

# 스러스트 내면 연삭가공의 가공면 정도에 관한 연구

최환\*, 서창연\*\*, 서영일\*\*\*, 이충석\*\*\*\*,#

\*금오공과대학교 기계설계공학과, \*\* (주)베셀, \*\*\* (주)에스엘글로벌, \*\*\*\* 씨에스엔테크

## A Study on the Precision of a Machined Surface in Thrust Internal Grinding

Hwan Choi\*, Chang-Yeon Seo\*\*, Young-Il Seo\*\*\*, Choong-Seok Lee\*\*\*\*,#

\*Dept. of Mechanical Design Engineering, Kumoh National University of Technology.

\*\*VESSEL CO., LTD., \*\*\*SL Global CO. LTD., \*\*\*\*CS&Tech. Company

(Received 18 May 2016; received in revised form 21 July 2016; accepted 29 August 2015)

### ABSTRACT

In this paper, the grinding characteristics in thrust internal grinding have been studied using vitreous CBN wheels with a machining center. Grinding experiments have been performed according to grinding conditions such as wheel feed speed, cut depth, workpiece speed, rate of grinding width and number of grinding passes. The machining error, shape of machined surfaces, grinding force, and surface roughness have been investigated through these experiments. Based on the experimental results, the grinding characteristics on the machined surface in the internal thrust grinding are discussed.

**Key Words :** Thrust Internal Grinding(스러스트 내면 연삭), Shape of Machined Surface(가공면 형상), Machining Error(가공오차), Surface Roughness(표면거칠기), Grinding Force(연삭력)

### 1. 서 론

제품의 형상이 점차 다양해짐에 따라 범용 연삭기 활용이 불가능한 제품의 연삭가공을 위해 머시닝센터의 실효성이 점차 늘어나고 있는 가운데, 머시닝센터를 이용한 고정도 가공에 대한 연구가 수행되고 있다<sup>[1,2]</sup>. 머시닝센터를 이용한 연삭가공은 장비의 규격에 따라 가용한 킴(quill)축의 직경과 연삭숫돌의 직경이 한계가 있고, 더욱이 내면연삭가공의 경우는 평면연삭이나 외면연삭과는 달리 공작물의 내경이 제한적이므로 공구계의 강성저하로 인

해 고정도, 고능률 연삭가공의 한계가 있다.

스러스트(thrust) 내면 연삭은 공작물의 반경방향으로 연삭 숫돌을 절입한 후, 숫돌과 공작물을 상대 회전시켜서 숫돌을 주축의 축방향으로 이송하면서 가공하는 방법으로, 숫돌의 스러스트 이송속도와 절입깊이, 회전수 등의 변화에 따라서 연삭특성들이 다르게 나타나게 된다. 이러한 연삭특성들 중 가공면의 형상과 가공오차는 공작물의 가공도를 평가하는 데 매우 중요한 요소이다.

따라서 본 연구에서는 비트리파이드(vitrified) CBN 숫돌을 사용하여 합금공구강 STD-11 (HRC 60)을 머시닝센터상에서 스러스트 내면 연삭 실험을 수행하였고, 공작물 원주속도( $V_w$ ), 스러스트 이

# Corresponding Author : csntech99@gmail.com

Tel: 070-4117-4432, Fax: 0504-040-4432

송속도( $V_t$ ), 절입깊이( $a_s$ ), 연삭폭비( $W$ ), 연삭횟수의 변화에 따른 가공면의 형상, 가공오차, 연삭력, 표면거칠기 변화를 통해 가공면에 미치는 영향을 검토하였다. 여기서 연삭폭비( $W$ )는 슷돌 폭에 대한 공작물 가공폭의 비로 정의하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 장치 구성도

Fig. 1은 본 연구에 사용된 스러스트 내면 연삭 실험 장치의 구성도를 나타낸 것으로, 회전 테이블형 지그를 자체 제작하여 사용하였다. 회전 테이블은 속도제어 모터와 타이밍 벨트를 이용하여 구동되며 별도의 제어 드라이버를 이용하여 공작물의 회전수를 10~180rpm의 범위까지 조절할 수 있도록 제작하였다. 실험 장치는 연삭가공시 휠의 접선방향, 법선방향의 연삭저항을 측정하기 위하여 압전형 공구동력계를 머시닝센터 베드 위에 설치하고, 그 위에 제작된 회전 테이블형 지그를 부착하여 공작물을 고정하였다.

