

스프링백 저감을 고려한 초기블랭크 설계

양우열* · 이승열** · 김영탁***

(2002년 11월 11일 접수)

Initial Blank Design Considering Springback Reduction

W. Y. Yang, S. Y. Lee and Y. T. Keum

Abstract

The methodology to design initial blanks considering the reduction of both springback and flange trimming amounts is studied. Three dimensional forming analysis of a trial blank is first carried out using FEM and the tentative initial blank shape is then determined by cutting the outer edge of the trial blank whose shape is nearly matched with the trimming line. During the shaping the blank edge, the movement of blank outer line is described with random variables to reduce the sensitivity of initial blank geometry. After performing 2-D FEM forming and springback simulations for selected sections and optimizing the trimming and springback amounts in terms of section length of the blank, the initial blank is finally determined. In order to see the springback reduction in the initial blank determined by the proposed method, a stepped s-rail is stamped and the springback is measured. The springback of newly designed initial blank of stepped s-rail is tremendously reduced.

Key Words : Springback Reduction, Twist, Wall Curl, High-Strength Steel Sheet

1. 서론

금속성형공정의 설계에는 공정결정, 예비 성형체 설계, 금형설계 및 공정조건과 장비선정 등과 같은 많은 영역을 포함하고 있다. 특히 금속성형공정은 일반적으로 예비 성형공정이 포함된 다단계 성형공정이 필요하므로 금속성형공정의 설계에서 중요한 사항 중의 하나는 예비

성형체의 설계와 공정절차의 설계이다. 실제 산업현장에서는 이들을 설계자의 경험적 지침, 직관 및 실험에 의한 시행착오를 거쳐서 수행하고 있지만 시간 및 비용 면에서 효과적이지 못하며, 특히 정밀성형이 요구되는 경우에는 심각한 문제가 된다. 따라서 컴퓨터를 이용한 수치 해석적인 설계 방법들이 여러 가지 금속성형 공정의 설계에 활발히 이용되고 있다.

* 한양대학교 대학원
** PFTech
*** 한양대학교 CPRC 기계공학부

이중 박판금속성형은 금속판재를 이용하여 비교적 복잡한 형상의 제품을 만드는 것으로 저렴한 소재의 가격, 제품의 높은 비강도 및 양호한 표면, 대량 생산성등의 장점을 가지고 있어 현대 산업에 폭 넓게 이용되고 있다. 박판성형공정 중에 블랭크의 설계는 짧은 시간과 적은 노력으로 최적의 블랭크를 설계하는 방법이 요구되어진다. 컴퓨터의 발달은 수치적인 방법을 가능하게 하였으며 그것을 통한 많은 방법들이 박판성형공정의 해석에 신뢰할 만한 수단으로 사용되고 있다. 박판성형공정이 대변형을 수반한 비선형 문제인 만큼, 아직도 공정을 완전하게 예측하기에는 무리가 있지만, 직접 산업현장에 이용될 수 있을 정도의 유용한 정보는 예측이 가능하다.

컴퓨터에 의한 초기 블랭크 설계방법으로는 작도에 의한 Hazek 와 Langel⁽¹⁾, Chu와 Dou⁽²⁾등의 미끄럼선장법, 유한요소 역해석을 이용한 방법⁽³⁾, 이상성형 이론인 최소일의 원리를 이용하는 방법⁽⁴⁾ Kim과 Huh의 설계민감도를 이용한 박판금속성형 공정변수 최적화^(5~6), Lee와 Huh의 블랭크 설계 및 변형을 예측⁽⁷⁾ 그리고 유한요소 역추적법⁽⁸⁾등을 들 수 있다. 또한 플랜지 외곽의 절점의 이동경로를 선형적으로 보간하는 방법인 톨백⁽⁹⁾과 민감도법을 이용한 방법 등이 있다.⁽¹⁰⁾ 그러나, 이들 방법은 대부분 스크랩의 감소를 위한 최적의 초기블랭크 예측에 주안점을 두고 있다.

