

## DVM 및 Z-Map 복합모형을 이용한 금형의 모의가공

신양호\*, 박정환#, 정연찬\*\*

### Cutting Simulation of Mold & Die via Hybrid Model of DVM and Z-Map

Yang Ho Shin\*, Jung Whan Park# and Yun Chan Chung\*\*

#### ABSTRACT

Geometric cutting-simulation and verification play an important role in detecting NC machining errors in mold & die manufacturing and thereby reducing correcting time & cost on the shop floor. Current researches in the area may be categorized into view-based, solid-based, and discrete vector-based methods mainly depending on workpiece models. Each methodology has its own strengths and weaknesses in terms of computing speed, representation accuracy, and its ability of numerical inspection. The paper proposes a hybrid modeling scheme for workpiece representation with z-map model and discrete vector model, which performs 3-axis and 5-axis cutting-simulation via tool swept surface construction by connecting a sequence of silhouette curves.

**Key Words** : Hybrid-Model(복합모형), DVM(이산벡터모형), Z-map(지-맵), Cutting-Simulation(모의가공)

#### 1. 서론

NC 가공경로(tool-path)의 기하학적 모의가공(geometric cutting-simulation) 및 검사(verification) 기능은 가공데이터 이상으로 인한 가공 불량률 사전에 파악하는 데 중요한 역할을 한다. 이러한 NC 가공 검증시스템은 모의 가공과 검증을 위한 피삭재(workpiece)의 형상을 표현하는 방법에 따라 1) 솔리드(solid) 모델, 2) 그래픽기반(view-based) 모델, 3) 이산벡터(discrete vector) 모델로 분류할 수 있으며, 각 방법은 계산속도, 정밀도 등에서 장점과 단점을 가진다.

우선 첫 번째 솔리드 방식은 공구이동체적(cutter

swept volume)과 피삭재를 솔리드로 표현하고, 피삭재와 공구이동체적의 불리언 연산을 통해 가공된 피삭재를 얻는 방법을 취하고 있다<sup>1,7</sup>. 이 방법은 가공에 의해 생성되는 공작물 형상을 정량적으로 나타낼 수 있어 수치적 검사가 가능하며 3축 이상의 가공 검증도 가능하다는 장점이 존재하는 반면, 충분한 정밀도를 얻기 위해서는 많은 계산량과 메모리를 필요로 하는 단점이 있다<sup>16</sup>. 현재까지 이 방식의 대표적인 자료구조로는 B-rep, CSG, Octree, Voxel 등을 찾을 수 있다.

두 번째 그래픽 기반 모델은 일반적으로 z-buffer를 이용하며 관측방향에 따라 시각적으로 가공 결과를 검증하는 방법이다<sup>8,9</sup>. 이 방법은 솔리

2002년 9월 24일 접수

\* 영남대학교 대학원 기계공학과

# 교신저자, 영남대학교 기계공학과

Email jwpark@yu.ac.kr Tel. (053) 813-3524

\*\* (주)큐빅테크 큐빅기술연구소

드 모델을 이용한 방법보다 상대적으로 계산 속도는 빠르지만 가공오류를 정성적으로 알 수 있고 다른 각도에서 보고자 하면 다시 계산을 수행하여야 하는 어려움이 있다.

마지막으로 이산벡터모델(DVM: discrete vector model) 방식은 '곡면 법선벡터(surface normal vector)'를 이용하는 방법<sup>10-14</sup>과 '수직벡터(vertical vector)'를 이용하는 방법<sup>15-23</sup>이 있다. 수직벡터를 이용하는 방법은 이산벡터모델의 특별한 경우로 생각할 수 있는데 곡면의 모든 벡터들이 직교좌표계의 Z축과 동일한 방향의 벡터들로 이루어진다. 특히 수직벡터모델 중 하나인 z-map 모델은 데이터의 구조가 간단하고 계산속도가 빠르다는 장점이 있으나 수직벽 형상이나 돌출형상(overhang)의 표현이 어렵기 때문에 보조 모델을 활용하거나<sup>23</sup>, z-map 데이터의 구조를 변경한 Dixel로 표현하기도 한다<sup>24,25</sup>. 곡면 법선벡터를 이용하는 방법은 설계곡면에 위치하는 점들의 법선벡터를 이용하여 피삭재 모델을 구축하는 방법이다. 이 방식은 각 법선벡터와 공구 이동 궤적의 교차점(intersection point)을 찾아 법선벡터의 길이를 갱신하는 것으로 모의가공을 수행한다. 이 방법은 형상 표현이 자유롭기 때문에 5축 가공에도 적용이 가능하며, 가공 결과의 수치적 검사가 용이하다는 장점이 있으나 소재제거체적(MRV: material removal volume)을 구하기가 어렵다는 단점이 있다. 이상의 방법에 대해 기존 연구의 분류방식을 참고하여 분류하면 Table 1과 같다.

기하학적 모의가공에 있어서 피삭재의 표현과 더불어 공구의 움직임은 수학적 모델로 표현하는 공구이동체적(cutter-swept volume or surface)에 대한 모델링도 중요한 문제이다. 특히 5축 가공의 경우 3축 가공에 비해 복잡한 공구 운동을 수식화 하는 연구가 필요한데, 이에 대한 다양한 연구들을 찾을 수 있으며, 최종 공구이동체적은 솔리드 또는 곡면으로 모델링하는 것이 일반적이다.

