

대형 디젤엔진용 배기밸브의 단조공정에 관한 연구

김동권* · 김동영* · 석진익* · 류석현* · 김동진* · 김병훈*

Investigation of the Forging Process of Exhaust Valve for Large Diesel Engine

Dong-Kwon Kim, Dong-Young Kim, Jhin-Ik Suk, Seog-Hyeon Ryu,
Dong-Jin KIM and Byung-Hoon KIM

Key Words : Exhaust Valve(배기밸브), Superalloy(초합금), Open Die Forging(자유단조), Closed Die Forging(형단조), Preform(예비형상)

Abstract

Nimonic 80A superalloy with high-temperature strength and high corrosion-resistance is used in jet engine for aircraft, gas turbine for power plant and marine diesel engine, etc. To develop the manufacturing process of exhaust valve for large diesel engine using Nimonic 80A, various mechanical tests, such as hot compression, microstructure and hardness test have been performed. This results effectively used to set the reasonable forging conditions while hot forging of Nimonic 80A superalloy. Open die and closed die forging experiments are carried out from ESR ingot and finally get a good shaped exhaust valve product.

1. 서론

선박용 디젤기관은 저속(70~200 rpm) 2 싸이클 기관과 중속(200~800 rpm) 4 싸이클 기관으로 크게 나눌 수 있다. 특히, 저속 디젤기관의 배기밸브는 열효율을 높이기 위하여 고온, 고압의 연소분위에서 운전이 되어 400°C~600°C 되는 고온가스와 접하고 있다. 이러한 저속 디젤기관용 배기밸브는 사용 환경 및 사용 연료에 의한 반복응력과 고온 부식 등에 의해서 밸브에 마모와 부식으로 인한 손상이 종종 발생한다. 이러한 손상이 발생할 때에는 주로 손상된 부분을 완전히 제거한 후 경화확성에 의하여 재사용하지만, 근래에는 특수한 소재를 사용하여 제품 전체의 경도를 높게 하여 사용하고 있다[1].

본 연구에서는 이러한 대형 디젤엔진용 배기밸브의 국산화 개발을 위하여 고온 특성이 우수한 Nimonic 80A 초합금을 사용하여 소재 제조에서부터 단조공정까지 검토하고, 이를 토대로 하여 실제 제품을 대상으로 하여 자유단조 및 형단조 작업을 수행한 결과에 대하여 소개하고 향후의 연구방향에 대하여 검토하였다.

2. 배기밸브의 제조방법

배기밸브는 그 구조와 형상은 단순하지만 용해, 단조, 열처리, 기계가공, 특성평가 등의 복잡한 생산공정과 가혹한 환경에서 사용하기 위해 밸브의 부위별로 요구되는 특성이 다르기 때문에 제조하기가 쉽지 않은 것으로 알려져 있다.

배기밸브의 제조방법은 밸브헤드부와 스템부를 일체로 제조하는 일체형과 각각 별도로 제조하여 접합하는 조합형으로 대별할 수 있다.

일체형 배기밸브는 소재를 주로 Nimonic 80A 또는 SNCrW로 사용하며, 그 제조방법은 주로 소재의 Preform까지를 전기업셋방법 또는 자유단조에 의해서 제조하고 최종적으로 형단조작업을 수행하여 완제품을 생산하고 있다.

조합형 배기밸브는 상대적으로 가혹한 하중상태가 아닌 밸브의 스템부를 저렴한 소재를 사용하여 제조한 후 고가의 밸브헤드부 제품과 접합함으로써 소재의 제조원가를 낮추는 제조방법이다. 이러한 조합형 배기밸브의 제조는 가혹한 환경에서 작동하게 될 밸브헤드의 소재 물성치를 만족시키는 동시에 접합부의 강도도 확보해야 하므로 상당한 어려운 점이 따르게 된다.

