

# 프랙탈 해석을 이용한 표면 미세형상 평가 기법에 관한 연구

조 남 규\*, 엄 계 익\*\*

## A Study on the Surface Asperities Assessment by Fractal Analysis

N. Cho\*, K. Uhm\*\*

### Abstract

In this paper, Fractal analysis was applied to evaluate machined surface profile. The spectrum method was used to calculate fractal dimension of generated surface profiles by Weierstrass-Mandelbrot fractal function. To avoid estimation errors by low frequency characteristics of FFT, the Maximum Entropy Method (MEM) was examined. We suggest a new criterion to define the MEM order  $m$ . MEM power spectrum with our criterion is proved to be advantageous by the comparison with the experimental results.

Keywords : Surface Roughness(표면거칠기), Fractal(프랙탈), MEM(Maximum Entropy Method)

### 1. 서론

고성능, 고기능의 고부가가치 제품 개발을 위하여, 고정밀 부품에 대한 요구가 증가함에 따라, 고정도의 가공기술과 함께 부품 가공정도를 엄밀하게 평가하기 위한 정밀평가기술의 중요성이 인식되어지고 있다. 또한, 종래에는 부품의 양·불량 판정만을 위하여 이용되었던 가공정도의 평가정보가, 제품의 설계, 개발, 평가, 가공 공정의 최적화, 공정 자동화 등, 생산 전반에 걸친 지표로 사용되고 있다. 따라서, 목적에 맞는 정확한 가공정보를 제공할 수 있는 정밀평가기술은 산업의 거반기술로서 그 가치를 달리하게 되었다. 그리고, 이와 같은 시대적 요구에 부응하

기 위하여, 기계적인 접촉을 하는 기계부품이나 광학기기 부품 등의 미세표면 특성평가를 위한 계측기술과 평가기술에 대한 많은 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 그 결과, 계측장비로는 접촉식 표면거칠기 측정시스템을 필두로 하여, 광절단식, 반사광 강도식, 광간섭식, 입체각식 등의 광학식 측정시스템과 높이방향 측정분해능 0.1 $\mu$ m을 가능하게 한 STM, AFM에 이르기까지, 다양한 계측시스템이 개발되어 실용화되기에 이르렀다. 또한, 측정된 2,3차원의 데이터로부터 표면을 평가하기 위한 수 많은 평가파라미터들이 제안되고 있다.

프랙탈 이론에 의한 표면특성의 평가방법은 표면측정에 의해 얻어지는 프로파일이 갖는 대량의 형상정보를 간단

\* 한양대학교 기계공학과

\*\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

한 표현에 의해 전달할 수 있는 뛰어난 정보 압축효과와 재생성으로 인하여, 그 적용 및 응용 가능성에 대한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있는 표면 평가 방법이다.

Thomas는 구조함수를 이용하여 기계 가공면이 프랙탈 적 성질을 갖고 있으며, 자기유사성을 갖는 범위가 한계를 갖고 있는 점을 밝혔다.<sup>(1)</sup> 또한, Sayles와 Thomas는 구조함수가 자기공분산함수와 자기상관함수가 갖는 몇가지 약점들을 극복할 수 있는 이점을 갖고 있음을 밝히고 있다.<sup>(2)</sup> 그러나, 프랙탈에 의한 평가법의 실용화를 위해서는, 가공면의 특성을 고려한 프랙탈 차원의 계산기법의 개발과 함께, 가공정도와 프랙탈 지표의 상관관계에 대한 엄밀한 분석에 의한 평가기술의 개발이 이루어져야 한다.

본 연구에서는, 프랙탈 해석에 의한 표면 가공 정도 평가의 실용화를 목적으로, 가공 표면 및 측정 데이터의 특성을 고려한 프랙탈 차원의 추정법을 제안하고, 그 적용가능성을 검토하여 신뢰성 있는 프랙탈 해석을 위한 데이터 처리 기술의 개발을 수행하였다.

## 2. 스펙트럼법에 의한 프랙탈 차원의 계산

기계 가공면과 같이, 자기 유사성을 지니는 형상의 경우, 프랙탈 차원을 계산하기 위한 대표적인 방법으로는 파워 스펙트럼을 이용한 스펙트럼법, Cover법, RCC (Rectangular cell counting)법 등이 있으며, 그 중에서도 계산의 편의성이나 여러 다른 장점들로 인하여 스펙트럼법을 이용한 방법이 가장 널리 쓰이고 있다. 본 연구에서는, 스펙트럼법을 이용하여 프랙탈 차원을 계산하였으며, 표면 프로파일의 파워 스펙트럼을 구하기 위하여 FFT법과 J.P.Burg에 의해 제안된 MEM(maximum entropy method) 법이<sup>(3)</sup> 사용되었다.

