

AMON-RA 광학계를 활용한 통합적 광선 추적 기법의 지구 반사율 측정 성능 검증

이재민^{1†}, 박원현¹, 함선정¹, 이현수¹, 윤지연¹, 김석환^{1,2}, 최기혁³, 김진철³, Mike Lockwood⁴

¹연세대학교 천문우주학과

²연세대학교 자외선우주망원경연구단

³한국항공우주연구원

⁴Rutherford Appleton Laboratory, UK

INTEGRATED RAY TRACING MODEL FOR END-TO-END PERFORMANCE VERIFICATION OF AMON-RA INSTRUMENT

Jae-Min Lee^{1†}, Won Hyun Park¹, Sun-Jeong Ham¹, Hyun-Su Yi¹, Jee Yeon Yoon¹,
Sug-Whan Kim^{1,2}, Ki-Hyuk Choi³, Zeen Chul Kim³, and Mike Lockwood⁴

¹Dept. of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²Center for Space Astrophysics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

³Korea Aerospace Research Institute

⁴Rutherford Appleton Laboratory, UK

E-mail: leejaemin@galaxy.yonsei.ac.kr

(Received November 16, 2006; Accepted December 12, 2006)

요 약

Earth-Sun-Heliosphere Interactions Experiments(EARTHSHINE) 미션의 주 탑재체인 Albedo Monitor and Radiometer(Amon-Ra) 광학계는 최초로 제1 라그랑제 지점(Lagrange point 1) 주위의 헤일로(Halo) 궤도에 위치하여 태양 복사 활동 및 지구 반사율 변화를 1% 정확도 이내로 측정함으로써 현존하는 지구 반사율 추이의 모순을 해결할 수 있는 과학적 측정 자료를 제시하는데 그 목적을 가지고 있다. 이에 이미 개발된 광학 성능 검증용 Amon-Ra 광학계의 가시광 채널 시험 모델 및 광선 추적 기법을 이용한 통합적 광선 추적 end-to-end 과학 임무 성능 평가 수치 모사 기법을 확립하였으며, 개발된 기법을 이용하여 실제 제작된 Amon-Ra 광학계를 제1 라그랑제 지점에 위치시키고 태양과 지구 밝기를 다양하게 변화시킨 후 광학계에 입사되는 에너지 복사량을 수치 모사로 측정하였다. 관측된 지구 및 태양 밝기로부터 지구 반사율 변환을 위하여 각 분포 모델(Global Angular Distribution Model, ADM)을 이용하였으며 수치 모사에 의한 지구 반사율 측정 결과를 Amon-Ra 광학계의 측정 오차 범위인 $\pm 0.28\%$ 와 비교함으로써 개발된 end-to-end 성능 검증 기법의 계산 정밀도를 확인하였다. 이는 기존의 광학계 성능 검증법의 한계를 뛰어넘어 광학계 성능 평가를 실시간으로 검증할 수 있다는 점에서 큰 의의를 지닌다.

ABSTRACT

The international EARTHSHINE mission is to measure 1% anomaly of the Earth global albedo and total solar irradiance using Amon-Ra instrument around Lagrange point 1. We developed a new ray tracing based integrated end-to-end simulation tool that overcomes the shortcomings of the existing end-to-end performance simulation techniques. We then studied the in-orbit radiometric performance of the breadboard

[†]corresponding author

Amon-Ra visible channel optical system. The TSI variation and the Earth albedo anomaly, reported elsewhere, were used as the key input variables in the simulation. The output flux at the instrument focal plane confirms that the integrated ray tracing based end-to-end science simulation delivers the correct level of incident power to the Amon-Ra instrument well within the required measurement error budget of better than $\pm 0.28\%$. Using the global angular distribution model (ADM), the incident flux is then used to estimate the Earth global albedo and the TSI variation, confirming the validity of the primary science cases at the L1 halo orbit. These results imply that the integrated end-to-end ray tracing technique, reported here, can serve as an effective and powerful building block of the on-line science analysis tool in support of the international EARTHSHINE mission currently being developed.

Keywords: end-to-end simulation, Amon-Ra instrument, ray-tracing technique, earth global albedo, total solar irradiance

1. 서 론

최근 지구 온난화의 원인 규명에 관한 다양한 연구 방법론적 접근이 이루어지고 있다. 특히 Total Solar Irradiance(TSI)의 변화(Labitzke & van Loon 1997, Labitzke et al. 2001, Gray et al. 2001, Haigh 2003), 우주선에 의한 구름 분포의 변화(Svensmark & Friis-Christensen 1997), 인간의 활동에 의한 지구 환경의 변화(Levitus et al. 2001) 등의 다양한 요인에 의해 지구 온난화가 진행되고 있다. 지구 온난화의 척도가 되는 표면온도(T_s)는 지구에 입사되는 태양 에너지, 지구의 반사율, 지구의 온실효과와 밀접한 관계를 가지고 있으며 normalised greenhouse effect(g)를 이용하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다(Raval & Ramanathan 1989).

