

# 단조공정에서 민감도법을 이용한 예비 성형체 설계

심현보\* · 노현철\*\* · 손기찬\*\*

## Preform Design for Forging by the Sensitivity Method

H. B. Shim, H. C. Noh and K. C. Son

### 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 한 쌍의 금형을 이용하여 소재를 재료를 압축시켜 소요의 형상으로 성형함과 아울러 조대한 결정을 파괴하여 이를 미세화하고 재료의 물리적 및 기계적 성질을 개선 강화하는 목적으로 사용되고 있는데, 재료의 손실 없이 신뢰성이 높은 기계적 성질을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 따라서 큰 하중이나 큰 타격력을 받는 제품이나 터빈 블레이드, 원자력 압력용기 등과 같이 높은 신뢰도를 필요로 하는 제품의 생산에 단조공정이 주로 적용되고 있다.

단조 공정을 살펴보면 최종형상의 복잡성의 정도에 따라 여러 단계를 거쳐서 점차 최종제품으로 만들어지고 있는데, 초기 형상의 소재로부터 성형 후 원하는 형상의 제품을 얻기 위해서는 적절한 유동제어가 필요하다. 하지만 공정도중에는 금속유동의 제어가 곤란하기 때문에 결국 소재의 초기형상을 적절히 조절함으로써 해결하는

데, 이러한 예비 성형 작업으로 만들어지는 반제품을 예비성형체라 부르고 있다. 예비성형체를 어떻게 결정하는가에 따라서 성형하중, 최종제품의 형상의 정확성 및 성형의 난이도가 결정되므로 적절한 예비성형체 결정이 공정설계의 필수요소라 할 수 있을 것이다.

그런데 예비성형체 형상 결정도 중요한 문제이지만 어떠한 공정을 통해서 얻어내는 가라는 공정선택도 중요한 문제라 할 수 있을 것이다. 일반적으로 자유단조는 제품의 신뢰도 향상이나 후속공정인 형단조의 예비성형체를 성형하기 위한 목적으로 실시되는데 금형과 소재 사이의 마찰에 의해 공정도중 배럴링 뿐만 아니라 소재의 단면이 원형에 가깝게 변형되는 현상이 나타나지만, 형단조에 비해 성형하중이 적게 작용하고 별도로 금형을 제작할 필요가 없기에 자유단조 후 원하는 형상의 제품을 얻기 위한 소재의 초기모양 즉 예비성형체를 성형해 낼 수 있다면 가장 이상적인 공정이라 할 수 있을 것이다. 따라서 형단조를 위한 예비성형체가 자유단조를 통해 성형

\* 영남대학교 기계공학부

\*\* 영남대학교 대학원

될 수 있는 초기 소재형상 설계법이 요구되고 있다.

Park 등<sup>(1)</sup>에 의해 제안된 역추적법 (backward tracing)은 최종상태의 모양으로부터 하중경로를 역으로 추적하여 예비 성형체를 찾는 방법으로 셸노징(shell nosing)에 최초로 적용된 이후, 원판단조 (disk forging)<sup>(2)</sup>, 터빈블레이드 단조<sup>(3)</sup>, 리브-웹(rib-web) 단조<sup>(4)</sup> 뿐만 아니라 3차원 예제로 환상압연(ring rolling)<sup>(5)</sup>에 성공적으로 적용되어 왔으며 박판성형에서도 적용되어 Kobayashi 등<sup>(6,7)</sup>에 의해 최적블랭크 설계가 이루어지기도 하였다.

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

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

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

박판성형공정에서 최적블랭크는 원하는 형상의 최종제품을 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 성형 후 형상에서 절점 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 변형 후 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 변형 전 절점의 위치를  $X$ , 변형 후 절점의 위치를  $x$ 로 나타내었는데  $x$ 로부터 최종단계 절점 이동방향으로의 연장선과 목표형상을 정의하는 곡면(또는 곡선)과 만나는 점을  $x_T$ 로 표현하였다.

