



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

액정을 이용한 소형 가변조리개가
탑재된 DFD 기반의
거리 측정 센서 시스템

Distance sensor system
based on DFD with tunable aperture
by liquid crystal

2020년 8월

서울대학교 대학원

전기·컴퓨터공학부

김 유 미

액정을 이용한 소형 가변조리개가 탑재된 DFD 기반의 거리 측정 센서 시스템

지도 교수 전 국 진

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2020년 8월

서울대학교 대학원
전기·컴퓨터공학부
김 유 미

김유미의 공학박사 학위논문을 인준함
2020년 8월

위 원 장 _____ 김 용 권 _____ (인)

부위원장 _____ 전 국 진 _____ (인)

위 원 _____ 이 경 무 _____ (인)

위 원 _____ 김 서 규 _____ (인)

위 원 _____ 김 봉 환 _____ (인)

초 록

자율 주행 관련 기술들이 급격히 발전해 가고 있는 가운데 자율주행의 기반 기술 중 하나인 센서 기술은 현재 라이다, 레이더, 스테레오 비전, 알고리즘 기반의 모노 비전 카메라 등이 사용되고 있으나 이러한 센서들은 부피가 크거나 가격이 높아 아직 대중적으로 많은 차량에 적용하기 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 블랙박스 카메라의 크기와 동일한 소형 카메라의 앞단에 가변조리개를 간단히 삽입하여 부피를 줄이고 가격을 현저히 낮추어 영상과 거리 정보를 동시에 제공하는 거리 센서를 개발하였다.

이 거리 센서는 $f/1.8$ 과 $f/4.0$ 의 값을 가지는 가변조리개와 초점 거리 8 mm, 화각 45°, FHD급 화질을 가지는 카메라 모듈로 구성된다. 가변조리개가 입력 전압을 받게 되면 전압에 따라 가변조리개의 크기가 변화하고, 가변조리개가 탑재된 카메라 모듈에서는 조리개의 크기에 따라 같은 장면에 대해 피사계 심도가 다른 두 이미지를 얻게 되며, 이 피사계 심도의 차이를 통해 거리 정보를 추출할 수 있게 된다. 이때 서로 다른 크기의 조리개로 얻은 두 이미지 간의 피사계 심도 차이는 거리에 따라 선형적으로 증가하며 실제 측정을 통하여 이를 확인하였다. 딥러닝 알고리즘을 적용하면 오차를 줄일 수 있는데, 본 연구에서는 디텍터 기반과 거리맵 기반의 알고리즘을 사용하였다. 디텍터 기반의 알고리즘을 적용하였을 경우, 주간에 차량이 정지된 상황에서는 50 m

거리 범위에서 평균 0.826 m의 오차가 발생하였다. 거리맵 기반의 경우, 주간에 촬영된 70 m 거리 범위의 영상에서 물체 영역의 오차는 차량의 정지 상황에서는 0.619 m, 주행 상황에서는 1.000 m를 가진다. 야간에 주행 중 촬영한 영상은 40 m 범위에서 물체 영역에 대해 5.470 m의 오차를 가진다. 가변조리개의 구동은 액정 디스플레이 방식을 사용함으로써 2.64 V의 낮은 동작 전압과 10.59 ms의 빠른 응답 시간을 구현하여 전체 거리 센서 시스템이 낮은 전력에서 30 fps로 실시간 거리 측정이 가능하다는 것을 보였다.

본 연구에서 개발한 거리 센서는 가변조리개를 사용함으로써 카메라 한 대 만으로 한 장의 이미지가 아닌 피사체 심도가 다른 두 장의 이미지를 이용하여 거리 정확도를 높였다. 또한 1/2.7 인치의 이미지 센서를 가지는 카메라 앞단에, 반도체 공정 및 디스플레이 공정 기술을 이용하여 구현된 $10 \times 10 \times 1.8 \text{ mm}^3$ 크기의 소형 가변조리개를 삽입함으로써 전체 센서 크기를 소형화 시켰으며 공정 정확도를 높였다. 가격적인 측면에서도 기존 거리 센서들과 비교해 매우 낮아졌으며 FHD급 카메라를 사용하여 영상의 화질을 높였다. 개발한 가변조리개가 한 레이어에서 동작하기 때문에 정렬의 오차에서 오는 광학 수차를 줄일 수 있고 기계적으로 움직이는 부분이 없어 신뢰성이 좋으며 부호화된 조리개, 컬러 필터를 이용한 조리개, 가시광, 적외선 필터를 이용한 이중 조리개 등 조리개를 이용한 다른 DFD 방식보다 거리 측정 가능 범위가 커서 자동차 용으로 사용될 수 있으며 이미지의 후처리 없이 선명한

영상을 바로 얻을 수 있다.

거리 센서는 자율주행차에 적용되어 충돌 방지 경고, 사각 지대 검출, 보행자 검출 및 거리 인식, 주차 보조 등의 기능을 할 수 있으며 그 외 로봇, 드론, 모바일용 카메라, 게임 산업, 사물인터넷 등과 같이 소형 카메라가 삽입되어 거리 측정을 필요로 한 여러 응용 분야에서 사용될 수 있다.

주요어 : 카메라 기반 거리 센서, 차량용 영상 센서, 소형 가변조리개, 액정 디스플레이 방식의 가변조리개, 비초점 Depth from defocus, FHD급 화질

학 번 : 2013—23106

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 배경.....	1
제 2 절 선행 연구	4
1.2.1 거리 측정 방식의 종류	4
1.2.2 다양한 방식의 소형 가변조리개	12
제 3 절 연구의 목적.....	19
제 2 장 액정 디스플레이 방식의 가변조리개	23
제 1 절 가변조리개의 동작 원리.....	23
제 2 절 가변조리개 설계	27
제 3 절 가변조리개 제작	29
제 4 절 가변조리개 제작	33
제 3 장 거리 측정 시스템	40
제 1 절 거리 측정의 원리.....	40
제 2 절 광학 시스템의 파라미터 선정	42
제 3 절 시뮬레이션을 통한 블러 예측.....	48
제 4 절 광학계 개발.....	52
제 5 절 가변조리개와 렌즈의 단일 기관 집적화.....	57
3.5.1 웨이퍼 레벨의 렌즈 연구 동향.....	57
3.5.2 웨이퍼 레벨의 오목렌즈 설계 및 실험	62
3.5.3 집적화 공정 및 결과	67
제 6 절 어셈블리	77
제 4 장 거리 측정 실험	84
제 1 절 실험 환경 구축.....	84

제 2 절 영상 획득	87
제 3 절 결과 및 분석	91
4.3.1 DFD 알고리즘을 이용한 결과 분석	91
4.3.2 딥러닝을 이용한 결과 분석	93
제 5 장 결 론	106
참고 문헌	109
Abstract	125

표 목차

표 2.1	가변조리개의 사진 및 크기 측정 결과.....	33
표 2.2	가변조리개 샘플 5개의 동작 전압.....	36
표 2.3	가변조리개 샘플 5개의 응답 시간.....	38
표 3.1	광학계 시스템의 파라미터	47
표 3.2	설계된 렌즈 특성	53
표 3.3	설계값과 시뮬레이션 결과값 비교	54
표 3.4	설계된 광학계의 상대 조도 평가 결과.....	56
표 3.5	열 리플로우 공정을 이용한 유리 블록 렌즈의 비교.....	58
표 3.6	유리 기판을 이용한 오목렌즈 공정 비교	60
표 3.7	실리콘의 공동 높이 및 렌즈의 새그 높이 결과.....	71
표 3.8	실제 렌즈 측정값을 토대로 재 설계한 렌즈의 특성	74
표 3.9	재설계한 광학계의 상대 조도 평가 결과.....	76
표 4.1	주간 정지 상황의 영상에 대한 거리맵 기반 알고리즘 적용 시 거리 x 에 대한 오차	99
표 4.2	촬영 영상에 대한 알고리즘 적용 및 거리 오차 계산 결과.....	103
표 4.3	조리개를 이용한 거리 측정 방식의 비교	105

그림 목차

그림 1.1 자율주행의 5 단계.....	2
그림 1.2 Velodyne의 64채널 라이다 [24]	5
그림 1.3 Bosch의 중거리용(좌)/장거리용(우) 레이더 [32, 33].....	6
그림 1.4 Continental의 스테레오 비전 센서 [37]	8
그림 1.5 구조광 카메라의 원리 [45]	9
그림 1.6 Mobileye의 모노 비전 센서 [46]	10
그림 1.7 이중조리개 방식 [58]	12
그림 1.8 빗살 구동기를 이용한 가변조리개 [59]	13
그림 1.9 전기 습윤 현상을 이용한 가변조리개 [60]	14
그림 1.10 압전 액추에이터를 이용한 가변조리개 [61]	15
그림 1.11 통전 변색성을 이용한 가변조리개 [62]	16
그림 1.12 유전영동을 이용한 가변조리개 [63]	16
그림 1.13 전자석 액추에이터를 이용한 방식 [64]	17
그림 1.14 롤 액추에이터를 이용한 가변조리개 [65].....	18
그림 1.15 거리 센서 시스템을 나타낸 블록 다이어그램.....	21
그림 2.1 액정 디스플레이의 동작 원리.....	24
그림 2.2 유리 기판 위에 링 형태로 패터닝된 ITO	25
그림 2.3 액정 디스플레이 방식을 이용한 가변조리개의 동작 원리.....	26
그림 2.4 6개의 서로 다른 크기를 가지는 가변조리개의 패턴....	27
그림 2.5 다이, 조리개 및 전극 패드의 크기 설계	29
그림 2.6 가변조리개의 공정 흐름도.....	31
그림 2.7 ITO 건식 식각 결과.....	32

그림 2.8 가변조리개의 동작 전압과 응답 시간을 측정하기 위한 셋업.....	34
그림 2.9 가변조리개의 전압-투과도 곡선.....	35
그림 2.10 구형과 인가 시 가변조리개 샘플 5의 응답 시간.....	37
그림 2.11 타 가변조리개와의 동작 전압, 응답 시간의 비교.....	39
그림 3.1 얇은 렌즈 모델에서의 착란원.....	40
그림 3.2 초점 거리에 대한 FoV와 조리개 간의 블러 차이.....	43
그림 3.3 f/#의 변화에 대한 광량과 조리개 간의 블러 차이.....	45
그림 3.4 거리 증가 시 여러 z_{IFP} 와 f/#에 대한 블러.....	46
그림 3.5 z_{IFP} 에 대한 최소 거리값과 블러의 기울기.....	47
그림 3.6 행렬로 도출한 (a) 차량이 10 m 앞에 있을 때의 이미지, (b) 차량이 50 m 앞에 있을 때의 이미지.....	49
그림 3.7 시뮬레이션을 통한 거리에 따른 블러 값 추출.....	51
그림 3.8 Code V를 이용해 설계된 광학계.....	53
그림 3.9 설계된 광학계의 MTF 평가 결과.....	55
그림 3.10 설계된 광학계의 왜곡 평가.....	57
그림 3.11 공동 내의 기체 팽창으로 인한 오목 형태 구현 과정.....	63
그림 3.12 오목렌즈의 공정 흐름도.....	65
그림 3.13 실리콘 공동 깊이에 따른 렌즈의 프로파일.....	66
그림 3.14 실리콘 공동 깊이에 따른 렌즈의 새그.....	67
그림 3.15 가변조리개와 오목렌즈의 단일 기판 집적화 공정 흐름도.....	69
그림 3.16 웨이퍼 레벨의 오목렌즈.....	70
그림 3.17 제작한 오목렌즈의 프로파일.....	71
그림 3.18 오목렌즈와 가변조리개가 집적된 칩 사진.....	72

그림 3.19 오목렌즈와 단일화된 가변조리개의 전압—투과도 곡선	73
그림 3.20 오목렌즈와 단일화된 가변조리개의 응답 시간 측정 곡선	74
그림 3.21 재설계한 광학계의 MTF 평가 결과.....	75
그림 3.22 재설계한 광학계의 왜곡 평가.....	76
그림 3.23 CAD를 이용하여 설계된 경통의 전체 도면.....	78
그림 3.24 가변조리개와 링 구조물과의 어셈블리	79
그림 3.25 카메라 광학계의 렌즈부 부품. 좌측부터 순서대로 경통, 렌즈 1, 렌즈 2, 1번 스페이서, 렌즈 3, 2번 스페이서, 렌즈 4, 렌즈 5, 적외선 필터, 하단의 고정을 위한 기구물	80
그림 3.26 아두이노로부터 동작 전압을 받는 가변조리개	81
그림 3.27 카메라 메인 보드.....	82
그림 3.28 가변조리개가 어셈블리된 렌즈 경통의 메인보드 체결 및 전원 연결	83
그림 4.1 라이다가 장착된 자율주행차량(좌)과 거리 센서 설치 환경(우)	85
그림 4.2 카메라의 내부 파라미터 캘리브레이션을 위한 촬영 ...	86
그림 4.3 카메라의 외부 파라미터 캘리브레이션을 위한 촬영 ...	87
그림 4.4 1차선 차량은 9 m, 2차선 차량은 4 m, 3차선 차량은 3 m 위치에서의 f/1.8 사진(좌)과 f/4.0 사진(우)	88
그림 4.5 사람은 10 m, 차량은 3차선에서 각각 30 m, 40 m 위치에서의 f/1.8 사진(좌)과 f/4.0 사진(우)	89
그림 4.6 1차선 차량은 60 m, 2차선 차량은 55 m, 3차선 차량은 70 m 위치에서의 f/1.8 사진(좌)과 f/4.0 사진	

(우)	89
그림 4.7 야간 도로 주행시의 f/1.8 사진(좌)과 f/4.0 사진 (우)	91
그림 4.8 차량과 거리 센서 사이의 거리에 따른 블러	92
그림 4.9 LAPD 방식에 대한 시뮬레이션과 실제 영상 값의 비 교	93
그림 4.10 디텍터 기반 거리 측정 알고리즘 모식도	94
그림 4.11 YOLO-v2 디텍터를 사용하여 검출된 차량 영역	95
그림 4.12 거리맵 기반 거리 측정 알고리즘 모식도	95
그림 4.13 f/4.0 영상(좌), GT 거리맵(중), 영상의 거리맵(우) ..	96
그림 4.14 주간 정지 상황의 영상에 디텍터 기반 알고리즘 적 용 시 거리에 대한 오차 분포도	97
그림 4.15 주간 정지 상황의 영상에 거리맵 기반 알고리즘 적 용 시 거리에 대한 오차 분포도	98
그림 4.16 주간 주행 상황의 영상에 거리맵 기반 알고리즘 적 용 시 거리에 대한 오차 분포도	101
그림 4.17 야간 주행 상황의 영상에 거리맵 기반 알고리즘 적 용 시 거리에 대한 오차 분포도	102

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

최근 자동차 제조업체들뿐 만 아니라 Information and Communication Technology (ICT) 대표 기업들까지 자율주행자동차 기술 개발에 경쟁적으로 참여하며 관련 기술이 급속도로 발전하고 있다 [1—9]. 컨설팅 기업인 Gartner의 2019 Hype Cycle Report에서는 10대 전략 기술 트렌드 중 하나로 자율주행을 꼽았으며 [10], 전 세계 시장 규모는 연평균 62.86%로 성장하여 2024년에는 412억5천달러로 급격한 성장을 이룰 것으로 전망 된다 [11].

그림 1.1과 같이 완전한 자율주행까지는 0부터 5까지의 레벨로 분류할 수 있는데 레벨 0은 운전자가 차량을 완전히 제어해야만 하는 단계, 레벨 1은 조향, 가감속 등을 자동화해 운전자가 도움 받는 수준, 레벨 2는 고속도로 주행 시 차량, 차선 인식, 앞차와 간격 유지가 가능한 단계, 레벨 3은 일정 기간 자율주행이 가능하지만 운전자가 주변상황을 주시하여 돌발상황을 대비해야 하는 단계, 레벨 4는 특정 도로조건에서 모든 제어가 가능한 단계, 레벨 5는 운전자의 개입 없이

목적지까지 주차 등 모든 기능이 완전 자동화 된 단계이다 [12]. 현재 상용화된 기술 수준은 레벨 2에서 3 사이의 수준이고 Gartner에 의하면 완전 자율주행의 안정 단계 진입까지는 앞으로 10년 이상 소요될 것으로 예측된다 [10].

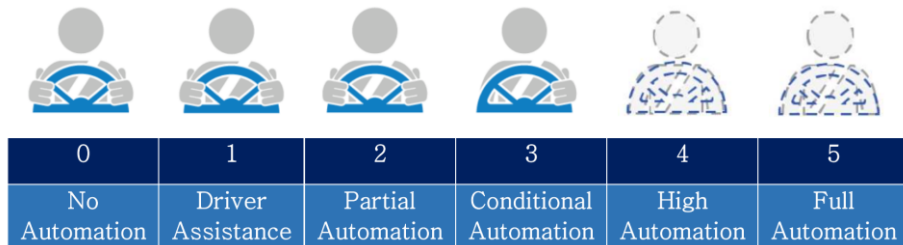


그림 1.1 자율주행의 5 단계

자율주행차 개발에 있어 현재 Google의 자회사인 Waymo가 가장 앞서있다. 2010년 Google은 360°로 회전하는 Velodyne의 라이다(Light Detection and Ranging, LIDAR)를 장착하여 세계 최초로 자율주행차 기술을 공개하였다 [8, 13]. 관련 기술을 이어 받은 Waymo는 2018년 카 셰어링 업체인 Lyft와 협약을 맺어 미국 애리조나 주 피닉스 지역에서 어플리케이션을 통한 자율주행택시 서비스를 시작하였다 [14].

자율주행차는 여러가지 측면에서 이점을 갖는다. 미국 도로교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration,

NHTSA)에 따르면 2016년 교통 사고로 37,000명 이상이 사망했는데 그중 약 94%가 과속에 의한 충돌, 음주 운전, 전방 주시 태만, 졸음 운전 등 사람의 과실로 인한 사고였다 [15]. 자율주행 기술은 운전자를 대체함으로써 교통사고 사망률을 크게 줄일 수 있게 된다. 또한 운전자는 차량 안에서 집이나 사무실에서와 같이 쉬거나 일을 할 수 있으며 이를 통해 운전자의 스트레스를 줄일 수 있고 운전을 할 수 없는 사람도 운전을 가능하게 할 수 있다. 보다 효율적으로 속도 변경을 하는 운전 형태는 도로 혼잡 및 탄소 배출도 줄일 수 있다.

미국 고속도로안전보험협회(Insurance Institute for Highway Safety, IIHS)에 따르면 Autonomous Emergency Braking (AEB) 기능이 차량에 탑재된 경우 후방 추돌사고가 40% 감소한다고 발표하였다 [16]. 이에 미국 정부는 2022년까지 AEB를 의무 장착하기로 합의 하였으며 유럽연합(EU) 역시 AEB 의무화를 추진하기로 하였다 [17, 18]. 이는 자율주행을 위한 기술이 운전자의 편의만을 위한 것이 아닌 운전자 안전을 위한 필수 규제 요소가 된다는 것을 의미한다.

자율주행차 관련 업체들이 상용화를 목표로 하고 있지만 실제 상용화를 위한 기술 수준은 아직 부족한 실정이다. 2016년에는 Tesla의 모델 S가 자율주행기능을 사용하다가 교통사고가 발생해 운전자가

사망하는 사고가 일어났다 [19]. Tesla 측은 역광 탓에 피해 차량 앞에 끼어든 트레일러의 흰색 옆면이 햇빛에 반사되면서 시스템이 트레일러를 하늘로 오인해 브레이크가 작동하지 않았다고 설명했다.

프랑스의 자율주행 기업인 Navya의 자율주행택시의 경우 가격을 25만 유로로 책정되었고 현재 자율주행단계 레벨 5에 대해 테스트 중이다 [20]. 이렇게 레벨 4 이상 자율주행 자동차는 대중이 구입하기에는 매우 부담스러운 수준이라 초기 자율주행 시장에서는 차량공유업체의 자율주행택시나 트럭과 같은 운송 수단의 수요에 그칠 것으로 보인다. 따라서 일반 대중에게 공급되기 위해서는 보다 저렴하면서도 차량 주위의 환경을 정확히 인식할 수 있는 센서의 제공이 필요하다.

제 2 절 선행 연구

1.2.1 거리 측정 방식의 종류

라이더는 특정 패턴으로 송출된 레이저 빔이 주변 물체에 반사되어 돌아오는 왕복 시간, 위상 변위, 펄스 전력, 펄스 폭을 통해 영상 정보를 수집한다 [21—24]. 그림 1.2는 Velodyne의 64채널을 가진 라이더로

다채널의 레이저 송수신부가 모터에 의해 360° 돌아갈 수 있으며 회전 스캐닝을 함으로써 3D 영상 수집이 가능하다 [23—26]. 정밀도가 높지만 [27] 큰 부피와 높은 가격대를 가지며, 라이다를 탑재한 차량이 많아질 경우 차량 간의 신호 간섭이 문제될 수 있다 [28].



그림 1.2 Velodyne의 64채널 라이다 [24]

레이더는 라이다에 비해 오랜 기간 개발이 진행되어 왔다. 차량용 라이다는 밀리미터파를 이용하며, 송출된 전파와 수신된 전파 사이의 도플러 주파수 편이를 이용하여 피탐지체와의 거리와 상대 속도를 추정한다 [29—31]. 그림 1.3은 Bosch의 레이더로 좌측의 중거리용 레이더는 80 m까지 측정이 가능하여 주로 차량의 모서리 부근이나 사각지대를 탐지하고 다른 차량의 차선 교차를 관찰하며, 우측의

장거리용 레이더는 250 m까지 측정 가능하여 전방 주시 센서로 활용된다 [32—33]. 밀리미터파를 이용한 차량용 레이더는 눈, 비, 황사, 미세먼지 등 시야가 확보되지 않는 환경에서 우수하게 동작하지만 [34] 긴 파장으로 인해 상대적으로 작은 물질을 감지가 어렵다 [35].

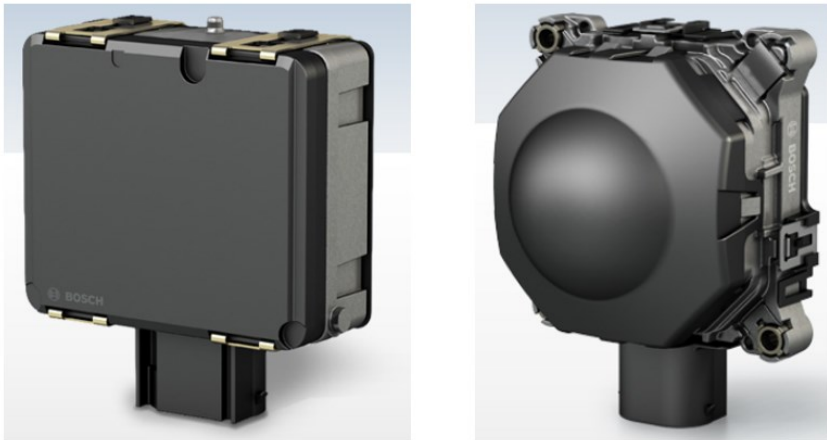


그림 1.3 Bosch의 중거리용(좌)/장거리용(우) 레이더 [32, 33]

초음파 센서는 초음파를 활용하여 근거리 장애물을 감지하고 측정한다 [36]. 일정한 간격으로 높은 주파수의 음파를 발사하고 물체를 통해 반사된 에코를 압전변환기를 통하여 전자 신호로 전환하는데 이때 음파의 속도와 음파가 반사되어 돌아올 때까지의 시간을 통해 물체까지의 거리를 계산한다. 초음파 센서의 기술은 이미 성숙 단계에 있고 제품 단가가 타 센서 대비 가장 저렴하다. 가능한

측정 거리가 수 미터 이내로 짧아 주차 보조 기술로 사용되고 있다 [34].

영상 센서는 카메라의 이미지 센서를 이용하여 주변 환경을 이미지로 감지하여 거리를 추정하는 방식으로, 동시에 인간의 눈과 같이 차선, 신호등, 표지판, 차량 및 보행자 등의 다양한 사물을 인지할 수 있다. 영상 센서는 크게 카메라를 한 대 이용하는 모노 비전(mono vision) 방식과 두 대 이용하는 스테레오 비전(stereo vision) 방식으로 나눌 수 있다.

그림 1.4는 Continental의 스테레오 비전 센서로, 사람이 두 눈을 사용하여 거리를 측정하는 원리와 비슷하게 두 대의 카메라를 이용하여 하나의 사물을 인식하여 거리를 추출한다 [37]. 스테레오 비전이 거리를 계산하기 위해 필요한 세 요소는 크게 베이스라인(baseline), 초점 거리, 시차이다. 베이스라인은 카메라와 카메라 간의 거리이고 초점 거리는 이미지 센서와 렌즈와의 거리이며 시차는 좌우 영상에서 동일하게 나타나는 물체에 대한 위치 차이를 의미한다. 베이스라인과 초점 거리는 고정된 상수이고 스테레오 영상 정합 기법을 통해 시차를 계산하여 거리를 추출한다 [38—40]. 이 방식은 카메라 모듈 구조가 일반 카메라와 같기 때문에 하드웨어적인 수정이 필요하지 않다는 것이 장점이다. 하지만 거리 정보를 획득하기 위해서는 두 카메라의 내부 및

외부 칼리브레이션(calibration) 과정과 두 카메라 간의 정렬이 반드시 필요하다. 자동차에서 사용하게 되면 카메라의 정렬이 틀어지기 쉽기 때문에 이로 인한 이슈가 주요 연구 대상이다. 또한 스테레오 비전 기술은 카메라 두 대 간의 최소 베이스라인이 정해져 있기 때문에 전체 부피를 줄이는 데에 한계가 있다 [41].



그림 1.4 Continental의 스테레오 비전 센서 [37]

스테레오 카메라 중 한 대를 프로젝터로 대체한 구조광 카메라도 개발되었다. 프로젝터를 통해 면, 점, 선 등 구조화 되어 있는 광 패턴을 물체에 주사하고 그 패턴의 굴곡을 인식하여 광에 대한 대응점을 찾아 스테레오 비전 방식과 동일하게 삼각 측량 방식을 이용한다 [42—45]. 구조광 방식은 이미 설계된 패턴을 분석하기 때문에 비교적 정밀한 측정이 가능하다. 또한 다른 방식과는 달리 구조화 된 패턴을 물체에 주사하기 때문에 물체의 텍스처에 영향을 받지 않는다. 그러나 면

거리의 물체에 대해 광을 주사하게 되면 패턴이 광범위하게 적용이 되면서 패턴의 변형을 인식하기 어려워지며 패턴보다 작은 물체 또한 패턴의 변형을 분석하기 어렵다. 또한 조도가 큰 환경에 취약하기 때문에 차량용 거리 측정 센서로는 적합하지 않고 실내에서 사용할 수 있는 제스처 인식, 안면 인식과 같은 보안용으로 적합하다.

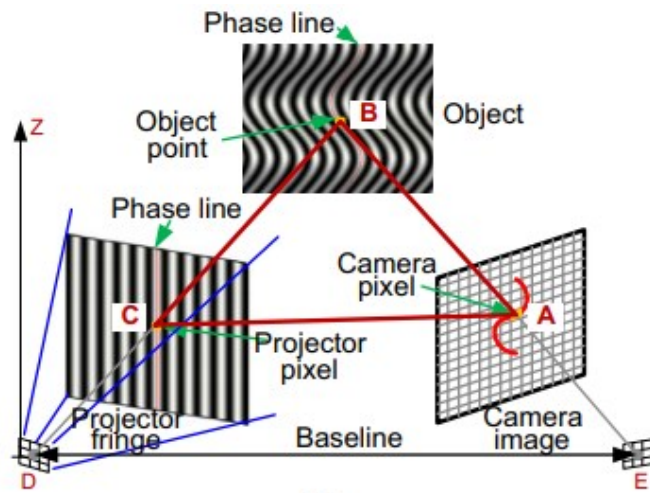


그림 1.5 구조광 카메라의 원리 [45]

카메라 한 대만을 이용하는 모노 비전은 인공지능을 기반으로 한 Mobileye의 제품이 첨단 운전자 보조 시스템(Advanced Driver Assistant System, ADAS) 시장의 1위를 차지하고 있다. 2018년 78개 완성차 모델에 적용되는 20개 프로그램을 출시하였고 누적기준으로 32백만대 차량이 Mobileye 칩을 사용 중이다 [46]. 이 제품은

카메라의 전체 화면 크기 대비 앞 차량의 크기 비율을 통해 해당 차량까지의 거리를 산출하고, 그 크기의 변화로부터 속도를 계산해 충돌소요시간을 산출하고 충돌 전에 경보를 울린다 [47]. 부피가 작고 다른 센서에 비해 가격이 저렴하다는 장점이 있지만 앞 차량의 크기, 각도 등을 정확히 읽어내기 위해서는 카메라가 지면으로부터 위치해야 하는 값이 정해져 있어, 자동차와 같이 지속적으로 움직임과 진동이 발생하는 환경에서는 첫 설치 후에도 사용자가 계속 주의를 기울여야 한다.



