

# Alloy 718의 잉고트 파쇄공정시 재결정거동에 대한 해석

염종택<sup>1,2#</sup>, 이종수<sup>2</sup>, 김정환<sup>1</sup>, 김남용<sup>1</sup>, 박노광<sup>1</sup>

## Assessment of Recrystallization Behavior in Ingot-Breakdown Process of Alloy 718

J. T. Yeom, C. S. Lee, J. H. Kim, N. Y. Kim, N. K. Park

### Abstract

Recrystallization behavior during ingot-breakdown process of Alloy 718 was investigated with finite element analysis and experimental approaches. In order to analyze microstructural changes during the cogging process of an Alloy 718 ingot, the side-pressing and heat treatment tests were performed at different temperatures and ram speed. From the side-pressing and heat treatment test results, it was found that microstructural changes during hot forging of Alloy 718 ingot greatly influenced on a close interaction between dynamic and static-recrystallization behaviors. A recrystallization model of Alloy 718 was used to predict the complex microstructural variation during continuous heating and forging processes of the cogging, and the predicted grain size and its distribution were compared with the actual cogged Alloy 718 billet.

**Key Words :** Alloy 718, Ingot-Breakdown Process, Recrystallization, Finite Element Analysis, Side-Pressing

### 1. 서론

Alloy 718 잉고트 파쇄공정으로 주로 사용되고 있는 방법으로 여러 각도로 side-pressing을 가하는 코깅(cogging)공정이 주로 사용되고 있다.[1] 이러한 Alloy 718 잉고트의 코깅공정은 주조조직의 완전한 파괴 이외에 TCP(Topologically Close-Packed)상 및  $\delta$ 상 등 제어, 빌렛 표면과 내부간의 균일한 결정립 크기 유지, 평균 결정립 크기 제어, necklace 결정립 구조관리 등의 목적을 가지며, 결국 빌렛의 품질을 결정하는 중요한 공정이라 할 수 있다.[2] 코깅 공정시 잉고트 가열온도, 금형과 소재의 접촉시간, 재가열 횟수, 그 밖의 공정변수(변형량, 변형속도)는 잉고트조직의 파쇄정도와 최종 빌렛의 조직 및 특성에 상당한 영향을 미치게 되며, 특히, Alloy 718 잉고트의 결정립 미세화는 동적 및 정적 재결정거동에 의한 것이다. 따라서, 이들 공정변수의 효과적

인 제어를 통해 결정립 미세화와 균질화를 꾀하기 위해서는 Alloy 718 잉고트의 고온 변형시 공정변수에 따른 고온변형거동 특히, 재결정거동의 이해가 선행되어야 하며, 이와 함께 미세조직예측 및 평가를 위한 방법론의 구축이 반드시 수반되어야 한다.

본 연구의 목적은 크게 두 가지로 나누어 진다. 첫째는 실제 Alloy 718 잉고트 파쇄공정에 앞서 여러 공정조건에서 재결정 거동에 의한 결정립 미세화 현상을 고찰하는 것이며, 또 다른 하나는 Alloy 718 잉고트 파쇄공정시 미세조직을 예측하기 위한 결정립 예측 방법론을 구축하는 것이다. 이러한 연구 목적을 달성하기 위하여 본 연구에서는 여러 온도와 속도에 따른 side-pressing 시험을 수행하였고, 이들 시험결과를 토대로 재결정거동에 의한 결정립 미세화 현상을 이해하고자 하였다. 또한 신뢰할 수 있는 재결정모델과 FEM해석과의 연계방법을 통한 부 프로그램(User Material

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

2. 포항공과대학교 신소재공학과

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

Subroutine)을 구축함으로써 Alloy 718 잉고트 파쇄 공정시 미세조직을 사전에 예측하기 위한 방법론을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 3.1 Alloy 718 잉고트

본 연구에서 잉고트 파쇄공정에 사용된 Alloy 718 잉고트는 VIM(Vacuum Induction Melting)과 VAR(Vacuum Arc Remelting)공정을 거쳐 제조된 것으로, 1150°C에서 60시간동안 균질화 열처리 후 파쇄공정이 이루어 졌다.

