

인공위성 재질별 반사율 및 분광유형 측정[†]

이동규^{1†}, 김상준¹, 이준호², 한원용³, 민상웅¹

¹경희대학교 우주과학과 인공위성관측팀

²한국과학기술원 인공위성연구센터

³한국천문연구원

MEASUREMENTS OF ALBEDO AND SPECTRAL PATTERNS OF MAN-MADE SATELLITE MATERIALS[†]

D. K. Lee^{1†}, S. J. Kim¹, J. H. Lee², W. Han³, S. W. Min¹

¹KOSOF, Dept. of Astronomy & Space Science, Kyung Hee Univ., 449-701, Korea

²Satellite Technology Research Center, KAIST, 305-701, Korea

³Korea Astronomy Observatory, Daejeon, 305-350, Korea

E-mail: leedq@space.kyunghee.ac.kr

(Received October 28, 2002; Accepted November 20, 2002)

요 약

인공위성의 본체 및 탑재체 제작에 사용되고 있는 구성품 재질 12점을 수집하여 가시광 영역에서 지상 분광실험을 수행한 결과 위성체 구성품 재질별로 분광반사율과 분광유형이 뚜렷이 차이를 보였고 위성체의 재질별 분류 및 식별이 가능하였다. 인공위성 재질의 지상 분광실험 결과는 운용초기에 있는 인공위성이나 우주잔해물을 실제로 분광관측하여 얻은 자료와 비교함으로써 대상물의 재질유형 및 재질구성비, 그리고 크기와 중량을 예측하는데 활용될 수 있을 것이다.

ABSTRACT

Laboratory tests have been carried out for investigation of the spectroscopic characteristics at visible wavelength of 12 common satellite materials used in satellite bus and payload. The obtained spectral data show that the materials can be classified and identified since their spectral features and albedos distinctly differ among them. It is suggested that the result of the laboratory tests for the satellite materials can be used for the predictions of material types, material composition ratios, sizes, and masses in comparison with the spectral data obtained from observations of new satellites or space debris.

Keywords: spectroscopic observations, satellite materials, spectral albedo

[†]이 연구의 일부는 한국천문연구원 위탁과제의 도움을 받아 수행되었음

[†]corresponding author

1. 서 론

인공위성은 제작사나 임무 종류에 따라 외부구조체 형태와 탑재체의 구성이 달라질 수 있고 각 구성품들은 진공, 열, 방사선, 자력계 및 우주진 요소 등 우주환경으로부터 안전하게 보호될 수 있는 재질 또는 합금형태의 특수 코팅재질을 사용한다. 인공위성이나 우주잔해물(Space debris)과 같은 인공 우주물체를 분광관측하면 물체에 따른 재질별 신호패턴과 세기를 측정할 수 있어 재질유형 추정 및 분광패턴별 위성의 식별 및 분류가 가능하다(이동규 등 2001). 위성체의 구성품별 재질에 따른 지상 분광실험 결과로 얻어진 자료는 직접 관측을 통해 얻은 위성체의 분광관측 자료와 비교함으로써 운용 초기에 있는 인공위성의 재질 유형과 합금형태의 재질 구성비를 알아낼 수 있다. Jorgensen(1998)은 Lambert(1971)가 관측한 2기의 인공위성 분광자료를 가지고 몇 가지 인공위성 구성품별 재질 후보를 대상으로 지상 분광실험을 한 결과 인공위성의 재질 유형을 밝히는데 성공하였다. 또한, Vilas et al.(1997)과 Clark(1999)은 분광실험을 통해 얻어진 재질들의 분광선을 가지고 비례적으로 합치는 선형조합(linear combination)만으로도 관측한 인공위성의 재질 구성비를 충분히 알아 낼 수 있다고 했다. Culp & Gravseth(1996)는 일반적인 수 개의 위성체 재질을 가지고 가시영역과 근적외선 영역에서 저분산의 지상 재질분광실험을 수행하여 재질별 분광 세기와 유형을 얻어냈고 우주궤도물체의 재질식별을 위해 지상 재질실험은 유용하다고 제안한 바 있다.

