

엔드밀 제작용 연삭숫돌형상과 가공조건 결정을 위한 프로그램 개발

고 성 립*

Development of Software for Determining Grinding Wheel Geometry and Setting Condition in End Mill Manufacturing

Sung-Lim Ko*

ABSTRACT

As tools for machining precision components, end mills and ball end mills are widely used. For the end mills have longer cylindrical shape comparing diameter, they are liable to deflect when machining and induce geometrical error and deterioration of surface roughness. To improve the stiffness and the sharpness of the cutting edge of end mill, a software for manufacturing end mills are developed. The program predicts the result of helical flute grinding and the configuration of cutting edge which is located in cylindrical surface. Furthermore to facilitate the manufacturing end mills using CNC grinding machine, the setting conditions which satisfy the geometrical requirements like tool rake angle and stiffness are obtained.

Key Words : end mill(엔드밀), CNC grinding machine(CNC 공구 연삭기), helical flute grinding(나선홈 연삭)

1. 서 론

NC 공작기계의 발달과 함께 공구의 위치제어 및 공구경로 제어능력이 발달하면서 종전의 수평형 밀링머신에 의존하던 평면가공이나 윤곽가공이 수직형 CNC 밀링머신에서 이루어지면서 공구의 사용도 정면밀링커터나 엔드밀로 대체되고 있는 실정이다. 평면가공을 위한 정면밀링커터는 주로 공구반경에 비하여 작은 절삭깊이로 가공하기 때문에 공구의 강성의 측면보다는 적정 공구경사각의 사용으로 절삭성의 향상에 주로 초점이 맞추어져 있고 대

부분의 경우 인서트(insert)를 장착한 밀링커터가 사용되고 있다. 윤곽가공은 가늘고 긴 세장형의 엔드밀이 주로 사용되고 있다. 대부분 엔드밀의 작은 직경으로 인하여 인서트를 장착한 형태로의 전환이 매우 제약이 되기 때문에 아직도 날부와 자루부가 동일재질인 일체형타입(solid type)을 많이 사용하고 있다. 인서트의 제작은 금형제작 기술과 장비의 발달 그리고 분급야금법의 발달로 인하여 다양한 형상이 대량으로 제작이 되고 있으며 이를 장착하여 사용하는 밀링커터바디(milling cutter body)는 CAD/CAM을 이용한 자동생산라인이 비교적 잘 구축이

* 건국대학교 기계설계학과

되어 있는 실정이다. 이와같은 인서트 장착형의 공구에서는 공구경사각과 같은 절삭성에 관한 특성은 인서트에서 고려되고 칩의 배출이나 공구의 강성과 같은 특성은 커터 바다에서 고려됨으로서 문제의 해결을 분담함으로써 좋은 절삭성과 강성을 보유한 공구를 개발하기가 비교적 쉽다. 이에 비하여 일체형타입의 공구에서는 이와 같은 문제들을 제작시에 동시에 고려하여야 하기 때문에 제약이 더 크다고 할 수 있다. 엔드밀의 생산을 위하여 여러개의 연삭숫돌을 보유하고 5축 이상의 자유도를 갖는 우수한 CNC공구연삭기가 최근에 개발됨에 따라 이를 이용하여 엔드밀의 생산효율을 증대시키기 위한 노력이 큰 관심의 대상이 되었다.

엔드밀의 경우에는 절삭성을 좌우하는 인선부와 강성및 칩배출의 특성을 결정하는 나선형홈부의 가공이 동시에 이루어져야 하기 때문에 가공시 정밀도와 동일 형상의 가공을 재현하기가 매우 어려워져서 제품의 성능과 생산성에 많은 문제를 안고 있다. 엔드밀 형상의 특징은 세장형으로서 가공깊이가 엔드밀의 직경에 비하여 비교적 큰 형태이기 때문에 가공중에 측면방향의 절삭저항이 작용하여 변형되기 쉽다. 이 때문에 공구강성이 가공정밀도에 크게 영향을 미치게 되므로 설계시에 이에 대한 배려가 필수적이다. 또한 절삭날이 공구의 측면에 위치함으로써 회전용 공구에서 칩을 배출시키기 위하여 설치하는 나선형홈의 가공은 절인부와 몸체부를 동시에 가공하기 때문에 매우 복잡적이고 중요한 효과를 수반한다고 할 수 있다. 나선형홈 가공의 복잡성으로 인하여 다른 공구에서와 같이 공구경사각이나 여유각이 공구면의 평면상태에서 정의되지 못하고 곡면상태에서 임의의 위치에서 주관적으로 결정되기 때문에 정의하기가 매우 어려운 실정이다. 또한 주로 엔드밀의 재종으로 고속도강이나 초경이 사용되기 때문에 연삭숫돌에 의해서 가공이 이루어진다. 이 경우에 가공중에 발생하는 연삭숫돌의 마모로 인한 공구의 형상이 변화하기 때문에 나선형홈의 형상도 더불어 변화함으로써 균일한 형상을 보장하기가 어렵다. 종전의 만능 공구연삭기에서는 연삭숫돌의 마모에 의한 형상변화로 인하여 주로 경험에 의존한 자료로서 제작함으로써 균일한 형상을 확보하기가 어려운 실정이었다. 최근에 NC공작 기계의 발달과 함께 위치제어능력이 확보되고 반복작업이 가능해짐에 따라 CNC 공구연삭기가 활발하게 개발이 되었다. 이와 함께 드릴과 엔드밀이나 전용 회전공구와 같은 여러종류의 공구를 자동으로 생산하기 위한 소프트웨어개발이 최근에 활발하게 진행되고 있다. 회전용 공구

의 설계와 제작에 있어서 가장 어려운 부분은 자루부의 나선형홈 가공시에 발생하는 언더컷(undercutting) 현상에 의한 사용 숫돌 단면형상보다 더 큰 단면이 형성됨으로써 가공조건에 따른 가공결과와의 예측이 어려운 것이다. 임의의 숫돌 단면형상을 사용할 때 나선형홈 가공결과를 예측할 수 있는 소프트웨어를 개발하기 위한 연구가 계속되어 왔다. 첫째 방법은 사용하는 일정두께의 연삭숫돌이 매우 두께가 얇은 숫돌요소로 이루어져 있다고 가정하여 각요소의 가공결과를 기하학적으로 구한 후 각 요소의 결과를 중첩함으로써 가공결과를 예측할 수 있었다^(1,2,3). 또 다른 방법은 나선형홈의 가공시에 숫돌과 엔드밀과의 접촉점(contact line)에서 공통법선은 반드시 축을 통과한다는 기본관계에 의한 수학적인 관계에 기초하여 나선홈 단면형상을 예측하였다^(4,5,6). 이와함께 그결과를 드릴제작을 위한 CAD용 소프트웨어로 발전시키려는 노력도 아울러 진행되어왔다^(3,4,6). 이에 반하여 회전공구중 주요한 역할을 하는 엔드밀 제작을 위한 CAD용 소프트웨어의 개발에는 별다른 진전이 없었고 경험에 의해서 축적된 가공자료의 데이터 뱅크(data bank) 구축에 의한 통계적인 방법이 최근에 소개되었다⁽⁷⁾. 그러나 이 방법은 수없이 많은 연삭숫돌의 마모에 의한 변화와 형상의 다양성과 정확한 가공을 위한 세팅치수를 제공해 주기에는 현실성이 결여되었다고 판단이 된다. 실용성있는 엔드밀 가공전용 소프트웨어는 일부 CNC공구연삭기 제작업체에 의해서 개발이 되어서 제한된 범위에서 상품화되고 있다. 그러나 이 경우에서도 응용도가 자체 CNC공구연삭기의 제원과 각장비마다 미리 정해 놓은 연삭숫돌의 형상에 매우 제한이 되어 있다. 엔드밀 제작은 드릴의 경우와 달라서 나선형 홈가공시 절삭날이 동시에 생성되기 때문에 절삭날 부분의 형상이 매우 중요하다. 본 논문에서는 앞서서의 연구⁽³⁾를 토대로 앞에서 기술한 바와 같은 엔드밀 제작시 설계요소들, 즉 공구경사각과 공구강성을 만족하는 엔드밀 제작전용 CAD용 소프트웨어를 개발하고자 한다.

