

위성용 STAR TRACKER 광학계의 설계요소 선정

나자경 · 김 용 하 · 이 유
충남대학교 천문우주학과

SELECTION OF DESIGN PARAMETERS IN OPTICAL SYSTEM OF STAR TRACKER FOR A SATELLITE

Ja-Kyung Nah, Yong Ha Kim, Yu Yi

Department of Astronomy and Space Science, Chungnam National University

(Received March 31, 1999; Accepted May 15, 1999)

요 약

위성용 star tracker의 국내 개발을 위한 기초 연구의 일환으로 광학계 설계 요소 선정 과정을 연구하였다. 논리적인 광학 요소 선정을 위해 CCD 센서에 결상된 별빛을 관련 전자회로에서 읽고, 처리하는 전 과정을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션으로부터 별의 등급과 성취 가능한 지향 정밀도간의 관계가 구해졌으며, 그 관계로부터 요구되는 star tracker의 지향 정밀도를 만족시키기 위한 최적의 광학요소를 유도하였다. 선정된 광학 요소들은 10 arcsec의 지향 정밀도를 갖는 star tracker의 광학계 설계에 사용되었다.

ABSTRACT

In order to develop star trackers for a satellite in our country we studied selection procedure of optical parameters. For logical selection of the optical parameters, we simulated the entire processes in which star lights imaged on a CCD sensor were read into and processed in an associated electronics. The simulation resulted in relations between star's magnitude and achievable pointing accuracy, from which we derived optimal optical parameters to satisfy a required pointing accuracy of a star tracker. The selected optical parameters were used in an optical system design of a star tracker with a pointing accuracy of 10 arcsec.

1. 서 론

위성을 이용한 지상관측 및 우주관측은 고도의 지향 정밀도를 필요로 한다. 이를 만족시킬 수 있는 자세 감지 장치로서 Star Tracker는 관성 좌표계에서 3축의 자세정보를 수 arcsecond까지 제공해줄 수 있

다(Wertz 1988). Star Tracker가 자세정보를 얻는 방식은 Star Tracker가 찍은 별들과 tracker에 내장된 star catalogue의 별들을 비교함으로써 지향 방향에 대한 정보를 얻는 것이다.

Star Tracker의 성능예측과 관련된 연구들은 대부분 자세인식을 위한 알고리즘만을 포함하여 시뮬레이션하거나 이 시뮬레이션에 하드웨어의 간단한 사양만을 입력시킴으로서 이루어졌다(van Bezooijen, 1993). 이 연구에서는 원하는 성능을 만족하는 하드웨어(특히 광학계와 감지센서)의 설계요소 선정에 비중을 두어 시뮬레이션을 수행하였다. Star Tracker의 광학계 설계요소들은 사용 가능한 하드웨어(CCD, 렌즈)와 관측 가능한 별의 등급과 개수를 고려하여 결정되어야 한다(Abreu, 1993). 관측 가능한 별의 등급은 감지센서(CCD)의 특성을 반영하는 시뮬레이션을 통해 추산할 수 있다. 설계요소의 선정을 위해 먼저 Star Tracker의 CCD 화소 배열에서 별의 중심을 찾는 방식을 시뮬레이션하여, 별의 등급에 따른 자세 오차를 화소(pixel) 단위로 구하였다. 그 다음, 이 시뮬레이션 결과를 이용하여 시야, 광학계의 구경과 적분시간, 그리고 CCD의 화소 수에 따라 달성할 수 있는 자세 정확도가 어떻게 변하는가를 분석해보았다. 이 분석으로부터 목표로 하는 자세 정확도를 얻기 위해 요구되는 광학계의 설계요소들을 결정하였다.

2. 중심찾기 시뮬레이션

Star Tracker의 설계요소 결정에 있어서 센서로 사용되는 CCD의 신호대 잡음비(SNR, Signal to Noise Ratio)와 별의 중심찾기 오차와의 관계는 광학계 설계요소 선정에 가장 중요한 자료가 된다. 이 관계를 얻기 위해 Star Tracker가 별빛을 감지하여 1 화소 이내의 정확도로 별의 중심을 찾는 과정을 시뮬레이션하였다. 이 과정을 대략 설명하면 (1) 표준성인 분광형 A0 별로부터 나오는 파장별 에너지 플럭스를 구하고, (2) 광학계를 거치는 효과를 나타내기 위해 양자효율이 고려된 2차원의 CCD 화소 배열 위에 별빛의 플럭스 분포가 가우시안 패턴이 되도록 하고, (3) 각각의 화소에는 또한 CCD의 여러 가지 노이즈와 전하전달 효율이 적용되었으며, (4) 노이즈가 포함된 신호는 A/D(Analog to Digital) 변환에 의해 계수화되고, (5) 계수화된 가우시안 이미지는 5×5 의 그룹화를 통해 중심찾기 알고리즘에 이용된다. 중심찾기 알고리즘에 의해 구해진 중심은 실제 중심위치와 비교되어 별의 중심찾기 오차로 구해진다. 이 과정을 별의 등급에 따라 반복 계산하여, 결국 등급(또는 신호대 잡음비)대 화소단위 중심찾기 오차와의 관계가 구해진다. 이 시뮬레이션 과정은 Reseach System, Inc의 IDL(Interactive Data Language)로 구현되었다(나자경 1998).

