

3차원 측정 곡면의 효율적인 NC 가공을 위한 공구 경로 생성

Generation of Tool Paths for NC Machining of 3D Surfaces by Measurement Data

구영희(충남대학교 기계공학과 대학원), 이동주(충남대학교 기계공학과)

Abstract

The purpose of this study is the development of CAM system which can cut and measure any shape by machining center and coordinate measuring machine.. The overall goal of the CAM system is to achieve the CNC machining, from digitizing through to final cutting. The hardware of the system comprises PC and machining center, CMM. There are three steps in the CNC machining, (1) workpiece measuring on the CMM, (2) geometric modeling by the CAD system, (3) NC commands generation by the tool path compensated for tool nose radius. It is developed a software package, with which can conduct a micro CAM system in the PC without economical burden.

Key Words : CAM system(CAM 시스템), machining center(머시닝 센터), CMM(3차원 좌표 측정기), CAD system(CAD 시스템), tool path(공구 경로), tool nose radius(공구 인선 반경)

1. 서론

오늘날 우리 주변에서 흔히 접하게되는 생활 용품이나 가전 제품, 기계 부품, 자동차 등과 같은 제품의 제작에 쓰이는 금형의 제작에 있어서 그 가격이나 기능적인 측면 뿐만아니라 이들 제품을 선택하는 소비자의 기호가 점점 더 고급화, 다양화됨에 따라 제품의 가치도 또한 제품의 기능으로부터 미적 감각을 중요시하는 변화가 일어나고 있다. 이에 따라서 어떠한 방법으로 소비자에게 호소할 수 있도록 이들 제품의 외관을 디자인(design)하는가가 제품의 판매에 커다란 영향을 주고 있다. 이와 같이 소비자의 제품 선택에 중대한 영향을 미치는 미적인 측면을 살리는 제품 생산에 따르는 금형의 제작을 위해서는 제품의 실물 모델의 작성에서부터 최종 금형의 가공까지를 통합화시킨

CAD/CAM 시스템의 필요성이 요구되고 있다.

복잡한 곡면 형상에 대응할 수 있는 CAD/CAM 시스템은 지금까지 많은 수가 개발되어 드넓게 사용되고 있지만, 미적인 감각을 요구하는 제품의 형상은 자유 곡면의 복합체로 이루어진 경우가 많으며, 이를 수학적 모델로 표현하는 것 또한 어려움이 많다. 최근에 이와 같은 자유 곡면으로 이루어진 제품의 수요가 늘어남에 따라서, 이들 곡면 형상의 설계와 함께 이를 가공할 수 있는 NC 가공 방법에 대한 개선의 필요성이 증대되고 있다.

오늘날 현장에서 금형 생산을 위한 여러 가지 형태의 CAD/CAM 시스템을 사용하고 있는데, 이들은 형상 설계와 데이터의 변환, 제도, NC 황삭 가공에 대하여 대부분 사용되고 있지만, 최근의 연구와 발전 방향은 이들 금형을 구성하고 있는 곡면을 수학적인 모델로 표현하고 이들의 수학적 표현으로부터 자동적으로 공구 경로를 생성하고 효율적으로 기계 가공을 할 수 있는 기술에 집중되어 있다[1,2].

또한, 이들 금형 제품에서는 외관이 전부 원활한 자유 곡면으로 구성되어 있지만은 않으므로, 복합 곡면 상의 특징선(character line)이 미적인 측면의 중요한 핵심(point)이 된다. 그러나 현재 상황에서는 이를 측정하는 것은 극히 곤란하다. 또한, 반대로 측정하는 입장에서도 균일하고 아름답게 이어지는 특징선을 CAD 상으로 재현하는 것은 거의 불가능하다. 이와 같은 이유로 모형의 측정 데이터를 CAD 시스템에 입력한 후에 정확한 치수, 형상으로 수정하여 특징선을 부가하는 것이 가능하다면 대단히 유효한 시스템이 될 수 있다.[3]

