

Nanometer Order의 가공기술 현황과 미래



이 응 속 (가공기술실 선임연구원)

- '80. 2 서울대학교 공과대학 기계설계학과 졸업
- '82. 2 동 대학원 기계설계학과 졸업(석사)
- '82. 3-현재 한국기계연구소 선임 연구원

1. 서 론

고도의 정보화 사회로 치닫고 있는 현재 사회에서 LSI, Computer, VTR 등의 전자제품의 기술 발전은 가속적으로 진행되고 있음과 더불어 Video Camera, Projection TV 등 결상광학 응용제품 및 CD Player, Digital 복사기 등 Laser 응용제품의 기술에 있어서도 급속한 발달이 이뤄지고 있다.

반도체부품 LSI의 생산뿐만 아니라 금속반사경 등의 광학부품 가공에는 초정밀 가공기술이 필요하다. 이 두가지의 제조기술은 서브 마이크론 내지 나노미터의 정밀도라는 측면에서 비슷하다고 할 수 있으나 전자는 IC 리소그래피 시스템과 같은 미세형상을 만드는 것으로 미세가공(Fine Machining)에 속하고 후자는 가공대상이 커다란 부품이다.

예를들면, 천체망원경의 주반사경은 가까운 거리에 직경이 10m에 달하는 것도 개발될 것이며, 정확한 해상도를 위해선 광파 파장의 수십배 내지 수백배의 일에 해당되는 표면거칠기로 가공되어야 한다. 흐린 영상이나 색수차를 없애기 위해선 지극히 정밀한 가공기술이 필요한 것이다. 이와 더불어 최근에는 형상 정밀도 뿐만 아니라 표면 거칠기를 포함한 표면 품위(Surface Integrity)에 관한 문제들을 해결하기 위해 많은 관심이 집중되고 있다. 이는 기억밀도 및 입출력 속도를 높이기 위해선 메모리 디스크의 표면 특성 향상이 필요하게 되고, 고출력의 장수명 레이저의 개발에는 고반사율의 반사경이 필요하게 되는 것과 같이 제품기능의 고도화를 위해 여러분야에서 초정밀 가공기술의 필요성이 증가하고 있기 때문이며,

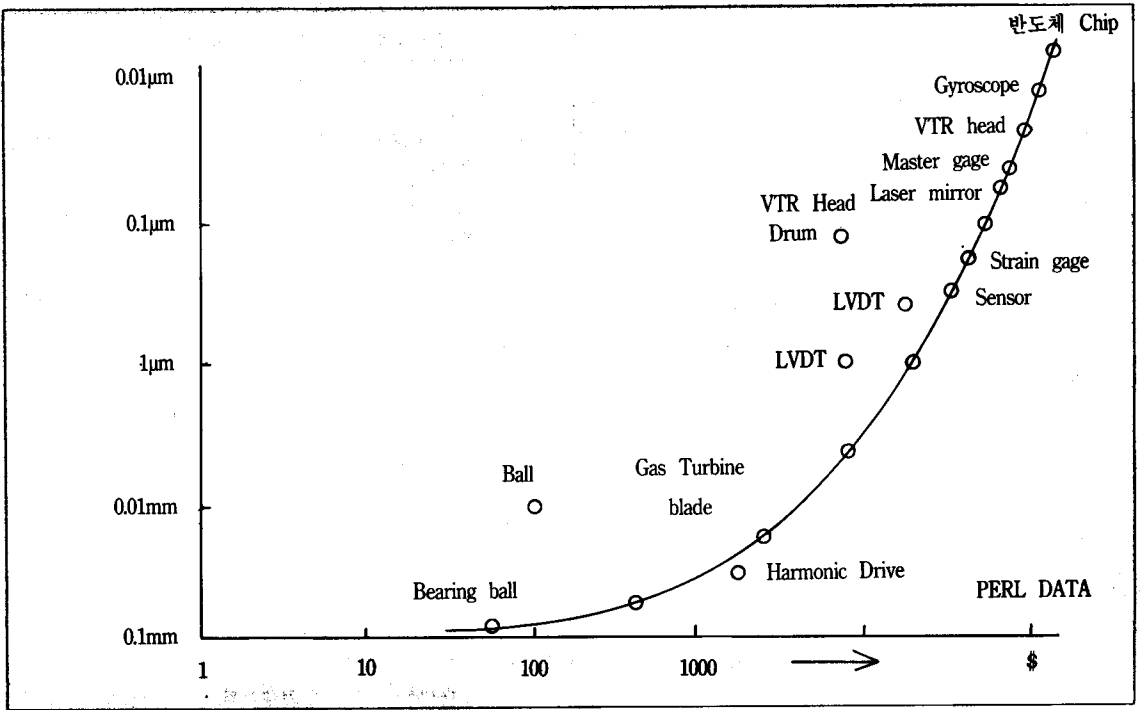


그림 1) g당의 무게로 본 제품의 부가가치와 정밀도

그림 1에서와 같이 제품의 미세화와 정밀화에 따른 부가가치가 급격하게 증가하기 때문이다.

초정밀 가공기술은 이러한 제품들을 생산하는데 있어서 기간기술의 하나로서 여기서는 전자부품, 광학부품의 동향, 가공기술 면에서의 과제를 비롯하여 Nanometer 단위의 가공정밀도를 달성하기 위한 초정밀 절삭 가공기술, 초정밀 연삭 가공기술, 초정밀 연마 가공기술, 위치제어기술 사례와 금후의 방향에 대해서 논의한다.

2. 초정밀 가공과 Nano technology

「초정밀」의 기준 인식은 여러가지가 있겠지만 하나의 기준으로서는

- (1) Sub-micron 단위의 형상 치수 정밀도
- (2) Nano-meter 단위의 표면 거칠기
- (3) 가공면 손상 혹은 변질층의 극히 작은 가공면 등을 들 수 있다.

그러나 이 기준은 가공면의 크기, 형상, 생산수량, 대상 재료에 따라 많이 변할 수 있으며 기술의

진보에 따라서도 당연히 변한다. 그림 2에 지난 70년간의 가공 정밀도의 수준을 범용 가공기술(normal machining), 정밀 가공기술(precision machining), 초정밀 가공기술(ultra precision machining) 등으로 분류하여 기계, 가공장비와 표시된 분해능을 가진 측정 장비와 함께 도표[1]로 나타냈다.

그림 3은 정밀 가공 부품의 대표적인 것을 예로 들어 형상 치수에 대하여 요구 정밀도를 정리한 것으로 전반적으로 치수의 고정도화, 미세화, 가공면의 평활화 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Nonotechnology는 가공 정밀도가 $1\text{nm} = 0.001\ \mu\text{m}$ 정도 필요한 제품을 만들어 내는 통합 생산 기술(integrated manufacturing system)이라고 일단 정의하자. 1nm 의 높은 수준의 가공 정밀도는, 고체 물자의 원자간격이 0.3nm 단위인 것을 볼 때 이 치수는 가공 정밀도의 한계에 가깝다고 할 수 있다. 통합이라는 것은 종래의 개념에서의 가공 및 조립등의 고유생산기술을 개별적으로 사용해서는 이러한 극한의 가공 정밀도를 달성하기 어렵다고 생각되기 때문이다.

