

유한요소법을 이용한 Inconel 718의 열간단조공정시 동적재결정거동 예측

최민식* · 강범수* · 엄종택** · 박노광**

(1998년 3월 2일 접수)

Prediction of the Behavior of Dynamic Recrystallization in Inconel 718 during Hot Forging using Finite Element Method

Min Shik Choi, Beom Soo Kang, Jong Taek Yum and Noh Kwang Park

Abstract

This paper presents the prediction of dynamic recrystallization behavior during hot forging of Inconel 718 alloy. Compression tests were carried out to get the stress-strain curve and data for metallurgical modeling of Inconel 718. Another experiment of pancake forging was also carried out to examine the recrystallization ratio, dynamically recrystallized grain size, and grain growth in the forgings. In experiments, cylindrical billets were forged by two operations with variations of forging temperature, reduction ratio of deformation, and preheating process at each forging step. Also the finite element program, developed here for the prediction using the metallurgical models, was used for the analysis of the Inconel 718 upsetting, and the results were compared with the experimental ones.

Key Words : Dynamic Recrystallization, Hot Forging, Inconel 718, Metallurgical Modeling, Finite Element Method

1. 서론

소성가공은 정형이나 정형에 가까운 제품을 만들 수 있고 표면 정밀도와 기계적 성질이 향상되며 재료와 에너지를 절약할 수 있다는 장점을 가지고 있다.⁽¹⁾ 특히 열간 단조에서는 가공중 재료 내에서의 온도, 변형률, 변형률 속도 등의 차이에 의해 부위별로 불균일한 재결정이 일어나게 되고 재결정에 의해서 달라진 미세조직에 따라서 가공품은 현저한 기계적 성질의 차이를 나타내게 된다. 최종제품의 미세조직을 소비자나 사용자가 원하는 형태로 만들

기 위해서는 소재의 변형중 각 단계에서 가공된 소재의 미세조직을 각 부위별로 관찰하고 결과에 따라 공정변수를 조절해야 하는 등 많은 시간과 경비를 필요로 하는 일련의 작업을 거쳐야 한다. 하지만 이러한 과정을 통해 제품의 공정을 설계한다는 것은 매우 불합리하며 기업으로서는 제품의 개발에 필요한 비용이 많이 들게 되고 이는 생산비용의 증가로 연결되어 제품의 경쟁력이 떨어지게 된다. 지금까지 재료의 가공온도, 변형양상에 따른 재결정 및 결정립의 성장에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔으며 여러 재료에 대한 금속학적 수식화와 함께 기계적 성질과의 관계

* 부산대학교, 정밀정형 및 금형가공연구센터
** 한국기계연구원

에 관한 연구결과들이 얻어졌다. C. M. Sellars 등은 저탄소강의 재결정 및 결정립의 성장을 온도와 변형속도, 시간의 함수로 고려하고 평판롤링에 적용하였으며,⁽²⁾ W. Roberts 등은 오스테나이트 스테인레스강의 동적 재결정을 고온에서의 응력/변형률의 관계와 금속용 현미경을 이용한 미세조직의 측정을 통하여 연구하였다. 특히 초기 결정립의 크기가 특정한 온도와 변형속도에서의 동적 재결정에 미치는 영향에 대한 세밀한 연구가 수행되었다.⁽³⁾

또한 R. Srinivasan 등은 "double-cone" 형상의 Inconel 718 시편을 유한요소법을 이용하여 단조 시뮬레이션하고 계산된 변형률과 실험의 결과로 측정된 결정립과의 관계에 대하여 고찰하였다.⁽⁴⁾ 그리고 G. Shen 등은 고온에서 크리프와 피로에 대한 내성이 우수한 Waspaloy의 고온변형시 동적 재결정과 동적재결정 그리고 결정립 성장에 관한 모델을 수립하고 유한요소 시뮬레이션의 결과와 비교하였다.⁽⁵⁾

국내에서는 황상무 등이 인바합금의 고온변형 특성을 규명하고 응력, 변형률속도, 온도와의 관계를 정량화하고 고온가공시 석출물의 형태 및 거동을 고찰하였다.⁽⁶⁾ 황상현 등은 V침가 구조용강의 압연공정 및 냉각속도 제어에 따른 결정립의 미세화에 대한 연구를 수행하였다.⁽⁷⁾ 또한 권오준 등은 압연 및 냉각 중에 일어나는 각종 야금학적 현상을 수식화하고 미세조직과 기계적 성질간의 상호관계를 규명하여 탄소강의 온라인 열연 재질예측 시스템 개발하였다.⁽⁸⁾ 그리고곽우진 등이 강의 재결정거동에 관한 여러 작업자들의 연구결과를 소개하고 시뮬레이션을 통하여 얻어진 결과들을 비교하였다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 Inconel 718의 열간단조시 재결정거동을 모델링한 후 이를 유한요소 프로그램에 코딩하고 모델링된 수식들을 검증하는 작업을 수행하였다. 금속학적 모델은 압축실험을 통해 얻어진 실험치를 이용하여 동적 재결정, 결정립 성장 및 재결정비율 등을 수식화하는 작업들로 이루어졌다. 수식화된 금속학적 모델을 강점소성 유한요소 프로그램내에 서브루틴화 한 후 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 조건들은 실험의 결과와 비교를 위해 실험과 동일한 조건으로 수행되었다. 실험은 재결정거동이 온도와 변형정도에 의해 영향을 받는 정도를 살펴보기 위해 가공온도와 변형량을 변화시켜 6가지로 구분하였으며 각 경우 2단계의 단조를 통해 pancake 형태로 가공하고 광학현미경으로 미세조직을 관측하였다.

