Waspaloy 터빈디스크의 열간 단조시 결정립분포 해석에 관한 연구

A Study on the Prediction of Grain Size Distribution in Hot Forging of Waspaloy Turbine Disc

염 종 택*,** 이 종 수** 김 정 한* 이 동 근* 박 노 광*
Yeom, Jong Taek Lee, Chong Soo Kim, Jeoung Han Lee, Dong-Geun Park, Nho Kwang

ABSTRACT

The microstructure evolution during a hot forging of Waspaloy was investigated using the recrystallization model and FEM simulation. In order to obtain an uniform microstructure, hot forging was carried out by two step. The change of grain size during hot forging has a deep connection with dynamic recrystallization behavior. Avrami-type constitutive equation for the dynamic recrystallization was implemented into an user subroutine of 2D FE simulator. The evolution of grain structure in the two-step forging of Waspaloy was simulated using the 2D FEM user-subroutine. The detailed variation of microstructures due to dynamic recrystallization could effectively be predicted at various locations in a forged pancake.

주요기술용어(주제어) : Waspaloy, Turbine Disc(터빈 디스크), Dynamic Recrystallization(동적 재결정), 2-D FE Simulation(2차원 유한요소해석), Grain Size Distribution(결정립 분포)

1. 머리말

일반적으로 터빈디스크의 경우 작동하는 동안 원심력과 함께 열피로가 결합된 가혹한 고응력조건에 노출되어 있으며, 이 경우 고온특성과 강도를 동시에 요구되게 된다. 따라서, 이러한 터빈디스크 소재로 니켈기 초내열합금이 주로 사용되며, 디스크 제조공정으로는 열간단조가 흔히 수행된다[1]. 니켈기 초내열합금의 열간 단조공정에서 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 결정립 크기와 분포를 제어하는 것으로, Alloy 718, Waspaloy 등과 같은 단련용 니켈기 초내열합금의 경우 특히 결정립 크기에 따라 기계적 성질이 크게 좌우된다[2]. 일례로, 결정립 크기가 작은 경우(ASTM 10-14) 우수한 인장강도 및 연신율과 함께 저주기 피로에서 균열생성에 대한 저항성이 높은 특성을 얻을 수 있으며, 결정립크기가 다소 큰 경우(ASTM 4-8) 크리프특성과 균열전파의 저항성이 우수한 특성을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다[3].

열간단조시 미세조직변화, 특히 결정립 크기의 변

† 2006년 2월 9일 접수~2006년 5월 17일 게재승인
* 한국기계연구원(KIMM), 재료기술연구소
** 포항공과대학교, 신소재공학과
주저자 이메일 : yjt96@kmail.kimm.re.kr

화는 동적회복과 동적재결정에 의한 동적연화에 의해 주로 결정된다. 동적재결정은 변형으로 인한 불안정한 상태의 내부에너지가 새로운 결정립을 생성하면 안정화된 상태로 전이되는 현상으로 동적재결정이 발생되는 임계 변형량 및 재결정분율 등을 예측하는 것은 재결정 모델링에서 중요한 부분을 차지한다[4]. 동적재결정에 의한 결정립 크기의 변화는 단조온도, 변형속도, 변형량 등의 공정변수에 따라 크게 좌우되며, 또는 결정립 크기는 재결정의 핵생성 site로 작용하기 때문에 초기 결정립크기에도 상당한 영향을 받는다. 따라서, 결정립 크기를 예측하고 제어하기 위해서는 단조 중에 변화하는 부위별 온도, 변형율, 변형속도 분포 등 내부 변수들의 신뢰할 수 있는 예측과 함께 동적재결정 모델을 연계 해석할 수 있는 방법론이 필수적으로 구축되어야 한다.

본 연구에서는 터빈 디스크용 니켈기 초내열합금인 Waspaloy에 대하여 결정립 크기를 예측하고 제어할 수 있는 방법론을 구축하기 위한 연구의 일환으로, 기존 보고된 Avrami형태의 동적재결정 모델을 2D DEFORM 상용 FE code의 부프로그램으로 작성하여 결정립 크기 예측 시스템을 구축하고, 실제 Waspaloy 디스크 열간단조에 적용함으로써 본 예측 시스템의 신뢰성을 입증하고자 하였다.

