

원추형 센터와 볼형 센터를 이용한 페룰 동축 연삭시 척킹에 관한 연구-척킹 오차 해석

김동길*, 박성준*, 김영태*, 이상조**

A Study on the Chucking of Ferrule using Cone-type Centers and Ball-type Centers in Co-Axial Grinding - Chucking Error Analysis

Dong Kil Kim*, Sung Jun Park*, Young Tae Kim* and Sang Jo Lee**

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 centers are investigated in the case where the ferrule is chucked with the cone-shaped center pins and ball centers. With homogeneous coordinate transformation and numerical analysis, the obtained results are as follows: In the case of cone-type center, the alignment errors between center pins alone do not affect the rotation accuracy of ferrule. The alignment errors between center holes cause sinusoidal displacement of ferrule. And the maximum displacement of ferrule centers is proportional to the center pin angle. In the case of ball-type center, the displacements of ferrule centers has similar pattern as cone-type center, and the alignment errors are proportional to ball diameters.

Key Words : Ferrule (페룰), Grinding(연삭), Chucking (척킹), Alignment error (정렬 오차), Headstock (주축대), Tailstock (심압대), Center pin(센터핀), Cone-type center(원추형 센터), Ball-type center(볼형센터)

1. 서론

최근의 초고속 통신망 구축과 대용량 및 고속전송 요구 등에 힘입어 광통신은 정보 전송의 중요한 수단이 되었다. 광통신 네트워크와 수용자 사이를 광커넥터를 이용하여 연결하는데, 이때 광커넥터는 정보의 전송효율과 정보의 질을 결정하는 극히 중요한 역할을 수행한다. 페룰은 광 커넥터의 핵심

부품으로서, 페룰의 형상정도와 표면정도는 정보 전송효율에 중요한 역할을 하게 된다. 페룰의 형상정도와 표면 정도를 향상시키기 위하여, 동축연삭기를 사용하여 내경과 외경의 동축도를 $0.5\mu\text{m}$ 이하로 가공해야 한다. 그러나 SC-type 페룰의 경우 외경 2.5mm, 길이 10.5mm, 내경 $125\mu\text{m}$ 이므로 동축연삭 가공시 공작물을 지지하는 방법과 오차가 공작물의 형상정밀도에 큰 영향을 미치게 된다.

2002년 5월 30일 접수

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학과

원통연삭가공에서 원추형 센터를 사용한 공작물 척킹 방법과 진원도 관계가 연구되어 왔으며, 볼형 센터를 이용하여 척킹 오차를 줄이려는 연구도 이루어졌다. A. Kyusojin^[1, 2] 등은 볼센터와 원추형센터의 실용성을 비교하였고, T. Oiwa^[3, 4]은 볼센터를 원통연삭에 응용하여 반경방향 강성과 축방향 강성에 대하여 연구하였고, H. Kato^[5, 6]은 초경 센터를 사용하여 센터와 연삭면 진원도 오차곡선의 관계를 검토하였으며, 또한 센터 지지부의 강성이 연삭면의 진원도에 미치는 영향도 고찰하였다.

국내에서는 볼스크류의 나사 연삭가공시 리이드 오차와 유효경 오차를 감소시키는 편차보정 시스템 개발에 관한 연구가 있었다^[8]. 센터와 센터 구멍의 6개의 정렬오차 중 양센터의 평행오차와, 센터 단면이 2, 3산인 단면 형상을 고려하여 리이드 오차와 유효경 오차를 시뮬레이션 하였다.

본 연구에서는 Kato^[5]와 박성준^[9]의 원추형 센터를 사용한 원통연삭시 공작물의 회전 오차 관계와 김동길^[10]을 이용하여, 좌표변환과 수치해석을 이용하여 센터와 센터구멍의 6개의 정렬오차와 센터의 형상이 회전하는 페룰의 중심 거동에 미치는 영향을 운동학적 관점에서 고찰하였다. 또한 원추형 센터대신 볼형 센터를 사용할 때 페룰 중심의 거동을 고찰하였고, 볼의 직경과 오차크기의 상호 관계를 검토하여 볼형 센터를 사용할 수 있는 타당성을 검토하였다.

2. 이론

2.1 페룰의 척킹 방법

일반적으로 페룰을 동축연삭을 하기 위해서는 Fig. 1과 같이 광섬유가 삽입되는 내경에 원추형 초경 핀으로 지지하여 페룰을 회전시키면서 연삭을 하게 된다. 이때 페룰의 회전 안내면은 절삭력을 지지하고 있는 페룰의 센터 구멍 접촉부에 의해서 형성된다. 이상적인 경우라면 센터와 센터구멍이 일직선상에 놓여야 하지만 실제로는 센터핀과 센터구멍의 가공오차와 주축대와 심압대에 장착되어 있는 양 센터핀 사이의 오차등에 의해 정렬 오차가 발생하게 된다.

