

旋削時 척의 클램핑 條件이 眞圓度와 chatter 安定性에 미치는 影響

鄭 錫 柱

<京畿工業開放大學 機械設計學科 教授>

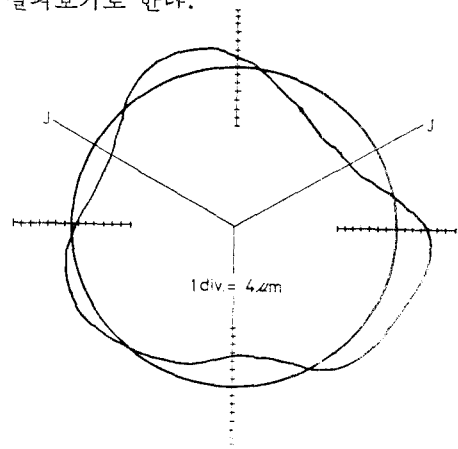
1. 머리 말

旋削작업에 있어서 圓筒形 工作物이나 디스크형 또는 링형 공작물에 있어서는 대부분 3-조오척(jaw chuck)이 사용된다. 그리고 통계적으로 旋削加工하는 공작물 중에서 약 75%는 길이/직경의 비가 3 이하라고 알려져 있다. 이들 공작물은 대개의 경우 작업상의 문제 때문에 센터를 고정시키지 않고 작업을 하는 것이 보통인데, 불행스럽게도 이들 경우에 있어서는 그림 1과 같은 形狀誤差가 두드러지게 나타나기 때문에 現場에 있어서 매우 고민스러운 문제 중의 하나로 지적되었다. 그 때문에 精密加工 문제를 다루는 사람들에 있어서는 관심 대상 중의 하나가 되었고, 그 결과 여러 因子들에 대한 加工誤差 발생기구를 파악하게 되었으며, 그 중 척의 클램핑(clamping)조건의 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있게 되었다^(1,2). 그래서 精密 旋削加工 또는 NC 선삭가공의 경우에는 加工時마다 조오를 공작물 꼭틀에 맞추어 가공한 후 클램핑하는 것이 필수적인 일로 되었는데, 이는 경험적으로도 완전접촉과 부드러운 척의 경우가 가공상태가 양호하다는 것을 판단할 수 있었기 때문이다.

한편 최근에는 여러 가지의 수학적 모델과 해석이 실시되어⁽³⁻⁶⁾, 이와 같은 경험적인 結果에 대한 근거들을 제시하였는데, 나름대로의 制約

條件들이 있어서, 범용적으로 실제 現場에서 작업자들이 응용할 수 있는 資料들은 그렇게 많은 것은 못되는 것 같다.

그러한 이유로 본 解說에서는 應用性 있는 수학적 모델 해석을 소개하고, 대표적인 실험결과와 병행하여 클램핑 접촉 문제와 가공精度 및 眞圓度, 그리고 chatter 安定性에 대한 특성을 살펴보기로 한다.



J: 조오위치, 오우버행 길이: 145mm, 스핀들속도: 450rpm, 절삭길이: 3mm, 공작물직경: 60mm
그림 1 3-조오 척에서 선삭된 가공물의 形狀오차

2. 클램핑 조건의 모델해석

클램핑 條件의 特性을 표현해 주는 여러 提案式⁽⁴⁻⁶⁾들이 있으나, 응용성을 가진 간결한 제안

☐ 解 說

식으로서는 剛性度의 변화에 입각한 解析이 지배적이다⁽⁶⁾. 따라서 여기서는 조오-공작물 幾何에 대한 강성도 변화를 표현해 주는 모델에 대해 설명한다.

2.1 對向-조오 剛性

그림 2에서 보이는 것처럼 힘 F 가 조오의 반대편에서 K 軸과 α 角을 이루는 Y 軸에 작용하는 경우를 생각해 본다. 이때 Y 축 방향으로 y 의 처짐이 생긴다면, 스프링 K 에 의해 받는 힘은 $K \cdot y \cdot \cos\alpha$ 가 될 것이다. 이를 Y 축에 대한 平衡으로 취하면

$$F = (K \cdot y \cdot \cos\alpha) \cos\alpha = K \cdot y \cdot \cos^2\alpha$$

이므로, 對向-조오 剛性은

$$S_{AG} = F/y = K \cdot \cos^2\alpha \quad (1)$$

이다. 式(1)은 작은 α 값에 대한 剛性의 변화모양을 예측하는데 사용할 수 있다. 그리고 여기서 스프링 K 는 壓縮만을 받는 경우이고, 다른 2개의 조오에 의한 영향이 없는 것으로 制限되어야 한다.

