

# 식스 시그마 기법을 활용한 초소형 광픽업용 마이크로미러 어레이의 개발

## Development of Micromirror Array for Miniaturized Optical Pickup by Employing the Six Sigma Methodology

이명복<sup>1</sup>, 편양범<sup>2\*</sup>

Myung-Bok Lee<sup>1</sup>, Yang-Bum Pyun<sup>2\*</sup>

### 요약

식스 시그마 기법은 생산라인의 품질관리, 경영관리뿐만 아니라 연구개발에도 유용하게 적용할 수 있다. 본 논문에서는 식스 시그마 방법론을 활용하여 휴대형 광정보저장장치용 초소형 광픽업의 구현에 필수적인 마이크로미러의 설계 및 개발에 대하여 연구한 결과를 기술한다. 식스 시그마 방법론으로는 일반적으로 사용되는 DMAIC 프로세스를 적용하였다. 마이크로미러는 <110> 결정 방향으로 9.7° 경사지게 절단된 Si(100) 기판을 KOH 용액을 사용한 습식 이방성 식각으로 45° 미러면을 제작하고, 광학수차 감소를 위하여 정밀 유리 마스터 몰드를 사용한 자외선 경화형 폴리머 엠보싱을 추가하여 표면 거칠기를 감소시켰다. 폴리머 층을 추가한 마이크로미러의 표면 거칠기는 습식 식각만 적용한 Si 마이크로미러에 대비하여 약 1/8로 감소하여 초소형 광픽업용 미러의 규격을 만족시켰다.

핵심어 : 식스 시그마, DMAIC, 마이크로미러, Si 습식 식각, 폴리머 자외선 엠보싱

### Abstract

Six Sigma methodologies can be used not only for quality control and solving the management problem of production lines, but also for research and development of novel products. In this paper, we describe the design and fabrication of micromirror array, which is essential for the implementation of micro-optical pickups for portable optical information storage devices using Six Sigma methodology. The DMAIC process was applied as a Six Sigma roadmap. The micromirror array was fabricated by wet anisotropic etching of a Si(100) wafer which was cut at an angle of 9.7° in the <110> crystal direction using a KOH solution and additional UV embossing using a precision glass master mold. The surface roughness of the polymer-coated micromirror was reduced to one eighth compared to the Si micromirror fabricated with wet etching only, satisfying the specifications of the micromirror for the optical pickup.

Keyword : Six sigma, DMAIC, Micromirror, Si wet etching, Polymer UV embossing

1 Division of Mechanical and Metallic Mold Engineering, Gwangju University, Gwangju, Korea [Professor]  
e-mail: mblee3@gwangju.ac.kr

2 Department of Real Estate and Finance, Gwangju University, Gwangju, Korea [Professor]  
e-mail: ybpyun@gwangju.ac.kr (Corresponding author)

\* 이 연구는 2020년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

Received(October 14, 2020), Review Result(1st: November 6, 2020), Accepted(December 7, 2020), Published(December 31, 2020)



© 2020 The Authors. Published by NCISS.  
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 1987년에 미국의 Motorola사에서 개발된 이래, 수 많은 글로벌 기업에서 적용되어 제품과 서비스의 품질 개선, 생산성 향상 등 다양한 측면에서 놀라운 성과를 올린 품질 경영 기법이다 [1]. 식스 시그마란 기업 등의 조직이 자원의 낭비를 최소화하는 동시에 고객 만족을 극대화하는 방법으로 제반 활동을 설계하고 실행하여 결과적으로 조직의 수익성과 효율성을 개선시키는 경영 프로세스라고 정의할 수 있다 [2][3]. 또한 식스 시그마는 기업의 각 기능 부서에서 경영 활동의 효율 개선을 위한 다양한 기법과 도구를 도입함으로써 기업의 핵심 역량을 지속적으로 향상시킬 수 있는 프로그램이다. 식스 시그마에서 말하는 시그마란 품질특성의 산포의 크기를 의미하며, 식스 시그마 수준이란 통계적으로 100 만번의 불량 발생 기회 당 3.4 개에 해당하는 결함이 발생하는 프로세스로 매우 높은 품질을 의미한다. 한편, 품질 비용이란 제품이나 서비스의 품질과 관련하여 발생하는 비용으로 기회비용을 포함한 개념이며, 결함 예방을 위한 비용이 1이라면, 제품의 시험평가에 소요되는 비용은 10, 품질의 실패에 따르는 비용은 100에 이른다고 한다 [4]. 따라서, 품질을 설계 품질, 제조 품질, 사용 품질로 나눌 때 설계 품질의 관리가 가장 중요하며 이러한 관점에서 제품의 개발 단계로부터 식스 시그마를 적용하는 것이 필요하다. 이는 처음부터 올바른 목표를 정하고 이를 올바른 방법으로 행하는 품질경영의 철학과 상통한다. 개발 단계에서 식스 시그마를 적용한다는 것은, 소비자의 필요와 욕구를 정확히 파악하고 이를 제품의 주요 성능과 사양으로 변환시키며, 나아가 실제 생산이 가능한 제품의 설계로 전개하는 과정을 의미한다.

