

# 목표윤곽선이 3 차원 곡선인 형상의 최적블랭크 설계를 위한 형상오차 측정법

심현보

## Method of Shape Error Measurement for the Optimal Blank Design of Shapes with 3D Contour Lines

H. B. Shim

(Received September 2, 2014/ Revised November 11, 2014 / Accepted November 19, 2014)

### Abstract

After a short review of the iterative optimal blank method, a new method of measuring the shape error for stamped parts with 3D contour lines, which is an essential component of the optimal blank design, is proposed. When the contour line of the target shape does not exist in a plane, but exists in 3D space, especially when the shape of the target contour line is very complicated as in the real automotive parts, then the measurement of the shape error is critical. In the current study, a method of shape error measurement based on the minimum distance is suggested as an evolution of the radius vector method. With the proposed method, the optimal blank shapes of real automotive parts were found and compared to the results of the radius vector method. From the current investigation the new method is found to resolve the issues with the radius vector method.

**Key Words** : Optimal Blank, Shape Error, Minimum Distance, Radius Vector Method

### 1. 서 론

최적블랭크는 원하는 형상으로 성형이 되는 초기 블랭크의 모양으로 엄밀하게는 성형후 트리밍 공정이 없이 그대로 사용이 가능한 제품을 생산하는 초기 블랭크의 모양을 뜻한다. 그렇지만 실제로는 공정변수의 미세한 변화에 대응하거나 성형후 윤곽선 형상의 조절을 통한 성형성제어[1]를 위해 제품의 형상에 약간의 여유를 부여하여 목표형상을 설정하고, 원하는 형상으로 성형이 되는 초기블랭크의 모양으로 정의하는 것이 보다 현실적이다.

이러한 최적블랭크는 소재이용을 증가라는 분명한 장점 외에도 성형성의 향상과 더불어 결과적으로는 제품개발기간 단축 등의 효과를 얻을 수 있다 [1,2].

최적블랭크가 지닌 이러한 장점 때문에 일찍부터 많은 설계방법이 개발되어 왔다. 지금까지 발표된 최적블랭크 설계방식은 역추적방식과 반복수정방식의 크게 2가지 범주로 분류할 수가 있다. 역추적방식으로는 작도법에 의한 소성해법인 미끄럼선장법 [3], 변형된 형상에서의 표면적을 면적을 일정하게 유지시키면서 평면으로 투영하는 기하학적 사상법 [4], 유한요소역해석법[5], 최소일의 원리에 입각한 이상성형방법[6], 유한요소역추적법[7]등을 들 수가 있다. 역추적방식에서는 예측된 블랭크형상으로 다시 해석을 수행하여 얻어진 최종형상이 목표형상과 차이가 나더라도 이를 보완할 수 있는 수단이 없기 때문에 예측의 정확도는 제한적이다.

반복수정방식은 임의로 가정된 블랭크 형상으로 성형해석을 수행한 뒤 최종형상과 목표형상의 차이,

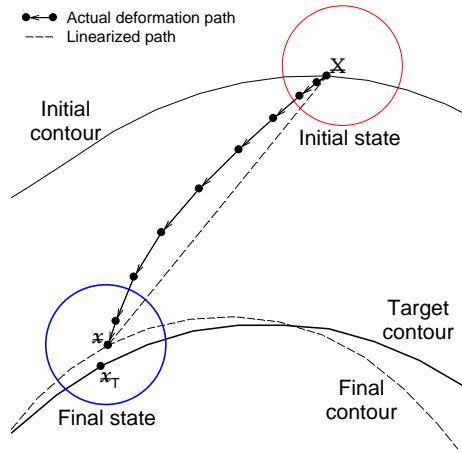


Fig. 1 Movement of nodal point located on the contour

즉 형상오차를 측정하고, 이 형상오차를 바탕으로 블랭크형상을 다시 수정하여 형상오차가 일정한도 이내에 들 때까지 해석을 반복하는 방식이다. 면적 가감법[8]과 저자에 의해 발전되어 온 일련의 최적 블랭크 설계법, 즉 민감도법[2], 초기속도법[9], 반경 벡터법[10] 등이 이 방식에 포함되며 예측의 정확성 뿐만 아니라 수렴성도 매우 우수함이 확인되었고, 윤곽선형상이 평면에 있지 않는 매우 복잡한 실제 자동차부품의 성형에도 성공적으로 적용될 수 있음을 입증하였다.

본 논문에서는 저자에 의해 제안된 일련의 최적 블랭크 설계법에 대하여 최적블랭크 설계법의 두가지 핵심사항인 형상오차를 측정하는 방법과 블랭크 형상을 수정하는 방법을 각각 비교하고 목표형상의 윤곽선이 평면상에 있지 않는 경우에도 적용가능한 형상오차를 측정하는 방법을 제안하고자 한다.

Fig. 1은 블랭크 외곽선상에 위치한 임의의 절점이 이동하는 경로를 나타낸 것으로,  $X$ 는 그 절점의 변형전 위치, 그리고  $x$ 는 변형후 위치를 나타낸다. 최종위치  $x$ 에서 절점이 이동하는 방향으로 연장선과 목표형상의 외곽선과 만나는 점을  $x_T$ 로 표현하였다.

