

터빈디스크의 등온단조 공정설계를 위한 유한요소 해석

김 태 호*, 박 노 광**, 강 범 수***

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 한국기계연구원

*** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

Isothermal Forging Design in Turbine Disk by Finite Element Method

Tai-Ho Kim*, Nou-Kwang Park**, Beom-Soo Kang***

* Department of Aerospace Engineering

** Korea Institute of Machinery & Materials

*** ERC for Net-Shape and Die Manufacturing

Abstract

Process design is one of the most important fields in metal forming, where the finite element method has appeared a useful method for industrial applications. In this study, A finite element method has been applied for iso-thermal forging design in turbine disk. This kind of approach is good for minimize actual redesign of die, which can reduce die production cost. - vital importance in current industrial environment.

1. 서 론

최근 소성가공 산업은 급속한 산업의 발전과 항공기용 부품 개발, 전자제품의 초소형화 추세에 따라 새로운 형상 부품의 수요가 급증하고 있으며 정밀한 소성가공품의 요구가 늘고있다. 그러나 아직도 실제 현장에서는 이러한 제품을 생산하기 위해서는 많은 시행착오를 거치고 있다. 대형 컴퓨터의 보급 및 수치해석 프로그램의 개발로 이러한 현장의 어려움을 극복해 주는 수치적 해석방법들이 많이 연구되었다. 이들중 대표적인 방법이 유한차분법과 유한요소법인데, 특히 유한요소법은 종래의 해법에 비해 그 적용의 융통성이 좋으며 다양하고 상세한 정보를 제공할 수 있어 오늘날 소성가공 문제의 해석에 가장 널리 사용되고 있다[1-3].

재결정온도 이상에서 행하는 열간단조는 초기의 간단한 형상의 소재로부터 복잡한 형상의 최종제품을 성형하는데 이용되는 소성가공법이다. 냉간단조가 비교적 작은 부품의 생산에 사용되는 반면, 열간단조는 한번의 성형으로 큰 변형을 일으킬 수 있으므로 형상이 복잡하고 치수가 큰 부품의 생산에 유용하며, 절삭가공으로 생산된 기계가공품에 비하여 재료절감 및 생산성 향상을 꾀할 수 있다. 또한 단조가 진행됨에 따라 단류선(flow line)이 생성되어 인장강도, 연신율 및 충격치 등의 기계적 성질이 향

상되므로 현재까지 많이 응용되고 있다. 그러나 성형중 소재유동, 다이와 소재사이의 마찰과 열전달, 사용장비와 공정변수들과의 관계 및 단조품의 복잡한 기하학적 형상으로 인하여 열간단조공정의 상세한 공학적 해석에는 많은 어려움이 있다[4-7].

터빈 및 엔진디스크는 고속, 고온에서 작동하는 회전체 부품으로서 신뢰도가 높아야 하므로, 높은 강도를 유지하면서 고온, 진동, 산화, 부식 등에 견딜 수 있는 재료를 사용하여야 하므로, 주로 Inconel alloy, IN100과 같은 니켈합금(nickel-base alloy) 및 티타늄합금(titanium-base alloy) 등과 같은 고온합금(high-temperature alloy)을 사용한다[8]. 일반적으로 고온합금(high-temperature alloy)의 단조에 있어서는 몇 번의 예비성형공정을 거쳐야 하므로, 이에 따른 금형의 개수가 증가하여 단조품의 단가를 상승시킨다. 따라서 일반적인 단조공정은 금형단가를 줄이기 위하여, 소재의 손실과 기계가공의 비용이 증가하더라도 후속의 기계가공이 많은 부품으로 단조를 행한다. 그러나 단조품의 가격은 소재의 가격에 많은 영향을 미치며(50%이상), 단조시 플래쉬 등으로 인해 25% 이상의 소재가 손실된다. 또한 최근 단조산업은 소재비 상승, 작업환경의 악화로 인한 숙련기술자의 부족 및 다품종 소량생산 등의 문제를 극복하기 위하여, 생산성향상, 소재손실의 최소화, 예비성형횟수의 감소와 후처리 공정의 최소화를 통한 비용절감에 주력하고 있다. 따라서 고온합금과 같이 유동응력이 아주 높아 단조하기가 힘들고, 소재의 가격이 비싼 소재는 재래적인 단조공정으로는 성형이 어려우므로, 거의 등온에 가까운 열간단조 또는 등온단조(isothermal forging)를 이용하여 성형하므로, 이를 위한 단조 및 금형기술의 개발은 아주 중요하다[9-10].