2. 유한요소수식화

2.1 유한요소 수식화

본 연구에서는 강소성 유한요소법의 확장인 강-점소성(rigid-viscoplastic) 유한요소법을 사용하였으며, 이의 수식화는 이미 많은 문헌에 잘 알려져 있다.⁽¹⁰⁻¹⁴⁾

비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙함수(penalty function) K를 도입하면, 강-점소성 재료에 대한 1차 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta\bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\bar{\epsilon}}_V \delta\dot{\bar{\epsilon}}_V dV - \int_{S_f} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

$$\text{여기서, } \bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma'_{ij} \sigma'_{ij})^{1/2}, \quad \dot{\bar{\epsilon}} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}, \quad \sigma'_{ij}$$

는 편차응력, F_i 는 표면력, u_i 는 속도성분, ϵ_{ij} 는 변형률속도, $\dot{\epsilon}_V$ 는 체적 변형률속도이다.

식(1)은 일반적인 유한요소 분할화 과정을 거치면, 질점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 Newton-Raphson법을 이용하여 해를 구하며, 초기속도장은 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다. 유동응력식은 압축실험을 통해 얻어진 실험치를 이용하였다.

2.2 소성일에 의한 온도변화

소재를 변형할 때 내부에서는 소성일로 인한 에너지의 증가에 의해 온도가 상승하게 된다.

소성일은 $dW = \int_0^{\epsilon_p} \sigma d\epsilon_p$ 로 표현될 수 있다. 여기서 소성일에 의한 변형에너지의 약 90%정도가 열로 전환되는 것으로 알려져 있으므로 온도증가분은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\Delta T = \frac{0.9}{\rho c} \int_0^{\epsilon_p} \sigma d\epsilon_p \quad (2)$$

여기서, ϵ_p 는 소성변형률, σ 는 응력, ρ 는 밀도, c 는 비열이다. 본 연구에서는 소성일로 인한 온도의 증분만을 고려했으며 재료와 금형간의 열전달로 인한 온도의 감소분은 고려하지 않았다.

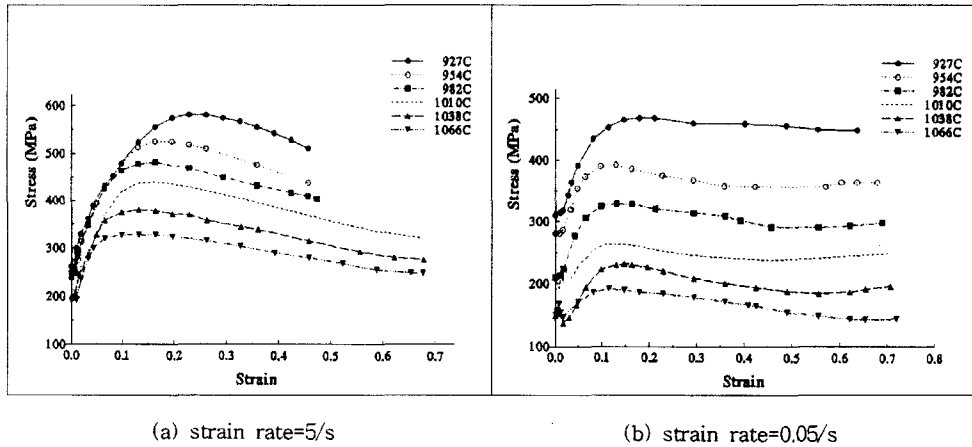


Fig. 1 Flow stress curve of Inconel 718 at various temperature and strain rate

3. 압축실험을 통한 금속학적 모델링

3.1 압축실험

일반적으로 재료의 유동응력을 얻는데는 압축실험이 이용된다. 이것은 인장실험에 비해 압축실험이 보다 큰 변형률에 대한 정보를 얻을 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 유동응력과 동적재결정 거동에 관한 데이터들을 얻기 위해 초기 결정립의 크기가 53 μm , 320 μm 인 봉상 시편(8 mm D \times 12 mm H)에 대한 압축실험을 927, 954, 982, 1010, 1038, 1066 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 5, 0.5, 0.05, 0.005, 0.0005/s 변형률속도에 대하여 수행하였다. 실험에서 시편은 진공(~ 0.01 torr)에서 진변형률 0.7까지 압축되었다. 시편은 실험온도까지 5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 로 가열되었으며, 실험온도에서 5분간 유지되어 시편내의 온도구배가 없도록 하였다. 압축 직후의 미세조직을 살펴보기 위하여 실험직후 시편을 정제된 N_2 가스로 캔칭하였다. Fig. 1에 변형률속도가 5/s, 0.05/s일때의 유동응력곡선이 나타나 있다.

3.2 동적재결정

재료를 소성가공할 때 재료의 내부에서는 변형으로 인해 에너지가 축적되고 변형이 진행됨에 따라 이러한 불안정한 상태의 내부에너지로 인해 새로운 결정핵이 생성되어 안정된 상태로 전이한다. 따라서 재결정핵은 주로 변형이 심한 입계에서 일어나며, 새로 생성된 핵은 무변형상태로 주위의 결정들에 비하여 전위밀도가 매우 낮은 상태가 되는데 이러한 전위밀도차이로 인해 재결정핵의 경계가 전위밀도가 높은 쪽으로 이동하면서 재결정핵이 성장하게 된다.