장기간 우주환경에 노출된 인공위성의 경우 계속되는 부식, 마모, 열적 스트레스 현상, 그리고 우주진이나 우주물체와의 충돌 등으로 인해 위성체 부분별로 작고 새로운 우주잔해물을 지속적으로 만들어 내게 된다(Stuckey et al. 1994). 위성체 구성품별 재질의 지상 분광실험 자료를 실제 관측한 우주잔해물의 분광 자료와 비교하면 재질 파악이 가능하고, 각 구성품 마다 재질이 다소 차이가 나므로 인공위성의 어떤 부분에서 떨어져 나온 잔해물 인지를 어느 정도 파악할 수 있을 것으로 판단된다(표 1 참조). 또한, 지상 분광실험에서 얻어진 위성체의 재질별 반사율은 실제 관측을 통해 측정된 밝기를 이용하여 인공위성이나 인공위성에서 떨어져 나간 우주잔해물의 크기를 구하는데 사용될 수 있다. 이를 위해서는 대상물의 분광관측을 통한 재질의 유형 파악이 우선되어야 하고 재질의 유형에 따른 반사율과 크기를 바탕으로 대상물의 중량을 구할 수도 있다(Lambert et al. 1993, Culp et al. 2000).

운용 초기에 있는 인공위성이나 인공위성에서 떨어져 나간지 얼마 되지 않은 우주잔해물의 경우는 지상 분광실험 결과와의 비교분석이 유용하다고 판단된다. 최근에는 NASA의 LDEF(Long Duration Exposure Facility), EOIM(Effects of Oxygen Interaction with Materials), Skylab, SPACELAB, Magellan Spacecraft 임무 등을 통하여 장기간 우주환경에 노출된 상태에서의 위성체 재질의 변화특성을 알아보기 위한 연구가 수행되고 있다(e.g., Stuckey et al. 1994). 위성체의 재질실험과 관련하여 인공위성의 반사 광원인 태양 빛을 직접 입사광원으로 이용한 실험결과는 아직까지 없고 재질 샘플의 종류도 제한적이었다.

이 논문은 위성본체 및 탑재체 제작에 현재 사용되고 있는 일반적인 구성품 재질 12점을 수집하여 지상 재질 분광실험을 수행한 결과이다. 재질의 입사광원으로 태양 빛을 직접 이용하였고 기존에 연구된 적이 없는 재질샘플 8점을 포함하여 구성품 재질별 분광반사율과 분광유형을 소개하였다.

표 1. 지상 분광실험을 통하여 측정된 인공위성의 구성 재질별 분광반사율.

인공위성 구성재질	재질 주요 용도	반사율	Culp* 자료
Aluminum 6061	Bus, Payload, Antenna(dish type)	0.679	Aluminum
Aluminum 7071	Bus, Payload, Antenna(dish type)	0.694	0.754
Copper 1100	Antenna(patch array type), Bus, Payload	0.359	
Copper 1201	Antenna(patch array type), Bus, Payload	0.344	
SiO ₂	Solar cell array, Camera coating	0.543	
Steel(18Cr-8Ni강)	Bus, Payload	0.121	
Mylar	Insulator	0.353	
Kevlar	Frame, Connecting Materials		0.679
Teflon	Insulator, Connecting Materials	0.546	
Kapton	Insulator, Coating	0.525	0.940
VDA	Insulator, Coating	0.579	0.810
Carbon epoxy	Coating		0.301
Titanium carbide	Bus, Payload	0.244	
MLI 501	Insulator, Coating		0.557
Zinc(용융아연도금)	Camera coating	0.351	

*Culp & Gravseth(1996)

