

# 공구경로 곡면을 이용한 이송속도 최적화

김수진\*, 정태성\*, 양민양#

## Feedrate Optimization Using CL Surface

Su Jin Kim \*, Tae Sung Jung \* and Min Yang Yang #

### 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 the machining of speaker and cellular phone mold. 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 reduced, compared to the machining by constant feedrate. The machining time was shorter to 17% and surface quality and tool was also better than the conventional feedrate regulation using curvature of the tool path.

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

### 기호설명

$\delta$  = depth of cut  
 $R_{CL}$  = radius of curvature on CL surface

$w$  = side step of tool path  
 $A$  = local area to compute side step  
 $l$  = tool path length in local area  
 MRR = material removal rate

접수일: 2003년 6월 9일; 게재승인일: 2004년 2월 20일  
 \* 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
 # 교신저자, 한국과학기술원 기계공학과  
 Email myyang@kaist.ac.kr Tel (042)869-3264

$V$  = feedrate  
 $r$  = tool radius

### 1. 서론

제품의 디자인과 외관의 품위가 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 무늬가 남기도 한다.

공구 인선을 미소 날로 나누어 절삭이 일어나는 날의 절삭력을 더해 절삭력과 공구 힘을 해석하고 가공조건을 최적화 하는 연구들이 있다<sup>14</sup>. 이 방법들은 공구와 피삭체가 닿는 영역을 알기 위한 소재 제거 시뮬레이션이 필수적인데 일반적으로 3 축 가공에 적합한 Z-map 모델이 많이 이용되고 있다. 이 방법은 절삭량이 많은 황삭과 중삭에서 정확한 절삭력을 예측 할 수 있어서 연구에 많이 이용되고 있지만 경로간격이 모델의 분해능에 가까워지는 정삭과 고속 중삭 경로에서는 공구 접촉 영역계산 오차가 크며, 오차를 줄이기 위해 Z-map 의 격자간격을 줄일 경우 연산시간이 기하급수 적으로 증가해 정삭 NC 코드의 가공조건 부여를 위한 시뮬레이션에는 부적합하다. 정확한 소재 제거 시뮬레이션을 통해 MRR 을 일정하게 이송속도를 부여하는 C 사의 상용 소프트웨어 역시 정삭 코드에 대해서는 긴 연산 시간으로 인해 금형 가공에 이용되고 있지 못하다<sup>13</sup>.

소재 제거 시뮬레이션을 이용하지 않는 최적화 연구로, 공구경로의 곡률과 경사를 이용하여 가공 부하를 예측하고 가공조건을 최적화 하는 연구들이 있었다. 주종남<sup>5</sup> 은 국부형상특징 (Local shape feature)을 고려해 채터가 발생하지 않는 이송속도를 실험적으로 얻고 불엔드밀 가공의 이송속도를 최적화하는데 적용했다. Jee<sup>6</sup> 는 NC 제어기에서 평엔드밀을 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.<sup>7,8</sup>

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.<sup>9</sup>

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 구면근사 방법을 제안해 적용함으로써 CL 곡면의 오차에 둔감하고 연산시간이 빠르도록 했다. CL 곡면을 이용한 이송속도 최적화 시스템을 스피커 케이스 금형의 정삭 가공에 적용하고 시스템을 적용하지 않은 경우와 가공 시간, 가공 정밀도, 공구 마모를 비교해 보았다.

## 2. CL 곡면의 곡률반경

### 2.1 CL 곡면 생성

비교적 일정한 두께를 가공하는 정삭에서 MRR 은 경로 간격과 이송 방향 곡률 그리고 이송에 수직한 방향의 곡률에 의해 변화 한다. 하지만 기존 연구에서는 NC 코드에서 쉽게 얻을 수 있는 이송 방향의 곡률만을 이용해 이송 속도를 변경하므로 경로 간격과 이송에 수직한 방향의 곡률 변화로 인한 가공 부하를 제대로 예측 하고 있지 못하다. 이송에 수직한 방향의 곡률을 NC 코드에서 직접 계산하기 위해서는 각 블록마다 가장 가까운 옆 블록을 찾기 위해 모든 경로와 거리를 검색해야 하므로 기하급수적 계산이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 공구경로로부터 CL 곡면을 만들고 이송 방향과 이송에 수직한 방향의 곡률을 곡면으로부터 직접 계산하였다. NC 코드로부터 Z-map 기반의 CL 곡면을 만들기 위해 각 블록이 지나가는 격자의 높이를 변경하는데 블록 수만큼의 계산과 각 격자에서 평균 곡률을 계산하는데 격자 수 만큼의 계산이 필요하므로 공구경로에서 직접 계산하는 방법보다 안정적이며 빠르다.

