

이온 빔 이용 통합시스템의 제작 및 구조해석

김성걸*

(논문접수일 2007. 1. 17, 심사완료일 2007. 4. 4)

Structural Analysis and Manufacturing of the Integrated System using Ion Beam

Kim, Seong Keol*

Abstract

Generally, the integrated system using ion beam consists of 4 major parts, which are SEM, FIB, nano stage, and chamber. Among them, the nano stage and the chamber are designed and manufactured. The whole systems are integrated. Also, FE models are built to perform modal analyses of each part and the whole integrated system with a commercial program. Through these analyses, it is found that each part and the integrated system are very safe against vibrations including external excitations from ground and any others, because their natural frequencies are much larger than frequencies of external excitations. Also, isolation of ground induced vibration is considered.

Key Words : Integrated System(통합시스템), SEM, FIB, Chamber(챔버), Modal Analysis(모드해석), Ground Induced Vibration(지반진동)

1. 서론

이온 빔을 이용한 통합 시스템은 일반적으로 나노 크기의 시편 등을 측정하여 보여주는 SEM(Scanning Electron Microscope), 나노 크기의 가공을 담당하는 FIB(Focused Ion Beam), 나노 크기의 시료를 이송을 하는 나노 스테이지(stage), 그리고 진공상태에서 나노 스테이지를 내부에 장착하고 있는 챔버(chamber) 등으로 구성되어 있다⁽¹⁾. SEM과 FIB가 챔버에 장착되는 형태에 따라 통합시스템을 크게 두가지로 분류할 수 있으며, 하나는 SEM과 FIB가 y자 형태로 챔버

에 장착된 통합시스템과 다른 하나는 SEM과 FIB가 각각 독립적으로 챔버에 일정 간격으로 장착되어 있는 통합시스템이다⁽²⁾.

본 연구에서는 후자의 통합시스템을 채택하였으며, SEM^(3,4)과 FIB⁽⁵⁾은 다른 연구팀에서 제작 개발되었다. 그러나 시스템의 통합화를 위해 내부는 비어있고, 기하학적 크기는 동일한 SEM과 FIB를 제작하였으며, 통합 시스템용 나노 스테이지^(6,7) 및 챔버를 직접 설계 제작한다.

2개의 컬럼과 1개의 챔버로 구성된 통합 시스템에 대하여, 실제 제작하기 전에 전체 시스템의 동적안정성, 특히 외부

* 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 (rhett@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

진동 및 자체진동에 대한 안정성을 평가하기 위한 이론 모드 해석⁽⁸⁾을 다양한 조건 하에서 수행한다. 본 통합시스템은 FIB와 SEM 그리고 나노 스테이지와 챔버로 구성되어 있다. 모드 해석을 위해 CAE 상용 프로그램을 사용하였고, 각 부품인 FIB, SEM, 그리고 나노 스테이지가 장착되어 있는 챔버 등에 대하여 모드해석을 수행한다. 또한 전체 통합 시스템에 대한 모드해석에서는, 제작된 나노 스테이지가 2 종류 이어서 각각에 대한 해석을 실시하며, 나노 스테이지의 위치가 SEM 밑에 있을 경우와 FIB에 있을 경우 등 각각에 대해서도 전체 통합시스템에 대한 해석을 한다⁽⁹⁾.

모든 이론해석을 수행한 후 SEM, FIB, 나노 스테이지 그리고 챔버를 각각 제작하여 최종적으로 통합화 작업을 한다.

2. 각 부품의 모드 해석 및 결과

2.1 SEM의 모드 해석

SEM의 형상은 Fig. 1과 같으며, 길이는 587.1mm이고, 중간 부분의 직경은 150mm이다. SEM의 외부와 내부는 실제의 SEM과 거의 동일하게 모델링을 하였다. 또한 SEM에 사용된 재료는 SUS304이고, 이에 대한 물성치는 Table 1과 같다.

본 해석은 솔리드(solid) 요소를 사용하여 모델링을 하였고, 경계치 조건은 가장 일반적인 조건인 자유단을 선택하였다. 모드해석 결과는 Table 2와 같으며, Fig. 2 ~ Fig. 4는 대표적인 모드형상을 나타낸다.