스펙트럼법은 표면 프로파일의 파워 스펙트럼을 이용하여 프랙탈 차원을 구하는 방법으로, 현재 가장 널리 사용되고 있다. 스펙트럼법을 이용하여 프랙탈 차원을 구하기 위해서는 표면 프로파일의 파워 스펙트럼을, Fig.1과 같이, 양대수 그래프 상에 도시하였을 때, 파워값과 주파수 값이 일차적인 선형관계로 나타낼 수 있어야 한다. 즉, 표면 형상 프로파일로부터 얻어진 주파수에 대한 파워값이 파워법칙을 따를 때 성립되며, 식 (1), (2)의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$p(\omega) \propto \omega^{-\alpha} \quad (1)$$

$$D = \frac{5-\alpha}{2} \quad (2)$$

식에서  $\omega (=2\pi f)$ 는 주파수, D는 프랙탈 차원이며,  $\alpha$ 는 양대수 그래프상에 도시된 파워 스펙트럼으로부터 최소제곱법에 의해 구해지는 최소제곱직선의 기울기이다.  $\alpha$ 는 양의 값을 가지며, 프랙탈 차원 D는 1과 2사이의 값을 갖는다. 또한, 프랙탈 차원 D는 형상이 복잡해짐에 따라 2로 접근하게 된다.

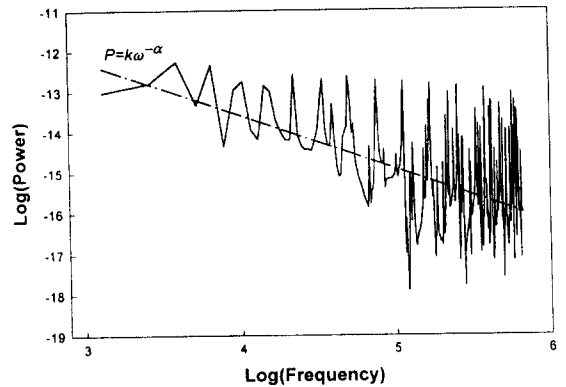


Fig.1 Fractal dimension by spectrum method

### 2.1 FFT를 이용한 프랙탈 차원의 산출

프랙탈 차원 D는 최소제곱법을 적용하여 식(3)에 의해 얻어지는 기울기값  $\alpha$ 로부터 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \sum_i \log(f_i)^2 & \sum_i \log(f_i) \\ \sum_i \log(f_i) & \sum_i 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i \log(f_i) \log(P_i) \\ \sum_i \log(P_i) \end{bmatrix} \quad (3)$$

그러나, 양대수 그래프로 도시되는 FFT에 의한 스펙트럼은 주파수 간격이 동일하지 않게 되며, 이러한 영향이 최소제곱법에 의해 구해지는 기울기에 오차요인으로 작용하게 된다. 본 연구에서는, 이러한 영향의 보정을 위하여 하기 위하여, 주파수 간격에 비례하는 하중치를 두어, 식 (4)과 같이 보완된 최소제곱법을 적용하였다.

$$\begin{bmatrix} \sum_i w_i \log(f_i)^2 & \sum_i w_i \log(f_i) \\ \sum_i w_i \log(f_i) & \sum_i w_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i w_i \log(f_i) \log(P_i) \\ \sum_i w_i \log(P_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

식에서  $w$ 는 데이터 간격에 비례하는 하중치를 의미한다.

Fig.2에 식(3), (4)의 적용예를 보인다. 그림에서, 일점쇄선으로 도시된 직선은 식(3)에 의한 결과를 보이고 있으며, 고주파영역의 밀집된 데이터값들에 의하여, 회귀 직선이 올바르게 구해지지 않고 있다. 이에 반하여, 하중치를 적용하여 산출된 이점쇄선의 회귀직선은 이러한 영향이 보정되어 개선되고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는, 이러한 점을 고려하여, FFT를 이용한 프랙탈 차원의 계산에 식(4)의 관계를 이용하기로 한다.

