

# 선반으로 보링가공 할 때 척킹력이 가공 정도에 미치는 영향

이상수\*, 강신길<sup>+</sup>, 전영석<sup>++</sup>

(논문접수일 2007. 10. 18, 심사완료일 2008. 1. 4)

## Influence of Chucking Forces upon the Accuracy of Circular Hole in Boring Process on the Turning

Sang-Soo Lee\*, Shin-Gil Kang<sup>+</sup>, Young-Seog Jeon<sup>++</sup>

### Abstract

The cutting process of materials is accompanied with the elastic and plastic deformation due to chucking forces in the boring process of thin holes on the turning. Upon removal of chucking forces at the end of process, the original shape is remained in the plastic deformation; on the other hand, it is modified in the elastic deformation due to spring back. Fixing materials by chucks on the turning has influence on roundness because the process is conducted with unbalanced distribution load induced from the fixing of three jaws. Moreover, the amount of spring back depends on the magnitude of fixing forces. We studied the change of roundness according to fixing forces as well as the method to reduce the influence of chucking forces.

**Key Words** : chucking forces(고정력), boring process(보링가공), roundness error(진원도 오차), elastic and plastic deformation(탄소성변형)

### 1. 서론

초정밀 기계의 수요증대와 각종기계의 정밀도 및 품질향상에 대한 요구가 갈수록 심화되고 있는 시점에서 경쟁의 우위를 확보하기 위해 기계 부품의 정밀 가공이 더욱더 증대되고 있다.

부품의 정밀도는 치수공차, 형상공차, 표면 거칠기 등 여러

요소에 의해 달라진다.

전통적으로 사용하고 있는 치수공차가 만족되더라도 공차 안에서의 형상은 무수히 다르게 존재하게 된다. 이를 적절히 제한하므로써 조립을 원활하게하고, 성능 및 수명을 증대시키고 호환성 있는 부품을 만들 수 있다.

선반에서 링을 가공하면 Fig. 1과 같은 과정으로 진원도에 오차가 형성된다.

\* 동양공업전문대학 기계자동화공학부 기계과 (sslee@dongyang.ac.kr)

주소: 152-714 서울시 구로구 고척동 62-160

+ 동양공업전문대학 기계자동화공학부 기계과

++ 동양공업전문대학 기계자동화공학부 기계설계과

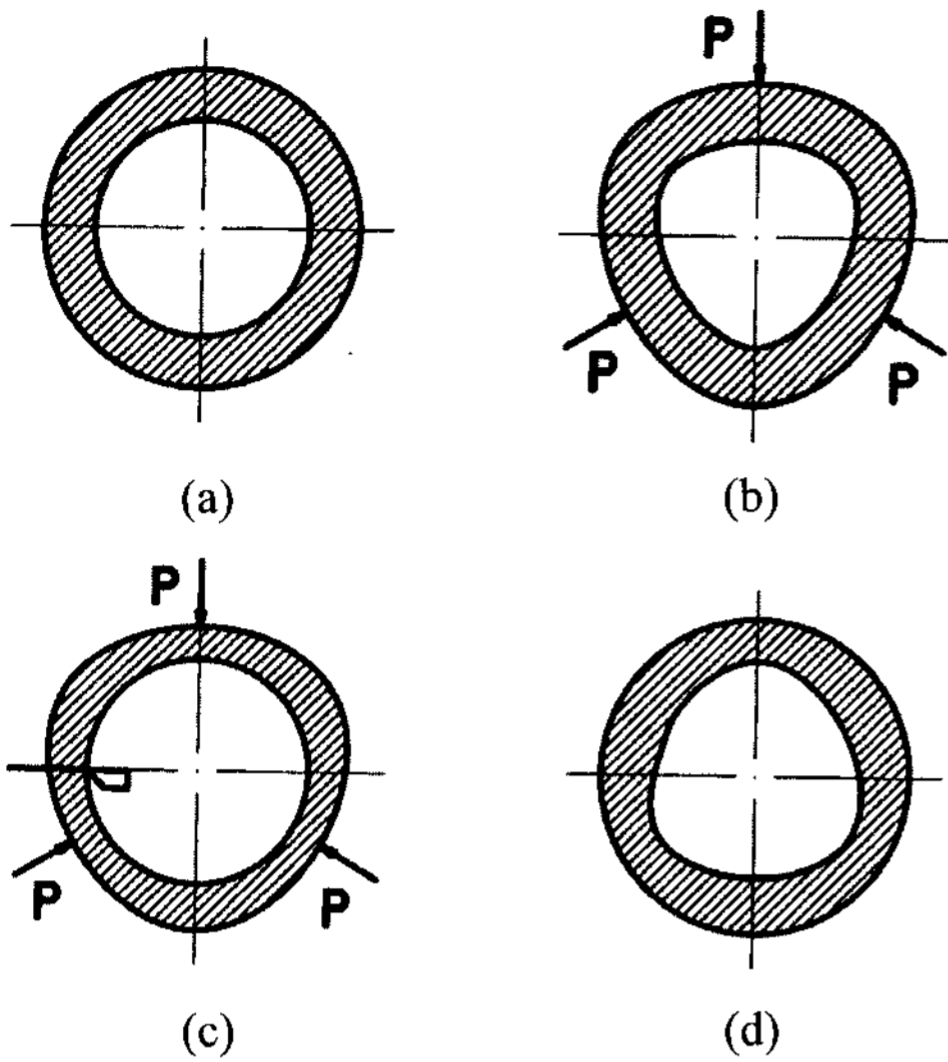


Fig. 1 Schematic illustration of the distortion of the boring hole by the chucking force

Fig. 1 (a)과 같은 소재를 보링하기 위하여 연동적으로 고정하면 고정력에 의해 공작물은 탄성 변형 또는 탄성 변형과 소성 변형이 동시에 나타나 Fig. 1 (b)과 같이 변형된다. 이렇게 변형된 상태에서 보링을 하면 Fig. 1 (c)과 같이 진원으로 가공이 이루어지나 가공을 마치고 척조(chuck jaw)의 고정력을 제거하면 가공 할 때 탄성 변형되었던 부위가 스프링 백으로 원상 복귀되며 Fig. 1 (d)과 같이 변형하여 진원도에 오차가 발생한다. 이러한 사실은 보고된바 있으며<sup>(1)</sup>, 수식을 통하여 오차 값을 산출 할 수 있다<sup>(4)</sup>.

본 연구에서는 선반으로 보링가공 할 때 척조(chuck jaw)의 고정력 변화와 링 두께의 변화에 따라 가공품의 진원도 오차 추이를 실험적으로 관찰하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 3등분점에서 반지름 방향으로 압축 하중을 받는 원통형 링의 변위

