

초정밀기술과 옵토메카트로닉스부품의 현황과 과제

본고는 「특집: 여러 가지 초정밀기술을 응용한 옵토메카트로닉스부품화기술」이라는 주제로 일본 광기술콘택트지 (Vol. 42, No. 12(2004년), 637~641쪽)에 게재됐던 카사이 도시오(河西敏雄)씨가 기고한 내용을 번역, 정리한 것으로 초정밀기술과 옵토메카트로닉스부품의 현황과 과제에 관해 간단히 논하였다. 산업계에서 신문보도등에 의하면 교토의정서의 발효는, 러시아의 기준에 의해 2005년 2월경이라고 한다. 지금까지 앞서간다고 여겨져 왔던 엄한 CO가스의 삭감규제가 드디어 아주 가깝게 대두되었다. 환경문제로 지구온난화를 조금이라도 억제하려는 기업 노력이 추진되어 왔지만, 금후의 초정밀기술 및 옵토메카트로닉스부품·시스템에 대해서도 이를 염두에 둔 새로운 기술전개가 시작될 것으로 예상된다.

1. 서론

가공기술에 관해서는 세상의 필요에 따른 조속하고 신속한 대응과 새로운 요구를 상징하여 씨를 싹트게 하는 것이 무엇보다 중요한 가운데, 현재 이에 대한 노력이 관계기관을 통해 활발히 진행되고 있다. 빛이 직접 혹은 간접적으로 옵토메카트로닉스부품·시스템에 관하여 갖는 고분해능·고속성·광대역성 등을 최대한 혹은 극한에 까지 활용하려는 여러 가지 제안이 행해지고 있다. 또한 빛을 취급시 고정밀도가 요구되어, 그에 맞는 초정밀가공·생산기술이 요구되고 있다. 따라서 본 고에서는 이들 현상과 과제에 관해 간단히 살펴본다.

2. 초정밀가공기술의 현상과 장래

초정밀가공기술은 1960년대 초 미국이 위신을 걸고 로켓으로 달에 보낼 우주비행사의 무사귀환을 전제로 한 우주계획을 100%의 성공시키는 과정에서 생긴 가공기술이다. 이때 여러 분야에서 최고의 기술을 사용하여 기계설계, 소재 등의 선택과 병행하여 최고 수준의 초정밀 기술, 즉 종래의 정밀가공으로 보면 대폭 비약한 초정밀가공기술이 개발·검토되었음은 이미 잘 알려져 있는 사실이다. 당시 일본의 정밀공업제품으로 친근하며 가장 대표적인 것은 카메라나 시계였다. 일부 범용의 TV나 스테레오에는 아직 진공관이 사용되고 있었던 시절이다.

초정밀가공이 일본에 소개된 것은 1960년대 후반, 동경올림픽 개최의 일이다. 기업의 노력과 여러 학회 및 협회의 활동을 토대로 급속히 보급되어 새로운 옵토메카트로닉스부품·시스템의 개발과 그 제품화에 있어서 눈을 크게 뜨게 한 것이 있었다. 예를 들

면, 그 때까지 고정밀도 형상을 갖는 거울면은 연마가공이 아니면 입수할 수 없는 것이었으며, 절삭가공으로는 잘 마무리되어도 무지개면이 얻어지는 것이 일반상식이었다. 그러나 초정밀절삭장치나 예리한 다이아몬드공구에 의해 알루미늄합금이나 무산소동을 고정밀도의 거울면으로 절삭할 수 있게 되었다. 게다가 레이저의 보급에 있어서도 여러 종류의 반사경제작에 적용되어 많은 민생용 고성능부품·시스템의 실현을 지탱하는 초정밀가공기술·생산기술로서 다방면으로 인식 받게 되었다. 일반가공이나 정밀가공의 초정밀화를 위한 연구전개나 그 진행 방법이 명확해지면 초정밀이라 할 수 있는 많은 가공기술이 생겨났다. 경면가공이라는 점에서 초정밀절삭가공의 추적을 받은 연마가공에서는, 재료제거나 정밀도확보 등에 대해 기본원리까지 소급된 검토가 행해지고, 새로운 초정밀연마가공, 즉 액중연마, 기계화학적연마(Chem. Mechanical Polishing), EEM(탄성방출가공;Elastic Emission Machining), 부유연마, P-MAC 연마 등이 차례로 제안되어, 현재에도 계속되고 있다.