2.1 중심찾기

중심찾기에는 1화소 이내로 별의 중심을 찾기 위해 내삽 알고리즘을 사용한다. 사용된 중심찾기 알고리즘은 STELLAR tracker(Stanton & Hill 1980)에서 이용되었던 알고리즘의 변형으로서, STELLAR tracker에서는 중심찾기를 위해 3×3 의 화소배열을 사용했으나 여기서는 화소배열을 5×5 로 확장하여 사용하였다. 5×5 화소배열의 중앙화소내 중심은 내삽 좌표계의 원점이 되며 별의 위치는 배열의 중앙

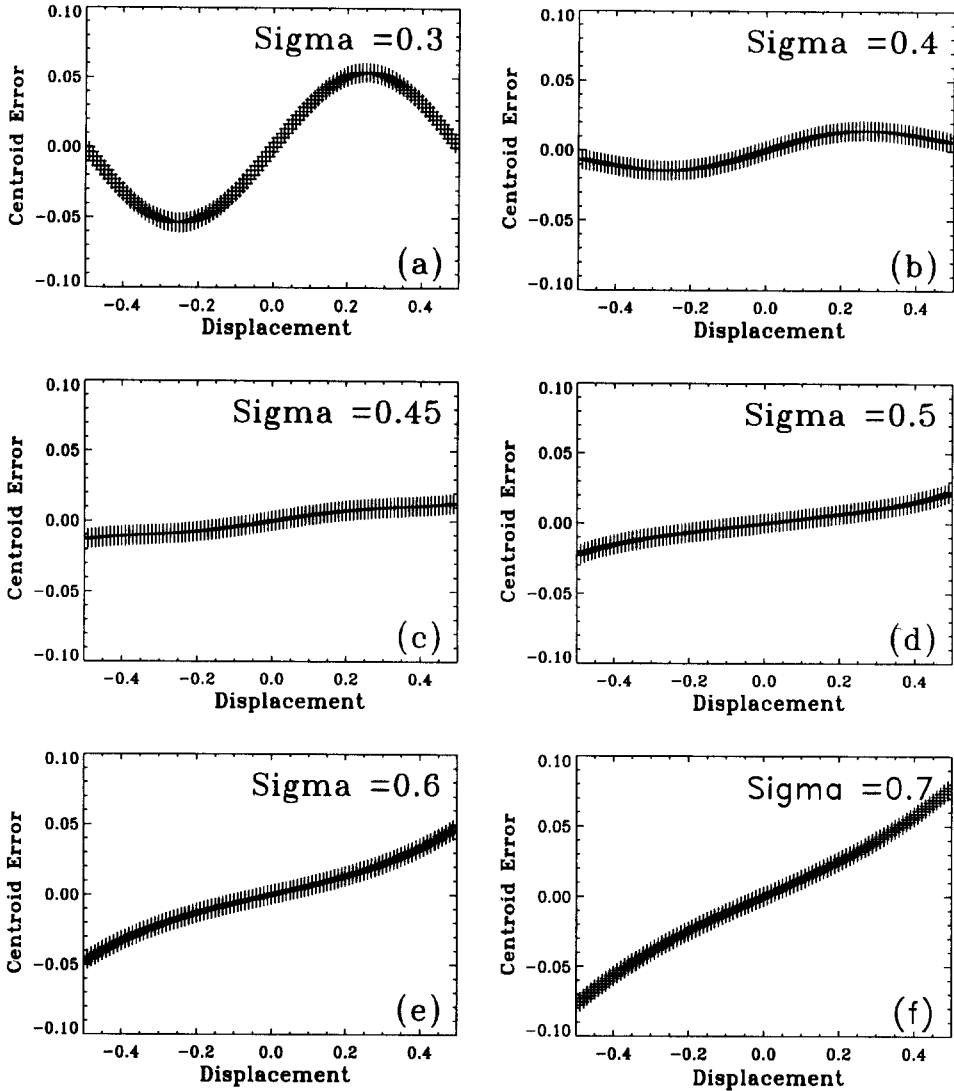


그림 1. 가우시안의 형태와 화소내 중심위치에 따른 중심찾기 오차 (가로축과 세로축 모두 화소 단위이다).

