

〈論 文〉

절삭력 신호를 이용한 공구운동의 모델링과 고정도 표면생성에 관한 연구

김정두* · 이은복**
(1992년 12월 21일 접수)

A Study on the Modeling of Tool Motion and High Accuracy Surface Generation by Use of Cutting Force Signal

Jeong-Du Kim and Eun-Bok Lee

Key Words : Cutting Force(절삭력), Surface Roughness(표면거칠기), Waviness(파상도), Surface Profile(표면형상), Power Spectral Density(PSD), PSD ratio(PSD 비), Normalized Spindle Frequency PSD(정규화된 주축회전 주파수의 PSD), High Accuracy Surface Finishing(고정도 가공)

Abstract

The creation process of a typical machined surface is treated here as a dynamic system. An investigation is carried out to establish a relationship between the characteristics of cutting force fluctuations that cause vibration response of the tool-workpiece system and the formation of surface in face cutting by sintered carbide cutting tool. Cutting force is measured and analyzed in frequency domain. The power spectral densities of cutting force give a useful information in surface generation and it can be used to find out the control factor of surface roughness. The terms, PSD ratio & Normalized spindle frequency PSD, are defined and when the value of power in spindle frequency is absolutely little but relatively large, it is obtained high accuracy surface roughness. The aim of this research is to find surface profile by measured and analyzed cutting force signals. The simulation of surface generation gives the comprehension of its mechanism and help to predict and control the surface quality. In this study, it is suggested what informations about surface generation can be acquired from the cutting force signal and an way of generating a better surface.

1. 서 론

최근, 공장자동화의 일환으로 가공자동화의 연구가 활발히 진행중이다. 그의 대표적인 것으로 음향방출(acoustic emission)신호와 절삭력 신호 등에

의한 공구의 마멸, 파손검출 등이 주류를 이루고 있으며, 표면거칠기의 예측내지는 실시간 감지에도 이용되고 있다. 절삭되는 과정중 얻어진 신호는 상태의 감지 외에도 가공공정의 적응제어에 이용되고 있다. 무인화로 인한 가공시에 돌발적인 사태에 대한 감시 및 제어는 많은 연구가 되어 있으나, 양질의 표면생성 혹은 원하는 품질의 제품을 제조하는 방법은 아직 미비한 실정이다. Weck^(1,2)는 공작기

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과
**한국과학기술원 정밀공학과 대학원

계의 동적특성을 이용하여 생성된 표면의 정도 (accuracy)를 초정밀 가공을 통해 연구하였으며, Baradie⁽³⁾는 절삭변수들의 변화에 따른 표면거칠기와의 관계를 보고하였다.

Takasu⁽⁴⁾와 Liu⁽⁵⁾는 공구와 공작물 사이의 상대진동을 이용하여 중복절삭(overlap-cutting)에 의해 공구의 형상이 표면거칠기에 지대한 영향이 있음을 입증하였으며, Fawcett⁽⁶⁾는 이러한 상대진동을 실시간 제어에 이용하여 표면거칠기의 제어에 효과를 얻었음을 보고하였다. Zhang^(7,8)은 가공재의 불균일성을 이용하여 경도의 변화로 인한 절삭력의 변화를 수치화하여, 가공된 형상의 3차원 구조를 시뮬레이션하였다. 이외에도 Christensen⁽⁹⁾은 얻어진 절삭력의 동적성분과 표면거칠기와의 관계를 ARMA (autoregressive moving average) 모델을 이용해 연관시켰으며, Rakhit⁽¹⁰⁾는 절삭력 신호의 분산과 표면조도와는 비선형적인 관계가 있음을 보고하였다. 이러한 연구보고를 종합해 볼 때 가공표면 생성에 지대한 영향을 끼치는 인자는 다음과 같은 3가지로 요약될 수 있다. (1) 공작기계의 동적 특성, (2) 가공조건의 변화, (3) 절삭력의 변동.

이와 같은 인자중, 절삭력의 변동이 유용한 정보라 판단되는데 절삭력은 공구와 피삭재 사이에서 일어나는 물리적 변화의 양적신호이기 때문이다. 즉 공작기계의 진동으로 인한 공구위치 변화로 인한 절삭깊이의 변화와 가공조건의 변화로 인한 가공되는 양의 변동이 절삭력에 영향을 미치므로 가공된 재료의 형상이 예측가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 가공중 발생하는 공구와 피삭재 사이의 상대진동을 얻어진 절삭력으로 모델링하여 가공된 피삭재의 형상을 시뮬레이션하고, 절삭력 변동과 생성된 표면 사이의 관계를 관찰하여 피할 수 없는 공구 피삭재 사이의 진동을 역이용 하여 가공에 응용할 수 있는 가를 관찰하였다.

2. 가공표면 생성의 이론적 모델링

2.1 공구 운동의 모델링

회전하는 피삭재에 대하여 일어나는 상대진동은 피삭재가 공구에 대하여 한 회전당 이송방향에서 공구의 진폭이 약간씩 달라지게 한다. 즉, 위상차이에 의한 영향으로 이송방향으로의 진동 또한 일어난다고 볼 수 있다. 이것이 표면거칠기에 큰 영향을 미치는데 다음과 같이 모델링 할 수 있다. 주

축회전수 N (rpm), 피삭재 반경 r_o (mm), 이송량 f (mm/rev)의 상태에서 공구의 반경방향의 이동체적은 단면절삭일 경우에 다음과 같다.

$$r_i = r_o - \frac{fN\tau}{60} \quad (1)$$

r_i : 피삭재의 중심으로부터 공구가 위치한 지점까지의 반경방향 거리

τ : 시간(sec)

이때, 공구의 진동은 시간 τ 와 각각의 주파수 a_i 에만 영향을 받으므로 다음과 같다.

$$y = \sum_i A_i \sin(2\pi a_i \tau) \quad (2)$$

A_i : 공구의 진동진폭의 크기

(1)식을 τ 에 대하여 정리하고, 반경방향으로 매 회전당의 위치변화를 고려하여 (2)식에 대입하면

$$y_j = \sum_i A_i \sin\left[\frac{120\pi a_i (r_o - R_j)}{fN}\right] \quad (3)$$

y_j : j 지점에서 일어나는 공구진동의 진폭값

A_i : 각각의 주파수 성분에 의해 구별된 진폭값

a_i : 공구진동 주기를 구성하는 각각의 주파수

R_j : j 번 회전후 이송된 상태에서의 반경방향의 공구위치

와 같이 된다. 위의 식들은 공구의 이동체적을 나타내며, 최종적인 표면의 형태는 공구의 위치변화로 일어나는 중복절삭과 공구의 형상을 이용하여 생성시킨다.

