

1. 개요

1.1 역사적 배경

약 300년 전의 발명 이후 망원경은 징집력과 해상도를 향상시키기 위해 발전해왔다. 징집력과 해상도(이론적 한계)는 각각 망원경의 직경  $D$ 의 함수  $\pi D^2/4$ 과  $1.22\lambda/D(\text{rad})$ 로 주위지기 때문에 망원경은 계속적으로 대구경화 됐으며, 현재 주요 천문대의 직경은 8m에 이른다. 하지만, 지구대기의 난류에 의한 입사광의 파면왜곡은 거대 망원경을 사용한다하더라도 아마추어수준인 직경 20cm 망원경의 해상도 이상을 얻지 못하게 되어 1953년 Babcock[1]은 현재 적응광학이라 불리는 Adaptive Optics의 개념을 제안하였다.

"If we had a means of continually measuring the

for seeing and for any inherent imperfections of optics figure"

Babcock은 적응광학에 필요한 구성요소 등의 구체적인 제안까지 하였으나, 그 당시 관련 기술 수준의 미비로 한동안 관심을 끌지 못했다. 하지만, 1970~80년 미군당국은 고출력레이저프로그램(High Energy Laser Program, HEL)과 위성감시시스템을 개발하면서 적응광학을 개발하였다.

1980년 말 미군당국이 적응광학기술을 공개함에 따라 많은 분야에서 적응광학의 적용에 관심을 보이고, 그 중 천문학계는 상당히 많은 적응광학시스템 및 관련 기술을 연구·개발함에 따라 현재 세계 주요 천문관측소는 적응광학(Adaptive Optics) 및 보상광학(Active Optics)을 적용하고 있다. 1990년 중반 이후에는 천문분야 외의 산업용 적응광학 개발에 상당히 많은 연구가 진행되고 있으며,

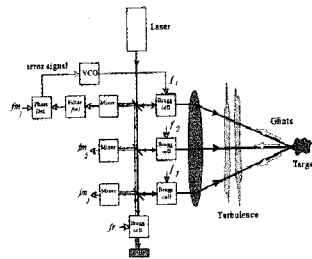
특집 ─ 첨단 광학 및 광기술 해설

적응광학 소개 및 국내외 현황

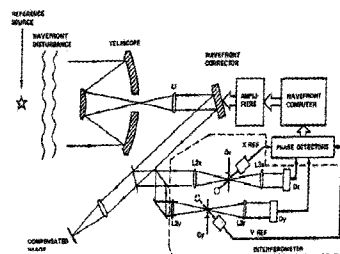
이준호\*

deviation of rays from all parts of the mirror, and of amplifying and feeding back this information so as to correct locally the figure of the mirror in response both

특히 2000년 들어 적응광학의 상업화가 급속히 진행되고 있다.



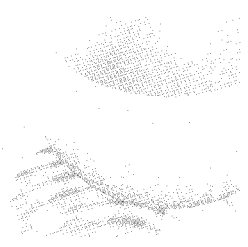
a) Phase-conjugate Coherent Optical Adaptive Technique (COAT)



b) Real-Time Atmospheric Compensator (RTAC)

그림 1. 미군당국에 의해 개발된 초기의 적응광학 시스템

\* 공주대학교



## 1.2 적응광학시스템 구성

적응광학 시스템은 대기과 같은 난류에 의한 파면의 왜곡을, 그 왜곡의 공간·시간적 특성에 상응하는 반대의 파면 왜곡을 발생함으로써, 제거 또는 향상시키는 시스템을 말한다[2]. 적응광학시스템은 일반적으로 다음의 4개의 서브시스템으로 이뤄져 있다: 1) Reference/Guide Star (구성요소에서 제외되기도 한다), 2)파면측정기(Wavefront Sensor), 3)파면보상기(Wavefront Correction Device), 4)제어 시스템.

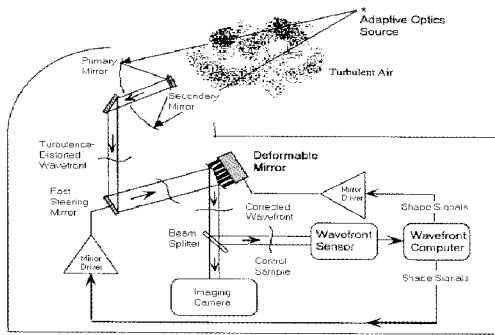
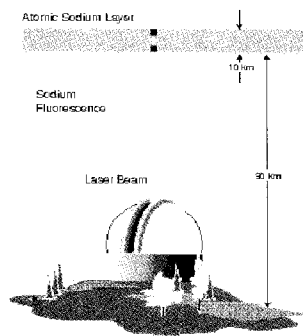


그림 2. 적응광학의 개념도

간혹 측정된 영상으로부터 직접 파면의 왜곡을 계산하여 파면측정기를 시스템에서 제외한 경우도 있고, 각각 1개의 파면측정기, Tip/Tilt 거울과 변형 거울을 사용하는 전형적인 시스템과는 달리 여러 개의 파면측정기, 변형거울을 사용하는 Multi-conjugate 시스템도 이용되고 있다[3].



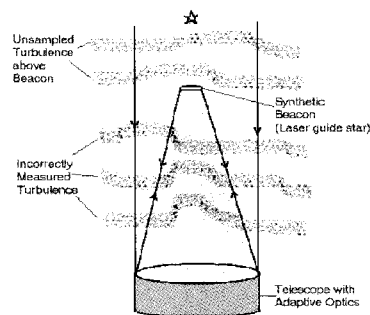
a) Sodium resonance를 이용한 LGS

### 1.2.1 Guide Star

적응광학은 빛이 통과하는 난류에 의하여 발생하는 파면의 왜곡을 연속적으로 제거, 보상시켜주는 시스템이다. 연속적인 파면의 보상을 위하여 파면의 지속적인 측정이 필요하고, 이러한 파면의 측정을 위하여 파면의 왜곡을 측정할 수 있는 빛이 필요하게 된다. 이렇게 파면측정용 빛을 제공하는 광원을 천문의 경우 Reference/Guide Star라고 한다. 천문의 경우 관측 대상으로부터 일정한 측정각(Isoplanatic angle)이내에 광원이 될 수 있는 충분한 밝기의 별이 있으면 Natural Guide Star(NGS)라하고 이 별을 사용하지만, 많은 경우 관심 있는 대상 주변에 충분히 밝은 별이 존재하지 않기에 인위적으로 가상의 별(Artificial Guide Star)을 만들어 사용하기도 하는데, 이러한 인위적인 별을 레이저를 사용하여 만들기에 Laser Guide Star(LGS), Laser probe, Laser Beacon라 한다[4]. LGS는 크게 고도 20km 이하에서 발생하는 Rayleigh Diffusion을 이용하는 경우와 고도 90~100km에 위치한 나트륨 원자의 자연방출(Sodium resonance)을 이용하는 경우로 나뉜다. 하지만, LGS를 사용한다하더라도 Focal anisoplanatism 및 image determination problem때문에 적어도 tip/tilt를 측정하기 위한 추가의 NGS를 필요로 한다.

### 1.2.2 파면 측정기 (Wavefront Sensor)

적응광학이 적용되는 대부분의 경우 입사되는 난류에 의한 왜곡이 없다면 입사파면이 평면파로 고려 될 수 있으며, 이러한 특성을 이용하여 파면을 측정하는 것이 파면측정기(Wavefront Sensor, WS)이다. 파면측정기로는 크게



b) LGS의 anisoplanatism

그림 3. Sodium resonance를 이용한 LGS

1) Shearing interferometer[6], 2) Shack-Hartman WS[7], 3) Curvature WS[8], 4) the pupil-imaging wavefront gradient sensor[9]로 나뉠 수 있다.

### 1.2.3 파면보상기 (Wavefront Corrector)

파면보상기는 파면의 왜곡에 상응하는 광경로 또는 빛 전파 속도에 변화를 주는 역할을 한다. 파면보상기에는 크게 거울을 사용하는 Segmented Mirrors[10], Continuous Thin mirror[11], Bimorph/membrane mirror[12]와 액정을 이용하여 빛의 위상을 변화시키는 액정빛변조기[13]가 있다. 현재에는 변형가능거울(DM, Deformable Mirror)을 이용한 것이 가장 많이 그리고 성공적으로 사용되고 있다. 통상의 경우 Tip/tilt와 같은 강제 운동만을 제공할 수 있는 Tip/tilt mirror와 고차의 왜곡을 생성할 수 있는 Higher Order DM을 각각 사용하지만, Cassegrain형의 망원경에서 부경을 DM으로 사용함으로써 하나의 DM만으로 Tip/tilt와 Higher Order 수차를 동시에 제거하는 것이 가능하게 되었다[14].

