자동차 프레스 패널 성형을 위한 드로 금형의 어텐덤 곡면 모델링

정연찬^{a*}

Addendum Surface Modeling in Draw Die Design for Stamping Automotive Panels

Yunchan Chung^{a*}^a Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Tech., Gongreung-ro 232, Nowon-gu, Seoul, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	28	October	2013
Revised	25	November	2013
Accepted	8	December	2013

Keywords:

Addendum surface
Parametric modeling
Curvature estimation
Draw die
Stamping
Automotive press panel

ABSTRACT

In the process of draw die design for stamping automotive press panels, the addendum surfaces generated in metal forming simulation software cannot be used in downstream processes such as machining and making draw dies because simulation tools use simple discrete models for the surface geometry. The downstream processes require more precise and continuous geometric models such as NURBS surfaces. Generally, automotive die engineers manually regenerate the addendum surface geometry using the discrete model. This paper presents an automated geometric modeling process for generating addendum surfaces using draft surface models. The design parameters of the section curve for the addendum surfaces are extracted automatically from the draft geometry. Using the extracted design parameters, smooth addendum surfaces are generated automatically as NURBS surfaces. The generated surfaces are G^1 continuous with the part surface and the binder surface, and can be used in downstream processes.

1. 서 론

이 논문은 자동차 드로 금형(draw die)의 어텐덤(addendum) 곡면을 모델링하는 방법을 제안한다. 드로 금형은 자동차 차체 패널의 성형(forming) 과정에서 드로잉(drawing) 공정을 담당한다. 드로잉 공정은 평판 소재를 금형 속으로 끌고 들어가면서 성형하기 때문에 파단과 주름 등의 결함을 방지하기 위해 성형력을 적절히 제어하는 것이 필요하다. 드로 금형의 어텐덤 곡면은 드로잉 공정의 성형력 제어에 영향을 주는 중요한 요소다^[1,2].

자동차 패널 성형을 위한 드로 금형의 금형면은 Fig. 1에서 보듯이 제품면(part face), 바인더면(binder face), 어텐덤면 등으로 분류된다. 바인더면과 어텐덤면은 패널의 성형을 가능하게 하는 부가

적인 형상들이다. 바인더면은 프레스 성형을 위해 초기 판재를 잡는 역할을 하고, 어텐덤면은 제품면과 바인더면을 잇는 곡면으로 프레스 성형에서 드로잉(drawing) 공정을 가능하게 한다. 자동차 프레스 패널은 일반적으로 형상이 복잡하고 고르지 않아서 드로잉 공정에서 금형면에 일정한 성형력을 얻기가 어렵다. 어텐덤면은 적절한 성형력을 얻기 위해 금형면에 부가되는 형상이다^[3-5].

자동차 드로 다이의 금형면 설계는 성형 시뮬레이션을 통해 시행착오적 방법으로 수행된다. Fig. 2에서 보듯이 설계 변수의 변경을 통해 형상 모델을 만들고, 그 형상 모델로 성형 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 결과가 만족스럽지 않으면 설계 변수를 다시 수정해서 새로운 형상 모델을 만들고 시뮬레이션을 반복한다. 성형 시뮬레이션 결과가 만족스러울 때까지 설계 변수의 수정과 형상

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6395

Fax: +82-2-976-5173

E-mail address: ychung@seoultech.ac.kr (Yunchan Chung).

모델링이 반복된다^[6].

성형 시뮬레이션에 사용된 곡면 모델을 금형의 최종 형상 정보로 사용할 수 없는 경우가 많다. 성형 시뮬레이션에 사용되는 곡면은 정밀도가 낮고 연속성(continuity)이 부족하거나 설계 및 제조 특징(feature)을 반영하지 않기 때문이다. 성형 시뮬레이션에 사용되는 곡면은 주로 메쉬 형태의 다면체 곡면 모델이기 때문에 정밀도에 한계가 있다. 매개변수형 곡면의 경우에도 인접 곡면과 연결되지 않거나 접선 연속을 만족하지 못하는 경우가 많다. 그리고 하나의 큰 곡면으로 생성되는 경우가 많아 설계 혹은 제조 특징형상을 찾기 어렵고 특징형상 단위의 조작이 불가능하다.

