

원통연삭 가공물의 3차원 형상특성에 관한 연구

A Study on the 3-D Form Characteristics of Center Ground Parts

조재일(대우 자동차), 김강(국민대 공대)
Jaeil Cho(Daewoo Motor), Kang Kim(Kookmin Univ.)

ABSTRACT

The form accuracy of parts has become an important parameter. Therefore dimensional tolerance and geometric tolerance are used in design to satisfy required quality and functions of parts. But the informations for machining conditions, which can satisfy the assigned geometric tolerance in design, are insufficient. The objectives of this research are to study the effects of the grinding parameters such as traverse speed, work speed, depth of cut, and dwell time on the after-ground workpiece shape, and to find out the major parameters among these parameters. Finally, a methodology is proposed for getting the optimal grinding condition for precision workpiece. The results are as follows; The effects of work speed and depth of cut on workpiece shape are ignorable compared to the effect of traverse speed. These is the optimal dwell time depending on the traverse speed. The optimal dwell time is decreasing when the traverse speed is increased.

Key Words : cylindrical grinding(원통연삭), geometric tolerance(형상공차), straightness(진직도), machining elasticity parameter(가공탄성계수)

1. 서론

현재 사용되고 있는 정밀기계부품 중 많은 것들이 원통형상을 하고 있으며, 이것들은 선삭이나 연삭을 통하여 만들어지고 있다. 원통형상의 부품을 규제하기 위한 형상공차로서 진원도, 원통도, 진직도가 활용되고 있으며, 이 공차들은 기계의 상태, 공작물의 상태, 가공방법 및 가공조건에 따라 그 값들이 변한다고 알려져 있다. 원통연삭시 발생하는 형상오차에 관련된 선행연구에서는 기계의 상태 및 공작물의 상태에 따른 형상변화를 주로 다루고 있다.^(1~6)

본 연구에서는 실험 1을 통하여 작업자가 용이하게 조절할 수 있는 가공변수인 공작물 이송속도, 절삭깊이, 공작물 회전속도를 변화시켜 각 조건들이 공작물의 기하학적 형상에 미치는 영향에 대하여 알아보고자 한다. 실험 2에서는 실험 1을 통하여 밝혀진 형상변화의 주된 변수인 공작물 이송속도의 영향을 알아보기 위하여 공작물 회전속도와 절삭깊이는 일

정하게 고정시켜 놓고 공작물 이송속도와 슷돌(grinding wheel)이 공작물 양끝에서 머물러 있는 시간인 드웰시간(dwell time)을 변화시켜 이 두 조건이 가공 후 공작물의 기하학적 형상에 어떠한 영향을 미치는가를 실험을 통하여 알아보고자 한다. 이 실험을 통하여 여러 가공조건중 형상공차에 주된 영향을 미치는 조건의 허용범위를 알아보고 이를 바탕으로 최적가공조건을 제시하고자 한다.

2. 이론

2.1 연삭 특성

Fig. 1은 연삭시 공작물과 슷돌사이에 작용하는 힘과 절삭량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 슷돌과 공작물이 접촉되는 순간부터 절삭이 행하여지는 것이 아니라 어느 정도의 힘이 작용하여야 실제절삭이 일어난다는 것을 알 수 있다.

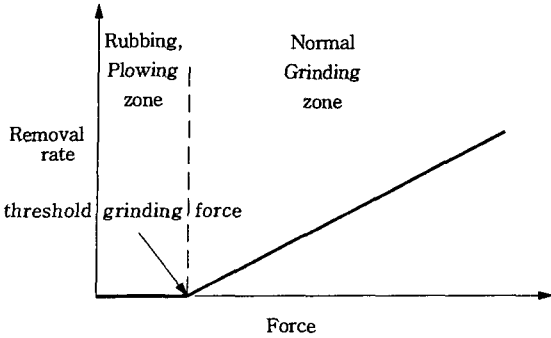


Fig. 1 Effect of normal grinding force on the metal removal rate

여기서 힘은 법선방향 연삭력을 의미하며, 이 값은 기하학적인 절입깊이에 비례한다고 볼 수 있다.^(7,8) 그러므로 연삭후 실제 절삭된 깊이는 주어진 절삭깊이에 비해 작다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 가공탄성계수(machining elasticity parameter) k 에 의해 설명될 수 있다. k 는 1보다 작은 값을 갖는 임의상수로서, 가공시 기계 및 공작물의 탄성변형에 의해 발생하는 현상을 나타내는 값이다. 이는 정확히 규명되어 있지 않으나 각 가공조건에 따라 다른 것으로 알려져있다.

