

싱글 스크류 압축기의 스크류 로터의 설계 및 가공

김두형^{a*}, 경진호^a, 김왕환^b**Design and Machining of a Screw Rotor of
a Single-Screw Compressor**Doo-Hyeong Kim^{a*}, Jin-Ho Kyung^a, Yoang-Hwan Kim^b^a Robot and Mechatronics Research Lab., Korea Institute of Machinery & Materials,
156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea^b Hanguk AIRRO Co., LTD,
281, Techno 2-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34102, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*Received 1 September 2016
Revised 24 November 2016
Accepted 30 November 2016*Keywords:*Compressor
Single screw
Screw rotor
Main rotor
Coordinate transformation**ABSTRACT**

Single screw compressors are widely used in the fields of air/gas compression, refrigeration, and chemical fluid transportation systems. A single-screw compressor is composed of a screw rotor and two gate rotors located at both sides. This simple construction enables low rotational speed of the rotor, efficient compression with low noise, low vibration, and long bearing life. Despite these merits, the design method of single-screw compressors is not well known. To accelerate the industrial application of single-screw compressors, a design method using coordinate transformation is presented in this paper, and a tool trajectory is established for machining. Finally, the screw rotor, which is machined using the proposed method, is presented.

Nomenclature

D : Distance of centers between screw rotor and gate rotor
 H : D minus Radius of screw rotor
 R : Radius of gate rotor
 w : Tooth width of gate rotor
 α : Rotational angle of gate rotor
 θ : Rotational angle of screw rotor
 C_α, S_α : Abbreviation of $\cos(\alpha)$ and $\sin(\alpha)$

 $\{g\}$: Coordinate system g ${}^s_g T$: Coordinate transformation matrix from $\{s\}$ to $\{g\}$ ${}^s P_i$: Position of point i w.r.t. coordinate system $\{s\}$ ${}^s_s R(z, \theta)$: Rotational transformation from $\{s\}$ to $\{s'\}$, rotate
 θ around z axis of coordinate system $\{s\}$ ${}^s_s T(x, D)$: Translational transformation from $\{s'\}$ to $\{s\}$,
trans D along a axis of coordinate system $\{s'\}$ ${}^s x_i, {}^s y_i, {}^s z_i$: Position of point i w.r.t. coordinate system $\{s\}$

* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7125

Fax: +82-42-868-7135

E-mail address: kdh649@kimm.re.kr (Doo-Hyeong Kim).

1. 서론

공기를 비롯한 유체의 이송과 저장을 위해서 압축기(compressor)를 사용하고 있다. 압축기의 종류로는 압축 대상인 유체의 종류나 압축 방식에 따라서 왕복동형, 로터리 스크류형, 로터리 베인형, 로터리 기어형, 다이아프램형, 터보형 등이 있다. 본 논문에서는 로터리 스크류형 중에서 비교적 최근(1960년대)에 프랑스의 Zimmern에 의해 개발된 싱글 스크류 컴프레서(single screw compressor)의 스크류 로터(screw rotor)의 설계와 가공에 대하여 연구 검토해 보고자 한다.

2. 싱글 스크류 컴프레서의 구조 및 특징

싱글 스크류 컴프레서의 핵심 부품의 대략 구조는 Fig. 1과 같다. 스크류 로터의 양측으로 게이터 로터(gate rotor)가 배치되어 있는 구조이다. 타 구조의 동일 용량 압축기에 비해서 스크류가 저속 구동되므로 저소음에 발열이 적고, 내부압력이 밸런스를 이루어 압력 변동(맥동)이 작다. 또한 대체적으로 유지보수가 용이하다.

3. Screw Rotor 설계

3.1 좌표변환

스크류 로터의 설계에 앞서 게이터 로터와 스크류 로터 간의 좌표관계 수식화를 위해 기본이 되는 좌표변환을 설명한다. 여기서 해결하고자 하는 문제는 게이터 로터에 부착된 로컬(local)좌표계 {g'}으로 표시되는 점 ①의 위치좌표를 스크류 로터의 글로벌(global)좌표계 {s}로 표현하는 방법과 그 수식 관계를 구하는 것이다.

