

자유곡면으로 이루어진 Cavity의 가공경로생성

전 용 태*, 박 세 형*

Tool Path Generation of a Die Cavity Defined by Sculptured Surfaces

Yong-Tae Jun*, Se-Hyung Park*

ABSTRACT

This paper deals with a new method for the machining of a die cavity defined by sculptured surfaces. In machining die cavities or pockets, process planners have been faced with some troubles. One of the troubles is to remove a great deal of material within a given boundary while avoiding cutter interference. Cutter interference is a critical problem in NC machining of a die cavity. Even though this cavity machining has been implemented in many CAM systems, most of them can handle limited shapes of cavities or pockets. In this paper, a procedure has been developed to machine die cavity or pocket of a sculptured surface. The offset surfaces of the part surfaces and boundary surfaces are determined to calculate the intersection curves. These intersection curves form a FACE on the part surface, and the interference free tool path is generated by eliminating the points outside the FACE when computing the cutter contact (CC) data. Additionally, the cutter location (CL) data obtained from the CC data convert to an NC data. The NC data generated through this algorithm are verified on the CINCINNATI milling machine. A prototype die cavity machining system has been implemented in FORTRAN language and FIGARO graphics library on IRIS workstation.

Key Words : Sculptured Surface (자유곡면), Cavity (캐비티), Offset Surface (오프셋 곡면), Intersection curve between two Surfaces (곡면간의 교선), FACE (곡면상의 폐곡선)

1. 서 론

최근들어 심미적인 이유와 기능적인 필요성으로 자유 곡면(sculptured surface)형상을 갖는 제품의 수요가 크게 증가되었다. 자유곡면 제품의 형상은 더욱 복잡한 양상을 띄므로 기존의 재래식 수동가공(manual part programming)이나 모방가공(copy milling)으로는 가공이 불가능한 경우가 점차 많아져서 CAD/CAM 시스템을 이용하여 가공정보를 산출해야만 한다. 자유곡면의

NC 가공을 위해서는 여러가지 복잡한 문제가 해결되어야 하는데, 그중에 한 가지가 자유곡면 포켓가공(pocketing)이다.

Fig. 1은 전형적인 포켓가공을 도해한 것으로, 일반 각형 기계부품(prismatic mechanical parts)이나 플라스틱 몰드 금형의 캐비티(cavity) 가공등이 대표적인 경우이다. 포켓가공은 주어진 소재(workpiece)로 부터 많은 양을 제거하는 가공으로 포켓의 형상이 자유곡면일 때 가공양상은 더욱 복잡해 진다. 일반적으로 대부분의

* 한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구실(정희원)

사출금형 캐비티는 자유곡면을 포함하게 되는데 상용화된 CAD/CAM 시스템의 포켓(캐비티)가공기능은 대개 제한된 모양과 곡선으로 이루어진 2차원 혹은 2.5차원의 곡면에만 한정된다(1). 특히, 자유곡면 캐비티를 가공할 때는 캐비티 벽면과 공구와의 간섭(interference; gouging)으로 인한 벽면의 과절삭(overcut)문제와 코너(corner) 부위등에서의 과도한 절삭력에 의한 공구의 떨림(chatter), 휨(deflection)에 의한 가공 정밀도 저하등의 문제점이 발생할 수 있다(2). 따라서 자유곡면을 포함한 캐비티 곡면을 효율적으로 가공할 수 있는 안정된 가공경로 생성 알고리즘이 요구된다. 기존의 포켓가공을 위한 연구로서, Persson(3)은 분할(subdivision)법을 이용한 효율적인 포켓가공 알고리즘을 제안하였으나 원호와 직선으로 이루어지는 2차원 곡면에 국한되며, Y. S. Suh(4)는 경계곡면이 룰드곡면(ruled surface)인 3차원 포켓가공에 대하여 연구를 수행하였으며, W. S. Yoo(5)는 경계곡면이 수직이 아닌 경우에 캐비티의 CAPP(공정설계)에 대한 연구를 Z-map을 이용하여 수행하였다. 또한, Check surface(경계곡면)가 있는 경우의 자유곡면 NC가공에 관한 연구로서는 가공곡면과 경계곡면의 지정된 위치에 공구를 동시에 놓이게 하여 공구간섭이 생기지 않도록 한 연구가 있었다(6).

