

소형 가스터빈용 터빈 디스크의 형단조 공정 연구

김동권* · 김영득* · 김동영*

Study on the Closed-die Forging Process for Turbine Disk of Small Gas Turbine Engine

D. K. Kim, Y. D. Kim and D. Y. Kim

Abstract

Gas turbine disk components have been used by Ni-base superalloys which have high temperature strength for enduring stress induced by high speed rotation. This study introduced the overview of development strategy of precision forging of turbine disk and closed-die forging process for manufacturing good quality gas turbine disk. To make superior quality turbine disk, it is important to select optimal forging process conditions like preform shape, die shape and forging temperature etc. In this paper, closed-die forging process has been studied through the rigid-plastic finite element simulation. Proposed forging process can be used for the successful manufacturing of small-size gas turbine disk.

Key Words : Closed Die Forging (형단조), Gas Turbine(가스터빈), Turbine Disk(터빈 디스크), Recrystallization(재결정), Preform Design(예비성형체 설계)

1. 서 론

일반적으로 소형 가스터빈 디스크는 높은 온도와 응력의 조건에서 사용되기 때문에 고온 강도가 우수한 초내열합금 소재를 사용하여 제조하게 된다. 그림 1은 소형 가스터빈 엔진의 전형적인 구성을 보여주고 있다.

본 논문에서는 이러한 초내열합금 소재를 사용한 가스터빈 디스크의 정밀단조 기술 개발의 개요와 터빈 디스크의 형단조 공정에 대한 세부적인 형단조 해석의 수행 결과를 소개하였다.

가스터빈 디스크의 정밀단조공정 해석에서는 대표적인 초내열합금인 Waspaloy 소재를 대상으로 하여 소형 가스터빈 디스크의 소재 형상과 금형 형상을 모델링하고 강소성 유한요소해석 프로그램 사용하여 형단조 성형 해석을 수행하였다.

형단조 공정의 해석에 있어서는 형단조 작업이 진행됨에 따라서 소재의 유동양상, 변형률 분포, 온도변화 및 재결정^{1,2)} 거동에 대한 검토를 수행하여 가스터빈 디스크의 형단조 과정에서 발생하는 현상에 대한 이해를 높이고 이러한 결과들을 통하여 향후 실제 단조 작업 공정의 설정 시에 참조하고자 하였다.

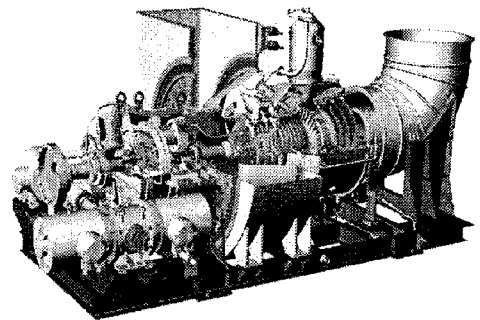


Fig. 1 Typical small gas turbine engine

* 두산중공업 기술연구원

2. 터빈 디스크의 형단조 공정 개발

2.1 공정 개발 개요

개발 대상품인 소형 가스터빈용 터빈 디스크와 터빈 블레이드가 조립된 형태를 그림 2 에서 보여 주고 있는데, 터빈 블레이드는 주조용 초내열합금으로 제작이 되며 터빈 디스크는 단조용 초내열합금으로 제작될 예정이다.

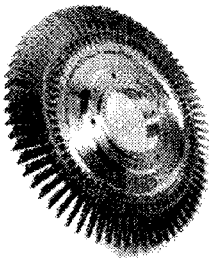


Fig. 2 Typical assembly shape of blade and disk for small gas turbine disk

표 1 에서는 이러한 터빈 디스크의 개발을 위한 세부 개발 항목과 개발 방향을 보여 주고 있다.

Table 1. Development plan of turbine disk

No.	주요항목
1	계획 수립 및 자료조사
2	후보 강종 DB 구축, 소재 선정
3	재질 Spec. 및 제조공정 검토
4	디스크 단조품의 소성변형 검토
5	디스크 단조품의 제조조건 연구
6	디스크 금형 설계 및 제작
7	디스크 형단조품 제조
8	디스크 형단조품의 물성 평가

우선, 계획 수립 및 자료 조사에서는 디스크 정밀단조 기술개발을 위한 예비성형체, 금형설계 및 미세조직 제어기술 등과 같은 요소기술을 검토한다. 후보 강종 DB 구축 및 소재 선정에서는 디스크의 후보 강종에 대한 자료 조사를 수행한다. 재질 Spec. 및 제조공정 검토에서는 디스크의 요구 Spec. 관련 자료 조사, 요구 Spec.의 시험을 위한 시험조건 및 설비 및 제작 소요설비 사양에 대하여 검토를 수행한다.

