

차체 판넬의 가공 제작을 위한 금형형상의 효율적 모델링

Efficient Modeling of Die-Face Shapes for Stamping

Automobile Outer Panels

박 종 천*, 이 건 우**, 전 기 찬***
J. C. Park, K. Lee, G. Jun

ABSTRACT

A procedure has been developed so that a die-face for stamping automobile outer panels can be designed and modelled efficiently. The procedure is composed of four parts each of which corresponds to modeling major components of a die-face, i.e. tipped product, blankholder, draw beads, and step draw.

The modeling techniques developed specifically for die-face design enable a designer to generate the shape of a die-face quickly with the minimum input, and the resulting models can be used in FEM analysis and NC tool path generation. This will lead to the reductions in lead time and man-hours required for the design and manufacture of the stamping dies.

주요기술용어 : Die-Face Shape(금형형상), Stamping(스텝핑),
Blankholder Surface(블랭크홀더 곡면),
Step Draw Surface(스텝드로 곡면), Draw Bead Surface(드로우 비드 곡면)

1. 서 론

자동차 산업에서의 CAD/CAM의 응용은 관련 산업계 중에서도 선도적 역할을 하면서 급속히 발전해 왔으며 그 중요성은 더욱 증대되고 있다. 또한 국내외적으로 치열한 경쟁으로 인해 자동차 각사는 다양한 모델의 신차종을 신속하게 소비자들에게 제공하는 일이 더욱 중요해졌다. 이러한 신차종의 개발요구에 부응하기 위해서는

CAD/CAM시스템의 개발 및 고도화를 통한 개발소요기간의 단축이 절실히 요구되고 있다.

신차종개발에 있어 최대의 개발기간이 소요되며 가장 민감한 부분이 차체 개발공정이다. 외형설계, 차체 구조설계, 프레스 금형설계, 생산준비 등으로 구성되는 일련의 차체개발공정에서 각 공정별 개발소요기간을 비교하면 전체 개발기간중에서도 특히 금형의 설계 및 생산준비 단계가 그 최대 부분을 차지하고 있다.⁽¹⁾

* 서울대 자동차 시스템 공동연구소

** 서울대 기계설계학과

*** 기아자동차(주)

이것은 전통적인 금형의 비효율적 설계과정에 문제가 있기 때문이며 그 근본원인으로는 첫째, 도면과 입체모델에 의한 공정간의 정보 전달의 부정확성, 둘째, 설계자의 경험을 대신할 수 있는 전산화된 정량적 평가기능의 부재, 셋째, 설계자의 다양한 설계 의도를 반영할 수 있는 형상 모델링 방법의 미비 등을 들 수 있다. 결국 이러한 원인으로 인해 누적된 설계오차를 해소하기 위해 시험성형-형 수정-시험 성형의 과정을 비효율적으로 반복함으로 해서 상당한 개발 기간이 필요하게 되었고 이로 인해 총생산성을 크게 낮추는 결과를 초래하게 되었다.⁽²⁾

궁극적으로 미래의 신차종 개발의 승패는 차체 개발에 소요되는 전체 개발기간과 노동시간의 단축 여부에 있다고 볼 수 있다. 이를 위해서는 특히 금형설계와 이와 관련된 생산준비기간의 대폭적인 단축이 절대적으로 필요하게 되며 이것은 위에서 지적한 전통적인 금형 설계과정에서 비롯되는 비효율적인 요인들을 개선한 새로운 설계방법의 개발을 통해 이루어질 수 있다. 이와같은 측면에서 본 연구의 목적은 기존의 범용 모델링 방법보다 효율적인 금형 전용 모델링 방법을 개발하고, 동시에 정량적 설계 평가방법을 구축하여 이를 설계 단계에서 적용함으로써 고품질의 금형 곡면형상 데이터를 얻고, 이를 프레스형 제작을 위한 CAM시스템에 제공하는데 있다. 이러한 목적에 부합하는 전체 설계시스템중 설계형상에 대한 평가 부분은 추후에 논하기로 하고, 본 논문에서는 금형의 곡면 모델링시스템만을 다루기로 한다. 본 연구에 의해 개발된 금형의 곡면 모델링시스템은 평가시스템이 개발 완료되어 통합 설계시스템화할 경우 기존의 비효율적인 설계방법을 개선할 수 있을 뿐만 아니라, 성형 결함을 설계단계에서 사전에 제거함으로써 궁극적으로는 시험성형의 반복 횟수를 줄여 차체 개발을 위한 전체 개발기간중 금형의 설계-생산준비에 소요되는 공정수와 기간을 단축할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 금형의 곡선과 곡면의 형상을 표현하는데 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)⁽³⁻⁵⁾ 이론식을 사용하였으며, 본 논문에서

다루어질 내용은 금형의 주요 구성 형상부에 대한 모델링으로서 다음과 같다.

- 블랭크 홀더(Blankholder) 곡면의 모델링
- 스텝 드로(Step Draw) 곡면의 모델링
- 드로우 비드(Draw Bead) 곡면의 모델링

2. 곡선 및 곡면의 표현방법

전산기 이용곡선 및 곡면설계분야는 1960년대 초 프랑스와 미국을 주축으로 시작되었다. 프랑스에서 P.de Casteljaou가 처음 소개한 이후, P. Bezier가 르노자동차에서 UNISURF라는 시스템을 개발하면서 본격적인 연구가 시작되었다. 미국에서는 J.Ferguson이 Boeing사에서 설계시스템에 cubic spline을 도입하고, S.Coons가 MIT에서 곡면이론을 확립하면서 발전하였다. 그 후 1974년에는 전산기이용 형상설계(Computer Aided Geometric Design)라고 하는 학문적 체계를 갖추게 되었다.⁽⁶⁾ 1970년대에는 Mansfield, de Boor, Cox⁽⁷⁾에 의한 이론적 배경을 바탕으로 W. Gordon과 R.Riesenfeld⁽⁸⁾에 의해 B-spline 곡선과 곡면이 소개되었다. B-spline에 대한 수학적 기초는 B-spline 함수값과 미분값을 효율적으로 계산하는 반복계산식(recursive formula)이 유도됨으로써 완전히 확립되었다. 그 이후 B-spline이 형상설계에 있어서 Bezier의 방법을 포함하는 가장 보편적인 표현형태라는 것이 입증되면서 곡선과 곡면설계분야에 많이 응용되기 시작했다. 한편 W.Tiller^(3,4)는 B-spline 곡선과 곡면의 확장된 형태인 rational B-spline 곡선과 곡면으로 원, 원통면, 구면과 같은 2차 곡선 및 곡면도 정확히 표현하는 방법을 제시함으로써, 이 방법은 거의 모든 곡면을 하나의 데이터 형태로 나타낼 수 있는 장점을 갖게 되었고, 현재는 NU-RBS(Non-Uniform Rational B-Spline)⁽³⁻⁵⁾라는 명칭으로 많은 상용 CAD시스템에서 수학적 기초가 되고 있다.

본 논문에서는 금형의 곡선과 곡면의 수학적 표현방법으로 NURBS를 채택하였다. 이것은 기존의 거의 대부분의 금형 설계에 이용되고 있는

Bezier⁽⁹⁾나 기타 다항식 계통의 이론식에 비해 NURBS를 특히 금형의 형상모델링에 적용할 경우, 필수적으로 요구되는 곡선과 곡면의 다양한 수정과 생성의 구현에 적합하기 때문이다. 즉, 조정점을 움직임으로써 국부적인 형상수정(local modification)이 가능하며, 사각형 경계곡선을 채우는 단순한 곡면모델링 방법 외에도 스위핑(sweeping)⁽¹⁰⁾, 스킨닝(skinning)^(3,11) 등과 같은 다양한 곡면모델링 방법이 가능하게 된다. 또한 NURBS 곡선과 곡면은 non-rational B-spline과 rational/non-rational Bezier 곡선과 곡면을 모두 포함하는 가장 일반적인 형태이므로 식 하나로 모든 곡선과 곡면이 정의되며, 따라서 데이터 관리에도 유리한 장점을 가진다.

