

최적 2.5D 윤곽 평행 공구경로

김현철[#], 양민양^{*}

An Optimum 2.5D Contour Parallel Tool Path

Hyun Chul Kim[#] and Min Yang Yang^{*}

ABSTRACT

Although the conventional contour parallel tool path obtained from geometric information has been successful to make desirable shape, it seldom consider physical process concerns like cutting forces and chatters. In this paper, an optimized contour parallel path, which maintains constant MRR(material removal rates) at all time, is introduced and the result is verified. The optimized tool path is based on a conventional contour parallel tool path. Additional tool path segments are appended to the basic tool path in order to achieve constant cutting forces and to avoid chatter vibrations at the entire machining area. The algorithm has been implemented for two dimensional contiguous end milling operations with flat end mills, and cutting tests were conducted to verify the significance of the proposed method.

Key Words : 2.5D Milling (2.5D 가공), Contour parallel tool path (윤곽 평행 공구경로), Material removal rate (소재 제거량)

기호설명

r =radial depth

R =corner radius

s =step length

F =cutting force

k =specific cutting energy

b =radial depth of cut

t =axial depth of cut

v =cutting speed

K_t =spindle motor constant

I_M =spindle current

J =moment of inertia of motor shaft

ω =rotational speed of spindle

B_M =viscous damping coefficient

T_f =viscous friction torque of motor shaft

T_d =torque of disturbance

1. 서론

2.5D 밀링은 2D와 3D의 합성형태로 임의의 한 평면이 가공 면으로 정의된 후 2축이 동시에 제어되는 것을 말한다. 즉, 2.5D 밀링은 Fig. 1과 같이 2축이 동시 제어되고 제 3축은 독립적으로 제어되

^{1..} 접수일: 2005년 7월 15일; 게재승인일: 2006년 1월 13일

[#] 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과 대학원

E-mail michael77@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3264

^{*} 한국과학기술원 기계공학과

는 밀링 작업을 말하며, 많은 밀링 작업은 2.5D 밀링을 사용한다. Harenbrock¹ 에 따르면, 기계부품의 거의 80%이상이 2.5D 밀링을 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 2.5D 밀링 작업을 위한 효율적인 공구경로는 기계가공에서 근본적으로 중요한 요소이다.

2.5D 밀링은 Z 축에 평행한 높이가 다른 각각의 가공 면들에서 독립적으로 이루어지므로, 2.5D 방식은 가공공간의 차원을 2D로 줄일 수 있다.

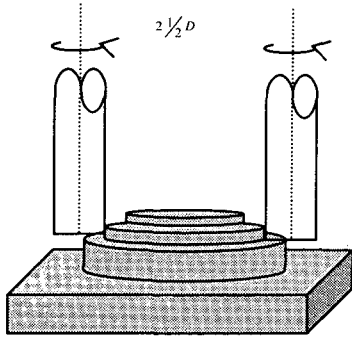


Fig. 1 2.5D milling path control type

일반적으로 2D 밀링은 포켓가공(pocket machining)으로 알려져 있으며, 황삭을 비롯한 정삭가공(3D 영역 가공)에서도 사용된다. 포켓가공에서 가장 많이 쓰이는 공구경로는 Fig. 2 와 같은 공구의 에어컷(air cutting)을 줄이면서 이송방향의 변화를 피할 수 있는 윤곽 평행 공구경로(contour parallel tool path)이다.

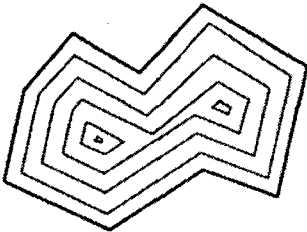


Fig. 2 Contour parallel tool path

윤곽 평행 공구경로는 주어진 외곽 경계곡선의 순차적인 오프셋으로 얻어질 수 있으므로, 기하학적인 2 차원 오프셋 알고리즘이 필수적이다. 따라

서 기존 연구의 대부분은 기하학적인 공구경로 생성방법을 대상으로 하고 있으며, 가공성 향상 방안과 같은 기술적인 문제 등에 대한 연구는 활발하게 수행되지 않았다.

