

해머 단조된 Alloy 718 디스크의 결정립 분포 해석

염종택* · 박노광*

(1997년 6월 26일 접수)

Assessment of Grain Size Distribution in a Hammer-Forged Alloy 718 Disk

Jong Taek Yum and Nho Kwang Park

Abstract

Hammer forging was employed for Alloy 718 disk. The change in grain size during hot forging depends very much on dynamic recrystallization. The final grain size depends especially on the critical strain(ϵ_c) for dynamic recrystallization and Zener - Holloman parameter(Z). In this study, the critical strain(ϵ_c), the strain for 50 pct. recrystallization($\epsilon_{0.5}$) and fraction of dynamic recrystallization (X_{dyn}) were measured by compression tests. FE simulation was also carried out to predict the evolution of microstructure. The strain, strain rate and temperature distribution predicted by forging simulation can be effectively used to predict the distribution of grain sizes in the forged workpiece. The present model predictions showed an excellent agreement with the microstructural evolution of hammer-forged Alloy 718 disks.

Key Words : Alloy 718 Disk, Hammer Forging, Recrystallization, Critical Strain, Zener-Holloman Parameter, Model Predictions

1. 서론

1960년대초 Eiselstein에 의해 개발된 Alloy 718은 650℃까지 기계적 특성이 매우 우수하고 여타 초내열 합금에 비해 단조성이 양호하며, 고가의 Co를 사용하지 않고 Fe를 약 20% 함유하므로 가격이 저렴한 이점 때문에 단조품으로 가스터빈의 고온 rotating part(터빈 디스크, 압축기 디스크, spacer, 압축기 블레이드 등)와 stationary part(볼트, fastener, frame 등)에 널리 사용되고 있다.^(1,2) 이 합금은 주로 항공기 가스터빈의 소재로 사

용되고 있으며, 특히 가스터빈 소재중 터빈 디스크 제조에 다량 이용된다. 터빈디스크는 엔진부품중 가장 안정성이 요구되는 부품으로 터빈 블레이드가 부착되는 rim부와 중심부인 bore부로 나누어진다. rim부는 작동시 블레이드의 pull stress에 의한 radial stress를 받고, bore부는 회전 때 따른 강한 tangential stress를 추가로 받게 된다.⁽³⁾ 따라서 디스크의 각부위별 미세조직을 예측하는 것은 궁극적으로 수명예측과 기계적 특성을 예측할 수 있기 때문에 상당한 중요성을 가진다. 특히 Alloy 718의 경우 미세조직 중 결정립 분포에 따라 기계적 성질이 크게 좌우되며

* 한국기계연구원 재료기술 연구부

로 그들의 해석이 주로 연구되고 있다.^(4,5,6)

열간성형시 결정립크기의 변화는 단조시 혹은 단조후의 동적, 정적재결정 (dynamic/static recrystallization)과 상당한 관련성을 갖는다. 즉 재결정 발생여부에 따라 미세조직의 변화를 가져오며, 소성변형 중 발생하는 재결정 양상은 소성변형조건 (변형속도, 변형률, 온도등)에 따라 주로 결정된다.^(7,8) 본 연구에서는 Alloy 718의 열간성형시 재결정 거동을 알아보고, 강소성 유한요소해석 (DEFORM-2 상용code)을 통한 열간단조된 디스크의 부위별 결정립 분포를 해석하고자 하였다.

2. 본 문

2.1 원소재 관찰 및 실험방법

본 연구에서 사용된 원소재는 Teledyne Allvac에서 제조된 디스크용 Alloy 718로 이 합금의 조성은 Table 1에 나타내었다. 빌렛의 평균 결정립 크기는 ASTM5-6(50-60 μm)로 γ 기지에 미세한 γ' 및 γ'' 상이 석출되어 있었으며, δ 상이 입계에 석출되어 있는 것을 관찰할 수 있다.(Fig. 1 참조)

Alloy 718의 재결정 거동을 알아보기 위해서 열간 압축 시험을 수행하였다. 이때 시편은 직경 8 mm×길이 12 mm으로 제작하였고, Thermacmaster-Z 장비를 이용하여 10^{-3} torr의 진공분위기에서 유도가열되었다. 또한 시험



Fig. 1 Microstructure of the initial billet.

