

(論 文)

# 트위스트 드릴제조를 위한 나선형 홈가공의 기하학적인 해석

고 성 립\*

(1993년 12월 15일 접수)

## Geometrical Analysis of Helical Groove Machining for Manufacture of Twist Drill

S. L. Ko

**Key Words :** Drill(드릴), Helical Groove(나선형 홈), Flute Configuration(플루트형상), Undercut(초과가공현상), Drill Cutting Edge(드릴인선)

### Abstract

To facilitate the manufacturing of drill using CNC grinding machine, the simulation of helical groove machining with given wheel profile and setting condition is necessary. Considering the wheel as a collection of thin disks, the flute configuration is predicted in a cross section perpendicular to the axis and the grinding wheel profile is also predicted to machine the desired helical groove with given setting conditions. Two programs for these processes are developed. Using programs interactively, the helical groove machining process can be predicted more accurately. By clarifying the geometrical relation between the shape of cutting edge and the flute configuration in the cross section which is perpendicular to drill axis, it becomes possible to predict the necessary cross sectional shape of wheel for desired drill cutting edge shape. Some factors for the software are considered concerning prediction of accuracy and computing time.

### 1. 서 론

트위스트 드릴의 성능을 좌우하는 형상에 관련된 요소들은 크게 다음의 세가지로 분류된다. 첫째는 절삭을 시작할때 피삭재와 처음 접촉하는 선단부 즉, 치즐부위의 형상과 둘째는 대부분의 절삭이 이루어지는 드릴인선의 형상과 셋째는 드릴의 강성과 칩절단 및 칩제거가 이루어지는 나선형의 홈부위로 이루어진 드릴몸체 부분이다. 나선홈부의 형상은 다이아몬드 휠이나 밀링용 커터의 형상과 작업위치에 의한 나선홈작업에 의해서 결정되며 인선부의 형상은 이렇게 결정된 나선홈형상과 드릴선단각 및

선단부 연삭방법에 의해서 결정된다. 이제까지는 대부분의 나선형 홈작업의 복잡성으로 인하여 대부분 숙련자의 경험에 의존해 왔으며 제품의 균일성을 보장하기위한 작업의 재현성에 상당한 어려움이 있었다. 이것을 해결하기 위하여 주어진 휠의 형상과 작업조건하에서 나선홈 단면형상과 인선형상의 예측과 역으로 절삭성형상을 위하여 설계된 드릴의 나선홈 단면형상과 선단부의 인선형상을 정밀하게 가공하기 위한 휠의 단면형상 예측에 의한 드릴의 정밀하고 균일한 가공이 절실히 요구되어왔다.

나선형 홈가공용 공구인 다이아몬드 휠이나 밀링용 커터와 같은 회전공구의 경우 일정길이의 날부가 동시절삭이 이루어지면서 일정양의 리드를 가지고 회전하므로 임의 단면의 홈형상은 가공에 가담하는 휠의 부분이 그 단면을 완전히 벗어날 때까지

\*정회원, 대한중석(주) 중앙연구소

계속적으로 가공함을 생각하면 그 단면에서의 홈형상은 항상 휠의 단면형상보다 크게 된다. 이와 같은 임의의 단면에서의 가공휠의 계속적인 가공으로 인한 초과가공으로 휠단면형상보다 홈형상이 커지는 현상을 'UNDER CUT'이라 불린다. 이 현상 때문에 직감에 의한 정확한 나선형 홈가공을 수행하기가 어렵다. 그래서 오랫동안 나선각이나 선단부각과 같은 드릴형상이나 드릴과 휠의 가공위치에 따라서 다양하게 변하는 홈단면형상의 결정을 경험에 의존해 온 실정이다. 이러한 의미에서 드릴형상의 설계 및 제작을 위하여 나선형 홈가공의 해석에 의한 CAD를 이용하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있을 것이다. 이 작업은 주어진 휠의 형상과 작업조건으로부터 드릴홈단면을 예측하는 작업(direct method)과 주어진 작업조건으로 원하는 홈단면의 정확한 가공을 위해서 필요한 휠의 형상을 예측하는 작업(inverse problem)으로 이루어진다. 이 두 작업의 유기적인 사용에 의해서 정밀한 나선형 홈가공을 성공적으로 수행할 수 있다.

일찌기 트위스트 드릴에서의 홈단면형상과 사용휠에 관한 연구가 있었지만 위에 언급된 초과가공(undercut)현상을 고려치 않아서 근사적인 값에만족해야만 했다.<sup>(1)</sup> 나선형의 홈가공을 위하여 지금까지 두가지의 방법이 소개되었다. 첫째 방법은 사용되는 일정 두께의 휠을 여러개의 두께를 무시할 만한 얇은 휠이 일정 간격의 조합으로 이루어져 있다는 가정에 기초하여 나선형 홈가공시 단면형상은 각 얇은 휠요소에 의한 나선형 홈가공의 결과를 중첩함으로써 얻을 수가 있다. 이때 각각의 휠요소에 의한 나선형 홈가공시 단면형상이 해석적으로 예측되었다.<sup>(2,3)</sup> 역으로, 주어진 드릴단면형상의 가공을 위한 휠형상 예측은 나선형 홈가공의 예측과 유사한 방법으로 역순으로 행해졌으나 주어진 드릴단면형상을 여러개의 각 휠요소에 해당하는 각 드릴단면으로 분리하여야 하는 어려움으로 인하여 앞에서의 직접적인 방법과 같은 해석적인 방법에 의해서는 실제 적용시에 어려움이 예상된다.<sup>(3)</sup> 두번째 방법은 나선형 홈가공시에 휠과 드릴홈과의 접촉선(contact line)에서 공통법선은 반드시 사용휠의 축을 통과한다는 기본적인 관계에 의한 수학적인 관계에 기초하고 있다. 이 경우는 휠단면형상의 각 지점에 주어진 작업조건에서 드릴단면과 접하는 축방향의 위치를 계산함으로써 드릴단면형상을 예측하였다.<sup>(4~6)</sup> 역으로, 주어진 드릴홈형상 가공을

위한 휠형상의 예측을 위한 작업에서는 드릴단면형상에측에서와 같이 수학적으로 예측이 가능하다. 그러나 드릴홈과 휠의 접선관계로부터 볼록한 모서리나 오목한 모서리에서는 두개의 법선의 기울기를 갖게됨으로서 수정작업이 필요하며 또한, 유일한 휠형상 예측이 어려울 때에는 주어진 드릴홈형상의 재설계가 필요하다.<sup>(4)</sup>

