

# 초내열합금 Nimonic 80A 의 미세조직 변화에 관한 연구

정호승\* · 조종래\* · 박희천\*\*

## Microstructure Evolution of Superalloy Nimonic 80A

H. S. Jeong, J. R. Cho and H. C. Park

### Abstract

The nickel-based alloy Nimonic 80A possesses strength, and corrosion, creep and oxidation resistance at high temperature. These products are used for aerospace, marine engineering and power generation, etc. The control of forging parameters such as strain, strain rate, temperature and holding time is important because the microstructure change in hot working affects the mechanical properties. It is necessary to understand the microstructure variation evolution. The microstructure change evolution occurs by recovery, recrystallization and grain growth phenomena. The dynamic recrystallization evolution has been studied in the temperature range 950-1250°C and strain rate range 0.05-5s<sup>-1</sup> using hot compression tests. The metadynamic recrystallization and grain growth evolution has been studied in the temperature range 950-1250°C and strain rate range 0.05, 5s<sup>-1</sup>, holding time range 5, 10, 100, 600 sec using hot compression tests. Modeling equations are developed to represent the flow curve, recrystallized grain size, recrystallized fraction and grain growth phenomena by various tests. Parameters of modeling equation are expressed as a function of the Zener-Hollomon parameter. The modeling equation for grain growth is expressed as a function of initial grain size and holding time.

**Key Words :** Nimonic 80A, Microstructure, Recrystallization, Grain growth, Superalloy, Hot deformation

### 1. 서론

선박 디젤엔진은 저속(70-200rpm, 2cycle)과 중속(200-800rpm, 4cycle)으로 구분된다. 특히, 선박의 저속 디젤엔진 배기밸브는 열효율을 향상시키기 위해 고온(400-600°C), 고압과 배기가스에 의한 부식에 노출되어있다. 또한 배기밸브는 열적, 기계적 반복하중을 수반하고 있다. 이런 조건을 충족하기 위해 대형 저속 배기밸브의 소재로 Nimonic 80A 를 사용하고 있다. 니켈을 기초로 한 초내열합금 Nimonic 80A 는 고온에서 우수한 기계적 특성과 내식성, 내산화 특성을 지니고 있고 항

공, 조선, 핵발전소 등의 부품으로 널리 사용되고 있다. 단조용 소재 Nimonic 80A 는 열간가공 동안 미세조직 변화가 발생하고, 기계적 특성에 영향을 미친다.

지금까지 많은 연구자들은 고온 변형시 미세조직 변화 현상을 연구하였고 미세조직의 정적, 동적, 입자 성장 등의 현상을 수학적 모델링을 하였으며<sup>(1-6)</sup>, 수학적 모델링을 유한요소법에 적용하여 미세조직을 예측하는 시뮬레이션을 수행하기도 하였다<sup>(7-8)</sup>. 미세조직 변화를 예측하고 공정 변수를 제어함으로써 기계적 특성을 향상시키는 연구가 많이 이루어지고 있다. 본 연구는 대형 배기 밸브

\* 한국해양대학교 기계정보공학부

\*\* (주)케이에스피

의 열간단조 동안 미세조직 변화 현상을 이해하고 기계적 특성을 향상시키기 위해서 Nimonic 80A 의 기초실험을 수행하여 공정 변수에 따른 미세조직 변화 현상을 이해하고 수학적 모델링을 할 것이다.

## 2. 실험

열간 가공동안 재결정과 입자성장이 발생한다. 미세조직 변화와 유동곡선을 연구하기 위해 열간 압축실험을 수행하였다. Nimonic 80A 의 화학성분은 Table 1 과 같다. 압축시편 크기는 직경 8mm, 높이 12mm 이다. 동적재결정 변화는 고온 압축 시험을 통해 변형률 속도  $0.05\text{-}5\text{s}^{-1}$ , 온도  $950\text{-}1250^\circ\text{C}$  범위에서 수행하였고, 입자 성장 변화는 변형률 속도  $0.05, 5\text{s}^{-1}$ , 온도  $950\text{-}1250^\circ\text{C}$ , 유지시간 5, 10, 100, 600sec 범위에서 수행하였다.