초정밀가공은 미국에서 우주, 군수, 에너지 등에 사용되는 대형 혹은 거대시스템 제작에 완벽을 기하기 위한 기술로서 시작되었지만, 일본에서는 경제성최우선의 민생용양산품가공 목적으로 기술이 전개되어 왔다. 그 기술 사이에 무언가 서로 틀린 점이 있어도 이상하지 않다. 일본의 우주로켓의 성공률이 낮은 이유 중 하나는 경제성을 최우선한 것에 원인이 있는지도 모른다. 또한 스바루망원경의 주경제작에는 당시, 여러 사정이나 정책적인 것이 있었겠지만, 지금까지 경험한 적이 없는 대구경 반사경이라고 하는 점도 있어, 일본기업의 경제 감각으로는 청부맡을 수 없었던 것으로 생각된다.

최근에는 일본 내에도 완벽을 기한다고 할 수 있는 초정밀가공기술의 요청이 몇 가지 나왔다. 옵토메카트로닉스 부품에 한 한다면, 고가 소재를 사용하는 대구경 광학부품의 제작을 들 수 있다. 싱크로트론방사광시설에 쓰이는 X선 반사경은 일반광학부품에 비해 형상정밀도와 표면거칠기가 의외로 엄격하다. 특히 비구면가공에 대해서는, 전부터 여러 방법이 제안되어 왔으나, 최신으로 초정밀기술을 결집한 공작기계를 써서 확실한 가공이 행해지고 있다. 전산기 제어의 초정밀절삭 혹은 초정밀연삭으로 고정밀도 비구면형상을 확보하고, 동일기계에서 초정밀연마후, 계측도 동일기계에서 행해지도록 하고 있다. 형상정도의 확보로 완벽을 기하는 경우, 공작물의 셋팅오차를 전부 없애는 것은 불가결하며, 게다가 기계구동소프트웨어를 공통으로 이용하는 것까지 합치면 그 우위성은 헤아릴 수 없다.

연마가공의 새로운 전개로서, 반도체디바이스 웨이퍼의 CMP

(Chemical Mechanical Polishing)가 있다. LSI디바이스가공후 웨이퍼의 전체면에 층간절연막(層間絶縁膜)을 부착하고, 그것을 연마로 평활하게 하여 배선회로를 다층으로 겹치는 CMP기술이 고성능의 반도체 디바이스제작으로 일반화되었다. 미세한 배선회로를 리소그래피(석판화)기술로 제작하므로 다층으로 겹칠 때에 디바이스웨이퍼의 평탄화 연마가 필요하다. 층간절연막외에 금속배선재료나 확산방지용 장벽(배리어)재료 등 가공특성이 다른 이종재료의 면적비가 틀린 면의 동시연마로, 요철(凹凸) 발생을 최소한으로 억제하는 연마기술이 요구된다. 배선회로의 다층화도 층수가 늘어남에 따라 공수증가에 따르는 비용이 순차 적산되어, 디바이스웨이퍼의 가격은 상승하여 8층을 넘으면 $\phi 8 \cdot \phi 12$ inch 웨이퍼로, 1억원을 넘는다. 반도체디바이스 제작에서, 가공중의 파손이나 실패가 허용되지 않는 완벽이라고도 할 수 있는 가공요구가 나오고 있다. 연마장치에 관해서도 종래 연마기와 달리 초정밀기술을 결집한 것이 필요해진다. 최근에는 층간절연막은 초자에서 파손되기 쉬운 저유전율재료로 바뀌고 있으며, 종래까지는 연마대칭으로 여겨지지 않았던 신재료의 취급도 필요해지고 있다. 반도체디바이스 제작에서는 여러 오염이 거부되어져 왔음에도 불구하고 이러한 오염이 극심한 연마가공이 생산공정에 도입되어, 게다가 중금속오염의 가능성이 있는 구리배선의 전기도금까지 행해지고 있다. 또한 전해연마의 도입도 제안되는 등 지금까지 적용이 엄격히 금지되어 왔던 가공법의 검토도 진전하게 되었다. 여기서는 연마기술 외에, 연마자재기술, 세정기술, 분석기술 등 여러 주변기술의 지탱이 있고, 최근에는 이를 포함한 CMP기술의 새로운 부품제작에의 응용 요구도 나오고 있다.

