

## 미세조직 변화를 고려한 대형 배기밸브 스피들 제조공정 해석

정호승† · 조종래\* · 박희천\*\*

(원고접수일 : 2005년 6월 30일, 심사완료일 : 2005년 11월 7일)

### **A Manufacturing Process analysis of Large Exhaust Valve Spindle considering Microstructure Evolution**

Ho-Seung Jeong† , Jong-Rae Cho\*\* and Hee-Cheon Park\*\*

**Abstract :** The microstructure evolution in hot forging process is composed of dynamic recrystallization during deformation as well as grain growth during dwell time. Therefore, 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. Modeling equations are developed to represent the flow curve, grain size, recrystallized volume fraction and grain growth phenomena by various tests. The developed modeling equations were combined with thermo-viscoplastic finite element modeling to predict the microstructure change evolution during hot forging process. The large exhaust valve spindle (head diameter of 512mm) was simulated by closed die forging with hydraulic press and cooled in air after forging. The preform was heated to each 1080 and 1150°C. Numerical calculation was performed by DEFORM-2D, a commercial finite element code. Heat transfer can be coupled with the deformation analysis in a non-isothermal deformation analysis. In order to obtain the fine and homogeneous microstructure and good mechanical properties in forging, the FEM would become a useful tool in the simulation of the microstructure development. In forging, appropriate temperature, strain and strain rate and rapid cooling are required to obtain the fine grain microstructure. The optimal forging temperature and effective strain range of Nimonic 80A for large exhaust valve spindle are about 1080~1120°C and 150~200%.

**Key words :** Exhaust valve spindle(배기밸브 스피들), Recrystallization(재결정), Grain growth(입자 성장), Microstructure evolution(미세조직 변화), FEM(유한요소법)

---

† 책임저자(한국해양대학교 공학박사), E-mail : jhs009@naver.com Tel : 051)410-4972

\* 한국해양대학교 기계정보공학부

\*\* (주)케이에스피

## 기호설명

$X_{dyn}$  : Recrystallized volume fraction

$Q$  : Activation energy, kJ/mol

$\epsilon$  : Strain

$\dot{\epsilon}$  : Strain rate

$T$  : Temperature(°C)

$t$  : Time(sec)

$D$  : Grain size( $\mu\text{m}$ )

## 1. 서 론

열간 소성가공이란 재결정 온도 이상에서 금속에 외력을 가하여 소성변형 시켜서 여러 가지 형태의 물체를 만드는 것을 말한다. 열간 소성가공 동안 금속조직은 동적 회복, 동적 재결정 현상과 가공 후 일정 온도 이상에서 정적 재결정과 입자 성장이 발생한다. 이러한 미세조직 변화는 기계적 특성에 영향을 미치며 열간 가공에 있어서 공정변수인 온도, 변형률 속도, 변형률 등이 적절히 사용되지 못하면 금속조직이 불균일하게 되어 균일하고 미세한 입자를 얻을 수 없다. 따라서 이러한 공정 변수들의 최적 제어가 가능하다면 균일하고 미세한 미세조직을 얻을 수 있고 기계적 특성을 향상시킬 수 있으며 현재까지 많은 연구가 되고 있다.

Srinivasan 등은 Nimonic 75, 80A and 90의 유동곡선과 열간 변형특성을 연구하였고<sup>[1]</sup>, Park 등은 Inconel 718의 열간성형 동안 동적, 준동적 재결정에 대해 유한요소법을 이용하여 미세조직 예측을 하였으며<sup>[2]~[5]</sup> Robert 등은 Inconel 718의 코깅(cogging) 동안 미세조직 변화를 예측하기 위해 정적, 동적 재결정과 입자 성장을 고려하여 시뮬레이션을 하였다<sup>[6]</sup>. Cho 등은 Al과 금형강에 대해 열간성형 동안 동적재결정과 입자 성장에 대해 유한요소법을 이용하여 미세조직 예측을 하였다<sup>[7], [8]</sup>. Wang 등은 유한요소법을 이용하여 전기 업셋팅 방법으로 배기밸브 스프링의 예비성형품을 만드는 공정에 관하여 연구하였고<sup>[9]</sup>, Kim 등은 열간 형단조에 의한 배기밸브 헤드 제작을 위해 소재의 단순 압축 실험과 압축 후 경도변화

에 대한 연구를 하였다<sup>[10]</sup>. 최근에는 제품 성형공정 동안 유한요소법을 이용하여 미세조직을 예측하는 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[11]~[13]</sup>.