스탬핑 공정에서 스프링백을 제어하는 방법으로는 소재, 금형형상 및 공정조건적인 측면으로 대별될 수 있다. 소재의 품질 등급을 높이는 것은 목적 소재의 강도와 가격면에서 제한이 되고, 금형형상의 변경은 특히 양산공정을 대상으로 할 때 트리아아웃 비용의 과다 발생으로 용이하지 못하지만 공정조건 변경은 가장 쉽고 적용도가 높은 장점이 있다. 공정조건 측면에서 BHF와 초기블랭크 형상의 제어가 주로 사용되지만 고강도강을 대상으로 하는 난성형품은 낮은 성형한계로 BHF 조정에 따른 성형과단의 위험이 높아 제어에 어려움이 있어서 초기블랭크 설계의 중요성이 대두되고 있다. 특히, 초기블랭크의 형상 변경은 현재 프레스샵에서 경험적인 방법으로 많이 적용되고 있습니다만 스프링백이 심각한 고강도강에 대해서는 수차 블랭크 형상을 변경해 보고 실패하면 최적화되지 않은 상태에서 고비용이 소요되는 금형형상 및 드로우비드 변경을 위한 트리아아웃을 시도하는 경우가 있다.

본 연구에서는 스크랩의 감소뿐만 아니라 고강도강을 사용하는 스탬핑 패널의 주요 결함 중의 하나인 스프링백 인자를 고려하여 결함이 적게 발생하는 초기블랭크 설계를 시도하였으며, 설계방향은 3차원 성형해석으로

블랭크 외곽선상에 위치한 절점의 위치를 수정하고, 단면성형 및 스프링백 해석으로 스프링백과 트림량을 최적화하였다. 3차원 성형해석으로 블랭크 외곽선상에 위치한 절점의 위치를 수정하고, 단면 성형 및 스프링백 해석으로 스프링백과 트림량을 최적화하였다.

2. 형상 최적화

성형해석 후에 성형제품의 외곽 라인이 원하는 블랭크 트림라인과 일치하지 않을 경우, 제품의 외곽 라인이 원하는 블랭크 트림라인과 일치하도록 성형해석을 반복 수행하여 초기 블랭크 외곽 라인을 수정한다.

Fig. 1은 3차원 성형으로 얻은 블랭크 절점들의 이동경로를 보여주고 있다. 초기 블랭크 가장자리 한 절점 P(i)가 성형해석후에 C(i)가 되었을때, 성형해석 후 얻어진 성형품의 가장자리 블랭크 라인은 원하는 가장자리 블랭크 라인과 차이가 있게된다.

Fig. 2는 성형해석이 진행되면서 초기 블랭크 한점 P(i)의 이동하는 경로를 나타낸다. Fig. 3은 이동거리 $y = P(i)_{j+1} - P(i)_j$ 와 편차행정 x 와의 관계를 최소사승법을 이용하여 선형적으로 보간한 것이다. 여기서 i는 블랭크 가장자리에 위치한 절점번호를 의미하고, j는 해석과정의 step을 나타낸 것이다.

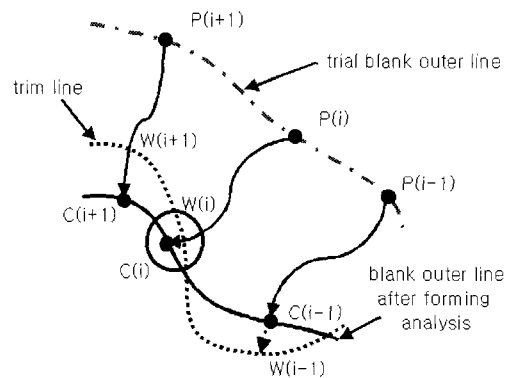


Fig. 1 Movement of nodal points located on blank outer line during forming analysis

각 성형단계에서 블랭크라인의 이동경로는 여러 공정 변수에(불균일한 블랭크 면압력, 불균일한 윤활, 초기블랭크의 안착위치 등) 따라 크게 달라지기 때문에 확률적 개념으로 초기블랭크를 결정하였다.

이를 위하여 본 연구에서는 성형에 따른 편차행정 x

와 블랭크 외곽라인상의 한 점의 이동경로 y 를 확률적 변수로 취급하고 y 를 k 차 다항식으로 표현한다. 그리고 확률밀도함수의 최우량조건으로부터 k 차 다항식의 계수를 구하고, k 차 다항식을 이용하여 블랭크 형상을 보정한다.

