

정밀광학에서 자기유동연마의 최근 동향

최근 상용화되어 여러 분야에서 적용되고 있는 자기유동연마(MRF: Magneto-Rheological Finishing)는 정밀광학에서 사용되고 있던 전통적인 연마의 한계를 극복하여 더 신속하고, 정확하고, 저렴하고, 우수한 표면특성을 가능하게 하였다. 자기유동연마는 30nm p-v(peak-to-valley)보다 우수한 정확도와 0.5nm rms 이하의 표면 미세거칠기(micro-roughness)로 평면, 구면, 비구면, 프리즘, 실린더 등의 다양한 형태로의 정밀광학 연마가 가능하다. 정밀광학분야 이외에도 자기유동연마는 반도체 및 LCD 분야에서 Silicon wafer 및 SOI(silicon-on-insulator) wafer, lithography component로 사용되는 step-per lens 등의 EUV(extreme ultraviolet) optics, photomask 기판 등에 적용되고 있다.

자기유동연마란?

자기적 성질을 갖고 있는 유체인 자성유체(magnetic fluid)를 이용한 연마를 자기유동연마(MRF: Magneto-Rheological Finishing 또는 Magneto-Rheological Polishing)라고 한다. 자성유체는 1965년 미국의 아폴로계획의 일환으로 개발하여 우주선에 사용되는 실링재로 주목 받았고 클러치, 충격흡수기(shock absorber), 진동차단기(vibration isolator) 등에 사용되고 있다. QED Technologies사의 Kordonsky 등은 자성유체를 이용한 연마 방법을 개발하였다.^{1,2)} 이에 의하면 자성유체에 자기장을 가하면 자성유체는 가소성고체(plasticized solid)로 바뀌고, 자기장의 세기와 자성유체의 점도 등을 조절하여 연마를 제어할 수 있다. 자성유체의 성분은 연마입자(CeO₂, 다이아몬드

등), 자성입자(Carbonyl Iron 등), 안정화제 및 운반유체(물 등)로 구성되어 있다.

자기유동연마는 선진 정밀광학업체에서는 이미 널리 적용되어 사용 중이며 석영유리, ULE,³⁾ Zerodur,⁴⁾ 단결정 실리콘, CaF₂, SiC 등의 유리, 결정화유리, 세라믹스, 단결정, 다결정 등의 여러 분야에서 사용되고 있다. 이는 30nm p-v(peak-to-valley)보다 우수하고 0.5nm rms 이하의 표면 미세거칠기(micro-roughness)를 달성할 수 있는 정밀가공법으로, QED Technologies사는 1998년 자기유동연마를 이용한 정밀가공장비를 상용화하였다.⁵⁾

자기유동연마장치의 개념을 그림 1에 나타내었다. 펌프에 의해 노즐에서 공급되는 자성유체는 전자석에 의한 자기장에 의해 가소성 고체로 바뀌면서 wheel에 부착되고 피가공물(workpiece)

