

민감도법을 이용한 자유단조 공정의 예비성형체 설계

심현보* · 노현철* · 서의권**

(2001년 2월 27일 접수)

Preform Design by the Sensitivity Method

H. B. Shim, H. C. Noh and E. K. Suh

Abstract

The sensitivity method has been applied to find preform shape that results in the desired shape after forging. As a 2D example, initial shape of specimen for the cylinder shape without barrelling after forging has been found. The method is then applied to various shapes of 3D free forging and initial shapes of the corresponding specimens after forging have been found successfully. The sensitivity method is proven to be an effective and accurate tool for the preform design.

Key Words : Forging, Preform Design, Sensitivity Method

1. 서 론

단조공정은 한쌍의 금형을 이용하여 소재를 재료를 압축시켜 소요의 형상으로 성형함과 아울러 조대한 결정립을 파괴하여 이를 미세화하고 재료의 물리적 및 기계적 성질을 개선 강화하는 목적으로 사용되고 있다. 재료의 손실 없이 신뢰성이 높은 기계적 성질을 얻을 수 있다는 점에서 그 장점이 있다. 따라서 큰 하중이나 큰 타격력을 받는 제품이나 터빈블레이드, 원자력 압력용기 등과 같이 높은 신뢰도를 필요로 하는 제품의 생산에 단조공정이 주로 적용되고 있다.

초기 형상의 소재로부터 성형후 원하는 형상의 제품을 얻기 위해서는 적절한 유동제어가 필요한데 공정도중에는 금속유동의 제어가 곤란하기 때문에 결국 소재의 초기형상을 조절함으로써 해결한다.

일반적으로 자유단조는 제품의 신뢰도 향상이나 후속 공정인 형단조의 예비성형체를 성형하기 위한 목적으로 실시되는데 금형과 소재 사이의 마찰에 의해 공정도중 배럴링 뿐만 아니라 소재의 단면이 원형에 가깝게 변형되는 현상이 나타난다. 따라서 단조후 원하는 형상의 제품을 얻기 위한 소재의 초기모양, 즉 예비성형체는 실험적 방법이나 컴퓨터 시뮬레이션 또는 경험에 의하여 결정되고 있다.

Park 등⁽¹⁾에 의해 제안된 역추적법(backward tracing)은 최종상태의 모양으로부터 하중경로를 역으로 추적하여 예비성형체를 찾는 방법으로 쉘노징(shell nosing)에 최초로 적용된 이후, 원판단조(disk forging)⁽²⁾, 터빈블레이드 단조⁽³⁾, 리브-웹(rib-web) 단조⁽⁴⁾ 뿐만 아니라 3차원 예제로 환상압연(ring rolling)⁽⁵⁾에 성공적으로 적용되어 왔으며 박판성형에서도 적용되어 Kobayashi 등^(6,7)

* 영남대학교 기계공학부

** 영남대학교 공업기술연구소

에 의해 최적블랭크 설계가 이루어지기도 하였다.

한편 역추적법은 먼저 소재의 초기모양을 가정하고 이 형상의 초기소재로 성형과정을 해석한 후 얻은 변형경로를 따라 역으로 성형과정을 해석하는 방법인데 최초로 가정된 초기모양으로 성형한 후 형상과 원하는 형상과는 차이에 따른 변형경로의 차이, 최종상태에서 최초 상태로 역추적을 하는 동안 변형단계를 여러 개로 나누고 각 변형단계에서의 목표형상을 얻기 위한 반복계산을 추가로 필요로 하는 문제점이 있다.

최근 유한요소해석을 이용한 예비성형체설계 대신 복잡한 최종형상을 지역필터링을 통하여 비교적 단순한 형상으로 만들어 주는 지역필터법⁽⁸⁾, 최종 형상과 간단한 형상사이에 전위차를 가하여 최종형상으로부터 일정한 전위차를 가지는 면을 예비성형체로 설계하는 등전위면법⁽⁹⁾도 제안되고 있다.

