

〈論 文〉

## 엔트로피 개념을 이용한 절삭가공에서 표면거칠기의 특성화

최기흥\* · 최기상\*\*

(1993년 11월 12일 접수)

### Characterization of Surface Roughness Using the Concept of Entropy in Machining

Gi Heung Choi and Gi Sang Choi

**Key Words :** Surface Roughness(표면거칠기), Entropy(엔트로피), Relative Entropy(상대 엔트로피), Geometrical Factor(기하학적 요인), Physical Factor(물리적 요인)

#### Abstract

This paper describes the use of the concept of (relative) entropy for effective characterization of the amplitude and the frequency distributions of the surface profile formed in machining operation. For this purpose, a theoretical model for surface texture formation in turning operation is developed first. Then, the concept of (relative) entropy is reviewed and its effectiveness is examined based on the simulation and experimental results. The results also suggest that under random tool vibration the effect of the geometrical factors on the surface texture formation can be successfully decomposed and therefore, identified by applying the concept of (relative) entropy.

#### 기 호 설 명

$A_s$	: 공작물 표면형상의 진폭	$M$	: 공작물 상의 임의의 위치에서 공구의 끝날위에 설정된 노드의 개수
$A_t$	: 공구 진동의 진폭	$m$	: 공작물 상의 특정 부위(예를 들면, $j$ 번째 노드)의 반복 절삭회수
$E(Y_1, Y_2)$	: 두 사건 $Y_1$ 과 $Y_2$ 에 의한 엔트로피	$N$	: 공구의 표면을 따라 설정된 총 노드의 수
$f$	: 이송속도	$n$	: 공작물의 회전속도(rpm)
$f_k$	: 주파수성분	$Q$	: $Q = \frac{f}{\Delta x}$ 을 만족하는 정수
$H(Y_1, Y_2)$	: 두 사건 $Y_1$ 과 $Y_2$ 사이의 상대 엔트로피	$S_k, T_k$	: 주파수성분 $k$ 에서의 파워
$i$	: 공구가 공작물 상의 임의의 위치에 있을 때 공구의 끝날(cutting edge)을 따라 일정한 간격으로 설정된 노드를 나타내는 인덱스	$T$	: 샘플주기
$j$	: 전체 가공구간에 대하여 공구의 회전축을 따라 일정한 간격으로 설정된 노드를 나타내는 인덱스	$Y^j$	: 공구의 이송 방향을 따라 $j$ 번째 노드에서의 공작물 표면의 $y$ 방향 위치
$K$	: 공구진동의 진폭을 변화시키기 위한 증폭인자	$y_r^j$	: $r$ 번째 회전하는 공구상의 노드 $j$ 의 상대적인 위치
		$(X_{or}, Y_{or})$	: $r$ 번째 회전시 공구선단의 곡률반경 중심의 위치
		$(X_{ir}, y_{ir})$	: $r$ 번째 회전시 공구 끝날상의 $i$ 번째 노드의 위치

\*정회원, 고등기술연구원

\*\*정회원, 서울시립대학교 제어계측공학과

- $\Delta x$  : 공구의 끝날상에 설정된 두 인접한 노드사이의 간격
- $\sigma_y^2$  : 공구의 이송방향을 따라(즉, 공작물의 회전축을 따라) 측정된 표면형상으로 부터 계산된 분산값
- $\sigma_y^2 + \sigma_z^2$  : 공구진동과 feed mark에 의한 표면의 분산값

### 1. 서 론

기계가공에 의한 공작물의 표면거칠기(surface roughness)는 여러가지로 공작물의 성능에 영향을 미치는데 특히, 공작물의 피로, 응력집중에 의한 균열, 크리프(creep) 등 기계적 특성이 크게 영향 받게 된다. 이와 같은 사실은 과중한 부하와 함께 사용되는 기계장치(예를 들면, 항공산업이나 국방산업 등과 연관된 부품들)의 설계 또는 가공 기준은 이러한 표면의 결점을 배제할 수 있도록 엄격하게 정해져야 한다는 것을 의미하기도 한다. 보통, “절삭가공 시스템”은 Fig. 1에 도시되어 있는 바와 같이 절삭 프로세스 그 자체와 이를 위한 기계장치로 나눌 수 있으며 이들은 서로 패쇄된 회로를 구성하게 된다. 이 때, 가공된 부품의 표면거칠기는 시스템의 출력으로 볼 수 있으며 시스템의 출력에 직접적인 영향을 주는 주변잡음(noise)의 예로는 공구의 마모, 파손, 칩의 절단 등을 들 수 있다. 그렇다면, 선삭가공에 있어서 가공된 부품의 표면거칠기에 관한 가장 중요한 정보는 공구의 이송방향(feed direction)을 따라서 나타나므로 이 방향으로 측정된 표면의 거칠기가 가공 표면의 기하학적 형상을 연구하는데 기본이 된다.<sup>(1)</sup> 통상, 가공된 부품의 표면형상은 가공시스템의 기하학적 요인(geometrical factors)과 공작물의 물리적인 요인(physical factors)에 의해 영향을 받는다.<sup>(2~7)</sup> 기하학적 요인으로는 공구의 형상에 의한 영향(반복