2. 결정립 분포 예측을 위한 방법론 구축

본 연구에서 Waspaloy의 열간단조시 부위별 결정립 크기의 변화를 예측하기 위해서 사용된 모델은 Shen[5,6] 등이 발표한 Waspaloy합금에 대한 동적재결정 모델식을 기초로 하였으며, 표 1에 모델식을 요약하여 나타내었다.

이 모델에서 재결정 분율의 경우 γ′ 상의 고용온도구간(1010℃~1027℃)을 기준으로 모델식을 달리 구성하고 있음을 알 수 있는데, 이는 γ′ 상이 동적재결정을 방해하는 역할을 함으로 인해 γ′ 상 고용온도 이상으로 단조를 수행할 경우 동적재결정이 더욱 빠르게 진행됨을 나타내기 위한 것이다. 결국, 언급된 모델은 미세조직적 인자를 고려하여 동적 재결정모델식을 도출한 것으로, 이러한 모델식을 소성가공 전용

[표 1] Waspaloy의 동적재결정 모델링

Critical strain

$$Z = \dot{\bar{\epsilon}} \exp(Q/RT)$$

$$\bar{\epsilon}_p = 5.375 \times 10^{-4} d_0^{0.54} Z^{0.106} \quad (T < 1010℃)$$

$$\bar{\epsilon}_p = 1.685 \times 10^{-4} d_0^{0.54} Z^{0.106} \quad (T \geq 1010℃)$$

$$\bar{\epsilon}_c = 0.8\bar{\epsilon}_p$$

Case of sub-solvus forging

$$\bar{\epsilon}_{0.5} = 0.1499 d_0^{0.32} Z^{0.03} \quad (T < 1010℃)$$

$$X_{drx} = 1 - \exp(-0.693(\bar{\epsilon}/\bar{\epsilon}_{0.5})^{3.0})$$

$$\bar{\epsilon}_{0.5} = 0.056 d_0^{0.32} Z^{0.03} \quad (1010℃ < T < 1027℃)$$

$$X_{drx} = 1 - \exp(-0.693(\bar{\epsilon}/\bar{\epsilon}_{0.5})^{2.0})$$

$$d_{drx} = 8103 Z^{-0.16} (\mu m)$$

Case of super-solvus forging

$$\bar{\epsilon}_{0.5} = 0.035 d_0^{0.29} Z^{0.04} \quad (T > 1027℃)$$

$$X_{drx} = 1 - \exp(-0.693(\bar{\epsilon}/\bar{\epsilon}_{0.5})^{1.8})$$

$$d_{drx} = 108.85 Z^{-0.0456} (\mu m)$$

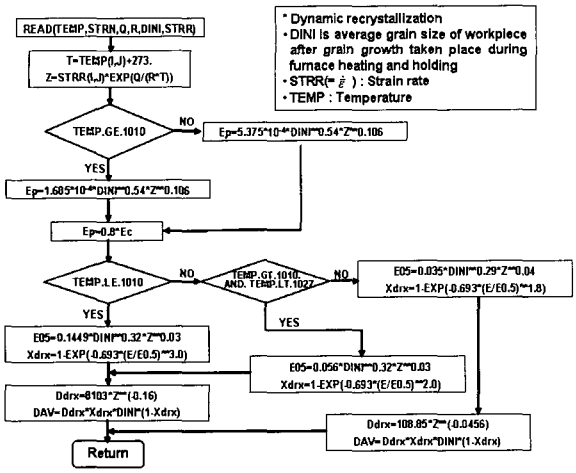
Average grain size

$$d_{AV} = d_{unrex}(1 - X_{drx}) + d_{drx} X_{drx}$$

▶ Z=Zener-Holloman변수, $\bar{\epsilon}_p$= 피크점에 대한 변형율, $\dot{\bar{\epsilon}}$= 변형속도, d0= 초기결정립 크기, $\bar{\epsilon}_c$= 임계변형율, $\bar{\epsilon}_{0.5}$= 50% 재결정에 해당하는 변형율, X_{drx}= 재결정 분율, d_{drx}= 재결정된 결정립크기, d_{AV}= 평균결정립크기, d_{unrex}= 재결정되지 않은 결정립크기

FE simulator인 2-D DEFORM의 부프로그램으로 작성하여 열간단조시 Waspaloy 디스크의 부위별 결정립 분포를 예측하고자 하였다. 재결정모델의 부프로그램의 작성도는 그림 1에 나타내었다.

