

# 기하학적 정보를 이용한 Burr 형성 예측 프로그램의 개발 Burr formulation prediction program using geometric information

김영진, 이재열, 안용진(경희대학교)

Young-Jin Kim, Je-Yeol Lee, Yong-Jin Ahn (KyungHee University)

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지 경희대학교 공과대학 산업공학과

## Abstract

금형가공에 사용되는 밀링머신의 가공시 공구와 피삭재의 접합면에서 버가 생성되며, 이러한 버의 생성에 따라 작업효율 감소 및 생산비의 비효율적 낭비를 가져오게 된다.[1] 밀링 작업시 버가 생성되는 메카니즘을 파악하여 임의의 형상을 가진 공작물을 밀링작업할 때의 버의 형태와 Exit 각 등을 제공하는 프로그램을 개발하려 한다. 여기에서 핵심적인 피삭재의 형상 데이터 인식, 절삭영역 인식, 공구와 피삭재의 접점 및 그 Exit 각을 결정하는 알고리즘을 소개한다.

이러한 과정을 통해 Exit 버 알고리즘에 대한 연구를 수행하고자 하며, concave를 포함한 여러가지 형상의 피삭재를 대상으로 Exit 버에 대한 접근을 시도하여 실제 작업에서와 유사한 환경에 대해 고려함으로써 버의 감소 및 작업 효율성의 증가를 위한 기초 연구를 수행한다. 또 이를 이용하여 Windows 환경에서의 버 예측 프로그램을 개발한다.

## 1. 서론

절삭 작업 과정에서 발생하는 버는 공구와 피삭재가 만나는 상태에 따라 그 형상이 결정되어진다. 공구와 피삭재 사이의 각, 공구의 회전속도, 이송속도, 피삭재의 종류 등은 이러한 버의 형상을 결정하는데 결정적인 역할을 하므로, 실험에 의해서 생성된 단계별 자료를 CAD 및 CAM 데이터와 연관시켜 효율적인 알고리즘을 만들고자 한다.

여기서 CAD 데이터는 피삭재에 대한 특징 형상의 정보를 포함하고 있기 때문에 프로그램에서 CAD 데이터의 코드를 인식하여 피삭재의 형상에 대한 정보를 얻을 수 있다. 인식된 형상에 대하여 Exit 버 형성시 접점과 Exit Angle을 계산하기 위해 도형의 방향인식이 필요하며, 이를 통해 공구와 피삭재와의 관계를 산출하여 Exit 버의 판별을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 과정을 수행하는 프로그램을 개발한다.

## 2. 피삭재의 형상인식

### 2.1 임의의 형상 CAD 도면의 인식

일반적인 경우에 도면을 통해 파악된 피삭재의 형상을 인식하는 과정이 필요하다. 여기에서는 피삭재가 CAD 데이터인 DXF 파일 포맷으로 제공되는 경우에 대한 형상인식을 수행한다. DXF 파일은 4개의 섹션으로 구분되어 있으며, 각 섹션은 많은 그룹으로 되어 있고 도면상의 그래픽 객체들은 개체(entity)로 되어 있다. 4개의 섹션은 HEADER, TABLES, BLOCKS, ENTITIES Section으로 구성되어 있다.[2]

본 연구에서는 객체들의 표현에만 중점을 두기 때문에 오직 Entities Section의 내용에만 중점을 두기로 한다. 이 섹션에서는 도면을 구성하는 실제 그래픽 개체에 대해서 표시될 좌표, 크기, 색상 등이 정의되어 있다. 각 개체는 새로운 개체 타입을 나타내는 0그룹으로 시작된다. Entities Section의 Code 내용 중 10, 20, 30, 11, 21, 31으로 되어있는 부분은 각각 x, y, z의 시작점 및 끝점을 표시한다. Line은 이 명령줄에 의해서 그려진다고 볼 수 있으며, 이 Code의 정보를 Visual Basic으로 작성된 프로그램에서 읽어들인다.

