

페를 동축연삭시 척킹 오차 해석

김동길*, 김영태*(연세대 대학원 기계공학과), 이상조(연세대 기계공학과))

A study on the chucking alignment error analysis in coaxial grinding of ferrule

K. D. KIM, Y. T. Kim(Mech. Eng. Dept., Yonsei), S. J. Lee(Mech. Eng. Dept., Yonsei)

ABSTRACT

Ferrule is widely used as fiber optic connectors. In fiber-optic communications, the shape accuracy such as coaxiality and cylindricity of ferrule affects insertion loss. When coaxial grinding of ferrule supported by two pin, pin alignment and chucking accuracy are very important. In this research, the kinematic behavior of the ferrule center is investigated in the case where cone-shaped center pins and round circle holes which make contact with each other near the edge of the holes, using homeogenous coordinate transformation and numerical analysis. The obtained results are as follows: The alignment errors between center pins alone do not affect the rotation accuracy of ferrule. The alignment errors between center holes cause a sinusoidal displacement of ferrule. And the maximum displacement of ferrule centers increase in proportion to the center pin angle in the case of a fixed alignment errors

Key Words : Ferrule (페를), Grinding(연삭), Chucking (척킹), Alignment error (정렬 오차), Headstock (주축대), Tailstock (심압대), 센터핀(center pin)

1. 서론

최근의 초고속 통신망 구축과 대용량 및 고속전송 요구 등에 힘입어 광통신은 정보 전송의 중요한 수단이 되었다. 광통신 네트워크와 수용자 사이에 광커넥터를 이용하여 연결하는데, 이때 광커넥터는 정보의 전송효율과 정보의 질을 결정하는 극히 중요한 역할을 수행한다. 페를은 광 커넥터의 핵심 부품으로 대부분 연삭공정으로 이루어진다. 광의 전송손실을 줄이기 위해서는 페를의 형상정도와 표면 정도를 향상시키기 위하여, 동축연삭기를 사용하여 내경과 외경의 동축도를 0.5 μ m이하로 가공해야한다. 그러나 페를은 외경이 2.5mm, 길이가 10.5mm, 내경이 125 μ m이므로 동축 연삭 가공시 공작물을 지지하는 방법과 오차가 공작물의 형상정밀도에 큰 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 Kato[1]과 박성준[2]의 원통연삭시 공작물의 회전 오차 관계를 이용하여, 페를의 동축연삭가공시 양쪽 센터와 센터 구멍에 각각 정렬 오차가 회전하는 공작물의 거동에 미치는 영향을 운동

학적 관점에서 고찰하기 위하여, 좌표변환과 수치해석을 통해 페를의 중심의 변화를 고찰하였다.

2. 이론

2.1 페를의 척킹 방법

일반적으로 페를을 동축연삭하기 위해서는 광섬유가 삽입되는 내경에 초경 핀으로 지지하여 공작물을 회전시키면서 연삭을 하게 되는데, 이때의 공작물의 회전 안내면은 절삭력을 지지하고 있는 공작물의 센터 구멍 접촉부에 의해서 형성된다. 이상적인 경우라면 센터와 센터구멍이 일직선상에 놓여야하지만 실제로는 센터핀과 센터구멍의 가공오차와 주축대와 심압대에 장착되어있는 양 센터핀 사이의 오차 등에 의해 정렬 오차가 발생하게 된다.

2.2 가정

센터핀과 센터 구멍사이에는 다음과 같은 가정을 세운다.

- 1) 센터핀의 앞쪽 끝부분 오차가 없는 직원추형

이다.

- 2) 센터핀과 센터구멍의 접촉은 센터구멍 입구부에서만 이루어진다.
- 3) 심압대쪽의 센터핀은 축방향으로 이동이 가능하며 스프링에 의하여 공작물을 주축대 방향으로 밀고 있다.
- 4) 센터와 센터 구멍의 접촉부에 있어서 탄성 변형, 소성 변형, 그리고 마찰력은 무시한다.

2.3 양 센터핀과 가공물의 센터 구멍과의 기하학적 관계

심압대와 주축대 쪽의 양 센터핀의 오차관계를 Fig. 2.1에 표시하였다.

