

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.9.761

## 황삭 가공을 위한 최적 직선 평행 공구경로 생성

김 현 철<sup>†</sup>

(2008년 5월 28일 접수, 2008년 7월 30일 수정, 2008년 8월 1일 심사완료)

### An Optimized Direction Parallel Tool Path Generation for Rough Machining

Hyun-Chul Kim

**Key Words :** Rough Machining(황삭), Direction Parallel Tool Path(직선 평행 공구경로), Constant Cutting Force(일정 절삭력), Material Removal Rate(소재 제거량)

#### Abstract

The majority of mechanical parts are manufactured by milling machines. Hence, geometrically efficient algorithms for tool path generation and physical considerations for better machining productivity with guarantee of machining safety are the most important issues in milling tasks. In this paper, an optimized path generation algorithm for direction parallel milling which is commonly used in the roughing stage is presented.

First of all, a geometrically efficient tool path generation algorithm using an intersection points-graph is introduced. Although the direction parallel tool path obtained from geometric information have been successful to make desirable shape, it seldom consider physical process concerns like cutting forces and chatters. In order to cope with these problems, an optimized tool path, which maintains constant MRR in order to achieve constant cutting forces and to avoid chatter vibrations at all time, is introduced and the result is verified. Additional tool path segments are appended to the basic tool path by using a pixel based simulation technique. The algorithm has been implemented for two dimensional contiguous end milling operations, and cutting tests are conducted by measuring spindle current, which reflects machining situations, to verify the significance of the proposed method.

#### 1. 서론

절삭가공은 전통적인 기계가공 방법으로 대부분의 기계업체에서 이용하는 모든 가공방법 중 70 ~ 80% 이상의 비중을 차지하고 있다. 이러한 기계가공 중 Harenbrock<sup>(1)</sup>에 따르면, 기계부품의 거의 80% 이상이 황삭 가공 알고리즘인 2.5D 밀링가공을 적용함으로써 가공할 수 있는데, 이는 많은 수의 기계부품이 2.5D 이고, 더 복잡한 부품들은 2.5D 황삭 후에 3D-5D 정삭을 하기 때문이다. 그러므로 복잡한 황삭 가공을 위한 2.5D

공구경로 생성 알고리즘들은 기계가공에서 근본적으로 중요한 요소이다.

황삭 가공은 Z 축에 평행한 높이가 다른 각각의 가공 면들에서 독립적으로 이루어지므로, 가공공간의 차원을 2D 로 줄일 수 있다. 결과적으로 황삭 가공의 성과는 2D 평면가공을 위한 효율적인 알고리즘들에 기인한다. 2D 평면가공에서 가장 많이 쓰이는 공구경로는 Fig. 1 과 같이 크게 윤곽 평행 공구경로(contour parallel tool path)와 직선 평행 공구경로(direction parallel tool path)로 나눌 수 있다. 윤곽 평행 공구경로는 주어진 외곽 경계곡선의 순차적인 오프셋으로 얻어질 수 있으므로, 효율적인 2 차원 오프셋 알고리즘이 필수적이며 이와 관련된 많은 연구들이 수행되어 왔다.<sup>(2-5)</sup> 직선 평행 공구경로는 평행한

<sup>†</sup> 회원, 인제대학교 기계자동차공학부  
고안전 차량 핵심기술 연구소  
E-mail : mechkhc@inje.ac.kr  
TEL : (055)320-3988 FAX : (055)324-1723

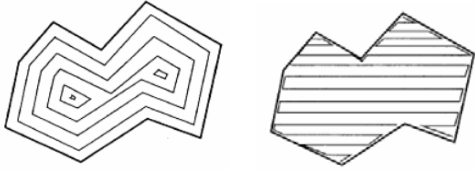


Fig. 1 Contour parallel and direction parallel tool path

직선 패턴들로 경계곡선 내부를 채우는 것으로 지그재그 공구경로로 알려져 있으며, 윤곽 평행 공구경로 생성에 비해서 간단하고 안정적이다.

본 논문에서는 최적의 직선 평행 공구경로 생성을 위한 기하학적인 알고리즘뿐만 아니라 가공상의 문제도 함께 고려한 새로운 알고리즘들을 제안한다.

직선 평행 공구경로 생성에 관한 기존의 연구는 크게 두 가지로 살펴볼 수 있다. 첫째는 최적의 가공 각도(optimal inclination angle)를 찾는 것이고, 둘째는 주어진 기준선(reference line)과 평행한 공구경로 요소(tool path element)들을 계산하는 것이다. 최적의 가공 각도는 일반적으로 공구경로 요소를 최소화하는 방향으로 결정되는데, 이는 공구경로 요소가 적을수록 평균적으로 하나의 가공요소의 길이를 증가시킬 수 있고, 공구의 에어컷을 최소로 할 수 있기 때문이다. 이와 관련된 연구들은 주로 공구의 뜨는 횟수를 최소화하는 방향으로 연구가 진행되어 왔다.<sup>(6-10)</sup> 하지만, 아직까지 최적의 결과를 찾는 알고리즘은 없는 상태이고, 기존의 연구들은 특정 형상에 대해서는 최적의 결과를 찾지 못하게 된다. 뿐만 아니라 실제 현장에서의 가공경로 각도는 작업자가 정하는 것이 보통이며, 이러한 방법이 가공의 특성을 살릴 수 있는 최적의 방법으로 여겨지고 있어서, 최적의 가공경로 각도를 찾는 문제는 직선 평행 가공경로 생성에서 중요하게 고려될 대상이 아니다. 주어진 기준선으로부터 공구경로 요소를 계산하는 연구의 초점은 얼마나 빨리 경계곡선과의 교점들을 찾는가와 이를 저장하고 연결하기 위한 자료구조를 어떻게 정의하느냐 하는 문제이다. 이와 같이 기존 연구의 대부분은 기하학적인 공구경로 생성방법을 대상으로 하고 있으며, 가공성 향상 방안과 같은 기술적인 문제 등에 대한 연구는 활발하게 수행되지 않았다.