3. 블랭크 호올더 곡면의 모델링

일반적으로 차체 외판의 가공 제작을 위한 프레스 금형은 Fig.1에서와 같이 크게 세부위, 즉 다이(die), 펀치(punch), 블랭크 호올더(blank holder)로 구성되며 이중 다이는 다시 크게 제품(product)면, 스텝드로(step draw)면, 블랭크 호올더면 등 세곡면 부위로 이루어진다. 프레스 금형에 의한 성형 과정을 단계별로 간략히 살펴보면 먼저 다이에 초기소재(initial blank)를 위치시키면, 블랭크 호올더가 하강하여 소재를 호올딩한다. 이때 초기 소재는 변형되는데 이를

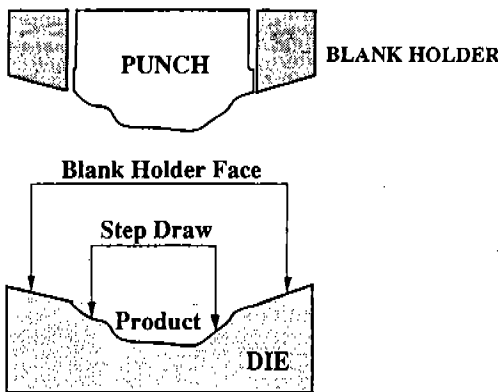


Fig.1 Major components of die assembly for stamping

초기 변형소재(binder wrap)^(12,13)이라고 한다. 이 상태에서 펀치가 하강하면서 초기 변형 소재와 첫 접촉을 한 후, 계속해서 소재를 가공하여 최종적으로 가공을 완료하게 된다.

이상의 프레스 성형과정에서도 알 수 있듯이 블랭크 호올더 곡면은 성형중 소재판넬의 가장 자리를 지지하고 또한 그 형상에 따라 초기 소재판넬의 변형상태를 결정하게 된다. 이때 블랭크 호올더 곡면의 형상을 결정하는 기준은 펀치방향과 제품의 성형방향(tipping position)이다. 따라서 블랭크 호올더 곡면의 모델링에 앞서 설계자는 펀치 방향과 이에대한 제품의 성형 방향을 먼저 결정하게 된다. 본 연구에서 블랭크 호올더 곡면을 생성하는 과정은 크게 펀치의 외곽 경계선(punch opening curve)의 모델링과 이로부터 곡면을 생성하는 단계로 구성된다.

3.1 펀치 외곽 경계선의 2차원 형상 입력

본 연구에서 블랭크 호올더 곡면을 모델링하는 첫 단계는 Fig.2에서와 같이 펀치의 외곽 경계선을 생성하는 일이다. 이를 위해 먼저 2차원 상면 투영도(top-view)상에서의 펀치 경계선(punch profile)을 정의하게 되는데 이때 선밀립

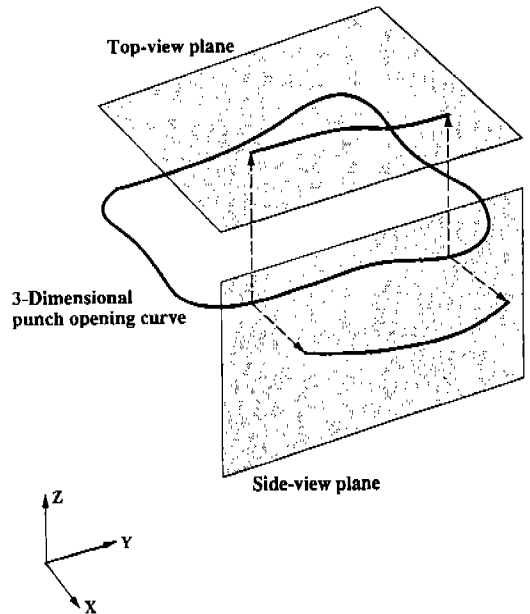


Fig.2 Generation of punch opening curve

(14)의 방지와 쇼크라인(14)의 제품면내 유입방지 등 성형성과 관련한 종합적인 설계검토가 선행되어야 한다. 상면 투영도 상의 2차원 편치 경계선이 생성되면 이에 관련된 측면투영도(side-view) 상에서 편치 경계선을 동시에 설계하게 된다. 이것은 궁극적으로 3차원 형상의 편치 외곽경계선을 생성하기 위해서는 상면 투영도 상의 2차원 편치 경계선에 대응되는 측면 투영도 상의 2차원 곡선 형상이 부가적으로 필요하기 때문이다. 이 2차원 측면의 곡선 형상은 블랭크 호올더에 의해 소재 판벌이 호올딩될때 그 방향에서의 초기 변형소재의 단면 형상을 의미하게 된다. 각 투영면 상의 편치 경계선은 시스템 내의 2차원 입력에디터를 사용하여 생성한다.

3.2 3차원 편치 외곽 경계선의 생성

Fig.2에서 3차원 편치 외곽경계선의 네 변은 서로 직교한 투영면 상에서 각각 생성된 두 개의 2차원 곡선들로부터 생성된다. 이를 위해서는 직교하는 두 개의 2차원 측면 곡선으로부터 3차원곡선을 도출하는 과정이 필요하게 되는데 이 과정을 Fig.3과 Fig.4의 예를 통해서 설명하기로 한다. Fig.3은 상면투영도의 곡선 $T(v)$ 와 측면투영도의 곡선 $S(u)$ 로부터 3차원 상의 곡선 $R(t)$ 위의 점 R_0 에서 R_i 까지를 구한 상태에서 다음점 R_{i+1} 를 구하는 과정을 설명하고 있다.

- ① 먼저 두 곡선의 공통좌표축을 결정한다. 이 예에서는 x 축이 된다.
- ② 두 곡선 $S(u)$, $T(v)$ 위의 점 S_i , T_i 에서 직선보간길이(step length) 및 접선방향길이를 구한다. Fig.4는 점 S_i 에서 곡선 $S(u)$ 의 곡률반경을 ρ , 허용공차를 δ 라고 할 때, 직선보간길이 L 과 접선방향의 길이 D 의 관계를 근사적으로 보여주고 있다. 이때 L 과 D 는 다음 식에 의해서 계산된다.

$$L = 2\sqrt{2\rho\delta - \delta^2}, D = L(1 - \delta/\rho) \quad \rho \neq \infty \quad (1)$$

$$L = D = L_{max} \quad \rho = \infty$$

이때 최대 직선보간길이 L_{max} 는 시스템에서

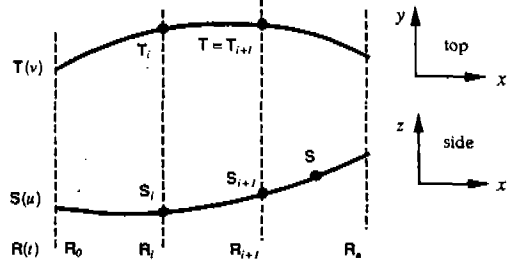


Fig.3 Generation of 3-D curve

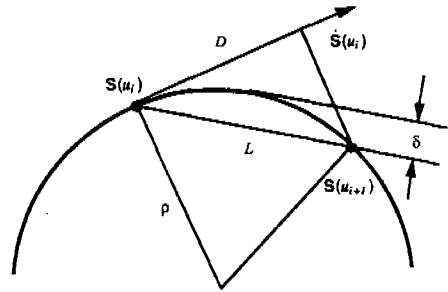


Fig.4 Calculation of step length

두 곡선의 길이를 고려하여 결정한다. 또 $T(v)$ 에 대해서도 같은 방법으로 이들을 구할 수 있다.

- ③ 접선방향의 길이에 따라 두 곡선 $S(u)$, $T(v)$ 위의 다음점 S 와 T 를 결정한다. 접선방향의 길이가 D 일 때, 곡선 $S(u)$ 위의 다음점 S 에 해당하는 매개변수 u_{i+1} 은 다음의 비선형 방정식을 풀어서 계산한다. 물론 T 도 마찬가지로 방법으로 구한다.

$$[S(u_{i+1}) - S(u_i)] \cdot [S'(u_i) / |S'(u_i)|] = D \quad (2)$$

- ④ S 와 T 중 공통좌표 x 의 값이 작은 것을 택하여 3차원상의 다음점 R_{i+1} 의 x 좌표로 한다.
- ⑤ Fig.3의 예처럼 T_i 의 x 좌표 T_i 가 R_{i+1} 의 x 좌표로 선택되었다면, 먼저 곡선 $S(u)$ 위의 점중에서 x 좌표가 T_i 와 같은 점에 해당하는

매개변수를 방정식 $S_i(u) = T_i$ 를 풀어서 구한 후, 이로부터 점 S_{i+1} 를 구한다.

- ⑥ 점 S_{i+1} 의 z 좌표와 T_{i+1} 의 y 좌표로부터 R_{i+1} 의 나머지 좌표를 결정한다.
- ⑦ ①~⑥과정을 반복하여 구한 3차원상의 점들을 B-spline으로 보간한 것이 $R(t)$ 가 된다.