화소와 중앙 화소내의 내삽된 위치(x_c 와 y_c)를 구함으로써 나타내어진다. 별의 위치는 화소배열의 첫 번째와 두 번째 열(또는 행)의 합과 네 번째와 다섯 번째 열(또는 행)의 합사이의 강도 차를 이용해서 계산된다.

$$\begin{aligned} x_c &= A_1 \frac{(S_{x4} + S_{x5}) - (S_{x1} + S_{x2})}{S} \\ y_c &= A_2 \frac{(S_{y4} + S_{y5}) - (S_{y1} + S_{y2})}{S} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $S_{x_j} = \sum_i I_{ij}$, $S_{y_i} = \sum_j I_{ij}$, 그리고 $S = \sum_{ij} I_{ij}$ 이며, I_{ij} 는 화소(i,j)의 신호값이다. 상수 A_1 과 A_2 는 형성되는 점상의 크기에 따라 결정되며 하나의 CCD화소보다 약간 큰 이미지에 대해서는 1에 가까운 값을 갖는다. 1 화소보다 작은 점상에 대해서는 내삽법으로 중심을 찾을 때 아무런 정보를 얻을 수 없기 때문에, 별의 상크기가 1화소보다 크도록 광학계가 설계되어야 한다. eq.(1)과 같은 간단한 내삽 알고리즘이 사용되는 이유는 상대적으로 작은 위성용 프로세서의 능력으로도 중심찾기를 실시간으로 처리하기 위해서이다.

중심찾기 알고리즘의 중심을 찾는 능력을 알아보기 위해 잡음을 포함시키지 않고 가우시안의 형태 별로 화소내 중심위치를 변화시켜 보았다. 가우시안은 $e^{-(x^2+y^2)/(2\sigma^2)}$ 의 형태로 표현되었다. 중심찾기 알고리즘의 상수 A_1 과 A_2 는 광학계에 의해 형성되는 점퍼짐 함수(Point Spread Function)가 대칭이라는 가정하에서 모두 1의 값을 취하였다. 그림 1은 이 알고리즘이 찾은 중심의 위치가 실제 위치에서 얼마나 벗어나는 지를 여러가지 σ 에 대해 보여준다. 여기서 가로축은 주어진 점상의 중심 위치이고 세로축은 알고리즘이 찾은 중심의 오차이다. 그림 1에서 중심찾기 능력은 가우시안의 형태와 위치에 따라 변화함을 볼 수 있으며 가우시안의 형태를 나타내는 σ 가 0.4에서 0.5사이의 값을 가질 때 상대적으로 작은 중심찾기오차를 보이고 σ 가 0.75일 때 중심찾기오차는 0.1화소를 초과하기 시작한다. 여기서 σ 값, 0.5는 광량의 85%가 들어오는 에어리 원반(Airy disk)으로 별빛의 점상을 표현할 때, 점상이 2개의 화소를 차지하게 됨을 의미하고, 0.75의 σ 값은 별빛의 점상이 3개의 화소를 차지하게 되는 것을 나타낸다. 이 결과로부터 중심찾기 오차를 최소화하기 위해서는 Star Tracker의 제작시, 광학계에 의해 맺히는상이 CCD센서의 화소배열에서 2개의 화소를 차지하는 크기로 맺히도록 광학계를 설계하거나 초점호리기를 할 필요가 있음을 알 수 있다.

2.2 신호대 잡음비에 따른 중심찾기 오차

위에서 설명한 중심찾기 알고리즘을 잡음이 포함된 가상 별 이미지에 대해 적용하는 시뮬레이션을 실시하였다. 가상 별 이미지의 신호 대 잡음은 Newberry(1994)의 방법으로 계산하였다. 각 화소에 잡음을 적용시키기 위해 랜덤(random)함수를 이용하였으며, 등급별로 1500번의 반복계산을 실시하여 신호대 잡음비에 따른 중심찾기 오차를 구할수 있도록 하였다. 이 시뮬레이션에서 광학계가 빛을 받아들이는 집광면적(A)과 적분시간(T)은 두 요소의 곱 형태인 시뮬레이션 요소, AT로 나타내었다. AT=1 $cm^2 \cdot sec$ 인 경우, 이 값은 적분시간, 0.1 sec(10 Hz)에 대해 구경이 3.57 cm인 광학계를 나타낸다. 광학계

의 광투과도는 60%를 가정하였으며, 전하전달의 효율성을 계산하기 위해서 광학계에 의해 형성된 점상이 512×512 CCD의 중앙에 위치하도록 고려하였다. CCD센서 상에 별의 화상을 앞에서처럼 가우시안 형태를 가정하였으며, 가우시안 함수의 σ 값은 0.45를 가정하였다. 양자효율은 Loral Fairchild사의 front illuminated 방식 CCD의 값을 사용하였으며, 이 값은 같은 방식의 다른 CCD chip들에 대해서도 비슷하다(Loral Fairchild 1994/1995).

시뮬레이션의 결과로 나온 신호대 잡음비에 따른 중심찾기 오차는 그림 2에 보였다. 그림 2를 보면 신호대 잡음비가 작아질수록 화소단위의 중심찾기 오차가 증가하는 것으로 나타난다. 이 신호대 잡음비는 별의 등급으로 변환될 수 있다. 그림 3은 신호대 잡음비를 별의 등급으로 변환시켜서 나타낸 중심찾기 오차와 등급과의 관계이다. 이 그림에서 약 6등급보다 밝은 별의 중심찾기 오차가 0.1화소 이하로 감소하다가, 0등급에서 센서의 포화(saturation)로 오차가 다시 증가한다. 1등급 이하에서 일시적으로 오차가 감소하는 현상은 중심찾기에 사용되는 5×5의 화소 그룹중 중심 화소들이 포화되면서 일정한 값을 갖게되고, 따라서 외각쪽 화소들만이 중심 찾기에 영향을 주기 때문이다. 그러나 포화현상이 증대됨에 따라 중심찾기 오차는 다시 급격히 증가하게 된다. 실제 Star Tracker의 운영에서 0등급 보다 밝은 별의 개수는 매우 적으므로, 이런 경우를 제외시켜도 Star Tracker의 성능에는 별 영향이 없다.

