

# 터빈 블레이드 단조금형 설계의 자동화에 관한 연구

최 병욱\*, 왕 지석\*\*, 조 종래\*\*

## Study on the Development of Die Design System for Turbine Blade Forging

### 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 words:** Turbine Blade, Side force, Optimal die Angle, Preform, Slab Method

### 1. 서론

블레이드는 원자력과 화력발전소용의 증기터빈과 같이 가혹한 운전조건에서 장시간동안 사용되며, 얇은 두께를 갖고 꼬여있는 날개부분과 로타(rotor)축에 고정되는 자루(root)부분으로 구성되어있는 중요한 기계요소이다.

국내에서는 보통 각재를 밀링기계에서 가공하여 블레이드를 제작하였고, 최근에 단계적으로 단조 공정으로 바꾸고 있지만, 단조 소재의 가공여유가 많아 다시 정삭가공을 하고 있는 실정이다. 블레이드의 단조공정은 정삭도면에서 가공여유를 고려하여 단조도를 만들고, 이 단조도를 기준하여 다이의 기본 설계가 이루어 진다. 여기서 사용될 장비나 단조되는 재료 그리고 다른 공정변수를 고려해서 상·하부 다이의 최적의 분할선을 찾아내는데, 축력(side force)의 최소화에 기준을 둔다. 단조 다이에서 축력이 발생하면 상·하다이 정확히 일치하지 않아 정밀도가 낮아진다.

본 논문에서는 블레이드 정밀단조작업에 있어서 정밀도를 해치는 요인을 분석하고, 블레이드 형상의 꼬임에 의한 다이에 작용하는 축력을 최소화

화하는 최적의 단조각과 단조하중을 예측하고, 마찰 및 플래시의 폭과 두께등이 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

\* 한국해양대학교 기계공학과 대학원

\*\* 한국해양대학교 기계공학부

있고, 충분히 활용하기 어렵다. 이러한 불편함을 극복하기 위해 최근에 일본 KOBE STEEL에서는 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 미소크기를 갖는 슬랩요소로 변형영역을 나누는 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  $\sigma_y - \sigma_x = -\frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\sigma}$  사용하였다.

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

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

$$P = -\frac{k_2}{k_1^2} [h_e(\ln h_e - 1) - h_b(\ln h_b - 1)] \quad (2)$$

$$+ \left(\sigma_{ye} + \frac{k_2}{k_1} \ln h_e\right) x_e$$

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

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

Fig1과 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 상·하다이 운동에 수직이라 생각한다(Fig.4참조). Fig. 3과 같이 계산은 각각 좌·우측 소재끝단으로부터 시작하여, 수직응

력 분포선이 교차하는 점이 중립선(neutral line)이 된다.

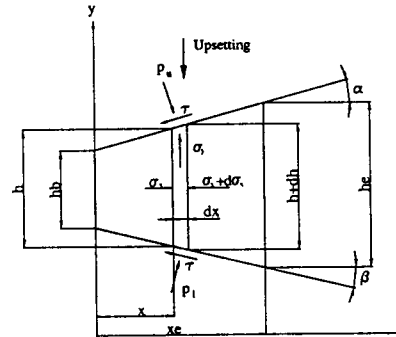


Fig.1 Slab method of general plain strain case

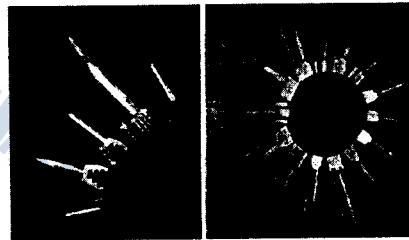


Fig.2 Profile of forged turbine blade

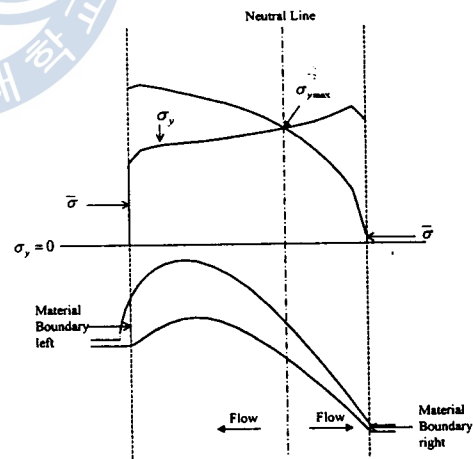


Fig.3 Neutral line determination with the slab method

3.2 금형 축력의 최소화

블레이드 단조에서 다이의 최적각 결정은 대단히 중요하며, 소재가 비대칭이거나 블레이드처럼 많이 꼬여있다면, 언더컷(undercut)을 피할 뿐 아

니라 축력을 최소화할 의도 때문에, 위치의 결정은 대단히 어렵게 된다.