본 논문은 첫째 방법에서 사용된 가정, 즉 일정 두께의 휠은 매우 얇은 두께의 휠의 조합으로 이루어져 있다는 가정에 기초하고 있다. 처음 단계로 매우 얇은 단일 휠을 사용하여 나선홈 가공시에 드릴의 나선홈의 각의 변화 및 휠의 크기나 상대위치 혹은 휠회전 세팅각의 크기의 변화에 따라서 드릴축에 직각인 단면에서의 가공홈의 형상을 실제 작업조건을 고려하여 예측하였다. 일정두께의 휠의 경우 이와 같은 얇은 휠의 가공결과를 한단면에 중첩하여 그 외곽선을 취함으로써 가공홈의 결과를 예측하였다. 이 작업을 위한 프로그램이 제작되었다. 이와 같은 직접적인 방법(direct method)에 의한 가공후 홈형상 예측은 특별한 제약조건이 없어서 그 결과가 항상 신뢰성을 가지고 있다. 좀 더 정확한 홈가공을 위하여서는 원하는 홈단면의 형상이 주어졌을때 사용되는 휠단면형상예측(inverse problem)이 불가피해진다. 이와 같은 휠단면형상에측을 위하여 첫번째 방법<sup>(3)</sup>에서는 실제로 드릴홈단면을 여러개의 각 휠요소에 해당하는 홈 단면요소로 분리하는 것이 어렵고 둘째방법에서는 가공단면의 모서리부에서의 수정작업이 필요하기 때문에 실제로 적용하기에는 한계점을 갖고 있다. 본 논문에서는 직접적인 방법의 신뢰성과 최근의 PC의 빠른 연산능력을 이용하여 직접적 방법의 반복사용에 의한 '수치해석적 방법'으로 각 휠요소들의 주어진 위치에서의 반경을 구하여 휠단면형상을 예측하였다. 이 방법에 의해서는 특별한 제약조건이나 적용상의 어려움이 없기 때문에 실용화하기에 적합하다. 앞에서의 단일 휠요소를 이용한 홈단면형상 예측방법을 반복 사용하여 주어진 각 휠요소에서 원하는 홈단면형상의 일부를 가공하기 위한 휠반경을 구함으로써 각 휠요소의 중심위치에 따른 각각의 반경값으로 주어지는 휠형상을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 또한 정확한 휠요소를 예측하기 위한 원하는 홈형상의 필요조건들이 고려되었으며, 앞에서 개발된 프로그램에 의한 휠형상 예측시 한계점이 제시되었으며 이것에 의한 원하는 홈형상의

조건도 함께 고려되었다. 이때의 한계점은 실제 나선홈가공이 갖는 현상을 물리적으로 정확하게 나타내는 것이다. 최종적으로 이와같은 과정을 통하여 얻은 드릴홈형상과 일정 선단각을 가지고 있는 드릴날부의 인선형상과의 관계가 제시됨으로서 주어진 휠형상에 의한 드릴인선부 형상의 예측과 원하는 형상의 드릴인선을 얻기 위해서 필요한 휠단면형상 예측이 가능하게 되었다.

## 2. 얇은 휠요소에 의한 나선형 홈가공 해석

드릴과 같은 나선형홈 가공시 발생하는 휠단면형상보다 더 큰 홈형상이 나타나는 현상인 under-cut의 해석을 위하여 휠두께의 영향을 배제한 매우 얇은 두께의 휠로서 가공했을 때 나타나는 결과를 고찰하고자 한다. 이와 같은 확대현상이 일어나지 않는다면 홈의 나선각에 수직인 단면에서의 홈형상이 휠의 단면과 같아야만 한다. 실제 매우 얇은 두께의 휠로 가공했을 때의 현상이 Fig. 1에 잘 나타나있다. 점 1과 3은 드릴과 휠이 만나는 양 끝점을 나타내며 점 2는 중간 의 임의의 접촉점을 나타내고 있다. 점 1을 지니고 드릴축에 수직인 단면 A-A에서의 홈단면형상을 찾기위하여 휠과 드릴단면형상이 정면도에서는 X-Y좌표로 측면도에서는 Y-Z좌표에 의해서 나타내었다.

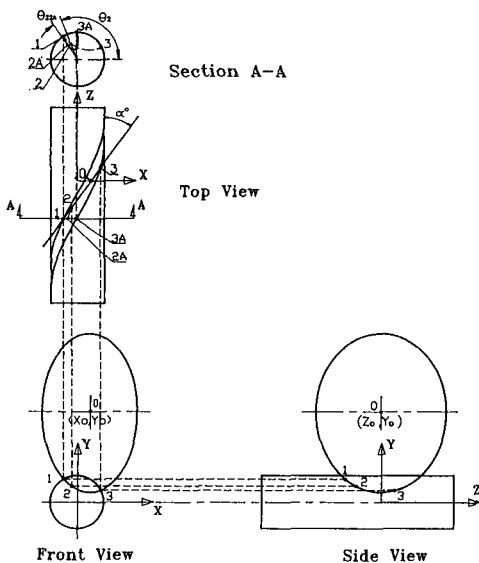


Fig. 1 Schematic illustration of helical groove operation with thin wheel

Wheel :

$$\frac{(X-X_0)^2}{(W\sin\alpha)^2} + \frac{(Y-Y_0)^2}{W^2} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{Z^2}{(W\cos\alpha)^2} + \frac{(Y-Y_0)^2}{W^2} = 1 \quad (2)$$

Drill :

$$X^2 + Y^2 = R^2 \quad (3)$$

여기에서,  $(X_0, Y_0)$ 는 드릴축에 대한 휠중심의 좌표를 나타낸다. 두점 1과 3은 식(1)과 (3)으로부터 수치해석적으로 구할 수 있으며 A-A 단면에 있는 점 3A는 점 3으로부터 상면도에서 드릴의 나선홈을 따라서 이동함으로써 구할 수 있다. 그 이동거리는 식(2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{33A} = Z_3 - Z_{3A} = Z_3 - Z_1$$

단면 A-A에서 나선각이  $\beta$ 인 나선홈을  $(Z_3 - Z_1)$ 만큼 이동중에 발생하는 이동각  $\theta_{33A}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{33A} = \frac{(Z_3 - Z_1)\tan\beta}{R}$$

이 이동중에 단면 A-A에서의 반경방향의 거리는 변하지 않으므로 점 3A를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{3A} &= r_3 = \sqrt{(X_3^2 + Y_3^2)} \\ \theta_{3A} &= \theta_3 + \theta_{33A} \end{aligned} \quad (4)$$