실선은 블랭크 외곽선상의 절점들이 실제로 이동하는 경로를, 점선은 절점의 최초위치와 최종위치를 직선으로 연결한 것으로 실제 이동경로는 비선형임을 보여준다. 즉 이동경로가 직선적이라면 목표형상과 성형후 형상의 차이인 형상오차를 측정할 때 최초위치와 최종위치를 연결한 직선방향으로 거리를

Table 1 Comparison of Shim's Optimal Blank Design Method

Method	Req'd # of Analysis	Shape Error Measure	Blank Shape Modification	
			Direction	Magnitude
Sensitivity Method	2	Final Moving Direction	Initial Moving Direction	Sensitivity & Shape Error
Initial Nodal Velocity Method	1	Radius Vector (Final)	Radius Vector (Initial)	Nodal Velocity & Shape Error
Radius Vector Method	1	Radius Vector (Final)	Radius Vector (Initial)	Shape Error

측정하면 되고, 또 형상오차를 보정하기 위한 블랭크형상의 수정도 이와 동일한 방향으로 절점을 이동시키면 된다. 그렇지만 이동경로가 직선적이지 않을 경우 형상오차를 측정할 때 측정방향을 택하는 방식뿐만 아니라 블랭크형상을 수정하는 방법에도 유의할 필요가 있다.

Table 1은 저자에 의해 발전되어 온 3가지의 최적 블랭크법 즉 민감도법, 초기속도법과 반경벡터법을 서로 비교한 것으로 별도로 수행되는 유한요소 성형해석결과를 이용하여 윤곽선상에 위치한 절점을 대상으로 형상오차의 측정과 블랭크형상을 수정한다는 점에서 서로 유사하지만 각 방법마다 약간의 차이가 있다.

## 2. 최적블랭크 설계법의 비교

### 2.1 민감도법

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 변형의 초기와 최종단계에서의 외곽선에 위치한 절점  $m$ 의 움직임을 표현한 것이다.  $\underline{N}^m$ 은 첫 번째 스텝에서의 절점  $m$ 이 이동하는 방향의 단위벡터, 그리고  $\underline{n}^m$ 은 최종단계에서의 이동방향의 단위벡터를 나타내고 있다.  $\underline{X}_\delta^m$ 는 오프셋 블랭크의 외곽선상의 절점의 위치를 나타내고 있으며 이는 원래 블랭크의 외곽선상의 절점의 위치  $\underline{X}^m$ 로부터  $\underline{N}^m$ 방향으로 미소량  $\delta$ 만큼 오프셋시킨 것으로 다음과 같이 표현된다.

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

절점  $m$ 이 최종단계에서 이동하는 방향, 즉 단위 벡터  $\underline{n}^m$ 의 연장선과 목표윤곽선과 만나는 점의 위치를  $\underline{x}_T^m$ 으로 표현하였고, 이때  $\underline{x}^m$ 와  $\underline{x}_T^m$ 사이의

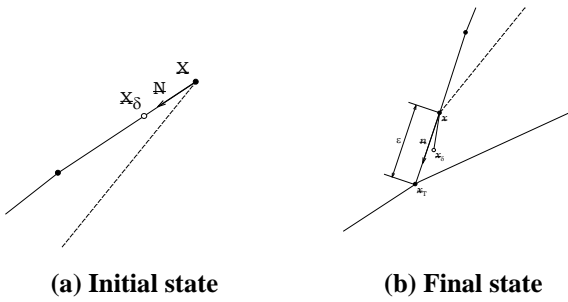


Fig. 2 Shape error measurement and blank shape correction in sensitivity method

거리가 형상오차  $\varepsilon^m$  이 된다.  $\underline{x}_\delta^m$  는 오프셋블랭크의 절점 m 의 위치, 즉  $\underline{X}_\delta^m$  의 변형후 위치로 식 (2)를 이용하면 각 절점에서의 민감도  $S^m$  가 구해진다.

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

(2)에서 얻은 민감도와 형상오차를 이용하여 i번째 축차에서의 절점의 위치  $\underline{X}_{(i)}^m$  는 다음의 식으로부터 구해진다. 형상오차를 측정하는 방법에 대해서는 다음 장에서 다시 설명하기로 한다.

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

즉 식(3)은 윤곽선상에 위치한 모든 절점에 대하여 각각 수행하며 최적블랭크는 형상오차  $\varepsilon^m$  이 모든 절점에서 허용치이하가 될 때까지 반복적으로 해석을 수행한다.

민감도법을 다시 정리하면, 절점이 이동하는 방향을 관찰하여, 최종단계에서의 이동방향으로 목표윤곽선과의 거리, 즉 형상오차  $\varepsilon^m$  를 측정하며, 다시 원래 블랭크에서 최초이동 방향으로 균일한 크기로 오프셋을 한 오프셋블랭크로 다시 해석을 수행한다. 식(2)를 이용하여 오프셋량에 따른 성형후 절점위치의 민감도를 구하고, 앞에서 측정한 형상오차  $\varepsilon^m$  를 고려하여 식(3)을 이용하여 최초이동방향으로 절점의 위치를 이동시켜 주는 과정으로 이루어져 있다. 즉 이 방법에서는 절점이 이동하는 방향에 유의하고, 한 번의 블랭크형상을 수정하기 위해 2회의 성형해석이 요구된다. 아울러 제품의 형상에 따라 강제회전이 크게 발생하는 경우 성형도중 윤곽선상의

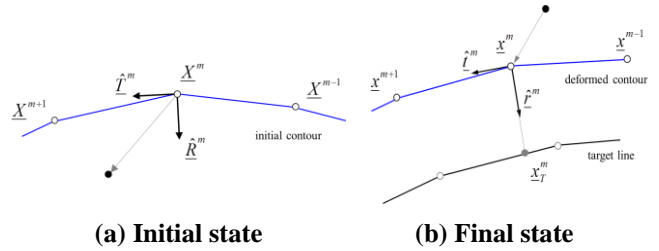


Fig. 3 Shape error measurement and blank shape correction (INOV and radius vector method)

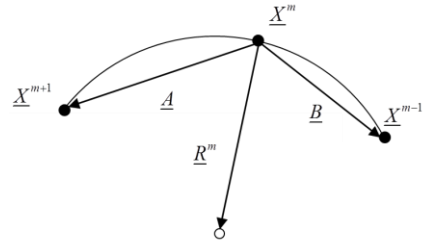


Fig. 4 Radius vector by the circle end condition

절점의 운동방향이 역전되는 경우가 있는데, 이 경우는 블랭크의 수정방향을 반대로 취해주어야 되는 문제점이 있다.