금형면 설계에 사용되는 대표적인 상용 도구인 AutoForm-DieDesigner^[7]와 PAM-Diemaker^[8]에서 만들어진 곡면도 절삭 가공 등과 같은 후공정에서 사용하기 곤란하다. 성형 시뮬레이션에 적합한 정도의 품질로 곡면이 만들어지기 때문이다. Fig. 3은 AutoForm-DieDesigner에서 생성된 어텐덤면의 품질을 살펴볼

Fig. 1 Components of a die face

Fig. 2 Typical process of the die face design

수 있도록 줄무늬를 투영한 이미지다. 그림에서 곡면의 연속성이 매우 불량함을 알 수 있다. 그리고 라운드 혹은 필렛면(round or fillet surface)과 룰드면(ruled surface) 등의 특정 곡면이 구분되지 않고 하나의 연결된 면으로 생성되었음을 알 수 있다. 결과적으로 성형 시뮬레이션 과정에서 생성된 곡면 모델을 토대로 후공정에 적합한 품질의 곡면을 새로 생성해야 한다^[9].

일반적인 자동차 금형 개발 과정에서는 후공정을 위한 금형면의 곡면 모델링에 CAD 소프트웨어 도구를 사용한다. 최근의 CAD 도구는 파라메트릭 모델링(parametric modeling) 등의 다양한 기능으로 사용이 매우 편리하다^[10]. 하지만 자동차 금형의 어텐덤면은 그 형상이 복잡해서 최신의 CAD 도구를 이용하더라도 많은 수작업이 필요하다. 성형 시뮬레이션을 통해 최적 설계로 검증된 곡면 모델은 대개 메쉬 모델이기 때문에 어텐덤면의 설계 변수 등도 수작업으로 유추해야 한다. 어텐덤면의 설계 변수를 확보하더라도 금형 제작에서 요구되는 부드러운 곡면을 만들기 위해 많은 노력과 시간이 필요하다.

자동차 드로 금형의 설계와 관련된 연구는 크게 금형 형상 모델링 자동화^[11]와 금형 설계 최적화로 분류할 수 있다. 금형 형상 모델링 자동화 연구에서는 어텐덤면 혹은 금형면 전체를 몇 개의 설계 변수로 모델링하는 방법들이 제안되었다. Schenk와 Debray 등은 어텐덤면을 매개 변수로 모델링하고 성형시뮬레이션을 통해 최적화하는 방법을 제시하였다^[3,4,9]. 이들 연구에서는 설계 변수를 이

(a) overall view

(b) magnified view

Fig. 3 An example of the addendum surfaces from a commercial tool

용해 제품면의 외곽 경계선을 따라 어텐덤면의 단면을 모델링한다. 여러 개의 단면을 부드럽게 연결해서 어텐덤 곡면을 생성한다. Chi 등은 물리적 모델을 사용해서 부드러운 어텐덤 곡면을 만드는 방법을 제안했다^[12]. 최적 설계의 결과인 메쉬 모델을 기초로 정교한 어텐덤 곡면을 새로 모델링할 수 있는 방법을 제시한 연구는 없었다.

이 연구에서는 곡면 모델링과 성형 시뮬레이션을 반복하면서 얻은 최적 설계 형상 모델을 이용해서 후공정에 사용할 수 있는 정교한 어텐덤 곡면을 모델링하는 방법을 제안한다. 메쉬로 표현된 기존 형상 모델에서 교차곡선 계산을 통해 어텐덤면의 설계 변수를 추출한다. 추출된 설계 변수로 새로운 어텐덤면의 단면곡선을 생성한다. 여러 개의 단면곡선과 제품면의 경계곡선, 바인더면의 경계곡선을 이용해 부드러운 어텐덤 곡면을 생성한다. 2장에서는 전체적인 어텐덤 곡면 생성 방법을 설명한다. 제안된 방법의 구현과 그 결과를 3장에서 설명하고 4장에서 결론을 제시한다.

