

식스 시그마 기법을 활용한 초소형 광픽업 개발

Development of Ultrasmall Optical Pickup by Employing the Six Sigma Methodology

이명복¹

Myung-Bok Lee¹

요약

식스 시그마 기법은 생산라인의 품질관리, 경영관리 뿐만 아니라 신제품의 연구개발에도 유용하게 적용할 수 있다. 본 논문에서는 식스 시그마 도구와 방법론을 적용하여, 청색 광원을 사용하는 고밀도 휴대형 광정보저장기기용 초소형 광픽업의 설계 및 제작에 대하여 연구한 결과를 기술한다. 식스 시그마 방법론으로서는 보편적으로 사용되는 DMAIC 프로세스를 적용하였다. 초소형 광픽업은 크게 마이크로렌즈와 실리콘 광학 벤치 모듈로 구성되며, 조립 정렬의 용이성 및 생산성 향상, 초소형화 및 박형화 가능성을 고려하여 MEMS 기술과 집적광학 기술을 적용하여 개발하였다. 먼저 마이크로미러 어레이를 포함하는 실리콘 광학 벤치를 제작하였고, 굴절렌즈와 회절렌즈를 결합한 하이브리드형 마이크로렌즈를 광학 벤치에 탑재하고 청색 레이저 다이오드 칩을 광축을 조정하면서 본딩하여 광픽업을 완성하였다. 제작된 광픽업의 파면 수차와 광학 신호 평가 결과, 청색광에 적합한 광픽업의 규격을 만족시켰다.

핵심어 : 식스 시그마, DMAIC, 마이크로렌즈, 마이크로미러, 실리콘 광학 벤치, 초소형 광픽업

Abstract

The Six Sigma methodology can be applied to R&D of new products as well as quality control and business management of production lines. In this paper, we describe the results of design and fabrication of ultrasmall optical pickup, which is essential for the implementation of high-density portable optical information storage devices using blue light source, by applying Six Sigma tools and methodology. The DMAIC process was used as a Six Sigma roadmap. The optical pickup was consisted of microlens and silicon optical bench and fabricated by applying the MEMS and integrated optics technology in consideration of the ease of assembly, productivity improvement, and the possibility of miniaturization. First, a silicon optical bench including a micromirror array was fabricated, and a hybrid microlens that combining a refractive lens and a diffractive lens was mounted on the optical bench and the blue laser diode chip was bonded while adjusting the optical axis for the optical pickup. As a result of evaluating wavefront aberration and optical signal, the specification of an optical pickup suitable for blue light was satisfied.

Keyword : Six sigma, DMAIC, Microlens, Micromirror, Si Optical Bench, Ultrasmall Optical Pickup

¹ Department of Materials Science and Engineering, Daejin University, GyeongGi, Korea [Professor]
e-mail: mblee3@daejin.ac.kr

* 이 논문은 2022학년도 대진대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

Received(July 21, 2022), Review Result(1st: August 9, 2022), Accepted(August 12, 2022), Published(August 31, 2022)



© 2022 The Authors. Published by NCIS.
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

1. 서론

식스 시그마 프로그램은 기업이 완벽에 가까운 제품이나 서비스를 개발하고 제공함으로써 고객 만족을 달성하기 위하여 전략적으로 실행하는 품질 경영 기법이나 경영 철학으로서, 조직 내의 다양한 문제를 구체적으로 정의하고 현재 수준을 계량화하여 평가한 다음 이를 개선하고 관리하는 기법이다 [1]. 또한 식스 시그마는 기업의 각 부서에서 경영 활동의 효율성을 개선하기 위한 다양한 도구와 기법들을 도입함으로써 기업의 핵심적인 역량을 지속적으로 향상시킬 수 있는 프로그램이다 [2]. 식스 시그마는 1987년에 미국의 Motorola사에서 정립된 이후, 다수의 글로벌 기업에서 적용되어 제품 및 서비스의 품질 개선과 생산성 향상 등 여러 가지 측면에서 놀라운 성과를 올려 그 효과를 입증하였다 [3]. 식스 시그마란 용어에서 시그마란 품질특성의 표준편차를 의미하며, 식스 시그마 수준은 통계적으로 볼 때 100 만번의 불량 발생 기회 당 3~4 개의 결함이 발생하는 프로세스로 아주 높은 품질 수준을 의미한다. 한편, 품질 비용이란 제품이나 서비스의 품질과 관련하여 발생하는 비용으로, 예방 비용이 1이라면, 검사 비용은 10, 품질 실패 비용은 100에 해당한다고 하며 1:10:100의 법칙으로 잘 알려져 있다 [4]. 따라서, 품질을 설계 품질, 생산 품질 및 사용 품질로 구분할 때 설계 품질의 관리가 가장 중요하며 이러한 측면에서 제품의 연구 개발 단계로부터 식스 시그마를 적용할 필요가 있다. 이는 처음부터 올바른 목표를 정하고 이를 올바른 방법으로 시행하는 품질 철학과 상통한다. 개발 단계로부터 식스 시그마를 적용한다는 것은, 고객의 요구를 정확히 파악하고 이를 제품의 주요 기능과 사양으로 변환시키며, 더 나아가 실제로 생산이 가능한 제품의 설계로 전개하는 과정을 포함한다.