Table 1 Material properties of SEM

Material	Elastic modulus	Density
SUS304	206GPa	7,800kg/m ³

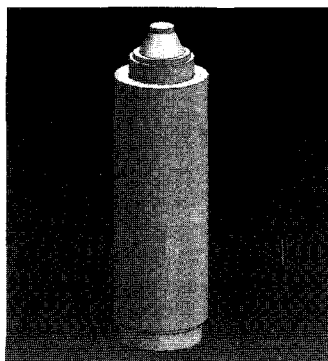


Fig. 1 Schematic drawing of SEM

Table 2 Results of modal analysis of SEM

No. of mode	Natural frequencies(Hz)
1	2,461.9
2	2,462.9
3	3,627.8
4	5,114.5
5	5,327.8
6	5,342.5
7	7,245.3
8	8,333.2
9	8,344.5

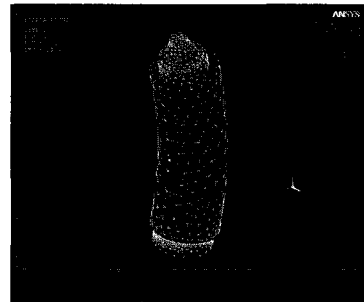


Fig. 2 The 1st mode shape of SEM

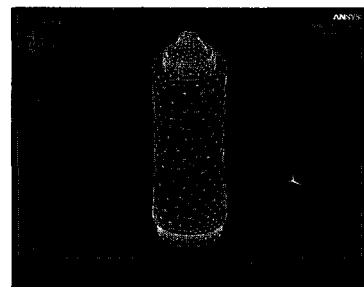


Fig. 3 The 3rd mode shape of SEM



Fig. 4 The 5th mode shape of SEM

첫 번째 모드와 두 번째 모드는 SEM이 축대칭이므로 x축과 z축에 대한 1차 굽힘 모드가 고유진동수의 차이가 거의 없이 나타나고 있다. 3차 모드는 1차 비틀림이고, 5차와 6차는 대칭 모드로 x축과 z축에 대한 2차 굽힘 모드이다. 또한, 7차는 2차 비틀림 모드이며, 8차와 9차는 대칭모드로 x축과 z축에 대한 3차 굽힘 모드이다. SEM에 대한 모드해석 결과에서 알 수 있듯이 2,400Hz 이상에서 고유진동수들이 계산되었다.

2.2 FIB의 모드 해석

FIB에 대한 형상은 Fig. 5와 같으며, 길이는 챔버 내부에 들어가서 안 보이는 부분까지 합하여 539.1mm이고, 챔버 위부분의 길이는 376.5mm이며, 원통 부분의 직경은 120mm이다. FIB의 외부와 내부는 SEM과 같이 실제의 FIB과 거의 동일하게 모델링을 하였다. 또한 FIB에 사용된 재질은 SUS304로 SEM과 동일하다.

본 해석 역시 솔리드(solid) 요소를 사용하여 모델링을 하였고, 경계치 조건은 자유단을 선택하였다. 모드해석 결과는

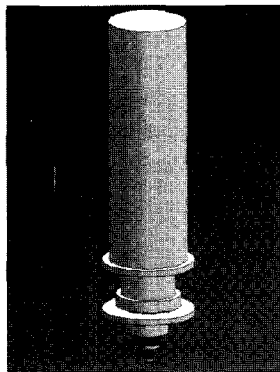


Fig. 5 Schematic drawing of a FIB

Table 3 Results of modal analysis of FIB

No. of mode	Natural frequencies(Hz)
1	2,118.0
2	2,126.8
3	3,734.5
4	4,320.6
5	4,330.0
6	5,454.2
7	6,069.7
8	6,993.9
9	7,004.3

Table 3과 같다.

