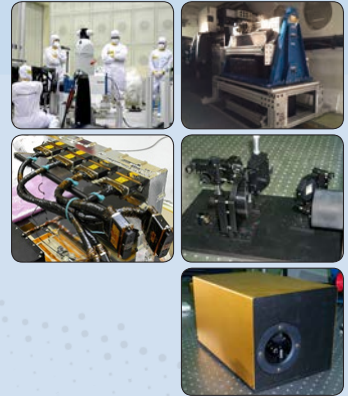


05호

해설이 있는

# 국민기술제안 인사이트

INSIGHT



항공우주 기술을 이용한  
대기환경 감시



미세먼지 문제 해결을 위한  
국가기후환경회의

대통령 직속 자문기구인 국가기후환경회의는 미세먼지 문제해결에 필요한 국민의 아이디어 및 보유기술에 대한 창구 역할을 수행하는 「국민기술제안 자문 플랫폼」을 운영하고 있습니다.

이를 통해 국민의 미세먼지 해결 기술 제안을 적극 청취하고, 전문기관(연구개발, 특허, 인증, 사업화 등)을 통한 기술자문 및 대국민 서비스를 지원해 오고 있습니다.

본 ‘국민기술제안 INSIGHT’는 국민들이 제안한 미세먼지 문제 해결을 위한 기술아이디어 가운데 정책 반영 및 사업화 등이 필요한 아이템을 선별하여 심층적으로 분석하기 위해서 추진된 사업입니다.

앞으로, 다양한 국민들의 아이디어가 기술개발로 이루어지고 현장 적용이 확대되어 미세먼지 없는 푸른 하늘에서 숨쉴 수 있도록 적극 지원하도록 하겠습니다.

· 항공우주 기술을 이용한 대기환경 감시 기술 관련 국민기술제안 내용 ·

국민기술제안명	제안내용	주요사진
<p>항공활동 대응 시스템 (19.7, 전*윤)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항공기에 의한 천연 흡착제 분사를 통한 미세먼지 저감</li> <li>• 대기오염배출 사업장 밀집 지역(공단·산단 등)에 천연 흡착제를 항공에서 분사</li> <li>• 미세먼지 표면에 흡착(코팅)시켜 토양에 낙하되어 분해가 이루어지게 하는 미세먼지 감소 기술</li> </ul>	
<p>3차원 분석을 위한 종관 기상 및 대기오염도 측정용 kytoon 시스템 개발 (19.8, 강*)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대기오염도 측정용 kytoon 시스템 개발</li> <li>• 벌룬 이용 연직루트의 기상과 오염도 측정기술</li> <li>• 항공 측정에 비해 경제적, 드론 측정(측정기 무게, 전력공급 등)에 비해 장시간 측정이 가능하며 고도 변화에 따른 측정 방법임</li> </ul>	
<p>자동교정 범국가 대기오염 측정 네트워크 (20.10, 이*엽)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광학측정방식을 이용하여 센서가 미세먼지 농도를 측정하는 원리는, Mie 이론에 근거하여, LED에서 발생한 적외선이 미세먼지에서 산란되면 이를 Photodiode로 관측</li> </ul>	
<p>미세먼지 포집 드론 (19.9, 주*식)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공기가 초음속 영역을 급가속하여 지날 경우 공기 중의 수증기가 응축되는 현상을 활용하여 미세먼지를 응축 포집하는 드론제작 기술</li> </ul>	

## 요약문

- ✔ 최첨단 전자광학기기인 초분광영상기를 인공위성이나 드론에 탑재, 운영함으로써 대기환경을 효율적으로 감시하는 기술을 설명하고 현재 운용중인 천리안위성2B호 환경탑재체를 소개
- ✔ 초분광영상기는 망원경과 분광기가 결합되어 공간정보(영상)와 분광정보(스펙트럼)를 동시에 획득하는 획기적 기기이며 일반인들이 알기 쉽도록 그 원리를 설명
- ✔ 초분광영상기는 대기환경을 관측하는데 적합한 기기이며 첨단 전자광학기술의 발전에 의해 항공기탑재, 저궤도위성탑재, 심지어 정지궤도위성에도 항우연과 미국 Ball Aerospace가 공동개발한 우리 환경탑재체가 세계 최초로 탑재되어 운용중
- ✔ 우리나라를 중심으로 동아시아지역의 대기환경 관측을 위해 천리안위성2B호에 탑재된 초분광영상기 GEMS의 열개를 설명하고 그 개발과정과 우주궤도에서 운용하는 방식도 간략히 소개
- ✔ 최첨단 전자광학 기기인 초분광영상기의 우주급 실용모델이 이미 개발된 현재, 이러한 기술기반을 가지고 이를 지상용 포터블 방식 및 드론탑재용 등으로 소형경량화 다운그레이딩을 수행하면 우리나라 곳곳에서 대기오염 감시를 목적으로 널리 활용되는 공공장비를 적은 예산으로 개발 운용할 수 있음
- ✔ 위성용 우주급 기기는 아주 높은 신뢰도를 가져야 하므로 고가의 부품을 사용하여 개발비가 막대하고 고장시 대처방안이 없으나, 이를 지상용, 무인기(드론)용으로 다운그레이딩 하면 일반 상용부품을 대부분 사용할 수 있고 국내기업을 통한 국산화가 상당 부분 가능하며, 고장시에도 손쉽게 수리할 수 있고 계속해서 개선해 나갈 수 있는 큰 장점이 있음
- ✔ 항우연은 정지궤도위성용 초분광영상기를 환경탑재체로 이미 개발하였고 이를 활용하여 항공기탑재용 모델을 개발중이며 과거 실험실 모델도 이미 개발한 기술유산을 보유하고 있으므로, 산학연 체계를 구성하여 여러 가지 용도와 조건에 적합한 환경감시장비로 초분광영상기를 다양하게, 경제적으로 개발할 수 있음
- ✔ 항공기탑재 초분광영상기는 위성탑재 초분광영상기의 데이터를 검보정 하는데도 사용되고, 차기 위성용 탑재체 개발을 기술적으로 준비하는 선행모델로 기여도가 크기 때문에 개발과 관련 연구가 활발해지는 현재 기회를 활용하여 소규모, 지역적 환경감시용으로 다양한 지상용 및 드론용 초분광영상기 개발이 연동되어 촉발될 필요가 있음



# CONTENTS

1. 대기환경 감시 방법 및 장단점	1
2. 대기환경 관측기기로서의 초분광영상기	2
3. 인공위성을 이용한 지구대기환경 감시	6
4. 드론을 이용한 대기환경감시 제안	12
5. 결론: 초분광영상기를 드론, 위성에 탑재하여 효율적 대기환경 감시	16