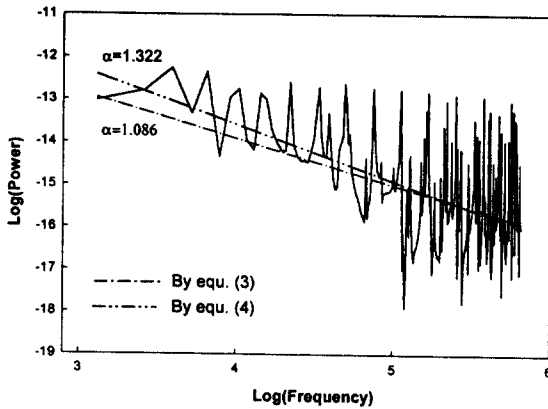


Fig.2 Effect of weighted FFT method

## 2.2 MEM을 이용한 프랙탈 차원의 산출

신뢰할 수 있는 프랙탈 차원의 계산 결과를 얻기 위해서는, 관찰하고자 하는 주파수 영역 전체에 대한 스펙트럼의 분석이 요구된다. 그러나, 실제의 가공면으로부터 표면 프로파일을 얻고자 하는 경우, 측정은 시편의 형상이나 측정시스템 등에 의한 측정 조건상의 제약을 받으며, 그 결과 제한된 길이의 측정 데이터만을 얻게 된다. 또한, KS 규격 및 ISO에 규정된 표면 평가 지침에는 평가를 위한 데이터의 길이를 일정하게 규정짓고 있다. 이러한 측정 데이터의 조건은 FFT에 의한 프랙탈 차원 추정에 중대한 문제를 야기시킨다. 즉, FFT에 의하여 계산되는 스펙트럼은 알고리즘의 특성상 저주파 영역에서의 현저한 분해능 저하를 초래하게 되어, 그 결과, 프랙탈 차원의 계산 오차를 유발하게 된다. 본 연구에서는, 이러한 문제점에 대한 대응책으로 저주파 영역에서의 스펙트럼 추정성능이 우수하며, 임의의 주파수에 대한 파워의 계산이 가능하여

데이터 밀도의 조절이 가능한 MEM의 도입을 검토하였다.

시계열 데이터에 차수가  $m$ 인 MEM법을 이용하여 파워스펙트럼을 구하기 위한 연립방정식의 표현은 식(5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} C_0 & C_{-1} & C_{-2} & \dots & C_{-m} \\ C_1 & C_0 & \dots & \dots & C_{-m+1} \\ C_2 & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m & \dots & \dots & \dots & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \gamma_{m1} \\ \gamma_{m2} \\ \vdots \\ \gamma_{mm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_m \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기에서  $C_k$ 는 자기상관계수,  $\gamma_{mk}$ 는  $m$ 의 예측오차필터,  $P_m$ 은  $m+1$ 점의 예측오차필터에서의 평균출력을 의미하고,  $P_m$ 은 식(6)과 같다.

$$P_m = C_0 + \gamma_1 C_1 + \gamma_2 C_2 + \dots + \gamma_m C_m \quad (6)$$

식(5)를 풀기 위한 방법으로 Levinson 알고리즘을 이용하며,  $P_m$ 과  $\gamma_{mk}$ 에 관한 점화식을 구할 수 있다.  $\gamma_{mk}$ 에 관한 점화식은 식(7)과 같이 나타나며,

$$\gamma_{mk} = \gamma_{m-1, k} + \gamma_{m, m} \gamma_{m-1, m-k} \quad (7)$$

$P_m$ 에 관한 점화식은 식(8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{m-1} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \Delta_{m-1} \end{bmatrix} + \gamma_{m, m} \begin{bmatrix} \Delta_{m-1} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ P_{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_m \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(8)에서  $P_{m-1}$ 과  $\Delta_{m-1}$ 은 각각 다음과 같다.

$$P_{m-1} = C_0 + \gamma_{m-1,2} C_2 + \dots + \gamma_{m-1, m-1} C_{m-1} \quad (9)$$

$$\Delta_{m-1} = C_m + \gamma_{m-1,1} C_{m-1} + \gamma_{m-1,2} C_{m-2} + \dots + \gamma_{m-1, m-1} C_1 \quad (10)$$

식(7)에서  $\gamma_{mm}$ 은 다음의 관계식으로부터 구할 수 있으며,

$$\gamma_{mm} = -2 \frac{\sum_{i=1}^{N-m} b_{mi} b'_{mi}}{\sum_{i=1}^{N-m} (b_{mi}^2 + b'_{mi}^2)} \quad (11)$$

