

엔드밀 가공에서 프랙탈 차원 해석을 통한 표면 거칠기의 특성

Characteristics of Surface Roughness through Fractal Dimension Analysis in End milling

최임수*, 이기용(부산대 대학원), 강명창(부산대 기계기술연구소), 이득우, 김정석(부산대 ERC/NSDM)
Im-Su Choi, Lee Ki-Yong(Graduate School, Pusan Univ.), Myeong-Chang Kang(RIMT, Pusan Univ.),
Deug-Woo Lee, Jeong-Suk Kim(ERC/NSDM, Pusan Univ.)

Abstract

End milling is available for machining the variable shape of products and has been widely applied in many Manufacturing industries. The surface finish of machined parts determines quality and functionality of products. Surface roughness causes friction, noise, fracture, glossiness and seizure, so many research had been performed to measure it precisely. In particular an experimental analysis was carried out to investigate the influence of surface roughness on the fractal dimension. This parameter was assumed to contain not only information of roughness but also extra meaning. Experiments which were performed under various cutting conditions to compare fractal dimension with surface roughness R_a show fractal dimension to be useful parameter for determining of roughness.

Key Words : Surface Roughness(표면 거칠기), End milling(엔드밀링), Fractal Dimension(프랙탈 차원), Capacity Dimension(용적차원), Correlation Dimension(상관차원), Box-count(박스 카운트)

1. 서론

엔드밀 가공은 다양한 형상의 가공이 가능하여 가공 산업에 널리 응용되고 있다. 이러한 엔드밀 가공에서 표면 거칠기는 마찰, 소음, 광택 등에 영향을 크게 미치게 되어, 기계제품의 기능과 품질을 좌우하는 중요한 요소이다. 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자는 절삭조건 및 공작기계 동특성, 공구형상 등인데, 절삭조건과 표면 거칠기 관한 연구는 여러 측면에서 진행된 바 있다.^[1]

표면 거칠기는 중심선 평균 거칠기(R_a), 최대 높이(R_{max}), 10 점 평균 거칠기(R_z) 이외에 많은 파라미터로 표현되지만, 측정 방법과 부위에 따라서 일정하지 않은 값을 보이며, 기존의 몇 가지의 파라미터만으로 표면의 특징을 설명하기에 충분하지 못한 점이

있다. 이에 프랙탈 차원으로서 표면 거칠기의 특성을 설명하고자 하는 연구들이 수행되었고 선삭과 연삭 등의 가공면의 거칠기와와의 관계가 규명되었다.^[2]

따라서 본 연구에서는 엔드밀 측면 가공면의 표면 거칠기와 프랙탈 차원과의 관계 규명을 시도하였으며, 프랙탈 차원이 가공면의 표면 거칠기를 나타내는 유용한 도구가 될 수 있음을 알아보고자 한다.

2. 프랙탈 이론

2.1 프랙탈 구조(Fractal geometry)

많은 종류의 자연물에서 찾아볼 수 있는 형상은 유클리드 기하학으로는 해석하기 어려운 매우 복잡함을 가지고 있다. 물체의 표면, 산맥과 해안선의 형상 및 구름의 모양은 불규칙한 것으로 보이지만 일

정한 규칙하에 자기 복제를 순환적으로 반복하고 있으며, 자기 유사성(Self-similarity)과 반복성의 의미로 해석되는 것을 프랙탈 구조라고 한다.

프랙탈 구조는 존재하는 공간에서 채움의 정도와 복잡성을 나타내는 프랙탈 차원(Fractal dimension)으로 평가되며 소수의 형태로 나타나며, 표면 거칠기와 같은 미소구조부터 지형과 같은 확대된 구조까지 복잡한 형상을 해석하는 유용한 수단으로 사용된다.