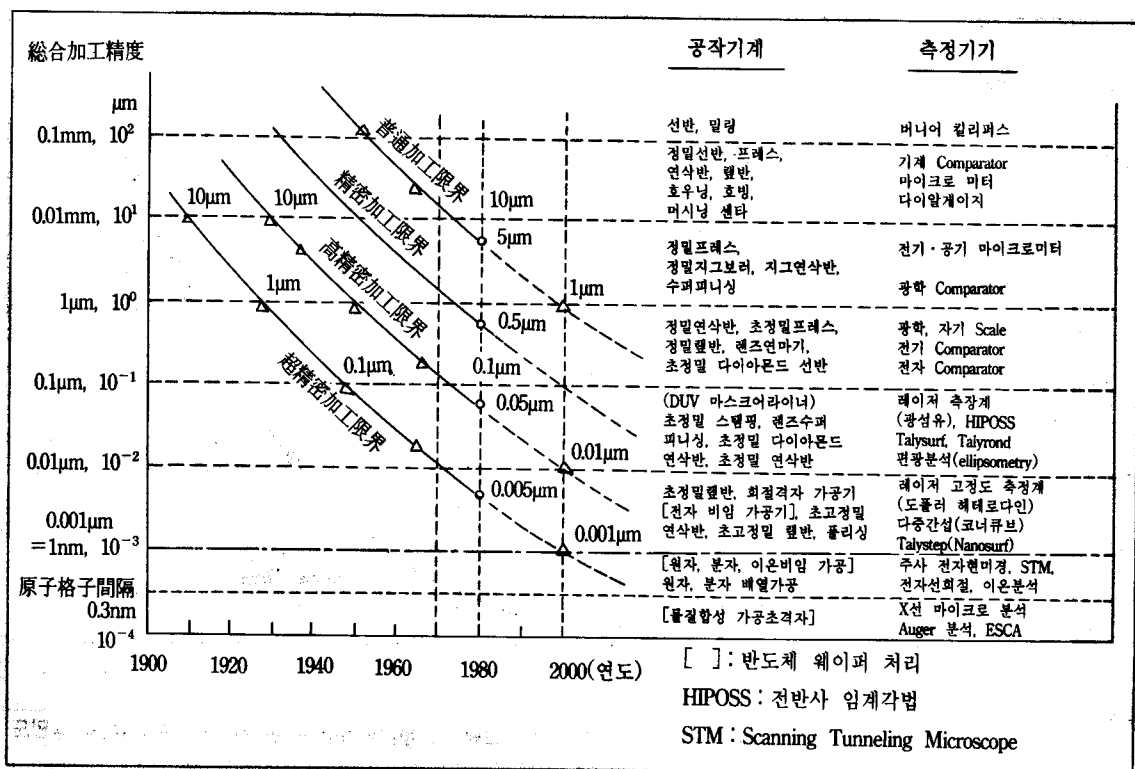


그림 2) 도달가공 정밀도와 연대

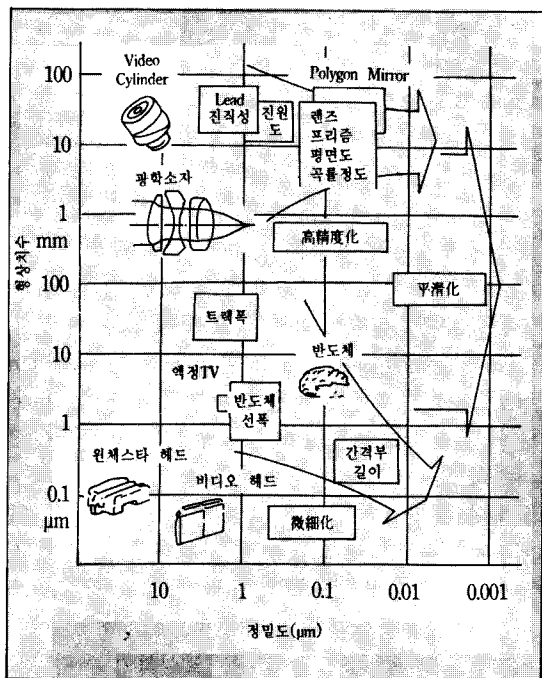


그림 3) 정밀부품의 高精度, 微細化, 平滑化 傾向

즉, 초정밀 가공, 조립 및 조정, 초정밀 치수 계측 및 선별 혹은 초정밀위치 제어등의 고유 생산 기술을 통합(integrate)하여, 균형있게 조정하여 통합 시스템을 구축함으로써 처음의 목표에 도달하고자 하는바, Nano technology는 가공정밀도의 극한을 추구하는 통합생산기술이라고 말할 수 있다. 그 중 초정밀 가공기술이 중심이 되는 것은 말할 필요가 없다.

특히 최근 수요가 많은 기계, 전자장치(Mechatronics)에서는 기본치수가 미세화 되고 있다. 예를 들면, 양산되고 있는 고집적 밀도의 IC 기억장치(집적회로 1Mb DRAM)등에서는 회로패턴의 최소 치수폭(design rule이라고 함)이 0.8μm 등으로 되어 있고, 극한적인 것은 최소치수 MOS 트랜지스터의 경우 게이트 폭이 0.24μm등으로 되어 있다[2]. 이를 위해선 초고정밀도의 가공만이 아니고 고밀도 미세화 제품을 만드는 것이 요청된다. 물론 이러한 미세한 기본치수(예를 들어 1μm폭)를 양산적으로 생산하는데는 적어도 미세치수가

