

Z-map을 사용한 모의가공과 NC-code의 검증

최병규* · 정연찬*

Machining Simulation and NC-code Verification Using Z-map

Byoung K. Choi · Yun Chan Chung

(요 약)

일반적인 CAD/CAM 시스템을 이용해서 생성한 NC-code는 오류의 가능성이 항상 내포되어 있으므로, 실 가공하기 전에 NC-code의 불량 여부를 검사할 필요가 있다. 본 논문에서는 Z-map 형태의 계산모형을 이용한 모의가공의 계산방법을 볼랜드밀, 평엔드밀, 라운드엔드밀에 대해서 도식적으로 설명하였다. 또, 모의가공된 형상만으로 NC-code의 불량 여부를 검사하는 자체적인 검사방법과 모의가공된 형상과 설계형상을 비교해서 불량여부를 판별하는 비교 검사방법을 제시하였다.

Z-map 모델을 모의가공과 가공형상의 검증에 사용하면, 빠른 속도로 실제가공 상황을 재현할 수 있고 육안 검증을 포함한 다양한 수치적 검증이 가능하다. 또, 간단한 데이터 구조이므로 필요한 알고리즘을 효율적이고, 로버스트하게 구현할 수 있다.

주요어 : Z-map, 모의가공, NC-code, NC검증

1. 서론

CAD/CAM 시스템을 이용해서 생성한 NC-code에는 시스템 사용과정에서 모델링 오류와 데이터 처리 실수 등의 사용자 오류(human error)와 CAD/CAM 시스템 자체적인 오류(system error)의 가능성이 항상 내포되어 있다. 오류가 포함된 NC-code로 실제 NC 가공을 했을 때에는 과절삭, 미절삭 등으로 인한 가공 불량은 물론이고, holder/chuck 등과 가공 피삭재의 충돌로 인해 기계의 파손까지 가져올 수 있다. 결과적으로 NC-code의 오류는 납기의 지연과 피삭재, 가공 시간의 낭비 및 설비 파손으로 인한 생산비의 증가와

생산성의 저하는 물론 가공된 제품의 품질(정밀도)을 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. 따라서, CAD/CAM 시스템에서 생성한 NC-code는 실 가공하기 전에 올바른지 여부를 검사할 필요가 있다.

NC-code를 검증하는 일반적인 방법에는 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) NC-code 파일의 text를 들여다보는 방법 : 이것은 수많은 숫자와 문자를 일일이 살펴 봐야하는 지루한 작업이므로, 가공 시작 부분만 살펴보거나 데이터 양이 적은 경우에만 가능한 방법이다.
- 2) 공구 경로를 그림으로 그려보기 : 일반적으로

* 한국과학기술원 산업공학과

공구의 바닥점(tip point)을 선으로 연결한 공구의 경로를 살펴보는 방법으로, 공구경로가 loop을 형성하는 “convex interference”등의 검사에는 유용하나 실제 가공되는 형상을 알 수는 없다. 따라서, 공구의 rapid move만 살펴보거나, NC 데이터의 양이 많지 않고 비교적 단순한 형상인 경우에만 신뢰성 있는 검증이 가능하다.

- 3) 공구경로의 해석 : 공구경로의 꺾인 정도, 공구이송 방향(수직, 수평 등), “convex loop” 존재 여부 등을 평가하거나 가공시간 추정에 사용되며, 실제 가공형상의 확인은 불가능하다.
- 4) 실물모형(physical “hard” model) 가공 : 나무, 플라스틱 등의 소재를 직접 가공해보는 방식으로 가공형상의 확인이 가능한 방법이다. 하지만, 기계 셋업(set up) 및 가공 시간이 많이 걸리며, 많은 기계/작업자/피삭재 비용을 필요로 한다. 또, 가공형상의 검증방법도 육안 등의 감각적인 관찰이 대부분이고, 수치적인 검증도 제한적이다.
- 5) 계산모형(computational “soft” model) 가공 : 컴퓨터에서 정의된 계산모형을 모의가공하는 방법으로 최근 고성능, 저가의 컴퓨터 출현으로 검증에 많이 이용되고 있다. 실 가공 없이 가공형

상을 관찰할 수 있을 뿐만 아니라 수치적인 해석까지 가능하다.

본 논문에서는 Z-map 형태의 계산모형을 이용한 모의가공 방법과 모의가공된 계산모형의 검증방법에 대해 설명하고자 한다. Z-map 모델은 x,y-평면에 정의된 일정한 간격의 격자점(i,j)에서만 곡면의 z-값을 표현하는 방법으로 <그림 1>에 그 개념과 정의방법이 나타나 있다.

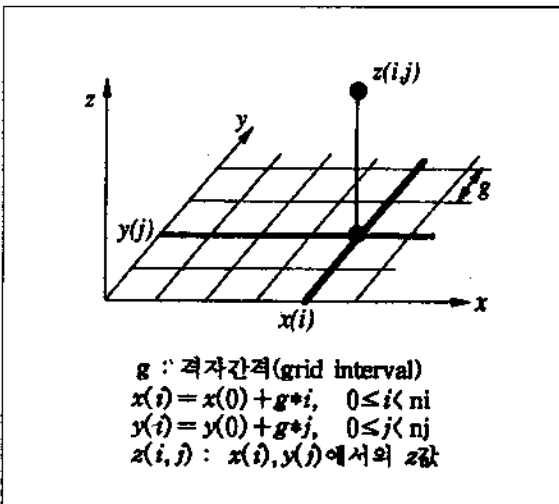
2. 컴퓨터 모의가공에 관한 기존의 연구

계산모형을 가공하는 컴퓨터 모의가공에 관한 기존의 연구는 가공물 형상(계산모형)을 표현하는 방법에 따라 크게 세 가지로 분류된다. 형상 표현방법에 따른 모의가공의 계산방법과 장/단점 및 관련 연구는 <표 1>에 개략적으로 설명되어 있으므로 각 방법의 특성만 설명하기로 한다.

솔리드 모델로 가공형상을 표현하는 방식은 솔리드 모델링의 기본적 개념에 충실한 방법으로 기존의 CAD/CAM 시스템이 지원하는 형상 모델링 기능을 이용해서 모의가공을 수행한다. 기본적인 모의가공 계산 방법은 가공 피삭재 형상에서 공구의 궤적이 형성하는 부피(swept volume)를 뺀(boolean subtraction)는 방법을 취하고 있다. 하지만, 솔리드 모델은 형상의 설계에 용이한 모델이므로 공구의 커슁(cusp)을 포함하는 부드럽지 못한 가공면을 표현하는데는 적합하지 못하다.

실제 십만 개 이상의 직선 공구 운동으로 이루어지는 3차원 가공형상을 솔리드 모델로 표현하는 것은 거의 불가능하며, 표현하더라도 엄청난 데이터량과 계산량을 필요로 할 것이다.

Point set으로 가공형상을 표현하는 방법은 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 분야로, x,y-평면을 일정한 격자로 나누고, 그 격자점에서만 높이(z)값을 가지는 방법과 곡면에서 점(point)을 샘플링하고, 그 점에서의 법선벡터를 함께 저장하는 방법이 있다. 일정한 격자점에서만 높이값을 가지는 방법들 가운데, 그 격자점에서 오직 하나의 높이값만 가지는 Z-map 방



