

인공위성의 오염 측정, 분석 및 관리

이상훈*, 홍석종**, 조혁진***, 서희준****, 문귀원*****

Contamination measurement, Analysis & Control for Satellite

Sang-Hoon Lee*, Seok-Jong Hong**, Hyokjin Cho***, Hee-Jun Seo****, Guee-Won Moon*****

Abstract

It is necessary to be careful about contamination control to minimize the accumulation of the contamination material on satellite surface during the I&T phase. In the space environment which characterized by high vacuum, high and very low temperature, contamination material causes satellite to lose its own performance. Especially, contamination material can accumulate on critical surfaces such as lenses, mirrors, and sensors. KARI(Korea Aerospace Research Institute) conducts the clean room to control and minimize the contamination effect. This paper introduces the principle of contamination and the method of measure and analysis for the contamination.

초 록

우주환경에서 임무를 수행하는 인공위성의 경우, 조립, 시험, 운용시점까지 위성 표면에 흡착되는 오염물질을 최소화하기 위하여 전 기간 동안 세심한 주의를 기울여야 한다. 위성 표면에 흡착된 미세한 오염물질은, 고진공 및 고온, 극저온이 반복되는 가혹한 우주환경 속에서 위성의 성능저하 및 효율의 손실을 가져올 수 있다. 예를 들어 위성 표면에 떨어진 입자오염은 별 추적장치의 오류를 발생시킴에 따른 위성 자세제어의 실패를 가져올 수도 있고, 표면에 흡착된 분자오염은 렌즈, 미러, 윈도우 등의 광학기기 및 주요 민감 표면에 작용하여 광학적 특성과 열제어 성능의 저하를 가져올 수 있다. 위성의 조립 및 시험을 관장하는 한국항공우주연구원에서는 위성의 오염물질에 대한 노출을 최소화하기 위해, 오염 측정이 이루어지는 청정실을 운영하고 있는데, 본 논문에서는 청정실 및 진공챔버 내의 부유입자측정, 표면입자오염측정, 표면분자오염측정법을 소개하고 오염측정 결과에 대한 분석을 수행하였다.

키워드 : contamination control, Cleanliness, particle counter, PFO, IR-spectrometer, witness plate

접수일(2010년 1월 18일), 수정일(1차 : 2010년 4월 9일, 2차 : 2010년 6월 18일, 게재 확정일 : 2010년 10월 1일)

*우주환경시험팀/leesh@kari.re.kr **우주환경시험팀 goodh729@kari.re.kr ***우주환경시험팀/wittycho@kari.re.kr

****우주환경시험팀/seohj@kari.re.kr ***** 우주환경시험팀/aeromoon@kari.re.kr

1. 서 론

진공이란 공간의 기체압력이 대기압보다 낮은 상태, 즉 분자밀도가 약 2.5×10^{19} 분자/cm³보다 적은 상태를 의미하며, 극청정 환경 제공, 단열효과, 입자의 장거리 비행가능, 증발과 승화작용, 안정된 플라즈마를 유지, 생화학 반응 억제, 우주 환경 제공 등의 특성으로 인해 오늘날 전 산업분야 및 과학기술 분야에 응용이 되고 있다[1, 2].

위성체가 궤도에서 임무를 무사히 수행하기 위해서는 지상에서 이루어지는 조립 및 환경시험시에 오염물질로부터 보호하는 것이 매우 중요하다. 오염된 위성체 부품의 작동시 발생 할 수 있는 탈기체현상(outgassing)으로 인해 위성체가 이차오염되어 위성체의 성능이 저하될 수 있으며, 특히 이차면경 및 광학렌즈 등을 오염시킴으로써 위성체 본연의 임무수행 실패라는 결과를 초래할 수도 있다[1]. 이에 위성의 조립 및 시험을 관장하는 한국항공우주연구원에서는 오염물질에 대한 노출을 최소화하기 위해, 청정도 10,000 class 이하의 청정실을 운영하고 있는데, 본 논문에서는 오염관리를 위한 청정실 및 진공챔버 내의 오염 측정법을 소개하고 오염측정 결과에 대한 분석을 수행하였다.



Figure 1 Contamination measurement

2. 오염물질에 따른 측정법

오염물질은 첫째 공기 중에 부유중인 미세 먼지의 양을 측정하는 방법, 둘째 표면에 떨어진 미세 먼지의 양을 측정하는 방법, 셋째 분자오염물질의 양을 측정하는 방법, 이렇게 세 가지 측정법에 의해 측정 된다.

