

연삭조건이 원통연삭 공작물 형상에 미치는 영향

조재일*, 김강**

Effects of the Grinding Conditions on the Shape of Center Ground Part

J. I. Cho*, K. Kim**

ABSTRACT

The form accuracy of parts has become an important parameter. Therefore, dimensional tolerance and geometric tolerance are used in the design stage to satisfy required quality and functions of parts. But the informations on the 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 them. The results are as follows: The effects of work speed and depth of cut on workpiece shape are negligible compared with the effect of traverse speed. There is an optimal dwell time depending on the traverse speed. The optimal dwell time is decreasing as the traverse speed is increased.

Key Words : Cylindrical grinding(원통연삭), Machining elasticity parameter(가공탄성계수), Straightness(진직도), Traverse speed(공작물 이송속도), Work speed(공작물 회전속도), Depth of cut(절삭깊이), Dwell time(드웰시간)

1. 서 론

현재 사용되고 있는 정밀기계부품 중 많은 종류의 부품들은 원통형상을 하고 있으며, 이것들은 일반적으로 1차 선삭가공 후 2차 연삭가공에 의하여 제작된다. 원통형상의 부품을 규정하기 위한 형상공차로는 진원도, 원통도, 진직도가 활용되고 있으며, 이 공차들은 기계의 상태, 공

작물 및 공구의 종류 및 상태, 가공방법 및 가공조건에 따라 그 값들이 변한다고 알려져 있다. 그러나, 원통연삭시 발생하는 형상오차에 관련된 선행연구에서는 공작물의 센터지지 방법 및 기계의 상태에 따른 형상변화를 주로 다루어 왔으며, 대표적인 연구 내용은 다음과 같다.

Kato와 Nakano는 원통연삭시 양 센터 구멍의 크기와 형상 및 공작물 센터와 센터구멍의 부정확한 얼라인먼트

* 대우자동차(주) 엔진구동 생산기술팀
 ** 국민대학교 기계자동차공학부

(alignment)가 공작물에 미치는 영향에 대한 연구 결과를 발표하였으며,^(1,2) Willmore는 인피드율(infeed rate)이 진원도, 진직도 및 표면조도에 미치는 영향을 확인하였다.⁽³⁾ 또한, Rao와 Mu는 공작물 회전축과 연삭숫돌 사이의 흔들림 오차가 공작물의 진원도에 미치는 영향을 반으로 줄일 수 있는 방법을 제안하였으며,⁽⁴⁾ Kyusojin은 볼 센터(ball center)가 공작물의 회전축에 미치는 특성을 일반적인 콘 센터(cone center)와 비교하여 설명하였으며, 볼 센터의 고정 방법이 공작물의 형상정밀도에 미치는 영향에 대한 연구도 수행하였다.^(5,6)

이와 같이, 작업자가 용이하게 조절할 수 있는 연삭조건이 공작물의 형상에 미치는 영향에 대한 연구는 다소 미흡한 실정이다. 그러므로, 본 논문에서는 공작물 이송속도(traverse speed), 절삭깊이(depth of cut), 공작물 회전속도(work speed) 및 드웰시간(dwell time)이 가공 후 공작물의 기하학적 형상에 미치는 영향을 알아보 고자 한다.

2. 원통 연삭

Fig. 1은 연삭가공 중에 공작물과 숫돌사이에 작용하는 힘과 연삭량과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 숫돌과 공작물이 접촉되는 순간부터 연삭이 행하여지는 것이 아니라, 숫돌과 공작물사이에서 어느 정도의 힘이 작용하여야만 실질적인 공작물 제거가 발생한다는 것을 알 수 있다. 여기서 힘은 법선 방향 연삭력을 의미하며, 이 값은 기하학적인 절삭깊이에 비례한다고 볼 수 있다.^(7,8) 그러므로, 연삭 후 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 상수로서,