본 논문에서는 휴대형 광정보저장장치용 초소형 광픽업의 구현에 필수적인 마이크로미러 어레이의 개발을 위하여 식스 시그마 방법론을 적용한 사례에 대하여 기술하고자 한다. 식스 시그마 프로세스는 품질경영에서 보편적으로 많이 사용되고 있는 문제해결 과정인 정의(define), 측정(measure), 분석(analyze), 개선(improve), 관리(control)의 다섯 단계, 즉 DMAIC 로드맵을 적용하였으며 [5], 각 단계별로 달성하고자 하는 목표와 적용한 기법 및 성과에 대하여 상세하게 설명하였다. 본 방법론을 활용함으로써 휴대형 광정보저장장치에 적용할 수 있는 초소형 광픽업용 마이크로미러의 제작 프로세스를 확보하였으며, 제작된 마이크로미러를 적용한 광픽업은 파장 405 nm의 청색 광원에 허용되는 파면수차를 충분히 만족시킬 수 있는 것으로 평가되었다.

## 2. 연구 및 실험방법

### 2.1 식스 시그마 설계 방법론

식스 시그마 과제 수행을 위한 프로세스는 몇 가지 종류가 있는데, 본 과제에서는 표준적으로 많이 사용되는 DMAIC 프로세스를 적용하였다. DMAIC 프로세스는 여러 조직에서 제품과 서비스

의 품질 개선을 위하여 성공적으로 적용된 바 있으며 연구개발 분야에서도 활용 가능하다 [6][7]. 각 단계별로 달성하고자 하는 목표와 사용한 기법 및 방법들을 [표 1]에 나타내었다.

[표 1] 본 과제에서 적용된 프로세스 순서 및 주요 적용 기법

[Table 1] Sequence of Process and Main Tools Employed in This Project

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

## 2.2 실험 방법

<110> 결정 방향으로  $9.7^\circ$  각도로 경사지게 절단된 두께  $700\ \mu\text{m}$ 의 Si(100) 기판을 원재료로 사용하였다. Si 기판은 표준 RCA 공정으로 세정하였고 기판 온도  $78^\circ\text{C}$ 에서  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ 와  $\text{NH}_3$ 를 원료 가스로 하여 저압화학기상성장(LPCVD) 법으로 식각용 마스크용으로 두께  $150\ \text{nm}$ 의  $\text{SiN}_x$  박막을 성장시켰다. 포토리소그래피에 의해 장방형의 패턴을 형성한 후 반응성 이온 식각(RIE)에 의해 노출된 부위의  $\text{SiN}_x$  박막을 제거하였다. 패턴닝된 Si 기판을 테프론 캐리어의 slot에 삽입한 후 KOH 수용액 bath에 침지하여 식각하였다. 이 때 수용액 bath의 jacket을 온수로 순환 가열하여 수용액을 일정 온도로 유지하였고 bath의 내부에서는 용액의 교반이 일어나도록 하였다. KOH 수용액에 의한 습식 이방성 식각에 의하여 양측 경사면의 각도가 각각  $45^\circ$  및  $64^\circ$ 인 마이크로미러 표면이 형성되었다. 습식 식각된 기판은 흐르는 증류수 속에서 세정하고 인산( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) 비등액에 20분간 침지하여 잔류하는  $\text{SiN}_x$  마스크 층을 제거하였다.

