

## CNC 공구연삭기를 이용한 엔드밀 제작용 software개발 (Software Development for Manufacturing End Mill using CNC Tool Grinding Machine)

고성림

(Sung-Lim Ko)

전국대학교 기계설계학과

### 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.

### 1. 서론

NC 공작기계의 발달과 함께 공구의 위치제어 및 공구경로 제어능력이 발달하면서 종전의 수평형 밀링머신에 의존하던 평면가공이나 유파가공이 수직형 CNC 밀링머신에서 이루어지면서 공구의 사용도 plain 밀링커터에서 최근에는 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 대부분의 경우 insert를 이용한 밀링커터가 사용되고 있다. 유파가공은 가능하고 긴 세장형의 엔드밀이 주로 사용되고 있다. 대부분의 엔드밀의 작은 직경으로 인하여 insert를 장착한 형태로의 전환에 매우 제약이 되기 때문에 아직도 날부와 사루부가 일체형인 solid 타입을 많이 사용하고 있다. insert의 제작은 전용 금형제작기술과 장비의 발달 그리고 powder metallurgy의 발달로 인하여 다양한 형상이 대량으로 제작이 되고 있으며 이를 장착하여 사용하는 밀링커터바디는 CAD/CAM을 이용한 자동생산라인이 비교적 잘 구축이 되어있는 실정이다. 이와같은 insert 형의 공구에서는 공구경사각과 같은 절삭성에 관한 특성은 insert에서 고려되고 침의 배속이나 공구의 강성과 같은 특성은 커터바디에서 고려됨으로서 문제의 해결을 분담하게 됨으로서 좋은 절삭성과 강성을 보유한 공구를 개발하기가 비교적 쉽다. 이에비하여 일체형의 solid 타입의 공구에서는 이와같은 문제들을 제작시에 동시에 고려하여야 하기 때문에 제약이 더 크다고 할 수 있다. 엔드밀의 생산을 위하여 여러개의 연삭휠을 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 강성 및 침배출의 특성을 결정하는 helical flute부의 가공이 동시에 이루어져야 하기 때문에 가공시 정밀도와 동일 규격의 가공이 재현되기 가 매우 어려워서 제품의 성능과 생산성에 많은 문제를 안고 있

다. 엔드밀 형상의 특징은 세장형으로서 가공깊이가 엔드밀의 직경에 비하여 비교적 큰 형태이기 때문에 가공중에 측면방향의 절삭저항이 작용하여 변형되기 쉽다. 이때문에 공구강성이 가공정밀도에 크게 영향을 미치게 되므로 설계시에 이에대한 배려가 필수적이다. 또한 절삭날이 공구의 측면에 위치함으로서 회전용 공구에 칩을 배출하기 위하여 설치하는 나선형홈의 가공은 선인부와 봄체부를 동시에 가공하기 때문에 매우 복합적이고 중요한 효과를 수반한다고 할수있다. 나선형홈 가공의 복잡성으로 인하여 다른 공구에서와 같이 공구경사각이나 여유각이 공구평면상태에서 정의되지 못하고 폭면상태에서 임의의 위치에서 주관식으로 결정되기 때문에 정의하기가 매우 어려운 설정이다. 또한 주로 엔드밀의 재종으로 고속도강이나 초경이 사용되기 때문에 연삭휠에 의해서 가공이 이루어진다. 이경우에 가공중에 발생하는 연삭휠의 마모로 인한 공구의 형상이 변화하기 때문에 나선형홈의 형상도 더불어 변화함으로서 균일한 형상을 보장하기가 어렵다. 종전의 만능 공구연삭기에서는 연삭휠의 마모에 의한 형상변화로 인하여 주로 경험에 의존한 자료로서 제작함으로서 균일한 형상을 확보하기가 어려운 실정이었다. 최근에 NC공작기계의 발달과 함께 위치제어능력이 확보되고 반복작업이 가능해짐에 따라 CNC 공구연삭기가 활발하게 개발이 되었다. 이와함께 드릴과 엔드밀이나 전용 회전공구와 같은 여러종류의 공구를 자동으로 생산하기위한 software개발이 최근에 활발하게 진행되고 있다. 회전용 공구의 설계와 제작에 있어서 가장 어려운 부분은 자루부의 나선형홈 가공시에 발생하는 undercutting 현상에 의한 사용률 단면 형상보다 더 큰 단면이 형성됨으로써 가공조에 따른 가공결과의 예측이 어려운 것이다. 임의의 단면 형상에 따른 가공결과의 예측이 어려운 것이다. 임의의 단면 형상을 사용할 때 나선형홈 가공결과를 예측할 수있는 software를 개발하기 위한 연구가 계속되어왔다. 첫째방법은 사용하는 일정두께의 연삭휠이 매우 두께가 얕은 필요로 이루어져 있다고 가정하여 각요소의 가공결과를 기하학적으로 구한 후 각요소의 결과를 중첩함으로서 가공결과를 예측할 수있었다[1, 2, 3]. 또 다른 방법은 나선형 홈의 가공시에 훨과 엔드밀과의 접촉점(contact line)에서 공통법선은 반드시 축을 통과한다는 기본판례에 의한 수학적인 판례에 기초하여 나선홈 단면형상을 예측하였다[4, 5, 6]. 이와함께 그결과를 드릴제작을 위한 CAD용 software로 발전시키려는 노력도 아울러 진행되어왔다[3, 4, 6]. 이에반하여 회전공구중 주요한 역할을 하는 엔드밀 제작을 위한 CAD용 software의 개발에는 별다른 진전이 없었고 경험에 의해서 축된된 가공자료의 data bank 구축에 의한 통계적인 방법이 최근에 소개되었다[7]. 그러나 이방법은 수없이 많은 연삭휠의 마모에 의한 변화와 형상의 다양성과 정확한 가공을 위한 setting 치수를 제공해주기에는 현실성이 결여되었다고 판단이 된다. 실용성있는 엔드밀 가공전용 software는 일부 CNC공구연삭기 제작업체에 의해서 개발이 되어서 제한된 범위에서 상품화되고 있다. 그러나 이경우에서도 그용도가 자체 CNC공구연삭기의 제원과 각장비마다 미리 정해놓은 연삭휠의 형상에 매우 제한이 되어있다. 엔드밀 제작은 드릴의 경우와 달라서 나선형홈 가공시 절삭날이 동시에 생성되기 때문에 절삭날 부분의 형상이 매우 중요하다. 본 논문에서는 앞에서의 연구[3]를 토대로

