

## He-Ne 레이저 빔 품질 진단용 고속파면센서 개발

The Development of High Speed Wavefront Sensor  
for Diagnosis of Beam Quality of He-Ne Laser

**이 영 철\***      **이 재 일\***      **강 응 철\***  
Lee, Young-Cheol      Lee, Jae-Il      Kang, Eung-Cheol

### ABSTRACT

In this paper, we presented the development results of high speed wavefront sensor which is used in diagnosing the beam quality of He-Ne laser for adaptive optics system. The beam quality information of laser in AO system is necessarily required for diagnosing the optical components or correcting the distorted wavefront afterward. According to system requirements, normally, it is requested that there are high precision of measurement and real time processing speed. The developed wavefront sensor in this paper achieved maximum 30Hz of measurement rate and  $\lambda/20$  ( $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ ) of measurement precision in RMS. We also applied the developed into an experimental adaptive system and verified the performance of it by correcting the aberrated wavefront with a rate of 30Hz and  $\lambda/20$  precision using the combination of the developed and PID control algorithm.

주요기술용어(주제어) : Adaptive Optics(적응광학), Shack-Hartmann Sensor(샤-하트만 센서), Beam Quality(빔품질), Wavefront Reconstruction(파면복원), Wavefront Correction(파면보정)

### 1. 머리말

적응광학(adaptive optics, AO)은 천문학, 군용 시스템에서 가장 활발히 연구되고 있는 분야로서 최근에는 광통신, 의료(안과)분야 등으로도 적용영역이 점차 확대되어지고 있다. 적응광학 기술은 광 현상 및 사용하는 레이저 빔 품질(beam quality)을 측정하고, 보정하여 최종적인 광 정보 개선 및 시스템 성능 진

단을 목적으로 하는 분야에 활용되어지고 있다. 관련 기술을 선도하는 국가들은 정부 차원의 기술보안 정책과 통제로 인하여 관련 기술의 확산을 극도로 제한하고 있어, 독자적인 국산화 기술 확보 노력이 절실히 요구되어지고 있다. 본 논문에서는 이러한 국산화 기술 확보 차원의 연구에서 수행한 설계 및 개발 결과를 제시코자 한다.

적응광학 시스템에 사용되는 레이저 빔 품질 정보는 시스템을 구성하는 광학계 성능진단이나 후단 파면보정에 필수적으로 사용되는 정보로서, 빔 품질을 측정하는데 샤-하트만(Shack-Hartmann, S-H) 파면센서(wavefront sensor)가 널리 적용되어지고 있다.

† 2007년 10월 24일 접수~2007년 11월 29일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : lyc1304@hanmail.net

이 센서는 광학적 구조가 간단하고, 진동 환경에 강하며, 빠른 처리속도가 가능한 장점을 가지고 있다. 파면센서의 주요 성능인자로는 시스템 요구사항을 만족하는 실시간 처리 기능과 파면측정 정밀도가 있다. 본 연구에서 개발된 시스템은 He-Ne 레이저 빔 품질 측정을 목적으로 파면측정율은 최대 30Hz, 파면측정 정밀도는  $\lambda/20$  ( $@\lambda=0.6328\mu\text{m}$ ) 이하를 목표로 성능으로 설정하였다.

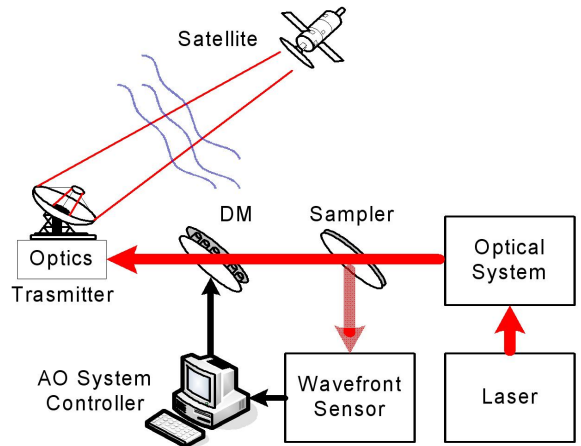
파면측정율은 CCD 검출기 영상출력율과 영상 데이터양, 파면복원 기법, 파면신호처리기의 연산 능력에 의존한다. 이를 고려한 실시간 처리가 가능토록 파면 센서를 두 대의 상용 컴퓨터 기반에서 신호처리 기능을 순차적으로 분산처리토록 하였으며, 두 컴퓨터 간에는 TCP/IP(transfer control protocol/internet protocol) 방식으로 데이터 통신을 수행토록 하였다. 파면측정 방법은 파면의 국부 기울기를 측정하는 S-H 기법을 적용하였으며, 파면복원은 지역복원(zonal reconstruction)기법을 사용하였다. 본 시스템에서 개발된 파면 센서는 다양한 파면분석을 위해 온라인(on-line) 또는 오프라인(off-line) 방식으로 3차원 OPD(optical path difference)영상, Zernike 계수추정, 합성 fringe 영상, 합성 far-field 영상 등을 생성할 수 있다. 또한 운용 프로그램은 Visual C++ 6.0을 적용하여 MDI(multiple document interface) 방식으로 설계/구현함으로써 운용자 편의성을 확보하였다.