본 연구에서는 Nimonic 80A 소재를 사용하여 열간 형단조 방법으로 대형 배기밸브를 균일하고 미세한 입자를 갖는 제품을 만들기 위해 Nimonic 80A의 미세조직 변화에 대한 수학적 모델식들을<sup>[14]</sup> 열점소성 유한요소법과 연계하여 전산수치해석 방법을 제시하고 대형 배기밸브 제작 공정 해석을 통한 미세조직의 변화과정을 관찰하여 최적의 제조공정을 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 미세조직 변화 수학적 모델링

대형 디젤엔진의 배기밸브 소재로 사용되는 초내열합금 Nimonic 80A에 대한 미세조직 변화 예측을 위한 수학적 모델식들을 식 (1)~(5)에 나타내었다. 동적 재결정은 재결정이 발생하는 온도 이상에서 임계변형률(critical strain) 이상의 변형을 받으면 동적 재결정이 발생한다. 식 (1)은 고온 유동곡선에서 최대응력이 발생하는 변형률을 함수로 표시하고 있으며 임계변형률보다 크다. 식 (2)은 동적 재결정 입자크기를 표현한 식이며 고온가공에서 공정변수인 온도, 변형률 속도의 함수로 표시하고 있다. 동적 재결정이 발생하는 정도를 동적 재결정 분율이라 하며, 식 (3)과 같이 초기 입자크기, 변형률, 변형률 속도, 온도의 함수로 표시하고 있다. 식 (4)는 재결정이 50% 발생하는 지점을 나타내는 함수이며 식 (3)에 적용된다. 입자성장은 온도가 높고 유지시간이 길수록 입자크기가 커지며 성장속도가 빨라진다. 온도와 유지시간에 따른 입자성장예에 의한 입자크기 변화를 식 (5)와 같이 온도, 유지시간, 초기 입자크기로 표시하고 있다.

$$\epsilon_p = 0.199 \left( \frac{Z}{A} \right)^{0.0657} \quad (1)$$

$$D_{dyn} = 1.2 \times 10^{-7} \dot{\epsilon}^{-0.08} \left[ \exp \left( \frac{Q}{RT} \right) \right]^{-0.36} \quad (2)$$

$$X_{\text{dyn}} = 1 - \exp \left[ -0.693 \left( \frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}} \right)^{2.0} \right] \quad (3)$$

$$\epsilon_{0.5} = 10^{-4} D_0^{0.3} \dot{\epsilon}^{0.1} \left[ \exp \left( \frac{Q}{RT} \right) \right]^{0.2} \quad (4)$$

$$D^2 = D_0^2 + 1.4 \times 10^{17} t \exp \left( -\frac{Q}{RT} \right) \quad (5)$$

여기서  $Z$ 는 Zener-Hollomon 파라미터이며,  $Q$ 는 Nimonic 80A에 대한 열간 변형동안의 활성화 에너지(activation energy, 426 kJ/mol),  $T$ 는 절대 온도(K),  $R$ 은 기체상수(gas constant, 8.314 J/mol K),  $\epsilon_{0.5}$ 은 50% 동적 재결정이 발생하는 변형률,  $D_0$ 는 초기 입자크기,  $t$ 는 유지 시간(sec)을 나타낸다.

