

효율적인 황삭 가공을 위한 Pocket 가공 경로에 관한 연구

김 공 목*, 이 희 관**, 양 균 의***

An Algorithm of Efficient Rough Cutting Path for Pocket

* 전주 기능 대학, ** 전북대학교 대학원, *** 전북대학교 기계공학과

ABSTRACT

A study on the generation of optimum tool path for machining the concave parts is discussed. Above all, the various cutting factors and their relationships are considered. Then optimum tool path for concave parts is generated on these cutting variables and their relationships. It is difficult for existing CAD/CAM systems to machine the concave parts. For cutting the part even the experienced craft must give many attentions and much time since it needs consideration of various cutting conditions and geometric properties.

The optimum tool path for the concave part is generated on not only geometric properties but also cutting conditions. We choose ,as variables, feed and cutting direction for productivity, diameter of tool and constant(stable) cutting force for machining accuracy. The results are verified through simulation of the index of performance and cutting force.

1. 서론

금형은 제조산업의 대량 생산에 큰 기여를 하며 중요한 역할을 해왔다. 그러나 현재는 다양한 제품을 요하는 소비자들의 요구에 의해 다품종 소량생산으로 전환되어 다양한 금형과 고급스럽고 복잡한 형상의 금형을 만들 필요가 생겼다. CAD/CAM system은 다품종 소량생산이 요구되는 현실에서 산업의 모든 분야로 확산되어 가고 있다.

그러나 다양하고 고급스런 제품을 요구하는 시대의 요구를 만족시키기 위해서는 빠른 속도로 복잡한 물체도 정밀 가공을 수행할 필요성이 절실히 지고 있다. 그러나 상용 CAD/CAM system들은 이러한 요구를 충족시키기에 어려가 지 개선점을 보완해야만 한다. CAD/CAM system에서는 가공 경로를 구하는데 있어서 part의 기하학적 특성만을 고려하고 있기 때문이다. 그러나 가공 조건을 고려하지 않고 기하학적 특성만을 기초로 생성한 최적 경로는 본래의 경로대로 가

공을 수행하지 못하게 된다. 즉, 생산성을 저하시키고 양질의 금형을 얻지 못하게 된다.

1990년대에 이르러 이를 해결하고자 연구가 진행되고 있다. 한편으로는 공작기계의 성능을 향상하는 쪽으로, 한편으로는 가공 기술의 고도화로 진행이 되었다. 가공 기술의 향상을 꾀하는 쪽에서 대표적인 것이 가공 조건을 고려한 질삭 경로이다. 질삭조건을 고려한 가공 경로 생성의 도구로서 simulation system을 이용하고 있다. 금형을 설계하고 test 가공을 하면 시간과 경비의 낭비가 컸으나 test 가공 대신에 simulation system를 이용하여 가공 경로와 질삭 상태를 검증하고 수정할 수 있게 되었다. 즉 simulation system를 이용함으로써 test 가공에 필요한 경비와 시간을 절감하고 검증과 수정에 필요한 노력을 절약하게 되었다.

그러나 질삭의 특성상 다양한 요인들이 서로 복잡하게 얽힌 연관성때문에 해석이 복잡하고 실제 구현에 문제가 발생되었다. 대개 2가지 질삭 조건에 대하여 많은 연구가 되었다. 질삭깊이를 조정하거나 첨가함으로써 질삭력을 일정하게 하여 가공조건을 향상시키는 연구가 Tsai등에 의하여 행하여 졌다^[1,2]. 이송을 조정함으로써 질삭량과 평균 질삭력을 일정하게 함으로써 공구와 공작물 사이에 발생하는 진동과 힘을 방지하는 연구가 Fussell 등에 의하여 행하여 졌다^[3,4,5,6,7].

