

## 선형가이드용 블록 연삭 공정 시뮬레이션 및 개선에 대한 연구

조명동\*(금오공과대학교 대학원), 김현수(금오공과대학교 대학원),  
홍성욱(금오공과대학교), 박천홍(한국기계연구원)

Simulation and Improvement of Grinding Processes for Linear Motion Guide Blocks

Myung-Dong Jo (Graduate School, KNUT.), Hyun-Soo Kim (Graduate School, KNUT),  
Seong-Wook Hong (KNUT), Chun-Hong Park (KIMM)

### ABSTRACT

This paper presents a result of simulation and improvement of grinding process for linear motion guide blocks. A simulation software, which is based on cylindrical grinding process, is used to predict the grinding wheel wear during the grinding process. To validate the simulation, the simulation result is compared with the experimental one. Simulation study is extended to obtain an optimal grinding condition for minimizing the grinding wheel wear. The optimal condition is validated through an experiment.

**Key Words :** Surface Grinding(평면 연삭), Grinding wheel wear(연삭 스톨 마모), Plunge grinding(플런저 연삭), Linear Guide(선형가이드), Laser Scanning Micrometer(레이저 스캐닝 마이크로미터), Surface roughness(표면 거칠기), Depth-of-cut(절입량)

### 1. 서론

연삭 가공은 형상 및 치수 정밀도가 높고 표면의 품질이 높아 거의 모든 기계 가공의 마무리 공정을 이루고 있다. 따라서 연삭 가공의 질은 제품의 정밀도와 성능에 그대로 반영된다. 연삭 공정은 가공 원리상으로 다른 절삭 공정에 비해 공구의 마모 진행 정도가 빠르며, 가공 중에 발생하는 스톨의 마모는 기계적으로 인가된 겔보기 절입량(Depth of cut)보다 실 절입량을 작게 하여 연삭비를 감소시키므로 가공 오차의 원인이 되고 있다. 이와 같은 측면을 고려하여 연삭 공정 중 발생하는 연삭 스톨의 마모를 측정함으로써 연삭기의 고정도화를 가능하게 하고, 생산성의 향상과 가공물의 정도를 개선함으로써 품질 향상 및 코스트저감에 기여할 수 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 주요 연삭 파라미터를 예측함으로써 LM블록을 가공 공정에서 최적 조건을 찾기 위한 한 방법을 제시하고 있다. 그 예로서 본 연구에서는 연삭 스톨 마모

를 최소화하는 조건을 결정하고 실험적으로 검증하였다. 선형가이드용 블록 연삭 공정을 시뮬레이션하기 위해 최근 원통 연삭 공정에 기반을 두고 개발되어 그 유용성이 입증된 관련식과 프로그램<sup>1)2)</sup>을 적용하였다. 실험에서는 연삭 스톨의 마모를 측정하였다. 참고문헌<sup>3)</sup>에서 제시한 LSM(Laser Scanning Micrometer)을 이용하는 방식으로 마모를 측정하였다. 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 실험결과와 비교하였다. 가공 특성 개선을 위해 직교 배열 실험 계획에 근거한 시뮬레이션을 실시하였으며 미리 선정하였던 4개의 인자 중 가장 영향이 큰 인자를 찾아내었다. 또, 그 인자를 변화시킨 실험으로부터 얻어진 결과를 검증하였다.

### 2. 선형가이드 블록 연삭 시뮬레이션 및 실험

#### 2.1 시뮬레이션 및 실험 조건의 설정

시뮬레이션은 실제 가공 조건에서 적용되고 있는 인자들을 고려하여 실행하였다. 시뮬레이션 프로그램이 원통연삭에 기초를 두고 있으므로 평면

연삭에 관련된 몇가지 기본 변수들을 원통연삭에 대응되는 인자로 변경할 필요가 있다. 평면 연삭에서 1회 절입량을 원통연삭의 이송률(Feedrate)과 비교해보면, 이송률은 점차로 절입이 발생하면서 가공이 되지만 평면 연삭은 1회 절입에 가공이 이루어지므로 가공상의 약간의 차이가 있다.

한편, 실제 선형 가이드 블록에 대한 연삭 과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 베드 위에 블록을 여러 행과 열로 나란히 배치한다. 그리고 연삭 슯돌 드레싱을  $5\mu\text{m}$ 로 실시한 후,  $5\mu\text{m}$ 씩  $150\mu\text{m}$ 의 황삭을 실시한다. 그리고 다시  $5\mu\text{m}$  드레싱을 한 후  $2\mu\text{m}$ 씩  $50\mu\text{m}$ 를 정삭하고 마지막으로 스파크아웃(Spark out)을 거쳐 공정을 마치게 된다. 본 연구에서는 연삭 슯돌의 마모를 저감할 목적으로 하였으며 블록의 수를 5개로, 그리고 연삭 조건은 황삭 조건으로 국한하여 분석하였다. Fig. 1에서 실험 장치 셋업 상태를 볼 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 선형가이드용 블록은 요철이 있어 실제 가공시에는 테이블의 이송 방향이 바뀔 때마다 횡이송을 시켜 가공한다. 따라서 가공에 따라 상향 및 하향 연삭이 순차적으로 반복되는 특성이 있다. 따라서 동일 연삭 방향으로 가공이 지속되는 것과 차이를 유발하게 된다.

