

연삭공정에서의 가공탄성계수에 관한 연구 (A Study on the Machining Elasticity Parameter in the Grinding Process)

임관혁 (영풍정밀공업), 김 강 (국민대 기계·자동차공학부)

G. H. Yim (Young Poong Precision Ind.co., Ltd.), K. Kim (Kookmin Univ.)

Key Words : machining elasticity parameter(가공탄성계수), apparent depth of cut(기하학적인 절삭깊이), 실제절삭깊이(true depth of cut), threshold grinding depth(초기연삭깊이)

Abstract : Force generated during grinding process causes elastic defomation. The effect of this deforms a workpieces. So grinding system is explainable using the concept of macining elasticity phenomenon. Machining elasticity is defined as ratio between the true depth of cut, and an importnat factor to affect material removal mchanism and productivity.

Generally, to produce accurate surface and dimensionally precise components operators depend on their experiences. Because of these, productivity is reduced and time is wasted.

The objective of this reserch is to study the effect of grinding conditions, such as table speed, depth of cut on the machining elasticity parameter.

1. 서 론

연삭시 작용하는 연삭력은 공작물, 스톨 및 가공 시스템의 탄성변형을 야기시키며, 이 탄성변형은 연삭되는 부품의 기하학적인 부정확성을 발생시킨다. 따라서 연삭가공시에는 반드시 이러한 사항이 고려되어야 한다. 이러한 현상은 연삭공정의 마무리 단계인 스파크아웃에 의해 일부 제거되거나 표면과 치수공차에 영향을 줄 뿐만 아니라 생산성을 감소시킨다.

가공탄성계수(machining elasticity parameter) k 는 1보다 작은 값을 갖는 임의의 상수로서, 가공시 가공 시스템 및 공작물의 탄성변형에 의해 가공 중에 발생하는 현상을 정량적으로 나타내는 값이다.

가공탄성은 금속제거역학적인 측면에서 중요한 인자이며, 생산된 부품의 정밀도에 영향을 준다. 따라서 가공탄성에 대한 이해와 이에 영향을 주는 인자들에 대한 연구가 필요하다.

W. B. Rowe, M. M. Barash와 F. Koenigsberger는 센터리스 연삭의 진원도 특성에 관한 연구에서 가공탄성계수를 실제 절삭깊이(true depth of cut)와 기하학적인 절삭깊이(apparent depth of cut)의 비로 정의하였으며, 이 값 k 는 절삭깊이가 줄어들수록 증가한다고 하였다.⁽¹⁾

연삭시 발생하는 가공탄성에 관련된 대표적인 연구로는 스톨과 공작물 사이의 국부적인 탄성변형에 관한 연구를 들 수 있으며 그 내용은 다음과

같다.

J. G. Wager와 D. P. 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⁾ D. Y. Gu와 J. G. Wager는 실제접촉길이와 기하학적 접촉길이의 비가 절삭깊이가 증가할수록 줄어든다고 하였다.⁽³⁾

평면연삭은 테이블의 좌우 이송시 up grinding과 down grinding이 교차되어 가공이 행하여 진다. J. G. Wager와 D. Y. Gu는 down grinding이 up grinding보다 같은 절삭깊이에 대하여 힘이 많이 가해지며, 접촉길이가 또한 down grinding이 더 길다고 하였다.⁽⁴⁾

D. P. Saini는 스톨의 경도와 국부탄성변형과의 관계에 관한 연구에서 스톨경도가 경할수록 국부 변형이 적다고 하였다.⁽⁵⁾

따라서 본 연구를 통하여 가공탄성계수를 정의하고, 이 계수와 가공변수와의 관계를 파악하고자 한다.

평면연삭(surface grinding)작업시 작업자가 용이하게 조절할 수 있는 가공변수로는 테이블 이송속도(table speed), 절삭깊이(depth of cut)가 있다.

