J. Space Technol. Appl. 4(4), 268-278 (2024)
https://doi.org/10.52912/jsta.2024.4.4.268

우주기술과 응용
Journal of Space Technology and Applications
pISSN 2765-7469 eISSN 2799-3213

연구논문

지상 관측소 기반 위성 추적 데이터를 활용한 대기 투과도와 관측 밝기 간 상관관계 분석

현 철†, 김동건, 김현승, 이호진

엘아이지넥스원 전장분석개발팀

Correlation Analysis between Atmospheric Transmittance and Observed Brightness Using Ground-Based Satellite Tracking Data

Chul Hyun†, Donggeon Kim, Hyunseung Kim, Hojin Lee

Department of Battlefield Analysis and Development, LIG Nex1, Seongnam 13488, Korea

Received: October 8, 2024
Revised: October 26, 2024
Accepted: November 1, 2024

†**Corresponding author :**
Chul Hyun
Tel : +82-31-5178-4293
E-mail : chul.hyun@gmail.com

Copyright © 2024 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID
Chul Hyun
https://orcid.org/0009-0006-7300-0740
Donggeon Kim
https://orcid.org/0009-0005-2374-1252
Hyunseung Kim
https://orcid.org/0000-0003-3974-0631
Hojin Lee
https://orcid.org/0009-0002-4312-6001

요 약

본 연구에서는 지상 관측소에서 획득한 위성 추적 데이터를 활용하여 대기 투과도와 관측 밝기 간의 상관관계를 분석하였다. 대기 투과도는 중위도 겨울 조건을 반영하여 MODTRAN(MODerate resolution atmospheric TRANsmission) 소프트웨어를 통해 산출되었으며, 관측 밝기는 위성 추적 데이터를 이용하여 산출하였다. 데이터 분석 과정에서 대기 투과도와 관측 밝기 간의 상관성을 평가하고자 다항 회귀 분석을 적용하여 모델을 구성하였다. 연구 결과를 통해 다양한 고도 각에서 대기 조건이 위성 밝기에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있었으며, 이를 기반으로 위성 관측의 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

This study investigates the correlation between atmospheric transmittance and observed brightness using satellite tracking data collected from a ground-based observation station. Atmospheric transmittance was calculated under mid-latitude winter conditions using MODTRAN software, while observed brightness was derived from satellite tracking data independently of transmittance measurement angles. Polynomial regression was applied to model the relationship between transmittance and brightness. The results allowed for a quantitative assessment of the impact of atmospheric conditions on satellite brightness across various elevation angles. This study provides foundational insights for satellite observation by clarifying the relationship between atmospheric transmittance and brightness changes under specific observational conditions. Future work may expand upon these findings by exploring a broader range of seasonal and environmental factors to enhance the generalizability of the model.

핵심어 : 위성 관측, 대기 투과도, 밝기 분석, MODTRAN, 상관관계분석
Keywords : satellite observation, atmospheric transmittance, brightness analysis, MODTRAN, correlation analysis

1. 서론

지구 대기는 광학 신호의 전파에 있어 여러 가지 영향을 미친다. 대기를 통과하는 과정에서 신호는 산란과 흡수로 인해 세기가 감쇠되며, 시상 현상으로 인해 이미지의 선명도가 떨어지거나 왜곡될 수 있다. 이러한 대기 효과는 천체 및 인공위성 관측에 필수적으로 고려되어야 하며, 특히 관측 각도와 대기 경로 길이에 따라 감쇄와 왜곡이 달라진다. 본 연구에서는 이러한 대기 효과 중에서도 대기 투과도에 집중하여 분석을 진행하였다.

본 연구의 목적은 인공위성 관측 이미지에서 고각별 대기 투과도와 관측된 밝기 데이터 간의 상관관계를 확인하여, 향후 관측 데이터 해석 및 보정에 있어 기초 자료로 활용할 수 있는 상관관계 모델을 구축하는 데 있다. 이를 위해, 수십 년간 신뢰성을 인정받아온 상용 프로그램인 MODTRAN을 활용해 대기 투과도 데이터를 산출하고, 이를 관측된 밝기 데이터와 비교하였다.