본 연구에서는 압축실험을 통해서 얻어진 실험결과를 이용하여 입계변형률이 초기 결정립의 크기 d_0 와 Zener-Hollomon 변수 Z 를 고려하였다. 초기 결정립의 크기가 입계변형률을 결정하는 변수로 포함된 것은 초기 결정립의 크기가 재결정 거동에 큰 영향을 미치기 때문이다. 즉, 결정립의 크기가 작을수록 결정립계의 면적이 넓어져 재결정핵이 생성될 수 있는 확률이 높아지게 되고, 재결정이 빨리 일어나게 된다. 실험에서 분석한 결과 변형률속도 0.05/s를 기준으로 입계변형률의 크기가 다른 양상을 보여 다음과 같이 두 식으로 구성하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= 8.87 \times 10^{-4} \times d_0^{0.200} \times Z^{0.099} \quad \text{when } \dot{\epsilon} \geq 0.05/s \quad (3) \\ \epsilon_c &= 9.57 \times 10^{-6} \times d_0^{0.196} \times Z^{0.167} \quad \text{when } \dot{\epsilon} < 0.05/s \end{aligned}$$

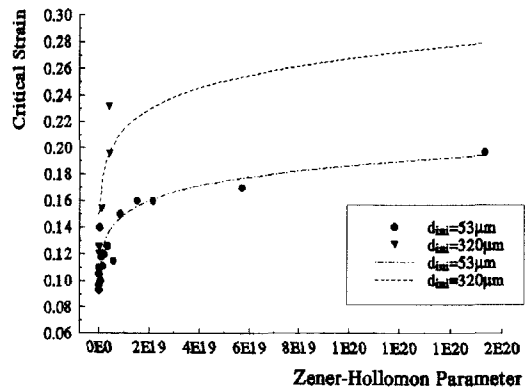


Fig. 2 Zener-Hollomon parameter vs. critical strain at $\dot{\epsilon} \geq 0.05/s$

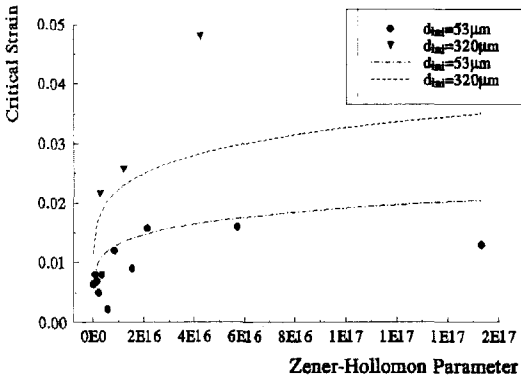


Fig. 3 Zener-Hollomon parameter vs. critical strain at $\dot{\epsilon} < 0.05/s$

여기서, d_0 는 초기결정립의 크기, Z는 Zener-Hollomon 변수 ($= \dot{\epsilon} \exp(\frac{Q}{RT})$), Q는 열적활성화 에너지 ($= 447906/\text{mol}$), R은 기체상수 ($= 8.314\text{J}/\text{mol}$), T는 절대온도 ($= T(\text{K})$)이다.

Fig. 2와 Fig. 3에 변형률속도가 0.05/s이상일 때의 임계변형률과 0.05/s미만일 때의 임계변형률을 초기결정립의 크기와 Z에 대하여 실험결과와 모델링된 식을 비교하여 나타내었다.

동적재결정립의 크기는 일반적으로 알려진 바와 같이 Zener-Hollomon 변수에 대한 지수함수로 모델링하였는데, ⁽²⁻⁹⁾ 상수값과 지수는 식(4)에 나타나 있는 바와 같다.

$$d_{dyn} = 1300.8071Z^{-0.1243} \quad (4)$$

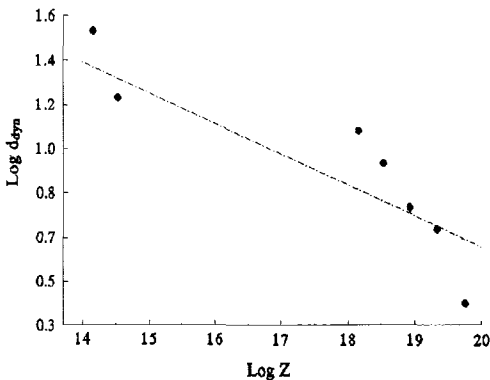


Fig. 4 Comparison of experimental data of Log Z vs. Log d_{dyn} and approximated equation

여기서, d_{dyn} 은 동적재결정립의 크기, Z는 Zener-Hollomon 변수이다.

Fig. 4에는 압축실험의 결과와 모델링된 식이 Zener-Hollomon 변수의 상용로그값에 대한 동적재결정립의 크기가 상용로그값으로 나타나 있다.

3.3 결정립의 성장

소재의 변형중 변형률이 임계변형률보다 작을 경우에는 동적재결정이 일어나지 않고 기존의 결정립이 성장하게 된다. 성장된 결정립의 크기는 Sellars의 모델을 참고로 하여 얻어진 것이다.⁽²⁾

$$D^2 = D_0^2 + 1.056 \times 10^3 t^{0.14215} \exp(-15630/RT) \quad \text{when } T \leq 1038^\circ\text{C}$$

$$D^2 = D_0^2 + 6.904 \times 10^6 t^{0.08983} \exp(-15936/RT) \quad \text{when } T \geq 1038^\circ\text{C} \quad (5)$$

여기서, D는 성장된 결정립의 크기, t는 유지시간 (hour), T는 절대온도 ($= T(\text{K})$), D_0 는 재결정된 결정립 또는 초기 결정립의 크기이다. 식(5)가 1038℃를 기준으로 두 개의 식으로 나뉘어진 이유는 Inconel 718의 경우 δ 상의 용융온도(1010℃~1038℃)를 기준으로 결정립의 성장속도가 현저한 차이를 보이기 때문이다.

