

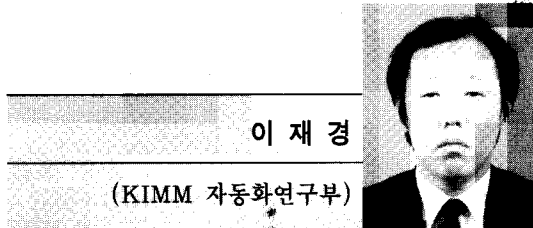
초정밀 절삭 가공기술 현황



제 태 진

(KIMM 자동화연구부)

- '86 경남대학교 기계공학과(학사)
- '91 경남대학교 기계공학과(석사)
- '82 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이 재 경

(KIMM 자동화연구부)

- '69 한양대학교 기계공학과(학사)
- '80 WASEDA대학 정밀공학과(석사)
- '80 - 현재 한국기계연구원 책임연구원



김 부 태

(삼성전자 렌즈파트)

- '82 삼성전자 입사
- '89 생산기술센터 렌즈파트 팀장

1. 서 론

근년까지 초정밀 절삭가공기술은 0.1mm이하의 미세 드릴링 기술, 미세 앤드밀 가공기술 및 단결정 Diamond Bite와 초정밀 가공기를 이용한 서브 마이크론 단위의 초정밀 경면 절삭가공이 주류를 형성하였다. 이러한 기술들은 최근 수십 마이크론의 미세 드릴, 직경 0.2mm급의 앤드밀 및 미세 가공용으로 제작된 수십 나노메타 오다의 다이아몬드 공구 등에 의해 초미세 초정밀 가공기술로 변천하고 있다.

또한 최근에는 고생산성을 위한 초정밀 고속 가공기술의 필요성과 함께 환경친화형 절삭가공기술의 필요성이 이슈가 됨에 따라 이러한 분야에 대응한 초정밀 가공기술의 개발도 주요한 테마가 되고 있다.

급변하는 기술환경의 변화와 더불어 절삭가공의 기본이 되는 가공조건 및 가공현상의 규명에도 많은 기술적 발전이 있었으며, 특히 실용화 가능한 초정밀 부품 가공 분야에서는 크다란 기술적 변화가 일어나고 있다. 가장 대표적인 예의 첫 번째는 기존의 초정밀 경면 가공기술을 이용한 비구면, 비축대칭 반사경, 마이크로 렌즈, 회절격자 등 초정밀 고성능 광학부품의 개발 분야이고, 두 번째는 밀리머신, 마이크로머신 등 초소형 미세 형상 부품의 수요에 대응하기 위한 각종 Micro parts의 초정밀 미세 가공기술의 발전이다. 이중 최근의 기계적 미세 가공기술 분야는 Micro parts 가공에 있어서 고에너지 가공이나 전기, 화학적 가공을 위주로 하는 MEMS 기술, 반도체가공기술 등에 대응하기 위하여 nm수

준의 극한정밀도의 추구 및 가공방법의 획기적 개선을 위한 노력이 심혈을 기울이고 있다.

이러한 초정밀 절삭가공의 추세에 맞추어 본 논문에서는 초정밀 절삭가공기술의 변천^[1]에 대한 간단한 조명과 함께, 최근 이슈가 되고 있는 Micro 부품의 초정밀 미세 절삭가공기술, 광학요소 부품의 초정밀 가공기술 개발 등을 사례 중심으로 소개하고자 한다.

2. 초정밀 절삭가공기술의 변천

18세기 후반 산업혁명의 원동력이 된 증기기관은 윌킨슨이 개발한 선반으로 직경 1피트의 실린더를 코인 직경 정도로 두께 정밀도를 향상시킨 것이 결정적 역할을 한 것으로 말하고 있다. 그로부터 200년이 지난 지금 Nano-technology의 제창자인 Taniguchi씨^[2]는 최고 정밀도의 가공한계는 서기 2000년에 가공정밀도에서 0.001 μm (1nm)에 달할 것으로 예측했다. 이 예측에 의하면 이러한 가공정밀도를 실현하는 가공법은 절삭가공이 아닌 연삭, 폴리싱 또는 빔가공 등이다. 그러나 현재 실험실적으로는 이미 절입 1nm에서 절삭이 이루어지고 있고^[3], nm 오더의 절입에서 절삭력도 측정되고 있다.^[4] 이러한 초정밀 마이크로 절삭에 있어서의 한계는 공작기계의 운동정도와 공구인선에 있어서의 공구형상의 전사정도, 즉 가공프로세스에 의해 결정된다.

최근 공작기계에 있어서 초정밀 에어베어링을 갖춘 주축회전정도는 10nm 오더이고 운동재현성은 nm 오더에 달하고 있다. 공구는 단결정 다이아몬드를 폴리싱으로 연마하는 것이지만 인선 측정결과 10nm 오더에 있다. 이 들로 전술한 실험실에서 1nm의 절삭이 실현되고 있지만 현재의 공작기계, 공구기술로서는 거의 가공한계에 이르고 있는 것으로 볼 수 있다.

향후 마이크로 절삭의 가공한계가 어디까지 향상할 지는 이러한 기계, 공구 등의 하드웨어의 발전에 달려있다.

한편으로는 최근들어 컴퓨터시뮬레이션으로는 분자동력학을 이용하여 분자레벨의 절삭 시뮬레이션에 대한 연구가 성행하고 있고, 분자레벨에서의 절삭가능성도 나타나고 있어 향후 기대되는 부분이다.

실용적인 초정밀 절삭가공은 공작물의 치수에 따라 현재는 0.1~0.01 μm 수준이고 최고 표면조도는 그 한 단계 아래에 있는 것으로 판단된다. 대표적인 초정밀 가공법인 단결정 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 절삭은 공구 형상의 전사정도가 좋아 형상창성기능이 우수하고 고능률로 복잡형상의 가공면을 고정도로 가공하는 이점이 있다. 그러나 단결정 다이아몬드의 재질특성 때문에 제약이 있어 현재 알루미늄, 동, 플라스틱 등의 연질재료에 많이 이용되고 있고, 경질재료의 가공에는 크게 활성화 되지 못하고 있다.

이러한 경질재료의 가공문제를 해결하기 위하여 최근에는 탄소분위기 속에서의 절삭, 냉동절삭 등이 시도되고 있으며, 최근에는 초음파 타원진동절삭이 큰 효과를 나타내는 것으로 보고되고 있다.

이와 더불어 최근에는 단결정 Si 또는 유리, 수정 등의 경질재료에 대한 다이아몬드 절삭가공이 진행되고 있다. 지금까지 이들 가공은 절입을 적게하는 경성모드 가공이었으나 최근에는 연성모드 절삭의 실용화 연구가 수행되고 있다. 그러나 현재까지 연성모드의 한계는 재료에 따라서 차이는 있지만 1 μm 이하의 절입 범위에 있어 향후 연성모드의 절삭조건을 확대하는 것이 중요한 과제가 되고 있다.

