

초내열 합금 배기 밸브 스피들 단조 해석 및 기계적 특성 평가

최성규¹, 오중석², 정호승³, 조종래[#]

A Forging Analysis and Mechanical Properties Evaluation of Superalloy Exhaust Valve Spindle

S. G. Choi, J. S. Oh, H. S. Jeong, J. R. Cho

Abstract

The nickel-based alloy Nimonic 80A possesses strength, and corrosion, creep and oxidation resistance at high temperature. The exhaust valves of low speed diesel engines are usually operated at temperature levels of 400-600°C and high pressure to enhance thermal efficiency and exposed to the corrosion atmosphere by the exhaust gas. Also, the exhaust valve is subjected to repeated thermal and mechanical loads. So, the nickel-based alloy Nimonic 80A was used for the large exhaust valve spindle. It is composed a 540mm diameter head and a 125mm diameter stem. It is developed large products by hot closed-die forging. Manufacturing process analysis of the large exhaust valve spindle was simulated by closed die forging with hydraulic press and cooled in air after forging. The preform was heated to 1080°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. Mechanical properties of the large exhaust valve spindle were evaluated by the variety of tests, including microstructure observation, tensile, as well as hardness and fatigue tests, were conducted to evaluate the mechanical properties for head part of exhaust valve spindle.

Key Words : Nimonic 80A, Valve spindle, Mechanical property, Fatigue, Forging, Process analysis

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 80A를 사용하고 있다. 니켈을 기초로 한 초내열 합금 Nimonic 80A는 고온에서 우수한 기계적 특성과 내식성, 내산화 특성을 지니고 있고 항공, 조

선, 핵발전소 등의 부품으로 널리 사용되고 있다.

단조용 소재 Nimonic 80A 소재는 고온에서 큰 강도를 유지하고 있으며 열간단조 온도 범위가 좁아서 열간형단조 공정이 어렵다. 또한 열간가공 동안 미세조직 변화가 발생하고, 이런 현상은 기계적 특성에 영향을 미친다.

지금까지 많은 연구자들은 초내열합금의 열간 특성에 대한 연구를 하였고 있으며(1-5), 열간 단조 공정에서 발생하는 미세조직에 변화를 예측하는 연구를 하고 있으며(6-16), 열점소성 유한요소 해석을 통해 열간단조 성형성을 평가하고 있다. 본 연구에서는 실린더 직경이 980mm에 사용되는 디젤기관용 배기밸브 스피들을 제작하고자 한다.

1. 케이에스피 기술연구소
2. 현대중공업 엔진기계사업본부
3. 부산대학교 롤스토이스 대학기술센터
교신저자: 한국해양대학교 기계정보공학부,
E-mail: cjr@hhu.ac.kr

이 모델의 헤드부 직경은 540mm, 스템부 직경은 125mm이며, 스템부와 헤드부의 직경이 대략 4.3 배가 난다.

일반적으로 헤드부 직경이 작은 밸브 스템들은 예비 성형체를 만들기 위해선 전기 업셋공정을 통해 예비 성형체를 만들지만 밸브 직경이 큰 배기밸브는 자유단조를 통해 예비 성형체를 만든다.

일반적으로 밸브 스템들의 열간 형단조 공정은 가열된 예비성형체를 금형에 삽입한 후 평평한 상부 금형을 사용하여 형단조를 한다. 하지만 이러한 공정은 소재와 금형의 마찰에 의한 불균일한 변형을 분포가 발생되며, 또한 변형열이 발생하여 불균일한 온도 분포가 발생된다. 그러므로, 균일한 변형을 발생시키는 단조 공정에 대한 연구가 요구된다.

본 연구는 열간 형단조 공정에 대한 열점소성 유한요소해석을 수행하여 성형성을 검토하고 이를 바탕으로 대형배기밸브 스템들을 제작할 것이다. 또한, 대형 배기밸브 스템들은 아주 가혹한 환경에서 작동되므로 미세조직 관찰, 성분분석, 인장, 경도, 피로시험 등의 기계적, 금속적 특성평가를 통해 신뢰성을 확인할 것이다.

2. 공정해석 및 기계적 특성평가

2.1 밸브 스템들 공정해석

Fig. 1 은 열간 형단조 공정해석에 사용되는 유한요소 모델을 나타낸다. Fig. 1 (a)는 일반적으로 사용되는 평평한 상부 금형 모델을 나타내며 Fig. 1 (b)는 볼록한 상부 금형 모델을 나타낸다.

