

적응광학계 변형거울의 구동기 배열에 따른 성능 변화 연구

임태경[†] · 이완술 · 윤성기*

한국과학기술원 기계공학과

Ⓣ 305-701 대전시 유성구 구성동 373-1번지

이준호

*한국과학기술원 인공위성연구센터

Ⓣ 305-701 대전시 유성구 구성동 373-1번지

(2002년 5월 31일 받음, 2002년 9월 23일 수정본 받음)

지상용 천문 망원경에서 대기의 영향으로 인해 발생하는 오차를 실시간으로 보상해주는 적응 광학을 이용하면 지상용 망원경으로도 막대한 비용이 드는 우주용 망원경에 버금가는 이미지를 얻을 수 있다. 일반적으로 적응 광학계에서는 대기에 의한 파면 오차를 제거하기 위하여, 변형 거울을 변형시켜 각 부분의 파면 오차를 보정하는 방법을 이용하므로, 변형 거울을 효과적으로 변형시키기 위한 구동기의 특성과 구동기의 배열에 대한 연구가 필수적이다. 하나의 구동기를 작동하여 거울을 변형시킬 때, 변형된 거울면의 형태를 영향 함수라고 정의하며, 이러한 영향 함수를 이용하여 변형 거울을 효과적으로 모형화하고 설계할 수 있다. 본 논문에서는 유한요소해석을 이용하여 계산된 변형 거울의 실제 영향 함수를 가우시안 함수 형태로 단순화하고, 추가로 구동기들 사이의 영향을 고려한 커플링 계수를 도입하여, 주어진 구동기 배열에 대한 영향 함수를 결정하였다. 또한 변형 거울에 사용되는 구동기들 사이의 적절한 커플링 계수를 결정하기 위하여, 커플링 계수 변화에 따른 변형 거울의 성능 변화를 해석하였다. 이와 같이 구성된 영향 함수를 이용하여, 구동기가 삼각형과 사각형 형태와 같이 등간격으로 배치되어 있을 때의 구동기 간격에 따른 변형 거울의 성능을 해석하고 효과적인 배열을 제안하였다.

주제어 : adaptive optics, deformable mirror, influence function, actuator pattern.

I. 서 론

적응 광학(adaptive optics)은 천체 망원경의 이미지 특성을 개선하기 위한 하나의 방식으로서 1953년 Babcock에 의해 최초로 제안되었다.^[1] 지구의 대기가 망원경의 이미지 특성을 악화시킨다는 사실은 뉴턴의 시대부터 잘 알려졌다.^[2] 뉴턴은 1730년에 이러한 대기의 악영향에 대한 해법으로서 높은 산 꼭대기에 망원경을 설치할 것을 제안하였다. 이러한 접근방식의 극치로서 허블 우주 망원경(Hubble Space Telescope)이 건조되었고 이에 따라 대기에 의한 영향을 완전히 제거할 수 있었다. 그러나 대기의 영향으로 인한 파면 오차를 실시간으로 보상해주는 적응 광학계를 지상용 망원경에 적용하면 막대한 비용이 드는 우주용 망원경의 광학계보다 더 큰 광학계를 사용할 수 있어 지상에서도 더 좋은 이미지를 얻을 수 있다. 이러한 장점으로 인하여 현재 많은 대구경 천문 망원경에는 실제로 적응 광학 시스템이 적용되고 있다.

적응 광학은 대기에 의한 파면의 왜곡을 감지하고 파면에 적절한 보상을 해줌으로써 회절 한계의 상을 얻는 일련의 과정들로 구성되어 있다. 적응 광학은 크게 파면 측정기, 파면 보상기, 그리고 제어 시스템의 세 가지 요소로 구성되어 있다. 파면 측정기가 파면의 오차를 측정하고, 제어 시스템에서 이를 보상하기 위한 신호를 발생시키면, 파면 보상기가 제어 시

스템의 지령에 따라 광학면을 변형시키거나 굴절률을 변화시킴으로써 파면 오차를 보상해 주게 되는 것이다. 파면 보상기로는 광학면의 형태가 입력 신호에 따라 조절 가능한 변형 거울(deformable mirror)이 주로 사용된다. 일반적으로 변형 거울은 수십 내지 수천 개의 등간격으로 배치된 구동기로 거울면을 원하는 형태로 변형시킴으로써 동작한다. 구동기에는 여러 가지 종류가 있는데 보통 적용된 형태의 압전 소자를 이용한 구동기가 자주 이용된다. 그러나 이것은 상당히 고가이고, 구동기의 개수가 많을수록 거울면으로 표현 가능한 표면 형태의 수는 늘어나지만 그에 따라 이를 제어하기가 힘들어진다. 따라서 거울의 변형을 효율적으로 일으키기 위해서는 적절한 수의 구동기를 최적화된 배열로 배치할 필요가 있다. 이를 위하여 주어진 시스템에 적합한 구동기 배열의 형태와 구동기의 특성에 따른 변형 거울의 성능에 대한 연구가 필수적이다.