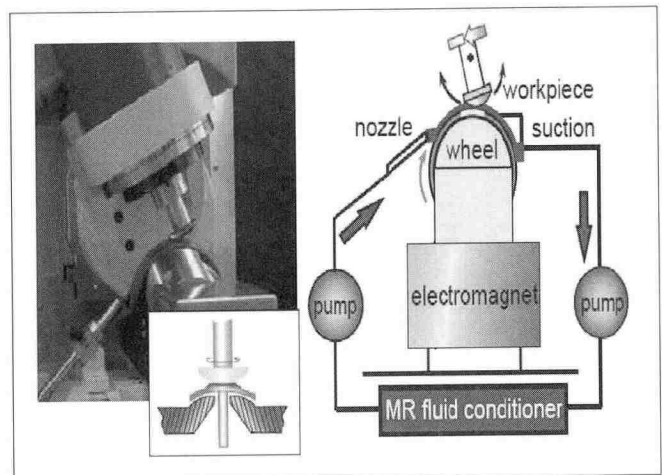


그림 1. 자기유동연마장치 개념

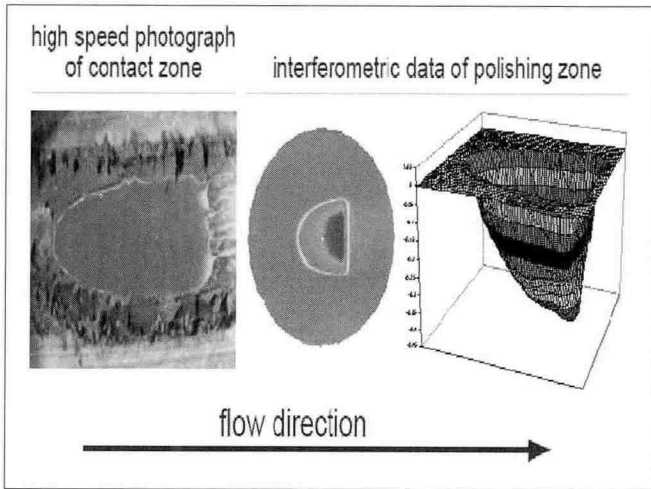


그림 2. 자기유동연마에서의 연마 spot

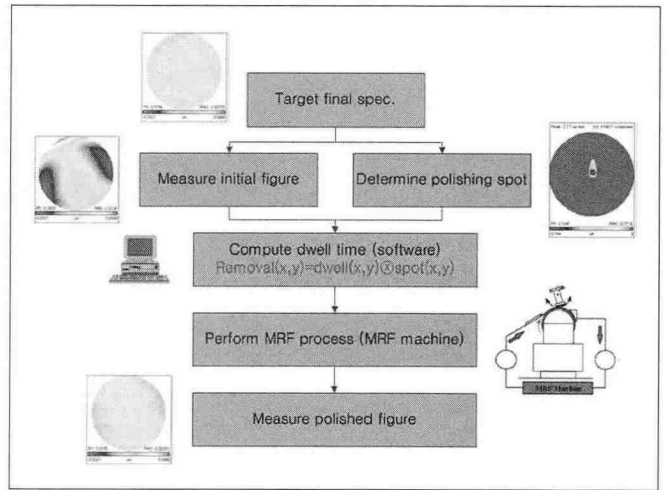


그림 4. 자기유동연마 공정 흐름도

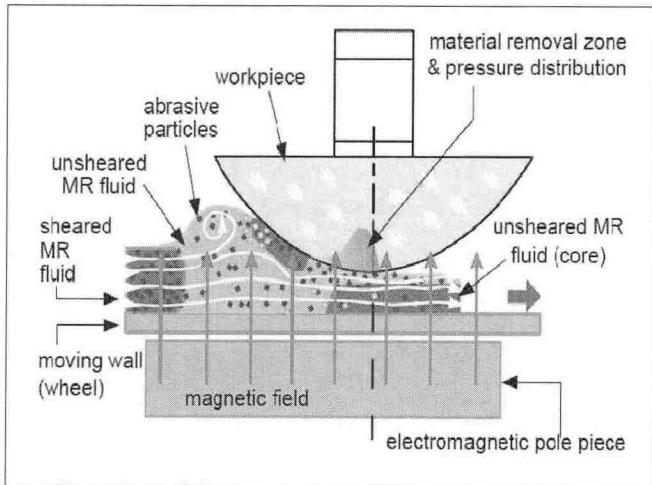


그림 3. 접촉면에서의 자성유체 모델

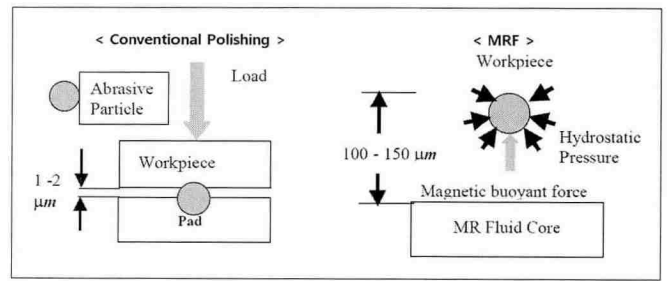


그림 5. 전통적인 연마와 자기유동연마와의 비교

자성유체의 흐름으로 발생하는 정수압에 의한 전단력에 의해 연마되며, 매우 낮은 수직력(약 $10^{-7}N$)과 자성부력(약 $10^{-9}N$)에 의해 표면손상과 가공에 의한 결함을 받지 않고 평탄도와 표면거칠기가 우수한 정밀연마가 가능하다(그림 5).