$b_{mi}$ ,  $b'_{mi}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} b_{mi} &= b_{m-1,i} + \gamma_{m-1,m-1} \cdot b'_{m-1,i} \\ b'_{mi} &= b'_{m-1,i+1} + \gamma_{m-1,m-1} \cdot b_{m-1,i+1} \\ b_{0i} &= b'_{0i} = x_i ; b_{1i} = x_i, b'_{1,i} = x_{i+1} \end{aligned} \quad (12)$$

이상의 관계로부터, m차 MEM의 파워 스펙트럼은 식 (13)과 같이 나타내어진다.

$$P(f) = \frac{\Delta t P_m}{1 + \sum_{k=1}^m \gamma_{mk} e^{2\pi i k \Delta t}} \quad (13)$$

그러므로, 식(13)에 의해 추정되는 스펙트럼으로부터 프랙탈 차원을 구할 수 있다. 그러나, MEM법에 의한 파워 스펙트럼은 차수 m의 선정에 따라 스펙트럼의 추정결과가 달라지므로, 데이터의 특성에 따라 그 적절한 차수를 선정하여야 한다. 본 연구에서는, 효과적인 프랙탈 차원 추정이 가능하도록 하기 위한 차수 m의 선정법을 검토하고, 이를 기준으로 하여 프랙탈 차원을 추정하고 그 성능을 평가함으로써 적용가능성을 검토하였다.

### 2.3 W-M 프랙탈 함수를 이용한 데이터 발생

기계 가공면의 표면 프로파일은 매우 복잡한 형상을 지니고 있으며, 프로파일의 복잡한 형상을 연구하기 위하여 많은 방법들이 시도되어 왔다. 일례로, 가공면의 표면 프로파일은 베어링곡선이나, 자기상관함수, 랜덤 함수 등의 다양한 방법으로 모델링되어 왔다.<sup>[4]</sup> 최근에는, 기계 가공면의 표면 프로파일이 프랙탈적이라는 연구가 있었으며, 프로파일의 새로운 모델링 방법으로 프랙탈 차원을 이용하는 연구가 활발히 진행중이다.<sup>[5]</sup>

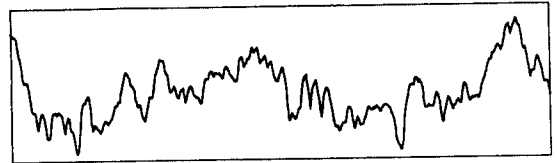
본 연구에서는, 프랙탈 차원의 추정결과를 검토하기 위하여, W-M (Weierstrass-Mandelbrot) 프랙탈 함수를 도입하고, 이 함수에 실제의 가공면으로부터 구하여진 프랙탈 차원값을 적용하여 프랙탈적인 프로파일을 생성시킴으로써, 실제의 가공면으로부터 얻어진 프로파일에 가까운 기지의 데이터를 사용하였다.

W-M 프랙탈 함수는 1과 2 사이의 프랙탈 차원을 가지고 있으며 식(14)로 표현할 수 있다.

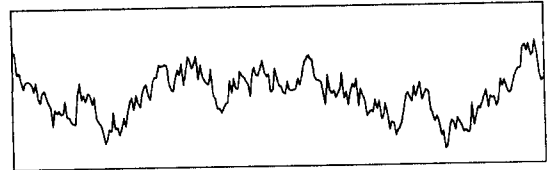
$$Z(x) = G^{(D-1)} \sum_{n=n_1}^{\infty} \frac{\cos(2\pi \gamma^n x)}{\gamma^{(2-D)n}} \quad 1 < D < 2, \gamma > 1 \quad (14)$$

식 (14)에서, D는 프랙탈 차원, G는 표면프로파일의 진폭을 결정하는 스케일 상수이고, 파라미터  $\gamma$ 는 W-M 프랙탈 함수의 스펙트럼의 밀도를 결정하며, 또한 스펙트럼 모드의 상대적 위상 차이를 결정한다. 즉,  $\gamma^n$ 은 기본 주파수를 나타내며, 랜덤한 위상을 가질 경우의  $\gamma$ 는 1.5의 값을 갖는다.<sup>[6]</sup> 또, 파라미터  $n_1$ 는 Cutoff 주파수에 해당하며, 시료의 길이 L과 다음의 관계를 가진다.<sup>[7]</sup>

$$\gamma^{n_1} = 1/L \quad (15)$$



(a) A measured profile(ground surface)



(b) A generated fractal image(ground surface)