본 연구에서는 2가지 변수에 대하여 공작물을 가공함으로써 가공탄성계수에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

II. 가공탄성

Fig. 1는 연삭시 공작물과 스톨사이에서 작용하는 힘과 절삭량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 스톨과 공작물이 접촉되는 순간부터 공작물의 제거가 행하여지는 것이 아니라 어느 정도의 힘이 작용해야 실제제거가 일어난다는 것을 알

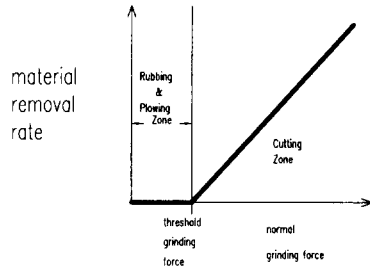


Fig. 1 Relationship between Grinding forces and material removal rate

수 있다. 이 구간에서 작용하는 연삭력을 초기연삭력(threshold grinding force)이라 하며, 초기에 이 힘에 의해 절삭되지 않는 깊이를 초기연삭깊이(threshold grinding depth) t_0 라 한다.

여기서 힘은 법선방향 연삭력(normal force)를 의미한다. 그러므로 실제 절삭된 깊이는 주어진 절삭깊이에 비해 작다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2에서는 공작물과 스톨사이의 거동 및 가공탄성 현상을 나타내었다.

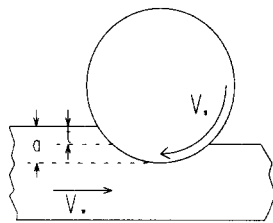


Fig. 2 Illustration of machining elasticity phenomenon

이러한 현상은 가공탄성계수(machining elasticity parameter) k 에 의해 설명 될 수 있다. k 는 1보다 작은 값을 갖는 임의의 상수로서, 가공시 가공시스템 및 공작물의 탄성변형에 의해 발생하는 현상을 나타내는 값이다. 이는 명확히 규명되어 있지 않

나 가공 조건에 따라 다른 것으로 알려져 있다. 여기서 가공탄성계수를 정의하면 가공탄성계수 k 는 실제절삭된 양 t 를 기하학적 절삭깊이 a 로 나누어준 값을 말한다.

$$k = \frac{t}{a} \quad (1)$$

스파크 아웃시 각 pass마다 절삭량은 한 번 절삭되고 남은 양이 절삭되기 때문에 이전의 k 값의 영향을 받는다. 따라서 계산은 다음과 같이 행하게 된다.

여기서 i 는 이송횟수를 말한다.

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

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

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

⋮
⋮

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

III. 실험

1. 실험

본 실험에 사용된 평면연삭기(surface grinding machine)는 宇珍機工사의 WSG-7050A기종이다.

공작물 고정방법은 전자석척(magnetic chuck)을 이용하여 고정한다. 본 연삭기에는 Mitutoyo사의 디지털 스케일(0.0005mm)을 설치하였다.

사용된 스톨은 WA46K8VIA로 입자재료는 알루미나(Al_2O_3)로 경도(hardness)는 약 9이며, 입도(grain size)는 46, 결합도는 중간, 조직은 8이고, 결합방법은 vitrified bonding으로 만들어졌다.

가공변수에 따른 가공탄성계수 k 값의 변화를 알아보기 위해 절삭깊이, 이송속도를 변화시켜 실행하였다. Table. 1은 가공조건을 보여 준다.

드레싱횟수는 매 시편마다 0.01 mm/pass 2회로 하였다. 드레싱 부위는 항상 일정하게 하려고 했으나 육안으로 확인해야 했기 때문에 오차가 있을 수 있다. 테이블 상의 시편도 동일위치에 놓고 가공하였다.

연삭액의 양도 일정하게 되도록 조절하였으며, 스파크아웃을 행한 후 절삭깊이(depth of cut)를 3 μm , 7 μm , 10 μm 로 정하여 불꽃이 나지 않는 점을 기

Table. 1 Experimental conditions

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

준으로 이송을 하였다. 시편은 각 실험시편의 조건마다 매 이송시 테이블을 정지시켜 시편 두께를 마이크로미터로 6부분을 측정하였다. 불꽃이 나지 않을 때까지를 이송횟수의 기준으로 삼아 측정하였으며, 마이크로미터의 측정력은 일정하게 되도록 조절하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 결과

k값을 계산하기 위해서 위의 식(2)을 사용하였는데 식(2)에서 기하학적 절삭깊이(apparent depth of cut) a는 스파크아웃을 해도 남은 양이 존재한다. 그러므로, 기하학적 절삭깊이 a는 절삭깊이 (assigned depth of cut)d와 초기연삭깊이 t_0 의 합으로 생각할 수 있다.

