

금형의 절삭가공을 위한 자동공구선정 및 공구경로 생성
(Automated Tool Selection and Cutter Path Generation
for Die Cavity Machining)

유 우 식 , 최 병 규
한국과학기술원 산업공학과
대전시 유성구 구성동 373-1

Abstract

본 논문에서는 복합형상의 금형을 가공하기 위하여 필요한 공구와 가공경로를 자동으로 생성해 주는 자동공정계획(CAPP) 방법을 제시한다. 금형곡면은 일반적으로 복잡한 형상의 자유곡면들의 조합으로 이루어 지는데 육면체 형상의 소재로부터 원하는 금형곡면을 가공하는 데는 수십시간의 기계가공 시간이 소요되며 또한 NC Code 를 준비하는데도 같은 정도의 시간이 소요된다. 금형곡면의 NC 가공에 있어서 또다른 어려움은 공구의 과부하와 공구간섭이 빈번하게 발생할수 있다는 점이다.

제안하는 자동공정계획 방법은 전 처리, 공정계획, 공구경로 생성의 3 단계로 구성된다. 자동공정계획 시스템의 입력정보는 1) 생성될 곡면형상 2) 가공할 소재 형상 3) 가공공구 셀 (드릴, 볼 엔드밀, 플랫 엔드밀), 절삭성 데이터 등이다. 전 처리 단계에서는 곡면 모델러로부터 생성된 입력 형상을 Z-map 이라 부르는 자료구조로 변환 한다. 두번째 단계에서는 절삭 가공작업의 순서가 사용되는 공구와 함께 후방순환법에 의하여 결정된다. 그리고 실제 가공될 NC 공구경로가 마지막 세번째 단계에서 생성된다.

1. 서 론

공정계획이란 “초기의 소재 블럭으로부터 원하는 형상의 제품을 얻기위하여 행해지는 일련의 작업과 그 순서를 정하는 일” 이라고 정의될 수 있다.[Pratt '84] 자동공정 계획의 연구는 Variant 방식과 Generative 방식이 있는데 최근 수년동안 활발한 연구가 수행되고 있으며 특히 Generative 방식의 자동 공정계획에 대한 연구가 활발하다.[Pratt'84] [Kanumury'91] 그러나 대부분의 자동공정계획 연구는 Holes, Prismatic parts 혹은 Rotational Parts 가공에 대해서 연구되고 있으며 자유곡면의 가공에 대해서는 자동 공정계획의 연구를 찾아보기 힘들다. 그러나 성형가공에서 사용되는 금형의 형상들은 여러 자유곡면 조각곡면들의 조합으로 이루어져 있는 경우가 일반적이기 때문에 이를 통합하여 전체곡면을 일관되게 가공하는 공정과 공구경로를 생성하는 일은 매우 중요한 일이다. 먼저 지금까지 자유곡면 금형가공의 자동공정계획을 어렵게 하는 이유를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 복잡한 형상의 자유곡면 정보를 자유자재로 다룰 수 있고 공정계획시 원하는 정보를 위상학적 문제없이 쉽게 얻을 수 있는 형태로 저장할 수 있는 알맞은 자료구조를 찾기 힘들다.
- 2) 공구의 선정시 특정공구로 가공가능한 형상의 인식이 어렵다.
- 3) 자유곡면 가공 공구경로 생성시 인접곡면을 침범하는 Gouging 문제를 해결하기 힘들다.

본 연구에서는 이러한 문제들을 해결하는 Generative 방식의 자동 공정계획 알고리즘을 제시하려 한다. 절삭가공에 있어서 공정계획은 초기의 소재 블럭으로부터 원하는 최종형상의 제품을 얻기 위하여 수행해야될 가공공정의 순서를 결정하는 일인데 따라서 형상의 초기

state는 가공해야될 소재 블럭이 되고 최종 state는 완성제품의 형상이라고 말할수 있다. 그러나 자동공정계획을 위해서는 완성제품 형상을 초기 state로 출발하여 역순으로 공정을 결정하며 소재 블럭형상의 최종 state에 이르는 후방순환법(Backward recursive approach)을 적용하는 것이 편리하다.[Choi'85] 이때 현재의 state가 최종 State인 소재형상이 되기 위해서는 여러 공정을 거쳐야 할 필요가 있는데, 따라서 한 공정을 결정한 후에는 State를 변화시켜 전단계의 알고리즘을 그대로 적용할수 있는 순환(recursive) 형태의 공정계획이 효율적이다. 이때 변화된 State를 Preform 이라고 하는데 현단계에서 선택한 공정의 가공량 만큼 살을 덧붙인 형상이 된다. 그러므로 다음에 설명된 기능들이 충족된다면 정형화되지 않는 자유곡면의 Generative 공정계획문제도 체계적으로 접근할수 있게 될것이다.

