

모노펌프 로터 4-축 가공에 관한 연구

조현덕*[#], 박종배*, 왕사관**, 허유***

*경일대학교 기계자동차학부, ** (주)그린모빌리티, ***에이펙스펌프(주)

A Study on 4-Axis Machining for Mono Pump Rotor

Hyun-Deog Cho*[#], Jong-Bae Park*, Si-Kuan Wang**, Yu Heo***

*KYUNGIL UNIVERSITY, **GREEN MOBILITY CO. LTD., ***APEXPUMP CO.LTD.

(Received 2 October 2018; received in revised form 23 October 2018; accepted 30 October 2018)

ABSTRACT

Mono pump rotors are widely used in wastewater treatment plants, medicine, cosmetics, paint, paper, and chemical manufacturing, dairy production, public works, agriculture, and so on. A mono pump comprises two main parts: the rotor and stator. Typically, the rotor is machined using an expensive whirling machine. In this study, we developed an algorithm for 4-axis machining of the rotor on machining center (MCT). NC-code was obtained by applying the algorithm and finally the rotor of the mono pump was machined on a 4-axis MCT. Results of four sample experimental works showed close agreement with design geometries.

Key Words : 4-Axis Machining(4-축 가공), Mono Pump(모노펌프), Rotor(로터), Stator(스테이터)

1. 서 론

모노펌프(mono pump)는 액체를 연속적으로 정량 이송할 수 있는 용적식 일축 편심 나사 펌프로서 조선설비, 하수처리시설, 식품산업, 제약/화장품 산업, 콘크리트 이송설비, 농업기계 등 많은 산업분야에 사용된다^[1,2]. 모노펌프의 핵심부품은 로터(rotor)와 스테이터(stator)로 구성되며, 로터는 일반적으로 다수의 인서트 날이 원주상에 고정된 공구가 회전하면서 편심량 위치에서 좌우 이송하고 공작물이 회전 제어되면서 가공이 이루어지는 윙링머신(whirling machine)으로 가공하는데, 기계의 가격이 매우 비싸고 관련 기술자가 거의 없는 단점이 있다^[1]. 대량생산이 아닌 경우 CNC선반을 개조한

전용기계로 생산하는 경우가 있는데, 전용공구의 인서트를 수입하고 공구 소모도 크며 가공정밀도와 생산성도 떨어지는 많은 단점을 갖고 있다^[2]. 이러한 특수한 가공에 대한 직접적인 참고문헌이 없어 본 연구에서 대량생산을 하지 않는 제조사가 주문식 생산에 대응할 수 있도록 모노펌프의 로터 4-축 가공을 연구하였다. 본 연구는 이러한 모노펌프 로터를 4-축 머시닝센터(machining center)에서 가공할 수 있는 4-축 가공 알고리즘을 개발하였고, 이를 적용하여 NC 프로그램을 자동으로 작성할 수 있는 소프트웨어를 개발하였고, 포스트프로세서는 파낙(Fanuc)과 Mazak Integrex-200IV에서 가공이 가능하도록 하였다. 4개의 로터 샘플을 4-축 가공하였으며 3D 스캐너로 로터를 측정하여 특정 구간에서의 진원도가 0.03mm이내의 오차내로 정밀한 형상을 얻을 수 있었다.

Corresponding Author : hdcho@kiu.kr

Tel: +82-010-3544-8528, Fax: +82-53-600-5339

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 모노펌프 로터 4축 가공 알고리즘

2.1 모노펌프 원리 및 구조

모노펌프는 Fig. 1과 같이 내부에 나선형 터널이 있는 탄성체로 제작된 스테이터(stator)와 그 내부에서 회전하는 나선형태의 로터(rotor)로 구성되는데, 로터는 철강재질로 고도의 정밀 가공기술로 제작되며 스테이터는 내마모성이 뛰어난 고무로 제작된다. 스테이터 내부에 로터가 회전하면 마치 2개의 연속적인 밀폐공간이 띠와 같은 모양으로 전진함으로서 물체를 이동시키는 원리로서, 로터가 정회전하면 흡입부로부터 토출구 방향으로 물체를 이동시키고 역회전하면 반대방향으로의 이송이 가능하다^{[1,2]}}.