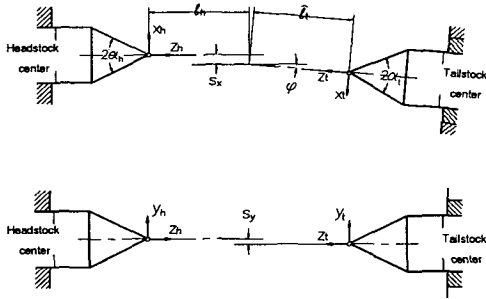


Fig. 2.1 Alignment error between centers[1]

양센터핀과 센터구멍사이의 alignment 오차는 2개의 평형 오차와 1개의 각도오차에 의해, s_x, s_y, ϕ 와 S_x, S_y, ϕ 로 표시된다. 센터핀에는 정점을 원점으로 하는 직교 좌표계 $x_h - y_h - z_h$ (주축대쪽)와 $x_t - y_t - z_t$ (심압대쪽)을 고정 시키고, 센터 구멍에는 입구부의 중심을 원점으로 하는 직교 좌표계 $X_h - Y_h - Z_h$ (주축대쪽)와 $X_t - Y_t - Z_t$ (심압대쪽)를 고정시킨다.

주축대 센터핀은 보통 주축대에 끼워져 베드등에 고정되어있으므로, 좌표계 $x_h - y_h - z_h$ 는 외부에서 보면 정지된 것으로 간주되며, 나머지 3개의 좌표계는 공작물의 회전에 따라 이동되어 얻어진다. 따라서 나중에 가공물의 회전에 따른 공작물의 위치는 좌표계 $x_h - y_h - z_h$ 를 기준 좌표계로 나타낸다.

다음은 위치와 좌표계의 관계를 수식적으로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \text{단, } x_h &= \{ x_h \ y_h \ z_h \ 1 \}^T \\ x_t &= \{ x_t \ y_t \ z_t \ 1 \}^T \\ X_h &= \{ X_h \ Y_h \ Z_h \ 1 \}^T \\ X_t &= \{ X_t \ Y_t \ Z_t \ 1 \}^T \end{aligned} \quad (2.1)$$

2.3.1 양 센터 상호간의 위치관계

Fig 2.1에서 양센터 상호간의 위치 관계를 나타내는 식은(2.2)와 같다. 여기서, 행렬 T_1 은 좌표계 $x_h - y_h - z_h$ 좌표계를 좌표계 $x_t - y_t - z_t$ 로 나타내기 위하여, 먼저 적절하게 직선 변환시킨 후, y축에 대하여 $(180^\circ - \phi)$ 만큼 회전 변환한 것이다

$$x_t = T_1 \cdot x_h \quad (2.2)$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} -\cos\phi & 0 & -\sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\phi & 0 & -\cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & S_x \\ 0 & 1 & 0 & S_y \\ 0 & 0 & 1 & -L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3.2 양 센터구멍 상호간의 위치관계

Fig. 2.2에서 센터핀과 센터 구멍 상호간의 위치 관계를 나타내고 식은 (2.3)과 같고, 양 센터 구멍간의 위치관계를 나타내기 위한, 행렬 T_2 은 좌표계 $X_h - Y_h - Z_h$ 를 좌표계 $X_t - Y_t - Z_t$ 로 나타내기 위하여, 먼저 직선 변환시킨 후, y축에 대하여 $(180^\circ - \phi)$ 만큼 회전 변환한 것이고, L은 공작물의 길이를 표시한다.

$$X_t = T_2 \cdot X_h \quad (2.3)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} -\cos\phi & 0 & -\sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\phi & 0 & -\cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & S_x \\ 0 & 1 & 0 & S_y \\ 0 & 0 & 1 & -L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

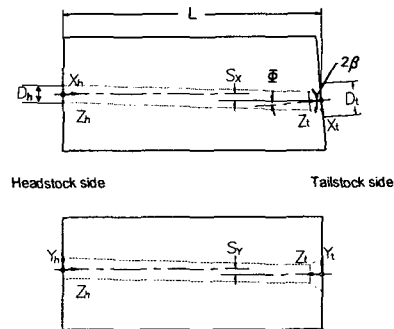


Fig. 2.2 Alignment error between center holes

2.3.3 주축대 센터와 센터구멍과의 관계

Fig. 2.3에서 주축대 센터와 센터 구멍과의 좌표계 관계는 식(2.4)와 같다. 여기서, 행렬 T_3 는 Y축에 대하여 $-\gamma$ 만큼, X축에 대하여 $-\eta$ 만큼, Z축에 대