세정 및 건조시킨 기판을 glass 기판에 고정된 후 과불소화 아크릴계 자외선(UV) 경화형 레진 (ChemOptics, WIR-30-542-RI)을  $45^\circ$  미러면에 도포하였다. 초정밀 가공으로 주문 제작된 glass 마스터 몰드를 사용하여 레진을 압착한 상태에서 자외선을 조사하여 레진을 경화시킨 후 glass 몰드와 고정용 glass 기판을 Si 기판으로부터 분리하여 폴리머 표면으로 덮여 있는  $45^\circ$  Si 경사면을 얻었다. 최종적으로 RF 마그네트론 스퍼터링에 의해 두께  $100\ \text{nm}$ 의 광 반사용 Al 박막을 증착하여 마이크로미러 어레이를 완성하였다.

제작된 마이크로미러의 형상 및 광학적 특성의 평가를 위하여 미러면에서 반사된 빛과 기준 빛

사이의 간섭 효과를 이용하는 비접촉식 optical surface profiler (Wyko, NT 3300)를 사용하여 미러면의 표면 형상(surface waviness) 및 표면 거칠기를 측정하였다. Optical power meter (Yokogawa, TB 100)을 사용하여 파장 405 nm에서 미러면의 반사율을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

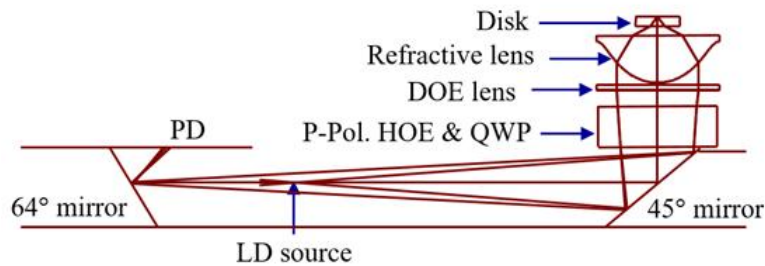
#### 3.1 Define 단계

이 단계는 DMAIC 프로세스의 첫 단계로 문제가 무엇인지 정의하고 제품이나 서비스의 핵심품질특성(Critical to quality, CTQ)을 파악하여 문제 해결을 위한 식스 시그마 과정을 선정하는 단계이다. 이를 위해서는 Table 1에 나타난 바와 같이 먼저 고객이 누구인지 정의하고 고객의 요구사항(Voice of customers, VOC)을 명확하게 파악해야 한다.

최근 지능형 정보화 사회의 도래로 휴대형 초고밀도 정보 저장장치의 필요성이 증가하고 있다. 초고밀도 정보저장을 위하여 파장 405 nm의 blu-ray 디스크 규격에 대응할 수 있는 초소형 광 픽업이 요구되며 [8], 광 픽업을 구성하는 각종 미세 광학 요소들은 반도체 및 MEMS 공정기술에 의하여 웨이퍼 레벨에서 제조하는 것이 바람직하다. 웨이퍼 레벨 제조는 반도체 batch 제조 공정 사용, 다른 광학요소들과 조립의 용이성, 광축 조정 등의 복잡한 공정의 제거 등의 많은 장점을 가지고 있으므로 대량 생산에 유리하다. 한편, 광정보저장장치에서 빛의 전체 파면수차는 Marechal 기준에 의하면 사용하는 레이저 다이오드 광원의 파장을  $\lambda$ 라고 할 때  $0.07\lambda_{rms}$  이하가 되어야 하며 이를 위해서는 광픽업용 미러의 표면 거칠기의 허용 한계는 p-v(peak to valley) 값으로 1/6 이하를 만족해야 한다. 파장 405 nm의 청색 광원에서 이는 68 nm 이하의 표면 거칠기에 해당한다. 한편, 마이크로미러는 집적화된 미세광학 장치에서 빛을 반사하여 빛의 경로를 바꾸어 주는 역할을 하는 핵심 부품이다. 마이크로미러는 단결정 Si 기판의 습식 식각, glass 재료의 초정밀 연삭과 연마, 폴리머 재료의 사출 성형 등의 방법으로 제작할 수 있다. 그러나, 이 중에 웨이퍼 레벨 제조에 의해 초정밀 마이크로미러의 대량 일관 생산은 단결정 Si 기판의 습식 식각에 의해서만 가능하다. 최근에 습식 식각에 의한 Si 미러는 광통신 소자 등에서 구현된 바가 있으나 식각 깊이가 100~200  $\mu\text{m}$ 에 불과하고 표면 형상의 정밀도도 초소형 광픽업용으로 적용하기에 미흡한 실정이다. 식각 깊이가 수백  $\mu\text{m}$  이상이고 초정밀 표면을 위해서는 Si 단결정 잉곳의 절단 각도와 Si 기판의 불순물 원소, 전위, 적층 결함 등의 결정 결함, 습식 식각 시의 여러 가지 공정 조건들을 엄격하게 제어해야만 한다 [9][10].