생산 공정 계획에 의하여 금형 제품을 가공할때에 가장 심각한 문제의 하나가 공구 간섭의 발생이다. 공구 간섭(cutter interference)은 공구가 가공 곡면과 접해 있을 때 공구 접촉점(cutter contact point, CC점) 이외의 부분에서 공구 곡면과 가공 곡면이 교차됨을 말하는데, 이는 큰 반경의 공구로 가공할 때 공구가 곡면을 과절삭하는 현상으로 곡면의 NC 가공에서 가장 중요한 문제 중의 하나이며, 이에 대한 여러 가지

접근 방법이 제시되고 있다.[4,5,6]

본 연구에서는 3차원 측정 데이터에 근거하여 해석 곡면(analytic surface)과 자유 곡면(sculptured surface) 등의 합성 연산에 의하여 형상 설계된 복합 곡면(compound surface)의 효율적인 NC 가공을 위한 공구 경로 생성에 주안점을 두고 있으며, 이와 같은 곡면을 가공할때에 발생하는 공구와 공작물과의 간섭을 방지하기 위하여 공구 접촉점으로부터 법선 벡터 방향으로 공구 반경값 만큼 움푹시킨 공구 중심점을 구하여 절삭 가공이 이 점을 따라서 이루어지도록 하고 있다.

2. 시스템의 구성

본 시스템은 크게 측정 시스템, 형상 해석 및 설계 시스템, 가공 시스템의 3가지 시스템과 데이터 베이스(data base)로 구성되어 있다.

측정 시스템은 설계자에 의하여 주어지는 형상 모델의 측정 시스템으로서 본 연구에서는 3차원 좌표 측정기(coordinate measuring machine)에 의한 3차원 측정 방법을 통하여 얻어진 데이터를 이용하고 있다. 3차원 모델 형상을 정확히 받아들이기 위해서는 모든 형상을 세밀한 피치로 측정해야 되지만, 이를 위해서는 비대한 접근이 되어 많은 시간을 필요하게 되고, CAD 데이터 생성에 관계없는 데이터가 포함되어 효율적이지 않다. 그래서 최초로 넓은 피치로 측정한 데이터로부터 특징선(character line)이 존재하는 영역을 크게 추출하여, 그 근방을 다시 세밀하게 측정하는 방법으로 측정이 이루어진다. 또한, 형상 모델과 가공 제품 형상의 비교에 의한 제품의 형상 평가에도 이용될 수 있다[7,8,9].

형상 해석 및 설계 시스템은 측정 데이터로부터 추출되는 특징선에 의한 기본 형상의 경계선을 생각함으로써 형상 모델을 이루는 있는 복합 곡면을 특징선의 의해 몇 개의 면으로 분리하여 기본 형상의 특징면(평면, 원통면, 원추면, 구면, 자유 곡면 등)을 결정하고, 이를 이용하여 해석 곡면과 자유 곡면의 형상을 설계할 수 있으며, 이들의 형상 합성을 통하여 곡면 데이터를 얻을 수 있다[10,11,12].

가공 시스템은 곡면 데이터로부터 임의의 공구 형상에 대응하는 오프셋(offset)면을 생성하여 공구 간섭을 방지할 수 있도록 함으로서 NC 가공을 위한 공구 경로를 자동 발생할 수 있으며, 실제로 NC 가공정보를 생성하고, 이를 머시닝 센터(machining center) 등과 같은 NC 공작 기계에 DNC 전송하여 가공이 이루어

어지는 CAM 시스템이다.