## 2.2 미세조직 변화 예측 해석 방법

미세조직 변화를 예측하기 위해선 Nimonic 80A의 미세조직 변화에 대한 수학적 모델식을 열점소성 유한요소법에 연계시킨다. 열간 공정변수인 변형률, 온도, 변형률 속도, 초기 입자크기, 시간에 대한 정보를 사용하여 미세조직 변화를 예측한다. 동적 재결정 분율은 온도와 변형률에 따라 비선형으로 증분하므로 식 (6)과 같이 현재 변형률과 이전 변형률에 대한 재결정 분율의 증분을 구하여 사용한다. 공정변수 값들을 사용하여 구한 입자크기를 식 (7)에 의해 매 스텝마다 동적 재결정된 평균 입자크기로 변환한다. 동적 재결정 평균 입자크기는 이전 스텝에서의 재결정된 입자크기와 현재 스텝에서의 재결정된 입자크기를 동적 재결정 분율의 비로서 구한다. 식 (8)은 현재 스텝까지의 동적 재결정 분율을 구하는 식이다. 식 (9)은 입자성장을 구하는 식이며 시간과 온도에 따라 비선형으로 증분함에 따라 현재 위치에서의 시간과 이전 위치에서의 시간에 대한 입자크기 증분을 구하여 사용한다. 식 (10)은 평균 입자크기를 구하는 식으로써 평균 입자크기는 재결정된 평균 입자크기와 재결정이 되지 않는 입자크기를 재결정 분율의 비로서 구한다.

$$X_{\text{dyn},n} = \Delta \left[ 1 - \exp \left( -A \left( \frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon_{0.5}} \right)^B \right) \right] \quad (6)$$

$$\bar{D}_{\text{dyn},n} = \left[ \frac{\bar{D}_{\text{dyn},n-1} \sum X_{\text{dyn},n-1} + D_{\text{dyn},n} X_{\text{dyn},n}}{\sum X_{\text{dyn},n}} \right] \quad (7)$$

$$\sum X_{\text{dyn},n} = \sum X_{\text{dyn},n-1} + X_{\text{dyn},n} \quad (8)$$

$$\bar{D}_{\text{dyn},n}^2 = \bar{D}_{\text{dyn},n-1}^2 + C \Delta t \exp \left( -\frac{Q}{RT} \right) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{D}_{m,n} = & A \cdot \bar{D}_{\text{dyn},n} \sum X_{\text{dyn},n} \\ & + B \cdot D_{0,n} (1 - \sum X_{\text{dyn},n}) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (6)~(10)에서  $n$ 은 현재 스텝을 나타내며  $\bar{D}_m$ 은 평균 입자크기를 나타낸다.

## 3. 배기밸브 스프링들 제작공정 해석

### 3.1 배기밸브 스프링들 형단조 공정해석

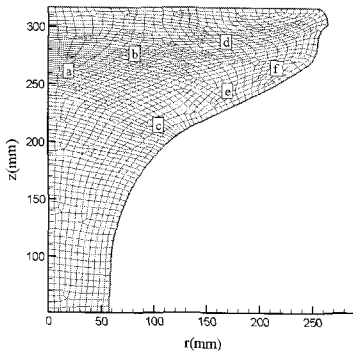
본 연구에서는 실린더 직경이 900mm의 디젤기 관용 배기밸브 스프링들을 해석 모델로 선정하였다. 이 모델의 헤드부 직경은 512mm, 스텝부 직경은 118mm이며 스텝부와 헤드부의 직경이 4배 이상 차이가 난다. 이런 형상은 먼저 예비 성형체를 만들어야 한다. 예비 성형체의 초기 가열온도와 형상은 최종 제품의 입자크기에 영향을 미치므로 초기 단조온도와 예비성형체 형상을 달리하여 해석을 하였다. 열간 형단조를 위해 예비 성형체를 가열하면 가열온도에 따라 입자성장에 의해 초기 입자크기가 달라진다. 가열 후 프레스까지 소재 이송시간 50sec 동안 소재는 대기와의 열전달에 의해 냉각이 발생한다. 형단조 공정 동안 소재는 대기와 금형과의 열전달에 의한 냉각을 방지하기 위해 단열재를 사용하였다. 단조 후 300sec 공냉 동안 소재는 냉각된다. 이런 현상들을 고려하여 공정해석을 Table 1 조건을 사용하여 열점소성 해석 프로그램인 DEFORM -2D와 미세조직 예측 프로그램을 연계하여 수행하였다.