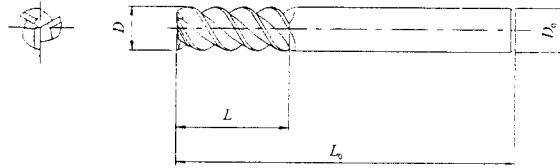


Fig. 1 General configuration of end mill

앞에서 기술한 바와같은 엔드밀 제작시 설계요소들, 즉 공구경사각, 공구강성 그리고 흄의 나선각을 만족하는 엔드밀 제작전용 CAD용 software를 개발하고자한다.

## 2. 엔드밀의 특성 및 설계조건

엔드밀의 형상은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 공구직경에 비하여 공구길이의 비가 큰 세장형 공구로서 주로 다양한 곡면형상을 포함한 윤곽가공과 키홈(key home)과 같은 미소탕의 축방향의 가공과 반경방향의 가공을 동시에 수행하기 위한 형상적인 특징을 갖추고 있다. 이와같은 가공을 위하여 절삭날이 축방향의 끝부분과 반경방향의 외주부에 나선형으로 형성이 되어있다. 또한 가공중 발생한 칩(chip)의 원활한 배출과 철삭유의 공급을 위한 공간으로서 적정 크기의 나선형의 홈공간, 즉 flute가 필요하다. 엔드밀의 경우 대부분 윤곽가공을 수행한다고 가정할 때, 우선적으로 축면절삭날의 형상과 축면방향으로의 변형에 대한 저항에 유리한 형상이 필수적이다.

모든 절삭공구에서와 마찬가지로 가공중 절삭자항이 가능한 적게 발생하는 절삭날의 형상을 갖추기 위하여 점흐름방향으로의 적정한 공구경사각과 공구여유각을 설정하는 것이 매우 중요하다고 할수있다. 이와같은 점흐름방향으로의 형상은 공구단부의 단면형상과 나선홈의 각(helix angle)의 관계에 의해서 결정된다. 또 다른 주요한 현상으로서는 엔드밀의 경우 주로 축면방향의 저항으로 인하여 가공중의 공구변형으로 인한 공구파손과 가공면의 조도가 불량해지기 쉬운 사실이다. 이를 방지하기 위해서는 앞에서 언급한 절삭자항의 감소와 강성이 우수한 형상을 갖춘 공구형성이 필요하다. 축면방향으로의 변형에 대한 강성은 공구의 축방향에 수직한 단면의 면적이나 2차 면적 모멘트가 큰 경우에 확보된다. 이상에서 판찰한 엔드밀에서의 절삭특성은 축면가공시 축면날부의 형상과 flute부의 단면형상에 의해서 결정됨을 쉽게 알 수 있다. 이때문에 엔드밀의 나선홈 가공은 절삭날부의 형상과 공구강성도 함께 결정하기 때문에 그 중요성은 매우 크다 할 수 있다. 대부분의 경우 나선홈 가공시 연삭轮回의 형상이 고정되어 있을 경우에는 공구경사각과 단면의 형상이 엔드밀과 연삭轮回의 상대위치가 결정되면 동시에 결정되기 때문에 사전에 선택한 연삭轮回이 가공할 수 있는 영역을 파악하여야 한다. 이과정에서 흄의 형상이 적절하지 않을 경우에는 형상을 변화시키면서 적정형상의 개발적인 결정이 진행되어야 한다. 그후에 상대위치를 변화시켜서 적정범위에서의 공구경사각과 공구강성을 일깨워나. 그이외의 공구여유각이나 recess의 크기는 나선형홈 가공이외의 각작업에 의해서 이루어진다. 그러나 공구제작의 생산성 형상을 위하여 공구경사각, 공구강성과 recess의 크기까지 포함하여 1회가공에 의한 완성작업을 수행하고자 할때에는 연삭轮回의 단면형상의 설계가 매우 중요하다. 이것은 앞의 연구에서 수행한 나선형홈 가공의 기하학적 연구의 결과 [6]로부터 개발된 software의 기본구조를 반복하여 적용함으로써 연삭轮回의 적정형상을 주어진 상대위치에 대하여 얻을 수 있다. 결론적으로 본연구에서는 앞에서 언급된 엔드밀의 설계조건을 만족하는 형상을 얻기 위하여 각형상조건을 만족하는 가공을 수행한 여러개의 연삭轮回를 선정한 후에 이를 장착한 CNC공구연삭기를 사용하여 엔드밀 제작시 연삭轮回의 상대위치를 결정하기 위한 제작전용 software를 개발하고자 한다.

