

평면연삭조건이 가공탄성계수에 미치는 영향

임 관 혁*, 김 강**

Effects of the Surface Grinding Conditions on the Machining Elasticity Parameter

G. H. Yim*, K. Kim**

ABSTRACT

The grinding force generated during the grinding process causes an elastic deformation of the workpiece, grinding wheel, and machine system. Thus, the true depth of cut is always smaller than the apparent depth of cut. This is known as machining elasticity phenomenon. The machining elasticity parameter is defined as a ratio between the true depth of cut and the apparent depth of cut. It is an important factor to understand the material removal mechanism of the grinding process. To increase productivity, the value of this machining elasticity parameter must be large. Therefore, it is essential to know the characteristics of this parameter. The objective of this research is to study the effect of the major grinding conditions, such as table speed and depth of cut, on this parameter experimentally. Through this research, it is found that this parameter value is increasing when the table speed is decreasing or the depth of cut is increasing. Also, this parameter value depends on the grinding mode (up grinding, down grinding).

Key Words : Machining elasticity parameter(가공탄성계수), Surface grinding(평면연삭), Up grinding(상향연삭), Down grinding(하향연삭), Apparent depth of cut(기하학적 절삭깊이), True depth of cut(실제절삭깊이), Table speed(테이블 이송속도)

1. 서 론

절삭가공시 작용하는 가공력은 공작물, 공구 및 가공시스템에 탄성변형을 야기시킨다. 이러한 탄성변형은 모든 절삭가공 중에 발생되나, 일반적으로 연삭가공에서 발생하는 탄성변형량은 선삭이나 밀링 가공에서 발생하는 변

형량에 비하여 매우 클 뿐만 아니라, 연삭가공은 선삭이나 밀링 가공된 공작물의 정밀도 향상을 위하여 수행되는 가공이므로, 가공탄성현상은 연삭 가공물의 생산성 및 정밀도와 밀접한 관련을 갖는다. 연삭가공에서만 볼 수 있는 임계연삭력(threshold grinding force) 및 스파크아웃(spark out)공정은 가공탄성현상에서 기인된 것이다.

* 영풍정밀공업(주) 기술부
** 국민대학교 기계자동차공학부

연삭가공은 부품의 생산성이나 정밀도 측면에서의 중요성은 인정되나, 다량의 연삭액 사용으로 가공 중의 관찰이 어렵고 확률적인 가공이라는 어려움 때문에, 여타 다른 가공법에서와 같은 최적 가공조건의 확립이 미흡하다. 따라서, 실제 가공에 있어서의 연삭가공조건은 작업자의 경험에 의하여 결정되는 것이 일반적이다. 그러므로, 최적 연삭조건의 확립을 위하여서는, 앞서 언급한 바와 같이, 가공탄성현상에 대한 이해가 필요하며, 현재까지 알려진 주요 관련 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

가공탄성계수(machining elasticity parameter)는 Rowe, Barash와 Koenigsberger의 무심연삭공정의 진원도 특성에 관한 연구에서 처음으로 소개되었으며, 이 계수는 실제 절삭깊이(true depth of cut)와 기하학적 절삭깊이(apparent depth of cut)의 비로 정의되었으며, 이 값 k 는 절삭깊이가 줄어들수록 증가한다고 발표하였다.⁽¹⁾ Wager와 Saini는 스톨입자의 공작물 접촉 표면에서의 첫 번째 거동은 변형(deflection), 회전(rotation), 미끄러짐(sliding)이고, 스톨입자의 수직분력이 어느 정도에 이를 때, 공작물이 충분히 물러졌을 때, 절삭이 일어난다고 하였다. 또한, 공작물의 경도가 증가할수록 국부접촉변형이 증가한다고 하였고 이것은 경도가 증가할수록 수직분력(normal force)이 증가하는 것으로 설명될 수 있다고 하였다.⁽²⁾ Gu와 Wager는 실제 접촉길이와 기하학적 접촉길이의 비는 절삭깊이가 증가할수록 줄어든다는 것을 발견하였다.⁽³⁾ 또한, 이들은 평면연삭가공시 하향연삭이 상향연삭보다 같은 절삭깊이에 대하여 연삭력이 많이 가해지며, 접촉길이가 또한 하향연삭이 더 길다는 사실도 확인하였다.⁽⁴⁾ Saini는 스톨의 경도와 국부탄성변형과의 관계에 관한 연구 결과를 발표하였다.⁽⁵⁾

본 연구의 목적은 가공탄성계수에 미치는 연삭조건의 영향을 파악하는 것이다. 그러므로, 본 논문에서는 우선 가공탄성계수를 정의하고, 실험을 통하여 확인된 내용을 고찰하고자 한다. 실험은 평면연삭공정을 대상으로 수행하였으며, 연삭변수로는, 작업자가 용이하게 조절할 수 있는, 테이블 이송속도와 절삭깊이를 선정하였다.

