변형중에 유동응력이 정점에 이르기 직전 ($\varepsilon \geq \varepsilon_c$)에 발생하고 재결정에 의해 변형률이 없는 새로운 결정립이 생성되며, 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

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

여기서 ε_c는 동적재결정이 일어나기 위한 임계변형률, d_{dyn}은 동적재결정이 일어난 결정립크기(μm), Z는 Zener-Holloman 파라메타, Q는 활성화에너지, R은 기체상수, X_{dyn}은 동적재결정률, $\varepsilon_{0.5}$는 50% 재결정이 일어날때의 변형률, d_0는 초기결정립의 크기이다. 위의 수식에서 볼 수 있는 바와 같이 동적재결정은 변형률과 초기결정립의 크기에 의존하지 않고, Z에 의해 결정됨을 알 수 있다.

3.2 정적재결정

정적재결정은 일반적으로 냉간가공을 받은 재료를 풀림처리할 때 주로 발생하는 것으로 동적재결정기구와 본질적인 차이는 없다. 그러나 동적재결정은 변형에너지를 구동력으로 일어나며, 정적재결정은 이전의 가공도, 풀림온도 등에 영향을 받는다는 것에 차이가 있다. 따라서 무하중하에서 발생하는 재료의 정적재결정거동은 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

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

여기서 X_{st}는 정적재결정률, $t_{0.5}$는 50%의 재결정이 일어날 때까지의 시간(sec), S_v는 단위체적당 차지하는 결정립경계의 면적, d_{st}는 정적재결정이 일어난 결정립크기(μm)를 나타낸다.

3.3 결정립성장

재결정이 진행되면 조직이 미세화된다. 결정립크기가 작을수록 결정립경계면을 구성하는 면적이 넓어지며, 이를 유지하기 위해서는 높은 수준의 에너지가 필요하다. 그러므로 재결정이 일어난 결정립은 결정립경계면을 최소화해 보다 안정된 상태로 변화하기위해 결정립의 성장이 일어난다. 이러한 결정립성장은 재결정이 완료된 이후($X \geq 0.95$)에 발생하며 다음과 같은 수식으로 표현될 수 있다.

$$d = d_{dyn} + 1.1_y (d_{pd} - d_{dyn})$$

for dynamically recrystallized grain (7a)

$$d^2 = d_{st}^2 + 1.44 \times 10^{12} \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

for statically recrystallized grain (7b)

$$\textit{where} \quad y = 1 - \exp\left[-295\dot{\bar{\varepsilon}}^{0.1} \exp\left(\frac{-8000}{T} t\right)\right]$$

$$d_{pd} = 5380 \cdot \exp\left(\frac{-6840}{T}\right)$$

3.4 미세조직변화 예측모델

열간단조에서의 미세조직변화를 예측하기 위해서는 앞에서 설명한 것과 같이 열적 · 기계적 변수의 이력과 금속학적 인자에 대한 영향들을 파악해야 한다. 따라서 강열점소성 유한요소법과 미세조직변화 예측모델을 연계해서 해석해야 하며, 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 절차로 해석을 수행하였다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 성형중에 나타나는 동적재결정거동을 해석하기 위해 강열점소성 유한요소법과 재료의 동적재결정거동을 연계하여 해석을 수행하였으며, 무하중하에서의 정적재결정거동을 해석하기 위해서 열전달프로그램과 연계하여 미세조직변화를 해석하였다.

