

Inconel 718의 열간단조시 동적 재결정 거동 예측

최민식*, 강범수**, 엄종택***, 박노광***

* 부산대학교 항공우주공학과, ** 부산대학교 ERC/NSDM, *** 한국기계연구원

Prediction of the Behavior of Dynamic Recrystallization in Inconel 718 during Hot Forging

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

* Dept. of Aerospace Eng., PNU, ** ERC/NSDM, PNU *** Korea Institute of Machinery and Materials

Abstract

This paper presents the prediction of microstructure of Inconel 718 disk forgings. The experiments are carried out to examine the recrystallization ratio and grain growth in the forgings. In the experiments, cylindrical billets are forged by two operations with variations of forging temperature and reduction ratio of deformation. Also the finite element program, developed here for the prediction, is used for the analysis, and the results are compared with the experimental ones. It is noted that the comparison appears in sound agreement.

1. 서 론

지금까지 재료의 가공온도, 변형양상에 따른 재결정 및 결정립의 성장에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔으며 여러재료에 대한 금속학적 수식화와 함께 기계적 성질과의 관계에 관한 연구결과들이 얻어졌다. Sellars등은 저탄소강의 재결정 및 결정립의 성장을 온도와 변형속도, 시간의 함수로 고려하고 평균 롤링에 적용하였으며^[1], Roberts등은 오스테나이트 스테인레스강의 동적재결정을 고온에서의 응력/변형률의 관계와 금속용 현미경을 이용한 미세조직의 측정을 통하여 연구하였다^[2]. 또한 GangShu등은 Waspaloy의 고온변형시 동적재결정과 결정립 성장에 관한 모델을 수립하고 유한요소 시뮬레이션의 결과와 비교하였다^[3]. 또한 국내에서는곽우진등이 강의 재결정거동에 관한 여러 작업자들의 연구결과를 소개하고 시뮬레이션을 통하여 얻어진 결과들을 비교하였다^[4].

터빈디스크는 고온에서 고속으로 회전하는 부품으로서 신뢰도가 높아야 하므로, 높은 강도를 유지하면서 고온, 진동, 산화, 부식 등에 견딜 수 있는 고온합금 재료를 사용하게 되는데 Inconel 718은 터빈디스크에 가장 많이 사용되는 소재로서 미세조직관찰, 경도시험, 인장시험, 파괴실험, 피로실험등을 거쳐 적절한 소재라는 것이 판명되었다. 엔진 디스크의 경우 전체적으로 피로파괴에 대한 저항이 높아야 하며, 보어(bore)부는 비교적 저온에서 높은 응력을 받으므로 인성이 높아야 하고, 림(rim)부, 특히 블레이드와의 결합부에서는 고온에서 높은 응력을 받으므로 크리프(creep)에 대한 저항이 높아야 한다.^[5] 따라서 열간단조로 터빈 디스크와 같은 제품의 공정설계시에는 미세조직에 대한 연구가 필수적이다.

본 연구의 최종목표는 Inconel 718의 터빈디스크 단조품의 미세조직과 이에 따른 최종제품의 기계적 성질을 예측하는데 있다. 본 논문에서는 이를 위한 예비작업으로 실험을 통해 수립된 Inconel 718의 재결정, 결정립 성장 및 재결정비율등의 금속학적 모델을 이용하여 원통형의 초기빌렛을 가공온도와 변형 정도를 변화시켜 2단계의 단조를 통해 pancake형태로 가공했을 때 동적 재결정으로 인한 결정립 크기의 변화를 예측하는 유한요소 해석을 수행하고 이를 실험의 결과와 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 유한요소 수식화

본 연구에서는 강-점소성 유한요소법의 확장인 강-점소성(rigid-viscoplastic)유한요소법을 사용하였으며, 이의 수식화는 이미 많은 문헌에 잘 알려져 있다^[6-8].

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

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2.1)$$

여기서, $\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_{ij} \sigma_{ij})^{1/2}$, $\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$, σ_{ij} 는 편차응력, F_i 는 표면력, u_i 는 속도성분, $\dot{\epsilon}_{ij}$

는 변형률속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률속도이다.

