

論文

정밀도 향상을 위한 2축 소형 정밀 태양센서의 모델링

윤미연*, 이병훈*, 최정원*, 장영근**

Modeling of Two-axis Miniature Fine Sun Sensor for Accuracy Improvement

Mi-Yeon Yun*, Byung-Hoon Lee*, Jung-Won Choi* and Young-Keun Chang**

ABSTRACT

Sun sensors are frequently implemented by satellites for attitude sensing, due to its simple manufacturability and light weight. A modeling of sun sensors has an important effect on the accuracy of satellite attitude determination. This paper addresses a new modeling of a 2-axis miniature fine sun sensor with improved accuracy. Unlike other previous algebraic modeling methods, the newly suggested physical modeling method takes into account the shadowing effect of the slit thickness. It was shown that a newly proposed sun sensor modeling provides a substantial accuracy improvement of 29% compared to the generic algebraic modeling. The proposed sensor modeling was validated using 2-axis fine sun sensors with FOV(Field of View) of $\pm 60^\circ$ mounted on HAUSAT-2 small satellite, currently under development by SSRL(Space System Research Lab.) at Hankuk Aviation University, Korea.

초 록

태양센서는 제작이 용이하고 가벼워 위성의 자세센서로 많이 사용되며 센서 모델의 정밀도는 위성의 자세결정 정밀도에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 정밀도 향상을 위한 2축 소형 태양센서 모델링 방식을 새롭게 제안하였다. 제안된 센서 모델링 방식은 기존 수학적 모델링 방식에서는 고려되지 않았던 슬릿 두께가 센서 출력에 영향을 주는 그림자 효과(shadow effect)를 고려한 물리적 모델링 방식이다. 또한 기존의 수학적 모델링 방식과의 비교를 통해 제안된 방식의 성능을 검증하였다. 새롭게 제안된 모델을 사용하면 기존 방식보다 정밀도가 약 29% 증가함을 확인할 수 있었다. 제안된 센서 모델은 현재 한국항공대학교 우주시스템연구실에서 개발 중인 HAUSAT-2 위성에 탑재될 $\pm 60^\circ$ 의 시야각을 갖는 2축 고정밀 태양센서를 대상으로 검증하였다.

Key Words : Sun Sensor Modeling(태양센서 모델링), Attitude Accuracy(자세 정밀도), Incident Angle(입사각), Fine Sun Sensor(고정밀 태양센서)

1. 서 론

† 2006년 2월 21일 접수 ~ 2006년 6월 21일 심사완료

* 정희원, 한국항공대학교 대학원

** 정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail : ykchang@hau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

인공위성의 자세를 결정하기 위해서는 먼저 몇 개의 잘 알려진 천체를 기준좌표계로 두고 이에 대한 위성의 상대적인 방향이 결정 되어야 한다. 이를 위해 몇 개의 기준벡터가 선택될 수 있으며, 일반적으로 태양광 벡터나 지구자기장 벡터, 별

벡터 등이 기준벡터로 흔히 사용된다. 위성 자세 결정을 위해 사용되는 자세센서의 경우 측정하는 기준벡터에 따라 태양센서, 자기센서, 별 센서 등 다양한 종류가 있으며, 이중 태양센서의 경우 태양광 벡터를 측정하여 위성의 자세를 결정한다. 태양센서는 센서구조가 간단하여 제작이 용이하고, 제작비용이 적다. 또한 크기가 작고 소모전력이 적어 특히 소형위성의 자세제어용 센서로 많이 이용되고 있다[1-3].

태양센서는 출력신호의 종류에 따라 아날로그와 디지털 타입, 정밀도에 따라 저정밀과 고정밀 센서로 구분된다. 아날로그 태양센서는 태양광의 입사각에 따라 연속적으로 변하는 신호를, 디지털 태양센서는 인코딩된 이산신호를 출력한다. 또한 고정밀 센서는 저정밀 센서와는 달리 보통 0.1° 이하의 높은 정밀도를 가지나 시야각이 저정밀 센서에 비해 좁다[2,4-6]. 한국항공대학교 SSRL에서 제작된 2축 소형 고정밀 태양센서는 아날로그 타입의 태양센서로 SSRL에서 개발 중인 소형 위성 HAUSAT-2의 자세결정에 적합하게 제작되었다. 2축 고정밀 태양센서는 두 개의 1축 고정밀 태양센서가 서로 직교하게 배치되어 센서로 입사되는 태양광벡터의 방위각(Azimuth angle)과 앙각(Elevation angle) 즉 입사각을 각각 측정한다. 따라서 센서로 입사되는 태양광 벡터를 결정할 수 있으며, 이를 이용하여 위성의 자세를 결정할 수 있다.