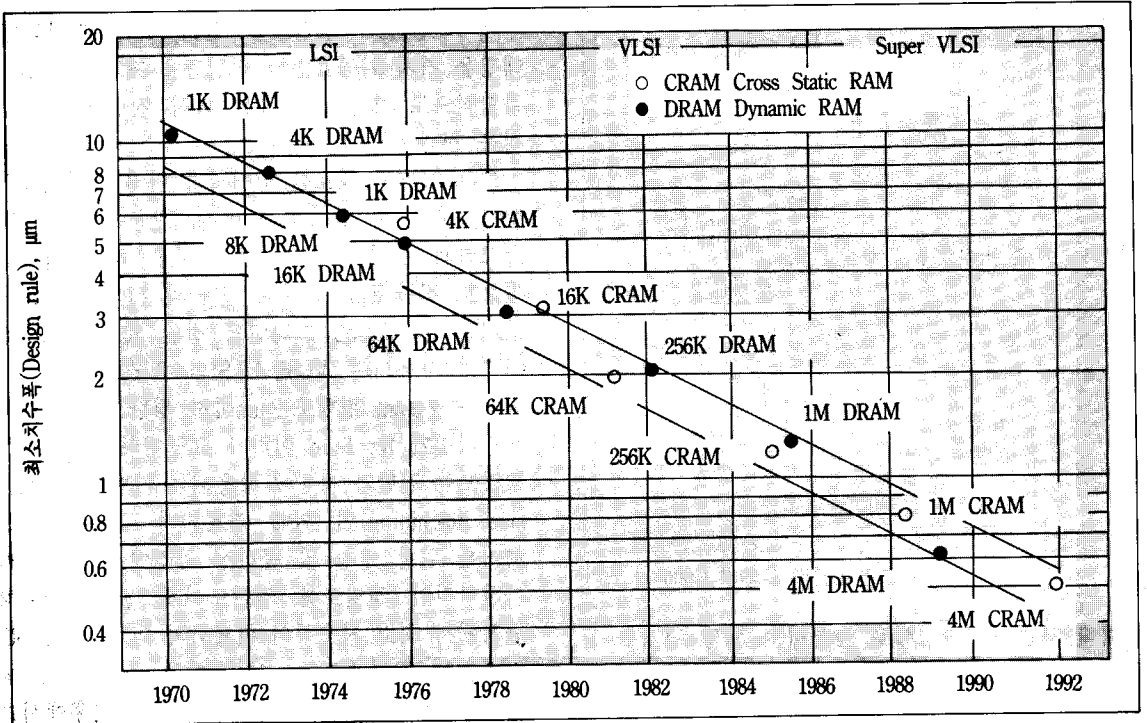


그림 4) VLSI 기술의 발전

10nm의 초고의 가공정밀도를 갖는 가공기술이 확립되지 않으면 안된다. 이와같은 실정으로 μm 대의 기본 치수를 갖는 제품의 생산에서는 이미 가공과 조립, 계측, 제어가 생산 공정 중에 일체화 되어 있고, 개개의 공정이 따로따로 이루어져서는 원하는 결과를 얻기 힘든 것이다. 즉, 수 nm의 가공 정밀도를 필요로 하는 미세 치수의 IC등의 생산에 있어서는 고유 생산기술이 통합된 Nano technology가 이미 어느 정도 구현되고 있다. 더욱이 CD(Compact disk) 및 VD(Video disk)등의 기계 전자 부품은 플라스틱 원판 상에 미세한 기록홈(폭 $0.7\mu\text{m}$, 깊이 $0.1\mu\text{m}$)을 나선상으로 만들어 그홈의 길이와 피치의 변화에 의해 영상과 음성 정보를 기록하는 것이다.

이러한 생산기술은 IC의 생산기술을 대폭 들여와서 고밀도, 고미세도의 정보 기록홈을 갖는 금형을 Ni 전주에 의해 만들고, 이 금형으로 플라스틱 원판상에 압인(stamping) 혹은 사출성형(injection molding)으로 극히 미세한 정보 기록홈을 갖는 원판을 만드는 것이다.

순 기계 부품으로서 VTR(Video tape recorder) 실린더 축의 miniature bearing은 $0.1\sim 0.01\mu\text{m}$ 의 가공 형상 정밀도가 요구된다. 그의 자이로스코우프의 회전축 흔들림도 $0.01\mu\text{m}$ 의 공차가 요구된다는 것은 이미 알려진 사실이다.

광학 부품으로서 최근에는 광 기계 전자학(opto-mechatronics)이라고 부르는 광, 기계, 전자를 종합한 VD 및 CD의 광학적 입출력 및 광섬유 통신장치가 있으며, LSI 제작용 수차 분할 축소노광장치 stepper)도 그 한 예이다. 당연히 $1\sim 10\text{nm}$ 의 반복위치 정밀도가 요구되는 장치이다[2].

3. 전자 부품의 가공기술

3.1. 전자 부품의 동향

반도체에서의 LSI 메모리의 대표 제품으로서 DRAM을 중심으로 그 동향을 살펴보면, 그림 4와 같이 1970년대 미국 Intell사가 1K DRAM을 발표한

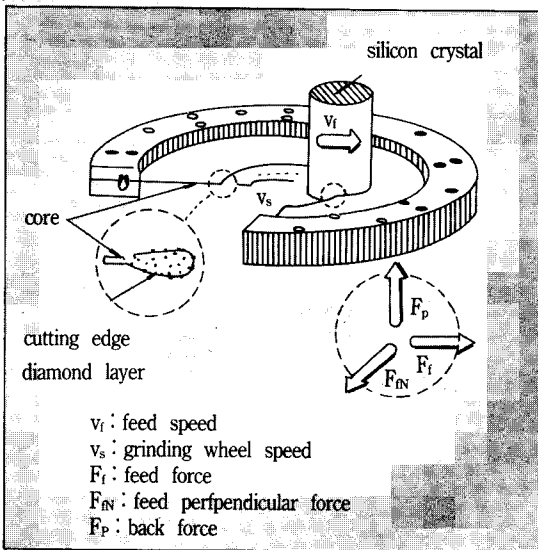


그림 5) ID Cut-off Grinding 원리

이래 3년 사이에 4배로 높아졌고 bit당 단가는 1년당 1/10로 내려갔다. design rule은 1~4M 시대에 이르서는 $12\mu\text{m}$ 에서 $0.8\mu\text{m}$ 으로 되어 1/15이 되었다[3].

한편, 정보의 전기 변환 소자인 자기 Head는 먼기록 밀도의 향상으로 고밀도화가 현저하게 이루어져 VTR의 경우는 테이프상의 기록폭(트랙폭) $15\mu\text{m}$, 최단 기록 파장 $0.6\mu\text{m}$ 이며 자기 디스크용 자기 헤드에서는 트랙폭 $10\mu\text{m}$ 이하, 디스크 매체 면상의 부상량 $0.15\mu\text{m}$ 정도에 이르고 있다.

따라서 금후 점점 고밀도화가 진행되면 트랙폭의 협소화가 더욱 심해질 것으로 추측된다.

3.2. 전자 부품의 가공 기술 과제

반도체 부품의 90%이상이 실리콘으로 만들어진다. 실리콘은 다이아몬드와 같은 공유결합의 결정구조를 가지며, 비커스 경도가 1000정도로 고정이고 탄소강의 1/100 정도의 낮은 파괴인성강도로 인해 경취성이 강해 기계가공성의 커다란 차이를 나타내게 된다. 실리콘 웨이퍼의 가공공정은 다결정 실리콘으로부터 길이 1m 이상의 원통형 단결정 실리콘 로드를 만들어 그림 5와 같이 ID Cut-off 그라인딩 혹은 Grinding/slicing 방법으로 얇게 절단함으로써 시작된다. 정밀한

두께와 평행도, 평탄도를 얻기 위해 그라인딩, 래핑을 거쳐 가공표면의 변질층을 제거하기 위해 화학적으로 에칭을 한다음 다시 경면으로 폴리싱을 한다.