실험적인 방법에 대한 연구로는 열간에서 강의 성질과 비슷한 플라스틱인 이나 납 등을 사용하여 수치해석 결과를 검증한 연구결과도 발표되고 있다.^(10,11)

최근 심현보 등은 박판성형공정에서의 최적블랭크의 설계를 위하여 민감도법에 개발하여 이를 일반적인 형상의 컵 디프드로잉에 성공적으로 적용한 바가 있다.^(12~14)

박판성형공정에서의 최적블랭크는 원하는 형상의 최종 제품을 얻기 위한 초기블랭크의 모양을 의미하는 것으로 단조공정에서의 예비성형체와 비슷한 개념을 지니고 있다. 본 논문에서는 최적블랭크의 설계에 적용되었던 민감도법을 단조공정의 예비성형체 설계에 적용하여 단조공정의 적용가능성을 조사하는 것을 목표로 한다.

2. 민감도법에 의한 예비성형체 설계

민감도법(sensitivity method)은 임의로 가정된 초기 시편의 모양으로 성형해석을 수행한 후 성형후 모양이 목표형상(target shape)과 차이가 있을 경우 시편의 외곽에 위치한 절점과 목표형상과의 거리를 이용하여 시편의 초기모양을 수정해 줌으로써 목표형상을 얻는 방법이다.

이때 민감도란 시편의 초기형상에서 외곽에 위치한 절점을 변화시켰을 때 성형후 형상에서의 절점의 위치변화량의 역수로 정의되는데 시편의 외곽에 위치한 절점들에 대하여 민감도를 구하고 각 절점당의 민감도값을 이용하여 시편의 초기모양을 수정하도록 한다.

다시 말하면 최종형상이 목표형상으로 성형이 이루어졌다고 함은 변형후 시편의 외곽에 위치한 모든 절점들이 목표형상을 정의하는 면(target surface) 또는 곡선상

(target contour)상에 위치하는 경우를 말한다. 성형해석 후 시편외곽에 위치한 절점이 목표형상을 벗어날 경우 각 절점과 목표형상과의 거리와 그 절점에서의 민감도를 이용하여 시편의 초기모양을 수정한 후 성형해석을 수행하는데 시편의 외곽에 위치한 모든 절점들이 목표형상과 일치할 때까지 계산을 반복함으로써 성형후 목표형상이 되는 초기모양을 찾는다.

Fig. 1은 시편의 외곽면(또는 선)상에 위치한 임의의 절점이 변형도중 이동되는 경로를 나타낸 것으로 변형경로가 비선형적임을 알 수 있다. Fig. 1에서 변형전의 절점의 위치를 X , 변형후의 절점의 위치를 x 로 나타내었는데 x 로부터 최종단계의 절점의 이동방향으로의 연장선과 목표형상을 정의하는 곡면(또는 곡선)과 만나는 점을 x_T 로 표현하였다.

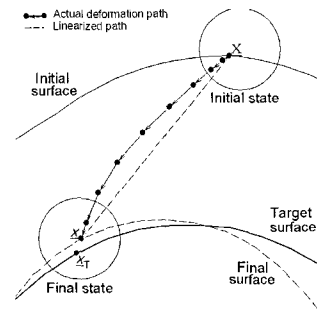
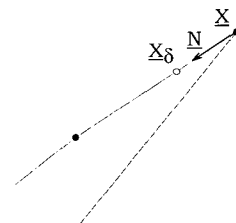
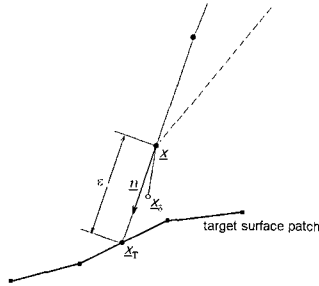


Fig. 1 Movement of a outermost node

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 변형의 초기와 최종단계에서의 절점의 움직임을 확대하여 나타낸 것이다. N 은 첫 번째 변형단계에서의 절점이 움직이는 방향의 단위벡터, 그리고 n 은 최종단계에서의 절점이 움직이는 방향의 단위벡터이다.