3. 가공기술과 계측평가기술의 일체화에 대해서

(사)일본옵토메카트로닉스협회(JOEM)에서는 (사)일본기계공업연합회의 조사위탁으로 2002년과 2003년까지 2년에 걸쳐 옵토메카트로닉스기술관련의 로드맵 작성을 하였다. 가공기술, 생산기술, 계측평가기술, 그리고 그에 따라 제조되는 여러 고성능부품·시스템에 관해 정력적인 검토가 이루어졌다. 한정된 기간, 예산, 인원이었기 때문에, 폭넓은 조사 대상을 전체에 걸쳐 망라하고, 기술예측이 되었다고 말하기는 어려우나, 어느 쪽도 장래를 향한 초정밀기술, 초정밀가공기술이 중요함을 말할 것도 없다. 그들 내용과 다소 중복되었지만, 옵토메카트로닉스부품·시스템의 가공·생산기술로서, 초정밀가공기와 계측평가기기의 일체화의 필요성이 지적되었다. 현재 부품형상을 얻을 수 있는 가공 장치로는 예산계상(豫算計上)이 되지만, 직접 가공에 관여하지 않는 측정평가장치에 대해서는 뒤로 미루지는 견해가 있어, 초정밀가공기술의 본래의 발전에 지장을 주어 한심스럽게 생각하는 점이 있다. 반도체디바이스의 회로패턴등의 미세화를 예로 들면, 측정이 가능하므로 처음으로 미세화의 가공기술개선이 가능해지고 있다. 초정밀폴리싱에 의해 표면거칠기의 극한을 목표로 하는 경우, 가공장치의 수배, 때로는 수십 배에 달하는 계측장치의 준비가 필요해지는 경우도 있다. 이러한 종류의 가공으로 타사와 차별화한 고도생산기술을 확립·보유하려면, 가공장치와 계측평가장치를 일체로 시스템화하려는 자세가 필요하다. 이제 광기술을 사용한 계측·평가시스템은, 다른 측정원리의 추종을 불허하는 고속도·고정밀도로, 높은 재현성을 갖는 등의 이점이 있으며, 가공기술의 자동화나 전산기제어 등 장래 이 분야의 산업계를 지탱하

는 중요한 기술이 되고 있다.

