

머시닝센터를 이용한 내면 스러스트 연삭가공에 관한 연구

최환*, 서창연**, 박원규***, 이충석****.#
*금오공과대학교, ** (주)베셀, ***경기과학기술대학, ****씨에스엔테크

A Study on the Internal Thrust Grinding by Machining Center

Hwan Choi*, Chang-Yeon Seo**, Won-Kyue Park***, Choong-Seok Lee****.#

*Dept. of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology, **VESSEL CO., LTD,

Dept. of Automotive Engineering, Gyeonggi College of Science and Technology, *CS&Tech Company

(Received 30 March 2015; received in revised form 2 June 2015; accepted 22 June 2015)

ABSTRACT

In this paper, the grinding characteristics of internal thrust grinding were studied with vitreous CBN wheels using a machining center. Grinding experiments were performed according to grinding conditions, such as wheel feed speed and depth of cut, workpiece speed, and rate of grinding width. Additionally, the grinding force and grinding ratio were investigated through these experiments. Based on the experimental results, the grinding characteristics of internal thrust grinding were discussed.

Key Words : Internal Thrust Grinding(내면 스러스트 연삭), Grinding Force(연삭력), Spark-out(스파크 아웃), Rate of Grinding Width(연삭폭비), Grinding Ratio(연삭비), Machining Center(머시닝센터)

1. 서 론

산업발달과 더불어 제품의 형상이 다양화 되어 평면, 원통연삭만으로는 불가능한 연삭가공물이 많아짐에 따라 머시닝센터를 활용한 연삭가공의 필요성이 증가하고 있다. 이에 따라 머시닝센터를 이용한 고정도 가공을 위한 연구^[1-3] 활동도 활발하게 진행되고 있다. 그 중 내면 연삭가공은 초정밀 산업기기 및 자동차 산업, 항공 산업에 사용되는 정밀 부품을 가공하기 위한 필수적인 가공방법 중의 하나이다. 하지만 이러한 내면 연삭가공법 중 플런지 연삭가공법에 대한 연구^[4,5]에 비해,

스러스트 연삭가공법에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

내면 스러스트 연삭은 공작물의 반경방향으로 연삭 스톨을 절입한 후, 스톨과 공작물을 상대 회전시켜서 스톨을 주축의 축방향으로 이송하면서 가공하는 방법이다. 그러므로 내면 스러스트 연삭 가공은 스톨의 스러스트 이송속도와 절입깊이, 회전수, 공작물 가공폭 등의 변화에 따라서 연삭특성들이 다르게 나타난다.

따라서 본 연구에서는 비트리파이드 CBN 스톨을 사용하여 합금공구강 STD-11(H_{RC} 60)을 머시닝센터 상에서 내면 스러스트 연삭 실험을 수행하여, 가공조건의 변화에 따른 연삭저항력 변화를 알아보고, 가공 조건별 연삭비를 측정하여 비교 분석하였다. 또한, 스톨 폭에 대한 공작물 가공 폭

Corresponding Author : csntech99@gmail.com

Tel: +82-70-4117-4432

의 비를 연삭폭비(W)라고 정의하고, 연삭폭비의 변화에 따른 스러스트 연삭가공 특성을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 장치 구성도

Fig. 1은 본 연구에 사용된 내면 스러스트 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 슷들의 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 슷들은 비트리파이드(V) 본드를 사용한 CBN 소형 슷들을 사용하였으며, 입도 #230, 집중도 100, 결합도는 G등급이다. 슷들의 크기는 직경 $\phi 35$, 폭 20mm이며, 길이 100mm로 정밀가공된 고속도강 쥬 축에 너트를 이용하여 고정하였다.