Fig. 2에서와 같이 원통형 링의 3등분점에서 반지름 방향으로 압축력을 받을 때는 Fig. 3과 같이 세부분으로 대칭되게 등분된 아치형 멤버로 나누어 하중 P, P/2와 모멘트 M<sub>0</sub>이 평형 상태를 이루게 된다. 이때 φ각의 단면에서 N과 F는

$$N = \frac{1}{2} P \cos \varphi \quad (1)$$

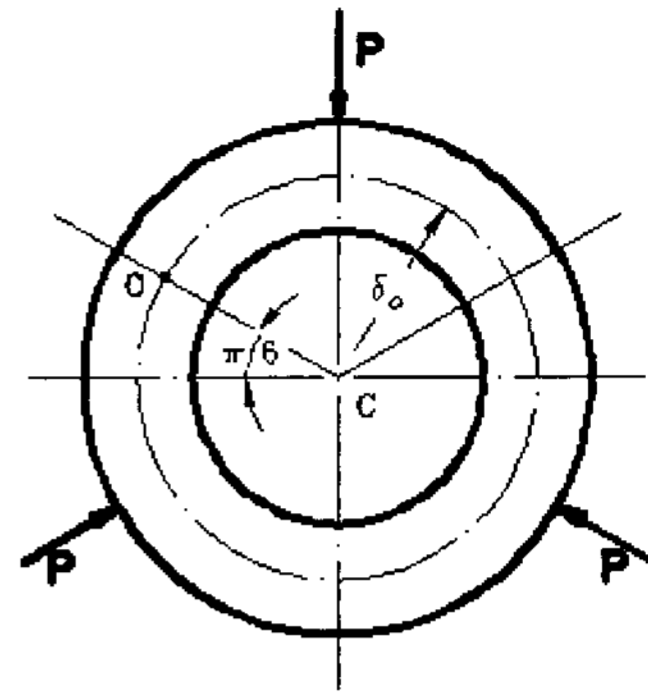


Fig. 2 Ring under compressive loads in three directions

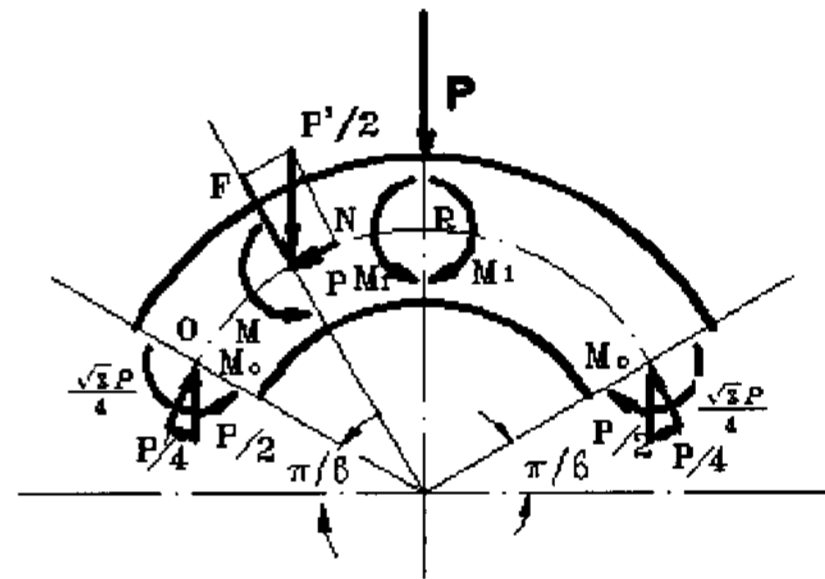


Fig. 3 Equilibrium state by three symmetric radial compressive loads

$$F = \frac{1}{2} P \sin \varphi \quad (2)$$

이고, 굽힘 모멘트 M은

$$M = M_0 - \int_{\pi/6}^{\varphi} F \rho_0 d\varphi \quad (3)$$

$$= M_0 + \frac{1}{2} P \rho_0 \left( \cos \varphi - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (4)$$

가 된다.

한편 3개의 반지름 방향 하중에 의하여 링이 휘어진다고 하더라도 O점(φ = π/6 위치)과 R점(φ = π/2 위치)는 변하지 않는다. 그러므로

$$i = \int_{\pi/6}^{\pi/2} W d\varphi = \frac{1}{EA} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \left( -N + \frac{M}{\rho} + \frac{M}{K\rho_0} \right) d\varphi = 0 \quad (5)$$

또는

$$\begin{aligned}
 EAi &= \int_{\pi/6}^{\pi/2} (-N + \frac{M}{\rho} + \frac{M}{K\rho_0}) d\varphi \\
 &= \int_{\pi/6}^{\pi/2} [-\frac{1}{2}P\cos\varphi + (1 + \frac{1}{K}) \times [\frac{M_0}{\rho_0} + \frac{1}{2}P(\cos\varphi - \frac{\sqrt{3}}{2})]] d\varphi \\
 &= (1 + \frac{1}{K})(\frac{M_0}{\rho_0} - \frac{\sqrt{3}}{4}P)\frac{\pi}{3} + \frac{P}{4K} = 0
 \end{aligned} \tag{6}$$

위 식에서

$$M_0 = \frac{\sqrt{3}}{4}P\rho_0 [1 - \frac{\sqrt{3}}{\pi(1+K)}] \tag{7}$$

$$M = \frac{P\rho_0}{2} [\cos\varphi - \frac{3}{2\pi(1+K)}] \tag{8}$$

$$M_1 = (M)_{\varphi=\pi/2} = -\frac{3}{4}P\rho_0 \frac{1}{\pi(1+K)} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 (\delta x)_{\varphi_1} &= \frac{1}{EA} [\int_{\pi/6}^{\varphi_1} (-N + \frac{M}{\rho_0} + \frac{M}{K\rho_0})(y_1 - y) d\varphi + \\
 &\quad \int_0^{x_1} (-N + \frac{M}{\rho_0}) dx] \tag{10}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\delta y)_{\varphi_1} &= \frac{1}{EA} [-\int_{\pi/6}^{\varphi_1} (-N + \frac{M}{\rho_0} + \frac{M}{K\rho_0})(x_1 - x) d\varphi + \\
 &\quad \int_0^{y_1} (-N + \frac{M}{\rho_0}) dy] \tag{11}
 \end{aligned}$$

식 (2), (8)를 위의 식에 대입하여 풀면

$$\begin{aligned}
 (\delta x)_{\varphi_1} &= \frac{P\rho_0}{8EA} [\frac{4\pi\sin^2\varphi_1 - 2(\pi + 6\varphi_1)\sin\varphi_1 - 12\cos\varphi_1 + 6\sqrt{3} + \pi}{2\pi K} + \\
 &\quad \frac{6\cos\varphi_1 - 3\sqrt{3}}{\pi(1+K)}] \tag{12}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (\delta x)_{\varphi_1} &= \frac{P\rho_0}{8EA} [\frac{12\pi\sin\varphi_1\cos\varphi_1 - 36\sin\varphi_1 + 6(\pi - 6\varphi_1)\cos\varphi_1 + 12\pi\varphi_1 - 2\pi^2 - 3\sqrt{3} + 18}{6\pi K} \\
 &\quad + \frac{6\sin\varphi_1 - 3}{\pi(1+K)}] \tag{13}
 \end{aligned}$$

따라서 원점O에 대한 R점의 변위는 다음과 같다.

$$(\delta x)_{\pi/2} = \frac{P\rho_0}{16EA} \cdot \frac{3(2\sqrt{3} - \pi - \pi K)}{\pi K(1+K)} \tag{14}$$

$$(\delta y)_{\pi/2} = \frac{P\rho_0}{8EA} [\frac{3}{\pi K(1+K)} - \frac{4\pi - 3\sqrt{3}}{6K}] \tag{15}$$

위에서 언급한 바와 같이 (10)식~(15)식으로 얻어지는 변위는 원점 O에 대한 변위이다.

실제로 원점은 x방향으로  $-(\delta x)_{\pi/2}$ , y방향으로  $(\delta x)_{\pi/2} \tan \frac{\pi}{6} = \frac{1}{\sqrt{3}}(\delta x)_{\pi/2}$  만큼 변위되므로 R점의 x방향변위는 0이 된다.

링이 척의 세 개의 jaw에 의하여 축의 직각 방향 하중에 의하여 변형 될 때  $\pi/6$ 에서 반지름 CO는

$$(\rho)_{\pi/6} = \rho_0 + \frac{2}{\sqrt{3}}(\delta x)_{\pi/2} \tag{16}$$

이고,  $\pi/2$ 에서 반지름 CR는

$$(\rho)_{\pi/2} = \rho_0 + (\delta y)_{\pi/2} + \frac{1}{\sqrt{3}}(\delta x)_{\pi/2} \tag{17}$$

이다.

