

## 박판성형공정의 블랭크 최적설계

이정민\* · 김용환\*\*

# Optimal Blank Design for Sheet Metal Stamping

J. M. Lee and Y. H. Kim

### Abstract

A systematic method to find the optimal blank shape for sheet forming is proposed by coupling the numerical simulation and the optimization technique. A weighted parameter was introduced in order to simplify the multi-variable optimization problem to a single-variable problem. The proposed method has been applied to the blank design of drawing processes to obtain the near-net shape within the required error bound after forming. Excellent results have been obtained between the numerical results and the target contour shapes. Through the investigation, the proposed systematic method for optimal blank design is found to be effective in the practical forming processes

**Key Words** : Optimal Blank, Blank Design, Finite Element Analysis

### 1. 서론

박판성형공정에서 블랭크 설계란 주어진 최종성형물을 얻기 위하여 필요한 초기소재의 형상 및 크기를 결정하는 일련의 과정을 말한다. 박판성형공정에서 초기소재의 형상 및 크기는 아직도 주로 경험 또는 시행착오에 의한 방법으로 결정한다. 이상적인 초기소재의 형태는 성형공정후 트리밍 공정이 필요치 않은 것이나, 성형공정에 있어서 드로우 비드의 존재, 재료의 생산로트에 따른 물성치의 차이 및 실제공정에 있어서 성형조건의 변화 등으로 트리밍 공정을 완전히 배제한다는 것은 불가능하다. 따라서 블랭크 설계의 주목적은 재료의 실수율을 높이기 위하여 성공적인 성형을 전제로 블랭크의 크기를 최소로

하는 형상을 예측하는데 있다. 미끄럼선장법<sup>(1,2)</sup>, 기하학적 사상법<sup>(3-5)</sup>, 변형이론<sup>(6,7)</sup> 이상성형이론<sup>(8)</sup> 및 유한요소 역해석<sup>(9)</sup> 등과 같은 다양한 방법이 블랭크 설계방법으로 제안되고 있다. 그러나 이와 같은 방법들은 실제공정에 적용 가능한 수준의 정확도를 제공하지 못하기 때문에 프레스 금형의 try-out에 소요되는 시간 및 노력을 줄여 주지 못하는 실정이다. 본 연구에서는 유한요소해석과 최적화 기법을 연계한 박판성형공정 공정설계 방법을 개발하였으며, 이를 드로잉공정에서 근사정형가공을 위한 블랭크 설계에 적용하였다. 유한요소해석은 상용 해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였고 매개변수를 도입한 최적화 기법을 적용하였다. 제안된 방법은 자동차부품의 블랭크 설계에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.

\* 국방과학연구소

\*\* 충남대학교

## 2. 매개변수를 도입한 최적화 기법

일반적으로 비선형 최적설계 문제는 수학적으로 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \min \quad & F(X_i) \\ \text{subject} \quad & g_j(X_i) \leq 0 \quad j=1,m \\ & X_i^l \leq X_i \leq X_i^u \quad i=1,n \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $X_i$ 는 설계변수이며, 목적함수  $F(X_i)$ 를 주어진 구속조건에 따라 최소화(최대화) 시키는  $X_i$ 를 찾아내는 것을 의미한다. 최적화는 설계변수의 초기치  $X_i^0$ 로부터 반복적으로 설계변수를 변경시키는 과정을 거치게 된다. 여기서,  $q$ 번째 반복계산은 다음 식에 따른다.

$$X_i^{q+1} = X_i^q + d^q S_i^q \quad (2)$$

이때,  $S_i^q$ 는 탐색방향 벡터이며  $d^q$ 는 탐색거리이다. 따라서, 최적화절차는 먼저 탐색방향 벡터를 찾아내고 다음에 탐색거리를 찾아내는 두 단계로 구성된다. 최적화를 성공적으로 달성하기 위하여 적절한 목적함수의 선택은 필수적이다. 박판성형공정에서는 트리밍 여유를 최소로 하는 근사정형가공을 위한 블랭크의 최적설계가 주된 관심사항중 하나이다. 이를 위한 가장 간단한 방법으로 가감법이 있다. 이 방법은 성형해석 결과와 목표형상과의 차이만큼을 예측된 블랭크 형상에 더하거나 감하여