본 단락 이후에서는 개발된 파면센서의 시스템 설계 내용과 파면측정 정밀도 시험 결과를 제시하여, 개발 성능목표를 달성하였음을 보이고자 한다. 또한 폐루프 PID 제어기 설계를 통하여 왜곡된 레이저 빔을 보정한 결과도 제시하여 개발한 파면센서 및 적응광학시스템이 우수한 성능임을 입증하고자 한다.

## 2. 적응광학 시스템

응용분야에 따라 여러 적응광학 시스템이 있지만, 가장 전형적인 형태를 가지는 레이저 빔 통신용 적응광학 시스템의 개념 구성도를 그림 1에 나타내었다.

이 시스템은 송신될 레이저의 형상을 만드는 광학 시스템과 레이저 파면의 왜곡량을 측정하는 파면센서,



[그림 1] 통신용 적응광학 시스템 개념구성도

왜곡된 파면을 실시간으로 보정하는 폐루프(closed-loop) PID(proportion-integration-differentiation)제어계, 보정장치인 형상가변거울(deformable mirror, DM), 그리고 최종적으로 빔을 송신하는 송신장치 등으로 구성되어 있다.

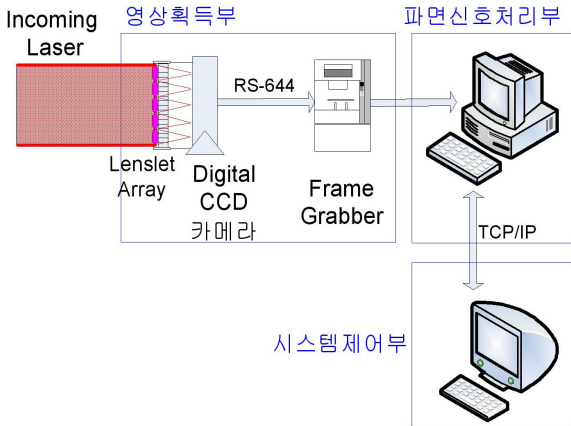
레이저 빔은 자체의 불균일한 특성이나 송신시스템 내부 진동, 광학 부품에 의한 왜곡이나 대기 중 전송 경로상의 빔 왜곡을 겪으므로 송신 전에 미리 빔 품질을 측정하고 보정하여 송신한다. 송신시스템 내부에서 발생하는 빔 왜곡량, 대기 중 전송경로상의 왜곡 등을 측정할 수 있다면, 폐루프 PID 제어 알고리즘과 형상가변거울을 이용하여, 송신되는 빔의 파면을 제어함으로써, 빔 송신효율을 증대시킬 수 있다.

## 3. S-H 파면센서 설계

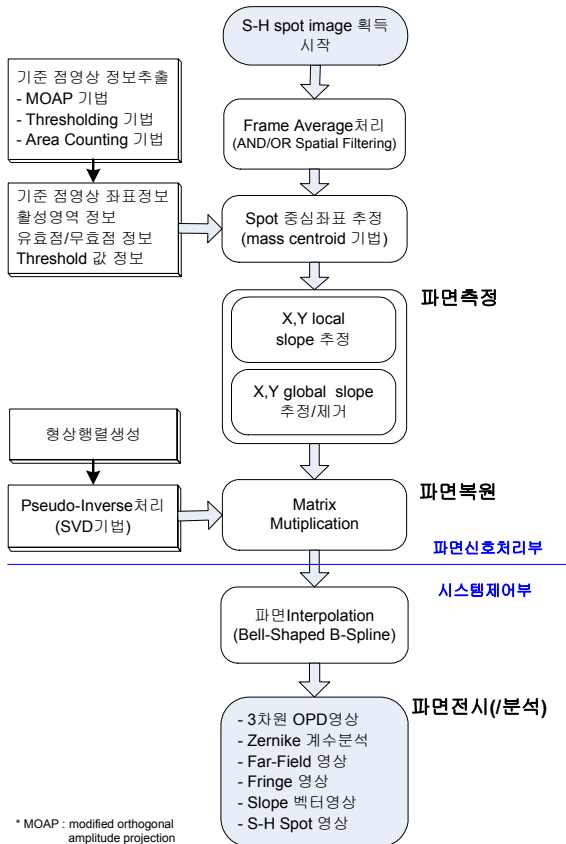
### 가. S-H 파면센서 설계

개발한 S-H 파면센서는 기능적으로 영상획득부, 파면신호처리부, 시스템 제어부 등으로 구분하였다. 이에 대한 개념 구성도를 그림 2에 나타내었으며, 설계한 S-H 파면센서 신호처리 흐름도는 그림 3에 나타내었다.