연속적인 변형을 받는 비정상상태인 열간성형공정에서 재료의 동적재결정거동을 해석하기 위해서 Fig. 2와 같은 절차로 재료의 아입계(subgrain)를 고려해서 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 변형해석시 한스텝에서의 변형증분 및 온도조건 등이 재결정이 완전

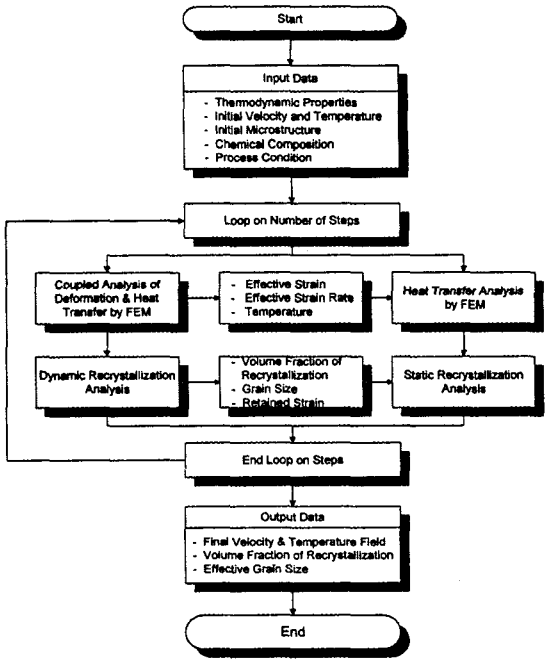


Fig. 1 Numerical analysis procedure to predict microstructural evolution in hot forging

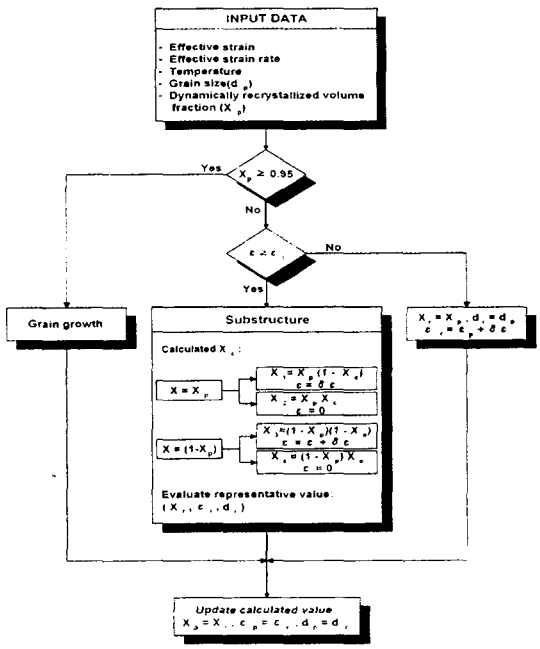


Fig. 2 Procedure of numerical analysis for dynamic recrystallization

히 일어나기 어려운 경우에는 변형이 누적되어 발생될 때, 동일한 시간에서도 서로다른 시간적 차이가 발생하기 때문에 이러한 아입계를 고려해서 각각의 부분에서의 가공경화 및 연화를 계산하여 전체 영역에서의 값으로 변환시켜 해석을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험조건 및 결과

열간단조공정에서 재료의 미세조직 변화양상과 개발된 프로그램의 효용성을 검증하기 위해서 열간단순업셋팅실험을 수행하였다. 초기시편은 탄소강인 AISI 1030 (C-0.28~0.34%, Mn-0.6~0.9%)이고, 시편의 초기온도와 결정립크기를 균일하게 하기 위해서 유도가열로에서 1200℃의 온도로 30분간 가열하였다. 금형은 열간성형공정에서 많이 사용되는 SKD 61을 이용하였으며, 금형은 350℃로 예비가열하였다. 유도가열로에서 프레스까지의 이송시간은 10초이며, 성형직전까지 하부금형과의 접촉시간은 4초이다. 600ton 유압프레스를 이용하여 10㎜/sec의 램속도로 40%의 높이감소율이 될 때까지 가압한 직후 시간에 따른 재료의 미세조직 변화를 보기 위해서, 성형직후, 성형후 5초, 60초동안 공랭한 후 담금질처리하였다. 재료내부의 결정립크기를 보기 위해 시편의 중심단면을 절단한 뒤 폴리싱과 부식처리를 해서 각 부위에서의 결정립크기를 측정하였다[17,18]. 이상의 실험조건을 Table 1에 요약하여 나타내었다.