(그림 1) Z-map 모델의 개념과 정의

〈표 1〉 Machining Simulation and NC-code Verification 관련연구

곡면 표현 방법		계산 방법	입력과 출력	장점(+) / 단점(-)	관 련 연 구
Solid Volume	CSG	공구 swept volume과 피삭체간의 boolean	Raw Stock • Machined Surface	+ 수치적인 해석 + MRV 계산 + 5축 구현 - 계산속도 - 많은 Memory 필요!!	[Voelcker] PADL 이용해서 구현 ^[14] [Fridshal] TIPS 이용해서 구현 ^[14] [Wang] Swept volume 계산법 ^[24]
	Octree				[Kawashima] Octree 활용 ^[26]
	Voxel	Scan-conversion 알고리즘			[Kaufman] Voxelization ^[15] [Kishinami] 모의가공에 적용 [Udupa] 데이터량/연산 최적화 ^[25] [Hsu] Isometric projection ^[20] [김광수] 5축 모의가공에 적용 ^[2]
Line Segment	Regular (Vertical)	Z-map	Raw Stock • Machined Surface	+ 계산속도 !!! + 수치적인 해석 + MRV 계산 - 5축 불가	[Anderson] 제안 ^[27] [Jerard] Verification 방법 ^[12] [Saito] G-buffer system ^{[19][20]} [Takeuchi] 가공데이터 생성 ^[2]
		Extended Z-map (Dexel)			+ 5축 구현 + 수치적인 해석 + MRV 계산 - 많은 Memory 필요
	Irregular (Normal)	공구 swept volume과 surface normal vector와 교점	Design Surface, Normal Vector • Under/Over Cut	+ 법선방향 과/미절삭 + 계산속도 ! + 5축 구현 - MRV 계산 불가	[Chappel] 제안 ^[5] [Jerard] Surface discretization 방법 point bucketting ^[12] [Oliver] Image based discretization ^[22] [Chang] Voxel로 bucketting ^[4]
Image	(Extended) Z-buffer	Image depth 계산	Raw Stock Image • Machined Image	+ 계산속도 !!! + Animation 용이 - 수치적인 해석 불가	[Wang] Extended Z-buffer ^[23]

식은 가공형상을 실제형상(physical shape)과 유사하게 표현할 수 있으며, 간단한 데이터 구조이므로 효율적인 계산방법을 개발하기에 용이하다. 하지만, 3축 가공형상만 표현할 수 있는 제약 때문에 하나의 격자점에 여러 개의 높이값을 가지도록 확장한 방법(Extended Z-map)들도 많이 연구되고 있다.

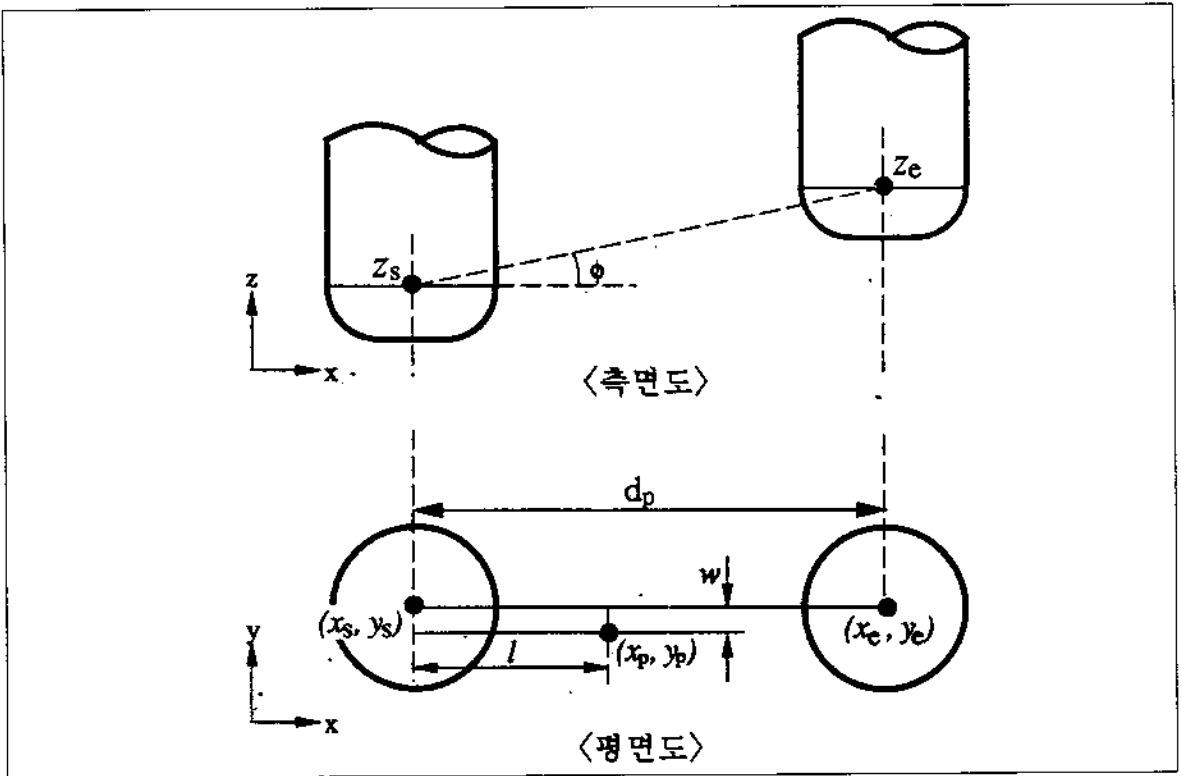
곡면에서 샘플링한 점과 법선벡터를 저장하는 방식은 과절삭/미절삭을 확인하는데는 유용한 방법이지만, 초기 피삭체(raw stock)에서 황삭, 중삭, 정삭을 거치는 각 단계의 가공형상을 하나의 모델에 표현하지 못하며, 실제형상이 없는 경우에도 모의가공을 수행할 수 없다.

끝으로 컴퓨터 화면의 그래픽 이미지(graphic image)에서 모의가공을 수행하는 방법이 있는데 기존의 몇몇 CAD/CAM 시스템에서 사용되고 있다. 이 방법은

가공 진행 상황을 그래픽 하계 확인하는데는 유용하지만, 실제 형상 데이터를 갖고 있지 않으므로 확대를 해서 자세히 보거나, 가공이 끝난 형상을 수치적으로 검증하기는 곤란하다.

3. Z-map 모델의 모의가공 방법

실제 CNC 가공에서 공구가 움직이면서 피삭체를 깎아내듯이 공구가 한번 움직일 때마다 가공물의 형상변화를 Z-map 모델에 반영하면 Z-map의 모의가공이 이루어진다. Z-map 모델은 각 격자점에서 높이값만을 갖고 있기 때문에, Z-map 모델의 각 격자점에서 가공되기전 피삭체의 높이값과 공구가 움직인 궤적면의 높이를 비교해서 낮은값을 취하면, 공구가 한번 움직여 가공된 피삭체의 Z-map 모델을 얻을 수 있다.



〈그림 2〉 공구 궤적면의 평면도와 측면도

가공된 Z-map 모델의 어떤 격자점 (x_p, y_p) 에서의 높이값은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$z_m = \text{MIN}(z_s, z_p) \quad (1)$$

where, z_m : 모의가공 후, 한 격자점 (x_p, y_p) 에서의 높이값

z_s : 가공되기전 격자점 (x_s, y_s) 에서의 피삭재 높이값

z_p : (x_p, y_p) 에서의 공구 궤적면의 높이값

결국, Z-map 모델의 어떤 격자점 (x^p, y^p) 에서 공구 궤적면의 높이(z)값을 구하는 것이 Z-map 모의가공의 주된 연구 분야이다. 이 분야의 연구는 Jerard[13]와 Choi[6] 등에 의해 연구 정리된 것이 있지만, 본 논문에서는 도식적인 방법을 통해 이해하기 쉽게 정리하고자 한다.

설명의 편의를 위해 공구의 반경과 공구의 움직임이 식(2)와 같이 정의될 때, Z-map의 격자점 (x^p, y^p) 에서의 높이값 z^p 를 구하는 과정을 살펴보자. 이때, 출발점(r_s)과 끝점(r_e)에서의 고정된 공구면의 높이는 쉽게 알 수 있으므로, 설명의 복잡도를 줄이기 위해 공구가 출발점(r^s)에서 끝점(r^e)으로 움직이면서 생성하는 궤적면의 높이만을 고려하기로 하자. 또, 공구는 라운드반경(r : Nose radius)과 전체 공구반경($D/2$: D =공구직경)에서 라운드반경(r)을 뺀 반경(R)으로 정의하자. 따라서, 항상 $R+r=D/2$ 의 관계가 성립하며, 블엔드밀은 $R=0$ 이고, 평엔드밀은 $r=0$ 이다.