### 2.2 형상의 Data file화 작업

위의 단계에서 인식된 임의의 형상에 대하여 Exit 버 형성시 접점과 Exit Angle을 계산하기 위해서는 먼저 형상을 CCW 방향으로 인지하는 작업이 필요하다. 이를 위해 다음과 같은 방법으로 방향을 인식시키는 작업을 수행한다.

먼저 DXF 파일로부터 얻어진 도형에서 임의의 한 점 P를 잡고 도형의 꼭지점에서 점 P로 선분을 연결한다. 다음 꼭지점과 점 P로 선분을 연결하고, 이와 이루는 각을  $\theta_1$ 이라고 한다. 다시 다음 꼭지점과 점 P로 선분을 연결하고, 이전에 연결한 선분과 이루는 각을  $\theta_2$ 라고 한다. 이렇게 순차적으로 각  $\theta$ 의 누적합을 구한다. 점 P와의 연결이 시작점에 도달할 경우 작업을 종료한다.(Fig 1)

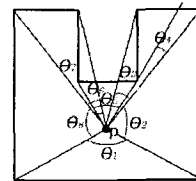


Fig.1 도형의 방향인식

경우에 따라서는 임의로 선택한 점 P가 도형 외부에 존재하는 경우가 생길 수 있다. 도형 내부에 점 P가 있을 경우에는  $\theta$ 의 누적합이  $360^\circ$ , 혹은  $-360^\circ$ 가 되며, 도형 외부에 점 P가 있을 경우에는  $\theta$ 의 누적합이  $0^\circ$ 가 된다. 따라서  $\theta$ 의 누적합이  $0^\circ$ 가 산출되었을 경우에는 점 P가 도형 외부에 있다고 판단하고 다시 임의의 점 P를 선택하여 위의 과정을 반복한다.

점 P가 도형 내부에 있고  $\theta$ 의 누적합이 구해졌을 경우, 그 합이  $360^\circ$ 이면 도형의 방향은 CCW로 인식된 것이다. 만약  $\theta$ 의 누적합이  $-360^\circ$ 일 경우에는 반대방향으로 인식된 것이므로 현재의 반대방향으로 도형의 꼭지점을 연결하여 방향이 CCW가 되도록 한다.

### 3. Exit 버 형성시 접점과 Exit Angle의 계산

#### 3.3.1 버 형성의 기하학적 표시

여기에서는 수학적이고 기하학적으로 완벽하게 Milling 가공시 Exit 버가 발생하는 구역을 구하는 과정을 유도하였다

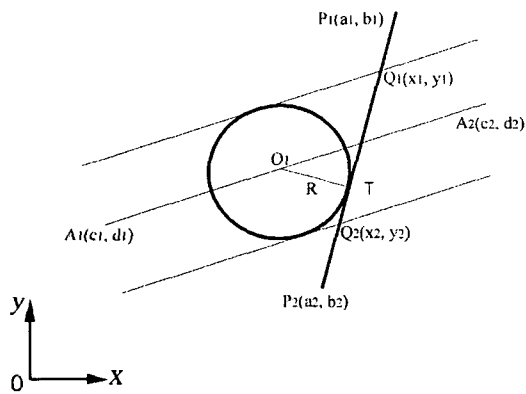


Fig.2는  $O_1$ 을 중심으로 하면서  $A_1$ 부터  $A_2$ 까지 이동하는 공구가 피삭재  $\overline{P_1P_2}$  위를 지나가는 과정의 점들을 표시한 것이다. 그리고, 공구와 피삭재가 접하는 점을 T로 했다.  $Q_1Q_2$ 는 공구가 피삭재 위를 지나가는 영역을 표현한다. 좌표축의 실제 중심 좌표 O에서 공구의 중심  $O_1$ 에 이르는 벡터를  $\vec{OO_1}$ 이라고 보고, 공구와 피삭재의 접점인 T와 중심 좌표 O가 이루는 벡터를  $\vec{OT}$ 라고 정의하면 이 두 벡터의 값은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{OO_1} = (c_1 + l(c_2 - c_1), d_1 + l(d_2 - d_1)) \quad 0 \leq l \leq 1 \quad \text{①}$$

