



## FIB-SEM 복합 구조물의 정적·동적 정밀도 해석에 관한 연구

이태홍<sup>a</sup>, 맹희영<sup>b\*</sup>Static and Dynamic Accuracy Analysis of  
FIB-SEM Multifunctional Machine StructureTae Hong Lee<sup>a</sup>, Heeyoung Maeng<sup>b\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Osan University  
45, Cheonghak-ro, Osan, Gyeonggi-do, 18119, Korea<sup>b</sup> Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology  
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	13	December	2018
Revised	12	February	2019
Accepted	13	February	2019

## Keywords:

Focused Ion Beam (FIB)  
Field Emission SEM (FE-SEM)  
Nano-stage and table  
Static and dynamic analysis  
Compound fabricated system

## ABSTRACT

In order to realize nano processing technology using ion beam, it must be accumulated the design of nano-fabrication system, ion focusing mechanism, measurement technology, fabrication of nano-stage and nano tilting device, and processing technology, etc. In this study, three FIB, FE-SEM, and nano-stage components were stored to design the FIB and FE-SEM systems in an integrated structure with a balanced way. The test specimen adopts a design method for the structure that is connected through the tunnel between the chambers. In order to evaluate the influence of the center of gravity, static analysis, and modal analysis on the static and dynamic accuracy of the combined machine.

## 1. 서론

공학적, 물리학적 융복합기술인 이온빔 이용 나노 가공 기술은 집속이온빔(FIB)과 스캔전자빔(SEM)을 하나의 시스템으로 통합하여 구성하는 아이디어에서 시작되었으며<sup>[1,2]</sup>, 나노 가공과 나노 측정을 하나로 통합시켜 나노 가공 정밀도의 수준을 한 단계 끌어 올리는 계기가 되었다<sup>[3,4]</sup>.

집속이온빔과 스캔전자빔을 하나의 시편 표면에서 교차하도록 챔버(chamber)에 설치하면, 작업 공정을 수행하면서 실시간으로 동시에 SEM 이미지를 얻을 수 있게 된다. 이렇게 되면 작업의 정밀도뿐만 아니라 가공 능률과 적용 범위를 대폭 증진시킬 수 있는

큰 장점을 갖게 된다<sup>[5-7]</sup>.

이 기술은 최근 많은 연구를 통해 현장 적용 능력이 높아져서 실용적인 FIB/SEM 통합시스템으로 상용화되었으며, 현재에는 반도체 생산 장비, 의료기기, 전자 정보기기 등 전자 부품의 가공과 측정, 나노 조작 등의 다양한 용도로 널리 사용되고 있다.

일반적으로 이온빔 이용 나노 가공 기술을 구현하는 데에는 나노 가공시스템의 설계와 이온 집속기구의 고안, 전자 빔 기반 복합 나노 형상 측정기술, 진공용 나노 스테이지와 나노 틸팅 장치의 제작, 그리고 이에 수반한 나노급 가공 공정 기술이 축적되어야 한다<sup>[8-11]</sup>.

본 연구에서는 FIB와 FE-SEM 시스템을 통합된 구조로 설 계하기 위하여 3가지의 FIB, FE-SEM (Field Emission SEM), 나노

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6363

Fax: +82-2-978-6878

E-mail address: maeng@seoultech.ac.kr (Heeyoung Maeng).

스테이지(nano-stage) 구성 요소를 균형적으로 축적비를 정하여 단순 통합시켜 설계하였다. 이 모델은 독립된 2개 챔버를 사용하는 2챔버(chamber) + 2컬럼(column) 방식으로 시험편의 이동은 챔버 사이의 터널을 통하여 이동하는 유형이며, 터널을 통해 각각의 독립된 공정이 연결되도록 설계하였다.

이 구조는 작동 과정에서 간섭을 일으키지 않는 적절한 거리를 갖는 장점이 있으나, 시험편의 세팅 시간, 각 챔버 사이의 진공도 조절 시간에 대한 제약 조건을 해결해야 하는 어려운 점이 있다.

