

핵 마이크로프로브 설계 및 제작

우형주* · 김준곤 · 최한우 · 홍 완 · 김영석 · 이진호 · 김기동 · 양태건

한국지질자원연구원, 환경지질연구부
(논문접수일 : 2001년 6월 20일)

The Design and Construction of the Nuclear Microprobe

H.-J. Woo*, J.-K. Kim, H.-W. Choi, W. Hong, Y.-S. Kim, J.-H. Lee, K.-D. Kim, and T.-G. Yang

*Environmental Geology Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources,
P.O. Box 111, Daedeok Science Town, Taejeon, 305-350, Korea*

(Received June 20, 2001)

요 약

정밀가변슬릿과 자기사중극렌즈로 구성된 핵 마이크로프로브 (nuclear microprobe) 시스템을 일차행렬법을 이용한 빔광학 전산모사를 통해 설계하였으며, 제작된 시스템을 KIGAM 1.7 MV 탄뎀 반데그라프 가속기의 30° 빔 라인에 설치하였다. X 및 Y축에 대한 역배율은 각각 25와 4.9로 계산되며, 3 MeV 양성자빔의 경우 최소 빔크기는 약 5 미크론, 빔전류는 약 1 nA 정도로 추산된다. PIXE, RBS, ERDA 등 MeV 이온빔분석법과 이온빔 미세가공을 위해 다목적 8각형 표적함을 제작하였으며, 표적함은 X-선 및 하전입자검출기, 증현미경, 파라데이컵, 4축 시료이송계 및 고진공계로 구성되어 있다. 현재 핵 마이크로프로브 시스템 성능 조사가 이루어지고 있으며, 자동화된 시료 이송 및 자료 처리 시스템이 설치되면 일상적인 마이크로 이온빔 분석이 가능해질 것으로 예상된다.

Abstract

A nuclear microprobe system with adjustable precision object slits and a magnetic quadrupole doublet was designed by the beam optics simulation using a first order matrix formalism, and installed in a 30° beam line connected with KIGAM 1.7 MV Tandem VDG Accelerator. Demagnification factors for x and y axis are calculated to be 25 and 4.9, respectively, and a minimum beam spot size is expected to be about 5 μm for 3 MeV proton beams with a current of about 1 nA. A multi-purpose octagonal target chamber has been built to facilitate MeV ion-beam analytical techniques of PIXE, RBS, ERDA, and ion beam micro-machining. It contains X-ray and particle detectors, a zoom microscope, a Faraday cup, a 4-axis sample manipulator and a high vacuum pumping system. The system performance of the nuclear microprobe is now being tested, and automatic manipulator control and data acquisition system will be installed for routine applications of micro ion-beam analytical techniques.

1. 서 론

지난 30 여년간 MeV급 고에너지 이온빔은 원소 분석 및 소재의 특성분석에 널리 활용되어 왔으며, 특히 미크론 이하의 초집속빔 형성이 현실화되면서

2차원 또는 3차원적인 원소분포분석이 가능하게 되었다. 핵 마이크로프로브는 입자가속기와 MeV급 고에너지 이온 집속 시스템이 결합된 복합 시스템으로서 공간분해능은 현재 100 nm 수준에 와 있으며, 표 1에 볼 수 있듯이 활용기술(정량분석 및 미세가

* E-mail : hjwoo@kigam.re.kr

공기술) 또한 다양하게 개발되어 왔다.
 정량분석에 있어 핵 마이크로프로브의 여타 다른 탐침수단(전자, X-선, UV 및 레이저)들과의 차별화된 특성은 다음과 같다. [1] 대체로 MeV급 고에너지 이온의 매질 내의 궤적은 주로 전자적 충돌에 의해 지배되며 전자당 평균 에너지 전달량과 산란각이 저에너지 이온이나 전자에 비해 매우 작으므로 매질 내에서 거의 직선운동을 하게 된다. 따라서 제동복사선(bremsstrahlung radiation)에 의한 백그라운드 X-선이 매우 적다. 2 MeV 양성자의 경우를 보면 실리콘 내 비정이 약 47 μm 에 이를 정도로 이온의 매질 내 비정이 상대적으로 크므로 집속 이온빔은 매질내부 상당한 깊이까지 공간분해능을 유지한다. 또한 충돌반응의 통계적 특성으로 인해 이온의 비정 분산이 수 % 정도로 매우 적으므로 매질내 일정한 깊이에 정지하게 된다.

