

민감도법에 의한 최적블랭크 형상 설계에 관한 연구

심 현 보* · 손 기 찬**
(1998년 12월 7일 접수)

A Study on the Optimal Blank Design Using Sensitivity Analysis Method

Hyun-Bo Shim and Ki-Chan Son

Key Words: Optimal Blank(최적블랭크), Sensitivity Analysis(민감도법)

Abstract

In this study, a method of optimal blank design using the sensitivity analysis has been proposed. To get sensitivity a well-known commercial code PAM-STAMP has been used. In order to verify this method, formings of square cup, clover shaped cup and L shaped cup have been chosen as the examples. With the predicted optimal blank both computer simulation and experiment are performed. Excellent agreements are recognized between the numerical results and the target contour shapes. Through the investigation, the proposed systematic method of optimal blank design is found to be effective in the design of the deep drawing process.

1. 서 론

박판 소재로부터 금형을 이용하여 제품을 생산하는 박판 성형공정은 최종 제품과 거의 동일한 형상의 우수한 기계적 성질을 가진 성형품을 직접 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 금형에 의한 대량 생산이 가능하여 높은 생산성과 낮은 가격으로 자동차 산업이나 전자산업 등 여러 분야에서 널리 이용되고 있다. 박판 성형공정은 대체로 현장 작업자의 경험과 트라이아웃(始打, try-out)과정을 거치면서 문제점을 찾고 이를 수정하는 방법으로 공정설계가 이루어져 왔으며 이에 따른 시행착오로 제품의 개발에 많은 시간과 비용이 소비되어 왔다. 이러한 시행착오를 줄이기 위해 공정해석과 실험을 통하여 체계적으로 공정을 설계하는 방법이 적용되어 왔으며 최근 컴퓨터의 발달과 함께 수치해석 기법의 발전으로 유한요소법을 이용

한 해석이 신뢰할 만한 수단으로 사용되고 있다.

초기 블랭크 설계 예측 방법으로 작도법에 의한 소성해법인 미끄럼선장법^(1~5)을 이용한 방법과 변형된 형상에서의 표면적을 면적을 일정하게 유지시키면서 평면으로 투영하는 기하학적 사상법^(6~8)을 들 수가 있으며 최근의 유한요소해석 결과를 이용한 시행착오에 의한 면적감법^(9,10) 유한요소 역해석법^(11~13) 최소일의 원리에 입각한 이상성형이론을 이용하는 방법⁽¹⁴⁾ 유한요소 역추적법⁽¹⁵⁾을 들 수가 있다. 그 밖에 플랜지 외곽의 절점의 거동을 선형적으로 보간하는 방법⁽¹⁶⁾ 그리고 롤백(roll back)법⁽¹⁷⁾도 있다.

실험적인 방법으로는 전압분포장과 금속변형속도장의 상사성에 입각한 방법⁽¹⁸⁾ 그리고 고점성 유체유동과 금속변형속도장의 상사성에 입각한 방법⁽¹⁹⁾ 등도 있다.

이러한 최근의 연구 동향들은 해의 정확성을 보장하면서 계산 시간의 단축을 꾀하는 효율성을 추구하고 있으나 실제 플랜지 부위의 변형 경로, 각 절점들의 이동 속도의 차이, 또한 중첩이 심한 수직면들을 가진 특이 형상에 대한 검증은 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서는 플랜지 부위의 변형경로, 절점들의 이동속도 차이에 의한 민감도 등을 고려하

* 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : hbshim@yu.ac.kr

TEL : (053)810-2573 FAX : (053)813-3703

** 영남대학교 대학원

여 재료의 실수율을 제고시키고 사용이 용이한 최적 블랭크 형상설계 기법을 제안하고 이를 여러 가지 형상의 디프드로잉 공정에 적용하여 실험과의 비교를 통하여 타당성을 확인하였다.

2. 민감도에 의한 초기 블랭크 설계법

본 연구에서의 민감도는 초기 블랭크의 외곽선상에 위치한 절점 위치의 변화량이 최종제품에서의 그 절점에서의 위치 변화량의 비로 고려하였다. 즉 성형후의 외곽선이 목표 외곽선과 일치하지 않을 경우 제품의 외곽선이 목표 외곽선과 일치하도록 성형전의 블랭크의 모양을 수정해 주어야 한다. 이때 성형전의 블랭크 모양의 수정은 외곽선상에 위치한 절점의 위치를 이동시켜줌으로써 이루어지며 절점의 이동거리와 크기를 결정할 때 민감도를 이용한다.