2.1 부유 입자오염 물질 (Airborne Particulate Contamination)

입자오염 물질은 인공위성의 조립 및 환경 시험을 수행하는 과정에서 작업자 신체로부터 발생된 각질, 의류에서 떨어져 나온 섬유조각, 기계 표면의 부스러기 혹은 부식되어 발생된 먼지, 용접 혹은 구멍 뚫기 작업 등에 의해 주로 발생한다. 이런 공기 중에 부유 중인 입자오염 물질들은 파티클 카운터(Particle Counter)를 이용해 그 양을 측정하게 되는데 현재 운용중인 파티클 카운터에는 레이저 측정장비를 이용한 광산란식 측정법이 적용된다. Fig. 2에서와 같이 펌프에 의해 측정하고자 하는 장소의 대기가 흡입 될 때,관을 따라 이동하는 먼지가 레이저 다이오드 앞을 지나게 되면 먼지에 의해 산란 된 광량 및 산란 횟수에 의해 입자오염 물질의 크기와 개수가 측정된다. Fig. 3은 운용중인 파티클 카운터의 사진이다.

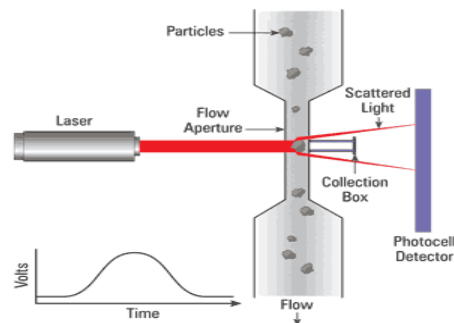


Figure 2 Principle of particle counter



Figure 3 Particle Counter(MetOne 273B)

일반적인 청정실은 ECSS-Q-70-01A 에 의거하여 1 CFM(Cubic Feet per Minute)당 $0.5 \mu\text{m}$ 입자의 개수(Clean Class)가 10,000 이하로 유지 되어야 한다.[3]

2.2 표면에 떨어진 입자오염 물질 (Particulate Contamination)

부유하던 입자오염 물질들이 시간이 지남에 따라 표면에 가라앉게 되는데 인공위성의 표면에 떨어진 입자 물질은 별 추적 센서나 기타 민감부위에서 작용하여 인공위성의 임무수행에 차질을 빚게 된다. 이런 표면에 떨어진 입자오염 물질의 양을 측정하기 위해서 PFO(Particle Fall Out) 광도계(Photometer)를 사용하게 된다. 먼저 Fig. 4와 같은 채취용 판(Sample Plate)을 측정을 원하는 장소에 놓고 무반사 유리(Nonreflecting glass) 부분을 노출 시켜 설치한다. 일정 기간 동안 측정이 완료되면 수거하여 Fig. 5와 같은 PFO 광도계인 Mark 3 장비에 넣게 되면, Fig. 4의 무반사 유리 중심에 위치한 지름 15 mm의 원(2)부분에 안정된 빛을 수평하게 비추어 표면에 흡착된 입자오염 물질에 의한 빛의 산란을 측정하는 방식으로 오염을 측정 하게 된다.

청정도 10,000 class로 유지되는 청정실의 경우 ESA PSS-01-204 기준문서에 의거하여 52 ppm/day 이하로 유지 되어야 하며[4], 이에 대한 관리를 위해 위성시험동 청정실에서는 매 2주마다 표면에 떨어진 입자오염 물질의 오염도를 측정한다.

2.3 분자오염 물질(Molecular Contamination)

분자오염 물질은 위성의 광학기기 및 주요 민감 표면에 흡착되는 경우 성능에 직접적인 영향을 주어 기능 저하와 효율의 감소를 가져올 수 있다. 이런 분자오염 물질은 주로 고분자 화합물, 가소성 물질 등에서 탈기체 되는 유기체, 위성 시험 설비에 사용 되는 오일류의 증기 등에서 발생하는데, 이런 분자오염 물질의 측정에는 적외선 분광기(IR Spectrometer)를 사용하게 된다. 한국항공우주연구원에서 적용하고 있는 측정 및 분석 과정은 다음과 같다.