일반적으로 링이 위에서 언급한 동일 하중조건일 때 임의의 각  $\varphi$ 위치에서의 반지름  $(\rho)_{\varphi}$ 는 다음과 같다.

Fig. 4에서

$$PQ = (\delta x)_{\varphi} - (\delta x)_{\pi/2}$$

$$P'Q = (\delta y)_{\varphi} + \frac{1}{\sqrt{3}}(\delta x)_{\pi/2}$$

일 때

$$\begin{aligned}
 (\rho)_{\varphi} &= CP' = SP' / \sin(\varphi + \delta\theta) = \frac{SP + P'Q}{\sin(\varphi + \delta\theta)} \\
 &= \frac{\rho_0 \sin\varphi + (\delta y)_{\varphi} + \frac{1}{\sqrt{3}}(\delta x)_{\pi/2}}{\sin(\varphi + \delta\theta)} \\
 &= \frac{\rho_0 \sin\varphi + (\delta y)_{\varphi} + \frac{1}{\sqrt{3}}(\delta x)_{\pi/2}}{\sin\varphi} \\
 &= \rho_0 + [(\delta x)_{\varphi} + \frac{1}{\sqrt{3}}(\delta x)_{\pi/2}] \operatorname{cosec}\varphi
 \end{aligned} \tag{18}$$

그러므로  $(\rho)_{\pi/6}$ 와  $(\rho)_{\varphi}$ 사이의 반지름 차이는

$$\begin{aligned}
 (\rho)_{\varphi} &= (\rho)_{\pi/6} - (\rho)_{\varphi} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\rho)_{\pi/2}(2 - \operatorname{cosec}\varphi) - (\delta y)_{\varphi} \operatorname{cosec}\varphi
 \end{aligned} \tag{19}$$

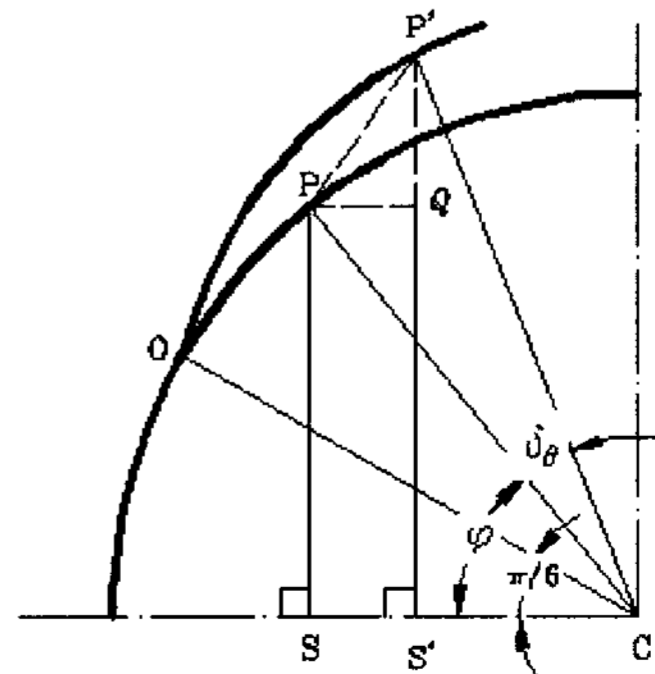


Fig. 4 Deflection of curved beam

이며, 최대값은

$$\begin{aligned}
 (\delta\rho)_{\max} &= (\rho)_{\pi/6} - (\rho)_{\pi/2} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\delta x)_{\pi/2} - (\delta y)_{\pi/2}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

이 된다.

### 2.2 보링작업 할 때 3-Jaw 척(Chuck)에 의한 보링 구멍 반지름의 변위

원형 구멍의 정밀도는 이원을 구성하고 있는 지름 차이로 설명된다.

Fig. 6에서와 같이 링의 외경을  $r_{oo}$ , 내경을  $r_{io}$ 으로 하고 이들이 형성하는 진원을 일점쇄선으로 표시한다. 링을 보링 가공 할 때 3-Jaw 척으로 고정하여 보링한다면, 3곳의 반지름 방향으로 가해지는 힘에 의해 그림 5에서 실선으로 표시된 바와 같이 탄성으로 변형되게 될 것이다. 만약 링이 이러한 하중 조건하에 보링된다면 최소 반경( $r_i$ )<sub>min</sub> 부위가 초기에 먼저 절삭되고, 그리고 절삭라인이 최대 반지름( $r_i$ )<sub>max</sub> 이상 절삭 될 때 그림 5에서 일점쇄선으로 표시된 진원으로

형성된다. 그러나 이 진원은 3개의 Jaw로 고정된 상태에서 진원이며, 실제로는 ( $r_i$ )<sub>min</sub> 부위는 ( $r_i$ )<sub>max</sub> 부위보다 더 많이 절삭 되게 된다. 보링 완료 후 링을 척에서 분리하면 탄성 변형은 원 상태로 되돌아간다. 따라서 내부 가공면의 원은 Fig. 6의 실선으로 표시된 것과 같이 찌그러진 원으로 된다.

즉  $\pi/6$ 각도 위치의 내측 반지름은 척으로 고정된 상태에서는 최대 반지름 이던 것이 최소 반지름으로 된다. 그리고  $\pi/2$ 각도 위치의 내측 반지름은 척으로 고정된 상태에서는 최소 반지름 이던 것이 최대 반지름으로 되며, 각  $\varphi$ 에서의 반지름은  $r_{io} + (\delta r)_{\varphi}$ 이 된다. 즉 반지름은  $\pi/6$ 에서  $\pi/2$  사이에서 각  $\varphi$ 의 변화에 따라  $r_{io}$ 에서  $r_{io} + (\delta r)_{\pi/2}$ 으로 변하게 된다.

반지름의 스트레인은 무시할 수 있으므로, 반지름의 공차 ( $\rho$ ) <sub>$\varphi$</sub> 는 식 (19)의 ( $\delta\rho$ ) <sub>$\varphi$</sub> 로, 최대값 ( $\delta r$ )<sub>max</sub>는 식 (20)의 ( $\delta\rho$ )에 근접하게 되며, 이들 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 (\delta r)_{\varphi} &= (r_i)_{\max} - (r_i)_{\varphi} \\
 &= (\rho)_{\pi/6} - (\rho)_{\varphi} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\delta x)_{\pi/2}(2 - \cos\varphi) - (\delta y)_{\pi/2}\operatorname{cosec}\varphi
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
 (\delta r)_{\max} &= (r_i)_{\max} - (r_i)_{\min} \\
 &= (\rho)_{\pi/6} - (\rho)_{\pi/2} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\delta x)_{\pi/2} - (\delta y)_{\pi/2}
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

