

형단조 예비성형체 설계의 CAE

김낙수

홍익대학교 기계공학과 교수



●1959년생.
●소성가공, 유한요소법을 전공하였으며, 전산기를 이용한 소성가공의 공정해석 및 설계와 모형 재료를 이용한 공정해석에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

단조는 소재를 주로 압축하여 원하는 모양으로 성형하는 가공법으로 가공 중에 재료의 유동방향으로 단류선(grain flow line)이 생기게 된다. 단류선 방향으로서는 인장강도, 연신율, 충격치 등의 기계적 강도가 크게 향상되므로 크랭크 축, 커넥팅 로드, 디스크 등과 같은 신뢰성이 요구되는 부품의 가공에 적합하다. 따라서 고부가가치를 갖는 항공기 엔진 부품이나 구조재와 같은 핵심 부품의 가공에는 단조가 필수적이다. 또한 단조는 초기 설비비는 비싼 편이지만, 일단 공정 설계가 완전히 이루어진 후에는 다른 가공법에 비해 생산율이 높으므로 자동차, 가전제품 등의 부품을 대량 생산하는 데에도 적당하다.

형단조 공정은 금형을 사용하며, 최종 제품 형상의 복잡한 정도에 따라서 주로 원기둥과 같은 간단한 모양의 빌렛으로부터 한 단계 또는 여러 단계를 거쳐서 점차 최종 제품으로 만들어진다. 소재가 여러 단계를 거칠 때는 중간 작업을 예비성형작업(preforming operation)이라고 하며, 각 예비성형작업으로 만들어지는 반제품을 예비성형체(preform)라고 한다. 그림 1에 H형 단면을 가진 림/웹형(rib/web type) 단조품에 사용되는 전형적인 예비성형체를 나타내었다.

단조의 생산성을 높이기 위해서는 예비성형작업의 회수를 가급적 줄여서 전체적인 공수를 줄이는 것이 바람직하지만, 신뢰도를 엄격하게 요구하는 항공기 부품처럼 재료의 유동응력이 높고 단조 중에 미세 조직이 조절되어야 하거나, 제품의 신뢰도를 크게 요구하지 않는 대량 생산의 경우라도 최종 제품의 모양이 복잡한 경우에는 예비성형작업을 통하여 소재의 유동이 조절되어야 한다. 따라서 단조 공정 중에 소재의 유동을 정확하게 파악하는 일이 매우 중요하며, 이러한 정보로부터 예비성형체가 최적 설계될 수 있다. 그림 2에는 H형 단조에서 예비성형체가 잘못 설계된 경우에 단조품에 생기는 결함을 나타내며, 이로부터 소재유동에 대한 지식과 정확한 공정 해석 등이 더욱 필요함을 알 수 있다.

지금까지 현장에서 예비성형체를 설계하는

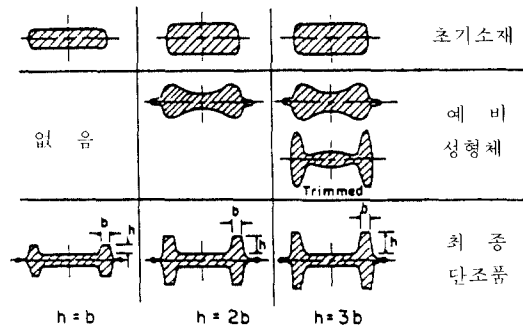


그림 1 H-형 단조품에 대한 예비성형체

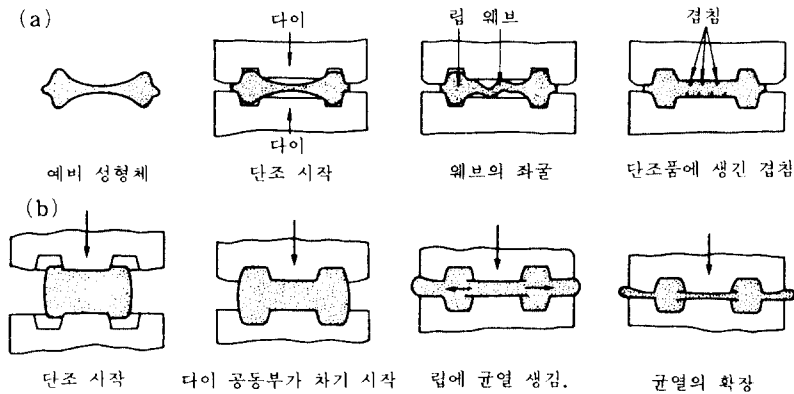


그림 2 H-형 단조품의 결합.

방법은 주로 단조기술자의 풍부한 경험을 토대로 정확한 수치자료 없이 시행오차법에 의존하여 왔다. 최근에는 설계의 자동화를 통하여 시행오차의 회수에 비례한 경비, 시간, 노력을 절감하여 공정설계의 생산성을 높일 수 있는 방법이 모색되고 있다.⁽¹⁾ 단조 공정의 설계 자동화는 크게 두 영역으로 분류할 수 있다. 그 하나는 단조품의 최종 형상이 주어졌을 때, 소재의 유동을 미리 해석하여 예비성형체의 형상을 가공하는 예비성형작업의 결정이며(주로 CAE),⁽²⁾ 다른 하나는 예비성형체나 최종 제품의 형상을 가공하기 위한 금형의 설계 및 가공(CAD/CAM)이다. 이 외에도 단조품의 가공 방법 및 형상을 미리 분류하여 자료화하는 전문가 시스템의 개발도 진행중이다.⁽³⁾

소재의 유동해석 및 예비성형체의 설계에는 수치 해석법이나 모형재료를 통한 실험이 많이 사용되는데, 수치해석법으로는 초등해법(slab method), 상계법 또는 상계요소법(UBET),⁽⁴⁻⁶⁾ 유한요소법(FEM)⁽⁷⁻⁹⁾ 등이 사용될 수 있으며, 이 중에서 형단조의 경우에는 강소성 유한요소법이 현실적으로 만족할만한 결과를 주므로 많이 이용되고 있다. 모형 실험에는 유동응력이 매우 낮으나, 열간에서 강의 성질과 비슷한 플라스틱이나 납 등이 많이 사용되어 수치해석결과를 검증하거나 보완하는 데 이용된다.^(10,11) 플라스틱을 사용하는 경우에는 색

상이 다른 층을 적층한 뒤 단조 공정과 동일한 절차로 변형시켜 소재의 유동을 알아 볼 수 있다.

