

# 민감도법을 이용한 최적블랭크 설계법의 일반적인 모양의 금형에의 적용

심현보\* · 손기찬\*\* · 황현태\*\*  
(1999년 9월 28일 접수)

## An Application of Optimal Blank Design by the Sensitivity Analysis to the Stampings of General Shaped Parts

H. B. Shim, K. C. Son and H. T. Hwang

### Abstract

The optimal blank design method by sensitivity analysis has been applied to the formings of oil-pan, tailored blank and front panel as the examples. Die geometry is prepared by a commercial CAD system. Excellent results has been obtained 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 practical forming processes.

**Key Words** : Optimal Blank, Blank Design, Sensitivity Analysis

### 1. 서론

박판성형 공정 중 블랭크의 설계는 짧은 시간과 적은 노력으로 최적의 블랭크를 설계하는 방법이 요구되어진다. 블랭크설계는 현장 작업자의 숙련된 경험을 요하였고 이에 따른 시행착오로 제품의 개발에 많은 시간과 비용이 소비되어 왔다. 이러한 시행착오를 줄이기 위해 여러 방법이 고려되어 왔으며 근래에 들어 컴퓨터의 발달과 함께 수치해석 기법의 발전으로 유한요소법을 이용한 박판성형 공정의 해석이 신뢰할 만한 수단으로 사용되고

있다.

초기 블랭크 설계 예측 방법으로 작도법에 의한 소성해법인 미끄럼선장법<sup>(1~5)</sup>을 이용한 방법과 변형된 형상에서의 표면적을 면적을 일정하게 유지시키면서 평면으로 투영하는 기하학적 사상법<sup>(6,7,8)</sup>을 들 수가 있으며 최근의 유한요소해석 결과를 이용한 시행착오에 의한 면적감법<sup>(9,10)</sup>, 유한요소 역해석법<sup>(11,12,13)</sup>, 최소일의 원리에 입각한 이상성형이론을 이용하는 방법<sup>(14)</sup>, 유한요소 역추적법<sup>(15)</sup>을 들 수가 있다. 그밖에 플랜지 외곽의 절점의 거동을 선형적으로 보간하는 방법<sup>(16)</sup>, 그리고 롤백(roll

\* 영남대학교 기계공학부  
\*\* 영남대학교 대학원

back)법<sup>(17)</sup>도 있다.

실험적인 방법으로는 전압분포장과 금속변형속도장의 상사성에 입각한 방법,<sup>(18)</sup> 그리고 고점성 유체유동과 금속변형속도장의 상사성에 입각한 방법<sup>(19)</sup> 등도 있다.

최근 손기찬 등은 민감도법<sup>(20-22)</sup>에 의한 최적블랭크 설계기법을 제안하고 이를 간단한 형상인 정사각형 컵, 클로버형 컵, 그리고 L형상의 컵을 대상으로 성형 후 균일한 트림 여유(trimming allowance)를 가지는 최적블랭크 형상을 설계하고 이를 실험으로 확인하여 타당성을 입증한 바 있다. 본 논문에서는 이 방법을 이용하여 레이저 용접소재의 정사각형 컵 성형, 오일팬의 성형, 그리고 Numisheet '99의 벤치마크 문제인 AUDI의 front door panel의 최적블랭크에 적용하여 실제 공정에의 적용가능성을 조사하였다.

## 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.

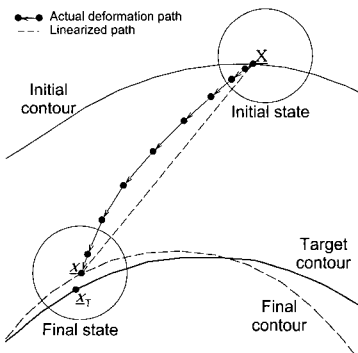


Fig. 1 Movement of a material point

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.