3.4 재결정비율

재결정거동의 예측에 있어서 중요하게 관찰되어야 할 다른 하나의 해석 대상은 재결정 비율이다. 재결정비율은 제어체적에 대해 재결정이 일어난 부분의 부피의 비율을 의미한다. 소재의 변형 초기에는 변형률이 임계변형률을 넘지 못한다. 이렇게 되면 식(5)를 통해서 성장된 결정립의 크기가 계산되게 되는데 재결정이 일어나기 직전까지 성장된 결정립의 면적을 전체 면적이라고 생각하고 재결정비율을 계산하였다. 식(6)은 G. Shen등이 Nickel-based super alloy계열인 Waspaloy에 대해 수립한 모델을 참고로 하여 만들어진 Avrami 식이다.⁽⁴⁾

$$X_{dyn} = 1 - \exp(-\ln 2 (\frac{\epsilon}{\epsilon_{0.5}})^{1.68}) \quad \text{when } T \leq 1038^\circ\text{C}$$

where, $\epsilon_{0.5} = 0.037 \times d_0^{0.2} \times Z^{0.058}$

$$X_{dyn} = 1 - \exp(-\ln 2 (\frac{\epsilon}{\epsilon_{0.5}})^{1.9}) \quad \text{when } T \geq 1038^\circ\text{C}$$

where, $\epsilon_{0.5} = 0.029 \times d_0^{0.2} \times Z^{0.058} \quad (6)$

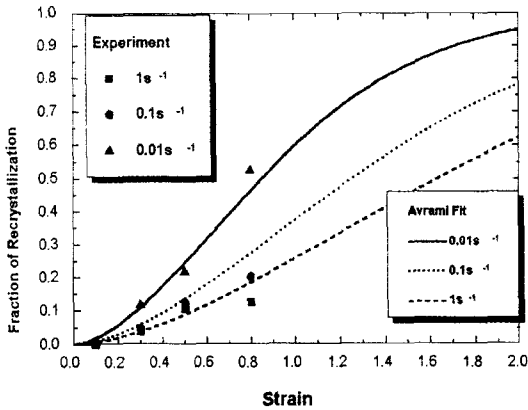


Fig. 5 Comparison of experimental data of strain vs. dynamic recrystallization fraction and approximated equation at initial grain size=320 μm and initial temperature=1020 °C

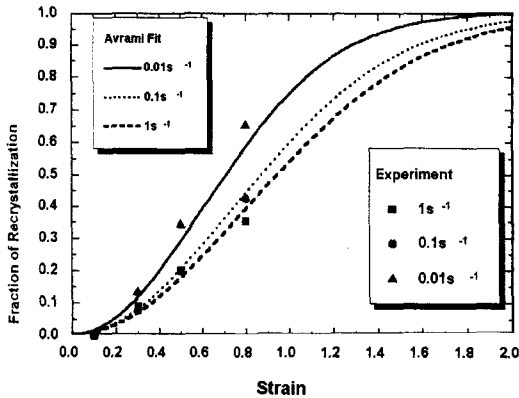


Fig. 6 Comparison of experimental data of strain vs. dynamic recrystallization fraction and approximated equation at initial grain size=320 μm and initial temperature=1060 °C

여기서 $\epsilon_{0.5}$ 는 재결정 비율이 0.5일때의 변형률을 의미한다. Fig. 5와 Fig. 6에는 초기결정립의 크기가 320 μm 이고 초기온도가 1020 °C와 1066 °C일 때 여러 변형률속도에 대한 재결정비율이 실험결과와 비교되어 있다.

3.5 해석알고리즘

이미 설명된 Inconel 718의 수식화된 재결정 모델은 다음과 같은 알고리즘으로 해석에서 적용되었다.

먼저 강점소성 유한요소 해석을 통해 한 스텝에서의 각 요소단위의 변형률속도, 변형률, 소성일에 의해 변화된 온도 등이 계산된다. 그리고 1차 단조후의 동적재결정립의

크기(d_{dyn1}), 재결정비율(X), 초기 결정립의 크기(d_{ini})등이 기록된 참조파일을 읽어들이고 식(3)을 통해 임계변형률을 계산하고 요소에서의 변형률이 계산된 임계변형률보다 커서 재결정이 시작되었다고 판단되면 식(4)와 식(6)을 통해 2차 단조시의 동적재결정된 결정립의 크기(d_{dyn2})와 비율(X_2)을 계산하고, 식(7)을 통해 최종 재결정비율(X), 재결정립의 크기(d_{dyn}), 재결정되지 않은 결정립의 크기(d_n)를 계산한다.

$$X = X_1 + X_2$$

$$d_{dyn} = (X_1 * d_{dyn1} + X_2 * d_{dyn2}) / X \quad (7)$$

$$d_n = d_{ini} \sqrt{1 - X}$$

변형률이 임계변형률보다 작은 경우에는 식(5)를 통해 성장된 결정립의 크기(D)를 계산한다. 그리고 식(8)을 통해 최종 재결정비율(X), 재결정립의 크기(d_{dyn}), 재결정되지 않은 결정립의 크기(d_n)를 계산한 후 초기결정립의 크기(d_{ini})를 계산된 성장된 결정립의 크기(D)로 대체한다.

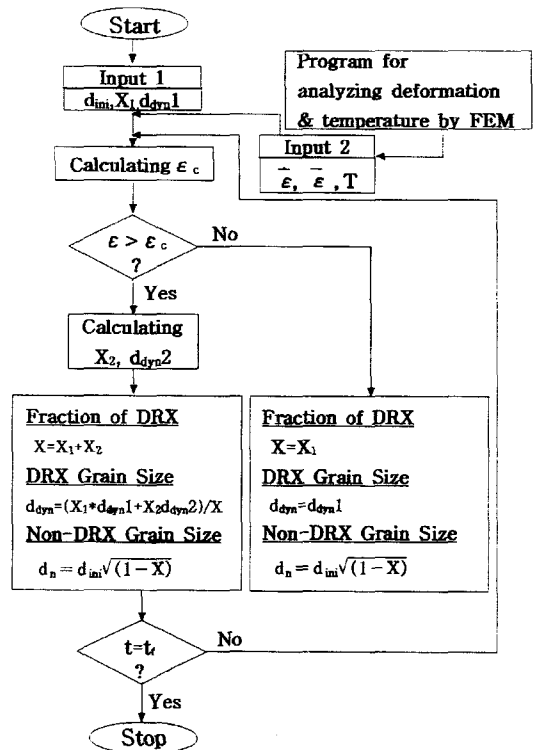


Fig. 7 Structure of subroutine for the analysis of dynamic recrystallization

$$\begin{aligned}
 X &= X_1 \\
 d_{dyn} &= d_{dyn}^1 \\
 d_u &= D \\
 d_{mi} &= D
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

위와 같은 과정을 최종변형 상태까지 계속한다. 이 알고리즘은 Fig. 7에 플로우 차트로 정리되어 있다.

