

위성 열제어 부품 이차면경상의 수상돌기 성장 매카니즘 분석

이춘우*, 이균호**, 김희경***

Dendrite Growth Analysis of Satellite SSM(Second Surface Mirror)

Choon-Woo Lee*, Kyun-Ho Lee**, Hui-Kyung Kim***

Abstract

The purpose of this paper is to present the summary of trouble shooting result on the dendrite defect of SSM(Second Surface Mirror) which is one of major thermal control elements for satellite. Through this failure analysis on SSM dendrite, it is found that the dendrite defect may happen to silver coated layer of SSM if SSM is directly exposed to the environment containing sulfur or chlorine compound. As a preventive action, it is required that SSM shall not contact directly with rubber pad containing sulfur compound.

초 록

본 연구는 위성 열제어 주요 구성품중 하나인 SSM(이차면경) 표면에서 나타난 수상돌기(Dendrite) 현상에 대한 고장탐구 수행 내역과 그 결과를 정리한 것이다. 본 고장탐구 시편 시험을 통하여 SSM 표면의 은도금 층은 황 또는 염소 화합물이 함유된 환경에 장기간 직접 노출시키는 경우, 은도금 층이 황화 변색되는 현상이 나타날 수 있음을 확인하였으며 SSM 수상돌기(Dendrite) 현상을 방지하기 위해서는 가황 처리된 고무 패드와 직접 접촉하지 않도록 격리 보관할 필요가 있음을 알 수 있었다.

키워드 : 이차면경(Second Surface Mirror), 수상돌기(Dendrite), 황화반응(Sulfur Corrosion), 은도금 변색(Silver Coating Discoloration)

1. 서 론

위성체 열제어 시스템은 일반적으로 수동 열제어 방식을 적용하여, 위성체와 외부를 단열시

키기 위한 부품으로 다층박막단열재(MLI, Multi-Layer Insulation)를 사용하며, 위성에서 발생한 열을 외부로 내보내기 위하여 SSM(Second Surface Mirror)을 주로 사용한다

접수일(2012년 9월 14일), 수정일(1차 : 2012년 10월 15일, 게재 확정일 : 2012년 11월 1일)

* 다목적실용위성3A체계팀/lcw@kari.re.kr

** 다목적실용위성3A체계팀/khlee@kari.re.kr

*** 다목적실용위성3A체계팀/harry@kari.re.kr

이중 SSM(이차면경)은 외부에서 유입되는 태양열을 반사하고, 위성 내부 전자부품 발열을 외부로 방출시키기 위한 사각거울 형상의 열제어 구성품이다. 이를 위해 SSM은 얇은 유리 판막에 은도금 층을 증착시킨 형상으로 되어 있으며, 열전도 특성이 좋은 실리콘 계열 접착제를 사용하여 위성 외부 판넬면에 적용하게 된다.

그림 1은 위성체 판넬에 장착된 SSM 형상을 나타낸 것으로, 일반적으로 위성체 열해석 결과를 토대로 저궤도 위성의 경우 약 2000여개의 SSM 부품을 위성 외부 판넬에 장착하여 사용하게 된다. SSM 부품은 위성 열제어 성능을 좌우하는 중요한 구성부품으로 지상조립부터 임무 기간까지 외표면 오염 및 변형으로 인한 열제어 특성 변화가 없어야 하며 극저온/고온, 저진공 및 전자기 복사 등과 같은 우주환경에 장기간 노출되어도 열화에 의한 성능저하가 적어야 한다.

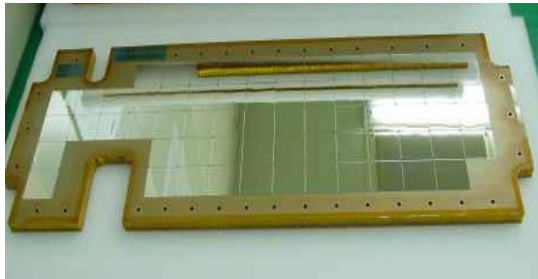


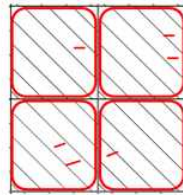
그림 1. SSM 장착된 위성체 판넬

본 연구에서는 위성 지상시험 중 SSM 표면에 수상돌기(Dendrite)형상의 검은색 가지 모양의 흑화변색이 급격하게 성장하는 특이 현상이 발견됨에 따라, SSM 수상돌기 결함의 발생 메카니즘을 분석하고, 수상돌기 결함을 모사하기 위한 고장탐구 내역 및 결함 재발 방지 대책 등을 종합적으로 검토한 내용이다.