이상의 과정들을 통해 펀치 외곽 경계선의 네 변이 설계되면 인접한 변들을 매끄럽게 연결함으로써 모서리 부분의 곡선을 생성하여 최종적인 3차원 펀치 외곽 경계선을 완성한다. 본 연구에서는 Fig.5에서와 같이 모서리 곡선의 설계 입력조건 중 양끝점에서의 접선벡터의 크기를 중요 변수로 선정하도록 하였다. 이때 접선 벡터의 방향은 앞에서 결정된 인접한 네개의 변중 해당 변으로부터 얻도록 하였다. 따라서 입력된 접선 벡터의 크기에 따라 처짐 정도가 다른 형상의 곡선이 다수 생성될 수 있는데 그 처짐 정도는 곡면 생성결과 소재의 굴곡, 부풀음, 굽힘선 등의 결합발생의 관건이 되므로 설계자가 판단해서 선택한다. 그러나 이 과정을 통해 선택된 곡선 C_0 의 2차원 상면투영 형상은 일반적으로 이미 상면 투영도 상에서 정의한 2차원 모서리 곡선 형상 C_{TOP} 과 일치되지 못하므로 이를 보정하는 설계과정이 추가로 필요하게 된다. 이를 위해 Fig.5에서와 같이 상면 투영도 상의 2차원 모서리 곡선 C_{TOP} 을 이동자(director)로 하여 펀치 방향으로 룰드(ruled) 곡면 S 를 생성하고 선택된 3차원 모서리 곡선 C_0 를 이 룰드 곡면상으로 투영(projection)시키게 된다. 이 투영 과정은 다음 단계에 의해 설명된다.

- ① 곡선 C_0 상의 $P_i (i=0, \dots, m)$ 를 계산한다. 점 P_i 는 앞의 3차원 곡선의 합성 과정에서도 설명한 바와 같이 일정한 허용공차가 주어질 때 직전의 점 P_{i-1} 에서 계산된 직선 보간길이 및 접선 방향의 길이에 따라 결정될 수 있다.
- ② 점 P_i 에서의 투영방향 r 을 구한다. 이를 위해 먼저 곡선 C_0 의 양끝점 P_0, P_m 에서 T_0, T_m 와 펀치방향 벡터간의 외적 벡터 N_0, N_m 상의 일정한 점 A, B 를 계산하고, 이 점들에

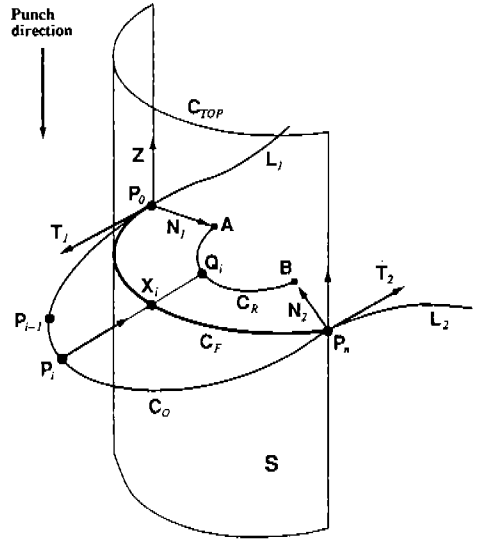


Fig.5 Adjustment of punch opening curve at the corner

양끝점이 일치하도록 곡선 C_0 를 좌표변환하여 새로운 곡선 C_R 을 결정한다. 이때 곡선 C_0 상의 점 P_i 에서의 투영벡터 r 은 점 P_i 와 이와 동일한 매개변수값에 대응하는 곡선 C_R 상의 점 Q_i 간의 벡터 $Q_i - P_i$ 로 한다.

- ③ 점 P_i 를 ②에서 구한 방향 r 으로 곡면 S 위에 투영시켜 투영점 X_i 를 다음 식을 풀어서 구한다.

$$P_i + wr - S(u, v) = 0 \quad (3)$$

여기에서 u, v 는 룰드 곡면 S 의 매개변수이고 w 는 점 P_i 를 기점으로 하는 r 방향 직선의 매개변수 값이다.

- ④ ①~③과정에서 계산된 $X_i (i=0, \dots, m)$ 를 양끝점 P_0, P_m 에서 접선벡터 T_0, T_m 를 갖도록 보간하여 최종곡선 C_F 를 구한다. 양끝점에서 접선벡터를 만족하는 곡선의 보간계산 과정은 참고문헌⁽¹⁵⁾를 참고하기 바란다.

3.3 측면부 곡면의 모델링

3차원 펀치 외곽경계선이 생성되면 블랭크 호올더의 곡면 형상을 설계하는데 이것도 펀치

외곽경계선에서와 마찬가지로 측면에 해당되는 곡면을 먼저 설계하게 된다. 일반적으로 블랭크 홀더의 측면은 룰드 곡면들로 구성되는데 이 측면부 룰드 곡면을 생성하기 위해서는 측면 편치 외곽경계선에 대응할 또다른 곡선이 존재해야 한다. 본 연구에서 새로운 곡선을 구하는 과정을 Fig.6의 예를 통해 살펴보면 다음과 같다.

- ① 측면 편치 외곽경계선 C_s 의 내부 위치 점들 $P_i (i=0, \dots, n)$ 에 대한 대응점 Q_i 를 구한다. 이때 대응점 Q_i 는 그림에서와 같이 점 P_i 에 대해 설계자가 지정한 방향벡터 u_i , 방향각 θ_i , 방향길이 d_i 에 의해 결정된다. 여기에서 u_i 는 $P_i Q_i$ 벡터의 XY평면상으로의 단위 투영벡터이다.
- ② 양끝 대응점(Q_0, Q_n)에 접선 벡터 T_0, T_n 을 부여한다. T_0, T_n 는 각각 반드시 t_0, t_n 일 필요는 없으며 설계 형상에 따라 설계자가 지정할 수 있는 접선 벡터이다.
- ③ 양끝 점에서의 접선 벡터 T_0, T_n 을 만족하도록 대응점 Q_i 들을 보간한다.
- ④ ①-③과정을 통해 새로운 경계곡선이 생성되면 편치 외곽경계선과 차수, 절점벡터, 조정점의 수를 맞춰 동질화한 후 두 곡선을 안내자로 하는 룰드곡면을 생성한다.

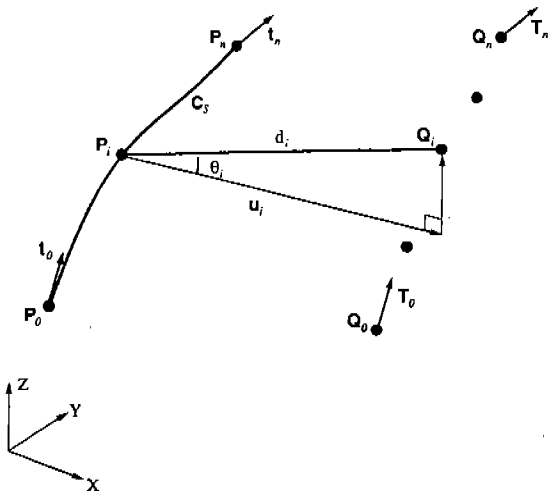


Fig.6 Determination of side boundary of blankholder surface

3.4 모서리부 곡면의 모델링

모서리부 곡면의 설계시 만족해야할 가장 중요한 설계조건으로 본 연구에서는 다음 두가지 요건을 선정하였다.

- (1) 인접한 두 측면부 곡면과의 경계에서 연속성을 만족해야 한다. Fig.7에서와 같이 B-spline곡면이 경계에서 C'연속이기 위해서는 일반적으로 다음 식을 만족시켜야 한다.⁽¹⁶⁾ 여기에서 α, β 는 상수이고 n 은 경계 곡선의 조정점의 갯수이다.

$$|S_j - R_j| : |T_j - S_j| = \alpha : \beta$$

$$|S_j - R_j| / |S_j - R_j| = [T_j - S_j] / |T_j - S_j|$$

$$j=0, \dots, n-1 \quad (4)$$

- (2) 생성곡면은 충분히 팽팽해야 한다. 생성된 모서리 곡면 자체가 팽팽하지 않고 처진형상을 가지면 초기 변형 소재 판넬에 굽힘선,

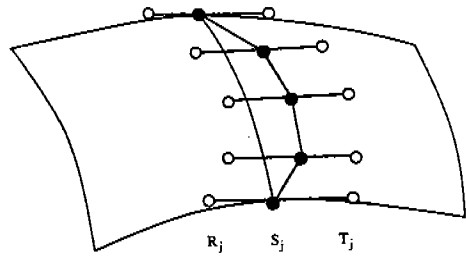


Fig.7 Connectivity between adjacent surface patches

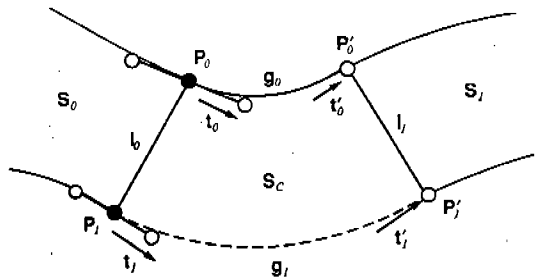


Fig.8 Completion of blankholder face at its corner by four boundary surface

부풀음, 굴곡 등 성형 결함이 발생할 소지가 있기 때문이다.