Fig. 2는 일반적인 SC-type 페룰의 치수를 나타내고 있다. 우측면에서부터 좌측 끝단까지 광섬유를 삽입하여 좌측면이 서로 대향하도록 조립을 하는데, 우측면은 광섬유 삽입이 용이하도록 홈을 만

들고, 결합면쪽의 센터홈은 양쪽 광섬유의 정확한 정렬을 위해 홈을 만들 수가 없다. 따라서 페룰을 동축연삭 가공할때 좌측면의 센터핀은 센터구멍과 회전 접촉으로 마모가 되어 척킹오차를 유발시킨다. 이러한 핀의 마모는 정밀한 핀을 자주 교환하게 하므로 생산 효율을 저하시키게 된다. 따라서 본 연구에서는 원추형 센터 대신에 센터 볼형 센터를 사용하였을 때 가공 오차의 정도를 줄일 수 있는 방법을 제시하였다.

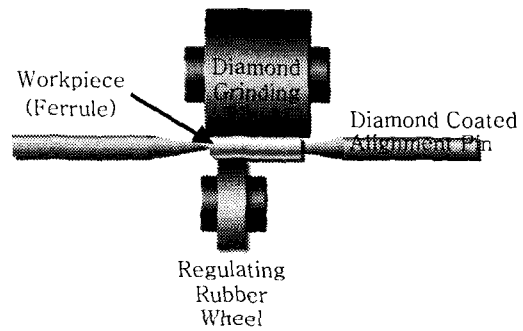


Fig. 1 Co-axial grinding of ferrule with cone-type center pins

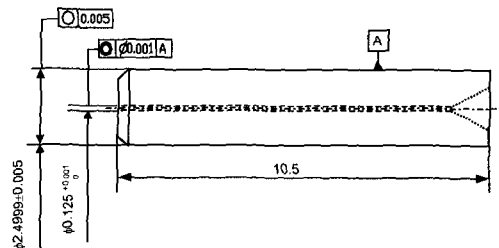


Fig. 2 Dimension of SC-type ferrule

2.2 가정

센터핀과 센터 구멍사이에는 다음과 같은 가정을 세운다.

2.2.1 원추형 센터

- 1) 심압대쪽의 센터핀은 축방향으로 이동이 가능하며 스프링에 의하여 페룰을 주축대 방향으로 밀고 있으므로 센터와 페룰은 항상 완전히 밀착되어 있다.
- 2) 센터와 센터 구멍의 접촉부에 있어서 탄성

- 변형, 소성 변형, 그리고 마찰력은 무시한다.
- 3) 센터핀과 센터구멍의 접촉은 센터구멍 입구 부에서만 이루어진다.
 - 4) 센터핀의 앞쪽과 끝부분은 오차가 없는 직원 추형이다.

2.2.2 불형 센터

- 1) 양쪽 센터에 부착된 볼은 오차가 없는 완전한 구이다.
- 나머지는 2.2.1의 1), 2), 3)과 동일하다.

2.3 양 센터핀과 가공물의 센터 구멍과의 기하학적 관계

심압대와 주축대 쪽의 양 센터핀의 오차관계를 Fig. 3에 표시하였다.

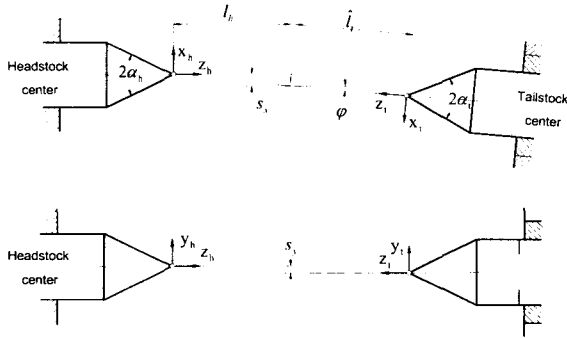


Fig. 3 Alignment errors between centers

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

주축대 센터핀은 보통 주축대에 끼워져 베드등에 고정되어 있으므로, 좌표계 $x_h-y_h-z_h$ 는 외부에서 보면 정지된 것으로 간주되며, 나머지 3개의 좌표계는 페룰의 회전에 따라 이동되어 얻어진다. 따라서 나중에 페룰의 회전에 따른 페룰의 위치는 좌

표계 $x_h-y_h-z_h$ 를 기준 좌표계로 표현된다.