편의 내부까지 균일한 온도분포를 이루게 하기 위해서 압축온도 도달 후 5분간 유지하였다. 압축조건은 927~1066℃의 온도구간과 $5 \sim 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 의 변형속도구간에서 진변형률 0.7까지 압축을 행하였다. 또한 변형시의 동적재결정을 알아보기 위해서 982℃, 1020℃, 1066℃의 온도조건과 1 s^{-1} , 0.1 s^{-1} , 0.01 s^{-1} 의 변형속도조건에서 진변형률을 각각 0.1, 0.3, 0.5, 0.8로 변화시켜 그들의 미세조직관찰과 이미지 분석기를 이용하여 재결정률 (X_{dyn})을 측정하였다. 초기 빌렛은 직경 140 mm×길이 152 mm의 크기를 준비하였고, 5톤 해머단조기를 이용하여 1020℃에서 열간단조하였다. 빌렛의 평균결정립 크기는 ASTM5~6(50~60 μm)로 표면과 중심이 비교적 균일한 빌렛을 이용하였다. 단조는 2단계로 수행되었고, 1차단조의 경우는 중심부의 균형을 맞추기 위한 단조공정으로 상부금형은 평다이를 이용하였으며, 단조온도는 1020℃이고 단조비는 5% 이내로 하였다. 또한 2차 단조의 경우 다시 1020℃로 가열하여 최종단조품의 형상까지 (60%변형) 단조되었다. 이들의 각 부위별 결정립 분포를 해석하기 위해서 DEFORM-2 상용코드를 통한 비등온 강소성 유한요소해석(nonisothermal rigid plastic finite element analysis)을 이용하였다.

2.2 Alloy 718의 재결정 거동

일반적으로 냉간성형과는 달리 열간성형의 경우 변형으로 인한 불안정한 상태의 내부에너지가 새로운 결정립을 생성하면서 안정한 상태로 전이되는 재결정거동을 거치게 되며, 이것은 미세조직의 변화에 상당한 영향을 미친다. 이러한 재결정거동 중 본연구에서는 단조공정중에 발생하는 동적재결정에 의한 결정립 분포를 예측하고자 하였으며, 동적재결정에 비해 상대적으로 결정립분포 변화에 큰 영향을 미치지 못하는 빠른 냉각중에 발생하는 준동적재결정(matadynamic recrystallization)에 대한 고려는 이루어지지 않았다.

Fig. 2는 압축시험에서 얻어진 진변형률과 진응력의 관계 그래프를 여러 온도와 변형속도에 따라 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical composition of Alloy 718(wt.%)

C	S	Mn	Si	Cr	Mo	Co	Ti	Al	B	Fe
0.027	0.0005	0.06	0.05	18.03	2.87	0.34	0.96	0.47	0.04	17.81
Cu	Ni	F	Nb+Ta	others						
0.05	Bal.	0.004	5.38	-						

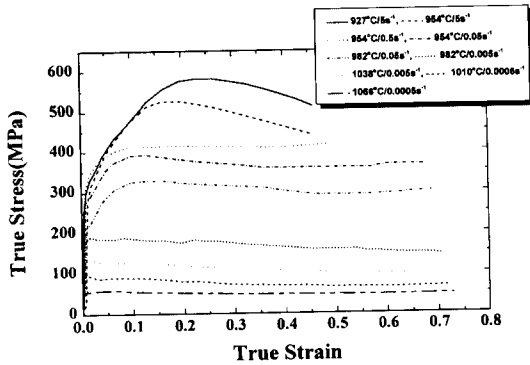


Fig. 2 Plots of compressive true stress and true strain of Alloy 718

유동곡선을 살펴보면, 초기의 단계는 가공경화에 의한 응력상승이 급격히 일어나며 그 이후 기울기가 완만해지다가 피크응력에 이른 후 가공연화가 뚜렷이 나타나는 전형적인 유동곡선을 나타낸다. 시험편에 대한 마크로 관찰 및 미세조직 관찰로부터 국부 소성변형과 같은 특기 사항이 발견되지 않는 것으로 미루어 앞서 언급한 가공연화 양상은 조직의 재결정에 기인하는 것으로 짐작할 수 있다. Fig. 2는 또한 여러 온도와 변형속도에서 피크응력에 대응하는 변형률 (ϵ_{max})의 변화를 나타내며, 온도가 낮고 변형속도가 높은 조건에서 ϵ_{max} 이 커지는 경향을 나타내고 있다.