본 시스템에서 채택하고 있는 블랭크 호울더의 모서리부 곡면의 설계 방법은 Fig.8에 의해 다음 단계들로 설명될 수 있다.

- ① 모서리 블드 곡면 S_1 를 생성하기 위해 편치 외곽 경계선의 모서리 곡선 g_0 에 대응되는 P_0, P_1 위치상의 새로운 경계곡선을 구한다. 이 경계곡선은 곡선 g_0 를 양끝점에서의 접선 벡터 t_0, t_1 를 그대로 유지시키면서 그 양끝점 P_0, P_1 이 각각 P_1, P_1 와 일치하도록 변환 작업을 수행하여 생성한다. 이 과정은 측면부 곡면의 생성시에 적용한바 있는 편치 외곽경계선의 변환과정과 동일하게 수행된다.
- ② 측면부 곡면 S_0 와의 경계에서 C^1 연속성을 만족하기 위한 점 P_1 에서의 접선 벡터 t_1 를 구한다. 접선 벡터 t_1 는 식(4)로 제시된 B-spline곡면 간의 C^1 연속조건으로부터 계산된다. 곡면 S_1 과의 경계에 대해서도 동일한 과정에 의해 또 다른 접선 벡터 t_1 를 구한다.
- ③ ①에서 생성된 곡선이 그 양끝점에서 ②에서 구한 접선 벡터(t_0, t_1)를 만족하도록 재보간하여 최종 경계 곡선 g_1 을 구한다. 재보간을 위해서는 ①에서 생성된 곡선상의 다수 점들을 생성하는데 이것은 앞서 모서리 편치 경계곡선의 투영과정 중 ① 과정과 동일한 방법에 의해 수행된다.
- ④ 곡선 g_0 와 g_1 을 경계로 하는 블드 곡면을 생성한다.

4. 스텝드로 곡면의 모델링

스텝드로 곡면이란 성형중의 발생 결함을 억제, 방지하기 위해 편치 외곽 경계선과 제품 경계곡선사이에 설계한 곡면을 말한다. 본 연구에서 스텝드로 곡면을 생성하는 과정은 크게 ① 단면위치의 지정, ② 단면 입력기구의 설정 및 단면 곡선의 생성, ③ 중간단면곡선의 결정, ④ 접선조건을 고려한 보간에 의한 곡면생성등으로

요약할 수 있다.

4.1 기본 모델링 개념

스텝드로 곡면의 설계시 만족시켜야할 조건으로 본 연구에서는 다음 두가지를 선정하였다.

- ① 생성된 곡면의 한쪽 경계는 주어진 제품의 경계곡선과 일치하여야 한다. 이때 다른쪽 경계를 편치 외곽경계선과 일치시키는 문제는 설계 조건에 포함시키지 않았다. 왜냐하면 이 경계 부위, 즉 스텝드로 곡면과 블랭크 호울더 곡면이 만나는 부위는 날카로운 형상을 갖는 관계로 NC 가공시 필렛 곡면으로 대체되기 때문이다.
- ② 인접한 곡면 패치간의 경계에서는 연속성(continuity)이 만족되어야 한다.

스텝드로 곡면의 기본 설계 개념을 설명하기 위해 Fig.9에 양쪽 경계 단면곡선 C_L, C_R 과 그 위치에서 편치 외곽 경계선과 제품 외곽선을 분할하여 얻은 두 안내곡선 G_U, G_D 로 이루어진 사각 곡면패치를 그 예로 제시하였다. 일반적으로 3차 NURBS 곡선의 경우에는 그림에서와 같이 안내곡선의 조정점의 갯수가 $N(=6)$ 이라면 내부 결점수는 $(N-2)(=4)$ 이고 이중 곡선경계에서의 절점을 제외한 내부 절점수는 $(N-4)(=2)$ 가 된다. 따라서 이 내부 절점에 해당하는 안내곡선상의 위치에 경계단면곡선 C_L, C_R 와 완전히 동질화된 중간 단면 곡선 C_1, C_2 를 결정할 수만 있다면 전체 단면곡선의 조정점들을 인접한 곡면 패치와의 C^1 연속조건을 고려하여 보간함으로써 연속성이 보장되는 곡면을 얻을 수 있다. 가령 Fig.9에서 임의 방향의 조정점을 P_1, P_2, P_3, P_4 라고 하면 양끝점에서 인접 곡면 패치와 연속성을 보장하는 접선 벡터 T_L, T_R 를 만족하도록 보간함으로써 그 방향으로의 곡면의 조정점을 얻게된다. 이 보간작업을 안내곡선 G_U 상의 조정점열을 포함한 다른 방향의 조정점 열에 대해서도 동일하게 수행한다. 이렇게 해서 생성된 각 방향의 조정점들은 생성 곡면의 등매개변수 곡선(iso-parametric curve)의 조정점이 되며 주어진 안내곡선과 동일한 갯수를 갖게 된다. 한편 생성된 곡면의 한쪽 경계를 제품 외곽선과 일

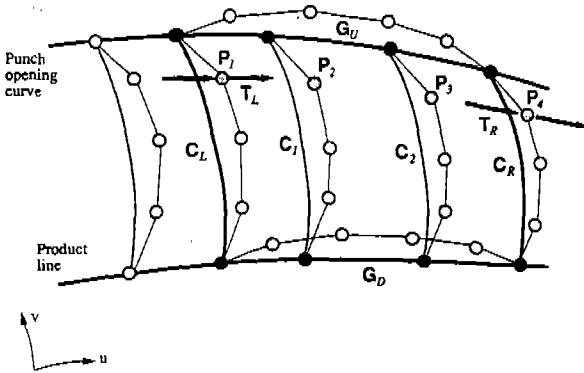


Fig.9 Example surface patch for explaining step draw design

치시키기 위한 방편으로 제품 외곽선에 해당하는 안내곡선 G_D 상에 놓여진 조정점열에 대해서만은 보간하지 않고 그대로 생성 곡면의 경계 곡선의 조정점으로 대체한다.

4.2 단면 곡선의 생성

스텝드로 곡면을 생성하기 위한 첫 단계는 중요 단면 곡선이 놓일 위치를 선정하고 그 위치에 대해 단면 곡선을 생성하는 일이다. 이를 위해 단면 입력기구를 설정하고 이를 통해 단면 곡선을 생성, 입력하게 된다. Fig.10은 단면 곡선의 입력 기구를 설명하기 위한 예를 나타낸다. 그림에서 A, B는 단면 입력 위치로 지정된 점이다. 또한 d 는 각각 단면 입력 위치점 간의 벡터를 XY 평면에 투영시켜 얻은 단면 방향벡터⁽¹⁷⁾이며, θ 는 그 단면 방향벡터가 양의 X 축과 이루는 단면 방향각⁽¹⁷⁾이다. 이때 단면곡선이 생성될 단면 위치평면은 AB 간 벡터와 Z 축 벡터의 외적을 법선벡터로 갖는 평면으로 결정되며, 이 평면은 다음의 변환 과정에 의해 XY 평면 상으로 이동된다.

$$\begin{aligned} & \text{Transform}(A, d, Z) \\ &= \text{Trans}(-A) \text{Rot}(d, -90^\circ) \\ & \text{Rot}(Z, -\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

이 과정을 거쳐 결정된 새로운 평면이 설계

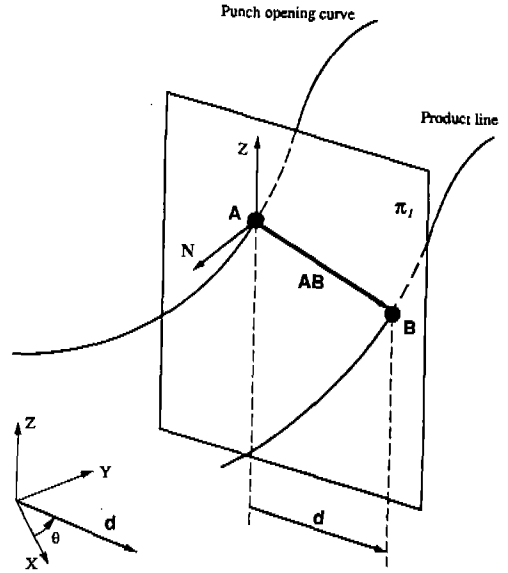


Fig.10 Specification of a plane to input 3-D section curve

자의 단면 입력 평면이 되며, 이때 단면 곡선이 위치해야 할 평면상의 양 끝점 A, B는 변환 과정에 의해 자동으로 결정된다. 또한 생성된 단면 곡선을 공간상에 원위치시키는 과정은 그 역변환에 의해 쉽게 수행된다.