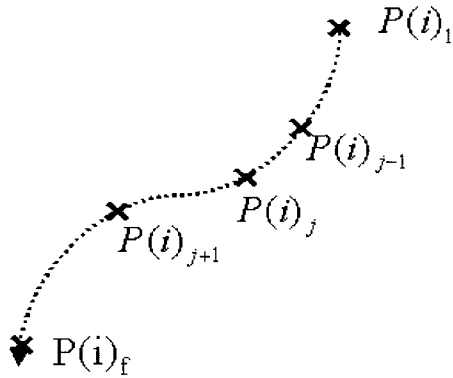


Fig. 2 Path and location of a nodal point on the outer line of trial blank

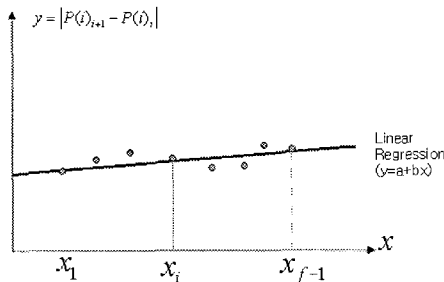


Fig. 3 Relationship between nodal point movement(y) and punch stroke(x)

절점의 이동거리함수(y)를 구하는 첫 단계에서는 성형 가능한 초기블랭크를 결정한다. 두번째 단계에서는 초기 안착위치에서 조금씩 안착 위치를 변경하여 n 경우의 안착 위치를 결정한 후, n 경우에 대한 3차원 성형해석을 수행한다. 세번째 단계에서는 안착위치가 다른 n 경우의 블랭크 외곽라인 이동점들로부터 이동 경로식을 k 차 다항식 $y=a+bx+\dots$ 으로 나타낸다. k 차 다항식의 계수는 확률밀도 함수의 최우량추정값 조건으로부터 구하여지고, 이식의 계수를 구하는 과정은 다음과 같다.

확률밀도 함수를 $L(x_1, x_2, \dots, x_n)$, n 개 샘플의 평균값을 m , 그리고 분산을 σ^2 이라고 하면 확률밀도함수는 다음과 같이 표현된다.

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y_i - y(x_i)}{\sigma_i} \right)^2} \quad (1)$$

최우량 추정값 조건으로부터 L 이 최대가 되는 $y(x_i)$ 가 가장 신뢰성이 높기 때문에 식(1)에서 지수가 최소일 때 가장 신뢰성이 높다. 즉,

$$\frac{\partial L}{\partial a} = 0, \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \quad (2)$$

혹은,

$$\sum \frac{1}{\sigma_i} \{ y_i - y(x_i) \} \frac{\partial y(x_i)}{\partial a} = 0 \quad (3)$$

$$\sum \frac{1}{\sigma_i} \{ y_i - y(x_i) \} \frac{\partial y(x_i)}{\partial b} = 0,$$

이다. 계산의 단순화를 위하여 선형으로 회기 시키고, x_i 는 편치 행정에 따른 반복 부분이기 때문에 분산이 무시함을 고려하면 식 (3)은 식(4)와 같이 간단히 쓰여진다.

$$an + b \sum x_i = \sum y_i \quad (4)$$

$$a \sum x_i + b \sum x_i^2 = \sum x_i y_i$$

따라서 식(4)를 연립하여 풀면 선형회기식의 계수 a 와 b 를 구할 수 있다.(Fig. 3 참조) 이상과 같은 과정으로 구한 외곽선상 절점들의 이동경로식으로부터 언제 즉, 편치가 얼마만큼 진행했을 때 블랭크의 외곽라인이 trim line에 얼마만큼 근접하는지를 예측할 수 있다.

Fig. 4는 이동경로식 $y=a+bx+\dots$ 의 식을 이용하여 블랭크의 형상을 트립라인 근처로 수정하여 결정하는 과정을 보여주고 있다. 성형공정 후 절점($P(i)_i$)을 원하는 trim line상에($W(i)$) 위치시키기 위하여 2점간의 거리차이를 초기 블랭크 외곽 라인에서 보상해 주었다.

즉, 절점에 대한 이동경로식 x 를 $P(i)_1, P(i)_2, \dots, P(i)_f, P(i)_{f-1}, P(i)_{f-2}, \dots$ 를 증가시키면서 이에 대응하는 값 $y(P(i)_1), y(P(i)_2), \dots, y(P(i)_f), y(P(i)_{f-1}), y(P(i)_{f-2}), \dots$ 를 찾고, 만일 trim line상의 한 점 $W(i)$ 가 $y(P(i)_{f-1})$ 와 $y(P(i)_{f-2})$ 사이에 있다면, $y(P(i)_f)$ 가 $y(P(i)_{f-1})$ 와 $y(P(i)_{f-2})$ 사이에 있도록 초기 블랭크 시작점을 $P(i)_2$ 로 한다. 이런 과정으로 초기 블랭크의 외곽라인상의 한절점 $P(i)$ 는 $P(i)_2$ 로 수정된다.