단조공정중에 조직의 변화는 동적재결정에 의해서 큰 영향을 받으며, 동적재결정이 발생하기 시작하는 임계변형량 (ϵ_c)과 재결정된 결정립 크기를 결정하는 Zener-Holloman 변수 ($Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$)에 크게 의존한다. 본 연구에서는 압축시험에서 얻어진 유동곡선을 토대로 실제 단조가 빠른 변형속도에서 진행됨을 감안하여 변형속도가 $0.01s^{-1}$ 이상인 조건에서 strain hardening rate vs. stress의 curve를 통해 새로운 무변형핵의 생성으로 인하여 응력이 급격히 감소하는 변곡점 부근에 해당하는 변형률을 임계변형률로 정의하면 초기결정립 크기와 Zener-Holloman 변수에 따른 임계변형량을 다음식에 의해 얻을 수 있었다.

$$\epsilon_c = 8.87 \times 10^{-4} \cdot d_0^{0.2} \cdot Z^{0.099} \text{ when } \dot{\epsilon} \geq 0.01s^{-1} \quad (1)$$

또한 Alloy 718의 결정입계에 석출되는 δ 상의 영향을 고려하기 위해 δ 상 용융점(1010~1038℃)을 기준으로

그 이상과 이하에서의 재결정률 관계식을 유도하였고 다음과 같은 식으로 표현하였다.

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

$$\epsilon_{0.5} = 0.037 \times d_v^{0.2} \times Z^{0.058}$$

$$X_{dn} = 1 - \exp(-\ln 2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{0.5}}\right)^{1.9}) \text{ when } T \geq 1038^\circ C \quad (3)$$

$$\epsilon_{0.5} = 0.029 \times d_v^{0.2} \times Z^{0.058}$$

(1)~(3)의 관계식을 통해 알 수 있는 바는 주어진 시험 범위에서 Z 및 d_0 값이 커짐에 따라 임계변형량 (ϵ_c)도 커지는 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 결정립이 작을수록 온도가 높고 변형속도가 느릴수록, 임계변형량 (ϵ_c)이 낮아져 재결정이 더욱 빨리 일어남을 의미한다. 동적 재결정에 의한 결정립크기는 Z값에 의존하며, 여러 문헌^(9,10)에서 제시된 동적재결정된 결정립크기에 관한 모델을 참고로 본 연구에서 수행한 압축시험을 통해 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$d_{dn} = 1.301 \times 10^3 \cdot Z^{-0.1243} \quad (4)$$

(4) 관계식은 결정립크기가 $Z^{0.12}$ 에 반비례함을 나타내며, 이것은 변형속도가 높고 온도가 낮은 조건에서 결정립크기가 미세해지는 것을 의미한다. 그러나 이러한 조건에서는 임계변형률이 높아지기 때문에 재결정이 더 많은 변형조건에서 일어나 재결정률이 낮아짐을 압축시험결과에서 알 수 있었다.

재결정 관계식을 통해 Alloy 718의 단조공정시의 평균 결정립 크기는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$D_{AV} = D_{unrex} \cdot (1 - V_f) + D_{rex} \cdot V_f \quad (5)$$

여기서 D_{unrex} 는 초기결정립 또는 결정립 성장된 결정립 크기, D_{rex} 는 재결정된 결정립 크기이며, V_f 는 재결정된 결정립의 부피분율이다.