* 두산중공업 기술연구원

3. NIMONIC 80A 초합금의 소재특성

항공기용 제트엔진이나 발전용 가스터빈 및 선박용 엔진 부품 소재로서 광범위하게 사용되고 있는 니켈계 초내열합금인 Nimonic 80A는 고온에서 높은 강도를 유지할 수 있는 고온 내열합금으로서, 약 20% Cr 과 상대적으로 적은 Al 을 포함하여 용접성이 우수하고 고온 부식성 분위기에서 사용될 수 있는 우수한 재료이다. 또한, 이 합금은 고온 강화 및 적은 량의 Al, Ti 등으로 인해 크리프 및 rupture 저항성을 갖는 γ' 생성에 의한 석출경화 등에 기인한 고온강도와 Ni 및 Cr 에 의한 내산화성이 우수하다[2].

이하에서는 상기의 대형 디젤엔진용 배기밸브로서 주로 사용되고 있는 배기밸브 헤드부를 본 소재로 제조하기 위해서 사전 소재특성을 검토한 내용을 보여주고 있다.

3.1 고온인장 특성

Nimonic 80A 소재는 고온강도가 우수한 소재로 잘 알려져 있기 때문에 고온인장 특성에 대해서는 기존의 연구결과를 쉽게 구할수 있다.

Fig. 1은 고온에서의 인장특성을 보여주고 있는데, 고온으로 갈수록 고온강도가 떨어지는 비율이 줄어들고 있으며, 1150도 이상에서 급격히 연신율이 떨어지므로 이 온도이상에서 단조할 경우에는 세심한 주의가 필요하다는 것을 알 수 있다.

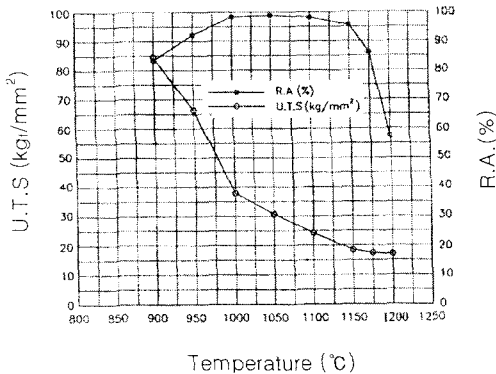


Fig.1 Tensile Test Result of Nimonic 80A

3.2 고온압축 특성

Nimonic 80A 소재의 고온압축 특성을 파악하기 위하여 Table 1과 같은 조건에서 열간압축시험을 수행하였는데, 실험에 사용된 소재의 화학성분은 Table 2와 같다.

열간압축시험은 시편을 직경 8mm × 높이 12mm로 제작하여 열간 가공성 시험 장치인 HDS(Hot Deformation Simulation)에서 아래의 조건에 따라

실험을 수행하였다. 가열시의 정확한 온도측정을 위하여 시편의 표면에 열전대를 부착하고, 10^{-2} torr 이하의 진공상태에서 5°C/sec의 속도로 가열하여 시편의 표면이 목표온도에 도달한 후 시편 내부까지의 균일한 가열을 위하여 10분간 유지하도록 하였다.

Table 1. Hot compression test conditions of Nimonic 80A

Forging Temperature(°C)	950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200
Strain Rate(1/sec)	0.1, 0.5, 1.0, 5.0

Table 2. Chemical composition of Nimonic 80A(wt.%)

Ni	C	Si	Cu	Fe	Mn	Cr
Bal.	0.08	0.05	0.02	0.75	0.01	19.66
Ti	Al	Co	B	Zn	P	S
2.53	1.54	0.12	0.003	0.09	0.005	0.001

압축시험결과를 Fig. 2에서 보여주고 있는데, 온도가 올라갈수록 Flow Stress는 떨어지고 또한 변형률속도가 증가할수록 Flow Stress가 증가하는 전형적인 열간압축 특성을 나타내고 있으며, 1,100도에서 변형률속도가 높을 경우에는 약 280 Mpa의 높은 값을 보여주고 있으므로 소성변형을 시키기 위해서는 상당히 큰 하중이 필요함을 알 수 있다.

3.3 조직변화 특성

Nimonic 80A 소재의 조직변화 특성을 파악하기 위하여 상기의 시편에 대해서 열간압축시험후에 질소가스로 급냉하였다.