부 프로그램에서는 γ′ 상의 고용온도를 기준으로 그 이상과 이하에서 임계변형량, 재결정분율, 50% 재결정분율에 해당하는 변형량 등을 달리 사용하도록 작성하였다.

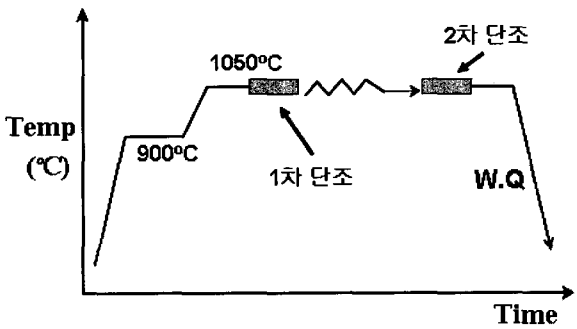


[그림 1] 재결정모델 FE 부프로그램의 작성도

3. Waspaloy의 열간단조공정 및 조직분석

Waspaloy 팬케익 열간 단조공정에 사용된 빌렛은 VIM/VAR double melting 용해공정으로부터 얻어진 잉고트를 코깅공정에 의해 제조된 상태로, 초기 형상은 지름 95mm × 높이 190mm의 원통형으로 준비되었다. 초기 빌렛은 가열 및 단조시의 표면산화, 가열로에서 프레스로 소재 이송시 온도하강 등을 최소화하기 위해서 유리 base의 표면코팅제(Deltaglaze 151)를 도포하였다. 또한 금형의 가열은 1000℃이상으로 가열된 탄소강블럭을 이용하여 간접가열을 수행하였고, 단조직전 금형온도는 300℃정도로 측정되었다.

그림 2는 Waspaloy 디스크 제작을 위한 2단계 단조공정을 나타낸 것으로, 단조는 4000톤 유압프레스

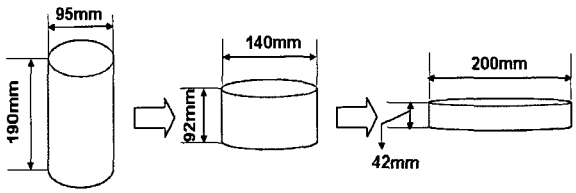


[그림 2] Waspaloy의 2단계 단조공정 사이클

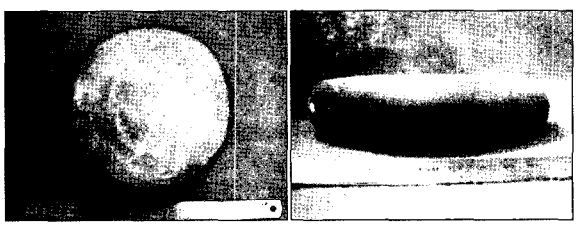
를 활용하였다. 1차와 2차 단조온도는 모두 1050℃정도로, 이는 γ′상의 고용온도(1010℃~1027℃)를 기준으로 고용온도 직상의 온도에서 단조를 수행하는 super-solvus 단조로 디스크를 제작한 것으로, 이러한 온도설정은 γ′상의 일부 고용을 통해 성형성을 향상시키는 것과 과도한 결정립성장을 억제하기 위한 목적에서 수행된 것이다. 또한 그림 3에 나타낸 바와 같이 2단계 단조에 대한 각 단계별 압축량은 1차에는 높이 190mm에서 92mm로, 2차에는 높이 92mm에서 42mm로 단조가 수행되었다.

