

# 공초점 변위 센서를 이용한 폰 카메라 렌즈의 자동초점 구동 측정

## Measurement of Auto-Focus Driving Distance for Mobile Phone Camera Lens Using a Confocal Displacement Sensor

손석우<sup>1</sup>, 김학용<sup>2,#</sup>  
Suk Woo Son<sup>1</sup> and Hagyon Kihm<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> LG 이노텍 광학솔루션사업부 (Optical Solution Division, LG Innotek Co., Ltd.)

<sup>2</sup> 한국표준과학연구원 우주광학센터 (Center for Space Optics, Korea Research Institute of Standards and Science)  
# Corresponding Author / E-mail: hkihm@kriss.re.kr, TEL: +82-42-868-5239

KEYWORDS: Confocal displacement sensor (공초점 변위 센서), AF driving distance (AF 구동거리), Camera module (카메라모듈), VCM dynamic tilt (VCM 동적틸트)

*In mobile phone cameras, usually a voice coil motor (VCM) is used as a micro-positioning device for the image autofocus (AF) because of its low cost, simplicity, and reliability. Measuring the actual displacement of the VCM is important when we assemble the camera and test the AF performance for distant objects. In this paper, we propose using a confocal displacement sensor for calibrating the VCM displacement, where the axial chromatic aberration of a confocal objective lens is used to measure the target position. The tolerance angle for the dynamic tilt of a VCM increased up to  $\pm 15^\circ$  because of the large numerical aperture of the confocal objective lens, which increased the stability of the repeatable in-line inspection. We compared the measurement robustness of the confocal displacement sensor with that of the laser displacement sensor in a mass production line to verify its performance superiority.*

Manuscript received: February 22, 2017 / Revised: June 13, 2017 / Accepted: August 8, 2017

### 1. 서론

스마트 폰 카메라들은 초점 거리를 자동으로 조절할 수 있는 AF (Auto Focus) 기능을 대부분 갖추고 있다. 자동 초점 기능을 위해서는 렌즈를 광축 방향으로 이동 시킬 수 있는 구동기가 필요하다. 카메라 모듈에 사용되는 AF 구동기의 종류는 VCM (Voice Coil Motor), 피에조(Piezo), 스텝핑 모터(Stepping Motor) 등 여러 방식이 있으나 그 중에서도 VCM 방식이 가장 널리 사용되고 있다. VCM은 제작 구조의 단순성 및 낮은 가격 그리고 높은 신뢰성으로 인해 대부분의 카메라 모듈에서 AF 구동기로 사용한다. 하지만 이런 장점에도 불구하고 VCM의 근본적인 구조적 한계로 인해 구동 중에 렌즈의 틸트(Tilt)가 발생하는 문제가 있으며 이로 인한 카메라 모듈의 광학 성능 저하가 여전히 VCM의 개선 과제로 남아있다.<sup>1</sup> VCM의 틸트는 크게 정적틸트(Static Tilt)와 동적틸트(Dynamic Tilt)로 구분이 되는데 정적틸트는 VCM을 구동하지 않은 상태에서의 VCM 바닥면과 Lens 중심축

과의 틸트를 말하며, 동적틸트는 VCM의 동작 과정에서 발생하는 틸트를 말한다. 동적틸트의 주요 원인으로는 판 스프링의 위치 별 강성 차이, 내부 자석의 위치 별 자기력 세기 차이, 보빈(Bobbin)에 감겨진 코일의 밀도 차이 등으로 주로 VCM의 제작 과정에서 발생된다. Fig. 1은 12 메가픽셀(Mega Pixel)급 카메라 모듈에 사용되는 VCM의 동적틸트를 측정할 데이터로 최대 13'(Arc-Minute)까지 동적틸트가 특정한 방향성이 없이 발생할 수 있다.

AF 구동 시 초점거리 변위량은 카메라 모듈의 주요 성능 평가 항목 중 하나로 카메라 모듈에서는 최대 변위량에 대한 사양을 정해놓고 이를 관리하고 있다. 카메라 모듈의 AF 변위량을 측정할 때 가장 많이 사용하는 방법은 비접촉식 레이저 변위 센서를 이용하는 것이다.<sup>2,3</sup>

레이저 변위 센서는 삼각 측정 원리를 이용한 비접촉식 광학 측정 방식으로 Fig. 2에 레이저 변위 센서를 이용한 카메라 모듈의 AF 변위량 측정 방법을 나타내었다. 레이저 광원이 투광렌즈를