(a) initial stage of deformation



(b) final stage of deformation
Fig. 2 Details of Fig. 1

각 절점에서의 민감도를 구하기 위해 시편의 초기모양으로부터 변형의 초기단계에서 절점이 움직이는 방향으로 미소량 δ 만큼 오프셋한 시편이 필요하다. 즉 오프셋 시편의 외곽에 위치한 절점의 위치를 \underline{X}_δ 로 할 때 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{X}_\delta = \underline{X} + \delta \cdot \underline{N} \quad (1)$$

식 (1)의 과정을 거쳐 구한 오프셋 시편으로 변형해석을 재차 수행하여 변형후의 절점의 위치 \underline{x}_δ 를 구한다. 이때 유한요소 분할 작업시 원래 시편의 요소연결 상태와 오프셋 시편의 요소연결상태가 달라지지 않도록 주의할 필요가 있다. 유한 요소 해석 결과로부터 민감도를 구할 수 있는데 시편의 초기 모양 및 성형 후의 모양, 그리고 오프셋 시편의 초기모양과 성형후의 모양을 이용하여 시편의 외곽에 위치한 각 절점에서의 민감도 S 를 구할 수가 있다.

$$S = \frac{|\underline{X} - \underline{X}_\delta|}{|\underline{x} - \underline{x}_\delta|} \quad (2)$$

축대칭 또는 평면변형 해석 등과 같은 2차원 해석의 경우 목표형상은 곡선으로 정의될 수 있다. 따라서 목표형상을 정의하는 목표윤곽선(target contour)과 성형후의 형상과의 차이 즉 형상오차는 다음과 같은 방법으로 구한다. 목표윤곽선이 복잡할 경우 이 윤곽선을 몇 개의 조각으로 나눈 후 각각의 윤곽선 조각을 직선으로 근사하도록 한다. 변형후의 절점의 위치로부터 최종변형단계에서의 변형이 진행되는 방향, 즉 \underline{n} 벡터로의 연장선과 윤곽선과 만나는 점 사이의 거리로부터 그 절점에서의 형상 오차를 구할 수 있다. 즉

$$\epsilon \underline{n} = \frac{(1+r)}{2} \underline{x}_1 + \frac{(1-r)}{2} \underline{x}_2 \quad (3)$$

where $-1 \leq r \leq 1$

여기서 \underline{x}_1 과 \underline{x}_2 는 목표형상을 정의하는 윤곽선 조각의 양 끝점의 위치를 나타내고 있다. 식 (3)을 만족하는 ϵ, r 를 구하여 이를 해당 절점에서의 이 윤곽선 조각에 대한 형상오차와 만나는 위치로 정한다. 이 과정을 목표형상을 정의하는 모든 윤곽선조각에 대하여 실시하고 그중 가장 가까운 것을 그 절점에서의 형상오차로 정의한다.

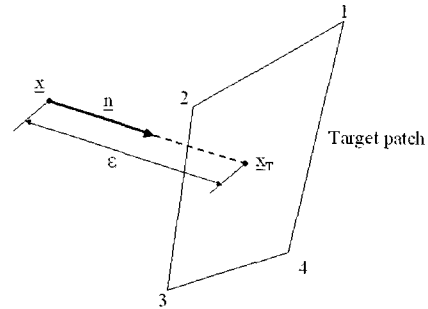


Fig. 3 Amount of error in 3D analysis

Fig. 3은 3차원 해석에서의 형상오차의 개념도를 나타내고 있다. 성형후 원하는 형상을 목표형상(target shape)로 하고 이 목표형상을 구성하는 각각의 면 조각(target patch)에 대하여 변형후의 절점의 위치로부터 최종변형단계에서의 변형이 진행되는 방향, 즉 \underline{n} 벡터와 면 조각 사이의 거리가 그 절점에서의 형상오차를 구하는데 이는 다음의 식으로부터 구한다.

$$\epsilon \underline{n} = \sum_{i=1}^4 \underline{x}_i h_i(r, s) \quad (4)$$

where $-1 \leq r \leq 1$ and $-1 \leq s \leq 1$

여기서 \underline{x}_i 는 목표형상을 정의하는 면조각의 모서리 점의 좌표, h_i 는 유한요소 형상함수이다. Newton-Raphson 법을 적용하여 식 (4)을 만족하는 ϵ, r, s 를 구한다. 식 (4)를 목표형상을 정의하는 모든 면조각에 대하여 적용하고 그중 가장 가까운 것을 그 절점에서의 형상오차로 정의한다.