공작물은 합금공구강 (STD-11)의 환봉을 외경(D) $\phi 60$, 내경(d) $\phi 38$, 길이(S) 70mm로 가공하고, 내면 스러스트 연삭가공을 수행하기 위해 스러스트 연삭폭(B_{work})이 각각 10, 20, 30mm가 되도록, 나머

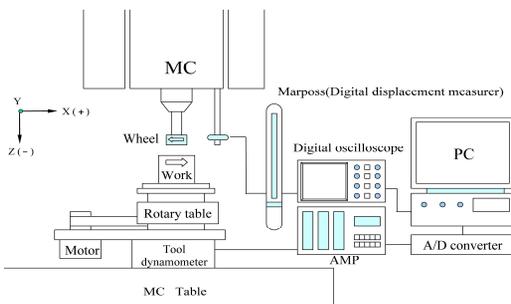


Fig. 1 Experimental set-up

지 내면을 $\phi 44$ 로 선반가공을 하여 제작한 후 경도 $H_{RC} 60$ 으로 열처리하여 사용하였다. Fig. 2은 슷들과 공작물의 형상을 나타내고, Table 1에 본 연구의 실험조건을 나타내었다.

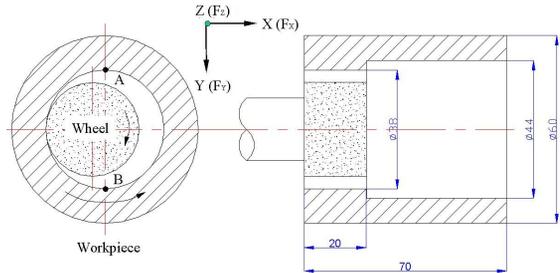


Fig. 2 Setting of wheel position and workpiece shape

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 [m/min, (rpm)]	329 (3,000)	
Workpiece speed (V_w) [m/min(rpm)]	4.2(40), 9.8(80), 18.95(120)	
Feed speed (V_t) [mm/min]	10, 20, 30	
Width rate (W)	0.5, 1, 1.5	
Depth of cut (a_s) [μm]	10, 20, 30	
Dressing condition	Wheel speed: 143m/min Feed speed: 200mm/min Depth of cut: $5\mu m \times 2$ pass Dresser: Single-point diamond	
Grinding fluid	Syntilo-9954(Castrol, 40:1)	
Workpiece [mm]	STD-11 ($H_{RC} 60$) Size: $60D \times 38d \times 10(20,30)B \times 70L$	
Measuring instrument	Force	Tool dynamometer Kistler, 9257B
	Roughness	Mitutoyo, TV-600

내면 스러스트 연삭 가공을 수행하기 위하여 슷들을 머시닝센터의 x축의 (-)방향으로 절입깊이를 설정하고, 슷들과 공작물의 회전방향을 반대로 하여 z축의 (-)방향으로 이송속도(V)를 변화시켜가며 습식 상향 내면 스러스트 연삭실험을 수행하였다. 트루잉과 드레싱은 단석 다이아몬드 드레서(1/2")를 사용하여 실험 전 슷들의 진원을 유지하기 위하여 슷들의 측면과 밀면을 트루잉 하였으며, Table 1의 조건으로 매 실험마다 드레싱을 실시하였다.

공작물 표면의 진원과 표면경사의 오차를 최소화 하기 위하여 정삭가공을 실시하였다. 정삭가공 방법은 절입깊이 1 μ m씩 미소 절입하여 공구동력계에서 얻어지는 힘의 값이 처음 공작물과 슷들이 처음 접하는 순간의 값과 유사한 값이 될 때까지 스파크 아웃(Spark-out) 가공을 행한 후, z축을 서서히 움직이면서 스러스트 가공을 행하여 기준을 잡았다.

내면 연삭가공에 있어서 데이터의 신뢰성을 위해, 슷들의 회전중심과 공작물의 회전중심을 절입 방향의 연삭선상에 일치시키는 것은 매우 중요하다. 이를 위한 방법으로 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 슷들을 머시닝센터의 y축 방향으로 점 A와 B부위에 각각 접촉하여 좌표 값의 1/2 지점에 주축의 중심을 위치시킨 후, x축 방향으로 이동시켜 공작물과 슷들이 만나는 지점을 절입의 기준점으로 하고, 슷들의 절입 방향을 x축으로 하여 실험을 실시하였다.