2.3 시야에 따른 중심찾기 오차의 변화

Star Tracker가 자세정보를 얻기 위해서는 일반적으로 2~5개의 별이 필요하다. 따라서 천구상의 임의의 방향에 5개 혹은 2개의 별이 들어올 수 있는 원형 시야(FOV, Field of view)를 추산하여 볼 필요가 있다. 천구상에 별이 고르게 분포한다고 가정하면 원형시야에 별이 5개 혹은 2개 들어오는 한계등급이 그림 4와 같이 계산된다. 그림 4에서 등급이 낮아짐(밝은 별)에 따라 지정된 개수의 별이 들어오려면 시야가 넓어져야 함을 알 수 있다. 이 결과와 등급이 낮아짐에 따라 중심찾기 오차가 감소하는 그림 3의 결과를 이용하여, 등급을 매개로 하는 중심찾기 오차와 시야와의 관계를 나타낼 수 있다. 그러나 시야가 넓어질수록 화소 하나가 차지하는 각도가 증가하므로, 그림 5와 같이 시야가 증가함에 따라 중심찾기 오차가 완만히 증가함을 알 수 있다. 그림 5는 5개의 별이 시야에 있으며 $AT = 1$ 이고 CCD 배열의 크기가 512×512인 경우에 대해 구해진 결과다.

3. 설계요소의 계산방법

3.1 설계 가능범위 결정

지향정밀도는 광학계의 시야(FOV)를 CCD센서 한변의 화소 수로 나눈 것에 화소 단위의 중심찾기 오차를 곱함으로써 구해진다. 역으로 일정한 지향정밀도가 요구될 때 광학계가 가질 수 있는 시야는 다음과 같이 주어진다.

$$FOV = \#P \times \frac{\sigma_{xy}}{E_p} \quad (2)$$

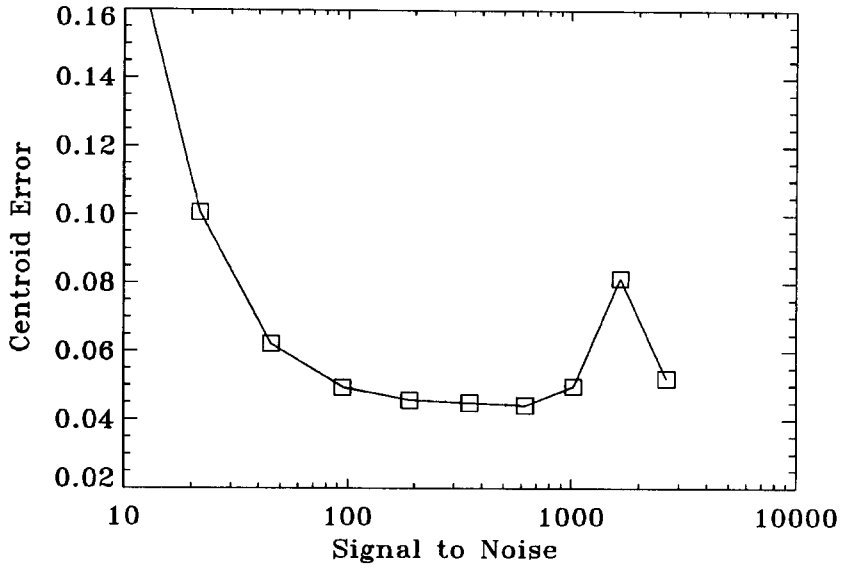


그림 2. 신호대 잡음비(S/N)에 따른 중심찾기오차 (AT=1).

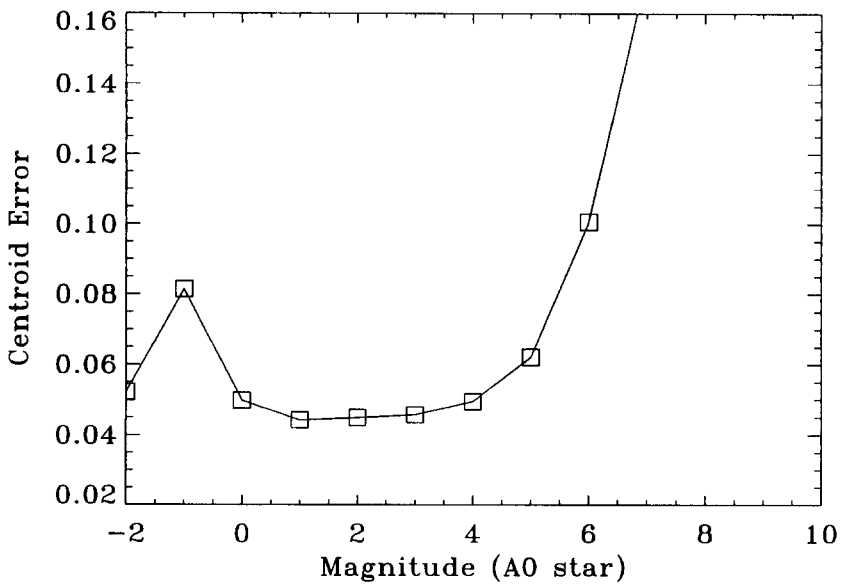


그림 3. 중심찾기 오차와 별의 등급과의 관계.