### 1.2.4 제어 시스템

제어시스템은 유한하고 에러가 있는 파면측정으로부터 파면 보상기에 최적의 신호를 제공하여야 한다. 대기의 조건에 따라 다르지만, 제어시스템은 가시광선영역에서 1000Hz까지 작동할 수 있다. 대개의 경우 계산양이 많아 독립적인 제어시스템을 구성한다. 제어시스템은 크게 Modal[15]과 Zonal[16]로 나뉠 수 있으며, Modal Control의 경우 파면의 정보를 Zernike polynomial과 같은 일정한 기저함수들의 선형 합으로 표현하고 각 모드에 대응하는 제어 신호를 발생/제어하는 반면 Zonal의 경우 파면보상기의 각 구동소자 위치에 대응하는 신호를 발생/제어한다. Actuator의 개수가 충분한 경우 Zonal과 Modal의 차이는 실질적으로 존재하지 않는다. 실제 제어시스템의 개발 시 Guide Star 파면의 입사각과 관측하는 파면의 입사각의 차이에 따른 파면정보의 이동 및 보상과 함께 유한한 파면정보 및 파면보상기의 개수에 따른 문제점 극복이 문제가 되며, 이론적으로 간단하더라도 실제 빠른 속도로 구현하는 것이 개발상의 주요 쟁점이 된다.

## 2. 적응광학 세부 구성 요소

### 2.1 변형 거울

변형 거울은 파면의 왜곡에 상응하는 거울 면의 왜곡을 발생시켜 파의 왜곡을 제거하는 역할을 한다. 변형 거울은 여러 가지 효과 piezoelectric effect, magnetostrictive effect, electrostatic attraction에 의하여 형성된 힘이 거울 면을 움직이면서 변형하게 된다.

변형 거울은 변형의 형태 및 변형의 물리적 구현 방식에 따라 구분할 수 있다. 전자의 분류 방식을 택하면 두 가지 형태의 장치가 있는데 바로 모드별 보상기(modal corrector)와 지역별 보상기(zonal corrector)이다. 모드별 보상기는 각 입력 채널에 대해 전체 개구에 대해 위상 왜곡을 보상해 주는 장치이고, 지역별 보상기의 경우 각각의 제어 채널에 대한 공간적인 위상 왜곡이 개구의 일부분으로 제한되어있는 장치이다. 후자의 방식에 따르면, 변형 거울은 분할 거울, 단일 연속 변형 거울, Bimorph 변형 거울 및 Membrane 변형 거울로 구분이 가능하다.

#### 2.1.1 변형 거울의 종류

변형거울 가운데에서 가장 흔한 형태는 바로 분할 거울이다. 이것은 압전 소자로 만들어진 적층 구동기 위에 수 많은 작은 평면거울이 달려 있는 형태이며 이 작은 평면 거울들은 구동기를 통해 큰 강성을 가지는 강판에 대하여 상대적으로 위치를 변화하게 된다. 대개 각각의 거울은 피스톤(piston), 팁(tip) 그리고 틸트(tilt)의 3개의 자유도를 갖는다. 그러므로 분할거울은 지역별 방식으로 동작을 하며 보상을 제대로 해주기 위해서는 수많은 요소들을 필요로 한다. 이러한 형태의 변형거울은 기울기파면측정센서와 잘 결합되지만 기울기 측정센서의 하위 개구와 거울의 구동기의 상대적 위치를 결정하는데 세밀한 주의를 요한다. 모든 분할거울이 가지는 문제점은 각 거울 사이의 틈을 통해 빛이 소실되는 점이다. 또한 회절로 인해 빛이 소실된다.

또 다른 변형거울에는 단일 보정 거울이 있다. 이것은 적층 구동기의 배열이 하나의 연속적인 얇은 거울의 뒷면을 밀어주는 방식으로 동작한다. 이러한 구동기의 각각은 그 주위의 작은 영역을 변형시킨다. 따라서 이것도 역시 지역별(zonal) 형태의 거울이다. 이러한 연속적인 거울 분할 거울과 달리 빛이 소실될 염려가 없다. 단일 보정 거울

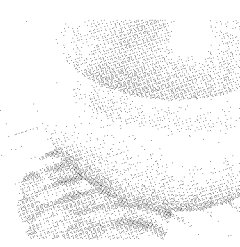


표-1. 변형 거울의 개념도 및 제품사진

	분할 거울	얇은 단일 거울	Bimorph	Membrane
개념도	<p>조각 거울, 압전 소자, 강판</p>	<p>얇은 단일 거울, 압전 소자, 강판</p>	<p>거울면, 얇은 단일 거울, Control 전극, Ground 전극</p>	<p>Ground 전극, Control 전극</p>
제품사진				

과 분할 거울은 천문학에서 가장 흔히 사용된다.

바이몰프 개념은 1978년 Steinhaus와 Lipson에 의해 최초로 적응광학에 적용되었다. 수동층이 압전층에 붙어 있는 형태이며 전압을 가하면 압전층이 팽창하게 되어 굽힘 모멘트를 유발시켜 층을 이룬 구조가 굽혀지게 된다. 압전층의 일부분에 전압을 가함으로써 국부적인 굽힘을 유발시키는 것이 가능하고 따라서 장치의 나머지 부분은 그 경계조건에 부합하는 형태로 변형을 하게 된다. 이러한 형태의 구동기는 많은 장점을 가진다. 즉 연속적인 반사판을 가지고 있고 모달 장치이며, 따라서 저차의 수차 보정에 적합하다 또한 각 요소들의 비용이 저렴하고 적층 구동기에 비해 전력소모가 작다.

마지막으로 흔히 사용되는 형태의 변형 거울에는 박막 거울이 있다. 이 거울은 제작방식에서 다른 변형 거울과 매우 다르다. 얇은 막이 정전기력에 의해 전극 쪽으로 움직이는 방식으로 동작을 한다. 이러한 변형 방식은 한 가지 단점이 있는데 그것은 바로 전극이 박막을 당길 수만 있다는 점이다. 이것은 박막 거울이 미리 바이어스(pre-biased)되어 있어야만 한다는 것을 의미한다. 박막 거울의 표면은 포와송의 식에 의해 결정되는 모양을 취하는 것으로 알려져 있다. 여기서 압력항은 정전기력에 의해 발생한다. 그러므로 박막 거울은 모달 장치이다. 박막 거울은 기존의 실리콘 제작 방식을 사용하여 대량 생산이 가능하다. 다른 이점은 큰 스트로크를 낼 수 있다는 점이다. 그러나 불행하게도 박막 거울은 물리적으로 약해서 쉽게 손상될 수 있다(일반적으로 박막은 0.5 $\mu$ m 두께).

## 2.2 파면 센서

파면의 정보는 크게 '위상' 과 '강도'로 구분되어 질 수 있으며, 파면 센서는 일반적으로 '위상'의 정보를 구하는 광학 장치를 말한다. 파면 센서는 크게 측정하는 파면 정보의 형태에 따라 구분할 수 있고, 그 중 간단한 형태의 센서는 파면의 평균 기울기를 측정하는 장치로 기울기 측정기 또는 위치 센서라 한다. 본 장에서는 기울기보다 차수가 높은 형태의 파면을 측정하는 장치 즉 위치 센서를 제외한 파면 측정 장치를 파면 측정기 또는 파면 센서라 하겠다.

파면 측정기는 대략적으로 1) 간섭계, 2) 샤크-하트만 센서(Shack-Hartmann sensor), 3) Curvature Sensor, 4) Grating/Pyramidal Prism, 5) Phase diversity 등으로 구분할 수 있다. 파면 측정기는 개발 과정상 전통적으로 광학 가공 및 측정 단계에서 사용되던 광학 측정법을 직접 또는 변형된 형태로 사용하던 것과 처음부터 적응광학용 파면 측정기로 고안된 것으로 나눌 수 있으며, 대략적으로 5)에서 1)로 갈수록 전통적 광학 측정법에 가까워진다.