다음은 위치와 좌표계의 관계를 수식적으로 나타낸 것이다.

$$\overline{x_h} = \{ x_h \ y_h \ z_h \ 1 \}^T$$

$$\overline{x_t} = \{ x_t \ y_t \ z_t \ 1 \}^T$$

$$\overline{X_h} = \{ X_h \ Y_h \ Z_h \ 1 \}^T$$

$$\overline{X_t} = \{ X_t \ Y_t \ Z_t \ 1 \}^T$$

(2.1)

2.3.1 양 센터 상호간의 위치관계

Fig. 3에서 양센터 상호간의 위치 관계를 나타내는 식은 (2.2)와 같다. 여기서, 행렬 T_1 은 좌표계 $x_h-y_h-z_h$ 좌표를 좌표계 $x_t-y_t-z_t$ 로 나타내기 위하여, 먼저 적절하게 직선 변환시킨 후, y축에 대하여 $(180^\circ - \phi)$ 만큼 회전 변환한 것이다.

$$\overline{x_t} = T_1 \cdot \overline{x_h} \tag{2.2}$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} -\cos\phi & 0 & -\sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\phi & 0 & -\cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & s_x \\ 0 & 1 & 0 & s_y \\ 0 & 0 & 1 & -l_h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3.2 양 센터구멍 상호간의 위치관계

Fig. 4에서 양 센터 구멍간의 위치관계를 나타내고 있으며, 양 센터 구멍간의 관계식은 식(2.3)과 같고 같다. 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 페룰의 길이를 표시한다.

$$\overline{X_t} = T_2 \cdot \overline{X_h} \tag{2.3}$$

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

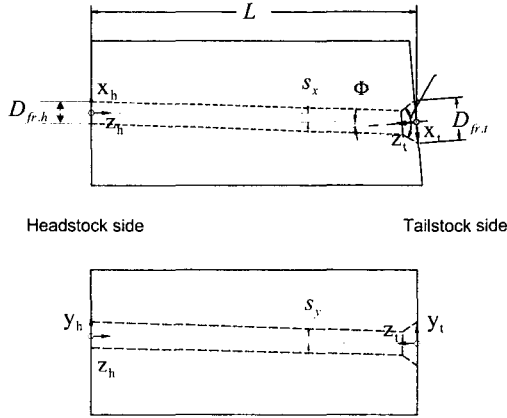


Fig. 4 Alignment errors between center holes

2.3.3 주축대 센터와 센터구멍과의 관계

Fig. 5에서 주축대 센터와 센터 구멍과의 좌표계 관계는 식(2.4)과 같다. 여기서, 행렬 T_3 는 Y축에 대하여 $-\zeta$ 만큼, X축에 대하여 $-\eta$ 만큼, Z축에 대하여 $-\gamma$ 만큼 회전 변환시키고 직선 변환한 것이다(단, $0 \leq \zeta < \pi$, $0 \leq \eta < \pi$).

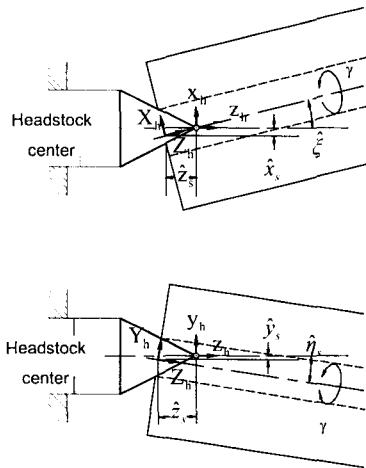


Fig. 5 Relation between center and center hole on headstock side

$$\overline{x}_h = T_3 \cdot \overline{X}_h \quad (2.4)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \widehat{x}_s \\ 0 & 1 & 0 & \widehat{y}_s \\ 0 & 0 & 1 & \widehat{z}_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_x$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \eta & -\sin \eta & 0 \\ 0 & \sin \eta & \cos \eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \zeta & 0 & \sin \zeta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \zeta & 0 & \cos \zeta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3.4 센터와 센터구멍의 접촉상태

1) 원추형센터

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. 4와 같이 센터 단면이 그 최대 직경 방향의 2점에서 센터구멍에 접촉하는 경우가 가장 타당하다고 생각할 수 있다.

센터 형상의 좌표계는 식(2.6)을 만족한다.

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

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

여기서, α_h, α_t 는 주축대와 심압대 핀의 반정각이며, 주축대와 심압대의 접촉조건은 다음과 같다.

$$\overline{x}_h^T \cdot C_1 \cdot \overline{x}_h = 1, \quad z_h < 0$$

$$\overline{x}_t^T \cdot C_2 \cdot \overline{x}_t = 1, \quad z_t < 0 \quad (2.7)$$

여기서,

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

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

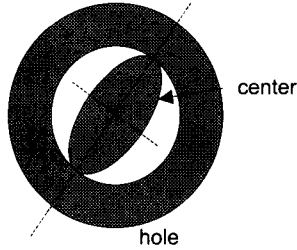


Fig. 6 Relation between center and center hole at workpiece end

페들의 센터 구멍은 항상 원이므로 페를 좌표계에서 경계조건으로 변환시키기 위하여, 식(2.7)을 주축대 센터 구멍의 경계 조건과 심압대 센터구멍의 경계조건을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{X}_h^T \cdot (T_3^T \cdot C_1 \cdot T_3) \cdot \overline{X}_h &= 1, \\ \overline{X}_t^T \cdot ((T_2^{-1})^T \cdot T_3^T \cdot T_1^T \\ &\cdot C_2 \cdot T_1 \cdot T_3 \cdot T_2^{-1}) \cdot \overline{X}_t = 1 \end{aligned} \quad (2.8)$$