향후 초정밀 절삭가공이 기대되는 분야로서는 초정밀 마이크로 절삭이다. 마이크로머신으로 대표되는 마이크로기계, 기계요소를 제작하는 방법으로서 lithography, etching 기술 등이 폭넓게 연구개발되고 있지만, 공작물 재질에 구애받지 않고 복잡한 형상을 고정도, 고능률로 가공하여 얻는 가공법으로서 초정밀 절삭가공의 수요는 높다. 현재 단결정 다이아몬드 바이트를 이용한

선삭, Fly cutting 또는 특수한 1 절인 단결정 다이아몬드 엔드밀 등을 이용한 마이크로부품의 밀링 가공이 많이 시도되고 있다. 특히 최근에는 4축, 5축 등의 복합 초정밀 가공기를 이용하여 미세한 3차원형상 절삭을 실현하고 있다.

향후 연구개발이 필요한 대표적인 초정밀 절삭가공기술 분야를 표 1에 나타내었다.

이와같은 초정밀가공기술의 변천에서 최근의 초정밀 선삭 가공기술은 기존의 단결정 천연 다이아몬드 공구에 의한 미세 경면 절삭가공기술을 바탕으로 한 광디스크, 반사경, 렌즈, 광학용 금형 등의 가공에서 고집적화된 DVD Disk, 마이크로 렌즈 등과 같은 초정밀, 초소형화는 물론 밀러머신, 마이크로머신에 사용되는 초소형 미세형상부품(마이크로 부품)의 가공으로 발전하고 있다. 특히 마이크로 부품의 가공에서는 기본적으로 초소형화된 선삭 가공기, 복합가공기를 개발하여 각종 형상의 마이크로 부품을 가공하는 방법이 제안되어 큰 반향을 불러일으키고 있다.

3. 마이크로 절삭가공기술

3.1 국내 관련기술 개발현황

최근 선진국들을 중심으로 Milli structure나 Micro machine의 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 중 미세 가공 기술(마이크로 가공 기술)은 핵심 주요 요소 기술로서 차지하는 중요성이 매우 크다.

현재 수행중인 마이크로 가공 기술은 리소그

라피와 엿칭 등의 반도체 제조 기술을 응용한 것과 절삭, 연삭, 방전 가공 등의 일반 기계 가공 기술을 응용한 것으로 크게 분류될 수 있다. 전자는 두꺼운 소재나 혹은 소재의 재질에 따라 제한될 수 있으며, 후자는 연삭이나 방전 가공의 경우에 있어서는 생산성은 양호하나 우수한 가공면 품질을 얻기가 곤란하다. 따라서 생산성이 우수하고 가공 자유도가 높은 절삭 가공의 적용이 바람직한 경우가 있다.

그러나 종래의 초정밀 절삭 가공 기술로는 소재의 고품위 가공면을 달성할 수 있지만 선반을 이용한 실제적인 초미세 부품화로의 적용 예는 그다지 많지 않다. 따라서 초정밀 가공기 상에서 단결정 다이아몬드 바이트를 이용한 밀링 가공을 수행하여 3차원 형상의 초정밀 마이크로 부품을 생산하기 위한 관련 연구가 진행 중에 있다.

국내의 경우에는 한국기계연구원에서 직경 50-100 μ m의 마이크로 드릴을 제조할 수 있는 공정 및 평가 기술에 관한 연구를 수행하는 한편, 스테핑 모터를 적용한 전용 가공 시스템을 활용하여 박판에 대한 고세장비의 천공 실험을 수행하고 있다. 그림 1은 한국기계연구원과 참여기업이 공동개발한 마이크로 드릴링 시스템과 드릴링 공정 및 성능평가 시스템이며, 그림 2는 본 시스템을 적용하여 직경100 μ m 및 50 μ m의 마이크로 구멍을 가공한 모습이다.

또한 한국기계연구원에서는 초정밀 경면 절삭 가공기술개발의 일환으로 그림 3과 같은 초정밀 경면 가공기를 개발하였으며, 각종 재료 및 제품 형상의 경면 가공기술개발에 대한 연구를 수행

표 1. 향후 연구개발이 필요한 초정밀 절삭가공 분야

초정밀가공 분야	응용 사례	배 경
초고정도화(초초정밀화)	X선관련기기(SOR관련) 초초정밀 광학부품	X선 관련 수요증대 광학기기의 단파장화
복잡형상의 초정밀가공	각종 렌즈, 미러 대형 프레넬렌즈	비구면 광학계의 수요증가
대형화	X선 천체망원경 대형 SOR용 미러	특수 대형부품의 요구
마이크로화	밀러머신, 마이크로머신	부품의 미소화, 복잡형상화
난삭재의 초정밀고속가공	초정밀 금형 특수 렌즈, 미러	강,경성재료의 초정밀가공요구

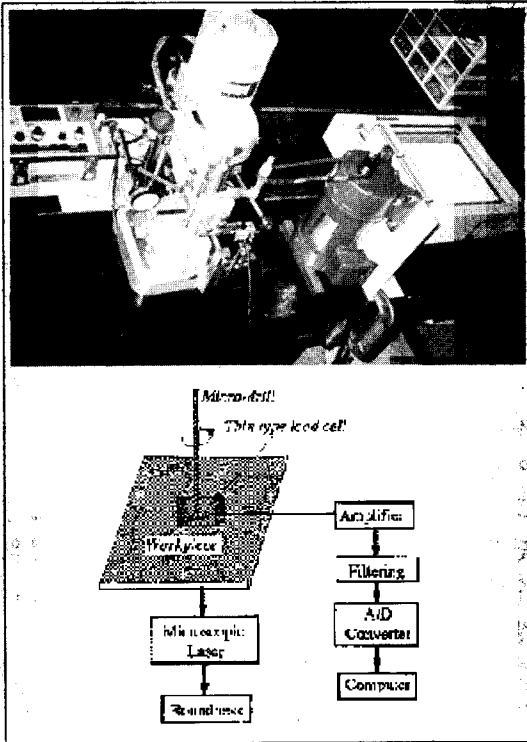


그림 1. 마이크로 드릴링 및 성능평가 시스템 구성도

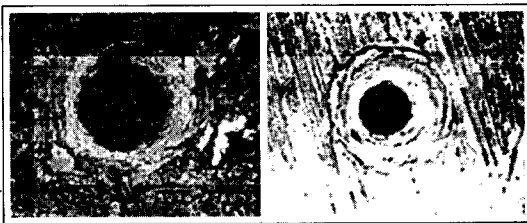


그림 2. 직경 100 μ m, 직경 50 μ m 드릴링 예

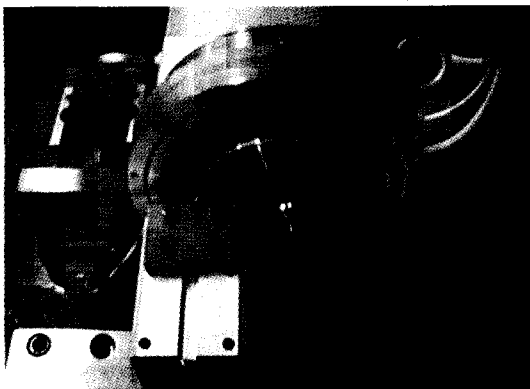


그림 3. KIMM의 초정밀 경면 가공기

하였다. 그림 4에는 0.3mm 피치의 미세한 그루브를 가진 프레넬 렌즈 금형 가공 예를, 그림5에는 여기에 사용된 미세 인선 다이아몬드 공구 (R10 μ m 및 R1.5 μ m) 형상을 나타내었다.