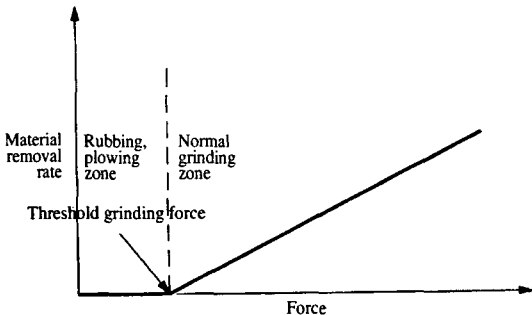


Fig. 1 Effect of normal grinding force on the material removal rate

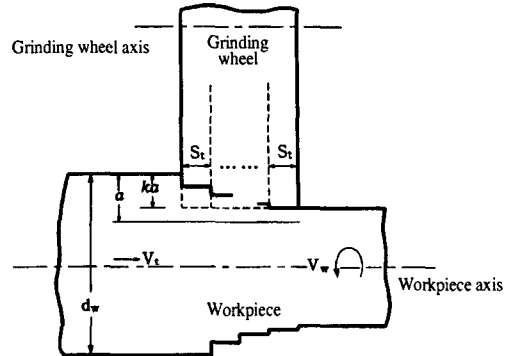


Fig. 2 External cylindrical traverse grinding showing exaggerated wheel surface due to machining elasticity

가공시 기계 및 공작물의 탄성변형에 의해 발생하는 현상을 나타내는 값이다. 이런 현상은 정확히 규명되어 있지는 않으나 각 연삭조건에 따라 다른 것으로 알려져 있다.

공작물에 이송을 주는 원통연삭은 숫돌의 회전운동과 공작물의 회전운동 및 축방향 직선이송운동에 의하여 가공이 수행된다. Fig. 2에서는 공작물이송에 따른 공작물 1회전당 숫돌의 이송거리 및 가공탄성 현상을 나타내고 있다. Fig. 2에서 공작물 이송속도를 V_t , 공작물 원주속도를 V_w , 공작물직경을 d_w 라고 하면 공작물 1회전당 축방향 이송거리 S_t 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_t = \frac{\pi d_w V_t}{V_w} \quad (1)$$

숫돌의 이송거리 S_t 는 공작물 이송속도에 비례하고 공작물 원주속도에 반비례한다. 공작물 1회 이송시 기하학적인 절삭깊이를 a 라고 할 경우, Fig. 2에서 알 수 있듯이 숫돌면 전체가 균일하게 공작물 표면을 a 만큼 연삭하는 것이 아니라 공작물의 회전에 따라 새로운 접촉을 이루는 숫돌의 원주면에 의하여 점진적인 연삭이 일어난다.

그러므로, 하나의 연삭숫돌을 두께가 S_t 인 상대적으로 얇은 다수의 가상의 숫돌이 축방향으로 적층되어 있다고 가정할 수 있다. 이 경우, 공작물 1회전시 이송방향의 첫 번째 가상의 숫돌이 연삭을 행한 후, 다음의 가상의 숫돌이 연삭을 행하며, 계속해서 마지막 가상의 숫돌이 연삭을 행함에 따라 축방향 이송에 의한 가공이 수행된다고 생각할 수 있다. 그러므로, 공작물 이송이 멈추는 가공부위 양단에서는 숫돌원주면의 모든 점들이 공작물 표면과 완전한 접촉을 이루지 못하므로 원하는 양만큼 연삭되지 않는다. 이러한 현상을 최소화하기 위하여 연삭 중에 가

공부위 양단에서 슷들을 잠시 머물게 하는 방법(dwelling)으로 가공하는 것이 일반적이다. 이와 같은 가공의 슷들 및 이 슷들을 이용한 연삭가공을 가정함으로써, 슷들과 공작물계의 국부적인 탄성변형을 해석할 수 있는 모델을 제안할 수 있다.

스들의 회전속도는 일정하므로 1회전당 이송거리 S_g 가 작을수록 슷들의 지립이 공작물 표면과 많은 접촉을 하게 된다. 일반적으로 공작물 이송속도는 공작물 1회전당 이송량이 슷들폭의 2/3 ~ 3/4, 다듬질연삭의 경우는 1/4 ~ 1/2 정도가 되도록 작업하고 있다.⁽⁹⁾

3. 실험

본 실험에 사용된 원통연삭기는 MIYAMOTO사의 GAU25-50L기종이다. 시편은 기계부품으로 많이 사용되는 기계구조용 탄소강 SM45C를 고주파 열처리하여 사용하였다. 시편은 지름 30mm, 길이 200mm이며, 양센터구멍은 $\phi 3$ mm 센터드릴(center drill)을 사용하여 구멍깊이를 5mm로 열처리 전에 가공하였다. 센터구멍은 열처리 후 변형이 발생하므로 열처리 후 $\phi 5$ mm 센터드릴로 구멍깊이를 10mm로 하여 재가공하였다.