최근에 컴퓨터의 연산처리 및 화상처리 능력이 비약적으로 발전하여 생산기술분야에도 수치적인 공정해석 방법이 본격적으로 이용되고 있는 실정이다. 이 글에서는 예비성형체에 대한 단조 공정을 2차원 강소성 유한 요소법으로 시뮬레이션하고 그 결과를 이용하는 적절한 설계절차를 통하여 예비성형체를 설계할 수 있는 방법과 단조설계에서의 CAE의 전망에 대하여 알아 본다.

2. 단조공정 해석방법

2.1 유한요소 수식화

강소성 유한요소법에서는 다음과 같은 지배 방정식들을 사용한다.⁽¹²⁾

- 1) 평형방정식

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

- 2) 경계조건

$$\left. \begin{aligned} v_i &= \bar{v}_i \text{ on } S_U \\ \sigma_{ij} n_j &= \bar{t}_i \text{ on } S_F \end{aligned} \right\} S_U + S_F = S_{total} \quad (2)$$

- 3) 유동법칙(응력-변형률 관계)

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda} \quad (3)$$

단, 여기서 $f(\sigma_{ij})$ 는 일반적으로 재료의 항복

함수를 사용한다.

4) 적합방정식(속도-변형률속도 관계)

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (4)$$

5) 재료의 비압축성

$$\dot{\epsilon}_{kk} = 0 \quad (5)$$

6) 유동응력식

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T) \quad (6)$$

여기서, $\dot{\bar{\epsilon}}$ 은 식 (7)로 정의되는 유효변형률속도이다.

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl}} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon} D \dot{\epsilon}} \quad (7)$$

미분방정식 (1)과 그 경계조건 (2)의 약형에 구속조건 (5)를 벌칙상수 k 를 써서 첨가하면, 식 (8)과 같이 된다.

$$\int_V \sigma_{ij} \sigma \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_{\epsilon_{SF}} \bar{t}_i \delta v_i dS + \int_V k \dot{\epsilon}_{kk} \delta \dot{\epsilon}_{kk} dV = 0 \quad (8)$$

위 식에는 소재가 차지하고 있는 영역 V 와 표면 S_F 에 대한 적분이 있으므로 변수를 이산화(discretization)하여 적분이 일반적으로 수행될 수 있도록 한다. 그 결과는 식 (9)와 같이 된다.

$$\left\{ \int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \bar{v}^T \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV + \int_V k \bar{v}^T \mathbf{B}^T \mathbf{c} \mathbf{c}^T \mathbf{B} dV - \int_{S_F} \mathbf{t}^T \mathbf{N} dS \right\} \delta \bar{v} = 0 \quad (9)$$

위 식에서 $\delta \bar{v}$ 는 임의이므로 다음과 같이 요약된다.

$$\mathbf{\Phi}(\bar{v}) = \mathbf{F}(\bar{v}) \bar{v} + \mathbf{G} \bar{v} - \mathbf{h} = 0 \quad (10)$$

여기서,

$$\mathbf{F}(\bar{v}) = \int_V \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \quad (11)$$

$$\mathbf{G} = \int_V k \mathbf{B}^T \mathbf{c} \mathbf{c}^T \mathbf{B} dV \quad (12)$$

$$\mathbf{h}(\bar{v}) = \int_{S_F} \mathbf{t}^T \mathbf{N} dS \quad (13)$$

이다.

식 (10)은 비선형 연립방정식으로 보통 두 가지 방법이 조합되어 사용된다.

○직접반복법: 식 (14)에서 속도벡터를 직접 구한다.

$$\{\mathbf{F}(\bar{v}) + \mathbf{G}\} \bar{v} = \mathbf{h} \quad (14)$$

○Newton-Raphson 반복법: 이 방법에서는 식 (10)을 1차 Taylor 전개하여 선형화시킨 연립방정식을 푼다.

$$\mathbf{K}_{N-R}^i \Delta \bar{v} = \mathbf{L}_{N-R}^i \quad (15)$$

단, 여기서,

$$\mathbf{K}_{N-R}^i = \frac{\partial \mathbf{\Phi}}{\partial \bar{v}} \Big|_i = \mathbf{F}(\bar{v}) + \mathbf{G} + \frac{\partial \mathbf{F}(\bar{v})}{\partial \bar{v}} \bar{v} - \frac{\partial \mathbf{h}(\bar{v})}{\partial \bar{v}} \quad (16)$$

$$\mathbf{L}_{N-R}^i = -\mathbf{\Phi}(\bar{v}^i) = -\mathbf{F}(\bar{v}) \bar{v} - \mathbf{G} \bar{v} + \mathbf{h}(\bar{v}) \quad (17)$$

이다.

한편 마찰력은 마찰인자(friction factor)를 사용하여 다음과 같이 모형화한다.

$$\underline{f} = -mk \left(\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|\underline{v}_r|}{a} \right) \right) \frac{\underline{v}_r}{|\underline{v}_r|} \quad (18)$$

여기서, \underline{v}_r 은 소재와 공구간의 상대속도이다.