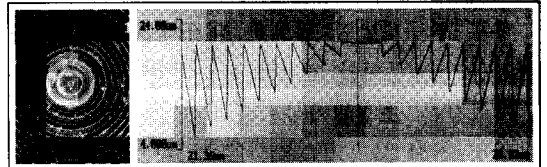


그림 4. 프레넬 렌즈 금형가공 예 및 형상 측정결과

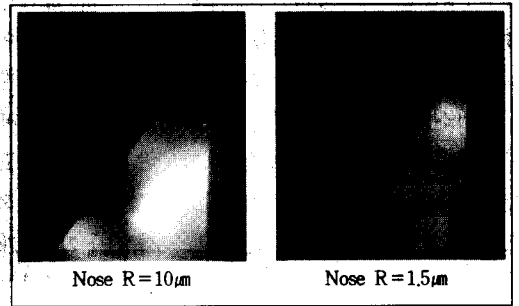


그림 5. 프레넬 렌즈 가공용 미세 다이아몬드 공구

이와 더불어 최근 한국기계연구원에서는 초소형 부품 즉, Milli-Structure 또는 Micro machine 용의 미세 부품을 초정밀 절삭가공을 통하여 실현하기 위한 준비를 진행하고 있다.

삼성전자는 국내 최고의 초정밀 경면 가공설비를 기반으로 다양한 초정밀 광학부품을 생산하고 있으며, 최근에는 자유곡면과 같은 비구면을 갖는 고난이도 가공공정의 레이저 프린트용 F- θ 렌즈의 개발에 성공하고 있다.

기초과학기술연구소에서도 98년에 도입된 초정밀 경면 가공기를 기반으로 각종 초정밀 부품 및 금형 가공기술을 개발하고 있다.

그러나 이와같은 국내의 기술개발은 대부분 외국의 장비와 기술에 의존하기 때문에 아직 독자적인 마이크로 가공기술을 확보하지 못한 수준이라고 보여진다. 따라서 국내에서도 21세기를 주도할 Micro Machine용 부품들을 생산할 수 있는 초초정밀도 개념의 미세 절삭가공기술개발에

더욱 노력해야 할 것으로 보인다.

3.2 국외의 Micro 가공기술 개발동향

일본은 마이크로 절삭가공 기술 분야에서 세계에서 가장 활발하다고 볼 수 있다. 최근에는 선반형 초정밀 밀링 머신을 개발하여 그림6과 같은 자유 곡면의 형상에 관한 마이크로 가공을 수행한 실적이 있으며, 기존에는 석영(글라스)과 같은 취성 재료에 대한 마이크로 가공이 중심이었으나 현재까지의 축적된 노하우를 충분히 활용하여 그림 7과 같이 금속 재료에 대하여 자유 곡면의 복잡한 형상도 미세 가공하고 있다.

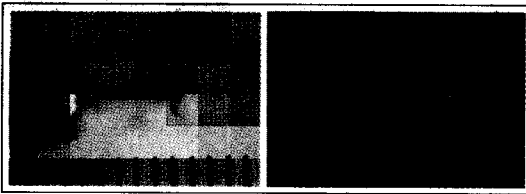


그림 6. 직경 3mm의 팬형상 스크류의 미세 성형 가공 예

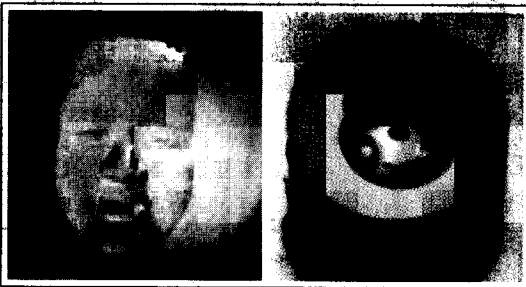


그림 7. 직경 3mm의 석영 및 금속재에 대한 3차원 미세 성형 가공 예

히타치사에서는 직경 200 μ m 급의 마이크로 드릴을 개발하여 상품화하고 있으며, 세이코사에서는 자체적으로 직경 80 μ m 급의 마이크로 드릴을 가공 제작하여 시계용 초소형 무브먼트의 가공에 활용하고 있다.

일본 나고야 기술연구소와 미국 콜로라도 대학교는 전해가공을 이용하여 FIM(field ion microscopy) 용 미세 선단(sharp tip) 가공을 수

행하여 선단반경 5nm의 미세 선단을 가공하였다. 그 이외에 다이아몬드 선삭을 비롯하여 일반 가공법의 극미세화, 정밀화를 통하여 기계적 미세 가공에 대한 연구가 진행 중에 있으며 특히 3차원 구조를 지닌 미세 금형 제작 기술에 많은 관심이 모이고 있는 추세이다.

일본 기계기술연구소에서는 마이크로 공장의 실현을 위한 기초연구를 수행하면서 그림 8과 같은 Micro 선반을 시제작하였다. Laminated Piezo Actuator 방식에 의한 XY 구동 유닛트와 마이크로 모터에 의한 주축 디바이스 등을 중심으로 제작되었으며, 32 \times 25 \times 30.5mm의 초소형화된 사이즈이고 전체 중량은 100g, 주축 디바이스의 구동 용량은 1.5W 이다. 보통의 선반에 비하여 크기는 1/50, 중량은 1/10000, 소요동력은 1/1000 이라는 특징을 가지고 있다.

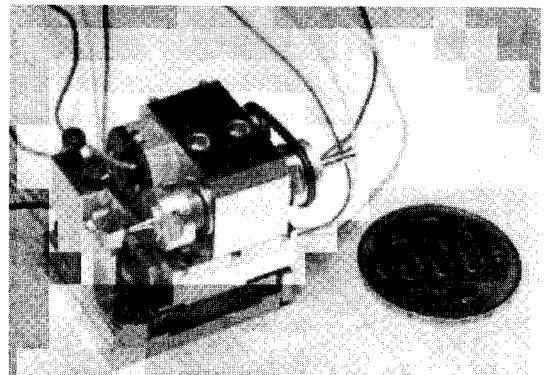


그림 8. Micro-lathe

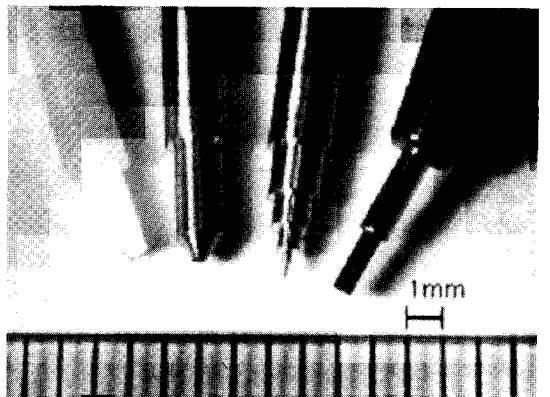


그림 9. Machined works

이 마이크로 선반을 이용하여 직경 2mm의 황동봉을 회전속도 10,000rpm, 절입량 30 μ m, 이송속도 0.06 μ m/rev의 절삭조건으로 가공하여 1.5 μ m Rmax의 표면거칠기와 2.5 μ m의 진원도를 획득함으로써 일반 선반과 동등 이상의 성능을 발휘할 수 있다는 것을 확인하였다. 가공물의 크기는 최소 직경 60 μ m 까지 가능하며, 그림9와 같이 Acetal resin 봉과 같은 소재의 가공도 가능하다.