Fig. 4에서는 수 개의 변형요소로 나뉜 블레이드의 단면이 보여지는데, 슬랩법으로써 상·하부다이에 작용하는 축력을 계산할 수 있다.

상·하다이의 축력은 단위길이당 축력을 고려하여 식(3)과 같이 표현된다.

$$F_{H_u} = \sum_{i=1}^n F_{u_i} \quad F_{H_l} = \sum_{i=1}^n F_{l_i} \quad (3)$$

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

$$F_{total} = [F_{H_u} - F_{H_l}] \quad (4)$$

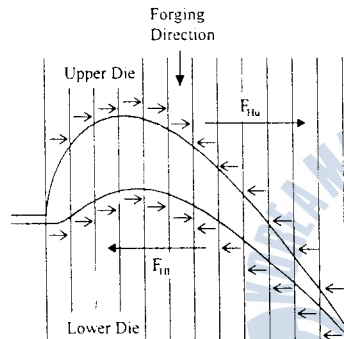


Fig. 4 Slab and side force for plane strain

3.3 하중의 중심

프레스 구조물에 뒤틀림이 생기지 않도록 프레스 베드(bed) 위에 다이의 위치를 선정하는 것도 또한 대단히 중요하다. 하중의 중심( $R_x, R_z$ )은 두 축(x, z)에 관한 모멘트의 평형방정식으로부터 얻게 되는데, 먼저 Fig.8에 표시되어 있는 요소의 길이  $L(i, j)$ 와 슬랩법에서 계산된 단위길이당의 힘  $F(i, j)$ 를 갖고, z축에 관한 모멘트를 표시하면

$$F(i, j) \cdot L(i, j) \cdot (R_x - r(i, j)_x) = M_{ij}$$

가 되고, 여기서  $R_x$ 는 z축으로부터 하중중심까지의 거리이고,  $r(i, j)_x$ 는 z축으로부터 요소의 도심까지의 거리이다. 이 식을 모든 변형요소  $j=1, m$  (요소의 개수)와 전 단면  $i=1, n$ (단면의 개수)에 걸쳐 적용하고 모멘트의 합력이 영(zero)이 되는  $R_x$ 를 구하면 식(5)와 같이 표현된다.

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

x축에 대해서도 같은 방법을 고려하여  $R_z$ 를 구할 수 있다.

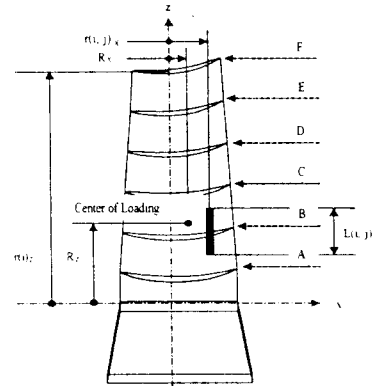


Fig.5 Center of loading determination

3.4 역슬랩법

블레이드 자체의 방위는 플래시가 생기는 곳으로 정해지나, 다이내부에 모재의 위치를 결정하는 것은 슬랩법을 역으로 추적하여 모재가 다이에 놓일 위치를 예측하는데, 다음과 같은 과정을 거치게 된다.(Fig.6 참조)

- 1) 단조형상에 슬랩법을 적용하여 중립면(NS1)을 구한다.
- 2) 이 중립면(NS1)의 좌·우측의 면적을 각각 구한다.(SL1, SR1)
- 3) 상부다이를  $\Delta H$  ( $=$  다이속도  $\times \Delta t$ ) 만큼 올린다.
- 4) 중립면(NS1)을 경계로 SL1=SL2 및 SR1=SR2라 하고 변형중의 모재단면 EL2o 및 ER2o를 구한다.
- 5) EL2o~ER2o 구간에서 다시 Slab법을 적용하여 새로운 중립면 NS2를 구한다.
- 6) 2)~5)를 반복하므로써 초기 모재의 위치를 구한다.

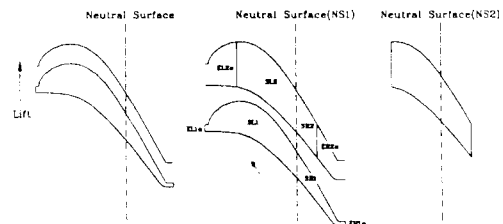


Fig.6 Prediction method of neutral surface in blank shape

이 방법은 강소성 FEM해석과 비교해서 계산시간이 현저히 단축되고, 중립면의 위치변화와 예비성형체의 크기 또한 제시해 준다.

