

터빈 블레이드의 형단조 금형설계 시스템 개발

최 병욱*, 조 종래**, 김 동권***, 김 동영***

Development of Die Design System for Turbine Blade Forging

Byung-Wook Choi, Jong-Rae Cho, Dong-Kwon Kim, Dong-Young Kim

Abstract

The predictions of metal flow, forging load, optimal die angle and preform size are not so easy in turbine blade forging. First of all, the quality of final product is influenced by side force which is one of the significant factors. In this study, slab method is applied to determine optimal die angle minimizing side force and the position of preform. Finally, drawing of die design is obtained in optimal die angle with developing tool that is composed of Visual Basic.

Key word: Turbine Blade, Side force, Optimal Die Angle, Preform, Slab Method

1. 서론

블레이드는 발전소용의 터빈과 같이 가혹한 운전조건에서 장시간 동안 사용되며, 얇은 두께를 갖고 꼬여있는 날개부분과 로타축에 고정되는 자루(root) 부분으로 구성되어있는 기계요소이다.

국내에서는 보통 각재를 밀링기계에서 가공하여 블레이드를 제작하는데, 최근에 단계적으로 단조 공정으로 바꾸고 있지만 단조 소재의 가공여유가 많아 다시 정삭가공을 하고 있다.

블레이드의 단조공정은 정삭도면에서 가공여유를 고려하여 단조도를 만들고, 이 단조도를 기준으로 하여 다이의 기본 설계가 이루어 진다. 여기서, 사용될 장비나 단조되는 재료 그리고 다른 공정변수를 고려해서 상·하부 다이의 최적의 분할선을 찾아내는데, 측력(side force)의 최소화에 기준을 둔다. 단조 다이에서 측력이 발생하면 상·하다이가 정확히 일치하지 않아 정밀도가 낮아진다.

본 논문에서는 블레이드 정밀단조 작업에 있어서 정밀도를 해치는 요인을 분석하고, 블레이드 형상의 꼬임에 의한 다이에 작용하는 측력을 최

소화하는 최적의 단조각과 단조하중을 예측하고, 마찰 및 플래시의 폭과 두께 등이 단조하중에 미치는 영향을 분석하며, 금형설계를 위해서 산출된 결과로 금형도면을 생성하는 일련의 과정을 자동화하고자 한다.

2. 역사적 배경

1970년대 중반부터 도면 작성과 NC가공에 컴퓨터를 이용하면서 급속히 발전하여 CAD/CAM시스템을 단조다이의 설계와 생산에 이용하였는데, Battelle연구소를 중심으로 이루어 졌다[1-3]. 소성가공에 관한 해석기술의 발달로 CAE를 도입하기 시작하여 슬랩법과 유한요소법(FEM)을 사용하여 단조하중과 금속의 유동을 예측하게 되었다[4,5]. 터빈블레이드의 단조해석은 주로 2차원 평면 변형 문제로 다루어져 국내외적으로 연구가 진행되어 왔다[6-9]. 최근에는 해석 기법이 더욱 발달하여 3차원해석까지 가능하게 되었다[9,10].

이상과 같은 많은 연구들은 블레이드 단조공정에 CAD를 적용하고 하중과 금속유동해석, 플래시의 영향평가 등 해석적인 관점에 초점을 맞추어 연구하였다. 그러나 이러한 연구결과는 기술자의 관점에서 볼 때 사용상 불편한 점이 많이 있고, 충분히 활용하기 어렵다. 이러한 불편함을 극복하기 위해 최근에 일본 KOBE STEEL에서

* 한국해양대학교 기계공학과 대학원

** 한국해양대학교 기계공학부

*** 한국중공업 기술연구원

는 블레이드 금형설계 전용프로그램을 개발하여 사용하고 있다[11]. 따라서 국내에서도 블레이드의 제작과 실용화에 관한 연구가 필요하며 중소기업에서 쉽게 사용할 수 있는 전용시스템이 개발되어야 한다.