## 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. Fan<sup>10</sup>은 이산 곡면의 곡률을 추정하기 위해 미분 기하학을 이용하였다. 곡률의 계산을 위하여 1차, 2차 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.<sup>11</sup> 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 둔감하며 최대 곡률과 최소 곡률이 발생하는 방향과 값이 얻어지지만 계산 양이 많은 편이어서 긴 연산 시간이 소요된다.

이송 방향 곡률과 이송 수직 방향의 곡률이 MRR의 변화에 같은 영향을 줌으로 방향에 관계 없는 이산 곡면의 평균 곡률을 빠르고 오차의 영향을 작게 계산하기 위해 본 연구에서는 구면 근사를 이용한 곡률 반경 계산 방법을 이용하였다. 구면을 근사 시키고자 하는 위치에서 오차가 가장 작은 평면을 구하고 이산 점들을 평면의 법선 방향을 기준으로 좌표 변환한다. 주변 점들을 좌표 변환 한 후에 최소 자승법을 사용하여 구면의 곡률반경을 계산한다. 이 방법은 오차에 둔감하고 계산 양이 적은 편이어서 방향에 관계없는 평균 곡률을 계산하는데 적합하다.

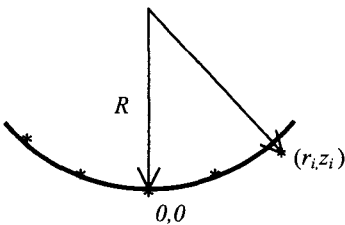


Fig. 1 Radius of curvature approximation from discrete data

구면을 근사하고자 하는 위치에서의 법선 벡터를 주변의 점들로부터 얻고 근사하고자 하는 위치를 원점으로 하고 법선 벡터를 z 축으로 하는 원통좌표로 주변 점들을 좌표변환 한 후에 최소 자승법으로 구면의 곡률을 얻는다. Fig. 1에서 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 구면 근사를 이용한 CL 곡면의 곡률반경 식 (4)가 얻어진다.

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

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

소재제거율과 표면 조도를 일정하게 유지하기

위해 일정 경로간격의 공구경로를 생성하는 것이 이상적이지만, 실제로는 가공 위치에 따라 변화하는 경우가 많다. Fig. 2는 사각형의 넓이  $A$ 를 사각형을 통과하는 공구경로 길이로 나누어 경로간격  $w$ 를 계산할 수 있음을 보여준다.

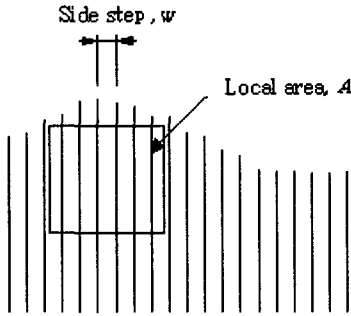


Fig. 2 Relation between side step, local area, and tool path length

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

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  $\beta$ 라 하면 경로 간격은 식 (6)과 같다.

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

여기서 계산되는 경로간격은 3장에서 소재제거율과 최적 이송속도를 계산하는데 이용된다.

### 3. 곡률과 소재제거율

#### 3.1 소재제거율과 절삭력

소재제거율(MRR, Material Removal Rate)은 절삭 깊이  $\delta$ , 폭  $w$ , 그리고 이송 속도  $V$ 의 곱으로 절삭 에너지를 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 의미하는데 논문에서는 이 동력이 일정하도록 가공 조건을 최적화 하도록 한다. 비절삭 에너지는 칩 두께에 따라 변하는 것이 일반적이지만, 여기서는 일정하다고 가정하면 절삭 동력을 일정하게 하는 것은 식 (7)의 MRR을 일정하게 하는 것과 같다.

절삭력은 가공 폭, 깊이, RPM 등 많은 변수에 의해 영향을 받으므로 MRR을 일정하게 하더라도 절삭력은 일정하다고 할 수 없지만 연산 속도와 실용성을 고려해 위 방법을 채택하였다.