이러한 점을 보완하기 위해 일부 상용 시스템들에서는 FIB와 FE-SEM의 경통부를 Y형으로 배치하고 2가지의 공정이 격리된 공간에서 수행되면서 진공 흡입 흐름을 잘 제어하면서 격리대를 설치하여 가공 칩에 의한 오염의 문제도 해소될 수 있도록 하기도 한다. 그러나 이 구조의 통합 모델에 있어서는 나노 스테이지의 이동에 따라 발생할 수 있는 정적·동적 변형이 가공정밀도에 영향을 주는 경우가 많고, 서로 중량이 다른 2개의 경통부가 균형적으로 잘 배치되어야 하는 애로점이 있다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 FIB와 FE-SEM의 경통부를 수직으로 평행하게 배치하는 방식을 채택하면서 시험편은 챔버 사이의 터널을 통하여 연결되는 구조로 설계하였고, 이러한 구조 방식으로 최종 설계된 FIB+SEM 통합시스템 모델에 대해 무게 중심과 정적 해석, 모달 해석(modal-analysis) 등을 실시하여 복합가공기의 정적·동적 정밀도에 미치는 영향성을 평가하고자 하였다.

## 2. 기본 해석 조건과 모델링

본 연구는 기본 해석을 위한 모델링 대상으로 하나의 챔버에 2개의 칼럼이 있는 구조를 사용하였으며, 초기 설계에 사용되었던 FIB

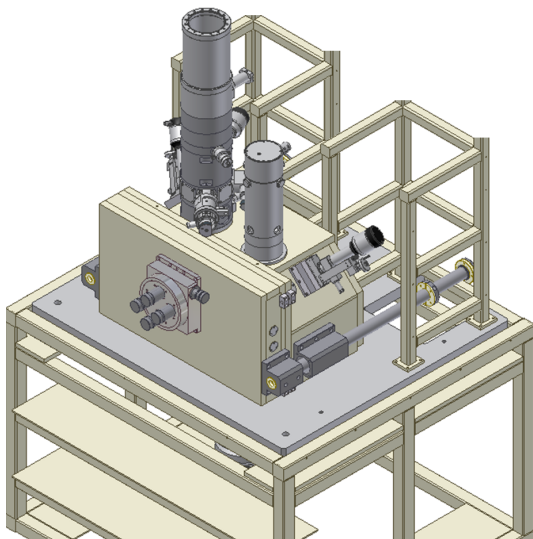


Fig. 1 Modeling result of FIB+SEM integrated system

와 FE-SEM 사이의 거리가 430 mm인 모델과, 나노 스테이지의 이동으로 인한 가공/측정 오차를 최소화할 수 있는 FIB와 FE-SEM 사이의 거리를 250 mm로 최소화한 모델을 사용하였다.

이때 해석을 위해 사용된 모델은 Table 1과 같은 총 4가지 모델로 하였다. 각각의 이들 시스템에 대해서는 PRO/E를 사용하여 모델링 하였고, 통합 시스템은 Fig. 1과 같이 FIB, FE-SEM, 챔버, 나노 스테이지와 랙(rack), 통합시스템을 지지하는 4개의 방진용 에어 스프링으로 구성되도록 모델링하였다.

해석은 4개의 모델에 대해 우선 PRO/E를 사용하여 각각의 모델에 대한 무게중심의 위치를 계산한 다음, ANSYS를 사용하여 정적 해석과 모달 해석을 수행하였다. 정적 해석은 나노 스테이지의 위치가 FE-SEM 밑에 있을 경우와 FIB 밑에 있을 경우에 대한 정적 처짐을 구하는 것으로 하였고, 모달 해석은 각각의 통합 시스템에 대해 진동 해석을 수행하여 고유 진동수와 그에 대한 고유 모드를 도출하는 것으로 하였다.