위의 식(2.8)을 전개하면 센터의 단면 곡선은 다음과 같은 타원의 방정식으로 유도된다.

$$\begin{aligned} a_1 X_h^2 + a_2 X_h Y_h + a_3 Y_h^2 + a_4 X_h + a_5 Y_h + a_6 &= 0 \\ b_1 X_t^2 + b_2 X_t Y_t + b_3 Y_t^2 + b_4 X_t + b_5 Y_t + b_6 &= 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

주축대와 심압대에서 원(센터구멍)과 타원(센터)의 교점에서의 근은 $(X_{h1}, X_{h2}), (Y_{h1}, Y_{h2})$ 과 $(X_{t1}, X_{t2}), (Y_{t1}, Y_{t2})$ 이다.

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

$$\begin{aligned} \overline{X}_h &= X_{h1} + X_{h2} = 0, \\ \overline{Y}_h &= Y_{h1} + Y_{h2} = 0, \end{aligned}$$

$$\overline{A}_h = \sqrt{(X_{h1} - X_{h2})^2 + (Y_{h1} - Y_{h2})^2} = D_{fr,h},$$

$$\overline{X}_t = X_{t1} + X_{t2} = 0,$$

$$\overline{Y}_t = Y_{t1} + Y_{t2} = 0,$$

$$\overline{A}_t = \sqrt{(X_{t1} - X_{t2})^2 + (Y_{t1} - Y_{t2})^2} = D_{fr,t} \quad (2.10)$$

2) 불형 센터

원추형 센터핀 대신에 불형 센터를 사용하여 원추의 중심과 볼의 중심과 동일할 경우 심압대쪽 접촉조건은 Fig. 7과 같고, 센터 형상과 접촉 조건은 다음과 같다.

여기서, $D_{b,h}, D_{b,t}, D_{c,h}, D_{c,t}$ 는 주축대 센터볼의 직경, 심압대 센터볼의 직경, 주축대 접촉 원의 직경, 심압대 접촉 원의 직경이다.

$$\begin{aligned} x_h^2 + y_h^2 + z_h^2 &= \frac{D_{c,h}^2}{4}, \\ x_t^2 + y_t^2 + z_t^2 &= \frac{D_{c,t}^2}{4} \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$D_{c,h} = D_{fr,h} \quad (D_{b,h} > D_{fr,h}),$$

$$D_{c,t} = D_b \cos \beta \quad (0 < D_{b,t} < D_{fr,t}),$$

$$D_{c,t} = D_{fr,t} \quad (D_{b,t} > D_{fr,t}) \quad (2.12)$$

주축대와 심압대의 접촉조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{x}_h^T \cdot C_3 \cdot \overline{x}_h &= \frac{D_{hc}^2}{4}, \quad \left(\frac{D_{hc}}{2} > z_h > 0\right), \\ \overline{x}_t^T \cdot C_3 \cdot \overline{x}_t &= \frac{D_{tc}^2}{4}, \quad \left(\frac{D_{tc}}{2} > z_t > 0\right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

여기서,
$$C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

식(2.13)을 주축대쪽 센터 구멍의 경계조건과 심압대쪽 센터 구멍의 경계조건을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{X}_h^T \cdot (T_3^T \cdot C_3 \cdot T_3) \cdot \overline{X}_h &= \frac{D_{c,h}^2}{4} \\ \overline{X}_t^T \cdot ((T_2^{-1})^T \cdot T_3^T \cdot T_1^T \cdot C_3 \\ &\cdot T_1 \cdot T_3 \cdot T_2^{-1}) \cdot \overline{X}_t = \frac{D_{c,t}^2}{4} \end{aligned} \quad (2.14)$$

위의 식(2.14)을 전개하면 센터구멍의 단면 곡선은 다음과 같은 타원의 방정식으로 유도된다.

$$\begin{aligned} a_1 X_h^2 + a_2 X_h Y_h + a_3 Y_h^2 + a_4 X_h + a_5 Y_h + a_6 &= \frac{D_{c,h}^2}{4}, \\ b_1 X_t^2 + b_2 X_t Y_t + b_3 Y_t^2 + b_4 X_t + b_5 Y_t + b_6 &= \frac{D_{c,t}^2}{4} \end{aligned} \quad (2.15)$$

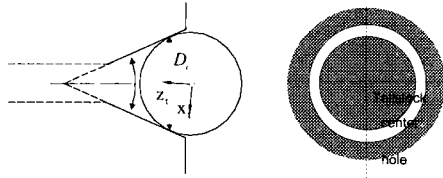


Fig. 7 Relation between center and center hole at workpiece end

식(2.16)의 접촉상태를 만족하는 식은 아래의 6원연립 방정식이다.