### 2.2.1 파면 센서의 종류

파면 센서 중 현재 가장 많이 사용되는 파면 센서는 샤크-하트만 센서로 전통적인 하트만 광학 측정법에서 사용되던 작은 구멍이 뚫린 Hartmann plate 대신 작은 렌즈 배열을 사용하여, 전통적인 하트만 측정법에서 발생되었던 광 손실을 없앴 측정법이다. 샤크-하트만 센서의 작

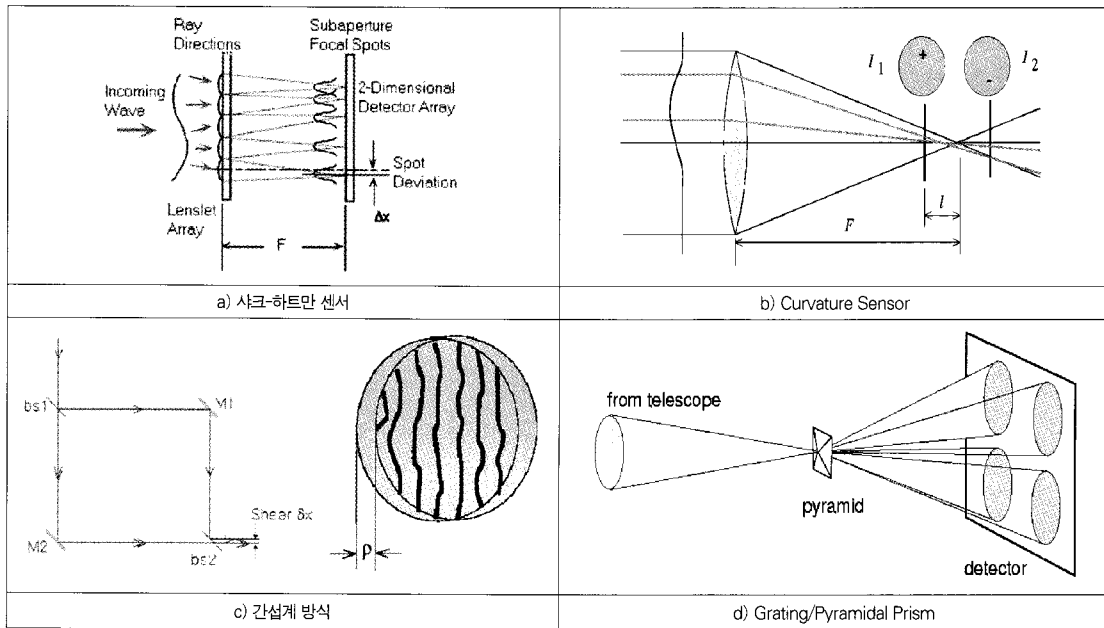


그림 4. 파면 센서의 종류별 개념

은 렌즈 배열은 자신에 입사되는 파면의 초점을 형성하게 되고, 그 초점의 형상 및 위치는 파면의 왜곡과 관련이 있으며 특히 초점의 중심점(Centroid)의 이동은 파면의 평균 기울기와 비례하는 관계를 일정한 범위 내에서 갖고 있다. 각 초점의 이동량을 측정된 후, 측정된 이동량으로부터 각 작은 렌즈의 입사동에 해당하는 파면의 평균 기울기를 추정하고, 이렇게 추정된 Local 기울기 정보를 조합하여 전체 파면의 형태를 추정하게 된다.

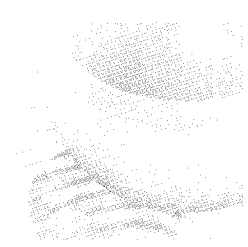
다음으로 가장 많이 사용되는 센서는 곡률 센서로, 파면의 위상 정보는 빛이 진행하는 방향을 따라 빛의 강도를 두 곳 이상 측정하게 되면, 이로부터 위상 정보를 얻을 수 있다는 원리를 이용한다. 특히 짧은 거리에서도 강도 변화를 심하게 보일 수 있는 경우는 초점을 형성하는 파면의 경우이며, 더욱 초점 면 앞뒤로 파면 왜곡에 따른 빛의 강도 변화가 극명하게 보인다. 전통적인 광학 측정법인 Knife-edge test 또는 Focault test 기법과 상당히 유사하다. 빛의 파동학적 전파 특성 또는 Energy/wave propagation 관련 식을 정리하면, 곡률 센서의 정보는 식 1과 같이 표현될 수 있다.

$$S(r) = \frac{I_2(r) - I_1(r)}{I_2(r) + I_1(r)} = \frac{f(f-l)}{2l} \left[ \frac{\partial}{\partial n} \phi(fr/l) \delta_c + \nabla^2 \phi(fr/l) \right] \quad (\text{식 1})$$

여기서  $I_1$ 은 초점면 앞의 빛의 강도분포,  $I_2$ 는 초점면 뒤의 빛의 강도분포이다. 괄호 안의 첫 항은 경계조건을 측정하는 것이다. 즉, 항  $\delta_c$ 는 출사동 가장자리 부분의 임펄스 함수(impulse function)이다. 이러한 표현은 기하학적인 근사에서 타당하며, 이 센서가 다가오는 파면의 라플라시안(Laplacian)을 측정한다는 것을 보여주고 있다.

그 밖에 간섭계 이용한 파면 측정법은 적응광학개발 초기인 1950~1970년대에 사용되어 왔으나, 최근에는 실질적으로 거의 사용되고 있지 않는다. 또한, Pyramidal prism 또는 Grating 등을 사용하여 파면을 등가의 강도로 대략 4분할하고, 각기 분할된 빛에 특정 방식의 변조를 취한 후 빛의 강도를 측정하여 파면의 기울기 또는 Laplacian을 측정하는 새로운 측정법이 제시되기도 하였으나, 실질적으로는 개념의 제안자 외에는 사용하지 않는 것이 현실이다.

또한, 여러 가지의 제한 조건으로 인하여 파면을 직접 측정하는 것이 불가능한 경우 파면 센서가 없이 초점면에 형성된 상의 질을 향상시키는 방법(Image sharpening process)의 연구가 계속적으로 진행되고 있으며, 일부는 파면 센서 측정과 Image Sharpening 기법을 혼용하여 적응광학 변형 거울을 제어하는 방법을 사용하기도 한다.



## 2.3 제어알고리즘

### 2.3.1 수학적기초

변형 거울의 성능은 광학 면을 얼마나 원하는 형태로 변형할 수 있는지 표현할 수 있을 것이다. 다음은 변형 거울의 영향 함수를 고려한 변형 거울의 성능 예측을 보여주고 있다.

먼저 반경 R을 갖는 원형의 개구(Aperture)에 입사하는 파면 수차를  $\phi(r, \theta)$ 라 하면, 변형 거울은 이 파면에 가장 근사하게  $\hat{\phi}(r, \theta)$ 의 파면 왜곡을 거울을 변형하게 된다. 여기서, 가장 근사한 것이라 식 1에 정의된 잔여 파면 수차(e)의 RMS의 값이 가장 작도록 하게 되는 것을 의미한다.

$$e^2 = \int \rho d\rho \int d\theta W(\rho) [\phi - \hat{\phi}]^2 \quad (\text{식 2})$$

$$W(\rho) = \begin{cases} 1/\pi, & \rho \leq 1 \\ 0, & \rho > 1 \end{cases} \quad (\text{식 3})$$

여기서, 변형 거울의 변형은 모든 구동기에 의한 각 변형의 합으로 식 4로 표현된다.

$$\hat{\phi}(R\rho, \theta) = \sum_{i=1}^m a_i r_i(\rho, \theta) \quad (\text{식 4})$$

여기서,  $\gamma_i$ 는 영향 함수로,  $\gamma_i$ 는 i번째 구동기의 영향함수를 나타낸다. 또한  $a_i$ 는 i번째 구동기에 들어가는 입력 신호가 된다.  $(\rho, \theta)$ 는 통상적인 극좌표다.