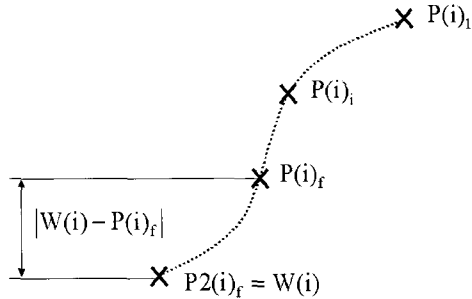


Fig. 4 Modification of a nodal point on the blank outer line

그러나 위와 같은 방법으로 블랭크 외곽라인을 정도 높게 결정하기 어려운 경우에는 이동경로식으로 $P(i)_{f+2}$ 와 $W(i)$ 가 얼마나 떨어져 있는지 알 수 있기 때문에 (Fig. 5에서 $G\%$) $P(i)_{f+2}$ 와 $W(i)$ 의 거리를 새로운 초기블랭크 시작점 $P(i)_2$ 에서 $P2(i)_1 = P(i)_3 - |P(i)_3 - P(i)_2| * G\%$ 로 보다 정확하게 보정해 줄 수 있다.

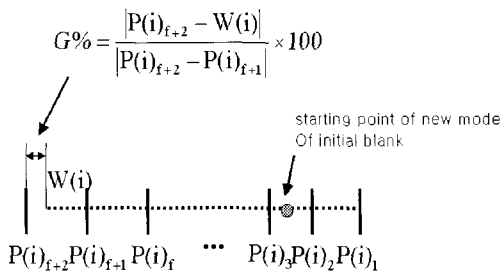


Fig. 5 Determination of new nodal point using $G\%$

이상의 내용을 요약하여 기술하면, 시도 초기 블랭크로 3차원 FEM해석 후, 블랭크 외곽절점들의 정보를 이용하여 성형 후 블랭크 외곽점과 trim line과의 차이를 얻고 그 차이를 초기블랭크 외곽절점에서 보상해 주어 초기블랭크 형상을 정한다.

초기블랭크의 형상은 초기블랭크의 외곽선(Blank Outer Line)상에 있는 모든 절점이 트림라인과 허용오차 이하가 될 때까지 Fig. 6과 같이 3차원 성형해석과 블랭크 외곽선 보정작업의 반복으로 결정된다.