4. 신재료출현과 옵토메카트로닉스부품에의 응용

옵토메카트로닉스부품·시스템의 발전을 보면서, 본 협회의 전신인 광학공업연구조합 시절까지 가보기로 하자. 당초에는 카메라산업을 지탱하여 일본의 정밀공업계의 발전에 일익을 담당하는 것으로부터 시작되었다. 그 고도화에서는, 렌즈의 밝기나 고해상도, 고속셔터, 필름자동감기, 경량화, 소형화, 오토포커스, 간이하등이 순조롭게 진행되었다. 현재에는 탈(脫)필름, 디지털화, 동화(動畵)촬영 등이 가능해졌다. 그 사이에 8mm카메라는 비디오키메라로 바뀌고, 이어서 카메라업계는 새로운 AO관련시스템, 광계측 및 고도광 응용시스템의 개발·제품화에 힘을 쏟아 부어왔다. 레이저의 출현으로, 광통신, 광데이터처리, 의료, 에너지, 분석, 가공·처리·계측평가 등 폭넓은 기술도 포괄해서 취급하게 되었다. 이들 발전과 직결되는 것으로 여러 신재료의 출현이 있고, 그에 수반하는 가공기술의 고도화가 행해진 것은 무시할 수 없다. 수정(水晶)은 기원전 300년의 렌즈로서 유적에서 출토되고 있다. 투명유리의 입수가 불가능한 시대에 보석연마기법을 응용하여 광학부품 가공이 가능해졌다 하여도 크게 틀리지 않을 것이다. 이 수정은 파장판이나 프리즘 등에 적용되어, 유리렌즈나 프리즘의 연마기술이 적용되었다. 그리고 전자부품의 발전자, 진동자, 압전필터가 되면 계측기술과 병용하여 고도연마기술이 쓰여, 양산기술로까지 발전하고 있다. 또한 해저동축케이블의 중계기에 필요한 140MHz대의 수정발전자는, 두께가 35 μ m으로 그 가공정밀도는 초정밀가공이라는 기술용어가 생기기 전부터 그에 필적하는 엄격한 요구에 해당하는 것이었다. 언제부터인가 시계는 종래의 진자를 대신하여 수정발전자를 사용한 새로운 구조로 바뀌었다. 현재에는 각 가정에 여러 형태의 시계가 있으며, 또, 퍼스컴이나 휴대전화 등에도 사용되고 있다. 어느 쪽도 양산체제로 가공이 행해지고 있고 초정밀이라고도 할 수 있는 연마기술에 의지하는 부분이 크다. 게다가 박편화(薄片化)와 그 양산화의 요청이 높다. SiO₂ 단결정 수정에 대해 비정질초자류에 대해 기술한다. 다성분계초자로 투명도가 좋은 광학렌즈재료로서 오래전부터 주목받아 온 것으로 베네치아글래스가 있다. 갈릴레오도 굴절망원경제작에 이 유리를 사용했다고 전해지지만, 그 후 렌즈 조합시의 수차 문제를 해결해주는 새로운 유리소재가 개발되었다. 플린트유리, 크라운유리, 그리고 Ba(바륨)계를 중심으로 하는 신중유리로 분류되어, 많은 굴절률을 갖는 것이 있다. 그러나 최근에는 렌즈가공

기술에 커다란 변혁이 생기고 있다. 그 발단이 된 것이 투명플라스틱렌즈용 성형기술이다. 한 가지 금형으로 수많은 플라스틱렌즈를 만들 수 있고, 이것을 글라스렌즈 제작에 응용할 수 있게 되었다. 종래의 유리렌즈소재는 준비단계에 프레스에 의한 간이한 형상가공이 행해졌지만, 고정밀도의 경면금형(鏡面金型)과 고도로 개선된 프레스기를 써서 연마에 해당하는 최종마무리를 끝낸 렌즈의 양산이 가능해졌다. 게다가 유리조성의 개선으로, 유독한 납이나 카드뮴등이 배제되어, 프레스용 저용점 제품이 개발되었다. 금형제작용 NC연삭·연마기도 개발되어, 조합렌즈수를 줄여주는 비구면금형가공도 행해지고 있다. 이같이 가공된 렌즈는, CD의 쓰기·읽기용의 소형렌즈나 형태전화용의 소형카메라렌즈 등에 적용되어, 그 용도는 계속 확대되고 있다. 석영유리로 말하면, 그 한 가지 쓰임으로 광섬유를 들 수 있다. 일찍부터 광섬유 통신의 우위성이 강조되어 왔지만, 고순도 석영유리의 파이버화(化)로 고속·대용량전송이 가능해졌다. 각 가정의 배선용으로는 다성분계유리 혹은 플라스틱광섬유로 바뀌겠지만, 커넥터를 중심으로 여러 소형 광부품이 필요해진다. 또한 석영유리기판은 LSI등 반도체디바이스의 미세패턴형성용 리소그래피(석판화)기술에서도 마스크로서 이용된다. 특히 패턴의 미세화, 집적화가 진행되고, 엑시머레이저광원에 의한 단파장광(短波長光)용 유리의 고순도화와 함께 고정밀도, 고품질가공에의 요청이 높다. 이 글라스마스크는, 반도체 웨이퍼 $\phi 8$ 인치, $\phi 12$ 인치용에 대해 액정이나 PHD용으로 되면 크기에 차이가 있고, 대각선으로 1.5m에 달하는 것이 요구된다. 중량은 20~30kg에, 취급하는 것만으로도 문제가 되며, 또한 연마기기, 검사기기 등 종래의 것으로 대응하기가 어렵다. 여기에서 소재가 고가가 되므로 위에서 말한 것처럼 완벽한 가공이 필요해진다. 반도체웨이퍼가공에서는 이미 말한 디바이스웨이퍼의 회로배선의 적층과 평탄화의 CMP의 검토가 눈에 띄는 가운데, 주류라 할 수 있는 Si(실리콘)웨이퍼의 장래의 대구경화를 예견한 $\phi 16$ 인치웨이퍼 제작을 행하여 결정성장, 절단, 거친면 연마, 경면 연마 등 전체적인 검토가 이루어졌다. 또한, GaAs(갈륨비소)의 화합물반도체웨이퍼에 대해서도 광반도체디바이스, 고속반도체디바이스의 수요증가에 맞추어 기술 강화의 중요성이 지적되어, 여기에도 장래를 향한 여러 기술개선의 여지가 있다. 반도체재료중 특히 새로운 것으로 SiC(탄화규소)단결정웨이퍼가 있다. 와이드밴드갭디바이스로서 사용가능하고, 저전력손실, 고속스위치, 고온작동이라고 하는 점에서 실리콘디바이스보다 우수하다. 그 응용은 파워디바이스, 자동차탑재디바이스, 대용량전력변환디바이스 등이 열거되어, 고품질단결정의 육성과 그에 맞는 웨이퍼가공기술의 확립이 과제가 되고 있다. SiC단결정은, 벽개성(劈開