실험 중에 공작물은, 원통연삭시 보편적으로 사용되는, 돌리개를 이용한 양센터지지 방법으로 고정되었으며, 실제 연삭은 공작물 양단에서 각각 40mm씩을 제외한 중앙부의 120mm 구간에 대하여 수행하였다. 절삭깊이는 심압대측에서만 주었으며 스파크아웃은 3회씩 수행하였다. 공작물의 형상측정은 Rank-Taylor Hobson사의 Talyrond 250을 사용하였으며, 진원도 및 원통도는 공작물을 레벨링(leveling)한 후에 공작물이 주축대에 고정되었던 부분을 기준으로 하여 10mm씩 단속적으로 촉침(stylus)을 이동시켜서 총 11개의 원형단면 형상을 측정하여 구하였으며, 진직도는 촉침을 주축대에 고정되었던 부분에서 심압대에 고정되었던 부분으로, 공작물의 회전축에 평행하게 100mm 구간에 대하여 등속 직선 이송시켜서 측정하였다.

실험 1에서는 연삭조건에 따른 기하학적 형상변화 및 특성을 알아보기 위하여 공작물 원주속도, 공작물 이송속도, 절삭깊이를 변화시켜 실험하였으며, 실험 2는 공작물 이송속도와 드웰시간이 공작물형상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 연삭조건 중 공작물 원주속도, 슷들 회전속도, 스파크아웃 횟수, 절삭깊이는 일정하게 고정시켜 놓고 공작물 이송속도와 드웰시간을 변화시켜 실험하였

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 (mm/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

다. 상세한 실험 조건은 Table 1과 2에 나타나 있다.

4. 시뮬레이션 모델

시편의 가공 전 형상이 회전축에 대하여 대칭인 형상이므로 가공 후 형상도 회전축에 대하여 대칭이 된다고 가정할 수 있다. 그러므로 시편의 축을 포함하는 임의의 단면의 윤곽을 나타내는 진직도를 시뮬레이션 함으로써 공작물의 3차원 형상을 추정할 수 있는 정보를 얻을 수 있다.

원통연삭가공시 발생하는 간섭현상을 무시하면, 공작물이 1회전할 때마다 공작물 원주상의 임의의 점은 슷들과 1회 접촉하게 된다. 또한, 슷들과 접촉하는 점들의 축방향 위치는 서로 다르므로, 기하학적인 절삭깊이가 a 일 때, 이 접촉점들은 서로 다른 실제절삭깊이를 갖는다. 그러므로, 실제 슷들과 공작물은 각각 S_g (공작물의 1회전시

이송량)의 두께를 갖는 가상의 슷돌 n 개와 동일한 두께의 가상의 공작물 m 개가 축방향으로 적층되어 있으며, 공작물이 매 1회전할 때 마다 S_i 만큼씩 단속적으로 이송 운동하는 것으로 가정하였다. 그러므로, N_w 가 1분 동안의 공작물 회전수라고 할 때,

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

인 순간에 가상의 슷돌 S_j 와 접하는 가상의 공작물을 W_j 라고 하면, j 는 다음과 같이 i 와 n 으로 표현할 수 있다.

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

따라서, 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 절삭깊이를 나타내며, $a_{j,l+1}$ 은 이 순간의 연삭 직후에도 가공탄성 효과에 의하여 제거되지 않고 남은 절삭깊이를 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. 이 때 $a_{j,l-(i-1)}$ 은 초기에 주어진 기하학적인 절삭깊이 a 와 같다.

그러므로 가공탄성계수 k 값을 알면, 가공 중의 형상 및 가공 후 형상을 시뮬레이션을 통하여 추정할 수 있다. 실험상의 조건에 따른 공작물 1회전에 대한 이송거리 S_i 는 식(1)로 구하였다. 또한, 드웰공정은 가상의 슷돌 n 개에 대하여 각각의 드웰시간 동안에 공작물이 회전 운동한 회전수를 구하여 모델링 하였다.

