

# 주사전자 현미경의 통계적 인자 해석

## Statistical Factor Analysis of Scanning Electron Microscope

권상희\*, 김병환\*\*

Sanghee Kwon, Byungwhan Kim

**Abstract** - A scanning electron microscope (SEM) is a system that visualizes complex surface features. The resolution of SEM is affected by each of equipment components. In this study, we examined the effects of the four factors including the beam current, magnification, voltage and working distance. A statistical analysis was conducted to investigate the main and interaction effects. For a systematic characterization, a  $2^4$  full factorial experiment was conducted. The  $R^2$  of constructed statistical model was 88.9%. The main effect revealed that the current and working distance are dominant factors. Of the interactions, those between the current and voltage yielded the highest interaction. 3D plots generated from the model were used to explore various parameter effects.

**Key Words** : SEM, Statistical Analysis, Main Effect Analysis, Response Surface Model

### 1. 서론

과학기술의 발달로 미세한 물질들을 관찰하기 위해 측정 장비의 의존도가 높아지고 있다. 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope-SEM)은 전자빔을 이용하여 미세물질의 형상을 영상으로 제공하는 측정기이며, 마이크로크기의 입자부터 금속나노입자, 세라믹 나노 파우더 등의 나노미터 이하 범위까지 분석하며 매우 효과적으로 이용되고 있다.

SEM의 해상도에 대해 지금까지 많은 연구들이 진행되어 왔다[1-3]. 높은 해상도의 영상은 나노입자의 크기나 형태를 정확하게 보여줄 뿐만 아니라, 재료내의 원자들의 배열상태나 결정학적 정보 등 세부적인 내용들도 확인할 수 있다. SEM 해상도는 많은 변수들에 의해 결정되는데 빔 전류, Magnification of the image(or pixel resolution), Working distance, 가속전압 이외의 시편표면에서 Effective electron-probe의 직경, 이미지 모드의 종류 등이 포함된다. SEM의 해상도의 최적화를 위해서는 측정시에 다수의 시행착오적인 방법에 의존하는 것이 아닌, 해상도를 결정하는 각각의 변수들의 영향을 정확히 분석하여 미리 예측하는 모델 개발이 필요하다. 나아가서, 변수들의 상호작용에 의한 해상도의 영향도 분석할 필요성이 있다. 이를 위해 최근 통계적 해석 방식을 적용하여 SEM 특성의 영향을 고찰한 바 있다 [4].

본 연구에서는, SEM 특성분석을 위한 새로운 통계적인 모델을 제안한다. 기존의 모델 [4]과 비교해 제안하는 모델은 다른 SEM 변수에 대해서 개발되었다는 점에서 구분된다. 모

델개발은 주인자와 교호작용의 영향을 분석, 통계적 회귀 모델의 개발, 그리고 모델-응용 3D 인자영향 해석으로 구성된 다.

표 1. 실험 변수 및 인자 수준

Factor	Factor level
전류 ( $\mu\text{A}$ )	100
	180
배율 ( $^{\circ}$ )	1000
	5000
전압 (V)	5
	15
거리 (mm)	5
	15

### 2. 실험데이터

서울산업대는 현재 SEM의 국산화를 위해 SEM 장비를 자체 개발해오고 있으며, 이를 이용해 본 연구의 데이터를 수집하였다. 본 연구에서 고려한 SEM 장비변수는 4 종류 즉, 빔 전류, 배율, 작업거리(Working distance), 가속전압을 포함한다. 변수들을 분석하기 위해 통계 프로그램인 MINITAB<sup>®</sup> [5]을 이용하였으며, 이는 변수들의 영향해석을 위해 여러 연구에서 사용되어지고 있다[6-7]. 데이터 수집을 위해 통계적 실험계획법중의 하나인  $2^4$  전 인자 실험 계획법이 이용되었으며[8], 실험계획에 적용된 각 부품 변수와 그 수준(level)은 표 1에 나타나 있다. 표 1에서의 전류는 각도로 측정하였으며, 약  $90\mu\text{A}$ 일 때 180,  $25-30\mu\text{A}$ 일 때 100이다. 또한 작업거리는 stage높이와 같게 조정하였다. 수집된 데이터는 표 2에 나타나 있다. 표 2에서와 같이 수집된 16번의 실험데이터는 통계적 회귀 모델 개발에 이용되었다. 표 2에서의 응답인

저자 소개

\* 권 상 희 : 세종대학교 전자공학과 석사과정

\*\* 김 병 환 : 세종대학교 전자공학과 교수

Resolution은 '0', '0.5', 그리고 '1'로 구분하였으며, 수치가 높을수록 보다 높은 해상도를 의미한다.