2. 엔드밀의 특성 및 설계조건

엔드밀의 형상은 Fig.1에 나타난 바와 같이 공구직경에 비하여 공구깊이의 비가 큰 세장형 공구로서 주로 다양한 곡면형상을 포함한 윤곽가공과 키웨이(key way)와 같은 미소량의 축방향의 가공과 반경방향의 가공을 동시에 수행하기 위한 형상적인 특징을 갖추고 있다. 이와 같은 가공을 위하여 절삭날이 축방향의 끝부분과 반경방향의 외

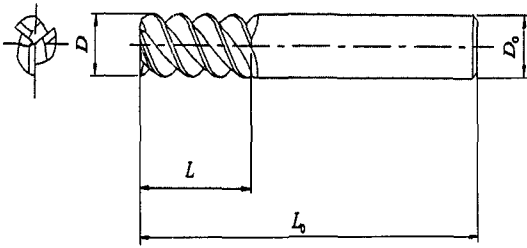


Fig.1 General configuration of end mill

주부에 나선형으로 형성이 되어 있다. 또한 가공 중 발생한 칩(chip)의 원활한 배출과 절삭유 공급을 위한 공간으로서 적정 크기의 나선형의 홈, 즉 flute가 필요하다. 엔드밀의 경우 대부분 윤곽가공을 수행한다고 가정할 때, 우선적으로 측면절삭날의 형상과 측면방향으로의 변형에 대한 저항에 유리한 형상이 필수적이다.

모든 절삭공구에서와 마찬가지로 가공 중 절삭저항이 가능한 적게 발생하는 절삭날의 형상을 갖추기 위하여 칩 흐름방향으로의 적정한 공구경사각과 공구여유각을 설치하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 이와 같은 칩흐름 방향으로의 형상은 공구날부의 단면형상과 나선홈의 각(helix angle)의 관계에 의해서 결정된다. 또 다른 주요한 현상으로는 엔드밀의 경우 주로 측면방향의 저항으로 인하여 가공중의 공구변형으로 인한 공구파손과 가공면의 정밀도가 불량해지기 쉬운 사실이다. 이를 방지하기 위해서는 앞에서 언급한 절삭저항의 감소와 강성이 우수한 형상을 갖춘 공구형상이 필요하다. 측면방향으로의 변형에 대한 강성은 공구의 축방향에 수직한 단면의 면적이 나 2차 면적 모멘트가 큰 경우에 확보된다. 이상에서 관찰한 엔드밀에서의 절삭특성은 측면가공 시 측면날부의 형상과 flute부의 단면형상에 의해서 결정됨을 쉽게 알 수 있다. 이 때문에 엔드밀의 나선홈 가공은 절삭날부의 형상과 공구강성도 함께 결정하기 때문에 그 중요성은 매우 크다 할 수 있다. 대부분의 경우 나선홈 가공시 연삭숫돌의 형상이 고정되어 있을 경우에는 공구경사각과 단면의 형상이 엔드밀과 연삭숫돌의 상대위치가 결정되면 동시에 결정되기 때문에 사전에 선택한 연삭숫돌이 가공할 수 있는 영역을 파악하여야 한다. 이 과정에서 숫돌의 형상이 적절하지 않을 경우에는 형상을 변화시키면서 적정형상의 개괄적인 결정이 선행되어야 한다. 그 후에 상대위치를 변화시켜서 적정범위에서의 공구경사각과 공구강성을 얻게 된다. 그 이외의 공구여유각이나 리세스부(recess)의 크기는 나선형홈 가공 이외의 각 작업에 의해

서 이루어진다. 그러나 공구제작의 생산성 향상을 위하여 공구경사각, 공구강성과 리세스부의 크기까지 포함하여 1회가공에 의한 완성작업을 수행하고자 할 때에는 연삭숫돌의 단면형상의 설계가 매우 중요하다. 이것은 앞의 연구에서 수행한 나선형홈 가공의 기하학적 연구의 결과⁽¹⁾로부터 개발된 소프트웨어의 기본구조를 반복하여 적용함으로써 연삭숫돌의 적정형상을 주어진 상대위치에 대하여 얻을 수 있다. 결론적으로 본 연구에서는 앞에서 언급된 엔드밀의 설계조건을 만족하는 형상을 얻기 위하여 각 형상조건을 만족하는 가공을 수행할 여러 개의 연삭숫돌을 선정 한 후에 이들을 장착한 CNC공구연삭기를 사용하여 엔드밀 제작시 연삭숫돌의 상대위치를 결정하기 위한 제작전용 소프트웨어를 개발하고자 한다.

3. 엔드밀 제작용 연삭숫돌에 의한 나선형홈 가공의 형상 예측

엔드밀 제작에 사용되는 전형적인 연삭숫돌의 형상인 일정한 두께의 두개의 다른 기울기를 갖는 직선의 조합으로 이루어진 다이아몬드숫돌 형상의 예가 Fig.2에 주어져 있다. 숫돌의 두께방향에 따른 일정한 간격의 n개의 매우 얇은 숫돌로의 분리 작업에 의해서 각 숫돌요소의 반경을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

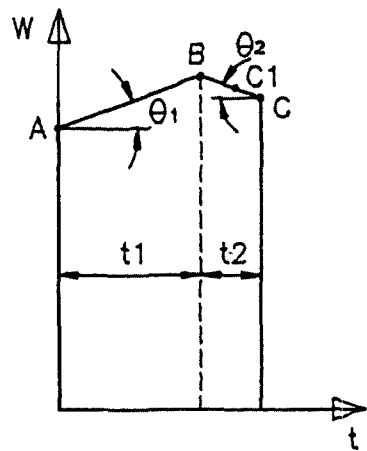


Fig. 2 Configuration of Grinding Wheel for Manufacturing End Mill

$$W_i = f(t_i) \quad i = 1, n \quad (1)$$

Fig.3과 같이 엔드밀 가공시, 초기 연삭숫돌 요소의 중심좌표, $O(X_o, Y_o, Z_o)$,로부터 거리, t , 만큼 떨어진 숫돌요소의 반경이 W_i 일 때, 각 숫돌요소의 중심좌표, $O'(X_o', Y_o', Z_o')$,가 다음식으로 표시될 수 있다.