시뮬레이션과 실험에서 모두 연삭 슯돌에 대한  $5\mu\text{m}$ 의 드레싱을 마치고  $5\mu\text{m}$ 의 절입 깊이로  $100\mu\text{m}$  씩 가공 후 슯돌 마모량과 표면 거칠기를 계산/측정하였으며 총 가공량  $300\mu\text{m}$ 일 때까지 반복하였다. Table 1은 시뮬레이션 및 실험에 사용된 가공조건을 보여주고 있다.

시뮬레이션에서는 인자들이 마모와 표면조도에 어떤 영향을 미치고, 실제 실험 결과와 어떤 관계가 있는가를 검토하였다. 그 결과, 가공성을 개선하기 위해 고려해야 할 인자들을 찾아내어 그 인자들을 중심으로 진행하였다. 시뮬레이션 결과 마모와 표면조도에 영향을 미치는 인자들을 찾을 수 있었다. 가공시 1회 절입량, 드레서 이송 속도, 드레싱시 절입량, 슯돌의 회전속도, 드레서의 상태 등을 주요 파라미터로 고려하였다.

## 2.2 시뮬레이션 및 검증 실험

앞에서 설명한 바와 같이 황삭 조건에 대한 시뮬레이션과 실험을 실시하였다. Table 1은 시뮬레이션 및 실험에 사용된 가공조건을 보여주고 있다. Fig. 1은 평면 연삭기에 적용한 측정 장치의 예를 보인 것으로 연삭 테이블의 중심에 가공물을 위치시키고 가공완료 후 슯돌의 수직 이동 없이 측정이 가능하도록 테이블 앞부분에 LSM을 고정시켰다.

Table 1 Grinding condition

<b>Grinding wheel</b>	Type	WA46K <sub>m</sub> V
	Width	38mm
	Diameter	305mm
	Cutting speed	2200rpm
<b>Workpiece</b>	Type	LM Block(SCM 420H)
	Size	60x70x29mm
	Depth of heat treatment	0.9mm
	No. of block	5 EA
<b>Table</b>	Feeding speed	0.275 m/s
	Dressing feed speed	300 mm/min
<b>Removal</b>	Rough grinding	$5\mu\text{m} \times 60\text{회} = 300\mu\text{m}$
	Finish grinding	$2\mu\text{m} \times 100\text{회} = 200\mu\text{m}$
<b>Grinding method</b>		Plunge Grinding

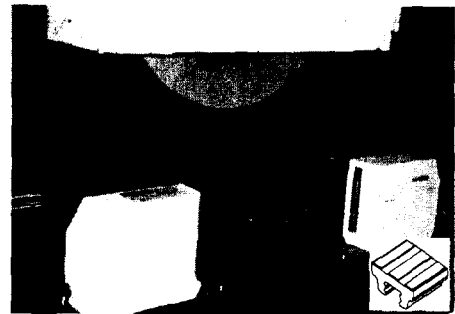


Fig. 1 Experimental setup

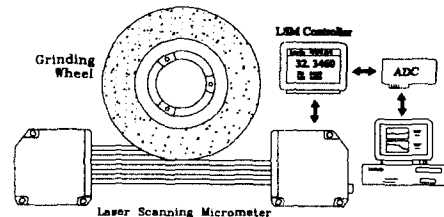


Fig. 2 Schematic diagram for measurement of grinding wheel wear using LSM

실험에 사용된 연삭기는 X축(스트로크 방향)을 제외한 Y, Z축은 NC에 의해 제어된다. X축이 NC에 의해 제어되지 않으므로 원하고자 하는 정확한 위치에 슯돌을 위치시킨 후 측정하기가 불가능해서 측정오차가 커지게 된다. 따라서 가공에 참여하지 않는 슯돌면 중 일부를 먼저 측정하여 이 슯돌면을 기준으로 상대적인 변화를 측정하는 방식으로 마모량을 측정하였다. Fig. 2는 측정의 전체 개념도를 나타내고 있다.

