

NURBS 곡면과 면적 사상법을 이용한 T-형 압출 금형곡면의 자동생성에 관한 연구

임종훈*, 유동진#

Investigation on the Automatic Surface Generation for Extrusion Die of T-shaped Section using NURBS Surface and Area Mapping Method

Jong-Hoon Im* and Dong-Jin Yoo#

ABSTRACT

In order to construct the extrusion die surface of T-shaped sections, an automatic surface construction method based on NURBS surface and area mapping method is proposed in the present work. In the present study, a center point for area mapping is determined by introducing the mapping concept based on constant area proportionality between original billet and final product. The characteristic points of inlet profile are determined using the traditional area mapping method and the root finding numerical method. The inlet and outlet profiles are precisely described with NURBS curves using the characteristic points of entry and exit sections.

For the construction of NURBS surface, an interpolation method for the pre-determined two section curves has been developed to be used in the generation of interior control points and weights. To show the validity of the proposed method, automatic die surface generation is carried out for the T-shaped section and T-shaped section with rounded corners.

Key Words : Extrusion die (압출금형), Area mapping method (면적사상법), NURBS surface (너브곡면)

1. 서론

주요 금속성형 방법중의 하나인 압출공정은 높은 생산성 및 제품의 기계적 성질의 우수성 등 많은 장점 때문에 자동차 산업, 항공기 산업, 군수산업 등에 널리 사용되고 있다. 최근에 CAD, CAE, CAM 등의 컴퓨터 응용기술들이 금속성형 기술에 응용되면서 평균형에 의한 열간압출은 물론이고 직선금형, 곡선금형에 의한 압출공정에 CAD, CAE,

CAM기술을 접목시키려는 시도가 이루어져 왔다.

특히 금형 가공기술의 발전 및 고강도의 금형재료 사용의 보편화 추세에 따라 고강도의 합금강, 복합재료등을 냉간 압출하기 위한 직선금형, 곡선금형 등 종래의 평균형과는 다른 새로운 개념의 금형설계에 관해 많은 연구가 이루어져 왔다.

Nagpal과 Altan^{1,2}은 이중유선함수(dual stream function)를 제안하고 그에 대한 동적가용 속도장을 유도하여 원형소재로부터 타원형 및 정다각형 제품

접수일: 2003년 3월 25일; 게재승인일: 2003년 8월 14일

* 대전대학교 기계설계공학과 대학원

교신저자: 대전대학교 컴퓨터응용기계설계학과

E-mail: djyoo@daejin.ac.kr, Tel: (031) 539-2031

을 압출하기 위한 공정을 상계해법을 이용하여 해석하였다. Yang과 Lee³는 등각사상(conformal mapping)개념을 이용하여 일반적인 형상의 단면형체에 대한 최적의 금형형상을 구하기 위하여 상계해법을 이용하여 해석하였다.

Gunasekera^{4,5}는 오목한(re-entrant) 형상에는 적용할 수 없었던 종래의 면적사상(area mapping)개념을 길이사상(line mapping)개념으로 전환하여 일반적인 형상의 단면형체를 압출하기 위한 금형곡면을 다항식 곡면, 베지에 곡면 등으로 자동생성하는 프로그램을 개발하였다. Yang과 Han⁶ 등은 일반적인 형상의 단면형체에 대한 압출공정을 해석하기 위하여 입구 및 출구형상을 푸리에(Fourier)함수로 표현하고 이 두 단면곡선을 보간하여 금형곡면을 생성하고 상계해법을 이용하여 해석하였다.

Shin과 Kim⁷ 등은 면적사상개념 및 4차 다항식을 이용하여 금형곡면을 표현하고 2차원 강소성 유한요소법과 슬랩방법을 혼합한 방법을 제안하여 정다각형 및 T-형의 출구형상에 대한 유한요소 해를 구하였다. Joun과 Hwang⁸은 금형곡면을 3차 스플라인 곡선 보간 개념을 이용하여 몇 개의 독립변수로 표현한 후 강소성 유한요소법과 최적화 방법을 이용하여 정다각형 및 T-형의 출구형상에 대한 최적 금형형상을 구하였다.

Celik과 Chitkara^{9,10,11}는 단면형상의 도심이 압출 방향의 중심축과 편심(off-centric)되어있는 비축대칭 단면형상의 제품을 압출하기 위한 금형곡면을 베지에(Bezier) 형태의 곡면으로 표현하고 속도장을 유도해서 다각형, T-형, H-형, U-형 등 다양한 형태의 출구형상에 대한 상계해를 구하였다.

이상과 같이 최적의 금형곡면 형상을 구하기 위하여 컴퓨터 해석 기술, 가공된 금형에 의한 실험 등 많은 시도가 이루어져 왔으나 금형곡면 자체에 관한 수식적인 표현에 관해서는 그 연구가 제한적으로 이루어져 왔다. 지금까지의 많은 연구를 통하여 금형곡면 표현을 위하여 사용되었던 다항식 곡면, 베지에 곡면 등은 현장에서 금형설계 기술자나 성형해석 기술자가 이용하기에는 정확성 및 호환성 등의 관점에서 볼 때 큰 부담이 아닐 수 없다. 대부분의 현장 기술자들은 범용 CAD, CAE, CAM 시스템을 사용하고 있기 때문에 연구결과를 이용하려면 다양한 형태의 곡면 방정식을 각자의 시스템으로 재현 또는 변환해야 하는데, 이러한 일은 CAD 전문가가 아니고는 매우 힘든 일이 아닐 수 없다.