인공위성 관측 데이터는 박명 조건에서 태양광을 반사하는 위성을 추적하여 얻어진 것으로, 관측 고각에 따라 밝기가 변화하며 이는 대기 투과도와 연관되어 있다. Fig. 1은 이러한 관측 상황의 기하학적 관계를 나타낸 개념도이다.

Fig. 1은 박명 조건에서 태양-위성-관측소 간의 기하학적 관계를 나타내며 박명 시간대에 태양광이 위성에 반사되어 관측소에 도달하는 과정을 시각적으로 보여준다. 이 과정에서 고각별 대기 경로 길이는 관측된 밝기 변화의 주요 요인이 된다.

기존 연구들은 정밀한 예측을 위해 크리깅 보간과 고차 적합 모델을 활용하여 태양 위상각과 적위각 등의 변수와 밝기 간의 관계를 분석해 왔다[1,2]. 이러한 고차 모델들은 높은 정확성을 목표로 하며, 우주 물체 식별과 추적에 필요한 기초 자료로서 유용하게 활용되어 왔다[3]. 그러나 이와 같은 접근법은 복잡한 통계적 기법을 요구하며, 대기 조건과 밝기 변화의 상

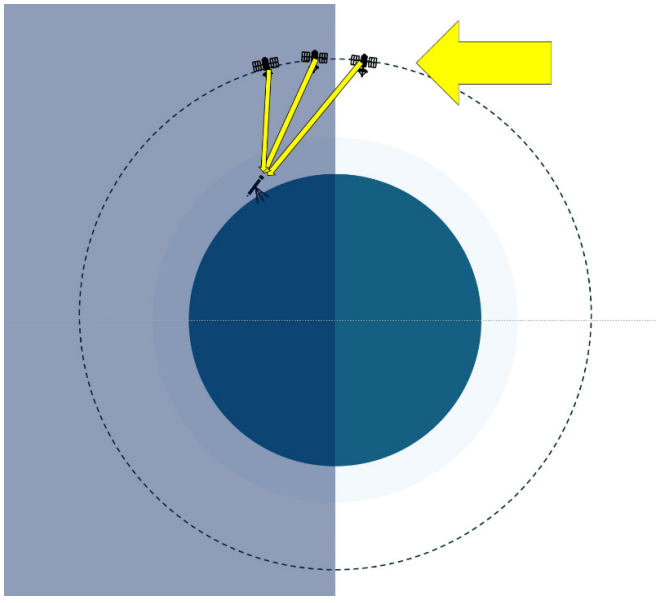

Fig. 1. Geometry of satellite observation during twilight conditions: sunlight reflection and atmospheric path variations.

관성에 대한 직접적인 분석보다는 정밀도에 초점을 맞추어 왔다. 그 밖에 대기 중 에어로졸과 수증기와 같은 요소들이 관측 데이터에 미치는 영향을 줄이는 다양한 기법들도 제안된 바 있다[4-8].

본 연구는 대기 투과도와 밝기 데이터의 상대적 상관성에 초점을 맞추어 $S(\theta)$ 함수를 도출하고 이를 해석하였다. 본 연구의 범위는 특정 위성의 반사도나 자세 변화와 같은 복합적 요인의 정밀 분석을 포함하지 않으며, 상대적 상관성을 중심으로 초기적 관계를 정립하는 데 초점을 두었다. 이러한 분석은 향후 정량적 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 MODTRAN을 활용하여 대기 투과도를 계산하는 방법과 결과를 제시하며, 제3장에서는 관측 이미지를 기반으로 밝기 데이터를 산출하는 과정을 설명한다. 제4장에서는 대기 투과도와 밝기 데이터 간의 상관관계를 모델링한 결과를 다룬다. 결론에서는 연구 결과와 향후 연구 방향을 논의한다.

2. 대기 투과도

본 연구에서 사용된 대기투과도는 MODTRAN을 이용해 모델링하여 계산하였다. MODTRAN은 미국 Spectral Science 사와 미국 공군연구소에서 개발되어 30년 넘는 기간 동안 다양한 분야에서 사용되고 있는 대표적인 대기 모델링 도구이다. MODTRAN을 통해 가시광부터 원적외선 대역에 대한 대기 투과도 및 복사 에너지를 계산할 수 있다[9].

