

비균등분할 등고선 가공법에 의한 황삭가공경로의 자동생성

김 병 회

Automatic Generation of Roughing Tool Path upon Unequal Level Line Machining

Byeong-Hee Kim

ABSTRACT

The methodology of automatic generation of tool path for rough cutting of a sculptured surface is proposed with the improved contouring method, *unequal level line machining*. Considering the surface shape and the diameter of the endmill, the distance between level lines is obtained. To improve MMR, initial rough cutting is processed with the large diameter endmill and the remained material is removed by the relatively small diameter endmill. Tool path is generated from the offset curve of respective level line and the interferences between the tool and workpiece are automatically avoided. After generating NC part program, the sculptured surface is machined at the vertical machining center. From the experimental results, total cutting length and machining time are reduced more effectively than the conventional contouring methods.

1. 서 론

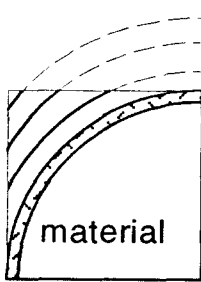
NC기계가공기술의 발달과 더불어 자동차, 우주 항공, 가전 등 여러 생산분야에서 심미적, 공학적 곡면(sculptured surface)의 사용이 증가함에 따라 자유곡면을 가공하기 위한 NC 명령어를 자동생성하는 CAD/CAM 시스템의 개발이 절실하게 되었다. 그러나 지금까지 연구된 대부분의 연

구는 CAD 데이터 베이스를 기초로 최종형상에 대한 마무리가공(finishing)을 위한 공구위치 결정에 관한 연구가 대부분이었으며^[1,2], 마무리가공 이전의 공작물의 황삭가공에 관한 연구는 미진한 형편이다. 실제로 금형가공에서의 황삭가공체적은 제거해야 할 금속피의 70%를 차지하고 있어 전체가공공정의 많은 부분을 차지하고 있으며, 또한 황삭가공의 결과는 이후의 마무리가공에 많은 영향을 미치기 때문에 효과적인 황삭가공의 필요성은 절실하다 하겠다. 그러나 실제 현장에서는 숙련공들의 눈어림

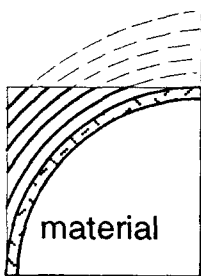
강원대학교 정밀기계공학과 전임강사

식 초기제거방식에 의존하고 있는 형편이며 이에 따른 생산성 저하는 매우 큰 것으로 알려져 있다.

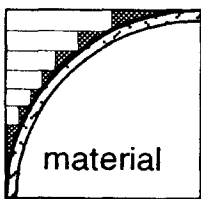
황삭가공에 대한 구체적 연구는 매우 미진한 상태며 제시된 몇몇 이론들도 실용적이지 못한 실정이다. Kochan 등은^[3] Fig. 1에서와 같이 거친 가공 방법을 3가지 유형으로 나누어 제시하였다. (a)와 (b)는 마무리가공 영역을 기준으로 하여 각각 마무리 가공면으로부터 일정 거리로 가공하는 것과 등간격으로 가공하는 것이며, (c)는 단계별 등고선절삭 방법이다.



(a) equivalence depth to finishing contour



(b) equidistance same as finish cut



(c) equidistance using level line

Fig. 1. Variants of cutting distribution

Wakahara^[4]등은 GEOMAP-III라는 CAD/CAM시스템에서 드릴에 의한 1차 가공으로 절삭량이 많은 부분에 대한 체적을 제거한 후 엔드밀에 의한 수직가공, 그리고 등간격 등고선에 의한 지그재그(zigzag)식 공구궤적을 이용하여 황삭가공을 행하였다. 그러나 이러한 방법들도 대부분 상향절삭(upcut)과 하향절삭(downcut)이 교차되는 지그재그식 공구궤적으로 등간격의 등고선에 의한 절삭 방식이었다^[5,6]. 이는 상향절삭과 하향절삭이 교차함에 따라 백래쉬(backlash)를 유발하여 공작물과 공구에 손상을 주고 공구의 마모율도 커져 절삭성의 저하를 초래할 수 있다. 또한 자유곡면의 가공에서는 황삭가공 이후 마무리가공을 위한 여유량이, 최종형상의 특이성으로 인하여 일정 공구만을 사용할 경우 불규칙한 형태로 남는 단점도 있다.