반복법을 통하여 절점에서의 속도가 구해지면 새로운 형상은 Euler method를 사용하여 구한다.

$$\underline{x}^{n+1} \xleftarrow{\text{b.c. handling during at}} \underline{x}^n + \Delta t \underline{v}^n \quad (19)$$

2.2 후방추적기법

그림 3에 소재가 변형되어 가는 개략도를 나타내었다. 강소성 유한 요소법을 사용하여 변형과정을 해석하는 경우에, 소재내 절점의 위치 좌표를 \underline{X} , 절점에서의 속도를 \underline{V} 라 하면,

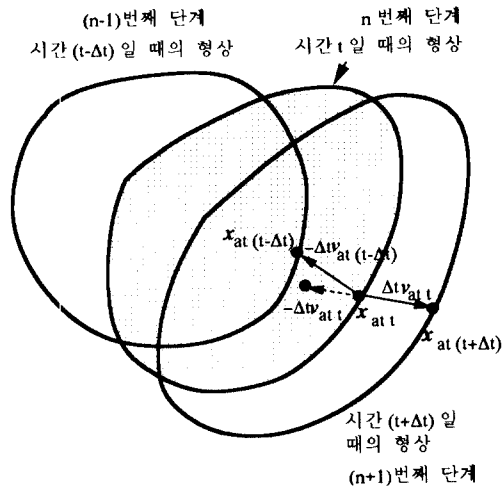


그림 3 후방추적을 하는 방법.

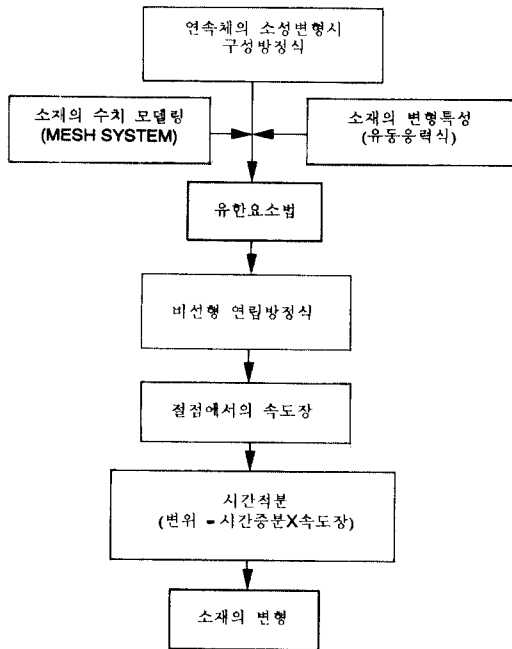


그림 4 단조공정을 시뮬레이션하는 유동도.

식 (10)은 이들을 포함하는 다음과 같은 비선형 연립 방정식이 된다.

$$f(\underline{X}, \underline{V}) = 0 \quad (20)$$

위의 식은 변형과정을 통하여 만족되어야 하

므로 $(n-1)$ 번째 단계에서도 만족되어야 하고 식 (19)로부터 다음식이 성립한다.

$$\underline{X}^{(n-1)} = \underline{X}^n - \Delta t \cdot \underline{V}^{(n-1)} \quad (21)$$

따라서 식 (20)은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} f(\underline{X}^{(n-1)}, \underline{V}^{(n-1)}) \\ = f(\underline{X}^n - \Delta t \cdot \underline{V}^{(n-1)}, \underline{V}^{(n-1)}) \\ = f_1(\underline{X}^n, \underline{V}^{(n-1)}) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, Δt 는 시간증분이고, $(n-1)$ 번째 단계에서의 경계조건은 미리 알려져 있지 않다. 따라서 n 번째 단계에서의 소재의 형상 및 속도가 알려져 있는 경우에 $(n-1)$ 번째 단계에서의 소재의 형상을 구하려면 적절한 경계조건을 사용자가 제공하여야 한다. 결국 사용자가 경계조건을 제공하는 방향에 따라서 변형 전의 소재의 모양이 결정되어 나갈 것이며, 이러한 방식이 후방추적기법을 이용한 예비성형체 설계방식의 핵심이 되고 있다.

시험 예비성형체(test preform)로 일련의 공정을 해석한 후에는, 수치해석 결과를 토대로 원하는 설계조건에 맞도록 예비성형체의 모양이 보정되어야 한다. 설계조건을 예를 들면 정밀 밀폐단조에서 금형 공동부가 완전히 채워질 때까지 플래쉬가 생기지 않도록 하거나, 대형 단조품의 경우 단조하중을 경감시키는 것 등이다. 소재가 수치 모델링된 후 변형되는 과정을 시뮬레이션하는 절차를 개략적으로 나타내면 그림 4와 같다.

3. 정밀 밀폐단조의 설계

3.1 H-형 단면을 갖는 축대칭 제품

축대칭 단조품을 정밀 밀폐단조하여 금형이 완전히 탈출 때까지 플래쉬가 생기지 않도록 하는 정밀 밀폐단조에서는 예비성형체의 형상이 중요하다. 그림 1에 나타난 것과 같은 세 가지 유형의 금형에 대하여, 단조 재료로는 상업용 순수 알루미늄을 모델링하고, 최초의 빌렛은 원기둥 모양에서 시작한다. 계산 조건은