그림 10에는 마이크로 선반을 이용하는 경우의 에너지 소비량을 나타내었다. 마이크로 모터를 사용하므로 일반 선반에 비하여 1/100 정도의 에너지만 소비되며, 어떠한 가공에서라도 실제 절삭가공에 소요되는 에너지 소비량은 전체의 약 5% 정도인 것을 알 수 있다. 이는 소형 제품 가공시 대부분의 에너지는 기계가동에 소요되며, 동작기계가 소형화되면 동작기계도 축소될 수 있고, 마이크로 공장은 공기조화에 필요한 에너지를 절약할 수 있다는 장점을 유추할 수 있다.

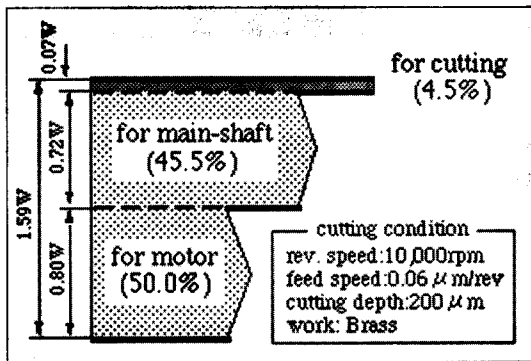


그림 10. Rate of power consumption

일본 FANUC사에서는 그림 11과 같이 ROBOnano Ui라는 초정밀 마이크로 머신을 개발하여 선삭에서 3차원 형상 가공까지 복합가공이 가능하게 하였다. 그림 12는 이 머신의 구성도를 나타낸 것이다. 이 기계로 지금까지 lithography로 제작하기 어려웠던 자유곡면 형상의 회절격자나 비구면 렌즈의 금형을 가공하는 것이 가능하다. 공기정압으로 200mm의 이송거

리와 1nm의 분해능을 갖는 Non-friction servo system, 2nm 오차 이내의 이송서보모터트랙 등의 특성을 가지고 있다.

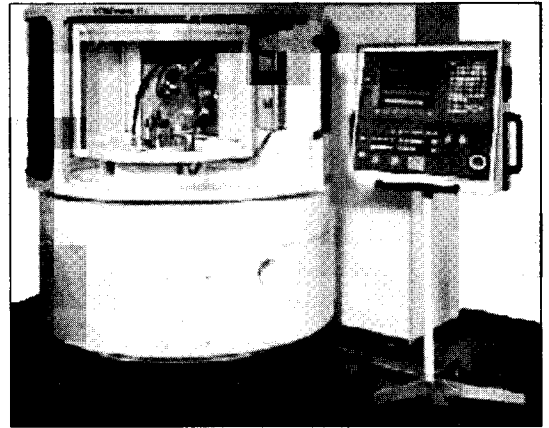


그림 11. ROBOnano Ui 마이크로 머신

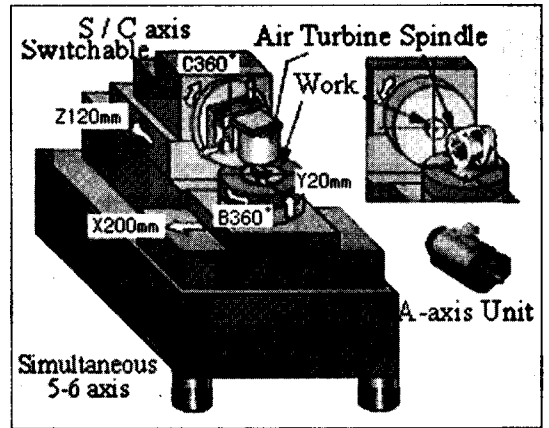


그림 12. ROBOnano Ui 머신의 구조

그림 13에는 이 기계를 사용하여 직경 1mm, 높이 30 μ m의 가면 마스크를 경면 가공한 예를 나타내었다. 재질은 황동이며 공구회전수는 50,000rpm, 가공속도는 5mm/min으로 약 2시간 가공으로 58nmRmax의 표면조도를 얻었다. 그림 14에는 가공에 이용된



그림 13. 1mm 가면 mask

단결정 다이아몬드 공구의 형상과 가공방법을 나타내었다. 공구를 회전시켜 엔드밀과 같은 효과를 내는 일종의 Fly-cut 방식이다.

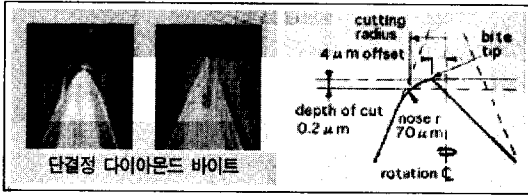


그림 14. 미세가공용 다이아몬드 공구형상

그림 15는 직경 12mm의 Encoder Disk에 1μm의 V groove grating을 가공한 모습이다. 미세한 groove를 Edge부의 Burr 결함 없이 초정밀 가공할 수 있음을 알 수 있다.

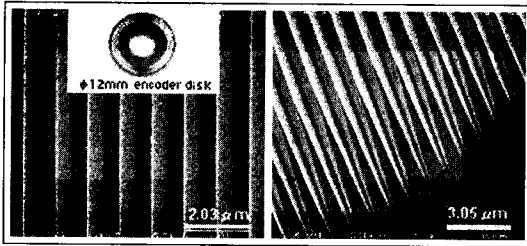


그림 15. Micro V groove 가공

이러한 미세 groove의 가공에는 그루브의 형상에 따라 다양한 다이아몬드 공구를 제작하여 응용할 수 있다. 그림 16에는 그 응용 예를 나타내었다.

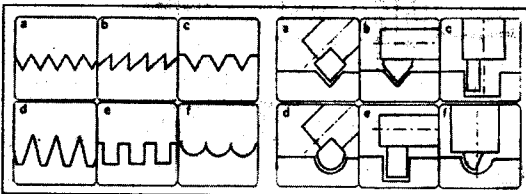


그림 16. Micro Groove의 Cutting 방법

일본 동경대에서는 그림 17과 같이 1nm의 분해능을 갖는 4축 초정밀 가공기를 개발하여 각종 Micro parts의 절삭가공기술을 개발하고 있다.