그림 1.6 Mobileye의 모노 비전 센서 [46]

모노 비전으로 이미지의 피사계 심도를 이용하여 거리를 추출하는 방식인 Depth from Defocus (DFD) 방식은 꾸준히 연구 되어 왔다 [48—52]. 하지만 전통적인 DFD 방식은 한 장의 이미지만을 사용하기

때문에 거리의 정확도를 높이기 위하여 피사계 심도에 변화를 줄 수 있는 조리개가 연구되어 왔고, 그 중 하나의 방식이 부호화된 조리개(coded aperture)를 이용하는 것이다 [53—54]. 이 방법은 부호화된 조리개를 기존의 카메라에 삽입하여 블러(blur)를 유도하고 이를 통해 이미지를 합성하여 피사계 심도를 변경하고 깊이 맵(depth map)을 만들 수 있다.

부호화된 조리개 대신 특정 색을 필터링 할 수 있는 조리개를 이용한 방법도 연구 되었다 [55—56]. 컬러 필터를 사용하게 되면 초점이 맞는 경우에는 컬러 필터를 통과한 각 빛이 한 지점에 모여 이미지가 선명하게 보이지만 초점이 맞지 않는 경우는 컬러 필터를 통과한 빛이 서로 다른 지점에 모이게 되고 이 때 발생하는 위상 차의 분석을 통해 이미지의 깊이를 알 수 있게 된다. 하지만 부호화된 조리개나 컬러 필터를 이용한 방식들은 보통의 조리개보다 적은 광을 투과 시키고 선명한 영상을 얻기 위해서는 이미지를 가공하는 후 처리가 반드시 필요하다.

입사되는 광량을 효율적으로 사용하면서 정확도를 높이기 위해 이중 조리개 방법이 연구 되었다 [57]. 그림 1.7과 같이 이중 조리개 방식은 가시광과 적외선을 각각 필터링 시키는 2개의 조리개를 사용한다. 각 조리개는 크기가 달라 가시광 필터 조리개로부터 얻어지는 이미지와

적외선 필터 조리개로부터 얻어지는 이미지의 피사계 심도가 다르기 때문에 이를 분석하여 이미지에 있는 물체들의 거리를 추정할 수 있다. 하지만 이 방식은 두 개의 조리개를 각각 제작하여 어셈블리하기 때문에 두 조리개 간에 정렬 오차가 생길 수 있다. 또한 일반적인 이미지 센서의 베이어(Bayer) 패턴은 가시광만 처리하므로 적외선 신호를 처리하기 위해 이미지 센서 상의 녹색 필터를 적외선 필터로 대체해야 한다.

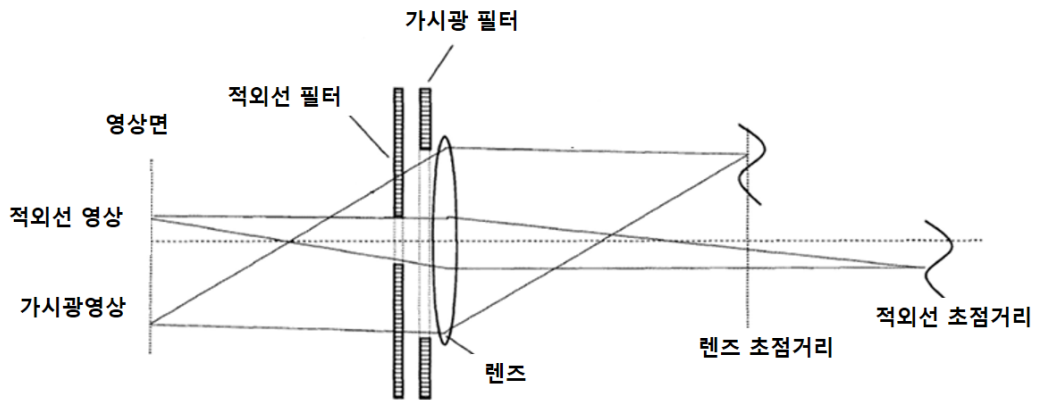


그림 1.7 이중조리개 방식 [58]

1.2.2 다양한 방식의 소형 가변조리개

그림 1.8은 기계적 방식의 가변조리개로 Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)의 빗살(comb-drive) 구조를 이용한 정전기 액추에이터(actuator)로 구동 된다 [59]. 불투명한 블레이드는 빗살 구동기에 연결되어 있는데 이 구동기에 전압 인가 시 정전기력에 의해

미세한 간격을 지닌 빗살 구조의 사이가 변하면서 수평 방향으로 블레이드가 회전하게 된다. 전체 두 레이어로 이루어져 있는데 각 레이어에는 블레이드가 4개로 구성되어 있어, 총 8개의 레이어가 회전하면서 팔각형의 가변조리개를 형성한다. 전압을 0부터 100 V까지 가하였을 때 조리개의 지름은 0.45 mm부터 1.56 mm까지 변화한다. 응답 시간은 4 ms로 매우 빠르나 구동 전압이 높은 편이다.

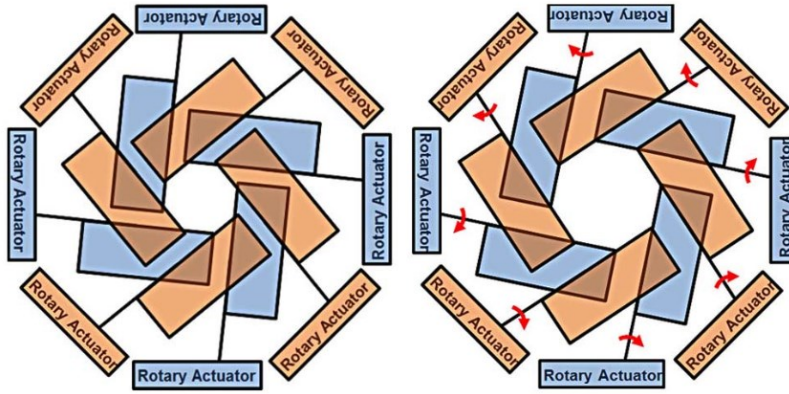


그림 1.8 빗살 구동기를 이용한 가변조리개 [59]

그림 1.9는 액체의 전기 습윤(electrowetting) 현상을 이용한 가변조리개로 소수성으로 표면 처리된 메인 채널과 서브 채널 안에 도전성과 광 흡수성을 지닌 액체를 넣어 구동 시킨다 [60]. 액체의 표면에 전기장이 가해지면 전기 습윤 현상에 의해 액체의 접촉각이 작아지면서 모세관 현상이 발생하게 되며 조리개의 크기가 줄어들게

된다. 전압을 0부터 70 V까지 가하였을 때 조리개 크기는 4.5 mm부터 0.85 mm까지 변화하며 42 ms의 응답 시간을 가진다.

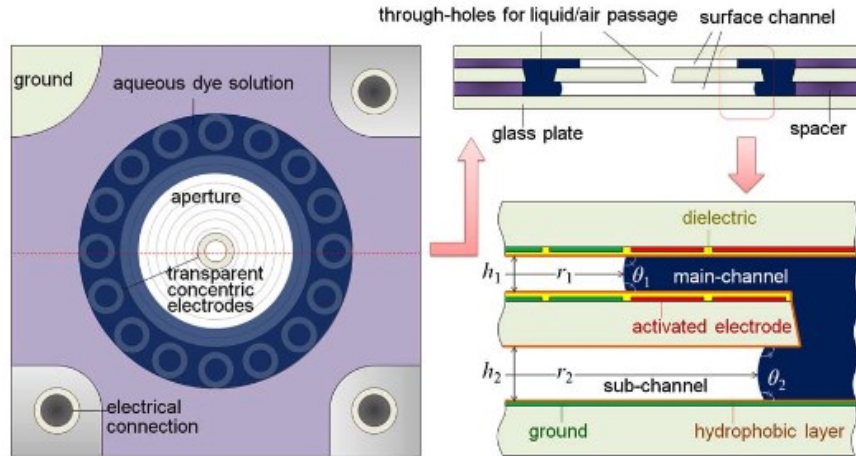


그림 1.9 전기 흡윤 현상을 이용한 가변조리개 [60]

그림 1.10은 링 형태의 압전 액추에이터를 이용한 가변조리개이다 [61]. 액추에이터에 연결된 polydimethylsiloxane (PDMS) 멤브레인(membrane)과 유리 기판 사이에 광 흡수성 액체를 넣었다. 압전 액추에이터에 전압을 가하게 되면 액추에이터가 위쪽으로 휘어지고 챔버 안의 기압은 내려가면서 PDMS 멤브레인이 아래쪽으로 오목한 형태로 휘어진다. 이때 멤브레인이 유리 기판과 원형으로 접촉하게 되는데 압전 액추에이터에 가해지는 전압이 커질수록 접촉되는 면적은 더욱 커진다. 접촉이 된 부분에는 액체가 존재하지 않아 빛이 투과하지만 접촉이 되지 않은 부분은 액체로 인해 빛이 투과 되지 않아

전압에 따라 조리개의 크기가 변화하게 된다. 80 V의 전압을 가하였을 때 조리개 크기는 0부터 4.55 mm까지 변화하며 시간은 약 1초 정도 걸린다. 멤브레인이 유리 기판과 닿으면서 조리개의 원형이 정의 되기 때문에 조리개의 테두리 쪽이 선명하지 않다는 단점이 있다.

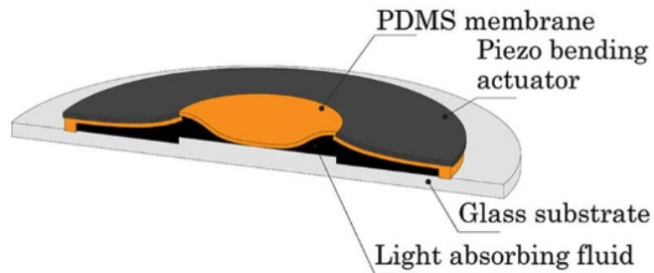


그림 1.10 압전 액추에이터를 이용한 가변조리개 [61]

그림 1.11은 전압이 걸릴 때 전기화학적 반응으로 인해 물질의 색이 변화하는 통전 변색성(electrochromism)을 이용한 가변조리개이다 [62]. 물질로는 phenazine과 viologen을 이용하여 변색 시 물질의 투과도 대비를 높였고 두 개의 동심원으로 패터닝하여 세 가지 크기의 조리개가 형성되도록 하였다. 2 V의 동작 전압으로 낮지만 통전 변색성의 특성 상 응답 시간은 70초로 매우 오래 걸린다.

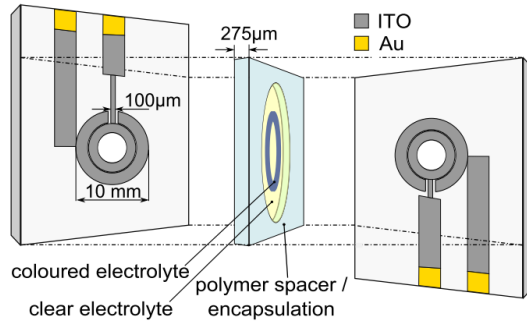


그림 1.11 통전 변색성을 이용한 가변조리개 [62]

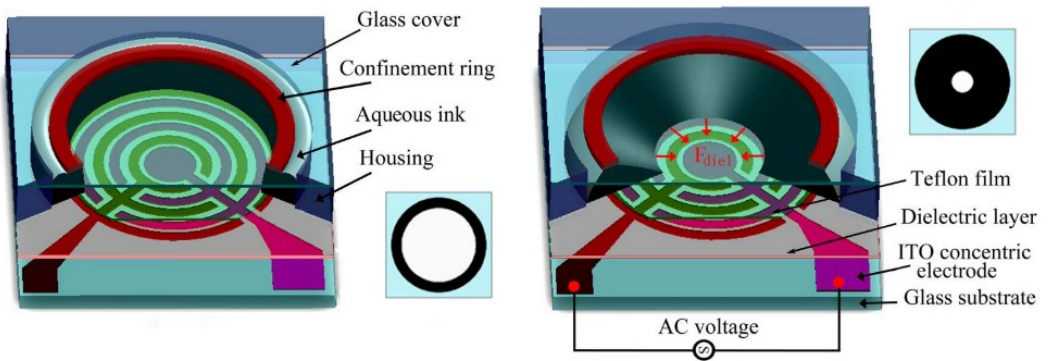


그림 1.12 유전영동을 이용한 가변조리개 [63]

그림 1.12는 유전영동(dielectrophoresis)을 이용한 가변조리개이다 [63]. 유전영동은 불균일한 전기장에 입자가 놓였을 때 입자에 유도된 쌍극자에 의해 입자에 방향성 있는 힘이 가해지는 현상으로, 전기장 위의 액체를 이동 시켜 조리개를 형성하였다. 액체는

투명한 오일과 유전상수가 큰 불투명한 잉크를 사용하여 두 액체가 섞이지 않도록 하였으며, 액체에 전기장이 인가되면 힘이 원의 가운데 방향으로 가해지면서 잉크가 가운데 방향으로 좁혀와 조리개 크기가 줄어들게 된다. 동작 전압은 0부터 160 V로 80 V를 가하였을 때의 응답 시간은 45 ms이다.

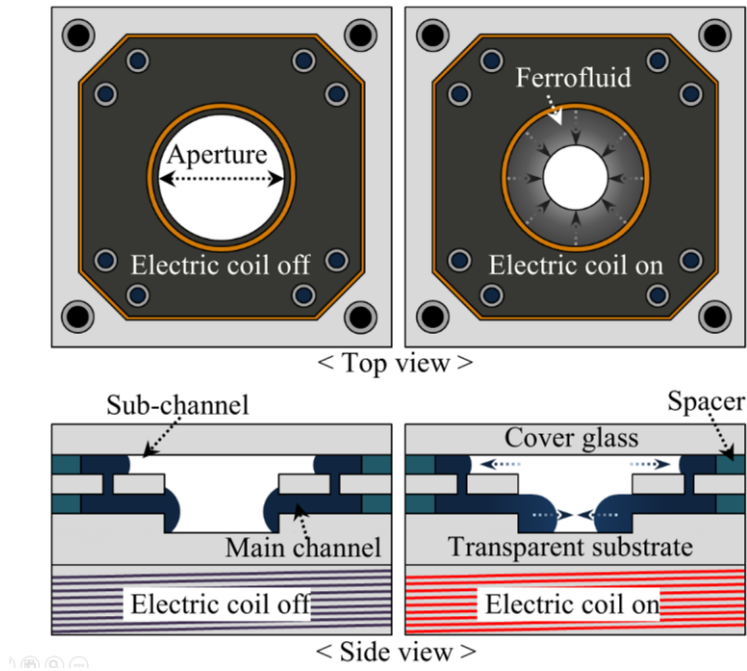


그림 1.13 전자석 액추에이터를 이용한 방식 [64]

그림 1.13은 전자석 액추에이터를 이용한 방식의 가변조리개이다 [64]. 패러데이의 전자기 유도 법칙에 따라 전류가 코일에 흐르게 되면 자기장이 발생하는데, 이 자기장이 불투명한 액체 자석을 움직여

조리개를 가변 시킨다. 액체 자석은 서브 채널 안에 채워져 있고, 전류가 흐르게 되면 메인 채널의 가운데 방향으로 움직이면서 조리개가 작아지게 된다. 전류를 0부터 2.6 A까지 변화시켰을 때 조리개의 크기는 1.09 mm에서 1.72 mm까지 변화한다.

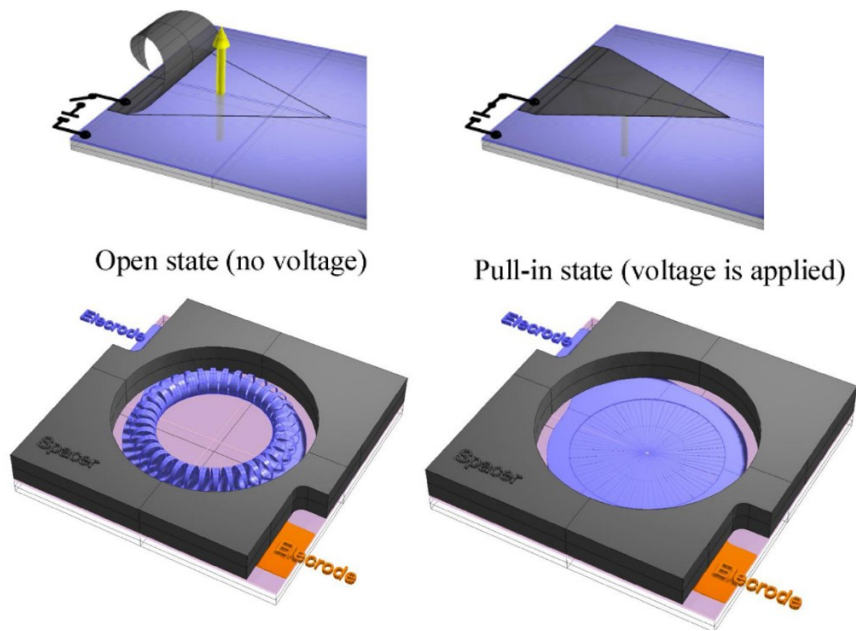


그림 1.14 롤 액추에이터를 이용한 가변조리개 [65]

그림 1.14는 정전기력을 이용한 롤 액추에이터 방식의 가변조리개이다 [65]. 실리콘 나이트라이드(Silicon Nitride)와 알루미늄 박막이 MEMS 공정 기술을 이용하여 36개의 조각으로 패터닝 되어 있는데 실리콘 나이트라이드와 알루미늄 사이의 스트레스 차이로 인하여

를 형태로 말려 있다. 바닥 부분의 투명한 금속에 전압을 가하게 되면 정전기력에 의하여 말려 있던 박막이 퍼지게 되면서 조리개의 크기가 작아진다. 30 V의 전압을 가하였을 때 조리개의 지름은 0에서 2.2 mm로 변화하며 응답 시간은 2 ms 이다. 이 방식은 점진적으로 크기를 변화시키는 다른 가변조리개 방식과 달리 두 가지 크기의 조리개 만을 구현한다.

제 3 절 연구의 목적

자율주행을 위한 기반 기술로써 매우 중요한 거리 측정 센서는 현재 부피가 크거나 가격이 높아 아직 대중적으로 차량에 적용하기 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 소형 카메라에 가변조리개를 간단히 삽입하여 영상과 거리 정보를 동시에 제공하는 거리 센서를 하드웨어적으로 구현하였다. 블랙박스 카메라와 같은 크기의 카메라의 앞단에 반도체 공정 및 디스플레이 공정 기술을 이용하여 구현된 소형 가변조리개를 어셈블리함으로써 전체 센서 크기를 소형화 시켰으며 가격적인 측면에서도 기존 거리 센서들과 비교해 매우 낮아졌다.

이 거리 센서는 가변조리개를 사용함으로써 카메라 한 대 만으로 이미지 한 장이 아닌 피사계 심도가 다른 두 장을 이용하여 거리

정확도를 높였다 [66]. 또한 개발한 가변조리개는 타 연구에서 개발한 가변조리개 대비 낮은 동작 전압과 빠른 응답 시간을 동시에 지님으로써 전체 거리 센서는 낮은 전력으로 실시간 거리 측정이 가능하게 되었다.

거리 센서의 전체 시스템을 나타내는 블록 다이어그램은 그림 1.15와 같다. 전압을 스위칭 하도록 코딩된 아두이노 보드로부터 가변조리개가 입력 전압을 받게 되면 전압에 따라 가변조리개의 크기가 변화한다. 가변조리개와 어셈블리된 카메라 모듈의 이미지 센서에서는 가변조리개의 크기에 따라 서로 다른 영상을 받게 되고 이미지 센서와 연결된 카메라의 메인 보드에서 이미지 프로세싱을 거쳐 디스플레이 창에 영상이 보여지게 된다. 디스플레이 되는 영상에 거리 추정 알고리즘이 적용되면 거리 정보가 함께 보여질 수 있다.

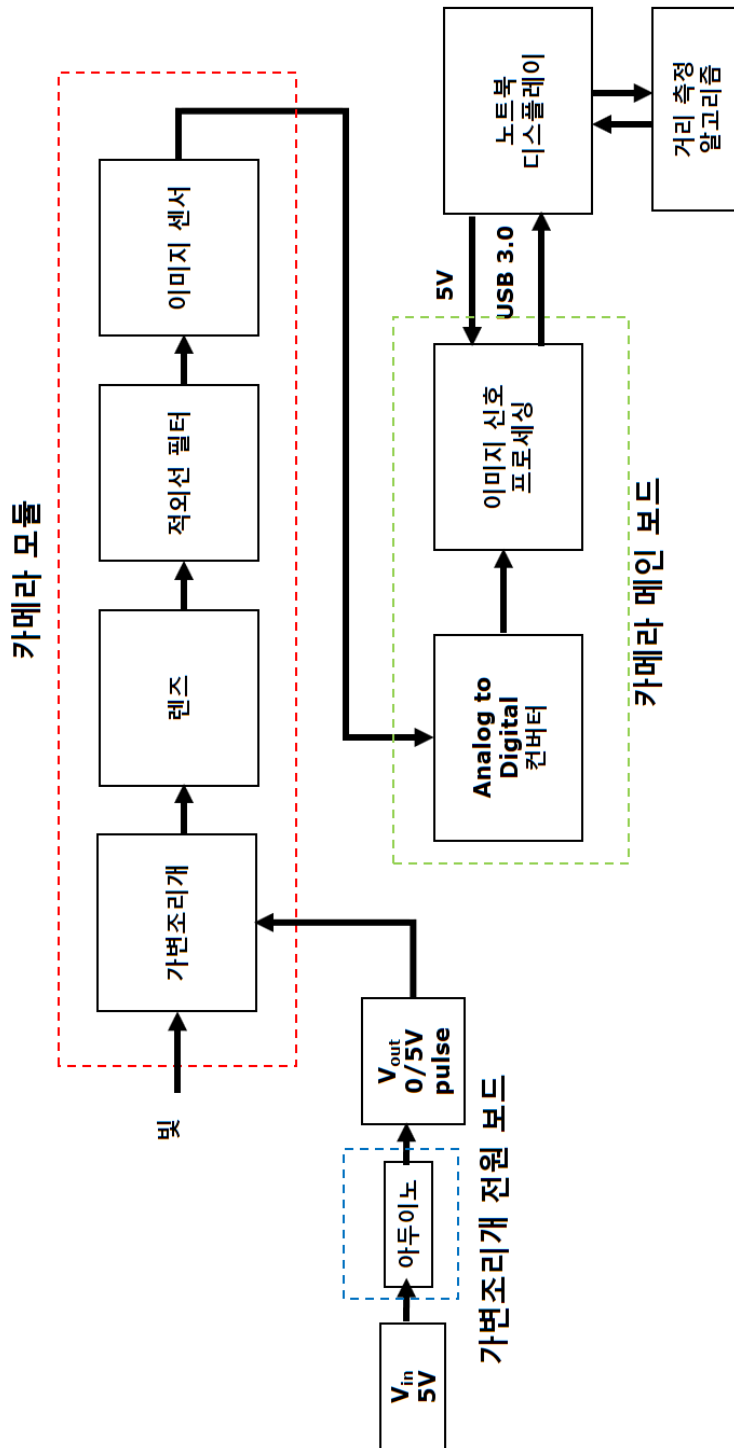


그림 1.15 거리 센서 시스템을 나타낸 블록 다이어그램

본 논문의 제 2장에서는 가변조리개의 개발에 관한 내용을 다루고 제 3장에서는 가변조리개가 삽입될 카메라 모듈을 거리 측정 시스템에 맞게 개발하고 카메라 메인 보드와 가변조리개를 구동시키는 아두이노 보드를 함께 어셈블리 하는 것에 대해 다룬다. 제 4장은 전체 거리 측정 시스템으로 얻은 영상에 DFD 알고리즘을 적용하여 도출된 거리 측정 결과와 그에 대한 분석으로 구성하였다.

제 2 장 액정 디스플레이 방식의 가변조리개

제 1 절 가변조리개의 동작 원리

기존에 개발된 소형 가변조리개는 MEMS를 이용한 방식처럼 전압이 높거나 [59], 전기 습윤 현상을 이용한 방식처럼 응답 시간이 낮은 문제가 있어 [60], 본 연구에서는 액정(Liquid Crystal, LC)을 이용하여 구동하는 가변조리개를 개발하였다. 액정은 고체와 같이 결정 구조를 갖지만 액체처럼 움직이는 물질로써 배열 구조의 차이에 따라 네마틱(nematic), 스멕틱(smectic), 콜레스테릭(cholesteric)으로 분류된다 [67]. 그 중 1971년 네마틱 액정이면서 층간에 방향이 틀어진 형태인 비틀린 네마틱(Twisted Nematic, TN) 액정에 의한 전기—광학 효과가 발표 되면서 오늘날 가장 기본적인 액정 디스플레이(Liquid Crystal Display, LCD)에 사용되게 되었다 [68].

액정 디스플레이의 구성과 기본적인 동작을 그림 2.1에 나타내었다. 위아래 유리 기판의 안쪽에는 투명 전극인 indium—tin—oxide (ITO)가 증착 되어 있다. 이 ITO 위에는 액정의 방향자(director)의 정렬을 돕기 위해 폴리이미드(polyimide) 배향막이 러빙(rubbing) 되어 있다.

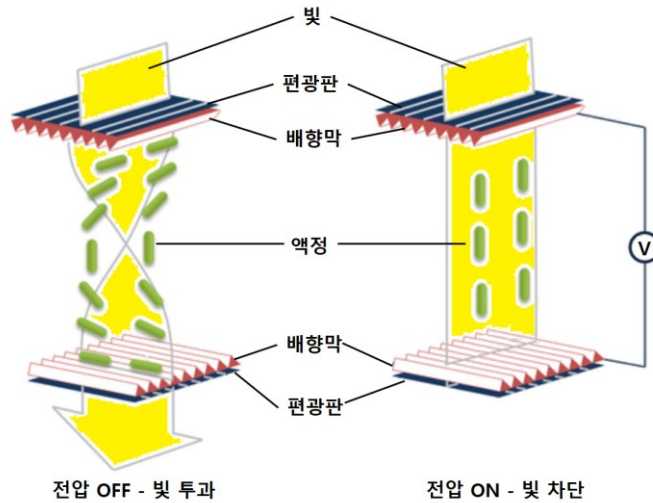


그림 2.1 액정 디스플레이의 동작 원리

위쪽 기판과 아래쪽 기판의 러빙 방향이 수직이 되게 하고 기판 사이에 액정을 주입하게 되면 ITO 표면에서 러빙 방향에 평행하게 액정의 방향자가 놓이게 되며 유리 기판 사이에서 연속적으로 90° 비틀리게 된다. 유리 기판의 각 바깥쪽에는 편광 필름을 부착하는데 이때 편광 필름의 편광축이 배향막의 러빙 방향과 평행하도록 부착한다. 전압을 인가하기 전에 빛이 들어오게 되면, 위쪽 편광 필름에 의해 선편광된 빛의 편광면이 액정 층에서 단계적으로 비틀린 구조에 의해 회전하면서 아래쪽 편광 필름의 편광축과 평행하게 되어 빛이 투과하게 된다. 위아래 기판에 전압을 인가하게 되면 방향자가 전기장 방향에 평행하게 배열되기 때문에 액정 층에서 편광면이 회전하는 특성이 없어져 위쪽

편광 필름에 의해 선편광된 빛이 그대로 바닥까지 내려와 아래쪽 편광 필름의 편광축과 90°가 되어 빛이 투과하지 못하게 된다.

이러한 액정 디스플레이의 동작 원리를 이용하여 가변조리개를 개발하였다. 한쪽 유리 기판의 ITO 전극을 그림 2.2와 같이 링 형태로 패터닝을 하여 가운데 원에 유리 기판이 드러나게 하였다. 이후 기판 전체에 ITO 전극이 있는 다른 유리 기판과 합착 시켜 두 기판 사이에 전압을 가하게 되면 유리 기판이 드러난 원 부분에는 전기장이 형성되지 않아 항상 빛이 통과하게 된다. ITO 전극의 바깥 부분에 크롬(Chromium)을 증착한 것은 빛이 조리개 이외의 부분으로 통과되는 것을 막기 위함이다.