2.2 절삭력과 공구진폭의 연관관계

위의 식들은 공구의 진폭값을 알아야만 사용이 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 절삭력과 공구진폭의 관계를 통계적 방법을 이용하여 연관시켰다. 공구진폭은 측정된 평균 절삭력과 절삭조건을 이용하여 절삭깊이를 최소자승법(least-square method)으로 수치화하여 사용하였다. 공구의 진폭을 계산하는 식의 대표적인 형태는 다음과 같다.

$$t = C \cdot F^a \cdot N^b \quad (4)$$

여기서,

t : 절삭깊이(공구의 진폭), C : 상수, F : 절삭력

N : 주축 회전수, a, b : 지수 상수

(4)식에서 절삭력의 진동에 의해 절삭깊이의 변화량을 알 수 있게 해준다. 이때, (4)식의 입력변수인 절삭력은 (3)식과 유사하게 주기함수로 표현이 가능하게 된다. (3)식은 공구의 주파수 성분별로 구분된 공구의 진동진폭을 임의의 지점에서 진폭값으로 표현하는 주기함수의 식인데 반하여, 다음 식은 절삭력의 값을 표현하는 것이다.

$$F_j = \sum_i P_i \sin \left[\frac{120\pi a_i (r_o - R_j)}{fN} \right] \quad (5)$$

F_j : j지점에서의 절삭력 크기

P_i : 각각의 주파수 성분에 의해 구별된 절삭력의 값

a_i : 공구진동 주기를 구성하는 각각의 주파수

R_j : j번 회전후 이송된 상태에서의 반경방향의 공구위치

따라서, 절삭력에 대해 주파수 성분별로 값을 알고 있으면 임의의 지점에서 절삭력을 (5)식에 의해

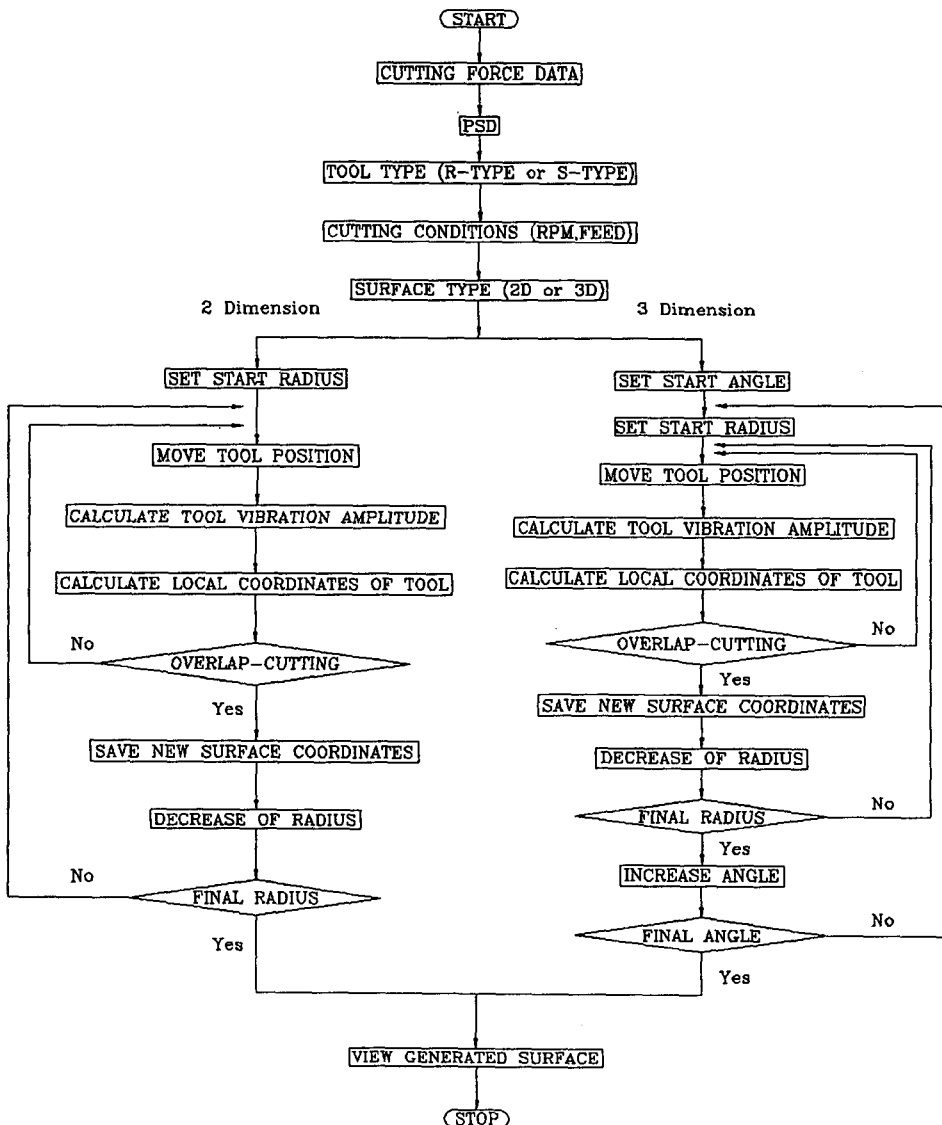


Fig. 1 Flow chart of surface generator

알 수 있고 (4)식에 의해 공구의 진동진폭 값을 알 수 있게된다. 이 과정을 피삭재의 반경방향으로 이송량 만큼 움직이면서 수행하고 중복절삭 알고리즘을 적용한다면, 절삭력의 진동으로부터 2차원 동적 표면을 생성 시킬수 있게 된다.