대기 투과도 계산에 이용된 조건은 MODTRAN 계산에 필요한 입력 조건에 기반하며, 본 연구에서는 중위도 겨울 프로파일을 적용하고, 청명한 기상 상황과 구름이나 강수가 없는 맑은 날씨를 가정하였다. 위치 정보는 관측 사이트의 위, 경도(36.OO°N, 129.OO°E)와 고도(약 1,OOO m)를 적용하였다. Fig. 2와 같이 관측 위치에서 수평 방향을 고각 0도, 연직 방향을 고각 90도로 설정하여 고각 변화에 따른 대기투과도를 계산하였다.

Fig. 3에는 파장별 대기 투과도를 관측 고각에 따라 계산한 결과를 나타내었고, Fig. 4에는 관측 고각에 따라 계산한 평균 대기 투과도 결과를 나타내었다. 파장이 커질수록 대기투과도

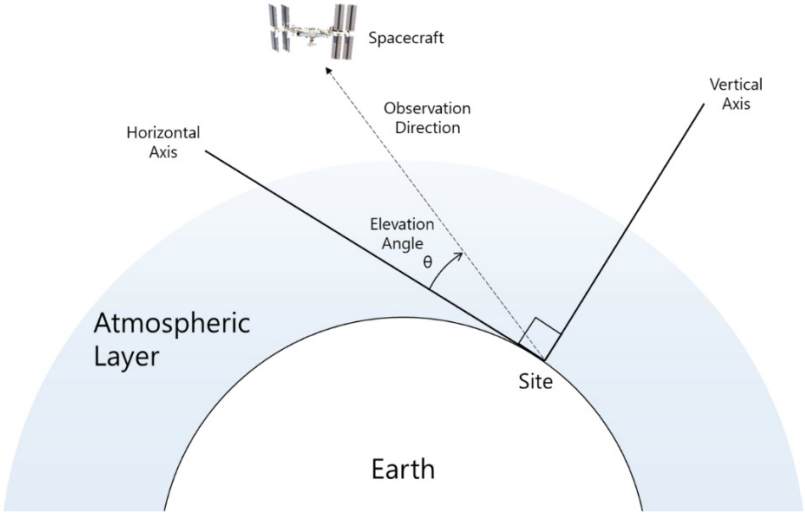

Fig. 2. Conceptual diagram of atmospheric transmittance calculation using MODTRAN.

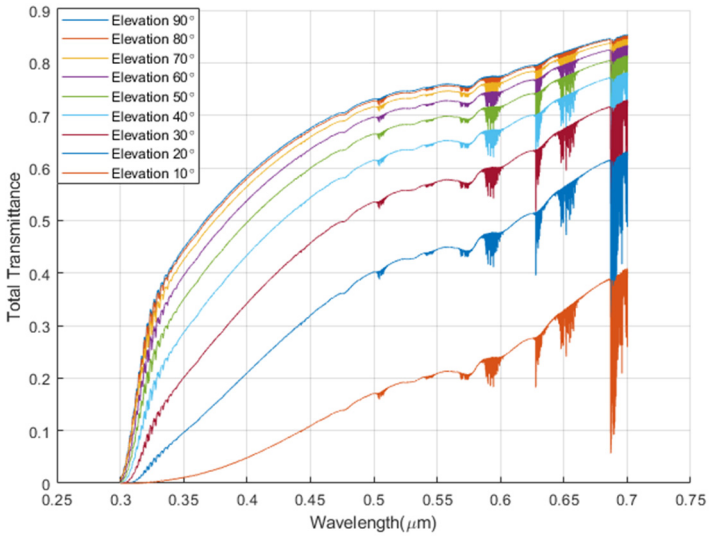

Fig. 3. Atmospheric transmittance by wavelength.