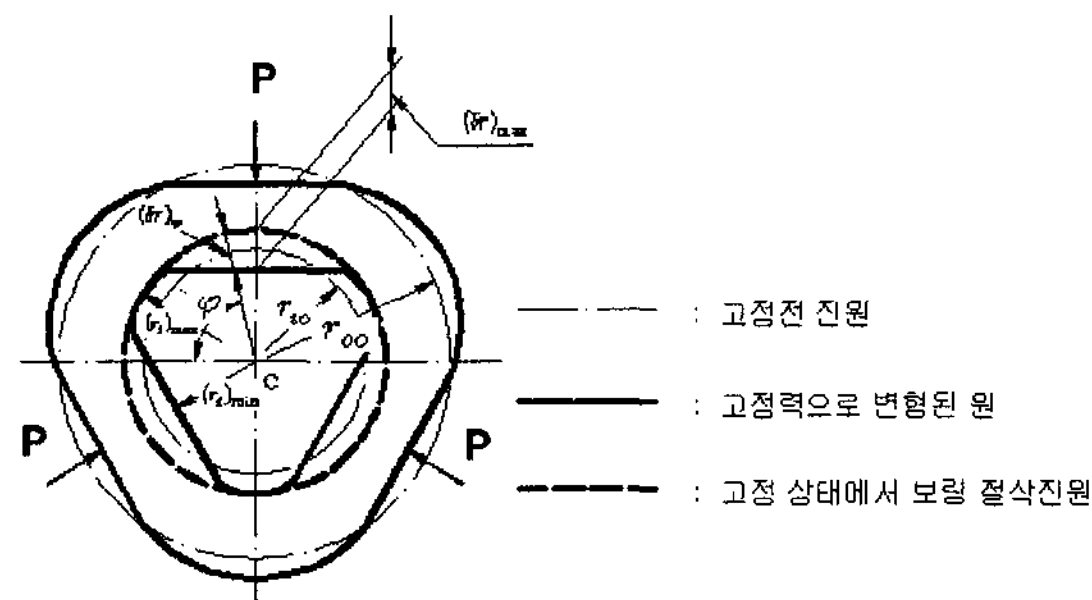


Fig. 5 Sectional view deformation of the boring hole by the chucking force

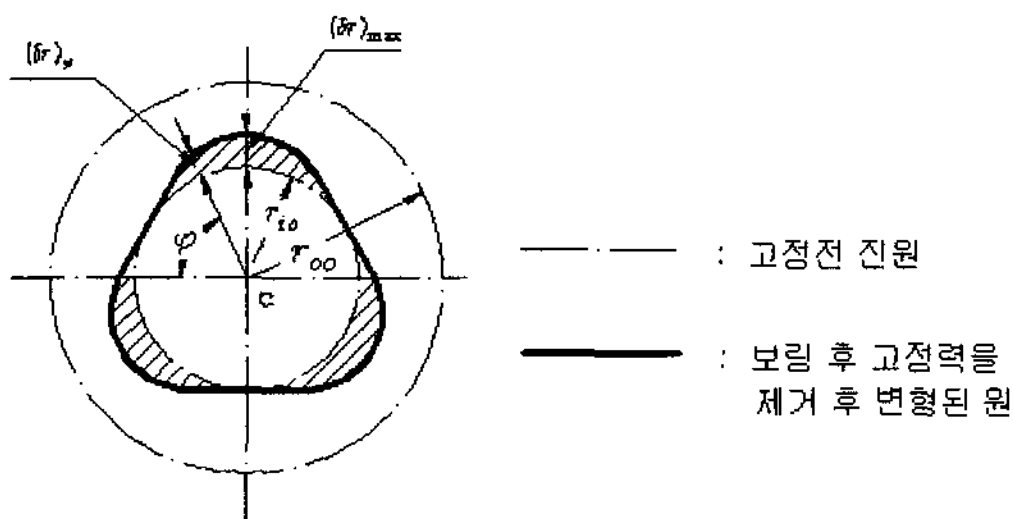


Fig. 6 Deformation of the boring hole after releasing the chucking force

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 실험 방법

본 실험은 SM20C와 AL2024를 사용하였으며 시편은  $\varnothing 70 \times 30$ ,  $\varnothing 50 \times 30$ ,  $\varnothing 30 \times 30$ 에 가공여유가 2mm인 소재를 보링바이트로 각 두께를 3mm, 6mm, 9mm인 원통형으로 가공하여 진 원도를 측정하였다.

가공은 화천 정밀선반을 사용하였으며, 공작물 고정은 연동척으로 고정하고 습식으로 보링가공 하였다. 가공 할 때 정확한 고정력 측정을 위하여 토크렌치(Torque Wrench)로 고정하여 가공하였다.

보링바이트는 공구강 몸체에 초경 팁을 부착한 완성바이트로 노스 반경을 0.3mm로 하여 가공하였다. 진원도 측정은 덕인 3차원 측정기 SIGMA 665C를 사용하였다.

### 3.2. 실험 결과 및 고찰

Fig. 7은 시험편의 내경을 3차원 측정기로 측정한 윤곽으

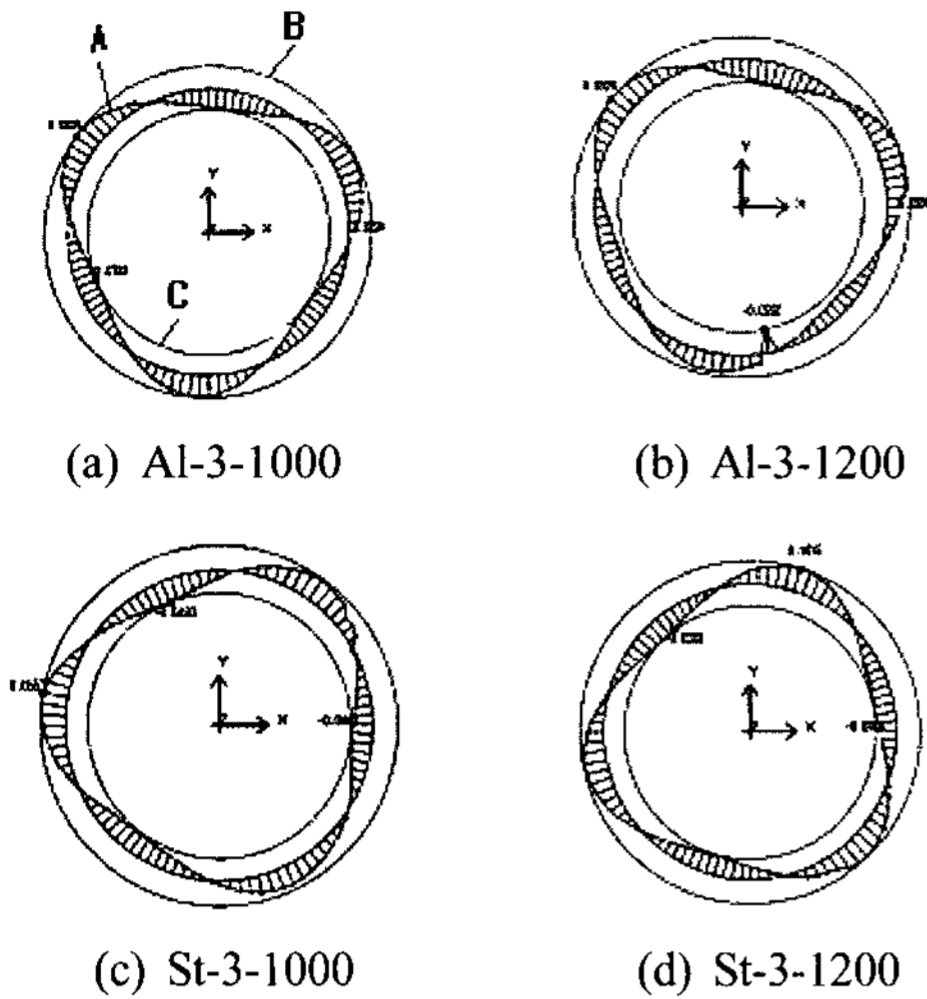


Fig. 7 Typical roundness error

로 내경의 찌그러진 형태를 볼 수 있다. Fig. 7 (a)에서 원B는 최대지름 일 때 진원이며 원C는 최소지름 일 때 진원이다. 윤곽선A는 실제 내경의 형상을 나타내는 윤곽 곡선으로 최대 원인 원B와 접하는 지점이 공작물과 조가 접촉하는 지점이며 고정력에 의해 압축되었다.