여기서 #P는 CCD 한변의 화소 수, σ_{xy} 는 각도 단위의 지향정밀도, E_p 는 화소 단위의 중심찾기 오차를 나타낸다. 위 식에서 화소단위의 중심찾기 오차는 별의 등급에 따라 변하므로, 요구되는 지향 정밀도에 대해 별의 등급과 FOV와의 관계를 그림6의 □곡선으로 나타낼 수 있다. 그림 6에서 □로 표시된 곡선은 화소수 512×512, AT=1 cm²sec, 그리고 10 arcsec의 지향 정밀도가 요구될 때의 등급과 시야의 관계를 나타낸다. 이 그림에서 어두운 별에 대해서는 중심찾기 오차가 크므로 요구되는 지향 정밀도를 얻기 위해서는 시야를 좁게 할 필요가 있고, 밝은 별쪽으로 갈수록 중심찾기 오차가 작아지기 때문에 보다 넓은 시야를 이용할 수 있음을 알 수 있다. 여기에 그림 4에서 제시된 것 처럼 5개의 별이 시야 내에 있을 한계등급대 FOV 관계를 *로 함께 표시하였다. 두 곡선을 비교하면 FOV가 30°보다 작을 때, 10 arcsec의 지향 정밀도를 얻기 위해 필요한 별이 *표시의 한계등급보다 어두움을 알 수 있다. 이는 이런 별이 FOV 내에 5개 이상 있음을 의미한다. 반대로 FOV가 30°보다 클 경우, 10 arcsec의 지향 정밀도를 얻기 위해 필요로 하는 별이 너무 밝아, 이 FOV 내에 5개의 별이 포함되지 못한다. 따라서 광학계의 최대 FOV와 이용 가능한 등급은 지향 정밀도 곡선과 FOV 대 한계등급의 관계를 나타내는 곡선이 겹치는 곳에서 결정된다. 그러나 광학계의 시야가 작아질수록 필요한 최소 별목록의 크기가 급격히 증가하므로 광학계의 시야를 좁히는 데도 한계가 있다.

3.2 설계요소의 선정

위와 같은 분석으로 요구되는 지향 정밀도에 대한 시야 범위가 결정되었다. 이 과정에서 CCD의 화소 수와 AT값이 가정되었다. 여기에 CCD 화소 크기를 추가하면 최종적으로 광학계의 F수를 다음 관계 식으로 구할 수 있다.

$$F/\# = \sqrt{\frac{T}{4/\pi \times AT}} \times \frac{\text{Size of Pixel}}{\tan(\text{FOV}/\text{No. of Pixels})} \quad (3)$$

그림 7은 AT=1(T=10 Hz)인 경우, CCD의 화소크기(7, 15, 24 μm)와 화소개수(256 × 256, 512 × 512, 1024 × 1024)별로 시야와 F 수의 관계를 보여준다. 이 그림에서 상당부분의 설계요소 조합은 F수가 1에 못 미치는 결과를 초래한다. F수가 1보다 작은 광학계는 설계하기가 어렵기 때문에 이런 설계요소 조합은 바람직하지 않다. 따라서 F수를 크게 하기 위해 가능한 큰 화소를 선택하거나 화소 수를 늘려야한다.

최종적으로 적분시간 T가 0.1 sec(10 Hz)이며 Star Tracker의 구경이 1인치와 2인치인 경우(각각 AT = 0.5, 2 cm²sec)에 대해 앞의 시뮬레이션과 분석 과정을 반복하였다. 그림 8은 각각의 경우에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 8에 앞서 행한 분석 방식을 동일하게 적용하여, 각 경우에 대해 가능한 지향 정밀도와 최대 시야를 구할 수 있다. 표 1은 그 결과를 요약한 것이다. Table 1에서 AT=2인 경우가 AT=0.5인 경우보다 지향 정밀도가 높다. 그 이유는 AT=2일 때가 AT=0.5일 때 보다 많은 별빛을 집광할 수 있고, 이로 인한 신호 대 잡음비의 증가가 중심찾기 오차를 감소시키기 때문이다. Table 1에 제시된 성취 가능한 지향 정밀도에 대한 최대 시야, 한계 등급, 최소 별목록 크기는 이론적인 한계를 뜻한다. 따라서 실제 설계에서는 이러한 이론적 한계치에 충분한 여유를 가지도록 해야 한다. 광학계의 F수는 eq.(3)에 AT, 0.5와 2를 적용하여 계산되었고, 그 중에서 설계 제작이 용이한 F수를 선택하였다. 최종적으로 선정된