2차원 해석의 경우 식 (3), 3차원 해석일 경우 식 (4)로 정의 되는 형상오차와 식 (2)의 민감도를 이용하여

성형후 목표형상으로 되는 예비성형체의 외곽의 절점은 다음과 같이 된다.

$$\underline{X}^{(i)} = \underline{X}^{(i-1)} + \epsilon \cdot \underline{S} \cdot \underline{N} \quad (5)$$

이때 상첨자 (i)는 i-번째의 반복계산을 의미한다. 모든 절점에서의 형상오차값이 허용오차 이내로 들 때까지 해석을 반복한다.

Fig. 4는 민감도법을 이용한 예비성형체의 설계를 흐름도를 나타낸 것으로 시편의 모양을 정의하는 외곽에 위치한 모든 절점이 목표형상과 일치할 때까지 민감도법을 반복하여 적용한다. 성형해석을 위한 도구로 2차원 해석 모델의 경우 Deform 2D⁽¹⁵⁾, 3차원 해석 모델의 경우 Deform 3D⁽¹⁶⁾를 이용하였으며, 유한요소 격자분할은 Hyper-mesh⁽¹⁷⁾를 이용하여 작업을 하였다.

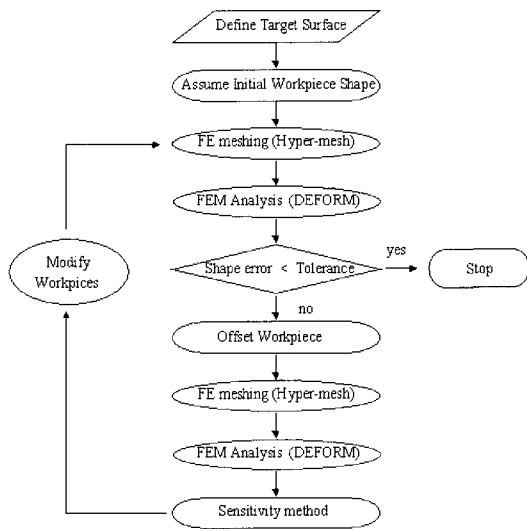


Fig. 4 Flow Chart for Preform Design

3. 예비성형체 설계 예제

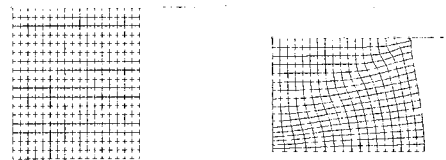
민감도법을 이용한 단조공정의 예비성형체 설계법의 타당성을 확인하기 위하여 몇가지 목표형상을 설정하여 평균형을 이용한 냉간 자유단조후 원하는 형상이 되는 예비성형체를 설계하였다. 편이상 해석에 사용한 재료는 Deform S/W에 물성치가 내장된 AISI-1035 강으로 하였으며 금형과 소재사이에는 균일전단 마찰력이 작용하는 것으로 가정하였고 이때 마찰상수(friction factor)는

0.3으로 택하였다.

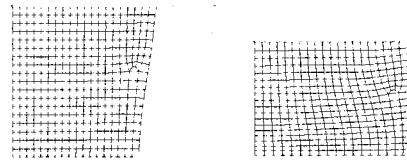
변형전의 소재의 모양은 체적불변 법칙을 이용하여 도출하였고 이를 민감도법을 적용하기 위한 시편의 초기 가정으로 사용하였다. 이 시편과 이 시편으로부터 미소량 오프셋 된 시편에 대하여 성형해석을 수행하고 성형 해석의 결과로부터 민감도법을 적용하여 Fig. 4의 흐름도에 따라 예비성형체를 설계하였다.

3.1 목표형상이 원기둥인 경우 (축대칭 문제)

높이가 20mm인 시편으로 30% 단조후 반경이 12mm 이고 높이가 14mm인 원기둥을 목표형상으로 하고 목표형상으로 성형이 되는 초기 시편의 모양을 결정하였다.