Fig.3 Fractal image and real surface profile

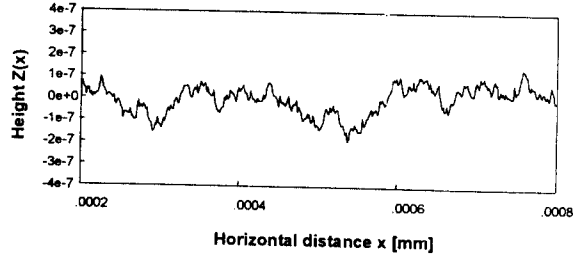
Fig.3은 실제 기계 가공면의 프로파일과 W-M 함수를 이용하여 발생시킨 프로파일을 나타낸 것이다. Fig.3의 (a)는 실제의 연삭가공면으로부터 측정된 표면거칠기 측정기를 이용하여 얻어진 프로파일이며, (b)는 (a)의 데이터로부터 프랙탈 차원과 스케일 상수를 구하여, W-M 프랙탈 함수에 대입하여 발생시킨 프로파일을 나타낸 것이다. 완전하게 동일한 형상은 아니지만, 유사한 형상을 지니고 있음을 알 수 있다. W-M 프랙탈 함수의 수학적 특징은 전 구간에서 미분 불능이며, 자기 유사성을 지니고 있다는 점이다.

Table.1에 본 연구에 사용된 데이터를 보이며, 이를 이용하여 W-M 프랙탈 함수에 의해 발생된 프로파일의

예를 Fig.4에 보인다. 실제의 가공면에 의한 표면 프로파일의 프랙탈 차원은 1.46에서 1.88사이의 값을 가지며, 주어진 데이터는 일반적으로 널리 사용되는 가공법을 대상으로 하였다.

Table.1 Used profile data for simulation

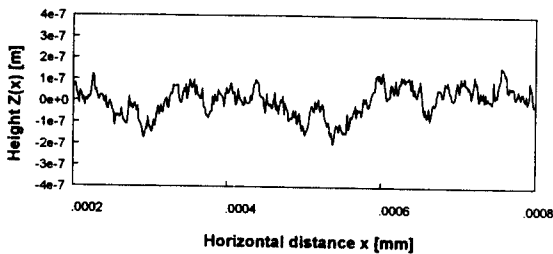
Data No.		Sampling interval(m)	Scale constant(G)	Fractal dimension	Sampling length(m)
1	Lapped	$0.75 \cdot 10^{-9}$	$1.24 \cdot 10^{-8}$	1.88	$7.68 \cdot 10^{-4}$
2	Lapped	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$1.25 \cdot 10^{-9}$	1.70	$7.68 \cdot 10^{-4}$
3	Ground	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$1.19 \cdot 10^{-10}$	1.58	$7.68 \cdot 10^{-4}$
4	Lapped	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$2.04 \cdot 10^{-10}$	1.88	$7.68 \cdot 10^{-4}$
5	E.D.M	$0.75 \cdot 10^{-5}$	$5.87 \cdot 10^{-11}$	1.68	$7.68 \cdot 10^{-4}$
6	Ground	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$5.19 \cdot 10^{-13}$	1.46	$7.68 \cdot 10^{-4}$
7	Ground	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$3.89 \cdot 10^{-12}$	1.63	$7.68 \cdot 10^{-4}$
8	Lapped	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$1.24 \cdot 10^{-6}$	1.88	$1.54 \cdot 10^{-3}$
9	Lapped	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$1.25 \cdot 10^{-9}$	1.70	$1.54 \cdot 10^{-3}$
10	Ground	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$1.19 \cdot 10^{-10}$	1.58	$1.54 \cdot 10^{-3}$
11	Lapped	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$2.04 \cdot 10^{-10}$	1.88	$1.54 \cdot 10^{-3}$
12	E.D.M	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$5.87 \cdot 10^{-11}$	1.68	$1.54 \cdot 10^{-3}$
13	Ground	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$5.19 \cdot 10^{-13}$	1.46	$1.54 \cdot 10^{-3}$
14	Ground	$0.75 \cdot 10^{-6}$	$3.89 \cdot 10^{-12}$	1.63	$1.54 \cdot 10^{-3}$



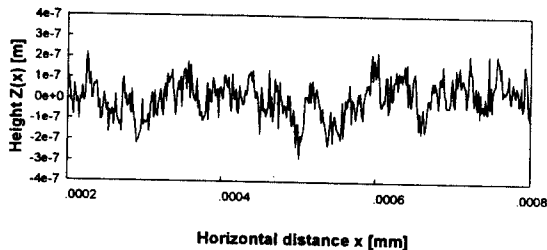
(c) Data3(F.D=1.579, G= $1.190 \cdot 10^{-10}$  [m])