일반적으로 1축 태양센서는 두 개의 삼각형 형태의 수광소자, 작은 슬릿 마스크, 전자회로로 구성된다. 태양센서의 측정원리는 단순하며 다음과 같다. 슬릿을 통하여 입사된 태양광의 각도에 따라 수광소자에 전달되는 빛의 양과 위치가 달라지며, 그에 따라 수광소자는 $0V \sim 5V$ 사이의 아날로그 전압신호를 각각 출력한다. 이렇게 두 개의 수광소자에서 출력된 전압신호의 비율을 이용하여 태양광의 입사각을 결정하게 된다. 따라서 태양센서 개발의 가장 중요한 기술적 문제는 측정된 태양광 입사각과 그에 따른 센서 출력신호 사이의 관계를 정밀하게 모델링 하는 방식을 찾는 것이다.

일반적으로 잘 알려진 태양센서 모델링 방법은 지상에서의 실험을 통해 측정된 출력전압과 태양광 입사각의 관계를 직접 근사다항식으로 나타내는 수학적 모델링방식과 태양센서의 물리적, 기하학적 관계를 이용하는 물리적 모델링 방식이 있다[2,3,5,7].

정밀한 태양센서의 모델링을 위해 보상해야 할 오차가 몇 가지가 있다. 우선 구조물 제작의 문제로 발생하는 기계적 오차와 전기 회로도에서 기인한 전기적 오차를 모델링 과정에서 보정해야

한다. 또한 슬릿과 수광소자의 형상오차에서 오는 광학 오차가 있으며, 광학오차로는 센서출력이 슬릿에 입사하는 태양광 벡터의 방위각과 앙각에 모두 영향을 받는 cross-coupling 효과와 슬릿 두께로 수광소자가 받는 실제 태양광 면적이 줄어들어 센서출력에 영향을 주는 그림자 효과가 있다[5,6,8-10].

태양센서 모델링 방법은 지금까지 다양하게 연구되어 왔다. 먼저 Chang & Kim은 수학적 모델링 방식을 이용하여 태양센서를 모델링 하였다[11]. 지상에서의 실험을 통해 측정된 출력전압과 태양광 입사각의 관계를 직접 5차 근사다항식으로 표현하였으며, cross-coupling 효과와 그림자 효과는 고려하지 않고 있다. 센서 정밀도가 비교적 낮지만 근사 다항식의 차수를 높인다면 좀 더 나은 정밀도를 보여 준다고 언급하고 있다. 반면 Wu & Steyn은 cross-coupling 효과를 고려하는 경우의 수학적 모델링 방식과 물리적 모델링 방식의 성능을 비교분석 하였다[9]. 두 방식 모두 평균에러 측면에서는 큰 차이가 없으며, 다만 물리적 모델링 방식을 사용할 경우 결정해야 될 계수의 수가 줄어드는 장점이 있음을 보여준다. Pedersen & Hales는 MEMS 태양센서 개발과정에서 물리적 모델링 방식을 사용하였으며, cross-coupling 효과와 그림자 효과는 고려하지 않고 있다[8]. MEMS 센서의 경우 슬릿의 두께가 매우 작아 그림자 효과는 무시할 수 있다고 말한다.

따라서 본 논문에서는 기 개발된 센서 모델에서는 고려되지 않은 태양센서 슬릿 두께에 의한 그림자 효과를 고려한 물리적 모델링 방식의 센서 모델을 제안하고 성능을 분석하였다.

II. 2축 아날로그 태양센서

HAUSAT-2에서는 자세센서로 그림 1과 같이 4개의 고정밀 태양센서, 하나의 저정밀 태양센서와 3축 자기센서를 사용하여 자세를 결정하나 식기간의 경우 3축 자기센서만을 사용하여 자세를 결정한다. 한 개의 고정밀 태양센서의 FOV는 그림 2와 같이 X, Y축에 대해서 $120^\circ(\pm 60^\circ)$ 이다. 표 1은 HAUSAT-2에 장착되는 고정밀 태양센서의 요구조건을 나타낸다.