따라서, 본 식스 시그마 프로젝트에서 CTQ는 초소형 광픽업의 광학 특성을 만족하기 위하여 표면 거칠기가 p-v 68 nm 이하이고 식각 깊이가 수백  $\mu\text{m}$  이상인 초정밀 마이크로미러 어레이의 제작 공정기술을 Si 습식 이방성 식각을 토대로 하여 웨이퍼 레벨로 제조하는 기술의 확보라고 할

수 있다. [그림 1]에 본 과제에서 목표로 하는 초소형 광픽업과 마이크로미러의 개념도를 나타내었다.



[그림 1] 본 과제의 초소형 광픽업과 마이크로미러의 개념도

[Fig. 1] Conceptual Diagram of the Small Optical Pickup and Micromirror Proposed in This Project

### 3.2 Measure 단계

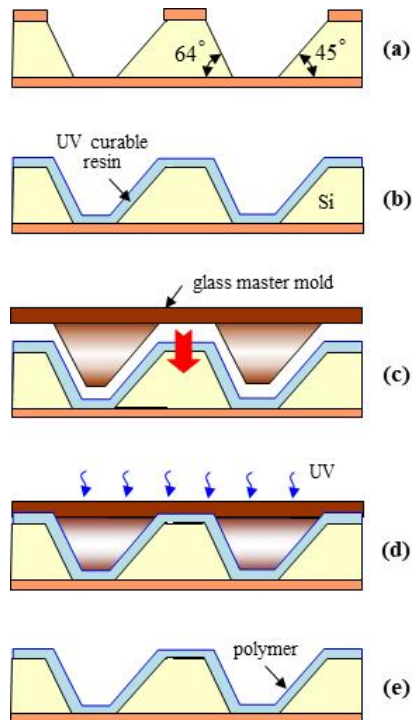
식스 시그마 기법의 가장 큰 특징 중 하나는 데이터, 즉 사실에 근거하여 판단한다는 것이다. 본 단계에서는 측정을 통하여 현재의 수준을 정확히 파악하고, 현 수준과 고객이 요구하는 품질 수준의 갭을 분석하여 개선 목표를 수립한다. 식스 시그마에서 측정하고 분석하는 데이터에는 CTQ의 충족 정도를 나타내는 성과변수와 이에 영향을 미치는 요인을 나타내는 원인변수가 있으며 측정단계에서는 성과변수 Y의 측정에 초점을 둔다. 현상의 분석을 위하여 사용하는 데이터의 정확성을 확보하기 위해 측정 시스템 분석(Measurement system analysis,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

본 과제에서는 초소형 광픽업의 광학특성을 만족시키기 위한 표면 형상의 정밀도가 우수하고 식각 깊이가 수백  $\mu\text{m}$  이상인 초정밀 마이크로미러 어레이의 제작 공정기술을 Si 습식 이방성 식각에 의해 웨이퍼 레벨로 제조하는 기술을 제안하고 개발하고자 한다. 문헌 조사를 통하여 Si 마이크로미러 제작 기술의 동향을 파악하였으며 [11-13], 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 영향도가 큰 소수의 핵심 인자인 ‘Vital Few X’를 선별한다. 이를 위하여 프로세스 상세 분석에 따른

특성요인도(Cause & effect diagram) 작성을 통하여 제품 성능에 영향을 미칠 수 있는 잠재 인자들을 도출한다. 또한, 원인-결과 매트릭스(Cause & effect matrix) 분석을 통하여 가설을 설정하고 검정하여 여러 잠재 인자들 중에서 핵심 인자들을 도출한다. [그림 2]에 본 과제의 마이크로미러 어레이 제작과정의 단계별 분석을 위해 제조공정 순서도를 나타내었다.