한편, 2단계 단조후 Waspaloy의 열처리는 1024℃에서 4시간 유지 한 후 상온까지 급냉하는 용체화처리 후 843℃에서 4시간 유지후 공냉하고, 760℃에서 16시간 유지후 공냉하는 2단계 시효처리를 수행하였다. 이러한 열처리는 γ′상의 크기 및 량을 조절하여 기계적 특성을 극대화하기 위한 것으로, 결과적으로 조대한 γ′상과 미세한 γ′상이 혼재되는 조직을 얻을 수 있다. 한편, 열간단조 후 열처리된 Waspaloy 팬케익의 외관사진은 그림 4에 나타내었으며, 육안검사에서 표면결함이 없는 건전한 단조품임을 확인할 수 있었다.

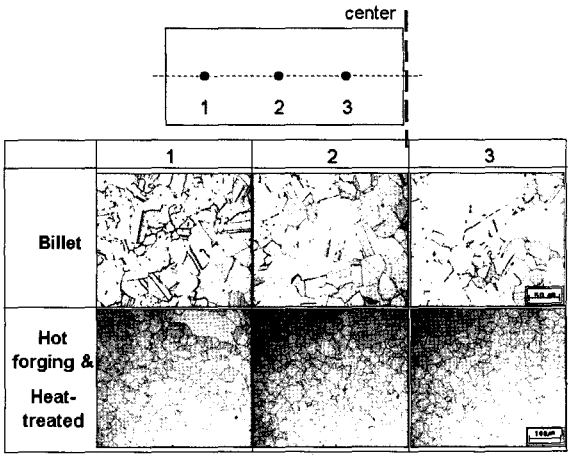
그림 5는 Waspaloy의 빌렛상태와 단조후 열처리된 상태에 대한 조직분석결과를 나타낸 것이다. 초기 빌렛조직의 경우 미세한 결정립과 조대한 결정립이 혼재되어 있는 상태인 것으로 관찰되며, 단조후 열처



[그림 3] 2단계 단조공정에 대한 압축량 변화



[그림 4] 열간단조후 열처리된 Waspaloy 팬케익

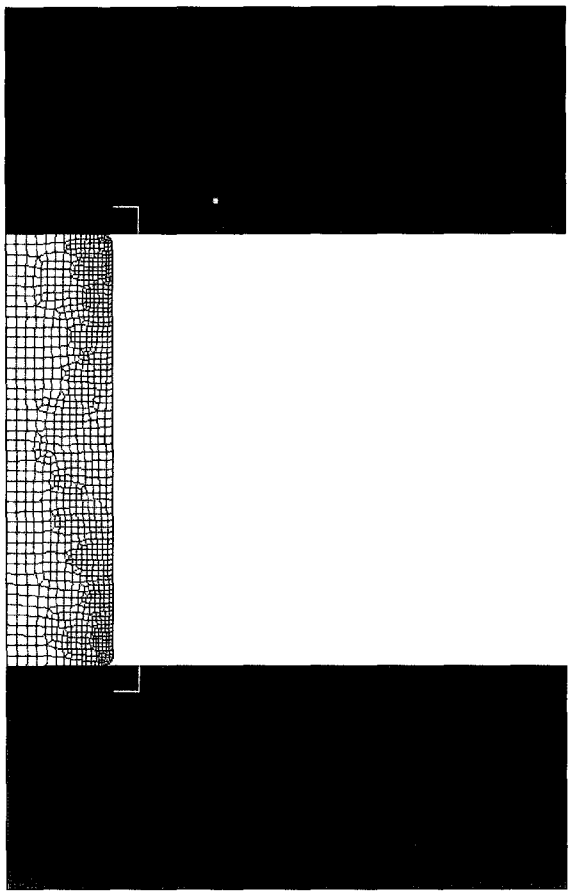


[그림 5] Waspaloy 초기빌렛 및 열간단조후 열처리된 단조품의 미세조직

리된 조직의 경우는 표면부인 1번 부위에서 부분 재결정으로 인해 형성된 necklace구조를 보이기는 하나 비교적 균일하며, 빌렛상태의 조직에 비해 미세한 평균 결정립크기를 나타내고 있음을 알 수 있다. 평균 결정립크기를 이미지 분석기를 통해 측정한 결과, 빌렛은 ASTM # 5~6로 측정되었고, 단조 후 열처리된 Waspaloy 팬케익의 완전재결정된 부위인 3번 부분의 경우 ASTM # 7.5 이상으로 측정되었다. 이러한 결과는 실제 Waspaloy 디스크 제조시 2단계 열간단조와 열처리를 통해 결정립 미세화를 이룰 수 있음을 나타내는 것이다.