2. 분광실험 장치 및 절차

인공위성을 구성하고 있는 구성품들의 재질별 지상 분광실험은 그림 1과 같이 외부에서 임의의 빛이 들어오지 못하도록 암실에서 청명한 날씨에 낮 시간동안 행해졌다. 그림 1의 (가)는 입사광원의 세기(I_λ)를 측정하기 위한 장치이고 그림 1의 (나)는 입사광원인 태양 빛이 위성 재질샘플에 반사된 후, 위상각 크기별 반사광의 세기(R_λ)를 측정하기 위한 장치이다. 입사광원으로는 태양 빛을 이용하였고 태양추적기(Heliostat)를 사용하여 매 실험시 일정한 입사 광량과 방향이 유지되도록 하여 지상분광실험의 전반적인 환경을 실제 야간의 인공위성 분광관측시와 동일하게 적용하였다. 균일하고 평행한 광선(collimated light beam)이 재질 내로 정확히 입사될 수 있도록 하기 위해 6인치 뉴턴식 반사망원경의 아이피스 부분으로 태양 빛을 들어오게 하여 부경에 반사된 후 주경에서 나온 광선 일부가 재질이 위치한 암실로 들어오게 하였다. 측정할 재질에 반사되는 입사광량을 조절하기 위해 망원경의 구경 앞부분을 3cm 정도만 남기고 가린 후, 재질크기에 따라 광량을 조절하였고 재질샘플 밖으로의 광량 손실이 없도록 하였다. 수집된 재질 샘플들은 10cm 크기로 절단한 후, 알코올로 표면 오염물질을 닦아낸 후 테이블 위에 고정하였다. 각도를 사용하여 위상각을 일정하게 변화시키면서 재질별로 분광실험을 수행하여 분광유형 및 분광반사율(spectral albedo)을 측정하였다. 재질별로 입사각에 따른 샘플위치, 위상각 변화, 관측과장영역 등 관측조건을 모두 일치 시켰다. 매 측정시 광원이 정확히 재질내로 도달할 수 있도록 위치정렬을 한 후, 재질마다 표면상태가 불균일하기 때문에 위상각을 10도씩 변화시키면서 재질별로 8번씩 입사광과 반사광 세기를 측정하여 각각의 분광유형과 평균 분광유형을 구하였다. 매 실험마다 반사광 세기를 측정하기 직전과 직후에 입사광의 세기를 다시 측정하였다. 재질별 평균 분광특성으로부터 총 관측과장영역에 대한 파장별 반사율의 평균값을 구하여 재질별 반사율 값을 결정하였다. 각 재질별 반사율(A_λ)을 구하는 공식은 $A_\lambda = \frac{R_\lambda}{I_\lambda}$ 이다. 여기서, I_λ 는 입사광원의 세기이고 R_λ 는 입사광이 위성 재질샘플에 반사된 반사광원의 세기를 나타