## 2.2 초기속도법 및 반경벡터법

Fig. 3에서  $\underline{X}^m$  는 변형전의 블랭크 외곽선상의 절점 m의 위치,  $\underline{x}^m$  는 이 점의 성형후 위치를 나타낸다. 최종위치  $\underline{x}^m$  에서 목표형상의 외곽선과 만나는 점  $\underline{x}_T^m$  는 민감도법과는 달리 인접하는 3 절점의 위치로 결정되는 원의 반경벡터방향으로의 연장선과 목표윤곽선과 만나는 점이 된다. Fig.3을 다시 관찰하면 절점의 이동방향을 반경방향성분과 접선방향성분으로 분해할 수 있는데 성형후 형상에서는 반경방향 성분은 절점에서 목표윤곽선까지의 거리, 즉 형상오차를 측정하기 위한 최단거리 방향으로, 성형전 형상에서는 블랭크형상의 수정에 가장 직접 관계되는 방향으로 간주할 수 있다. 다시 말하면 접선방향인  $\hat{t}^m$  및  $\hat{T}^m$  으로는 형상오차의 측정 및 블랭크형상의 수정에 직접 영향을 주지 않기 때문에 반경방향은 형상오차측정과 블랭크형상의 수정에 최급(Steepest Descent) 방향이 된다.

Fig. 4는 성형전 형상에서 절점 m에서의 인접하는 3 절점으로 결정되는 원의 반경방향의 벡터  $\underline{R}^m$  을 나타내었는데 이는 다음의 식(4)와 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \underline{A}^m &= \underline{X}^{m+1} - \underline{X}^m \\ \underline{B}^m &= \underline{X}^{m-1} - \underline{X}^m \\ \underline{C}^m &= \underline{A}^m \times \underline{B}^m \\ \underline{R}^m &= \frac{\left\{ \left| \underline{A}^m \right|^2 \left( \underline{B}^m \times \underline{C}^m \right) + \left| \underline{B}^m \right|^2 \left( \underline{C}^m \times \underline{A}^m \right) \right\}}{2 \left| \underline{C}^m \right|^2} \\ \hat{\underline{R}}^m &= \frac{\underline{R}^m}{\left| \underline{R}^m \right|} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 구한 반경방향 단위벡터  $\hat{\underline{R}}^m$  은 블랭크형상을 수정할 때 윤곽선에 위치한 절점을 이동시키는 방향으로 사용한다. 마찬가지로 방법으로 성형후 형상에서의 반경방향 단위벡터  $\hat{\underline{r}}^m$  도 구할 수 있는데 이는 성형후 외곽 절점에서의 법선벡터로 최종 형상에서 목표윤곽선 과의 형상오차  $\varepsilon^m$  의 측정에 사용된다. 형상오차의 측정에 관해서는 다음 장에서 구체적으로 설명하기로 한다.

그런데 식 (4)로 구한 반경방향벡터는 윤곽선 형상이 불룩한 부분에서는 반경방향벡터가 안쪽으로 향하게 되고, 오목한 부분에서는 밖으로 향하게 되기 때문에 윤곽선형상이 복잡하다면 인접한 절점에서 벡터의 방향이 반대로 나타나게 되며, 또한 윤곽선상의 인접한 절점이 일직선상에 있는 경우에는 반경방향 벡터를 구할 수 없는 문제점이 있다. 그런데 반경방향벡터는 형상오차의 측정과 블랭크형상의 수정에 이용하는 방향인데 윤곽선형상이 복잡하여 오목한 부분과 불룩한 부분이 동시에 존재하거나 인접한 절점이 일직선상에 있는 경우에는 이 방법을 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 이 문제는 반경방향벡터를 구할 때는 윤곽선을 기준으로 블랭크의 내외부 여부를 판단하여 내부를 향하도록 하며, 또 윤곽선이 일직선일 경우에는 그 윤곽선에 수직이면서 블랭크내부를 향하도록 정하면 해결이 가능하다.

i-번째 측차에서의 절점위치  $\underline{X}_{(i)}^m$  는 다음의 식으로부터 구해진다. 여기서 초기속도법에서는 식 (5)로 표현되고, 반경벡터법에서는 식 (6)으로 표현된다.

$$\underline{X}_{(i)}^m = \underline{X}_{(i-1)}^m + \Gamma^m \cdot \varepsilon^m \cdot \hat{\underline{R}}^m \quad (5)$$

$$\underline{X}_{(i)}^m = \underline{X}_{(i-1)}^m + C \cdot \varepsilon^m \cdot \hat{\underline{R}}^m \quad (6)$$

최적블랭크는 민감도법에서와 마찬가지로 형상오차  $\varepsilon^m$  이 모든 절점에서 허용오차 이하가 될 때까지 반복적으로 블랭크수정-성형해석-오차측정과정을 수행한다.