4. 열간단조 FEM 시뮬레이션 및 조직해석

그림 6은 1차단조의 초기 model을 나타낸 것으로, 해석은 모두 좌우 축대칭으로 가정하였으며, 앞서 언급된 Waspaloy 팬케익의 2단계 단조 공정조건에 따라 해석을 수행하였다. 1차 단조전 소재는 가열로에서 금형으로 이송하는 동안 가열된 빌렛의 표면온도는 시간에 따라 하강하게 되는데, 이러한 온도하강 효과를 해석에 반영하기 위해 단조전 10초간 공기와 접촉된 것으로 가정하여 열전달해석을 수행하였다. 열간단조시 금형의 온도는 300℃로 가정하였고, 프레스의 램속도는 8.3mm/s로 해석하였다. 또한 마찰계



[그림 6] 1차 열간단조의 초기 FEM해석 모델링

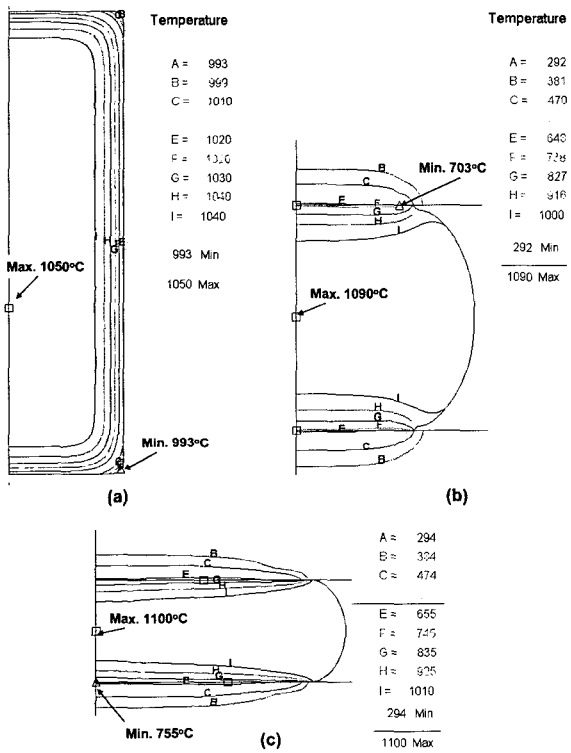
[표 2] FEM해석에 활용된 Waspaloy의 열적 DB

온도	열전도도(N/s/℃)	열용량(N/mm^2/℃)
20	10.6	4.3
537	18	4.5
649	20	4.5
700	21.9	4.6
871	24	4.7
982	26.2	5.8
1204	30.6	8.0

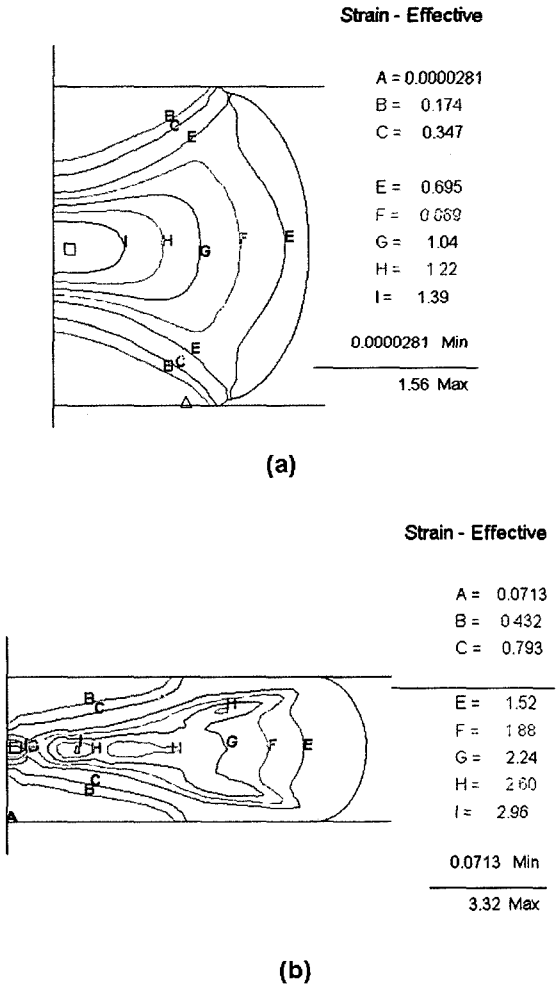
수와 열전달계수의 경우 기존 문헌[7]에서 제시된 초내열합금의 열간단조공정에 통상적으로 적용해 오던