- 1) 초기 state와 최종 state 형상을 잘 정의할수 있다.
- 2) 임의의 State에서 공정을 선택할때 요구하는 정밀도를 만족시키며 제품 형상을 만들수 있는 공정들을 찾을수 있다.
- 3) 제품형상 생성이 가능한 여러 공정중에서 가장 효율적인 공정을 빠르게 찾을수 있다.
- 4) 현 State 에서 공구가 결정되었을때 바람직한 다음 State(Preform 곡면)을 만들수 있다.
- 5) 초기 State 의 형상모델이 다음 State의 모델로 개선될때 항상 같은 자료구조를 갖게 되어 자료구조의 Closeness 가 보장된다.

다음에는 제품형상을 Z-map [Takeuchi'89] 이라는 자료구조로 표현하여 위의 기능들을 만족시키고 공정계획을 체계적으로 수행하는 절차에 대해서 설명한다

2. 제안 시스템의 구성

[그림 1]에서 보는 바와같이 제안하는 시스템은 세단계로 구성되는데 첫째, 형상정보를 공정계획시 원하는 정보를 위상학적 문제없이 얻을수 있는 자료구조로 변환하는 전처리(Preprocessing) 단계와 둘째, 공구를 선정하는 공정계획 단계 그리고 셋째, 선정된 공구의 공구경로 생성단계로 구성된다. 금형 곡면은 일반적으로 상업용 CAD시스템등에서 Bezier, NURB 등과 같은 매개변수 다항식 곡면으로 모델링되는데 첫째 단계에서 이들 금형 곡면모델을 Z-map 형태로 변환하여 공정계획을 위한 초기 state 정보를 얻는다. 또한 소재 블럭 형상정보도 최종 state로 역시 Z-map 형태로 저장한다. 입력 금형곡면 정보가 3차원 측정기에서 얻은 CMM 정보인 경우도 역시 Z-map 자료구조로 곡면정보를 변환한다.

공정계획 시스템의 중심이 되는 다음 단계는 초기 state가(완성제품 형상) 최종 state에(소재 형상) 이르도록 후방순환 공정계획 알고리즘을 적용하는 단계이다. 본 공정계획 단계에서 가용한 공구 데이터 베이스를 이용하여 각 절삭작업의 사용공구를 선택한다.

마지막 단계에서 선정된 공구의 실 공구경로가 계산되고 절삭성 데이터베이스를 이용하여 NC Code가 생성된다. 각 단계의 간략한 설명은 다음과 같다.

3. 형상정보의 전처리 (자료구조의 Z-map 변환)

일반적으로 형상 모델은 Surface 모델과 Solid 모델로 구분된다. Surface 모델은 복잡한 형상을 모델링하기 위해서 각 부위별로 별도의 곡면을 형성하는데 각 곡면간의 위상학적 관계를 부여할수 없으므로 곡면이 서로 겹치거나 떨어져 있게된다. 따라서 이를 이용한 공정 계획이나 NC가공의 경우 전체곡면을 효율적으로 연결하여 가공하기가 어렵다. 한편 Solid 모델은 위상학적 관계는 완벽하나 대형 시스템에서도 많은 계산부담을 갖게되고 자유곡면 형상의 표현이 곤란하므로 금형가공에 Solid 모델을 적용하기는 적합하지 않다.

따라서 본 연구에서는 형상모델로 [그림 2] 와같은 Z-map 비매개 변수 모델을 선택하였다.