3. 슬랩법을 이용한 해석

3.1 슬랩법

슬랩법은 미소코기를 갖는 슬랩요소로 변형영역을 나눈 다음 이 요소의 힘평형을 고려해 미분방정식을 만들고, 경계조건을 고려하여 미분방정식의 적분을 통해 변형영역내의 응력분포나 힘을 근사적으로 구할 수 있는 방법이다.

표면마찰의 영향은 힘의 평형에서는 고려되지만 내부의 변형이나 주응력방향에는 영향을 주지 않는다고 가정하며 마찰계수 $\tau = f\bar{\sigma}$ 를 사용하였고, Von Mises의 항복조건을 따라 평면변형문제인 경우 $\sigma_y - \sigma_x = -\frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}$ 를 사용하였다.

Fig. 1과 같이 상·하부 기울기가 서로 다른 경우의 일반식과 압축하중을 정리하면 식(1)과 (2)가

$$\sigma_y = \frac{k_2}{k_1} \ln\left(\frac{h_e}{h_b + k_1 x}\right) + \sigma_{ye} \quad (1)$$

$$P = -\frac{k_2}{k_1^2} [h_e(\ln h_e - 1) - h_b(\ln h_b - 1)] + \left(\sigma_{ye} + \frac{k_2}{k_1} \ln h_e\right) x_e \quad (2)$$

된다. 여기서, $k_1 = \tan\alpha + \tan\beta$, $k_2 = -\frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}k_1 + \tau$

($2 + \tan^2\alpha + \tan^2\beta$) 이고, 그림에서 아래첨자 "u", "l" 은 상부와 하부를 "b", "e"는 시작과 끝을 나타낸다.

Fig. 1과 같은 블레이드 단조 해석은 길이방향의 변형이 거의 없기 때문에, 평면변형 문제로 가정하고, 블레이드의 각 대표되는 단면에 슬랩법을 적용하여 단조하중과 응력계산을 하였다.

먼저 상부와 하부 다이의 단면사이를 작은 변형요소로 나누고, 각각의 변형요소에 대해서 상부와 하부는 다른 경사를 갖고 있지만, 재료의 유동방향은 본질적으로 상하다이 운동에 수직이라 생각한다(Fig. 4참조). Fig. 3과 같이 계산은 각각 좌·우측의 자유표면으로부터 시작하여, 수직응력 분포 선이 교차하는 점이 중립선(neutral line)이 된다.

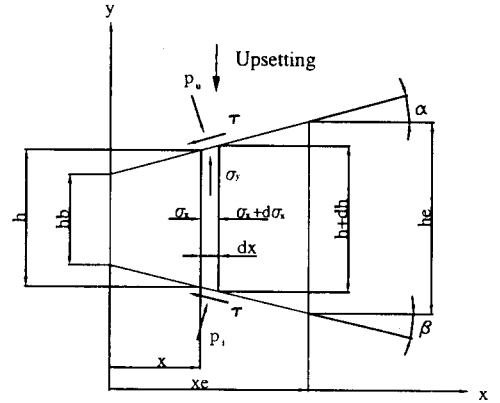


Fig. 1 Slab method of general plain strain case

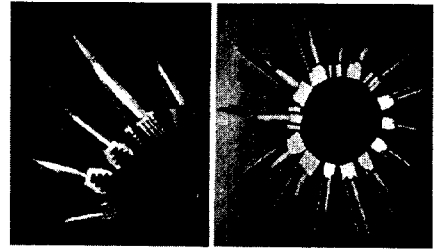


Fig. 2 Profile of forged turbine blade

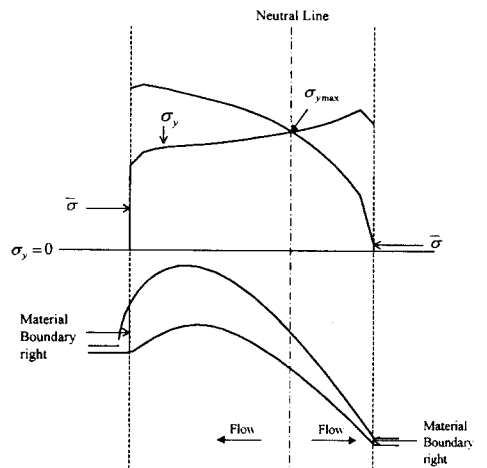


Fig. 3 Neutral line determination with the slab method

3.2 금형 축력의 최소화

블레이드 단조에서 다이의 최적각 결정은 대단히 중요하며, 소재가 비대칭이거나 블레이드처럼 많이 꼬여있다면, 언더컷(undercut)을 피할 뿐 아니라 축력을 최소화할 의도 때문에, 위치의 결정은 대단히 어렵게 된다.