한다. 이는 전류 수준에 전압의 변화가 크게 의존하고 있음을 의미한다. 한편, 배율과 작업거리의 교호작용을 보면,

표 2. 실험 계획표

	전류	배율	전압	거리	해상도
1	100	1000	5	5	0.5
2	180	1000	5	5	0.5
3	100	5000	5	5	0
4	180	5000	5	5	0.5
5	100	1000	15	5	0.5
6	180	1000	15	5	1
7	100	5000	15	5	0
8	180	5000	15	5	1
9	100	1000	5	15	0
10	180	1000	5	15	0
11	100	5000	5	15	0
12	180	5000	5	15	0.5
13	100	1000	15	15	0
14	180	1000	15	15	1
15	100	5000	15	15	0
16	180	5000	15	15	0.5

3. 결과

그림 1은 주인자의 영향을 보여준다. 그림 1에서와 같이 전류와 작업거리의 수준변화가 전압이나 배율의 변화에 비해 해상도에 크게 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 특히 높은 수준의 전류에서와 낮은 수준의 작업거리에서 해상도가 크게 증가함을 알 수 있다.

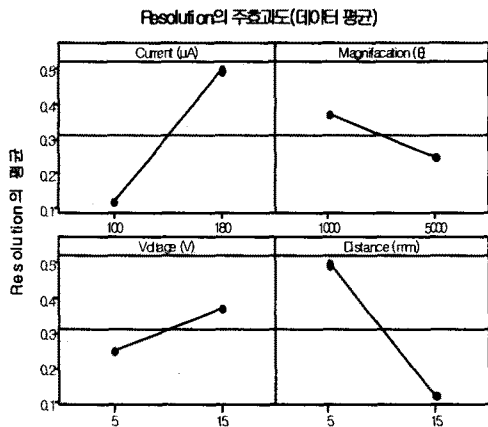


그림1. Resolution에 대한 주효과도

그림 2는 변수들 간의 교호 작용을 보이고 있다. 교호작용이란, 하나의 인자의 효과가 다른 인자의 수준에 따라 변화하여 나타나는 효과를 말한다. 그림 2에서 대부분의 인자 사이에서 교호작용을 보이며, 가장 강한 교호작용을 보이는 경우는 전류와 전압, 그리고 배율과 작업거리의 경우이다. 먼저 전류와 전압사이의 교호작용을 살펴보면, 높은 수준의 전류에서 전압을 증가시키면 해상도가 크게 증가한다. 이와 반대로, 낮은 수준의 전류에서는 전압을 감소시킬수록 해상도가 증가

Resolution에 대한 상호효과도(데이터 평균)

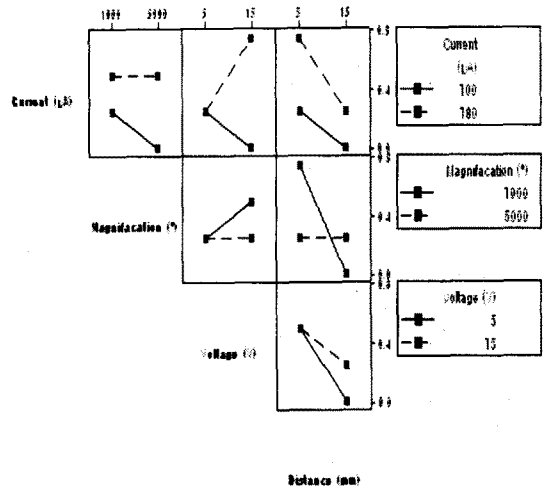


그림2. Resolution에 대한 상호효과도

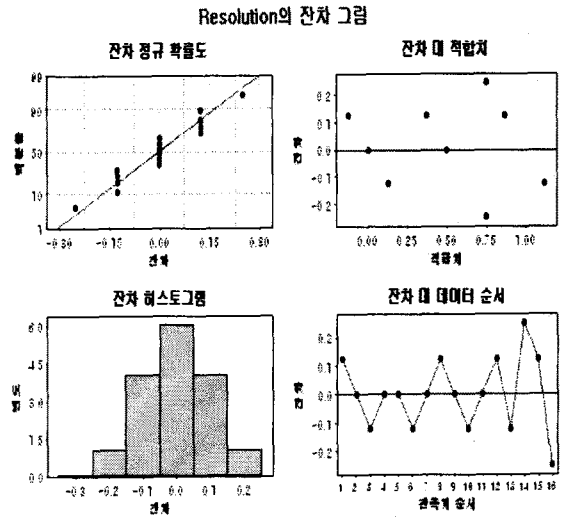


그림3. 회귀모델에 대한 잔차도

배율의 높은 수준에서의 작업거리의 수준변화는 해상도에 영향을 주지 않지만, 낮은 수준의 배율에서는 작업거리를 감소시킬수록 해상도가 급격히 증가한다. 또한, 그림 2를 통해 낮은 수준의 전류에서 다른 인자들(배율, 전압, 작업거리)의 수준이 낮아질수록 해상도가 증가함을 알 수 있고, 대부분의 인자에서 작업거리를 감소시킴에 따라 해상도가 증가함을 확인할 수 있었다. 한편, 높은 수준의 배율은 전압과 작업거리의 변화에 민감하게 반응하지 않음을 알 수 있다.