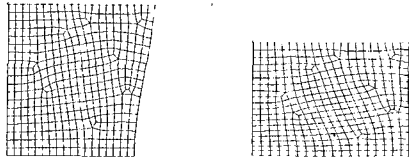


(a) (b)
Fig. 5 Initial guess
(target shape : cylinder)



(a) (b)
Fig. 6 1st modification
(target shape : cylinder)

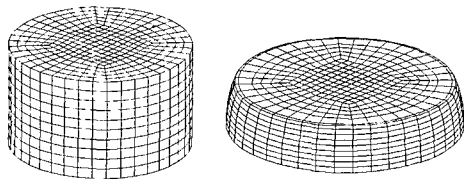
제품의 모양이 상하 대칭이기 때문에 1/2만 택하여 해석을 수행하였다. Fig. 5(a) 및 5(b)는 각각 체적불변법칙을 적용하여 구한 시편의 초기모양과 이를 이용하여 성형해석한 결과로 배럴링 현상이 나타나고 있음을 알수 있다. Fig. 6(a)은 민감도법을 적용하여 구한 시편의 모양이고 Fig. 6(b)는 성형후의 모양을 나타내고 있는데 상당히 개선된 결과를 보여주고 있다. Fig. 7은 1차 수정된 시편으로 민감도법을 재차 적용한 것으로 성형후 원하는 형상, 즉 배럴링 현상이 없이 성형이 이루어지고 있음을 보여주고 있다.



(a) (b)
Fig. 7 2nd modification
 (target shape : cylinder)

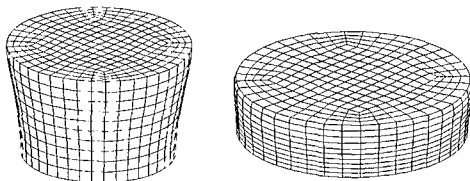
3.2 목표형상이 원기둥인 경우 (3차원 문제)

민감도법이 3차원 성형에의 적용 가능성을 조사하기 위하여 목표형상을 50%의 단조후 배럴링이 없는 원기둥형상으로 설정하고 이를 위한 예비성형체를 설계하였다. 즉 높이가 20mm인 시편을 평균형으로 압축하여 높이가 10mm 이고 반경이 12mm인 원기둥형상으로 성형이 이루어지는 시편의 모양을 결정하였다. 시편모양의 초기 가정은 체적불변법칙을 적용하여 얻었다.

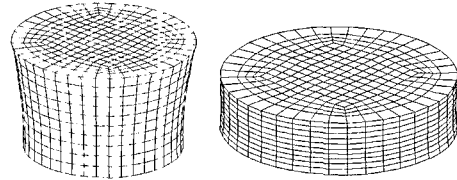


(a) (b)
Fig. 8 Initial guess
 (target shape : cylinder)

Fig. 8(a) 및 8(b)는 각각 변형전의 시편의 모양과 변형후의 시편의 모양을 나타내고 있는데 배럴링이 발생되고 있음을 알 수 있다. Fig. 9(a)는 민감도법을 적용하여 구한 시편의 모양이고 Fig. 9(b)는 이 시편으로 성형해석을 수행한 결과를 보여주고 있는데 최초시편에 비하여



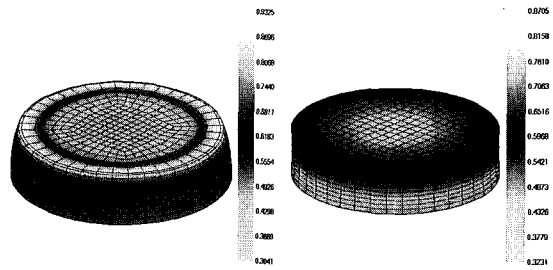
(a) (b)
Fig. 9 1st modification
 (target shape : cylinder)



(a) (b)
Fig. 10 2nd modification
 (target shape : cylinder)

배럴링 현상이 많이 개선되었지만 목표형상과는 아직 차이가 있다. Fig. 10(a) 및 10(b)는 1차 수정된 시편에 민감도법을 재차 적용한 결과로 목표형상으로 성형이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 성형해석후의 유효변형을 분포를 나타낸 것으로 Fig. 11(a)는 최초형상의 시편, Fig. 11(b)는 민감도법을 2회 적용하여 구한 시편에 대한 것으로 최초형상의 경우 최대 유효변형율이 0.93 정도이나 민감도법으로 설계된 시편의 경우 최대 0.87정도로 나타나 변형을 분포가 개선되고 있음을 알 수 있다.