0.3과 11kW/m^2℃의 값을 각각 대입하여 해석하였다. 한편, FEM해석에 사용된 Waspaloy의 열전도도 및 열용량 등의 열적 입력값과 각 변형속도와 온도에 따른 유동응력값은 DEFORM FEM코드에 입력되어 있는 DB를 활용하여 해석하였으며, 온도에 따른 열적 입력변수를 표 2에 정리하였다. 이러한 입력값들은 항공재료관련 핸드북과 비교시 온도에 따라 거의 유사한 값들임을 확인 할 수 있었다.

그림 7은 FEM해석에 의해서 얻어진 1차 단조 및 2차 단조후 온도분포를 해석한 결과를 나타낸 것이다. 소재의 이송단계(그림 7(a))에서 소재의 열손실은 표면에서 최대 60℃정도(1050℃→993℃) 나타났으며, 이송시의 열손실은 크지 않음을 알 수 있다. 그러나, 1차단조후 온도(그림 7(b))는 표면에서 최대 약 290℃정도(993℃→703℃)의 열손실을 나타내고 있으며, 변형에너지에 의한 중심부의 온도상승은 40℃정도(1050℃→1090℃)로 해석되었다. 이러한 표면부와 중심부의 온도 불균일 현상은 각각 금형으로의 열전달(Die chilling)과 변형에너지에 기인한 것으로, 균일한 조직을 얻기 위해서는 온도 불균일을 최소화하기 위한 단조방안에 따라 수행되어야 한다. 따라서, 실제 디스크 단조시 소재의 표면온도가 금형으로 열전달되는 것을 최소화하기 위하여 금형온도를 상승시키거나, 소재 표면의 온도하강을 최소화하기 위한 물유리 코팅을 시도하는 것을 추천하는 바이다. 한편, 2차단조후 온도분포는 표면부의 온도하강과 중심부의 온도상승이 1차단조와 거의 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 1차와 2차단조후 변형율 분



[그림 7] FEM 온도분포해석결과, (a) 소재이송단계 (b) 1차 단조후 (c) 2차 단조후



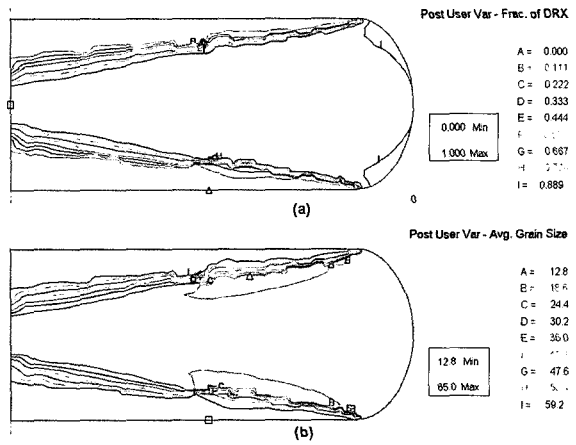
[그림 8] FEM 변형율 분포해석결과, (a) 1차 단조후 (b) 2차 단조후

포의 FEM해석결과를 나타낸 것이다. 1차 단조후 최대 변형율 집중위치는 중심부이며 약 1.5정도로 해석되었고, 2차 단조후에는 약 3.3정도로 2배이상의 변형율 집중현상이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 표면부에서는 거의 변형을 받지 않는 dead metal zone이 형성되는 것을 알 수 있다. 이러한 dead metal zone의 형성은 계면마찰과 금형과 소재간의 열전달에 기인한 온도불균일이 영향을 미치는 것으로 이러한 영역이 확대될 경우 최종제품의 부위별 미세조직의 불균일성을 초래할 수 있기 때문에 이러한 영역을 최소화하도록 공정설계가 이루어져야 한다.