**Table 1 Hot closed die forging processing parameters for finite element analysis**

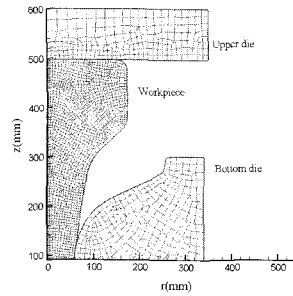
Item	Value	
	Case 1	Case 2
Workpiece heating temperature	1150℃	1080℃
Setting time after heating	50 sec	
hydraulic press velocity	10 mm/sec	
Air cooling time after forging	300 sec	
Friction factor	0.1	
Initial temperature of die	450 ℃	
Room temperature	20 ℃	
Thermal conductivity of workpiece	28.4 N/sec℃	
Thermal conductivity of die	24.5 N/sec℃	
Heat capacity of workpiece	6.0 N/mm <sup>2</sup> ℃	
Heat capacity of die	3.9 N/mm <sup>2</sup> ℃	
Convection coefficient	0.02N/mm sec℃	
Lubricant heat transfer coefficient	0.2 N/mm sec℃	
Emissivity	0.6	

3.2 공정해석 결과

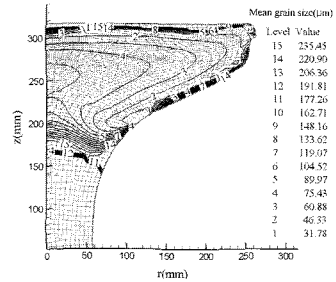
Fig. 1은 형단조에 의한 최종 형상이며 미세조직 변화를 관찰하기 위한 위치를 나타내고 있다. Fig. 2(a)와 3(a)는 초기 유한요소해석을 위한 요소형상을 나타내었으며 소재 형상을 달리한 이유는 초기 형상이 형단조 동안 입자크기에 미치는 영향을 비교하기 위함이다. Fig. 2(b)는 열간 형단조 공정해석의 결과이며 평균 입자크기 분포를 나타내고 있다.



**Fig. 1 Inspection positions at the section of exhaust valve head**

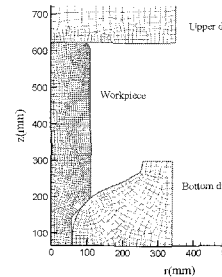


(a) initial finite element mesh shape

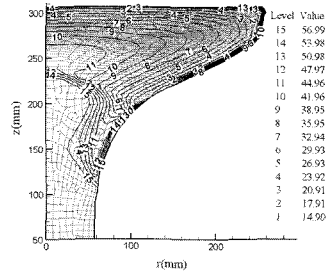


(b) distribution of mean grain size at final processing

**Fig. 2 FE simulation results of large exhaust valve forging(case 1)**



(a) initial finite element mesh shape

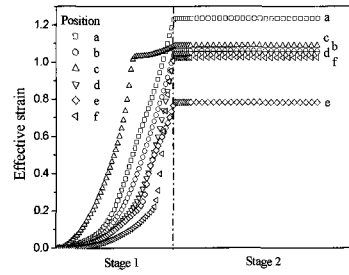


(b) distribution of mean grain size at final processing

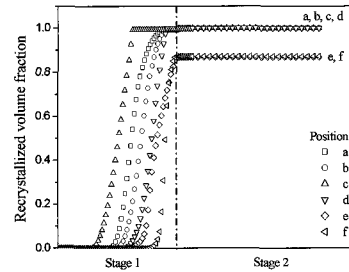
**Fig. 3 FE simulation results of large exhaust valve forging (case 2)**