기존 연구로부터 알 수 있듯이 각 피삭재 표현 방식은 개별적인 장단점을 가진다. 특히 DVM의 곡면법선벡터(surface normal vector) 모델은 형상 표현이나 검사 등의 능력을 고려할 때 자유곡면의 모의가공에 적합하다고 판단된다. 그러나 자동차 프레스 금형 혹은 대형 가전 제품의 사출 금형의 경우에는 계산 시간 및 메모리 등의 이유로 사용자가 원하는 정밀도로 모의가공 결과를 얻는 것이 현실적으로 어려운 경우도 있다. 반면 DVM의 특수한

형태인 z-map의 경우, 몇몇 특징형상(예: 수직벽, 꺾인 모서리, 역구배 형상)의 표현이 현실적으로 어려운 반면 계산 시간 및 계산 강건성(robustness)에 상당한 강점을 가지면서 일부 상업용 CAM 시스템에서 채택하고 있다. 또한 평활하고 부드러운 자유곡면에 대해서는 표현 정밀도에 특별한 문제가 없다고 판단된다<sup>23</sup>.

Table 1 Summary of research on workpiece modeling for cutting-simulation

Workpiece model		Strengths	Weaknesses	
Solid model	CSG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numerical analysis</li> <li>• MRV computation</li> <li>• 5-axis machining</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computing speed</li> <li>• Memory req.</li> </ul>	
	Octree			
	B-rep			
	Voxel			
Discrete vector model	Vertical vector	Z-map	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computing speed</li> <li>• Numerical analysis</li> <li>• MRV computation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5-axis machining</li> <li>• Feature modeling</li> </ul>
		Ext. Z-map (Dixel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5-axis machining</li> <li>• Numerical analysis</li> <li>• MRV computation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memory req.</li> <li>• Feature modeling</li> </ul>
	Surface normal vector	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numerical analysis</li> <li>• 5-axis machining</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MRV computation</li> </ul>	
View-based model	Z-buffer (3D image buffer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5-axis machining</li> <li>• Computing speed</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numerical analysis</li> <li>• View-dependent</li> </ul>	

이에 따라 본 연구에서는 일반적인 DVM 즉 곡면법선벡터 모델을 피삭재 모델로 사용하면서 동시에 평활하고 부드러운 곡면부를 z-map으로 표현대상 피삭재를 복합모델로 표현하여 모의가공을 수행하는 과정을 다루고자 한다. 또한 3축 및 5축 가공시 공구이동체적은 공구 실루엣 곡선(silhouette curve)으로부터 삼각형 다면체 근사 곡면을 만들었으며, 이를 복합모델의 모의가공에서 활용하였다.

본 연구에서는 곡면법선벡터 표현방식을 'DVM', 수직벡터 표현방식을 'Z-map'이라는 용어로 나타내기로 한다. 2절에서는 복합모델을 설명하고, 3절에서는 공구의 이동체적 모델링, 4절과 5절은 모의가

공 절차와 사례를 보이고 있다.

## 2. 피삭재 복합 모델링

본 절에서는 z-map 및 DVM 자료구조를 살펴보고, 복합모델에 의한 피삭재 모델링(workpiece modeling)을 다루고자 한다. 본 연구에서 '피삭재'는 모의가공의 입력모델로서, 일반적인 NC 가공에서는 설계곡면(design surface)을 포함하는 사각형 블록 또는 설계곡면의 오프셋(offset) 형태를 지닌다. 전자의 경우는 가전제품의 사출금형 몰드베이스, 후자는 자동차 등의 프레스 금형 주물소재에서 그 예를 찾을 수 있다.

### 2.1 Z-map

Z-map은 자료구조 특성상 일정 간격으로 미리 정의된 xy 위치에서의 높이값을 저장하는 자료구조를 가진다(Fig. 1). 곡면 오프셋팅, 블렌딩, 불리안 작업 등 각종 변형이 간단하고 계산의 강건함(robustness)이 좋은 모델인 반면, 수직벽이나 꺾인 모서리 등의 특징형상을 표현하는데에는 현실적인 어려움을 가진다. 보다 자세한 특성은 기존연구<sup>23</sup>를 참조할 수 있다.

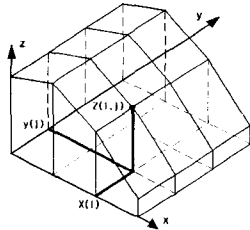


Fig. 1 Z-map model

### 2.2 DVM

DVM은 설계곡면(파트곡면)에서 추출된 점 데이터 집합으로써 각 점은 위치(position) 및 법선(normal) 정보를 가진다. 따라서 z-map은 모든 점의 법선벡터가 직교좌표계의 z 축 방향과 동일한 DVM으로 생각할 수 있다. 이때 각 점의 법선벡터는 ± 방향으로 일정한 '길이'를 가짐으로써 모의가공시 공구궤적과의 교점(intersection)을 계산할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 '위치, 단위법선벡터, 길이' 정보를 (C,N,L<sup>+</sup>,L)로 표시하기로 한다. 이때

L<sup>+</sup>는 C에서 N 방향으로의 길이를, L<sup>-</sup>는 C에서 -N 방향으로의 길이를 의미한다. Fig. 2는 DVM에 대한 모의가공의 개념을 보이고 있다<sup>26</sup>. DVM에 대한 자세한 특성은 별도 참고문헌<sup>18</sup>에 나타나 있다.

