



광학소자 가공방법(연마①)

조면 연마 · 경면 연마의 기본

연마법은 정밀도가 높은 가공을 할 수 있게 함으로써 르네상스 시대부터 오늘날에 이르기까지 다양한 광 디바이스를 제공하고 광학산업발전에 크게 기여를 했다고 해도 과언이 아니다. 최근 과학과 기술의 진보에 따라 새로운 연마 자재를 입수하기가 쉬워진 덕택에 연마법은 다양한 형태로 기술 개선이 진행되고 있다. 연마는 조면 연삭과 경면 연삭으로 크게 나눌 수 있는데 이들 연마는 기본적인 가공 조작으로서, 래핑과 폴리싱 패드(폴리셔) 혹은 지석 등의 공구면에 연마제나 연마액을 공급하고 거기에 가공물을 누르면서 문지르는 방법을 채용하는 것이 일반적이다. 래핑은 지석 연마로 바뀌고 있고, 폴리싱은 다시 고도의 경면 연마로 발전하고 있어 앞으로도 광 디바이스 제작에 기여할 가공 기술이다. 이와 관련하여 본 고에서는 조면 연마, 경면 연마 순서로 설명하겠다.

편집자 주

광 디바이스에는 다양한 기능, 성능, 형태를 가진 것이 있다. 또 여러 가지 재료로 구성되기 때문에 디바이스를 제조할 때 적용되는 가공법도 다양하다. 이들 가공법 중에서도 경면을 다듬질할 수 있는 연마법은 오랜 역사를 가지고 있다. 정밀도가 높은 가공을 할 수 있게 됨으로써 르네상스 시대부터 오늘날에 이르기까지 다양한 광디바이스를 제공하고 광학산업발전에 큰 기여를 했다고 해도 과언이 아니다. 이러한 연마법은 최근 과학과 기술의 진보에 따라 새로운 연마 자재를 입수하기가 쉬워지면서 다양한 형태로 기술 개선이 진행되고 있다. 때로는 신가공 원리의 도입도 추가돼 디바이스 제작에 관여하는 사람들로서는 눈을 땔 수 없는 상황이 되었다.

연마는 다듬질된 표면의 외관을 보고 판단해 조면 연삭과 경면 연삭으로 크게 나눌 수 있다. 이들 연마는 기본적인 가공 조작으로서, 래핑과 폴리싱 패드(폴리셔) 혹은 지석 등의 공구면에 연마

제나 연마액을 공급하고 거기에 가공물을 누르면서 문지르는 방법을 채용하는 것이 일반적이다. 조면 연마의 래핑과 경면 연마의 폴리싱의 조건은 단순하게 지립과 공구의 선택으로 결정되는 듯하다. 거친 지립과 경질 공구의 래핑을 이용하면 래핑이, 미세한 지립과 연질 공구의 폴리싱 패드를 이용하면 폴리싱이 가능하다는 견해가 있고 이들의 관계는 그림1과 같다. 고정 지립을 이용하는 지석 연마에 적용하려면 공구를 지석으로 바꾸면 된다. 그러나 연마에는 거친 지립과 연질 공구, 미세 지립과 경질 공구를 조합하는 경우도 있기 때문에 래핑과 폴리싱이란 말로 나누는 것도 그다지 정확한 것은 아니다. 표 1은 예전의 래핑, 폴리싱을 기본 기술로 하여 여기서 파생된 연마법을 정리한 것이다. 래핑은 지석 연마로 바뀌고 있고, 폴리싱은 다시 고도의 경면 연마로 발전하고 있어 앞으로도 광 디바이스 제작에 기여할 가공 기술이다. 이에 대해서는 조면 연마, 경면 연마 순서로 설명한다.

2. 지식 연마

렌즈 가공의 양산 현장에서는 래핑을 대신해 통칭 다이아몬드가 의한 지식 연마 (현장 명칭 : 정연삭)가 적용되고 있다. 공구로 $\phi 5 \sim 15 \times t4 \sim 8\text{mm}$ 의 청동 혹은 레진을 결합체로 사용한 펠릿상의 작은 다이아몬드 조각으로 된 지석을 이용한다. 다이아몬드 지석이기에 깊이가 빠지는 않지만 여러 개를 랩면에 깔아 집착 고정하고 이 지식면에 가공액을 공급하면서 가공물을 문질러 가공한다.

래핑에서 유리(遊離) 상태의 지립은 가공물뿐만 아니라 공구의 랩에도 기계적 작용을 하기 때문에 종전보다 랩의 마모에 따른 형상의 열화를 초래하고 장기간에 걸쳐 정밀도가 높은 가공을 할 수 없다는 점이 지적되고 있다. 특히 양산 현장에서는 가공 중에 마모된 랩의 정밀도 수정 조작을 빈번히 할 필요가 있다.

이것을 펠릿 지석을 이용한 지식 연마로 바꾸면 지식에 고정된 다이아몬드 지립은 가공물에만 작용하고 공구면에는 작용하지 않는다. 또한 다이아몬드는 내마모성이 뛰어나기 때문에 가장 먼저 래핑으로 지식으로서의 형상 정밀도와 표면 상태를 조정하는 드레싱을 해 두면 장기간 그 정밀도를 유지할 수 있다. 가공 중 공구의 형상 열화가 래핑에 비해 매우 작고 또한 공구의 고속 회전도 채용할 수 있으며 폐액 처리도 쉽다는 이점이 인정돼 렌즈의 양산 현장에서는 이 지식 연마가 래핑을 대체하고 있다. 단 다이아몬드 지식 탈락에 의한 스크래치 발생에 유의할 필요가 있다. 또한 래핑의 대체 기술로 멈추지 않고 지립을 미세하게 가공하여 경면 다듬질까지 기술 영역을 넓히기 위한 연구가 진행되고 있다.