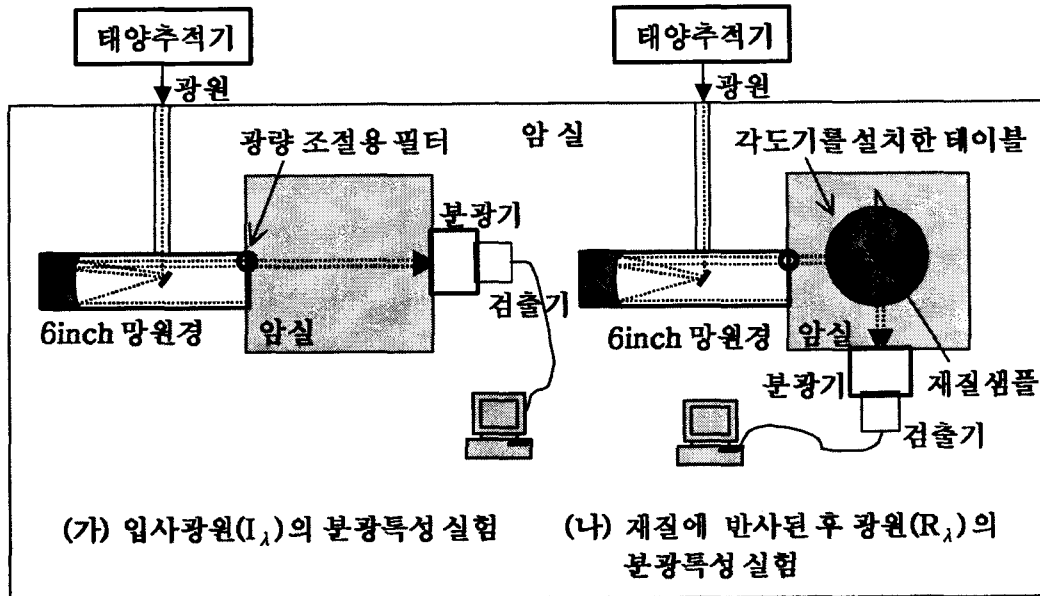


그림 1. 인공위성 재질별 분광반사율과 분광특성을 측정하기 위한 분광 실험장치.

낸다.

입사광과 반사광의 세기를 측정하기 위해 5500Å에서 70%, 4000Å 및 7000Å 영역에서 30%의 양자효율을 갖는 ST-7E Imaging CCD 카메라와 Santa Barbara Instrument Group(SBIG)의 모델인 SBIG 분광기를 사용하였다. 과장 분해능은 150 lines/mm grating을 사용하여 5000Å에서 38Å이며 관측 과장범위는 약 3900Å에서 7200Å까지의 가시광 영역이었다. 노출시간은 재질별 반사광량에 따라 5초에서 20초 사이로 적용하였고 입사광과 반사광의 측정 노출시간을 재질별로 동일하게 적용하였다. 분광 소프트웨어로는 CCDSoft(Software Bisque image processing program, Version 5.0), Spectra(SBIG Spectral Calibration Program, Version 1.0)를 사용하였다.

3. 재질별 반사율과 분광유형 측정결과 및 분석

인공위성은 제작사 및 운용국가별, 임무별로 위성체의 형태나 구성 재질, 색깔, 그리고 표면코팅 등이 달라질 수 있고 위성본체와 탑재체내 구성품에 따라서도 여러 가지 재질이 사용된다. 지상 분광실험 결과 재질별로 분광 유형과 반사율은 상호간 차이를 보여 식별 및 분류가 가능하였다. 표 1은 위성체 구성품 중 제작에 실제로 사용되었던 재질의 샘플 6 종류(Al 6061, Al 7071, Mylar, Teflon, Kapton, VDA)와 시중에서 구입한 위성체 제작에 사용되는 것과 유사한 6 종류의 재질 샘플을 가지고 재질별 용도 조사와 분광반사를 실험값을 나타낸 것이다. 그림 2는 수집한 재질을 가지고 지상분광실험을 수행한 결과로 얻어진 재질별 분광패턴을 나타내고 있다. 재질별로 위상각을 10도씩 변화시켜 각각 8회의 분광실험을 하였고 입사광원인 태양 빛으로 나누어 준 후의 재질별 총 평균 분광곡