비록 기하학적인 형상으로부터 얻어진 공구경로가 원하는 형상을 생성할 수 있으나 실제 가공 시에는 많은 문제점을 야기시키므로, 기하학적인 문제뿐만

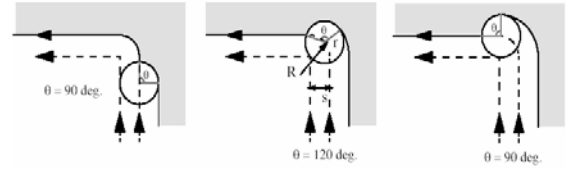


Fig. 2 Varying engagement arising

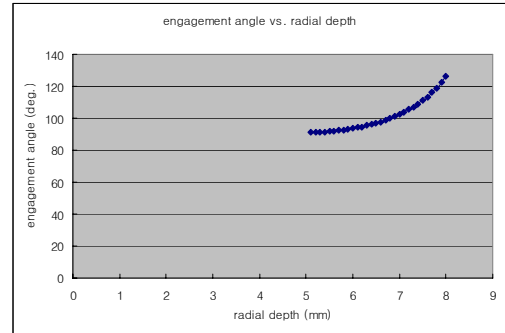


Fig. 3 Engagement angle vs. radial depth

아니라 가공 특성도 공구경로 생성 시에 반드시 고려되어야만, 가공의 효율을 최대한으로 높일 수 있다.

Trusty<sup>(11)</sup>는 직선 경로에서는 반경 방향 절입각(radial engagement)이 일정하지만, 코너 부위에서는 Fig. 2 와 같이 반경 방향 절입각의 증가로 채터 등이 발생할 수 있다고 지적했다. 2D 밀링에서는 공구와 소재(workpiece)사이의 반경 방향 절입각과 반경 방향 절삭 깊이는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\theta_{\max} = \pi - a \cos \left( \frac{2r^2 + 2R(s-r) - s^2}{2r(R-r)} \right) \quad (12) \quad (1)$$

Fig. 3 은 지름 10mm 인 공구의 반경 방향 절삭 깊이와 절입각 사이의 관계를 도시한 그래프로 절입각 증가는 반경 방향 절삭 깊이의 증가를 의미한다.

이와 같은 반경 방향 절삭 깊이의 변화는 기하학적인 형상으로부터 얻어진 공구경로에서는 피할 수 없는 현상이다. 이와 같이 기하학적인 정보만을 이용해 생성한 공구경로는 반경 방향 절입각의 변화가 크고, 이러한 반경 방향 절입각 증가에 의한 반경 방향 절삭 깊이의 증가는 절삭력(cutting force)의 증가를 야기한다. 절삭력의 증가는 공구의 휨(deflection), 채터 심지어는 공구의 파손(breakage)을 야기시키므로, 물리적인 관점에서 절삭력을 일정하게 하는 공구경로가 중요하다.