고정력 제거로 탄성 변형된 부분이 팽창 되었음을 알 수 있다. 윤곽선A와 최소원인 원B와 접하는 지점은 고정점사이의 중간에 나타나고 있으며 고정점과 반대로 가공당시보다 지름이 축소 되었음을 알 수 있다. 이와 같이 모든 시험편의 3차원 측정결과 보링된 내경은 동일한 형상으로 찌그러진 윤곽으로 나타났다.

### 3.2.1 고정력의 영향

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 링의 두께를 3mm, 6mm, 9mm로 하고 각각 고정력을 1000Kg, 1200Kg, 1500Kg로 다르게 하여 켈러를 보링하였을 때 나타나는 진원도 그래프다. 이들 그래프 모두 링의 두께는 얇을수록, 고정력은 커질수록 진원도 오차는 증대됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 외경이  $\varnothing 50$ 인 알루미늄 켈러를 보링작업 할 때 두께 및 고정력의 변화에 따른 진원도 오차관계를 나타내는 그래프다. 링의 두께를 9mm에서 6mm로 3mm얇아 질 때 고정력 1000Kg에서는 진원도 오차는 0.1111mm, 1200Kg에서는 진원도 오차는 0.1218mm, 1500Kg에서는 진원도 오차는 0.1711mm로 모두 증대함을 알 수 있으며 평균 0.135mm만큼 증대하였다. 또한 링의 두께를 6mm에서 3mm

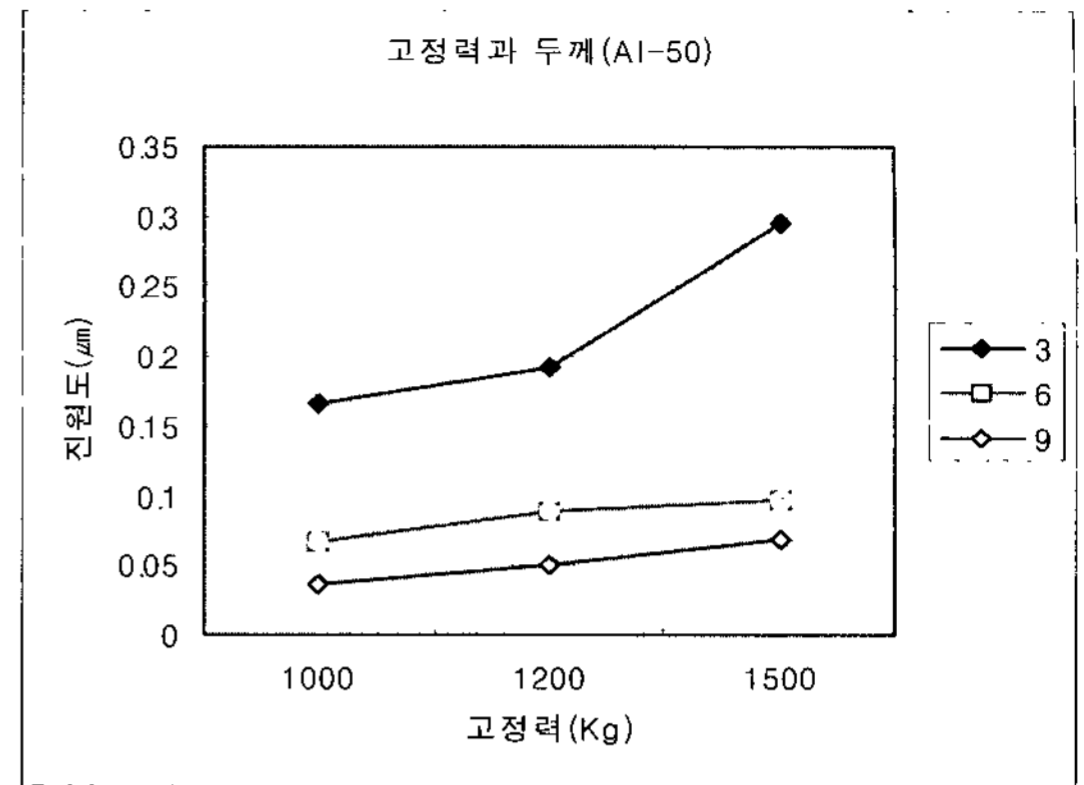


Fig. 8 Effect of chucking forces upon roundness error (Al50) ; work piece : Aluminum, O.D, 50mm

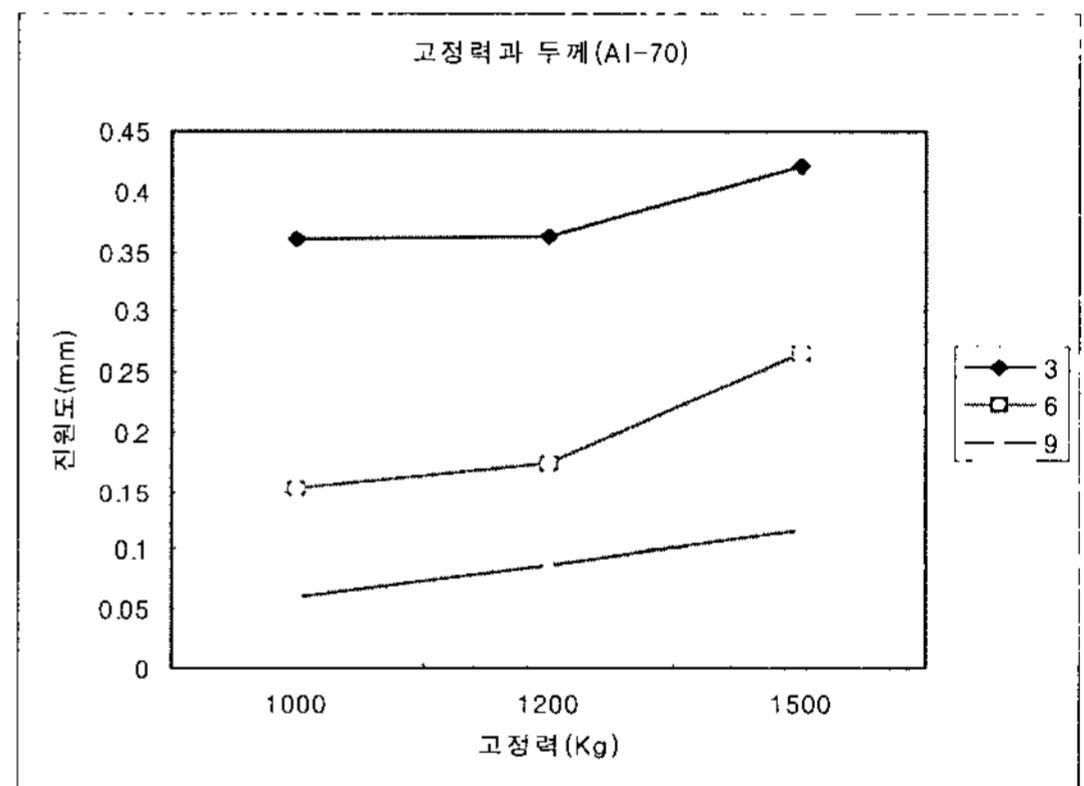


Fig. 9 Effect of chucking forces upon roundness error (Al70) ; work piece : Aluminum, O.D, 70mm