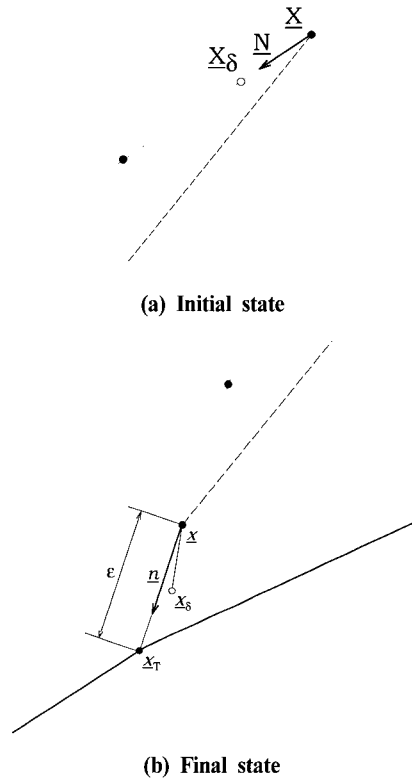


Fig. 2 Sensitivity and Error Correction

Fig.2(a)과 Fig.2(b)는 각각 변형의 초기와 최종단계에서의 절점의 움직임을 벡터 형태로 표현한 것이다.  $N$ 은 첫 번째 스텝에서의 절점이 움직이는 방향의 단위벡터, 그리고  $n$ 은 최종단계에서의 절점이 움직이는 방향의 단위벡터이다.  $X_0$ 는 오프셋 블랭크의 외곽선상의 절점의 위치를 나타내고 있으며 이는 원래의 블랭크의 모양을 표현하는 외곽선상의 절점의 위치  $X$ 로부터

$N$  방향으로 미소량  $\delta$ 만큼 오프셋 시킨 것으로 다음과 같이 구한다.

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

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

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

(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  $\varepsilon$ 이 모든 절점에서 허용오차 이하가 될 때까지 해석 및 절점 이동의 방법을 Fig. 3에 표시한 순서대로 수차례 반복하여 구한다.

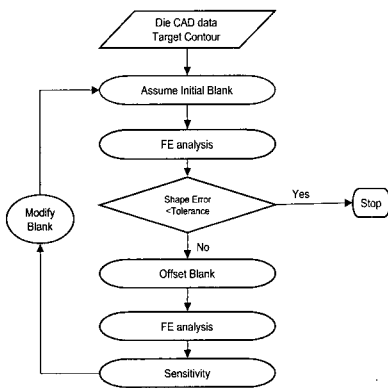


Fig. 3 Flow Chart for optimal blank design

### 3. 일반적인 금형에의 적용

#### 3.1 레이저 용접 판재의 정사각형컵 성형

민감도법을 이용한 최적블랭크 설계방법을 두께1.2mm와 0.8mm의 판재를 레이저 용접한 소재의 정사각형 컵 성형에 적용하였다. Fig.4는 수치해석에 사용된 사각형 컵 디프 드로잉 공정에 사용된 금형의 기하학적 형상을 나타내고 있다. 금형면은 상용 CAD system인 I-Deas<sup>®</sup>를 사용하여 모델링하였으며 금형면 정보는 유니버설 파일(universal file)의 형태로 Pam-Stamp<sup>®</sup>로 넘겨 주었다. 블랭크 모양의 초기 가정으로 직경 84mm의 원형 블랭크를 택하였고 민감도를 구하기 위한 미소 편차량  $\delta$ 는 0.5mm로 택하였으며 목표형상은 펀치행정 20mm에서 2mm의 균일한 플랜지 트리밍 여유폭을 가지는 형상으로 설정하였다.

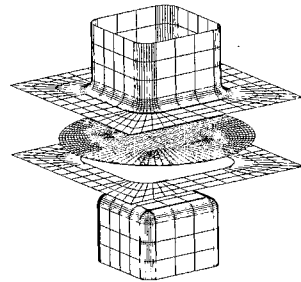
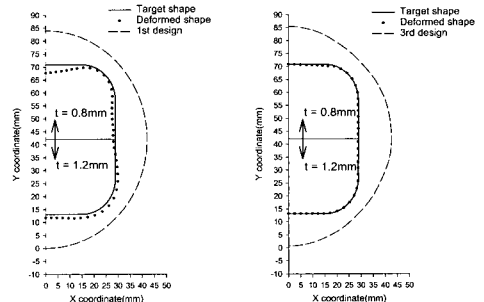


Fig. 4 Die geometry for square cup drawing

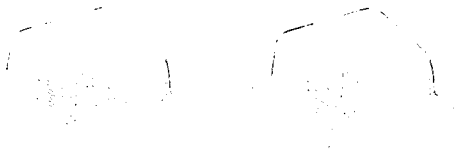
Fig.5(a)는 최초로 가정한 직경 84mm의 원형 블랭크로 성형 해석한 결과로 펀치행정 20mm 일 때의 플랜지 외곽선 모양으로 성형모양이 목표형상과 차이가 있으며, Fig.5(b)는 민감도법을 이용하여 블랭크를 2차 수정후의 최종성형모양을 나타내고 있는데 플랜지 외곽선의 모양이 목표형상과의 형상오차 이내로 들어갔고 따라서 이를 최적블랭크로 하였다.