표 1. HAUSAT-2 고정밀 태양센서의 요구조건

Mass	Power	Accuracy	FOV	Size(box)
<0.1kg	<0.1W	< $\pm 0.5^\circ$	> $\pm 60^\circ$	80×80×20mm ³

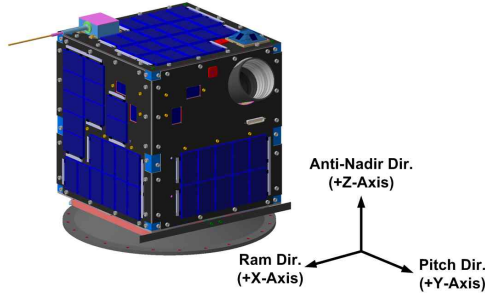


그림 1. HAUSAT-2의 자세제어 시스템

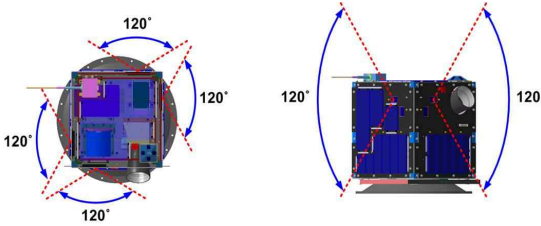
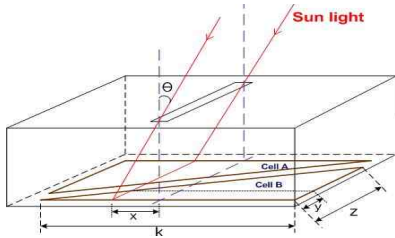


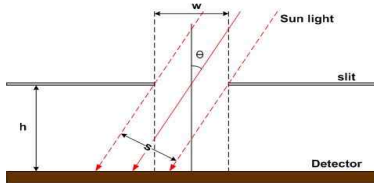
그림 2. 태양센서의 시야각 분석



(a) HAUSAT-2 FSS EM(Engineering Model)



(b) 태양센서의 형상



(c) 입사각에 따른 빛의 양

그림 3. 2축 아날로그 태양센서

그림 3-(a)는 HAUSAT-2에 장착될 고정밀 태양센서의 엔지니어링 모델이다. 고정밀 태양센서는 그림 3-(b)에서와 같이 삼각 마스크된 두 개의 수광소자를 한 쌍으로 장착하여 두 셀의 전압값의 차이로 태양각을 측정하며, 수광소자 위에 태양 빛을 통과하는 유리 슬릿을 장착하여 수광소자가 받는 빛의 양과 세기를 결정한다. 슬릿을 통해 들어오는 빛의 양은 그림 3-(c)와 같이 입사각에 따라 변화하게 되며 빛을 받는 수광소자의 출력 데이터는 빛의 양에 비례하므로 센서의 이상적인 출력 데이터는 그림 3에 의해 다음 식(1)과 같이 표현된다[1,8].

$$x = h \tan \theta$$

$$y(\theta) = \frac{z}{k} \left(\frac{k}{2} + h \tan \theta \right)$$

$$s(\theta) = w \cos \theta$$

이상적 FSS 출력 데이터

∝ (위치에 따른 수광 길이) × (각도에 따른 빛의 양)

$$= \frac{z}{k} w \cos \theta \left(\frac{k}{2} + h \tan \theta \right) \quad (1)$$

w : 슬릿 폭

h : 슬릿과 수광소자 윗면까지의 거리

θ : 태양으로부터 들어오는 입사각

x : 수광소자 중앙부터 실제 빛이 비치는 곳까지의 거리

y(θ) : x 거리에 빛이 비추었을 때 실제 수광소자에 빛이 닿는 부분의 길이

s(θ) : 각도에 따른 빛의 양

III. 태양센서의 특성 측정 및 결과

3.1 태양센서의 시험 환경 구성

태양센서의 시험구성은 그림 4와 같다. 빛의 각도를 측정하는 센서의 특성을 측정하기 위해서는 평행 광을 만들어주는 광원, 이 광원을 각도에 따라 측정하는 보정 장비와 정확한 각도를 돌려줄 수 있는 로터리 스테이지(rotary stage)가 있어야 한다. 데이터 획득 시스템(DAS; Data Acquisition System)은 입사각에 따른 출력값을 측정한다. 실험이 진행되는 동안 태양센서가 고정된 로터리 스테이지는 PC의 명령에 따라 0.5°(0.01°분해능)의 정밀한 각도로 회전하여 할로겐램프(광원)에서 나오는 빛의 정확한 입사각을 만들며, 이에 따라 각 수광소자에서 출력되는 전압($V_{measured_A,B}$)과 입사각은 DAS를 거쳐 PC에

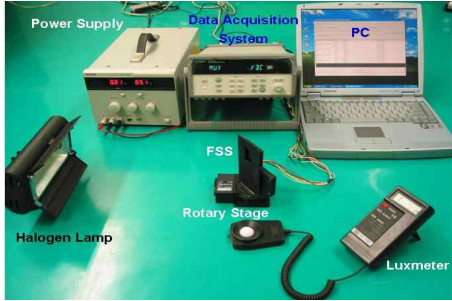


그림 4. 태양센서의 시험 구성

저장 된다. PC에 저장된 출력전압은 입사각에 대한 전압비(λ)로 다시 변경된다. 여기에서 전압비(λ)는 다음 식 (2)와 같다.