실시간 처리를 위해 파면신호처리와 파면전시 기능을 분리하여 3.2GHz와 3.0GHz 두 대의 PC 기반 처리 구조로 파면센서를 구성하였다. 영상획득부에서 획득



[그림 2] 개발된 S-H 파면센서 개념 구성도



[그림 3] S-H 파면센서 신호처리 흐름도

득된 레이저 빔 점 영상은 파면신호처리부에서 일련의 신호처리 후 파면이 복원되고, TCP/IP 방식으로

시스템 제어부로 전송되어 복원된 레이저 파면정보를 전시토록 하였다.

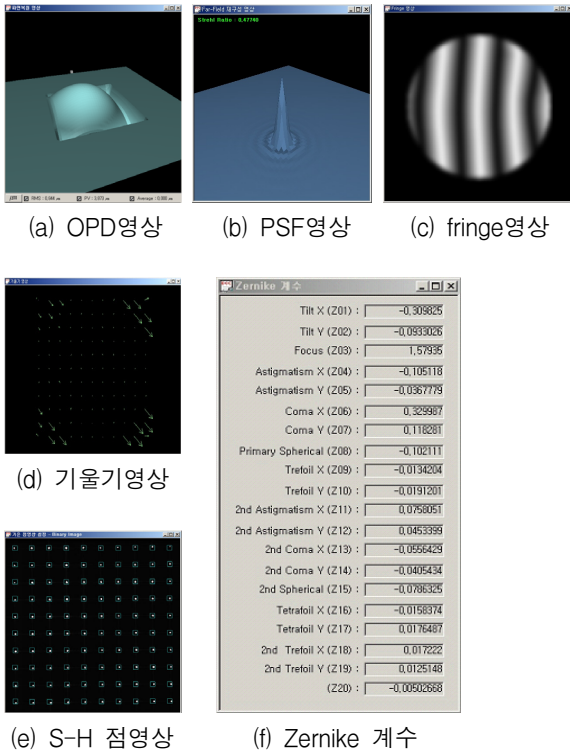
영상획득부는 레이저 빔 정렬과 샘플링을 위한 일련의 광학 부품과 배열렌즈(lenslet array), CCD 카메라, 그리고 영상획득장치(frame grabber) 등으로 구성되어 있다. 배열렌즈는 입사하는 레이저 빔 파면을 공간샘플링하여 CCD 카메라 초점면에 점 영상(spot image)으로 영상화시키는 광학 부품으로서, 20×20 배열과 초점거리는 30mm, subaperture 직경은 0.5mm 그리고 구경형상은 사각형 형상을 적용하였다.

CCD 카메라는 DALSA사 CA-D8 모델을 선정하였으며, 8비트 RS-644 형태로 최대 77Hz 영상출력율을 가진다. 본 연구에서는 30Hz 영상출력율로 운용하였으며, 영상획득 장치로는 MATROX사의 Meteor-II/Digital 모델을 선정하여 적용하였다. 사용된 점 영상은 512×512 화소 크기로 획득하였다.

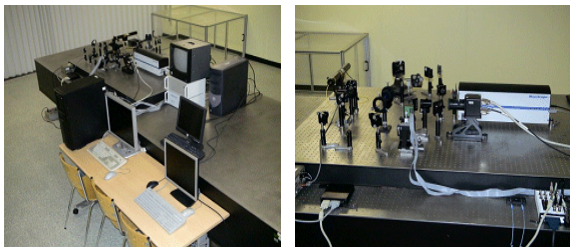
파면신호처리부에서는 먼저, 획득된 레이저 빔 점 영상에 대해 임계치 처리(thresholding)와 함께 무게 중심 추정법(mass centroid estimation)을 수행하여 각각의 점 영상들의 중심좌표를 추정한다. 이 추정된 좌표 값으로부터 파면의 국부 기울기(local slope)와 전역기울기(global slope)를 함께 추정하고, 지역복원 기법인 Southwell 복원 모델의 형상행렬(geometry matrix)을 특이값 분해(singular value decomposition, SVD)기법으로 유사역행렬(pseudo-inverse matrix)처리하여 파면을 복원하였다. 복원된 파면정보는 TCP/IP 방식으로 시스템 제어부에 전송되어 저장된다.

