



주사전자현미경 특성의 통계적 해석

김태선^a, 김우석^b, 김동환^c, 김병환^{b*}

^a가톨릭대학교 정보통신전자공학부, ^b세종대학교 전자공학과,
^c서울산업대학교 기계설계자동화공학부

Statistical Analysis of Characteristics of Scanning Electron Microscope

T. S. Kim^a, W. Kim^b, D. H. Kim^c, B. Kim^{b*}

^aSchool of Information, Communications & Electronics Engineering, The Catholic University of Korea, Bucheon 420-743, Korea

^bDepartment of Electronic Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

^cSchool of Mechanical Design & Automation Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received July 12, 2007 ; accepted August 22, 2007)

Abstract

A scanning electron microscope (SEM) is a complex system, consisting of many sophisticated components. For a systematic characterization, a 2^4 full factorial experiment was conducted. The SEM components examined include condenser lens 1 and 2 (denoted as A and B, respectively), and Objective lens (coarse and fine-denoted as C and D respectively). A statistical analysis was conducted to investigate factor effects and variations in response surfaces. Among four factors, main effect analysis revealed that A and D were identified as the dominant factor. Moreover, B showed conflicting effect against C. The R^2 of statistical regression model constructed was about 69.6%. The model generated 3D response surface plots facilitated understanding of complex factor effects.

Keywords : SEM, Statistical analysis, Main effect, Response surface model

1. 서 론

나노과학과 공학의 성장으로 미세 패턴과 입자 거동을 고찰하기 위해 보다 정교한 측정장치가 요구되어지고 있다. 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope-SEM)은 반도체 소자제조과정에서 증착 또는 식각된 표면의 미세 기하학적인 형상을 영상으로 제공하는 측정기기이다. SEM은 다수의 부품으로 이루어진 매우 복잡하고 정교한 기기이며, 전자를 방출하는 전자건(Electron Gun), 전자빔을 1차적으로 초점화하는 Condenser Lens 1(CL1), CL1을 지난 전자빔의 직경을 줄이는 역할을 수행하는 Condenser Lens 2(CL2), 고도의 해상도를 결정하는

Objective Lens(OL), 이외의 Anode Allignment Coil, Scanning Deflection Coil, Detector 등으로 구성된다. SEM의 분해능을 3.5 nm 이하로 줄이기 위해 전자방출원 타입에 고전압(15~30 kV)을 인가하여 고휘도의 작은 에너지 분산을 내는 전자방사형 전자빔 설계에 많은 연구가 진행이 되고 있다¹⁻³⁾.

SEM 특성의 최적화를 위해서는 SEM을 구성하는 각 부품에 대한 동특성을 정확히 이해하는 것이 필요하다. 나아가서, 각 부품의 특성 외에 다수의 부품 조합에 따른 특성들도 예견할 수 있는 모델의 개발이 요구된다. 그러나, SEM을 구성하는 각 부품의 동특성에 대한 해석적인 모델의 개발이 미흡하며, 나아가서 이들 모델을 결합해 다수의 부품의 영향을 해석할 수 있는 모델은 아직 보고된 바가 없다. 이에 따라 SEM 개발은 다수의 시행착오적인

*Corresponding author. E-mail : kbwhan@sejong.ac.kr

실험에 의존하고 있으며, 이러한 모델의 부재로 인해 SEM 성능을 최적화하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 이러한 어려움을 극복하기 위해 통계적 또는 지능적 기법을 현재 진행 중인 SEM 개발에 적용해 오고 있으며, 여기에는 SEM 부품의 통계적 또는 지능적 모델링, 모델-기반 SEM 부품의 영향 해석과 SEM 특성의 정성적 해석, 그리고 모델-기반 SEM 특성의 최적화 기법 등이 포함된다. 측정 기기의 특성분석을 위해 통계적 또는 지능적 분석 기법이 적용된 사례는 극히 드물다. 플라즈마 장비와 관련하여 공정특성의 통계적⁴⁾ 또는 지능 모델⁵⁾은 다 수 개발된 사례가 있다. 특히 측정기기를 구성하는 하드웨어 부품 특성에 대한 어느 종류의 모델도 문헌상으로 확인할 수가 없었으며, 이는 SEM 장비를 비롯해서 다른 장비의 개발에 체계적인 분석 기법이 적용되지 않고 있음을 의미한다.