이를 위해서는 글로벌좌표계 {s}에서 로컬좌표계 {g'}까지의 좌표변환 행렬을 구하여 사용하면 된다. 즉 다음 식을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} {}^s P_i \\ 1 \end{bmatrix} = [{}^s_g T] \begin{bmatrix} {}^g P_i \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

여기서, ${}^s P_i$ 는 글로벌좌표계 {s}에서 본 점 ①의 위치좌표

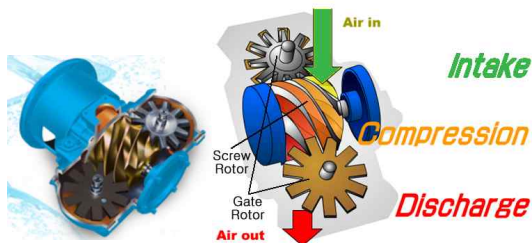


Fig. 1 Structure of single screw compressor¹¹⁾

${}^g P_i$ 는 로컬좌표계 {g'}에서 본 점 ①의 위치좌표

$[{}^s_g T]$ 는 글로벌좌표계 {s}에서 로컬좌표계 {g'}까지의 좌표변환 행렬

좌표변환행렬 $[{}^s_g T]$ 는 다음과 같은 순서로 변환되는 행렬이다.

i) 좌표계 {s}에서 {s'}으로 변환;

$${}^s_g R(z, \theta) = \begin{bmatrix} C_\theta - S_\theta 0 \\ S_\theta C_\theta 0 \\ 0 0 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

ii) 좌표계 {s'}에서 {g}로 변환;

$${}^s_i T(x, D) \cdot {}^i_j R(z, 180) \cdot {}^j_g R(x, 90) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & D \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{180} - S_{180} 0 & 0 & 0 \\ S_{180} C_{180} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{90} - S_{90} 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{90} C_{90} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & D \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

iii) 좌표계 {g}에서 {g'}으로 변환;

$${}^g_g R(z, \alpha) = \begin{bmatrix} C_\alpha - S_\alpha 0 \\ S_\alpha C_\alpha 0 \\ 0 0 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

따라서 위의 변환의 곱으로 만들어지는 좌표변환행렬 $[{}^s_g T]$ 는

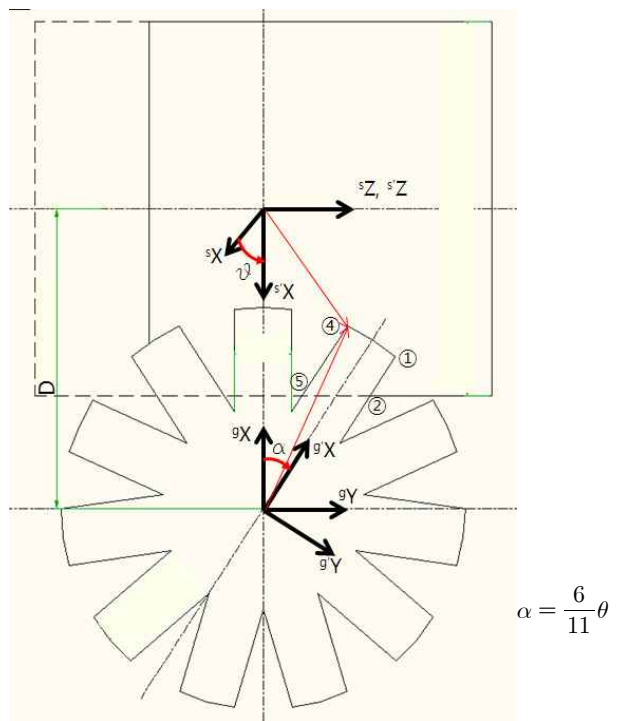


Fig. 2 Coordinate relation between screw and gate rotor

다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 {}^s_g T &= \begin{bmatrix} C_\theta - S_\theta & 0 & 0 \\ S_\theta & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_\alpha - S_\alpha & 0 & 0 \\ S_\alpha & C_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -C_\theta C_\alpha & C_\theta S_\alpha & S_\theta DC_\theta \\ -S_\theta C_\alpha & S_\theta S_\alpha & C_\theta DS_\theta \\ S_\alpha & C_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)
 \end{aligned}$$

iv) 최종 로컬좌표계 $\{g'\}$ 에 고정되지 않은 점(②와 ⑤)의 위치 계산을 위한 일부 좌표변환;