2. SSM 표면의 수상돌기 현상

SSM 표면에서 발견된 수상돌기(Dendrite) 현상은 그림 2와 같이 신경세포 돌기와 같은 가지 형상을 가지며 주로 SSM 가장자리부터 급속하게

성장하는 흑화변색 현상이다. 수상돌기 결함이 발생된 SSM 표면은 외부 이물질에 의한 오염과 같이 검게 변색되며 SSM 가장자리 및 내부에서 급속하게 성장하였다. 50배율 현미경 검사 결과, 신경세포 돌기 모양으로 가지를 치며 SSM 내부로 성장하고 있음을 확인 할 수 있었다.



1. 원형적인 결함발생 위치



2. Battery Panel의 결함부위 사진



3. X Upper Anionics Panel, X200

그림 2 SSM 표면상의 수상돌기 현상

SSM 수상돌기에 의한 흑화변색은 위성 구조체 판넬에서 넓게 발생되어 있음을 확인하였고 지속적인 변색의 확대는 거울 표면의 흡수율 및 반사율 특성에 영향을 줄 수 있다. 이에 따라 SSM 수상돌기 현상의 발생 메카니즘 규명이 반드시 필요하였으며 가능한 결함 요소인자 등을 다각도로 분석하여 고장탐구를 수행하였다.

일반적으로 SSM 단면 구성은 그림 3과 같이 붕규산염 유리 피막에 99.99% 은도금 층과 이를 보호하기 위한 니켈 크롬 도금층으로 구성되어 있다. SSM 수상돌기의 발생 위치는 은도금 층에서 발생하여 신경세포 모양으로 흑화 변색되었으며

주로 SSM 가장자리에서 많이 발생하고, 일부 내부에서도 성장하는 것을 확인되었다.

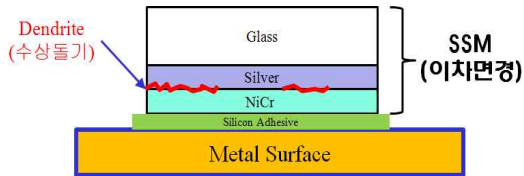


그림 3 SSM 구성 단면 및 수상돌기 현상

먼저, 지상 시험중 발견된 SSM 수상돌기와 유사한 사례를 문헌 조사한 결과, 저궤도 장기 노출 시험을 수행한 NASA LDEF 위성의 SSM 표면에서 다음 그림 4와 같은 형태의 수상돌기 현상이 보고되었다(참고문헌 1). NASA LDEF 위성의 SSM 수상돌기 현상은 전자기방사에 의한 결합으로 판단하였으며 궤도 진행방향에 장착된 시편에서만 코팅소재의 용융 및 고형화 과정에서 Cu, Al이 Zn과 화학반응을 일으켜 나타난 현상으로 설명하고 있다.

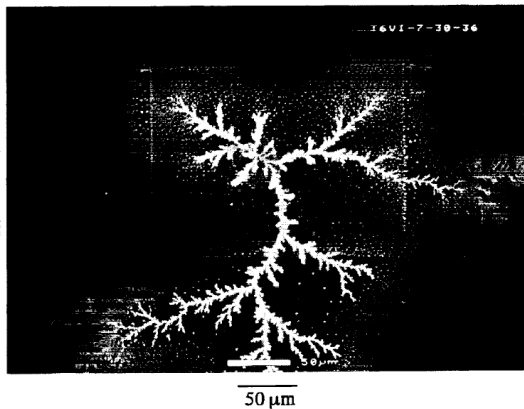


그림 4 NASA LDEF위성의 Mirror Dendrite

이외에도, IEEE Paper(참고문헌 3)에서는 전자파 복사 환경에 장기간 노출시험을 수행한 결과, SSM 표면의 광학적 성능 저하를 유발하고 그림 5와 같은 수상돌기 현상이 나타날 수 있다고 보고되었다.