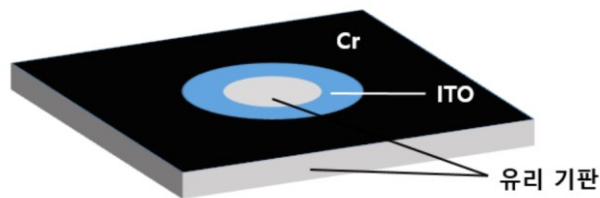


그림 2.2 유리 기판 위에 링 형태로 패터닝된 ITO

그림 2.3은 위아래 기판이 합착 되었을 때의 단면도와 그 동작 원리를 나타낸다. 위쪽 기판에는 ITO가 전체적으로 증착되어 있고

아래쪽 기판에는 ITO의 가운데 부분이 식각 되어 있으며 조리개 바깥쪽 부분에는 크롬을 증착 하였고 전압은 ITO 기판 사이에 인가하게 된다. 전압을 가하지 않은 상태에서는 전체적으로 전기장이 형성되지 않아 크롬이 있는 부분을 제외한 곳에서 빛이 투과가 되면서 큰 원이 형성된다. 전압을 가하게 되면 ITO가 있는 부분은 전기장이 형성되지만 ITO가 식각된 부분에는 전기장이 형성되지 않아 전기장이 형성된 부분만 빛이 통과하지 못하게 되므로 작은 원이 형성되게 된다.

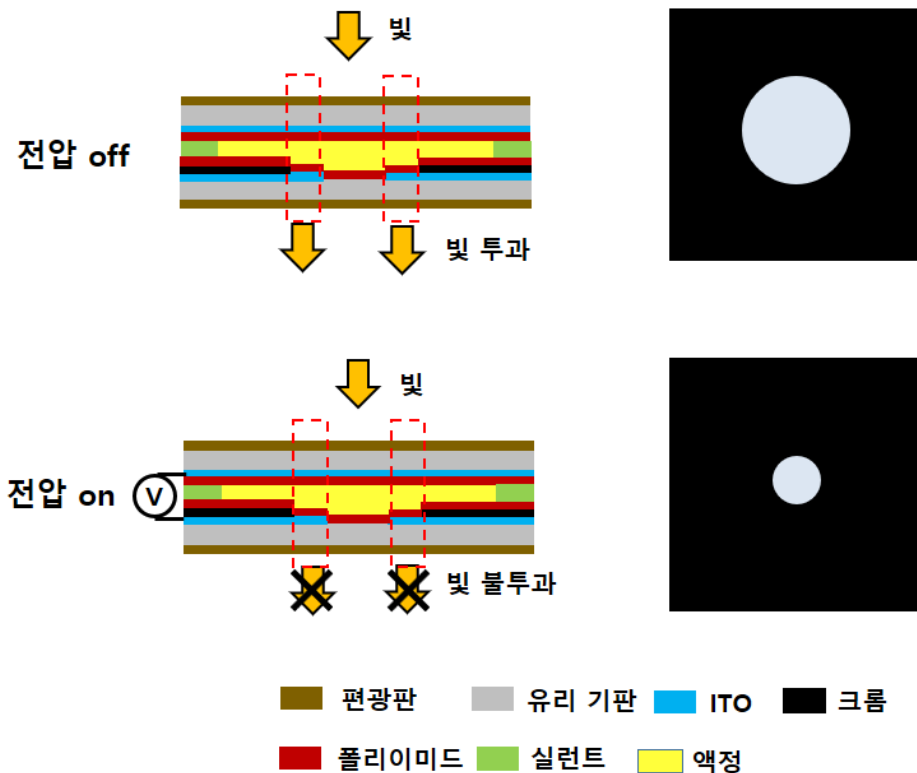


그림 2.3 액정 디스플레이 방식을 이용한 가변조리개의 동작 원리

제 2 절 가변조리개 설계

한쪽 유리 기판을 동심원 형태로 패터닝 하게 되면 전기—광학 액추에이터로써 여러 가지 크기를 가지는 가변조리개를 형성할 수 있다.

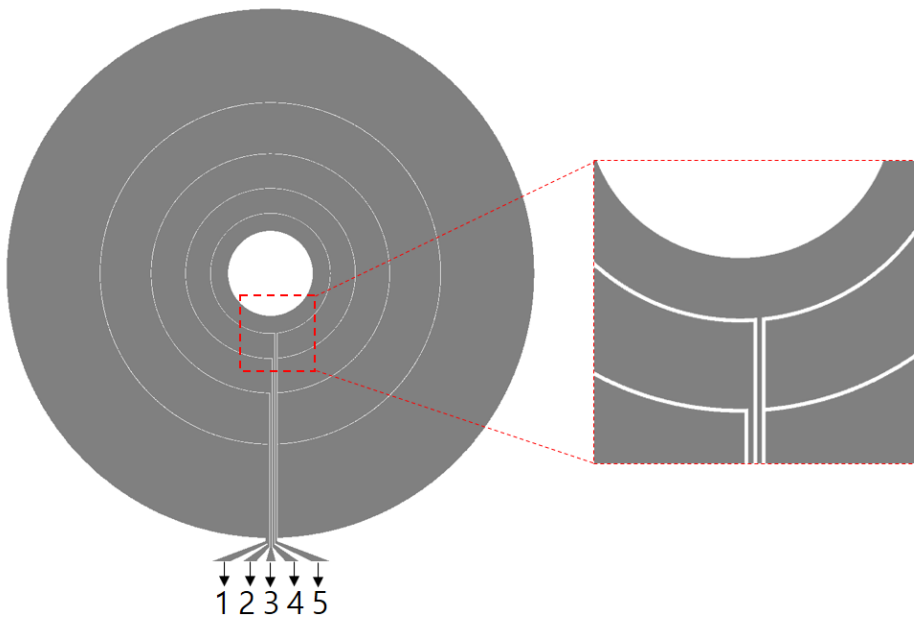


그림 2.4 6개의 서로 다른 크기를 가지는 가변조리개의 패턴

그림 2.4에서 ITO는 동심원 형태로 패터닝 되었으며 1번 전극이 가장 바깥쪽 링에 연결되고 5번 전극이 가장 안쪽 링에 연결 되어 있다. 1번 전극부터 5번 전극까지 순차적으로 동작 전압을 가하고 패턴이

없는 다른 한쪽 유리 기판의 ITO를 접지에 연결 시키면 가변조리개의 크기를 6단계로 제어할 수 있다. 먼저, 전압을 가하지 않은 상태는 빛이 모두 투과되므로 가장 큰 조리개가 형성 된다. 전극 패드 1번에 동작 전압을 가하게 되면 가장 바깥쪽 링 부분으로는 빛이 투과되지 않으면서 조리개의 크기가 한 단계 줄어든다. 1번 전극과 2번 전극에 동시에 전압을 가하게 되면 조리개의 크기가 처음 크기에 비해 두 단계 줄어든다. 1번 전극부터 5번 전극까지 모두 전압을 가하게 되면 가운데 ITO가 제거된 원 부분만이 빛을 투과하게 되면서 가장 작은 조리개를 형성 하게 된다.

조리개의 크기는 사진 분야에서 일반적으로 사용되는 f-number($f/\#$)인 1.8, 2.8, 4.0, 5.6, 8.0, 11.0으로 설정하였다. $f/\#$ 는 식 (2.1)과 같이 초점 거리(f)를 입사 동공 지름의 길이(D)로 나눈 값으로 정의 된다 [69]. 렌즈 앞단에 조리개를 위치시킬 경우 D 를 조리개의 지름으로 볼 수 있다.

$$f/\# = N = \frac{f}{D} \quad (2.1)$$

한 다이(die)의 크기는 일반 블랙박스의 렌즈 크기를 고려하여 10×10 mm로 하였으며 3.2 절에서 설계된 초점 거리 8 mm를 식 (2.1)에 적용하면 가장 바깥쪽 원의 지름은 $f/1.8$ 일 때인 4.44 mm

이다. 상판과 하판의 합착 시 실런트(sealant)의 너비가 대략 1.5 mm인 것을 고려하여 전극 패드의 길이는 1 mm로 하였다. ITO 전극이 상하판의 안쪽에 있기 때문에 전계를 가하기 위해서는 전체 두께의 절반만 절단하여 그림 2.5와 같이 패드가 드러나야 한다.

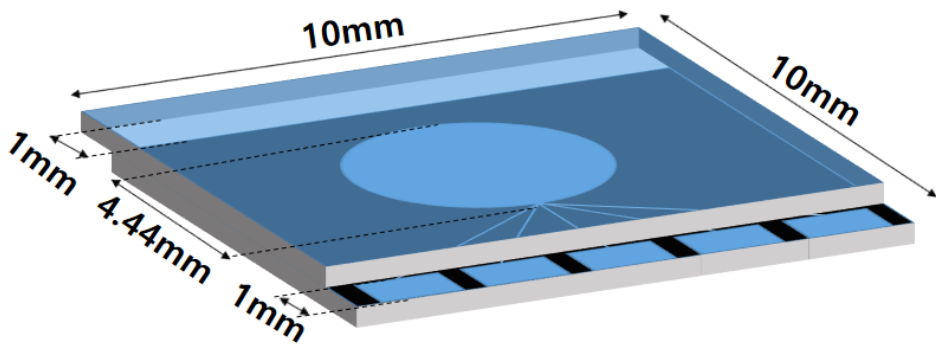


그림 2.5 다이, 조리개 및 전극 패드의 크기 설계

제 3 절 가변조리개 제작

액정 디스플레이 방식 가변조리개는 반도체 공정과 디스플레이 공정을 이용하여 제작하는데 상판과 하판을 각각 공정하여 합착 후 액정을 주입하게 된다. 그림 2.6은 전체 공정의 흐름도로 먼저 0.7 mm 두께의 소다라임(Sodalime) 유리 기판에 투명 전극인 ITO를 75 nm의

두께로 증착한다. 이후 크롬을 이용하여 조리개의 바깥 부분은 빛을 흡수함으로써 조리개 구동 시 빛의 영향이 없게 하였다. Metal sputter를 이용하여 100 nm의 크롬을 증착한 후 감광제로는 1.5 μm 두께의 PR 5214를 사용하여 사진 공정 진행하였으며 Reactive Ion Etching (RIE) 방식을 이용하여 식각 하였다. 하판의 ITO는 가변조리개를 구현하기 위하여 패터닝 하게 되는데 이전 단계에서 형성된 크롬 패턴에 정렬 하여 사진 공정을 진행 후 RIE 방식을 이용해 식각 하였다. 이후 상하판에 비틀린 네마틱 액정의 정렬을 위하여 폴리이미드를 증착하고 경화된 폴리이미드를 일정한 방향으로 러빙을 하였다. 상하판 사이의 합착을 위해서는 실린트를 도포 해야 하는데 이때 실린트에 4 μm 크기를 가지는 스페이서(spacer)를 함께 섞어서 합착하여 상하판의 간격이 일정하게 유지될 수 있도록 하였다. 다이싱(dicing) 공정을 진행할 때는 다이 별로 전체 두께를 절단하고 전극 부분에는 전체 두께의 절반만 절단하여 전극이 바깥으로 드러나도록 하였다. 액정은 JNC Korea Co.의 IAN-5000XX T20를 사용하였고 모세관 현상을 이용하여 액정을 주입 시켰다. 이 후 양쪽 면에 편광 필름을 부착하고 전극 패드에 전선을 연결하였다.

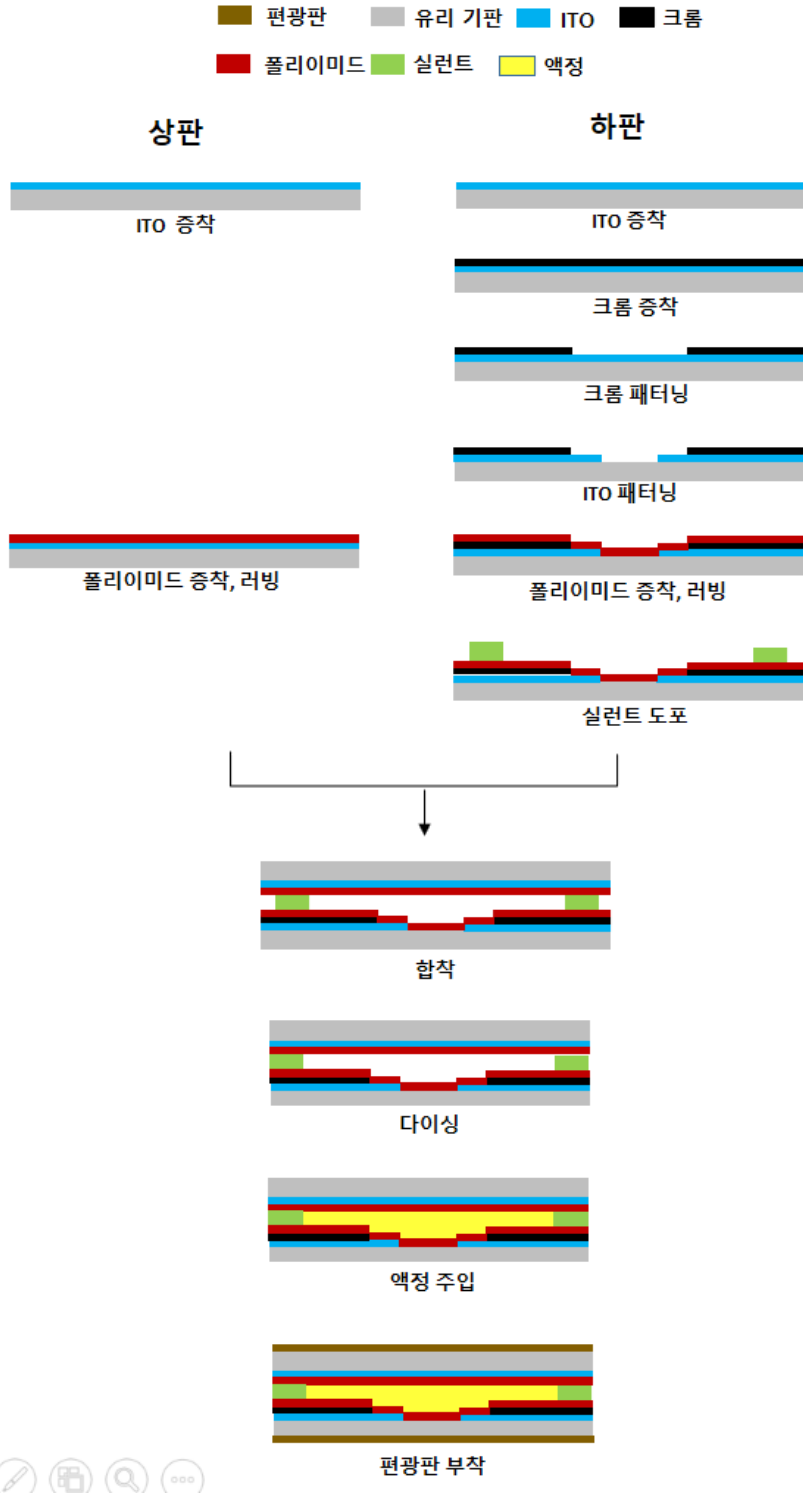


그림 2.6 가변조리개의 공정 흐름도

ITO 식각 시 RIE를 이용하였는데 이때 사용한 기체는 아르곤, 수소, 메탄이다 [70]. 식각 실험 시 아르곤, 사플루오린화탄소, 산소로 사용 기체를 구성 하였을 때에는 식각률이 $3.6\text{--}12.9 \text{ \AA}\text{min}^{-1}$ 으로 매우 낮았다 [71]. 하지만 아르곤, 수소, 메탄을 각각 20, 60, 20 sccm으로 설정하고 100 mTorr의 압력 하에서 150 W의 전력을 공급하였을 때 $73.7 \text{ \AA}\text{min}^{-1}$ 의 식각률을 얻을 수 있었다.

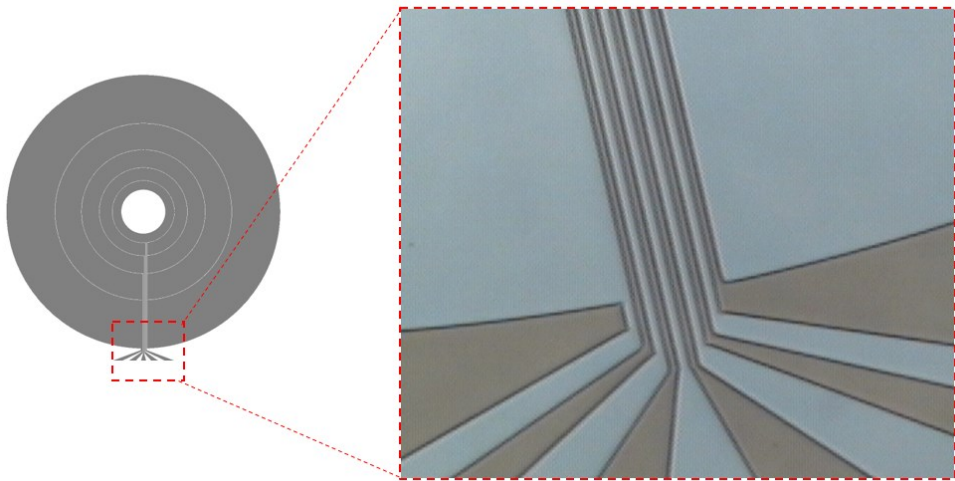







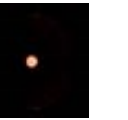
그림 2.7 ITO 건식 식각 결과

그림 2.7은 그림 2.4의 조리개 패턴에서 전극 패드 라인 사이의 식각 결과를 보여준다. 얇은 부분의 선폭은 본 공정에서 가장 작은 값인 $5 \mu\text{m}$ 로, 식각 결과 각 ITO 패턴이 잘 절연됨을 확인할 수 있었다.

제 4 절 가변조리개 제작

제작된 가변조리개의 전체 칩 사이즈는 $10 \times 10 \times 1.8 \text{ mm}^3$ 이며, 설계된 f/#에 따라 해당 전극 패드에 전압을 가하였을 때 동작하는 가변조리개의 사진과 측정된 크기를 표 2.1에 나타내었다.

표 2.1 가변조리개의 사진 및 크기 측정 결과

f/#	1.8	2.8	4.0	5.6	8.0	11.0	
사진							
설계값 (μm)	4400	2860	2000	1420	1000	720	
측정값 (μm)	가로	4342.86	2742.86	1973.29	1457.14	1028.57	776.18
	세로	4429.48	2914.29	1971.43	1459.66	1032.14	685.71
	대각(\)	4387.20	2788.02	2060.71	1395.33	977.29	727.31
	대각(/)	4340.06	2849.27	1939.49	1405.82	1032.14	669.45
평균	4374.90	2823.61	1986.23	1429.49	1017.53	714.66	
오차 (%)	0.57	1.27	0.69	0.67	1.75	0.74	
Elongation	0.04	0.06	0.06	0.04	0.05	0.14	

여기서 elongation은 측정된 조리개가 얼마나 원에 가까운지

측정하기 위해 측정값의 최대값과 최소값의 비를 1에서 뺀 수치로 원에 가까울수록 0에 가깝다.

액정의 특성에 따라 전압을 인가하게 되면 투과되는 빛의 양이 줄어들게 되어, 전압에 대한 빛의 투과량을 측정함으로써 동작 전압과 응답 시간을 측정 할 수 있다.

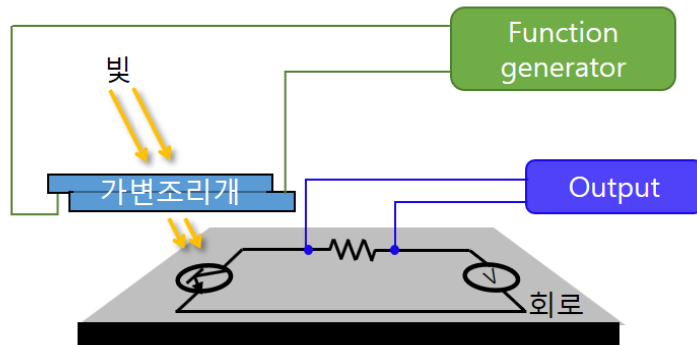


그림 2.8 가변조리개의 동작 전압과 응답 시간을 측정하기 위한 셋업

그림 2.8은 측정 시스템 구성에 관한 것으로 가변조리개의 바로 아래에는 포토다이오드가 있어 광량의 변화를 알 수 있고 이 포토다이오드는 100 MΩ의 저항, 5 V DC 전압과 직렬로 연결되어 있다. 가변조리개에 0부터 10 V까지 가하였을 때 포토다이오드로 입사되는 빛의 양이 줄어들게 되고 이에 포토다이오드에 걸리는 전압은 증가하여 포토다이오드에 직렬로 연결된 저항에 걸리는 전압은 줄어들게 된다.

이때 저항에 걸리는 전압을 출력 전압으로 측정함으로써 동작 전압과 응답 시간을 측정할 수 있다.

출력 전압을 측정하여 투과도로 0—100%까지 정규화 하면 전압—투과도 곡선을 얻을 수 있는데 그림 2.9는 샘플 5개에 대하여 전압—투과도를 표현한 것이다. 투과도의 변화가 전체의 90%가 되는 때의 전압을 광학적 포화 전압(optical saturation voltage)이라고 하는데 가변조리개에서는 이 광학적 포화 전압을 동작 전압으로 볼 수 있다. 샘플 5개의 동작 전압을 나타내면 표 2.2와 같고 전체 샘플의 평균 동작 전압은 2.64 ± 0.26 V 이다.

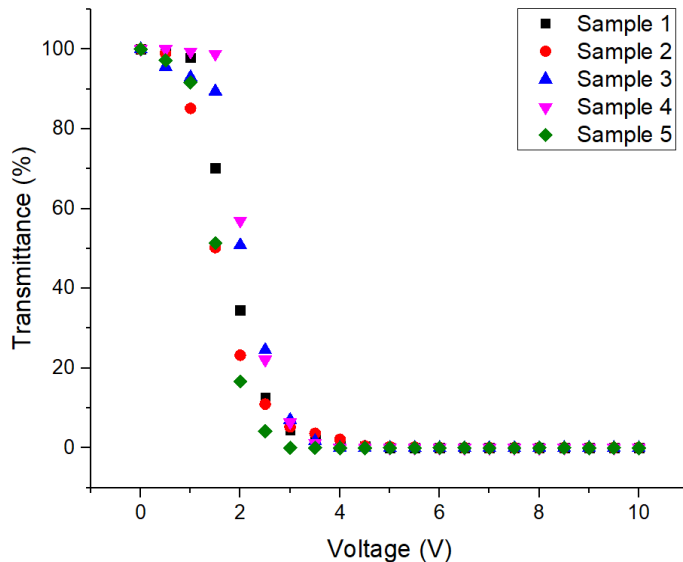


그림 2.9 가변조리개의 전압—투과도 곡선

표 2.2 가변조리개 샘플 5개의 동작 전압

	동작 전압 (V)
샘플 1	2.65
샘플 2	2.56
샘플 3	2.91
샘플 4	2.86
샘플 5	2.25
평균	2.64
표준편차	0.26

또한 가변조리개에 5 V, 1 Hz의 구형파를 인가했을 때 회로의 출력 전압을 나타내면 가변조리개의 응답 시간을 알 수 있다. 출력 전압의 최소값을 투과도 100%, 출력 전압의 최대값을 투과도 0% 라고 했을 때 응답 시간 중 상승 시간은 투과도 10%에서 90%까지 변화하는데 걸리는 시간, 하강 시간은 투과도 10%에서 90%까지 변화하는데 걸리는 시간 이다. 그림 2.10은 샘플 5개 중 한 샘플에 대한 측정 그래프로 왼쪽 y축에 표시된 것은 가변조리개에 인가되는 전압이고 오른쪽 y축에 표시된 것은 가변조리개의 동작으로 인해 변화하는 회로의 출력 전압이다. 출력 전압의 (+), (-) 단자를 바꾸어 측정하게 되면 상승 시간은 0 V의 입력 전압을 가하여 f/4.0에서 f/1.8로 변화될

때 출력 전압이 90%에서 10%로 낮아지는데 걸리는 시간이고, 하강 시간은 5 V의 입력 전압을 가하여 $f/1.8$ 에서 $f/4.0$ 으로 변화할 때 출력 전압이 10%에서 90%로 증가하는데 걸리는 시간이다. 가변조리개 샘플 5개에 대해 측정된 응답 시간의 상승 시간과 하강 시간에 대해 표 2.3에 나타내었다. 이를 통해 샘플 5개의 평균 상승 시간은 8.29 ± 1.18 ms이고 하강 시간은 2.30 ± 0.94 ms 임을 알 수 있다.

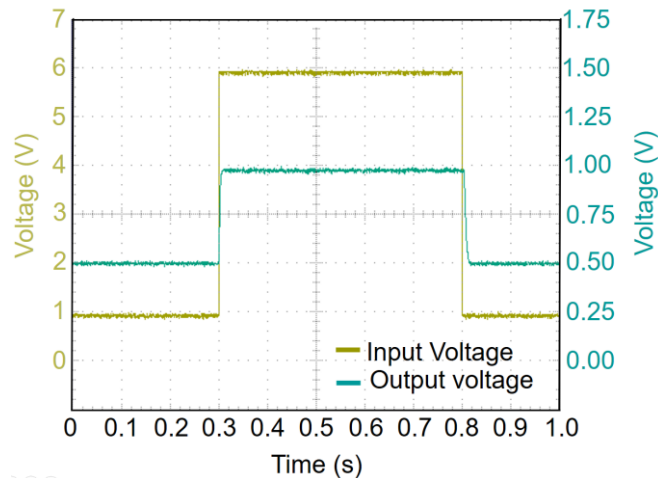


그림 2.10 구형파 인가 시 가변조리개 샘플 5의 응답 시간

같은 장면에 대해 동작 전압이 인가되지 않았을 때와 동작 전압이 인가되었을 때 각각의 장면이 필요하므로, 두 장의 사진을 찍기 위해서는 응답 시간의 상승 시간과 하강 시간이 모두 고려되어야 하며 이를 합하면 10.59 ms 이다. 30 fps로 영상을 송출할 경우 두 장의

사진을 얻는 데에는 대략 16.65 ms 이하의 시간이 필요하게 되는데 측정된 응답 시간은 이를 만족한다.

표 2.3 가변조리개 샘플 5개의 응답 시간

	상승 시간 (ms)	하강 시간 (ms)
샘플 1	6.62	1.50
샘플 2	8.00	1.30
샘플 3	8.61	2.20
샘플 4	9.91	2.99
샘플 5	8.33	3.50
평균	8.29	2.30
표준편차	1.18	0.94

측정된 동작 전압과 응답 시간을 각각 x축과 y축으로 나타내어 타 연구들과 비교한 결과를 그림 2.10에 나타내었다. 동작 전압과 응답 시간을 동시에 평가하였을 때 가장 우수한 결과임을 알 수 있다.