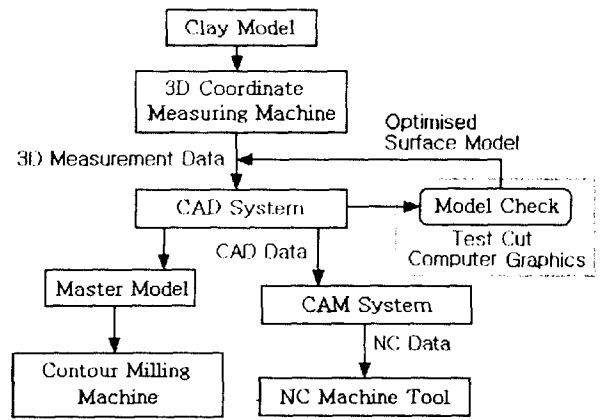


Fig.1 System architecture

Fig.1에는 본 시스템의 개략적인 구성을 나타내고 있다. 컴퓨터 내에서 형성되는 개념 모델(conceptual model)에서는 CAD 데이터를 직접 생성할 수 있으며, 수학적 모델의 생성법으로는 Ferguson, Bezier, B-spline, NURBS 등이 일반적으로 이용되는데, 본 연구에서도 Bezier 곡면식을 이용한다. 본 시스템에서는 설계자에 의하여 금형의 형상 모델(clay model)이 주어지는 경우이므로, 우선 형상 측정(digitizing)을 행하고, 그 3차원 측정 데이터에 근거하여 여러개의 기본 형상의 특징면으로 형상 분리를 행하고, 그 특징면의 형상을 이용하여 해석 곡면으로부터 자유 곡면까지의 형상 설계와 합성 연산을 통하여 복합 곡면을 생성하고, 여기에 대응하는 공구 경로가 결정된다. 이와 같은 시스템을 구축함으로써 설계자의 미적인 감각을 손상시키지 않고 곡면의 금형 가공을 행할 수 있다.

3. 3차원 측정 곡면의 모델링

3차원 측정 시스템으로부터 특징선에 의해서 분리되는 형상 모델의 특징면 추출 방법에 대하여 설명하면, 3차원 측정 데이터에 의하여 분리된 형상 모델(1, 2, 3 ... n)의 데이터를 이용하여 표준형의 2차 곡선

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2(lx + my + nz) + d = 0 \quad \dots(1)$$

에 대하여 최소 자승법을 적용하여 각 계수를 구하여 특징면의 판정을 수행하게 된다. 즉, a, b, c가 모두 0이 되면 평면, a, b, c 중에 1개만 0이고 나머지 2개의 계수가 같으면 원통면, a, b, c 중 2개가 같고 나머지 1개의 계수가 다른 부호이면 원추면, a, b, c 모두가 같으면 구면으로 판정한다. 또한 이들 어디에도 속하

지 않는 것은 자유 곡면이 된다. 실제로는 측정 데이터에는 노이즈(noise)가 포함되어 있기 때문에 피측정물의 형상이나 표면 상태에 대하여 보정값을 설정하여 판단하는 것으로 한다. Fig.2에 구면의 경우에 대한 3차원 측정 데이터와 그 판정 예를 나타내고 있다.

Point 1	X	147.0746	Y	-135.7295	Z	-301.2053
Point 2	X	137.1950	Y	-135.7225	Z	-308.1829
Point 3	X	143.4849	Y	-126.6335	Z	-308.2009
Point 4	X	153.2123	Y	-123.4325	Z	-308.2029
Point 5	X	159.8897	Y	-137.1510	Z	-308.2039
Point 6	X	155.1278	Y	-146.4125	Z	-308.2044
Point 7	X	145.9104	Y	-148.0540	Z	-308.2054
Point 8	X	146.3872	Y	-144.7850	Z	-303.7934
Point 9	X	146.8006	Y	-137.2965	Z	-301.1868
Point 10	X	148.2826	Y	-137.2965	Z	-301.0798

Sphere
 X 148.5049 Y -136.9453 Z -313.5740
 D 25.0045
 SMm 10P 0.0005 0.0005 -0.0006

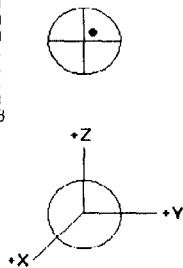


Fig.2 Examples of measuring

이와 같이 3차원 측정 데이터의 형상 해석을 통하여 평면, 원통면, 원추면, 구면 등과 같이 해석적으로 표현이 가능한 기본적인 해석 곡면들을 각각 설계하고, 이들이 서로 접합되어 이루어지거나 또는 이들과 자유 곡면이 접합되어 이루어진 복합 곡면(compound surface)의 형상을 합성 방법에 의하여 설계한다.