2.3 유한요소해석에 의한 디스크 단조 해석

해머에 의한 단조는 가동부분의 낙하에 의한 운동에너지를 이용하여 소재를 타격하는 것으로, 운동에너지 E는 $E = 1/2 \cdot m \cdot v^2$ 으로 표현된다. 타격이 계속 진행됨에 따라 에너지 손실을 가져오게 되는데 이때의 시간당 변형

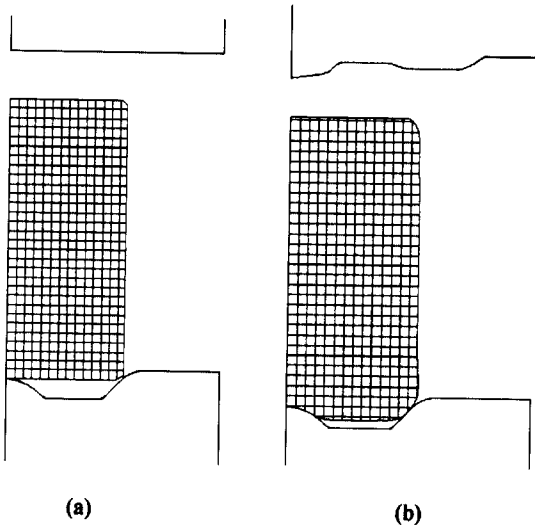


Fig. 3 Initial FEM mesh (a) first forging (b) second forging

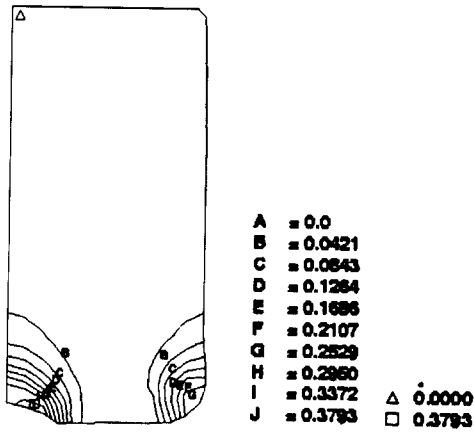


Fig. 4 Predicted strain distributions by FEM simulation for first forging

에 대한 에너지 손실량은 "(하중×타격)/효과"로 계산된다. Fig. 3은 1차와 2차의 초기 단조 model을 나타낸 것으로 해석은 모두 좌우 축대칭으로 가정하였으며, 실제 해머의 높이를 고려하여 초기에 상부금형과 빌렛이 서로 떨어져 있는 상태로 해석되었다. Fig. 4는 1차단조 후의 단조품의 변형을 분포를 나타낸 것으로 하부의 모서리 부분에 변형이 집중되어 있을뿐 전체 빌렛의 변형은 없는 것으로 해석되었다. 이러한 해석결과로 인하여 2차단조 전

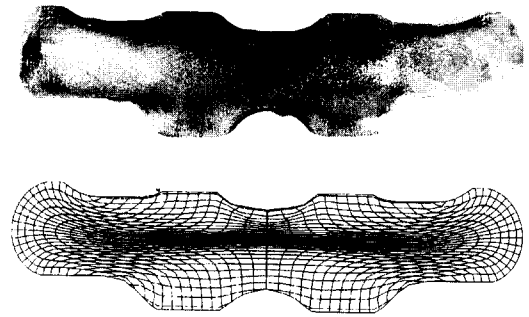


Fig. 5 Experimental and simulated material flow in a finish-forged Alloy 718 Disk

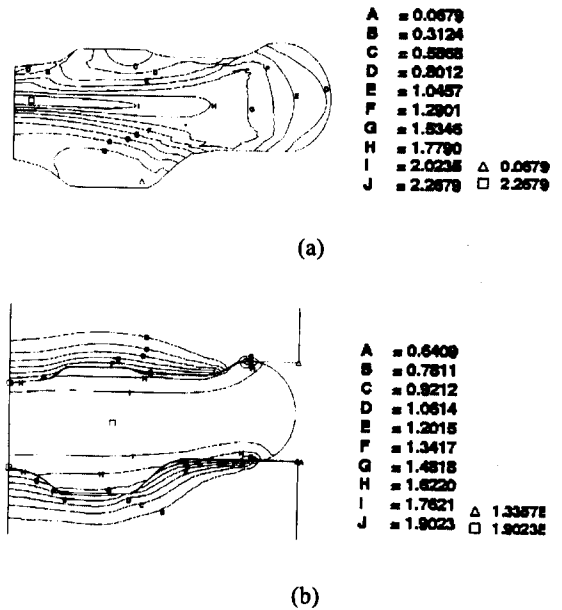


Fig. 6 Predicted strain (a) and temperature distributions (unit: $\times 10^3$ °F) (b) for final forged Alloy 718 disk