온도 측정을 위해 시편 표면에 열전대를 붙였고, 목표온도까지 초당  $5^\circ\text{C}$ 로 상승하여 3 분동안 등온 유지 하였다. 압축 실험 후 시편은 동적 재결정된 미세조직을 얻기 위해 질소가스에 의해 급속 냉각을 하였다.

Table 1 Chemical composition of Nimonic 80A(wt(%))

Element	Cr	Fe	Ti	Al	Ni
Composition	19.8	2.75	2.59	1.57	bal

## 3. 결과

### 3.1 유동 곡선 모델링

고온유동곡선은 공정변수인 온도, 변형률, 변형률 속도로 표현된다. 식(1)은 Zener-Hollomon 파라미터, 식(2)는 Arrhenius 방정식 형태인 하이퍼블릭 사인 방정식을 나타낸다. 여기서,  $Z$  는 고온 유동곡선을 표시하는데 매우 유용하게 이용된다.

$$Z = \dot{\epsilon} \cdot \exp(Q/RT) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \cdot \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

식(1)과 식(2)을 이용하여 식(3)으로부터 온도에 대한 기울기로부터 활성화 에너지  $Q$  를 구하였다. Fig. 1 은 식(3)을 이용하여 구한 값을 나타내고 있다.

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] = \frac{Q}{nRT} + c \quad (3)$$

$Q$  는 활성화 에너지(activation energy, J/mol)이며,  $R$  은 가스상수(gas constant,  $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ )이며,  $T$  는 절대온도(K)이다.

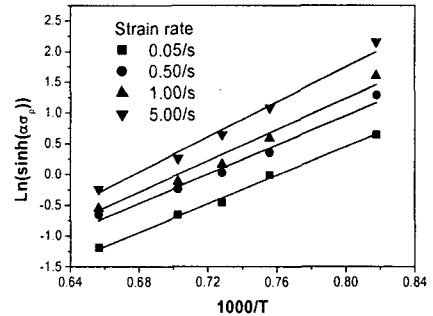


Fig. 1 Sinh( $\alpha\sigma_p$ ) vs temperature at various strain rate

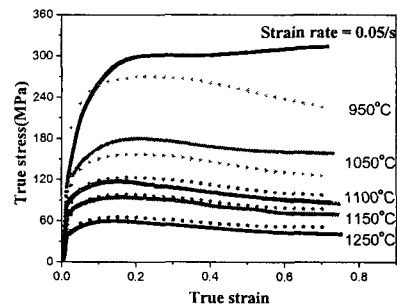
동적 연화현상을 고려하기 위해 유동곡선은 식 (4)와 같이 표현하였다.

$$\sigma = \sigma_p [1 - \exp(-c\epsilon)]^m - (\sigma_p - \sigma_s) [1 - \exp(-k(\frac{\epsilon - \alpha\epsilon_p}{\epsilon_p})^m)] \quad (4)$$

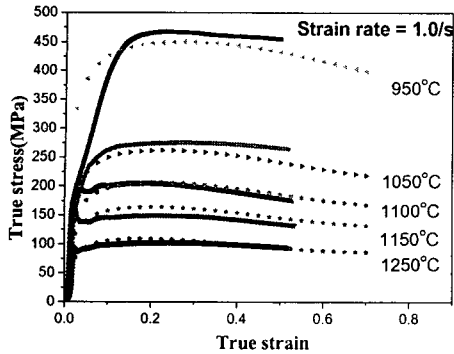
$$\sigma_p = 185.0(Z/A)^{0.17}$$

$$\epsilon_p = 0.20(Z/A)^{0.066}$$

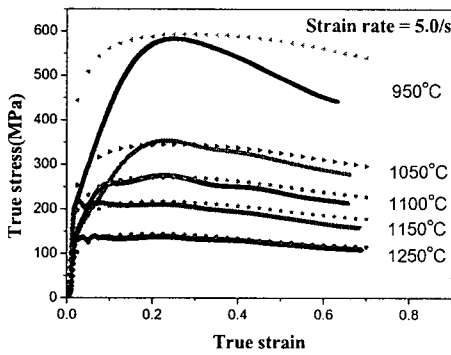
$\sigma_p$  는 최대 응력이며,  $\epsilon_p$  는 최대응력에 대한 변형률이다. 식 (4)을 이용하여 모델링된 유동곡선은 온도  $950\text{-}1250^\circ\text{C}$ , 변형률 속도  $0.05\text{-}5\text{s}^{-1}$  범위에서 실험값과 비교하여, Fig. 2 에 도시하였다.