위에서 서술된 식들을 행렬 표기법으로 표현하기 위하여 변형 거울에서 n개의 샘플링 포인트를  $\vec{x}_j, j=1, \dots, n$ 에서 수행하였다고 가정하자. 그러면, 식 3은 식 4와 같은 행렬 관계식으로 표현된다.

$$\hat{\phi} = Ha \quad (\text{식 5})$$

여기서  $\hat{\phi} = [\hat{\phi}(\vec{x}_1), \dots, \hat{\phi}(\vec{x}_n)]^T$ 는 n개의 샘플링 포인트에서의 직접적인 파면 수차 값을 나타내는 행렬이 된다. 또한, Configuration 행렬이라고 알려지는 H 행렬은  $n \times m$  행렬로 n은 샘플링 포인트의 수가 되고 m은 구동기의 수를 의미한다. H의 i번째 열(column) 행렬은

$[r_i(\vec{x}_1), \dots, r_i(\vec{x}_n)]^T$ 로 i번째의 영향함수를 의미하게 된다. 그러면, 식 2에서 언급한 파면 왜곡을 최소로 갖는 변형 거울의 구동 신호는 식 6과 같이 주어지게 된다.

$$a(t) = (H^T H)^{-1} H^T \phi(t) \quad (\text{식 6})$$

### 2.3.2 이상적인 제어 신호

앞 장의 수학적 기초에서 언급되었듯이 변형 거울의 제어 신호는 식 6과 같다. 여기서, H는 configuration 행렬로 영향 함수의 정보를 포함하고 있다. 여기서, 파면 측정기는 이상적인 측정을 한다고 가정하였다. 그림 13은 변형 거울 제어 신호의 발생 개념도를 보여주고 있다.

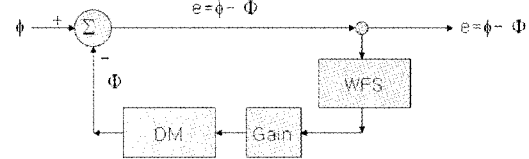


그림 5. 변형 거울 제어 신호의 발생 개념도

### 2.3.3 잔여 에러 고려 제어 신호:

앞서서 언급된 제어 신호는 파면 측정 및 파면 보정 사이의 시간 차이가 존재하거나, 파면 측정 및 보정에 에러가 존재하면 지속적인 에러를 갖게 되는 문제점이 존재한다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 구동기의 신호는 잔여 에러를 제거하도록 구동기의 신호가 발생되어야 한다.

이 때 통상적인 구동기의 신호는

$$a(t_{i+1}) = -g \times (H^T H)^{-1} H^T e(t_i) + a(t_i) \quad (\text{식 7})$$

여기서  $e(t_i) = \phi(t_i) - \hat{\phi}(t_i)$ 로 파면 측정기에 측정되는 파면을 말한다.

여기서, 상수 g는 시스템의 Converging speed를 결정하는 상수로 값이 큰 경우, 빠른 Converging 속도를 확보할 수 있으나 Noise에 의하여 발산할 수 있으며, 그 반대로 g가 작은 경우 파면 오류 속도를 좇아 가지 못하는 경우가

발생한다.

잔여 에러를 최소화하기 위하여 제어 신호 발생기는 에러의 동적 특성을 고려해야 하며, 이러한 고려는 제어기 구성에 있어 단순 Gain control는 물론 미분기 및 적분기를 포함한 제어기를 다음의 식과 같은 형태로 구성할 수 있다.

$$a(t_{i+1}) = \begin{cases} -g_1 \times (H^T H)^{-1} H^T e(t_i) \\ + g_2 \sum_{j=1}^{j=i} a(t_j) \\ + g_3 (a(t_j) - a(t_{j-1})) \\ + a(t_i) \end{cases} \quad (식 8)$$

여기서,  $g_1, g_2, g_3$ 는 각 상수 제어기, 적분기 및 미분기의 계수를 의미한다.

### 3. 대기효과의 개요

적응광학의 주요 적용 분야중의 하나인 천문 및 위성감시의 경우, 지구 대기의 난류에 의한 파면왜곡과 관측 건물 안의 대류현상에 의한 파면왜곡으로 나뉜다. 후자의 경우 각 관측대의 상황에 따라 다르므로, 본 장에서는 지구 대기의 효과를 소개한다.

대기의 효과는 크게 파면의 위상 왜곡과 진폭 왜곡(Scintillation[17])으로 나눌 수 있는데, 후자는 그 효과가 전자에 비해 무시할 만하고, 또한 진폭 왜곡을 보정시킬 수 있는 보상기 또한 현재 개발 중이 있기에 전통적으로 위상 왜곡에 의한 효과만을 고려한다.

#### 3.1 공간 위상 변화(Spatial Phase Variation)

대기에 의한 위상 변화는 임의의 값을 갖지만 일정한 확률적 특성을 가지며, 이러한 확률적 특성은 위상-구조함수(Phase-structure function)[18]로 표현된다. 위상-구조함수는 거리  $r$ 만큼 떨어진 공간 벡터 좌표  $x, x'$ 에 대해 다음과 같이 주어진다. ( $\langle \rangle$ 은 ensemble average를 의미한다.)

$$D_\phi(r) = \langle [\phi(x) - \phi(x')]^2 \rangle, \quad (식 9)$$

$$r = |x - x'|$$

Kolmogorov[19]의 이론에 의하면, 망원경의 Entrance Pupil에서의 위상-구조 함수는 다음과 주위지며 Kolmogorov Turbulence라 한다.

$$D_\phi(r) = 6.88 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{5/3} rad^2, \quad (식 10)$$

여기서  $r_0$ 를 Coherence length 또는 Fried parameter라고 하고,  $r_0$ 는 관측 파장  $\lambda$  및 관측 각  $\xi$ 의 함수로 아래와 같이 주어진다.

$$r_0 = 0.185 \lambda^{6/5} \cos^{3/5} \xi \left( \int C_n^2(h) dh \right)^{-3/5} \quad (식 11)$$

$C_n^2(h)$ 는 고도  $h$ 의 변화에 따른 대기 굴절률의 변화 즉 Turbulence의 크기를 나타내는 함수이고, 실질적으로  $r_0$ 의 의미는 구경의 크기가  $r_0$ 보다 작은 광학계를 사용 시에 대기의 효과는 상의 위치를 이동시킬 뿐 상 자체는 회절 한계에 이른다는 것을 의미한다.

#### 3.2 시간 위상 변화(Temporal Variation)

대기 효과는 대기 온도 변동에 따른 굴절률의 변화에 기인한다. 대기 온도 변동은 대기 이동 속도 변동에 따르므로, 결과적으로 대기의 효과는 대기의 풍속 변동에 따른다. Greenwood[20]는 대기의 효과가 실질적으로 동일한 시간을 임계시간상수(Critical Time Constant)  $\tau_0$ 를 정의하고, 평균 풍속  $V_{wind}$ 에 대하여 다음과 같은 관계를 갖는다는 것을 유도하였다.

$$\tau_0 \approx 0.314 \frac{r_0}{V_{wind}}, \quad (식 12)$$

$$V_{wind} = \left( \frac{\int C_n^2(h) v^{5/3} dh}{\int C_n^2(h) dh} \right)^{3/5} \quad (식 13)$$

여기서  $v(h)$ 는 고도  $h$ 에서의 풍속을 나타낸다. 여기에서 더 나아가 Greenwood는 간단한 적응광학 제어시스템의 최저(3DB cutoff) 제어 속도 즉 주파수를 다음과 같이 유



도하였다.

$$f_G = 0.43 \frac{V_{wind}}{r_o} = 0.135 f_o = 0.135 \frac{1}{\tau_o} \quad (\text{식 14})$$

통상적으로  $f_G$ 는 10에서 100Hz의 값을 갖는다.

### 3.3 대기의 효과의 Zernike Polynomial 표시

대기의 효과는 확률적인 특성을 가지고 있으며, 그 확률적 특성을 Zernike Polynomial로 표시하면 표 5와 같이 표시될 수 있다.

여기서 Zernike Polynomial은 다음과 같은 Noll[21]의 정의를 따랐다.

$$\begin{cases} Z_{evenj} = \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \cos(m\theta) \\ Z_{oddj} = \sqrt{n+1} R_n^m(r) \sqrt{2} \sin(m\theta) \end{cases} \quad m \neq 0 \quad (\text{식 15})$$

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

여기서,

$$R_n^m = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s![(n+m)/2-s]![(n-m)/2-s]!} r^{n-2s} \quad (\text{식 16})$$

표 5에서 주지할 것은 대기 효과의 87%는 단순한 상의 이동으로, Tip/Tilt mirror만을 사용할 경우 87%의 대기 효과를 제거할 수 있고, 그 이상의 보상을 원할 때 교차의 변형거울을 사용하게 된다는 것이다.

