

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.1.145>
JIIBC 2023-1-21

프랙탈 차원에 의한 소자 표면의 정량화 분석

Quantification Analysis of Element Surface by Fractal Dimension

홍경진*

Kyung-Jin Hong*

요약 표면의 고해상도 이미지는 나노(nano)사이즈 부터 마이크로미터까지 특정한 크기를 갖는 기공이나 형상에 대한 자세한 정보를 제공한다. 그러나 표면의 고해상도 이미지로 부터 기공이나 형상에 대한 효율적인 연관성을 결정하는 것은 아직 확실하지 않다. 기공이나 형상의 효율적 연관성을 위하여 소자의 표면특성은 SEM 사진을 촬영하고 이미지를 이진화하여 프랙탈 차원으로 고찰하였다. 소자의 표면 분석을 위하여 프랙탈 프로그램은 직접 코딩하였다. 소자 표면 특성과 전기적 특성은 프랙탈 차원과 연관성이 있을 것으로 생각된다. 프랙탈 차원은 내부 기공의 증가와 더불어 감소하였다. 소자 표면의 구조적 특성인 입자의 밀도와 입계는 프랙탈 차원과 연관이 있었다. 입자의 크기는 프랙탈 차원의 증가와 더불어 감소하였으며 균일하게 형성되었다. 입자가 균일하게 형성되면 기공이 적게 존재하여 프랙탈 차원이 증가하였다.

Abstract High-resolution images of surfaces provide detailed information on pores or shapes with specific sizes ranging from nano sizes to micrometers. However, it is not yet clear to determine an efficient association for pores or shapes from high-resolution images of surfaces. For the efficient association of pores and shapes, the surface characteristics of the device were considered as fractal dimensions by taking SEM photographs and binarizing the images. The fractal program was directly coded for surface analysis of the device. The device surface characteristics and electrical characteristics are thought to be related to the fractal dimension. The fractal dimension decreased with an increase in internal pores. The density and grain boundary of particles, which are structural characteristics of the device surface, were related to the fractal dimension. The particle size decreased with an increase in the fractal dimension and was uniformly formed. When the particles were uniformly formed, fewer pores were present and the fractal dimension increased.

Key Words : high-resolution images, internal pores, grain boundary, density, fractal dimension, particle size

*정회원, 광주대학교 전기전자공학부
접수일자 2022년 11월 21일, 수정완료 2023년 1월 21일
게재확정일자 2023년 2월 3일

Received: 21 November, 2022 / Revised: 21 January, 2023 /
Accepted: 3 February, 2023

*Corresponding Author: tronichkj@gwangju.ac.kr
School of Electrical and Electronic Engineering, Gwangju
University, Gwangju, Korea

I. 서 론

프랙탈 차원은 물체의 기하학적 구조를 결정하기 위한 매개 변수이다. 프랙탈 치수는 연소와 같은 가스-입자 변환 과정에서 브라운 응고에 의해 생성된 응집체를 특성화하기 위해서도 적용되었다. 표면의 이미지 분석은 응집체의 프랙탈 치수를 직접 추정하는 강력한 도구이다. 표면의 고해상도 이미지는 나노(nano) 크기부터 마이크로미터까지 특정한 크기를 갖는 기공이나 형상에 대한 자세한 정보를 제공한다. 그러나 표면의 고해상도 이미지로부터 기공이나 형상에 대한 효율적인 연관성을 결정하는 것은 아직 확실하지는 않다. 내부의 기공이나 형상에 대해 프랙탈 차원으로 표현하여 연관성을 해석하는 것이 연구되고 있다.^[6]

물질 표면의 기공이나 형상에 대한 나노 크기의 모델링은 기공 사이의 상호 작용을 해석함으로써 특정한 대상을 표현할 수 있다. 또한 이러한 물질 표면의 기공이나 형상의 이미지는 물질 내부의 기공을 해석하는 위상기하학에 도움을 준다. 지형의 특성을 연구하는 분야에서 기공 크기나 형상의 이미지는 암석의 해석과 물질을 이해하는데 많은 도움을 준다.

