

청정환경에서의 인공위성 오염 측정 및 분석에 관한 연구

조혁진 · 윤용식 | 한국항공우주연구원 · 선임연구원
박홍철 · 이상설 | 한국항공우주연구원 · 책임연구원

1. 머리말

일반적으로 오염이란 어떤 대상의 성능에 좋지 않은 영향을 미치는 입자(Particle)나 분자(Molecule)에 의해 대상에 미치는 영향을 의미한다. 다루는 대상에 따라 그 원인은 다를 수 있으나 인공위성의 경우 입자 오염과 분자 오염의 두 가지 큰 원인에 의하여 영향을 받게 된다. 입자 오염(Particulate Contamination)의 주 원인은 공기 중에 존재하는 먼지들과 건물 또는 장비 제작시 사용되는 물질들, 그리고 작업을 수행하는 사람들이며, 이러한 입자 오염으로 인하여 생기는 결과는 광학 센서나 거울, 렌즈 등에서의 빛의 산란, 전기적 접점에 발생하는 노이즈이며, 심지어 전해질에 의한 부식까지도 나타날 수 있다. 한편 분자 오염(Molecular Contamination)의 원인으로는 작업장의 상태, 시험 장치 내부의 잔유물, 또는 시험 대상 자체에서 발생하는 탈가스를 들 수 있으며 입자 오염과 마찬가지로 작업 수행자도 분자 오염의 원인이 된다. 분자 오염으로 인하여 광학면의 성능 감소 및 질 저하, 적외선 장비 및 태양전지판의 민감도 저하, 열제어 대상 표면의 과열이 발생할 수 있다.

이와 같은 이유로 오염 물질은 광학 장비나 청정 장비를 다루는 작업장에서 가장 중요한 관리 대상이 되고, 이를 줄이기 위한 끊임없는 노력이 이루어지고 있다. 인공위성의 오염 측정 및 관리는 입자 오염과 분자 오염 중 하나에 국한되는 것이 아니라

반드시 두 가지 모두에 적용되는 것으로, 본 논문에서는 인공위성의 입자 오염과 분자 오염을 측정하는 여러 가지 방법과 각 방법의 특징에 대하여 살펴보고 이를 분석해 보고자 한다.

2. 입자 오염의 측정

입자 오염의 측정은 크게 공기 중에 부유하는 입자를 측정하는 방법과 바닥이나 물체 표면에 떨어지는 입자를 측정하는 방법으로 나누어진다. 일반적으로 공기 중 부유 입자를 구성하는 것은 5 μm 이하의 크기를 갖는 것이 대부분이고 강하 입자는 주로 5 μm 이상의 입자로 구성되어 있다. 보통 시험 대상의 작동이나 조립시 문제가 되는 것은 공기 중에 부유하는 입자들 보다는 실제로 표면에 떨어진 입자(강하 입자)들이기 때문에 후자의 방법이 전자의 방법보다는 오염을 측정하는 관점에 있어서 보다 유용하다[1].

2.1 공기 중 부유 입자의 측정

공기 중 부유 입자의 경우 그 크기와 단위 체적당 개수로써 오염의 정도를 판단하게 되는데, 이것이 청정도(Clean Class)를 나타내는 기준이 된다. 연방규격 209E[2]에 따른 분류를 통해 광학렌즈, 거울 및 기타 민감한 대상의 경우 청정도 100(1 ft^3 내에 0.5 μm 크기 이상의 입자가 100개 이하, 청정도 표기 기준은 1 ft^3 내에 존재하는 0.5 μm 크기 이상

의 입자 개수임) 이하에서 모든 작업이 이루어지며 일반적으로 청정환경이 중요한 대상은 청정도 10,000 이하, 그리고 그 외의 대상은 청정도 100,000 이하에서 작업이 수행된다.

2.1.1 측정 원리

기본적인 측정 원리는 입자에 의한 레이저 빛의 산란을 이용하는 것이다. 관을 통해 흡수된 공기 중의 입자가 레이저원으로부터의 빛을 산란시키면, 그 빛을 모을 수 있는 광학 장치가 포토다이오드(Photo diode)에 초점을 맞추게 되고 이 포토다이오드는 빛의 파열을 전기적인 파동으로 바꾸어주게 된다. 이 때, 전기적 파동의 높이는 입자의 크기와 비례하게 되는데 파동의 개수와 높이의 측정을 통하여 입자 크기별 개수를 측정할 수 있게 된다.