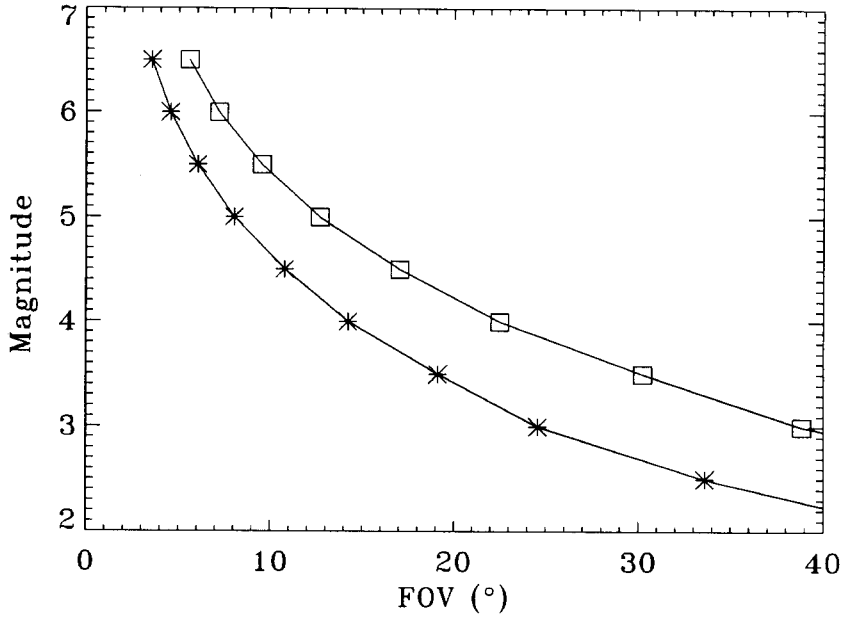


그림 4. FOV 대 등급의 관계(* : 2 stars, □ : 5 stars).

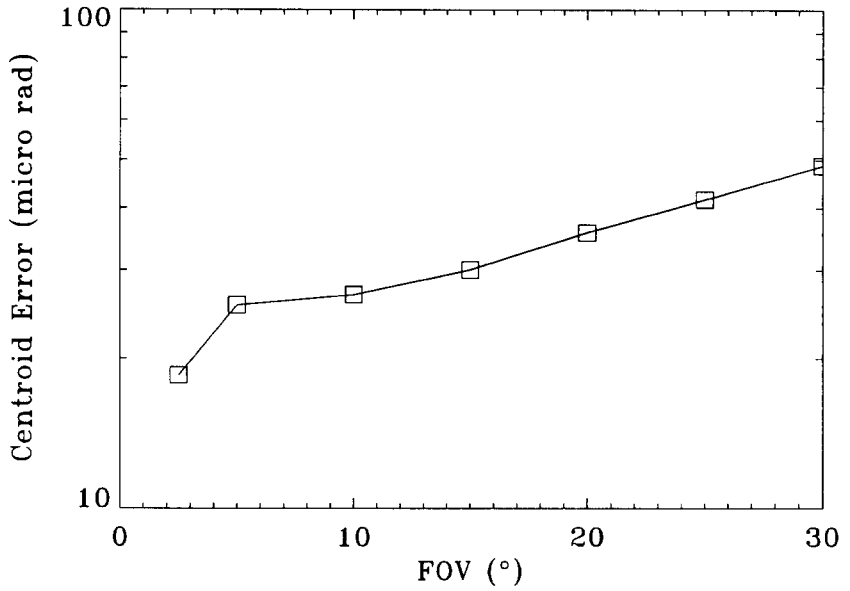


그림 5. FOV의 증가에 따른 중심찾기 오차의 변화 (512×512, AT=1).

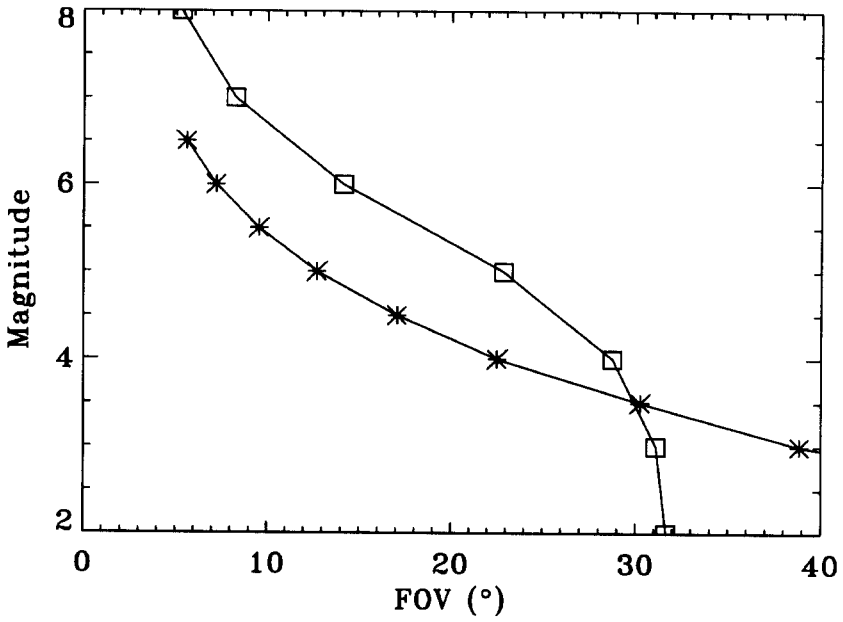


그림 6. FOV와 이용 가능한 등급과의 관계 (512×512, AT=1, $\sigma=10$ arcsec).