Case 1 은 평평한 상부 금형을 사용하여 열간 형단조 공정이며, Case 2 는 볼록한 상부 금형으로 1 차 단조를 한 후 평평한 금형으로 2 차 단조를 한 공정이다.

Table 1은 Nimonic 80A의 화학성분을 나타낸다. Table 2는 열간 형단조 공정해석에 사용되는 변수를 나타낸다. 초기 예비성형체 온도는 1080℃, 금형의 온도는 450℃를 적용하였다. 그 이유는 다음과 같다. Nimonic 80A는 1080℃ 이상의 온도에서는 입자 성장이 급속히 발생되어서 기계적 특성이 저하되는 현상이 발생할 수 있으며, 1080℃ 이하의 온도에서는 금속유동 응력이 높아져서 단조 하중이 많이 요구된다.

열간 형단조 공정 동안 소재는 대기와 금형과의 열전달에 의한 냉각을 방지하기 위한 단열재

사용 조건을 사용하였다. 이러한 현상들을 고려하여 열점소성 해석 프로그램인 DEFORM -2D 를 이용하여 수행하였다.

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

Element	Cr	Fe	Ti	Al	Ni
Composition	20.0	2.75	2.45	1.50	bal

Table 2 Hot closed die forging processing parameters for finite element analysis

Item	Value
Workpiece heating temperature	1080℃
hydraulic press velocity	10 mm/sec
Friction factor	0.1
Initial temperature of die	450℃
Room temperature	20℃
Convection coefficient	0.02N/mm sec℃
Lubricant heat transfer coefficient	1 N/mm sec℃
Emissivity	0.7

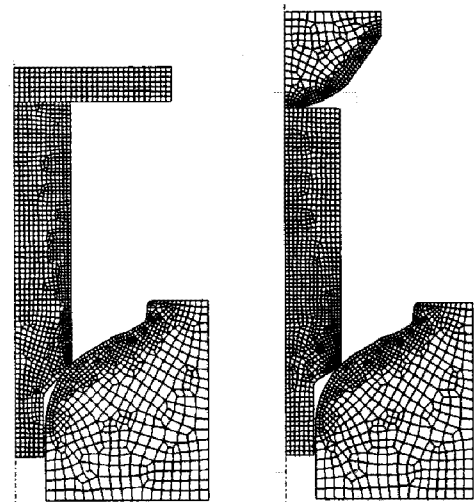


Fig. 1 FE model of hot closed die forging

2.2 기계적 특성 평가

Case 2 의 열간 형단조 공정 방법으로 1080℃에서 예비성형체를 7000ton 유압프레스를 이용하여 열간 형단조를 하였으며 단조 후 공냉방식으로 냉각을 하였으며, 700℃에서 16 시간 동안 aging 처리를 하였다.

열간 형단조에 의해 성형된 밸브 헤드부의 기계적 특성을 평가하기 위하여 미세조직 관찰 및

인장, 경도, 피로시험을 하였다.

광학현미경을 이용하여 헤드부에 대한 미세조직을 관찰하였다.

인장시험은 게이지 길이 50mm, 직경 10mm 인 시험편을 이용하여 하였으며 항복, 인장 강도 및 연신을 등의 기계적 특성을 평가하였다. 밸브 스피ndl의 경도는 상온에서 10kg 하중 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 밸브 시트면에서 경도를 측정하였다. 피로시험은 로타리 밴딩시험기를 사용하여 $1 \times 10^6 - 1 \times 10^7$ 사이클 범위에서 수행하였다.

3. 공정해석 및 기계적 특성 평가

3.1 밸브 스피ndl 공정해석 평가

Fig. 2는 열간 형단조 공정 해석 결과이며, 최종 변형 형상과 변형을 분포를 나타낸다

Fig. 2(a)는 평평한 상부 금형을 사용하여 열간 형단조 공정 해석 결과이다. 상부 금형과 접촉한 밸브 헤드부위는 마찰에 의해 변형율이 적음을 알 수 있었다. 또한 헤드부 중심에서는 급격한 변형율이 발생함을 알 수 있었다. 이는 비균일한 변형이 발생함을 알 수 있었다.