2.5D 밀링의 효율을 위해서는 기하학적인 알고리즘들뿐만 아니라, 실 가공 시에 발생할 수 있는 문제점들에 대한 고려가 반드시 필요하다. 이 중 절삭력(cutting force)과 채터(chatter)는 가장 중요한 물리적 요소로 생각할 수 있다. 절삭력은 소재 제거량(MRR: material removal rate)의 변화에 기인하는 것으로, 급격한 절삭력의 변화는 공구파손(tool breakage)을 야기 시킨다. 따라서 절삭력을 일정하게 하기 위한 방법으로 가공 중에 절삭력을 예측하여 공구 이송속도(feedrate)을 조절하는 방법에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다²⁻⁴. 이들 연구의 대부분은 절삭력 모델을 수립하고 가공 시 발생하는 절삭력이 주어진 범위를 넘지 않도록 공구의 이송속도를 조절하는 방법을 채택하였다. 이 방법은 절삭력을 계산하는 데 많은 시간이 요구될 뿐 아니라, 가공 시 공구마모와 파손에 주된 원인이 되는 공구 떨림, 즉 채터가 고려되지 않기 때문에 가공 상황을 정확히 예측할 수가 없다. 2.5D 밀링 가공 시에 채터는 기존연구들에 의해 절삭조건(cutting condition) 중 축 방향 절삭 깊이(axial depth)와 반경 방향 절삭 깊이(radial depth)가 중요한 요소로서, 이 중 축 방향 절삭 깊이는 2.5D 밀링에서는 일정하므로 반경 방향 절삭 깊이가 가공의 안정성을 결정하는 주된 원인으로 알려져 있다⁵⁻⁶.

절삭력과 더불어 채터를 야기 시킬 수 있는 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 하기 위해서는 이송속도의 조절로는 불가능하며, 공구경로의 수정이 필요하나 이에 관하여는 활발한 연구가 진행되지 않았다. 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 하기 위한 기존의 연구들도 단지 경로상의 오목한 코너(corner)부위에서만 추가적인 경로를 삽입하는 방식⁷⁻⁹으로 전체 경로 상에서 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 하는 데는 한계를 가진다. 즉, 기존의 연구들의 대부분은 공구 경로 자체의 수정보다는 가공성 향상을 위한 또 다른 방법인 이송속도를 조절하는 방법에 초점이 맞추어져 있었다.

따라서 본 논문에서는 기하학적인 형상으로부터 구한 공구경로의 문제점들을 지적하고, 실제 가공의 관점에서 근본적인 해결책인 일정한 절삭

력과 반경 방향 절삭 깊이를 갖도록 기존의 공구 경로를 수정하는 방법을 제시하며, 가공실험을 통하여 검증한다.

2. 물리적인 고려

2.1 기하학적인 공구경로에 대한 물리적 고려

Thusty⁵는 직선 경로에서는 반경 방향 절입각 (radial engagement)이 일정하지만, 코너 부위에서는 Fig. 3과 같이 반경 방향 절입각의 증가로 채터 등이 발생할 수 있다고 지적했다. 2.5D 밀링에서는 공구와 소재(workpiece)사이의 반경 방향 절입각과 반경 방향 절삭 깊이는 식 (1)과 같이 표현된다.

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

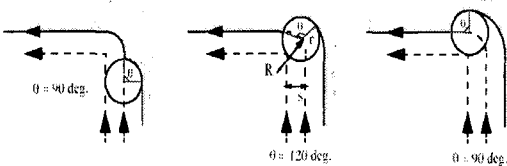


Fig. 3 Varying engagement arising with contour path

Fig. 4는 지름 10mm인 공구의 반경 방향 절삭 깊이와 절입각 사이의 관계를 도시한 그래프로 절입각 증가는 반경 방향 절삭 깊이의 증가를 의미한다.

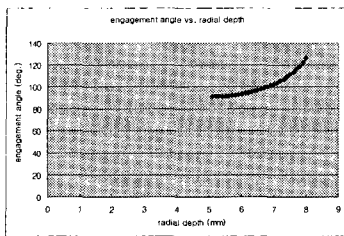


Fig. 4 Engagement angle vs. radial depth

이와 같은 반경 방향 절삭 깊이의 변화는 기하학적인 형상으로부터 얻어진 윤곽 평행 공구경로에서는 피할 수 없는 현상이다. 윤곽 평행 공구경로의 경우, 공구가 Fig. 3과 같이 오목한 코너 부위를 지날 때나 오프셋 공구경로의 연결과정에서 반경 방향 절삭 깊이의 변화를 야기한다.