## 3. 엔드밀 제작용 흄에 의한 flute 가공의 형상 예측 [3]

엔드밀제작에 사용되는 전형적인 흄의 형상인 일정한 두께의 다른 기울기를 갖는 직선의 조합으로 이루어진 다이아몬드

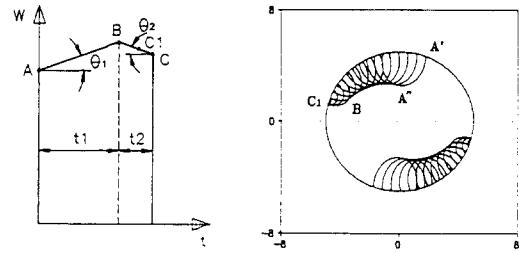


Fig. 2 Configuration of grinding wheel for manufacturing end mill

Fig. 3 Simulation result which shows the behavior of each element of grinding wheel in using the software for grinding helical groove

월형상의 예가 Fig. 2에 주어져있다. 흄의 두께방향에 따른 일정한 간격의 n개의 매우 얕은 흄로의 분리 작업에 의해서 각 흄요소의 반경이 얻어진다.

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

이렇게 구해진 각 흄들의 반경과 이에따른 각 흄의 중심으로부터 앞의 연구 [3]에서 제시된 각 흄요소에 의한 가공후 단면형상 예측용 software를 이용하여 엔드밀축에 적적인 단면에서의 나선형홈가공의 형상이 얻어진다. Fig. 3에서는 주어진 엔드밀과 외곽형상과 월형상에 의한 각 흄요소들의 가공결과가 잘나타나있고 이것의 외곽만을 취함으로써 나선형 흄의 가공결과가 나타나 있다. 이때 엔드밀의 중요한 요소인 강성의 크기를 나타내는 내접위의 크기를 만족하도록 흄의 중심이 결정된다. 일반적인 엔드밀 가공용 연삭轮回은 Fig. 2에 나타난대로 두개의 직선으로 이루어져있는데 각 부문의 각도,  $\theta_1, \theta_2$ 와 각각의 두께,  $t_1, t_2$ 로 정의된다. 나중에 나서 언급하자면 이부분의 형상은 강성의 향상을 위하여 원호의 일부분을 이룰 수도 있다. Fig. 2에서의 흄은식 (1)과 같이 위의 n개의 얕은 흄요소로 분리되었으며 각 흄요소들의 거동의 차이가 Fig. 3에서 각 흄요소에 대응하는 엔드밀의 임의의 단면에서 나타나 있다. 그리고 나선홈의 단면형상은 각 흄요소들의 중첩가공의 결과로서 나타나는 외곽형상으로 결정된다. 이것은 흄요소 'A'의 가공결과는 Fig. 3에서  $A'-A''$ 으로 표시되는 홈형상에 해당한다. 흄요소 'A'에 인접한 흄요소에 의한 중첩가공결과로서 진체 홈형상에 기여하는 부분은  $A'-A''$  만이 남게되며 때문이다. 이와같은 중첩가공의 결과로서 Fig. 2에서  $A-B$ 에 흄요소에 해당하는 가공결과는 Fig. 3에서  $A'-A''$ 과  $A''-B$ 에 해당한다. 각요소별로 가공후 홈형상에 1:1에 유사한 대응관계를 유지하고 있음을 발견할 수 있다. n개의 유한한 흄요소의 경우에는 각 흄요소의 두께의 크기에 의해서 약간의 영향을 받지만 실제 흄의 경우 연속체로서 무한한 갯수의 흄요소로 이루어져 있기 때문에 두께의 영향없이 대응관계가 이루어진다고 가정할 수 있다. Fig. 2에서의 흄요소의  $B-C_1$ 에 해당하는 가공홈의 형상은 Fig. 3의  $B-C_1$ 와 1:1 대응관계에 있음을 알 수 있다. 이상의 관찰로부터 흄의 단면형상과 가공홈의 형상과는  $A'-A''$ 부분을 제외하고는 1:1 대응관계를 이루고 있음을 알 수 있다. Fig. 3에 나타난 나선홈 가공형상 부분에서  $A'$ 부분은 엔드밀의 절삭날에 해당하며  $A'-A''$ 에 이르는 경로에 의해서 공구경사면의 형상이 결정되고  $A''$ 의 위치, 즉 내접轮回의 크기에 의해서 공구의 강성의 크기가 결정된다. 또한  $A''-B$ 부분의 경로에 의해서 공구의 강성과 침매출의 성능이 결정되므로 이를 각부분에 해당하는 흄의 단면형상의 설계가 매우 중요한 요소가 된다. 흄의  $B-C$ 부분에 해당하는 나선홈의  $B-C_1$ 부분은 Fig. 1에서 공구인선부의 두께를 결정하는 마아진부를 형성하게 된다. 앞에서 나선형 홈가공에 가담되지 않은 부분은 흄의  $C_1-C$ 이다. 이때문에 경우에 따라서는 Fig. 2에서  $t_2$ 에 해당하는 요소가 없는 흄을 사용하기도 한다. 이상의

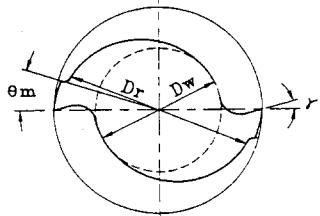


Fig. 4 Design Factors for End Mill

원형상과 나선홈 형상과의 관계로부터 실제 엔드밀에서의 역할과 중요성을 연결함으로서 앞에서의 형상예측용 software를 이용한 엔드밀의 설계와 제작을 위한 전용 software를 개발하고자 한다.