### 2.2 실험조건 및 방법

본 연구에 사용된 슷돌은 비트리파이드(V) CBN 소형 슷돌을 사용하였으며, 입도 #230, 집중도 100, 결합도는 G등급이다. 슷돌의 크기는 직경  $\phi 35$ , 폭 20mm이며, 길이 100mm로 정밀 가공된 고속도강 쉘 측에 너트를 이용하여 고정하였다.

공작물은 합금공구강 (STD-11)의 환봉을 외경(D)  $\phi 60$ ( $\phi 80$ ), 길이(L) 70mm로 가공하고, 스러스트내면 연삭가공을 수행하기 위해 내경(d)을  $\phi 38$ ( $\phi 60$ ), 스러스트 연삭폭이 10, 20, 30mm가 되도록 선반가공을 하여 제작한 후 경도  $H_{RC} 60$ 으로 열처리하여 사용하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 공작물의 형상을 나타내었고, Table 1에 본 연구의 실험조건을 나타내었다.

스러스트 내면 연삭 가공을 수행하기 위하여 슷돌을 머시닝센터의 x축의 (-)방향으로 절입깊이를 설정하고, 슷돌과 공작물의 회전방향을 반대로 하여 z축의 (-)방향으로 이송속도( $V_t$ )를 변화시켜가며

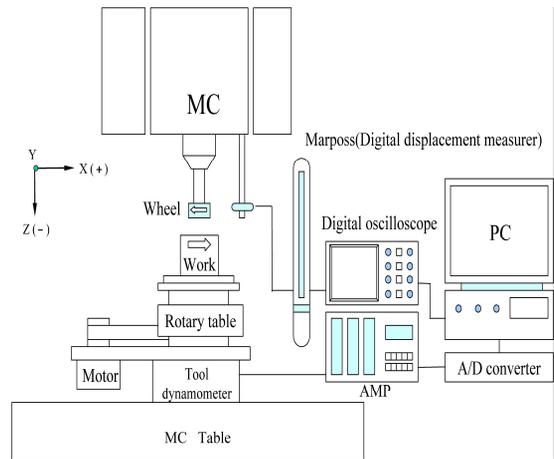


Fig. 1 Experimental set-up

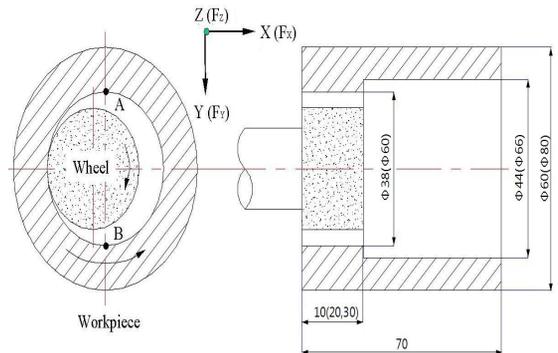


Fig. 2 Setting of wheel position and workpiece shape

습식 상향 스러스트 내면 연삭실험을 수행하였다. 트루잉(truing)과 드레싱(dressing)은 단석 다이아몬드 드레서(1/2")를 사용하여 실험 전 휠의 진원을 유지하기 위하여 휠의 측면과 밀면을 트루잉 하였으며, Table 1의 조건으로 매 실험마다 드레싱을 실시하였다. 공작물의 표면의 진원과 표면경사의 오차를 최소화하기 위하여 정삭가공을 실시하였다. 정삭가공 방법은 플런지(plunge) 연삭가공 절입깊이 1 $\mu$ m 씩 미소 절입하여 공구동력계에서 얻어지는 힘의 값이 처음 공작물과 슷돌이 처음 접하는 순간의 값과 유사한 값이 될 때까지 스파크 아웃(spark-out) 가공을 행하여 기준을 잡았다.