3.1 해석 곡면의 형상 설계

해석적 표현이 가능한 여러가지 기본적인 3차원 곡면의 형상 설계는 Fig.3에서와 같은 3차원 직교좌표계의 상의 각기둥(prismatic shape), 각뿔(pyramid shape), 구(sphere shape), 회전체(rotational body shape)와 평면(plane) 등이 해당되며, 이들 해석 곡면이나 자유 곡면과의 합성을 통하여 복합 곡면을 형성하게 된다.

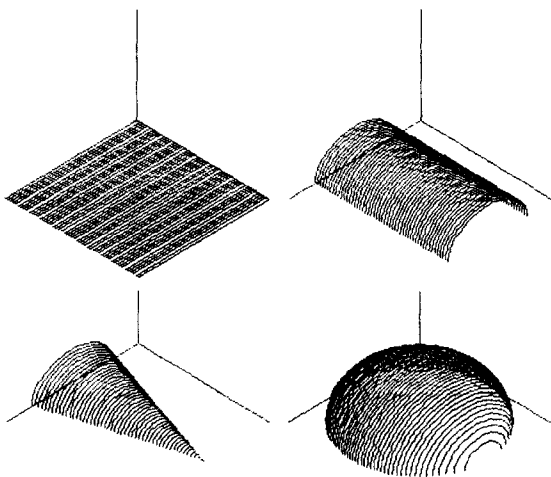


Fig.3 Modeling of analytic surface

3.2 자유 곡면의 형상 설계

자유 곡면위의 각 patch는 두 개의 매개변수(parameter) 함수 u와 v로서 patch위의 점을 X, Y와 Z 좌표계로 표시하는 양3차 방정식(bicubic equation)에 의하여 정의된다. Cartesian coordinate system에서 각점 p(u, v)의 성분은

$$p(u, v) = [x(u, v) \ y(u, v) \ z(u, v)]^T \dots\dots\dots(2)$$

Hermite form으로는

$$p(u, v) = [uM_hQ_x \ M_h^T v^T \ uM_hQ_y \ M_h^T v^T \ uM_hQ_z \ M_h^T v^T]^T \dots\dots\dots(3)$$

여기에서 $0 \leq u, v \leq 1$ 이고,

$$\begin{matrix} \mathbf{u} = [u^3 & u^2 & u & 1] \\ \mathbf{v} = [v^3 & v^2 & v & 1] \end{matrix} \dots\dots\dots(4)$$

그리고 M_h 는 Hermite matrix

$$M_h = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

이다. Q_x, Q_y, Q_z 는 patch의 4개의 코너에서의 경계 조건(boundary condition; position, u-slope, v-slope와 twist)을 포함하는 4×4 matrix이다.

$$Q_x = \begin{bmatrix} x(0,0) & x(0,1) & \frac{\partial x(0,0)}{\partial v} & \frac{\partial x(0,1)}{\partial v} \\ x(1,0) & x(1,1) & \frac{\partial x(1,0)}{\partial v} & \frac{\partial x(1,1)}{\partial v} \\ \frac{\partial x(0,0)}{\partial u} & \frac{\partial x(0,1)}{\partial u} & \frac{\partial^2 x(0,0)}{\partial u \partial v} & \frac{\partial^2 x(0,1)}{\partial u \partial v} \\ \frac{\partial x(1,0)}{\partial u} & \frac{\partial x(1,1)}{\partial u} & \frac{\partial^2 x(1,0)}{\partial u \partial v} & \frac{\partial^2 x(1,1)}{\partial u \partial v} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

또한, Q_y 와 Q_z 도 같은 형태이다.