Photos. 1, 2의 실험결과에서 알 수 있듯이 소재 중심에서는 미세화가 뚜렷이 관찰되며, 소재의 외곽으로 갈수록 결정립의 미세화는 일어나지 않음을 확인할 수 있다. 이것은 성형중에 변형이 심한 중심부분에서 동적재결정이 활발하게 일어났으며, 변형을 거의 받지 않고 열손실

Table. 1 Experimental conditions for hot upsetting process

Condition	Value
Dimension of workpiece	⌀85×H85 ㎜
Material of workpiece	AISI 1030
Material of dies	SKD 61
Original temperature of workpiece	1200℃
Original temperature of dies	350℃
Lubricant	Graphite with water (1 : 1)
Heating time	30 min
Transfer time	10 sec
Dwell time	4 sec
Forming time	3.4 sec
Ram speed	10㎜/sec
Cooling condition	Quenching
	Quenching after 5 sec
	Quenching after 60 sec

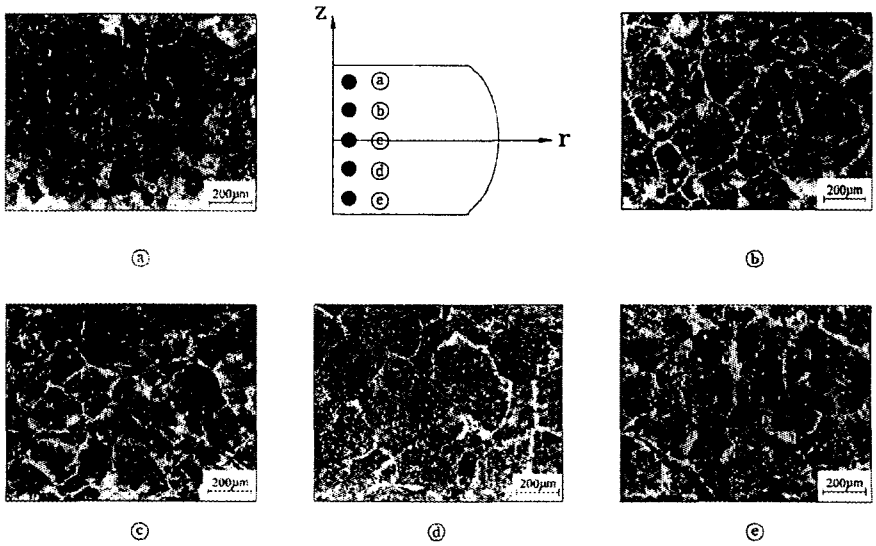


Photo. 1 Microstructures of hot forged part according to axial direction

이 심한 소재의 외곽부위에서는 재결정에 의한 조직의 미세화를 기대하기 어려움을 알 수 있다. Photo. 3은 시간의 변화에 따른 결정립크기를 나타낸 것이다. 성형동안 조사된 부분에서는 성형직후 거의 재결정이 일어나지 않았으며, 시간이 흐름에 따라 일정시간동안 이전의 가공도 및 내부발생열에 의한 재가열효과에 의해 정적재결정이 빠르게 진행된 후, 다시 결정립성장이 일어남을 Photo. 3에서 확인 할 수 있었다.

4.2 시뮬레이션조건 및 결과

해석결과와 실험결과를 비교하기 위해서 실험과 동일한 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 이용된 AISI 1030의 유동응력식은 Shida[19]가 제안한 탄소강에 있어서 탄소 함유량의 영향을 고려하여 열간평균변형저항을 변형률, 변형률속도, 온도의 함수로 표현한 식을 이용하였다. 기타 시뮬레이션을 위한 조건은 Table 2와 같다.