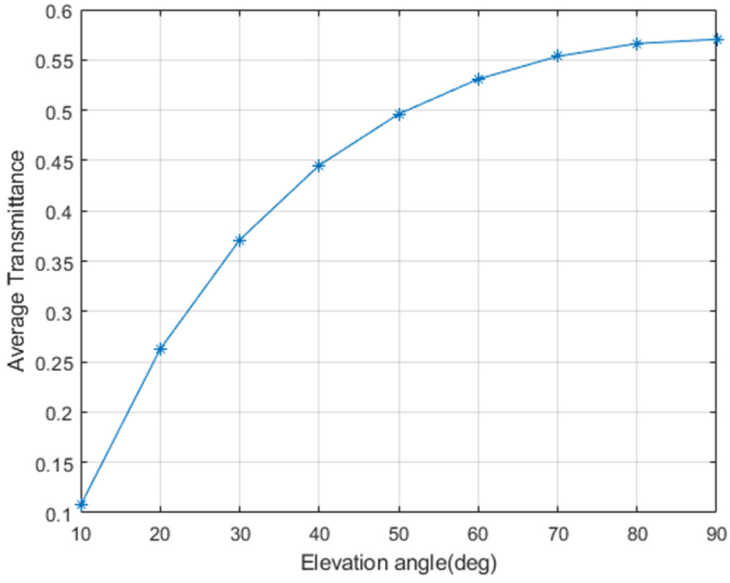

Fig. 4. Average atmospheric transmittance by wavelength.

도 증가하나 일부 파장에서는 대기투과도가 낮아지는 현상이 고각별로 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 대기 성분별 투과 특성이 반영되었기 때문으로 판단할 수 있다. 평균 대기 투과도 계산 결과를 살펴보면, 관측 고각이 증가할수록 대기투과도도 비례하여 증가함을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 관측 고각이 커질수록 대기를 투과하는 거리가 짧아짐을 알 수 있다. 대기투과도는 대기를 투과하는 거리에 반비례한 특성을 가지므로 관측 고각이 90도일 때 대기를 투과하는 거리가 가장 짧고 이에 따라 대기투과도는 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에 도시된 고각별 평균 대기 투과도에 대하여 다항 회귀 모델링을 수행하였다. 평균 밝기 관측 데이터와의 상관관계 분석을 위하여 실제 관측 범위에 해당하는 고각 범위에 대해서만 식 (1)과 같은 형태의 3차 다항식을 적용하였다.

$$T(\theta) = a_3\theta^3 + a_2\theta^2 + a_1\theta + a_0 \quad (1)$$

여기에서 $T(\theta)$는 고각 θ에서의 대기 투과도이고, a_3, a_2, a_1, a_0는 회귀 분석을 통해 산출되는 계수이다. 실제 관측 범위 내에서 얻어진 계수 값은 Table 1과 같다.

이 값을 바탕으로 MODTRAN으로 산출된 대기 투과도와 모델링 결과를 Fig. 5에 그래프로 도시하였다. 두 값 사이의 유사성을 시각적으로 확인할 수 있다.

3. 위성 관측 및 밝기 분석

위도 36.00°, 경도129.00°, 고도(약 1,000 m)의 위치한 관측 사이트에서 위성을 추적하며 촬영한 영상 이미지를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6은 촬영 이미지에서 표적 위성을 중심으로 400 × 400 픽셀 크기로 크롭한 결과이다. 대상 위성은 Cosmos 367 위성이고 노출 시간은 100 ms이다. 고각이 40도에서 70도로 증가함에 따라 표적의 밝기가 밝아지고, 위성의 겉보기 속도가 빨라져서 표적 크기도 크게 보이는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Polynomial regression coefficients for atmospheric transmittance