시스템 제어부에서는 복원된 파면정보를 최종적으로 bell-shaped B-spline 기법을 적용하여 1, 2, 4배 까지 선택적으로 파면보간을 실시한 후, 3차원 OPD 영상 으로 화면에 전시한다. 또한 다양한 파면분석을 수행할 수 있도록 Zernike 계수추정, 합성 fringe 영상, 합성 far-field 영상, 국부기울기 벡터 영상, 그리고 S-H 점 영상을 함께 전시할 수 있도록 설계하였다. 그림 4에는 개발한 파면센서 운용 프로그램의 기능인 전시화면을 한 예로 나타내었다.

이외에도 파면측정시 기준이 되는 S-H 기준 점 영상 측정 알고리즘, 형상행렬 자동생성 기능도 구현되었다. 시스템 제어부는 전체 파면센서 시스템의 운용을 관장하므로, 파면측정 및 복원을 위한 환경변수



[그림 4] 개발한 파면센서 운용 프로그램 기능 예



[그림 5] 개발한 파면센서가 적용된 AO 시스템

설정과 영상획득 및 통신(LVDS, RS-232C), 전시조건 등 운용 변수들의 변경이 가능하도록 구현하였다. 그림 5에는 개발한 파면센서를 적용하여, 왜곡된 He-Ne 레이저 빔 품질을 실시간으로 보정하는 적응광학 시스템을 나타내었다.

나. 적용된 대표적 알고리즘

1) S-H 위치 추정 알고리즘<sup>(1)</sup>

S-H 점영상 중심위치 추정을 위해 새로운 검출 알

고리즘을 설계하여 적용하였다. 구현된 알고리즘은 수정된 직교진폭 사영(modified orthogonal amplitude projection, MOAP), 무게중심 추정(mass centroid estimation), 잡음분포 분석 그리고 연성 임계치 처리(soft thresholding)를 근간으로 구성되어 있다. 대표적으로, 적용된 무게중심 추정기법의 정의식은 식 (1), (2)와 같다. 연성 임계치 처리는 배경잡음을 제거하기 위한 것으로서 무게중심 추정기법의 잡음면역성을 개선시킨다. 이때, 문턱치( $V_{TH}$ )는 CCD 검출기 잡음을 시간잡음(temporal noise,  $\delta_{TP}$ ), 공간잡음(spatial noise,  $\delta_{SP}$ ), 평균오프셋( $L_{offset}$ )으로 모델링한 후, 분석을 통해 식 (3), (4)를 정의하여 적용하였다.  $\beta$ 는 범위 조정 인자(range adjusting factor)로서, CCD 검출기 잡음을 분석한 결과 3.0~6.0 범위에서 최적 값을 가지고 있음을 확인하였다. 이들로부터 구한 식 (1), (2)의 점 영상 좌표를 식 (5), (6)에 적용함으로써 각 점 영상에서의 국부 기울기를 구할 수 있다.

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_i \cdot I_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{ij}} \quad (1)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_j \cdot I_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{ij}} \quad (2)$$

여기서,  $m \times n$ 는 배열렌즈 임의의 한 렌즈에 대응하는 CCD 검출기의 화소수,  $I_{ij}$ 는 위치 ( $i, j$ )에서의 신호세기이며,  $(x_c, y_c)$ 는 측정된 왜곡파면 점 영상의 중심좌표이다.

$$\delta_{TOT} = \sqrt{\delta_{SP}^2 + \delta_{TP}^2} \quad (3)$$

$$V_{TH} = \beta \cdot \delta_{TOT} + L_{offset} \quad (4)$$

$$S^x = [x_c - x_{ref}] / F \quad (5)$$

$$S^y = [y_c - y_{ref}] / F \quad (6)$$

여기서,  $F$ 는 배열렌즈의 초점거리( $\mu m$ ),  $(x_{ref}, y_{ref})$ 는 기준파면 점 영상의 중심좌표,  $S^x, S^y$ 는 추정된

x, y 방향 기울기 값이다.