2. 어텐덤 곡면 생성

2.1 요구 조건

금형 설계 엔지니어의 인터뷰와 기존 작업 분석을 통해 어텐덤 곡면 모델링에 몇 가지 제약 조건이 있음을 알았다. 성형 시뮬레이션을 통해 얻은 최적 설계 형상을 이용한 어텐덤 곡면 모델링의 제약 조건은 다음과 같다.

- 1) 설계 변수를 사용자가 수정할 수 있다.
- 2) 곡면이 여러 개의 작은 특징(feature) 곡면으로 나뉘어져 국부적인 조절이 가능하다.
- 3) 인접한 두 면(제품면, 바인더면)과 G^1 이상의 연속성^[13]을 만족한다.
- 4) 어텐덤 곡면 내부는 G^1 이상의 연속성을 만족한다.

이때, G^1 연속성이란 곡선 혹은 곡면의 부드러운 정도를 표현하는 용어다. 서로 인접한 두 곡선 $f(t)$ 와 $g(t)$ 가 식 (1)과 같이 두 끝점이 일치하면 그 점에서 G^0 연속성 조건을 만족한다.

$$f(1) = g(0) \quad (1)$$

또, 그 점에서 식 (2)와 같이 1차 미분 결과의 방향이 같으면 G^1 연속성 조건을 만족한다. G^1 연속성은 접선 연속이라고도 한다. 식에서 $\vec{T}$ 는 만나는 점의 단위 접선 벡터다.

$$\dot{f}(1)/|\dot{f}(1)| = \dot{g}(0)/|\dot{g}(0)| = \vec{T} \quad (2)$$

그리고 그 점에서 식 (3)과 같은 2차 미분 관계식이 만족되면 흔히 곡률 연속이라 하는 G^2 연속성 조건을 만족한다.

$$\ddot{f}(1)/|\dot{f}(1)|^2 = \ddot{g}(0)/|\dot{g}(0)|^2 \quad (3)$$

두 곡면이 인접한 경우는 인접한 경계를 가로지르는 곡면위의 곡선을 따라 위의 조건을 만족해야한다^[13].

이 연구에서는 금형 설계 엔지니어의 의견을 종합해 어텐덤 곡면을 위한 단면의 설계 변수를 Fig. 4와 같이 정의하였다. Fig. 4에서 보듯이 설계 변수는 6개의 원호(Part, CB1, CB2, Bar1, Bar2, Die) 반경과 5개의 각도(CB angle, CB slope, Bar angle, Bar slope, Wall angle), 4개의 길이(Part plus, CB height, CB width, Bar height) 변수로 구성된다.

정의된 설계 변수로 생성되는 단면 곡선은 최소 1개에서 최대 6개의 원호로 구성된다. 첫 번째 원호(Part)는 제품면과 접선으로 연결된다. 서로 인접한 원호끼리도 접선으로 연결된다. 마지막 원호(Die)는 바인더면에 직접 접한다.

성형 시뮬레이션에 사용되는 어텐덤 곡면의 설계 변수와 이 연구에서 정의한 설계 변수가 다를 수 있다. 같은 설계 변수가 사용되는 경우에도 메쉬 곡면 등으로 단순화되면서 원래의 설계 변수를 정확히 복원하기는 어렵다. 결국 형상 모델에서 설계 변수를 추정해야 한다.

2.2 전체적인 절차

앞 절에서 설명한 제약 조건을 만족하기 위해 이 연구에서 제안하는 어텐덤면 모델링의 전체적인 절차는 Fig. 5와 같다. 첫 단계는 입력된 기존 어텐덤 곡면의 단면 분석을 통해 설계 변수를 추출하는 일이다. 이때 추출된 설계 변수는 사용자가 수정할 수 있다. 두 번째 단계에서는 설계 변수에 해당하는 단면곡선을 생성한다. 단면곡선은 직선과 원호의 조합으로 구성된다. 세 번째 단계에서는 단면곡선을 연결하는 안내곡선을 생성한다. 마지막 단계에서 단면곡

Fig. 4 Design parameters for the section curve

선과 안내곡선을 이용해 최종 어텐덤 곡면을 생성한다. 특징 곡면으로 분할 생성하기 위해 단면곡선과 안내곡선이 이루는 곡선망의 사각 조각별로 곡면을 생성한다. 이때 인접한 제품면 혹은 바인더면과 G^1 연속성을 만족하는 곡면을 생성한다.