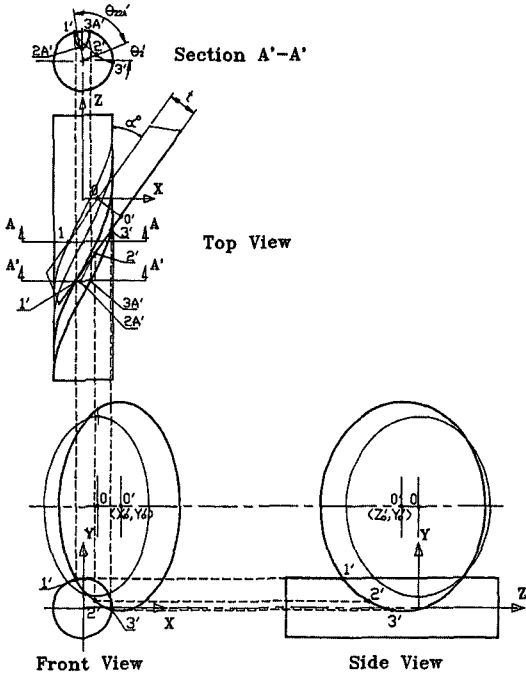


Fig. 3 Schematic Illustration of Helical Groove Operation with Finite Wheel Thickness

$$\begin{aligned} X_{o'} &= X_o + t \cos \alpha \\ Y_{o'} &= Y_o \\ Z_{o'} &= -t \sin \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

이때에 각 숫돌요소의 외곽형상은 각 좌표에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{(X - X_{o'})^2}{(W_i \sin \alpha)^2} + \frac{(Y - Y_{o'})^2}{W_i^2} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{(Z - Z_{o'})^2}{(W_i \cos \alpha)^2} + \frac{(Y - Y_{o'})^2}{W_i^2} = 1 \quad (4)$$

위와 같이 나타낼 수 있는 각 연삭숫돌에 의한 가공결과와 각각의 결과를 종합한 결과를 임의의 축에 직각인 단면에서 예측하는 작업은 앞의 연구(3)에서 소개한 과정의 반복작업을 통하여 엔드밀축에 직각인 단면에서의 나

선형 홈가공의 형상이 얻어진다. Fig.4에서는 주어진 숫돌형상에 의한 각 숫돌요소들의 가공결과가 잘 나타나 있고 이것의 외곽면을 취함으로써 나선형홈의 가공결과가 나타나 있다. 이때 엔드밀의 중요한 요소인 강성의 크기를 나타내는 내접원의 크기를 만족하도록 숫돌의 중심이 결정된다. 일반적인 엔드밀 가공용 연삭숫돌은 Fig.2에 나타난대로 두개의 직선으로 이루어져 있는데 각 부분의 각도, θ_1, θ_2 와 각각의 두께, t_1, t_2 로 정의된다. 나중에 다시 언급하겠지만 이 부분의 형상은 강성의 향상을 위하여 원호의 일부분을 이룰 수도 있다. Fig.2에서의 숫돌은 식(1)과 같이 임의의 n개의 얇은 숫돌요소로 분리되었으며 각 숫돌요소들의 거동의 결과가 Fig.4에서 각 숫돌요소 'A'의 가공결과는 Fig.4에서 A'-A''으로 표시되는 홈형상에 해당한다. 숫돌요소 'A'에 인접한 숫돌요소에 의한 중첩 가공결과로서 전체 홈형상에 기여하는 부분은 A'-A''만이 남게 되기 때문이다. 이와 같은 중첩가공의 결과로서 Fig.2에서 A-B의 숫돌요소에 해당하는 가공결과는 Fig.4에서 A'-A''과 A''-B에 해당한다. 각 요소별로 가공 후 홈형상에 1:1에 유사한 대응관계를 유지하고 있음을 발견할 수 있다. n개의 유한한 숫돌요소의 경우에는 각 숫돌요소의 두께의 크기에 의해서 약간의 영향을 받지만 실제 숫돌의 경우 연속체로서 무한한 갯수의 숫돌요소로 이루어져 있기 때문에 두께의 영향없이 대응관계가 이루어진다고 가정할 수 있다. Fig.2에서의 숫돌요소의 B-C₁에 해당하는 가공홈의 형상은 Fig.4의 B-C₁와 1:1 대응관계에 있음을 알 수 있다. 이상의 관찰로부터 숫돌의 단면형상과 가공홈의 형상과는 A'-A''부분을 제외하고는 1:1 대응관계를 이루고 있음을 알 수 있다. Fig.4에 나타난 나선홈 가공형상 부분 중에서 A'부분은 엔드밀의 절삭날에 해당하며 A'-A''에 이르는 경로에 의해서 공구경사면의 형상이 결정되고 반경이 최소가 되는 A''의 위치, 즉 내접원의 크기에 의해서 공구의 강성의 크기가 결정된다. 또한 A''-B부분의 경로에 의해서 공구의 강성과 칩배출의 성능이 결정되므로 이들 각 부분에 해당하는 숫돌의 단면형상의 설계가 매우 중요한 요소가 된다. 숫돌의 B-C₁부분에 해당하는 나선홈의 B-C₁부분은 Fig.1에서 공구인선부의 두께를 결정하는 마아진부를 형성하게 된다. 앞에서 나선형 홈가공에 가담되지 않은 부분은 숫돌의 C₁-C이다. 이 때문에 경우에 따라서는 Fig.2에서 t₁에 해당하는 요소가 없는 숫돌을 사용하기도 한다. 이상의 숫돌형상과 나선홈 형상과의 관계로부터 실제 엔드밀에서의 역할과 중요성을 연결함으로써 앞에서의 형상예측용 소프트웨어

를 이용한 엔드밀의 설계와 제작을 위한 전용 소프트웨어를 개발하고자 한다.