2.1.2 적용 사례

다음 결과는 HEPA 필터를 사용한 공조 시스템으로 청정실을 유지하고 있는 한국항공우주연구원 위성시험동 조립실 내의 부유 입자 측정 결과이다.

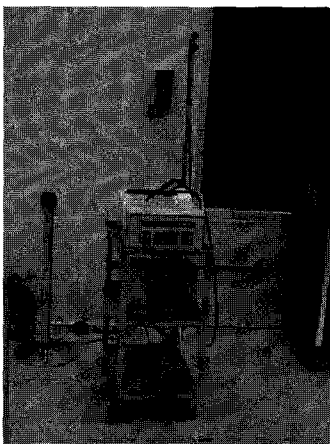


그림 1. 청정실에 설치된 부유 입자 측정기

하루 동안 측정된 부유입자의 크기별 개수를 나타내고 있으며, 측정 기간동안 오후 1시부터 5시까지는 작업자가 작업 공간 내에 있었고, 그 외의 시간에는 작업자가 존재하지 않았다.

청정도를 나타내는 기준은 $0.5 \mu m$ 이상의 입자의 개수로서 그래프를 보면 작업자가 없는 경우 청정도 100이하로, 작업자가 있는 경우 청정도 10,000 이하로 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 인공위성에 탑재되는 광학 센서의 요구조건에 따라 때로는 $0.5 \mu m$ 이하의 크기를 가지는 입자의 개수를 관리하는 경우도 있다.

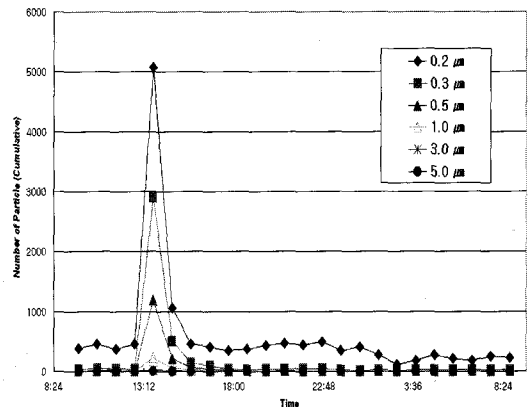


그림 2. 부유 입자 측정 결과

2.2 강하 입자(Particle Fallout)의 측정

부유 입자의 측정이 실시간으로 이루어질 수 있는 반면에 강하 입자의 경우 일정기간 동안 별도의 강하 입자 센서판을 원하는 장소에 설치해 두고 이를 수거하여 분석하는 방법을 사용한다. 측정 결과를 표현하는 단위는 ppm(parts per million)으로 측정 전체 면적에 대한 입자에 의해 빛이 투영된 면적 비율로 나타낸다. 이를 obscuration factor라고 한다. Obscuration factor는 간단히 다음과 같이

계산되어질 수 있다.

$$C = n \times \frac{d^2}{D^2}$$

여기서, C : obscuration in $\mu\text{m}^2/\text{mm}^2$

n : 입자의 개수

d : 입자의 직경 (μm)

D : 측정 부위의 직경 (mm)

설치하는 센서판에는 광학측정이 이루어지므로 검은색의 부드러운 유리판을 사용하는데, 외부 환경으로부터 오염이 되지 않도록 덮개를 씌워두어 보관한다. 강하 입자의 측정값과 청정도 사이의 관계는 아직 정확히 밝혀져 있지 않으나 일반적으로 정비례하는 것으로 알려져 있다.

2.2.1 측정 원리

강하 입자의 측정은 센서판에 모아진 입자들이 빛을 산란시키는 원리를 이용한다. 센서판에 평행한 레이저가 투사되면 입자에 의해 산란된 빛은 PIN 다이오드인 감지기(detector)에 전달되고 전기적으로 증폭되어 표시기에 값을 나타내게 된다. 교정이 필요한 경우에는 크기를 알고 있는 폴리스틸렌 미세구(microsphere)나 형광 입자를 이용하여 행한다.



그림 3. 강하 입자 측정을 위한 센서판

오염에 매우 민감한 광학 장비인 경우 300 ppm 이하의 결과를 요구한다.

3. 분자 오염의 측정

분자 오염은 크게 비활성 잔유물(Non-Volatile Residue, NVR)과 활성 잔유물로 나누어질 수 있다. 활성 잔유물 및 비활성 잔유물 모두 인공위성에 대하여 좋지 않은 영향을 미치기 때문에 관리의 주요 대상이 된다. 특히 정밀한 광학 기기가 사용되는 장비의 경우 분자에 의한 오염은 치명적인 결과를 낳는다. 흔히 HEPA 필터를 통한 공조 시스템이 모든 오염원을 차단할 수 있다고 생각하지만 HEPA 필터는 입자 오염을 줄일 뿐 분자 오염에는 영향을 미치지 못한다.