5. 가공탄성계수

앞에서 언급한 바와 같이 슷돌과 공작물계에서는 가공 중에 접촉점에서 국부적인 탄성변형이 발생된다. 그러므

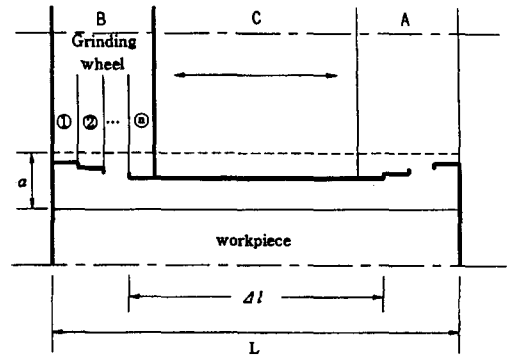


Fig. 3 Schematic illustration of grinding wheel deflection

로, 기하학적 절삭깊이를 a , 공작물 1회전당 이송되는 슷돌의 이송거리를 S_i 라고 할 때, Fig. 3에서와 같이 슷돌이 A위치에서 B위치로 이송되었다면 실제 제거된 양은 a 보다 작다. 그러므로, 실제 제거된 깊이는 임의상수 k 를 사용하여 ka 로 나타낼 수 있다. 여기서, 임의의 상수 k 는 앞에서 정의한 가공탄성계수(machining elasticity parameter)를 의미한다. k 는 실험에 의해 구할 수 있으며 1회 이송시 일정한 값을 갖는다고 가정하였다.

k 를 구하기 위하여, a_i 라는 절삭깊이를 준 후, 슷돌이 심압대에서 주축대까지 이송되었을 때 슷돌면이 모두 통과한 중앙부위(Δl)의 지름을 가공 전, 후에 측정하여 지름의 차이를 계산하면 실제 연삭된 깊이를 구할 수 있다. 슷돌폭을 W_g 라하면 공작물 1회 이송시 Δl 을 지나는 S_i 의 개수, 즉 가상 슷돌의 개수 n 은 W_g/S_i 로 구할 수 있다. 이때 연삭되지 않고 남아있는 양을 a_{i+1} 라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

그러므로, 이 식을 k 에 대하여 다시 정리하면, k 는 아래와 같이 실험에 의하여 측정된 값의 함수로 나타낼 수 있다.

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

와 같이 구할 수 있다. 따라서, k 는 공작물이 이송을 마치는 각각의 경우에 대하여 구할 수 있다. 본 실험에는 절삭깊이를 0.050mm로 하여 매 1회 이송 마다의 k 값을 구하였으며, 이 값은 시뮬레이션에 사용되었다. 절삭깊이는 심압대쪽에서 1번만 주었으며 이후는 이송만 행하였

Table 3 Machining elasticity parameter (Experiment result)

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

다. Table 3은 이러한 방법으로 구하여진 가공탄성계수 k 값을 보여주고 있다. 실험 결과, k는 이송횟수가 증가되면 점차 감소되는 특성이 있음이 확인되었다.

6. 결과 및 고찰

6.1 연삭조건

Table 4는 실험 1을 통하여 가공된 시편을 측정된 결과를 보여준다. 이 표에 제시된 진원도는 축방향 등간격으로 측정된 값의 평균값을 의미한다.

측정 결과를 보면 알 수 있듯이, 공작물의 3차원 형상 정밀도를 나타내는 원통도는 상대적으로 진원도보다 진직도의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이, 원통연삭의 경우, 공작물이 회전축에 대하여 항상 회전대칭 형태로 가공이 이루어진다는 사실에 기인한 것이다. 아울러, 실험에 사용된 시편의 형상은 좌우 대칭형인 단순한 원통형상이므로, 3차원 형상공차인 원통도를 구성하는 인자 중의 하나인 테이퍼형상 발생의 가능성도 배제할 수 있었다. 그러므로, 공작물의 형상 특성은 진직도의 변화에 주안점을 두고 분석하였다.