유한요소 해석을 통한 단조공정의 해석은 소재유동에 대한 자세한 정보, 성형하중 및 결함발생 가능성 등을 미리 예측할 수 있으므로, 실제로 금형을 제작하기 이전에 금형형상과 예비성형체의 형상의 수정이 가능하다. 터빈 및 엔진디스크의 열간 및 등온단조 공정설계에 유한요소법을 활용하여 공정에 필요한 정보를 미리 구하는 것은 시행착오를 줄여 생산단가 및 공정개발 시간을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 제품의 품질도 향상시킬 수 있으므로, 이에 대한 연구가 절실히 필요하다. 또한 이러한 연구의 결과는 현장 애로기술의 해결을 위한 아주 필요한 정보가 될 것이다.

2. 2차원 강소성 유한요소 수식화

금속성형공정의 해석에 효과적이며, 현재 널리 사용되고 있는 수치해법인 2차원 강소성 유한요소법에 대한 이론과 수식화 과정은 이미 널리 알려져 있다[11].

비압축성 조건을 만족하기 위한 벌칙함수(penalty function) K를 도입하면, 강소성 재료에 대한 1차 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} f_i \delta u_i dS = 0 \quad (2.1)$$

여기서 $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2} (\sigma_{ij} \dot{\sigma}_{ij})^{1/2}$, $\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2}$, $\dot{\sigma}_{ij}$ 는 편차응력, f_i 는 표면외력, u_i 는 속도성분, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 변형률 속도, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적 변형률속도이다.

표면외력으로 주로 작용하는 금형과 소재사이의 마찰의 처리를 위하여, 마찰면에서의 중립점발생으로 인한 특이성을 피하여 수치해의 안정성을 고려한 다음의 식을 사용한다.

$$\hat{f} = -mk \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\tilde{v}_r|}{u_0} \right) \frac{\tilde{v}_r}{|\tilde{v}_r|} \quad (2.2)$$

여기서 m 은 마찰상수, k 는 소재의 전단항복응력, \tilde{v}_r 은 금형에 대한 소재의 상대속도, u_0 는 \tilde{v}_r 에 비하여 아주 작은 양수이다.

일반적인 유한요소 분할화 과정을 거치면, 절점속도벡터 \tilde{v} 에 대한 비선형 방정식이 된다.

$$\Omega(\hat{v}) = K(\hat{x}, \bar{\varepsilon}, \hat{\varepsilon})\hat{v} - F(\hat{x}, \hat{v}) = 0 \quad (2.3)$$

여기서 K는 강성행렬(stiffness matrix), F는 힘 벡터(load vector), \hat{x} 는 절점좌표 벡터이다. 본 연구에서는 유한요소 분할화 과정에서 2차원 4절점 요소(quadrilateral element)를 사용하였다. 식(2.3)는 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 해를 구하며, 초기속도장은 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

3. 단조도면 설계

단조공정을 설계하기 위해서는 기본적으로 필요한 조건들이 있다. 단조에 사용하는 기계라든지 단조를 열간으로 할 것인가 등온으로 할 것인가 등이 그것이다. 이중에 주어지는 조건도 있고 고정된 조건도 있으며 선택해야 할 조건도 있다. 본 연구에 사용된 조건은 Table.1과 같다. 부품단면의 기계도면은 Fig.1과 같이 주어졌다.

CAD/CAM을 사용한 단조공정설계는 Fig.2과 같은 과정을 거쳐서 설계되며 주어진 조건을 바탕으로 Fig.3과 같이 각종공차를 적용하면서 기본의 단조단면을 만든다[12]. 이렇게 나온 단조단면은 바로 성형을 하기에는 언더컷이 있는 등 여러가지 성형상 어려움이 발생할 수 있으므로 수정을 하여서 사용한다. 본 해석에서는 빌렛이 이미 구입이 되어 크기를 바꿀수 없으므로 단면에서 계산된 체적과 빌렛의 체적차이를 효과적으로 배분하여 단조의 용이성과 변형률의 균일화를 위해 사용하기로 하였다. 이러한 과정은 Fig.4에 나타나 있다. 첫번째 그림은 공차를 적용하여 나온 단면이다. 여기서 A, B부분은 두개의 리브사이에 끼어서 미충진이 발생할 소지가 많으므로 단을 주어서 단순화 시켰다. C부분은 연속적으로 형상이 변하여서 성형이 어려우므로 수평으로 하였고 D부분은 계단식으로 되어있어 이부분도 성형을 용이하게 바꿨다. 두번째의 상태에서도 약간의 여유체적이 있으므로 추가로 수정을 하였는데 계단식으로 되어있는 E부분을 평형으로 하였으며 단조품의 바깥끝부분에 있는 F형상도 성형이 어려우므로 단순화 시켰다. 중심부위에 웹이 얇으면 좋지 않으므로 H부분을 낮추었다. 그리고 조금 남은 부피는 G를 낮추는데 사용하였다. 이렇게 만들어진 기본단면에 주어진 빌렛을 위치시킨 상태는 Fig.5와 같다.