최근에는 금속이나 유기물 분말을 결합체로 사용한 다이아몬드 지석을 이용하여 지식의 드레싱을 가공 중에 인프로세스로 전해 작용에 따라 하면서 지식 연마를 진행하는 ELID 연마·연삭이 일부에서 도입되고 있다. 다이아몬드 지립이 거친 입자로 된 경우에는 조면 연마가, 미세한 입자로 된 경우에는 경면 연마가 가능하다.

3. 폴리싱

폴리싱을 대표로 하는 경면 연마는 조면 연마의 래핑이나 지식 연마와 비교하면 재료 제거의 규모가 더 작다. 여기서는 균열을 동반하는 경우가 없기 때문에 고품질의 경면 다듬질이 가능하고 미세한 재료 제거를 조절함으로써 정밀도가 높은 기하학적인 형상이나 치수의 가공이 가능하다. 단 이러한 조절을 위해서는 특수한 기능이나 숙련도가 요구된다는 점, 또 가공에 시간을 요한다는 점 등이 단점으로 지적되고 있다.

3.1 경면 연마의 기본

간단히 경면 다듬질을 실행할 수 있는 연마법으로 금상학적 폴리싱이 있다. 일례로 철계 시험편의 금속 조직을 관찰하기 위해

표 1. 각종 연마법의 특징

명칭	지립	공구	가공액	가공 특징	적용 예	
기계적 작용 ELID 연마·연삭 (조면, 경면 다듬질)		철계 본드나 유기물 혼합 금속 본드의 다이아몬드 지식	연삭액 중성염 수용액	가공 중에 전해에 의해 지식의 금속 본드를 수화·산화·용해시켜 지식의 돌출량을 유지하고, 가공 작용을 높이는 것을 특징으로 하는 연마·연삭	초경 금형, 금속 금형, 유리, Si 등의 렌즈·반사경 등의 연마·연삭	
연마의 원점 지식 연마	조면	지립 지식 (인조, 천연 지식)	물	펠릿상 다이아몬드 등에 의한 조면 연마	유리 렌즈 등의 스무딩, 날붙이 거친 연마	
	경면	미립 지식(인조, 천연 지식)	물 (건조한)	SiO ₂ 자석 등에 의한 경면 연마	Si 등의 경면 연마 날붙이 다듬질 연마	
	기본적인 연마	Al ₂ O ₃ SiC CeO ₂ 벵갈라 Cr ₂ O ₃	주철 랩 피치나 합성 수지 패드	물 물	핸드 래핑, 핸드 폴리싱 렌즈 연마기, 수정 링형 연마기, 양면 연마기 등에 의한 일반 기계 연마기	유리 렌즈, 프리즘, 유리 마스크 기판 금속 금형, X선 반사거울, 자기 디스크 기판, 수정 등의 연마
복합 작용	〈광학 폴리싱의 개선〉 초정밀 폴리싱	초미세 지립, 미세화하기 쉬운 지립	연질 피치, 왁스, 불소 수지 패드 등	매우 순수한 물	면지, 지립, 패드 등에 의한 기계적 작용의 최소화에 따른 고품질 연마	광응용 곁정 소자, 레이저 광학용 미세 부품, 레이저 핵융합용 광학 부품, 압전 결정 발전기 기판, X선 반사 거울
	액중 폴리싱			물	면지, 지립, 패드 등에 의한 일반 기계 연마기	광응용 곁정 소자, 레이저 광학용 미세 부품, 레이저 핵융합용 광학 부품, 압전 결정 발전기 기판, X선 반사 거울
	전산기 원용 폴리싱	미세 지립	미세 지립	순수	설계값과 실측값의 오차를 바탕으로 한 전산기 원용의 형상 수정 연마	결정 발전기 기판, X선 반사 거울
	〈유체 이용 연마〉 EEM (Elastic Emission Machining)	초미세 지립	우레탄 볼, 롤러	매우 순수한 물	공구 회전으로 발생하는 연마액중 내 지립의 침투에 의한 미세 탄성 파괴 가공 전산기 원용 형상 수정 연마에 이용 가능	비구면 연마, X선 반사 거울의 연마, 극부 연마
	비고체 접촉 연마	초미세~미세 지립	우레탄 고무	매우 순수한 물, 알칼리 수용액	동압 베어링 원리에 따라 가공물과 공구 사이에 형성된 연마제 층의 부유 지립의 침투에 의한 연마, 화학 작용 부가 가능, 구면 공구에 의한 구면 연마 가능	Si 웨이퍼, GaAs 웨이퍼 등의 평면 연마
	플로트 폴리싱	초미세 지립	경면 질삭 금속 주석면	매우 순수한 물	정밀도가 높은 베어링을 이용한 연마기를 구성하고 경면 질삭한 주석 원판을 공구로 이용, 연마제를 충분히 공급하여 액중 연마 상태에서 가공	유리, 패러이트, Mo 등의 평면 연마
	〈반용 생성물 제거 연마〉 (습식) 메카노케미컬 폴리싱	클로라이드상 실리카	인조 피혁	약 알칼리 수용액	가공면과 연질 수화막을 발생시켜 그것을 닦아 없애는 연마	Si의 경면 연마
	(건식) 메카노케미컬 폴리싱	초미세 SiO ₂	석영 유리	건식	가공면과 지립면의 화학 반응에 의한 연질 광물의 생성과 박리에 의한 연마	사파이어 기판 등의 연마
	구리(은) 치환 연마	지립 없음	인조 피혁	화학적	가공면과 구리를 포함한 가공액 사이의 치환 반응으로 부드러운 구리 피막을 형성, 그것을 패드로 닦아 없애는 연마	Si나 GaAs 웨이퍼의 경면 연마
	하이드레이션 폴리싱	지립 없음	카본, 목재	고온 수증기	200도 정도의 수증기로 생긴 수화막을 공구로 문질러 없애는 연마	사파이어 ZnSe의 경면 연마
화학 작용	〈화학 용기에 의한 연마〉 (디스크식) 화학 연마	지립 없음	인조 피혁	화학적	재료 제거를 가공액의 용기 작용으로 진행하는 연마	GaAs 결정면의 경면 연마
	하이드로 플레인 폴리싱	지립 없음	인조 피혁	화학적	건식은 비점촉 공작물과 공구 사이에 가공액이 집입한 상태에서 연마	GaAs 결정면의 경면 연마
	P-MAC 폴리싱 (Progressive Mechanical And Chemical Polishing)	지립 없음	불소 수지 발포체 패드, 인조 피혁	화학적	패드에 의한 미찰 작용과 가공액의 용기 작용으로 평활하게 하고 이어서 가공액 종류의 용기로 고품질로 다듬질하는 연마 기구나 조건이 연마 과정에서 변하는 연마	GaAs, InP, ZnSe, CdTe 웨이퍼 등의 경면 연마 Cu 경면 연마