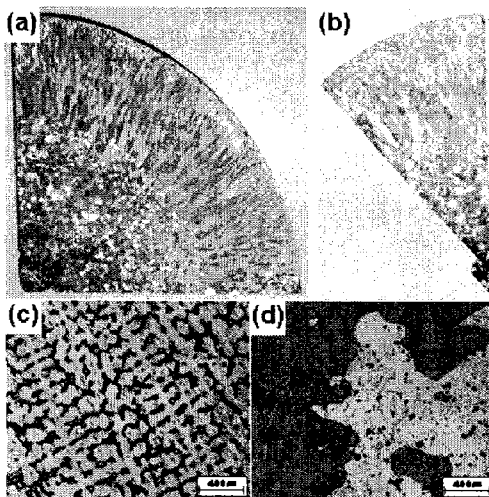


Fig. 1 Macrostructures (a) before and (b) after homogenization, and microstructures (c) before and (d) after homogenization

그림 1은 Alloy 718 잉고트의 균질화 처리 전·후 마크로 및 마이크로 조직사진을 나타낸 것이다. 뚜렷하게 구별이 되고 있지는 않으나, 잉고트의 최외각부터 Chill zone, Columnar zone, Equiaxed zone 이 생성되어 있음을 관찰할 수 있으며, 잉고트의 중심으로부터 가장자리로 갈수록 수지상의 간격이 좁아지고 있음을 알 수 있다. 한편, 균질화 처리 전·후의 미세조직을 살펴보면, 균질화 처리 전에는 전형적인 수지상 응고조직을 나타내고 있으나, 균질화 처리 후에는 고온의 장시간 노출로 인해 수지상간의 편석이 크게 개선된 고상변태조직을 나타내고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 Side-pressing시험

Alloy 718 잉고트 파쇄공정시 미세조직의 변화

를 사전에 예측하기 위하여 side-pressing시험이 수행되었다. Side-pressing시험은 지름 50mm, 높이 72mm의 원통형 시험편으로 준비하고, 금형온도를 300°C로 한 후 다른 온도와 단조속도조건에 따라 50%로 압축하였다. 이때 단조온도는 1000°C, 1050°C, 1100°C로 하였고, 단조속도는 4, 40mm/sec로 시험하였다. 또한, 열처리후 조직의 변화를 살펴보기 위하여 Side-pressing된 시험편은 여러온도와 유지시간에 따라 열처리시험을 수행한 후 미세조직의 변화를 분석하였다.

### 3.3 유한요소해석 및 잉고트 파쇄공정

Alloy 718 잉고트의 고온 변형에 대한 해석은 상용 유한요소해석(finite element method) 코드인 DEFORM-2D/3D 프로그램을 활용하였다. 또한, 미세조직을 예측하기 위한 방법으로 이러한 유한요소해석과 미세조직예측모델의 연계해석 방법론을 구축하였고, Side-pressing시험과 Alloy 718 잉고트 파쇄공정에 적용하였다. 최종적으로는 실제 Alloy 718 잉고트 파쇄공정에 연계해석 방법을 적용하여 신뢰성을 검증하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 Side-pressing시험결과 분석

그림 2는 1000°C, 1050°C의 온도조건에서 4와 40mm/s로 50%까지 side-pressing시험된 시험편의 조직사진을 나타낸 것이다.

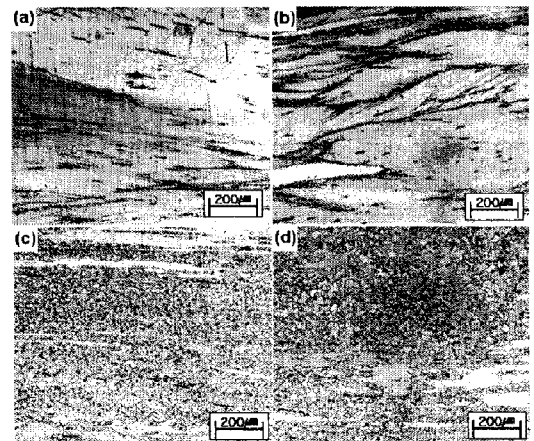


Fig. 2 Microstructures of the samples side-pressed at (a) 1000°C, 4mm/s, (b) 1050°C, 4mm/s, (c) 1000°C, 40mm/s and (d) 1050°C, 40mm/s

동일한 온도조건에서 4mm/s로 변형된 경우가

40mm/s로 변형된 경우에 비해 동적재결정에 의한 미세한 결정립의 분율이 현저히 떨어지고 있음을 관찰 할 수 있다.