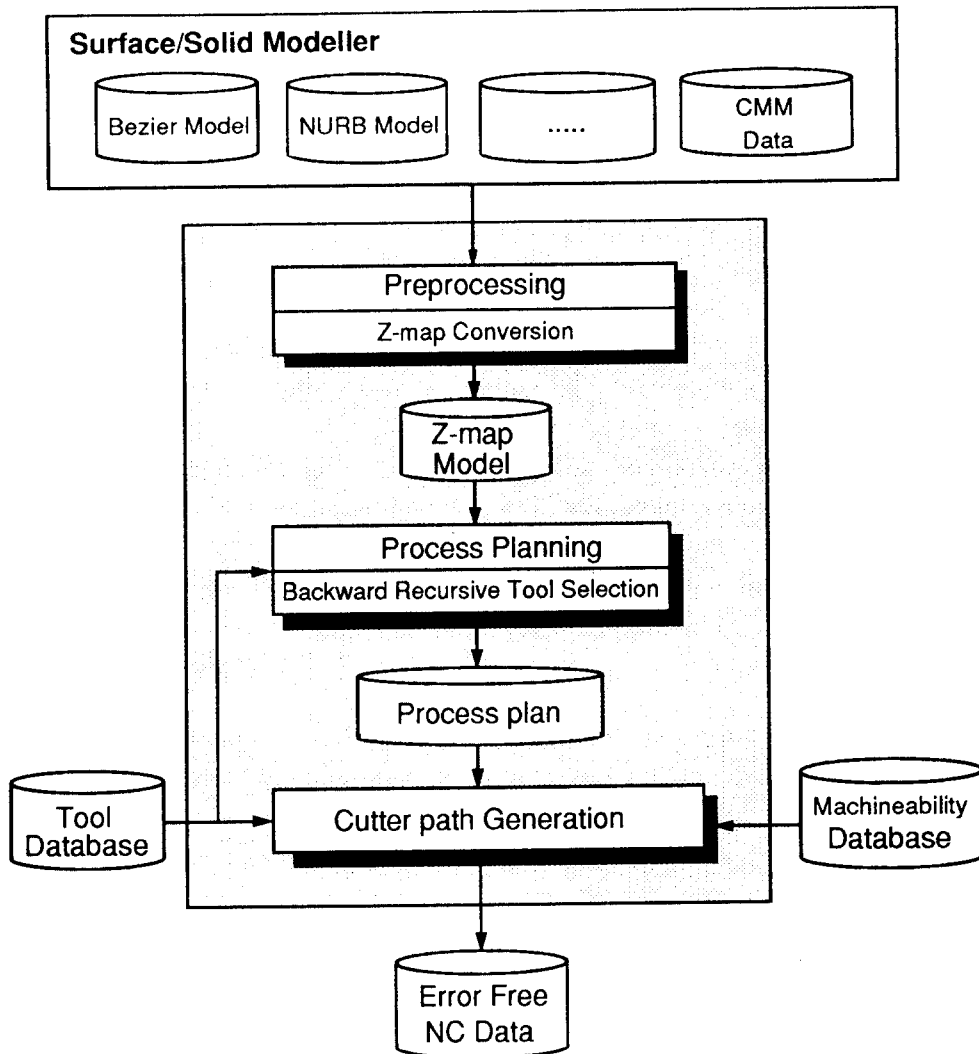


Figure 1 CAPP System for Die Machining

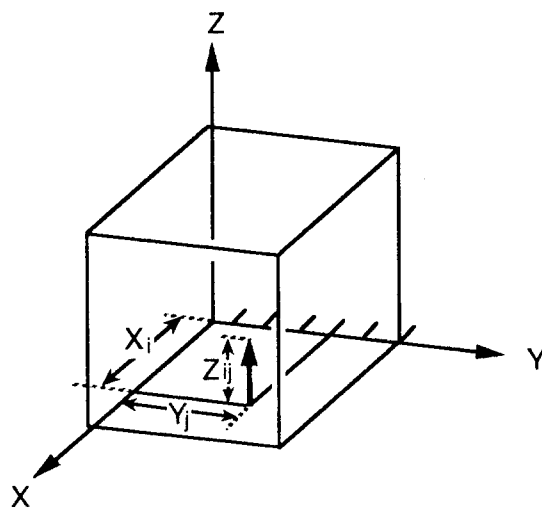


Figure 2 Z-map model

기존의 Surface 모델러의 곡면 형상정보를 이용하여 Z-map 모델을 만들고자 하면 XY평면에 곡면을 투영한 후 사각형 격자를 규칙적으로 형성하고 각 격자점 좌표에 해당되는 곡면의 Z값을 저장한다. 이는 곡면의 Z 값 지도를 가지는 것과 같으므로 Z-map 이라 부른다.

Z-map 자료구조로 형상이 저장되면 다른 형태의 곡면모델과 비교하여 많은 장점을 갖는데 그중에서 특히 여러 조각곡면들의 조합으로 전체곡면이 구성되었을때 위상학적 문제를 해결할수 있다는 점과 데이터 조작의 견고성(Robustness), 자료구조의 Closeness 등이 Z-map모델을 기본형상모델로 채택하게 된 이유이다. 왜냐하면 자동공정계획을 위해서는 형상모델 데이터의 조작과 변환이 매우 많은데 이들에 대해서 견고성(Robustness)과 Closeness가 보장되어야 하기 때문이다.

Bezier, NURB등의 매개변수 곡면모델로부터 비매개변수 모델인 Z-map을 형성하기 위해서는 각 격자점의 Z값을 모두 계산하여야 하는데 효율적인 변환을 위하여 다음과 같은 알고리즘을 적용한다.

- 1) 매개변수 곡면을 포함하는 사각 Majorizing Box를 xy평면상에서 결정 (그림 3a)
- 2) xy평면상의 majorizing 사각형에서 균일한 격자점들을 정의
- 3) 매개변수 곡면에서 순차적으로 2개씩의 iso-parametric 점군을 샘플링하여 Strip을 생성 (그림 3b)
- 4) Strip에서 삼각형을 만들때 내각의 최소각이 크게되는(maxmin) 삼각형망 형성(그림 3c)
- 5) 형성된 삼각형의 3점과 그점에서의 법선벡터를 이용하여 비매개변수 삼각형 Bezier patch 형성
- 6) 삼각형 내부 Z-map격자점의 barycentric 좌표값 u, v, w 를 계산하여 격자점위치의 곡면높이로 Z-map 격자점의 높이 계산