각 해석을 위해 사용한 시스템의 재질 및 물성치는 Table 2와 같다.

Fig. 2는 통합 시스템의 무게중심 위치와 자중에 의한 처짐 해석, 그리고 모달 해석을 수행하기 위해 PRO/E로 모델링을 한 것을 보여주고 있다. 전체 통합시스템을 구성하는 챔버, FIB, FE-SEM, 나노 스테이지 및 랙 등은 모두 SUS 304의 재질이며, 나노 스테이지는 FIB와 FE-SEM 사이를 움직이기 위해 랙을 모델링에 추가하

Table 1 The 4 kinds of model used for analysis

Kinds	Distance of gravity center between FIB and FE-SEM	Location of nano-stage
Model 1	430 mm	Lower of FIB
Model 2	430 mm	Lower of FE-SEM
Model 3	250 mm	Lower of FIB
Model 4	250 mm	Lower of FE-SEM

Table 2 Mechanical properties of system components

Kinds	Distance of gravity center between FIB and FE-SEM
Material	SUS 304
Young's modulus (SI units)	200 GPa ( = $2.0 \times 10^{11}$ N/m <sup>2</sup> = $2.0 \times 10^{12}$ (N · m/sec <sup>2</sup> )/m <sup>2</sup> = $2.0 \times 10^9$ N/mm · sec <sup>2</sup> )
Density	7.8 g/cc ( = $7.8 \times 0.01$ (N/1000 mm <sup>3</sup> ) = $7.8 \times 10^{-5}$ (N/mm <sup>3</sup> ) )
Stiffness of air spring	$K_x, K_y = 13.7284 \times e^7$ N/sec <sup>2</sup> $K_z = 13.7284 \times e^8$ N/sec <sup>2</sup>

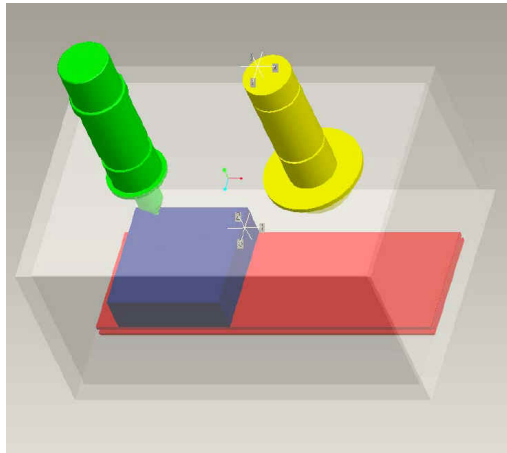


Fig. 2 Modeling result of integrated system

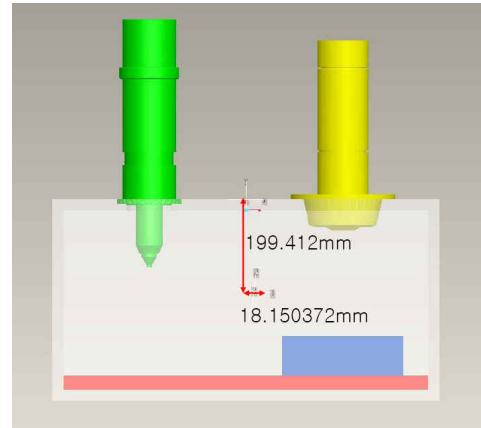


Fig. 4 Location of gravity center for model 2

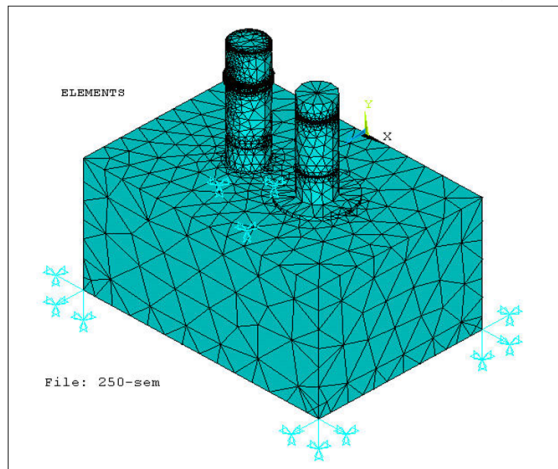


Fig. 3 ANSYS modeling for the model 3

여 완성하였으며, 나노 스테이지의 전체 무게는 40 kg로 하였다.