Coefficient	a_3	a_2	a_1	a_0
Value	1.0204×10^{-6}	-2.5192×10^{-4}	0.0217	−0.0827

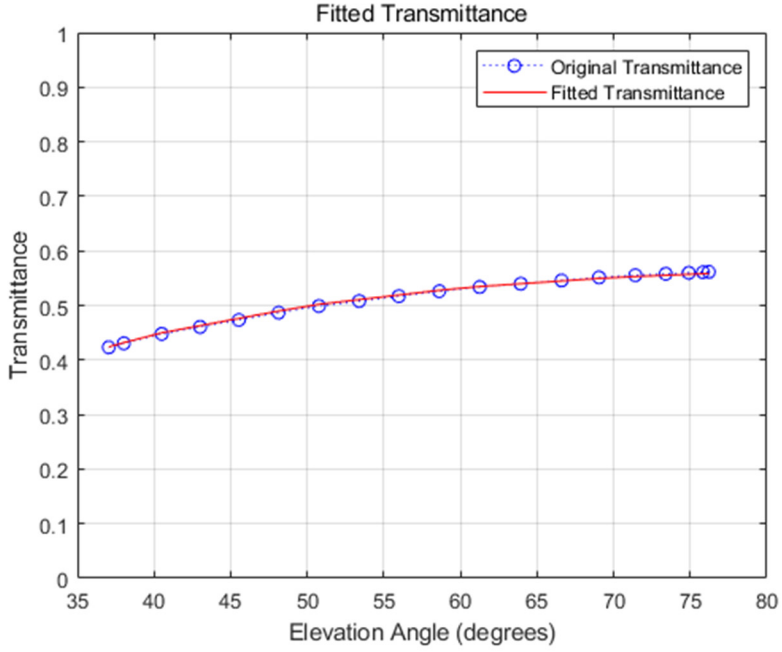

Fig. 5. Comparison of polynomial regression model with calculated values.

(a) Elevation 40° (b) Elevation 50°

(c) Elevation 60° (d) Elevation 70°

Fig. 6. Centered and enlarged view of satellite trace.

위성의 평균 밝기 계산은 식 (2)와 같이 이미지 내에서 타겟 영역의 각 픽셀의 빛 강도를 더한 후, 해당 영역의 픽셀 영역으로 나누어주는 형태로 계산한다.

$$B_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{N} I_i \times A_i}{\sum_{i=1}^{N} A_i} \quad (2)$$

식 (2)에서 I_i는 타겟 영역 내에서 각 픽셀 i의 빛의 세기 값이고, A_i는 각 픽셀의 면적, 그리고 N은 타겟을 구성하는 전체 픽셀의 수를 의미한다.

측정된 고각별 평균 밝기를 Fig. 7에 나타냈다. 고각이 높아짐에 따라 밝기도 비례하여 커지는 것을 확인할 수 있다. 측정되는 밝기는 16 bit로 표현되어 최대값 65,536을 갖는다.

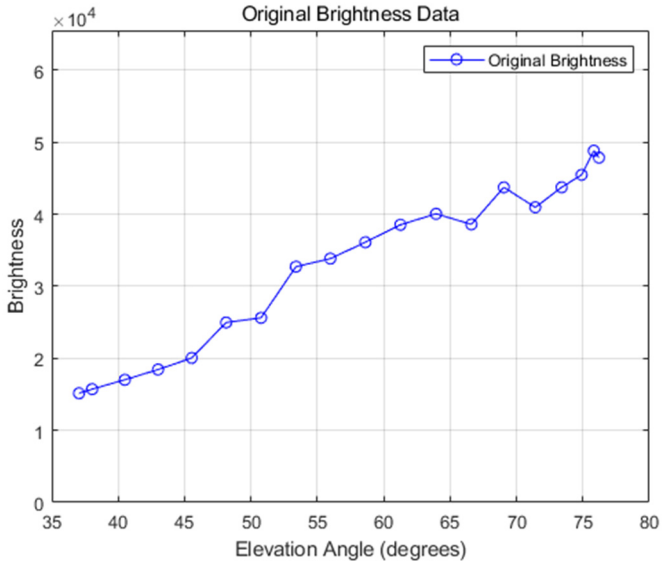

Fig. 7. Brightness intensity by elevation angle.

위성 관측에서 고각에 따라 밝기 데이터가 변동되는 특성을 파악하기 위해, 다항 회귀 기법을 적용하였다. 다항회귀 분석을 위하여 산출된 평균 밝기 값을 정규화하고, 정규화된 밝기 데이터와 고각값을 기반으로 3차 다항식을 사용하여 모델링하였다. 2장에서와 유사한 방법으로 3차의 다항식은 식 (3)와 같은 형태로 표현된다.

$$B(\theta) = b_3\theta^3 + b_2\theta^2 + b_1\theta + b_0 \tag{3}$$

식 (3)에서 $B(\theta)$는 고각 θ에서의 평균 밝기값이고, b_3, b_2, b_1, b_0는 회귀 분석을 통해 산출되는 계수이다. 실제 산출된 계수 값을 Table 2에 정리하였다.