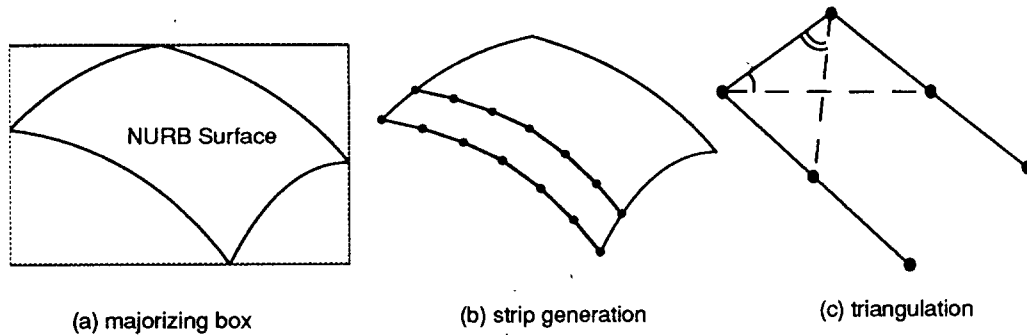


Figure 3 Z-map Conversion from Parametric Surface

삼각형망 형성의 자세한 내용은 [Choi'91]에 설명되어 있으며 barycentric 좌표값을 이용하여 비매개변수 삼각형 Bezier patch로 부터 격자점높이를 계산하는 방법은 [Farin'88]에 자세하게 설명되어 있다.

위에 설명된 Z-map 변환방법은 날카로운 탐침(Probe)으로 측정된 3차원 측정데이터의 경우 바로 적용될수 있고 볼 탐침으로 측정된 경우 질삭 시뮬레이션 방법[Choi'91]을 이용하여 Z-map 변환을 할수 있다.

4. 금형곡면 가공의 공정계획

본 연구에서는 자유곡면을 가공할때 사용되는 공구로 다양한 직경의 볼엔드 밀, 플랫 엔드밀, 필렛 엔드밀, 드릴 그리고 EDM 전극을 고려하였다. 자유곡면 가공에서 가장 많이 사용되는 볼 엔드밀은 정삭(Finishing)과 중삭(semi-Finishing)에 쓰이고 필렛 엔드밀은 중삭과 황삭(rough cutting)에 그리고 플랫 엔드밀은 황삭에 주로 쓰인다. Drill은 Centercut이 없는 중절삭용 플랫 엔드밀 의 진입구멍 가공에 쓰이는데 Centercut이란 하향절삭이 가능하게 공구의 밀면 중심에도 공구날이 있는것을 말한다. EDM(electro discharged machining)은 엔드밀로 생성할수 없는 각진 코너부근의 가공을 담당하는데 설명에서는 제외하였다

앞에서 Generative 공정계획을 위한 기능적 요구조건을 제시하였는데 본 연구에서는 이를 다음과 같이 해결하여 자유곡면 공정계획의 자동화 알고리즘을 제안한다.

1) 임의의 State에서 제품형상을 생성해 낼수있는 공구를 선택하는 문제는 각 공구별로 공구 포락곡면을 생성함으로써 해결한다. 공구 포락면은 원하는 제품 형상의 표면을 주어진 공구의 형상으로 Scanning 할때에 공구가 최대로 들어갈수 있는 형상으로 그 공구로 원하는 형상에 가장 가깝게 생성할수 있는 형상이다. 이는 곡면을 주어진 공구로 상향 옹셀시킨후 다시 하향 옹셀시켜 구하는데 공구포락면은 원곡면의 필렛곡면이 된다. 만약 어떤공구의 포락면이 원하는 stste 곡면과 Tolerance 내에서 차이가 난다면 그 공구는 state 생성가능 곡면이 된다.

2) 제품형상 생성이 가능한 여러 공구중에서 가장 효율적인 공구는 절삭효율이 크고 유효한 공구이다. 절삭효율이 크다는것은 직경이 크고 견고한 공구(길이/직경 이 작은 공구)를 말하며 유효하다는 것은 하향 절삭만 가능한 공구는 Drill이 있는경우를 그리고 필요 공구길이조건을 만족하는 경우를 말한다.

3) 공구가 결정된후 바람직한 다음 State(Preform)를 만들기 위해서는 현 State의 Machining Range만큼 상향 옹셀시키면 된다. 즉 선택된 공구로 가공될 살만큼을 현 State에 덧붙이는 것이다.

4) 초기 State 의 형상모델이 다음 State의 모델로 개선될때 즉 preform을 만들때에도 초기의 자료구조는 변하지 않고 항상 같은 구조를 유지한다. 이는 Z-map 자료구조가 옹셀에 대하여 닫혀있기 때문이다. 이를 자료구조의 Closeness 가 보장된다고 한다.

Z-map 변환에 의해 조각곡면들을 모두 Z-map으로 변환하면 곡면들간의 위상학적 문제가 사라지게 되어 앞에서 설명한 기능적 요구조건을 만족시키는 방법을 찾을수 있다. 제시된 4가지 기능과 공구 및 절삭조건 데이터 베이스를 활용하면 공정을 역순으로 결정할수 있는 후방순환 방식의 자동공정계획 알고리즘을 얻을수 있는데 [그림 4]에 그 개념이 설명되어 있다. 입력 정보는 초기 State가 되는 제품형상과 원하는 정밀도를 의미하는 Tolerance, 그리고 소재형상인 최종 state와 공구 DB 이며 마지막 State인 소재형상에 이룰때 까지 공구 선정과 다음 State로의 변화(preform 생성)를 반복해서 수행한다.