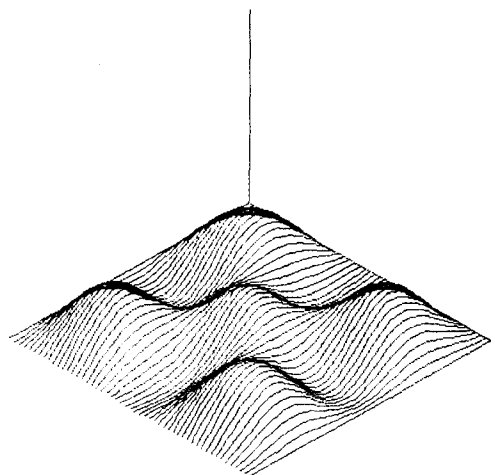


Fig.4 Modeling of sculptured surface by the 3D measurement data

Fig.4과 5에는 3차원 측정 데이터에 근거하여 형상 해석을 수행하고, 그 특징면의 형상을 추출하여 Bezier 곡면식을 이용한 자유 곡면의 형상 설계의 경우의 예를 나타내고 있다.

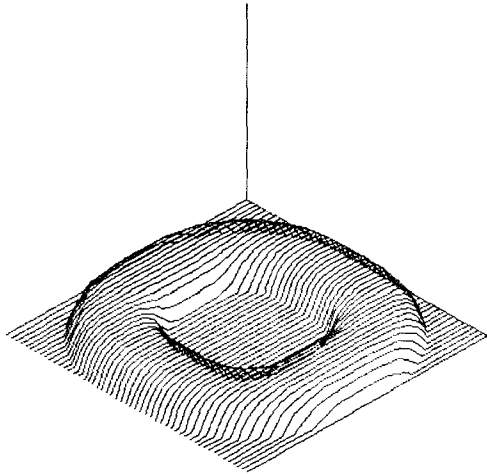


Fig.5 Modeling of sculptured surface by the sweeping of section curve

3.3 복합 곡면의 형상 설계

해석 곡면들이 서로 접합되거나 또는 이들과 자유곡면이 접합되어 이루어진 복합 곡면(compound surface)의 형상 설계는 기본적인 해석 곡면들과 자유곡면을 자유로이 조합하여 새로운 형상을 설계하게 되는데, 이들 형상의 합성 방법은 불린 작업(Boolean operation)을 통하여 이루어진다.

임의의 복합 곡면에서 기준 곡면 $B(u,v)$ 에 대하여 해석 곡면 S_1 이 제거되고, S_2 가 첨가되었다면, 이 복합 곡면의 경우 불린(Boolean) 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$BP = B - S_1 + S_2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

첨가되는 곡면의 경우에는 교점의 큰 값을 취하고, 제거되는 곡면의 경우에는 교점의 작은 값을 취하는 방법으로 복합 곡면상에서의 실제 교점을 구할 수 있다.

Fig.6에서는 여러 개의 구면과 평면을 도형의 첨가(addition)와 제거(subtraction)의 방법을 통하여 형상을 정의한 경우를 나타내고 있다. Fig.7은 자유 곡면을 기준 곡면으로하여 2개의 구면을 합성하여 복합 곡면 형상을 정의한 경우의 예이다.