이 회전과 이동을 하여 연마된다. 자기유동연마에서는 연마 spot을 $1mm^2$ 에서 수 cm^2 까지 조절할 수 있는 것이 핵심이다(그림 2). 연마 wheel과 피가공물과의 접촉면을 지나가는 자성유체에 함유되어 있는 연마입자에 의해 피가공물은 연마된다(그림 3).

자기유동연마 공정 흐름도를 그림 4에 나타내었다. 먼저 피가공물의 최종 표면 스펙을 설정하고, 이에 도달하기 위하여 초기 표면 형상을 측정하고 연마 spot을 결정한다. 연마 removal은 머무르는 시간(dwell time)과 연마 spot에 의해 결정되고, 최종 표면 스펙과 초기 표면 형상과의 차이만큼 연마 removal이 필요하므로 결정된 연마 spot과 연마 removal로부터 시뮬레이션하여 위치에 따른 머무르는 시간을 계산한다. 계산된 머무르는 시간에 따라 자기유동연마를 수행하고 최종 표면 형상을 측정하여 완료하게 된다.

전통적인 연마에서는 연마패드 위의 연마입자에 전달되는 수직력에 의해 연마되며, 약 $0.01N$ 의 높은 수직력에 의해 스크래치나 표면손상이 발생될 확률이 높다. 반면 자기유동연마에서는

자기유동연마의 장점

자기유동연마를 광학 제조 라인에 적용시키면 set-up time과 cycle time을 줄여 비용 절감효과를 볼 수 있다.⁷⁾ 대부분의 광학 제조는 다품종 소량 생산으로 이루어지기 때문에 가공시 set-up time을 무시할 수 없다. 1/4 fringe p-v 표면특성을 갖는 직경 80mm, 중심두께 30mm의 평볼록렌즈를 가공한다면, 표 1과 같은 제조 라인을 구성할 수 있다. 먼저 연삭기(grinder)에 의해 1차 가공을 하고 연마기(polisher)에 의해 2차 가공을 한다. 연삭기의 cycle time이 연마기의 cycle time보다 약 3배정도 되기 때문에 throughput을 맞추기 위해서는 연삭기 1대에 연마기가 3대 필요하다. 반면, 자기유동연마를 적용시키면 연삭기에 의한 1차 가공, 연마기에 의한 2차 가공, 자기유동연마에 의한 3차 가공으로 표 2와 같은 제조 라인을 구성할 수 있다. 연마기에 의한 2차 가공은 2 fringe p-v 정도까지만 하여도 되기

	set-up time (min)	cycle time (min)	# of units		
			1000	100	10
			total time (min)		
Grinder	20	3	3020	320	50
Polisher #1	180	8	8180	980	260
Polisher #2	60	8	8060	860	140
Polisher #3	60	8	8060	860	140
total job time (min)			27320	3020	590
average time per lens (min)			27.3	30.2	59.0

표 1. 일반적인 광학 제조 라인

	set-up time (min)	cycle time (min)	# of units		
			1000	100	10
			total time (min)		
Grinder	20	3	3020	320	50
Polisher #1	30	3	3030	330	60
MRF	30	3	3030	330	60
total job time (min)			9080	980	170
average time per lens (min)			9.1	9.8	17.0

표 2. 자기유동연마를 이용한 광학 제조 라인

때문에 set-up time과 cycle time이 일반적인 광학 제조 라인에서의 연마시보다 줄어들게 된다. 자기유동연마에 의한 3차 가공에서 1/4 fringe p-v를 맞출 수 있게 된다. 렌즈 한 개당 전체 가공시간을 계산해보면 일반적인 광학 제조 라인에서보다 자기유동연마를 이용한 광학 제조 라인에서 3배 이상의 시간 절감효과를 볼 수 있으며 이는 비용 절감으로 이어진다.