1020℃의 재가열에 의한 정적재결정의 영향이 크게 미치지 못할 것으로 생각되어 본 연구에서는 정적재결정에 의한 결정립분포의 영향은 고려하지 않았으며, 열처리시 미세조직의 변화는 차후에 연구될 것이다.

Fig. 5는 최종단조품의 유한요소해석에 의해서 얻어진 flow net과 실제 단조된 디스크의 metal flow를 비교 분석한 것으로 실제의 변형형태와 해석결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

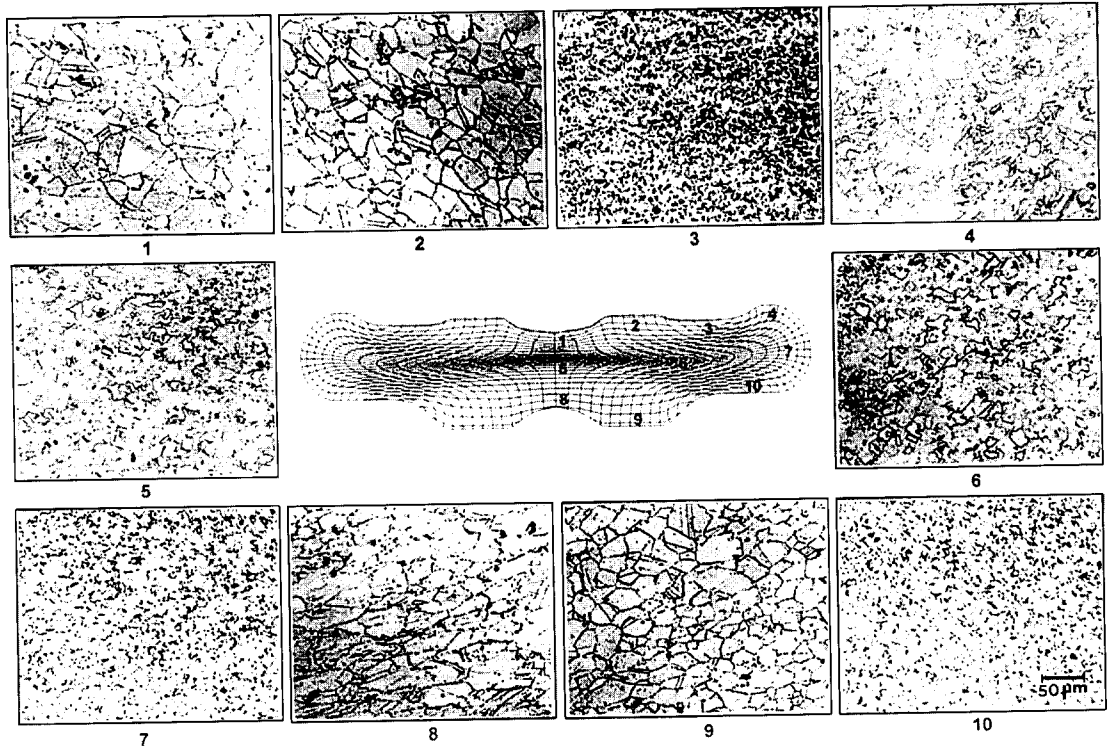


Fig. 7 Microstructures observed at different locations of forged Alloy 718 disk and distorted FEM mesh at the final forging

Fig. 6은 최종단조된 디스크의 변형률 분포와 온도분포를 해석한 결과를 나타낸 것이다. 변형률 분포는 소재의 중간부위(□부근)를 중심으로 외곽으로 갈수록 변형률이 감소하는 것을 알 수 있으며, 소재의 중심부가 2.27 정도로 가장 높은 반면 하부금형과 접촉되어 있는 △부분은 0.07로 가장 낮게 나타났다. 온도분포의 경우 표면부는 금형과 소재의 열전달로 인하여 표면부는 최고 140℃ 정도의 온도하강을 나타냈으며, 중심부는 변형시 발열로 인해 20℃ 정도의 온도상승이 나타났다.

