

내면 플런지 연삭에 있어서 연삭력 특성에 관한 연구

서영일*, 허만승*, 최 환**, 이종찬**, 정선환**

A Study on the Grinding Force Characteristics in the Internal Plunge Grinding

Young Il Seo*, Man Seung Her*, Hwan Choi**, Jong Chan Lee**, Seon Hwan Cheong**

ABSTRACT

High precision internal plunge grinding is difficult because of the decrease in the quill stiffness due to the small diameter of wheel. In this paper, the characteristics of internal plunge grinding were investigated. Grinding experiments were performed at various grinding conditions with vitrified bonded CBN wheels. The grinding period was assumed to be consisted of rough grinding and fine grinding. The classification of grinding was determined in terms of the normal grinding forces and actual depth of cut. The experimental results indicate that the higher depth of cut and infeed speed result in the longer rough grinding time. The maximum normal grinding force was nearly equal to the static force and it decreases exponentially as the grinding continues.

Key Words : Internal plunge grinding(내면 플런지 연삭), Grinding time(연삭시간), Vitrified bonded CBN wheel(비트리파이드 CBN 스톨), 연삭력(Grinding force)

1. 서론

내면 플런지 연삭가공은 공작물의 내경(예를들면 베어링 내륜)을 정밀하게 가공하기 위하여 가공할 내경보다 연삭스톨 폭을 크게하여 스톨을 공작물 내부에 삽입한 후 반경방향(Radial direction)으로 절입하여 서서히 가공하는 방법이다. 따라서 공작물 내경의 제한으로 인해 대부분 소경스톨(Small diametric wheel)이 사용되므로 공구계의 강성저하로 인하여 기계상에 설정한 절입속도에 대한 스톨의 실제 절입속도의 응답성이 나쁘게 되어 고 능률 연삭이 어렵게 된다. 그러므로 능률적인 내면연삭을 행하기 위해서는 절입 후 가공시간에 따른 스톨의 가공현상을 파악하는 것이 매우 중요하다.

내면 플런지 연삭가공 있어서 이와 관련된 기존의 연구결과들을 살펴보면 연삭 시정수를 이용한 연삭가공의 적응제어에 관한 연구,¹⁾ Rapid infeed를 이용한 가공시간의 단축에 관한 연구,²⁾ 연삭가공에서의 응답지연상태를 감소시키기 위하여 일정압력으로 가공하는 방법에 관한 연구³⁾ 등이 있으나 아직까지 이 분야의 연구는 매우 적은 실정이다.

본 연구에서는 내면 플런지 연삭가공에 있어서 가공특성을 파악하기 위하여 가공조건(공작물 회전수, 절입속도, 절입깊이 등)의 변화에 대해 내면 플런지 연삭을 수행하고, 가공시간의 경과에 따른 연삭력 및 스톨의 실제 절입깊이를 측정하였다. 그리고 이러한 실험결과들로부터 가공시간 및 연삭형태 등을 구분하는 방법들을 제시하였다.

* 금오공과대학교 기계공학과 대학원

** 금오공과대학교 기계공학부

2. 실험장치 및 방법

2.1 슷돌 및 공작물

본 실험에 사용한 슷돌의 입자는 CBN으로 비트리파이드(V) 본드를 사용하였으며, 입도 #230, 집중도 100, 결합도 G이다. 쿨(Quill)은 직경 ϕ 20 mm, 길이 80 mm로 정밀 연삭가공하였고, 슷돌을 직경 ϕ 34 mm, 폭 25 mm로 제작하여 쿨 축에 보울트, 너트로 고정하였다.

공작물은 금형 재료로 널리 사용되고 있는 합금 공구강(STD-11)의 환봉을 외경 60 mm, 길이 60 mm로 가공하고, 내면 플런지 연삭가공을 위해 내경을 38 mm, 플런지 연삭폭을 10 mm가 되도록 선반가공을 한 후 경도 Rc 60으로 열처리하여 사용하였다.