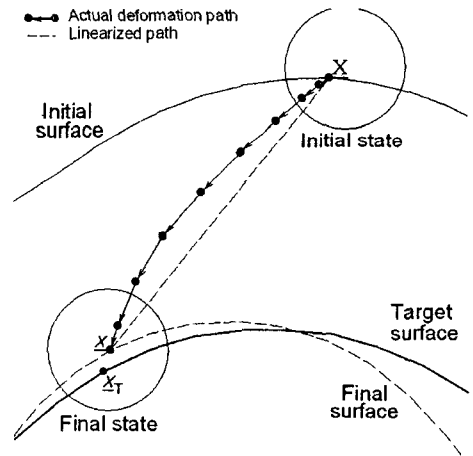


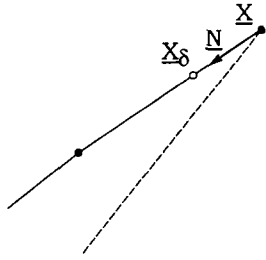
Fig. 1 Movement of a outermost node

Fig. 2 (a) 와 (b)는 각각 변형의 초기와 최종단계에서 절점의 움직임을 확대하여 나타낸 것이다.  $N$ 은 절점의 초기 변형 방향 단위벡터,  $n$ 은 최종 변형 방향 단위벡터이다.

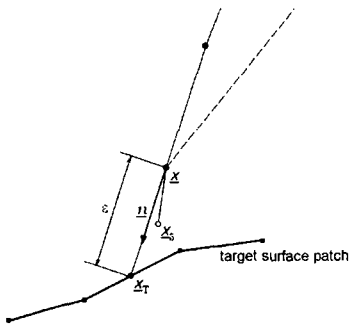
각 절점에서의 민감도를 구하기 위해 시편 초기모양으로부터 변형 초기단계에서 절점의 이동방향으로 미소량  $\delta$ 만큼 오프셋한 시편이 필요하다.

즉 오프셋 시편의 외곽에 위치한 절점의 위치를  $X_\delta$ 로 할 때 이는 다음과 같이 표현된다.

$$X_\delta = X + \delta \cdot N \quad (1)$$



(a) initial stage of deformation



(b) final stage of deformation

Fig. 2 Details of Fig. 1

(1)의 과정을 거쳐 구한 오프셋 시편으로 변형해석을 재차 수행하여 변형 후의 위치  $x_\delta$ 를 구한다. 이때 유한 요소 분할 작업 시 원래 시편의 요소연결 상태와 오프셋 시편의 요소연결상태가 달라지지 않도록 주의할 필요가 있다. 유한 요소 해석 결과로부터 민감도를 구할 수 있는데 시편의 초기 및 성형 후 모양, 그리고 오프셋 시편의 초기와 성형 후 모양을 이용하여 시편의 외곽에 위치한 각 절점에서의 민감도(S)를 구할 수 있다.

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

Fig. 3은 3차원 해석에서의 형상오차의 개념도를 나타내고 있다. 성형 후 원하는 형상을 목표형상(target shape)로 하고 이 목표형상을 구성하는 각각의 면 조각(target patch)에 대하여 변형 후 절점의 위치로부터 최종변형 단계에서의 변형이 진행되는 방향, 즉  $n$  벡터와 면 조각 사이의 거리가 그 절점에서의 형상오차를 구하는데 이는 다음의 식으로부터 구한다.

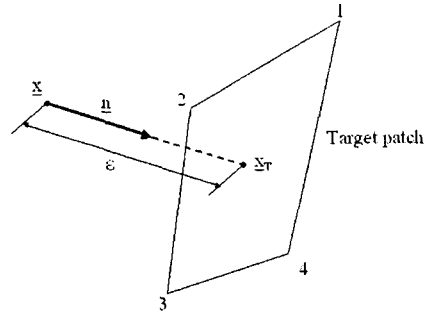


Fig. 3 Amount of error in 3D analysis

$$x_T = x + \epsilon n = \sum_{i=1}^4 x_i h_i(r, s) \quad (3)$$

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

여기서  $x_i$ 는 목표형상을 정의하는 면조각 모서리점의 좌표,  $h_i$ 는 유한요소 형상함수이다. Newton-Raphson 법을 적용하여 식 (3)을 만족하는  $\epsilon, r, s$ 를 구한다. 식 (3)을 목표형상을 정의하는 모든 면조각에 대하여 적용하고 그 중 가장 가까운 것을 그 절점에서의 형상오차로 정의한다. 성형 후 목표형상으로 되는 예비성형체의 외곽 절점은 다음과 같이 된다.