그후 설계된 회로를 집어넣기 위해 여러단계의 산화, 화학 및 플라즈마 에칭, 진공증착, 광 리소그래피 등의 공정을 거친 다음 하나 하나의 칩으로 절단(dicing) 된다. 최근의 웨이퍼 제조공정에는 ID Cut-off 그라인딩 절단 및 양면 래핑 기술이 사용되며, VLSI, ULSI의 요구정밀도는 두께여유 $\pm 3\mu\text{m}$, 평행도 $2\mu\text{m}$ 이하, 평탄도 $1\mu\text{m}$ 이하, 표면거칠기 $R_z 1\mu\text{m}$ 이하가 요구된다[4]. 이러한 정밀도는 절단과 래핑에 사용되는 지립가공(Abrasive machining)에 의해 결정되며 표면손상층의 제거를 위한 에칭 및 폴리싱 공정에서는 오히려 기하학적인 정밀도를 떨어뜨리게 된다. 반도체 공정에서 최소 치수폭의 미세화와 더불어 photolithography 공정에서는 g선에 의한 축소 투영 노광이 주류이지만 4M에서는 i선, 16M 이후에서는 Excimer Laser, 전자선, X선이 사용되는 것으로 알려져 있다. 실리콘 및 실리콘 산화막 등의 에칭에서는 반응성 이온 에칭 및 마이크로파여기에 에칭 방식이 사용되고, 막형성 공정에서는 감압 CVD, 플라즈마 CVD등이 사용된다. 한편, 웨이퍼의 대직경화에 따라 현재 6인치가 주류이지만 8인치도 개발되고 있다. 웨이퍼의 기판의 가공 기술에서는 생산성의 요구는 물론이지만, 광 리소그래피에서의 평면도의 영향, 고밀도화에 따른 가공손상의 영향 등이 개선되어야 한다. 자기 Head에서는 먼기록 밀도의 향상을 위한 가공기술 과제로서는 트랙폭의 협소화, 자기 간격 부분의 고정도 가공, 디스크용 자기 Head 부상면의 고정도 평면 가공, 합금계 자성재료-결정화 유리-세라믹-저융점 유리등의 복합 재료의 고정도 연삭 연마 가공기술 등이다.

4. 광학 부품의 가공 기술

4.1. 광학 부품의 동향

Video camera, projection TV등의 결상 광학계에

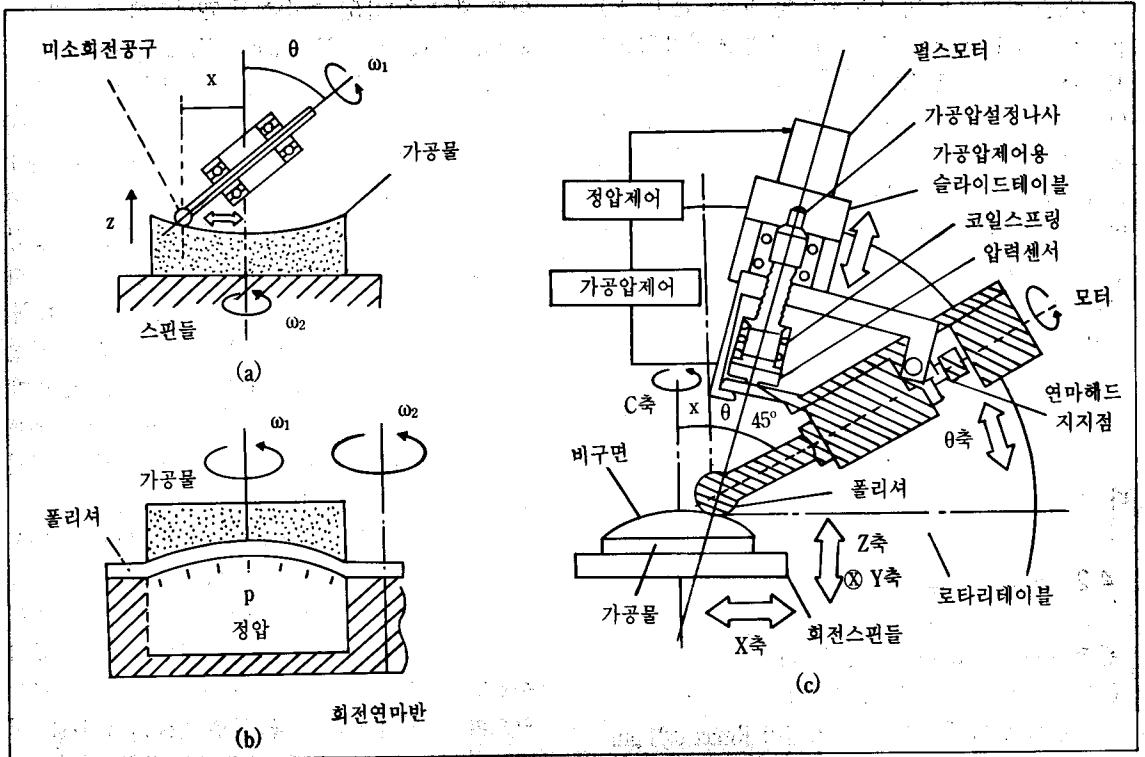


그림 6) 비구면 연마법의 종류

사용되는 광학부품, CD, VD, Laser beam printer 등의 Laser 광학계에 사용되는 광학 부품 중에서 평면, 구면 렌즈, 반사경의 가공 기술은 선진국에서는 이미 공업적으로 확립되어 있다.

그러나, 상기 제품에 있어서는 고성능화, 고기능화, 나아가서 소형화가 진행되어 새로운 광학 기능 부품의 개발 및 실용화가 이루어져 있다.

예를들어 광 디스크 광학 Head의 유리 프레스 비구면 렌즈, 감시 카메라용의 초광학 비구면 렌즈, AI의 다이아몬드 경면 절삭(Single Point Diamond Turning)에 의한 다면체경 등이 있다.

한편으로는 반도체 프로세스에 사용되는 축소 투영노광장치(Stepper), 형상 계측용 레이저 간섭계등에는 $\lambda/50$ 단위의 형상 정도의 광학 부품이 필요하게 되고 이러한 조립 정밀도 확보를 포함하여 정밀도 향상이 특별히 요구된다. 앞에서의 비구면 렌즈는 하나의 광축에 대해서만 회전대칭이며 그 이외의 축에 대해서는 비대칭이므로 형상 가공이 어려우며 높은 가공 정밀도가 요구

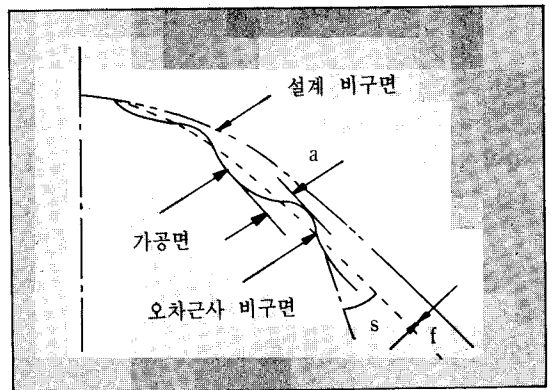


그림 7) 비구면 형상 오차의 표시 방법

된다.

그림 6은 비구면 연마법의 종류를 나타내며, 그림 7은 비구면 가공시 오차 형상을 나타내는 것으로 f는 각점의 측정치로부터 최소 자승법에 의한 오차 근사 비구면과 설계 비구면의 차이, a는 각점과 오차 근사 비구면과의 차, s는 오차 근사 비구면에 대한 오차 형상의 기울기 이다.

VTR용 카메라용 비구면 렌즈의 정밀도는 $f=\pm 1 \mu\text{m}$, $a=\pm 0.1 \mu\text{m}$, $s=1/5000 \text{ rad}$, 표면 거칠기 $R_{\text{max}} 0.01 \mu\text{m}$ 이하가 필요하다[3]. 비구면 렌즈는 광 디스크용 광학용 Head의 대물렌즈를 중심으로 실용화 되어 있지만, 그 제조 방법은 여러가지이다.