Fig. 3는 연삭이 진행되는 과정에서 매  $100\mu\text{m}$

가공 후의 마모 상태를 보여주고 있다. 드레싱 직후의 연삭 표면이 수평하게 유지되는 것에 비해 마모면은 약간의 경사를 갖는 것을 볼 수 있는데 이것은 블록 위 가공면 폭의 차이에 의해 연삭 슷돌 중앙부가 항상 연삭에 참여하는 것과는 달리 바깥측은 조건에 따라 연삭이 이루어지기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 마모량을 올바르게 평가하기 위해서는 마모량이 가장 큰 슷돌면을 기준으로 할 필요가 있다. 마모의 발생 추이를 보면 초기 100  $\mu\text{m}$  가공까지 큰 마모가 발생하고 이후 마모량이 작아지는 것을 볼 수 있다. 마모량이 크지 않은 경우 가공량이 증가할 때 오히려 그 값이 전단계에 비해 작게 보이는 경우도 있는데 이는 가공이 진행되는 정도에 따라 슷돌 입자들 사이에 칩이 끼거나 달라붙어서 마모가 진행되지 않는 것처럼 보이는 것으로 파악된다. 한편 Fig. 4는 동일한 조건으로 실험과 시뮬레이션 결과를 비교해서 보여주고 있다. 시뮬레이션과 실험이 정성적, 정량적으로 모두 잘 일치하고 있는 것으로 볼 수 있다. 시뮬레이션의 정확성을 검증하기 위해 표면거칠기를 측정, 시뮬레이션 결과와 비교하였다. Fig. 5는 표면거칠기에 대한 비교로서 정량적인 특성이 대체로 잘 맞고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 실험에서는 마모에 따라 표면거칠기가 약간씩 나빠지는 특성을 보이고 있으나 시뮬레이션에서는 대체로 균일하게 나타남으로서 차이를 보이고 있다.

### 3. 공정개선을 위한 시뮬레이션 및 검증 실험

#### 3.1 시뮬레이션

연삭 가공에서 슷돌의 마모와 표면조도에 영향을 미치는 요인을 잘 설정하면 가공성도 향상되고, 경제적으로나 시간적으로 많은 효과를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 연삭스틀 마모에 영향을 준다고 믿어지며 또한 실제적으로 용이하게 변경시킬 수 있는 조건 하에 4가지 인자를 선정하였다. 그리고 이 4가지 인자에 대해 실험과 시뮬레이션을 바탕으로 최적의 연삭가공 조건을 찾기 위해 직교배열 실험 계획법을 적용하였다. 선정된 인자는 드레싱 이송속도(Dresser feedrate), 도레싱 절입량(Dressing depth-of-cut), 연삭 절입량(Grinding depth-of-cut), 연삭속도(Grinding wheel speed)이다. Table 2 ~4까지는 직교배열 실험계획법을 시뮬레이션에 적용하는 과정을 나타낸 것이다. Table 2에는 실현 가능성 등을 고려하여 4가지 요소에 대해 각각 3가지의 수준을 설정한 것이다.

Table 3은 최적의 가공조건을 찾기 위한 과정으로 각 조건에서의 시뮬레이션 결과 값을 나타낸 것이며 Table 4은 4가지 요소 별, 각 수준별 값을 정

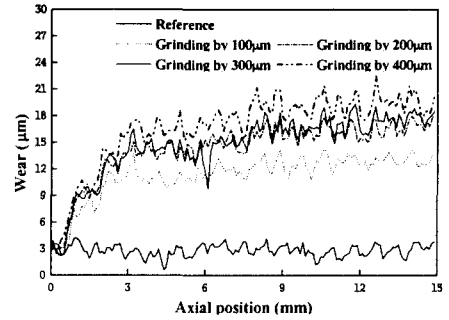


Fig. 3 Grinding wheel wear during the LM block grinding process

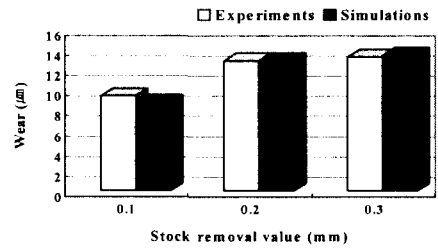


Fig.4 Comparison of measured and computed grinding wheel wear for the LM block grinding process

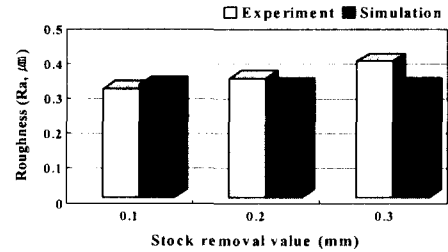


Fig. 5 Comparison of measured and computed surface roughness for the LM block grinding process

리한 것이다. Table 4에서 보면 드레싱속도 200  $\text{mm}/\text{min}$ , 드레싱 1회절입 깊이가 2  $\mu\text{m}$ , 가공시 절입 깊이가 10  $\mu\text{m}$ , 가공속도가 2200rpm인 상태에서 마모가 적게 나타날 것으로 예측되었다. 한편 Table 5는 분산 분석 결과를 보여주고 있는데 연삭 슷돌 마모에 가장 큰 영향을 주는 인자가 선정하였던 4가지 인자 중 드레싱 절입 깊이를 보여주고 있다.

