

이분법에 의한 자유곡면 황삭가공 경로산출에 관한 연구 A study on Rough machining path generation of sculptured surface by bisection method.

신동혁(서울대학교 기계설계학과 대학원)

주중남(서울대학교 기계설계학과)

Dong-Hyok Shin, Chong-Nam Chu

ABSTRACT

This paper presents an algorithm to determine the tool path height for rough machining of sculptured surface. To minimize rough machining of sculptured surface, it is necessary to determine the tool path heights of contour planes. the proposed algorithm searches for the height at which maximum metal removal rate is obtained. This bisection method is accomplished until all shoulder heights are within roughing tolerance. The machining experiment demonstrates the superiority of the algorithm presented in this thesis.

Key Words : Rough Machining, Maximum Metal Removal Rate, Bisection Method

1. 서 론

3축 가공기에서의 황삭 가공은 금속피에서 불필요한 부분을 제거하는 작업으로 생산성 향상과 가공 비용 감소가 주된 관심사이다. 생산성 향상과 비용 감소는 처음의 금속피에서 마무리 허용 여유를 고려한 나머지 부분을 제거하는 작업 시간의 축소를 의미한다. 불엔드밀의 오프셋 황삭 가공은 contour-map 가공보다 효율이 떨어지는데, 이것은 불엔드밀의 절삭성이 평엔드밀보다 나빠서 feed를 크게 줄수가 없고, 불엔드밀의 정점에 특이점이 있어 절삭이 일어나지 않아 가공물을 문질러서 표면이 나빠진다. 최근의 가공의 추세는 절삭 성능이 나쁜 불엔드밀보다 평엔드밀을 사용하여 황삭가공을 하고 평엔드밀 가공으로 생긴 큰 shoulder는 불엔드밀로 중삭을 한 후 작은 직경의 불엔드밀로 정삭을 하는 가공으로 나아가고 있다. contour-map 가공은 절삭성이 좋은 평 엔드밀을 사용하므로 불엔드밀 보다 feed량을 크게 할 수 있고, 공구 직경의 대부분을 절삭에 사용할 수 있어서 금속제거율이 커야 하는 황삭가공에 적합하다.

contour-map 가공에서 한 등고면의 가공 시간 최소화를 목표로 한 공구 경로 계획은 많이 진행되었으며 등고면은 위에서 아래 방향으로 가공되는것이 일반적이다. Li[1]등은 여러가

지 공구 경로 패턴에 대해서 등고면 내에서의 등고선 안쪽의 절삭되지 않는 면적과 전체 면적사이의 면적비와 비절삭면적의 방향에 의해서 fuzzy이론을 적용하여 가장 적합한 공구 경로 패턴을 결정하였다. 그러나 이 경우 하향 밀링과 상향 밀링이 교차하는 zigzag형의 공구 경로 패턴을 사용하므로 절삭이 불안정하며, 제거되어야 할 면적이 많을 경우에도 하나의 정해진 공구의 사용에 한정되어, 공구 경로가 길어지므로 시간을 최소화한다는 목표에 이긋난다.

또 Lee[2]는 하나의 공구 만으로 황삭을 하는 것이 아니라 여러 가지 직경과 종류의 공구를 사용하여 절삭을 하고, 등고선의 높이에 따른 공구 교체 및 통합 계획과 공구 선택에 따른 등고선 높이의 재조정 등으로 알고리즘의 효율을 높였으나 제 2차 황삭(또는 중삭)의 경우에 불엔드밀을 사용하였다.

본 논문에서는 평형 엔드밀만을 사용하여 절삭성을 높여 등고선 가공의 shoulder를 삭가공의 허용 cusp 높이로 낮추는 가공시간 최소화 알고리즘을 제안한다. 여기서는 등고선의 가공을 일반적인 그림 1 (a)의 경우와는 달리 그림 1 (b)의 경우와 같이 가공하는 방식을 사용하여 금속 제거율의 최대화를 꾀하며, 최대의 금속 제거율을 얻을 수 있는 등고선의 높이를 결정하는 알고리즘을 제시한다.