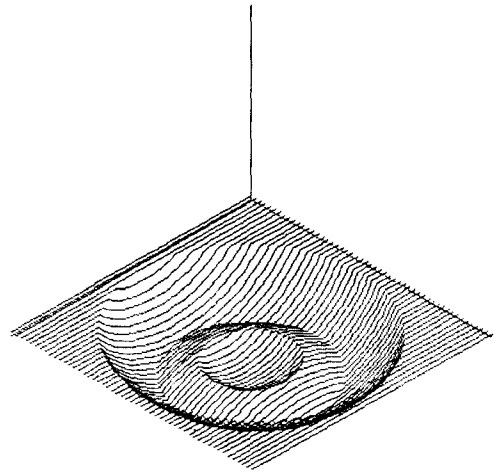


Fig.6 Modeling of compound surface by the Boolean operation of analytic surface

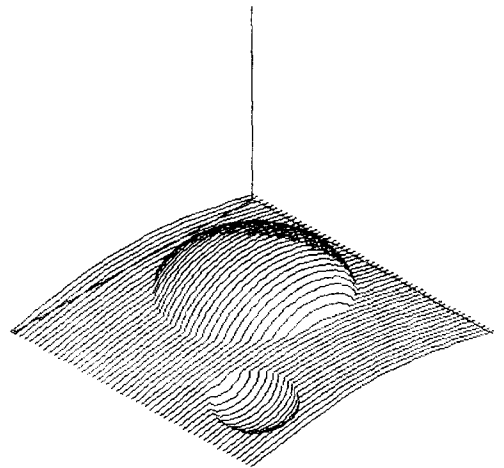


Fig.7. Modeling of compound surface by the Boolean operation of analytic surface and sculptured surface

4. 공구 간섭 처리

과절삭이 방지된 공구 위치(cutter location) 경로를 얻는 방법에는 크게 나누어 3가지로 생각할 수 있는데, 첫번째 방법으로는 매개변수 공간에서 공구 접촉(cutter contact) 경로를 얻고 이로부터 과절삭이 없는 공구 위치 경로를 생성하는 방법이다. 두번째 방법으로는 공구의 반경값만큼 법선 방향으로 움푹시킨 움푹 곡면을 형성하여 공구 경로를 얻는 방법으로서 법선 거리(normal distance), 즉, 움푹된 곡면과의 거리 오차(distance error)를 최소화하기 위하여 최소 자승 보간법(least squares fitting) 등이 사용되어진다. 세번째 방법으로는 움푹 곡면을 정의할때에 Z-map을 이용하는 것으로, XY평면에서 일정한 간격으로 위치한 점

에 대하여 Z값을 계산하여 2차원 Z-map을 형성하고, 이를 공구접근 역방향으로 오프셋시켜서 오프셋된 Z-map을 형성한후에 이를 이용하여 공구 경로를 산출한다.

이와 같은 복합 곡면(compound surface)으로 이루어진 금형의 NC 가공시 공구 간섭이 발생하는 것을 방지하기 위하여 복합 곡면을 구성하고 있는 해석 곡면과 자유 곡면의 도형 형상 정보를 이용하여 복합 곡면 데이터에 대하여 법선 벡터 방향으로 공구 반경값만큼 오프셋(offset)하여 NC 가공을 위한 공구 경로를 Fig.8에서와 같이 정의한다.

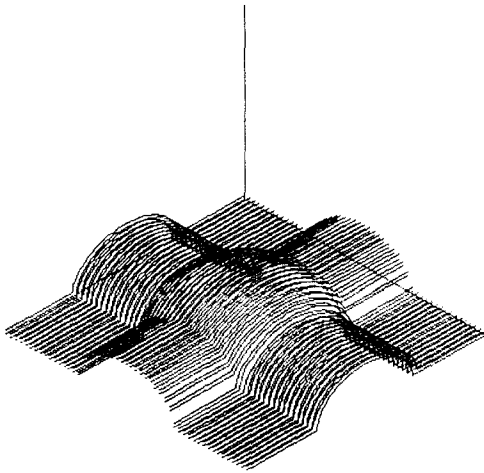


Fig.8 CC data and Tool-interference-free CL data

다음의 방정식은 Eq.(3)를 사용하여 정의된 곡면으로부터 오프셋(offset)에 의하여 공구곡면을 정의하기 위하여 사용되어진다. 곡면에 대한 법선 벡터는 다음으로부터 계산된다.

$$\mathbf{n}(u, v) = \frac{\frac{\partial \mathbf{p}(u, v)}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{p}(u, v)}{\partial v}}{\left| \frac{\partial \mathbf{p}(u, v)}{\partial u} \times \frac{\partial \mathbf{p}(u, v)}{\partial v} \right|} \quad \dots\dots(8)$$