(a) circular blank (b) 2nd modification

Fig. 5 Flange contours after deformation

Fig.6은 원형 블랭크와 최적 블랭크를 이용하여 유한 요소 해석한 후 제품의 형상을 3차원적으로 나타낸 형상이며 원형 블랭크의 경우 플랜지 부위가 일정하지 않음을 알 수 있으나 최적블랭크를 사용할 경우 균일한 폭의 플랜지가 남아 있음을 보여준다. 최근 자동차 산업에서 널리 이용되고 있는 레이저 용접된 판재에서도 민감도법이 성공적으로 적용되고 있음을 보여준다.



(a) circular blank (b) 2nd modification

Fig. 6 Comparison of the deformed shapes (square cup)

### 3.2 Oil-Pan의 성형

오일팬은 깊이가 2단으로 되어 있기 때문에 깊이가 얇은 쪽과 깊은 쪽과의 드로잉속도의 차이에 의한 주름현상이 얇은 쪽의 벽면부근에서 발생되기 때문에 드로잉속도를 일치시켜주기 위한 목적으로 드로오비드(draw bead)를 설치해 준다. 따라서 오일팬 형상의 최적블랭크를 설계하기 위해서는 컵의 높이차 및 드로오비드의 영향을 모두 고려해야 하기 때문에 목표형상을 제공해주는 최적블랭크를 설계하기가 쉽지 않은 형편으로 실제로 오일팬 생산업체에서는 금형의 트라이아웃 과정에서 시행착오법으로 블랭크의 모양을 결정해 주고 있기 때문에 재료의 실수율이 낮고 이에 따른 소재 원가부담이 상당한 편이다.

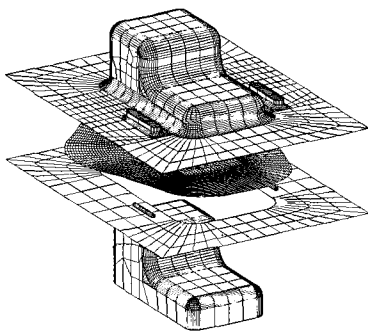
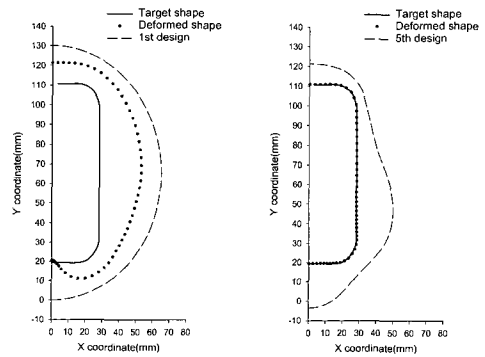


Fig. 7 Die geometry for Oil-Pan drawing

이러한 매우 복잡한 변형역학을 지닌 오일팬의 성형에 민감도법을 적용하여 보았다. Fig.7은 수치해석에 사용된 오일팬 드로잉 공정에 사용된 금형의 기하학적 형상을 나타내고 있다.

정사각형 컵의 성형에서와 마찬가지로 금형면은 상용 CAD system인 I-Deas<sup>®</sup>에서 모델링 하였고 금형면은 유니버설 파일의 형태로 변환하여 해석에 사용하였다.

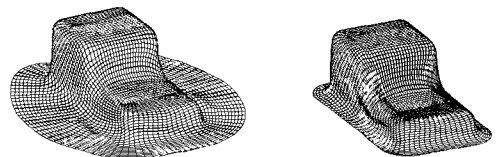
블랭크 모양의 초기 가정으로 직경 130mm의 원형 블랭크를 택하였고 앞의 정사각형 컵의 성형에서와 같이 민감도를 구하기 위한 미소 편차량은 0.5mm로 택하였으며 목표형상은 편치행정 20mm에서 2mm의 균일한 플랜지 트리밍 여유폭을 가지는 형상으로 설정하였다.