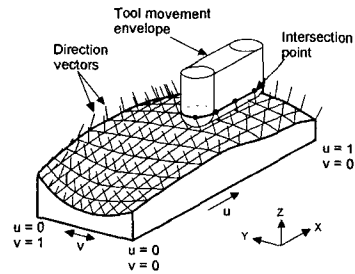


Fig. 2 DVM and cutting simulation

### 2.3 피삭재 모델링

우선 z-map은 자료구조 특성상 일정 간격으로 미리 정의된 xy 위치에서의 높이값(Z[i,j]) 만을 저장함에 반해서 DVM은 사용자가 원하는 임의의 위치에서 더 많은 정보 (C,N,L<sup>+</sup>,L)를 저장할 수 있음을 알 수 있다. 이는 동일한 영역에 대해 동일한 간격으로 이산벡터를 추출할 경우 DVM은 z-map에 비해 약 8배 가량의 메모리를 필요로 함을 의미한다. 또한 z-map은 비교적 평활한 곡면에 대해서는 표현 능력이 비교적 우수하다고 볼 수 있으므로<sup>23</sup>, z-map으로 표현하기 어려운 특징형상 - 수직벽, 꺾인 모서리 - 영역만을 DVM으로 표현하는 것이 바람직하다고 사료된다. 여기에 더하여 모의가공 계산과정에서 일반적으로 DVM은 z-map에 비해 계산시간이 더 많이 소요된다는 것을 고려할 때에도, 전체 영역은 z-map으로 표현하고 특징형상 영역을 DVM으로 나타내는 것이 적절한 것으로 판단된다. Fig. 3은 복합모델의 개념도와 수직벽 영역에 초기 DVM을 생성한 예를 보이고 있다.

다음으로 초기 피삭재(initial workpiece) 모델링에 관해 살펴보도록 하자. 일반적으로 NC 가공 공정은 황삭, 중삭, 정삭, 잔삭 및 필요할 경우 EDM(electrical discharge machining)까지 거치게 되며<sup>26</sup>, 설계곡면의 오프셋(주물) 또는 블록 형태로 주어지는 초기 피삭재는 각 공정을 거치면서 최종 설계곡면 형상에 근접하게 된다. Fig. 4는 초기 피삭재의 두 가지 형태를 보이고 있다.

NC 가공에서 피삭재는 황삭~잔삭에 이르는 가

공공정을 거치면서 변형이 이루어지며, 모의가공은 초기 피삭재 형상부터 최종 가공형상에 이르는 단계별 변형 형상을 표현하는데(즉 모델링) 어려움이 없어야 한다.

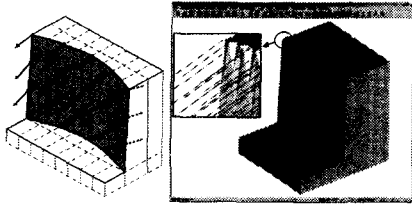


Fig. 3 Schematic view and example of the hybrid model

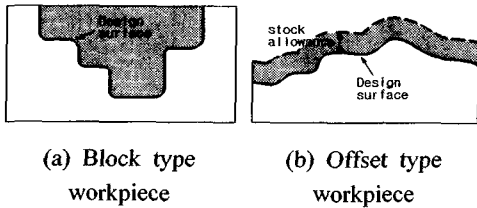


Fig. 4 Typical types of initial workpiece model

이러한 관점에서 보았을 때, z-map은 적어도 3축 가공에서는 두 가지 형태의 피삭재 모델링에 무리가 없다고 판단되는 반면, DVM의 경우는 곡면법선 벡터라는 특성 때문에 일정한 두께를 가지는 주물 형태의 피삭재 모델링에 더 적합하다고 사료된다. 즉 z-map은 임의 형태의 초기 피삭재 모델로부터 모든 공정 또는 단위가공(UMO<sup>26</sup>: unit machining operation)별 가공결과를 표현하기에 적절하고, DVM은 최종 가공 면에 적당량의 가공여유(uncut allowance)<sup>26</sup>가 존재하는 상태 — 주물 형태의 초기 피삭재 또는 중·정삭 직전 피삭재 모델 — 를 표현하는데 적절한 것으로 판단된다.

이상의 논의를 바탕으로 본 연구에서는 다음과 같은 접근방식을 취하고자 한다.

- 초기 피삭재 모델은 블록 및 읍셋 형태를 고려한다.
- 초기 피삭재 모델을 z-map으로 모델링한다.
- 설계곡면을 기준으로 블록하게 꺾인 모서리, 수직벽 영역은 DVM을 추가로 구축한다. 이때 각각의 (C,N,L<sup>+</sup>,L) 정보에서 초기 L<sup>+</sup>는 다음과 같이 결정한다. 초기 L<sup>+</sup>는 일반적인 과절삭 확인이 가능한 정도의 길이로 정하도록 한다.

- (i) 초기 피삭재 모델 = 읍셋형태 → L<sup>+</sup> = 주물 읍셋량(stock allowance),
- (ii) 초기 피삭재 모델 = 블록형태 → L<sup>+</sup> = 정삭 가공여유(uncut allowance) + ε.

여기서 (ii)의 경우를 살펴보도록 하자. 일반적으로 정삭 이전의 가공공정(예: 황삭)에서는 가공여유가 주어지며, 모의가공 후 사용자는 과절삭(overcut, gouging) 여부에 관심을 가진다. 그러므로 수직벽이나 꺾인 모서리 등 z-map이 표현하기 어려운 특징형상에 대한 모의가공 및 검사에서 가공여유 만큼의 허용오차가 존재한다고 보면, 일정한 가공여유를 남기는 가공공정에 대한 모의가공시에는 z-map이 충분한 역할을 수행할 것으로 기대하는 것이다(물론 가공 후 남는 형상에 대한 정확한 수치를 원한다면 접근방식이 달라져야 할 것이다). 달리 표현하면 자원(계산시간)의 낭비를 최소화한다는 의도도 존재한다. 또한 (i)의 경우에도 이와 같은 적용이 가능할 수 있다.