2.4 디스크의 부위별 결정립 분포 해석

Fig. 7은 열간단조된 디스크의 각부위별 미세조직과 해석에서 얻어진 단조품의 변형을 나타낸 것이다. 최종단조품의 각부위별 조직관찰에서 금형과 접하고 있는 1,2,3,4,8,9,10의 부위에서 1,2,9의 경우는 초기 결정립(~55 μm)과 비슷한 결정립을 나타내고 있으며, 재결정에 의한 결정립 미세화는 관찰되지 않는다. 4,8 부위는 변형에 의해 연신된 결정립과 소량의 재결정된 결정립이 관찰된다. 반면에 3,10 부위의 경우 결정립 미세화가 관찰되

며 중심부인 5,6,7부위의 경우 전체적으로 재결정에 의한 미세한 결정립을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 단조후의 각 부위별 미세조직의 차이는 단조중에 변화하는 각부위별 변형률과 변형속도 및 온도등과 밀접한 관계가 있을 것으로 생각되며, 단조중에 변화하는 변수들을 유한요소해석에 의해 해석함으로써 이러한 미세조직의 변화를 예측할 수 있을 것이다.

Fig. 8은 유한요소해석에서 얻어진 결과로서 단조시간에 따른 각 부위의 온도와 유효변형률에 대한 관계를 나타낸 것이다. 또한 압축시험에서 얻어진 동적재결정 발생시점인 임계변형률과 50% 재결정이 완료된 변형률을 그래프상에 나타내었다. 이들의 결과와 Fig. 7의 미세조직사진과 비교를 통해 결정립분포를 해석하였다. 시편의 표면부인 1,2,3,4,8,9,10부위중 1,2,9부위의 경우 아직 재결정이 일어나지 않은 상태로 초기 결정립크기를 유지하면서 소성변형에 의해서 결정립이 약간 연신되는 양상을 보이고 있다. 8부위의 경우 임계변형선을 지나 변형이 진행되고는 있으나 50% 재결정선에 미치지 못하였기 때문에 변형에 의해 연신된 초기 결정립사이로 소량의 재

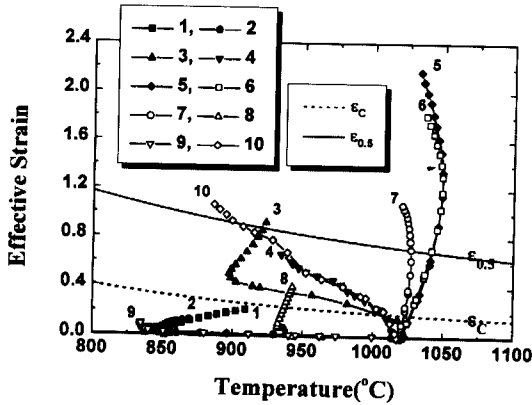


Fig. 8 Variation of effective strain and temperature at different locations during final forging

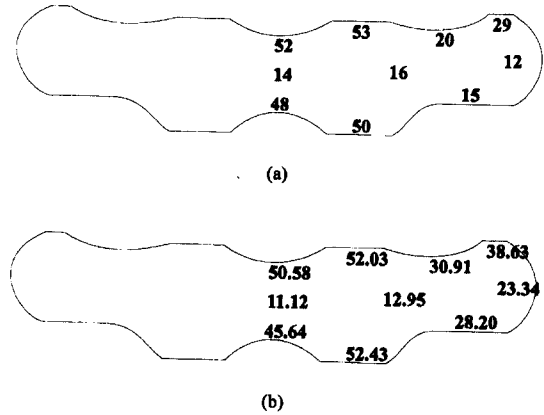


Fig. 10 Grain size distribution for hammer forging obtained from (a) experiment and (b) model prediction