에칭 전단계에 실시하는 경면 연마를 들 수 있다. 녹색의 산화 크롬 지립을 물에 분산시킨 연마제와 펠트인 폴리싱 패드를 사용하여 회전하는 패드에 연마제를 공급하며 시험편을 손에 들고 누르는 방법을 채택한다. 펠트 섬유에 가만히 유지된 지립의 굵힘으로 가공이 진행된다고 보면 된다. 패드가 연질이기 때문에 연마를 포함한 탄 · 소성 변형에 따라 연마면의 외주 가공이 진행돼 볼록면 형상이 되지만 금속 조직의 검경 시야의 범위 안에서는 특별히 문제가 되지 않는다. 연질 재료를 대상으로 하는 경우에는 10nm대의 크기로 연질 지립의 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 지립이나 SiO_2 지립을 이용하는 등 가공물에 따라 다양한 조건을 선택할 수 있다. 간단히 실행할 수 있는 경면 연마법이며 소정의 정밀도 가공을 위한 래핑이나 폴리싱 전 단계에 하는 광 디바이스 재료의 내부 결함을 파악할 때 자주 이용된다.

다음으로 광학적 정밀도를 확보하는 대표적인 연마법으로 광학 폴리싱을 들 수 있다. 유리 렌즈 등의 양산 현장에서는 CeO_2 지립을 물에 분산시킨 연마제와 경질 발포 폴리우레탄 폴리싱 패드가 사용된다. 이 폴리싱은 예전에는 벙갈라와 피치의 폴리싱 패드에 의해 고품질 경면 다듬질이 실시되었다. 가시광선용 렌즈의 경우 피치 폴리싱은 과잉 품질의 표면을 제공하는 것으로 판단되며 가공의 경제성을 고려해 지금의 폴리우레탄 폴리싱 패드를 이용하는 연마 조건이 되었다. 그러나 반도체 디바이스의 미세 패턴 노광용 고급 스테퍼 렌즈와 같은 높은 사양의 광 디바이스 제작에서는 지금도 피치 폴리싱이 적용되고 있으며 지립은 CeO_2 지립뿐만 아니라 SiO_2 지립도 이용되고 있는 듯하다.

피치의 폴리싱 패드는 이와 같이 ①고품질 · 고정밀도 연마용의 경면 연마 공구로 예전부터 사용되고 있다. 그러나 ②가공 능률이 낮고 ③공구 제작이 쉽지 않으며 ④연질이기 때문에 마모 및 변형되기 쉽고 ⑤점탄성체이기 때문에 사용하지 않을 때에도 형상 정밀도가 무너지고 ⑥고정밀도, 고품질용 공구로 잘 다루려면 고도의 숙련된 기술이 필요하다는 등의 문제점이 지적되어 왔다. 따라서 새로운 경면 연마용 공구 재료의 출현이 기대되고, 지금까지 브론 아스팔트, 세라믹 함침 펠트, 다양한 합성 수지 등의 폴리싱이 검토되었다. 현재, 범용 렌즈 가공용으로 내열성과 내마모성이 뛰어나고 동시에 가공 능률이 높은 경질 발포 폴리우레탄 폴리싱 패드가 정착되고 있다. 이것도 경도나 발포의 종류, 흡의 형태나 이층 구조 등 다양한 것이 있으며 시판되고 있다.

3.2 광학 폴리싱과 초정밀화

새로운 광 디바이스로 예를 들면 X선 광학계의 반사경이 있다. 파장이 가시광의 수 백분의 1인 X선이 반사되는 경면이 필요하

고 대부분의 경우 비스듬하게 입사되는 X선을 결상시키기 위해 정밀도가 높은 비구면으로 가공하지 않으면 안 된다.

레이저 핵융합에서 사용하는 직경 1m에 가까운 유리 렌즈에는 유리 소재의 품질과 고품질, 정밀도가 높은 연마에 대한 주문이 엄격하다. 소재 유리가 용융 · 파괴될 정도로 높은 에너지 밀도의 빛이 투과하기 때문에 결함이나 오염을 전혀 없게 해야 한다. 또한 렌즈의 개수를 줄이기 위해 정밀도가 높은 비구면과 연마 기술이 요구된다.

스테퍼 렌즈 제작에서는 피치 폴리싱이 이루어지고 있는데 위에서 말한 광 디바이스를 포함해 경면 연마 기술의 고도화가 필요해진다.

