

위성체 및 위성관련 부품의 세척

윤용식 · 이상설 | 한국항공우주연구원
 선임연구원 / 책임연구원

1. 머리말

위성체의 조립 및 시험은 위성 탑재 센서 혹은 특성에 따라 청정도 100, 10,000 및 100,000인 청정 시설 내에서 수행되어야 한다. 현재 위성체의 조립 및 시험을 위한 오염 계획, 세척, 포장 및 운반 등에 대한 계획 수립 및 규정은 미국 연방 규격인 FED-STD-209와 MIL-STD-1246 등을 기초로 하여 해당 위성체에 적합하게 작성하여 수행하고 있다.

위성체의 조립/시험 및 위성체가 우주 궤도상에 진입한 후에도 요구되는 청정도를 만족하기 위해서는 해당 위성체의 오염관리 계획^[1, 2]에 따라 위성체에 탑재되는 센서뿐만 아니라 구조체 및 볼트, 너트 등 위성용 부품의 세척이 필수적이다. 위성용 물품 구입 시 세척 등에 대한 요구 조건이 충족되는 물품은 외관 검사 등을 통하여 사용할 수 있으나, 특정 부품에 대하여 복잡한 세척 작업이 요구되는 경우에는 직접 세척 작업을 수행하여야 한다. 세척 작업이 잘못되거나 불만족스러운 경우에는 오염 물질의 발생으로 인하여 위성체의 조립/시험뿐만 아니라 위성체가 우주 궤도에서 운용되면서 위성 탑재 센서 및 기타 오염 민감 부품에 대한 손상을 초래하여 위성체에 부분적인 기능 저하나 임무 수행이 불가능한 사항도 초래할 수 있다.

본 글에서는 위성체 및 위성관련 부품의 세척 계획 및 방법과 검사 방법에 대하여 고찰하고, 위성체 및 관련 부품에 대한 세척 계획 방안 수립을 위한 방향을 제시하고자 한다.

2. 세척 종류 및 대상 물품의 선정

위성체 및 위성용 부품의 세척은 위성체에 요구되는 청정도 및 부품의 종류와 재질에 따라 세척제의 종류와 세척 방법이 달라질 수 있다. 위성체 및 위성용 부품의 세척에는 열·진공 bake-out 세척, 초음파 세척 및 IPA 세척으로 구분될 수 있다^[3]. 열·진공 bake-out 세척은 열·진공 챔버에 세척 대상물을 설치하여 진공 상태에서 열적 변화를 주어 대상물에 내재된 비활성 잔류 물질을 제거하는 방법이다. 이 방법을 이용하여 위성용 하니스(Harness), 태양전지판(Solar Array Panel), 자이로(Gyro) 등 조립된 위성 탑재용 전기/전자 장치의 세척에 사용한다. 초음파 세척은 위성용 볼트, 너트 및 탑재 장비의 외관 금속성 박스 등을 계면 활성제와 비전수(De-Ionized Water)를 혼합한 용액으로 초음파 세척을 수행하는 것이다. 특히 초음파 세척은 위성체의 자세제어를 위한 추진제 조절 밸브나 배관 파이프 류에 매우 중요한 세척 방법이다. 그리고, 이소프로필 알코올(Isopropyl Alcohol, 이하 IPA)은 순도 99.5%의 알코올 75%와 비전수(De-

Ionized Water) 25%를 혼합한 것이다. IPA 세척은 순도 99.5% 이상의 IPA를 청정용 형겔에 묻혀 위성체 및 위성용 부품의 외관을 닦아내는 작업으로 조립이 완료된 위성체의 외관 세척과 지상지원 장비의 세척 등에 많이 사용된다.

상기의 세척을 위한 시설은 청정도 10,000 이하가 항상 유지되어야 하고, 세척에 사용되는 IPA의 순도와 비활성 잔류물질의 양^{4, 5}, 비전수의 전도도 등을 규격에 만족하도록 한다.

2.1 전자기 방전(ESD)

위성체에 탑재되는 ESD에 민감한 전자 장비의 손상을 막기 위해 오염 관리 계획에 따른 여러 가지 예방 대책이 수립되어 시행되어야 한다. 이를 위한 몇 가지 예는 다음과 같다.