### 3.4 Isoplanatic Angle

대기는 위치에 따라 왜곡이 다르므로 적응광학의 보상이 실질적으로 동일한 효과를 가질 수 있는 각의 범위는 한정되어 있고, 이 각을 Isoplanatic Angle이라 한다. 이 각은 Coherence Length  $\gamma_o$ 의 함수로 다음과 같이 주어진다[22].

$$\theta_o = 0.314 \frac{r_o}{H} (\text{rad}) \quad (\text{식 17})$$

여기서 H는 다음의 식으로 정의되는 대류 층의 평균 고도를 의미한다.

$$H = \text{sec} \left\{ \left( \frac{\int C_n^2(h) h^{5/3} dh}{\int C_n^2(h) dh} \right)^{3/5} \right\} \quad (\text{식 18})$$

일반적으로 Isoplanatic Angle은 가시광선 영역에서 1~10 arcsec의 크기를 갖는다.

### 3.5 세계 주요 천문대의 대기조건

다음의 표 6은 세계 주요 천문 관측소 중 비교적 좋은 기상 조건(0.75" seeing at 0.5 $\mu$ m)을 가지고 있는 장소의 전형적인 대기 효과에 따른 Coherence Length  $r_o$ , Critical Time Constant  $\tau_o$ , isoplanatic angle  $\theta_o$ 를 표장별로 정리한 것이다[23].

## 4. 국내외 기술개발 현황

### 4.1 상위 5개국 현 기술 수준

적응광학의 역사는 짧지만 이의 발전은 상당히 빠른 속도로 진행되고 있다. 적응광학은 이제 지상용 우주 망원경에서 없어서는 안 될 필수적인 요소로 인식되고 있으며 현재 전 세계의 대부분의 망원경에 적응광학이 적용되고 있는 실정이다. 적응광학은 미국을 축으로 하여 영국, 유럽, 일본, 중국 등에서 활발히 연구를 진행하고 있다. 적응광학시스템에 대한 연구를 활발히 진행하고 있는 상위 5개국에 대하여 현 기술 수준을 서술하고자 한다.

#### 4.1.1 미국 (W. M. Keck Observatory / Keck telescopes)

Keck 관측소의 적응광학시스템은 0.8~5.0 $\mu$ m 영역에 대하여 일정 보정 능력을 가지면서 1.1~2.3 $\mu$ m의 파장영역에 대하여 회절한계 이미지를 얻는 것을 목표로 하고 있다. 이 프로그램의 첫 번째 단계는 Keck II 10m급 망원경의 Nasmyth 플랫폼에 적응광학계를 설치하는 것이다. 참조 광원은 대략 15등성의 자연성이나 19등성까지의 자연 조



표 2. 대기 효과(Atmospheric Turbulence)의 Zernike Polynomial 표시

Z <sub>n</sub>	n	m	Expression	Name	Residual Variance $\Delta_j(\text{rad}^2)$
1	0	0	1	Piston	$1.030(D/r_0)^{5/3}$
2	1	1	$2r \cos \theta$	Tilt	$0.582(D/r_0)^{5/3}$
3	1	1	$2r \sin \theta$	Tilt	$0.134(D/r_0)^{5/3}$
4	2	0	$\sqrt{3}(2r^2 - 1)$	Defocus	$0.111(D/r_0)^{5/3}$
5	2	2	$\sqrt{6}r^2 \sin 2\theta$	Astigmatism	$0.089(D/r_0)^{5/3}$
6	2	2	$\sqrt{6}r^2 \cos 2\theta$	Astigmatism	$0.0648(D/r_0)^{5/3}$
7	3	1	$\sqrt{8}(3r^3 - 2r) \sin \theta$	Coma	$0.0587(D/r_0)^{5/3}$
8	3	1	$\sqrt{8}(3r^3 - 2r) \cos \theta$	Coma	$0.0525(D/r_0)^{5/3}$
9	3	3	$\sqrt{3}r^3 \cos 3\theta$	Trefoil	$0.0463(D/r_0)^{5/3}$
10	3	3	$\sqrt{3}r^3 \sin 3\theta$	Trefoil	$0.0401(D/r_0)^{5/3}$
11	4	0	$\sqrt{5}(6r^4 - 6r^2 + 1)$	Spherical	$0.0277(D/r_0)^{5/3}$

표 3. 전형적인 대기 특성 정리

Spectral Band	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$r_0$ (cm)	$\tau_0$ (sec)	$V_{im}$	$\theta_s$ (arcsec)	Sky coverage (%)
U	0.365	9.0	0.009	7.4	1.2	$1.8e-5$
B	0.44	11.5	0.011	8.2	1.5	$6.1e-5$
V	0.55	14.9	0.015	9.0	1.9	$2.5e-4$
R	0.70	20.0	0.020	10.0	2.6	0.0013
I	0.90	27.0	0.027	11.0	3.5	0.0006
J	1.25	40	0.040	12.2	5.1	0.046
H	1.62	55	0.050	13.3	7.0	0.22
K	2.2	79	0.079	14.4	10.1	1.32
L	3.4	133	0.133	16.2	17.0	14.5
M	5.0	210	0.21	17.7	27.0	71
N	10	500	0.5	20.4	64	100

준성을 갖는 대략 10등성의 나트륨 레이저 비콘이 될 것이다. NASA는 두 개의 Keck 망원경을 이용하여 간섭계를 구성하는데 자금을 덜 계획을 하고 있다. 이것은 Keck I에 대한 2차의 적응광학 시스템을 필요로 할 것이다.

적응광학시스템은 349개의 구동기를 갖는 Xinetics 변형거울을 포함하고 있다. Georgia Tech Research Inst.에 의해 만들어진 파면센서는 MIT/LL에 의해 만들어진  $64 \times 64$  픽셀의 CCD를 사용하는데 이 CCD는 2kHz의 프레임 속도에서 11개의 전자 판독 노이즈를 갖는다. 틸트 센서는 EG&G 포토다이오드를 사용한다. 나트륨 레이저 조준 시스템은 Nd-YAG 레이저를 이용하는데 이는 50cm의 발전 망원경으로부터 10등성을 만들어 내기 위해 30kHz PRF, 100ns 펄스, 20W의 성능을 갖는다.

#### 4.1.2 유럽 (European Southern Observatory / Very Large Telescope)

ESO의 VLT는 독립적으로 또는 함께 사용될 수 있는 네 개의 8m급 망원경들로 구성되어 있다. 관측소는 칠레에 위치하고 있다. 고해상도 이미지를 얻기 위해 이 시스템의 성능을 최대한으로 이용하기 위해서 분광학, 측정학, 적응광학이 처음 설계부터 포함되어졌다. 각 망원경의 쿠테 경로(coude path)에 적응광학시스템을 설치하기 위한 최초의 계획은 연기되었고, 현재의 계획은 망원경 1호기의 Nasmyth 초점에 1세대 시스템을 설치하는 것이다.

ESO는 프로토타입 시스템인 Come-On과 Come-On Plus를 포함한 장기의 적응광학 개발 프로그램을 지원하고 있다. 그 시스템은 이해하기 쉽고 사용자에게 친숙한 인

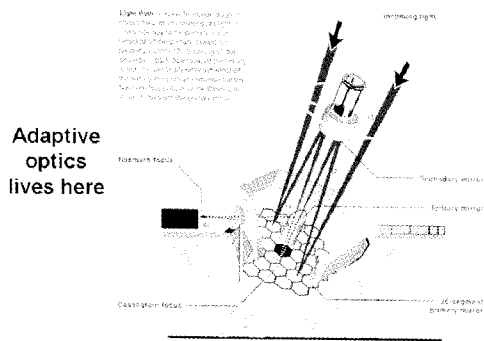


그림 6. 켈(Keck) 망원경 개념도

터페이스로 업그레이드되어 왔으며 현재는 ADONIS로 알려져 있다. ADONIS를 위해 개발된 소프트웨어는 VLT 적응광학시스템에도 사용될 것이다. VLT는 가시광선 영역부터 10 $\mu$ m에 이르는 넓은 파장영역에 대하여 관측될 목적으로 개발되었다. Come-On 시스템은 적응광학이 근적외선 파장에 대하여 효율적이면서도 경제적이라는 것을 보여주었다. 그 결과로 VLT NAOS(Nasmyth Adaptive Optics System)는 1~5 $\mu$ m 파장영역에서 동작하도록 설계되었다.