2) 파면복원 알고리즘

측정된 국부 기울기로부터 파면복원을 위해 샘플링이 균일하고, 복원 전달오차(propagation error)가 작은 Southwell 모델을 적용하였으며, 이를 행렬식으로 처리토록 하였다<sup>[2]</sup>. 이때, 복원모델 형상행렬이 특이값을 가지는 특성으로 인해 특이값 분해기법을 적용하여 최소-제곱근(least-square solution)을 구하였다<sup>[3]</sup>. 식 (7), (8)이 Southwell 모델이며, 식 (9)는 이를 행렬식으로 나타낸 것이다. 최종적으로 복원된 파면인 최소-제곱근을 식 (10)에 나타내었다.

$$\frac{s_{i+1,j}^x + s_{i,j}^x}{2} = \frac{(\Phi_{i+1,j} - \Phi_{i,j})}{h} \tag{7}$$

여기서, (i=1, ..., N-1; j=1, ..., N)

$$\frac{s_{i,j+1}^y + s_{i,j}^y}{2} = \frac{(\Phi_{i,j+1} - \Phi_{i,j})}{h} \tag{8}$$

여기서, (i=1, ..., N; j=1, ..., N-1)

여기서, N는 한 축 방향에 대한 위상점 개수, h는 배열렌즈 내 임의의 한 개 렌즈직경,  $\Phi_{i,j}$ 은 위상 추정치,  $s_{i,j}^x, s_{i,j}^y$ 는 측정된 x, y 방향 기울기 값이다.

$$[R][S] = [G][\Phi] \tag{9}$$

$$[\Phi] = [V][\bar{D}]^{-1}[U]^T[G]^T[R][S] \tag{10}$$

여기서, [R]은 기울기 관계행렬(slope relation matrix), [G]는 형상행렬, [S]는 기울기 벡터,  $[\Phi]$ 는 위상벡터이고, SVD에 의해  $[G^T G]^{-1} = [V][\bar{D}]^{-1}[U]^T$ 로 된다.

3) 파면보간 알고리즘

복원된 파면은 실제의 연속적인 파면을 공간 샘플링하여 얻은 이산적인 파면이므로, 시각적 측면에서 공간해상도가 낮아, 적절한 보간(interpolation) 알고리즘을 적용하여 해상도를 향상시킨 후 전시토록 하였다.

$$R_2(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}(x + \frac{3}{2})^2, & -\frac{3}{2} \leq x \leq -\frac{1}{2} \\ \frac{3}{4} - (x)^2, & -\frac{1}{2} \leq x \leq \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2}(x - \frac{3}{2})^2, & \frac{1}{2} \leq x \leq \frac{3}{2} \end{cases} \tag{11}$$

이를 위해, 2차 보간법인 bell-shaped B-spline 기법을 적용하였다<sup>[4]</sup>. 이 기법의 1차원 수식을 식 (11)에 나타내었으며, 이를 2차원으로 확장 적용하였다.

4) Zernike 계수추정 알고리즘

복원된 레이저 파면의 수차(aberration)를 분석하기 위해 Noll<sup>[5]</sup>이 전개한 Zernike 다항식을 적용하였다. Zernike 다항식들은 단위 원(unit circle) 상에서 정의되며, 방사다항식(radial polynomial)과 각 함수(angular function)의 곱으로 표현된다. 각 함수는 2차원 회전 집합(rotation group)에 대한 기저함수(basis function) 역할을 하고, 방사다항식은 Jacobi 다항식으로부터 유도된다. Zernike 다항식들은 식 (12)~(15)로 정의된다. 본 시스템에서는 20차까지 구현하였으며, 복원된 파면과 Zernike 다항식을 최소-제곱 적합(least-square fitting)처리를 통하여 각각의 계수를 추정하였다.

i)  $m \neq 0$

$$Z_{even j} = \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \cos(m\theta) \tag{12}$$

$$Z_{odd j} = \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \sin(m\theta) \tag{13}$$

ii)  $m = 0$

$$Z_j = \sqrt{n+1} R_n^0(r) \tag{14}$$

$$R_n^0(r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2 - s]! [(n-m)/2 - s]!} r^{n-2s} \tag{15}$$

여기서 n, m은 항상 정수이고,  $n \leq m, n - |m| =$  짝수를 만족한다. j는 모드 순서값(mode ordering number)이고 n과 m의 함수이다.

5) 합성 fringe 영상 생성 알고리즘

복원된 레이저 파면의 수차 형상을 분석하기 위해, 가상의 합성 Newton 간섭패턴(interferometric pattern)을 구현하였다. 임의의 두 개 파면에 대한 fringe 패

턴 영상은 식 (16), (17)로 나타낼 수 있다<sup>[6]</sup>. 여기서,  $\alpha_1 - \alpha_2$ 는 두 개 간섭광에 의한 위상차이고,  $\Phi$ 는 복원된 파면이다.