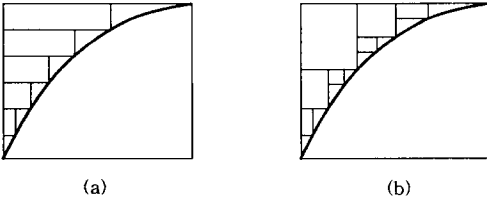


그림 1. 등고선 가공 방법

2. 이론

2.1 자유 곡면의 설계

자유 곡면의 표현 방식으로는 양삼차 매개변수 표현법을 이용한 Ferguson 곡면, Bezier 곡면, Coons 곡면, Rational parametric 곡면, B-spline 곡면 등이 있는데 이 중에서 가장 간단하고 구현하기 쉬운 Ferguson 곡면을 사용하였다.

하나의 Ferguson patch는 다음과 같은 벡터 식으로 표현된다.

$$\mathbf{r}(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \mathbf{a}_{ij} u^i v^j$$

여기서 \mathbf{a}_{ij} 는 네 격자점에서의 위치 벡터, u 방향의 접선 벡터, v 방향의 접선 벡터, 꼬임 벡터로 결정된다.

2.2 오프셋 곡면의 생성

황삭 가공은 큰 금속제거율을 가지므로 절삭 저항이 커서 공구의 변형을 고려하여야 한다. 그래서 정삭 여유 만큼 최종 마무리 곡면에서 떨어진 곡면(오프셋 곡면)의 정보를 필요로 한다. 오프셋 곡면은 각 격자점에서의 법선 벡터를 구한 후에 법선벡터의 방향으로 점을 정삭여유 만큼 이동시키고 다시 그 점들을 경계조건으로 Ferguson 복합곡면을 생성한다. 공작물의 재료와 공구의 재질을 고려하면 공구는 금속제거율이 최대일때 최대 변형을 가지며 이 최대 변형량을 오프셋양으로 정한다. 임의의 점 (u, v) 에서의 곡면 위의 점 $\mathbf{r}(u, v)$ 에 대해 오프셋 된 점 $\mathbf{r}'(u, v)$ 는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다. 여기서 \mathbf{n} 은 곡면의 단위 법선 벡터이고 \mathbf{s} 와 \mathbf{t} 는 각각 u, v 방향의 접선 벡터이며 d 는 오프셋 양이다. 오프셋 양은 곡면

전체에 대해서 하나의 값으로 정한다.

$$n = \frac{\mathbf{s} \times \mathbf{t}}{|\mathbf{s} \times \mathbf{t}|}$$

$$\mathbf{r}'(u, v) = \mathbf{r}(u, v) + d \cdot \mathbf{n}(u, v)$$

2.3 등고선의 생성

주어진 높이에 대한 등고면은 매개변수 곡면간의 교선을 구하기 위한 전진 알고리즘[4]을 이용한다. 원래의 알고리즘은 임의의 두 곡면간의 교선을 구하는데 사용하므로 복잡하지만 등고면의 경우에는 두 곡면 중에서 한 곡면이 평면이므로 계산이 비교적 간단하다. 여기서는 전진 알고리즘을 등고선에 적합하도록 변형시켜 하나의 patch마다 적용한다. 변형된 전진 알고리즘은 등고면과 만나는 patch의 결정, 초기 근사점의 결정, 초기 근사점의 교선위로의 접근, 곡률에 의한 step vector의 계산 및 다음 근사점의 계산으로 이루어지며 하나의 patch에 대한 교차점들이 모두 구해지면 이것을 sorting한다. 모든 곡면상의 patch에 대해서 교선을 구한 후 등고면이 지나가는 patch상의 교선의 끝점을 비교함으로써 조각난 교선을 연결하여 등고선 생성을 완료한다. 등고선의 정보는 하나의 평면내에 존재하므로 Ferguson 곡선으로 저장한다.