양산성의 측면에서는 사출 성형법을 이용한 비구면 플라스틱 렌즈와 구면 유리 렌즈 모재에 편육 수지막을 형성시킨 하이브리드 타입의 비구면 렌즈가 유리하다. 하지만 내열성, 내후성 및 형상 정밀도의 확보의 측면에서는 유리 렌즈에 비해 성능이 떨어진다. 따라서 연삭, 연마에 의해 대구경도 제작할 수 있고 다품종 소량 생산에도 적합한 비구면 유리 렌즈의 수요가 많아지고 있다.

4.2. 광학 부품 가공기술 과제

광학 부품 가공상의 특징은 다음과 같다.

- (1) 파장 단위 정밀도의 3차원 형상 창성 가공
- (2) 광학적 다듬질면(표면 거칠기 $R_{\text{max}} 0.01 \mu\text{m}$ 이하)를 실현하는 가공
- (3) 대상 재료는 광학 유리등의 경취성 재료 혹은 광학 플라스틱 재료, 연질 금속 재료 등이다.
- (4) 초고정도(측정 정도 $0.01 \mu\text{m}$) 3차원 형상 측정기 등의 평가 수단이 필요 불가결함.

따라서 가공기술면의 과제로서는 다음과 같다.

- (1) $\lambda/50$ 단위의 형상 정도를 실현하는 평면, 구면의 총형 공구 상대운동에 의한 연마 가공
- (2) 연삭 가공, 절삭 가공
- (3) 3차원 형상 창성 연마 가공

5. Nanometer Order 가공기술의 동향

5.1. 초정밀 절삭 기술

1966년에 미국 Union Carbide 사가 半球體($\phi 100 \text{ mm}$)를 $0.6 \mu\text{m}$ 의 정밀도로 절삭하는 기계 및 3년뒤 네덜란드의 Phillips 사의 초정밀 다이아몬드 절삭기계가 발표되어 초정밀 절삭가공이 시작되었

다고 할수 있다[5]. 계속해서 72년도에 미국의 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)에서 Oil Shower 방식의 초정밀 절삭가공장치가 발표되었다. 레이저 핵융합의 연구개발과 관련하여 연질금속의 고정도 비구면반사경이 다수 필요하게 되어 미국의 에너지 청의 지원을 받았다. 영국에서는 Cranfield 대학 부설 연구소 CUPE에서 X선 천체망원경에 사용될 비구면 반사경 가공용 다이아몬드 선반을 개발하였으며, NPL과 각 대학, 기업의 협력으로 X선 광학 부품을 가공하기 위한 기계 및 측정기술 등의 연구에 노력하고 있으며, 87년도에는 국가 프로젝트로서 Nanotechnology를 추진하고 있다. 일본은 70년에 공압 및 유압의 정압(Hydrostatic) 베어링을 개발한 이래 Toyota 공장기계, Toshiba사, Hitachi, Fujikoshi사 등에서 각종 초정밀 경면 가공기를 개발하여 자기 디스크, 다면체경, 레이저 반사경, 복사기 드럼등의 가공에 사용하고 있다. 일본의 특징은 사무기기, 컴퓨터 주변기기, 음향기기 등의 민수품을 대상으로 하고 있으며, 구체적으로 예를 들면 Compact Disk 및 Video Disk 장치의 Pickup 렌즈용 금형, 탄산가스 레이저의 Bend Mirror 및 집광렌즈, Video Tape Recorder의 Cylinder 등으로 점차 적용 대상을 넓혀 가고 있으며 자기 디스크의 경우는 연간 1000만매 이상 생산하고 있으며, 최근에는 금형을 경면 절삭하여 사출 성형에 의해 대량생산하고 있는 실정이다. 그외 독일, 중국 등에서도 활발히 연구를 추진하고 있는 실정이다.

그림 8은 실제 다이아몬드 절삭 가공의 이용 예화 가공정밀도를 나타낸 것이다(日本 豊田工機 자료 1983).

컴퓨터 자기디스크 회전시 자기헤드의 부상량은 $0.3 \mu\text{m}$ 정도이며, 최근에는 $0.15 \mu\text{m}$ 까지 요구된다. 부상량 $0.3 \mu\text{m}$ 은 점보 제트기가 지상과 8mm 를 유지하며 수평비행하는 것과 같은 상태이다.

5.2. 초정밀 연삭기술

공작기계의 역사중에서 다이아몬드 공구를 이용한 경면가공기술이 중요시 되는 것은 운동전 사원리를 기초로 하여 광학적인 정밀도를 실현

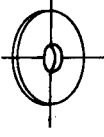
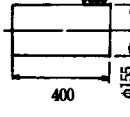
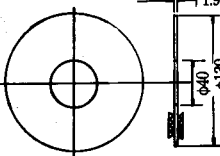
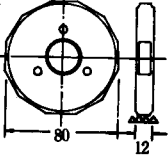
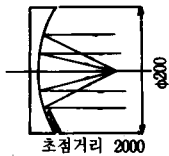
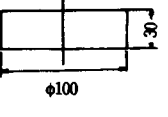
기계		초정밀 선반				초정밀평면
항목						폴리싱 머신
이 용 예	컴퓨터[자기드럼]	컴퓨터 [자기디스크]	레이저프린트[다면경]	광학부품[레이저반사경]	VTR[화상 Head]	
	복사기[감광드럼]		광학기기 [다면경]	비구면 플라스틱렌즈	광학부품[광학유리, 레이저반사경, 반도체기판[실리콘웨이퍼]]	
공작물 재질		비철금속, 비금속(알루미늄 · 구리 · 합성수지등)				페라이트, 실리콘, 광학유리(BK7), 세라믹
공 작 물 예	형 상					
	재 질	알루미늄합금	알루미늄합금	알루미늄합금	무산소동	광학유리 BK7
	가공량	0.01mm	0.03mm	0.05mm	0.03mm	
	사이클 타임	2분 40초	25초 / 1면가공	13분(황+정삭공정)	5분(다듬질가공)	약 1시간
	정밀도	표면 거칠기 0.005 μ m Ra 진척도 0.12 μ m / 100mm 진원도 0.3 μ m	표면 거칠기 0.007 μ m Ra 가속도 10m/sec ²	표면거칠기 0.016 μ m Rmax 평면도 $\lambda/8$ 평분할정도 7.5°	표면거칠기 0.03 μ m Rmax	표면거칠기 10A 평면도 0.03 μ m

그림 8) 다이아몬드 절삭가공의 이용 예

시킨 실용적인 기술로서 일단 정착단계에 들어섰다는 점이며, 또한 가공정도의 극한을 추구하고 그 특성을 해명함으로써 가공정도를 지배하는 요소인 공작기계, 절삭공구, 피삭재등의 모든 관점에서 가공정도제어를 위한 계기를 주었다는 데 의의가 크다. 그러나, 초정밀 다이아몬드 선반에 의한 절삭이 적용 가능한 공작물 재료는 한정되어 있고 경취성 재료에 대해서는 아직 대부분 실용화 단계에 접어들지 못했으며, 또한 초정밀 부품의 사용환경은 민생기에 있어서도 온도, 습도, 진동, 충격등 환경조건이 엄격하며, 공업용기에서도 반도체 산업에서 발달한 無塵, 溫度, 振動의 초안정공간이 극히 고가인 형편임으로 온도, 습도, 진동등 환경에 대해 민감하지 않은 재료의 선택으로 각각 부품에 필요한 고정도, 고성능, 고신뢰성을 실현