본 논문에서는 파장 405 nm의 청색 광원과 개구수(Numerical Aperture, NA) 0.85에 해당하는 Blu-ray Disc(BD)급 고밀도 휴대형 광정보저장장치의 구현에 필수적인 초소형 광픽업의 개발을 위하여 식스 시그마 방법론을 성공적으로 적용한 사례에 대하여 기술하고자 한다. 식스 시그마 과정은 품질관리에서 보편적으로 많이 사용되고 있는 절차인 정의(define), 측정(measure), 분석(analyze), 개선(improve), 관리(control)의 다섯 단계, 즉 DMAIC 로드맵을 적용하였으며 [5], 각 단계에 따라 달성하고자 하는 목표와 적용한 기법 및 성과에 대하여 설명하였다. 본 방법론을 활용함으로써 Small Form Factor 광정보저장기기에 적용할 수 있는 초소형 광픽업의 제작 프로세스를 확보하였으며, 제작된 광픽업은 BD급 광디스크에 허용되는 파면수차와 광학 신호 규격을 충분히 만족시킬 수 있는 것으로 평가되었다.

2. 연구 및 실험방법

2.1 식스 시그마 설계 방법론

식스 시그마 과제를 수행하기 위한 절차는 몇 가지 종류가 있는데, 본 연구에서는 표준적으로 많이 사용되는 DMAIC 프로세스를 적용하였다. DMAIC 프로세스는 여러 기업에서 제품과 서비스의 품질 개선을 위하여 성공적으로 적용되었으며 연구개발 분야에서도 활용이 가능하다 [6][7]. 각 단계에 따라 달성하고자 하는 목표와 사용한 도구 및 기법들을 [표 1]에 나타내었다.

[표 1] 본 과제에서 적용된 프로세스 및 적용 기법

[Table 1] Processes and Main Tools Applied in This Project

Stage	Goal	Tools
Define	• Find problems and establish targets to be improved	• Understanding of VOC • Identification of CTQ
Measure	• Measure the present quality level and identify the problem quantitatively	• MSA
Analyze	• Find potential variables that affect the CTQ and select a few key factors among them	• Fishbone diagram • C&E matrix
Improve	• Find optimal conditions of key factors to increase the CTQ satisfaction	• Design of Experiment • FMEA
Control	• Manage and maintain the improved quality state	• Control chart • Check list

2.2 실험 방법

초소형 광픽업은 크게 마이크로렌즈와 실리콘 광학 벤치(Silicon Optical Bench, SiOB) 모듈로 구성되며 조립 및 광축 조정의 용이성 및 양산성, 초소형화 및 박형화 가능성을 고려하여 MEMS 기술과 집적광학 기술을 적용하여 개발하였다. 마이크로렌즈는 제작의 용이성과 조립 공차를 고려하여 굴절렌즈와 회절렌즈를 결합한 하이브리드형으로 설계 제작하였다. 굴절렌즈는 비구면 형상을 갖는 금형을 가공하고 진공 성형기(GMP-207HV, Toshiba)를 사용하여 Glass 소재를 압축 성형하여 제작하였으며, 회절렌즈는 전자 빔 리소그래피로 마스터 몰드를 제작한 후에 Pyrex 기판 위에 나노 임프린트 공정으로 형상을 전사하여 어레이 형태로 제작하였다. 하이브리드형 마이크로렌즈 어레이 제작을 위해 Si 기판을 Deep RIE(반응성 이온 식각)으로 가공한 렌즈홀더 기판과 Pyrex 기판을 웨이퍼 본딩한 후에 Pyrex 기판을 소정 두께만큼 연마하고 그 위에 회절렌즈 어레이를 전사하였으며 굴절렌즈를 렌즈홀더의 안착부에 접착하여 조립하였다.

SiOB 모듈은 포토다이오드(PD)와 배선이 있는 Si 기판으로, 청색 레이저 다이오드(LD)와 마이크로미러가 탑재되며, 최종적으로 1/4 파장판(QWP)을 갖는 편광 홀로그래픽 광학요소(P-HOE)가 광축 정렬을 통해 접합된다. 마이크로미러 어레이는 약 9.7° off-axis로 절단된 Si(100) 단결정 기판을 KOH 수용액으로 이방성 식각하여 45° 미러면을 형성하고 이 미러면을 폴리머로 Cladding하여 면 정밀도를 보정하였고, RF 마그네트론 스퍼터링에 의해 광 반사용 Al 박막을 100 nm 두께로 코팅하여 완성하였다. 하이브리드 마이크로렌즈는 다이싱된 각각의 SiOB 위에 Gripping Stage와 간섭계를 이용한 Active Alignment를 통하여 접합이 된다.

제작된 광픽업의 성능 평가를 위하여 Modified Mach-Zehnder 간섭계(Sextant Labs Inc.)를 사용하여 파면 수차(wavefront aberration)를 측정하였고, 디스크 구동 장치를 사용하여 Astigmatism 및 Push-Pull 방법으로 포커싱과 트래킹 에러 신호를 측정하였다.

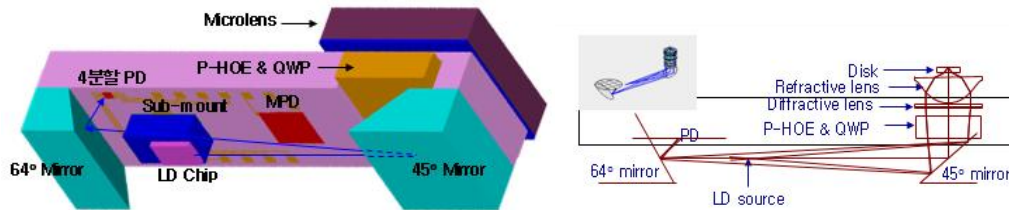
3. 결과 및 고찰

3.1 Define 단계

본 단계는 DMAIC 로드맵의 첫 번째 단계로서 문제를 정의하고 제품의 핵심 품질특성(Critical to quality, CTQ)을 파악하여 문제를 해결하기 위한 식스 시그마 과제를 선정하는 단계이다. 이를 위해서는 Table 1에 나타난 바와 같이 먼저 대상 고객 및 고객의 요구사항(Voice of customers, VOC)을 정확하게 파악해야 한다.