(a) circular blank (b) 4th modification

Fig. 8 Flange contours after deformation

Fig.8(a)는 직경 130mm 원형 블랭크로 성형 해석한 결과인데 최종상태에서 플랜지의 외곽선의 모양으로 성형모양이 목표형상과 많은 차이가 나타났는데, Fig. 8(b)에서 4회의 수정으로 플랜지 외곽선의 형상이 목표형상과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉 4회 수정후 블랭크의 모양이 본 공정에서의 최적블랭크가 된다.



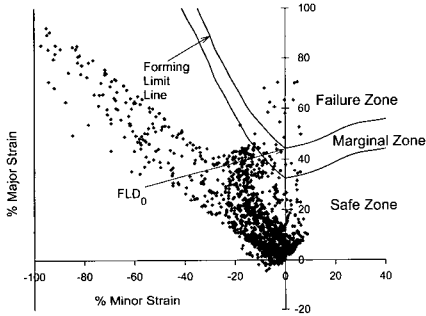
(a) Circular blank (b) Optimal blank

Fig. 9 Comparison of the deformed shapes (Oil-Pan)

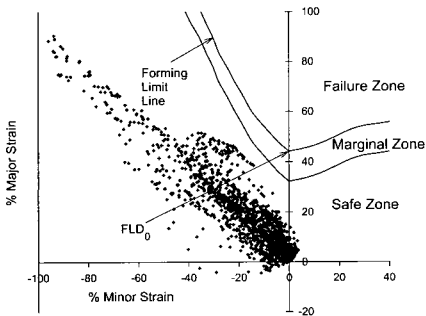
Fig.9는 원형 블랭크와 최적블랭크를 이용하여 유한요소 해석한 성형 후 제품의 형상을 3차원적으로 나타낸

형상으로, 최초로 가정한 직경 130mm의 원형 블랭크는 성형 후 플랜지의 면적이 불균일하게 많이 남아 있으나 최적블랭크의 경우 성형 후에 목표한 바의 균일한 트리밍 여유폭을 가지고 있음을 보여준다.

초기 블랭크의 형상에 따라 성형성에 많은 영향이 있으므로 원형 블랭크와 제안되어진 최적 블랭크의 성형성을 성형한계도(FLD)를 이용하여 알아보았다. Fig.10에서 나타난 바와 같이 원형블랭크에서는 과단으로 판정되어지는 요소들의 분포를 볼 수 있으나 최적블랭크에 의한 성형에서는 순수 전단 상태(pure shear state)에 놓여있어 두께분포가 일정한 성형품을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이것은 최적블랭크가 성형 중 재료의 유동이 더 원활하여 양질의 제품을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.



(a) Circular blank



(b) Optimal blank

Fig. 10 FLD for oil-pan drawing

3.2 AUDI Front door panel의 성형

민감도법을 Numisheet '99의 벤치마크 문제인 AUDI사의 front door panel에 적용해 보았다. IGES 형식으로 제공 받은 금형면 정보를 이용하였으며 초기블랭크 모양

도 같이 제공받았다. 이 문제에서는 바인더랩 및 드로오비드가 있고 금형면의 정보가 CAD 형식으로 되어 있다.

Fig.11은 수치해석에 사용된 오일팬 드로잉 공정에 사용된 금형의 기하학적 형상을 나타내고 있는데 제공되어진 IGES 형식의 파일을 상용 CAD system인 I-Deas®에서 받아들인 후 요소분할을 한 뒤 유니버설 파일의 형태로 변환하여 해석에 사용하였다.

Fig. 12(a)는 Numisheet 99'에서 제시한 초기 블랭크로 성형 해석한 결과로 최종상태에서 플랜지 외곽선의 성형모양이 목표형상과 약간 차이가 나타났으나 Fig. 12(b)의 2회의 수정을 통하여 결정된 최적블랭크로 성형 해석한 결과 플랜지 외곽선의 모양이 목표형상과 전구간에서 허용오차이내에 들어감을 확인할 수 있다.