Fig. 2(b)는 볼록한 상부 금형으로 1 차 단조를 한 후 평평한 금형으로 2 차 단조를 한 공정해석 결과이다. 상부 금형과 접촉한 부위의 변형율이 많이 발생함이 관찰되었으며, Case 1의 경우보다 변형율이 균일함을 알 수 있었다.

Fig. 3, 4는 단조 후 온도 분포와 300sec 공냉 후의 온도 분포를 나타낸다. 단조동안 변형열이 발생하여 밸브 스피ndl은 최고 1120℃까지 온도가 상승하였으며 300sec 공냉 동안 1050℃까지 냉각됨을 알 수 있었다. Fig. 3(a)는 Case 2의 경우 Case 1보다 온도 분포가 균일함을 알 수 있었다.

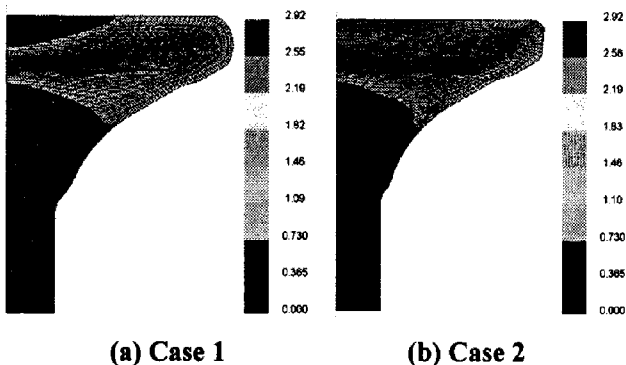


Fig. 2 Strain distribution after a forging process

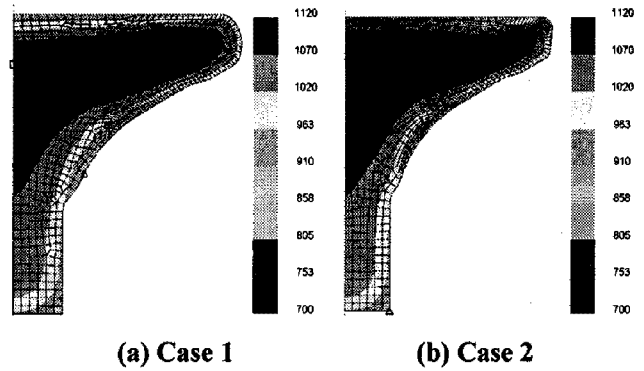


Fig. 3 Temperature distribution after a forging process

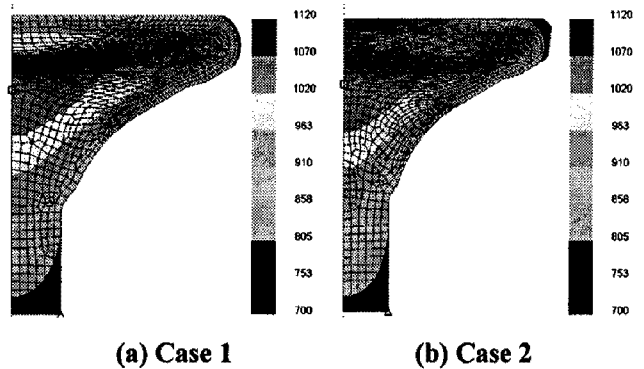


Fig. 4 Temperature distribution after a 300sec air cooling

3.2 기계적 특성 평가

열간 형단조에 의해 제작된 배기밸브 스피ndl에 대하여 기계적 특성을 평가하였다.

Photo 1은 밸브 스피ndl 헤드부 단면과 미세조직 관찰 부위를 나타낸다. Photo 2은 관찰된 부위의 미세조직 사진이다. 밸브 중심부에서는 단조 동안 변형열에 의한 내부 온도 상승에 의한 입자성장과 적은 변형율에 의한 적은 재결정 발생하여 입자크기가 상대적으로 크게 관찰되었다. 반면, 표면부에서는 단조 동안 열전달에 의해 온도 감소와 많은 변형율에 의한 많은 재결정이 발생하여 입자크기가 상대적으로 작게 관찰되었다.