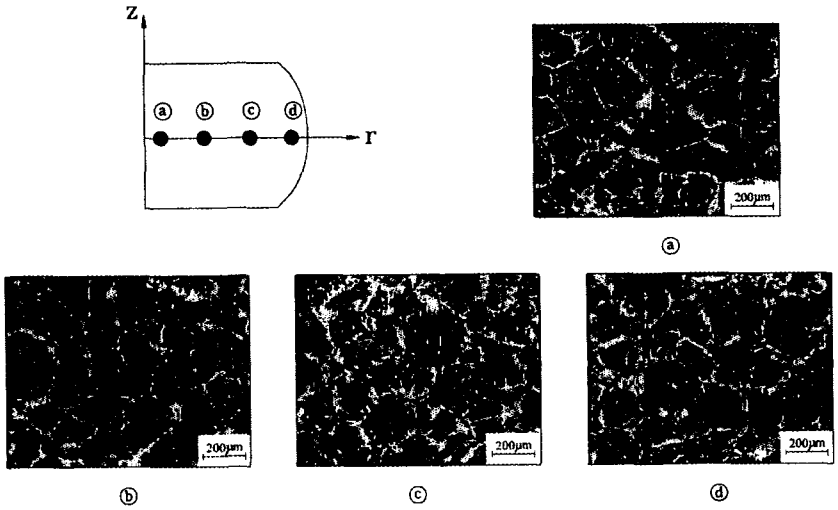


Photo. 2 Microstructures of hot forged part according to radial direction

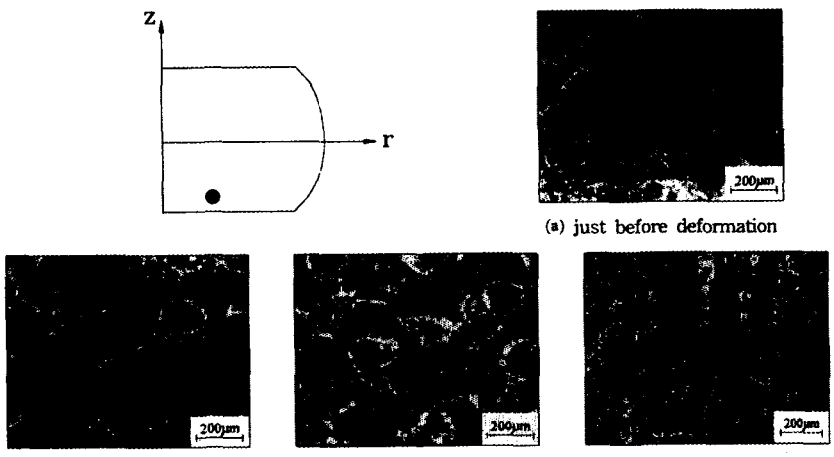


Photo. 3 Microstructural changes for air cooling time at fixed point

Table. 2 Process parameters for FE-simulation in hot upsetting process

Process parameter	Value
Upper die velocity	10 ㎜/sec
Friction factor	0.3
Initial temperature of workpiece	1200℃
Initial temperature of dies	350℃
Temperature of surrounding medium	20℃
Thermal conductivity of workpiece	36.8N/(s · K)
Thermal conductivity of dies	28.4N/(s · K)
Material property of workpiece(ρc)	3.77N/(㎟ · K)
Material property of dies(ρc)	4.0N/(㎟ · K)
Heat transfer coeff. during resting	0.4N/(㎟ · K)
Heat transfer coeff. during forging	4.0N/(s · ㎟ · K)
Heat transfer coeff. for medium	0.0029N/(s · ㎟ · K)
Radiation property($\sigma\varepsilon$)	8.5×10^{-12}N/(s · ㎟ · K^4)