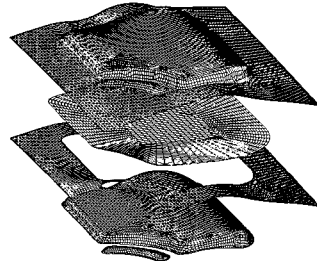
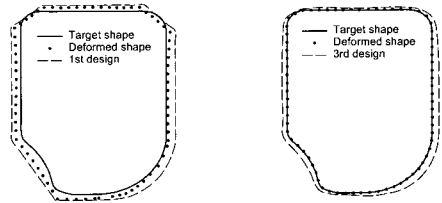


Fig. 11 Die geometry for front door panel



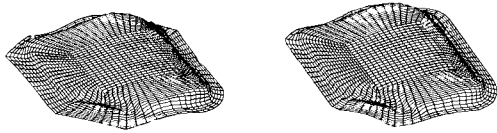
(a) Given initial blank (b) 2nd modification

Fig. 12 Flange contours after deformation

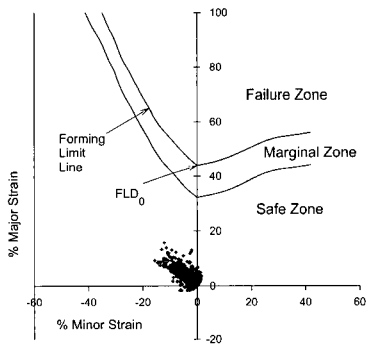
Fig.13은 Numisheet '99에서 제공된 초기 블랭크와 최적블랭크를 이용하여 유한요소 해석한 성형 후 제품의 형상을 3차원적으로 나타낸 형상으로, 제공된 초기 블랭크는 성형 후 플랜지의 면적이 불균일하게 남아 있으나 최적블랭크의 경우 성형후에 목표한 바의 균일한 트리밍 여유폭을 가지고 있음을 보여준다.

Fig.14는 Numisheet '99에서 제공된 블랭크와 최적블랭크의 성형성을 성형한계도(FLD)를 이용하여 나타내었는데 제공된 초기 블랭크의 형상이 이미 최적블랭크와

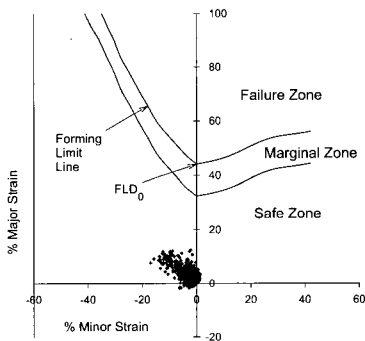
형상이 비슷한 관계로, 큰 차이는 보이지 않지만 최적블랭크의 성형성이 우수함을 알 수 있다.



(a) Given initial blank (b) 2nd modification  
**Fig. 13 Comparison of the deformed shapes (front door panel)**



(a) Given initial blank



(b) Optimal blank

**Fig. 14 FLD for front door panel**

이 문제에서는 일반적인 금형에서 보여줄 수 있는 특성인 바인더 랩, 드로우비드, 그리고 CAD 형식의 금형면을 모두 포함하고 있기 때문에 본 공정을 성공적으로 해석함에 따라 실제 자동차 부품의 생산등에 사용되는 CAD로 설계된 자유곡면형식의 금형면에 대하여도 민감도법이 성공적으로 적용되고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 레이저 용접된 관재, 복잡한 변형역학을 지닌 오일팬의 성형, 그리고 드로우 비드, 바인더 랩이 있는 일반적인 금형면에도 성공적으로 적용함으로써 민감도법에 의한 최적블랭크 설계 기법이 실제 산업현장 문제에의 적용가능성을 확인하였다. 아울러 최적블랭크가 성형성 향상에 기여하고 있음을 확인할 수 있어 최적블랭크의 근본 목적인 재료의 수율향상 뿐만 아니라 특히 성형이 어려운 형상의 성형시 큰 효과가 있을 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

- (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.
- (20) 손기찬, 1998, 민감도법에 의한 최적블랭크 형상 설계에 관한 연구, 영남대학교 석사학위 논문.
- (21) Shim, H.B., Son, K.C., and Kim, K.H., 1999, "Optimum Blank Shape Design by Sensitivity Analysis", *Proceedings of Numisheet '99*, pp 523~528.
- (22) 심현보, 손기찬, 2000, 민감도법에 의한 최적블랭크 형상설계에 관한 연구, 대한기계학회 논문집 A권 제 24권 제 1호, pp 79~86.