식(2.1)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. 압축실험은 5, 0.5, 0.05, 0.005, 0.0005/s의 변형률속도에 대하여 927, 954, 982, 1010, 1038, 1066의 온도범위에서 수행되었다. Fig.1에는 이중 5/s의 변형률 속도에 대한 응력-변형률 곡선이 나타나 있다.

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.

$$\Delta T = \frac{0.9}{\rho c} \int_0^{\epsilon_p} \sigma d\epsilon_p \quad (2.2)$$

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.

2.2 재결정거동

재결정 거동은 크게 볼 때 재결정 임계변형률(ϵ_c)과 Zener-Hollomon변수(Z)에 의존한다. 재결정 임계변형률은 동적 재결정이 일어나기 시작하는 변형률의 크기를 나타내는데, $\epsilon > \epsilon_c$ 일 때 무변형의 새로운 핵의 생성이 시작된다. 본 연구에서는 Fig. 2에 나타나 있는 압축실험의 결과를 이용하여 임계변형률을 초기결정립크기, Z 값, 변형률속도의 함수로 고려하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= 8.87 \times 10^{-4} \times d_0^{0.200} \times Z^{0.099} & \text{when } \dot{\epsilon} \geq 0.05/\epsilon \\ \epsilon_c &= 9.57 \times 10^{-6} \times d_0^{0.196} \times Z^{0.167} & \text{when } \dot{\epsilon} \leq 0.05/\epsilon \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서, d_0 는 초기결정립 크기, $Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$, $Q = 447.906\text{KJ/mol}$, $R = 8.314\text{J/mol}$ 이다.

식(18)을 통해서 각 요소에서 결정되는 임계변형률과 해석을 통해 얻어진 변형률을 비교하여 재결정 여부를 판단하고 재결정이 시작되면 생성된 결정립의 크기를 계산하고 그렇지 않은 경우에는 성장된 결정립의 크기를 계산하는 알고리즘을 이용하였다. 재결정된 결정립의 크기는 실험결과를 이용하여 Z 의 함수로 하여 (2.4)식과 같으며 결정립 성장식은 Sellars의 모델을 참고로 만들어 졌으며 (2.5)식과 같다.

$$d_{dyn} = 1300.8071Z^{-0.1243} \quad (2.4)$$

$$D^2 = D_0^2 + 1.056 \times 10^3 t^{0.14215} \exp(-15.630_{\text{KJ}}/RT) \quad \text{when } T \leq 1038^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

$$D^2 = D_0^2 + 6.904 \times 10^6 t^{0.08683} \exp(-51.936_{\text{KJ}}/RT) \quad \text{when } T \geq 1380^\circ\text{C}$$

여기서, d_{dyn} 는 재결정된 결정립의 크기, D 는 성장된 결정립의 크기, t 는 유지시간(hour), T 는 온도[$=T(\text{K})$], D_0 는 재결정된 결정립 또는 초기 결정립의 크기이다.

또한 본 연구에서는 재결정이 진행되면서 기존에 존재하고 있던 결정립주변에서 일어난 재결정의 비율을 계산하여 평균결정립을 결정하는 알고리즘을 사용하였는데 재결정비율은 (2.6)식을 통해 계산된다.

$$\begin{aligned} X_{dyn} &= 1 - \exp\left(-\ln 2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{0.5}}\right)^{1.68}\right) & \text{when } T \leq 1038^\circ\text{C} \\ \text{여기서, } \epsilon_{0.5} &= 0.037 \times d_0^{0.2} \times Z^{0.058} \\ X_{dyn} &= 1 - \exp\left(-\ln 2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{0.5}}\right)^{1.9}\right) & \text{when } T \geq 1038^\circ\text{C} \\ \text{여기서, } \epsilon_{0.5} &= 0.029 \times d_0^{0.2} \times Z^{0.058} \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.6 평균 재결정립크기

재결정이 일어나기 직전까지 성장된 결정립이 원이라고 가정하고 재결정된 결정립들이 그 원의 내부를 가장자리로부터 채워나가기 시작한다고 하면 평균 결정립크기는 (2.7)식과 같이 계산되어 질 수 있다.

$$d_{mean} = \sqrt{\frac{D^2}{n+1}} \quad (2.7)$$

여기서, n 은 재결정된 결정립의 개수 ($n = X(D/d_{dyn})^2$), X 는 재결정 비율, D 는 재결정이 일어나기 직전까지 성장된 결정립의 지름(μm)이다.