Fig. 1에서 가공된 표면형상의 한 부분을 적당한 가로와 세로의 비율로 확대시키면 원래의 형상과 유사한 구조를 확인할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

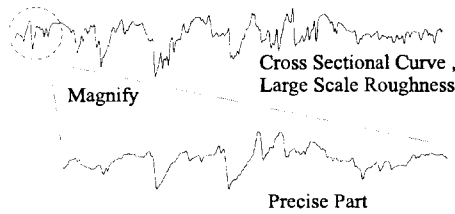


Fig. 1 Self-affinity of surface roughness

2.2 프랙탈 차원 해석

프랙탈 차원을 구하는 방법은 여러 가지가 있지만 박스 카운트 차원(box-count dimension), 용적차원(Capacity dimension), 상관차원(Correlation dimension)은 비교적 간단한 계산방법으로 전산 자동화(Computerizing)가 쉬워 많이 사용된다.^[3,4,5]

먼저 박스 카운트 차원의 계산방법은, 평면상에 존재하는 점이나 곡선 또는 형상을 크기가 e 인 격자 $N(e)$ 개로서 전체를 포함하였다고 하면, 크기 e 가 작아질수록 개수 $1/e$ 는 늘어나게 된다. 그 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N(e) = \frac{k}{e^D} \quad (1)$$

여기서 k 는 박스 크기의 비, D 는 요소의 차원 식 (1)의 양변에 \log 를 취하면 다음과 같다.

$$\log N(e) = D \log(1/e) + \log k \quad (2)$$

식 (2)에 대해서 크기가 다른 격자의 개수 e_1, e_2 에 대해서 계산하면 다음과 같다.

$$D_b = \frac{\log N(e_2) - \log N(e_1)}{\log(1/e_2) - \log(1/e_1)} \quad (3)$$

여기서 D_b 는 박스 카운트 차원

fig. 2의 영국 지도에서 (a)와 (b)의 가로 격자 개수 e 는 24개, 32개이며, 형상이 지나가거나 만나는 격자의 개수를 헤아리면 각각 155개와 224개이다.

이 때, 식 (3)에서 박스 카운트 차원 D 를 구하면 다음과 같다.

$$D_b = \frac{\log 224 - \log 155}{\log 32 - \log 24} \approx 1.28$$

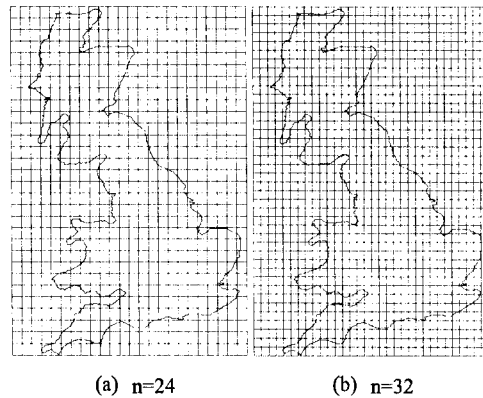


Fig. 2 Count all boxes that intersect the coastline of Great Britain

식 (1)에서 만일 e 가 무한히 작다고 하면 식 (3)은 다음과 같이 표현된다.

$$D = \lim_{e \rightarrow 0} \frac{\log N(e)}{\log(1/e)} \quad (4)$$

그러나 일반적인 경우에는 분석해야 할 요소(point)의 개수는 한정적이므로 e 가 아주 작을 경우 하나의 격자에 하나의 요소를 포함하게 된다.

이 때 $N(e)$ 는 집합 S 에 속한 요소의 개수 $\|S\|$ 가 되어 식(4)는

$$D_c = \lim_{e \rightarrow 0} \frac{\log \|S\|}{\log(1/e)} \quad (5)$$

로 되는데, 여기서 D_c 를 용적차원이라고 한다.

만일 임의의 두 요소간의 거리를 $|x_i - x_j|$ 로 하여 상관적분계수(Correlation integral) $C(r)$ 를 계산하게 되는데, 이렇게 만든 N 개의 샘플에 대한 상관적분계수의 식은 다음과 같이 된다.