$$\begin{aligned} \overline{X}_h &= X_{h1} + X_{h2} = 0, \\ \overline{Y}_h &= Y_{h1} + Y_{h2} = 0, \\ \overline{A}_h &= \sqrt{(X_{h1} - X_{h2})^2 + (Y_{h1} - Y_{h2})^2} = D_{c,h}, \\ \overline{X}_t &= X_{t1} + X_{t2} = 0, \\ \overline{Y}_t &= Y_{t1} + Y_{t2} = 0, \\ \overline{A}_t &= \sqrt{(X_{t1} - X_{t2})^2 + (Y_{t1} - Y_{t2})^2} = D_{c,t} \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.4 미정 계수의 계산 방법과 순서

식(2.10)과 (2.17)의 6원 비선형 연립 방정식은 다음과 함수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{X}_h &= f(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\zeta}_s) \\ \overline{Y}_h &= f(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\zeta}_s) \\ \overline{A}_h &= f(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\zeta}_s) \\ \overline{X}_t &= f(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\zeta}_s, \tau_t) \\ \overline{Y}_t &= f(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\zeta}_s, \tau_t) \\ \overline{A}_t &= f(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\zeta}_s, \tau_t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

식(2.18)은 직접적으로 풀어나가는 곤란하므로, Newon-Raphson의 수치해석방법^[11]을 이용하여 6개의 파라미터가 일정한 수정량 이하가 될 때까지 반복계산을 행하였다.

$$f_i(\overline{x}) = f_i(\widehat{x}_s, \widehat{y}_s, \widehat{z}_s, \widehat{\eta}_s, \widehat{\zeta}_s, \tau_t) = 0 \quad (2.19)$$

(여기서, $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

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

비선형 연립 관계에 있는 식(2.19)의 6개의 함수는 수치해석을 통해 다음 식(2.20)의 관계를 가지고, 이를 행렬식으로 표시하면 식(2.21)과 같다.

$$f_i(\overline{x}) = \frac{\partial f_i(\overline{x}')}{\partial \widehat{x}_s} ds + \frac{\partial f_i(\overline{x}')}{\partial \widehat{y}_s} ds + \dots + \frac{\partial f_i(\overline{x}')}{\partial \tau_t} ds = 0 \quad (2.20)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\overline{x}')}{\partial \widehat{x}_s} & \frac{\partial f_1(\overline{x}')}{\partial \widehat{y}_s} & \dots & \frac{\partial f_1(\overline{x}')}{\partial \tau_t} \\ \frac{\partial f_2(\overline{x}')}{\partial \widehat{x}_s} & \frac{\partial f_2(\overline{x}')}{\partial \widehat{y}_s} & \dots & \frac{\partial f_2(\overline{x}')}{\partial \tau_t} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_6(\overline{x}')}{\partial \widehat{x}_s} & \frac{\partial f_6(\overline{x}')}{\partial \widehat{y}_s} & \dots & \frac{\partial f_6(\overline{x}')}{\partial \tau_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ds \\ ds \\ \vdots \\ ds \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_1(\overline{x}') \\ f_2(\overline{x}') \\ \vdots \\ f_6(\overline{x}') \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

3. 시뮬레이션

3.1 오차 조건

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

Fig. 3.1은 일반적으로 많이 사용되고 SC type 페룰을 시뮬레이션에 사용하였다. Table 1은 원추형 핀과 볼형 핀을 사용할 때 정렬 오차 조건으로, 센터핀과 센터핀의 평행오차와 각도 오차, 그리고 센터구멍간의 평행 오차와 각도 오차를 준 경우이다. 그리고, 동일 조건에서 페룰과 센터의 평행오차가 페룰의 중심에 미치는 경우와, 페룰과 센터의 각도 오차가 페룰의 중심에 미치는 영향을 고찰하였다.

Table 1 Conditions of alignment error

case \ error	1	2	3	4
$S_x(\mu m)$	0	0	0	0
$S_y(\mu m)$	1	0	0	0
$\psi(\circ)$	0	0.1	0	0
$S_x(\mu m)$	0	0	0	0
$S_y(\mu m)$	0	0	1	0
$\alpha(\circ)$	0	0	0	0.1

$$D_{b,h} = D_{b,t} = 125 \mu m, L = 10.5 mm, l_h = 0.5 mm$$

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

3.2 플로우 차트

Fig. 8은 페룰 중심의 변화를 관찰하기 위한 플로우차트를 나타낸 것이다.

먼저 페룰과 센터의 초기 조건을 입력한다. 원추형 센터일 때는 (2.10)의 경계 조건을 적용하고, 볼형 센터일 때는 (2.17)의 경계조건을 적용한다. Newton-Rapson 방법에 의하여 6개의 파라미터

$\hat{x}_s, \hat{y}_s, \hat{z}_s, \hat{\eta}_s, \hat{\zeta}_s, \hat{l}_t$ 를 구하게 된다. 이 파라미터값으로부터 페룰의 회전 위치에 따른 $\overline{x}_h, \overline{x}_t, \overline{X}_h, \overline{X}_t$ 값을 구하여, 페룰 중심의 오차량을 계산하게 된다.