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 야기 시키므로, 물리적인 관점에서 절삭력을 일정하게 하는 공구경로가 중요하다. 절삭력뿐만 아니라 가공의 안정성 측면에서는 Thusty⁵와 Smith⁶가 지적 했듯이 축 방향 절삭 깊이(axial depth)와 반경 방향 절삭 깊이가 중요한 요소로서, 이중 축 방향 절삭 깊이는 2.5D 밀링에서 일정하므로 반경 방향 절삭 깊이가 가공의 안정성을 결정하는 주요 인자로 작용한다. Zhao는 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. 5와 같이 구하였다¹⁰. Fig. 5의 일련의 안정화 선도로부터 안정적인 가공 영역이 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.

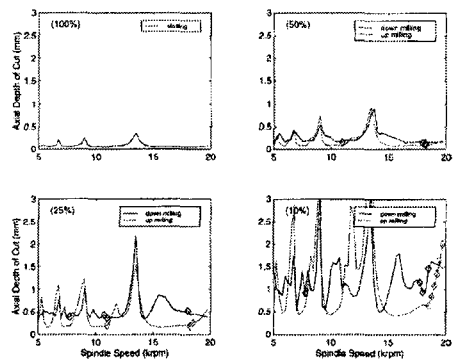


Fig. 5 Stability lobes

위의 사항들을 정리해보면 2.5D 밀링 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.

2.2 이송속도 조절과 공구경로 수정

절삭력을 일정하게 하기 위한 기존 연구의 대부분은 절삭력 모델을 세워서 절삭력을 예측하고, 가공 시 발생하는 절삭력이 주어진 범위를 넘지 않도록 공구의 이송속도를 조절하는 방법을 채택하였다²⁻⁴. 이는 가공에 영향을 미치는 많은 요소들 중 이송속도가 가장 제어하기 쉬운 요소이기 때문이다. 기존 연구들 중에는 시간당 소재 제거량(MRR: Material Removal Rate)을 일정하게 하는 방법이 실용적이어서 가장 보편적으로 사용되어 온 방법이다. 이 방법의 이론적 근거는 다음과 같다. 기계가공에서 절삭력은 식 (2)와 같이 비절삭 에너지(specific cutting energy), 절삭 폭, 절삭 깊이의 곱으로 나타낼 수 있다. 양변에 절삭 속도를 곱하면 절삭력과 절삭속도의 곱이 비절삭 에너지와 MRR의 곱과 같아진다. 즉, 비절삭 에너지와 절삭속도가 일정하다면 절삭력이 MRR에 비례한다. 그러나 실제로는 비절삭 에너지는 절삭 깊이가 커지면 감소하며, 엔드밀의 절삭속도는 반경에 따라 변하므로 MRR을 이용해 절삭력을 정확히 계산하는 것은 어렵다.

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

$$Fv = kbtv = k \cdot MRR$$

MRR을 이용한 절삭력 예측의 문제점을 보완하기 위한 여러 가지 절삭력 모델이 제안 되었지만, 비절삭 에너지는 근본적으로 절삭속도와 절삭 깊이에 따라 달라지는 값으로, 이를 정확히 예측하여 절삭력을 일정하게 한다는 것은 매우 어려운 일이다. 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 Fig. 6과 같이 추가적인 공구경로를 삽입하여 이 문제를 해결해 보고자 하였다⁷⁻⁹. 하지만, 윤곽 평행 공구경로의 경우 코너 부근 이외에도 절삭력이 증가하는 2가지 다른 경우가 존재하며 Fig. 7에 나타나 있다. 첫 번째 경우는 오프셋을 할 때 타락(degeneracy)하는 선분들에 의해서 오프셋 후의 형

상이 바뀌는 경우로 Fig. 7 (a)에서 원으로 표시된 부분들이고, 두 번째 경우는 Fig. 7(b)에 나타나듯이, 열은 색으로 표시된 경로를 지날 때 원으로 표시된 부분들에서 발생하며, 이 영역은 전역적 무효화 루프들이 제거된 부분이다. 즉, 기존 연구들과 같이 단순히 코너 부위에서의 원호삽입으로는 윤곽 평행 공구경로의 전체 영역에서 절삭력과 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 하는 공구경로를 생성할 수 없고, 앞에서 말한 두 가지 경우들에 대해서도 추가적인 공구경로가 삽입되어야만 전가공영역에서 절삭력과 반경 방향 절삭 깊이가 일정한 공구경로를 얻을 수 있다.