3.5 다이 설계 방법

(1) 최적 다이각의 설계

상·하부 다이에 작용하는 축력은 단조품의 정밀도를 낮추게됨으로, 축력이 영이 되는 최적각을 찾아야 한다.

(2) 플래시 높이 차가 최소가 되는 다이각 선정 각도에 따라 축력의 크기 변화가 적을 경우, 단면의 좌·우측 플래시의 높이 차가 가장 작은 각도를 선택하여야 한다.

(3) 예비성형체가 놓일 위치의 결정 최적위치에서 벗어날 경우, 다이내부를 채우지 못하여, 정밀한 단조품을 얻을 수 없을 뿐만 아니라, 단조하중도 증가하게 된다.

(4) 재료의 축방향 신장 평면변형 상태를 만족한다고 하더라도, 각 단면의 미미한 신장의 합이 축방향 신장을 유발하므로 예비성형체의 양끝단이 구속되었다면 좌굴(buckling)이 발생하게되어, 다이의 한쪽이 구속되지 않도록 해야 한다.

4. 프로그램의 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	15:45 (m=0.3)	00:03
	25:32 (m=0.5)	

Table.1 The time required for calculation

마찰상수	DEFORM2D		슬랩법	
	중립면 (mm)	하중(kgf)	중립면 (mm)	하중(kgf)
m=.3	-3.8	22801.1	-0.2	22837.4
m=.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.7참조). Fig.8은 계산된 결과를 보여주는 대화상자를 나타내고, Fig.9는 최적의 다이각일 때, 금형도면을 AutoCAD에서 구현한 것으로 HP7단을 적용하였다.

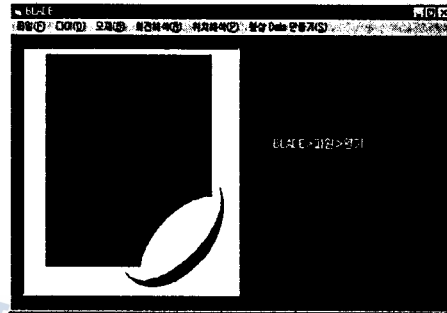


Fig.7 The initial window of program

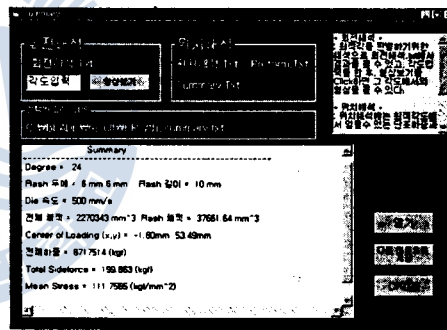


Fig.8 Dialog box to view results

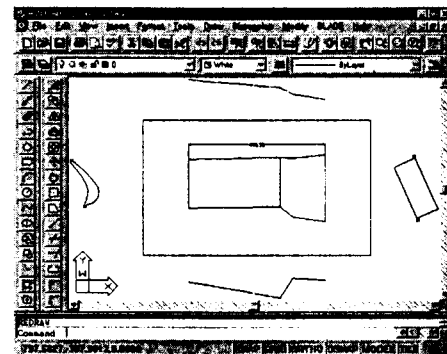


Fig.9 Die drawing

5. 프로그램 적용 및 해석결과

Fig.10~12는 HP7단에 대한 결과로써, Fig.10은

플래시의 두께와 폭이 각각 6mm, 10mm 일 때의 다이각 변화에 따른 상·하다이에 작용하는 축력을 나타낸 것으로 20°가 최적의 다이각으로 계산되었으며, Fig.11은 플래시의 두께(5, 6, 7mm)와 폭(10, 14, 18mm)의 변화에 따른 단조하중과 최적의 다이각을 나타내고 있다. 여기서 플래시의 폭이 작아질수록, 플래시의 두께가 커질수록 최적의 다이각은 감소하는 경향을 나타낸다. Fig.12는 마찰상수가 0.1, 0.3일 때의 각 단면에서 작용하는  $\sigma_y$ 의 분포를 나타낸 것이다.