반도체소자에 대해 SEM, AES나 SIMS를 사용하여 미세특성 분석을 수행하는 경우 충전현상이 발생하거나 비파괴적인 깊이방향에 대한 정보제공이 곤란하며, 비교체가 요구되는 등 정량성 문제가 대두된다. Micro-RBS의 경우 비교체가 요구되지 않으며, 비파괴적이며 마이크론 두께까지 깊이방향의 함량변화를 추적할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 이와 같은 특징을 적절히 이용함으로써 표 1과 같은 정량, 정성분석이 가능해 지며, 아울러 신기술 중의 하나인 양성자 미세가공기술은 고 종횡비(aspect ratio)의 초미세구조 가공수단으로도 활용될 수 있을 것으로 기대된다. [2]

본 연구에서는 1.7MV 탄뎀 반데그라프 가속기를

주 장비로 하여 국내 최초로 수 MeV급 에너지를 갖는 수 마이크론급 핵 마이크로프로브 시스템을 설계, 제작하였다.

2. 장치 설계 및 구성

2.1 마이크로프로브 빔광학 전산모사 및 시스템 설계

일반적으로 입자가속기의 이온빔 수송문제를 다루는 방법으로는 행렬법(Matrix Formalism)과 운동방정식 수치적분법 두 가지를 들 수 있다. 본 가속기에서는 이온빔 전류가 수십 μA 이하이므로 공간전하효과를 무시할 수 있고, 빔의 크기는 광학부품의 크기에 비해 충분히 작게 설계되어 근축선 근사가 타당하므로 수송계 설계에 1차 행렬법만을 적용하였다. 전산프로그램으로는 TRANSPORT [3] 이온광학프로그램을 이용하여 시스템을 설계하였다.

핵 마이크로프로브 시스템 구성에 필수적인 부품을 그림 1에서 볼 수 있다. [4] 입자가속기에서 방출되는 MeV급 고에너지 이온은 object 슬릿을 거쳐 시스템에 입사되며, collimator 슬릿에 의해 재단이 되어지고, 최종 집속렌즈에 의해 허상면(image plane)

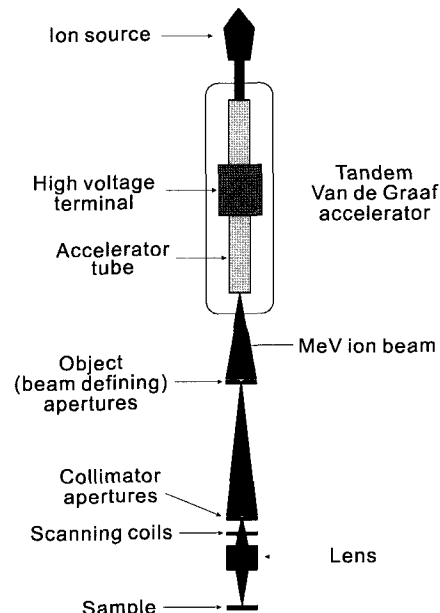


Fig. 1 Schematic diagram of a scanning nuclear microprobe(or nuclear microscope).

Table 1 High-energy nuclear microprobe techniques.

Particle Induced X-ray Emission(PIXE)
Rutherford Backscattering Spectrometry(RBS)
Scanning Transmission Ion Microscopy(STIM)
Ion Beam Induced Charge(IBIC)
Ion Beam Induced Luminescence(IBIL)
Secondary Electron Imaging(SEI)
Single ion machining
Single event upsets
Single ion irradiation
Deep ion beam lithography
Ion beam tomography
Microchanneling using RBS, PIXE or STIM

상에 작은 크기의 빔으로 집속된다. 렌즈를 짧은 초점 거리를 갖는 집속렌즈로 가정하면 역배율(D: demagnification factor) D는 대개 긴 실상거리(object distance)와 짧은 허상거리(image distance)의 비로 나타내어진다. D값의 범위는 대개 5-50 사이이므로 1 μm 크기의 빔을 얻기 위해서는 실상크기를 약 10-50 μm 정도로 제한해야 한다. [5]

마이크로프로브 빔라인의 설계에 일차적으로 고려될 사항들을 표 2에 정리하였다. 다양한 이온빔분석 수행을 위해 본 가속기에서 가용한 최대에너지 3.4 MeV의 양성자 집속이 가능하도록 설계하였다. 공간분해능이 1 μm인 경우 색수차(chromatic aberration)가 제한요소가 되지 않기 위한 에너지 안정도는 5×10^{-5} 정도이다. 마이크로프로브 빔라인은 가속기실의 공간상의 제약 때문에 기존의 PIXE 빔라인을 개조하여 macro 및 micro 빔을 모두 이용하도록 설계하였

Table 2 Design parameters of KIGAM microprobe beamline.