따라서 본 연구에서는 마무리 가공용 볼 엔드밀에 비하여 높은 절삭성을 가진 평엔드밀(flat endmill)을 사용하여 절삭성능을 향상시키고, 엔드밀의 직경에 따라 다변의 등고선 높이를 결정하므로써 최대의 금속 제거율(metal removal rate)을 가지는 공구궤적을 생성하는 알고리즘을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 자유곡면의 설계

자유곡면의 표현방법이 갖추어야 할 요건으로는 형성될 곡면의 예측에 대한 용이함, 예측 불허의 굴곡 발생 방지, 적은 격자(patch)에 의한 복잡한 형상 표현, 격자간의 원활한 연결 등이 있으며 이들 조건을 잘 갖춘 대표적인 곡면표현식으로 양삼차매개변수표현법(bicubic parametric polynomial)이 있다. Ferguson, Bezier, Coons 곡면 등이 이에 해당되며 대부분의 CAD 시스템이 이 방법들을 이용하고 있다. 본 연구에서는 공학적 자유곡면으로 설계된 형상 모델

(prototype)을 시제작한 후 실험을 거쳐 최종형상을 결정하고 최종 결정된 실험 모델로부터 일정한 간격으로 점 데이터를 측정 한 후 이를 보간하여 곡면을 표현하는 Ferguson의 자유곡면식을 이용하였다.

일반적으로 Ferguson곡면은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$r(u,v) = U \cdot C \cdot R \cdot C^T \cdot V^T \quad (1)$$

식(1)로 표현되는 Ferguson곡면은 격자들을 위상학적으로 직사각형의 배열로서 연결시킨 것이며, 이때 경계에서는 1차미분(C1 continuity), 2차미분(C2 continuity)이 연속되어야 한다. Ferguson곡면에 대한 데이터는 Fig. 2에 보인 것과 같은 형식을 지니며, 격자점에서의 접선벡터(tangential vector)는 세 입력점을 지나는 원에 접하게 하는 경계조건을 이용하여 그 방향을 결정하였고 네 모서리에서의 꼬임벡터(twist vector)는 물리적 의미를 찾기 어려우므로 0으로 두었다. 꼬임벡터를 0으로 둘 경우 모서리에 국부적인 평활현상(flattening)이 발생하나 곡면에 미치는 영향이 미소하므로 무시하였다.

이들 입력값들로부터 격자내의 모든 점에 대하여 격자곡선 방향의 접선벡터와 꼬임벡터의 성분은 다음 식으로부터 구한다.

X_{00}	S_{00}	S_{01}	· · · · ·	S_{0N}	X_{0N}
t_{00}	r_{00}	r_{01}	· · · · ·	r_{0N}	t_{0N}
t_{10}	r_{00}	r_{01}	· · · · ·	r_{0N}	t_{1N}
·	r_{00}	r_{01}	· · · · ·	r_{0N}	·
·	r_{00}	r_{01}	· · · · ·	r_{0N}	·
t_{M0}	r_{00}	r_{01}	· · · · ·	r_{0N}	t_{MN}
X_{M0}	S_{M0}	S_{M1}	· · · · ·	S_{MN}	X_{MN}

Fig. 2. Schematic diagram of input data for Ferguson surface design

$$\begin{aligned} s_{i+1,j} + 4s_{ij} + s_{i-1,j} &= 3(r_{i+1,j} - r_{i-1,j}) \\ t_{i,j+1} + 4t_{ij} + t_{i,j-1} &= 3(r_{i,j+1} - r_{i,j-1}) \\ x_{i+1,j} + 4x_{ij} + x_{i-1,j} &= 3(r_{i+1,j} - r_{i-1,j}) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 오프셋 곡면(offset surface)의 형성

황삭가공은 마무리가공 영역의 경계까지 수행하므로, 마무리가공 허용량(finishing allowance) 만큼의 오프셋을 가질 수 있도록 중간곡면의 형상에 대한 정보를 필요로 한다. 오프셋 곡면은 각 격자점에서의 법선벡터(normal vector)를 구한 후, 법선벡터의 방향으로 곡면을 이동시킴으로써 구할 수 있다.

$$r'(u,v) = r(u,v) + d \cdot n(u,v) \quad (3)$$

여기서 d는 마무리가공 허용량이다.