$$T_s = \left\{ \frac{S(1-A)}{4\sigma(1-g)} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

여기서 S 는 대기 상단에서의 태양상수, A 는 지구 반사율, σ 는 볼츠만 상수이다. 지구에 입사되는 태양 에너지 가운데 지구가 반사하는 비율로서 지구 반사율은 일반적으로 0.3으로 알려져 있으나 일정하게 유지되지는 않는다. 식 (1)에 나타난 각 변수의 정확한 측정과 더불어 지구 반사율 변화에 의한 지구의 온난화의 진행 추이를 예측, 궁극적으로 지구의 온난화의 원인을 밝혀 낼 수 있다.

현재 지배적으로 사용되는 지구 반사율 측정법은 크게 두 가지로, 첫 번째는 미국의 Big Bear 태양 관측소(BBSO)에서는 지구에서 반사되어 달의 어두운 면에서 다시 반사되어 지구로 되돌아오는 태양 에너지를 측정하여 전 지구 반사율을 측정하고 있다(Goode et al. 2001). 두 번째로는 미국 NASA의 Earth Observing System(EOS) 위성인 Clouds and the Earth's Radiance Energy System(CERES) 다광장 광학계가 탑재되어 저궤도 관측을 통해 지구 반사율을 측정해내고 있다(Wielicki et al. 1996). 하지만 BBSO 측정법(지상 관측) 및 CERES 광학계(저궤도 관측)가 가지는 한계로 인하여 두 가지 방법으로 측정한 지구 반사율은 그 경향에서 큰 차이를 보여 왔다(Pallé et al. 2004, Wielicki et al. 2005). 더욱이 영국 Hadley centre의 기후 모델인 Hadley Centre Coupled Model, version 3(HadCM3)에 의

한 반사율 예측과도 일치하지 않는다는 점이 발견되었다(Gordon et al. 2000, Pope et al. 2000). 이로 인하여 전 지구 평균 표면온도(T_S)의 장기 변화(특히 상승)의 이해, 즉 지구 온난화 진행 추이의 정밀한 이해에 있어서의 모호성이 증가하게 되었다.

Earth-Sun-Heliosphere Interactions Experiments(EARTHSHINE) 미션은 Lockwood et al.(2004a)에 의해 처음 제안되어 영국, ESA, 한국, 미국 등에 소속된 20개 이상의 연구기관이 참여, 2010년과 2015년 사이에 발사될 예정이다. EARTHSHINE은 제1 라그랑제 지점 주위의 헤일로 궤도에 위치하여 주 탑재체인 Albedo Monitor and Radiometer(Amon-Ra) 광학계로 400nm에서 4000nm까지의 파장대에서 태양 복사 에너지 및 지구 반사율 변화를 1% 정밀도로 측정, 전술된 지구 반사율 측정의 모순을 해결할 최초의 미션으로 기대되고 있다(Lockwood et al. 2004b). Amon-Ra 광학계의 시야각은 4도이며 가시광 채널(관측영역 400nm~750nm)은 카세그레인 방식으로 2개의 반사경과 4개의 보정렌즈로 이루어져 있다. 에너지 채널(관측영역 400nm~4000nm)에는 Confocal Parabolic Concentrator(CPC)가 이용된다(Lee et al. 2005).

한편, 기존의 위성 미션용 end-to-end 과학 임무 성능 검증에 사용된 방법들은 탑재체의 광학적 성능만을 평가할 목적으로 광학 요소만 포함하거나(Fitzmaurice et al. 2005) 탑재체 구조에 대한 유한구조해석을 실시하였다(Schönhoff et al. 2000). 또한 실제 관측 목표물에 대한 수치 모사 계산을 시행한 경우(Miller & Bergen 2004)가 있으나 이는 광원에서 방출되는 에너지 변화를 반영하기 어려운 단점을 지니고 있었다. 따라서 기존의 end-to-end 과학 임무 성능 검증이 가진 문제점을 해결하기 위해서는 각 수치 모사 단계별로 여러 가지 다른 해석 기능을 가진 독립적인 프로그램을 사용해야 하였고 이는 연구 개발 과정에서의 비효율성을 증가시키게 되었다(Crowther & Wassom 2004). 하지만 이 연구에서 개발된 통합적 광선 추적 end-to-end 과학 임무 성능 검증 기법은 광원과 관측 대상 및 광학계의 구성 요소와 검출기까지의 정보전달과정을 한 종류의 광선 추적 기법으로 통합하였기 때문에 실제 궤도상에서 위성 광학계가 보여주는 과학적 성능을 직접적이고 현상학적으로 확인할 수 있다는 데에서 방법론적 접근 개념과 그 효율 면에서 진일보된 기법이라 할 수 있다. 이는 광원에서부터 출발한 광선(ray)이 관측 목표물의 특성을 반영한 후 결과적으로 광학계에 입사됨으로서 관측 목표물에 대한 광학계의 측정 성능을 단번에 판단할 수 있게 된 것이다.