Table 2 Design of experiments

	level 1	level 2	level 3
<b>A</b>	200	300	400
<b>B</b>	2	5	10
<b>C</b>	2	5	10
<b>D</b>	1200	1700	2200

※ A : Dressing feed speed ( mm/min )  
 B : Dressing depth of cut (  $\mu\text{m}$  )  
 C : Grinding depth of cut (  $\mu\text{m}$  )  
 D : Grinding wheel speed ( rpm )

Table 3 Results based on orthogonal table

A	B	C	D	Wear
200	2	2	1200	3.66
200	5	5	1700	3.75
200	10	10	2200	3.99
300	2	5	2200	3.31
300	5	10	1200	4.67
300	10	2	1700	7.86
400	2	10	1700	3.35
400	5	2	2200	5.19
400	10	5	1200	7.93

Table 4 Optimal condition

	level 1	level 2	level 3
<b>A</b>	<b>3.80</b> ①	5.28 ②	5.49 ③
<b>B</b>	<b>3.44</b> ④	4.54 ⑤	6.59 ⑥
<b>C</b>	5.57 ⑦	4.99 ⑧	<b>4.01</b> ⑨
<b>D</b>	5.42 ⑩	4.98 ⑪	<b>4.16</b> ⑫

Table 5 Analysis of variance

	D.O.F	sum of squares	mean of squares	F
<b>A</b>	2	5.09	2.55	
<b>B</b>	2	15.38	7.69	4.17
<b>C</b>	2	3.77	1.89	
<b>D</b>	2	2.44	1.22	
<b>total</b>	8	26.68		
<b>error</b>	(6)	11.3	1.84	

### 3.2 검증 실험

Fig. 6은 시뮬레이션에 의해 얻어진 결과에 근거하여 드레싱 절입량을 변경시키면서 스톨 마모량을 실험과 시뮬레이션으로 결과를 비교해서 보여주고 있다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 시뮬레이션이 실험 보다 약간 크게 나타나고 있지만 경향은 잘 일치하고 있으며, 예상한 바와 같이 드레싱 절입량을 적게함으로써 연삭 스톨 마모를 저감할 수 있음을 확인할 수 있다.

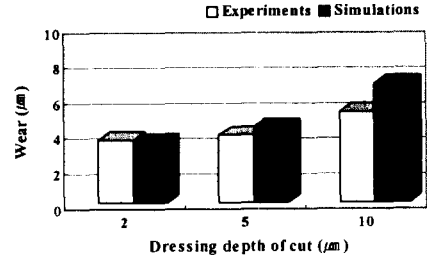


Fig. 6 Comparison of measured and computed grinding wheel wear with the dressing depth-of-cut varied

### 4. 결론

본 연구에서는 연삭공정 시뮬레이션 프로그램을 이용하여, LM 블록 평면연삭 공정을 시뮬레이션 하였으며 이를 기초로 연삭스톨의 마모를 저감할 수 있는 방법을 도출하였다. 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위해 실험을 실시하였으며 그 경향이 잘 일치하는 것을 확인하였다. 실제 공정에서 연삭스톨 마모를 저감하기 위해 직교배열에 기초한 실험계획법을 이용하여 여러가지 파라미터에 대한 분석을 하였으며 그 결과 미리 선정하였던 4개의 파라미터 중 드레싱 절입량이 가장 중요한 인자로 확인하였으며 실험을 통해 그 적합성을 검증하였다.

### 후기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “첨단기계류·부품”사업의 “연삭 메커니즘의 일류화 제품 기술 개발”과제의 위탁과제로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 주광훈, 이용숙, 김현수, 홍성욱, 박천홍, “평면 연삭에서의 연삭 스톨 마모 추정 및 실험적 검증,” 한국정밀공학회지 Vol.18, No.8, pp.150-156, 2001.
2. 이용숙, 원통 연삭 작업의 시뮬레이션에 관한 연구, 박사학위논문, 한국과학기술원 기계공학과, 1997.
3. T. Suto. and T. Sata, "Simulation of Grinding Process Based on Wheel Surface Characteristics," Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., Vol.15, No.1, pp27-33, 1981.
4. 주광훈, 김현수, 홍성욱, 박천홍, “LSM을 이용한 연삭 스톨 마모 모니터링,” 한국정밀공학회지 Vol.17, No.12, pp.82-87, 2000.