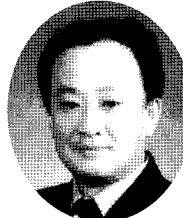


# 노광장비에서의 고효율 전자빔 응용 기술 현황



임선종

한국기계연구원  
지능형생산시스템연구본부



강재훈

한국기계연구원  
지능형생산시스템연구본부



이현용

한국기계연구원  
지능형생산시스템연구본부



이승우

한국기계연구원  
지능형생산시스템연구본부

## 1. 서 론

30 keV의 에너지를 갖는 전자빔의 파장은 0.0065 nm로 ArF의 파장이 193 nm인 것에 비해 약 1/30,000 정도이다. 또한 현재 서브 미크론의 패턴을 형성하는 기술에서 광원으로 사용하고 있는 G-선(436 nm)과 I-선(356 nm), 단파장의 원자외선(deep UV: 300 nm 이하) 및 엑시머 레이저(ArF: 193 nm, F2 : 157 nm)에 비해서도 작은 파장을 가지고 있다. 회절 한계(Diffraction limit)의 측면에서도 광학 리소그래피 보다 우수한 분해능을 보이고 있다. 따라서 차세대 리소그래피 기술로 선택되는 EUV(Extreme ultraviolet lithography), XRL(X-ray lithography), 및 IPL(Ion projection lithography) 등과 함께 전자빔을 이용한 리소그래피가 선택될 수 있는 가능성을 가지고 있다.

그러나 아직 전자빔 리소그래피는 광학 리소그래피 공정에서 필요한 마스크를 제조하는 제한적인 공정에 사용되고 있다. 이것은 분해능 측면에서 우수하지만 생산성을 만족

시키지 못하기 때문이며 이점을 극복하기 위해 multi electron beam 기술과 TEM(Transmission electron microscopy)을 기반으로 하는 프로젝션 방식의 전자빔 리소그래피 기술 등이 연구되고 있다.

본 논문은 나노 패터닝 장비의 기술적인 발전 단계의 분석을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 해외의 리소그래피 개발 단계를 보이고 있으며 국내·외 특허를 분석하여 전자빔 미세 가공 장치의 기술 발전 방향을 분석하였다.

## 2. 전자빔 리소그래피의 개요

전자빔 리소그래피는 진공내에서 고에너지의 전자를 가속시켜 가공물에 주사하고 이때 발생한 열에 의한 국부적인 용융 및 증발로 가공을 수행한다. 전자빔 리소그래피는 주사형 전자 현미경과 유사한 구조를 가지고 있으며 Fig. 1 과 같이 전자총, 전자 렌즈, 빔 블랭커 및 편향 장치 등으로

## 특집

구성되어 있다<sup>(1-2)</sup>.

전자총은 높은 열에너지를 가진 전자빔을 발생하는 음극(Cathode)과 음극과 전위차를 형성하여 전자를 가속시키는 양극(Anode) 그리고 방사된 전자를 제어하는 웨닐넷으로 구성되어 있다. Fig. 2는 전총의 기본 구성과 전자빔의 형성을 보이고 있다.