적인 groove 패턴에 의한 영향, 즉, 공구의 이송 방향으로 나타나는 feed mark)과 공구-기계장치의 동적특성(즉, 스피들의 편심, 이송속도의 불안정성, 그리고 공구 자체의 진동) 등을 예로 들 수 있다. 물리적 요인은 주로 표면거칠기의 불규칙성(randomness)에 영향을 미치는데 공구와 공작물 사이의 마찰, 압출(extrusion), 찢어짐(tearing), 공작물의 찌꺼기가 가공된 부품의 표면에 쌓이는 것등이 대표적인 예이다. 따라서, 공작물의 표면형상은 기하학적 요인에 의해 형성되는 형상에 물리적 요인에 의한 불규칙한 주파수 성분의 형상이 합쳐져서 이루어지게 된다. 그러나, 물리적 요인은 보통 매우 복잡한 형태로 상호 작용하기 때문에 이들의 표면거칠기에 대한 영향은 정확히 알려져 있지 않다.<sup>(8~10)</sup> 즉, 정량적인 해석(quantitative analysis)은 불가능하며 표면의 질을 설명하는 정성적인 분석(qualitative analysis)만이 가능할 뿐이다.

공구와 공작물 사이의 상대적인 운동은 결국 공구-기계장치 자체의 동적 특성의 결과이므로 공구의 형상, 절삭조건(즉, 이송속도 및 절삭깊이), 공구의 진동 등이 가공된 부품의 표면 형성에 미치는 영향 또는 높은 생산성과 고도의 정밀도를 동시에 유지할 수 있는지의 여부는 매우 흥미로운 주제라고 할 수 있다. 따라서, 본 연구의 목적은 불규칙적으로 진동하는 공구에 의해 가공되는 공작물의 표면거칠기를 이론적으로 분석하려는 것이고 실제로는 0.5~1 mm 정도의 공구 곡률반경을 갖는 점 접촉 선삭용 공구와 최대 12.5 mm 정도의 곡률반경을 갖는 로타리공구<sup>(11,12)</sup>까지에 대하여 모의 실험(simulation)을 실시하였다. 또한, 여기서 얻어진 결과중 일부는 실제 절삭실험결과와도 비교하였다. 그러나, 물리적 요소에 의한 영향은 본 연구에서는 논의되지 않는다.

### 2. 표면형상의 형성과정

원형의 공작물을 공구의 진동하에서 점접촉 선삭(single point turning)에 의해 가공한다고 가정하자. 선삭 가공에서 공구선단의 공작물에 대한 상대적인 궤적은 Fig. 2에서와 같이 나타난다. 이제, 물리적인 요인에 의한 표면거칠기에의 영향은 무시하고 Fig. 3에 나타난 바와 같이 공구가 공작물의 반경방향(Fig. 3에서 y방향)으로 한정된 밴드폭

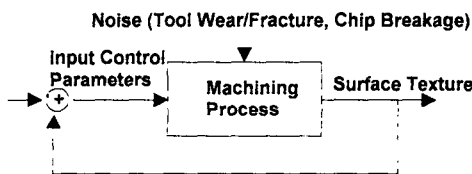


Fig. 1 Closed loop representation of machining system

(bandwidth)을 갖는 진동을 한다고 가정하면 공구의 곡률반경 중심의  $y$ 방향 좌표는

$$Y_o(t) = \sum_{k=1}^S C_k \sin(2\pi f_k t + \alpha_k) \quad (1)$$

와 같이 주어진다. <sup>(2)</sup> 이때,  $f_k$ 는 주파수성분이며  $\alpha_k$ 는  $(0, 2\pi)$  사이의 각도이다. 그렇다면, 공작물이  $r$ 번째 회전할 때 공구의 공작물에 대한 상대적인 위치를 공구선단의 곡률반경 중심의 좌표  $(X_{or}, Y_{or})$ 에 대하여 나타내면 (Fig. 3(a) 참조)

$$X_{or} = rf$$

$$Y_{or} = Y_o(t)|_{t=rT} = \sum_{k=1}^S C_k \sin(2\pi f_k rT + \alpha_k) \quad (2)$$

와 같이 주어진다. 여기서,  $T$ 는 샘플주기이며

$$T = \frac{60}{n} \text{ (sec)} \quad (3)$$

을 만족하고  $n$ 은 공작물의 회전속도 (rpm)이다. 다음에는 절삭공정에 수반되는 운동역학과 표면 형

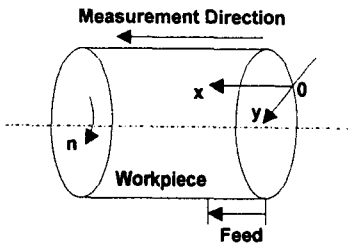


Fig. 2 Helical surface formed in turning operation

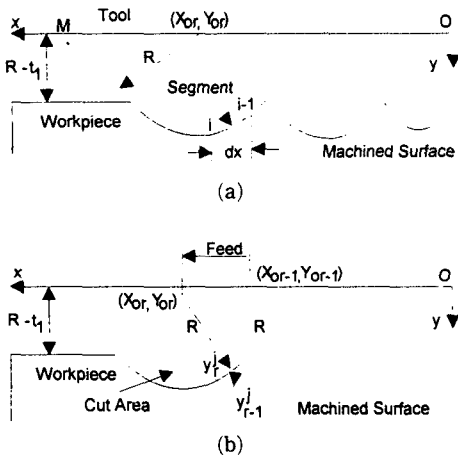


Fig. 3 Designation of the local (a) and the global index (b)