하나의 구동기가 변형 거울을 변형시킬 때 거울면의 변형 형태를 영향 함수(influence function)라 한다. 변형 거울의 성능은 영향 함수의 형태와 구동기 배열 형태에 의하여 결정된다. 영향 함수는 변형 거울의 두께, 탄성 계수, 프와송 비, 구동기의 형태 등과 같은 변수들에 의해 결정되는데, 이러한 영향 함수의 수학적 모형화는 수년 동안 연구의 대상이 되어 왔다. Hudgin은 대기의 난류 효과를 보상하기 위한 변형 거울에 대해 피스톤(piston)형, 가우시안 함수(Gaussian function)형 그리고 피라미드형 영향 함수를 도입하여 이에 대한 보상 오차를 유도하였다.^[3] Taranenko 외 다수는 강성이 작은 금속 거

[†]E-mail: taerii@kaist.ac.kr

울면과 큰 금속 거울면에 대한 영향 함수를 지수 함수 형태로 유도하였다.^[4] Claflin과 Bareket는 단일 보정 거울에 대하여 포와송 식(Poisson's equation)으로부터 영향 함수를 유도하였다.^[5] 그리고 성능 해석을 위해서 다채널의 거울면을 최소 자승 원리를 사용하여 제르니케 다항식(Zernike polynomial)으로 근사화 하였다. Harvey와 Callahan은 단일 보정 거울의 보상 성능을 구동기 사이의 간격과 파면의 자기공분산 길이와 연관시키는 선형 이론의 사용을 제안하였다.^[6] 그러나 기존의 연구들은 영향 함수의 모양과 변형 거울의 성능에 큰 영향을 미치는 구동기 사이의 커플링 효과를 고려하고 있지 않으며, 따라서 이러한 커플링 효과를 영향 함수에 반영할 필요가 있다. 또한 영향 함수의 형태를 유한요소해석을 통하여 유도함으로써 더욱 실제적인 영향 함수를 구성할 수가 있다. 실제 변형 거울의 표면 형태를 정확하게 계산하기 위해서는 각각의 구동기 배열에 대하여 매번 유한요소해석과 같은 정밀한 계산이 필요하지만, 많은 구동기가 사용되는 경우에는 유한요소법에 의해서 얻어진 변형 거울의 영향 함수를 근사화함으로써 이를 효과적으로 계산할 수 있다.

본 연구는 적응 광학분야에서 파면 보상기로 사용되는 변형 거울의 일반적인 형태인 단일 보정 거울에 대해 초점을 맞추고 있다. 단일 보정 거울은 적층 구동기의 배열이 하나의 연속적인 반사판의 뒷면을 밀어주는 방식으로 동작한다. 일반적으로 구동기의 배열로는 등간격의 삼각형, 사각형 배열 또는 원형 배열 등이 사용되고 있다. 본 연구에서는 등간격의 구동기 배열에 대한 변형 거울의 성능 해석을 통하여 각 구동기 배열이 가지는 특징을 파악하고 또한 구동기 사이의 간격에 따라서 변형 거울의 성능이 어떻게 변화하는 지를 파악하고자 한다.

II. 변형 거울의 성능 평가

편리를 위하여 망원경 개구면에서 위치 \hat{x} , 시간 t 일 때 대기의 난류에 의해 야기된 위상 윤곽(phase profile)을 $\Phi(\hat{x}, t)$ 라 하자. 그리고 변형 거울의 i 번째 구동기에 대한 시간 t 에서의 지령을 $a_i(t)$ 라 하자. 지령 $a_i(t)$ 를 내려서 변형 거울면을 조절하는 이유는 변형 거울면을 대기난류에 의해 야기된 $\Phi(\hat{x}, t)$ 의 근사적인 꼴레로 나타냄으로써 변형 거울에서 빛이 반사되고 난 후의 수차를 제거하거나 대기의 난류가 존재하지 않을 때의 위상 윤곽 형태로 만들기 위한 것이다.

거울면은 기본적으로 그것이 변형되도록 밀고 당기는 수많은 구동기에 의해 조절된다. m 개의 구동기가 있고 거울면의 변형이 구동기의 지령에 선형적으로 일어난다고 가정하면 변형 거울면을 다음 식과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\hat{\Phi}(\hat{x}, t) = \sum_{i=1}^m a_i(t) r_i(\hat{x}) \quad (1)$$

여기서, $r_i(\hat{x})$ 는 위치 \hat{x} 에서 변형 거울면의 영향 함수이며 i 번째 구동기에 단위 변위를 가할 때의 응답을 나타낸다. 변형 거울면의 표본으로 n 개의 위치, $\hat{x}_j, j=1 \dots n$ 를 취하면 거울면의 위치와 구동기의 지령 사이의 관계는 다음 식과 같이 묘사가 된다.

$$\hat{\Phi}(t) = H a(t) \quad (2)$$

식 (2)에서 n 차원 벡터 $\hat{\Phi}(t) = [\hat{\Phi}(\hat{x}_1, t), \dots, \hat{\Phi}(\hat{x}_n, t)]^T$ 는 시간 t 에서의 보상된 위상 윤곽을 나타낸다. i 번째 열이 벡터 $[r_i(\hat{x}_1), \dots, r_i(\hat{x}_n)]^T$ 인 변형 거울의 형상 행렬 ($n \times m$) H 는 시간에 독립적이다.

형상 행렬은 구동기의 위치가 정해지면 각 구동기에 대한 영향 함수를 구함으로써 정해진다. 이 영향 함수를 구하는 방법은 다음 절에서 설명한다. 식 (2)으로부터 형상 행렬, H 가 정해져 있을 때 보상된 위상 윤곽 $\hat{\Phi}(t)$ 를 구하기 위해서는 변형 거울의 지령 벡터인 $a(t)$ 를 구해야 한다. 변형 거울을 이용하는 목표는 $\Delta\Phi = \Phi(t) - \hat{\Phi}(t)$ 라 할 때 $\langle \Delta\Phi, \Delta\Phi \rangle$ (여기서 $\langle f, g \rangle = \int f^T g$)를 최소화, 즉 대기 난류에 의해 야기된 위상 윤곽과 같도록 거울면을 변형시켜주는 것이므로, $\langle \Delta\Phi, \Delta\Phi \rangle$ 를 최소화하기 위한 가장 직관적인 최적의 $a(t)$ 는 다음 식으로부터 구할 수가 있다.