- ① 온·습도 조절용 방전 봉투의 사용
- ② ESD를 만족하는 청정복
- ③ 민감한 위성용 전자 부품을 취급하기 전 접지에 연결

3. 세척

3.1 열·진공 bake-out 세척

위성체 부품의 열·진공 bake-out 세척은 위성체에 탑재되는 부품 중 초음파 세척이 불가능하거나 전기적 장치의 조립이 완료된 것에 잔존하는 비활성 잔류물을 추출해 내기 위한 세척 방법의 하나이다⁶. 고진공 상태에서 일정시간 동안 열적 변화를 주면 위성용 부품 혹은 전기·전자 박스에 잔존하는 비활성 물질이 진공 상태로 빠져나와 챔버에 설치된 냉각 판에 흡착됨으로써 제거된다. 진공 bake-out 세척 방법은 챔버의 사양에 따라 달라질 수 있다. 일반적인 열·진공 bake-out 세척은 bake-out 챔버의 세척, 열·진공 bake-out 세척의 순으로 진행된다.

3.1.1 Bake-out 챔버의 세척

열·진공 bake-out 세척을 수행하기 전에 순서에 따라 챔버(그림 1) 내부를 미리 세척하기 위하여 사전 bake-out을 수행하여야 한다. 이때 TQCM (Thermoelectrical Quartz Crystal Microbalance)이라는 미세 정밀 저울을 챔버 내부에 설치하여 세척 대상물에 잔존하는 출기 가스 비(out gassing rate)가 안정화(stabilization)될 때까지 bake-out을 계속 수행한다.

① 챔버 내부의 먼지를 제거하기 위하여 진공 청소기를 사용하여 진공청소를 수행한다. 다음에 IPA를 폴리에스터(Polyester) 형겔에 묻혀 챔버 내부를 깨끗이 닦아낸다.

② 세척 대상물의 지원 장비를 챔버 내부에 설치한다.

③ 챔버 내부에 TQCM을 설치하고, 오염관리 담당자가 지정한 위치에 witness plate를 설치한다.

④ 1.0×10^{-5} Torr이하의 진공 능력을 가진 챔버의 열조절 장치인 쉬라우드(shroud)를 이용하여 챔버 내부의 온도를 10°C로 유지시킨 상태에서 20



그림 1. Vacuum Bake-out Chamber

±2 시간 동안 진공 상태를 유지시킨다.

⑤ 다음에 출기된 가스가 흡착되는 장치인 3 inch × 3 inch 크기의 냉각 판(cold plate)에 액화 질소를 순환시켜 잔류 물질이 흡착되도록 한다.

⑥ 계속해서 쉬라우드를 이용하여 챔버 온도를 위성체의 최대 허용 온도까지 낮추면서 4시간 동안 TQCM의 신호를 읽고, 기록하여 챔버 온도의 상승 및 하강 온도 비율을 결정한다. 이것은 챔버 내부의 온도를 상승시키는데 걸리는 시간과 냉각되는데 걸리는 시간 비율을 맞추기 위해서이다.

⑦ 일단, 챔버 내부의 온도 상승 및 냉각 비율이 결정되면, bake-out을 종료하고, witness plate를 제거한 다음 NVR 샘플을 채취한다.

3.1.2 열·진공 bake-out

2절에서 언급된 바와 같이 bake-out을 통한 세척 대상물은 조립이 완료된 위성 탑재 장비인 위성용 하니스, 태양전지판, 자이로 등 위성체에 탑재되는 비행용 하드웨어이다. 열·진공 bake-out에 적용되는 진공도, 온도 및 시간은 세척 대상물에 따라 다르다. 여기에는 위성용 하니스 장비를 위한 진공 bake-out의 세척 절차를 예로 들어 기술하고자 한다.

① 챔버 내부가 3.1.1에 따라 세척이 종료된 후 세척 대상물을 챔버에 설치한다. 다음에 오염관리자에 의해 지시된 위치에 witness plate를 설치하고 TQCM을 세척 대상물 가까이 설치한다.

② 쉬라우드의 온도가 115±5°C인 상태로 유지하고, 냉각 판에 액화질소를 순환시키면서 38±2시간 동안 진공 bake-out 세척을 수행한다. 수행 중에 TQCM이 0±2°C인 상태에서 TQCM으로 출기 가스를 측정한다.

③ Bake-out 수행 38±2시간 후에, 쉬라우드의 온도를 55±5°C까지 내린다.

