

연삭가공시 연삭숫돌의 드레싱 시기 검출 방법에 관한 연구

홍민성*

A study on the dressing time monitoring method of grinding wheel in surface grinding

Minsung Hong*

Abstract

In surface grinding, the contact between the grinding wheel and the workpiece introduces heat and resistance, which restrict the self-dressing of the grits and result in burrs and cracks on the workpiece. Therefore, before or during the grinding operation, it is necessary to self-dress the grinding wheel for more accurate performance.

In order to determine the dressing time monitoring method of grinding wheel in surface grinding, a three-dimensional computer simulation of the grinding operation has been attempted based on the contact mechanism and surface-shaping system between the grinding wheel and the workpiece. The optimal dressing time is determined based on the amount of the grain wear and work surface roughness.

1. 개 요

연삭작업은 기계가공의 마무리 단계에 속하는 공정으로 연삭가공면의 거칠기 및 형상정도가 제품의 품질에 직접 영향을 주게 된다. 연삭가공면은 숫돌의 입자 및 가공의 상태 등에 의존하기 때문에 연삭가공시에는 주기적인 드레싱 작업이 필요하다. 또한, 연삭 숫돌 입자의 이산분포로 숫돌 입자의 형상을 정확하게 표현하기는 매우 어렵다.

연삭 작업시 숫돌입자가 가공물과 접촉하여 그 결과로 숫돌의 입자는 변형, 마모, 파괴, 탈락 등의 현상이 발생된다. 따라서 이러한 현상을 규명하기 위하여 드레싱된 연삭 숫돌에서의 절삭 날 연구, 절삭 날의 미세구조와 거동, 숫돌입자의 마모상태 측정, 등의 연구가 진행되어 왔다. 연삭작업중 부적절한 드레싱 시기 및 드레싱량 결정에 의한 비가공시간을 단축하기 위해 센서신호에 기초하여 숫돌상태의 감시를 통한 적절한 드레싱 시기 및 최적의

* 이주대학교 공과대학 기계 및 산업공학부

드레싱량을 결정하는 연구가 수행되었으며⁽¹⁾⁽²⁾, 슷들의 재생작용에 의한 정상연삭과 눈막힘에 의한 이상연삭의 구분은 검출된 눈막힘량과 가공면 표면 거칠기의 상관관계를 통해 드레싱 시기를 결정하였다.

이러한 연삭 특성의 이해를 위해 시뮬레이션 기법은 연삭 공정을 분석하고, 실질적인 연삭스톨 형태의 변이성을 반영함으로써 실험결과를 예측하여 연삭가공과 드레싱의 이해를 향상시킨다.⁽³⁾ 또한 슷돌 입자의 수와 마모된 면적을 측정함으로써 연삭 공정의 실험적 모델을 향상시켰다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 contact mechanism에 의한 슷돌과 공작물 사이의 접촉면의 간격, 슷돌의 마모 등을 고려하여, 이를 표면 가공법(surface-shaping system)⁽⁵⁾에 접목시켜 연삭공정을 분석하였다.

우선 슷돌과 공작물 사이의 탄성 및 소성 변형 및 마모 현상을 contact mechanism으로 분석하고, 3차원 슷돌 표면을 모델링하여 공작물과의 접촉에 의한 슷돌 마모를 표면 가공법을 통하여 해석하였다. 연삭 공정 중의 슷돌의 마모 및 가공표면의 예측을 바탕으로 슷돌 입자의 거동 및 최적드레싱 시기를 검출하였다.

2. 이론 배경

스톨 드레싱 시기의 검출을 위하여 연삭 가공에서 슷돌 입자와 공작물 간의 마찰 현상을 분석하기 위한 contact mechanism을 도입하였으며, 표면 가공법을 통하여 공작물과 연삭 슷돌 사이의 상호작용을 해석하였다.