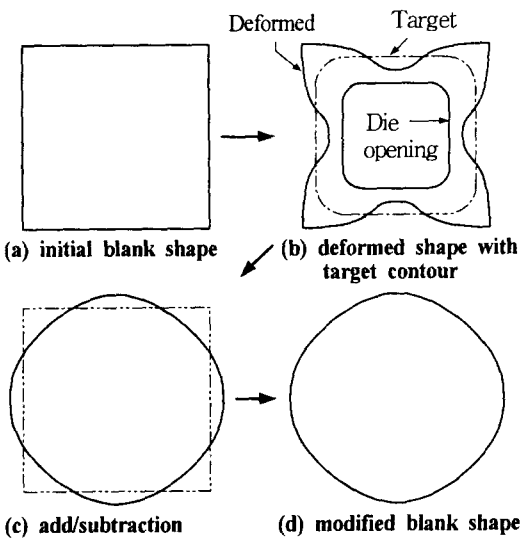


Fig. 1 Illustrating the process of optimum blank design by add/subtraction method

블랭크 형상을 수정한다(Fig. 1). 이 방법은 반복계산이 필요하게 되며,  $q+1$ 번째 반복계산시 외곽선의  $i$ 번째 절점의 위치  $X_i^{q+1}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$X_i^{q+1} = X_i^q + (P_m - Y_i^q) \quad (3)$$

이때  $P_m$ 은 외곽을 이루는 절점의 변형경로와 목표외곽선과의 교점이며,  $Y_i^q$ 는 성형완료후 해당절점의 위치이다. 이 방법은 일반적으로 과대보정에 의하여 반복계산이 되풀이됨에 따라 설계변수 값이 목표값을 기준으로 진동하는 경향이 있으며 반복계산 횟수가 초기가정에 크게 좌우되는데, 이를 극복하기 위하여 (3)식에 매개변수를 도입하였다.

$$X_i^{q+1} = X_i^q + \beta_i^q (P_m - Y_i^q) \quad (4)$$

이때,  $\beta_i^q$ 가 절점  $i$ 의 가중매개변수이다( $0 \leq \beta_i^q \leq 1$ ). (4)식에서  $(P_m - Y_i^q)$ 는 탐색방향 벡터,  $\beta_i^q$ 는 탐색거리이다. 목적함수는 가중매개변수가 특정한 값( $\beta_i^{opt}$ )을 가질 때 최소가 된다. 본 연구에서는  $\beta_i^{opt}$  값이 전 요소에 걸쳐서 동일한 값을 갖는다고 가정하였으며 이에 따라 다변수 최적화를 단변수 최적화로 단순화시킬 수 있으며,  $\beta_i^{opt}$ 를 1차원 최적화기법<sup>(10)</sup>을 이용하여 찾아낼 수 있다. Fig. 2에 가중매개변수를 이용한 최적화절차의 흐름을 나타내었다. 성형해석은 사용 프로그램인 ABAQUS/Explicit 5.7을 이용하였고 유한요소해석과 최적화 모듈은 제어프로그램을 통하여 연계시켰다.

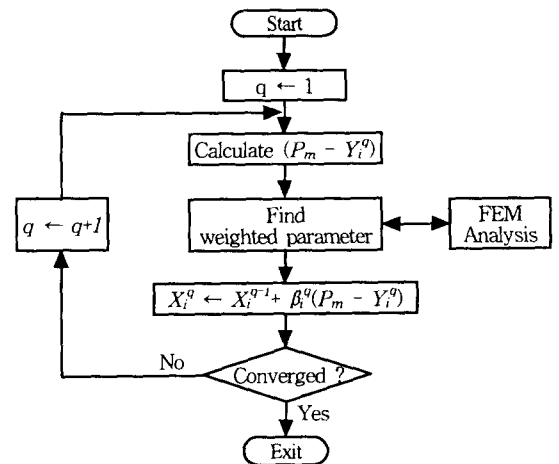


Fig. 2 Flow chart of optimization process with weighted parameter

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 사각상자 블랭크 최적설계

본 연구에서 제시한 방법을 간단한 형상인 사각상자의 블랭크 설계에 적용하여 보았다. 사각상자의 및 성형공구의 FEM 모델을 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다. 최적화는 임의의 사각형상을 초기형상으로 하여 황금분할법으로 매개변수  $\beta^*$ 를 계산하였으며, 목적함수는 다음과 같이 정의하였다.

$$F(X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\Delta L^2} \quad (5)$$

여기서  $N$ 은 초기 소재의 외곽선을 구성하는 절점수이며  $\Delta L$ 은 성형 후 노드와 목표외곽선까지의 거리이다. 따라서, 위 식은 성형결과 최종형상의 외곽선을 이루는 각각의 절점과 목표값과의 편차의 평균을 나타낸다.

