

열간 형단조 Nimonic 80A 의 미세조직 변화 예측

정호승¹ · 조종래[#] · 박희천² · 이성열³

Microstructure Prediction of Superalloy Nimonic 80A for Hot Closed Die Forging

H. S. Jeong, J. R. Cho, H. C. Park, S. Y. Lee

(Received December, 28, 2004)

Abstract

The nickel-based alloy Nimonic 80A possesses the excellent strength, and the resistance against corrosion, creep and oxidation at high temperature. Its products are used in aerospace engineering, marine engineering and power generation, etc. Control of forging parameters such as strain, strain rate, temperature and holding time is important because change of the microstructure in hot working affects the mechanical properties. Change of the microstructure evolves by recovery, recrystallization and grain growth phenomena. The dynamic recrystallization evolution has been studied in the temperature range of 950~1250°C and strain rate range of 0.05~5 s⁻¹ using hot compression tests. The metadynamic recrystallization and grain growth evolution has been studied in the temperature range of 950~1250°C and strain rate range 0.05, 5 s⁻¹, holding time range of 5, 10, 100, 600 sec using hot compression tests. Modeling equations are proposed to represent the flow curve, recrystallized grain size, recrystallized fraction and grain growth phenomena by various tests. Parameters in modeling equations are expressed as a function of the Zener-Hollomon parameter. The modeling equation for grain growth is expressed as a function of the initial grain size and holding time. The modeling equations developed were combined with thermo-viscoplastic finite element modeling to predict the microstructure change evolution during hot forging process. The grain size predicted from FE simulation results is compared with results obtained in field product

Key Words : Nimonic 80A, FEM, Recrystallization, Superalloy, Hot Forging, Microstructure Evolution, Grain Growth

1. 서 론

선박 디젤엔진은 저속(70~200 rpm, 2 cycle)과 중속(200~800 rpm, 4 cycle)으로 구분된다. 특히, 선박의 저속 디젤엔진 배기밸브는 열효율을 향상시키기 위해 고온(400~600°C), 고압과 배기가스에 의한 부식에 노출되어 있으며 열적, 기계적 반복하중을 수반하고 있다. 니켈을 기초로 한 초내열합금

Nimonic 80A 는 고온에서 우수한 기계적 특성과 내식성, 내산화 특성을 지니며 항공, 조선, 핵발전소 등의 부품으로 널리 사용되고 있다. 단조용 소재 Nimonic 80A 는 열간가공 동안에 미세 조직 변화가 발생하며 기계적 특성 변화에 영향을 미친다. 지금까지 많은 연구자들은 고온 변형시 미세 조직 변화 현상을 연구하였고 정적, 동적, 입자 성장 등의 현상을 수학적으로 모델링하였으며[1~6],

1. 한국해양대학교 기계정보공학부

2. (주)케이에스피 기술연구소

3. 한국해양대학교 기계소재공학부

교신저자: 한국해양대학교 기계정보공학부

여러 소재의 수학적 모델링을 유한요소법과 연계하여 미세조직 변화를 예측하는 시물레이션을 수행하기도 하였다[7~12].

현재 Nimonic 80A 소재는 전량 수입에 의존하며 가격이 고가이다. 또한 고온에서는 일반 탄소강보다 유동응력이 크고, 단조 온도 구간이 좁으며 난삭재이다[12~14]. 따라서 열간변형 동안 공정변수들을 제어하여 제품의 전 영역에 걸쳐 균질하고 미세한 조직을 얻을 수 있고, 최대한 가공 형상에 가까운 정형(net shape)으로 성형할 수 있으면 제품 제작에 있어서 시간과 소재의 손실을 최대한 줄일 수 있으므로 경제적이거나 시간적으로 많은 이익을 얻을 수 있다.

본 연구는 Nimonic 80A의 기초 실험을 통해 미세조직 변화를 고찰하여 수학적 모델링을 제시하고 이를 열점소성 유한요소법에 연계하여 대형 배기 밸브의 실제 제품 실험을 통해 미세조직과 시물레이션 결과를 비교하여 시물레이션의 타당성을 검증한다. 그리고 공정 변수에 따른 미세조직 변화 과정을 고찰하여 공정변수와 미세조직 변화와의 상관관계를 규명한다.