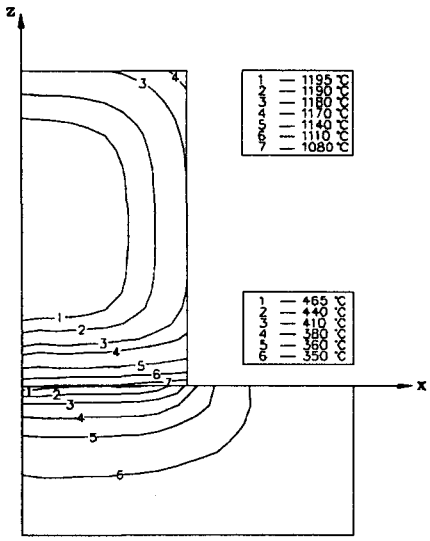


Fig. 4 Distribution of temperature along the axisymmetric plane just before deformation(℃)

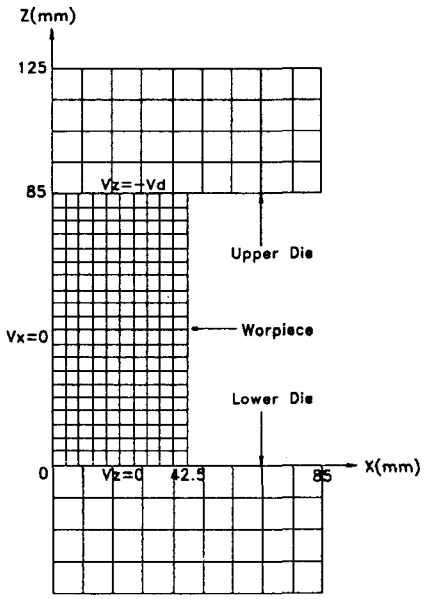


Fig. 3 Finite element mesh for the simulation of hot upsetting

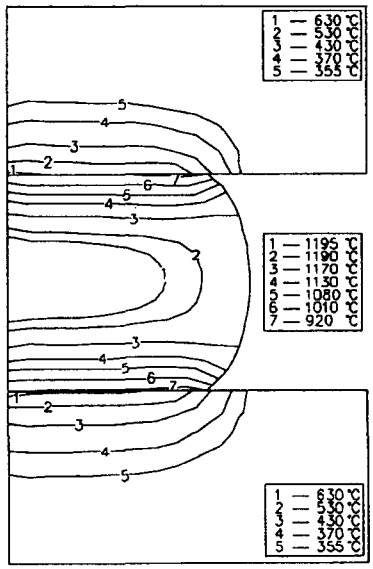
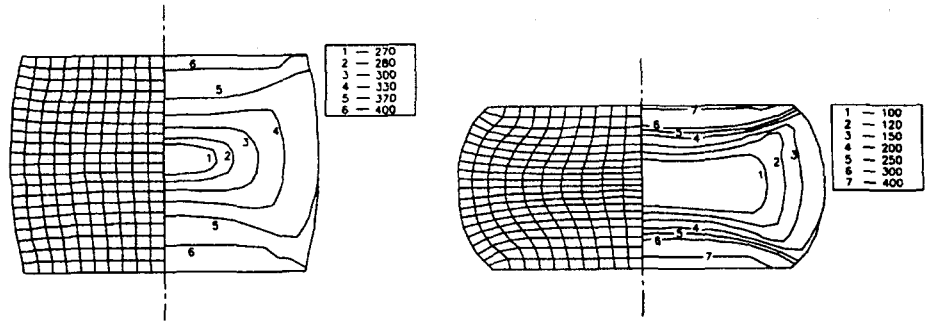