(a) initial guess (b)
Fig. 11 Effective strain
 (target shape : cylinder)

3.3 목표형상이 타원기둥인 경우

50% 단조후 장축 28mm, 단축 14mm, 높이가 10mm인 타원기둥이 되는 예비성형체설계에 민감도법을 적용하였다. 체적불변법칙을 적용하여 시편의 초기모양을 결정하였는데 이때 높이가 20mm이면서 목표형상에서의 타원 장단축 비를 그대로 유지하는 모양으로 결정하였다.

Fig. 12(a) 및 12(b)는 각각 변형전의 시편의 모양과 변형후의 시편의 모양을 나타내고 있는데 배럴링 뿐만 아니라 타원의 장단축 비가 원형에 가까이 되고 있음을 알 수 있다. Fig. 13(a)는 민감도법을 2회 적용하여 구한 예비성형체의 모양이고 Fig.13(b)는 성형후의 최종형상으로 목표형상과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

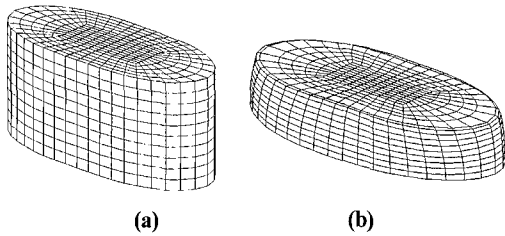


Fig. 12 Initial guess
(target shape : elliptic prism)

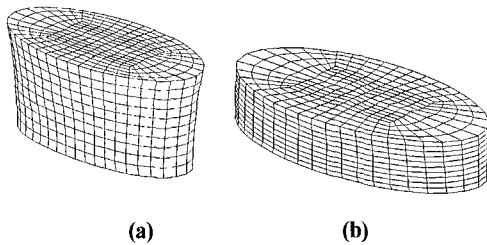


Fig. 13 2nd modification
(target shape : elliptic prism)

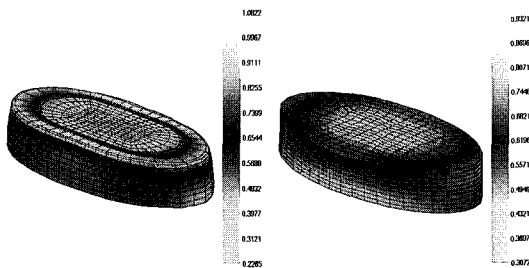


Fig. 14 Effective strain
(target shape : elliptic prism)

Fig. 14는 성형해석후의 유효변형을 분포를 나타낸 것으로 Fig.14(a)는 최초형상의 시편, Fig.14(b)는 민감도법을 2회 적용하여 구한 시편에 대한 것으로 최초형상의 경우 최대 유효변형율이 1.00 정도이나 민감도법으로 설계된 시편의 경우 최대 0.93정도로 나타나 변형율 분포가 개선되고 있음을 알 수 있다.

3.4 목표형상이 클로버형 기둥인 경우

50% 단조후 장축 32mm, 단축 16mm, 높이가 10mm인 클로버형 기둥이 되는 예비성형체설계에 민감도법을 적용하였다. 체적불변법칙을 적용하여 시편의 초기모양을 결정하였는데 이때 높이가 20mm이면서 목표형상에서의 클로버의 장단축 비를 그대로 유지하는 모양으로 결정하였다.