이 논문에서는 개발된 통합적 광선 추적 기술을 이용한 광학계 성능 검증법을 설명한 후, 지금까지 제작 및 성능 검증이 완료된 Amon-Ra 가시광 채널의 시험 모델을 이용하여 3개의 서로 다른 초기 조건에 따른 태양 복사량 및 지구 반사율 계산 결과를 도출하였다. 통합적 광선 추적 end-to-end 과학 임무 검증 기법에 의한 계산 오차가 지구 반사율 측정 요구 조건인 $\pm 0.28\%$ 오차를 만족함을 검증하였다.

2. 통합적 광선 추적 end-to-end 과학 임무 성능 검증 수치 모사

개발된 통합적 광선 추적 end-to-end 과학 임무 검증 기법 내에서 광선은 태양으로 정의된 광원에서 전 방향으로 방출된다. 그 중 일부의 태양 에너지를 산란 및 반사하는 지구는 산란각 $\alpha < 60^\circ$ 인 경우 램버트 산란면으로 표현될 수 있기 때문에(Goode et al. 2001) 태양에서 지구로 입사된 광선은 지구의 램버트 산란(Lambertian scattering) 법칙을 따르는 반사율 특성이 반영된 후 Amon-Ra 광학계로 진행하며, 광학계로 입사된 광선은 주경을 거쳐 다시 주경의 초점으로 향하게 되고 부경에

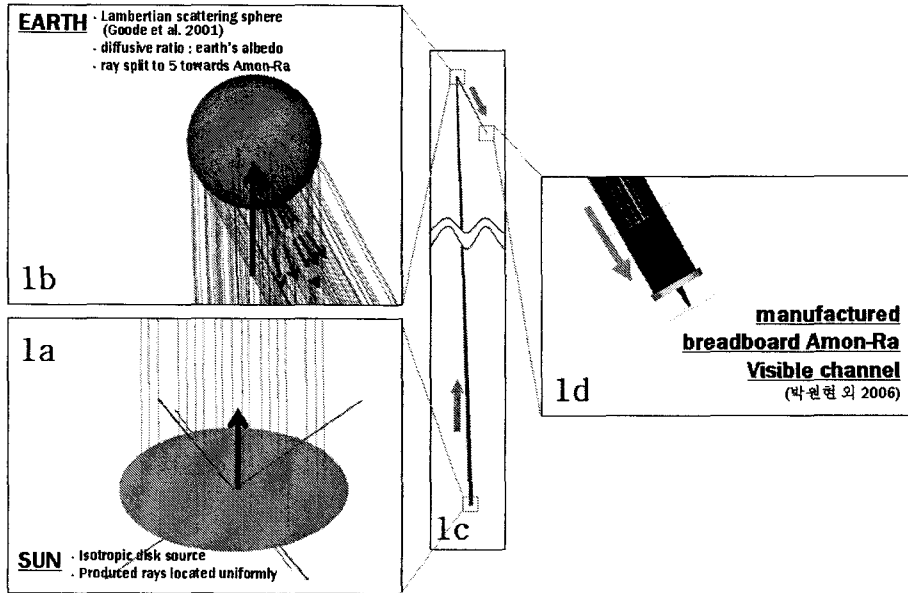


그림 1. End-to-end 광선 추적 모델. 광원(1a)에서 방출된 광선은 지구(1b)로 입사되고 입사된 광선은 지구 산란 특성이 반영된 후 Amon-Ra 광학계 가시광 채널 시험 모델(1d)의 입사등으로 향한다.

서 반사된 후 4개의 보정렌즈를 거쳐 결과적으로 검출기에 입사된다. 이 같은 통합적 광선 추적 수치 모사의 개념도를 그림 1에 나타 내었다.

시험 모델 Amon-Ra 광학계의 가시광 채널은 2개의 미러와 4개의 보정 렌즈로 이루어져 있다(박원현 외 2007). 이미 측정된 각각의 광학 요소의 파면형상오차 대한 Zernike 다항식의 37차 계수를 모두 구하여 수치 모사 내에서 재현함으로써 제작된 Amon-Ra 광학계의 가시광 채널이 궤도상에서 보여주는 과학적 성능을 검증할 수 있게 되었다. 수치 모사에 적용된 주요 기법을 2.1절과 2.2절에 제시하였다.