Fig.4 Generated fractal surfaces for simulation

Fig.4의 W-M 프랙탈 함수로부터 다음의 세가지 특성을 알 수 있다. 첫째, 프랙탈 차원값이 커질수록 형상이 복잡해 지는 것을 알 수 있다. 이것은 프랙탈 차원이 1에서 2사이의 값을 가지며, 복잡한 형상일수록 프랙탈 차원은 2에 가까워지기 때문이다. 둘째, 프로파일의 일부를 확대하여 관찰하면 전체와 유사한 형태를 지니고 있다. 이것은 W-M 프랙탈 함수가 자기 유사성을 지니기 때문이다. 셋째, 스케일 상수가 작아질수록 프로파일의 진폭이 축소됨을 알 수 있다. 따라서, 스케일 상수가 프로파일의 진폭에 관련이 있음을 알 수 있으며, W-M 프랙탈 함수의 특성값인 프랙탈 차원과 스케일 상수를 이용하면 가공면의 대략적인 형상을 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 이것은 새로운 평가 파라미터가 표면 프로파일의 단순한 진폭정보 뿐 아니라 보다 풍부한 형상정보까지 지니고 있다는 것을 의미하며, 대부분의 평가 파라미터가 단순히 표면 형상의 진폭 정보만을 제공하는 것을 고려할 때, 더 많은 표면 정보를 함축적으로 표현할 수 있는 효과적인 평가 파라미터로 이용될 수 있음을 시사하고 있다.



(a) Data1(F.D=1.882, G= $1.245 \cdot 10^{-8}$  [m])



(b) Data2(F.D=1.701, G= $1.254 \cdot 10^{-9}$  [m])

#### 4. MEM의 차수 m의 결정

MEM의 파워 스펙트럼은 MEM의 차수 m에 따라 스펙트럼의 결과가 달라진다. 최적의 차수를 구하기 위한 여러 가지의 criterion이 이용되고 있으며, 그 중 가장 널리 사용되는 것으로는 식(16)에 보이는 Akaike(1969)와 Ulrych가 제안한 FPE(final prediction error)와

$$(FPE)_m = \left(1 + \frac{m+1}{N}\right) P_m \quad (16)$$

Akaike가 제안한 AIC(an information-theoretic criterion)로 다음과 같다.

$$AIC(m) = N \ln(P_m) + 2m \quad (17)$$

본 연구에서는, FPE를 토대로 하고, 통계적 기법을 적용하여 MEM의 차수 m의 결정법을 검토하였다. Fig.5는 Table.1에 주어진 데이터를 이용하여 발생된 프로파일로부터 계산된 결과로, MEM 차수 m값의 변화에 따른 프랙탈 차원의 추정값을 보인다. m값이 증가함에 따라 프랙탈 차원값이 점차 감소함을 알 수 있다. 이것은 MEM의 차수 m이 증가하여도 오차는 감소하지 않는다는 것을 나타내며, 정확한 프랙탈 차원을 구하기 위한 m값의 설정이 중요함을 의미한다.

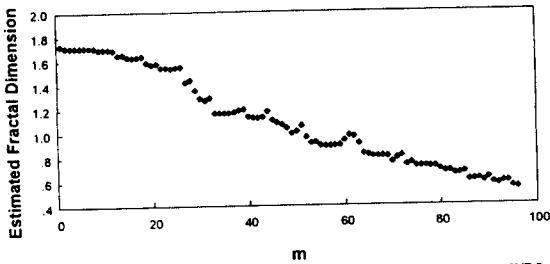


Fig.5 Estimated fractal dimension(F.D=1.579, G=1.190\*10<sup>-10</sup>(m))

Fig.6은 m값을 설정하기 위한 FPE값의 변화를 보인다. Akaike가 추천한 FPE를 이용한 m의 설정은 FPE값이 감소에서 증가로 변하는 지점으로 결정된다. 그러나, Fig.6에서 볼 수 있듯이, Akaike의 설정 기준을 만족하는 지점은 존재하지 않는 것을 볼 수 있다. 본 연구에서는 기존의 방법을 수정하여 FPE의 비 R<sub>f</sub> = FPE(m)/FPE(1)와 프랙탈 차원 F.D의 추정오차를 관찰하여, 통계적 방법에 의한 MEM 차수 m의 설정기준을 검토하였다.