Beam source system	
accelerator	pelletron
Ion source	RF source
Momentum analyzer	SNICS sputter source bending magnet(30°)
Beam characteristics (at the objective slit)	
Ion	H ⁺ , He ⁺ , He ²⁺
Acceleration voltage	1.7 MV(max.)
Energy spread	0.02 %
Typical current:	
for 3 MeV H ⁺	5 μA
for 3 MeV He ⁺	2 μA
Microbeam system characteristics	
Objective distance	2770 mm
Image distance	275 mm
Demagnification factors	
X-axis	25
Y-axis	4.9
Quadrupole Doublet Lens	
Pole length	50 mm
Gap between Q-poles	40 mm
Bore diameter	13 mm
Coil turn	155 turns per pole
Excitation instability	0.01 % (long-term)
Spatial resolution	5 μm (estimated)
Beam current at max. resolution	1 nA (estimated)

다. 아울러 기존 빔라인 길이가 가용한 한계이므로 object 슬릿 이후의 빔라인의 길이를 최대 3.4 m로 정하였다.

점집속을 실현하기 위해서는 pole의 극성을 교대로 위치하여 doublet, triplet 또는 quadruplet 등 두 개 이상의 렌즈들을 조합하여야 한다. 이중(doublet) 렌즈는 상대적으로 단순하다는 장점은 있으나 X-Y 면상의 집속도가 서로 크게 다르다는 문제가 있다. 그러나 본 연구에서는 공간 및 제작비용문제를 고려하여 우선 MQD(Magnetic Quadrupole Doublet)로 정하였으며, Working Distance, 즉 MQD 후단에서 표적함 중심부까지의 가용거리는 250 mm이다. MQD pole두께는 50 mm, pole 간격은 44 mm이며, object 슬릿과 MQD 중간 위치에 collimator 슬릿을 위치하였다.

일반적인 macro-beam의 경우 빔전류가 수십 μA 인 반면 미크론 이하의 마이크로프로브에서는 수십 pA까지도 전류가 급격히 감소한다. 특히 PIXE에 활용하기 위한 실용적인 한계는 1 μm 분해능에서 약 100 pA 정도로 추산된다. [6]

그림 2(a)는 2 MeV 양성자에 대한 KIGAM시스템의 전산모사 결과를 보여주고 있다. 서로 1.4 m 떨어져 있는 object 슬릿과 collimator 슬릿(±1 mm)에 의한 이온빔의 벌어짐 반각(half-angle)은 약 0.7 mrad이며, 집속렌즈는 x-축에 대해 D-F(defocusing-focusing), y-축에 대해 F-D 집속특성을 갖는다. X-Z, Y-Z 양면 등집점운전(stigmatic operation) 조건에서 MQD 첫째 및 둘째 요소들의 자장구배는 264.7 및 345.6 gauss/mm로 계산되며, 3 MeV 양성자 및 5 MeV He²⁺ 이온에 대한 운전이 가능하도록 최대 자장구배는 1 T/cm 가 되도록 MQD를 설계하였다.

입사하는 빔직경(2 r_a)과 각도분산(r'_a)이 (d_{1x}, d_{1y})와 (d_{2x}/D, d_{2y}/D)보다 매우 클 경우 한 쌍의 collimator를 통과하는 이온빔의 세기는 단순히 다음과 같이 계산된다. [7]

$$I = I_a \frac{k_a}{\epsilon_a^2} \frac{d_{1x}d_{1y}d_{2x}d_{2y}}{D^2} \quad (1)$$