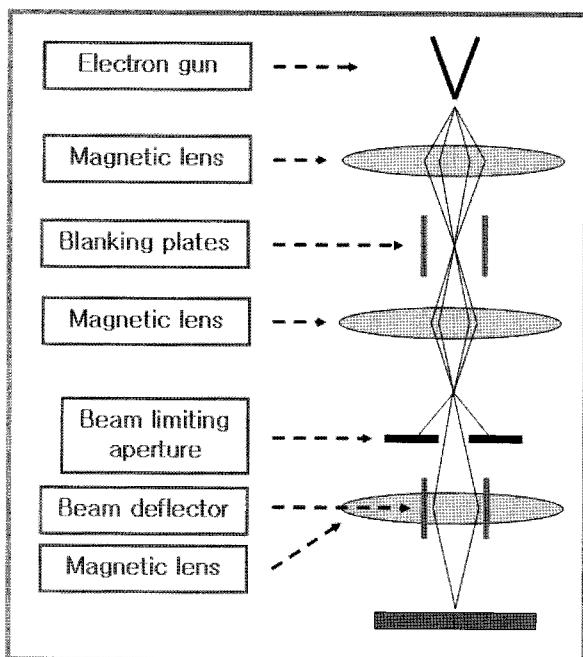


Fig. 1 공작기계에 사용된 오일쿨러

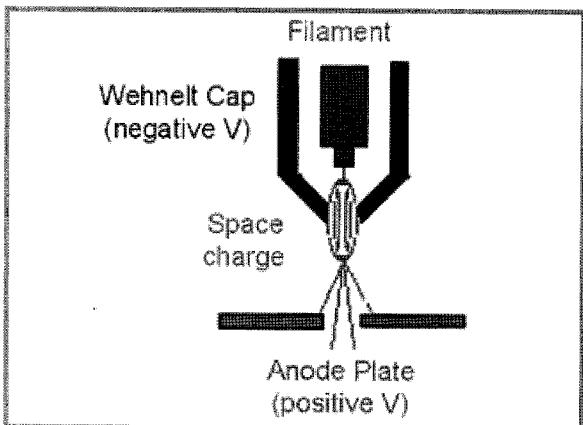


Fig. 2 Configuration of electron gun

전자 렌즈는 빛이 유리 렌즈를 통과하는 것과 같은 방식으로 구리선을 원형으로 감아 자기장을 형성하고 전자빔을 통과시켜 초점을 형성한다. 자기장의 세기는 렌즈의 세기를 결정한다. Fig. 3은 전자 렌즈에 의해 전자빔 초점이 생기는 원리를 나타내고 있다. 자속 밀도  $B$ 와 속도  $V$ 를 가진 전자 상에 미치는 힘은 식 1로 표현되고 렌즈 축 방향의 힘은 식 2로 표현되며 이 힘으로 초점 거리가 형성된다<sup>(3-4)</sup>.

빔 블랭커는 두 극판사이에 전압을 걸어 전자빔이 축에서 벗어나게 하여 시료에 도달하는 전자빔을 on/off하게 된다. 편향 장치는 전자빔을 시료의 표면에 스캐닝하는데 쓰여진다. 정전기 혹은 전자장은 이용하는 방식이 있다. 정전기 방식의 경우 평행된 플레이트에 인가된 전기장의 변화로 전자빔을 제어하게 된다. 패턴을 그리는 방식은 레스터 주사 방식과 벡터 주사 방식이 있다. 레스터 주사 방식은 은 패턴을 포함한 전 부분을 스캔하므로 긴 시간이 요구된다. 벡터 주사 방식은 패턴 부분만 스캐닝을 하므로 레스터 주사 방식 보다 빠르나 패턴 밀도에 따라 주사 시간의 차가 발생한다. 또한 전자빔의 정밀한 위치를 유지하기 위

$$F = -e(V \times B) \quad (1)$$

$$F_r = -V_s \times B_r \quad (2)$$

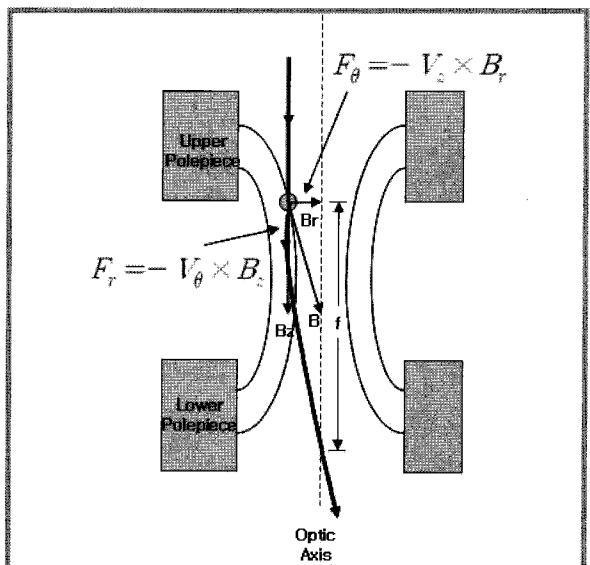


Fig. 3 The force on an electron

한 초기 작업의 시간이 길다.