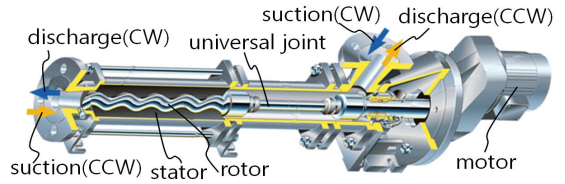


Fig. 1 Geometries of mono pump

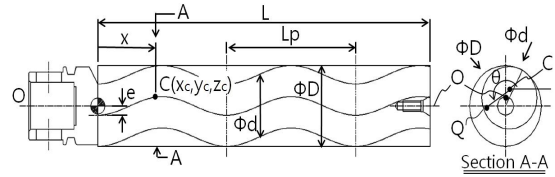


Fig. 2 Design dimensions of rotor

2.2 모노펌프 로터의 설계

모노펌프 로터의 기하학적 형상은 Fig. 2와 같이 회전축 O-O에 대하여 e만큼 편심된 중심 C가 주기 L_p에 대하여 나선형 환을 형성한다. 전체길이(L), 주기(L_p), 편심(e) 등은 모노펌프의 용량 및 사양 설계에서 결정되며 가공을 위한 소재 직경(D)도 결정된다. 로터의 표면은 C를 중심으로 YZ-평면에 대해 직경 d인 원이 연속적으로 연결된 형상이다. 편심에 의한 나선형인 중심좌표 C(x_c, y_c, z_c)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_e &= x, & 0 \leq x \leq L \\ y_e &= e \cos\left(\frac{2\pi x}{L_p}\right) \\ z_e &= e \sin\left(\frac{2\pi x}{L_p}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

2.3 모노펌프 로터 4축 가공 알고리즘

Fig. 3에서와 같이 우측을 가공시작점으로 설정하면 x는 -L에서 0까지 변화하고, 가공 시작점과 끝점에서 1회전 가공하고, 이외의 영역에서는 1회전에 대한 공구경로 폭을 P로 설정하여 연속적으로 나선형 가공을 하는 공구경로를 정의할 수 있다. 우선 가공방향에 대하여 임의의 독립변수 x에 대하여 공구경로 폭만큼씩 단계이동에 있어서 전체 공구경로의 회전수 n은 다음과 같다.

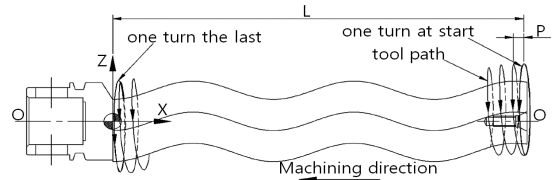


Fig. 3 Tool path for 4-axis machining of rotor

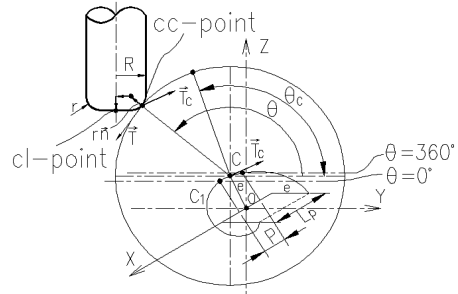


Fig. 4 Machining mechanism between rotor and fillet end mill cutter

$$n = \frac{L}{P} \quad (2)$$

임의의 i번째 공구경로에 대해 x는 iP가 되고, 공구경로는 폭 P내에서 Fig. 4와 같이 미소 나선형으로 1회전을 하므로 변수를 θ라 하면 (1)식의 로터 중심 C는 다음과 같이 변환된다. Fig. 4에 표

시된 \vec{T} 는 가공방향에 대한 접선벡터이고, \vec{T}_c 는 원의 중심이 이동하는 즉 편심된 중심의 이동에 대한 접선벡터이고, 필렛엔드밀의 반경 관련 벡터가 표시되어 있다.

$$\begin{aligned} x_c &= iP + P\frac{\theta}{2\pi}, \quad 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ, \quad i=0,1,2,\dots,(n-1) \\ y_c &= e \cos\left(\frac{2\pi x_c}{L_p}\right) \\ z_c &= e \sin\left(\frac{2\pi x_c}{L_p}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

또한 임의의 i 번째 공구경로에서 cc-점(cc-point)은 (3)식의 (x_c, y_c, z_c) 를 중심위치로 하고 직경 d 를 갖는 원주 표면으로서 위치좌표는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_{cc} &= x_c \\ y_{cc} &= y_c + \frac{d}{2} \cos\theta \\ z_{cc} &= z_c + \frac{d}{2} \sin\theta \end{aligned} \quad (4)$$

cc-점은 (3)식으로 표현된 로터의 중심이 점진적으로 이동하므로 (4)식도 점진적으로 이동하여 나선형의 연속으로 공구경로가 묘사된다. 그리고 가공을 위한 cl-점(cl-point)은 공구의 종류와 공구의 위치에 따라 차이가 있으며, 일반적인 공구인 필렛엔드밀(fillet end mill)에 대한 cl-점의 위치벡터(position vector)는 다음과 같다.