여기서, I_a, ε_a는 입사빔의 전류 및 방사면량(emittance) 이고 D는 두 collimator간의 거리이다. 계수 k_a는 선

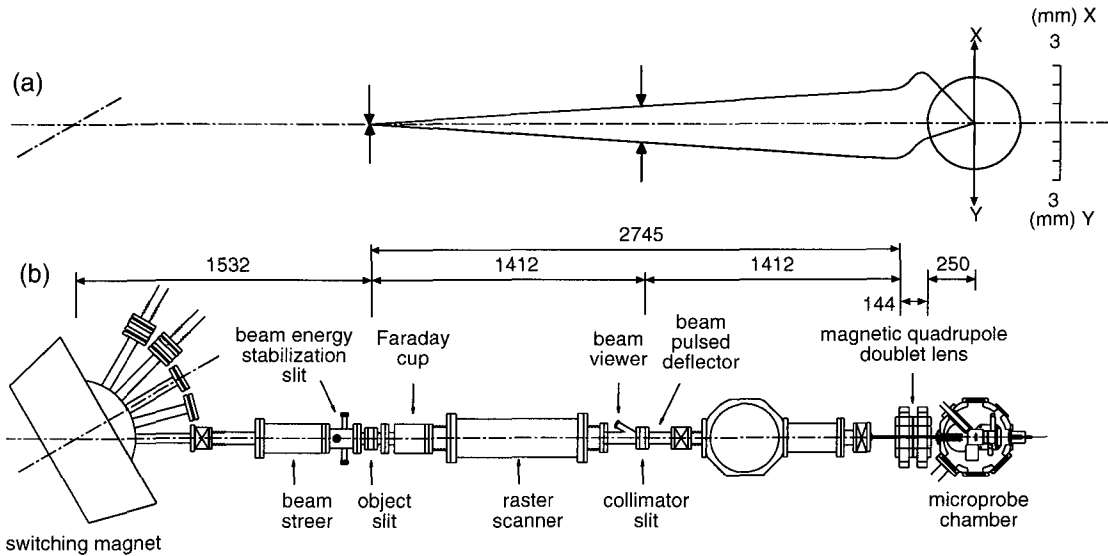


Fig. 2 The calculated beam trajectories in the horizontal and vertical plane, and the schematic geometries of the KIGAM micro-beam & PIXE(PIGE) complex beamline.

속분포에 관계되며, d_{lx} , d_{ly} 는 슬릿간격을 뜻한다. 본 시스템에서 $d_{lx}=63 \mu\text{m}$, $d_{ly}=13 \mu\text{m}$, $d_{2x}=d_{2y}=2,000 \mu\text{m}$, $I_a=1 \mu\text{A}$, $\epsilon_a=3 \text{ mmmr}$ 으로 가정하면 통과 빔전류는 $I=0.7 \text{ nA}$ 로 추정된다.

그림 3은 등집점운전을 가정했을 때, MQD의 집속특성을 그래프로 나타낸 것이다. [8] 이미 앞에서 언급되었으며 그림에서도 알 수 있듯이 MQD의 경우 등집점운전 조건하에서는 x-, y-배율이 동일할 수 없다. 본 시스템에서 허상거리(image distance)는 275 mm이므로, 실상거리(L_1) 2,770 mm에 대해 x-축, y-축 역배율 D_x , D_y 는 약 25, 4.9로 추정된다. 따

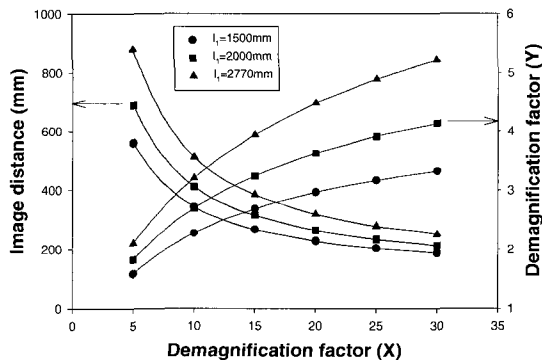


Fig. 3 Characteristics of a stigmatic focusing quadrupole doublet.

라서 y-축 배율이 x-축의 약 1/5이 됨을 알 수 있으며, 표적 위치에서 정사각형 허상을 얻고자 하는 경우 object 슬릿의 모양은 x-축이 5배 긴 직사각형꼴이 되어야 함을 알 수 있다.