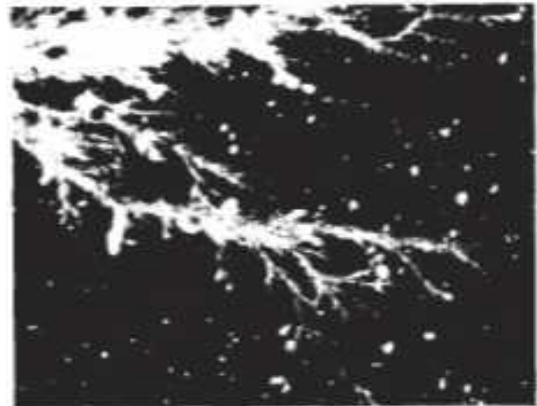


그림 5 SSM 표면 손상 및 수상돌기 흔적

3. SSM 수상돌기 현상 시편실험

지상 시험중 발견된 SSM 수상돌기 현상과 기존 문헌 자료를 참고하여 수상돌기 발생 매커니즘을 검토하고 SSM 수상돌기의 결합 가능 요소들을 다음과 같이 추정하였다

- Electron Irradiation
- Electrical Current/Voltage Difference
- Acetone 세척제
- Battery Charge & Discharge Cycle
- Vacuum
- ESD(Electrostatic Discharge) Arc

추정된 결합 가능요소들과 SSM 수상돌기 현상과의 연관성을 실험적으로 검증하기 위하여 그림 6과 같이 알루미늄 플레이트 상에 SSM 시편 1개를 동일공정으로 접착하여 사용하였으며 표 1과 같이 SSM 수상돌기 시편 실험을 단계적으로 수행하였다.

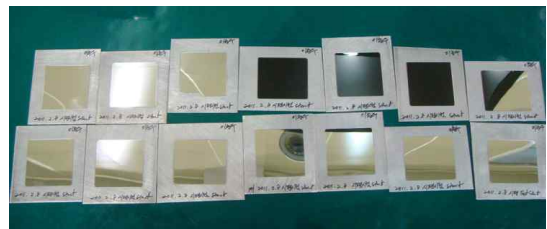


그림 6 SSM 시편 형상

표1 SSM 수상돌기 시편실험

시편시험	Possible Cause	시험내용	수상돌기 현상재현 여부
1) Halogen Lamp 조사시험	Electron Irradiation	Halogen lamp 장기 조사 시험(13H 65℃)	X
2) Electrical Current 노출시험	Current	Current Flow 노출 : 8H 50mA ~1.0A	X
3) Electrical Voltage 노출시험	Voltage Difference	50V/55V 전위차인가 노출시험	X
4) Acetone 세척시험	Acetone	Acetone Cleaning	X
5) Test Battery 충방전 시험	충방전 전압 Cycle	Test Battery 상에서 충방전 Cycle 수행	X
6) Vacuum 시험	Vacuum	열진공시험 전후비교	X
7) ESD Arc 방전시험	ESD Arc	ESD Arc 1kV ~ 28 kV, 총 44,900 Cycle (단, ESD Arc 산화 흔적)	X

표 1의 SSM 시편 시험은 할로겐램프 조사시험, 전류/전위차 노출시험, 배터리 충방전 노출시험, 정전기 방전시험 등 전기적 실험과 진공노출시험, 아세톤 반응 시험등 기계적 실험을 수행하였다. 그러나 상기 시편 실험에서는 수상돌기와 동일한 현상을 재현하는데 실패하였으며, 일부 정전기 방전시험에서 약 4만5천 방전 사이클 이후에 정전기 발생 아크로 인하여 그림 7과 같이 SSM 가장자리 은도금 층의 산화 손상 흔적만 재현되었다. 그러나 정전기 아크에 의한 점(Spot) 형상의 산화물 흔적은 지상에서 발견된 SSM 수상돌기 형태와는 전혀 다른 모양으로 실험적 연관성을 찾을 수 없었다.



그림7 SSM 정전기 방전 시험 및 시편

이에 따라, SSM 수상돌기 발생시편의 단면 검사를 추가적으로 수행하여 SEM/EDX(Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) 분석을 수행한 결과, 수상돌기 발생부위에 그림 8과 같이 오염물질 또는 수분이 침입할 수 있는 유입경로가 형성되어 있음을 확인하였으며, 유입경로를 통하여 은도금 층의 흑화 변색이 점진적으로 확산되어 수상돌기 형태로 성장하고 있음을 추정할 수 있었다.