본 연구에서는 사각패치(patch)를 이용한 매개변수 다항식곡면(parametric polynomial surface)으로 모델링된 자유곡면을 포함하는 몰드 금형 캐비티의 가공경로를 생성할 수 있는 소프트웨어를 개발하여 정밀가공을 수행하는 방안을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 개발된 방법은 본 연구실에서 개발한 자유곡면 전용 CAM 시스템인 CASSET에 기능을 포함시켰다.

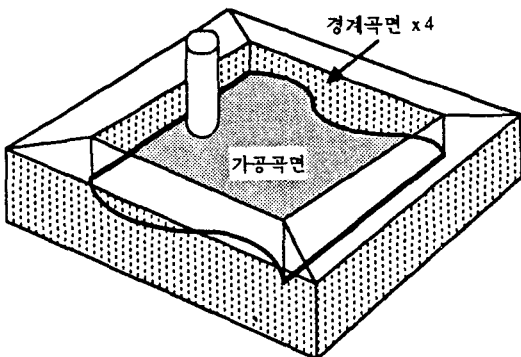


Fig.1 Example of free-formed die cavity

2. 포켓 가공경로의 생성

2.1 개요

캐비티의 가공은 일반적인 곡면의 가공방법과 같이 파라메트릭 방식(parametric machining)과 카테시안방식(cartesian machining)으로 가공할 수 있다. 그러나, 캐비티 가공은 Fig.2와 같이 경계곡면과의 간섭을 제거해야 하는 추가적인 문제가 있다. 즉, Fig.2의 간섭발생 영역 안으로 공구의 중심이 포함되면 경계벽면을 과절삭하게 되므로 캐비티면을 가공할 때는 가공곡면과 경계벽면 사이에서 간섭이 발생하는 간섭발생영역을 찾아내고 그 영역에서의 가공경로를 제거해야 한다.

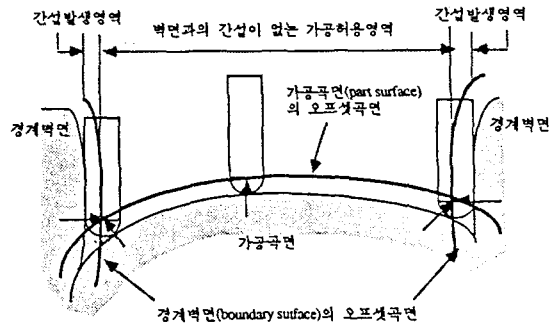
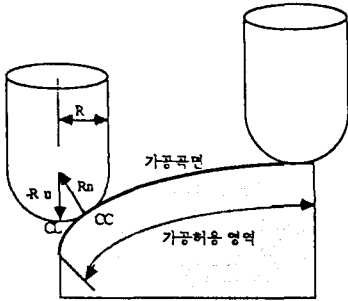


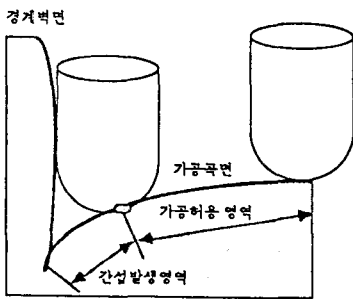
Fig.2 Interference free area of cavity defined by sculptured surfaces

Fig.3 (a)는 경계벽면이 존재하지 않는 임의의 자유곡면 모델을 보여주는데 가공곡면의 모든영역이 가공허용영역이 됨을 알 수 있다. 즉, 경계벽면이 존재하지 않으므로 단순히 곡면위의 모든 점에서 CC데이터를 계산하여 가공정보를 산출하면 된다. 그러나, Fig.3의 (b)는 가공곡면 주위로 경계곡면이 존재하는 캐비티 곡면의 한 모서리 부분을 도시한 것이다. 만약에 캐비티의 바닥곡면이 평면인 2.5차원 포켓이라면 바닥면을 가공할 때 단지 중심방향으로 공구반경만큼 오프셋시킨 가공경로를 생성시키면 경계벽면을 과절삭하지 않는 NC 데이터를 얻을 수 있다. 그러나, 바닥면과 경계면이 모두 자유곡면일 때는 경계벽면을 절삭하지 않는 가공경로를 얻기가 복잡해진다. Fig.3의 (b)곡면을 가공할 때, (a)에서와 마찬가지로 방식으로 가공곡면의 전 부분에 걸쳐서 가공경로를 생성하면 간섭 발생 영역의 가공경로까지 포함이 되므로 경계벽면의 원하지 않는 부분까지 절삭하게 된다. 따라서, 간섭발생영역의 가공경로를 제거