$$\frac{\partial}{\partial a} \langle \Delta\Phi, \Delta\Phi \rangle = 0 \quad (3)$$

$\Delta\Phi$ 를 식 (3)에 대입하여 미분을 수행하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$a(t) = (H^T H)^{-1} H^T \Phi(t) \quad (4)$$

형상 행렬, H 를 알고 있을 때 식 (4)로부터 $a(t)$ 를 구할 수 있고, 이 값들을 식 (2)에 대입함으로써 보상된 위상 윤곽 $\hat{\Phi}(t)$ 를 얻을 수 있다. 보상이 제대로 되었는지를 확인하기 위한 오차에 대한 지표로서 제곱 평균 근호 오차를 다음 식과 같이 정의할 수가 있다.

$$\text{제곱평균근호 오차} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Phi_i - \hat{\Phi}_i)^2} \quad (5)$$

식 (5)으로부터 보상 오차를 확인할 수 있으나 원래의 위상 윤곽에 대해 오차가 상대적으로 얼마만큼의 크기를 가지는 지를 한 눈에 알아볼 수가 없다는 단점이 있다. 따라서 다음 식과 같이 정규화된 매개변수를 사용하면 그 단점을 없앨 수가 있다.

$$\text{보상성능, } F = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Phi_i - \hat{\Phi}_i)^2}{\sum_{i=1}^N \Phi_i^2}} \quad (6)$$

F 를 오차에 대한 지표로 사용할 경우 $\Phi(t)$ 와 $\hat{\Phi}(t)$ 가 완전히 일치할 경우 F 는 1의 값을 가지게 되며, 1에 가까운 값을 가질수록 보상이 잘 이루어진 것으로 볼 수가 있고, 1보다 작아지면 작아질수록 보상이 잘 되지 않은 것을 의미한다.

III. 등간격 구동기 배열 하에서의 영향 함수 예측 및 평가

변형 거울에서 구동기의 등간격 배열이라 함은 변형 거울의

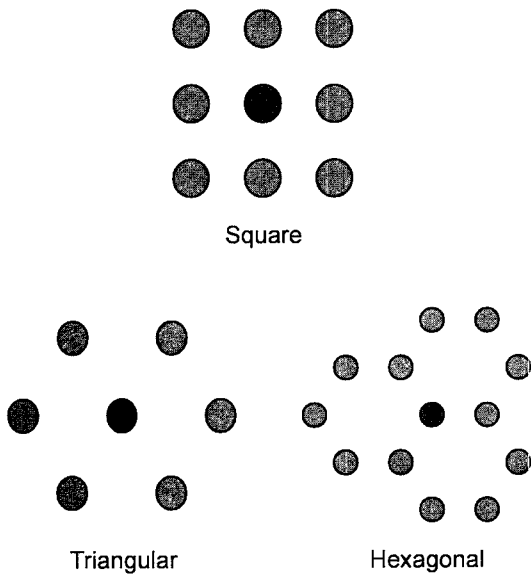


그림 1. 등간격 구동기 배열의 여러 형태.

가장자리에 위치한 구동기를 제외한 모든 구동기에 대하여 각 구동기를 중심으로 봤을 때 인접한 구동기가 동일한 위치에 배열되어 있어서 영향 함수가 모두 같은 모양을 가지는 배열을 일컫는다. 적용 광학계 변형 거울의 구동기 배열로는 일반적으로 등간격 배열이 사용된다.^[7] 등간격 배열로는 그림 1에 서와 같이 삼각형, 사각형 그리고 육각형 배열 등이 있으며 이러한 배열 하에서의 영향 함수의 형태가 어떠한 모습을 띠고 있는지 알아보기 위하여 유한요소해석을 수행하였고, 이를 통하여 그림 2와 같이 각 배열에 대한 영향 함수의 형태를

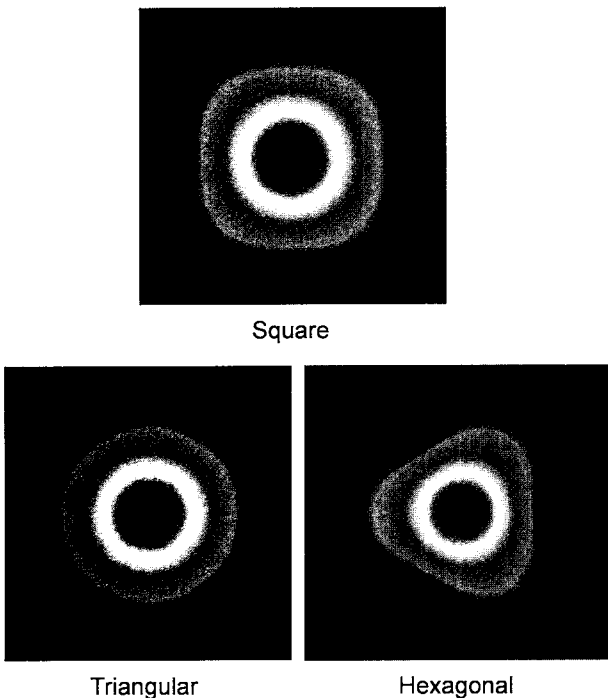


그림 2. 등간격 구동기 배열 하에서 변형 거울의 영향 함수.