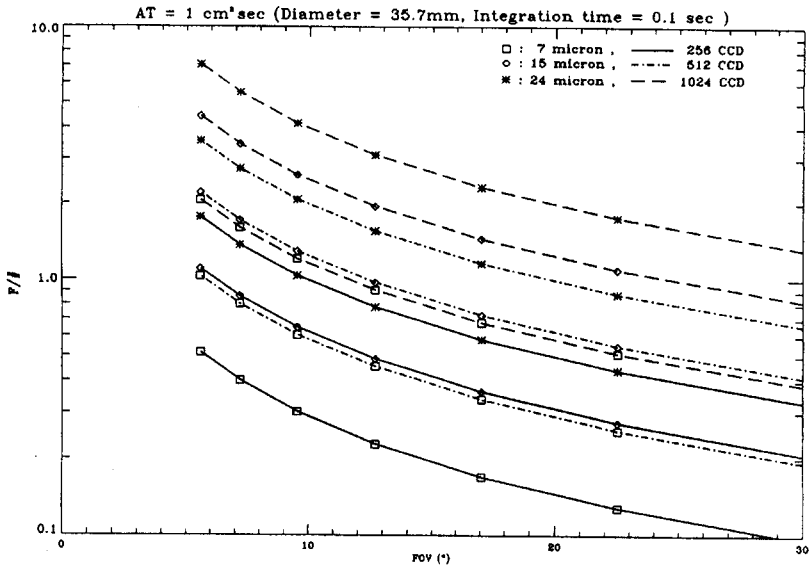


그림 7. 다양한 화소크기와 CCD 크기에 따른 광학계의 F수(AT=1cm² sec).

표 1. 성취 가능한 지향 정밀도.

AT($cm^2 sec$)	CCD 크기	지향 정밀도(arcsec)	최대 시야(deg)	한계 등급	최소 별목록 크기
0.5	256 × 256	20	25	3.8	> 450
0.5	512 × 512	10	25	3.8	> 450
0.5	1024 × 1024	5	25	3.8	> 450
2	256 × 256	10	15	4.7	> 1250
2	512 × 512	5	15	4.7	> 1250
2	1024 × 1024	< 5	30	3.5	> 300

설계요소는 table 2와 같으며 이 결과를 이용하여 지향 정밀도, 10 arcseconds인 Star Tracker의 광학계 구
체 설계가 Ray Tracing 프로그램을 사용하여 이루어진 바가 있다(이유 등 1998).

4. 토의 및 요약

위성이 요구하는 지향 정밀도를 만족하기 위한 Star Tracker의 광학계 설계요소를 시뮬레이션을 통
하여 분석하였다. 시뮬레이션은 Star Tracker의 감지센서로 사용되는 CCD에 별빛이 결상되고 전자회로
가 이를 처리하는 과정을 포함하고 있다. 이 과정에서 CCD 및 전자회로가 가지는 다양한 잡음들이 포
함되었고, 이렇게 생성된 가상 별 이미지의 중심을 단순한 내삽 알고리즘으로 찾아 내었다.
시뮬레이션의 결과로서 별의 등급에 따른 중심찾기 오차가 구해졌으며, 이로부터 시야(FOV)와 이용 가
능한 별의 등급과의 관계가 얻어졌다. 그리고 이 관계의 분석을 통해 원하는 지향 정밀도를 만족시키는
구경, 최대 시야, 한계등급, CCD 화소 수가 결정되었다.

요구되는 지향 정밀도를 만족시키기 위해서는 별의 밝기뿐만 아니라 충분한 개수의 별이 시야 안
에 있어야 한다. 시야와 이용 가능한 별의 한계 등급의 관계 분석에서 천구상에 별들이 고르게 분포하
고 있다는 가정을 하였다. 그러나 별들의 분포는 균일하지 못하므로 시야에 충분한 별들을 확보하지 못
할 수도 있다. 따라서 한계 등급과 충분한 등급 여유를 가지는 지향 정밀도를 결정해야 한다. 또한 광학
계의 F수를 결정하는 과정에서는 너무 작은 F수가 선택되지 않도록 해야 한다. 작은 F수로 광학계를 설

표 2. 최종적으로 선정된 설계요소.