분석 결과, 연삭조건 중 절삭깊이와 공작물 원주속도가 진직도에 미치는 영향은 공작물 이송속도에 비하여 상대적으로 작은 것으로 판단된다. 공작물 원주속도의 변화는 연삭숫들의 원주속도가 상대적으로 큰 값을 가지므로, 공작물과 숫들의 접촉점에서의 상대 선속도로 정의되는, 연삭속도에는 큰 변화를 야기시킬 수 없으며, 따라서 실제

Table 4 Grinding results in each condition

Test No.	work surface speed(V _s) (m/min)	traverse speed(V _t) (m/min)	depth of cut(a) (mm)	roundness(R _a) (μm)	cylindricity(C _c) (μm)	straightness(S _a) (μm)	
1	6.16	0.130	0.0125	1.580	4.30	2.50	
2			0.0250	1.486	3.90	2.35	
3			0.0375	1.200	3.40	2.45	
4			0.0500	1.018	3.75	2.60	
5		0.714	0.0125	1.213	5.15	1.75	
6			0.0250	2.940	9.00	2.10	
7			0.0375	1.663	4.15	1.95	
8			0.0500	1.300	2.75	2.10	
9		1.630	0.0125	1.445	2.25	1.60	
10			0.0250	1.831	3.25	1.85	
11			0.0375	1.922	3.95	2.65	
12			0.0500	1.877	4.20	3.40	
13		14.6	0.130	0.0125	0.659	5.10	2.80
14				0.0250	0.650	3.85	2.45
15				0.0375	0.635	3.60	2.60
16				0.0500	0.627	4.00	2.50
17			0.714	0.0125	1.586	4.25	2.00
18				0.0250	1.963	5.60	1.75
19				0.0375	1.381	3.70	1.80
20				0.0500	1.159	3.05	1.90
21		1.630	0.0125	1.477	2.95	1.00	
22			0.0250	1.881	4.55	1.15	
23			0.0375	1.700	4.00	1.55	
24			0.0500	2.365	5.25	2.20	

Test No.	work surface speed(V _s) (m/min)	traverse speed(V _t) (m/min)	depth of cut(a) (mm)	roundness(R _a) (μm)	cylindricity(C _c) (μm)	straightness(S _a) (μm)	
25	33.46	0.130	0.0125	0.745	3.20	2.25	
26			0.0250	0.745	3.20	2.00	
27			0.0375	1.431	4.00	2.00	
28			0.0500	1.300	3.90	2.45	
29		24.5	0.714	0.0125	1.009	3.90	1.30
30				0.0250	1.127	3.90	1.55
31				0.0375	1.136	6.05	1.55
32				0.0500	1.486	6.80	1.95
33		1.630	0.130	0.0125	1.504	6.00	1.40
34				0.0250	1.145	5.50	2.35
35				0.0375	1.430	7.60	1.80
36				0.0500	1.550	5.20	2.30
37		33.46	0.130	0.0125	0.572	4.10	2.25
38				0.0250	0.613	2.60	2.00
39				0.0375	0.804	2.85	1.95
40				0.0500	0.818	3.55	2.05
41			0.714	0.0125	0.931	3.70	1.55
42				0.0250	1.372	5.50	1.75
43				0.0375	0.845	3.45	1.55
44				0.0500	1.213	3.90	2.05
45		1.630	0.130	0.0125	1.522	5.75	3.05
46				0.0250	1.368	8.10	3.05
47				0.0375	1.604	9.05	3.55
48				0.0500	2.709	12.50	4.70