휠과 드릴의 임의의 접촉점 2의 Z값은 측면도에서 임의의 Z값의 증가분,  $\Delta Z$ 에 의해서

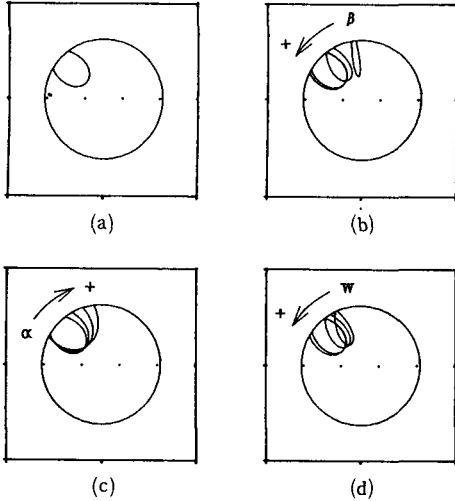
$$Z_2 = Z_1 + \Delta Z$$

로 나타내 수 있으며,  $\Delta Z$ 의 값을 0에서  $(Z_3 - Z_1)$ 까지 변형시킴으로써  $Z_2$ 는 점 1과 3사이의 모든 값을 나타낼 수 있다. 식(1)과 (2)를 이용하여  $(X_2, Y_2)$ 와  $(Y_2, Z_2)$ 가 결정된다. 단면 A-A에서의 점 2A를 찾기위하여 점 2도 점 3과 같은 방법으로 이동하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{2A} &= r_2 = \sqrt{(X_2^2 + Y_2^2)} \\ \theta_{2A} &= \theta_2 + \theta_{22A} = \theta_2 + \frac{\Delta Z \tan\beta}{R} \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서,  $\theta_2$ 와  $\theta_{22A}$ 는 Fig. 1의 단면 A-A에 잘 나타나 있으며 점 1과 3A사이의 모든 점들도  $\Delta Z$ 의 값을 0부터  $(Z_3 - Z_1)$ 까지 변형시킴으로써 얻을 수 있다.

Fig. 2에서는 앞에서 제시된 방법에 의해서 얻어



- (a) With fixed condition  $R=5, \beta=30^\circ, W=75, \alpha=30.5^\circ$
- (b) By changing helix angle  $\beta=2^\circ\sim 60^\circ, \alpha=\beta+0.5^\circ$
- (c) By changing wheel setting angle  $\alpha=30^\circ\sim 40^\circ$
- (d) by changing wheel radius(with same depth)  $W=5\sim 75$

Fig. 2 Some examples of undercutting effect

진 여러 조건으로부터 얻은 홈가공의 결과가 나타나 있다. 나선형 홈가공에 있어서 변수가 될수 있는 것은 드릴반경,  $R$ , 나선형 홈의 각,  $\beta$ , 휠의 반경,  $W$ , 휠의 회전각,  $\alpha$ , 그리고 휠의 중심위치,  $(X_0, Y_0)$ 가 있다. 각 요소들의 영향이 Fig. 2(a)를 기준으로하여 비교되어 있다. Fig. 2(a)에서는  $R=5, \beta=30^\circ, W=75, \alpha=30.5^\circ$  그리고  $(X_0, Y_0)=(0, 77)$ 일 때 가공결과이다. Fig. 2(b)에서는 나선홈의 각이  $2^\circ$ 부터  $60^\circ$ 까지 증가하는 경우이고 이때 휠의 회전각은 나선홈의 각보다  $0.5^\circ$  큰 각을 사용하였다. Fig. 2(c)에서는 나선홈의 각이  $30^\circ$ 일때 휠회전각을  $30^\circ$ 부터  $40^\circ$ 까지 변화시킬 때의 홈의 형상변화를 나타내고있다. Fig. 2(d)에서는 동일 홈의 깊이를 유지한 채 휠의 반경이  $5\text{ mm}$ 부터  $75\text{ mm}$ 까지 변화할 때의 홈가공의 결과이다. Undercut 효과의 측정을 위하여 홈의 깊이에 대한 폭의 비(ratio)로서 나타낼 수 있다. 이 경우 비의 값이 '0'에 가까울수록 undercut 효과가 적은 것이다. 앞의 관찰로부터 나선홈의 각이 작을수록, 휠회전각이 작을수록, 휠의 반경이 작을수록 이 효과가 작아짐을 알 수 있다.

### 3. 유한한 두께의 휠에 의한 나선형 홈가공 해석

유한한 두께의 휠을 매우 얇은 휠의 조합으로 가정할 때, 이 휠에 의한 홈가공 결과는 여러개의 매우 얇은 휠에 의한 홈가공의 조합으로 예측할 수 있다. Fig. 3에서는 초기 필요소로부터  $t$ 만큼 떨어져 지고 반경이  $W'$ 인 또 다른 필요소에 의한 나선홈의 가공을 나타내고 있다. 이 휠의 중심은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_v &= X_0 + t \cos \alpha \\ Y_v &= Y_0 \\ Z_v &= -t \sin \alpha \end{aligned} \tag{6}$$

이때에 필요소는 각 좌표에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{(X - X_v)^2}{(W' \sin \alpha)^2} + \frac{(Y - Y_v)^2}{W'^2} = 1 \tag{7}$$

$$\frac{(Z - Z_v)^2}{(W' \cos \alpha)^2} + \frac{(Y - Y_v)^2}{W'^2} = 1 \tag{8}$$

초기 필요소에서와 같은 방법으로 점 1'을 지나고 드릴축에 수직인 단면  $A'-A'$ 에서의 홈가공 형상을 예측할 수 있다. 단면  $A'-A'$ 에서의 점 3A'의 좌표를 구한 다음 임의의 점 2A'의 좌표가 2장에서 점

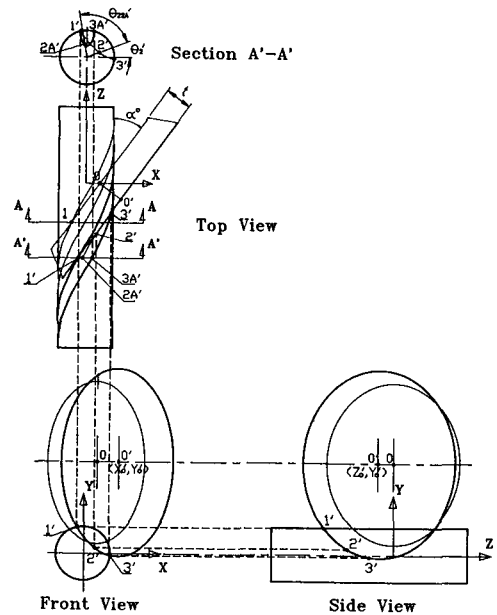


Fig. 3 Schematic illustration of helical groove operation with given wheel profile

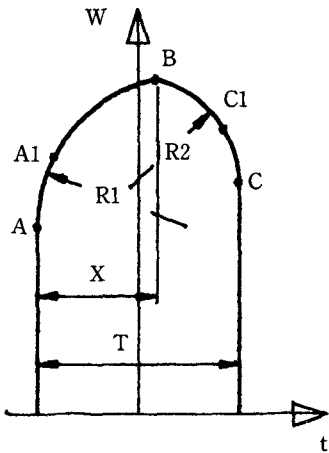


Fig. 4 Specification of wheel for drill

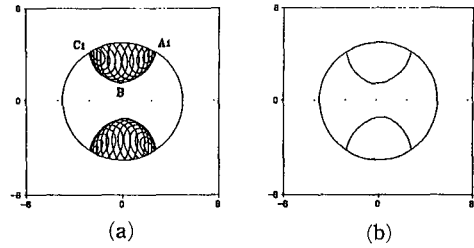


Fig. 5 Groove configuration in cross section by accumulating traces of each segmented wheel for drill (a) and those envelop (b) with  $D=10$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $T=4.5$ ,  $(R_1, R_2) = (3, 3)$ ,  $X=2.0$ ,  $\alpha=31^\circ$ ,  $(X_0, Y_0)_c = (0, 74.3)$