④ Bake-out 수행 44±2시간에 TQCM으로 출기 가스 안정화율을 측정한다. 적절한 안정화의 판단은 오염관리 담당자나 시험 책임자에 의해 결정된다. 4시간 동안 출기 가스의 비가 안정화되면 bake-out을 종료한다.

⑤ 출기 가스의 비율이 안정화되지 않는 경우 다시 38±2 시간 동안 bake-out을 계속 수행하고, 다음에 약 6시간 동안 55°C까지 챔버 내부의 온도를 내려 세척 대상물의 출기 가스 상태를 검사한다. 만약 bake-out 수행 시간이 총 96시간이 지나도 그 비율이 안정화되지 않으면, bake-out을 종료하고 냉각 판에서 오염물질을 채취한다.

⑥ Bake-out을 종료한 후 장갑을 끼고 witness plate를 제거한 다음 허용된 포장재에 세척 대상물을 포장하고 청정실인 대상물의 작업장으로 이동한다. 작업장에서 세척 대상물은 다시 IPA로 깨끗이 세척한다.

3.2 초음파 세척

초음파 세척이 필요한 위성체 부품은 각 부품의 종류에 따라 적용되는 세척 방법이 다르다. 그림 2에서는 초음파 세척에 대한 세척 방법을 순서대로 나열한 것으로 위성 부품에 따라 세척 순서나 방법을 설정하여 초음파 세척 및 일련의 작업을 수행하도록 한다.

청정 지역인 세척 작업장에 세척 대상물을 반입하기 전에 대상물에 기름, 파편조각 등 외관상 오염 물질이 발견되지 않도록 한다.

3.2.1 Method A : 기름 제거를 위한 초음파 세척 작업(Emulsion Degreasing Ultra-sonic Immersion)

계면 활성제인 세척제와 비전수를 약 1대 5의 비율로 혼합한 후 초음파 세척기 (그림 3)의 온도를

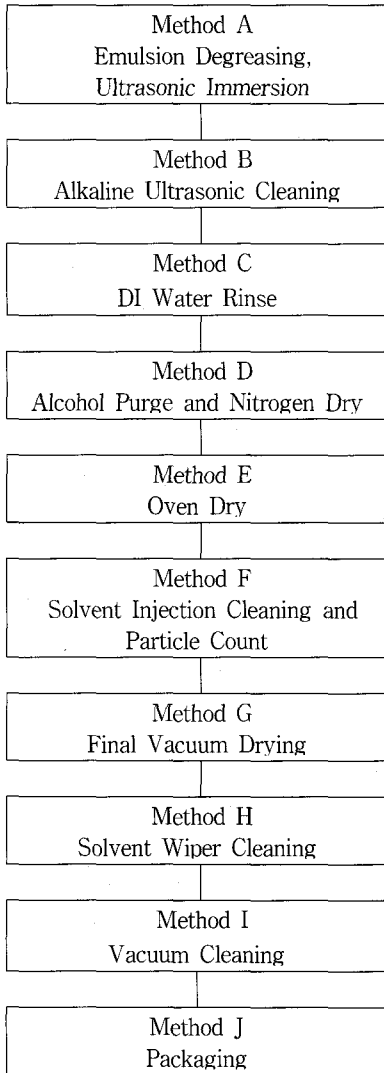


그림 2. Ultrasonic Cleaning Process

60±15℃로 맞추어 세척 대상물을 혼합액에 완전히 잠기게 한 후 약 10 분 동안 초음파 세척을 수행한다.

초음파 세척 후 대상물은 최소 2분 동안 비전수로 즉시 닦아내고, 젖은 상태에서 다음 작업으로 이동한다.

3.2.2 Method B : 알칼리성 초음파 세척(Alkaline Ultrasonic Cleaning)

계면 활성제인 세척액을 비전수와 약 1대 4의 비율로 혼합한 후 초음파 세척기의 온도를 45±5℃로 맞춘 후 세척 대상물을 혼합액에 완전히 담근 후 약 10 분 동안 초음파 세척을 수행한다.

초음파 세척 후 대상물은 최소 2분 동안 비전수로 즉시 닦아내고, 젖은 상태에서 다음 작업으로 이동한다.