2.3 3차원 표면생성 알고리즘

2차원 표면생성 알고리즘은 반경방향으로만 고려한 것에 반하여 3차원 표면생성 알고리즘은 피삭재의 회전방향으로도 공구의 움직임을 나타내게 한 것이다. 다시말해서, 임의의 측정영역이 (X, Y) 좌표값으로 프로그램에 입력 되어지면 극좌표(R, θ)로 변환되어 최소값의 θ_i 좌표에서 2차원 형상의 데이터 값을 생성시킨다. 이 과정에서 중복절삭으로 인한 형상변화의 고려가 이루어지며 계산이 끝난후 값을 저장된다. 이어서 $\theta_i + \Delta\theta$ 에서의 데이터가 위와 같은 순서로 계산되어 저장되게 된다. 이 과정은 최대값의 θ_f 에 도달할 때까지 계속 수행된다. 그후 3차원 그래픽 소프트웨어를 거쳐 도시된다.

표면생성의 전체적인 알고리즘은 Fig. 1에 순서도를 통해 나타내었다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 2는 실험에 사용된 공구의 형상이다. 사용된 공구의 형태는 총 4가지로 R형(round type)과 S형(straight type)으로 나눌 수 있는데, R형은 노우즈 반경 0.4 mm로 하였으며 S형은 공구인선의 폭을 각각 0.75 mm, 0.9 mm, 1.0 mm로 하였다.

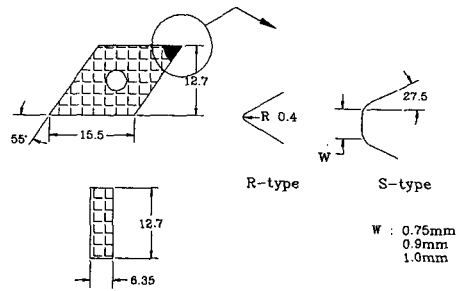


Fig. 2 Geometry of tips

사용된 공구의 재질은 (주)한국야금의 P계열 초경공구(ST10P DNPR150604)이다. 피삭재는 SM45C를 사용하였다. 가공조건은 고정도가공을 목적으로 하는 연구이므로 절삭깊이를 0.1 mm에서 0.3 mm 사이로 제한하였으며, 이송은 0.036 mm/rev으로 고정하였다. 또한, 주축회전수를 바꾸어가며 단면절삭(face cutting)을 수행하였다. 가공중 공구동력계를 통해 절삭력 신호를 측정하여 증폭기(kyowa, low pass filter)에서 100 Hz이하를 필터링하여 통과시킨 후, A/D변환(sampling time : 0.59 msec)하여 PC(IBM PC 486)에 데이터를 저장하였다. 절삭력의 측정과정중 외부에서 들어오는 잡음(noise)의 효과를 극소화 하기위해 쉴딩(shielding) 및 실험장치의 모든 접지(ground)선을 모아서 전원의 접지선에 연결하였다. 절삭력 신호는 각각 공구와 절삭 조건에 대해 10,240(512×20)개의 데이터를 샘플링 했으며, 한 경우에 대해 8번의 실험을 수행하였다. 4개의 다른 공구, 절삭 깊이 0.1, 0.2, 0.3 mm, 주축회전수 420, 700, 1100 rpm의 절삭

Table 1 Experimental devices and its contents

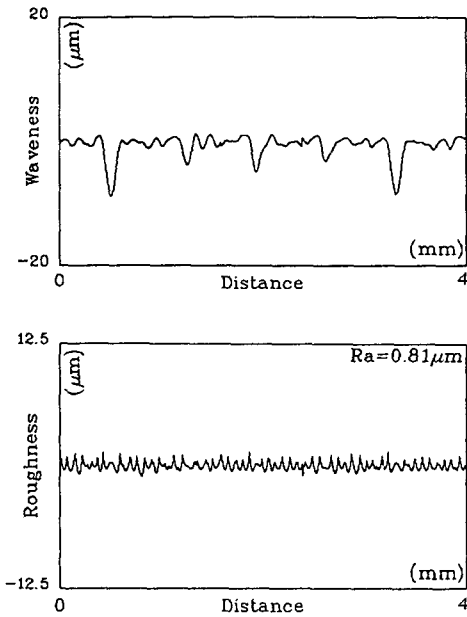
Devices	Content
A/D converter	Labin master sampling time : 0.59 msec
Tool materials	Sintered carbide tool (ST10P DNPR15064)
Workpiece	SM45C
Surface roughness tester	Mitutoyo Surfptest-402
Tool dynamometer	Sambo electronic MFG Co. AST type
Strain amplifier	KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENT Co. LTD. SER. HB 5010
Lathe	Tongil Co., TIPL-4

조건들에 대해 실험하였다. 저장된 데이터는 주파수 분석 및 평균 절삭력을 계산하는데 사용되었다. 주파수 분석과정은 해닝 윈도우(Hanning window)를 사용하여 512개 석의 샘플(sample) 데이터들을 구성하여 20회의 평균화(averaging)를 수행하였다. 실험에 사용된 재원은 Table 1에 나타내었다. 참고로 2.2절에서 제시한 공구의 진폭을 계산하는 (4)식은 공구별로 다음과 같다.

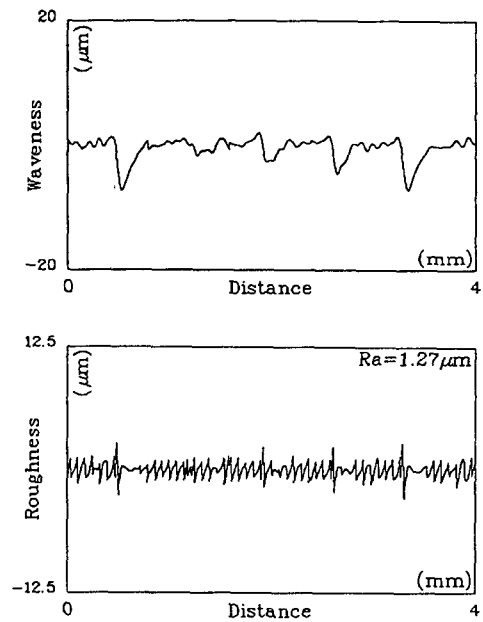
$$\begin{cases} \text{R-type tool}(R=0.4 \text{ mm}) : t = e^{-5.19} F^{1.26} N^{-0.12} \\ \text{S-type tool}(W=0.75 \text{ mm}) : t = e^{7.40} F^{1.12} N^{0.30} \\ \text{S-type tool}(W=0.9 \text{ mm}) : t = e^{-6.84} F^{1.90} N^{-0.29} \\ \text{S-type tool}(W=1.0 \text{ mm}) : t = e^{11.52} F^{1.37} N^{0.73} \end{cases}$$