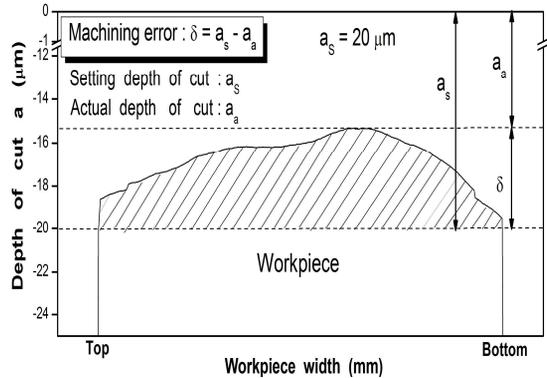
**Table 1 Experimental conditions for grinding**

Grinding machine	Vertical type machining center (ECOMIL-35V, 7.5kW)	
Grinding wheel	CBN 230 G 100 V Diameter: $\phi 35$ Width: 20mm	
Quill	Diameter: $\phi 20$ Length: 100mm	
Wheel speed ( $V_s$ )[m/min(rpm)]	330 (3,000)	
Workpiece speed ( $V_w$ )[m/min(rpm)]	4.8(40), 9.6(80), 14.3(120) 7.54(40)	
Feed speed ( $V_f$ )[mm/min]	10, 20, 30	
Depth of cut( $a_s$ )[ $\mu\text{m}$ ]	10, 20, 30	
Width rate (W)	0.5, 1, 1.5	
Dressing condition	Wheel speed: 143m/min Feed speed: 200mm/min Depth of cut: 5 $\mu\text{m}$ $\times$ 2pass Dresser: Single-point diamond	
Grinding fluid	Syntilo-9954(Castrol, 40:1)	
Workpiece [mm]	STD-11 (HRC 60) 60(80)D $\times$ 38(60)d $\times$ 10(20,30)B $\times$ 70L	
Measuring instrument	Force	Tool dynamometer Kistler, 9257B
	Roughness	Mitutoyo, TV-600
	Displacement	Marposs, E4N (Resolution: 0.1 $\mu\text{m}$ )

연삭폭비(W)와 가공회수 관한 실험은 연삭폭비를 0.5, 1, 1.5 세 가지 경우로 나누어 실시하였으며, 이때의 공작물은 내경 60mm의 동일한 시편을 제작하여 실험을 실시하였고, 나머지 조건은 Table 1과 동일하게 진행하였다.

### 2.3 가공면의 형상 및 가공오차의 측정

내면 연삭에 있어서는 공작물의 내경에 따라 휠 직경의 선택에 많은 제한이 있으므로 소경의 연삭 휠이 사용되는 경우가 대부분이며, 이 경우 휠의 강성이 저하되어 이로 인해 설정절입깊이( $a_s$ )와 실제절입깊이( $a_a$ )의 차에 의한 가공오차가 발생하게 된다.<sup>[3]</sup> 이러한 가공오차는 공작물의 형상정도와 가공정도에 직접적인 영향을 미치므로 본 연구에서는 가공조건의 변화에 따른 가공면의 형상과 실제절입



**Fig. 3 An example of measured machining errors**  
( $V_s=330\text{m/min}$ ,  $V_f=20\text{mm/min}$ ,  $V_w=4.8\text{m/min}$ ,  $a_s=20\mu\text{m}$ ,  $W=0.5$ )

깊이 및 가공오차를 측정하여, 스러스트 내면 연삭에서의 가공정도를 살펴보았다.

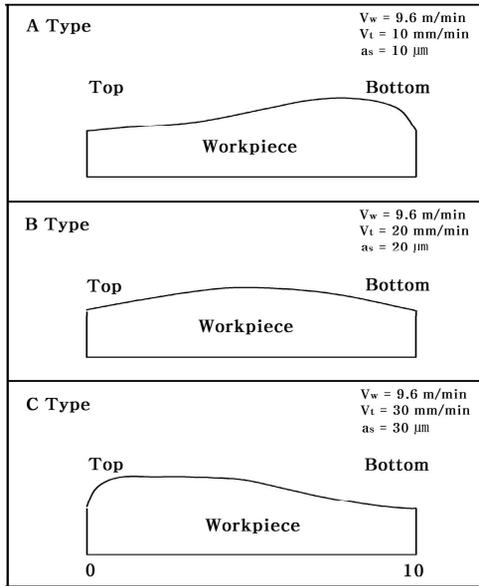
가공조건의 변화에 따른 가공오차 및 가공면의 형상을 측정하기 위하여 실험 전 공작물의 가공면을 수 회 스파크 아웃을 실시하고, 이 면에 분해능 0.1 $\mu\text{m}$ 인 디지털 변위 측정기를 접촉시켜 측정 기준으로 설정하였다. 실험 조건에 따라 스러스트 내면 연삭 실험을 행한 후 가공된 공작물 상단에 변위 측정기를 접촉시키고, 공작물의 하단으로 이송시켜 슷들에 의해 실제로 가공된 실제절입깊이를 측정하였다. 가공오차( $\delta$ )는 설정절입깊이( $a_s$ )와 가공 후 측정된 실제절입깊이( $a_a$ )와의 차이다. Fig. 3에 실험에 의해 측정된 실제 절입깊이와 가공오차 측정의 예를 나타내었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 가공면의 형상