각 절점당의 민감도는 최초 블랭크 형상과 이 블랭크로부터 외곽선상의 절점을 미소량 오프셋(offset)시킨 블랭크로 변형 해석을 수행함으로써 구하도록 한다.

2.1 민감도에 의한 오차 보정 방법

Fig. 1은 초기 블랭크 외곽선상 임의의 한 점이 변형되는 경로를 나타낸 것으로, 블랭크 외곽선상의 절점들은 비선형적인 변형경로로 거동을 한다는 것을 알 수 있으며, 현장에서 블랭크 설계시에 주로 사용하는 선형화된 경로와 차이가 있음을 알 수 있어 선형화된 변형경로를 이용하여 블랭크를 설계하는 데에는 문제점이 있음을 알 수 있다. 초기 블랭크 외곽선상의 임의의 점인 X 가 최종형상으로 성형된 후의 위치를 x 로 나타내었다. 성형후의 위치 x 에서 최종단계의 성형방향으로의 연장선과 목표형상의 외곽선과 만나는 점을 x_T 로 표현하였다. 그림에서 점선은 변형경로를 선형으로 표현한 것으로 실제 변형경로와의 오차를 보여준다.

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

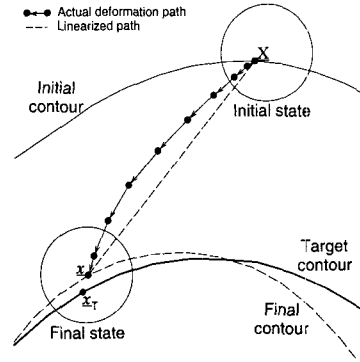
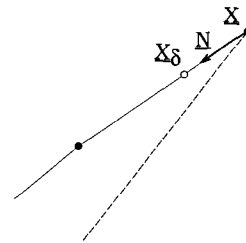
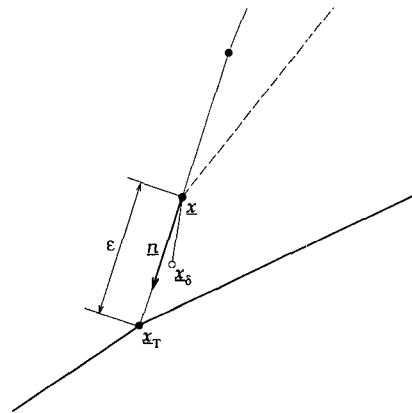


Fig. 1 Movement of a material point



(a) Initial state



(b) Final state

Fig. 2 Concept of sensitivity and error correction

Fig. 2(a)는 초기 상태를 벡터 형태로 표현한 것이다. N 은 첫 번째 단계 진행 방향의 단위벡터이다. 식 (1)을 통해 구한 X_δ 는 X 로부터 N 방향으로 미소변위 δ 만큼 오프셋(offset)시킨 수치미분에 사용되어질 점들로 본 논문에서는 δ 를

0.5mm로 설정하였다. Fig. 2(b)는 최종상태를 벡터 형태로 표현한 것이다. \underline{u} 은 최종단계 진행 방향의 단위벡터이다.

\underline{x}_T 는 목적형상 외곽선상의 점으로 최종변형 단계에서의 변형이 진행되는 방향의 단위벡터 \underline{u} 의 연장선과 만나는 점으로 결정되며, \underline{x} 와 \underline{x}_T 사이의 거리를 형상오차 ε 으로 하였다. \underline{x}_δ 는 \underline{X}_δ 의 최종 변형된 점의 위치로 식 (2)의 과정을 거쳐 각 절점에서의 민감도(S:sensitivity)가 구하여진다.

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

식 (2)에서 얻은 민감도를 이용하여 변형경로를 고려하여 구하여 질 절점의 새로운 위치 $\underline{X}^{(i)}$ 는 다음의 식으로부터 구하여 진다.

$$\underline{X}^{(i)} = \underline{X}^{(i-1)} + \varepsilon \cdot S \cdot \underline{N} \quad (3)$$

최적블랭크는 형상오차 ε 이 모든 절점에서 허용오차 이하가 될 때까지 해석 및 절점 이동의 방법을 수차례 반복하여 구한다.