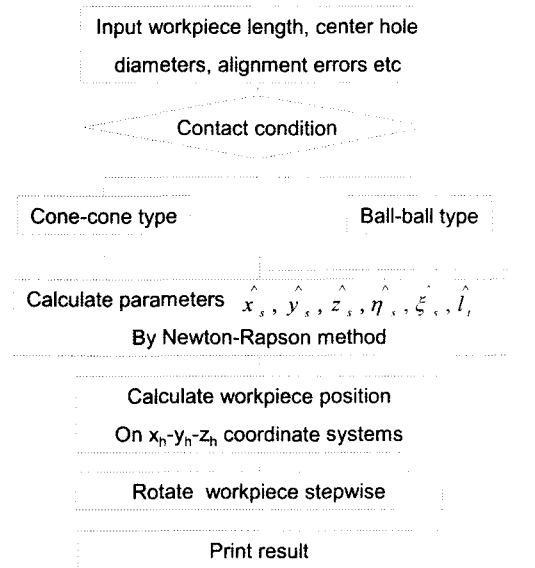


Fig. 8 Flow chart of simulation

4. 시뮬레이션 결과

4.1 원추형 센터

회전각 γ 에 대한 페룰의 회전 거동의 계산 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9는 주축 대쪽의 페룰의 중심의 변화이고, Fig. 10은 심압대쪽의 페룰의 중심의 변화이다. 정렬 오차는 S_y, S_x 또는 각도 오차 ϕ, θ 만으로 하였다.

경우1과 경우2의 양센터만의 정렬오차 S_y , 또는 ϕ 가 있는 경우 페룰에는 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 빗나간 위치에 있다는 것을 표시하고 있고, 외경 연삭시 진원도에는 직접 영향을 미치지 않지만, 센터 구멍과 가공면의 동축도에는 영향을 미치게 된다.

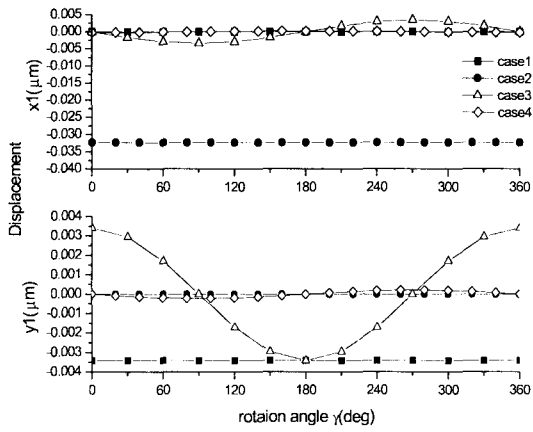


Fig. 9 Displacements of workpiece center on headstock side, cone-type center

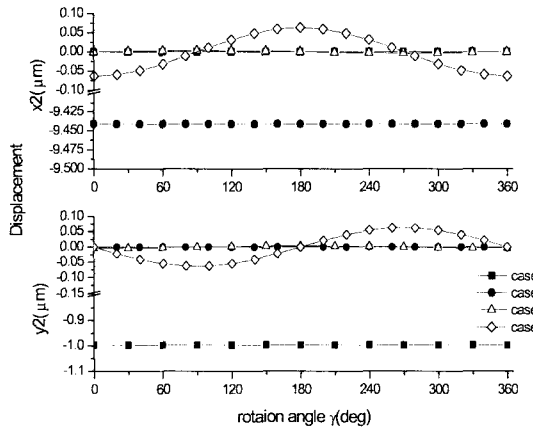


Fig. 10 Displacements of workpiece center on tailstock side, cone-type center

Fig. 11과 Fig. 12은 평행오차와 각도 오차가 페룰의 중심의 변화량에 미치는 영향의 크기를 나타내었다. S_y, s_y 의 평행오차에서 크기를 각각 1, 5, 10 μm 로 변화시켰을 때, 최대 변위량은 페룰구멍의 평행오차보다는 센터의 평행 오차에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 Fig. 12에서도 ϕ, Φ 를 각각 0.1, 0.5, 1 $^\circ$ 씩 변화시켰을 때 페룰 중심의 최대 변화량은 ϕ 에 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

Fig. 13은 동일 조건의 정렬 오차에서 센터핀의 각도와 페룰 중심의 최대 변화량을 관계를 나타내

었는데, 센터핀의 각도가 감소할수록 오차도 감소함을 알 수 있다. 그러나 실제 페룰 지지에서 센터핀의 각도는 센터핀의 강도와 반비례하기 때문에 최적의 각도가 필요하다.