Fig. 4는 스러스트 내면 연삭에서 연삭조건별 발생된 연삭가공면의 형상 유형을 보여주는 것으로 이해를 돕기 위해 특정 가공조건의 결과만을 나타내었다.

스러스트 내면 연삭가공시 발생하는 가공면의 형상을 분석한 결과, 모든 실험결과에 대하여 Fig. 4와 같은 세 가지 유형(A type, B type, C type)으로



Width of machined surface (mm)  
**Fig. 4 Type of machined surface shape**  
 ( $V_s=330\text{m/min}$ ,  $W=0.5$ )

구분할 수 있었으며, 본 연구범위 내에서 이 세 가지 유형을 벗어나는 가공면의 형상은 존재하지 않았다. A type은 가공면의 형상이 슷돌 진입부(상단부)보다 후퇴부(하단부)로 갈수록 점점 높아지는 형태로 최대 가공오차가 슷돌 후퇴부 쪽에서 발생되었다. B type은 가공면의 중앙부가 가장 높고 슷돌 진입부와 후퇴부는 비슷한 형태로 가공면의 중앙부에 최대 가공오차가 발생하는 유형이다. C type은 가공면이 슷돌 진입부가 가장 높고 후퇴부로 갈수록 낮아져 슷돌 진입부 쪽에서 최대 가공오차가 발생하는 유형이다.

Table 2는 가공조건의 변화에 따라 가공면의 형상 유형(A, B, C Type)을 측정하여 나타낸 결과이다. Table 2의 (a)는 연삭폭비(W) 0.5인 경우, 공작물 속도( $V_w$ )와 스러스트 이송속도( $V_t$ ), 설정절입깊이( $a_s$ )를 각각 변화시켰을 때의 가공면 형상 유형을 나타내었고, (b)는 공작물의 속도( $V_w$ )를 일정하게 하고, 연삭폭비(W)와 스러스트 이송속도( $V_t$ ), 설정절입깊이( $a_s$ )를 각각 변화시켰을 때 가공면의 형상을 나타낸 결과이다.

Table 2 (a)의 실험결과를 보면 가공면의 형상은

**Table 3 Classification of types according to grinding conditions**

		$V_t$ (mm/min)			
		10	20	30	
4.8	$V_w$ (m/min)	$a_s$ ( $\mu\text{m}$ )			
		10	A	A	B
		20	B	B	C
9.6	$V_w$ (m/min)	$a_s$ ( $\mu\text{m}$ )			
		10	A	A	B
		20	B	B	C
14.3	$V_w$ (m/min)	$a_s$ ( $\mu\text{m}$ )			
		10	A	A	B
		20	C	C	C
		30	C	C	C

(a) Experiment 1 ( $V_s=330\text{m/min}$ ,  $W=0.5$ )

		$V_t$ (mm/min)			
		10	20	30	
0.5	W	$a_s$ ( $\mu\text{m}$ )			
		10	A	A	B
		20	B	B	C
1	W	$a_s$ ( $\mu\text{m}$ )			
		10	B	A	A
		20	A	A	A
1.5	W	$a_s$ ( $\mu\text{m}$ )			
		10	B	A	A
		20	B	A	A
		30	A	A	A

(b) Experiment 2 ( $V_s=330\text{m/min}$ ,  $V_w=7.54 \text{ m/min}$ )