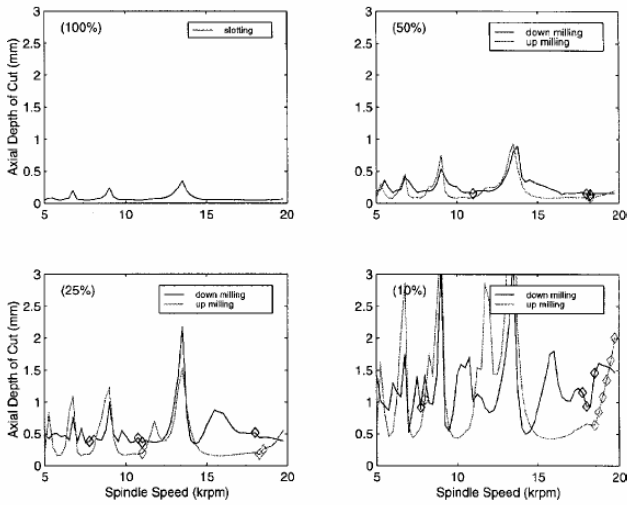


Fig. 4 Stability lobes

절삭력뿐만 아니라 가공의 안정성 측면에서는 *Thusty*<sup>(11)</sup>와 *Smith*<sup>(13)</sup>가 지적했듯이 축 방향 절삭 깊이(axial depth)와 반경 방향 절삭 깊이가 중요한 요소로서, 이중 축 방향 절삭 깊이는 황삭 가공에서 일정하므로 반경 방향 절삭 깊이가 가공의 안정성을 결정하는 주요 인자로 작용한다. *Zhao* 는 안정한 가공영역을 구분하기 위해서 주어진 반경 방향 절삭 깊이에 대해 축 방향 절삭 깊이와 공구 회전 속도(spindle speed)의 함수로 안정화 선도(stability lobe diagram)를 Fig. 4 와 같이 구하였다.<sup>(14)</sup> Fig. 4 의 일련의 안정화 선도로부터 안정적인 가공영역이 반경 방향 절삭 깊이가 10%에서 100%로 증가함에 따라 급격히 변하는 것을 볼 수 있다. 따라서 주어진 공구경로에 대해서 안정화 선도를 이용해 채터가 없는 안정적인 가공을 이루기 위해서는 반경 방향 절삭 깊이의 변화가 없는 일정한 절입각을 갖는 공구경로가 필요하다.

하지만, 이를 해결 하기 위한 기존 연구의 대부분은 절삭력 모델을 세워서 절삭력을 예측하고, 가공 시 발생하는 절삭력이 주어진 범위를 넘지 않도록 공구의 이송속도를 조절하는 방법을 채택하였다.<sup>(15-17)</sup> 이는 가공에 영향을 미치는 많은 요소들 중 이송속도가 가장 제어하기 쉬운 요소이기 때문이다. 기계가공에서 절삭력은 식 (2)와 같이 비절삭 에너지(specific cutting energy), 절삭 폭, 절삭 깊이의 곱으로 나타낼 수 있다. 그러나 비절삭 에너지는 절삭 깊이와 속도에 따라 변하므로 절삭력을 정확히 계산하는 것은 어렵다.

$$F = kbt \tag{2}$$

( $F$  : 절삭력,  $k$  : 비절삭 에너지,  $b$  : 절삭 폭,  $t$  : 절삭 깊이)

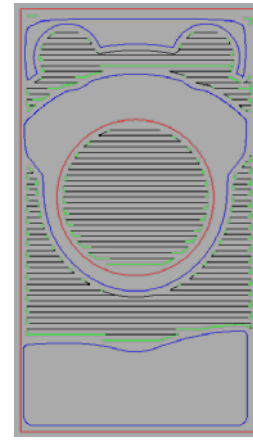


Fig. 5 Overloaded paths that are indicated in green lines

그리고 절삭력을 일정하게 이송속도를 조절한다 할지라도 가공 안정성의 중요한 요소인 반경 방향 절삭 깊이는 공구경로의 수정 없이 이송속도의 조절로는 불가능하다. 따라서 절삭력과 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 하기 위한 근본적인 해결책은 공구경로 생성 시에 이러한 문제들을 고려하는 것이지만, 이에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았고, 윤곽 평행 공구경로의 경우 일부 연구들이 생성된 공구경로의 오목한 코너 부위에 추가적인 공구경로를 삽입하여 이 문제를 해결해 보고자 하였다.<sup>(18,19)</sup>

직선 평행 공구경로의 경우는 Fig. 5 에 나타난 것처럼, 기준선에 평행한 공구경로들을 연결하는 과정뿐 아니라 가공 영역의 기하학적인 형상에 의해서 반경 방향 절삭 깊이가 변하므로 이러한 모든 영역에 추가적인 공구경로의 삽입이 필요하나, 이송속도 조절 이외에 공구경로를 수정해 이 문제를 해결해 보고자 하는 어떤 연구도 없었다.

위의 사항들을 정리해보면 황삭 가공에 있어서 절삭력뿐만 아니라 가공 안정성의 가장 중요한 요소인 반경 방향 절삭 깊이도 일정하게 유지할 수 있는 공구경로가 실제 가공의 관점에서 반드시 필요함을 알 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 최적의 직선 평행 공구경로를 위해 기하학적인 알고리즘뿐만 아니라 이로부터 생성된 직선 평행 공구경로에 추가적인 공구경로를 삽입하는 방법을 제안한다.

## 2. 직선 평행 공구경로 생성

본 논문에서 제안하는 기하학적인 직선 평행 공구경로 생성은 크게 세 가지 절차를 갖는다.

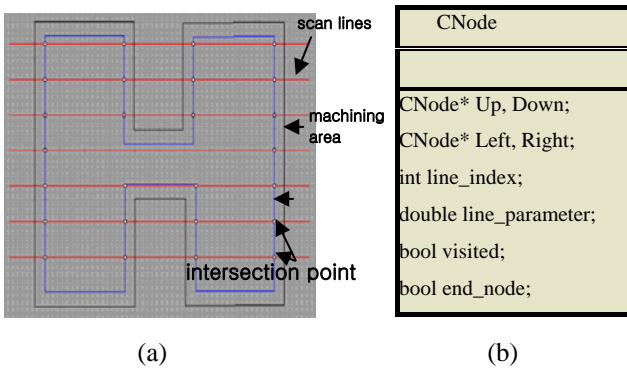


Fig. 6 Intersection points and data structure CNode class

1. 주사선들과 입력 프로파일의 교점들 계산
2. 교점 그래프(intersection points graph)의 생성
3. 그래프 이동(graph traversal)을 통한 공구경로 생성

이 중 주사선들과 입력 프로파일의 교점 계산은 계산 시간의 효율을 위하여 그리드 방법<sup>(20)</sup>을 이용하여 계산하였다.