## 표목차

## 그림목차

[표 1] 외국의 저궤도 환경위성	7	<그림 1> 초분광영상기 개념도	4
[표 2] 환경탐재체 GEMS 제원	8	<그림 2> 환경탐재체 GEMS 센서부와 전자부	9
[표 3] 환경탐재체 GEMS 관측항목과 기대효과	12	<그림 3> GEMS의 초점면전자부	9
		<그림 4> GEMS의 기기제어전자부(P+R)	9
		<그림 5> 환경탐재체의 GEMS의 우주궤도상 관측 방식	10
		<그림 6> GEMS 광학계-망원경 광정렬 (항우연 광학Lab에서 완성)	11
		<그림 7> 항우연이 1998년 자체연구로 개발한 초분광영상기 HIKA	13
		<그림 8> NASA 프로그램으로 Ball Aerospace가 개발한 항공기탐재 대기환경관측 초분광영상기 GeoTASO	14
		<그림 9> GeoTASO 내부와 항공기탐재 마운트	14
		<그림 10> 2016년 NASA의 KORUS-AQ 프로그램으로 한국 관측	15



# 항공우주 기술을 이용한 대기환경 감시

이승훈 한국항공우주연구원 위성연구소 책임연구원

최첨단 전자광학기기인 초분광영상기를 인공위성이나 드론에 탑재, 운영함으로써 대기환경을 효율적으로 감시하는 기술을 설명하고 현재 운용 중인 천리안위성2B호 환경탑재체 소개

## 1. 대기환경 감시 방법 및 장단점

- 대기환경 관련 물질은 가히 무수한 종류가 있다고 하겠으나 여기서는 대기오염, 그중에서도 미세먼지를 일으키는 원인이 되는 화학물질을 관측하여 종류, 발생위치, 발생량(농도), 이동 경로 등을 알아내는 기술적 방법 범주에서 논의하고자 함.

### ☑ 포집

- 현재 가장 많이 행해지고 있는 방법으로 관측지점을 설정하거나 이동형 플랫폼을 이용하여 대기 샘플을 채취하고 이를 분석함으로써 오염물질과 발생량을 측정함. 대부분의 경우 사람의 손이 필요하고 최종 산출물을 얻기까지 비교적 긴 시간이 걸리는데 포집방법을 새로 개발 하므로써 자동화, 실시간측정을 추구하고 있음.

### ☑ 라이다(Lidar)

- 레이저(주로 펄스형)를 발사하고 그 반사신호를 감지함으로써 거리를 정밀 측정하는데 이를 스캔 방식으로 운용하면 주변 지형, 장애물 등을 관측할 수 있어 (고가이긴 하지만) 많이 쓰이고 있음.
- 또한 이 라이다를 대기오염 화학물질에 특화된 파장으로 선별 또는 가변식으로 하여 대기에 발사하면 반사되는 신호를 감지함으로써 대기 중 특정 화학물질의 양과 위치를 알아낼 수 있는데, 아주 높은 신호대 잡음비의 데이터를 얻을 수 있고 밤에도 관측이 가능하다는 장점이 있으나 조금만 정렬이 틀어져도 발진을 하지 않는 레이저의 특성과 열적 기계적 조건이 까다로워 고장이 잦으며 기기가 고가이고 소모 전력도 높은데다가 대기오염원에 맞춘 여러 파장을 동시에 조사하거나 파장 가변형 레이저로 구현하는 것은 더욱 힘들기 때문에 현장에서 쉽게 운용할 수 있고 내구성이 높은 기기로 만들거나 소형경량화 제작단가절감 등을 이루

기에는 매우 힘든 현실적 단점이 있음.

☑ 분광영상기(Imaging Spectrometer)

- 분광기: 입력 빛을 그 파장을 가지고 분해하여 그 속에 담긴 정보를 얻게 해주는 기기로, 여러 파장 신호가 한데 섞여 들어온 빛을 파장별로 분산시켜 내어보내는 프리즘과 같은 역할을 하는 분광소자인 회절발(Diffraction Grating)과 광검지기로 구성된 광전자구조체로 되어 있음. 한편 분광신호를 얻는 다른 방법으로 푸리에(Fourier) 변환 분광기가 있는데, 이는 마이켈슨 간섭기의 원리를 이용하여 피사체에서 오는 빛을 서로 수직한 두 빛으로 나누고 기준 축 빛과 미세이동축을 오간 빛을 간섭시키면 공진조건에 맞아 강해진 파장의 빛이 검지되도록 하는 열개임. 분광기의 주요 성능은 어떤 파장 대역에서 얼마나 미세하게 빛을 분해하는가(분해능), 그 신호가 잡음(여기선 소리가 아니고 빛)신호에 비해 얼마나 뚜렷한가(신호대잡음비), 분광신호의 안정성, 불용광(Straylight) 차단 능력 등에 달려있음.
- 초분광영상기(Hyperspectral Imager): 원격으로 공간정보 곧 영상과 함께 분광정보를 동시에 획득하는 기기로, 위에서 설명한 분광기 앞에 망원경이 연결되어 먼 거리의 피사체 영상을 분광기 입력단에 결상시켜주고 이 빛살을 다시 나란히 펴서(Collimation) 회절발(Grating)에 닿게 하면 분광이 일어나고 이를 다시 결상하여 초점면의 광검지기로 신호를 출력하는 기기로 첨단 전자광학기술의 결정체라 할 수 있음.

2. 대기환경 관측기기로써의 초분광영상기

- 원격탐사(Remote Sensing)를 위한 전자광학 관측기기 분야에서 공간정보와 함께 분광정보도 얻기 위한 노력은 일찍이 다색관측 카메라(Multi-spectral Camera)를 세상에 내놓음. 이는 흑백으로 관측하던 전자광학 카메라의 광학계에 필터를 삽입하여 입력광을 몇 가지 파장 밴드(수십 나노미터 정도의 파장대역폭을 가지고 있으며 R—Red, G—Green, B—Blue, NIR—근적외선 등)로 나누어 관측하는, 마치 칼라TV와 같은 개념인데 미세한 파장 분해를 필요로 하지 않는 분야에서 지금도 많이 활용되고 있음.
- 넓은 지역의 곡물 작황이나 수립 상태를 모니터링 하거나 바다의 색깔을 알아내어 오염이나 플랑크톤, 조류 등에 대한 정보를 얻고자 하는 목적이 있을 때는 여러가지 파장으로 나누어 촬영하여야 하는데, 수백 나노미터의 넓은 파장대역의 빛을 하나로 합쳐서 받아들이는 흑백 영상(흑백영상관측이 반드시 못한 것만은 절대 아님. 원격탐사의 목적과 촬영조건에 따라 적합한 방식이 있고 지금도 흑백촬영은 지표면의 물체를 촬영하는데 있어서 가장 효율적 공간