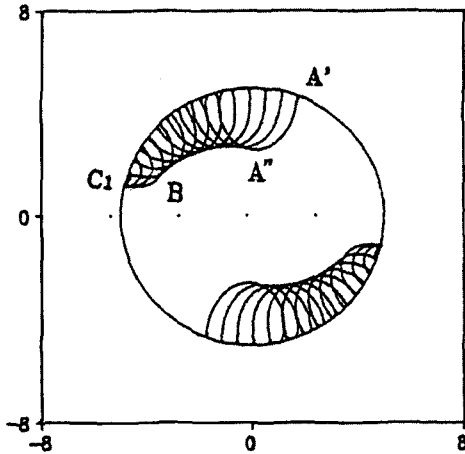


Fig.4 Simulation Results by Each Element of Grinding Wheel in Helical Flute Grinding

4. 엔드밀 제작을 위한 전용 소프트웨어 개발

실제 엔드밀을 제작함에 있어서 앞에서의 연구결과⁽³⁾인 나선홈 가공결과 예측용 소프트웨어의 결과 검토에서 언급한 바와 같이 절삭인선부와 공구경사면에 해당하는 Fig.4에서의 A'A"부분이 스톨요소와 1:1 대응관계를 이루지 못함으로 원하는 단면형상으로부터 스톨형상을 예측하는 것이 불가능하지만 드릴의 경우와 같이 1:1 대응관계를 유지하면 앞에서의 작업의 역작업에 의한 스톨형상예측이 가능할 것이다⁽³⁾. 그러므로 엔드밀 제작을 위한 스톨형상 예측이 어렵기 때문에 경험에 의한 대략적인 형상을 선택하여 결정한다. 앞 절에서 검토한 바와 같이 엔드밀의 중요한 요소인 공구경사면과 공구 내접원의 크기가 스톨의 하나의 단면(Fig.2에서 스톨요소 A에 의해서 결정되고 나머지 요소에 의해서 공구강성과 칩배출을 위한 나선형홈의 남은 형상을 결정한다. 또한 엔드밀 가공시 엔드밀과 스톨의 상대위치, 즉 스톨중심의 위치, $O(X_p, Y_p)$, 스톨의 설치각, α , 에 의해서 최종적으로 결정된다. 공구연삭기에서의 공구연삭작업은 엔드밀에 대한 스톨중심의 상대위치와 설치각의 결정에 의해서 자동으로 이루어지기 때문에 그 결과에 대한 예측이 필수적이다. 결론적으로 본 연구에서는 가공하고자 하는 엔드밀의 형상을 얻기 위하여 미리 정해진 형상의 연삭스톨을 사용

할 때 요구되는 상대위치를 결정할 수 있는 소프트웨어를 개발하고자 한다. 물론 여기서는 주어진 연삭스톨의 형상으로 가공 가능한 영역에 대한 검토가 선행이 되어야 한다. 가공하고자 하는 엔드밀의 형상에 따라 1차적으로 개괄적인 연삭스톨의 형상을 결정한 후에 Fig.5에 나타난 엔드밀의 주요한 설계요소인 공구경사각(γ)이나 내접원의 크기(D_w), 리세스부(recess)의 크기(D_r) 및 마아진의 크기(θ_m)를 만족하기 위하여 엔드밀에 대한 연삭스톨의 상대위치가 정확하게 결정이 되어야 한다. 그 결과가 CNC 공구연삭기의 위치결정기구로 전달이 되어 이동한 후에 가공을 시작하게 된다.

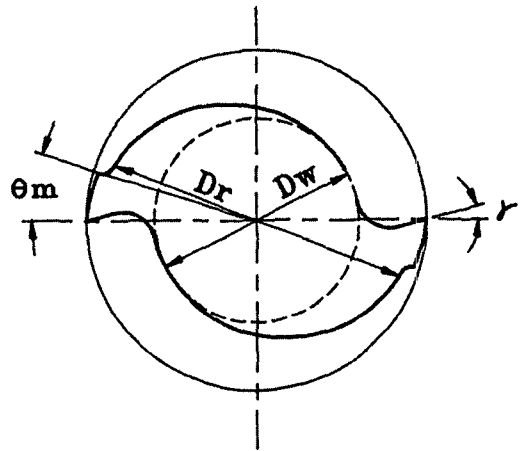


Fig. 5 Design Factors for End Mill

(1) 연삭스톨의 형상 결정

대부분의 경우에 CNC 공구연삭기에서 가공을 할 때는 이미 연삭스톨의 형상이 이미 결정이 되어서 원하는 공구와 스톨의 상대위치만 입력한 후에 프로그램에 의한 작업을 수행한다. 그러므로 연삭스톨의 형상결정이 선행이 되어야 한다. Fig.2와 Fig.4의 관계로부터 살펴본대로 공구경사면에 해당하는 A'A"부분의 가공은 스톨요소 A에 의해서 가공이 되고 나선홈 형상을 결정하는 A"-B부분은 Fig.4에서 스톨의 경사면 A-B의 형상에 의해서 결정된다. Fig.2에서 경사각 θ_1 와 t_1 의 크기에 의해서 엔드밀의 단면형상이 결정된다. 물론 주어진 형상에서도 스톨의 상대위치 X_p, Y_p 와 설치각(α)의 크기에 의해서 변화하지만 그 변화의 범위가 경사각의 크기에 의해서 결정된다. 이와 같은 형상은 엔드밀의 용도에 의해서 결정된다. 예를 들면 경도가 높은 강(steel)을 가공한다면 절삭저항이 크

게 발생하기 때문에 공구강성이 커야하고 칩의 체적이 작기 때문에 나선형홈의 단면적이 클 필요가 없다. 이 때에는 경사각의 크기와 나선홈의 깊이를 감소시킨다. 또 다른 예로서 연성이 크고 경도가 낮은 알루미늄 합금을 가공한다면 낮은 절삭저항과 큰 칩의 부피로 인하여 나선홈의 면적이 커야 하기 때문에 경사각과 깊이를 증가시켜서 가공량을 증가시킨다. 1차 경사면 부분의 형상과 크기는 Fig.5에서 엔드밀의 나선형홈부의 형상을 결정하고 스톱 요소 B가 사용될 때에는 날부 두께를 나타내는 마아진부의 크기를 결정한다. 경우에 따라서는 스톱의 2차 경사면에 해당하는 경사각과 두께인 θ_2, t_2 부분을 없애기도 한다. 이 때에는 Fig.5에서 나타난 리세스부를 형성하는 단이 발생하지 않는다. 이와같은 사전 작업은 제3장에서 소개된 형상예측용 소프트웨어를 이용하여 검색을 하여 적정 형상을 미리 결정한다. 결정된 연삭숫들의 형상은 엔드밀 제작을 위한 상대위치 결정용 소프트웨어의 입력으로 제공된다. Fig.6에는 Table 1에서 제시된 엔드밀의 형상조건을 만족하는 가공을 위한 여러 형태의 연삭숫들을 사용한 결과를 앞에서 소개된 소프트웨어를 사용하여 예측하였다. 모든 엔드밀은 날의 수가 4개이고 직경(D)이 8mm, 내접원의 크기(D_w)가 5.6mm이며 공구경사각(γ)가 11° 를 만족하여야 한다. 공구 나선홈의 각(β)의 크기가 30° 와 50° 의 두 경우를 가공하고자 한다. 나선홈각이 30° 인 경우에 연삭숫들의 1차 경사각이 10° 와 20° 의 두 종류를 사용하였다. 그 결과가 Fig.6(a)와 (b)에 나타나 있다. (b)의 경우 과도한 홈가공이 이루어졌음을 알 수 있다. 그러므로 이 경우에는 1차 경사각이 10° 인 연삭숫들이 적합함을 알 수 있다. 물론 앞에서 소개될 엔드밀의 설계조건을 만족하기 위하여 어느 정도의 범위내에서 단면형상이 변할 수 있다. 나선홈각이 50° 인 경우에도 연삭숫들의 1차 경사각이 0° 와 -10° 의 두가지를 적용하였는데 0° 의 경우에는 과도한 홈가공이 이루어져서 여유면을 가공할 여유가 없음을 알 수 있다. -10° 의 경우에는 너무 적은 양이 가공되었으므로 적정 연삭숫들의 형상은 이 두