물질의 고해상도 이미지 표면에 대한 기공과 형상의 표면의 구조적 특성 연구는 SEM, XRD 및 AFM 등을 이용되고 있다.^[11-12] 이와 같은 방법 중에서도 이미지 표면의 기공 형상 특징을 열화 현상과 연계하는 것이 가능하다. 전자 주사 현미경을 이용하여 소자 이미지 표면의 열화 현상을 고찰하는 경우 기공과 형상에 대한 측정자의 오차가 크게 나타난다.^{[3]-[4]} 이미지의 기공과 형상의 특성을 정량적으로 분석하고 소자의 구조적 분석과 전기적 특성등과 연관성에 대해 연구할 필요가 있다. 자기 유사성이란 어떤 특정 부분들이 반복되면서 전체가 유사한 모양을 하고 있다는 것으로 기하학적으로 반복되는 것이다. 프랙탈은 순환성(recursiveness)과 자기 유사성(self-similarity)의 특징이 있다. 프랙탈을 이용할 수 있는 것은 리아스식 해안선, 동물혈관의 분포형태, 특정한 모양, 디자인에서 특정한 패턴의 반복, 산맥의 모습 등이다. 우리가 살고 있는 세상에서 모든 패턴의 반복은 프랙탈 구조로 되어 있다.

프랙탈은 순환성과 자기 유사성을 이용하여 특정 지형의 형상을 고찰하는곳에 이용되었다. 소자 표면을 분석하기 위해서 프랙탈의 응용은 이미지 영상을 블록화 하고 정량화 한다. XY 평면의 이미지 표면은 $N \times N$ 의 가변 크기 블록으로 분할한다. 표면 이미지를 블록으로 분

할한 영역에서 가장 반복적으로 나타나는 유사한 패턴을 찾아서 원래의 이미지와 가장 잘 유사한 특성을 부여하는 것이다.^{[5]-[9]}

Barnsley는 반복적 축소 매핑을 이용하는 프랙탈 부호화 방법을 제안하였다. Jacquín는 프랙탈 부호화 특성을 프랙탈을 이미지에 적용하는 연구를 행하였다.

또한 Monro, Oien, Fisher 등은 프랙탈 부호화는 반복적인 매핑에 의해 특정 블록 영역을 분할하여 분석하는 경우 많은 시간이 소요된다. 그러므로 Monro, Oien, Fisher 등에 의해서 이러한 단점을 보완하려는 연구를 하였다.

본 연구에서는 소자 표면의 이미지를 이용하여 소자의 기공과 형상 및 입자와 입계의 구조적 특성을 분석하기 위하여 SEM 사진을 촬영하였다. 또한 SEM 사진은 정량적으로 분석하기 위하여 프랙탈 현상의 차원을 프로그램으로 코딩하였다. 프랙탈 이론을 이용하여 간단한 프로그램을 만들고 물질 표면의 이미지에 대한 입자의 형상 및 입자의 조밀도 등 구조 분석을 하였다. 프랙탈 현상으로 정량화된 소자의 표면 미세 구조를 프랙탈 차원으로 정량화 하여 검토하였다. 이는 전자주사 현미경(SEM)을 이용하여 출력된 소자 표면의 이미지 특징을 프랙탈 차원으로 해석하였다. 고해상도 표면 이미지를 프랙탈 차원으로 정량화하여 표면에 존재하는 기공과 입자의 구조적 특성을 전기특성의 기초 자료로 활용하고자 한다.

II. 실험 및 방법

1. 시료의 제작

표면의 이미지를 분석하기 위하여 박막과 후막의 시료를 제작하였다.

박막의 시료에 사용되는 소자는 졸겔법을 이용하여 직접 제작한 BaTiO₃이다. 이는 절연소자로서 박막 커패시터로 사용된다. Ba 아세테이트 분말과 Sr 아세테이트 분말은 아세트 산을 이용하여 교반하면서 용액을 제조하였다. 아세트 산은 이소프로필 알코올을 이용하여 Ba 아세테이트와 Sr 아세테이트를 녹이는 역할을 한다. 제조된 용액은 Pt/SiO₂/Si에 스프인코팅법으로 증착하였다. 스프인코팅과 열처리하는 대기중에서 3번 시행하였다. 스프인코팅은 4500/min으로 30초 하였으며 건조는 150℃에서 15분 하였다. 건조된 박막은 750℃에서 30분 열처리 하여 소자를 제작하였다.