본 논문의 실험에서는 절삭깊이 d를 스파크아웃을 행하고 주기 때문에 초기 연삭깊이 t_0 를 구해야 했다. 계산을 행하기 전 초기연삭깊이 t_0 는 문헌상⁽⁷⁾의 값으로 추정하여 3.5 μm 를 사용하였다. 따라서 k값을 계산하기 위해 사용한 기하학적 절삭깊이는 실험 전 고정된 값인 절삭깊이 d(3, 7, 10 μm)와 초기연삭깊이 t_0 를 더한 값을 사용했다.

식(2)의 실제절삭된 양 t는 평균값을 사용하였다. 실험 절삭깊이 d는 불꽃이 발생되지 않을 때까지 스파이크아웃을 수행한 후 연속적으로 연삭한 깊이이다. 불꽃이 발생되지 않는 것은 절삭이 이루어지지 않는다는 것을 의미하므로 초기연삭깊이 t_0 가 포함된 양을 제외한 절삭깊이 d만큼 깎여야 한다. 그러나, 결과에서 알 수 있듯이 실제로는 절삭깊이 d만큼 깎이지 않았다. 이는 매 이송시 마다의 절삭된 양을 합산한 실제누적절삭깊이(total true depth of cut) d_n 를 구해본 결과가 절삭깊이 d와 차이가 있다는 것을 통해서도 알 수 있다. Table. 2는 각 조건당 실제누적절삭깊이 d_n 과 절삭깊이의 차이를 보여준다. 실제누적절삭깊이는 각 조건당 5개 시편의 평균치를 구했으며, 그 평균의 표준편차를 나타내었다. 절삭깊이 d와 실제누적절삭깊이 d_n 의 차이를 보면 속도 0.122 m/s 일 때 2, 3번째 절삭깊이 차이가 3.0 μm 와 2.6 μm 가 나며, 속도 0.163

m/s 일 때에는 2, 3번째 절삭깊이 차이가 2.2 μm 와 2.3 μm 이 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 오차가 발생하는 원인을 파악하기는 어렵지만 연삭기에 장착된 디지털 스케일과 기계시스템의 탄성변형에 의한 오차로 추정된다.

따라서, 이와같은 오차를 수정하기 위해 각각의 실험조건마다 기하학적 절삭깊이 a를 실제누적절삭깊이 d_n 과 초기연삭깊이 t_0 의 합으로 구하여 가공탄성계수k를 다시 계산하였다.

Table. 2 Total true depth of cut

속도	누적절삭 깊이 $d_n(\mu\text{m})$	표준편차 (std.dev.)	$d-d_n(\mu\text{m})$
$V_w=0.073$ m/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
$V_w=0.122$ m/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
$V_w=0.163$ m/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

2. 수정결과

다음의 Table. 3은 k값의 수정결과를 나타낸 것이다. 각 조건마다 시편 5개의 계산결과를 평균한 값을 사용하였으며, 표준편차를 나타내었다. 위에서 언급한 토대로 그래프를 그리게 되면 다음과 같다. Fig. 3은 속도에 따른 누적절삭깊이를 나타낸 것이다. 이를 보면 속도가 증가할수록 누적절삭깊이의 값이 줄어드는 경향을 보임을 알 수 있다. 속도가 0.063m/s, 0.122m/s, 0.163m/s일 때 누적절삭깊이는 2.7, 2.3, 2.1 μm 됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 속도가 0.163m/s 일 때 실제누적절삭깊이와 이송횟수의 관계를 나타낸 것이다. 절삭깊이가 증가할수록 누적절삭깊이도 증가하며 일정한 추이를 나타냄을 알 수 있다.

테이블과 그림에서 알 수 있듯이 실제누적절삭깊이 d_n 이 증가할수록 k값이 커지는 경향을 볼 수 있었다. W. B. Rowe, M. M. Barash and F. Koenigstbergers는 절삭 깊이가 줄어들수록 k값이 증가한다고 하였으나 본 실험결과에서는 반대되는 현상이 나타난다. 하향연삭이 상향연삭보다 k값이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 같은 절삭깊이에 대해 하향연삭이 상향연삭보다 수직분력이 더 크고, 접촉길이가 길다고 한 결과로도 설명될 수 있다. 접촉길이가 길다는 것과 수직분력이 크다는 것은 같은 절삭깊이에 대해 더 많은 양이 절삭된다고 볼 수 있다.