한가지 대응책으로 오래된 연마 조건 중 고정밀도, 고품질의 연마에 대응할 수 있는 것에 주목하고, 이 피치의 폴리싱 패드가 가공될 때의 모습에 대해 다루어 본다. 폴리싱 초기의 가공물측이 전가공 · 처리에 의한 흔적으로 면이 거칠 때, 그 요철로 인해 굽혀 패드면측도 광택이 없는 표면 상태를 나타내는 것이 보통이다. 그러나 연마가 진행돼 요철의 머리 부분이 평탄해지면 패드면도 평활해져 광택을 가지게 된다. 이러한 변화는 다른 패드 재료에서도 볼 수 있다. 그러나 피치가 가장 현저하다. 가공물의 표면 상태에 따라 변하기 쉽고 가공물과 폴리싱 패드 사이에서 상호 작용하면서 표면 거칠기의 미세화나 경면화를 가능하게 한다. 또한 동시에 평면도 등의 형상 정밀도에 대해서도 패드 측에서 가공물 측으로 반전이 진행돼 정밀도의 극한까지 이를 가능성이 있다고 할 수 있다.

경면의 가공 품질 평가에는 검경을 이용하는 방법이 간편하다. 경면 연마용 지립의 대부분은 건조한 분말상으로 입수된다. 이것을 증류수에 분산해도 덩어리로 응집된 것이 대부분이고 피치 폴리싱에서도 패드 면에 유지된 이들 지립으로 인해 흡집이 생긴다. 벽개성이 강한 LiTaO_3 단결정 X면의 피치 폴리싱에서는 언뜻 보면 경면으로 다듬질되어 있어도 검경을 하면 각각 지립 특유의 미세하게 움푹 패인 것이 관찰된다. 일례로 고품질 측에서 $0.06\mu\text{m}\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, 벙갈라, ZrO_2 , CeO_2 , Cr_2O_3 , $0.3\mu\text{m}\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 순서로 품질이 뒤떨어지고 제조업체가 표시한 $0.01\mu\text{m}$ 대 크기의 지립이나 미세화 하기 쉬운 지립을 이용하면 좋은 결과를 얻을 수 있다.

여기에서 폴리싱으로 얻을 수 있는 가공 품질의 가공 한계에 대해 생각해 볼 경우, 우선 최고 품질의 이상적인 경면의 슈퍼 스무드 경면을 정의해 본다. 가공물이 단결정인 경우에는 실리콘 벽개면의 STM (Scanning Tunneling Microscope) 상의 구형 원자가 규칙적으로 배열된 요철 파형의 프로파일로 다듬질된 것이라고 생각할 수 있다. 표면 원자가 조밀하게 배치되어 있다면 표면 거칠기의 요철은 원자 크기의 몇 분의 일이라는 미세한 크

기일 것으로 예상된다. 현실적으로 폴리싱에서 재료 제거의 규모는 원자·분자의 최소 단위부터 이들 집단의 덩어리까지 생각할 수 있다. 지립이나 지립을 주입한 폴리싱의 불룩한 부분의 운동 궤적에 따라 이 재료 제거가 진행된다면 표면 구조는 논발처럼 연속된 발이랑이나 회절 격자처럼 방향성을 가진 요철이 되고, 운동 궤적의 교차를 생각하면 피라미드나 원추가 늘어선 듯한 요철이 된다. 연마면에는 이러한 재료 제거의 흔적이 남고 원자 배열의 혼란과 같은 이른바 가공 변질층이 표면에 있는 몇 개의 원자층부터 수 백 원자층까지 미친다고 할 수 있다.

광학 폴리싱의 고도화를 진행시키려면 이것들의 표면 구조를 정밀하게 할 필요가 있다. 위에서 말한 것처럼 미세 지립이나 미세화 하기 쉬운 지립을 이용하는 것과 촉감이 미세한 폴리싱 패드를 채용하는 것이 효과적이다. 연마제 중에 큰 입자가 섞이거나 패드에 먼지 등이 부착되어 있는 것은 논외로 한다.

연마 장치의 설치 환경이 나쁘면 먼지가 패드 위에 쏟아져 시간이 지남에 따라 증가하기 때문에 가공 품질을 떨어뜨린다. 검경시 사용 지립의 수 십배에서 수 백배나 폭이 넓게, 또 깊은 스크래치가 관찰되는 경우 먼지가 원인이 된 것으로 봐도 된다. 폴리싱 패드를 준비할 때 먼지 부착에 주의하고, 먼지를 포함하지 않는 미세 지립과 매우 순수한 물을 사용한다. 여기에 연마 지그나 가공물에 부착된 먼지의 세척과 연마 환경 청결화에 유의하면 그림 2와 같은 고품질 연마를 실현할 수 있다. 그림 2는 부드러운 고체 레이저용 Nd 도프 인산계 유리의 표면 거칠기 프로파일을 나타낸 것이다. 미세한 7nm-SiO₂ 지립을 이용한 결과 모두 0.1~0.3nm Rz로 다듬질되어 있고 석영 유리, BK 유리, 형석도 같은 표면 거칠기를 얻을 수 있다.

3.3 폴리싱의 이론적 취급법

광학 폴리싱의 고도화에는 가공 품질만이 아니라 가공 정밀도 확보도 중요하다. 몇 번이나 말한 것처럼 연마에서는 가공물을 폴리싱 패드면에 문지르는 연마 작용에 따라 가공이 진행되고 이 때 재료 제거와 공구 마모가 일어난다. 패드 면이 마모·변형돼 평면도 등의 형상 정밀도가 열화되면 가공을 중지하고 패드 면의 형상 정밀도를 수정할 필요가 있으며 이것은 숙련자가 해야 되는 일이다. 숙련자에게 의뢰할뿐 아니라 누구나 할 수 있도록 하려면 이론에 맞는 기술을 채택할 필요가 있으며 여기서 연마의 이론적 취급법이 중요해진다. 그림 3은 유리를 조면에서 경면으로 연마할 때의 연마 시간 경과에 따른 가공량과 아크릴수지인 폴리싱 패드의 연마량 변화를 관찰한 것이다. 가공물의 면이 거친 상태일 때는 가공량이 작고, 패드의 마모량이 크다. 그러나 가공물이 경면이 되면 가공량이 증가하고, 패드 마모량