또한 ZnO 후막 소자는 벌크법으로 제작되었다. ZnO 분말을 이용하여 지름 10[mm]의 펠렛 타입으로 제작하고 성형하였다. 성형된 벌크는 1000℃에서 1시간 열처리하여 제작하였다.

2. 표면 이미지의 분석법

표면의 이미지를 분석하기 위하여 베이직으로 프로그램을 코딩하였다.

소자 표면의 구조는 프랙탈 차원으로 정량적인 분석을 하기 위하여 SEM을 이용하여 흑백 사진으로 출력하였다. SEM 사진은 흑백의 사진으로 프랙탈 차원을 구하기 위해서는 이진화 파일로 변환시켰다. 이진화된 소자 표면 사진은 가로와 세로를 블록화하여 제작된 프랙탈 프로그램으로 정량화 하였다. 정량화를 위해 소자의 이미지는 히스토그램을 이용하여 명암값을 추출하였다. 히스토그램에 의한 명암값은 영상처리 기법에서 이용되는 1차 미분과 2차 미분의 방법을 도입하여 처리하였다. 영상처리 기법에서 사용되는 미분과 필터링에 의하여 입자들의 경계선과 윤곽의 잡음 처리를 하고 프랙탈 프로그램으로 물질의 표면 이미지에서 입자의 조밀도, 입자 형상, 입계의 구조적 특성을 정량적으로 분석하였다.

일반적인 영상처리에서 이미지의 경계는 물체의 외각을 나타내는 윤곽으로 설명하고 있다. 소자의 이미지에서 많은 입자의 경계부분들은 입자들의 윤곽선으로 표현된다. 영상처리에서 1차 미분에 의한 입자들의 경계에 대한 부분은 밝고 어두운 상태가 급격히 변하는 부분이기 때문에 경계의 변화값을 취하는 미분 연산이 매우 유용하게 사용되었다.

입자의 경계면에 대한 변화 표시는 미분 연산자를 이용하여 XY 평면 방향으로 하였다. 입자의 경계면을 좀더 정확하게 하기 위해 1차 미분을 다시 한번 하여 입자의 경계면에 대한 윤곽의 강도만 검출하였다. 경계면의 검출은 경계면의 중심에 위치한 입자의 경계면을 검출할 수 있어야 한다. 경계면의 정확도를 높이기 위한 2차 미분은 검출된 경계면의 윤곽선들이 폐곡선을 이루도록 나타난다. 이러한 특징을 이용하여 소자 표면에서 입자의 형상과 입자의 조밀도 등을 구할 수 있다. 이진화된 이미지는 여러개로 블록화 하였으며, 프랙탈 특성인 자기 유사성(self similarity)으로 표현하였다. 블록화 방법으로는 거리(r)와 정사각형 수(N(r))의 관계로 표현하였다. 프랙탈 표현법에 의해 정량화된 데이터는 오차를 최소화 하기 위하여 최소 자승 오차법을 이용하여 분석하였다.

그림1은 제작된 소자 표면의 이미지를 프랙탈 현상을

이용하여 정량화하기 위한 공정도이다. 그림에서 소자의 표면을 SEM 사진으로 촬영하였다.

SEM 사진은 이미지가 흑백이므로 프랙탈 분석을 하기 위하여 이미지 파일로 변환하였다. 변환된 이미지는 이진화 하였으며 이미지를 가로와 세로로 2부터 60까지 블록화 하여 구분하였다. 블록화된 이미지는 프랙탈의 자기 유사성을 이용하여 프랙탈 차원으로 정량화 하였다.

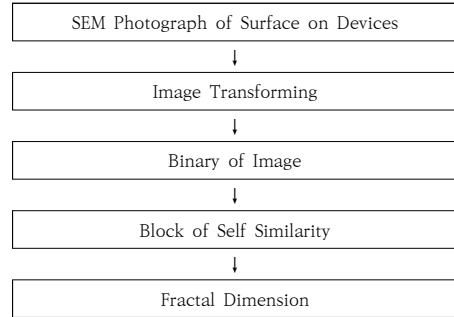


그림 1. 프랙탈 차원과정
 Fig. 1. The processing of fractal dimension.