해석 결과 나타난 모드형상들이 앞의 SEM 해석과 동일한 모드형상들을 나타내었는데, 이는 SEM과 FIB가 유사한 원통 형상에 기인한다. 그러나 각 모드의 순서는 SEM과 다소 다르게 나타났다. 첫 번째 모드와 두 번째 모드는 FIB가 축대칭이므로 x축과 z축에 대한 1차 굽힘 모드가 약간의 고유진동수의 차이를 보이면서 나타나고 있다. 3차 모드는 1차 비틀림이고, 4차와 5차는 대칭모드로 x축과 z축에 대한 2차 굽힘 모드이다. 또한, 7차는 2차 비틀림 모드이며, 8차와 9차는 대칭모드로 x축과 z축에 대한 3차 굽힘 모드이다. FIB에 대한 모드해석 결과에서 SEM보다는 각각의 고유진동수들이 작게 나타났으나, 2,100Hz 이상에서 고유진동수들이 나타나고 있다.

2.3 챔버의 모드 해석

챔버에는 FIB와 SEM사이에서 시편 또는 제품을 이동시키는 나노 스테이지와 랙이 내부에 장착되어 있으나, 본 해

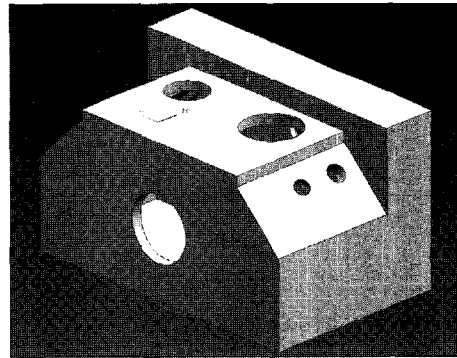


Fig. 6 Schematic drawing of a chamber

Table 4 Results of modal analysis of chamber

No. of mode	Natural frequencies(Hz)
1	1,124.7
2	1,326.6
3	1,423.6
4	1,548.3
5	1,609.7
6	1,650.7
7	1,824.7
8	1,863.0
9	1,971.3

석에서는 챔버 단품의 해석을 위해 제거하였다. Fig. 6과 같이 챔버 뒷면의 크기는 폭 711mm, 높이 414mm이고, 옆면은 폭 315mm, 높이 202mm이다. 또한, FIB와 SEM이 장착되는 윗면은 폭이 460mm이고, SEM과 FIB 사이의 중심거리는 215.5mm이다.

챔버 역시 솔리드 요소로 모델링하였고, SEM 및 FIB와 동일한 재질을 사용하였다. 모드해석 결과는 Table 4와 같으며, Fig. 7~Fig. 8에는 대표적인 모드형상을 보여준다.

1차 모드는 챔버 전체의 1차 굽힘모드이고, 2차는 챔버 뒷면과 윗면의 동일한 위상(in-phase) 1차 굽힘 모드이다. 3차는 x방향 비틀림 모드이고, 5차는 챔버 뒷면과 윗면의 반대 위상(out-of-phase) 1차 굽힘 모드이다. 또한, 6차는 챔버 뒷면과 윗면의 반대 위상(out-of-phase) 2차 굽힘 모드이고, 8차는 챔버 바닥면의 1차 굽힘 모드를 나타낸다. 챔버의 고유진동수들은 1,100Hz 이상에서 계산되었으나, SEM과 FIB의 고유진동수들에 비해 낮게 계산되었다.