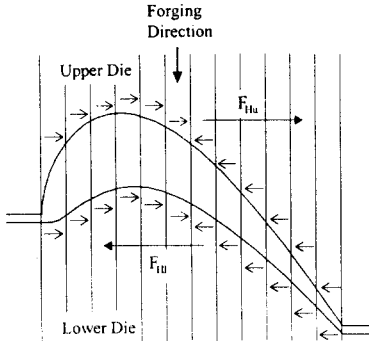


Fig. 4 Slab and side force for plane strain

Fig. 4에서는 수 개의 변형요소로 나뉜 블레이드의 단면이 보여지는데, 슬랩법으로써 상·하다이에 작용하는 축력을 계산할 수 있다. 상·하다이의 축력은 단위길이당 축력을 고려하여 식(3)과 같이 표현된다.

$$F_{Hu} = \sum_{j=1}^n F_{uj}, \quad F_{Hl} = \sum_{j=1}^n F_{lj} \quad (3)$$

전체합력은 식(4)가 되고, 최적의 각도는 F_{total} 이 최소화될 때 얻어진다.

$$F_{total} = [F_{Hu} - F_{Hl}] \quad (4)$$

3.3 하중의 중심

프레스 구조물에 뒤튐림이 생기지 않도록 프레스 베드(bed) 위에 다이의 위치를 선정하는 것 또한 대단히 중요하다. 하중의 중심(R_x, R_z)은 두 축(x, z)에 관한 모멘트의 평행방정식으로부터 얻게 된다.

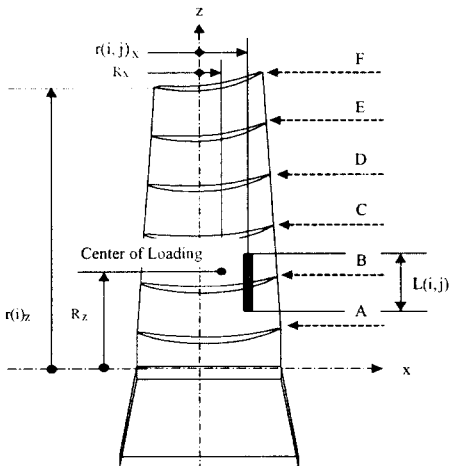


Fig. 5 Center of loading determination

$$R_x = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ L(i) \sum_{j=1}^m F(i,j) \cdot r(i,j)_x \right\}}{\sum_{i=1}^n \left\{ L(i) \sum_{j=1}^m F(i,j) \right\}} \quad (5)$$

여기서 $L(i,j)$ 는 요소의 길이, $F(i,j)$ 는 슬랩법에서 계산된 단위길이당의 힘, $r(i,j)_x$ 는 z축으로부터 요소의 도심까지의 거리, m은 요소의 개수, n은 단면의 개수를 나타낸다.

3.4 역슬랩법

블레이드 자체의 방위는 플래시가 생기는 곳으로 정해지나, 다이내부에 모재의 위치를 결정하는 것은 슬랩법을 역으로 추적하여 모재가 다이에 놓일 위치를 예측할 수 있다.

이 방법은 강소성 FEM해석과 비교해서 계산시간이 현저히 단축되고, 블레이드 전단면에 관해서 중립면의 위치변화를 알 수 있을 뿐만 아니라, 플래시로 빠져나가는 재료의 손실을 최소화하는 예비성형체의 크기도 제시해 준다.