性)이 강하여 상처받기 쉽고, 연마가공시 가공량이 극히 적으며, 화학적으로 안정된 재료인데 Si웨이퍼나 GaAs웨이퍼 등과 같은 연마가공에서의 화학작용을 크게 기대할 수 없는 어려움이 있다.

다음으로, 신결정재료등으로 부품형태로 가공하는 경우, 연마가공을 적용하는 것이 적지 않다. 특히 광학적이방성, 유전적이방성 등의 응용을 지향하는 부품검토에서는 연마가공을 중심으로 한 가공기술에 결정절단과 결정방위수정가공 등의 가공기술을 보유하여, 어떠한 경우에도 대응 가능한 기술축적이 요망된다. 예를 들면, 형석(螢石;CaF₂불화칼슘)의 렌즈연마가공이 있다. 형석은, 원자외선대역에서도 이용할 수 있어서 반도체디바이스가공에서의 최신의 노광장치나 검사장치의 광학렌즈 계에 사용된다. 이 경우 단지 구면가공이 아닌 비구면 가공의 필요가 있다. 소재로서 연질로 스크래치가 나기 쉽고, 결정이방성에 의해 이형(異形)으로 마무리될 가능성이 있는 등 문제도 적지 않고, 노하우로서 여러 데이터를 축적하고 있는 부분도 많다. 옵토메카트로닉스부품·시스템제조를 향한 여러 가공기술의 축적, 고도화가 필요하다.

5. 결론

초정밀기술과 옵토메카트로닉스부품의 현황과 과제에 관해 간단히 논하였다. 표 1은 초정밀가공기술·계측평가기술의 과거·현재·장래에 관해 나열한 것이다. 참고하기 바란다. 산업계에서 신문보도등에 의하면 교토의정서의 발효는, 러시아의 비준에 의해 2005년 2월경이라고 한다. 지금까지 앞서간다고 여겨져 왔던 엄한 CO₂가스의 삭감규제가 드디어 아주 가깝게 대두되었다. 환경문제로 지구온난화를 조금이라도 억제하려는 기업노력이 추진되어 왔지만,

금후의 초정밀기술 및 옵토메카트로닉스부품·시스템에 대해서도 이를 염두에 둔 새로운 기술전개가 시작될 것으로 예상된다. 즉, 에너지-손실, 온난화가스를 중심으로

한 환경오염, 자원손실의 최소화를 꾀한 기술, 종합적으로 보아 유리한 기술이 대두될 것으로 생각된다. 또한, 기술연구분야에서도 시점(視點)이 변할 가능성이 있다.