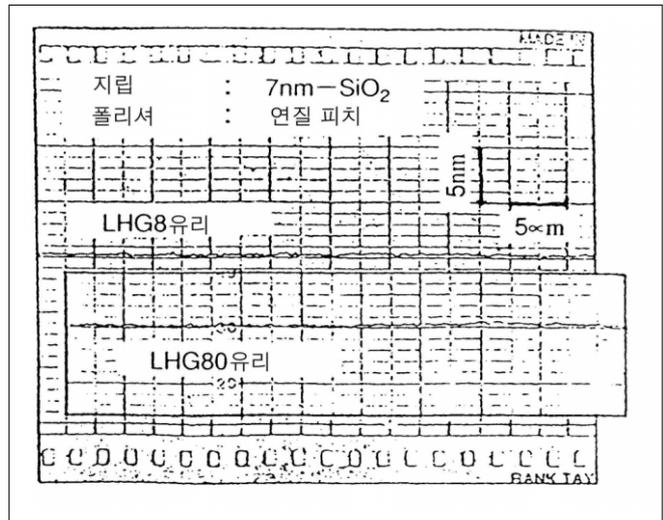


그림 2. Nd 도프 인산계 유리의 초정밀 연마면의 표면 거칠기

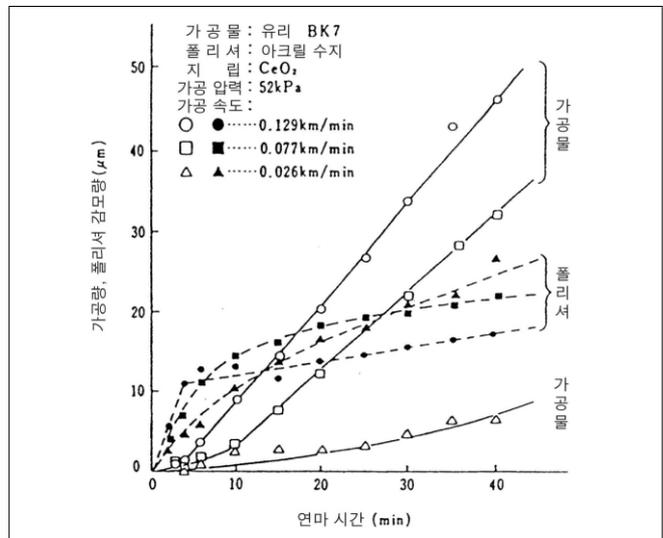


그림 3. 폴리싱에서의 가공량과 폴리싱 패드 마모량의 변화

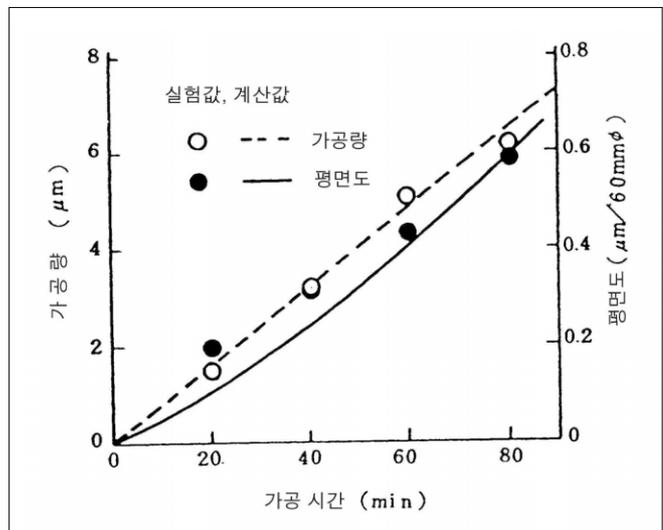


그림 4. 원판상 가공물과 둥근 고리 모양의 폴리싱 패드를 이용한 연마의 가공량과 평면도의 이론적 계산값 및 실험값

은 작아진다. 게다가 이것은 시간에 비례해 변화한다. 폴리싱이나 래핑에서는 가공량이 가공물과 공구의 상대 속도, 압력, 시간에 비례한다는 조건 하에서 정밀도 확보 등 주요한 가공을 하는 것이 보통이다.

래핑이나 폴리싱에서 가공량이나 공구 감모량이 속도, 압력, 시간에 비례하는 비례 상수는 속도와 시간을 곱한 주행 거리와 압력 단위를 남기고 [비연마량 · 압력비, $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}/\text{Pa}$], [비공구 마모량 · 압력비, $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}/\text{Pa}$]로 정의한다. 이들 비례 상수는 가공물의 재질이나 가공 조건으로 정하기 때문에 연마 장치의 운동 해석과 연마 압력 분포 해석 사이의 가공물 조건이나 공구 조건의 하나로 적용할 수 있고, 피치 폴리싱의 이론적 취급 시에 이용하여 고정밀도 평면 연마를 실현할 때까지 연마 가공의 연구를 전개시켰다. 그림 4는 단순한 원판상 가공물과 둥근 고리 모양의 폴리싱 패드를 이용한 연마 압력 분포의 해석과 운동 해석을 진행하여 연마 시간의 경과에 따른 가공량이나 평면도의 변화, 공구 마모의 계산 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 나타낸 것이다.