여기서 식 (5)로 표현된 초기속도법에서의  $\Gamma^m$  은 식(7)로부터 결정되는 절점속도계수 (Nodal Velocity Coefficient)로 그 절점의 전체 이동거리에 대한 최초 이동거리의 비로부터 결정되는데 여기서  $\beta_1$  과  $\beta_2$  는 절점속도계수  $\Gamma^m$  이 0.5 ~ 0.9사이가 되도록 하는 매핑(Mapping)상수로, 반경벡터법에서는 이 값을 상수로 둔다.

$$\begin{aligned} \Gamma^m &= \frac{\left| \underline{v}^m(0) \right|}{\int_0^{t_f} \left| \underline{v}^m(t) \right| dt} \beta_1 + \beta_2 \\ &= \frac{\left| \underline{v}^m(0) \right|}{\sum_{k=1}^{\#of\ steps} \left| \underline{v}_k^m \right| dt} \beta_1 + \beta_2 \end{aligned} \quad (7)$$

초기속도법과 반경벡터법은 인접하는 3절점의 위치로 결정되는 반경벡터방향으로 형상오차를 측정하고, 반경벡터방향으로 블랭크형상을 수정한다는 점은 동일하지만 블랭크형상의 수정을 위한 이동거리를 계산하는 방식은 차이가 있다. 이러한 차이에도 불구하고 두 방법 모두 수렴성이 비슷하게 나타났다. 이를 다시 생각하면 최적블랭크의 설계에는 형상오차를 측정하는 방법(즉 방향)과 블랭크형상을 수정하기 위한 절점을 이동시키는 방향이 적절하게 선정되었다면 초기속도법에서 주요하게 고려하였던 절점의 최초이동에는 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 식 (7)에서 제시한 절점속도 계수는 절점의 움직임에 대한 관찰을 통해 도입된 것으로 근거가 뚜렷하지 않은 문제점이 있어 이를 상수값( $C=0.7$ )으로 두고 명칭도 반경벡터법으로 변경하였다.

반경벡터법은 같은 반복수정방식의 최적블랭크 설계법인 민감도법과 비교하면 목표형상을 만족할 때까지 블랭크형상수정-성형해석-오차측정의 과정을 반복적으로 수행한다는 점에서는 비슷하지만 민감도법에서는 블랭크형상을 수정하기 위해서는 2회의 성형해석이 필요하나 이 방법은 1회의 해석만으로 가능하다는 점이 크게 다르다. 즉 민감도법에서는

매 설계단계마다 원래의 블랭크로 먼저 해석을 수행하고, 이 해석결과를 바탕으로 오프셋블랭크를 다시 결정한 뒤 성형해석을 수행하는 2회의 해석이 필요하고 특히 오프셋블랭크의 결정과정의 번거로움 때문에 상용해석 S/W의 해석 결과를 그대로 이용하는 데 어려움이 있었지만 이 방법에서는 각 단계마다 1번의 해석만으로 블랭크형상의 수정이 가능하기 때문에 최적블랭크설계 기간이 단축되고 상용해석 S/W 해석결과를 그대로 후처리할 수 있어 사용이 간편해지는 장점이 있다.

### 3. 형상오차의 측정

#### 3.1 목표윤곽선이 평면상에 있는 경우

제품의 개구부(Punch Opening)가 평면, 즉 바인더면이 평면인 경우, 목표윤곽선은 평면상에 있게 되고, 또 이 곡선은 폐곡선이기 때문에 성형후 형상으로부터 형상오차를 측정하는 방향이 동일한 평면상에 있다면 반드시 하나 이상의 점에서 목표윤곽선과 만나게 된다. 이 중에서 절대값이 작은 것, 즉 거리가 가까운 것을 택하면 된다.

즉 목표윤곽선을 윤곽선상의 절점으로 연결된 선분, 즉 윤곽선조각으로 구성하고 각 윤곽선의 조각에 대하여 최종형상에서의 윤곽선상의 각 절점에서 오차측정방향으로 연장선을 그려 모든 목표윤곽선 조각들에 대하여 만나는지 여부를 판단하고, 만나는 윤곽선조각과의 오차측정방향으로의 거리를 구한 뒤 절대값이 가장 작은 값을 그 절점에서의 형상오차로 택하면 된다. 이때 오차측정의 방향과 반대방향으로 만난다면 그 절점에서의 형상오차값을 음으로, 같은 방향에서 만난다면 형상오차값이 양으로 두면 된다.

이 방법은 성형후 윤곽선형상이 목표윤곽선과 동일한 평면에 있지 않더라도 그 평면상의 성분만 사용하면 되며, 이 경우 동일평면상에 있는 경우에 비해 수렴속도는 약간 느려질 수 있지만, 형상오차값의 부호만 정확하다면 목표형상으로 성형되는 블랭크 형상을 찾을 수 있는데 특히 목표윤곽선이 바인더면에 위치하는 경우에는 적용이 가능하다.