조직시험은 크롬산액(50ml H₂O + 150ml HCl + 25g CrO₃)으로 압축시편의 절단면을 에칭한 후 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였다.

Fig. 3을 보면 일정 온도의 일정 변형률속도로 평균 grain size가 ASTM 5.6(45 μ m)인 초기시편에 압축시험을 행할 때 시편의 상부는 다이와의 마찰에 의하여 소성변형량이 작기 때문에 소재의 평균 grain size가 ASTM 6.1(39 μ m)로 크게 나타난 반면에, 시편의 중심부는 소성변형이 가장 크게 나타나기 때문에 소재의 평균 grain size가 ASTM 8.7(14.5 μ m)로 미세하게 나타남을 알 수 있다.

3.4 경도변화 특성

Nimonic 80A 소재의 열간상태에서의 단조조건에 따른 경도의 변화를 파악해 보기 위하여 여러 가지 조건에서의 열간압축시험을 수행하여 소재의 변형정도에 따른 경도의 변화를 얻음으로써 실제제품의 열간단조시의 경도값을 유추하고자 하였다[3~5].

Table 3은 컴퓨터 시뮬레이션 및 열간압축시험의 조건을 나타내고 있다.

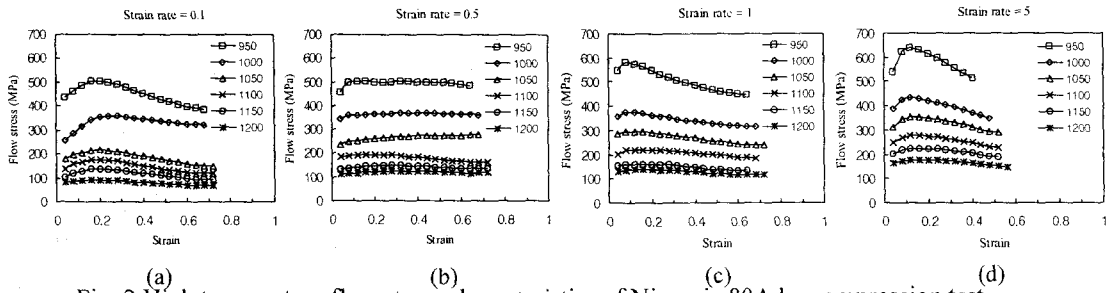


Fig. 2 High temperature flow stress characteristics of Nimonic 80A by compression test

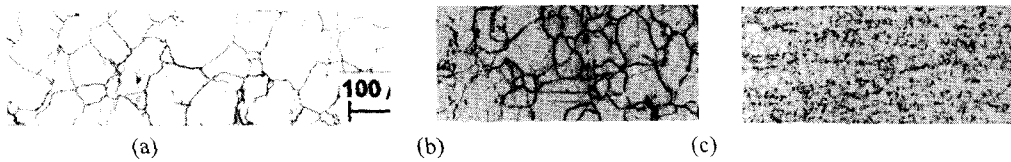


Fig. 3 Microstructure during hot compression test($\times 100$) (a) initial specimen (b) top position after 50% compression (c) center position after 50% compression

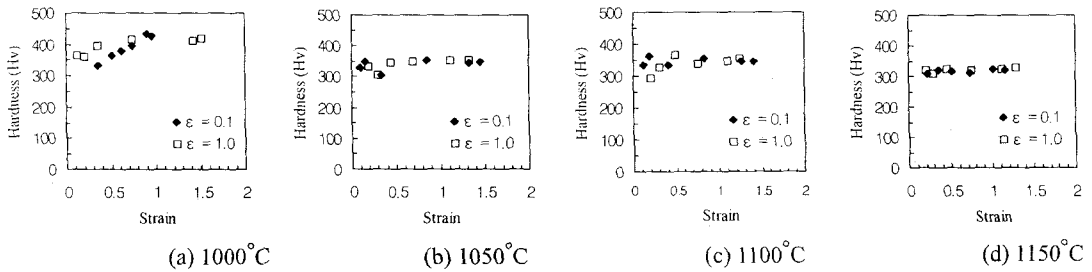


Fig. 4 Relationship between forging condition and hardness of Nimonic 80A

Table 3. Analysis and measurement condition

Specimen	A1	A2	B1	B2
Temp($^{\circ}\text{C}$)	1000	1000	1050	1050
Strain rate(/sec)	0.1	1.0	0.1	1.0
Specimen	C1	C2	D1	D2
Temp($^{\circ}\text{C}$)	1100	1100	1150	1150
Strain rate(/sec)	0.1	1.0	0.1	1.0