3. 스프링백 및 트림량 최적화

위에서 구한 초기 형상 블랭크는 성형 후 트림량의 최소화만 고려된 블랭크이다. 본 연구에서는 초기 블랭크

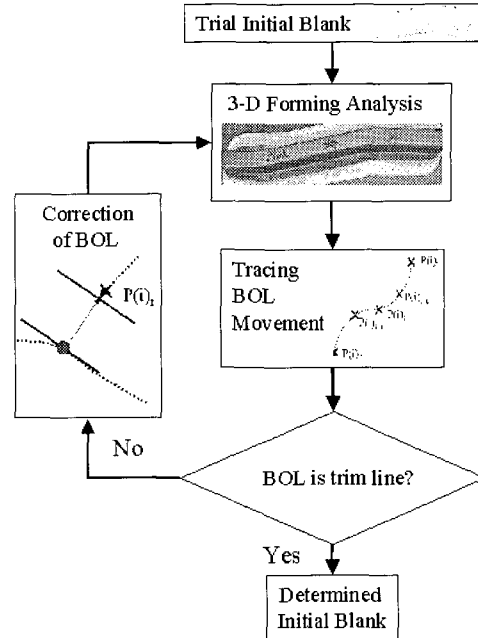


Fig. 6 Determining the initial blank by shape optimization

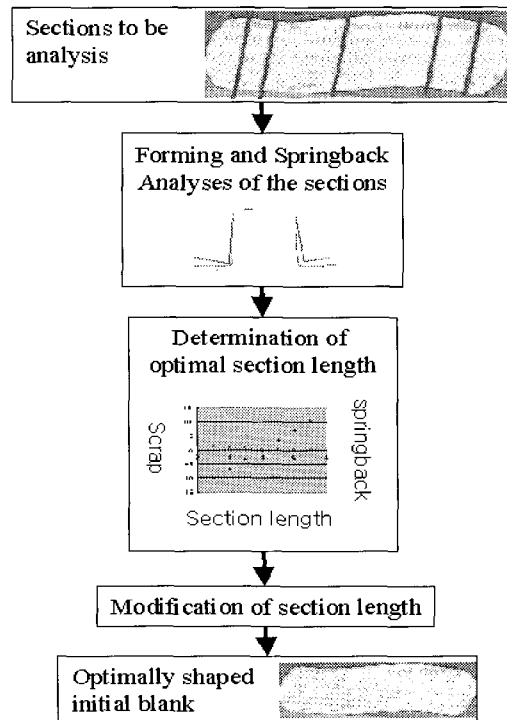


Fig. 7 Determination of initial blank considering springback reduction

결정과정 중에 스프링백 감소를 위한 방법으로 스프링백량과 초기블랭크에서 단면길이 변화의 관계를 검토하였다. 위의 방법을 구체적으로 기술하면, 첫 번째로 Fig. 6과 같은 방법으로 구한 초기블랭크에서 성형에 지배적인 단면을 추출한다. 두 번째로 추출된 단면길이를 3차원 해석에서와 같은 공정변수를 가지고 단면 성형을 한다. 두 번째 과정을 여러 가지의 단면길이를 가진 블랭크에 대하여 해석을 수행하면 스프링백과 단면 길이 블랭크의 관계가 도시된다. 세 번째 단계로는 최적화 방법으로 두 번째 과정에서 얻어진 정보를 이용하여 스프링백과 트림량이 고려된 블랭크 단면길이를 정한 후 추출되어진 3차원 블랭크에 보정을 한다. 위의 과정을 Fig. 7에 나타내었다.

4. 적용

스프링백 저감을 위해 설계된 초기블랭크를 검증하기 위하여 두께가 1.0mm인 TRIP60 고장력 강판을 대상으로 Stepped S-Rail을 성형하고 스프링백을 측정하였다.

스프링백 측정을 위하여 아래의 그림과 같이 스프링백을 단면A와 단면B가 이루는 수직백터의 교차각의 차이로 Stepped S-Rail의 스프링백인 비틀림 값을 정의하여 측정하였다.

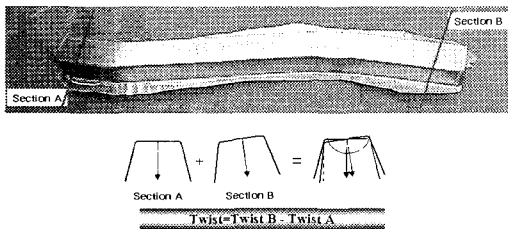


Fig. 8 Definition of twist

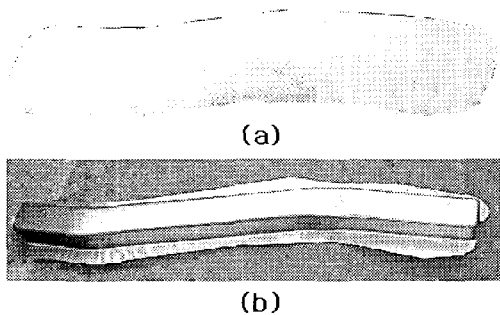


Fig. 9 (a) Initial blank and (b) draw panel formed with initial blank

초기블랭크 모양은 트라이아웃 과정에서 시행착오법으로 결정하였다. Fig. 8은 시행착오법으로 결정된 초기블랭크, 성형패널 결과들이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 시행착오법으로 결정한 초기 블랭크로 성형한 성형품에는 플랜지 형상이 불규칙하고, 성형패널의 비틀림 값은 1.7°로 측정되었다.

Stepped S-Rail에 대한 3차원 FEM해석을 수행한 후 블랭크 외곽선과 trim line의 간격을 5.0mm로 정하고, 100mm 플랜지량을 되도록 초기블랭크를 설계하기 위하여 2회의 초기블랭크 결정 과정을 가졌다. 이렇게 구한 초기블랭크와 성형품을 Fig. 9에서 보여 주고 있다. Fig. 8의 성형 패널의 형상에 비하여 균일한 플랜지 형상을 가졌고, 비틀림량은 0.7°로 감소되었다.