2. 가공탄성

Fig. 1은 연삭가공 중에 공작물과 연삭스톨사이에서 작용하는 연삭력과 절삭량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 공작물은 스톨이 접촉되는 순간부터 제거되는 것이 아니라 어느 정도의 힘이 작용해야만 실제 제

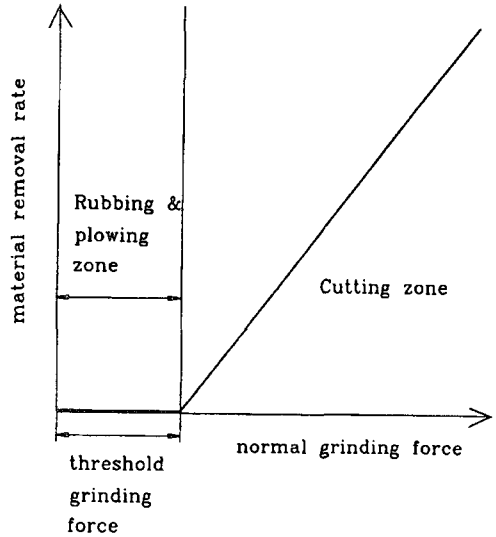


Fig. 1 Relationship between grinding force and material removal rate

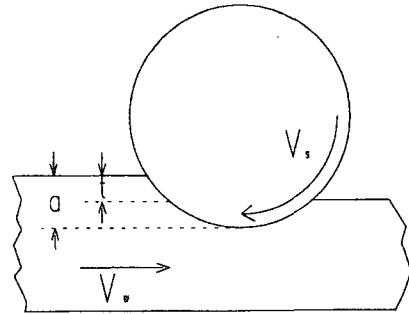


Fig. 2 Illustration of machining elasticity phenomenon

거가 발생된다는 것을 알 수 있다. 이 구간에서 작용하는 연삭력을 임계연삭력(threshold grinding force)이라 하며, 초기에 이 힘에 의해 절삭되지 않는 깊이를 임계연삭깊이(threshold grinding depth) t_0 라 한다. 여기서 힘은 법선방향 연삭력(normal grinding force)를 의미한다. 그러므로 실제 절삭된 깊이는 주어진 절삭깊이에 비하여 항상 작다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2에서는 공작물과 스톨사이의 거동 및 가공탄성현상을 나타내었다. 이러한 현상은 가공탄성계수 k 에 의해 설명될 수 있다. k 는 1보다 작은 값을 갖는 임의의 상수로서, 명확히 규명되어 있지 않으나 가공 조건에 따라 다른 것으로 알려져 있다. 가공탄성계수 k 는 실제절삭된 깊

이 t 를 기하학적 절삭깊이 a 로 나누어준 값으로 정의된다. 그러므로, k 는 다음과 같이 식으로 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{t}{a} \tag{1}$$

그러므로, 만일 처음에 지정된 절삭깊이를 고정한 상태에서 테이블 이송을 반복한다면, 임의의 순간의 기하학적 절삭깊이는 처음에 지정된 절삭 깊이에서 처음부터 바로 직전까지의 이송에 의하여 제거된 실제 절삭깊이의 누적 값을 제외한 값으로 표현된다. 평면연삭의 경우에는 위에서 좌로의 이송과 좌에서 우로의 이송이 번갈아 반복된다. 따라서, 매 이송시 마다, 기하학적 절삭깊이 및 실제 절삭깊이는 변하게 되고, 아울러 가공탄성계수도 다른 값을 갖는다. 그러므로, 이송 횟수가 i 일 때 가공탄성계수는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{(1)} = \frac{t_{(1)}}{a_{(1)}} = \frac{t_{(1)}}{a}$$

$$k_{(2)} = \frac{t_{(2)}}{a_{(2)}} = \frac{t_{(2)}}{a(1 - k_{(1)})}$$

$$k_{(3)} = \frac{t_{(3)}}{a_{(3)}} = \frac{t_{(3)}}{a(1 - k_{(1)})(1 - k_{(2)})}$$

⋮

⋮

$$k_{(i)} = \frac{t_{(i)}}{a_{(i)}} = \frac{t_{(i)}}{a(1 - k_{(1)})(1 - k_{(2)}) \cdots (1 - k_{(i)})}$$

여기에서, $k_{(i)}$, $t_{(i)}$, $a_{(i)}$ 는 각각 이송 횟수가 i 일 때의 가공탄성계수, 실제 절삭깊이, 기하학적 절삭깊이를 의미한다.