$r_s = (x_s, y_s, z_s)$: 출발점의 공구 중심 좌표값

$r_e = (x_e, y_e, z_e)$: 끝점의 공구 중심 좌표값

r : 공구의 라운드 반경 (2)

R : 전체 반경에서 라운드 반경을 뺀 공구반경

(x_p, y_p) : 높이값(z_p)을 구하려는 점의 평면 격자점

식(2)에서 정의된 공구의 출발점(r^s)과 끝점(r^e)으로부터 <그림 2>와 식(3)에 나타난 값들을 구할 수 있다. 이때, (l, w)는 공구의 출발점을 원점으로 하고, 공구중심의 이동선을 x축으로 하는 상대좌표계에서 격자점 (x^p, y^p)의 상대좌표값이다.

$$\Delta x = x_e - x_s, \Delta y = y_e - y_s, \Delta z = z_e - z_s$$

d_p = (공구의 수평이동 거리)

$$= (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}$$

l = (출발점에서 구하려는 점까지의 공구이동방향 수

평 상대거리)

$$= \{\Delta x \cdot (x_p - x_s) + \Delta y \cdot (y_p - y_s)\} / d_p \quad (3)$$

w = (공구중심 이동선과 구하려는 점의 수직거리)

$$= |\Delta x \cdot y_p - \Delta y \cdot x_p + x_s \cdot y_e - x_e \cdot y_s| / d_p$$

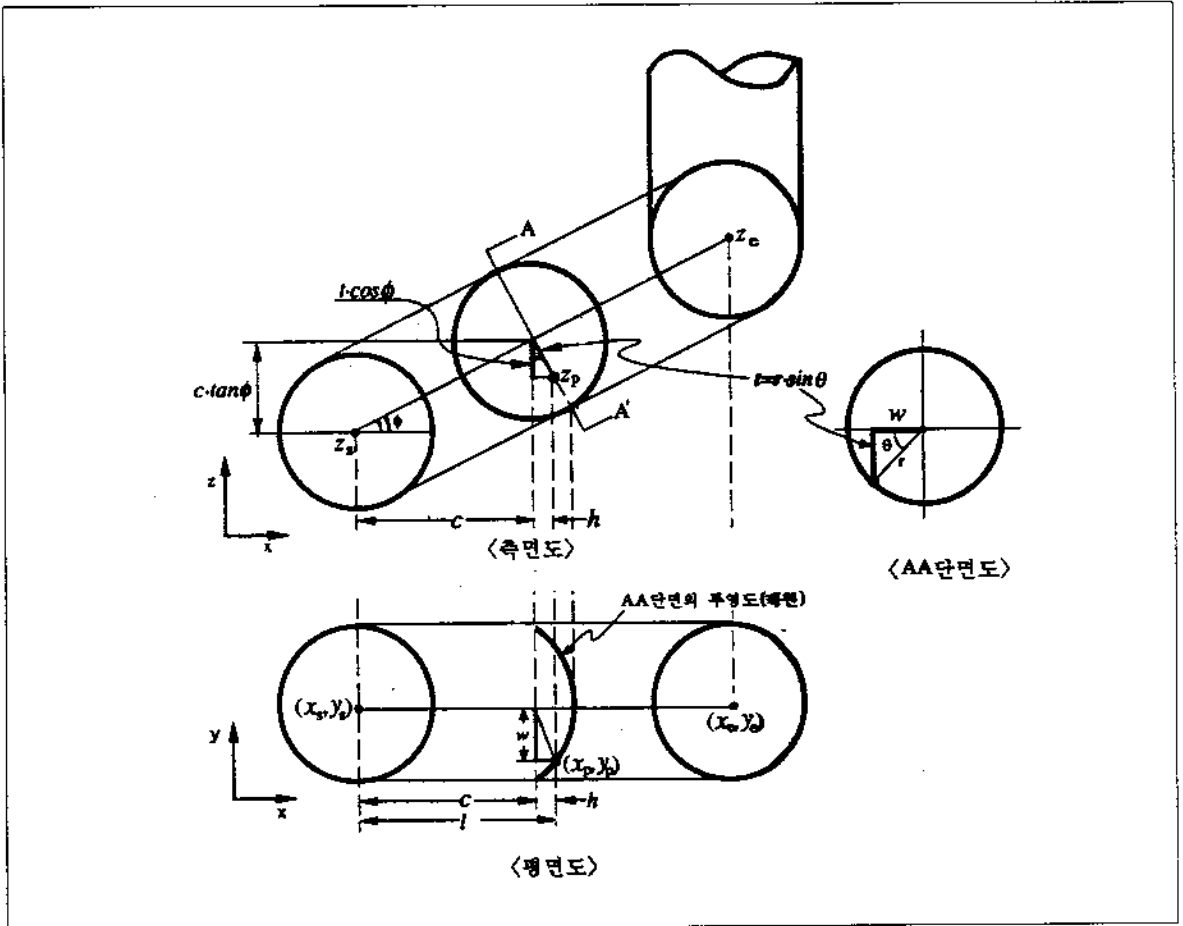
ϕ = $\tan^{-1}(\Delta z / d_p)$: 공구 이동 경사각

r_c = z_p 를 최소화하는 공구의 중심값

3.1 볼엔드밀(Ball-end mill)의 궤적면 계산

$$(R = 0, r > 0)$$

볼엔드밀이 움직일 때 형성되는 궤적면은 구(sphere)를 움직여서 형성되는 면이므로, 원기둥(cylinder)면이 된다. 따라서, 볼엔드밀의 궤적면에서 격자점 (x^p, y^p)



<그림 3> 볼엔드밀의 궤적면 계산 개념도

의 높이값 z_p 를 구하기 위한 개념도는 <그림 3>과 같다. <그림 3>에서 단면도의 w 는 평면도에서 미리 구해진 w (평면도상에서 격자점과 공구 중심선과의 수직거리)와 같으며, 단면도에서 간단한 삼각함수를 적용하면 t (측면도에서 높이값 z_p 와 공구 중심선간의 수직거리)를 얻을 수 있다. 이때 얻어진 t 는 측면도의 t 와 같은 값이며, 측면도에 나타난 작은 삼각형의 사이각이 공구 이동 경사각(ϕ)과 같으므로 z_p 를 구할 수 있다. <그림 3>과 관련한 변수의 값들은 식(4)와 같다.

$$z_p = z_s + c \cdot \tan\phi - t \cdot \cos\phi$$

3.2 평엔드밀(Flat-end mill)의 궤적면 계산

$$(R > 0, r = 0)$$

평엔드밀이 움직일 때 형성되는 궤적면은 원판(disk)을 비스듬히 움직여서 형성되는 면이므로, 타원기둥(elliptic cylinder)면이 된다. 높이값 z_p 를 구하기 위한 개념도는 <그림-4>와 같으며, 평면도의 삼각형에서 h (측면도에서 공구바닥 중심점과 z_p 와의 거리)를 구할 수 있으므로 z_p 를 쉽게 구할 수 있다. <그림 4>와 관련한 변수의 값들은 식(5)와 같다.