전자빔 리소그래피는 전자빔의 작은 회절로 고해상도의 패턴 구현이 가능하며 CAD 파일을 이용해 신속한 마스크 제작이 가능하다. 그러나 전자빔 발생, 제어 및 가공 등의 동작이 진공 내에서 동작하므로 설치 비용이 증가하고 쓰기 속도가 제한적이라 대량 생산에 부적합면을 가지고 있다.

### 3. 나노 패터닝 장비에서 전자빔 응용 사례

전자빔 노광 장비용 마스크 제작 비용이 증가함에 따라 electron beam direct writing(EBDW) 방식이 주목을 받고 있다. 이 방식의 연구는 마스크レス(Maskless) 패턴 형성에 유연성을 살리는 방향으로 진행하고 있다.

이는 ML2(Maskless lithography)로 불린다. ML2는 실용화 측면에서 높은 생산성을 올릴 수 있지만 기술의 복잡성으로 인해 해결해야 하는 기술적인 문제점을 가지고 있다. Cannon, Nikon, IMS Nanofabrication, Leica microsystem 등이 상용화를 위해 연구를 진행하고 있다. Table 1은 electron projection 리소그래피의 연구 현황을 보이고 있다.

SCALPEL(SCattering with Angular Limitation Projection Electron-beam Lithography)은 step-

and-scan 방식의 쓰기 방식이다. SCALPEL은 공간 전파 효과로 인해 노출 장비의 전자빔 전류가 제한되어며 분해 능의 한계는 Table 1과 같이 35nm 정도이다.

Nikon의 (EPL(Electron projection lithography)인 PREVAIL(Projection Reduction Exposure with a Variable Axis Immersion Lens)은 70 nm의 반도체 공정에 사용될 수 있다.

Fig. 4는 PREVAIL의 개략도를 보이고 있다<sup>(5)</sup>. 이 장비는 전자빔이 항상 광축 상에 놓이게 되어 수차를 최소화하고 최고의 출력을 발생시킨다. 진공 환경에서 초정밀을 유지하는 에어베어링, 리니어 모터, 피에조(Piezo actuator)를 이용한 테이블의 레벨링 시스템 및 자기장 차폐 기술 등은 광학 리소그래피 장비와 유사하지만 통합적인 성능에서 우수한 성능을 보인다.

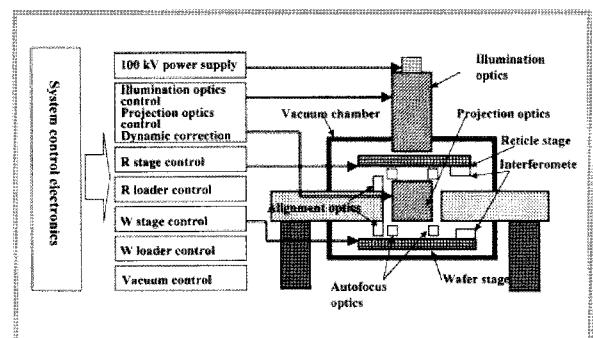


Fig. 4 Configuration of Nikon EPL

Table 1. Research trend for electron beam lithography

	E-beam Projection Lithography			
	SCALPEL	PREVAIL	LEEPL	Mask-Less Lithography(ML2)
System overview				 
Resolution	≈35nm	< 100nm	50-100nm	
Throughput	25(300 mm wafer/hr)	20 (300 mm wafer/hr)	40(300mm wafer/hr)	
Mask	Membrane mask		Si stencil mask	
Issues	Resolution vs. Throughput		Complexity vs. Throughput	

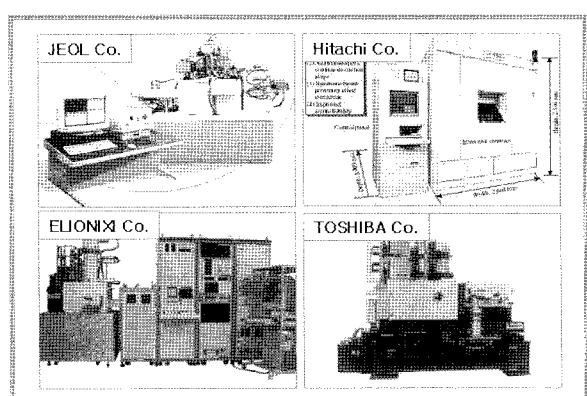


Fig. 5 Examples for Electron beam writing system

전자빔을 이용한 노광 장치는 일반적으로 SEM(Scanning Electron Microscopy)를 기본 구조로 하므로 SEM을 생산하고 있는 일본의 HITACHI, JEOL, TOSHIBA, CANNON, NIKON 등과 미국의 FIE, SCALPEL, LEICA, PHILIPS, ELINIXI, 독일의 RAITH 등이 상품화하고 있다.