설정절입깊이( $a_s$ )가 증가함에 따라서 A type에서 C type으로 변화하였고, 스러스트 이송속도( $V_t$ )가 빨라질수록 절입깊이가  $10\mu\text{m}$  인 경우는 A type에서 B type으로, 절입깊이가  $20\mu\text{m}$  인 경우는 B type에서 C type으로 변화하는 경향이 있으나, 절입깊이  $30\mu\text{m}$ 인 경우와 공작물의 회전속도( $V_w$ ) 변화에 의한 가공면의 유형변화는 미비하였다. 그러나 Table 2 (b)의 연삭폭비 1과 1.5인 경우의 실험결과에서는 대부분이 A type의 가공면 유형을 나타내었으며 오히려 재료제거율이 증가할 수록 A type의 형상을 확연히

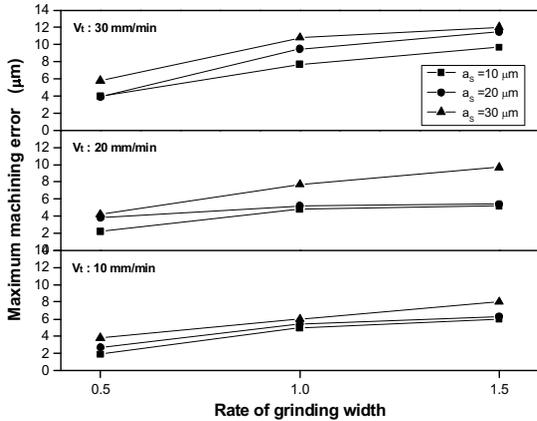


Fig. 5 Maximum machining error according to grinding conditions ( $V_s=330\text{m/min}$ ,  $V_w=7.54\text{m/min}$ )

확인할 수 있었다. 이 이유는 연삭폭비가 커질수록 휠과 공작물의 접촉면적이 더 커지고 어느 순간부터는 공작물이 휠 전체와 접촉된 상태에서 연삭이 이루어지기 때문에 휠의 탄성변형이 더 크고, 탄성회복이 이루어지지 않고 탄성변형이 점점 축적되므로 A type의 가공면 형상을 나타낸다고 판단된다.

이러한 결과로 볼 때, 설정절입깊이 및 연삭폭비의 변화가 연삭가공면의 형상에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 가공정도

스러스트 내면 연삭시 가공조건의 변화에 따른 가공정도를 알아보기 위해 연삭가공을 1회 수행한 후 가공오차 및 표면거칠기를 측정하여 Fig. 5와 Fig. 6의 결과를 얻었다.

Fig. 5는 휠과 공작물의 동일원주속도에서 스러스트 이송속도, 설정절입깊이, 연삭폭비 변화에 따른 가공오차의 변화를 나타낸 것으로, 스러스트 이송속도와 설정절입깊이, 연삭폭비가 증가할수록 가공오차가 커지는 경향을 나타내었다. 이와 같은 이유는 스러스트 이송속도 및 설정절입깊이, 연삭폭비가 증가할수록 연삭력이 증가하기 때문에 이에 따라 가공오차도 증가한 것으로 판단되며, 특히 연삭폭비가 증가할수록 휠의 마모량이 증가하기 때문에 가공오차도 커지는 것<sup>[4]</sup>으로 예상할 수 있다.

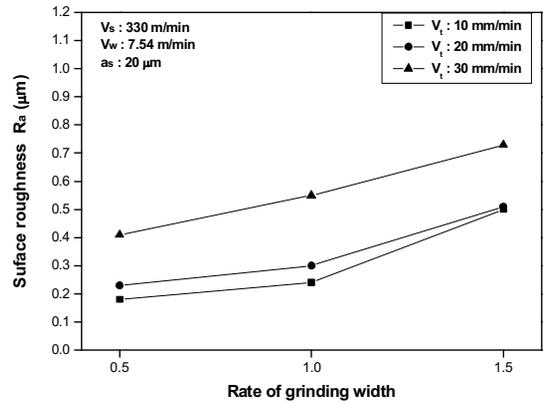


Fig. 6 Surface roughness for rate of grinding width and feed speed

Fig. 6은 스러스트 이송속도와 연삭폭비 변화에 따른 가공면의 표면거칠기 변화를 나타낸 그래프로, 스러스트 이송속도가 느릴수록, 연삭폭비가 작을수록 가공면의 표면거칠기가 좋게 나타났다.