하고자 하는 것이 설계상의 중요한 관점으로 되고 있다. 따라서 온도변화에 대한 안정성이 높고 열팽창 계수가 낮은 고강성의 재료를 채용하기 시작하여 광학 유리, 용융석영, SiC, SiO₂, Al₂O₃, WC등이 용도에 따라 사용되어지고 있다. 결국 초정밀 가공부품의 재료는 금속으로부터 경취성 재료로 옮겨가고 있다고 할 수 있다. 경취성 재료의 연삭가공에서의 거동은 취성파괴에 의한 제거메카니즘이 일반적이지만 이러한 경취성 재료에서도 재료가 갖는 임계파괴 응력이하의 연삭조건이 실현된다면 이 영역에서의 가공거동은 연성파괴에 의한 제거메카니즘으로 이행하는 것으로 널리 알려져 있다. 즉 연삭에서도 작용지립이 피가공물에 간섭하는 양이 임계절삭 깊이 이하로 되도록 제어 된다면 연성파괴에 의한 가공이 실

超純水에 분산시킨 연마재를 사용하여 無塵化清淨 환경하에서 작업하는 방식이 많이 채택되어 진다.

폴리싱에서의 재료 제거 메카니즘은 기계적 작용(기계적 제거와 마찰, 혹은 응착 박리작용)과 더불어 화학적 작용(화학적 제거 및 피막 형성 작용)으로 나뉘지며 이러한 작용의 조합에 의해 여러가지 연마방법으로 분류된다.

기계적 작용을 줄이고 초정밀화를 이루기 위해선 超微粒砥粒과 연질공구를 사용하는 것이 유리하다. 궁극적으로 액체와 기체가 해당되며, 초미립자를 현탁시킨 콜로이드 특유의 현상을 이용하는 콜로이달 실리카 폴리싱, 액체가 지립을 지지하는 EEM(Elastic Emission Machining), 플로우트 폴리싱, 비접촉 폴리싱등이 그 예이다.

이러한 방법들은 연마재의 흐름 속에서 비중 혹은 질량이 다른 초미립자가 유선을 벗어나 가공물 표면에 얇은 각도로 긁고 지나가면서 원자, 분자 단위의 재료 제거(화학 에칭의 제거 단위에 필적)가 이루어지는 것으로 예측된다. 즉, 기계적 작용이 최소로 한정되고 연마액의 존재 하에서는 화학적 작용이 첨가된다.

또한, 대형광학부품, 비구면 광학 부품, 특수형상 광학 부품등의 고정밀한 형상 및 평활면을 얻기 위해서는 일반적인 연마기술로서는 어려워 형상 창성연마의 새로운 연마기술이 필요하게 된다. 이의 한 방법으로서 CAD에 의한 설계와 CAM에 의한 가공을 병용하여 설계치와 가공물의 측정치의 오차를 컴퓨터로 산출하고 작은 직경의 랩 혹은 폴리셔를 이용하여 컴퓨터의 제어에 의해 오차를 수정하는 연마법도 개발되고 있다. 즉, 소형의 연마공구를 이용하여 공작물의 치수와 비교하여 부분적으로 제거하는 방법으로 컴퓨터를 이용하여 공작물의 형상오차를 계측하고 부분적으로 연마조건을 구해 공구위치와 그 체류시간을 제어하여 형상 창성연마를 하는 것이다. 최근에는 이러한 연마장치와 측정장치가 1대로 구성된 전용기도 등장하고 있다. 이와같이 초정밀 연마는 재료 가공원리와 연마 조작의 쌍방간의 고도화에 의해 진전되고 있다.

5.4. 원자/분자 제거가공 기술

초정밀 가공에서는 칩의 제거가 극히 미세하게 이뤄져야 하므로 극한적으로는 원자 혹은 분자를 하나씩 들어내어야 한다. 이에 가까운 가공법으로서 단결정 다이아몬드 공구에 의한 미세절삭, 이온 빔을 이용한 가공 및 에칭, 플라즈마 가공, 레이저 가공, 이온 스퍼터링 등을 들 수 있다.

이온가공은 플라즈마 중의 이온을 음극의 가공물에 충돌시켜 재료를 최소 단위의 원자, 분자 크기로 제거하는 가공법이다.

이온 가스로서는 희귀성의 아르곤 가스, 반응성 이온을 생성하는 CF_4 , 분위기 조정을 위한 C_2H_6 가스 등이 사용되며 주로 반응성 이온 스펙타 에칭이 보급되어 왔다. 반응성 이온에 의한 화학적 제거와 더불어 가공 능률향상 및 가공 결합이 없는 것이 특징이다.

이온 빔 가공은 이온원으로부터 이온만을 뽑아내어 가공물에 조사하는 것으로 이온빔의 플라즈마 생성에는 직류, 교류, 고주파 마이크로파 등이 이용된다.

이러한 가공은 반도체 IC의 패턴 에칭 뿐만아니라 광 전자 기계 부품의 제작에 널리 이용되며, 다이아몬드 공구의 인선 가공에도 극히 효과적이다. 광학 유리의 비구면화에도 적용되어 연마와 같은 형상 전사 원리가 도입되어 표면 거칠기 및 형상의 비약적 향상이 기대되어 진다. 특히 이온 빔의 직경이 $1\sim 2\mu m$ 까지 미세해지고 초정밀 위치 제어가 가능해진다면 2차원 및 3차원의 형상의 초정밀 가공도 가능해질 수 있다.

플라즈마 가공은 플라즈마 생성시 반응성 가스를 생성하여 가공물에 작용시켜 기화하기 쉬운 반응 생성물을 만들어 진공 펌프로 배출시킨다. 가공물을 설치한 용기내에서 플라즈마를 생성시키든지 혹은 고주파 또는 마이크로파를 이용하여 생성한 플라즈마를 외부로 부터 공급받는 형태가 있다.

그림 10은 이온 빔 가공의 실제 응용 예를 나타낸다.