$$X^{(i)} = X^{(i-1)} + \epsilon \cdot S \cdot N \quad (4)$$

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 Deform 3D<sup>(15)</sup>를 이용하였으며, 유한요소 격자분할은 HyperMesh<sup>(16)</sup>를 이용하여 작업을 하였다.

민감도법을 이용한 단조공정의 예비성형체 설계법의 타당성을 확인하기 위하여 몇가지 목표형상을 설정하여 평균형을 이용한 자유단조 후 원하는 형상이 되는 예비성형체를 설계하였다. 해석에 사용한 재료는 편이상 해석에 사용된 Deform S/W에 물성치가 내장된 AISI-1035 강으로 하였으며 금형과 소재사이의 마찰상수(friction factor)는 0.3으로 택하였다.

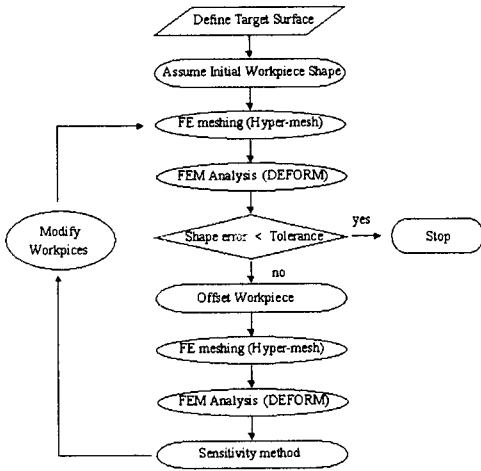


Fig. 4 Flow Chart for Preform Design

변형 전 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. 예비성형체 설계 예제

#### 3.1 목표형상이 원기둥인 경우

민감도법이 3차원 성형에의 적용 가능성을 조사하기 위하여 목표형상을 50%의 단조 후 배럴링이 없는 원기둥 형상으로 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.

Fig. 5(a) 및 (b)는 각각 변형전의 시편의 모양과 변형 후 시편의 모양을 나타내고 있는데 배럴링이 발생됨을 알 수 있다. Fig. 6(a)는 민감도법을 적용하여 구한 시편의 모양이고 Fig. 6(b)는 이 시편으로 성형해석을 수행한 결과를 보여주고 있는데 최초시편에 비하여 배럴링 현상이 많이 개선되었지만 목표형상과는 아직 차이가 있다. Fig. 7(a) 및 (b)는 1차 수정된 시편에 민감도법을 재차 적용한 결과로 목표형상으로 성형이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

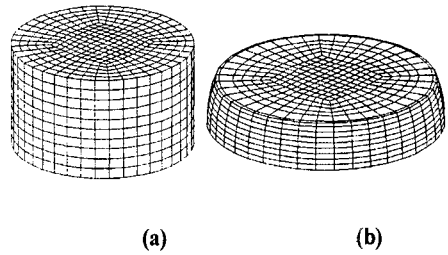


Fig. 5 Initial guess (cylinder)

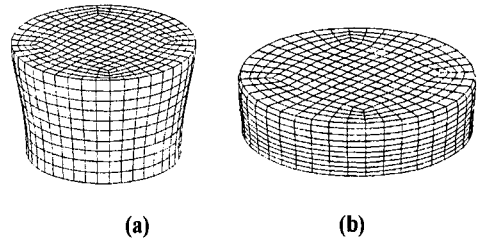


Fig. 6 1st modification (cylinder)

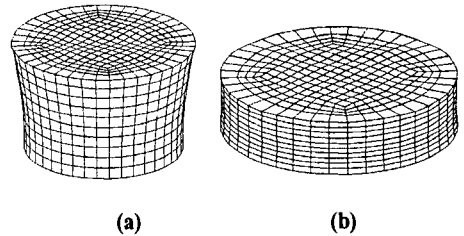


Fig. 7 2nd modification (cylinder)