또한 공구 마모에 대한 연구와 최대 질삭량에 대한 연구도 Nastatos에 의해 행하여 졌다^[5]. 질삭에 영향을 미치는 가공 조건의 변수는 너무나 많고 서로 상관관계가 밀접하게 연결되어 있어 연구하기가 어렵다. 그래서 가공 조건의 변수들의 변화에 따른 질삭력의 변화를 측정함으로써 가공 경로의 최적성을 검사와 수정할 수 있다^[1,2,3,4,5,7,10]. 보다 민감하게 질삭력의 변화를 측정하기 위해 질삭력과 공구 반경으로 발생하는 torque를 이용하기도 하였다^[5]. 그 외에 생산성을 높이기 위해 공구의 반경과 질삭 깊이의 관계를 연구하기도 하였다^[10]. 그러나 대개의 연구가 2차원 가공에 제한을 두고 있다^[1,2,3,4,5,6,7]. 3차원 곡면 가공은 매우 복잡하기 때문이다.

본 연구는 기하학적 특성에 기초한 3차원 가공 경로를 생성하고 질삭 조건에 대한 연구를 이용하여 최적의 가공 방법을 찾고 질삭력 계산 시뮬레이션을 통해서 검증을 하였다. 황삭 가공 후 미가공 부위를 찾아 신속한 정밀 가공 방법을 제시하였다.

2. 황삭 가공 경로에 대한 고찰

2.1 가공 경로

기존의 시스템들은 주사선 가공 경로를 주로 이용하였다. 주사선 가공 경로는 경로 생성이 간단하여 자동화가 용이하였기 때문이다. 그러나 주사선 가공 경로는 절삭력의 심한 변화로 인해 chatter, 공구 파손 등을 야기시킨다. 특히 높은 생산량을 목표로 하여 높은 이송과 큰 절삭 깊이를 가지는 황삭에서는 문제가 된다. 절삭력의 변화가 낮은 조건에 맞추면 생산성을 저하시키야 하기 때문이다.

그래서 여기서는 윤곽 가공 경로를 사용한다. 윤곽 가공 경로는 축방향 절삭이 일어나지 않으므로 절삭력의 변동이 크게 일어나지 않는다. 축방향 깊이가 일정할 때 반경 방향 깊이와 절삭력의 비는 거의 일정하기 때문이다. 또한 경사가 큰 부분에서 절삭이 일어나는 공구 반경이 큰 조건에서 절삭을 위로 양호한 절삭 상태를 얻을 수 있다. 밑의 Fig. 1과 2에서 윤곽선 가공 경로와 주사선 경로를 보여주고 있다.

Fig. 1 Spiral-in and Spiral-out routine

Fig. 2 Zig-Zag and Zig routine

2.2 공구 간섭 제거

공구 간섭은 설계값 보다 너무 깊이 절삭하여 제품을 비리게 되므로 가공 경로 생성에서 가장 주의해야 할 부분이다. 이를 위해서 많은 연구가 되었고 블록 부분, 오목 부분, 집선 연속 만곡이 되지 않는 부위에서의 간섭 제거가 필요하다. 블록 부위는 공구의 이동이 실제로는 직선 경로이기 때문에 발생하므로 간섭 부위를 원호 보간하거나 새로운 점을 추가한다. 오목 부위는 공구의 반경이 오목 부위의 최소 곡률보다 클 때 발생하므로 가공 경로의 offset 경로가 loop를 만드는 부위를 제거하고, 반경이 작은 공구로 재 가공함으로써 해결한다. Fig. 3은 Offset 경로를 이용한 간섭 제거 경로의 예이다.

Fig. 3 Interference avoidance using offset loop

2.3 커스프의 높이

표면 거칠기는 기하학적 특성만을 고려한다면 주로 커스프에 의해 결정되므로 되도록 커스프의 높이를 낮게 하는 공구 상로를 생성해야 한다. 커스프는 공구 경로의 간격과 이송에 따라 변한다. 커스프를 구하는 식은 아래와 같다.

$$HC_{\min} = R - \left[R^2 - \left(\frac{P}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$HC_{\max} = R - \left[R^2 - \frac{\left(P^2 + \frac{f_z^2}{2} \right)}{4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 R : 공구반경, P : 평면에서 가공 경로 간격, fz : 1년당 이송 이다.