전압비(λ) 형태로 표현하는 이유는 출력되는 전압 ($V_{measured,A,B}$)의 절대적인 양의 변화를 고려하지 않아도 되어 모델링이 편리하기 때문이다[7,11].

$$\lambda = \frac{V_{measured,A} - V_{measured,B}}{V_{measured,A} + V_{measured,B}} \quad (2)$$

3.2 기존 모델을 이용한 태양센서의 시험 결과 분석

근사 다항식을 이용하는 수학적 모델은 차수가 높을수록 정밀해지나 너무 높은 차수를 사용할 경우 근사 다항식의 계수의 수가 증가하기 때문에 적절한 차수를 결정해야 한다. 이런 이유로 본 논문에서는 11차 근사 다항식을 사용하였다.

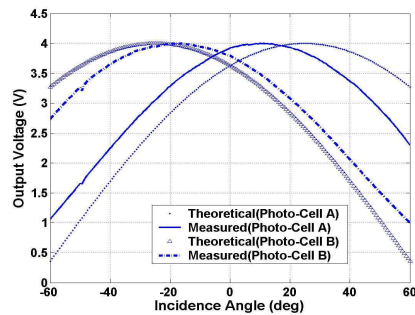
HAUSAT-2 태양센서의 수광소자에서 측정된 데이터를 사용하여 태양센서의 정밀도를 결정하였다. 이를 위하여 식 (3)과 같이 11차 근사 다항식을 이용하여 데이터를 근사화 시켜 나타냈다. 여기서 θ_x, θ_y 는 각 축의 입사각이다.

$$\theta_x(\lambda_x) = 10^5(6.27\lambda_x^{11} + 0.013\lambda_x^{10} - 3.507\lambda_x^9 - 0.42\lambda_x^8 + 0.87\lambda_x^7 + 0.109\lambda_x^6 - 0.049\lambda_x^5 - 0.013\lambda_x^4 - 0.002\lambda_x^3 + 0.001\lambda_x^2 + 0.002\lambda_x) \quad (3)$$

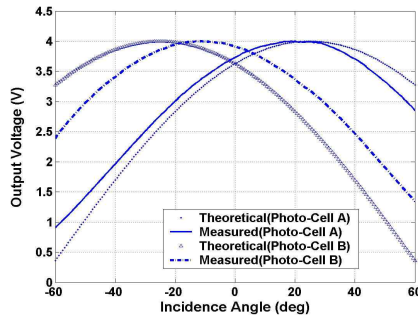
$$\theta_y(\lambda_y) = 10^5(-5.09\lambda_y^{11} - 5.587\lambda_y^{10} + 0.434\lambda_y^9 + 1.99\lambda_y^8 + 0.241\lambda_y^7 - 0.25\lambda_y^6 - 0.038\lambda_y^5 + 0.012\lambda_y^4 - 0.001\lambda_y^3 - 0.0001\lambda_y^2 + 0.008\lambda_y)$$

그림 5는 수학적 모델링 방식의 센서 모델링 결과를 보여준다. 그림 5(a),(b)는 실험으로 측정된 출력전압을 도시하였으며, 이론적 출력전압과 비교하면 측정에러를 포함하고 있음을 알 수 있다. 그림 5(c),(d)는 실험으로 측정된 전압비(λ)를 식 (3)의 수학적 모델의 입력 값으로 할 때 계산된 입사각과 실제 입사각 즉 로터리 스테이지의