식(3)에 의해 계산된 점의 값들을 다시 Ferguson 곡면식에 대입하여 오프셋 곡면에 대한 정보를 형성하게 된다.

2.3 황삭가공시의 등고선 생성

등고선 높이(h)의 결정

Fig. 3에서 보는 것과 같이 경사면의 기울기에 따라 주어진 공구의 직경으로 1회에 절삭이 완료되는 높이는 서로 다르다. 따라서 주어진 공구 직경에 대해 이전 등고선을 기준으로 등고선을 따라 구하는 높이들은 각각 서로 다른 값들을 가지게 되므로 이들의 평균을 취하여, 이를 다음 등고선의 높이로 결정하면 한 등고선에 대한 절삭횟수를 2 내지 3회로 줄일 수가 있다.

등고선 탐색

등고선은 같은 높이에 있는 곡면상의 좌표값들의 연속을 나타내므로 곡면과 평면의 교선으로 구할 수가 있다. 실제 가공

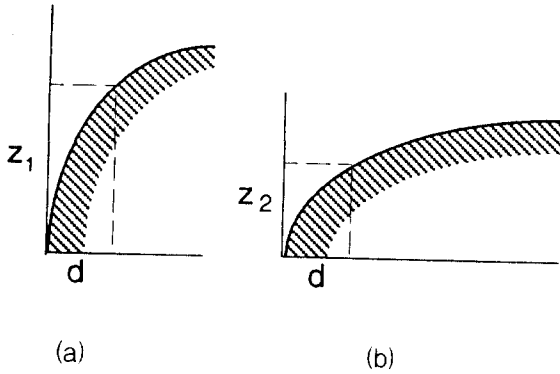


Fig. 3. Variation of contour height according to surface slope($z_1 > z_2$)

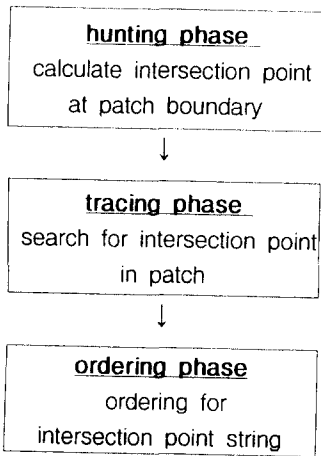


Fig. 4. Schematic diagram for contour searching algorithm

경계면이 되는 오프셋 곡면은 식(1)과 같은 Ferguson곡면이므로 구하고자 하는 교선의 방정식은 식(4)로 표현된다. 이 식은 u 와 v 에 대한 3차식으로서 미정의(undetermined) 방정식이나 u, v 중 하나의 변수를 고정시킴으로써 구할 수가 있다.

$$h = U \cdot C \cdot Q \cdot C^T \cdot V^T \quad (4)$$

등고선은 Fig. 4와 같이 격자 경계에서의 교점을 구하는 hunting phase, 격자 내부의

교점들을 탐색하는 tracing phase, 각 격자들의 교점열들을 순서대로 연결시켜 주는 ordering phase의 3가지 절차를 통해 구하였다.

등고선 보간식 생성

생성된 등고선 또한 자유곡면상의 곡선이므로 자유곡선이 된다. 따라서 자유곡선의 표현방법에 의해 곡선의 정보를 저장할 필요가 있으며, u 를 매개변수로 하여 표현하는 Ferguson곡선을 사용하였다.