영국의 Nimbus사는 electron beam mastering 시스템을 제작하여 1999년 15GB 용량의 원판 가공 성공하였으며 2002년에는 50 GB의 매스터 제작하였다. 이 시스템은 거대한 챔버 안에 회전 테이블을 지지하는 스윙 앰(Swing arm)을 이용하여 직선 이동을 수행하여 트랙 피치의 안정도를  $\pm 5\text{ nm}$ 를 유지하고 있다.

SONY는 전자빔 조사부에만 부분적으로 진공을 형성하고 별도의 진공 챔버가 없이 전자빔 가공이 가능한 electron beam recoder를 개발하였다. 회전 테이블과 직선 운동 스테이지는 대기중에 작동한다. Differential pumping head에 의해 생성되는 전자빔 조사부의 진공도는 2.68 m/sec의 기록 속도에서  $3 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 이며 4.92

m/sec에서는  $1.3 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 을 유지한다. 25 GB의 용량의 디스크의 경우 트랙 피치는 320 nm, 최소 pit 크기는 149 nm이며 100 GB 용량의 디스크는 트랙 피치 160 nm에 최소 pit 크기는 87 nm이다. Fig. 6은 differential pumping head를 보이고 있다.

한편, IMS Nanofabrication의 RIMANA(Radical innovation maskless nanolithography)는 수천 개의 마이크론 사이즈의 전자빔을 생성하는 APS(programmable Aperture-Plate System)를 장착하고 있다. APS는 수천 개의 미소 전자빔을 만드는 aperture plate와 전자빔을 반사해주는 blanking plate로 구성된다. 이 시스템을 이용해 60 nm의 PMMA로 코팅된 실리콘 웨이퍼에 22 nm half-pitch 분해능을 가진 선들을 가공하였다.

#### 4. 전자빔 미세 가공 장치의 기술 개발 분석

전자빔 미세 가공 장치를 구성하는 공정 지능화 기술, 진공용 초정밀 운동 요소 기술 그리고 전자빔 컬럼 및 전자빔 제어 기술을 중심으로 분석하였다. 공정 지능화 기술은 전자빔 거리 측정과 보정, 전자빔 전류 측정 기술 및 전자빔 자동 초점 기술을 중심으로 분석하였다<sup>⑥</sup>. 진공용 초정밀