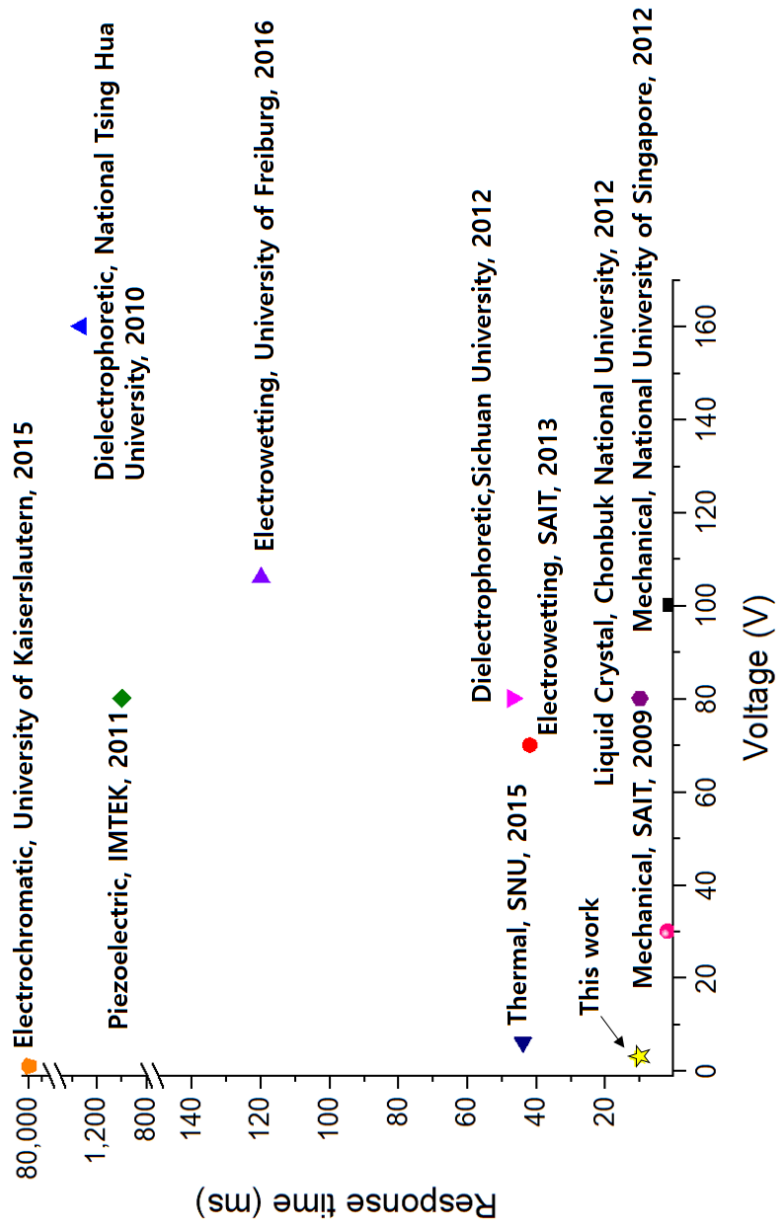


그림 2.11 타 가변조리개와의 동작 전압, 응답 시간의 비교

맞지 않아 c 가 커지게 될 경우 맺힌 상의 윤곽을 뚜렷하게 알 수가 없게 되며 이를 블러라 한다. c 가 작아 블러 되어 보이지 않기 위한 물체면(object plane)에서의 거리 범위를 피사계 심도, 이미지면(image plane)에서의 초점 범위를 초점 심도라고 한다. c' 은 c 로 인해 물체면에 생기는 원으로 c 에 대해 배율 m 배만큼 차이가 난다.

$$c = c' \cdot m \quad (3.1)$$

여기서 m 은 다음과 같은 비율로 나타낼 수 있다.

$$m = \frac{i}{z_{IFP}} \quad (3.2)$$

i 는 렌즈에서 이미지 센서까지의 거리, z_{IFP} 는 렌즈에서 물체면의 초점면(in-focal-plane)까지의 거리이다. 물체면에서 삼각형 닳은꼴을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c' = A \frac{|z - z_{IFP}|}{z} \quad (3.3)$$

z 는 렌즈에서 물체까지의 거리, A 는 조리개의 크기이다. 식 (3.2)와 식 (3.3)을 이용하여 식 (3.1)을 정리하면 다음과 같다.

$$c = A \frac{|z - z_{IFP}| \cdot i}{z \cdot z_{IFP}} \quad (3.4)$$

초점 거리 f 에 대한 렌즈 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{z_{IFP}} \quad (3.5)$$

식 (3.5)와 식 (2.1)을 이용하여 식 (3.4)를 정리하면 다음과 같이 표현 된다 [76].

$$c = \left(1 - \frac{z_{IFP}}{z}\right) \frac{1}{(z_{IFP} - f)} \frac{f^2}{N} \quad (3.6)$$

식 (3.6)을 통해 $f/\#$ 가 작아질수록, 즉 조리개의 크기가 커질수록 c 가 커져 이미지에 블러가 더 많이 일어나는 것을 알 수 있다.

제 2 절 광학 시스템의 파라미터 선정

이 절에서는 이미지 센서의 크기, 광학계의 화각, 초점 거리, $f/\#$, z_{IFP} 의 파라미터 값을 각각 설정한다. 먼저 이미지 센서는 전장용 카메라로 많이 쓰이는 1/2.7 인치 포맷의 Full High Definition (FHD)의 해상도를 가지는 센서를 선정하였다.

화각(Field of View)은 식 (3.7)과 같이 나타낼 수 있다 [77].

$$Field\ of\ View = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{pixel\ size \times number\ of\ pixel}{2 \times focal\ length} \right) \quad (3.7)$$

화각이 크면 전방의 더 넓은 시야가 한 이미지 안에 들어올 수

있지만 큰 화각을 갖기 위해 초점 거리를 작게 하면 식 (3.6)에서 파생된 식 (3.8)로부터 두 조리개 간의 블러 차이가 작아지게 된다.

$$Blur\ diff. = \left(1 - \frac{z_{IFP}}{z}\right) \frac{f^2}{(z_{IFP} - f)} \left(\frac{1}{N_{large}} - \frac{1}{N_{small}}\right) \quad (3.8)$$

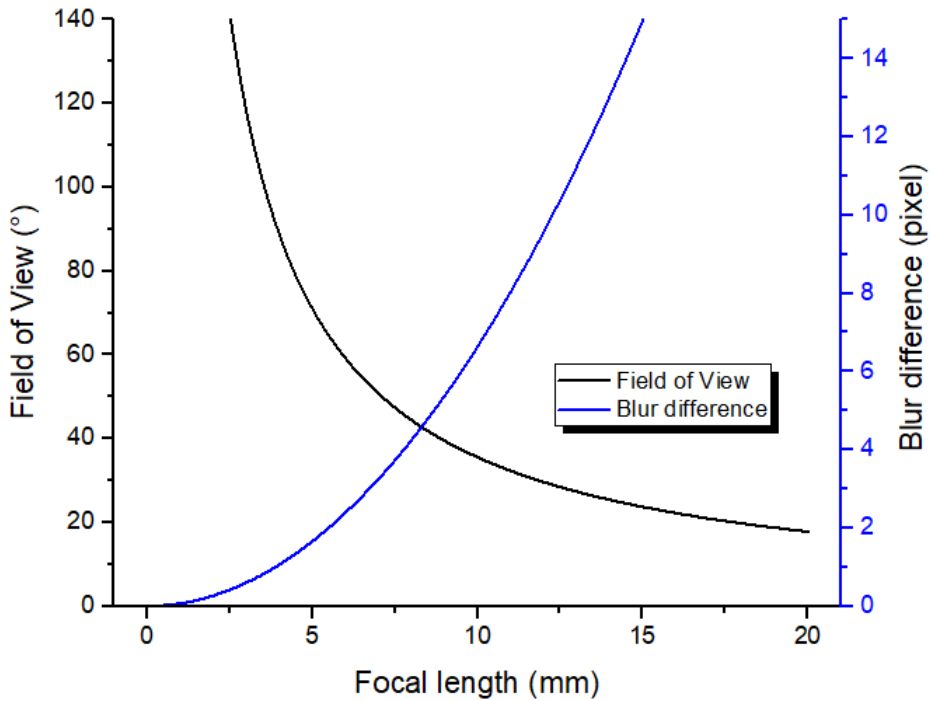


그림 3.2 초점 거리에 대한 FoV와 조리개 간의 블러 차이

두 조리개 간의 블러 차이를 통해 거리 정보를 추출하기 때문에 블러 차이가 작아지게 되면 거리 센서의 정확도는 낮아진다. 따라서 두 파라미터를 함께 고려하기 위하여 그림 3.2에 식 (3.7)과 식 (3.8)을

초점 거리에 대하여 나타내었다. 현재 Mobileye의 제품이 40°의 화각을 사용하고 있는 점을 고려하여 [46], 40° 이상의 화각에서 조리개 크기에 따른 블러 차이가 큰 지점인 초점 거리 8 mm에서의 화각 45°로 정하게 되었다.

식 (3.8)로부터 두 조리개 간의 값의 차이가 클수록 각 조리개로부터 얻는 이미지의 블러의 차이가 큼을 알 수 있다. 두 조리개 중 지름이 큰 조리개는 2.3절에서 제작한 가변조리개 중 지름이 가장 큰 f/1.8을 선택하였다. 나머지 다른 하나의 조리개는 지름이 작아질수록 f/1.8 조리개와의 블러 차이를 크게 만들 수 있어 거리 추출 정확도 면에서 유리하다. 하지만 지름이 너무 작아지게 되면 입사되는 빛이 현저히 줄어들어 되어 이미지가 매우 어두워지게 된다. 큰 사이즈의 조리개 대비 작은 사이즈의 조리개의 빛의 세기 비율을 식 (3.9)에 나타내었다.

$$Light\ intensity = \left(\frac{Size\ of\ smaller\ aperture}{Size\ of\ larger\ aperture} \right)^2 \quad (3.9)$$

여기서 큰 사이즈의 조리개는 f/1.8인 지름 4.4 mm 이다. 식 (3.9)를 백분율화하여 f/1.8보다 큰 f/#에 대해 나타낸 것과 식 (3.8)의 블러 차이를 함께 나타내면 그림 3.3과 같이 표현할 수 있다.

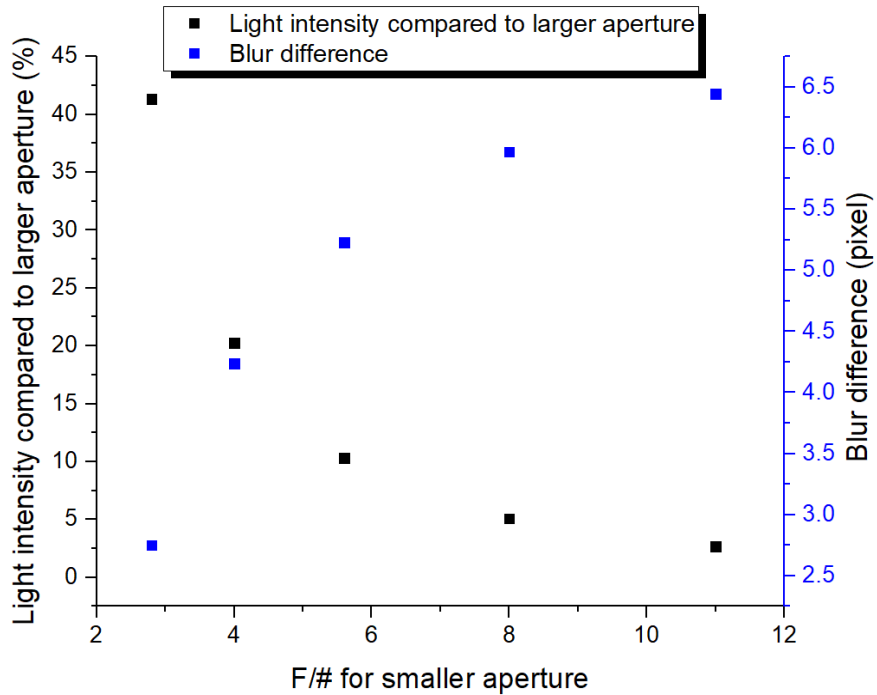


그림 3.3 f/#의 변화에 대한 광량과 조리개 간의 블러 차이

그림 3.3을 통해 조리개 간 블러의 차이를 크게 하여 거리의 정확도를 높이는 것과 광량의 효율을 동시에 고려하였을 때 f/4.0인 부근이 최적인 것으로 확인하였다. 이것은 두 조리개를 이용하여 DFD 알고리즘을 적용할 때 두 조리개 간의 지름의 차이는 약 2배 정도가 적절하다는 참고문헌과도 일치한다 [57].

Z_{IFP} 지점으로부터 물체가 멀어질수록 두 조리개 간의 블러 차이가 발생하므로 거리 측정 가능 범위의 최소값은 Z_{IFP} 가 된다. 이는 Z_{IFP} 값이 작을수록 더 가까이 있는 물체까지의 거리도 측정 가능하다 것을

의미한다. 하지만 여러 z_{IFP} 값에 대하여 거리에 따른 블러 양을 나타낸 그림 3.4를 보면 z_{IFP} 가 작을수록 근거리에서의 기울기가 매우 커 거리 정확도 측면에서 불리하다는 것을 알 수 있다.

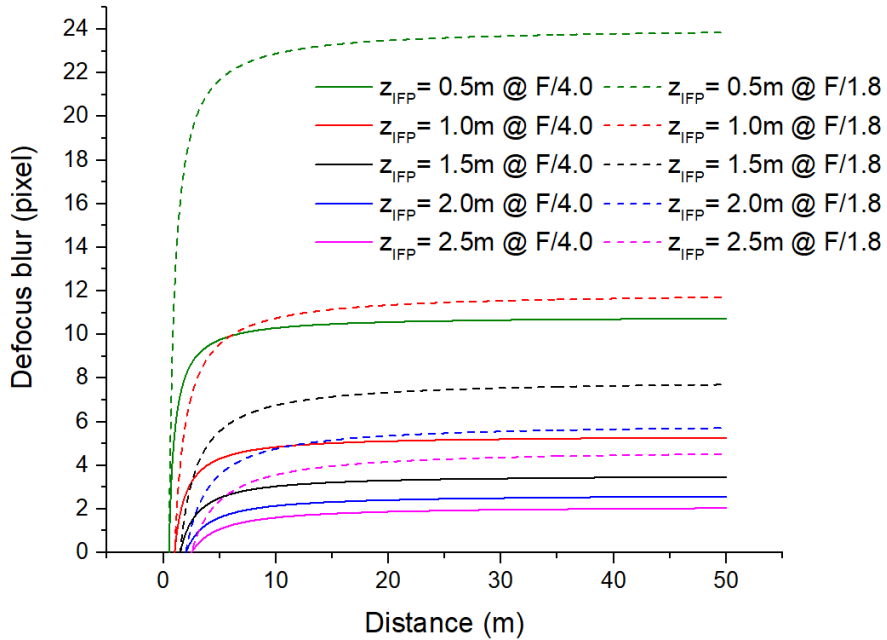


그림 3.4 거리 증가 시 여러 z_{IFP} 와 $f/\#$ 에 대한 블러

이에 그림 3.5와 같이 z_{IFP} 에 대해 거리 측정이 가능한 최소의 거리값과 블러 그래프의 기울기를 함께 나타내어 최적점을 고려하였다. 10 m 거리까지의 기울기를 나타내었을 때, z_{IFP} 값을 1.8 m로 하는 것이 거리 측정 시 정확도에 대한 안정성도 가지면서 가까운 거리도 측정할 수는 있는 지점인 것을 확인하였다.

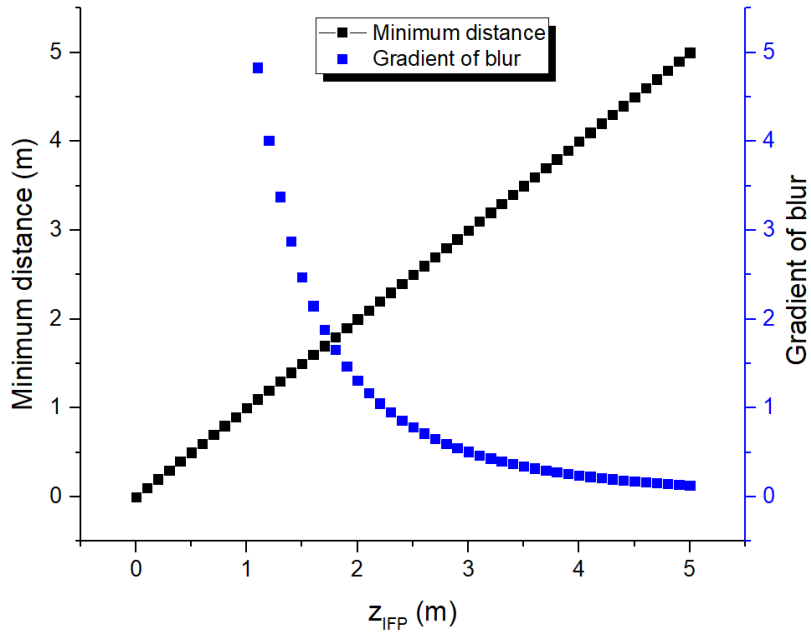


그림 3.5 z_{IFP} 에 대한 최소 거리값과 블러의 기울기

이 절에서 설정한 광학계의 파라미터를 정리하면 표 3.1과 같다.

표 3.1 광학계 시스템의 파라미터

파라미터	값
이미지 센서 포맷	1/2.7 인치
이미지 센서 해상도	FHD (1920 × 1080)
화각	45°
초점 거리	8 mm
f/#	1.8, 4.0
z_{IFP}	1.8 m

제 3 절 시뮬레이션을 통한 블러 예측

같은 크기의 물체가 렌즈로부터 멀어지게 되면 이미지면에서는 그 물체가 작아 보이게 되는데 이에 대한 고려가 식 (3.6)에는 포함되어 있지 않기 때문에 Matlab을 이용하여 물체까지의 거리가 증가할 때의 $f/\#$ 에 따른 블러에 대한 시뮬레이션을 진행하였다.

먼저 블러가 생기지 않은 가상의 이미지를 행렬로써 설정하는데, 3.2절에서 정한 이미지 센서의 스펙에 의해 행렬의 크기는 1920×1080 이 되고 회색조를 나타내는 0부터 255의 값 중 흰색인 255를 모든 행렬 값에 할당한다. 물체는 차량 뒷면을 단순화 하여 2×1 m의 직사각형 물체라 가정하였고 이 물체가 이미지 센서에 맺히는 크기는 식 (3.10)에 의해 정해진다.

$$L' = \frac{L \cdot f}{z \cdot p} \quad (3.10)$$

여기서 L 은 실제 물체의 길이, f 는 초점 거리, p 는 이미지 센서의 픽셀 크기로 여기서는 1/2.7 인치 FHD급을 사용하므로 $3 \mu\text{m}$ 이며 z 는 렌즈와 물체 사이의 거리, L' 은 이미지 센서에 맺히는 물체의 길이이다. 이미지 센서에 맺힌 물체는 행렬에서 검은색인 0으로 할당되며 뒷면을 보이는 차량 한 대가 중앙에 위치한 것으로 가정하여 시뮬레이션을

진행하였다. 그림 3.6의 (a)는 차량이 10 m 앞에 있을 때의 이미지이고 (b)는 50 m 앞에 있을 때의 이미지이며, (a)와 같이 흰 배경을 255, 검은 물체를 0으로 하여 픽셀 수만큼의 크기를 가진 행렬로 표현 가능하다.

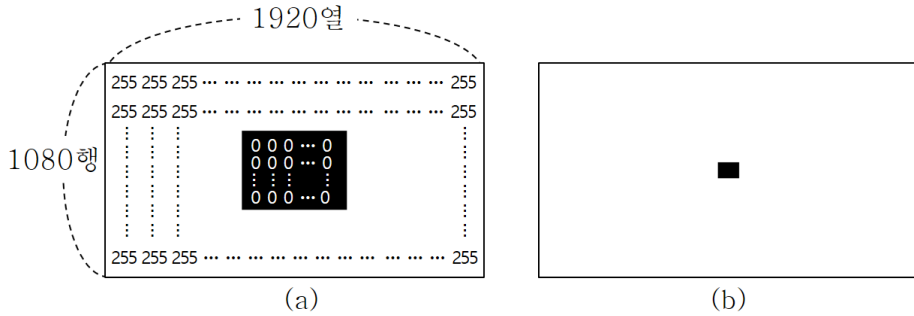


그림 3.6 행렬로 도출한 (a) 차량이 10 m 앞에 있을 때의 이미지, (b) 차량이 50 m 앞에 있을 때의 이미지

5 m부터 55 m까지 1 m 단위로 물체를 위치시킨 이미지에 필터를 이용하여 블러를 형성 시킨다. 이때 실제 블러가 생기는 형태와 가장 유사한 가우시안 필터를 사용하였다 [78]. 블러된 이미지는 블러 되지 않은 이미지와 가우시안 필터를 컨볼루션(convolution) 하여 얻을 수 있으며 수식으로 나타내면 식 (3.11)과 같다.

$$I'(z) = I(z) * h(x, y) \quad (3.11)$$

I 는 블러가 되지 않은 이미지이고 I' 은 거리, 조리개의 크기에 따라 블러가 된 이미지이며 $h(x, y)$ 는 가우시안 함수로 식 (3.12)와 같고

가우시안 함수의 σ 값은 식 (3.13)과 같이 c 값을 이용하여 나타낼 수 있다 [79].

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3.12)$$

$$\sigma = \frac{1}{2\sqrt{2}} c = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(1 - \frac{z_{IFP}}{z}\right) \frac{1}{(z_{IFP} - f)} \frac{f^2}{N} \quad (3.13)$$

블러된 이미지를 정량적인 값으로 표현하기 위해 Diagonal Laplacian (LAPD) 연산자를 사용하였다. LAPD는 이미지의 가로, 세로, 대각 방향으로의 픽셀 값의 변화를 통해 얼마나 블러가 되었는지 계산하는 방식으로 다른 계산 방식에 비해 정확한 방법이다 [80]. 식 (3.14)와 같이 이미지와 M 을 컨볼루션 하면 블러에 대한 정량적인 값을 추출할 수 있다.

$$Q = \sum_{n=1}^4 |I'(z) * M_n| \quad (3.14)$$

$$M_1 = [-1 \quad 2 \quad -1]$$

$$M_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$M_4 = M_1^T$$

최종 블러 값 B는 계산된 Q 행렬의 모든 원소 값에 대하여 평균을 내었고 블러의 증가를 가시적으로 표현하기 위해 역수를 취했다.

$$B = N_p \frac{1}{\sum_{ij} a_{ij}}, \quad Q = [a_{ij}] \quad (3.15)$$

각 조리개 값에 대해 거리가 증가할 때의 블러의 값을 나타낸 것이 그림 3.7이다. 이를 통해 거리에 따라 블러가 거의 선형적으로 증가하며 조리개가 클수록 블러의 증가 속도가 큰 것을 알 수 있다.

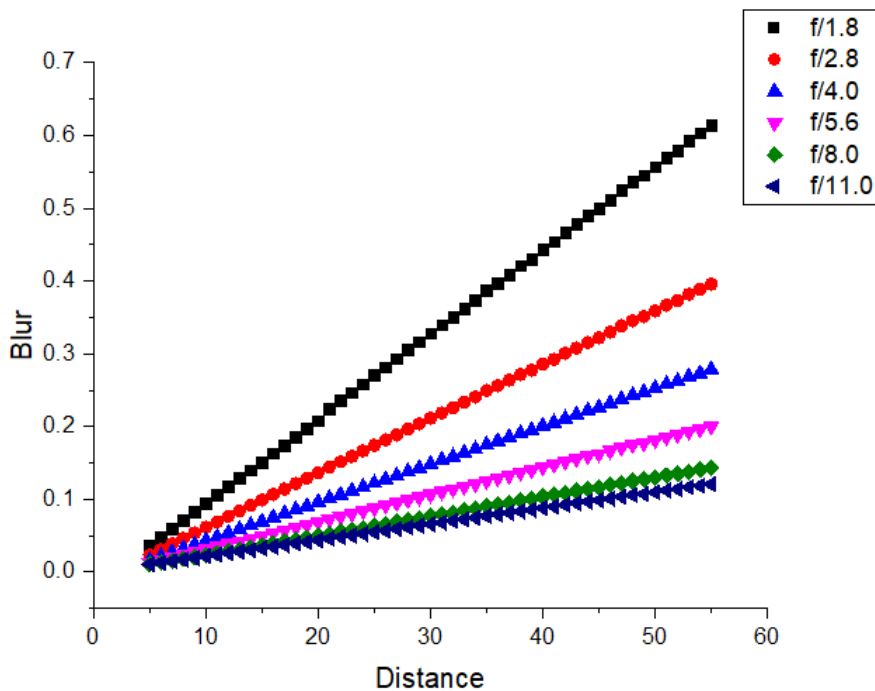


그림 3.7 시뮬레이션을 통한 거리에 따른 블러 값 추출

제 4 절 광학계 개발

이 절에서는 Code V 시뮬레이션을 이용하여 3.2절에서 설계된 파라미터 값을 충족하는 광학계를 설계한다. 설계된 광학계의 도면은 그림 3.8과 같다. 가변조리개와 유리 렌즈 5매, 적외선 차단 필터, CMOS Image Sensor (CIS)로 구성되어 있다. 화질을 높이기 위해서는 볼록렌즈와 오목렌즈를 결합한 멀티 렌즈로 설계해야 하며 FHD급을 설계할 때에는 적어도 5매 이상의 렌즈가 필요하여 전체 렌즈 매수는 5매로 설계 하였고 이미지 센서에서 노이즈를 일으키는 적외선을 차단하기 위하여 적외선 차단 필터를 렌즈 끝 단에 배치하였다. 광학계 제작 시 렌즈 경통을 조립한 뒤 가변조리개를 어셈블리를 하게 되는데 이때 두 부품 간의 정렬을 쉽게 하고 가변조리개의 구동을 위한 전선을 밖으로 빼내기 위하여 가변조리개를 가장 앞에 위치 시켰다. 또한, 보통 1/2.7 인치 이미지 센서를 사용하는 블랙박스 카메라는 초점 거리가 대략 3—4 mm로 본 연구에서 필요한 초점 거리는 2배 정도 길기 때문에 핀홀 렌즈의 형태에서 착안하여 앞 부분의 렌즈 직경을 뒷 부분보다 줄여 초점 거리가 8 mm가 되도록 맞추었다.

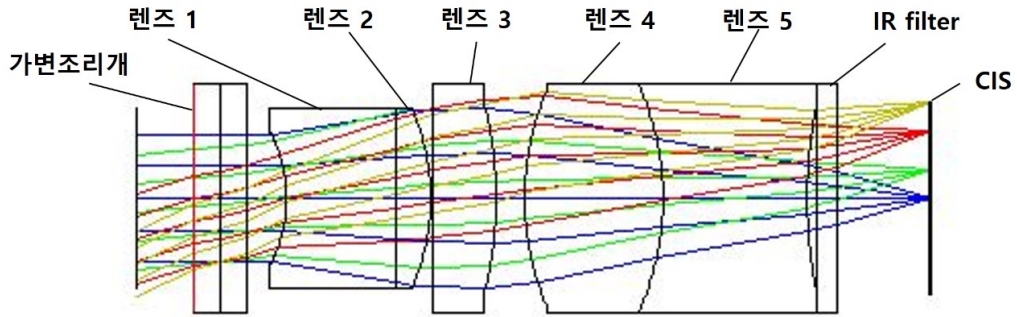


그림 3.8 Code V를 이용해 설계된 광학계

설계된 각 렌즈의 특성은 표 3.2와 같다.

표 3.2 설계된 렌즈 특성

	렌즈 1	렌즈 2	렌즈 3	렌즈 4	렌즈 5
두께 (mm)	3.44	1.20	2.20	4.80	5.00
좌측 곡률 (mm)	4.75	infinity	infinity	9.60	9.60
우측 곡률 (mm)	infinity	7.63	13.30	9.60	16.50
소재 모델명, 회사	BK7, SCHOTT	FK1, SCHOTT	NLAK14, SCHOTT	TAF1, HOYA	FDS90, HOYA

3.2절에서 설정한 광학 파라미터 값과 시뮬레이션으로부터 얻어진 광학 파라미터의 결과값을 표 3.3에 나타내었다. 전체 오차는 2% 내로 설계 되었으며, 이미지 센서 포맷은 이미지 센서를 원으로 커버 했을 때

그 원의 지름으로 표현되는 파라미터로 대체하여 설계 하였다.

표 3.3 설계값과 시뮬레이션 결과값 비교

파라미터	설계값	결과값	오차 (%)
이미지 센서 포맷 (이미지 서클 지름)	1/2.7 인치 (6.60 mm)	— (6.70mm)	1.52
화각	45°	45.23°	0.51
초점 거리	8 mm	8.04 mm	0.53
f/#	1.8, 4.0	1.83, 4.02	1.55, 0.54

렌즈의 성능을 평가하는 테스트로 총 3가지를 진행 하였다. 먼저 Modulation Transfer Function (MTF) 곡선을 통해 렌즈의 성능을 판단할 수 있다. 이 MTF 곡선은 검정과 흰색이 서로 번갈아 표시되는 라인 쌍(line pair)을 서로 구분된 개체로 볼 수 있는 렌즈의 능력을 뜻하며 밀리미터 당 라인 쌍을 단위로 한다. MTF 결과를 나타내는 그림 3.9에서 빨간색, 녹색, 파란색 곡선은 각각 광선이 이미지 센서의 0 필드, 0.7 필드, 1 필드로 들어가는 것을 뜻한다. 여기서 필드는 이미지 센서의 가운데를 0, 모서리 부분을 1로 정의한 위치 값이다. 또한 점선은 단면을 가로로 통과하는 광선이고 실선은 세로로 통과하는

광선을 뜻한다. 검은색 점선인 회절 한계는 렌즈의 이론적인 최대 분해능이다. 이 그래프는 120 lp/mm에서 10% 이상이므로 FHD급 해상도를 만족한다고 볼 수 있다.