4.3 중간 단면 곡선의 결정

곡면 패치의 경계 곡선들이 구성되면 먼저 중간 단면곡선들의 양끝점이 놓일 두개의 안내곡선을 서로 동질화시켜 차수, 조정점수, 절점 벡터를 동일하게 한 다음 그 내부절점의 위치에 중간 단면곡선을 생성한다. 본 연구에서 중간 단면 곡선의 형상은 해당 곡면 패치의 양쪽 경계 단면곡선의 형상에 의해 결정된다. 이를 설명하기 위해 Fig.11에 경계 단면곡선과 안내곡선들로 구성된 임의의 곡면 패치를 나타낸다. 이때 경계 단면곡선 $C_L(u)$, $C_R(u)$ 와 안내곡선 $G_U(v)$, $G_D(v)$ 를 각각 정의하는 절점벡터 U 와 V 는 다음과 같이 주어진다고 가정한다. 여기서 e, f 는 곡선의 세그먼트의 갯수이다.

$$\begin{aligned} U &= \{\bar{u}_0, \dots, \bar{u}_0, \bar{u}_1, \dots, \bar{u}_{e-1}, \bar{u}_e, \dots, \bar{u}_e\} \\ V &= \{\bar{v}_0, \dots, \bar{v}_0, \bar{v}_1, \dots, \bar{v}_{f-1}, \bar{v}_f, \dots, \bar{v}_f\} \end{aligned} \quad (6)$$

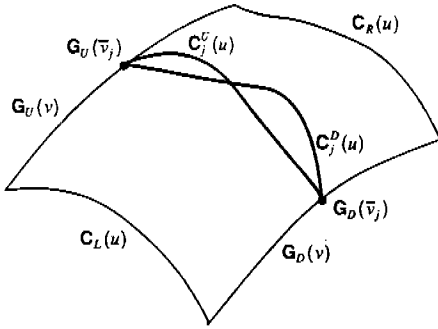


Fig.11 Generation of an internal curve

이제 안내곡선 상의 내부 절점중 양끝점이 임의의 절점 $G_U(\bar{v}_j)$, $G_D(\bar{v}_j)$ 에 놓여 질 중간 단면곡선 $C_j(u)$ 를 구하기로 하자. Fig.11에서 $C_j(u)$ 는 두 곡선 $C_j^{UL}(u)$, $C_j^{UR}(u)$ 를 적절히 혼합함으로써 결정되는데 여기에서 $C_j^{UL}(u)$ 는 단면곡선 $C_L(u)$, $C_R(u)$ 를 안내곡선 $G_U(v)$ 를 따라 변환한 후, 이를 혼합하여 생성한 곡선이다. 마찬가지로 $C_j^{UR}(u)$ 는 $C_L(u)$, $C_R(u)$ 를 $G_D(v)$ 를 따라 변환한 후 혼합한 곡선이다. 이제 중간 형상곡선 $C_j^P(u)$ 를 결정하는 과정에 대해 Fig.11의 예를 통해 설명하기로 한다. $C_j^P(u)$ 도 이와 유사한 절차를 따라 구할 수 있게 된다.

(1) 좌표 변환

먼저 경계 단면곡선 $C_L(u)$, $C_R(u)$ 를 각각 안내곡선 $C_U(v)$ 를 따라 좌표 변환하여 각 곡선의 왼쪽 끝점을 $G_U(\bar{v}_j)$ 와 일치시킨다. 이때 변환된 두 곡선을 $C_j^{UL}(u)$, $C_j^{UR}(u)$ 라고 하자.

(2) 스케일 변환

좌표변환 결과 두 곡선 $C_j^{UL}(u)$, $C_j^{UR}(u)$ 의 양 끝점간의 직선길이가 $G_U(\bar{v}_j)$, $G_D(\bar{v}_j)$ 간의 길이와 같지 않게 되므로 이를 교정하기 위해 곡선을 스케일(scale) 변환한다. 즉 곡선 $C_j^{UL}(u)$ 와 $C_j^{UR}(u)$ 를 왼쪽 끝점 $G_U(\bar{v}_j)$ 를 고정점으로하여 각각 $\xi_L(\bar{v}_j)$ 와 $\xi_R(\bar{v}_j)$ 만큼 스케일한다. 이때 $\xi_L(v)$, $\xi_R(v)$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\xi_L(v) = \frac{|G_D(v) - G_U(v)|}{|C_L(\bar{u}_v) - C_L(\bar{u}_0)|} \quad (7)$$

$$\xi_R(v) = \frac{|G_D(v) - G_U(v)|}{|C_R(\bar{u}_v) - C_R(\bar{u}_0)|}$$

(3) 쉬어 변환

스케일된 곡선 $C_j^{UL}(u)$ 와 $C_j^{UR}(u)$ 의 오른쪽 끝점이 절점 위치 $G_D(\bar{v}_j)$ 와 일치하도록 쉬어(Shear) 변환한다. $C_j^{UL}(u)$ 를 예로 설명하면, $G_U(\bar{v}_j)$ 를 고정점으로 $C_j^{UL}(u)$ 를 회전시켜 오른쪽 끝점을 $G_D(\bar{v}_j)$ 와 일치시킨다. 이 때 회전축은 두 벡터, $C_L(\bar{u}_v) - C_L(\bar{u}_0)$ 와 $G_D(\bar{v}_j) - G_U(\bar{v}_j)$ 의 외적으로 하고 회전각도는 이 두 벡터간의 각도가 된다.

(4) 혼합 변환

스케일, 쉬어 변환을 통해 얻은 두 곡선 $C_j^{UL}(u)$ 와 $C_j^{UR}(u)$ 를 다음 식으로 선형 혼합(blend)하여 $C_j^P(u)$ 를 얻는다.

여기에서 $f(v) = \frac{v - \bar{v}_0}{v_j - \bar{v}_0}$ 이다.

$$C_j^P(u) = \{1 - f(v_j)\} C_j^{UL}(u) + f(v_j) C_j^{UR}(u) \quad (8)$$

한편 $C_j^P(u)$ 도 이상의 과정과 마찬가지로 생성되었다고 가정하면, 두 곡선 $C_j^P(u)$, $C_j^P(u)$ 를 허마이트혼합(Hermite blending)하여 최종적인 중간 단면곡선 $C_j(u)$ 를 얻는다.

여기서 $g(u) = \frac{u - \bar{u}_0}{u_v - \bar{u}_0}$ 이다.

$$C_j(u) = [1 - 3\{g(u)\}^2 + 2\{g(u)\}^3] C_j^P(u) + [3\{g(u)\}^2 - 2\{g(u)\}^3] C_j^P(u) \quad (9)$$

4.4 스텝드로 곡면의 생성

전체 스텝드로 곡면을 패치별로 설계할 경우 인접한 곡면 패치간의 매끄러운 연결, 즉 연속성이 요구된다. 곡면 패치간의 C¹연속성은 식(4)에서와 같이 곡면 경계상의 인접 조정점들간의 일정한 기하학적 조건을 만족하여야 한다. 본 연구에서 C¹연속성을 고려한 곡면 보간에 의해 스텝드로곡면을 생성하는 과정을 Fig.12의 예를 통해 설명하면 다음과 같다.

① 패치경계상의 내부 조정점들에서 가져야할 접선벡터의 방향을 먼저 결정한다. 예를 들어 Fig.12에서 경계상의 조정점들중 Q점

을 생각하면 먼저 조정점 Q 와 곡면패치 A , B 의 경계상에서 인접해 있는 두 조정점 P , R 을 찾아 이 세 조정점을 지나는 B-spline 원을 생성한다. 이어서 생성된 원의 Q 점에서의 미분벡터를 계산한 다음, 그 미분벡터의 방향을 Q 점에서 가져야할 접선벡터의 방향으로 결정한다.