3. 실험

본 실험에 사용된 평면연삭기는 宇珍機工사의 WSG-7050A기종이며 절삭깊이 조절을 위하여 분해능이 0.5 μ m인 리니어 스케일을 설치하였다. 실험에 사용된 스톨은 알루미나(Al_2O_3) 연삭입자를 비트리파이드 결합(vitrified bonding)한 스톨로서, 범용으로 많이 쓰이는 중간 정도의 입도, 결합도, 조직을 갖는 WA46K8VIA를 선정하였다. 스톨의 면을 일정한 상태로 유지하기 위하여 시편을 가공하기 전에 항상 한번에 0.01mm씩 2회의 드레싱을 실시하였으며, 연삭액의 공급량도 일정하게 유지되

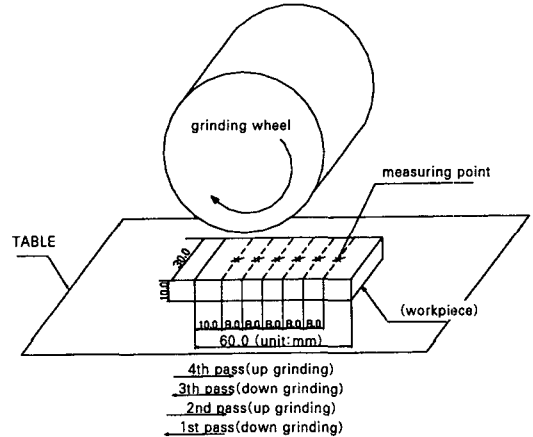


Fig. 3 Schematic diagram of experiment

Table. 1 Experimental conditions.

고정조건	설정값
grinding wheel	WA46K8VIA
grinding wheel speed	1800 rpm
dressing depth	0.02 mm
grinding wheel size	φ 305 × 38 mm
변화조건	설정값
table speed	0.073, 0.122, 0.163 m/s
depth of cut(d)	3, 7, 10 μ m

도록 하였다.

시편은 일반 기계부품으로 많이 사용되는 기계구조용 탄소강 SM45C를 고주파 열처리하여 사용하였다. 시편의 폭은 스톨 폭보다 작도록 30mm로 하였으며, 길이와 두께는 각각 60mm, 20mm로 하였다. 또한, 가공 전 시편 표면의 높이 및 형상 차이에 의한 영향을 최소화하기 위하여, 시편의 가공면과 바닥면은 스파크아웃을 불꽃이 생기지 않을 때까지 실시하여 두 면이 곱고 서로 평행이 되도록 준비되었다. 우선 바닥면이 연삭된 시편을 전자석 척을 이용하여 일정한 위치에 고정한 후 가공면의 준비를 위한 연삭을 실시하였으며, 이 때 스파크아웃을 충분히 실시하여 불꽃이 발생하지 않는 순간의 시편과 스톨의 간격을 기준으로 하여 미리 설정한 절삭깊이가 되도록 하였다. 1회 이송이 종료될 때마다 테이블을 정지시키고 미리 제작한 측정 치구를 이용하여 마이크로미터로 시편 두께를 측정하였으며 이 값을 이용하여 실제 절삭깊이를 계산하였다. 측정 위치로는 Fig. 3에서와 같이 좌우 대칭으로 6부분을 선정하였다. 테이블 이송에 의한 연삭 및 측정은 불꽃이 발생되지 않을 때까지 반복적으로 계속 실시하였다. Table 1은 실험에 사용된 연삭조건을 보여준다. 실험

오차를 최소화하기 위하여 동일 연삭조건으로 각각 6개의 시편이 가공되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 결과

Table 2는 실험 결과를 바탕으로 계산된 실제 절삭깊이 및 가공탄성계수 값을 나타낸다. 이 값들은 동일 조건하에서 실험된 6개의 시편 및 각각의 시편에 있어서 6개의 측정 위치에서 측정된 값을 평균하여 구해진 값들이다.