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(r - |x_i - x_j|) \quad (6)$$

여기서 H는 헤비사이드 계단함수(Heaviside step function)로서 다음과 같이 계산된다.

$$r \geq |x_i - x_j| \quad H = 1, \quad r < |x_i - x_j| \quad H = 0$$

식(5)의 $\log\|S\|$ 대신 식(6)의 $C(r)$ 을 사용하면 상관차원 D_{CO} 를 구할 수 있다.

$$D_{CO} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log(r)} \quad (7)$$

3. 실험장치 및 구성

3.1 실험장치의 구성

본 실험을 위한 장치도는 Fig. 3 과 같다.

NC 밀링에서 플랫 엔드밀(Flat End mill)을 사용하여 측면가공을 행하였으며, 촉침식 표면 측정기를 사용하여 표면 거칠기에 대한 데이터를 PC로 받아 분석 후, 프렉탈 차원을 구하였으며, 공구 현미경에서 가공면의 이미지를 얻은 뒤 영상처리를 행하였다.

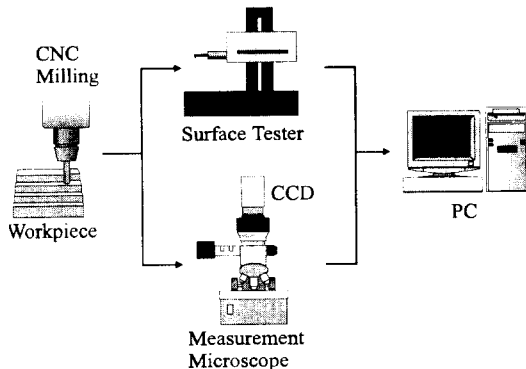


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

공작물 재질은 금형강 SKD11이며, 경도가 높고 내마멸성이 있어서 피삭성이 좋지 않은 난삭재이다.

본 실험에서 사용된 실험장비 및 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 The Specification of Experimental Apparatus and Cutting Condition

Item	Specification
Tool	Carbide 4 Fluted Flat End mill
Workpiece	SKD11
Machine	Vertical CNC Milling Machine (HVN - 850F0 Hwacheon)
Cutting Condition	Spindle(rpm) : 320, 640, 960 Feed per tooth(mm/tooth) : 0.01, 0.02, 0.03 Axial Depth(mm) : 4 Radial Depth(mm) : 0.2 Cutting Fluid : Dry
Microscope	STM5MJS
Surface Tester	Rank Taylor Series II

3.2 실험방법

각 실험조건은 절삭속도와 날당 이송량에 따라 선정하였고, 채터나 공구마멸의 영향을 최소화 하기 위하여 공구 반경 방향의 절삭깊이를 0.2mm로 작게 선정하였으며, 하향 절삭을 하여 고른 표면 거칠기를 얻을 수 있도록 하였다.

표면 거칠기 측정시에 차단 길이(Cut-off Length)를 0.8mm로 30회의 측정을 실시하여 총 24mm의 구간에서 거칠기 신호를 획득하였다. 엔드밀의 가공면은 4회의 측정 데이터를 획득하여 표면 거칠기와 프렉탈 차원 해석을 위한 데이터로 가공하였으며, CCD를 통하여 얻어진 이미지 데이터는 명암의 단계를 16등분하여 수치화하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭 조건에 따른 표면 거칠기의 변화

스핀들 회전수와 날당 이송에 대한 표면 거칠기의 변화는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 증가하는 경향을

보이고 있다. 점을 잇는 선은 각 데이터의 평균값으로서 날당 이송의 증가율은 스펀들 회전수보다 뚜렷하지 않음을 볼 수 있다. 도시한 그래프에서 증가율이 다소 불규칙한 형태를 띠는 것은 가공면이 0.8mm의 범위 내에서도 불규칙한 표면 거칠기를 보였기 때문인데, 측정은 아래쪽부터 0.2mm 간격으로 시행되었으며, 측정 부위가 바깥쪽으로 갈수록 불규칙한 경향이 심하였다.