2.3 교차 곡선 생성

기존의 어텐덤 곡면에서 설계 변수를 추출하기 위해 기존의 Fig. 4 Design parameters for the section curve 어텐덤 곡면과 평면의 교차 곡선을 분석한다. 교차 곡선을 생성 할 평면은 금형의 작동 방향과 평행하다. 그리고 금형 작동 방향과 수직한 평면에 투영된 제품의 경계 곡선과 수직하다. 위치는 제품의 경계 곡선에 정의되며 사용자가 전체 어텐덤면의 특징을 살펴서 필요한 단면의 위치를 정한다. 위치가 정해지면 교차 평면을 정의하는 세 축은 다음과 같이 식 (4), (5), (6)으로 정해진다.

$$\vec{x} = \vec{T} \times \vec{Z} / |\vec{T} \times \vec{Z}| \quad (4)$$

$$\vec{y} = \vec{Z} \quad (5)$$

$$\vec{z} = \vec{x} \times \vec{y} \quad (6)$$

식에서 단위벡터 $\vec{Z}$ 는 프레스 금형의 작동 방향이고, $\vec{T}$ 는 평면이 놓인 위치에서 제품 경계 곡선의 접선 벡터다. 제품 경계 곡선의 방향은 $\vec{Z}$ 축에서 볼 때 반시계 방향으로 가정되었다.

평면과 곡면의 교차 곡선은 일반적인 기하 연산을 통해 쉽게 얻을 수 있다. 특히 곡면이 메시와 같은 단순한 정보로 표현될 때 평면과 곡면의 교차 곡선의 계산은 안정적으로 이루어진다. 이 연구

에서는 교차 곡선을 점열 곡선으로 얻었다. Fig. 6은 메시 모델에서 얻은 교차 곡선의 예다.

2.4 설계 변수 추출

얻어진 교차 곡선에서 어텐덤의 단면 설계 변수를 추출하는 것은 간단하지 않다. 교차 곡선에서 단면 설계 변수를 추출하기 위해 이 연구에서는 교차 곡선에서 원호 구간을 추출하는 방법을 사용했다. Fig. 6에서 보듯이 교차 곡선의 각 점에서 곡률을 계산한 후 곡률이 일정한 구간을 하나의 단위로 분리했다. 분리된 구간에 해당하는 원호를 근사한 후 원호와 원호를 잇는 접선을 구하면 최종적으로 원호와 선분으로 구성된 곡선을 얻을 수 있다. 얻어진 원호와 선분으로 이루어진 곡선을 분석하면 Fig. 4의 설계 변수를 얻을 수 있다.

곡률 반경 계산을 위한 원호의 근사(fitting) 구간은 가변적이며 기준 근사 오차를 만족하는 최대 근사 구간에서 원을 근사한다. 먼저 해당 점 주변의 최소 점들로 원을 근사하고 근사 오차를 계산한다. 근사 오차가 기준 오차보다 작으면 근사 구간을 조금 확장하고 다시 계산한다. 근사 구간을 계속 확장하다가 근사 오차가 기준을 초과하면 확장을 중단한다. 이 방법은 근사 구간이 불확정적이고 순차적으로 구간을 늘려가면서 계산하기 때문에 컴퓨터 계산량이 많다. 그러나 최근의 컴퓨터 성능으로는 큰 어려움이 없다. 기준으로 사용할 최적 근사 오차는 0.01을 사용했다.