#### 3.2 목표윤곽선이 3차원곡선인 경우

Fig. 5는 금형면이 3차원곡면일 때 형상오차를 결정하는 방법을 설명하고 있다. 즉 형상오차는 변형

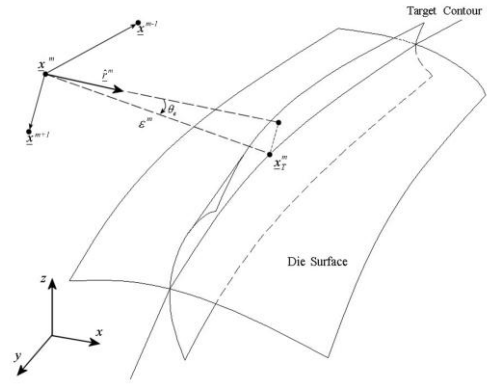


Fig. 5 Measurement of shape error in 3D (radial vector)

후의 절점위치인  $\underline{x}^m$  과 목표형상의 외곽선  $\underline{x}_T$  와의 거리를 오차측정방향  $\hat{r}^m$  방향으로 측정한 거리이며 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\underline{x}^m + \epsilon^m \cdot \hat{r}^m = \underline{x}_T \quad (8)$$

즉  $\underline{x}_T^m$  은 목표형상의 외곽선상의 점으로 변형의 최종단계에서  $\hat{r}^m$  방향의 연장선과 만나는 점으로 결정된다. 그런데 목표윤곽선이 3차원곡선일 경우 오차의 측정을 위해  $\underline{x}^m$  에서  $\hat{r}^m$  방향의 연장선과 목표윤곽선인  $\underline{x}_T^m$  과 동일한 평면에 있지 않을 수 있기 때문에 오차의 측정이 문제가 된다.

따라서  $\hat{r}^m$  을  $\underline{x}^m$  에서의 접선벡터를 중심축으로 금형면, 즉 목표윤곽선과 만날 수 있도록 회전시킨 뒤 목표윤곽선과 만나는 점과의 거리를 측정하여 그 절점에서의 형상오차  $\epsilon^m$  으로 정의한다. 윤곽선이 바인더면상에 위치하는 경우는 비교적 2차원 평면상에서 멀지 않기 때문에 2차원평면으로 투영한 뒤 형상오차를 측정하더라도 수렴성은 약간 저하되지만 비교적 정확하게 예측이 가능해진다.

그렇지만 자동차부품과 같은 실제 판재성형 제품은 윤곽선의 일부가 바인더면에만 있지 않고 편치면에 걸쳐있거나, 목표윤곽선이 매우 복잡한 경우가 있기 때문에 형상오차의 측정이 매우 어려워진다. 따라서 형상오차를 결정할 때 가능한 모든 경우를 고려하지 않으면 예상치 못한 곳과 만나는 경우도 발생한다.

목표윤곽선의 형상이 비교적 단순하거나 목표윤곽선이 바인더면에만 위치하는 경우에는 이 방법으로 형상오차를 측정하더라도 수렴성에 큰 문제가 없지만, 최적블랭크설계의 초기단계와 같이 성형후

형상이 목표윤곽선에서 크게 차이가 나거나, 목표윤곽선이 매우 복잡하거나, 또는 목표윤곽선이 바인더면에 있지 않은 경우에는 이 방법을 적용하기가 어려워진다.

### 3.3 최소거리 형상오차 측정법

Fig. 5의 방법대로 성형후 윤곽선으로부터 반경벡터를 구한 뒤 이를 접선벡터를 중심으로 회전시키면 목표윤곽선이 3차원곡선이라도 형상오차를 측정이 가능하다. 그렇지만 목표윤곽선이 매우 복잡하거나, 3차원적으로 급형의 운동방향인 z방향으로 성형 깊이가 심하게 변하는 경우 반경방향벡터를 적절히 회전시켜주더라도 목표윤곽선과 만나는 점을 찾지 못하는 경우가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 반경방향벡터를 사용하는 대신 목표윤곽선을 구성하는 각각의 윤곽선조각에 대해 최소거리를 찾는 방법을 채택하도록 한다.

즉 절점 m의 성형후 위치  $\underline{x}^m$  부터 목표윤곽선에 위치한 점  $\underline{x}_T^p$  와 점  $\underline{x}_T^{p+1}$  을 잇는 p-번째 윤곽선조각에 대한 최단거리  $d^{(m,p)}$  는 3차원공간에서 어떤 점과 직선과의 최단거리로부터 구할 수 있다.

p번째 윤곽선 조각방향의 단위벡터  $\hat{\underline{b}}_T^p$  는

$$\hat{\underline{b}}_T^p = \frac{\underline{x}_T^{p+1} - \underline{x}_T^p}{|\underline{x}_T^{p+1} - \underline{x}_T^p|} \quad (9)$$

절점 m의 최종위치  $\underline{x}^m$  에서 p-번째 윤곽선조각으로 정의되는 직선과 최단거리로 만나는 점까지의 벡터  $\underline{c}^{(m,p)}$  는

$$\underline{c}^{(m,p)} = \hat{\underline{b}}_T^p \times \left( (\underline{x}_T^p - \underline{x}^m) \times \hat{\underline{b}}_T^p \right) \quad (10)$$

따라서 윤곽선조각과 만나는 점의 위치는  $\underline{x}_c^{(m,p)}$  는

$$\underline{x}_c^{(m,p)} = \underline{x}^m + \underline{c}^{(m,p)} \quad (11)$$

이때 점  $\underline{x}_c^{(m,p)}$  가 해당 윤곽선조각내부에 해당하는 것만 택하면 된다. 이를 위해 다음의 판별식을 만족하는

$$(\underline{x}_T^p - \underline{x}_c^{(m,p)}) \cdot (\underline{x}_T^{p+1} - \underline{x}_c^{(m,p)}) \leq 0 \quad (12)$$

을 만족하는 윤곽선조각을 선택하여 각 윤곽선 조각까지의 최단거리  $d^{(m,p)}$  가 최소인 조각을 찾아 절점 m과 목표윤곽선과의 형상오차로 둔다.