4. 시뮬레이션

기본단면상태에서 성형을 하기위해 빌렛을 놓을때 아래쪽 모서리 부분이 다이의 곡면부위에 걸치는 문제가 있다. 그리고 초기의 원통형 빌렛에는 버가 남아있을 수 있으므로 업세팅을 하여 사용하기로 하였다. Fig.6와 같은 세가지의 형상을 기준으로 테스트 해보았고 각각의 결과는 Fig.7-Fig.9와 같다. 세가지의 빌렛에 편의상 BIL-A, BIL-B, BIL-C라고 이름을 붙여보았다. 세가지 빌렛의 유동특성을 보면 윗부분의 안쪽 캐비티가 차고 아래쪽이 차는 순서이다. 그런데 BIL-A와 BIL-B의 경우를 보면 위쪽과 아래쪽이 차고 난후 반경방향으로 유동이 발생해서 디스크의 직경이 커지게 되는데 팽창을 위해서 금속의 유동이 위쪽과 아래쪽의 캐비티를 따라서 흐르게 된다. 이렇게 될 경우 다이의 마모가 심각해지며 금속이 과도한 변형을 받아 특성이 나빠지며 윤활에도 좋지 않다. 그래서 다이의 채움은 동시에 발생하는 것이 좋다. 예비성형체를 사용하기로 하고 BIL-C 정도의 업세팅을 해서 사용하기로 하였다.

아랫부분 캐비티의 채움을 돕기위해서 약간의 각을 더 주고 밑부분에 단이 있는 예비성형체를 사용하는 것으로 바꾸기로 하였다. 몇번의 시행착오를 거쳐 Fig.10과 같은 공정을 얻게 되었다. 최종부품의 변형분포는 Fig.11과 같다. 업세팅된 빌렛에서 예비성형체를 만드는 공정은 Fig.12와 같다.

5. 결과

본 해석에서는 유한요소법을 사용하여 초소성 재료를 사용한 등온단조로 엔진 디스크를 성형하는 공정을 설계하였다. 주어진 각종 조건하에서 부품을 성형하기 위한

단조단면을 설계하였으며 거기에 맞는 공정을 유한요소법을 사용하여 설계하였다.

빌렛은 이미 구매되어 바뀔 수 없으므로 남은 체적을 활용하여 단조가 쉽게 되도록 바꾸었으며 초기의 빌렛에 버 등의 문제점을 해결하기 위해서 업세팅을 거친후 예비성형체를 만들고 이것을 성형하여 최종 부품을 만들었다. 공정의 요약은 Fig.13과 같고 성형하중은 업세팅을 위해서는 하중이 4500톤, 예비성형체를 위해서는 4200톤, 마지막 공정을 위해서는 6000톤이 필요한 것으로 나왔다.

참고문헌

1. Padmanabhan, K. N. and Davies, G. J., "Superplasticity", Springer-Verlag, Berlin, 1980.
2. Hamilton, C. H. and Paton, N. E.(eds), "Superplasticity and Superplastic Forming", Proc. Int. Conf., The Minerals, Metals and Materials Society, U.S.A. 1988.
3. B.S. Kang and S. Kobayashi, "Preform Design in Ring Rolling by the Three-Dimensional Finite Element Method", Int. J. Mech. Tools and Manufact., Vol. 31, pp. 139, 1991.
4. K. Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill Book Co., 1985.
5. T. Altan, S.I. Oh and H.L. Gegel, "Metal Forming: Fundamentals and Applications", ASM, Metals Park, OH, 1983.
6. T. Altan, F.W. Boulger, J.R. Becker, N. Akgerman and H.J. Henning, "Forging Equipment, Materials, and Practices, MCIC-HB-03", Battele-Columbus Lab., Columbus, OH, 1973
7. A.M. Sabroff, F.W. Boulger and H.J. Henning, "Forging Materials and Practices", Reinhold Book Co., Battelle Memorial Institute, Columbus, OH, 1968
8. 박종진, "Ti 합금의 제트엔진 디스크의 열간 및 등온단조의 최적공정설계", 한국과학기술재단, 1994
9. 이진희, 강범수, 김병민, 김왕도, "유한요소법을 이용한 제트엔진 디스크의 초소성 단조공정설계", 대한기계학회논문집 제18권 제4호, pp. 876-886, 1994
10. Hori, S., Tokizane, M. and Furushiro, N.(eds), "Superplasticity in Advanced Materials", Proc. Int. Conf. on Superplasticity in Advanced Materials, (ICSAM-91), Osaka, Japan, 1991.
11. S. Kobayashi, S.I. Oh, and Altan, T., "Metal Forming and the Finite- Element Method", Oxford Univ. Press. 1989.
12. 강성원, "열간단조 공정설계 및 금형설계의 자동화시스템에 관한 연구", 부산대학교, 1994