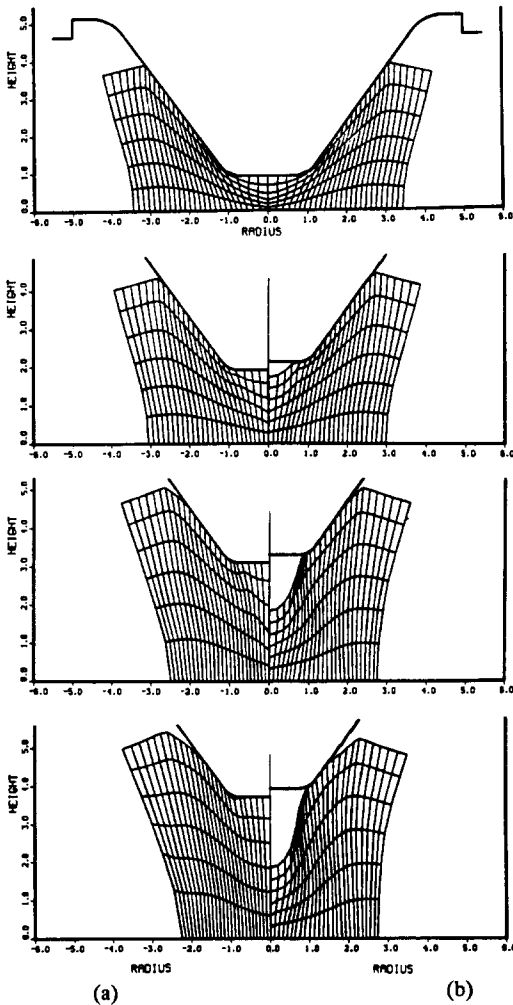


그림 5 후방추적기법의 적용

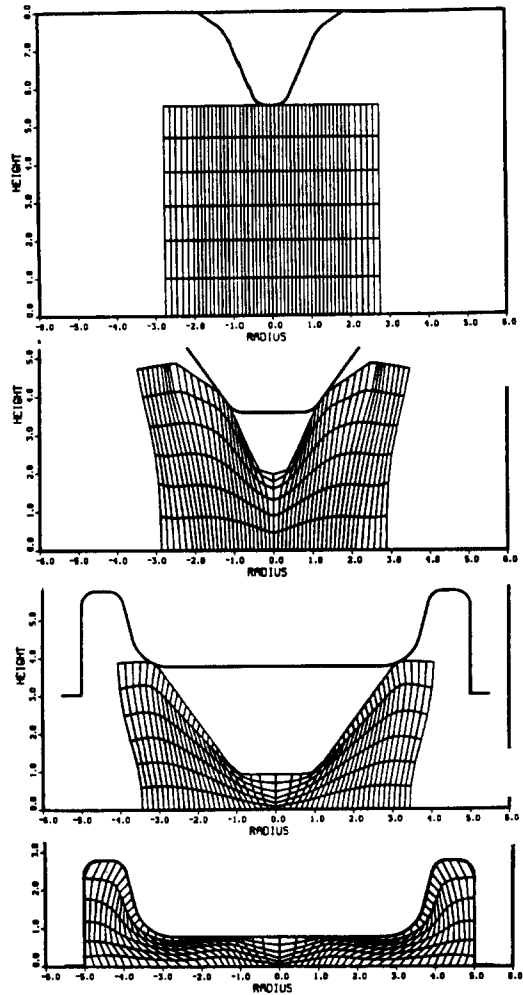


그림 6 설계된 단조공정

다음과 같다.

소재의 부피 : 금형 공동부와 같음

마찰인자(friction factor) : $m=0.1$

소재의 유동응력 : $\sigma/Y_o = (1 + \epsilon/0.3193)^{0.34}$

그림 5는 Rib의 높이/폭의 비가 2인 경우 후방추적기법을 통하여 예비성형체가 설계되는 과정을 나타내며, 그 결과로부터 예비성형작업을 결정하여 일련의 가공 공정을 시뮬레이션한 것을 그림 6에 나타내었다.

그림 7은 세 가지 단조품을 정밀 밀폐단조하

는 경우 가능한 예비성형체의 수 및 모양을 나타낸다. 참고로 플래쉬를 허용하는 일반 형단조의 경우에 UBET와 후방추적기법을 조합하여 예비성형체를 설계하고 그 결과를 검증하기 위해 플라스틱인 및 납을 모형재료로 사용하여 실험한 결과 최종 단조품이 결함없이 성형되었음이 보고되고 있다.⁽⁶⁾