2.1 교점 그래프 생성

Fig. 6(a)에서처럼, 주사선들은 가공 영역 위에 일정한 경로 간격(path interval or pick feed)을 가지고 놓이게 되고, 가장 위의 주사선부터 가장 아래의 주사선까지 오프셋 선과의 교점들이 계산 되면, 이들을 저장 할 수 있는 자료 구조(data structure)가 필요하다. 이를 위해서 Fig. 6(b)와 같은 자료 구조를 갖는 CNode 라는 클래스(class)를 정의한다. 각 노드(node)들은 상하 좌우 노드를 가리킬 수 있는 포인터(pointer) 변수들을 갖고, 교점을 나타내기 위한 입력선의 순서(index)와 파라미터(parameter) 값을 갖는다. 또한, 그래프 이동 시에 필요한 방문여부를 표시할 수 있는 변수와 노드들을 연결하여 교점 그래프를 생성할 때 양 끝의 노드임을 표시할 수 있는 변수를 가진다. 교점 그래프의 생성은 교점의 노드들을 서로 연결하여 그래프를 생성하는 것으로 다음의 절차를 통해 수행된다.

1. 각 주사선과 오프셋 선과의 교점들 중 양 끝점을 표시 (Fig. 7(a))
2. 모든 짝수 번째 교점을 홀수 번째 교점과 연결 (좌우 연결, Fig. 7(b))

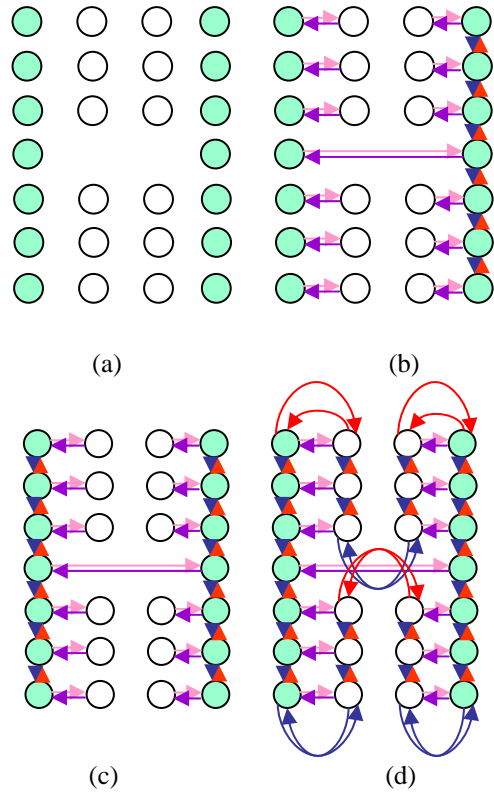


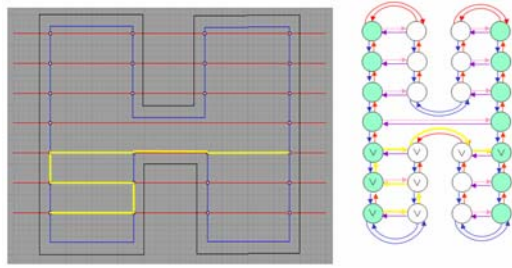
Fig. 7 Intersection points graph construction

3. 끝점의 노드들을 서로 연결 (상하 연결, Fig. 7(c))
4. 오프셋 선을 따라서 만나는 첫 번째 교점과 연결 (상하 연결, Fig. 7(d))

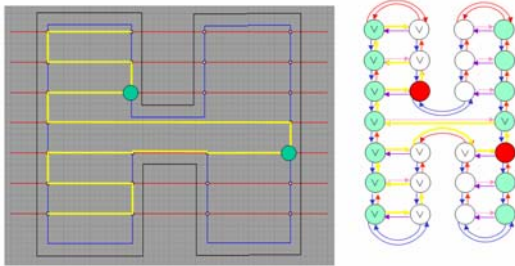
Fig. 6(a)의 형상에 대해서 교점 그래프 생성을 위한 위의 네 가지 과정이 Fig. 7 에 순서대로 나타나 있다.

2.2 그래프 이동을 통한 공구 경로 생성

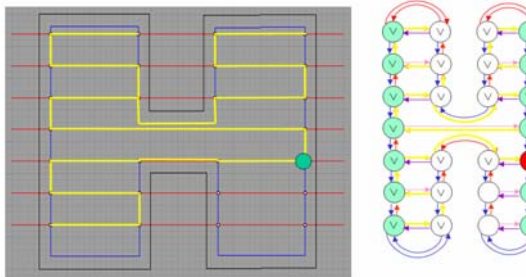
직선 평행 공구경로 생성은 교점 그래프 이동(graph traversal)을 통해 구현할 수 있다. 직선 평행 공구경로 생성에서 중요한 요소는 공구의 진출입을 최소로 하여 가공 시간을 단축 할 수 있는 공구경로 생성이다. 이를 위해서 교점 그래프를 이동할 때 가능한 하나의 경로(path)로 연결하고, 반드시 공구가 떠서 이동해야 할 경우만 공구를 상승시킨다. 또한, 상승한 공구가 다른 가공 지점으로 진입할 때, 이미 가공된 영역으로 진입할 수 있도록 스택을 이용하였다. 위와 같은 사항들이 고려된 공구경로 생성을 위한 그래프 이동 알고리즘은 다음의 순서와 같다.