ESO는 Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik Garching와 함께 3.6m급 ESO 망원경의 적응광학계에 레이저 비콘을 설치하기 위해 연구 중이며 4개의 8m급 VLT에도 레이저 비콘의 사용이 검토될 것이다.

#### 4.1.3 영국

영국의 Adaptive Optics Programme은 영국의 PPARC(Particle Physics and Astronomy Research Council)의 자금을 지원받아 적응광학 연구를 진행 중에

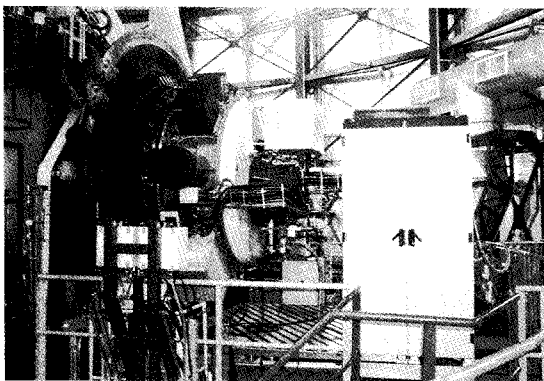


그림 8. VLT 망원경 사진

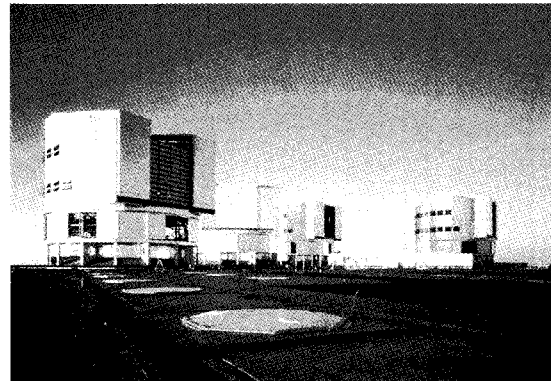


그림 7. 칠레에 위치한 ESO VLT 망원경

있다. 이 프로그램의 주요목적은 Canary 섬에 위치한 4.2m급 William Herschel Telescope(WHT)와 하와이에 위치한 3.8m급 United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT)에 일반사용자용 적응광학 시스템을 설치하는 것이다. 이 프로그램은 또한 부지평가, IR기기, 부분 적응광학, 레이저 비콘(laser beacon)과 같은 여러 다른 관련 분야를 지원한다. 목적은 적응광학을 우주분야에서 널리 활용하는 것이다.

WHT와 UKIRT에 적용되는 적응광학은 처음에는 자연성을 참조하게 될 것이고 2.2 $\mu$ m 근방의 근적외선 영역을 관측하기 위해 최적화될 것이다. 또한 특별한 전문구동팀 없이 방문 천문학자들이 이용 가능한 수많은 장치들을 제공하게 될 것이다. WHT 적응광학의 최초 개념은 Gentles에 의해 제안되었다. 그것은 Nasmyth 초점에서 동작하며 따라서 고정된 광학 벤치에 마운트 될 수 있다. 변형거울은 입사동이나 대기의 난류층에 맞추어질 수 있다. 적응광학시스템의 구조는 나트륨 레이저 비콘을 포함하도록 설계되어진다. UKIRT는 적도에 위치한 망원경이다. 여기서 적응광학은 적응 부반사경(adaptive secondary mirror)을 이용하여 다소 다르게 적용될 것이다.

일반사용자용 적응광학시스템은 NAOMI(Natural guide-star Adaptive Optics system for Multi-purpose Instrumentation)라는 이름을 가지고 있다. NAOMI는 근적외선 파장에서의 관측을 위한 적응광학시스템이다. 처음에는 자연성을 참조로 하여 최소한의 자동제어시스템으로 운영될 것이다. 현재의 설계안은 직경에 걸쳐 10개의 조각을 갖는 총 76개의 조각으로 구성된 반사경을 사용하고 있다. 파면센서는 공간해상도를 조절하기 위하여 교환이 가능한 렌즈배열을 갖는 하트만 센서 형태이다. 참

## 적응광학 소개 및 국내외 현황

조광원으로부터의 입사하는 광자의 수가 적을 때는 더 큰 구경의 서브렌즈가 사용된다. 제어시스템은 빛이 센 경우 지역 제어(zonal control)를 사용하고 희미한 광원에 대해서는 모드 제어(modal control)를 사용한다. 적응광학시스템은 파면왜곡을 실시간으로 최적화된다.

### 4.1.5 일본 (Japanese National Astronomical Observatory / Subaru telescope)

Subaru 망원경은 185개의 구동기를 갖는 프랑스의 CILAS 바이모르프 변형거울로 구성된 적응광학계를 갖추고 있으며 8.3m급이다. 이 시스템은 밝은 조준성에 대해서는 144개의 서브렌즈를 갖는 파면센서를 사용하고 희미한 조준성에 대해서는 36개의 서브렌즈를 사용하게 된다. 가시광선 영역의 파면센서(500Hz frame rate)와 적외선 센서(200Hz frame rate)가 함께 사용된다.

### 4.1.6 Consortium (Gemini-8m Telescope Project)

미국, 캐나다, 영국, 칠레, 브라질, 아르헨티나의 천문 컨소시엄인 Gemini는 두 개의 8.1m급의 쌍둥이 망원경으로서 하나는 칠레의 Mauna Kea(G-MK)에 다른 하나는 Cerro Pachon(G-CP)에 설치되었다. G-MK에 대한 적응광학 시스템은 캐나다에 위치한 Herzberg Institute of Astrophysics와 Dominion Astrophysical Observatory에 의해 설계되었다. 이 시스템은 8×8개의 렌즈배열을 갖는 하트만 센서와 단일 보정 변형거울로 구성되어 있다. 센서는 틸트에 대하여 200Hz까지의 속도로 판독이 가능한 64×64 픽셀의 CCD를 사용한다. G-MK의 독특한 특징은 6.5km 고도의 가장 강한 대기 난류층에서 변형거울의 동(瞳)으로 이미지가 생성된다는 것이다. 이는 측정가능각(isoplanatic angle)을 최대화하기 위한 것이다. 모든 다른 천체관측시스템과 레이저 발사 시스템은 변화하는 대기에 대해 설계의 단순성과 유연성을 위해 변형거울의 동(瞳)에서 주경으로 이미지가 생성되도록 해준다.

## 4.2 국내개발 현황

국내에서는 1990년 후반까지는 적응광학계 구성에 관한 원천기술에 관한 연구로 천문관측 적응광학의 활용에 관한 연구와 실험실 수준에서의 적응광학계 구성이 이루어졌다.

국내 최초의 적응광학 연구로는 과학재단 지원을 받아 영국 런던대학교에 설치된 한국과학기술원 인공위성 연구센터의 해외 연구실에서 진행된 적응 부경(Adaptive Secondary)의 연구로 7개의 구동기로 구성된 얇은 변형 금속 거울의 제작을 통하여 Gemini Telescope에 적용 가능한 부경 모델을 제시하였다(24-26).

국내 최초의 폐회로 적응 광학 구성은 2000년대 초반 한국원자력연구원에서 시도되었으며, 이 때 37채널 PZT 변형 거울, 고전압 구동장치, Shack-Hartmann 파면측정 장치 및 제어 알고리즘의 개발이 있다(27,28). 폐회로로 구성된 적응광학 시스템은 5Hz 작동하였으며, 잔여 수차가 PV 0.34λ인 폐회로 성능을 시현하였다(29).

이 후 2003년부터 2006년까지 레이저 빔의 집속력 향상을 위하여, 공진기 내에서 발생하는 위상 오차를 보상하기 위한 적응광학계의 개발이 국방과학연구소로 중심으로 진행되었다. 진행 결과 37Ch 변형 거울, 10×10 샤크-하트만 센서, 30Hz Tip/Tilt mirror, 10Hz 폐회로를 개발하였으며, 개발된 적응광학 시스템은 가시광 영역에서 약 2λ의 파면 오차에 대하여 잔여수차 RMS λ/45의 성능을 시현하였다(30). 이와 병행하여 적외선 고속력 레이저에 작동 가능한 냉각 변형 거울의 개발 및 파면 센서와 이를 통합한 적외선 적응광학계의 개발이 성공적으로 진행되었다(31).