2.1 물리적 크기 및 복사량의 재설정

사용된 광선 추적 프로그램 언어 내에서는 천문학적인 규모의 거리 및 크기를 자동적으로 구현할 수가 없기 때문에 이를 해결하기위해 Amon-Ra 광학계를 기준으로 태양, 지구까지의 거리와 각각의 크기를 광학계 입사각에 적합하게 재구성하였다. 예를 들어 거리의 배율을 결정해 주는 인수를 M , Amon-Ra-지구간의 거리를 d_E , 태양-지구간의 거리를 d_S 라고 하면 광선 추적 수치 모사상 정의되는 Amon-Ra-지구(D_E), 태양-지구(D_S) 간의 거리는 식 (2), (3)과 같다.

$$D_E (m) = \frac{M \times d_E}{10^8} \tag{2}$$

$$D_S (m) = \frac{M \times d_S}{10^8} \tag{3}$$

이 때 지구의 반지름을 r_E , 태양의 반지름을 r_S 라 하면 수치 모사 내에 정의되는 지구의 반지름(R_E)과

태양의 반지름(R_S)은 각각 식 (4), (5)와 같이 정의 된다.

$$R_E(m) = \frac{(r_E - 0.029) \times D_E}{d_E} + 0.029 \quad (4)$$

$$R_S(m) = \frac{(r_S - 0.029) \times D_S}{d_S} + 0.029 \quad (5)$$

이 때 각 식에 입력된 0.029(m)는 Amon-Ra 광학계 입사동(Entrance pupil) 구경의 반지름이다. 각 물체간의 거리가 재구성됨에 따라 광원의 광도는 거리 제곱의 역수에 비례하는 값으로 설정되어 방출된다.

2.2 광선 경로의 최적화 및 광선 추적의 반복

태양에서 생성된 광선과 지구에서 반사되는 광선의 상당수는 계산과정에 있어 불필요할 뿐 아니라 오히려 계산시간을 기하급수적으로 증가시키는 결과를 초래한다. 따라서 다음 입사체를 향하는 광선만을 계산 과정에 포함시킴으로서 광선 추적에 소요되는 시간을 크게 줄일 수 있다. 또한 태양에서 생성된 각각의 광선은 5개의 광선으로 나누어져 지구에 입사되고 반사된 각각의 광선 역시 5개로 나누어져 최종적으로 광학계의 검출기에는 광원에서 생성된 최초 광선 수의 약 25배에 해당하는 광선이 도달하여 계산 효율 및 결과의 정확도를 크게 높여주게 된다. 예를 들어 1,000,000개의 광선을 광학계의 입사동에 도달시키고자 할 때 나누어지는 광선을 1개로 설정하면 수치 모사에 소요되는 시간은 광선이 5개로 나누어질 때보다 약 2.16배 길어지는 반면 오차는 약 13배 크게 계산된다.

지구에서 나누어진 광선 개개의 플럭스 F_s 는 식 (6)과 같이 표현된다(ASAP V2R3 online help 2005, Breault Research Organization).

$$F_s = F_i \cdot \rho(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s) \frac{A \cos \theta_e \cos \theta_s}{nR^2} \quad (6)$$

여기서 F_i 는 광선의 초기 플럭스, ρ 는 지구의 반사율, A 는 광학계의 구경 제한면(Aperture stop)의 면적, R 은 광선이 반사된 위치에서 광학계 구경까지의 경로의 길이, θ 는 천정각, ϕ 는 입사평면과 반사평면 사이의 각, 아래 첨자인 i, s, e 는 각각 입사, 반사, 반사된 광선과 광학계 구경면 사이를 의미한다. 또한 n 은 최초 광선과 나누어지는 광선의 곱으로 여기에서는 $5 \times$ (지구 입사 광선의 개수)가 된다.

또한 광선 추적 프로그램은 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 이용하여 광선을 생성하기 때문에 추적되는 광선의 개수가 많으면 많을수록 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다. 하지만 사용되는 광선의 개수가 많아질수록 프로그램의 실행시간은 기하급수적으로 길어진다. 이를 해결하기 위해 상대적으로 적은 양의 광선을 다수 실행한 후 각각의 결과를 평균하는 방법을 사용하게 된다.

3. 각 분포 모델을 이용한 행성 반사율 측정법

제1 라그랑제 지점에서 광학계에 검출된 지구의 밝기로부터 얻어지는 산란각의 함수인 지구의 반사도(Reflectance, $R(\alpha)$)를 전 지구 반사율로 변환하기 위해서는 산란각(α)에 따른 각 분포 모델($G(\alpha)$)을 이용하여야 한다. 실제 지구의 각 분포 모델은 지구의 산란 특성에 따라 경험적으로 얻어지게 되지만(Pallé et al. 2003), 2장에서 언급한 바와 같이 지구는 $\alpha < 60^\circ$ 인 경우 램버트 산란면이라고 가정되어 램버트 구면의 위상 함수를 이용, 산란각에 따른 $G(\alpha)$ 을 이론적으로 구할 수 있다.