최근 디지털 변환에 따른 지능정보화 사회의 도래로 휴대형 초고밀도 정보 저장기기의 필요성이 증가하고 있다. 초고밀도 광정보 저장기기를 위해서는 파장 405 nm의 청색 LD를 사용하는 광 디스크에 대응할 수 있는 초소형 광픽업이 요구된다 [8]. 기존의 광픽업은 광학 부품의 조립에 약 10개 정도의 조정 공정 수가 필요하며 광학 부품도 부피가 커서 소형화가 어려웠다. 본 과제에서는 직경 1인치인 휴대형 광디스크 구현을 위하여 MEMS 공정에 의한 웨이퍼 레벨 제조 기술 및 집적광학 기술을 적용하여 두께 2 mm 이하의 초박형/초소형 광픽업 개발을 목표로 한다. 광학 부품의 웨이퍼 기반 제조는 반도체 batch 제조 공정의 사용, 다른 광학요소들과의 조립 용이성, 광축 조정 등의 복잡한 공정의 감축 등의 많은 장점을 가지고 있으므로 대량 생산에 유리하다. 웨이퍼 레벨 제조를 통하여 광픽업의 소형화와 집적화를 꾀하며 이를 통하여 부품의 대량 생산과 조립 공정 수의 감축을 통한 제조 원가 절감이 가능하다. 한편, 광정보저장기기에서 빛의 시스템 전체 파면수차는 Marechal 기준에 의하면 사용하는 LD 광원의 파장을 λ 라고 할 때 $0.07\lambda_{rms}$ 이하가 되어야 하며, 이를 위해서는 광학 시스템 설계 기술과 함께 광픽업용 대물렌즈와 마이크로미러 등의 광학 수차가 허용치를 벗어나지 않도록 미세광학 부품들의 초정밀 제조 기술과 조립 기술이 필요하다.

따라서, 본 식스 시그마 프로젝트에서 초소형 광픽업 개발을 위한 CTQ는 마이크로렌즈 등 광학 계 설계 기술, 마이크로렌즈와 마이크로미러 등의 미세광학 부품의 웨이퍼 레벨 제조 기술, 광학 요소들의 조립 기술 및 시스템 평가 기술의 확보라고 할 수 있다. [그림 1]에 본 과제에서 목표로 하는 초소형 광픽업의 개념도 및 광경로를 나타내었다.



[그림 1] 본 과제의 초소형 광픽업의 개념도 및 광경로

[Fig. 1] Conceptual Diagram and Optical Path of the Small Optical Pickup Proposed in This Project
(PD: photodiode, MPD: monitor PD, P-HOE: polarized holographic optical element, QWP: quarter-wave plate)

3.2 Measure 단계

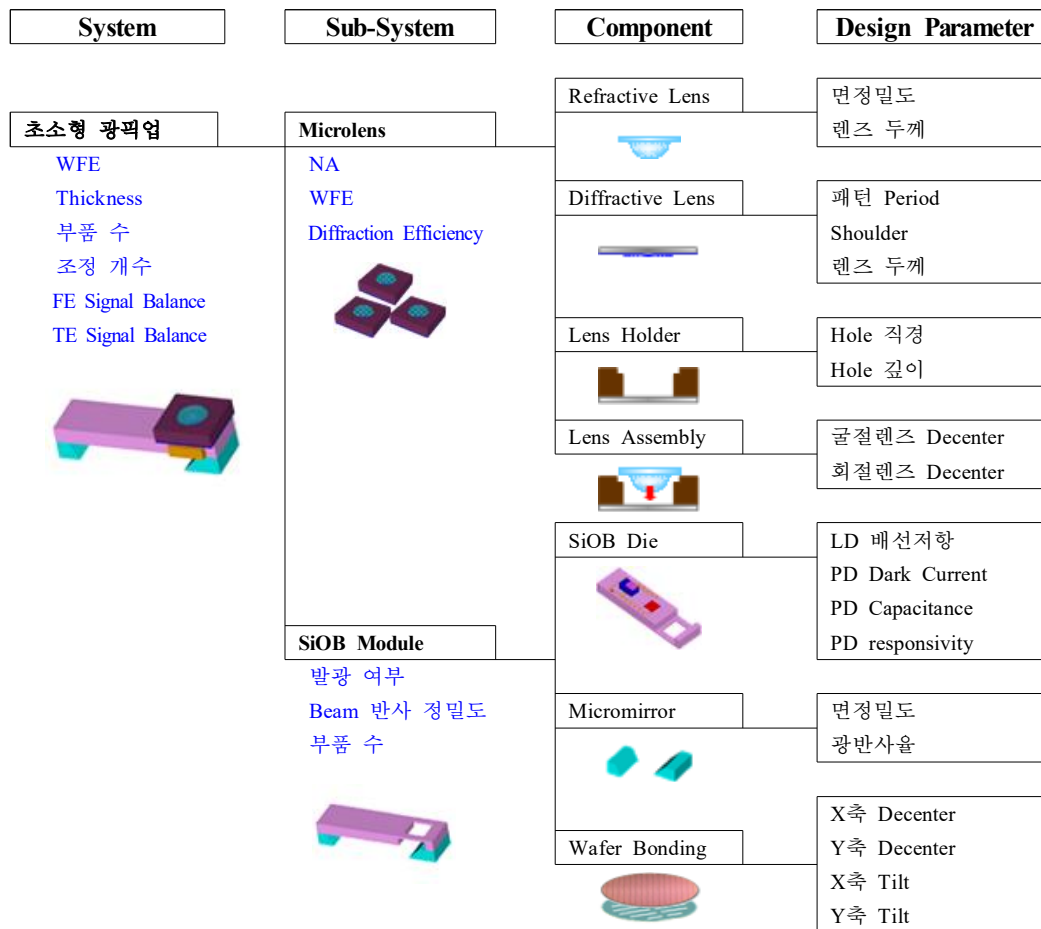
식스 시그마 기법의 가장 큰 특징 중 하나는 과학적 사실, 즉 데이터에 근거하여 모든 것을 판단한다는 것이다. 본 단계에서는 측정을 통하여 현재의 품질 수준을 정확히 파악하고, 현 수준과 고객이 요구하는 성능 수준의 격차를 분석하여 개선 목표를 수립한다. 식스 시그마에서 측정하고 분석하는 데이터에는 CTQ의 충족 정도를 나타내는 성과변수와 이에 영향을 미치는 요인을 나타내는 원인변수가 있으며 측정단계에서는 성과변수 Y의 측정에 초점을 둔다. 현상의 분석을 위하여 사용하는 데이터의 정확성을 확보하기 위해 측정 시스템 분석(Measurement system analysis, MSA)을 수행한다. MSA란 측정 방법, 측정 도구, 측정 환경, 작업자 등 측정의 전체 과정을 분석하여 데이터의 반복성과 재현성을 얻고자 하는 것이다.