얇은 렌즈나 윈도우와 같이 종횡비가 큰 제품(두께보다 직경이 15배 이상)이나, 특히 품질특성이 1/2 fringe p-v 이상을 요구할 때에는 전통적인 연마로는 어려움이 있다. 기존의 방법으로 얇은 윈도우를 연마할 때에는 매우 평탄하게 연마된 치구에 윈도우를 wax로 부착하고 연마한다. 윈도우를 연마한 후 wax를 제거하고 떼어내면 응력이 인가되지 않은 상태로 돌아오기 때문에 윈도우는 탄성에 의해 더 이상 평탄하지 않게 된다(일반적으로 dimple, bump 결함). 그러나 자기유동연마를 이용하면 이를 극복할 수 있다. 자기유동연마에서는 피가공물이 자성유체에 잠기는 깊이는 연마에 큰 영향을 미치지 않고 부착 변형이 거의 없기 때문이다.

최근에는 2개 이상의 구면렌즈를 1개의 비구면렌즈로 대체할 수 있기 때문에, 비구면광학은 구면광학보다 크기, 무게, 개수, 재료비 등을 절감하고 시스템을 간단하게 구성할 수 있고 광학 특성이 우수하여 급속히 증가하는 추세이다. 비구면광학의 일반적인 연마에서는 연마 lap의 불일치, tool의 마모 등에 의해 제한을 받고 있지만, 자기유동연마에서는 유체 기반으로 이를 극복할 수 있다.

자기유동연마에서의 연마 spot(그림 2 참조)은 기본적으로 나선형 경로를 지원하지만, 옵션으로 래스터 경로를 지원하여 사각미러, 윈도우, 프리즘, 실린더형까지도 적용 가능하다(그림 6).

Materials	Examples
Optical glasses	KzF6, F7, LHG8, SF7, SF56, Q89, K7, fused silica, BK7, SK7, SK14, LaK9, LaK10, LaK33, LaF2, TaFD5, B270, SLAM55
IR glass	AMTIR-1™(Ge33As12Se55)
Glass-ceramics	Astrosital™, Code 9600, Zerodur™
Hard single crystals	Al ₂ O ₃ , Ge, Si
Soft single crystals	CaF ₂ , MgF ₂
Soft, water soluble crystals	LiF, KDP, NiSO ₄ · 6H ₂ O, NaCl
Hard, polycrystalline materials	SiC, Si ₃ N ₄ , Co:WC, ALON
Soft, polycrystalline materials	ZnS, ZnSe
Metals	Cu, 304SS, 6061A1, brass, electroless nickel
Plastics	CR-39

표 3. 자기유동연마 적용 재료

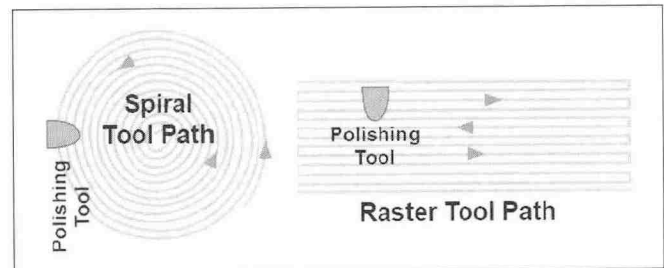


그림 6. 나선형 경로와 래스터 경로와의 비교

자기유동연마의 적용

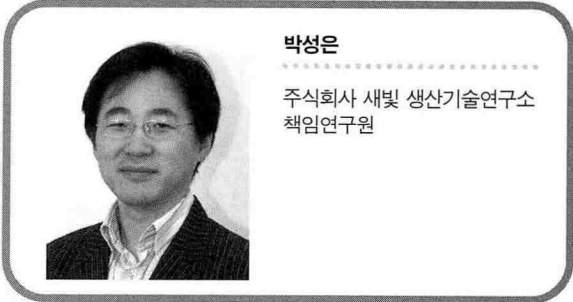
자기유동연마를 상용화한 QED Technologies사에서는 직경 80mm까지 연마 가능한 장비에서부터 950mm×1250mm까지 연마 가능한 장비를 제작하였고, 4m까지 연마 가능한 장비를 개발 중에 있다. 또한 QED Technologies사에서 개발한 측정 시스템인 SSI(Subaperture Stitching Interferometer)를 함께 이용할 경우, 자기유동연마의 효과는 배가될 것이다.⁸⁾ 또한 SSI는 Zygo사(미국)와 공동 개발하여 MRF와는 별도로 측정장비로 사용할 수도 있다.