정적 및 모달 해석을 수행하는 과정에서는 절점이 8개인 3차원 Solid 185를 사용하여 모델링하였고, 또한 4개의 방진용 에어 스프링은 스프링요소인 Combination 14를 사용하여 모델링을 하였다. Fig. 3은 FIB와 FE-SEM 사이의 거리가 250 mm인 통합시스템의 model 3에 대한 ANSYS 모델 설정 과정을 보여 주고 있다.

### 3. 통합 시스템의 무게 중심 위치

통합 시스템의 무게 중심의 위치를 구한 결과는 Table 3과 같으며, Fig. 4에서는 model 2에 대해 무게 중심의 x, y값을 산출한 결과를 보여준 것이다. 모델 1에서 모델 4까지 총 4개의 모델에 대해 무게중심의 위치를 Table 1에 제시하였다.

나노 스테이지의 위치에 따라 무게중심의 x의 위치가 변하고 있음을 알 수 있으며, FIB가 FE-SEM보다 약간 무거우므로 FIB와 FE-SEM 사이의 거리에 상관없이 나노 스테이지가 FIB 밑에 위치

Table 3 Gravity center locatuin for each model

Axis	Model 1	Model 2
X	18.55945 mm	18.150372 mm
Y	199.412 mm	199.412 mm
Z	298.50016 mm	298.50016 mm
Axis	Model 3	Model 4
X	10.790378 mm	10.552542 mm
Y	199.412 mm	199.412 mm
Z	297.50009 mm	298.50009 mm

할 때 무게 중심이 x축으로 치우치는 현상을 나타내었다. 또한 FE-SEM과 FIB 사이의 거리가 작을수록 그 값도 작아짐을 알 수 있었다. 그렇지만 무게중심의 y 및 z 값의 변화는 없다는 것도 확인 되고 있다.

### 4. 통합 시스템의 정적 해석 결과

모델링된 결과 도면을 ANSYS에서 불러들여 4개의 모델에 대해 통합 시스템 자체 무게에 의한 처짐량을 계산한 결과는 Table 4와 같다. 그리고 Fig. 5는 model 1에 대한 자중에 의한 처짐 결과를 나타내고 있는 것으로, 최대 처짐량은 0.012116 mm를 나타내고 있다.

이 결과에서 알 수 있듯이 모델 1의 경우는 나노 스테이지가 FIB 밑에 위치하므로 왼쪽의 경통 부위가 상대적으로 오른쪽 경통 부위 보다 처짐량이 많았고, 이에 따라 응력은 지지부에 많이 집중되고 있음을 나타내고 있다. 4개의 모델에 대한 최대 처짐량을 비교하여 보면, FIB와 FE-SEM 사이의 중심거리에 상관없이 그 값이 11 nm~12 nm 사이의 값을 보여주고 있다. 그러나 전체 처짐량의 분포를 보면 중심 거리가 작을수록 처짐량은 다소 우수한 것 현상을 보이고 있다.