2.3 연삭저항력과 연삭비의 측정

내면 스러스트 연삭에서는 스러스트 연삭특정상 연삭력이 x축 방향으로의 연삭력 F_x 와 y축 방향으로의 연삭력 F_y , 스러스트 이송방향으로의 연삭력 F_z 가 동시에 작용한다. Fig. 1의 장치구성에서 슷들로 공작물을 연삭하면 연삭저항이 지그를 통해 공구동력계로 직접 전달되고, 공구동력계에서는 이 연삭저항이 아날로그 신호로 발생하게 된다. 공구동력계에서 발생한 신호는 다채널 증폭기에서 증폭된 후 아날로그-디지털변환기를 통해 디지털화 되어 개인용 컴퓨터로 전송된다. 이 전송된 디지털신호를 소프트웨어를 이용해 분석하여 연삭저항력을

검출하였다.

스들의 마모량 측정은 가공 전과 후에 슷들로 흑연판을 가공하여 표면조도측정기로 흑연판의 단차를 측정한 후, 가공 전과 가공 후의 차이를 계산하여 산출하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연삭 영역과 스파크 아웃 영역

내면 스러스트 연삭가공은 슷들이 공작물과 상대 회전운동을 하며, 슷들과 공작물의 접촉면적이 시간에 따라 변하기 때문에 연삭저항력 곡선 역시 시간에 따라 변하게 된다. 이러한 내면 스러스트 연삭가공에서 발생하는 연삭저항력의 변화를 살펴보기 위해서 연삭시간의 경과에 따른 연삭저항력을 측정하여 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 내면 스러스트 연삭가공에서 연삭저항력의 형태를 연삭 영역(Grinding time)과 스파크 아웃 영역(Spark-out time)으로 나누어 정의하였고, 하단에 영역별 슷들의 공작물 가공과정을 그림(a, b, c, d)으로 나타내었다. 연삭 영역은 a-b 구간으로 슷들이 z축 방향으로 스러스트 연삭할 때, 슷들의 밀부분이 공작물 하단부에 도착하는 시간으로 실제 연삭가공이 이루어지는 구간이며, 스파크 아웃 영역은 b-d 구간으로 연삭시간 이후 슷들의 측면이 공작물과 마찰 및 미소절삭을 하면서 스파크 아웃을 일으키며 슷들이 공작물을 완전히 빠져 나가기

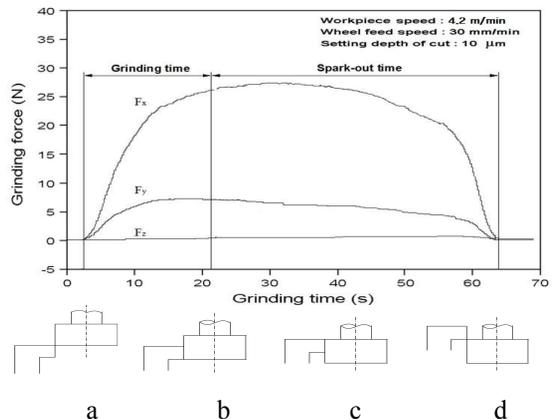


Fig. 3 Grinding force versus grinding time(W=0.5)

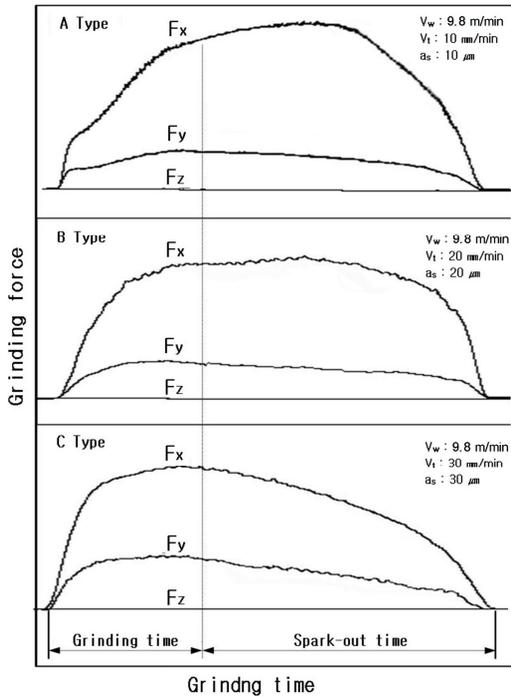


Fig. 4 Type of grinding forces

까지의 구간이다.

