

공구경로 곡면을 이용한 이송속도 최적화

김수진*(한국과학기술원 기계공학과 대학원), 양민양(한국과학기술원 기계공학과)

Feedrate Optimization using CL Surface

S. J. Kim (Mecha. Eng. Dept. KAIST), M. Y. Yang(Mecha. Eng. Dept. KAIST)

ABSTRACT

In mold machining, there are many concave machining regions where chatter and tool deflection occur since MRR (material removal rate) increases as curvature increases even though cutting speed and depth of cut are constant. Boolean operation between stock and tool model is widely used to compute MRR in NC milling simulation. In finish cutting, the side step is reduced to about 0.3mm and tool path length is sometimes over 300m, so Boolean operation takes long computation time and includes much error if the resolution of stock and tool model is larger than the side step. In this paper, curvature of CL (cutter location) surface and side step of tool path is used to compute the feedrate for constant MRR machining. The data structure of CL surface is Z-map generated from NC tool path. The algorithm to get local curvature from discrete data was developed and applied to compute local curvature of CL surface. The side step of tool path was computed by point density map which includes cutter location point density at each grid element. The feedrate computed from curvature and side step is inserted to new tool path to regulate MRR. The resultants were applied to feedrate optimization system which generates new tool path with feedrate from NC codes for finish cutting. The system was applied to speaker mold machining. The finishing time was reduced to 12.6%, tool wear was reduced from 2mm to 1.1mm and chatter marks and over cut on corner were removed.

Key Words : CL surface (CL 곡면), Curvature of surface (곡면의 곡률), Material removal rate (소재제거율), Cutting force (절삭력), Feedrate optimization (이송속도 최적화)

1. 서론

제품의 디자인과 외관의 품질이 중요한 만큼 NC 에서 가공되는 제품은 많은 곡면과 코너를 가진다. 가공 깊이를 줄이고 이송을 높이는 고속 가공이 도입 되면서 전체적인 절삭력은 감소하고 있지만, 금형에 곡면이 많아지면서 곡률에 따른 절삭력의 변화는 커지고 있다. 일정한 이송율과 경로간격으로 가공할 경우 오목한 구간에서 절삭력이 증가하고 볼록한 구간에서는 감소하는 현상이 발생한다. 특히 오목한 코너부의 경우 절삭력이 급격히 증가하고 진동이 발생해 공구가 파손되기도 하고 가공 면에 부딪기가 남기도 한다.

금형에서 나타나는 일반적인 형상의 절삭력을 예측하기 위하여 Z-map 을 이용한 가공 시뮬레이션이 많이 이용되고 있다.⁽¹⁾ 이 방법은 절삭량이 많은

황삭가공 시뮬레이션에 적합하지만, 경로 간격이 작은 고속 가공에서는 경로간격이 모델의 분해능에 가까워 소재제거율 계산 오차가 증가하는 경향이 있다. 또한 계산 시간이 격자의 크기와 가공물의 크기에 따라 기하급수적으로 증가하므로 정삭 NC 프로그램의 이송속도 조절에 부적합하다.

공구경로의 곡률과 경사를 이용하여 가공 부하를 예측하고 가공조건을 최적화 하는 연구들이 있었다. 주종남⁽²⁾은 국부형상특징 (Local shape feature) 을 고려해 채터가 발생하지 않는 이송속도를 실험적으로 얻고 볼랜드밀 가공의 이송속도를 최적화하는데 적용했다. Jee⁽³⁾는 NC 제어기에서 평앤드밀을 이용한 2 차원 평면 가공에서 공구경로의 곡률을 이용하여 소재제거율이 일정하도록 이송속도를 조정하였다. 또한 NC 제어기에서 공구경로의 곡률로 인한 가속도를 고려하고 공구 접촉점의 이송속도

변화를 보상하기 위하여 이송속도를 제어하는 방법이 연구되었다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾

공구경로의 곡률과 경사를 이용하는 방법은 구현이 간단하고 연산시간이 짧아서 상용 CAM 과 DNC 에서도 이용되고 있지만, 형상가공에서 이송방향과 이송 수직 방향의 곡률이 함께 가공 부하에 영향을 주기 때문에 두 영향을 모두 고려할 필요가 있다.⁽⁶⁾

본 연구에서는 모든 방향의 곡률을 고려하기 위해 공구경로로부터 CL (Cutter location)곡면을 만들고 곡면의 곡률을 이용하여 일정 소재제거율을 가지도록 이송 속도를 최적화하였다. 실용성을 고려해 경로간격은 공구경로가 지나는 영역의 면적을 거리로 나누어 계산하고, 곡률 계산에는 구면 근사 방법을 제안해 적용함으로써 CL 곡면의 오차에 둔감하고 연산시간이 빠르도록 했다. CL 곡면을 이용한 이송속도 최적화 시스템을 스피커 케이스 급형의 정삭 가공에 적용하고 시스템을 적용하지 않은 경우와 가공 시간, 가공 정밀도, 공구 마모를 비교해 보았다.