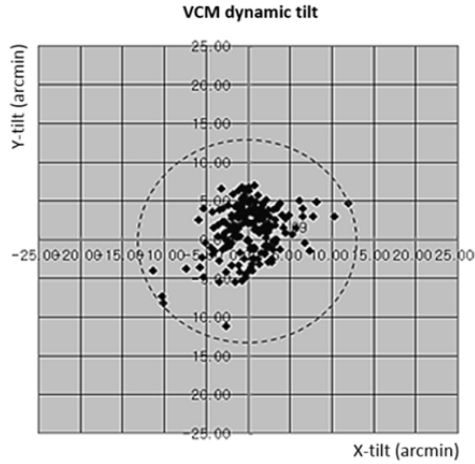


Fig. 1 Distribution of VCM dynamic tilt for camera module

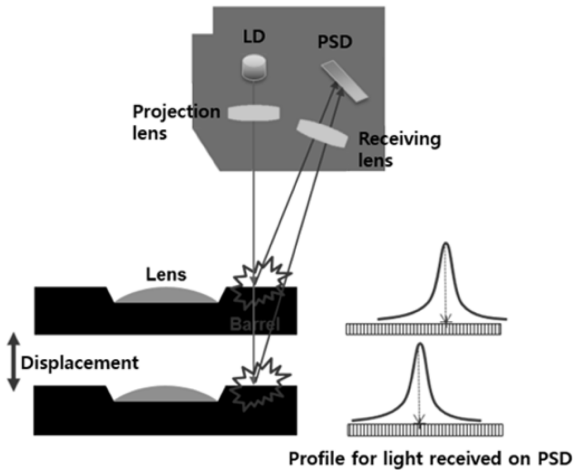


Fig. 2 AF displacement measurement method of a camera module using a laser displacement sensor

통해 배럴(Barrel)에 조사되고, 배럴을 맞고 되돌아오는 반사광을 수광 렌즈로 집광하여 PSD (Position Sensitive Detector)에 수광되면 센서에서 수광량이 최대가 되는 지점의 위치 변화를 감지하여 변위량을 측정하게 된다.<sup>4,5</sup> 이 때 변위 측정 위치는 카메라 모듈의 광축 중심인 렌즈 중심이 아니라 중심에서 떨어진 배럴이다. 이는 레이저 광원의 측정 물체에 따른 반사 특성 때문인데, Fig. 3(a)에서와 같이 레이저가 렌즈와 같은 곡률이 있는 경면체에 입사되면 정반사가 일어나게 되고, 이 때 레이저 광원의 직진성으로 인해 입사광이 렌즈의 중심에서 조금만 벗어나게 되어도 렌즈의 곡률에 의해 반사광의 각도가 급격히 변하게 되어 PSD 센서에 수광 하지 못하는 현상이 발생할 수 있다.<sup>6,7</sup> 반면에 배럴은 렌즈와는 달리 평탄한 면을 유지하고 있으며, 거친 표면 특성으로 인해 확산반사가 일어나게 되고 배럴에 틸트가 있더라도 반사광이 일정 범위로 확산되기 때문에 PSD 센서에서 비교적 안정적으로 반사광을 수광할 수 있다.<sup>8</sup> 카메라 모듈의 제작 공차 및 측정 장비의 셋업(Setup)

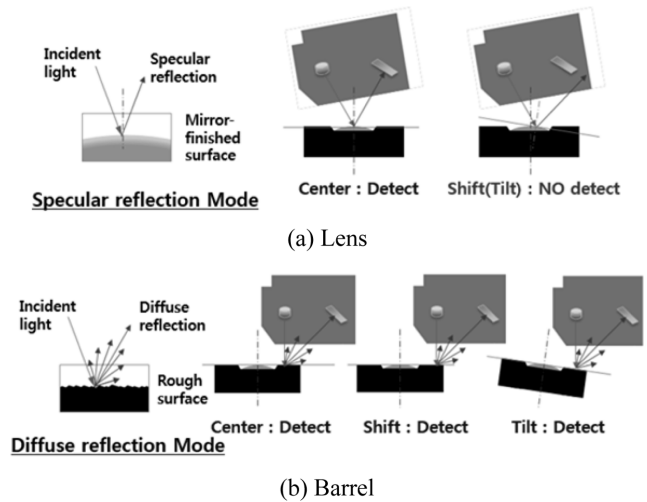


Fig. 3 Reflectance characteristics of the laser displacement sensor light source according to the measurement object

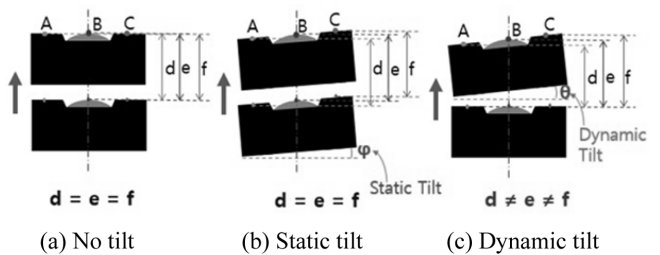


Fig. 4 Measurement differences of the AF driving distance at 3 measuring points A, B, C

공차 등을 고려 했을 때 공정 중에 항상 렌즈의 중심을 오차 없이 측정하는 것이 불가능 하며, 따라서 렌즈에 비해 수광이 안정적인 배럴에 측정점을 두고 AF 변위량을 측정하고 있다.