Fig. 3의 연삭저항력 경향을 살펴보면, 이송분력인 F_z 의 경우는 F_y , F_x 에 비해 매우 작기 때문에 가공시간에서 거의 일정한 값으로 변화가 없었으며, 접선분력인 F_y 의 경우는 연삭영역에서는 점차 증가하다가 스파크 아웃 영역에 접어들면서 점차 감소하는 경향을 나타내었고, 수직분력인 F_x 는 연삭영역에서 초기에 급증하다가 스파크 아웃 영역에서도 다소 증가한 후 점차 감소하다 마지막에 다시 급감하는 형태의 그래프를 나타내었다.

Fig. 4는 내면 슬러스트 연삭에서 연삭조건별 발생된 연삭저항력의 그래프의 유형을 나타낸 것이다. 연삭저항력의 형태는 위에서부터 A type, B type, C type의 세 가지 유형으로 측정되었다. A type은 슬러스트 연삭가공 중 최대 연삭저항력이 스파크 아웃 영역에서 발생하는 유형이고, B type은 최대 연삭저항력이 연삭영역과 스파크 아웃 영역 양쪽에 비슷하게 발생하는 유형, C type은 최대 연삭저항력이 연삭영역에서 발생하는 유형이다. 즉,

내면 슬러스트 연삭가공에서 발생하는 연삭저항력의 최대값은, 연삭영역에서 발생하기도 하고 스파크아웃영역에서 발생하기도 한다. 본 연구에서의 최대 연삭력은 실제 연삭가공이 이루어지는 연삭영역 내에서만 측정된 연삭력의 최대값을 최대연삭력으로 정의하였다.

재료제거율(Material removal rate)이 증가할수록 연삭저항력 그래프는 A type에서 점점 C type의 형상으로 변화되는 경향을 보였는데, 이와 같은 이유는 공작물의 재료제거율 증가에 따른 킨(Quill)의 탄성회복에 기인한다고 여겨진다.

즉, 설정절입깊이가 작은 경우에 연삭영역에서 킨에 축적되는 탄성변형에너지가 낮아 스파크 아웃 영역에서도 탄성회복이 되지 못하고 계속해서 축적만 되어, 결국 후퇴부로 갈수록 연삭저항력이 점점 증가하는 A type의 그래프가 형성되며, 설정절입깊이가 증가함에 따라 연삭영역에서 킨에 축적된 탄성변형에너지가 스파크 아웃 영역에서 킨의 급격한 탄성회복이 이루어져, 누적오차량을 제거하고 마찰저항도 감소하면서 연삭저항력이 줄어드는 C type의 그래프를 보인다고 판단된다. B type의 경우, 킨에 축적되는 탄성에너지와 회복되는 탄성에너지가 거의 동일한 경우라고 볼 수 있다.

가공 중 최대 연삭저항력의 발생위치가 다른 이유는 내면 슬러스트 연삭의 가공특성상 슷돌과 공작물의 접촉면적이 시간에 따라 변화하기 때문이며, 슷돌의 치수, 가공속도, 절입량 등 가공조건이 달라짐에 따라 발생하는 연삭저항력 그래프의 형상도 다양하게 나타날 수 있음을 알 수 있다.

3.2 연삭폭비

Fig. 5는 연삭폭비가 0.5인 경우에서 슷돌의 회전수를 3,000rpm(329m/mim)으로 일정하게 한 후 공작물 회전수, 설정절입깊이, 슬러스트 이송속도의 변화에 따라 최대연삭력의 변화를 나타낸다. Fig. 5에서 최대연삭력은 슬러스트 이송속도가 증가할수록 점차 증가하는 경향을 나타내었으며, 공작물 회전수의 변화에는 큰 차이를 나타내지 않음을 확인할 수 있다. 이와 같은 원인은, 연삭가공에서 저항력은 슬러스트 이송속도가 증가할수록 입자의 최대절입