$$\theta = \cos(w/r)$$

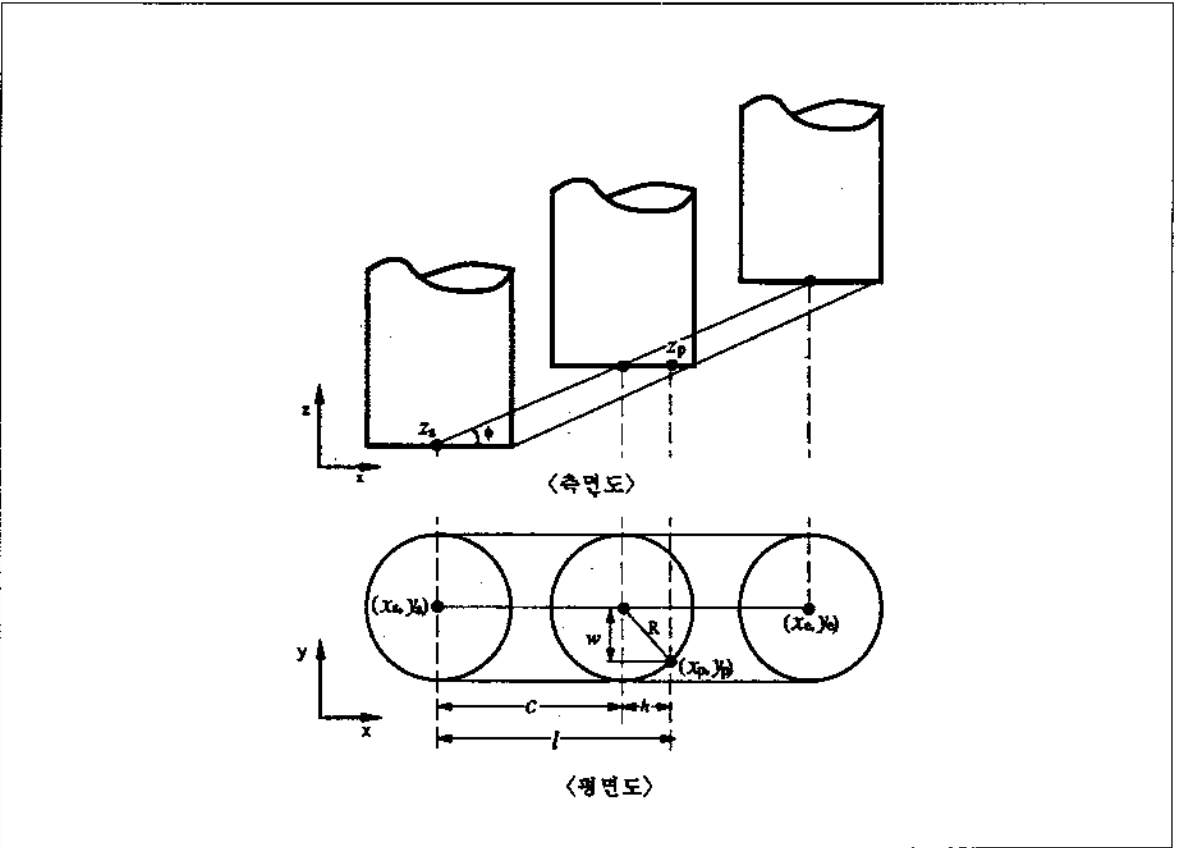
$$t = r \cdot \sin\theta$$

$$h = t \cdot \sin\phi$$

$$c = l-h$$

$$(4) \quad h = (R^2 - w^2)^{1/2}$$

$$c = l-h$$



<그림 4> 평엔드밀의 궤적면 계산 개념도

$$z_p = z_s + c \cdot \tan \varphi \quad (5)$$

3.3 라운드엔드밀(Round-end mill)의 궤적면 계산
($R > 0, r > 0$)

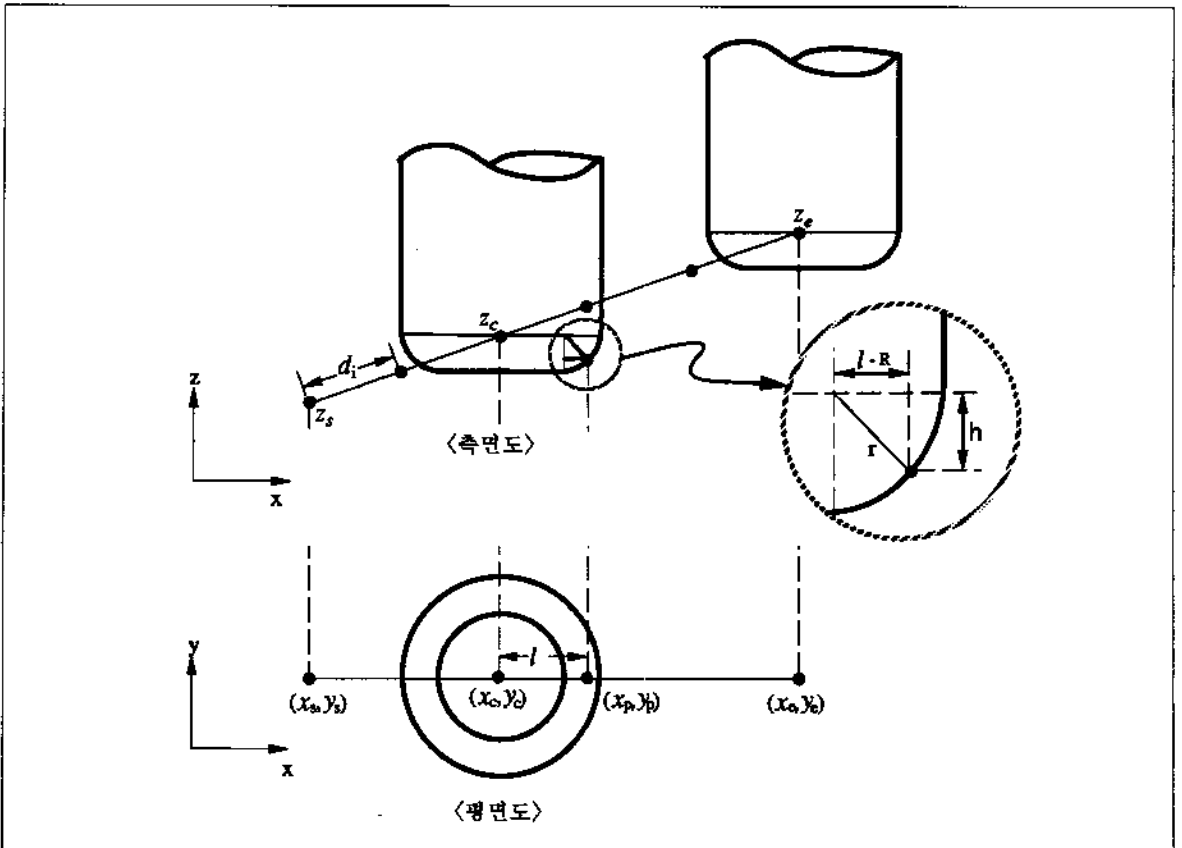
라운드엔드밀의 궤적면은 평엔드밀에서의 타원기동을 r 만큼 오프셋(offset)한 면이기 때문에 볼엔드밀과 평엔드밀의 경우와 달리 해석적인 방법으로 계산할 수 없다. Jerard[13]는 이진탐색(bisection search)법으로 궤적면을 구하는 방법을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 한번의 긴 공구 이동을 짧은 길이로 끊어 여러 번에 나눠 이동함으로써 실제로는 공구가 부드럽게 이동한 효과를 내는 방법을 소개하고자 한다.

〈그림 5〉에서와 같이 출발점(r^s)에서부터 공구를 끝점(r^e)방향으로 d 만큼씩 옮겨 놓으면서 고정된 공구

의 면으로 모델의 격자점을 변화시키는 방법이다. 이때, d 는 실험적으로 Z-map 격자 간격(grid interval)의 1/2정도가 계산량과 정확도면에서 타당한 것 같다. 〈그림 5〉에서는 공구가 r^e 에 위치해 있을 때, 공구의 바닥면을 계산하는 방법을 나타낸다. 격자점이 공구의 라운드된 면에 속하는지 바닥 평면에 속하는지 판단되면, 그림에서 보듯이 쉽게 z^p 를 구할 수 있다. 〈그림 5〉의 개념도에서 z^p 를 구하는 관계식은 식(6)과 같다.

$$z_p = \begin{cases} z_c - r, & l < R \\ z_c - h, & R < l < R + r \end{cases}$$

$$\text{where, } h = \{r^2 - (l - R)^2\}^{1/2} \quad (6)$$



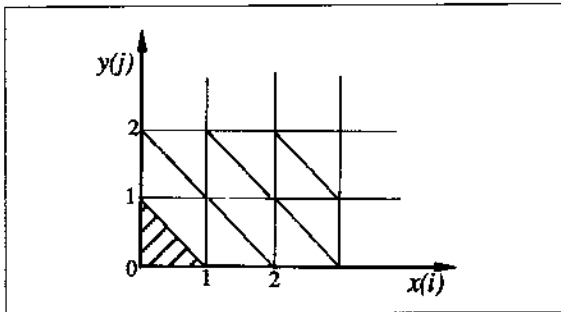
〈그림 5〉 공구를 일정간격씩 움직인 후 고정된 공구면을 계산

4. 모의 가공된 형상의 검증 - (1)

모의가공에 사용된 NC-code의 품질을 보증하기 위해서는 모의 가공된 형상을 충분히 검증해야만 한다. 모의 가공된 형상을 검증하는 방법에는 설계형상 데이터(CAD data)의 유무에 따라 가공형상만 가지고 검증하는 방법과 설계형상과 비교하여 검증하는 방법이 있다. 다음 장에서 설계형상과 비교 검증하는 방법에 대해 설명하고, 본 장에서는 가공형상만 가지고 검증하는 방법들 중, "Soft-Master" 시스템에서 구현된 방법 몇 가지만 소개하려고 한다.