4. 시뮬레이션 및 검증

Fig. 3은 R형 공구(R=0.4 mm)의 실제 조도의



Cutting condition : $N = 420 \text{ rpm}$
 $t = 0.3 \text{ mm}$
 $f = 0.036 \text{ mm/rev}$



Cutting condition : $N = 420 \text{ rpm}$
 $t = 0.1 \text{ mm}$
 $f = 0.036 \text{ mm/rev}$

Fig. 3 Simulated waveness, roughness and real roughness profile machined by R-type tool (R=0.4 mm)

Fig. 4 Simulated waveness, roughness and real roughness profile machined by S-type tool (W=0.75 mm)

형상과 시뮬레이션된 파상도와 표면거칠기 형상을 타나내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 실제 표면 거칠기 형상이 더욱 치밀한 요철을 가지고 있다. 시뮬레이션된 형상이 실제형상과 다소 차이가 있는 이유는 시뮬레이션 과정에서 공구의 형상이 기하학적으로 완벽함을 가정하였고, 가공이 가정한대로 이상적인 절삭(ideal cutting)이 아닌 이유때문이라 사료된다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 인선의 폭이 0.

75 mm, 0.9 mm인 상태에서 비교된 형상들이다. 여기에서도 실제형상과의 차이는 있지만 개략적인 형태는 비슷하다고 할 수 있다. Fig. 6은 인선의 폭이 1.0 mm인 경우로서 주축회전수가 커짐에 따라 표면이 양호해짐을 보여주고 있다. 이는 절삭속도가 클수록 표면거칠기가 좋아진다는 일반적인 실험관측 결과가 시뮬레이션으로도 입증될 가능성을 밝혀주고 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 시뮬레이션된 3

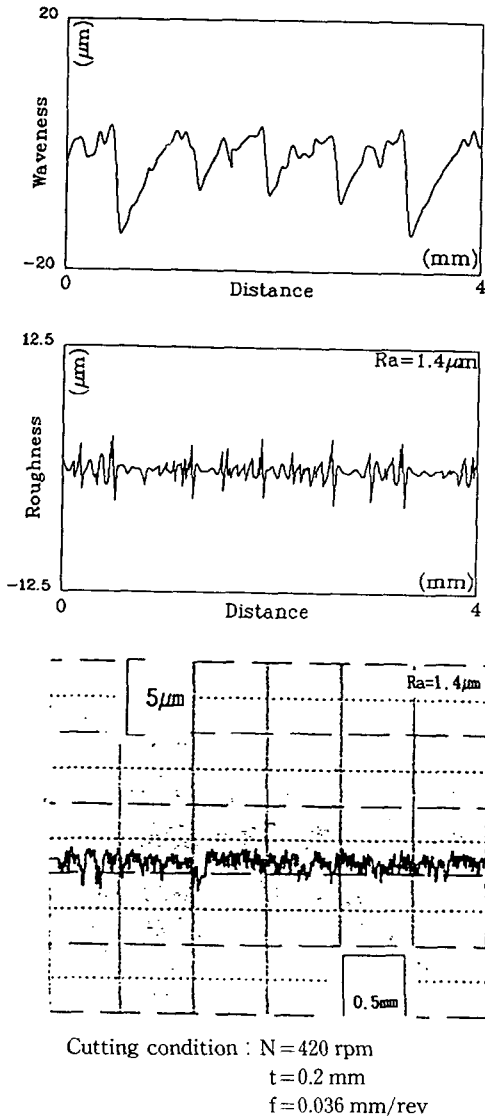


Fig. 5 Simulated waveness, roughness and real roughness profile machined by S-type tool (W=0.9 mm)

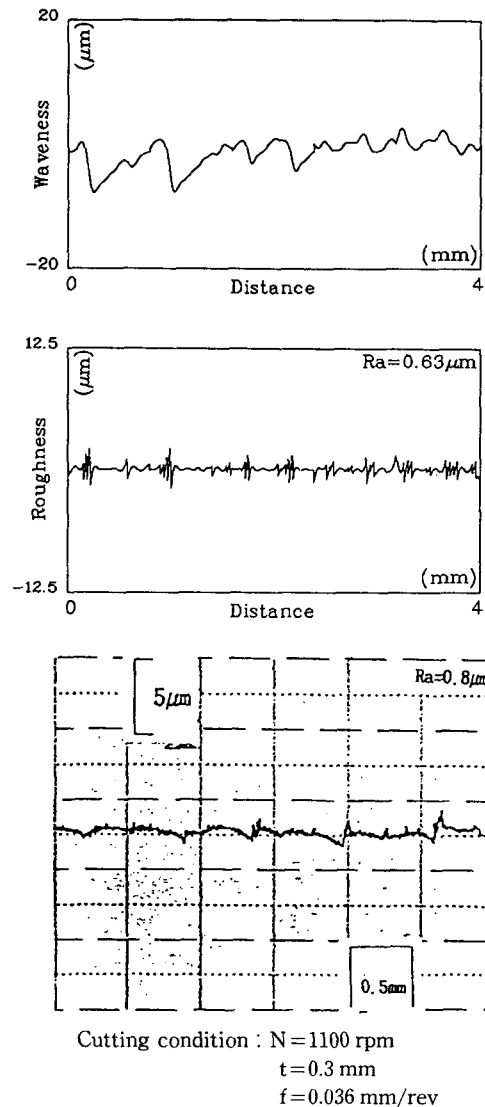


Fig. 6 Simulated waveness, roughness and real roughness profile machined by S-type tool (W=1.0 mm)

차원 표면의 형상이다. R형 공구로 가공된 표면을 시뮬레이션한 것인데 각각 표면거칠기 Ra의 실험 값은 1.4 μm , 1.1 μm 를 나타내고 있다. 시뮬레이션된 형상으로는 Fig. 7이 더 양호한 면으로 판단