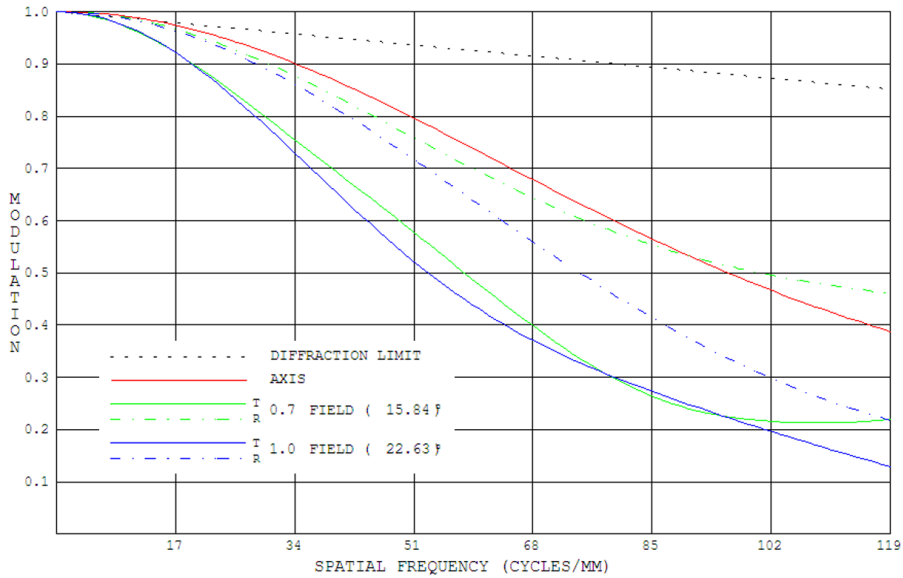


그림 3.9 설계된 광학계의 MTF 평가 결과

상대 조도(relative illumination)는 센서의 가장 바깥쪽인 1 필드의 조도가 센서 중앙인 0 필드 대비 상대적으로 어느 정도의 밝기를 가지는지 평가하는 지표이다. 0, 0.7, 1 필드에 대하여 상대 조도에 대한 결과는 표 3.4와 같다. 일반적으로 1 필드에서 60% 이상을 만족해야 하는데 본 연구에서 설계한 렌즈는 1 필드에서 65.3%로 기준을 충족한다.

표 3.4 설계된 광학계의 상대 조도 평가 결과

Field	Relative illumination (%)
0	100
0.7	86.8
1	65.3

왜곡(Distortion)은 렌즈의 중심을 통과한 빛과 외곽을 통과한 빛의 광학 배율이 조금씩 달라지게 되어 생기는 수차로, 원래 상의 크기보다 크게 혹은 작게 보이는 현상이다. MTF는 상의 선명도를 결정한다면 왜곡은 상의 전체적인 모양을 결정한다. 왜곡의 정도를 수치적으로 표현하면 다음과 같다.

$$Distortion(\%) = \frac{Actual\ distance - Predicted\ distance}{Predicted\ distance} \times 100\% \quad (3.16)$$

이때 왜곡이 양수이면 실패형(pincushion) 왜곡이라 하고 음수이면 원통형(barrel) 왜곡이라 한다. 일반적으로 $\pm 3\%$ 내의 왜곡은 비전 시스템에서 문제가 없다 [81]. 왜곡의 정도에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 3.10과 같다. 그림에서 검정색 십자선이 상의 원래 위치일 때 빨간색 실선은 실제로 상이 맺히면서 변형이 된 위치를 나타낸다. 결과 값은 -2.58% 로 적은 양의 원통형 왜곡이 일어남을 알 수 있다.

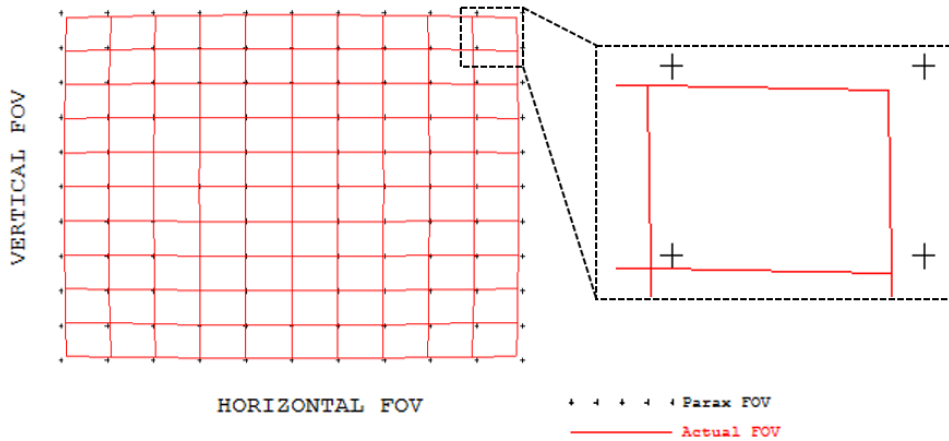


그림 3.10 설계된 광학계의 왜곡 평가

제 5 절 가변조리개와 렌즈의 단일 기판 집적화

이 절에서는 가변조리개와 렌즈를 웨이퍼 레벨에서 집적화 하여 가변조리개와 렌즈 간의 정렬 오차를 줄이고 간격 조절을 미세하게 컨트롤 할 수 있도록 한다.

3.5.1 웨이퍼 레벨의 렌즈 연구 동향

웨이퍼 레벨에서 제작 된 렌즈는 마이크로시스템에 쉽게 집적화 될 수 있어 활발히 연구되고 있는 분야이다. 대부분의 경우 폴리머와 유리가 렌즈의 재료로써 사용된다. 폴리머는 부피 대비 무게가 적고

공정이 쉽기 때문에 유리보다 더 많이 선택되는 경향이 있다. 하지만 폴리머는 기계적 강건함이 낮고 화학적 내구성이 떨어지며 수분에 취약하다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 유리로 제작된 렌즈들이 연구 되어 왔으며, 웨이퍼 레벨에서 제작하기 위하여 열 리플로우, 레이저 등이 사용된다.

표 3.5 열 리플로우 공정을 이용한 유리 블록 렌즈의 비교

	(a) [82]	(b) [83]	(c) [84]
렌즈 물질	유리 (Pyrex 7740)	유리 (Borofloat 33)	유리 (Borofloat 33)
제작 방법	열 리플로우	열 리플로우	열 리플로우
렌즈 지름	960 μm	793 μm	1900 μm
렌즈 새그 (sag)	43 μm	124 μm	42 μm
렌즈 형태	블록	블록	블록

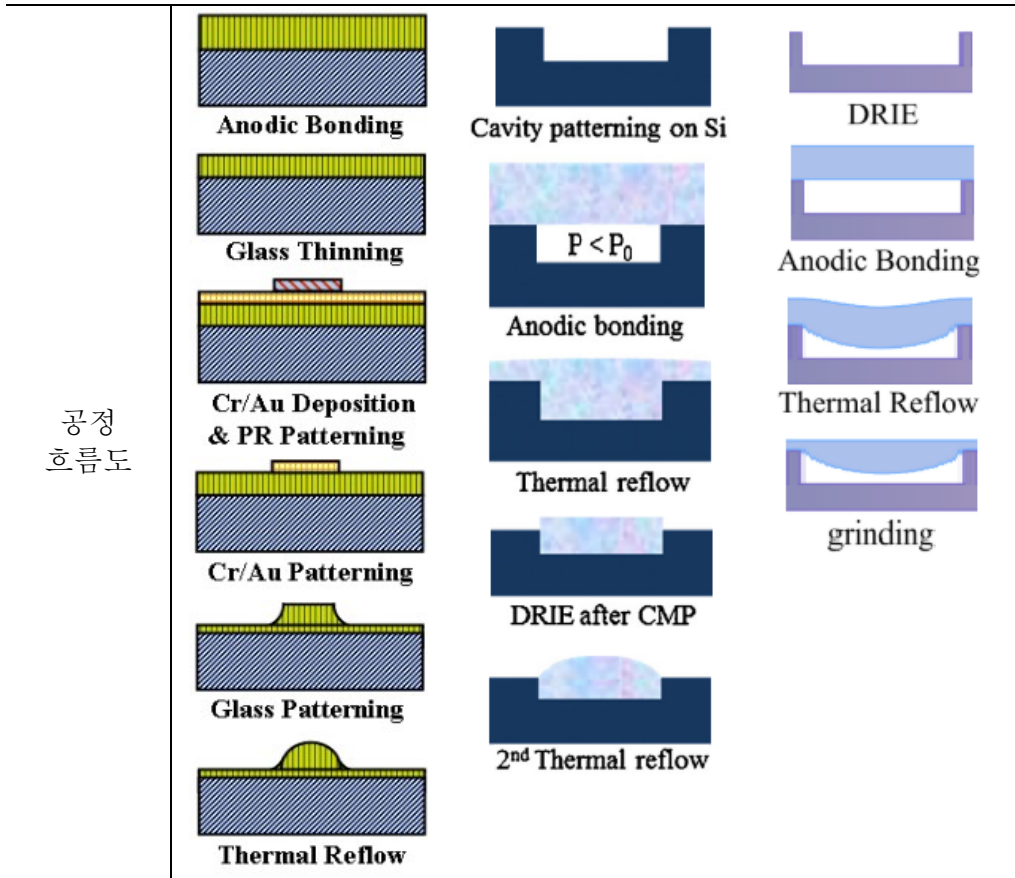


표 3.5는 열 리플로우 공정을 이용한 유리 볼록 렌즈를 비교한 표이다. 표 3.5의 (a) 렌즈는 유리와 실리콘 기판을 양극 접합하여 유리를 식각한 상태에서 열 리플로우를 하여 렌즈 형태를 만드는 방식이다. 공정이 매우 간단하지만 열 리플로우 공정 시 유리가 바깥쪽으로 흐르면서 지름에 대한 컨트롤이 어렵다는 단점이 있다. 표 3.5의 (b) 렌즈는 실리콘을 먼저 식각하고 유리를 양극 접합한 후 1차 열 리플로우를 진행함으로써 실리콘 공동 안에 유리를 채워 넣는다. 이후 유리를 식각하여 2차 열 리플로우를 진행하여 렌즈를 형성한다. 이

방식은 실리콘 공동 안에서 렌즈가 형성되기 때문에 지름의 컨트롤이 정확하지만 열 리플로우 공정을 2회 진행해야 하는 복잡성이 있다. 표 3.5의 (c) 렌즈는 (b) 렌즈와 유사하게 실리콘을 식각한 후 유리와 양극 접합 하였지만, 열 리플로우 시 시간을 조절하여 유리가 아래로 처지면서 생긴 볼록해진 면을 렌즈로 활용하였다. 이 방식은 열 리플로우 시 시간에 대한 렌즈의 새그(sag)가 선형적이거나 온도가 높을 때에는 시간에 대한 새그의 기울기가 매우 커 새그를 컨트롤 하기 어렵다는 단점이 있다.

오목렌즈는 카메라의 성능을 높이기 위해 볼록렌즈와 복합적으로 쓰이는 경우가 많이 있고 또한 레이저나 [85] LED의 빔 [86] 확장에도 쓰이는 등 많은 어플리케이션에 사용된다. 그럼에도 불구하고 웨이퍼 레벨의 유리 렌즈에 대한 선행 연구의 대부분은 볼록 렌즈에 대해 진행이 되어 왔고 오목렌즈에 대한 연구는 부족한 실정이다. 표 3.6에는 유리 오목렌즈 제작 방식에 관하여 비교한 것을 나타내었다.

표 3.6 유리 기판을 이용한 오목렌즈 공정 비교

	(a) [87]	(b) [88]
렌즈 물질	유리	유리 (Pyrex 7740)

제작 방법	레이저, 습식 식각	열 리플로우
렌즈 지름	50 μm	2008 μm
렌즈 새그 (sag)	1.25 μm	164 μm
렌즈 형태	오목	오목
공정 흐름도	<p>Laser Source</p> <p>Gold Film</p> <p>Etchant</p> <p>IPA / DI Water</p>	<p>Silicon etching</p> <p>Silicon etching (Another substrate)</p> <p>Anodic bonding(vacuum)</p> <p>Anodic bonding</p> <p>Thermal reflow</p>

표 3.6의 (a)는 레이저와 습식 식각을 이용한 방법으로, 레이저 패터닝을 이용하여 크레이터(crater)를 형성한 후 골드 필름을 하드 마스크로써 사용하여 습식 식각을 통해 오목렌즈를 형성한다. 이 방식은 오목렌즈 형성에 있어 공정이 간단하여 많이 쓰이지만, 밀리미터 단위의 지름을 가지는 렌즈의 제작이 어렵다는 단점이 있다. 표 3.6의 (b)는 열 리플로우 공정을 이용하여 오목렌즈를 제작했다. 두 장의 실리콘을 각각 식각하는데 한 장은 원이 완전히 관통되게 하였고 나머지 한 장은 공동을 형성 하였다. 식각된 두 장의 실리콘 기판과 한 장의 유리 기판을 진공 상태에서 양극 접합 하였고 이후 열 리플로우 공정에서 유리가 아래쪽으로 흐르면서 오목렌즈를 형성하였다. 이 공정 방법은 두 장의 실리콘 기판을 이용함으로써 지름 컨트롤이 잘 될 수 있도록 하였지만 공정 과정이 복잡한 편이다.

3.5.2 웨이퍼 레벨의 오목렌즈 설계 및 실험

기존의 유리 오목렌즈 제작 방법을 보완하여 새로운 방식으로 오목렌즈를 제작 하였다. 이전의 열 리플로우 방식을 이용한 렌즈 제작 방식과 같이 식각된 실리콘과 유리 기판을 양극 접합 하여 열 리플로우를 진행하지만, 양극 접합 시 진공이 아닌 대기압 상태에서

진행하여 열 리플로우 시 공동 안의 기체가 팽창하면서 오목렌즈를 형성한다. 이러한 방식은 실리콘과 유리 기판, 각 한 장씩으로 얼라인 없이 한 번 만의 사진 공정 만을 진행하고, 열 리플로우 시 진공으로 만들 필요가 없다는 장점을 가지고 있다.

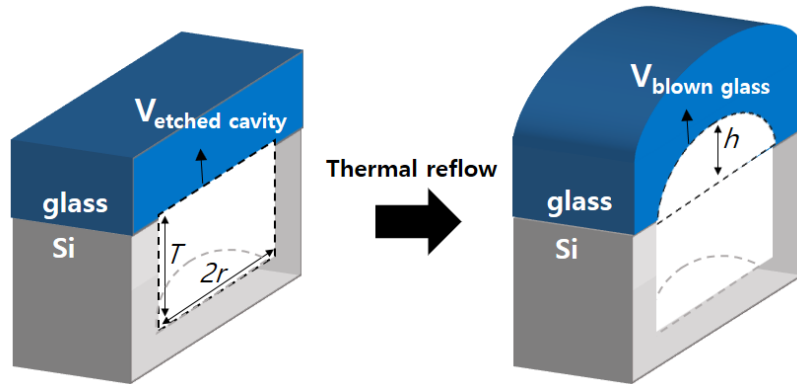


그림 3.11 공동 내의 기체 팽창으로 인한 오목 형태 구현 과정

그림 3.11은 온도가 증가함에 따른 공동 내의 기체의 팽창을 나타낸 것이다. 만약 유리 기판과 실리콘 기판의 접합을 진공 상태에서 진행한다면 열 리플로우 시 유리가 아래 방향으로 흐르게 된다. 반대로 대기압 상태에서 유리와 실리콘을 접합하여 열 리플로우를 진행한다면 유리가 위 방향으로 솟아 아래에서 보면 오목한 렌즈 형태를 가지게 된다. 일정한 압력에서 기체의 부피가 비례한다는 샤를의 법칙으로부터 식 (3.16)을 유도할 수 있다.

$$V_{blown\ glass} = V_{etched\ cavity} \times \left(\frac{Reflow\ temp.}{Anodic\ bonding\ temp.} - 1 \right) \quad (3.16)$$

식 (3.16)의 부피를 렌즈의 새그(h), 반지름(r), 실리콘 공동(T)의 높이로 대체하면 식 (3.17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{6}h^3 + \frac{1}{2}r^2h = r^2T \times \left(\frac{Reflow\ temp.}{Anodic\ bonding\ temp.} - 1 \right) \quad (3.17)$$

그림 3.12는 오목렌즈 공정 과정을 나타낸 것이다. 렌즈의 새그를 크게 하려면 실리콘 공동의 부피를 크게 해야 하므로 1 mm 두께의 두꺼운 실리콘 웨이퍼를 사용했다. 유리 웨이퍼는 실리콘과 비슷한 열팽창계수를 가지는 borosilicate glass (BSG)를 사용하였다. 실리콘에 공동을 만들기 위해 300 nm의 알루미늄을 증착하여 사진 공정을 통해 하드 마스크를 만든 후 deep reactive ion etching (DRIE)를 했다. 이후 대기압 상태에서 실리콘과 유리 기판을 양극 접합한다. 이때 척(chuck)의 온도는 400℃, 기판 사이의 전압은 800 V를 가하며 10분 동안 진행 하였다. 접합 된 기판은 850℃로 설정된 퍼니스(furnace) 안에서 30분 동안 열 리플로우 공정을 거쳐 렌즈 형태가 완성이 되며 이후 렌즈의 바깥쪽을 평평하게 하기 위하여 CMP (Chemical Mechanical Planarization)를 진행 한다.

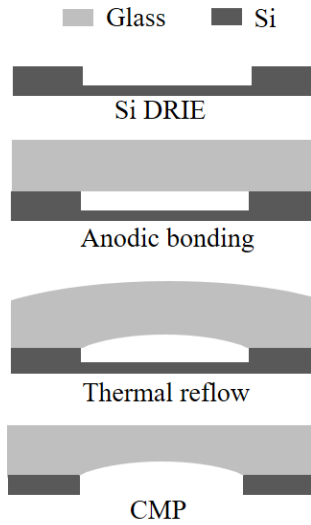


그림 3.12 오목렌즈의 공정 흐름도

그림 3.13은 실리콘 공동의 깊이에 따른 렌즈의 프로파일을 depth measurement (Olympus, STM6)를 이용하여 측정한 결과이다. 실리콘의 공동 깊이의 평균은 검은색이 550 μm (실제 평균 552.3 μm), 녹색이 600 μm (실제 평균 601.8 μm), 파란색이 650 μm (실제 평균 657.36 μm), 자주색이 700 μm (실제 평균 705.88 μm)이다. 실리콘 공동의 깊이가 깊을수록 간혀 있던 기체의 부피가 더 크기 때문에 렌즈의 새그가 더 큰 것을 알 수 있다.

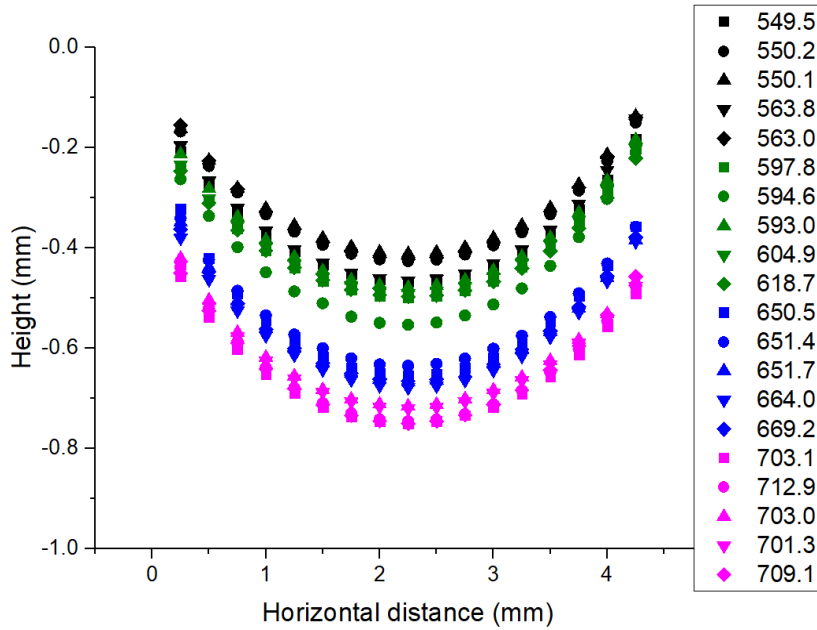


그림 3.13 실리콘 공동 깊이에 따른 렌즈의 프로파일

그림 3.14는 그림 3.13의 실험 결과를 공동 깊이에 대한 렌즈의 새그 높이로 나타낸 후 선형으로 근사 시킨 것이다. 3.4절에서 설계한 렌즈군의 첫번째 렌즈가 567 μm 의 새그를 가지는데 이를 만족하기 위해서는 실리콘 공동의 높이가 620 μm 가 되도록 식각을 하면 될 것으로 예상 된다.

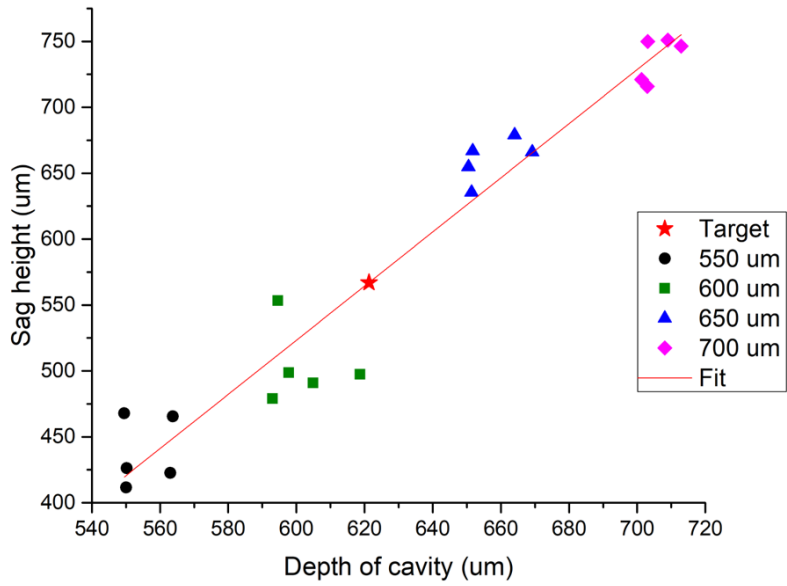


그림 3.14 실리콘 공동 깊이에 따른 렌즈의 새그

3.5.3 집적화 공정 및 결과

그림 3.15는 설계한 오목렌즈와 가변조리개를 단일 기판에 집적화 하는 공정을 나타낸 흐름도이다. 그림 3.12의 흐름도와 마찬가지로 4 mm 두께의 BSG 유리 기판과 1 mm 두께의 실리콘 기판을 이용해 오목렌즈를 형성한다. 300 nm 두께의 알루미늄을 하드 마스크로써 이용하여 실리콘 DRIE를 진행한다. 이때 식각되는 공동의 지름은 렌즈의 지름인 4.5 mm이고 공동의 깊이는 5.1절의 실험을 통해 얻어진 620 μm 로 하였다. 식각된 실리콘 기판과 BSG 유리 기판은 대기압

하에 400℃, 800 V가 가해진 상태에서 양극 접합하고 850℃에서 30분동안 열 리플로우 공정을 진행하여 유리를 오목한 모양으로 변화시킨다. 이후 CMP 공정을 통해 위쪽 유리 기판을 평평하게 하고 아래쪽 실리콘도 일부 제거하여 렌즈 부분이 드러나도록 한다. 남은 실리콘 부분은 가변조리개의 유리 하판을 양극 접합 시킬 매개체 겸 렌즈와 가변조리개 사이의 간격을 조절하는 스페이서로써 활용 된다. 이 실리콘과 유리 기판 (Pyrex 7740)의 양극 접합을 통해 가변조리개의 하판을 만들고 ITO를 증착한 후 2.2절과 마찬가지로 가변조리개 형성을 위한 동심원 형태로 ITO를 식각을 하게 된다. 이후 액정의 정렬을 위한 폴리이미드를 증착하고 러빙 과정을 거치게 된다. 가변조리개의 상판인 다른 유리 기판도 ITO를 증착하고 조리개 외의 부분으로 들어오는 빛을 차단하기 위해 크롬을 패터닝 하게 된다. 이후 하판과 마찬가지로 폴리이미드의 증착 및 러빙 공정이 수행 된다. 그 위에 스페이서가 섞인 실런트를 도포하여 두 기판을 합착하고 다이싱을 한 후 액정을 주입하고 편광 필름을 부착하여 완성 한다.

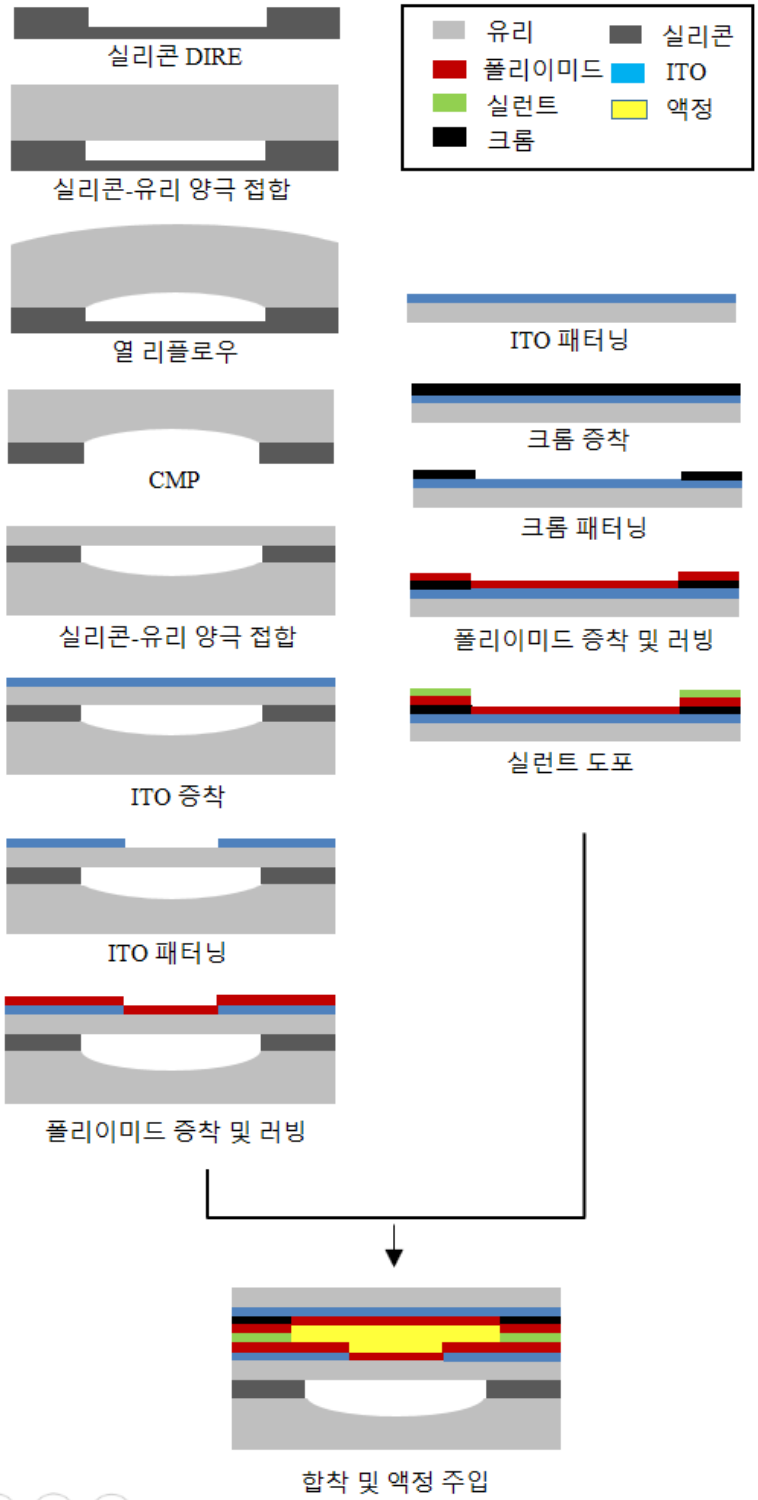


그림 3.15 가변조리개와 오목렌즈의 단일 기판 집적화 공정 흐름도

그림 3.16은 오목렌즈까지 제작된 기판의 사진이다.

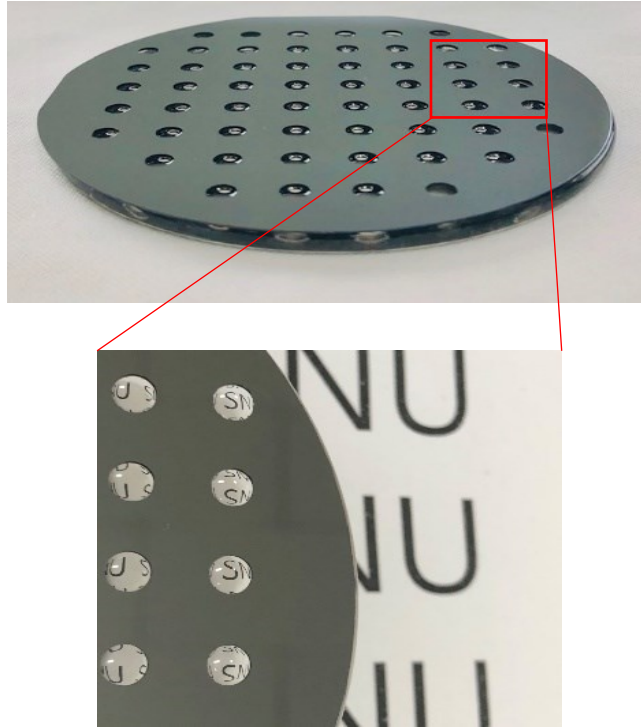


그림 3.16 웨이퍼 레벨의 오목렌즈

오목렌즈에서 실리콘의 공동 높이와 새그 값의 설계값과 측정값은 표 3.7과 같다. 공동 높이는 1% 미만의 오차를 가지며 렌즈 새그의 경우 8.38%의 오차를 가지는 것을 확인 하였다. 그림 3.17은 렌즈의 프로파일을 depth measurement (Olympus, STM6)를 이용하여 측정한 것으로 가로 축의 렌즈 지름에 따른 새그 높이를 나타낸다.