#### 3.2 곡률과 소재제거율

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

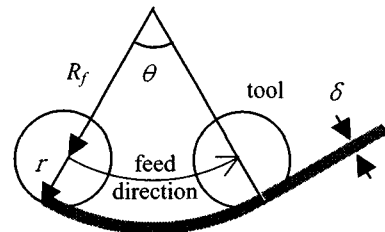


Fig. 3 MRR by the tool of radius  $r$  on a circular path of radius  $R_f$  with depth of cut  $\delta$ .

이송방향 곡률반경이  $R_f$ 인 공구경로의 가공 부분은 공구경로를 공구반경  $r$ 만큼 읊셋 한 곳으로 Fig. 3에 음영부분에 해당한다. 원호를 가공할 때 제거되는 소재의 부피  $V_M$ 은 큰 부채꼴에서 작은

부채꼴을 빼고 가공 폭  $w$ 를 곱해 얻는다.

$$V_M = 0.5 \left\{ (R_f + r)^2 - (R_f + r - \delta)^2 \right\} \theta w \quad (9)$$

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  $MRR_0 = \delta w V_0$  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 이송 속도를 제어해 소재제거율을 일정하게 하려는 연구가 있었는데 범위가 평엔드밀에 의한 2 차원 가공에 한정 되어 있다.<sup>2</sup>

3 차원 윤곽 가공에 있어서는 이송 방향뿐 아니라 이송에 수직한 방향으로도 곡률이 변화해 소재제거율에 영향을 준다.<sup>6</sup> 본 논문에서는 모든 방향의 곡률을 고려하기 위해 CL 곡면의 구면근사 곡률과 소재제거율 과의 관계를 알아보았다. 소재 제거율에 대한 구면근사 곡률의 영향은 Fig. 4 와 같다.

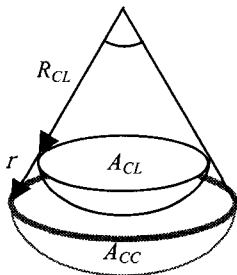


Fig. 4 MRR by the tool of radius  $r$  and radius of curvature  $R_{CL}$  on a sphere shape

공구경로가 지나는 CL 곡면의 넓이  $A_{CL}$ 와 실제로 가공되는 영역의 면적  $A_{CC}$ 의 관계는 두 원뿔의 답음에 의해 식(12)와 같다.

$$A_{CC} = A_{CL} \left( 1 + \frac{r}{R_{CL}} \right)^2 \quad (12)$$

가공 깊이  $\delta$ 가 일정하고 구면근사 곡률반경  $R_{CL}$ 과 공구반경  $r$ 에 비해 작다면 소재제거율이 식 (13)과 같이 표현된다.

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

평면 구간의 소재제거율  $MRR_0 = \delta w V_0$ 과 곡면 구간의 소재제거율이 같기 위해서 곡면 구간의 이송 속도  $V$ 와 평면 구간의 이송속도  $V_0$  사이에 다음 관계가 성립한다.

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

식 (14)에서 소재제거율이 일정하기 위해서는 오목한 형상에서 이송 속도가 줄어야 함을 알 수 있다.

### 3.3 이송속도 최적화

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

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 계산 법 식 (4)를 이용했다. 이송속도 최적화 프로그램은 C++와 OpenGL 을 이용하여 개발했으며 프로그램의 흐름도는 Fig. 5 와 같다.

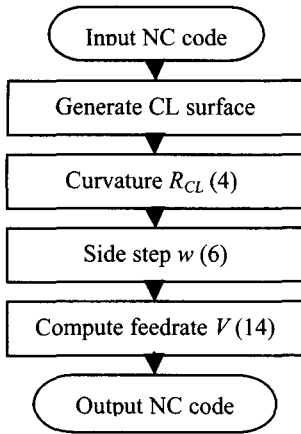


Fig. 5 Block diagram of feedrate optimization for constant MRR with CL surface.

#### 4. 적용 실험

##### 4.1 실험 방법

스피커 금형의 일방향 정삭 코드에 CL 곡면을 이용한 이송속도 조정 방법을 적용해 일정 이송속도로 가공한 경우와 비교하였다. 또한 핸드폰 금형의 3D 육셋 정삭 코드에 CL 곡면을 이용한 이송속도 조정 방법을 적용해, 이송방향의 곡률만을 고려한 경우와 가공시간, 가공품질, 공구 마모를 비교하였다.