표 1. 산란각 α 에 따른 Global ADM($G(\alpha)$)의 역수 및 태양과 지구의 관측 이론값.

$\alpha(^{\circ})$	$1/G(\alpha)$	Reflectivity ¹	Solar flux on Amon-Ra(Watts)	Earth flux on Amon-Ra(10^{-6} Watts) ¹
-32	1.732	0.1732	0.5713	1.770
-24	1.628	0.1842	0.5721	1.883
-16	1.557	0.1927	0.5726	1.969
-8	1.514	0.1981	0.5730	2.024
0	1.500	0.2000	0.5731	2.044
8	1.514	0.1981	0.5730	2.024
16	1.557	0.1927	0.5726	1.969
24	1.628	0.1842	0.5721	1.883
32	1.732	0.1732	0.5713	1.770

¹A=0.3 일 때

$R(\alpha)$ 은 태양의 밝기(I_S), 지구의 밝기(I_E)의 비를 이용하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며 결과적으로 식 (8)을 통해 지구 전 반사율을 얻을 수 있다(Lockwood et al. 2004a).

$$R(\alpha) = \frac{I_E}{I_S} \times \left[\frac{(d_E)(d_S)}{(r_E)(d_S - d_E)} \right]^2 \quad (7)$$

$$A = \frac{R(\alpha)}{G(\alpha)} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)을 역으로 계산하면 광학계로 입사되는 지구의 밝기를 구할 수 있으며, 이는 표 1에 나타나 있다. 이러한 계산을 통하여 수치 모사의 정확도를 확인하였다.

4. 궤도상에서의 Amon-Ra 가시광 채널 시험 모델의 성능 검증

4.1 Amon-Ra 광학계의 측정 오차 요구 조건

Amon-Ra 광학계는 전 지구 반사도를 측정하여 TSI와 지구 반사율 간의 관계를 규명, 지구 기후에 대한 태양의 영향을 밝혀낼 예정이다. 이에 일반적으로 TSI와 지구 반사율의 관계를 선형관계로 가정할 경우 amplification factor(β)를 이용하면 식 (9)의 관계를 갖는다.

$$\frac{\Delta A}{A_0} = (\beta - 1) \left(1 - \frac{1}{A_0} \right) \frac{\Delta S}{S_0} \quad (9)$$

이 때 A_0 와 S_0 는 임의로 주어진 기간의 지구 반사율 및 TSI의 평균이다. 여기서 지구 기후에 미치는 태양의 효과를 의미하는 β 는 오랜 시간에 걸친 TSI의 변화와 지구 해양 온도(Reid 1987, White et al. 1997), 지구 표면 온도(Friis-Christensen & Lassen 1991) 및 대류권의 온도(Hill et al. 2001, Marsh & Svensmark 2003)와의 상호 변화 연구로부터 알려지고 있음에도 불구하고 정확한 값은 결정되어 있지 않다. Crooks(2004)에 의하면 β 는 약 2 ~ 5, Marsh & Svensmark(2003)는 약 3 ~ 4, Lean et al.(1995)은 약 3, Lean(2000)은 > 3으로 예측하고 있다. 다양한 사전 연구에 의해 공통으로 제시될 수 있는 β 를 3이라하면 식 (9)에 의해 지구 반사율에서는 약 1%의 변화가 나타나며 식 (8)에 의해 지구 반사도는 약 1.16%의 변화한다. 이러한 변화율을 관측하기 위해 요구되는 측정 정확도는 광학계 자체의 측정 오차(ϵ_R)와 적용되는 각 분포 모델 오차(ϵ_A)의 합으로 반사도 변화의 1/4인 $\pm 0.29\%$ 이

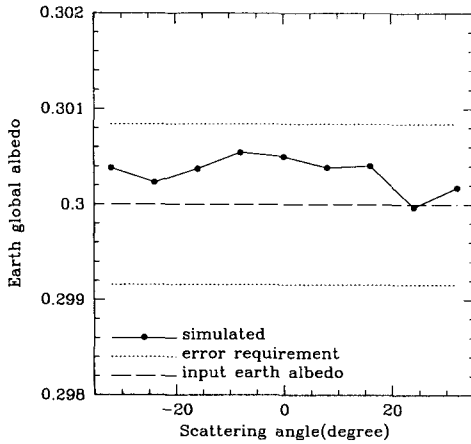


그림 2. Amon-Ra 가시광 채널의 시험 모델을 이용하여 지구 반사율을 산란각에 따라 계산한 결과.

