

# 단조용 니켈기 초내열합금의 조직예측기술

염종택<sup>1,#</sup>, 김정한<sup>1</sup>, 홍재근<sup>1</sup>, 박노광<sup>1</sup>

## Microstructure Prediction Technology of Ni-Base Superalloy

J. T. Yeom, J. H. Kim, J. K. Hong, N. K. Park

### Abstract

As a class of materials, Ni-base superalloys are among the most difficult metal alloys to forge together with refractory metals and cobalt-base superalloys. The mechanical properties of Ni-base superalloys depend very much on grain size and the strengthening phases,  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$ -type) and  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ -type). Especially, the control of grain size remains as a sole means for the control of mechanical properties. The grain size and distribution changes of the wrought superalloys during hot working and heat treatment are mainly controlled by the recrystallization and grain growth behaviors. In this presentation, prediction technology of grain size through the computer-aided process design, and numerical modeling for predicting the microstructure evolution of Ni-base superalloy during hot working were introduced. Also, some case studies were dealt with actual forming processes of Ni-base superalloys.

**Key Words** : Ni-base Superalloy, Microstructural Control Technology, Grain Size, Recrystallization, Grain Growth, Numerical Modelling

### 1. 서론

일반적으로, 니켈기 초내열합금은 단조성이 철계 합금, 알루미늄 등에 비해 현저히 낮으며, 특히 성형공정구간이 타소재에 비해 좁아 난성형성 소재로 분류되어 있다[1]. 또한, 주요 적용분야가 항공기 부품, 발전설비용 부품 등 고온소재부품으로 활용되고 있어, 요구되는 미세조직과 특성이 까다롭기 때문에 이러한 요구를 만족할 수 있도록 제품을 생산, 제조하기는 쉬운 일이 아니다. 일례로, 단조용 초내열합금인 Alloy 718에 대한 항공재료 규격[2]에 따르면, 항공기엔진 부품에서 요구되고 있는 결정립크기와 분포에 대하여 ASTM #4 이상의 결정립과 함께 부위별 차이가 ASTM# 2 order 이상을 허용하지 않도록 규정하고 있으며, 이는 초내열합금 부품을 성형함에 있어 공정구간

상에 상당한 제한을 받게 될 수 있음을 의미하는 것이다.

단조용 초내열합금의 열간성형시 조직변화, 특히 결정립 크기의 변화는 동적회복과 동적재결정에 의한 동적연화에 의해 주로 결정되며, 냉각시 혹은 짧은 시간의 유지시 발생하는 준동적 재결정에 의해서도 영향을 받는다. 또한 성형후 열처리 및 재가열, 유지시 정적재결정 및 결정립성장 등은 정적인 상태에서 조직 변화에 상당한 영향을 미친다. 동적재결정은 변형으로 인한 불안정한 상태의 내부에너지가 새로운 결정립을 생성하면서 안정한 상태로 전이되는 현상으로 동적재결정이 발생하는 시점에 해당하는 임계변형량( $\epsilon_c$ ), 재결정률( $X_{dx}$ ) 및 재결정된 크기 등을 예측하는 것은 성형공정시 조직제어를 위하여 기본적으로 수행되어야 하는 중요한 일이다.