평면에 대해서 경사가 θ 만큼 기울어진 면에서는 가공 경로 간격이 변하고, 따라서 cusp의 높이도 변한다. 경사면에서의 경로 간격 P_{inc} 은 P를 이용하여 다음과 같이 계산되어진다.

$$P_{inc} = \frac{P}{\cos(\theta)}$$

위의 식을 이용하여 커스프의 높이를 계산한 수치가 Fig. 4에 나타나 있다.

Fig. 4 the height of cusp

3. 황삭 가공후 잔삭이 많이 남은 부위

3.1 경사가 낮은 면

윤곽 가공 경로는 Fig. 5에 보는 바와 같이 경사가 낮은 평면가까운 부위에서는 큰 커스프가 남게 되어 정삭에서 많은 양을 가공해야 하므로 어느 한도 이하에서는 황삭 가공 후 커스프가 높은 부위를 새롭게 가공해야 한다.

Fig. 5 cusp of surface with low slope

3.2 오목 부위

Fig. 6의 slot-type 오목 부위는 공구의 반경이 오목 부위에서의 곡률반경보다 클 경우에 공구 간섭이 발생하여 가공물을 파먹게 된다. 이 부위에서는 공구 간섭 제거가 필요하다. hole-type 오목부위는 간섭 제거 외에도 과절삭 부하의 위험이 있다. 오목 부위에서는 공구가 많은 가공물을 절삭하므로 공구에 큰 절삭력이 가해져 공구의 손상과 가공의 질을 떨어뜨리게 된다.

Fig. 6 a) slot-type concave part b) hole-type concave part

3.3 원호 경로와 코너 경로

Fig 7에서와 같이 원호 부분과 코너 부분도 과절삭 부하가 걸리는 부분이다. 상용 CAM 시스템은 윤곽 가공시 spiral-out 방식을 주로 사용하고 있는데 이 부분에서 절삭력의 증가로 문제가 발생한다. 공구의 날이 직선 경로에서 보다 더 넓은 절삭 면적을 가지므로 큰 절삭부하를 받고 황삭에서는 진동과 정삭에서는 뺨이 발생하게 된다. 코너 경로에서 원호 경로보다 더 큰 절삭 부하가 걸린다.

Fig. 7 a) circle part b) corner part

3.4 두 블럭이 인근에 있는 경우

Fig.8과 같이 두 블럭 사이의 거리가 공구의 반경보다 작은 부위는 가공을 위해 두 블럭의 거리보다 작은 공구를 선정해야만 한다. 작은 공구로서 가공을 하면 생산성의 저하가 야기된다. 황삭 가공에서는 이 사이를 가공하지 않고, 잔삭 부위를 탐색하여 거리에 맞게 공구 크기를 정하여 가공한다.

Fig. 8 blocks to be close

4. 효율적인 황삭 가공의 방법

효율적인 황삭은 단순히 기하학적 특성만을 고려해서는 얻이 수 없고 전삭 조건을 함께 고려해야만 된다. 또한 정밀 가공을 수행하는 정삭을 고려할 필요가 있다. 이를 위해 황삭후 미가공 부위 가공은 황삭이 남긴 많은 미가공 부위를 정삭에서 처리할 때 발생할 수 있는 많은 어려움을 해결해 준다. 황삭에서 남긴 미가공 부위는 정삭에서 처리하기에는 너무 크고 많은 시간을 요구한다. 반면에 황삭에서 부리하게 이 부분은 가공하려고 하면 심한 진삭력의 변동으로 인한 chatter, 공구의 파손 등이 발생한다. 황삭 가공후 미가공부위의 가공을 행함으로 황삭에서 부리없이 정삭으로 넘어갈 수 있도록 전력오차를 줄이는 역할을 한다.