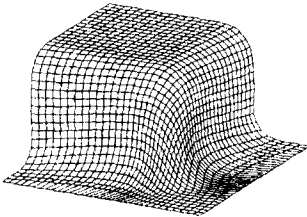


Fig. 3 3D shape of square cup (1/4 model)

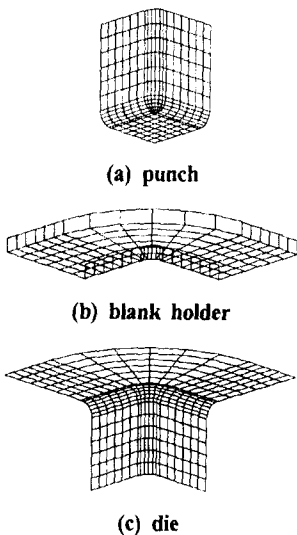


Fig. 4 FEM models for square cup forming tools

최적화는 성형결과와 목표 외곽선과 최대차이가 0.25mm 이내로 들어오면 종료되는 것으로 하였다. Fig. 5에 매개변수 최적화기법을 도입한 가감법에 의하여 블랭크 형상의 수정과정을 나타내었는데, 최초의 사각 블랭크에 의한 해석결과 코너부분에서는 10.7mm 정도가 남고, 중심선에서는 10.6mm가 모자라는 것으로 나타났다. 3회의 1차원 최적화 절차에 의하여 모든 외곽절점들이 목표값과의 오차범위 이내에 위치하게 되어 최적화된 블랭크의 형상을 계산할 수 있었다. 최적화 진행에 따른 목적함수, 매개변수 및 최대오차를 table 1에 나타내었다.

Table 1 Variation of object function, weighted parameter and maximum deviation during optimization process for square box forming

Iteration	$F(X)$	$\beta^*$	Max. deviation
Initial	8.12	-	10.70
Iter. 1	1.90	0.94	2.50
Iter. 2	0.36	0.91	0.54
Final	0.08	0.85	0.15

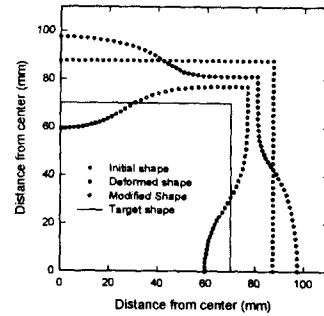


Fig. 5 Modification of blank shape with parametric add/subtraction optimization for square cup drawing

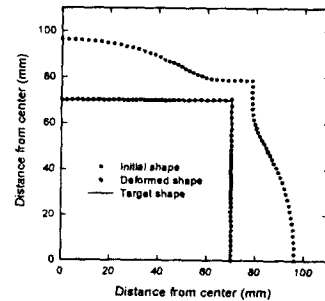


Fig. 6 Optimized blank and deformation shape for square cup drawing

표에서 보는바와 같이 목적함수 및 최대오차의 변화 추이를 보면 최적화가 원만히 진행됨을 알 수 있다. 최적화 결과에 따른 최적블랭크와 성형해석결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 목표외곽선과 아주 잘 일치함을 알 수 있고, 이 경우의 최대오차는 0.15mm이었다.