4. 프로그램 검증 및 적용예

4.1 프로그램의 검증

가스터빈의 한 단면(k-k)에 있어서 DEFORM2D와 슬랩법의 결과를 Table.1, 2에 나타내었다. 계산시간은 한 단면만 비교한 것으로 가스터빈 블레이드에는 17개의 단면이 있고 1°씩 돌려서 최적각을 찾는 작업을 하면 대단히 큰 계산시간 차이가 발생한다.

	DEFORM2D	슬랩법
요소 개수	1000	15
계산에 소요된 시간 (분:초)	15:45(m=0.3) 25:32(m=0.5)	00:03

Table. 1 Required time for calculation

마찰상수	DEFORM2D		슬랩법	
	중립면 (mm)	하중(kgf)	중립면 (mm)	하중(kgf)
m=0.3	-3.8	22801.1	-0.2	22837.4
m=0.5	-6.0	30259.3	-8.5	31220.0

Table. 2 Results of DEFORM2D and slab method

4.2 적용예

프로그램의 초기화면에는 파일, 다이, 모재, 회전

해석, 위치해석과 형상data만들기와 같은 메뉴가 있다. Fig. 6은 계산된 결과를 보여주는 대화상자를 나타내고, Fig. 7은 최적의 다이각일 때, 금형도면을 AutoCAD에서 구현한 것으로 HP7단을 적용하였다.

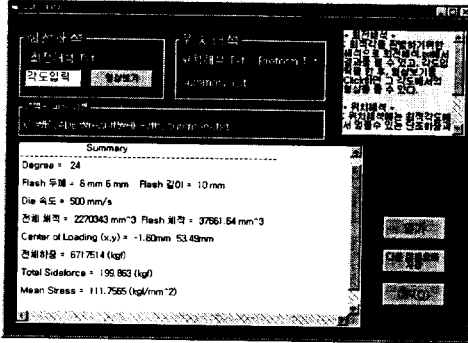


Fig. 6 Dialog box to show the results

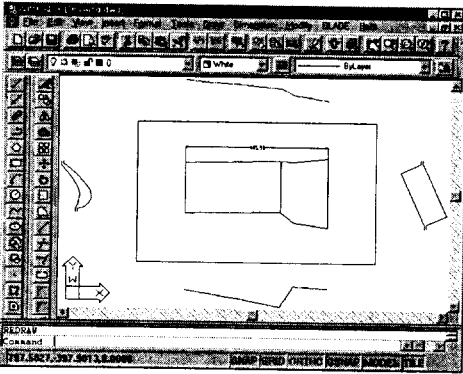


Fig. 7 Drawing of forging die

Fig. 8과 9는 HP7단에 대한 결과로써, Fig. 8은 플래시의 두께와 폭이 각각 6mm, 10mm 일 때의 각도 변화에 따른 상·하다이에 작용하는 축력을 나타낸 것이며, Fig. 9는 플래시의 두께(5, 6, 7mm)와 폭(10, 14, 18mm)의 변화에 따른 단조하중과 최적의 다이각을 나타내고 있다.

Fig. 10은 가스터빈 블레이드의 경우, 플래시의 두께(2, 3, 4mm)와 폭(10, 14, 18mm)의 변화에 따른 단조하중과 최적의 다이각을 나타내고 있다.

5. 결론

슬랩법을 사용하여 블레이드와 단조해석 전용 프로그램을 개발하였다. 슬랩법과 DEFORM2D와 잘 일치하는 결과를 볼 수 있었고, 본 프로그램은 증기터빈과 가스터빈 블레이드에 적용하여 유

용성을 확인하였다. 신속한 최적의 다이각 선정 및 하중계산으로 프레스의 용량을 쉽게 결정할 수 있으며, 단조 금형 설계 및 예비성형체의 크기까지 제시할 수 있었다.