점 ②와 ⑤의 위치는 좌표계 $\{g\}$ 로 표시하고, 이 $\{g\}$ 좌표계로 표시된 점의 위치를 좌표계 $\{s\}$ 로 나타낸다. 위에서와 같은 방법으로

$$\begin{bmatrix} {}^s P_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^s_g T \begin{bmatrix} {}^g P_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{단 } i = \text{②와 ⑤} \quad (6)$$

을 얻는다. 여기서, ${}^g P_i$ 는 글로벌좌표계 $\{g\}$ 에서 본 점 ①의 위치 좌표이고, ${}^s_g T$ 는 글로벌좌표계 $\{s\}$ 에서 글로벌좌표계 $\{g\}$ 까지의 좌표변환 행렬로서 앞에서 유도한 ${}^s_g T$ 중에서 ${}^g R(z, \alpha)$ 를 제외한 좌표변환행렬이다. 즉,

$${}^s_g T = \begin{bmatrix} C_\theta - S_\theta & 0 & 0 \\ S_\theta & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_\theta & 0 & -S_\theta DC_\theta \\ -S_\theta & C_\theta & DS_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

설계에 있어서 게이트 로터상의 점 ①과 ④는 게이트의 로컬좌표계에서 변하지 않는 점이므로 식 (5)의 좌표변환행렬 ${}^s_g T$ 를

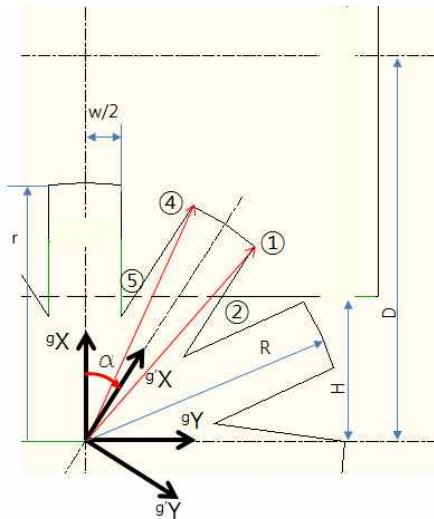


Fig. 3 Edge points of gate rotor

사용하고, 점 ②와 ⑤는 게이트의 로컬좌표계에서 변하는 점이므로 게이트의 글로벌좌표계 위치를 이용하는 식 (7)의 ${}^s_g T$ 를 사용하는 것이 계산 상 편리하다.

3.2 설계 예

i) 모서리점 ①, ④의 궤적

모서리점 ①, ④는 좌표계 $\{g'\}$ 에 대해서 고정된 점이므로 좌표 변환행렬 ${}^s_g T$ 를 이용한다.

$$\begin{bmatrix} {}^s P_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^s x_1 \\ {}^s y_1 \\ {}^s z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = {}^s_g T \begin{bmatrix} {}^g P_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 ${}^g P_1 = \begin{bmatrix} r \\ w/2 \\ 0 \end{bmatrix}$, 단 $r = \sqrt{R^2 - w^2/4}$ 이다.