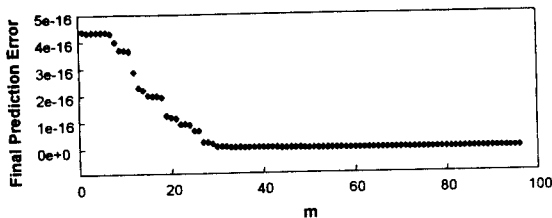


Fig.6 Relation between m and FPE(F.D=1.579, G=1.190\*10<sup>-10</sup> (m))

Fig.7에 FPE의 비 R<sub>f</sub>의 변화에 따른 프랙탈 차원의 추정오차 변화를 보인다. R<sub>f</sub>가 증가함에 따라 오차는 감소하다가 다시 증가함을 알 수 있다. 그림의 굵은 실선은 주어진 데이터로부터 최소제곱법에 의해 얻어진 3차 근사식을 보인다.

$$Error = 0.059(\log R_f)^3 + 0.363(\log R_f)^2 + 0.393(\log R_f) + 0.175 \quad (18)$$

근사식으로부터 추정오차는 R<sub>f</sub> = 0.24일 때 최소값을 보인다. 따라서, 이 조건에 가장 근사한 지점의 m값이 프랙탈 차원의 추정을 위한 조건이 된다.

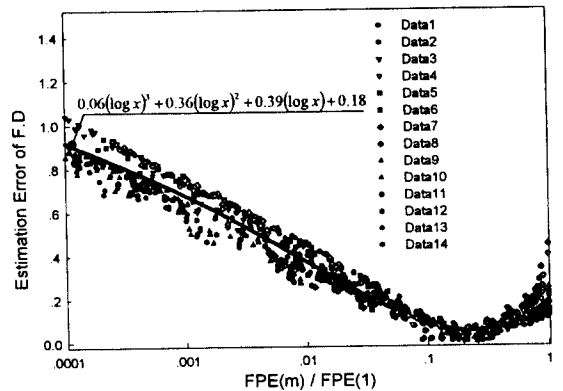


Fig.7 Minimum error condition

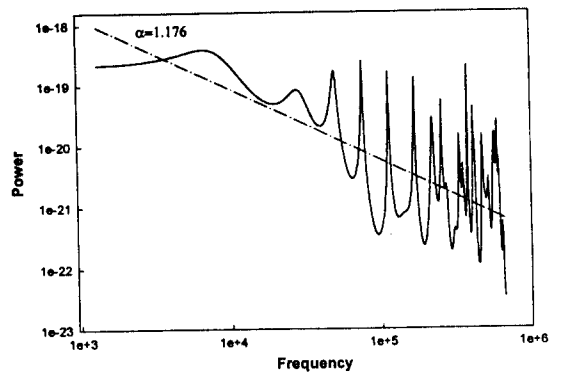


Fig.8 Estimated fractal dimension by MEM power spectrum(datal)

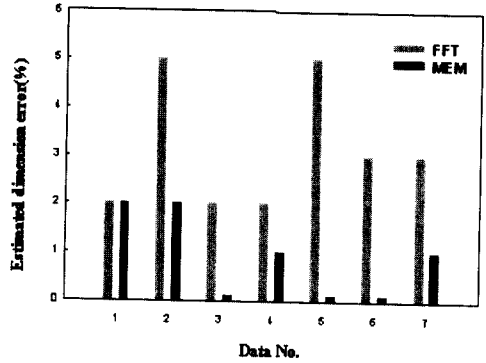
MEM법을 사용하여 얻어진 파워 스펙트럼은 FFT법과

달리 임의의 주파수에 대하여 파워 스펙트럼을 구할 수 있는 장점이 있으며, 또한 저주파에 대한 분해능이 뛰어나다는 특징을 가지고 있다. Fig.8에 앞에서 얻어진 결과를 이용하여, 프랙탈 차원을 구하는 예를 보인다. 또, Table.2에 개선된 방법에 의해 추정된 프랙탈 차원 및 추정오차를 나타내었다.