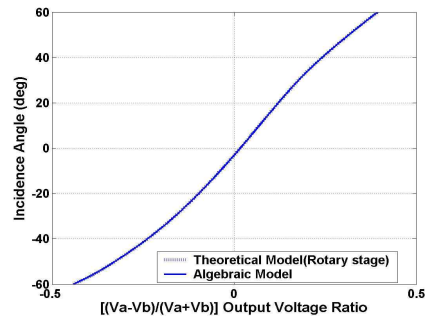
회전각을 도시하였으며, 그림 5(e),(f)는 실제 입사각과 모델식에 의해 계산된 각 축에 대한 입사각의 차(오차)를 보여주고 있다. 표 2에서 보듯이 각 축 별 평균 오차는 X축으로 0.043°, Y 축으로 0.033°가 발생하여 전체적으로 0.054°의 평균 오차(RMS 값)가 발생하였다. 이러한 오차만으로도 위성의 자세결정에 사용하기에는 무리가 없다. 하지만 표 2에서 보듯이 이론적인 경우의 결과와 비교하면 약 88%정도 상대적인 정밀도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 수학적 모델링 방식을 적용하면서 그림자 효과를 고려하지 않았기 때문이다. 본 실험에서는 참고문헌 [9]와 달리 양각은 0°로 고정시켜두고 측정하였기 때문에 Cross-coupling 효과는 발생하지 않으며, 따라서 정밀도에 영향을 주지 않는다.



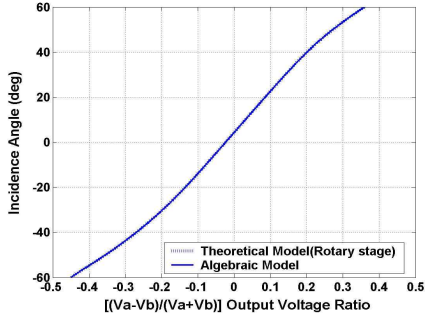
(a) X 축 출력 데이터



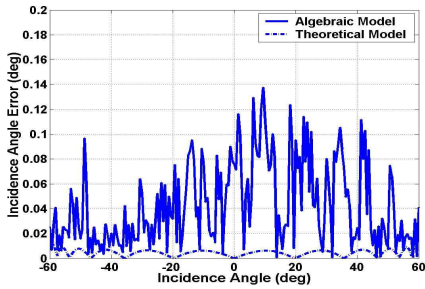
(b) Y 축 출력 데이터



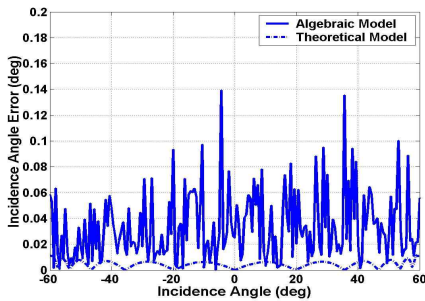
(c) X축 출력전압 비율에 따른 각도



(d) Y축 출력전압 비율에 따른 각도



(e) X 축의 오차 특성



(f) Y 축의 오차 특성

그림 5. 고정밀 태양센서 특성(수학적 모델링)

표 2. 기존의 태양센서 모델에 의한 오차

축	평균 오차	
	수학적 모델	이론적 모델
X	0.043	0.005
Y	0.033	0.005
평균오차율 (RMS값)	0.054	0.007

3.3 새로운 모델의 제안 및 태양센서의 시험 결과 분석

태양센서는 입사각이 일정하게 변화함에 따라 출력전압이 규칙성을 띄며 변화할 때 정밀한 모

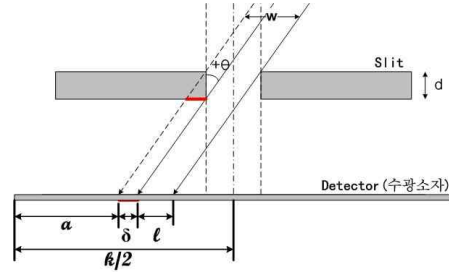


그림 6. 태양센서의 기하학적 특징

델을 만들 수 있다. 그러나 실제 태양센서의 시험을 통해 얻은 데이터는 입사각이 커질수록 오차가 커짐을 알 수 있으며, 이는 수광소자 위에 놓이는 슬릿의 두께(d)로 인한 것이다. 슬릿의 두께는 μm 단위로 아주 얇으나 이로 인해 입사각이 변화함에 따라 태양광이 일정 너비(w)를 가지고 입사를 하지 못하게 되며, 빛이 투영되지 못한 부분은 센서의 정밀도에 영향을 미치게 되며, 이를 그림자 효과라고 한다. 따라서 입사각에 대한 센서의 특성을 정밀하게 나타내 주기 위해 슬릿 두께로 인해 빛이 감지되지 않는 부분에 대한 출력전압을 추론하였으며 이를 반영하여 센서 모델을 완성하였다. 그림 6은 슬릿 두께로 인해 빛이 감지되지 않는 부분에 대한 기하학적 특징을 보여준다. 여기서 l 은 실제 센서에 빛이 감지되는 부분이며, δ 는 슬릿 두께에 의해 태양광선이 입사하지 못하는 부분이다. 따라서 그림 6에서 알 수 있는 기하학적인 관계는 다음 식 (4)와 같다.