2.4 등고면에서의 공구 경로 생성 및 금속 제거율의 계산

2.4.1 임의의 등고면 상에서의 공구 경로의 생성

하나의 shoulder의 가공시 가공 영역은 하위 등고선(그림 2의 곡선 a)과 상위 등고선(그림 2의 곡선 b)사이의 영역이다. 이 영역을 제거하기 위한 공구의 경로는 그림 2의 1번 원이 지나가는 경로를 먼저 가공한 후에 다시 2번 원이 지나가는 경로로 가공을 하게된다. 여기서 원은 공구를 의미한다. 곡선 a와 곡선 b사이의 영역이 더 넓다면 제 3, 제 4의 공구 경로가 1번 원의 경로 밖으로 차례로 생성이 된다. 공구경로를 얻기 위해서는 절삭 기준 등고선(그림2의 곡선 b)에서부터 기준 등고선의 바깥 방향으로 오프셋 곡선을 구한 후에 다시 경로들을 역으로 배열시키면 된다. 공구의 반경길이 r만큼 오프셋한 곡선을 생성하고 다시 여기에서 등고면 내의 비절삭 영역을 판단한 후에 다시 반경의 1.5배를 오프셋한 곡선을 생성한다. 이 작업은 곡선 a, b사이의 가공 영역이 모두 공구 경로에 의

해서 제거될 때까지 계속된다. 절삭을 상향 밀링과 하향 밀링이 교차하는 경우 절삭이 균일하지 않아 불안정하다. 그래서 상향 밀링과 하향 밀링을 모두 하는 zigzag가공을 피하여 한 방향으로만 경로를 생성한다. 이 논문에서는 하향 밀링을 선택하였으며 그 방향은 그림 2에 표시되어 있고, 이 방향으로 가공을 하게 된다.

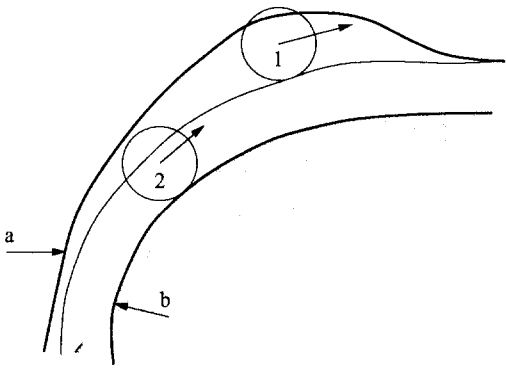


그림 2 공구 경로의 생성

2.4.2 한 등고면의 절삭시의 금속제거율의 계산

그림 3의 그림(b)와 같은 하나의 shoulder를 가공할 경우에 금속제거율은 다음과 같은 식에 의해서 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 MRR &= \frac{\text{Volume}}{\text{time}} \\
 &= \frac{\text{Area} \times h}{\frac{l}{f_r}} \\
 &= \frac{\text{Area} \times f_r \times h}{l}
 \end{aligned}$$

여기서 Area는 그림 3의 그림 (a)에서 빗금쳐진 영역의 면적, 즉 제거되어야 할 부분의 면적이고, h는 그림 3의 그림 (b)에서의 제거되어야 할 부분의 높이를 나타낸다. 그리고 l은 단면, 즉 Area내에서의 공구 경로의 총 길이이며, f_r은 공구의 feed rate이다. 그림 3의 그림 (a)는 그림 3의 그림 (b)는 a-a면을 자른 단면도이다.