2.2 민감도 법의 적용

본 논문에서 제안된 민감도법을 이용하여 Fig. 3에 표시한 순서로 최적 블랭크 형상을 구하였다. 이를 구체적으로 설명하면, 먼저 최초의 블랭크 형상 및 미소한 크기의 편차를 가진 블랭크로 성형해석을 수행하고 이 해석의 결과로부터 외곽선에 위치한 절점 들에 대한 민감도를 구한다. 성형해석의 결과로부터 목표형상과의 오차를 구하고 본 논문에서 제안된 민감도법을 이용하여 블랭크 형상을 수정한다. 민감도법의 적용과정에서 다음과 같은 사항을 고려하였다.

1. 변형경로는 초기상태와 최종상태간의 경로를 10단계로 나누어 해석.
2. 최종목표형상을 편차행정 20mm에서 플랜지에서의 트리밍 여유폭을 2.0mm로 설정.
3. 목표형상과의 형상허용오차는 각 절점당 최대 0.5mm로 설정.

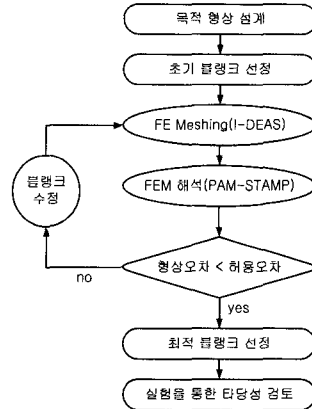


Fig. 3 Schematic diagram for optimal blank design

Table 1 Material property

Young's modulus	$E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$
Poisson's ratio	$\nu = 0.3$
Sheet thickness	$t_0 = 0.760 \text{ mm}$
Lankford value	$R = 1.377$
Stress-Strain curve	$\sigma = 514.0 (0.001 + \varepsilon_p)^{0.2} \text{ MPa}$
Coulomb Friction Coefficient	$\mu = 0.24$ (punch / sheet) $\mu = 0.12$ (die & holder / sheet)

4. 유한요소분할은 상용 CAD시스템 I-DEAS[®]를 이용.
5. 성형해석은 성형해석 S/W인 PAM-STAMP[®]를 사용.
6. 최초의 초기 블랭크는 원형으로 하고 크기는 제품의 크기에 따라 적절히 선정.

3. 결과 및 고찰

3.1 성형해석에 사용된 물성치

해석에 사용된 재료는 냉간 압연강판으로 인장 시험을 통하여 얻었으며 Table 1과 같은 물성치를 얻었다. 또한 본 논문에서 제안된 방법의 타당성을 확인하기 위하여 실험을 수행하였으며 이때 최적블랭크는 와이어 커팅법으로 제작하였다.

3.2 사각형 컵의 성형해석

본 논문에서 제시한 민감도법을 이용하여 사각형 컵의 최적블랭크 설계에 적용하였다. Fig. 4는 실험과 수치해석에 사용된 사각형 컵 디프드로잉 공정에 사용된 금형의 기하학적 형상을 나타내고 있다. 금형면은 상용 CAD system인 I-Deas[®]를

사용하여 모델링하였으며 금형면 정보는 유니버설 파일(universal file)의 형태로 Pam-Stamp® 로 넘겨 주었다. 최적의 블랭크형상을 결정해 주기 위해 성형해석을 수행하는데 최초 $\phi 84$ 의 원형 블랭크로부터 시작하였다.

Fig. 5(a)는 원형블랭크로 성형해석한 결과로 최종상태인 펀치행정 20mm일 때의 플랜지의 외곽선의 모양으로 성형모양이 목표형상과 차이가 나타났으나 Fig. 5(b)는 단 1회의 블랭크 형상의 수정만으로 플랜지 외곽선의 모양이 목표형상과의 형상오차 이내에 들어갔고 따라서 이를 최적 블랭크로 하였다.

Fig. 6은 원형 블랭크와 최적블랭크를 이용하여 유한요소 해석한 성형 후 제품의 형상을 3차원적으로 나타낸 형상이고, Fig. 7은 $\phi 84$ 인 원형 블랭크와 최적블랭크의 2가지 경우에 대하여 성형해석과 실험을 각각 수행하여 외곽선의 형상을 비교한 것이다.