(a)  $\dot{\epsilon} = 0.01/s$



(b)  $\dot{\epsilon} = 1.0/s$



(c)  $\dot{\epsilon} = 5.0/s$

Fig. 2 The relationship between experimental and predicted high temperature flow curves of Nimonic 80A in various strain rate and temperatures

### 3.2 재결정 현상

열간가공동안 동적재결정이 발생한다. 동적재결정은 공정변수인 온도, 변형률, 변형률 속도에 따라 입자 크기와 재결정분율이 달라진다. 식(5)는 동적재결정 입자크기를 나타내고, Fig. 3 은 온도에 따른 입자크기의 관계를 도시하며, Fig. 4 는 압축된 시편의 미세조직 사진이며 온도에 따른 입자 크기가 큰 차이를 보여주고 있다.

온도가 증가하고 변형률 속도가 감소하면 입자 크기가 커짐을 알 수 있다. 그러나, 변형률 속도가 너무 빠르면 변형에 의한 열이 발생되고 입자 크기와 재결정 분율에 영향을 끼친다.

$$d_{rex} = 1.33 \cdot 10^7 \dot{\epsilon}^{-0.05} (\exp(Q/RT))^{-0.37} \quad (5)$$

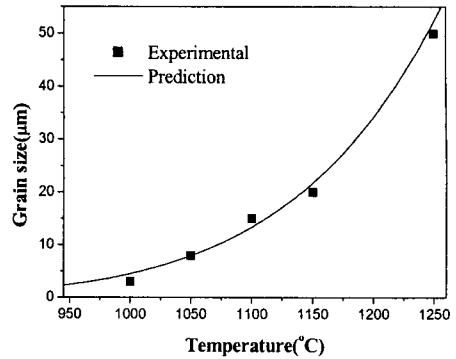
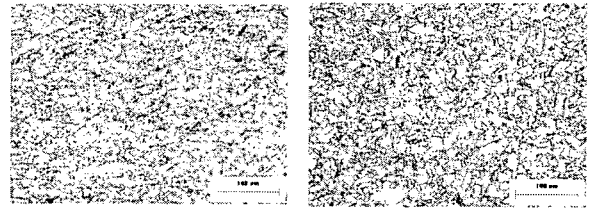
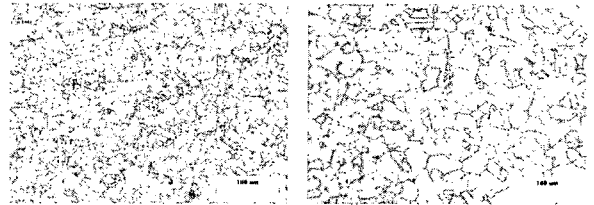


Fig. 3 The relationship between experimental and predicted dynamic recrystallization grain size of Nimonic 80A



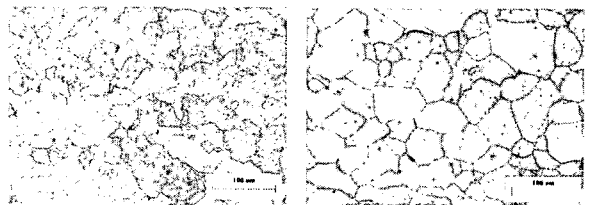
(a) 1100°C, 0.05/s

(b) 1100°C, 5.0/s



(c) 1150°C, 0.05/s

(d) 1150°C, 5.0/s



(e) 1250°C, 0.05/s

(f) 1250°C, 5.0/s

Fig. 4 Photography of microstructure of Nimonic 80A in various strain rates and temperatures