본 연구에서는 모델-기반 SEM 부품의 영향 해석에 관한 연구결과를 보고한다. 영향 해석은 통계적 기법을 이용하여 분석하였으며, 체계적인 분석을 위해 통계적 실험계획법을 적용하여 SEM 특성 데이터를 수집하였다. 분석은 부품의 주인자 분석과 교호(Interaction) 작용 분석으로 이루어져 있으며, 분석을 위해 선형모델과 선형모델을 포함한 다항식 모델이 이용되었다.

2. 실험 데이터

서울산대는 현재 SEM의 국산화를 위해, SEM 장비를 자체 개발해오고 있으며, 본 연구에서 이용된 데이터는 그림 1에 도시된 SEM 장비를 이용하여 수집되었다. 그림에서와 같이 SEM 장비는 다수의 부품으로 구성되어 있으며, 여기에는 Electron Gun, Anode Alignment Coil, CL1, Sleeve & Aperture, CL2, OL, Scanning Deflection Coils, Stigmator, 그리고 Detector 등이 포함된다.

Electron gun은 전자를 방출하는 전자원이며 텅스텐을 가열하여 열전자를 방출시키고 이 방출된 전자를 고전압으로(30 kV) 가속하며 일차 초점화를 위해 Bias 전압을 걸어주게 된다. Anode Alignment Coil은 전자빔의 소스를 정 중앙에 위치시키기 위한 코일로서 빔의 중심이나 좌우로 편차가 생길 때 보정을 해주는 역할을 한다. CL1은 전자총에서 나온 전자빔을 일차적으로 focusing하는 코일로서 전자빔의 직경을 확연히 줄이는 역할을 한다. Sleeve는 전자빔이 지나가는 작은 관으로써 일반적으로 동으로 제작된다. 이 Sleeve 안에 보다 작은 구멍을 삽입한 것이 Aperture이며 이를 통해 빔의 집중

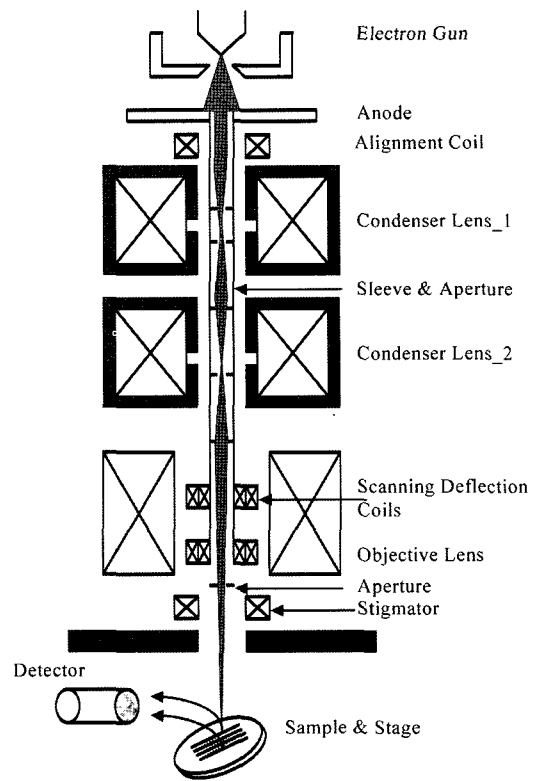


Fig. 1. Schematic of SEM.