그림 18은 소결 다이아몬드 공구($r=0.05\text{mm}$, $\alpha=0^\circ$, $\beta=15^\circ$)를 이용하여 직경 200μm, 50μm, 10

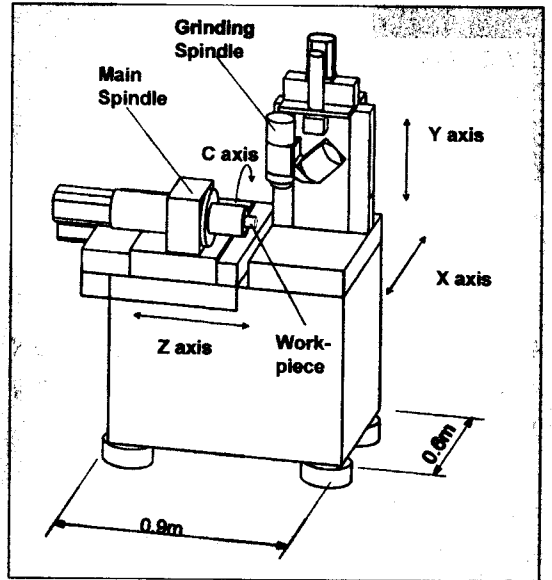


그림 17. 4축 초정밀 가공기 개략도

μm의 샤프트를 차례로 선삭가공한 예이며, 그림 19는 직경 100μm의 샤프트에 피치 20μm의 나선을 5μm 깊이로 총 1mm의 길이로 가공한 예이다. 인선폭 10μm, 여유각 20°의 단결정 다이아몬드 공구를 이용하여 회전수 130rpm, 1회 절입 깊이가 0.5μm, 총10회의 절입으로 4분 정도에 가공하였다.

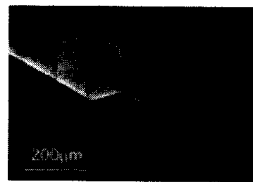


그림 18. 마이크로 3단 샤프트

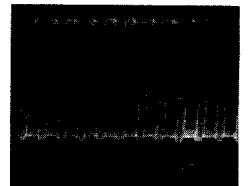


그림 19. 마이크로 나선 가공

그림 20은 두께50μm, 길이 100μm, 폭120μm의 진동자 레버 선단과 그 끝에 160×120×80μm의 사각형상을 중첩 가공한 예를 나타내었다. 재질은 스테인레스이며 제작방법은 먼저 외경을 200μm으로 선삭 가공하고 0.2mm의 엔드밀을 사용하여 가공한다. 그림 21은 같은 방법으로 알루미늄 합금재료를 이용하여 평행 보 구조의 마이크로 액츄에이터용 진동자를 가공한 예이다.



그림 20. 액츄에이터 진동자

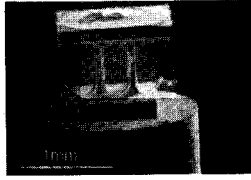


그림 21. 평행 보 진동자

그림 22는 마이크로 메뉴플레이터 핸드부 부품을 가공한 예이다. 재질은 SUS304이며, PCBN 엔드밀 공구로 외경을 700 μm 으로 가공하고 중심부는 200 μm 의 드릴로 가공했다.

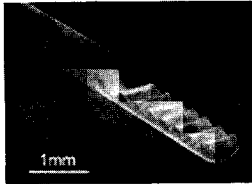


그림 22. 마이크로 Manipulator hand 부품

일본 Kanazawa 대학에서는 그림 23 및 그림 24에 나타난 것과 같은 사이즈 200mm, 주축회전수 15,000rpm, 공작물 직경 0.3mm를 장착하여 최소 10 μm 까지 가공할 수 있는 Micro lathe turning system을 개발하여 다이아몬드 공구를 이용한 다양한 형상의 Micro Parts 가공기술을 개발하고 있으며, 3방향의 Force Sensor를 사용하여 절삭력을 측정, 마이크로 부품에 적용하기 위한 작업의 정확성과 저항력감소에 대한 연구를 수행하고 있다.

가공 공구는 직경 0.25mm 봉에 경사각이 0° 또는 60°인 삼각 피라미드형 단결정 다이아몬드 공구를 부착사용하며, 공구대는 회전이 가능하여 facing, forming, taper turning, internal cutting 등 다양한 형태의 절삭에도 적용 가능하도록 되어 있다.

공구동력계는 그림 25와 같이 가공중 3방향의 절삭력을 측정할 수 있도록 0.3mm 평판 위에 스트레인지지를 부착하는 형식으로 구성되어 있으며 하중측정 범위는 1mN~1N 이다.

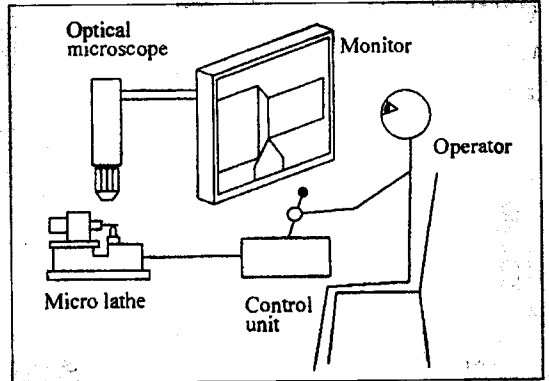


그림 23. Micro Cutting System

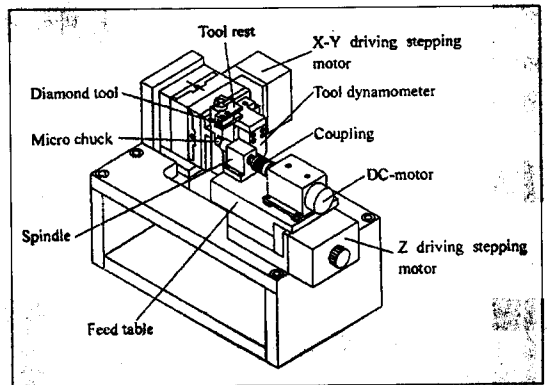


그림 24. Schematic of Micro Lathe

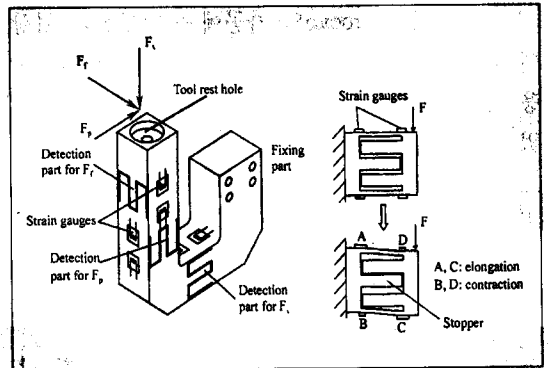


그림 25. Cutting Dynamometer

가공 예로는 단결정 다이아몬드 공구로 직경 0.3mm의 황동 wire를 사용하여 직경 200 μm , 최소직경 10 μm 까지 가공하였으며, 직경 100 μm 봉의 단면가공, 30 μm 깊이로 100 μm 길이의 groove 가공, 직경 120 μm 에 피치 12.5 μm 의 screw 가공

등을 하였고, 표면조도는 모두 $1\mu\text{mRmax}$ 이하를 달성하였다. 기타 다양한 형태의 마이크로 부품 가공에 대한 적용연구와 함께 미세 가공에서의 가공 칩 형상, 절삭력 분석 등의 기반 연구를 수행하고 있다.