4. 실험 및 해석조건

4.1 실험조건

실험은 변형시의 온도와 변형량에 의한 영향을 살펴보기 위하여 2500 ton의 스크류 프레스에서 모두 6가지의 경우(Table 1)에 대하여 982℃에서 1038℃의 초기온도 범위에서 수행되었다.

Table 1 Conditions of screw press forging

Specimen	1st Forging			2nd Forging		
	Ratio(%)	Temp.(℃)	Cooling	Ratio(%)	Temp.(℃)	Cooling
A	52	1010	FAC	24	982	FAC
B	44	1010	FAC	40	982	FAC
C	25	1010	FAC	54	982	FAC
D	52	1038	FAC	24	1010	FAC
E	44	1038	FAC	40	1010	FAC
F	25	1038	FAC	54	1010	FAC

FAC: Fan Air Cool

각 경우 모두 최종 변형량은 0.65정도에 가압도록 1차와 2차 단조로 나뉘어 수행되었으며, 초기빌렛의 크기는 140mm D × 152 mm L(5.5in D × 6in L) 이고 결정립의 크기는 150 μm였다. 6가지의 경우 모두 2.5시간씩 Table 1에 표시된 1차단조의 온도에서 예열되었으며 1차

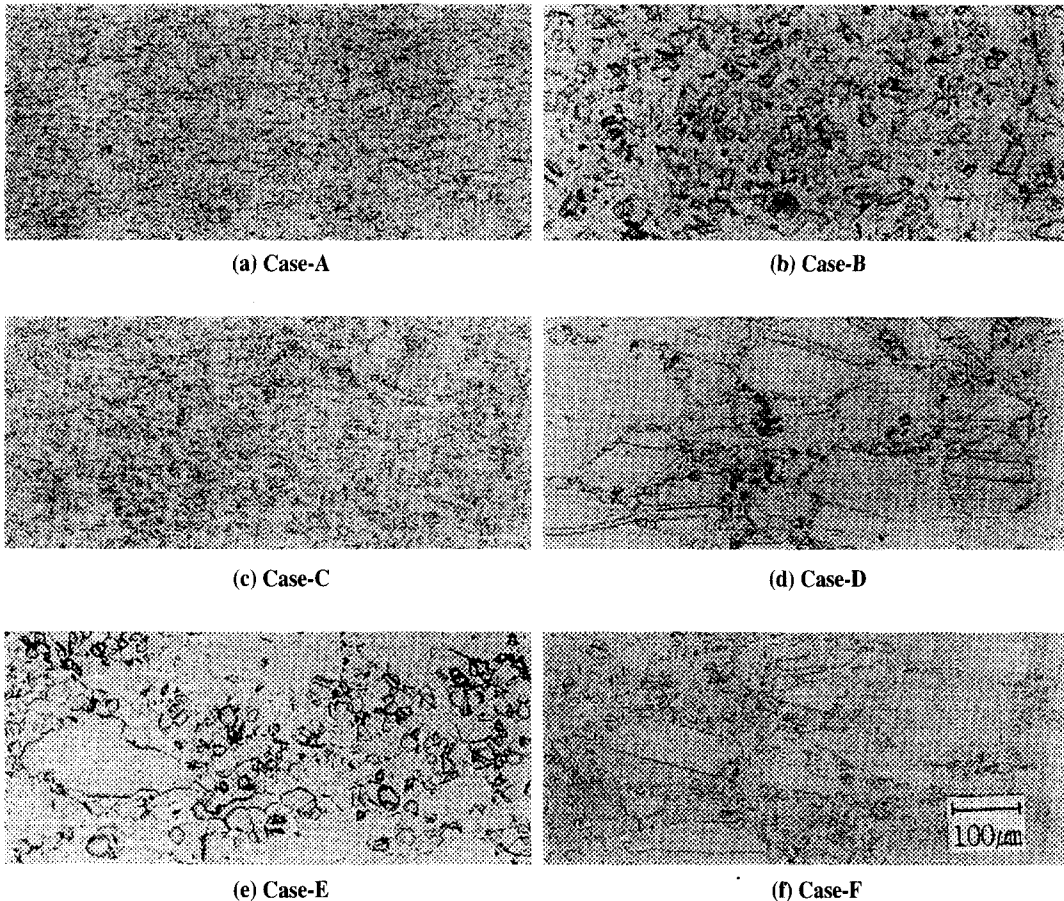


Fig. 8 Microstructure of Inconel 718 observed by optical microscope at center after 2nd forging

단조가 끝난 후에는 Table 1에 표시된 2차단조 온도로 역시 2.5시간동안 예열된 후에 최종변형 높이까지 가공되는 2차 단조를 수행했다. 2차 단조후 냉각은 팬을 이용하여 공기중에서 냉각하였다. 2차 단조후 중심부에서 관찰된 미세조직이 Fig. 8에 나타나 있다.

4.2 해석조건

해석에서 사용된 변형률에 대한 유동응력은 압축실험을 통해 얻어진 데이터들을 이용하였다. 압축실험은 앞서 설명되었듯이 927℃~1066℃의 온도 범위에 대해 5/s~0.0005/s의 변형률속도 범위에 대하여 수행되었으며, 해석시에는 얻어진 변형률과 온도를 선형보간하여 응력을 구하여 사용하였다.