$$w = \delta + l, \delta = d |\tan \theta|$$

$$a = \frac{k}{2} - (h + d) \tan \theta - \frac{w}{2} \tag{4}$$

슬릿 두께로 인해 빛이 감지되지 않는 부분 δ 에 빛이 투영할 경우 예상되는 출력전압을 $P(v)$, 실제 출력전압을 V_{measured} 라 할 때 이 둘의 상관관계에 의해 다음 식 (5)와 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $P(v)$ 는 입사각의 부호에 따라 특성이 달라지며 +입사각일 경우 셀 A는 Case 1, 셀 B는 Case 2와 같고 -입사각일 경우 셀 A는 Case 2, 셀 B는 Case 1과 같이 나타난다.

<Case 1>

$$P: V_{\text{measured}} = (a + \delta)^2 - a^2 : (a + \delta + l)^2 - (a + \delta)^2 \tag{5}$$

<Case 2>

$$V_{\text{measured}} : P = (a + l)^2 : (a + l + \delta)^2 - (a + l)^2 \tag{6}$$

이와 같이 센서의 FOV 범위에서 예상되는 슬릿 두께에 의해 영향을 받는 출력전압을 근사 다항식을 사용하여 센서의 출력전압의 비율에 따른 근사식을 만들었으며 식 (7) 및 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

- X축 슬릿 두께의 영향을 받는 출력전압($P_{x,A}^*$)

$$P_{x,A}^*(\lambda) = 3.243\lambda_x^{11} + 15.504\lambda_x^{10} - 5.179\lambda_x^9 - 27.2087\lambda_x^8 + 2.377\lambda_x^7 + 17.9848\lambda_x^6 + 0.271\lambda_x^5 - 5.401\lambda_x^4 - 0.665\lambda_x^3 + 1.106\lambda_x^2 + 0.59\lambda_x + 0.008 \quad (7)$$

$$P_{x,B}^*(\lambda) = -3.078\lambda_x^{11} + 6.227\lambda_x^{10} + 5.481\lambda_x^9 - 11.285\lambda_x^8 - 3.306\lambda_x^7 + 7.778\lambda_x^6 + 0.526\lambda_x^5 - 2.666\lambda_x^4 + 0.267\lambda_x^3 + 0.6416\lambda_x^2 - 0.389\lambda_x + 0.003$$

- Y축 슬릿 두께의 영향을 받는 출력전압($P_{y,A}^*$)

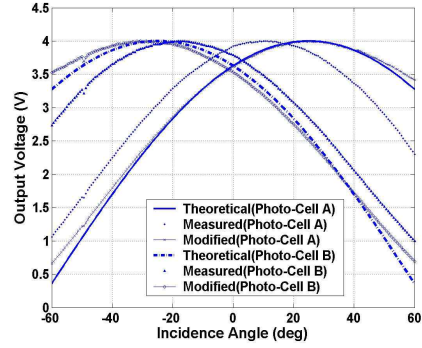
$$P_{y,A}^*(\lambda) = -2.412\lambda_y^{11} + 7.599\lambda_y^{10} + 4.07\lambda_y^9 - 13.507\lambda_y^8 - 1.93\lambda_y^7 + 8.998\lambda_y^6 - 0.318\lambda_y^5 - 2.933\lambda_y^4 + 0.664\lambda_y^3 + 0.663\lambda_y^2 - 0.635\lambda_y + 0.004 \quad (8)$$

이렇게 구해진 각 축에 대한 P^* 를 출력데이터에 반영하면 수정된 출력 데이터는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

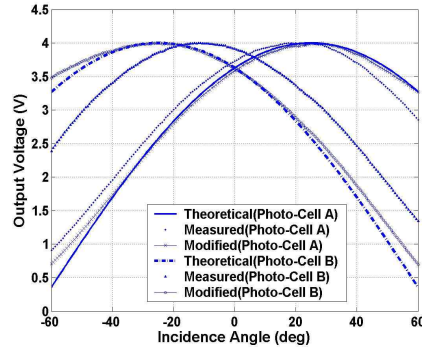
$$V_{modified} = V_{measured} + P^* \quad (9)$$