따라서 금형형상 최적화 방법 이전에 앞서 금형형상의 표현법에 관한 표준화가 먼저 이루어져야 실질적이고 지속적인 설계기술의 발전을 기대할 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 대부분의 CAD 시스템에서 채택하고 있는 NURBS 곡면 기법과 단면 내에서는 금속 유동속도가 일정하다는 개념을 기본으로 하고 있는 면적사상법을 이용하여 T-형체를 압출하기 위한 금형곡면을 하나의 NURBS 곡면으로 자동 생성하는 방법에 대하여 제안하고자 한다.

NURBS 곡선, 곡면 이론은 지금까지 연구 보고된 모든 형태의 곡선, 곡면을 포함하고 있는 확장된 개념의 곡선, 곡면 이론으로서 자유곡선(free form curve), 자유곡면(free form surface)은 물론 원추곡선(conic curve), 원추곡면(conic surface)을 오차 없이 정확히 나타낼 수 있는 장점이 있다. 압출금형의 경우 원래 소재에 해당하는 입구형상 및 최종 제품에 해당하는 출구형상이 원, 타원, 다각형, 스플라인 등 다양한 형태로 정의되어야 하기 때문에 이 모든 형상을 오차 없이 표현할 수 있는 방법인 NURBS 곡선, 곡면 방법을 채택하게 되었다. 표현의 정확성뿐만 아니라 NURBS 곡선, 곡면은 CAD 데이터의 표준 포맷인 IGES, STEP 등으로의 전환이 정확하고 용이하기 때문에 타-CAD 시스템이나, CAE, CAM 시스템과의 연결(interface)에 전혀 문제가 없다는 중요한 장점을 가지고 있다.

2. NURBS 곡면의 수식적 표현

NURBS는 Non-Uniform Rational B-Spline의 약자로서 다항식의 비율(ratio) 형태로 표현되고 비균일(non-uniform)한 노트값(knot value)과 B-스플라인 블렌딩 함수를 기본으로 하고 있다는 것을 의미한다. B-스플라인과 마찬가지로 각 블렌딩 함수는 노트값의 일정범위 내에서만 영향력을 발휘하기 때문에 국부수정이 용이하고 조정점의 개수와는 무관하게 원하는 차수를 지정할 수 있어 적은 차수로 복잡한 형상의 곡선 및 곡면을 표현하는데 널리 사용되고 있는 주요한 CAD 이론중의 하나이다.

본 연구에서는 T형 압출 금형곡면의 자동생성을 위하여 사용자가 금형형상과 관련된 몇 가지 매개변수만 입력하면 면적사상법(area mapping method)을 이용하여 단면형상의 특성점들을 찾아내고 이들을 이용하여 입·출구 형상을 NURBS 곡선으로 변

환한 후 이 두 NURBS 곡선을 금형길이 방향으로 보간하여 전체 금형곡면을 하나의 NURBS 곡면으로 생성하는 방법을 제안하였다.

NURBS 곡선 및 곡면에서는 B-스플라인과 달리 각 조정점에서의 가중치가 정의된다. NURBS 곡면식은 두 매개변수 u, v 에 대하여 다음과 같이 표현된다.¹²

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}} \quad (1)$$

where,

- $P_{i,j}$: 곡면을 구성하는 조정점의 위치벡터
- p, q : u, v 방향의 차수
- $n+1$: u 방향의 조정점 수
- $m+1$: v 방향의 조정점 수
- $N_{i,p}(u), N_{j,q}(v)$: u, v 방향의 B-스플라인 기저함수(basis function)
- $w_{i,j}$: 조정점 $P_{i,j}$ 의 가중치

3. T형 압출 금형 곡면의 자동생성

3.1 출구 형상의 특성점들의 좌표 계산

Fig. 1은 원형소재로부터 T형의 제품을 압출하는 경우의 금형곡면 구성을 위한 단면형상들을 보여주고 있는데 T-형상을 나타내기 위한 특성점들인 점 P_0 부터 점 P_7 까지 총 8개의 점의 좌표를 사용자가 입력한 l_1, l_2, t_1, t_2 의 함수로 Table 1과 같이 구할 수 있다.

Table 1의 x_c 는 T-형상의 기하학적인 도심의 x좌표로서 P_3 및 P_4 의 x좌표를 0으로 하였을 때 계산된 값으로서 다음 식과 같이 표현된다.

$$x_c = \frac{l_2^2 t_2 + (2l_2 + t_1) l_1 t_1}{2(l_2 t_2 + l_1 t_1)} \quad (2)$$

3.2 출구측 금속유동 중심점의 결정

본 연구에서는 출구측 금속유동 중심점을 구하기 위하여 Nagpal, Altan¹²이 제안한 방법에 다음과 같은 수치해석적 방법을 응용하였다. Fig. 2의 x_d 가 구하고자 하는 출구측 유동 중심점의 x좌표로서 면적 A_p, A_B, A_f, A_o 간에는 다음과 같은 식이 성립된다.