하지만 이러한 레이저 변위 측정 방식에는 한가지 문제점이 존재한다. VCM에서는 구동 시 동적틸트가 발생하게 되는데, 이 동적틸트로 인해 실제 렌즈 중심에서의 AF 변위량과 배럴에서의 측정값이 달라지게 된다. Fig. 4에서와 같이 변위 측정점을 A, B, C로 각각 다른 지점을 측정했을 때 VCM의 틸트가 없거나 정적 틸트만 있는 경우는 AF 구동 시 각 측정점에서의 변위량이 모두 동일 하지만 동적틸트가 있는 경우는 각 위치별로 변위량에 차이가 발생함을 알 수 있다. 카메라 모듈에서 정의하는 AF 변위량은 렌즈의 광축 중심이 수직 방향으로 이동한 거리를 의미한다. 즉 배럴에서 측정된 변위량은 VCM의 동적틸트로 인해 카메라 모듈에서 정의하는 AF 변위량을 정확히 반영하지 못한다고 할 수 있다. 동적틸트가  $\theta$ 만큼 발생 했을 때 렌즈 중심(B지점)에서 변위량을 측정할 값과 배럴(A or C지점)에서 변위량을 측정했을 때의 값의 차이는 다음의 식으로 표현 할 수 있다.

$$e - d(\text{or } f - e) = \overline{AB}(\text{or } \overline{BC}) \times \sin \theta \quad (1)$$

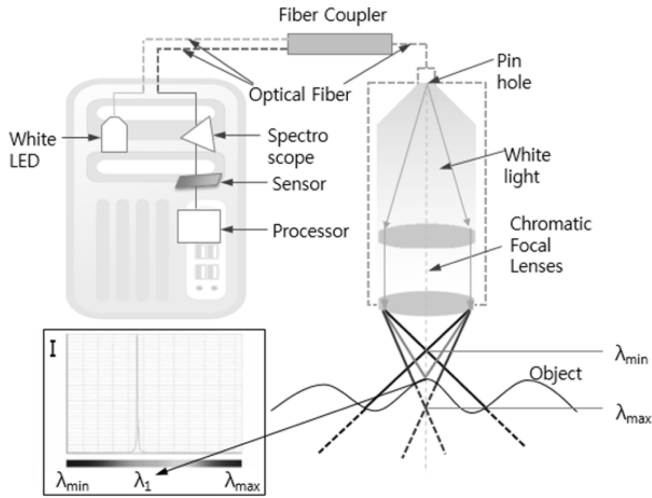


Fig. 5 Structure of confocal displacement sensor

일반적인 모바일 폰 카메라 모듈의 렌즈 중심에서 배럴까지의 거리(AB)를 2.5 mm, 그리고 동적틸트 최대 스펙을 ±13'(Arc-Minute)이라고 할 때, 배럴에서 측정한 변위량은 렌즈 중심에서 측정한 변위량과 최대 약 11 μm이 차이가 날 수 있다. 이는 VCM 최대 AF 변위량이 300 μm이라 했을 때 약 4%에 해당하는 오차 값으로, 현재처럼 배럴에서 측정한 결과는 카메라 모듈에서 정의하고 있는 AF 변위량을 정확하게 반영하지 못하는 문제점을 가지고 있다.

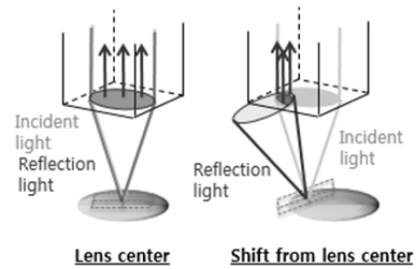
따라서 본 연구에서는 렌즈의 AF 구동 변위량의 정확한 측정을 위해 배럴이 아닌 렌즈 표면의 변위를 직접 측정할 수 있는 새로운 방법을 제안하고, 이 측정 시스템에 대한 검증을 진행하였다.

2. 본론

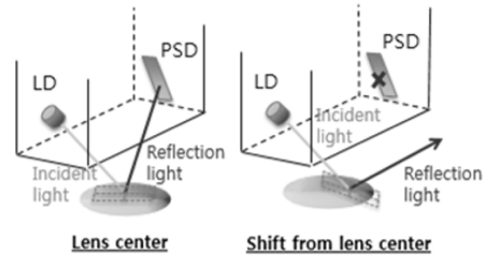
2.1 공초점 변위 센서의 원리 및 특성

백색광 공초점 변위 센서는 Fig. 5와 같이 LED로부터 나온 백색광이 광섬유와 핀홀(Pin Hole)을 지나 렌즈를 통해 대상물로 입사되면 빛의 파장에 따라 초점위치가 다르게 맺히도록 설계된 색수차 유발 렌즈를 거친 후 각 파장에 따라 높이가 다른 위치에 초점이 형성된다. 이 때 대상물을 맞고 되돌아오는 반사광은 입사광과 동일한 축으로 다시 입사되고 그 중 초점이 맞는 파장의 빛 대부분이 핀홀을 지나 센서부로 수광되고 나머지 파장의 반사광은 핀홀을 통과하지 못하게 된다. 핀홀을 통과한 특정 파장의 빛은 장치 내부의 분광기를 통과해서 수광 소자로 입사되는데 분광기에서 어떤 파장의 빛이 들어오는지를 검출해냄으로써 대상물의 거리를 측정할 수 있다.<sup>9,10</sup>