2. CL 곡면의 곡률반경

2.1 CL 곡면

가공하려는 모델을 공구 반경만큼 읍셋 한 모델을 CL 곡면이라 하며 볼랜드밀의 공구경로는 이 곡면 위에 있다. 본 연구에서는 공구경로만을 입력 받기 때문에 공구경로로부터 역으로 CL 곡면을 만들어 곡률을 인식하는데 이용했다. 공구경로가 이동하는 영역을 Z-map 으로 만들고 정해진 x, y 위를 지나는 공구경로의 높이 값을 저장해 CL 곡면을 만든다.

2.2 구면근사 곡률반경

공구경로에서 만들어진 CL 곡면은 이산 곡면 (점 데이터로 이루어진 곡면)이며 오차를 가지고 있어 해석적 곡면의 곡률을 계산하는 방법으로 계산할 수 없다. 이산 곡면의 곡률을 추정하기 위해 Fan 은 미분 기하학을 이용하였다.⁽⁷⁾ 곡률의 계산을 위하여 1 차, 2 차 미분이 사용되는데 이는 오차가 포함되어 있는 데이터의 경우 그 영향을 받게 되어 공구경로로부터 만든 CL 곡면에서 곡률을 얻는데 부적합하다. 이처럼 오차가 포함되어 있는 데이터로부터 곡률을 효과적으로 추정하기 위해서 다복스 (Darboux) 프레임을 국부적으로 근사 시킴으로써 곡률을 추정하는 방법이 사용된다.⁽⁸⁾ 프레임을 근사하고자 하는 위치에서의 법선 벡터를 주변의 점들로부터 얻고 법선 벡터를 중심 축으로 하여 주변

점들을 좌표변환 한 후에 최소 자승법을 사용하여 다복스 프레임 식의 계수들을 계산한다. 이 방법은 오차에 둔감하지만 계산 양이 많은 편이어서 긴 연산 시간이 소요된다.

본 연구에서는 구면근사를 이용한 곡률 반경 계산 방법을 이용 하였다. 구면을 근사 시키고자 하는 위치에서 오차가 가장 작은 평면을 구하고 이산 점들을 평면의 법선 방향을 기준으로 좌표 변환한다. 주변 점들을 좌표변환 한 후에 최소 자승법을 사용하여 구면의 곡률반경을 계산한다. 이 방법은 오차에 둔감하고 계산 양이 적은 편이어서 방향에 관계없는 평균 곡률을 계산하는데 적합하다.

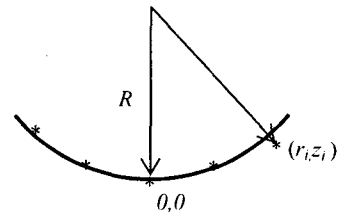


Fig. 1 Radius of curvature approximation from discrete data

구면을 근사하고자 하는 위치에서의 법선 벡터를 주변의 점들로부터 얻고 근사하고자 하는 위치를 원점으로 하고 법선 벡터를 z 축으로 하는 원통 좌표로 주변 점들을 좌표변환 한 후에 최소 자승법으로 구면의 곡률을 얻는다. Fig. 1 에서 곡률을 R 이라고 하고 i 번째 점의 좌표를 r_i, z_i 라고 하면 점과 구면 사이의 오차를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$e_i \cong r_i^2 + (z_i - R)^2 - R^2 \quad (1)$$

$$= r_i^2 + z_i^2 - 2z_i R$$

오차의 자승의 합 E 는 식 (2)와 같이 계산되고

$$E = \sum_i (r_i^2 + z_i^2 - 2z_i R)^2 \quad (2)$$

최소 자승법은 오차의 자승의 합을 최소로 하는 R 을 계산하는 것으로 E 를 R 로 편미분하여 계산한다.