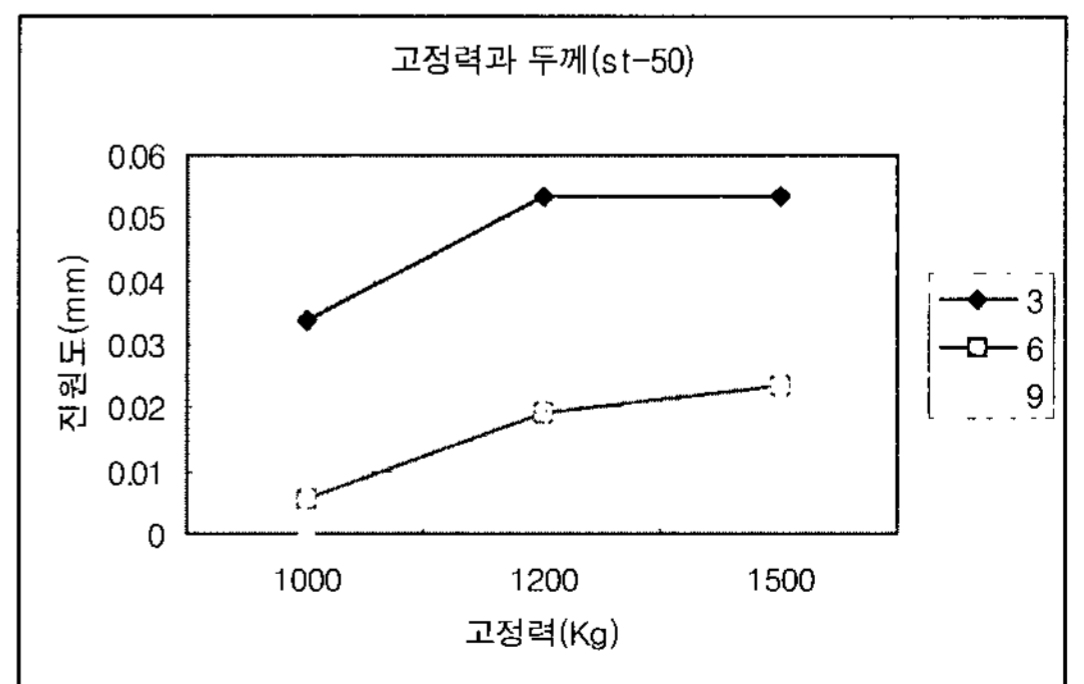


Fig. 10 Effect of chucking forces upon roundness error (St50) ; work piece : Steel, O.D, 50mm

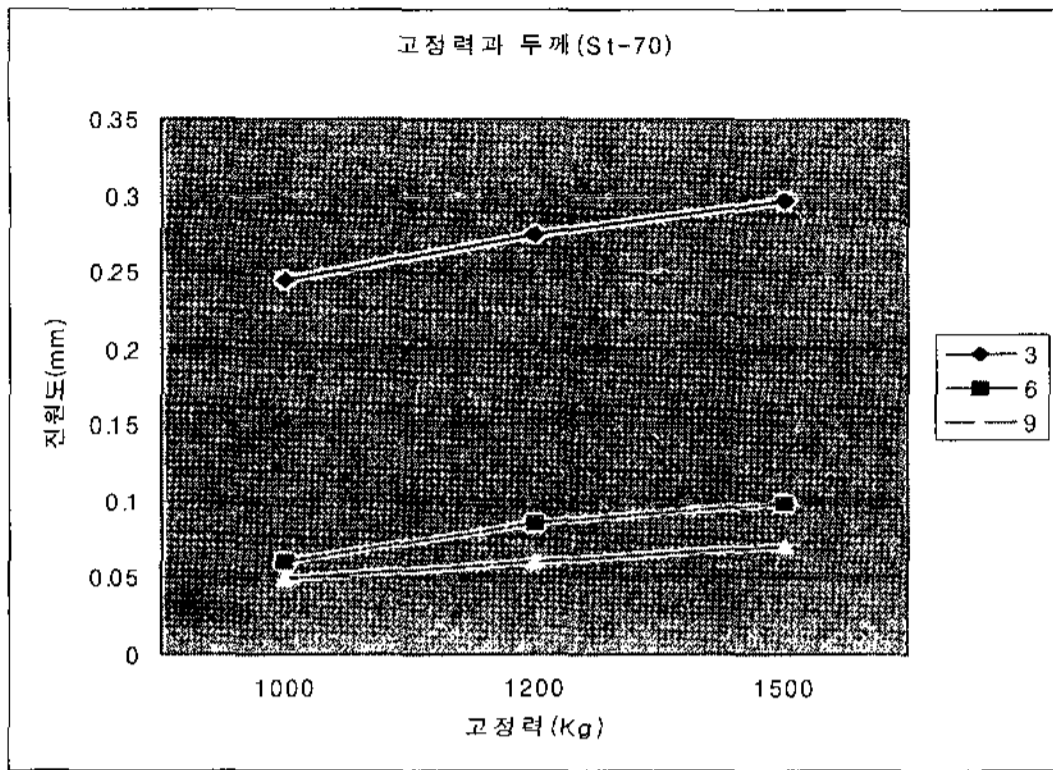


Fig. 11 Effect of chucking forces upon roundness error (St70) ; work piece : Steel, O.D, 70mm

로 링의 두께가 전보다 얇은 영역 내에서 동일한 두께인 3mm가 얇아질 때 고정력 1000Kg에서는 진원도 오차는 0.0218mm, 1200Kg에서는 진원도 오차는 0.0174mm, 1500Kg에서는 진원도 오차는 0.0551mm로 모두 증대함을 알 수 있으며 평균 0.0314mm만큼 증대하였다. 동일한 두께인 3mm로 두께가 얇아졌으나 진원도 오차는 약 4배정도 증대하였다. 즉 링의 두께가 얇을수록(내경이 커질수록) 진원도 오차는 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 오차 값의 차이는 있으나 재질이나 외경의 크기에 관계없이 비슷한 현상으로 나타나고 있다.

### 3.3.2 외경의 크기에 따른 영향

Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16, Fig. 17은

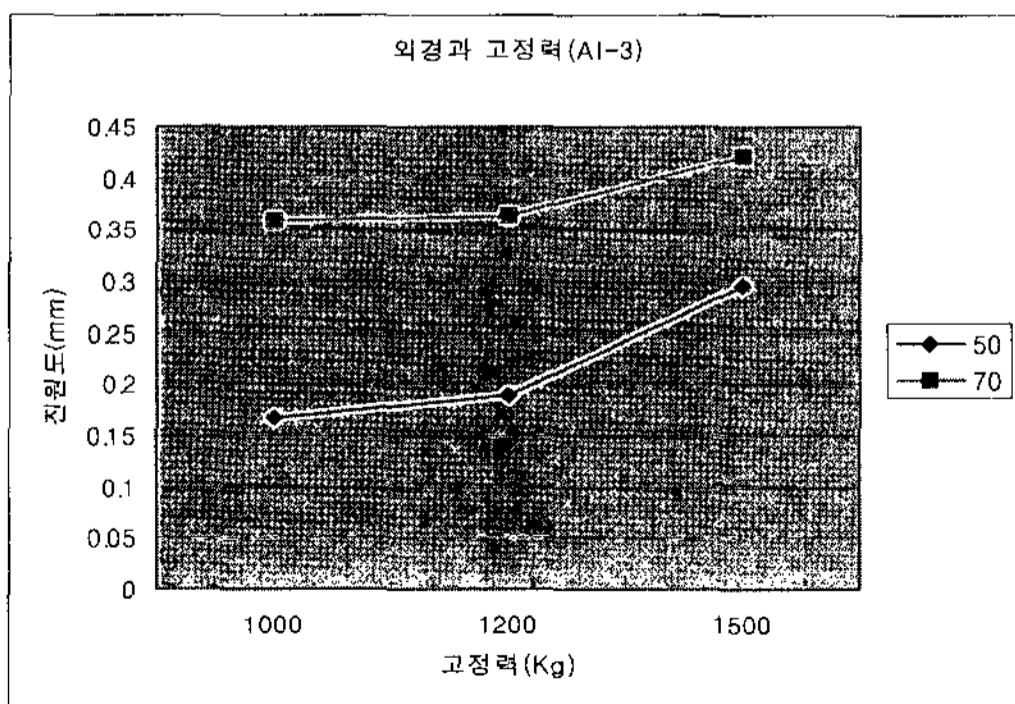


Fig. 12 Effect of chucking forces upon roundness error (Al-3) ; work piece : Aluminum, Thickness 3mm