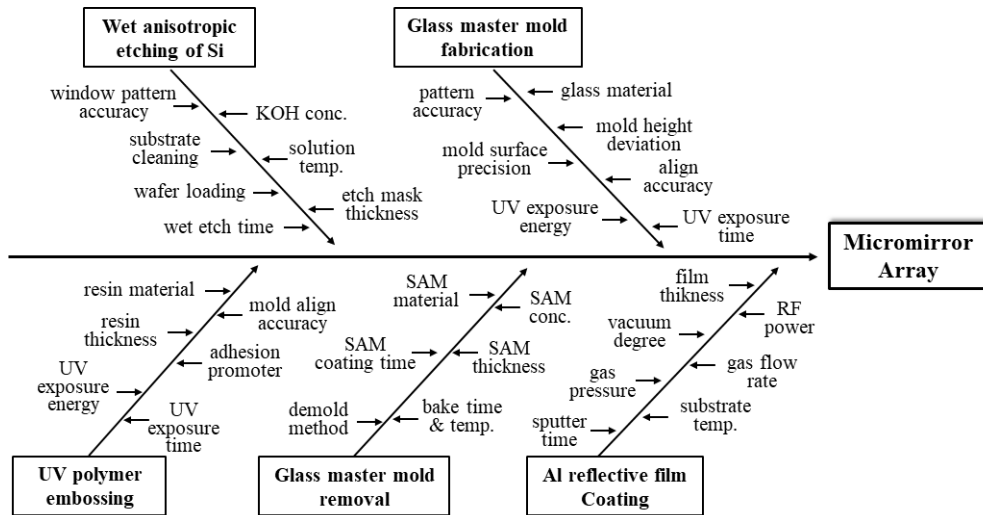


[그림 2] 마이크로미러 어레이의 제작공정 순서도: (a) Si 습식 이방성 식각, (b) 자외선 경화형 레진 도포, (c) Glass 마스터 몰드 압착, (d) 자외선 경화, (e) 몰드 제거

[Fig. 2] Fabrication Process for the Fabrication of Micromirror Array: (a) Wet Anisotropic Etching of Si, (b) Coating of UV Curable Resin, (c) Pressing with the Glass Master Mold, (d) UV Curing, (e) Demolding

본 마이크로미러 어레이 제작은 Si 습식 이방성 식각, 자외선 경화형 레진의 도포, Glass 마스터 몰드 압착, 자외선 조사에 의한 경화, 몰드 제거의 순으로 구성된다. 단결정 Si(100) 기판을 장방향으로 패터닝한 후에 KOH 수용액을 사용하여 식각하면 Si{111} 결정면이 원자충진밀도(atomic packing density)가 가장 높기 때문에 식각 속도가 가장 느리게 나타난다. 따라서, 이방성으로 식각이 일어나 Si{111}의 경사면으로 둘러싸인 역 피라미드 형태의 공동(cavity)이 형성되고 이 때 {111} 경사면은 기판에 평행한 면인 {100} 결정면에 대하여 54.7°의 각도를 이루게 된다. 기판의 {100} 결정면에 대하여 45°의 경사면을 얻기 위해서 <110> 방향으로 9.7° 경사를 이루도록 절단된 기판을 원자재로 사용하였다. [그림 3]에 마이크로미러 어레이 제작을 위한 주요 공정별로 표면 형

상과 광학적 성능에 영향을 미칠 수 있는 잠재인자들을 특성요인도, 즉 Ishikawa 도표에 의하여 도시하였다. 또한, 주요 공정 다섯 가지 중에서 가장 중요한 Si 단결정의 습식 이방성 식각 공정에 대하여 잠재 인자들과 품질 특성 간의 상호 관련성을 보여 주는 원인-결과 매트릭스를 작성하였다.



[그림 3] 마이크로미러 어레이의 제작방법에 대한 특성요인도

[Fig. 3] Cause and Effect Diagram for the Fabrication of Micromirror Array

No.		1	2	3	4	5	
Rating of Importance		7	7	8	9	10	
Process Step	Process Output Process Input	Particulate matter	Micromirror surface area	Etch depth	Optical reflectivity	Surface waviness	Total Score
Si Wet Anisotropic Etching	Substrate cleaning	3	1	1	3	9	153
	Pattern accuracy	1	9	3	3	3	151
	Etch mask thickness	3	3	3	1	3	105
	KOH concentration	3	9	9	9	9	327
	Solution temperature	3	3	9	9	9	285
	Wafer loading	3	3	3	9	9	237
	Wet etch time	3	9	9	3	1	193

[그림 4] Si 습식 이방성 식각 공정에 대한 요인-결과 매트릭스도

[Fig. 4] Cause and Effect Matrix Diagram for the Si Wet Anisotropic Etching Process

[그림 4]는 마이크로미러 어레이의 광학적 특성을 결정하는 원인-결과 매트릭스도를 나타낸다. [그림 4]로부터 Si 습식 이방성 식각 공정에서 본 마이크로미러 어레이의 품질 성능에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 인자(vital few X's)는 그 중요도 순으로 습식 식각 시의 KOH 농도, 용액의 온도, 기판 장입 방향(수직, 수평) 등인 것을 알 수 있다.