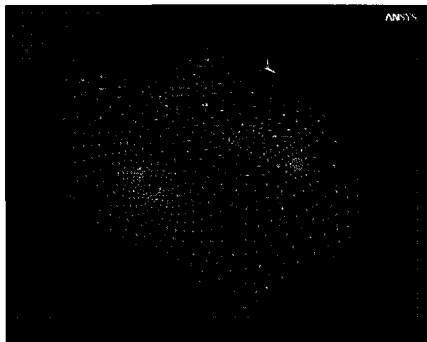


Fig. 7 The 1st mode shape of chamber

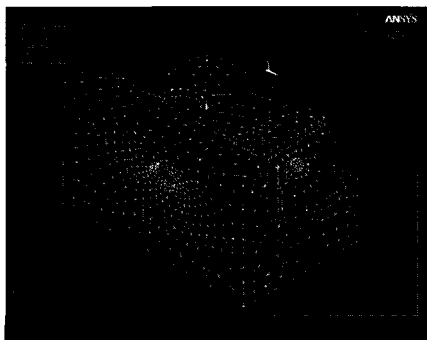


Fig. 8 The 4th mode shape of chamber

3. 통합 시스템의 모드 해석 및 결과

3.1 나노 스테이지 위치에 따른 모드 해석

나노 스테이지는 전술한 바와 같이 FIB와 SEM 사이를 이동하면서 동시에 시편이나 제품을 정확하게 FIB와 SEM의 위치에 맞게 이송을 해야 한다. 그러나 실제 측정을 하기

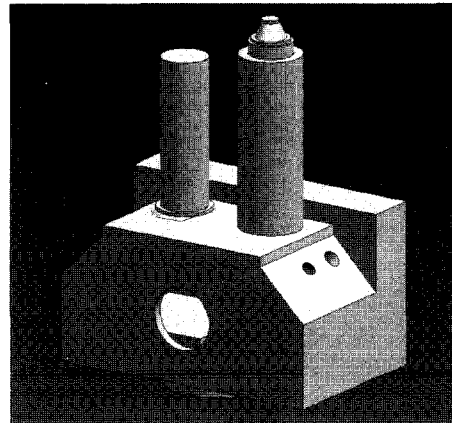


Fig. 9 Schematic drawing of integrated system

Table 5 Results of modal analysis of integrated system (by change of location of nano-stage, 490N)

No. of mode	Natural frequencies(Hz)	
	SEM	FIB
1	240.04	238.20
2	292.44	291.06
3	432.54	432.41
4	442.98	442.69
5	728.50	738.64
6	952.57	935.16
7	1,088.3	1,108.1
8	1,284.6	1,338.5
9	1,676.1	1,688.5
10	2,014.9	2,000.0
11	2,031.3	2,026.2
12	2,060.4	2,058.1
13	2,099.4	2,098.1
14	2,118.6	2,111.8
15	2,242.0	2,204.5
16	2,292.7	2,287.5
17	2,314.7	2,307.0
18	2,402.8	2,391.7

나 가공을 할 때는 나노 스테이지가 이동하지 않고 고정되어 있으므로 나노 스테이지가 FIB 및 SEM에 각각 위치할 때에 대해 모드 해석을 수행하였다. 본 해석을 위해 1차로 제작하여 사용된 나노 스테이지의 무게는 490N이며, 모드 해석 결과는 Table 5에 제시하였다. Fig. 9는 FIB, SEM, 그리고 내

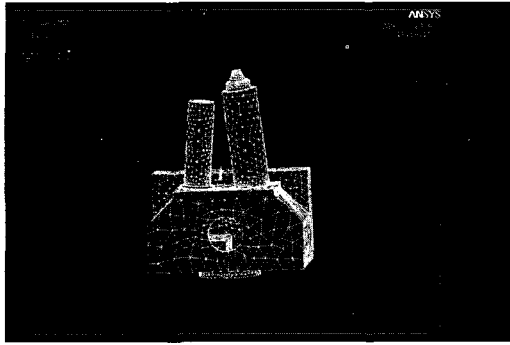


Fig. 10 The 1st mode of integrated system(FIB)

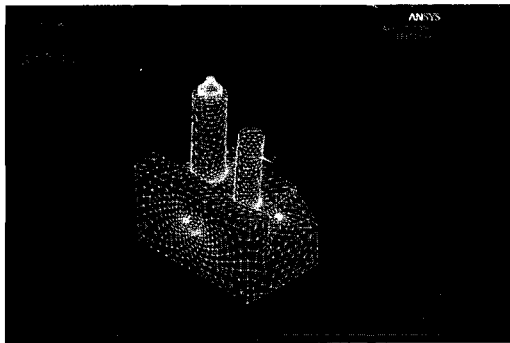


Fig. 11 The 6th mode of integrated system(FIB)