$$\vec{x}_d = \vec{x}_{cc} + r(\vec{n} - \vec{u}) + (R-r)(\vec{n} - \alpha\vec{u}) / \sqrt{1-\alpha^2} \quad (5)$$

여기서, R 은 공구반경이고, r 은 공구의 필렛 반경이고, $\vec{u} = \vec{k}$ 이고 $\alpha = \vec{n} \cdot \vec{u}$ 이다. 따라서 (5)식을 구하기 위해서는 cc-점에서 법선벡터 \vec{n} 을 구하여야 하는데, \vec{n} 은 cc-점에서 2방향의 접선벡터로부터 구할 수 있다. cc-점에서의 접선벡터는 가공에서 원주를 형성하는 (4)식으로부터 Fig. 4의 \vec{T} 을 구할 수 있고 로터 중심의 이동을 묘사하는 (3)식으로부터 Fig. 4의 \vec{T}_c 를 구할 수 있다. 따라서 cc-점에서 법선단위벡터 \vec{n} 은 (6)식으로 되고, \vec{T} 는 (4)식을 θ 에 대해 미분하면 (7)식으로 된다.

$$\vec{n} = \frac{\vec{T} \times \vec{T}_c}{|\vec{T} \times \vec{T}_c|} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_{cc}}{d\theta} &= \frac{P}{2\pi} \\ \frac{dy_{cc}}{d\theta} &= -\frac{eP}{L_p} \sin\left(\frac{2\pi iP + P\theta}{L_p}\right) - \frac{d}{2} \sin\theta \\ \frac{dz_{cc}}{d\theta} &= \frac{eP}{L_p} \cos\left(\frac{2\pi iP + P\theta}{L_p}\right) + \frac{d}{2} \cos\theta \end{aligned} \quad (7)$$

상기 (7)식은 미소각도인 $\Delta\theta$ 의 변화에 대한 접선벡터를 의미하며 단위벡터 \vec{T} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{dx_{cc}/d\theta}{\sqrt{(dx_{cc}/d\theta)^2 + (dy_{cc}/d\theta)^2 + (dz_{cc}/d\theta)^2}} \\ T_y &= \frac{dy_{cc}/d\theta}{\sqrt{(dx_{cc}/d\theta)^2 + (dy_{cc}/d\theta)^2 + (dz_{cc}/d\theta)^2}} \\ T_z &= \frac{dz_{cc}/d\theta}{\sqrt{(dx_{cc}/d\theta)^2 + (dy_{cc}/d\theta)^2 + (dz_{cc}/d\theta)^2}} \end{aligned} \quad (8)$$

그리고 (3)식을 θ 에 대하여 표현하면 (9)식으로 되고, 이를 θ 에 대해 미분하면 (10)식으로 표현되고 \vec{T}_c 가 된다.

$$\begin{aligned} x_c &= iP + P\frac{\theta}{2\pi}, \quad 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ, \quad i=0,1,2,\dots,(n-1) \\ y_c &= e \cos\left(\frac{2\pi iP + P\theta}{L_p}\right) \\ z_c &= e \sin\left(\frac{2\pi iP + P\theta}{L_p}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_c}{d\theta} &= \frac{P}{2\pi} \\ \frac{dy_c}{d\theta} &= -\frac{eP}{L_p} \sin\left(\frac{2\pi iP + P\theta}{L_p}\right) \\ \frac{dz_c}{d\theta} &= \frac{eP}{L_p} \cos\left(\frac{2\pi iP + P\theta}{L_p}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

따라서 (10)식은 미소 회전변위 $\Delta\theta$ 의 변화에 대한 로터 중심의 순간 이동벡터를 의미하며 단위벡터 \vec{T}_c 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} T_{Cx} &= \frac{dx_c/d\theta}{\sqrt{(dx_c/d\theta)^2 + (dy_c/d\theta)^2 + (dz_c/d\theta)^2}} \\ T_{Cy} &= \frac{dy_c/d\theta}{\sqrt{(dx_c/d\theta)^2 + (dy_c/d\theta)^2 + (dz_c/d\theta)^2}} \\ T_{Cz} &= \frac{dz_c/d\theta}{\sqrt{(dx_c/d\theta)^2 + (dy_c/d\theta)^2 + (dz_c/d\theta)^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