3.2 익형 단면의 평면변형 제품

그림 8에는 원기둥 모양의 빌렛을 압축하여 터빈 블레이드를 밀폐 단조하는 공정을 시뮬레

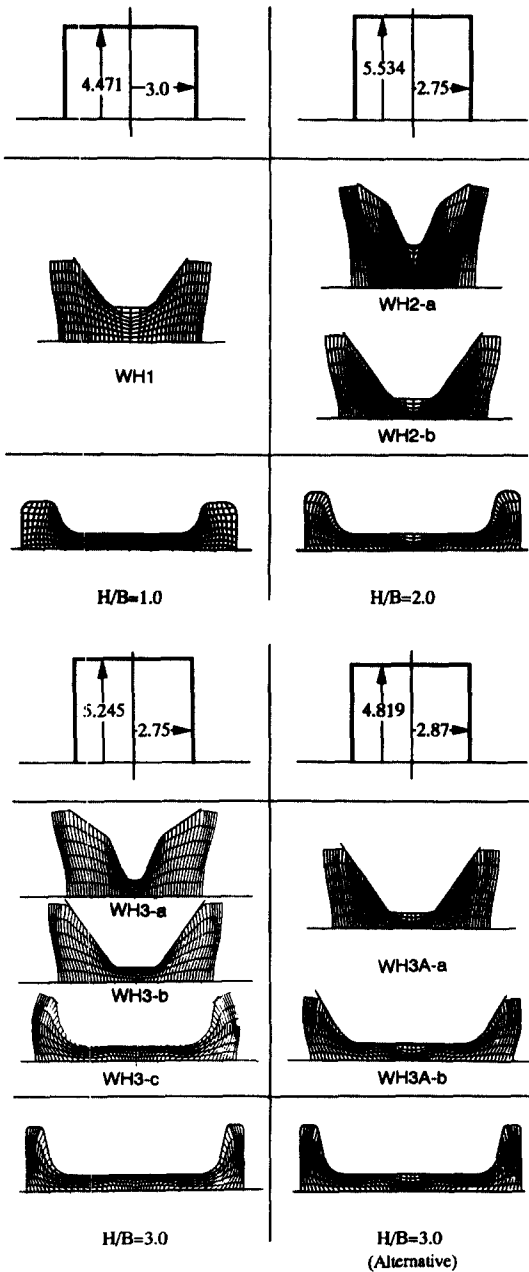


그림 7 밀폐단조를 위한 예비성형체

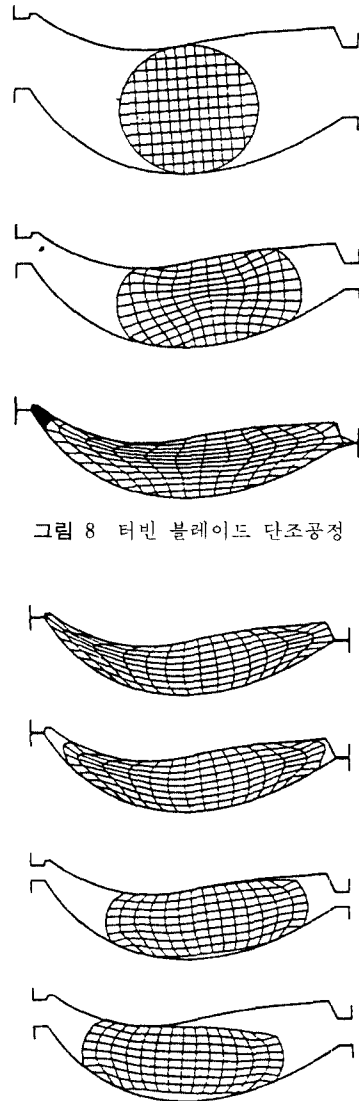


그림 8 터빈 블레이드 단조공정

그림 9 터빈 블레이드 단조에서 후방추적

이선한 결과이다.⁽⁹⁾ 모델링된 재료는 앞의 경우와 같으며, 마찰조건만 $m=0.5$ 로 하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 소재의 단면적을 금

형 공동부의 면적과 같게 하여 플래쉬를 남기지 않는 정밀 단조가 목적이었으나, 원기둥 빌렛으로는 그 목적을 달성할 수 없게 된다. 따라서 그림 9와 같이 후방추적기법을 이용하여 예비성형체의 모양을 결정하였는데, 중간에만 들어지는 예비성형체는 원기둥 빌렛을 업세팅함으로써 가능하다. 이로부터 일련의 공정을 시뮬레이션한 결과, 그림 10과 같이 터빈 블레

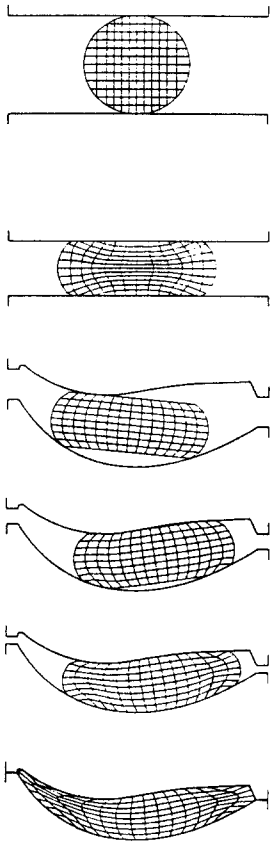


그림 10 설계된 터빈 블레이드 단조과정

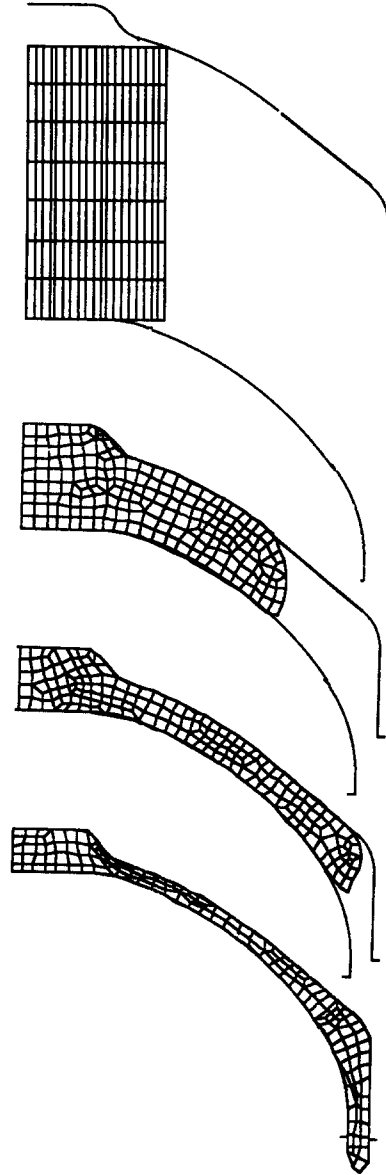


그림 11 예비성형이 없는 경우의 소재의 변형과정

이드가 정밀단조될 수 있음을 알 수 있다.