스위스의 경우는 전문 제조 업체에서 PCB 보드 및 반도체 관련 제품, 특수 섬유사 제조용 노즐 헤드 등의 초미세 천공 가공을 위한 직경 $100\mu\text{m}$ 이하의 마이크로 드릴을 생산하여 전세계에 고가로 시판하고 있다.

미국 Purdue 대학교에서는 미세 방전 가공 중 정확한 방전상태 진단과 전극 이송제어에 관한 연구가 진행중이며, 로체스터 대학에서는 Moore Tool사와 공동으로 Nanotech150AG라는 절연삭 공용 초정밀 가공기를 개발하여 직경 10mm급의 비구면 마이크로 렌즈에 대하여 진원도1nm, 가공면 결합층 1-2nm급의 정밀가공을 수행하고 있다.

또 National Jet사에서는 마이크로 드릴링 머신 및 드릴을 개발하여 $25\mu\text{m}$ 의 구멍을 $2.5\mu\text{m}$ 의 정밀도로 가공하는데 성공하고 있다.

4. 초정밀 광학소자의 절삭가공

4.1 Hologram 광학소자 가공법

일본 Kanazawa 대학과 동경대학은 공동으로 앞의 4자유도의 초정밀 가공기로 자유곡선을 갖는 회절격자인 홀로그래프 광학소자의 절삭가공을 실현하였다. 그림 26은 가공 제품의 형상을 개략적으로 나타낸 것이다. 회절격자의 선 형상은 자유곡선으로 되어 있고 단면은 톱날형상으로 되어 있다. 회절격자 선이 자유곡선형상이므로 치형과 경사면의 기울기는 회절격자 곡선의 간격에 따라 변화한다. 따라서 그림에 표시된 형상을 가공하기 위해서는 곡선형상의 생성에 2자유도, 치형과 경사면의 기울기 제어에 1자유도, 절삭절입량 제어에 1자유도 등 최소한 합으로 4자유도

가 필요하다. 여기서 치형의 피치 폭을 w , 각도를 θ , 깊이를 d 라 하면

$$w = d \sin \theta$$

가 되는 관계가 성립하기 때문에 4자유도의 제어가 가능하면 이와같은 회절격자를 가공할 수 있는 것이다.

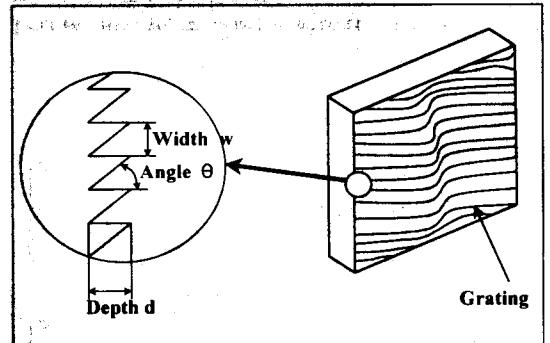


그림 26. Hologram Lens의 구조

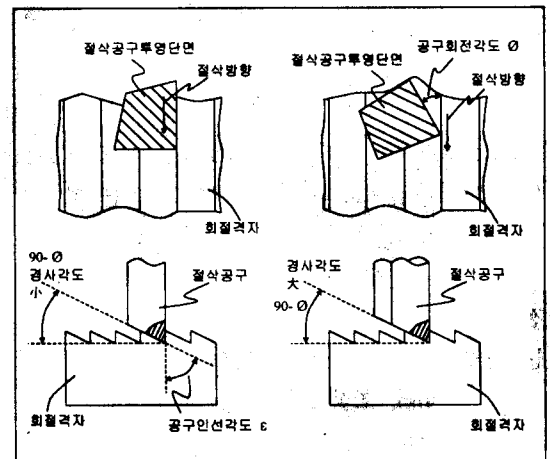


그림 27. 공구각 변화에 의한 미세 groove 가공법

이와같은 경사면의 각도를 변화하는 절삭방법으로는 몇 가지가 있지만 여기서는 그림 27에 나타낸 방법을 채용하였다. 그림 16(a)는 공구회전각이 0의 경우, (b)는 공구를 가공면에 대하여 수직인 축에서 만큼 회전시킨 경우이다. 이때 회절격자 경사면의 각도와 회전각도 사이에는

$$\tan \theta = \tan \alpha \cos \phi$$

의 관계가 성립한다. 따라서 이를 변화시킴으로서

경사면의 각도 또는 그루브 폭을 변화시킬 수가 있다. 단 절삭공구의 Nose 각 ϵ 은 미리 가장 큰 각도에 맞추어 제작할 필요가 있다.

그림 28에 무산소동(C1020), 무전해 니켈도금, 알루미늄합금 2종(A5086, A7075) 등 4종류의 재료에 대하여 단결정 다이아몬드 공구로 가공한 표면 단면을 AFM으로 관찰한 결과를 나타내었다. 무산소동과 무전해 니켈도금 가공면 형상이 비교적 양호한 것을 알 수 있다.

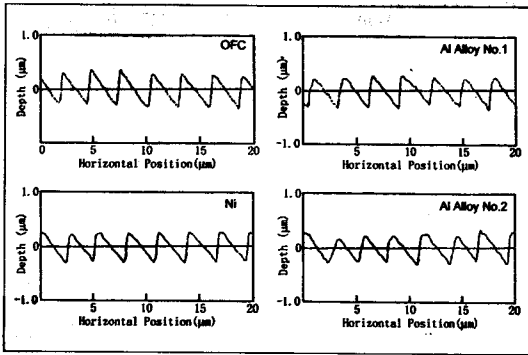


그림 28. Groove 가공단면 형상 측정

본 실험에서는 공구회전 각도를 0, 22.5, 30, 45도로 변화시킴으로써 피치를 변화시키는 가공법을 개발하였고, 모든 각도에서 양호한 그루브를 가공할 수 있게되었다. 이와같이 절삭공구를 회전시키며 그루브를 가공함으로써 자유곡선을 갖는 회절격자의 가공이 가능함을 규명하고, 실제로 직경 1mm, 초점거리 20mm의 반사형 홀로그래프 광학소자의 가공하였다.