될 수 있으나, 파상도를 제외한 표면거칠기만을 고려한다면 Fig. 8에 표현된 형상이 양호한 표면거칠기를 나타내게 된다. 즉, 전자는 파상도를 제외한 표면거칠기가 불규칙적인 형상을 나타낸다. 이는 공구의 랜덤(random)한 진동으로 인한 공구와 공작물의 상호작용이라 사료된다. 이에 반해 후자는 면절삭시 공구의 궤적이 나선형운동(spiral motion)임을 뚜렷이 보여주고 있는데, 공구와 공작물의 상호작용에서 어떤 규칙성을 갖고 있음을 추측할 수 있다. 따라서 이와 같은 규칙성이 중복절삭을 통해 파상도의 영향을 뚜렷하게 함에 반해서 표면거칠기는 좋아지게 된다고 사료된다. Fig. 9는 앞에서 언급한 두 형상에서의 절삭력을 주파수영역에서 본 PSD분포이다. 그림에서 볼 수 있듯이 절삭력의 규칙성이 있을 때 표면에 공구의 궤적이 뚜렷이 나타난다. 이로 미루어볼 때 절삭력 PSD분포의 특성과 표면거칠기는 정성적관계가 성립될 수 있으리라 사료된다. 어떠한 상관관계가 있는지 살펴보기로 하자.

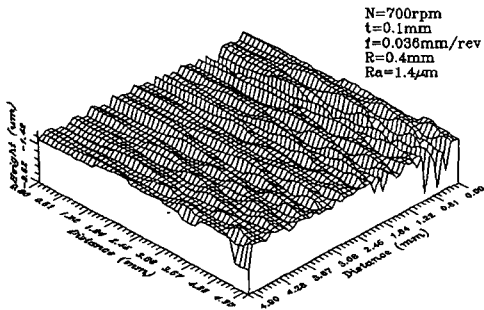


Fig. 7 Simulated surface topography in depth of cut 0.1 mm by R-type tool

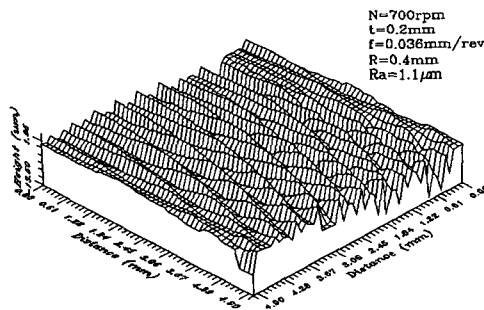


Fig. 8 Simulated surface topography in depth of cut 0.2 mm by R-type too

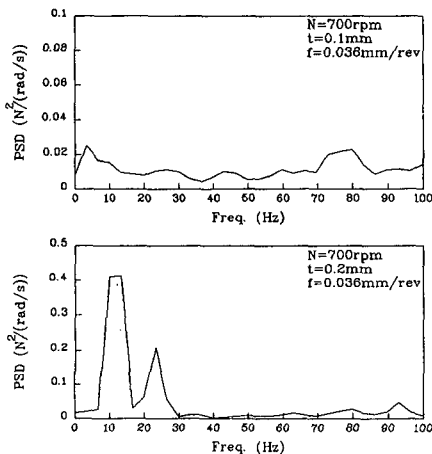


Fig. 9 PSD for varoius cutting conditions in R-type tool

5. 절삭력의 PSD분포와 표면거칠기의 상관관계

Fig. 10과 Fig. 11은 가공시 발생한 절삭력의 PSD분포이다. Fig. 10에서는 S형 공구들로 700 rpm으로 가공시 나타난 절삭력 신호의 PSD분포를 나타내고 있다. 전체적으로 에너지가 비슷한 정도임을 볼 수 있으나 peak가 발생하는 주파수 대역

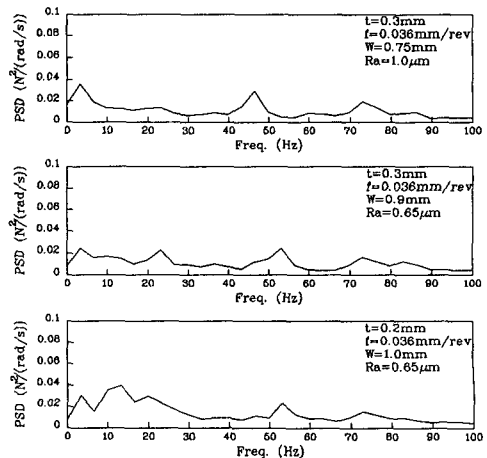


Fig. 10 PSD for various S-type tools in 700 rpm

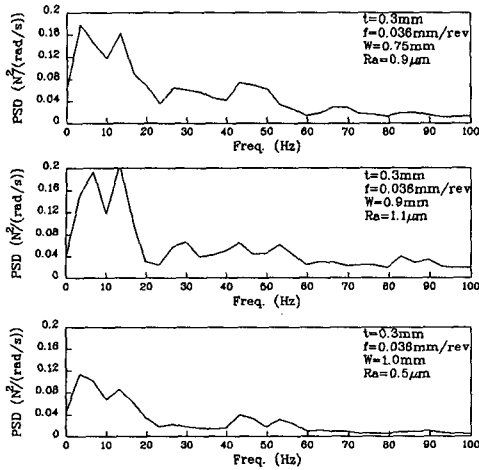


Fig. 11 PSD for various S-type tools in 420 rpm

의 변화에 따라 표면거칠기의 변화가 있음을 볼 수 있다. Fig. 11에서는 420 rpm에서 S형 공구들로 가공시 얻어진 PSD분포인데 전체적으로 형태의 유사성을 볼 수 있으며 에너지 레벨(level)의 감소가 표면거칠기의 좋아짐을 보여주고 있다. 일반적으로 chatter(chatter) 현상을 제외한 가공시 절삭력의 PSD분포를 관찰하다 보면, 분포의 특성이 상당히 랜덤(random)하다는 것을 알 수 있다. 그러나 물리적 현상의 대부분은 이상적인 환경에서 특정한 규칙성을 갖고 운동하게 된다. 절삭력도 같은 개념이라 사료된다. 즉, 공구의 진동이 전혀 존재하지 않는다면 측정되는 절삭력은 일정한 값을 가지게 된다. 공구의 진동은 공구 자체가 탄성체이므로 발생하는 특징이므로, 외부의 가진이 어떤 특성이느냐에 크게 좌우된다. 실제 상황에서는 가공 자체의 불안정성 등등 여러가지 이유로 인해 이러한 특징을 찾기가 상당히 어려우나, 관찰영역을 판단하고 분석하는 방법은 이상적인 모델로부터 접근함이 용이하다.