Fig. 6은 렌즈와 같이 곡률이 있는 경면체를 측정할 때 공초점 변위 센서와 레이저 변위 센서 측정 방식의 차이에 대해 표현한 그림이다. 공초점 변위 센서는 광원으로부터 나온 빛이 측정 대상물에 수직인 방향에서 초점이 맺히면서 입사된다. 이렇게 수렴(Converging)된 빛이 측정 대상물을 맞고 반사될 때에는 발산

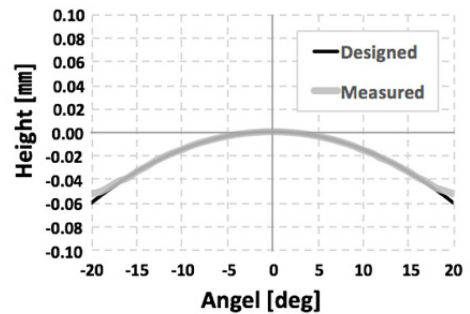


(a) Confocal displacement sensor

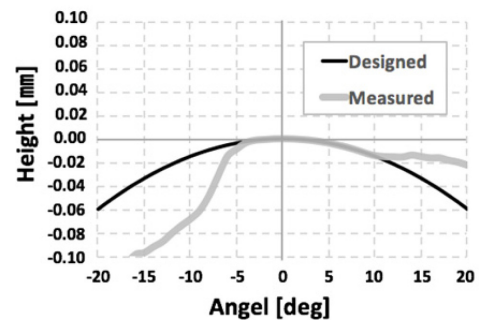


(b) Laser displacement sensor

Fig. 6 Comparison of displacement sensors



(a) Confocal displacement sensor



(b) Laser displacement sensor

Fig. 7 Angular deviation tolerance according to displacement sensor method

(Diverging)되어 넓은 범위로 퍼져서 수광부로 들어오기 때문에 수광면적이 넓어 레이저 변위 센서 방식에 비해 반사광을 수광하는데 훨씬 유리하다. 또한 반사광의 일부만 수광 하더라도 파장

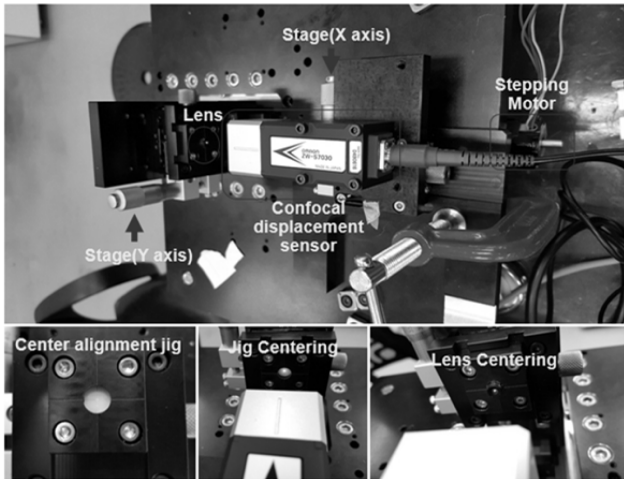


Fig. 8 Device configuration for testing the confocal displacement sensor

정보를 통해 안정적으로 대상물을 측정할 수 있다.<sup>11,12</sup> 반면에 레이저 변위 센서는 레이저 광원의 직진성으로 인해 입사광과 반사광이 항상 일정한 각도를 유지하지 않으면 수광 센서로 반사광을 수광하지 못하여 측정 각도가 극히 제한적이다.

Fig. 7은 공초점 변위 센서와 레이저 변위 센서로 곡률이 있는 렌즈를 측정할 데이터로서, 공초점 변위 센서가 레이저 변위 센서 방식에 비해 훨씬 넓은 각도 범위에서 측정이 가능함을 알 수 있다. 측정에 사용된 변위 센서는 모두 현재 상업용으로 판매가 되고 있는 제품들로 공초점 변위 센서는 Omron사의 ZW-S7030 모델을 사용하였고, 레이저 변위 센서는 Keyence사의 LK-G30 모델을 사용하였다.