$$\frac{\partial E}{\partial R} = -4 \sum_i (r_i^2 + z_i^2) z_i + 8R \sum_i z_i^2 \quad (3)$$

편미분 값이 0 이 되는 R 값을 계산하면 구면근사

를 이용한 CL 곡면의 곡률반경 식 (4)가 얻어진다.

$$R_{CL} \approx \frac{\sum_i (r_i^2 + z_i^2) z_i}{2 \sum_i z_i^2} \quad (4)$$

구면 근사를 이용한 평균 곡률 계산은 주변 점들이 이루는 평면의 법선 벡터를 계산하는 단계와 식 (4)를 이용하여 곡률을 계산하는 단계로 이루어진다. 여기서 계산되는 CL 곡면의 곡률을 이용하여 소재제거율이 일정하도록 이송속도를 제어한다.

2.3 경로간격

경로간격은 소재제거율과 표면조도에 영향을 준다. 소재제거율과 표면 조도를 일정하게 유지하기 위해 일정 경로간격의 공구경로를 생성하는 것이 이상적이지만, 실제로는 가공 위치에 따라 변화하는 경우가 많다. Fig.2 는 사각형의 넓이 A 를 사각형을 통과하는 공구경로 길이로 나누어 경로간격 w 를 계산할 수 있음을 보여준다.

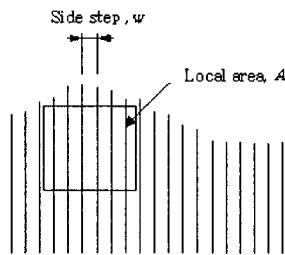


Fig. 2 Relation between side seep, local area, and tool path length

$$w = \frac{A}{l} = \frac{A}{\sum l_i} \quad (5)$$

공구경로를 단위 길이 l_u 로 나누어 점들을 얻고 XY 평면 상의 격자에 투영해 각 격자에 투영된 점의 수를 저장하면 이송방향에 관계 없이 경로간격을 계산할 수 있는데 식(5)로부터 유도하면 다음과 같다. 단위 면적 A 에 있는 점의 개수를 n , 공구경로의 단위 길이를 l_u , CL 곡면의 경사각을 β 라 하면 경로 간격은 식 (6)과 같다.

$$w = \frac{A}{nl_u \cos \beta} \quad (6)$$

여기서 계산되는 경로간격은 3 장에서 소재제거율과 최적 이송속도를 계산하는데 이용된다.

3. 곡률과 MRR

3.1 MRR 과 절삭력

소재제거율(MRR, Material Removal Rate)은 절삭 깊이 δ , 폭 w , 그리고 이송 속도 V 의 곱으로 절삭에너지를 결정하는 기준이 된다.

$$mrr = \delta w V \quad (7)$$

비절삭 에너지 k 와 소재제거율의 곱으로 엔드밀의 절삭에너지 P_c 을 계산할 수 있다.

$$P_c = k \delta w V \quad (8)$$

절삭 에너지는 스피indle에 가해지는 동력을 의미하므로 논문에서는 절삭 에너지가 일정하도록 가공조건을 최적화 하도록 한다. 비절삭 에너지는 칩 두께에 따라 변하는 것이 일반적이지만, 여기서는 일정하다고 가정한다.⁽⁹⁾ 비절삭 에너지를 상수로 가정하면 절삭 동력을 일정하게 하는 것은 식 (7)의 소재제거율을 일정하게 하는 것과 같다.

3.2 곡률과 MRR

엔드밀을 일정한 속도로 이송해도 곡률에 따라 소재제거율이 달라진다. 오목한 형상에서 소재제거율이 증가해 공구에 힘과 진동이 발생하며 볼록한 형상에서는 반대로 소재제거율이 감소한다. 오목한 형상의 곡률 반경을 양으로 하고 볼록한 형상의 곡률반경을 음으로 할 때 Fig 3 에서 소재제거율의 변화를 유도하면 다음과 같다.

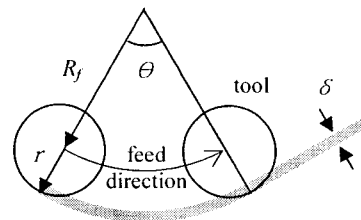


Fig. 3 MRR by the tool of radius r on a circular path of radius R_f with depth of cut δ .