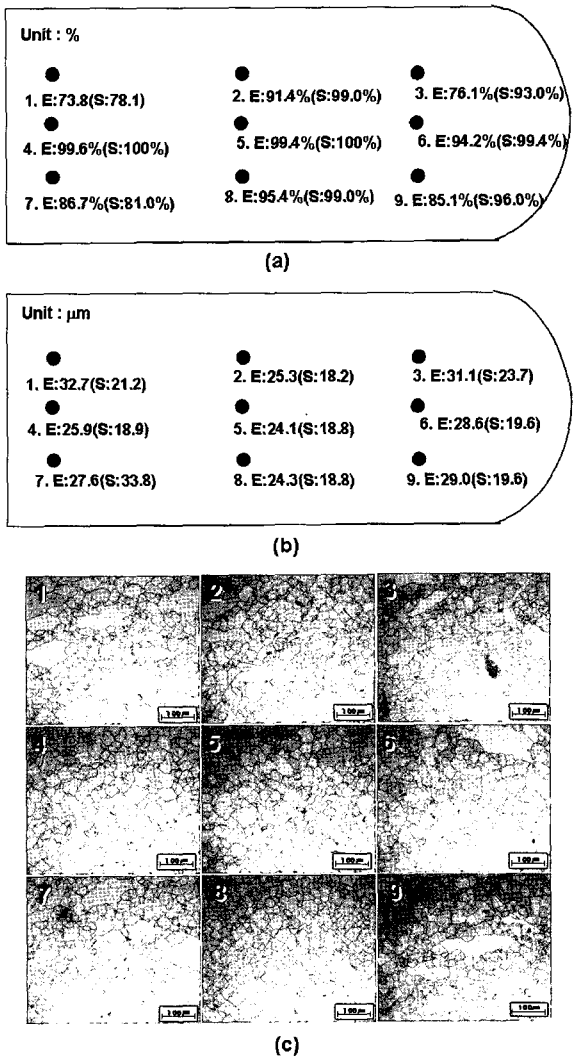
그림 8은 동적재결정 모델에 의해서 해석된 부위별 재결정 분율 및 평균결정립 크기분포를 나타낸 것으로, 평균결정립 크기는 표 1에 나타낸 바와 같이 혼합법칙(mixture rule)을 기초로 얻어진 것이다.

재결정 분율은 중심부영역에서 대부분 완전재결정이 발생한 것으로 해석되었고, 표면부로 갈수록 부분재결정이 일어나고 있는 것으로 해석되었다. 이러한 경향은 동적재결정이 온도와 변형량에 따라 크게 영향을 받고 있는 것을 의미하는 것으로, 변형율 분포의 해석결과와 비교하면, 완전재결정을 위해서는 적어도 1.1(그림 8(b)에서 line D이상 영역)정도의 변형율이 요구됨을 알 수 있다. 한편, 평균 결정립크기분포는 재결정분율과 거의 유사한 경향을 보이고 있으며, 완전재결정된 중심영역의 결정립크기가 line C (24.4㎛)와 line B(18.6㎛)사이에 위치하고 있음을 알 수 있으며, 정중앙의 표면부는 거의 재결정되지 않고 초기 빌렛상태의 결정립크기를 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 이미지 분석기를 통해 부위별 동적재결정 분율과 평균결정립크기에 대한 해석 및 측정결과의 비교와 함께 부위별 미세조직을 나타낸 것이다. 그림 10(c)에서 관찰되는 바와 같이 dead zone형성