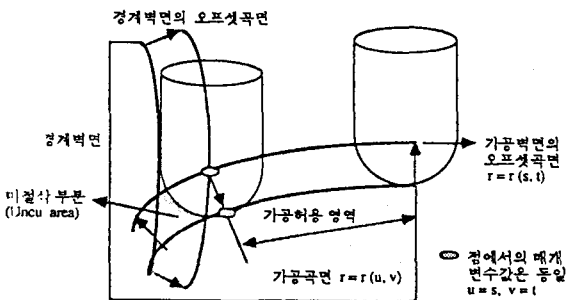
하기 위해선 먼저 가공곡면의 간섭발생영역을 찾아야 하는데 Fig. 3의 (c)는 이러한 간섭발생영역을 구하는 절차를 도시한 그림으로 그 과정은 다음과 같다.



(a) Calculation the CL data for free-formed part surfaces



(b) Limitation tool path for avoiding tool interference



(c) Calculation interference free area

Fig. 3 Schematic description of determining interference free area

가공곡면의 오프셋곡면과 경계곡면의 오프셋곡면을 생성한 뒤 두 오프셋곡면의 교점들을 먼저 구한다(모든 오프셋 곡면은 기준곡면의 법선방향으로 볼 엔드밀 공구

의 반경만큼 오프셋시킨다). 구한 교점들을 가공곡면 오프셋곡면의 두 매개변수 s, t 영역에서 보간하여 교선으로 만든다. 이때, 기준곡면을 법선방향으로 오프셋을 하였으므로 기준곡면의 한 점과 그 점의 법선방향 오프셋점의 매개변수값은 서로 동일하다. 따라서, 가공곡면의 오프셋곡면위에 구해둔 교선의 매개변수식을 기준곡면의 매개변수에 그대로 적용할 수가 있게된다. 즉, $R=R^*(s, t)$ 를 오프셋곡면의 두 매개변수 s, t 영역에서 보간한 교선의 매개방정식이라 할때 경계곡면을 과절삭하지 않는 가공 허용영역(FACE)의 경계가 되는 경계곡선식은 단순히 동일한 방정식을 기준곡면의 두 매개변수 u, v 로 대체하면 얻을 수 있다($R=R^*(u, v)$).

캐비티의 모든 경계곡면과 가공곡면 사이의 교선들을 모두 구한뒤 가공곡면위에서 교선들을 연결시키면 경계곡면을 절삭하지 않는 가공허용영역(FACE)을 정의할 수 있다. 즉, 자유곡면으로 모델링된 임의 캐비티의 가공경로를 산출할 때 경계곡면과의 간섭이 발생하는 영역을 찾아내는 과정과 영역내의 공구간섭을 제거하는 절차는 Fig. 4와 같다.

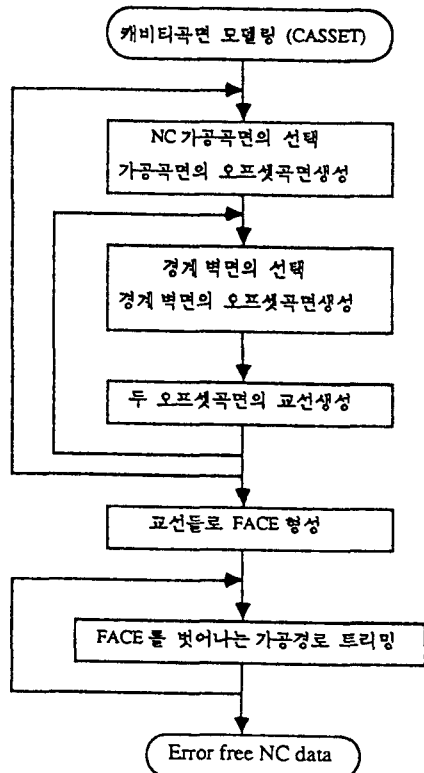


Fig. 4 Algorithm of die cavity machining

2.2 오프셋 곡면(Offset Surface)의 생성

캐비티 곡면의 가공경로 생성을 위하여 본 연구에서 제안한 알고리즘의 첫 단계가 가공곡면과 경계곡면의 오프셋곡면을 생성하는 작업이다. Fig. 5와같이 기준곡면(base surface)을 법선(normal) 방향으로 일정량 D만큼 오프셋시킨 오프셋 곡면의 위치벡터, u와 v방향의 1차미분값, 법선벡터 \underline{R}^o , \underline{R}_u^o , \underline{R}_v^o , \underline{N}^o 는 다음과 같이 표시된다.