또한, 디스크 단조품의 소성변형 검토에서는 후보 소재에 대한 단조 시 소성변형거동을 검토하고, 디스크 단조품의 제조조건 연구에서는 후보 소재에 대한 단조 및 열처리 조건 검토하고자 한다. 이러한 제반 요소기술의 개발을 통하여 최종적으로 디스크 형단조품을 제조하고 물성 평가를 수행하고자 한다.

그림 3 은 초내열합금 터빈 디스크의 단조 조건에 대한 연구를 위하여 제작 중인 항온 단조 축소모델 실험장치를 보여주고 있다.

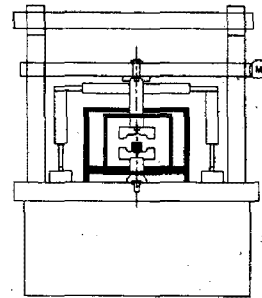


Fig. 3 Small scale isothermal forging apparatus

2.2 디스크 형상

소형 가스터빈의 터빈 2 단 디스크의 형상을 그림 4 에서 보여주고 있다. 터빈 2 단 디스크의 형상은 디스크의 중심선을 기준으로 상하의 일부가 돌출되어 있는 전형적인 Rib-web Type 의 형태를 가지고 있다. 이와 같이 Rib 부위가 높은 경우에는 예비성형체의 설계가 중요하며, 경우에 따라서는 형단조 작업 시에 완전한 충진을 위하여 2 단계의 형단조 작업을 수행할 필요가 있다.

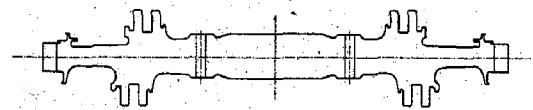


Fig. 4 Finish machining shape of 2nd stage turbine disk for small size gas turbine

그림 5 는 소형 가스터빈의 터빈 2 단 디스크의 형단조 소재의 형상에 대하여 1/2 로 절단된 단면의 형상을 보여 주고 있다.



Fig. 5 Closed-die forging turbine disk shapes of 2nd stage

2.3 형단조 금형설계

소형 가스터빈의 터빈 2 단 디스크의 형단조 작업을 위한 금형의 형상을 1/2 로 절단한 단면의 형상을 그림 6에서 보여 주고 있다.

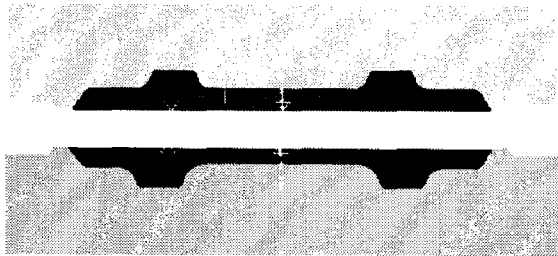


Fig. 6 Closed-die forging die of 2nd stage turbine disk

특히, 형단조 금형의 설계 시에는 내부를 완전히 채우기 위하여 플래쉬의 형상 설계가 매우 중요한데, 본 금형의 설계에서는 기본적으로 아래의 식³⁾을 참조하였다.

$$H = 0.013 D_s \quad (1)$$

여기서, D_s : 원형 단조품의 직경

2.4 형단조 예비성형체 설계

설계된 형단조 금형을 사용하여 형단조 시의 소재 유동과 소요 하중 등을 검토하기 위하여 형단조 소재의 초기 높이와 형단조 디스크의 안쪽 두께의 비가 3:1 인 예비성형체 형상을 등온 단조로 작업할 경우에 대한 형단조 공정의 해석⁴⁾을 수행하였다.

표 2 는 터빈 2 단 디스크의 형단조 해석을 위한 해석 조건을 보여주고 있다. 소재는 Ni 기 초내열 합금의 일종인 Waspaloy 이며, 형단조 작업을 위한 예비성형체의 형상은 D377.2mm × H168.0mm 로 설정하였다. 단조온도는 1,150℃로 가정하였으며, 1 mm/sec 의 다이 속도로 112mm 의 압하를 실시하였다. 마찰계수는 열간 단조를 수행할 경우에 무 윤활일 경우에 일반적으로 적용하는 값을 사용하였다.

Table 2. Analysis condition of disk forging

소재	Waspaloy	압하량	112 mm
초기형상 (D×H)	377.2mm × 168.0mm	다이속도	1 mm/sec
초기온도	1,150℃	마찰계수	0.7

터빈 2 단 디스크의 형단조 시의 압하량에 따른 변형 양상을 그림 7에서 보여주고 있다.