Eq.(3)과 Eq.(8)을 이용하여 공구 경로(tool path)는 곡면 patch 위쪽에 생성되어지고, 절삭 공구가 볼 앤드 밀(ball-end mill)이므로, 공구 중심의 경로 $t(u, v)$ 는 다음 식을 사용하여 계산된다.

$$\mathbf{t}(u, v) = \mathbf{p}(u, v) + r_t \mathbf{n}(u, v) \quad \dots\dots\dots(9)$$

여기에서 r_t 는 공구 반경이고, $\mathbf{p}(u, v)$ 는 위쪽에 공구 경로가 생성되는 기저 곡면이다. 변수 u 와 v 에 의하여 Eq.(9)은 오프셋된 곡면을 따라 유연하게 기계 가공이 이루어질 수 있다.

5. 공구 경로의 생성과 가공

NC 가공에 사용되는 공구 형상에 대응하는 오프셋(offset)면을 생성하고, 이를 이용하도록 하는 방식을 도입하여, 복합 곡면을 구성하고 있는 해석 곡면과 자유 곡면의 도형 형상 정보에 의해서 곡면 형상에 대하여 최적의 공구 선정을 행하고, 복합 곡면을 구성하고 있는 형상과의 공구 간섭 처리를 고려함으로써 공구 경로를 자동 발생할 수 있는 기능을 가지는 CAM 시스템을 개발하였다.

3차원 좌표 측정기에 의한 점 데이터나 곡선 정보 등에 근거한 형상 설계와 합성 연산을 통하여 가공할 곡면에 대한 형상 설계 과정이 끝나면 이를 가공하기 위한 공구의 이동 경로를 결정하게 된다. NC 가공에서 공구의 위치를 나타내는 좌표값을 공구 위치(cutter location) 경로라고 하는데, 대개의 NC 가공시에 곡면 형상의 절삭 가공은 볼 앤드 밀(ball-end mill)이 주로 사용되는 관계로, 본 연구에서는 공구 중심점을 기준으로 하여 공구 위치 경로를 결정하게 되며, 공구는 절삭 가공을 할때 이 공구 위치 경로에서 주어지는 점을 따라서 움직이게 된다.

일반적으로 공구 경로는 사용되는 절삭 공구의 종류와 치수, 곡면의 보정(offset)량, 가공 공차 등을 고려하여 곡면상의 절삭 경로로 구하게 된다. 본 연구에서는 제시된 일련의 과정을 거쳐서 생성된 공구 경로를 이용하여 실제 NC 가공을 수행하는 것을 Fig.9에서 볼수 있다. 본 시스템에 의하여 측정 데이터에 근거하여 생성된 복합 곡면을 가지고 공구 간섭이 일어나지 않도록 고려된 공구 위치 경로를 따라서 NC 기계 가공을 수행하는 과정을 보여주고 있다.

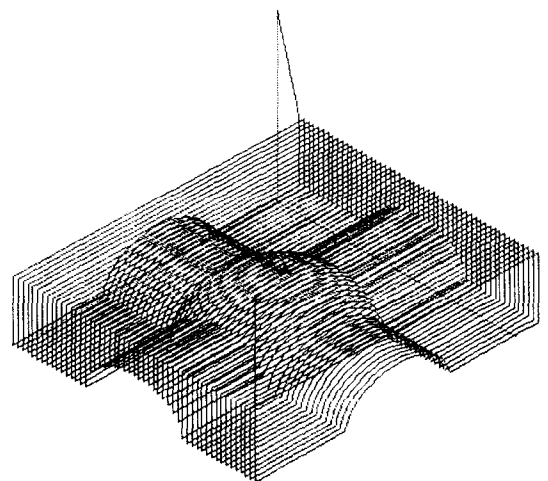


Fig.8 Example of NC Machining

6. 결론

3차원 측정 데이터에 근거하여 곡면 형상이 설계된 복합 곡면(compound surface)으로 이루어진 금형의 효율적인 NC 가공을 위한 공구 경로의 생성을 목적으로하여 가공시에 공구 간섭이 발생하는 것을 방지하기 위하여 복합 곡면을 구성하고 있는 해석 곡면과 자유 곡면의 도형 형상 정보를 이용하여 복합 곡면 데이터에 대하여 법선 벡터방향으로 오프셋(offset)하여 공구 경로를 정의하였다.