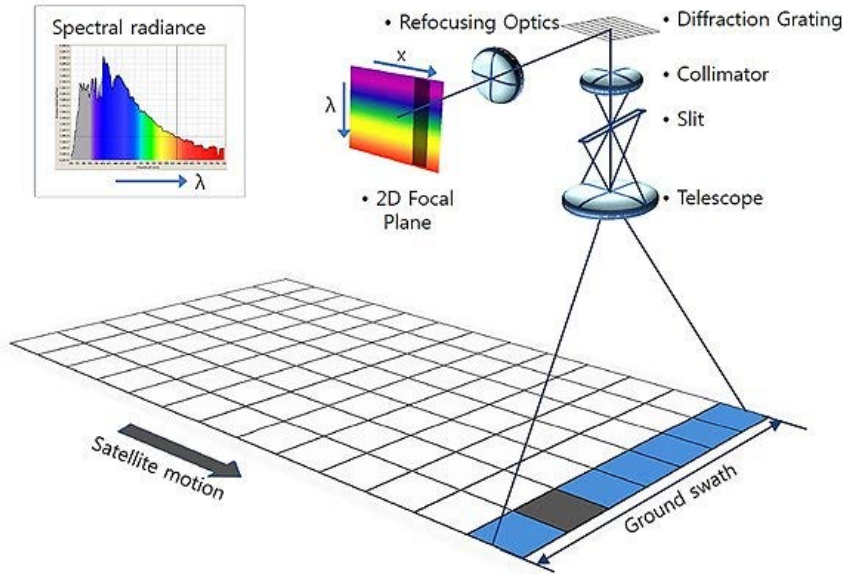
정보 획득 방식임) 관측과 비교할 때, 수십 나노미터씩 묶어서 열 개 내외 파장대역으로 촬영하는 다색관측 카메라(Multispectral Camera)만 하여도 그 각각의 칼라채널의 입력 에너지가 흑백 전체를 합쳐서 받아들일 때(Panchromatic)보다 현저히 낮으므로 흑백 채널의 광검지기 픽셀보다 더 큰 것을 쓰거나 또는 흑백과 같은 것 여러 개를 묶어 사용함.

- 그런데 대기환경을 관측하고자 하면 지역 영상과 함께 오염원이 되는 화학물질의 스펙트럼을 얻어야 하므로 분광해상도가 다색관측의 수십 나노미터로는 불가하고 수 나노미터 심지어 영점 몇 나노미터와 같이 극히 미세한 분광정보가 필요함. 대기환경을 논할 때 그 속에 존재하는 입자상 물질과 기체상 화학물질로 나눌 수 있는데 미세먼지와 같은 입자를 원격으로 직접 관측할 수는 없고(포집하여 현미경으로 보는 작업으로 가능) 그 원인이 되는 화학물질(전구물질—Precursor)이 태양빛의 경로상에 있을 때 저마다 고유한 파장에서 빛을 흡수하는 성질을 이용하여 스펙트럼 정보로부터 산출해냄.
- 예를 들자면, 천리안위성2B에 실린 환경탐재체인 GEMS는 고도 35,768킬로미터에서 동아시아 지역을 내려다보면서 지구에서 반사되어 올라오는 태양빛의 자외선 영역 스펙트럼을 관측하고 있는데 만일 어느 지역에서 305 ~ 330 나노미터 파장의 빛이 약해진(흡수된) 것이 관측되면 그곳에 이산화황이 존재하며(흡수정도에 따라 농도도 산출) 정지궤도위성의 장점인 지속 관측을 통해 이 화학물질이 어느 경로로 이동하는지도 알려줌.
- 이렇게 미세한 파장으로 쪼개어 수백, 수천 개의 파장정보로 검지해내는 것이 초분광(Hyperspectral)인데 각각의 광검지 소자 하나하나에 들어오는 입력에너지를 생각해보면 원격탐사라는 거리 조건에 따라 제공분의 일로 에너지가 줄어드는 기본조건에 더하여 분광해상도가 높아지는 것은 기술의 한계를 개척해야 하는 어려운 일임. 그래서 90년대까지는 항공기탑재 초분광영상 획득이 실험적으로 수행되던 것을 저궤도위성에 이어 오늘날 정지궤도에서도 초분광영상 획득이 가능해진 것은 실로 광전자검지기 기술발전의 결과임.

☑ 초분광영상기 열개

- 공간정보 분야에서 원격탐사의 데이터를 더 고해상도로 요구하는 것처럼 분광정보도 더 세밀한 파장분해능을 요구받아온 것은 관측데이터의 활용도를 생각할 때 당연함. 실제로 해상도에는 네 가지가 있음을 알아야 하는데, 예로써 위성탐재 관측기기의 경우 지상의 몇 미터를 한 화소로 관측하는가 하는 공간해상도(Spatial Resolution) 외에도, 피사체로부터 올라오는 빛 신호를 몇 나노미터 또는 그 이하의 세밀한 파장으로 분해하여 관측결과를 출력하는가 하는 분광해상도(Spectral Resolution)도 있고, 입력광의 세기를 몇 단계로 나누어 감지해내는가 하는 방사해상도(Radiometric Resolution), 그리고 얼마나 자주 관측 하는가 곧, 출력데이터는 얼마나 작은 시간간격으로 자주 갱신되는가 하는 시간적해상도(Temporal

Resolution)도 있음. 전자광학 관측기기 분야에서 가히 최첨단 기술의 결정체라 할 초분광영상기의 열개는 크게 나누어 망원경, 분광기, 그리고 광전자(검출기)부로 이루어짐.



〈그림 1〉 초분광영상기 개념도

(그림출처: ESA)

### ☑ 망원경

- 실험실에서와 같이, 분광기만으로는 스펙트럼을 얻을 수 있으며 이를 위해 빛을 분광기로 넣어주는 열개를 꾸며야 함. 멀리 떨어진 곳의 공간정보를 함께 얻으려면 다시 말해 어느 곳에 어떤 가스가 있는가를 알려면, 그 먼 곳의 공간정보를 상면(Image Field)에 가져다주는 영상광학계 곧 망원경이 필요함.
- 이 망원경은 관측하고자 하는 공간적(Geometric- 거리, 시야각 등), 방사적(Radiometric- 광입사구에서의 복사조도(Irradiance), 곧 빛이 얼마나 세계 들어오는가) 조건에 따라 최적화된 설계로 시작되며 촬영방법/조건에 맞춘 광구조체(Optomechanical Structure)로 구현되어 이에 이어질 분광기와 결상점을 보통 슬릿(Slit) 형태로 공유함. 그리고 이 망원경에 덧붙여서, 초분광영상기에 필수적 요소 중 하나인 복사보정 유닛이 추가되는데 이는 망원경과 같이 결상광학계는 아니지만 매우 중요한 유닛이라 언급되어야 함. 태양빛이 지구대기에 반사하여 이 관측기기로 입사할 때 그 스펙트럼을 측정하는데 한편으로는 태양빛 자체의 스펙트럼을 분광정보의 기준으로 얻어야 하므로 망원경 광학계 앞 또는 별도의 광경로를 내어

서 복사보정용 디퓨저(Diffuser)를 설치함.

- 이 디퓨저는 투과형 또는 반사형으로 되어있고 관측파장대역 전체에서 거의 완벽한 난반사를 만들도록 되어있으며 스펙트럼 보정의 기준이 되므로 특히 위성탑재체의 경우 우주에서 방사능에 의한 광학특성 악화를 대비하여 두 개의 디퓨저를 준비하고 그중 하나를 주기적으로 노출하여 복사보정에 사용한다면 다른 하나는 가능한 장기간 노출을 금하다가 아주 가끔씩 디퓨저 자체의 성능악화를 알아내기 위하여 사용함.
- 따라서 이 망원경의 광입사구에는 관측을 위한 열린 입사구 외에 암흑보정과 광학계 보호를 위한 광학마개와 두 개의 디퓨저 등 총 네 가지의 기능별 구역으로 나뉘어진 보정휠(Calibration Wheel)이 장착되는 것이 보통임.