이를 계산하면 다음과 같다.

$${}^s P_1 = \begin{bmatrix} {}^s x_1 \\ {}^s y_1 \\ {}^s z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\theta(D - rC_\alpha + \frac{w}{2}S_\alpha) \\ S_\theta(D - rC_\alpha + \frac{w}{2}S_\alpha) \\ rS_\alpha + \frac{w}{2}C_\alpha \end{bmatrix} \quad (9)$$

${}^s P_4$ 는 왼편의 $\frac{w}{2}$ 대신 $-\frac{w}{2}$ 를 넣은 것이다.

ii) 경계점 ②, ⑤의 궤적

경계점 ②, ⑤는 좌표계 $\{g'\}$ 에 대해서 변하는 점이므로 좌표 변환행렬 ${}^s_g T$ 를 이용한다. 즉,

$$\begin{bmatrix} {}^s P_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^s x_2 \\ {}^s y_2 \\ {}^s z_2 \\ 1 \end{bmatrix} = {}^s_g T \begin{bmatrix} {}^g P_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{여기서 } {}^g P_2 = \begin{bmatrix} {}^g x_2 \\ {}^g y_2 \\ {}^g z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ HT_\alpha + \frac{w}{2}/C_\alpha \\ 0 \end{bmatrix}$$

앞에서 ${}^g y_2$ 는 Fig. 4의 직선 식에서 $x = H$ 일 때의 y 값이다.

$${}^s P_2 = \begin{bmatrix} {}^s x_2 \\ {}^s y_2 \\ {}^s z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\theta(D - H) \\ S_\theta(D - H) \\ HT_\alpha + \frac{w}{2}/C_\alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

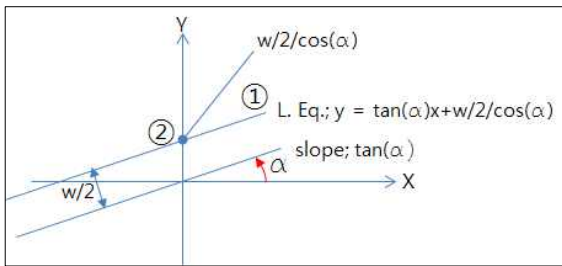


Fig. 4 Linear equation of line that join point ①, ②

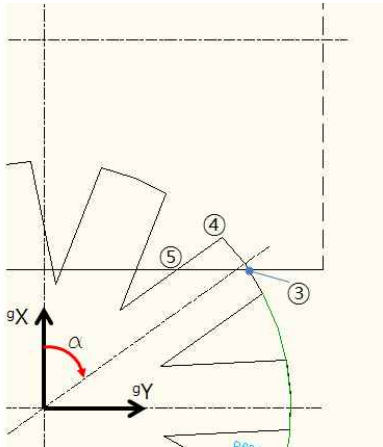


Fig. 5 Boundary point ③

sP_3 는 왼편의 $\frac{w}{2}$ 대신 $-\frac{w}{2}$ 를 넣은 것이다.

iii) 경계점 ③의 좌적

경계점 ③은 좌표계 {g'}에 대해서 변하는 점이므로 좌표변환 행렬 sT_g 를 이용한다. 즉,

$$\begin{bmatrix} {}^sP_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^s x_3 \\ {}^s y_3 \\ {}^s z_3 \\ 1 \end{bmatrix} = {}^sT_g \begin{bmatrix} {}^gP_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서

$${}^gP_3 = \begin{bmatrix} {}^g x_3 \\ {}^g y_3 \\ {}^g z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm \frac{H}{\sqrt{R^2 - H^2}} \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ 단 } \begin{matrix} +; \alpha \geq 0 \\ -; \alpha \leq 0 \end{matrix} \text{ 이므로}$$

$${}^sP_3 = \begin{bmatrix} {}^s x_3 \\ {}^s y_3 \\ {}^s z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\theta(D-H) \\ S_\theta(D-H) \\ \pm \sqrt{R^2 - H^2} \end{bmatrix}, \text{ 단 } \begin{matrix} +; \alpha \geq 0 \\ -; \alpha \leq 0 \end{matrix}$$