Fig. 8은 다항 회귀 모델을 통해 도출된 밝기 데이터의 모델링 결과를 나타내며, 관측된 밝기 값과 모델링된 밝기 값 간의 유사성을 시각적으로 확인할 수 있다.

4. 상관관계 분석

고각(elevation angle)에 따른 대기 투과도와 밝기 데이터의 상관 관계를 정량적으로 파악하기 위해, 2섹션과 3섹션에서 도출된 대기 투과도(T)와 정규화된 밝기(B_{norm}) 모델링 함수를 바탕으로 밝기-투과도 상관함수 $S(\theta)$를 식 (4)과 같이 계산하였다.

$$S(\theta) = \frac{B_{norm}(\theta)}{\mathrm{T}(\theta)} \tag{4}$$

Table 2. Polynomial regression coefficients for average observed brightness

Coefficient	b_3	b_2	b_1	b_0
Value	-3.3794×10^{-6}	4.6395×10^{-4}	-0.0061	-0.0256

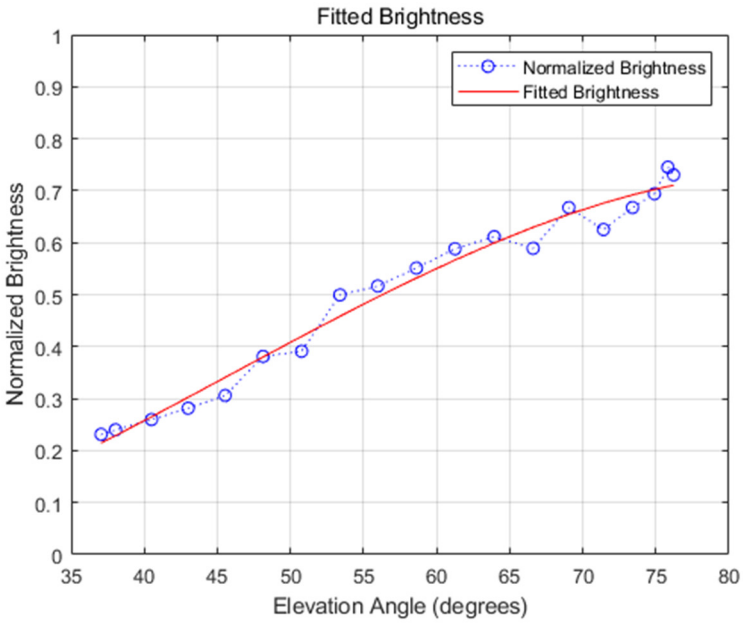

Fig. 8. Normalized brightness and polynomial regression modeling results.

Fig. 9는 고각과 $S(\theta)$ 값 간의 관계를 시각화한 그래프로, 고각별로 관측된 밝기와 대기 투과도의 상대적인 비율을 나타낸다. 파란 원은 관측된 밝기와 대기 투과도 모델링 결과를 기반으로 계산된 값이고, 빨간 괘선은 이 값을 2차 다항회귀로 모델링한 결과이다. 회귀식은 식 (5)와 같고 이 때 $R^2 = 0.98$로 높은 적합성을 보였다.