[그림 9] FEM 조직해석결과 (a) 재결정분율 (b) 평균결정립크기



[그림 10] FEM 조직해석결과과 측정결과의 비교 (a) 재결정분율 (b) 평균결정립크기 (c) 부위별 미세조직(E : 측정결과, S : FEM해석결과)

인접부위(1번, 7번)와 외곽부위(3번, 6번, 9번 부위)에서 일부 부분재결정으로 인한 necklace 구조가 관찰되기는 하나, 대부분의 영역이 재결정으로 인해 균일하고, 미세한 결정립분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

미세조직의 해석결과와 측정결과의 비교에서, 전반적인 결정립 분포는 해석결과와 측정결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 관찰할 수 있다. 그러나, 일부 외곽부위(3번, 9번 부위)의 조직예측의 경우 해석결과가 다소 높은 재결정율을 보이고 있음을 관찰할 수 있다. 실제 디스크의 조직관찰은 후열처리를 거쳐 얻어진 결과이며, 이 경우 γ′ 상의 고용온도 직하에서 수행되는 용체화 처리시(1024℃/4hrs) 정적재결정은 거의 발생하지 않으나, 결정립 성장은 유지시간에 따라 일어날 수 있는 것으로 알려져 있다[6]. 따라서 이러한 해석상의 차이는 FEM해석이 실제 열간단조에서 발생되는 열손실을 충분히 반영하여 해석되지 못한 것과 결정립성장을 고려하지 않은 것에 기인한 것으로 판단되며, 향후 정확한 열전달계수 측정, 열전달해석의 향상과 결정립성장모델의 적용을 통해 이러한 해석상의 오차를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 Waspaloy에 대하여 열간단조시 부위별 결정립크기 분포를 예측하기 위한 방법론을 구축하는 연구의 일환으로, 기존에 발표된 Waspaloy의 동적재결정 모델식을 FEM 부프로그램으로 작성한 후 FEM해석과 연계할 수 있는 시스템을 구축하였다. 또한 구축된 Waspaloy의 재결정 부프로그램의 검증을 위해 2단계 열간단조공정을 통하여Waspaloy 팬케익을 제조하였고, 부위별 조직을 분석하여 해석결과와 비교하였다. 해석결과는 외곽부위에서 약간의 과대평가가 이루어 졌으며, 결정립크기의 예측에서 다소 오차를 나타내기는 하였으나, 전반적인 재결정분율 및 결정립 크기 분포를 비교적 잘 묘사하였다. 이러한 결과는 본 연구에서 구축된 결정립예측 시스템이 우수한 신뢰성을 가진다는 것을 의미하는 것이며, 결국, 이러한 시스템은 향후 단조용 니켈기 초내열합금의 열간성형공정 설계에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 항공우주부품기술개발사업의 일환으로 수행됨과 함께 2003년도 국가지정연구실사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Donachie, M. J., and Donachie S. J., Superalloys - A Technical Guide, ASM International, Materials Park, 2002, pp.91~115.

[2] Krueger, D. D., "The Development of Direct Age 718 for Gas Turbine Engine Disk Applications", Proceeding of the international Symposium on the Metallurgy and Application of Superalloy 718, Pittsburgh, 1989, pp.279~296.

[3] Sims, C. T., Stoloff, N. S., and Hagel, W. C., Superalloys II, Wiley, New York, 1987, pp. 441~458.

[4] 염종택, 박노광, "해머단조된 Alloy718 디스크의 결정립 분포해석", 한국소성가공학회지, 제6권, 제3호, 1997, pp.250~256.

[5] Shen G., Semiatin, S. L., and Shivpuri, R., "Modeling microstructural development during the forging of Waspaloy", Met. Trans. A, 26A, July 1995, pp.1795~1803.

[6] Shen, G., "Modeling Microstructural development in the Forging of Waspaloy Turbine Engine Disks", Ph. D. Dissertation, The Ohio State Univ., 1994.

[7] Yeom, J. T., et al., "FE simulation of Microstructure Evolution during Direct Age Process of Alloy 718", J. Chinese Soc. Mech. Eng., Vol. 26, No. 5, 2005, pp.533~538.