Fig. 5는 인장과 경도 시험에 사용된 시험편의 위치를 나타낸다. Fig. 6은 인장시험 결과를 보여준다. 인장시험은 밸브 스피ndl 내부의 여러 부위에서 채취한 시험편을 이용하여 시험을 하였다. 상대적으로 T4 시험편의 인장특성이 낮게 나타났지만 모두 목표치를 만족하였다. Fig. 7은 경도시험 결과를 보여준다. 경도시험은 시트부 표면에서 내부 8mm 까지 측정하였다. 표면에서 가장 경도

가 크게 나타났다. Fig. 8은 헤드부와 스템부를 연결하는 위치에서의 S-N 곡선을 보여준다. F1 시험편의 피로강도는 1×10^7 에서 405MPa 임을 알 수 있었다.

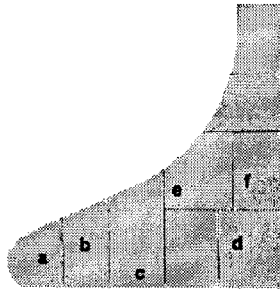
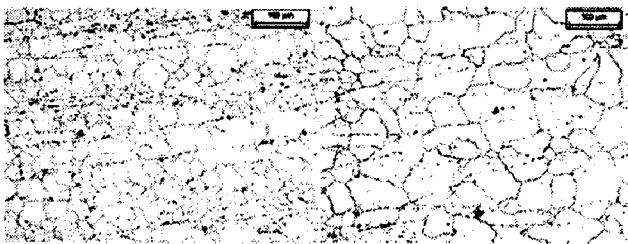
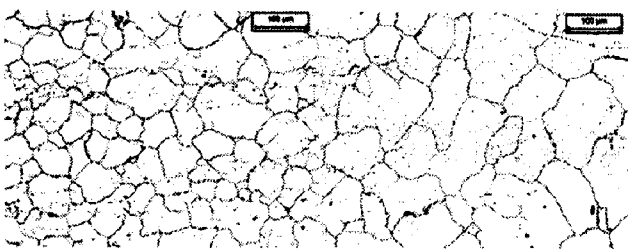