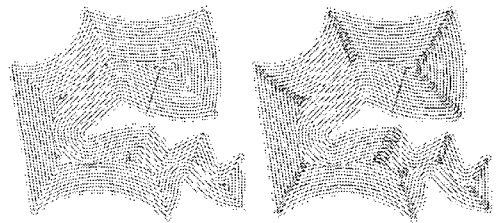


Fig. 6 Path insertion at corner

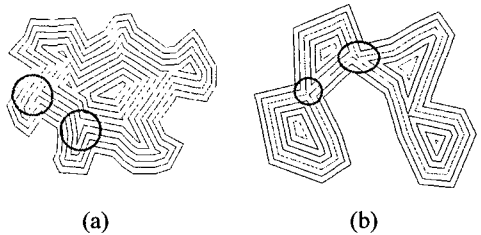


Fig. 7 Excessive MRR portions except corners

따라서 본 연구에서는 윤곽 평행 공구경로의 전 가공영역에서 절삭력과 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 할 수 있도록, 주어진 공구경로에 추가적인 경로를 삽입하는 방법을 제안한다.

3. 공구경로 수정

3.1 일정 MRR을 위한 공구경로 수정

2.5D 밀링의 경우에는 축 방향 절삭 깊이가 일정하므로, 절삭력과 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 하기 위해서는 MRR을 일정하게 하는 공구경로 생성이 필요하다. 식 (2)를 다시 살펴보면, 이송속도의 조절 없이 일정한 이송으로 가공할 경우, 일정한 MRR은 반경 방향 절삭 깊이가 일정

하다는 것을 의미한다. 또한 반경 방향 절삭 깊이가 일정하면 비절삭 에너지가 일정해 지므로, 절삭력도 일정하게 유지된다. 따라서 절삭력과 반경 방향 절삭 깊이를 일정하게 유지하는 공구경로는 2.5D 밀링에서 MRR을 일정하게 하는 공구경로이다.

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

3.2 픽셀 맵을 이용한 MRR 시뮬레이션

Fig. 8은 MRR 계산을 위한 픽셀 맵 시뮬레이션 절차를 보여주고 있다. 이 그림에서 짙은 회색 픽셀들은 아직 가공이 되지 않은 미 가공 영역을 나타내고, 옅은 회색 픽셀들은 가공이 된 영역을 나타낸다. 그림에서와 같이 공구 역시 픽셀로 구성되고, 공구가 샘플링 거리(sampling distance) Δs 마다 가공한 MRR은 그림에서 공구가 이동하여 생긴 영역 안의 픽셀들의 개수로 계산할 수 있다. 주어진 경로간격(step size)과 샘플링 거리에서 기준이 되는 MRR에 해당하는 픽셀 개수는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$reference_MRR = \left(\frac{\Delta s}{pixel_resolution}\right) \times \left(\frac{s}{pixel_resolution}\right)$$

공구가 Fig. 9와 같이 임의의 시작점에서 끝점까지 직선 보간을 할 경우 MRR은 다음과 같이 계산할 수 있다.

MRR calculation algorithm :

//input: start pt, end pt//

//output : pixel_num//

Linear_Motion(start pt, end pt, pixel_num)

```

{
  make boundingbox;
  while(lower_line < upper_line)
  {
    calculate intersection_pt;
    for( ; st_x < end_x; ++st_x)
      if(pixel_map[st_x][lower_line] != visit)
        ++pixel_num;
    ++lower_line;
  }
}
    
```