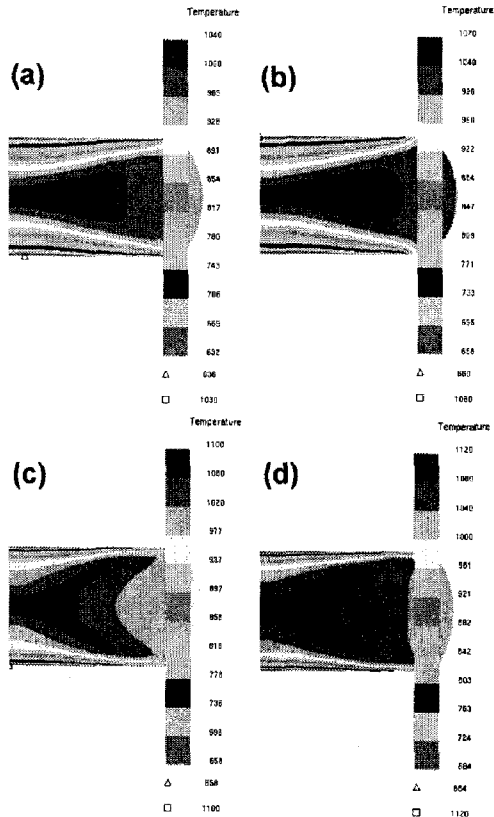


Fig. 3 Temperature contours of side-pressing simulation carried out at (a) 1000°C, 4mm/s, (b) 1050°C, 4mm/s, (c) 1000°C, 40mm/s and (d) 1050°C, 40mm/s

그림 3은 그림 2에서 살펴본 Side-pressing조건에 대해 유한요소해석을 수행한 결과중 온도분포를 나타낸 것이다. 해석결과에서 알 수 있는 바와 같이 40mm/s로 변형된 경우 변형열에 기인한 온도 상승으로 인해 중심부의 온도가 1100°C이상을 나타내고 있다. 그러나, 4mm/s로 변형된 경우 1050°C에서 변형된 조건에서조차 중심부 온도가 1070°C 정도로 약 20°C 정도 온도 상승이 발생하였음을 알 수 있다. Alloy 718 합금에서 결정립계에 존재하는  $\delta$ 상(Ni<sub>3</sub>Nb)은 재결정과 결정립 성장을 방해하는 상으로 알려져 있다.[3] 즉,  $\delta$ 상의 고용온도(1010~1040°C)를 기준으로 이 온도 이상에서 변형이 진행되는 경우 재결정속도는 급격하게 상승하게 됨을 의미한다. 따라서, 4mm/s의 단조속도에 비해 40mm/s의 단조속도에서 동적재결정이 더욱 활

발히 발생한 것에 대한 이유는 해석결과에서도 잘 반영하고 있듯이  $\delta$ 상의 고용온도 이상으로의 온도 상승이 주요한 요인으로 작용한 것으로 판단된다

한편, 그림 4는 Side-Pressing 시험 후  $\delta$ 상 고용온도 직상인 1050°C에서 100sec 동안 유지한 다음 부위별로 미세조직을 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 4mm/s의 단조속도로 초기 변형을 가한 후 등은 열처리된 경우가 40mm/s에 비해 결정립 크기는 다소 크나, 재결정분율은 오히려 상승하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 40mm/s의 경우가 4mm/s에 비해 정적 재결정의 구동력인 축적 에너지(stored energy)가 상대적으로 작음을 나타내는 것이다. 따라서, 동적재결정은 결정립 미세화 측면에서 유리하나, 균일조직을 얻기 위해서는 정적 재결정의 유도가 필수적이라 할 수 있다.

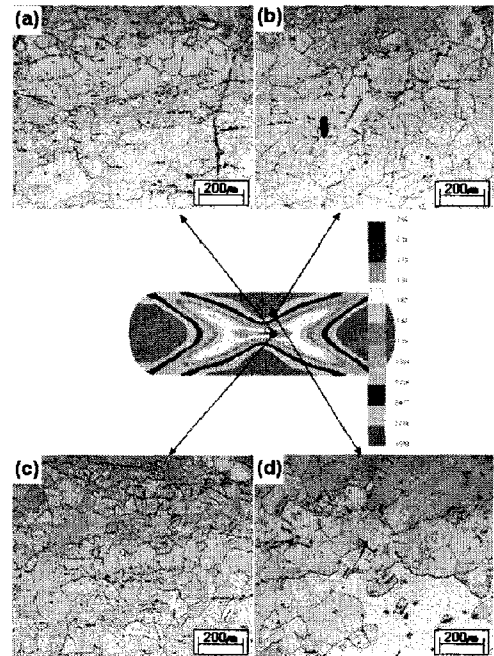


Fig. 4. Microstructures of the samples isothermal heated at (a) and (b) 1050°C, 4mm/s  $\Rightarrow$  1050°C/100sec, (c) and (d) 1050°C, 40mm/s  $\Rightarrow$  1050°C/100sec

### 3.2 미세조직 예측 방법론 및 검증

Alloy 718 잉고트 파쇄공정에 대한 최적 공정설계를 도출하기 위한 연구의 일환으로, 유한요소해석과 미세조직 예측모델의 연계해석 방법론을 구축하였다. 미세조직을 예측하기 위한 모델은 기존에 연구된 모델식을 활용하였고, DEFORM-2D/3D