가지 형태의 중간에서 발견되어야 할 것이다. 이때에 1차 경사각(θ_1)이 음의 값, -10° 를 갖는것은 2차경사각(θ_2)이 양의 값, 10° 를 갖는 것과 동일한 형상을 갖고 있음을 유의하여야 한다.

(2)연삭숫들의 상대위치 결정

엔드밀 가공을 위한 연삭숫들 위치결정용 소프트웨어는 크게 두 부분으로 이루어져 있다. 1단계로서 주어진 스톱 형상을 가지고 Fig.5에 의해서 요구되는 엔드밀의 형상 조건, 즉 인선부의 공구경사각 γ 와 내접원의 크기 D_w 를 만족하는 연삭숫들의 위치 (X_o, Y_o)를 결정한다. 2단계에서는 Fig.5에서 나선형홈의 최종부위의 크기를 나타내는 리세스부의 크기 D_r 와 마아진부의 크기인 θ_m 을 결정하는 스톱의 위치와 2차가공시 회전각도, (X_{o2}, Y_{o2}), θ_r 을 결정한다. 대부분의 경우 Fig.5에서와 같이 나선홈의 형상이 가늘고 길어서 가공량이 많은 경우에 1회 연삭으로 완성하고자 할 때에는 복잡한 형상의 연삭숫들이 요구되기 때문에 특수한 경우를 제외하고는 동일 연삭숫들을 사용하여 2회나 그 이상의 횟수에 의한 작업을 수행한다. Fig.6에서와 같이 4날 엔드밀의 경우에는 1회의 연삭가공으로 작업을 완료할 수 있다. 이 경우에는 엔드밀의 설계조건 중에서 공구경사각(γ)과 내접원의 크기(D_w)를 만족하도록 소프트웨어가 구성되어 있기 때문에 마아진의 크기를

Table 1. Comparison of Helical Grinding using Different Grinding Wheel Geometry

End Mill spec.		Grinding WL geometry				Result
End mill	Helix Ang.	θ_1	t_1	θ_2	t_2	
(a)	30°	10°	4	20°	2	proper cutting
(b)	30°	20°	4	20°	2	over cutting
(c)	50°	0°	4	0°	0	over cutting
(d)	50°	0°	0	10°	4	under cutting

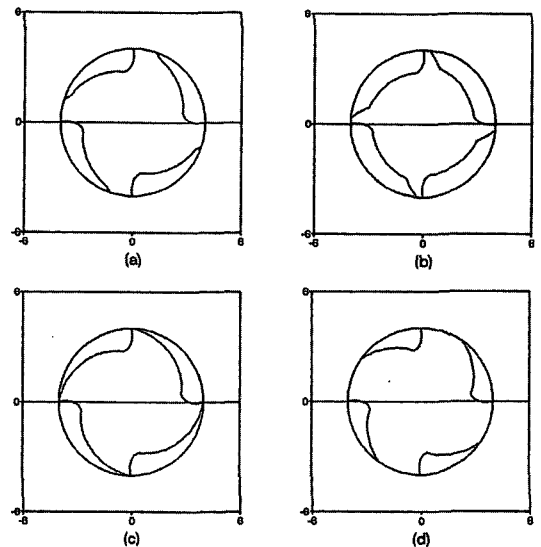


Fig. 6 Comparison of Helical Flute Grinding with Different Wheel Geometry in End Mills (a),(b) with 30° helix angle (c),(d) with 50° helix angle

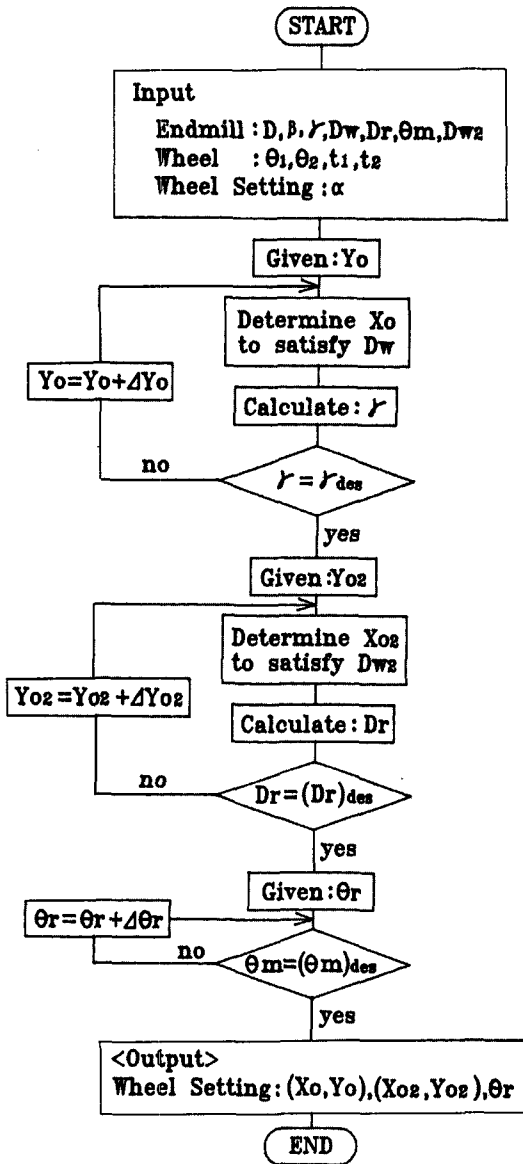


Fig. 7 Flow Chart of Simulation Software for Manufacturing End Mill

임의로 결정하기가 어렵다. 그러므로 이 경우에는 앞 절에서 Table 1을 작성하는 방법으로 사용할 연삭숫돌의 형상을 마야진의 크기를 고려하여 결정하는 작업이 선행되어야 한다. Fig. 7에서는 앞에서 설명한 2단계의 엔드밀 가공에 필요한 연삭숫돌의 설치를 위한 상대위치를 결정하는 소프트웨어의 흐름도가 잘 나타나있다. 본 프로그램에서 만족해야 하는 요소는 내접원의 크기, 공구경사

각, 리세스부의 크기 그리고 마야진부의 크기로서 4가지를 설정했다. 각단계에서의 접근방법을 다음과 같이 기술한다.