Table 1 Drill and wheel geometry and setting conditions

Drill			Wheel					
Dia D	Helix ang. $\beta$	Web dia. $W_a$	Set ang. $\alpha$	Center loc. $(X_0, Y_0)_c$	Width T	Dist. X	Wheel R $(R_1, R_2)$	Elements n
10	$30^\circ$	3	$31^\circ$	$(0, 74.3)$	4.5	2.0	$(3, 3)$	20

2A와 동일한 방법으로 다음과 같이 구해진다.

$$r_{2A'} = r_{2'} = \sqrt{(X_{2'}^2 + Y_{2'}^2)}$$

$$\theta_{2A'} = \theta_{2'} + \theta_{22A'} = \theta_{2'} + \frac{\Delta Z \tan \beta}{R} \quad (9)$$

여기에서,  $\Delta Z$ 는 Fig. 3의 측면도에서 0'부터 ( $Z_{3'} - Z_{1'}$ )까지의 임의의 증가분으로써 점 1'와 3'사이의 모든 점을 나타낼 수 있다. 각 휠요소들의 홈가공 결과를 하나의 단면에서 보기 위해서는 단면  $A'-A'$ 에 있는 모든 점들이 단면  $A-A$ 로 옮겨져야 한다. 이때 측면도에 있어서 Z축으로의 이동거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\Delta Z)_{AA'} = Z_{1'} - Z_{3'}$$

이동방향에 따른 이동각도의 부호를 고려하여, 단면  $A-A$ 에서의 점  $2A'$ 의 좌표는 다음과 같다.

$$(r_{2A'})_A = r_{2A'}$$

$$(\theta_{2A'})_A = \theta_{2A'} + \frac{(Z_{1'} - Z_{3'}) \tan \beta}{R}$$

$$= \theta_{2'} + (\Delta Z + Z_{1'} - Z_{3'}) \frac{\tan \beta}{R} \quad (10)$$

드릴제작에 사용되는 전형적인 휠의 형상인 일정한

두께의 두개의 원호의 조합으로 이루어진 다이아몬드 휠형상의 예가 Fig. 4에 주어져 있다. 원호를 따른 일정한 간격의 n개의 매우 얇은 휠로의 분리 작업에 의해서 휠위치  $t_i$ 에서의 각 휠요소의 반경  $W_i$ 가 얻어진다.

$$W_i = f(t_i) \quad i=1, n \quad (11)$$

이렇게 구해진 각 휠들의 반경과 식(6)에 의해서 얻은 각 휠요소의 중심으로부터 앞에서 소개한 과정의 반복작업을 통하여 드릴축에 직각인 임의의 단면에서의 나선형 홈가공결과의 형상이 얻어진다. Fig. 5(a)에는 Table 1에 주어졌던 드릴 및 휠형상과 작업조건에 의한 각 휠요소들의 가공결과가 잘 나타나 있고 Fig. 5(b)에서는 이것의 외곽만을 취함으로써 나선형 홈의 가공결과가 나타나 있다. Fig. 4에 나타난 휠의 단면중에서 Fig. 5(a)에서는  $A_1, B$  그리고  $C_1$ 에 이르는 부분적인 휠요소만이 홈작업에 기여했음을 관찰할 수 있다. 이때 드릴의 중요한 요소인 내접원의 크기를 나타내는 웨브(web)의 크기를 만족하도록 주어진 휠중심 위치  $X_0$ 에 따른  $Y_0$ 의 값이 결정된다.

### 4. 원하는 형상의 나선형 홈가공을 위한 휠단면형상의 예측

앞장에서는 주어진 휠형상에 의한 나선형 홈가공 결과의 형상예측이 이루어진 반면에 경우에 따라서는 주어진 홈형상의 정밀한 가공을 위한 휠형상의 예측이 필요하게 된다. 서론에서 언급한 대로 주어진 홈단면에서는 각 휠요소의 예측을 위한 홈단면의 분리작업의 어려움으로 해석적인 방법보다는 수치해석적인 방법에 의한 휠형상의 예측이 용이하다. 결과적으로는 완전한 역작업으로 보이지만 실제로는 2장에서 언급된 무한히 얇은 각 휠요소들의 반경을 증가시켜서 각 휠들의 위치에서 주어진 홈단면형상과 만나는 휠의 반경을 각각 구하는 작업의 반복으로 볼 수 있다. Fig. 6(a)에 가공하고자 하는 원하는 형상의 홈이 주어져 있다. 원하는 홈형상 가공을 위한 휠단면형상을 찾는 프로그램의 흐름도가 Fig. 7에 주어져 있다. 제1단계로서 입력으로  $m$ 개의 좌표로 이루어진 원하는 홈단면형상 좌표,  $(X_r, Y_r)_m$ 와 초기 작업조건으로서 Fig. 1에 나타난 바와같이 최초 휠요소의 중심좌표,  $(X_0, Y_0)_1$ 과 드릴축에 대한 휠의 설치각,  $\alpha$ 가 주어진다. 여기에서 휠 중심좌표  $(Y_0)_1$ 의 변화는 휠단면형상은 변하지 않고 휠의 반경만이 변하기 때문에 전체 휠요소소에서 공통적으로 사용된다. 홈단면 시작점, A를 만나는 초기 휠중심  $(X_0)_1$ 의 위치에 따라서 단면형상과 휠의 두께가 더불어 변하기 때문에 적절한  $(X_0)_1$ 의 결정이 중요하다. 제2단계로서 주어진 입력 조건으로서 최초 휠요소에 의한 가공후 홈단면을 앞에서의 직접적인 방법(direct method)으로 예측한 결과인  $(X_w, Y_w)$ 와 주어진 홈단면형상  $(X_r, Y_r)$ 와의 비교에 의한 휠요소의 반경의 크기,  $W_i$ 가 결정된다. 이 경우 비교의 판정기준으로서  $\Delta Y$ 을 다음과 같이 사용한다.

$$(Y_w - Y_r)_{\min} < \Delta Y \tag{12}$$

여기에서,  $(Y_w - Y_r)_{\min}$ 이 판정기준  $\Delta Y$ 보다 크면 휠요소의 반경이  $\Delta W_i$ 만큼 증가된 후 앞에서의 비교작업을 되풀이 한다. 이때  $\Delta W_i$ 의 크기가 너무 크면 앞의 조건 (12)를 만족하지만 휠반경의 정밀도가 떨어지며, 너무 작으면 계산시간이 증가하므로 경제적인  $\Delta W_i$ 의 크기가 판정기준  $\Delta Y$ 의 크기에 따라서 조심스럽게 결정되어야 한다. Fig. 6(a)에서  $W_i$ 가 커짐에 따라서 주어진 홈단면과의 관계