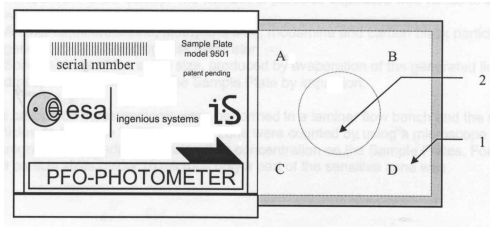


Figure 4 Sample plate



Figure 5 PFO-Photometer : Mark 3

분자오염 물질 측정을 위해 스테인레스로 제작된 흡착판(Witness Plate)을 Fig. 6과 같이 측정을 하고자 하는 장소에 노출 시킨다. 측정 기간이 종료되면 흡착판을 수거하여 Fig. 7과 같이 Plate 표면에 흡착 된 분자오염 물질을 용매로 사용되는 클로로포름(Chloroform)을 흘려서 준비해 놓은 오염되지 않은 샬레에 담는다. 클로로포름을 서서히 증발시켜 오염 물질의 농도를 높인 후 적외선 분광기의 윈도우(NaCL)를 꺼내어 Fig. 8과 같이 유리 막대를 이용해 오염 물질을 적외선 빔이 투과되는 윈도우의 중앙 위치에 여러 번 찍어가며 흡착판의 모든 오염 물질이 윈도우에 옮겨질 수 있도록 한다. 클로로포름이 충분히 증발된 윈도우를 Fig. 9의 적외선 분광기에 넣고 측정을 시작하면 방출된 적외선 빔의 일부가 흡착된 물질에 의해 흡수가 되고 나머지는 측정기(detector)에 도달하여 분석이 이루어진다.[5] 각 물질을 구성하는 화학적 결합은 고유의 특정 주파수 흡수 영역을 가지고 있어서, 측정 및 분석

된 적외선 흡수율을 통해 해당물질을 구성하는 화학적 결합의 종류와 그 양을 측정 할 수 있다. 위성 및 위성관련 부품의 경우, 총 4가지의 물질에 대해 측정을 수행하고 있으며, 탄화수소(hydrocarbon) 계열, 에스터(ester) 계열, 메틸기 실리콘(methyl silicon) 계열, 페닐기 실리콘(phenyl silicon) 계열의 물질이 이에 해당한다.

일반적인 청정실은 ECSS-Q-70-01A에 의거하여 $0.5 \times 10^{-7} \text{g/cm}^2/\text{week}$ 이하로 유지 되어야 하며[3] 항공우주연구원 내 청정실에서는 매 4주마다 분자오염 물질의 오염도를 측정하여 요구 조건에 부합하는지 분석한다.

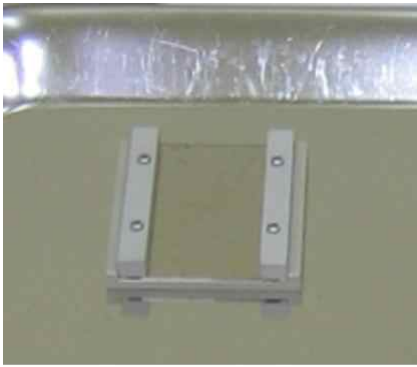


Figure 6 Witness Plate (SUS)



Figure 7 Capturing of contamination



Figure 8 moving contamination

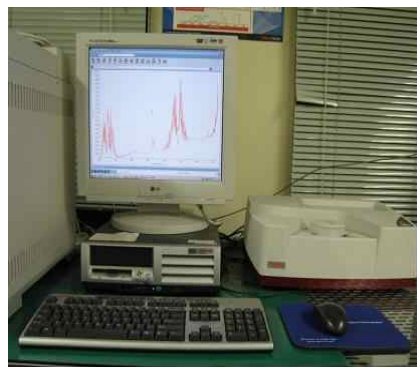


Figure 9 IR-Spectrometer

3. 오염 측정 및 결과 분석

오염 측정은 일반적인 청정실 뿐만 아니라, 위성의 궤도환경을 모사하는 열진공챔버 내에서의 위성에 대한 시험 시에도 적용된다.

3.1 청정실 내의 부유입자

한국항공우주연구원 내 위성의 조립 및 시험이 이루어지는 공간에 대해서는 오염물질에 대한 노출을 최소화하기 위해, 청정도 10,000 class 이하의 청정실을 운용하고 있다.

청정실에 대한 청정도 측정은 파티클 카운터에 의해 이루어지고 있으며, Fig. 1과 같이 청정실 내에 설치되어 매 30분 단위로 24시간 지속적으로 측정을 수행한다.