본 과제에서는 MEMS 공정 기술과 집적 광학 기술을 이용하여 웨이퍼 레벨에서 광학 요소들을 제작하고 이를 정렬 조립함으로써 파장 405 nm의 광원 및 개구수 0.85에 대응할 수 있는 Blu-ray 디스크급 두께 2 mm 이하의 초박형/초소형 광픽업을 제조하는 기술을 제안하고 개발하고자 한다. 우선 문헌 조사를 통하여 기존의 집적화된 초소형 광픽업의 개발 동향을 파악하였으며 [9-11], 광학적 특성 분석 기기들의 MSA를 통하여 측정 데이터에 충분히 신뢰를 가질 수 있음을 확인하였다.

3.3 Analyze 단계

본 단계에서는 CTQ의 충족 정도(Y)에 영향을 주는 잠재적인 원인 변수들을 찾고, 그 중에서 영

향도가 큰 소수의 핵심 인자인 ‘Vital Few X’를 선별한다. 이를 위하여 프로세스 상세 분석에 따른 특성요인도(Cause & effect diagram) 작성을 통하여 제품의 품질에 영향을 미칠 수 있는 잠재 인자들을 도출한다. 또한, 원인-결과 매트릭스(Cause & effect matrix) 분석을 통하여 가설을 설정하고 이를 검정하여 여러 잠재 인자들 중에서 핵심 인자들을 도출한다. 이를 위하여 우선 광픽업 시스템을 마이크로렌즈와 SiOB의 서브시스템으로 분류하고 이를 다시 부품으로 전개한 후에 각각의 부품에 대하여 주요 설계 파라미터를 도출하였다. [그림 2]에 본 과제의 광픽업에 대한 시스템 전개도를 나타내었다. 아울러 시스템과 서브시스템에 대한 핵심 품질특성(CTQ)을 정리하여 나타내었다.