Table 4는 열간압축시험후의 시편의 최상부에서부터 중심부까지의 길이방향에 따라 측정된 경도값과 해석으로부터 계산된 변형률의 크기를 보여준다. 해석 및 실험 결과를 전체적으로 나타내게 되면 Nimonic 80A 소재의 단조조건에 따른 경도의 변화를 알 수 있다. Nimonic 80A 소재의 열간상태에서의 경도변화는 소재의 단조온도와 변형률에 따라 민감하게 변화하고 있는데, 변형률속도에 대한 영향을 보다 정확히 파악하기 위해서는 보다 많은 시험조건이 필요하다.

Table 4. Measurement and simulation results after 50% hot-forging by micro-vicker's hardness test

소재	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
위치 (mm)	Hardness							
	Strain							
0.5	333	364	330	332	336	293	308	322
	0.35	0.13	0.10	0.20	0.12	0.20	0.22	0.20
1.0	365	359	348	307	362	328	320	308
	0.5	0.20	0.16	0.30	0.19	0.31	0.35	0.30
1.5	378	393	307	347	336	366	316	323
	0.61	0.36	0.34	0.45	0.40	0.49	0.52	0.45
2.0	393	415	354	348	352	340	314	319
	0.74	0.74	0.85	0.70	0.82	0.75	0.74	0.75
2.5	433	409	344	355	348	346	323	323
	0.90	1.43	1.33	1.12	1.26	1.10	1.02	1.12
3.0	426	417	349	352	346	353	320	328
	0.96	1.52	1.45	1.33	1.40	1.25	1.16	1.29

이러한 단조조건에 따른 경도의 변화를 보기 위하여 단조온도별로 변형률에 따른 경도변화를 나

타내어 보았다. 이것을 각각 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같다. Fig. 4를 보면 변형율 0.1~1.5와 변형율속도 0.1/sec~1.0/sec의 범위에서 일정한 단조온도에 대하여 변형율이 증가할수록 전반적으로 경도값은 증가하고 있다. 그 변화폭은 단조온도가 1150°C 일 경우에는 Hv300~340, 1100°C 일 경우에는 Hv300~360, 1050°C 일 경우에는 Hv310~360 이고 가장 낮은 단조온도인 1000°C의 경우에는 Hv340~440으로 나타나고 있다.

4. 자유단조 실험

4.1 소재 준비

Nimonic 80A를 사용한 자유단조 작업을 위하여 ESR(Electro Slag Remelting) 공정을 이용하여 Fig. 5와 같이 우선 직경 380mm이고, 길이 1,800mm의 소재를 제조하였다.

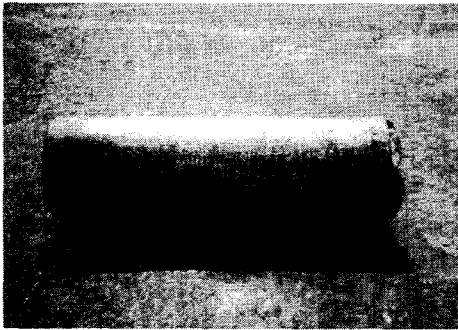


Fig.5 Manufactured ESR Ingot

이렇게 하여 제조한 ESR 소재의 내부 건전성 검사를 위하여 Fig.6과 같이 UT(Ultrasonic Test)를 실시하고, 또한 표면 건전성 검사를 위해 Fig.7과 같이 PT(Penetration Test)를 통한 비파괴검사를 수행하였다.