#### 4. 엔드밀 제작을 위한 전용 software 개발

실제 엔드밀을 제작함에 있어서 앞에서의 연구결과 [3]인 나선홈 가공결과 예측용 software의 결과 검토에서 언급한 바와같이 결식인선부와 공구경사면에 해당하는 Fig. 3에서의  $A'-A''$ 부분이 원요소와 1:1 대응관계를 이루지 못함으로 원하는 단면형상으로부터 원형상을 예측하는 것이 불가능하지만 드릴의 경우와 같이 1:1 대응관계를 유지하면 앞에서의 작업의 역작업에 의한 원형상예측이 가능할 것이다 [3]. 그러므로 엔드밀 제작을 위한 원형상 예측이 어렵기 때문에 경험에 의한 대략적인 형상을 선택하여 결정한다. 앞절에서 검토한 바와같이 엔드밀의 중요한 요소인 공구경사면과 공구 내접원의 크기가 원의 하나의 단면 (Fig. 2에서 원요소 A)에 의해서 결정되고 나머지 요소에 의해서 공구강성과 침배출을 위한 flute의 남은 형상을 결정한다. 엔드밀 가공시 엔드밀과 원의 상대위치, 즉 뛰어중심의 위치,  $(X_0, Y_0)$ , 원의 설치각,  $\alpha$ ,에 의해서 최종적으로 결정된다. 공구연삭기에서의 공구연삭 작업은 원의 중심의 엔드밀에 대한 상대위치와 설치각의 결정에 의해서 자동으로 이루어지기 때문에 그결과에 대한 예측이 필수적이다. 결론적으로 본연구에서는 가공하고자 하는 엔드밀의 형상을 얻기 위하여 미리 정해진 형상의 연삭휠을 사용할 때 요구되는 상대위치를 결정할 수 있는 software를 개발하고자 한다. 물론 여기서는 주어진 연삭휠의 형상으로 가공 가능한 영역에 대한 검토가 선행이 되어야한다. 가공하고자 하는 엔드밀의 형상에 따라 1차적으로 개별적인 연삭휠의 형상을 결정한후에 Fig. 4에 나타난 엔드밀의 주요한 설계요소인 공구경사각이나 내접원의 크기 및 바아진의 크기를 만족하기 위하여 엔드밀에 대한 연삭휠의 상대위치가 정확하게 결정이 되어야한다. 그결과가 CNC공구연삭기의 위치결정기구로 전달이 되어 이동한후에 가공을 시작하게 된다.

##### (1) 연삭휠의 형상 결정

대부분의 경우에 CNC공구연삭기에서 가공을 할 때는 이미 연삭휠의 형상이 이미 결정이 되어서 원하는 공구와 원의 상대위치만 입력한 후에 프로그램에 의한 작업을 수행한다. 그러므로 연삭휠의 형상결정이 선행이 되어야한다. Fig. 2와 Fig. 3의 관계로부터 살펴본대로 공구경사면에 해당하는  $A'-A''$ 부분의 가공은 원요소 A에 의해서 가공이 되고 flute형상을 결정하는  $A''-B$ 부분은 Fig. 3에서 원의 경사면  $A-B$ 의 형상에 의해서 결정된다. Fig. 2에서 경사각  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 의 크기에 의해서 엔드밀의 단면 형상이 결정된다. 물론 주어진 형상에서도 원의 상대위치와 설치각의 크기에 의해서 변화하지만 그 변화의 범위가 경사각의 크기에 의해서 결정된다. 이와같은 형상을 엔드밀의 용도에 의해서 결정된다. 예를들면 경도가 높은 강(steel)을 가공한다면 절삭저항이 크게 발생하기 때문에 공구강성이 커야하고 침의 체적이 작기 때문에 flute의 단면적이 클 필요가 없다. 이때에는 경사각의 크기와 나선홈의 깊이를 감소시킨다. 또 다른 예로서 연성이 크고 경도가 낮은 알루미늄 합금을 가공한다면 낮은 절삭저항과 큰 침의 부피로 인하여 flute면적이 커야하기 때문에 경사각과 깊이를 증가시켜서 가공양을 증가시킨다. 1차 경사면

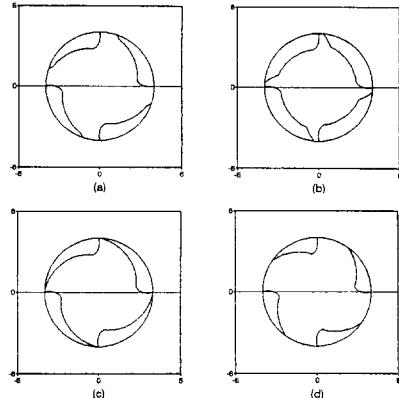


Fig. 5 Cross sectional configurations of 4 edge end mill as a result of flute grinding using different grinding wheel shown in Table 2.