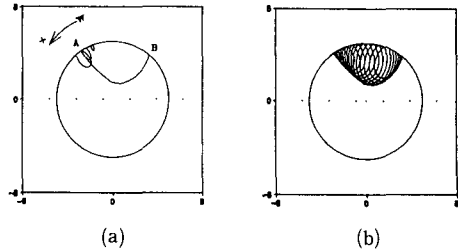


Fig. 6 (a) Desired groove profile (with  $D=10, \beta=30^\circ, \alpha=31^\circ$  and  $W_d=3$ ) and representation of the effect of increase of wheel radius when  $(X_0, Y_0) = (0, 73.9)$ ,  $W=69.5, 70.0$  and  $70.5$   
 (b) Accumulating trajectories of each wheel segment found for desired groove profile and comparison

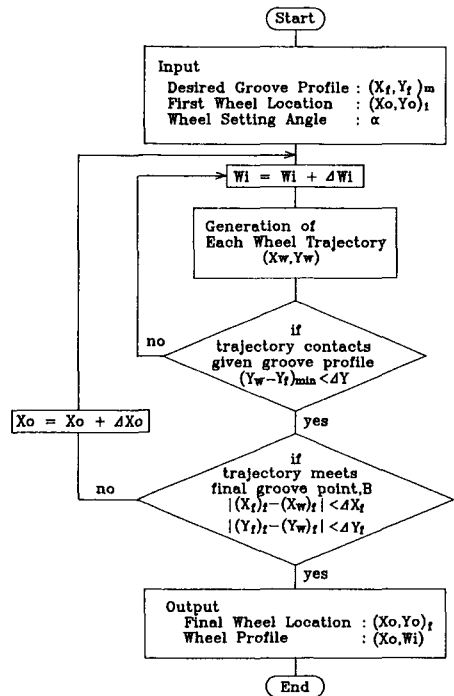


Fig. 7 Flow chart for finding wheel profile to machine desired groove profile (inverse problem)

가 잘 나타나 있다. 제3단계에서는 최초 휠요소의 반경  $W_i$ 가 결정된 후 나머지 휠요소들이 결정되어야 한다. 휠중심의 위치는 Fig. 3에서 보는바와 같이 휠중심이 식(6)에서 보는바와 같이  $\Delta X_0 = t \cos \alpha$ 만큼 떨어져 있을 때  $(X_0, Y_0)$ 가 된다. 이 각 휠요소의 반경  $W_i$ 도 2단계에서와 마찬가지로 동일한

$\Delta Y$ 와  $\Delta W_i$ 의 크기를 가지고 결정되어야 한다. 이 경우 휠중심의  $Y$ 좌표,  $Y_0$ 는 2단계에서  $(Y_0)_1$ 과 동일한 크기를 갖는다. 최종 단계로서, 마지막 휠요소 위치,  $(X_0, Y_0)_f$ 와 그때의 반경  $W_f$ 를 구하기 위하여 홈형상 마지막 지점인 Fig. 6(a)에서의 B점 근처에서의 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$\begin{aligned} |(X_f)_f - (X_w)_f| &< \Delta X_f \\ |(Y_f)_f - (Y_w)_f| &< \Delta Y_f \end{aligned} \quad (13)$$

여기서,  $(X_f, Y_f)_f$ 는 홈형상에서 마지막 지점인 점 B의 좌표이며,  $(X_w, Y_w)_f$ 는 각 휠요소에 의한 홈가공단면의 마지막점의 좌표이다. 조건 (12)에서는 판정기준으로  $\Delta Y$ 만 사용되는데 비해 마지막 휠요소의 판정기준으로  $\Delta X_f$ 와  $\Delta Y_f$ 를 사용하는 것은 마지막 휠요소가  $\Delta Y_f$ 를 만족한다 할지라도  $X$ 방향으로의 오차가 발생할 수 있기 때문에  $X$ 방향의 형상 정밀도를 유지하기 위하여  $\Delta X_f$ 의 판정기준을 도입하였다. 3단계에서의 휠요소 중심,  $(X_0, Y_0)$ 에서 조건 (13)을 만족하지 않는 경우는 계속적으로  $\Delta X_0$ 만큼  $X_0$ 의 크기가 증가하게 된다. Fig. 6(b)에서는 Fig. 6(a)에서 주어진 홈형상을 가공하기 위한 각 휠요소들의 최종 가공후 홈형상들이 조합되어 있다. 이 홈형상의 조합들의 외곽선이 이렇게 얻어진 휠에 의한 가공형상이다. 이 경우에도  $\Delta X_0$ 의 크기가 너무 크면  $\Delta X_f$ 와  $\Delta Y_f$ 의 크기에 따라 조건 (13)을 만족하는 경우를 찾지 못할 수도 있으며,  $\Delta X_0$ 가 너무 작으면 앞에서와 같이 계산시간이 오래 걸리므로 적정크기의  $\Delta X_0$ 가  $\Delta X_f$ 와  $\Delta Y_f$ 의 크기에 따라 결정되어야 한다. 일반적으로 다소 큰  $\Delta X_0$ 를 이용하면서 마지막 휠요소에서는 작은  $\Delta X_0$ 를 사용하여 조건 (13)을 만족하는 최종 휠의 위치와 크기를 결정한다.

원하는 나선형 홈가공을 위한 휠형상의 예측을 위하여 제작된 프로그램을 이용하여 앞에서 제시된 방법의 타당성을 입증하기 위하여, Fig. 8(a)에 주어진 홈가공을 위한 휠의 단면형상에측을 시도하였다. 드릴의 직경은 10, 외측 나선각은  $30^\circ$  그리고 최초의 휠요소의 중심위치  $(X_0, Y_0)_1$ 는  $(-2.38, 66.22)$ 로 주어졌다. 드릴축에 대한 휠의 설치각은  $30.5^\circ$ 이다. 앞의 방법에 의한 각 휠요소들의 중심의  $X$ 좌표와 휠반경,  $(X_0, W_i)$ 가 Fig. 8(b)와 같이 결정되었다. 조건 (12)와 (13)에서의 판정기준  $\Delta Y$ ,  $\Delta X_f$ ,  $\Delta Y_f$ 의 크기는 0.1의 크기를 사용하였고,  $\Delta W_i$ 는 0.01~0.5범위와  $\Delta X_0$ 의 크기는 0.01~0.1

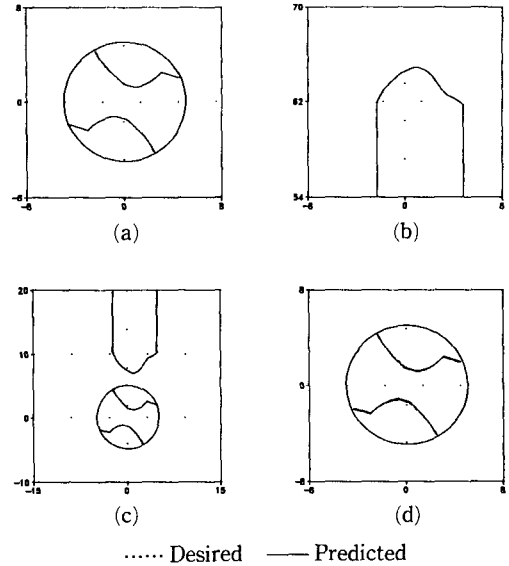


Fig. 8 (a) Representation of desired groove profile  
 (b) Obtained wheel profile by solving Inverse problem with input :  $D=10, \beta=30^\circ, \alpha=30.5^\circ$  and  $(X_0, Y_0)_1=(4.72, 66.22)$ , output :  $(X_0, Y_0)_1=(-2.38, 66.22)$   
 (c) Wheel setting configuration as a result of inverse problem  
 (d) Prediction of groove profile with obtained wheel and comparison with desired one