해석시 초기온도와 변형량은 실험조건을 바탕으로 하여 수행하였다. 격자시스템은 대칭성을 고려하여 빌렛의 절반을 200개의 요소(elements)와 231개의 절점(nodes)으로 이루어진 축대칭 해석을 위한 초기 격자시스템을 구성하였다. 150.0 μm였던 초기 빌렛의 결정립크기는 1차 단조를 위해 1010℃에서 2.5시간동안 예열한 후에는 결정립크기가 150.9 μm으로 계산되었고 1038℃에서 예열한 후에는 293.7 μm로 계산되었다. 소재와 금형간의 마찰상수는 열간 가공이므로 0.3으로 두었고 1·2차 단조 모두 초기 다이의 속도는 400 mm/s로 해석하였다.

5. 해석결과 및 고찰

각 경우에 대해서 2차 단조후의 변형률분포, 온도분포, 재결정 비율분포, 동적재결정립의 크기분포 그리고 재결정이 되지 않은 결정립의 크기분포들을 정리하였다. 변형률, 온도, 재결정립크기, 재결정비율, 평균결정립크기등은 각 요소에 대해서 계산된 값을 나타낸 것이다.

5.1 변형률분포와 온도분포

Fig. 9와 Fig. 10에는 Case-A와 Case-F의 최종변형된 형상이 나타나 있는데 최종변형된 소재의 높이에 따라서 소재의 중심축에서 바깥쪽으로 소재의 유동이 조금씩 차이가 난다.

즉 2차 단조에서 변형이 많이 진행된 Case-F에서 Case-A보다 중심부의 소재유동이 많이 일어났음을 관찰할 수 있다. Fig. 11에 나타나 있는 Case-A의 2차 단조 후 변형률 분포도를 보면 배불림 현상이 일어난 바깥쪽(위치 1)과 다이와 접촉하고 있는 중심축부근(위치2)에

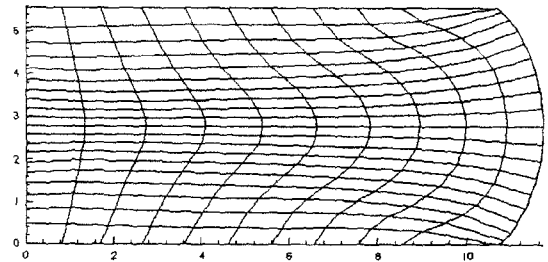


Fig. 9 Deformed mesh system of Case-A (1st:1010℃, 52%, 2nd:982℃, 24%) after 2nd forging

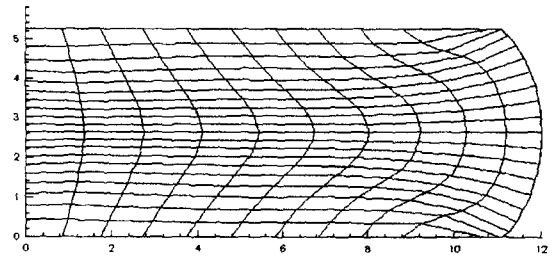


Fig. 10 Deformed mesh system of Case-F (1st:1038℃, 25%, 2nd:1010℃, 54%) after 2nd forging

서 변형률이 각각 0.19와 0.21로 변형이 가장 적게 되었고 중심축을 따라 소재의 유동이 많은 중심부쪽으로 갈수록 변형이 심해짐을 볼 수 있다. 또한 바깥쪽에서 다이와 접촉하고 있는 부분(위치8)에서도 변형이 심하게 일어나 있는데 이는 Fig. 9, Fig. 10의 변형된 격자 시스템을 통해서도 확인할 수 있다. 하지만 2차 단조시의 변형률이 작으므로 인해 전체적으로 낮은 0.2~0.3정도의 변형률을 보이고 있다. Fig. 12에 나타나 있는 CASE-F의 2차 단조 후 변형률 분포도 CASE-A와 전반적으로 비슷한 양상

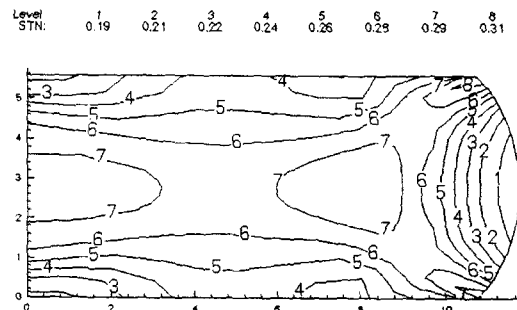


Fig. 11 Effective strain distribution of Case-A (1st:1010℃, 52%, 2nd:98℃, 24%) after 2nd forging

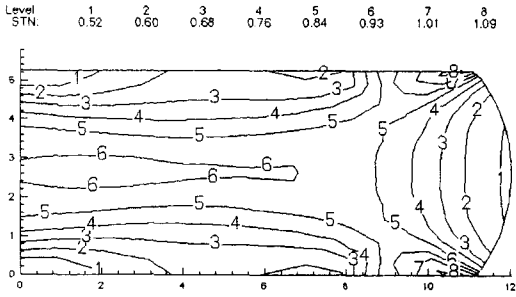


Fig. 12 Effective strain distribution of Case-F(1st:1038 ℃, 25%, 2nd:1010 ℃, 54%) after 2nd forging

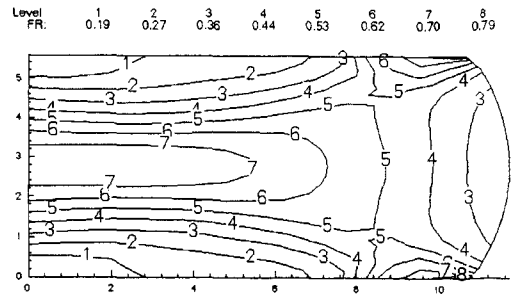


Fig. 13 Fraction of Dynamic recrystallization distribution of Case-A(1st:1010 ℃, 52%, 2nd:982 ℃, 24%) after 2nd forging

을 보이고 있지만 2차 단조시의 변형량이 많음으로 인해 0.52~1.09정도의 높은 변형률을 보였다.