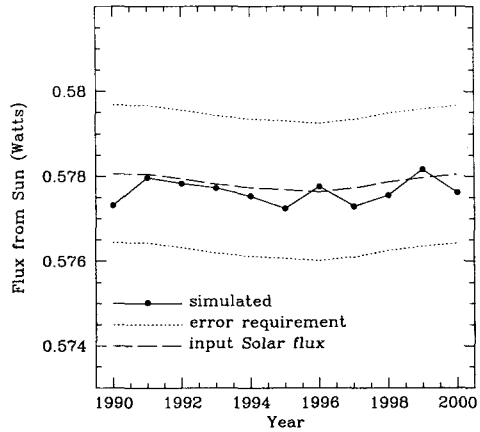


그림 3. Lockwood(2002)의 연도별 TSI 측정치가 주어졌을 때 Amon-Ra 가시광 채널의 시험 모델이 태양 밝기를 계산한 결과.

다. 그런데 ϵ_A 는 $\pm 0.1\%$ 이내로 줄어들 것으로 기대되고 있으므로 결과적으로 ϵ_R 은 $\pm 0.28\%$ 가 요구된다(Lockwood et al. 2004a).

4.2 산란각에 따른 지구 반사율 측정 성능

EARTHSHINE은 제1 라그랑제 지점 주위를 회전하는 헤일로 궤도를 이용하여 약 $-40^\circ \sim +40^\circ$ 까지의 산란각에 대해서 Amon-Ra 광학계로 지구를 관측하게 된다. 다양한 산란각에 대한 통합적 광선 추적 end-to-end 과학 임무 검증 기법의 반사율 측정 정밀도를 평가하기 위해 통합적 광선 추적 수치 모사 내에 Amon-Ra 광학계를 지구를 중심으로 1,500,000km 떨어진 제1 라그랑제 지점까지의 반경을 가지고 $-32^\circ \sim +32^\circ$ 까지의 산란각을 가진 호상을 이동시키며 지구의 밝기를 계산하여 지구 반사율로 변환하였다. 이 때 수치 모사 내의 지구 반사율은 0.3으로 고정하였다. 그림 2는 Amon-Ra 가시광 채널의 시험 모델로 주요 산란각에 대하여 계산된 지구 밝기를 반사율로 변환한 결과로 지구 반사율이 최대 0.127%, 최소 -0.01% 범위 내에서 계산되었으며 점선으로 표시된 Amon-Ra 광학계의 측정 오차 요구 조건 내에 해당하는 결과임을 확인할 수 있었다.

4.3 TSI 변화 측정 성능

Amon-Ra 광학계는 지구 관측과 동시에 태양 관측을 시행할 예정이다. 시시각각 변하는 TSI의 관측 정밀도를 검증하기 위하여 Lockwood(2002)에 의해 제시된 1990년부터 2000년까지의 TSI 연도별 측정치를 수치 모사 초기값으로 입력하여 태양의 밝기를 계산하였다. Amon-Ra 시험 모델은 제1 라그랑제 지점에 고정하였다. 이 경우 수치 모사 내에서 Amon-Ra 광학계는 태양을 바라보게 되며 태양 방출 광선은 지구를 거치지 않고 광학계의 입사동으로 직접 입사되도록 설정하였다. 그림 3은 Amon-Ra 가시광 채널의 시험 모델을 이용하여 광선 추적에 의해 입사된 광량으로부터 역 수치 모사 계산한 태양 밝기 변화 결과로서, 기준이 되는 입력 태양 밝기 변화와 비교하여 볼 때 통합적 광선 추

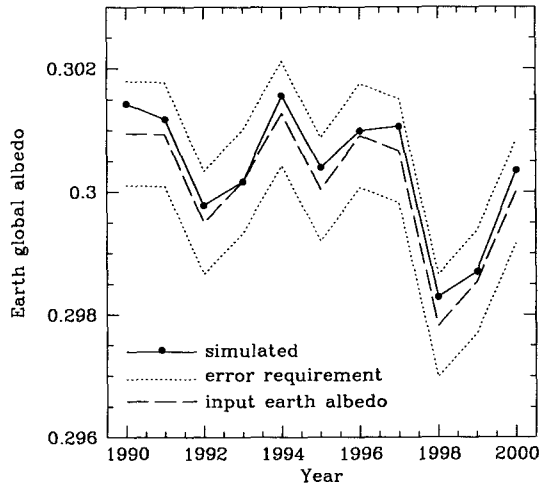


그림 4. 1990년부터 2000년까지의 Lockwood(2002)에 의한 TSI 측정치와 HadCM3에 의해 예측된 지구 반사율이 주어졌을 때 Amon-Ra 가시광 채널의 시험 모델이 지구 반사율을 계산한 결과.