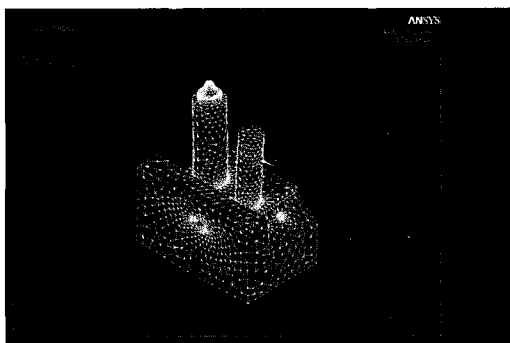


Fig. 12 The 8th mode of integrated system(FIB)

부에 나노 스테이지가 장착된 챔버 등으로 구성된 통합시스템의 형상을 나타내고 있으며, Fig. 10~Fig. 12는 대표적인 모드 형상을 보여주고 있다.

해석결과, 1차 모드부터 4차까지는 FIB와 SEM이 챔버의 윗면과 연동하여 대칭 1차 굽힘 모드를 나타내고 있고, 5차와 6차는 챔버의 윗면의 지역 모드를 보여주었다. 7차와 8차는 챔버의 1차 굽힘 모드이며, 9차는 FIB의 비틀림 모드가 챔버의 윗면과 연동되어 나타났다. 또한, 10차부터 12차 모드에서는, FIB와 SEM 그리고 챔버가 서로 연동되어 굽힘과 비틀림 등의 모드들이 계산되었다. 13차와 14차 모드는 FIB의 대칭 2차 굽힘 모드와 SEM의 1차 비틀림 모드 그리고 챔버의 1차 굽힘 모드가 나타났다. 15차 이상에서는 SEM의 대칭 2차 굽힘 모드와 FIB의 대칭 2차 굽힘 모드가 연동된 모드들이 나타났다. 통합 시스템에서는 각 단품에 대한 해석에 비해 나노 스테이지의 위치에 상관없이 다소 낮은 230Hz 이상에서 고유진동수들이 계산되었다. 이는 모드형상 결과에서 알 수 있듯이 챔버 윗면의 운동과 SEM 및 FIB의 1차 굽힘 운동이 연동된 모드를 나타내므로, 챔버에 FIB와 SEM이 장착된 것이 강성증대 효과보다는 질량증대 효과를 나타낸 결과이다. 또한, 7차와 8차의 고유진동수 및 모드형상은 챔버 단품의 결과와 거의 유사하며, 13차 이상의 고유진동수 및 모드형상은 FIB 및 SEM의 저차 모드와 거의 동일한 결과를 나타내어 각 단품해석 결과의 유효성을 알 수 있었다.

490N의 나노 스테이지가 FIB 및 SEM 밑에 각각 위치할 때의 해석결과를 비교하면, 전체적으로 고유진동수의 차이는 거의 없었으나 크게 두 가지 특징을 나타내었다. 첫 번째, 챔버만의 모드에서는 FIB 밑에 나노 스테이지가 있는 경우의 고유진동수들의 값들이 다소 크게 나타났으며, 두 번째, FIB나 SEM의 모드가 추가되면 반대의 경향을 나타내었다.

3.2 나노 스테이지 무게 변화 따른 모드 해석

전술한 통합시스템에서의 나노 스테이지의 무게는 490N이었는데, 실제 통합시스템에서 나노 스테이지의 무게가 너무 무거운 것으로 판단되었다. 현재 통합시스템에 맞게 그 크기를 줄여 무게가 294N인 통합시스템용 나노 스테이지를 제작하였다. 이 새로운 나노 스테이지를 가지고 SEM과 FIB 각각 밑에 스테이지가 있을 경우에 대해 모드 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Table 6에 제시하였다.