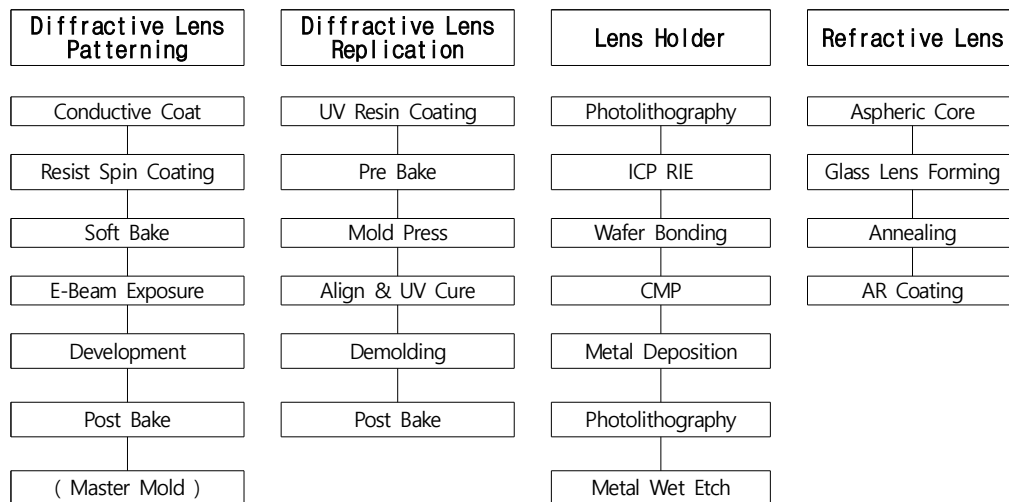


[그림 2] 초소형 광픽업의 시스템 전개도

[Fig. 2] System Deployment Diagram for the Ultrasmall Optical Pickup

본 광픽업 시스템은 [그림 2]와 같이 크게 마이크로렌즈와 SiOB 모듈의 2가지 서브시스템으로

구성되는데 이 중에 특히 광픽업의 품질특성 중 가장 중요한 성능인 파면 수차(Wavefront Error, WFE)를 결정하는 서브시스템은 마이크로렌즈라고 할 수 있다. 마이크로렌즈의 주요 구성 요소는 굴절렌즈, 회절렌즈, 렌즈 홀더, 렌즈 조립 등을 들 수 있다. 본 과제의 초소형 광픽업을 구성하는 마이크로렌즈는 기존의 650 nm 이상의 장파장을 사용하는 광픽업용 대물렌즈에 대비하여 다음과 같은 차별화 요소를 고려하여 설계되었다. 기존에는 높은 개구수(Numerical aperture, NA)를 얻기 위해서 2개의 비구면 곡면을 가진 단일 렌즈가 적용되었으나, 본 마이크로렌즈에서는 기존 렌즈에서 비구면 곡면에 높은 굴절력이 요구되는 부담을 해소하고 제작의 용이성을 위해 굴절렌즈와 회절렌즈로 구성되는 하이브리드형 렌즈로 설계하였다. 또한 굴절렌즈와 회절렌즈의 아베수는 서로 반대 부호를 가지므로 하이브리드형 렌즈를 사용하면 색수차(Chromatic Aberration)를 현저히 감소시킬 수 있다는 장점이 있다 [12]. 본 과제의 주요 서브시스템인 마이크로렌즈에 대하여 구성 요소별 제조 공정 흐름도를 [그림 3]에 나타내었다.

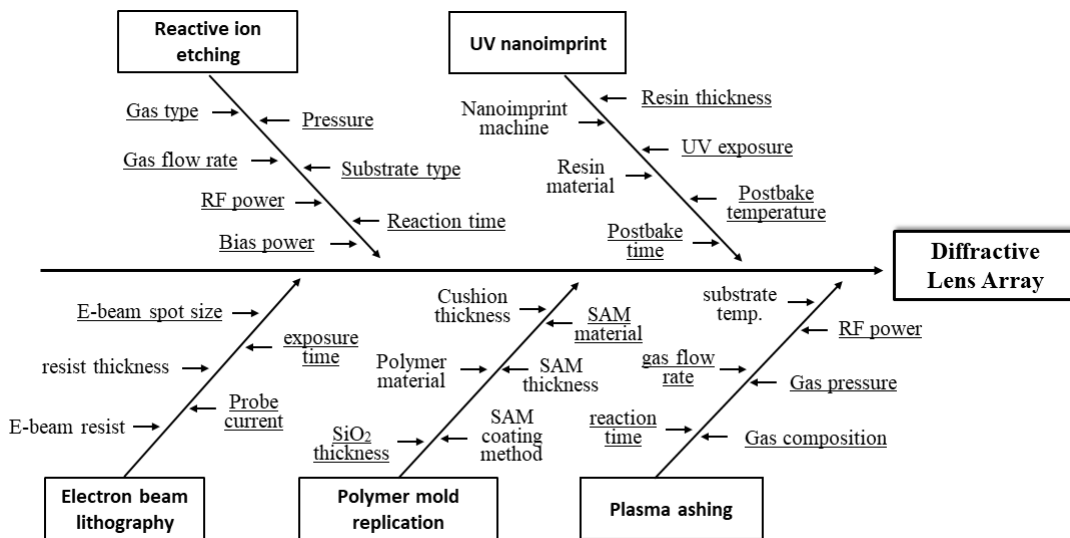


[그림 3] 마이크로렌즈의 요소별 제조 공정 흐름도

[Fig. 3] Fabrication Process Flow for the Each Component of the Microlens

먼저 광학 설계에 따라 전자빔 리소그래피를 이용하여 회절렌즈의 패턴을 만들고, 회절렌즈 패턴을 복제하여 투명한 마스터 몰드를 제작하였다. 이와 병행하여 굴절렌즈를 금형 가공 후에 글래스 압축 성형으로 단일 렌즈 형태로 제작하고 렌즈 홀더를 Si 기판의 Deep RIE(Reactive Ion Etching) 공정으로 제작하였다. 렌즈 홀더 Si 기판을 Pyrex 기판과 wafer bonding한 후에 Pyrex 기판 표면을 CMP 연마하여 두께를 맞추고 금속 박막 도포 후에 패터닝하여 위치 정렬용 마크를 마련하였다. 다음에 렌즈 홀더의 Pyrex 기판 면에 UV 나노임프린트를 이용하여 회절렌즈 패턴을 소정

위치에 3x3 어레이 형태로 복제하였다. 최종적으로 굴절 렌즈를 렌즈 홀더의 안착부에 UV 경화형 접착제로 접착하여 회절렌즈와 굴절렌즈가 결합된 하이브리드형 마이크로렌즈를 얻었다. 생산성을 고려하여 굴절렌즈와 회절렌즈 간의 조립 허용 공차가 크도록 설계가 되었으므로 굴절렌즈와 회절렌즈 간의 위치 정렬이 필요없이 Pick & Place 공정에 의해 렌즈 홀더에 조립될 수 있었다. 굴절렌즈와 회절렌즈의 제조공정과 렌즈 홀더의 제조공정에 영향을 미치는 잠재적인 요인을 선정하기 위하여 특성요인도, 즉 Fishbone Diagram을 작성하였다. [그림 4]는 회절렌즈 어레이 제작을 위한 주요 공정 단계별로 렌즈의 형상과 광학적 성능에 영향을 미칠 수 있는 잠재인자들을 Fishbone Diagram에 의하여 도시하였다. 그림에서 밑줄 친 인자들은 실험적으로 제어 가능한 인자들이며 밑줄을 치지 않은 것들은 실험적으로 제어가 불가능한 인자들을 나타낸다.