적 end-to-end 과학 임무 성능 검증 기법에 의한 계산 오차가 1990년에서 최대 -0.1258%, 1991년에서 최소 -0.014%으로 나타남으로서 Amon-Ra 광학계의 관측 오차 요구치를 만족함을 알 수 있었다.

4.4 TSI와 지구 전 반사율의 동시적 변화에 따른 지구 반사율 측정 성능

EARTHSHINE의 실제 미션 수행 과정에서 Amon-Ra 광학계는 TSI와 지구 반사율의 변화를 동시에 관측하게 된다. 따라서 개발된 성능 검증 기법의 초기값으로 연도에 따른 서로 다른 TSI와 지구 반사율을 입력, 동시에 변화시키며 Amon-Ra 가시광 채널 시험 모델로 태양 및 지구 밝기를 계산하였으며 식 (7), (8)을 이용, 지구 반사율로 변환하였다. 입력된 TSI와 지구 반사율의 초기값은 Lockwood(2002)의 TSI 연도별 측정치와 영국 Hadley Centre의 HadCM3을 통해 얻어진 지구 반사율 변화 예측치 가운데 1990년부터 2000년까지의 자료를 선택하였다. Amon-Ra 광학계는 제1 라그랑제 지점에 고정시켰다. 수치 모사 결과가 그림 4에 제시되어 있으며 Amon-Ra 가시광 채널의 시험 모델을 이용한 통합적 광선 추적 end-to-end 과학 임무 검증 기법이 지구 반사율을 최대 오차 0.158%, 최소 오차 0.001%로 계산함으로써 관측 오차 범위를 벗어나지 않음을 거듭 확인하였다.

5. 결 론

지구 반사율 변화가 지구 온난화에 미치는 영향은 지대하여 지구 반사율 측정은 온난화 문제에 대한 해결점을 제시해 줄 핵심 연구로 대두되고 있다. EARTHSHINE 위성의 주 탑재체인 Amon-Ra 광학계는 태양과 지구를 약 3년에 걸쳐 지속적으로 관측, 지구의 전 반사율의 즉각적인 변화를 확인할 예정이다(Lockwood et al. 2004a).

이 연구에서는 설계, 조립 및 측정이 완료되었고 각 미러와 렌즈의 파면형상오차를 측정된 Amon-Ra 광학계의 가시광 채널 시험 모델 및 광추적 기법을 이용한 새로운 통합적 광선 추적 end-to-end

과학 임무 검증 기법을 개발, 궤도 상에서의 과학 임무 성능 여부를 확인할 수 있게 되었다. 개발된 검증 기법은 기존의 검증법이 가지고 있는 기술적 방법론의 한계(Crowther & Wassom 2004)를 극복할 수 있었다는 점에서 큰 의의를 지닌다.

전술된 광선 추적 기법을 기초로 Amon-Ra 가시광 채널의 시험 모델을 제1 라그랑제 지점에 두고 주요 산란각에서의 지구 반사율을 수치 모사로 계산하였다. 또한 TSI와 지구 반사율을 다양하게 변화시켜 광학계에 의해 관측된 태양과 지구의 밝기로부터 지구 반사율을 계산하였다. 그 결과 제작된 Amon-Ra 가시광 채널 시험 모델에 의한 측정 성능이 오차 범위 요구 조건인 $\pm 0.28\%$ 를 만족하였으며 이로서 통합적 광선 추적 end-to-end 과학 임무 성능 검증 기법의 정밀도를 확인할 수 있었다.

감사의 글: 이 연구는 Breault Research Organization사의 지원 하에 Advanced System Analysis Program(ASAP)으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 대한 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 박원현, 김성희, 이한신, 이현수, 이재민, 함선정, 윤지연, 김석환, 양호순, 최기혁, 김진철, Lockwood, M., Morris, N., & Tosh, I. 2007, 한국우주과학회지, 24, 79
- Crooks, S. 2004, PhD Thesis, Oxford University
- Crowther, B. G. & Wassom, S. R. 2004, in Novel Optical Systems Design and Optimization VII, vol.5524, eds. J. M. Sasian, R. J. Koshel, P. K. Manhart, & R. C. Juergens (Bellingham, WA: SPIE), p.196
- Fitzmaurice, M. W., Ha, K. Q., Le, C., & Howard, J. M. 2005, Optical Modeling and Performance Predictions II, vol.5867, ed. M. A. Kahan (Bellingham, WA: SPIE), p.257
- Friis-Christensen, E. & Lassen, K. 1991, Science, 254, 698
- Goode, P. R., Qiu, J., Yurchyshyn, V., Hickey, J., Chu, M. C., Kolbe, E., Brown, C. T., & Koonin, S. E. 2001, Geophysical Research Letters, 28, 1671
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., Mitchell, J. F. B., & Wood, R. A. 2000, Climate Dynamics, 16, 147
- Gray, L. J., Dunkerton, S. J., Balwin, M. P., Drysdale, E. F., & Allen, M. R. 2001, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 127, 1985
- Haigh, J. D. 2003, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 361, 95
- Hill, D. C., Allen, M. R., & Stott, P. A. 2001, Geophysical Research Letters, 28, 1555
- Labitzke, K., Austin, J., Butchart, N., Knight, J., Takahashi, M., Nakamoto, M., Nagashima, T., Haigh, J. D., & Williams, V. 2001, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 64, 201
- Labitzke, K. & van Loon, H. 1997, Space Science Reviews, 80, 393
- Lean, J., Beer, J., & Bradley, R. 1995, Geophysical Research Letters, 22, 3195
- Lean, L. 2000, Geophysical Research Letters, 27, 2425