실험 결과와 수치해석 결과가 거의 일치하고 있어 본 연구에서 제안하는 민감도법에 의한 최적 블랭크 설계방법이 타당할뿐만 아니라 효과적임을 보여준다.

Fig. 8은 실험에 의한 성형후의 제품의 모양으로 원형블랭크의 경우 플랜지 부위가 일정하지 않음을 알 수 있으나 최적블랭크를 사용할 경우 균일한 폭의 플랜지가 남아 있음을 보여준다.

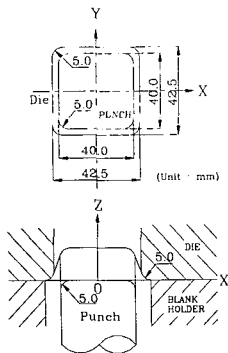
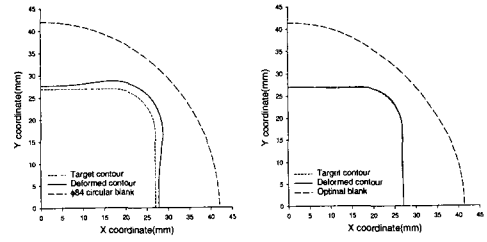
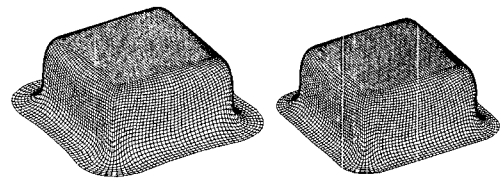


Fig. 4 Die geometry for square cup drawing



(a) $\phi 84$ Circular blank (b) Optimal blank

Fig. 5 Flange contours after deformation(square)



(a) Circular blank (b) Optimal blank

Fig. 6 Comparison of the deformed shapes(square)

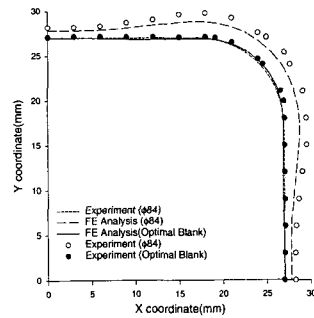
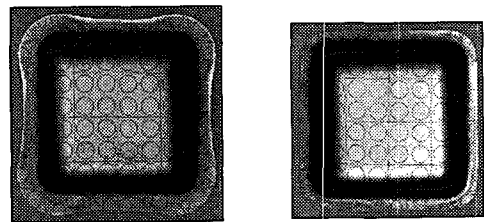


Fig. 7 Comparison of flange contours(square cup)



(a) Circular blank (b) Optimal blank

Fig. 8 Photos of square cup drawing specimen

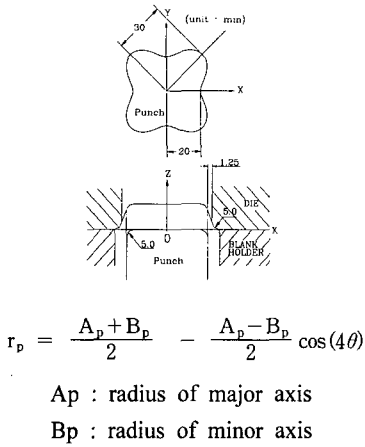


Fig. 9 Die geometry for clover cup drawing

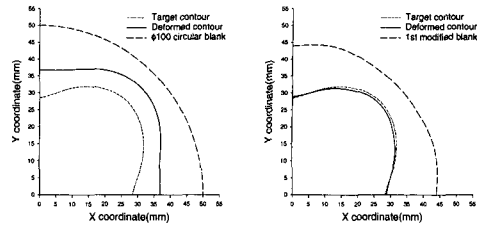
3.3 클로버형 컵의 성형해석

민감도법을 사각형 컵보다 모양이 약간 더 복잡한 클로버형 컵의 디프드로잉에 적용시켜 보았다. Fig. 9는 실험과 수치해석에 사용된 금형의 기하학적 형상을 나타내고 있다.