Recursive CAPP 알고리즘 :

- 1) 제품의 현 state를 생성할수 있는 가능한 공구 셀 생성
- 2) 가능한 공구 셀 중에서 가장 효율적인 공구 선택
- 3) 선택된 공구를 고려하여 다음 state로 형상을 변환하고 Tolerance 완화
- 4) 현 state가 최종 state에 이르면 stop
else goto 1)

제안하는 CAPP 알고리즘에 따라 공구가 선택되는 과정을 도식적으로 나타낸 [그림 4] 를 살펴보면 초기 state가 Z-map 형태로 변환된 정보와 가공된 곡면이 원 곡면과 다를때 허용되는 값을 의미하는 Tolerance가 주어져 있다. 첫번째 단계(그림 4a)에서는 일반적으로 볼

엔드밀이 사용되는 정삭공정을 계획하고 있다. 예에서는 20 mm 직경의 볼 엔드밀이 선택되었다. 그리고 정삭가공 두께만큼(예에서는 0.3mm) 곡면을 읍셀하여 다음 state를 생성하고 Tolerance도 0.1mm 에서 0.3mm 로 완화하였다.

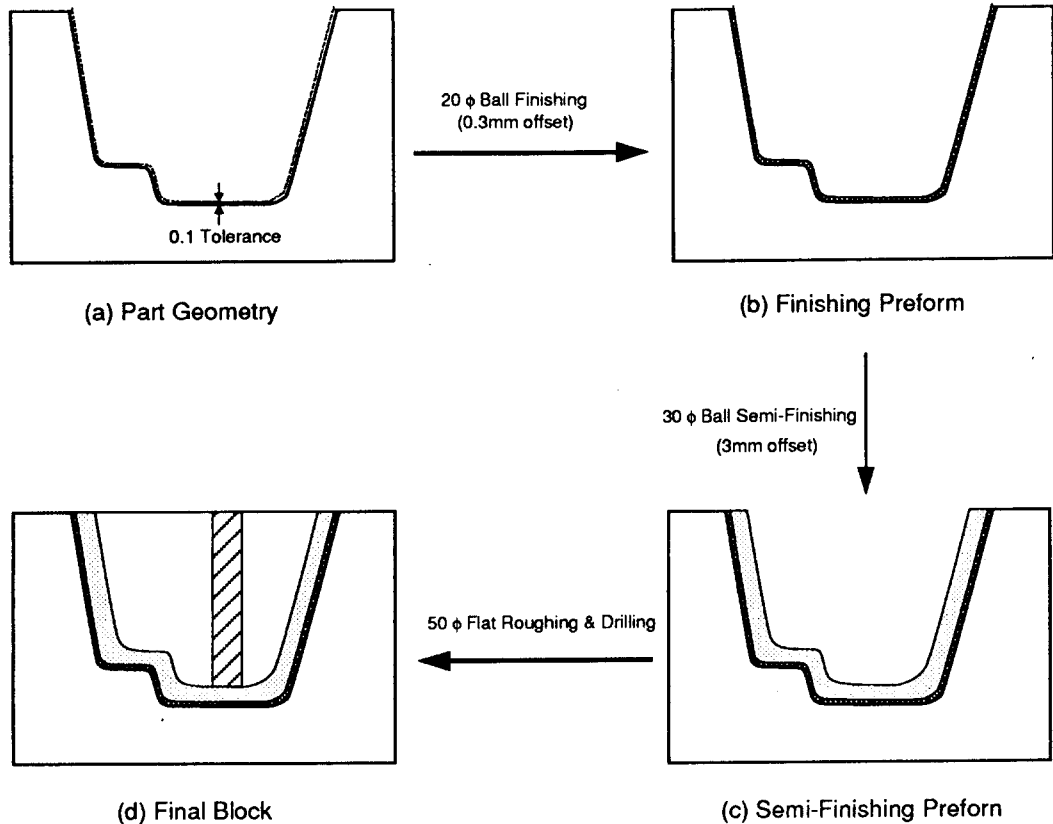


Figure 4 Schematic Description of Recursive Planning Logic

다음 단계에서는 중삭 공정을 계획하는데 [그림 4b] 와 같이 30mm 볼엔드밀이 선택되고 3mm 를 읍셀시켜 다음 state를 생성하였다. 그후 50mm 플랫 엔드밀을 황삭공정에서 선택하고 황삭공정의 경우 다음 state를 최종 state에 이르게 변환하나 하향절삭이 없는 공구를 선택했으므로 드릴공구를 부가적으로 선택하여 황삭 진입구멍을 가공하게 한다.

Z-map 곡면의 읍셀방법에 대한 자세한 설명은 [Takeuchi '89][Choi '91] 등에 설명되어 있다.

5. 공구경로의 자동생성

본 절에서는 공정계획에 따라 선정된 공구의 공구경로를 생성하는 방법에 대해서 간략히 설명한다. 두번째 단계인 공정계획이 완료되면 선택된 공구순서와 그에 따른 공정 그리고 각단계의 state형상인 Preform Z-map 정보등이 주어진다. 이를 이용하여 실 공구경로를 마지막 단계에서 구해준다.