4.1 가공형상 그려보기 (Rendering)

모의가공된 형상을 컴퓨터 화면에 그려보는 것은 가장 일반적인 검증 방법이다. Z-map 모델의 셰이딩(shading)은 <그림 6>에서 나타난 것과 같이 세개의



<그림 6> Z-map 모델에서 삼각형 형성

격자점으로 삼각형을 형성하고, 그 삼각형을 하나씩 셰이딩함으로써 전체 형상을 얻을 수 있다. 이때, 3차원 그래픽 도구(3D graphic library)를 사용하지 않는 경우에 가려진 면을 처리하기 위해서는 가장 멀리 있는 삼각형부터 그려나가는 방법(painter's algorithm [9])을 사용하면 된다. 또, 인접 삼각형간의 색깔 블렌딩(blending)을 하지 않는 것이 꺾어진 면을 그대로 나타내 주기 때문에 가공면 검증에는 도움이 된다.

와이어프레임(wire frame)으로 모의가공된 형상을 디스플레이 할 때에는 Z-map 모델이 사각블럭 형상이므로 floating horizon algorithm[9]을 적용하면 가려

진 선을 처리할 수 있다.

4.2 가공형상 잘라보기 (Sectioning)

가공형상의 단면을 수치적으로 확인하는 검증방법이다. Z-map 모델의 단면곡선은 절단면과 Z-map 격자선(x,y grid line)과의 교점에 의해 형성되는 점들의 순서로 정의된다. <그림 7>에서 보듯이 절단면이 x-축과 이루는 각이 45°보다 작으면 y-축과 평행한 격자선과의 교점을 구하고, 그 각이 45°보다 크면 x-축과 평행한 격자선과 교점을 구한다. 이렇게 정의된 단면곡선은 연결된 점(polyline)으로 표현되므로 각 점에서의 R값과 경사도를 쉽게 계산할 수 있다. R값과 경사도는 필렛이나 라운딩 처리된 형상이 제대로 가공되었는지 알 수 있을 뿐만 아니라, 다음 가공을 어떻게 해야할 지 분석하는데 중요한 정보가 된다.

4.3 검사점 측정

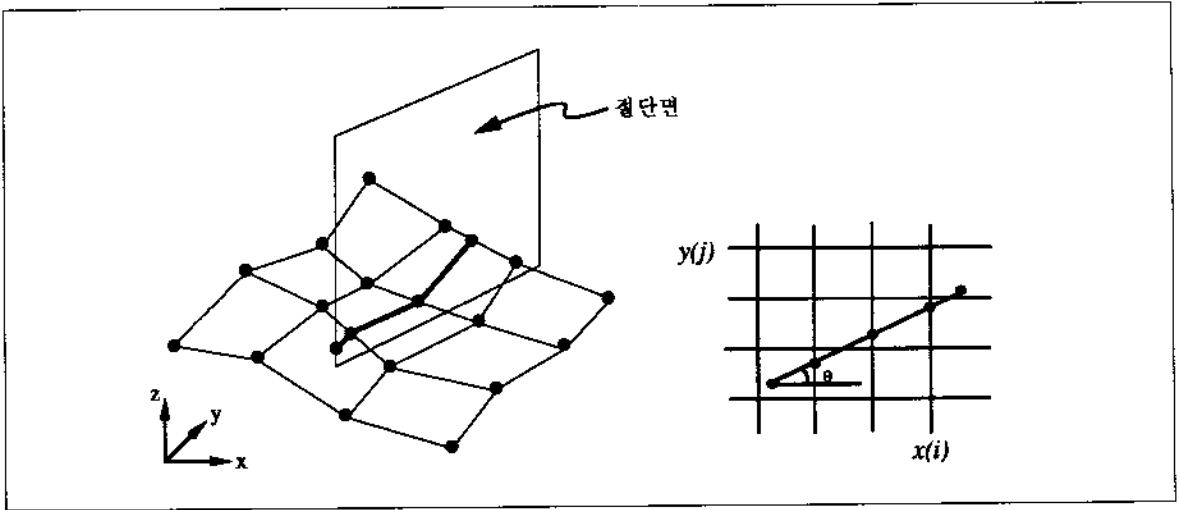
(x, y)점에서 높이값 z를 확인하는 검증방법이다. Z-map의 격자점이 아닌 임의의 (x, y)값이 주어진 경우에 z값을 계산하는 방법은 주위의 네 격자점을 bilinear로 보간하는 방법이 가장 일반적이고 쉬운 방법이다. <그림 8>은 (x', y')에서의 높이값 z'를 보간하는 방법을 설명하고 있다.

4.4 Laplacian-map 관찰

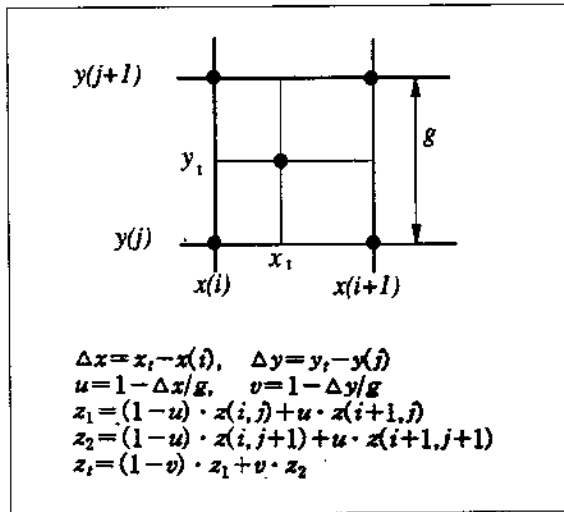
가공형상의 곡률값을 육안으로 관찰하는 검증방법이다. 이 방법은 설계형상의 부드러운 정도를 확인하는데 더 유용한 방법이지만 가공형상 검증에도 도움이 된다. Z-map 모델에서는 각 격자점의 기울기 변화로 Laplacian-map을 형성하는데, 격자점{x(i), y(j)}에서의 laplacian 값 L(i,j)은 식(7)과 같다.

$$L(i, j) = \text{SIGN}(\cdot) \cdot \text{MAX}\{|L_x(i, j)|, |L_y(i, j)|, |D_+(i, j)|, |D_-(i, j)|\} \quad (7)$$

$$\text{where, } L_x(i, j) = \{z(i+1, j) + z(i-1, j) - 2 \cdot z(i, j)\} / g$$



〈그림 7〉 Z-map 모델 잘라보기



〈그림 8〉 Z-map 모델의 bi-linear 보간

$$L_y(i, j) = \{z(i, j+1) + z(i, j-1) - 2 \cdot z(i, j)\} / g$$

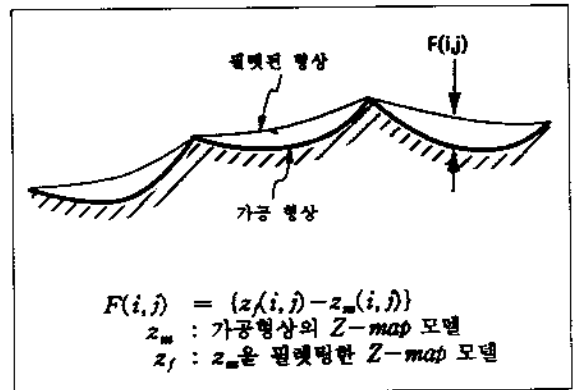
$$D_x(i, j) = \{z(i+1, j+1) + z(i-1, j-1) - 2 \cdot z(i, j)\} / (g^2)^{1/2}$$

$$D_y(i, j) = \{z(i-1, j+1) + z(i+1, j-1) - 2 \cdot z(i, j)\} / (g^2)^{1/2}$$

4.5 Fillet-map 관찰

가공에 사용된 공구의 반경보다 조금 더 큰 반경으로 가공된 형상을 필렛팅해서 원래의 가공형상과 비교해보면, 공구 커슥(cusp)의 확인이 용이하다. 특히,

공구가 한번 찍은(plunge) 형상이나 공구가 굽고 간 자국(gouge)을 쉽게 찾을 수 있다.



〈그림 9〉 Fillet-map 계산 방법

필렛팅된 형상에서 가공형상을 뺀 모델이 Fillet-map 인데, 격자점(x(i), y(j))에서의 Fillet-map 값 F(i, j)은 〈그림 9〉와 같다. 실험적인 방법으로 필렛팅 반경은 가공에 사용한 공구 반경의 120%를 사용한다.