$$\vec{OT} = (x_1 + l(x_2 - x_1), y_1 + l(y_2 - y_1)) \quad 0 \leq l \leq 1$$

피삭재의 CAD Data는 2.2에서 수행한 바와 같이 피삭재의 꼭지점 표기시 시계반대방향(CCW)으로 한다.

#### 3.3.2 좌표계에서 도형의 변환

좌표계에서 도형의 변환은 Fig.3에서 보여지는 순서대로 진행된다.

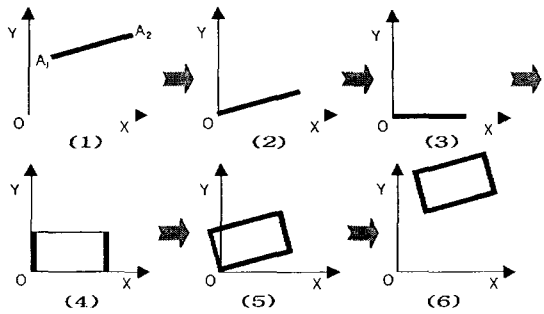


Fig.3 좌표계에서 도형의 변환

- (1) X축, Y축으로 이루어진 좌표계를 설정한다.
- (2)  $A_1$ 을 O로 직선이동시킨다.
- (3)  $A_1A_2$ 를  $\phi = \cos^{-1} \frac{c_2 - c_1}{\sqrt{(c_2 - c_1)^2 + (d_2 - d_1)^2}}$ 만큼 CW로 회전이동한다.
- (4) 직사각형의 네 꼭지점의 값을 구한다.  
→  $(c_1^* \pm R)$   $(c_2^* \pm R)$   
(여기서  $c_1^*$ ,  $c_2^*$ 는  $c_1$ ,  $c_2$ 의 회전이동된 값)
- (5) 네 꼭지점에 대해 CCW로  $\phi$ 만큼 회전이동한다.
- (6) 원위치로 직선이동한다.  
⇒ (1)~(6)의 과정을 정리하면  
[  $T_{A \rightarrow O} R_\phi$  [꼭지점의 계산]  $R_{-\phi} T_{O \rightarrow A}$ ]이 된다.

여기서  $P_1$ ,  $P_2$ 와 네 꼭지점  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ 와의 교점인  $Q_1(x_1, y_1)$ ,  $Q_2(x_2, y_2)$ 를 구한다.

#### 3.3.3 Cohen Sutherland 알고리즘

교점의 존재여부 및 교점의 개수는 Cohen Sutherland 알고리즘을 적용하여 판별한다.[3]

#### 3.3.4 Exit 영역

$$\vec{O_1T} = \begin{pmatrix} x_1 + l(x_2 - x_1) - c_1 - l(c_2 - c_1) \\ y_1 + l(y_2 - y_1) - d_1 - l(d_2 - d_1) \end{pmatrix} \quad \text{②}$$

이므로,

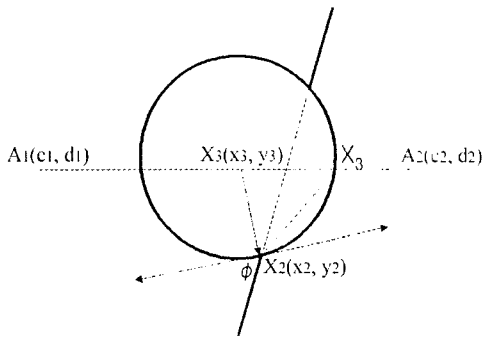
$$(x_2 - x_1)(x_1 + l(x_2 - x_1) - c_1 - l(c_2 - c_1)) + (y_2 - y_1)(y_1 + l(y_2 - y_1) - d_1 - l(d_2 - d_1)) = 0 \quad \text{③}$$