Table 1. 해석에 사용된 압전 소자(PZT)의 주요 물성치

탄성 계수(Elastic modulus)	90.6 GPa
밀도(Density)	2530 kg/m ³
프와송 비(Poisson's ratio)	0.24

Table 2. 해석에 사용된 제로더(Zerodur)의 주요 물성치

탄성 계수(Elastic modulus)	50.0 GPa
밀도(Density)	7500 kg/m ³
변형률 계수(Strain coeff., d ₃₃)	5e-10 m/V

구할 수가 있었다. 이 때 사용된 거울면의 두께는 3 mm, 구동기의 직경은 6 mm, 구동기의 높이는 20 mm, 그리고 구동기 사이의 간격은 10 mm이다. 거울면의 재료로는 제로더(Zerodur), 구동기의 재료로는 압전 소자(PZT)가 사용되었으며 그 물성치는 표 1, 2와 같다.

먼저 삼각형 배열을 살펴보면, 힘이 가해지는 구동기 주위로 6개의 인접 구동기가 동일한 거리에 존재한다. 이 경우 영향 함수가 거의 원형에 가깝다는 것을 알 수가 있고, 따라서 3차 원으로 생각할 때 축대칭의 함수 형태로 근사화 하는 것이 가능하다. 사각형 배열의 경우 힘이 가해지는 구동기에 대하여 좌우상하의 인접 구동기보다 대각선 방향으로의 인접 구동기가 더 멀리 떨어져 있어서 대각선 방향으로 영향 함수가 약간 퍼지는 양상을 나타내고 있다. 그러나 이 경우에도 영향 함수를 축대칭의 함수 형태로 근사화 하더라도 큰 오차는 없을 것으로 보인다. 마지막으로 육각형 배열의 경우 힘이 가해지는 구동기 주위로 120° 간격으로 3개의 인접 구동기가 존재한다. 인접한 구동기 사이의 각도가 너무 커서 영향 함수가 그 사이로 크게 퍼지는 것을 알 수가 있고 이 경우 영향 함수를 축대칭 함수로 근사화 할 경우 오차가 클 것이라고 예상할 수 있다.

이러한 결과를 바탕으로 축대칭 함수로 근사화가 가능한 삼각형, 사각형 구동기 배열에 대하여 구동기 간의 간격이 변화함에 따라서 변형 거울의 성능이 어떻게 변화하는 지에 대해 알아보기로 하자. 유한요소해석을 통한 영향 함수의 형태와 이

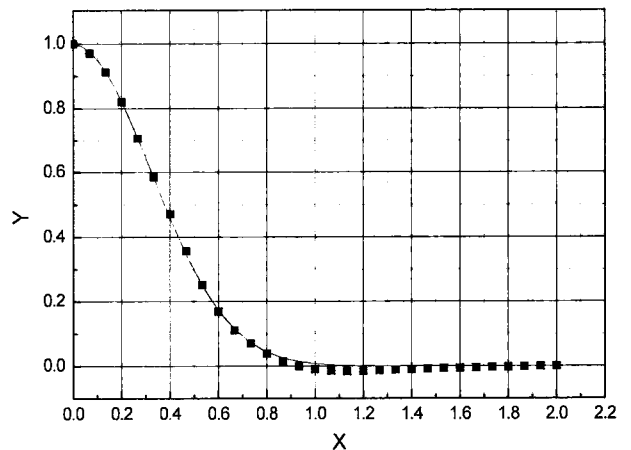


그림 3. 유한요소법에 의한 영향 함수의 가우시안 함수로의 근사.

를 가우시안 함수로 근사화했을 때의 결과를 그림 3에 나타내었다. 이 그림은 삼각형 구동기 배열일 때의 영향 함수를 나타내며 사각형 배열에 대해서도 동일한 형태의 영향 함수를 얻을 수 있었다. 각 점들이 유한요소해석 결과를 나타내고 실선이 근사화된 함수 형태를 나타내고 있다. 그림 3으로부터 영향 함수의 가우시안 함수로의 근사가 매우 잘 들어맞음을 알 수 있다. 따라서 영향 함수의 근사 함수식을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = y_0 + A \exp(-B(x - x_c)^2) \quad (7)$$

식 (7)에서 x_c 와 y_0 는 각각 함수의 x 축과 y 축 방향으로의 평행 이동량을 나타내므로 이 경우 거의 0의 값을 갖는다. 그리고 계수 A 는 함수의 최고값을 나타내므로 이 경우 단위 상수이다. 따라서 변수는 B 로 한정이 되고 이 값이 정해지게 되면 영향 함수가 결정된다. 등간격의 구동기 배열의 경우 배열 간격에 따라 B 의 값이 변하게 되므로 B 와 구동기 사이의 간격을 연관시키기 위해 커플링(coupling)의 개념을 도입하였다. 구동기의 커플링 계수 C_A 는 식 (8)과 같이 전압이 가해진 구동기의 최대 변위에 대한 인접 구동기에서의 거울면의 변위의 비로 정의된다.

$$C_A = \frac{y_d}{y_{pk}} \quad (8)$$

구동기 사이의 커플링의 존재는 임의의 입사 파면에 대하여 변형 거울의 보상 정확도를 향상시키는 역할을 한다.^[7] 그러므로 변형 거울의 설계에 있어서 커플링이 적절하게 일어나도록 하는 것이 중요하다. 커플링이 일어나지 않아도 변형 거울의 성능에 좋지 않은 영향을 주지만 커플링이 너무 심하게 일어나도 적응 광학 되먹임 루프에서 불안정성의 요인이 될 수 있으므로 파면 보상의 설계 시에 이를 고려해야 한다.