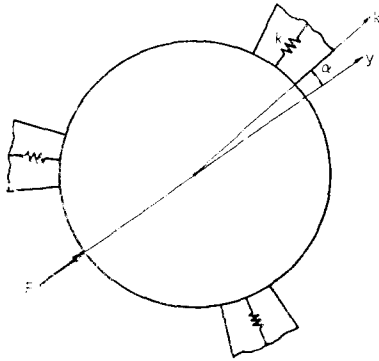


그림 2 對向-조오 剛性 모델

2.2 同向-조오 剛性

그림 3은 작용력 F 가 한 조오의 方向으로부터 나머지 2개의 조오 사이에 작용하는 경우를 보여 준다. 앞에서와 같은 방법으로

$$F = K \cdot y \cdot \cos^2(\beta/2 - \alpha) + K \cdot y \cdot \cos^2(\beta/2 + \alpha)$$

이다. 여기서 β 는 조오와 접촉하지 않는 공작물 圓弧角이다. 따라서

$$S_{AL} = F/y = K \{ \cos^2(\beta/2 - \alpha) + \cos^2(\beta/2 + \alpha) \}$$

$$= 2K \cdot \cos^2\beta/2 \cdot \cos^2\alpha + 2K \cdot \sin^2\beta/2 \cdot \sin^2\alpha \quad (2)$$

S_{AL} 은 특정방향에 대한 同向-조오 剛性으로서, 剛性의 변화모양을 예측하는데 사용할 수 있다.

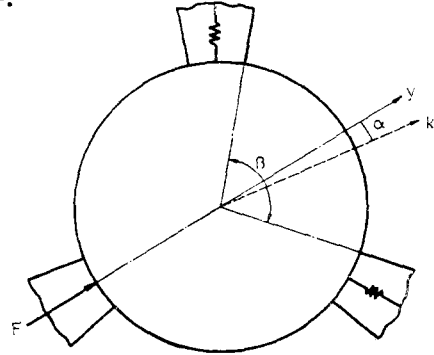


그림 3 同向-조오 剛性 모델

한편 剛性의 方向性은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{dS_{AL}}{d\alpha} &= 2K \{ \cos^2\beta/2 \cdot 2 \cdot \cos\alpha \cdot (-\sin\alpha) \\ &\quad + \sin^2\beta/2 \cdot 2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \} \\ &= 4K \{ \sin^2\beta/2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha - \cos^2\beta/2 \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha \} \\ &= -2K \sin 2\alpha \cdot \cos\beta \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{d^2S_{AL}}{d\alpha^2} = -4K \cos 2\alpha \cdot \cos\beta > 0 \quad (4)$$

($\beta > 90^\circ$ 일때)

결국, 이는 同向-조오 剛性이 두 조오의 中央에 위치했을 때 最小가 됨을 의미한다. 또한 $\alpha=0$ 일때 式(2)와 式(3)은 다음과 같이 된다.

$$S_{AL} = 2K \cdot \cos^2\beta/2 \quad (5)$$

$$\frac{dS_{AL}}{d\alpha} = 0 \quad (6)$$

즉, 式(5)는 3-조오와 4-조오에 대한 同向-조오 剛性을 예측하는데 사용할 수 있는데, 이때

표 1 對向-조오 척과 同向-조오 척 剛性의 이론값

	3-조오 척	4-조오 척
β	120°	90°
S_{AG} (max.)	K	K
S_{AL} (min.)	$K/2$	K

旋削時 척의 클램핑 條件이 眞圓度와 채터 安定性에 미치는 影響

3-조오의 경우는 $\beta=120^\circ$, 4-조오의 경우에는 $\beta=90^\circ$ 를 대입한다. 따라서 對向-조오와 同向-조오의 두 경우에 대한 이론값은 표 1과 같다. 이로서 4-조오 척의 경우가 3-조오 척의 경우보다 더 작은 剛性變化가 생김을 알 수 있다.

2.3 접촉 길이

또한 앞의 모델은, 조오-공작물 접촉면적이 증가할수록 方向性 因子를 감소시킨다는 점을 설명하는 데에 이용할 수 있다. 즉 그림 3에서 만약 식 (5)의 접촉원호 l 이 증가하고 단위 스프링 K 가 접촉원호를 통해 일정하다면, $S_{AL} = 2K \cdot \cos^2 \beta / 2$ 는 β 가 감소할수록 증가할 것이다.