범위에서 가변적으로 사용하여 경제적인 계산을 수행하였다. 그 결과 최종 휠요소의 중심위치  $(X_0, Y_0)_f$ 는  $(4.72, 66.22)$ 가 되어서 휠두께가 7.1이 되었다. 휠단면형상을 회전하지 않은 상태에서 드릴과 휠의 설치상태가 임의의  $Y_0$ 값에 대하여 Fig. 8(c)에 나타나 있다. Fig. 8(b)에 예측된 휠형상의 타당성을 검증하기 위하여 이 휠을 사용하여 제3장에서 직접적인 방법에 의하여 동일한 가공조건으로 가공한 홈형상이 Fig. 8(d)에 나타나 있으며 Fig. 8(a)에 나타난 원하는 홈형상을 점선으로 같이 나타내어 오차를 표현하고자 하였다. 보는바와 같이 육안으로 식별하기 어려운 정도의 오차를 갖고 있으며 그 오차는 조건(12)와 (13)에서의 판정기준을 변화함으로써 조절할 수 있다.

## 5. 나선형 홈가공 해석의 드릴제작에의 적용

### 5.1 드릴의 기하학적 요소 및 특성

앞에서 언급한 바와 같이 드릴의 성능을 좌우하

는 기하학적 요소는 크게 세가지로 분류된다. 첫째, 구멍가공시 피삭재와 처음 접촉하는 드릴선단부의 웨브인선 형상은 구멍가공시 절삭저항과 구멍정밀도에 직접적인 영향을 미친다. 종전의 일반 트위스트 드릴은 큰 음의 경사각을 갖는 치끝에지(chisel edge)를 보유하고 있어서 절삭저항이 커지며 또한 처음 접촉시 치끝에지의 미끄럼 현상으로 구멍확대량도 커지는 현상을 나타낸다. 최근에는 웨브인선 제작시 크로스씨닝(cross thinning)에 의해서 인선부를 분리시킴으로써 치끝에지가 제거된 형상을 갖는 드릴이 보편화되고 있다. 이에 따라 절삭저항과 구멍확대량이 감소함으로써 가공속도 증가와 정밀도의 향상이 이루어지고 있다. 둘째로는 실제 대부분의 절삭이 이루어지고 있는 선단부 플루트 인선의 형상으로서 이 형상에 따라서 절삭날부의 길이와 절삭시 칩의 흐름각과 칩의 두께등이 결정된다. 이러한 것들에 의해서 축방향의 절삭저항( $F_z$ )와 토크( $T$ )의 크기와 원활한 칩배출을 위한 칩브레이킹(chip breaking)의 형태가 결정된다. 종전의 트위스트 드릴의 경우 강(鋼)의 구멍가공시에는 항상 나선형의 연속칩이 배출되었지만 최근의 웨브인선과 플루트부 인선형상의 드릴에서는 강의 구멍가공시 짧게 절단된 칩이 생성되어서 칩배출이 용이하며 이로 인한 절삭속도의 증가가 가능하게 되었다. 선단부인선은 웨브인선부와 플루트부 인선으로 이루어져있는데 이하 드릴선단부의 플루트부 인선형상을 드릴인선형상이라 칭한다. 인선부 형상은 반경방향으로의 날부의 경사각과 축방향의 경사각에 의해서 결정된다. 다시 이야기하면 드릴인선부 형상은 몸체부의 나선홈 즉, 플루트단면형상과 홈의 나선각 그리고 선단각에 의해서 결정된다. 드릴인선부 형상과 각 요소들과의 관계에 대하여 구체적으로 논의될 예정이다. 세번째 중요한 기하학적 요소로는 드릴의 강성과 절삭유 급유 및 칩배출 공간을 결정하는 드릴 몸체부의 형상이다. 드릴의 강성은 주로 비틀림모멘트에 관한 것으로서 극이차모멘트로 불려지는  $I_2 = \int_A r^2 dA$ 의 값이 큰 단면형상이 비틀림강성이 크다고 할 수 있다. 이것은 플루트의 단면적의 크기와 형상에 의해서 결정되며 이러한 강성외에도 플루트의 형상과 홈의 나선각 그리고 드릴선단각에 의해서 드릴인선형상이 결정되기 때문에 플루트형상은 드릴의 강성과 인선부 형상을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 또한 절삭시 발생된 칩을 외부로 배출하는 통로가 되며 동

시에 외부로부터 공급되는 절삭유의 급유통로가 되어서 구멍가공이 깊어질수록 칩배출과 절삭유 공급이 어려워져 드릴파손의 원인이 된다. 최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위한 특수한 형태의 플루트형상이 개발되었으며 또한 절삭유를 드릴 몸체 중심을 관통하는 급유구멍을 통하여 선단부에 직접 주입하는 드릴이 점점 보편화 되고 있다.

이상의 세가지의 중요한 요소중에서 나선형 홈가공과 직접 관련이 있는 것은 우선 몸체부 플루트 단면형상과 그 결과에 의한 드릴인선형상으로서 드릴의 선단각과 나선홈의 각도 및 선단부의 연삭방법에 의해서 결정된다. 그러므로 플루트단면형상과 선단부의 인선형상과의 관계를 규명함으로써 원하는 드릴의 성능을 보유한 드릴제작을 위한 휠의 형상과 작업조건을 결정할 수 있게 된다.

## 5.2 드릴 홈단면형상과 드릴인선형상과의 관계

앞에서 언급한 바와 같이 드릴인선형상은 첫째, 홈단면형상과 나선홈의 각도로 나타내는 몸체부의 나선홈형상과 둘째, 드릴선단부 형상 즉, 선단각과 연삭방법으로 결정된다. 몸체부 나선홈의 형상은 드릴의 강성과 원활한 칩배출을 위한 공간을 확보하기 위한 조건을 만족해야 하며 선단부 형상은 절삭시 칩흐름각의 유도에 의한 칩형성과 웨브 절삭날의 결정을 위하여 선단각과 연삭방법에 의해서 결정된다. Galloway는 최초로 주어진 선단각,  $2\kappa$ 와 웨브크기,  $2t$ 를 보유하고 원뿔연삭에 의한 직선형의 드릴인선형상을 얻기 위한 홈단면형상과 선단부인선 형상과의 관계를 구하였다.<sup>(7)</sup>