나노 스테이지의 무게가 490N의 해석결과와 비교하여, 모드형상은 동일하게 나타났다. 그러나 나노 스테이지의 무게가 감소했지만, 전체적으로 고유진동수들이 낮게 계산되었고, 나노 스테이지의 위치에 따라 고유진동수의 차이가 크

Table 6 Results of modal analysis of integrated system (by change of location of nano-stage, 294N)

No. of mode	Natural frequencies(Hz)	
	SEM	FIB
1	239.93	238.40
2	291.45	290.52
3	433.28	433.23
4	442.70	443.86
5	727.86	747.68
6	951.47	948.31
7	1,089.1	1,174.4
8	1,284.0	1,374.8
9	1,676.1	1,684.6
10	2,010.9	2,005.7
11	2,029.0	2,031.2
12	2,054.6	2,058.2
13	2,096.5	2,100.0
14	2,113.9	2,120.1
15	2,241.1	2,223.8
16	2,285.5	2,285.2
17	2,312.8	2,295.2
18	2,402.1	2,393.8

게 나타났다. 특히 나노 스테이지의 위치에 대한 챔버만의 모드형상의 고유진동수들 차이가 크게 증대되었다. 위 해석의 결과로, 많은 나노 스테이지의 무게 변화에도 불구하고 통합시스템의 고유진동수에 거의 영향이 없다는 것을 알 수 있으며, 그 이유는 통합시스템의 무게에 비해 나노 스테이지의 무게가 차지하는 비율이 아주 낮기 때문이다. Fig. 13~Fig. 14는 대표적인 모드형상을 보여준다.

4. 복합 가공기의 제작

4.1 나노 스테이지 제작

전술한 바와 같이 본 연구에서는 통합 시스템을 위해 나노 스테이지를 제작하였다. 나노 스테이지는 통합시스템의 챔버에 장착되어 시료를 FE-SEM과 FIB로 이송해주는 역할을 한다. 스테이지는 총 5축으로 구성되었다. X축의 최대 이송 거리는 280mm, Y축의 최대 이송 거리는 60mm, Z축의 최대 이송 거리는 40mm, 최상위 원형 스테이지 회전 각도는 360°이고, 경사각은 양 방향 합쳐서 60°이다. 스테이지의 5축 구성도를 Fig. 15에서 제시하였다.

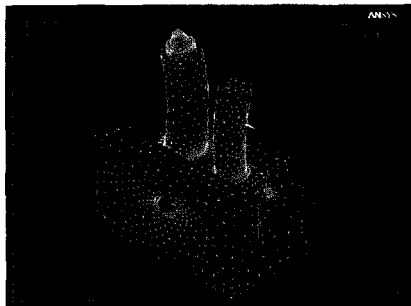


Fig. 13 The 13th mode of integrated system(SEM)

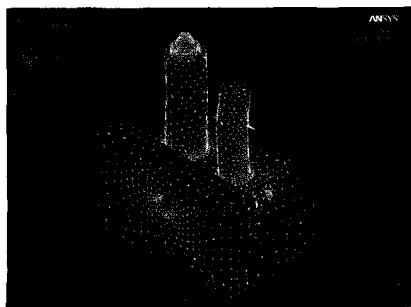


Fig. 14 The 18th mode of integrated system(SEM)