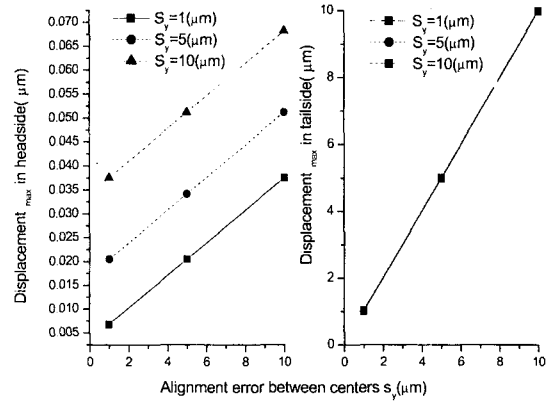


Fig. 11 Effects of parallel alignment error on maximum displacement of workpiece center, cone-type center, $S_x = s_x = 0 \mu\text{m}$, $\phi = \Psi = 0^\circ$

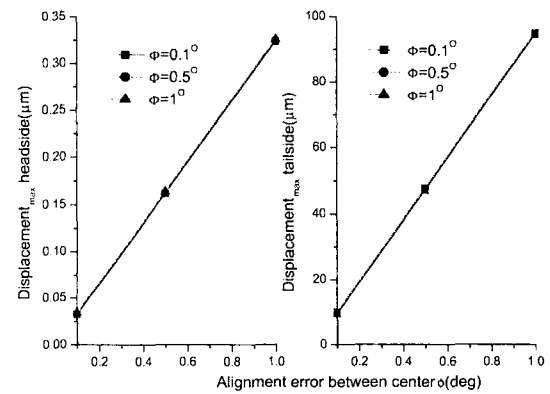


Fig. 12 Effects of angular alignment error on maximum displacement of workpiece centers, cone-type center $s_x = s_y = S_x = S_y = 0$

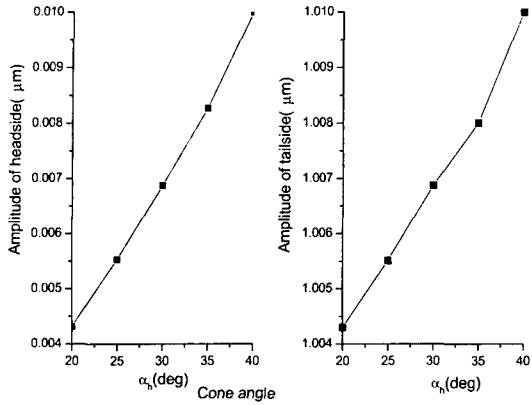


Fig. 13 Effects of center pin angle on amplitude of displacement, cone-type center $S_x = s_x = 0\mu m$, $S_y = s_y = 1\mu m$, $\phi = 0$, $\Psi = 0$

4.2 불형 센터

Fig. 14와 Fig. 15는 불형 센터를 사용하여 Table 1의 오차 조건을 적용하였을 경우 페룰 중심의 거동을 나타내었다. 페룰의 회전각 γ 에 따른 오차의 형태와 크기는 주축대쪽에서는 거의 동일함을 알 수 있다. 그러나 심압대쪽에서 경우1, 3, 4의 형태는 동일하나 경우 2에서 반경방향으로 떨림이 발생함을 알 수 있다. 그리고 오차의 크기도 4가지의 경우 원추형 센터일때 보다 크다. 이유는 심압대쪽에서 센터볼은 Fig. 7과 같이 페룰 내경보다 큰 직경에서 접촉하기 때문이다.

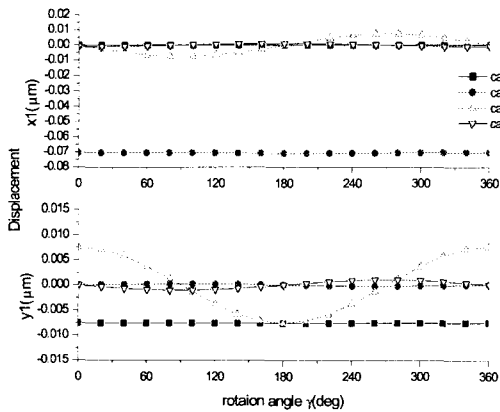


Fig. 14 Displacements of workpiece center on headstock side, ball-type center

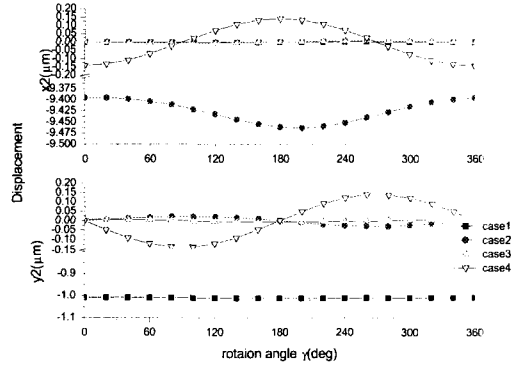


Fig. 15 Displacements of workpiece center on tailstock side, ball-type center

Fig. 16은 양센터의 직경에 따른 페룰 중심 오차의 크기를 나타낸 것이다. 센터볼의 직경을 150μm~700μm까지 변화할 때 주축대쪽과 심압대쪽의 최대 변위를 나타낸 것으로, 직경이 증가하면 오차 크기도 비례함을 알 수 있다. 따라서 오차를 감소시키기 위해서는 볼의 직경이 페룰 내경에 근접하는 정밀한 볼을 사용해야 할 것이다.

