

초내열합금 터빈 디스크의 열간 단조 공정에 대한 공정 설계 및 미세조직 평가

차도진¹, 김동권¹, 김영득¹, 배원병², 조종래[#]

Process Design and Microstructure Evaluation During Hot Forging of Superalloy Turbine Disk

D. J. Cha, D. K. Kim, Y. D. Kim, W.B. Bae, J. R. Cho

Abstract

The forging process design and microstructure evolution for gas turbine disk of a Waspaloy is investigated in this study. Parameters related to deformation are die and preform geometry, and forging temperature of die and workpiece. Die and preform design are considered to reduce the forging load, and to avoid the forging defects. Blocker and finisher dies for multistage forging are designed and the initial billet geometry is determined.

The control of hot forging parameters such as strain, strain rate and temperature also is important because the microstructure change in hot working affects the mechanical properties. The dynamic recrystallization evolution has been studied in the temperature range 900-1200°C and strain rate range 0.01-1.0s⁻¹ using hot compression tests. Modeling equations are required represent the flow curve, recrystallized grain size, recrystallized volume fraction by various tests.

In this study, we used to thermo-viscoplastic finite element modeling equation of DEFORM-2D to predict the microstructure change evolution during thermo-mechanical processing. The microstructure is updated during the entire thermal and deformation processes in forging.

Key Words : English Key Word: Gas turbine disk, Waspaloy, Preform design, Dynamic recrystallization

1. 서 론

가스터빈엔진은 압축기에서 압축된 공기의 동작유체를 연소기에서 가열하여 터빈을 회전시키는 형식의 원동기다. 가스터빈엔진의 효율 및 성능은 터빈입구온도에 따라 좌우되며, 높은 열효율을 얻기 위하여 터빈입구온도를 상승시켜야 한다. 이를 위하여 고온강도를 유지할 수 있는 니켈 합금이나 코발트 합금과 같은 내열성이 우수한 재료가 터빈부품에 응용되고 있다.

가스터빈엔진 부품 중 터빈 디스크는 운전 중에 높은 응력을 받는 부품으로서 운전시에 요구되는 고온강도를 만족시키기 위하여 초내열합금 소재를 사용하여야 한다. 따라서 제조 비용 절감을 위한 공정 설계 및 고온강도 등의 요구 성능을 만족시키기 위한 미세조직 예측 등의 정밀단조기술이 요구된다.

Altan 등[1]은 Waspaloy 에 대한 재결정 모델을 제안하였다. Zhang 등[2, 3]은 IN718 의 열간성형공정 중의 결정립 크기와 열간성형공정 후의

1. 두산중공업 기술연구원

2. 부산대학교 공과대학 기계공학부

교신저자: 한국해양대학교 기계정보공학부,

E-mail: cjr@hhu.ac.kr

holding time 에 따른 결정립 크기에 대해 연구하였다. Medeiros 등[4]은 IN718 의 준정적재결정 모델에 대해 연구하였다. Cho 등[5]은 viscoplastic FE method 를 사용하여 Al-5wt.%Mg 의 미세조직 거동에 대한 연구를 하였다. Kim 등[6]은 exhaust valve heads 의 열간 단조 공정에 Nimonic 80A 를 적용하였다.

본 연구에서는, 니켈 합금인 Waspaloy 에 대한 온도별 유동응력 및 재결정 모델 정립을 위한 초기결정립 크기, Zener-Hollomon 변수 등을 결정하기 위해 압축 시험을 수행하였다. 또한 blocker 및 finisher 설계를 위하여 등온 단조 공정을 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 또한 각 부위별 단조 공정에 의한 미세조직 변화를 예측하기 위하여 동적재결정에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 가스터빈 디스크의 제품 형상 및 단조품 형상을 Fig. 1 에 나타내었다.