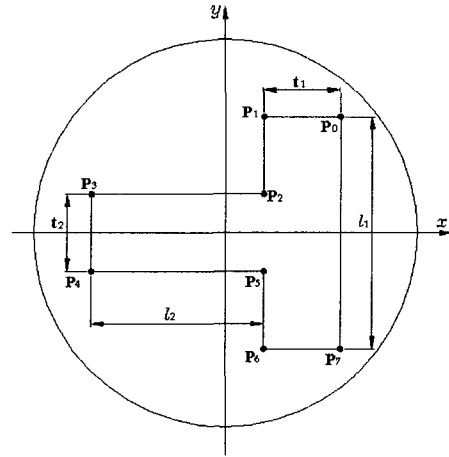


Fig. 1 Geometric description of characteristic points of outlet profile

Table 1 Parametric description of characteristic points of outlet profile

Point No.	x	y	z
P_0	$-x_c + l_2 + t_1$	$l_1/2$	d
P_1	$-x_c + l_2$	$l_1/2$	d
P_2	$-x_c + l_2$	$t_2/2$	d
P_3	$-x_c$	$t_2/2$	d
P_4	$-x_c$	$-t_2/2$	d
P_5	$-x_c + l_2$	$-t_2/2$	d
P_6	$-x_c + l_2$	$-l_1/2$	d
P_7	$-x_c + l_2 + t_1$	$-l_1/2$	d

$$\frac{A_B}{A_p} = \frac{A_o}{A_f} \quad (3)$$

식(3)을 구체적으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{A(x_d)}{(x_o - x_d) \frac{l_1}{2}} = \frac{A_o}{A_f} \quad (4)$$

where,

$$A_o : \pi R^2, \quad A_f : l_1 t_1 + l_2 t_2$$

$$A(x_d) : \int_{x_d}^R \sqrt{R^2 - x^2} dx$$

식(4)는 최종적으로 다음과 같은 x_d 에 관한 비선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

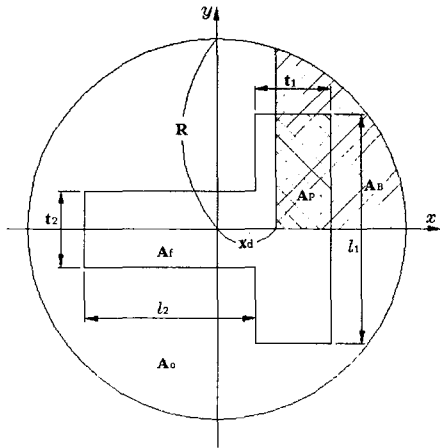


Fig. 2 Determination of the center point for area mapping using numerical method

$$f(x_d) = (x_0 - x_d) \frac{l_1 A_a}{2} - A(x_d) A_f = 0 \quad (5)$$

식(5)를 만족하는 x_d 를 구하기 위해서 여러 수치 해석법 중 수렴성이 좋은 이분법을 사용하였다.

3.3 면적사상법을 이용한 입구측 특성점들의 좌표계산

Fig. 3에서 보는바와 같이 입구측과 출구측을 앞절에서 구한 중심점을 기준으로 해서 네 부분의 영역으로 나눈 후 각각의 영역에 대하여 면적사상법을 적용하면 면적들간에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\frac{A_{o_i}}{A_{f_i}} = \frac{A_o}{A_f} \quad (1 \leq i \leq 4) \quad (6)$$

식(6)에 구체적인 기하학적 치수들을 대입하여 정리하면 다음과 같은 입구측 특성점의 좌표를 구할 수 있는 비선형 방정식을 얻을 수 있다.

$$f(\theta_{i-1}) = \frac{R^2 \theta_{i-1}}{2} - \frac{x_d R \sin \theta_{i-1}}{2} - \sum_{j=1}^i A_{o_j} - A_f \frac{A_o}{A_f} = 0 \quad (1 \leq i \leq 4) \quad (7)$$

본 연구에서는 이분법을 사용하여 θ_0 에서 θ_3 을 구하였다. θ_0 에서 θ_3 은 원점에서 측정된 각으로 입구측 반경 R과 더불어 입구측 특성점들의 좌

표계산에 이용된다.

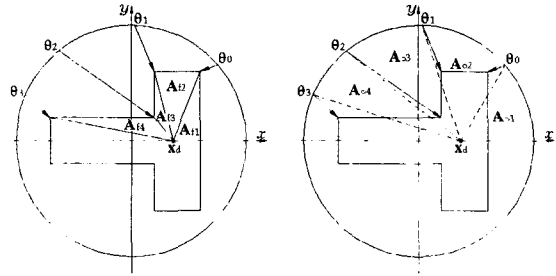


Fig. 3 Determination of characteristic points of inlet profile considering constant area proportionality

3.4 NURBS 곡선에 의한 입구 및 출구형상의 표현

Fig. 4는 원형소재로부터 T-형의 제품을 압출하는 경우의 단면형상을 나타내고 있는데 앞에서 구한 입구 및 출구측의 특성점의 좌표를 이용하여 입구와 출구형상을 NURBS 곡선으로 정의하기 위한 조정점 및 가중치들을 구하였다.

Table 2는 입구와 출구형상을 NURBS 곡선으로 정의하기 위한 조정점들의 좌표값 및 가중치들을 나타내고 있는데 사용자가 입력한 R, l_1 , l_2 , t_1 , t_2 , d 등의 급형형상과 관련된 매개변수로 표현된다.

Table 2에는 8개의 조정점만 나타나 있지만 형상의 대칭성을 이용하여 반사변환하면 u방향의 조정점의 갯수는 17개로 된다.