iv) 각 점에 있어서 α 값의 범위

Fig. 6에서 좌표계 {g}에 대한 점 ①의 위치에서 ${}^g x_1$ 이 H일 때

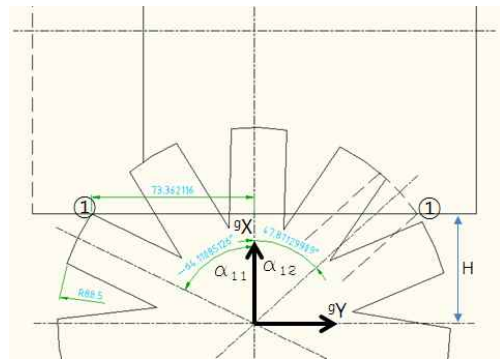


Fig. 6 Boundary angle of point ①

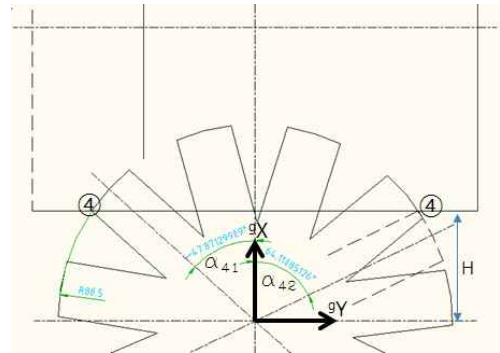


Fig. 7 Boundary angle of point ④

각도 α 를 구해보자.

$${}^g x_1 = rC_\alpha - \frac{w}{2}S_\alpha = H \text{에서 } \alpha \text{를 풀면}$$

$$\alpha = T^{-1} \frac{r}{w/2} - T^{-1} \frac{H}{\pm \sqrt{r^2 + w^2/4 - H^2}}$$

여기서 +를 α_{12} , -를 α_{11} 이라 둔다.

한편 Fig. 7에서 점 ④에 대해서도 α 를 풀면

$$\alpha = T^{-1} \frac{H}{\pm \sqrt{r^2 + w^2/4 - H^2}} - T^{-1} \frac{r}{w/2}$$

여기서 +를 α_{41} , -를 α_{42} 라 둔다.

그러면 각 점의 α 값의 범위는 다음과 같다.

점 ①, ② ; $\alpha_{11} \leq \alpha \leq \alpha_{12}$

점 ③ ; $\alpha_{11} \leq \alpha \leq \alpha_{41}$ 과 $\alpha_{12} \leq \alpha \leq \alpha_{42}$

점 ④, ⑤ ; $\alpha_{41} \leq \alpha \leq \alpha_{42}$

v) 설계결과

위에서 도출된 수식으로 3차원 그래픽으로 표현하면 Fig. 8과 같다.



Fig. 8 Grooves of screw rotor (main rotor)

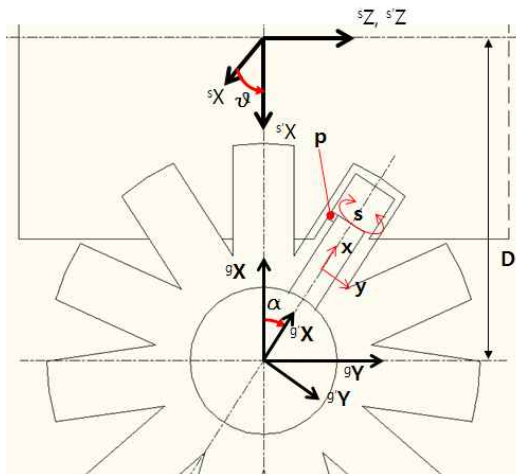


Fig. 9 Degree of freedom of manufacturing machine

4. Screw Rotor 가공

4.1 가공기계의 구성요소

스크류 로터 가공기계는 Fig. 9와 같이 스피들 1축(s), 서보 4축(α, θ, x, y) 및 수동 또는 자동으로 두 회전축 간의 거리 D 를 조정하는 축, α 의 회전평면과 θ 의 회전축의 평면을 조정하는 축 등 모두 7 자유도가 필요하다.