2. 1 Contact Mechanism

본 논문에서 연삭스톨의 입자는 균일한 반구형태로 분포한다고 가정하였다. 따라서 연삭스톨 입자와 공작물사이의 contact mechanism을 고려한 접촉반지름은 접촉 하중(W)을 이용하여 구할 수 있다.

$$W = \pi r_0^2 H_d \quad (1)$$

여기서 r_0 는 접촉 반지름이고 H_d 는 압입경도(kgf/mm²)이며, πr_0^2 은 실제접촉면적 A_a 이다. 일반적으로 실제 접촉부분은 탄성변형보다는 99%이상 소성변형에 의한 것이다.⁽⁶⁾

연삭스톨이 공작물에 접촉하게 되면 마모되어 실제 접촉면적은 계속 줄어든다. 이때 마모된 연삭입자의 체적(δV)

은 평균접촉 반지름의 세제곱(r^3)에 비례하므로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta V = \beta \cdot \frac{2\pi}{3} r^3 \quad (2)$$

여기서 β 는 비례상수이다.

또한 연삭 슷돌입자의 마모율을 알기 위해서는 공작물과 입자사이에 접촉하는 미끄럼 거리(sliding distance)를 알아야한다. 미끄럼 거리(δL)는 평균접촉반지름(r)에 비례하며 다음과 같이 모델링할 수 있다.⁽⁷⁾

$$\delta L = 2 r \quad (3)$$

위의 (1), (2), (3)식에 의해 단위 미끄럼 거리당 마모된 슷돌입자의 체적은 다음과 같다.

$$\frac{\delta V}{\delta L} = \frac{\beta}{3} \pi r^2 = \frac{\beta}{3} \delta A = \frac{\beta}{3} \frac{\delta W}{H_d} \quad (4)$$

여기서 δA 는 최대 접촉면적이다. 따라서 모든 접촉면을 고려한 총마모율은

$$\frac{V}{L} = \frac{\beta}{3} K_1 \frac{W}{H_d} \quad (5)$$

이며, 마모계수 $K = \beta \cdot K_1/3$ 이라 하면 식(5)는

$$\frac{V}{L} = K \frac{W}{H_d} \quad (6)$$

이다.

식(6)을 마모 깊이(d)에 대하여 고찰하기 위해서 겉보기 면적(A_a)에 의해 재배열하면 식(7)을 얻을 수 있다.

$$d = \left[\frac{K}{H_d} P_m \right] \cdot L \quad (7)$$

여기서 평균 압력 $P_m = W/A_a$ 이다.

2. 2 표면 가공법(Surface-Shaping System)

가공표면은 표면을 따라서 칩(Chip)을 형성하는 여러 가지 운동의 조합에 의해 생성된다. 공구는 원하는 깊이로 연속적인 이송 운동을 가지므로, 가공표면의 기하학적 형상은 공구의 모양과 가공경로와 관계가 있다. 공작기계의 기구학은 가공정밀도, 공작물과 작업 공정의 복잡성, 가공도중에 발생하는 여러 가지 어려움, 그리고 공구 종류의 다양성과 기계의 셋업등으로 구성된다.

또한, 가공표면 생성과정의 시뮬레이션에서는 정확하게 절삭공구의 묘사가 필요하다. 절삭 공구의 절삭각은 절삭 조건, 칩 형성의 특징과 공구 마모 뿐 아니라 표면의 조도에도 영향을 미치고, 정적, 동적 절삭력에 영향을 미친다. 따라서, 표면가공의 정확한 모델링과 시뮬레이션을 위하여 일반적인 공구 형상을 가지고 어떠한 가공이라도 수행할 수 있는 시뮬레이터가 필요하다. 다시 말하면, 이용자가 원하는 기계와 절삭날의 형상 및 공작물을 선택하면, 표면 가공의 새로운 모델은 공구와 공작물간의 명확한 관계 뿐 만 아니라 공구경로식의 정의와 가공 표면 조도에 대한 필요한 정보를 제공할 수 있어야 한다.