2.2 자극자석의 설계, 제작 및 특성조사

MQD의 자장해석은 LANL(Los Alamos National Lab., USA)에서 개발된 SUPERFISH 전산모사 프로그램을 통해 이루어졌으며 [9], 이 결과를 토대로 자기사중극렌즈 내의 유효직경 13 mm 내에서 목표하는 최대 자장구배(1 T/cm)와 양질의 자장분포를 얻을 수 있도록 설계하였다.

자장구배(G)와 자극표면에서의 자기장(B_0)은 다음과 같다.

$$G = \frac{2\mu_0 NI}{R_0^2} = \frac{2\mu_0 NI}{R_0} \cdot \frac{1}{R_0} = \frac{B_0}{R_0} \quad (2)$$

$$B_0 = \frac{\mu_0 NI}{(R_0/2)} \quad (3)$$

여기서, R_0 는 4개의 자극면 중심이 이루는 내경 $R_0(0.65\text{cm})$ 이고, NI 는 각 자극의 Ampere · Turn(AT)으로서 최대 1 T/cm의 자장구배를 얻기 위한 값은

Table 3 Design and measured specification of KIGAM MQD.

Specification	expected value	measured data
lens bore radius, R_0	$R_0=6.5$ mm	-
pole length	$L=50$ mm	57.8 mm (effective)
drift space between doublet	40 mm	-
max. gradient	100 T/m	102 T/m (at 15 A)
max. pole field	0.65 T	~ 0.68 T (at 15 A)
long-term stability (at 10 A)	1×10^{-4}	2×10^{-4}
multi-pole elements		dipole 0.66 % sextupole 0.4 % others < 0.1 %

1,680 AT이다. 직경 3 mm의 에나멜동선의 최대 허용전류는 11 A이므로 자극당 권선수는 각각 155 회가 된다. 본 MQD에서 직렬연결된 4개의 코일봉치는 약 0.4 Ω 의 직류저항 값을 가지므로 정전류원의 최대 전류, 전압은 각각 15 A, 10 V이고, 전류안정도는 10^{-4} 이 되도록 제작하였다.

자극의 재질은 자기이력효과가 적고 포화자속값 (1.5 T)이 큰 저탄소강 AISI1010(0.1 % C, 0.45 % Mn)을 사용하였고 최대 2,500 AT을 고려하여 설계하였다. 가공오차를 최소화하기 위해 자극면은 최대 5 μm 의 가공오차로 방전가공(wire cutting) 하였으며, 4개의 자극공간에 부합하는 지그(jig)를 역시 방전가공하여 체결한 후 조립하였다.

지름 1 mm의 Hall 소자로서 제작된 자극자석의 자기장의 공간적분포를 측정하였으며, 이온빔이 통과하는 유효공간 내에서의 자속구배, optical focusing power, 다극성분 등을 평가하였다. 자극 이외의 다극항들은 자극의 모양이 완전한 쌍극선에서 벗어남, 재질의 불균일성과 불완전한 정렬에서 비롯된다. 표 3에서 볼 수 있듯이 가장 크게 나타나는 방위각(azimuthal) 방향의 dipole 성분이 0.66 % 정도로 확인되었다.

2.3 마이크로프로브 빔라인과 표적함

공간 및 연구비의 제약으로 새로운 빔라인을 건설하는 대신 기존의 PIXE 빔라인에 겹쳐 Micro-Macro 복합 빔라인을 구성하였으며, 설계시 이온빔의 공간분해능에 영향 미치는 가스산란, 열적 불안정성, 기계적 진동, 자기간섭, 렌즈 수차 등 제반요인들을 고려하였다. [4] MQD부위 진공도는 약 5×10^{-7} Torr

로 예상되며, 가속기 실험실의 경우 $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도 제어가 가능하다. 표적함과 터보분자펌프 사이에는 진동완화장치(vibration damper)를 설치하여 펌프진동의 영향을 극소화하였다. MQD렌즈의 가공오차는 $\pm 5 \mu\text{m}$, 정렬오차는 $\pm 10 \mu\text{m}$ 이었으며, 렌즈여기수차(lens excitation aberration)를 극소화하기 위해 전류안정도가 10^{-4} 정도인 정전류 전원을 사용하였다.