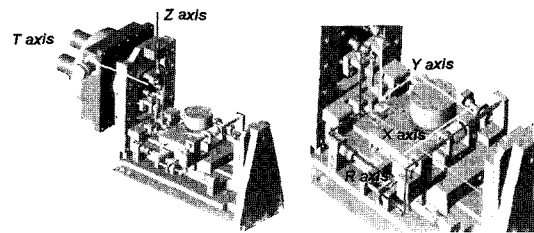


Fig. 15 Schematic of 5-axis nano stage

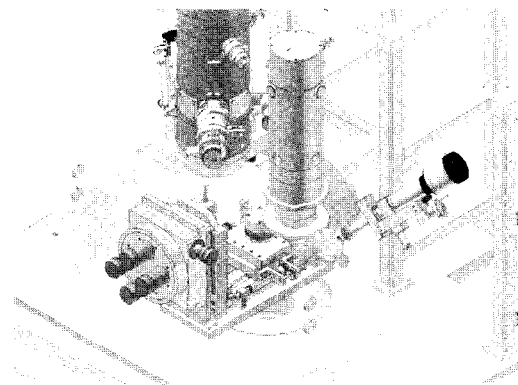


Fig. 16 Schematic of nano stage in the integrated system

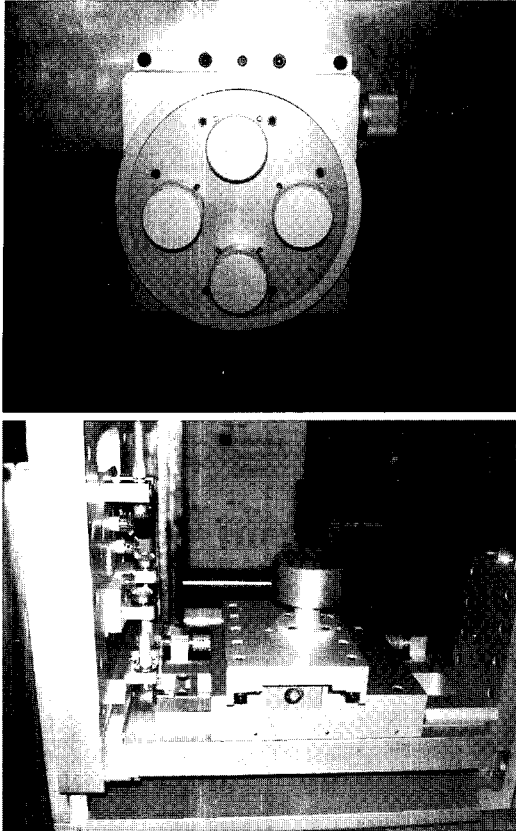


Fig. 17 Assembled nano stage in the integrated system

X축 방향으로 긴 이동거리를 얻기 위하여 Y축 베이스 및 R축 이송계가 확장되었다. 통합 시스템에 설치된 나노 스테이지의 투상도는 Fig. 16에 나타내었으며, Fig. 17에는 실제로 통합 시스템의 챔버에 조립된 스테이지를 보여주고 있다.

4.2 복합 가공기의 조립

본 연구에서는 FIB와 FE-SEM 등 2개의 컬럼과 나노 스테이지를 내부에 포함한 1개의 챔버로 구성된 복합가공기의 시작품을 설계하고 직접 제작하였다.

통합시스템은 FE-SEM과 FIB의 유기적인 통합을 이루기 위하여 1개의 챔버와 2개의 컬럼의 형태로 구성되었다. 챔버 내에는 각 컬럼 사이의 거리(170mm) 이상을 이송할 수 있는 스테이지를 적용하여 FE-SEM과 FIB 작업 시, 시편의 재셋업 없이 가공 및 측정이 이루어지도록 제작되었다. 이러한 방식의 장점은 FIB와 SEM 간의 독립 운영으로 인한 상호 간섭의 최소화 및 자유로운 FIB와 SEM 작업 각도이다. 반

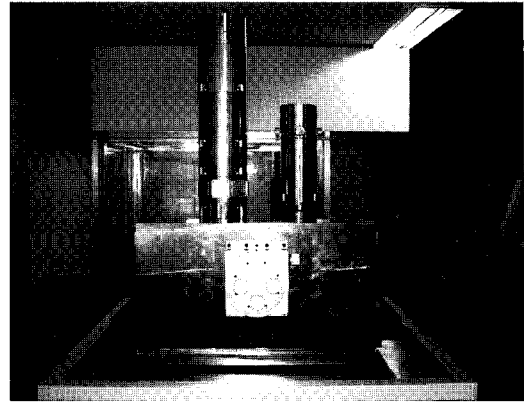


Fig. 18 Assembled integrated system

면, 시편의 이동을 위하여 정밀 이동 기술이 필요하다.

Fig. 18에서는 가조립된 통합 시스템을 보여주고 있다. 사진의 좌측에 있는 컬럼은 FE-SEM, 우측에 있는 컬럼은 FIB이다. 챔버 정면의 다이얼 및 게이지는 나노 스테이지의 조작부이다.