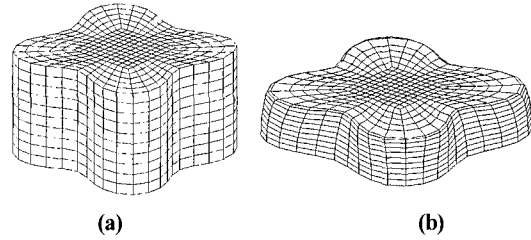


Fig.15 Initial guess
(target shape : prism of clover)

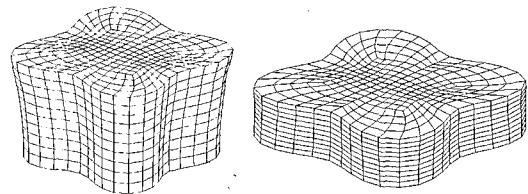


Fig. 16 3rd modification
(target shape : prism of clover)

Fig. 15(a) 및 15(b)는 각각 변형전의 시편의 모양과 변형후의 시편의 모양, 그리고 Fig. 16(a)는 민감도법을 3회 적용하여 구한 예비성형체의 모양이고 Fig.16(b)는 성형후의 최종형상으로 목표형상과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 17은 유효변형을 분포로 최초형상의 경우 최대 0.93에서 민감도법을 적용하여 구한 예비성형체의 경우 0.88로 변형율 분포가 개선되고 있음을 알 수 있다.

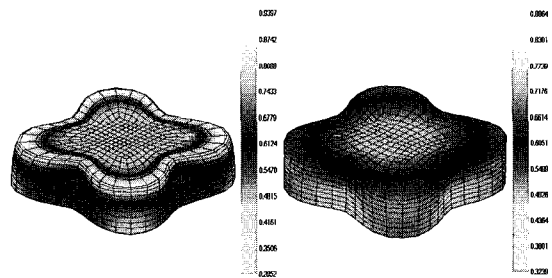


Fig. 17 Effective strain
(target shape : prism of clover)

3.5 목표형상이 정사각 기둥인 경우

일반적으로 평균형에 의한 자유단조를 실시할 경우 단조가 진행됨에 따라 배럴링 현상 뿐만 아니라 단면의 모양도 점차 원형에 가깝게 변형한다. 본 예제는 목표형상을 원형에서 크게 벗어나는 변의 길이가 20mm이고 높이가 10mm인 정사각형 기둥을 택함으로써 민감도법의

궁극적인 적용범위를 조사하기 위하여 실시되었다. 비압축성을 이용하여 시편의 초기모양을 가정하여 민감도범을 적용하였다.

Fig. 18(a) 및 18(b)은 각각 변형전의 시편의 모양과 변형후의 시편의 모양을 나타내고 있는데 배럴링 뿐만 아니라 단면의 모양이 약간 원형에 가깝게 변형되고 있음을 알 수 있다. Fig. 19(a)는 민감도범을 2회 적용하여 구한 예비성형체 모양이고 Fig. 19(b)는 성형후의 최종형상으로 목표형상과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

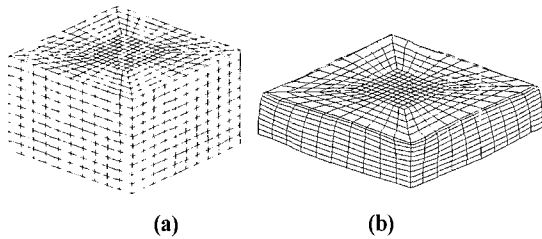


Fig. 18 Initial guess
(target shape : square prism)

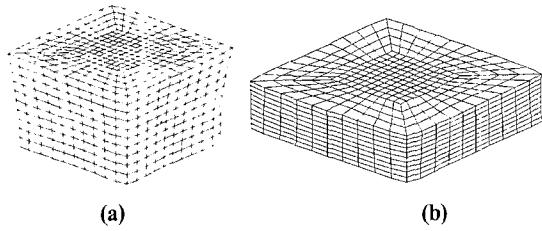


Fig. 19 2nd modification
(target shape : square prism)

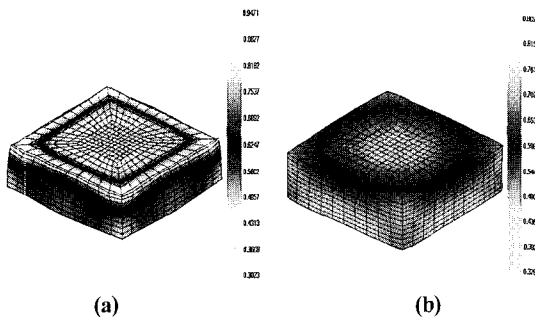


Fig. 20 Effective strain
(target shape : square prism)

Fig. 20은 유효변형을 분포로 최초형상의 경우 최대 0.94에서 민감도범을 적용하여 구한 예비성형체의 경우 0.87로 정도로 나타나고 있으며 변형을 분포가 개선되고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 박판성형에서의 최적블랭크 설계에 사용되고 있는 민감도범을 이용하여 단조공정의 예비성형체 설계법의 타당성을 확인하였다.