일정한 점열을 하나의 원으로 근사하는 방법은 Kasa가 제시한 방법^[14,15]을 사용하였다. 일반적인 원의 근사는 오류의 제곱을 최소화하는 기준을 사용한다. 즉, N개의 점이 주어질 때 식 (7)을 만족하는 원의 반경 R을 찾는다.

$$\min \sum_i^N (R_i - R)^2 \quad (7)$$

$$\text{이때, } R_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2},$$

(x_i, y_i) 는 i번째 점의 x, y 좌표값이다. N은 근사하려는 점의 개수

Fig. 5 Overall modeling process for the addendum surfaces

Fig. 6 An example of the intersection curve and the curvatures

이며 3보다 크거나 같다. 그리고 (a, b) 는 근사된 원의 중심점 좌표 값이다. 그러나 식 (4)는 해석적인 방법으로 해를 얻기 어렵다. Kasa는 식 (8)과 같이 수정된 최소제곱법을 제시하였다.

$$\min \sum_i^N (R_i^2 - R^2)^2 \quad (8)$$

Kasa가 제시한 방법은 해석적인 방법으로 해를 얻을 수 있으며, 그 결과도 이 연구에서 활용하기에 충분하였다. 원을 근사하는 다양한 방법론은 Rusu 등의 연구에서 찾을 수 있다^[16].

2.5 단면 곡선 생성

설계 변수를 입력으로 선분과 원호로 이루어진 단면 곡선을 생성한다. 단면 곡선을 생성할 때 시작점은 제품면의 경계 곡선에 놓이며 시작점의 접선은 제품면의 접선과 일치한다. 끝점은 바인더면의 경계 곡선에 놓이고 그 접선은 바인더면의 접선과 일치한다. 이렇게 만들어진 곡선의 양끝은 제품면과 바인더면에 G^1 연속성을 만족한다. 그리고 내부도 G^1 연속성을 만족한다.

제약 조건을 만족하는 단면 곡선을 생성하는 순서는 다음과 같다. 접선 조건을 이용해서 Fig. 4에 보인 원호 Part와 Die를 제일 먼저 생성한다. 그리고 거리 변수를 이용해서 원호 Bar1을 생성한 후 각도 변수를 이용해서 Bar2를 생성한다. 다시 거리 변수와 각도 변수를 이용해 CB1과 CB2를 생성한다.

앞 절에서 설명된 방법으로 추출된 설계 변수로 단면 곡선을 재

생성하면 원래의 교차 곡선과 다른 곡선이 얻어진다. 제품면과 바인더면의 연속성을 고려하고 제한된 개수의 설계 변수를 사용하기 때문이다. 이 연구에서는 사용자가 설계 변수로 생성된 단면 곡선을 보면서 설계 변수를 수정할 수 있도록 하였다. 사용자가 주변의 형상을 고려해서 설계 변수의 값을 수정하거나 경험 지식을 근거로 특정 설계 변수의 값을 수정해서 사용한다.

Fig. 7의 (a)는 설계 변수로 생성한 단면 곡선의 예다. 그림에서 점이 조밀한 구간은 원호이고 점이 없는 구간은 원호를 잇는 직선이다. Fig. 7에 보인 예는 Fig. 6에 보인 교차 곡선에서 추출한 설계 변수의 값에서 Part Plus 길이를 0.5로 수정하고 Die 반경을 7로 수정한 결과다. Fig. 7의 (b)에서 왼쪽 시작 부분의 위쪽에 놓인 곡선이 재생성된 단면 곡선이다.

2.6 안내 곡선 생성

안내 곡선은 Fig. 8에서 보듯이 단면 곡선을 잇는 곡선이다. 단면 곡선의 시작점을 잇는 안내 곡선 $cv-P$ 는 제품의 경계 곡선이고 끝점을 잇는 곡선 $cv-B$ 는 바인더 경계 곡선이다. 그림에서 안내 곡선 $cv-1$ 과 안내 곡선 $cv-2$ 는 제품 경계 곡선인 안내 곡선 $cv-P$ 의 속성을 상속해서 생성된다. 안내 곡선 $cv-P$ 를 축척과 이동 변환해서 안내 곡선 $cv-1$ 과 $cv-2$ 를 생성한다. 안내 곡선 $cv-1$ 과 $cv-2$ 를 제외한 다른 안내 곡선은 안내 곡선 $cv-P$ 와 안내 곡선 $cv-B$ 의 접선 벡터를 블렌딩해서 각 점의 접선 벡터로 사용한다. 이 연구에서는 G^1 연속성을 보장하기 위해 3차 B-spline 곡선식으로 안내 곡선을 생성했다.