부분의 두께는 Fig. 4에서 엔드밀의 날부 두께를 나타내는 마진 (margin) 부의 크기를 결정한다. 경우에 따라서는 원의 2차 경사면에 해당하는 경사각과 두께인  $\theta_2, t_2$ 부분을 없애기도 한다. 이때에는 Fig. 4과 같은 단이 발생하지 않는다. 이와같은 사전 작업은 앞의 연구 [3]에서 소개된 형상예측용 software를 이용하여 검색을 하여 적정형상을 미리 결정한다. 결정된 연삭휠의 형상은 엔드밀 제작을 위한 상대위치 결정용 software의 입력으로 제공된다. Fig. 5에는 Table 1에서 세시된 엔드밀의 형상조건을 만족하는 가공을 위한 여러형태의 연삭 휠을 사용한 결과를 앞장에서 소개된 software를 사용하여 예측하였다. 모든 엔드밀은 날의 수가 4개이고 직경(d)이 8mm, 내접원의 크기( $D_w$ )가 5.6mm이며 공구경사각( $\gamma$ )가 11°를 만족하여야 한다. 공구나선홈의 각( $\beta$ )의 크기가 30°와 50°의 두경우를 가공하고자한다. 나선홈각이 30°인 경우에 연삭휠의 1차 경사각이 10°와 20°의 두종류를 사용하였다. 그결과가 Fig. 5(a)와 (b)에 나타나있다. (b)의 경우 과도한 홈가공이 이루어졌음을 알 수있다. 그리고 이경우에는 1차 경사각이 10°인 연삭휠이 적합함을 알 수 있다. 물론 앞에서 소개된 엔드밀의 설계조건을 만족하기 위하여 어느정도의 범위내에서 단면형상이 변할 수있다. 나선홈각이 50°인 경우에도 연삭휠의 1차경사각이 0°와 -10°의 두가지를 적용하였는데 0°의 경우에는 과도한 홈가공이 이루어져서 여유면을 가공할 여유가 없음을 알 수있다. -10°의 경우에는 너무 적은 양이 가공되었으므로 적정 연삭휠의 형상능 이무가지 형태의 중간에서 발견되어야 할것이다. 이때에 1차경사각이 음의 값을 갖는것은 2차경사각이 양의 값을 갖는 것과 동일한 형상을 갖고 있음을 유의하여야한다.

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

End Mill spec.	Grinding WL geometry				Result	
End mill	Helix Ang.	$\theta_1$	$t_1$	$\theta_2$	$t_2$	
(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

##### (2) 연삭휠의 상대위치 결정

엔드밀 가공을 위한 연삭휠 위치 결정용 software는 크게 두부분으로 이루어져있다. 1단계로서 주어진 원형상을 가지고 Fig. 4에 의해서 요구되는 엔드밀의 형상조건, 즉 인선부의 공구경사각  $\gamma$ 와 내접원의 크기  $D_w$ 를 만족하는 연삭휠의 위치  $(X_0, Y_0)$ 를 결정한다. 2단계에서는 Fig. 4에서 flute의 최종부위의 크기를 나타내는 recess부의 크기  $D_f$ 과 margin부의 크기인  $\theta_m$ 을 결정하는 원의 위치  $(X_{02}, Y_{02})$ ,  $\theta_r$ 을 결정한다. 대부분의 경우

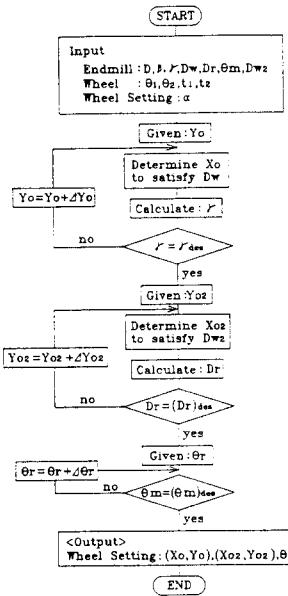


Fig. 6 Flow chart of simulation software for manufacturing end mill

Fig. 4에서와 같이 flute의 형상이 가능하고 같아서 가공량이 많은 경우에는 1회 연삭으로 완성하고자 할 때에는 복잡한 형상의 연삭휠이 요구되기 때문에 특수한 경우를 제외하고는 동일 연삭휠을 사용하여 2회나 그 이상의 회수에 의한 작업을 수행한다. Fig. 5에서와 같이 4년 엔드밀의 경우에는 1회의 연삭가공으로 작업을 완료할 수 있다. 이 경우에는 엔드밀의 설계조건에서 공구경사각( $\gamma$ )과 내접원의 크기( $D_w$ )를 만족하도록 software가 구성되어 있기 때문에 margin의 크기를 임의로 결정하기가 어렵다. 그러므로 이 경우에는 앞절에서 Table 1을 작성하는 방법으로 사용할 연삭휠의 형상을 margin의 크기를 고려하여 결정하는 작업이 선행되어야 한다. Fig. 6에서는 앞에서 설명한 2단계의 엔드밀 가공에 필요한 연삭휠의 위치를 위한 상대위치를 결정하는 software의 흐름도가 잘 나타나있다. 본 프로그램에서 만족해야 하는 요소는 내접원의 크기, 공구경사각, recess의 크기 그리고 margin부의 크기로서 4 가지를 설정했다. 각 단계에서의 접근방법은 다음과 같이 기술한다.