번호	구분	비고
Forging type	Isothermal forging	
Billet material	Inconel 718	Nickel alloy
Billet size	Height 6.0" Diameter 5.5"	Fixed
Friction factor	0.3	
Material property	$\sigma = C(\dot{\epsilon})^m$	C : 0.0583 (sec ^m (ton/mm ²) ⁻¹) m : 0.141
Geometry	Drawing	

Table 1 Forging specification.

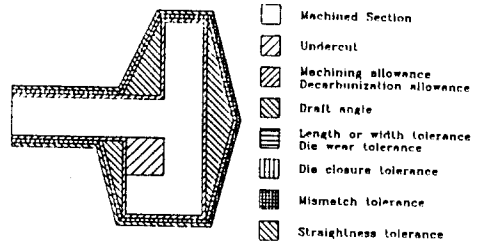


Fig. 3 Forged section geometry, shown with application of allowances and tolerances.

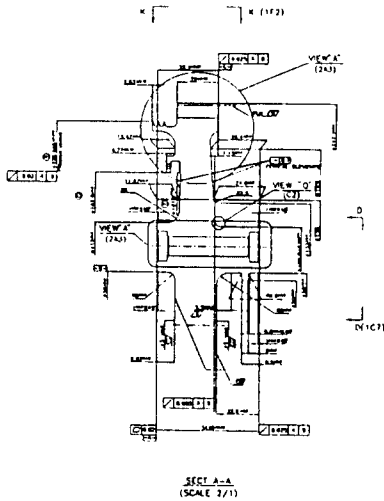


Fig. 1 Drawing for engine disk.

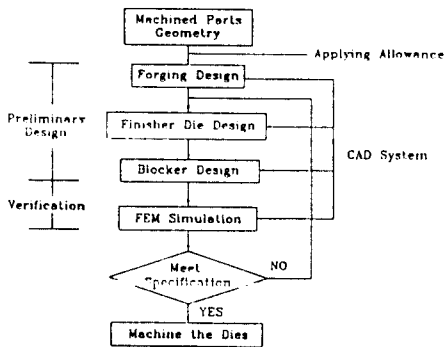


Fig. 2 CAD/CAM procedure of forging die design.

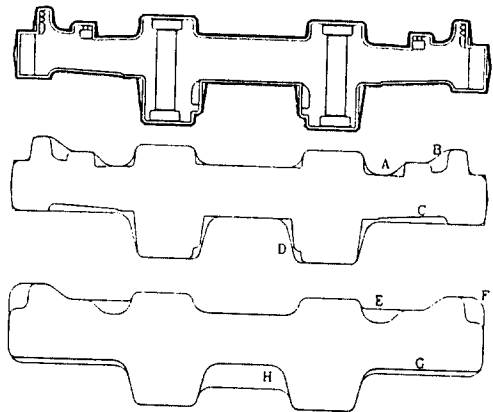


Fig. 4 Apply allowances and modify geometry.

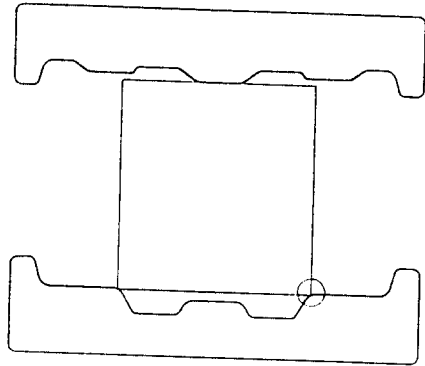


Fig. 5 Basic forging design and billet setting in position.