4. 단조하중 경감을 위한 예비성형체 설계

4.1 설계절차

형단조에서 단조하중을 경감시키기 위하여 예비성형작업을 하는 경우에도 유한요소법을 이용한 CAE가 효과적으로 이용될 수 있다. 예를 들어 크기가 큰 형단조품의 경우나,⁽¹³⁾ 크기가 크지 않더라도 형상이 복잡하여 금형의 마모가 심한 경우에는 적절한 형상의 예비성형체를 사용하여 소재와 금형 간의 압력을 낮추어야 한다. 용기형(bowl type) 단조품의 형단

조에서는 재료의 최종 유동은 용기의 끝 부분에서만 일어날 것이므로, 단조 하중을 경감시키기 위해서는 끝 부분이 열린 개방형 단조가 응용될 수 있다.⁽¹¹⁾ 이 때, 단조품에 생기는 유동 결함을 억제하기 위해서는 소재에 대한 정밀한 유동 해석이 이루어져야 한다.

그림 11에는 용기형(bowl type) 단조품을 원기둥 모양의 소재에서 예비성형 과정없이 성형되는 것을 유한요소법으로 모사실험한 결과를 나타내고 있다. 가공 조건은 등온 열간 단조이고, 설계조건은 단조 하중이 일정한 한도 이내로 제한될 수 있도록 하면서 예비성형 작업의 회수는 가능한한 적게 하는 것이다. 공정 해석조건은 다음과 같다.

마찰인자(friction factor) : $m=0.5$

소재의 유동응력 : $\sigma=C\bar{\epsilon}^{0.1}$

위의 계산조건에서 소재의 처음 형상은 일정한 지름을 가진 원기둥 모양으로 그 부피는 최종 단조후 단조품의 부피보다 약간 크게 하였다. 열간단조의 경우를 감안하면 마찰인자 0.5는 적정하며, 소재의 유동응력은 가상의 재료에 대한 것으로 변형률속도에만 의존한다고 하였다.

단조하중을 제한하는 예비성형공정을 설계하기 위해 다음과 같은 절차를 사용하였다.

1) 원기둥 모양의 소재로부터 최종 단조품 형상이 되기까지 예비성형 과정없이 공정해석한다.

2) 최종가압순간에 소재와 금형 간의 접촉면에서의 하중분포로부터 최대하중점과 최대압력점을 찾아낸다.

3) 후방추적기법 등을 이용하여 최대하중점 또는 최대압력점이 최종순간에 금형면에 접촉하도록 예비성형체의 모양을 찾아낸다.

4) 예비성형체의 모양대로 가공될 수 있는 금형을 설계하여 공정해석을 반복한다.

최대압력점이 최종순간에 금형면에 접촉하기 위해서는 이 부분은 중간예비성형과정 동안 미리 최종치수가 되도록 가공되어야 한다. 또한, 금형과 소재의 접촉면이 넓어지면 최종치수로 가압하는 동안 제한하중을 초과하는 경향이 있으므로 이를 감안하여 중간 성형용 금형의 지름과 곡률반경 등을 결정한다.

4.2 예비성형과정이 없는 경우의 공정해석

그림 12에는 단조가 종료된 후 최종단조품에

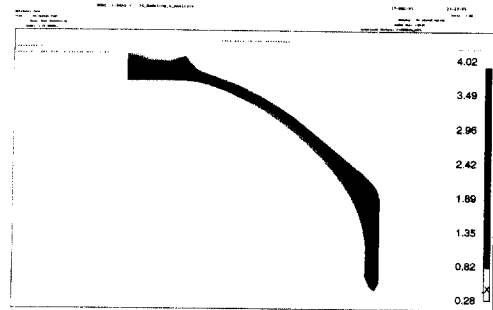


그림 12 최종단조품의 총유효변형률 분포. (예비성형이 없는 경우.)

(제한하중=1.0)

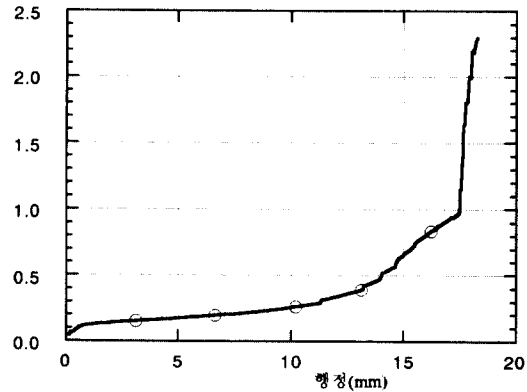


그림 13 예비성형이 없는 경우의 단조하중. (제한하중=1.0)

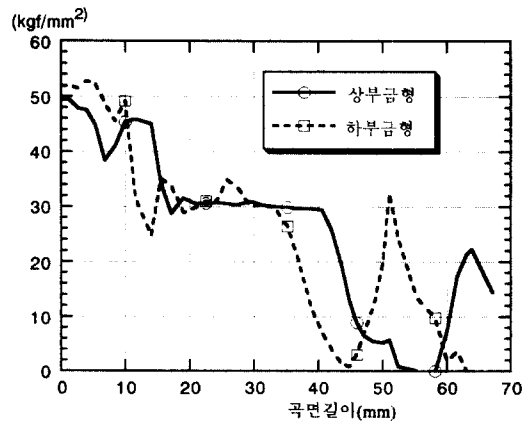


그림 14 단조압력의 분포

서의 총유효변형률의 분포를 명암으로 나타내었다. 그림에서 진한부분은 변형을 심하게 받은 부분이며, 옅은 부분은 변형을 덜 받은 부분이다. 이 결과는 차후에 단조품을 후속가공(주로 기계가공)하는 경우에 유용한 자료로 사용될 수 있다. 단조가 종료되었을 때 총유효변형률의 최대값은 4.02에 달하였고, 주로 중앙부의 목부분과 단조품의 중심부, 그리고 외주부에서 변형이 심함을 알 수 있다.