하여 $-\gamma$ 만큼 회전 변환시키고 직선 변환한 것이다.(단, $0 \leq \zeta < \pi$, $0 \leq \eta < \pi$)

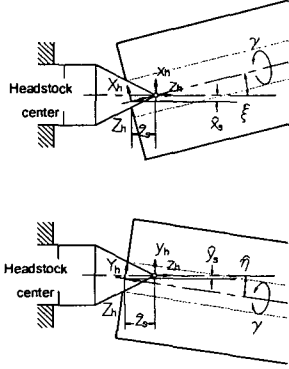


Fig. 2.3 Relation between center and center hole in headstock side

$$x_h = T_3 \cdot X_h \quad (2.4)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \widehat{x_s} \\ 0 & 1 & 0 & \widehat{y_s} \\ 0 & 0 & 1 & \widehat{z_s} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \widehat{\eta} & -\sin \widehat{\eta} & 0 \\ 0 & \sin \widehat{\eta} & \cos \widehat{\eta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \zeta & 0 & \sin \zeta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \zeta & 0 & \cos \zeta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3.4 센터와 센터구멍의 접촉상태

센터와 센터구멍의 접촉점은 가정에 의해서 가공물 끝면을 포함한 평면에 위치한다. 즉 식(2.5)와 같은 조건을 만족한다.

$$Z_h = 0, \quad Z_t = 0 \quad (2.5)$$

따라서, 센터와 센터구멍의 접촉상태는 원추의 단면인 원이나 타원의 곡선(센터)과 원(센터구멍)의 교점을 그 접촉점으로 함으로써 관계를 나타낼 수 있다. 그런데 심압대의 작용에 의하여 센터가 구멍에 가능한 깊이 들어가려 하기 때문에 Fig. 2.4과 같이 센터 단면이 그 최대 직경 방향의 2점에서 센터구멍에 접촉하는 경우가 가장 타당하다고 생각할 수 있다.

센터 형상의 좌표계는 식(2.6)을 만족한다.

$$x_h^2 + y_h^2 = (z_h \cdot \tan \alpha_h)^2$$

$$x_t^2 + y_t^2 = (z_t \cdot \tan \alpha_t)^2 \quad (2.6)$$

여기서, α_h, α_t 는 주축대와 심압대 핀의 반정각이다.

따라서, 주축대와 심압대의 접촉조건은 다음과 같다:

$$x_h^T \cdot C_1 \cdot x_h = 1, \quad z_h < 0 \quad (2.7)$$

$$x_t^T \cdot C_2 \cdot x_t = 1, \quad z_t < 0 \quad (2.8)$$

$$\text{여기서, } C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\tan^2 \alpha_h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\tan^2 \alpha_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

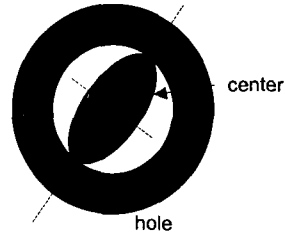


Fig. 2.4 Relation between center and center hole at workpiece end

식 (2.7)을 주축대 센터 구멍의 좌표계로 변환시키고, 식(2.8)을 심압대 센터구멍의 좌표계로 변환시키면 다음과 같다.

$$X_h^T \cdot (T_3^T \cdot C_1 \cdot T_3) \cdot X_h = 1 \quad (2.9)$$

$$X_t^T \cdot ((T_2^{-1})^T \cdot T_3^T \cdot T_1^T \cdot C_2 \cdot T_1 \cdot T_3 \cdot T_2^{-1}) \cdot X_t = 1 \quad (2.10)$$

위의 식(2.9)와 식(2.10)을 전개하면 센터의 단면 곡선은 다음과 같은 타원의 방정식으로 유도된다.

$$a_1 X_h^2 + a_2 X_h Y_h + a_3 Y_h^2 + a_4 X_h + a_5 Y_h + a_6 = 0$$

$$b_1 X_t^2 + b_2 X_t Y_t + b_3 Y_t^2 + b_4 X_t + b_5 Y_t + b_6 = 0$$

$$(2.11)$$

주축대와 심압대에서 원(센터구멍)과 타원(센터)의 교점에서의 근은 $(X_{h1}, X_{h2}), (Y_{h1}, Y_{h2})$ 과 $(X_{a1}, X_{a2}), (Y_{a1}, Y_{a2})$ 이다.