5. 통합 시스템의 방진대책

통합 시스템의 진동을 유발하는 요인은 다음의 두 가지로 대별할 수 있다. 첫째, 바닥으로 유입되는 진동이 있는데, 주로 50Hz 이하의 저주파수 대의 진동이다. 통합시스템이 설치되는 곳은 일반적으로 저주파수 대역의 진동은 차단되는 장소이며, 통합시스템을 방진용 에어 스프링으로 지지하므로 문제가 되지 않는다. 둘째, FIB나 SEM 그리고 챔버의 진공도를 유지하기 위해 이온 펌프를 비롯한 각종 펌프가 연결되어 통합시스템의 진동을 유발시킬 수 있다. 그러나 이런 형태의 진동은 주기성을 갖고, 진폭도 작으며, 또한 저주파수 대역이다.

6. 결론

SEM, FIB, 그리고 나노 스테이지를 내부에 장착한 챔버 등 각 단품과 이들로 구성된 통합시스템에 대해 다양한 조건 하에서 모드 해석을 수행하였으며, 통합 시스템을 구성하기 위해 나노 스테이지 및 챔버를 제작하여 다음과 같은 결론을 획득하였다.

(1) 각 단품에 대한 모드 해석을 통해, FIB는 2,100Hz 이상

에서, SEM은 2,400Hz 이상에서, 챔버는 1,110Hz 이상에서 고유진동수와 관련 모드형상이 계산되었다.

- (2) 490N과 294N 등 두 가지 무게의 나노 스테이지를 제작하였다. 그리고 이 2가지 스테이지의 위치에 따른 통합시스템의 모드해석을 수행하였다. 그 결과로, 나노 스테이지가 FIB 밑에 있을 경우와 무게가 가벼운 경우의 통합시스템의 고유진동수가 상대적으로 작게 계산되었다. 그리고 그 값들은 240Hz 이상에서 계산되었고, 다양한 통합시스템의 모드형상을 알 수 있었다.
- (3) 단품 및 통합시스템에 대한 모드 해석을 통해, 통합시스템의 고유진동수들이 최소 200Hz를 넘게 계산되었다. 이러한 결과로 50Hz 이하의 주파수 성분이 대부분인 바닥을 통한 외부 진동에 대해 통합시스템이 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.
- (4) 최종적으로 5축용 나노 스테이지가 내부에 장착된 1개의 챔버와 FIB 및 SEM 등 두 개의 컬럼으로 구성된 통합시스템을 조립 제작하였다.

후 기

본 논문은 서울특별시 지원하는 전략산업 혁신클러스터 육성 지원 사업(3D Microsystem Packaging을 위한 접합공정 및 장비개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- (1) Nalwa, H. S., 2004, *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*, American Scientific Publishers, California.
- (2) Busnaina, A., 2001, *Micro & Nanoscale Defects in Micro & Nanofabrication*, ASME international, New York.
- (3) Lee, R. E., 1993, *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, Prentice Hall.
- (4) Hawkes, P. W., 1982, *Magnetic Electron Lenses*, Springer, Berlin.
- (5) Munro, E., 1997, "Electron and Ion Optical Design Software for integrated Circuit Manufacturing Equipment", *Journal of Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 15, No. 6, pp. 2692~2791.
- (6) Sakuta, S., Okawa, K. and Ueda, K., 1993, "Experimental Studies on Ultra-Precision Positioning - An Inchworm Movement Method using and Coarse Positionings," *Int. J. Japan Soc. Pre. Eng.*, Vol. 27, No. 3, pp. 235~240.
- (7) Okazaki, Y., Asano, S. and Goto, T., 1993, "Dual-Servo Mechanical Stage or Continuous Positioning," *Int. J. Japan Soc. Pre. Eng.*, Vol. 27, No. 2, pp. 172~173.
- (8) Ewins, D. J., 1984, *Modal Testing: Theory and Practice*, Research Studies Press, London.
- (9) Kim, S. K., Moon, S. H. and Cho, J. I., 2006, "Structural analyses of the integrated system using ion beam," *Proc. of 2006 Spring Conference of KSMTE*, pp. 3~8.