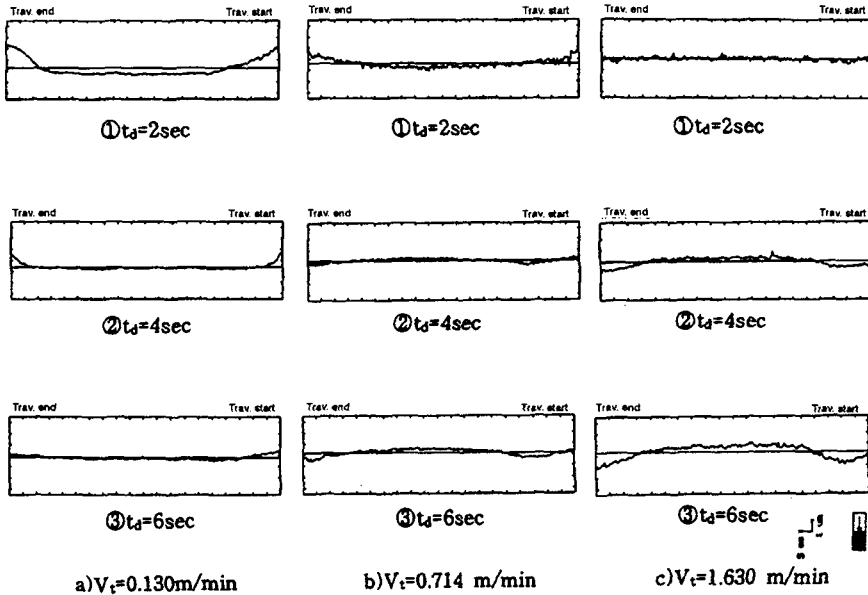


Fig. 4 Straightness profile (Experiment) (t_d =dwell time, V_t =traverse speed)

적인 연삭가공 중에 미치는 공작물 원주속도 변화의 영향은 작은 것으로 사료된다. 또한, 공작물의 이송운동이 반복적으로 수행되기 위해서는 공작물 양단에 있는 드웰구간에서 이송속도의 크기 및 방향 변화가 필요하므로, 이 구간에서의 진직도 변화가 다른 부분보다 많은 것도 확인되었다.

6.2 이송속도 및 드웰시간

Fig. 4와 Fig. 5는 공작물 이송속도와 드웰시간 변화에 따른 진직도의 변화를 나타낸 실험결과 및 시뮬레이션결과이다. 진직도 측정구간을 셋으로 구분하여, 가공시 심압대 쪽에서의 드웰구간을 A, 주축대 쪽에서의 드웰구간을 B, 나머지 공작물의 중앙부를 C라고 할 때, 공통적으로 드웰구간인 A, B가 C에서 보다 큰 형상 변화가 일어나고 있는 것이 확인되었다. (사용한 숫들의 폭은 38mm이고 측정 구간의 길이는 실제 연삭 구간의 양단에서 10mm씩을 제외한 100mm이므로, Fig. 4에서 A, B, C 구간의 길이는 각각 28mm, 44mm, 28mm 임.)

Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 공작물 이송속도가 증가됨에 따라 C구간에서의 연삭량은 감소되며 드웰시간이 증가됨에 따라 A, B구간에서의 연삭량은 증가되는 양상을 띄게 된다. 그러므로, 공작물 이송속도에 비하여 드웰시간이

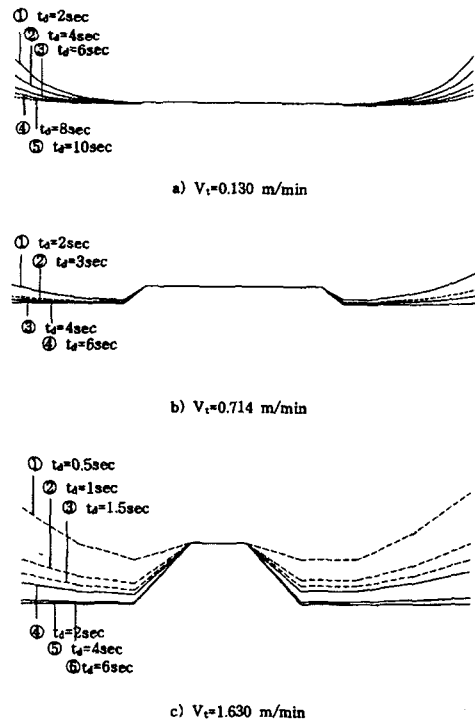


Fig. 5 Straightness profile (Simulation) (t_d =dwell time, V_t =traverse speed)

Table 5 Variation of straightness(Experiment, Simulation)

traverse speed(V _t) (m/min)	dwell time(t _d) (sec)	straightness (μm)		tolerance (%)
		experiment	simulation	
0.13	2	2.70	2.20	1.8
	4	1.65	1.56	0.5
	6	0.95	1.03	-0.9
	8	-	0.73	-
0.714	2	2.15	1.27	4.0
	3	-	0.68	-
	4	0.75	0.70	0.5
	6	1.20	0.73	3.9
1.63	0	-	3.50	-
	1	-	1.58	-
	1.5	-	1.80	-
	2	1.00	1.97	-9.7
	4	1.70	2.28	-3.4
	6	2.15	2.32	-0.8