도를 더 높이고 흩어진 빔들을 모으거나 버리는 역할을 한다. CL2는 1차 콘덴서 렌즈를 지난 전자빔을 다시 집중 시키는 코일로서 전자빔의 직경을 더 줄이는 역할을 한다. Scanning Deflection Coils은 시편을 관찰하기 위하여 집중된 전자빔을 고속으로 x-y 방향으로 주사하기 위하여 제작된 코일로서 측정하는 물체의 배율(Magnification)을 조절한다. Objective Lens는 전자빔의 초점을 시편과의 거리를 고려하여 더 집중시키는 코일로서 마지막 집중 코일이며 여기서 고도의 해상도가 결정되며, Objective Lens(Coarse)와 Objective Lens(Fine)으로 나누어진다. Stigmator는 SEM의 이미지에 수차가 생길 경우 이를 보정하기 위하여 제작된 코일로서 이미지의 왜곡, 기울어짐을 바로 잡는다. Detector는 집중된 전자빔이 시편에 고속으로 주사하면 시편으로부터 2차 전자가 방출된다. 이 방출되는 전자를 포집하여 제작된 전자 포집 장치이며 이 신호에 따라 시편 부위에 따른 강도(intensity)가 결정되며 이를 근간으로 이미지를 관찰하게 된다.

본 연구에서 고려한 부품은 4종류, 즉 CL1, CL2, Objective Lens(Coarse), 그리고 Objective Lens(Fine)이며, 편의상 이들을 A, B, C, 그리고 D로 대체해 분석한다. 체계적인 데이터 수집을 위해 통계적 실험계획법중의 하나인 2⁴ 전 인자 실험계획법⁶⁾이 이용되었으며, 실험계획에 적용된 각 부품 변수의 실

험범위는 표 1에 나타나 있다. 수집된 16번의 실험 데이터외에 표 1의 각 부품의 실험범위의 중간 값에 해당하는 실험 1회가 추가되어 총 17회의 실험데이터가 통계적 회귀 모델개발에 이용되었다. 표 1에서 C와 D 변수의 중간 값은 정확히 계산하면 각각 5.5회이었어야 했으나, 이 수치로의 조정에 수반되는 불확실성을 제거하고자 5회로 수정하였다. 중심에 해당하는 조건에서 명확한 SEM 영상이 수집되었으며, 이 조건을 기준 조건으로 하여 다른 조건들에 대한 영상을 확보하였다. 즉 기준 조건에서 다른 조건으로 변수 변이를 주었으며, 거리를 조정하여 가능한 한 명확한 영상을 확보하여 하였다. 렌즈와 시편사이의 거리는 10으로, High Voltage는 15 Kv로, 그리고 Beam Alignment는 잘 보이는 곳으로 맞추었다. 모든 실험에 대해 배율은 2,000으로 고정하였다. 이상의 실험환경에서 실험계획표에 의거하여 수집된 데이터는 표 2에 나타나 있다. 표에서 "C"는 각 변수의 중심 값에 해당하는 실험이다. 그리고 표 2에서의 응답인 "R"은 해상도 (Resolution)의 약자이다. R은 "0", "0.5", 그리고 "1"

로 구분하였으며, 수치가 높은 R은 보다 높은 해상도를 의미한다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 수행한 통계적 해석은 Minitab⁷⁾을 이용하여 수행하였다. 그림 2는 Minitab이 제공하는 Screening 분석을 통해 얻은 정규확률 그림이다. 그림 2에서와 같이 총 7개의 변수조합들이 R에 영향을 크게 미치고 있음을 알 수 있다. 7개의 변수조합에는 단일 변수인 A와 D, 그리고 변수들의 조합인 AD와 BC, ABC, BCD, 그리고 ABCD 등이 포함된다.

그림 3은 주인자의 영향을 보여주고 있다. 그림 3에서와 같이 B와 C의 경우 그 변화를 주어도 R에 거의 영향을 주지 않고 있음을 알 수 있다. 이에 반해, A와 D의 경우 그 값을 증가시키면 R이 증가된다는 것을 알 수 있다. 그림 4는 변수들 간의 교호 작용을 보이고 있다. 교호작용이란 어느 한