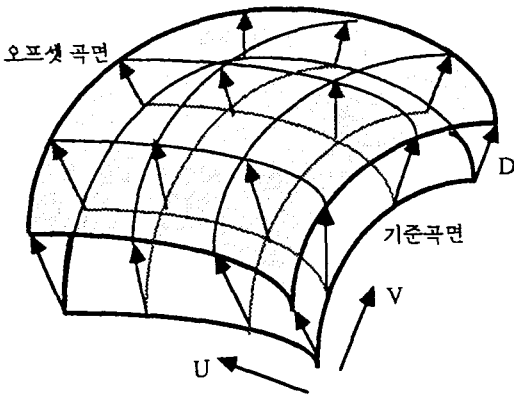


Fig. 5 Offset Surface

$$\underline{A} = \underline{R}_u \times \underline{R}_v$$

$$A = (\underline{A} \cdot \underline{A})^{0.5}$$

$$\underline{A}_u = \underline{R}_{uu} \times \underline{R}_v + \underline{R}_u \times \underline{R}_{uv}$$

$$\underline{A}_v = \underline{R}_u \times \underline{R}_{vv} + \underline{R}_v \times \underline{R}_{uv}$$

여기서,

$$\underline{R}^o = \underline{R} + D \cdot \underline{N}$$

$$\underline{R}_u^o = \underline{R}_u + D \cdot \{ (\underline{A}_u / A) - (\underline{A}_v \cdot \underline{A}) \underline{A} / A^3 \}$$

$$\underline{R}_v^o = \underline{R}_v + D \cdot \{ (\underline{A}_v / A) - (\underline{A}_u \cdot \underline{A}) \underline{A} / A^3 \}$$

$$\underline{N}^o = \underline{R}_u^o \times \underline{R}_v^o$$

단, R와 \underline{R}_u , \underline{R}_v 그리고 \underline{R}_{uu} , \underline{R}_{vv} 와 \underline{R}_{uv} 는 각각 기준곡면의 위치, 1차 미분, 2차 미분, 꼬임(twist) 벡터이다.

2.3 곡면사이의 교선(Surface-Surface intersection) 계산

곡면의 교선을 구하는 절차는 다음과 같이 검출과정, 추적과정, 재 정렬과정으로 나누어진다(7).

2.3.1 검출(Detection) 과정

교선을 구하고자 하는 두 개의 곡면 중에서 첫번째 곡면의 등 매개곡선(iso-parametric curve)과 두 번째 곡면을 삼각패치(patch)로 분할(subdivision)하여 근사시킨 미소 삼각평면과의 근사교점을 구한다(curve-plane intersection). 다음에 Newton-Raphson 방법을 이용하여 근사교점으로부터 정밀 교점을 구한다. 여기서 구한 교점들은 여러개의 다른 교점을 추적할 수 있는 시작점이기 때문에 초기 설정교점(initial intersection point)이라 한다.

2.3.2 추적(Tracing) 과정

검출과정에서 구한 초기 설정교점을 기준으로 교선위의 다른 교점들을 추적하는 과정이다. Fig. 6과 같이 두 곡선 법선벡터의 벡터곱(cross product)으로부터 교점의 추적방향(교선의 접선방향)을 구하고, 추적방향으로 교선의 주어진 원호길이(arc length)만큼 떨어진 곳의 추가 교점들을 Newton-Raphson방법을 이용하여 구한다.

2.3.3 재 정렬(Sorting) 과정

추적과정에서 얻은 교선상의 교점들을 각각의 폐곡선에서 순서에 맞게 재 정렬하고 교점들을 곡면상의 매개변수((u, v) or (s, t))상에서 보간(interpolation)하여 원하는 교선을 얻는 과정이다(6).