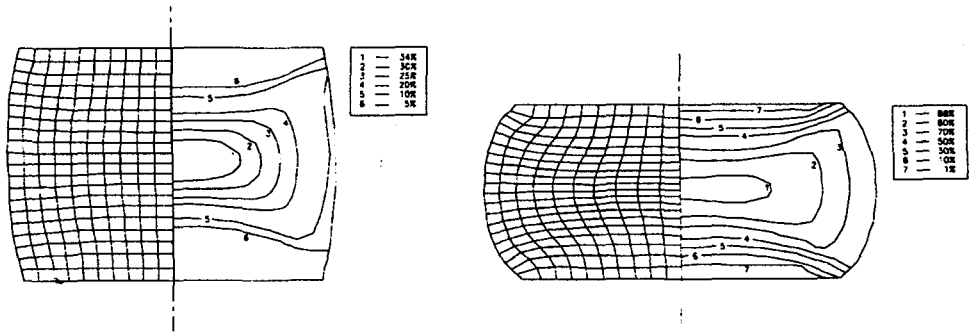
Fig. 5 Distribution of temperature at 40% height reduction (℃)

소재는 상하부 금형과 접촉하고 있는 조건이 다르므로 Fig. 3과 같이 1/2단면을 해석대상으로 하였다. Fig. 4는 이송시간과 성형전까지 하부금형과의 접촉시간을 고려해서 온도분포를 해석한 결과이며, Fig. 5는 40%높이 감소율까지 성형했을 때의 온도분포를 나타낸 것이다. 변형이 심한 소재의 중심영역에서 변형열에 의한 온도상승으로 금형의 상하부에 비해 온도가 상당히 높은 것을 알 수 있다. 성형시 나타나는 재료의 동적재결정거동을 해석한 결과는 Figs. 6, 7과 같다.



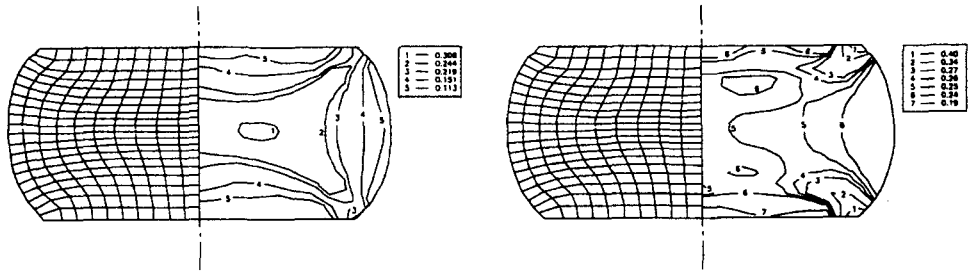
(a) 20% height reduction (b) 40% height reduction

Fig. 6 Distribution of grain size after dynamic recrystallization(㎛)



(a) 20% height reduction (b) 40% height reduction

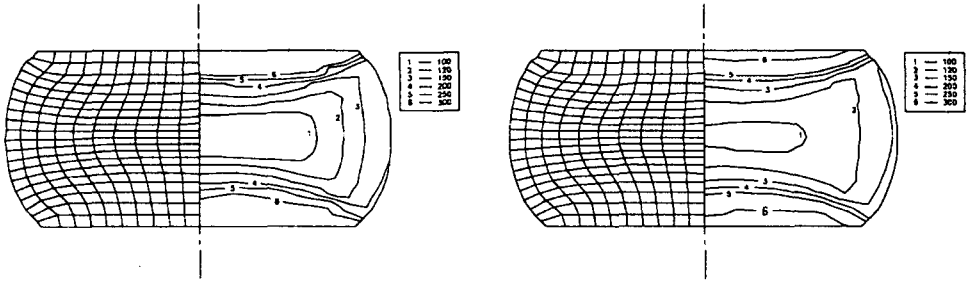
Fig. 7 Volume fraction of dynamic recrystallization at 20% and 40% height reduction



(a) strain rate (b) retained strain

Fig. 8 Distributions of presenting strain rate and retained strain just after deformation