2.2 실험장치

본 실험에 사용된 공작기계는 수직형 머시닝센터(화천기계, ECOMIL 35V, 7.5kW)이며, 머시닝센터 상에서 내면 플런지 연삭가공을 수행할 수 있도록 Fig. 1과 같이 공작물을 회전시키기 위한 회전 테이블(Rotary table)을 자체 제작하였다. 실험에 사용된 회전 테이블의 구동방식은 속도제어 전동기(VEXTA, FBLM5120C)와 타이밍 벨트를 이용하였으며, 공작물의 회전수는 전동기 구동장치(VEXTA FBLD120C)를 이용하여 20~180 rpm의 범위까지 조절할 수 있도록 제작하였다. 그리고 Fig. 1과 같이 내면 플런지 연삭가공시 발생하는 연삭저항력을 측정하기 위해 머시닝센터 테이블 위에 압전형 공

구동력계를 설치하고, 그 위에 회전 내이בל을 장착하였으며, 공작물은 지그(Jig)를 이용하여 장착하였다. Fig. 1에 본 실험의 실험장치 및 구성을 나타내었다.

2.3 실험방법

실험방법은 내면 플런지 연삭가공을 수행하기 위하여 슷돌을 머시닝센터의 X(+)축 방향으로 절입을 하였으며, 슷돌은 정회전, 공작물은 역회전으로 하여 습식 내면 플런지 상향 연삭 가공을 수행하였다. 또한 Table 1에 주어진 가공조건에 대해 가공시간을 일정(90 sec)하게 하기 위해서 NC 프로그램 상에 드웰(Dwell)기능을 이용하여 가공시간 완료 후 슷돌을 급속 후진하도록 하였다.

내면 플런지 연삭가공에 있어서 슷돌의 회전중심을 공작물 내면의 회전중심 선상에 정확히 일치시키시켜 절입하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 공작물 회전중심과 슷돌의 회전중심을 일치시키기 위한 방법으로 슷돌을 공작물 내경에 삽입시켜 Y축 직선방향으로의 슷돌과 공작물과의 접촉된 두 점의 좌표값으로부터 직선길이를 구하고, 그 직선길이에 대한 1/2 지점의 좌표값을 공작물 내면의 회전중심으로 선정하였다. 그리고 그 회전중심의 선상에 슷돌의 회전중심을 위치시킨 후 슷돌의 절입방향을 X축 방향으로하여 절입하였다. 또한, 실험을 행하기 전에 정확한 공작물 내경을 형성시키기 위하여 공작물의 내면에 매직을 칠한 다음 슷돌을 미소 절입하여 가공한 후 매직이 다 지워질 때를 공작물의 진원이 형성된 것으로 하였다.

스�돌의 트루잉 및 드레싱은 매 실험마다 Table 1의 조건으로 단석 다이아몬드 드레서(1/2")를 사용하여 행하였다.

Table 1에 본 실험의 실험조건을 나타내었다.

2.3.1 연삭력 측정

내면 플런지 연삭가공시 발생하는 연삭력의 측정은 머시닝센터 테이블 위에 설치된 공구동력계(Kistler, 9257B)로부터, 연삭가공시 발생된 연삭력 신호(3축)를 다채널 증폭기(Kistler, 5019A)에서 증폭한 후 아날로그/디지털 변환기(10tech, DaqBook)에서 디지털화 하여 개인용 컴퓨터(PC)로 전송하고, 이렇게 전송된 연삭력의 데이터를 Grinding Software를 이용하여 획득하였다.

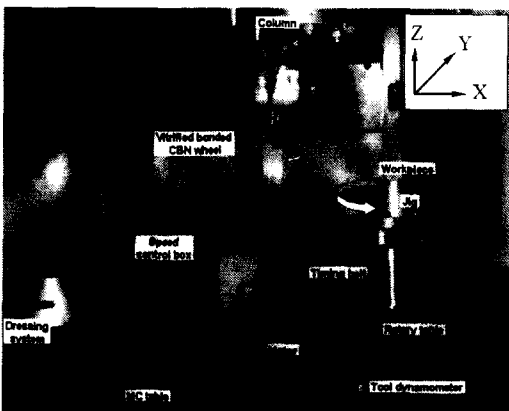


Fig. 1 Experimental set-up

Table 1 Experimental conditions

Wheel	CBN 230 100 G V	
	Diameter : Φ 34 mm Width : 25 mm	
Quill	Diameter : Φ 20 mm Length : 20 mm	
Wheel speed, V_s [m/min., (rpm)]	300 (3,000)	
Workpiece speeds, V_w [mm/min., (rpm)]	5(40) ~ 19(160)	
Infeed speeds, V_i (mm/min.)	0.1, 1, 10, 20	
Depth of cut (μ m)	5, 10, 20, 30	
Dressing condition	w h e e l speed	143 m/min.
	feed speed	200 mm/min.
	depth of cut	5 μ m \times 2 pass
	dresser	Single-point diamond
Grinding fluid	Syntilo-9954 (Castrol, 40:1)	