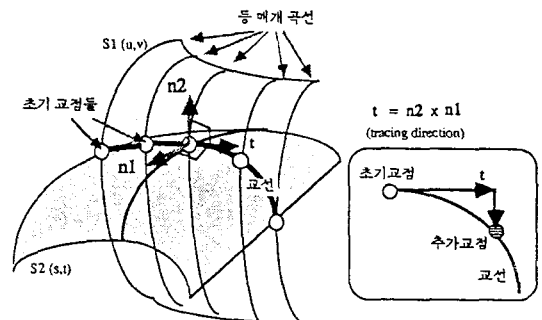


Fig. 6 Intersection curve between two surface

2.4 가공 경로의 트리밍(trimming)

오프셋곡면간의 교선이 결정되어 가공 곡면상에 가공 허용영역(FACE)이 결정되면 공구경로 곡선과 허용영역의 경계곡선과의 교점을 구하여 가공허용영역을 벗어나는 공구경로를 잘라내야 한다. 따라서, 공구경로 곡선과 경계곡선 사이의 교점을 구하는 모듈(module)이 필요한데, 곡면의 매개변수인 u, v 영역상에 존재하는 곡선사이의 교점을 구하는 과정은 다음과 같다(특별히 곡선이 곡면위에 놓여 있어서 $r(t)=[u(t) \ v(t)]^T$ 와 같이 곡면의 두 매개변수 u, v 로 표현이 가능한 곡선을 Edge라고 정의하자⁽⁶⁾).

- (1) 각각의 곡선을 Fig. 7에서와 같이 단위곡선(arc)의 u, v 방향 최대값과 최소값을 나타내는 Box를 계산하고 Box 사이의 상관관계로부터 교점이 있는지의 여부를 검사한다.
- (2) Box 검사에서 교점이 있는 것으로 판정된 Arc의 정밀교점을 구하기 위해

$$\dot{u}(t) = 0$$

$$\dot{v}(t) = 0$$

인 점들을 계산하면 각 점사이의 스패(span)은 단 순증가, 또는 단순감소의 성질을 갖게되어 교점추적이 용이하게 된다. 각각의 스패를 중간 매개변수 값을 기준으로 분할(subdivision)하여 교점이 있는 부분으로 Box를 줄여나간다. 이와같은 과정을 Box가 점으로 근사되는 허용한도(tolerance)까지 반복 계산하면 이 추적점이 구하고자 하는 두 Edge의 교점이 된다.

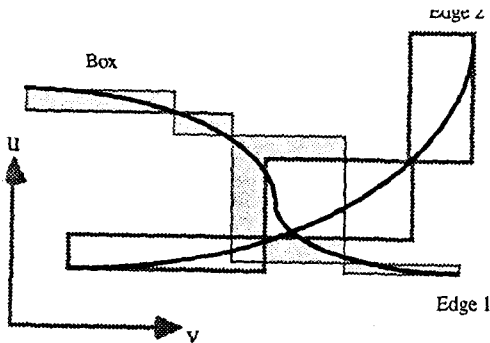
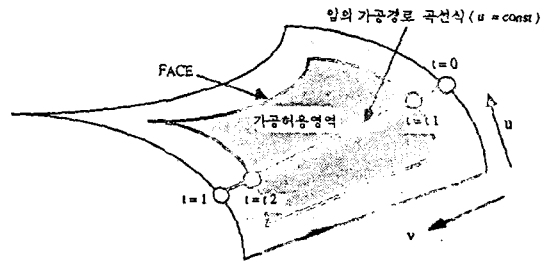
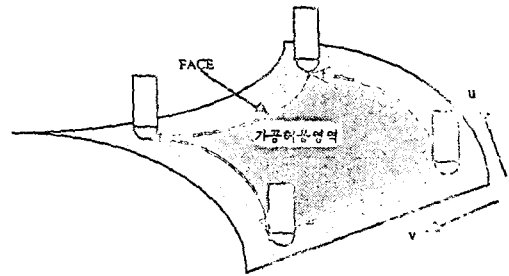


Fig. 7 Intersection of two curves in a surface.