5.2 동적재결정 비율분포

Fig. 13에는 Case-A의 2차 단조후 동적재결정비율 분포가 나타나 있다. 동적재결정비율은 식(6)에서 볼 수 있듯이 50%의 재결정이 이루어졌을 때의 변형률인 $\epsilon_{0.5}$ 와 소재내의 변형률에 의해 결정된다. 그러므로 일반적으로 변형률이 높은 부분에서는 재결정비율 또한 높게 나타난다. Case-A에서 재결정비율이 가장 높은 곳은 중심축 부근의 절반높이 정도의 부분(위치 7)과 다이와 접하고 있

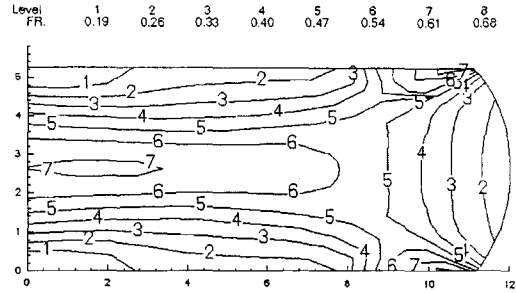
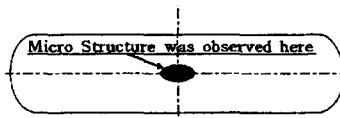


Fig. 14 Fraction of Dynamic recrystallization distribution of Case-F(1st:1038 ℃, 52%, 2nd:1010 ℃, 54%) after 2nd forging

Table 2 Comparison of microstructure of experimental data and simulation



Case	Forging conditions				DRX Grain Size (μm)		DRX Fraction
	1st Forging		2nd Forging		Exp.	Sim.	Sim.
	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Reduction (%)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Reduction (%)			
A	1010	52	982	24	25	17.63~	0.79
B	1010	44	982	40	31	13.95~	0.82
C	1010	25	982	54	15	10.71~	0.79
D	1038	52	1010	24	22	17.73~	0.69
E	1038	44	1010	40	32	14.79~	0.66
F	1038	25	1010	54	23	11.22~	0.68

는 바깥부분(위치 8)이다. 이것은 Fig. 11의 변형률이 최고치인 부분과 동일한 위치이며 변형률이 높은 부분에서는 재결정비율이 높고 변형률이 낮은 부분에서는 재결정비율 또한 낮게 나타났다. Fig. 8에 나타나 있는 Case-A의 미세조직 실험결과에는 이 부분에서는 완전재결정이 일어났음을 보이고 있다. 일반적으로 95% 이상 재결정이 일어나면 완전재결정이 되었다고 판단하는데 해석에서는 이부분에서 약 80%정도의 재결정이 일어났다는 결과를 보이고 있어 약간의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 전체적으로는 변형률 분포와 비슷하게 중심부가 변형률이 가장 높고 바깥쪽으로 갈수록 비율이 낮아지는 경향을 보이고 있다. Fig. 14에 나타나 있는 CASE-F도 CASE-A와 비슷한 양상을 보이며, 나머지 Case-B, C, D, E의 중심부의 동적재결정비율 해석결과는 Table 2에 정리되었다.

Table 2에 나타나 있는 바와 같이 Case A, B, C에서 실험과 시뮬레이션의 결과가 오차를 보이고 있는 것은 식 (6)에 나타나 있는 재결정 비율식의 모델링시 초기결정립의 크기에 대한 데이터의 부족으로 인한 현상인 것으로 생각된다. 식(6)의 $\epsilon_{0.5}$ 를 모델링할 때 고려된 초기 결정립의 크기는 53 μm 와 320 μm 의 두 가지였는데, 초기결정립의 크기에 대한 보다 많은 고려가 이루어졌다면 실험에 좀 더 가까운 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 또한 전체적으로 Case A, B, C에 비해 Case D, E, F에서 재결정 비율이 낮게 나타난 것은 D, E, F의 경우는 1차 단조시의 초기 온도가 δ 상 용융점 근처로 결정립의 성장이 많이 일어나 초기 결정립이 커진 영향이라 생각된다.

5.3 동적재결정립의 크기분포

Fig. 15와 16에 Case-A와 F의 동적재결정립 크기분포의 해석결과가 나타나 있다. 나머지 경우에 대한 해석결과

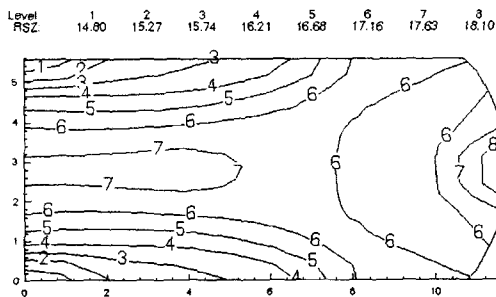


Fig. 15 Dynamically recrystallized grain size distribution of Case-A(1st:1010 $^{\circ}\text{C}$, 52%, 2nd:982 $^{\circ}\text{C}$, 24%) after 2nd forging

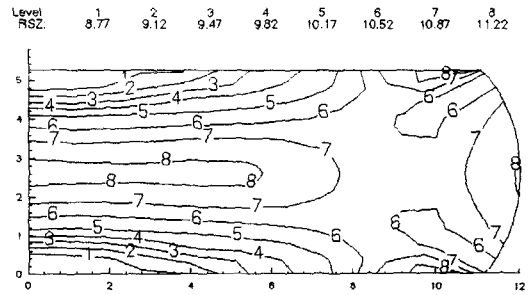


Fig. 16 Dynamically recrystallized grain size distribution of Case-F(1st:1038 $^{\circ}\text{C}$, 25%, 2nd:1010 $^{\circ}\text{C}$, 54%) after 2nd forging

들은 동적재결정비율과 함께 Table 2에 정리되었다.