Fig. 5와 Fig. 6의 결과를 통해 고찰해보면, 스러스트 내면 연삭가공에서 가공오차는 작고 표면거칠기가 우수한 고정도 가공을 위해서는 스러스트 이송속도, 절입깊이, 연삭폭비를 작게 하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 가공횟수

스러스트 내면 연삭시 1회 가공만으로는 가공오차가 발생하기 때문에 이러한 가공오차를 감소시키기 위해서는 스파크 아웃을 실시하여 가공오차를 줄일 필요가 있다. 본 절에서는 스파크 아웃 회수에 따른 연삭력과 가공오차, 표면거칠기 변화를 알아보았다.

Fig. 7은 가공횟수, 절입깊이, 연삭폭비에 따른 휠의 법선방향의 연삭력( $F_n$ )의 변화를 나타낸 그래프이다. 연삭가공횟수 3회까지는 가공횟수가 증가할수록, 절입깊이가 낮을수록, 연삭폭비가 작을수록 연삭력이 급격히 감소하는 경향을 보이고 있으며, 가공횟수 3회 이후부터는 연삭폭비나 설정절입깊이의 변화와 상관없이 연삭력이 일정한 값에 수렴하는 경향을 나타내었다. 이 같은 결과를 고찰해보면,

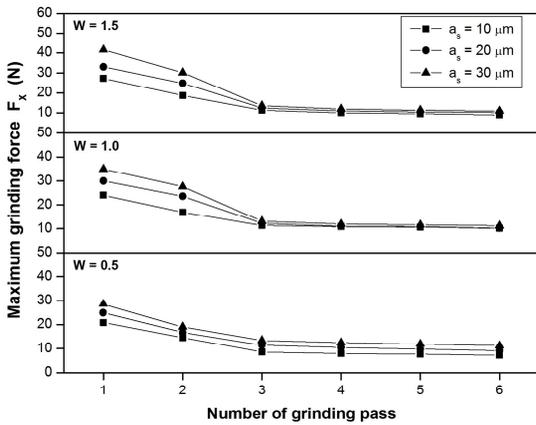


Fig. 7 Maximum grinding force according to the number of grinding pass ( $V_s=330\text{m/min}$ ,  $V_t=20\text{mm/min}$ ,  $V_w: 7.54\text{m/min}$ )

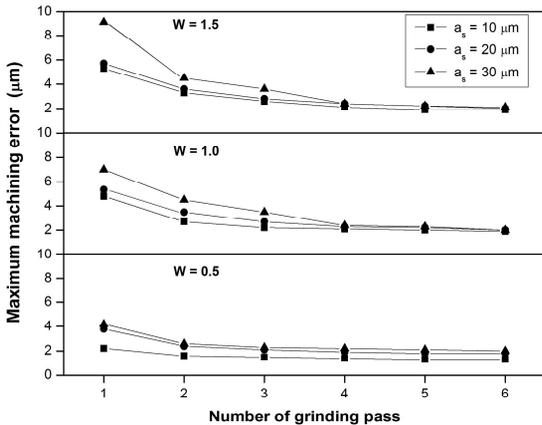


Fig. 8 Maximum machining error according to the number of grinding pass ( $V_s=330\text{m/min}$ ,  $V_t=20\text{mm/min}$ ,  $V_w: 7.54\text{m/min}$ )

가공횟수 3회 이후부터는 스파크 아웃을 진행하더라도 휠이 공작물을 가공하기보다는 주로 마찰만을 일으키는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 결과를 좀 더 자세히 알아보기 위해 가공횟수 증가에 따른 가공오차를 측정하여 Fig. 8에 나타내었다. 가공횟수가 증가할수록 가공오차의 변화를 살펴보면, 가공오차의 변화도 Fig. 7의 연삭력 변화와 마찬가지로 연삭가공 3회까지는 가공횟수가 증가할수록, 설절입깊이와 연삭폭비가 작을수록 가공오차가 급