2.7 곡면 생성

단면 곡선과 안내 곡선의 곡선 망이 주어지면 곡면을 만들 수 있다. 그러나 어텐덤 곡면의 경우 제품면 혹은 바인더면과 G^1 이상

Fig. 7 An example of the re-created section curve: (a) re-created section curve, (b) overlapped view with the intersection curve

Fig. 8 Guide curve construction

의 연속성을 만족해야한다. 이 연구에서는 곡선 망을 이루는 단면 곡선과 안내 곡선이 주변 곡면과 G^1 을 만족하기 때문에 인접한 곡면과 연속성을 만족하는 곡면 생성 방법은 잘 정립된 기하학적 문제이다. 이 연구에서는 곡선망을 이용해 주변 곡면과 접선 연속성을 만족하는 NURBS 곡면^[17]을 생성했다. 자세한 내용은 어텐덤 곡면을 생성하는 기존의 다른 연구에서 찾을 수 있다^[12,18].

3. 구현 결과

이 연구에서 제안한 방법을 상용 CAD 시스템인 UG/OPEN API와 C++를 이용해 구현하였다. 2.3절에 설명한 교차 곡선은 API의 기존 기능을 이용해서 구현했다. 2.4, 2.5, 2.6절에 설명한 설계 변수의 추출과 단면 곡선 생성, 안내 곡선 생성 등은 C++로 직접 구현했다. 2.7절에 설명한 곡면 생성은 API의 기능을 사용해서 구현했다. 개발된 프로그램은 지멘스 NX에서 실행된다.

Fig. 9는 Fig. 3에 보인 곡면을 입력으로 구현된 프로그램에서 새로 생성한 어텐덤 곡면이다. 투영된 줄무늬가 곡면 경계에서도 부드럽게 이어짐을 통해 G^1 연속성을 만족하는 부드러운 곡면이 생성되었음을 알 수 있다. 곡면 분석을 통해 곡면의 경계에서 접선의 방향이 일치함을 확인하였다. 그리고 제품면과 바인더면의 연결 부분에서도 접선의 방향이 일치함을 확인하였다.

금형 설계 실무자의 작업시간을 조사한 결과 구현된 프로그램을 사용하면 기존에 평균 20공수(man-hour)가 소요되던 어텐덤 곡면 생성 작업을 5공수에 마칠 수 있었다. 그리고 생성된 곡면은 금형 제작 등의 후공정에 사용할 수 있었다.

개발 결과를 통해 이 연구에서 제안된 방법이 기존의 형상 모델을 이용해서 정교하고 부드러운 어텐덤 곡면을 재생성할 때 유용하다는 것을 알 수 있었다. 개발된 모델링 도구는 자동으로 설계 변수를 추출하며 사용자가 새로운 어텐덤 곡면을 생성할 때 필요한 자유도를 제공한다. 그리고 이 방법으로 생성된 어텐덤 곡면은 금형 제작에 충분히 이용할 수 있다.

Fig. 9 Re-created addendum surfaces

4. 결 론

이 연구에서는 자동차 프레스 패널 생성을 위한 드로 금형의 금형면을 구성하는 어텐덤 곡면의 모델링 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 프레스 성형 해석 과정에서 모델링된 메쉬 모델에서 어텐덤 단면의 설계 변수를 추출한다. 추출된 설계 변수로 어텐덤의 단면 곡선과 안내 곡선을 새로 생성한 후 최종적으로 부드러운 곡면을 생성한다. 제안된 방법을 구현하고 테스트한 결과, 제안된 방법이 모델링 자동화 도구 개발에 쓰일 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 구현된 도구가 유용함을 알 수 있었다.

이 연구의 의의는 기존에 작성된 모델에서 설계 변수를 추출한 후 어텐덤 곡면을 재생성 하는 것이다. 그 동안의 많은 연구는 어텐덤 등의 금형면을 자동으로 설계한다. 그러나 자동차 패널 금형의 경우 많은 시행 착오를 거치면서 설계가 이루어지기 때문에 사용자의 노하우를 반영할 수 있는 구조가 필요하다. 이 연구에서는 자동 설계된 형상에서 설계 변수를 추출한다. 추출된 설계 변수를 사용자가 변경해서 새로운 곡면을 생성할 수 있다.