실험에서 설정한 절삭깊이를 주기 위한 시편과 숫들의 기준 간격은, 가공면을 준비하는 스파크아웃 가공시 불꽃이 발생하지 않는 순간을 기준으로 하여 결정되었다. 그러므로, 이 간격을 기준으로 하면, 이미 임계연삭깊이가 주어진 것과 동일한 상황이 된다. 따라서, 식(2)를 이용하여 가공탄성계수 값을 계산하려면, 기하학적 절삭깊이 a 는 실험에서 설정한 절삭깊이 d 와 임계연삭깊이 t_c 의 합

Table 2 Experimental results .

속도	절삭깊이(d)	이송횟수	실제절삭깊이(t)	k값	
V _w =0.073 m/s	3 μ m	1	1.1333	0.1744	
		2	0.7667	0.1429	
		3	0.8000	0.1739	
	7 μ m	1	2.6333	0.2508	
		2	1.5333	0.1949	
		3	1.6667	0.2632	
		4	0.7000	0.1500	
	10 μ m	1	3.8333	0.2840	
		2	1.9333	0.2000	
		3	2.3667	0.3060	
		4	0.6667	0.1242	
	V _w =0.122 m/s	3 μ m	1	1.1000	0.1692
2			0.4000	0.0741	
3			0.8000	0.1600	
7 μ m		1	2.0000	0.1906	
		2	0.8333	0.0980	
		3	0.8000	0.1043	
		4	0.4333	0.0631	
10 μ m		1	2.9333	0.2173	
		2	1.5333	0.1451	
		3	1.7667	0.1956	
		4	0.6333	0.0872	
		5	0.5000	0.0754	
V _w =0.163 m/s		3 μ m	1	0.9000	0.1385
			2	0.2666	0.0476
			3	0.9000	0.1688
	7 μ m	1	2.0000	0.1906	
		2	1.0667	0.1255	
		3	1.4667	0.1973	
		4	0.2333	0.0391	
		5	0.8333	0.1453	
	10 μ m	1	3.1667	0.2346	
		2	1.7667	0.1710	
		3	1.6667	0.1946	
		4	1.0667	0.1546	
		5	0.6333	0.1086	

Table 3 Total true depth of cut

테이블이송속도	누적 절삭깊이 d _n (μ m)	표준편차 (std.dev.)	d-d _n (μ m)
V _w =0.073m/s	d _n =2.7	0.7583	0.3
	d _n =6.5	1.1081	0.5
	d _n =8.8	1.4832	1.2
V _w =0.122m/s	d _n =2.3	0.4625	0.7
	d _n =4.0	0.8944	3.0
	d _n =7.4	0.6055	2.6
V _w =0.163m/s	d _n =2.1	0.2528	0.9
	d _n =4.8	0.5963	2.2
	d _n =7.7	0.9930	2.3

으로 보아야 한다. t_c 는 공작물과 숫들의 종류와 관련된 값으로서, 본 논문에서는 이 값을 문헌⁽⁷⁾을 참조하여 3.5 μ m로 추정하였다.

Table 2를 분석해 보면, 전반적으로 이송횟수가 홀수인 경우의 k값이 짝수인 경우의 k값 보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 하향연삭시 k값이 상향연삭시 k값 보다 크다는 것을 의미한다. (작업자를 기준으로하여 수평축 연삭숫들이 시계방향 회전할 때, 테이블이 위에서 좌로 이송되면 하향연삭, 좌에서 우로 이송되면 상향연삭)

그러나, 실험 결과의 값들은, 이송횟수에 따라서 중간 부분 값들이 뒤섞이는 경우가 발생하는 등 고르지 못하게 나타나는 경향을 보이므로, 연삭 모드(상향연삭, 하향연삭)의 영향을 제외하고는 그 변화 특성을 분명히 알 수는 없다. 이는 실험 오차에서 기인된 결과로 판단된다. 대표적인 실험오차의 원인은 정확한 절삭깊이의 조정이 어렵다는 것이다. 이것은 실험에서 설정한 절삭깊이 만큼 실제 절삭이 이루어지지 않는다는 사실을 보면 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 실험이 시작될 때의 시편과 숫들의 간격은 준비가공에서 불꽃이 발생하지 않는 순간의 간격이 유지된 것이므로, 이 간격을 기준으로 절삭깊이가 주어지면 실험의 종료 순간 역시 불꽃이 발생하지 않을 때까지이기 때문에, 이론적으로는 실제 절삭깊이가 주어진 절삭 깊이와 동일하여야 한다. 그러나, 매 이송시 마다 절삭된 양을 합한 실제 누적절삭깊이 d_n 를 구해 보면, 절삭깊이 d 보다 그 값이 작음을 알 수 있다. Table 3은 계산된 실제 누적절삭깊이 및 주어진 절삭깊이와의 오차를 보여준다.