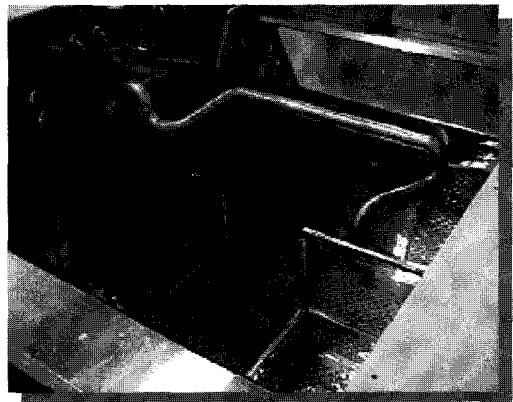


그림 3. Ultrasonic Cleaning Bath

3.2.3 Method C : 행굼 작업(DI-water Rinse)

약 30℃로 가열된 비전수에 세척 대상물을 잠기게 하고, 세척액이 표면에 남아 있지 않도록 씻어낸다. 행굼 작업이 종료된 후에는 리트머스 종이 등으로 부품 표면의 pH를 검사한다.

3.2.4 Method D : 알코올 세척 및 질소가스 건조(Alcohol Purge and Nitrogen Dry)

행굼 작업과 pH 검사 후 즉시 세척 대상물 표면에 남아있는 비전수를 제거하여야 한다. 먼저, 측정 대상물을 1µm 이하의 필터를 통해 이소프로필 알코올을 분사하여 세척을 수행하고 건조 오븐에 넣

고, 약 $70\pm 10^{\circ}\text{C}$ 로 가열된 질소 가스를 5분 동안 세척 대상물에 분사하여 건조시킨다.

3.2.5 Method E: 오븐 건조(Oven Dry)

상기 3.2.3이나 3.2.4 작업을 수행한 후 세척 대상물을 최소 1시간 동안 $65\pm 5^{\circ}\text{C}$ 로 미리 가열된 건조 오븐에 넣어 건조한다.

3.2.6 Method F: 용제 분사 세척 및 먼지 갯수 측정(Solvent Injection Cleaning and Particle Count)

배관, 금속성 유연 호스와 세척장비의 크기 제한, 세척 대상물의 형상 혹은 초음파 세척에 민감하여 초음파 세척을 할 수 없는 기타 위성용 부품은 알코올 등을 사용한 용제 세척을 수행하여야 한다. 세척 용제는 최소 10 psig 이상의 가압 장치가 되고 $1\mu\text{m}$ 이하의 필터 장치가 되어있는 노즐을 통하여 최소 5분 이상 분사 세척한다. 이때, 표면을 세척한 용제 약 100 ml를 비이커에 모아 유체내 입자 측정 장치(Fluid Particle Counter, 그림 4)로 액체 내에 존재하는 먼지 혹은 입자의 수를 측정하여 요구되는 청정도의 만족 여부를 판단한다. 만약 세척 대상물의

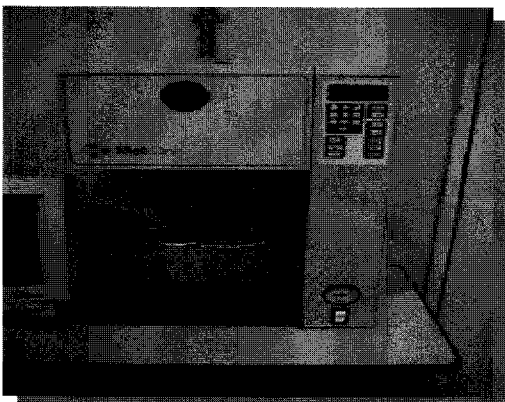


그림 4. Fluid Particle Counter

청정도 등급이 만족하지 않는 경우에는 다시 세척이 수행되어야 하고, 필요하다면 재 세척 과정이 2회 반복되어야 한다.

3.2.7 Method G: 최종 진공 건조(Final Vacuum Drying)

용제 세척이 수행된 세척 대상물은 0.5 Torr 이상의 진공 상태와 진공 오븐 내 온도가 $65\pm 5^{\circ}\text{C}$ 인 상태에서 건조된다. 이때, 위성용 단순 부품의 경우에는 최소 1시간, 조립품 혹은 반제품인 경우에는 최소 2시간 이상 건조되어야 한다.