### ☑ 분광기

- 스펙트럼을 얻어내는 분광기는 프리즘 같이 빛을 분해하는 회절발(Diffraction Grating)을 광경로 상에 관측하고자 하는 파장에 맞추어 회절 차수(Diffraction Order)와 블레이즈 각(Blaze Angle)을 정확히 맞춰서 정렬해놓고 그 전후로 빛을 가지런히 해주는 시준기(Collimator) 형태의 광학계로 이루어짐.
- 극히 안정된 광구조체가 필요하며, 산란광이 많이 생길 수 밖에 없는 여기에서 불용광(Straylight)과 고차(Higher Order)의 회절빛을 차단하는 기술이 아주 중요함. 대부분의 경우 광학계는 나름대로 어떤 형태의 편광을 두드리지게 하는데, 이것이 대기 스펙트럼에 나타난 미세한 차이를 가지고 화학물질을 산출해내는 측정결과에 오류를 만들 수 있기 때문에 광경로상(분광기 앞)에 Depolarizer를 두는 경우도 있음.

### ☑ 광전자부

- 인공위성이나 드론 같은 비행체(관측자가 이동)에 초분광영상기를 탑재하여 대기환경 원격 관측을 수행하는 경우, 그림1과 같이 그 초점면은 평면(2차원)이 되어야 함. 이 초점면의 한 축을 따라서는 공간정보가, 다른 한 축으로는 분광정보가 수집되는 것임. 잘 알려진 예로써, 지상을 고해상도로(높은 공간해상도로) 촬영하는 저궤도위성 카메라의 경우 최종 상이 맺어지는 초점에는 1차원의 광검지기 어레이(Focal Plane Array)를 사용함. 한 순간에 지상의 가로로 한 줄이 카메라 초점 상의 광검지기 어레이 한 줄이 되는 것이고(이미징이란 이렇게 오브제 한 점을 이마쥬 한 점으로 떠옮기는 것임) 위성이 빠른 속도로 비행하면서 훑어나가 마치 복사기처럼 넓은 띠 모양으로 지상의 영상을 찍어나가는 것임.
- 그런데 초분광영상기는 이렇게 망원경으로 지상 한 줄을 초점의 한 줄 곧, 슬릿으로 옮긴 것

을 다시 나란히 펴서 중간에 회절밭을 놓아 분광하여 직각방향 다른 축으로 스펙트럼을 펼치면 한 순간에 지상 한 줄의 위치와 스펙트럼이 한 면(2차원)에 맺히는 것임.

- 위성이 진행함에 따라 지상의 그 다음 한 줄에 대해서도 이렇게 한 면의 분광 데이터가 얻어지고 이런 식으로 계속하여 촬영을 함. 그러므로 초분광영상기는 일반 고해상도 카메라보다 데이터 양이 훨씬 많아서 저장 및 전송 장치에 기술적 부담이 됨. 물론 그보다 더 기본적으로 요구되는 것이 바로 광검지기 픽셀 각각의 양자효율(Quantum Efficiency)인데 쉽게 바꾸어 말하자면 적은 양의 빛에 대해서도 충분한 광전자를 내주는 능력으로 현재는 고효율 2차원 CCD로 이를 수행함.
- 특히 대기환경 감시용 초분광영상기는 그 신호대 잡음비(SNR) 요구치가 일반 고해상도 전자광학카메라의 그것보다 약 열 배 높아 이 기술 한계를 극복하는 것이 큰 걸림돌임. 이러한 광전자검출면에는 물론 높은 신호대잡음비 구현을 위하여 특별한 냉각장치가 접속되고 임무수명 기간 이 초점면의 열화를 감지하기 위하여 탑재형 복사보정 광원(On-board Rad. Cal. Lightsource)을 초점면검지기 옆에 장치하는 것이 좋음

### 3. 인공위성을 이용한 지구대기환경 감시

#### ☑ 위성으로 대기관측을 하는 이유

- 현재 천리안위성2B호에 실려 임무를 수행중인 환경탑재체의 개발목적은 우리나라를 포함한 동아시아 지역의 기후변화 및 대기환경 곧, 장단기 체류 기후변화 유발물질, 에어로졸과 미세먼지의 전구물질인 대기오염물질의 농도를 실시간 입체적으로 감시하는 것임. 그러면 미세먼지 등 대기오염물질의 장거리 이동에 대해서도 실시간 지속 감시가 가능하고 국가간 유입량에 대하여 객관적 정량화가 가능한 과학적 입증 자료가 확보됨. 우주는 공역으로 간주되기 때문에 이와 같이 여러나라에 걸친 넓은 지역의 대기환경을 감시하는 데는 인공위성을 이용하는 것이 가장 효율적이고 비용 면에서도 실제로 유리함.
- 인공위성에 초분광영상기를 탑재하여 대기환경을 모니터링 하는 것이 효과적이라고 하여 그 외 다른 방법의 관측이 쓸모 없어지는 것은 아님. 관측이 결국 가치있게 되려면 위성, 항공기, 지상의 사람에 의한 작업 모두 함께 엮어져 입체적 정보망으로써 서비스해야 그 정확도를 높이고 활용을 극대화 할 수 있어 위성개발이 오히려 타 산업분야를 촉진하는 순작용이 있음.
- 지구정지궤도에 위성을 운영하면 비록 지면으로부터 거리는 멀어서(약 36,000 킬로미터 상공) 관측하는데 어려움이 있지만 지구 자전과 같은 속도로 위성이 공전하기 때문에 한 곳을 계속 내려다보며 관측을 수행하게 되어 지속적 관측이라는 장점을 보임.

- 반면 저궤도 위성으로 관측을 하면 그 고도는 약 400 ~ 800 킬로미터로 관측거리는 짧아 유리하고 지구의 이곳저곳을 돌아다니며(위성이 돌아다니는 것이 아니고 지구가 천천히 자전하는 동안 위성이 남북으로 빨리 돌고 있으므로) 관측하여 전 지구적 관측이 가능하지만 (대부분의 경우) 남북극을 잇는 위아래 방향으로 1 초에 약 7 킬로미터의 고속으로 한 지점을 훑고 지나가므로 같은 곳을 재방문 하는 주기가 수 일 정도로 길어서 지속적 관측이 불가능함.
- 앞서 설명한 시간적 해상도(Temporal Resolution)가 낮은 셈인데 여러 개의 같은 위성을 올려서 함께 돌리는 방법(Constellation)으로 이것을 어느 정도 극복하는 보완책이 있음.