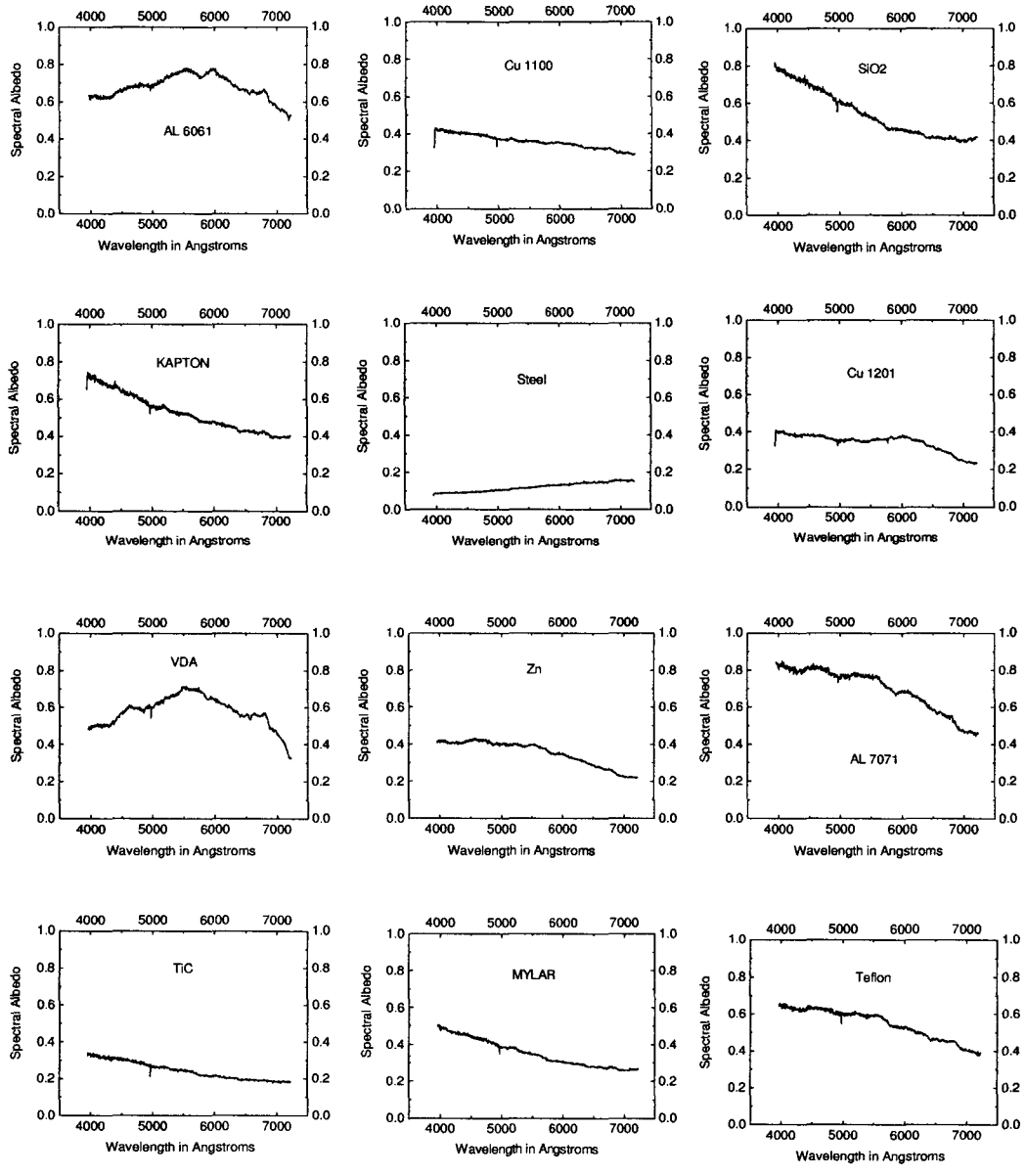


그림 2. 지상분광실험 결과로 얻어진 인공위성 구성 재질별 분광유형 비교.

선을 보여 주고 있다. 표 1에 나타난 반사율은 그림 2에서 나타난 재질별 관측파장에 따른 분광 반사율 그래프로부터 구한 재질별 평균반사율이다.

그림 2에서와 같이 지상 실험결과 얻어진 인공위성의 구성 재질별 분광유형 비교에서는 Aluminum 계열과 Steel의 경우 종전에 Culp et. al.(2000)이 수행한 실험자료와 일치함을 확인할 수 있었다. 전반적으로 재질별 분광곡선의 패턴과 흡수선 형태가 서로 차이가 나므로 상호간 분광유형 식별 및 분류가 가능하였고, 분광유형이 비슷한 TiC, Mylar, Cu 1100의 경우에는 전 파장영역에서의 분광곡선 기울기(slope and dip)와 peak가 차이를 보였다. Steel의 경우 일반탄소강이 아닌 Stainless steel을 사용하였으나 얇은 Cr_2O_3 피막이 파괴되어 표면에 산화과정이 진행됨으로써 반사율이 낮은 것으로 판단된다. Zinc의 경우 철강재에 아연을 합금시킨 응용 아연도금 재질을 사용한 결과이다.