Ferguson곡선은 식(5)로 주어진다.

$$h = U \cdot C \cdot R \quad (5)$$

2.4 공구 경로의 결정

가공순서의 결정

임의의 곡면에 대해 직경 d_0 인 엔드밀에 의한 등고선이 Fig. 5와 같이 결정되었다면 주어진 공구 가공해야 할 공작물의 최대 깊이가 l 인 경우 직경 d_0 인 엔드밀의 최대 가공 깊이보다도 큰 경우가 되어 1회의 가공으로서는 제거하기가 불가능하다. 이런 경우 기존의 CAD/CAM 시스템은 Fig. 5(a)에서와 같이 일정 간격의 절삭층을 순서대로 가공하는 공구경로를 사용하고 있으나, 본 연구에서는 Fig. 5(b)와 같이 절삭성을 고려하여 $2d_0, 3d_0$ 등의 직경을 가지는 공구로 큰 깊이의 많은 양을 짧은 궤적으로 제거한 후, Fig. 5(c)에서처럼 d_0 의 공구로써 균일한 마무리가공 여유량이 남도록 하는 가공순서를 정하였다.

A. Ber^[7]와 J. Tlustý^[8]는 평 엔드밀의 절삭력에 관한 연구에서 절삭깊이와 이송량 사이의 관계가 비례하지 않음을 보여주고 있고, 절삭깊이가 클수록 작은 것에 비해 절삭력도 안정되어 있음을 보여주고 있다. 따라서 같은 직경에 대해 어느정도 절삭깊

이가 클수록 절삭 효율은 좋다는 것을 알 수 있으며, 직경 또한 큰 것을 사용함으로써 급속제거율도 증가하게 된다.

이에 따라 공구 교환 시간에 대한 NC 동작기계의 ATC(automatic tool changer) 능력을 고려한다면 큰 직경의 공구에 의한 1차 가공에 의해 많은 양의 체적을 한번에 제거함으로써 현장 지향적인 절삭과정이 되고 높은 효율도 기대할 수 있다.

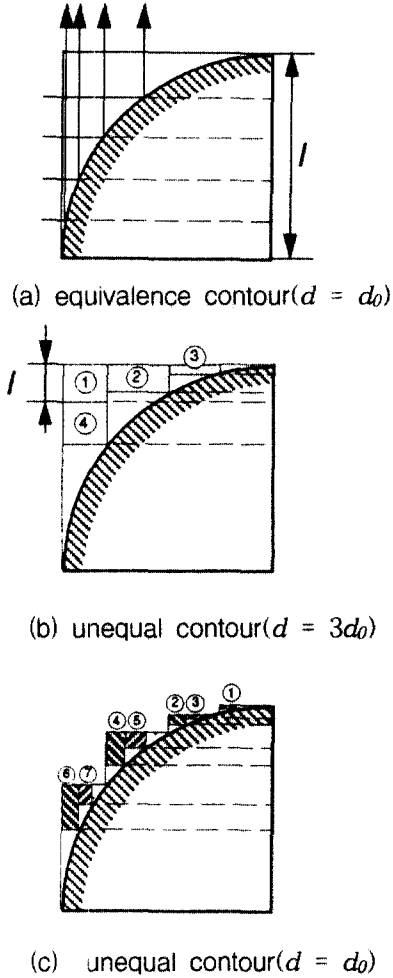


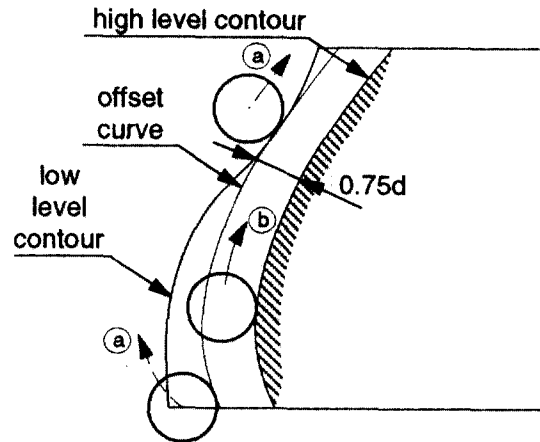
Fig. 5. Tool path according to endmill diameter

또한 공구의 최대 절삭 깊이는 대략 $l \approx 3d$ 의 관계를 가지게 되며 곡면의 기울기를

1이라 가정한다면 주어진 공구 직경의 3배에 해당하는 공구는 약 3개의 등고선에 해당하는 깊이를 한번에 절삭할 수 있다. 따라서 Fig. 5(b)와 같이, $3d_0$ 의 공구를 사용하는 경우 주어진 번호순서로 1차가공이 수행되고, Fig. 5(c)에서와 같이 d_0 의 공구로 2차가공이 수행된다.