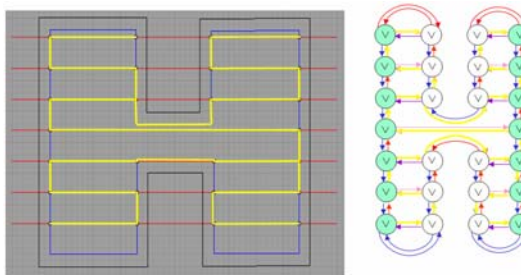
(a)



(b)



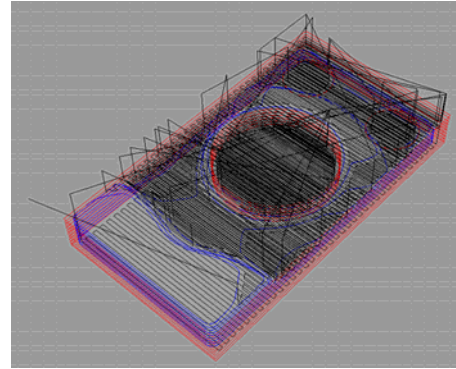
(c)



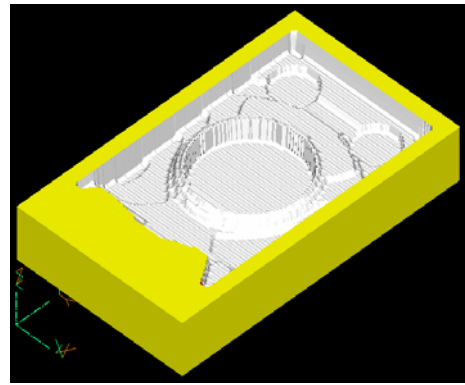
(d)

**Fig. 8** Direction parallel path generation through graph traversal

1. 시작 노드와 진행 방향 설정
2. 현재 노드를 방문한 노드로 표시



**Fig. 9** Direction parallel tool path of a speaker model



**Fig. 10** Simulation result of direction parallel path

3. 주어진 좌우 방향으로 이동
4. 주어진 좌우 방향으로 이동할 노드가 없으면, 주어진 상하 방향으로 이동하고 이때 위나 아래에 방문하지 않은 노드가 있으면 스택에 방문하지 않은 노드와 진행 방향 저장
5. 더 이상 상하 좌우로 이동할 노드가 없을 때, 스택을 비울 때까지 스택의 맨 위의 노드를 꺼내어 위 1-4의 과정을 반복

위의 알고리즘에 대한 전체적인 절차는 Fig. 8 에 나타나 있다. 오른쪽 위를 시작 방향으로 하여 그래프를 이동하면서 공구경로를 생성하는 과정이 Fig. 8(a)에 나타나 있으며, 다음 노드로 이동할 때 아래 노드가 방문되지 않았으므로 스택에 저장하고 계속 공구경로를 생성한 과정은 Fig. 8(b)에 나타나 있다. 그래프의 빨간색 노드들은 스택에 저장된 노드들이다. 이후에 더 이상 진행할 노드가 없어서 스택에 저장된 노드를 꺼내어 알고리즘을 계속 진행한 과정은



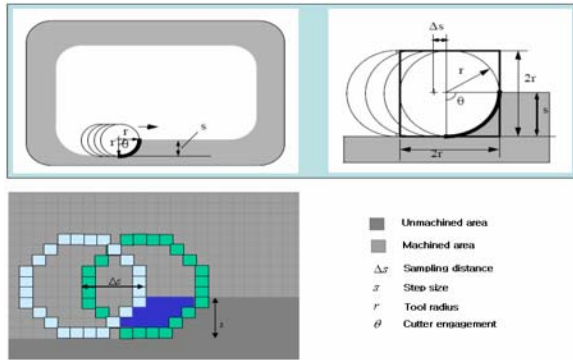


Fig. 11 Pixel based MRR simulation

Fig. 8(c), (d)에 나타나 있다. 지금까지의 알고리즘들을 종합하여 스피커 모델에 대해서 직선 평행 공구경로를 생성하고 공구경로를 표현한 결과는 Fig. 9 에 나타나 있고, 이러한 공구경로로 실 가공 전에 Tool 2000 이라는 가공 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 NC 코드를 생성 하고 가공 후 형상을 시뮬레이션 한 결과는 Fig. 10 과 같다.