표 3.7 실리콘의 공동 높이 및 렌즈의 새그 높이 결과

	설계값 (μm)	측정값 (μm)	오차 (%)
공동 높이	620	624.32	0.70
렌즈 새그	567	614.50	8.38

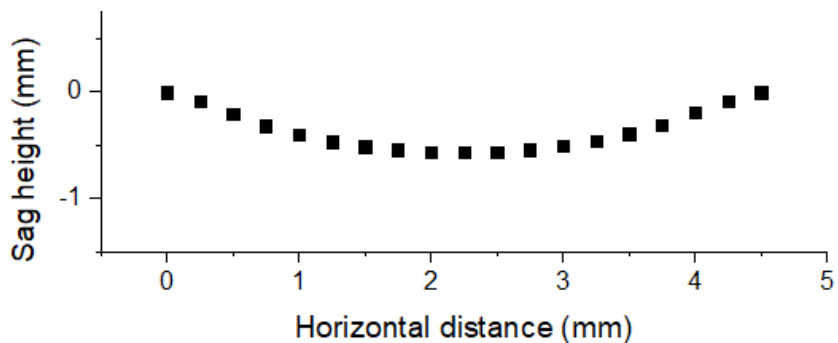


그림 3.17 제작한 오목렌즈의 프로파일

렌즈의 표면 거칠기는 stylus profiler (DectakXT, Bruker)을 사용하여 측정하였고 산술 평균 거칠기를 이용해 나타내었다. 산술 평균 거칠기는 일정 구간(L)의 거칠기 곡선($f(x)$)에서 중심선을 기준으로 모든 구간을 더해 길이(L)로 나눈 것이다. 길이 $100\ \mu\text{m}$ 에 대해 측정 결과 $26.1\ \text{nm}$ 가 측정 되었다. 가시광선 파장($400\sim 800\ \text{nm}$)에서 표면 거칠기 R_a 가 파장의 $1/4$ 보다 클 때 표면에서 빛의 산란이 일어나는데, 개발한 렌즈의 경우 파장의 $1/15$ 보다 작아 산란으로 인한 광손실이

발생하지 않음을 알 수 있다.

그림 3.18은 오목렌즈와 가변조리개가 단일 기관 집적화된 칩의 사진이다. 칩 하나의 크기는 $10 \times 10 \times 5.5 \text{ mm}^3$ 이고 렌즈의 지름은 4.5 mm이며 전압 구동 시 각 조리개의 크기는 4.4 mm (f/1.8)와 2.0 mm (f/4.0)를 가진다.

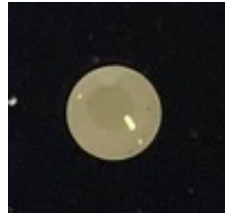


그림 3.18 오목렌즈와 가변조리개가 집적된 칩 사진

오목렌즈와 가변조리개의 정렬 오차는 정렬 키(alignment key) 기준 $2.32 \mu\text{m}$ 로 측정 되었다. 이는 기존 생산되는 렌즈와 타 부품간의 정렬 오차가 $\pm 20 \mu\text{m}$ 인 것에 비해 매우 적은 수치이다.

오목렌즈와 단일화된 가변조리개의 동작 전압과 응답 시간은 2.3절의 측정 방법과 동일하게 측정 하였다. 가변조리개에 인가된 입력 전압이 커짐에 따라 빛의 투과도가 줄어들게 되고 가변조리개 아래에 있는 포토다이오드로 들어가는 빛도 줄어들게 되면서 포토다이오드와 직렬 연결 된 저항에 걸리는 출력 전압도 줄어들게 된다. 이때 출력

전압의 변화를 0부터 100%까지의 투과도로 표현하여 그림 3.19에 나타내었다. 그래프를 통해 동작 전압은 2.84 V임을 확인할 수 있었다.

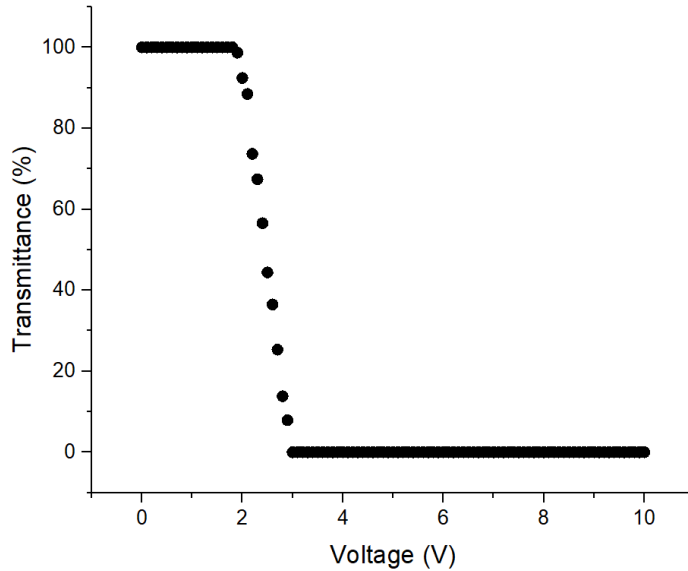


그림 3.19 오목렌즈와 단일화된 가변조리개의 전압—투과도 곡선

그림 3.20은 오목렌즈와 단일화된 가변조리개의 응답 시간 그래프이다. 투과도의 10%에서 90%로 변화할 때와 90%에서 10%로 변화할 때를 각각 상승 시간과 하강 시간이라고 할 때 상승 시간은 7.80 ms, 하강 시간은 1.76 ms임을 확인하였다.

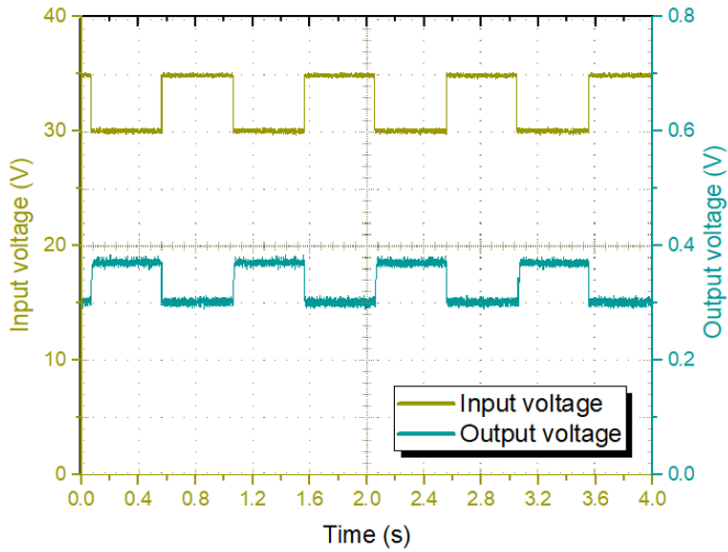


그림 3.20 오목렌즈와 단일화된 가변조리개의 응답 시간 측정 곡선

공정 후 렌즈 새그 값의 오차로 인해 곡률이 4.31 mm로 설계값인 4.75 mm 대비 9.3% 오차가 발생하였다. 또한 렌즈 두께에 있어서도 2.3% 오차가 발생하였다. 이에 Code V를 통한 렌즈 시뮬레이션으로 다른 렌즈의 곡률과 두께를 조금씩 수정하여 FHD급 화질에 맞도록 하였다. 표 3.8에서 수정 전은 3.4절에서 설계된 값이며 수정 후의 렌즈 1은 단일 기관 집적화 공정을 통해 측정된 값으로 렌즈 2와 렌즈 3만을 수정하여 전체 FHD값을 가지도록 하였다.

표 3.8 실제 렌즈 측정값을 토대로 재 설계한 렌즈의 특성

수정	렌즈 1		렌즈 2		렌즈 3		렌즈 4		렌즈 5	
	전	후	전	후	전	후	전	후	전	후

두께 (mm)	3.44	3.52	1.20	1.33	2.20	0.90	4.80	5.00
좌측 곡률 (mm)	4.75	4.31	infinity		infinity		9.60	9.60
우측 곡률 (mm)	Infinity		7.63	6.68	13.30	14.65	9.60	16.50
소재 모델명, 회사	BK7, SCHOTT		FK1, SCHOTT		NLAK14, SCHOTT		TAF1, HOYA	FDS90, HOYA

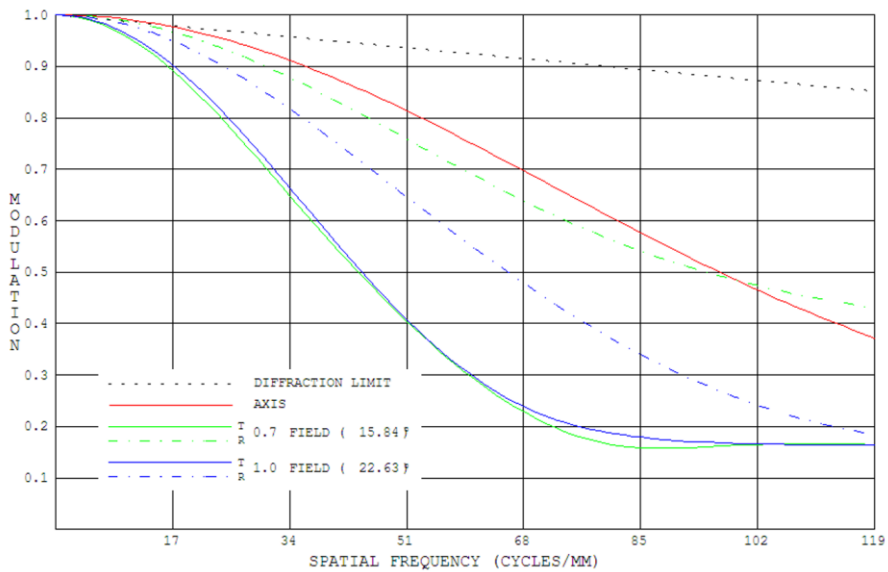


그림 3.21 재설계한 광학계의 MTF 평가 결과

표 3.8에 대한 렌즈를 토대로 Code V를 이용하여 3.4절에서 진행했던 3가지 테스트를 통하여 성능을 확인하였다. 먼저 그림 3.21은 MTF 시뮬레이션 결과이다. 3.4절에서 설계하였던 렌즈군과 비교할때 68lp/mm에서 13% 가량 낮아진 것을 확인할 수 있다. 하지만

120lp/mm에서는 오히려 더 높아진 것을 보이며 10% 이상이므로 FHD급 해상도를 만족한다고 볼 수 있다.

표 3.9는 상대 조도에 대한 결과이다. 1 field에서 상대 조도값은 75.8%로 60% 이상 기준을 만족하며 3.3절에서 설계한 렌즈보다 10.5% 증가함을 보인다.

표 3.9 재설계한 광학계의 상대 조도 평가 결과

Field	Relative illumination (%)
0	100
0.7	94.7
1	75.8

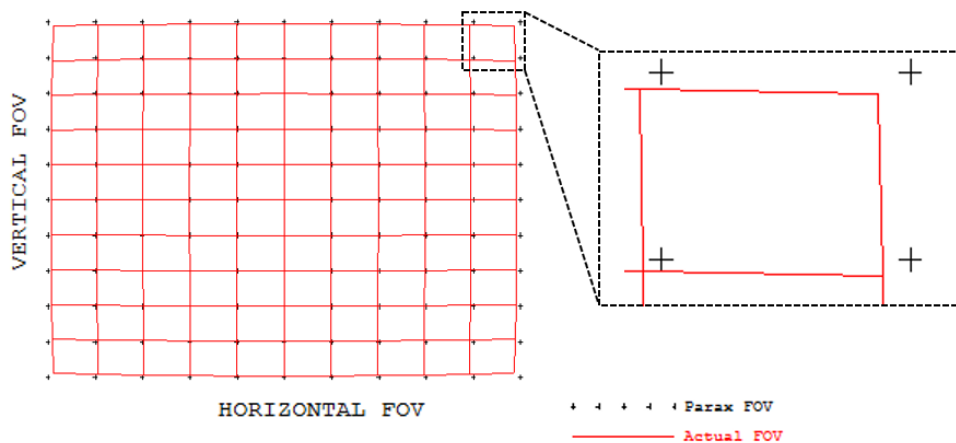


그림 3.22 재설계한 광학계의 왜곡 평가

마지막으로 왜곡에 대한 시뮬레이션 평가 결과를 그림 3.22에 나타내었다. -2.30% 로 원통형 왜곡이 일어났지만 비전 시스템에 문제가 되지 않는 적은 양의 왜곡이며 3.3절에서 설계한 렌즈보다 0.28% 줄어들어 왜곡이 완화됨을 알 수 있다.

설계된 광학계의 3가지 성능 테스트를 통해 FHD급 화질을 가지며 광량과 왜곡에 있어 문제가 없는 렌즈 설계가 잘 되었음을 확인하였다. 이를 통해 표 3.8과 같이 두 번째 렌즈와 세 번째 렌즈의 두께와 곡률을 수정하고, 나머지 렌즈는 그대로 사용하여 제작된 단일 기관의 가변조리개와 오목렌즈와 어셈블리를 하면 FHD 해상도의 영상을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

제 6 절 어셈블리

3.4절에서 설계한 광학계를 구현하기 위해 그림 3.23과 같이 CAD를 이용하여 카메라 경통과 내부 부품에 대한 도면을 작성하고 제작하였다. 실제 어셈블리에 있어서는 3.5절에서 제작한 단일 기관에서 집적화된 가변조리개와 렌즈를 사용하지 않고 렌즈 제작 회사로부터 렌즈를 제작하였으며 2장에서 제작한 가변조리개를 어셈블리 하였다.

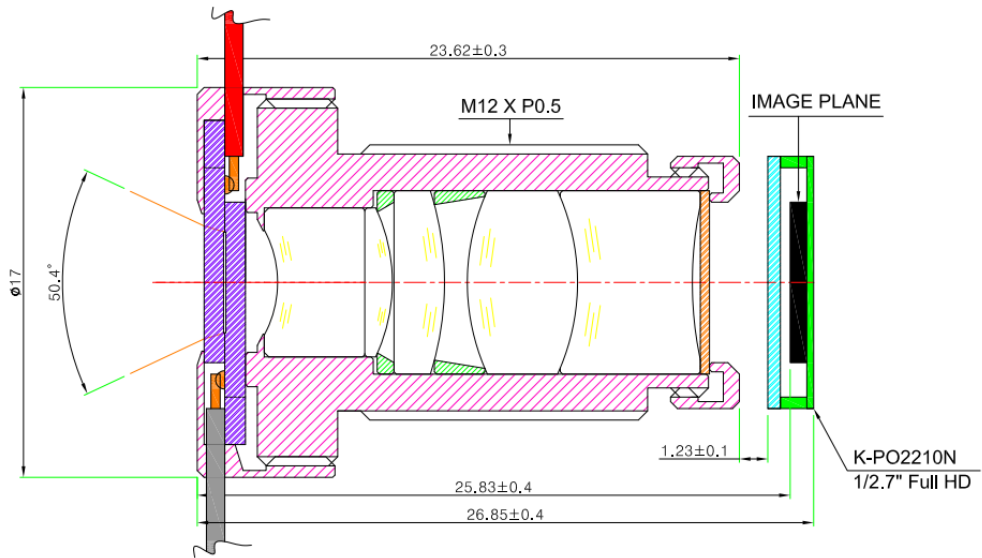


그림 3.23 CAD를 이용하여 설계된 경통의 전체 도면

그림 3.23에서 카메라의 가장 앞단에 위치한 것은 가변조리개를 고정하기 위한 링 형태의 구조물로서 그림 3.24와 같이 제작을 하여 가변조리개를 장착하였다. $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 크기의 가변조리개의 대각 길이를 고려하여 제작된 이 구조물에 가변조리개를 장착한 후, 구조물 측면에 있는 0.8 mm 홀로 가변조리개의 전원선을 빼내었다. 이 구조물의 모서리에 홈을 만들어 1차로 가변조리개를 정렬 시킨 후 가변조리개가 가운데에 정확히 위치할 수 있도록 현미경을 보며 2차로 정렬한 후 에폭시를 이용하여 고정하였다. 링에는 가변조리개가 카메라 경통과 쉽게 체결되는 동시에 정렬이 될 수 있도록 나선홀이 형성되어 있어 경통의 앞단에 돌려 끼우면 광학계의 광축에 맞게 조립된다



그림 3.24 가변조리개와 링 구조물과의 어셈블리

그림 3.23에서 렌즈와 적외선 차단 필터, 경통, 스페이서는 (주)ROC를 통하여 제작 하였다. 렌즈는 곡률과 두께를 1차로 깎는 곡면 형성 공정, 곡률과 두께를 미세하게 그라인딩 하고 광을 내는 연마 공정, 렌즈의 외경을 가공하고 광축을 점검하는 센터링 공정, 렌즈의 표면을 보호하고 투과율을 높이면서 반사율은 낮추기 위한 코팅 공정을 거쳐 제작되었다. 렌즈들을 일렬로 위치시키기 위한 경통은 그림 3.23과 같이 M12(12pi) 규격에 5매 렌즈의 전체 길이, 각 렌즈의 지름 및 두께를 고려하여 제작 되었고 경통의 안쪽 지름의 공차는 ± 0.03 mm을 가지도록 하였다. 렌즈들 간 거리를 일정하게 유지 시켜 주는 스페이서는 2번 렌즈와 3번 렌즈 사이와 3번 렌즈와 4번 렌즈 사이에 위치하며 스페이서의 두께 공차는 ± 0.02 mm 이다.

그림 3.25는 제작된 경통과 그 안의 부품이다. 렌즈 표면의 이물, 얼룩 등 외관 상태를 검사하는 과정을 진행한 후 조립 공정이

진행되었다. 경통에 가장 앞단의 렌즈부터 조립되며 차례대로 렌즈 1, 렌즈 2, 첫 번째 스페이서, 렌즈 3, 두 번째 스페이서, 렌즈 4, 렌즈 5, 적외선 차단 필터를 조립한 후 마지막 링을 홈에 맞게 돌려서 고정하였다. 렌즈 제작 시 지름과 두께를 정밀 공정 수준인 ± 0.02 mm의 공차를 가지도록 제작하였기 때문에 렌즈들을 경통에 조립 시 셀프 정렬(self-aligned)이 될 수 있다. 경통의 바깥쪽에는 나선홀이 형성되어 있어 이미지 센서 보드에 쉽게 체결 된다. 경통을 조립한 후에는 앞서 조립한 가변조리개를 경통의 앞단에 체결하였다. 전체 경통 조립이 완료된 후에는 상단의 가변조리개와 하단의 기구물이 풀리거나 흔들리지 않도록 고정하기 위하여 UV 경화 본드를 사용해 경화 작업을 거쳤다.



그림 3.25 카메라 광학계의 렌즈부 부품. 좌측부터 순서대로 경통, 렌즈 1, 렌즈 2, 1번 스페이서, 렌즈 3, 2번 스페이서, 렌즈 4, 렌즈 5, 적외선 필터, 하단의 고정을 위한 기구물

가변조리개의 구동을 위하여, 그림 3.26과 같이 노트북의 USB

포트로 입력 전원을 공급 받는 아두이노 보드의 출력 전압을 가변조리개에 연결하였다. 아두이노 보드에서 두 전원 출력 핀을 가변조리개의 상판과 하판의 전극 패드로 각각 연결하였고 두 핀 사이의 전압이 0 V(off)와 5 V(on)를 번갈아 가며 출력되도록 코딩을 하여 가변조리개의 크기가 변화하도록 하였다.

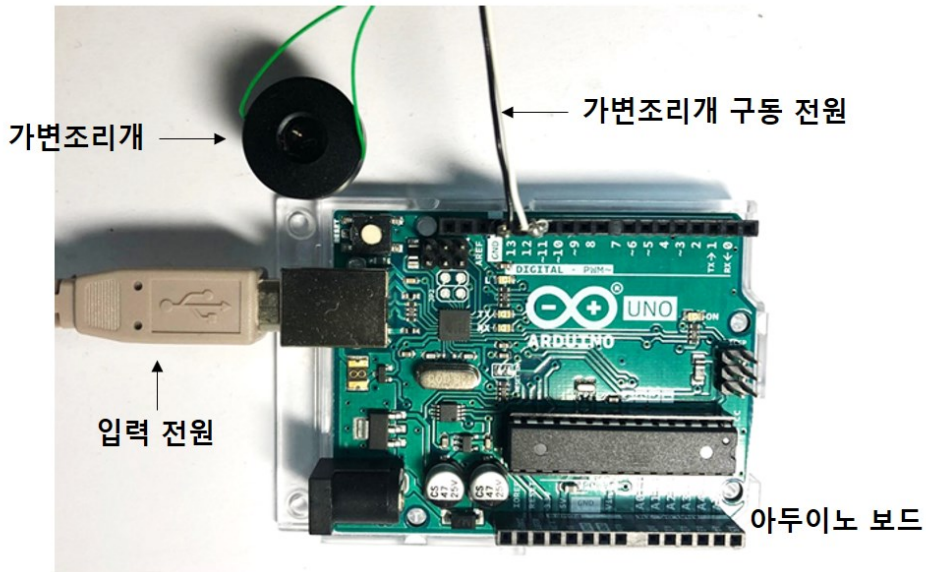


그림 3.26 아두이노로부터 동작 전압을 받는 가변조리개

이미지 센서에서 영상을 디지털 신호로 변환한 후 이를 카메라 메인보드로 전달하는 기능을 하는 이미지 센서 보드는 카메라 메인보드에 연결되어 이미지 센서로부터 받은 이미지 데이터를 Inter-

Integrated Circuit (I2C) 방식의 컨트롤 방식으로 전송한다. 이미지 센서 보드는 제작한 렌즈 경통이 마운트 될 수 있는 M12 규격의 DK SEMICON의 IB-K-Po2210N 모델을 사용하였고 이 이미지 센서 보드 안에는 1/2.7 인치 FHD급 CMOS 이미지 센서인 Pixel plus의 CMOS 이미지 센서 K-PO2210N 모델이 포함되어 있다. 그림 3.27은 이미지 센서 보드를 장착 시킬 수 있는 카메라 메인보드이며 DK SEMICON의 PP-DEB-009 모델을 사용하였다. 그림 3.27의 카메라 인터페이스 커넥터에 경통이 마운트 된 이미지 센서 보드를 연결할 수 있다.

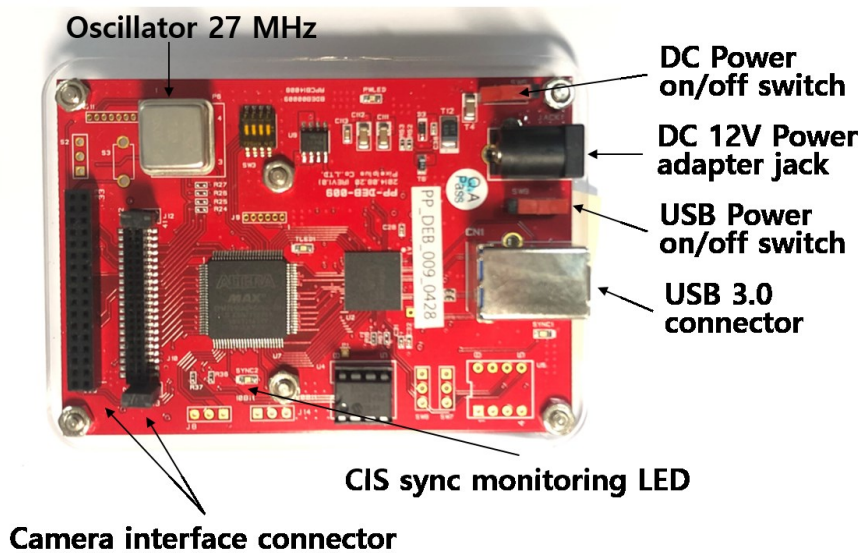


그림 3.27 카메라 메인 보드

그림 3.28은 가변조리개, 렌즈 경통, 이미지 센서, 카메라 메인보드, 아두이노 보드가 모두 어셈블리된 것으로 가변조리개가 부착된 렌즈 경통을 이미지 센서 보드에 마운트 한 후 카메라 메인 보드에 장착시킨 다음 가변조리개의 구동을 위한 입력 전원선을 아두이노 보드에 연결하여 완성한다. 카메라 메인보드와 아두이노 보드를 노트북 USB 포트를 통해 구동 시키게 되면 가변조리개가 동작하면서 실시간으로 피사체 심도가 서로 다른 이미지를 얻을 수 있게 된다.

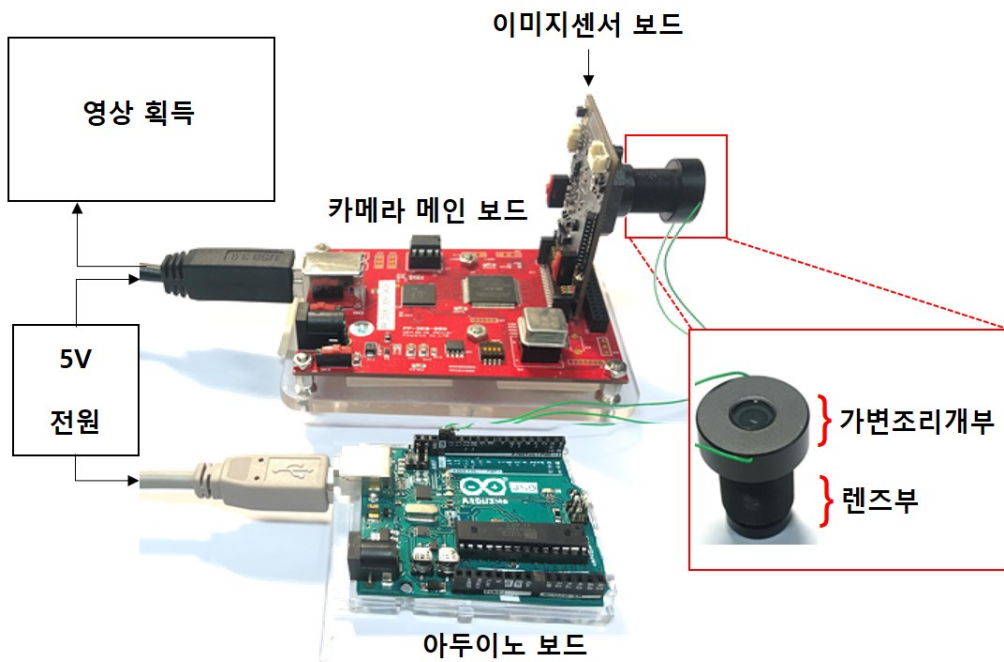


그림 3.28 가변조리개가 어셈블리된 렌즈 경통의 메인보드 체결 및 전원 연결

제 4 장 거리 측정 실험

제 1 절 실험 환경 구축

3장에서 개발한 거리 센서를 이용하여 실제 거리를 측정하는 실험을 진행하였다. 피사체와의 실제 거리를 알기 위해 Velodyne의 32채널 라이다를 활용하였는데, 회전 모터를 이용하여 360° 촬영이 가능하며 80—100 m의 거리 범위에서 ± 2 cm의 정확도를 가지고 있고 때문에 라이다의 데이터를 실제 참 값인 ground truth (GT)로 볼 수 있다 [89]. 그림 4.1은 서울대학교 지능형 자동차 연구실의 자율주행차로 차량 상단에 라이다 2개가 장착되어 있어 이를 활용하였고, 내부 대시보드에 거리 센서를 설치 하고 영상 획득을 위한 보조 장비(가변조리개 전원 보드, 노트북)를 세팅하였다. 라이다로부터 각 장면마다 3D 포인트 클라우드 데이터로 거리 정보를 획득하였고, 동시에 거리 센서로부터 조리개가 f/1.8과 f/4.0일 때의 피사체 심도가 서로 다른 두 이미지를 획득 하였다.