금형의 절삭경로 종류에는 기본적으로 Drilling, Pocketing, Scanning 등의 3가지가 있

는데 볼 엔드밀이나 필렛 엔드밀이 정삭이나 중삭공정을 수행할때는 주로 Scanning 동작이 채택된다. Scanning 공구경로는 가공하려는 곡면을 선택된 공구만큼 옴셀하여 공구의 중심 궤적이 되는 옴셀 Z-map을 생성한후 생성된 옴셀 Z-map을 공구진행 방향과 경로간격을 고려하여 샘플링하고 공구경로 연결방식에 따라 샘플링된 중심궤적 곡면을 연결하고 높이를 반경만큼 낮추어 생성한다.

플랫 엔드밀이나 필렛 엔드밀이 사용되는 황삭 공정에서는 Pocketing 공구경로가 주로 채택되는데 수평면방법[Pratt'84]이라 불리는 공구경로 생성의 과정은 다음과 같다. 먼저 수평절단 평면의 초기위치를 소재의 가장 높은값에서 선택공구의 최대절삭표를 참조한 절삭 깊이만큼 감하여 정한다. 그후 수평면을 순차적으로 절삭 깊이만큼씩 낮추어 가며 옴셀곡면의 최하점에 이를 때까지 한 절단평면으로 생성되는 Pocketing 경로를 다음에 설명한 알고리즘을 적용하여 구한다.[그림 5]

- 1) 절단 수평면과 옴셀곡면의 교선을 구하여 평면 상의 Pocket 경계곡선 생성
- 2) 평면상의 Pocket 등고선 옴셀
- 3) 루프(loop) 성질을 이용하여 옴셀 등고선의 간섭루프를 제거하고 경계곡선의 폭이 절삭 너비 보다 작아질 때까지 연속 옴셀

[그림 6]은 위와같은 방법으로 모든 수평면에 대하여 구한 금형곡면의 Pocketing 공구경로와 Pocket 경계곡선이다.

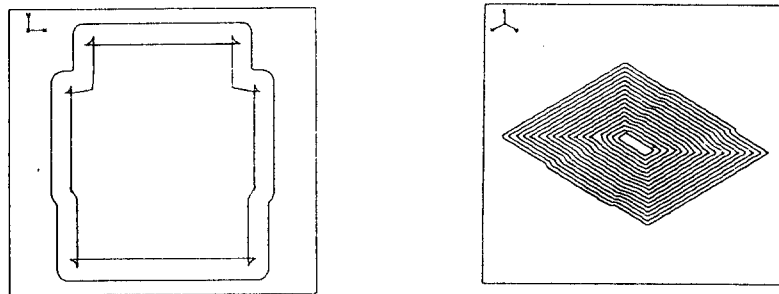


Figure 5 Pocketing Example

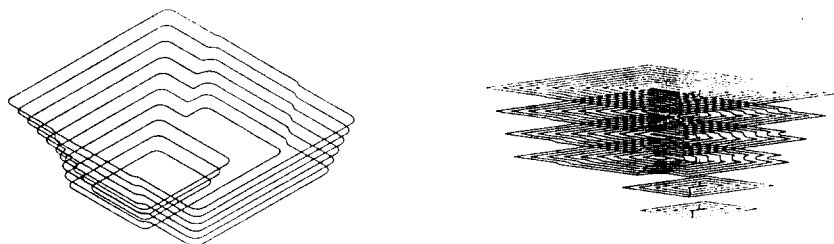


Figure 6 Parallel Plane Method

본 연구에서 제시하는 Z-map을 이용한 Scanning, Pocketting 공구경로 생성방식의 가장 큰 장점은 법선 벡터를 이용한 기존의 방식과 비교하여 공구간섭에 따른 곡면 과적삭 문제가 원천적으로 배제된 방식이라는 점이다. 이는 본 방식이 Copy-milling과 유사하게 Z-map의 읍셀을 이용하여 공구경로를 생성하기 때문에 가능하다. 그리고 Z-map자료구조를 이용하면 각 공구 이송시의 소재 절삭량을 계산하는 것이 용이하게 되어 각 Nc 블럭의 공구 이송 속도를 조절함으로써 공구의 과부하를 막는 것도 가능하게 된다. 이에 대한 자세한 설명은 [Jerard'88][Wang'87]을 참조하기 바란다.

6. 금형곡면에서의 적용 예

[그림 7]은 아이스 박스 사출 금형 모델의 곡면 형상이다. 곡면의 깊이, 넓이, 길이는 대략 25cm, 20cm, 40cm 정도이며 사각블럭 소재로부터 가공된다. [그림 7]은 Z-map 자료구조의 Wireframe 모델을 은선을 제거하여 표현한 것으로 워스테이션에서 "C"로 구현한 시스템인 Z-Master시스템에서 얻은 출력이다. 예제로 이용된 아이스박스 금형은 도면정보를 이용하여 Surface 모델러에서 여러 조각곡면들로 모델링 되었다. 그후 조각곡면들을 통합하여 Z-map 모델로 변환하면 [그림 7] 과 같은 형상이 된다. 생성된 공구경로와 가공 시뮬레이션 과정은 [그림 8,9]와 같다.