중심부에서 Case-A의 재결정립의 크기는 18 μm 정도로 나타났다. 실험결과는 25 μm 정도였다. 실험에서 31 μm 정도의 재결정립크기를 보인 Case-B의 해석결과에서는 중심부에서 14 μm 정도의 재결정립 크기를 보였다. Case-C에서는 11 μm 정도의 재결정립 크기를 보이고 있는데 실험에서는 15 μm 정도로 나타났었다. 일반적으로 실험결과가 시뮬레이션의 결과들에 비해 큰 결정립을 보이고 있는데 이는 2차 단조후 냉각시 결정립들이 성장됨으로 인해 나타난 결과로 생각된다.

Case-D, Case-E, Case-F 해석결과에서는 각각 18 μm , 15 μm , 12 μm 정도의 재결정립 크기를 보이고 있는데 2차 단조후 재결정립의 성장을 고려하더라도 D와 E의 재결정립의 크기는 실험의 결과와 상당한 오차를 보이고 있다. D의 경우는 1·2차 단조의 변형량이 비슷하게 나뉘어져 정적재결정이 많이 일어난 것으로 생각되며, E의 경우는 결정립이 미세할수록 경계면의 면적이 넓어서 결정립은 많이 성장되므로(2), 미세한 결정립들이 δ 상의 용융점 이상의 온도에서 냉각되면서 많이 성장된 것으로 생각된다.

6. 결 론

이상과 같이 Inconel 718의 열간단조시 동적재결정과정 결정립의 성장에 관한 금속학적 모델링을 수립하고, 수립된 모델의 검증에 위하여 팬케익 형태의 단조를 수행한 후, 시뮬레이션의 결과와 비교하였다.

동적재결정비율은 전체적으로 1, 2차 단조 모두 δ 상의 용융점 이하의 초기 온도로 변형시킨 경우에는 해석의 재결정 비율이 실험에 비해 낮게 나타났고, 1차 단조는 δ

상의 용융점부근의 온도에서 행하고 2차 단조는 그보다 좀 낮은 온도에서 수행한 경우에서는 실험에 비해 높게 나타났는데 이는 초기 결정립 크기에 대한 데이터의 부족으로 분석된다.

동적재결정립의 크기는 전체적으로 실험의 결과보다 작게 나타났다. 실험과 해석의 오차는 정적재결정과 냉각시의 온도변화가 고려되지 않음으로 인한 것으로 분석된다.

본 연구의 결과가 Inconel 718의 열간단조시 재결정거동을 완벽하게 예측해 줄 수는 없었다. 하지만 미세조직을 고려한 공정설계시, 변형과 온도 그리고 초기결정립 등의 공정변수들이 최종성형품의 미세조직에 미치는 영향을 개략적으로나마 살펴볼 수 있었으며 이에 대한 추가적인 연구가 진행되면 보다 실제와 근접한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) T. Altan, S.I. Oh and H.L. Gegel, 1983, "Metal Forming: Fundamentals and Application", ASM series in Metal Processing.
- (2) C. M. Sellars and J. A. Whiteman, 1979, "Recrystallization and grain growth in hot rolling", Metal Science, March-April, pp. 187~194.
- (3) W. Roberts, H. Bod n and B. Ahlblom, 1979, "Dynamic recrystallization kinetics", Metal Science, March-April, pp. 195~205.
- (4) R. Srinivasan, et. al., 1993, "Computer Simulation of the Forging of Fine Grain IN-718 Alloy", Metallurgical and Materials transactions A, Vol.

- 24A, pp. 2061~2069.
- (5) G. Shen, S.L. Semiatin and R. Shivpuri, 1995, "Modeling Microstructural Development during the Forging of Waspaloy", Metallurgical and Materials transactions A, July, Vol. 26A, pp. 1795~1803.
- (6) 황상무, 장병록, 김희중, 유연철, 1994, "인바합금의 고온변형특성에 관한 연구", 대한금속학회지, Vol. 32, No. 3, pp. 306~310.
- (7) 황상현, 이성노, 유연철, 1994, "V첨가 구조용강의 압연공정 및 냉각속도 제어에 따른 결정립 미세화 효과", 대한 금속학회지, Vol. 34, No. 2, pp. 246~252.
- (8) 권오준, 이경중, 강기봉등, 1992, "탄소강의 온라인 열연 재질예측 시스템 개발", 대한금속학회지, Vol. 30, No. 11, pp. 1335~1343.
- (9) 광우진, 이경중, 권오준, 황상무, 1996, "열간단조공정중 강의 재결정거동 유한요소해석", 한국소성가공학회지, 제5권, 제4호, pp. 305~319.
- (10) 박종진등, 1996, "IN-718과 Ti-64 디스크단조의 유한요소해석", 한국기계연구원 연구보고서.
- (11) K. Bathe, 1982, "Finite element procedures in engineering analysis", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- (12) J.N. Reddy, 1984, "An introduction to the finite element method", McGraw-Hill, New York.
- (13) O.C. Zienkiewicz, 1977, "The Finite Elements Method", McGraw-Hill, New-York.
- (14) C.C. Chen and S. Kobayashi, 1978, "Rigid-plastic finite element analysis of ring compression", Application of Numerical Method to Forming Process, ASME, AMD, Vol. 28.
- (15) S. Kobayashi, S.I. Oh and T. Altan, 1989, "Metal Forming and the Finite-Element Method", Oxford University Press.