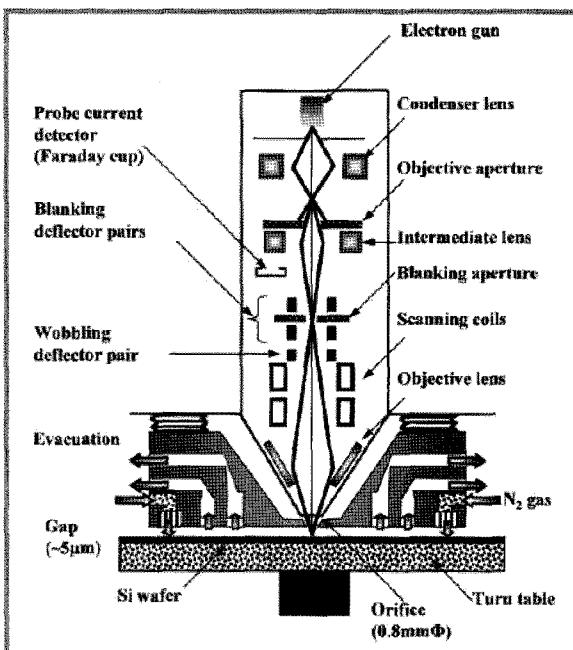


Fig. 6 Differential pumping head

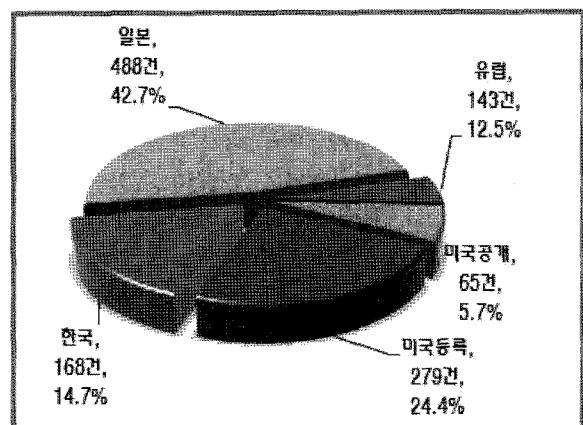


Fig. 7 Patent trend

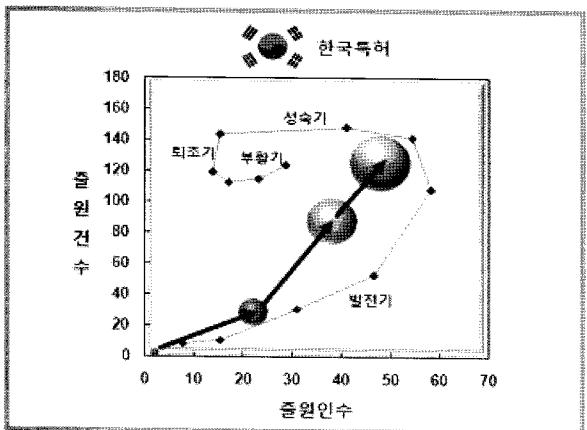


Fig. 8 Patent trend of Korea

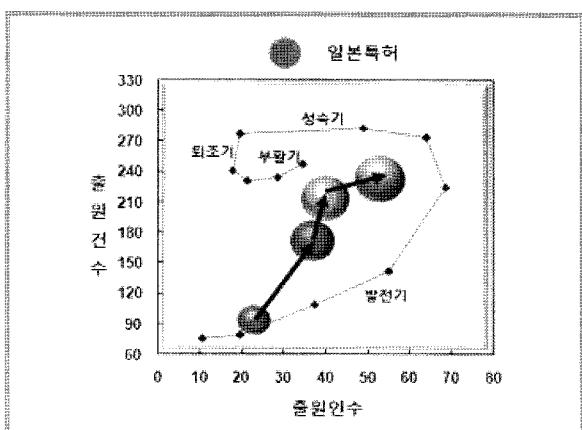


Fig. 9 Patent trend of Japan

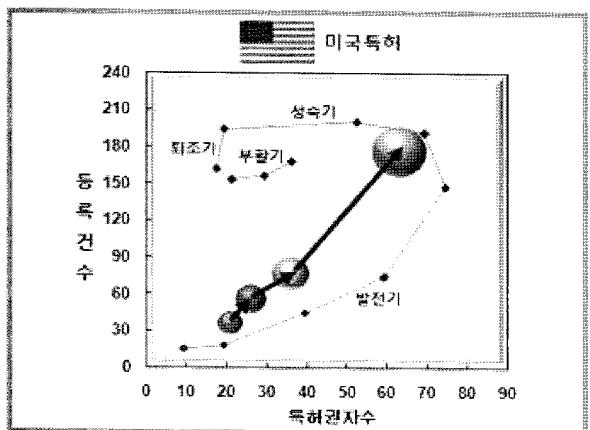


Fig. 10 Patent trend of USA

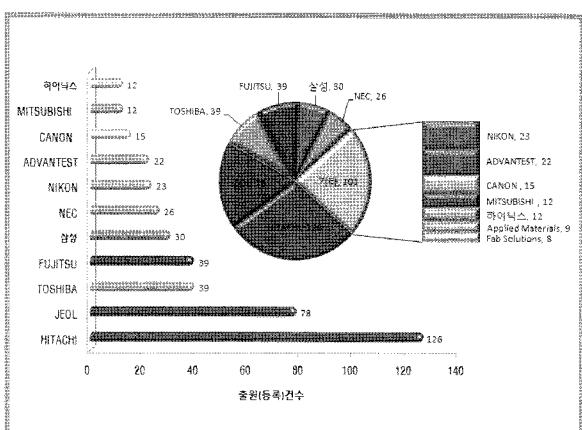


Fig. 11 Paten trend for process intelligence

운동 요소 기술은 자기장 차폐, 스테이지 구동 및 제어 그리고 쳐킹 기술을 중심으로 분석하였다. 전자빔 컬럼 및 전자빔 제어 기술은 빔 스캔, 전자빔 발생 그리고 빔 차단 기술을 중심으로 분석하였다. Fig. 7에서 Fig. 10은 각국의 출원 규모와 동향을 보이고 있다.

전자빔 가공 기술은 일본이 40% 이상의 높은 출원 점유율을 보이고 있다. '02년도 이후에는 미국의 특허 출원과 등록이 증가하고 있다. 특히 출원과 출원인의 증가로 각국에서 모두 발전기로 나타나고 있다.

공정 지능화 설계 분야는 HITACHI가 126건으로 가장 많으며 JEOL이 78건이다. HITACHI와 JEOL의 출원건

을 합치면 약 50%로 시장의 영향력이 클 것으로 보인다.