Fig. 5는 이송속도가 0.163m/s 일 때 각각의 실

Table. 3 Experimental results($d_n=2.1\sim 8.8\mu m$)

속도	누적 절삭 깊이(μm)	이송회수	평균k	표준편차
$V_w=0.073$ 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
	$d_n=2.7$	1	0.3104	0.03
		2	0.2272	0.02
		3	0.3571	0.07
		4	0.1565	0.06
	$V_w=0.122$ m/s	$d_n=2.7$	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
$d_n=2.7$		1	0.2625	0.04
		2	0.1869	0.06
		3	0.2623	0.07
		4	0.1302	0.08
$V_w=0.163$ m/s		$d_n=2.7$	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
	$d_n=2.7$	1	0.2672	0.03
		2	0.2054	0.03
		3	0.2414	0.02
		4	0.2059	0.02

제누적절삭깊이 d_n 과 이송횟수에 따른 k 값을 나타낸 것이다. 실제누적절삭깊이 d_n 이 증가할수록 k 값이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 실제누적절삭깊이 d_n 을 속도변화에 따라 나타낸 것이다.

이송속도가 증가함에 따라 단위시간당 절삭되는 양이 상대적으로 적으므로 k 값도 줄어드는 경향을 나타내리라고 예측할 수 있는데, 그림에서 볼 수 있듯이 추이가 다르게 나타나는 경우가 생긴다. 이는 앞서 언급한 실험 오차에서 기인한 것으로 추정할 수 있으며, 이것을 감안하면 이송속도가 증가할수록 k 값이 줄어든다고 할 수 있다. 아울러 상향연삭과 하향연삭의 차이는 쉽게 확인할 수 있다.

V. 결론

가공탄성계수를 정의하고 연삭조건에 따른 가공탄성계수의 변화를 알아보려고 평면연삭에서 조절 가능한 연삭조건인 이송속도, 절삭깊이를 실험을 수행하였으며, 실험오차를 감안하여 볼 때 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

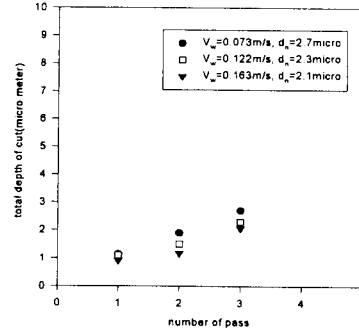


Fig. 3 Total depth of cut

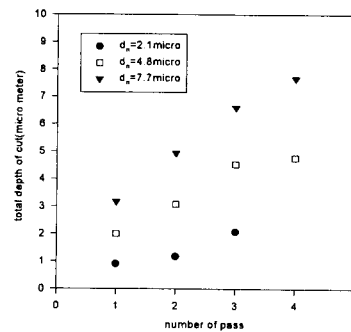


Fig. 4 Total depth of cut($V_w=0.163$ m/s)

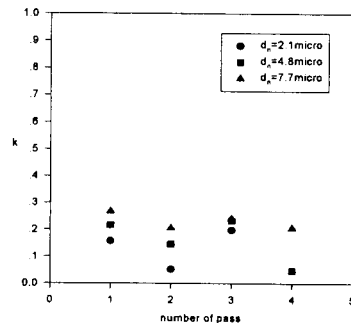


Fig. 5 Value of k ($V_w=0.163$ m/s)

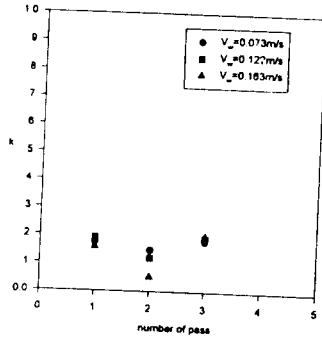


Fig. 6 Value of $k(d_n=2.1, 2.3, 2.7\mu\text{m})$

- 상향연삭(upgrinding)과 하향연삭(down grinding)의 차이가 발생하며 하향연삭(downgrinding)의 k 값(대략 0.01~0.11)이 더 큼을 알 수 있었다.
- 이송속도가 증가할수록 k 값은 감소한다.
- 절삭깊이(depth of cut)가 증가할수록 k 값은 증가한다.

참고문헌

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