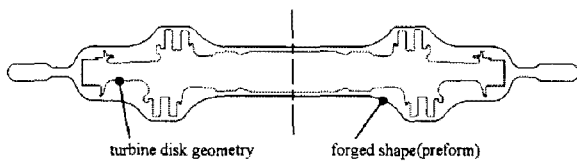


Fig.1 Turbine disk geometry and forged shape

2. 실험

2.1 실험조건

본 연구에서 사용된 Waspaloy 의 화학 성분을 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Composition of Waspaloy

Composition	Wt. %	Composition	Wt. %
C	0.04 ~0.08	Ti	2.75~3.25
P	0.015	Al	1.2~1.6
Mn	0.1	Zr	0.01~0.08
Si	0.15	B	0.003~0.01
S	0.01	Fe	2.0
Cr	18~21	Cu	0.1
Mo	3.5~8	Ni	Bal.
Co	12~15		

고온 압축 시험에 사용된 시편의 규격은 직경 8mm, 높이 12mm 이며, 등온 상태에서 실시하였다.

유동응력을 측정하기 위하여 일정한 변형률속도 및 일정한 온도조건에서 실시하였으며, 각 조건은 Table 2 에 나타내었다.

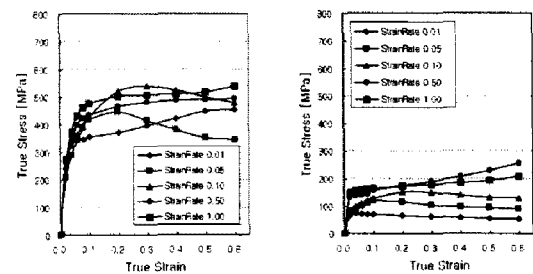
미세조직 관찰을 위한 에칭액은 마블용액(CuCl₂ + Alcohol + HCl)을 사용하였으며, 에칭시간은 수초를 유지하였다.

Table 2 Experimental conditions for compression test

Strain rate (s ⁻¹)	Value				
	0.01	0.05	0.10	0.50	1.00
Temperature (°C)	900	1000	1100	1200	

2.2 실험결과

압축시험에서 얻은 응력-변형률 곡선을 Fig. 2 에 나타내었다. 유동응력은 온도와 변형률속도에 매우 민감하며, 1000°C에서 450MPa 이상으로 상온에서의 탄소강의 인장강도와 유사하다. 일반적인 유동곡선은 peak stress 이후에 재결정에 의한 가공연화현상으로 응력이 낮아지나, 변형률 속도가 0.5s⁻¹ 및 1.0s⁻¹ 의 경우는 peak stress 이후에도 응력이 상승하는 경향을 나타낸다. 이는 가공경화에 의한 응력 상승효과가 재결정에 의한 가공연화 효과보다 큼을 알 수 있다.



(a) at 1000°C

(b) at 1200°C

Fig.2 True stress-strain curves obtained from hot compression tests

온도 1000°C, 변형률속도 1.0s⁻¹ 의 조건에서 50% 압축한 시편에 대한 미세조직을 Fig. 3 에 나타내었다. 상하부의 미세조직은 시험 전후에 유사한 형상을 나타내고 있다. 이는 상하부에서 발생한 열전달로 인해 소재 온도가 낮아져 변형이 발생하지 않았으며, 중심부에 변형이 집중되었기 때문이다. 이에 따른 동적재결정에 의한 결정립 미세화도 중심부로 갈수록 높은 현상을 나타낸다.

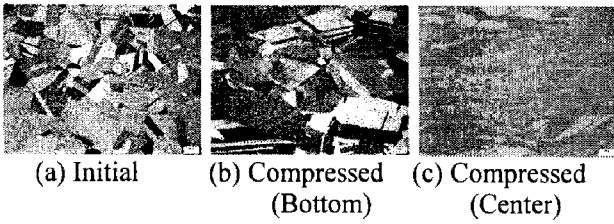


Fig. 3 Microstructure of specimen ($\times 100$)

3. Simulation

Waspaloy 와 같은 superalloy 의 단조공정 설계 시 고려해야 할 중요한 요소 중에 하나는 단조하중과 재결정에 의한 결정립 미세화다.