특징형상 탐색은 블록하게 꺾인 모서리를 탐색하는 방법<sup>29</sup>을 이용하거나 입력되는 설계곡면에서 법선벡터를 구하고 이를 이용하여 특징형상이 존재하는 영역을 찾을 수 있다. Fig. 5는 복합 모델을 생성하는 과정을 나타내고 있다.

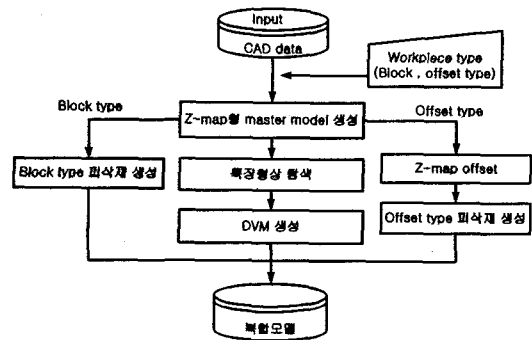


Fig. 5 Hybrid model construction

### 3. 공구 이동 궤적면 모델링

본 연구에서는 실루엣 곡선(silhouette curve)을 활용하여 3축 및 5축 공구 이동에 의해 형성되는 궤적 곡면 즉 공구 이동 궤적면(TSS: tool swept surface)을 모델링 하였으며, TSS는 삼각형 다면체(triangular polyhedra)모델로 근사하였다. 일반적으

로 곡면  $r(s,t)$ 과 임의의 방향벡터  $D$ 가 주어질 때, 실루엣 점(point)은 식 (1)을 만족하는 곡면상의 점이다. 실루엣 곡선은 연속된 실루엣 점으로 구성된다.

$$D \cdot N(s,t) = 0 \quad (1)$$

where  $N(s,t) = \text{surface normal vector}$

### 3.1 공구 모델

공구의 이동궤적을 생성하기 위해선 우선 공구의 형상을 정의하고 모델링 하여야 한다. 본 연구에서 적용한 공구 형상은 볼, 필렛, 평 엔드밀이다. 공구 모델은 몇 개의 단위 형상으로 분리하여 삼각형 다면체(triangular polyhedra)로 모델링한다.

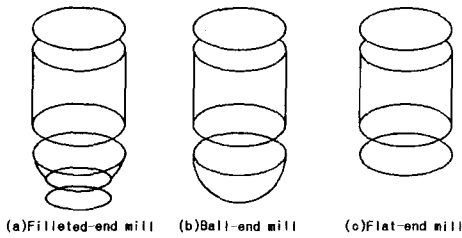


Fig. 6 Tool body modeling

### 3.2 공구축벡터가 고정된 경우의 이동 궤적면

일반적으로 3축 이하의 가공에서는 각 NC 블록 이동시 공구 축벡터(cutter axis vector)는 고정된다. 따라서 공구 이동 방향벡터  $D$ 가 주어질 때 공구의 실루엣 곡선(silhouette curve) 계산은 비교적 간단하다<sup>16</sup>. 본 연구에서는 기존 연구<sup>16</sup>를 이용하여 볼, 필렛, 평엔드 밀 공구에 대해 점열(point sequence)로 이루어진 실루엣 곡선을 계산한 후, 이로부터 삼각형 다면체 곡면을 구축하였다. Fig. 7은 볼 엔드밀의 공구 스윕곡면과 실루엣 곡선을 그린 개략도이고, Fig. 8은 볼 엔드밀의 TSS를 삼각형 다면체로 근사한 예를 보인다.

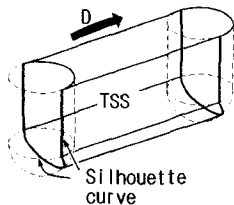


Fig. 7 Silhouette curves and TSS

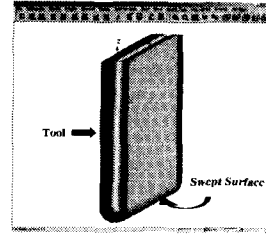


Fig. 8 Example of a TSS (3-axis)

### 3.3 공구축벡터가 변하는 경우의 이동 궤적면

3축 가공에 비해 4축이나 5축 가공은 병진 이외에 회전운동이 포함되므로, 실루엣 곡선은 다소 복잡하게 된다. 본 연구에서는 Fig. 9에 보이는 형식의 5축 NC 기계를 가정하고 실루엣 곡선을 계산하고자 한다.