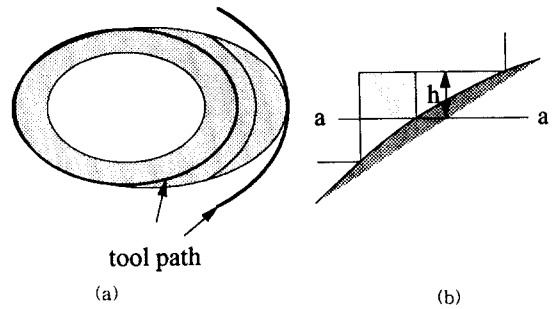


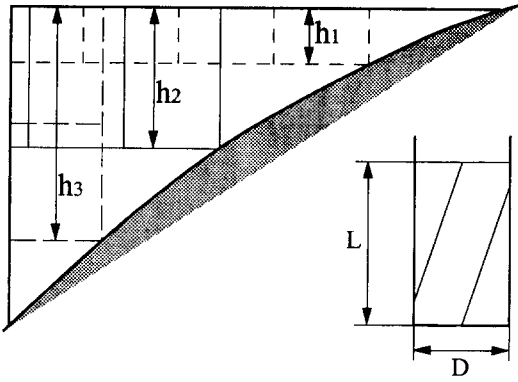
그림 3. 단면 면적과 shoulder의 높이

2.5 등고면 높이의 결정

공작물의 황삭 가공시의 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

- (1) 최대의 금속제거율
- (2) shoulder의 높이 제한

금속제거율을 크게하기 위해서 볼랜드밀보다 절삭성이 높은 평엔드밀을 사용하며, shoulder 높이 제한 조건을 만족시키는 최적의 공구 경로를 생성하여 금속제거율을 최대로 한다. 금속제거율을 최대로 하기 위해서 가공면의 높이를 조정한다. 평엔드밀로 가공을 하므로 한 높이에서의 가공이 끝난 후 새로운 shoulder를 생성하므로 공작물의 모든 절삭영역은 shoulder로 간주할 수 있으며 최초 공작물의 절삭 영역도 커다란 하나의 shoulder로 간주할 수 있다. 그림 4의 (b)의 최대 절삭 깊이 L과 직경 D를 갖는 공구를 사용하는 경우, 임의의 shoulder의 최대 높이와 최소 높이사이를 미리 정한 높이 간격으로 공구 경로를 생성하고 금속제거율을 계산하여 최대의 금속제거율이 나오는 높이를 선정한다. 이 작업은 컴퓨터에서 수치적으로 계산을 함으로써 시간이 많이 걸리지만 3축 가공기로 가공할 수 있는 모든 임의의 형상에 대해서 사용이 가능하다. 예를 들어 h_{high}=30이고 h_{low}=20이고 Δh=1.0일때 21.0, 22.0, 23.0, 24.0, 25.0, 26.0, 27.0, 28.0, 29.0에서 금속제거율을 계산하여 그중 최적의 높이를 선정한다. 그러나 21.0이나 29.0 같은 높이의 경우는 최적의 높이가 될수 없고 계산시간만 소비하게 된다. 그래서 계산은 효율을 높이기 위해서 최대허용 cusp의 높이(예를 들어 h_{cusp}=3.0)를 고려하여 23.0에서 27.0사이에서 계산을 한다. 그림4의 (a)에서와 같이 h₁, h₂, h₃의 높이에서 금속제거율을 계산하는 경우, 임체적인 형상에 따라서 최적의 높이가 결정되었지만 h₂나 h₃에서 최대의 금속제거율이 나오게 될 가능성이 높다. 그림 4이 단순한 볼록한 형상이라면 최적 높이는 h₂가 된다.



(a) 공구 경로 길이의 계산 (b) 공구

그림 4. 공구 및 최적 높이의 결정

입의 shoulder에서 최대 금속제거율을 갖는 높이를 결정하여 가공이 수행되면 다시 두 개의 새로운 shoulder를 갖게 되며 이 두 새로운 shoulder에 대해서 다시 앞의 과정을 반복한다. 이와 같은 이분법을 단순한 불룩한 형상의 자유곡면에 대해 적용을 하면 그림 4과 같이 shoulder의 절삭 측면적이 최대가 되는 높이가 최적 높이로 결정된다. 일반적인 형상의 공작물의 shoulder에 대해서는 그림 5에서와 같이 먼저 1의 높이로 가공을 하고 새로 생긴 두개의 shoulder에 대해 다시 높이를 결정하여 2, 4의 가공을 한다. 그림5의 가공순서는 프로그램의 수행 편의를 위해서 선택된 순서이다.