소자 표면의 고해상도 이미지는 기공, 입자, 입계등에 대한 정보를 제공하여 프랙탈 차원으로 정량적인 정보를 제공한다. 제공된 프랙탈 차원과 소자의 전기적 특성과 연관성을 해석하고자 한다.

III. 결과 및 고찰

그림 2는 소자 표면을 고해상도로 출력한 SEM 사진이다. 박막 소자의 표면은 Pt/SiO₂/S i기판에 상대적으로 균일하게 증착되었다. 그림에서 밝은 부분은 입자를 나타내며 어두운 부분은 기공이다.

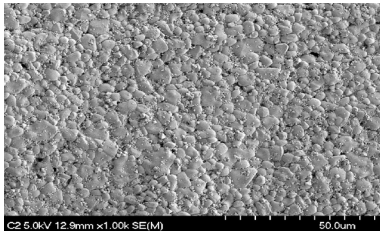
프랙탈 차원으로 정량화 하기 위하여 고해상도의 SEM 사진은 이진화 하였다. 표면 이미지를 이진화 하기 위하여 경계값 처리를 하였다. 표면 이미지에서 각각의 화소를 명암으로 규정하고 흑백의 밝기가 일정한 값 이상을 갖는 경우 화소값을 1로 하였다. 밝기가 경계값의 이하인 경우는 화소값을 0으로 하였다. 경계값의 화소값을 결정하기 위해 다음과 같이 정의하였다.

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & f(x,y) \geq t \\ 0 & f(x,y) < t \end{cases} \quad (1)$$

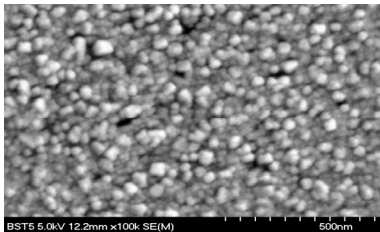
$f(x,y)$, $g(x,y)$ 는 각각 이미지 프로세싱 후의 (x, y) 평면에 있는 화소의 밝기이며 t는 경계값이다. 경계

값을 구하기 위해 각 이미지의 명암 정보를 일반적인 히스토그램(histogram)을 이용하였다.

그림3은 표면 이미지의 블럭화거리 r 과 블럭화 속에서 반복된 패턴의 수 $N(r)$ 의 관계이다. 2차원의 공간에서 이미지 패턴의 주변거리 r 과 패턴을 2차원의 블럭으로 덮을 때 필요한 반복된 패턴의 최소수 $N(r)$ 이라 하면 $N(r) \propto r^{-D}$ 이 된다. 여기서 D 는 2이다.



(a) Bulk surface of ZnO device.

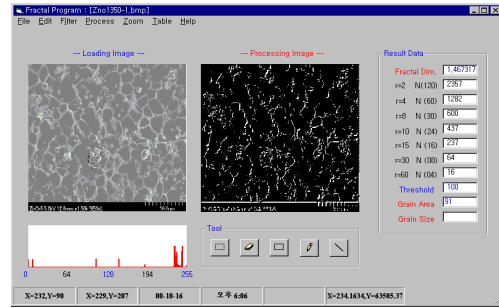


(b) Thin film surface of Barium Acetate Titanium.

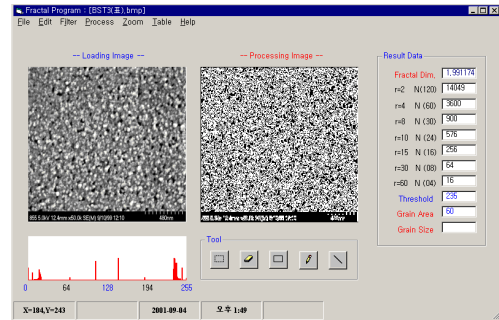
그림 2. ZnO 벌크와 BaTiO₃박막 소자의 전자현미경 사진
Fig. 2. SEM photograph of ZnO bulk and BaTiO₃thin films.