- Lee, H., Tosh, I., Morris, N., Lockwood, M., & Kim, S.-W. 2005, *Optical Design and Testing II*, vol.5638, eds. Y. Wang, Z. Weng, S. Ye, & J. M. Sasian (Bellingham, WA: SPIE), p.248
- Levitus, S., Antonov, J. S., Wang, J., Delworth, T. L., Dixon, K. W., & Broccoli, A. J. 2001, *Science*, 292, 267
- Lockwood, M. 2002, *A&A*, 382, 678
- Lockwood, M., Morris, N., Smith, M. F., Haigh, J. D., Waltham, N. R., Russell, J., Barnett, J., Allen, M. R., Crooks, S., Coates, A. J., James, A., Fazakerley, A. N., Owen, C. J., Harra, L., Horbury, T., Carr, C., Cargill, P., Castelli, C., Kirkby, J., Rouillard, A., Eyles, C., Goode, P., Stott, P., Harrison, R. G., Lean, J. L., Wang, Y. M., Harrison, R. A., Carslaw, K., Baran, A., Gray, L., Loeb, N., Hobbs, S., Ward, R., & Chalenor, C. 2004a, *Proposal of Earth-Sun-Heliosphere Interactions Experiment A. Science Case*, p.5, pp.25-27, pp.55-57
- Lockwood, M., Morris, N., Smith, M. F., Haigh, J. D., Waltham, N. R., Russell, J., Barnett, J., Allen, M. R., Crooks, S., Coates, A. J., James, A., Fazakerley, A. N., Owen, C. J., Harra, L., Horbury, T., Carr, C., Cargill, P., Castelli, C., Kirkby, J., Rouillard, A., Eyles, C., Goode, P., Stott, P., Harrison, R. G., Lean, J. L., Wang, Y. M., Harrison, R. A., Carslaw, K., Baran, A., Gray, L., Loeb, N., Hobbs, S., Ward, R., & Chalenor, C. 2004b, *Proposal of Earth-Sun-Heliosphere Interactions Experiment B. Instrument & Work Package Descriptions*, p.5
- Marsh, N. & Svensmark, H. 2003, *Space Science Reviews*, 107, 317
- Miller, S. W. & Bergen, W. R. 2004, *Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization: an End-to-End System Perspective*, vol.5548, eds. H.-L. A. Huang, & H. J. Bloom (Bellingham, WA: SPIE), p.380
- Pallé, E., Goode, P. R., Montañés-Rodríguez, P., & Koonin, S. E. 2004, *Science*, 304, 1299
- Pallé, E., Goode, P. R., Yurchyshyn, V., Qiu, J., Hickey, J., Montañés-Rodríguez, P., Chu, M.-C., Kolbe, E., Brown, C. T., & Koonin, S. E. 2003, *JGR*, 108, 4710
- Pope, V. D., Gallani, M. L., Rowntree, P. R., & Stratton, R. A. 2000, *Climate Dynamics*, 16, 123
- Raval, A. & Ramanathan, V. 1989, *Nature*, 342, 758
- Reid, G. C. 1987, *Nature*, 329, 142
- Schönhoff, U., Eisenträger, P., Wandner, K., Kärcher, H., & Nordmann, R. 2000, In *Airborne Telescope Systems*, vol.4014, eds. R. K. Melugin & H.-P. Roser (Bellingham, WA: SPIE), p.380
- Svensmark, H. & Friis-Christensen, E. 1997, *Journal of Atmospheric Terrestrial Physics*, 59, 1225
- White, W. B., Lean, J., Cayan, D. R., & Dettinger, M. D. 1997, *JGR*, 102, 3255
- Wielicki, B. A., Barkstrom, B. R., Harrison, E. F., Lee, R. B., Smith, G. L., & Cooper, J. E. 1996, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 853
- Wielicki, B. A., Wong, T., Loeb, N., Minnis, P., Priestly, K., & Kandel, R. 2005, *Science*, 308, 825