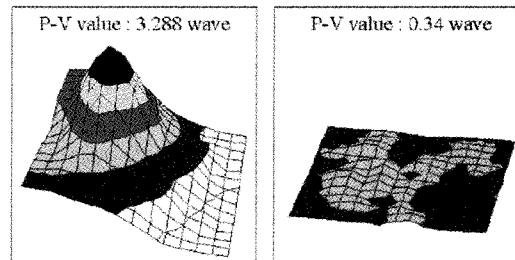


그림 9. 한국원자력연구원에서 개발된 적응광학 시스템 성능(29)

2000년 중반 이후 광주과학기술원은 100TW Ti:Sapphire 레이저 시설에서 발생된 레이저 펄스의 파면 보정용 적응 광학계를 개발하였다(32). 개발된 적응광학계는 층밀립 간섭형 파면 측정기를 이용하여 파면 수차를 5차까지의 Zernike Polynomial로 표현하였으며, 32Ch의 Bimorph 변형 거울로 보정하였다. 개발된 적응광학계는 폐회로 구성시 RMS 0.067μm (~λ/10)의 잔여 수차를 확보하였고, 이는 Strehl Ratio가 0.76까지 향상된 성능을 의미한다(33).

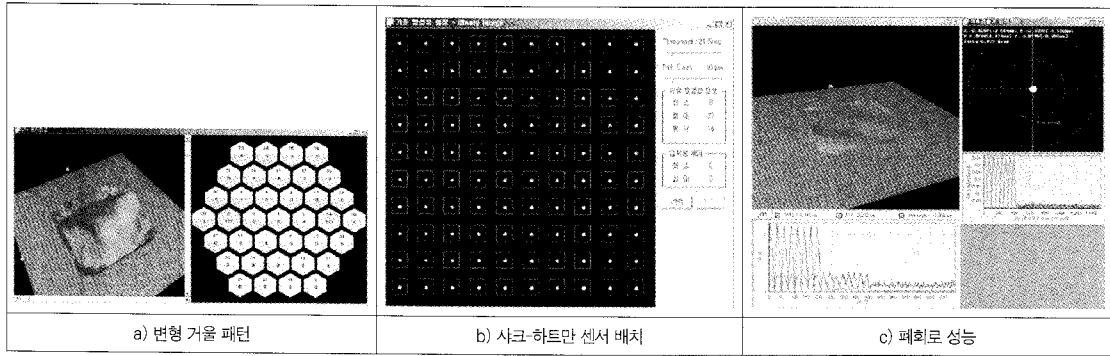
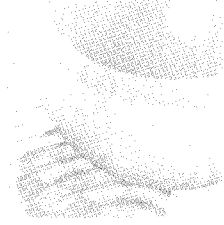


그림 13. 레이저용 적응광학 시스템 (ADD 개발)(35)

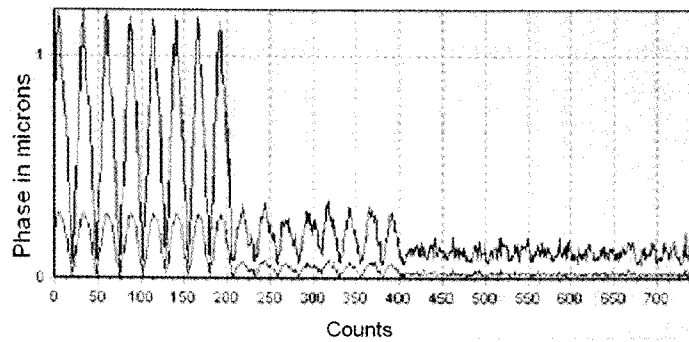


그림 14. 레이저용 적응광학 시스템 폐회로 성능(잔여 수차:  $RMS \lambda/45$ )(35)

또한 한국과학기술원은 국방과학 특화센터의 일환으로 인공위성추적용 고속 적응광학계의 기반기술연구를 2005~2008년까지 1~2단계로 나눠서 진행하고 있다. 1 단계에서는 파면 센서, 변형 거울, 제어 등의 기반 요소에 대한 연구가 진행되었고, 2단계에서는 이를 고속화한 Embedded 시스템에 통합하는 작업을 수행 중에 있다. 그

림 17은 샤크-하트만센서에서 측정 정밀도 향상을 위하여 개선된 상관관계법을 보여주고 있으며(34), 그림 18은 전산모사를 통하여 확보된 적응광학 보정 전후의 위성 관측 영상을 보여주고 있다(35).

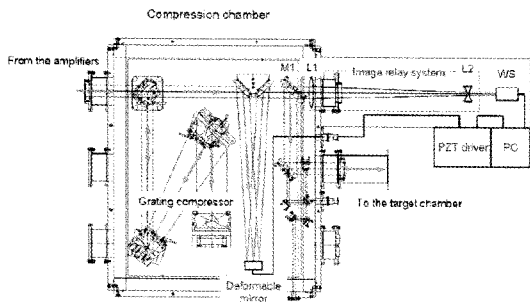


그림 15. 광주과학기술원의 100TW Ti:Sapphire 레이저용 적응광학계(37)

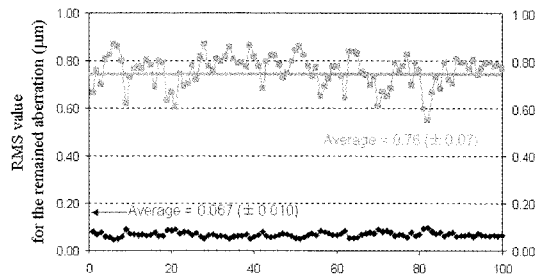


그림 16. 광주과학기술원 100TW Ti:Sapphire 레이저용 적응광학계의 폐회로 성능(38)

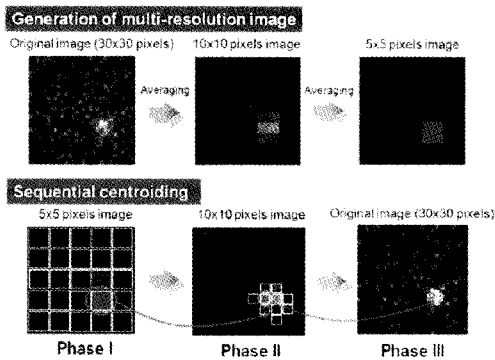


그림 17. 향상된 상관관계법을 이용한 피면 측정(34)

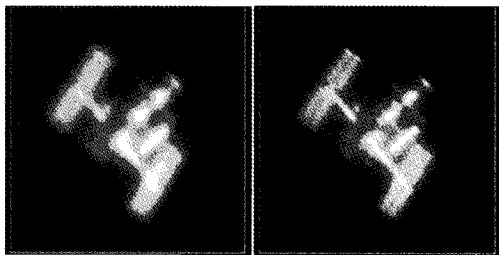


그림 18. 전산 모사를 통하여 확보된 적응광학 보정 전후의 위성 촬영 영상(35)

## 5. 맺음말

적응광학은 망원경 또는 현미경과 같이 독자적인 기능을 갖는 광학계라기보다는, 기존 광학계가 가지고 있는 빠른 속도의 랜덤 파면 오류를 실시간으로 보정하여 원래 광학계의 성능을 향상시키는 시스템이다. 따라서 적응광학은 고성능, 대구경 또는 고출력 광학계에 적용되어 왔다. 이러한 분야는 주로 천문, 우주 및 군사 분야에 국한되고, 개발에 상당한 예산을 필요로 하는 초정밀 대형 광학계의 개발을 전제하고 있다. 따라서 적응광학계의 개발은 상당한 경제 및 기술규모를 갖고 있는 기술 선진국에서 주도하고 있는 실정이다.

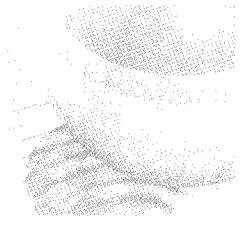
1990년 후반부터 국내에서도 위성추적, 천문관측 및 고출력레이저 전송 등에서 적응광학 연구가 수행되었고, 특히 2000년 중반 들어 회절 한계 수준에 가까운 폐회로 적응광학계 성능 시연에 성공하였으며, 이러한 과정에서 적응광학 연구 인력 및 기반 시설을 어느 정도 확보하게 되었다. 하지만 현재까지의 연구는 주로 적응광학 시스템 구성에 집중하였고, 요소 기술에 대한 밀도 있는 연구가 충

분히 수행되지는 못했다.