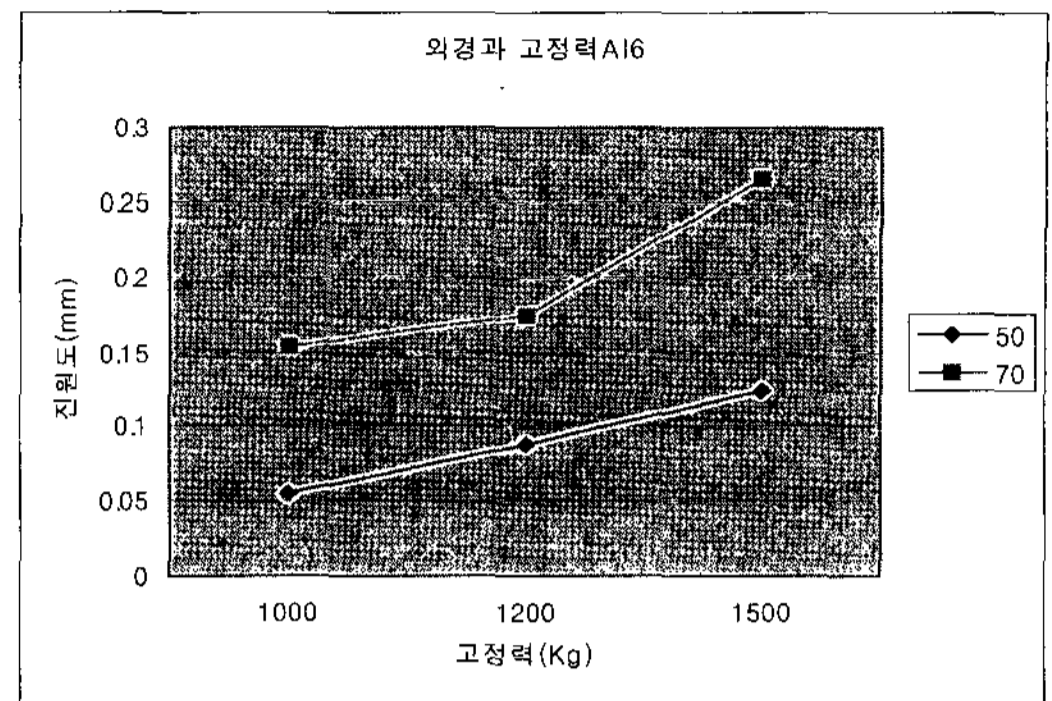


Fig. 13 Effect of chucking forces upon roundness error (Al-6) ; work piece : Aluminum, Thickness 6mm

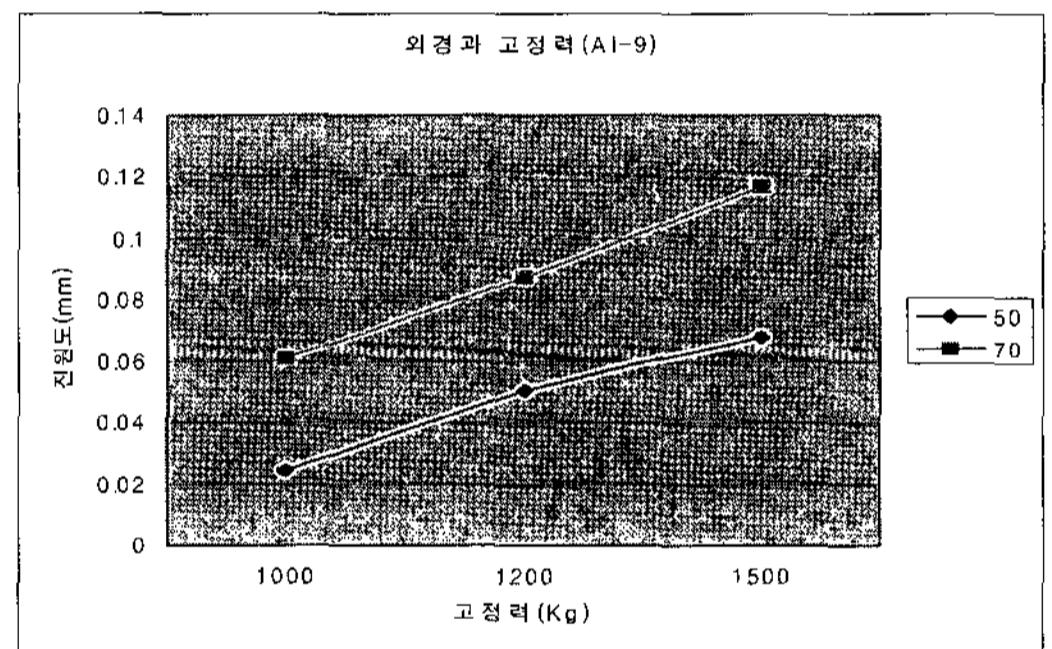


Fig. 14 Effect of chucking forces upon roundness error (Al-9) ; work piece : Aluminum, Thickness 9mm

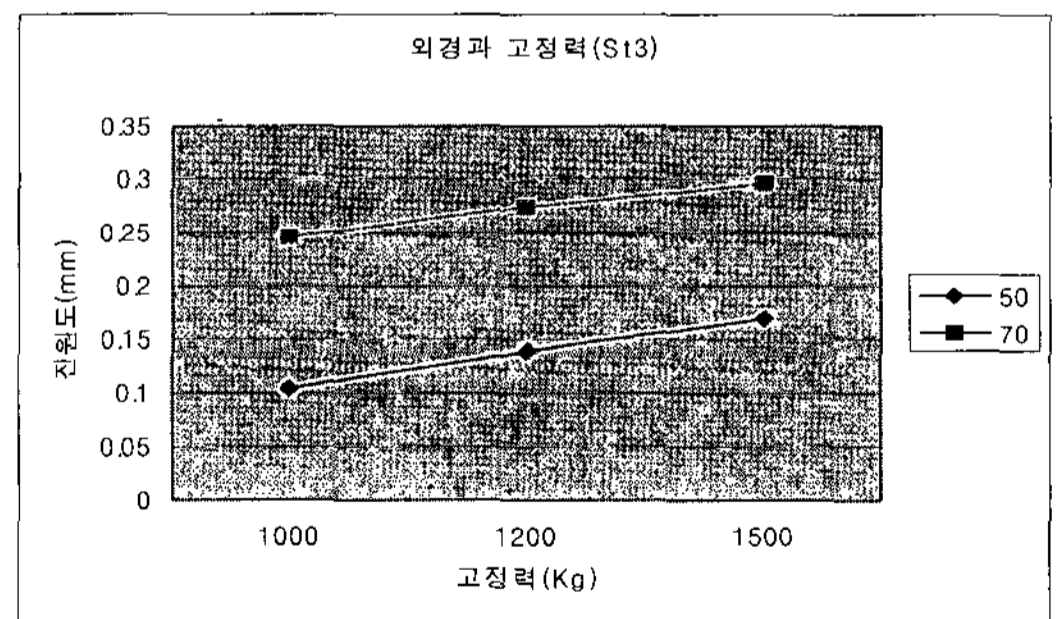


Fig. 15 Effect of chucking forces upon roundness error (St-3) ; work piece : Steel, Thickness 3mm