이를 이용하여 NC 가공을 수행하는 CAM 시스템을 구축하였으며, 3차원 곡면의 특징면에 대한 형상 정보를 이용하여 공구 경로 및 NC 가공 정보를 생성함으로써, 기존의 시스템에 비하여 NC 가공 블록(block)의 개수를 줄였으며, 그에 따라 가공 시간을 단축할 수 있었다.

또한, NC 공작 기계로 직접 전송하여 가공하기까지의 제반 절차를 수행함으로써, 제품의 실물 모델의 작성에서부터 최종 금형의 가공까지를 통합화시키는 시스템의 개발을 통하여 생산 현장에서의 적용이 기대된다.

그러나, 보다더 실용적이고 효율적인 시스템이 되기 위해서는 측정 시스템의 보강을 통한 시스템의 재구축, 가공 정밀도 향상을 위한 공구 오프셋(offset) 방법 등에 관한 개선이 필요하다.

7. 참고 문헌

- [1] M.L. Philpott, N.A. Duffie, "An Intelligent Manufacturing System for the Production of Molds and Dies", Proc. of the 6th Int. Conf. on Computer-Aided Production Engineering, Edinburgh, pp.189-197, 1990
- [2] M.L. Philpott, S.E. Mitchell, J.F. Tobolski, P.A. Green, "Simultaneous In-Process Inspection of Surface Form and Roughness of Machined Sculptured Surface", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.117, pp.430-438, 1995
- [3] 高井憲二郎, "카메라 자유 곡면 생성 처리 시스템", 日本精密工學會誌, 54권, 10호, pp.1897-1901, 1988
- [4] I.D. Faux, M.J. Pratt, "Computational Geometry for Design and Manufacture", Ellis Horwood Ltd, 1979
- [5] M. Sakamoto, M. Abe, R. Orita, "Development of a personal CAD/CAM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques", Annals of the CIRP, Vol.38, pp.429-432, 1989
- [6] 竹内芳美외 3인, "초정밀 밀링 가공 연구(자유곡면의 가공)", 日本機械學會論文集(C編), 59권 566호, pp.3193-3198, 1993
- [7] H. Bosse, F. Lüdicke, H. Reimann, "An Intercomparison on Roundness and Form Measurement", Journal of the International Measurement, Vol.13, pp.107-117, 1994
- [8] 近勝司의 1인, "스캐닝 데이터를 근거로 하는 형상 가공 처리", 日本精密工學會誌, 54권, 6호, pp.1070-1075, 1988
- [9] A. Seiler, V. Balendran, K. Sivayoganathan, A. Sackfield, "Reverse Engineering from Uni-Directional CMM Scan Data", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.11, pp.276-284, 1996
- [10] V.K. Gupta, R. Sagar, "A PC-based System Integrating CMM and CAD for Automated Inspection and Reverse Engineering", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.3, pp.305-310, 1993
- [11] 中村 隆의 2인, "자유 곡면 입체의 특징 추출", 日本機械學會論文集(C編), 60권 572호, pp.1476-1481, 1994
- [12] B.K. Choi, C.S. Lee, J.S. Hwang, C.S. Jun, "Compound Surface Modelling and Machining", Computer-aided Design, Vol.20, No.3, pp.127-136, 1988
- [13] J.Y. Lai, C.Y. Lu, "Reverse Engineering of Composite Sculptured Surface", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.12, pp.180-189, 1996