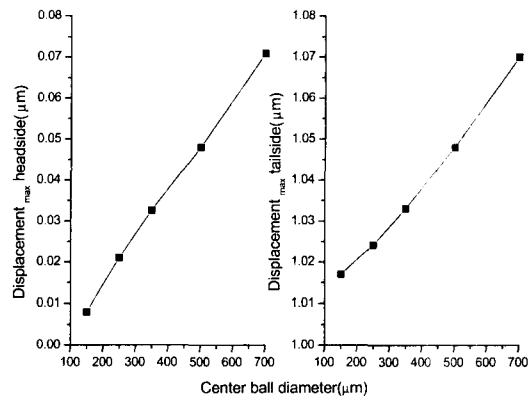


Fig. 16 Effects of center ball diameter on amplitude of displacement, ball-type center $S_x = s_x = 0\mu m$, $S_y = s_y = 1\mu m$, $\phi = 0$, $\Psi = 0$

5. 결론

페룰을 원추형 미세핀으로 지지하여 동축 연삭할때, 양센터핀과 센터구멍에 정렬오차가 있는 경

우와 원추형 편 대신 불형 센터를 사용하여 페들의 거동을 운동학적 관점에서 시뮬레이션 할경우 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

첫째, 원추형 센터에서, 양센터편의 정렬 오차만 존재하는 경우 페들의 반경방향의 떨림현상은 발생하지 않으며, 양센터구멍만의 정렬 오차가 존재하는 경우, 페들 회전에 따라 반경방향으로 떨림 현상이 발생하고, 그 진폭은 정렬 오차에 비례한다.

둘째, 원추형 센터에서, 동일한 정렬오차의 경우 페들 중심의 오차는 센터편의 각도에 반비례한다.

셋째, 불형 센터에서, 센터의 각도 오차가 존재하거나, 페들의 정렬 오차가 존재하면 페들 중심의 반경 방향 떨림일 발생하며, 동일한 정렬오차에서 페들중심의 오차는 센터편의 직경에 반비례함을 고찰하였다.

넷째, 원추형 센터 대신 불형 센터를 사용할 수 있는 타당성을 검토하였고, 센터 정렬 오차와 센터 구멍의 정렬 오차에 의해 불센터의 직경을 결정하여야 됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 중기거점사업인 "고기능성 부품 가공용 지능형 연삭 시스템"의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. A. Kyusojin, K. Ogawa and A. Toyama, "A Comparison of Cone Center and Ball Center for Roundness in Cylindrical Grinding," Bull. of the JSPE, Vol. 20, No. 2, pp. 85-90, 1986.
2. A. Kyusojin, R. Todaka and A. Toyama, "Development of a Precise Cylindrical Grinding by Using Steel Ball," JSPE, Vol. 53, No. 3, pp. 444-448, 1987.
3. T. Oiwa and A. Kyusojin, "Development of a Precise Cylindrical Grinding by Ball Centers(1st Report)," JSPE Vol. 54, No. 12, pp. 2319-2434, 1988.
4. T. Oiwa and A. Kyusojin, "Development of a Precise Cylindrical Grinding by Ball Centers (Continued Report)," JSPE Vol. 58, No. 8, pp.

- 1375-1380, 1992.
5. H. Kato, Y. Nakano and Y. Hosoya, "Influence of Alignment Error of Centers and Center Holes on Rotation Accuracy of Workpiece," JSPE, Vol. 50, pp. 568-573, 1984.
6. H. Kato, Y. Nakano and T. Saito, "Effect of Roundness of Center on Roundness of Workpiece in Cylindrical Grinding," JSPE, Vol. 52, No. 9, pp. 1638-1645, 1986.
7. H. Kato, Y. Nakano and T. Watanabe, "Rotation Accuracy an Circularity of Workpiece in Center Type Cylindrical Grinding," JSPE, Vol. 55, No. 11, pp. 1975-1980, 1989.
8. "고정밀 가공 및 측정 기술에 관한 연구(4차년도 최종 보고서)," 통산산업부, 과학기술처, pp. 173-182, 1996.
9. 박성준, "원통 연삭시 공작물의 회전오차와 진원도에 관한 연구," 연세대학교 석사학위 논문, 1995.
10. 김동길, 김영태, 이상조, "페들 동축연삭시 척킹 오차 해석," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 9-14, 2002.
11. Melvin J. Maron, Robert J. Lopez, "Numerical Analysis-A Practical Approach," Wadsworth, 3rd edition, pp. 205-216, 1990.