☑ 국외 환경위성

- 2020년 말 현재, 지구 정지궤도에서 운영중인 환경탐재체는 우리 천리안2B호의 환경탐재체 GEMS 뿐임. 기기 개발은 거의 동시에 진행되었던 미국의 환경탐재체 TEMPO도 2021년 하반기 발사될 예정이고, 유럽연합에서도 정지궤도위성 Sentinel-4에 탑재할 환경탐재체를 개발하고 있어서 머지않아 전 지구적으로 대기환경 물질의 측정과 이동추적 등 지구대기환경에 대한 공동연구가 활발히 수행될 예정임. 저궤도에서 대기환경을 관측하는 외국 위성들은 이제까지 몇 가지가 개발되었는데 미국은 벌써 70년대 말에 지구 오존층 측정을 위해 TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer) 위성을 개발하였고 미국 NASA와 유럽 ESA를 중심으로 활발한 개발이 이어지고 있음. 외국에서 개발된 대표적 저궤도 환경위성은 아래 표와 같음.

[표 1] 외국의 저궤도 환경위성

위성이름	탐재체이름	관측목표물
Sentinel-5	TROPOMI	오존, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , HCHO, CH <sub>4</sub>
AURA	OMI	오존, 이산화질소, 이산화황
ENVISAT	SCIAMACHY	성층/대류권내 미량개스
MetOp	GOME-2 IASI	NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , 에어로졸 등 대기온도수직분포
CALIPSO		구름과 에어로졸
GOSAT	TANSO(FTS+CAI)	온실가스(CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> 등)
OCO		이산화탄소

## ☒ 천리안위성2B호 환경탐재체 GEMS

### ☑ GEMS 개요, 관측방법

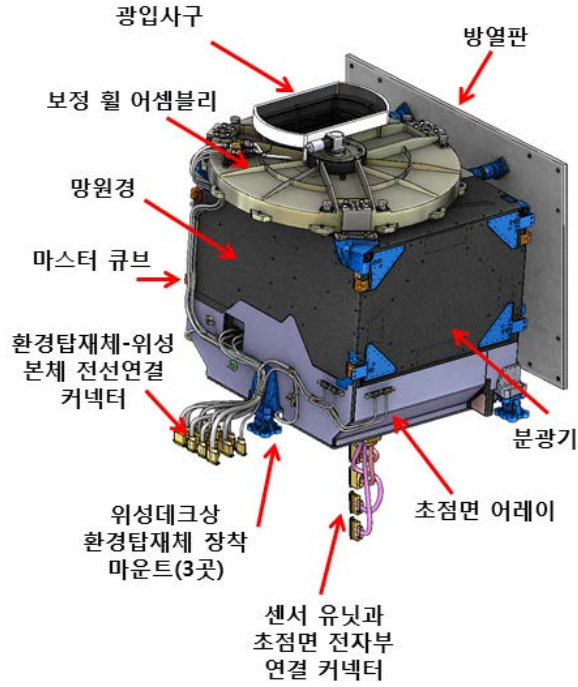
- GEMS(Geostationary Environment Monitoring Spectrometer)는 우리나라를 중심으로 한 동아시아 지역의 기후변화 유발물질과 대기오염물질의 입체적 지속적 감시를 위하여 정지궤도복합위성 개발사업의 일환으로 한국항공우주연구원과 미국 Ball Aerospace가 공동 개발한 세계 최초의 정지궤도 초분광영상기임.
- 2020년 2월 19일 발사되어 고도 35,786 km 적도연장면의 동경 128.25°에 위치한 천리안 2B위성에 탑재된 환경탐재체는 남위 5°에서 북위 45° 일본 동쪽에서 인도 동쪽 지역까지 약 5천 km × 5천 km 범위를 30분씩 하루에 8번 낮 동안 계속 관측하므로써 이산화황(SO<sub>2</sub>), 오존(O<sub>3</sub>), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 포름알데하이드(HCHO), 에어로졸 등 대기에 오염을 일으키는 화학물질과, 그로부터 간접적으로 산출되는 미세먼지에 대하여, 발생 지점부터 이동경로 등 신뢰도 높은 데이터를 획득함.

[표 2] 환경탐재체 GEMS 제원

임무 수명	공간 해상도	분광 해상도	관측 파장	부피	무게	소요 전력
10 년	7×8 km <sup>2</sup>	0.6 nm	자외선~가시광선 (300~500 nm)	1200 × 1100 × 900mm <sup>3</sup>	160 kg	< 200 W

- 초분광영상기(Hyperspectral Imager)인 환경탐재체 GEMS 하드웨어는 위성 데크 위에 장착된 센서부와 위성체 속에 장착된 전자제어부 세 개의 전장박스로 이루어져 있는데 이 센서부는 다시 망원경, 분광기, 광전자부 세 개의 모듈로 구성되며, 큰 광구조체인 망원경 속에 분광기가 들어있고 분광기 밑단에 광검지기가 붙어있으며 망원경 광입사구에는 디퓨저(Diffuser)가 장착된 보정휠 어셈블리(CMA: Calibration Wheel Assembly)가 있고 전체 구조체 옆에 열제어를 위한 방열판이 장착되어있는 형상임.
- 위성체 속에는 GEMS의 기기제어전자부(ICE: Instrument Control Electronics) 두 박스 (Primary + Redundant)와 초점면전자부(FPE: Focal Plane Electronics)가 위성체 옆면 패널 안쪽에 장착되어있음. 광경로를 따라 GEMS의 기능을 설명하자면, 정상관측의 경우 보정휠 속에 있는 광입사구가 열리고, 지구대기에서 반사된 태양빛은 맨 먼저 스캔미러에 닿음. 이 스캔 미러는 지면의 남북으로 길고(약 5천 km) 좁은(약 7 km) 띠 모양의 관측목표물에 대응하는 상을, 동쪽에서부터 서쪽방향으로 매우 미세한 각도 95 μrad로 약 700 스텝을 옮

겨가며 각 스텝마다 그 가늠자란 때 모양 지역 대기의 자외선~가시광선의 스펙트럼을 획득하는데 이 한 번의 관측에 30분이 소요됨.



〈그림 2〉 환경탐재체 GEMS 센서부와 전자부

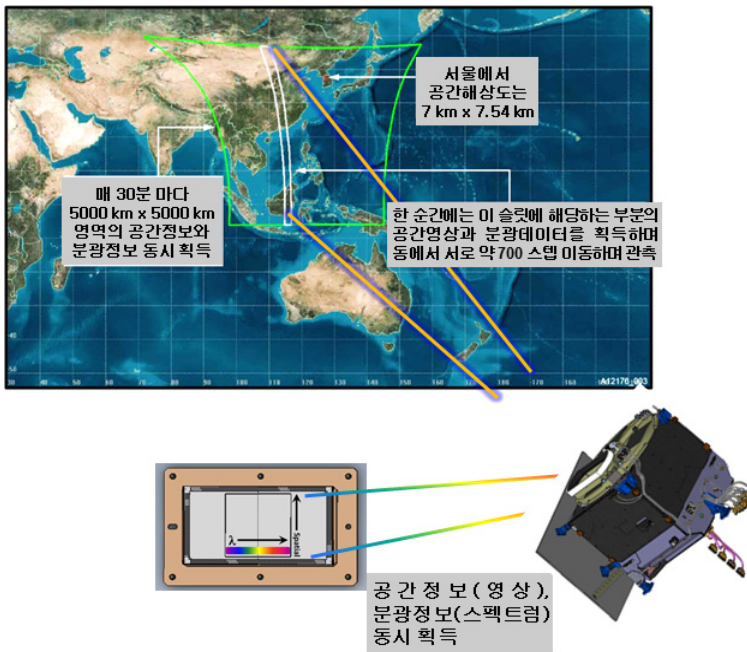


〈그림 3〉 GEMS의 초점면전자부



〈그림 4〉 GEMS의 기기제어전자부(P+R)