2.2 실험 방법 및 장치

모든 양산 테스트 장비들은 측정 기기의 위치 셋업에 대한 공차, 측정 지그(Jig)의 제작 공차 및 카메라 모듈의 제작 공차 등으로 인해 모든 제품마다 측정 위치가 항상 일정하지 않고 이동오차가 발생하며, 양산 테스트 장비들은 이러한 측정 위치 공차까지 감안하여 측정 정밀도를 높여야 한다. 따라서 공초점 변위 센서의 공정 시프트에 대한 공차 및 측정 정밀도를 분석하였다. 먼저 공초점 변위 센서로 측정 가능한 렌즈의 구간을 확인하였고, 측정 가능 구간 내에서 정밀한 측정이 이루어지는지를 확인하였다. 이를 위한 테스트 장치의 구성은 Fig. 8과 같다. X-Y 스테이지(Stage)를 이용하여 각 축 방향으로 렌즈를 100 μm씩 이동시켜 가면서 공초점 변위 센서의 측정 범위를 확인하였다. 렌즈가 변위 센서의 측정점 정 위치에 위치하도록 정렬 지그를 따로 제작하여 렌즈의 중심을 측정점의 한 가운데 정렬토록 하였다. 또한 스텝 모터를 이용하여 렌즈가 정확한 값으로 이동하도록 정밀하게 제어 하였다. 볼스크류(Ball Screw)의 리드(Lead)는 2 mm 이다.

공초점 변위 센서에서의 측정 가능 여부는 분광센서의 수광량의 세기로 판별하였다. Fig. 9는 변위 센서에서 렌즈를 맞고

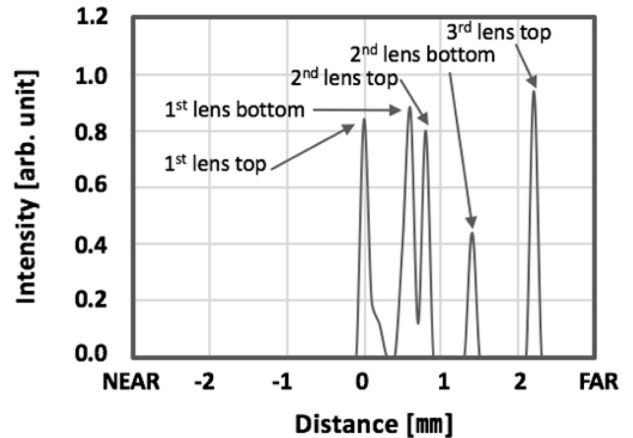
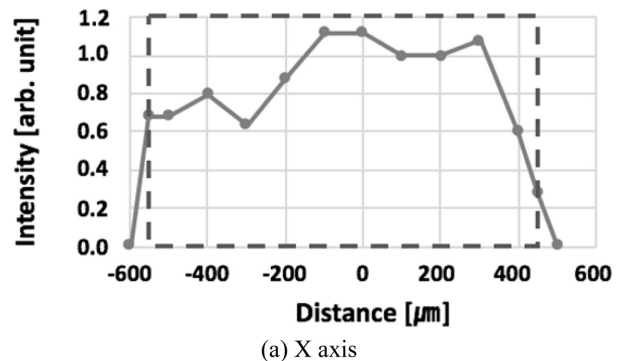
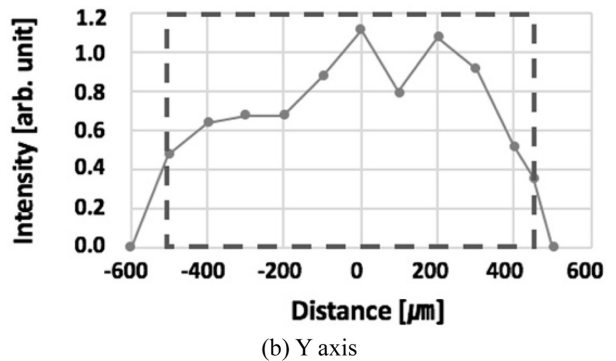


Fig. 9 Input intensity of light received on confocal sensor



(a) X axis



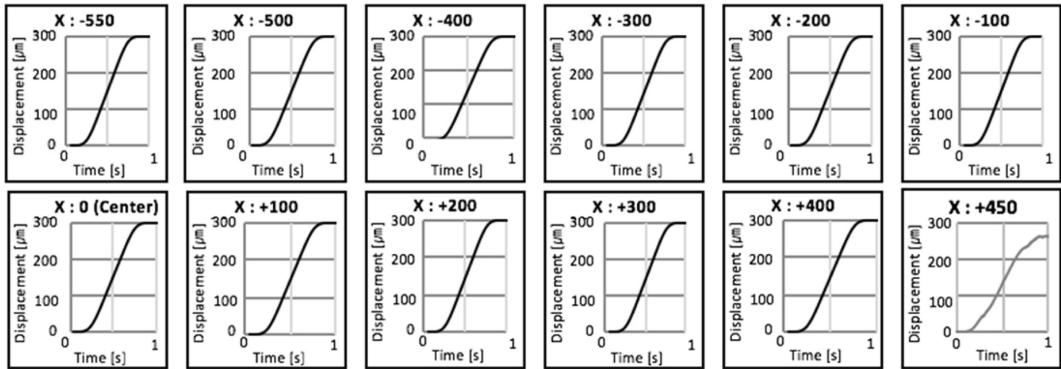
(b) Y axis

Fig. 10 Measurement results of input intensity of 1st lens surface

돌아오는 빛의 수광량을 측정한 그래프이다. 이중 첫 번째 피크(Peak) 위치가 1번 렌즈의 윗면을 맞고 돌아오는 빛의 수광량을 나타내는 것으로, 렌즈의 중심을 기준으로 공초점 변위 센서의 측정 위치를 X와 Y축으로 각각 일정 간격으로 이동 시키면서 첫 번째 피크가 감지되는 구간을 변위 센서의 측정 가능 구간으로 판별하였다.