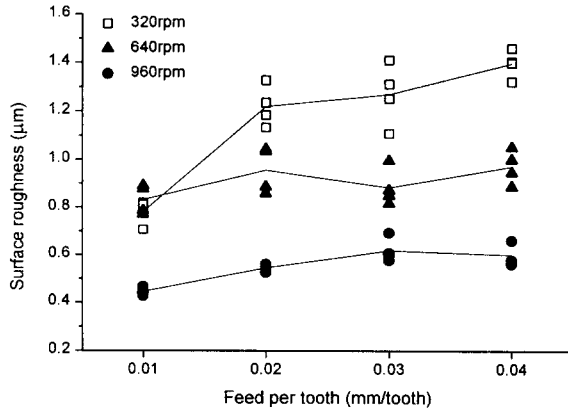


Fig. 4 Variation of surface roughness according to cutting condition

4.2 절삭 조건에 따른 프랙탈 차원의 변화

Fig. 5에서 스펀들 회전수에 따른 표면 거칠기 형상을 보면 회전수가 커질수록 공간의 채움(space filling)의 정도가 작아지는 것을 볼 수 있으며, 이는 프랙탈 차원이 작아진다는 것을 의미한다.

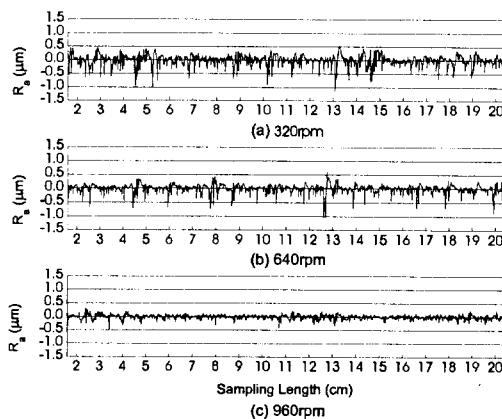


Fig. 5 The profiles of surface roughness

날당 이송량에 대한 프랙탈 차원의 변화는 표면 거칠기와의 관계와 거의 비슷하게 나타났는데, 프랙탈 차원도 날당 이송량보다 절삭 속도에 더 명확한 차이를 보였다. 용적차원과 상관차원에 대한 관계를 Fig. 6에 나타내었으며 두 종류의 차원의 값이 다른 값의 분포를 보이지만 증가 형태는 거의 동일하였다.

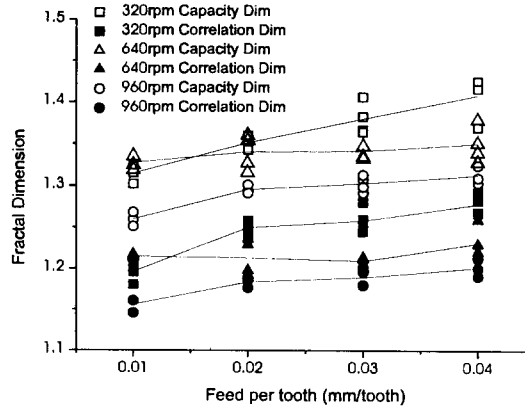


Fig. 6 Variation of fractal dimension according to cutting condition

4.3 표면 거칠기와 프랙탈 차원의 관계

표면 거칠기 R_a 와 프랙탈 차원과의 상관 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 절삭속도에 따른 프랙탈 차원의 분포가 국부적으로 집합을 이루고 있으며, 분포의 기울기가 거의 일정함을 알 수 있었다. 이는 프랙탈 차원이 표면 거칠기와 상관관계가 높음을 의미한다.

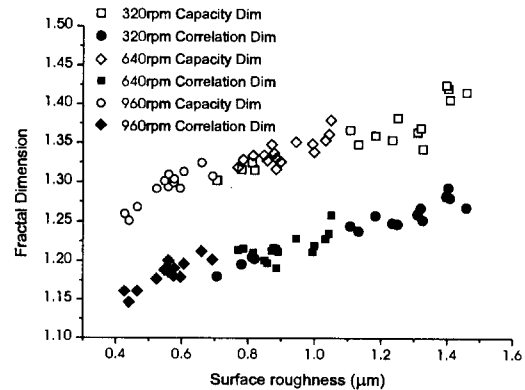


Fig. 7 Correlation between surface roughness and fractal dimension

4.4 2 차원 영상을 통한 프랙탈 차원의 해석

앞에서 구한 프랙탈 차원도 측정식 표면 측정기로 얻은 1 차원적인 데이터로서 측정부위에 영향을 받기 때문에 2 차원적인 데이터를 사용하면 더욱 광범위한 프랙탈 차원의 해석이 가능할 것이다.