- 스캔미러에 의해 조준된 지역의 영상은 높은 성능의 TMA(Three Mirror Anastigmat) 방식의 망원경에 의해 Slit에 결상되고 이를 분광기와 공유하므로써 분광기 입력이 되며 시준 기형태의 광학계 속에 놓인 반사식 회절발(Diffraction Grating)에 의해 0.2 nm 간격으로 분광된 스펙트럼이 재결상 광학소자에 의해 2k×2k 2차원 CCD(Charge Coupled Device) 초점면 어레이에 맺힘.
- 2020년 2월 19일 발사되어 정지궤도에 안착한 천리안위성2B호에는 환경탐재체 GEMS와 함께 해양탐재체 GOCI-2도 실려있어 GEMS와 GOCI가 30분 씩 번갈아가며 관측을 하고 있으며 2020년 10월 초기운영 및 시험 단계가 완료되었고 정상관측이 수행중임.



〈그림 5〉 환경탐재체 GEMS의 우주궤도상 관측 방식

- 최첨단 전자광학기술의 결정체인 환경탐재체 GEMS는 한국항공우주연구원과 미국 Ball Aerospace가 공동개발팀을 결성하여 최초 설계부터 최종 시험까지 모든 과정을 함께 개발 하였으며 핵심기술의 국내이전과 일부 부분체들의 국내기업을 통한 국산화를 병행하므로써 차기 환경탐재체와 이를 응용한 지상용, 항공기(드론)용 초분광영상기 환경센서의 국내독자 개발능력을 확보함.
- 90년대 중반부터 저궤도위성인 아리랑 위성 시리즈에 탑재되는 고해상도 카메라를 계속해서 개발해오고 있는 항우연은 초창기 해외로부터 기술이전을 기술의 초석으로 하여 해외공동개



발을 거쳐 위성탑재 고해상도 카메라의 독자적 개발능력을 갖추었으며 이번 정지궤도 위성용 환경탐재체의 공동개발을 통해 초분광영상기에 대해서도 충분한 지식과 경험을 축적하여, 인공위성 탐재체 뿐만 아니라 지상용, 유무인 항공기용 등 다양한 초분광영상기로 응용 개발을 추진 중임.



〈그림 6〉 GEMS 광학계-망원경 광정렬(항우연 광학Lab에서 완성)

☑ GEMS 운영 및 산출자료

- GEMS 개발은 그 태동기부터 유효성과 타당성(Utility & Validity)을 가지고 교과서적으로 바르게 진행되었다는 것이 성공으로 귀결된 이유 중 하나라고 할 수 있음.
- 최종사용자그룹의 외국 유사 위성자료를 활용한 충분히 심도있는 사전연구를 통해 국내외 과학자들이 대기환경감시에 대한 협력연구체계를 이루었고 그로부터 적합한 요구사항이 도출되었으며 전문성과 탁월한 능력의 연구지휘자(PI - Principal Investigator, 연세대 김 준 교수가 장시간에 걸친 개발과정에서 성실히 책임을 다했다는 점, 사용자그룹의 요구에 부응한 정부(환경부 국립환경과학원)의 강력한 리더십이 지속적 추진력을 제공했다는 점 등이 기술적인 면 외로 사업적 면에서 성공으로 이끌었다고 평가되며 환경탐재체를 맡고있는 환경부와 위성개발사업을 주도하는 과기정통부 그리고 함께 참여한 여러 수요부처 간의 협력도 중요한 성공사례의 표본이 됨.
- 항우연에서 천리안위성2B호 전체의 발사 및 초기운영(시험 포함) 과정을 마치고 나서 환경탐재체의 정상운영은 그 임무수명 10년에 걸쳐 국립환경과학원의 환경위성센터와 항우연 위성관제실 간의 협업으로 진행됨.

- 환경위성센터는 매일 환경탐재체의 임무를 계획하여 MR(Mission Request)을 항우연으로 보내며 이에 맞추어 위성을 관제하고 환경탐재체에 명령을 전송하며 데이터를 수신하면 다시 환경위성센터는 그와 연결된 사용자그룹의 과학자들과 함께 대기환경 관련 산출물을 추출해내고 가공하여 대국민 서비스 현업에 사용함. 이와 함께 산출물의 정확도 향상을 위하여 검보정 작업을 수행하는데 여기에는 지상 및 항공기 탑재 대기관측 센서들이 활용될 것임.

**[표 3] 환경탐재체 GEMS 관측항목과 기대효과**

관측항목	특 징	기대효과
O <sub>3</sub>	- 주요 대기오염 및 기후변화 유발물질 - 강력한 산성 물질	- 환경보건피해 저감 - 기후변화 안정화목표 달성
SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , 에어로졸	- 월경성 대기오염 관련 물질, 기후변화 유발 물질 - 강력한 산성 물질, O <sub>3</sub> 의 전구물질	- 중국 등 장거리 이동 오염물질 추적 가능 - 환경보건, 산림, 농업 등 피해 저감
HCHO	- O <sub>3</sub> , VOC, 에어로졸 생성, 발암물질	- 기후변화 및 대기환경 관련 기초자료 제공

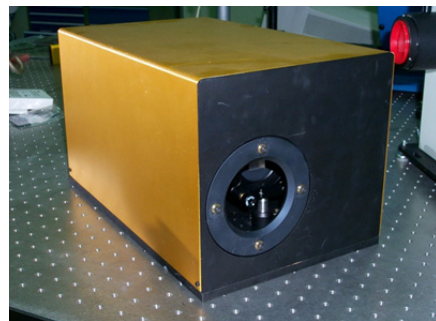
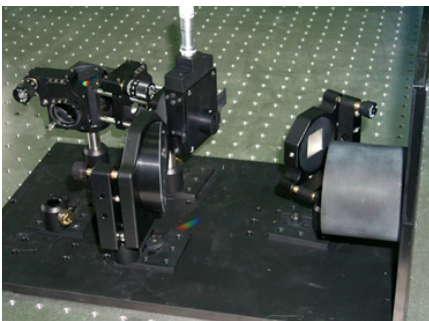
#### 4. 드론을 이용한 대기환경감시 제안