상간의 함수적 관계를 설정하여야 한다. 이를 위하여, 표면형상의 궤적을 Fig. 3(b)에서와 같이 공구의 이송 방향을 따라  $M$ (짝수)개의 일정한 간격  $\Delta x$ 을 갖는 미소단위(segment)로 분할한 다음 각 노드에서의 실제의 표면형상이

$$Y^j(x) = F^j(x) + \epsilon^j(x) \quad (4)$$

와 같이 나타나도록 함수  $F^j(x)$ ,  $j=1, 2, \dots, N$ 을 정의한다. <sup>(9)</sup> 여기서,  $\epsilon^j$ 는 근사오차(approximation error)로서 물리적인 요인에 의한 영향을 의미하며 본 연구에서는 고려하지 않는다.  $N$ 은 주어진 표면형상에 대하여 정의된 총 미소단위(또는 노드)의 숫자이며  $j$ 는 global index이다. 이제, Fig. 3(b)에서 한 구간에 국한하여 부분적으로 고찰해 보면 공구의 기하학적 형상을 고려하여  $r$ 번째 회전시 공구 끝날의  $i$ 번째 점(노드)의 위치는

$$x_{ir} = X_{or} + \Delta x \left( i - \frac{M}{2} \right)$$

$$y_{ir} = F_{ir}(x|x=x_{ir})$$

$$= Y_o(rT) + \sqrt{R^2 - (x_{ir} - X_{or})^2} \quad (5)$$

와 같이 주어진다. 실제의 가공 작업에서는 이전 회전 때 한번 깎인 표면을 다시 깎게 되는 경우가 발생할 수 있다. 따라서,  $y_{ir}^j$ , 공작물의 축을 따라  $r$ 번째 회전하는 공구상의 노드  $j$ 에서의 상대적인 위치를 나타낸다고 하면 노드  $j$ 에서의 표면형상의 궤적은

$$Y^j = \text{MAX}[y_{r-P}^j, y_{r-P+1}^j, \dots, y_{r+P-1}^j, y_{r+P}^j],$$

$$y_{ir}^j \geq R - t_1 \quad (6)$$

이 된다. 위의 식에서  $j$ ,  $y_{ir}^j$  그리고 정수  $P$ 는 각각

$$j = (r-1)Q + i$$

$$x_{ir}^j = x_{ir}$$

$$y_{ir}^j = Y_o(rT) + \sqrt{R^2 - (x_{ir} - X_{or})^2}$$

$$P = \frac{M}{2Q}$$

$$Q = \frac{f}{\Delta x} \quad (7)$$

을 만족한다. 또한, 특정 노드  $j$ 에서 공구에 의하여 절삭이 반복적으로 이루어지는 회수를  $m$ 으로 나타내면  $m=1$ 은 주어진 위치에서 전 공정을 통하여 단 한차례의 절삭이 이루어짐을 의미한다.

### 3. 엔트로피 개념에 의한 표면거칠기의 특성화

일반적으로 표면의 형상을 정의하는 기본적인 특성치로는 RMS, CLA(centerline average), 진폭 밀도(amplitude density), skewness, kurtosis, 에너지 스펙트럼 등을 들 수 있다. 이와는 별도로 공구의 형상과 공구진동에 의한 표면형상의 형상을 분리하여 고려할 필요가 있을 때 특히 유효한 특성치로 분산값을 들 수 있다. 즉, 가공물의 표면거칠기는 기하학적인 요인만 놓고 보면 공구(또는 기계장치)의 동적 특성에 크게 영향 받는다. 따라서, 표면거칠기의 측정으로부터 가공기계의 동적 특성을 평가할 수 있는 방법이 제안된 바 있으며<sup>(2)</sup> 이때의 평가 기준으로는 표면거칠기의 분산값이 사용되었다. 즉, 표면형상의 단순 측정과 이의 분석보다는 공구의 진동특성과 연관지어 고려한 것이 그 특징이라 할 수 있다. 표면형상의 분산값은

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (Y^j - \bar{Y})^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

$$\bar{Y} = E[Y^j] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y^j \quad (8)$$

와 같이 정의된다.

공작물의 불규칙한 표면형상으로부터 진폭의 밀도가 확률의 형태로 구해지면 엔트로피라고 불리우는 정보량을 정의할 수 있다. 엔트로피는 특정 시스템의 총 불확실성을 나타내기 위한 이론적인 정보량으로 물리학자 볼츠만(Boltzmann)에 의해 처음 도입되었다. 즉, 확률  $p(Y^j)$ 를 갖는 어느 특정 상태(예를 들면, Fig. 3에서  $Y^j$ )가 발생함에 따라 얻어지는 정보의 양은 이 확률의 역수에 로그를 취한 값  $\log(1/p(Y^j))$ 으로 정의된다. 엔트로피의 의미는 자주 발생하는 상태에 대하여는(또는 발생확률이 높을수록) 실제 발생하였을 때 새로 얻어지는 정보의 양은 적고 반대로 드물게 발생하는 상태에서 부터 얻어지는 정보의 양은 많다는 것이 된다. 그러면, 시스템 전체가 갖고 있는 정보량은

$$E(Y) = - \sum_j p(Y^j) \log(p(Y^j)) \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다. 이는, 불규칙적인 프로세스에서 얻어지는 총 정보의 양으로도 볼 수 있는데 이 값이 크면 불규칙한 정도가 크다는 것을 의미한다. 따라서, 통계에서의 kurtosis와 유사한 의미를 갖