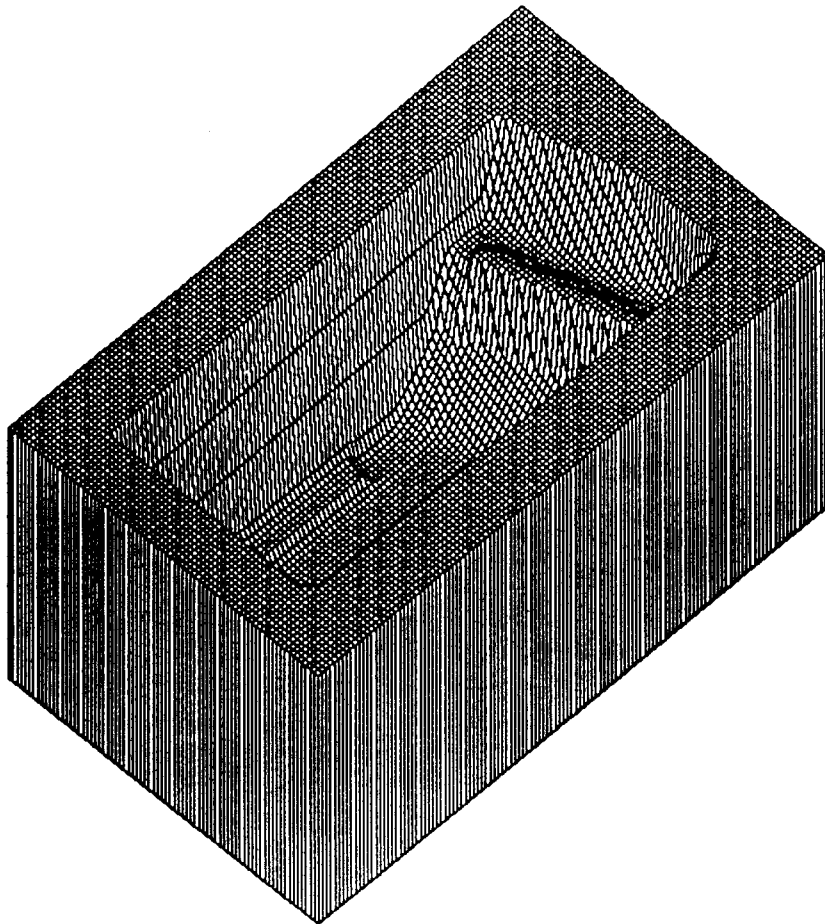


Figure 7 Example Die Cavity

한정된 엔드밀과 드릴공구를 갖는 공구 데이터 베이스를 이용하여 공정계획을 생성하면 다음과 같은 네 공정과 그에따른 공구가 선정된다. 가공순서에 맞게 설명하면 먼저 50 ϕ Drill을 사용하여 하향절삭이 불가능한 중절삭용 공구(Flat_H)의 진입 구멍을 가공하고 (Drilling) 다음에 원하는 제품에서 3mm를 남겨놓고 50 ϕ 중절삭용 공구로 황삭을 한다.(Rough Cutting) 다시 0.3mm를 남겨놓고 30 ϕ 볼 엔드밀로 중삭을 한 후(semi-Finishing) 20 ϕ 볼 엔드밀로 정삭을 한다.(Finishing)