3.2.8 Method H: 용제 와이퍼 세척(Solvent Wiper Cleaning)

위성체 부품 중 초음파 세척이나 용제 분사 세척을 할 수 없는 세척 대상물은 용제를 청정용 와이퍼에 묻혀 닦아낸다. 한번 적셔진 와이퍼는 그 크기의 10배 이하의 면적을 닦은 후 버려져야 한다. 이 세척 방법은 구멍이 많은(porous) 표면을 가진 물품에 대해서 수행해서는 안된다.

그리고, 광학(optics) 혹은 다른 오염 한계 표면을 가진 위성 부품의 경우 에틸알코올이나 IPA를 용제로 사용하여 광학용 티슈에 묻혀 선형 모양으로 닦아낸다.

3.2.9 Method I: 진공 청소(Vacuum Cleaning)

입자, 금속 파편, 섬유 등은 진공 청소기에 의해 제거되어야 한다. 이때 사용되는 진공 청소기는 HEPA 필터가 장착된 청소기이거나 배기 공기가 세척 장소 밖으로 장치된 것을 사용하여야 한다.

일반적으로 입자의 진공 청소는 청정시설과 청정실 반입을 위해 작업장에서 정기적으로 수행되지만, 세척 대상물의 표면에 오일이나 그리스 등이 묻어 있는 경우에는 IPA 등의 용제를 사용하여 청정

용 와이퍼로 닦아낸다.

3.2.10 Method J : 포장 작업(Packaging)

세척이 종료된 후 오염담당자에 의해 허용된 포장재를 사용하여 세척된 물품의 포장 작업을 한다. 먼저 포장재에 사용되는 ESD 처리가 된 것을 사용하고 포장 전에 MIL-STD-1246B에 따라 Level 500으로 세척되어야 한다.

그리고 세척된 물품을 포장재에 넣고 진공 상태로 만든 후 열선 히터를 이용하여 밀봉한다. 다음에 세척된 다른 포장재에 이미 포장된 세척 물품을 넣고, 물품 고유 번호, 세척 일자 등이 기재된 인식표(identification tag)를 첨부한 후 진공 포장을 한다.

3.2.11 위성 탑재물의 초음파 세척 절차

1개의 위성체에 탑재되는 물품 및 소모성 자재는

약 500 여종 이상이다. 이들 물품이 위성에 탑재되기 전에 정해진 세척 방법에 따라 최소한 3회 이상의 세척을 거치게 된다. 이들 중 대표적인 것을 예로 들어보면 표 1과 같다.

3.3 IPA 세척

상기의 bake-out 세척이나 초음파 세척 등의 방법이 적용되지 않거나 특수한 세척이 요구되는 장비 및 부품의 경우에는 다음과 같이 IPA 세척을 수행한다.

3.3.1 방열판(Radiators) 및 도장 표면(Paint-ed Surface)

위성체의 열제어 부품인 방열판 등에 지문, 얼룩 등에 의해 오염된 경우에는 먼저 진공 청소기로 청소한 후 IPA로 닦아낸다. 또한, 위성체의 열제어를 위하여 백색 페인트로 도장된 표면은 진공 청소만을 수행하여야 한다.

3.3.2 이중 면경(Second Surface Mirror)

이중 면경은 순도 99.5%의 톨루엔(Toluene)이나 IPA를 청정용 형짚에 묻혀 힘을 주지 않고 가볍게 세척한다.

3.3.3 히터 및 온도조절장치(Thermostat)

모든 열 조절장치는 IPA로 세척되어야 하고, 위성체에 설치되기 전에 통전 검사 및 외관 검사를 수행하여야 한다.

3.3.4 조립된 위성체의 세척

조립이 완료된 위성체는 다층 단열재(multi-layer insulator)와 이중면경 그리고 외부로 노출된 일부 광학 센서에만 접근할 수 있다. 따라서, 이들 표면의 외관 검사를 통하여 오염된 곳을 확인하면,

표 1. Cleaning Processing of S/C part

Items	Materials	Procedure
Heater Clamp	Titanium	A→C→F→D→ G→J
DTM Bracket	Al	B→C→F→D→G →J
Connector Cover	Fiber glass Epoxy	B→C→D→E
Ballast Plate	Al	F→D→E
Harness Clamp	Al	F→D→E
Magnetic Torquer Assembly	Chemfilm	H
Power Control Unit	Black paint	I→H

진공펌프로 먼지 등을 제거하고, 청정용 형광에 IPA를 묻혀 부드럽게 세척작업을 수행한다.