Fig. 11은 공정 지능화 설계 분야에서 출원 경향을 보이고 있다.

진공용 초정밀 운동 요소 분야의 출원도 HITACHI가 최다 출원인으로 조사되었다. 이 분야는 타 분야에 비해 출원 건수가 적어 상대적으로 연구가 미약한 것으로 보이고 있다. Fig. 12는 진공용 초정밀 운동 요소의 출원 경향을 보이고 있다.

전자빔 컬럼 및 빔 제어 기술 분야의 출원도 HITACHI가 최다 출원을 보이고 있다. HITACHI를 제외하면 타 기술 분야에 비해 고른 출원을 보이고 있다. Fig. 13은 전자

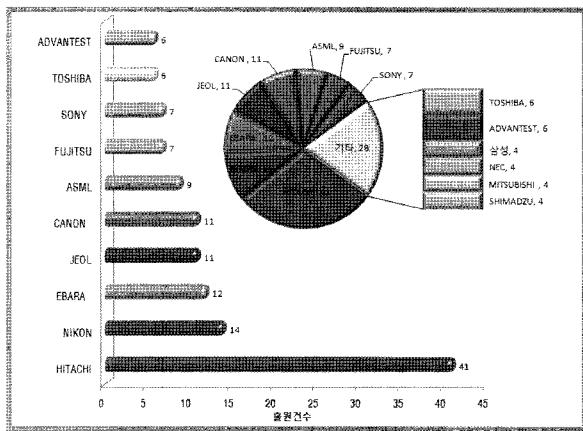


Fig. 12 Patent trend for ultra precision movement elements

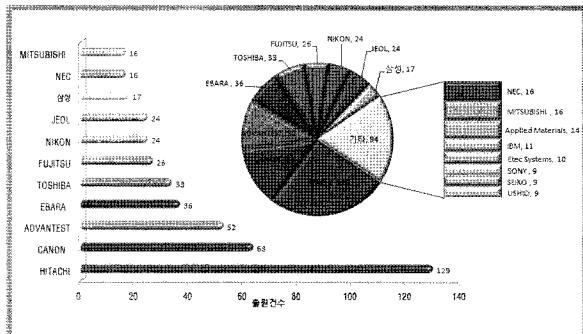


Fig. 13 Patent trend for electron beam column

빔 컬럼에서 특허 경향을 보이고 있다.

가장 많은 특허 출원을 하고 있는 HITACHI의 특허 내용을 분석하면 다음과 같다. 공정 지능화 설계 분야와 전자빔 컬럼 및 제어 분야와 관련된 특허를 다수 출원하고 있으나 진공용 초정밀 운동 요소 분야와 관련된 특허는 상대적으로 적게 출원하고 있다. 공정 지능화 분야에서는 빔 거리 측정과 보정 기술, 전자빔 사이즈 측정 분야에서 다수 출원을 하고 있다. 전자빔 컬럼 및 제어 분야에서는 전자빔 스캔 기술과 멀티빔 가공 기술 그리고 빔 차단 기술 분야에서 출원을 하고 있다. CANON은 전자빔 컬럼 및 빔 제어 분야에서 활발한 특허 활동을 보이고 있다. 이 분야에서는 멀티빔 가공 기술 및 빔 차단 기술과 관련된 특허를 다수 출원하고 있다.