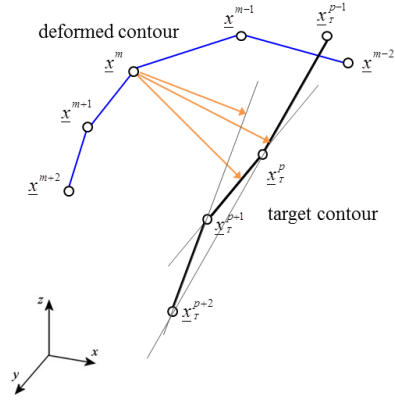


Fig. 6 Measurement of shape error in 3D (min. distance)

$$d^{(m,p)} = \left| (\underline{x}^m - \underline{x}_T^p) \times \hat{\underline{b}}_T^p \right| \quad (13)$$

이때 형상오차의 부호는 벡터  $\underline{c}^{(m,p)}$  와 절점 m의 반경벡터를 내적하여 부호가 (+)이면 음의 값을, 부호가 (-)이면 양의 값을 취하면 된다.

이상과 같은 방법으로 각 절점별로 형상오차값을 구하고, 식 (6)을 이용하여 블랭크 윤곽선에 위치한 절점들을 반경벡터방향으로 절점을 이동시켜 줌으로써 블랭크 형상을 수정한다.

## 4. 예제

Fig. 7은 실제 자동차부품(Radiator Support Lower)을 생산하는 급형의 형상을 나타낸 것으로 급형의 특징을 살펴보면 바인더면이 평면이 아닌 2 단으로 되어 있으며, 직면부위에는 직각에 가까운 수직벽면으로 되어있다. 소재의 재질은 두께 0.7mm의 SG440이며 블랭크의 크기는 대략 1300mm × 260mm 정도이며, 상용 S/W인 Dynaform[11]을 이용하여 성형해석을 수행하였고 이때 바인더힘은 20ton으로 설정하였다.

Fig. 8은 목표형상을 펀치와 함께 나타낸 것을 3방향에서 본 것으로 연두색(엷은 색)은 펀치를, 감청색(깊은 색)은 목표형상을 나타내고 있다. 목표형상의 윤곽선이 Fig. 8(a)의 상면은 바인더면에, 나머지면은 펀치면에 위치하고 있으며, 또 주로 펀치형상을 따라 설정된 목표윤곽선은 바인더면과 수직방향으로 설정된 구간도 있음을 알 수 있다. 이 목표형상으로부터 Dynaform의 BSE(Blank Size Estimation)기능을 이용하여 최적블랭크 설계를 위한 초기블랭크



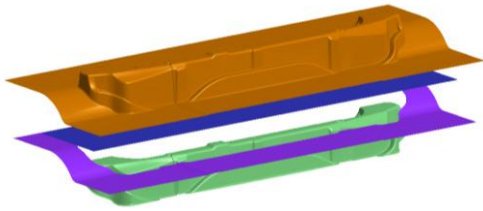
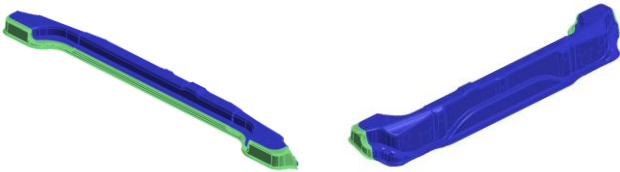


Fig. 7 Stamping die



(a) Top view



(b) Left isometric view (c) Right isometric view

Fig.8 Target shape with comparison to punch

를 도출하였고 최대형상오차가 5.0mm 이내가 될 때까지 최적블랭크 설계를 진행하였다. 본 연구에서 제안하는 최소거리에 기인한 형상오차측정방법의 수렴속도를 조사하기 위해 기존의 반경벡터법[10]의 결과와 비교하였다.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 각각 반경벡터법과 본 연구에서 제안하는 방법인 목표윤곽선까지의 최소거리를 형상오차로 두는 최적블랭크설계를 진행한 과정을 나타낸 것으로 설계단계별로 블랭크형상과 성형후 형상을 목표형상과 비교하고 있다.

Fig. 9(a)는 목표형상으로부터 생성된 초기블랭크로 성형해석을 수행하여 구한 최종형상과 목표형상을 비교한 것이다. 이 블랭크는 성형후 형상에서 반경방향으로 측정된 형상오차가 최대 21mm 정도로 나타났으며 반경벡터법을 이용하여 블랭크형상을 수정한다. Fig. 9(b), Fig. 9(c)의 2, 3 단계를 거쳐 Fig. 9(d)의 4 번째 설계단계에서 최대형상오차가 허용치 이내로 들어 최적블랭크 설계절차를 종료한다.

Fig. 10(a)는 Fig. 9(a)와 동일한 블랭크로 성형해석을 수행하여 구한 최종형상과 목표형상을 비교한 것이다. 성형후 형상은 Fig. 9(a)와 동일하지만 최소거리를 기준한 형상오차값은 반경벡터법에서의 형상오차값과 다르게 측정되며 최대 18mm 정도로 나타나 이 방법으로 측정된 형상오차값을 적용하여