내접원의 크기와 공구경사각을 만족하는 1차 가공위치 결정

엔드밀에 대한 연삭숫돌의 상대위치로서 (X_0, Y_0) 점은 연삭숫돌의 임의의 위치를 나타내는데 여기서는 Fig. 2에서 공구경사면을 결정하는 숫돌요소 A의 중심, Fig. 3에서 O점에 설정하였다. $O(X_0, Y_0)$ 를 결정하기 위하여 Fig. 3에서 먼저 임의의 Y_0 에 숫돌을 설치한 후에 내접원의 크기 D_w 를 만족할 때까지 X_0 를 엔드밀 중심방향으로 접근시켜서 결정한다. 내접원의 크기 D_w 는 숫돌요소 A에 의해서 결정되는 flute 단면에서 가장 깊은 부분에서의 직경을 의미한다. Y_0 가 고정되어 있을 때 연삭숫돌의 중심을 엔드밀의 축의 중심에 접근시킬수록 즉 Fig. 3에서 X_0 를 감소시킬 때에 내접원의 크기는 감소한다. 이렇게 결정된 연삭숫돌의 위치에서의 가공결과인 나선홈 단면 형상을 나타내는 각 점, (x_i, y_i) $i = 1, m$, 은 앞 절에서의 나선홈 가공결과 예측용 소프트웨어를 사용하여 얻을 수 있다. 이 결과로부터 공구경사각을 구하여서 원하는 설계값과 비교하여 허용오차내에 있는 경우는 현재의 위치를 받아 들이지만 그렇지 않은 경우에는 초기에 설정한 Y_0 값을 일정간격으로 변화시키면서 앞의 작업을 반복함으로써 각 경우에 내접원의 크기와 공구경사각을 비교하여 최종위치를 결정한다. 숫돌중심값 Y_0 가 감소할수록 공구경사각 γ 이 단조증가하거나 단조감소하는 경향을 보이기 때문에 적정 γ 의 값을 쉽게 발견할 수 있다. Table 2에서는 동일한 연삭숫돌을 사용하여 공구경사각이 $0^\circ, 5^\circ$ 로서 서로 상이하고 직경은 $\phi 8\text{mm}$ 이고 나선홈각이 50° 로서 동일한 6날의 엔드밀을 가공하고자 할 때, 각 경우를 위한 연삭숫돌의 최종적인 상대위치를 구하기 위하여 개발한 소프트웨어를 사용할 때 필요한 입력과 그 결과가 나타나 있다. 이조건에 의한 가공결과가 Fig. 8에서 절삭날부에서의 공구경사면의 차이가 구체적으로 잘 나타나 있다. 엔드밀 A는 공구경사각이 0° 로서 엔드밀 B의 5° 에 비하여 작아서 절삭저항은 증가하지만 공구인선부는 좀 더 강인하게 된다. 앞에서 주어진 동일한 숫돌의 형상으로 이와 같은 엔드밀을 가공하기 위한 숫돌의 설치 위치가 본 소프트웨어에 의해서 결정되었다. Table 2에서 보는 바와 같이 공구경사각의 근소한 차이가 연삭숫돌의 설치위치에서는 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 여기서 주목해야 하는 사항은 공구경사각을 어떻게 정의하

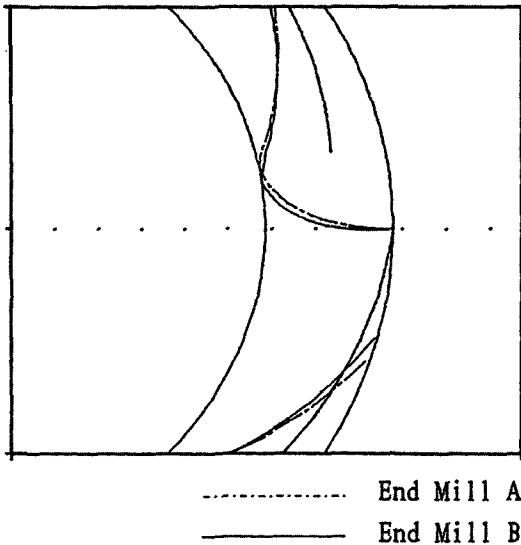


Fig. 8 Detail Observation of the End Mill Rake Face using Different Wheel Position with Same Wheel Geometry

느냐 하는 것이다. 엔드밀의 축에 수직인 단면에서의 공구경사각은 인선부에서의 공구경사면의 접선과 반경방향과 이루는 각으로 정의할 수 있다. 이것은 식 (1)에서와 같이 연삭숫돌을 n개의 요소로 분리할 때 Fig.2에서 숫돌요소 A에 의해서 결정된다. 그러므로 본 소프트웨어에서 1단계에서 매 스텝마다 결정된 숫돌위치에서의 단면형상이 (x_i, y_i) $i = 1, m$, 와 같이 m개의 점으로 이루어져 있으므로 일정지점에서의 인선부와 이루는 각도를 공구경사각으로 정의하였다. Fig.8에서 보는데로 공구경사면은 곡선으로 정의되기 때문에 공구경사각을 결정하기 위하여서는 인선부, (x_i, y_i) , 에 되도록 인접한 임의의 점, (x_i, y_i) , 에서 공구인선과 이루는 경사각으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tan \gamma = \frac{y_1 - y_i}{x_1 - x_i} \quad i = 2, m, \quad (5)$$

Table 2. Input and Output in using Software for Manufacturing End Mill with 6 edges

	Input										Output
	End Mill (6 edges)					Wheel					Location
	D	β	γ	D_w	α	t_1	t_2	θ_1	θ_2	Dia.	(X_o, Y_o)
A	8	50°	0°	6	50.5°	0	4	0	10	148.6	(30.8, 67.3)
B	8	50°	5°	6	50.5°	0	4	0	10	148.6	(26.0, 70.6)