우선, 공구의 이상적인 탄성, 외부가진의 균일함과 가공의 완전함을 가정하자. 공구가 가공을 하면서 받는 외부의 가진은 단면가공(face cutting)의 경우 주축의 회전수에 영향을 받게된다. 주축회전수가 420 rpm일 경우 공구에 가진되는 주파수는 7 Hz가 된다. 따라서 공구는 7 Hz의 진동을 하면서 가공을 하게된다. 이때 공구는 공작물의 회전방향으로는 진동을 일으키되 이송방향으로는 위상의 차가 생기지 않으므로 공작물이 일회전 한 후 공구의

공작물에 대한 상대높이는 동일하게 된다. 생성되는 표면은 공작물의 회전방향으로는 정현파의 굴곡이 생기더라도, 이송방향으로는 이론적 표면거칠기와 동일한 표면이 생성된다. 이런 관점에서 볼때, 절삭력의 PSD분포가 주축회전 주파수에서만 peak 값이 있다면 표면거칠기는 이론적 값에 도달하게 된다. 그러나 실제상황에서는 다른 주파수 영역에서도 에너지의 값이 존재하므로 다음과 같이 수정할 수 있다. 주축회전 주파수의 에너지 값이 다른 영역에서의 에너지 값보다 상대적 클 경우 표면거칠기는 양호해지며, 에너지의 레벨(level)이 낮을 수록 공구의 진동진폭이 작아지므로 양질의 표면이 생성되어진다. 따라서 측정된 절삭력의 PSD분포에서 분석인자는 다음과 같이 두가지로 분류된다.

첫째로, PSD분포중 주축회전 주파수에서의 에너지가 전체 분포중 어느정도의 값을 가지고 있는지를 알기위해 최고의 에너지 값에 대한 비를 나타내는 PSD비(ratio)이다. PSD비는 다음과 같이 정의된다.

$$PSD\ ratio = \frac{(peak\ value)_{spindle\ frequency}}{(Max.\ peak\ value)_{overall}}$$

위의 정의에서 PSD비의 값이 1에 가까워 질수록 표면거칠기의 값이 좋아지게 된다.

둘째로, 주축회전 주파수에서의 에너지 값의 크기이다. 이 인자는 크기가 클수록 표면에 굴곡이 크게 생기므로 작은값이 양호한 표면을 생성시키게 된다. 이와 같은 결과를 볼 때 주축회전 주파수에서의 값이 중요한 관찰인자이며, PSD비가 크고 에너지의 값이 작을수록 양질의 표면을 얻을 수 있음을 알 수 있다. Fig. 12는 주축회전수를 1100 rpm, 700 rpm, 420 rpm별로 고정된 후 공구와 다른 절삭조건을 변화시켜가며 실험을 통해 얻은 절삭력의 PSD를 위의 두가지 인자와 표면거칠기에 대한 경향을 3차원 그래픽 패키지(graphic package)인 SURFER로 나타낸 관계이다. 이때, 주축회전 주파수에서의 에너지 값은 주축회전 주파수에서 얻어진 에너지를 각각의 주축회전수의데이터에 대해 정규화(normalizing)한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 PSD비의 증가는 표면거칠기의 감소를 유발하며, 에너지 크기의 증가는 표면거칠기의 증가를 가져온다. 또한, Fig. 13은 절삭조건을 각기 달리하여 실험을 통해 얻은 데이터를 도시화한 것이다. Fig. 13의 (a)는 Fig. 12의 관계와 유사한 경

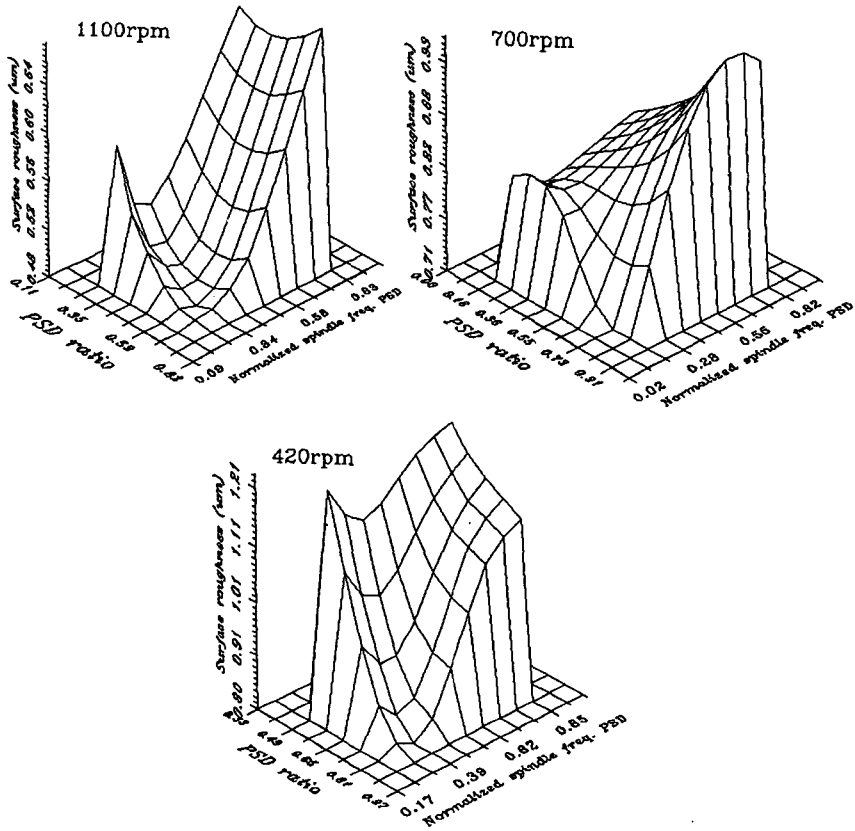


Fig. 12 Relation between PSD ratio & normalized spindle frequency and surface roughness in each RPM