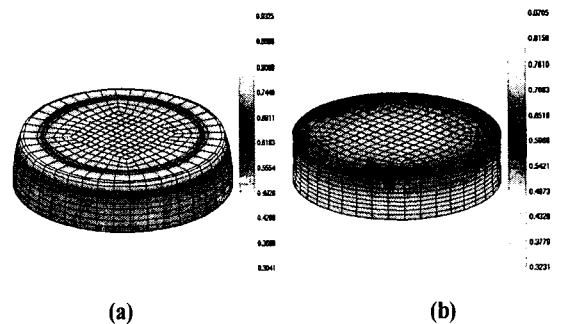


Fig. 8 Effective strain (cylinder)

Fig. 8은 성형해석 후 유효변형을 분포를 나타낸 것으로 Fig. 8(a)는 최초형상의 시편, (b)는 민감도법을 2회 적용하여 구한 시편에 대한 것으로 최초 형상의 경우 최대 유효변형율이 0.93 정도이나 민감도법으로 설계된 시편의 경우 최대 0.87 정도로 나타나 변형을 분포가 개선되고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 목표형상이 클로버형 기둥인 경우

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

Fig. 9(a) 및 (b)는 각각 변형 전 시편의 모양과 변형 후 시편의 모양, 그리고 Fig. 10(a)는 민감도법을 3회 적용하여 구한 예비성형체의 모양이고 Fig. 10(b)는 성형 후 최종형상으로 목표형상과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11는 유효변형을 분포로 최초형상의 경우 최대 0.93에서 민감도법을 적용하여 구한 예비성형체의 경우 0.88로 변형을 분포가 개선되고 있음을 알 수 있다.

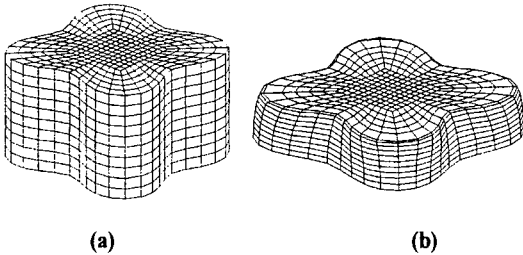


Fig. 9 Initial guess (clover)

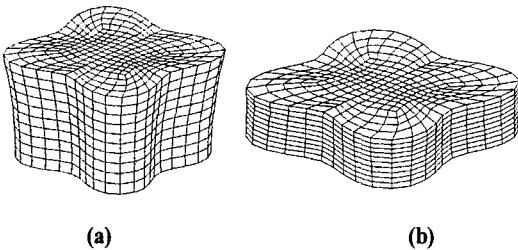


Fig. 10 3rd modification (clover)

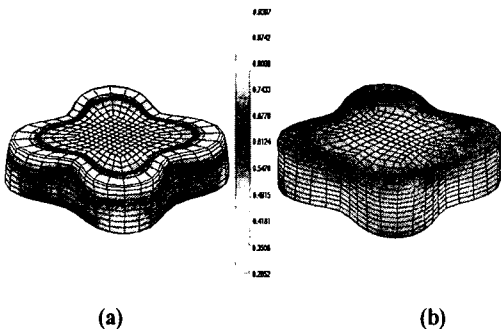


Fig. 11 Effective strain (clover)

Fig. 9(a) 및 (b)는 각각 변형 전 시편의 모양과 변형 후 시편의 모양, 그리고 Fig. 10(a)는 민감도법을 3회 적용하여 구한 예비성형체의 모양이고 Fig. 10(b)는 성형 후 최종형상으로 목표형상과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11는 유효변형을 분포로 최초형상의 경우 최대 0.93에서 민감도법을 적용하여 구한 예비성형체의 경우 0.88로 변형을 분포가 개선되고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 목표형상이 계단형상인 경우