4.2 수정결과

앞에서 언급한 오차를 보정하기 위하여, 기하학적 절삭

깊이 a 를 실제누적절삭깊이 d_n 과 임계연삭깊이 t_d 의 합으로 수정하여 가공탄성계수 k 를 다시 계산하였다. Table 4는 k 값의 수정결과를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 테이블 이송속도에 따른 누적절삭깊이의 변화

Table. 4 Values of machining elasticity parameter (recalculated value)

테이블이송속도	누적절삭깊이 (μm)	이송횟수	평균 k	표준편차
$V_w=0.073\text{m/s}$	$d_n=2.7$	1	0.1757	0.05
		2	0.1472	0.02
		3	0.1799	0.03
	$d_n=6.5$	1	0.2628	0.02
		2	0.2069	0.02
		3	0.2807	0.04
		4	0.1617	0.07
	$d_n=8.8$	1	0.3104	0.03
		2	0.2272	0.02
		3	0.3571	0.07
		4	0.1565	0.06
	$V_w=0.122\text{m/s}$	$d_n=2.3$	1	0.1905
2			0.1193	0.06
3			0.1908	0.03
$d_n=4.0$		1	0.2526	0.02
		2	0.1395	0.02
		3	0.1565	0.04
		4	0.0967	0.06
$d_n=7.4$		1	0.2625	0.04
		2	0.1869	0.06
		3	0.2623	0.07
		4	0.1302	0.08
$V_w=0.163\text{m/s}$		$d_n=2.1$	1	0.1569
	2		0.0515	0.05
	3		0.1976	0.04
	$d_n=4.8$	1	0.2165	0.02
		2	0.1463	0.01
		3	0.2330	0.04
		4	0.0470	0.03
	$d_n=7.7$	1	0.2672	0.03
		2	0.2054	0.03
		3	0.2414	0.02
		4	0.2069	0.02

를 나타낸 것이다. 이것은 이송속도가 증가할수록 실제 누적절삭깊이가 줄어드는 경향임을 보여준다. Fig. 5는 이송속도가 0.163m/s일 때, 실제 누적절삭깊이와 이송횟수의 관계를 나타낸 것으로서, 절삭깊이가 증가할수록 실제 누적절삭깊이도 증가하는 추이를 나타낸다. Fig. 6은 이송속도가 0.163m/s일 때 각각의 실제 누적절삭깊이와 이송횟수에 따른 가공탄성계수 값의 변화를 나타낸 것이다. 실제 누적절삭깊이가 증가할수록 가공탄성계수 값이 증가함을 알 수 있다. 또한, Fig. 7은 테이블 이송속도와 이송횟수에 따른 가공탄성계수 값의 변화를 보여주는 것으로서, 실험오차의 영향으로 인하여 다소 무리는

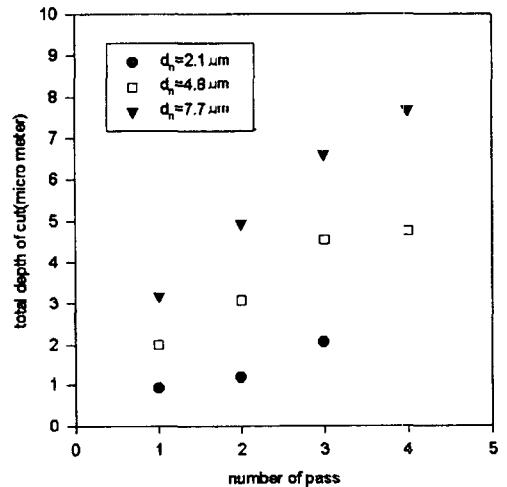


Fig. 5 Total depth of cut ($V_w=0.163\text{m/s}$)