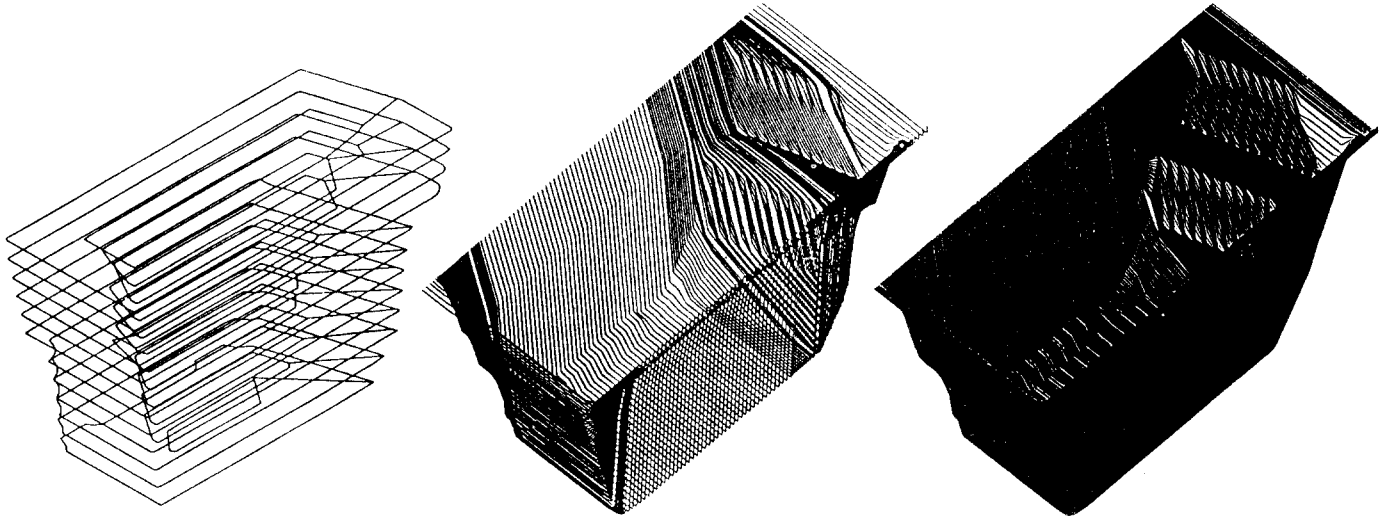


Figure 8 Output Tool Paths

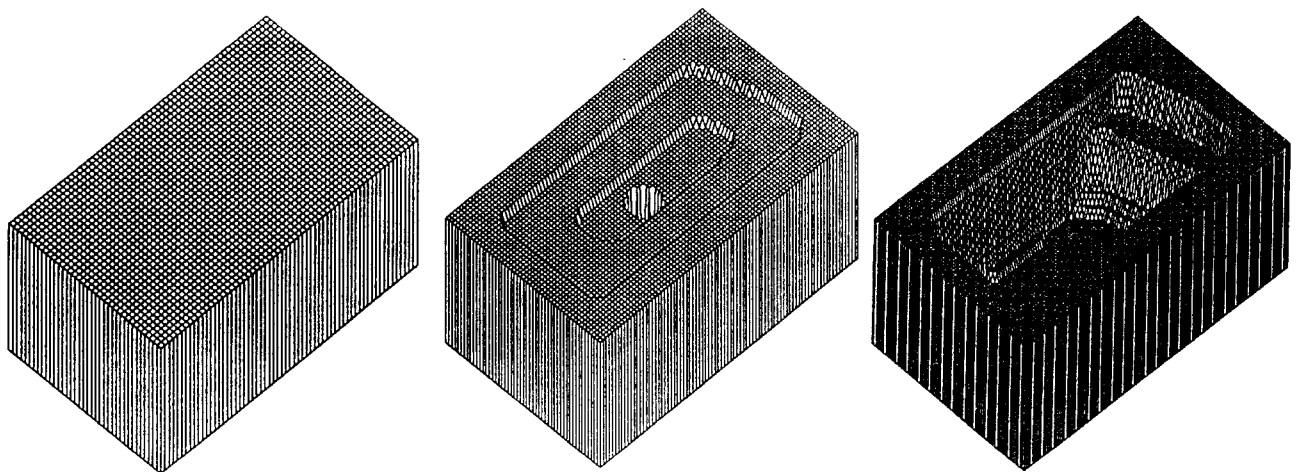


Figure 9 Progress of Cutting Simulation

[그림 8]은 선정된 공구의 Pocketing, semi-Finishing, Rough Cutting 공구경로에서 G01 NC code 동작을 Plotting 한것이고 [그림 9]는 초기소재의 형상과와 드릴링 후의 Pocketing 중간 과정 그리고 Pocketing 후의 소재 모습을 보여주고 있다.

7. 결론

제안된 자동 공정계획 알고리즘은 간단한 예들에 대해서 효율적임이 검증되었다. 즉 전 체곡면을 고려하여 공정과 공구를 선택하고 위상학적 문제가 해결된 가공데이터를 생성할수 있었다. 그러나 아직 해결되지 않은 문제들도 많은데 이들 문제들은 현재 연구중에 있다. 즉 수직벽등의 표현을 위해서는 "E-map"자료구조를 제안하여 연구중에 있으며 라운딩된 코너등과 슬롯등의 가공 Feature를 인식하여 가공하는문제 그리고 가공 경제성평가등이 그것이다.

[참고문헌]

- [Choi'85] B.K.Choi, M.M.Barash, and D.C.Anderson, "STOPP: An approach to CAD/CAM integration", Computer Aided Design, Vol.17, No.4, 1985.
- [Choi'91] B.K. Choi, Surface Modeling for CAD/CAM, Elsevier, 1991.
- [Farin'88] G. Farin, Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design, Academic Press, 1988.
- [Jerard'88] R.B.Jerard and R.L.Drysdale, "Geometric simulation of numerical control machining", Computers in Engineering, Vol.2, 1988, ASME.
- [Kanumury,91] M.Kanumury and T.C.Chang, "Process planning in an automated manufacturing environment", Jr. of Manufacturing System, Vol.10, No.1, 1991.
- [Pratt'84] M.J.Pratt, "Solid modeling and the interface between design and manufacture " IEEE CG&A, July 1984.
- [Takeuchi'89] Y.Takeuchi et al, "Development of a personal CAD/CAM system for mold manufacture based on solid modeling techniques", Annals of the CIRP, Vol.38, No.1, 1989.
- [Wang'87] W.P.Wang, "Application of solid modeling to automate machining parameters for complex parts", Proc. of CIRP, 1987, pp.33-37.