최종 구성된 마이크로빔라인은 그림 2(b), 4와 같다. Object 슬릿(0-150 μm)으로부터 1.4 m 후방에 collimator 슬릿(0-1500 μm)을 설치하고, 다시 1.4 m 후방에 MQD를 위치하였다. 표적은 MQD중심으로부터 322 mm에 위치하며, 이러한 기본적인 부품 외에 운전 시 필요한 beam viewer와 beam deflector가 collimator 슬릿 전후에 자리잡고 있다.

이온빔 전류는 정전형 deflector와 macro-PIXE표적함의 파라데이컵을 통해 모니터링하도록 하였다. Collimator 슬릿 후단에 설치된 deflector(전극길이: 14 cm, 간격: 12 mm)에 10 kV/cm의 전장을 형성하면 3 MeV 양성자빔은 82 cm 후방의 파라데이컵 중심에서 약 20 mm 벗어나게 된다. 파라데이컵 중심에는 마이크로프로브 시스템으로 통하는 직경 14 mm의 구멍이 뚫려있으므로 주기적인 펄스전압 인가에 의해 빔전류측정이 가능하게 된다.

표적함은 팔각 모양의 실린더 형태로 설계하였으며, PIXE 분석을 위한 Si(Li) 검출기, RBS 분석을 위한 SSB 검출기, 시료 표면을 관찰하기 위한 원거리 줌 현미경, 빔전하량 측정을 위한 파라데이컵 그리고 시료 이송계를 장착하였다. 그림 5에서 표적함 내부구조를 살펴볼 수 있다.



Fig. 4 Photograph of the KIGAM scanning nuclear microprobe.

본 시스템에서 이온빔 주사방식은 자기주사(magnetic scanning) 대신 X-Y 스테이지에 의한 시료의 기계적 이송방식을 채택하고 있다. XY 스테이지는 Opto-Mechanical Associates사 제품(Model: M-462-XY-SD-MV6)를 사용하여 빔에 수직방향으로 2차원 미세이동이 가능하도록 하였다. 최대 이송 가능거리는 25 mm, 수평방향 최대 하중은 6.8 kg이고, 구동기(actuator)로는 위치재현성이 1 μm 급인 850 GV6(8kg, 최대 50 mm)를 사용하였다. 추후 회전 스테이지를 부착하여 빔 방향에 대한 각도조절이 가능하게 하여 입자의 미세구조물 가공 등 마스크가 불필요한 micro-machining이 가능하도록 할 계획이다.

RBS(Rutherford Backscattering Spectrometry) 측정용으로 유효면적 100 mm²의 annular SSB 검출기를 빔 진행방향에 대해 180° 방향에 설치하였으며, 검출기 입체각은 1.4 msr이다. 또한 입사되는 이온빔으로부터 검출기를 보호하기 위하여 이온빔이 들어오는 방향에 collimator를 설치하였으며, 후방산란된 이온을 차폐하기 위하여 시편 쪽으로도 구멍직경 12 mm의 collimator를 설치하였다. PIXE 분석용으로는 유효 검출면적 12.5 mm²인 Si(Li) 검출기를 사용하며 검출기의 입체각은 0.3 msr이 되도록 설계하였다. 또한 검출기와 진공함 사이에 100 μm 두께의 Be진공창을 설치하였으며, 검출기 전단에 다양한 X-선 필터를 장착할 수 있도록 하였다. 또한 입사되는 이온빔의 전류를 직접 확인하기 위하여 0° 방향에 파라데이컵을 설치하였다.

입사되는 이온빔의 크기와 위치를 시각적으로 확인하기 위하여 대물거리가 약 230 mm이고 배율

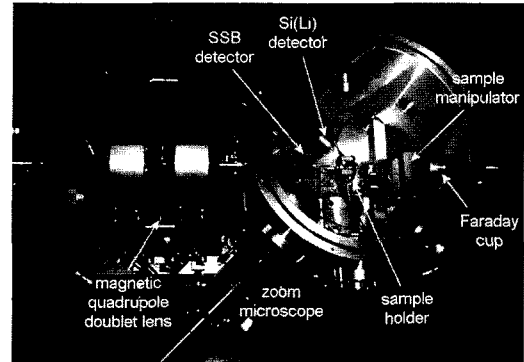


Fig. 5. Inside view of the micro-beam chamber.

이 20-200X인 줌 현미경을 설치하였으며, CCD 카메라를 부착하여 모니터상에서 관찰 할 수 있게 하였다. 표적함의 진공은 400 l/s의 용량의 터보분자펌프로서 약 5×10^{-7} torr 정도로 유지된다.