내접원의 크기와 공구경사각을 만족하는 1차 가공위치 결정  
엔드밀에 대한 연삭휠의 상대위치로시  $(X_0, Y_0)$ 점은 연삭휠의 임의의 위치를 나타내는데 여기서는 Fig. 2에서 공구경사면을 결정하는 월요소 A에서의 중심에 설정하였다.  $(X_0, Y_0)$ 를 결정하기 위하여 Fig. 2에서 먼저 임의의  $Y_0$ 에 휠을 설치한 후에 내접원의 크기  $D_w$ 를 만족할 때까지  $X_0$ 를 엔드밀 중심방향으로 접근시켜서 결정한다. 내접원의 크기  $D_w$ 는 월요소 A에 의해서 결정되는 flute 단면에서 가장 깊은 부분에서의 직경을 의미한다.  $Y_0$ 가 고정이 되어있을 때 연삭휠의 중심을 엔드밀의 축의 중심에 접근시킬수록 즉 Fig. 2에서  $X_0$ 를 감소시킬 때에 내접원의 크기는 감소한다. 이렇게 결정된 연삭휠의 위치에서의 가공결과인 flute단면 형상,  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, m$ ,은 앞절에서의 나선홈 가공결과 예측용 software를 사용하여 얻을 수 있다. 이결과로부터 공구경사각을 구하여서 원하는 설계값과 비교하여 허용오차 내에 있는 경우는 현재의 위치를 받아들이지만 그렇지 않은 경우에는 초기에 설정한  $Y_0$ 값을 일정간격으로 변화시키면서 앞의 작업을 반복함으로서 각경우에 내접원의 크기와 공구경사각을 비교하여 최종위치를 결정한다. 휠중심값  $Y_0$ 가 감소할수록 공구경사각  $\gamma$ 이 단조증가하거나 단조감소하는 경향을 보이기 때문에 적정  $\gamma$ 의 값을 쉽게 발견할 수 있다. Table 2에서는 동일한

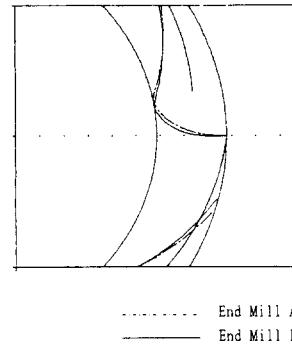


Fig. 7 Detail observation of the end mill rake face using defferent wheel position with same wheel geometry

연삭휠을 사용하여 공구경사각이  $0^\circ, 5^\circ$ 로서 서로 상이하고 직경은  $\phi 8\text{mm}$ 이고 나선홈각이  $50^\circ$ 로서 동일한 6년의 엔드밀을 가공하고자할 때 각경우를 위한 연삭휠의 최종적인 상대위치를 구하기 위하여 개발한 software를 사용할 때 필요한 입력과 그 결과가 나타나있다. 이조건에 의한 가공결과가 Fig. 7에서 절삭날부에서의 공구경사면의 차이가 구체적으로 잘 나타나있다. 엔드밀 A는 공구경사각이  $0^\circ$ 로서 엔드밀 B의  $5^\circ$ 에 비하여 작아서 전작 저항은 증가하지만 공구인성부는 좀더 강인하게된다. 앞에서 주어진 동일한 휠의 형상으로 이와같은 엔드밀을 가공하기 위한 휠의 설치위치가 본 software에 의해서 결정되었다. Table 2에서 보는바와 같이 공구경사각의 근소한 차이가 연삭휠의 설치위치에서는 상당한 차이를 보임을 알 수있다. 여기서 주목해야하는 사항은 공구경사각을 어떻게 정의하느냐 하는 것이다. 엔드밀의 축에 수직한 단면에서의 공구경사각은 인선부에서의 공구경사면의 접선과 반경방향과 이루는 각으로 정의할 수있다. 이것은 식 (1)에서와 같이 연삭휠을 n개의 요소로 분리할 때 Fig. 2에서 월요소 A에 의해서 결정된다. 그러므로 본 software에서 1단계에서 메스텝마다 결정된 휠위치에서의 단면형상이  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, m$ 와 같이 m개의 점으로 이루어져 있으므로 일정지점에서의 인선부와 이루는 각도를 공구경사각으로 정의하였다. Fig. 7에서 보는대로 공구경사면은 곡선으로 정의되며 때문에 공구경사각을 결정하기 위하여서는 인선부에 되도록 인접한 점으로부터의 공구인선과 이루는 경사각으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\tan \gamma = \frac{y_i - y_j}{x_i - x_j} \quad i = 2, m \quad (2)$$

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

	Input						Output				
	End Mill (6 edges)			Wheel							
	D	B	$\gamma$	$D_w$	$\alpha$	$t_1$	$t_2$	$\theta_1$	$\theta_2$	Dia.	Location $(X_0, Y_0)$
A	8	$50^\circ$	$0^\circ$	6	$50.5^\circ$	0	4	0	10	148.6	(30.8, 67.3)
B	8	$50^\circ$	$5^\circ$	6	$50.5^\circ$	0	4	0	10	148.6	(26.0, 70.6)

recess부와 margin부의 크기를 만족하는 2차가공위치 결정  
Fig. 5과 같은 4년 엔드밀의 경우에는 recess의 크기가 주어지지 않고 좁은 flute형상으로 1차가공에 의해서 주어진 설계조건, 즉 공구경사각, 내접원의 크기를 만족할 수있기 때문에 2차가공이 불필요하다. 다만 이경우에는 margin의 크기를 만족하기 위하여 공구경사각과 연삭휠의 적절한 선택이 선행되어야한다. Fig. 8과 같이 2년 엔드밀의 경우에는 절삭량이 많고 복잡하여 2회의 가공이 불가피하다. 2차가공에서는 1차가공과 동일한 연삭휠을 사

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

INPUT													
END MILL ( 2 edges)						WHEEL							
D	B	$\gamma$	$D_w$	$D_r$	$\theta_m$	$D_{w2}$	$\alpha$	$r_1$	$r_2$	$\theta_1$	$\theta_2$	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												
	$(X_0, Y_0)$		$(X_{02}, Y_{02})$		$\theta_m$							
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°							