기술별 기술 발전도를 분석하면 다음과 같다. 공정 지능

화 분야는 1992년 까지 일본 특허의 비중이 한국과 미국 특허에 비해 압도적이었으나 1992년 이후 한국과 미국에서도 관련 기술의 특허가 다수 출원되고 있으며 2000년 이후부터는 일본 특허와 한국, 미국 특허 출원 격차가 줄어들고 있다. 1998년까지는 빔 거리 측정, 자동 초점 등에 관한 특허가 다수 출원되고 있다. 진공용 초정밀 운동 요소 기술 분야의 경우 스테이지 동기 제어 기술을 제외하고 특허 출원이 되고 있지 않고 있다. 전자빔 컬럼 및 제어 기술 분야는 일본의 특허 건수가 한국과 미국에 비해 많다. 한국은 1993년 이후 특허가 출원되기 시작했다. 미국은 2003년 이후 일본보다 특허건수가 증가하기 시작하고 있다.

## 5. 결론

나노 패터닝 장비의 기술적인 발전 단계를 분석한 결과로 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전자빔을 이용한 리소그래피가 나노 패턴링을 위한 리소그래피에 대한 하나의 선택안이 될 수 있으나 생산성 극복이라는 큰 문제를 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 다양한 전자빔 리소그래피 기술의 연구가 일본과 미국에 의해 주도되고 있다.
- (2) 국내의 전자빔 리소그래피를 개발하기 위한 전자렌즈 설계 및 고전압 발생기 설계 기술 등 기반 기술이 취약한 상태로 선지국과 많은 격차를 가지고 있다.
- (3) 정량적인 특허 분석에서는 일본의 출원 비중이 매우 높으며 이는 전자빔 미세 가공 장치에 대한 연구와 상용화가 활발함을 보이고 있다.
- (4) 한국, 일본, 유럽 및 미국은 공정 지능화와 전자빔 컬럼 및 제어 기술 분야에 대한 특허 활동에 집중하고 있다. 이것은 이 분야가 장비 개발의 핵심 요소임을 알려주고 있다.
- (5) 정성적 특허 분석에서는 HITACHI와 CANON이 전자빔 가공 장치 기술과 관련하여 각국에 출원을 하고 있다. 공정 지능화 설계 분야에서는 HITACHI와 TOSHIBA 및 네덜란드의 ASML이 주로 출원하고

전자빔 컬럼 및 빔 제어 분야는 일본의 EBARA와 NIKON 그리고 미국의 APPLIED MATERIALS 등이 출원하고 있다.

(6) 전자빔을 이용한 미세 가공 장치에 대한 특허 출원이 발전기에 있는 것으로 분석되어 아직 기술 개발을 필요로하는 분야가 많은 것으로 나타나고 있다.

#### 참고 문헌

1. Joseph, I. G., Dale, E. N., Patrick, E., David. C. J., Roming. A. D., Charles. E. L., Charles, F. and Eric. L., 1992, "Scanning Electron Microscopy and X-

- Ray Microanalysis," PLENUM PRESS, pp. 21~272.
- 2. John, T. L., 1993, "ELECTRON BEAM TESTING TECHNOLOGY," Plenum Press, pp. 129~147.
- 3. Sunjong, L. and Chanhong, L., 2006, "Design of Control Signal Systemization for SEM," KSMTE, pp. 97~100.
- 4. Sunjong, L. and Chanhong, L., 2007, "Hardware Design for the Control Signal Generation of Electron Optic by Focal Length," KSMTE, Vol. 16, No. 5, pp. 96~100.
- 5. Gibom, K., 2003, "Nano patterning technology using electron beam," KISTI tech trend report.
- 6. "Patent trend analysis for electron beam manufacturing system," KIMM, 2007.