분자 오염의 측정으로는 비활성 잔유물 전체의 질량을 정밀 정울을 사용하여 직접 측정하는 방법 [3]과 유기물질을 중심으로 적외선 분광법을 사용하여 얻은 결과를 미리 교정된 데이터와 비교하여 측정하는 방법[4]이 대표적으로 사용된다.

3.1 정밀 저울을 이용한 비활성 잔유물의 측정

본 방법은 비활성 잔유물을 수거하여 직접 그리고 모든 오염물질의 질량을 직접 측정한다는 점에서 적외선 분광법을 이용하는 방법과 구분이 된다. 하지만 마이크로그램 단위의 질량을 다루기 때문에 매우 세심하고 조심스러운 작업이 이루어져야 한다.

3.1.1 측정 준비 및 측정 방법

측정을 위해서는 DI(De-ionized) water, 에탄올, 에틸아세테이트, 디클로로메탄으로 증류시킨 가로, 세로 4인치 크기의 클린와이프(clean wiper)를 준비하여야 한다.[5] 이 과정에서 약 1주일 정도가 소요되는데 와이퍼의 청정도가 실험의 결과에 중요한 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 과정이다. 와이

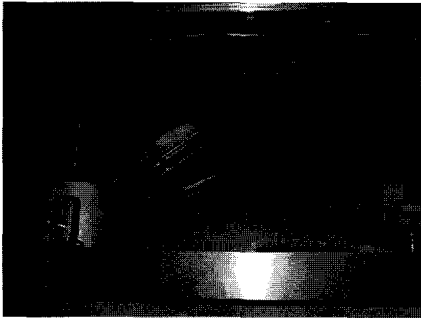


그림 4. 클린 와이어 증류 작업

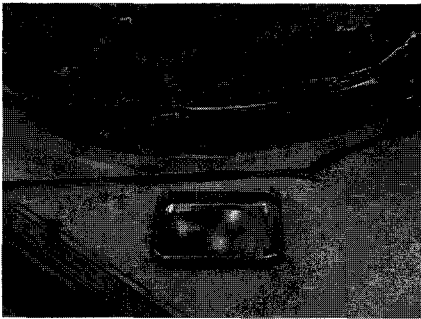


그림 5. 위성체 옆에 설치된 집진판

퍼가 준비되면 이를 용매(solvent)에 넣고 미리 세척된 밀폐 용기에 보관해 둔다.

오염을 측정하려는 위치에 미리 클로로포름(CHCl₃)으로 닦아 놓은 집진판(witness plate)을 설치하고 일정기간 경과 후 클린와이어로 집진판의 집진된 표면을 닦아낸다. 닦아내는 과정에서 닦아내고 남은 용매를 가능하면 모두 수거하여 표면에 오염물질이 더 이상 남지 않도록 주의하여야 한다. 수거된 와이어에서 용매에 용해된 오염물질을 모두 채집 용기에 짜내는데 이때 입자들을 모두 제거하기 위하여 필터를 사용하여 분석 용기에 걸러낸다. 그리고 용매를 모두 증발 시켜 최종적으로 분석 용기와 오염물질만이 남도록 한다. 집진판을 닦

는 과정이 생략된 별도의 클린와이어를 가지고 동일한 과정을 수행한다.

3.1.2 측정 결과의 도출 및 분석

측정 결과의 도출은 다음과 같다.

$$NVR = \frac{(a-b)-(c-d)}{e \times f}$$

여기서,

a : 분석 용기와 잔유물의 질량(mg)

b : a 분석 용기의 질량(mg)

c : 분석 용기와 집진판을 닦지 않은 와이어에서 처리된 잔유물의 질량(mg)

d : c 분석 용기의 질량(mg)

e : 집진판의 면적(ft²)

f : 집진판 설치 기간(month)

질량의 측정은 최소한 10 마이크로그램 이상의 정밀도를 가지는 정밀 저울을 사용하고 집진판의 설치 기간은 한달을 28일로 기준하여 계산한다. 와이어를 증류처리 하여 클린와이어로 만들었는지라도 클린와이어 자체에서 잔유물이 생길 수 있기 때문에 식의 분자 항에 이를 소거하는 부분이 반드시 있어야 한다. 측정 결과의 단위는 mg/ft²·month이다. 본 연구원에서 다루는 인공위성에 탑재되는 민감한 광학장치의 경우 4.645 mg/ft² 이하의 환경에서 유지되고 있다.