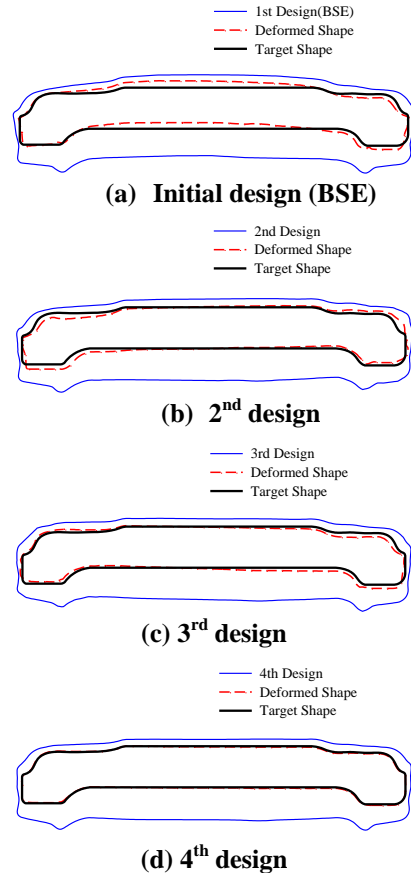


Fig. 9 Evolution of optimal blank design (radius vector method)

블랭크형상을 수정하도록 한다. Fig. 10(b), Fig. 10(c)의 2, 3 단계의 수정을 거쳐 Fig. 10(d)의 4 번째 설계 단계에서 최대형상오차가 허용치 이내로 들어 최적블랭크 설계절차를 종료한다.

Fig. 11 는 동일한 해석결과임에도 최적블랭크설계법에 따라 수정블랭크 형상이 서로 다르게 나타나는 경우를 보여주고 있다. 실제로 목표윤곽선이 3 차원인 경우 반경벡터법에서는 원으로 표시한 부분처럼 튀는 점이 나타나는 경우가 많은데 튀는 점은 주로 형상오차의 측정과 관련 있다. 즉 Fig. 5 에서 설명한 바와 같이 목표윤곽선이 3 차원곡선일 경우 반경벡터를 목표윤곽선과 만날 수 있도록 접선벡터를 기준으로 회전시킨 뒤 거리를 구하는데, 목표윤곽선과 성형후 절점과의 거리가 멀거나, 윤곽선이 복잡하거나 또는 기하학적 처리의 어려움 때문에 반경방향으로의 연장선과 목표윤곽선이 만나는 윤곽선조각을 찾는데 실패했기 때문에 나타난 결과이다. 최소거리를 기준으로 하여 형상오차를 측정할

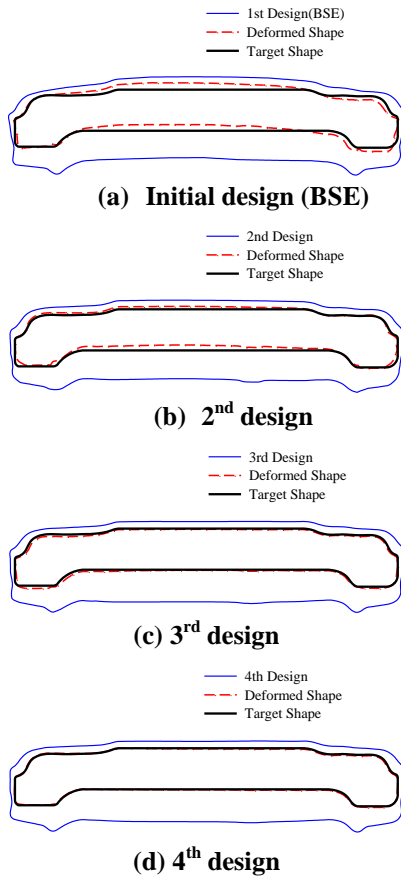


Fig.10 Evolution of optimal blank design stage (Min. distance error)

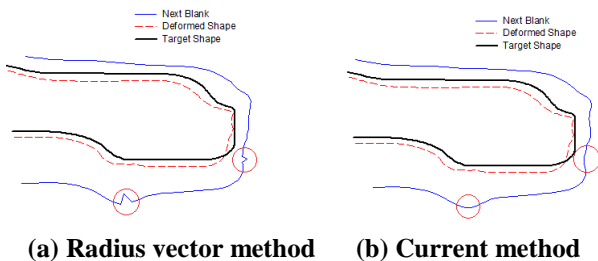


Fig.11 Comparison of next blank shapes to show the failure in finding the target contour segment

때는 이러한 문제점이 비교적 적게 나타난다. 형상오차의 측정과 관련된 튀는 점은 최적블랭크 설계결과를 분석하여 해당점을 제거한 뒤 인접절점을 연결시켜서 유한요소 격자를 생성하여 해석을 수행하면 된다.

Fig. 12 는 설계단계별 형상오차가 변화하는 과정을 비교하고 있는데 두 방법은 비슷하게 빠른 속도로 오차가 감소하고 있어 수렴성이 우수한 것으로