4.1 최적화 함수

최적의 가공 경로는 생산성이 높고 원하는 가공 정밀도를 만족하는 것인 것이다. 여기서는 두 가지 조건을 수식을 통해서 평가하고 최적의 가공을 행하는 가공 방법을 찾고자 한다.

가공 정밀도는 공구의 강성과 전삭력에 크게 관계하므로 다음의 식으로 평가할 수 있다.

$$IP_1 = \frac{\rho}{F} \quad (3)$$

여기서 ρ :공구의 강성비, F: 전삭력이다.

$$\rho = \delta \cdot \frac{D^4}{l^3}$$

여기서 δ :공구의 휨, D:공구의 직경, l:공구의 날 길이 이다.

전삭력 F은 다음의 식으로 계산된다.

$$F = K \cdot A = k \cdot h^{-\epsilon} \cdot A \quad (4)$$

$$h = R - \sqrt{(R - R_d)^2 + (R \cdot \sin \theta - f_2)^2}$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{R - R_d}{R} \right)$$

여기서 k : 피삭 재질, 절연의 변형에 의해 결정되는 계수, h_{max} : 최대전삭 두께이다.

가공오차를 줄이고 가공 정밀도를 높이려면 공구의 강성비를 높이기 위해 공구의 반경을 크게 하고, 전삭력을 작게 해야함을 알 수 있다.

생산성은 가공 능률과 가공 비로 관계하므로 전삭 가공 속도와 강비를 이용하여 평가식을 세울 수 있다.

$$IP_2 = \frac{R_d \cdot A_d \cdot f_2 \cdot Z \cdot N}{K_d + \frac{K_c \cdot t_c + K_t}{T}} \quad (5)$$

여기서 K_d : 단위 시간당 경비, K_c : 공구비, t_c : 공구 교환시간, T:공구 수명시간이다.

분자식은 시간당 전삭 체적이고, 분모식은 시간당 가공비이다. 두개의 평가식을 이용하여 가공 정밀도와 생산성을 동시에 만족하는 최적의 평가식은 아래와 같다.

$$IP = IP_1^m \times IP_2^n \quad (6)$$

여기서 m, n은 가중치(weight)이다.

가공 정밀도가 목표인 정삭에서는 m=1로 정하고, 생산성을 고려한 황삭인 경우는 n=1로 정하면 된다. 위 식을 통한 분석에서 생산성과 정밀도를 동시에 만족하는 경우는 없다는 것을 알 수 있었다. 그래서 황삭 후 미가공 부위의 가공을 통해서 황삭에서 바로 정삭으로 넘어감으로 생산성과 정밀도를 높이는 방식이 합리적이라고 생각된다.

4.2 미가공 부위의 탐색방법

탐색 방법은 Z-map을 이용한다. 설계값인 CAD 데이터보다 가공값인 CAM 데이터가 크면 미가공 부위로 탐색을 한다. 미가공 부위의 계산은 Fig. 9와 같이 BOOLEAN OPERATION을 이용하여 계산할 수 있다. 그리고 위에서 말한 각각의 가공 부위에 맞는 형상을 정의한 후에 4.3에서 정의하는 가공 경로를 따라 가공을 한다.

Fig. 9 Z-map에서 BLOOEAN OPERATION

4.3 미가공 부위의 가공 경로 생성과 평가

상용하는 황삭 가공 방법과 위에서 제시한 황삭 후 미가공 부위 가공하는 가공을 위의 식을 이용하여 평가해 보고, 각 부분에 대한 전삭력을 계산한 시뮬레이션을 통해서 잔삭 가공 경로의 유용성을 제시하고자 한다.