변형이 심하고 온도가 비교적 높은 소재의 중심에서 변형과 더불어 상당히 크게 동적재결정이 일어난 것을 볼 수 있다. 이처럼 변형이 심하게 일어나는 재료의 중심부분에서는 성형과 함께 발생한 동적재결정에 의해 뚜렷한 변형률연화현상을 Fig. 8과 같이 확인 할 수 있다. 무하중하에서 이전의 가공도와 온도조건 등에 의해 나타나는 정적재결정거동을 해석한 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 동적재결정에 의해 조직의 미세화가 크게 진전되고 재결정에 의한 변형률연화의 결과로 소재의 중심부분에서는 변형률의 정도가 낮으므로 더 이상의 재결정이 진행하지 않으며, 시간이 지남에 따라 결정립성장이 일어남을 볼 수 있다. 그리고 상하부 금형과의 접촉



(a) after 5 seconds air cooling (b) after 60 seconds air cooling

Fig. 9 Distribution of grain size after static recrystallization (㎛)

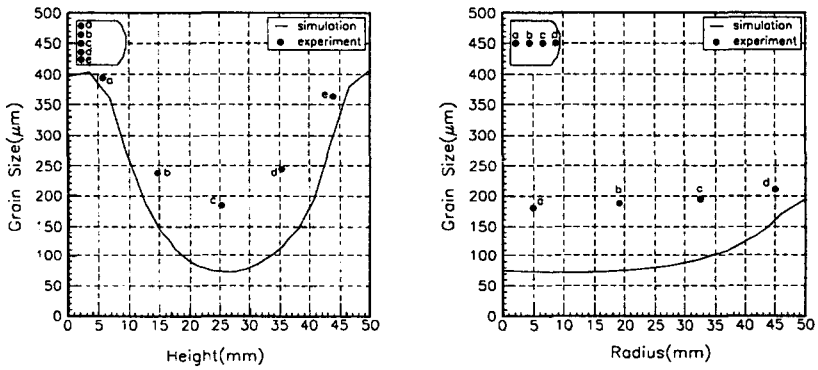


Fig. 10 Comparison of measured grain size with calculated results

부분에서는 금형과의 접촉에 의한 열손실로 인해 성형중에서는 재결정이 일어나기 어려웠지만 시간이 흐름에 따라 내부의 높은 온도에 의한 재가열 효과에 의해 정적재결정이 일정시간동안 빠르게 진전되고, 다시 시간이 흐름에 따라 결정립성장이 지배적으로 일어났음을 확인할 수 있다.

실험과 시뮬레이션의 결과를 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 재료의 중심부분으로 갈수록 실험치와 시뮬레이션의 결과의 오차가 커짐을 볼 수 있는데, 이것은 재료의 내부까지 충분한 담금질효과를 기대 할 수 없었기 때문이라고 생각되지만, 그 경향은 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

5. 결 론

단조가공분야에서는 치수정밀도가 높고 기계적성질이 우수한 제품을 만들기 위한 최적의 공정조건을 찾는 것이 중요하다. 특히 열간단조공정에서 변형이력, 열이력 및 미세조직변화 등은 재료의 기계적성질에 영향을 미치므로 제품의 기계적성질을 개선시키기 위해서는 성형공정동안 재료내부의 미세조직변화에 대한 열적-기계적변수들의 이력과 미세조직변화에 대한 상호관계를 알아야 할 필요가 있다. 그러므로 유한요소법을 이용한 재료내부의 미세조직변화에 대한 예측이 필요하다. 본 연구에서는 열간단조가공 중 재료의 미세조직변화에 대한 영향을 고려하기 위한 기초연구로서 실험과 시뮬레이션을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 열간성형공정 동안 재료의 미세조직변화를 고려하기 위해 강열점소성 유한요소법과 미세조직변화 예측모델을 연계하여 재료의 미세조직변화를 예측할 수 있는 프로그램을 구성하였다.

(2) 개발된 프로그램의 유용성을 평가하기 위해 열간단순업셋팅 실험을 수행하였으며, 실험결과와 시뮬레이션

결과의 경향이 잘 일치함을 볼 수 있었다.