2. 실험

미세조직 변화를 고찰하고 수학적 모델링을 위해 고온 압축실험을 수행하였다. 실험에 사용된 Nimonic 80A의 화학성분은 Table 1과 같고 시편 크기는 직경 8mm, 높이 12mm이다. 동적 재결정 현상을 고찰하기 위해 변형률 속도 0.05~5s⁻¹, 온도 950~1250℃ 범위에서 Thermicmaster를 이용하여 압축 실험을 수행하였고, 동적 재결정 후 입자 성장을 고찰하기 위해 변형률 속도 0.05, 5s⁻¹, 온도 950~1250℃ 범위에서 압축 후 유지시간 5, 10, 100, 600sec 범위에서 입자 성장 현상을 관찰하였다. 열전대를 이용하여 시편의 온도를 측정하였고, 목표 온도까지 초당 5℃로 가열하여 3분 동안 등온 유지 한 다음 50% 압축 후 시편을 질소 가스에 의해 급속 냉각을 하였다.

Table 1 Chemical composition of Nimonic 80A

Element	Cr	Fe	Ti	Al	Ni
Composition (wt. %)	19.8	2.75	2.59	1.57	bal

3. 결과

3.1 유동 곡선 모델링

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

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

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

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

Q는 활성화 에너지(activation energy, J/mol), T는 절대온도(K), R은 기체상수(gas constant, 8.314 J/mol·K)이다.

식(3)을 이용하여 다양한 온도에서 변형률 속도와 응력의 관계에 의해 상수 n 값을 구하고 다양한 변형률 속도에서 온도와 응력의 관계에 의해 활성화 에너지를 구했다. Fig. 1은 다양한 변형률 속도에 대해 기울기가 일정하며 기울기의 평균으로 426(kJ/mol)의 활성화 에너지를 구하였다.

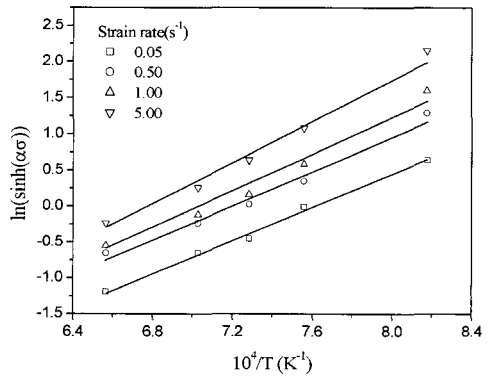


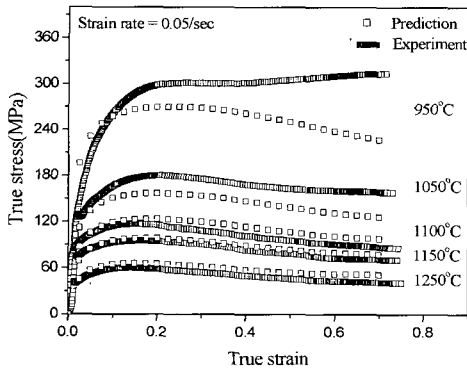
Fig. 1 Sinh(ασ_p) vs temperature at various strain rate

동적 재결정에 의한 연화현상이 고려된 고온 유동곡선을 식(4)와 같이 표현하였다[2].

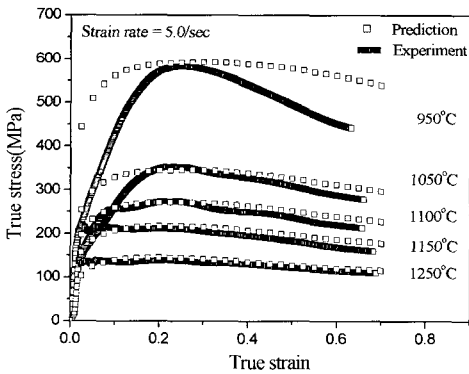
$$\sigma = \sigma_p [1 - \exp(-c\epsilon)]^m - (\sigma_p - \sigma_s) [1 - \exp(-k(\frac{\epsilon - \alpha \epsilon_p}{\epsilon_p})^m)] \quad (4)$$

$$\sigma_p = 185.0(Z/A)^{0.17}, \quad \epsilon_p = 0.20(Z/A)^{0.066}$$

σ_p 는 최대 응력이며, ϵ_p 는 최대응력에 대한 변형률이다. 식(4)을 이용하여 모델링된 유동곡선 식은 온도 950~1250°C, 변형률 속도 0.05~5 s⁻¹ 범위에서 실험값과 비교하여 Fig. 2에 도시하였다. 온도 1100°C 이상에서는 잘 일치함을 알 수 있지만 950°C에서는 잘 일치하지 않았다. 이유는 용체화 온도 이하의 온도에서 변형에 따른 많은 변형열 발생과 석출현상 때문으로 생각된다.