[그림 4] 회절렌즈 어레이의 제작방법에 대한 특성요인도

[Fig. 4] Cause and Effect Diagram for the Fabrication of the Diffractive Lens Array

또한, 회절렌즈 어레이의 형상과 광학적 성능을 결정짓는 가장 중요한 공정 중 하나인 UV 나노 임프린트 공정 및 나노 임프린트 직후 기판 상에 잔류하는 수지를 제거하기 위한 plasma ashing 공정에서 잠재적인 인자들과 회절렌즈의 품질 특성 간의 상호 관련성을 보여 주는 원인-결과 매트릭스를 작성하여 [그림 5]에 나타내었다. [그림 5]로부터 회절렌즈의 형상과 광학적 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 소수의 핵심 인자(vital few X's)는 그 중요도 순으로 UV 노출시간, UV 광원의 파워, UV 경화 수지의 두께이며, plasma ashing과 관련된 여러 인자들은 회절렌즈의 품질 특성에 미치는 영향이 상대적으로 미미함을 알 수 있다.

No.		1	2	3	4	5	
Rating of Importance to Customer		5	8	7	10	9	
Process Step	Process Input / Process Output	Lens height	Shape fidelity	Diffraction efficiency	Wavefront error	Chromatic aberration	Total Score
UV nano imprint	Resin thickness	3	9	9	3	3	207
	UV power	3	3	9	9	3	219
	UV exposure time	3	9	9	9	3	267
	Post-bake temperature	3	9	9	3	1	189
	Post-bake time	1	9	3	3	3	155
	Ashing gas pressure	3	3	3	3	3	117
	Gas flow rate	3	1	1	3	3	87
	Ashing gas composition	1	3	3	3	1	89
	Ashing time	3	3	3	1	3	97

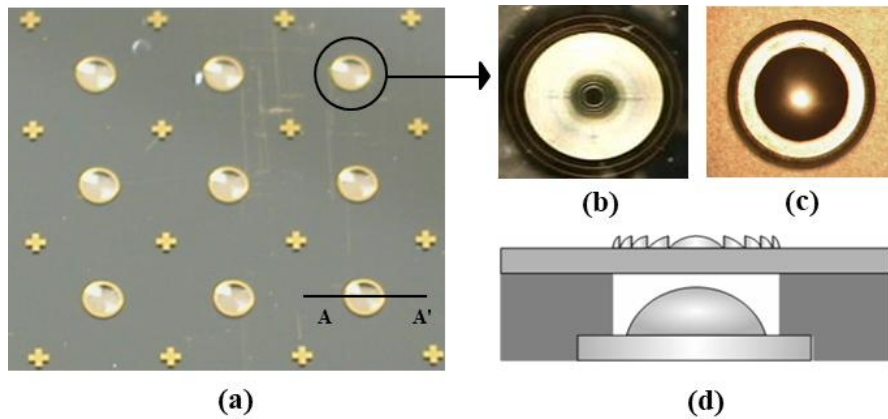
[그림 5] UV 나노 임프린트 공정에 대한 요인-결과 매트릭스도

[Fig. 5] Cause and Effect Matrix Diagram for the UV nanoimprint Process

3.4 Improve 단계

개선 단계는 문제의 근본 원인을 발견하고 제거하기 위하여, 앞 단계에서 얻은 핵심 인자에 대하여 최적 조건을 찾아내어 프로세스의 개선을 실행하는 단계이다. 본 과제에서는 실험계획법 (Design of experiment, DOE)을 통하여 회절렌즈에 대한 소수의 핵심 인자 X를 선택하여 최적화된 제조 공정조건을 도출하였다. 실험계획법 수행을 위하여 상용화된 Minitab 소프트웨어를 사용하였으며, UV 노출 시간, UV 파워, UV 경화성 Resin 두께 등의 3인자(X)에 대하여 각각 2수준으로 완전 요인설계를 시행하였고 2회 반복으로 실험하였다. 반응인자(Y)로는 회절렌즈의 형상과 광학적 성능을 선정하여 실험하였다. 이 때 Postbake 온도 및 시간, plasma ashing 조건 등 다른 실험 조건들은 일정하게 고정하였다. 주인자와 교호인자들에 대하여 95% 신뢰도 수준에서 유의미한 순서에 따른 파레토 차트를 분석한 결과, 예상한 바와 같이 UV 노출 시간 및 UV 파워가 회절렌즈의 형상 정밀도와 회절효율 및 파면수차에 가장 큰 영향을 미치는 주효과임을 알 수 있었다. 또한, 반응 표면법(RSM)을 사용하여 UV 나노 임프린트 단계에서 최적화된 공정변수는 UV 노출 시간 70 sec,

UV 파워 100 W, UV 경화성 수지의 두께 1.0 μm 였다. 실험계획법에 의해 도출된 최적화된 공정 변수에 따라 굴절렌즈와 회절렌즈 어레이로 구성된 하이브리드 마이크로렌즈를 구현하였다. [그림 6]은 제작된 마이크로렌즈 어레이의 광학 현미경 사진 및 그 굴절렌즈와 회절렌즈를 결합한 하이브리드형 렌즈의 구조도를 나타낸다. 본 연구에서는 제조 공정조건의 최적화에 따라 직경 750 μm , 최소 피치 4 μm , 8레벨의 회절렌즈 패턴을 갖는 3x3 회절렌즈 어레이와 직경 700 μm , 렌즈 높이 500 μm 의 굴절렌즈를 제작하였다.