용할 때 설계요소중 recess와 margin부의 크기를 만족시키기 위한 2번째 연삭가공을 위한 연삭휠의 작업위치를 결정하고자 한다. 앞에서 언급한대로 flute부 가공을 1회의 연삭가공으로 완성한다면 제한된 연삭휠의 형상으로는 앞에서 열거한 모든 설계조건을 만족시키기가 매우 어렵다. 엔드밀의 경우에는 복잡한 flute형상을 위한 정확한 월형상의 예측이 매우 어렵기 때문에 연삭가공의 폭이 큰경우에는 2회 이상의 작업으로 분리함으로서 월형상의 관리가 용이하며 앞에서 열거한 설계조건을 만족시키는 것이 가능하게된다. Fig. 6에서 2단계작업으로서 1단계에서와 동일한 방법으로서 임의의 월의 중심의 높이  $Y_{02}$ 를 정하여 1차에서와 유사하게  $X_{02}$ 의 값을 일정범위내에서 조절하여 판단기준을 위하여 입력으로 제공한 내접원의 크기  $D_{w2}$ 를 만족하는 중심의 위치  $(X_{02}, Y_{02})$ 를 결정한다. 이때의 recess의 크기,  $D_r$ 을 구하여 초기에 제공한 입력사항과 비교하여 일정범위의 정밀도를 유지할 때까지 월중심의 높이  $Y_{02}$ 를 계속적으로 변화시켜서 최종 월중심의 위치  $(X_{02}, Y_{02})$ 를 결정한다. 월의 2차가공위치,  $(X_{02}, Y_{02})$ 를 구한 후에 엔드밀 margin의 입력크기  $\theta_m$ 을 만족하기 위하여 엔드밀이 1차가공위치로부터 회전량  $\theta_m$ 만큼 움직여야 한다. 이상과 같은 각 설계요소들을 만족하는 1, 2차 flute연삭가공에 필요한 연삭휠의 위치를 순차적인 방법에 의하여 구하는 방법이 Fig. 6에 기술이 되어있다. Fig. 8에서는 Table 3에서 제시된 5가지의 설계값을 입력조건으로 할 때 각 경우의 가공을 위한 공구의 상대위치와 엔드밀 회전각을 앞에 제시된 software를 이용하여 구한 결과가 나타나있다. Fig. 8에서는 Table 3에 나타난 엔드밀 'A'의 설계조건과 그에 따른 가공결과를 기준으로 하여 각 설계요소가 변화함에 따른 가공결과의 변화를 서로 비교하였다. 엔드밀 'A'는 실선으로 엔드밀 'B, C, D, E'는 편의상 점선으로 표시되어 있다. Fig. 8 (a)에서는 엔드밀 'A'에 비하여 recess부의 크기가 변화한 엔드밀 'B'의 가공결과가 비교되었으며 이에 가공하기 위한 연삭휠의 설치 위치가 Table 3에 나타나있다. 1차 가공을 위한 설치 위치는 변화가 없으나 2차가공위치와 이에 따른 엔드밀의 회전량( $\theta_m$ )이 변화하였음을 알 수 있다. Fig. 8 (b)에서는 엔드밀 'A'에 비하여 margin양을 증가시킨 엔드밀 'C'의 가공결과를 비교하였고 이경우에는 1, 2차 연삭휠의 설치위치는 변화하지 않고 엔드밀의 회전각만이 margin의 크기만큼 변화한 것을 알 수 있다. Fig. 8 (c)에서는 엔드밀 'A'에 비하여 2차가공시 내접원의 크기( $D_{w2}$ )와 recess의 크기를 동시에 변화시킨 엔드밀 'D'의 가공결과와 2차가공을 위한 설치위치의 변화를 잘 나타내고있다. 이상의 변화를 거치면서 엔드밀의 단면의 크기가 엔드밀로 'A'에 비하여 점점 커지는 것을 발견할 수 있다. Fig. 8 (d)에서는 엔드밀 'A'에

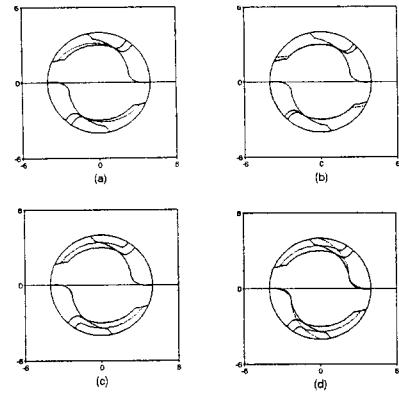


Fig. 8 Comparison of cross sectional configurations of 2 edge end mill as a result of flute grinding using different design factors shown in Table 3.

비하여 공구경사각이 5°로 감소하고 recess부의 크기와 2차내접원의 크기( $D_{w2}$ )의 크기를 모두 증가시킨 엔드밀 'E'의 가공결과를 나타내고 있다. 이경우에 엔드밀의 단면이 가장 커서 가장 높은 강성을 유지할 수 있다. 2차가공시에 입력으로 주어진 내접원의 크기( $D_{w2}$ )와 recess부의 크기( $D_r$ )에 의해서 연삭휠의 위치  $(X_{02}, Y_{02})$ 가 1차가공과 관계없이 독립적으로 결정된다. 그렇지만 margin부의 크기에 의해서 독립적인 1, 2차 가공결과가 서로 연관성을 갖게된다. 동일한 크기의 margin부를 가공함에도 불구하고 매우 상이한 엔드밀의 회전각  $\theta_m$ 을 갖는 사실을 확인할 수있었다.