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (16)$$

$$\alpha_1 - \alpha_2 = (2\pi/\lambda) \cdot \Phi \quad (17)$$

### 6) 합성 far-field 영상 생성 알고리즘

Fraunhofer 회절이라고도 하며, 이 현상에 의해 발생하는 점 패턴이 PSF(point spread function)이다. Far-field 패턴을 통해 원거리에서 빔 전체 형상을 예측할 수 있다. 복원된 파면으로부터 far-field 패턴  $P_{Far}(x,y)$  생성은 복소 Fourier 변환을 이용하며, 이를 식 (18), (19)에 나타내었다<sup>[6]</sup>. 여기서  $M(x,y)$ 는 광학계 입사동 마스크이고,  $\Phi(x,y)$ 는 복원된 파면,  $A(x,y)$ 는 빔 세기함수이다.

$$P_{Far}(x,y) = | \text{complex FT}[P_{apr}(x,y)] |^2 \quad (18)$$

$$P_{apr}(x,y) = M(x,y) \cdot A(x,y) \cdot \exp(i \cdot \Phi(x,y)) \quad (19)$$

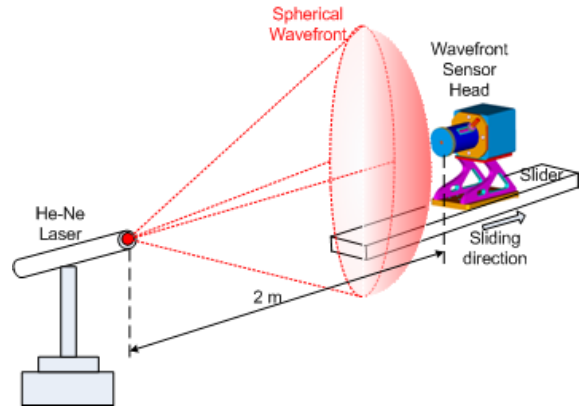
## 4. 실험 결과 및 분석

### 가. 파면측정

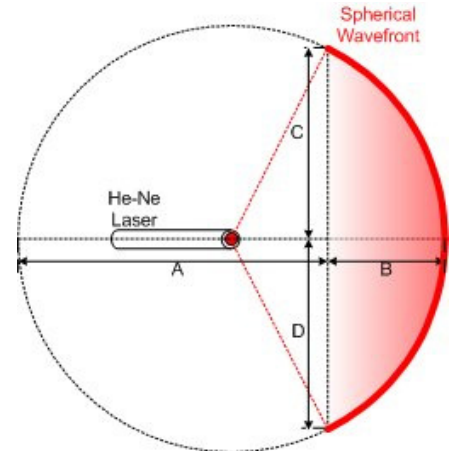
파면측정 정밀도에 대한 성능평가를 위해 구면파를 이용한 측정 정밀도 시험장치를 그림 6과 같이 구성하였다.

단일모드 광섬유를 사용하여 He-Ne 레이저를 점 광원으로 만들고 기준거리 2m에서 파면센서로 기준 파면을 측정하였다. 점 광원에서 퍼져 나가는 레이저 빔의 파면은 구면파이다. 광원과 파면센서 사이의 거리를 변화시키면서 파면의 변화를 측정하고, 측정파면의 RMS값( $V_m$ )과 기하학적인 예측치( $V_c$ )를 비교하였다.

구면파 측정에 대한 예측치 개념도를 그림 7에 나타내었다. 굵은 원호가 CCD 카메라에 의해 측정되는 구면파 영역이다. 이 그림으로부터  $AB = CD$  관계가 성립된다.  $C, D$  값은 측정에 사용된 배열렌즈 개수에



[그림 6] 구면파에 의한 파면측정 정밀도 시험장치 개념도



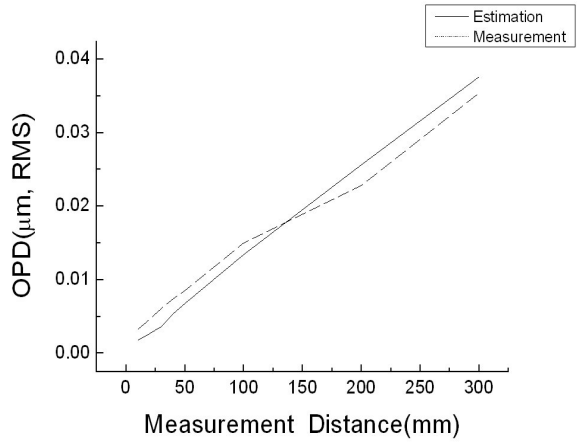
[그림 7] 구면파 이론 예측치 개념도

의해 수치를 알 수 있으며 본 측정에서는 2.3717mm이다. A는  $2(2000 \pm \Delta)$ mm가 되며,  $\Delta$  값이 0인 경우 최초 측정시의 기준면이 되고 이동거리에 따라 예측치를 구하게 된다. 이에 대한 측정치와 예측치를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 각각의 측정치는 측정장치 주변온도나 대류변동 등에 의한 환경인자들의 영향을 최소화하기 위해 실시간으로 180회 측정한 후 평균값을 구한 것이다.