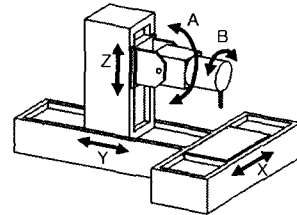


Fig. 9 A 5-axis NC machine: spindle tilting & rotating type

우선 단일 NC 블록에서 공구 이동에 따른 공구 곡면을  $r(s,t,\theta)$ 로 표현하자. 여기서  $(s,t)$ 는 곡면상의 위치를 표현하기 위한 매개변수이며,  $\theta$ 는 운동을 표현하기 위한 이동매개변수이다. 즉  $r(s,t,\theta)$ 는 블록 시작점을 의미한다. 일반적인 포락이론(envelope theory)에 따라 공구 곡면상에서 식 (2)와 같은 특성을 가지는 모든 점을 구하면 공구의 이동포락(sweep envelope)을 찾는 것이 된다. 여기서 속도벡터  $V$ 는 3축 가공에서  $D$ 에 해당하며, 이동매개변수  $\theta$ 는 블록 시작점에서  $\theta=0$ 으로 둔다.

$$V(s,t,\theta) \cdot N(s,t,\theta) = 0 \quad (2)$$

where  $V = \text{velocity vector of a point on the surface at } \theta$   
 $N = \text{normal vector, } \theta = \text{motion parameter.}$

다음으로, 공구자세 즉 공구의 위치(position)와

방향(orientation)을 공구상의 기준점(reference point)  $P$ 와 공구축벡터  $U$ 로 정의하도록 하자. 그리고 Fig. 10에서 보이듯이 단일 NC 블록에 대해 시작점 및 끝점에서의 공구자세를 각각  $(P_s, U_s)$ 와  $(P_e, U_e)$ 라고 하고 두 공구자세 사이의 공구 운동을 좌표계 변환 문제로 생각하도록 한다. 즉  $(P_s, U_s)$ 에 대한 좌표계  $T_0$ 를 식 (3)과 같이 정의한다. 이때 정의에 의해 좌표축  $n$ 과  $n'$ 은 동일함을 알 수 있다.

$$T_0 = [n \ o \ a \ p]$$

where  $p = P_s, a = U_s, n = U_s \times U_e$  (3)  
 $o = U_s \times n$

좌표계  $T_0$ 가  $(P_e, U_e)$ 에 의한 최종 좌표계로 이동하는 문제는 일반적으로 병진운동(translation) 및 회전운동(rotation)의 조합에 의한 변환 문제로 다루고 있으며<sup>24</sup>, 여기서 회전운동은  $U_s$ 가 좌표축  $n$ 을 중심으로  $\Psi$  만큼 회전하여  $U_e$ 로 변환되는 경우로 간주한다. 식 (4)는 공구 운동을 좌표계  $T_0$ 에 대한 상대적인 변환으로 나타낸 경우이다.

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & D_x(\theta) \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & D_y(\theta) \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & D_z(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$D = P_e + (P_e - P_s) \theta / \Psi, \quad 0 \leq \theta \leq \Psi$$

이제 공구 운동을 변환행렬  $M(\theta)$ 로 표현하였고, 여기서 공구 곡면상의 한 점을  $Q(\theta) = r(s, t, \theta)$ 로 나타낸다면 점  $Q(\theta)$ 에서 속도벡터  $V$ 는 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$V = \frac{\partial M}{\partial \theta} Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & D_x(\theta) \\ 0 & -\sin \theta & -\cos \theta & D_y(\theta) \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & D_z(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$D(\theta)' = (P_e - P_s) / \Psi$$

다음 단계는 이동매개변수  $\theta$ 가 주어졌을 때  $V(s, t, \theta) \cdot N(s, t, \theta) = 0$ 을 만족하는 공구곡면상의 점을 찾아내는 일이다. 본 연구에서는 공구곡면을 매개변수형 곡면(parametric surface)으로 정의함으로써, 정의역(domain) 공간에서 이러한 특성을

가지는 점들을 추출할 수 있다. 추출된 점들은 3차원 점열 곡선으로 변환하여 실루엣 곡선을 얻을 수 있으며, 단일 NC 블록에 대한 공구 이동 궤적면은 적절한  $\theta$  간격으로 계산된 실루엣 곡선들을 보간함으로써 얻어진다. 본 연구에서는 간단한 선형보간을 통하여 선형곡면(ruled surface)을 구하고 이로부터 삼각형 다면체 근사곡면을 얻었다.

Fig. 11은 필렛엔드밀에 대해 실루엣 곡선 군(Fig. 11-a), 실루엣 곡선을 연결한 선형 곡면 및 공구곡면(Fig. 11-b) 예를 보이고 있다.

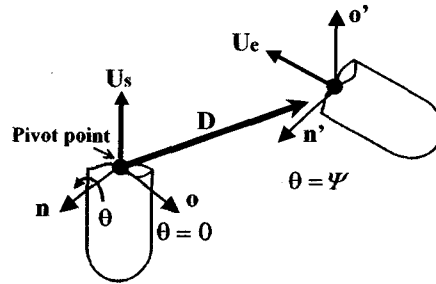


Fig. 10 Tool motion modeling for a single NC block

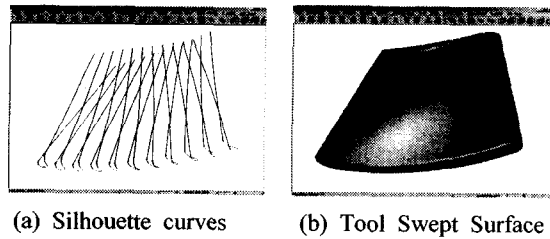


Fig. 11 Example of silhouette curves and TSS

#### 4. 모의가공 및 검사

일반적으로 기하적 모의가공(geometric cutting simulation)은 주어진 NC 가공 데이터와 공구에 의해 피삭재의 형상 변화 및 간섭 여부를 관찰하는데 관심이 있다. 대표적인 간섭(interference)의 예로 과절삭(overcut, gouging)과 충돌(collision)을 꼽을 수 있으며, 이외에 기계 축값 벗어남(stroke-over)도 5축 가공에서는 주요 간섭 현상으로 고려해야 할 대상이다<sup>27</sup>.