본 연구에서는 유효하중 7000ton 프레스에 대해 blocker 및 finisher 를 설계하였다. 금형설계 단계는 단조품 성형 단계에서 내측과 반경방향으로의 충전 균형을 맞추는 관점에서 blocker 를 설계하고, 설계된 blocker 에 대해 프레스의 유효하중 내에서 제품을 제작할 수 있는 finisher 를 설계하였다. 또한 성형속도에 따른 미세조직의 변화를 예측하기 위해 3 가지 경우의 펀치 속도에 대해 해석을 수행하였다. 해석은 상용 FE-code 인 DEFORM-2D 를 이용하였다. 소재의 온도는 변형 양상 및 동적재결정에 영향을 주는 중요한 요소 중에 하나이므로 열전달 해석은 필수적이다. 따라서 비등온성형 해석 방법을 이용하여 열전달과 성형해석을 동시에 수행하였다.

Table 3 Analysis conditions

Item	Value	Unit
Billet size	$\text{Ø}300 \times \text{H}200$	mm
Friction factor	0.3	-
Upper Die Velocity	10, 30, 50	mm
Temp.	Workpiece	1100
	Upper & lower Die	400
	Room	20
Convection coeff.	0.02	N/mm.sec. $^{\circ}\text{C}$
Heat transfer coeff.	5.0	N/mm.sec. $^{\circ}\text{C}$
Emissivity	0.7	-
Initial and average grain size	150	μm

3.1 Analysis Conditions

금형설계 및 미세조직 예측을 위한 해석조건을 Table 3 에 나타내었다. 금형설계를 위한 해석 과정에서는 상금형의 속도 10mm/sec 에 대해 수행하였다. 또한 미세조직 예측을 위한 재결정모델은 Altan 등이 제안한 식을 사용하였다.

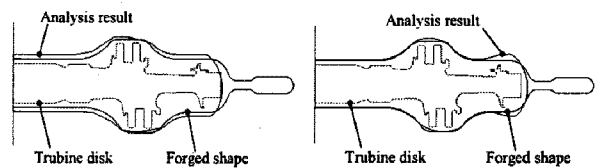
3.2 Analysis Results

3.2.1 Die Design

Blocker 및 finisher 에 따른 해석결과를 Table 4 에 나타내었다.

Table 4 Analysis results according to blocker and finisher for die design

Case	Blocker	Finisher	Load-stroke curve
1			
2			
3			



(a) Case 2

(b) Case 3

Fig. 4 Comparison of analysis results with forged shape

하중-변위 곡선에서 후반부에서 하중이 급격히

상승하는 경향을 보이고 있다. 이는 성형과정이 진행되면서 후반부로 갈수록 마찰에 의한 영향이 커지기 때문이다. 따라서 A, B 및 C 영역의 충전 균형을 맞추는 것이 중요하다.

Case 1의 경우 C 영역에 비해 A, B 영역에서의 충전속도가 늦다. 따라서 A, B, C 영역에서의 충전 균형을 맞추기 위해 blocker의 형상을 Case 2와 같이 수정함으로써, Case 1에 비해 A, B 영역에서의 충전량을 증가시킬 수 있었다. Fig. 4(a)에 Case 2에 대한 해석 결과와 단조도를 비교하여 나타내었다. A 및 B 영역은 충분한 가공여유량을 확보하였지만, C 영역은 가공여유량이 부족하므로 finisher의 수정이 필요하다.

A, B 및 C 영역에서 마찰에 의한 하중 증가 효과를 줄이기 위해, Finisher의 형상을 Case 3과 같이 수정하였다. 하중-변위 곡선의 finisher 부분에서 변위에 따른 하중의 증가 속도가 감소하였으며, Case 2에 비해 성형량을 증가시킬 수 있었다. Fig. 4(b)에 Case 3에 대한 해석 결과와 단조도를 비교하여 나타내었다. A, B, C의 모든 영역에서 충분한 가공여유량이 확보되었음을 알 수 있다.

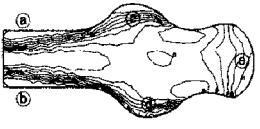
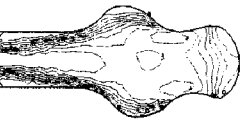
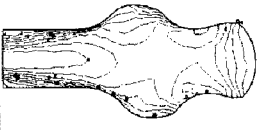
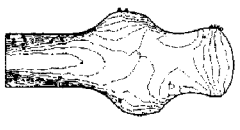
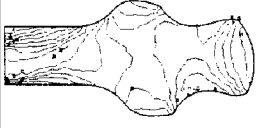
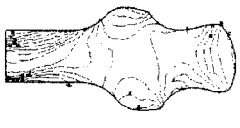


3.2.2 Microstructure

성형속도에 따른 해석결과를 Table 5에 나타내었다.