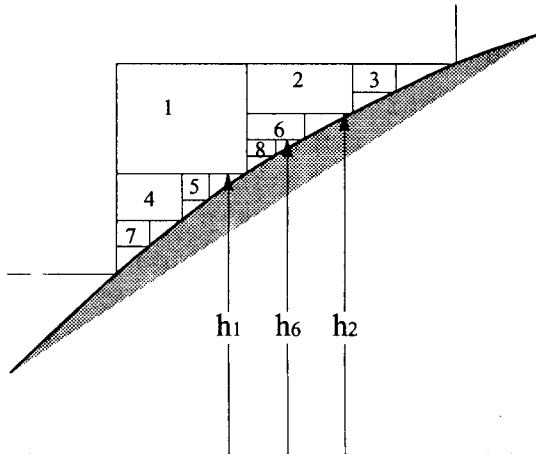


그림 5. shoulder 가공 순서

shoulder의 이분법은 허용 최대 cusp 높이에 의해서 완료된다. 그림5에서와 같이 높이 h_2 과 h_6 사이의 최대 cusp 높이가 허용 최대 cusp 높이보다 작으면 shoulder의 이분을 중단한다.

단 인접한 두 등고면의 최대 cusp 높이가 허용 최대 cusp 높이의 2배보다 작고, 허용 최대 cusp보다 큰 경우에는 최대의 금속제거율을 갖는 높이를 결정하기 보다는 단순히 높이를 이등분하는 것이 더 효율적이다. 높이의 차가 작으므로 단순히 불룩한 곡면, 또는 단순 오목한 곡면으로 간주할 수 있으므로 이등분하는 것은 충분히 근거가 있다.

입의 가공면에 대해서 최대 cusp 높이의 계산은 근사적으로 수행한다. 그림 6에서 공구가 곡면과 닿는 점B의 높이 h_1 과 점B에서의 등고선 법선 벡터와 만나는 점A의 높이 h_2 사이의 shoulder의 높이(또는 cusp)는 점 B에서의 곡면 법선벡터 방향의 길이 h_{cusp} 로 정한다. 곡면 법선 벡터 N 과 수직방향과의 각을 β 라하면 h_{cusp} 는 다음과 같이 계산된다. 이 근사 cusp 높이를 공구 경로를 따라서 계산하여 그값이 최대인 것이 허용 최대 cusp 높이 보다 작으면 알고리즘의 수행을 중단한다.

$$h_{cusp} = (h_1 - h_2) \times \cos \beta$$

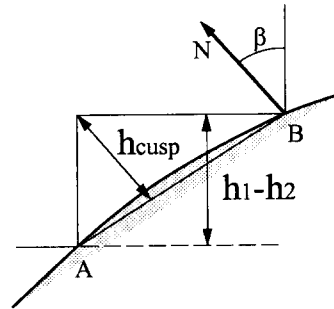


그림 6. cusp의 계산

3. 실험 및 결과

3.1 자유곡면의 모델링

실험에 사용할 자유 곡면은 경사도가 방사 방향으로 다른 단순 불룩한 곡면을 사용하였으며 이 곡면은 함수적으로 생성해낼 수 없는 자유곡면이고 그림 7에 그 형상이 있다. 바깥의 점선은 가공할 금속속를 나타내며 곡면테이타는 각 격자점의 점 테이타로부터 계산되어 Ferguson곡면을 생성한다.

가공 경로의 생성을 위해서는 공구의 선정이 필요하므로 여기서는 직경 20의 단일 평엔드밀 공구를 선정하였으며, 가공 높이를 결정하는데 필요한 최대 허용 cusp 높이는 5 mm로 잡았다. 이 조건에 대해서 최대의 금속제거율을 갖는 등고면이 11개 생성되었다. 그림 8은 이 등고선들을 나타내며 최종 형상을 의미한다.

공구 경로의 simulation결과를 <표 1>에 요약되어 있으며 공

구 경로는 그림9에 표시되어 있다.