Fig. 8 은 CCD 를 통한 표면의 확대 영상과 빛의 강도를 데이터로 변환한 그래프이다. 이 데이터로 프랙탈 차원 해석을 하면 Fig. 9 에서 보는 것과 같이 측정식 표면 측정기에서 얻은 데이터의 해석과 다른 감소하는 경향을 볼 수 있었다. 이것은 영상 데이터를 수치 데이터로 바꾸는 과정에서 실제 거칠기에 관계없이 동일한 스케일로 변환하였기 때문에 감소하는 경향을 나타내는 것으로 사료된다.

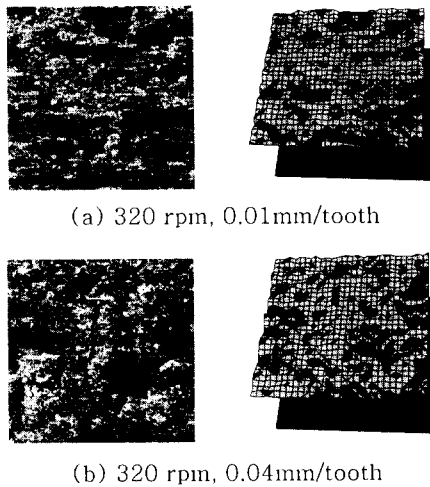


Fig. 8 Topography via light intensity of surface

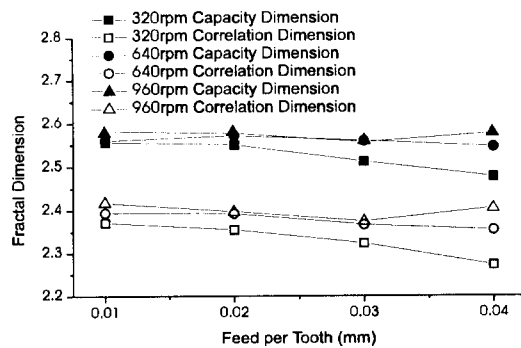


Fig. 9 Variation of fractal dimension according to cutting condition

5. 결론

엔드밀 가공에서 프랙탈 차원을 이용한 표면 거칠기의 측정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 엔드밀 가공 표면은 프랙탈 형상을 가지고 있으므로 프랙탈 차원 해석이 가능하다.
- (2) 프랙탈 차원은 스핀들 회전수와 날당 이송량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 프랙탈 차원과 중심선 평균 거칠기 R_a 는 서로 상관관계를 가지고 있었으며, 유용한 거칠기의 척도로 사용할 수 있다.
- (4) 표면의 2 차원적 형상을 통해서 프랙탈적인 특성을 확인하였으며, 프랙탈 차원을 이끌어낼 수 있었다.

참고문헌

1. M. E. Martellotti, "An Analysis of the Milling Process - Down Milling", Transactions of ASME, Vol. 67, 1945
2. B.B.Mandelbrot, "The Fractal geometry of Nature", Freeman, San Francisco, CA, 1983.
3. Jurgens, H., H. -O. Peitgen, et al. "Chaos and Fractals : New Frontier of Science". New York, John Wiley. 1993.
4. Larry S. Liebovitch, Tibor Toth, "A fast Algorithm to Determine Fractal Dimension by Box Counting", Physics Letter A, Volume 141, No. 8,9, 1989.
5. J. Theiler, "Efficient Algorithm for Estimating the Correlation Dimension from a set of Discrete Point", Physical review A, Vol. 36 No. 9, 1987