이송방향 곡률반경이 R_f 인 공구경로의 가공 부

분은 공구경로를 공구반경 r 만큼 읊셋 한 곳으로 Fig. 3 에 음영부분에 해당한다. 원호를 가공할 때 제거되는 소재의 부피 vol 은 큰 부채꼴에서 작은 부채꼴을 빼고 가공 폭 w 를 곱해 얻는다.

$$vol = 0.5((R_f + r)^2 - (R_f + r - \delta)^2)\theta w \quad (9)$$

소재제거율 mrr 은 제거되는 부피를 이송 시간 $R_f\theta/V$ 로 나누어 식(10)과 같이 계산된다.

$$mrr = \delta w V \left(1 + \frac{r - 0.5\delta}{R_f}\right) \quad (10)$$

직선 구간의 소재제거율을 $mrr_0 = \delta w_0 V_0$ 와 곡선구간의 소재제거율이 같기 위해서 곡선구간의 이송 속도 V 와 직선 구간의 이송속도 V_0 사이에 다음 관계가 성립한다.

$$V = \frac{V_0}{1 + \frac{r - 0.5\delta}{R_f}} \quad (11)$$

식 (11)과 같이 이송방향의 곡률에 따라 이송속도를 제어해 소재제거율을 일정하게 하려는 연구가 있었는데 범위가 평엔드밀에 의한 2 차원 가공에 한정 되어 있다.⁽²⁾

3 차원 윤곽 가공에 있어서는 이송 방향뿐 아니라 이송에 수직인 방향으로도 곡률이 변화해 소재제거율에 영향을 준다.⁽⁶⁾ 따라서 이송 수직방향의 형상을 고려할 필요가 있다. 소재제거율에 대한 경로간격 방향의 곡률의 영향은 Fig. 4 와 같다.

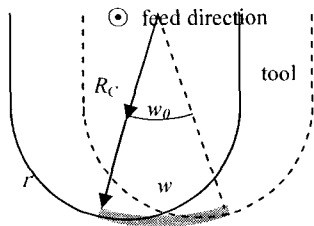


Fig. 4 MRR by the tool of radius r and radius of curvature R_c on a cross feed direction.

경로간격 방향으로 곡률이 R_c 이라 할 때 공구 경로간격을 w_0 와 가공 점에서 간격 w 는 부채꼴의 뒀음에 의해 식 (12)와 같이 유도된다.

$$w = w_0 \left(1 + \frac{r - 0.5\delta}{R_c}\right) \quad (12)$$

이송 방향 곡률과 이송 수직방향 곡률을 따로 계산하지 않고 식 (6)의 구면 근사 곡률을 적용하고 가공 깊이 δ 가 구면근사 곡률반경 R_{CL} 과 공구 반경 r 에 비해 작다고 가정하면 소재제거율이 식 (13)과 같이 표현된다.

$$mrr = \delta w_0 V \left(1 + \frac{r}{R_{CL}}\right)^2 \quad (13)$$

평면 구간의 소재제거율 $mrr_0 = \delta w_0 V_0$ 과 곡면 구간의 소재제거율이 같기 위해서 곡면 구간의 이송 속도 V 와 평면 구간의 이송속도 V_0 사이에 다음 관계가 성립한다.

$$V = \frac{V_0}{\left(1 + \frac{r}{R_{CL}}\right)^2} \quad (14)$$

소재제거율이 일정하기 위해서는 오목한 형상에 서 이송 속도가 줄어야 함을 볼 수 있다.

3.3 이송속도 최적화

일정한 가공 깊이의 남은 소재를 가공하는 중삭 과 정삭의 경우 가공 경로 간격이 일정하더라도 CL 곡면의 곡률반경에 따라 소재제거율에 차이를 보인다.

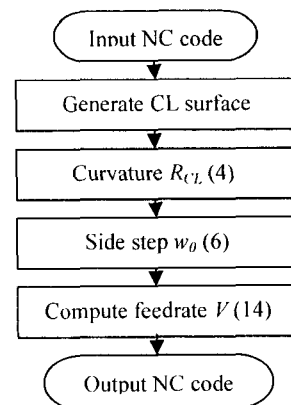


Fig. 5 Block diagram of feedrate optimization for constant MRR with CL surface

따라서 식 (14)와 같이 CL 곡면의 곡률에 따라

이송 속도를 최적화 함으로써 소재제거율을 일정하게 유지할 수 있는데, 곡률반경 계산은 오차의 영향을 작게 받고 계산이 빠른 구면근사 곡률 계산법 식 (4)를 이용했다. 이송속도 최적화 프로그램은 C++와 OpenGL 을 이용하여 개발했으며 프로그램의 흐름도는 Fig. 5 와 같다.