가공 경로의 방향은 생산성을 높이기 위해 길이 방향으로 한다. 길이 방향으로 할 때의 잇점은 연속적인 가공 경로의 길이가 길어서 이송을 크게 할 수 있고, 경로의 끝 부분에서 공구의 전삭력의 변화의 횟수를 줄일 수 있고, 공구의 traverse를 줄일 수 있다는 것이다. 또한 복합 곡면을 가공하면서 생기는 곡면들간의 가공 단차에 의한 오차를 제거할 수 있다. 길이 방향의 가공 경로는 빠른 생산성과 안정된 전삭력으로 가공 정밀도를 얻을 수 있다.

전삭력은 일정하게 유지해야 가공 정밀도를 얻을 수 있다. 날이 전삭하는 chip의 체적이 일정해야 공구의 휨, 진동에 의한 가공 오차와 공구의 파손 등을 방지할 수 있다. 여기서는 날이 전삭하는 전삭 체적을 일정하도록 경로의 간격과 가공하는 순서를 정한다.

이를 이용하여 생성한 가공 경로와 절삭력을 통한 평가 그래프가 밑의 그림들에 제시되었다. 절삭력 계산에서 이송은 일정하므로 절삭 두께는 일정하다고 생각할 수 있다. 즉 날에 의한 절삭 단면적만 고려하면 된다.

경사가 낮은 곡면

Fig. 10 tool path of machining surface with low slope

유과 가공에서 경사가 낮은 곡면을 가공할 때 큰 키스프가 남게 되어 정상에서 많은 양을 가공해야만 한다. 그래서 평탄한 곡면에서 키스프가 최소인 주사선 경로로 다시 가공을 행한다.

오목 부위

Fig. 11 tool path of machining concave part

황삭에서 오목부위의 가공을 생략하고 hole-type 오목부위의 미가공부 가공에서 spiral-in 방식으로 가공을 수행한다. 과절삭력을 방지하고 연속적 경로를 얻기 때문이다. Fig.11 (a)에 가공 순서를 바꾸어 최대 절삭력을 감소하는 경로가 있다. slot-type 오목부위에 대해서는 과절삭력을 많이 줄일 수 있음을 시뮬레이션 결과인 Fig. 11 (b)을 통해 알 수 있다.

원호와 코너

Fig. 12 tool path of machining circle and corner

Fig.12 (a)에서 보듯이 황삭에서 일단 원호와 코너 부의 가공을 피하는 경로 1로 황삭을 수행하고 미가공부 가공때에 전삭 변칙이 큰 부위를 정확한 가공 경로 2를 생성하여 가공한다. 시뮬레이션으로 이 경로를 평가한 Fig.12 (b)에서 미가공부 가공 경로를 따라가면 과절삭력을 상당히 줄일 수 있음을 보였다.

인접한 블럭들

Fig. 13 tool path of machining blocks

두 블럭의 사이의 가공을 생략한 황삭을 수행하고 후에 블럭 사이의 거리보다 작은 공구로 미가공부 가공을 수행한다.

5. 결론

상용하는 황삭 가공 방법과 위에서 제시한 황삭 후 미가공을 도입한 황삭 가공을 절삭 평가식을 이용하여 평가해 보고, 절삭에서 문제점이 있는 각 부분에 대한 절삭력을 계산한 시뮬레이션을 통해서 미가공 부위를 가공하는 황삭 가공의 유용성을 제시하였다.