리세스부와 마아진부의 크기를 만족하는 2차 가공위치 결정

Fig.6과 같은 4날 엔드밀의 경우에는 리세스부의 크기가 주어지지 않고 좁은 나선홈 형상으로서 1차가공에 의해서 주어진 설계조건, 즉 공구경사각, 내접원의 크기를 만족할 수 있기 때문에 2차가공이 불필요하다. 다만 이 경우에는 마아진의 크기를 만족하기 위하여 공구경사각과 연삭숫돌의 적절한 선택이 앞 절에서와 같이 선행되어야 한다. Fig.9와 같이 2날 엔드밀의 경우에는 절삭량이 많고 복잡하여 2회의 가공이 불가피하다. 2차가공에서는 1차가공과 동일한 연삭숫돌을 사용할 때 설계요소중 리세스부와 마아진부의 크기를 만족시키기 위한 2번째 연삭가공을 위한 연삭숫돌의 작업위치를 결정하고자 한다. 앞에서 언급한대로 나선홈 가공을 1회의 연삭가공으로 완성한다면 제한된 연삭숫돌의 형상으로 인하여 앞에서 열거한 모든 설계조건을 만족시키기 매우 어렵다. 엔드밀의 경우에는 복잡한 나선홈 형상을 위한 정확한 숫돌형상의 예측이 매우 어렵기 때문에 연삭가공의 폭이 큰 경우에는 2회 이상의 작업으로 분리함으로써 숫돌형상의 관리가 용이하며 앞에서 열거된 설계조건을 만족시키는 것이 가능하게 된다. Fig.7에서 2단계작업으로서 1단계에서와 동일한 방법으로서 임의의 숫돌의 중심의 높이 Y_{02} 를 정하여 1차에서와 유사하게 X_{02} 의 값을 일정범위 내에서 조절하여 판단기준을 위하여 입력으로 제공한 내접원의 크기 D_w 를 만족하는 중심의 위치 (X_{02}, Y_{02}) 를 결정한다. 이때의 리세스부의 크기, D_r , 을 구하여 초기에 제공한 입력사항과 비교하여 일정범위의 정밀도를 유지할 때까지 숫돌중심의 높이 Y_{02} 를 계속적으로 변화시켜서 최종 숫돌중심의 위치 (X_{02}, Y_{02}) 를 결정한다. 연삭숫돌의 2차 가공위치, (X_{02}, Y_{02}) 를 구한 후에 엔드밀 마아진의 입력 크기 θ_m 을 만족하기 위하여 엔드밀이 1차가공위치로부터 회전량 θ_1 만큼 움직여야 한다. 이상과 같은 각 설계요소들을 만족하는 1,2차 나선홈 연삭가공에 필요한 연삭숫돌의 위치를 순차적인 방법에 의하여 구하는 방법이 Fig.7에 기술이 되어 있다. Fig.9에서는 Table 3에서 제시된 5가지의 설계값을 입력조건으로 할 때 각 경우의 가공을 위한 공구의 상대위치와 엔드밀 회전각을 앞에 제시된 소프트웨어를 이용하여 구한 결과가 나타나 있다. Fig.9에서는 Table 3에 나타난 엔드밀 'A'의 설계조건과 그에 따른 가공결과를 기준으로 하여 각 설계요소가 변화함에 따른 가공결과를 서로 비교하였다. 엔드밀 'A'는 실선으로 엔드밀 'B,C,D,E'는 편의상 점선으로 표시되어 있다. Fig.9(a)에서는 엔드밀 'A'에 비하여 리세스부

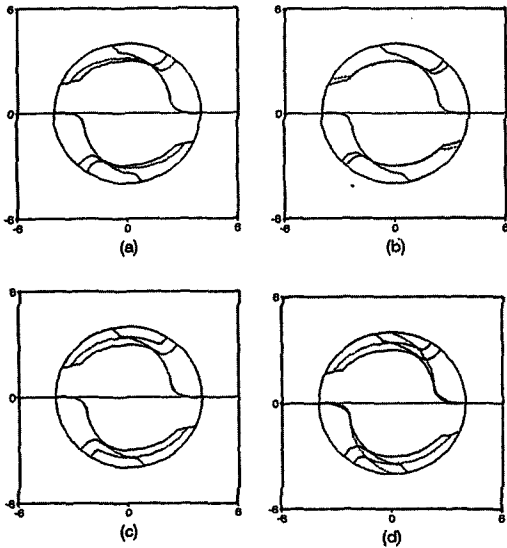


Fig. 9 Comparison of Helical Flute Grinding in Manufacturing End Mills with 2 Edges
 (a).end mill A and B
 (b).end mill A and C
 (c).end mill A and D
 (d).end mill A and E(solid line for A)

의 크기가 변화한 엔드밀 'B'의 가공결과가 비교되었으며 이를 가공하기 위한 연삭숫돌의 설치위치가 Table 3에 나타나 있다. 1차 가공을 위한 설치 위치는 변화가 없으나 2차 가공위치와 이에 따른 엔드밀의 회전각(θ_1)이 변화하였음을 알 수 있다. Fig.9(b)에서는 엔드밀 'A'에 비하여 마아진양을 증가시킨 엔드밀 'C'의 가공결과를 비교하였고 이 경우에는 1,2차 연삭숫돌의 설치위치는 변화하지 않고 엔드밀의 회전각만이 마아진의 크기만큼 변화한 것을 알 수 있다. Fig.9(c)에서는 엔드밀 'A'에 비하여 2차 가공시 내접원의 크기(D_{w2})와 리세스부의 크기를 동시에 변화시킨 엔드밀 'D'의 가공결과와 2차 가공을 위한 설치위치의 변화를 잘 나타내고 있다. 이상의 변화를 거치면서 엔드밀의 단면의 크기가 엔드밀 'A'에 비하여 점점 커지는 것을 발견할 수 있다. Fig.9(d)에서는 엔드밀 'A'에 비하여 공구경사각이 5°로 감소하고 리세스부의 크기와 2차 내접원의 크기(D_{w2})를 모두 증가시킨 엔드밀 'E'의 가공결과를 나타내고 있다. 이 경우에 엔드밀의 단면이 가장 커서 가장 높은 강성을 유지함을 예상할 수 있다. 2차 가공시에 입력으로 주어진 내접원의 크기(D_{w2})와 리세스부의 크기(D_r)에 의해서 연삭숫돌의 위치(X_{02}, Y_{02})가 1차가공과 관계없이 독립적으로 결정된다.

그렇지만 마아진부의 크기를 만족하기 위하여 엔드밀 회전각도 θ_1 에 의해서 독립적인 1,2차 가공결과가 서로 연관성을 갖게 된다. 동일한 크기의 마아진부를 가공함에도 불구하고 매우 상이한 엔드밀의 회전각 θ_1 을 갖는 사실을 확인할 수 있었다.

(3)공구강성을 고려한 나선형홈(flute) 가공

Fig.5에서 표시한 4가지의 설계요소들을 만족하는 엔드밀의 가공이 앞에서 제시한 소프트웨어를 이용하여 setting 치수를 결정함으로써 가능하게 되었다. 이상의 설계요소들 이 외에도 엔드밀의 중요한 요소 중의 하나로서 공구강성의 크기를 들 수 있다. 공구강성은 엔드밀과 같이 가늘고 긴 공구에 있어서 가공 중에 발생하는 저항으로 인하여 변형이 일어나기 쉽기 때문에 가공면의 조도 및 공구수명에 직접 영향을 미치는 중요한 요소이다. 물론 앞에서 거론된 요소중 내접원의 크기나 리세스부 및 마아진부의 크기가 공구강성에 영향을 미치고 있지만 직접적으로 관여하는 것은 다음과 같이 표현되는 단면적의 2차모멘트의 크기에 의해서 강성이 결정된다.