지향 정밀도(arcsec)	10	30
광학계의 시야(deg)	10	10
구경(mm, 10Hz기준)	25.4	25.4
F 수	2.79	1.4
CCD	512 × 512	256 × 256
CCD 화소 크기(μm)	24	24
별 목록의 크기	2703	2703

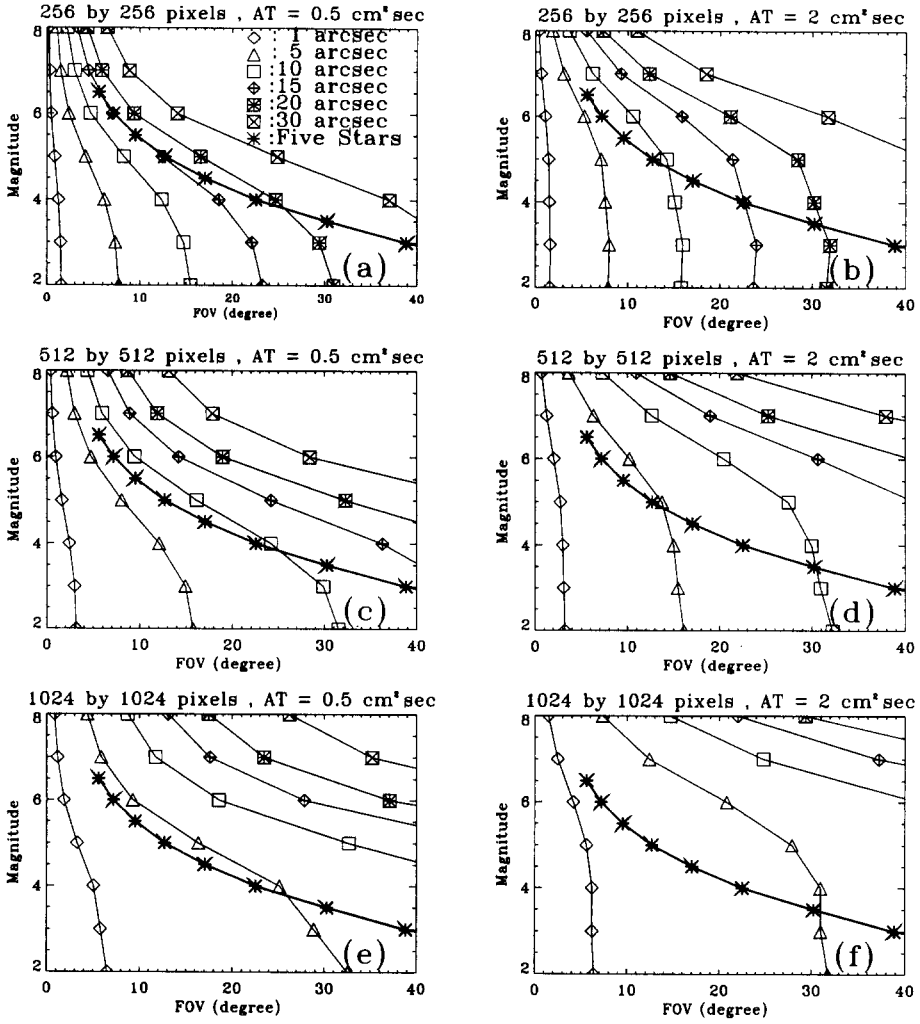


그림 8. CCD의 화소 수와 AT에 따른 지향 정밀도.

계할 경우, 설계가 어렵게 되거나, 수차에 의한 비대칭적인 결상이 나타나기 때문이다. 이것은 다시 중심찾기 오차를 현저히 증가시킬 수 있으며 Star Tracker의 성능을 저하시키게 한다.

시뮬레이션 결과의 분석을 통해 얻어진 최종적인 설계요소는 표 2와 같다. 이 값은 10 arcsec의 지향 정밀도를 만족시키는 Star tracker의 광학계의 구체적 설계에 이용된 바가 있다(이유 등 1998). 여기서는 한정된 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하여 원하는 지향 정밀도를 만족시키는 광학계 설계요소들을 계산하였다. 그러나 앞의 시뮬레이션과 계산 방법을 이용하여 보다 다양한 경우에 대해서도 Star Tracker 광학계의 설계요소를 결정할 수 있을 것이다.

감사의 글: 본 연구는 산업자원부, 과학기술부, 정보통신부의 지원으로 수행된 "다목적 실용위성 개발 사업"의 연구 결과의 일부입니다.

참고문헌

나자경, 1998, 석사학위논문, 충남대학교

이유, 김용하, Krmoyan, M., 나자경, 조영민, 1998, 위성용 Star Tracker의 설계연구 (I)(산업 자원부, 과학 기술부, 정보통신부 연구보고서)

Abreu, R., 1993, SPIE, 1946, 216

Loral Fairchild, 1994/1995, Loral Fairchild CCD imaging databook

Newberry, M. V., summer 1994, CCD Astronomy, p.34

Stanton, R. H. and Hill, R. E. 1980, J. Guidance and Control, 3(2), 179

van Bezooijen, R., 1993, Optical Technologies for Aerospace Sensing, p.153

Wertz, J. R., 1988, Spacecraft Attitude Determination and Control, Kluwer Academic Pub., p.184