공작기계는 대우 ACE-L40 수평형 머시닝 센터로 제어기는 Fanuc 0M 을 탑재하고 있다. 소재는 금형에 많이 쓰이는 S45C 로 크기는 50mm\*100mm 의 사각형으로 했다. 공구는 초경 TaguTec 에서 만든 초경 블엔드밀을 이용하였다.

##### 4.2 스피커 금형

###### 4.2.1 이송속도 조정

스피커 금형의 일방향 가공경로를 회전수 6000rpm 이송속도 1000mm/min 으로 일정하게 가공하는 경우와 CL 곡면의 곡률을 이용해 평활 면은 2000mm/min 으로 오목한 구간은 양 500mm/min 으로 변화를 주면서 가공하는 경우를 비교하였다. Table 1 과 같이 종삭은 공구 직경 8mm, 가공 여유 0.5mm, 경로간격 0.5mm 로 했으며, 정삭은 공구 직경 6mm 가공여유 0.0mm, 경로간격 0.3mm 로 했다.

Table 1 Tool path generation parameter for speaker

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

CL 곡면의 격자 간격이 0.3mm 일 때 펜티엄 III 800MHz 메모리 512Mb 에서 이송속도 조정 시간이 약 1 초 소요되었다. Fig. 6(a)는 정삭 공구경로 이고 Fig. 6(b)는 공구경로로부터 만든 공구경로 곡면 모델이다. 검은 색에 가까울수록 곡률이 큰 부분으로 일정 MRR 을 유지하기 위해 느린 이송속도로 가공되고 흰색에 가까울수록 곡률이 작은 부분으로 빠른 이송속도로 가공된다.

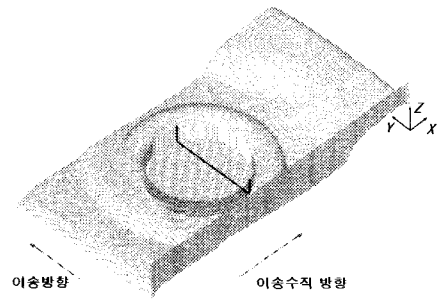


Fig. 6(a) One-directional finishing tool path, sidestep 0.3mm, tolerance 0.01mm

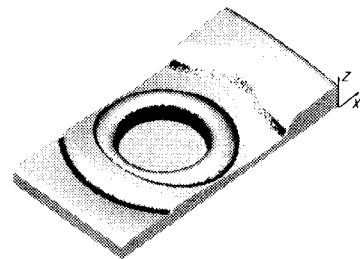


Fig. 6(b) CL surface, black color is low feed region and white color is fast feed region

Fig. 6(a)의 검은 선으로 표시된 스피커 자리를 가로지르는 공구경로의 최적화 전과 최적화 후 NC 코드는 Table 2 와 같다. 입력 코드의 이송속도

는 1000mm/min 이고 출력 코드는 140 ~ 2300mm/min 으로 CL 곡면의 곡률에 따라 변화하는 것을 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

#### 4.2.2 가공 결과

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

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.

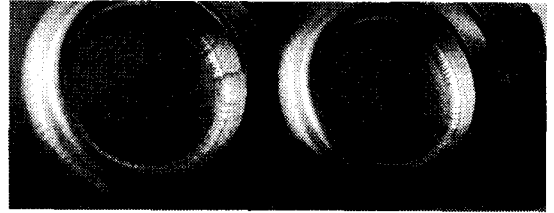


Fig. 7 The machining result, left is conventional, right is feed optimized finishing



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

### 4.3 핸드폰 금형

#### 4.3.1 이송속도 조정

핸드폰 금형의 3D 읍셋 정삭 가공에 기존 연구인 이송 방향 곡률을 이용해 이송율을 조정해 가공하는 방법과 새롭게 제시한 CL 곡면의 곡률을 이용해 이송율을 조정해 가공하는 방법을 비교 실험하였다. Table 3 과 같이 중삭은 공구 직경 4mm, 가공 여유 0.3mm, 경로간격 0.4mm 로 했으며, 정삭은 공구직경 3mm 가공여유 0.0mm, 경로간격 0.3mm 로 했다.