정밀광학분야 이외에 반도체 및 LCD 분야에서 자기유동연마가 적용되고 있는 것은 Silicon wafer 및 SOI(silicon-on-insulator) wafer,⁹⁾ lithography component로 사용되는 stepper lens 등의 EUV(extreme ultraviolet) optics,¹⁰⁾ photomask 기판¹¹⁾ 등이 있다. 마지막으로 자기유동연마 응용이 가능한 재료를 표 3에 정리하였다.¹²⁾

한편, 주식회사 새빛(T.041-563-3202)은 QED Technologies 사(미국)의 Marc Tricard씨를 초빙하여 2004년 11월 12일 한밭대에서 "초정밀 비구면 광학부품 생산기술 세미나"라는 주제로 MRF관련 세미나를 개최하였고, 현재 자기유동연마를 상용화한 QED Technologies사와 업무 제휴를 맺고 있다.

참고자료

1. United States Patent 5,449,313 (Sep. 12, 1995)
2. United States Patent 5,951,369 (Sep. 14, 1999)
3. Corning사 홈페이지(<http://www.corning.com>)
4. Schott사 홈페이지(<http://www.schott.com>)
5. QED Technologies사 홈페이지(<http://www.qedmrf.com>)
6. Marc Tricard, Paul R. Dumas, Greg Forbes, "Sub-aperture approaches for asphere polishing and metrology," Photonics Asia 2004, Nov. 8-11, 2004, Beijing, China.
7. Don Golini, Gunter Schneider, Mike DeMarco, Peter Flug, "The ultimate flexible optics manufacturing technology: Magnetorheological Finishing (MRF)," OPN Magazine, Dec., 2001.
8. Paul Murphy, Greg Forbes, Jon Fleig, Paul Dumas, Marc Tricard, "Stitching interferometry: a flexible solution for surface metrology," OPN Magazine, Apr., 2003.
9. Marc Tricard, Paul R. Dumas, Don Golini, James T. Mooney, "Prime silicon and silicon-on-insulator (SOI) wafer polishing with magnetorheological finishing (MRF)," Proceedings of IMECE '03, Dec. 16-21, 2003.
10. Paul E. Murphy, James T. Mooney, Thomas P. Courtney, "Fabrication of EUV components with MRF," Proceedings of SPIE Vol.5193, 2003.
11. Marc Tricard, Don Golini, "High precision photomask polishing with magneto-rheological finishing (MRF)," The 17th Annual Meeting of ASPE, Oct. 20-25, 2002.
12. Don Golini, William I. Kordonski, Paul Dumas, Steve Hogan, Peter Flug, Mike DeMarco, "Magnetorheological finishing (MRF) in commercial precision optics manufacturing," Proceedings of SPIE Vol.3782, July 20-23, 1999.



박성은

주식회사 새빛 생산기술연구소
책임연구원

특별취재

제41회 납세자의 날 행사에 협회 회원사들 수상의 영예

· 삼성전자 · 삼성테크윈 · 캐논코리아비즈니스솔루션 등 3개사

정부는 지난 3월 5일 서울 삼성동 코엑스에서 전군표 국세청장과 성윤갑 관세청장, 경제4단체장 등 각계 인사 1200여 명이 참석한 가운데 제41회 납세자의 날 기념식을 갖고 모범납세자로 선정된 기업과 개인 500여명에게 훈장과 표창을 수여했다.

이날 행사에는 삼성전자가 1조3,000억 원에 달하는 역대 단일기업 최대 규모의 국세를 납부해 '국세 1조3,000억 탑'을 수상했다. 삼성테크윈은 은탑산업훈장을, 캐논코리아비즈니스솔루션은 대통령표창을 각각 수상했다.

권오규 부총리 겸 재정경제부 장관은 이날 "앞으로 기부문화가 발달한 외국 사례를 벤치마킹해 조세지원 방안을 마련하고 세법의 내용과 형식을 쉽고 간결하게 개편하겠다"고 밝혔다.



▶올해 납세자의 날에서 대통령표창을 수여받고 있는 캐논코리아비즈니스솔루션의 김대곤 대표이사. 이 회사는 제40회 납세자의 날에는 재정경제부장관 표창을 받은 바 있다.