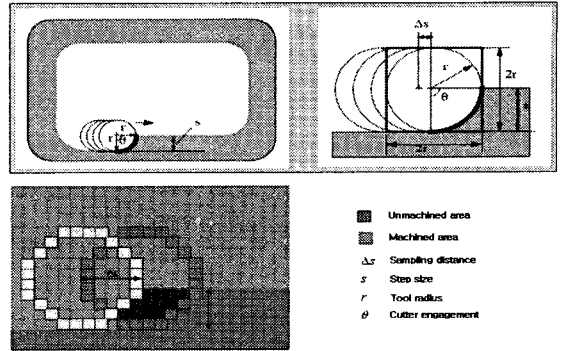


Fig. 8 Pixel based MRR simulation

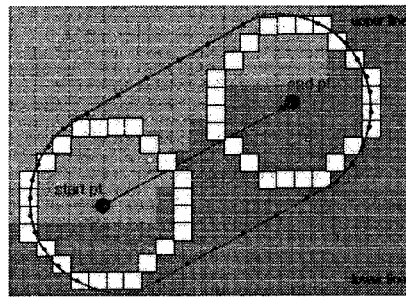


Fig. 9 MRR calculation in linear motion

3.3 MRR 시뮬레이션을 통한 공구경로 삽입

MRR 시뮬레이션을 통하여 기준이 되는 MRR 보다 과도한 부하가 걸리는 Fig. 10(a)와 같은 공구 경로에 대해서 공구의 이동 방향을 변경하여 Fig. 10(b)와 같이 추가적인 공구경로를 삽입한다. 이와 같은 방법으로 픽셀 맵을 이용한 시뮬레이션을 통하여 추가적인 공구경로를 삽입한 결과는 Fig. 11에 보여 진다. 이와 같은 시뮬레이션 방법을 통하여 추가된 공구경로는 샘플링 거리마다 미소한 직선들로 이루어진다. 따라서 실 가공 시에 많은 가감속으로 인한 가공 시간 저하를 가져올 수 있으므로, 미소한 직선으로 이루어진 추가적인 공구 경로에 대해서 원호 보간을 통하여 가감속 시간을 감소시켰다. 뿐만 아니라, 공구의 진입 시에 가공 부하를 줄이기 위하여 나선형 공구경로(spiral tool path)를 사용하였으며, 이렇게 수정된 최적의 공구경로는 Fig. 12에 나타나 있다.

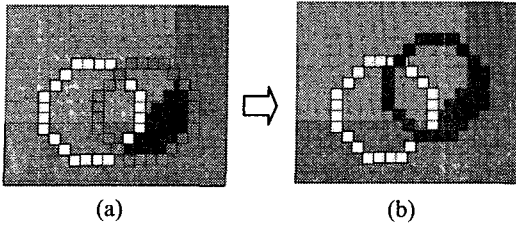


Fig. 10 Pixel based tool path modification

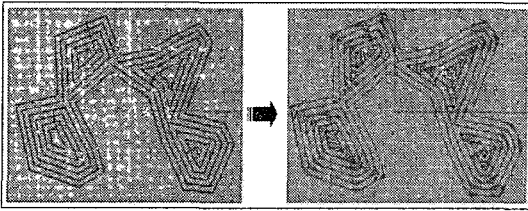


Fig. 11 Additional path insertion for constant MRR

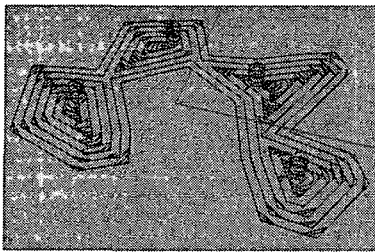


Fig. 12 Optimum path

Fig. 13 은 윤곽 평행 공구경로에 대해서 기하학적으로 구한 공구경로와 시뮬레이션 방법을 이용하여 최적화한 공구경로에 대하여 MRR 을 계산한 결과이다. 추가적인 공구경로의 삽입으로 전 가공 영역에서 일정한 MRR 을 유지할 수 있는 최적의 공구경로의 경우 MRR 의 변화가 심하지 않다는 것을 확인 할 수 있다.

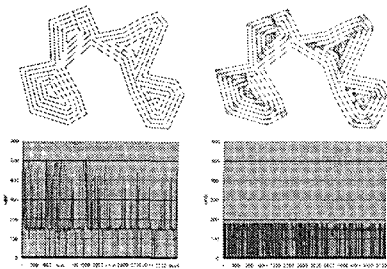


Fig. 13 MRR simulation results

4. 검증 실험

4.1 실험 방법

실 가공 시에 전 가공영역에서 절삭력의 변동이 적은 안정적인 가공경로의 검증을 위하여 공작기계의 주축 전류와 절삭력 및 MRR과의 관계를 규명하고 주축 전류를 측정하였다. 우선, 주축 전류와 절삭력의 관계를 알아보았다. 주축 전류와 절삭력의 관계를 알아보기 위한 공작기계 주축계의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$K_t I_M = J \frac{d\omega}{dt} + B_M \omega + T_f + T_d \quad (3)$$

주축속도가 일정하다고 한다면,

$$\frac{d\omega}{dt} = 0 \quad (4)$$

외관토크는 절삭력에 의해 발생하므로¹¹,

$$T_d = r \cdot F_c \quad (5)$$

또한 점성감쇠토크와 쿨롱마찰토크는 절삭토크에 관계있는 값이 아니라 기계적인 요소에 의해 발생하는 것이므로,

$$B_M \omega + T_f = C_s \quad (6)$$

으로 상수화 할 수 있다. 따라서 식 (3)은 (4), (5), (6)과 함께 식 (7)과 같이 1차적인 관계로 간략화 할 수 있다.