### 3. 물리적인 고려

#### 3.1 일정 MRR 을 위한 공구경로 수정

황삭 가공의 경우에는 축 방향 절삭 깊이가 일정하므로, 절삭력과 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 하기 위해서는 소재 제거량 MRR 을 일정하게 하는 공구경로 생성이 필요하다. 식 (2)를 다시 살펴보면, 이송속도의 조절 없이 일정한 이송으로 가공할 경우, 일정한 MRR 은 반경 방향 절삭 깊이가 일정하다는 것을 의미한다. 또한 반경 방향 절삭 깊이가 일정하면 비절삭 에너지가 일정해 지므로, 절삭력도 일정하게 유지된다. 따라서 절삭력과 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 유지하는 공구경로는 황삭 가공에서 MRR 을 일정하게 하는 공구경로이다.

따라서 본 연구에서는 기하학적인 형상으로부터 계산한 공구경로를 MRR 이 일정하도록 주어진 공구경로를 수정하는 방법을 제시한다. 임의의 가공경로에 대해서 해석적인 방법(analytic method)으로 추가적인 경로 삽입이 불가능하기 때문에, 가공 전 영역을 픽셀 맵(pixel map)으로 구성하고 시뮬레이션 접근법을 사용하여 추가적인 공구경로를 삽입하였다.

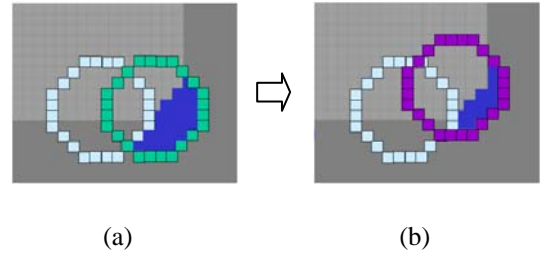


Fig. 12 Pixel based tool path modification

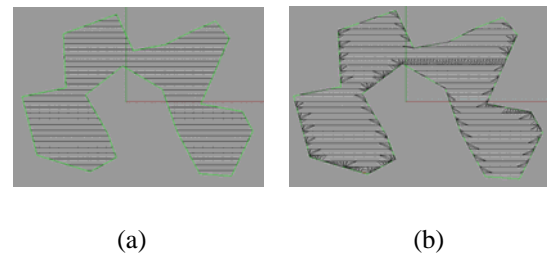


Fig. 13 Original path and optimum path

#### 3.2 픽셀 맵을 이용한 MRR 시뮬레이션

Fig. 11 은 MRR 계산을 위한 픽셀 맵 시뮬레이션 절차를 보여주고 있다. 이 그림에서 짙은 회색 픽셀들은 아직 가공이 되지 않은 미가공 영역을 나타내고, 옅은 회색 픽셀들은 가공이 된 영역을 나타낸다. 그림에서와 같이 공구 역시 픽셀로 구성되고, 공구가 샘플링 거리(sampling distance)  $\Delta s$  마다 가공한 MRR 은 그림에서 공구가 이동하여 생긴 영역 안의 픽셀들의 개수로 계산할 수 있다. 주어진 경로간격(step size)과 샘플링 거리에서 기준이 되는 MRR 에 해당하는 픽셀 개수는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$reference\_MRR = \left( \frac{\Delta s}{pixel\_resolution} \right) \times \left( \frac{s}{pixel\_resolution} \right)$$

#### 3.3 MRR 시뮬레이션을 통한 공구경로 삽입

MRR 시뮬레이션을 통하여 기준이 되는 MRR 보다 과도한 부하가 걸리는 Fig. 12(a)와 같은 공구경로에 대해서 공구의 이동 방향을 변경하여 Fig. 12(b)와 같이 추가적인 공구경로를 삽입한다. 이와 같은 방법으로 픽셀 맵을 이용한 시뮬레이션을 통하여 Fig. 13(a) 의 직선 평행 공구경로에 추가적인 공구경로를 삽입한 결과는 Fig. 13(b)에 보여 진다. 이와 같은 시뮬레이션 방법을 통하여 추가된 공구경로는 샘플링 거리마다 미소한 직선들로 이루어진다. 따라서 실 가공 시에 많은 가감속으로 인한 가공 시간

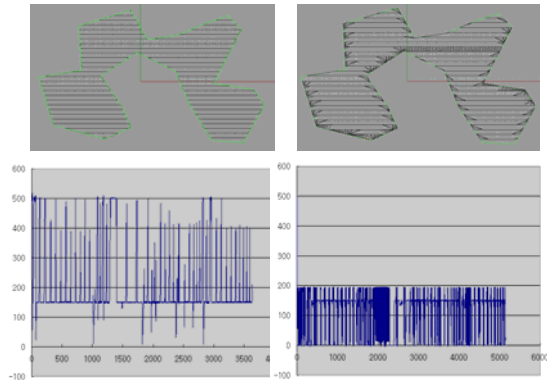


Fig. 14 MRR simulation result

저하를 가져올 수 있으므로, 미소한 직선으로 이루어진 추가적인 공구경로에 대해서 원호 보간(circular interpolation)을 통하여 가감속 시간을 감소시켰다.

Fig. 14 는 직선 평행 공구경로에 대해서 기하학적으로 구한 공구경로와 시뮬레이션 방법을 이용하여 최적화한 공구경로에 대하여 MRR 을 계산한 결과이다. 추가적인 공구경로의 삽입으로 전 가공영역에서 일정한 MRR 을 유지할 수 있는 최적의 공구경로의 경우 MRR 의 변화가 심하지 않다는 것을 확인 할 수 있다.