그림 4.1 라이다가 장착된 자율주행차량(좌)과 거리 센서 설치 환경(우)

거리 측정을 실험하기에 앞서 3차원 공간상의 점들이 카메라를 통해 2차원의 이미지 평면에 투영될 때 영향을 주는 내부, 외부의 요인들을 정량적으로 정립하고 이를 보정해주는 과정인 칼리브레이션(calibration)을 위한 촬영을 진행한다. 칼리브레이션은 내부 파라미터와 외부 파라미터로 나누어서 진행하는데, 내부 파라미터는 영상 좌표와 카메라 좌표 간의 관계를 의미하며 렌즈 중심에서 이미지 센서까지의 거리 값인 초점 거리, 카메라 렌즈의 광학축이 이미지 센서와 만나는 점인 주점, 이미지 센서의 기울기를 나타내는 비대칭계수를 포함한다. 내부 파라미터를 알기 위해서는 체커보드를 이용한 복수 개의 이미지를 사용하는 방법이 가장 보편화 되어 있다 [90, 91]. 그림 4.2와 같이 체커보드를 여러 각도와 위치에서 촬영한 후 패턴의 교차점을 검출하여 내부 파라미터를 미지수로 한 선형

방정식 풀이를 통해 카메라 내부의 좌표와 영상에서의 좌표를 매칭하고 이미지의 모서리 쪽에 생기는 왜곡을 보정하였다.

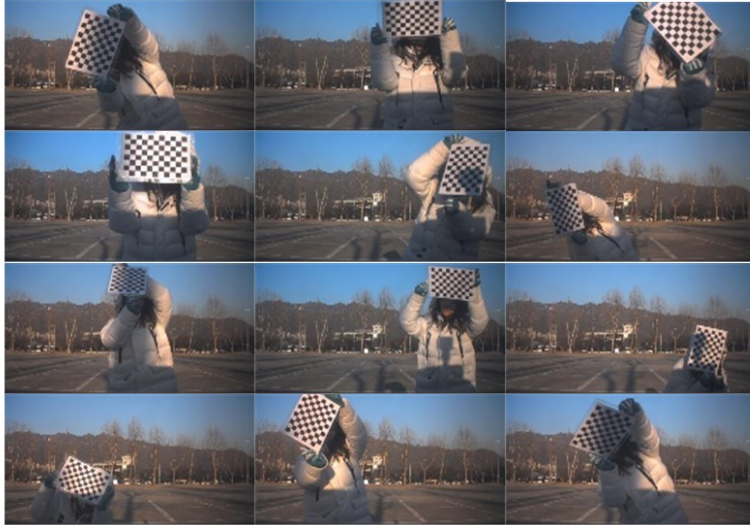


그림 4.2 카메라의 내부 파라미터 칼리브레이션을 위한 촬영

외부 파라미터는 2차원의 카메라 좌표계와 3차원의 세계 좌표계 사이의 관계를 나타내는데 카메라의 회전행렬과 이동 변위 벡터로 구성되어 있으며 카메라의 위치에 영향을 받는다 [92]. 카메라의 좌표계와 라이다의 좌표계가 일치 해야 라이다에서 얻은 거리 정보를 레퍼런스로 쓸 수 있기 때문에 그림 4.3과 같이 색깔이 있는 폼보드의 위치를 다양하게 촬영하였고 이후 거리 센서와 라이다 간의 좌표 매칭을 진행 하였다.



그림 4.3 카메라의 외부 파라미터 칼리브레이션을 위한 촬영

제 2 절 영상 획득

다양한 환경에 대한 데이터를 확보하기 위하여 차량의 정지 상황과 주행 상황으로 구성된 407개의 장면을 피사계 심도가 다른 영상 2장씩 전체 814장의 영상을 촬영하였다.

먼저 정지 상황은 300개의 장면으로 구성하였다. 2 m부터 11 m까지 1 m 단위로 촬영한 근거리 범위, 11 m부터 50 m까지 1 m 단위로 촬영한 중거리 범위, 55 m부터 70 m까지 5 m 단위로 촬영한 원거리 범위로 나누어 촬영하였다. 근거리는 차량 3대와 보행자 1명의 조합으로 된 72개의 장면에 대하여 가변조리개를 작동시켜 피사계

심도가 다른 영상 2장씩 총 144장을 촬영하였다. 그림 4.4는 근거리 범위에서 촬영한 영상의 예시이다.



그림 4.4 1차선 차량은 9 m, 2차선 차량은 4 m, 3차선 차량은 3 m 위치에서의 f/1.8 사진(좌)과 f/4.0 사진(우)

중거리 범위는 근거리 범위와 마찬가지로 차량 3 대와 보행자 1명의 조합을 이루어 장면을 구성하였으며 216개의 장면에 대하여 피사체 심도가 다른 영상 2장씩 총 432장을 촬영하였다. 그림 4.5는 중거리 범위에서 촬영한 영상의 예시이다.

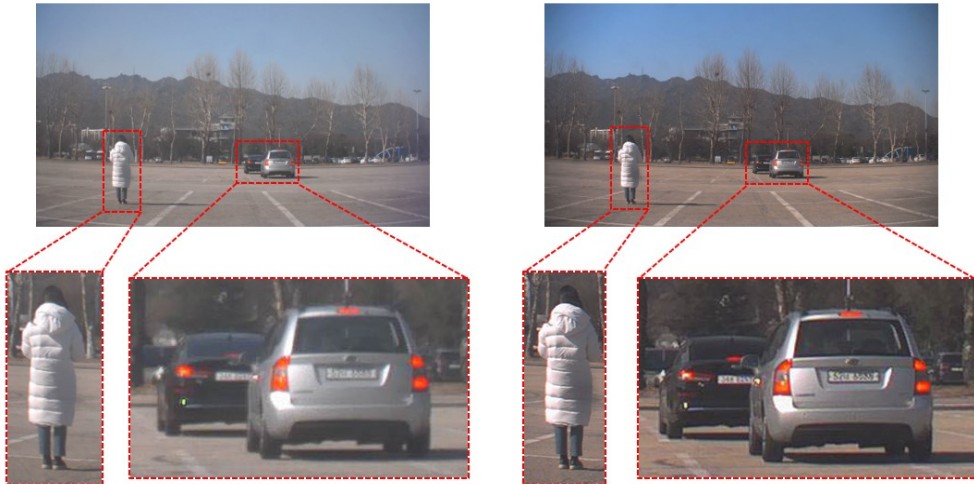


그림 4.5 사람은 10 m, 차량은 3차선에서 각각 30 m, 40 m 위치에서의 f/1.8 사진(좌)과 f/4.0 사진(우)



그림 4.6 1차선 차량은 60 m, 2차선 차량은 55 m, 3차선 차량은 70 m 위치에서의 f/1.8 사진(좌)과 f/4.0 사진(우)

원거리 범위에서는 차량 3대를 조합하여 12개의 장면에 대해 24장 영상을 확보하였다. 그림 4.6은 원거리 범위에서 촬영한 영상의 예시이다.

주행 상황은 90개의 장면으로 구성하였다. 촬영 차량은 정지하고 피사체 차량만 전진하는 상황에서, 피사체 차량 1대 혹은 2대가 속도 3, 5, 10 km/h로 이동하는 장면 54개에 대해 각 2장씩 영상을 얻었다. 반대로 피사체 차량은 정지하고 촬영 차량만 전진하는 상황에서, 촬영 차량의 속도가 3 km/h로 이동하는 장면 14개에 대해 각 2장씩 영상을 얻었다. 피사체 차량과 촬영 차량이 동시에 3 km/h로 이동하는 장면은 8개에 대해 각 2장씩 영상을 얻었다. 추가로 촬영 차량은 정지 상태에서 피사체 차량 1대와 보행자가 동시에 이동하는 장면 10개와 촬영 차량과 보행자가 동시에 이동 하는 장면 4개에 대해 각 2장씩 영상을 얻었다. 이때 보행자는 종 방향, 횡 방향으로 각각 이동 한다.

또한 야간에 실제 도로에서 촬영 차량과 피사체 차량이 동시에 움직이는 17개의 장면에 대해 34장을 획득하였다. 그림 4.7은 이때 촬영한 영상의 예시이다.



그림 4.7 야간 도로 주행시의 f/1.8 사진(좌)과 f/4.0 사진(우)

제 3 절 결과 및 분석

4.3.1 DFD 알고리즘을 이용한 결과 분석

거리 센서로부터 획득한 영상들에 3.3절에서 기술한 LAPD 방식의 블러 측정 연산자를 적용하여 나타낸 결과를 그림 4.8에 나타내었다. 원 표식은 f/4.0 조리개를 이용하여 얻은 영상이고 삼각형 표식은 f/1.8 조리개를 이용하여 얻은 영상이며, 촬영 차량을 기준으로 피사체 차량의 위치를 왼쪽, 가운데, 오른쪽으로 나누어 나타내었다.

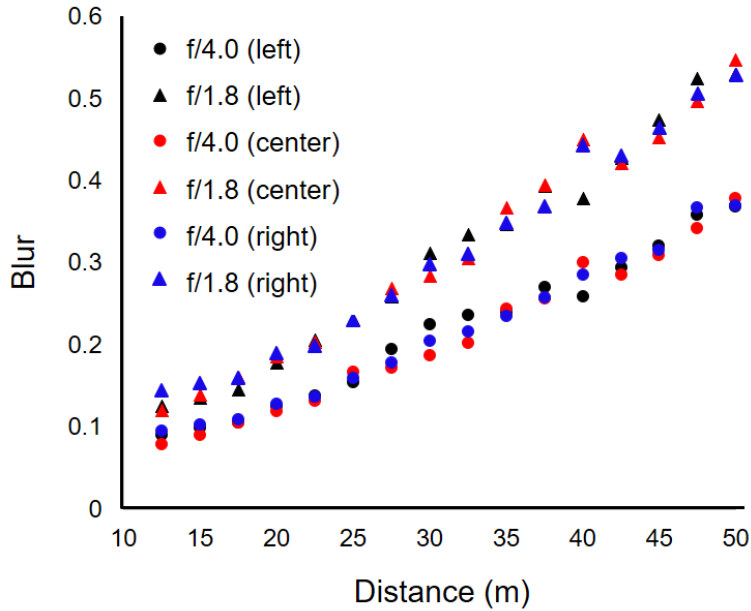


그림 4.8 차량과 거리 센서 사이의 거리에 따른 블러

그래프를 통해 앞 차량의 거리가 멀어질수록 f/1.8과 f/4.0의 영상 간의 블러 차이가 커짐을 알 수 있다. 그림 4.8의 결과를 같은 종방향 위치에서 평균을 내어 3.3절의 시뮬레이션 결과와 비교한 결과를 그림 4.9에 나타내었다. 실제 영상에 대한 결과는 시뮬레이션과 마찬가지로 어느 정도 선형성을 보이지만 f/4.0의 블러가 예상보다 더 발생 하였다. 시뮬레이션의 f/1.8과 f/4.0간의 블러 차와 실제 영상의 f/1.8과 f/4.0간의 블러 차를 비교하면 대략 40% 정도 차이가 난다. 이는 시뮬레이션이 흰 배경에 검은 색 물체를 기준으로 수행 되었고 실제 영상은 더욱 복잡한 환경이기 때문에 명확한 블러 차이가 덜 한 것으로

판단된다.

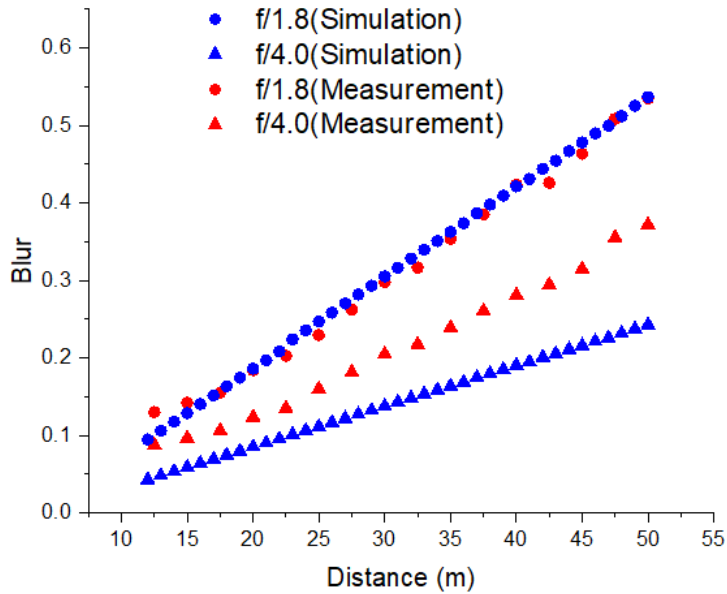


그림 4.9 LAPD 방식에 대한 시뮬레이션과 실제 영상 값의 비교

4.3.2 딥러닝을 이용한 결과 분석

이 절에서는 거리 센서로부터 얻은 영상을 통해 거리를 추출할 수 있도록 서울대학교 컴퓨터비전 연구실에서 진행한 딥러닝의 결과를 다룬다 [93]. 라이다로부터 얻은 거리 정보를 실제 참값에 해당하는 GT로 활용하여, 촬영된 영상에 대하여 GT 거리 값으로 구성된 데이터셋을 확보하였다. 정지 장면 촬영 시 얻은 300 장면의 데이터 중

하나의 장면은 영상과 라이다 데이터의 오류로 인해 사용하지 않았고 나머지 299 장면 중에서 학습 199 장면은 학습을 위한 데이터, 100 장면은 테스트를 위한 데이터로 나누어 사용하였다. 주간 주행 시 얻은 90 장면은 정지 장면 199 장면을 학습한 알고리즘에 추가로 60 장면을 학습하고 나머지 30 장면을 테스트 하였다. 야간 주행 시 얻은 17 장면은 장면 199 장면을 학습한 알고리즘에 추가로 10 장면을 학습하고 나머지 7 장면을 테스트 하였다.

사용된 알고리즘은 디텍터 기반과 거리맵 기반, 두 가지이다.

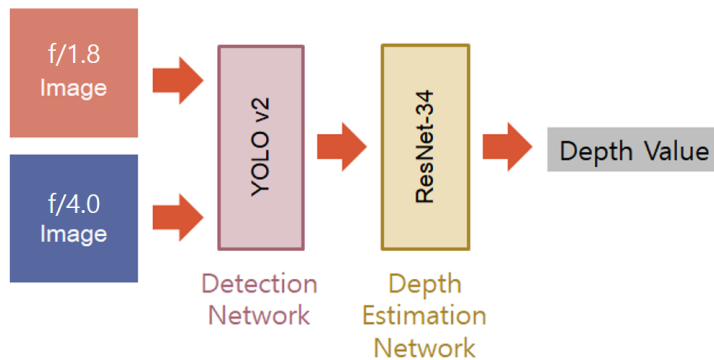


그림 4.10 디텍터 기반 거리 측정 알고리즘 모식도

그림 4.10은 디텍터 기반 알고리즘에 대한 모식도로, $f/\#$ 가 다른 두 영상이 입력 되었을 때 차량 및 사람을 검출하는 검출 단계와 이에 대한 거리 정보를 측정하는 두 단계를 거치게 된다. 물체의 검출에는

YOLO—v2 모델 [94]을 사용하였는데 그림 4.11는 YOLO—v2를 적용한 예시로 차량 또는 보행자를 인식해 검출해 낼 수 있다. 거리 추출에는 딥러닝 아키텍처인 ResNet—34 [95]를 이용하였다.



그림 4.11 YOLO—v2 디텍터를 사용하여 검출된 차량 영역

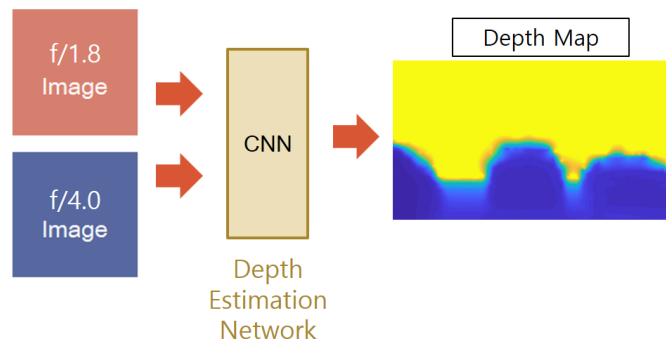


그림 4.12 거리맵 기반 거리 측정 알고리즘 모식도

그림 4.12는 거리맵 기반 알고리즘에 대한 모식도로 f/#가 다른 두 영상에 대해 Convolutional Neural Network (CNN)를 적용하여 영상

전체에 대해 한 장의 거리맵을 출력하도록 한다. 거리맵 방식은 입력된 영상에 존재하는 물체의 수에 관계없이 한 번의 작업을 통하여 결과물을 도출할 수 있으며 물체의 종류에 제한 받지 않고 영상 전체에 대한 거리 정보의 획득이 가능하다. 거리맵 알고리즘은 RGBD semantic segmentation에 활용된 네트워크인 RedNet [96]을 기반으로 했다. GT에 해당하는 거리맵이 없기 때문에 그림 4.13과 같이 라이다로부터 얻은 포인트 데이터로 GT 거리맵을 생성한 후 영상의 거리맵과 비교하였다.

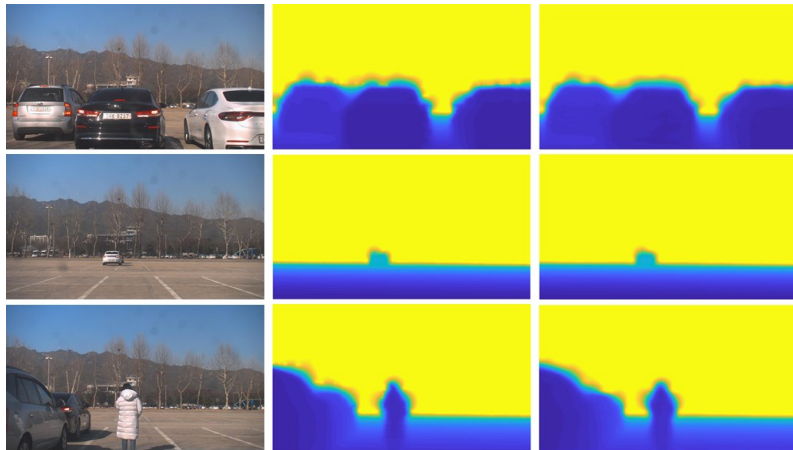


그림 4.13 f/4.0 영상(좌), GT 거리맵(중), 영상의 거리맵(우)

딥러닝 기반의 알고리즘을 사용한 경우에서 각 지점의 물체에 대하여 거리 오차를 나타낸 것을 그림 4.14에 나타내었으며, 전체 50 m

범위에서 평균 0.826 m의 오차가 검출 되었다. 49.605 m 지점에서 큰 오차를 보이는데 이 지점은 사람을 검출한 것으로 원거리에서는 사람이 차량에 비해 매우 작은 크기이기 때문에 인식률이 낮아지면서 큰 오차가 발생한 것으로 보인다.

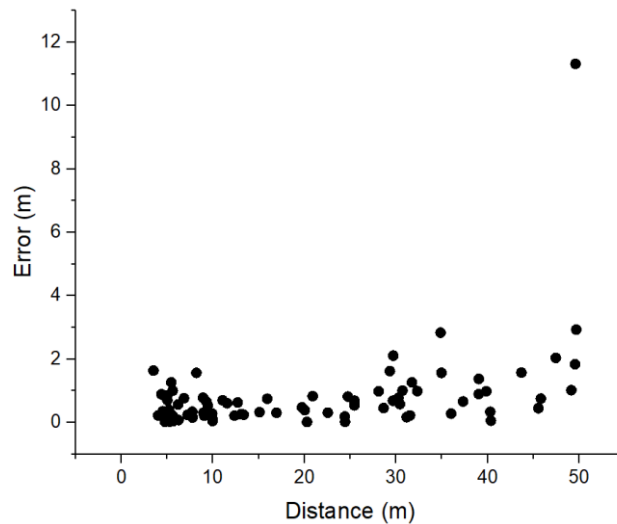


그림 4.14 주간 정지 상황의 영상에 디텍터 기반 알고리즘 적용 시 거리에 대한 오차 분포도

거리맵 기반의 경우 거리 오차 계산 시 오차 측정 대상을 차량 및 사람 등의 관심 있는 물체 영역에 대한 거리 정보만을 비교하여 그래프로 나타내었다. 오차 측정 대상을 해당 물체 영역만으로 제한하면 물체 주변의 노이즈에 영향을 받지 않고 정확한 오차를 계산할 수 있으며 도로 및 하늘 등의 불필요한 영역에 대한 오차가 최소화 되므로

보다 정확한 거리 측정이 가능하다. 물체가 정지 상황일 때 거리맵 기반 알고리즘을 적용한 경우의 거리에 대한 오차를 그림 4.15에 나타내었으며, 전체 70 m 범위에서 평균 0.619 m의 오차를 가진다. 오차가 큰 지점인 20.300 m, 31.495 m, 46.030 m 지점은 모두 사람을 검출했을 때 생긴 오차로, 차량에 비해 작은 크기인 사람이 오차를 더욱 크게 만들고 또한 학습 데이터의 불충분, 사람의 움직임 등이 오차의 원인으로 추정된다.

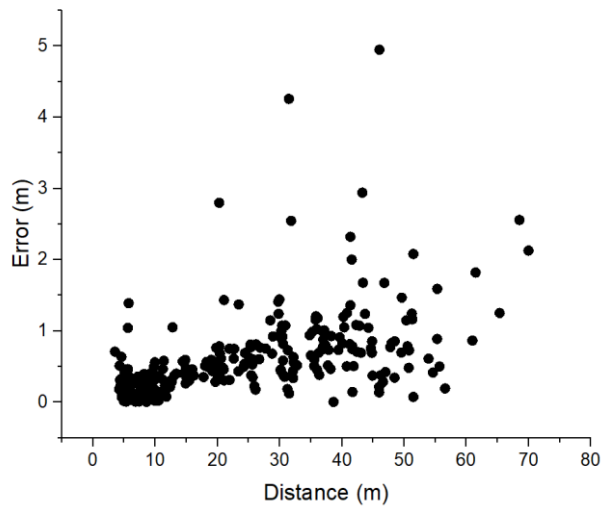


그림 4.15 주간 정지 상황의 영상에 거리맵 기반 알고리즘 적용 시 거리에 대한 오차 분포도

표 4.1은 그림 4.15의 거리 오차 분포도에서 거리를 구간 별로 나누어 거리 오차를 나타낸 것이다. 거리 범위 3.5 m 이상부터 10 m

이하의 범위에서는 거리에 대한 오차 비율이 3% 이상으로 다른 구간 대비 큰 것을 볼 수 있다. 이는 거리 센서의 45° 화각으로 인해 근거리에서는 주행 차로의 양 옆 차량이 완전히 보이지 않고 옆 면이 보이기 때문에 뒷면까지의 거리를 추정해야 하므로 이로 인해 오차가 커진 것으로 보인다. 도로 폭이 3 m일 때 주행 차선을 포함한 양 옆 차선의 차량 뒷면이 완전히 보이는 거리는 10.9 m로, 표 4.1을 보면 10 m 이상의 구간에서부터 오차가 3% 미만으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 예외적으로 20 m부터 25 m 사이의 범위는 3% 이상의 오차가 발생하였지만 보행자가 서 있는 하나의 장면을 제외하면 마찬가지로 3% 이내의 오차를 가진다.

표 4.1 주간 정지 상황의 영상에 대한 거리맵 기반 알고리즘 적용 시 거리 x에 대한 오차

거리 범위 (m)	오차 (m)	거리 대비 오차 (%)
$3.5 < x \leq 5$	0.27	6.35
$5 < x \leq 10$	0.23	3.07
$10 < x \leq 15$	0.31	2.48
$15 < x \leq 20$	0.46	2.63
$20 < x \leq 25$	0.74	3.29
$25 < x \leq 30$	0.75	2.73
$30 < x \leq 35$	0.88	2.71
$35 < x \leq 40$	0.76	2.03
$40 < x \leq 45$	1.07	2.52
$45 < x \leq 50$	1.00	2.11

$50 < x \leq 55$	0.87	1.66
$55 < x \leq 60$	0.79	1.37
$60 < x \leq 65$	1.34	2.14
$65 < x \leq 70$	1.98	2.93

거리맵 기반의 알고리즘을 사용하여 차량과 사람이 움직이는 상황일 때 거리에 대한 오차를 그림 4.16에 나타내었으며 전체 거리 70 m 범위에서 평균 1.000 m의 오차를 가진다. 실제 실험 시에는 가변조리개에 입력 전압이 들어가는 시간과 카메라 보드의 이미지 프레임 시간 간의 동기화를 하지 않고 진행하여 f/#가 다른 두 이미지를 찍는데 18 ms의 시간이 발생하였고 이로 인해 피사체 차량이 10 km/h로 이동할 때 두 이미지에서 차량의 위치는 5 cm의 차이를 가지게 되었다. 이러한 차이로 인해 정지 상황에 비해 0.55%의 오차가 증가한 것으로 보인다. 60 fps 성능의 카메라 보드를 사용하여 영상이 촬영 되도록 하고 카메라 보드와 가변조리개를 동기화 시켜 두 프레임 당 f/#가 서로 다른 두 이미지를 얻을 수 있게 하면, 두 이미지 간의 시간 차를 줄여 거리 정확도를 높일 수 있고 30 fps 속도로 거리 정보 송출이 가능하다. 특히 가변조리개의 경우 하강 시간이 상승 시간보다 짧기 때문에 f/1.8을 먼저 찍고 f/4.0을 후에 찍으면 두 이미지 간의 시간차는 2.3 ms이 된다. 이 시간차로 인해 차량이 60 km/h로 이동 시 이미지 간의 차량의 위치가 3.8 cm의 차이를 가지게 되지만 이는 작은

수치로 거리 추출에 있어 크게 영향을 주지 않을 것으로 예상 된다.

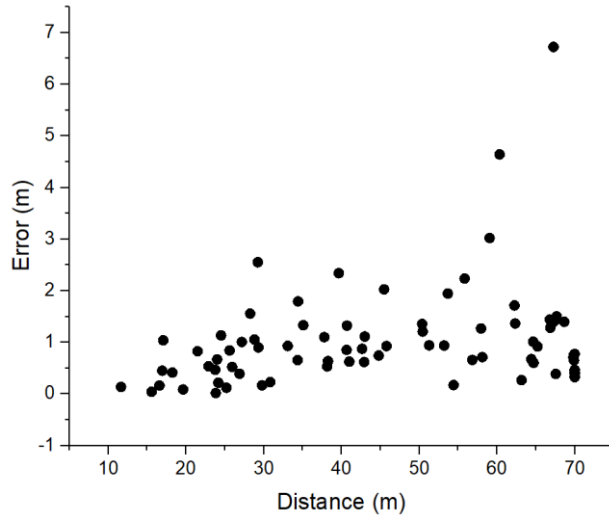


그림 4.16 주간 주행 상황의 영상에 거리맵 기반 알고리즘 적용 시 거리에 대한 오차 분포도

야간의 실제 도로 주행 상황에서 찍은 영상을 거리맵 알고리즘을 적용한 경우의 거리에 대한 오차를 그림 4.17에 나타내었으며, 전체 40 m 범위에서 거리 오차 5.470 m를 가진다. 야간 주행 시 오차가 큰 이유는 라이다로 측정한 GT 거리맵 자체가 많은 오차를 가지고 있어 정확한 학습이 어려웠기 때문인 것으로 분석된다. 또한 학습된 데이터가 거의 주간에 촬영된 영상이고 실제 도로가 아닌 설정된 공간 내에서 찍은 영상들로 이루어진 것도 원인으로 볼 수 있다. 특히 야간에는 차량의 미등(tail lamp), 제동등(brake lamp), 신호등 등의 빛 번짐으로

인해 영상의 블러를 파악하기 어렵다는 점이 오차를 크게 만드는 요인 중 하나이다.