Photo 1 Photography of an exhaust valve spindle section



(a) position of c (b) position of d



(c) position of e (d) position of f

Photo 2 Microstructure of an exhaust valve spindle head portion

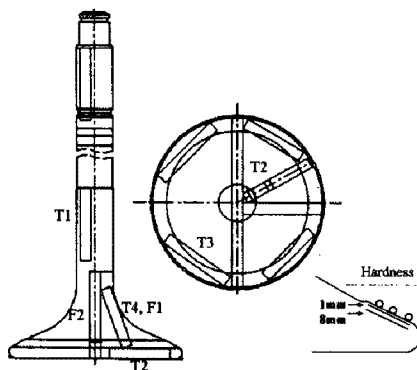


Fig. 5 Schematic of sampling location

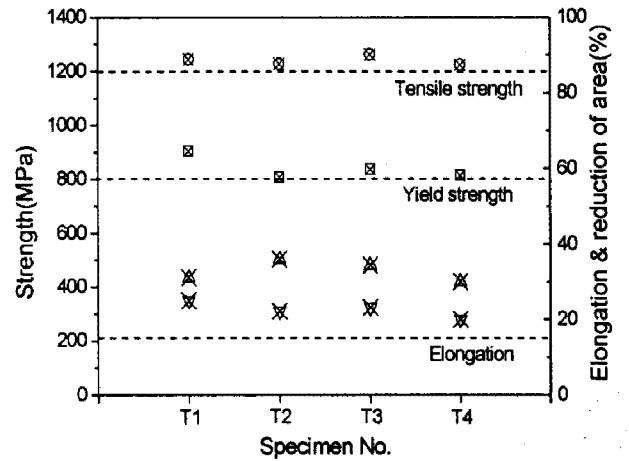


Fig. 6 Result of tensile test at room temperature

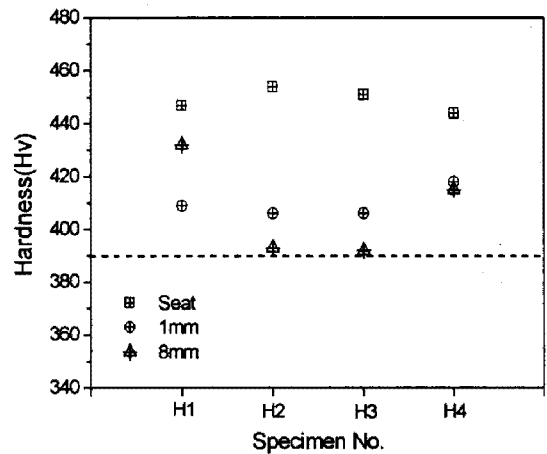


Fig. 7 Result of hardness test at room temperature

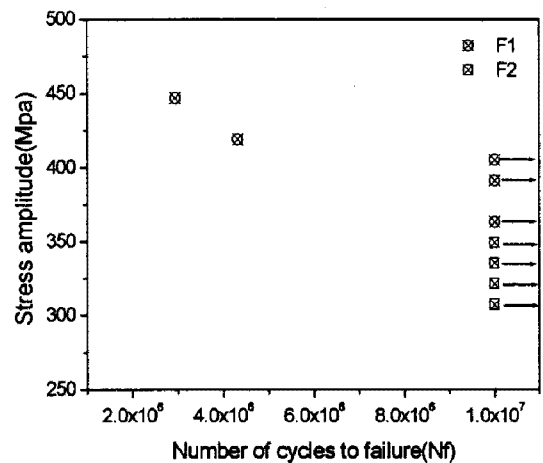


Fig. 8 Result of fatigue test at room temperature

4. 결 론

헤드 직경 540mm 인 대형 디젤엔진 저속 베기 밸브 제작을 위해서 균일한 변형을 발생시키는 열간 형단조 공정에 대한 열점소성 유한요소해석을 수행하였으며, 이를 제작하여 기계적 특성 평가를 하였다.

(1) 평평한 상부금형으로 단조한 경우보다 볼록한 상부 금형으로 1 차 단조를 한 후 평평한 금형으로 2 차 단조를 한 경우(Case 2) 변형율과 온도 분포가 균일함을 열간 형단조 공정해석으로 확인하였다.

(2) Case 2 열간 형단조 공정 조건을 이용하여 시제품을 제작하였다.

(3) 미세조직 관찰을 통해 변형이 많이 발생한 부분에서는 미세조직이 상대적으로 큼을 알 수 있었으며, 재결정이 균일하게 발생함을 알 수 있었다.

(4) 밸브 스피들 내부의 여러 부위에서 채취한 시험편을 이용하여 인장, 경도, 피로시험 등의 기계적 특성평가를 하였다. 시험 결과 모두 목표치를 만족함을 알 수 있었다. 또한 Nimonic 80A 소재로 만들어진 밸브 헤드부의 피로강도는 1×10^7 에서 405MPa 임을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. K20702000013-07E0200-01310). 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] 왕지석, 박태인, "전기 업셋팅 가공시의 열탄소성 해석에 관한 연구", 한국박용기관학회지, Vol. 18, No. 4, pp. 423-430, 1994.
[2] 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.
[3] 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.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 염종택, 박노광, "해머 단조된 Alloy 718 디스크의 결정립 분포 해석", 한국소성가공학회지, Vol. 6, No. 3, pp. 250-256, 1997.
[7] 최민식, 강범수, 염종택, 박노광, "유한요소법을 이용한 Inconel 718 의 열간단조공정시 동적 재결정거동 예측", 한국소성가공학회지, Vol. 35, No. 6, pp. 197-206, 1998.
[8] 염종택, "유한요소법을 이용한 단조공정시 조직 예측기법의 적용 사례", 단조심포지엄, 2001.
[9] 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.
[10] 박종진, 황한섭, 이상주, 홍승찬, 임성환, 이경섭, 이경종, "로워암 커넥터 열간단조 공정의 유한요소해석 및 미세조직 예측", 대한기계학회논문집 A 권, Vol. 27, No. 7, pp. 1243-1250, 2003.
[11] N. Bontcheva and G. Petzov, "Microstructure evolution during metal forming processes", Computational Materials Science, Volume 28, pp. 563-573, 2003.
[12] G. Kugler and R. Turk, "Modeling the dynamic recrystallization under multi-stage hot deformation", Acta Materialia, Volume 52, pp. 4659-4668, 2004.
[13] 정호승, 조종래, 박희천, 이성열, "열간 형단조 Nimonic 80A 의 미세조직 변화 예측", 한국소성가공학회지, Vol. 14, No. 4, pp. 383-390, 2005
[14] 정호승, 조종래, 박희천, "미세조직 변화를 고려한 대형 베기밸브 스피들 제조공정 해석", 한국마린엔지니어링학회, Vol. 29, No. 8, pp. 938-944, 2005.