폴리싱의 가공량과 속도, 압력, 시간의 비례 관계에 대해서는 1927년 Preston의 펠트 폴리싱 패드에 의한 천체 망원경 반사경의 연마기 설계에 관한 논문에 기재되어 있다. 이에 대해서는 오랫동안 그다지 주목받지 못했다. 연마 가공의 이론 해석이라고 하면 운동 해석이 이루어지는 경우가 많았고 일반적인 절삭이나 연삭 등 공구 날끝이나 가공물의 운동 정밀도로 가공 정밀도가 정해지는, 이른바 [운동 전사 가공]과 같은 취급에서 시작됐다. 그러나 래핑이나 폴리싱은 [압력 전사 가공]이라고 불리는 것처럼 지립을 포함한 연마제를 이용하여 공구면에 문지르는 가공이며, 압력을 가해 조금씩 재료 제거가 이루어져 가공 정밀도나 가공 품질을 얻을 수 있다. 여기에는 가공이나 마모로 인해 가공면과 공구면이 한쪽으로 기울어지는 형상 변화와 이들의 접촉 상황에서 구할 수 있는 분포 압력을 무시할 수 없다. 운동 해석과 압력 분포 해석을 조합함으로써 형상 정밀도 변화의 이론적 취급이 가능해지고, 실제 가공 결과와 대비할 수 있게 되었다. Preston의 가공량 요인 분석에 추가해 새로운 공구측의 마모와 분포 압력 발생에 대해서도 고려되고 있다. 또한 이 비례 상수는 마모의 비마모량($1/\text{Pa}$)과 동일하게 취급할 수 있고, 거의 같은 시기에 제안된 것이다.

연마 장치의 경우, 가공물과 폴리싱 패드를 문지르는 연마 조각이 단순하며 동시에 가공물과 패드 사이의 궤적 밀도가 균일하고 한쪽으로 기울어지지 않는 것일수록 좋은 것이다. 일찍이 렌즈 연마기, 수정 링형 연마기, 양면 연마기 등이 평면이나 구면 가공에 이용되었고 모두 회전에 모터 동력을 이용했다. 최근에는 전산기 제어 연마 장치도 개발돼 CAD 설계값과 가공물 사이

의 오차값을 미세한 연마 운동을 하는 작은 조각 지식, 랩, 폴리싱 등의 체류 시간 제어로 수정하는 방식을 채용하여 대구경 렌즈나 반사경을 정확하고도 확실하게 다듬질한다.

3.4 반도체 웨이퍼의 경면 다듬질

광학 폴리싱의 고도화는 광 디바이스 외에 전자 부품의 수정 발진자의 고성능화에도 큰 공헌을 했다. 그러나 반도체 디바이스용 실리콘 웨이퍼 제작에는 대응할 수 없었다. 충분히 주의한 경면 연마에서도 거칠고 큼직한 지립의 굵힘이나 폴리싱 패드의 돌출 부분에 의한 마찰이라는 불필요한 기계적 작용이 실리콘 표면에 가공 결함을 남기는 문제가 생겼다. 이 문제를 해결하기 위해 제안된 것이 습식 메카노케미컬 폴리싱에 해당하는 켄 메커니컬 폴리싱(Chem. Mechanical Polishing)이다. 이 폴리싱의 특징에 대해 가공 공정까지 포함해 정리하면,

- ① 래핑 후의 깊은 에칭으로 표면 거칠기의 미세화와 표면 결함 제거를 마친 웨이퍼에 켄 메커니컬 폴리싱을 적용한다.
- ② $0.01\mu\text{m}$ 대의 SiO_2 지립을 약 알칼리 용액에 콜로이드상으로 분산시킨 연마제와 연질 발포 폴리우레탄으로 덮인 부드러운 시트상의 폴리싱 패드를 이용해 경면 연마를 한다.
- ③ 연마 운동으로 웨이퍼 면과 폴리싱 패드면 사이에 하이드로플래닝 현상이 나타나 연마제 층이 형성된다. 한편에서는 그 연마제 층이 얇아지도록 연마 압력을 부가한다. 웨이퍼 면에는 연마제에 의한 부드러운 수화막이 형성되고, 폴리싱 패드나 연마제로 그 수화막을 제거한다. 특히 기계적 작용을 연질 수화막 제거에만 한정시키고 실리콘에 대한 직접적인 기계적 작용은 억제해 가공 변질층을 형성하지 않도록 조건을 단다.
- ④ 실리콘 웨이퍼 양산 현장에서는 완벽한 무요란 연마를 실행하기란 어려운 일이다. 단, 연마로 인해 다소 표면 결함이 잔류해도 표층에만 국한되고, 연마 후 웨이퍼를 보관할 동안 웨이퍼 면이 자연 산화막으로 덮이면 그것에 흡수될 정도의 얇은 가공 결함이 잔류하는 것은 허용된다. 이것은 에칭으로 간단히 제거할 수 있고 완전 무요란 경면을 얻을 수 있기 때문이다.

이처럼 연질 표면 피막을 형성하고 그것을 제거하는 메커니즘은 실리콘이나 게르마늄 같은 단원소 반도체뿐만 아니라 GaAs나 InP 등 III-V족 화합물 반도체 웨이퍼나 CdTe와 ZnSe 등 II-IV족 화합물 반도체 웨이퍼의 무요란 경면 연마에도 도입하는 것이 가능해졌다. 여기서는 농도가 낮은 차아염소산 나트륨(안티 포르민, NaClO) 수용액이나 아취소산 나트륨(NaBrO_2) 수용액과 연질 피막 제거에 연질 발포 폴리우레탄 폴리싱 패드가 이용되고 때로는 연마제에 미세한 SiO_2 지립도 혼입된다. 연질 피

막 형성과 그 제거라고 하는 메커니즘 규명을 위해서는 실리콘 웨이퍼나 GaAs 웨이퍼를 대상으로 한 동이나 은의 치환 폴리싱이 이용된다. 황산동 등의 pH를 조정된 용액을 이용했을 때 연마제의 용해에 따라 동피막 형성이라는 치환 반응이 생긴다. 그 피막은 폴리싱 패드로 문질러 없애는 작용으로 쉽게 제거할 수 있으며 튀어나온 부분의 제거부터 시작되기 때문에 평활하게 다듬질이 된다.

유리 광학 폴리싱의 경우 지금까지 지립으로 깎아내는 단순한 재료 제거인 것처럼 설명했지만 유리 면에도 연질 층이 형성되고 이것을 깎아내 연마가 진행된다는 설도 있다. 물이 존재하는 환경에서 지립이 눌러 유리의 표면 구조가 변하고, 또 깎인 수화물이 재부착함에 따라 유리면과의 이온 교환이나 수산기의 확산을 이 연질층의 생성에 결부시켰다.