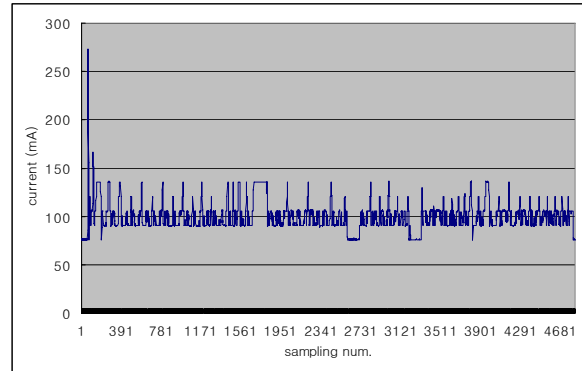
#### 4. 검증 실험

##### 4.1 실험 방법

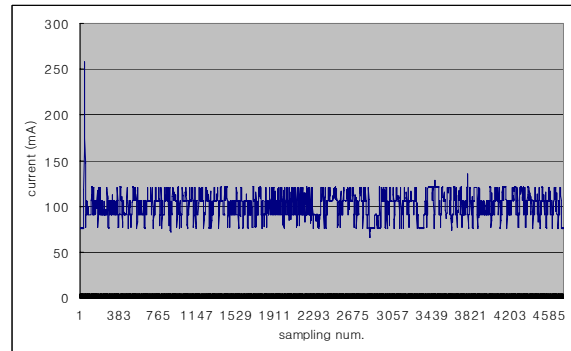
실 가공 시에 전 가공영역에서 절삭력의 변동이 적은 안정적인 가공경로의 검증을 위하여 동작기계의 주축 전류를 측정하였다. 여러 연구자들에 의해 주축 전류와 절삭력이 1 차적인 관계로 알려졌고, 실험적인 결과 또한 위의 관계를 입증한다.<sup>(21)</sup> 주축 전류와 MRR 의 관계 또한 기존의 연구에 의해 강한 1 차식의 관계라는 것이 알려졌고 다양한 실험을 통하여 검증되었다.<sup>(22)</sup> 이와 같이 주축 전류가 여러 가공 상태를 나타내므로, 주축 전류 모니터링 방법을 통하여 절삭력 및 가공의 안정성을 검증하였다. 가공 실험은 대우 수평형 머시닝 센터(AL-40, Fanuc 0M 탑재)를 사용하였고, 가공조건으로 반경 방향 절삭 깊이 3mm, 축 방향 절삭 깊이 0.5mm, 주축 속도 2000rpm, 10φ 초경 코팅 플랫 엔드밀, 피삭재 SM45C 를 사용하였다.

##### 4.2 결과 및 고찰

Fig. 15 는 사이즈(size) 120mm×85mm 의 Fig. 13



(a) Machining time : 4 min 5sec(F500)



(b) Machining time : 3min 40sec(F1000)

Fig. 15 Experiment results

모델에 대한 기하학적인 정보로부터 구한 공구경로와 전 가공 영역에서 추가적인 공구경로를 삽입한 경로에 대한 실험 결과를 나타낸다.

이 실험 결과로부터 기하학적인 정보로만 구한 공구경로는 절삭력의 변동 폭이 크고, 추가적인 공구경로를 삽입하여 최적화한 공구경로의 경우 절삭력의 변동폭이 감소하여 보다 안정적인 가공이 이루어진다는 것을 확인 할 수 있다. 추가적인 공구경로 삽입의 경우 가공거리의 증가로 인하여 같은 이송속도에서는 원래의 공구경로보다 가공시간이 많이 걸리게 된다. 하지만, 원래의 공구경로를 실제 현장에서 가공할 때는 절삭력의 변동이 심하여, 최대절삭력에 맞추어 이송속도를 줄여서 가공을 하므로, 최적화한 공구경로는 절삭력의 변동이 심하지 않기 때문에 그만큼 이송속도를 증가시켜 가공을 할 수 있고, 실제 이송속도를 증가시켜 실험한 결과를 살펴보면 원래의 공구경로와 비교하여 절삭력의 변동폭이 20%가까이 감소하여

보다 안정적인 가공이 이루어질 뿐 아니라 가공시간도 약 10%가량 단축 할 수 있다는 것을 확인 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 황삭 가공을 위한 직선 평행 공구경로 생성을 위해 기하 알고리즘을 개발하고, 또한 실제 가공의 기술적인 요구 사항들을 고려하여 생성된 공구경로를 수정하는 방법을 제시함으로써, 공구경로 생성의 효율화 및 고품질화를 꾀하였다.

기하학적인 공구경로 생성을 위해서 공구경로 요소들을 체계적으로 저장할 수 있는 교점 그래프를 제안하여 활용하였고 공구경로는 가공상의 기술적인 사항들을 고려하여 교점 그래프를 추적함으로써 수행된다.