Table 3 Tool path generation parameter for cellular phone

	Tool	Offset	Side step
Semi-finishing	φ 4 Ball	0.3mm	0.4mm
Finishing	φ 3 Ball	0.0mm	0.3mm

Fig. 9 에는 기존 방법으로 최적화 한 경로와 새로운 방법으로 최적화 한 경로를 이송 속도가 빠를수록 밝은 선으로 느릴수록 어두운 선으로 표시하였다. 표면조도를 고려해 가장 빠른 이송 속도는 1200mm/min 로 제한 되었고, 느린 이송 속도는

약 600mm/min 으로 나타났다. Fig. 9(a)와 같이, 공구 경로의 이송 방향만을 고려하는 기존 방법에서는 MRR 이 증가하지 않는 평면에서도 이송 방향이 변화 하면 속도를 줄이고 있고 MRR 이 증가하는 버튼 사이의 오목한 구간에서는 이송 방향이 변하지 않으므로 속도를 줄이지 않고 있어 MRR 이 제어되고 있지 못하다. 반면 Fig. 9(b)와 같이, CL 곡면의 곡률을 이용하는 논문의 방법에서는 MRR 이 증가하지 않는 평면에서는 이송 방향이 변화하더라도 이송 속도를 줄이지 않고 있으며 MRR 이 증가하는 버튼 사이 구간에서는 이송 방향이 변화하지 않더라도 속도를 줄이고 있다. 기존 방법을 이용할 경우 불필요한 감속 구간이 생기고, 반면 속도를 줄여야 하는 오목한 구간에서는 줄이지 못해 공구 수명을 단축시키는 현상이 발생한다.

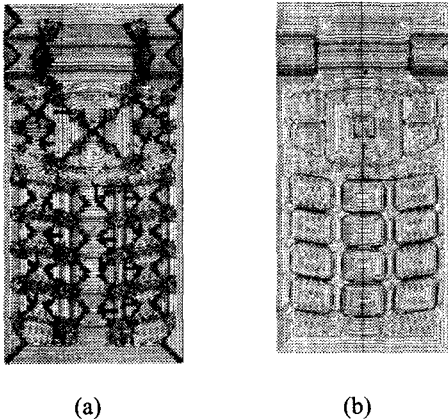


Fig. 9 3D offset tool path, sidestep 0.3mm, tolerance 0.01mm: (a) Feed was optimized by the curvature of the tool path; (b) Feed was optimized by the curvature of the CL surface.

### 4.3.2 가공 결과

가공 시간은 이송 방향의 곡률만을 이용한 경우 38 분 52 초, CL 곡면을 이용해 이송 속도를 조정 한 경우 32 분 11 초로, 논문의 방법이 약 17% 빠르다. 이것은 기존 방법이 부하에 관계 없이 이송 방향이 변화 하면 무조건 감속 시키는 방법으로 불필요한 감속이 많은데 비해 논문의 방법은 CL 곡면을 이용해 부하가 증가하는 오목한 가공 영역 만을 찾아 감속하는 방법이기 때문이다.

가공 품위 역시 이송 방향의 곡률을 이용한

기존 최적화 방법 보다 CL 곡면의 곡률을 이용한 경우에 더 좋게 나왔다(Fig. 10). 그 이유는 부하가 없는 평면에서 이송 방향의 변화에 따라 이송 속도를 줄이는 기존 방법에서 기하학적 조도가 불균일해 지는 점과 부하가 증가하는 버튼 사이의 코너에서 공구 날 끝이 마모되어 마모된 공구로 가공된 면이 거칠어 지는 점을 들 수 있다.

가공 후 공구 상태 역시 경로의 이송 방향 곡률만을 이용한 방법 보다 CL 곡면을 이용해 이송 속도를 최적화 한 가공 방법에서 더 좋았는데 그 이유는 부하가 증가하는 버튼 사이에서 이송 속도가 효과적으로 줄기 때문이다(Fig. 11).



Fig. 10 The machining result: left is the result of the optimization using curvature of tool path, right is the result of optimization using CL surface.



Fig. 11 Tool wear after finishing (Tool diameter is 3mm): left is the result of the optimization using curvature of tool path, right is the result of optimization using CL surface.