따라서 l 을 증가시키면 S_{AL} 은 같이 증가하게 되고, $S_{AG} - S_{AL}$ 은 차차 감소하다가 $\beta=90^\circ$ 일때 0이 된다. 그러므로 β 가 最大값 120° 를 갖는다면 S_{AL} 은 일정한 값으로 된다.

2.4 모델의 制約條件

그러나, 이 모델을 실제의 조오-공작물계에 적용할 때에는 2가지의 중요한 제약조건을 생각해야 한다. 첫째 이 모델들은 척이 순수한 탄성을 갖는 것으로 理想化 되었다. 이는 스프링이 순수한 탄성의 압축작용만으로 제한되기 때문에 α 가 작은 범위의 값을 갖는 경우에 한정됨을 의미한다.

둘째, K 가 조오와 공작물 사이의 전체 접촉원호를 통해 일정하다고 보았다. 때문에 접촉길이 긴 경우에는 유용한 모델이 못된다고 할 수 있다.

3. 實驗資料를 통한 分析

앞의 모델에서의 결과를 여러 實驗結果(3-6)의 양상과 비교하면서 클램핑 접촉의 特性을 살펴보기로 한다.

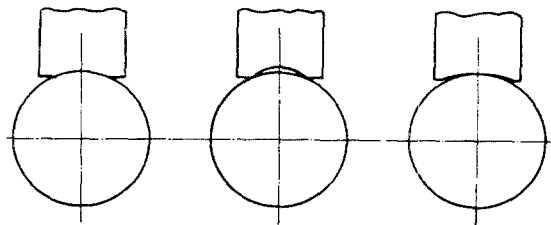
3.1 조오의 접촉상태와 眞圓度

그림 4와 같은 극단적인 경우의 접촉상태를 취해서, 이를 크게 다음과 같은 3가지 類型으

로 분류해 본다. (1) 完全접촉(full contact; FC) 여기서는 공작물의 반경과 조오面の 曲率半徑이 같다. (2) 線접촉(edge contact; EC)—여기서는 공작물 반경이 조오面の 曲率半徑보다 크다. (3) 中心線접촉(center-line contact; CC)—여기서는 곡률반경이 조오面の 곡률반경보다 작다.

이 3가지 유형에 대한 접촉상태를 그림 5와 같은 규격의 조오에 대해 실험한 결과(6)를 예로 보기로 한다. 여기서 척은 3-조오 스크롤 척이며, 공작물 직경은 60mm이고, 처킹력은 650kgf이며, 처킹길이는 50mm를 유지시켰다. 그리고 선삭은 25×25mm 생크에 P20의 드로우-어웨이 텀을 붙인 工具를 각 절삭날마다 1회씩만 사용해서 절삭하였다. 여기서 접촉상태에 따라 다음과 같은 典型的인 양상을 볼 수 있다.

(1) 完全접촉 : 그림 6에서와 같이 접촉원호의



(a) 完全접촉 (EC), (b) 선접촉 (EC), (c) 중심선접촉 (CC)
그림 4 접촉상태의 유형

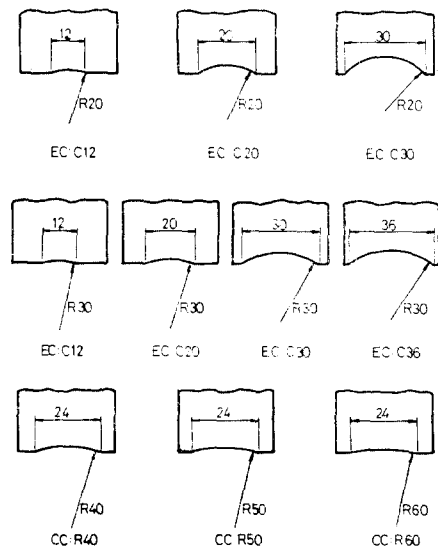


그림 5 접촉상태 구별을 위한 조오의 치수(6)