2.2 원통연삭

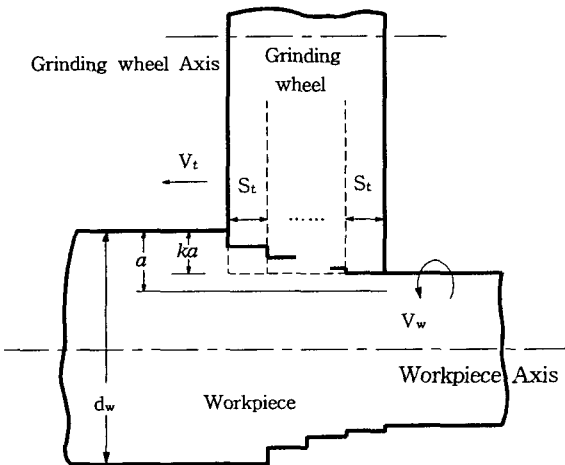


Fig. 2 External cylindrical traverse grinding showing exaggerated wheel surface due to machining elasticity

공작물에 이송을 주는 트래버스원통연삭은 슷들의 회전운동과 공작물의 회전운동 및 축방향 직선이송 운동에 의해서 연삭이 행하여 진다. Fig. 2에서는 공작물이송에 따른 공작물 1회전당 슷들의 이송거리 및 가공탄성 현상을 나타내고 있다.(공작물 이송속도: V_t , 공작물 원주속도: V_w , 공작물직경: d_w) 공작물 1회전당 슷들의 이송거리 S_t 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_t = \frac{\pi d_w V_t}{V_w} \quad [\text{mm/rev}] \quad (1)$$

공작물 1회 이송시 기하학적인 절입깊이를 a 라고 할 경우, Fig. 2에서 알 수 있듯이 슷들면 전체가 균일하게 공작물 표면을 a 만큼 연삭하는 것이 아니라 공작물의 회전에 따라 새로운 접촉을 이루는 슷들의 원주면에 의하여 점진적인 연삭이 일어난다.

공작물 1회전시, 이송방향의 첫 번째 가상의 슷들이 연삭을 행한후 다음의 가상의 슷들이 연삭을 행하며, 계속해서 마지막 가상의 슷들이 연삭을 행함에 따라 축방향 이송에 의한 가공이 수행된다고 가정할 수 있다. 이는 슷들과 공작물계의 국부적인 탄성변형에 의해 발생하는 것으로 해석되고 있다. 그러므로 공작물 이송이 멈추는 가공양단에서는 슷들 원주면의 모든 점들이 공작물 표면과 완전한 접촉을 이루지 못하므로 원하는 양만큼 연삭되지 않는다. 이러한 현상을 최소화하기 위하여 연삭중에 가공부위 양단에서 슷들을 잠시 머물게 하는 방법(dwelling)으로 가공하는 것이 일반적이다.

3. 실험

3.1. 실험장치

본 실험에 사용된 원통연삭기는 MIYAMOTO사의 GAU25-50L기종이며 양센터지지 방법을 이용하여 작업하였다. 형상측정은 영국 Rank-Talyor Hobson사의 Talyrond 252를 사용하였다. 시편은 기계부품으로 많이 사용되는 기계구조용 탄소강 SM45C를 고주파열처리하여 사용하였다. 시편은 지름 30mm, 길이 200mm이며, 양센터구멍은 $\varnothing 5\text{mm}$ 센터드릴로 구멍깊이를 10mm로 하여 가공하였다.

실험1은 가공변수에 따른 기하학적 형상변화 및 특성을 알아보기 위한 것으로서 공작물 원주속도, 공작물 이송속도, 절삭깊이를 변화시켜 실험하였다.

실험2는 공작물 이송속도와 dwell시간이 공작물형상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 가공변수 중 공작물 원주속도, 슷들회전속도, 스파크아웃 횟수, 절삭깊이는 일정하게 고정시켜 놓고 공작물 이송속도

와 드웰시간을 변화시켜 실험하였다.