Table 4 Deflection analysis due to gravity

Deflection	Model 1	Model 2
Maximum value	0.0121116 mm	0.011926 mm
Deflection	Model 3	Model 4
Maximum value	0.011761 mm	0.012304 mm

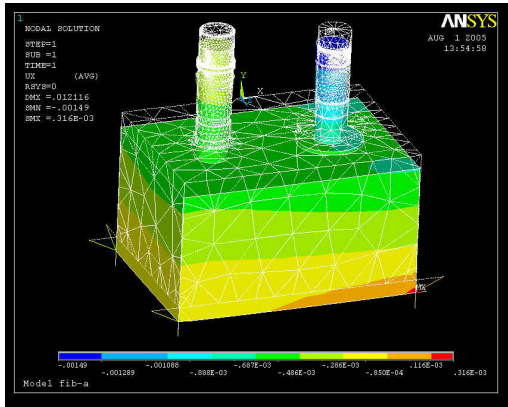


Fig. 5 Result of deflection for the model 1

### 5. 통합 시스템의 모달 해석 결과

통합 시스템의 모달 해석은 앞 절과 같이 4개의 모델을 대상으로 하였으며, 각 모델의 고유진동수와 그와 관련된 고유 모드 형상을 도출하는 것으로 하였다.

Fig. 6은 모델 1의 경우에 대한 관련 고유 모드 형상의 사례를 비교하여 보여준 것이며, Table 4은 각 모델에 대해 해석된 고유진동수를 비교하여 나타낸 결과이다.

각 고유진동수에 대응하는 고유 모드 형상에 대한 특성을 살펴보면 다음과 같다.

1차 모드는 FIB와 FE-SEM의 z축에 대한 1차 굽힘 모드(out-of-phase)로 상대적으로 FIB의 움직임이 크며, 2차 모드의 경우에도 상대적으로 FIB의 움직임이 큰 데, 이는 FIB와 FE-SEM의 x축에 대한 1차 굽힘 모드(out-of-phase)이다. 한편 3차 모드는 FIB와 FE-SEM의 z축에 대한 1차 굽힘 모드(in-phase)로 FE-SEM의 움직임이 상대적으로 크며, 4차 모드는 FIB와 FE-SEM의 x축에 대한 1차 굽힘 모드(in-phase)이다. 그리고 5차 모드는 챔버 윗면의 1차 굽힘 모드로 상대적으로 FIB쪽 면의 움직임이 크며, 6차 모드는 챔버 윗면의 2차 굽힘 모드, 7차 모드는 챔버 전체의 굽힘 모드로 나타난다. 또한 8차 모드는 챔버 전체의 z축 1차 굽힘 모드와 FE-SEM의 z축 2차 굽힘 모드를 나타낸다.

또한 9차 모드는 챔버 전체의 z축 1차 굽힘 모드와 FIB의 z축 2차 굽힘 모드를 나타내며, 10차 모드는 챔버 전체의 x축 1차 비틀림 모드와 FIB 및 FE-SEM의 x축 2차 굽힘 모드(out-of-phase)를