1. 재료연구소, 특수합금연구그룹  
# 교신저자: 재료연구소, E-mail: yjt96@kims.re.kr

**Table 1. Summary of recrystallization and grain growth models for Ni-base superalloy**

Dynamic Recrystallization	Static or Meta-dynamic Recrystallization	Grain Growth
$\epsilon_p = A \times d_0^a \times Z^b$	$d_s = D \cdot d_0^k \cdot \epsilon^{-l} \cdot Z^{-s}$	$d^* = d_0^k + Ft \exp(-Q_g / RT)$
$\epsilon_c = A' \epsilon_p$	$X_s = 1 - \exp(-0.693(t/t_{0.5})^n)$	$Q_g$ : Activation energy for grain growth
$d_{drc} = BZ^{-n}$	$t_{0.5} = E \cdot d_0^h \cdot \epsilon^{-i} \cdot Z^{-j} \exp(Q_s / RT)$	
$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q / RT)$		
$X_{drc} = 1 - \exp(-0.693(\epsilon / \epsilon_{0.5})^m)$		
$\epsilon_{0.5} = C \cdot d_0^c \cdot Z^d$	$d_s$ : Static and Meta dynamic recrystallized grain size	
$\epsilon_p$ : maximum strain	$X_s$ : Fraction of static recrystallization	
$\epsilon_c$ : Critical strain	$t_{0.5}$ : Time for 50% recrystallization	
$d_0$ : initial grain size	$Q_s$ : Activation energy for static recrystallization	
$Z$ : Zener - Holloman parameter		
$d_{drc}$ : Dynamic recrystallized grain size		
$\dot{\epsilon}$ : Strain rate		
$Q$ : Activation energy for dynamic recrystallization		
$X_{drc}$ : Fraction of dynamic recrystallization		
$\epsilon_{0.5}$ : Strain for 50% recrystallization		
<b>Average Grain Size</b>		
$\frac{1}{d_{av}^2} = \frac{X_n}{d_{wrex}^2} + \frac{X_{drc}}{d_{drc}^2} + \frac{X_{m-drc}}{d_{m-drc}^2} + \frac{X_s}{d_s^2}$		
$d_{av}$ : Average grain size		
$d_{wrex}$ : Non-recrystallized grain size		
$d_{drc}$ : recrystallized grain size		

이들 재결정 및 결정립성장거동 이론 등을 기초로한 조직예측모델을 통한 단조용 니켈기초 초내열합금의 조직제어 공정설계를 위해서는 고온 변형시의 온도, 변형률, 변형속도 등과 같은 외부 요인 뿐만 아니라 모상내 또는 결정립계에 존재하는 석출상 등과 같은 금속조직학적 요인에 관한 고찰이 선행되어야 하며, 관련 모델식을 유한 요소해석과 연계하여 공정설계에 활용할 수 있는 체계를 구축하여야 한다. 본 발표에서는 단조용 니켈기초 초내열합금의 변천사와 함께 단조용 초내열합금의 조직제어기술을 적용한 몇가지 사례 들을 들어 설명하고자 한다.

## 2. 조직예측 시스템

### 2.1 재결정 및 결정립성장모델

일반적으로, 압축, 인장, 비틀림시험 등을 통해 얻어지는 유동응력곡선상의 가공연화 현상은 불균일 소성변형 혹은 압축파단 등과 같이 국부적

으로 소성변형되거나 파단되는 경우를 제외하고는 대부분 동적 재결정에 기인한다[3]. 이러한 동적재결정에 대한 금속학적 모델식은 합금종류에 따라 다양하게 제안되고 있으며[4], 실제 열간단조 시 발생하는 조직변화는 성형중에 발생하는 동적 재결정과 가열, 유지 및 냉각중에 발생하는 준동적 및 정적 재결정에 의해서 일어난다[5]. 이러한 동적 및 정적 (혹은 준동적) 재결정의 분율은 Avrami-type의 유사 속도식에 의해서 수식화 할 수 있는데, 몇가지 초내열합금에 적용된 금속학적 모델식들을 표 1에 요약하여 나타내었다. 표 1에 제시된 식들의 상수값은 고온압축 및 등은 열처리시험 등을 통해 얻어짐이 가능하며, 합금종류에 따라 결정립계에 존재하는 δ상(Ni<sub>3</sub>Nb-type), γ'(Ni<sub>3</sub>(Al,Ti)-type), β상(NiAl-type) 등의 석출상 고온도에 따라 상수값이 달라지게 된다.

### 2.2 결정립 예측시스템

그림 1은 열간성형시 초내열합금의 결정립분포

를 예측하기 위한 결정립 해석시스템을 도식적으로 나타낸 것이다.