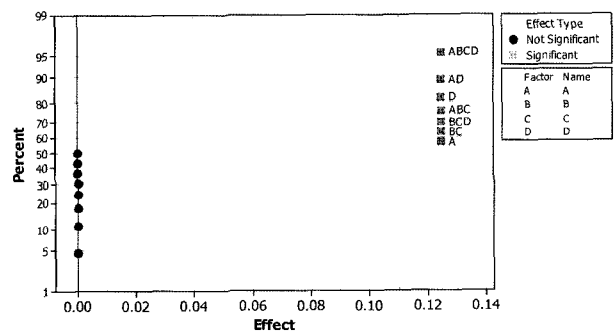
Table 1. Experimental parameters and ranges

Parameters	Ranges	Units
A	0-340	Deg
B	1-5	trun
C	1-10	trun
D	1-10	trun

Table 2. A sheet of experimental design

#	A	B	C	D	R
1	340	5	10	10	1
2	340	5	10	1	0.5
3	340	5	1	10	0.5
4	340	5	1	1	0.5
5	340	1	10	10	0.5
6	340	1	10	1	0.5
7	340	1	1	10	1
8	340	1	1	1	0.5
C	170	3	5	5	1
9	0	5	10	10	0.5
10	0	5	10	1	0.5
11	0	5	1	10	0.5
12	0	5	1	1	0.5
13	0	1	10	10	0.5
14	0	1	10	1	0.5
15	0	1	1	10	0.5
16	0	1	1	1	0.5

Normal Probability Plot of the Effects
(response is R, Alpha = .05)



Lenth's PSE = 3.407948E-17

Fig. 2. Normal probability plot of parameter effects.

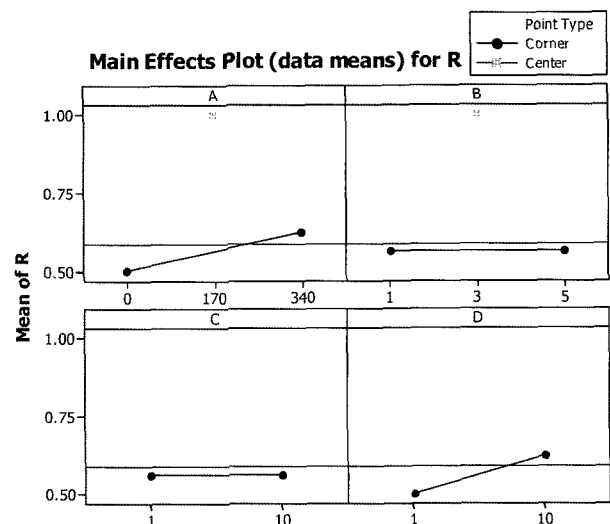


Fig. 3. Effect of main parameters.

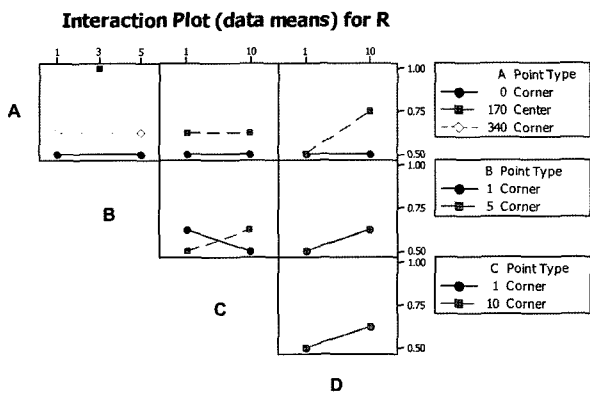


Fig. 4. Effects of parameter interactions.