'충돌'은 일반적으로 공구 절삭날 이외의 부분과 피삭재, 고정구 등과의 간섭현상을 의미하며, 대개는 공구 홀더를 충돌 검사 대상으로 삼는다<sup>28</sup>. '과절

삭' 및 '미절삭(uncut)'은 공구 절삭날에 의해 변형된 피삭재와 설계곡면간의 차이로 검사가 가능하다. 본 연구에서는 모의가공을 충돌 여부를 확인하는 '충돌 검사' 및 가공 형상을 생성하기 위한 '절삭 가공'으로 구분하여 다루고자 한다.

#### 4.1 충돌 검사

본 연구에서 충돌검사(collision detection)는 공구 홀더와 피삭재간의 간섭 여부를 판단하는 과정으로 정의한다. 또한 일반적으로 절삭가공과 비교하여 큰 공차(tolerance)를 적용하므로 기존의 z-map 모델에 의한 충돌검사<sup>28</sup>를 그대로 활용할 수 있다고 판단된다. 즉 복합 모델에서 DVM은 충돌검사의 고려 대상이 아니다.

#### 4.2 절삭 가공

절삭가공은 피삭재 모델의 각 이산벡터와 공구 이동 궤적면(TSS)간의 교점을 계산하여 이산벡터 길이를 갱신하는 과정이다. Z-map에 대한 3축 가공의 경우는 특수한 경우로서, 비매개변수형(non-parametric) TSS를 사용하여 수직 벡터간의 교점 계산 시간을 많이 줄일 수 있다<sup>22</sup>. 5축 가공의 경우는 3절에서 설명한 방식에 의해 삼각형 다면체 TSS와의 교점을 계산하는 작업이 필요하다.

DVM의 경우는 각 법선벡터 정보 (C,N,L<sup>+</sup>,L)로부터 만들어진 N 방향의 이산벡터와 다면체 TSS간의 교점을 계산하여 L<sup>+</sup> 값을 갱신하는 과정을 거친다. 이때 계산시간 단축을 위하여 xy 평면에 m×n 버킷(bucket)을 정의한 후 각 법선벡터를 그 위치에 따라 해당 버킷에 미리 담아 두도록 하였다. 기존 연구<sup>11,12,18</sup>에서는 이를 'bucketing'으로 부르기도 한다. 실제 절삭가공에서는 공구 TSS의 2차원 xy 투영 영역과 교차하는 버킷에 속한 벡터만을 고려하게 된다. 교점이 존재하면 L<sup>+</sup>의 값을 갱신하는데, L<sup>+</sup> < 0 인 경우는 과절삭에 해당하며, L<sup>+</sup> > 0은 미절삭에 해당한다.

#### 4.3 모의가공 절차

이상의 논의를 바탕으로 전체적인 모의가공 과정을 Fig. 12에 보이고 있다.

복합모델에 의한 피삭재 모델과 NC 가공데이터 및 관련 공구 정보를 입력으로 하며, z-map에 대한 모의가공을 먼저 수행한 후 DVM에 대한 모의가공

을 수행하도록 하였다.

앞서 언급한 바와 같이 블록 형태의 초기 피삭재 모델인 경우 정삭 이전 단계까지는 DVM 절삭가공이 발생하지 않을 수 있으며, 실제 교점이 발생하지 아니하는 경우는 계산시간이 대폭 감소된다. 모든 공정 데이터에 대한 모의가공이 완료되면, 수치적 또는 색깔에 의한 과/미절삭 검사를 수행하도록 하였다.

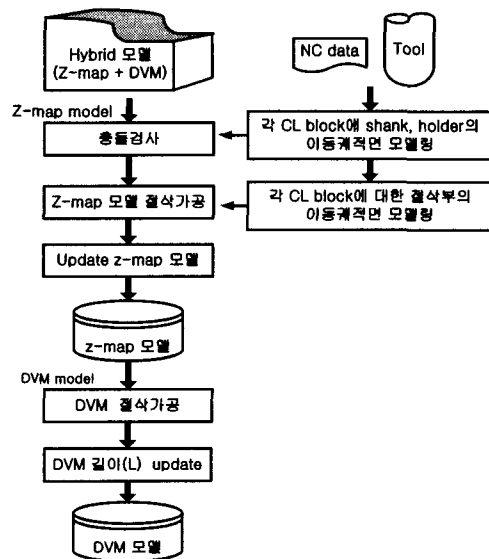


Fig. 12 Cutting simulation via hybrid model

### 5. 적용 사례

본 연구에서는 TV 캐비닛(back cover)의 사출금형 가공에 복합모델을 적용하여 보았다. 우선 Fig. 13-a는 금형의 CAD 모델을 보이고 있으며, 모두 569개의 단위곡면(face)로 구성되었다.

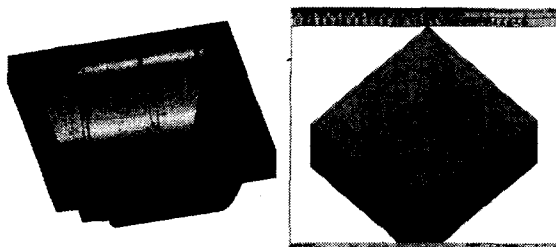
일반적인 사출금형과 같이 초기 피삭재는 블록 형태로 준비하며, z-map에 의한 블록 형상 표현을 Fig. 13-b에 나타내었다. 여기서 블록의 크기는 1000×955×340mm이다. 또한 80도 이상의 구배(slope)를 가지는 특징형상 영역에 대해 DVM을 생성한 예를 Fig. 13-c에 나타내었다. 참고로 이산벡터의 개수는 137,230개이고, 각 이산벡터는 xy 평면에서 102×97개의 균일한 버킷에 분포되어 있다(4.2절).