표면 가공법은 공작기계의 기본 움직임뿐만 아니라 가공 중에 발생하는 예러, 공구의 런아웃, 그리고 사용 목적에 따른 고차원 운동(higher order motion) 등을 포함하고 있다.

일반적인 표면 가공법의 기본식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$r_0 = B_{0,n} B_T e^4 \quad (8)$$

여기서 r_0 는 기본좌표계에서 절삭날까지의 벡터이고, $B_{0,n}$ 과 B_T 는 각각 공구와 공작물간의 기구학적 좌표변환과 공구좌표계에서 절삭날까지의 기하학적 좌표변환이다. e^4 는 $\{0 \ 0 \ 0 \ 1\}^T$ 이다.

3. 연삭공정 모델링

연삭공정의 모델링을 위하여 드레싱 작업과 연삭공정을 분리하여 시뮬레이션 하였다.

3. 1 드레싱 작업

다이아몬드 드레서에의해 형성된 슷들의 표면 윤곽은 다이아몬드와 슷들 사이에 상대적인 움직임에 의해 결정된다. Fig. 1은 슷들 드레싱작업을 보여준다. 본 연구에서는 사인곡선(sinusoidal curve)을 반구의 연삭 슷들 입자에 적용시켜 드레싱 하였다.

사용된 사인곡선의 식은 다음과 같다.

$$g(t) = A \sin \omega t \quad (9)$$

여기서 A는 드레싱 깊이이며 ω 는 드레싱 주기를 말한다.

3. 2 연삭공정

연삭공정에서 슷들입자를 각각의 단인 공구로 가정하고, Fig. 2를 보면 절삭날 위의 한점 P_k 를 표면가공법으로 나타내었으며 다음식으로 표현된다.

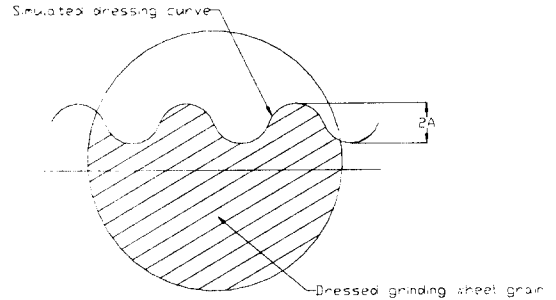
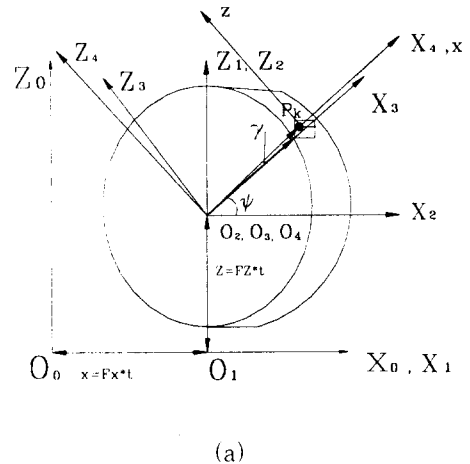


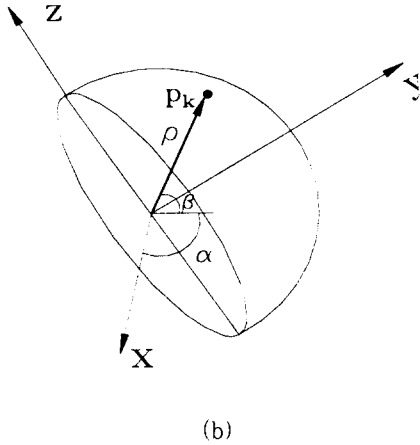
Fig.1 Simulation of dressing operation

$$r_0 = B_{0,4} r_4 = {}^N A^1(x) {}^N A^3(z) {}^N A^5(\psi) {}^N A^6(\gamma) r_4 \quad (10)$$