### 3.4 Improve 단계

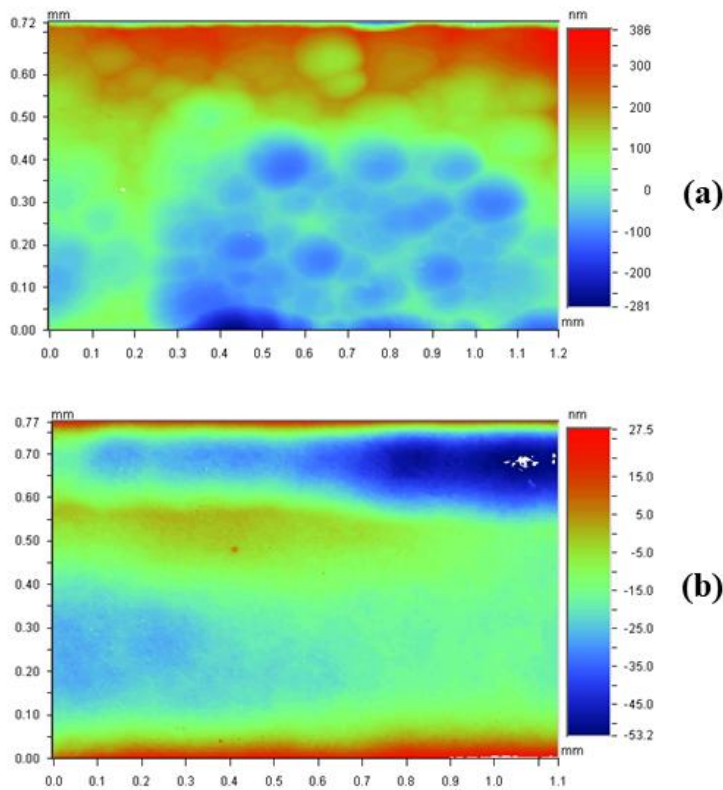
개선 단계는 문제의 근본 원인을 발견하고 제거하기 위하여, 앞 단계에서 얻은 핵심 인자에 대하여 최적 조건을 찾아내어 프로세스의 개선을 실행하는 단계이다. 본 과제에서는 실험계획법(Design of experiment, DOE)을 통하여 가장 중요한 공정인 Si 습식 이방성 식각 공정의 최적 조건을 도출하였다. KOH 농도, 용액 온도, 기판 장입 방향 등의 3인자와 2수준을 사용한 완전요인설계를 시행하였고 2회 반복실험을 하였다. 반응인자(Y)로는 {111} 식각면 표면에서 측정한 형상 정밀도(surface waviness)로 선정하여 실험하였다. 이 때 기판 세정 방법 및 조건, 직사각형 패턴의 형성 방법 및 조건, 용액의 교반 속도, 식각 mask인  $\text{SiN}_x$  박막의 두께, 식각 시간 등 다른 실험 조건들은 일정하게 고정하였다. 주인자와 교호인자들에 대한 95% 신뢰도 수준에서 유의미한 순서에 따른 파레토 차트를 분석한 결과, 예상한 바와 같이 KOH 농도와 용액 온도가 미러면의 형상 정밀도와 광반사율에 가장 큰 영향을 미치는 주효과임을 알 수 있었다. 또한, 반응표면법(RSM)을 사용하여 KOH 농도와 용액 온도의 최적 조건을 산출한 결과 KOH 농도는 38 wt%, 용액 온도는 80°C의 조합인 것으로 나타났다. 최적 조건에서 형상 정밀도는  $1.2 \times 0.72 \text{ mm}^2$ 의 미러 면적에서 p-v 값으로 670 nm로 측정되었으며 KOH 용액을 사용한 Si의 습식 이방성 식각만으로는 파장 405 nm의 청색 광원을 사용하는 광픽업용 마이크로미러의 규격을 만족시키지 못 함을 알 수 있었다.