4.2 마이크로 렌즈 Array의 가공

4축 동시 초정밀 운동제어를 사용한 초정밀 마이크로 렌즈 Array에 대한 새로운 가공법이 일본 이화학연구소(RIKEN)와 동경대학의 공동 연구에 의해 제안되고 검증되었다. 정밀 마이크로 렌즈 Array는 평판화면(flat panel display), 화면의 초점 설정, 광섬유 및 기타의 다른 광학 기구에 있어서도 중요하다. 지금까지 마이크로

렌즈 Array는 주로 Photo-lithographic 공정 혹은 수많은 작은 다이스를 조립하여 제조되었으나 본 연구를 통하여 초정밀 선반에서 4축의 초정밀 운동제어를 이용하는 새로운 가공법이 제안되었다. 이 가공법은 4 자유도를 이용한 "Offset-lathing" 방법으로 수행된다.

마이크로 렌즈 Array를 가공하는데는 몇 가지 방법이 있다. Photo-lithographic 기술을 이용한 방법, 작은 다이스들을 조립하는 방법, 소성변형(편칭)을 이용한 방법, 직접적인 기계가공을 이용한 방법 등이다. Photo-lithographic 기술은 대용량의 제품을 가공하기에 유리하나, 매끈한 표면과 형상정밀도를 얻기가 어렵다. 소성변형을 이용한 방법은 효과적인 방법이나, 공구의 내구성이 Array의 크기를 제한한다. Pick feed profile-milling 방법은 마이크로 렌즈 Array를 가공하기 위하여 가장 널리 쓰이는 방법이다. 일반적으로 다이아몬드로 만들어진 ball-end 밀링 공구는 완전하지 않고 또한 단일 Array 구조의 밀링 작업시 밀링 공구를 바꾸기 어렵기 때문에 절삭 공구의 내구성과 정밀도의 측면에서 제한성을 지닌다.

새로 제안된 방법은 단순 선삭 공구(simple lathing tool)를 이용한 초정밀 기계 공구의 4축 운동을 이용한다. 공구가 단순한 선반공구이므로 공구정밀도를 유지하기 쉽고 기계공구의 좌표를 이동시키므로 생산공정동안에 쉽게 변화시킬 수 있다. 그림 29에 Micro lens Array의 개략적 구조 및 Offset lathing 법에 의한 가공원리를 나타내었으며, 그림 30에 4축 초정밀 가공기와 공구 및 소재가 설치되어 있는 모습을 나타내었다.

소재는 주 스피indle에 설정되어 있고, 절삭 공구는 Y 면에 설치되어 있다. 그림 2에서 O는 주 스피indle의 중심을 나타내고 O'은 마이크로 렌즈의 중심을 A는 Cutting point를 나타낸다. 마이크로 렌즈의 중심의 위치는 반지름 R과 각 α 로 나타내어진다. 마이크로 렌즈의 중심에서부터 절삭 지점(Cutting point)까지의 거리는 초기값이

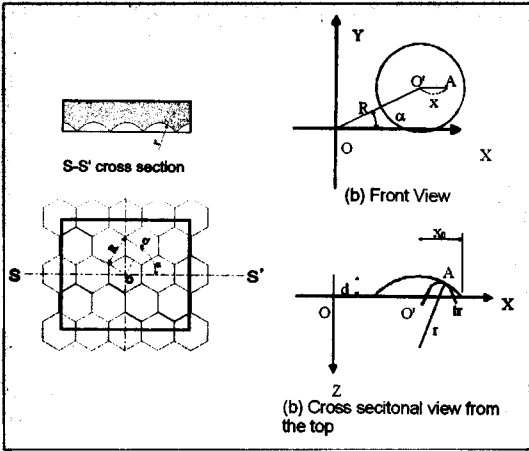


그림 29. Micro Lens Array 구조 및 가공원리

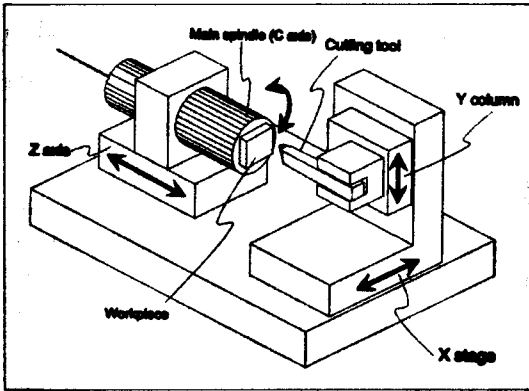


그림 30. 초정밀 가공 구성 개략도

X0로 설정되어진 X로 나타내어지며, Tr은 공구 반지름을 나타내며 마이크로 렌즈의 반지름이 r이다. A의 좌표는 다음과 같이 나타내어진다.

$$A(R\cos\alpha+x, R\sin\alpha, \gamma-d-\sqrt{\gamma^2-x^2})$$

주 스피들이 θ 에 의해 회전할 때 공구의 좌표는 다음과 같이 주어진다.

$$X=R\cos(\theta-\alpha)+x-tr\sin(\theta-\alpha)$$

$$Y=R\cos(\theta)$$

$$Z=\gamma-d-\sqrt{\gamma^2-d^2}+tr\cos\theta-ty$$

$$C=\theta-\alpha$$

NC 프로그램 자료는 직선 보간법에 의해서 계산되어진다. 위의 공식은 x, θ 에 의해서 표현된 NC 좌표(X, Y, Z, C)를 제공한다. 일련의 좌표들을 계산하기 위하여 $(x, \theta)=(x_0, \theta_0)$ 으로부터

x 가 0이 될 때까지 x 와 θ 는 $\Delta x, \Delta\theta$ 만큼 줄어든다. 짧은 직선에 의해서 이러한 점들이 연결을 위해서, NC프로그램이 생성되어진다. $\Delta x/\Delta\theta$ 는 회전당 이송비율(feed rate)을 나타내고 짧은 직선의 길이는 보간오차(interpolation error)와 관련이 있다. 그림 2의 절삭지점 A는 항상 마이크로 렌즈의 중심의 오른쪽에 위치하기 때문에 절삭 속도가 일정하게 유지되어진다. 이것은 주 스피들의 중심에서부터 움직인 중심 O'에서 선삭하는 것처럼 보인다.

4축 초정밀 가공기를 이용하여 가공실험을 하였다. 3방향의 선형 축(linear axis) x, y, z와 하나의 회전축인 (C)를 가지고 있으며 NC controller에 의해서 동시제어 된다. 이러한 선형 축은 V-V 초정밀 롤러 가이드(roller guide)에 의해서 1nm의 해상도로 유지된다. 회전축은 1/10,000도의 회전 엔코더를 가지고 있는 초정밀 공기 베어링으로 되어 있다. 무산소동 소재와 단결정 다이아몬드 공구($r=0.5\text{mm}$)를 사용하였다. $\Delta\theta$ 는 1.8도 이고 $\Delta x=50\mu\text{m}$ 이며 절삭 깊이는 최종 마무리 가공에서 $5\mu\text{m}$ 이다. 그림 31은 "offset lathing"방법에 의해 가공된 마이크로 렌즈의 형상 측정 결과를 보여주고 있다. 반지름이 2mm, 깊이가 0.11mm인 오목 구형이다. Profile은 광학적 방법(NH-3 Mitaka)으로 측정되었으며 형상 정밀도는 $0.5\mu\text{m}$ 이내 이다.