하위등고선에 대한 상위등고선의 가공경로

Fig. 6에서 보는 바와 같이 하위 등고선에 대한 절삭이 완료된 후 상위 등고선에 대한 절삭은, 직경의 3/4을 오프셋한 곡선을 구한 후 오프셋 곡선과 하위 등고선과의 교점 사이의 절삭영역을 판단한 후 1차와 2차절삭의 순으로 가공한다. 1차, 2차절삭 모두 1방향 절삭으로, 상향 또는 하향 절삭이 교차되지 않고 일반적으로 안정하다고 밝혀진 하향절삭만으로 가공이 이루어진다.



Ⓐ first tool path Ⓑ second tool path

Fig. 6. Machining for high level contour w.r.t. lower level contour

Step length의 계산

NC공작기계는 직선보간 또는 원호보간에 의해 운동이 제어되므로 내부공차와 외부공차를 고려한 이송 방향의 step length의 계산이 필요하다. 따라서 Fig. 7에서와 같은 2가지 경우를 생각하여 볼록한 경우에는

$$\alpha = 2 \cos^{-1} \frac{\rho - \delta_I}{\rho - \delta_O} \quad (6)$$

$$r_{CL} = r(u_i) + (R \cdot \sec(\alpha/2) + \delta_O)(-n) \quad (7)$$

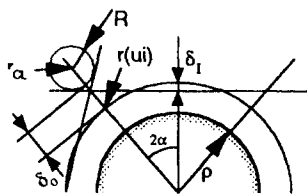
으로 하였고, 오목한 경우에는

$$\alpha = 2 \cos^{-1} \frac{\rho - \delta_O - R}{\rho - \delta_I - R} \quad (8)$$

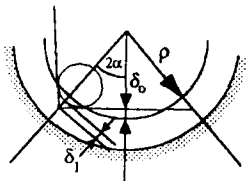
$$r_{CL} = r(u_i) + (\delta_I - R)(-n) \quad (9)$$

으로 하였으며, 결과적인 증분량은

$$\Delta u = \frac{\rho \alpha}{\| \dot{r}(u_i) \|} \quad (10)$$



(a) convex curve



(b) concave curve

Fig. 7. Parametric step length calculation

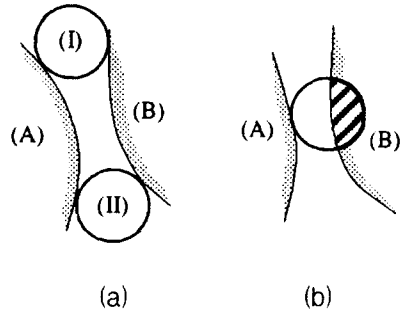


Fig. 8. Interference between contours

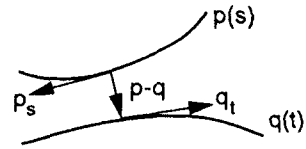


Fig. 9. Minimum distance between two curve

등고선과 등고선 사이의 간섭 제거

한 등고선 높이에서 등고선이 2개 이상 생기는 경우, Fig 8(a)에서 보는 바와 같이 인접 등고선과 간섭을 일으킬 수 있다. 이런 경우 (A)부 등고선과 (B)부 등고선 사이의 최단 거리를 계산한 후, 이것이 엔드밀의 직경보다 작을 때 간섭이 발생하는 것으로 판단하고, Fig 8(b)에서와 같이 간섭이 일어나기 직전의 위치 (I)에서 직후의 위치 (II)까지는 절삭을 하지 않고 건너뛰도록 한다. 두 곡선 사이의 최단거리는 Fig. 9에서

$$(p - q) \cdot \frac{\partial p}{\partial s} = 0 \quad (11)$$

$$(p - q) \cdot \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

3. 시뮬레이션 결과

3.1 자유곡면 모델링과 공구경로 산출

실험에 사용한 자유곡면은 안장형상을 지닌 해석곡면($z = x^2 - y^2$)으로부터 점 데이터를 얻고, 이를 정규화(normalizing)한 후 Ferguson곡면 형성법에 의해 모델링한 것이다.