Fig. 13-d는 영역가공(pocketing)방식으로 생성된 황삭 가공데이터를 보이고 있으며, 본 가공데이터로 z-map에 대해 모의가공한 결과를 Fig. 13-e에 나타내었다. 정상 가공여유는 2mm로 주었으며, 앞서 2.3절에서 설명한 바와 같이 이 단계까지는 DVM에 대한 모의가공은 실시하지 않았다.

다음으로 Fig. 13-f는 스캐닝(scanning) 방식으로 생성된 정상 가공데이터이며, z-map 및 DVM에 대한 모의가공 결과를 Fig. 13-g, h에 나타내었다. Fig. 13-i, j는 정상 모의가공이 끝난 Fig. 13-g, h의 결과들을 재구성한, 즉 z-map과 DVM의 모의가공 결과를 함께 표현한 복합모델을 보이고 있다. 그리고 구체적인 가공조건 및 모의가공 결과를 Table 2에 나타내었으며, 모의가공 시간은 Pentium IV 1.7GHz PC에서 실행한 결과이다.

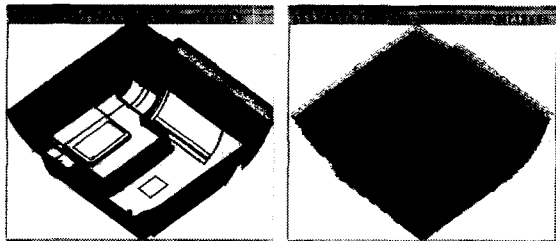
Table 2 Machining condition & cut-simulation

Process	NC block	Tool	Time(z-map)
			Time(DVM)
Rough-cut	78,524	Φ 30,Ball	87 sec
			-
Finish-cut	149,601	Φ 20,Ball	60 sec
			449 sec



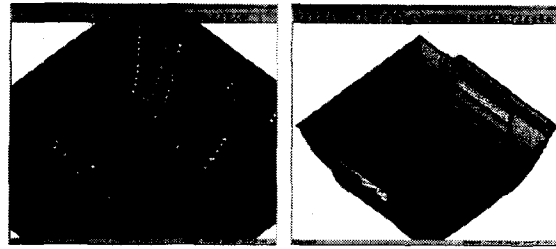
(a) CAD model

(b) Initial workpiece



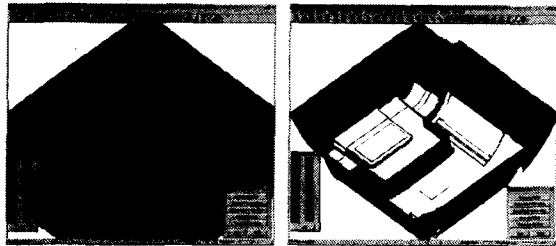
(c) Initial DVM

(d) Rough-cut NC data



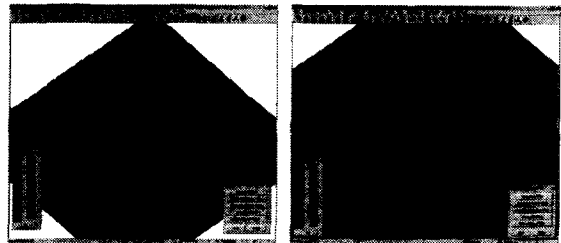
(e) Rough cut (Z-map)

(f) Finish-cut NC data



(g) Finish cut (Z-map)

(h) Finish cut (DVM)



(i) Hybrid model

(j) Magnified view of (i)

Fig. 13 Cutting simulation & graphical verification for TV Cabinet Back-cover

## 6. 결론

본 연구는 금형 형상부 등 자유곡면의 3축 및 5축 NC 가공을 위한 피삭재 모델링, 공구 궤적 곡면 모델링, 모의가공에 관한 내용을 살펴보았다. 본 연구에서는 z-map과 DVM(discrete vector model: surface normals)의 복합모델(hybrid model)을 고려하였으며, 상호보완적 장점을 살리고자 노력하였다. 즉 z-map의 계산 속도 및 계산 강건성(robustness)을 가능한 살리면서 z-map으로 표현하기 어려운 특징 형상을 DVM으로 표현함으로써 z-map의 단점을 보



완하고자 하였다. 공구 궤적곡면 모델링에 있어서는 일반적인 볼, 평, 필렛 엔드밀 공구의 3축 및 5축 궤적곡면(swept surface)을 모델링하고 이를 삼각형 다면체로 근사하여 모의가공을 수행하였다. 또한 모의가공 후 과/미절삭 결과를 컬러로 확인할 수 있는 검사기능을 구현하였다.

본 연구에서 다룬 DVM의 자체 표현 정밀도(representation accuracy)에 대해서는, 볼 엔드밀 공구의 경우 기존연구<sup>11,12</sup>에 잘 정리되어 있다. 기타 공구 형태에 대한 표현 오차에 대해서는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 모의가공 후 수치적 검사를 위한 추가적인 기능(예: 단면곡선 계산 등)의 구현이 따라야 할 것이다.