(a) $\dot{\epsilon} = 0.05s^{-1}$



(b) $\dot{\epsilon} = 5.0s^{-1}$

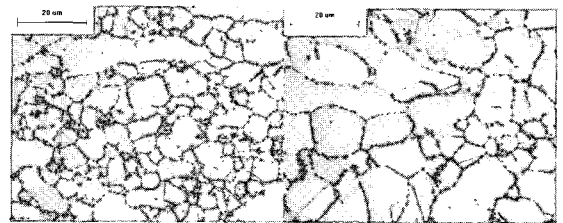
Fig. 2 The relationship between experimental and predicted high temperature flow curves of Nimonic 80A

3.2 동적 재결정 현상 모델링

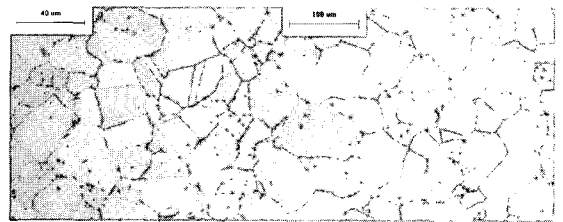
동적 재결정은 공정변수인 온도, 변형률, 변형률 속도에 따라 입자 크기와 재결정 분율이 달라진다. 실험 결과를 이용하여 식 (5)와 같이 수학적 모델링을 하였다.

$$d_{dyn} = 1.2 \times 10^{-7} \dot{\epsilon}^{-0.08} (\exp(Q/RT))^{-0.36} \quad (5)$$

Fig. 3은 고온 압축 실험에 의해 관찰된 동적 재결정된 미세조직 사진이며 Fig. 4는 동적 재결정 입자 크기의 예측값과 실험 결과를 비교하여 도시하였으며 잘 일치함을 알 수 있었다. 동적 재결정 입자 크기가 온도에 따라 큰 차이를 보여주고 있다. 온도 1050°C 이상의 온도에서 동적 재결정을 관찰할 수 있었다. 그리고 온도가 증가하고 변형률 속도가 감소하면 상대적으로 동적 재결정 입자 크기가 커짐을 알 수 있었고 변형률 속도가 너무 빠르면 변형열에 의해 입자 크기와 재결정 분율에 영향을 끼침을 알 수 있었다.



(a) 1050°C, 1.0 s⁻¹ (b) 1100°C, 5.0 s⁻¹



(c) 1150°C, 1.0 s⁻¹ (d) 1250°C, 5.0 s⁻¹

Fig. 3 Photography of microstructure of Nimonic 80A in various strain rates and temperatures

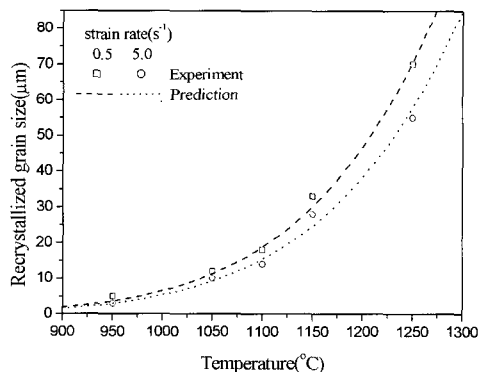


Fig. 4 The relationship between experimental and predicted dynamic recrystallization grain

3.3 입자 성장 현상 모델링

동적 재결정이 발생한 후 고온 분위기를 유지하면 입자가 성장하며 온도와 입자 크기에 따라 성장된 결과가 달라진다. 식 (6)은 초기 입자 크기와 유지시간, 온도의 함수로 구성된 입자 성장에 대한 수학적 모델링식이다. Fig. 5는 온도 1050~1250℃, 유지시간 1~100sec범위에서 입자 성장식에 의한 예측값과 실험에서 구한 데이터를 비교하여 도시하였다. 온도1150℃ 이상에서는 짧은 유지시간 동안 입자 크기가 급속히 성장함을 알 수 있었다. 특히 온도 1250℃의 경우 100sec 후 200μm 까지 급속히 성장함을 알 수 있었다.