식 (7)과 (8)로부터 커플링 계수 C_A 가 정해지고 구동기 사이의 간격이 주어지면 이 때의 변수 B 의 값을 알 수가 있다. 그러나 변형 거울의 설계 관점에서 적절한 C_A 의 값이 얼마인지 알지 못하므로 C_A 의 값을 결정하기 위해서는 이에 대한 연구가 필요하다. 적절한 C_A 의 값을 결정하기 위하여 C_A 의 값을 변화시켜 가면서 변형 거울의 성능에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과를 그림 4~5에 나타내었다. 여기서 구동기 사이의 간격은 변형 거울의 반경을 1로 보았을 때에 대한 상대적인 값을 나타낸다. 실제적인 경우에 있어서, 보상하고자 하는 위상 윤곽은 제르니케 다항식의 각 항들이 그 계수들을 가중치로 하여 합쳐진 형태로 나타나므로 각 수차들의 상대적인 분포에 대한 정보를 얻기 위해 유한요소법을 이용하여 직경 1 m의 이중 아치 주반사경에 대해 광축 방향의 자중에 대한 변형해석을 수행하였다. 그 결과, 피스톤(piston)을 제외하고 디포커스(defocus)와 트레포일(trefoil)이 가장 큰 부분을 차지하였으며 변형 거울이 이러한 형태의 위상 윤곽을 제대로 재현할 수 있는지를 알아보기 위해 위의 두 가지 수차에 대하여 대표적으로 나타내었다. 구동기 사이의 간격이 0.4인 경우 C_A 의 값이 증가함에 따라 보상 성능이 증가하다가 C_A 가 0.25 이상 이 되면 오히려 감소하는 양상을 보이고 있다. 간격이 0.2,

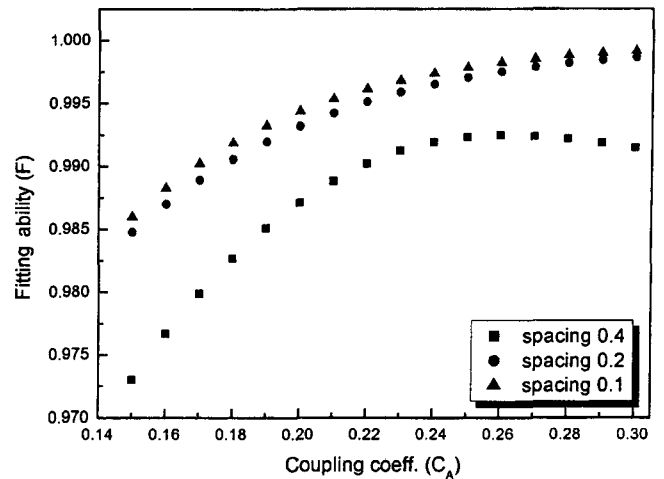


그림 4. 구동기 사이 간격이 0.1, 0.2, 0.4일 때 커플링 계수가 증가함에 따른 보상성능의 경향(디포커스에 대한 보상의 경우).

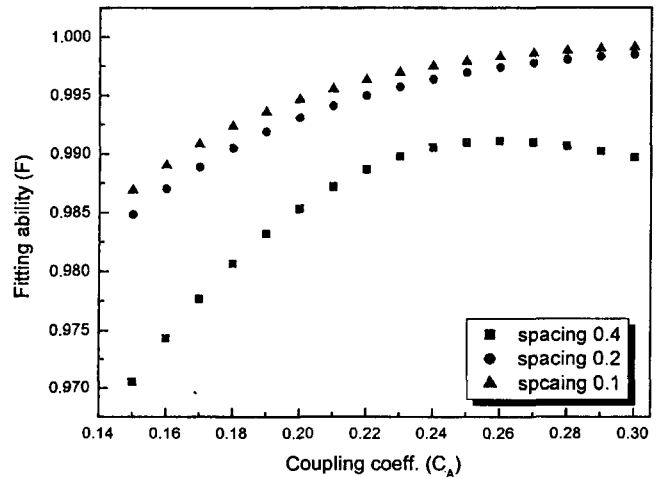


그림 5. 구동기 사이 간격이 0.1, 0.2, 0.4일 때 커플링 계수가 증가함에 따른 보상성능의 경향(트레포일에 대한 보상의 경우).

0.1인 경우는 C_A 의 값이 증가함에 따라 보상 성능이 계속 증가하는 양상을 보이나 그 증가율은 계속 둔화되어 C_A 의 값이 0.25 이상이 되면 보상 성능의 증가율이 상당히 둔화되는 양상을 보이고 있다. 따라서 이러한 결과로부터 C_A 의 값이 0.25 근처에 있을 때 보상성능이 최대값을 가지거나 최대값에 거의 근접한 값을 나타내므로 적절한 커플링 계수, C_A 의 값을 0.25라 볼 수 있다. 여기서 그림 4~5는 특정 수차에 대한 보상 성능을 나타내고 있지만 다른 여러 수차에 대해서도 동일한 양상을 보였다. 이러한 결과로부터 C_A 의 값이 특정한 값으로 고정될 경우 구동기 사이의 간격이 주어지면 이제 식 (7)과 식 (8)로부터 영향 함수가 결정된다.