먼저 축대칭 자유단조에 적용하여 성형후 배럴링현상이 없는 소재의 초기 모양을 결정을 결정하였다. 3차원 해석에서의 적용가능성을 확인하기 위하여 성형후 형상이 각각 원기둥, 타원기둥, 클로버형기둥, 정사각기둥 등에 적용하여 예비성형체를 설계하였고 구하여진 예비성형체로 성형해석을 수행한 결과 목표형상으로 성형이 이루어짐을 확인하였다.

본 연구에서는 격자생성 및 성형해석은 상용 S/W를 사용하였고 성형해석의 결과를 이용하여 예비성형체를 설계하는 방법이기 때문에 성형해석에 사용되는 S/W와 독립적으로 예비성형체를 설계할 수 있어 현장에서 쉽게 사용할 수 있다는 장점이 있다.

참고 문헌

- (1) Park, J.J., Rebelo, N. and Kobayashi, S., 1983, "A new approach to preform design in metal forming with the finite element method", Int. J. Mach. Tool. Des. Res., vol. 23, pp.71~79.
- (2) Hwang, S.M. and Kobayashi, S., 1986, "Preform design in disk forging", Int. J. Mach. Tool Des. Res., vol.26, pp.231~243.
- (3) Kang, B.S., Kim, N. and Kobayashi, S., 1990, "Computer-aided preform design in forging of an airfoil section blade", Int. J. Mach. Tool Manuf., vol.30, pp.43~52.
- (4) Kim, D.W. and Kim, H.Y., 1990, "Preform design for axisymmetric closed-die forging by the upper bound elemental technique (UBET)", The WAM, ASME, Dallas, Texas, U.S.A, MD-vol.20, RED-vol.48, pp.155~164.
- (5) Kang, B.S. and Kobayashi, S., 1991, "Preform design in ring rolling by the three-dimensional finite element method. Int J. Mach. Tool Manuf., vol 31, pp.139~148.
- (6) Toh, C.H., and Kobayashi, S., 1985, "Deformation analysis and blank design in square cup drawing", IJMS, vol. 25, pp. 15~32.

- (7) Kim, N. and Kobayashi, S., 1996, "Blank design in rectangular cup drawing by an approximate method, Int. J. Mach. Tools & Manuf., vol. 26, pp.125~135.
- (8) 황찬, 오수익, 1998, "열간 형단조 공정의 3차원 중간 금형 자동 설계에 관한 연구", 한국소성가공학회 '98 춘계학술대회 논문집, pp.126~129.
- (9) 양동열, 이석렬, 2000 "열간 단조에서의 최적 예비형상 설계", 한국과학기술원 석사학위논문.
- (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) 이근안외 4인, 1991, "모델재료를 이용한 대형 개방형 단조품의 성형에 관한 연구", 단조심포지엄, 반도체출판사 pp.52~62.
- (12) Shim, H.B., Son, K.C., and Kim, K.H., 1999, "Optimum blank shape design by sensitivity analysis, Proc. Numisheet '99, pp.523~528.
- (13) 심현보, 손기찬, 황현대, 2000, "민감도법을 이용한 최적블랭크 설계법의 일반적인 모양의 금형에의 적용, 한국소성가공학회지 제9권 제3호, pp.226~232.
- (14) Shim, H.B., Son, K.C. and Kim, K.H., 2000, "Optimum blank shape design by sensitivity analysis", J. Mat. Proc. Tech., vol.104, pp.191~199.
- (15) Deform 2D User's Manual, Scientific Forming Technologies Corporation
- (16) Deform 3D User's Manual, ver. 3.0, 1999, "Scientific Forming Technologies Corporation".
- (17) Hyper-mesh User's training manual, ver. 3.1, Altair Engineering, Inc (2000)