Fig. 4와 5는 공정에 따른 각 부위에서의 공정 변수와 미세조직 변화를 나타내고 있다. Fig. 4(a)와 5(a)에서는 형단조 동안 소재에서 발생하는 유효변형률을 도시하였으며 범위는 각각 0.8~1.2와 1.3~2.1을 나타내었다. 소재의 초기 형상에 따라 변형률이 달라짐을 알 수 있었다. Fig. 4(b)와 5(b)에서는 동적 재결정분율을 도시하였으며 온도와 유효변형률에 따라 동적 재결정분율은 달라진다. Fig. 4(a) 경우 표면부위에서는 재결정이 88% 발생하였고 이 외의 부위에서는 100% 발생함을 알 수 있었다. 균일한 입자크기를 만족하기 위해서는 100% 재결정이 발생하여야 하며 이는 충분한 재결정온도와 변형이 생겨야 한다. Fig. 4(c)와 5(c)는 형단조 동안 소재의 온도 변화를 나타낸다. Fig. 4(c)는 소재의 초기 가열 온도가 1150°C이나 이송동안 대기와의 열전달에 의해 내·외의 온도분포가 달라짐을 알 수 있었다. Fig. 5(c)는 초기 온도가 1080°C이나 이송동안 소재의 단열재 보호에 의해 내외의 온도차가 적게 변화됨을 알 수 있었다. 소재의 중심부에서는 변형에 따른 변형열이 발생하여 온도가 증가함을 알 수 있었다. 특히 상대적으로 초기 온도가 낮을수록 변형열이 많이 발생함을 알 수 있었다. 냉각 과정에서 내부는 냉각속도가 느리며 표면에서는 냉각속도가 빨라짐을 알 수 있었다.

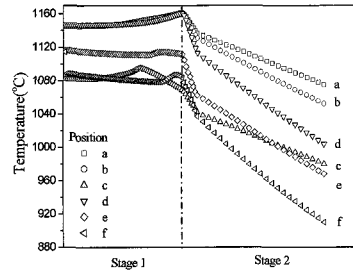
Fig. 4(d)와 5(d)는 형단조 공정 동안 입자크기의 변화를 보여준다. 변형에 의해 동적재결정이 발생하고 이로 인해 입자크기가 작아짐을 알 수 있었다. 냉각과정에서는 표면부의 빠른 냉각에 의해 입자성장이 적은 반면 내부는 늦은 냉각에 의해 입자성장이 발생하여 입자크기가 외부보다 커짐을 알 수 있었다. Fig. 4(d)에서 a부위는 단조 전 온도가 1145°C이고, 단조 후 온도가 1161°C이므로 변형열에 의해 온도가 16°C정도 상승하였으며, 동적 재결정은 100% 발생하였고 평균 입자크기는 단조 후 50 μm에서 입자 성장에 의해 89 μm로 나타났다. 입자가 다른 부위보다 큰 이유는 높은 초기 성형온도에 의해 재결정 입자크기가 상대적으로 크며 또한 다른 부위보다 냉각이 상대적으로 늦어 입자 성장에 의해 평균 입자크기가 크게 나타남을 알 수 있었다.



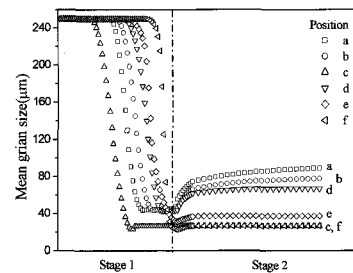
(a) distribution of effective strain



(b) distribution of recrystallized volume fraction



(c) distribution of temperature



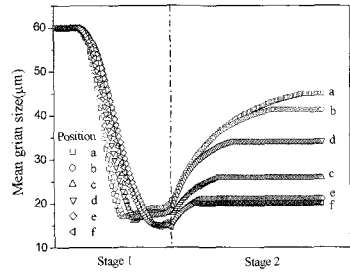
(d) distribution of mean grain size

**Fig. 4 FE simulation results of exhaust valve forging processing (Stage 1: forging, Stage 2: 300sec air cooling), (case 1)**