IV. 변형 거울의 구동기 간격에 따른 성능 해석

III절에서 영향 함수를 구성하였으므로 II절에서 설명한 방법에 따라 변형 거울의 각 수차들 또는 이 수차들의 조합에 대한 보상 성능해석이 가능하다. 삼각형과 사각형 구동기 배열

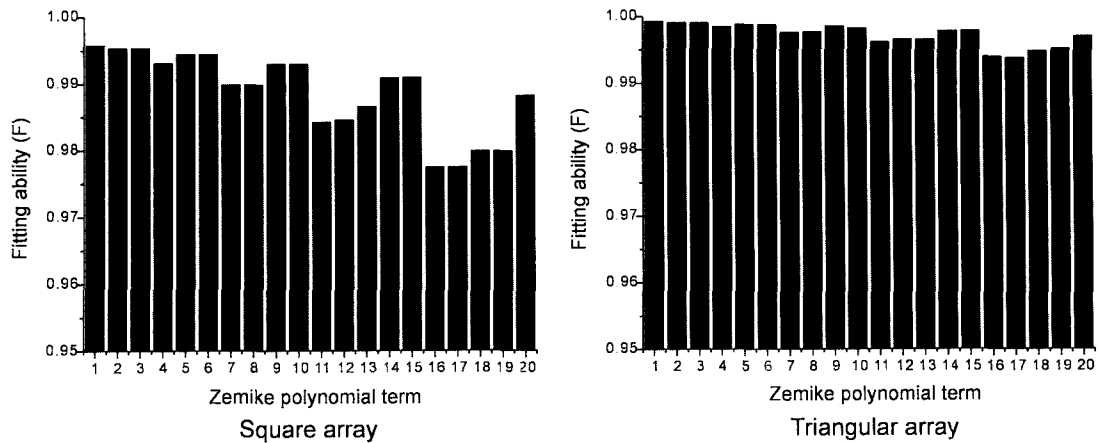


그림 6. 구동기 사이 간격이 0.20일 때 Zernike 다항식의 각 항에 대한 보상 성능.

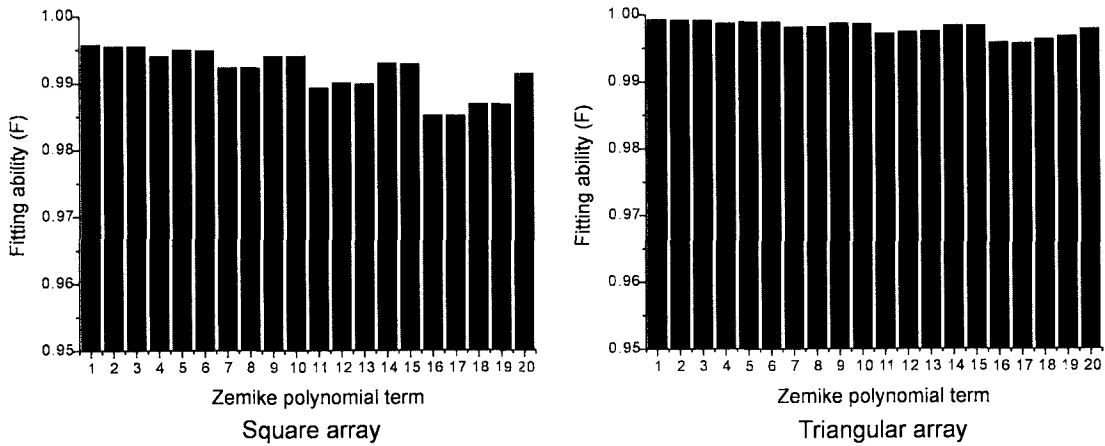


그림 7. 구동기 사이 간격이 0.15일 때 Zernike 다항식의 각 항에 대한 보상 성능.

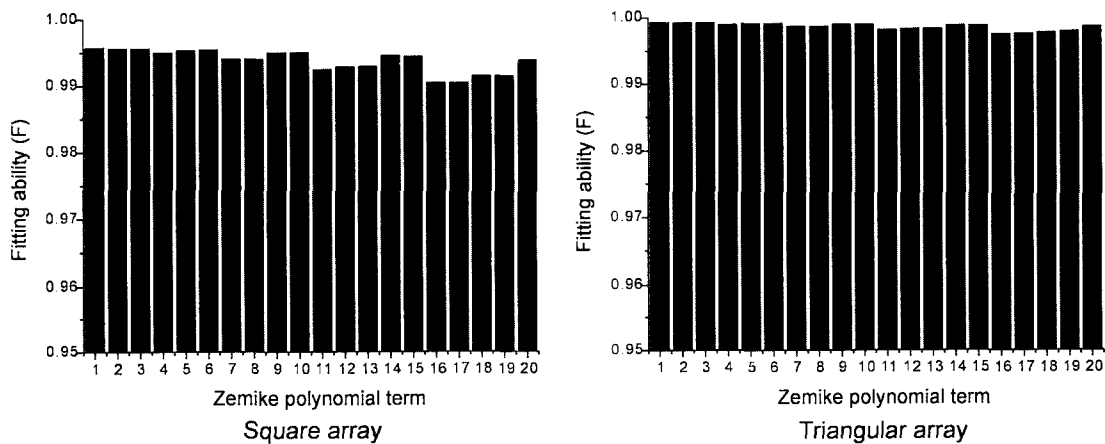


그림 8. 구동기 사이 간격이 0.10일 때 Zernike 다항식의 각 항에 대한 보상 성능.

에 대하여 구동기 사이의 간격을 0.5에서 0.1까지 0.01씩 변화시켜 가면서 제르니케 다항식의 처음 20개항에 대한 변형 거울의 성능 해석을 수행하였고 그 결과들 중 구동기 사이의 간격이 0.20, 0.15 그리고 0.10일 때의 결과를 그림 6~8에 나타내었다. 이 때 C_A 의 값은 0.2로 고정하였다.