##### ☑️ 항공기용 환경탐재체

- 선진국의 우주기기 개발 이력을 보면 당시의 기술한계에 도전하는 기기를 처음부터 위성용으로 개발하지 않고 항공기 탑재체로 먼저 연구 개발하는 과정을 거치는 경우가 매우 많음. 이것은 큰 예산을 들여 개발하여도 일단 우주로 발사되면 수리할 수 있는 기회가 전혀 없는 우주급 기기 개발 특성상 당연하고 그래서 알고 보면 위성에 구현된 기술이 실제로는 상당히 보수적으로 적용되었다는 것을 종종 보게 됨.
- 천리안위성2B호의 환경탐재체 GEMS는 미국 Ball Aerospace의 책임주도 하에 항우연과 공동개발 팀을 만들어 처음부터 끝까지 전 과정을 함께 개발하였는데 세계 최초의 정지궤도 위성용 초분광영상기 개발에 대하여 Ball이 책임을 지고 이끌 수 있었던 것은 그들이 자국의 환경위성탐재체 TEMPO(Tropospheric Emission: Monitoring of Pollution — 우리 GEMS와 유사하고 개발기간 겹침) 개발을 위해서 그보다 먼저 TEMPO와 유사한 항공기용 초분광탐재체 GeoTASO(Geostationary Trace gas and Aerosol Sensor Optimization)를 상당한 전문 인력과 예산과 시간을 들여 연구개발했던 기술유산이 있었기 때문임. 우리나라도 이렇게 처음에는 과학자들이 연구를 하면서 실험실에서 부분체에 대한 기술 장벽을 돌파하고 객관적으로 필요성이 입증되면 정부 또는 전문성 있는 정부기관과 함께 추진력 있는 사업

을 만들고 이를 유무인 항공기용으로 초도개발을 하면서 기술을 갈고 다듬은 후에 우주급으로 신뢰도 높게 만들어서 위성에 탑재하여 우주에서 운용하는 길을 갔으면 함.

- 항우연은 이번 정지궤도위성용 환경탐재체를 개발하기 오래전, 이미 90년대 후반에, 매우 유익한 첨단기술로 판단된 초분광영상기의 기초연구를 자체적으로 수행한 바가 있음. HIKA(Hyperspectral Imager developed by Korea Aerospace)로 명명되어 설계부터 최종 광정렬까지 자체적으로 수행된 우리나라 최초의 초분광영상기 개발은 적은 예산으로 실험실 모델(DM: Development Model)을 완성하는데까지 수행된 연구이지만 이것이 훗날 환경위성용 실용급 우주기기 개발에 기술적 밑받침이 됨.
- 또한 Ball Aerospace와 천리안위성2B호용 환경탐재체 GEMS를 공동개발하면서 7년이 넘는 시간을 긴밀히 함께하다 보니 시간상으로는 역순이지만 환경탐재체의 항공기 버전에 대한 기술정보도 이전받게 되고 국립환경과학원의 지원과 연구협력도 추가로 받게 되어, GEMS의 검보정 활동(위성탐재체로 관측한 자료의 정확도와 가치를 높이기 위해서 지상, 항공기 등을 이용한 검보정활동이 필수적)과 차기 환경탐재체의 독자개발을 위한 GeoTASO의 한국버전 개발을 수행중임.
- 그리고 이 항공기탐재용 환경센서를 응용하여 소형경량화 하므로써 우리나라에 필요한 대기환경감시용 기기로 변경(일종의 다운그레이딩)하면 적은 예산으로 여러 대를 만들어 지상에서 이동형으로 또는 무인기 드론에 탑재하여 우리나라 구석구석 대기오염감시가 필요한 곳곳에 쉽게 널리 활용할 수 있으므로 이미 환경부와 여러 차례 협의가 있었고 머지않은 미래에 가치 있는 이 일이 결성될 것으로 기대하고 있음.



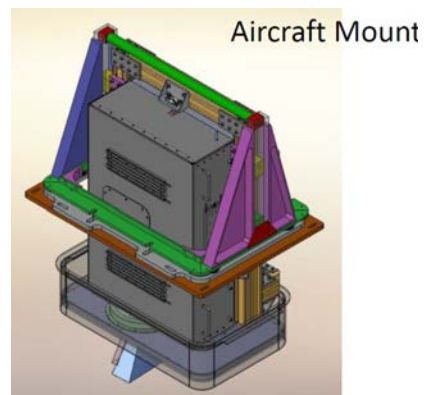
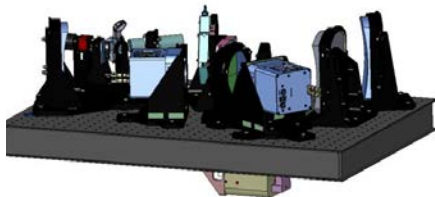
〈그림 7〉 항우연이 1998년 자체연구로 개발한 초분광영상기 HIKA

☑ 항공기용 환경탐재체 GeoTASO

- 대류권의 미량기체를 관측하는 초분광영상기 GeoTASO는 GEMS, TEMPO를 개발하기 위해 미리 수행한 선행연구의 결과물로 그 열개는 GEMS와 유사함. 망원경과 분광기 그리고 광전자부로 구성되었으며, GEMS가 300~500 nm 파장대역을 관측하는데 비해 GeoTASO는 광경로 마지막을 290~390 nm 자외선 대역과 415~695 nm 가시광선대역 두 개의 채널로 나누어 초분광영상을 받아보는데 항공기에 탑재하여 연직하방으로 관측하므로 최대고도 12 km에서 관측폭 9 km이고 지상 40×80 m를 한 화소로 갖는 공간해상도를 가짐.



〈그림 8〉 NASA 프로그램으로 Ball Aerospace가 개발한 항공기탑재 대기환경관측 초분광영상기 GeoTASO (출처: espo.nasa.gov)



〈그림 9〉 GeoTASO 내부와 항공기탑재 마운트

(출처: tempo.si.edu)

- 2016년 NASA는 한국 환경부와 대기과학자그룹 등과 함께 한미 대기질 공동관측캠페인 (KORUS-AQ) 활동을 수개월간 수행하였는데 이 활동에 GeoTASO가 핵심 관측기기로 활용되었고 부산대 팀은 항우연의 용역사업으로 이 KORUS-AQ의 데이터 분석활동에 참여함으로써 GEMS 데이터 산출 알고리즘 개발에 활용하기 위한 검보정 기술을 개발함.
- 이와 같이, 항공기탑재 환경센서로서 초분광영상기를 개발하면 그 항공기(드론 포함) 탑재체 자체의 다양한 활용을 통해 대기환경감시에 중요한 역할을 할 뿐 아니라, 차후 위성탑재 환경관측용 초분광영상기의 개발을 기술적으로 준비하고 그 데이터 산출 알고리즘을 위한 사전연구가 되면서 또한 이미 개발된 위성용 환경탑재체의 데이터 검보정 활동에 귀중한 도구로써 큰 기여를 할 수 있음.



〈그림 10〉 2016년 NASA의 KORUS-AQ 프로그램으로 한국 관측

- 특히 드론과 같은 항공기용 환경탑재체를 개발하면 위성용과 달리 고장수리가 용이하여 처음부터 고가의 고신뢰도 부품을 사용하여 제작하지 않아도 되므로 예산이 대폭 절감되고, 관측기기의 하드웨어와 소프트웨어를 계속하여 개선하거나, 다른 목적에 맞추어 변경할 수 있어서 경제적 기술적 이익이 큼.
- GeoTASO의 기술적 특장점 몇 가지를 소개하자면 다음과 같음
  - 독보적 멀티오더 분광기로서 290~695nm의 넓은 파장대역을 관측하면서도 콤팩트한 형태이며 높은 효율을 갖고 있음.
  - 재설정변경이 가능한 항공기탑재 시스템으로써 환경위성탑재체 GEMS의 관측을 모사할 수 있음.