2.3.2 실제 절입깊이의 측정

내면 플런지 연삭시 숫돌을 절입 후 가공시간에 따른 숫돌의 실제 절입상태를 파악하기 위하여 다음과 같은 순서로 숫돌의 실제절입깊이를 측정하였다. 먼저 공작물의 기준면을 정삭 및 여러번의 Spark-out을 실시하여 정도를 높였으며, 기준면과 가공면과의 단차를 형성하기 위해 공작물의 연삭부위를 연삭폭 하부로부터 1 mm를 남기고 플런지 연삭가공을 행한 후, 이 단차이를 접촉식 표면조도계(Mitutoyo, SV-600)를 사용하여 측정하였다. 이때 측정된 단차이가 숫돌이 실제로 가공한 실제절입깊이가 된다.

Fig. 2는 표면조도계를 사용하여 실제절입깊이를 측정한 일 예를 나타낸다. Fig. 2에서 머시닝센터 상에 숫돌의 설정절입깊이(Setting depth of cut, a_s)를 10 μ m를 입력하여 90 sec 동안 내면 플런지 연삭을 한 후 가공된 공작물의 단차를 측정한 결과, 휠의 실제절입깊이(Actual depth of cut, a_a)는 7.6 μ m로 나타났으며, 이 둘의 차이인 2.4 μ m가 가공오차(Machining error, δ)이다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 연삭력 곡선

내면 플런지 연삭가공에 있어서 연삭력은 숫돌의 수직방향으로 작용하는 법선연삭력(F_n)과 숫돌의 접선방향으로 작용하는 접선연삭력(F_t)으로 나타낸다.⁴⁾ Fig. 3은 내면 플런지 연삭가공에 있어서 가공시간의 경과에 따른 공구동력계로부터 측정된 연삭력의 일 예를 나타낸다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 연삭력(F_n , F_t)은 가공시간에 따라서 변화하게 되며, 연삭초기에는 연삭력이 급격히 증가하다가 가공시간이 경과함에 따라 지수함수적으로 급속히 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 숫돌을 공작물에 절입하였을 때 공구계의 강성저하로 인하여 주축 헤드부의 절입속도에 대해 숫돌의 실제 가공 응답성이 늦기 때문으로 가공시간이 지날수록 숫돌이 점차 탄성회복하여 공작물을 서서히 제거해 나가는 것으로 판단된다. 따라서 이와같은 가공현상을 규명하기 위하여 공구계의 변형에 직접적으로 영향을 미치는 법선연삭력과 실제절입깊이를 가공시간의 경과에 따라 살펴 본 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4의 (a)는 숫돌 회전수를 3,000 rpm, 공작물

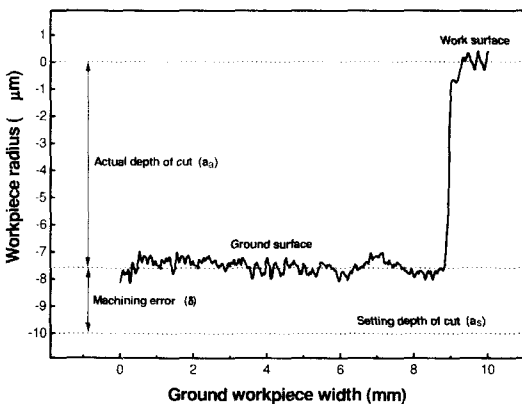


Fig. 2 A example of the measured actual depth of cut ($V_s=3,000$ rpm, $V_w=40$ rpm, $V_i=0.1$ mm/min., $a_s=10$ μ m)

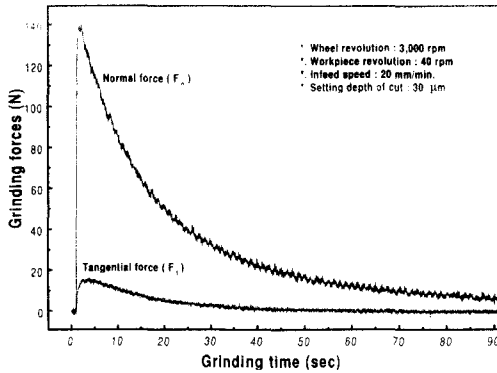


Fig. 3 An example of grinding forces in internal plunge grinding

회전수를 40 rpm, 절입속도를 1 mm/min, 설정절입 깊이를 20 μm한 결과이며, Fig. 4의 (b)는 슷돌 회전수를 3,000 rpm, 공작물회전수를 60 rpm, 절입속도 (V_i)를 10 mm/min, 설정절입깊이를 20 μm으로 한 결과이다.