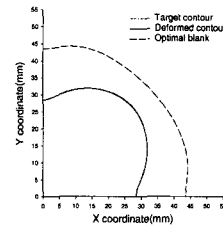
정사각형 컵에서와 마찬가지로 금형면은 상용 CAD 시스템인 I-Deas[®] 에서 모델링하였고 모델링된 금형면은 유니버설 파일의 형태로 변환하여 해석에 사용하였다.

최적의 블랭크형상을 결정해 주기 위해 성형해석을 수행하는데 최초 ϕ 100의 원형 블랭크로부터 시작하였다. Fig. 10(a)는 원형블랭크로 성형해석한 결과로 최종상태인 펀치행정 20mm일 때의 플랜지의 외곽선의 모양으로 성형모양이 목표형상과 차이가 나타났으나 Fig. 10(c)의 2회의 수정만으로 형상오차가 허용오차를 만족하였으며 이를 최적 블랭크로 결정하였다. Fig. 10(c)를 보면 최적블랭크로 성형해석한 결과 플랜지 외곽선의 모양이 목표형상과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 원형 블랭크와 최적블랭크를 이용하여 유한요소 해석한 성형후 제품의 형상을 3차원적으로 나타낸 형상이고, Fig. 12는 ϕ 100인 원형 블랭크로부터 출발하여 설계단계별 최종플랜지의 모양과 최적블랭크로 실험을 수행한 결과 얻어진 외곽선의 형상을 비교한 것이다. 실험결과 최적블랭크를 사용한 경우 플랜지의 외곽선의 모양이 목표형상과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

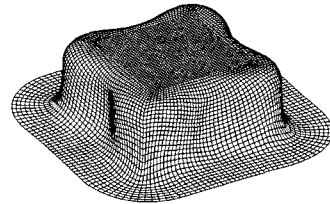


(a) ϕ 100 blank (b) 1st modification

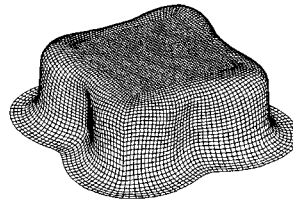


(c) Optimal blank

Fig. 10 Flange contours after deformation(clover)



(a) Circular blank



(b) Optimal blank

Fig. 11 Comparison of the deformed shapes(clover)

Fig. 13은 실험에 의한 성형후의 제품의 모양으로 원형블랭크의 경우 플랜지 부위가 일정하지 않음을 알 수 있으나 최적블랭크를 사용할 경우 균일한 폭의 플랜지가 남아 있음을 알 수 있다.

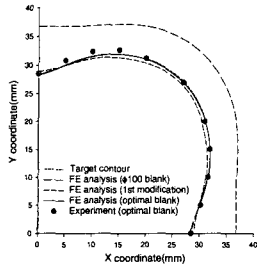


Fig. 12 Comparison of flange contours(clover)

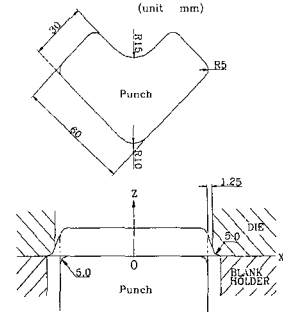
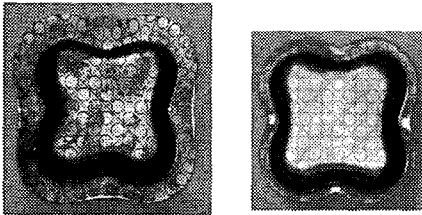


Fig. 14 Die geometry for L-shape cup drawing



(a) Circular blank (b) Optimal blank

Fig. 13 Photos of clover cup drawing specimen

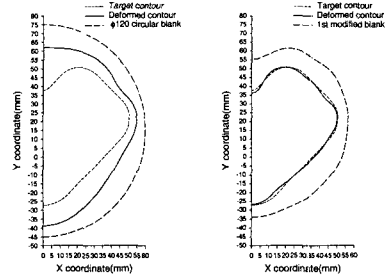
3.4 'L'자형 컵의 성형해석

본 논문에서 제시한 방법을 사각형과 클로버형 컵의 형상보다 더 복잡하고 오목한 부위에서 재료의 유입이 복잡하게 되는 등 복잡한 형상의 금형에서의 적용가능성을 타진해 볼 수 있는 L형 컵의 형상에 적용시켜 보았다.