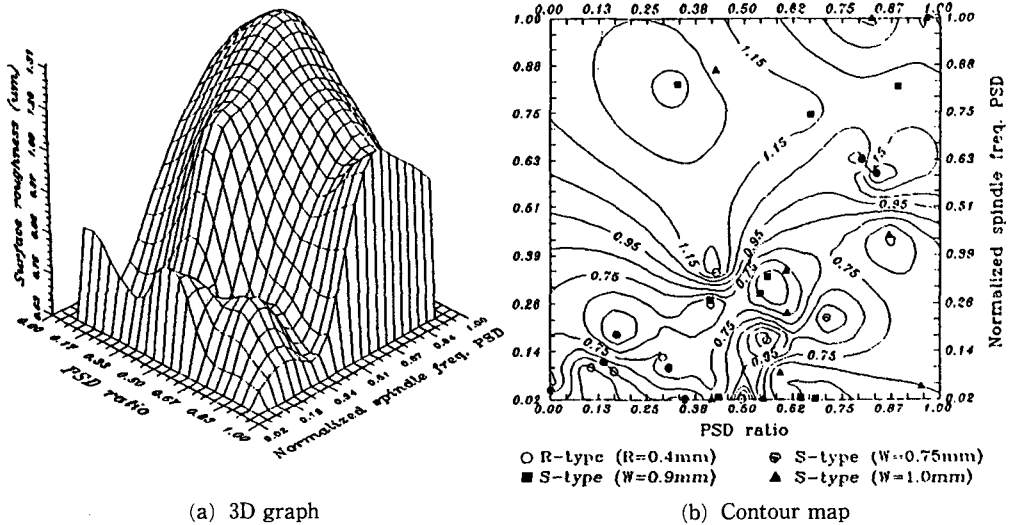


Fig. 13 Relation between PSD ratio & nomalized spindle frequency and surface roughness in various cutting conditions

향을 보여주고 있음을 알 수 있다. Fig. 13의 (b)는 표면거칠기의 등고선을 PSD비와 정규화된 주축회전 주파수의 PSD에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 R형 공구보다는 S형 공구가 양호한 표면을 생성시키고 있다. 또한, S형 공구중에서도 공구인선의 폭이 0.75 mm인 것 보다 0.9 mm 혹은 1.0 mm인 공구가 좋은 표면을 생성시킴을 보여주고 있다. 공구의 형상이 다름때에는 표면거칠기에서 값의 차이가 있을뿐, 주축회전 주파수에서의 에너지 값에 따른 변화는 유사한 경향이 나타남을 이제까지의 관찰로 알 수 있다. 이와 같은 관계를 이용하면 양질의 표면을 얻을 수 있는 가진방법(exciting method)을 찾을 수 있으며 앞에서 제시한 표면생성 시뮬레이션을 통해 표면의 형상을 알 수 있게 된다. 일례로 Fig. 14와 Fig. 15에 가진되는 절삭력의 형태와 R형 공구에 의해 시뮬레이션된 표면의 형상들이 나타내어졌다. 여기서

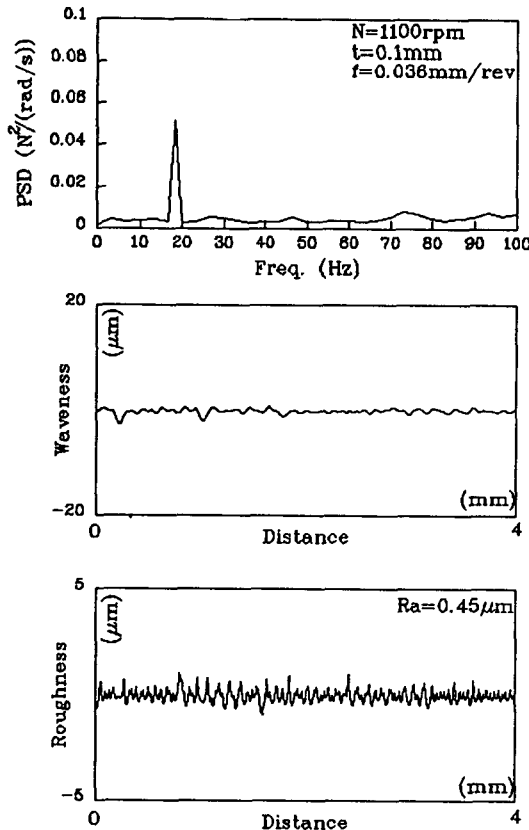


Fig. 14 Imaginary PSD and simulated surface profile in R-type tool (R=0.4 mm)

가진되는 절삭력의 형태는 임의로 주어진 것인데, 주축회전 주파수에서 다른 영역에서의 에너지보다 크나, 절대값으로는 작은 에너지를 주었다. 그외의 주파수 대역에서는 백색잡음에 가까운 형태의 에너지를 상당히 작은 값으로 하여 시뮬레이션 데이터로 사용하였다. 시뮬레이션 결과 상당히 양호한 표면이 생성 되었는데, 파상도는 물론 표면거칠기의 크기가 작으며 고른 표면임을 알 수 있다. 이와 같은 현상을 이용한다면 원하는 기준 이내의 표면을 얻을 수 있으리라 사료된다.