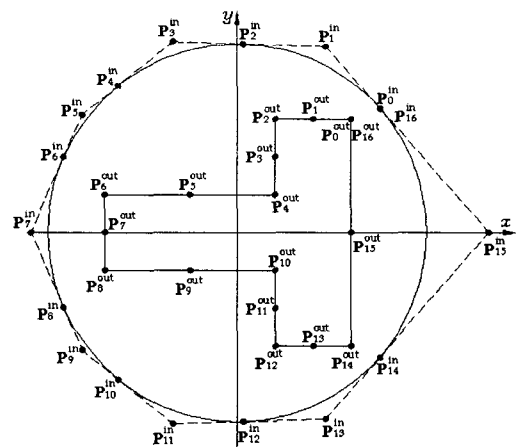


Fig. 4 Description of inlet and outlet profiles using NURBS curve

Table 2 Coordinates of control points for NURBS curve generation

Inlet profile		
No.	P_i^{in}	w_i^{in}
0	$R \cos \theta_0, R \sin \theta_0, 0$	1
1	$l_0 \cos((\theta_0 + \theta_1)/2), l_0 \sin((\theta_0 + \theta_1)/2), 0$	$\cos((\theta_1 - \theta_0)/2)$
2	$R \cos \theta_1, R \sin \theta_1, 0$	1
3	$l_1 \cos((\theta_1 + \theta_2)/2), l_1 \sin((\theta_1 + \theta_2)/2), 0$	$\cos((\theta_2 - \theta_1)/2)$
4	$R \cos \theta_2, R \sin \theta_2, 0$	1
5	$l_2 \cos((\theta_2 + \theta_3)/2), l_2 \sin((\theta_2 + \theta_3)/2), 0$	$\cos((\theta_3 - \theta_2)/2)$
6	$R \cos \theta_3, R \sin \theta_3, 0$	1
7	$-l_3, 0, 0$	$\cos((\theta_4 - \theta_3)/2)$

$l_0 = R/\cos((\theta_1 - \theta_0)/2), \quad l_2 = R/\cos((\theta_3 - \theta_2)/2)$
 $l_1 = R/\cos((\theta_2 - \theta_1)/2), \quad l_3 = R/\cos((\pi - \theta_3)/2)$

Outlet profile		
No.	P_i^{out}	w_i^{out}
0	x_0, y_0, d	1
1	$(x_0 + x_1)/2, y_0, d$	$\cos((\theta_1 - \theta_0)/2)$
2	x_1, y_1, d	1
3	$x_1, (y_1 + y_2)/2, d$	$\cos((\theta_2 - \theta_1)/2)$
4	x_2, y_2, d	1
5	$(x_2 + x_3)/2, y_2, d$	$\cos((\theta_3 - \theta_2)/2)$
6	x_3, y_3, d	1
7	$x_3, 0, d$	$\cos((\theta_4 - \theta_3)/2)$

3.5 금형길이 방향의 조정점 및 가중치 계산

두 단면곡선을 보간하여 하나의 NURBS 곡면으로 만들기 위하여 Fig. 5에서 보는바와 같이 사용자에게 의하여 입력된 입구와 출구에서의 접선벡터의 크기 및 경사각에 의하여 내부 조정점들을 생성하는 방법을 제안하였다.

$$\begin{aligned}
 P_{i,0} &= P_i^{in} & P_{i,3} &= P_i^{out} \\
 P_{i,1} &= \frac{1}{3} D_{0,i} + P_i^{in} \\
 P_{i,2} &= -\frac{1}{3} D_{1,i} + P_i^{out}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

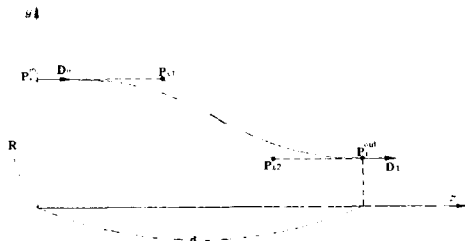


Fig. 5 Definition of v-direction control points

두 단면곡선으로부터 하나의 NURBS 곡면을 생성하기 위해서는 내부의 조정점들 외에 각 조정점들에서의 가중치도 구해야 하는데 본 연구에서는 입구 및 출구 조정점들에서의 가중치를 선형보간하는 방법을 제안하였다.

$$\begin{aligned}
 w_{i,0} &= w_i^{in} & w_{i,3} &= w_i^{out} \\
 w_{i,1} &= \frac{2}{3} w_i^{in} + \frac{1}{3} w_i^{out} \\
 w_{i,2} &= \frac{1}{3} w_i^{in} + \frac{2}{3} w_i^{out}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

3.6 T형 압출 금형곡면의 생성

앞에서와 같은 과정을 거쳐 얻어진 조정점들과 가중치들은 최종적으로 다음과 같은 곡면식을 구성하는 데이터로 이용된다.

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{16} \sum_{j=0}^3 N_{i,2}(u) N_{j,3}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^{16} \sum_{j=0}^3 N_{i,2}(u) N_{j,3}(v) w_{i,j}}
 \tag{10}$$

u방향의 조정점 수는 17개, v방향의 조정점 수는 4개로 총 68개의 조정점 및 가중치로 곡면을 구성하였다.

식(10)과 같은 NURBS 곡면은 Cox de Boor 알고리즘을 이용한 곡면상의 메쉬생성도 용이하므로 성형해석자나 금형설계 기술자들의 CAD, CAM, CAE 작업에 실제적인 데이터로 활용될 수 있다.