또한  $\|\vec{O_1T}\|^2 = R^2$ 에서

$$\|x_1 + l(x_2 - x_1) - c_1 - l(c_2 - c_1), y_1 + l(y_2 - y_1) - d_1 - l(d_2 - d_1)\|^2 = R^2 \quad \text{④}$$

위의 두 식으로부터 미지수 t와 l의 값을 구한다. 이 경우에 Exit 영역은  $l^* < t < 1$ 이다. 또한 Exit 영역은  $Q_1Q_2$ 에서 (0, l)이나 (l, 1)이다. 이것은 접점 T에서  $Q_1Q_2$ 와  $TQ_1$ 의 내적의 값이 +인지 -인지의 여부로 결정한다.

3.3.5 Exit 각



Exit 각은 공구와 피삭재가 만나는 부분의 사이각으로 정의할 수 있다. Fig.4와 같은 경우 공구의 회전 방향 벡터와 피삭재의 방향 벡터에 의해서 표시된  $\phi$  를 이 부분에 있어서 Exit 각으로 정의할 수 있다.

(1) Exit 각 알고리즘 적용

Fig.4에서 공구의 이동경로인  $A_1(c_1, d_1)$ ,  $A_2(c_2, d_2)$ 와 공구와 피삭재의 접점인  $X_2(x_2, y_2)$ 는 주어졌다고 볼 수 있다. 여기서 공구의 이동경로는 CAM 데이터의 정보를 수집하는 과정에서 정의될 수 있고, 접점인  $X_2$ 는 사용자가 마우스로 선택하는 점을 인식하여서 가능하다. 실제적으로 Exit 각을 계산하기 위해서는 공구가  $X_2$  점에 왔을 때의 공구의 중심점을 알아야 하는데, 그 계산 과정은 아래 보여지는 것과 같다.

$X_3(x_3, y_3)$ 를 공구 원점의 좌표라 하자.

$X_3$ 의 좌표는  $(c_1 + k(c_2 - c_1), d_1 + k(d_2 - d_1))$ 이며,

$$\| \vec{X_3 X_2} \|^2 = R^2 \text{로 부터}$$

$$(c_1 + k(c_2 - c_1) - x_2)^2 + (d_1 + k(d_2 - d_1) - y_2)^2 = R^2$$

$k$ 값에 의해서  $X_3$ 와  $X_3'$ 가 구해지며, 여기서 small  $k$ 를 선택한다.

$$\vec{X_3 X_2} = ((x_2 - c_2 + k(c_2 - c_1)), (y_2 - d_2 + k(d_2 - d_1)))$$

$\vec{X_3 X_2}$  와 직각 vector인

$$\vec{v} = \left( -\frac{y_2 - d_2 + k(d_2 - d_1)}{x_2 - c_2 + k(c_2 - c_1)}, 1 \right) \text{를 구하여}$$

if  $\vec{v} \times \vec{X_3 X_2} > 0 \rightarrow \vec{v}$  로 한다.

if  $\vec{v} \times \vec{X_3 X_2} < 0 \rightarrow -\vec{v}$

피삭재의 edge를  $\vec{u}$  라 하면 exit 각은

$$\phi = \cos^{-1} \frac{\vec{u} \cdot \vec{v}}{\|\vec{u}\| \|\vec{v}\|} \quad (5)$$

여기서 계산된  $\phi$ 는 현재 공구 위치에서의 Exit Angle 이라고 볼 수 있다.