FACE를 벗어나는 가공경로를 잘라내는 과정은 다음과 같다. Fig. 8 (a)와 같이 매개변수의 범위가 $0 \leq t \leq 1$ 인 가공경로의 곡선식과 FACE의 경계곡선 사이에서 구한 교점의 가공경로 곡선의 매개변수 값이 t_1 과 t_2 ($t_1 < t_2$)라고 할때, 교점들 사이에서만 공구경로를 생성시키기 위해서는 가공경로 곡선의 매개변수 범위를 $t_1 \leq t \leq t_2$ 로 재 조정하여 조정된 범위내에서만 정보를 산출시킨다. 대개의 캐비티 곡면은 닫혀진 폐곡선 형상을 띠므로 접하는 경우를 제외하고는 짝수개의 교점이 나오게 되는데, 교점의 갯수가 2개 이상일 때는 홀수번째 교점과 짝수번째 교점사이의 구간은 가공시키고 짝수번째 교점과 홀수번째 교점사이의 공구를 구간은 공구를 점프(jump)시킨다. 특별히, Fig. 8 (b)와 같이 FACE 경계곡선 위를 따르는 공구경로를 포함시켜 캐비티 코너 부위의 가공흔적(cusp)을 제거하도록 하였다.



(a) Trimming the iso-parametric tool path outside the FACE



(b) Profiling

Fig. 8 Toolpath generation of a die cavity.

참고로, 경계곡면과의 간섭을 방지하고 가공하면 Fig. 3 (c)처럼 미 절삭(uncut) 부분이 생기는데 이는 보다 작은 공구를 이용하여 별도 가공을 하거나 사상작업 과정에서 제거하는 것이 일반적이다.

3. 적용사례 (Implementation)

본 연구의 결과는 IRIS workstation에 FORTRAN 언어와 FIGARO (PHIGS의 IRIS Version) 그래픽 라이브러리로 프로그램화 되어, 당 연구실에서 개발한 자유곡면 전용 CAD/CAM 시스템인 CASSET의 한 부분으로 포함되도록 하였다. Fig. 9는 CASSET상에서 임의의 자유곡면 캐비티 모델을 형성한 화면을 보여준다. 본 응용예에서 선택한 모델의 바닥면은 5차 매개변수 다항식곡면이며 자유곡면을 포함한 4개의 경계면으로 이루어진 캐비티이다. Fig. 10의 (a)는 벽면과의 간섭이 처리되기 전의 CC(Cutter Contact) 데이터이며, Fig. 10의 (b)는 간섭을 일으키는 CC 데이터를 제거한 그림이다.

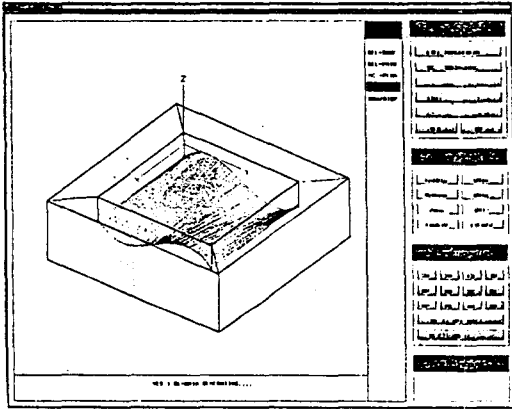
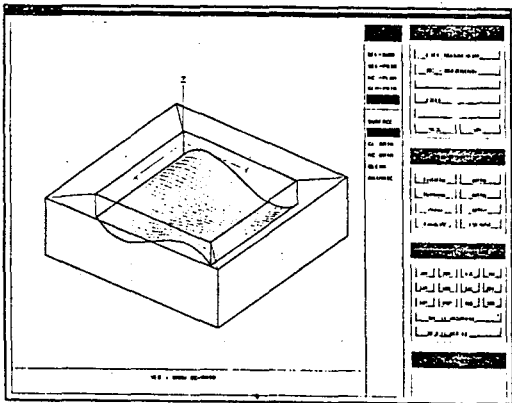
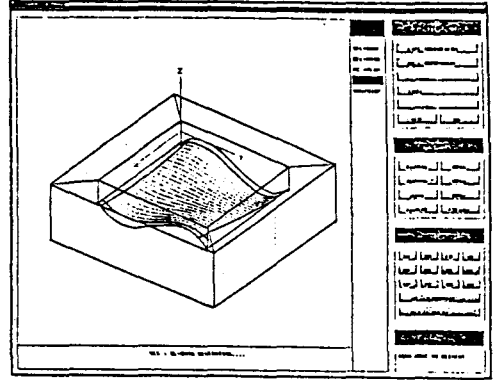


Fig. 9 A die cavity defined by sculptured surfaces



(a) Output CC paths before interference check.