### 후 기

본 연구는 영남대학교 BK21 사업지원에 의한 것입니다.

### 참고문헌

- Hartquist, E., Menon, J. P. and Sungurtekin, U. A., "Solid modeller based automatic NC verification," Biennial Int. Machine Tool Technology Conference, pp. 2-15, Sep. 1988.
- Hsu, P. L. and Yang, W. T., "Realtime 3D simulation of 3-axis milling using isometric projection," Computer-Aided Design, Vol. 25, No. 4, pp. 215-224, 1993.
- Imani, B. M., Sadeghi, M. H. and Elbestawi, M. A., "An improved process simulation system for ball-end milling of sculptured surfaces," Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 38, pp. 1089-1107, 1998.
- Kawashima, Y., Itoh, K. and Ejiri, K., "A flexible quantitative method for NC machining verification using a space-division based solid model," The Visual Computer, Vol. 7, pp. 149-157, 1991.
- Roy, U. and Xu, Y., "Computation of geometric model of a machined part form its NC machining programs," Computer-Aided Design, Vol. 31, pp. 401-411, 1999.
- You, C. F. and Chu, C. H., "Tool-Path verification in five-axis machining of sculptured surfaces," Int. J. Advanced Manufacturing Technology, Vol. 13, pp. 248-255, 1997.
- Wang, W. P. and Wang, K. K., "Geometric modeling for swept volume of moving solids," IEEE CG&A, Vol. 6, No. 12, pp 8-17, Dec. 1986.
- Chiou, C. J. and Lee, Y. S., "A shape-generating approach for multi-axis machining G-buffer models," Computer-Aided Design, Vol. 31, pp. 761-776, 1999.
- Wang, W. P. and Wang, K. K., "Real-time verification of multiaxis NC programs with raster graphics," Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 166-171, Apr. 1986.
- Chappel, I. T., "The use of vectors to simulate material removed by numerically controlled milling," Computer-Aided Design, Vol. 15, No. 3, pp. 156-158, 1983.
- Jerard, R. B. and Drysdale, R. L., "Geometric simulation of numerical control machining," Proc. ASME Int'l Computers in Engineering Conf. ASME, New York, pp. 129-136, 1988.
- Jerard, R. B., Hussaini, S. Z., Drysdale, R. L. and Schaudt, B., "Approximate methods for simulation and verification of numerically controlled machining programs," The Visual Computer, Vol. 5, pp. 329-348, 1989.
- Oliver, J. H., "Efficient Intersection of Surface Normals with milling tool swept volumes for discrete three-axis NC verification," J. of Mechanical Design, Vol. 114, pp. 283-287, 1992.
- Park, J. W., Chung, Y. C. and Jeong, H. M., "Five-axis Tool-path Verification via DVM," Proceeding of the 32nd ISR, pp. 79-83, April 2001.
- Anderson, R. O., "Detecting and eliminating collisions in NC machining," Computer-Aided Design, Vol. 10, No. 4, pp. 231-237, 1978.
- Chung, Y. C., "Cutting Simulation and Verification of NC Data for Unified CAM System for Die and Mold Manufacturing," Ph.D. Thesis, KIAST, 1996.
- Choi, B. K., Kim, D. H. and Jerard, R. B., "C-space approach to tool-path generation for die and mould machining," Computer-Aided Design, Vol. 29 No. 9, pp. 657-669, 1997.

18. Jerard, R. B., Drysdale, R. L. and Magewick, J., "Methods for detecting errors in numerical controlled machining of sculptured surfaces," IEEE CG&A, pp. 26-39, Jan. 1989.
19. Joo, S. W., Lee, S. H. and Park, K. H., "Mesh Decimation for Polygon Rendering Based Real-Time 3-Axis NC Milling Simulation," Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers, Vol. 5, No. 4, pp. 347-358, 2000.
20. Kim, C. B. and Yang, M. Y., "Verification System for Cutting Condition of Ball-End Milling Process," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 123-134, 1995.
21. Kim, K. I., Chon, Y. J. and Kim, K., "Simulation and verification of CNC tool path for sculptured surfaces," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 24, pp. 69-74, 1996.
22. Chung, Y. C., Park, J. W., Shin, H. Y. and Choi, B. K., "Modeling the surface swept by a generalized cutter for NC verification," Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 8, pp. 587-594, 1998.
23. Park, J. W., Chung, Y. C. and Choi, B. K., "Precision Shape Modeling by Z-map Model," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 11, pp. 180-188, 1998.
24. Fussell, B. K., Hemmett, J. G. and Jerard, R. B., "Modeling of five-axis end mill cutting using axially discretized tool moves," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 27, pp. 81-86, 1999.
25. Huang, Y. and Oliver, J. H., "Integrated simulation, Error Assessment, and Tool Path Correction for Five-axis NC Milling," Algorithmica, Vol. 4, pp. 331-344 1989.
26. Choi, B. K. and Jerard, R. B., Sculptured surface machining: theory and applications, Kluwer Academic Publishers, 1998.
27. Park, J. W., "A Study on the Development of a CAM System for 5-axis NC Machining of Die & Mold," Ph.D. thesis KAIST, 1995.
28. Chung, Y. C. and Park, J. W., "Verification of Tool Collision for 3-Axis Milling," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 35-42, 2002.
29. Park, J. W. and Lee, J. G., "Convex Sharp Edge Detection of CAD Surfaces without Topology," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 73-79, 2002.