반응 표면분석을 위해 선형모델과 선형모델을 포함한 다양한 모델을 개발하였다. 여러 모델 중 R<sup>2</sup>가 가장 높은 모델은 완전 2차 모델이었으며, 그때의 R<sup>2</sup>는 88.9% 이었다. 이 수치는 모델의 주어진 데이터에 관한 적합정도를 의미한다. 개발된 모델의 잔차 정보는 그림 3을 통해 확인할 수 있다. 잔

차는 대략 -0.3~0.3 사이에 분포하고 있으며, 빈도 그림에서 알 수 있듯이 대부분 -1.5~1.5 사이에 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 3에서 관측치 순서에 대한 잔차를 알 수 있으며, 잔차의 범위가 크지 않음은 높은  $R^2$ 에 기인한 것으로 해석할 수 있다.

개발된 모델을 이용하여 얻은 반응표면은 그림 4와 5에 도시되어 있다. 그림 4는 해상도를 전류와 전압의 함수로 도시하고 있다. 그림 4에서 전류와 전압이 커지면서 해상도가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 전압이 높은 수준에서의 해상도에 대한 전류변화의 영향이 현격히 크다. 또한 해상도는 높은 수준의 전류에서 전압의 영향을 현저히 받는 것을 확인할 수 있다.

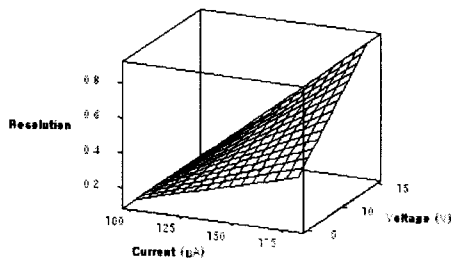


그림4. Current와 Voltage에 대한 표면도

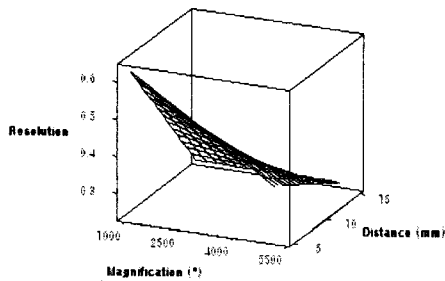


그림5. Magnification와 Distance에 대한 표면도

그림 5는 해상도를 배율과 거리의 함수로 도시하고 있다. 그림 5에서 작업거리에 대한 해상도의 변화는 낮은 배율에서 비교적 높게 작용하며, 작업거리와 배율이 낮을 때 최고의 해상도를 확보할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는, SEM의 해상도에 영향을 주는 변수들을 통계적으로 분석한 결과를 보고하였다. 체계적인 분석을 위해 통계적 실험계획표를 이용하여 데이터를 수집하였다. 주 인자와 상호효과도로부터 각각의 변수들의 해상도에 대한 영향력을 분석하였고, 또한 인자들 사이의 교호작용도 확인하였다. 한편, 반응표면 모델의 개발로 강한 교호작용을 보인 변수들의 해상도에 대한 영향을 보다 자세히 확인 하였다. 개발된 표면 반응 모델은 SEM의 해상도의 최적화에 이용될 수 있다. 또한 SEM 해상도에 영향을 주는 더 많은 인자들에 대한 정보와, 해상도의 값을 보다 더 세세하게 분류한 데이터가 이용된다면 더 효과적인 모델의 개발이 이루어 질 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

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

#### 참 고 문 헌

- [1] Mitsugu Sato, Hideo Todokoro and Mine Nakagawa "An evaluation for the depth of field in SEM image depending on accelerating voltage", J.Electron Microsc., Vol.43, pp.141-145 June 1994.
- [2] Shigeo Okayama, Satoshi Haraichi and Hirofumi Matsuhata, "Reference sample for the evaluation of SEM image resolution at a high magnification-nanometer-scale Au particles on an HOPG substrate", J.Electron Microsc., Vol.54, pp.345-350 Aug 2005.
- [3] 김승재, 김동환, 박만진, 오세규, 장동영, "SEM해상도 증대를 위한 제어회로 및 주사 파형의 조정방안", 한국공작기계학회 논문집, pp.108-111, 2008. 5.
- [4] 김태선, 김우석, 김동환, 김병환, "주사전자현미경 특성의 통계적 해석", 한국표면공학회지, Vol. 40, No. 4, pp.185-189, 2007.
- [5] Minitab, Manual, USA
- [6] 안성환, 이춘만, 신상훈, "고속 파이프 절단기의 절단 조건 선정에 관한 연구", 한국공작기계학회 논문집 Vol.17, No.1, 2008. 2.
- [7] Anchaleeporn W. Lothongkum, Preedara Thumsavate, and Kantanee seangkiatituyth, " Significant Parameters Determined by the MINITAB Pregroom to Affect Ink Abrasion Resistance of Polypropylane Tape and their Application to Surface Flexography Printing", J. Ind. Eng. Chem, Vol. 12, No. 1, pp.44-49, 2006.
- [8] D. C. Montgomery, "Design and Anlysis of Experiments", wiley, Singapore, 1992.