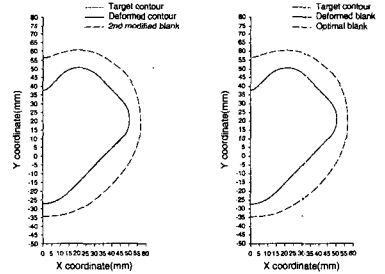
Fig. 14는 금형의 기하학적 형상을 나타내고 있으며 앞서와 마찬가지로 금형면은 I-Deas® 에서 모델링하였으며 금형면을 유니버설 파일의 형태로 변환하여 해석에 사용하였다.

Fig. 15(a)는 $\phi 120$ 인 원형블랭크로 성형 해석한 결과로 최종상태인 펀치행정 20mm 일때의 플랜지의 외곽선의 모양으로 성형모양이 목표형상과 차이가 나타났으나 Fig. 15(d)의 3회의 수정을 통하여 결정된 최적블랭크로 성형해석한 결과 플랜지 외곽선의 모양이 목표형상과 전구간에서 허용오차이내에 들어가 3회의 수정을 거친 블랭크를 최적블랭크로 하였다.

Fig. 16은 원형 블랭크와 최적블랭크를 이용하여 유한요소 해석한 성형후 제품의 형상을 3차원적으로 나타낸 형상이고, Fig. 17은 $\phi 120$ 인 원형 블랭크로부터 출발하여 설계단계별 최종 플랜지의 모양과 최적블랭크로 실험을 수행한 결과 얻어진 외곽선의 형상을 비교한 것이다. 코너부위에서



(a) $\phi 120$ circular blank (b) 1st modification

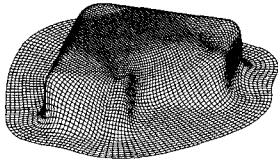


(c) 2nd modification (d) Optimal blank

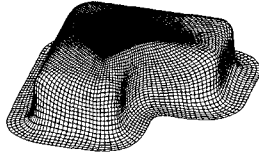
Fig. 15 Flange contours after deformation(L-shape)

다소의 오차를 보여주고 있으나 나머지 부분에서는 실험결과와 수치해석의 결과가 거의 일치하고 있어 본 연구에서 제안한 민감도법이 복잡한 형상의 제품에서도 성공적으로 적용될 수 있음을 보여준다.

Fig. 18은 실험에 의한 성형후의 제품의 사진으로 원형블랭크의 경우 성형후 플랜지 외곽선이 불균일한 모양으로 나타났으나 최적블랭크를 사용하여 플랜지 부위가 일정하게 나타나고 있어 유동이 매우 복잡하고 플랜지의 모양에 민감하게 변화하는 문제에도 성공적으로 적용됨을 알 수 있다.



(a) Circular blank



(b) Optimal blank

Fig. 16 Deformed shapes of L-shape cup

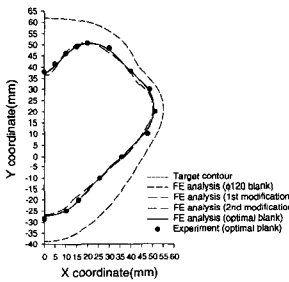
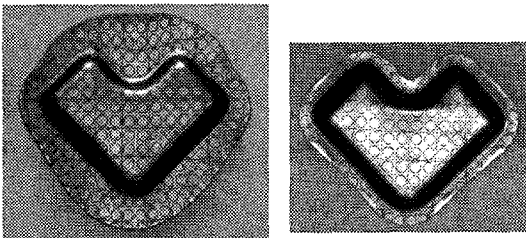


Fig. 17 Comparison of flange contours(L-shape)