### 3.2 자동차 연료탱크 블랭크 최적설계

제안된 최적설계 기법을 실제문제인 자동차 연료탱크 블랭크 설계에 적용하였다. 자동차 연료탱크의 제원은 길이 920mm, 폭 615mm, 최대높이 113mm로 비대칭 형상이며(Fig. 7) 초기소재의 두께는 0.8mm이다. Fig. 8에는 성형해석을 하기 위한 펀치, 다이, 블랭크홀더의 유한요소 모델을 나타내었으며 재료의 물성값은 Table 2에 나타내었다. 성형해석은 ABAQUS/Explicit 5.7을 이용하여 전산모사를 하였다. 성형조건으로서의 마찰계수는 드로잉 한계를 높이기 위해 펀치와 블랭크사이는 일반성형 조건에서의 마찰계수를 사용하였고 홀더와 블랭크, 그리고 다이와 블랭크 사이는 그리스 윤활의 표준 마찰계수를 사용하였다. 목적함수는 식(5)를 사용하였으며, 최적화는 성형결과와 목표 외곽선과 최대차이가 1mm 이내로 들어오면 종료되는 것으로 하였다.

Table 2 Material properties of cold rolled steel blank for fuel tank

E	Y <sub>0</sub>	ν	ρ
200 GPa	162 MPa	0.3	7800 kg/m <sup>3</sup>

$$\sigma = 526.0 \times (0.0074 + \epsilon)^{0.239} \text{ MPa}$$

먼저 연료탱크의 목표 외곽선 바깥쪽에 임의의 외곽선을 가지는 사각형의 소재를 가정하고 이로부터 최적화 절차에 따라서 최적의 초기소재를 결정하도록 하였다. 최적화는 매개변수를 이용한 최적화 전략을 이용하였으며 최적의 매개변수를 결정하는 1차원 최적화는 2차근사법을 이용하였다. Fig. 9에는 사각의 외곽형태를 갖는 블랭크로 연료탱크를 성형하였을 때 블랭크 및 전산모사에 의한 성형완료품의 형상을 나타내었다. 여기서 초기소재의 외곽선과 성형 후의 외곽선을 비교할 수 있는데 목표값을 기준으로 남는 부분과 모자라는 부분을 쉽게 알 수 있다. 최종상태에서의 연료탱크의 외곽선 좌표와 목표값과 비교하여 오차를 정량적으로 비교해 보면 제품의 목표치에 비하여 좌측하단 코너에서 9.5mm가 남고, 상단에서 65.4mm가 부족하였으며 평균오차는 32.9mm이다.

최적화 진행에 따른 목적함수, 매개변수 및 최대오차를 Table 3에 나타내었다. 4회의 1차원 최적화에 의하여 최

대오차가 0.78mm로 나타나 성형후의 모든 절점들이 목표 외곽선을 기준으로 ±1.0mm 이내에 분포되었으므로 목표로 하는 최적화가 달성되었음을 알 수 있다.

최적화 결과에 따른 최적블랭크와 성형해석결과를 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 성형해석 결과가 목표외곽선과 아주 잘 일치함을 볼 수 있다.

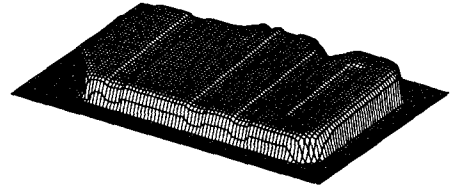
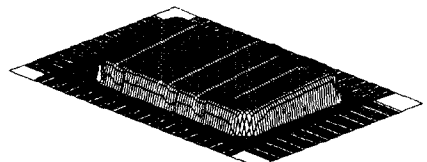


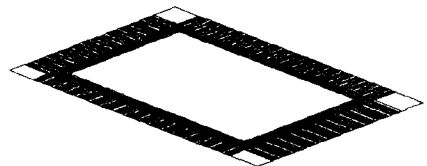
Fig. 7 3D model of fuel tank

Table 3 Variation of object function, weighted parameter and maximum deviation during optimization process for fuel tank forming

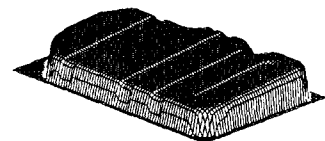
Iteration	F(X)	β*	Max. deviation
Initial	32.88	-	65.40
Iter. 1	5.35	0.892	34.54
Iter. 2	1.43	0.801	14.06
Iter. 3	0.80	0.646	2.79
Final	0.37	0.908	0.78