양쪽의 근은 중심이 원점인 원의 궤적에 있으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\overline{X}_h &= X_{h1} + X_{h2} = 0 \\ \overline{Y}_h &= Y_{h1} + Y_{h2} = 0 \\ \overline{A}_h &= \sqrt{(X_{h1} - X_{h2})^2 + (Y_{h1} - Y_{h2})^2} = D_h\end{aligned}\quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}\overline{X}_i &= X_{a1} + X_{a2} = 0 \\ \overline{Y}_i &= Y_{a1} + Y_{a2} = 0 \\ \overline{A}_i &= \sqrt{(X_{a1} - X_{a2})^2 + (Y_{a1} - Y_{a2})^2} = D_i\end{aligned}\quad (2.13)$$

식(2.12)과 (2.13)의 접촉상태를 만족하는 식은 아래의 6원연립 방정식이다.

$$\begin{aligned}\overline{X}_h(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\xi}_s) &= 0 \\ \overline{Y}_h(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\xi}_s) &= 0 \\ \overline{A}_h(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\xi}_s) &= D_h\end{aligned}\quad (2.14)$$

$$\begin{aligned}\overline{X}_i(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\xi}_s, \widehat{\tau}_i) &= 0 \\ \overline{Y}_i(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\xi}_s, \widehat{\tau}_i) &= 0 \\ \overline{A}_i(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\xi}_s, \widehat{\tau}_i) &= D_i\end{aligned}\quad (2.15)$$

2.4 미정 계수의 계산 방법과 순서

식(2.14)과 (2.15)는 비선형 연립 방정식으로 직접적으로 풀어내기에는 곤란하므로, Newon-Raphson의 수치해석방법[3]을 이용하여 6개의 파라미터가 일정한 수렴량 이하가 될 때까지 반복계산을 행하였다.

$$f_i(\overline{x}) = f_i(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\xi}_s, \widehat{\tau}_i) = 0$$

(2.20)

(여기서, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

한편, $\overline{x} = \overline{x} + ds$

비선형 연립 관계에 있는 식(2.20)의 6개의 함수는 수치해석을 통해 다음 식 (2.21)의 관계를 가지고, 이를 행렬식으로 표시하면 식(2.22)와 같다.

$$f_i(\overline{x}) = \frac{\partial f_i(\overline{x})}{\partial \widehat{x}_s} ds + \frac{\partial f_i(\overline{x})}{\partial \widehat{y}_s} ds + \dots + \frac{\partial f_i(\overline{x})}{\partial \widehat{\tau}_i} ds = 0 \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (2.21)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\overline{x})}{\partial \widehat{x}_s} & \frac{\partial f_1(\overline{x})}{\partial \widehat{y}_s} & \dots & \frac{\partial f_1(\overline{x})}{\partial \widehat{\tau}_1} \\ \frac{\partial f_2(\overline{x})}{\partial \widehat{x}_s} & \frac{\partial f_2(\overline{x})}{\partial \widehat{y}_s} & \dots & \frac{\partial f_2(\overline{x})}{\partial \widehat{\tau}_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_6(\overline{x})}{\partial \widehat{x}_s} & \frac{\partial f_6(\overline{x})}{\partial \widehat{y}_s} & \dots & \frac{\partial f_6(\overline{x})}{\partial \widehat{\tau}_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ds \\ ds \\ \vdots \\ ds \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_1(\overline{x}) \\ f_2(\overline{x}) \\ \vdots \\ f_6(\overline{x}) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

3 시뮬레이션

3.1 오차 조건

실제 페룰의 치수를 사용하여 척킹오차로 인한 공작물의 중심의 변화를 시뮬레이션 하였다.