마이크로미러의 형상 정밀도를 더욱 개선하기 위하여 2.2절에서 기술한 바와 같이 자외선 경화 엠보싱을 이용하여 폴리머 층을 Si{111} 경사 식각면에 클래딩(cladding)하였다. 습식 식각된 Si 기판에 레진을 도포하고 초정밀 가공한 glass 마스터 몰드를 사용하여 압착한 상태에서 자외선을 조사하여 레진을 경화시킨 후 glass 몰드를 Si 기판으로부터 분리하여 폴리머 층으로 덮인 45° Si 마이크로미러를 얻었다. 두께 100 nm의 Al 반사막을 코팅한 후 마이크로미러의 표면 형상 정밀도를 측정한 결과 p-v 값으로 80 nm를 얻었으며 Si 마이크로미러에 비해 표면 waviness가 약 1/8 이하로 감소함을 알 수 있었다. 또한 광학 설계상으로 레이저 다이오드 광원에서 나온 빛이 마이크로미러 표면에 닿는 실제 beam size 영역인 미러 면적  $0.6 \times 0.75 \text{ mm}^2$  내에서 표면 waviness를 측정한 결과 p-v 58 nm로 파장 405 nm를 사용하는 광픽업용 마이크로미러의 규격인  $\lambda/6$ (p-v 약 70 nm에 해당) 이하를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. DOE를 통하여 구한 최적 조건인 KOH 농도 38 wt%, 용액 온도 80°C에서 습식 이방성 식각하여 얻어진 Si 마이크로미러와 자외선 경화 엠보싱을 이용하여 상기 Si 마이크로미러의 표면 형상을 개선한 폴리머 cladded Si 마이크로미러에 대하여



Al 반사막 코팅 후에 표면 형상을 측정한 결과를 [그림 5]에 각각 나타내었다.

자외선 경화 엠보싱을 이용한 폴리머 cladded Si 마이크로미러의 표면 형상 정밀도 개선은 초정밀 가공된 glass 마스터 몰드의 표면 형상 정밀도가 전사되었기 때문인 것으로 보인다.  $1.2 \times 0.72 \text{ mm}^2$ 의 미러 면적에서 측정한 glass 몰드의 표면 형상 정밀도는 약 32 nm p-v인 것으로 나타났으며 이는  $\lambda/10$  이하에 해당하는 값이다. Glass 마스터 몰드와 폴리머 cladded Si 마이크로미러의 형상 정밀도의 차이는 자외선 경화 후에 레진의 수축 및 Al 반사막의 결정립에 따른 표면 거칠기에 기인하는 것으로 생각된다. 또한 최적 조건에서 제작된 마이크로미러의 Al 반사막 코팅 후 청색 광을 사용한 반사율을 측정한 결과 90% 이상의 값을 나타냈으며 이는 400-412 nm 파장 범위에서 100 nm 두께의 Al 박막에 대하여 TFCalc 소프트웨어를 사용하여 시뮬레이션한 반사율 값인 92.5%에 거의 일치하였다.



[그림 5] 최적 조건에서 얻어진 마이크로미러의 표면 형상 정밀도 측정 결과, (a) Si 마이크로미러 (b) 폴리머 클래드 Si 마이크로미러

[Fig. 5] Surface shape precision measurement results of micromirrors obtained at optimum process conditions, (a) Si micromirror (b) Polymer-cladded Si micromirror

### 3.5 Control 단계

본 단계에서는 개선된 조건을 표준화한 후 개선안의 실행책임자를 결정하고 주기적인 모니터링을 통해 개선된 상태가 지속적으로 유지되고 있는지를 확인한다. 이를 위해, 최적 공정조건에 따라 얻어진 마이크로미러 어레이의 표면 형상 정밀도, 반사율 등과 같은 주요 특성에 대하여 관리도(Control chart)를 작성하여 품질을 관리한다. 관리도란 데이터의 변화 추이를 나타내는 그래프로서, 공정 품질의 상태를 통계적으로 파악할 수 있는 중심선 및 관리 상한, 관리 하한과 같은 관리 한계선이 설정된다. 특성값 데이터를 관리도상에 나타낸 점들이 관리 한계선 내에 있으면 관리되는 상태로 간주하고, 이 점들이 관리 한계선을 벗어나면 이상이 발생한 것으로 보아 그 원인을 찾고 해결해야 한다. 또한 본 단계에서는 공정의 핵심 인자 등 주요 관리 항목들을 체크 시트로 작성하여 중점 관리하도록 한다. 이와 같은 모니터링과 관리를 통하여 개선된 품질을 지속적으로 유지할 수 있다.