의 부프로그램으로 작성되었다. 관련된 내용은 기존에 발표된 문헌[4]에서 자세히 다루었다. 그림 5는 1100°C에서 40mm/s로 Side-pressing한 경우에 대한 재결정 분율과 재결정된 결정립 크기의 해석 결과와 함께 실험결과를 비교분석한 것이다. 해석 결과는 전체적인 경향을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있으며, 측정결과와 비교시 약 10%이내의 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편, 열처리후의 정적 재결정된 결정립 크기와 분율의 경우 부위별로 다소 차이가 있는 부분도 있으나, 비교적 실험결과와 잘 일치하는 경향을 나타내었음을 확인하였다.

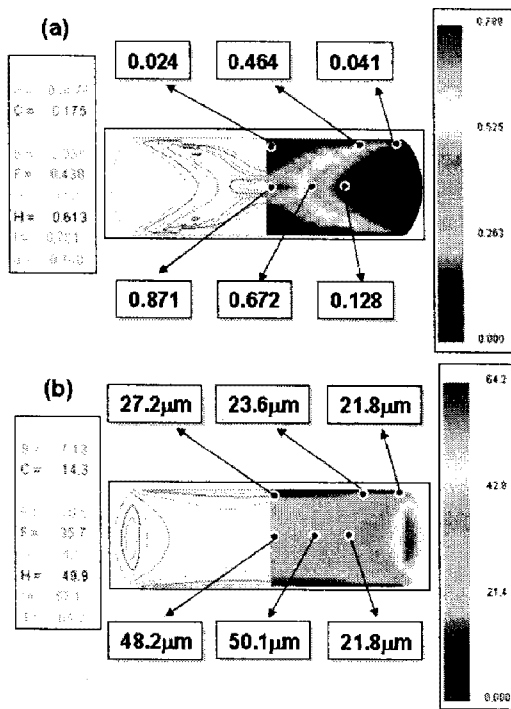


Fig. 5 (a) Volume fraction and (b) Dynamically recrystallized grain size contours obtained from sidepressing simulation at 1100°C and 40mm/s

### 3.3 Alloy 718 잉고트 파쇄공정 및 해석

Alloy 718 잉고트 파쇄공정은 기존 보고[4]에서 제시된 최적 공정설계조건에 따라 1100°C 부근에서 수행하였다. 코깅공정은 먼저 Alloy 718 잉고트를 4각으로 Side-pressing한 다음 6각, 원형 등으로 변화시켜 최종 지름 150mm급 원형 빌렛을 제조하였다. Alloy 718 잉고트 파쇄공정 직후의 부위별 평균 결정립 크기의 측정결과를 살펴본 결과, 정중앙에서의 결정립 크기에 비해 약간 떨어진 부위의

결정립 크기가 다소 미세한 것을 알 수 있었으며, 외곽으로 갈수록 결정립 크기가 커지고 있음을 알 수 있었다. 이러한 현상은 코깅공정에서 수행되는 반복적 가열과 단조로 인해 유도되는 동적 및 정적 재결정간 상호작용의 결과이며, Alloy 718 잉고트 파쇄공정에 대한 해석결과는 실제 공정에서 관찰된 결정립 분포에 대한 경향을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 Alloy 718 잉고트에 대하여 여러 공정변수에 따른 Side-pressing시험 및 열처리시험을 수행하였고, 이러한 시험을 분석한 결과 동적 재결정은 결정립 미세화 측면에서 유리하나, 균일조직을 얻기 위해서는 정적 재결정의 유도가 필수적이라는 것을 알 수 있었다. 또한, 본 연구에서 구축된 유한요소해석과 미세조직 예측모델의 연계 해석방법론을 Side-pressing시험과 Alloy 718 잉고트 파쇄공정에 적용한 결과, 약 10%이내의 오차를 가지는 신뢰할 수 있는 조직예측모델임을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 민·군겸용기술개발 사업(No.10023098-2005-21)과 함께 2003년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. R0A-2003-000-10309-0).

## 참 고 문 헌

- [1] 염종택, 박노광, 이종수, 2004, 고품위 초내열합금 Alloy 718 빌렛 제조기술, 한국소성가공학회지, 제13권, 제8호, pp. 653~662.
- [2] J. W. Brooks, 2000, Forging of Superalloys. Materials and Design, Vol. 21, pp. 297~303.
- [3] R. M. F. Jones and L. A. Jackman, 1999, The Structural Evolution of Superalloy Ingots during Hot Working. JOM, January, pp. 27~31.
- [4] 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.