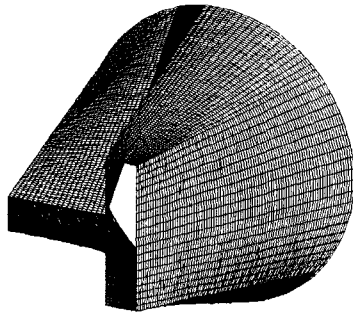
4. 결과 및 토론

본 연구에서 제안한 금형곡면의 자동생성 알고리즘의 효용성을 확인해 보기 위하여 C 프로그램을 작성해서 실제 금형곡면을 생성해 보았다.

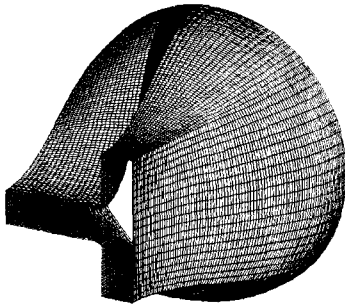
Fig. 6은 식(10)에 Cox de Boor 알고리즘을 적용해서 u, v방향의 등매개변수 곡선상의 점들을 구한 후 복수개의 사각메쉬(rectangular mesh)들을 가시화한 것이다. Fig. 6 (a)는 직선금형을, Fig. 6 (b)는 곡선금형을 나타낸다. 사용자의 선택에 의하여 직선금형, 곡선금형을 생성할 수 있도록 유연성있게 프로그램하였다.

본 연구에서 제안한 압출 금형곡면 생성법의 확장성 및 효용성을 입증하기 위해서 형상처리 및 면적사상 처리과정이 좀더 복잡한 코너 반경을 가진 T-형 압출 금형곡면을 생성해 보았다.

Fig. 7은 이 경우의 T 형상을 나타내기 위한 특성점들을 보여주고 있고 그 좌표값들은 사용자가 입력한 l_1, l_2, t_1, t_2, r 의 함수로 Table 3과 같이 구할 수 있다.



(a) Straight die



(b) Curved die

Fig. 6 NURBS die surface in the extrusion of round-to-T section

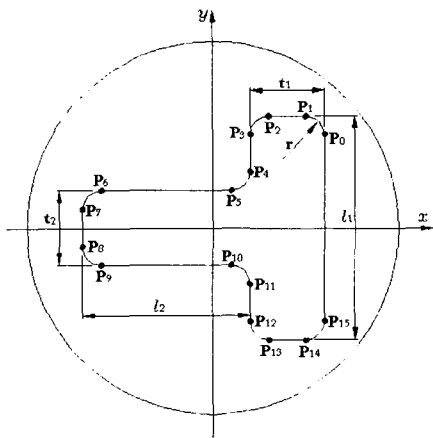


Fig. 7 Geometric description of characteristic points of outlet profile

Table 3 Parametric description of characteristic points of outlet profile

Point No.	x	y	z
P ₀	$-x_c + l_2 + t_1$	$l_1/2 - r$	d
P ₁	$-x_c + l_2 + t_1 - r$	$l_1/2$	d
P ₂	$-x_c + l_2 + r$	$l_1/2$	d
P ₃	$-x_c + l_2$	$l_1/2 - r$	d
P ₄	$-x_c + l_2$	$t_2/2 + r$	d
P ₅	$-x_c + l_2 - r$	$t_2/2$	d
P ₆	$-x_c + r$	$t_2/2$	d
P ₇	$-x_c$	$t_2/2 - r$	d

출구측 금속유동 중심점은 Fig. 8의 x_d 로서 코너 반경이 없는 앞의 경우와 유사한 방법으로 다음과 같은 x_d 에 관한 비선형 방정식의 해를 구함으로써 얻을 수 있다.

$$f(x_d) = [(x_0 - x_d) \frac{l_1}{2} - A_c] A_o - A(x_d) A_f = 0 \quad (11)$$

where,

$$A_o = \pi R^2 \quad A_f = l_1 t_1 + l_2 t_2 - 4A_c$$

$$A_c = (1 - \frac{\pi}{4}) r^2 \quad A(x_d) = \int_{x_d}^R \sqrt{R^2 - x^2} dx$$

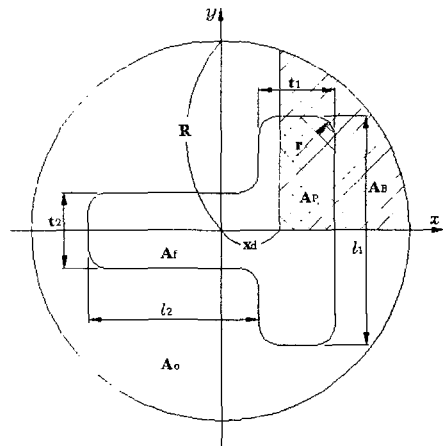


Fig. 8 Determination of the center point for area mapping using numerical method

다음 단계는 면적사상법을 이용하여 입구측 특성점들의 좌표를 구해야 되는데 Fig. 9에서 보는 바와 같이 이 경우는 면적사상법을 8개의 영역에 대해서 적용하면 된다. 따라서 식(7)을 다음 식과 같이 ;

의 범위만 수정하면 된다.

$$f(\theta_{i-1}) = \frac{R^2 \theta_{i-1}}{2} - \frac{x_d R \sin \theta_{i-1}}{2} - \sum_{j=1}^{i-1} A_o - A_f \frac{A_o}{A_f} = 0 \quad (1 \leq i \leq 8) \quad (12)$$