Fig.6 Ultrasonic Test

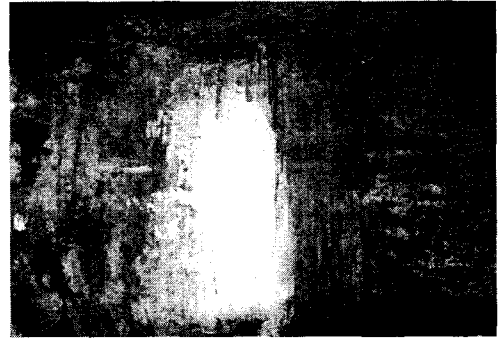


Fig. 7 Penetration Test

4.2 자유 단조

직경 380mm의 ESR 소재를 형단조 작업을 위한 Preform의 형태대로 직경이 줄어든 소재를 제조하기 위하여 자유단조 작업을 실시하였다.

Nimonic 80A 소재는 고온에서 높은 Flow Stress와 협소한 단조작업 구간으로 인하여 단조작업이 상당히 어려웠다.

초기 소재의 확산을 위한 충분한 가열시간과 고합금을 고려한 가열 상승속도를 적용하면서, 여러단계의 단조 및 재가열, 재단조 작업을 거쳐 소정의 형상으로 제조하였는데, Fig. 8은 자유단조 작업중인 소재의 상태를 보여주고 있다.

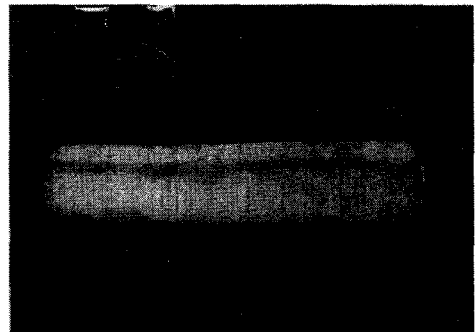


Fig. 8 Open Die Forging of ESR Ingot

5. 형단조 실험

5.1 형단조 시뮬레이션

실제 형단조 작업시의 오차를 최소화하기 위하여 Computer Simulation 작업을 수행하였다. 이를 통하여 배기밸브 소재의 형단조시에 필요한 적정 Preform 형상과 변형양상 및 소요하중 등을 파악하여 실작업시에 참고로 하였다.

Fig. 9는 개략적인 소재 유동의 변화양상을 보여주고 있으며, Fig. 10은 형단조후의 변형률 분포를 보여주고 있다.

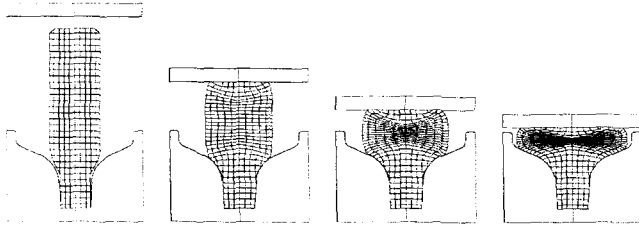


Fig. 9 Metal Flow Variation during Closed Die Forging

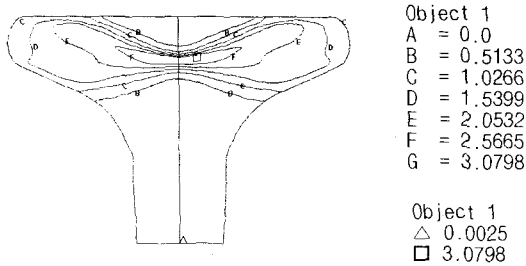


Fig. 10 Effective Strain Distribution of Nimonic 80A after Closed Die Forging

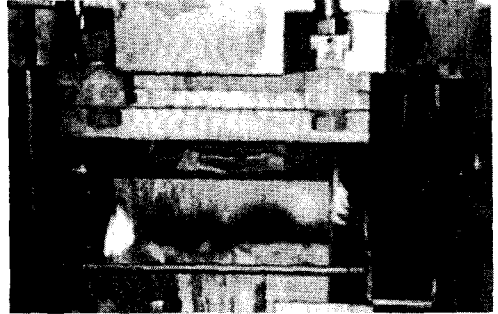


Fig. 12 Preheating of Die Set

5.3 형단조

상기의 작업으로부터 만들어진 Preform 소재를 사용하여 형단조 작업을 실시하였다. 실제제품의 형단조를 실시하기 전에 Press의 Power나 소재의 변형정도, 금형형상의 타당성 등을 전반적으로 먼저 파악하기 위하여 유사한 유동응력을 갖는 비교적 싼 소재로 먼저 예비 형단조 작업을 실시한 후에 실제제품의 형단조 작업을 실시하였다.