☐ 解 說

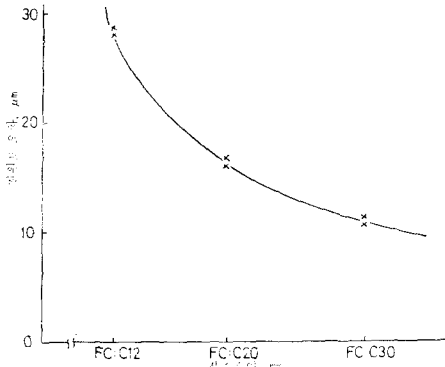


그림 6 완전접촉 상태에서의 진원도 변화

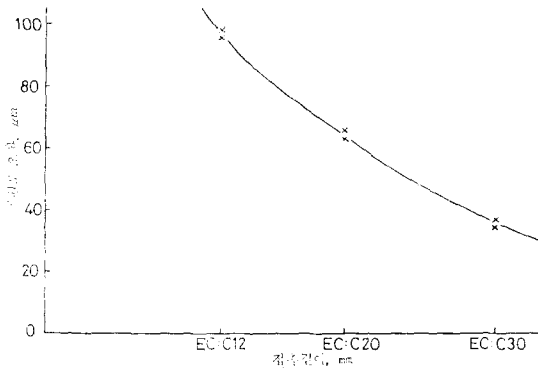


그림 7 線접촉 상태에서의 진원도 변화

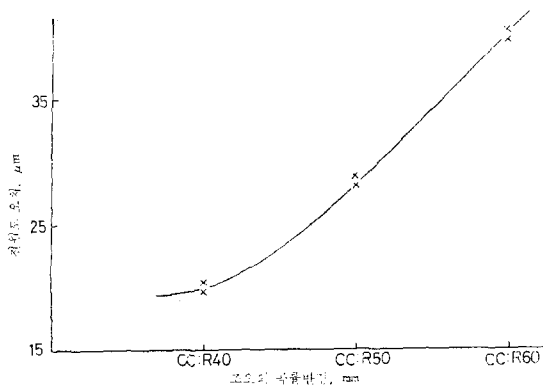


그림 8 中心線접촉 상태에서의 진원도 변화

길이 커질수록, 方向성과 眞圓도는 점차적으로 좋아진다.

(2) 線접촉 : 그림 7에서 보여주는 바와 같이 접촉원호의 길이가 커질수록 방향성과 진원도는 완전접촉의 경우보다도 더 빨리 좋아지는데, 이는 접촉원호의 길이가 공작물 반경보다 커질러

고 하는 순간에 포화상태로 되려는 양상을 보여 준다.

(3) 中心線접촉 : 그림 8에서와 같이, 조오면의 곡률반경이 커질수록 방향성과 진원도는 나빠진다. 이와 같은 양상을 클램핑 부분에서의 Herzian 접촉을 고려함으로써 쉽게 이해할 수 있다(4).

한편 이들 3가지의 접촉유형에 대한 결과를 比較하기 위해, 같은 크기로 모아서 그림 9에 함께 나타내었다. 여기서 볼 수 있는 바와 같이 完全접촉이 가장 접촉상태가 양호하고, 그 다음이 中心線접촉, 線접촉의 順으로 되고 있다. 이는 現場에서 경험적으로도 알 수 있듯이 부드러운 조오를 사용할 때 접촉상태가 좋아진다는 사실을 뒷받침해 준다.

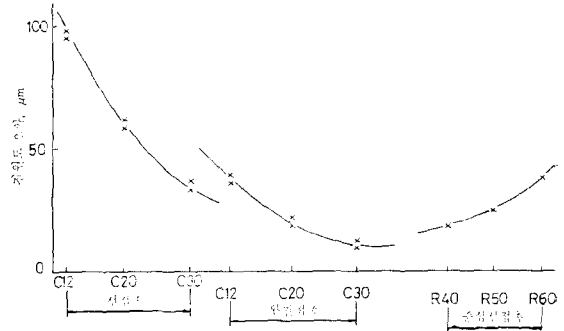


그림 9 여러 유형의 접촉상태에 대한 비교

3.2 접촉길이와 채터 安定性

다음으로는 限界절삭깊이와 채터 발생時의 주파수 응답에 대한 실험결과(5,6)를 예로 조오의 접촉길이에 대한 特性을 살펴 보기로 한다. 이 예는 영국의 MTIRA에서 제안한 규격에 따라서 테이퍼진 공작물을 절삭하는 실험인데, 그 중에서 한계절삭깊이와 조오의 접촉길이에 대한 관계를 구한 결과를 보면 그림 10과 같다. 여기서 알 수 있는 바와 같이, 조오의 접촉길이가 증가하게 되면 한계절삭깊이와 안정영역도 커짐을 볼 수 있으며, 이는 접촉길이가 공작물 반경과 거의 같을 때 임계상태에 이르고 있음을 알 수 있게 해 준다.