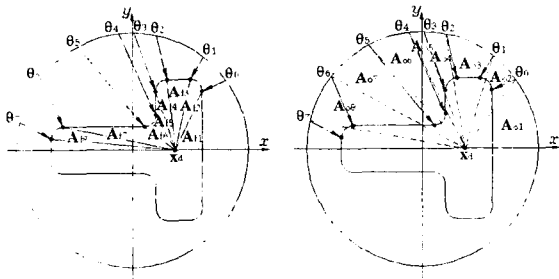


Fig. 9 Determination of characteristic points of inlet profile considering constant area proportionality

전술한 바와 같이 식(12)에 이분법을 사용하여 θ_0 에서 θ_7 를 구할 수 있고 이 데이터는 특성점들의 좌표계산에 이용된다.

Fig. 10 및 Table 4에서 보는바와 같이 입구 및 출구형상을 NURBS 곡선으로 표현하고 이 두 곡선을 급형길이 방향으로 보간하여 최종적으로 다음과 같은 NURBS 곡면을 얻게 된다.

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{32} \sum_{j=0}^1 N_{i,2}(u) N_{j,3}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^{32} \sum_{j=0}^1 N_{i,2}(u) N_{j,3}(v) w_{i,j}} \quad (13)$$

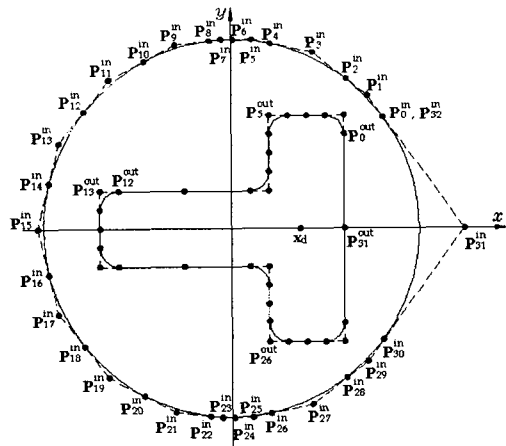


Fig. 10 Description of inlet and outlet profiles using NURBS curve

Table 4 Coordinates of control points for NURBS curve generation

Inlet profile		
No.	P_i^{in}	w_i^{in}
0	$R \cos \theta_0, R \sin \theta_0, 0$	1
1	$l_0 \cos((\theta_0 + \theta_1)/2), l_0 \sin((\theta_0 + \theta_1)/2), 0$	$\cos((\theta_1 - \theta_0)/2)$
2	$R \cos \theta_1, R \sin \theta_1, 0$	1
3	$l_1 \cos((\theta_1 + \theta_2)/2), l_1 \sin((\theta_1 + \theta_2)/2), 0$	$\cos((\theta_2 - \theta_1)/2)$
4	$R \cos \theta_2, R \sin \theta_2, 0$	1
5	$l_2 \cos((\theta_2 + \theta_3)/2), l_2 \sin((\theta_2 + \theta_3)/2), 0$	$\cos((\theta_3 - \theta_2)/2)$
6	$R \cos \theta_3, R \sin \theta_3, 0$	1
7	$l_3 \cos((\theta_3 + \theta_4)/2), l_3 \sin((\theta_3 + \theta_4)/2), 0$	$\cos((\theta_4 - \theta_3)/2)$
8	$R \cos \theta_4, R \sin \theta_4, 0$	1
9	$l_4 \cos((\theta_4 + \theta_5)/2), l_4 \sin((\theta_4 + \theta_5)/2), 0$	$\cos((\theta_5 - \theta_4)/2)$
10	$R \cos \theta_5, R \sin \theta_5, 0$	1
11	$l_5 \cos((\theta_5 + \theta_6)/2), l_5 \sin((\theta_5 + \theta_6)/2), 0$	$\cos((\theta_6 - \theta_5)/2)$
12	$R \cos \theta_6, R \sin \theta_6, 0$	1
13	$l_6 \cos((\theta_6 + \theta_7)/2), l_6 \sin((\theta_6 + \theta_7)/2), 0$	$\cos((\theta_7 - \theta_6)/2)$
14	$R \cos \theta_7, R \sin \theta_7, 0$	1
15	$-l_7, 0, 0$	$\cos(\pi - \theta_7)$
$l_0 = R/\cos((\theta_1 - \theta_0)/2), \quad l_4 = R/\cos((\theta_5 - \theta_4)/2)$ $l_1 = R/\cos((\theta_2 - \theta_1)/2), \quad l_5 = R/\cos((\theta_6 - \theta_5)/2)$ $l_2 = R/\cos((\theta_3 - \theta_2)/2), \quad l_6 = R/\cos((\theta_7 - \theta_6)/2)$ $l_3 = R/\cos((\theta_4 - \theta_3)/2), \quad l_7 = R/\cos(\pi - \theta_7/2)$		