2.4 빔 인출시험

2.0 MeV 양성자빔의 집속 특성을 조사하기 위해 시료 위치에 부착한 quartz 판에서 발생하는 형광을 200x의 줌 현미경으로 관찰하였다. Object 슬릿의 폭은 X축이 120 μm , Y이 40 μm 이었으며, collimator 슬릿은 X, Y축이 각각 0.7 mm가 되도록 하였다. 이온원 빔전류 및 가속에너지의 불안정성 때문에 아직 집속조건이 최적화 되지 못한 상태이나 예비 실험결과 시료면에서 관찰된 형광의 크기는 약 12 μm 정도였으며 이때 빔 전류는 약 0.1 nA 정도로 측정되었다. 형광빛의 크기는 실제 빔의 크기에 비하여 상대적으로 크게 나타날 것으로 예상되므로 추가 실험에서는 PMMA 박막 시료에 빔을 조사, 현상하여 실제 이온빔의 크기를 정확히 측정할 계획이다.

3. 결 론

MeV급 이온빔을 수 미크론 크기의 집속빔으로 형성할 수 있는 핵 마이크로프로브 시스템을 국내 최초로 제작하여 KIGAM 1.7 MV 탄뎀 반데그라프 가속기에 설치하였다. 고에너지 이온빔 집속을 위한 마이크로 빔라인은 마이크로 가변슬릿(0-150 μm)과

자기사중극이중렌즈로 구성되어 있으며, 3 MeV 양성자 집속이 가능하도록 MQD의 최대 자장 구배가 1 T/cm가 되도록 제작하였다. 등집점운전 조건하에서 실상거리 2,770 mm, 허상거리 275 mm에 대해 X 및 Y축 역배율(집속율)이 각각 25와 4.9로 계산되며, 3 MeV 양성자빔의 경우 최소 빔크기는 약 5 마이크로미터로, 이 때의 빔전류는 약 1 nA 정도로 추산된다. PIXE, RBS, ERDA 등 MeV 이온빔분석법과 이온빔 미세가공을 위해 팔각 실린더 형태의 표적함을 제작하였으며, PIXE 분석을 위한 Si(Li) 검출기, 후방산란 입자검출을 위한 SSB 검출기, 시료 표면의 광학적 관찰을 위한 원거리 줌 현미경, 빔 조사량 측정용 Faraday cup 그리고 시료의 미세 이송을 위한 4축 manipulator를 장착하였다. 현재 MQD 특성 및 인출된 집속이온빔 특성 등 핵 마이크로프로브 시스템에 대한 전반적인 성능조사가 이루어지고 있으며, 자동화된 시료이송 및 자료처리시스템이 추가로 설치되면 일상적인 마이크로이온빔분석 및 정밀가공이 가능해 질 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발중장기사업의 지원에 의해 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Frank Watt, Nucl. Instr. & Meth. B **130** 1-8 (1997).
- [2] F. Watt, T. Osipowicz, T. F. Choo, I. Orlic, S. M. Tang, Nucl. Instr. & Meth. B **136** 313-319 (1998).
- [3] K. L. Brown, D. C. Carey, Ch. Iselin and F. Rothacker: Transport, a Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems. See yellow reports CERN 73-16 (1973) & CERN 80-04 (1980).
- [4] G. J. F. Legge, P. M. O'Brien, R. M. Sealock, G. L. Allan, G. Bench, G. Moloney, D. N. Jamieson, A.P. Mazzolini, Nucl. Instr. & Meth. B **30** 252-259 (1988).
- [5] G.W. Grime and F. Watt, Nucl. Instr. & Meth. B **30** 227-234 (1988).
- [6] L. Grodzins, P. Boisseau, H. Glavish, R. Klinkowstein, W. Nett, R. Shefer, Nucl. Instr. & Meth. B **104** 1-6 (1995).
- [7] R. Nobile, Y. Civelekoglu, B. Povh, D. Scwalm, K. Traxel, Nucl. Instr. & Meth. **130** 325-334 (1975).
- [8] Hermann Wolinik, *Optics of charged particles*, Academic Press, London (1987).
- [9] Klaus Halbach and Ron. F. Holsinger, *SUPERFISH - A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry*, Particle Accelerators 213-222 (1976).