3.4 세척된 물품의 처리

세척된 물품은 세척된 날 즉시 위성체 조립에 설치되는 것을 원칙으로 한다. 그러나 보관한 후 사용되는 경우에는 바깥 포장재를 조립 및 시험 작업장 내에서 벗겨내고 안쪽 포장은 위성체 설치 직전에 제거된 후 사용해야 한다.

세척된 물품을 다루는 작업자는 항상 청정복을 입고 ESD 장치를 손목에 부착한 후 장갑을 착용하여 다루도록 한다.

4. 검사

4.1 White Light 외관 검사

포장 전에 볼트, 너트, 와셔 등과 같은 기본적인 탑재 부품을 제외하고 위성체의 모든 탑재 부품 및 장비에 대하여 100% 외관 검사를 실시한다. 특히, 추진계와 이에 관련된 모든 공구 및 지원 부품에 대해서는 모두 white light 외관 검사가 수행되어야 한다. 이것은 위성체 작동 중 위성체 추진과 관련된 파이프 등에 오염 물질이 붙는 경우 위성체 추진계의 유동을 힘들게 하거나 위성체에 심각한 영향을 초래할 가능성이 있으므로 엄격한 검사가 요구되는 것이다.

이 검사는 작업 표면에 광도(light intensity)가 100 foot-candles인 방에서 맨 눈으로 15cm에서 30cm까지의 거리로 떨어져서 수행되어야 한다.

4.2 Ultraviolet Light 검사

조립이 완료된 위성체 및 추진계 파이프의 내부 및 관련 부품에 검사를 수행한다.

Ultraviolet light 검사는 그림 5와 같이 ultraviolet lamp를 이용하여 2500~3700 Å 범위에서

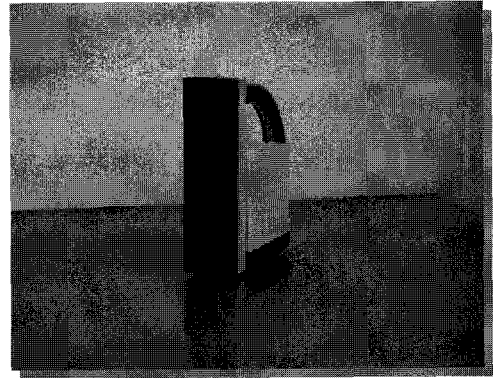


그림 5. Ultraviolet Lamp

자외선 광원을 사용하여 표면의 형광 물질이 존재하는지 여부를 검사한다.

5. 맺음말

위성체의 부품 및 장비는 그 특성이나 재질에 따라 여러 가지 세척 방법이 요구된다. 또한, 새로 개발되는 위성용 부품의 경우에도 다른 부품과의 유기적인 특성 및 다양한 세척 방법을 검토한 후 적용되어야 한다.

본 글에서 기술된 위성용 부품에 대한 세척 방법은 위성 오염에 관련된 수많은 시행 착오에 의해 수립된 것으로 일반 산업 분야에 설치·운영되고 있는 청정 시설의 운영과 초정밀 산업분야의 관련 부품의 적용에도 가능할 것으로 판단된다.

그리고, 이러한 세척 방법을 바탕으로 향후 위성용 부품의 국산화를 위해 세척 방법이 다양하게 개발될 것으로 기대된다.

- 참고문헌 -

1. 운용식, 최석원 “인공위성의 오염관리 계획”, 공기청정기술, 제13권, 제3호, 2000, pp. 101~111.
2. F. D. Cottrell, "KOMPSAT Contamination

-
- Control Plan", TRW, 1996, pp. 5-15.
3. Yon-Sik Yoon, "KOMPSAT 2 Cleaning Protocol", KARI, 2001, pp. 4-13.
 4. 박순영, 윤용식, 최종연, 이주진, "위성체 비활성 잔류물의 측정(Measurement of Spacecraft Non-Volatile Residues)", 한국항공우주학회, 1999. pp. 721~724.
 5. 윤용식, 최종연, 박순영, 이주진, "위성체의 오염 측정(Spacecraft Contamination Measurement)", 공기청정기술, 제12권 제2호, 1999, pp. 95~102.
 6. J.M. Choi, S.W. Choi, J.J. Lee "Cleaning Process and Contamination Control for Thermal Vacuum Test", IEST ESTECH, 2000 Proceedings, 2000, pp. 17-21.