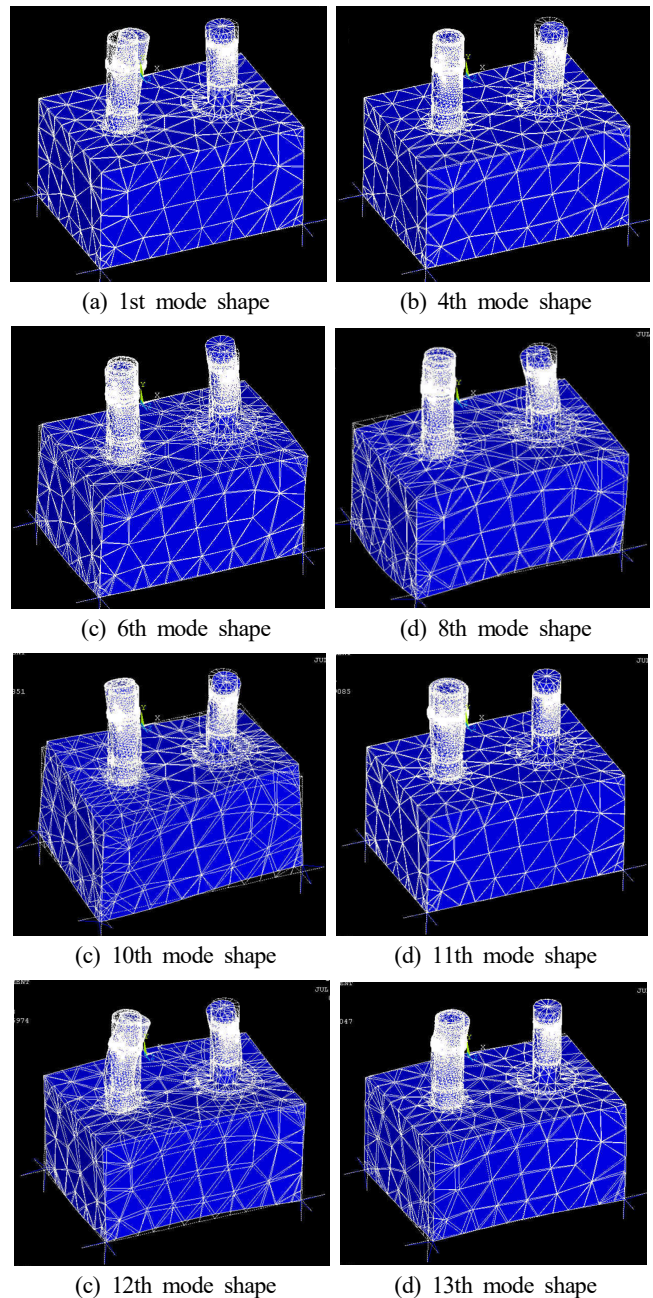


Fig. 6 Natural mode shape at the model 1

나타낸다.

또한 11차 모드는 FIB의 y축 1차 비틀림 모드, 12차 모드는 챔버 전체의 z축 1차 굽힘 모드와 FIB 및 FE-SEM의 z축 2차 굽힘 모드(out-of-phase), 13차 모드는 챔버의 y축 1차 굽힘 모드와 FIB의 1차 비틀림 모드를, 14차 모드는 챔버의 y축 1차 굽힘 모드와 FE-SEM의 1차 비틀림 모드 (in-phase)를 각각 나타낸 것이다.

FIB와 FE-SEM 만의 1차 굽힘 모드가 355 Hz에서 598 Hz 주파수 대역에서 4개의 고유 모드 형상을 보여주고 있으며, 챔버만의 굽힘 모드는 996 Hz에서 1,196 Hz 주파수 대역에서 3개의 모드

Table 5 Comparison of modal analysis result

Mode	Mode 1 (Hz)	Mode 2 (Hz)	Mode 3 (Hz)	Mode 4 (Hz)
1	355.18	337.22	369.02	306.26
2	381.64	371.02	388.32	335.33
3	564.51	536.98	590.18	504.65
4	597.84	570.08	603.39	521.17
5	996.74	838.98	1,020.6	698.01
6	1,162.2	1,041.4	1,235.8	991.40
7	1,195.3	1,056.7	1,307.6	1,014.4
8	1,415.3	1,281.8	1,511.4	1,172.1
9	1,490.7	1,303.4	1,567.4	1,264.8
10	1,602.0	1,524.4	1,707.8	1,532.9
11	1,827.0	1,733.8	1,918.7	1,760.2
12	1,903.3	1,823.0	1,980.6	1,804.6
13	1,962.2	1,870.5	2,096.8	1,882.4
14	1,988.1	1,929.9	2,159.5	1,930.4

형상을 나타내며, 8차 모드이상 즉, 1,415 Hz 이상에서는 챔버와 FIB, 챔버와 FE-SEM 또는 챔버와 FIB 및 FE-SEM의 굽힘 및 비틀림 모드가 혼합된 복잡한 모드 형상을 나타내고 있다. 그리고 FIB만의 y축 1차 비틀림 모드는 1,827 Hz에서 나타났다.