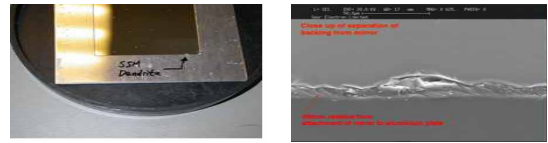


그림 8 SSM 수상돌기 부위 SEM/EDX분석

따라서, SSM 수상돌기 현상을 은도금 층의 흑화변색으로 추정하고, 위성 조립실 내부 환경 중 은도금 흑화변색을 유발할 수 있는 결함 요소를 추정하여 SSM 수상돌기 모사실험을 수행하였다.

4. SSM 수상돌기 성장 매카니즘

먼저, SSM 수상돌기 현상을 은도금 변색에 의한 흑화변색으로 추정하고, 은도금 변색 원인과 발생 매카니즘을 살펴보았다. 일반적으로 공기 중에 노출된 은제품의 변색현상은 그림 9와 같이 일상생활 주위에서도 많이 관찰된다. 즉 은 성분과 공기 중에 존재하는 이산화황, 황화수소 또는 염소 화합물이 은과 쉽게 반응하여 은 변색이 발생하며, 변색 원인 물질로는 일상 생활환경에서 흔히 접할 수 있는 마늘, 양파, 고무, 지표면 등 다양한 형태로 주위에 존재하게 된다.



그림 9 은도금 제품의 변색

즉, 은 도금 층이 공기중 황화가스와 접촉하는 경우, 황화반응을 일으키며 도금 표면에 유화은 피막을 만들어 표면을 황색에서 다갈색으로 변색 시키며 피막이 두꺼워지면 흑색으로 변하게 된다. 이러한 은도금 층의 변색은 은도금 부식의 일종으로 일상 생활에서도 쉽게 발견할 수 있으며, 아황산 가스나 염소가스에 노출되는 환경에서는 은 도금 황화변색이 더 빠르게 진행하게 된다.

황화 반응에 의한 은 변색 요인 물질은 주로 유황 화합물이나 암모니아이며, 유황화합물은 합성고무 제작시, 고무의 신축성을 높이기 위하여 가황공정을 통해 첨가되는 물질로 많이 사용됨에 따라 고무 제품에서는 황화가스가 지속적으로 공기중에 분출하게 된다.

다음 그림 10은 위성 전기전자 실험실 및 조립장에서 주로 사용하고 있는 정전기 방지 패드를 나타낸 것으로 3종의 상용제품을 주로 사용하고 있으며 주 재료는 합성고무 또는 우레탄 폼으로 되어 있다.

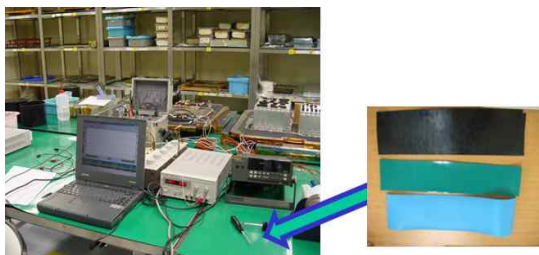


그림 10 정전기 방지 패드

일반적으로 위성조립 기간 중에 SSM 부품이 설치된 위성 판넬을 정전기 방지패드 위에 올려 놓은 상태로 장기간 보관하게 되며, 이때 고무에서 분출된 황화가스와 SSM 은도금층이 직접 접촉할 수 있게 된다. 이때 폴리에틸렌 또는 SSM 유리 표면과 같은 재질은 그림 11과 같이 내부에서 마이크로미터 단위의 미세한 기공이나 균열 틈새가 다수 존재함에 따라 외부 기체의 유입경로를 제공하게 된다.

폴리에틸렌 포장지에 밀봉된 은도금 제품이 황화 변색을 일으키는 것도 산소, 염소가스, 황화 가스, 산화 질소등의 기체가 투과되어 황화반응

을 일으키기 때문이다.