Fig. 5(c)에서 a부위는 단조 전 온도가 1080°C이고, 단조 후 온도가 1120°C이므로 변형열에 의

해 온도가 40℃정도 상승하였으며, 동적 재결정은 100% 발생하였고 평균 입자크기는 단조 후 20 μm에서 입자 성장에 의해 45 μm로 나타났다. 입자가 다른 부위보다 큰 이유는 많은 변형에 의해 100% 재결정이 발생하여 초기 입자보다는 작아졌지만 변형열에 의한 온도상승이 발생하여 재결정 입자크기가 다른 부위보다 상대적으로 크며 또한 다른 부위보다 냉각이 상대적으로 늦어 입자성장예 의해 평균 입자크기가 크게 나타남을 알 수 있었다.

재결정이 100% 발생하지 않으면 소재의 입자는 균일하지 않으며 초기 입자크기는 최종 입자크기에 상당한 영향을 준다. 초기 성형온도에 따라서 성형 후 최종 입자크기에 영향이 있음을 알 수 있었다.



(d) distribution of mean grain size

**Fig. 5** FE simulation results of exhaust valve forging processing (Stage 1: forging, Stage 2: 300sec air cooling), (case 2)

#### 4. 결 론

대형배기밸브에 대한 열간 형단조 해석을 통해 시간에 따라 공정변수와 미세조직 변화를 관찰하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

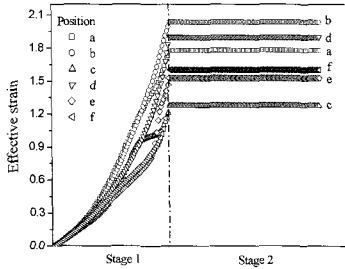
(1) 수치해석적인 방법으로 미세조직 예측을 위한 해석방법을 제시하였으며 이를 통해 열점소성 유한요소법을 이용해 미세조직 변화를 고려한 대형 배기밸브 스프링들 제조공정 해석을 수행하였다.

(2) 대형 배기밸브 스프링들의 경우 열간 형단조 과정에서 중심부위에선 많은 변형과 변형열이 발생하여 내부 온도가 증가하여 완전한 재결정이 발생하였다. 그러나 중심부에선 냉각이 잘 되지 않아서 급속한 입자성장이 발생하였다. 표면부위에서는 중심부위보다 변형이 작고 빠른 냉각에 의해 완전한 재결정을 발생하기 어려웠다.

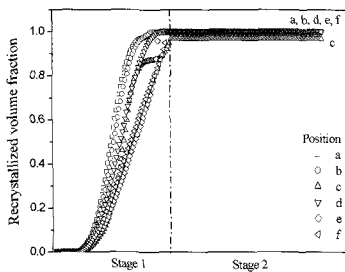
(3) 열간 형단조 공정해석을 통해 공정에 따른 미세조직 변화를 고찰하여 다음과 같은 최적의 단조 조건을 구할 수 있었다. Nimonic 80A의 열간 형단조동안 미세하고 균일한 조직을 얻기 위해선 소재의 온도 범위는 1080~1120℃, 변형률은 1.5~2.0이 가장 적합함을 알 수 있었다. 또한 소재 이송동안 내부부의 온도차를 적게 하기 위해 단열이 요구되며 형단조 후 입자성장을 방지하기 위해 급냉이 요구되었다.