그런데 (8)식과 (11)식을 (6)식에 대입하면 법선 단위벡터 \vec{n} 을 구할 수 있고, (5)식으로부터 공구의 위치점인 cl-점을 구할 수 있다. 그러나 (5)식의 cl-점은 공구의 간섭 등이 반영되지 않았으므로 4-축 가공기의 회전축(X-축 기준이면 A-축, Mazak Integrex 200IV 5-축 가공기에서는 C-축)의 회전에 의하여 간섭을 배제시켜야 한다. 따라서 공구의 위치가 수평위치에 존재한다면, 회전축의 좌표값은 θ 가 되며 cc-점인 (4)식과 법선벡터 (6)식은 θ 에 대하여 좌표변환되어야 하고, 만일 공구의 위치점이 θ_c 에 위치한다면 $(\theta - \theta_c)$ 에 대하여 좌표변환하면 다음과 같이 된다.

$$\vec{n}' = \begin{bmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta - \theta_c) & -\sin(\theta - \theta_c) \\ 0 & \sin(\theta - \theta_c) & \cos(\theta - \theta_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} x'_{cc} \\ y'_{cc} \\ z'_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta - \theta_c) & -\sin(\theta - \theta_c) \\ 0 & \sin(\theta - \theta_c) & \cos(\theta - \theta_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cc} \\ y_{cc} \\ z_{cc} \end{bmatrix} \quad (13)$$

따라서 (5)식을 변형하면 cl-점은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{x}_d = \vec{x}'_{cc} + r(\vec{n}' - \vec{u}) + (R-r)(\vec{n}' - \alpha\vec{u})/\sqrt{1-\alpha^2} \quad (14)$$

여기서, $\vec{u} = \vec{k}$ 이고 $\alpha = \vec{n}' \cdot \vec{u}$ 이다. 최종적으로 미소 공구경로 폭 P에 대하여 (14)식의 cl-점으로부터 NC-code의 좌표는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \\ \theta - \theta_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.4 시작 지점에서의 1회전 가공

시작 지점에서 미가공이나 공작물의 치수오차를 줄이기 위해 x-축 방향의 이동 없이 제자리에서 1회전을 가공하기 위해, (3)식으로부터 로터의 중심 좌표는 (16)식이 되고, cc-점은 (4)식으로부터 (17)식과 같이 된다.

$$x_c = 0, \quad y_c = e, \quad z_c = 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} x_{cc} &= 0, \quad 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ \\ y_{cc} &= e + \frac{d}{2} \cos\theta \\ z_{cc} &= \frac{d}{2} \sin\theta \end{aligned} \quad (17)$$

따라서 (17)식을 (12),(13),(14)식에 적용하여 cl-점을 구하면 시작점에서 1회전 가공이 가능하다.

2.5 끝 지점에서의 1회전 가공

공구경로 마지막 지점에서 미가공이나 공작물을 매끈하게 가공하기 위해 x-축 방향으로 이동하지 않고 제자리에서 1회전을 가공하기 위해, 로터의 중심의 좌표는 (3)식으로부터 (18)식으로 묘사되고, 또한 cc-점은 (4)식으로부터 직경 d를 갖는 원주를 형성하므로 (19)식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} x_c &= L, \quad 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ, \quad i = 0, 1, 2, \dots, (n-1) \\ y_c &= e \cos\left(\frac{2\pi L}{L_p}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$z_c = e \sin\left(\frac{2\pi L}{L_p}\right)$$

$$\begin{aligned} x_{cc} &= L \\ y_{cc} &= e \cos\left(\frac{2\pi L}{L_p}\right) + \frac{d}{2} \cos\theta \\ z_{cc} &= e \sin\left(\frac{2\pi L}{L_p}\right) + \frac{d}{2} \sin\theta \end{aligned} \quad (19)$$

따라서 (19)식에 대하여 전술한 cl-데이터를 구하는 절차를 따르면 마지막 지점에서 1회전 가공을 하게 된다.

2.6 황삭 가공공정

황삭은 절삭깊이를 가공표면까지 바로 진입시키지 못하고 단계적으로 조금씩 가공해야 한다. 그리고 공작물 원소재의 직경이 편심 중심으로부터 일정한 가공여유를 갖지 않기 때문에 편심량 e 와 로터 직경 d 가 황삭 단계마다 수정될 수 있는데, 기하학적인 형상은 Fig. 5로 정의할 수 있다.