동일한 두께에서 외경과 고정력의 변화에 따른 진원도의 변화 상태를 나타낸 그래프로 고정력의 증가가 진원도 오차가 증가하고, 외경 Ø50일 때 보다 외경 Ø70일 때 진원도 오차는 증대 되었음을 알 수 있다. 알루미늄 링의 외경이 Ø50과



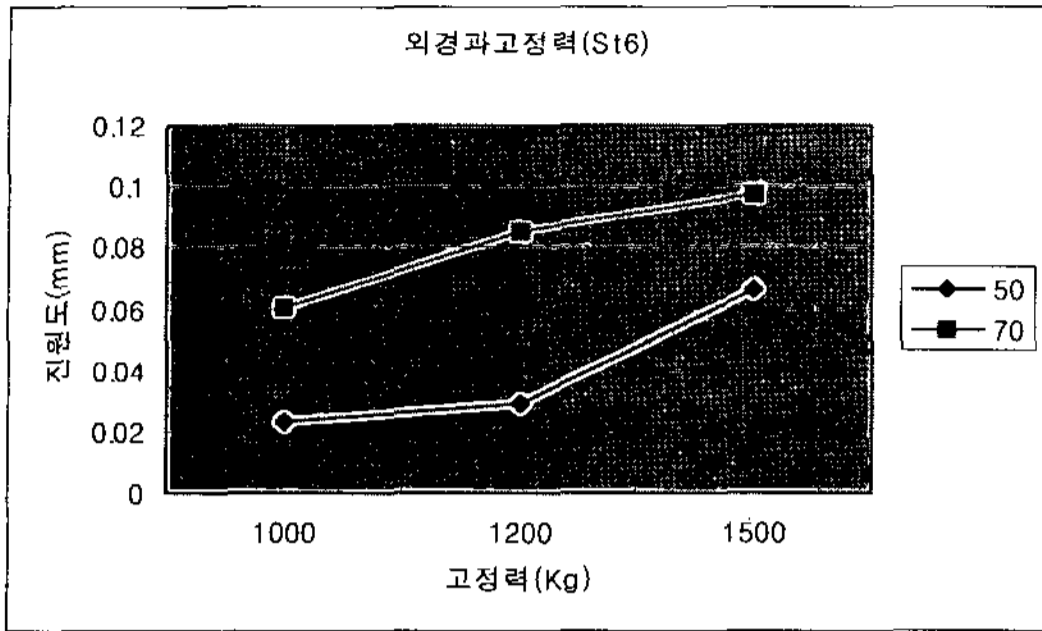


Fig. 16 Effect of chucking forces upon roundness error (St-6) ; work piece : Steel, Thickness 6mm

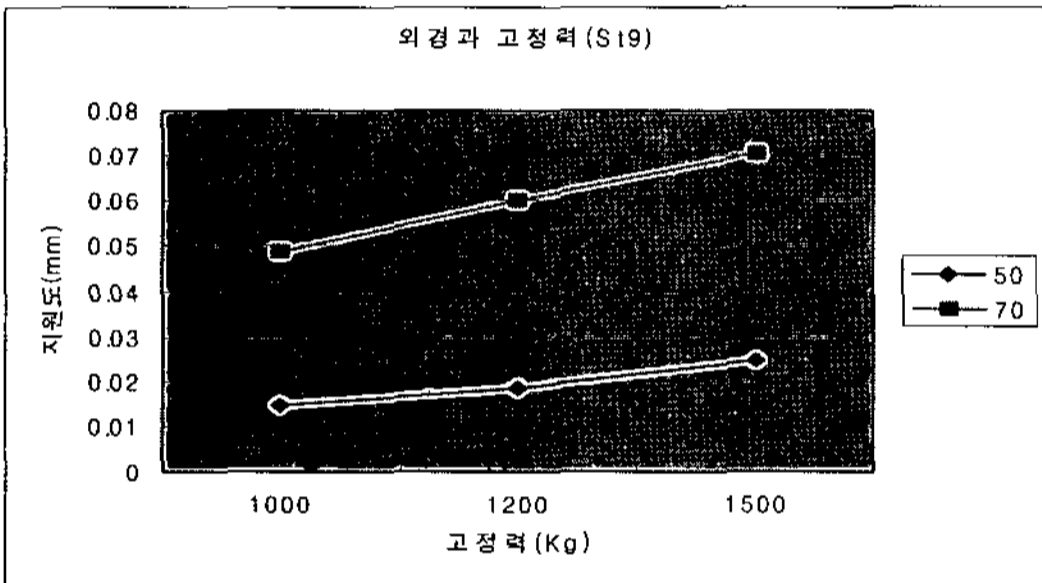


Fig. 17 Effect of chucking forces upon roundness error (St-9) ; work piece : Steel, Thickness 9mm

Ø70에서 고정력 변화에 따른 평균 진원도 오차는 링의 두께 3mm일 때는 0.164mm, 6mm일 때는 0.1086mm, 9mm일 때는 0.0406mm으로 링의 두께가 두꺼워지면 진원도 오차는 감소함을 알 수 있다. 강 링에서도 두께 3mm에서 0.137mm, 6mm에서 0.0418, 9mm에서 0.0406mm으로 링의 두께가 두꺼워지면 진원도 오차는 역시 감소하고 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 선반에서 칼러와 같은 원형 공작물을 보링가공 할 때 내경의 진원도가 척의 고정력에도 영향을 받는 현상을 실험을 통하여 분석한 것으로 다음과 같은 결과를 얻을 수

있었다.

- (1) 선반에서 보링가공 할 때 척킹력이 내경의 진원도 오차에 영향을 미치고 있으며, 고정력이 증대 할수록 오차는 증대된다.
- (2) 칼러의 두께가 얇을수록 진원도 오차가 증대한다.
- (3) 동일한 칼러의 두께일 때 외경이 클수록 진원도 오차가 증대한다.
- (4) 강보다 연질재인 알루미늄에서 오차가 크게 나타난다.
- (5) 두께가 얇은 칼러를 선반에서 보링가공 할 때 절삭 모멘트를 고려하여 이에 상응하는 최소의 고정력으로 고정하여 가공하므로써 진원도 오차를 최소화 할 수 있다.

본 연구는 동양공업전문대학 학술 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 알려드립니다.

#### 참고 문헌

- (1) Pahlitzsch, G. and Hellwing, W., 1967, "The Clamping Accuracy of Tree-Jaw Chuck," *Advances in Machine Tool Design and Research*. part 1, pp. 97~118.
- (2) Brash, M., 1958, "Eccentric Turning with a Three-Jaw-Chuck," *Machinery* 64, 10, pp. 158~159.
- (3) Schneider, F. J., Nov., 1969, "Roundness of Measurement, Part 2-The Proposed Standard," *Mechanical Engineering*, pp. 36~40.
- (4) Yoon, K. Y., 1970, "Influence of Jaw Chuck upon the Accuracy of Circular Hole in Boring Process," *J. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 10, NO. 3, pp. 137~146.
- (5) Davis, T. L., 1971, "An Analysis of Geometrical Errors in Boring," MS Thesis, Michigan Technological University, USA.
- (6) Solaia, V. and Kalajdzic, M., 1968, "Some Experiment with Three-and Four-Jaw Chucks," *Annals of CIRP*, Vol. 16. pp. 131~136.