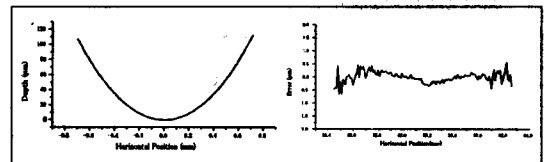


그림 31. Offset-Lathing 법에 의한 Micro Lens 가공면 Profile 측정결과

결론적으로 마이크로 렌즈 중심의 상대적인 위치 정밀도가 중요하다면 이 새로운 방법은 마이크로 렌즈 Array를 생산하는데 있어서 좋은 장점을 가지고 있는 셈이다. 남아있는 문제는 PC로부터 시리얼 인터페이스에 의해 전송되는

Data전송속도 때문에 가공속도가 제한된다는 것이다. 이러한 문제는 NC 컨트롤러에 더 빠른 인터페이스 장치를 이용함으로써 향상되어 질 수 있을 것이다.

5. 국내의 초정밀 광학소자 가공 사례

삼성전자는 1989년 광 부품기술 확보를 위해 국내 최초로 렌즈 금형 사업을 시작하였다. 그리고 10년간 각 사업부에서 필요한 렌즈의 국산화 과제를 진행하여 왔고 현재 DVD, Projection TV, CDP, Printer, Camera, LCD용 LGP 등 첨단 제품에 들어가는 렌즈 및 금형을 자체개발, 양산하고 있다. 주요한 기술개발현황을 살펴보면 다음과 같다.

- 1989년 국내 최초 비구면 렌즈 개발 및 양산적용
- 1993년 CRT Type P/J TV Lens 국산화 개발
- 1994년 CDP용 Detector Lens 국산화 개발
8X Camcorder용 Lens 국산화 개발
- 1996년 DVD Lens 금형 개발
- 1997년 CDP OL 국산화 개발
F-LCD P/J TV Lens 국산화 개발

CD-ROM OL Lens 개발

- 1998년 Laser Printer용 f-θ Lens 국산화 개발
- 1999년 LCD용 LGP 국산화 개발

이중 최근에 신가공기술로 개발되고 있는 Laser Printer용 f-θ Lens의 개발에 대하여 간단히 소개한다.

종래의 Laser Printer용 광학계는 LD에서 나온 Beam을 Polygon Mirror에 반사시켜 감광 Drum에 균일하게 멎히게 하기 위하여 그림 32와 같이 중간 경로에 다수의 구면 혹은 Cylindrical Glass Lens를 사용해 왔다.

최신 기술은 종전 수매의 구면 혹은 Cylindrical Glass Lens를 1매의 비축대칭 비구면 Plastic Lens

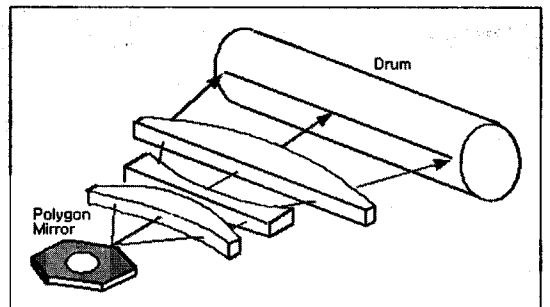


그림 32. 3매의 구면 Glass 렌즈 프린터 광학계

표 2. F-θ 렌즈 적용시의 생산공정 특성 비교

항 목	종전기술	신기술	비 고
Lens 매수	3매	1매	2매 절약
Lens 구성	Spheric & Cylindrical	Asymmetric Aspheric	
재 질	Glass	Plastic	
가공 Process	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">소재준비</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">황삭가공</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">연삭가공</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">폴 리 싱</div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">소재준비</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">CNC절삭가공</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">비구면 초정밀 절삭가공</div>	가공공정 단축
사용 측정기	원기, Laser 간섭계	Form Talysurf	
Cycle Time	30~1시간/EA	6분/EA	
Cost	₩6,000~8,000	₩2,000	2Cav 기준

로 대체하여 LSU(Laser Scanning Unit)의 Slim 및 Compact화를 도모한 것으로서 생산성 향상과 Cost Down에도 크게 기여했다. 그림 33에 1매로 재구성된 최신 LSU의 구성도를 나타내었다.

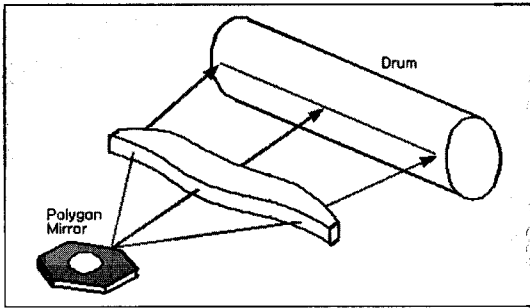


그림 33. 1매의 비구면 Plastic f-θ Lens 광학계

표 2에는 종전기술과 신기술의 공정특성을 비교하여 나타내었다. F-θ렌즈의 적용으로 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] T.Moriwaki, 절삭가공의 궤적, 일본정밀공학회지 Vol.65, No.1, 1999.
- [2] 谷口紀男, 나노테크놀로지의 기초와 응용, 일본공업조사회(1988)
- [3] N. Ikawa, R.R.Donaldson, R.Komanduri, W.Koenig, P.A.McKeown and T.Moriwaki, Ultraprecision Metal Cutting-The Past, the Present and the Future, Ann.CIRP, 40, 2, (1991)
- [4] T.Moriwaki and K.Okuda : Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting, Ann. CIRP.38, 1, (1989) 115.
- [5] Quarterly Magazine MICROMACHINE 1-12, Micromachine Center, Tokyo, 1995.
- [6] N. Ikawa, S. Shimada, R.R. Donaldson, C.K. Syn, J.S. Taylor, G. Ohmori, H. Yoshinaga, Chip morphology and minimum thickness of cut micromachining, JSPE 5904 (1993) 673-679.
- [7] T. Moriwaki, E. Shamoto, Ultrasonic elliptical vibration cutting, Annals of CIRP 44 (1995) 31-34.
- [8] Y. Yamagata, S. Mihara, T. Higuchi, Micro partt fabrication by ultra precision cutting technique, in processings of the 72nd JSPE Spring Annual Meeting, No. 95-1, 1995, pp.242-245.
- [9] K. Sawada, T. Kawai, Y. Takeuchi, T. Sata, Advanced three dimensional micromachining by means of ultraprecision milling, Journal of the JSME 61 (587)(1995) 3129-3135.
- [10] T. Yoneyama, Z. Lu, Trial construction of micro turning system, Journal of JSPE 64 (4) (1998) 598-602.
- [11] T. Kitahara, Y. Ishikawa, T. Terda, N. Nakajima, K. Furuta, Development of micro-lathe, Mechanical Engineering Lab. Report, AIST/MITI, vol. 50, No. 5, 1996, pp.117-123.
- [12] 이후상 외, Nanotechnology를 위한 가공시스템 연구, 과학기술부, 한국기계연구원 연구보고서, 1998. 1.