가공순서	가공면의 높이 (mm)	가공면의 면적 (mm ²)	공구경로 길이 (mm)	금속제거율 (MMR/회) (mm ³)
1	56.5	7039.85	632.99	285.78
2	66.5	3928.85	395.13	154.12
3	72.5	2088.39	249.56	79.50
4	77.5	1508.85	169.3	40.10
5	39.0	1050.47	164.21	111.95
6	49.0	3279.45	499.52	49.24
7	53.0	1504.45	424.98	12.39
8	69.5	1079.33	273.2	11.80
9	61.5	2020.61	352.34	28.67
10	44.0	1308.27	261.12	25.25
11	35.0	288.58	42	27.48

<표 1> 시뮬레이션 데이터

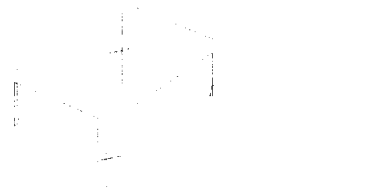
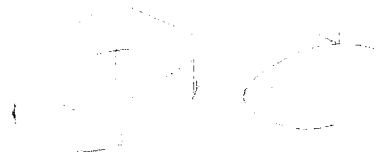


그림 9. 공구 경로

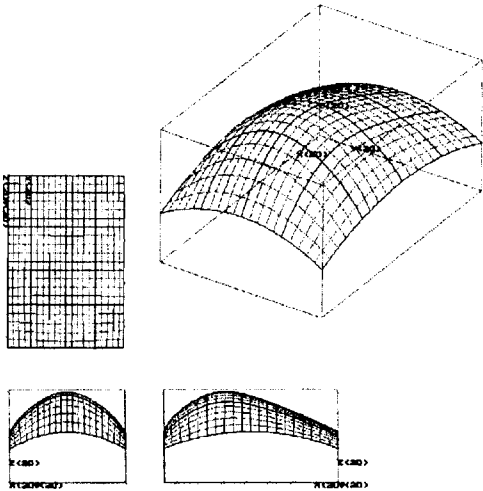


그림 7. 가공물의 형상

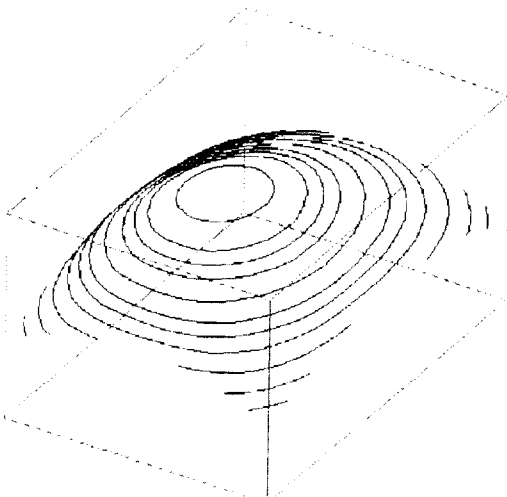


그림 8. 가공면의 형상

3.2 실험 및 실험 결과

실험 장치, 방법, 피삭 재료 및 공구는 다음과 같다. 피삭재는 절삭가공시에 절삭 저항이 매우 작고 bur가 생기지 않는 플라스틱과 종이의 혼합재료를 사용하였다.

공작 기계 : 세일중공업 MCH-10 수평형 머시닝 센터
 공구 : HSS 평엔드밀 $\phi 20$
 피삭재료 : KJL KL-101
 feed rate : 300 mm/min
 spindle speed : 1000 rpm

최종 공작물은 그림 10에 있다.



그림 10. 최종 공작물

3.3 실험 결과 및 분석

일반적인 상용프로그램을 사용하여 공구 경로를 생성하는 경우에는 보통 일정한 높이의 간격을 사용하는데 본 실험의 형상에 대해서 그 경로의 길이를 시뮬레이션 한 결과는 다음의 <표 2>과 같다. 여기서는 cusp 높이제한을 5mm로 정하여 경로를 생성한 순절삭경로 길이는 5446.8mm(1111.0 + 969.5 + 898.5 + 756.4 + 628.1 + 529.4 + 390.0 + 144.3 + 19.8)로 계산되었다.