동일한 구동기 간격에 대하여 삼각형과 사각형의 구동기 배열을 비교해 보면 삼각형 배열을 사용할 때의 보상 성능이 사각형 배열을 사용할 때보다 월등히 좋은 것을 알 수가 있다. 삼각형 배열의 경우 구동기 사이의 간격이 0.10일 때는 제르니케 다항식의 처음 20개항 모두에 대하여 보상 성능이 거의

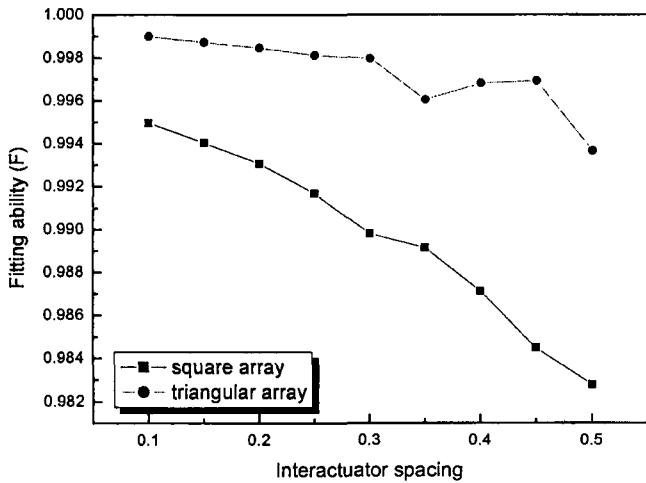


그림 9. 구동기 사이의 간격에 따른 보상 성능의 추이 (디포커스에 대한 보상의 경우).

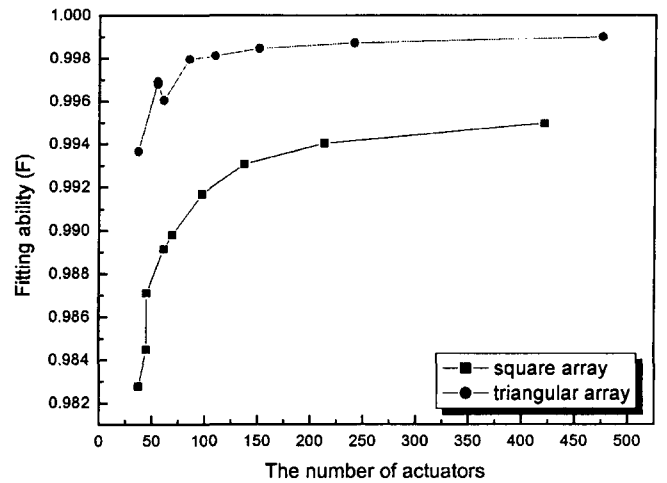


그림 11. 구동기 개수에 따른 보상 성능의 추이(디포커스에 대한 보상의 경우).

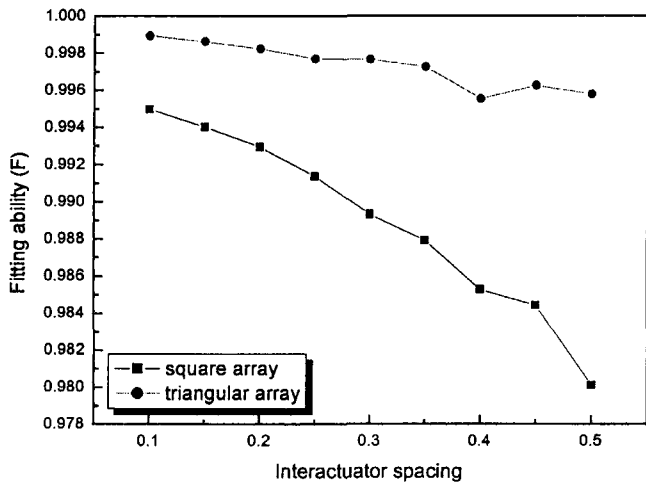


그림 10. 구동기 사이의 간격에 따른 보상 성능의 추이 (트레포일에 대한 보상의 경우).

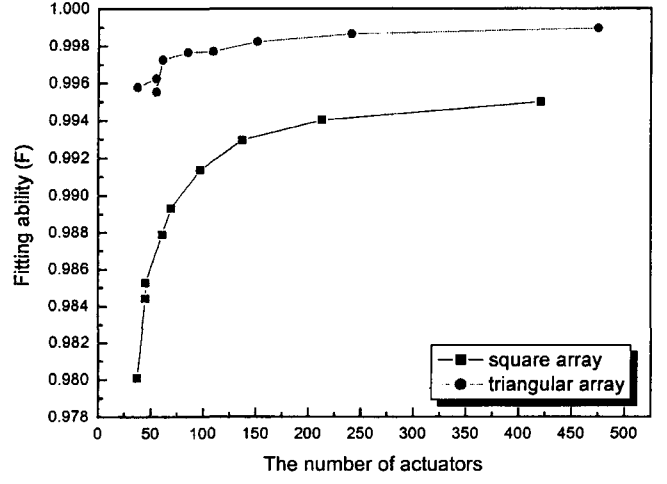


그림 12. 구동기 개수에 따른 보상 성능의 추이(트레포일에 대한 보상의 경우).

1에 가까운 값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 같은 구동기 배열 하에서도 발생하는 수차에 따라 보상 성능이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 구동기 사이의 간격이 변함에 따라서 또한 구동기 개수가 변함에 따라서 보상 성능이 어떠한 경향을 갖는지 알아보기 위하여 디포커스와 트레포일의 두 가지 항에 대한 성능 변화를 그림 9~12에 나타내었다. 사각형 배열의 경우 구동기 사이의 간격이 감소함에 따라 또한 구동기의 개수가 증가함에 따라 성능이 꾸준히 증가하는 양상을 보이고 있다. 그러나 삼각형 배열의 경우 사각형 배열의 보상 성능보다는 큰 보상 성능을 나타내고 있지만 전반적으로 구동기 사이의 간격이 감소함에 따라, 또한 구동기의 개수가 증가함에 따라 보상 성능의 증가량이 사각형 배열에 대한 보상 성능의 증가량만큼 크지 않은 것을 알 수 있다. 이는 이미 보상 성능이 상당히 큰 값을 가지고 있어서 구동기 개수를 증가시키더라도 더 이상 개선의 여지가 없기 때문인 것으로 판단된다. 또한 특징적인 점으로는 그림 11과 그림 12에서 구동기 개수가 증