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

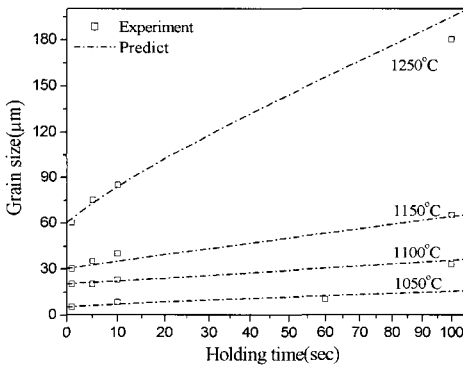


Fig. 5 The relationship between experimental and predicted grain growth during the holding period of Nimonic 80A

3.4 미세조직 변화 예측

3.4.1 등온 압축 실험

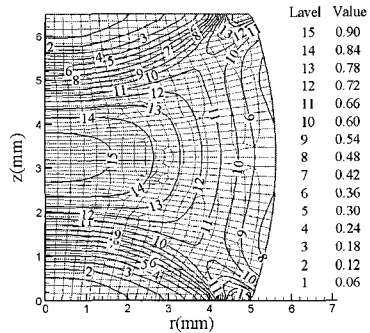
기초 실험 범위내의 변형률 속도, 온도, 변형률에서 고온 압축 실험을 수행하였다. 실험은 Table 2 조건에 의해 실험하였다. Fig. 6과 7은 동적 재결정 분율과 평균 입자 크기를 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 중심부에서의 유효 변형률은 1.1, 온도는 18℃ 상승, 90% 이상 재결정이 발생하였으며 반경방향과 축방향으로 갈수록 마찰에 의해 중심부보다 변형률이 적어 재결정이 적게 발생함을 보여주고 있다. 1200℃에서는 1100℃보다 재결정이 빨리 일어나지만 초기 입자 크기가 상대적으로 크기 때문에 재결정 분율이 비슷하게 나타남을 알 수 있었다. 각 시편 중심부의 동적 재결정 입

자 크기는 각각 20, 45μm 이며 시뮬레이션 결과는 23, 50μm으로 나타났다.

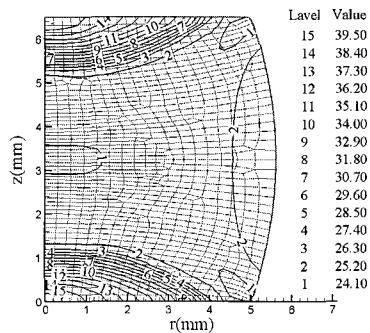
Nimonic 80A의 임계 변형률, 동적 재결정, 재결정 분율 현상에 대한 수학적 모델링이 적용된 미세조직 예측 프로그램과 열점소성 유한요소 프로그램(DEFORM)을 연계하여 시뮬레이션을 하였다. 예측 결과와 실험 결과가 잘 일치하였고 이로 인해 미세조직 예측을 위한 수학적 모델링이 잘 되었음을 알 수 있었다.

Table 2 Experiment conditions of hot isothermal compression

Experiment number	1	2
Initial grain size (μm)	40	250
Temperature (°C)	1100	1200
Die velocity (mm/s)	6	10
Reduction rate (%)	46	46
Friction factor	0.5	0.5



(a) volume fraction



(b) mean grain size

Fig. 6 FE simulation results of experiment No. 1

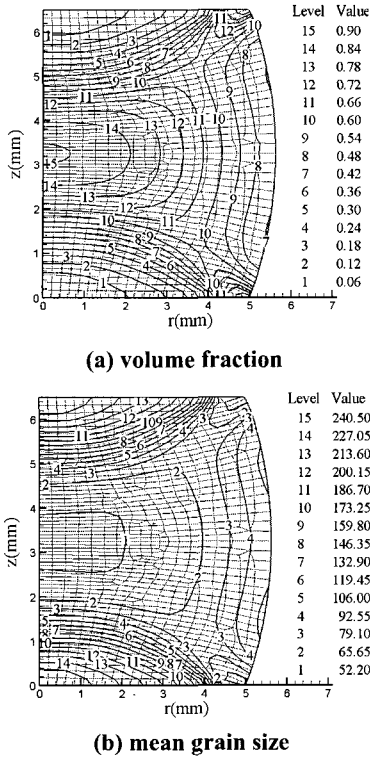


Fig. 7 FE simulation results of experiment No. 2

3.4.2 배기밸브 형단조 실험

5000ton 유압 프레스을 사용하여 열간 형단조 방법으로 헤드 직경 330mm 인 대형 배기밸브를 Table 3 조건으로 실제품 실험을 하였고 열간 형단조 공정 동안 미세조직 변화를 예측하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