6. 참고 문헌

1. M.D. Tsai, S. Takata, M. Inui, F. Kimura, T. Sata, 1991, Annals of the CIRP, Vol 40 "Operation Planning Based on Cutting Process Models"
2. J. Tlustý, S. Smith, C. Zamudio, 1990, Annals of the CIRP, Vol 39, "New NC Routines for Quality in Milling"
3. B. K. Fussell, C. Ersoy, R. B. Jerard. 1992, ASME, "Computer Generated CNC Machining Feedrates"
4. K. Yamazaki, N. Kojima, T. Saito, 1991, Annals of the CIRP, Vol 40, "Real-Time Reference Adaptive Control of 3-D Sculptured Surface Machining"
5. P. Nastatos, Y. L. Yao, X. D. Fang, 1994, S. M. Wu Symposium, " Design of Feedrate Profile for Constant Force Milling Involving Varying Workpiece Geometry"
6. K. D. Bouzakis, K. Efstathiou, R. Paraskevopoulou, 1992, Annals of the CIRP, Vol 40, "NC-Code Preparation with Optimum Cutting Conditions in 3-Axis Milling"
7. S. Takata, M. D. Tsai, M. Inui, T. Sata, 1989, Annals of the CIRP, Vol 40, "A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation Using a Workpiece Model"
8. M. Bala, T. C. Chang, 1990, CIRP, "Automatic Cutter Selection and Optimal Cutter Path Generation for Prismatic Parts"
9. 최병규, 1989, 청문각, "CAD시스템과 CNC절삭가공"
10. Li Yong, Yoshiya Fuji, Hiroyasu Iwabe, 1990, JSPE, "A Selecting Method of Tool Diameter and Depths of Cut in End Milling"
11. M. Held, 1991, Ph.D. thesis, "On the Computational Geometry of Pocket Machining"