따라서 식 (9)는 본 논문에서 제안하는 그림자 효과가 고려된 물리적 모델링 방법이다. 제안된 센서 모델링 방식의 성능을 검증하기 위해서 먼저 식 (9)에 의해 수광소자의 수정된 출력전압 ($V_{modified}$)을 계산하고 그 결과를 그림 7에 도시하였다. 그림 7에서와 같이 태양광선의 입사각도에 따른 각 축의 출력전압은 실제 측정 데이터 ($V_{measured}$)보다 수정된 데이터($V_{modified}$)가 이상적인 출력 특성 곡선과 비슷한 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 최종적인 센서모델을 도출하기 위해서 수정된 출력전압의 전압비와 입사각의 관계를 11차 다항식으로 나타냈으며, 따라서 태양센서는 다음 식 (10)과 같이 최종적으로 모델링 된다. 여기서, γ 는 출력전압의 비이며 $\theta_{x,y}^*$ 는 각 축의 입사각이다.

$$\theta_x^*(\gamma_x) = -172.271\gamma_x^{11} - 902.865\gamma_x^{10} + 284.267\gamma_x^9 + 974.213\gamma_x^8 - 354.972\gamma_x^7 - 348.834\gamma_x^6 + 270.921\gamma_x^5 + 39.438\gamma_x^4 - 139.552\gamma_x^3 + 5.396\gamma_x^2 + 120.952\gamma_x - 1.393$$



(a) X축 출력데이터



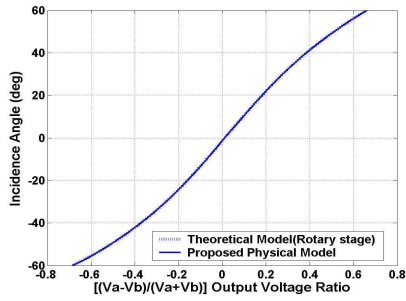
(b) Y축 출력데이터

그림 7. 각 축에 대한 출력데이터의 비교

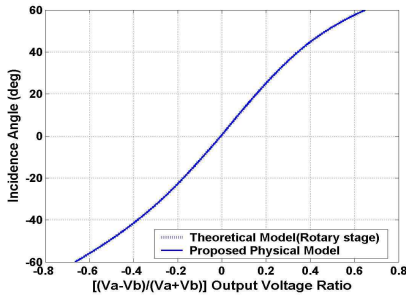
$$\theta_y^*(\gamma_y) = -404.365\gamma_y^{11} + 131.146\gamma_y^{10} + 489.578\gamma_y^9 - 306.156\gamma_y^8 - 302.579\gamma_y^7 + 253.64\gamma_y^6 + 195.857\gamma_y^5 - 105.002\gamma_y^4 - 131.12\gamma_y^3 + 17.494\gamma_y^2 + 124.774\gamma_y + 0.643$$

$$\gamma = \frac{V_{modified,A} - V_{modified,B}}{V_{modified,A} + V_{modified,B}} \quad (10)$$

그림 8은 본 논문에서 제안된 물리적 모델링 방식의 결과를 보여준다. 즉 수정된 출력전압 ($V_{modified}$)의 전압비(γ)를 제안된 센서모델의 입력값으로 할 때 계산된 입사각과 실제 입사각을 도시하였다. 그림 9는 이론적 센서모델과 제안된 센서 모델의 오차를 보여주고 있다. 표 3에서 보듯이 3가지 센서모델 모두 절대적인 오차 크기는 매우 작지만 상대적인 성능은 차이가 남을 알 수 있다. 또한, 제안된 물리적 센서모델링에 의한 센서 오차는 X축으로 0.031° , Y축으로 0.022° 가 발생하여 0.038° 의 평균 오차가 발생하였고 기존의 수학적 모델링 방식에 비해 정밀도가 향상됨을 알 수 있다.

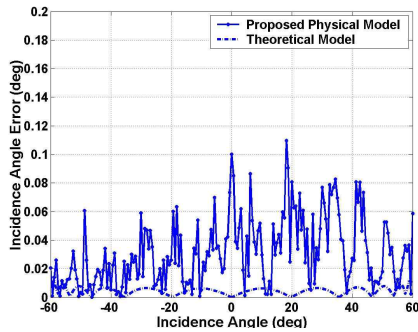


(a) X축 출력전압 비율에 따른 각도

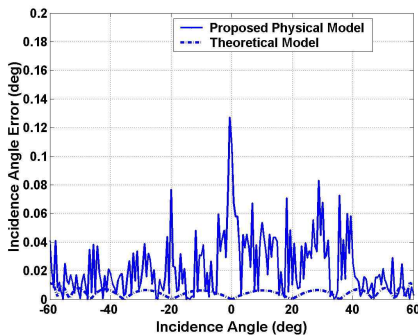


(b) Y축 출력전압 비율에 따른 각도

그림 8. 고정밀 태양센서 특성(제안된 모델링)