는다. 그러나, 보통 표면거칠기는 다양한 요인에 의해 영향을 받으므로 이러한 요인과 표면거칠기를 연관시킬 수 있는 다차원의 함수관계를 정의할 필요가 있다. 엔트로피가 로그 스케일에 의해 정의된 것이 주는 한가지 유용한 특징은 단계별로 나타나는 이러한 요소에 의한 영향을 단순히 합한(additive) 형태로 나타낼 수 있다는 점이다. 예를 들면, 두 가지의 변수  $Y_1$ 과  $Y_2$ 에 대하여 2차원 엔트로피,  $E(Y_1, Y_2)$ 는

$$E(Y_1, Y_2) = - \sum_{ij} p(Y_1^i, Y_2^j) \log(p(Y_1^i, Y_2^j))$$

$$= E(Y_1) + E_{Y_1}(Y_2) \quad (10)$$

와 같이 주어지는데 여기서, 조건 엔트로피(conditional entropy)  $E_{Y_1}(Y_2)$ 는

$$E_{Y_1}(Y_2) = - \sum_{ij} p(Y_1^i, Y_2^j) \log\left(\frac{p(Y_1^i, Y_2^j)}{p(Y_1^i)}\right)$$

$$p(Y_1^i) = - \sum_j p(Y_1^i, Y_2^j) \quad (11)$$

이다.

통상, 표면형상을 해석하는데 가장 흔히 쓰이는 방법 중의 하나는 Fourier 변환에 의한 스펙트럼 분석 방법일 것이다. 즉, 스펙트럼을 이용하면 여러가지 기하학적 요인에 의한 영향을 구분지을 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 또는, FFT 분석에 의해 표면형상의 제적으로부터 waviness와 형상오차(form error)를 분리해 낼 수도 있다. 만일 표면의 형상이 완전히 불규칙적이라면 표면 분산은 표면의 주파수 특성과 무관하게 상수가 된다. 그러나, 표면의 형상은 공구의 형상이나 공구의 진동등에 의해 만들어 지므로 공구진동의 주파수 특성과 표면형상의 주파수 특성간에는 상당한 연관관계(correlation)가 있다. 이제, 두 스펙트럼간의 오차를 나타내기 위한 특징량으로 "상대 엔트로피(relative entropy)"라 불리우는 정보량을 사용하기로 한다. 특히,  $S_k, T_k$ 를 각각 두 이산분포  $Y_1, Y_2$ 의 특정 주파수  $k$ 에서의 에너지레벨이라 하면 상대 엔트로피는

$$H(Y_1, Y_2) = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S \left( \frac{T_k}{S_k} - \log \frac{T_k}{S_k} - 1 \right) \quad (12)$$

와 같이 주어진다.<sup>(13)</sup>

### 4. 가 정

본 연구를 진행하기 위하여 다음과 같이 가정한

다.

(1) 가공시스템의 동적특성은 선형이어서 가공 프로세스 중 절삭력이 변하여도 절삭깊이가 변화하는데 따른 표면 형상의 주파수 특성은 일정하게 유지된다고 가정한다.

(2) 공구는 항상 공작물과의 접촉을 유지한다고 가정한다. 그러면, 참고문헌<sup>(13)</sup>에 언급된 바와 같은 공작물과 공구의 순간적인 분리에 기인한 비선형성의 가능성과 가공 프로세스의 불안정성(*instability*)이 배제될 수 있다. 이와 같은 가정은 특히 적삭율(MRR, metal removal rate)이 낮은 정밀 가공에 적합하다고 볼 수 있다.

(3) 공구 여유면(*flank face*)에서의 여유각(*clearance angle*)의 순간적인 변화에 의한 비선형성<sup>(14)</sup>은 비교적 큰 여유각을 갖는 공구를 사용하므로써 배제할 수 있다고 가정한다.

### 5. 실험결과 및 토의

모의실험(*simulation*)을 위해서는 진동하는 공구의 궤적이 필요하다. 이를 위하여 반경 2 in(50.8 mm)를 갖는 A16061-T651 원형봉을 공작물로 하는 선삭 실험이 Tree 1000 선반에서 행하여 졌다. 공구로는 Kennametal 다이아몬드 인서트 공구( $R=0.4$  mm)가 사용되었다. 또한, 절삭력 신호의 측정을 위하여 특별히 제작된 지지대 위에 Kistler dynamometer가 설치되었으며 공구는 지지대 위에 고정되어 사용되었다. 이때의 절삭조건은 각각  $n=1200$  rpm ( $V_w=3.19$  m/sec),  $t_1=0.125-0.508$  mm, 그리고  $f=0.125-0.508$  mm/rev이었다. 절삭력 성분은 공작물의 반경방향(Fig. 3에서 *y*방향)으로만 취해졌으며 charge 앰프를 거친 신호는 PC