### 3.3 입자성장 현상

고온 변형에 의해 재결정이 발생한 후 입자 성장이 일어난다. 입자 성장은 시간이 지남에 따라 입자가 성장하고 초기 입자 크기에 따라 성장된 결과가 달라진다. 식(6)은 초기 입자 크기와 유지시간, 온도의 함수로 되어있다. Fig. 5 는 온도 1050-1250°C, 유지시간 1-100sec 범위에서 입자 성장식에 의한 예측값과 실험에서 구한 데이터를 비교하여 도시하였다.

$$\bar{d}^2 = d_0^2 + 1.4 \cdot 10^{17} \cdot t \cdot \exp(-Q/RT) \quad (6)$$

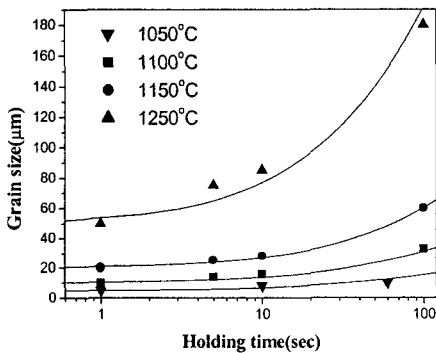


Fig. 5 The relationship between experimental and predicted grain growth during the holding period of Nimonic 80A

## 4. 결론

대형 디젤엔진 저속 배기밸브를 열간단조에 의해 만들기 위해 배기밸브 소재인 Nimonic 80A 의 열간 변형동안 미세조직 변화를 연구하였다.

1. 공정 변수인 변형률, 온도, 변형률 속도를 고려하여 고온 압축실험을 수행하였고 유동곡선과 재결정, 입자 성장의 미세조직 변화 현상을 관찰하였다.

2. Nimonic 80A 의 고온 유동곡선, 동적 재결정과 입자성장의 입자 크기를 수학적 모델링을 하였고 실험과 예측이 잘 일치하였다.

3. 고온 변형에서 동적 재결정과 입자성장된 입자 크기는 Zener-Hollomon 파라미터가 작을수록, 즉 온도가 높고 변형률 속도가 낮을수록 증가하였다.

4. Nimonic 80A 의 열간 변형동안 미세조직을 얻

기 위해선 공정변수인 온도, 변형률, 변형률 속도의 적절한 조절이 필요하다. 온도는 1050-1150°C 범위, 변형율은 1.0 이상이 가장 적합함을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 산업기술개발 사업과 교육인적자원부의 BK21 사업에 의하여 지원되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Sellars, C.M. & Whiteman, J.A., Recrystallization and grain growth in hot rolling, *Metal Science*, 13, 1979, 187-194.
- (2) S. F. MEDINA and C. A. HERNANDEZ, The influence of chemical composition on peak strain of deformed austenite in low alloy and microalloyed steels, *Acta mater.* Vol. 44, No. 1, 1996, pp. 149-154.
- (3) S. F. MEDINA and C. A. HERNANDEZ, Modeling of the dynamic recrystallization of austenite in low alloy and microalloyed steels, *Acta mater.* Vol. 44, No. 1, 1996, pp. 165-171.
- (4) J. M. Zhang, Z. Y. Gao, J. Y. Zhuang, Z. Y. Zhong, Modeling of grain size in superalloy IN718 during hot deformation, *Journal of Materials Processing Technology*. 88 (1999), pp. 244-250.
- (5) J. M. Zhang, Z. Y. Gao, J. Y. Zhuang, Z. Y. Zhong, Grain growth model of IN718 during holding period after hot deformation, *Journal of Materials Processing Technology*. 101 (2000), pp. 25-30.
- (6) S. C. Medeiros, Y. V. R. K. Prasad, W. G. Frazier, R. Srinivasan, Microstructural modeling of metadynamic recrystallization in hot working of IN 718 superalloy, *Materials Science and Engineering. A293* (2000), pp. 198-207.
- (7) Dandre, C. A. Roberts, S. M. Evans, R. W. & Reed, R. C. 1999, Prediction of microstructural evolution during cogging of Inconel 718: Process modeling and validation.
- (8) N. K. Park, I. S. Kim, Y. S. Na, J. T. Yeom, Hot forging of a nickel-base superalloy, *Journal of Materials Processing Technology*. 111 (2001), pp. 98-102.