3.2 적외선 분광법을 이용한 측정

본 측정 방법은 분자 오염물질 중 이미 알려진 유기 물질의 측정에 적용되는 것으로 적외선 영역 내에서 흡수 밴드(absorption band)를 측정하고 분석함으로써 오염물질의 종류와 양을 알아낼 수 있는 방법이다. 효율적으로 본 방법을 사용하기 위해서는 각각의 작업 공간 및 장비에 영향을 미치는 오염 가능 물질들에 대한 기본 데이터들을 충분히 가지고 있어

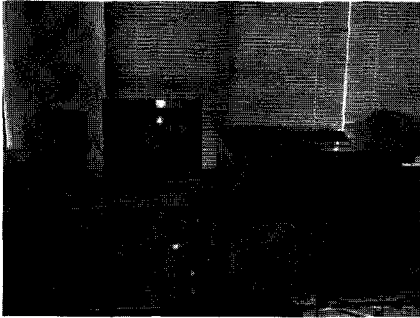


그림 6. 적외선스펙트로메타

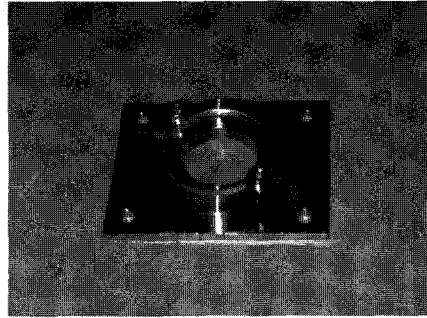


그림 7. 직접적 방법에 사용되는 디스크

야 한다. 이미 알려진 기본 데이터들 외에 다른 기본 데이터들을 얻을 수 있는 한 가지 방법은 Micro-VCN을 이용하여 응축 가능한 활성 잔유물들에 대한 적외선 분광 스펙트럼을 획득하는 것이다[6].

3.2.1 측정 원리

물질은 분자 구성에 따라 각각 고유한 흡수 밴드를 가지고 있다. 이러한 물질에 적외선을 투과시키게 되면 분자 결합에 따라 고유의 흡수 밴드가 나타나게 되는데 이를 이용하여 오염 물질을 판단할 수 있게 된다. 다른 물질이 같은 분자 결합을 포함하는 경우 같은 밴드에서 피크가 나타날 수 있지만 그 피크 이외에 다른 결합에 의한 피크로 이를 구분할 수 있다. 그러나 매우 복잡한 화합물일 경우 적외선 분광법을 이용하여 모든 물질을 완전히 판별해 내는 것은 매우 어려운 일이다.

3.2.2 측정 방법

적외선 분광법을 이용한 측정방법은 직접적 방법과 간접적 방법 두 가지로 나눌 수 있다.

직접적 방법의 경우 오염을 측정하려는 위치에 직접 적외선투과 디스크를 설치한 뒤 그 디스크를 직접 적외선스펙트로메타(IR spectrometer)를 사용하여 분석하는 방법이다.

반면 간접적 방법의 경우, 집진판을 이용한 방법과 클린와이퍼를 이용한 방법이 있다. 집진판을 이용한 방법은 다음과 같다. 초음파 세척을 통하여 깨끗한 집진판(보통 30 mm × 50 mm 크기)를 준비하고 이를 관심 위치에 설치한 후, 일정 기간이 지나면 집진판의 표면을 용매를 이용하여 페트리 접시 (Petri dish)에 녹여서 모아둔다. 이를 적외선 램프를 이용하여 소량만 남도록 증발시킨 후, 유리막대를 이용하여 적외선스펙트로메타에 사용되는 디스크에 옮겨 담아 완전히 증발시킨 후 적외선스펙트로메타로 측정한다. 이 때 주의할 점은 디스크에 옮겨진 면적이 투과되는 적외선의 면적보다 크면 정량적인 측정이 불가능해 진다는 것이다.