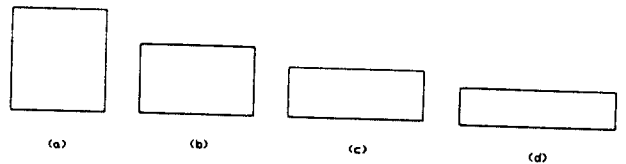


Fig. 6 Various billet geometry tested: (a) BIL-A, D170mm, (b) BIL-B, D200mm, (c) BIL-C, D230mm.

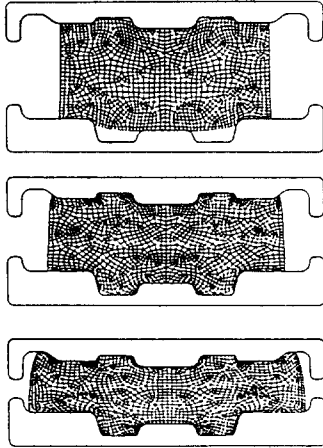


Fig. 7 Forging simulation for BIL-A.

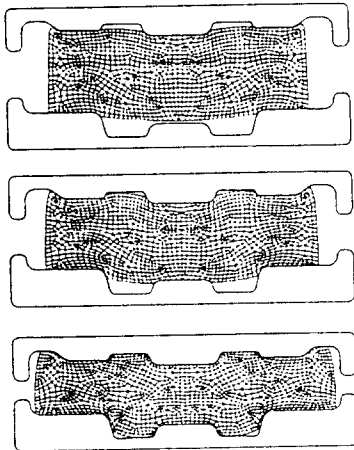


Fig. 8 Forging simulation for BIL-B.

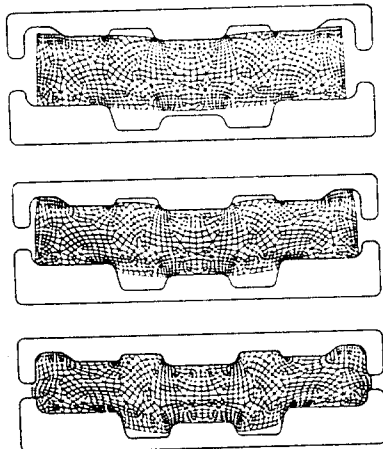


Fig. 9 Forging simulation for BIL-C.

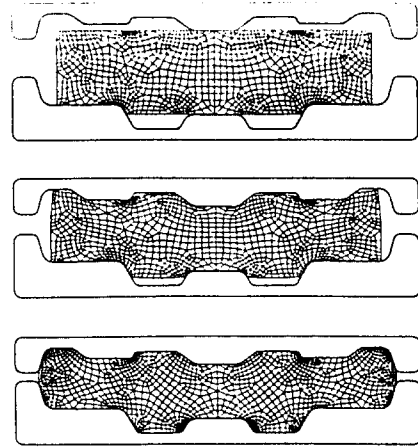


Fig. 10 Forging simulation with preform.

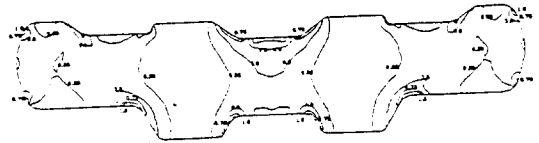


Fig. 11 Effective plastic strain distribution of forged workpiece.

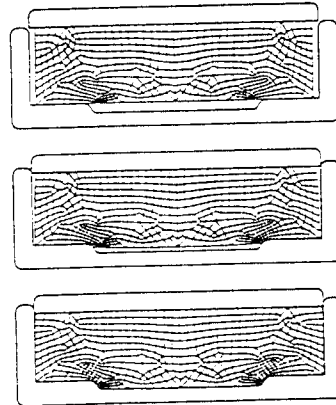


Fig. 12 Forging simulation for making preform.

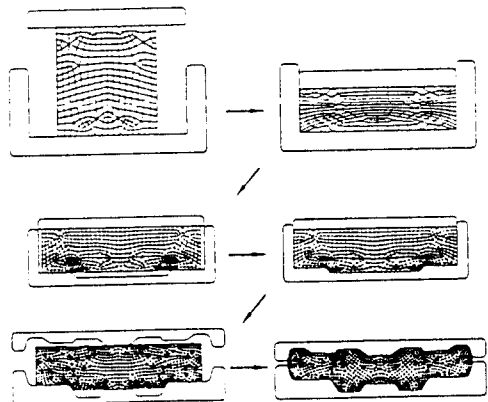


Fig. 13 Summary of forging design for engine disk.