$$K_t I_M = C_s + r \cdot F_c \quad (7)$$

여러 연구자의 실험적인 결과 또한 위의 관계를 입증한다¹²⁻¹³. 주축 전류와 MRR 의 관계 또한 기존의 연구에 의해 과 같이 강한 1 차식의 관계라는 것이 알려졌고 다양한 실험을 통하여 검증되었다¹⁴. 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. 14는 사이즈(size) 120mm×85mm의 Fig. 11 모델에 대한 가공 실험 결과를 나타낸다. 윤곽 평행 공구경로에 대한 가공 실험 결과를 나타내며, 원래의 공구경로와 본 연구에서 제안한 전 가공 영역에서 추가적인 공구경로를 삽입한 경로에 대한 실험 결과를 나타낸다.

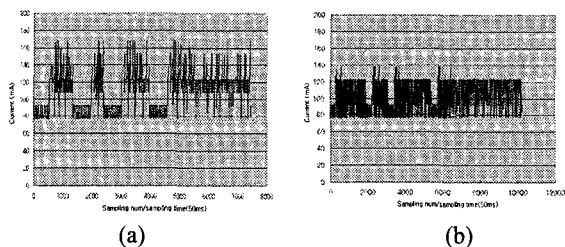


Fig. 14 Experiment results

이 실험 결과로부터 원래의 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 있어 가공 시간의 단축 효과 또한 기대 할 수 있다.

5. 결론

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 MRR을 일정하게 하기 위한 추가적인 공구경로 삽입을 픽셀 맵 기반의 시뮬레이션 방법을 사용해 구현하였으

며, 실제 가공실험을 통하여 절삭력의 변동 폭을 줄여 안정적인 가공이 이루어질 수 있음을 검증하였다.

참고문헌

1. Harenbrock, D., "The Connection of CAD and CAM by Means of the Program Package PROREN/NC," Technical Report, Inst. fur Konstruktionstechnik, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, FRG, 1980.
2. Cho, H. D. and Yang, M. Y., "Cornering and Feed-Rate Determination for Constant Max. Resultant Cutting Force with Ball-End Mill," KSME, Vol.15, No.5, pp.1572-1586, 1991.
3. Yazar, Z., Koch, K. F., Merrick, T. and Altan, T., "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, 1994.
4. Bae, S. H., Ko, K., Kim, B. H. and Choi, B. K., "Automatic Feedrate Adjustment for Pocket Machining," Computer-Aided Design, Vol.35, No.5, pp.495-500, 2003.
5. Tlustý, J., Smith, S. and Zamudio, C., "New NC Routines for Quality in Milling," Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, pp.517-521, 1990.
6. Smith, S., Cheng, E. and Zamudio, C., "Computer-Aided Generation of Optimum Chatter-Free Pockets," Vol.28, No.1/2, pp.275-283, 1991.
7. Iwabe, H., Fujii, Y., Saito, K. and Kisinami, T., "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, 1989.
8. Tsai, M. D., Takata, S., Inui, M., Kimura, F. and Sata, T., "Operation Planning Based on Cutting Process Models," Annals of the CIRP, Vol.40, No.1, pp.95-98, 1991.
9. Choy, H. S. and Chan, K. W., "A Corner-Looping Based Tool Path for Pocket Milling," Computer-Aided Design, Vol.35, No.2, pp.155-166, 2003.
10. Zhao, M. X. and Balachandran, B., "Dynamics and

- Stability of Milling Process,” *International Journal of Solids and Structures*, Vol.38, No.10/13, pp.2233-2248, 2001.
11. Stein, J. L., Colvin, D., Clever, G. and Wang, C. H., “Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors,” *ASME J. of Dynam. Syst., Meas. Contr.*, Vol.108, pp.279-288, 1986.
 12. Kim, G. D., Lee, S. I., Kwon, W. T. and Chu, C. N., “Cutting Force Estimation and Feedrate Adaptive Control Using Spindle Motor Current,” *Proceedings of Korean Society of Precision Engineering*, pp.150-156, 1996.
 13. Kim, S. C. and Chung, S. C., “Robust Cutting Force Control Using Indirect Force and Disturbance Estimators in the End Milling Process,” *Proceedings of ASPE*, Vol.20, pp.248-251, 1999.
 14. Lee, K. J., Lee, T. M., Kim, S. J. and Yang, M. Y., “Hybrid Approach to High-Performance Machining with TurboMill System,” *Proceedings of the International Conference on High Speed Machining*, pp.215-219, 2004.