Fig. 10은 모델링이 완료된 곡면의 형상을 보여주고 있다. 절삭되는 등고선의 높이를 결정하기 위한 가공 계획으로 직경 10mm의 엔드밀을 사용하는 경우 Fig. 11에서 보는 바와 같이 5단계의 높이를 가지는 10개의 등고선이 형성되었다.

공구경로를 생성하기 위해서는 앞서 생성된 등고선에 대한 정보와 1차 절삭공구에 대한 사용자의 설정이 입력정보로서 필요하다. 본 실험에서는 1차가공에 대한 공구로 원 사용공구 직경의 2배에 해당하는 직경 20mm의 엔드밀을 사용하였으며 각

공구에 대한 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of flat endmill

dia.	total length (mm)	cutting edge length(mm)	cutting edge dia.(mm)	shank dia.(mm)
φ 20	115	30	20	20
φ 10	70	25	10	10

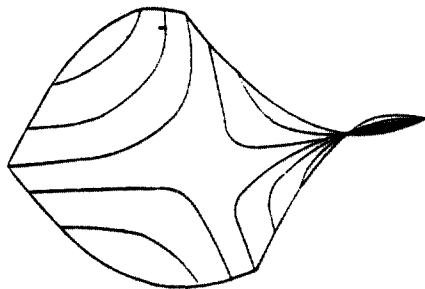
직경 20mm 엔드밀에 의한 1차 절삭 등고선은 높이 20.857824mm와 40.805546mm이며, 허용 최대 절삭깊이를 25mm로 주는 경우 최저 등고선에서 2단계의 절삭과정을 수행하게 된다. 엔드밀의 절삭깊이는 통상 직경의 1 내지 1.8배로 하고 있으며 이때의 절삭력도 안정되어 25mm의 절삭깊이는 충분한 타당성을 가지는 것으로 생각된다. 본 실험에서 사용한 자유곡면은 총 6단계의 절삭이 수행되며 각 단계에 대한 공구 경로를 Fig. 11에서 보여주고 있다.

4. 실험

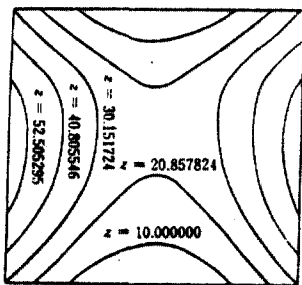
4.1 실험장치 및 방법

실험에 사용된 NC 공작기체는 Hitachi Seiki의 수직머시닝센터(vertical machining center) VA-40으로 7.5HP의 스피들 모터 동력을 가지고 있으며, 12m/min의 급속이송속도를 낼 수 있다. 공작물의 재료로는 알루미늄 합금인 A12024를 사용하였다. 공구는 코로이(Korloy)의 φ10 일체형 스파이럴 엔드밀(SSE 4100)과 φ20 스파이럴 엔드밀(ZSE 420)을 각각 사용하였다.

Table 1에서 보인 공구의 최대 축방향 절삭깊이는 φ10과 φ20이 각각 25mm와 30mm이므로, 본 실험에서는 허용최대축방향 절삭깊이를 각각 15mm와 25mm로 부여하였다. 절삭영역의 차이에 따라 약간의 변동이 있으나 대부분의 반경방향 절삭깊이

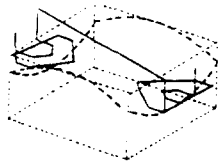


(a) 3-dimensional view

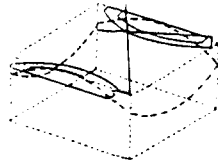


(b) projection to X-Y plane

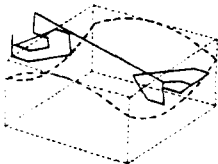
Fig. 10. Simulation of contour line of example surface $z = x^2 - y^2$ (endmill dia.=10mm)



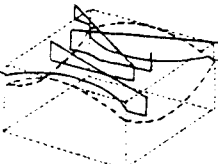
(a) step 1(cutting height : 35.0mm)



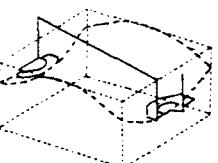
(b) step 2(cutting height : 40.850mm)



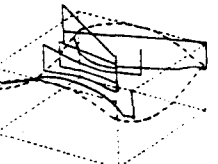
(c) step 3(cutting height : 20.853mm)



(d) step 4(cutting height : 52.505mm)



(e) step 5(cutting height : 30.152mm)



(f) step 6(cutting height : 10.0mm)

Fig. 11. Simulation for roughing tool path

이는 직경의 3/4으로 주었으며, 곡면의 내부영역 절삭에서는 직경 크기의 반경방향 절삭깊이로 1회의 홈가공을 수행하게 된다.