이상과 같은 모델링을 통해서 수립된 수식들을 재결정거동 해석을 위한 강점소성 유한요소 프로그램에 코딩하고 해석을 수행하였다.

3. 해석 조건

사용된 해석조건은 한국기계연구원에서 수행된 실험과 가능하면 동일하도록 하였다. 실험은 2500 ton의 스크류 프레스에서 모두 6가지의 경우(Table 1)에 대해서 982°C에서 1038°C의 초기온도 범위에서 수행되었는데 최종 변형률이 0.65에 가깝도록 1차와 2차 단조로 나누어 수행되었다.

초기빌렛의 크기는 5.5in D × 6in L 이고 6가지의 경우 모두 2.5시간씩 Table 1에 표시된 1차단조의 온도에서 예열되었으며 1차단조가 끝난 후에는 Table 1에 표시된 2차단조에 표시된 온도로 역시 2.5시간동안 예열된 후에 2차 단조를 수행했다.

초기 격자시스템은 대칭성을 고려하여 빌렛단면의 절반만을 구성했는데 200개의 요소(elements)와 231개의 절점(nodes)로 이루어져 있다. 초기 빌렛의 결정립크기는 150 μ m이고 1차 단조를 위해 1010°C에서 2.5시간동안 예열한 후의 결정립크기는 150.9236 μ m으로 계산되었고 1038°C에서 예열한 후의 결정립크기는 263.6913 μ m로 계산되었다.

소재와 금형간의 마찰상수는 열간가공이므로 0.3으로 두었다^[9].

4. 해석 결과 및 고찰

이상과 같은 조건으로 시뮬레이션을 수행한 결과는 다음과 같다.

Fig. 3에는 변형되어 가는 빌렛의 형상이 나타나 있다. 여기서 center라고 표시된 부분에서 평균 재결정립 크기를 실험을 통해 측정하였다. Fig. 4에는 각 경우에서의 평균결정립 크기가 나타나 있는데 A의 경우는 약13~20 μ m정도의 분포를 보이고 있으며 B는 10~18 μ m, C는 10~20 μ m, D는 13~21 μ m, E는 10~17 μ m, F는 11~23 μ m정도의 분포를 보이고 있다. Fig. 5의 광학적 미세조직 측정결과와 비교해 보면 미세조직의 양상이 A, B, C의 경우에는서는 완전재결정이 일어나고 D, E, F에서는 부분재결정이 일어나 재결정 양상이 두 가지로 나뉘어 짐을 볼 수 있다. 그래서 해석결과와의 비교도 이 두 가지의 양상에 따라 이루어져야 한다. A, B, C의 해석결과에서는 C경우에서 평균재결정립의 크기가 가장 미세하고 그 영역도 가장 넓음을 볼 수 있다. 이는 광학적 미세조직 분석의 결과와 일치한다. D, E, F의 해석결과에서는 E의 경우에서 평균재결정립의 크기가 가장 미세하고 고른 분포를 보이고 있다.

이상과 같은 해석결과를 통해 내린 결론은 다음과 같다.

- 1) 같은 온도 범위에서는 변형이 많이 되면 재결정비율이 높아져 고른 미세조직을 보인다.
- 2) A, B, C의 경우에는서는 C의 경우가 가장 고른 미세조직분포를 보인다.
- 3) D, E, F의 경우에는서는 E의 경우가 가장 고른 미세조직분포를 보인다.