4.2 공구 형상

공구는 Fig. 10과 같이 3 종류로서 스크류 로터에 대략적 그루브홈을 황삭가공하는 엔드밀과, 그루브홈의 측면을 정삭가공하는 T형의 측면절삭 공구와, 그루브홈의 바닥면을 정삭가공하는 저면절삭공구로서 형상은 측면은 원추이고 저면은 구형 형상이다.

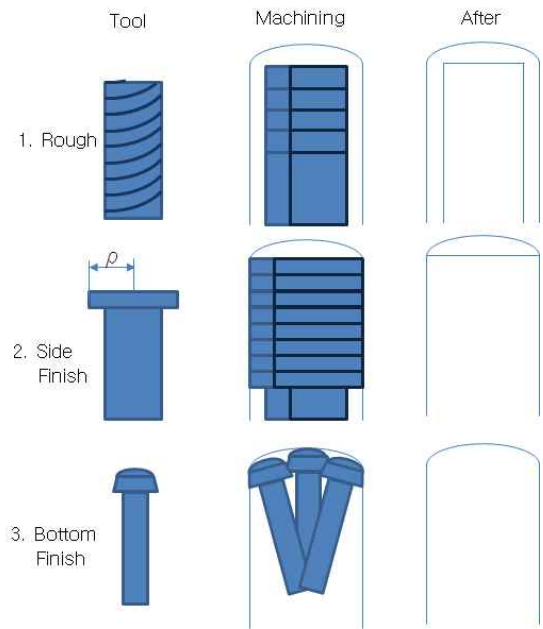


Fig. 10 Shape of tool and machining process

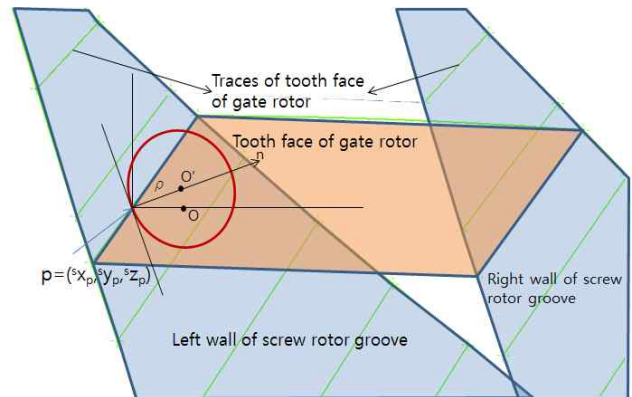


Fig. 11 Coordinate of tool center

4.3 측면정삭에서의 공구중심경로

공구중심경로를 구하기 위해서는 다음 그림에서 공구중심점 o' 의 좌표를 구해야 한다. 이는 점 p 에서의 그루브측면의 수직벡터(normal vector) n 을 구하고 n 방향으로 공구반경 ρ 만큼 읍셋을 주면 된다.

Figs. 9 및 11에서 좌표계 $\{s\}$ 에서 본 점 p 의 위치는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} sP \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \\ g \end{bmatrix} T \begin{bmatrix} g'P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{한편 } \begin{bmatrix} s \\ g \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} -C_\theta C_\alpha C_\theta S_\alpha S_\theta DC_\theta \\ -S_\theta C_\alpha S_\theta S_\alpha C_\theta DS_\theta \\ S_\alpha C_\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{이다.}$$

$[{}^gP] = [{}^g x_p, {}^g y_p, {}^g z_p]^T$ 이고 (단, Fig. 8에서 ${}^g z_p = 0$), $[{}^sP] = [{}^s x_p, {}^s y_p, {}^s z_p]^T$ 라면, Fig. 11에서 공구의 점 p 가 그루브의 측면과 접촉되는 점의 좌표는 다음과 같이 유도된다.

$${}^s x_p = C_\theta (D - {}^g x_p C_\alpha + {}^g y_p S_\alpha) \quad (14)$$

$${}^s y_p = S_\theta (D - {}^g x_p C_\alpha + {}^g y_p S_\alpha)$$

$${}^s z_p = {}^g x_p S_\alpha + {}^g y_p C_\alpha$$

여기서 $\theta = (11/6)\alpha$ 이고 ${}^g y_p = \rho (= const)$ 이므로 위 좌표값들은 α 와 ${}^g x_p$ 의 함수이다.