이때 절삭조건은 Table 2와 같고, 이는 반경방향 절삭깊이에 따라 차등을 두어 적용하였다.

Table 2. Cutting conditions

dia. (mm)	radial depth of cut(mm)	spindle speed (rpm)	feedrate (mm/min)	feed per tooth (mm/t)
20	20	1000	37	0.01
20	15	500	100	0.05
10	7.5	1500	70	0.012

4.2 실험 결과 및 분석

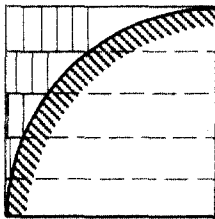
실험 결과 가공 이전의 준비 시간을 제외한 절삭에 소요된 시간은 약 31분으로 측정되었다. 시뮬레이션에 따르면 공구가 이동한 총 거리는 5656.83mm이며, 이중 급속이송에 소요된 거리는 3594.25mm, 실제 가공에 소요된 거리는 2062.58mm로, 계산에 의한 급속이송에 걸린 시간은 0.3분, 순절삭에 걸린 시간은 29분으로 나타났다. 이는 실제 가공 시간과 5% 정도의 오차를 보이고 있으나 가공 도중 이송속도의 변화와 공구교환시간에 의한 오차로 생각되며, 이를 보정하더라도 급속이송과 공구교환에 소요되는 시간은 약 1분 내외인 것을 알 수 있다.

따라서 급속이송경로의 거리가 실제 가공경로의 거리보다 더 길다 하더라도, 급속이송과 공구교환에 걸리는 시간이 전체 가공시간에 미치는 영향은 극히 미미하며, 절삭시간의 대부분은 순절삭 과정에서 소요되는 공구의 이동거리와 이송속도에 의존함을 알 수 있다.

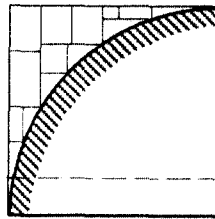
Fig. 12는 같은 직경의 엔드밀을 사용하는 경우 기존의 등고선 절삭법과 본 연구에서 제안한 알고리즘에 의한 공구경로의

차이를 도식적으로 보여주고 있다. Fig. 12 (a)는 등고선의 간격이 동일하고, 높은 등고선으로부터 낮은 등고선으로 절삭함에 따라 같은 절삭의 형태가 반복되므로, Fig. 12 (b)의 이전 등고선의 절삭에 따라 현 등고선의 절삭영역이 결정되는 공구경로보다 많은 거리를 가공해야 함을 분명히 알 수 있다. 따라서 동일한 이송속도를 주는 경우 (b)의 경로는 (a)의 경로에 비해 절삭시간이 많이 단축됨을 확인할 수 있다.

또한 Table 3에서 보는 바와 같이 1차 절삭으로 큰 직경의 엔드밀을 사용함으로써 금속제거율의 향상을 꾀할 수 있으며, Fig. 13(a)의 경우 작은 축방향 절삭깊이에 따른 이송속도를 충분히 증가시킨다 하더라도 그 크기에는 한도가 있고, 엔드밀의 특성상 허용축방향 절삭깊이 이하에서는 이송의 증감이 크게 변하지 않으므로, 금속제거율은 본 연구에서 제안한 절삭방식이 더 큼을 알 수 있다.