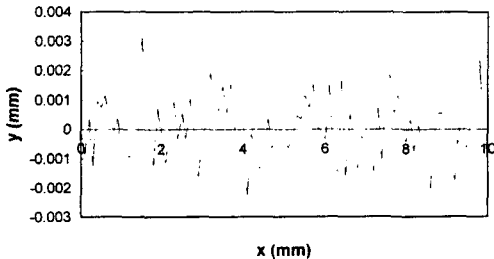


Fig. 4 Coordinate of the center of the tool along the lay(cutting tool vibration) sampled from the force signal in machining of A16061-T651.  $n=1200$  rpm,  $t_1=0.127$  mm,  $f=0.127$  mm/rev

안의 DACA보드에서 1024 Hz의 *sampling rate*로 샘플되었다. 이 데이터를 식(3)의 샘플주기  $T=20(=1200/60)$  Hz로 취하여 공구의 가상 진동 궤적으로 사용하였으며 이로부터  $\sigma_y^2$ 이 계산되었다. 이와는 별도로 가공된 공작물의 표면 형상을 Talysurf 표면 측정장치를 사용하여 측정하였으며 모의실험

데이터와의 비교를 위하여 사용하였다. (Fig. 4) 진동하는 공구의 진폭이 표면거칠기에 미치는 영향을 조사하기 위해 증폭인자(*amplification factor*)  $K$ 가 도입되었다. 그러면, 식(2)는

$$Y_{or} = K \sum_{k=1}^S C_k \sin(2\pi f_k r T + \alpha_k) \quad (13)$$

와 같이 쓰일 수 있다.

Fig. 5는 측정된 가공 표면의 형상으로 부터 계산된 분산값과 모의실험으로부터 계산된 분산값을 함께 도시하고 있다. 그림에서는 대부분의 경우 이들간의 선형적인 관계가 나타나고 있으나 이송속도가 낮은 경우 직선으로부터 벗어나는 경향을 보여 주고 있다. 이는 이송속도가 크면 기하학적인 요인에 의한 영향이 상대적으로 강하게 나타는 반면에, 이송속도가 낮은 경우 물리적인 요인에 의한 영향을 배제할 수 없음을 나타낸다. 일반적으로 반복절삭을 무시할 경우 이론적인 표면형상의 최대 진폭은

$$A_{s,max} = \frac{1}{2} \left( \frac{f^2}{8R} + A_t \right) \quad (14)$$

와 같이 주어진다. 이때  $A_s$ 와  $A_t$ 는 각각 표면 형상의 진폭과 공구진동에 의한 진폭이다. 공구의 진동이 없는 경우 ( $A_t=0$ ) 표면형상의 제척은 공구 이송에 의해서만 영향을 받기 때문에(*tool shape reproduction에 의한 feed mark*) 이론적으로 공구 선단의 곡률반경  $R$ 이 클수록 공작물의 표면 상태

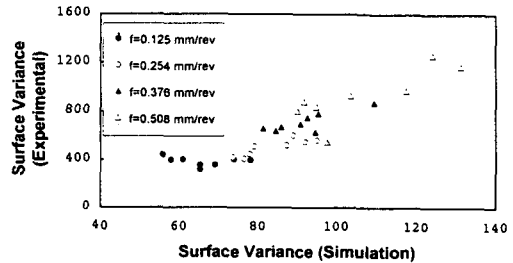


Fig. 5 Comparison of the simulated surface variances with the experimental values. Cutting conditions were same as in Fig. 4.  $R=0.4$  mm,

가 양호할 것이다. Fig. 6에 의하면 진폭이 거의 0에 가까울 때(즉,  $K \approx 0$ 으로 공구의 진동을 무시할 수 있을 때)에는 예상된 대로 공구의 곡률반경이 클수록 표면분산이 감소하여 양호한 표면 상태를 유지할 수 있음이 보여진다. 그러나, 공구의 진동이 있는 경우는 표면상태는 공구의 곡률반경과 진폭 및 이들의 상호 연관작용 모두에 영향을 받는다. 이와 같은 연관 작용은 반복절삭( $m > 1$ )의 형태로 나타나게 된다. 따라서, 진폭이 증가하면 큰 반경의 공구가 항상 유리한 것은 아니고 최적의 공구 반경이 존재함을 Fig. 6은 나타내고 있다. 유사한 경향이 분산비  $\sigma_z^2/\sigma_0^2$ 에 대하여도 확인되었다. 즉, 특정 곡률반경에 대하여 최소값을 갖는 것이나 이 때의  $R$ 값은 Fig. 6에서 얻어지는  $R$ 값과 일치한다는 점이다. 그러나, 분산비는 진폭에 영향을 받지 않는다는 점이 모의실험결과 나타났는데 이는 가공 시스템의 동적 특성이 선형적이라는 가정을 뒷받침하기도 한다.