상금형의 속도가 10mm/sec의 경우, 금형과의 접촉부분인 ①, ②, ③ 지점에서의 평균결정립 크기는 130~1500 μm로 동적재결정이 발생하지 않았다. 이는 금형과의 열전달로 인한 냉각으로 접촉부분에서는 변형이 발생되지 않았으며, 대부분의 변형은 내부에서 발생하였기 때문이다. 또한 속도가 증가할수록 ①, ②, ③ 지점에서 동적재결정이 발생하지 않은 영역이 줄어들어 양상을 보인다. 즉, 성형속도를 증가시킴으로써 금형으로의 열전달로 인한 온도 하강을 줄일 수 있으며, ①, ②, ③ 지점에서의 동적재결정율을 높일 수 있다.

③ 지점의 평균결정립크기는 75~100 μm로 상금형의 속도에 큰 영향을 받지 않았다. 그러나, 상금형의 속도를 50mm/sec 이상 증가시키면 ③ 지점의 금형과의 접촉면에서 폴딩현상이 발생하였다.

Table 5 Analysis results according to upper die velocity for microstructure

Velocity (mm/sec)	Average grain size	Dynamic rex. vol. fraction
10		
30		
50		
Scaling		

4. Prototype test

금형설계와 단조공정설계의 타당성을 검증하기 위해 1차적으로 SUS304 소재를 이용하여 테스트를 실시하였다. 고온성형 특성이 유사하고, Waspaloy보다 소재 수급이 원활한 superalloy 소재인 Nimonic80A를 이용하여 최종 성형성을 검증하였다. Prototype 형단조 시험 결과 simulation에서 예측된 변형특성과 유사하였으며 양호한 성형성을 보였다.

5. 결론

본 연구에서 waspaloy에 대한 압축 시험 및 DEFORM-2D를 이용한 성형해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Waspaloy에 대한 고온 압축 시험을 통하여 온도 및 변형률속도에 따른 유동곡선을 제시하였으며, 미세조직 예측을 위한 수학적 모델을 제시하였다.

(2) 제품 성형의 마지막 부분의 하중 증가는 마찰에 의한 영향이 크며 blocker와 finisher는 마찰에 의한 하중 증가를 최소화 시키는 방향으로 설계되었다. Blocker는 finisher 공정에서 내부 및

반경방향으로의 충전 균형을 맞추는 관점에서 설계되었으며, finisher 는 단조품이 충분한 가공여유량을 확보할 수 있도록 설계되었다.

(3) 상금형의 속도에 따른 미세조직예측 결과, 상금형의 속도가 빠를수록 표면에서의 동적재결정율이 높아지며, 전체적으로 결정립 크기가 고르게 분포한다.

(4) 유사한 재질의 prototype test 결과, 양호한 성형성 및 결과물을 얻을 수 있었으며, 성형해석 결과와 거의 동일한 결과를 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] T. Altan, G. Ngaile, G. Shen, COLD AND HOT FORGING – Fundamentals and Applications, ASM INTERNATIONAL, (2004), 247-255.
- [2] J.M. Zhang, Z.Y. Gao, J.Y. Zhuang, Z.Y. Zhong, Modeling of grain size in superalloy IN718 during hot formation, Journal of Materials Processing Technology, Vol.88 (1999), 244-250.
- [3] 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, Vol.101 (2000), 25-30.
- [4] 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, Vol.A293 (2000), 198-207.
- [5] J.R. Cho, W.B. Bae, W.J. Hwang, P. Hartley, A study on the hot-deformation behavior and dynamic recrystallization of Al-5wt.%Mg alloy, Journal of Materials Processing Technology, Vol.118 (2001),356-361.
- [6] 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 (2001), 148-152.