5. 모의 가공된 형상의 검증 - (2)

본 장에서는 모의 가공된 형상을 설계형상(CAD data)과 비교하여 검증하는 방법에 대해 설명하려고

한다. 본 검증 방법은 설계형상 곡면의 법선방향으로 차이를 비교하는 방법과 높이방향(z-방향)으로 차이를 비교하는 방법이 일반적이다.

5.1. 높이방향 비교 (Z-difference Map)

Z-map 모델로 표현된 가공형상과 설계형상을 높이 방향으로 비교하는 것은 아주 간단하다. 가공형상 Z-map의 격자점 높이 $zm(i,j)$ 에서 설계형상의 격자점의 높이 $zr(i,j)$ 를 빼면 z-방향의 차이가 얻어지는데, 모든 격자점에서 이 차이값을 계산해서 저장한 Z-map 모델이 "Z-difference Map"이다. 이때, 두 Z-map 모델의 정의역(domain)이 같아야 격자점에서 단순 비교가 용이하며, "Z-difference Map"에서 음수값은 과절삭이 발생한 부분이며, 양수값은 미절삭이 발생한 부분이다. "Z-difference Map"를 계산하는 방법이 식(8)에 나타나 있다.

$$z_z(i,j) = z_m(i,j) - z_r(i,j) \tag{8}$$

where, z_m : 공형상의 Z-map 모델
 z_r : 설계형상의 Z-map 모델
 z_z : Z-difference Map

5.2. 법선방향 비교 (N-difference Map)

설계형상 곡면의 법선방향으로 가공곡면을 비교하는 것은 Z-map 모델인 경우 간단하지 않다. 설계형상의 각 격자점 $\{x(i), y(j), z(i,j)\}$ 에서 곡면의 법선을 추정하고, 격자점에서 법선방향으로 가공곡면이 얼마나 떨어져 있는지 계산해야 한다.

일반적인 매개변수 곡면의 법선벡터는 x-방향 접선벡터와 y-방향 접선벡터의 외적(cross product)으로 정의되는데, Z-map 모델에서는 아래의 식(9)와 같이 추정할 수 있다.

$$N(i,j) : \text{격자점 } \{x(i), y(j)\} \text{에서의 법선벡터}$$

$$T_x(i,j) : \text{격자점 } \{x(i), y(j)\} \text{에서의 } x\text{-방향 접선벡터}$$

$$T_y(i,j) : \text{격자점 } \{x(i), y(j)\} \text{에서의 } y\text{-방향 접선벡터}$$

$$P(m,n) = \{x(m), y(n), z(m,n)\}$$

$$T_x(i,j) = \begin{cases} P(i+1,j) - P(i-1,j), & 0 < i < ni-1 \\ P(i+1,j) - P(i,j), & i = 0 \\ P(i,j) - P(i-1,j), & i = ni-1 \end{cases}$$

$$T_y(i,j) = \begin{cases} P(i,j+1) - P(i,j-1), & 0 < j < nj-1 \\ P(i,j+1) - P(i,j), & j = 0 \\ P(i,j) - P(i,j-1), & j = nj-1 \end{cases}$$

$$N(i,j) = \frac{T_x(i,j) \times T_y(i,j)}{|T_x(i,j) \times T_y(i,j)|} \tag{9}$$

하지만, Z-map 모델은 이산적(discrete)인 곡면 표현 방식이므로 식(9)에서 정의한 법선벡터가 항상 타당하지는 않다. 따라서, 설계형상 곡면의 한점 $P = \{x(i), y(j), z(i,j)\}$ 에서 가공형상 곡면까지의 법선방향 거리는 식(10)에 보여진 것과 같이 추정된 법선방향의 거리와 높이방향의 거리 및 P에서 가공형상의 Z-map 모델 격자점과의 최단거리 중 최소값을 선택하는 것이 타당하다.

$$D(i,j) = \text{MIN}\{\ |D_z(i,j)|, D_p(i,j), D_n(i,j) \} \cdot \text{SIGN}\{D_z(i,j)\} \tag{10}$$

where, $D_z(i,j)$: P에서 공형상까지의 수직거리
 $D_p(i,j)$: P에서 공형상 Z-map 격자점까지의 최단거리
 $D_n(i,j)$: 추정된 법선벡터 방향 거리
 $P = \{x(i), y(j), z(i,j)\}$: 설계형상 곡면의 한점

6. 모의가공 및 검증 적용례

본 논문에서 소개한 모의가공과 검증 방법은 "첨단생산시스템개발" 과제의 일환으로 연구 개발되어 "Soft-Master" 시스템에서 구현된 내용으로 ANSI-C와 X11R5, Motif를 이용해서 EWS를 기반으로하여 개발되었다. 본 연구에서 소개한 기능을 하위모듈로 포함하는 "Soft-Master" 시스템은 "Z-Master"라는 이름으로 상품화되어 국내 자동차 업계와 전자업계의 금형 관련 부서에서 사용되고 있으며, 미국 자동차 업계에서도 관심을 보이고 있다(Chrysler 자동차 Tech. Center에서 시험 사용중이다).

예제에 사용된 형상은 자동차 문짝 금형의 황삭 가공을 위한 NC-code로 모의가공한 형상인데, 실물 크기는 1000x1100 mm²이며, 사용된 NC-code는 11,041

블럭(block)이고, 공구는 50 ϕ 볼엔드밀이다. Z-map 모델의 격자 개수는 1430 x 1570개 이며, 격자의 간격은 0.7mm이다. 이때, 모의가공에 소요된 계산시간은 IBM RS6000/365에서 19초이다.

〈그림 10〉은 가공형상만으로 검증하기 위한 "Fillet-map"을 가공형상에 컬러로 나타낸 것이다. 〈그림 11〉은 설계형상과 비교검증하기 위한 "N-difference map"이며, 〈그림 12〉는 그것을 가공형상에 컬러로 나타낸 것이다. "N-difference map"의 계산시간은 위 모의가공에서와 같은 하드웨어에서 115초이다.

〈그림 13〉는 모의가공과 검증기능을 포함한 "Soft-Master"의 다양한 기능을 소개하는 컬러그림으로 최근 Choi[7]에 의해 정리 발표된 내용의 일부이다.