- ② 경계곡선의 양끝에 위치한 조정점 V_0, V_1 에 대한 좌우 곡면패치 A, B 의 제품선과 펀치 외곽경계선에서의 미분벡터의 크기, 즉 T_A, T_A', T_B, T_B' 의 크기를 계산한다.
- ③ 경계곡선상의 내부조정점들 Q, M, N 이 각각 경계곡선에 대해 갖는 매개 변수값(control node)을 계산한다.
- ④ 내부조정점들 Q, M, N, V_1 이 곡면패치 A 의 양끝 조정점으로서 가져야할 접선벡터의 크기를 계산한다. 이 접선벡터들의 크기는 미분벡터 T_A, T_A' 의 크기가 경계곡선의 매개 변수값에 따라 선형적으로 변한다는 가정하에 미분벡터 T_A, T_A' 의 크기와 ③에서 구한 내부조정점들이 경계곡선에 대해 갖는 매개 변수에 의해 결정된다.
- ⑤ ④에서 계산된 결과로부터 (4)식의 곡면의 C^1 연속조건을 적용하여 내부조정점들 Q, M, N, V_1 이 곡면 패치 B 의 경계조정점으로서 갖는 접선벡터의 크기를 결정한다.

⑥ 경계상의 내부 조정점들 Q, M, N, V_1 이 좌우 곡면패치에 대해 각각 가져야할 접선벡터를 계산한다. 이 접선벡터는 ①에서 결정된 방향과 ④와 ⑤로부터 계산된 크기로부터 결정된다.

⑦ ①~⑥의 과정을 거쳐 모든 곡면패치의 경계에서 가져야할 접선벡터를 결정 한 후, 제품 외곽선상의 조정점을 제외한 모든 내부조정점들을 양끝점에서 접선벡터를 구속조건으로하여 접선벡터방향으로 보간함으로써 최종 스텝드로곡면을 생성한다.

이상에서와 같이 곡면패치간 경계에서는 계산된 접선벡터의 방향과 크기에 의해 곡면을 보간함으로써 곡면간의 경계에서는 정확히 C^1 연속성을 만족하게 된다. 그러나 예외로 제품 외곽선상의 조정점들에 대해서는 보간하지 않고 그대로 생성곡면의 경계조정점으로 대체함으로써 생성곡면의 경계와 주어진 제품 경계선과 정확히 일치시킨다. 이 경우에도, 즉 제품 외곽선의 원래곡선을 생성곡면의 경계곡선으로 취하더라도 양쪽 접선벡터 T_A, T_B 가 곡면의 경계에서 그대로 유지되므로 전체적으로 C^1 연속성을 잃어버리지 않는다. 한편 Fig.12의 펀치 외곽경계선상의 조정점들에 대해서는 보간하여 새로운 조정점들을 얻는다. 이렇게 되면 전체 곡면간의 C^1 연속성은 만족되지만 생성된 곡면의 한쪽 경계가 주어진 펀치 외곽경계선과는 일치하지 않게 된다. 이 점은 B-spline곡면간 연속조건에 한계가긴하지만, 앞에서도 언급한 바와 같이 이 경계부위는 NC가공시 필렛곡면형상으로 가공될 것이므로 전혀 문제가 되지 않는다.

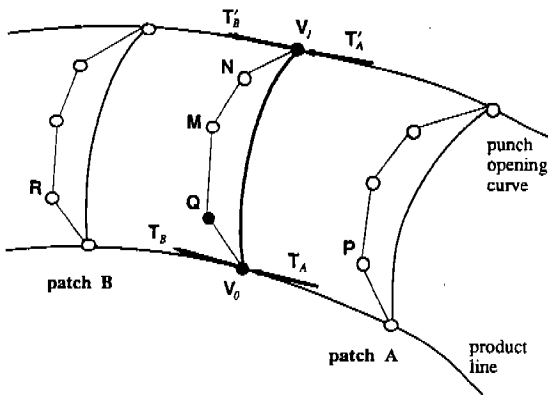


Fig.12 Surface interpolation with considering C^1 -continuity between adjacent patches

5. 드로우 비드곡면의 모델링

드로우 비드는 블랭크 호울더 곡면상에 위치하여 성형중 소재판넬의 다이내부로의 유동을 조절하고, 동시에 판넬에 발생하는 주름을 억제하는 역할을 한다. 본 연구에서는 드로우 비드 곡면을 생성하기 위해 드로우 비드의 경계와 중요단면에서 정의한 형상 곡선들로 곡선망을 구성한 후 스키닝에 의한 곡면 생성기법을 적

용한다. Fig.13은 본 시스템에 의해 구축된 드로우 비드의 곡선망의 예를 나타낸다. 구성된 곡선망에 적용될 스키닝 기법에 관해서는 많은 참고문헌들에서 인용되고 있으므로 여기에서는 드로우 비드의 곡선망을 구성하는 과정에 대해서만 설명하기로 한다.

- ① 드로우 비드의 경계 곡선을 생성한다. 이를 위해 먼저 블랭크 호울더 곡면의 상면 투영도에서 드로우 비드의 경계곡선을 생성한다. 이어서 생성된 2차원 경계곡선을 블랭크 호울딩 방향으로 블랭크 호울더 곡면위에 투영시켜 3차원 경계곡선을 생성한다.
- ② 중요 단면곡선을 생성한다. 설계자가 지정한 중요 단면 위치에 대해 단면 곡선을 생성하는 이 과정은 4절의 스텝드로 곡면의 설계과정에서 단면 곡선을 생성하는 절차와 동일하게 수행된다.

- ③ 단면 곡선간의 루울(rule)을 생성한다. 일단 단면 곡선들이 생성되면 필요한 경우 루울곡선을 입력하여 단면 곡선간의 인접 관계를 설정한다. 이 과정 역시 3절에서 서술한 펀치 외곽경계선중 3차원 측면부 곡선의 생성방법과 동일하게 수행된다.