Fig. 4에서 가공시간에 따른 법선연삭력 및 실제절입깊이의 변화를 살펴보면 두 경우가 서로 상관관계가 있음을 알 수 있으며, 이것은 가공조건이 다른 (a)와 (b)에서도 같은 경향을 나타내었다. 즉, 가공초기(주축헤드부가 주어진 설정절입깊이로 절입이 완료된 구간까지)는 법선연삭력이 급격하게 증가하여 최고값에 도달하였으며, 실제절입깊이는 미소하게 변화하였고, 이 시간이 지나서부터는 법선연삭력이 지수함수 형태로 급격하게 감소하였으며, 실제 절입깊이 또한 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 법선연삭력 곡선의 기울기 (dF_n/dt) 값이 -0.5인 점을 지나서 부터는 법선연삭력 및 실제절입깊이의 가공시간에 대한 변화가 거의 일정한 경향을 나타내었다.

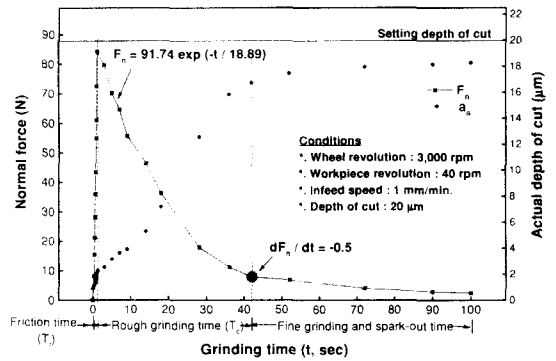
따라서 본 논문에서는 Fig. 4의 결과로부터 가공시간들을 다음과 같이 구분하였다. 먼저 슷돌이 공작물에 접촉하여 법선연삭력이 최대가 되는 시간 까지를 마찰시간(Friction time)으로, 마찰시간 이후로부터 법선연삭력 곡선의 기울기 값이 -0.5가 되기 까지의 시간을 황연삭 가공시간(Rough grinding time)으로, 그리고 황연삭 가공시간 이후 슷돌이 공작물을 미소절삭 및 가공잔량을 제거하는 시간을 정연삭 가공시간(Fine and spark-out grinding time)으로 규정하였다.

3.2 최대 법선연삭력 및 정강성

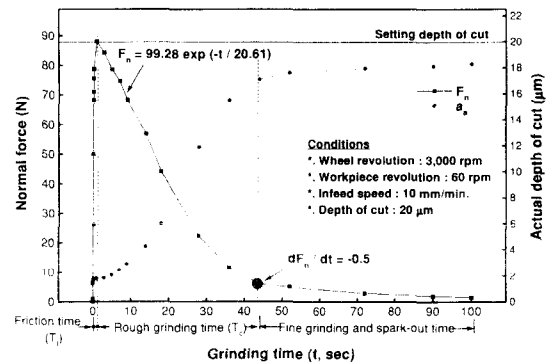
Fig. 4에서 마찰시간 동안에 발생한 법선연삭력의 최대값을 최대 법선연삭력이라 하면 최대 법선연삭력은 슷돌이 공작물을 가공하기 보다는 주로 슷돌과 공작물의 접촉에 의한 마찰과 휠이 공작물 반경방향으로 밀어 붙이는 힘에 의해 발생된 것으로 생각되며 따라서 이것은 정적인 상태에서의 정하중 값과 관련이 있을 것으로 사료된다.

Fig. 5는 가공조건(설정절입깊이와 절입속도)의 변화에 따른 최대 법선연삭력과 정하중을 주었을 때의 변위와의 관계를 살펴 본 결과를 나타낸 것이다. 여기서 정하중은 슷돌의 중앙부를 공작물에 접촉하고, 슷돌에 변위를 주어 이때에 발생하는 하중을 공구동력계로, 정적인 변위는 전기 마이크로메터로 측정한 것으로 Fig. 5에 파선으로 나타내었다.