가공순서	가공면의 높이 (mm)	가공면의 면적 (mm ²)	공구경로 길이 (mm)
1	76.0	13737.5	1111.0
2	71.0	12158.7	969.5
3	66.0	10383.4	898.3
4	61.0	8462.1	756.4
5	56.0	6433.1	628.1
6	51.0	4313.3	529.4
7	46.0	2166.8	390.0
8	41.0	1393.3	144.3
9	36.0	885.4	19.8

<표 2> 등간격 등고선 가공 경로

본 논문과는 다른, 평엔드밀을 사용하여 황삭을 수행하는 알고리즘을 개발한 이계정[13]의 방식은 그림 12에 보여지는 것과 같이 황삭 허용 여유의 3배 높이를 큰 공구로 가공을 하고, 새로 생성된 shoulder에 대해서 2차로 작은 공구로 절삭을 수행하여 shoulder의 높이를 황삭 허용 여유까지 낮춘다. 이계정의 알고리즘은 그림 11과 그림 12를 비교하면 알 수 있듯이 등간격의 등고면을 갖는 방식보다 월등한 금속제거율을 실현할 수 있다.

이 알고리즘을 본 논문의 실험과 같은 수준으로 최대 허용 cusp 높이를 제한하고, feed rate를 일정하게 유지하여 이계정의 방법으로 황삭경로를 시뮬레이션한 결과, 순절삭경로 길이는 3891.55mm(458.58*2 + 546.4 + 507.59 + 43.88 + 159.15 + 529.59 + 485.03 + 370.28 + 332.47)로 계산되었다.

본 실험에 대한 순절삭 공구 경로 길이는 <표 1>에 주어진 것과 같이 총 길이 3464.35mm이며 그 절삭 과정은 그림 13과 같다. 실제 가공 시간은 금속이송 등의 경로에 의해서 더 오래 걸리지만 금속이송은 feed 속도에 비해서 고속으로 이동

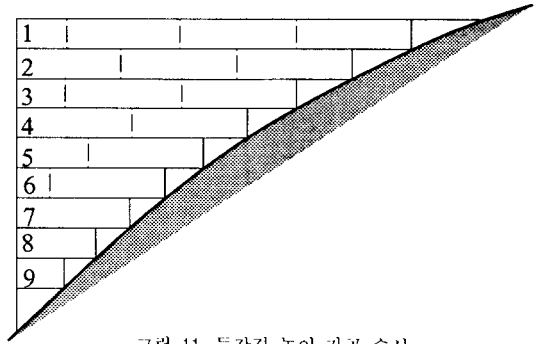


그림 11. 등간격 높이 가공 순서

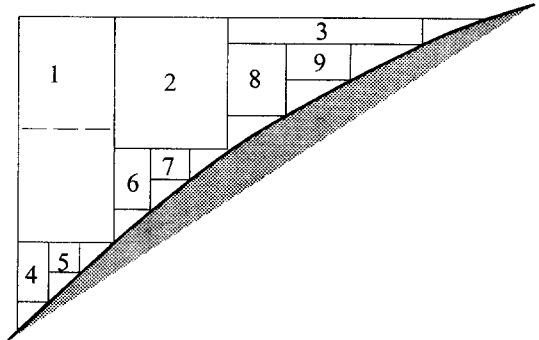


그림 12. 이계정의 알고리즘을 이용한 가공 순서

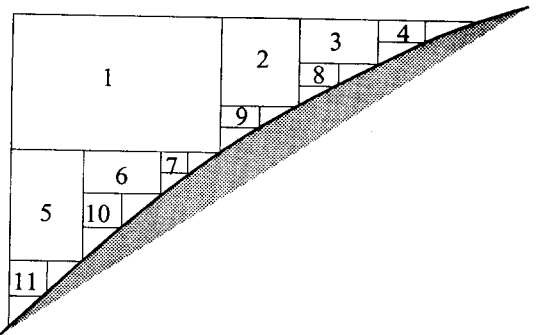


그림 13. 이분법 높이 결정 알고리즘에 의한 가공 순서

하기때문에 전체의 절삭시간에서 차지하는 부분이 매우 작으므로 실제 가공시간은 순절삭 시간과 거의 같다고 하여 무시한다.

본 논문의 알고리즘은 일반적인 상용 프로그램을 사용하는 경로 길이(5446.8mm)와 비교하면 34.4%의 경로 길이의 감소를 얻을 수 있으며 이계정의 알고리즘(경로 길이 3891.55mm)에 비하면 11.0%의 경로 길이의 감소를 얻을 수 있다. 이와 같은 비교로부터 본 논문의 알고리즘은 상당히 효율적인 것을 확인할 수 있다.