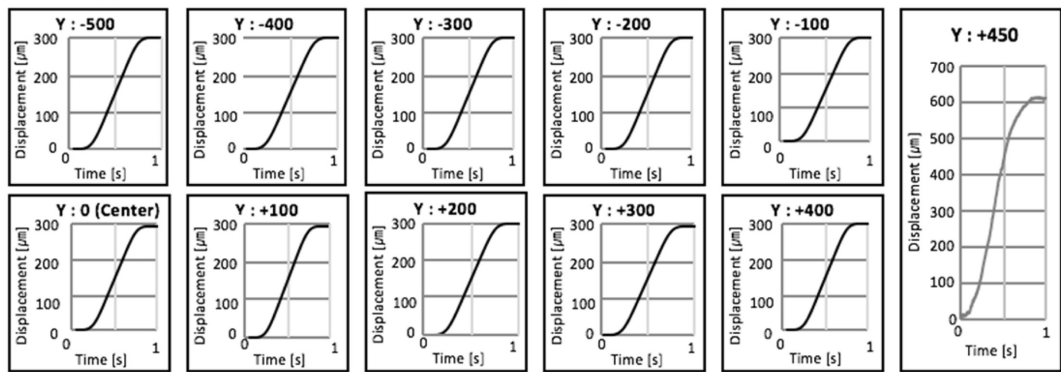
공초점 변위 센서의 측정 가능 구간을 구한 다음, 그 구간 내에서 측정이 얼마나 정밀하게 이루어지는지를 검증하였다. 검증 방법은 렌즈를 광축 방향으로 300 μm을 이동시키고, 변위 센서가

X [ $\mu\text{m}$ ]	-550	-500	-400	-300	-200	-100	0	+100	+200	+300	+400	+450
Y [ $\mu\text{m}$ ]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intensity [arb. Unit]	0.68	0.68	0.80	0.64	0.88	1.12	1.12	1.00	1.00	1.08	0.68	0.28
#1 [ $\mu\text{m}$ ]	299.7	299.16	299.74	299.85	299.36	299.73	299.62	299.56	299.58	299.64	300.05	261.36
#2 [ $\mu\text{m}$ ]	299.52	299.25	299.72	299.62	299.35	299.83	299.73	299.45	299.54	299.35	299.98	263.26
#3 [ $\mu\text{m}$ ]	299.36	299.52	299.45	299.45	299.46	299.49	299.59	299.52	299.67	299.35	299.79	299.16
#4 [ $\mu\text{m}$ ]	299.64	299.34	299.53	299.52	299.16	299.64	299.93	299.22	299.72	299.44	299.82	263.21
#5 [ $\mu\text{m}$ ]	299.64	299.11	299.54	299.65	299.13	299.53	299.67	299.34	299.75	299.26	299.93	269.24
Max. Error [ $\mu\text{m}$ ]	0.64	0.89	0.55	0.55	0.87	0.51	0.41	0.79	0.47	0.74	0.21	38.64
Avg. [ $\mu\text{m}$ ]	299.57	299.28	299.6	299.62	299.29	299.64	299.71	299.42	299.65	299.41	299.91	271.25
Stdev. [ $\mu\text{m}$ ]	0.13	0.16	0.13	0.15	0.14	0.14	0.13	0.14	0.09	0.15	0.11	15.88



(a) X axis

X [ $\mu\text{m}$ ]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y [ $\mu\text{m}$ ]	-500	-400	-300	-200	-100	0	+100	+200	+300	+400	+450
Intensity [arb. Unit]	0.48	0.64	0.68	0.68	0.88	1.12	0.80	1.08	0.92	0.52	0.36
#1 [ $\mu\text{m}$ ]	299.75	299.73	299.62	299.73	300.06	299.62	299.86	299.32	299.68	300.08	610.70
#2 [ $\mu\text{m}$ ]	299.43	300.04	299.92	299.74	299.64	299.73	299.46	299.36	299.74	299.67	589.13
#3 [ $\mu\text{m}$ ]	299.83	299.74	299.55	299.77	299.83	299.59	299.63	299.46	299.45	300.00	NG
#4 [ $\mu\text{m}$ ]	299.37	299.98	299.73	299.97	299.78	299.93	299.83	299.57	299.46	299.43	NG
#5 [ $\mu\text{m}$ ]	299.75	299.59	299.74	299.57	299.75	299.67	299.48	299.18	299.42	299.86	616.67
Max. Error [ $\mu\text{m}$ ]	0.64	0.41	0.45	0.43	0.36	0.41	0.54	0.82	0.58	0.57	316.67
Avg. [ $\mu\text{m}$ ]	299.63	299.82	299.71	299.76	299.81	299.71	299.65	299.38	299.55	299.81	363.30
Stdev. [ $\mu\text{m}$ ]	0.21	0.19	0.14	0.14	0.16	0.13	0.19	0.15	0.15	0.26	331.80



(b) Y axis

Fig. 11 Measurement results of AF displacement for lens

이 변위량을 얼마나 정확하게 측정하는지를 확인하는 방법으로 각 구간에서 5회 반복 측정을 실시하였다.