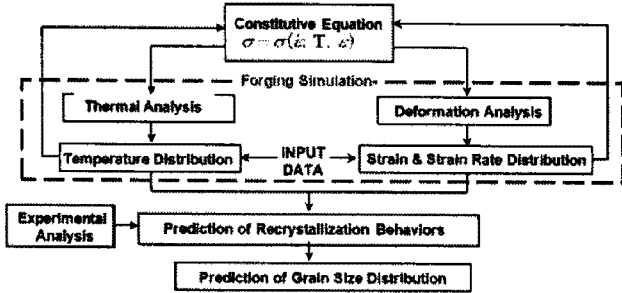


Fig. 1 Scope of microstructure prediction approach

소재의 유동응력을 얻기 위한 압축, 인장, 비틀림시험 등에서 얻어진 유동곡선을 이용하여 유한요소해석을 수행한다. 성형해석은 열해석과 소성변형해석이 연계되며, 열해석의 경우 열전도 및 소성열을 고려하여 소재의 온도분포를 해석하게 된다. 변형해석의 경우 금형속도 및 소재의 변형에 의한 변형률과 변형속도분포를 얻고, 해석결과와 시험결과 등에서 얻어진 재결정 모델링식을 기초로한 부프로그램을 이용하여 소재의 전체적인 결정립 분포를 예측하게 된다.

### 3. 여러 적용사례

앞서 언급된 조직예측 시스템을 활용한 몇가지 초내열합금 소재부품의 열간성형에 적용한 사례들을 다루고자 한다.

먼저, 외경 260mm급 가스터빈 디스크의 2단계 열간단조공정에 대하여 조직예측 시스템을 적용하여 공정설계를 수행한 사례[6]를 살펴보고자 한다. 초내열합금인 Alloy 718소재의 2단계 디스크 단조공정은 4,000톤 스크류프레스를 활용하였고, CAD/CAM기술을 이용하여 형상설계가 수행되었다. 이때 초기 빌렛은 dia. 140mm×152mm(H)로 준비되었다. 이렇게 준비된 소재는 전기식 배치형 가열로에 의해 1020°C의 온도에서 등온유지하여 소재의 균일한 온도분포를 유지하도록 하였고, 미리 준비된 단조금형위에 소재를 올려놓고 열간단조를 수행하였다. 업셋팅단조에 의하여 팬케익의 예비형상을 만듦으로써 업셋팅공정에서 단조결합의 발생을 억제시키고 일정량의 소성변형량을 유지하도록 하였으며, 최종성형을 거쳐 디스크 형단조를 수행하는 2단계 공정으로 설계하였다. 이때

단조공정의 감소는 작업효율성을 향상시킬 수 있는 반면에 단위 공정별 소성변형량은 상대적으로 증가하여 금형 마모를 촉진시킬 수 있는 여지가 많기 때문에 단조공정에 앞서 충분한 단조공정 및 금형설계가 필수적이다. 최종단조된 디스크의 조직분석결과와 조직예측 시스템을 통한 해석결과는 그림 2에 비교하여 나타내었다. 그림에 포함된 숫자는 부위별 평균 결정립크기를 나타낸 것으로, 해석결과는 실제 측정결과를 잘 예측하고 있음을 관찰할 수 있으며, 특히 온도, 변형량, 변형속도 등 내부변수에 따라 달라지는 각 부위별 결정립크기의 차이를 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

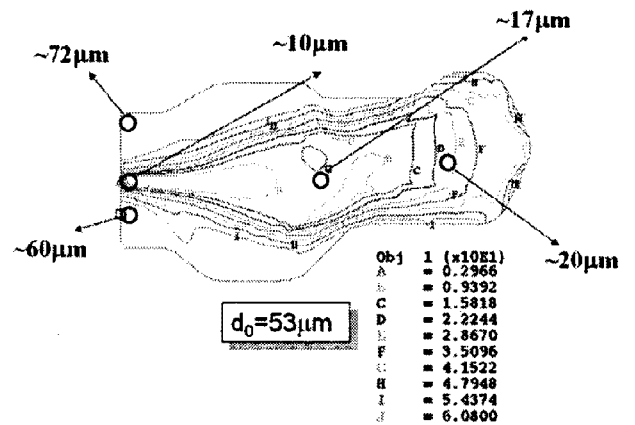


Fig. 2 Average grain size contours obtained from hot working process simulation of Alloy 718 turbine disk