(b) Output CC paths after interference check.
Fig. 10 CC paths generation while avoiding cutter interference

Fig. 11은 CC 데이터를 CL(Cutter Location) 데이터로 변환한 그림으로 경계가공(profiling) 경로를 볼 수 있으며 Fig. 12는 본 연구의 결과를 후 처리(post-processing)한 데이터를 CINCINNATI 밀링기계를 이용하여 직접 가공한 공작물을 보여준다.

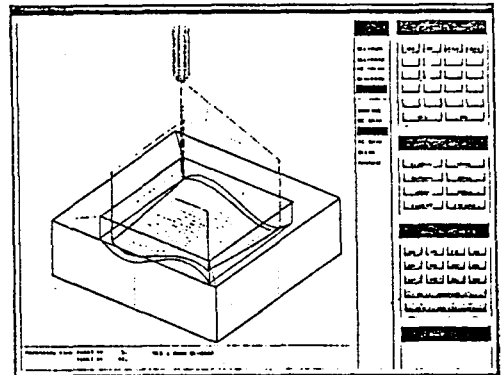


Fig. 11 Output CL paths

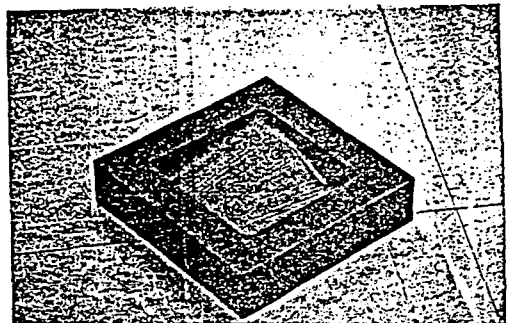


Fig. 12 Machined die cavity model

4. 결 론

참고문헌

금형의 캐비티곡면과 같이 자유곡면 포켓가공을 위한 방법이 개발되었으며 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 바닥곡면과 경계곡면이 롤드곡면, 콘스곡면(coons surface), 스위프곡면(sweep surface) 등 일반적인 사각 패치를 이용한 매개변수 다항식곡면으로 모델링 되는 자유곡면 캐비티를 NC 가공할 수 있는 프로그램을 개발하였다.
- 2) 기존에는 주로 곡면을 분할(subdivision)하여 2.5차원 곡면에 적용이 가능한 연구가 있었으나 본 연구에서는 오프셋 곡면의 교선을 이용한 알고리즘으로 일반 3차원 곡면에 적용이 가능하였다.
- 3) 경계곡면과의 과 절삭이 일어나지 않는 절삭허용영역의 경계가 되는 FACE(Edge)위를 가공하는 경계가공(profiling)은 나선형이 아닌 지그재그와 일방향으로 가공하였을때 발생하는 경계 끝 부위의 가공흔적(cusp)을 제거하는데 이용이 가능하다.
향후 연구과제는 다음과 같다.
 - 1) 나선형(spiral) 가공기능.
 - 2) 다수의 아일랜드(island)가 존재하는 캐비티의 가공기능

후 기

본 연구는 과기처 특정연구개발과제 "CIM기술개발"의 일환으로 추진된 것으로 연구비를 지원한 과학기술처와 KIST 산업협업체 GMP의 여러 회원사에 감사의 뜻을 표합니다.

1. CATIA User's Manual, IBM, 1988.
2. 전용태, "볼 엔드밀 곡면가공의 절삭기구 및 절삭력 예측에 관한 연구", 한국과학기술원 석사학위논문, 1990.
3. H. Perrsson, "NC machining of arbitrarily shaped pockets", Computer Aided Design, Vol. 10, No. 3, pp.169~174, 1978.
4. Y. S. Suh and K. W. Lee, "NC milling tool path generation for arbitrary pockets defined by sculptured surfaces", Computer Aided Design, Vol. 22, No. 5, pp.273~284, 1990.
5. W. S. Yoo and B. K. Choi, "CAPP for Cavity Machining", Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing, North-Holland, 1992.
6. I. D. Faux and M. J. Pratt, "Computational geometry for design and manufacture", Ellis Horwood Ltd., Chichester, W. Sussex, UK, 1981.
7. Mortenson, M. E., "Geometric Modeling", John Wiley and Sons, 1985.
8. 전용태, 이숙진, 박세형, "금형의 설계 및 생산을 위한 Surface Modeler의 개발" 과학기술처 연구보고서, 1991. 10.