5.5. Nanometer 단위의 위치결정기술

반도체 집적회로의 고속화, 고밀도화가 추진되어

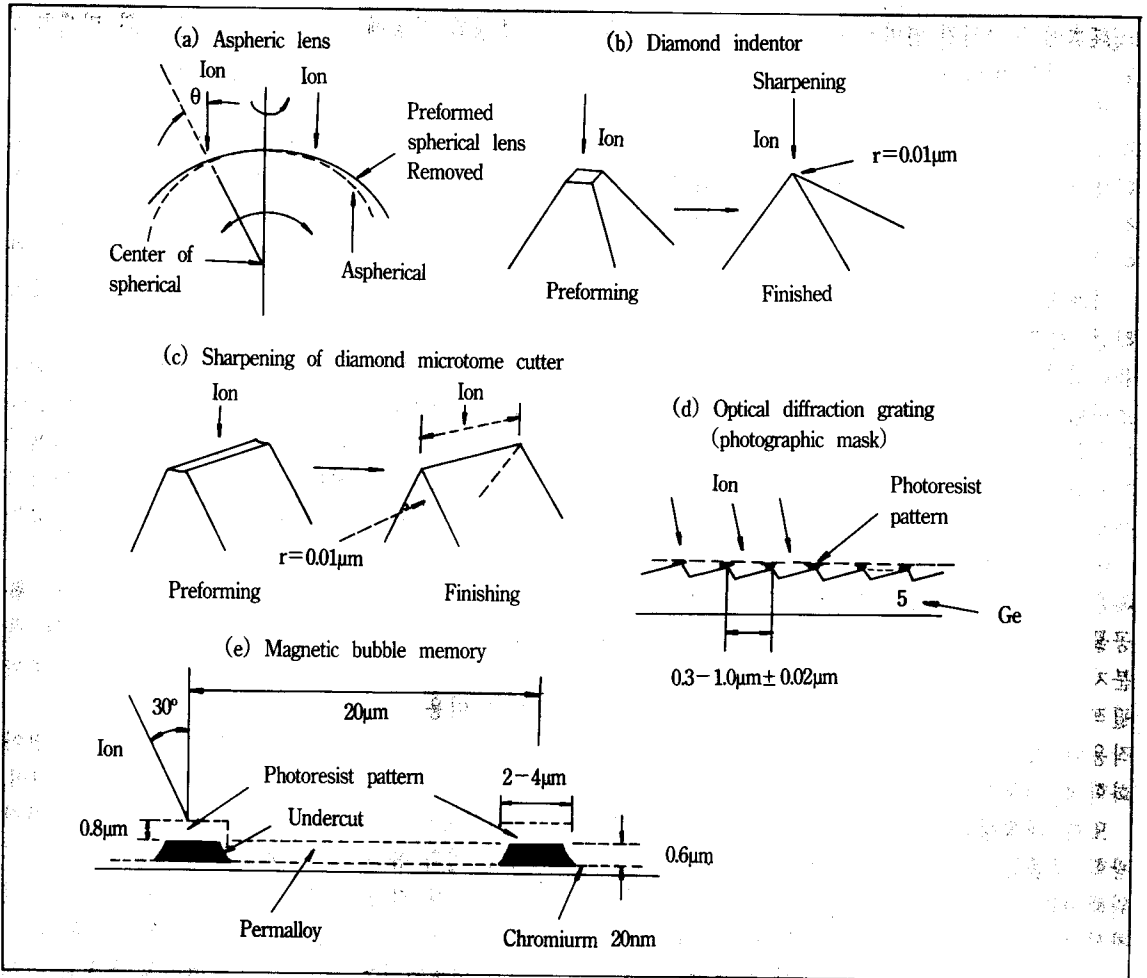


그림 10) 이온빔 가공의 응용에

회로 패턴의 미세화 현상에 대해서는 이미 언급한 바와 같다. 이 정도의 속도로 발전한다면 2000년대는 1 G DRAM이 등장할 것으로 예상된다. 이에 따라 반도체 소자의 선폭은 더욱 미세화될 것이다.

통상, VLSI 소자는 미세한 회로 패턴이 그려진 수십μm의 마스크를 이용하여, 이 패턴을 웨이퍼 상에 순차적으로 구워 제작 한다. 이 경우 각 패턴간의 중첩 정밀도가 소자 제조상 가장 중요하다. 이때의 정밀도는 최소 패턴 선폭의 1/3~1/5가 필요하게 되며 2000년도에는 0.02μm의 중첩 정밀도 달성이 필요하게 될 것이다. 여기서의 중첩 정밀도는 가공공정 오차, 위치결정오차 및 측정

오차를 포함한 것이다.

웨이퍼 상에 패턴을 전사하는 장치로서는 광노광 장치를 사용하며, 0.3μm 이하의 패턴 전사에는 광의 회절 한계 때문에 X선 노광 장치가 주류를 이루고 있다. 전자빔 장치는 전사장치의 마스크 제작용 등에 사용되며 2000년대의 중첩 정밀도를 달성하려면 위치 결정 정밀도가 5nm가 요구될 것은 틀림 없다.

이러한 위치결정을 정확히 하기 위해서는 적어도 네 가지의 위치결정 기술 즉, ① 피가공물의 위치를 알기 위한 체측기술, ② 피가공물을 구동하기 위한 구동기술, ③ 제어기술, ④ 이러한 것들을 구성하는 장치화 기술 등이 필요하다. 이에

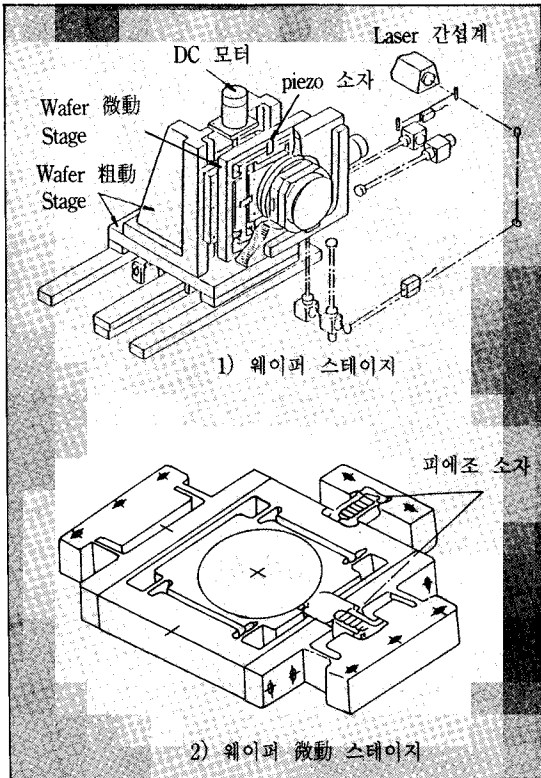


그림 11) Wafer Stage

덧붙여서 환경요소(외란) 또한 간과할 수 없는 문제이다.

현재는 빛의 회절 및 간섭을 이용한 위치검출의 방법이 많으며, 구동은 DC Servo Motor와 Ball Screw를 사용한다. 이러한 전통적인 구동기술은 강성이 높고 여러가지 잇점은 있으나 10~50nm 정도로 위치결정의 한계가 있다. 이에 대해 비접촉 리니어 DC Motor를 사용한 완전 비접촉 구동방법과 압전소자를 이용한 구동방법, 테이블을 구동하기 위해 직접 테이블에 힘을 가하는 DD 방식 등 여러가지 방법이 개발되었다. Nanometer의 구동정밀도를 위해서는 DD 방식의 채용, 미소영역에 있어서의 액츄에이터의 추력 증대, 감쇄 기능을 갖는 고강성의 기구가 필요한 것으로 알려져 있다. 제어기술에는 많은 부분이 디지털화 되어 이른바 디지털 피이드 백 제어방식이 많이 쓰이고 이는 노이즈 및 드리프트의 영향을 받지 않고 제어특성을 용이하게 바꿀 수 있는 잇점이 있다.

실제 반도체 웨이퍼의 리소그래피에 사용되는

스테퍼(stepper)의 예는 그림 11과 같다[9]. 이 경우는 DC Motor와 피에조 소자를 이용하여 구동하며, 微動 스테이지에 레이저 간섭계용 반사경을 설치하여 10 nm의 분해능으로 위치를 계측하여 스테이지 컨트롤러에 피이드 백 시킨다. 이와 같은 구성으로 직경 4인치의 웨이퍼 전면에 걸쳐 10 nm 분해능의 위치결정을 달성하고 있다.