가열로에서 예비형상 소재를 1125℃로 가열한 후 금형으로 이송 동안 소재 표면의 온도가 내려가고, 단조 동안 소재는 변형에 의한 변형열, 금형 및 대기와의 대류에 의해 소재의 냉각이 발생하며, 단조 후 소재는 금형에서 꺼내어 대기 중에서 냉각이 이루어진다.

Fig. 8은 초기 금형과 소재의 요소형상을 나타내며 Fig. 9는 유압 프레스에 의한 형단조 공정을 시뮬레이션 한 결과이며 단조 후 유효 변형률과 온도 분포를 도시하였다. Fig. 10은 열간 형단조 후 최종 형상으로 가공된 배기밸브의 헤드부 단면 형상이며 미세조직 변화를 관찰하기 위한 위치를 도시하였다. Fig. 11에 공정에 따른 각 부위의 변형, 은 및 미세조직 변화를 도시하였다. 여기서 1단계

는 열간 형단조에 의해 변형이 가해지면 이로 인해 동적 재결정이 발생하는 과정이며 2단계는 단조 후 공냉에 의해 재결정된 입자가 성장이 발생하는 단계이다. Fig. 12는 배기밸브 단면 각 부위의 미세조직 사진이다. a부위에서는 단조 전 온도가 1123℃이고, 단조 후 온도가 1153℃이므로 변형열에 의해 온도가 30℃정도 상승하였으며, 동적 재결정은 100% 발생하였고 평균 입자 크기가 43 μm 이었으나 단조 후 공냉 동안 입자 성장에 의해 60 μm(ASTM No. 5)로 되었다. 입자가 다른 부위보다 큰 이유는 변형에 의해 많은 변형열이 발생하여 동적 재결정 입자 크기가 상대적으로 크며 중심부이므로 냉각이 늦어 입자 성장에 의해 평균 입자 크기가 크게 나타남을 알 수 있었다. a, d부위를 관찰 한 결과 시뮬레이션 결과와 비슷하게 나왔으며 이상결정성장 현상에 의해 입자 크기가 균일하지 않았다. Fig. 12의 c, e, f부위는 표면부위이며 c, e부위는 동적 재결정이 100% 발생하였으며 최종 평균 입자 크기는 각각 29, 26μm(ASTM No. 8)로 나타났다. 동적 재결정이 일어나기에 충분한 변형과 온도 조건이었으며, 재결정 발생 후 f부위보다 금형 접촉에 따른 상대적으로 빠른 냉각에 의해 입자 성장이 적게 되어 평균 입자 크기가 작게 나타남을 알 수 있었고 각 부위의 관찰된 결과와 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

Table 3 Thermo mechanical processing parameters for FE simulation

Upper die velocity	12 mm/s
Air cooling time after heating	50 sec
Air cooling time after forging	120 sec
Friction factor	0.1
Initial temperature of workpiece	1125 ℃
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 ² ℃
Heat capacity of die	3.9 N/mm ² ℃
Convection coefficient	0.02N/mm sec℃
Lubricant heat transfer coefficient	2.0 N/mm sec℃
Emissivity	0.6

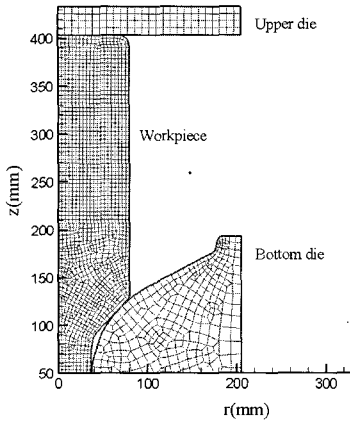
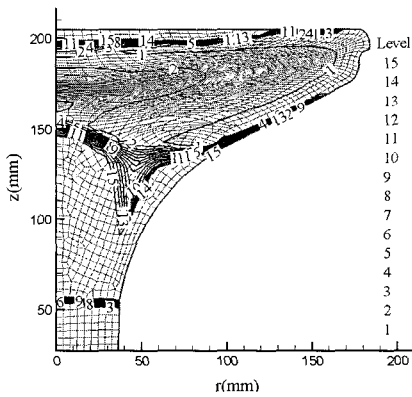
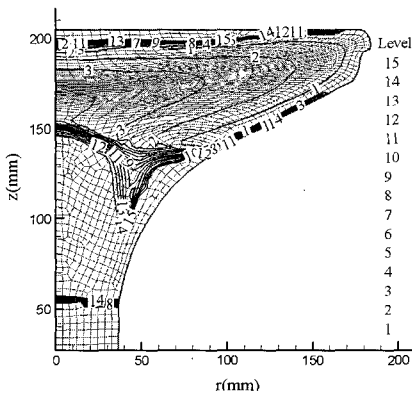