Fig. 5에서 원 0는 원소재로서 반지름은 $D/2$ 이며 중심은 $0'$ 이고 좌표원점이며 로터리테이블의 회전중심이 되며, 원 3은 가공하고자 하는 최종형상의 원주로서 반지름은 $d/2$ 이며 중심은 $3'$ 이고 편심량은 e 가 된다. 원 2는 황삭시 가공여유이며 반지름 R_1 은 $d/2+B-(B-A)/2$ 이고 중심은 $2'$ 이고 편심량은 $e-(B-A)/2$ 가 되고 항상 소재의 최소여유 영역에서는 가공이 되지 않도록 한다. 참고로 중삭 및 정삭 공정에서 가공여유가 존재할 경우 Fig. 5의 d 에 가공여유를 추가하여 가공하는 것으로 미가공이 발생하지 않도록 한다.

마지막으로 원 1은 단계적 황삭으로 최대 절삭깊이를 d_c 로 설정했을 경우 Fig. 5의 C에 대해 C/d_c 를 반올림한 정수값을 N_R 이라 하면 수정된 최대 절삭깊이 d_c 만큼씩 N_R 회 가공되도록 하는 가공위치로서 반지름은 $d/2+B+D-(B+D-A)/2$ 이며 중심은 $1'$ 이 되고 편심량은 $e-(B+D-A)/2$ 가 된다. 그리고 B 는 중삭이나 정삭을 위한 가공깊이로서 황삭 후 가공여유를 의미하며 정량적인 값 m 은 가공기술자가 지정하고, Fig. 5에서 소재의 가공여유는 A 인 최소가공여유 A_{min} 와 최대가공여유 A_{max} 는 다음과 같다.

$$A_{min} = \frac{(D-d)}{2} - e \quad (20)$$

$$A_{max} = \frac{(D-d)}{2} + e \quad (21)$$

따라서 황삭은 매 가공공정마다 편심량과 가공면의 직경을 e 와 D 가 아닌 상기 Fig. 5의 설명과 같이 새로운 치수로 치환하여 가공하며 편심의 방향은 초기 설정된 방향인 θ 와 동일하게 묘사할 수 있다. 따라서 황삭에서도 (12), (13), (14), (15)식을 통하여 NC-code의 좌표를 구할 수 있다.

2.7 중삭/정삭 가공공정

중삭과 정삭은 동일한 알고리즘을 사용하는 공정으로서 기하학적 형상 묘사는 Fig. 6과 같이 된다. 중삭 및 정삭을 위한 가공 알고리즘은 Fig. 6과 같이 d 는 $d+2m$ 으로 수정되고 편심량은 e 로 동일하게 설정하여 (12), (13), (14), (15)식을 계산하여 NC-code의 좌표를 구할 수 있다.