$$I_{yy} = \int_A y^2 dA$$

그러므로 칩배출로 인한 문제가 제기되지 않는 범위 내에서 I_{yy} 의 값이 되도록 큰 값을 유지할 수 있는 단면형상 가공이 이루어져야 한다. 1차가공에서 결정된 내접원의 크기, D_{w1} 와 2차 가공에 의한 리세스부와 마아진부의 크기, D_r, θ_m 를 만족하는 가공조건이 본 소프트웨어에 의해서 이루어지지만 또 다른 공구강성에 영향을 미치는 요소로서 1,2차 가공시 형성되는 나선형홈의 곡선형상, Fig.4에서 $A''-B-C_1$ 에 대한 고려가 이루어지지 않게 된다. 이에 대한 검토는 앞에서 언급한 연삭숫돌의 형상 결정시 미리 이루어져야 한다. 특히 Fig.2에서 A-B구간의 형상, 즉 경사면의 각도나 오목한 형상의 연삭숫돌의 결정이 공구강성에 큰 영향을 미치는 단면적 2차모멘트, I_{yy} 의 크기를 증가시킨다. Fig.9에서는 Table 3에 의해서 flute가공한 결과로서, E형상의 엔드밀이 강성이 가장 우수한 것을 발견할 수 있다. 이와 같은 2날 엔드밀에 있어서 동일 숫돌에 의해서도 가공조건의 변화에 의하여 일정범위내에서 강성을 변화시킬 수 있음을 알 수 있다. 엔드밀 단면에서의 방향성에 따른 I_{yy} 의 값은 2날 엔드밀에서는 주기적으로 변화하지만 3날 이상의 엔드밀에서는 모든 방향에서 균일한 값을 나타냄으로서 가공 중 변형에 의한 변화가 작다⁽⁶⁾. 그러므로 3날 이상의 엔드밀의 경우

절삭 중 변형의 균일성으로 유리한 특성을 보유하고 있다. 또한 변형에 의한 처짐량을 좀 더 손쉽게 얻기 위하여 각 엔드밀의 형상에 있어서 등가직경(equivalent diameter)을 다음과 같이 개괄적으로 나타낼 수 있다는 연구 결과가 있다⁽⁹⁾.

$$D_{eq} = 0.8D$$

물론 이 관계식은 본 연구에서 주장하는 연삭숫돌의 형상에 대한 고려로써 단면적 2차모멘트가 향상된다는 효과를 무시한 것이다. 또한 방향성이 적은 3날 이상의 엔드밀의 경우에 좀더 정확한 D_{eq} 의 계산은 각 형상에 의해서 결정되어야 한다. 향후 이에 대한 연구로서 가공 시의 엔드밀의 변형량과 단면적 2차모멘트와의 관계에 대하여 좀 더 이루어져야 한다.

Table 3. Input and Output in using Software for Manufacturing End Mill with 2 edges

INPUT													
END MILL (2 edges)								WHEEL					
D	β	γ	D_w	D_r	θ_w	D_{o2}	α	t_1	t_2	θ_1	θ_2	Dia	
A	8	30°	11°	4.8	6.4	25°	6.0	31.5°	5.5	2.0	20°	20°	150
B	8	30°	11°	4.8	7.2	25°	6.0	31.5°	5.5	2.0	20°	20°	150
C	8	30°	11°	4.8	6.4	30°	6.0	31.5°	5.5	2.0	20°	20°	150
D	8	30°	11°	4.8	7.2	25°	6.8	31.5°	5.5	2.0	20°	20°	150
E	8	30°	5°	4.8	7.2	25°	6.8	31.5°	5.5	2.0	20°	20°	150

OUTPUT			
	(X_o, Y_o)	(X_{o2}, Y_{o2})	θ_r
A	(13. 6, 71. 1)	(8. 6, 74. 4)	116°
B	(13. 6, 71. 1)	(11. 0, 73. 3)	92°
C	(13. 6, 71, 1)	(8. 6, 74, 4)	111°
D	(13. 6, 71, 1)	(8. 8, 74. 7)	122°
E	(17. 6, 68. 1)	(8. 8, 74. 7)	176°

5. 결 론

(1)엔드밀의 제작 시 고려해야 하는 설계조건으로서 엔드밀 공구경사각, 내접원의 크기, 리세스부의 크기 그리고 마아진부의 크기로 정하였다.

(2)이미 개발된 나선형홈 가공 시 형상에측용 프로그램을 이용하여 각 숫돌형상에 의한 가공결과를 관찰함으로써, 다양한 형상의 엔드밀 가공에 사용되는 허용 가능한 연삭숫돌 형상을 결정하였다.

(3)나선홈의 가공결과 예측용 소프트웨어를 이용하여,

주어진 연삭숫돌의 형상으로 엔드밀 제작시 4가지의 설계조건을 만족하기 위한 연삭숫돌의 상대위치를 결정하는 엔드밀 제작전용 소프트웨어를 개발하였다. 본 프로그램은 CNC공구연삭기를 이용하여 엔드밀 제작시 매우 유용하며 필요에 따라서는 장비의 컨트롤러(controller)와 접속에 의한 자동 프로그램장치가 가능하다.

(4)본 연구에서 개발된 소프트웨어에서 충분히 고려되지 못한 엔드밀의 공구강성의 향상을 위한 방안으로서 연삭숫돌의 형상 설계방법에 대하여 고려하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 부산대학교의 정밀정형및 금형가공연구센터 (지원과제번호 94-K3-0909-03-01-3)에 의해서 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Friedman, M and Meister, I., "The Profile of a Helical Slot Machined by a Form-Milling Cutter," Annals of the CIRP, Vol.22/1, p29-30, 1973.
2. Kaldor, S., Rafael, A.D. and Messinger, D., "On the CAD of Profiles for Cutters and Helical Flutes-Geometrical Aspects," Annals of CIRP, Vol.37/1, pp53-56, 1988.
3. 고성림, "트위스트 드릴제작을 위한 나선형 홈가공의 기하학적 해석," 대한기계학회 논문집, 제8권, 제7호, pp1643-1653, 1993.
4. Agullo-Battle, J., Cardona-Foix, S. and Vinas-Snz, C., "On the Design of Milling Cutters on Grinding Wheels for Twist Drill Manufacture. A CAD Approach," Proc. 25th MTDR Conf., pp315-320, 1985.
5. Sheth, D.S. and Markin, S., "CAD/CAM for Geometry and Process Analysis of Helical Groove Machining," Annals of CIRP, Vol.39/1, pp129-132, 1990.
6. Ehmman, K.F., "Grinding Wheel Profile Definition for the Manufacture of Drill Flutes," Annals of CIRP, Vol.39/1, pp153-156, 1990.

7. Ekambaram,B and Malkin,S., "CAD Software for Helical Flute Grinding of Milling Cutter," Transactions of NAMRI/SME, Vol.21, pp181-187, 1993.
8. Fuji,Y. and Iwabe,H., "Cross-Sections and Flexural Rigidity of Helical End Mills," JSPE, Vol.49/6, pp45-50, 1983.
9. Kops,L. and Vo,D., "Determination of the Equivalent Diameter of an End Mill based on Its Compliance," Annals of the CIRP Vol.39/1, pp93-96, 1990.