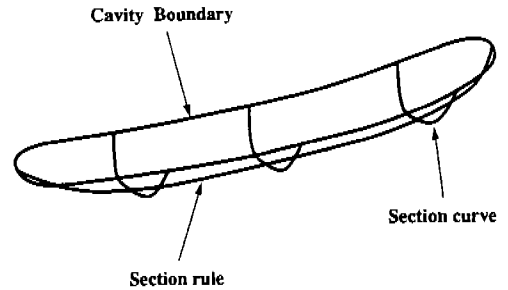


Fig.13 A curve-net for draw bead modeling

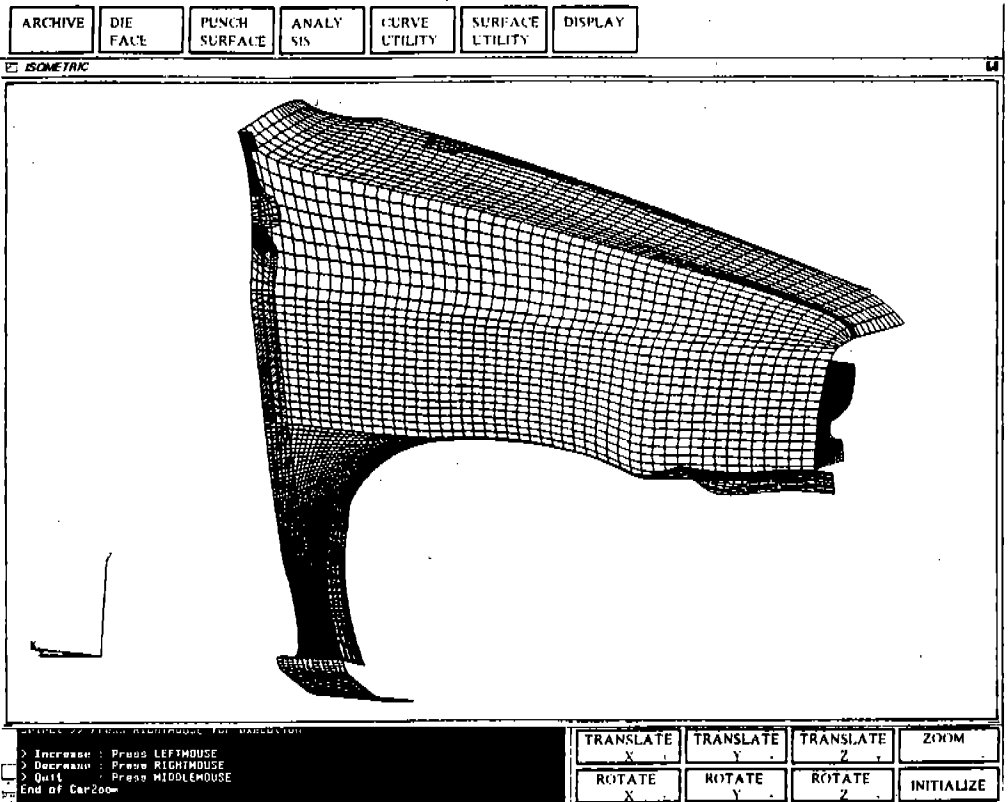


Fig.14 Final shape of product, i.e. front fender part

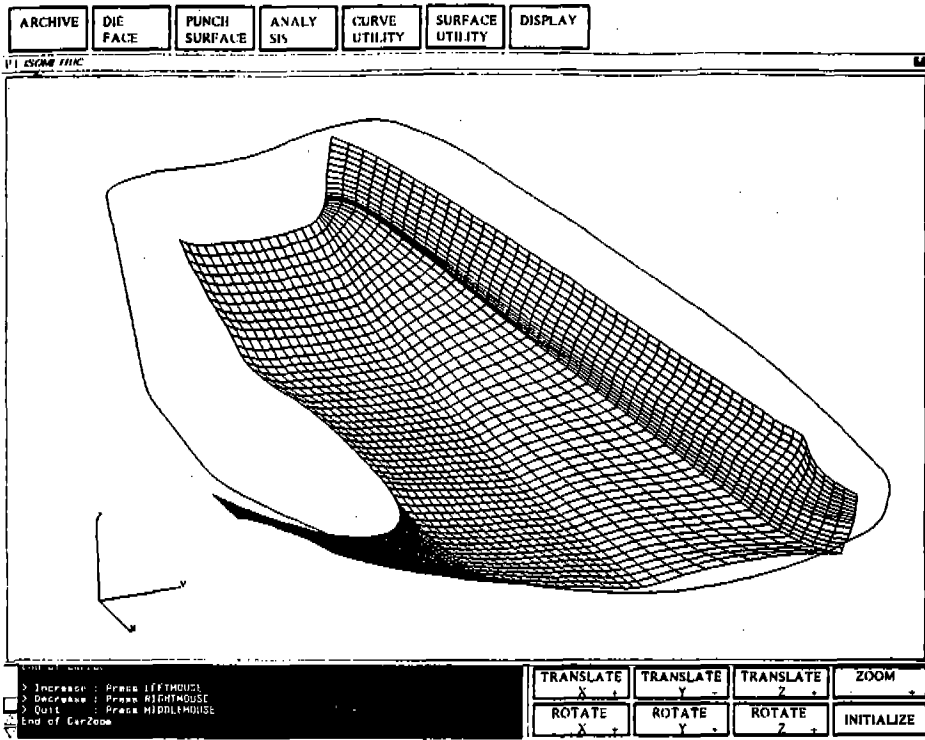


Fig.15 Completed punch opening curve with the tipped product

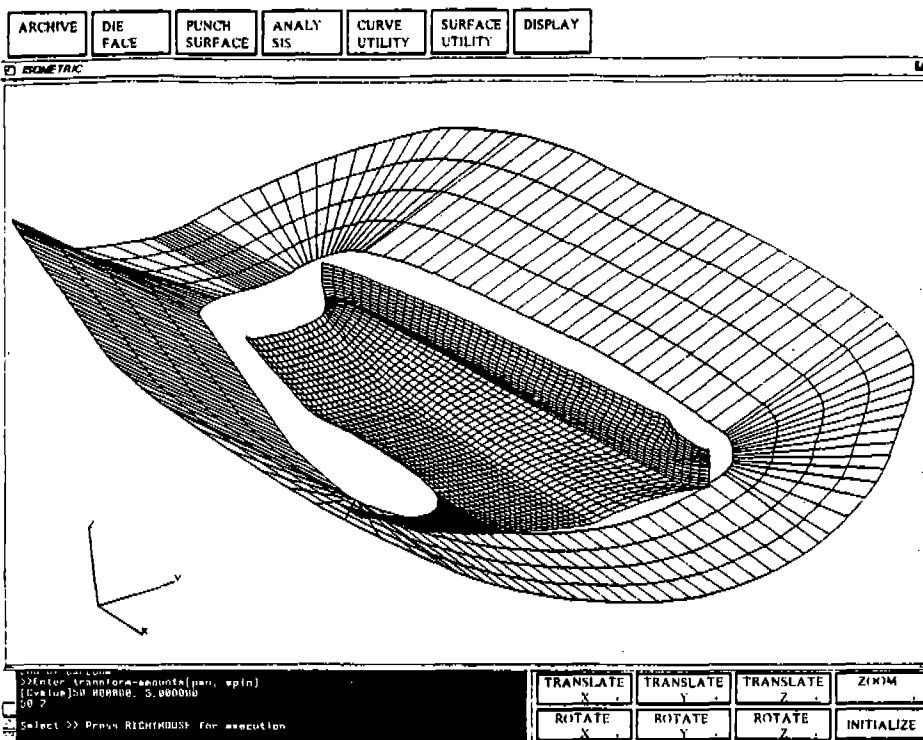


Fig.16 Generated blankholder surface

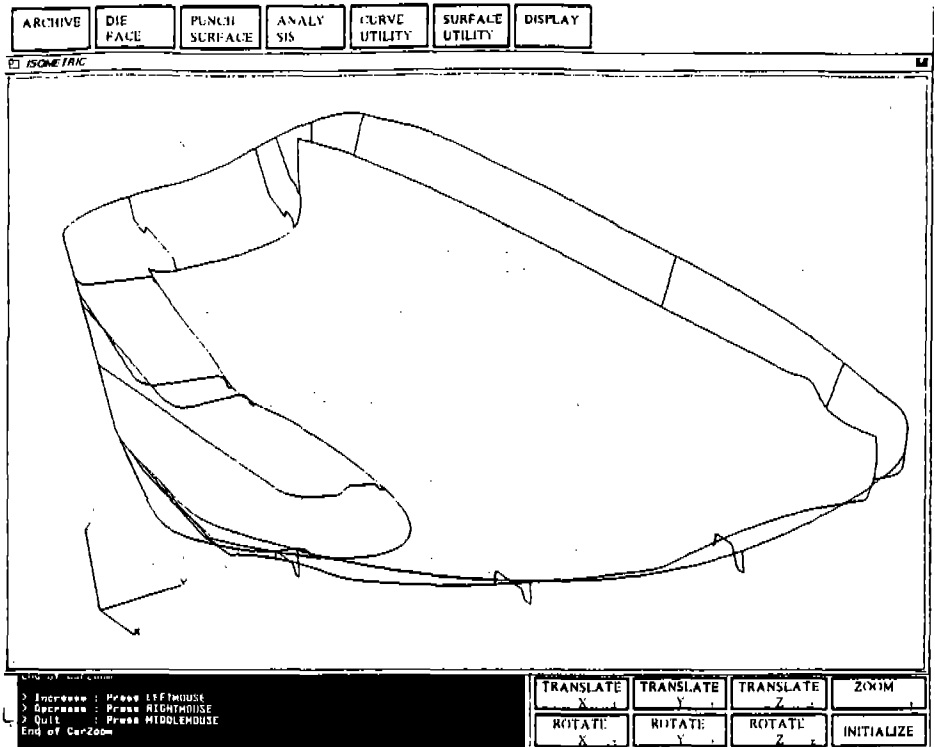


Fig.17 The patches composed of the section curves and the rule curves for generating the step draw surface