가했는데도 불구하고 오히려 보상 성능이 감소하는 현상이 국부적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 보상 성능이 구동기 개수에 전적으로 비례하지 않음을 의미한다. 이러한 현상이 생기는 이유는 변형 거울 끝단의 구동기 배치의 영향인 것으로 생각된다. 변형 거울 끝단은 면적상으로 볼 때 전체 면적에 대해 큰 비중을 차지하고 있으며, 이 부분의 구동기 배치 형상에 따라 보상 성능에도 큰 영향을 미친다. 따라서 구동기 사이의 간격이 줄어서 구동기의 수가 늘어났다 하더라도 이 끝단의 구동기 배치 형상이 보상을 어렵게 하는 배치 형상을 가진다면 전체적인 보상 성능이 감소할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석을 통하여 구한 변형 거울의 영향 함수를 가우시안 함수로 근사화하고, 이에 구동기의 커플링 계수를 도입하여 커플링 계수와 구동기 사이의 간격이 주

어질 때 영향 함수가 결정되도록 하였다. 또한 변형 거울의 설계 관점에서 적절한 커플링 계수값을 얻기 위해 커플링 계수에 따른 변형 거울의 성능 해석을 수행하였고, 그 결과로서 커플링 계수가 0.25 정도일 때 변형 거울이 좋은 보상 성능을 나타냄을 알 수 있었다.

이렇게 구성된 영향 함수를 바탕으로 하여 삼각형과 사각형의 등간격 구동기 배열에 대하여 구동기 간격에 따른 변형 거울의 성능 해석을 수행하였다. 분석 결과 사각형 구동기 배열에 비해서 삼각형 구동기 배열의 보상 성능이 훨씬 뛰어난 것을 알 수 있었다. 또한 구동기 간격이 감소함에 따라, 그리고 구동기의 개수가 증가함에 따라 일반적으로 보상 성능이 향상되지만 구동기의 개수와 보상 성능이 완전히 비례하지는 않는다는 사실도 확인할 수 있었다.

이러한 결과를 변형 거울의 설계에 반영한다면 적은 개수의 구동기로 효과적으로 거울면을 변형시켜 줌으로써 보상 성능을 향상시키는 데에 큰 도움이 되리라 생각된다.

또한 등간격 구동기 배열에서 한 발 더 나아가 구동기 배열 패턴 최적화를 수행할 경우 등간격 구동기 배열을 가지는 변형 거울보다 더 뛰어난 보상 성능을 가질 수 있으리라 기대가 되며 이 경우 그에 따른 파면 센서의 개발도 함께 이루어져야

할 것이다.

참고문헌

- [1] H. W. Babcock, The possibility of compensating astronomical seeing, *Publ. Astron. Soc. Pac.* vol. 65, 229, 1953.
- [2] I. Newton, *Opticks*, based on 4th Ed., 1730; Dover, New York, 1979.
- [3] R. H. Hudgin, Wavefront compensation error due to finite corrector-element size, *J. Opt. Soc. Am.* vol. 67, 393, 1977.
- [4] V. G. Taranenko, G. P. Koshelev, and N. S. Romanyuk, Local deformations of solid mirrors and their frequency dependence, *Sov. J. Opt. Technol.* vol. 48, 650, 1981.
- [5] E. S. Claflin and N. Bareket, Configuring an electrostatic membrane mirror by least-squares fitting with analytically derived influence functions, *J. Opt. Soc. Am. A* 3, 1833, 1986.
- [6] J. E. Harvey and G. M. Callahan, Transfer function characterization of deformable mirrors, *J. Opt. Soc. Am.* vol. 67, 1978.
- [7] J. W. Hardy, *Adaptive optics for astronomical telescope*, Oxford university, New York, 1998.

A study on the actuator arrays of a deformable mirror for adaptive optics

Tae-Kyoung Uhm[†], Wan-Sul Lee, and Sung-Kie Youn*

Mechanical Department, KAIST, Daejeon 305-701, KOREA

[†]E-mail: taerii@kaist.ac.kr

Jun-Ho Lee

**Satellite Technology Research Center, KAIST, Daejeon 305-701, KOREA*

(Received May 31, 2002 ; Revised manuscript received September 23, 2002)

In the earth telescope for space observation, the adaptive optical (AO) system that immediately compensates atmospheric turbulence is helpful to get high-resolution images. An adaptive optics for earth telescopes is very attractive, since the Earth telescopes can be made at lower costs and have larger optical apertures than space telescopes. Generally, in order to remove the wavefront error produced by atmospheric turbulence, a deformable mirror, whose surface shape changes in a controllable way in response to a drive signal, is used. The characteristics and patterns of actuators are very important for the effective control of a deformable mirror. The mirror surface shape deformed by one actuator is defined as an influence function and the deformable mirror can be effectively modeled and designed using this influence function. In this paper, by simplifying the actual influence function obtained by FEM analyses into the Gaussian function and introducing the coupling coefficient between actuators, the influence function is constructed. The proper coupling coefficient of the target system can be obtained by performance analyses of a deformable mirror for various coupling coefficients. Using the constructed influence function, the deformable mirror with equally spaced triangular and square actuator patterns is analyzed for various spacings and an effective actuator pattern is proposed.

Classification code : SM.020.