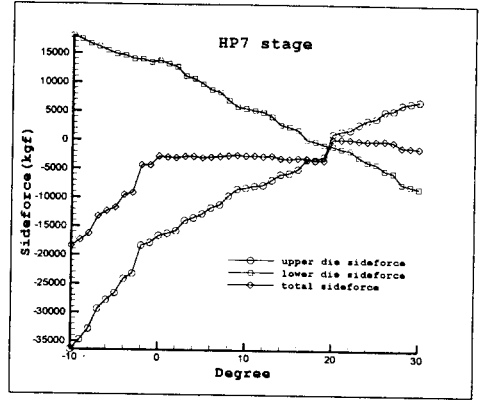


Fig. 8 Determination of optimum die angle in HP7 stage

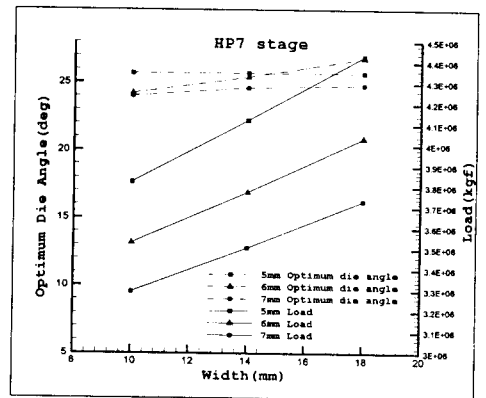


Fig. 9 Results of HP7 stage

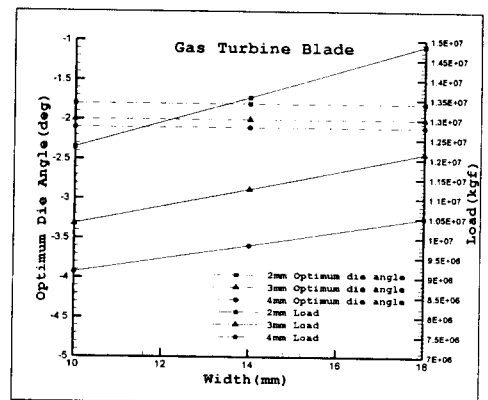


Fig. 10 Results of gas turbine blade

참고 문헌

- (1) N. Akgerman, Design and manufacture of forging dies: computer aided methods, SME Technical paper, MF 72-531, 1972.
- (2) N. Akgerman, T. Altan, Application of CAD/CAM in forging turbine and compressor blades, trans. of the ASME, J. of Engineering for power, Vol. 98, April 1976, p.290-296.
- (3) T.L. Subramanian and T. Altan, Application of computer aided techniques to precision closed-die forging, Annals of CIRP, November 1, 1978, Vol. 27, p.123.
- (4) T. Altan, S. I. Oh, H. L. Gegel, Metal forging fundamentals and applications, ASM, 1983.
- (5) Akgerman, N. and Altan, T. Application of CAD/CAM in forging turbine and compressor blades. Trans. ASME, J. Engng for Power, April 1976, 98(2), p.290-296.
- (6) Rebelo, N., Rydstad, H. and Schroder, G. Simulation of material flow in closed-die forging by model techniques and rigid-plastic FEM. In Numerical methods in industrial forming processes, 1982, p.237-246.
- (7) 이낙규, 윤정호, 양동열, 강소성 유한요소법을 이용한 냉간단조 금형 및 가공공정 해석, 대한기계학회논문집, 제13권 제6호, p.1070-1081, 1989.
- (8) Kang, B. S., Kim, N. S. and Kobayashi, S. Computer-aided preform design in forging of an airfoil section blade, Int. J. Mach. Tools Mf., 1990, 30(1), p.43-52.
- (9) Yang, D. Y., Lee, N. K and Yoon, J. A three-dimensional simulation of isothermal turbine blade forging by the rigid-viscoplastic finite element method. J. Mater. Engng and Performance, February 1993, 2(1), p.119-124.
- (10) Cho, J.R., Lee, N.K. and Yang, D.Y., A three-dimensional simulation for nonisothermal forging of a steam turbine blade by the thermo-viscoplastic finite element analysis, Proc. Instn Mech Engrs, Part B: J. of Engineering Manufacture, Vol. 207, p.265-273, 1993.
- (11) Dung, N. L. and Mahrenholtz, O. Progress in the analysis of unsteady metal-forming processes using the finite element method. In Numerical methods in industrial forming processes (Eds J. F. T Pittman et al), 1982, p.187-196 (Pineridge Press, Swansea).