한편 모델 2에 대한 고유진동수는, 모델 1과 비교하여 볼 때, 모든 모드 형상에서 고유진동수의 크기가 상당히 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 나노 스테이지의 위치의 영향으로 모델 1의 11차 고유진동수의 고유 모드 형상이 모델 2에서는 12차 고유진동수의 고유 모드 형상에서, 모델 1의 12차 고유진동수의 고유 모드 형상은 모델 2에서는 11차에서 발생되었다. 이런 현상은 13차와 14차 고유 형상 모드에서도 동일하게 나타났다.

아울러 모델 3에 대한 고유진동수를 모델 1의 경우와 비교해 볼 때, 각 모드의 고유진동수 크기가 상당히 증가하였으며, 이는 FIB와 FE-SEM 사이의 거리가 짧을수록 동일한 크기나 무게를 갖는 구성요소로 구성된 통합 시스템의 강성이 증대되는 효과가 있다는 것으로 보여주고 있다.

그리고 모델 4에 대한 고유진동수를 모델 2의 경우와 비교해 보면, 1차에서 9차 사이의 탄성 모드들에서 고유진동수의 크기가 상당히 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 10차 및 11차 모드 형상의 고유진동수는 그 크기가 반대로 증가하고 있으며, FIB의 1차 비틀림 모드는 모델 2에서는 12차에서 발생하고 모델 4에서는 13차 모드 형상에 나타나는 현상을 보였다. 또한 모델 2의 13차 고유진동수에서 도출되었던 모드 형상은 모델 4에서는 12차 고유진동수에서 보여주었다. 그리고 Fig. 7과 같이 14차 고유진동수의 고유 모드 형상은 모델 2에서는 볼 수 없었던 새로운 모드 형상으로 생성되고 있는 바, 나노 스테이지의 위치 변화 및 FE-SEM과 FIB 사이의 거리의 변화는 통합 시스템의 고차 모드에서 고유진동수

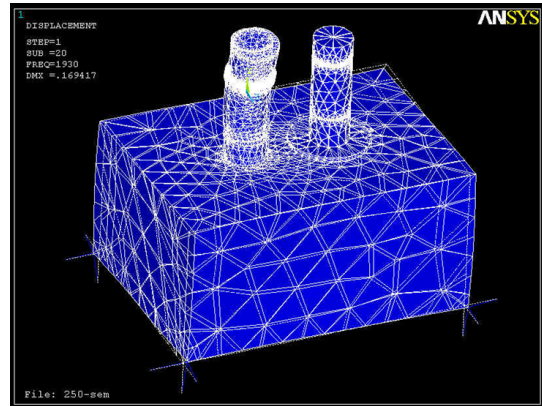


Fig. 7 Natural 14th mode shape at the model 4

및 모드 형상의 변화에 민감한 인자임을 알 수 있다.

또한 나노 스테이지의 위치에 따른 고유 모드 형상들의 변화를 살펴보면, 나노 스테이지의 위치가 FIB에 있을 때보다 FE-SEM에 있을 때 고유진동수의 크기들이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 강체모드와 관련된 고유진동수들의 변화는 거의 없는 특징이 있다. 전반적으로 탄성모드들이 300 Hz가 넘는 주파수 대역에서 발생되고 있으며, 특히 FIB와 FE-SEM 그리고 챔버가 같이 움직이는 탄성모드들은 1,000 Hz 이상의 주파수 대역에서 생성되기 때문에 모터 또는 외부 및 내부의 가진 요소들에 의해 통합 시스템이 교란을 일으킬 위험 요소는 없을 것으로 본다.

## 6. 결론

본 연구는 FIB와 FE-SEM의 경통부를 수직으로 평행하게 배치하는 방식을 채택하면서 시험편은 챔버 사이의 터널을 통해 연결되는 구조의 최종 설계된 FIB+SEM 통합시스템 모델을 대상으로 무게 중심과 정적 해석, 모달 해석 등을 실시하여 복합가공기의 정적·동적 정밀도에 미치는 영향성을 평가하였다.