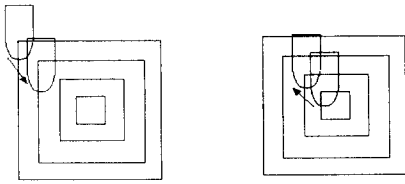


Fig. 1 Spiral-in and Spiral-out routine

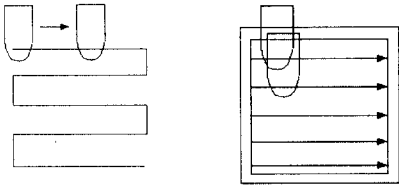


Fig. 2 Zig-Zag and Zig routine

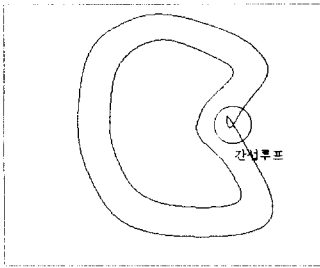


Fig. 3 Interference avoidance using offset loop

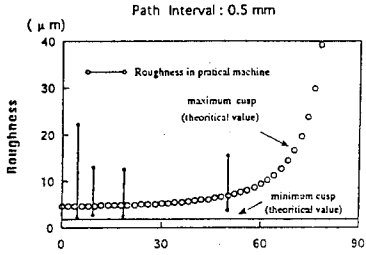


Fig. 4 the height of cusp

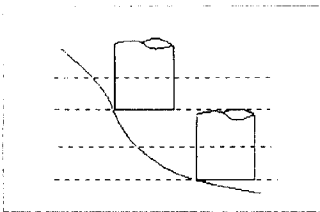


Fig. 5 cusp of surface with low slope

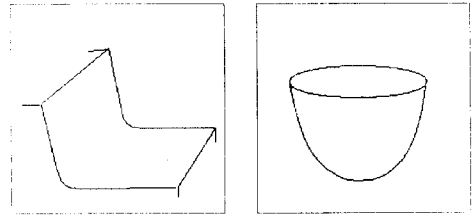


Fig. 6 a) slot-type concave part b) hole-type concave part

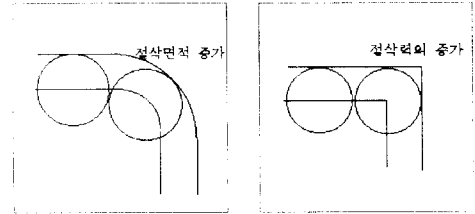


Fig. 7 a) circle part b) corner part

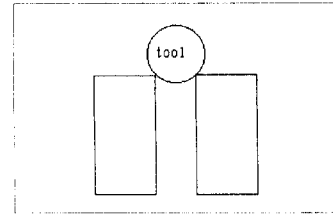


Fig. 8 blocks to be close

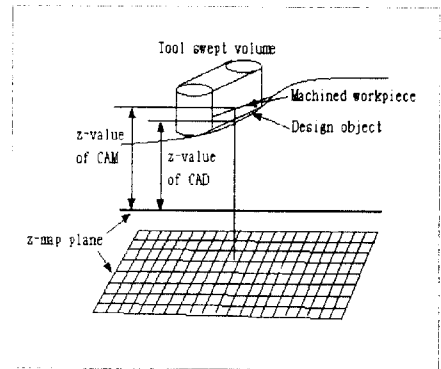


Fig. 9 Z-map에서 BLOOEAN OPERATION

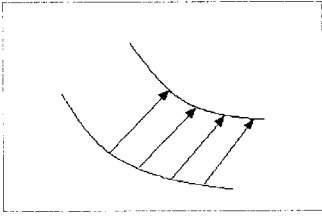
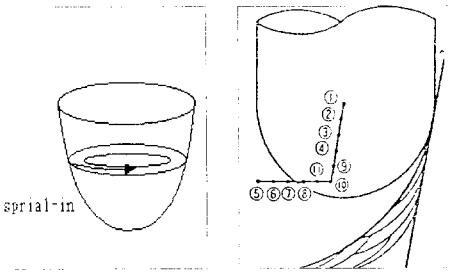


Fig. 10 tool path of machining surface with low slope



a) tool path for uncut concave part

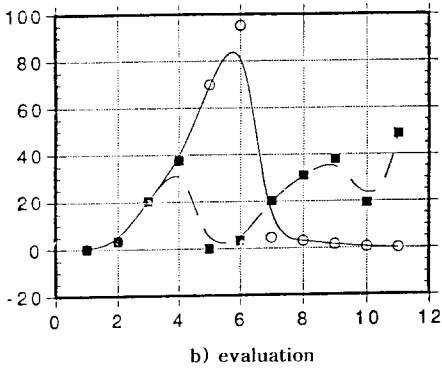


Fig. 11 tool path of machining concave part

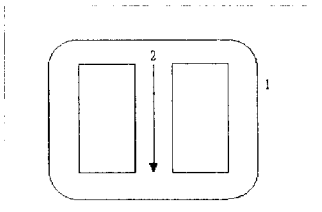
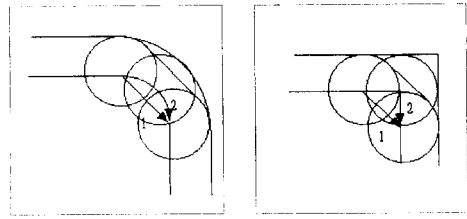
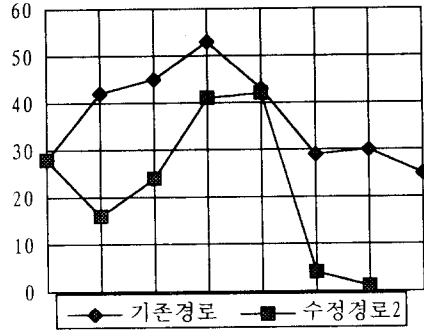


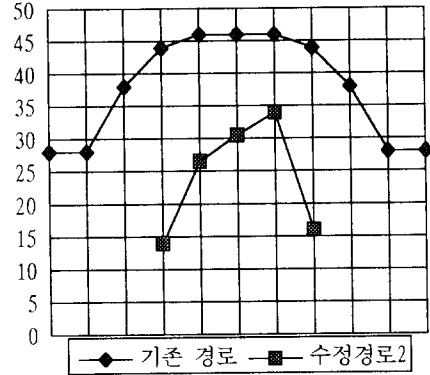
Fig. 13 tool path of machining blocks



a) tool path for uncut corner part



코너



원호

b) evaluation

Fig. 12 tool path of machining circle and corner