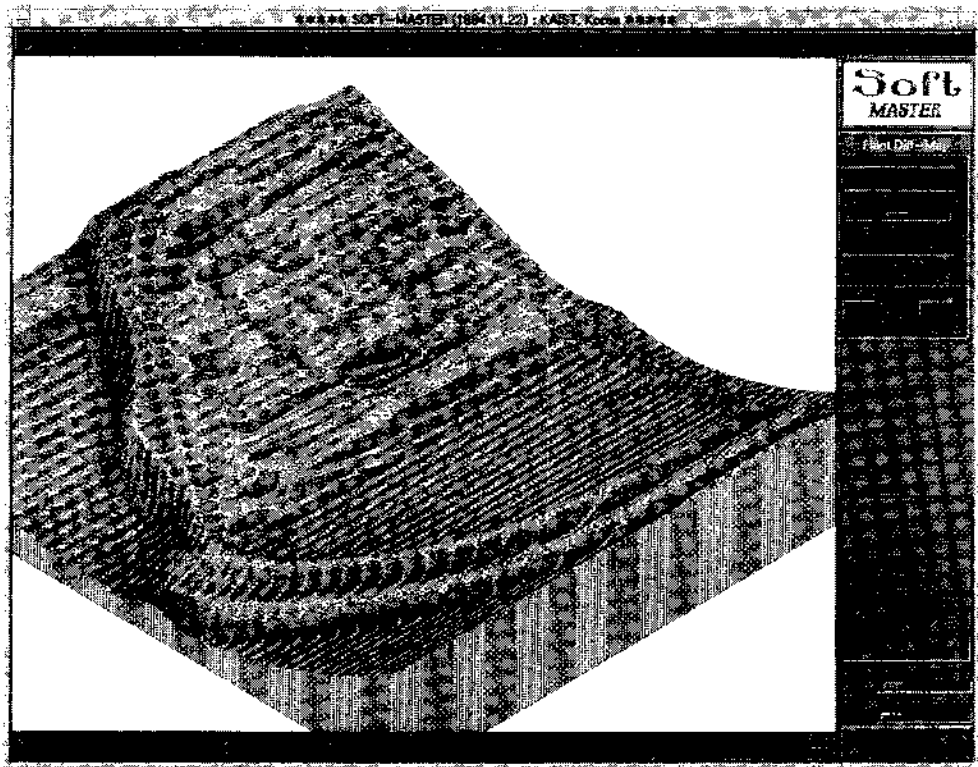
7. 결론 및 추후 연구방향

본 논문에서는 3축 NC가공을 컴퓨터에서 검증하기

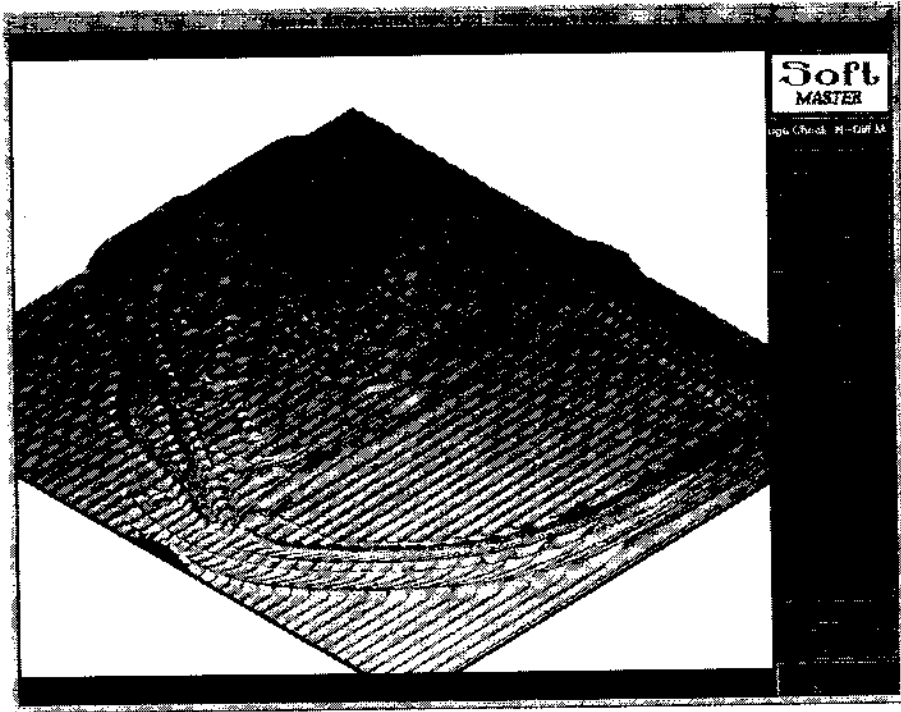
위해 Z-map 모델을 이용하여 모의가공하는 방법과 모의가공된 가공형상을 검증하는 방법에 대해 설명하였다. Z-map 모델을 모의가공과 검증에 사용하면 빠른 속도로 실제 가공 상황을 재현할 수 있고, 육안 검증을 포함한 다양한 수치적 검증이 가능하다. 특히, Z-map 모델은 간단한 데이터 구조이므로 필요한 알고리즘을 효율적이고 로버스트(robust)하게 구현할 수 있으며, 오프셋팅(offsetting)과 불리아닝(booleaning) 등의 형상 오퍼레이션(geometric operation)에 대해 closeness를 보장하는 장점을 가진다. 하지만, 정밀도를 높이기 위해서는 비례적으로 많은 메모리를 필요로 하므로 적은 데이터량으로 정밀도를 높이는 방법이 강구되어야 할 것이다.

Z-map 모델을 이용한 모의가공과 검증에 관련한 추후 연구과제로는 다음과 같은 것들이 있다.

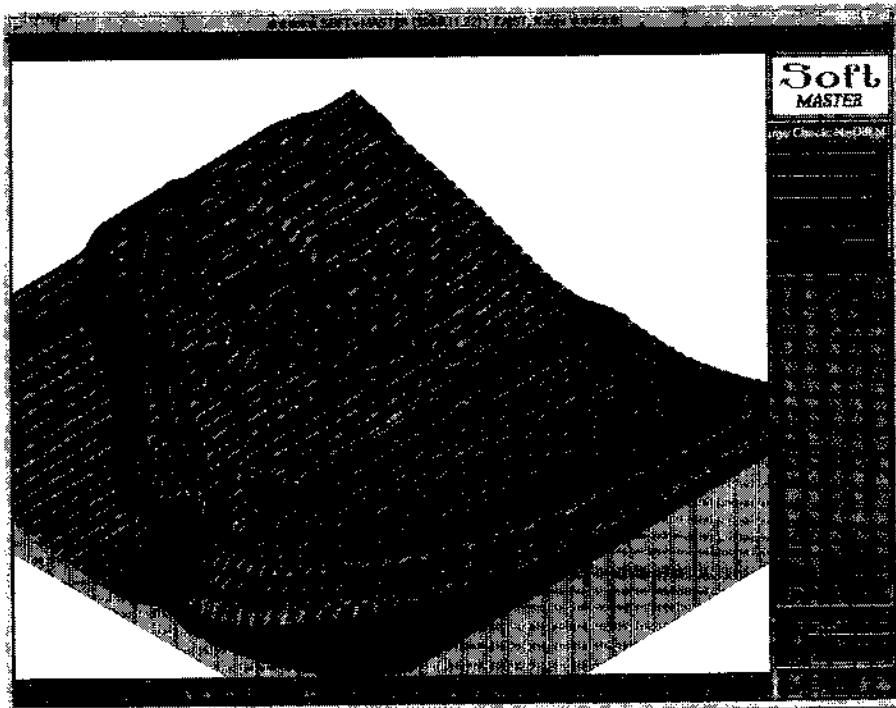
- 1) 정밀도 향상 : Z-map 모델은 이산적인 특성 때문에 각진 모서리와 수직벽이 정밀하게 표현되



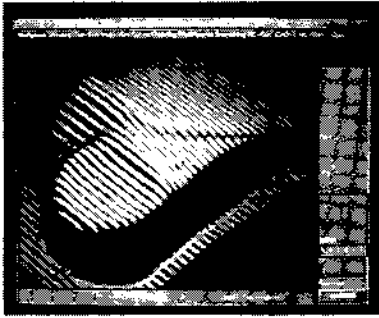
〈그림 10〉 Fillet-map의 Color Display



〈그림 11〉 N-Difference map



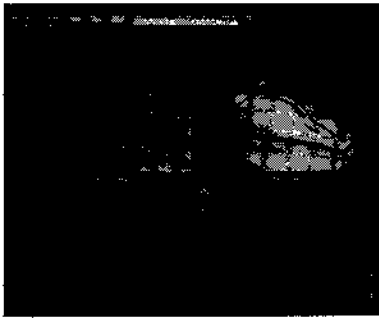
〈그림 12〉 N-Difference map의 Color Display



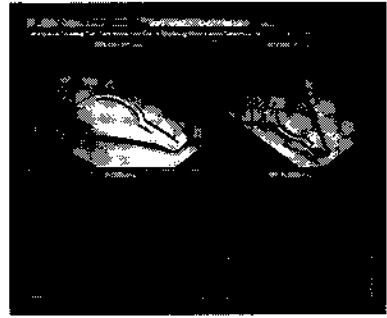
Colour Plate 1 Cutting simulation for rough-cut ball endmilling



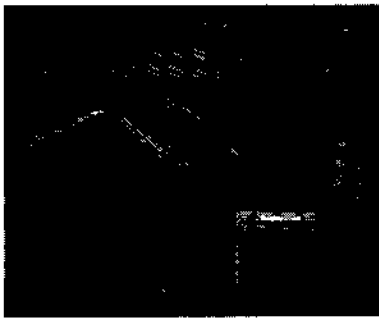
Colour Plate 5 Master-model creation by Z-value sampling



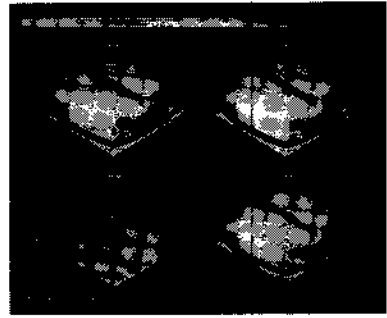
Colour Plate 2 Cutting simulation of CMM data