6. 국내외의 Nanotechnology 개발현황 및 장래

일본의 경우 Yoshida Nano-Mechanism Project가 85년 10월에 과학기술청계의 신기술사업단이 하고 있는 창조과학기술 추진 사업의 하나로 출발하였다. 이는 반도체 집적화에서 볼 수 있듯이 현재의 최선단 가공기술은 미세화, 고정도화의 경향을 점점 강하게 나타냄에 따라 종래의 기술과는 관점이 다른 새로운 영역의 가공기술을 개발해야 할 필요성 때문이다. 이에 계측, 제어, 가공등의 요소기술 개발을 추구하고 있으며, 주요 연구테마는 주사형 터널 현미경(STM), 나노미터 위치제어 및 측정, X선 다층막 가공, 이온 빔에 의한 초평활면의 가공등이다.

영국의 경우 86년에 일본과 같은 내용의 연구를 목적으로 한 NION(The UK National Initiative on Nanotechnology) 프로젝트가 NPL(National Physical Laboratory)을 중심으로 시작되어 정부와 학교, 연구소, 산업체가 공동으로 실제적인 연구를 수행하고 있으며, 일본과도 Joint Symposium을 개최하기도 하였다.

미국의 경우는 이와같은 체계적인 프로젝트는 없지만 이에 대한 연구 의욕은 매우 높다. MMM(Molecular Measuring Machine)의 개발이 NIST를 중심으로 MIT, Zygo 등의 정부와 대학, 기업체가 공동으로 참여하여 이루어지고 있으며, 이미 널리 알려진 LLNL을 비롯하여 NCSU(North Carolina State Univ.), U.C. Berkeley 등에서 활발히 Nanotechnology에 대한 연구를 수행하고 있다.

그외 다른 나라에서도 이에 뒤떨어질세라 상기의 프로젝트를 참고로 하여 연구 프로그램을 개시하고 있는 실정이다.

국내에서는 89년도에 국책연구사업의 일환으로 처음으로 Polygon Mirror 가공기가 개발되었고, 90년도 부터는 KIMM을 중심으로 초정밀 비구면 가공기를 개발하고 있다. 또한 국내 공작기계 메이커에서도 Polygon Mirror 가공기 및 드럼 타잎 가공기를 개발하고 있는 것으로 알고 있다. 선진국에 비해서 상당히 늦은 출발이지만 초정밀 가공에 대한 중요성을 이제라도 겨우 깨닫게 된 것은 일면 다행이라고 생각되어 진다.

그러나, 굳이 문제점을 지적하자면 한두가지가 아닌 것이 사실이다. 초정밀 가공기술 및 Nanotechnology에 관한 기술개발은 첨단 기술 중에서 상징적인 것으로서 선진국들의 자존심이 걸려있을 뿐만 아니라 기술 개발 미비로 인한 기술종속 상태가 가시화 되고 있으므로 이에 대한 연구개발 경쟁이 치열할 수 밖에 없다. 이로인해 국내에서는 선진국의 기술이전 기피로 핵심기술의 도입이 불가능해져 이른바 기술공황에 부닥칠 것은 명약관화한 일이다. 이러한 첨단기술의 개발에 있어서 전문인력 및 연구 장비의 부족, 투자 규모의 열세를 차지하고, 실제적으로 부닥치는 문제점은 다음과 같다.

① Nanotechnology는 가공정밀도의 극한을 추구하는 통합기술로서, 초정밀가공, 조립, 치수 계측 및 초정밀 위치제어의 균형 있는 조합에 의해 달성될 수 있다. 이 중 초정밀 가공기술이 중심이 되는 것은 당연한 일이다. 그러나 국내에는 가공기술에 대한 인식 부족으로 이에대한 지원이 미흡한 실정이다. 가공메카니즘 자체 뿐만 아니라 재료의 피삭성, 최적 공구, 가공조건과 가공면의 표면 품위, 가공중 가공변수의 변동에 따른 영향등 가공면의 품질을 직접 좌우하는 것이다. 또한 가공 프로세스의 정확한 이해와 결과 예측이 선행되어야만이 장비의 설계 제작 및 프로세스 컨트롤이 가능해지는 것이다. 기존의 장비도입을 우선으로 하여 제품을 개발함으로써 장비의 활용이 떨어지고, 장비의 성능을 충분히 발휘하지 못한 이유가 여기에 있는 것이다.

② 초정밀 다이아몬드 절삭의 소재인 고강도, 고순도의 알루미늄 및 동합금 재료의 공급이 안 되고 있고, 대부분의 초정밀 가공 제품의 소재인

세라믹, 반도체 재료, 기타 신소재의 공급이 거의 외국의 수입에 의존하고 있다.

③ 고강성, 고정밀도의 가공장치 개발이 미비되어 있다. 세계적으로 선두그룹에 속하고 있는 반도체 개발에 있어서도 웨이퍼의 가공, 에칭, 리소그라피 등의 각 공정에 사용되는 첨단 장비의 대부분은 도입된 것으로, 고집적도의 새로운 모델의 개발시 장치개발의 미비로 전 라인의 도입으로 인한 엄청난 장비투자가 소요되고 있는 실정이다.

④ 0.01 마이크론의 운동정밀도, 가공부품의 형상정밀도, 위치 측정, 가공면에 손상을 입히지 않는 비접촉식 측정방법의 개발이 과제이다.

⑤ 진동, 온도제어 등의 주변환경의 엄격한 관리가 필요하며, 철저한 가공환경의 정비가 필요하다.

⑥ 초정밀 가공기술, 기계, 조립, 계측 및 제어등의 기술을 종합하여 장치화 하는 기술이 부족하다.

초정밀 가공기술은 고부가가치의 기술로서 앞으로 절대적으로 수요가 증가할 것이다. 따라서 생산기술의 하나로써 원하는 성능의 정밀도로 값싸고 빠르게 반복 생산이 가능해야 하는 것이다. 이를 위해선 초정밀 가공에 대한 끊임없는 지원과 국가적인 육성책이 시급하다고 할 수 있다.

참고문헌

- [1] Norio Taniguchi ; Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Material Processing, Annals of the CIRP, Vol.32, No.2, 1983, p.573.
- [2] 谷口紀男 ; Nanotechnology の構築とその理念, 精密工學會, Vol.56, No.3, 1990, p.427.
- [3] 上田修治, 中田邦夫 ; 電子部品 光學部品の超精密加工, 機械の研究, Vol.41, No.10, 1989.
- [4] H.K. Tönshoff의 ; Abrasive Machining of Silicon, Annals of the CIRP, Vol.39/2/1990, p.621.
- [5] 이재경, 이웅숙, 제대진 ; 공구선택 및 마모대책 연구, 과학기술처, 1990.
- [6] 宮下政和, ぜい性材料 の延性モード 研削加工技

- 術, 精密工學會, Vol.56, No.5, 1990, p.782.
- [7] 大森 整외; 주철다이아몬드 슷들에 의한 실리콘의 연삭가공, 89년 JSPE 춘계학술강연회, p.212
- [8] 近藤莠正외; 비축대칭 비구면 유리렌즈 가공장치
의 試作, 89년 JSPE 춘계학술강연회, p.687.
- [9] 河野英一; Nanotechnology 적용 시스템의 실제, 精密工學會, Vol.56, No.3, 1990, p.461.