이 알고리즘을 실제 가공에 적용할 때 생기는 제한조건으로 공작기계의 성능에 따른 MRR의 한계와 전삭력의 제한을 들 수 있다. 그리고 공작물의 형상에 따라서 공작기계의 tool holder와의 간섭이 생길 수 있다. 공구의 최대 절삭 깊이를 제한함으로써 MRR과 전삭력을 공작기계의 한계 범위 내에 들어가도록 할 수 있다. 또한 본 논문의 알고리즘에서 사용한 것과 같이 이송 속도를 일정하게 유지할 경우에 MRR이 변동

되어 최대의 MRR을 유지할 수 없지만, 절삭 깊이와 절삭 폭에 따라 이송 속도를 변화시키는 알고리즘을 추가한다면 최대의 MRR을 유지시킬 수 있을 것이다.

4. 결론

금형을 NC가공을 할 때 황삭가공에서 소요되는 시간을 충분히 줄여 생산성을 향상을 시키기 위한 효율적인 황삭 경로 생성 알고리즘을 개발한 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 본 논문의 알고리즘은 금속제거율을 최대로 유지하면서 허용 최대 cusp 높이로 제한시킴으로써 널리 사용되는 방법과 이미 개발된 다른 황삭 알고리즘보다 가공 시간을 단축시켰으며 이것은 생산성의 향상을 의미한다.

(2) 직경이 큰 공구에 의해 간섭이 일어나는 곡면도 큰 공구로 절삭을 완료한 후 직경이 작은 공구로 교체하여 간섭 부분만을 다시 2차 절삭을 한다면 더욱 효과적인 황삭 가공을 수행할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] Li, H., Dong, Z., and Vickers, G.W., "Optimal Tool Path Pattern Identification for Sculptured Part Machining Using Fuzzy Pattern Analysis"
- [2] Lee, Y.S., Choi, B.K., and Chang, T.C., 1992, "Cut distribution and cutter selecting for sculptured surface cavity machining," *INT. J. PROD. RES.*, vol. 30, No. 6, pp. 1447-1470.
- [3] Suzuki, H., Yamazaki, K., Hosm, T., and Futagawa, M., 1987, "Real Time Numerical Control System for Metal Molds and Dies Machining," *JSPE*, vol. 53, No. 8, pp. 1189-1194.
- [4] Barnhill, R.E., and Kersey, S.N., 1990, "A marching method for parametric surface/surface intersection," *CAGD*, vol. 7, pp. 257-280.
- [5] Choi, B.K., and Jun, C.S., 1989, "Ball-end cutter interference avoidance in NC machining of sculptured surfaces," *CAD*, vol. 21, No. 6, pp. 371-378.
- [6] Ravani, B., and Ku, T.S., , 1991, "Bertrand offsets of ruled and developable surfaces," *CAD*, vol. 23, No. 2, pp. 145-152.
- [7] Pham, B., 1992, "Offset curves and surfaces: a brief survey," *CAD*, vol. 24, No. 4, pp. 223-229.
- [8] Kjellander , J.A.P., 1983, "Smoothing of bicubic parametric surfaces," *CAD*, vol. 15, No. 5, pp. 288-293.
- [9] Faux, I.D., Pratt, M.J., 1981, *Computational Geometry for Design and Manufacture*, Ellis Horwood Publishers.
- [10] Wang, H., Chang, H., Wysk, R.A., and Chandawarkar, A., 1987, "On the Efficiency of NC Tool Path Planning for Face Milling Operations," *Trans. of the ASME, Journal of Eng. for Ind.*, vol. 109, No. 11, pp. 370-376.
- [11] 최병규, 1991, CAM 시스템과 CNC 절삭가공, 청문각.
- [12] 중소기업진흥공단, 1986, 밀링 가공 기술, 중소기업진흥공단.
- [13] 이재정, 1992, 절삭성을 고려한 자유곡면 황삭 가공 경로의 생성 기법에 관한 연구, 서울대학교 기계설계학과 석사 학위논문.