또한, 기하학적으로 구한 공구경로가 실제 가공에서 발생할 수 있는 문제점들을 지적하고 이를 해결할 수 있는 방법을 제안하여 구현하였으며, 가공실험을 통하여 검증하였다. 공구의 파손과 가공 안정성을 위해서 절삭력과 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 하기 위한 일정 MRR 공구경로의 필요성에 대해서 논하였고, 전체 가공영역에서 MRR 을 일정하게 하기 위한 추가적인 공구경로 삽입을 픽셀 맵 기반의 시뮬레이션 방법을 사용해 구현하였으며, 실제 가공실험을 통하여 절삭력의 변동 폭을 줄여 안정적인 가공이 이루어질 수 있음을 검증하였다.

## 후 기

이 논문은 2005 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.” (KRF-2005-214-D00230)

## 참고문헌

- (1) Harenbrock, D., 1980, “The Connection of CAD and CAM by Means of the Program Package PROREN1/NC,” Technical Report, Inst. fur Konstruktionstechnik, Ruhr-Universitat Bochum, Bochum, FRG.
- (2) Bruckner, L. K., 1982, “Geometric Algorithms for 2.5D Roughing Process of Sculptured Surfaces,” In Proc. Joint Anglo-Hungarian Seminar on Computer-Aided Geometric Design, Budapest, Hungary.
- (3) Hansen, A. and Arbab, F., 1992, “An Algorithm for Generating NC Tool Path for Arbitrary Shaped Pockets with Islands,” *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 11, No. 2, pp. 152~182.
- (4) Persson, H., 1978, “NC Machining of Arbitrary Shaped Pockets,” *Computer-Aided Design*, Vol. 10, No. 3, pp. 169~174.
- (5) Jeong, J. and Kim, K., 1999, “Generating Tool Paths for Free-Form Pocket Machining Using z-Buffer-Based Voronoi Diagrams,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 182~187.
- (6) Held, M., 1991, “A Geometry-Based Investigation of the Tool Path Generation for Zigzag Pocket Machining,” *Visual Computer*, Vol. 7, pp. 296~308.
- (7) Held, M., 1991, *On the Computational Geometry of Pocket Machining*, Springer-Verlag.
- (8) Tang, K., Chou, S. and Chen, L., 1998, “An Algorithm for Reducing Tool Retraction in Zigzag Pocket Machining,” *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 123~129.
- (9) Park, S. C. and Choi, B. K., 2000, “Tool-Path Planning for Direction-Parallel Area Milling,” *Computer-Aided Design*, Vol. 32, No. 1, pp. 17~25.
- (10) Manuel, M. and Rodriguez, C. A., 2003, “Influence of Tool Path Strategy on the Cycle Time of High-Speed Milling,” *Computer-Aided Design*, Vol. 35, No. 4, pp. 395~401.
- (11) Tlustý, J., Smith, S. and Zamudio, C., 1990, “New NC Routines for Quality in Milling,” *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 517~521.
- (12) Kramer, T. R., 1992, “Pocket Milling with Tool Engagement Detection,” *J. Manufacturing Sys.*, Vol. 11, No. 2, pp. 114~123.
- (13) Smith, S., Cheng, E. and Zamudio, C., 1991, “Computer-Aided Generation of Optimum Chatter-Free Pockets,” Vol. 28, No. 1/2, pp. 275~283.
- (14) Zhao, M. X. and Balachandran, B., 2001, “Dynamics and Stability of Milling Process,” *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 10/13, pp. 2233~2248.
- (15) Cho, H. D. and Yang, M. Y., 1991, “Cornering and Feed-Rate Determination for Constant Max. Resultant Cutting Force with Ball-End Mill,” *KSME*, Vol. 15, No. 5, pp. 1572~1586.
- (16) Yazar, Z., Koch, K. F., Merrick, T. and Altan, T., 1994, “Feed Rate Optimization Based on Cutting Force Calculations in 3-Axis Milling of Dies and Molds with Sculptured Surfaces,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34,



- No. 3, pp. 365~377.
- (17)Bae, S. H., Ko, K., Kim, B. H. and Choi, B. K., 2003, "Automatic Feedrate Adjustment for Pocket Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 35, No. 5, pp. 495~500.
- (18)Iwabe, H., Fujii, Y., Saito, K. and Kisinami, T., 1989, "Study on Corner Cut by End Mill Analysis of Cutting Mechanism and New Cutting Method at Inside Corner," *Journal of Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 55, No. 5, pp. 841~846.
- (19)Tsai, M. D., Takata, S., Inui, M., Kimura, F. and Sata, T., 1991, "Operation Planning Based on Cutting Process Models," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp. 95~98.
- (20)Lee, D. Y., Kim, S. J., Lee, S. G. and Yang, M. Y., 2003, "Incomplete Mesh Based Tool Path Generation," *Proceeding of the SMPE Spring Conference 2003*, pp. 844~847.
- (21)Kim, G. D., Lee, S. I., Kwon, W. T. and Chu, C. N., 1996, "Cutting Force Estimation and Feedrate Adaptive Control Using Spindle Motor Current," *Proceedings of Korean Society of Precision Engineering*, pp. 150~156.
- (22)Lee, K. J., Lee, T. M., Kim, S. J. and Yang, M. Y., 2004, "Hybrid Approach to High-Performance Machining with TurboMill System," *Proceedings of the International Conference on High Speed Machining*, pp. 215~219.