Fig. 5에서 설정절입깊이 및 절입속도의 변화에



(a) Experiment 1



(b) Experiment 2

Fig. 4 Normal force versus actual depth of cut in internal plunge grinding

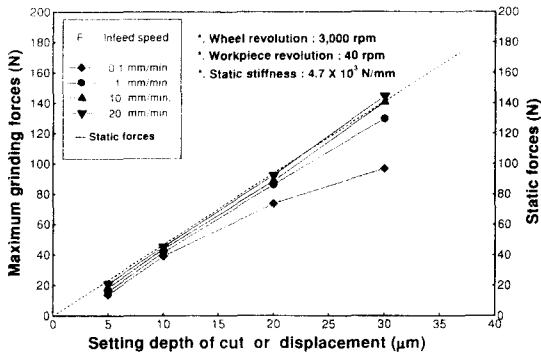


Fig. 5 Static force and maximum normal force according to the setting depth of cut

다른 최대 법선연삭력은 절입속도가 0.1 mm/min와 같이 아주 느린 조건을 제외하고는 정적상태에서 측정한 정하중 값과 거의 일치하는 경향을 나타내었다. 절입속도가 0.1 mm/min에서 최대 법선연삭력이 정하중 값과 약간의 차이를 나타내는 것은 절입속도가 아주 느릴 경우에는 연삭초기에 절입속도가 아주 느려서 슯돌이 공작물을 미소하게 제거하기 때문으로 생각된다.

3.3 황연삭 가공시간 및 연삭가공 형태

일반적으로 산업현장에서 내면 플런저 연삭가공을 수행하는데 있어서 연삭 가공시간은 생산성 향상에 영향을 미치는 중요한 요소 중에 하나이다. 따라서 본 연구에서는 연삭력 곡선으로부터 가공형태 및 Fig. 4에서 정의한 황연삭 가공시간을 가공조건 변화에 따라 살펴보았다.

Fig. 6은 설정절입깊이(a_s)를 5, 10, 20, 30 μm 으로 변화시킨 경우에 있어서 가공시간에 따른 법선연삭력의 변화를 살펴본 것이다. Fig. 6에서 법선연삭력 곡선의 형태를 살펴보면 설정절입깊이가 10 μm 이상에서는 법선연삭력 곡선이 황연삭 이후에 정연삭을 수행하는 형태로 나타나지만, 설정절입깊이가 5 μm 인 경우는 법선연삭력이 가공초기에 급격히 증가한 이후에 거의 선형적으로 감소되는 것으로 보아 황연삭 가공이 존재하지 않고 거의 정연삭으로 가공이 행해지고 있음을 알 수 있다.

따라서 이와같은 연삭형태들을 가공조건(설정절입깊이(a_s), 절입속도(V_i), 공작물 회전수(V_w) 등) 변화에 대하여 살펴 본 결과를 Table 2에 나타내었

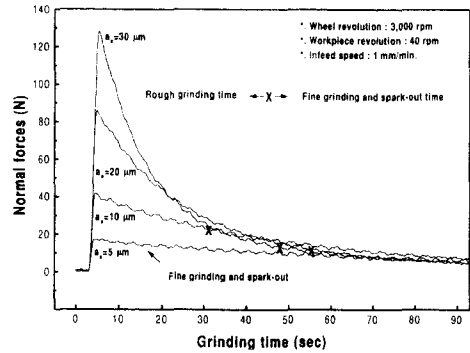


Fig. 6 Normal force for setting depth of cut in internal plunge grinding

Table 2 Classification of grinding at various grinding conditions (Where AF is all fine grinding and RF is a rough & fine grinding, wheel revolution 3,000 rpm,)

a_s (μm)	V_i (mm/min.)				V_w (rpm)			
	0.1	1	10	20	40	80	120	160
5	AF	AF	AF	AF	AF	AF	AF	AF
10	RF	RF	AF	AF	RF	AF	AF	AF
20	RF	RF	RF	RF	RF	RF	RF	RF
30	RF	RF	RF	RF	RF	RF	RF	RF

다. Table 2에서 AF는 법선연삭력 곡선이 전체적으로 정연삭 가공 형태로 나타난 경우를, RF는 황연삭 가공후 정연삭이 이루어지는 형태를 각각 의미한다.