(a) Circular blank (b) Optimal blank

Fig. 18 Photos of L-shape cup drawing specimen

4. 결론

본 연구에서는 최적의 초기 블랭크를 설계하는 방법을 제안하고, 여러가지 형상의 디프드로잉에 대하여 적용하여 예측된 최적블랭크형상으로 블랭크를 제작하여 실험을 하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 민감도법에 의한 새로운 최적 블랭크설계 방법을 제안하였다.
- (2) 제안된 방법을 이용하여 설계된 블랭크로 수치해석을 실행한 결과 최종제품에서의 목표형상과 잘 일치하고 있음을 확인하였다.
- (3) 제안된 방법을 이용하여 설계된 블랭크를 가공하여 실험한 결과 목표형상과 잘 일치하는 제품이 얻어짐을 확인하였고, 실험결과와 수치해석결과와 근사한 결과를 얻을 수 있었다.
- (4) 본 연구에서 제안된 방법을 여러 가지 형상의 제품성형에 적용한 결과 본 방법이 재료의 유입이 복잡한 문제에도 잘 적용됨을 확인할 수 있어 제안된 방법이 우수할 뿐만 아니라 일반적임을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Gloeckl H., and Lange K., 1983, "Computer Aided Design of Blanks for Deep Drawn Irregular Shaped Components," *proceeding 11th NAMRC*, pp. 243~251.
- (2) Vogel J.H., and Lee D., 1990, "An Analytical Method for Deep Drawing Process Design," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 32, No. 11, pp. 891~907.
- (3) Chen X. and Sowerby R., 1992, "The Development of Ideal Blank Shapes by the Method of Plane Stress Characteristics," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 2, pp. 159~166.
- (4) Chen X. and Sowerby R., 1996, "Blank Development and the Prediction of Earing in Cup Drawing," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 8, No. 5, pp. 509~516.
- (5) Kuwabara T., and Si W.H., 1997, "PC-Based Blank Design System for Deep-Drawing Irregularly Shaped Prismatic Shells with Arbitrarily Shaped Flange," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 63, pp. 89~94.
- (6) Sowerby R., Duncan J.L., and Chu E., 1986, "The Modelling of Sheet Metal Stampings," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 28, No. 7, pp. 415~430.
- (7) Blount G.N., and Fischer B.V., 1995,

- "Computerised Blank Shape Prediction for Sheet Metal Components Having Doubly-Curved Surfaces," *International Journal of Production Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 993~1005.
- (8) Guo Y.Q., Batoz J.L., Detraux J.M., and Duroux P., 1990, "Finite Element Procedures for Strain Estimations of Sheet Metal Forming Parts," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 30, pp. 1385~1401.
- (9) Toh C.H., and Kobayashi S., 1985, "Deformation Analysis and Blank Design in Square Cup Drawing," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 25, No. 1, pp. 15~32.
- (10) Kim N., and Kobayashi S., 1986, "Blank Design in Rectangular Cup Drawing by an Approximate Method," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 26, No. 2, pp. 125~135.
- (11) Iseki H., and Sowerby R., 1995, "Determination 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. 473~479.
- (12) Barlat O., Batoz J.L., Guo Y.Q., Mercier F., Naceur H., and Knopf-Lenoir C., 1996, "Optimum Blank Design of Blank Contours Using the Inverse Approach and a Mathematical Programming Technique," *Proceeding Numisheet 96*, pp. 178~185.
- (13) Lee C.H., and Huh H., 1997, "Blank design and strain prediction of automobile stamping parts by an inverse finite element approach," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 63, pp. 645~650.
- (14) Barlat F., Chung K., and Richmond O., 1994, "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.
- (15) Kim S.D., Park M.H., Kim S.J., and Seo D.G., 1998, "Blank Design and Formability for Non-Circular Deep Drawing Processes by the Finite Element Method," *Journal of Material Processing Technology*, 75, pp. 94~99.
- (16) Kim J.Y., Kim N.S., and Huh M. S., 1997, "Blank Design of Automobile Cross Member Using the Computer Aided Engineering," *Journal Korean Society of CAD/CAM Engineers '97*, pp. 239~246.
- (17) Kim J.Y., Kim N.S., and Huh M.S., 1998, "Optimum Blank Design of Automobile Sub-Frame," *Korean Society for Technology of Plasticity Spring Annual Meeting*, pp. 185~195.
- (18) Zhaotao Z., and Bingwen L., 1986, "Determination of Blank Shapes for Drawing Irregular Cups Using an Electrical Analogue Method," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 28, No. 8, pp. 499~503.
- (19) Xueshan L., and Bingwen L., 1986, "Modelling of Flange Deformation of Irregular Drawn Cups Using a Fluid Analogy," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 28, No. 8, pp. 491~497.