4. 적용 실험

4.1 실험 방법

스피커 금형의 정삭 가공에 CL 곡면을 이용한 이송속도 최적화 알고리즘을 적용했다. CAM 시스템에서 생성된 정삭 공구경로의 이송속도를 조정해 가공하고 일반적인 가공조건으로 가공한 것과 가공 시간, 가공품질, 공구 마모 정도를 비교했다.

4.1.1 실험 대상 및 조건

가공 대상은 S45C 금형강으로 경도는 약 HRC35 크기는 50mm*100mm*50mm 이다. 형상은 스피커 금형의 1/4 축소 모델로 공구경로는 D 사의 CAD/CAM 시스템을 이용하여 만들었다. 황삭 공구는 직경 10mm 볼엔드밀, 중삭은 직경 8mm 볼엔드밀, 정삭은 직경 6mm 초경 볼엔드밀을 이용했다. 중삭 공구경로는 가공여유 0.5mm, 경로간격 0.5mm로 했으며, 정삭 공구경로는 가공여유 0.0mm, 경로간격 0.3mm로 했다.

Table 1 Tool path generation parameter

	Tool	Offset	Side step
Roughing	φ 10 Ball	1.0mm	3mm
Semi-finishing	φ 8 Ball	0.5mm	0.5mm
Finishing	φ 6 Ball	0.0mm	0.3mm

공작기계는 대우 ACE-L40 수평형 머시닝 센터를 이용했으며 정삭 가공조건은 회전수 6000rpm 이송속도 1000mm/min 으로 했다.

4.1.2 이송속도 최적화

정삭 가공조건을 3 장에서 구성한 시스템을 이용하여 최적화 했다. CAM 시스템에서 생성된 정삭 공구경로를 입력 받아 CL 곡면을 만들어 구면근사 방법으로 곡률을 계산하고 경로 간격과 곡률에 따라 이송속도를 변화시킨 새로운 공구경로를 생성했다. 펜티엄 III 797MHz 프로세스 메모리 512Mb 에서 CL 곡면의 격자 간격이 0.3mm 일 때 연산 시간은 약 1 초 소요되었다. Fig. 6(a)는 정삭 공구경로이고 Fig. 6(b)는 공구경로로부터 만든 공구경로 곡면 모델이다. 검은 색에 가까울수록 곡률이 큰 부분으로

일정 MRR 을 유지하기 위해 느린 이송율로 가공되고 흰색에 가까울수록 곡률이 작은 부분으로 빠른 이송율로 가공된다.

Fig. 6(a) Finishing tool path, sidestep 0.3mm, tolerance 0.01mm

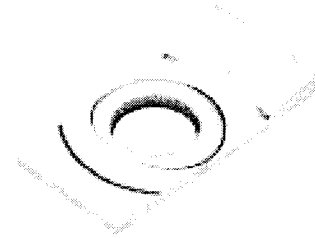


Fig. 6(b) CL surface, black color is low feed region; white color is fast feed region

스피커 자리인 둥근 원형을 가로지르는 공구경로의 최적화 전과 최적화 후를 Table 2 에서 볼 수 있다.

Table 2 Input and output NC code

Input NC code	Output NC code
Y13.569Z7.081 F1000	Y13.569 Z7.081 F2300
Y13.574 Z6.962	Y13.574 Z6.962
Z2.424	Y13.575 Z3.937 F2000
Y13.822 Z2.421	Z2.424 F140
Y36.33	Y13.822 Z2.421 F1200
Y36.429Z2.424	Y15.323
Y36.43Z6.957	Y34.829 F2300
	Y36.33 F350
	Y36.429 Z2.424
	Z3.935 F2000
	Y36.43 Z6.957 F2300

입력 코드의 이송속도는 1000mm/min 이고 출력 코드는 140 ~ 2300mm/min 으로 CL 곡면의 곡률에 따라 변화하는 것을 볼 수 있다.

4.2 실험 결과

가공시간은 일정한 이송율 1000mm/min 으로 가공했을 때 30 분 46 초, CL 곡면을 이용하여 일정한 소재제거율을 가지도록 이송율을 변화 시키면서 가공했을 때 26 분 48 초로 12.9%단축되었다.