표 1. 초정밀가공기술·계측평가기술의 과거·현재·미래

		〈과 거〉	⇒	〈현 재〉	⇒	〈미 래〉
초정밀 연마가공	기술	액중연마 EEM 습식·건식MCP 부유연마 P-MAC연마, 디바이스웨이퍼CMP (평탄화)		초정밀폴리싱, 무요란(無擾亂)연마 가공변질층 고정밀도평면연마 비구면연마 신공구재료 드레싱 고도자동화시스템		
	대상	글라스렌즈·프리즘 수정발진자기판 실리콘웨이퍼 화합물반도체웨이퍼 비구면렌즈 ULSI디바이스(CMP)		자기헤드 자기디스크기판 광커넥터 마이크로옵틱스 마스크용석영기판 X선 광학부품		광학결정소자 다이아몬드공구날끝(刃先) GaAs렌즈 금형류 스텝퍼용광학계 천체망원경주경 대구경광학부품
초정밀 지식 연마가공	기술	금속재료·경취(硬脆)재료·초경질재료의 지식연마 초(超)마무리·호닝 정연삭 펠렛연마 준(準)거울면연마 ELID연마 (연삭)		고능률화 무요란화 양산시스템 고도자동화시스템		신지식 신드레싱법
	대상	납땀이 각종금형부품 글래스렌즈·프리즘 비구면렌즈·미러 실리콘웨이퍼		X선광학부품 대구경광학부품		블록게이지 측정단자 자기헤드 광학결정소자 금형 화합물반도체웨이퍼 마이크로머신 ULSI디바이스
초정밀 연삭가공	기술	금속재료·경취(硬脆)재료·초경질재료의 연삭의 고도화 초정밀 연삭절단 초정밀연삭장치구성 (준) 경면연삭 NC연삭 ELID연삭 전기영동원용지석연삭		비구면연삭 신지식 신드레싱법		양산가공 가공 자동화
	대상	글라스렌즈·프리즘 비구면렌즈·미러 광학결정소자 마이크로옵틱스 마이크로머신		X선광학부품 대구경광학부품		실리콘웨이퍼 화합물반도체웨이퍼 파인세라믹스 부품
초정밀 절삭가공	기술	초정밀기구부품류(고정밀도·고강성·초미세이송·절입) NC절삭 연질금속경면절삭 경취재료의 연성모드절삭 비구면절삭		가공의 자동화 양산가공		
	대상	자기드럼 자기디스크기판 싱크로트론전자가속기 각종적외반사경 폴리곤미러 회전자기헤드 Ge렌즈 KDP소자 비선형유기결정소자		X선광학부품 대구경광학부품		마이크로머신
그 외의 가공의 초정밀화	기술	전해지립연마 비구면렌즈의 프레스가공 리소그래피기술 건식부가·제거 미소방전가공 방전경면가공 신가공기술		성력화 고정도화 경면화 평활화 무요란화 고성능화 습식도금 각종세정 극미세화 조성구조제어와 신재료가공기술		
	대상	ULSI디바이스 후막·박막부품 마이크로머신		각종금속경면부품(Ti, Al, SUS, 공구강등)		플라스틱렌즈 글라스렌즈 픽업렌즈 미소(微小)카메라렌즈
초정밀 계측· 평가·제어	기술	가공변질층깊이측정 접촉측정 SEM관찰·계측 비접촉측정 3차원표시 광학측정·위상천이 각종SPM(STM, AFM···)		표면오염미량분석 가공중계측·분석		
	대상	표면거칠기측정기 날끝측정기 초정밀형상측정기 기상(機上)계측 가공중계측·제어와의 일체화와 측정치의 피드백		미소요철측정기 광대역형상측정기 막두께측정기		반도체자동연마관련 측정검출시스템