본 논문에서 수행된 부분은 절삭력 신호의 해석 및 응용방향에 제한되어 있다. 절삭력 신호를 관측하여 표면거칠기와의 상관관계를 살펴보았으며 공구운동을 모델링하여 실험치와 비교하여 시뮬레이션의 타당성을 입증하였다. 그 후 관측된 절삭력 신호와 표면거칠기의 상관관계를 이용하여 능동적인 방법으로 이용하였을 경우를 시뮬레이션하여 표면거칠기의 양호해짐을 입증하였다. 그러나 이는 시뮬레이션에 의한 예측결과이므로 실험적인 입증이 고려되어야 한다. 따라서 절삭되는 과정에서 공구에 가진시키는 방법과 시스템의 구성방법을 제시

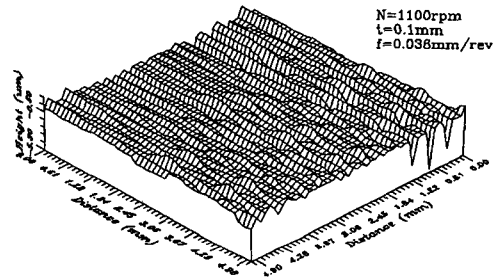


Fig. 15 Simulated surface topography in R-type tool by imaginary PSD (R=0.4 mm)

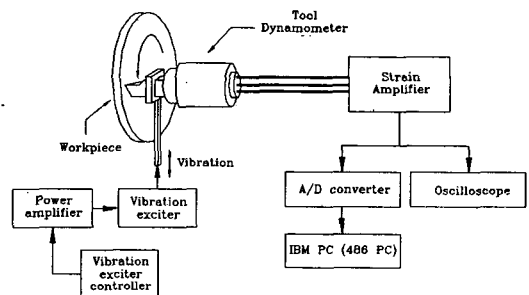


Fig. 16 Schematic diagram of exciting system

하여 보았다.

Fig. 16은 가진 시스템의 개략도를 나타내고 있다. 가진 시스템의 주요사항은 공구의 가진에서 가진의 방향이다. 가진의 방향은 절삭력 신호의 모델링 과정과 실험 데이터의 측정값을 주절삭력의 방향으로 행하였으므로 이 방향이 적절하다고 사료된다. 또한 가진장치의 용량은 고정도 가공시 절삭력이 20~60N정도로 측정되므로 100N이하의 힘을 발휘하는 것이 적절하다고 판단된다. 가진되는 주파수는 백색잡음의 형태가 아닌 정현파로서 주파수의 범위를 임의로 조절할 수 있어야 한다.

가진되는 형태의 적절성에 대한 고려는 다음과 같다. 절삭을 수행하기 전에 공구에 가진을 하며 공구동력계에서 얻은 신호를 주파수분석을 하여 가진되는 주파수와 응답하는 주파수가 동일함을 검사한다. 검사의 완료 후 가진 주파수를 주축회전 주파수에 설정하고 절삭을 수행한다. 절삭의 수행과정중 절삭력 신호의 값을 측정하여 주파수분석을 재수행한다. 주파수분석결과 PSD의 분포에서 가진되는 주파수에서 peak값이 발생하는가와 크기를 검사한다. 적절한 응답이 나올 때까지 가진되는 힘의 크기를 조절한 후 실제 절삭실험을 수행하게 된다.

이제까지는 가진을 통한 절삭실험에 대해 개략적으로 논의하였다. 본 논문에서는 주절삭력을 통하여 표면생성에 대한 모델링을 시도하였다. 그러나 공구의 진동은 한 방향으로만 일어나는 것이 아니므로 모델의 수정이 요구된다. 특히 이송방향으로의 고려가 요구된다. 이론적으로 표면거칠기의 생성은 공구의 형상과 이송량에 관계하므로 이송방향으로의 진동이 고려된다면 실제로 측정된 형상에 근접한 결과가 나올 수 있으리라 사료된다.

6. 결 론

본 연구의 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가공표면 생성에 절삭력의 변동 주파수 영역에서의 특이성이 상당한 영향을 준다. 이는 절삭력 신호의 분석이 표면의 특징을 알 수 있게하는 방법이 될 수 있음을 나타낸다.
- (2) 절삭력 신호를 이용하여 공구의 운동을 모델링하고 표면생성을 시뮬레이션 한 결과 실제와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.
- (3) 절삭력 신호의 분석결과 주축회전 주파수에

서의 에너지 값이 양질의 표면을 생성시킬 수 있는 인자임을 알 수 있었다.

(4) 양질의 표면을 얻기 위해서는 PSD비를 1에 가깝게 하고, 주축회전 주파수의 에너지 값을 작게 해야 한다. 즉, 전체적인 에너지 레벨은 작으나 주축회전 주파수에서의 에너지 값은 전체 레벨에 대해 상대적으로 높거나 최대값이 되어야 한다.

(5) 가공시 발생하는 진동은 피할 수 없는 필연적인 상황이나, 이러한 진동을 역이용하여 양질의 표면을 얻을 수 있는 가능성을 제시하였다.

참고문헌

- (1) Weck, M., Harter, R. and Bispink, T. 1988, Limits of workpieces accuracy caused by the geometrical and dynamical behavior of ultra-precision diamond turning machines, Proc. of the Int. Congress for Ultraprecision Technology, pp. 153~170.
- (2) Weck, M. and Modemann, K. 1988, Surface quality as a function of static and dynamic machine-tool behaviour during the cutting process, Surface Topography, Vol. 1, pp. 291~302.
- (3) El Baradie, M.A. 1991, Computer aided analysis of a surface roughness model for turning, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 26, pp. 207~216.
- (4) Takasu, S., Masuda, M. and Nishiguchi, T. 1987, Influence of steady vibration with small amplitude upon surface roughness in diamond machining, JSPE, Vol. 53, No.5, pp. 100~106
- (5) Liu, Y.S. Lin, Z.H. Hwong, X.Q. and Ku, C.H. 1984, An analysis of cutting surface formation under in-process measurement, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 24, No. 24, pp. 277~293.
- (6) Fawcett, S.C. 1990, Small amplitude vibration compensation for precision diamond turning, Precision Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 91~96.
- (7) Zhang, G.M. and Kapoor, S.G. 1991, Dynamic generation of machined surfaces, Part 1: Description of a random excitation system, ASME Journal of Engineering for industry, Vol. 113, pp. 137~144.
- (8) Zhang, G.M. and Kapoor, S.G. 1991, Dynamic

- generation of machined surfaces, Part 2 : Construction of surface topography, ASME Journal of Engineering for industry, Vol. 113, pp. 145 ~153.
- (9) Christensen, D.M. and Wu, S.M. 1982, Feasibility study of on-line surface finish prediction in boring operations, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 22, No. 4, pp. 253~260.
- (10) Rakhit, A.K., Sankar, T.S. and Osman, M.O. M. 1976, The influence of metal cutting forces on the formation of surface texture in turning, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 16, pp. 281~292.