이 밖에 가공물인 사파이어에 고온 수증기를 작용시켜 수화막을 형성하고 이것을 깎아가는 수화 폴리싱도 있다.

메카노케미컬 폴리싱과 관련해서는 습식 조건 외에 건식 조건의 연마도 있다. 고체 마찰 연마 연구에서 파생된 연마법이며 가공물인 사파이어를 0.01 μ m 대의 건조 상태인 SiO₂ 지립을 공급하면서 석영 유리로 문지르는 방법을 채택한다. 이 경우 가공물과 지립 사이의 고상 반응에 따라 부드러운 광물의 멀라이트(mullite)가 생성·박리되어 연마가 진행된다. 연질이고 미세한 SiO₂ 지립을 이용함으로써 다이아몬드 지립에 뛰어난 가공 능력, 가공 품질을 얻을 수 있다는 특징을 갖는다.

3.5 초정밀 연마의 제안

실리콘의 캠 메커니컬 폴리싱 출현에 따라 연마의 재료 제거 원

리와 방법 분석이 활발히 이루어지고, 새로운 초정밀 연마를 제안하는 토대가 마련되었다. 연마의 메커니즘으로 (1) 기계적 작용과 (2)(전기) 화학적 작용의 복합화에 따라 다양한 연마법이 성립되었다. 표 1은 각종 연마법의 특징을 정리한 것이다.

미세한 지립을 이용한 폴리싱을 적극적으로 이용하는 방법으로 가공물과 폴리싱 패드를 지립이 떠다니는 연마제에 담가, 상부의 매우 미세한 지립으로만 연마하는 액중 연마가 제안되었다. 한편 부드러운 폴리싱 패드는 피치나 합성 수지 등에 비해 부드럽고 극단적인 예를 들 경우 액체나 기체가 해당된다. EEM(Elastic Emission Machining), 비고체 접촉 연마, 플로트 폴리싱 등은 액체를 지립을 유지하는 공구로 본 연마법이라고 할 수 있다. 가공물과 공구 사이에 하이드로 플래닝 현상을 이용해 연마제 층을 형성하고 연마제의 흐름 내에서 비중이 다른 지립이 연마액의 유선에서 벗어나 가공물을 살짝 문지르는 기계적 작용으로 재료를 제거하는 것이다. 이 경우의 기계적 재료 제거는 화학적 용법과 마찬가지로 원자·분자 오더의 가공 단위라고 생각된다.

또한 지립이 아주 작아지면 원자·분자의 크기가 되고, 화학 연마와 구별이 안 된다. 튀어나온 부분을 적극적으로 제거할 때의 기계적 작용을 폴리싱 패드에 의한 부드러운 마찰에 한정시켜 화학적으로 녹여 없애고, 평활하게 된 후 연마액 층의 흐름으로 가공하는 P-MAC 폴리싱도 제안되어, Br⁻ 메탄올로 화합물 반도체 웨이퍼를 가공하는 데 있어 좋은 결과를 얻고 있다.

이 P-MAC (Progressive Mechanical and Chemical) 폴리싱은 가공물을 공구의 폴리싱 패드에 문지르면서 가공액의 화학 작용으로 연마를 진행시키는, 즉 디스크식 화학 연마에 속하는 것이다. 다양한 경면 연마법의 재료 제거나 경면화의 메커니즘

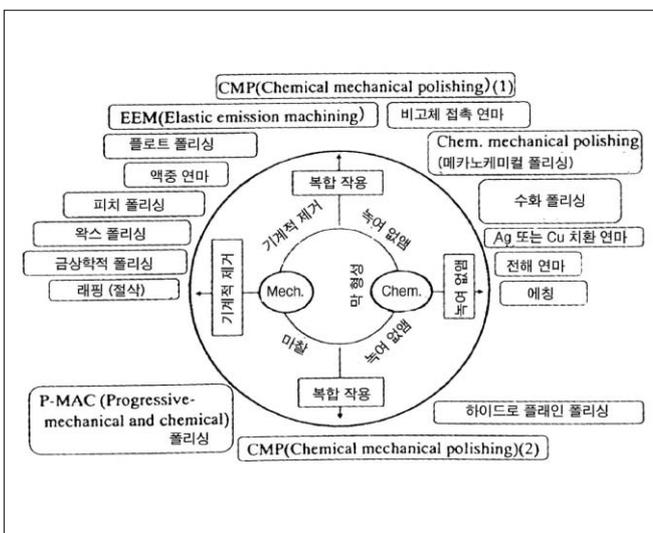


그림 5. 폴리싱에서의 재료 제거 메커니즘 분석 결과

종전의 각종 폴리싱	P-MAC 폴리싱
직접 접촉 조건 •금상학적 폴리싱 •피치 또는 왁스 폴리싱 •액중 연마	
준 접촉 조건 •캠 메커니컬 폴리싱 (Si 웨이퍼의 메카노케미컬 폴리싱)	
비접촉 조건 •플로트 폴리싱 •Elastic emission machining •하이드로 플래닝 폴리싱	

표 2. 폴리싱에서 가공면과 공구면의 관계

분석을 토대로 새로운 연마법으로 제안되고 있으며, 특히 [P-: Progressive]는 [연마 메커니즘이나 조건을 연마 진행 중에 적극적으로 바꾼다]는 특징을 표현하기 위해 서두에 덧붙였다.