$$r_4 = {}^N A^6(\alpha) {}^N A^5(\beta) {}^N A^1(\rho) e^4 \quad (11)$$

여기서 ${}^N A^1(x)$, ${}^N A^2(y)$ 는 각각 X, Y방향으로 좌표 변환이며 ${}^N A^6(\gamma)$ 와 ${}^N A^6(\alpha)$ 는 Z축을 중심으로 γ 와 α 만큼 회전을 뜻한다. 또한 ${}^N A^5(\beta)$ 와 ${}^N A^5(\psi)$ 는 각각 Y축을 중심으로 β 와 ψ 만큼의 회전이며 ${}^N A^1(\rho)$ 는 X축으로 ρ 만큼 거리를 나타낸다.





(b)
Fig. 2 The coordinate system for the grinding process

4. 컴퓨터 시뮬레이션

Fig. 3은 컴퓨터 시뮬레이션의 흐름도이다. Fig. 3에서 Tstep은 시간의 변화를 나타내며 0.01초이다. 또한 $W(x)$ 와 $T(x)$ 는 각각 공작물과 스톨입자의 x좌표값을 나타낸다. 그리고 $WZ(x,y)$ 와 $TZ(x,y)$ 는 각각 x, y좌표값에 따른 공작물과 공구의 높이이다. 연삭 작업시 스톨 입자와 공작물간의 마모에 의해 새로이 생성된 스톨 입자와 가공면을 각각의 패스마다 새롭게 저장된다. 이때 스톨 입자와 가공면의 시뮬레이션 결과를 드레싱 시기를 결정한다.

드레싱 조건은 CBN 스톨의 경우 최적 입자들의 평균 높이(R_{max})가 $30\mu m$ 이하가 될 때 드레싱을 하였다.⁽⁸⁾

Table 1은 실제 연삭조건을 나타내며⁽⁹⁾, 이 조건으로 시뮬레이션 하였다. 여기서 사용된 스톨은 레지노이드 결합제를 이용한 CBN스톨로서, 고속연삭 및 중연삭의 실현이 가능하고 고경도 재료는 물론 난삭가공재의 연삭에도 많이 사용된다.

Table 1 Simulation conditions

Grinding Wheel	CBN80N75B (175*20*31.75)
Wheel Speed	1897 m/min
Table Speed	9m/min
Depth of cut	0.05mm
Number of pass	20 pass
Workpiece	SKD 11(HRC 63)

5. 결과 및 고찰

5. 1 마모된 스톨면과 입자

Fig. 4는 Leitz사의 UMS432 비접촉식 3차원 측정기를 이용하여 본 연구에서 시뮬레이션한 실제 연삭 스톨 입자를 보여주고 있다. 사용된 비접촉식 3차원 측정기의 정밀도는 $1\mu m$ 이며 가로×세로의 크기는 $1\times 1mm$ 이다.

Fig. 5는 Fig. 4의 입자분포를 바탕으로 시뮬레이션한 CBN 스톨의 일부를 나타내고 있다. 각각의 입자의 모양은 반구로 가정하였다. 그림에서 보는바와 같이 입자들은 간격 및 높이에서 불규칙 분포를 보여주고 있다.

Fig. 6은 3.1절에서 언급한 사인곡선을 이용한 드레싱 작업후의 스톨 작업면을 보여주고 있다.