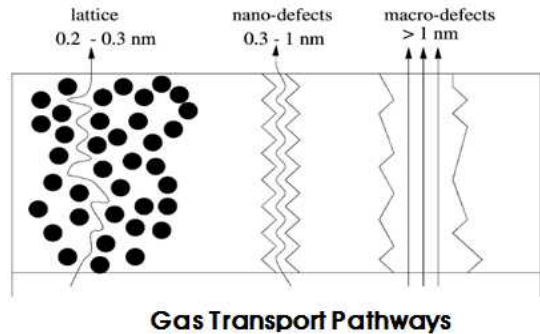


그림 11 기체 유입 경로

따라서, SSM 은도금 층과 정전기 방지 패드간의 황화 반응 여부를 실험적으로 검증하기 위하여 상용제품 3종(검정/합성고무, 녹색/합성고무+ESD 코팅, 파란색/우레탄 폼)의 정전기 방지패드를 이용하여 SSM 수상돌기 모사실험을 수행하여 실험적으로 검증하였다.

5. SSM 수상돌기 모사 실험

SSM 표면에서 발생한 수상돌기 현상을 은도금 층의 황화반응으로 판단하고, 위성 조립실에서 사용하는 정전기 방지패드 3종에 사용하여 그림 12와 같이 상온 및 고온 가속 모사실험을 수행하였다.



그림 12 SSM 수상돌기 상온/고온 가속실험

SSM 수상돌기 결함을 재현하기 위하여 SSM

시편을 정전기 방지 패드로 감싸 밀봉시킨 후, 상온 및 고온(55℃)에 노출시키고, SSM 표면의 수상돌기 발생 여부 및 성장 과정을 추적하였다. 특히, 정전기 방지 패드를 고온(55℃)에 노출시켜 가속 실험을 수행하여 고무패드에서 유황성분 가스가 지속적으로 분출되도록 하여 SSM 표면에 노출시켜 수상돌기의 발생 및 성장 여부를 관찰하였다.

수상돌기 모사실험에 사용된 정전기 방지 패드는 일반 상용품으로 검정패드는 가황고무 재질이며 녹색패드는 가황고무위에 ESD 코팅된 자재, 파란색 패드는 가황공정이 적용되지 않은 우레탄 재질을 사용하였다.

SSM 표면은 봉규산업 유리피막 밑에 99.99% 은도금 층으로 되어 있음에 따라 은도금 층이 직접적으로 외부와 접촉하는 경로가 존재하지 않는 것처럼 보이나, SSM 가장자리 부위에 미세한 틈새와 유리 내부 기공 또는 서브마이크로 크기의 미세 균열 틈새를 통하여 외부 유입경로가 존재함에 따라 은도금 층의 황화 반응이 일어나게 된다.

정전기 방지 패드를 이용한 SSM 수상돌기 모사실험을 약 15일간 고온 가속하여 추적한 결과, 녹색 및 파란색의 우레탄 폼 패드에서는 그림 13과 같이 SSM 시편상의 외관 변화가 전혀 나타나지 않았다.

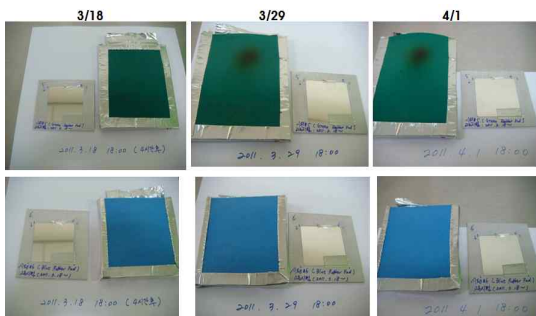


그림 13 녹색/파란색(우레탄 폼재질) 패드를 이용한 SSM 수상돌기 모사 실험

반면에 가황 처리된 검정색 패드에서는 고온가속 시험 2~3일후부터 SSM 시편 가장자리부터 수

상돌기 증상이 나타나기 시작하였으며 약 15일후에는 SSM 가장자리 전체면과 내부까지 확산 성장하였음을 그림 14와 같이 확인할 수 있었다. 또한 은도금 황화반응 여부를 추가 확인하기 위하여 은도금 처리된 전선 와이어를 함께 노출시켜 흑화변색을 동시에 관찰하였으며, SSM 가장자리 일부를 알루미늄 테이프로 밀봉하여 노출 부위와 비교한 결과, 알루미늄 테이프 밀봉 부위에서는 SSM 수상돌기 현상이 전혀 발견되지 않았다.