인자의 효과가 다른 인자의 수준에 따라 변화하여 나타나는 효과를 말한다. 그림 4에서와 같이 강한 교호작용을 보이는 경우는 B와 C, 그리고 A와 B, C, 또는 D의 경우이다. B와 C의 교호작용을 보면, B의 Low Level(1회)에서 C를 증가시키면 R이 감소한다. 이와 반대로, B의 High level(5회)에서 C를 증가시키면 R이 증가한다. 이는 결국 C의 영향이 B의 Level에 크게 의존하고 있음을 의미한다. 한편, A와 D의 교호작용을 보면, A의 Low level에서 D를 증가시킬 때 R에의 영향이 없으나, A의 중간 Level(170 deg.)에서 D를 증가시킬 때에는 R이 증가되고 있음을 알 수 있다. 상기의 분석을 통해, A의 중간 Level에서 C 또는 D를 증가시킬 때 R을 높일 수 있음을 알 수 있었다. 한편, B 또는 C의 High 또는 Low Level에서 D를 증가시킬 때 R이

증가되고 있음을 알 수 있다. 이는 D가 B 또는 C의 변화에 민감하게 반응하지 않음을 의미한다.

반응표면(Response Surface)을 그리기 위해 표면 반응 모델을 개발하였다. 개발된 회귀모델은 다음과 같이 표현된다.

$$R = 0.614583 + 0.005065 * A - 0.038194 * B - 0.020833 * C - 0.000015 * A^2 + 0.000082 * AD + 0.006944 * BC \quad (1)$$

개발된 모델의 R² 퍼센트는 69.6%이었다. 이 수치는 모델의 주어진 데이터에 대한 Fit 정도를 의미한다. 개발된 모델에 대한 다양한 Residual plot은 그림 5에 도시되어 있다. 그림 5의 Residual의 함수로의 Percent 그림은 17개의 반응에 대한 Residual들이(실제치와 모델 예측치의 차이) 대략 -0.2~+0.2 사이에 분포하고 있으며, 또한 전체 17개의 대부분의 응답에 대한 Residual이 -0.1~+0.1에 분포하고 있음을 보여준다. 그림 5에서 Residual이 Fitted Value의 함수로 도시되고 있으며, Fitted Value가 0.6~0.8인 경우에 Residual이 상대적으로 높게 나타나고 있음을 보이고 있다. 한편, 그림 5에서 Observation Order의 함수로 그려진 Residual 분포에서와 같이 4개의 응답에 대한 상당히 큰 Residuals이 발생하고 있으며, 앞서의 비교적 낮은 R²은 이들에 기인한 것으로 해석할 수 있다. 이는 다시 그림 5의 Residual의 함수로 그려진 Frequency plot에 분명하게 나타나고 있다. 개발된 모델을 이

Residual Plots for Response

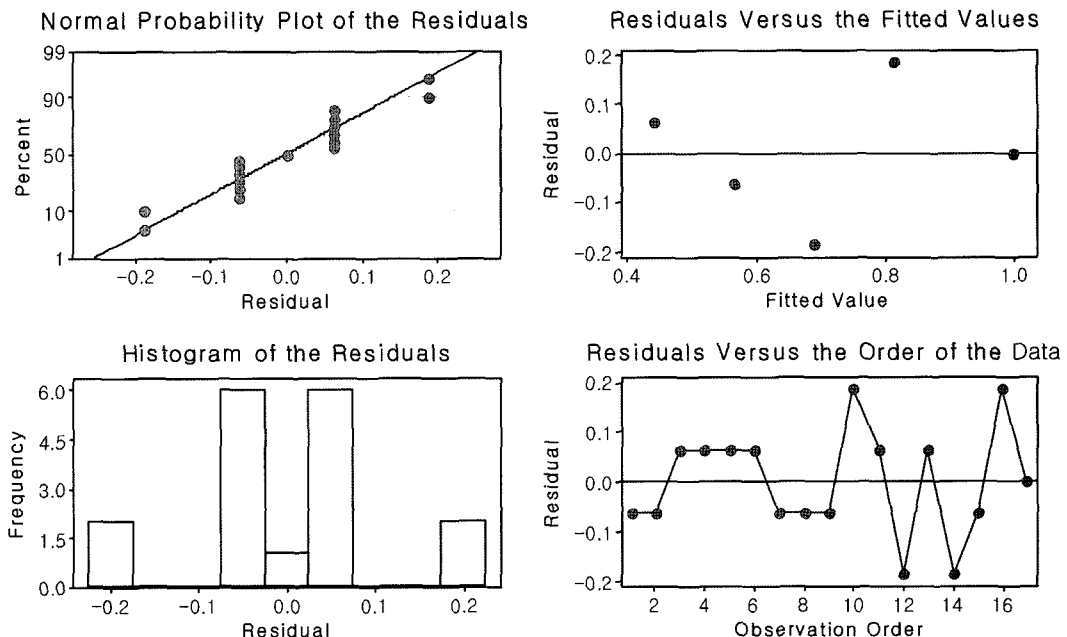


Fig. 5. Residual plot of regression model of R.