재질별 평균 반사율 측정값은 표 1에서와 같이 전반적으로 상이하게 측정되었다. 인공위성에 입사된 태양 빛 일부는 재질에 흡수되므로 반사광의 세기가 약해지게 되고 흡수된 빛은 열에너지가 되어 재질을 데우며 결국 적외선이 되어 방출된다. 따라서 일정한 입사 광량 조건시 재질 종류에 따라 흡수되는 광량에 차이가 있으므로 반사 광량에도 상호간 차이가 발생한다. 재질별 반사율 실험값은 파장영역이 $3900 \sim 7200\text{\AA}$ 에 이르는 짧은 가시광 영역에 제한된 값으로 같은 재질의 경우에도 재질의 순도, 표면처리 상태, 색깔 등에 따라 반사율에 영향을 미치게 된다. 같은 Aluminum 계열이나 Copper 계열의 경우 순도에 따라 반사율에 차이를 보였고 Steel의 경우는 구입한 재질의 피막처리 색깔이 어두워 반사율이 낮게 측정된 것으로 판단된다. 태양전지판의 구성재질로 사용되는 SiO_2 재질의 경우 태양전지판 외부에 보호용 유리판(glass plate)이 있으나 태양 빛에 대한 반사 방지 코팅(anti-reflective coating)이 되어 있어 그다지 반사율이 높지 않았다고 판단된다. 또한, 지상실험시 결정되는 측정 파장영역에 따라 재질별 평균반사율은 달라질 수 있다. Culp & Gravseth(1996)는 $5000 \sim 9000\text{\AA}$ 의 파장영역에서 재질실험을 수행하여 표 1과 같은 실험값을 제시하였기 때문에 본 실험 결과와는 차이가 있을 수 있다.

인공위성을 실제로 관측할 때 측정되는 반사율은 위성체를 구성하고 있는 외부 구성품들의 재질 종류에 대한 총 반사율 값이 나타나게 되고 대상물의 형태, 크기, 임무고도, 외부도장 색깔, 표면처리 상태, 재질 조합비, 관측자 위치 및 관측되어지는 위성체 부분과 관측지의 seeing에 따라 차이가 있다. 레이더를 이용하여 인공위성의 RCS(Radar Cross Section) 면적으로부터 인공위성의 크기를 결정한 후 인공위성 구성품 전체의 반사율을 구할 수 있고 이 관측값으로 얻어진 대부분 인공위성의 평균 반사율은 0.1로 알려져 있다(Henize et al. 1994). 적외선 영역과 가시광 영역을 동시에 관측하여 반사율 값을 측정할 수도 있다. 반사율이 높은 재질의 경우 대다수의 햇빛이 반사되고 단지 적은 양의 햇빛 에너지만 인공위성에 흡수되므로 적외선 영역의 방출량이 가시광선 영역에 비해 상대적으로 적게 되고 반사율이 낮은 재질의 경우는 반대의 경우가 된다. 이것을 이용하여 Lambert et al.(1993)가 측정된 20기 인공위성들의 평균 반사율은 0.14였다.

4. 결론 및 토의

위성체를 구성하고 있는 각 부분품별로 재질이 표 1과 같이 어느 정도 상이하고 실험결과에서 보듯이 각 재질에 따른 분광패턴이 상호간 뚜렷이 구별이 되므로 이를 활용하여 실제 관측한 인공위성이나 우주잔해물의 재질 식별이 가능하리라 판단된다. 관측한 대상물이 합금형태의 재질로 예상될