특히, 위성 비행모델의 조립이 이루어지는 경

우와 같이 중요한 시점의 경우, 청정도는 사내 네트워크를 이용하여 시설팀의 중앙모니터링 장치로 실시간 경보를 제공하도록 하여 관리하고 있다. Fig. 10은 2009년 수행된 정지궤도 위성의 조립 및 시험 기간 동안 청정실의 청정도(온도, 습도 포함) 측정 결과를 보여주는데, 근무시간을 기준으로 1,000 class 이하의 청정도를 유지하고 있음을 볼 수 있다.

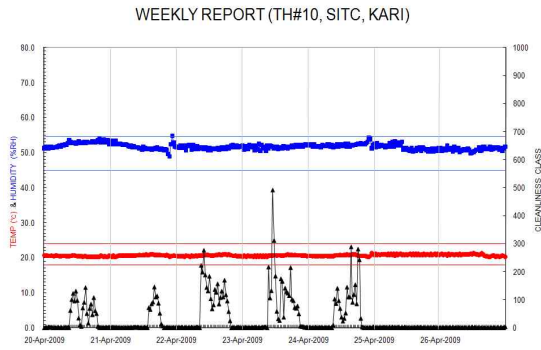


Figure 10 Measurement result for Particle counter

3.2 청정실 내 입자 및 분자오염

위성 비행모델의 조립이 이루어지는 경우에는 파티클 카운터 외에 PFO와 흡착판 이용하여 입자 및 분자오염도 측정을 수행한다. Fig. 11은 위성시험동 내 조립실에 설치된 오염측정장치 가운데 입자오염을 측정하기 위한 PFO와 분자오염 측정을 위한 흡착판을 보여준다.



Figure 11 PFO & witness plate

PFO는 2주 간격으로 수거 후 포획된 분자량을 측정하였으며, 흡착판은 한 달 간격으로 분석

을 수행하였다. 분석 결과는 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Result of molecular contamination

Location	Period	Result (g/cm ²)
TH#3 Integration Hall	2007. 8. 31 ~ 9. 28 (4 weeks)	1.38 × 10 ⁻⁷

Table 2 Result of particle fallout

Location	Period	Result	
		ppm	ppm/day
TH#3 Integration Hall	2007. 8. 31 ~ 9. 14	695	49
	2007. 9.14 ~ 9. 28	656	47

위 두 결과는 항공우주연구원 내 조립 및 시험 공간이 ECSS-Q-70-01A : Cleanliness and Contamination Control의 규격에 잘 부합되도록 관리되고 있음을 보여준다.

3.3 열진공챔버 내부의 분자오염

한국항공우주연구원에서는 차세대 정지궤도위성의 열진공시험을 앞두고 시험조건 충족 여부를 확인하기 위해 위성을 제외한 모든 지상지원장비 및 열진공챔버의 작동을 시험하는 예비시험을 2회 수행하였으며, 이때에 위성이 위치하게 될 주위에서의 오염 측정을 동시에 수행 하였다. 예비시험의 진행기간은 Table 3과 같다.

Table 3 Blank test schedule

	Start	End
1st	2009년 7월 13일	2009년 7월 20일
2nd	2009년 8월 04일	2009년 8월 11일

2회에 걸친 예비시험 동안의 오염 측정을 위해 대형열진공챔버 내부에 Fig. 11과 같이 총 4개의 흡착판을 설치하였으며, 적외선 분광기를 이용한 분석을 통해서 나온 각 흡착판의 스펙트럼은 Fig. 12 및 Fig. 13과 같다.

스펙트럼 분석을 통해 오염물질의 정량을 분석하여 Table 4와 5에 각각 나타내었다. Table 4에서 보는 바와 같이 1차 예비시험에서는 열진공챔버 내부에서 발생하는 오염 물질을 흡착하는 오염흡착판(cold plate, #01) 상부에서는 $1.24 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^2/\text{week}$ 로 기준치를 초과하는 오염물질이 검출되었으나, 챔버 내부 오염 성분의 제거를 위하여 추가로 수행한 2차 예비시험 결과 Table 5와 같이 동일 위치에서는 기준치 이하의 오염성분이 검출되었다.

2차 예비시험에서 에스테르 계열의 성분이 증가한 것은 챔버 내부 청소 과정에서 사용된 이소프로필알코올 등의 영향으로 추정할 수 있다.