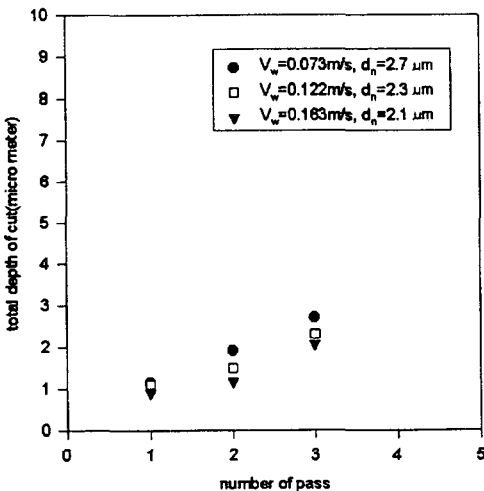


Fig. 4 Total depth of cut

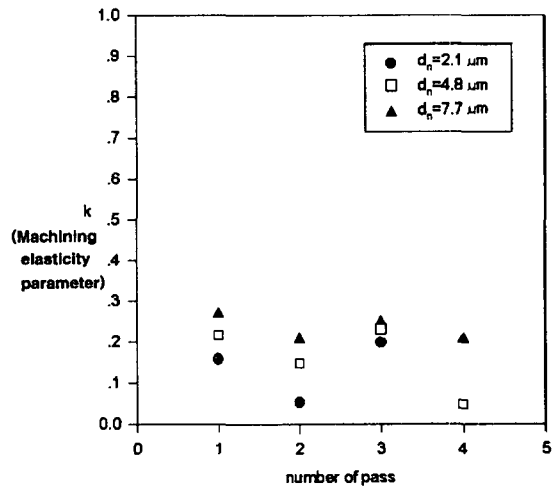


Fig. 6 Machining elasticity parameter ($V_w=0.163\text{m/s}$)

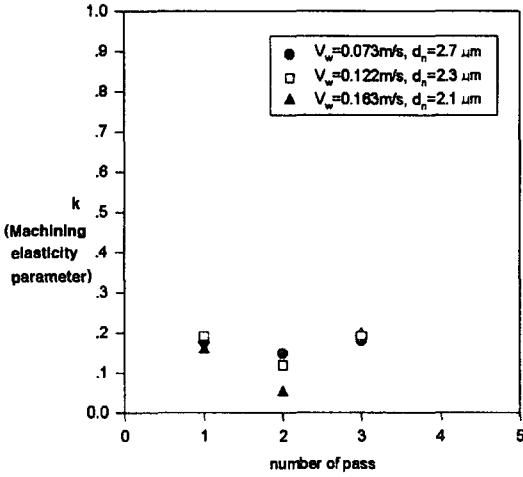


Fig. 7 Machining elasticity parameter

있으나, Fig. 4에서 보여주는 경향과 조합하여 볼 때 이 송속도가 증가할수록 가공탄성계수 값이 감소되는 경향이 있는 것으로 사료된다.

Table 4 및 Fig. 6과 Fig. 7에서는, Table 2에서 확인된 바와 같이, 하향연삭시 가공탄성계수 값이 상향연삭시 가공탄성계수 값 보다 크다는 것을 더욱 명확하게 보여준다. 이것은 기하학적 절삭깊이가 동일할 때 하향연삭이 상향연삭보다 수직분력이 더 크고, 접촉길이가 길다고 한 결과로도 설명될 수 있다. 접촉길이가 길다는 것과 수직분력이 크다는 것은 동일한 절삭깊이에 대해 더 많은 양이 절삭된다고 볼 수 있기 때문이다.

4.3 고찰

실험 결과 구해진 가공탄성계수 값들을 Rowe, Barash와 Koenigsberger의 연구 결과⁽¹⁾와 비교해 보면, 상대적으로 가공탄성계수 값들이 크다는 것과 절삭깊이의 변화에 따른 가공탄성계수 값의 변화 추세가 다르다는 것을 알 수 있다. 가공탄성계수 값이 큰 차이를 나타내는 것은 연삭가공 방법의 차이에서 기인된 것으로 추정된다. Rowe, Barash와 Koenigsberger의 연구 대상인 무심연삭에서는 공작물이 1자형의 공작물 받침대(work rest blade) 위에 지지되나, 본 연구의 대상인 평면연삭에서는 공작물이 테이블 위에 고정되어 가공되므로 가공시스템의 강성이 상대적으로 큰 값을 갖는다. 따라서, 기하학적 절삭깊이가 동일한 경우, 상대적으로 큰 강성을 갖는 평면연삭 시스템에서 가공탄성에 의한 변형이 작게 발생하여 실제 절삭깊이가 상대적으로 깊어지므로 가공

탄성계수 값이 커지게 된다.