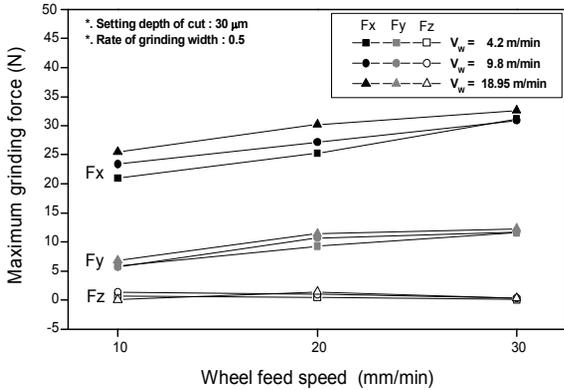


Fig. 5 Maximum grinding force versus wheel feed speed and workpiece revolution

깊이가 증가하기 때문이며, 공작물 회전속도의 증가는 입자 최대절입깊이에 미치는 영향이 작기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6은 슷돌의 회전수를 3,000rpm(329m/min), 공작물의 회전수를 40rpm(4.2m/min)으로 일정하게 한 후 설정절입깊이와 스러스트 이송속도 및 연삭폭비의 변화에 따른 최대연삭력을 살펴본 것이다. 최대연삭력은 절입깊이, 스러스트 이송속도가 증가할수록 커지는 경향을 나타내었는데, 이는 절입깊이와 이송속도가 증가하면 입자의 최대절입깊이가 증가하기 때문으로 여겨진다.

또한 연삭폭비가 증가할수록 최대연삭력이 커지는 경향을 나타냈는데, 이는 연삭폭비가 증가하게 되면 연삭영역이 증가하게 되고, 이에 따라 슷돌에 의해 가공되는 공작물 제거량과 연삭시간이 증가하게 되어, 결과적으로 슷돌의 마모량이 커지기 때문으로 생각된다.

3.3 연삭비

연삭비(Grinding ratio; G-ratio)는 제거된 공작물 체적(ΔS_w)과 슷돌의 마모체적(ΔS_s)의 비($\Delta S_w/\Delta S_s$)를 의미하며, 연삭가공의 성능을 판단할 수 있는 지표이다. 즉 연삭비가 클수록 연삭성능이 우수하다고 할 수 있다.

Fig. 7은 내면 스러스트 연삭가공의 성능을 알아보기 위하여 슷돌 회전수를 3,000rpm(329m/min), 공

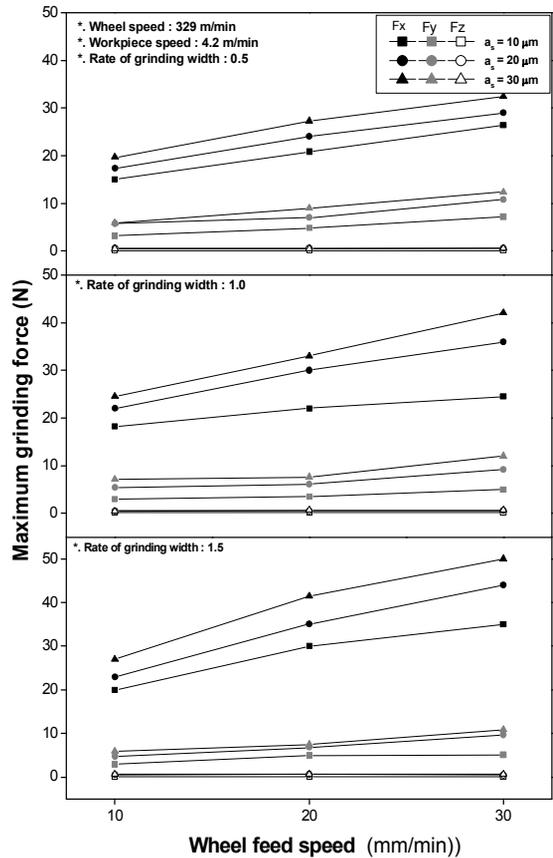


Fig. 6 Maximum grinding force for various grinding conditions

작물 회전수를 40rpm(4.2m/min)으로 일정하게 하고 설정절입깊이와 스러스트 이송속도 및 연삭폭비의 변화에 따른 연삭비를 나타낸다.