Fig. 9에서 보는바와 같이 선단부 연삭전에  $xy$ 평면에서 극좌표로  $(r, \nu)$ 로 나타나는 점  $P'$ 가 선단부 연삭후  $(r, \varphi)$ 의 점  $P$ 로 이동함을 알 수 있다. 이때 드릴 중심축을 따른 이동량  $L$ 은 다음과 같다.

$$L = \frac{r \cos \varphi}{\tan \kappa} = \frac{t}{\tan \kappa \tan \varphi}$$

이때의 점  $P'$ 의 이동 회전각  $(\nu - \varphi)$ 는 나선홈이  $2\pi$ 회전 했을때  $2\pi R / \tan \beta$ 의 피치를 이동하므로  $L$ 만큼의 이동을 위한 회전각  $(\nu - \varphi)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu - \varphi = \frac{t}{R} \cos \kappa \cos \varphi \tan \beta \quad (14)$$

여기에서,  $\beta$ 는 최외측 반경  $R$ 에서의 나선홈의 나



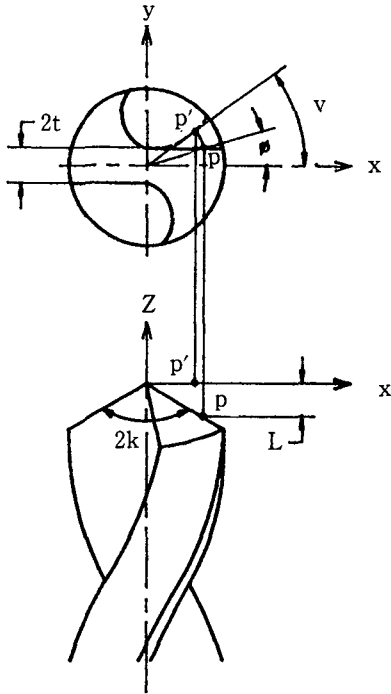


Fig. 9 Schematic illustration of the movement of a point in a cross section when ground with a point angle

선각의 크기를 나타낸다. 그러므로 주어진 선단각  $2\pi$ 와 나선각  $\beta$ 의 원뿔연삭에 의한 직선인선을 갖는 드릴제작을 위해서 요구되는 플루트의 단면형상이 식(14)에 의해서 결정된다. 위와 같이 주어진 드릴 인선형상을 만족하도록 축에 직각인 단면에서의 플루트의 형상이 주어졌을 때 드릴과 휠의 상대 위치에 따른 이것을 가공하기 위한 사용휠의 축방향 단면형상을 앞에서 언급한 대로 예측할 수 있다.

드릴직경이 10, 선단각  $2\kappa$ 가  $118^\circ$ , 나선홈 각  $\beta$ 가  $30^\circ$ 일때 웨브 크기  $2t$ 가 3을 만족하는 직선인선이 Fig. 10(a)에 점선으로 주어져 있다. 원뿔연삭에 의해서 Fig. 10(a)에 나타난 인선형상을 만족하기 위한 드릴축에 수직인 단면에서의 플루트형상이 Fig. 10(a)에 실선으로 식(14)를 이용하여 구하였다. 이 플루트형상 가공을 위하여 주어진 드릴축과 최초 휠요소의 상대위치  $(X_0, Y_0)_1 = (-2.58, 75.44)$ , 휠회전각  $\alpha = 30.5^\circ$ 에서 요구되는 휠의 형상이 Fig. 10(b)에 나타나 있다. 이때 휠의 두께  $T$ 는 4.6이 된다. 참고로 Fig. 10(b)와 유사한 휠의 모양에 의한 나선홈 가공결과가 본 논문의 다른

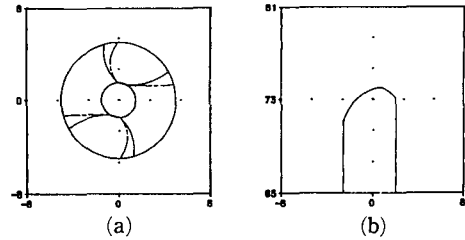


Fig. 10 (a) Representation of the required flute configuration (solid line) for desired cutting edge (dotted line)

(b) Cross section of wheel for required Flute Configuration with input :  $D=10, 2\kappa=118^\circ, \beta=30^\circ, 2t=3, \alpha=30.5^\circ$   $(X_0, Y_0)_1 = (-2.58, 75.44)$ , output :  $(X_0, Y_0)_r = (2.02, 75.44)$

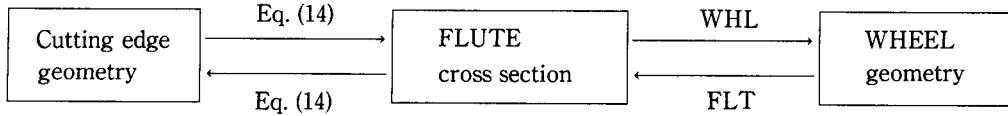
예에서는 Fig. 10(a)와  $y$ 축에 대칭인 형상으로 나타난 것은 Fig. 10(a)에서는 선단부 인선모양을 동시에 나타내기 위하여 드릴의 선단에서 본 정면도이기 때문이다.

### 5.3 CAD를 이용한 드릴제작

이상과 같은 과정을 통하여 드릴의 절삭성능을 고려한 드릴선단부의 인선형상의 설계가 완료된 후 이에 대응하는 드릴몸체부 플루트형상의 예측과 이것을 가공하기 위한 드릴과 휠의 상대위치 및 휠단면형상의 예측이 가능해졌다. 역으로, 주어진 휠을 이용한 드릴의 모의가공을 통하여 플루트형상 및 선단부 인선형상을 예측함으로써 종전의 작업자의 경험과 숙련도에 의존하던 시행착오를 탈피함으로써 드릴제작의 효율성을 극대화할 수 있게 되었다. 이와 같은 관계가 Table 2에 잘 나타나 있다.

3장에서 언급한 바와 같이 주어진 휠의 단면형상과 세팅조건에 의한 나선형 홈가공의 해석을 위한 프로그램 "FLT"가 FORTRAN을 이용하여 개발되었다. 원하는 드릴형상 즉, 직경, 웨브크기, 나선홈 각 그리고 선단각과 휠의 축방향 단면형상과 휠중심의 상대위치가 입력으로 주어지면 출력으로서 가공후의 축에 직각인 단면에서의 플루트형상을 예측할 수 있다. 이때에 가공 단면형상 예측의 정밀도는 제2장에서 소개한 얇은 휠요소들의 간격에 의해서 결정된다. 그러나 휠요소가 많을수록 소요되는 계산시간이 길어지기 때문에 사용자의 요구에 의해서 사용 휠요소의 수를 입력으로 주어진다. 각 휠요소들의 나선홈 가공결과를 임의의 단면에 나타내고 중첩에 의해서 그 외관만을 취함으로써 최종

**Table 2** Diagram for design and manufacture of drill vsing CAD



**Table 3** Variation of wheel geometry for same flute grinding according to the change of first wheel location

Input		Output	
Wheel Set Ang. $\alpha$	1st wheel Location $(X_0, Y_0)_1$	Final Wheel Location $(X_0, Y_0)_f$	Wheel Width T
30.5	(-4.0, 66.22)	(0.7, 66.22)	4.7
30.5	(-2.0, 66.22)	(2.5, 66.22)	4.5
30.5	(1.0, 66.22)	(5.2, 66.22)	4.2

적인 나선홈 형상을 결정할 수 있다.