Fig. 7에서는 10 패스 후 스톨 작업면을 보여주고 있다. 스톨 입자의 마모로 스톨의 드레싱이 요구됨을 보여주고 있다.(드레싱 기준 $30\mu m$)

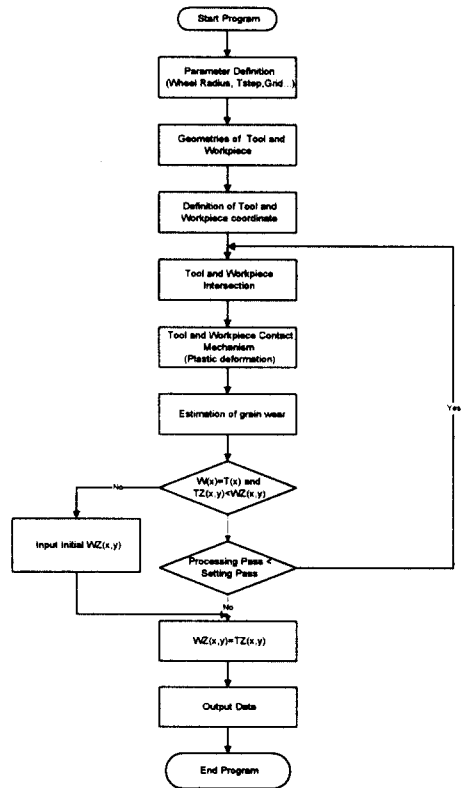


Fig. 3 Flowchart of the surface shaping system

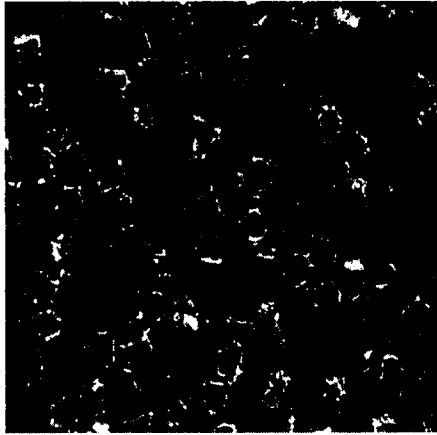


Fig.4 Photograph of the resinoid CBN grains of a grinding wheel

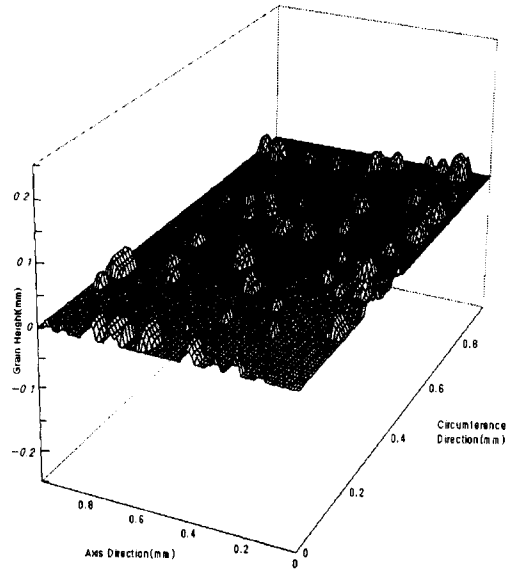


Fig. 6 Simulated grains on the grinding wheel after dressing

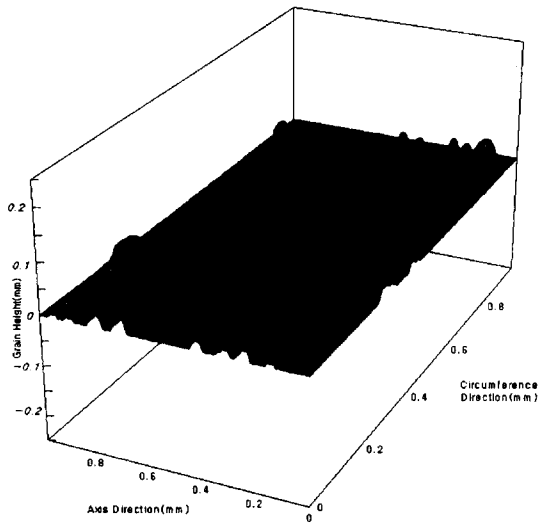


Fig. 5 Simulated grains on the initial grinding wheel

5. 2 연속 가공된 공작물의 표면

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 마모되지 않은 초기 슷돌 (Fig. 6)과 마모된 슷돌(Fig. 7)을 이용하여 가공된 공작물의 표면을 나타낸다.