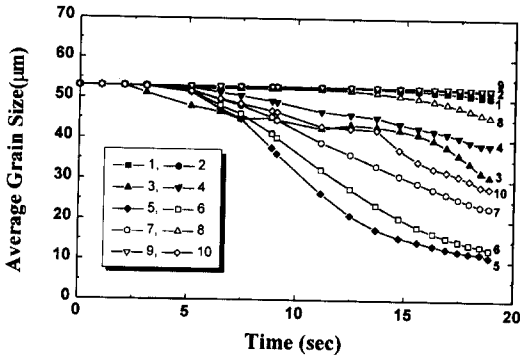


Fig. 9 Variation of grain size with time at different locations during hammer forging

결정된 미세한 결정립이 관찰되고 있다. 8부위와 같이 재결정이 발생하는 임계변형률의 범위를 넘기는 했지만 50% 재결정선을 넘지 못한 4부위의 경우도 초기결정립의 연신된 형태와 일부 재결정된 결정립이 관찰되고 있으나 최종 단조시의 변형이 8부위 (~0.4)에 비해 4부위 (~0.66)가 크게 해석되었으며, 이러한 원인으로 인하여 4부위가 8부위에 비해 재결정률이 더 높게 나타난 것으로 판단된다. 3, 10부위의 경우 임계변형률 범위와 50%재결정 선을 넘어서 변형이 계속 진행되었고, 특히 중심부에 비해 온도가 낮은 쪽에서 재결정이 이루어 졌기 때문에 재결정된 결정립 크기가 중심부보다 미세해진 것으로 판단된다. 중심부인 5,6,7부위는 단조초기부터 동적 재결정 발생선을 지나고 있으며, 50% 재결정선을 넘어 재결정이

계속 진행됨에 따라 완전 재결정된 것으로 판단되며, 단조 후 조직 전체가 재결정된 미세한 결정립을 나타내었다. 중심부중 7부위의 경우 최종단조시의 변형률이 1.08정도로 5,6부위(각각 2.18, 1.82)에 비해 낮음에도 불구하고 재결정된 결정립 크기가 미세함을 관찰할 수 있는데 이것은 변형량이 완전재결정될 수 있는 구간을 넘었으며, 5,6 부위에 비해 낮은 온도에서 동적재결정이 이루어 졌기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는 단조공정중에 발생하는 부위별 평균결정립 변화를 시간에 따라 나타낸 해석결과이다. 금형과 접촉되어 있고, 변형을 적게 받은 1,2,9부위의 경우 초기 결정립과 큰 변화를 관찰할 수 없으며, 중심부인 5,6부위의 경우 결정립 미세화가 다른 부위에 비해 뚜렷하게 나타난다. 이 그래프를 통해 단조공정이 시작된 후 약 5초 정도에서 동적재결정이 발생되어 평균결정립 크기가 감소하고 있음을 알 수 있으며, 최종단조품에서의 부위별 평균결정립 크기가 어떻게 나타나는 지를 예측할 수 있다.

Fig. 10은 최종단조 후 실제 단조품의 부위별 평균 결정립 크기와 유한요소해석 및 재결정 모델링식을 연계해석한 결과의 부위별 평균 결정립 크기를 비교 분석한 결과이다. 전체적인 결정립 분포가 잘 일치하고 있음을 관찰할 수 있으며, 다만 완전재결정으로 인해 결정립 미세화가 발생한 중심부위의 결정립 크기는 해석결과가 약간 작게 나타났음을 알 수 있다. 이것은 단조후에 약간의 결정립 성장이 되었음을 의미하며, 앞서 시험된 고온 압축시험에서 1°Cs⁻¹ 정도의 냉각속도에 의해 냉각된 경우의 미세조직 관찰결과에서 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서 Alloy 718의 디스크 열간단조시 각부위별 결정립분포를 해석하기 위해서 압축시험과 유한요소해석을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 열간단조된 디스크의 결정립분포는 주로 동적재결정에 의해 영향을 받으며, 특히 동적재결정이 발생하는 임계변형량 (ϵ_c) 및 재결정률(X_{dyn})에 크게 의존한다.