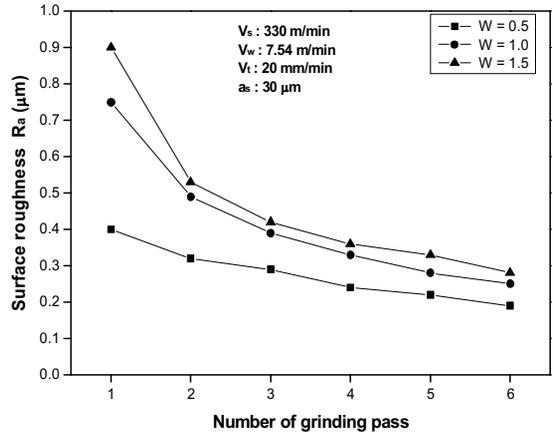


Fig. 9 Surface roughness according to the number of grinding pass and rate of grinding width

격히 감소하였으며, 가공횟수 3회 이후부터는 가공오차의 감소폭은 미세하고 일정한 값에 수렴하는 경향을 나타내었다.

Fig. 9는 공작물 원주속도, 스러스트 이송속도, 절입깊이가 동일한 상태에서 가공횟수 증가와 연삭폭비 변화에 따른 가공면의 표면거칠기를 변화를 나타낸 것으로, 가공횟수가 증가할수록 연삭폭비가 작을수록 연삭가공면의 표면거칠기가 좋아짐을 확인할 수 있다. Fig. 9의 가공횟수에 따른 연삭가공면의 표면거칠기 변화는 가공횟수 3회까지는 급격히 감소하다가 3회 이후부터는 감소폭이 완만해짐을 보여주고 있다. 이는 Fig. 7과 Fig. 8의 가공횟수에 따른 연삭력과 가공오차의 변화와 동일한 양상을 보여주고 있다.

위의 결과들로부터 살펴보면, 연구범위 내에서 가공횟수가 증가할수록 가공정도는 향상되나 3회 전후를 기점으로 그 향상폭이 급격히 감소함을 나타내고 있다. 즉 스러스트 내면 연삭가공에서 경제성과 효율성을 고려한 스파크 아웃의 회수는 3회가 적당하다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 한정된 범위내에서 진행되어 스러스트 내면연삭가공 전체에 적용하기는 무리가 있지만, 예측 모델로서 활용가치는 충분하다고 여겨진다.

향후 본 연구의 연장선으로 연삭휠과 공작물 소재, 가공조건의 범위를 확대하여 추가 연구를 진행할 필요가 있다.

본 연구에서는 머시닝센터를 이용하여 비트리파이드 CBN 스톨로 합금공구강의 스러스트 내면 연삭실험을 수행하였고, 연삭가공 조건에 따른 가공면의 형상, 가공오차, 연삭력, 표면거칠기를 측정하여 비교 분석한 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 연삭가공면의 형상은 연삭조건이 변함에 따라 영향을 받는다.
2. 스러스트 이송속도, 절입깊이, 연삭폭비가 작을수록 가공오차가 작고 표면거칠기가 좋아진다.
3. 가공횟수에 따른 연삭력과 가공오차, 표면거칠기 변화 그래프는 동일한 양상을 나타내었다.
4. 가공횟수가 증가할수록 가공정도는 향상되나, 가공횟수 3회를 기점으로 향상 폭이 급격히 감소하였다.

## 후기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비 (과제번호: 2015-104-039)에 의하여 지원된 논문이며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Seo, Y. I., Her, M. S., Choi, H., Lee, J. C. and Cheong, S. H., "A Study on the Grinding Force Characteristics in the Internal Plunge Grinding", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 54-59, 1999.
2. Kim, L. S., Kim, J. M., Choi, C., Liang, L. J., Lyu, S. K., "Study on the Teeth Grinding Condition of SCM415H Gears", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 2, pp. 19-24, 2015.
3. Choi, H., Kim, C. S., Park, W. K., and Lee, C. S., "The Effects on a Side-cut Grinding depend on the Change of the Quill Rigidity", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 5, pp. 36-41, 2013.
4. Choi, H., Seo, C. Y., Park, W. K., and Lee, C. S., "A Study on the Internal Thrust Grinding by Machining Center", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 4, pp. 55-61, 2015.