Fig.13은 가스터빈 블레이드의 경우, 플래시의 두께 3mm, 폭 10mm일 때 최적 다이각은 2°로 계산되었으나, Fig.14와 같이 플래시의 높이 차이가 최소가 되는 단조각을 검토한 결과 26°가 얻어졌다.

cf) S급속 - HP7단 : 20°  
 가스터빈 블레이드 : 25°

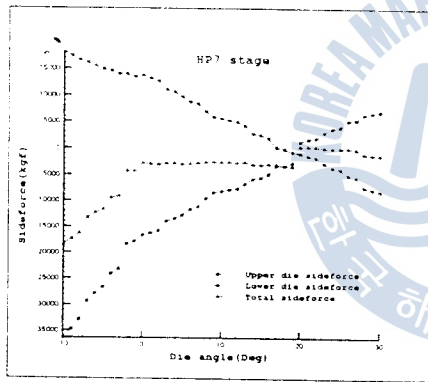


Fig.10 Determination of optimum die angle in HP7 stage

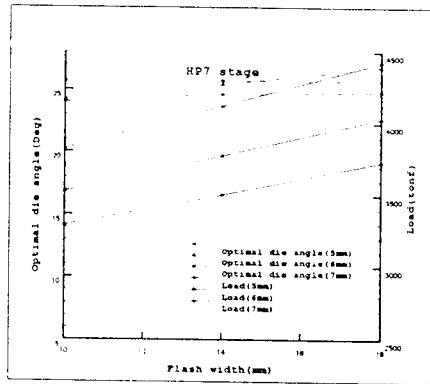


Fig.11 Results of HP7 stage

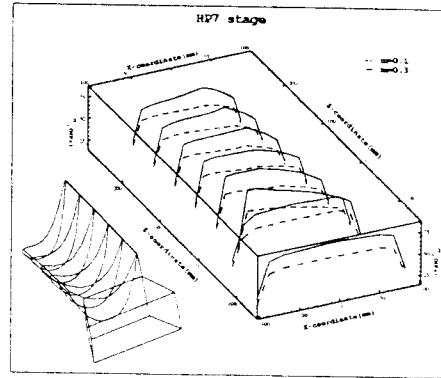


Fig.12 Stress distribution at y-direction of each section in HP7 stage

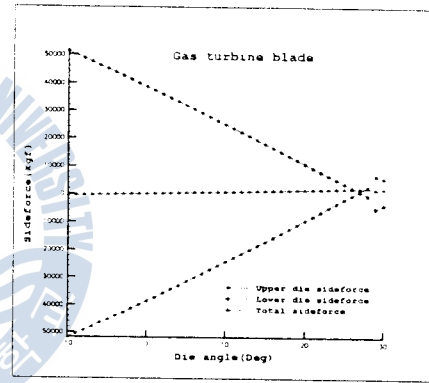


Fig.13 Optimal die angle detection of gas turbine blade

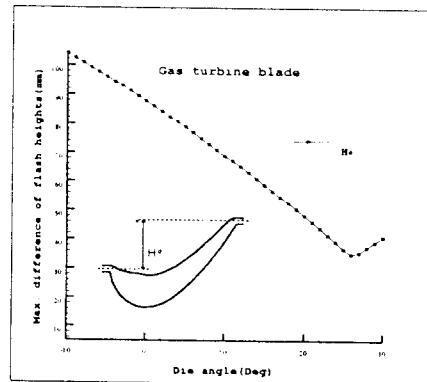


Fig.14 Maximum difference of flash heights for die angle

## 6. 결론

슬랩법을 사용하여 블레이드의 단조해석 전용 프로그램을 개발하였다. 슬랩법과 DEFORM2D와 잘 일치하는 결과를 볼 수 있었고, 본 프로그램은 증기터빈과 가스터빈 블레이드에 적용하여 유용성을 확인하였다. 신속한 최적의 다이각 선정 및 하중계산으로 프레스의 용량을 쉽게 결정할 수 있으며, 단조 금형 설계 및 예비성형체의 크기까지 제시할 수 있었다.

## 7. 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) Y.K Chan and W.A. Knight, Computer aided design and manufacture of dies for long hot forgings, Proceedings of the 6th NAMRC, 1978, p.455.
- (5) Y.K Chan and W.A. Knight, Computer aided manufacture of forging dies by volume building, J. of mechanical working technology, 1978, vol, 3, p.167.
- (6) T. Altan, Computer aided design and manufacturing (CAD/CAM) of hot forging dies, J. Applied Metalworking, Vol. 2, No.2, 1982, p.77.
- (7) T. Altan, S.I. Oh, and H.L. Gegel, Metal forging fundamentals and applications, ASM, 1983.
- (8) Aksenov, L. B., Chitkara, N. R. and Johnson, W. Pressure and deformation in the plane strain pressing of circular section bar to form turbine blade. Int.J.Mech.Sci., 1975, 17, p.681-691.
- (9) 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.
- (10) 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 (Eds J. F. T. Pittman et al.), 1982, p.237-246(Pineridge Press, Swansea).
- (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).