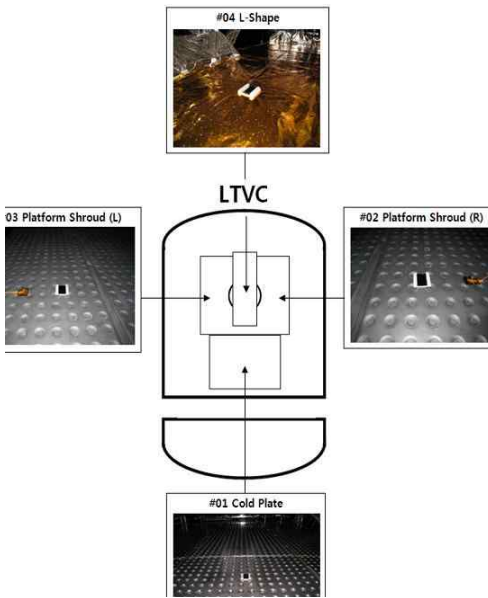


Figure 11 Witness plate location

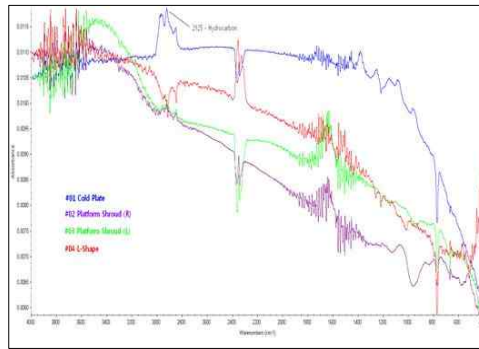


Figure 12 1st Blank Test Spectrum

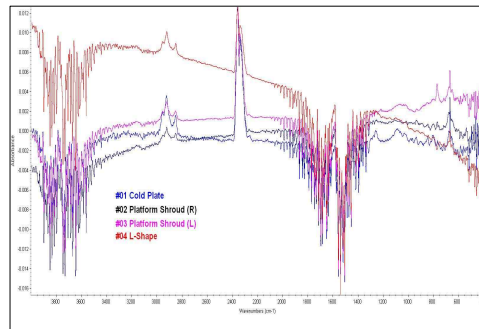


Figure 13 2nd Blank Test Spectrum

Table 4 Result of 1st Contamination quantitative analysis (10^{-8} g/cm^2)

Location	#01	#02	#03	#4
Hydrocarbon - equivalent	12.3	1.2	0.425	0.007
Ester - equivalent	-	-	-	-
Methyl silicon - equivalent	0.01	0.02	0.007	-
Phenyl silicon - equivalent	-	-	-	0.006
Total	12.4	1.4	0.43	0.013

Table 5 Result of 2nd Contamination quantitative analysis (10-8g/cm2)

Location	#01	#02	#03	#4
Hydrocarbon - equivalent	1.14	0.52	1.23	1.78
Ester - equivalent	0.4	0.59	1.18	1.37
Methyl silicon - equivalent	0.03	0.07	0.008	0.07
Phenyl silicon - equivalent	-	0.14	-	-
Total	1.58	1.33	2.41	0.32

TECHNOLOGY, 2nd ed. (Marcel Dekker, 1997), chap. 1

3. ECSS-Q-70-01A: Cleanliness and Contamination Control
4. ESA PSS-01-204 : Particulate contamination control in clean rooms by particle fallout (PFO) measurement
5. ECSS-Q-70-05A : Detection of organic contamination of surfaces by IR

4. 결 론

한국항공우주연구원에서는 인공위성의 조립 및 시험을 위하여 정해진 규격 내에서 철저한 오염관리를 수행 중에 있다. 위성의 조립과 시험이 수행되는 청정실 내에서의 입자 및 분자오염은 그 측정 결과 기준치 이하로 위성 조립 환경의 우수성을 확인하였다. 특히, 인공위성의 열진공시험에 앞서 수행한 예비시험을 통해 챔버 내부에서 기준치 이상의 오염물질 검출 가능성이 확인되었으나, 이는 반복되는 열진공챔버의 베이킹(baking) 및 진공배기를 통해 제거가 가능하고 챔버 내부 환경을 기준치 이하 적절히 관리할 수 있음을 검증하였다. 이 같은 철저한 오염 측정, 분석 및 관리를 통해 차세대 인공위성의 조립 및 시험이 성공적으로 완수될 것으로 기대할 수 있다.

REFERENCE

1. 이상훈, 서희준, 문귀원, 최석원. "고진공하에서의 위성체 부품의 오염측정에 관한 연구", 한국진공학회, Vol.11, No.2, 2002, pp.87~96.
2. Marsbed H Hablanian, HIGH-VACUUM