그림 13에는 단조하중의 증가추이를 나타내었다. 전형적인 형단조의 하중-행정곡선의 양상을 나타내며, 행정이 증가함에 따라 소재와 금형이 닿는 접촉면적이 넓어지고 금형공동부가 완전히 채워진 후에는 단조하중이 급격히 증가하여 제한하중을 초과하여 최종가압 순간에서의 단조하중은 제한하중의 2배 이상에 달한다. 가능한 예비성형체의 형상을 파악하기 위한 자료로서 그림 14에 상부금형과 하부금형에서의 단조압력의 분포를 나타내었다. 그림 14에서 단조압력은 중심축 부근의 목 부분에서 최대임을 알 수 있다. 단조방향으로의 단조하중을 기준으로 예비성형체를 설계하는 경우에는 금형의 어깨부분이 최종순간에 채워져야 하는데, 후방추적기법으로 이 부분을 먼저 자유화시킨 결과는 참고문헌(13)에서 제시한 예비성형체와 매우 유사하다.

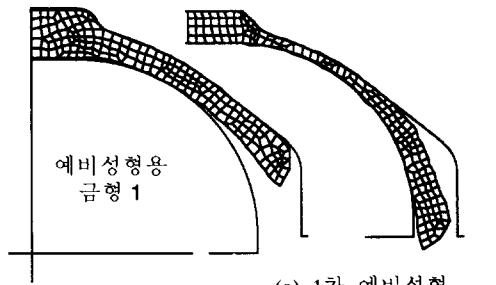
4.3 설계된 예비성형공정

공정해석 결과로부터 최종단조하중이 제한하중의 2~3배에 달하였으므로 적절한 중간예비성형과정을 통하여 단조하중이 제한하중을 초과하지 않도록 하여야 한다. 단조압력분포를 토대로 하여, 최종단계에서 압력이 높게 나타나는 중심축 부근이 거의 최종치수가 되도록 미리 가압하여 반지름 방향으로 차례로 성형하여 나가는 과정의 설계는 다음과 같다.

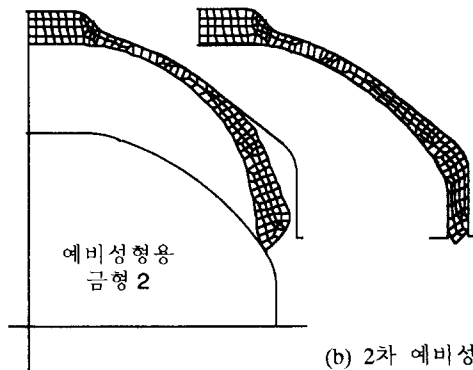
제1단계 예비성형에서는 중심축에서의 두께가 최종 제품의 치수로 될 때까지 가압한다. 이 때 사용된 금형의 형상 및 치수는 예비성형의 마지막 단계에서도 단조하중이 제한하중을

초과하지 않도록 지름 및 곡률반경이 결정되었다. 그림 15(a)는 제1차 예비성형과정에서 소재가 변형되어가는 과정을 보여주고 있다.

제2단계 예비성형에서는 어깨부분을 가압한다. 예비성형용 금형은 최종공정에 쓰이는 금형과 거의 같으나, 최종단조품의 두께까지 가압하더라도 제한하중을 초과하지 않도록 끝부분이 넓게 열려있는 것이 특징이다. 그림 15(b)에는 예비성형공정을 나타내었고, 그림



(a) 1차 예비성형



(b) 2차 예비성형

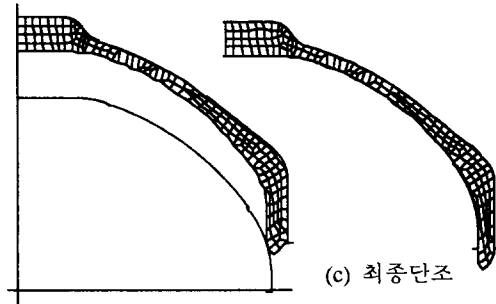


그림 15 설계된 단조공정

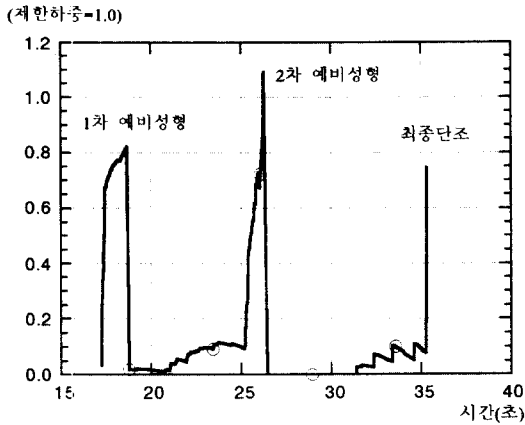


그림 16 각 예비성형 및 최종단조에서의 단조하중. (제한하중=1.0)

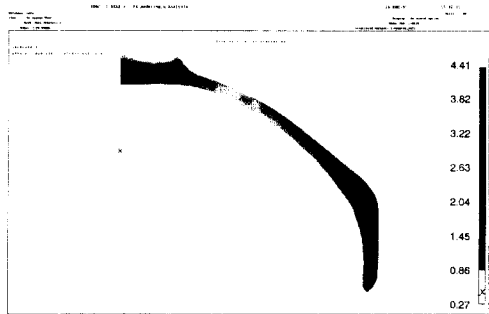


그림 17 최종단조품의 총유효변형률 분포. (설계된 예비성형과정을 따른 경우.)

15(c)에는 최종단조하는 과정을 나타내었다.