일반적으로 평균형에 의해 자유단조를 실시할 경우 단조가 진행됨에 따라 배럴링 현상뿐만 아니라 단면의 모양도 점차 원형에 가깝게 변형한다. 본 예제는 목표형상을 원형에서 크게 벗어나는 형상으로 정의하였고 평균형의 단차가 있을 경우를 조사하여 민감도법의 궁극적인 적용범위를 알기 위하여 실시하였다. 단차가 2.5mm인 계단형상의 금형을 사용하여 낮은쪽의 단조비는 50%이고 높은쪽의 단조비는 65%로 하였을 경우 낮은쪽의 높이가 4mm 이고 높은쪽의 높이가 6.5mm인 계단형상이 되게 하기 위해 예비성형체를 설계하였다. 초기 모양은 비압축성을 이용하여 시편의 초기모양을 가정하여 설정하였다.

Fig. 12 (a) 및 (b)는 초기모양의 각각 변형 전 시편의 모양과 변형 후 시편의 모양을 나타내고 있는데 배럴링뿐만 아니라 단면의 모양이 약간 원형에 가깝게 변형되고 있음을 알 수 있다. Fig. 13 (a)는 민감도법을 3회 적

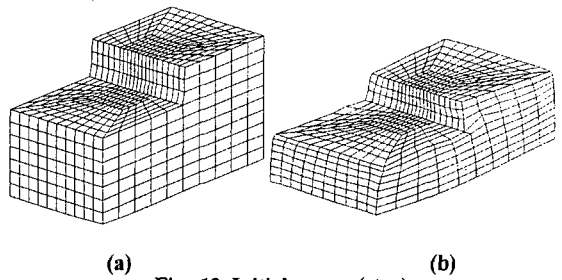


Fig. 12 Initial guess (step)

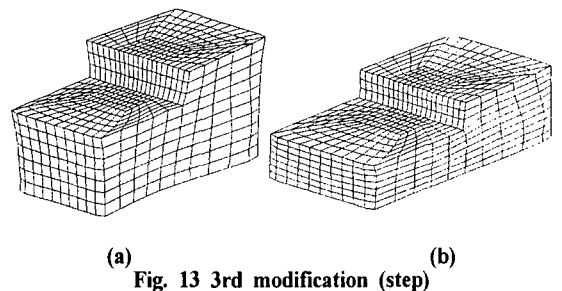


Fig. 13 3rd modification (step)

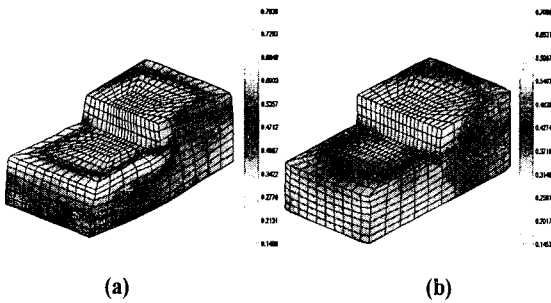


Fig. 14 Effective strain (step)

용하여 구한 예비성형체의 모양이고 Fig. 13(b)는 성형 후 최종형상으로 목표형상과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 14는 유효변형을 분포로 최초형상의 경우 최대 0.79에서 민감도법을 적용하여 구한 예비성형체의 경우 0.71으로 변형을 분포가 개선되고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 박판성형에서 최적블랭크 설계에 사용되고 있는 민감도법을 이용하여 단조공정의 예비성형체 설계법의 타당성을 확인하였다. 먼저 축대칭 자유단조에 적용하여 성형 후 배럴링 현상이 없는 소재의 초기 모양을 결정을 결정하였다. 그리고 여러 목표형상의 해석을 통해 그 적용가능성을 확인하기 위하여 성형후 형상이 각각 클로버형기둥, 계단형상등에 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., 1986, Blank design in rectangular cup drawing by an approximate method, *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, vol. 26, pp. 125~135.
- (8) 황찬, 오수의, 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) 이근안의 4인, 1991, 모델재료를 이용한 대형 개방형 단조품의 성형에 관한 연구, 단조심포지엄, 반도출판사 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, 황현태, 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 3D Version 3.0, 1999, User's Manual. Scientific Forming Technologies Corporation.
- (16) Hyper-mesh Version 3.0, 1998, User's Training Manual. Altair Engineering, Inc