Fig. 8 Initial mesh shape for FE simulation of an exhaust valve head



(a) mean grain size after forging



(b) mean grain size after air cooling for 180sec

Fig. 9 Distribution of mean grain size during an exhaust valve manufacture processing

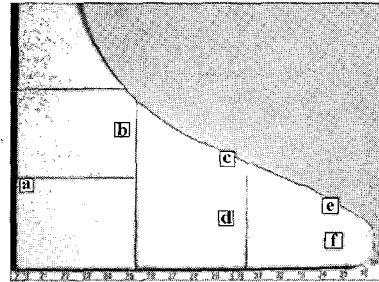
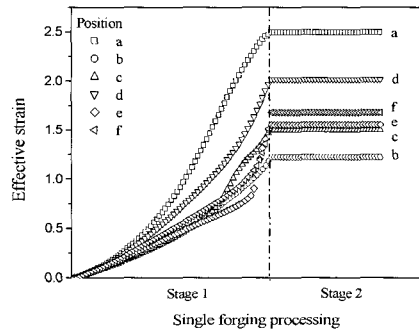
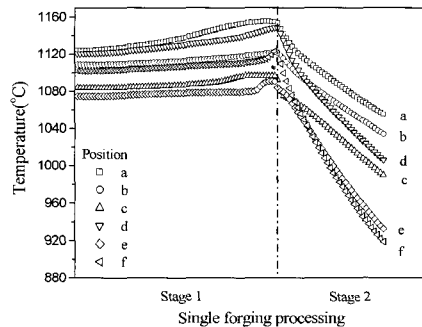


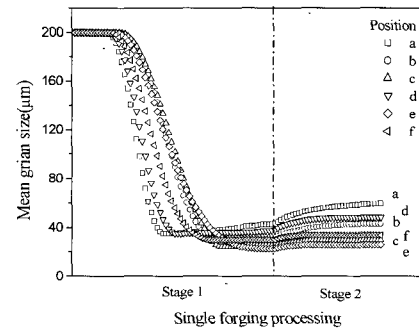
Fig.10 Photography of an exhaust valve head



(a) distribution of effective strain



(b) distribution of temperature



(c) distribution of mean grain size

Fig.11 Distribution of temperature and mean grain sizes at various locations

후 기

본 연구는 산업자원부의 우수제조기술연구센터(ATC) 기술개발사업에 의하여 지원되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] C. M. Sellars, J. A. Whiteman, 1979, Recrystallization and grain growth in hot rolling, *Metal Science*, Vol. 13, pp. 187~194.

[2] S. F. MEDINA, C. A. HERNANDEZ, 1996, The influence of chemical composition on peak strain of deformed austenite in low alloy and microalloyed steels, *Acta mater.*, Vol. 44, No. 1, pp. 149~154.

[3] S. F. MEDINA, C. A. HERNANDEZ, 1996, Modeling of the dynamic recrystallization of austenite in low alloy and microalloyed steels, *Acta mater.*, Vol. 44, No. 1, pp. 165~171.

[4] J. M. Zhang, Z. Y. Gao, J. Y. Zhuang, Z. Y. Zhong, 1999, Modeling of grain size in superalloy IN718 during hot deformation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, pp. 244~250.

[5] J. M. Zhang, Z. Y. Gao, J. Y. Zhuang, Z. Y. Zhong, 2000, Grain growth model of IN718 during holding period after hot deformation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 101, pp. 25~30.

[6] S. C. Medeiros, Y. V. R. K. Prasad, W. G. Frazier, R. Srinivasan, 2000, Microstructural modeling of metadynamic recrystallization in hot working of IN 718 superalloy, *Materials Science and Engineering, A293*, pp. 198~207.