5. 추후 연구 방향

추후 과제로는 설계 변수와 곡면의 변경이 좀 더 직관적이어서 사용자가 쉽게 수정할 수 있어야겠다. 이 연구에서 제시한 방법은 자동 설계가 아니라 사용자의 생산성을 높이는 방법이며, 설계 작업은 반복적인 과정이기 때문이다. 그리고 생성된 어텐덤 곡면의 연속성과 전체적인 윤곽을 유지하면서 곡면을 조절할 수 있는 방법을 제공한다면 성형성 향상을 위한 곡면의 반복적 미세 조정에 도움이 될 것이다.

바인더 곡면도 이 연구에서 제시한 방법과 유사한 개념을 도입해서 모델링할 수 있을 것이다. 판재의 성형 시뮬레이션 계산에 사용된 바인더 곡면을 이용해서 후공정에 사용될 고품질의 바인더 곡면을 생성할 수 있을 것이다. 바인더 곡면의 경우 형상 모델링 관점에서 설계 변수를 명확히 하는 것도 중요한 연구 과제다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 일부 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Pearce, R., 1991, Sheet Metal Forming, Adam Hilger, Bristol.

- [2] Yoh, E. G, Jo, S. H., Lee, Y. S., 2002, A Study on the Formability Factors of Axisymmetric Multi-Stage Deep Drawing Processes, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 11:4 6-11.
- [3] Schenk, O., Hillmann, M., 2004, Optimal Design of Metal Forming Die Surfaces with Evolution Strategies, *Computers & Structures*, 82:20 1695-1705.
- [4] Debray, K., Sun, Z. C., Radjai, R., Guo, Y. Q., Dai, L., Gu, Y. X., 2004, Optimum Design of Addendum Surfaces in Sheet Metal Forming Process, In *AIP Conference Proceedings*, 712 1980-1984.
- [5] Ke-jia, G., Ping, H., 2006, Method for Generating Additional Surface in Die Face Design of Automotive Panel, *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 1 014.
- [6] Pilani, R., Narasimhan, K., Maiti, S. K., Singh, U. P., Date, P. P., 2000, A Hybrid Intelligent Systems Approach for Die Design in Sheet Metal Forming, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16:5 370-375.
- [7] AutoForm Engineering, viewed 20 October 2013, AutoForm-DieDesigner, <<http://www.autoform.com>>.
- [8] ESI group, viewed 20 October 2013, Die Face Designer, <<http://www.esi-group.com>>.
- [9] Debray, K., Li, Y. M., Guo, Y. Q., 2013, Parametric Design and Optimization of Addendum Surfaces for Sheet Metal Forming Process, *International Journal of Material Forming*, 6:3 315-325.
- [10] Lee, K., 1999, Principles of CAD/CAM/CAE Systems, Addison-Wesley, Boston.
- [11] Kwon, H. H., Lee, B. K., 2005, Development of Automatic Program for Drawing Die Design, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 14:3 60-66.
- [12] Chi, D., Ruijun, L., Ping, H., Yuquan, S., 2008, Smoothing Parametric Method to Design Addendum Surface, *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, 1140-1144.
- [13] Choi, B. K., 1991, Surface Modeling for CAD/CAM, Elsevier, Amsterdam.
- [14] Kasa, I, 1976, A Circle Fitting Procedure and Its Error Analysis, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 8-14.
- [15] Corral, C. A., Lindquist, C. S., 1998, On Implementing Kasa's Circle Fit Procedure, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 789-195.
- [16] Rusu, C., Tico, M., Kuosmanen, P., Delp, E. J., 2003, Classical Geometrical Approach to Circle Fitting - Review and New Developments, *Journal of Electronic Imaging*, 179-193.
- [17] Piegl, L., Tiller, W., 1995, The NURBS book, Springer, Berlin.
- [18] Park, J. C., Lee, K., Jun, G., 1993, Efficient Modeling of Die-Face Shapes for Stamping Automobile Outer Panels, *Transactions of KSAE*, 15:13 96-110.