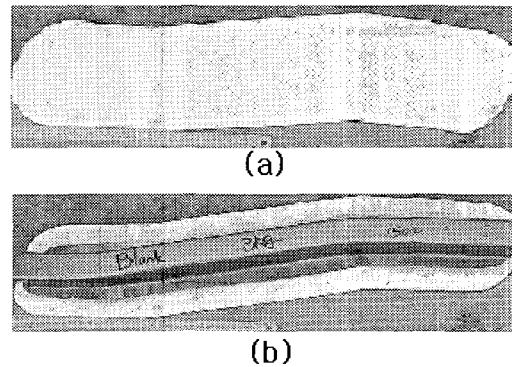


Fig. 10 (a) Optimized initial blank and (b) draw panel formed with optimized initial blank

이와 같은 과정을 스프링백과 다양한 트림량 조절에 의한 초기블랭크 변경을 하면서 실험한 결과와, 스프링백과 BHF를 변경하면서 실험한 결과를 이용하여 결과를 그림과 같이 나타내었다.

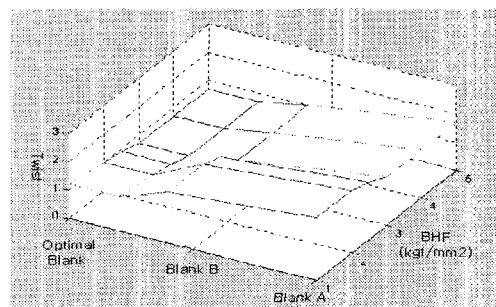


Fig. 11 Springback associated with various BHF's and initial blanks

5. 결론

확률변수의 개념을 도입하여 성형공정변수에 민감하지 않고 스프링백 저감을 고려하는 초기블랭크 설계 방법을 제안하였다. 그리고 stepped s-rail에 이 초기블랭크 설계방법을 적용하여 제안한 초기블랭크 설계방법의 타당성을 실험과 해석을 통해 확인하였다. 또한, 본 연구에서 제안된 초기블랭크 설계방법으로 트림량이 알맞게 조절된 블랭크는 체형형상의 성형공정에서 발생하는 스프링백 저감에 효과가 큰 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- (1) Hazek, V. V. and K. Lange, "Use of Slip Line Field Method in Deep Drawing of Large Irregular Shaped Components", Proc. of 7th NAMRC, Ann Arbor, Michigan, pp. 65~71, 1990.
- (2) Chu, J. Y. and A. P. Dou, "A Software System for Designing Reasonable Blank for Box-shaped Deep-drawn Articles", Proc. of ICTP, Vol.3, pp. 1319~1324, 1990.
- (3) 이진희 강범수 김병민, "강-소성 유한요소 해석에서의 3차원 역추적 기법에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제4권, 제3호, pp. 267~281, 1995.
- (4) Barlat F., Chung K., and Richmond O., "Anisotropic Plastic Potentials for Polycrystals and Application to the Design of Optimum Blank Shapes in Sheet Forming", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.25A, pp. 1209~1216, 1994.
- (5) 김세호, 허 훈, 직접미분 설계민감도 해석을 이용한 박판금속성형 공정변수 최적화 - 설계민감도 해석, 대한기계학회 논문집 A, Vol. 26, No. 11, pp. 2245~2252, 2002
- (6) 김세호, 허 훈, 직접미분 설계민감도 해석을 이용한 박판금속성형 공정변수 최적화 - 공전변수 최적화, 대한기계학회 논문집 A, Vol. 26, No. 11, pp. 2262~2269, 2002
- (7) C.H.Lee and H. Huh, Blank Design and Strain Prediction of Automobile Stamping Parts by an Inverse Finite Element Approach, J. Mat. Proc. Tech. Vol. 63, pp. 645~650, 1997
- (8) Iseki H., and Sowerby R., "Deformation of the Optimum Blank Shape when Deep Drawing Non-axisymmetric Cups Using a Finite Element Method", JSME International Journal. Series A, Vol. 38, No 4, pp. 125~135, 1995.
- (9) Kim J.Y., Kim N.S., and Huh M.S., "Optimum Blank Design of Automobile Sub-Frame", Korean Society for Technology of Plasticity Spring Annual Meeting. pp. 185~195, 1998.
- (10) 심현보 손기찬 황현태, "민감도법을 이용한 최적블랭크 설계법의 일반적인 모양의 금형에서 적용", 한국소성가공학회지, 제9권, 제3호, pp. 79~86, 2000.