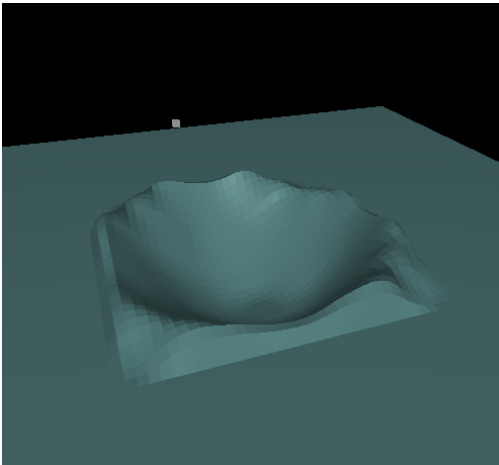
표 1에 나타난 측정정밀도(P)는 식 (20)을 적용하였다. 그림 8은 기준거리로부터 +100mm 떨어진 위치에서 측정 복원한 파면을 3차원 OPD영상의 한 예로 나타낸 것이다.

[표 1] 구면파를 이용한 파면측정 정밀도 결과

측정거리 (2m+)	예측치 (RMS)	측정치 (RMS)	측정정밀도
10mm	0.0018μm	0.0033μm	λ/198
20mm	0.0027μm	0.0046μm	λ/275
30mm	0.0036μm	0.0061μm	λ/791
40mm	0.0054μm	0.0074μm	λ/253
50mm	0.0068μm	0.0086μm	λ/352
100mm	0.0134μm	0.0150μm	λ/396
200mm	0.0256μm	0.0228μm	λ/226
300mm	0.0376μm	0.0354μm	λ/288



[그림 9] 파면측정 정밀도 비교



[그림 8] 측정된 구면파의 3차원 OPD 영상

$$P = \frac{\lambda}{0.6328/|V_e - V_m|} \quad (20)$$

표 1의 결과 값을 보면 측정정밀도는 목표치인 λ/20 이하를 충분히 만족할 수 있었다. 이러한 수치는 설계 목표치보다도 매우 우수한 성능을 보이는 것으로, 목표한 적용 분야에서 충분한 성능을 발휘할 수 있는 결과라 판단되어진다. 또한, 측정거리를 증가 시킴에 따라 측정치들이 예측치를 추종하는 선형 단조증가 추세를 보임에 따라 측정의 적절성도 확인되었다. 이를 그림 9에 나타내었다.

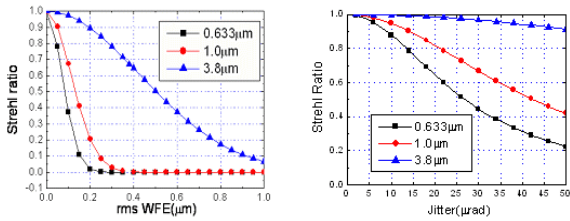
나. 파면보정

일반적으로 적응광학 시스템의 성능은 파면측정 및 보정 정밀도, 또는 성능지수인 Strehl 비율로 표현된다. Strehl 비율은 초점면상의 축상(on-axis)에서 수차가 없을 때와 있을 때의 빔 세기 비율로 정의되는 양이다. Strehl 비율은 원형 개구에서 파면왜곡을 나타내는 수차함수가  $\Psi(\rho, \theta)$ 일 때 정규화된 빔 세기의 Strehl 비율  $SR$ 은 다음과 같은 형태로 표현되며 항상 1보다 작다.

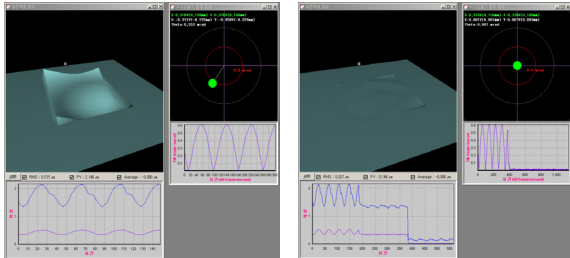
$$SR = \frac{1}{\pi^2} \left| \int_0^{2\pi} \int_0^1 e^{ik\psi(\rho, \theta)} \rho d\rho d\theta \right|^2 \quad (21)$$

그림 10은 3가지 파장에 대하여 파면에러 및 광축요동에 의한  $SR$  값의 변화를 보여주고 있다. 왜곡된 파면에서 tip/tilt 거울을 30Hz로 구동하여 기울기를 보정하고 형상가변거울을 10Hz로 보정하는 가시광용 적응광학 시스템 폐루프(closed-loop) PID 제어기를 구성한 후 왜란발생기에서 파면/기울기 왜곡을 발생시키고 시험한 결과는 그림 11과 같다.