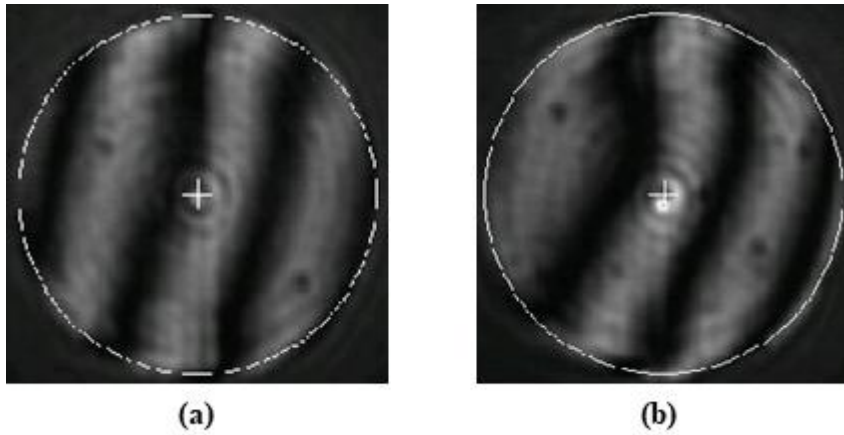


[그림 6] (a) 회절렌즈 어레이의 광학현미경 사진, (b) 회절렌즈 확대 이미지, (c) 굴절렌즈 확대 이미지, (d) 하이브리드 렌즈의 구조도 (AA' 단면)

[Fig. 6] (a) Optical Micrograph of Diffraction Lens Array, (b) Magnified Image of a Diffractive Lens, (c) Magnified Image of a Refractive Lens, (d) Schematic Diagram of a Hybrid Lens (Cross Section of AA').

개발된 하이브리드형 마이크로렌즈의 광픽업으로 조립하기 전후의 광학적 성능을 평가하였다. 회절렌즈의 회절효율은 참고문헌에 제시된 방법으로 측정하였고 [13], 마이크로렌즈의 파면수차는 Modified Mach-Zehnder 간섭계를 이용하여 측정하였다. 회절렌즈에 대한 회절 효율은 84%로 측정되었으며 이는 BD급 광디스크 규격의 하한을 초과하는 값이다. [그림 7]은 본 실험에서 제작된 하이브리드 렌즈를 SiOB에 접합한 상태, 즉 광픽업 조립 후의 전형적인 간섭 무늬 패턴을 보여준다. 또한 UV 경화 전의 파면수차는 $0.045\lambda_{\text{rms}}$, UV 경화 후는 $0.059\lambda_{\text{rms}}$ 를 나타내었다. SiOB와 마이크로렌즈 간의 Active Alignment가 완료되면 UV 접착제를 이용해 접합한다. UV 경화 후에 전체 파면 수차가 커지는데, 이는 접착제가 UV 경화시 수축이 되기 때문에 초기의 광정렬 위치가 벗어나기 때문이다. 그러나, 어느 경우에도 BD 규격의 상한 이하의 값으로 규격을 만족함을 알 수 있었다. 본 하이브리드 렌즈의 집광된 최소 광 스폿의 크기는 파장 405 nm의 청색 LD에 대하여 439 nm로서 규격 이내의 값으로 나타났다. 광픽업의 포커싱 및 트래킹 신호 검출 특성을 평가하기 위해 정적 오차신호 측정 시스템을 구성하여 포커싱 및 트래킹 신호 밸런스를 측정한 결과, 각각 4.6%,

8.3%로 BD 규격을 충분히 만족하였다. 최종적으로 이번 식스 시그마 프로젝트에서 제작한 초소형 광픽업의 광학 성능을 평가한 결과를 스코어카드로 [표 2]에 정리하여 나타내었다.



[그림 7] 제작된 하이브리드 마이크로렌즈의 간섭 무늬 패턴, (a) UV 경화 전, (b) UV 경화 후

[Fig. 7] (a) Typical Interference Fringe Pattern, (a) Before UV curing, (b) After UV curing

[표 2] 본 과제에서 개발된 초소형 광픽업의 스코어 카드

[Table 2] The Score Card of the Fabricated Ultrasmall Optical Pickup Developed in This Project

Items	Unit	Spec limit	Result
Wave front error	λ_{rms}	< 0.06	0.059
Diffraction efficiency	%	> 80	84
Spot diameter	nm	$400 < d < 460$	439
조립 조정 수	개	-	3
FE Signal Offset	%	< 10	4.6
TE Signal Offset	%	< 10	8.3

3.5 Control 단계

DMAIC 로드맵의 최종 단계인 관리 단계에서는 개선된 상태를 어떻게 지속적으로 유지할 것인가를 다룬다. 본 단계에서는 개선된 조건을 표준화한 후 개선안의 실행책임자를 결정하고 주기적인 모니터링을 통해 개선된 상태가 계속 유지되고 있는지를 확인한다. 표준화된 상태가 유지되고 있는지를 파악하기 위해서는 성과변수 Y와 원인변수 X값을 지속적으로 체크해야 한다. 이를 위해, 최적 공정조건에 따라 얻어진 광픽업의 파면수차와 같은 주요 특성에 대하여 관리도(Control chart)를 작성하여 품질을 관리한다. 관리도란 시간에 따른 데이터의 변화 추이를 나타내는 그래프로서,

공정 품질의 상태를 통계적으로 파악할 수 있는 중심선 및 관리 상한, 관리 하한과 같은 관리 한계선이 설정된다. 관리도상에 나타난 특성값의 점들이 관리 한계선 내에 있으면 관리되는 상태로 볼 수 있으며, 이 점들이 관리 한계선을 벗어나면 이상이 발생한 것으로 간주하여 그 원인을 찾아 해결해야 한다. 또한 본 단계에서는 주요 공정의 핵심 인자 등 관리 항목들을 체크 시트로 작성하여 중점적으로 관리하도록 한다. 이와 같은 모니터링과 관리를 통하여 개선된 품질을 지속적으로 유지할 수 있다.