### (3) 공구강성을 고려한 flute 가공

Fig. 4에서 표시한 4가지의 설계요소들을 만족하는 엔드밀의 가공이 앞에서 제시한 software를 이용하여 setting 치수를 결정함으로서 가능하게 되었다. 이상의 설계요소들 이외에도 엔드밀의 중요한 요소중의 하나로서 공구강성의 크기를 들 수 있다. 공구강성은 엔드밀과 같이 가늘고 긴 공구에 있어서 가공중에 발생하는 저항으로 인하여 변형이 일어나기 쉽기 때문에 가공면의 조도 및 공구수명에 직접 영향을 미치는 중요한 요소이다. 물론 앞에서 거론된 요소중 내접원의 크기나 recess 및 margin부의 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 침배출로 인한 문제가 제기되지 않는 범위내에서  $I_{yy}$ 의 값이 되도록 큰값을 유지할 수 있는 단면형상 가공이 이루어져야한다. Fig. 4에서 1차가공에서 결정된 내접원의 크기,  $D_w$ 와 2차 가공에 의한 recess와 margin부의 크기,  $D_r, \theta_m$ 를 만족하는 가공조건이 본 software에 의해서 이루어지지만 또 다른 공구강성에 영향을 미치는 요소로서 1, 2차 가공시 형성되는 flute곡선형상에 대한 고려가 이루어지지 않게된다. 이에대한 검토는 앞에서 언급한 연삭휠의 형상 결정시 미리 이루어져야한다. 특히 Fig. 2에서 A-B구간의 형상, 즉 경사면의 각도나 오목한 형상의 연삭휠의 결정이 공구강성에 큰 영향을 미치는 단면적 2차모멘트,  $I_{yy}$ 의 크기를 증가시킨다. Fig. 8에서는 Table 3에

의해서 flute가 공한 결과, E 형상의 엔드밀이 강성이 가장 우수한 것을 발견할 수 있다. 이와 같은 2날 엔드밀에 있어서 동일 휠에 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 가공중 변형에 의한 변화가 작다 [8]. 그러므로 3날 이상의 엔드밀의 경우 절삭중 변형의 균일성으로 유리한 특성을 보유하고 있다. 또한 변형에 의한 저감량을 좀 더 손쉽게 얻기 위하여 각 엔드밀의 형상에 있어서 등가 직경을 다음과 같은 결과를 개관적으로 나타낼 수 있다는 연구결과가 있다 [9].

$$D_{eq} = 0.8D$$

물론 이관계식은 본연구에서 주장하는 연삭휠의 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 결정되어야한다. 향후 이에대한 연구가 가공시의 엔드밀의 변형량과 단면적 2차모멘트와의 관계에 대하여 좀더 이루어져야한다.

## 5. 결론

- (1) 엔드밀의 제작시 고려해야하는 설계조건으로서 엔드밀 공구 경사각, 내접원의 크기, recess부의 크기 그리고 margin부의 크기로 정하였다.
- (2) 나선홈의 가공결과 예측용 software를 이용하여 엔드밀 제작시 4가지의 설계조건을 만족하기 위한 연삭가공시 연삭휠의 형상과 상대위치를 결정하는 엔드밀 제작전용 software를 개발하였다. 본 프로그램은 CNC공구연삭기를 이용하여 End Mill 제작시 매우 유용하며 필요에 따라서는 hardware와 접속에 의한 자동 programming 장치가 가능하다.
- (3) 본 연구에서 개발된 software에서 충분히 고려되지 못하는 엔드밀의 공구강성을 향상하기 위하여 연삭휠의 형상 설계에 대하여 고려하였다.

## 참고문헌

- (1) Friedman, M and Meister, I., 1973, 'The Profile of a Helical Slot Machined by a Form-Milling Cutter,' Annals of the CIRP, Vol. 22/1, p29~30
- (2) Kaldor, S., Rafael, A.D. and Messinger, D., 1988, 'On the CAD of Profiles for Cutters and Helical Flutes-Geometrical Aspects,' Annals of CIRP, Vol. 37/1, pp53~56.
- (3) 고성립, 1993, '트위스트 드릴제작을 위한 나선형 홈가공의 기하학적 해석,' 대한기계학회 논문집, 제8권, 제7호, pp1643~1653
- (4) Agullo-Battle, J., Cardona-Poix, S. and Vinas-Snz, C., 1985, 'Ontje Design of Milling Cutters on Grinding Wheels for Twist Drill Manufacture. A CAD Approach,' Proc. 25th MTDR Conf., pp315~320.
- (5) Sheth, D. S. and Markin, S., 1990, 'CAD/CAM for Geometry and Process Analysis of Helical Groove Machining,' Annals of CIRP, Vol. 39/1, pp129~132.
- (6) Ehmamann, K. F., 1990, 'Grinding Wheel Profile Definition for the Manufacture of Drill Flutes,' Annals of CIRP, Vol. 39/1, pp153~156.
- (7) Ekambaram, B and Malkin, S., 1993, 'CAD Software for Helical Flute Grinding of Milling Cutter,' Transactions of NAMRI/SME, Vol. 21, pp181~187
- (8) Fuji, Y. and Iwabe, H., 1983, 'Cross-Sections and Flexural Rigidity of Helical End Mills,' JSPE, Vol. 49/6, pp45~50.
- (9) Kops, L. and Vo, D., 1990, 'Determination of the Equivalent Diameter of an End Mill based on Its Compliance,' Annals of the CIRP Vol. 39/1, pp93~96.