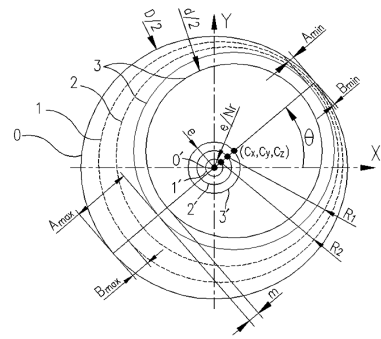


Fig. 5 Geometric definition for rough machining

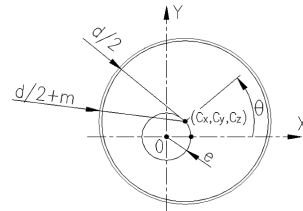


Fig. 6 Geometric definition for finishing machining

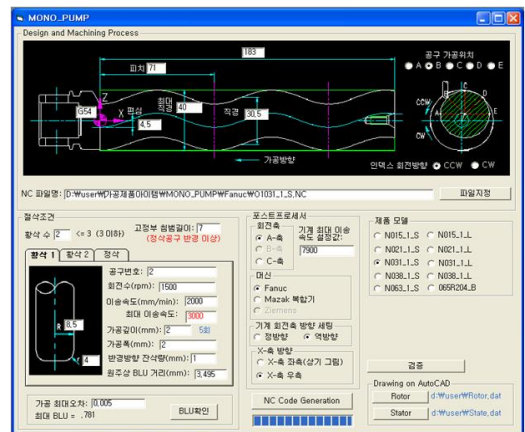


Fig. 7 Input window of the developed software

3. 프로그램 및 가공결과

3.1 소프트웨어 개발

모노펌프 로터의 4-축 가공을 구현하기 위하여 Visual BASIC 프로그램 언어를 사용하여 상기 이론적인 알고리즘을 적용하여 Fig. 7과 같이 소프트웨어를 개발하였다. 로터의 설계변수, 절삭조건, 포스트프로세서, NC-code 파일경로 등을 지정하고 NC-code 출력 버튼을 클릭하면 NC-code가 자동 생성된다. 복잡한 설계변수를 일괄적으로 지정할 수 있도록 모노펌프 사양에 따라 설계변수를 자동 지정될 수 있도록 하였고, 가공 접촉위치를 선택할 수 있도록 하였고, 로터리테이블의 회전방향을 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)에서 선택할 수 있도록 하였다.

3.2 4-축 가공기(Fanuc 0i)에 의한 가공

Fanuc 0i 모델의 3-축 가공기에 로터리테이블을 부착한 4-축 머시닝센터(MCT)에서 샘플 로터를 가공하기 위하여, Fig. 7의 설계치수와 공구의 가공위치를 45°인 B위치에 놓이도록 하고 로터리테이블의 회전은 반시계방향으로 연속적으로 회전하도록 설정하였다. 여기서 가공위치를 45°위치로 설치한 것은 필렛엔드밀의 필렛반경 r위치에서 가공이 이루어지도록 하고, 엔드밀의 경우 끝단의 원이 가공에 참여하도록 하여 볼엔드밀과 같이 곡면가공이 가능하기 때문이다. 그리고 가공방향은 로터 끝단부터 G54의 가공원점까지 나선형으로

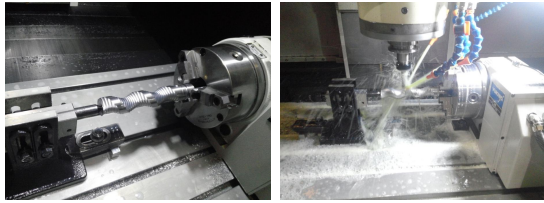
연속적으로 가공이 되도록 공구경로를 설정하였다. 절삭조건은 Fig. 7과 같이 개발된 프로그램 입력이 가능하며, 황삭(황삭1)과 중삭(황삭2) 및 정삭에 한 가공조건은 Table 1과 같이 입력하였다. 가공조건에서 이송속도의 경우 최대 이송속도를 3,000mm/min로 제한하여 2,000~3,000 범위에서 절삭깊이에 따라 선형적으로 자동 조정되도록 하였다. 여기서 이송속도는 로터리테이블의 회전각 속도에 대하여 선형길이인 원주를 구하여 조정되도록 하였으며, 총 5회 가공하여 중/정삭여유(잔삭량) 1mm를 남기도록 설정하였다. 그리고 가공오차를 0.1mm로 했을 때 원주상의 최소 BLU(basic length unit)가 3.495mm임을 확인하고 원주상의 NC-code의 블록(block)간의 간격을 3.495mm로 설정하여 프로그램 길이를 최적화하였다. 중삭의 경우도 Table 1과 같이 황삭과 동일한 공구를 사용하였다. 정삭의 경우 4번 슬롯에 $\phi 12$ mm인 볼엔드밀(ball end mill)을 장착하여 사용하였으며, 절삭조건도 3,000rpm과 1,000mm/min로 설정하고, 가공폭은 0.3mm로 하였고, 총 1회 가공하며 잔삭량이 0이 되도록 설정하였고, 가공오차가 0.005일 때 원주상의 최소 BLU가 0.781mm임을 확인하고 원주상의 NC-code의 블록간의 간격도 0.781mm로 동일하게 설정하였다.

포스트프로세서에 대한 변수는 Fig. 7과 같이, 로터리테이블의 회전축은 A-축으로 지정되고 기계의 최대 이송속도 설정이 8,000mm/min이하로 된 기계를 사용하였으며, NC 컨트롤러는 Fanuc 0i를 사용하였고, 로터리테이블의 회전방향의 +/-를 이론적인 방향과 달리 역방향을 +로 설정된 기계를 사용하였고, 로터리테이블은 X-축 방향으로 테이블 우측에 설치된 기계를 사용하였다. 이러한 절삭조건에 대해 최종적으로 NC-code를 생성하여 가공하였는데 Fig. 8과 같다.