형단조 작업을 위한 가열시에는 정확한 온도 Control을 위하여 사전에 가열로에 열전대를 설치하였다. 또한, Nimonic 80A 소재가 단조온도 범위가 좁고 단조성이 나쁘기 때문에 금형을 적당한 온도로 예열한 후 단조작업을 실시하였다.

Fig. 11은 소재의 가열로에서 취출 직후의 가열된 Preform을 보여주고 있고, Fig. 12는 금형 예열중인 상태를 보여주고 있다.

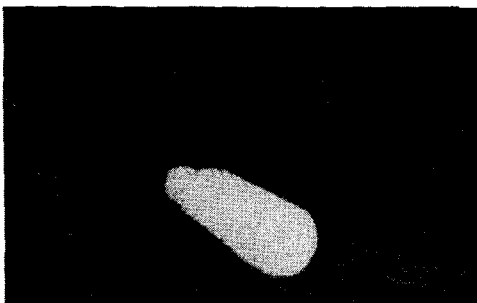


Fig. 11 Preform after Heating

위와 같은 형태의 Preform을 미리 예열된 금형에 삽입한 후 수차례의 단조작업을 거쳐 원하는 치수를 충분히 잘 만족시키는 제품형상을 만들 수가 있었다.

Fig. 13은 최종 단조작업후의 제품의 형상을 보여주고 있다.

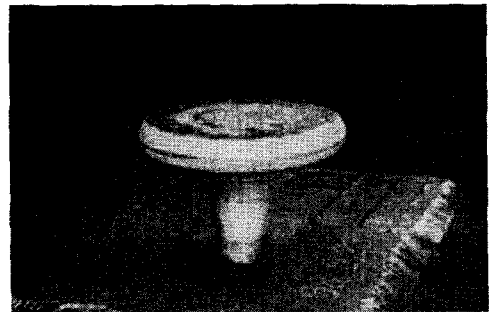


Fig. 13 Forged Product Shape

6. 결론

대형 디젤엔진용 배기밸브의 국산화 개발을 위하여 여러가지 형태의 예비시험을 수행하여 적절한 단조조건을 얻은 후 이를 근거로 하여 원소재의 제조에서부터 자유단조를 거쳐 최종 형단조 작업을 수행하여 원하는 형상을 가지는 제품을

제조하였다.

향후에는 본 제품의 소재 특성평가 부분이 추가로 수행되고 또한, 품질과 원가측면에서 보다 경쟁력 있는 제품을 만들기 위한 배가의 노력이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Eiichi Obata, 1983, Present Situation of Heat Resisting Alloys for Marine Diesel Engine Valves, 電氣製鋼, 제 54 권, 제 4 호, pp.238-245.
- [2] 김송희, 함종오, 윤여범, 박노광, 1996, Nimomic 80A 와 내열강 마찰용접물의 미세조직과 고온 저주기 피로특성, 용접기술, 11 월호, pp.54-67.
- [3] H. Kudo, K. Sato, and K. Aoi, 1967, On cold forgeability, Annals of CIRP, Vol. 16, pp.309-318.
- [4] P. Hartley, C.E.N. Sturgess, G. W. Rowe, 1980, Influence of friction on the prediction of forces, press distributions and properties in upset forging, Int. J. Mech. Sci., Vol.22, No.12, pp.743-753.
- [5] H. Sakuta, M. Kobayashi, M. Li., and C. Shgeno, 1989, Variation in material properties of a 5083 aluminium alloy during warm and hot forging, Light Metals(in Japanese), Vol. 39, No.12, pp.893-898.