(a) X축의 오차 특성



(b) Y축의 오차 특성

그림 9. 제안된 모델링의 오차 특성

표 3. 개선된 센서 모델에 의한 오차

축	평균 오차		
	제안된 물리적 모델	수학적 모델	이론적 모델
X	0.031	0.043	0.005
Y	0.022	0.033	0.005
평균오차율 (RMS값)	0.038	0.054	0.007

IV. 결 론

센서 모델링을 어렵게 만드는 요인은 많이 있으며, 태양센서의 슬릿 두께의 영향으로 수광소자가 받는 실제 태양광 면적이 줄어들므로 센서 출력에 영향을 주는 그림자 효과도 그 중 하나이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 개발된 센서 모델에서는 고려되지 않은 태양센서 슬릿 두께에 의한 그림자 효과를 고려한 물리적 모델링 방식의 센서 모델을 제안하고 성능을 확인하였다. 그림자 효과에 의해 손실된 전압을 수식적으로 모델링 하여 실제 측정된 출력 전압에 반영하였으며, 이렇게 수정된 출력전압의 전압비와 입사각의 관계를 11차 근사 다항식으로 센서를 모델링 하였다. 제안된 센서모델을 이용하여 태양센서의 특성을 분석한 결과 정밀도가 0.054°로 HAUSAT-2의 요구 정밀도인 0.5°를 만족함을 보였다. 또한 이를 일반적인 수학적 모델과 비교 분석한 결과, X, Y 축으로 각각 27%, 32%의 상대적인 오차가 감소하였으며, 결과적으로 제안된 센서 모델을 이용할 경우 기존 수학적 모델에 비해 약 29% 정도의 정밀도 향상을 볼 수 있었다. 따라서 저가의 소형위성의 자세 센서로 쓰이는 고정밀 태양센서의 모델링에 적합하게 사용할 수 있다.

후 기

이 논문은 2005년도 한국항공대학교 교비지원 연구구비에 의하여 지원된 연구의 결과이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) B. Doll, W. Pitz, I. Duschl, E. Settlemeyer, "A new technology coarse Earth & Sun sensor", Proc. ISTS 21 (1998) 1039-1041.
- 2) S. J. Kim, S. O. Kim, B. Y. Moon, Y. K. Chang, "Development of ultra-light 2-axis sun sensor for small satellite", J. Astron. Space Sci. 22(1) (2005) 47-58.

- 3) S. H. Rhee, M. S. Lee, H. W. Lee, K. S. Lim, S. D. Choi, "In-orbit Error Analysis of Sun Sensor for KITSAT-2", *J. Astron. Space Sci.* 13(2) (1996) 254-264.
- 4) V. S. Kouzmin, G. S. Cheremoukhin, V. I. Fedoseev, "Miniature sun sensor, Proc". SPIE 2739 (1996) 407-410.
- 5) M. J. Sidi., "Spacecraft Dynamics and Control", Cambridge Univ. Press, 1997, pp. 347- 353.
- 6) J. R. Wertz, "Spacecraft Attitude Determination and Control", D. Reidel, Dordrecht, 1985, Ch. 6, pp. 155-166.
- 7) S. H. Rhee, H. W. Lee, M. R. Nam, D. j. Park, "Development of pyramidal type 2-axis analog sun sensor", *J. Astron. Space Sci.* 17(2) (2000) 267-276.
- 8) M. Pedersen, J. H. Hales, R. W. Fleron, "Linear Two-Axis MOEMS Sun Sensor and the Need for MEMS in Space", *Proc. IAC* (2003) IAC-03-U.2.b.02.
- 9) S. F. Wu, W.H. Steyn, "Modeling and in-orbit calibration practice of a miniature 2-axis analogue sun sensor", *J. AST* 6(6) (2002) 423-433.
- 10) A. S. Zabiyaikin, V. O. Prasolov, A. I. Baklanov, A. V. Eltsov, O. V. Shalnev, "Sun sensor for orientation and navigation systems of spacecraft", *Proc. SPIE* 3901 (1999) 106-111.
- 11) H. S. Chang, B. J. Kim, K. S. Lim, D. K. Sung, S. D. Choi, "KITSAT-1/2 analog sun sensors-in-orbit results", *J. Astron. Space Sci.* 13(2) (1996) 173-180.