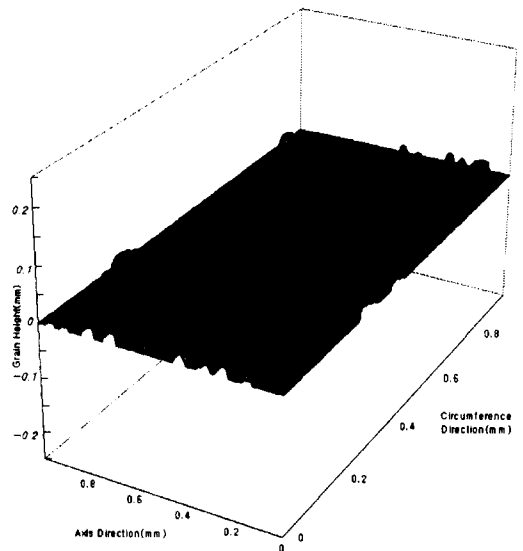


Fig. 7 Simulated grains on the grinding wheel after 10 passes

본 연구에서는 contact mechanism의 이론에 따른 슛돌입자의 마모만을 고려했기 때문에 마찰력이나 열 발생, 입자 및 결합제의 탈락, 눈에꿈등은 제외했다. 따라서, Fig. 8과 Fig. 9를 비교해보면 Fig. 9는 Fig. 8에 비해서 표면이 더 무더진 것을 볼 수 있다. 그림에서 보기엔 Fig. 9의 가공표면이 더 매끄러운 것처럼 볼 수 있겠지만, 이것은 슛돌입자의 마모에 따른 가공물의 형상이기 때문에 마찰력과 열 발생을 고려해본다면 가공표면은 더욱 거칠것이다.

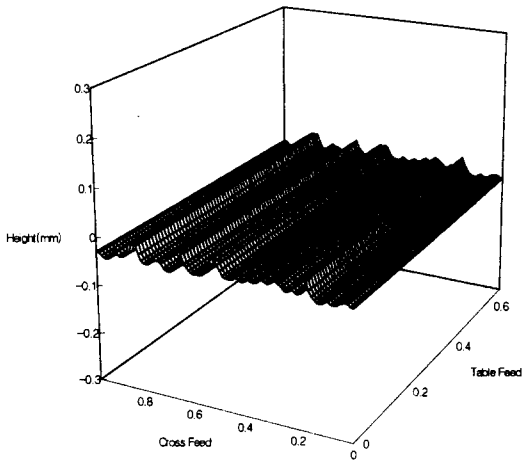


Fig. 8 Simulated surface roughness after dressing

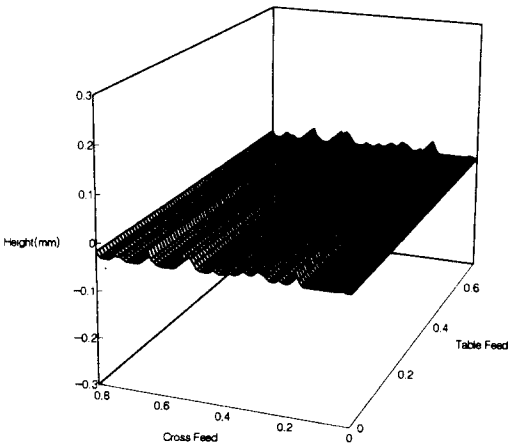


Fig. 9 Simulated surface roughness after 10 passes

Fig. 10은 Fig.8과 Fig.9의 프로파일을 비교한 것이다. 10패스 이후의 R_{max} 은 $30\mu m$ 이며 마모가 일어난

것을 확연히 볼 수 있다.