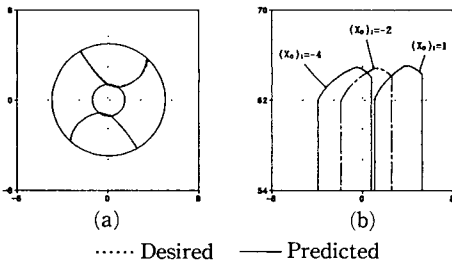
제4장에서는 원하는 플루트 단면형상 가공을 위해서 주어진 세팅조건하에서 요구되는 휠형상을 예측하기 위하여 프로그램 “WHL”이 개발되었다. 주어진 휠과 드릴의 상대위치에서 나선홈 형상을 예측하는 프로그램 “FLT”에서 사용된 동일한 알고리즘을 각 휠요소의 반경을 변화시키면서 반복 적용함으로써 적합한 정밀도를 갖는 각 휠의 반경을 결정한다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 프로그램 “WHL”의 입력으로서 가공하고자 하는 나선홈 단면형상을 나타내는  $m$ 개의 좌표,  $(X_f, Y_f)_m$ 와 세팅조건으로서 최초 휠요소의 드릴축에 대한 상대위

치,  $(X_0, Y_0)_1$ 과 휠 회전각  $\alpha$ 가 주어진다. 동일한 홈형상을 위하여 서로 다른 세팅조건에 따라서 요구되는 휠단면형상이 변한다. Table 3에서 보는 바와같이 최초 휠요소의 드릴축에 대한 상대위치의 변화에 따라 Fig. 11(a)의 동일한 홈가공을 위하여 세가지의 다른 최초 휠요소의 위치에 따른 각 휠의 형상과 두께가 다름을 Fig. 11(b)로부터 관찰 할 수가 있다. 각 휠에 의한 각각의 세팅조건에서 역으로 프로그램 “FLT”를 이용하여 예측한 가공후 홈단면형상을 실선으로 Fig. 11(a)에 나타내어 점선으로 표시한 원하는 홈단면형상과 비교함으로써 타당성을 점검하였다.

이같은 과정을 통하여 최종 휠 요소의 중심위치  $(X_0, Y_0)_f$ 를 구함으로써 휠두께가 결정되며, 각 휠 요소의 반경크기  $(X_0, W_i)$ 를 얻음으로써 휠 단면형상이 결정된다. 프로그램 “WHL”을 이용한 결과의 정밀도는 각 휠요소의 반경크기 결정을 위하여 사용되는 식(12)와 (13)에 나타난 판정기준  $\Delta Y, \Delta X_f$ 와  $\Delta Y_f$ 의 크기와 각 휠요소간의 간격,  $\Delta X_0$ 의 크기 및 각 휠요소의 반경크기 증가분  $\Delta W_i$ 의 크기에 의하여 결정된다. 앞에서 언급한 바와같이 각각의 크기가 클수록 정밀도는 저하되고 계산 시간이 짧게 걸리기 때문에 사용자의 요구에 의하여 각 요소들의 크기가 입력으로 주어진다.

**6. 결 론**

(1) 무한히 얇은 두께의 휠요소에 의한 나선형 홈가공 결과를 기하학적으로 해석하였다. 주어진



**Fig. 11** (a) Representation of desired groove profile and predicted groove profile from obtained wheel profile with different First wheel location

(b) Representation of wheel profile with different first wheel location solving inverse problem with input :  $D=10, \beta=30^\circ, \alpha=30.5^\circ$  and  $(X_0, Y_0)_1=(X_0, 66.22)$  where  $X_0 = -4, -2$  and  $1$ , output :  $(X_0, Y_0)_f=(X_0, 66.22)$  where  $X_0=0.7, 2.5$  and  $5.2$

휠요소의 반경의 크기, 세팅조건 즉, 휠요소의 드릴축으로부터 거리 그리고 휠설치 회전각의 크기에 따른 나선홈 형상에의 영향을 관찰하였다.

(2) 실제로 유한한 두께의 휠을 무한히 얇은 휠요소들의 일정 간격으로 조합한 것으로 가정하여 임의의 간격으로 떨어진 휠요소에 의한 나선홈 형상을 동일한 방법으로 예측하여 임의의 한 단면에서 중첩하여 나타낸 후 그 외곽을 취함으로서 나선홈 가공결과를 예측하였다.

(3) 임의의 원하는 형상의 나선형 홈가공을 위하여 주어진 세팅조건하에서 요구되는 휠단면형상을 예측하였다. 각 휠요소에 의한 나선홈 가공 예측용 알고리즘을 각 휠요소의 반경을 변화시키면서 반복 적용하여 적절한 정밀도의 휠반경을 구함으로써 휠단면형상이 결정된다.

(4) 드릴의 중요한 형상요소인, 선단부 인선형상과 몸체부 플루트 단면형상의 설계 및 제작을 위하여 나선홈 가공용 기하학적 해석방법을 SOFTWARE화 하였다. 주어진 휠형상으로부터 나선홈 가공 예측용 프로그램 "FLT"와 원하는 나선홈 단면형상 가공을 위하여 필요한 휠 단면형상 예측용 프로그램 "WHL"을 이용하고 나선홈 단면형상과 선단부 인선형상과의 기하학적인 관계를 이용함으로써 CAD를 이용한 드릴설계 및 제작을 가능케 하였다.

## 참고문헌

(1) Radhakrishnan, T., Kawlra, R. K. and Wu. S.

M., 1982, "A Mathematical Model of the Grinding Wheel Profile Required for a Specific Twist Drill Flute," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 22, No. 4, pp. 239~251.

(2) Friedman, M. Y. and Meister, I., 1973, "The Profile of a Helical Slot Machined by a Form-Milling Cutter," *Annals of CIRP*, Vol. 22/1, pp. 29~30.

(3) 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, pp. 53~56.

(4) Agullo-Batlle, J., Cardona-Foix, S. and Vinas-Sanz, C., 1985, "On the Design of Milling Cutters or Grinding Wheels for Twist Drill Manufacture. A CAD Approach," *Proceedings 25th MTDR Conf.*, pp. 315~320.

(5) Sheth, D. S. and Malkin, S., 1990, "CAD/CAM for Geometry and Process Analysis of Helical Groove Machining," *Annals of CIRP*, Vol. 39/1, pp. 129~132.

(6) Ehmann, K. F., 1990, "Grinding Wheel Profile Definition for the Manufacture of Drill Flutes," *Annals of CIRP*, Vol. 39/1, pp. 153~156.

(7) Galloway, D. F., 1952, "Some Experiments on the Influence of Various Factor son Drill Performance," *Trans. ASME*, Vol. 78, pp. 191~231.