나노 스테이지가 FIB 밑에 위치할 때는 x축으로의 치우침이 다소 크게 나타났고, FE-SEM과 FIB 사이의 거리가 작을수록 그 값이 작게 나타났으나 통합시스템의 작동과정에서 영향을 주는 내부 및 외부의 오차 발생 요인과 비교할 때에는 영향을 주지 않는 작은 크기임을 검증할 수 있었다. 그리고 최대 처짐량은 10 nm 정도의 작은 값을 갖고 있어서 FIB와 FE-SEM 사이의 중심거리에 따른 자중에 의한 처짐은 가공기의 정밀도 범위 이내이어서 그 영향은 무시할 수 있음을 알 수 있었다. 한편 동적 특성에 있어서는 나노 스테이지의 위치가 FIB에 있을 때보다 FE-SEM에 있을 때가 탄성 모드들과 관련 고유진동수의 크기들이 작게 나타나고 있으며, 전반적으로 탄성모드들이 300 Hz가 넘는 주파수 대역에서 발생되고 있음을 알 수 있었다.

또한 FIB와 FE-SEM 그리고 챔버가 같이 움직이는 탄성 모드들은 1,000 Hz 이상의 주파수 대역에서 생성되는 것으로 보아 통합 시스템에 미치는 외부 진동 및 내부 진동에 의한 영향은 매우 적을 것으로 판단할 수 있었다.

## 후 기

이 연구논문은 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(2019).

## References

- [1] Taniguchi, N., 1996, Nanotechnology - Integrated Processing Systems for Ultra-Precision and Ultra-fine Products, Oxford Univ. Press., London.
- [2] Cleland, A. N., 2003, Foundations of Nanomechanics, Springer, London.
- [3] Maeng, H. Y., Kim, S. G., 2005, Design and Modal Analysis of FIB-SEM Compound Machine Structure, Proceedings of KSMTE Spring conference, 14-19.
- [4] Reyntjens, S. R., Puers, R., 2001, A review of focused ion beam application in microsystem technology, J. Micromechanics and Microengineering, 11 297-300.
- [5] Chun, D. M., Kim, M. H., Lee, J. C., Ahn, S. H., 2008, A Nano Particle Deposition System for Ceramic and Metal Coating at Room Temperature and Low Vacuum Conditions, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 9:1 51-53.
- [6] Tseng A. A., Chen K., Chen C. D., Ma K. J., 2003, Electron Beam Lithography in Nanoscale Fabrication: Recent Development, IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 26:2 141-149.
- [7] Ahn, S. H., Chun, D. M., Kim, C. S., 2011, Nano-scale Hybrid Manufacturing Process by Nano Particle Deposition System (NPDS) and Focused Ion Beam (FIB), CIRP Annals-Manufacturing Technology, 60:1 583-586.
- [8] Park, K. S., Kim, T. S., Lee, W. S., Joe, H. E., Min, B. K., Park, Y. P., Yang, H. S., Kang, S. M., Park, N. C., 2012, Application of solid immersion lens-based near-field recording technology to high-speed plasmonic nanolithography, Jpn. J. Appl. Phys., 51:8S2 08JF01.
- [9] Kim, C. S., Jang, D. Y., Ahn, S. H., 2012, Developments in Micro/Nanoscale Fabrication by Focused Ion Beams, Vacuum, 86:6 1014-1035.
- [10] Fu, X. L., Li, P. G., Jin, A. Z., Chen, L. M., Yanga, H. F., Li, L. H., Tanga, W.H., Cuic, Z., 2005, Gas-assisted etching of niobium with focused ion beam, Microelectronic Engineering, 78:1 29-33.
- [11] Kim, C. S., Ahn, S. H., Jang, D. Y., 2010, Nanoscale effects in carbon structures fabricated using focused ion beam-chemical vapor deposition. Thin Solid Films, 518:18 5177-5182.