너무 짧으면 공작물 양단에서는 중앙부위에 비해 접촉되는 슷돌입자의 수가 적으므로 양단의 연삭량이 더 적게된다. 따라서, 공작물의 진직도 곡선은 중앙부위가 훌쭉한 'U'자 형상을 띄게된다. 반대로, 공작물 이송속도에 비하여 드웰시간이 너무 길면 공작물 양단에서는 중앙부위에 비해 접촉되는 슷돌입자의 수가 많으므로 중앙부위의 연삭량이 더 적게된다. 이 경우에는 중앙부위와 양 끝단이 불룩한 'W'자 형상의 진직도 곡선을 갖는 공작물이 가공된다.

따라서, 공작물이 작은 진직도 값을 갖기 위해서는 A, B, C구간에서의 단위 길이당 연삭량의 차이가 작아야한다. 그러므로, 진직도 측면에서 볼 때, 공작물 이송속도가 증가되면 최적드웰시간은 감소되어야 한다. 이 현상은 Fig. 4에 잘 나타나 있다. 공작물 이송속도가 0.130m/min일 경우에는 드웰시간이 6sec, 공작물 이송속도가 0.714m/min일 경우에는 4sec, 공작물 이송속도가 1.630m/min일 경우에는 드웰시간이 2sec일 때 진직도가 1μm 이내로 측정되었음을 보여주고 있다.

실험결과와 시뮬레이션결과를 비교해 보면 공작물 이송속도가 0.613m/min이고 드웰시간이 2sec인 경우를 제외하고는 ±5%이내의 오차를 나타내고 있음을 알 수 있다(Table 5). Fig. 4와 Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 진직도는 실험과 시뮬레이션에서 동일한 추세로 변화되는 것

을 보여주고 있으나, 그 값이 정확히 일치하지는 않는다. 그 이유는 다음과 같은 원인에서 기인한 것으로 사료된다.

- 시편의 형상을 정확한 원통형상으로 가정하여 간섭현상을 배제.
- 시뮬레이션시 슷돌뚝 및 공작물길이는 항상 S₁의 정수 배로 가정.
- 모델링시 최초로 절삭깊이를 주는 구간에서 시간에 대한 절삭깊이의 변화를 무시.
- 이송속도가 고속일 때 가공부위 양단에서 관성에 의한 영향을 무시.

7. 결 론

원통연삭시 작업자에 의하여 조절이 용이한 연삭조건이 공작물의 형상에 미치는 영향을 실험 및 시뮬레이션을 통하여 알아보았다. 사용된 시편의 형상이 축대칭 원통형상이며 가공 중에 시편의 회전축은 일정하다고 가정할 수 있으므로, 가공 후 형상 특성은 진직도를 위주로 하여 고찰하였다. 연구 결과 확인된 내용은 다음과 같다.

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

참 고 문 헌

1. Kato, H. and Nakano, Y., "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. Kato, H. and Nakano, Y., "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. Willmore, J. I., "Plunge Grinding and the Accuracy of the Workpiece Geometry," Proc. 6th Int'l Mach. Tool Des. and Res. Conf., pp. 543~555, 1965.
4. Rao, S. B. and Mu, S. M., "Compensatory

- Control of Roundness Error in Cylindrical Chuck Grinding," *Jour. of Engineering for Industry*, Vol. 104/23, pp. 23~28, Feb. 1982.
5. Kyusojin, A., Ogawa, K. and Toyama, A., "Comparison of Cone center and Ball center for Roundness in Cylindrical Grinding," *Precision Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 197~202, Oct. 1986.
 6. Kyusojin, A. and Todaka, R., "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. Dorzda, T. J. and Wick, C., *Tool and Manufacturing Engineers Handbook, fourth Edition, volume 1-Machining*, SME, pp. 11.109~11.118, 1983.
 9. 김동원, 기계공작법, 청문각, pp. 524~525, 1991.