## 4. 결론

고밀도 휴대형 광정보저장기기를 위한 초소형 광픽업에 적용할 수 있는 45° 각도를 갖는 마이크로미러 어레이 제작 프로세스 및 공정조건을 식스 시그마 기법을 적용하여 확보하였다. 식스 시그마 방법론은 일반적으로 사용되고 있는 DMAIC 프로세스를 적용하였으며, 프로젝트의 각 단계별로 달성하고자 하는 목표에 따라 적합한 방법과 도구를 적용하였다. 본 마이크로미러 어레이는 실험 계획법을 통하여 얻은 최적 공정조건에 따라 KOH 수용액을 사용하여 Si 기판을 습식 이방성 식각한 후에 정밀한 표면 형상을 갖는 glass 몰드를 사용하여 폴리머 자외선 엠보싱으로 표면 형상을 보정함으로써 얻어졌다. 본 기법을 활용함으로써 청색 광원을 사용할 때 마이크로미러에 요구되는 핵심 성능인 표면 형상 정밀도  $\lambda/6$  이하 및 광 반사율 90% 이상을 만족시키는 일체화된 마이크로미러 어레이가 얻어짐을 확인할 수 있었다.

## References

- [1] J. Antony, R. Banuelas, "Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program", *Measuring Business Excellence*, December 2002, vol. 6, no. 4, pp. 20-27, doi: 10.1108/13683040210451679.
- [2] M. Harry, R. Shroeder, *Six Sigma: the Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations*, Currency, New York, 1999.
- [3] T. Bertels, "Roles and Infrastructure", in *Rath & Strong's Six Sigma Leadership Handbook*, John Wiley and Sons, New Jersey, 2003, pp. 57-83.
- [4] C. R. Superville, S. Gupta, "Issues in modeling, monitoring and managing quality costs", *The TQM Magazine*, December 2001, vol. 13, no. 6, pp. 419-424, doi: 10.1108/EUM0000000006178.
- [5] J. d. Mast, J. Lokkerbol, "An analysis of the Six Sigma DMAIC method from the perspective of problem solving", *International Journal of Production Economics*, October 2012, vol. 139, no. 2, 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*, September 2008, vol. 4, no. 2, 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*, February 2009, vol. 20, no. 2, 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.*, February 2006, vol. 45, no. 2B, pp. 1144-1151, doi: 10.1143/JJAP.45.1144.
- [9] A. J. Nijdam, J. G. E. Gardeniers, C. Gui, M. Elwenspoek, "Etching pits and dislocations in Si{111}", *Sens. Actuators A*, November 2000, vol. 86, No. 3, pp. 238-247, doi: 10.1016/S0924-4247(00)00458-1.
- [10] H. Tanaka, Y. Abe, T. Yoneyama, J. Ishikawa, O. Takenaka, K. Inoue, "Effects of small amount of impurities on etching of silicon in aqueous potassium hydroxide solutions", *Sens. Actuators A*, May 2000, vol. 82, no. 1-3, pp. 270-273, doi: 10.1016/S0924-4247(99)00340-4.
- [11] C. Strandman, L. Rosengren, H. G. A. Elderstig, Y. Backlund, "Fabrication of 45° mirrors together with well-defined v-grooves using wet anisotropic etching of silicon", *J. Microelectromech. Syst.*, December 1995, vol. 4, no. 4, pp. 213-219, doi: 10.1109/84.475548.
- [12] J. Chen, L. Liu, Z. Li, Z. Tan, Q. Jiang, H. Fang, Y. Xu, Y. Liu, "Study of anisotropic etching of (100) Si with ultrasonic agitation", *Sens. Actuators A*, February 2002, vol. 96, no. 2-3, pp. 152-156, doi: 10.1016/S0924-4247(01)00786-5.
- [13] C.-R. Yang, P.-Y. Chen, Y.-C. Chiou, R.-T. Lee, "Effects of mechanical agitation and surfactant additive on silicon anisotropic etching in alkaline KOH solution", *Sens. Actuators A*, March 2005, vol. 119, no. 1, pp. 263-270, doi: 10.1016/j.sna.2004.07.015.