4. 적용

위에서 구한 이론적인 알고리즘을 기초로 하여 밀링가공시 Exit 버를 구하는 프로그램을 Windows 환경에서 개발하였다. 형상데이터는 DXF 형태로, 또 절삭데이터는 CAM의 데이터로 입력받으며 전체적인 프로그램은 Visual Basic을 이용하여 개발하였다.[4]

4-1 프로그램 개발

(1) Milling 버 프로그램 실행화면(Fig.5)

Fig.5는 Milling 버의 초기화면을 보여준다. 여기서 사용자는 Select Material에서 제공되는 AL6061, AL1050, SM20C, SM45C 등 4개의 피삭재 종류 중 하나를 선택할 수 있고, Tool Geometry 영역에서 공구의 형상(Lead Angle, Axial Angle, Radial Angle)에 관한 정보를 선정할 수 있다. 또한, 절삭조건을 포함하고 있는 CAM 데이터를 선정하여서 절삭조건에 관한 정보를 입력받을 수 있다. 이렇게 입력받은 정보는 Cutting Condition 영역에 표시된 Diameter, Feed Rate 및 Spindle RPM 을 통해 사용자에게 전달될 수 있다. 그리고, CAD 데이터를 선택하여서 피삭재에 대한 정보를 얻을 수 있다.

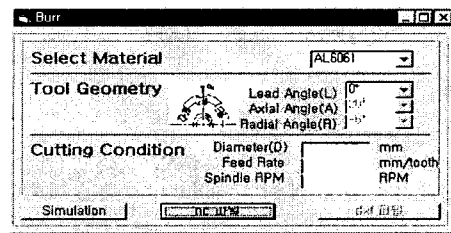


Fig.5 Milling 버 프로그램 실행화면

(2) 버 형상 윈도우(Fig.6)

이전 단계에서 얻어진 CAD와 CAM 데이터를 이용하여 공구 및 피삭재의 위치를 표시하고 공구의 이동 경로에 따라 발생하는 버를 표시한다. 보여진 그림 중 왼쪽의 원 부분은 공구의 형상을 나타내고 오른쪽의 박스는 피삭재의 형상을 나타낸다. 그리고, 공구의 이동 경로를 그 사이에 표시해주어서 사용자가 전체적인 상황을 쉽게 파악할 수 있게 했다. 화면에 보여지는 공구와 피삭재 사이의 관계에 의해서 버의 위치를 계산할 수 있다. 이렇게 계산되어진 부분은 붉은색으로 표시되어서 사용자가 쉽게 알아볼 수 있다. 피삭재에 표시된 버를 사용자가 선택하게 되면 그 부분에 대한 상세 정보를 결과 화면에서 얻을 수 있다.

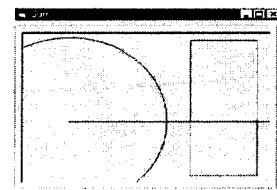


Fig.6 버 형상 윈도우

(3) 결과 화면(Fig.7)

Fig.7은 본 프로그램의 최종 결과 윈도우이다. 이 부분에서는 이전 단계부터 사용자가 선택해온 공구의 형상과 절삭조건을 Tool Geometry와 Cutting Condition에 표시하여서 이전 선택을 검증할 수 있는 기회를 제공한다. Tool Geometry와 Cutting Condition의 과제에 의해서 구해진 Exit Angle은 버의 형상을 예측하는데 중요한 자료로 이용된다. 또한, Workpiece 부분에서는 사용자가 선택한 피삭재에 대한 정보를 보여준다. 그리고, 이전 그래픽 단계에서 선택한 버 형상에 대한 정보를 Exit Angle 및 Workpiece에 의해서 버의 높이와 폭, 각도를 가지고 있는 도표로 표시하고 실제 버 형상에서의 각각의 위치 및 실제 버 형상을 그림을 이용하여 제공해 준다.