Surface Plot of R vs B, C

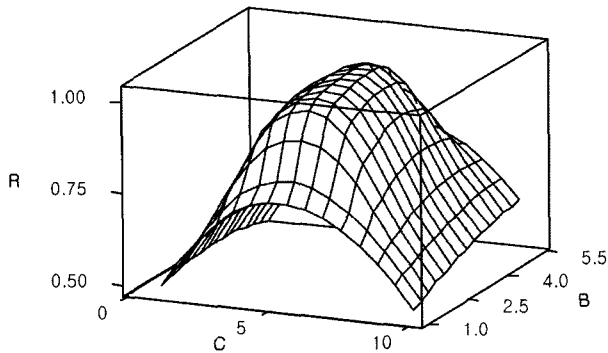


Fig. 6 Effect of interactions between B and C.

Surface Plot of R vs A, D

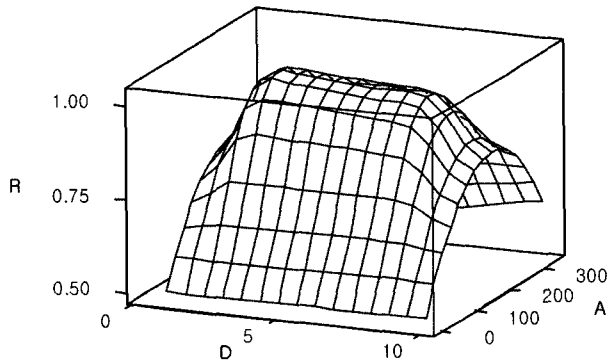


Fig. 7. Effect of interactions between A and D.

용해서 표면반응 모델을 개발하였다. 전술한바와 같이, B와 C, 그리고 A와 D가 특이하게 반응하고 있으며, 이들의 표면반응 모델이 그림 6과 7에 도시되어 있다. 그림 6, 7에서와 같이 각 변수의 중간값에서 최고의 R을 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 SEM 특성을 통계적 분석한 결과

를 보고하였다. 통계적 분석을 위해 주인자와 인자들간의 교호작용을 평가하여 SEM 특성, 즉 R에 영향을 크게 미치는 인자들을 확인하였다. 체계적인 분석을 위해 통계적 실험계획표에 의거하여 데이터를 수집하였다. 한편, 반응표면모델을 개발하였으며, 비교적 낮은 적합도에 대한 원인을 Residual 분석을 통해 확인하였다. 개발된 모델은 표면반응을 도시하는데 이용되었다. 개발된 모델은 다양한 SEM 부품 조건에서의 SEM 특성의 정성적 해석과 특성의 최적화에 이용될 예정이다. 한편, 본 연구에서는 R의 값을 0, 0.5, 1로 단순화하였지만, 영상처리기법을 이용해 이들을 보다 세세하게 분류한 데이터를 이용할 때 보다 효과적인 모델의 개발이 이루어질 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 10583).

참고문헌

1. R. E. Lee, Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, Prentice Hall, 1993.
2. L. Reimer, Scanning Electron Microscopy - Physics of Image Formation and Microanalysis, Springer, Berlin, 1998.
3. H. W. Mook, P. Kruit, Nucl. Instr. and Meth. A, 536 (1999).
4. G. S. May, J. Huang, C. J. Spanos, IEEE Trans. Semicond. Manufact., 4 (1991) 83.
5. B. Kim, K. Park, Microelectron. Eng., 77 (2005) 150.
6. D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, Wiley, Singapore, 1992.
7. Minitab, Manual, USA.