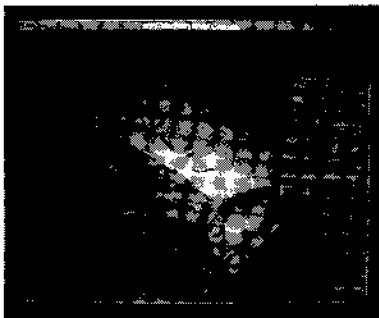
Colour Plate 6 Mating-die creation and unblending



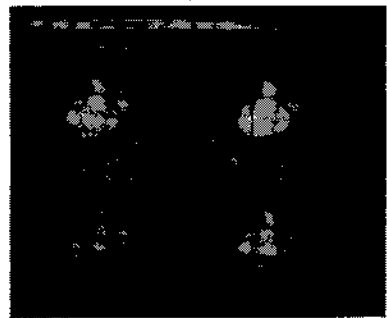
Colour Plate 3 Colour-coded display of errors



Colour Plate 7 Blending and mating-die creation



Colour Plate 4 Overcut filtering for collision avoidance



Colour Plate 8 Stamping-die machining sequence

(그림 13) "Soft-Master" 시스템의 다양한 기능

지 않으므로, 정밀도와 비례적으로 데이터량을 늘리지 않으면서 정밀도를 향상하는 방안이 연구되어야 한다.

- 2) 생산속도 향상 : 검증은 NC작업에서 하지 않으면 안되는 꼭 필요한 작업이 아니므로, 작업자가 검증에 시간적 부담을 느끼지 않을 정도로 생산속도를 더욱 향상시켜야 한다.
- 3) 자동 검사기능 : 가공데이터를 생성하는 시스템이 자동으로 검사하고 그 결과(품질 보증서)와 함께 가공 데이터를 생성해야 한다.
- 4) 검증결과를 NC-code에 반영 : 궁극적으로는 가공 데이터를 생성하는 시스템이 자동검증을 통해 얻어진 과절삭/미절삭 등의 검증결과를 가공 데이터에 반영하여, 무오류(error free)의 가공 데이터를 생성해야 한다.

정밀도 향상부분에 있어서는 최근 "core-map" 개념을 도입한 Z-map 모델로 수직벽의 정밀도를 1/100까지 보장하는 방법이 연구되고 있다. 최근 미국의 Chrysler 자동차에서 "Soft-Master"의 본 검증기능을 이용하여 CATIA Version4에서 생성한 NC-code를 검증한 결과 4/100mm의 과절삭(convex interference)을 관찰할 수 있었다. 이 방법을 이용한 모의가공과 검증의 계산시간은 "core-map"의 데이터량에 따라 달라지지만 원래의 Z-map 모델을 이용하는 것과 크게 다르지 않으므로(6장에서 설명한 예제의 경우, 같은 조건에서 모의가공 계산시간은 25초이고 수직벽의 정밀도는 2/100mm로 개선) 정밀도의 대폭적인 향상이 기대된다.

【참고문헌】

- [1] 김찬봉, 양민양, "5축 CNC 가공의 검증에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 18권 1호, pp. 93-100, 1994
- [2] 정정민, 김광수, "복셀 표현법을 이용한 5축가공 시뮬레이션", 대한산업공학회 '94 추계 학술대회 발표 논문집, pp. 549-556, 1994
- [3] R. O. Anderson, "Detecting and Eliminating Collisions in NC Machining", *Computer-Aided Design*, Vol. 10, No. 4, pp. 231-237, 1978
- [4] K. Chang, "Graphical Verification of Multi-axis Numerically Controlled Machining Programs for Sculptured Surface Parts", *Ph.D. Dissertation*, Michigan State University, 1991
- [5] I. T. Chappel, "The Use of Vectors to Simulate Material Removed by Numerically Controlled Milling", *Computer-Aided Design*, Vol. 15, No. 3, pp. 156-158, 1983
- [6] B. K. Choi, *Surface Modeling for CAD/CAM*, Elsevier, 1991
- [7] B. K. Choi, Y. C. Chung, J. W. Park and D. H. Kim, "Unified CAM-system Architecture for Die and Mould Manufacturing", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 235-243, 1994
- [8] R. L. Drysdale *et al.*, "Discrete Simulation of NC Machining", *Algorithmica, special issue on computational geometry*, Vol. 4, No. 1, pp. 33-60, 1989
- [9] J. D. Foley, A. van Dam, S.K. Feiner and J.F. Hughes, *Computer Graphics Principles and Practice*, Addison-Wesley Publishing Co., 1990
- [10] P. L. Hsu and W.T. Yang, "Realtime 3D Simulation of 3-Axis Milling Using Isometric Projection", *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 4, pp. 215-224, 1993
- [11] G. J. Jense, "Voxel-based Methods for CAD", *Computer-Aided Design*, Vol. 21, No. 8, pp. 528-533, 1989
- [12] R. B. Jerard, R. L. Drysdale, and K Hauck, "Geometric Simulation of Numerically Control Machining", *Proc. ASME Int'l Computers in Engineering Conf.*, ASME, New York, pp. 129-136, 1988
- [13] R. B. Jerard *et al.*, "Methods for Detecting Errors in Numerically Controlled Machining of Sculptured Surfaces", *IEEE CG&A*, pp. 26-39, 1989
- [14] R. B. Jerard and R. L. Drysdale, "Method for Geometric Modeling, Simulation and Spatial Verification of NC Machining Programs", *Proc. IFIP*

- TC5/WG5.2 Working Conference on Geometric Modeling for Product Engineering*, Elsevier, U.S.A, pp. 39-52, 1990
- [15] A. Kaufman, "Efficient Algorithms for 3D Scan-Conversion of Parametric Curves, Surfaces, and Volumes", *Computer Graphics (Proceeding of SIGGRAPH)*, Vol. 21, No. 4, pp. 171-179, 1987
- [16] Y. Kawashima, et al., "A Flexible Quantitative Method for NC Machining Verification Using a Space-division Based Solid Model", *The Visual Computer*, pp. 149-157, 1991
- [17] J. H. Oliver and E. D. Goodman, "Direct Dimensional NC Verification", *Computer-Aided Design*, Vol. 22, No. 1, pp. 3-9, 1990
- [18] J. H. Oliver, "Efficient Intersection of Surface Normals with Milling Tool Swept Volumes for Discrete Three-Axis NC Verification", *Journal of Mechanical Design*, V114, pp. 283-287, 1992
- [19] T. Saito and T. Takahashi, "Comprehensible Rendering of 3-D Shapes", *Computer Graphics (Proceeding of SIGGRAPH)*, Vol. 24, No. 4, pp. 197-206, 1990
- [20] T. Saito and T. Takahashi, "NC Machining with G-buffer Method", *Computer Graphics (Proceeding of SIGGRAPH)*, Vol. 25, No. 4, pp. 207-216, 1991
- [21] S. Takata, M. D. Tsai and M. Inui, "A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation Using a Workpiece Model", *Annals of the CIRP*, Vol. 38, pp. 417-420, 1989
- [22] Y. Takeuchi, M. Sakamoto, Y. Abe and 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
- [23] J. K. Udupa and D. Odhner, "Fast Visualization, Manipulation, and Analysis of Binary Volumetric Objects", *IEEE CG&A*, pp. 53-62, 1991
- [24] W. P. Wang and K. K. Wang, "Geometric Modeling for Swept Volume of Moving Solids", *IEEE CG&A*, Vol. 6, No. 12, pp. 8-17, 1986



최병규

현재 한국과학기술원 산업공학과 교수로 재직중이며, 서울대학교 산업공학과에서 학사, 한국과학기술원 산업공학과에서 석사, 미국 피듀대학교 산업공학과에서 박사학위를 취득하였다. "Computer-Aided Design"지를 비롯한 다수 해외 전문 학술지의 편집위원이며, IFIP WG5.3의 회원이기도 하다. 그의 주요 관심분야는 자유곡면 모델링과 다축 NC 가공, CAPP와 CAD/CAM 통합, 제조 시스템 모델링 및 시뮬레이션 등이다.



정연찬

현재 한국과학기술원 산업공학과 박사 과정에 재학중이며, 한양대학교 산업공학과에서 학사, 한국과학기술원 산업공학과에서 석사학위를 취득하였다. 그의 주요 관심분야는 자유곡면 및 솔리드 모델링과 NC 가공 시뮬레이션 등이다.