그림2의 SEM 사진에서 일부의 이미지를 선택하여 그림3의 우측에 후막과 박막의 표면을 2진화한 이미지를 표현하였다. 우측의 2진화된 표면 이미지에서 검은색으로 보여지는 부분은 입자이다. 프랙탈 정량화를 위하여 SEM 사진은 표본화와 양자화시킨 이진화(binary code) 하였다. 이진화된 표면의 이미지는 영상처리에서 사용하는 경계값(Threshold) 특성을 이용하여 이진화하였다.. 또한 박막 소자의 프랙탈 차원과 입자밀도를 측정하기 위하여 표면 이미지를 로버슨법으로 윤곽을 추출하였다.

바륨아세테이트 티탄의 표면이미지에서 입자의 밀도는 높았으며, 이를 프랙탈 차원으로 정량화 하면 1.94~1.98 정도에 2에 근접하였다. 프랙탈 차원이 높다는 것은 일정한 형상으로 구성된다는 것을 의미한다. 또한, 스핀 코팅으로 제작된 BST 박막용액이 기판 표면에 조밀하게 증착되었으며 열처리에 의해 표면의 기공이 감소하였음을 의미한다.



(a) Bulk device of ZnO.



(b) Thin film of BaTiO

그림 3. ZnO 벌크와 BaTiO₃박막 소자의 프랙탈 과정

Fig. 3. The fractal processing of ZnO bulk and BaTiO₃ thin films.

또한 후막 시료인 ZnO 소자에서 프랙탈 차원은 1.4 정도이었다. 이는 입자의 밀도가 낮고 기공이 발생하였음을 의미한다. 이러한 이유는 소자의 열처리 공정 중에서 내부의 열화학적 반응이 충분하지 않았다고 사료된다. 열처리 과정중에 내부에서 입자간의 열화학적 반응이 충분히 이루어지면 입자의 밀도는 높아진다. 열화학 반응이 진행됨에 따라 후막의 프랙탈 차원은 벌크소자의 특성상 1.7이상 이지만 이번 실험에서는 1.4로 나타났다.

그림 4는 입자밀도와 프랙탈 차원을 나타낸 그래프이다. 그림4에서 입자밀도의 증가에 따라 프랙탈 차원은 증가하였다. 이는 소자의 표면 구조에서 기공이 적기 때문에 구조적으로 조밀하게 제작되었음을 의미한다. 구조적으로 조밀하게 제작된 것은 기공이 적기 때문에 전기적 특성인 누설전류가 작을것으로 생각된다. 누설전류는 소자의 신뢰도를 저하시키는 원인으로 작용한다. 프랙탈 분석은 소자 표면의 이미지 해석을 위한 새로운 방법을 제공하고 입자의 밀도 및 입계의 복잡성을 정량적으로 평가할 수 있었다.

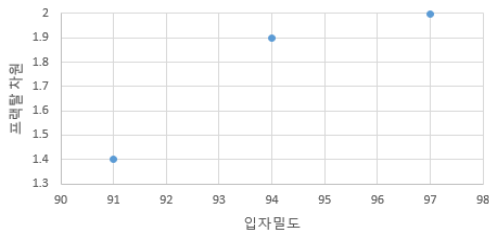


그림 4. 프랙탈 차원과 입자밀도
 Fig. 4. The grain density vs Fractal Dimension.

IV. 결 론

프랙탈 현상을 이용하여 소자 표면의 이미지를 정량적으로 분석하기 위해 박막과 후막의 전기적 소자를 직접 제작하였다. 소자 표면의 구조적 분석은 입자의 밀도와 기공 등을 프랙탈 차원으로 표현하였다.