4. 결론

고밀도 휴대형 광정보저장기기를 위한 초소형 광픽업 개발을 위하여 식스 시그마 기법을 적용하여 설계, 제작 공정 및 평가 방법을 확보하였다. 식스 시그마 방법론은 일반적으로 사용되고 있는 DMAIC 프로세스를 적용하였으며, 프로젝트의 각 단계별로 달성하고자 하는 목표에 따라 적합한 방법과 도구를 적용하였다. 휴대형 광정보저장기기의 광픽업에 적합한 소형화/박형화, 조립의 용이성, 양산성 등 고객의 요구조건을 만족시키기 위하여 MEMS 기술과 집적광학 기술을 적용하여 광픽업을 설계하고 제작하였다. 마이크로렌즈와 마이크로미러 등 주요 광학 요소는 광학적 성능에 영향을 미치는 핵심 인자들을 도출하고 실험계획법을 통하여 얻은 최적 공정조건에 따라 제작되었다. 청색 광원 대응 NA 0.85인 하이브리드형 마이크로렌즈는 어레이 형태로 제작되었고 회절효율과 파면수차는 고밀도 초소형 광픽업에 적용 가능한 측정 결과를 나타내었다. 개발된 초소형 집적형 광픽업의 광학적 특성을 평가한 결과, 파면수차와 포커싱 및 트래킹 신호 밸런스 등 BD급 광픽업에 요구되는 제반 성능을 충분히 만족함을 확인할 수 있었다.

References

- [1] J. Antony, R. Banuelas, "Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program", *Measuring Business Excellence*, vol. 6, no. 4, December 2002, pp. 20-27, doi: 10.1108/13683040210451679.
- [2] T. Bertels, Rath & Strong's Six Sigma Leadership Handbook, John Wiley and Sons, 2003.
- [3] M. Harry, R. Schroeder, *Six Sigma: the Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations*, Doubleday, 1999.
- [4] C. R. Superville, S. Gupta, "Issues in modeling, monitoring and managing quality costs", *The TQM Magazine*, vol. 13, no. 6, December 2001, pp. 419-424, doi: 10.1108/EUM00000000006178.
- [5] J. d. Mast, J. Lokkerbol, "An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving", *Int. J. of Production Economics*, vol. 139, no. 2, October 2012, pp. 604-614, doi: 10.1016/j.ijpe.2012.05.035.

- [6] T. Hasenkamp, A. Olme, "Introducing design for Six Sigma at SKF", *Int. J. Six Sigma and Competitive Advantage*, vol. 4, no. 2, September 2008, pp. 172-189, doi: 10.1504/IJSSCA.2008.020281.
- [7] P. Kaushik, D. Khanduja, "Application of Six Sigma DMAIC methodology in thermal power plants: A case study", *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 20, no. 2, February 2009, pp. 197-207, doi: 10.1080/14783360802622995.
- [8] J. S. Sohn, E. H. Cho, M. B. Lee, H. S. Kim, M. S. Jung, S. D. Suh, W. C. Kim, N. C. Park, Y. P. Park, "Development of microlens for high-density small-form-factor optical pickup", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 2B, February 2006, pp. 1144-1151, doi: 10.1143/JJAP.45.1144.
- [9] J. U. Bu, Y. Yee, S. -H. Lee, J. Kim, "MEMS technology for optical data storage", *Digest of Technical Papers for International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS'03)*, June 8-12, 2003, Boston, MA, USA, pp. 1762-1767, doi: 10.1109/SENSOR.2003.1217127.
- [10] K. Manoh, H. Yoshida, T. Kobayashi, M. Takase, K. Yamauchi¹, S. Fujiwara, T. Ohno, N. Nishi, M. Ozawa, M. Ikeda, T. Tojyo, T. Taniguchi, "Small integrated optical head device using a blue-violet laser diode for blu-ray disc system", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 2s, February 2003, pp. 880-884, doi: 10.1143/JJAP.42.880.
- [11] S. Yoshida, K. Minami, K. Okada, H. Yamamoto, T. Ueyama, K. Sakai, Y. Kurata, "Optical pickup employing a hologram-laser-photodiode unit", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 39, no. 2s, February 2000, pp. 877-882, doi: 10.1143/JJAP.39.877.
- [12] W. Harm, C. Roider, A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte, "Dispersion tuning with a varifocal diffractive-refractive hybrid lens", *Opt Express*, vol. 22, no. 5, February 2014, pp. 5260-5269, doi: 10.1364/OE.22.005260.
- [13] J. S. Sohn, M. B. Lee, W. C. Kim, E. H. Cho, T. W. Kim, C. Y. Yoon, N. C. Park, Y. P. Park, "Design and fabrication of diffractive optical elements by use of gray-scale photolithography", *Appl. Opt.*, vol. 44, no. 4, February 2005, pp. 506-511, doi: 10.1364/AO.44.000506.