Table 1. Experiment conditions (Experiment 1)

고정조건	설정값	
grinding wheel	WA60L7V30	
grinding wheel speed	1740	r.p.m.
dwell time	2	second
spark out times	3	회
변화조건	설정값	
traverse speed	0.130, 0.714, 1.630	m/min
work surface speed	6.16, 14.6, 24.5, 33.46	m/min
depth of cut (nm/path×No. of path)	0.0125×8, 0.0250×4 0.0375×3, 0.0500×2	mm/회

Table 2. Experiment conditions (Experiment 2)

고정조건	설정값	
grinding wheel	WA60L7V30	
grinding wheel speed	1740	r.p.m.
work surface speed	14.6	m/min
spark out times	3	회
depth of cut	0.0125	mm
변화조건	설정값	
traverse speed	0.130, 0.714, 1.630	m/min
dwell time	2, 4, 6	second

4. 시뮬레이션

4.1. 모델링

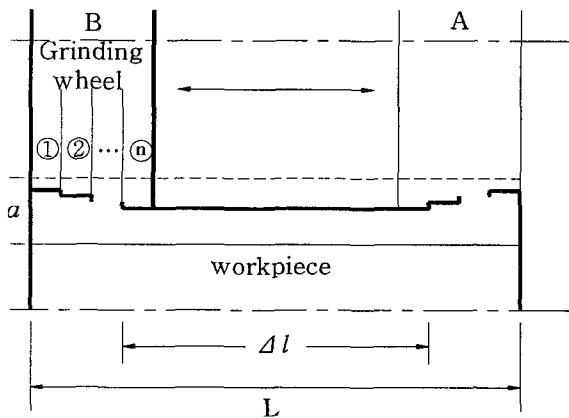


Fig. 4 Schematic illustration of grinding wheel deflection

시편의 가공전 형상이 회전축에 대하여 대칭인 형상이므로 가공후 형상도 축대칭이 된다고 볼 수 있다. 그러므로 시편의 축을 포함하는 임의의 단면의 윤곽을 나타내는 진직도를 시뮬레이션(simulation)함으로써 충분한 정보를 얻을 수 있다.

실제 원통연삭가공시 공작물 1회전시 원주상의 임의의 점은 슷돌과 1회 접촉하게 되며, 슷돌과 접촉하는 점들은 축방향 위치가 다르므로, 기하학적인 절입깊이가 a 일때 각각 서로 다른 실제절삭깊이를 갖는다. 그러므로 시뮬레이션을 위하여 슷돌과 공작물은 공작물의 1회전시 이송량에 해당되는 값 S_t 의 두께를 갖는 가상의 슷돌 및 공작물이 각각 n 개, m 개가 축방향으로 적층되어 있으며, 공작물이 매 1회전시 마다 S_t 만큼씩 단속적으로 이송운동하는 것으로 가정한다. 그러므로

$$t = \frac{1}{N_w} \times l \quad (0 \leq l \leq m-n) \quad (2)$$

인 순간, N_w 는 1분 동안의 공작물 회전수, 가상의 슷돌 S_i 와 접하는 가상의 공작물을 W_j 라고 하면

$$j = n + l - (i-1) \quad (3)$$

가 되며 이 순간의 실제절삭깊이 $d_{j,l}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{j,l} = a_{j,l} - a_{j,l+1} = k(a_{j,l}) \quad (4)$$

이때 $a_{j,l}$ 은 이 순간의 기하학적인 절입깊이를 나타내며 $a_{j,l+1}$ 은 이 순간의 연삭직후에 남는 양을 의미한다. 그러므로

$$\begin{aligned} a_{j,l+1} &= (1-k)(a_{j,l}) \\ &= (1-k)[(1-k)(a_{j,l-1})] \\ &\vdots \\ &= (1-k)^i(a_{j,l-(i-1)}) \end{aligned} \quad (5)$$

이다. $a_{j,l-(i-1)}$ 은 초기에 주어진 기하학적인 절입깊이 a 와 같다.

그러므로 가공탄성계수 k 값을 알면, 가공중의 형상 및 가공후 형상을 시뮬레이션을 통하여 파악할 수 있다. 실험상의 조건에 따른 공작물 1회전에 대한 이송거리 S_t 는 식(1)로 구하였다.

4.2. 가공탄성계수

앞에서 언급한 바와 같이 슷돌과 공작물계에서는 가공중에 접촉점에서 국부적인 탄성변형이 발생된다. Fig. 4에서와 같이 a 라는 절입깊이를 주었을 때 슷돌이 A위치에서 B위치로 이송되었다면 실제 깎이

는 양은 a 보다 작다. 이를 임의상수 k 를 사용하여 ka 로 나타낼 수 있다. 여기서 임의상수 k 를 가공탄성계수(machining elasticity parameter)라고 한다. k 는 실험에 의해 구할 수 있으며 1회이송시 일정한 값을 갖는다고 가정한다.

k 를 구하기 위해 a_i 라는 절삭깊이를 준 후 슷들이 심압대에서 주축대까지 이송되었을때 슷돌면이 완전히 통과한 중앙부위(Δl)의 직경을 측정하여 이송전 측정된 지름과의 차이를 구해 실제 연삭된 양을 구한다. 슷돌폭을 W_g 라하면 공작물 1회 이송시 Δl 을 지나는 S_t 의 갯수 n 은 W_g/S_t 로 구할수 있다. 이때 연삭되지 않고 남아있는 양을 a_{i+1} 라 하면 식(6)을 구할 수 있다.