현재 적응광학과 직접적으로 관련하여 고체 고출력 레이저 개발 사업(원자력연구소)이 조만간 진행될 예정이고, 인공위성추적시스템(국방과학연구소) 및 대형망원경(천문연구원) 사업이 현재 추진 단계에 있다. 또한, 8M 헨드폰 카메라의 액체 렌즈 형상 제어, 사크-하트만 센서를 이용한 비구면 측정, 적응광학을 이용한 망막 측정 등 민수분야로의 적응광학 적용도 확대되고 있다.

## 참고문헌

- (1) H.W. Babcock, "The possibility of Compensating Astronomical Seeing", Pub. of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 65, pp. 229-236, 1953
- (2) J.M.Beckers, "Adaptive Optics for Astronomy, Principles, Performance and Applications", Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 31, pp. 13-62, 1993
- (3) J.M.Beckers, "Increasing the size of the isoplanatic patch with multiconjugate adaptive optics", Proc. ESO, pp. 693-703, 1987
- (4) R.Foy, A. Labeyrie, "Feasibility of Adaptive Telescope with Laser Probe", Astronomical Astrophysics, Vol. 152, pp. 29, 1985
- (5) D.V. Murphy, "Atmospheric-Turbulence Compensation Experiments Using Cooperative Beacons", Lincoln Laboratory Journal, Vol. 5(1), pp. 25-44, 1992
- (6) C.L.Koliopoulos, "Radial grating lateral shear heterodyne interferometer", Applied Optics, Vol. 19(9), pp. 1523-1528, 1980
- (7) D. Schmutz, E. Lawrence, "Hartmann Sensing at Adaptive Optics Associates", Proc. SPIE, pp. 13-17, 1987
- (8) N. Roddier, "Curvature sensing and compensation. a new concept in adaptive optics", Applied Optics, Vol. 27(7), pp.1223-1225, 1988
- (9) J.H.Lee, A.P.Doel, D.D. Walker, "Pupil plane wavefront sensing with a static pyramidal prism. Simulation and preliminary evaluation", Journal of the Optical Society of Korea, Vol. 4(1), pp. 1-6, 2000
- (10) D.S. Acton, R.C. Smithson, "Solar imaging with a segmented adaptive mirror", Applied Optics, Vol. 31(16), pp. 3161-3169, 1992
- (11) E. Kibblewhite, M.F. Smulko, F. Shi, "The effect of hysteresis on the performance of deformable mirrors and methods of its compensation", Proc. SPIE, Vol. 2201, pp. 754-761, 1994
- (12) M. Yelin, "Using Membrane Mirrors in Adaptive Optics", Proc. SPIE, Vol. 75, pp. 97-102, 1976
- (13) F.L. Vladimirov, G.V. Vdovin, G.D. Love, A.F. Naumov, "Wavefront control systems based on modal liquid crystal lenses", Rev. Sci. Instrum. 71(9), pp. 3290-3297, 2000
- (14) J.H.Lee, B.C. Bigelow, D.D.Walker, A.P.Doel, R.G. Bingham, "Why Adaptive Secondaries?", Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 112, pp. 97-107, 2000
- (15) J.Y.Wang, J.K. Markey, "Modal Compensation of atmospheric turbulence phase distortion", JOSA, Vol. 68(1), pp. 78-87, 1978
- (16) D.P. Greenwood, "Mutual coherence function of a wavefront corrected by zonal adaptive optics", JOSA, Vol. 69(4), pp.549-553, 1979
- (17) R.S. Lawrence, "A review of the Optical Effects of the Clear Turbulent



Atmosphere", Proc. SPIE, Vol. 75, pp. 2-8, 1976

[18] V.I. Tatarski, "Wave propagation in a Turbulent Medium", McGraw-Hill Company, Inc., New York, 1961

[19] A.N. Kolmogorov, "Turbulence, Classic Papers on Statistical Theory", Interscience Publishers, New York, 1961

[20] D.P. Greenwood, "Bandwidth Specification for Adaptive Optics Systems", JOSA, Vol. 67(3), 1997

[21] R.J. Noll, "Zernike polynomials and atmospheric turbulence", JOSA, Vol. 66(3), pp. 207-211, 1976

[22] F.Roddir, C.Roddir, "National Optical Astronomy Observatories (NOAO) Infrared Adaptive Optics Programme II. Modelling atmospheric effects in adaptive optics system for astronomical telescopes", Proc. SPIE, Vol. 628, pp. 298-304, 1986

[23] J.M. Beckers, "Adaptive Optics for Astronomy. Principles, Performance and Applications", Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 31, pp. 13-62, 1993

[24] J. H. Lee, D.D. Walker, A.P. Doel, "Adaptive Secondary Mirror Demonstrator: Design and Simulation", Optical Engineering, 38(9), pp. 1456-1461, 1999

[25] J. H. Lee, B.C. Bigelow, D.D. Walker, A.P. Doel, R.G. Bingham, "Why Adaptive Secondary Mirrors?", PASP, Jan., pp. 112-97-107, 2000

[26] J. H. Lee, D.D. Walker, A.P. Doel, "Adaptive Secondary Mirror Demonstrator: Construction and Preliminary Evaluation", Optical Engineering, April, pp. 1057-1062, 2000

[27] Seung-Kyu Park, Sung-Hoon Baik, Young-Seok Seo, Cheol-Jung Kim and Sung Woong Ra, "Wavefront Measuring Algorithm with Improved Measurement Resolution Using a Shack-Hartmann Sensor", JKPS, Vol. 42, pp. 743-750, 2003

[28] 박승규, 백성훈, 서영석, 김철중, 박준식, 나성웅, "적응광학시스템의 고속 파면측정 알고리즘에 대한 연구", 한국광학회지 vol. 13, No 3, pp. 251-257, 2002

[29] Young-Seok Seo, Sung-Hoon Baik, Seung-Kyu Park and Cheol-Jung Kim, "Closed-Loop adaptive optics System for Wave-Front Correction", JKPS, Vol. 39, pp. 891-894, 2001

[30] Jun Ho Lee, He Suk Gho, Jae Il Lee, Young Cheol Lee, Ung Cheol Kang, Jun Won Kim, Yong Il Cho, Sung Jin Kim, Kyung Mook Lee, Byung Tae Choi and Ho Jung Cheon, "A 37Ch Visible adaptive Optics System for Wavefront Compensation", JKPS, Vol. 49, pp. 139- 144, 2006

[31] Jun Ho Lee, Y. C. Lee, E. C. Kang, "A Cooled Deformable Bimorph Mirror for a High Power Laser", Journal of the Optical Society Korea, vol. 10, No 2, pp. 57-62, 2006

[32] 정태문, 최일우, 성재희, Nasr Hafz, 고도경, 이종민, "100 TW 레이저 펄스의 파면 보정용 적응 광학계", 한국광학회 동계 학술발표대회 논문집, pp. 269-270, 2007

[33] 정태문, 최일우, Nasr Hafz, 이성구, 고도경, 이종민, "적응 광학계를 이용한 레이저 펄스의 파면 보정과 focal spot의 맞춤화", 한국광학회 하계 학술발표대회 논문집, pp. 19-20, 2007

[34] 유재은, 윤성기, "다중 해상도 중심점 탐색법을 이용한 Shack-Hartman 센서용 상관관계법의 속도 개선", 한국광학회지 vol. 19, No 1, pp. 1-8, 2008

[35] 김지연, 유재은, 엄태경, 이준호, 윤성기, "적응광학계 파면보정 시스템의 보정성능에 대한 연구", 한국광학회 동계학술발표대회 논문집, pp. 67-68, 2008

약 력



이준호

- 학력 :
  - 2005-현재 공주대학교 광공학과 조교수/부교수
  - 2006-현재 위오직 기술고문
  - 1999-2005 한국과학기술원 인공위성연구센터 선임연구 원/연구조교수/연구부교수
  - 1999 런던대학교 이학박사(광학)
  - 1995 런던대학교 위성공학 석사
  - 1994 한국과학기술원 기계공학 학사
- Email: jhlsat@kongju.ac.kr

• 관심분야 :  
적응광학, 우주광학, 광학설계, 광기계