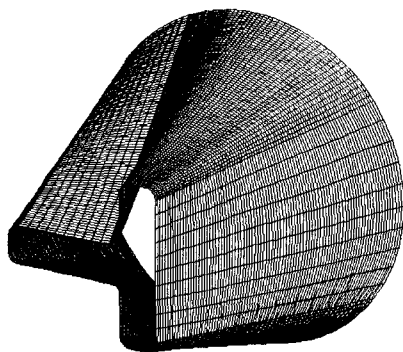
Outlet profile		
No.	P_i^{out}	w_i^{out}
0	x_0, y_0, d	1
1	x_0, y_1, d	$\cos(\pi/4)$
2	x_1, y_1, d	1
3	$(x_1 + x_2)/2, y_1, d$	$\cos((\theta_2 - \theta_1)/2)$
4	x_2, y_2, d	1
5	x_3, y_2, d	$\cos(\pi/4)$
6	x_3, y_3, d	1
7	$x_3, (y_3 + y_4)/2, d$	$\cos((\theta_4 - \theta_3)/2)$
8	x_4, y_4, d	1
9	x_4, y_5, d	$\cos(\pi/4)$
10	x_5, y_5, d	1
11	$(x_5 + x_6)/2, y_5, d$	$\cos((\theta_6 - \theta_5)/2)$
12	x_6, y_6, d	1
13	x_7, y_6, d	$\cos(\pi/4)$
14	x_7, y_7, d	1
15	$x_7, 0, d$	$\cos(\pi - \theta_7)$

식(13)은 조정점의 수가 다소 증가한 것 외에는 식(10)과 그 형태가 동일한 것으로 형상이 바뀌어도 NURBS 곡면이라는 일관된 방법으로 금형곡면이 표현되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 특정 형상에 대한 매개변수만 잘 정의하면 약간의 프로그램 수정으로 다양한 형태의 금형곡면 생성이 가능하다.

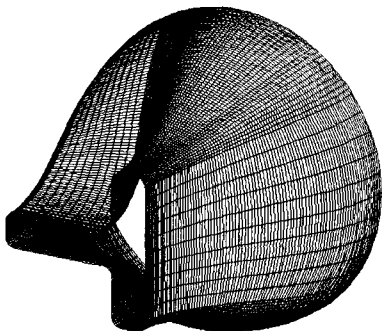
Fig. 11은 식(13)의 곡면을 가시화한 것으로 Fig. 11 (a)는 직선금형을 Fig. 11 (b)는 곡선금형을 나타낸다. 물론 최적의 금형설계를 위해서는 성형재료, 윤활제, 금형구조, 공정설계 등 복합적인 공정인자들을 총체적으로 검토해야 하지만, 본 연구에서 제안한 금형곡면의 자동생성을 통하여 이러한 검토과정을 조금이라도 줄이고 정량적으로 접근할 수 있는 체계적인 수단이 마련될 수 있을 것이다.

일반적으로 금형설계시 우선적으로 검토해야 할 사항은 최적의 금형길이를 구하는 것으로 마찰

계수, 금형형상 등을 바꾸어 가며 금형길이 변화에 따른 압출 하중, 구석 채움율 등을 검토하게 된다. 따라서 금형길이는 금형곡면의 자동생성을 위한 주요 입력변수이다. Fig. 12는 이러한 금형길이 변화에 따른 곡면의 변화된 모습을 보여주고 있다.

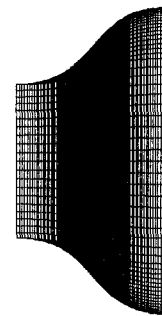


(a) Straight die

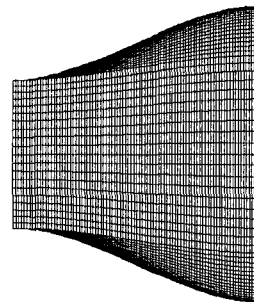


(b) Curved die

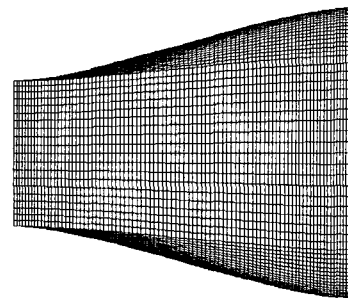
Fig. 11 NURBS die surface in the extrusion of round-to-T section with corner radius



(a) Die length : 30



(b) Die length : 50



(c) Die length : 70

Fig. 12 Effects of the die length on the generated die surface

Fig. 13은 입·출구측의 접선벡터의 크기 변화에 따라 곡면이 다양한 형태로 생성되는 것을 보여

주고 있는데 이를 통하여 입구형상에서 출구형상으로 변화해 가는 중간의 곡면형상에 대한 정량적인 제어가 가능하게 되었다. 변곡점의 위치를 자유자재로 조절할 수 있으므로 설계목적에 부합되는 최적의 금형형상을 체계적으로 구할 수 있는 수단으로 활용될 수 있을 것이다.

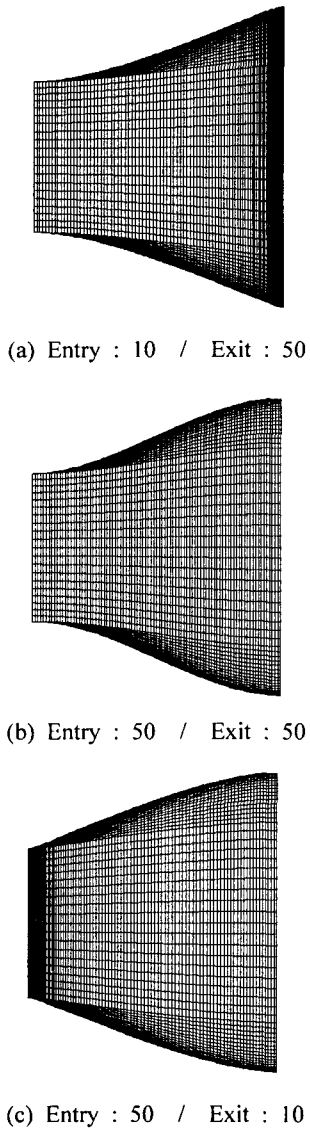


Fig. 13 Effects of the magnitudes of tangential vectors on the generated die surfaces