Fig. 9(a)와 같은 형상의 N063-1-S 모델에 대하여 4-축 가공한 결과는 Fig. 9(b)와 같이 되었는데 표면의 일부가 과먹힘 현상과 미가공 등이 확연히 보였는데 이를 다각도로 검토한 결과 Fanuc-0i의 데이터 인식(reading)속도가 늦어 실제 가공과 데이터 정보가 서로 맞지 않은 것으로 결론지었다. 상기 실험결과인 N031-1-S의 경우에는 NC-code의

Table 1 Cutting Conditions

cutting conditions	rough machining1	rough machining2	finishing machining
tool radius(mm)	8.5	8.5	12
fillet radius(mm)	4	4	0
cutting speed(rpm)	1,500	1,500	3,000
feed rate(mm/min)	2,000	2,000	1,000
cutting depth(mm)	2	0.8	0.3
tool path interval(mm)	2	1.5	0.3
cutting margin(mm)	1	0.3	0
min. linear interpolation length(mm)	3.495	3.495	0.781

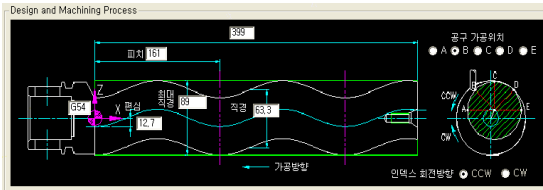


(a) Intermediate stages of rough machining by fillet end mill tool



(b) After finishing process and machining result by ball end mill tool

Fig. 8 4-axis machining of N031-1-S on Fanuc 0i



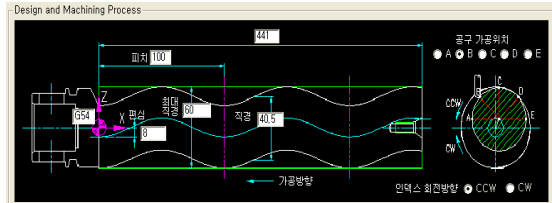
(a) Design dimensions of N063-1-S model



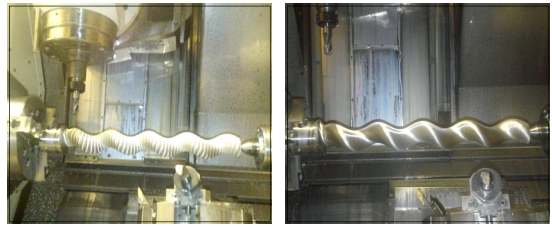
(b) Machined result of N063-1-S model by ball end mill tool

Fig. 9 4-axis machining of N063-1-S on Fanuc 0i

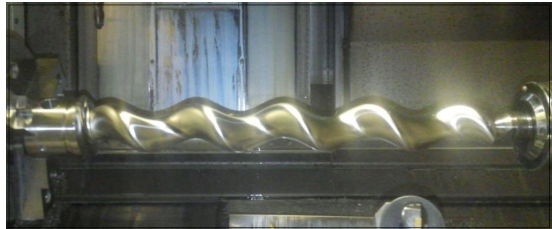
길이가 N063-1-S에 비해 짧아 다행히 가공이 매끄럽게 이행되었으나 치수 정밀도는 장담할 수 없는 것으로 사료된다. N063-1-S는 공작물의 직경이 2배 이상 크기 때문에 NC-code의 데이터 량이 훨씬 크기 때문인 것으로 분석된다. 따라서 본 가공은 Fanuc-32i이상의 컨트롤러를 사용해야 함을 알 수 있었다.



(a) Design dimensions of 065R204_B model

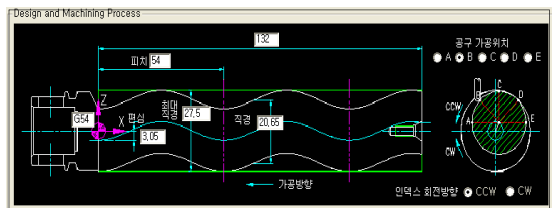


(b) Intermediate stages of rough machining by end mill



(c) After finishing process by ball end mill tool

Fig. 10 4-axis machining of 065R204_B model on Mazak Integrex-200IV

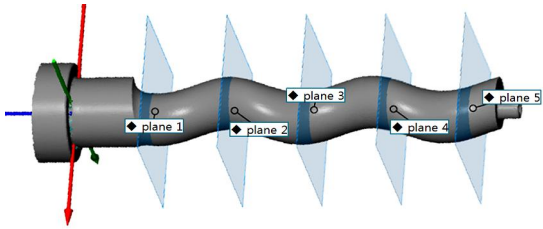


(a) Design dimensions of N021-1-S model



(b) After finishing process by ball end mill tool

Fig. 11 4-axis machining of N021-1-S model on Mazak Integrex-200IV



plane	1	2	3	4	5
position	30	60	90	120	150
eccentric error(e)	-0.085	+0.067	-0.048	-0.012	+0.053
diameter error	+0.01	+0.02	+0.03	+0.02	+0.03