기하학적 절삭 깊이의 증가가 가공탄성계수 값에 미치는 영향은 두 가지 방법으로 추론해 볼 수 있다. 우선, 가공탄성계수의 정의와 연삭 특성에 의한 수학적인 가공탄성계수 함수의 특성을 살펴보면 다음과 같다. 앞에서 언급한 바와 같이, 가공탄성계수는 실제절삭깊이를 임계연삭깊이를 포함하는 기하학적 절삭깊이로 나눈 값으로 정의된다. 또한, 임계연삭깊이보다 큰 기하학적 절삭깊이가 주어질 때, 실제절삭깊이와 기하학적 절삭깊이에서 임계연삭깊이를 뺀 값의 비는 일정하다는 사실을 Fig. 1에서 유추할 수 있다. 그러므로, 가공탄성계수는 기하학적 절삭깊이가 임계연삭깊이보다 작을 때에는 0이 되고, 기하학적 절삭깊이가 점차 증가됨에 따라 임계연삭깊이의 영향은 줄게 되므로 단조 증가하는 특성을 나타낸다. 아울러, Wager와 Gu의 연구 결과⁽⁸⁾를 이용하여 간접적으로 이러한 가공탄성계수의 특성을 알 수 있다. 이들이 제시한 절삭깊이와 공작물과 스톨간의 접촉 길이와의 관계를 보여주는 그래프에 의하면, 절삭깊이가 증가될수록 그래프의 기울기(절삭깊이에 대한 접촉길이의 변화율)가 감소되는 것을 보여준다. 이것은 스톨 형상에 의한 영향도 있으나 절삭깊이가 증가됨에 따라서 실제절삭깊이의 증가율이 커짐을 의미한다고 볼 수 있다. 그러므로, 실험을 통하여 확인된 바와 같이, 기하학적 절삭 깊이가 증가됨에 따라 가공탄성계수 값은 증가됨을 알 수 있다.

5. 결론

연삭조건이 가공탄성계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 평면연삭가공을 대상으로 실험을 수행하였다. 작업자에 의한 조정이 용이한 연삭조건인 이송속도, 절삭깊이를 주 변수로 하여 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 하향연삭(down grinding)시 가공탄성계수 값은 상향연삭(up grinding)시 가공탄성계수 값보다 크다.
- 테이블 이송속도(table speed)가 증가할수록 가공탄성계수 값은 감소한다.
- 절삭깊이(depth of cut)가 증가할수록 가공탄성계수 값은 증가한다.

아울러, 선행 연구 결과와의 비교를 통하여, 가공탄성계수는 가공시스템의 강성과 밀접한 관계가 있으므로 연

삭가공 방법에 따라서 그 값이 영향을 받는다는 사실도 확인되었다.

참 고 문 헌

1. Rowe, W. B., Barash, M. M. and Koenigsberger, F., "Some Roundness Characteristics of Centerless Grinding." *Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 5, pp. 203~215, 1965.
2. Wager, J. G. and Saini, D. P., "Local Contact Deflections in Grinding-Groups of Grains and Single Grains," *Annals of the CIRP* Vol. 35/1, pp. 245~248, 1986.
3. Gu, D. Y. and Wager, J. G., "New Evidence on the Contact Zone in Grinding - Contact Length, Sliding and Cutting Regions," *Annals of the CIRP* Vol. 47/1, pp. 335~338, 1988.
4. Wager, J. G. and Gu, D. Y., "Influence of Up-Grinding and Down-Grinding on the Contact Zone," *Annals of the CIRP*, Vol. 40/1, pp. 323~326, 1991.
5. Saini, D. P., "Wheel Hardness and Local Elastic Deflection in Grinding," *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 30, No. 4, pp. 637~649, 1989.
6. Drozda, T. J., Wick, C., *Tool and Manufacturing Engineers Hand book*, Forth Edition, Vol. 1-Machining, SME, pp. 11.109~11.118, 1983.
7. Reshetov, D. N. and Portman, V. T., *Accuracy of Machine Tools*, ASME PRESS, pp. 273~275, 1988.