$$S(\theta) = 0.0004\theta^2 - 0.032\theta + 2.09 \tag{5}$$

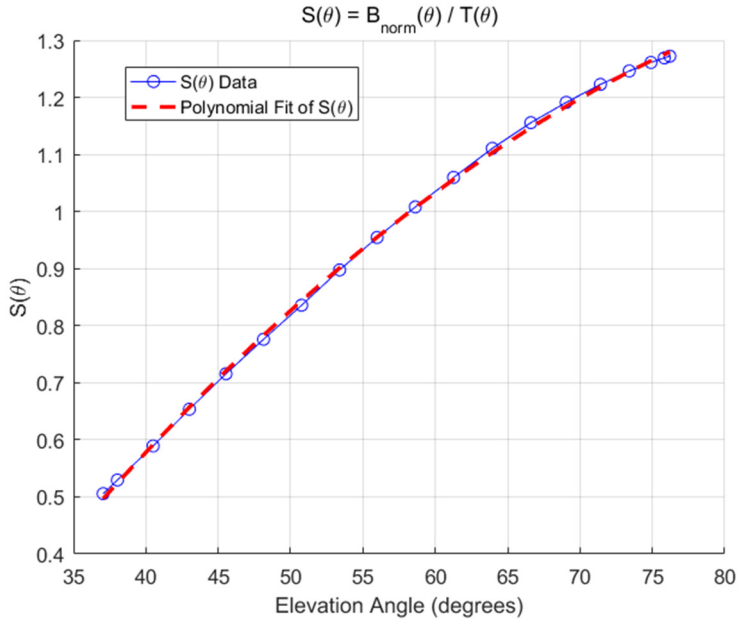

Fig. 9. Brightness-transmittance ratio function $S(\theta)$.

$S(\theta)$<1인 저고각 구간은 대기 경로가 길어지면서 대기에 의한 산란과 흡수로 인해 밝기 값이 상대적으로 더 어둡게 관측된다. 이는 대기 투과도에 비해 밝기의 감소 폭이 크다는 것을 의미한다. 고각이 증가함에 따라 약 55도-60도 구간에서 $S(\theta)$ 값이 1에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 이 구간에서는 대기 투과도와 밝기 값이 비슷한 비율로 변화하며, 관측된 밝기가 대기 영향에 대해 거의 보정된 상태라고 해석할 수 있다. 고각이 더 높아질수록 $S(\theta)$ 값은 1보다 커지고, 이는 대기 투과도에 비해 밝기가 더 빠르게 증가하는 것을 나타낸다. 고고각에서는 관측 밝기가 대기에 의한 감쇠 영향을 덜 받는다는 것을 보여준다.

$S(\theta)$ 함수를 통해 관측된 밝기 데이터를 대기 투과도의 영향을 보정하여 분석할 수 있다. 이를 통해 고각별로 대기 투과도가 밝기에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 관측 데이터의 정확도를 높일 수 있다. 특히, $S(\theta)$ 함수는 저고각에서 고고각으로의 전환 구간을 나타내는 지표로 사용될 수 있으며, 이를 통해 고각별 대기 효과 보정을 위한 기준을 마련할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 위성 관측을 통해 얻은 밝기 데이터와 MODTRAN을 통해 산출한 대기 투과도를 비교하여, 고각에 따른 밝기 변화와 대기 효과의 상관관계를 분석하였다. 이를 위해, 관측된 위성 이미지를 기반으로 평균 밝기를 산출하고, 고각별 데이터를 다항 회귀로 모델링하여 계수를 도출하였다. 또한, 대기 투과도와 밝기 데이터를 바탕으로 밝기-투과도 상관함수 $S(\theta)$를 계산하고 이를 해석하여 고각에 따른 대기 효과를 정량적으로 평가했다.

밝기-투과도 상관함수 $S(\theta)$의 분석을 통해, 저각에서는 대기 투과도가 밝기 감소에 주요한 영향을 미치며, 고각으로 갈수록 대기에 의한 감쇠 효과가 줄어드는 것을 확인하였다. 특히 고각55도-60도 구간에서 $S(\theta)$가 1에 가까운 값을 보였고, 이는 밝기 데이터가 대기 효과로부터 거의 보정된 상태임을 의미한다. 이러한 결과는 위성 밝기 관측 데이터의 정확성을 높이는 데 있어 $S(\theta)$ 함수의 유용성을 입증하며, 향후 대기 보정을 위한 기준을 제공할 수 있다.

본 연구는 $S(\theta)$ 함수를 활용하여 대기 효과와 밝기 변화 간의 상관성을 초기적으로 정립하였으나, 위성 표면의 반사도와 자세 변화와 같은 복합적 요인은 포함하지 않았다. 이는 본 연구의 한계로 남아 있으며, 향후 연구에서는 본 연구와 동일한 조건에서 추가적인 관측 데이터를 활용하여 $S(\theta)$ 함수의 신뢰성을 검증하고, 필요 시 수정을 통해 더욱 정확한 모델을 구축할 예정이다.