(2) 임계변형량은 Zener-Holloman 변수(Z)와 초기 결정립크기에 따라 변화하며, 본 연구에서 얻어진 Alloy 718의 유동곡선을 토대로 임계변형량과 재결정률의 관계식을 다음과 같이 얻을 수 있었다.

$$\epsilon_c = 8.87 \times 10^{-4} \cdot d_0^{0.2} \cdot Z^{0.099} \quad \text{when } \dot{\epsilon} \geq 0.01s^{-1}$$

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

$$\epsilon_{0.5} = 0.037 \times d_o^{0.2} \times Z^{0.058}$$

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

$$\epsilon_{0.5} = 0.029 \times d_o^{0.2} \times Z^{0.058}$$

(3) 동적재결정에 의한 결정립 크기에 관계되는 함수는 Zener-Holloman 변수(Z)이며, Alloy 718의 경우 동적 재결정에 의한 결정립 크기는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$d_{dyn} = 1.301 \times 10^3 \cdot Z^{-0.1243}$$

(4) 유한 요소해석에 의해 Alloy 718의 결정립 분포를 해석하기 위해서 변형속도를 고려한 부위별 온도, 변형률의 변화를 시간에 따라 나타내고, 디스크의 각부위별 미세조직과 비교한 결과, 디스크의 표면부중 재결정 발생 구간인 임계변형선을 지나지 못한 부위는 재결정되지 못하고 약간 결정립이 연신된 형태를 나타냈으며, 임계변형선을 지나기는 했지만 50% 재결정선을 넘지 못한 경우는 부분 재결정이 일어났다. 중심부의 경우 모두 50% 재결정선을 넘어 변형이 계속 진행되었으며, 이때의 미세조직은 재결정으로 인해 미세한 결정립 분포를 나타내었다.

(5) 실제 디스크의 결정립 분포와 재결정 모델링, 유한 요소해석 결과를 토대로 분석된 결정립 분포가 잘 일치하였으며, 이것은 본 연구에서 얻어진 결정립 크기 예측 시스템의 유효성을 잘 입증하는 결과이다.

참고 문헌

- (1) H. L. Eiselstein, 1965, Advances in the Technology of Stainless Steel and Related Alloys, STP 369, ASTM.
- (2) R. A. Sprague and S. J. Friesen, 1986, "Superalloy component durability enhancements", JOM, July, pp.24~30.
- (3) 과학기술처, 1997, "항공기 가스터빈 핵심 재료기술 개발(Ⅲ)", 한국기계연구원 연구보고서.
- (4) J. P. Domblesky, L. A. Jackman, R. Shivpuri, and B. B. Hendrick., 1994, "Prediction of grain size during multiple pass radial forging of Alloy 718", Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives, edited by E.A. Loria, TMS, pp.273~280.
- (5) C. Peyrourou and Y. Honnorat, 1991, "Characterization of Alloy 718 microstructure", Superalloys 718, 625 and various derivatives, edited by E.A. Loria, TMS, pp.309~324.
- (6) R. Srinivasan, V. Ramnarayan, U. Deshpande, V. Jain, and I. Weiss, 1993, "Computer simulation of the forging of fine grain IN-718 Alloy", Metall. Trans. A, Vol. 24A, pp.2061~2069.
- (7) W. Roberts, H. Bod n, and B. Ahlblom, 1979, "Dynamic recrystallization kinetics", Metal Sci., pp.195~205.
- (8) J. P. Sah, G. J. Richardson, and C. M. Sellars, 1974, "Grain-size effects during dynamic recrystallization of Nickel", Metal Sci., Vol. 8, pp.325~331.
- (9) G. Shen, S. L. Semiatin, and R. Shivpuri, 1995, "Modeling microstructural development during the forging of Waspaloy", Metall. Trans. A, Vol. 26A, pp.1795~1803.
- (10) C. Devadas, I. V. Samarasekera, and E. B. Hawbolt, 1991, "The thermal and metallurgical state of steel strip during hot rolling : Part Ⅲ. Microstructural Evolution", Metall. Trans. A, Vol. 22A, pp.335~349.