Fig. 14는 출구측 T-형상의 도심의 변화에 따라 금형곡면이 다양한 형태로 생성되는 것을 보여주고 있는데 이는 사용자가 프로그램내에서 자동으로 구한 도심의 좌표를 임의로 조절 가능하게 함으로써 설계자의 편의성을 도모하고자 하였다. 최근에는 출구형상의 도심의 좌표에 의도적으로 편심을 주어 압출 하중을 감소시키거나 압출 제품 자체에 곡률을 주어 휘어진 제품을 얻고자 할 때 이러한 방법을 사용하기도 한다.^{9,10,11} 본 연구에서는 이러한 설계경향을 감안하여 출구형상의 도심의 변화량도 사용자가 선택할 수 있게 하였다.



Fig. 14 Variation of the generated die surfaces obtained by moving the center point

5. 결론

본 연구에서는 금속 유동속도가 단면상에서 균일하다는 개념을 기본으로 하고있는 면적사상법과 CAD 분야의 최근 곡면이론 중 하나인 NURBS 곡면을 이용하여 T-형 압출 금형곡면을 자동 생성하는 방법을 제안하였다. 면적사상 기법을 이용하여 입구와 출구형상에서의 특성점들을 구한 후 입·출구 형상을 NURBS 곡선으로 표현하고 금형길이 방향으로는 3차 NURBS 곡선 보간법을 이용하여 금형 전체 형상을 하나의 NURBS 곡면화 하는 방법을 제안하였다. 금형길이 방향으로의 보간시 중간 조정점들에서의 가중치를 구하기 위하여 입구와 출구를 나타내는 NURBS 곡선상의 조정점들에서의 가중치를 선형 보간 하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서 제안한 제반 알고리즘을 프로그램 해서 T-형 및 코너 반경이 존재하는 T-형의 금형곡면을 생성해 본 결과 제안된 곡면생성 방법의 신뢰성 및 효율성을 확인할 수 있었다.

향후에는 H-형, L-형, U-형 등 보다 복잡한 형상에도 적용이 가능하도록 면적사상법의 개념을 좀더 개선하고 금속유동선(metal stream line)등의 역학적인 개념이 보강된 보다 진보된 곡면 생성법에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Nagpal, V. and Altan, T., "Analysis of the Three-Dimensional Metal Forming in Extrusion of Shapes with Use of Dual Stream Functions," Proc. 3rd North American Met. Res. Conf. Pittsburgh, Pennsylvania, pp. 26-40, 1975.
2. Nagpal, V., "On the Solution of Three-Dimensional Metal Forming Processes," J. Eng. Ind. Trans. ASME Series B. Vol. 99, pp. 624-629, 1977.
3. Yang, D. Y. and Lee, C. H., "Analysis of Three-Dimensional Extrusion of Section through Curved Dies by Conformal Transformation," Int. J. Mech. Sci., Vol. 20, pp. 541-552, 1978.
4. Gunasekera, J. S. and Hoshino, S., "Analysis of Extrusion of Non-Circular Sections through Shaped Dies," Annals of CIRP, Vol. 29, pp. 141-145, 1980.
5. Gunasekera, J. S., Gegel, H. L., Malas, J. C. and Doraivelu, S. M., "Computer Aided Process Modeling of Hot Forging and Extrusion of Aluminum Alloys," Annals of CIRP, Vol. 31, No. 1, pp. 131-136, 1982.
6. Yang, D. Y., Han, C. H. and Kim, M. U., "A Generalized Method for Analysis of Three-Dimensional Extrusion of Arbitrarily Shaped Sections," Int. J. Mech. Sci., Vol. 28, pp. 517-534, 1986.
7. Shin, H. W., Kim, D. W. and Kim, N. S., "A Simplified Three-Dimensional Finite-Element Analysis of the Non-Axisymmetric Extrusion Processes," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 38, pp. 567-587, 1993.
8. Joun, M. S. and Hwang, S. M., "Die Shape Optimal Design in Three-Dimensional Shape Metal Extrusion by the Finite Element Method," Int. J. Num. Methods Eng., Vol. 41, pp. 311-335, 1998.
9. Celik, K. F. and Chitkara, N. R., "Application of an Upper Bound Method to Off-Centric Extrusion of Square Section, Analysis and Experiments," Int. J. Mech. Sci., Vol. 42, pp. 321-345, 2000.
10. Chitkara, N. R. and Celik, K. F., "Extrusion of Non-Symmetric T-Shaped Sections, an Analysis and some Experiments," Int. J. Mech. Sci., Vol. 43, pp. 2961-2987, 2001.
11. Celik, K. F. and Chitkara, N. R., "Extrusion of Non-Symmetric U- and I-Shaped Sections through Ruled-Surface Dies : Numerical Simulations and some Experiments," Int. J. Mech. Sci., Vol. 44, pp. 217-246, 2002.
12. Les Piegl and Wayne Tiller, The NURBS Book, Springer, 1995.