감사의 글

이 논문에 대하여 중요한 지적과 코멘트를 하여 주신 익명의 심사위원님들께 감사드립니다.

References

1. Hejduk MD, Lambert JV, Williams CM, Lambour RL, Improved satellite brightness estimation techniques, in Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Technical Conference, Maui, HI, 8-13 Sep 2003.

2. Okada JM, Hejduk MD, Satellite brightness estimation using kriging optimized interpolaton, in Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Technical Conference, Maui, HI, 5–9 Sep 2005.
3. Fankhauser F, Tyson JA, Askari J, Satellite optical brightness, Astron. J. 166, 59 (2023). https://doi.org/10.3847/1538-3881/ace047
4. Sun H, Wang D, Han W, Yang Y, Quantifying the impact of aerosols on geostationary satellite infrared radiance simulations: a study with Himawari-8 AHI, Remote Sens. 16, 2226 (2024). https://doi.org/10.3390/rs16122226
5. Ban S, Kim T, Development of brightness correction method for mosaicking UAV images, Korean J. Remote Sens. 37, 1071–1081 (2021). https://doi.org/10.7780/kjrs.2021.37.5.1.19
6. Zhang Y, Clothiaux EE, Stensrud DJ, Correlation structures between satellite all-sky infrared brightness temperatures and the atmospheric state at storm scales, Adv. Atmos. Sci. 39, 714–732 (2022). https://doi.org/10.1007/s00376-021-0352-3
7. Oh SN, A study on atmospheric correction in satellite imagery using an atmospheric radiation model, Atmosphere. 14, 11–22 (2004).
8. Lee KS, Atmospheric correction issues of optical imagery in land remote sensing, Korean J. Remote Sens. 35, 1299–1312 (2019). https://doi.org/10.7780/kjrs.2019.35.6.3.12
9. Berk A, Conforti P, Kennett R, Perkins T, Hawes F, et al., MODTRAN6: a major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code, in Proceedings of the SPIE 9088, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX, 90880H, Baltimore, MD, 13 Jun 2014.

Author Information

현 철 chul.hyun@gmail.com

2011년 서울대학교에서 전기컴퓨터공학부 공학박사 학위를 취득한 후, 2011년부터 엘아이지넥스원에서 수석연구원으로 근무하고 있다. 비행 제어 및 유도, 모델링/시뮬레이션을 통한 무기체계 효과도 분석을 수행 중이며, 딥러닝을 활용한 수중운동체 및 항공기 항법을 중점적으로 연구하고 있다.

김 현 승 hyunseung.kim2@lignex1.com

2016년 인하대학교에서 항공우주공학과 제어 및 유도 전공으로 석사학위를 취득한 후, 2016년부터 엘아이지넥스원에서 선임연구원으로 근무하고 있다. 비행 제어 및 유도, 모델링/시뮬레이션을 통한 무기체계 효과도 분석을 수행 중이며, 딥러닝을 활용한 제어기 설계 관련 연구를 하고 있다.

김 동 건 donggeon.kim@lignex1.com

2016년 중앙대학교에서 기계공학부 공학박사 학위를 취득한 후, 2016년부터 엘아이지넥스원에서 수석연구원으로 근무하고 있다. 광학, 적외선, 열전달 관련 모델링/시뮬레이션을 통한 전자광학감시장비 효과도 분석을 수행 중이며, Generative AI를 적용한 감시체계 성능 분석 연구를 중점적으로 수행하고 있다.

이 호 진 hojin.lee2@lignex1.com

2011년 서울대학교에서 기계항공공학부 항공우주공학과 공학박사 학위를 취득한 후, 2011년부터 엘아이지넥스원에서 수석연구원으로 근무하고 있다. 운동체의 동역학, 제어, 모델링/시뮬레이션을 통한 무기체계 효과도 분석을 수행 중이며, 인공위성의 동역학 모델 관련 연구를 중점적으로 수행하고 있다.