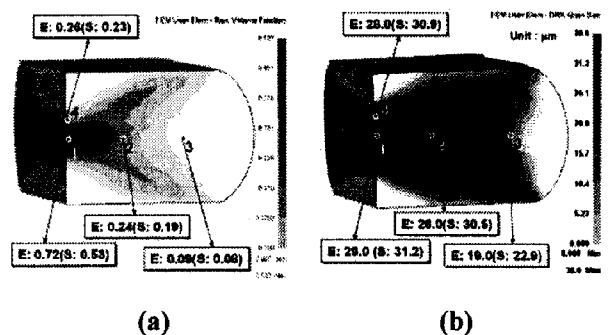


Fig. 3 (a) Dynamically recrystallized volume fraction and (b) grain size contours obtained from sidepressing simulation; symbols 'E' and 'S' represent experimental data and simulation results, respectively.

## 참 고 문 헌

다음 적용사례로, 초초임계압 화력발전소에 적용하기 위한 Stud bolt의 제조에 대한 연구의 일환으로, 초내열합금 잉고트 파쇄공정중에 변화하는 조직예측 및 공정설계 연구[7]에 대해 살펴보고자 한다. 초내열합금 Alloy 718 잉고트파쇄공정에 조직예측모델을 적용하기 전 Alloy 718 잉고트에 대한 side-pressing 단조시험이 수행되었고, 그림 3에 1100°C에서 side-pressing된 Alloy 718 잉고트의 부위별 평균결정립크기를 나타낸 것으로, 해석결과는 측정결과를 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 또한, Alloy 718 잉고트 파쇄공정에 본 조직예측 시스템을 적용한 결과, 결정립 분포 및 변화양상을 잘 묘사하는 것으로 결과되었다.

그밖에 초내열합금인 Udimet 720Li합금의 항온 단조공정시 각 공정조건별 조직예측 수행[8]과 함께 최근에, 이음매없는 Alloy 718 압축기 링부품의 제조를 위한 형상 링압연공정에 대해 본 조직예측시스템을 적용하여 우수한 신뢰성을 입증할 수 있었으며, 본 발표에서 자세히 다루고자 한다.

## 4. 결 론

본 발표에서는 초내열합금의 조직예측기술과 관련된 이론적 내용과 실제 여러 적용사례에 대해 다루어졌으며, 본 연구내용을 토대로 초내열합금의 열간 성형공정설계시 조직제어를 위한 기술 기반이 마련될 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 산업기술개발사업(지식경제부)의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. (과제번호: 10029447).

- [1] D. U. Furrer, S.L. Semiatin, 2005, in: S.L. Semiatin (Eds.), ASM Handbook- Vol. 14A, Metalworking: Bulk Forming, ASM International, pp.324-330.
- [2] Nickel Alloy, Corrosion and Heat Resistant, Bars, Forgings, and Rings, 1997, SAE International, AMS 5663J
- [3] C.M. Sellars, J.A. Whiteman, 1979, Recrystallization and Grain Growth in Hot Rolling, Metal Sci., Vol. 13, pp. 187-194.
- [4] 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.
- [5] J.T. Yeom, N.K. Park, 1997, Assessment of grain size distribution in a hammer-forged Alloy 718 disk, J. of the Korean Society for Technology of Plasticity, Vol.6, No.3, pp. 250-256.
- [6] J.T. Yeom, N.K. Park, 1997, Forging of Superalloys for gas turbine, Machinery and Materials, Vol. 9, No.4, pp. 84-96.
- [7] J.T. Yeom, C.S. Lee, J.H. Kim, N.K. Park, 2007, Finite element analysis of microstructure evolution in the cogging of an Alloy 718 ingot, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 449-451, pp. 722-726.
- [8] J.T. Yeom, Y.S. Na, N.K. Park, 2002, Assessment of hot deformation and grain size distribution in a Udimet 720Li pancake, Transactions of Materials Processing, Vol. 11, No. 6, pp. 538-546