Fig. 7을 통해 살펴보면, 스러스트 이송속도와 설정절입깊이가 증가하면 연삭비는 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 이는 스러스트 이송속도와 절입깊이가 증가하게 되면, 연삭스틀 입자의 최대 절입깊이가 증가하게 되므로, 슷돌에 작용하는 연삭저항력이 증가하여 입자에 작용되는 부하가 증가되므로 이에 따라 입자의 탈락과 마모가 증가하기 때문으로 생각할 수 있다. 그리고 연삭폭비가 증가할수록 연삭비가 줄어드는 경향을 볼 수 있는데, 이와 같은 이유는 Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 연삭폭비

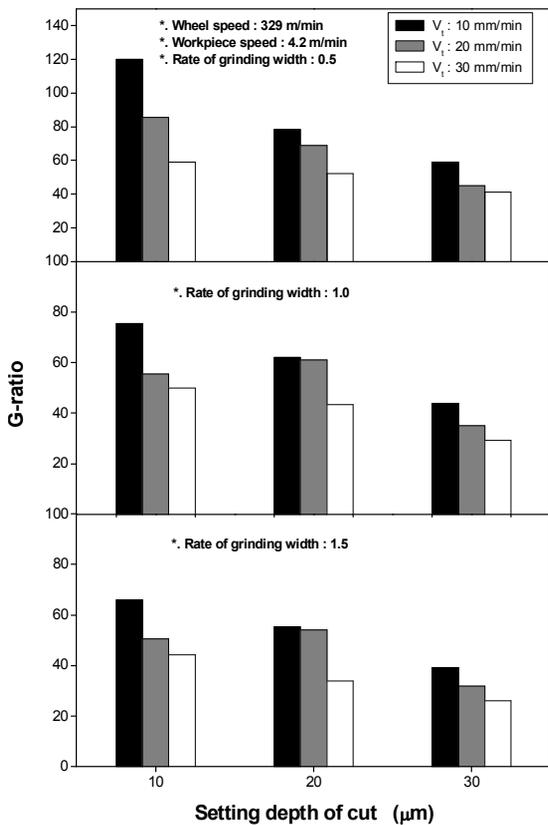


Fig. 7 G-ratio for various grinding conditions

가 증가할수록 가공중에 발생하는 최대연삭력이 증

가하기 때문이다. 결과적으로, 본 연구범위 내에서 연삭비로 고찰해보면, 절입깊이는 작게, 스러스트 이송속도는 느리게, 연삭폭비는 작게 가공하는 것이 보다 큰 연삭비를 얻을 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 머시닝센터를 이용하여 비트리파이드 CBN 스톨로 합금공구강의 내면 스러스트 연삭실험을 수행하였고, 연삭가공 조건 변화에 따른 가공 특성을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스러스트 이송속도가 빠를수록, 설정절입깊이가 클수록, 연삭폭비가 클수록 최대연삭력은 커짐을 확인할 수 있었다.
2. 스러스트 이송속도가 빠를수록, 설정절입깊이가 클수록, 연삭폭비가 클수록 연삭비가 작아짐을 확인할 수 있었다.
3. 연삭영역에서 발생하는 최대연삭력이 클수록 연삭비가 작아짐을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비(과제번호: 2013-104-093)에 의하여 지원된 논문이며, 이에 감사드립니다.

REFERENCE

1. Antonini, G., "Applying Machining Center Technology to Grinding", Modern Machine Shop, Vol. 66, No. 7, pp. 70, 1993.
2. Nakagawa, H., Hirogaki, T., Iwasaki, Y., Hayashi, T., Kita, Y. and Kakino, Y., "Study on Oscillation Grinding by Numerical Control with a Machining Center", Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 68, No. 7, pp. 923-927, 2002.
3. Rausch, S., Odendahl, S., Kersting, P., Biermann, D. and Zabel, A., "Simulation-Based Prediction of Process Forces for Grinding Free-Formed Surfaces on Machining Centers", Procedia CIRP, Vol. 4, pp. 161-165, 2012.
4. 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.
5. Lee, C. S., Kim, C. S., Park, W. K., Lee, J. C. and Choi, H., "A Study on the Side-Cut

Grinding using the CBN Wheels”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 98-103, 2012.

6. Rausch, S. and Biermann, D., “Grinding of Hard-Material-Coated Forming Tools on Machining Centers”, Procedia CIRP, Vol. 1, pp. 388-392, 2012.