## 5. 결 론

금형의 정삭 가공은 전체 가공시간에서 가장 많은 시간을 차지하며 최종 형상이므로 가공 정밀도와 품위에 직접적인 영향을 준다. 정삭 가공에서 평균적인 절삭력은 작지만 오목한 곳에서는 절삭력이 증가해 가공오차가 커지고 채터가 발생해 표면이 거칠어지고 공구의 인선이 깨지는 경우가 많다. 본 논문에서는 공구경로에서 CL 곡면을 만들고 이 곡면에서 예측되는 구면근사 곡률과 경로간격을 이용하여 소재제거율이 일정하도록 이송속도를 최적화 했다. 시스템을 스피커 케이스 금형의 정삭 가공에 적용하여 일정 이송속도로 가공하는 기존 가공 방법과 비교해 다음과 같은 결과를 얻었다. 소재제거율이 작은 평면에서 이송속도가 높아 가공시간이 12.6% 줄었으며 절삭력이 증가하는 오목한 부분에서는 이송속도를 줄여 과삭과 공구 진동이 줄었으며 공구마모 길기가 약 50% 감소되었다. 또한 핸드폰 금형의 가공에 공구 경로의 이송 방향 곡률을 이용해 이송 속도를 최적화 하는 기존 연구와 CL 곡면의 곡률을 이용한 논문의 방법을 각각 적용해 비교 실험 하였는데, CL 곡면의 곡률을 이용한 방법이 가공 시간이 17% 짧고 가공 품위와 가공 후 공구 상태 역시 좋은 것으로 나타났다.

CL 곡면을 이용한 MRR 계산 방법은 정삭 가공 이전의 소재 형상이 필요 없고, 최적화에 소요되는 시간이 극히 짧아 실시간에 준하는 계산 속도가 요구되는 DNC 와 개방형 CNC 제어기에도 쉽게 적용 될 수 있다. 하지만 실제 절삭력은 절삭 폭, 깊이, RPM 등 많은 다른 조건 들에 의해 결정되므로 미소 절삭력 이론을 이용하는 황.중삭의 최적화 알고리즘과 상호 보완이 필요하겠다.

## 참고문헌

- Kim, C. B. and Yang, M. Y., "Verification System for Cutting Condition of Ball-End Milling Process," Korean Society of Precision Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 123-134, 1995.
- Kim, K. M., Ju, J. P., Kim, B. H. and Ju, J. N., "The Study on the Cutting Force Prediction in the Ball-End Milling Process at the Random Cutting Area using A-map," KSPE Conference, pp. 125-129, 1996.
- Ko, J. H., Yun, W. S., Kang, S. J., Cho, D. W. and Ahn, K. G., "Development of a Virtual Machine Tool-Part2: Dynamic Cutting Force Model, Thermal Behavior Model, Feed Drive System Model, and Comprehensive Software Environment," International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 4, No. 3, 2003.
- Ko, J. H., Cho, D. W. and Ko, T. J., "Off-line Feed Rate Scheduling For 3d Ball-end Milling Using a Mechanistic Cutting Force Model," Transaction of NAMRI/SME, pp. 113-120, 2003.
- Chu, C. N., Kim, S. Y. and Lee, J. M., "Feed-rate Optimization of Ball End Milling Considering Local Shape Features," Annals of CIRP, Vol. 46/1, pp. 433-436, 1997.
- Farouki, R. T., Manjunathaiah, J. D., Yuan, G. F. and Jee, S., "Variable-feedrate CNC Interpolators for Constant Material Removal Rates along Pythagorean-Hodograph Curves," Computer-Aided Design, Vol. 30, pp. 631-640, 1998.
- Lo, C. C., "A new approach to CNC tool path generation," Computer-Aided Design, Vol. 30, pp. 649-655, 1998.
- Farouki, R. T., Tsai, Y. F. and Wilson, C. S., "Physical Constraints on Feedrates and Feed Accelerations along Curved Tool Paths," Computer-Aided Geometric Design, Vol. 17, pp. 337-359, 2000.
- Choi, B. K. and Jerard, R. B., "Sculptured Surface Machining," Kluwer Academic Publishers, pp. 180-184, 1998.
- Fan, T. J., Medioni, G. and Nevatia, R., "Segmented Descriptions of 3-D Surfaces," IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3/6, pp. 527-538, 1987.
- Ferrie, F. P., Lagarde, J. and Whaite, P., "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.
- 양민양, "절삭가공 이론과 실제," 청문각, pp. 25-28, 1997.
- VeriCut, <http://www.cgtech.com>