$$a_{i+1} = (1-k)^n a_i \quad (i=1,2,\dots) \quad (6)$$

여기서

$$k = 1 - \left(\frac{a_{i+1}}{a_i}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

와 같이 구할 수 있다. k 는 공작물이 이송을 마치는 각각의 경우에 대하여 구해진다. 본 실험에는 절삭깊이를 0.050mm로 하여 매 1회 이송 마다의 k 를 구하여 시뮬레이션에 적용시켰다. 절삭깊이는 심압대 쪽에서 1번만 주었으며 이후는 이송만 행하였다. Table 3에 이러한 방법으로 구하여진 가공탄성계수 k 를 나타내었다.

Table 3. Machining elasticity parameter(experiment)

traverse speed(V_t) (m/min)	path	diameter (mm)		k
		before	after	
0.130	tail→head	29.675	29.582	0.0574
	head→tail	29.582	29.580	0.028
	tail→head	29.580	29.580	0.01
	head→tail	29.580	29.580	0.01
0.714	tail→head	29.746	29.664	0.193
	head→tail	29.664	29.653	0.114
	tail→head	29.653	29.649	0.108
	head→tail	29.649	29.648	0.05
1.630	tail→head	29.729	29.668	0.2097
	head→tail	29.668	29.652	0.1236
	tail→head	29.652	29.647	0.0594
	head→tail	29.647	29.642	0.0781

5. 결과 및 고찰

5.1. 실험 1

실험결과 가공조건 중 공작물 이송속도가 절삭깊이와 공작물 원주속도에 비해 기하학적 형상에 미치는 영향이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 공작물 이송속도에 대한 최적가공조건을 제시하여 가공 후 형상을 최적화시킬 수 있을 것이다.

5.2. 실험 2

다른 조건이 일정할 때 공작물 이송속도는 진직도에 큰 영향을 미치나 드웰시간의 조절로 그 값을 1 μ m 이내로 줄일 수 있었다. 일반적으로 드웰시간이 길수록 슷돌이 공작물 양단에서 공작물표면과 접촉하는 시간이 길어진다. 슷돌이 공작물 표면에 닿을 때 슷돌의 입자에 의해 절삭이 행하여지는 것이기 때문에 표면에 슷돌이 오래 남아있으면 그만큼 절삭량도 증가한다.

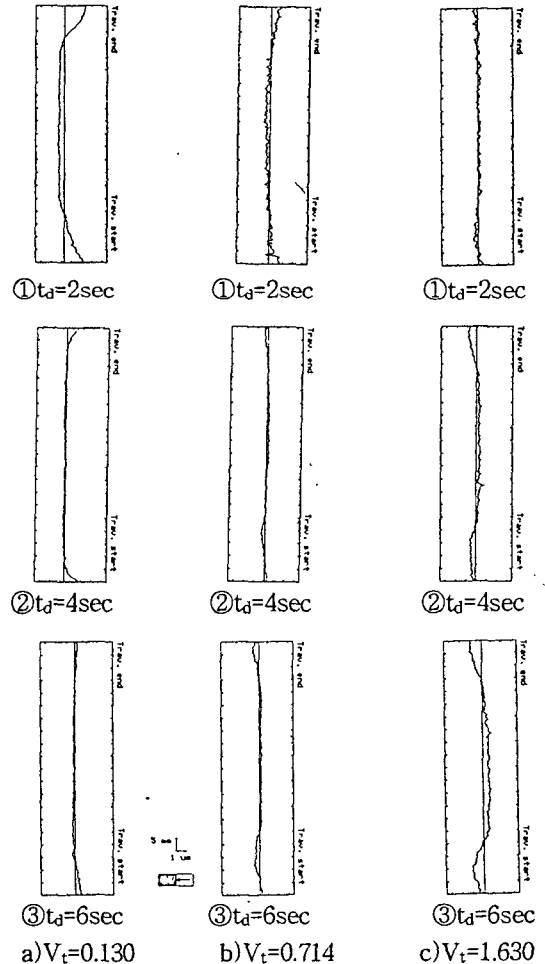


Fig. 5 Straightness profile (Experiment)

(t_d =dwell time, V_t =traverse speed m/min)