Fig.12 Geometric error of machined rotor(N021-1-S model) at five sections

3.3 복합가공기(Mazak Integrex-200IV)에 의한 가공결과 및 측정

본 연구의 소프트웨어 개발에서 마작 복합가공기(Mazak Integrex-200IV)에서도 적용할 수 있도록 포스트프로세서를 추가하였다. 로터 065R204-B 모델에 대해 설계치수는 Fig. 10(a)과 같고 가공한 결과는 Fig. 10(c)이 되었고, N021-1-S 모델에 대해 설계치수는 Fig. 11(a)과 같고 가공한 결과는 Fig. 11(b)과 같이 되었다. 마작 복합가공기로 가공된 2개의 샘플 로터의 표면은 시각적으로 매우 매끈하였으며 단면에서의 진원도 등도 디지털 버어니어 캘리퍼스로 개략적으로 측정했을 때 오차를 발견할 수 없을 정도로 정밀하였다.

그래서 N021-1-S 가공 결과에 대해 형상치수를 체계적으로 검증하기 위해 3D 스캐너로 측정하여 일정구간에서 진원도를 측정한 결과 Fig. 12와 같은 결과를 얻었다. 편심위치는 측정 기준설정에서 따라 큰 오차를 동반할 수 있기 때문에 고려하지 않고 직경오차가 +0.03mm 이내인 것으로 측정되어 정밀부품의 공차 범위임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구의 모노펌프 로터의 4-축 가공에 대한 수학적 알고리즘과 이를 적용한 소프트웨어는 바로 산업에 적용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

모노펌프 로터 4-축 가공에 관한 연구를 통해 다

음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일반 4-축 가공기에서 모노펌프 로터 가공을 위한 NC-code 생성 알고리즘을 개발하였고, 가공 공구를 일반화된 공구인 필렛엔드밀로 정의하여 엔드밀이나 볼엔드밀로도 가공이 가능하도록 하였다.
2. 수학적 모노펌프 로터 4-축 가공 알고리즘에 대해 일련의 과정을 프로그래밍하여 전용 소프트웨어를 개발하였고, Fanuc 4-축 가공기와 Mazak Integrex-200IV 복합가공기에 대해 포스트 프로세서를 적용하여 4가지 종류의 로터 샘플에 대해 가공실험이 가능하였다.
3. 본 연구의 정삭가공 후 단면의 진원도 가공오차가 0.03mm 이내로 정밀한 형상을 얻을 수 있음을 측정을 통해 확인하였다.

REFERENCES

1. Cho, H. D., "A Study on 4-Axis Machining of Spiral Eccentric Shaft", KSMPE Spring Conference, pp. 44-44, 2016.
2. Wang, S. K., "A Study on 4-Axis Machining of Mono Pump Rotor", Master's Thesis at Kyungil University, pp. 3-33, 2016.
3. Cho, H. D., Yoon, M. C. and Kim, K. J. "5-Axis CNC Machining of Roller Gear Cam", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 19, No. 6, pp. 739-745, 2010.
4. Kim, J. S., Kang, S. K. and Lee, D. S., "A Study on the Machining Characteristics of Prototype of Roller Gear Cam", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 5, pp. 60-67, 2012.
5. Jung, H. C., Hwang, J. D., Kim, S. M. and Jung Y. G., "The Postprocessor Technology of for 5-axis Control Machining", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 9-15, 2011.
6. Hwang, J. D., Lim, E. S. and Jung, Y. G., "The Control Technology of Cutter Path and Cutter Posture for 5-axis Control Machining", Journal of the Korean Society of

Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 2, pp. 1-8, 2011.

7. Kim, H. J., Jang, J. H. and Kim, N. K., "A Study on Interference Phenomenon of a Machine Tool when 5 Axes Working with Virtual Machine Tool", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 4, No. 2, pp. 16-23, 2005.