(a) constant contour height



(b) variable contour height

Fig. 12. Comparison of tool path

Table 3. Comparison of MMR

dia.	constant contour height				variable contour height			
	width	depth	feed	MMR	width	depth	feed	MMR
20					15	25	100	62500
					15	14.14	100	21213
					20	19.19	37	14203
10	7.5	10	70	5250	7.5	7.459	70	3935
	7.5	10	100	7500	7.5	10.86	70	5700
	7.5	10	140	10500	10	10.65	70	5593

기존의 등고선 절삭방법은 또한 지그재그식 공구경로를 사용하고 있어 하향과 상향절삭이 교차되므로 절삭성이 저하된다는 단점이 있으나, 본 연구에서는 등고선의 오프셋을 공구경로로 하여 한 방향만의 절삭을 행하게 되므로 절삭상태의 안정화를 또한 도모할 수 있었다. 그리고 직경이 큰 공구로부터 작은 공구순으로 가공함으로써, 등고선 사이의 간격을 좁게 설정하는 경우 모델링된 곡면에 더욱 근접하는 형상으로 절삭이 이루어지므로 마무리가공 시간의 단축도 기대할 수 있었다.

본 실험의 결과로부터, 본 연구에서 제안한 등고선 절삭경로의 생성법은 기존의 등고선 절삭법에 비해 절삭성의 안정화를 구현할 수 있었으며, 공구경로의 단축을 통해 가공시간을 줄일 수 있어 생산성 향상의 목적에 부합함을 확인하였다.

5. 결론

금형의 NC 가공에서 황삭가공에서 소요되는 시간이 전체 가공 시간의 많은 비중을 차지하고 있어 생산성 저하의 원인이 되어왔고, 이의 보완을 위해 등고선 절삭법을 통한 황삭가공의 자동화를 연구하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 측정된 점 데이터로부터 Ferguson 곡면 설계 방법에 의해 자유곡면을 형성할

수 있었으며, 등고선 탐색 알고리즘에 의해 임의 높이에서의 등고선을 구할 수 있었다.

(2) 주어진 공구에 따라 2 ~ 3회의 절삭과정으로 임의 높이에서의 가공이 완료되는 등고선의 높이를 구하는 알고리즘을 개발하였으며, 실험을 통해 타당성을 입증하였다.

(3) 등고선을 따른 한 방향 절삭으로 절삭성의 안정화를 도모할 수 있었으며, 적절한 공구의 사용으로 마무리 가공의 효율 또한 높일 수 있음을 알았다.

(4) 금속제거율을 최대화 하는 공구의 교체와 기존 등고선 절삭법보다 짧은 공구경로를 생성함으로써 절삭에 소요되는 시간을 단축시켰으며, 이에 따라 생산성 향상을 기대할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] I. D. Faux and M. J. Pratt, "Computational Geometry for Design and Manufacture", Ellis Horwood Ltd., 1981.
- [2] M. E. Mortenson, "Geometric modeling", John Wiley & Sons, 1985.
- [3] D. Kochan, S. Gumberidse, B. Burkhardt and K. Zehe, "Technological and Computational Aspects of CAD/CAM -System for Sculptured Surfaces", *Advances in CAD/CAM*, IFIP, pp. 289-302, 1983.
- [4] T. Wakahara, S. Shimura, M. Inui, T. Sata and F. Kimura, "Automatic Generation of NC Commands Based on a Machining Product Model", *JSPE*, Vol.53, pp. 1074-1079, 1987.
- [5] H. Suzuki, K. Yamazaki, T. Hoshi and M. Futagawa, "Real Time Numerical Control System for Metal Molds and Dies Machining", *JSPE*, Vol.53, pp. 1189-1194, 1987.
- [6] H. Wang, H. Chang, R. Wysk and A. Chandawarkar, "On the Efficiency of NC Tool Path Planning for Face Milling Operations", *Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry*, Vol.109, pp. 370-376, 1987.
- [7] A. Ber, J. Rotberg and S. Zombach, "A Method for Cutting Force Evaluation of End Mills", *CIRP*, Vol.37, pp.37-40, 1988.
- [8] J. Tlustý and P. Macneil, "Dynamics of Cutting Forces in End Milling", *CIRP*, Vol.24, pp. 21-25, 1975.
- [9] S. Smith and J. Tlustý, "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process", *Trans. of ASME, J. of Engineering for Industry*, Vol.113, pp. 169-175, 1991.
- [10] B. K. Choi, Y. C. Chung, J. W. Park and D. H. Kim, "Unified CAM-System Architecture for Die and Mold Manufacturing", *J. of Computer-Aided Design*, Vol.26, pp. 235-243, 1994.