소자 표면을 SEM사진 촬영 후 이진화하고 직접 제작한 프랙탈 프로그램을 이용하여 프랙탈 분석을 하였다. 이진화된 이미지에서 입자의 밀도와 기공을 분석의 결과는 다음과 같다. 제작된 소자 표면의 형상이 일정하게 반복되면 증착이 균일하게 이루어져서 입자의 밀도가 증가됨을 알 수 있었다. 일정한 형상이 반복되는 것은 프랙탈 현상이 표현되므로 정량화가 가능하였다. 소자의 표면이 일정하게 표현되어 프랙탈 차원으로 정량화가 되면 소자의 제작 공정이 양호하다고 판단되었다. 프랙탈 차원을 정량화 하기 위해서 여러 개의 블록화된 이미지로 나타냈을 때 블록내의 흑과 백의 패턴수는 프랙탈 차원에 비례하여 증가하였다. 프랙탈 차원이 높을수록 기공의 존재는 낮았다. 제작된 소자의 표면 이미지에서 입자밀도가 증가하는 것은 기공도가 기공이 적다는 것을 의미하며 구조적으로 균일하게 제작되었다. 구조적으로 입자 밀도가 높은 경우 기공이 적기 때문에 전기적 특성인 누설 전류를 감소시킬 것이다.

향후 프랙탈 차원에 의한 표면의 구조적 특성과 전기적 특성인 전압-전류 특성과의 연관성에 대해서도 연구가 필요하다.

References

[1] WOO HEE SOOK, Byung-Guk Kim, "Application of Fractal Dimension on Consistent Calculation of Coastline Length - Focused on Jeju Island", journal of

Korean Society for Geospatial Information Science, vol.24, no.4, pp. 83-88
 DOI : <https://doi.org/10.7319/kogsis.2016.24.4.083>

[2] Kim Eun Ji, Park Jae-yeon, "A Study on ceramic expression though fractal principle", The Korean Society of Science & Art (KSAF), vol.22, pp. 79-88, 2015
 DOI : <https://doi.org/10.17548/ksaf.2015.12.22.79>

[3] So Young Kim, "A study of Textile Surface Design using Fractal Pattern", Journal of Basic Design & Art, vol.19, no.5, pp. 101-112, 2018
 DOI : <https://doi.org/10.47294/KSBDA.19.5.8>

[4] Oh Taek-Keun, Seung-Oh Hur, Byung-Keun HYUN, Hyun-Jun Cho, YeonKyu Sonn, "Comparison between natural and anthropogenic soils through fractal dimension analysis", Korean Journal of Agricultural Science, vol.41, no.4, pp. 379-384, 2014
 DOI : <https://doi.org/10.7744/cnujas.2014.41.4.379>

[5] Hyungje Cho, "A Study on Generation and Types of Mandelbrot Fractal Images", IIBC, vol.15, no.1, pp. 217-222, 2015
 DOI : <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.1.217>

[6] Hye-Rim So, Gun-Baek So, Gang-Gyoo Jin, "An Efficient BC Approach to Compute Fractal Dimension of Coastlines", Journal of Korean Navigation and Port Reserch, vol.40, no.4, pp. 207-212, 2016
 DOI : <https://doi.org/10.5394/KINPR.2016.40.4.207>

[7] Sung Han Lim, Ryu, seungki, "Algorithms for Identification of Road Surface Conditions by Image Analysis", Seoul Studies, vol.8, no.2, pp. 145-154, 2007
 DOI : <https://doi.org/10.23129/seouls.8.2.200706.145>

[8] Mi-Jeong Lim, Hyong-Je Cho, Gyoo-Seok Choi, "A study on Interactive-type Exhibition Using Fractal Images", Vol. 15 No.5, pp.163-168, 2015
 DOI : <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.5.163>

[9] Sika Shrestha, Young-Gon Kim, Dong-You Choi, "Miniaturized Fractal Patch Antenna on Various Substrate", Vol.11, No.8, pp 99-209, 2013
 DOI : <https://doi.org/10.14801/kiitr.2013.11.8.199>

저 자 소 개

홍 경 진(정회원)



- 전남대학교 전기공학과(공학박사)
- 일본 국립과학기술청 물질연구소 외래 연구원
- 현재 : 광주대학교 전기전자공학부 교수
- 주관심분야 : 신재생에너지, 전기설비, 전기재료

※ 이 연구는 2023년도 광주대학교 대학연구비의 지원을 받아 수행되었음