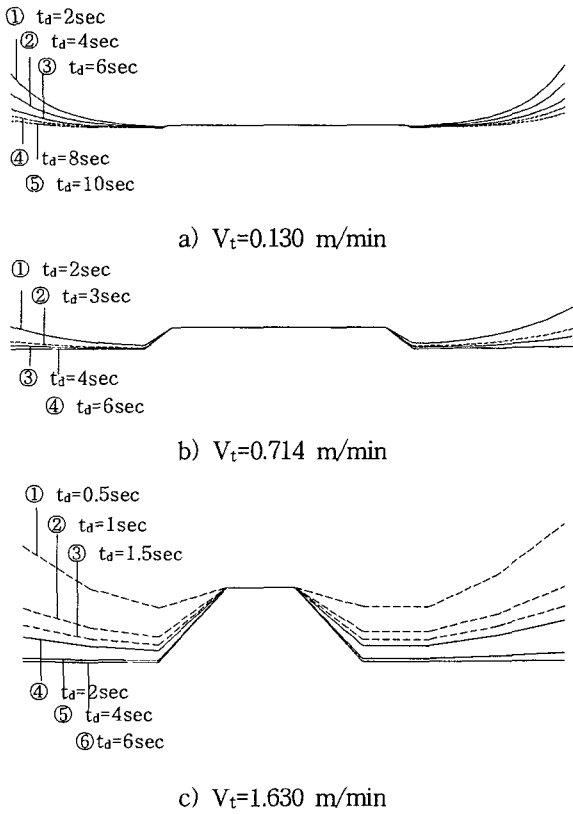


Fig. 6 Straightness profile (Simulation)
 (t_d =dwell time, V_t =traverse speed)

Fig. 5~Fig. 6에서 공작물 이송속도 변화에 따라 최적드웰시간은 각각 다르나 일반적으로 공작물 이송속도가 증가할 수록 감소하고 있음을 알 수 있다. 실험결과와 시뮬레이션결과를 비교해 보면 공작물 이송속도가 0.613m/min이고 드웰시간이 2sec인 경우를 제외하고는 $\pm 5\%$ 이내의 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 5~Fig. 6에서 진적도는 실험값과 시뮬레이션값이 동일한 추세로 변화하고 있으나 정확히 일치하지 않는다. 그 이유는 다음과 같은 원인에서 기인한 것으로 사료된다.

- 시편의 형상이 정확한 원통형상이 아니다.
- 시뮬레이션시 스톱폭 및 공작물길이는 항상 S_t 의 정수배로 가정한다.
- 최초로 절입깊이를 주는 구간의 모델링시 시간에 대한 절삭깊이의 변화는 무시한다.
- 이송속도가 고속일 때 가공양단에서 관성에 의한 영향이 발생한다.

6. 결론

원통연삭시 공작물의 형상에 미치는 가공변수의 영향을 파악하기 위하여, 이를 위한 실험 및 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 공작물 원주속도 및 절삭깊이는 공작물 이송속도에 비하여 가공후 형상에 미치는 영향이 작다.
- 공작물 이송속도에 따른 최적드웰시간이 존재한다.
- 최적드웰시간은 이송속도가 증가함에 따라 감소된다.

참고문헌

1. H. Kato and Y. Nakano, "Transfer of Roundness Error from Center and Center Hole to Workpiece in Cylindrical Grinding and its Control, Annals of the CIRP, Vol.34/1, pp.287~290, 1985
2. H. Kato and Y. Nakano, "Effect of Alignment Errors of Centers and Center Holes upon Rotation Accuracy of Workpieces, Bull. Japan Soc. of Precision Engineering, Vol.20, No.3, pp.171~176, Sep. 1986
3. J. I. Willmore, "Plunge Grinding and the Accuracy of the Workpiece Geometry," Proc. 6th Int' l Mach. Tool Des. and Res. Conf., pp.543~555, 1965
4. S. B. Rao and S. M. Mu, "Compensatory Control of Roundness Error in Cylindrical Chuck Grinding," Jour. of Engineering for Industry, Vol. 104/23, pp.23~28, Feb. 1982
5. A. Kyusojin, K. Ogawa and A. Toyama, "Comparision of Cone center and Ball center for Roundness in Cylindrical Grinding," Precision Engineering, Vol.8, No.4, pp.197~202, Oct. 1986
6. A. Kyusojin and Ryoji Todaka, "Development of a Precise Cylindrical Grinding by Using Steel Balls," Bull. Japan Soc. of Precision Engineering, Vol.22, No.3, pp.190~194, Sep. 1988
7. 서남섭, 금속절삭이론, 동명사, pp.363~367, 1991
8. Thomas J. Drozda, Charles Wick, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, fourth Edition, volume 1-Machining, SME, pp.11.109~11.118, 1983