참 고 문 헌

1. C. M. Sellars and J. A. Whiteman, 1979, "Recrystallization and grain growth in hot rolling", Metal Science, March-April, pp. 187~194
2. W. Roberts, H. Bodén and B. Ahlblom, 1979, "Dynamic recrystallization kinetics", Metal Science, Marc-april, pp. 195~205
3. GANGSHU SHEN, S.L. SEMIATIN, and RAJIV SHIVPURI, 1995, "Modeling Microstructural Development during the Forging of Waspaloy", METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, Vol. 26A, pp. 1795~1803
4. 박우진, 이경중, 권오준, 황상무, 1996, "열간단조공정중 강의 재결정거동 유한요소해석", 한국소성가공학회지, 제5권, 제4호, pp. 305~319
5. 박종진등, 한국기계연구원 연구보고서, "IN-718과 Ti-64 디스크단조의 유한요소해석", 1996
6. K. Bathe, "Finite element procedures in engineering analysis", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982
7. J.N. Reddy, "An introduction to the finite element method", McGraw-Hill, New York, 1984
8. O.C. Zenkiewicz, 1977, "The finite element method", McGraw-Hill, New-York
9. S. Kobayashi, S.I. Oh and T. Altan, 1989, "Metal Forming and the Finite-Element Method", Oxford University Press

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

Table 1 Forging Conditions of simple upsetting

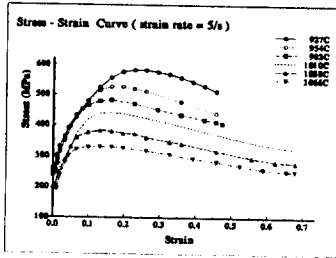
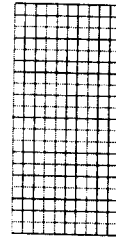


Fig.1 Stress-Strain Curve ($\dot{\epsilon}=5/s$)

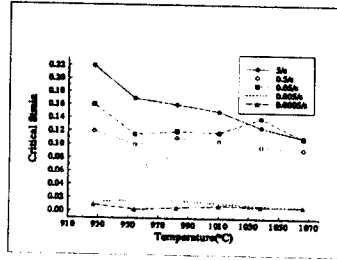


Fig.2 Critical Strain vs Temperature at given strain rate

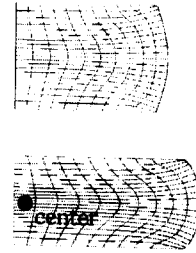
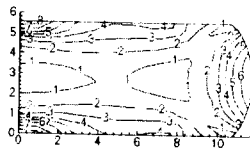
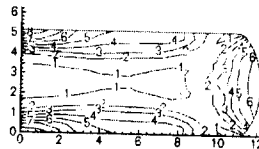


Fig.3 Deformed Shapes of billet after 1st and 2nd forging



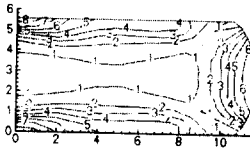
a) Case A



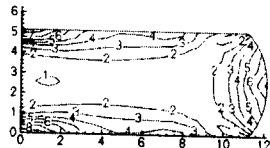
b) Case B



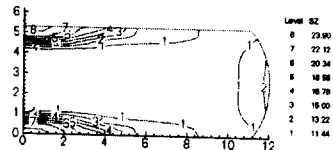
c) Case C



d) Case D

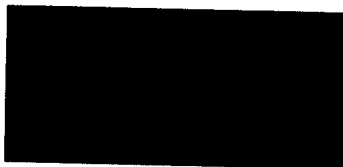


e) Case E

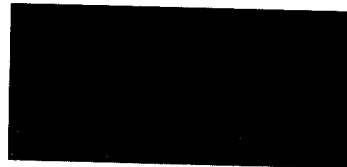


f) Case F

Fig. 4 Mean Grain Size Distributions after 2nd Forging at Completely Deformed Stage



a) Case A



b) Case B



c) Case C



d) Case D



e) Case E



f) Case F

Fig. 5 Optical Microstructures of Forged Inconel 718 pancakes (at center)