Fig. 3.1은 SC type으로 가장 많이 사용되고 페룰로서 시뮬레이션에 사용하였다. Table 3.1은 정렬 오차 조건으로, 센터핀과 센터핀의 평행오차와 각도 오차, 그리고 센터구멍간의 평행 오차와 각도 오차를 준 경우이다. 그리고, 동일 조건에서 공작물과 센터의 평행오차가 공작물의 중심에 미치는 경우와, 공작물과 센터의 각도오차가 공작물의 중심에 미치는 영향을 고찰하였다.

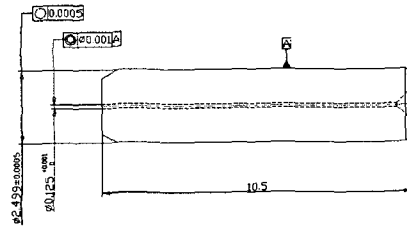


Fig. 3.1 SC type flat ferrule

Table 2.1 Conditions of alignment error

	1	2	3	4
$S_x(\mu\text{m})$	0	0	0	0
$S_y(\mu\text{m})$	1	0	0	0
$\psi(\circ)$	0	0.1	0	0
$S_x(\mu\text{m})$	0	0	0	0
$S_y(\mu\text{m})$	0	0	1	0
$\phi(\circ)$	0	0	0	0.1

$$D_h = D_t = 125 \mu\text{m}, L = 10.5 \text{mm}, l_h = 0.5 \text{mm}$$

$$\alpha_h = \alpha_t = 30^\circ$$

3.2 시뮬레이션 결과

회전각 γ 에 대한 공작물의 회전 거동의 계산 결과를 Fig. 3.2과 Fig. 3.3에 나타내었다. Fig. 3.2는 주축대쪽의 공작물의 중심의 변화이고, Fig. 3.3는 심압대쪽의 공작물의 중심의 변화이다. 정렬 오차는 s_y, S_y 또는 각도 오차 ϕ, Φ 만으로 하였다.

경우1과 경우2의 양센터만의 정렬오차 s_y , 또는 ϕ 가 있는 경우 공작물에는 반경 방향으로 떨림이 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

경우3과 경우4에서 표시하는 바와 같이 양센터 구멍만의 정렬오차가 있는 경우 반경 방향으로 1회전마다 1주기의 정현파 형태의 떨림이 생기는 것을 알 수 있다. 이 경우 x 방향과 y 방향에서는 진폭이 같고 위상만이 90° 차이가 난다. 반경방향의 정현파의 떨림은 가공물의 회전축이 센터 구멍의 중심으로부터 벗어나간 위치에 있다는 것을 표시하고 있고, 외경 연삭시 진원도에는 직접 영향을 미치지 않지만, 센터 구멍과 가공면의 동축도에는 영향을 미치게 된다.

Fig. 3.4와 Fig. 3.5는 평행오차와 각도 오차가 공작물의 중심의 변화량에 미치는 영향의 크기를 나타내었다. S_y, s_y 의 평행오차에서 크기를 각각 1, 5, 10 μm 로 변화시켰을 때, 최대 변위량은 공작물구멍의 평행오차보다는 센터의 평행 오차에 더 큰 영향을 받을 수 있다. 또한 Fig. 3.5에서도 ϕ, Φ 를 각각 0.1, 0.5, 1 $^\circ$ 씩 변화시켰을 때 공작물 중심의 최대 변화량은 ϕ 에 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

Fig. 3.7은 동일 조건의 정렬 오차에서 센터편의 각도와 공작물 중심의 최대 변화량을 관계를 나타내었는데, 센터편의 각도가 감소할수록 오차도 감소함을 알 수 있다. 그러나 실제 공작물 지지에서 센터편의 각도는 센터편의 강도와 반비례하기 때문에 최적의 각도가 필요하다.