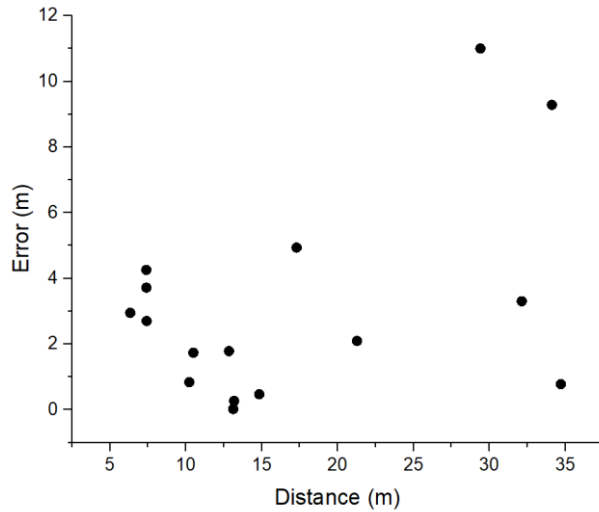


그림 4.17 야간 주행 상황의 영상에 거리맵 기반 알고리즘 적용 시 거리에 대한 오차 분포도

표 4.2에는 촬영한 영상 종류에 대해, 알고리즘 방식과 오차 측정 대상을 다르게 함에 따른 거리 오차를 정리하여 나타내었다. 주간에 촬영한 70 m 거리 범위의 영상에 거리맵 기반 알고리즘 적용 시, 영상 전체의 오차는 차량의 정지 상황에서 0.922 m, 주행 상황에서는 1.063 m를 가지며 물체 영역의 오차는 차량의 정지 상황에서는 0.619 m, 주행 상황에서는 1.000 m를 가진다. 야간에 촬영한 주행 영상은 거리에 대한 오차가 거리맵 전체에서 13.160 m, 물체 영역에서는 5.470 m를

가진다.

표 4.2 촬영 영상에 대한 알고리즘 적용 및 거리 오차 계산 결과




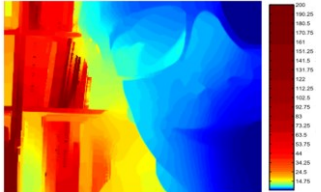

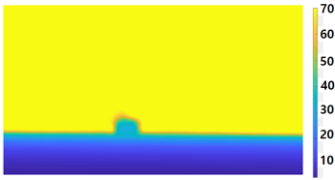
방식	상황	시간	학습 장면 수	테스트 장면 수	오차 측정 대상	측정 범위	거리 오차
디텍터			631	78	물체	< 50m	0.826m
	정지 상황		199	100	전체 장면	< 70m	0.922m
		주간	199	100	물체	< 70m	0.619m
거리맵			199+60	30	전체 장면	< 70m	1.063m
	주행 상황		199+60	30	물체	< 70m	1.000m
		야간		199+10	7	전체 장면	< 40m
				199+10	7	물체	< 40m

거리맵 기반의 경우 오차 측정 대상을 전체 장면으로 하였을 때 오차가 더 큰데 이는 그림 4.13에서 보듯이 차량 주변의 거리맵이 깔끔하지 않아 생기는 오차에 기인한다. 물체 주변의 노이즈가 GT 거리맵과 추정된 거리맵에서 유사한 형태를 띠고 있는 것으로 미루어 라이다의 데이터가 충분치 않기 때문이며 더 좋은 성능의 라이다를 사용하는 등 GT 거리맵의 정확도를 높이면 실제 오차도 더 줄일 수 있을 것이다.

카메라의 조리개를 수정하여 거리를 추출하는 부호화된 조리개 방식

[53], 컬러 필터를 이용한 방식 [56], 가시광·적외선 필터를 이용한 이중 조리개 방식 [57]에 대한 연구를 본 연구와 비교한 것을 표 4.3에 나타내었다. 비교 시 이미지 센서의 크기가 모두 다르므로, 35 mm 필름의 이미지 센서를 기준으로 하여 나타내는 환산 초점 거리를 함께 나타내었다 [97]. 본 연구의 거리 센서는 차량용으로 개발되어 70 m의 거리까지 측정 가능하다는 장점을 가진다.

표 4.3 조리개를 이용한 거리 측정 방식의 비교

	초점 거리 (mm)	f/#	환산 초점 거리 (mm)	거리 범위 (m)	오차 (m)	측정 사진	거리맵 결과
부호화된 조리개 [53]	50	f/1.8	80	3	—		
컬러 필터 조리개 [56]	50	f/1.8	80	0.4	—		
이중 조리개 [57]	8	f/2.8, f/6.0	35	2	0.26		
가변조리개 (본 연구)	8	f/1.8, f/4.0	52	70	0.922		

제 5 장 결 론

본 연구는 가변조리개가 탑재된 카메라를 이용하여 물체까지의 거리 정보와 영상을 동시에 얻을 수 있는 거리 센서 시스템을 개발하였다. 이 센서 시스템은 한 장면에 대해 $f/1.8$ 과 $f/4.0$ 의 조리개 값으로 각각 이미지를 얻는데, 이 두 이미지 간의 피사계 심도 차이가 거리에 따라 선형적으로 증가하는 특성을 이용하여 거리를 추정한다.

초점 거리 8 mm, 화각 45°, 1/2.7 인치 이미지 센서, FHD급 화질을 가지도록 설계된 카메라 모듈에 가변조리개를 어셈블리하여 거리 센서를 구현하였고 차량에 장착하여 영상을 얻었다. 이 영상에 DFD 알고리즘을 적용함으로써 $f/\#$ 가 다른 두 이미지의 피사계 심도 차이와 거리 간의 선형성을 확인하였다. 또한 오차를 줄이기 위하여 디텍터 기반과 거리맵 기반의 딥러닝 알고리즘을 적용하였다. 주간에 차량이 정지된 상태에서 찍은 영상에 대해 디텍터 기반의 알고리즘을 적용하였을 경우 50 m 거리 범위에서 평균 0.826 m의 오차를 가졌고, 거리맵 기반의 알고리즘을 적용하였을 경우 70 m 거리 범위에서 이미지 내 모든 영역의 오차는 평균 0.922 m, 물체 영역의 오차는 평균 0.619 m를 가졌다. 주간에 찍은 영상 중 차량이 10 km/h 이내로 움직이고

보행자가 걸어 다니는 영상에 대해 거리맵 기반의 알고리즘을 적용하였을 경우 70 m 거리 범위에서 이미지 내 모든 영역의 오차는 평균 1.063 m, 물체까지의 오차는 평균 1.000 m를 가졌다. 야간에 도로 주행 시 찍은 영상에 거리맵 기반의 알고리즘을 적용하였을 때는 40 m 거리 범위에서 이미지 내 모든 영역의 오차는 평균 13.160 m, 물체까지의 오차는 평균 5.470 m를 가졌다.

가변조리개는 액정 디스플레이의 원리를 이용하여 동작함으로써 2.64 V의 낮은 동작 전압과 10.59 ms의 빠른 응답 시간을 가지며 두 파라미터에 대해 타 소형 가변조리개에 관한 연구 대비 가장 좋은 성능을 가진다. 응답 시간은 $f/1.8$ 과 $f/4.0$ 간 연속적으로 변화하는데 걸리는 시간을 의미하므로, 가변조리개의 동작 전압이 들어가는 시간과 카메라 보드의 프레임 시간을 동기화 시킨다면 30 fps의 속도로 영상과 거리 정보를 동시에 송출하는 것이 가능하다. 또한 가변조리개의 하강 시간이 상승 시간보다 짧기 때문에 $f/1.8$ 의 이미지를 먼저 찍은 후 $f/4.0$ 의 이미지를 나중에 찍는다면 두 이미지 간의 시간차는 2.3 ms가 된다. 도로에서 60 km/h로 움직이는 차량을 가정 하였을 때, 이 차량을 찍은 두 이미지 간 차량의 위치 차이는 3.8 cm로 거리 정확도에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 예상 된다.

부호화된 조리개, 컬러 필터를 이용한 조리개, 가시광·적외선 필터를

이용한 이중 조리개 등 조리개를 이용한 타 DFD 방식과 비교하여 거리 측정 범위가 10.9 m부터 70 m까지로 가장 크며 한 레이어에서 조리개가 동작하기 때문에 정렬 오차로부터 발생하는 광학 수차를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

본 연구의 거리 센서는 블랙박스 카메라와 같은 크기의 카메라 앞단에 $10 \times 10 \times 1.8 \text{ mm}^3$ 크기의 소형 가변조리개를 어셈블리함으로써 전체 센서 크기를 소형화 시켰다. 또한 가변조리개 개발 시 반도체 공정 및 디스플레이 공정 기술을 이용하여 공정 정확도를 높였으며 가격적인 측면에서도 차량용 거리 센서들과 비교해 매우 낮아졌다. 낮은 전력으로도 사용 가능한 장점을 가지며 가변조리개가 기계적으로 움직이는 부분이 없기 때문에 신뢰성이 좋다.

개발된 거리 센서는 낮은 가격이면서 소형화 되어 대중적으로 차량에 보급될 수 있으며 차량 뿐 만 아니라 로봇, 드론, 모바일용 카메라, 게임 산업, 사물인터넷 등과 같은 다양한 분야에서 사용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] A. J. Hawkins, "Mercedes-Benz and Bosch are testing self-driving taxis in San Jose" [Online]. Available: <https://www.theverge.com/2019/12/9/21002911/mercedes-benz-bosch-self-driving-taxi-car-sclass-san-jose-autonomous>
- [2] J. Dickmann, N. Appenrodt, and C. Brenk, "Making Bertha See", 2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, Sydney, NSW, 2013, pp. 214-221.
- [3] J. M. Gitlin, "Assists, autopilot, and more: Ars talks about autonomous driving with Audi" [Online]. Available: <http://arstechnica.com/cars/2016/01/assists-autopilot-and-more-ars-talks-about-autonomous-driving-with-audi>
- [4] Volvo, "Autonomous driving" [Online]. Available: <https://www.volvocars.com/en-kw/own/own-and-enjoy/autonomous-driving>
- [5] L. Ulrich, "Top ten tech cars," in IEEE Spectrum, vol. 51, no. 4, pp. 38-47, April 2014.
- [6] J. Golson, "Tesla's Autopilot system is reportedly getting more sensors" [Online]. Available:

- <http://www.theverge.com/2016/8/11/12443310/tesla-autopilot-next-generation-radar-triple-camera>
- [7] BMW, "The path to autonomous driving" [Online]. Available: <https://www.bmw.com/en/automotive-life/autonomous-driving.html>
- [8] Waymo, "We're building the World's Most Experienced Driver" [Online]. Available: <https://waymo.com/>
- [9] M. Bojarski et al., "End to End Learning for Self-Driving Cars," arXiv preprint arXiv, Apr. 2016.
- [10] Smarter With Gartner, "5 Trends Appear on the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2019." [Online]. Available: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-appear-on-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2019/>
- [11] Market Watch, "Autonomous Vehicles Market Worth Around 41.25 Billion USD by 2024 | Accelerated CAGR 62.86%." [Online]. Available: <https://www.marketwatch.com/press-release/autonomous-vehicles-market-worth-around-4125-billion-usd-by-2024-accelerated-cagr-6286-2019-05-07>
- [12] NHTSA, "Automated Vehicles for Safety" [Online]. Available: <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated->

vehicles – safety

- [13] E. Guizzo, "How Google's Self-Driving Car Works" [Online].

Available:

<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial-intelligence/how-google-self-driving-car-works>

- [14] A. J. Hawkins, "Waymo's self-driving cars are now available on

Lyft's app in Phoenix" [Online]. Available:

<https://www.theverge.com/2019/5/7/18536003/waymo-lyft-self-driving-ride-hail-app-phoenix>

- [15] NHTSA, "2016 Fatal Motor Vehicle Crashes: Overview"

[Online]. Available:

<https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812456>

- [16] IIHS, "U.S. DOT and IIHS announce historic commitment of 20

automakers to make automatic emergency braking standard on

new vehicles" [Online]. Available:

<https://www.iihs.org/news/detail/u-s-dot-and-iihs-announce-historic-commitment-of-20-automakers-to-make-automatic-emergency-braking-standard-on-new-vehicles>

- [17] NHTSA, "NHTSA-IIHS Announcement on AEB" [Online].

Available: <https://www.nhtsa.gov/press-releases/nhtsa-iihs-announcement-aeb>

- [18] S. Corby, "EU and Japan set to mandate standard AEB for 2020" [Online]. Available: <https://www.carsguide.com.au/car-news/eu-and-japan-set-to-mandate-standard-aeb-for-2020-72954>
- [19] Scientific American, "Deadly Tesla Crash Exposes Confusion over Automated Driving" [Online]. Available: <https://www.scientificamerican.com/article/deadly-tesla-crash-exposes-confusion-over-automated-driving>
- [20] A. Nussbaum and M. Mawad, "This \$290,000 'Robo-Taxi' Is France's Answer to Waymo" [Online]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-11-07/a-290-000-robot-car-is-french-startup-s-answer-to-gm-waymo>
- [21] F. G. Fernald, "Analysis of atmospheric lidar observations: some comments," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 5, pp. 652-653, 1984.
- [22] J. D. Spinhirne, "Micro Pulse Lidar," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 31, no. 1, pp. 48-55, 1993.
- [23] D. S. Hall, "COLOR LIDAR SCANNER," US 8,675,181 B2, 2014.
- [24] Velodyne Lidar, "HDL-64E: High Definition Real-Time 3D

- Lidar" [Online]. Available:
<https://velodynelidar.com/products/hdl-64e/>
- [25] R. Halterman, M. Bruch, "Velodyne HDL-64E lidar for unmanned surface vehicle obstacle detection", Proc. of Int. Soc. for Opt. Eng., vol. 7692, pp. 224-231, 2010.
- [26] P. E. Ross, "Velodyne Announces a Solid-State Lidar" [Online]. Available: <https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/sensors/velodyne-announces-a-solidstate-lidar>
- [27] B. Gao, B. Coifman, "Vehicle Identification and GPS Error Detection from a LIDAR Equipped Probe Vehicle", Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conf. (ITSC), pp. 1537-1542, 2006.
- [28] G. Kim, J. Eom, and Y. Park, "Investigation on the occurrence of mutual interference between pulsed terrestrial LIDAR scanners," IEEE Intell. Veh. Symp. Proc., 2015, pp. 437-442.
- [29] D. R. Wehner, "High resolution radar," Norwood, MA, Artech House, Inc., 1987.
- [30] N. Levanon, "Radar principles," New York, Wiley-Interscience, 1988.
- [31] V. C. Chen, F. Li, S. S. Ho, and H. Wechsler, "Micro-doppler

- effect in radar: Phenomenon, model, and simulation study,”
IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 42, no. 1, pp. 2–21,
Jan. 2006.
- [32] <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/lane-change-assist/mid-range-radar-sensor-mrrrear/>
- [33] <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/left-turn-assist/long-range-radar-sensor/>
- [34] R.H. Rasshofer and K. Gresser, "Automotive Radar and Lidar Systems for Next Generation Driver Assistance Functions,"
Adv. Radio Sci., vol. 3, pp. 205–209, 2005
- [35] R. Bamler, “Principles of synthetic aperture radar,” Surv. Geophys., vol. 21, no. 2–3, pp. 147–157, 2000.
- [36] A. Carullo and M. Parvis, “An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications,” IEEE Sens. J., vol. 1, no. 2, pp. 143–147, 2001.
- [37] Continental, "Multi Function Stereo Camera MFS430" [Online]. Available: <https://www.continental-automotive.com/en->

gl/Passenger-Cars/Autonomous-Mobility/Enablers/Cameras/Stereo-Camera

- [38] S.T. Barnard and M. A. Fischler, "Computational Stereo," *Computing Surveys*, Vol. 14, No. 4, Dec. 1982.
- [39] C. Schmid, A. Zisserman, "The Geometry and Matching of Curves in Multiple Views", *Proc. European Conf. Computer Vision*, pp. 104-118, 1998.
- [40] A. Mitiche, "A Computational Approach to the Fusion of Stereo and Kineopsis", *Motion Understanding: Robot and Human Vision*, pp. 81-95, 1988.
- [41] C. Fu, A. Carrio, and P. Campoy, "Efficient visual odometry and mapping for unmanned aerial vehicle using ARM-based stereo vision pre-processing system." *2015 Int. Conf. on Unmanned Aircraft Sys. (ICUAS)*. IEEE, 2015.
- [42] H. Murase, S.K. Nayar, "Visual Learning and Recognition of 3-D Objects from Appearance", *Int'l J. Computer Vision*, vol. 14, pp. 5-24, 1995.
- [43] S. Zhang and P. S. Huang, "Novel method for structured light system calibration," *Opt. Eng.*, vol. 45, no. 8, p. 083601, Aug. 2006.
- [44] L. Shao, J. Han, P. Kohli, and Z. Zhang, "Computer Vision and

- Machine Learning with RGB-D Sensors," Cham, Switzerland:Springer, Feb. 2014.
- [45] B. Li, Y. An, D. Cappelleri, J. Xu, and S. Zhang, "High-accuracy, high-speed 3D structured light imaging techniques and potential applications to intelligent robotics," *Int. J. Intell. Robot. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 86-103, 2017.
- [46] Mobileye, "The Mobileye 5-Series Technical Documentation" [Online]. Available: <http://tracksurveying.com/sensorica/pdf/Mobileye%205%20-%20Full%20Technical%20Spec%20v0.3.pdf>
- [47] O. Mano, G. Stein, E. Dagan, and A. Shashua, "Forward Collision Warning with a Single Camera", *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2004)*, June. 2004.
- [48] A. P. Pentland, "A New Sense for Depth of Field," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-9, no. 4, pp. 523-531, July 1987.
- [49] P. Grossmann, "Depth from Focus", *Pattern Recognition Lett.*, vol. 5, pp. 63-69, 1987.
- [50] S. W. Hasinoff, and K. N. Kutulakos, "Confocal Stereo," *European Conf. Computer Vision*, Springer, Graz, Austria, 2006.

- [51] P. Favaro, A. Mennucci, and S. Soatto, "Observing shape from defocused images," *Int'l J. Computer Vision*, vol. 52, no. 1, pp. 25–43, 2003.
- [52] A. N. Rajagopalan, and S. Chaudhuri, "An MRF model-based approach to simultaneous recovery of depth and restoration from defocused images," *IEEE Tran. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 21, no. 7, pp. 577–589, 1999.
- [53] A. Levin, R. Fergus, F. Durand, and W. T. Freeman, "Image and depth from a conventional camera with a coded aperture," *Proc. ACM SIGGRAPH Conf. Comput. Graph.*, vol. 26, no. 3, 2007.
- [54] A. Veeraraghavan, R. Raskar, A.K. Agrawal, A. Mohan, and J. Tumblin, "Dappled Photography: Mask Enhanced Cameras for Heterodyned Light Fields and Coded Aperture Refocusing", *ACM Trans. Graph.*, vol. 26, no. 3, pp. 69, 2007.
- [55] Y. Bando, B. Y. Chen, and T. Nishita, "Extracting Depth and Matte using a Color-Filtered Aperture," *ACM Trans. Graph.*, vol. 27, no.5, 2008.
- [56] C. Ayan, and T. Zickler, "Depth and deblurring from a spectrally-varying depth-of-field," *European Conf. Computer Vision*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [57] M. Martinello, A. Wajs, and S. Quan, "Dual Aperture

- Photography: Image and Depth from a Mobile Camera,” *Comput. Photogr. (ICCP)*, 2015 IEEE Int. Conf., Houston, TX, 2015, pp. 1–10.
- [58] A. A. Wajs, “PROCESSING MULTI-APERTURE IMAGE DATA,” US 2013/0033579 A1, 2013.
- [59] G. Zhou, H. Yu, Y. Du, and F. S. Chau, “Microelectromechanical-systems-driven two-layer rotary-blade-based adjustable iris diaphragm,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 10, pp. 1745–7, 2012.
- [60] J. Chang, K. Jung, E. Lee, M. Choi, S. Lee, and W. Kim, “Variable aperture controlled by microelectrofluidic iris,” *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 15, pp. 2919–2922, 2013.
- [61] J. Draheim, T. Burger, J. Korvink, and U. Wallrabe, “Variable aperture stop based on the design of a single chamber silicone membrane lens with integrated actuation,” *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 11, pp. 2032–2034, 2011.
- [62] T. Deutschmann, C. Kortz, L. Walder, and E. Oesterschulze, “High contrast electrochromic iris,” *Opt. Express*, vol. 23, no. 24, p. 31544, 2015.
- [63] C. G. Tsai, and J. A. Yeh, “Circular dielectric liquid iris,” *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 14, pp. 2484–2486, 2010.
- [64] H. W. Seo, J. B. Chae, S. J. Hong, I. U. Shin, K. Rhee, J. Chang,

- and S. K. Chung “A tunable optical IRIS based on electromagnetic actuation for a high-performance mini/micro camera,” 2014 IEEE 27th Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst., pp. 1147–1150, 2014.
- [65] C. H. Kim, K. D. Jung, and W. Kim, “A wafer-Level micro mechanical global shutter for a micro camera,” Proc. IEEE Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst., pp. 156–159, 2009.
- [66] G. Song and K. M. Lee, “Depth estimation network for dual defocused images with different depth-of-field,” 2018 25th IEEE Int. Conf. Image Process., 2018, pp. 1563–1567.
- [67] B. Bahadur, *Liquid Crystals: Applications and Uses*, vol. 1. Singapore: World Scientific, 1990.
- [68] M. Schadt and W. Helfrich, "Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 18, no. 4, pp. 127–128, 1971
- [69] W. J. Smith, "Modern Optical Engineering," 4th Ed., McGraw-Hill Professional, 2007.
- [70] M. Mohri, H. Kakinuma, M. Sakamoto, and H. Sawai, "Plasma Etching of ITO Thin Films Using a CH₄/H₂ Gas Mixture," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol 29, pp. L1932–L1935, 1990.
- [71] H. S. Kim, J. C. Woo, Y. H. Joo, and C. Il Kim, “A study of the

- surface reaction on the etched ITO thin films by using inductively coupled plasma,” *Vacuum*, vol. 93, pp. 7–12, 2013.
- [72] L. Li, C. Liu, and Q.-H. Wang, “Optical switch based on tunable aperture,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 16, pp. 3306–3308, 2012.
- [73] S. Schuhloden, K. Banerjee, M. Sturmer, P. Muller, U. Wallrabe, and H. Zappe, “Variable optofluidic slit aperture,” *Light Sci. Appl.*, vol. 5, 2016.
- [74] 김세환, 전국진, "Low voltage and large displacement thermal actuator", 2014 한국센서학회 종합학술대회, 삼척, 강원.
- [75] H. Ren, S. Xu, and S. Wu, “Optical switch based on variable aperture,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 9, pp. 1421–1423, 2012.
- [76] P. Trouv, F. Champagnat, G. L. Besnerais, and J. Idier, “A theoretical performance model for single image depth from defocus,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 31, no. 12, pp. 2650–2662, 2014.
- [77] M. Wei, F. Xing, Z. You, and G. Wang, “Multiplexing image detector method for digital sun sensors with arc-second class accuracy and large FOV,” *Opt. Express*, vol. 22, no. 19, pp. 23094–23107, Sep. 2014.
- [78] Y. W. Tai and M. S. Brown, “Single image defocus map estimation using local contrast prior,” *Proc. Int. Conf. Image*

Process. ICIP, pp. 1797–1800, 2009.

- [79] M. Subbarao, T. C. Wei, and G. Surya, “Focused image recovery from two defocused images recorded with different camera settings,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 4, no. 12, pp. 1613–1628, 1995.
- [80] F. Memon, M. Ali Unar, and M. Sheeraz, “Image Quality Assessment for Performance Evaluation of Focus Measure Operators,” *Mehran Univ. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 34, no. 4, pp. 389–386, 2015.
- [81] Edmund optics, “Distortion” [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.co.kr/knowledge-center/application-notes/imaging/distortion/>
- [82] S. K. Lee, M. G. Kim, K. W. Jo, S. M. Shin, and J. H. Lee, “A glass reflowed microlens array on a Si substrate with rectangular through-holes,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 10, no. 4, 2008.
- [83] S. Yoo, J. G. Ha, J.Y. Jin, C.H. Ji, and Y.K. Kim, “Monolithically integrated glass microlens scanner using a thermal reflow process,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 23, no. 6, 2013.
- [84] J. V. Carrion, J. Albero, M. Baranski, C. Gorecki, and N. Passilly,

- “Microfabrication of axicons by glass blowing at a wafer–level,”
Opt. Lett., vol. 44, no. 13, pp. 3282–3285, 2019.
- [85] J. Lee, J. Lim, S. Moon, Y. Park, K. Kim, S. J. Lee, and J. H. Lee,
"Performance comparison of illumination methods for finger–
vein imaging and liveness detection." *Microsys, Tech.* vol. 24,
no. 12, pp. 4955–4964, 2018.
- [86] A. Motogaito and K. Hiramatsu, "Fabrication of Binary
Diffractive Lenses and the Application to LED Lighting for
Controlling Luminosity Distribution," *Optics and Photonics J.*,
vol. 3, no. 1, pp. 67–73, 2013
- [87] C. S. Lim, M. H. Hong, A. S. Kumar, M. Rahman, and X. D. Liu,
“Fabrication of concave micro lens array using laser patterning
and isotropic etching,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, pp.
552–558, 2006.
- [88] M. S. Kim, “Fabrication method of plano concave lens using
glass reflow process”, Master thesis, Seoul National University,
2017.
- [89] V. R. Kumar, S. Milz, C. Witt, M. Simon, K. Amende, and J.
Petzold, “Near–field Depth Estimation using Monocular Fisheye
Camera : A Semi–supervised learning approach using Sparse
LIDAR Data,” 2018 21st Int. Conf. Intell. Transp. Syst., pp.

2853–2858, 2018.

- [90] R. Y. Tasi, “A versatile camera calibration technique for highaccuracy 3D machine vision metrology using off–the–shelf TV cameras and lenses,” *IEEE J. Robotics and Automation*, vol. RA–3, no. 4, pp. 323–344, 1987.
- [91] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” *IEEE Tran. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330–1334, 2000. "
- [92] O. Faugeras, “The Geometry of Multiple Images,” The MIT Press, Cambridge, 2004.
- [93] G. Song, Y. Kim, K. Chun, and K. M. Lee, “Multi image depth from defocus network with boundary cue for dual aperture camera”, *IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process*, 2020.
- [94] Redmon, Joseph, and Ali Farhadi. "YOLO9000: better, faster, stronger." *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017.
- [95] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep residual learning for image recognition." *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016.
- [96] J. Jiang, L. Zheng, F. Luo, and Z. Zhang, "Rednet: Residual encoder–decoder network for indoor rgb–d semantic

segmentation." arXiv preprint arXiv:1806.01054, 2018.

- [97] A. Hess and B. McLernon, "Photography Techniques Digital Field Guide 3–Book Set", John Wiley & Sons, 2012.

Abstract

Yumee Kim

Department of Electrical Engineering
and Computer Science

The Graduate School

Seoul National University

Recently, autonomous car is rapidly developing with the distance sensing technology. There is LIDAR, radar, stereo vision, and algorithm-based monovision cameras, but these sensors are bulk or expensive. That's why these sensors are not yet popularly used in many vehicles for autonomous car. To overcome these major problems, this study provides the image and distance information at the same time by implementing the distance sensor by simply inserting a tunable aperture in front of the same size camera as dash cam.

The distance sensor of this study consists of the tunable aperture with $f/1.8$ and $f/4.0$ and the camera module with focal length of 8 mm, field of view of 45° , and FHD resolution. When a driving voltage is applied to the tunable aperture, the tunable

aperture changes according to the voltage. The camera module assembled with the tunable aperture can obtain two images with two different depth of field. Depth of field difference between two images increases linearly with distance, and this is confirmed through simulation and experiment. The distance information can be extracted through the difference in the depth of field of images. Additionally, the deep learning algorithm such as detector algorithm and depth map algorithm can increase the accuracy of the distance. When the detector algorithm was applied, the average error is 0.826 m in the 50 m range when the vehicle was stopped during the day. In the case of depth map algorithm, the error of the object area in the 70 m range during the day is 0.619 m in the stationary situation and 1.000 m in the driving situation. The image taken at night has an error of 5.470 m for the object area in the 40 m range. The distance sensor system can measure the distances in real time of 30 fps at low power by tunable aperture based on LCD method for low operating voltage of 2.64 V and fast response time of 10.59 ms,

The distance sensor improves the distance accuracy by using two apertures instead of just one aperture in a single camera. This sensor has the same size as a dashboard camera with a 1/2.7 inch image sensor by using small variable aperture of $10 \times 10 \times 1.8 \text{ mm}^3$

by semiconductor fabrication and display fabrication, which is realized to reduce the overall distance sensor size and improve fabrication accuracy. Also, the price is much lower than existing distance sensors, and the FHD camera is used to improve image quality. Since the tunable aperture operates in one layer, it can reduce optical aberration resulting from misalignment. The sensor could be highly reliable due to no moving mechanical parts. Unlike the distance sensors using other apertures such as coded aperture, aperture using color filter, and dual aperture using visible and infrared filter, clear image is obtained without recovery process.

The distance sensor is applied to autonomous vehicles for collision avoidance warning, blind spot detection, pedestrian detection, and parking assistance. It is also suitable to the other applications such as robots, drones, mobile cameras, gaming industry and the Internet of Things.

Keywords : Distance sensor based on camera, Automotive vision sensor, Miniaturized tunable aperture, Tunable aperture using LCD, Depth from Defocus, FHD camera

Student Number : 2013—23106