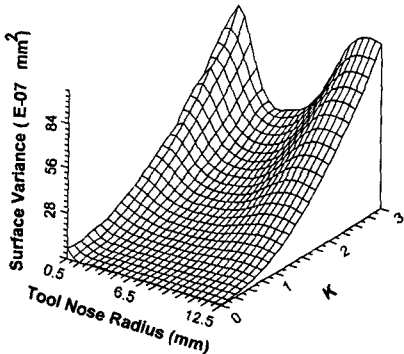


Fig. 6 Variation of the surface variance with R and K.  $n=1200$  rpm,  $t_1=0.1$  mm,  $f=0.1$  mm/sec

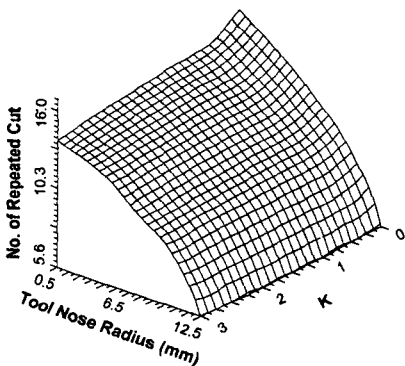


Fig. 7 Variation of  $m$  with R and K. Cutting conditions were same as in Fig. 6

Fig. 7에 도시되어 있는  $m$ 의 평균값은 공구의 곡률 반경에 대하여 일률적으로 증가하는데 이는 공구의 반경이 크면 공작물의 특정부위를 더 여러 번 절삭하게 됨을 의미한다. 그러나 Fig. 6과 Fig. 7을 비교해 보면 여러번 절삭이 이루어 진다고 해서 꼭 표면거칠기를 감소시키는 것은 아니라고 할 수 있다. 이와 같은 결과는 직선의 끝날(straight trimming edge)을 갖는 공구를 사용하는 경우 끝날의 길이와 표면거칠기는 반비례한다는 실험결과<sup>(2)</sup>와 일치하지는 않는다. 이는 공구형상의 차이에서 오는 결과로 해석할 수 있다.

Fig. 8에는 표면형상의 엔트로피  $E(Y_1, Y_2)$ 가 공구의 크기와 진폭의 함수로 도시되어 있다. 이 때,  $Y_1, Y_2$ 는 각각 공구이송에 따른 공구의 형상의 재생과 공구의 진동에 의한 영향을 나타내는 것이라고 가정하면  $E(Y_1)$ 은 일정한 값을 갖게 된다. 또한,  $R$  값이 감소함에 따라 엔트로피가 증가하는 것은  $R$ 이 작을수록 다양한 형태의 또는 다양한 진폭 성분을 갖는 표면형상이 형성됨을 의미한다. 이제, 2차원 엔트로피와 관련된 부등식

$$E(Y_1) + E(Y_2) \geq E(Y_1, Y_2) = E(Y_1) + E_{r_1}(Y_2)$$

$$\Delta E = E(Y_2) - E_{r_1}(Y_2) \geq 0 \quad (15)$$

로부터  $R$ 값의 증가에 따라 공구의 진동의 진폭이 증가한다고 가정하면 식, (15)의 첫번째 식에서  $R$ 이 증가함에 따라  $E_{r_1}(Y_2)$ 는 감소함을 알 수 있다. 그렇다면, 식(15)의 두번째 식에서  $\Delta E$ 는  $R$ 의 증가에 대하여 증가하는 경향을 보이는 것이다. 이것이 Fig. 9에 도시된 대로 실험치가 직선으로부터 벗어나게 하는 요인으로 해석될 수 있으며 그 정도

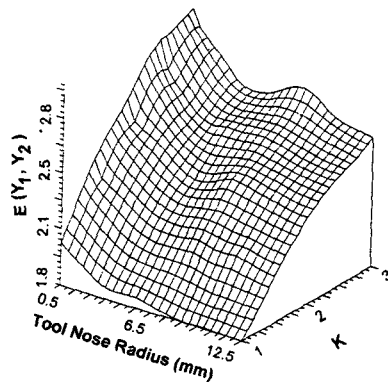


Fig. 8 Variation of the surface entropy with R and K. Cutting conditions were same as in Fig. 6

는  $\Delta E$ 의 값에 따라 변한다고 할 수 있다. 이제, 이 값이 의미를 생각해 보면 작은  $R$ 값에 대하여 공구의 진동이 표면형상에 끼치는 영향은 공구의 형상에 별로 영향을 받지 않으며 반대로 큰 공구를 사용했을 경우 진동에 의한 영향은 공구의 형상과 더욱 밀접한 연관이 있게 된다. 그러나, 조건 엔트로피 값은  $R$ 이 증가함에 따라 포화되게 된다.

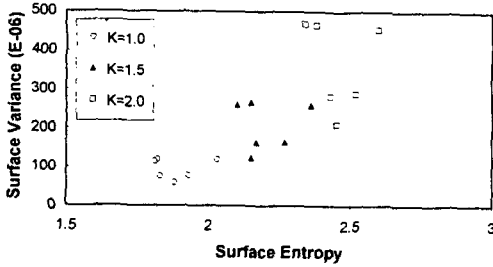


Fig. 9 Comparison of surface entropy with the surface variance. The arrow represents the increasing  $R$  direction. Cutting conditions were same as in Fig. 6.  $K=3$