2.3 실험 결과 및 고찰

센서 수광량 측정 결과는 Fig. 10에서와 같이 X축 방향으로

-550  $\mu\text{m}$ 에서 +450  $\mu\text{m}$ 까지의 구간 내에서 센서로 반사광이 수광 되는 것을 확인하였으며, Y축으로는 -500  $\mu\text{m}$ 에서 +450  $\mu\text{m}$ 의 범위 내에서 반사광이 수광되는 것을 확인하였다.

Fig. 11에서는 공초점 변위 센서의 수광 가능 범위 내의 각 지점에서 300  $\mu\text{m}$ 의 렌즈 이동에 대한 변위량 측정 결과를 테이블

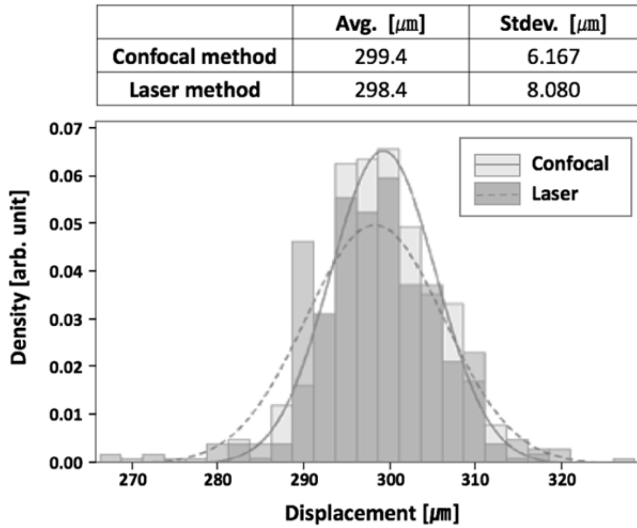


Fig. 12 Histogram of AF displacement measurement results (Confocal method vs. Laser method)

로 나타내었다. 테이블 하단의 그래프는 렌즈가 초기 위치에서 300  $\mu\text{m}$ 의 거리를 이동하는 동안 시간에 따른 이동량의 변화를 각 측정 지점별로 나타낸 것이다. #1에서부터 #5는 측정 회수를 나타낸 것으로 동일 지점에서 5회 반복 측정하였다. X축의 경우 렌즈의 중심으로부터 -550  $\mu\text{m}$ 에서 +400  $\mu\text{m}$ 까지의 구간 내에서 최대 측정 오차가 0.89  $\mu\text{m}$ 로 측정 되었다. 이는 실제 변위 값 (300  $\mu\text{m}$ )의 0.3%에 해당되는 오차로서, 이 구간에서는 정밀한 측정이 이루어지고 있음을 알 수 있다. Y축의 경우도 X축 방향의 결과와 유사하게 -500  $\mu\text{m}$ 에서 +400  $\mu\text{m}$ 까지의 구간 내에서는 최대 측정 오차가 0.82  $\mu\text{m}$ 으로 실제 변위 값의 0.27% 수준으로 정밀한 계측이 이루어짐을 확인하였다. 하지만 X, Y축 모두 +450  $\mu\text{m}$  지점에서는 변위 센서에서 수광량이 감지되고 있음에도 불구하고 측정 오차가 각각 38.64  $\mu\text{m}$ 과 316.67  $\mu\text{m}$ 이나 발생하였다. 또한 측정값의 시간에 따른 변화도 다른 구간의 그래프와는 달리 비선형적으로 발생하고 있음을 확인하였다. 이는 공초점 변위 센서가 측정 대상으로부터 오는 반사광을 수광하더라도 그 수광량이 충분하지 않으면 계측 값에 에러가 발생할 수 있음을 의미한다. 향후 정밀한 계측이 가능한 최소 수광량 조건 및 이를 개선하기 위한 계측 알고리즘에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 보인다.

종합해 보면, 공초점 변위 센서로 렌즈의 AF 변위량을 측정할 경우 렌즈 중심으로부터  $\pm 400 \mu\text{m}$  이내의 지점에서는 측정 오차가 0.3% 이하로 정밀한 측정이 가능하며, 이는 측정 위치의 이동 오차가 발생하더라도  $\pm 400 \mu\text{m}$ 까지는 허용 가능한 수준임을 의미한다. 현재 양산에서 사용 중인 AF 변위 측정 장비의 측정 점 위치에 대한 이동오차는  $\pm 300 \mu\text{m}$ 으로 공초점 변위 센서의 정밀 측정 가능 범위는 이를 충분히 만족하며 양산 측정 시스템으로 적용에 문제가 없음을 알 수 있다.