전체공정에 대한 단조하중곡선을 그림 16에 나타내었는데, 제2차 예비성형과정에서 단조하중이 제한하중을 약간 초과하고, 다른 공정에서는 단조하중이 제한하중보다 훨씬 못 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 제한하중 내에서 최종 단조품을 생산할 수 있다. 그림 17에는 변형률분포를 명암으로 나타내었는데, 최대유효변형률은 4.41 정도로, 이는 예비성형과정이 없었던 경우에 비해 훨씬 큰 값이다.

설계과정에서는 단조가 행해지는 동안 온도의 영향을 고려하지 않고, 등온변형해석을 하였으나, 이와 같은 단조품을 제조하기 위해서

는 허용하는 범위 내에서 단조온도를 높게 하여 소재의 유동응력을 낮춰야 할 것이다. 그리고 중간예비성형과정이 포함되므로 그 때마다 재가열이 필요해진다.

5. 단조설계에서의 CAE의 전망

5.1 입출력방식과 자동절점재구성

단조설계의 CAE화에는 입출력방식(pre-/post-processing)의 편의성이 보장되어야 한다. 즉, 해석시스템이 입출력시스템을 갖추고 있거나, 자연스럽게 연결되어서 작동방식이 사용자 편의 위주로 되어야 실용성이 확보된다. 단조공정을 해석할 수 있는 상업용 해석시스템으로는 ABAQUS, DEFORM 등이 있고, 이들은 자체적으로 입출력시스템을 갖추고 있다. 해석시스템을 자체개발하는 경우에는 I-DEAS (CAEDS)나 PATRAN과 같은 전용 입출력시스템과 연결하여 쓰면 된다. 그림 18에는 입출력시스템과 연계된 해석시스템의 구성 예를 나타내었다.

단조공정은 전형적인 대변형문제이므로, 최초의 격자모양은 공정이 진행됨에 따라 심하게

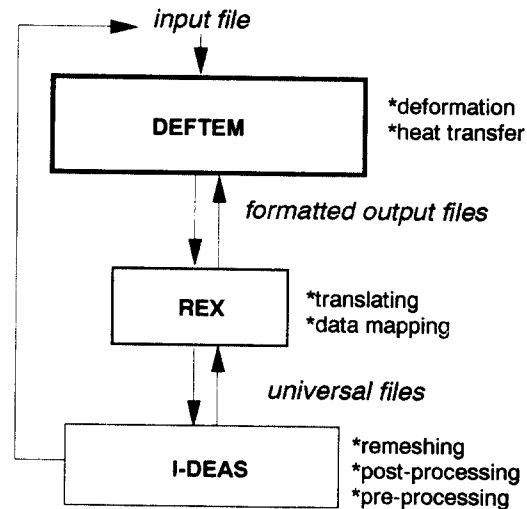


그림 18 입출력시스템과 해석시스템의 구성도.

립되어 있는 수치해석적 설계방법을 보편화하여 현장에서 사용하기 쉽도록 패키지화할 것과, 모형실험 또는 실제 공정을 통한 해석 결과 및 설계를 검증할 것 등이다. 또한, 일반 3차원 형단조의 공정해석도 활발하게 이루어져 복잡한 정밀 단조에 대한 설계 자동화도 연구되어야 할 것이다.

참고문헌

- (1) 김낙수, 1991, "유한요소법을 이용한 형단조 예비성형체의 설계," 단조심포지엄 '91, 반도출판사, pp. 92~99.
- (2) Kim, N. and Kobayashi, S., 1989, "Preform Design in Metal Forming," Advances in Manufacturing Processes, Systems and Machines(Proc. of 15th Conf. on Production Research and Technology, U.C. Berkeley), Vol.1, pp.295~305.
- (3) Sevenler, K., Raghupathi, P.S. and Altan, T., 1989, "Progressive Die Design for Cold Forging," ERC/NSM Report B-89-16, The Ohio State University.
- (4) Cramphorn, A.S. and Bramley, A.N., 1977, "Computer Aided Forging Design with UBET," Proc. 18th Int. MTDR Conf., pp.717~724.
- (5) Osman, F.H. and Bramley, A.N., 1984, "Forging and Preform Design Using UBET," Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp. 563~568.
- (6) 김현영, 1990, "UBET를 이용한 형단조 예비가공형 설계," 박사학위논문, 서울대학교.
- (7) Hwang, S.M. and Kobayashi, S., 1987, "Preform Design in Shell Nosing at Elevated Temperatures," Int. J. Mach. Tools and Manufacture, Vol. 27, pp.1~14.
- (8) Kim, N. and Kobayashi, S., 1990, "Preform Design in H-Shaped Cross Sectional Axisymmetric Forging by the Finite Element Method," Int. J. Mach. Tools and Manufacture, Vol. 30, pp. 243~268.
- (9) Kang, B.S., Kim, N. and Kobayashi, S., 1990, "Computer-Aided Preform Design of an Airfoil Section Blade," Int. J. Mach. Tools and Manufacture, Vol. 30, pp.43~52.
- (10) Pale, J.A., Shivpuri, R. and Altan, T., 1989, "Development of Equipment and Capabilities for Investigation of the Multi-Action Forming of Complex Parts," ERC/NSM Report B-89-28, The Ohio State University.
- (11) 이근안, 임용택, 이종수, 홍성석, 조남춘, 1991, "모델재료를 이용한 대형 개방형 단조품의 성형에 관한 연구," 단조심포지엄 '91, 반도출판사, pp. 52~62.
- (12) Kobayashi, S., Oh, S.I. and Altan, T., 1989, "Metal Forming and the Finite Element Method," Oxford University Press.
- (13) 유요한, 홍성석, 이종수, 1991, "대형도움 단조공정 개발에 관한 연구," 단조심포지엄 '91, 반도출판사, pp. 75~81.