폴리싱의 재료 제거 메커니즘을 단순화한 것이 그림 5이다. (1) 기계적 작용으로 (1a) 깎아내는 작용과 (1b) 단순한 마찰 작용, (2) 화학적 작용으로 (2a) 녹여 없애는 작용과 (2b) 피막 형성 작용 등이 복합되어 있는 것으로 생각할 수 있다. 이미 앞에서 말했듯이 실리콘 웨이퍼의 켈 메커니컬 폴리싱에서는 실리콘 웨이퍼 표면에 부드러운 수화막이 형성되고 이것을 연마제나 폴리싱 패드로 닦아 없애 경면 다듬질이 진행된다고 해석되고 있으며, 유리 폴리싱에서도 마찬가지로의 기계적 작용과 화학적 작용이 이루어진다. 대부분의 연마법은 재료 제거 메커니즘의 복합화 고리에서 위쪽 절반 부분에 집약되어 있으며 P-MAC 폴리싱은 아래쪽 절반 부분에 위치해 있어 일반적인 연마 가공과는 성질이 다르다.

연마 중인 가공물과 폴리싱 패드의 관계는 표2와 같다. 다양한 연마제가 이용되는 조건 하에서 양자 사이에는 ①직접 접촉 조건 (피치 폴리싱처럼 폴리싱 패드에 바둑판 눈금 모양의 홈이 있어 연마제 배출이 쉽고 가공면이 패드면에 직접 접촉하는 것으로 간주되는 경우), ②준접촉 조건(실리콘 웨이퍼의 켈 메커니컬 폴리싱처럼 패드면에 홈이 없고 또한 가공물이 대구경일 경우 하이드로 플레인 현상으로 양자가 접촉하지 않으려는 조건을 가압에 따라 조정하고 가공물과 패드면의 접촉과 비접촉이 섞인 상태인 경우), ③비접촉 조건(BEM이나 플롯 폴리싱처럼 하이드로 플레인 현상에 의한 부상 효과로 양자가 확실히 비접촉 된 상태인 경우)이 있다. 각종 연마법은 이들 조건 중 하나에 속하며 그 조건을 연마 중 시종일관 유지하는 연마 조작이 채용되고 있다.

P-MAC 폴리싱의 가공 상태 변화는 ①전가공에 의한 표면 거칠기에 상당히 큰 요철이 존재할 때에는 폴리싱 패드에 의한 경미한 기계적 마찰로 그 튀어나온 부분의 원자 배열을 흐트리고 그 부분에 대해 화학적으로 녹여 없애는 반응을 촉진시킨다. ②튀어나온 부분이 떨어져 평활해진다면 기계적 마찰을 피하는 조건으로 가공액막으로 녹여 없애 연마를 진행시킨다. 그 결과 가공 결함이 없는 고품질의 다듬질 면을 제공할 수 있다.

일반적인 래핑이나 폴리싱에서는 가공량이 가공물과 폴리싱 패드의 상대 속도, 압력, 시간에 비례한다고 했지만, 화학적으로 녹여 없애는 연마는 여러 점에서 다르다. 우선 지립을 이용하지

않기 때문에 가공 능률이나 가공 품질을 고려해 적절한 화학 약품을 선택하는 것이 중요하다. 가공 능률에는 가공액 농도나 온도가 영향을 준다. 속도, 압력, 시간은 가공 환경의 온도 상승과 가공면의 원자 배열이 흐트러지는 원인이 되어 화학적으로 녹여 없애는 작용이 촉진되는 것으로 이어지는 것이 확실하다. 그러나 속도에 의해 연마액의 교환이 촉진되는 반면 비산에 따른 연마액의 막 두께 감소로 이어지고, 또한 압력에 의해 연마액의 막 두께가 얇아지기 때문에 고속 · 고압이 유효하다고는 볼 수 없다.

표2 폴리싱에서 가공면과 공구면의 관계 III-IV족과 II-IV족의 화합물 반도체 재료의 P-MAC 폴리싱의 경우, 경면 에칭액으로 정평이 있는 Br-메탄올이 연마액으로 이용된다. 절삭분으로서의 취화물은 그대로 메탄올에 용해되고 이 때 수소 가스가 발생하지 않기 때문에 가공물과 폴리싱 패드 사이에 기포가 들어가 연마액이 밀려 나올 걱정은 없다. 저속 · 저압 조건에 따라 비교적 두꺼운 연마액막이 형성돼 Br 농도로 가공 능률을 조절할 수 있다.

가공물과 공구 간격 조정 방법에 대해서는 여러 가지 방법을 생각할 수 있는데 다른 종류의 재료를 동시에 연마했을 때 생기는 가공량 차이를 이용할 수 있다. 가공물의 GaAs 단결정을 더미(dummy) 재료인 사파이어 혹은 유리와 같은 기판 위에 높이를 맞춰 접착하고 Br-메탄올 연마액과 Br에 내성이 있는 불소 수지 발포체 폴리싱 패드를 이용해 연마하면 GaAs 단결정만 가공되고 가공물과 패드의 직접 접촉 조건부터 준 접촉 조건, 비접촉 조건 순서로 연마 상태의 변화가 생긴다.

단위 시간당 가공량은 연마액의 Br 농도에 좌우되고, 표면 거칠기는 폴리싱 패드의 평활함과 관계가 있다. 직접 접촉 조건에서는 웨이퍼 외주가 폴리싱 패드의 오목한 부분에서 닳아 없어져 가장자리가 늘어지기 쉽지만 준접촉 조건이나 비접촉 조건이 되면 웨이퍼 외주 가장자리가 늘어지는 것도 억제된다. 화합물 반도체뿐만 아니라 다른 재료의 경면 연마 가공에 대응할 수 있는 비지립 연마법으로 검토가 진행되고 있다.

지금까지 연마의 특수성이나 기본 기술을 다루어봤는데 절삭이나 연삭에 의해 경면 가공이 가능해져 폴리싱의 영역에 도달했지만, 한편에서는 연마의 초정밀화로 다른 가공에서는 도저히 불가능하다고 여겨지는 고도의 다듬질 가공이 가능해졌다. 여기서는 에칭과 같은 원자, 분자 오더로 재료 제거와 형상, 치수의 가공이 이루어진다.