기존 방법으로 가공한 금형은 오목한 코너에서 소재제거율이 증가해 채터가 발생했으며 소재제거율이 크면서 상향밀링인 부분에서 공구 휨으로 인해 0.5mm 의 파삭이 발생했다. 일정 소재제거율로 가공하기 위해 곡면의 곡률에 따라 이송율을 조정해 가공한 경우 채터가 감소했고 파삭이 발생하지 않았다. Fig. 7 은 기존 가공방법으로 가공한 금형(왼쪽)과, CL 곡면의 곡률을 이용하여 이송율을 조정해 가공한 금형(오른쪽)이다. 스피커가 위치하는 원형 주변에 채터마크를 볼 수 있고 원의 오른쪽 모퉁이에 공구 휨으로 인한 파삭을 볼 수 있다.

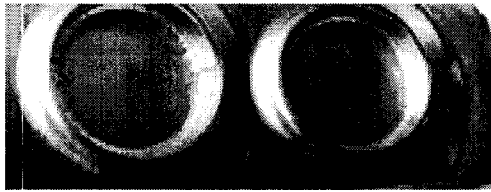


Fig. 7 The machining result, left is conventional, right is feed optimized finishing

초경 공구는 마모로 인한 손상 보다는 불안정한 가공 영역에서 날이 깨지는 경우가 많다. 같은 거리의 정삭 가공 후 직경 6mm 인 초경 공구의 칩핑이 기존 가공의 경우 양쪽 날에 각각 2mm 씩 발생했고 이송율을 변경하면서 가공한 경우 1.1mm 씩 발생했다.



Fig. 8 Tool wear after finishing, left is conventional, right is feed optimized finishing, Wear length is 2mm, 1.1mm (Tool diameter is 6mm)

5. 결론

금형의 정삭 가공은 전체 가공시간에서 가장 많은 시간을 차지하며 최종 형상이므로 가공 정밀

도와 품질에 직접적인 영향을 준다. 평균적인 절삭력은 작지만, 오목한 곳에서는 절삭력이 증가해 채터가 발생하거나 남고 초경 공구의 인선이 깨지는 경우가 많다. 본 논문에서는 공구경로에서 CL 곡면을 만들고 이 곡면에서 예측되는 구면근사 곡률과 경로간격을 이용하여 소재제거율이 일정하도록 이송속도를 최적화 했다. 시스템을 정삭 가공에 적용하여 소재제거율이 작은 평면에서 이송속도가 높아 가공시간이 12.6% 줄고 오목한 부분에서는 작아 채터와 파삭이 개선 되었으며 공구마모가 50% 감소됨을 확인했다.

참고문헌

1. 김찬봉, 양민양, “볼엔드밀링의 절삭조건 검증 시스템”, 한국 정밀공학회지, 제 12 권, 제 2 호, pp. 123-134, 1995.
2. C. N. Chu, S. Y. Kim, and J. M. Lee, “Feed-rate Optimization of Ball End Milling Considering Local Shape Features, Annals of CIRP, Vol. 46/1, pp. 433-436, 1997.
3. R. T. Farouki, J. Manjunathaiah, D. Nicholas, G. F. Yuan, and S. Jee, “Variable-feedrate CNC Interpolators for Constant Material Removal Rates along Pythagorean-Hodograph Curves”, Computer-Aided Design, Vol. 30, pp. 631-640, 1998.
4. Chih-Ching Lo, “A new approach to CNC tool path generation”, Computer-Aided Design, Vol. 30, pp 649-655, 1998.
5. Rida T. Farouki, Yi-Feng Tsai, and Curtis S. Wilson, “Physical Constraints on Feedrates and Feed Accelerations along Curved Tool Paths”, Computer-Aided Geometric Design, Vol. 17, pp. 337-359, 2000.
6. Byoung K. Choi and Robert B. Jerard, “Sculptured Surface Machining”, Kluwer Academic Publishers, pp180-184, 1998.
7. Ting-Jun Fan, Gerard Medioni, and Remakant Nevatia, “Segmented Descriptions of 3-D Surfaces”, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3/6, pp.527-538, 1987.
8. Frank P Ferrie, Jean Lagarde, and Peter Whaite, “Darboux Frames, Snakes, and Super-Quadrics: Geometry from the Bottom Up”, IEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 15/8, pp. 771-784, 1993.
9. 양민양, “절삭가공 이론과 실제”. 청문각, pp25-28, 1997.