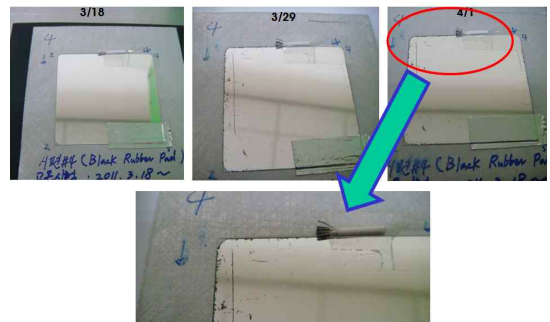


그림 14 검정색(가황처리 고무) 패드를 이용한 SSM 수상돌기 모사 실험

검정색 패드를 이용한 모사실험을 통해, SSM에서 발견된 수상돌기 현상은 가황 처리된 고무에서 발생한 황화가스와 반응하여 일어난 흑화현상을 실험적으로 검증할 수 있었다. 또한 SSM 수상돌기 발생 부위는 그림 15와 같이 유리 표면상의 미세한 균열 및 기공 부위를 유입경로로 하여 성장하고 있음을 확인하였다.

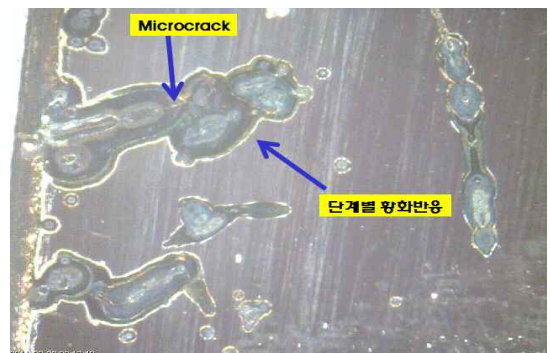


그림 15 SSM 수상돌기 발생

❖ 시편 #4, 검정고무-약 55°C, x200

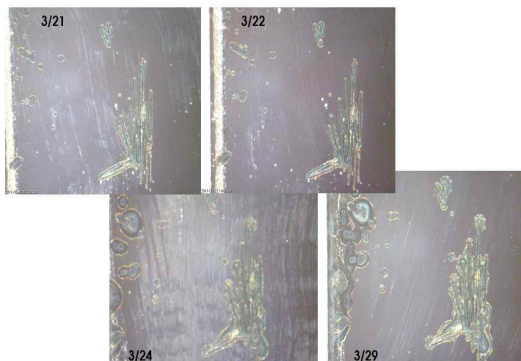


그림 16 SSM 수상돌기의 성장

그림 16은 SSM 수상돌기 발생 부위를 약 9일간 200배율로 촬영 관찰한 사진으로 수상돌기의 성장은 초기 발생부위를 중심으로 인근 부위로 흑화 변색되면서 확산 성장하고 있음을 알 수 있었다.

이상과 같이 SSM 수상돌기 모사실험 결과를 통하여, SSM 은도금 층은 외부 유입된 황화 가스에 직접 노출되는 경우 흑화변색으로 인한 열 제어 특성 저하를 일으킬 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 또한 SSM 수상돌기 모사실험 수행 후 원인 물질인 가황 고무패드를 우레탄 패드로 전량 교체하였으며, 이후에는 SSM 수상돌기 현상이 더 이상 발생 또는 성장하지 않음을 최종 확인할 수 있었다.

6. 결론 및 요약

본 연구에서는 위성 열제어 주요 구성품 중 하나인 SSM(이차면경) 표면에서 나타난 수상돌기 현상을 분석하고 결함원인을 규명하기 위한 시편 실험 및 모사실험 결과를 정리하였다. SSM 수상돌기 모사실험 결과에서 확인하였듯이, SSM 표면의 은도금 층은 황 또는 염소 화합물이 함유된 환경에 장기간 직접 노출시키는 경우, 은도금 층이 황화 반응을 일으켜 흑화변색현상 나타날 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 따라서, SSM 수상돌기 현상을 방지하기 위해서는 지상

조립/시험시 가황 처리된 고무 패드 사용을 금지하여야 하며, 기타 은도금 부품의 환경조건을 규제할 필요가 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. NASA Report N95-27652 " Effects of Low Earth Orbit on the Optical Performance of Multilayer Enhanced High Reflectance Mirrors"
2. Silver Whisker Gallery, NASA([http:// nepp.nasa.gov/whisker](http://nepp.nasa.gov/whisker))
3. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 38 No6 " Electrostatic Discharge Induced Thermo-Optical Degradation of Optical Solar Reflector(OSRs)