경우 지상실험을 통해 얻은 분광선들의 선형조합(linear combination) 등을 통해 어느 정도 재질의 구성비를 파악할 수 있을 것으로 본다. 또한, 인공위성에서 떨어져 나간 우주잔해물의 경우 지상 재질실험 자료와 실제 관측자료를 비교하여 재질 유형이 파악되면 위성체 내에서 그 재질의 용도를 알 수 있어 인공위성의 어느 부분에서 떨어져 나갔는지를 어느 정도는 알아 낼 수 있으리라 본다. 그리고 재질이 파악된 우주잔해물은 지상 분광실험에서 얻은 재질별 분광반사율 자료와 함께 인공위성을 직접 측광관측하여 얻은 밝기를 이용하여 우주물체의 크기와 중량을 계산할 수도 있을 것이다.

재질별 분광유형 식별은 분광패턴이 유사할 경우 기울기만 가지고 분류가 어려우므로 향후 고분산과 넓은 파장영역을 커버할 수 있는 지상 분광실험이 수행되어야 할 것이다. 본 지상실험 자료는 운용 초기에 있는 인공위성이나 생긴지 얼마 되지 않은 우주잔해물의 분광 관측 자료와 비교 분석 시 유용하다. 위성체나 우주잔해물의 표면은 우주환경에 장기간 노출되면 오염물질의 퇴적화, 재질의 산화반응, 표면 화학물질의 양적변화 등이 나타나게 되고 임무와 관련한 기계적 작동이나 기동시 재질의 부식이나 마모 현상이 초래되어 초기 제작시의 재질특성과 많은 차이를 보이게 된다. 또한, 우주물체의 표면특성을 변화시키는 주 오염원으로는 우주물체 상호간의 충돌, 연료의 누설, 운용중의 고체 로켓의 분사 등을 통해 생성되는 Al, Mg, Si, Cl, NH₃ 등이 알려져 있다(Green 1992). 따라서 장기간 우주환경에 노출되어 있는 우주잔해물이나 인공위성과 같은 인공우주물체의 가장 이상적인 재질특성 식별은 우주환경에서 장기간 수행된 우주실험실 재질연구 자료와 지상에서 관측시스템을 통해 얻어진 분광관측 자료를 상호 비교 분석하는 것이 보다 효과적인 방법일 것이다. 인공위성의 디자인뿐만 아니라 신소재 개발에 따른 위성체 구성품들의 재질은 향후 지속적인 변화가 예상되므로 인공우주물체의 보다 명확한 식별 및 분류를 위해서는 더 많은 위성체 재질의 지상 분광실험을 수행하여 이들 자료를 이용한 데이터베이스 구축이 필요할 것으로 본다.

감사의 글: 이 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 일부 지원을 받아 수행된 것임을 밝힙니다.

참고문헌

- 이동규, 김상준, 한원용, 박준성, 민상웅 2001, 한국우주과학회지, 18, 101
- Clark, R. 1999, *Manual of Remote Sensing* (New York: Wiley & Sons), 12
- Culp, D. R., & Gravseth, I. J. 1996, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 33, 262
- Culp, D. R., Jorgensen, K., Gravseth, I. J., & Lambert, J. V. 2000, *Space Debris 1* (Boulder: Univ. Colorado Press), 113
- Green, B. D. 1992, *SPIE*, 1754, 103
- Henize, K. G., O'Neill, C. A., Mulrooney, M. K., & Anz-Meador, P. 1994, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 11, 671
- Jorgensen, K. 1998, *Technical Report, SD-09.98-01KJ* (Colorado: CU Boulder Pub.)
- Lambert, J. V. 1971, *Masters Thesis, Air Force Institute of Technology*
- Lambert, J. V., Osteen, T. J., & Kraszewski, W. A. 1993, *SPIE*, 1951, 32
- Stuckey, W. K., Hemminger, C. S., Steckel, G. L., Hills, M. M., & Hilton, M. R. 1994, *Aerospace report No. TR-94(4935)-1, SMC-TR-94-41* (California: AFMC)

Vilas, F., Jensen, E. A., & McFadden, L. A. 1997, *Icarus*, 129, 440