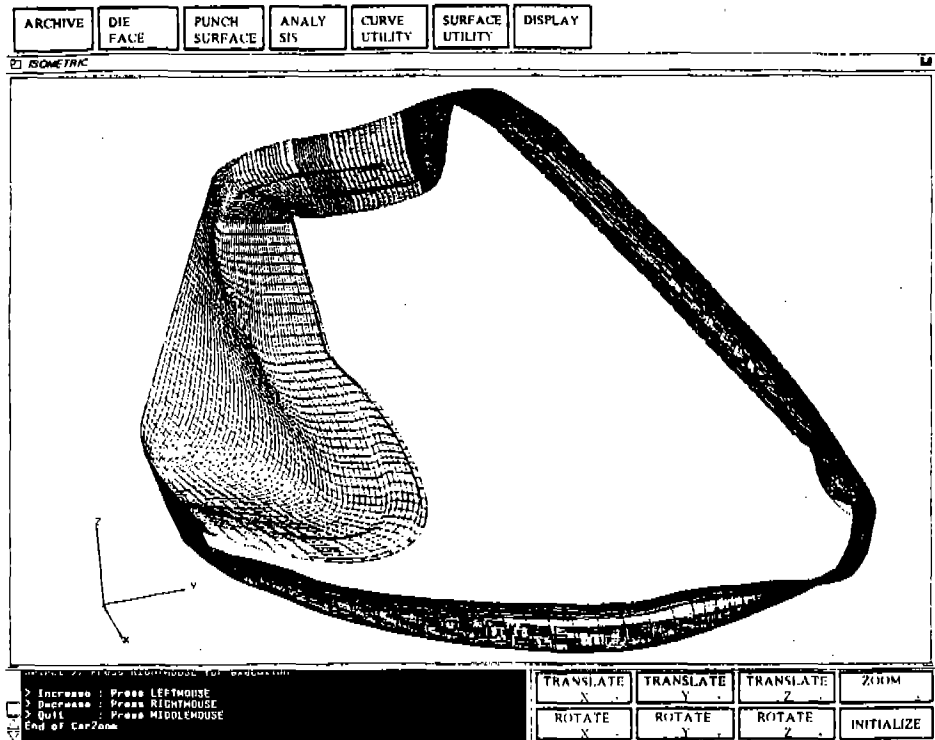


Fig.18 Completed step draw surface

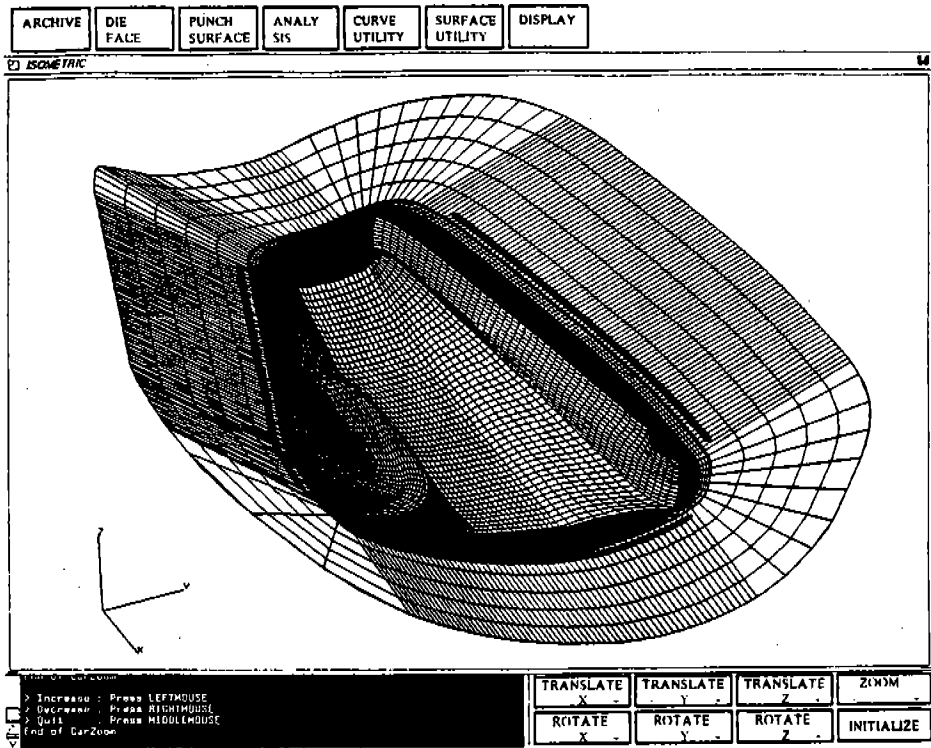


Fig.19 Final shape of die-face, i.e. product, step draw surface, blankholder surface, and draw bead surface

6. 적용 예

본 연구에서 개발한 모델링시스템을 사용하여 차체의 전방 우측 펜더(Front Fender)에 대한 금형의 형상을 모델링한 예를 소개한다. Fig.14는 NURBS로 표현된 펜더 제품의 곡면형상이다. Fig.15는 펀치방향과 성형방향이 결정된 제품면에 대한 3차원 펀치 외곽경계선을 보인다. Fig.16은 3차원 펀치 외곽경계선을 기준으로 생성한 블랭크 호울더 곡면을 나타낸다. Fig.17은 스텝드로 곡면을 생성하기 위해 중요단면곡선을 입력, 생성한 결과이고 Fig.18은 완성된 스텝드로 곡면이다. Fig.19는 드로우 비드 곡면을 모델링한 최종 완성된 금형형상을 나타낸다.

7. 결론

본 연구에서 개발한 차체 금형형상의 전용

모델링시스템은 기존의 설계과정에서 사용해온 범용 곡면 모델링시스템과 비교하여 다음과 같은 특징을 갖게 된다.

- (1) NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)를 곡선과 곡면 형상의 표현식으로 채택하였다. 기존의 대부분의 상용시스템이 Bezier나 다항식을 사용하고 있는 것과 비교하여, 특히 표현대상이 금형일때 (i) 대량의 곡선과 곡면 데이터의 간편한 관리, (ii) 다양한 구속조건을 갖는 형상 모델링 방법의 개발, (iii) 형상의 국부적 수정 등의 두드러진 장점을 갖는다.
- (2) 곡면의 생성이 자동으로 수행되므로 기존의 설계과정에서 요구되는 방대한 양의 수작업을 대폭 줄일 수 있어 전체 설계 시간을 단축할 수 있다.
- (3) 다수의 곡면 패치별로 모델링되는 형상부의 경우에 곡면 패치간에는 연속성(C¹)

이 보장되어 경계에서의 곡면간섭, 굴곡 등을 상당한 정도 방지할 수 있고, NC가 공시에도 공구 간섭을 배제할 수 있는 등의 가공상의 효율을 높일 수 있다.

- (4) 구성곡면 패치간에는 겹쳐 있거나 간격이 벌어져 있는 경우가 없으므로 생성된 최종 금형형상은 NC가공이나 FEM해석을 위한 최적 모델로서 제공될 수 있다.

참 고 문 헌

1. K. Yoshida, "Trends in Forming Technology for Car Body in Japan," *Advanced Technology of Plasticity*, Vol.I, 1984, pp.729~734.
2. CAD/CAM 사례집(CAD/CAM시리즈 5), 일본기계학회 편, 1985.
3. W. Tiller, "Rational B-splines for Curve and Surface Representation," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.3, No.10, 1983, pp.61~69.
4. L. Piegl and W. Tiller, "Curve and Surface Constructions using Rational B-splines," *Computer Aided Design*, Vol.19, No.9, 1987, pp.485~498.
5. L. Piegl, "On NURBS : A Survey," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.11, No. 1, 1991, pp.55~71.
6. G. Farin, "Trends in curve and surface design," *Computer Aided Design*, Vol.21, No.5, 1989, pp.293~295.
7. C.de Boor, *A practical guide to splines*, Springer, Berlin, FRG, 1978.
8. W. Gordon and R.Riesenfeld, "B-spline curves and surfaces," in R.E. Barnhill and R. Riesenfeld(eds.), *Computer Aided Design*, Academic Press, NY, USA, 1974, pp.95~126.
9. P.E. Bezier, *The mathematical basis of UNISURF CAD system*, Butterworths, London, 1986.
10. S. Coquillart, "A control-point-based sweeping technique," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.7, No.11, 1987, pp.36~45.
11. C.D. Woodward, "Skinning techniques for interactive B-spline surface interpolation," *Computer Aided Design*, Vol.20, No.9, 1988, pp.441~451.
12. S.C. Tang, "Verification and Application of a Binder Wrap Analysis," in N.M. Wang, S.C. Tang(eds), *Computer modeling of sheet metal forming process : theory, verification and application*, The Metallurgical Society, 1985.
13. K.K. Chen, "An iteration method for binder wrap calculations," *Proceedings of the NUMIFORM '86 Conference*, Gotheburg, Aug., 1986.
14. 김세환, *프레스 가공의 불량과 대책*, 대광서림, 1988.
15. 이상찬, *자동차 외형 설계를 위한 CAD시스템의 개발*, 박사학위논문, 서울대학교 대학원 기계설계학과, 1992.
16. G. Farin, *Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design : A Practical Guide*, Academic Press, New York, 1988.
17. B.K. Choi and C.S. Lee, "Sweep surfaces modelling via coordinate transformations and blending," *Computer Aided Design*, Vol.22, No.2, 1990, pp.87~96.