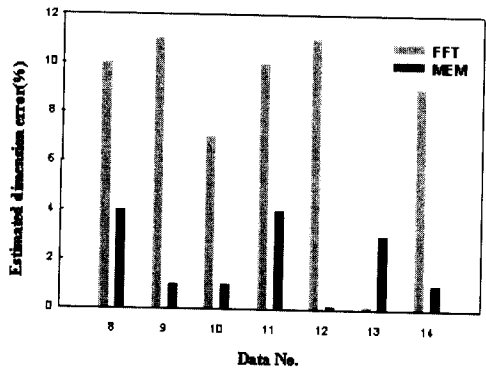
Table.2 Calculated FPE ratio, m, fractal dimension error

	FPE ratio	m	Calculated F.D	Error(%)
Data1(F.D=1.882)	0.261	54	1.912	-2
Data2(F.D=1.701)	0.204	26	1.741	-2
Data3(F.D=1.579)	0.260	21	1.578	0
Data4(F.D=1.880)	0.254	54	1.906	-1
Data5(F.D=1.680)	0.251	25	1.682	0
Data6(F.D=1.460)	0.210	19	1.464	0
Data7(F.D=1.630)	0.246	24	1.612	1
Data8(F.D=1.882)	0.246	41	1.952	-4
Data9(F.D=1.701)	0.271	24	1.712	-1
Data10(F.D=1.579)	0.239	22	1.566	1
Data11(F.D=1.880)	0.242	41	1.947	-4
Data12(F.D=1.680)	0.253	24	1.674	0
Data13(F.D=1.460)	0.195	20	1.418	3
Data14(F.D=1.630)	0.264	22	1.645	-1

Fig.9는 2.1절에서 제안한 개선된 FFT 스펙트럼법에 의해 추정된 프랙탈 차원값의 추정오차와 함께, 제안된 MEM 스펙트럼법에 의한 결과를 보이고 있다. 그림에서 (a)와 (b)의 계산에 사용된 데이터는 Table 1에 보이는 바와 같이 동일한 조건으로 발생되었으며, 데이터 길이를 각각  $7.68 \times 10^{-4}m$ 와  $1.54 \times 10^{-3}m$ 로 달리 한 경우이다. 두 경우 모두가 본 연구 결과의 적용에 의한 MEM 파워 스펙트럼법의 프랙탈 차원 추정정능이 우수함을 보이고 있으며, 측정 데이터의 길이가 짧은 (a)의 결과보다 데이터의 길이가 긴 (b)의 결과가 더욱 뛰어난 것으로 나타나고 있다. 따라서, 제한된 길이의 데이터를 사용하는 가공면의 평가는 물론, 충분한 길이의 측정 데이터가 얻어지는 경우에도 제안된 MEM 스펙트럼법이 우수함을 확인하였다. 두 방법에 대한 추정오차의 표준편차는 각각  $\sigma_{MEM}=0.031$ ,  $\sigma_{FFT}=0.076$ 로 나타났다.



(a) Sample length  $7.68 \times 10^{-4} m$  (data1 to data7)



(b) Sample length  $1.54 \times 10^{-3} m$  (data8 to data14)  
Fig.9 Comparison of estimated fractal dimension error

## 7. 결론

기계 가공면의 형상적 성질을 효과적으로 표현하고 평가하기 위하여, 프랙탈 해석을 위한 실용화 알고리즘 개발을 수행한 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

1. 프랙탈 차원 계산을 위한 스펙트럼법 적용에 있어서, FFT법의 저주파 분해능 저하 등의 특성으로 인하여, 프랙탈 차원의 추정정능이 떨어짐을 확인하였다.
2. 프랙탈 해석을 위한 MEM의 차수 m의 결정을 위하여, 기존의 FPE법이 갖고 있는 문제점을 확인하였으며, 이의 해결을 위한 새로운 설정 기준을 제시하였다.
3. 본 연구에 의하여 제시한 보완된 형태의 MEM법을 적용하여 프랙탈 해석을 실시한 결과, FFT에 의한 결과보다 우수함을 확인하였다.

### 참고문헌

1. T. R. Thomas and A. P. Thomas, Fractal and Engineering Surface Roughness, Surface Topography, Vol. 1, p143, 1988
2. R. S. Sayles and T. R. Thomas, The Spatial Representation of Surface Roughness by Means of the Structure Function, A Practical Alternative to Correlation, Wear, Vol. 42, p263, 1977
3. J.P.Burg, Maximum entropy spectral analysis, paper presented at the 37th Annual International Meeting, Soc. of Explor. Geophys., 1967
4. F.F. Ling, surface Mechanics, Wiley-interscience, pp.173-191, 1973
5. F.F. Ling, Fractals, Engineering Surface and Tribology Wear, Vol.133, pp.141-156, 1990
6. M. V. Berry and Z. V. Lewis, On the Weierstrass-Mandelbrot fractal function, Proc. R. Soc. Lond. A 370, pp.459-484, 1980
7. A.Majumdar and C.L.Tien, Fractal Characterization and Simulation of Rough Surfaces, Wear, Vol. 136, 313-327, 1990