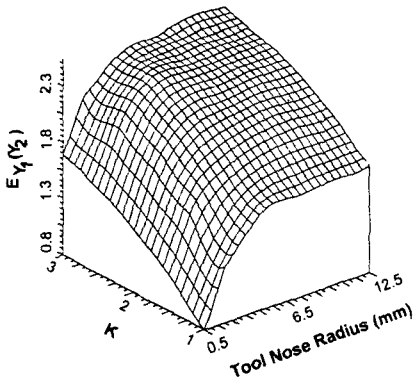


Fig. 10 Variation of  $E_{Y_1}(Y_2)$  with  $R$  and  $K$ . Cutting conditions were same as in Fig. 6

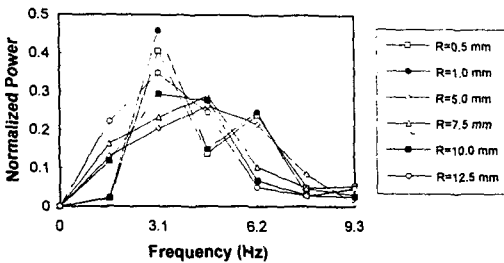


Fig. 11 Power spectrum calculated from the surface porile.  $K=3$ . Cutting conditions were same as in Fig. 6

(Fig. 10)

모의실험을 통해 얻어진 에너지 스펙트럼이 여러 공구 곡률반경과  $K=3$ 에 대하여 Fig. 11에 도시되어 있다. 비록 작거나 큰  $R$ 값에 대하여는 피크가 특징적으로 나타나며 중간의  $R$ 값(5 mm 근방)에서 에너지 성분이 높은 주파수 대역에서 낮은 주파수 대역으로 옮겨 가는 것이 보이기는 하지만 대체적으로 표면형상에 관하여 뚜렷이 차별적인 정보 (discriminatory correlation)를 제공하지는 못한다. 그 이유로는 공구의 진동에 의한 성분은 매우 낮은 주파수 성분이므로 대략 매우 좁은 주파수 내역내에 모든 에너지가 몰려 있기 때문이다. 그러나, 이 스펙트럼을 정규화(normalization)하여 상대 엔트로피를 계산하면 Fig. 12에 도시되어 있는 바와 같이  $R=5$  mm 근방에서 최저값을 나타낸다. 이와같은 결과는 Fig. 5의 결과와 일치하며  $K$ 값에 무관한 이유는 정규화된 스펙트럼을 사용하였기 때문이다. 이제까지의 결과를 종합해 보면  $E_{Y_1}(Y_2)$ 와  $H(Y_1, Y_2)$  값은 각각 진폭과 주파수 성분에 따

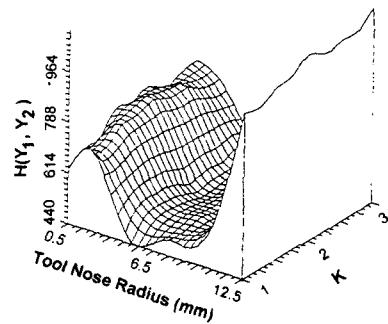


Fig. 12 Variation of  $H(Y_1, Y_2)$  with  $R$  and  $K$ . Cutting conditions were same as in Fig. 6

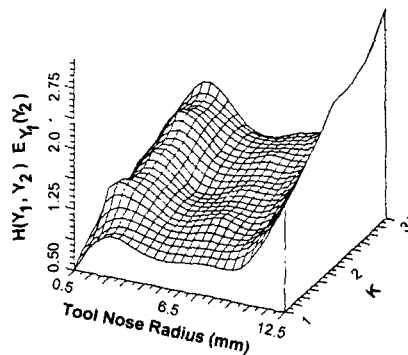


Fig. 13 Variation of  $E_{Y_1}(Y_1) * H(Y_1, Y_2)$  with  $R$  and  $K$ . Cutting conditions were same as in Fig. 6

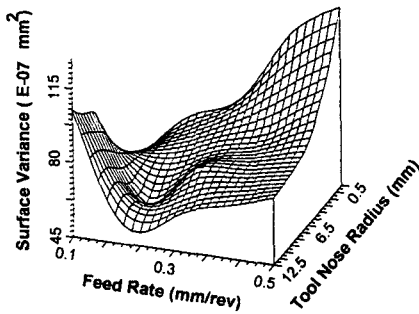


Fig. 14 Variation of the surface variance with R and f. Other conditions were same as in Fig. 6. K=3

라 변하는 특성을 나타낸다. 따라서, 이 두 값을 곱하여 Fig. 13에서와 같이 도시하면 위의 두가지 특성을 모두 나타내게 된다. Fig. 13을 Fig. 5와 비교해 보면 두 그림에 나타나 있는 경향은 대체로 일치한다. 그러므로, 엔트로피 또는 상대 엔트로피 값은 공구의 형상과 공구의 진도의 상호 의존성을 잘 표현하고 있으며 에너지 스펙트럼과 함께 사용되면 표면의 형상에 관한 더욱 유용한 정보를 제공한다고 볼 수 있다.