(3) 실제성형공정에 가까운 조건으로 시뮬레이션하기 위해서 소재의 유도가열후 이송시간 및 성형직전까지 하부금형과의 접촉시간을 고려하여 해석하였다.

(4) 성형중에는 변형이 심하고 내부발생열이 높은 재료의 중심영역에서 동적재결정이 활발하게 발생하였으며, 무하중에서 정적재결정은 이전의 가공도 및 온도 등의 영향에 의해 발생하였다.

(5) 열간성형공정에서 재료의 미세조직변화는 공정변수 및 성형중의 열적 · 기계적변수에 영향을 크게 받으므로 최적의 공정변수조합에 의한 최적의 가공열처리조건의 선정에 대한 기초자료로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. X. H. Zhang, "Finite element analysis of container and accuracy control of extrusion products," Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 343-348, 1990.
2. 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.
3. H. Kudo, "Towards net-shape forming," J. Mater. Proc. Technol., Vol. 22, pp. 307-342,1990.
4. T. A. Dean, "Progress in net shape forging," Advanced Technology of Plasticity, pp. 103-1040, 1993.
5. N. Takashi, "자동차용 냉간단조제품 금형의 정밀가공기술," KATECH '92 기술세미나, pp. 21-58, 1992.
6. M. Pietrzyk, Z. Kedzierski, J.G. Lenard, M. Tajima, J. Majta, "Multistage compression of microalloyed steels - FE simulation and measurements of grain size," J. Mater. Proc. Technol., Vol. 45, pp. 509-514, 1994.
7. C.M. Sellars and J.A. Whiteman, "Recrystallization and grain growth in hot rolling," Metal Science, Vol. 13, pp. 187-194, 1979.
8. S.G. Xu and Q.X. Cao, "Numerical simulation of the microstructure in the ring rolling of hot steel," J. Mater. Proc. Technol. Vol. 43, pp. 221-235, 1994.
9. 조현중, 김낙수, "열간압연중 발생하는 미세조직 변화에 관한 연구," 한국소성가공학회 '95년 추계 학술대회 논문집 pp. 16-29, 1995.
10. N. Rebelo and S. Kobayashi, "A coupled analysis of viscoplastic deformation and heat transfer - Ⅰ, Theoretical considerations," Int. J. Mech. Sci., Vol. 22, pp. 699-705, 1980.
11. N. Rebelo and S. Kobayshi, "A coupled analysis of viscoplastic deformation and heat transfer - Ⅱ, Applications," Int. J. Mech. Sci., Vol. 22, pp. 707-718, 1980.
12. H. Yada and T. Senuma, "Resistance to hot deformation of steel," J. JSTP, Vol. 27, pp. 34-44, 1986.
13. 곽우진, 이경종, 권오준, 황상무, "열간단조공정중 강의 재결정거동 유한요소해석," 한국소성가공학회지, Vol. 5, pp. 305-319, 1996.
14. 조상현, 김성일, 유연철, "미량원소첨가강의 석출 및 재결정에 의한 제어변형," 한국소성가공학회지, Vol. 6, pp. 102-109, 1997.
15. W. Lehnert, N. D. Cuong, "Experimental and mathematical simulation of microstructural evolution during hot rolling of Al and Cu material," J. Mater. Proc. Technol. Vol. 60, pp. 567-574, 1996.
16. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, "Metal forming and the finite element method," Oxford University Press, 1989.
17. Metals Handbook, "Metallography, structures and phase diagrams," American Society for Metals, 8th Edition, Vol. 8.
18. Vander Veort, "Metallography principle and practice," McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 410-508, 1984.
19. S. Shida, "Emprical formula of flow-stress of carbon steels-resistance to deformation of carbon steels at elevated temperatures," J. JSTP, Vol. 10, pp. 610-617, 1969.