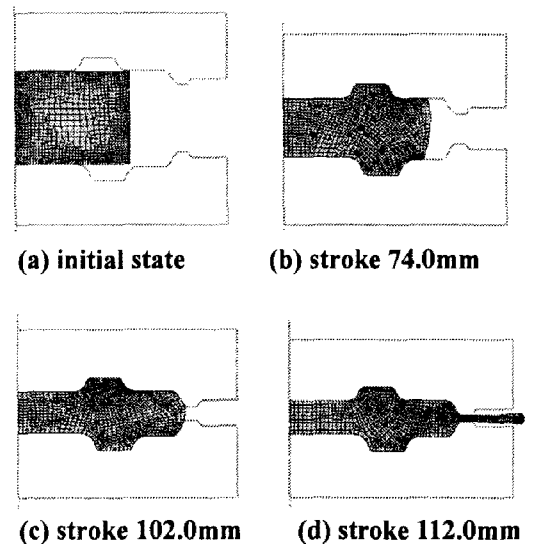


Fig. 7 Deformation behavior during closed-die forging of 2nd turbine disk

D377.2mm × H168.0mm 의 원통형 모양의 예비성형체를 상부 금형과 하부 금형에 삽입한 후 형단조 작업을 수행하면, 74.0mm 정도의 압하가 진행되면 금형 내부에 있는 Rib 의 충전이 어느 정도 이루어 진다. 이후에, 102.0mm 정도의 압하가 진행되면 소재의 일부가 플래쉬 부위를 통과하면서, 금형 내부로의 충전이 거의 완전히 이루어 지

며, 112.0mm 의 압하가 모두 끝나면 금형 내부로의 완전한 충전이 일어나게 된다.

이러한 형단조 해석을 통하여 소재의 유동 측면에서 볼 때, D377.2mm × H168.0mm 의 원통형 모양을 가진 예비성형체로도 터빈 2 단 디스크의 완전한 형상을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

터빈 2 단 디스크의 형단조 시, 압하량에 따른 소요 하중의 변화 양상을 그림 8 에서 보여 주고 있는데, 압하량의 증가에 따라서 소요하중이 증가하는 전형적인 형단조 작업 시의 양상을 보여 주고 있다.

압하량이 98.6mm 정도일 때까지는 소요하중이 서서히 증가하다가 소재의 유동이 플래쉬 부위를 통과하면서 급격하게 증가한 후에 최종적으로 112.0mm 의 압하가 완료되면 약 16,428 톤의 하중이 소요됨을 알 수 있다.

이러한 소요하중을 감소시키기 위해서는 예비성형체와 금형 형상의 변화를 고려해 볼 필요가 있으며, 경우에 따라서는 2 단계로 형단조 작업을 수행하는 방안에 대해서도 검토해 볼 필요가 있다고 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 소형 가스터빈용 터빈 디스크의 정밀단조 기술개발에 대한 개괄적인 개발 현황에 대하여 소개하였으며, 이전 논문⁵⁾에서 제시한 형단조 공정에 대한 추가 해석을 통하여 세부적인 단조공정 해석을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 소형 가스터빈용 터빈 디스크의 형단조 공정 개발을 위해서는 예비성형체, 금형설계 및 미세조직 제어기술 등과 같은 요소기술의 확보를 통한 형단조 제작 및 평가가 필요하다.

(2) 터빈 디스크의 형단조를 위하여 형단조품의 최종 형상을 토대로 형단조품의 형상과 금형의 설계를 수행하였다.

(3) 예비성형체의 형상이 D377.2mm × H168.0mm 인 경우에는, 압하량이 74.0mm 일 때 금형 안쪽의 Rib 부가 완전히 성형되며, 압하량이 45.8mm 일 때 소재가 Flash 부를 완전히 통과하여 금형 내부로의 완전한 충전이 이루어 진다. 또한, 최종 단계에서의 하중은 약 16,122 톤이 소요된다.

(4) 예비성형체와 금형 설계의 보완을 통하여 하중 저감을 위한 추가 연구가 필요하다.

(5) 최종적으로, 형단조품의 제작 및 물성평가를 통한 소형 가스터빈용 터빈 디스크의 정밀단조 기술의 확보가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 곽우진 등, “열간단조공정중의 강의 재결정 거동 유한요소해석”, 한국소성가공학회지, 제 5 권 제 4 호, 1996.
- [2] 염종택 등, “해머 단조된 Alloy 718 디스크의 결정립 분포 해석”, 한국소성가공학회지, 제 6 권 제 3 호, 1997.
- [3] 김박운 편저, “소성가공(II)”, pp.58, 대광서림
- [4] DEFORM-2D, Ver.9.0, Users' Manual
- [5] 김동권 등, “소형 가스터빈 디스크의 단조공정에 관한 연구”, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp.392~395, 2006.

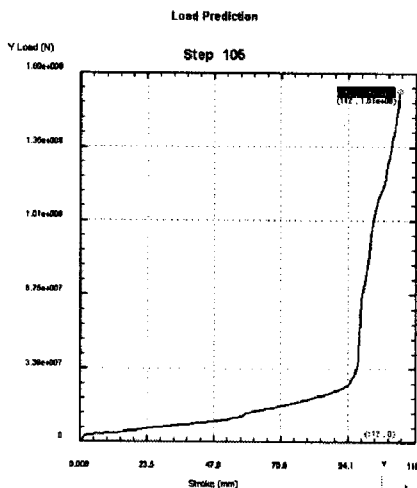


Fig. 8 Load-stroke diagram of closed-die forging of 2nd turbine disk