Fig. 14은 이송속도의 영향을 도시하고 있다. R이 작을 때는 이송속도의 증가에 따라 표면의 조도도 일률적으로 증가하나 큰 R 값에 대해서는 다시 한번 최적의 값을 나타내고 있다. 한가지 놀라운 것은 R이 큰 값일 때 대단히 큰 이송속도(0.1 mm/rev에서 0.5 mm/rev까지,  $n=1200$  rpm) 하에서도 표면의 질이 만족할 만한 선에서 유지된다는 사실이다. 이와 유사한 결과는 Nassirpour와 Wu<sup>(2)</sup>에 의하여 실험결과를 토대로 보고된 바 있는데 이송속도와 공구의 곡률반경이 공작물의 표면형상을 결정하는 가장 중요한 요소로 판명되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 불규칙적으로 진동하는 공구의 지하학적 또는 역학적 요인에 의한 공작물의 표면형상의 형성에 관하여 고찰하여 보았다. 칩 형성과정과 연관된 가공 프로세스의 동적 특성은 이송속도나 공구의 곡률반경과 밀접한 관련이 있으며 특히 가공 프로세스나 가공장치 등의 구조적 비선형성은 이론적인 해석을 더욱 어렵게 만드는 요인이다. 따라서, 본 연구에서는 이들에 의한 영향이 배제되었으며 물리적 요인에 의한 표면형상 형성에 관한 영

향도 배제되었다. 그러나, 지금까지의 결과를 종합해 보면 가공 프로세스의 정성적인 측면만을 고려할 때 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 주어진 절삭조건하에서 공구가 불규칙적으로 진동하는 경우 공구선단의 곡률반경 (tool nose radius) 과 이송속도에 따라 공작물의 표면거칠기는 최소화될 수 있다. 이러한 최소화는 기본적으로 표면형상의 주파수성분의 변화에 기인한다.

(2) 공구가 공작물의 한 위치를 반복하여 절삭하는 횟수는 표면거칠기에 별 영향을 끼치지 못한다.

(3) 표면거칠기를 나타내는 기본적인 통계적 척도외에(상대) 엔트로피의 개념도 유용한 정보를 갖고 있으며 특히 공구가 불규칙적으로 진동하는 경우 기하학적 요인이 표면형상에 미치는 영향을 잘 나타내 준다. 즉,  $E_{Y_1}(Y_2)$ ,  $H(Y_1, Y_2)$ 는 각각 표면형상의 진폭과 주파수 성분을 특징짓는데 적합하여 이들의 곱은 표면형상의 분산과 잘 일치한다.

## 참고문헌

- (1) Nassipour, F. and Wu, S. M., 1977, "Statistical Evaluation of Surface Finish and Its Relationship to Cutting Parameters in Turning," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 17, pp. 197~208.
- (2) 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. 4, pp. 277~293.
- (3) Rakhit, A. K., Sankar, T. S. and Osman, M. O. M., 1976, "The Influence of Metal Cutting Force on the Formation of Surface Texture in Turning," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 16, pp. 281~292.
- (4) Konczakowski, A. L., 1983, "The Matrix of Power Spectra Levels of Turned Surface Roughness," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 23, pp. 161~167.
- (5) Kline, W. A., Devor, R. E. and Shareef, I. A., 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," *ASME J. Engr. for Industry*, Vol. 104, pp. 272~278.
- (6) Babin, T. S., Lee, J. M., Sutherland, J. W. and Kappor, S. G., 1985, "A Model for End Mill



- Surface Topography," *Proc. of the 14th NAMRC*, pp. 362~368.
- (7) Babin, T. S., Sutherland, J. W. and Kappor, S. G., 1986, "On the Geometry of End Milled Surface," *Proc. of the 14th NAMRC*, pp. 168~176.
- (8) Nakayama, K. and Shaw, M. C., 1966, "Relationship Between Cutting Forces, Temperature, Built-up Edge and Surface Finish," *Annals of CIRP*, Vol. XIV, pp. 211~223.
- (9) Villa, A., Rossetto, S. and Levi, R., 1983, "Surface Texture and Machining Conditions, Part I : Model Building Logic in View of Process Control," *ASME J. Engr. for Industry*, Vol. 105, Nov. pp. 259~263.
- (10) Villa, A., G. and Levi, R., 1983, "Surface Texture and Machining Conditions, Part II : Development of Mathematical Model Based upon Pattern Recognition," *ASME, J. Engr. for Industry*, Vol. 105, Nov., pp. 264~269.
- (11) Narutaki, R., Iwata, K. and Motoda, T., 1970, "Geometric Analysis and Surface Roughness of Cylindrical Rotary Cutting Tools," *J. Japanese Society of Precision Engineering*, pp. 325~331.
- (12) Choi, Gi Heung, 1990, "A Study on Rotary Machining," PhD Dissertation, Department of Mechanical Engineering University of California, Berkeley
- (13) Tlusty, J. and Ismail, F., 1981, "Basic Non-linearity in Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 30/1, pp. 299~304.
- (14) Jemielniak, K. and Widota, M., 1989, "Numerical Simulation of Non-linear Chatter Vibration in Turning," *Int. J. Mach. Tool Manufacturing*, Vol. 29, No. 2, pp. 239~247.
- (15) Peklenik, J., and Gartner, J. P., 1967, "Workpiece Accuracy Criterion for the Dynamic Machine Tool Acceptance Test," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 7, pp. 303~324.
- (16) Gray, R. M., Buzo, A. and Matsuyama, Y., 1980, "Distortion Measure for Speech Processing," *IEEE Trans., Acous., Speech and Signal Processing*, Vol. ASSP-28, pp. 367~376.