Fig. 11은 10패스 이후의 실제 가공면과 시뮬레이션 결과의 프로파일을 비교하였다. 10패스 후에서 R_{max} 값이 $30\mu m$ 에 근접하였고 실험결과와 시뮬레이션 결과가 일치함을 알 수 있었다.

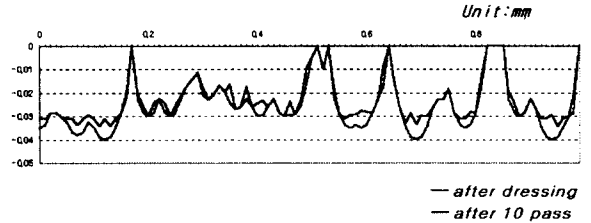


Fig. 10 Comparison of simulated profiles of after dressing and after 10 passes

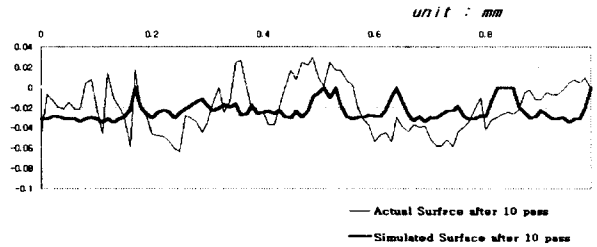


Fig. 11 Comparison of simulated profile and actual profile of after 10 passes

6. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실제 레이노이드 결합제를 사용한 CBN스�돌을 비접촉식 3차원 측정기를 이용하여 입자를 관찰함으로써 보다 정확한 슛돌면의 시뮬레이션이 가능하였다.
2. 시뮬레이션된 연삭 슛돌면을 바탕으로 contact mechanism과 표면 가공법을 이용하여 공작물과 연삭스�돌 입자간의 마모를 예측하였다.
3. 시뮬레이션을 통해 슛돌 입자의 마모를 관찰할 수 있었고 마모된 정도와 가공면의 표면 거칠기에 따라 드레싱시기를 결정할 수 있었다.
4. 실제 가공된 공작물과 시뮬레이션된 공작물에 대한 프로파일을 비교해본 결과 10 패스 후에 드레싱이 필요함을 알 수 있었다.

후 기

「이 논문은 1996학년도 아주대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었음」

참 고 문 헌

1. Eda, H., et al., "In-Process Detection of Grinding Burn by Means of Utilizing Acoustic Emission," *J. of JSPE*, Vol.49, pp. 1257-1262, 1983.
2. Inasaki, I., "Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, 1991.
3. Chen, X. and Rowe, W.B., "Analysis and Simulation of the Grinding Process. Part I: Generation of the Grinding Wheel Surface," *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 36, No. 8, pp. 871-882, 1995.
4. Suto, T. and Sam, T., "Simulation of grinding process based on wheel surface characteristics," *Bull. Jap. Soc. Prec. Engng*, 15(1), 1981.
5. Hong, M.S. and Ehman, K.F., "Generation of Engineered Surfaces by the Surface-Shaping System," *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 35, No. 9, pp. 1269-1290, 1995.
6. Suratkar, P.T. and Pandit, S.M. and Wu, S.M., "A stochastic approach to the mode of deformation and contact between rough surfaces," *Wear*, Vol. 39, pp. 239-250, 1976.
7. Archard, J.F., "Wear Theory and Mechanics" *Wear Control Handbook*, edited by Peterson, M. B. and Winer, W.O., ASME, 1980.
8. Yokogawa, K., "Effect of 'TSUKIDASHIRYO', resinbonded borazon CBN wheel on grinding performance," *J. of JSPE*, Vol. 4, pp. 93-98, 1986.
9. Hong, M.S. and Lee, J.S and Kim, H.N., "New method of dressing time monitoring using computer simulation and laser beam in surface grinding," *McNU '97, Joint ASME, ASCE & SES Summer Meeting*, Northwestern University, pp. 735, 1997.