따라서 수직벡터는 $n = \frac{\partial {}^s P / \partial \alpha \times \partial {}^s P / \partial {}^g x_p}{\|\partial {}^s P / \partial \alpha \times \partial {}^s P / \partial {}^g x_p\|}$ 의 식으로 계산되므로 다음을 얻는다.

$$n = \frac{1}{\sqrt{(11/6)^2 A^2 + ({}^g x_p)^2}} \begin{bmatrix} 11/6 A S_\alpha C_\theta + {}^g x_p S_\theta \\ 11/6 A S_\alpha S_\theta - {}^g x_p C_\theta \\ 11/6 A C_\alpha \end{bmatrix} \quad (15)$$

단, $A = D - {}^g x_p C_\alpha + {}^g y_p S_\alpha$ 이다.

결과적으로 공구중심 o' 의 좌표는 다음식과 같이 구해진다.

$$o' = ({}^s x_p, {}^s y_p, {}^s z_p)^T + \rho (n_x, n_y, n_z)^T \quad (16)$$

$$= \begin{bmatrix} {}^s x_p + \rho n_x \\ {}^s y_p + \rho n_y \\ {}^s z_p + \rho n_z \end{bmatrix}$$

4.4 공구경로 시뮬레이션 및 가공결과

Figs. 12, 13은 최종 형상의 측면 벽에서 약간의 가공여유를 두고 시뮬레이션한 공구중심경로와 가공된 스크류 로터의 형상이다.

5. 결론

유체의 압축과 냉동, 공조시스템 및 유체 수송 등에 널리 사용되는 압축기 중에서 싱글 스크류 컴프레서가 효율과 성능 및 수명 면에서 우수한 특징을 가지나 그 설계 및 가공방법에 대해서 잘 알려져 있지 않아 국산화 시도를 어렵게 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이 컴프레서의 주요 부품인 스크류 로터의 설계와 가공방법에 대하여 검토해 보고 시제품을 제작한 내용을 기술해 보았다. 시제품에 대한 가공정밀도 및 성능평가는 이를 수행할 수 있는 범용 장비가 없어 별도의 측정 및 성능평가용 장비 제작을 검토하고 있다.

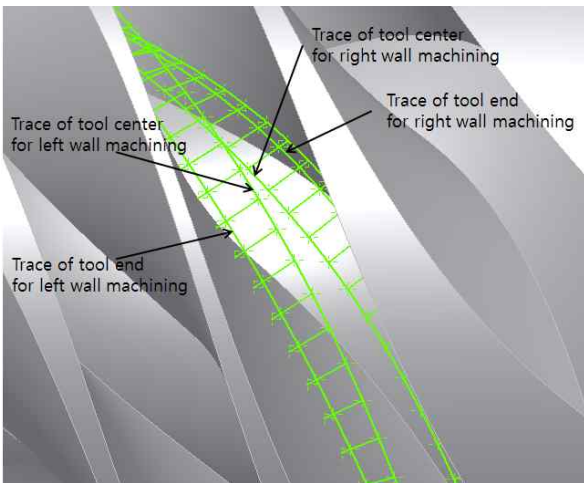


Fig. 12 Tool path



Fig. 13 Prototype of screw rotor

References

- [1] Mitsui Seiki, viewed 30 Aug.2016, Features of Z-screw, <<http://www.mitsuisseiki.co.jp/comp%20ressor/tabid/203/Default.aspx>>.
- [2] Yang, S.-C., 2002, A Mathematical Model of the Rotor Profile of the Single Screw Compressor, Proc Int. Mechanical Engineers 216: Part C, 343-351.
- [3] Zimmern, B., Patel, G. C., 1972, Design and Operating Characteristics of the Zimmern Single Screw Compressor, International Compressor Engineering Conference, Paper 16.