한편, 접촉길이를 변화시키면서 채터 발생時

▲▲▲▲▲▲▲▲▲▲▲▲▲▲▲▲ 旋削時 척의 클램핑 條件이 眞圓度와 채터 安定性에 미치는 影響 □

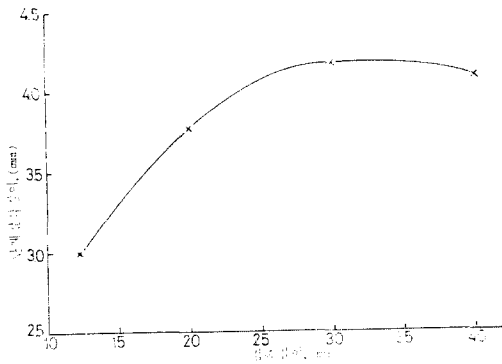


그림 10 접촉길이가 한계절삭깊이에 미치는 영향

周波數 應答 상태를 例로 살펴보면 그림 11(a, b, c)와 같다. 이 실험은 스피들 속도를 666rpm으로 고정시켜 실시한 것인데, 여기서 스피들속도의 3의 약수마다 생기는 振幅크기는 조오의 접촉길이를 증가시키에 따라 점차적으로 없어지는 매개변수적 진동특성을 보이고 있다. 즉, 이 사실은 조오의 접촉길이가 증가함에 따라서 채터 안정성이 좋아지고 있고, 이는 접촉길이가

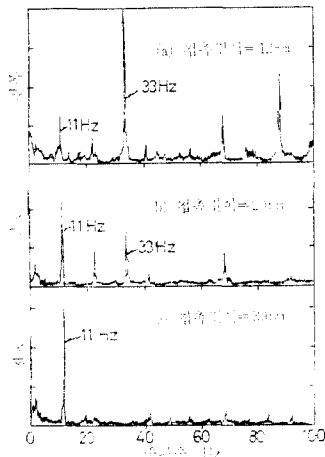


그림 11 접촉길이의 변화에 대한 주파수 응답 특성

저의 공작물 반경 크기와 같게 되는 부근에서 임계현상을 보이며, 매개변수적 振動特性的 효과도 점차 없어짐을 보이는 것이다.

4. 맺음 말

지금까지의 해설과 같이, 3-조오 척의 조오-공작물사이의 접촉상태는 加工物の 精度와 眞圓度

및 채터 安定性에 직접적인 영향을 주고 있다.

일반적으로 긴 접촉길이를 갖는 完全접촉상태는 線접촉이나 中心線접촉상태보다도 2~4배 가량의 加工精度나 眞圓度 向上을 가져오며, 채터 安定性에 있어서도 현저한 진전을 나타낸다.

따라서 선삭시에 클램핑 접촉상태는 가공물精度나 眞圓度を 해석하는 과정에서 중요한 因子로서 취급되어야 할 것이며, 구체적인 해석적 과정을 갖지 않고서 원활한 加工結果에 접근하기 위해서는 完全접촉의 상태로서 비교적 접촉길이를 工作物 半徑에 가깝도록 하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Pahlitzsch, G. and Hellwig, W., The Clamping Accuracy of Three-jaw Chucks, Proc. of 8th Int. MTDR Conference pp.97~118, 1967.
- (2) Miyao, K. and Iwaki, T., Deflection of Circular Plate Clamped in a Three-jaw Chucks, Trans. of the JSME, Vol. 35, No. 270 pp. 313~317, 1969
- (3) Kahng, C.H., Lord, H.W. and Davis, T.L., The Effect of Chucking Methods on Roundness Error in Boring Process, Trans. of the ASME, Vol. 98, No. 1, pp.233~238, 1976
- (4) Rahman, M. and Ito, Y., Machining Accuracy of a Cylindrical Workpiece Held by a Three-jaw Chuck, Bull. JSPE, Vol. 13, No. 1, pp.7~12, 1979
- (5) Doi, M., Masuko, M. and Ito, Y., Reobservation of the Chatter Vibration in Chuck Works-Effects of Jaw Number on the Appearance of a Scale-like Chatter Mark, Proc. of 10th NAMRC, p.409~416, 1982
- (6) Rahman, R., Effect of Clamping Conditions on Chatter Stability and Macining Accuracy, Annals of the CIRP, Vol. 34, No. 1, pp.339~342, 1985