#### 후 기

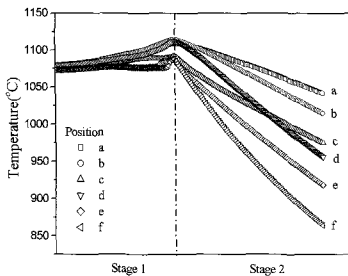
본 연구는 산업자원부의 우수제조기술연구센터



(a) distribution of effective strain



(b) distribution of recrystallized volume fraction



(c) distribution of temperature

(ATC) 기술개발사업에 의하여 지원되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] N. Srinivasan, Y. V. R. K. Prasad, "Hot working characteristics of nimonic 75, 80A and 90 superalloys: a comparison using processing maps", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 51, pp. 171-192, 1995.
- [2] 엄종택, 박노광, "해머 단조된 Alloy 718 디스크의 결정립 분포 해석", *한국소성가공학회지*, Vol. 6, No. 3, pp. 250-256, 1997.
- [3] 최민식, 강범수, 엄종택, 박노광, "유한요소법을 이용한 Inconel 718의 열간단조공정시 동적 재결정거동 예측", *한국소성가공학회지*, Vol. 35, No. 6, pp. 197-206, 1998.
- [4] 엄종택, "유한요소법을 이용한 단조공정시 조직 예측기법의 적용 사례", *단조심포지엄*, 2001.
- [5] 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, pp. 98-102, 2001.
- [6] S. M. Roberts, C. A. Walsh, R. C. Reed, C. A. Dandre, J. P. Lewis, R. W. Evans, "Nickel-base superalloy forging for gas turbine applications: Process model, microstructural model and validation", *Metal Forming 2000*, ISBN 90-5809-157-0.
- [7] 정호승, 조종래, 차도진, 배원병, "금형강의 동적 및 정적 재결정 거동과 미세조직 변화 예측에 관한 연구", *한국소성가공학회지*, Vol. 10, No. 4, pp. 338-346, 2001.
- [8] J. R. Cho, W. B. Bae, W. J. Hwang, "A study of the hot deformation behaviour and dynamic recrystallization of Al-5wt.%Mg alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, pp. 356-361, 2001.
- [9] 왕지석, 박태인, "전기 업셋팅 가공시의 열간 소성 해석에 관한 연구", *한국박용기관학회지*, Vol. 18, No. 4, pp. 423-430, 1994.
- [10] D. K Kim, D. Y. Kim, S. H Ryu, D. J Kim, "Application of nimonic 80A to the forging of an exhaust valve head", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 148-152, 2001.
- [11] 박종진, 황한섭, 이상주, 홍승찬, 임성환, 이경섭, 이경중, "로워암 커넥터 열간단조 공정의 유한요소해석 및 미세조직 예측", *대한기계학회논문집 A권*, Vol. 27, No. 7, pp. 1243~1250, 2003.
- [12] N. Bontcheva and G. Petzov, "Microstructure evolution during metal forming processes", *Computational Materials Science*, Volume 28, pp. 563-573, 2003.
- [13] G. Kugler and R. Turk, "Modeling the dynamic recrystallization under multi-stage hot deformation", *Acta Materialia*, Volume 52, pp. 4659-4668, 2004.
- [14] 정호승, 조종래, 박희천. "초내열합금 Nimonic 80A의 미세조직 변화에 대한 연구", *한국소성가공학회 춘계학술대회논문집*, pp. 174-177, 2004.

### 저 자 소 개



정호승 (鄭互勝)

1972년 04월생, 1999년 한국해양대학교 기계공학과 졸업(학사), 2001년 동대학원 기계공학과 졸업(석사), 2005년 동대학원 기계공학과 졸업(박사)



**조종래(趙琮來)**

1959년 3월생, 1982년 부산대학교 기계공학 졸업(학사), 1984년 한국과학기술원 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1993년 한국과학기술원 대학원 정밀공학과 졸업(박사), 1984년 1995년 한국중공업 기술연구소, 1999년 Post-Doc. (영

국-Birmingham Univ.), 1995년 ~ 현재 한국해양대학교 기계정보공학부



**박희천(朴熙千)**

1962년 08월생, 2000년 울산대학교 대학원 산업경영공학 졸업(석사), 2004년 한국해양대학교 대학원 기계공학 박사과정수료, 1987년~ 2000년 한국프랜지공업(주), 2000년 ~ 현재 (주)케이에스피