그림 11(a)는 시험I로서, 파면을 오목하게 왜곡시키고 전역기울기 성분을 인가한 경우이다. 이것을 보정한 결과를 그림 11(b)에 나타내었다. 그림 11(c)는 시험II의 경우로서, 파면을 볼록하게 왜곡시키고 전역기울기 성분을 인가하였다. 이것을 보정한 결과는 그림 11(d)에 나타내었다.

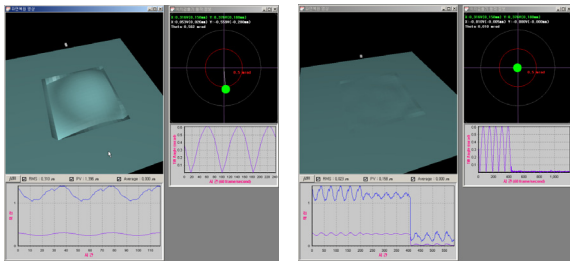


[그림 10] 파면에러와 광축 요동에 의한 Strehl 비율 변화



(a) 시험I(보정전)

(b) 시험I(보정후)



(c) 시험II(보정전)

(d) 시험II(보정후)

[그림 11] 파면보정 시험결과

시험결과, 수렴시간(convergence time)는 0.3초 이내, 광축(빔)요동은  $600\mu\text{rad}$ (RMS)에서  $10\mu\text{rad}$ 로 수렴하여 Strehl 비율이 0.93이었으며, 파면왜곡이  $0.31\mu\text{m}$ (RMS)인 경우에  $0.024\mu\text{m}$ (RMS)로 보정되어 Strehl 비율이 0.89로 파면보정 성능이 매우 우수함을 확인하였다.

## 5. 맺음말

본 논문에서는 적응광학 시스템에 사용되는 He-Ne

레이저의 빔 품질 진단을 위한 고속파면센서 설계 및 개발 결과를 제시하였다. 실시간 처리를 만족시키기 위해 두 대의 컴퓨터를 근간으로 순차 분산처리토록 시스템을 설계하였으며, 운용자 편의성을 위해 다양한 파면분석 기능을 구현하여 온라인 또는 오프라인 방식으로 항상 운용할 수 있는 유연성도 확보하였다. 개발된 시스템 성능은 파면측정율은 최대 30Hz, 파면측정 정밀도는 RMS 값을 기준으로 약  $\lambda/20$  ( $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ ) 이하를 달성하였다. 또한 개발된 파면센서와 폐루프 PID 제어를 결합하여 왜곡된 레이저 파면을 보정하는 적응광학 시스템에 적용한 결과 파면보정을 30Hz와 보정 정밀도  $\lambda/20$  이하의 우수한 성능을 나타냄을 입증하였다.

이러한 시스템은 He-Ne 레이저의 빔 품질 진단을 목적으로 개발되었지만, 천체관측을 위한 적응광학 시스템이나, 의료분야의 안구진단, 레이저 용접장치의 빔 품질 측정에도 적용할 수 있으므로, 이러한 유사 분야로의 기술적 확장에도 크게 기여할 것으로 판단되어진다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이재일, 이영철, 허준, “레이저 파면획득용 Lenslet Array 점 패턴 검출알고리즘”, 한국군사과학기술학회지, 제8권 제4호, pp. 110~119, 2005.
- [2] W. H. Southwell, “Wave-front Estimation from Wave-front Slope Measurements”, J. Opt. Soc. Am., Vol. 70, No. 8, pp. 998~1006, 1980.
- [3] Gilbert Strang, Linear Algebra and Its Applications, HBJ, 3rd ed., pp. 442~451, 1988.
- [4] William K. Pratt, Digital Image Processing, John Wiley & Sons, 2nd ed., pp. 441~445, 1991.
- [5] Robert J. Noll, “Zernike Polynomials and Atmospheric Turbulence”, J. Opt. Soc. Am. Vol. 66, No. 3, pp. 207~211, 1976.
- [6] Daniel Malacara, Optical Shop Testing, John Wiley & Sons, 1st ed., 1991.