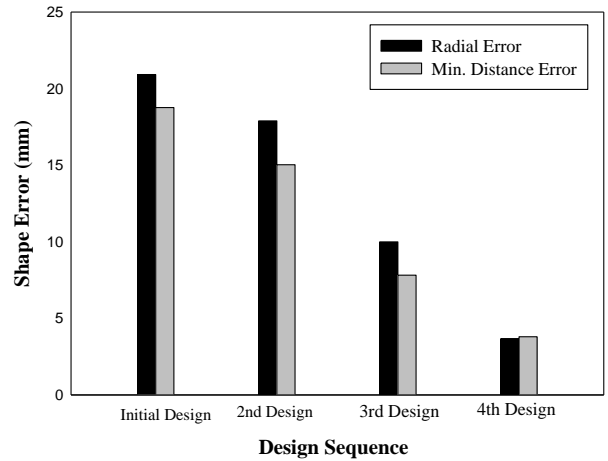


Fig.12 Change of shape error

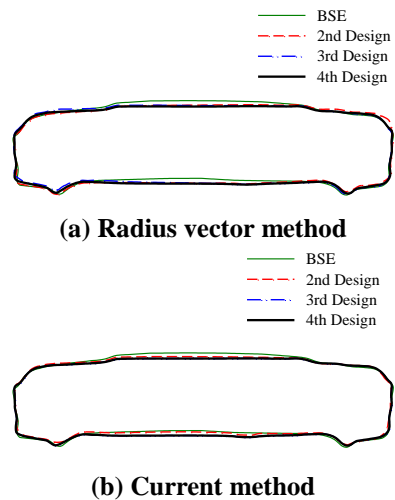


Fig.13 Change of blank shapes during the optimal blank design

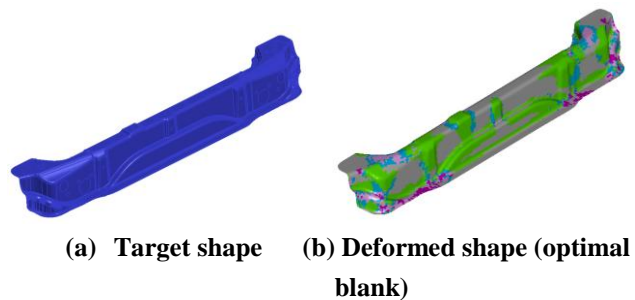


Fig.14 Comparison of target shape & deformed shape with optimal blank

나타나 본 연구에서 제시한 최소거리형상오차법이 타당함을 보여주고 있다. Fig. 13 은 설계단계별로 블랭크형상이 변화되는 과정을 보여주고 있는데 경로



는 서로 다르지만 결과는 동일하게 나타나고 있다.

Fig. 14는 목표형상과 도출된 최적블랭크로 성형하여 얻은 형상을 비교하고 있는데 목표형상과 성형 후 형상이 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

이러한 최적블랭크 설계기법은 단순히 목표형상으로 성형이 되는 블랭크형상을 찾는 데서 나아가 디지털트리아아웃[1]과 같은 합리적인 공정기술을 개발하도록 하는 기초가 되기 때문에 최적블랭크설계법의 정확성과 수렴성은 여전히 중요한 위치를 차지하고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 반복수정방식에 의한 최적블랭크 설계법에 대하여 각 방법의 발전과정을 재조명하여 최적블랭크 설계방법의 핵심요소인 형상오차측정과 블랭크형상을 수정하는 방법의 발전과정과 더불어 새로운 형상오차 측정 방법을 제안하였다.

자동차부품과 같은 형상이 매우 복잡한 제품의 최적블랭크설계를 위해서는 형상오차의 측정이 매우 중요한데, 반경벡터법에서는 목표윤곽선과의 만나는 점을 찾지 못하는 경우가 있는데 본 연구에서는 반경방향 대신 최소거리를 기준으로 한 형상오차측정법을 개발하여 이를 실제 자동차부품의 성형에 적용하여 그 수렴성과 정확성을 확인하였다.

아울러 본 연구에서 제안한 최적블랭크설계법, 즉 형상오차는 최소거리를 기준으로, 블랭크형상은 반경방향을 기준으로 수정하는 것이 복잡한 3차원형상의 최적블랭크설계법으로 타당함이 확인되었다.

## 후 기

본 연구는 중소기업청 대학·연구기관 보유기술 직접사업화 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- [1] H. B. Shim, 2013, Digital Tryout Based on the Optimal Blank Design Toward Realization of Beadless Stamping, Proc. Instn. Mech. Part B: J. Eng. Manuf., Vol. 227, No. 10, pp. 1514~1520.
- [2] H. B. Shim, K. C. Son, 2001, Optimal Blank Design for the Drawings of Arbitrary Shapes by the Sensitivity Method, J. Eng. Mater. Technol., Vol. 123, No. 4, pp. 468~475.
- [3] J. H. Vogel, D. Lee, 1990, An Analytical Method for Deep Drawing Process Design, Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, No.11, pp. 891~907.
- [4] R. Sowerby, J. L. Duncan, E. Chu, 1986, The Modeling of Sheet Metal Stampings, Int. J. Mech. Sci., Vol. 28, No. 7, pp. 415~430.
- [5] C. H. Lee, H. Huh, 1997, Blank Design and Strain Prediction of Automobile Stamping Parts by an Inverse Finite Element Approach, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 63, No. 1, pp. 645~650.
- [6] F. Barlat, K. Chung, O. Richmond, 1994, Anisotropic Plastic Potentials for Polycrystals and Application to the Design of Optimum Blank Shapes in Sheet Forming, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 25, No. 6, pp. 1209~1216.
- [7] S. D. Kim, M. H. Park, S. J. Kim, D. G. Seo, 1998, Blank Design and Formability for Non-circular Deep Drawing Processes by the Finite Element Method, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 75, No. 1, pp. 94~99.
- [8] C. H. Toh, S. Kobayashi, 1985, Deformation Analysis and Blank Design in Square Cup Drawing, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, No. 1, pp. 15~32.
- [9] H. B. Shim, K. C. Son, 2003, Optimal Blank Shape Design using the Initial Velocity of Boundary Nodes, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 134, No. 1, pp. 92~98.
- [10] H. B. Shim, 2004, Determination of Optimal Blank by the Radius of Vector of Boundary Nodes, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manuf., Vol. 218, No. 9, pp. 1099~1111.
- [11] Dynaform User's Manual(ver. 5.7.3), <http://www.eta.com/>

[1] H. B. Shim, 2013, Digital Tryout Based on the Optimal