[7] 염종택, 박노광, 1997, 해머 단조된 Alloy 718 디스크의 결정립 분포 해석, *한국소성가공학회지*, Vol. 6, No. 3, pp. 250~256.

[8] 최민식, 강범수, 염종택, 박노광, 1998, 유한요소법을 이용한 Inconel 718의 열간단조공정시 동적 재결정거동 예측, *한국소성가공학회지*, Vol. 35, No. 6, pp. 197~206.

[9] S. M. Roberts, C. A. Walsh, R. C. Reed, C. A. Dandre, J. P. Lewis, R. W. Evans, 2000, Nickel-base superalloy forging for gas turbine applications: Process model, microstructural model and

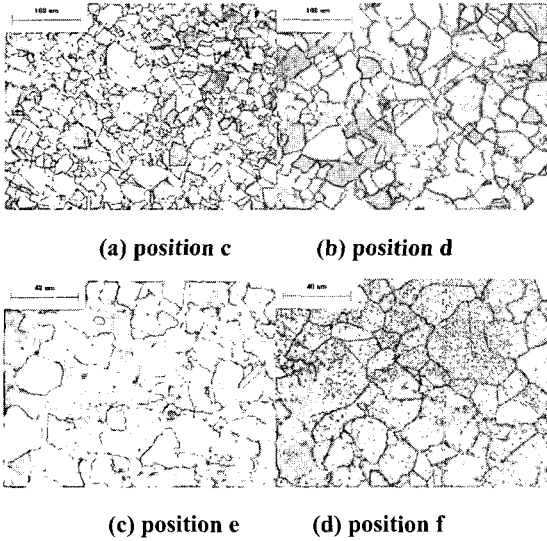


Fig.12 Microstructure of an exhaust valve head

4. 결 론

Nimonic 80A 를 소재로 하는 대형 디젤엔진 저속 배기밸브를 열간 형단조 방법으로 실제품 실험을 하였다. 시뮬레이션으로 미세조직 변화를 예측하여 검증하였고 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 공정 변수인 변형률, 온도, 변형률 속도를 고려하여 Nimonic 80A 의 고온 압축 실험을 수행하여 고온 유동곡선, 동적 재결정, 동적 재결정 분율, 입자 성장의 미세조직 변화 현상을 관찰하여 수학적 모델링을 하였다.

(2) 수치해석적인 방법으로 미세조직을 예측하기 위해 Nimonic 80A 의 미세조직 변화 현상에 대한 수학적 모델식을 열점소성 유한요소법에 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 실제품 실험에 의한 미세조직 관찰 결과와 잘 일치하였고 단조 공정 동안 미세조직 변화를 고찰하였다.

(3) Nimonic 80A 의 열간변형 동안 미세한 조직을 얻기 위해선 공정변수인 온도, 변형률, 변형률 속도의 적절한 조절이 필요하다. 열간성형 온도가 낮으면 재결정이 발생하지 않아 연신되고 불균일한 조직으로 변형되며 온도가 높으면 재결정은 잘 일어나지만 재결정 입자가 크며 재결정된 입자가 냉각 과정에서 빠른 성장이 발생한다. 그러므로 열간성형 온도 범위는 1080~1120℃, 변형율은 1.5~2.0 그리고 냉각속도의 조절에 의해 미세하고 균일한 입자를 얻을 수 있었다.

- validation, Metal Forming 2000, ISBN 90-5809-157-0.
- [10] N. K. Park, I. S. Kim, Y. S. Na, J. T. Yeom, 2001, Hot forging of a nickel-base superalloy, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 111, pp. 98~102.
- [11] J. R. Cho, W. B. Bae, W. J. Hwang, P. Hartley, 2001, A study on the hot-deformation behavior and dynamic recrystallization of Al-5wt.%Mg alloy, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118, pp. 356~361.
- [12] 정호승, 조종래, 차도진, 배원병, 2001, 금형강의 동적 및 정적 재결정 거동과 미세조직 변화 예측에 관한 연구, 한국소성가공학회지, Vol. 10, No. 4, pp. 338~346.
- [13] N. Srinivasan, Y. V. R. K. Prasad, 1995, 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.
- [14] D. K. Kim, D. Y. Kim, S. H. Ryu, D. J. Kim, 2001, Application of nimonic 80A to the forging of an exhaust valve head, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 148~152.