와이퍼를 이용한 방법은 오염을 측정하려는 위치

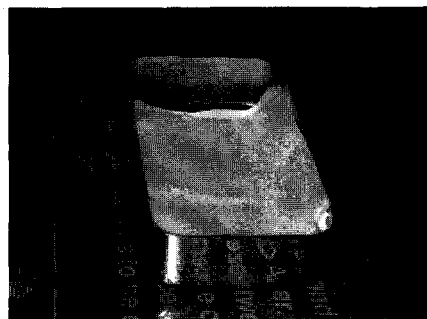


그림 8. 측정시 사용되는 와이퍼



그림 9. 용매로 오염 물질을 용해시키는 모습

에 미리 준비된 와이퍼로 정해진 면적만큼 직접 깨끗이 문지른 뒤 이를 용매를 이용해 녹여내고 페트리 접시에 옮긴 후 앞서 언급한 방법과 같이 수행한 뒤 오염 물질을 측정하는 방법이다.

3.2.3 결과의 분석

정량적인 분석을 위해서는 측정하고자 하는 오염 물질을 정하고 이에 대한 교정이 반드시 이루어져야 한다. 위성체에 영향을 미치는 유기 오염 물질로는 탄화수소, 에스테르, 메틸실리콘, 에틸실리콘을 대표적으로 들 수 있으며, 이들의 주요 흡수 밴드는 표 1과 같다.

이들 각각에 대하여 농도에 따른 피크값을 측정하고 교정그래프를 만든다. 그리고 이를 이용하여 새로운 시료에 대한 결과를 산출하는데, 네 가지 이외의

표 1 주요 오염 물질의 주 밴드

오염 물질	주 흡수 밴드 (cm ⁻¹)				
탄화수소	2925	1465	1375		
에스테르	1735	1070	1120	1260	
메틸실리콘	805	1020	1080	1260	
페닐실리콘	790	1050	1120	1260	1430

다른 물질이 밴드에서 미치는 영향이 있을 수 있으나 이는 값에 대한 증가만을 가져오는 것이므로 오염물질의 제한량을 만족시키는 데에는 문제가 없다.

4. 맺음말

오염의 관리라 함은 매우 포괄적인 개념으로 각각의 작업 상황에 맞는 적절한 적용이 이루어져야 한다. 입자 오염과 분자 오염은 오염을 이루는 가장 주요한 두 가지 요인이며, 논문에 제시한 내용처럼 정확한 측정과 분석을 수행하여야 효율적인 오염 관리가 이루어질 수 있다.

위성 시스템을 다루는 본 연구원의 경우 광학기가 탑재된 위성이나 기타 민감한 전자 부품 또는 센서들이 포함되는 장치에 관한 시험이 이루어지기 때문에 매우 엄격한 오염 관리가 이루어지고 있다.

특히 오염의 측정은 작업 대상에 악영향을 줄 수 있는 모든 관점에서 이루어져야 하며, 정확한 측정과 분석이 수행될 때만이 작업 대상의 성능이 완전히 보장될 수 있다. 한순간의 오염 발생이 전체 시스템에 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

현재 공기 중 부유 입자의 측정을 제외하고는 대부분의 작업이 실시간으로 이루어지지 못하고 측정 종료 후 분석으로 행해지고 있는데, 이를 개선할 수 있는 다양한 방법들이 개발되고 있으며 이 방법들에 대한 성능이 검증되고 있다. 끊임없는 연구개발을 통하여 보다 정확하고 다양한 오염 관리 방법이 개발되면 현재보다 더욱 효율적이고 정확한 측정 및 분석이 이루어 질 수 있을 것이며, 이를 통하여 성공적인 프로젝트를 수행 할 수 있을 것이라 생각된다.

5. 후 기

본 연구는 정보통신부의 선도기반기술개발사업

(과제번호:IMT2000-A1-2)에 의한 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

- 참고문헌 -

1. Product Assurance Division European Space Research & Technology Centre, "Particular Contamination Control in Clean Rooms by Particle Fallout(PFO) Measurements," ESA PSS-01-204, Sep. 1984
2. Institute of Environmental Sciences, "Airborne Particulate Cleanliness Classes in Cleanrooms and Clean Zones," Federal Standard 209E, 1992
3. American Society of Testing & Materials, "Standard Test Method for Gravimetric Determination of Nonvolatile Residue (NVR) in Environmentally Controlled Areas for Spacecraft," ASTM E 1235-88, 1993
4. Product Assurance Division European Space Research & Technology Centre, "The Detection of Organic Contamination of Surfaces by Infrared Spectroscopy," ESA PSS-01-705, Oct. 1982
5. 윤용식, 최종연, 박순영, 이주진 "위성체의 오염 측정(Spacecraft Contamination Measurement)", 공기청정기술 제12권 제2호, 1999, pp. 95~102
6. American Society of Testing & Materials, "Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment," ASTM E595-93, 1999