Fig. 12는 500개의 동일 샘플에 대해 레이저 변위 센서 방식과

공초점 변위센서 방식으로 AF 구동 변위량을 측정한 결과를 비교한 그래프이다. 공초점 방식으로 측정한 결과 표준편차가 6.167  $\mu\text{m}$ 로 레이저 변위센서로 측정한 표준편차 값 8.08  $\mu\text{m}$ 보다 작은 표준편차가 발생하는 것을 확인하였다. 이는 공초점 방식이 레이저 방식에 비해 카메라 모듈의 AF 구동 변위측정 시 작은 산포로 보다 안정적으로 측정되는 것으로 판단할 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 렌즈와 같은 곡률을 가진 경면체에서도 안정적으로 변위 측정이 가능한 공초점 변위센서를 사용하여 카메라 모듈 렌즈의 AF 구동 거리 변위량을 측정하였다. 실험 결과, 공초점 변위센서를 이용하여 렌즈 중심으로부터 400  $\mu\text{m}$  반경 이내의 측정 점에서 최대 측정 오차가 0.3% 이하 수준으로 정확한 측정 값을 얻을 수 있었고, 측정 점의 미세한 이동오차가 발생할 수 있는 대량 생산의 공정에서도 적용이 가능한 측정 시스템을 확인하였다. 또한, 레이저 변위 센서 방식에 비해 공초점 변위 센서 방식이 AF 변위량 측정 시 낮은 산포로 보다 안정적으로 측정이 이루어짐을 확인하였다.

본 연구를 통해 공초점 변위 센서 방식의 변위 측정기를 이용하여 카메라 모듈의 AF 변위량 측정 시 배럴이 아닌 렌즈를 측정함으로써 VCM의 동적틸트에 영향 없이 정확한 초점거리 변위량을 측정하는 것이 가능하게 되었으며, 이러한 정밀한 카메라 모듈 성능평가를 바탕으로 카메라 모듈 기술 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

### REFERENCES

1. Kwon, T.-K. and Kim, Y.-K., "Change the Structure of VCM Actuator AUTO Focusing the Camera Module Performance Optimization Through," Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 1381-1385, 2011.
2. Kwon, J.-H., Rhee, H.-G., Ghim, Y.-S., and Lee, Y.-W., "Field-Curvature Correction according to the Curvature of a CMOS Image-Sensor Using Air-Gap Optimization," Journal of the Optical Society of Korea, Vol. 19, No. 6, pp. 658-664, 2015.
3. Son, S. W., Kihm, H. Y., and Yang, H. S., "Effect of Die Bonding Epoxy on the Warpage and Optical Performance of Mobile Phone Camera Packages," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 15, No. 4, pp. 1-9, 2016.
4. Baik, S.-H. and Park, S.-K., "Shape Measurement by Using Optical Triangulation," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 22, No. 4, pp. 13-18, 2005.
5. Lee, J. and Kim, S., "Design of a Non-Contact Type Displacement Measurement System Based on Optical

- Triangulation Method,” Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 16, No. 6, pp. 1030-1035, 1992.
6. Vertoparkhov, V. V., “Influence of the Shape of an Object and the Orientation of Its Surface on the Accuracy of Laser Triangulation Measurement,” Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, No. 6, pp. 61-65, 1995.
  7. Park, J.-S. and Jeong, K.-W., “Characteristics of the Laser Displacement Sensor Using Optical Triangulation Method,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 16, No. 7, pp. 40-50, 1999.
  8. Torrance, K. E. and Sparrow, E. M., “Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces,” Journal of the Optical Society of America, Vol. 57, No. 9, pp. 1105-1114, 1967.
  9. Ruprecht, A., Pruss, C., Tiziani, H., Osten, W., Lucke, P., et al., “Confocal Micro-Optical Distance Sensor: Principle and Design,” Proc. of SPIE, Vol. 5856, pp. 128-135, 2005.
  10. Ruprecht, A., Wiesendanger, T., and Tiziani, H., “Chromatic Confocal Microscopy with a Finite Pinhole Size,” Optics Letters, Vol. 29, No. 18, pp. 2130-2132, 2004.
  11. Miks, A., Novak, J., and Novak, P., “Analysis of Method for Measuring Thickness of Plane-Parallel Plates and Lenses Using Chromatic Confocal Sensor,” Applied Optics, Vol. 49, No. 17, pp. 3259-3264, 2010.
  12. Browne, M., Akinyemi, O., and Boyde, A., “Confocal Surface Profiling Utilizing Chromatic Aberration,” Scanning, Vol. 14, No. 3, pp. 145-153, 1992.