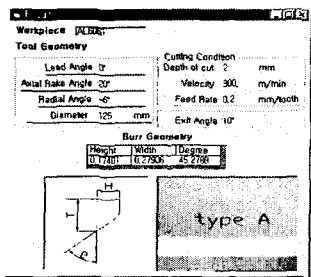


Fig.7 결과 화면

(4) 시뮬레이션

Milling 버 화면에서 simulation 버튼을 선택하면 Fig.8와 같은 윈도우를 통해 결과화면을 볼 수 있다. 이 윈도우는 피삭재와 절삭속도, rake 각과 절삭 깊이에 따라 버 발생과정을 보여준다. 그리고, 절삭 작업 과정에서 발생하는 피삭재의 Temperature와 Strain에 대해서도 확인할 수 있다.

또한 버 발생 simulation의 초기화는 피삭재와 Cutting Speed, Rake 각, Depth를 선정하고 Initialize 버튼을 클릭해서 얻을 수 있고, 절삭작업 과정에서 발생하는 Temperature 윈도우를 통하여 선택된 버의 가공 후의 Temperature에 대한 정보를 표현할 수 있으며, 절삭작업 과정에서 발생하는 피삭재의 Strain 윈도우로서, Initialize에 의해 선택된 피삭재와 절삭조건을 갖고 만들어진 버의 작업 후의 Strain에 대한 정보를 표현한다.

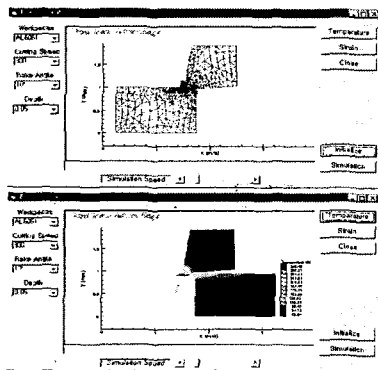


Fig.8 시뮬레이션 실행화면

5. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 먼저 CAD Data의 인식방법을 알아보았다. CAD Data인 DXF포맷에서 객체의 표현은 Entities Section에서 이루어지고 있었으며, Code 내용의 해독을 통해 객체의 형상을 인식할 수 있었다.

인식된 형상을 CCW 방향으로 인지하기 위하여 형상 내/외부에 임의의 한 점을 선정하였다. 채택된 점으로부터 형상의 각 꼭지점을 연결하여 선분간에 이루는 각도의 누적합을 구하고, 이 결과를 통해 형상의 방향을 인식하는 작업을 수행하였다.

이와 같이 피삭재에 대한 인식작업을 마친 후에는 수학적이고 기하학적으로 완벽하게 Milling 가공시 Exit 버가 발생되는 구역을 구하는 과정을 유도하여 Exit 버 생성시 접점 및 Exit 각을 계산하였으며, 이를 바탕으로 Visual Basic을 기반으로 한 Exit 버 형성 예측 프로그램을 개발하였다.

이러한 과정은 궁극적으로 Milling 가공시 생성되는 Exit 버를 최소화하여 작업효율 증대 및 생산비의 효율적 사용을 목적으로 한다.

향후 연구 과제로는 concave 등 실제 작업 환경에서 사용되는 여러 가지 형상의 피삭재를 대상으로 Exit 버에 대한 접근을 시도하여 실제 작업에서와 유사한 환경을 고려하고자 한다. 또한 밀링작업시 생기는 버는 Exit 각의 크기에 따라서 Primary 버와 Secondary 버로 나뉘어진다. 향후 프로그램의 개발 과정에는 Primary 버와 Secondary 버를 판별하여 결과를 다르게 도시할 수 있도록 할 계획이다.

참고문헌

1. D. Dornfeld, "Burr Minimization in Face Milling : A Geometric Approach", ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, May 1997
2. AutoCAD Release 14 Reference Manual, Autodesk, Inc., 1996
3. Vera B. Anand, "Computer Graphics & Geometric Modeling for Engineers", WILEY, 1993.
4. 이형배, "이형배의 비주얼 베이식 6", 사이버출판사, 1998