Table 2에서 연삭가공형태는 절입속도 및 공작물 회전수의 변화에 따라서는 큰 차이를 나타내지 않았으나, 설정절입깊이의 변화에 따라서는 큰 차이를 나타내었다. 즉 설정절입깊이가 10 μm 이하의 경우에는 대부분 정연삭 가공형태를 나타냈으며, 설정절입깊이가 10 μm 이상에서는 황연삭과 정연삭으로 가공되는 형태를 나타내었다. 그러므로 가공시간을 단축하기 위하여 황연삭 가공을 하기 위해서는 절입깊이를 크게하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 절입속도(V_f) 및 설정절입깊이 변화에 대한 황연삭 가공시간을 살펴본 결과이며, Fig. 8은 설정절입깊이(a_s)의 변화에 따른 공작물 회전수와 황연삭 가공시간과의 관계를 살펴본 결과이다. Fig. 7과 Fig. 8에서 황연삭 가공시간은 설정절입깊이 및 절입속도가 증가할수록 증가하였으며, 반면에 공작물 회전수의 변화에 따라서는 거의 일정한 경향을 나타내었다. 여기서 설정절입깊이 및 절입속도가 증가할수록 황연삭 가공시간이 증가하게 되는 이유는 설정절입깊이가 증가하게 되면 휠이 공작물을 제거하는데 소요되는 시간이 증가하기 때문이며, 절입속도가 증가하면 마찰시간이 감소하게 되어 상대적으로 황연삭 가공시간이 증가되기 때문이다.

위의 결과로부터 연삭시간이 일정한 경우 황연삭 가공시간이 짧게 되면 정연삭 가공시간이 증가하

게 되어 이로 인해 가공오차가 감소하게 되는 효과를 얻을 수 있지만, 가공시간을 고려한 생산성 관점에서 고려해 보면 가공시간이 증가하게 되어 생산성이 저하되는 단점이 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 생산성 및 가공정도를 향상시키기 위해서는 요구되는 가공상태에 따라 적절한 가공시간과 가공조건을 설정해야만 된다.

4. 결 론

내면 플런지 연삭가공에 있어서 가공특성을 파악하기 위하여 가공조건 변화에 따른 연삭력 곡선 및 슷들의 실제절입깊이 곡선을 측정하여 비교, 검토한 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 가공시간의 경과에 따른 법선연삭력과 실제 절입깊이 곡선에서 기울기(dF_n/dt)가 -0.5 인 시간을 기준으로 연삭시간을 황연삭 가공시간과 정연삭 가공시간으로 구분하는 방법이 타당성이 있음을 확인하였다.

(2) 최대 법선연삭력은 실험에서 구한 정하중 값과 거의 일치하는 경향을 나타내었다.

(3) 가공조건 변화에 따른 연삭형태는 설정절입깊이에 의해 가장 큰 영향을 받았으며, 본 연구의 범위에서 설정절입깊이가 $10 \mu m$ 이하의 경우는 거의 정연삭 가공형태를 나타내었다.

(4) 황연삭 가공시간은 절입속도 및 설정절입깊이가 증가할수록 증가하였고, 공작물 회전수의 변화에 따라서는 거의 일정한 경향을 나타내었다.

참고문헌

1. 鄭然植, 稻崎一郎, “研削時定數に關する研究,” 精密機械, Vol. 50, No. 6, pp. 67, 1984.
2. I. Inasaki, “Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process,” Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 359, 1991.
3. 西村 健, 稻崎一郎, 山本直樹, “內面研削사이클의最適化に關する研究,” 日本機械學會論文集(C編), Vol. 55, No. 515, pp. 1808, 1989.
4. Malkin, S., “Grinding Technology”, Ellis Horwood, pp. 223, 1989.

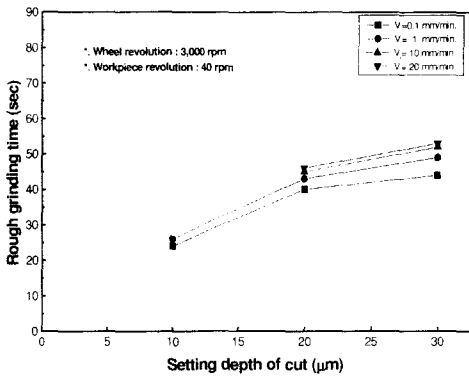


Fig. 7 The rough grinding time for setting depth of cut and infeed speed

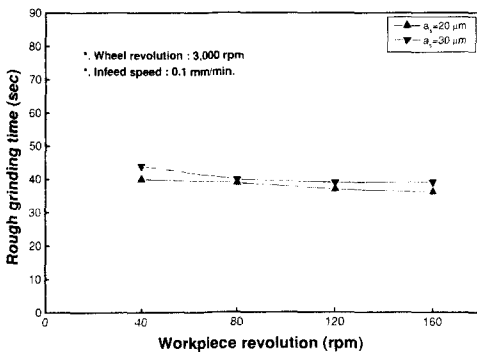


Fig. 8 The rough grinding time for workpiece revolution and setting depth of cut