(a) die



(b) blank holder



(c) punch

Fig. 8 FEM models for fuel tank forming tools

## 참 고 문 헌

- (1) V.R.Hasek and K.Lange, 1979, "Use of the slip line field method in deep drawing large irregular shaped component," Proc. 7th NAMRC, pp.65~71.
- (2) H.Gloeckl and K.Lange, 1983, "Computer aided design of blanks for deep drawing large irregular shaped component," Proc. 11th NAMRC, pp.243~251.
- (3) R.Sowerby, J.L.Duncan and E.Chu, 1986, "The modeling of sheet metal stamping," Int. J. Mech. Sci., vol.28, pp.415~430.
- (4) G.N.Blount and P.R.Stevens, 1990, "Blank shape analysis for heavy gauge metal forming," J. Mat'l Proc. Tech., vol.24, pp.65~74.
- (5) S.A.Majlessi and D.Lee, 1987, "Further development of multi-stage sheet forming analysis method," Trans. ASME, J. Eng. Ind., vol.109, pp.330~337.
- (6) Y.Q.Guo, J.L.Batoz and J.M.Duroux, 1990, "Application of an inverse FE-procedure for strain estimations of sheet metal forming part," Int. J. Num. Meth. Eng., vol.30, pp.1385~1401.
- (7) K.Chung and O.Richmond, 1992, "Ideal forming II- Sheet forming with optimum deformation," Int. J. Mech. Sci., vol.34, pp.617~633.
- (8) E.Chu, D.Soper, H.Gloeckl and J.C.Gerdeem, 1995, "Computer aided geometric simulation of sheet metal forming Processes," In: N.M.Wang and S.C.Tang eds., Computer Modeling of Sheet Metal Forming Processes, pp.65~76.
- (9) C.H.Lee and H.Huh, 1997, "Blank Design and Strain Prediction for Automobile Stamping Parts by an Inverse Finite Element Approach," J. Mat'l Proc. Tech., Vol. 63, pp.645~650.
- (10) G.N.Vanderplaats, 1984, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill.

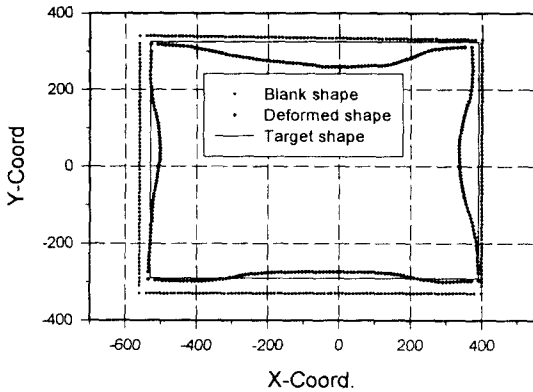


Fig. 9 Blank and deformed shape with initial blank shape for fuel tank drawing

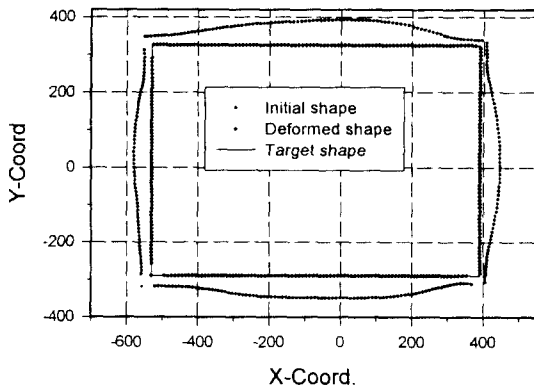


Fig. 10 Optimized blank and deformed shapes for fuel tank drawing

## 4. 결 론

박관성형공정에서 최적의 블랭크를 예측하기 위한 체계적인 방법을 제안하였다. 이 방법은 유한요소해석 도구와 최적화 기법을 연계하여 구성하였으며, 매개변수가 각각의 설계변수에 대하여 동일하다는 가정으로 다변수 최적화 문제를 단변수 최적화 문제로 단순화 시켰다. 제안된 방법을 박관성형공정에서 근사정형가공을 위한 블랭크 예측에 적용하였다. 최적블랭크는 성형해석결과와 목표값과의 차이가 미리 설정된 오차범위 이내 일 때를 기준으로 하였으며 수회의 1차원 최적화를 통하여 최적의 블랭크를 예측할 수 있었다. 이 방법은 드로잉공정에서의 블랭크 설계, 용접판재의 용접선 설계 등 최적화 과정에서 탐색방향을 알 수 있는 공정설계에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.