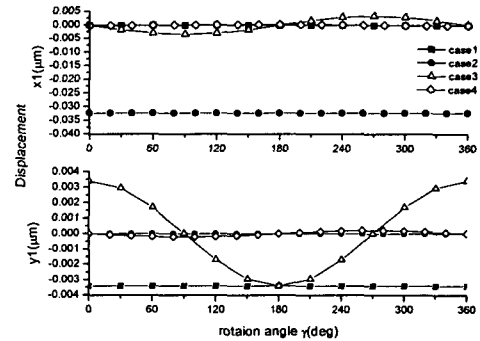


Fig. 3.2 Displacements of workpiece center in headstock side

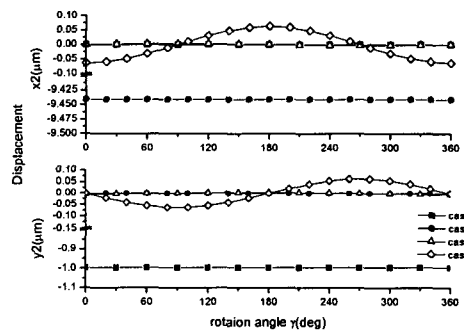


Fig. 3.3 Displacements of workpiece center in tailstock side

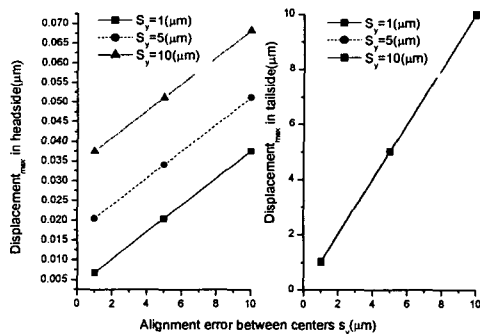


Fig. 3.4 Effects of parallel alignment error on maximum displacement of workpiece center

$$S_x = s_x = 0 \mu\text{m}, \phi = \Psi = 0^\circ$$

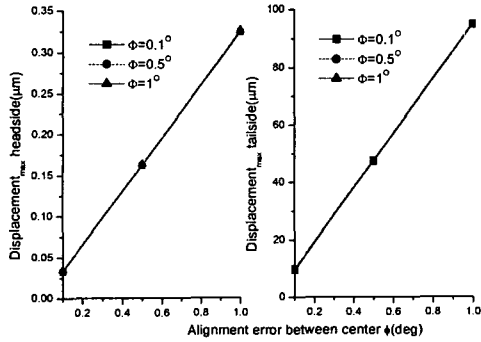


Fig. 3.5 Effects of angular alignment error on maximum displacement of workpiece center

$$s_x = s_y = S_x = S_y = 0$$

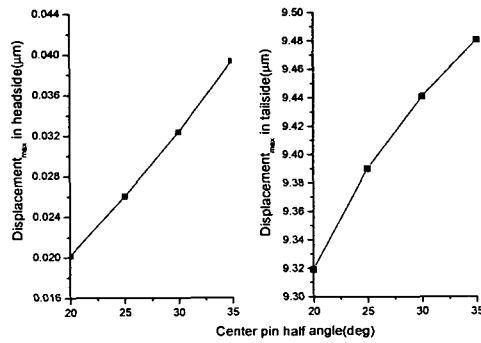


Fig. 3.6 Effects of center pin angle on amplitude of displacement

$$S_x = s_x = 0 \mu m, \quad S_y = s_y = 1 \mu m, \quad \phi = 0, \quad \Psi = 0$$

4. 결론

폐를 미세핀으로 지지하여 동축 연삭할때, 양 센터핀과 센터구멍에 정렬오차가 있는 경우 폐의 거동을 운동학적 관점에서 시뮬레이션 할경우 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

첫째, 양센터핀의 정렬 오차만 존재하는 경우 공작물의 반경방향의 떨림현상은 발생하지 않는다.

둘째, 양센터구멍만의 정렬 오차가 존재하는 경우, 공작물 회전에 따라 반경방향으로 떨림 현상이 발생하고, 그 진폭은 정렬 오차에 비례한다.

셋째, 동일한 정렬오차의 경우 공작물 중심의 오차는 센터핀의 각도에 반비례한다.

후기

본 연구는 산업자원부의 중기거점 개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kato H., Nakano Y., Hosoya Y., "Influence of AlignmentError of centers and Center Holes on Rotation Accuracy of Workpiece," JSPE, Vol. 50, pp. 598-573, 1984.
2. 박성준, "원통 연삭시 공작물의 회전오차와 진원도에 관한 연구", 연세대학교 석사학위 논문, 1995.
3. Melvin J. Maron, Robert J. Lopez, "Numerical Analysis-A Practical Approach" Wadsworth, 3rd edition, pp. 205-216, 1990.