- 변경 가능한 슬릿과 편광으로 센서의 중요 변수들에 대한 알고리즘 민감도를 시험 (Algorithm Testing)할 수 있음.
- 기존 PANDORA 지상 사이트와 맞물리면 대기오염 자료추출 알고리즘의 검보정(Cal/Val)에 사용 가능함.

## 5. 결론: 초분광영상기를 드론, 위성에 탑재하여 효율적 대기환경 감시

### ☑ 항공기(드론) 탑재용 및 지상용 포터블 초분광영상기

- 이상에서 소개한 바와 같이 초분광영상기는 현시점에서 개발되어 있는 최첨단 전자광학 기술을 활용하여 대기환경을 가장 효과적으로 감시·관측할 수 있는 기술이며 이미 국내에 연구·개발의 경험과 노하우가 산학연 전 분야에 축적되어 소위 기술기반이 마련된 유용한 기술임.
- 대기환경을 관측하는 우주 기기로서 최초 개발은 그를 위한 상당한 기초연구가 우선 선행되어야 하고 실험실 수준부터 우주급 적용까지 장시간 막대한 예산이 소요되며 한번 우주궤도에 올리면 극심한 우주환경에서 임무수명까지 작동되어야 하므로 고신뢰도(Reliability) 부품을 사용해야 하고, 최대한 대체가능 열개(Redundancy)를 가지도록 구성해야 함.
- 위성탑재체로서 환경감시 활동을 계속하면서 지금 우리는 국가우주개발 프로그램을 통해 진행중인 위성용 환경탑재체 개발의 기술유산 (Technological Heritage)을 활용하여 지상용으로 최적화변조 작업을 거치면, 위성관측과 그 검보정과 병행하여, 근처 여러 지역에서 간편히 대기오염을 감시할 수 있는, 그것도 충분히 과학적이고 객관적 증거를 제공하는, 정밀한 전자광학 기기를 경제적으로 개발 보급할 수 있는 것임.
- 엄청난 고성능 고신뢰도의 설계와 부품으로 이미 구성 완료된 위성탑재 환경관측 초분광영상기를 드론탑재용으로 개조하는데는 기술적으로 큰 어려움이 없고 지상용(드론용 포함)은 언제든지 개조 수리가 가능하므로 일반 상용 부품을 최대한 사용하여 제작하기에, 특히 이를 나중에 국내기업을 통해 수십대 수백대 제작한다면 개발단가를 획기적으로 낮출 수 있음.
- 항우연이 개발한 위성용 환경센서로서의 초분광영상기와, 개발중인 항공기탑재 환경센서로서의 초분광영상기를 바탕으로, 활용목적에 맞추어 소형경량화를 거친 초분광영상기를 지상용 포터블 기기로 또 드론 탑재용으로 개발하여 가능한 국내제작업체를 통하여 여러 대를 제작, 공공용으로 보급한다면 현재 국내외적으로 높은 관심과 실제 솔루션이 절실히 필요한 대기환경 문제를 푸는데 큰 기여를 할 것임.

## 국민기술제안 제언

### ◆ 국민기술제안 주요 내용

- 본 “항공우주기술을 이용한 대기환경감시 기술”과 관련하여 국민들은 ① 항공활동 대응 시스템, ② kytoon을 이용한 대기오염측정, ③ LED 조명의 산란을 이용한 미세먼지 측정, ④ 미세먼지 포집용 드론 등의 국민기술제안들이 제시됨
- 대기환경을 감시하고 미세먼지 저감을 위한 국민들의 다양한 기술제안은 독창적이면서도 현재 우리가 직면하고 있는 문제들을 현장에서 해결하기 위한 방안들이 제시되었으며, 국민들은 미세먼지 저감을 위해서 지대한 관심을 가지고 있으며 나름 경제적이고 새로운 방식의 감시장치, 저감방법을 지속적으로 제안해주고 계심

### ◆ 총평 / 전문가 의견

- 이러한 국민기술제안이 현실화하기 위해서는 우선 개별 기술에 대한 실효성을 검증하는 것이 필요할 것으로 보임. 일단 해당분야 전문가들의 의견을 모아 타당성이 공감되는 주제들을 추려보면, 실험실에서 이의 입증 가능한 것도 있고, 축소 모델을 만들어 필드에서 간단히 시도해보는 것도 좋겠음
- 현재 정부에서는 다양한 방법으로 국민들이 제시한 아이디어와 기술에 대한 현장적용 기술개발 및 사업화 등을 위한 지원사업을 추진 중에 있음
- 특이나, 대기환경을 지속적으로 면밀히 관측하고 예경보 업무를 수행하는 국립환경과학원, 차량의 미세먼지 저감기술 및 대안 마련 연구 등을 추진하는 국토교통부와 한국교통연구원, 국토교통과학기술진흥원등의 사업을 참고하여 제안한 국민기술제안이 현실에서 적용될 수 있는 방안을 찾아보면 도움이 될 것으로 생각됨

## 참·고·문·헌·

1. Chris Stewart, JM Park, S Kim, “Optical Subsystem Design”GEMS Program Critical Design Review Data Package, Ball-KARI, 2015
2. D. Harris, ES Lee, P. Spuhler, J Rosser, “AI&T Joint Development at KARI”GEMS Program Critical Design Review Data Package, Ball-KARI, 2015
3. J.Y. Cho, S.H. Lee, W.K. Jang, “Improvement of spectral resolution by signal padding method in the spatially modulated Fourier transform spectrometer based on a Sagnac interferometer”, Applied Optics, vol.58, no.25, pp.6755-6761, Sept. 2019
4. J. Kim, SH Lee, et al. “New Era of Air Quality Monitoring from Space: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer”, Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 101, no. 1, pp. E1~E22, Feb. 2020
5. 김재환(부산대), “항공기용 환경탑재체를 이용한 한미 국제공동관측 연구” (한국항공우주연구원 연구용역사업보고서) 2016
6. D. Nicks, S.H. Lee, et al. “GEMS and TEMPO System Integration, Characterization and Calibration”, AGU Fall Meeting A51D-0072, 2016
7. 서석배, 이일섭, 장수영, 고대호, 이승훈, “정지궤도환경탑재체 개발 및 초기성능시험”, 항공우주산업기술동향, 제18권, 제1호, pp.98-104, 2020



## 저자소개

### 이승훈

한국항공우주연구원 위성연구소 책임연구원  
천리안위성2B호 환경탑재체 개발책임자  
T. 042-860-2426, shlee@kari.re.kr



## 기획편집

### 국가기후환경회의

**이동규** 국장(국제과학기술국)

**윤영기** 과장(과학기술협력과)

담당 **오상열** 선임(과학기술협력과) / **김종익** 민간4급(과학기술협력과)

T. 02-6744-0513, kji804@korea.kr

※ 본 자료는 국가기후환경회의([www.ncca.go.kr](http://www.ncca.go.kr))에서 다운로드 가능합니다.

2021-05

미세먼지 기술분야 이슈페이퍼

## 항공우주 기술을 이용한 대기환경 감시

발행일 | 2021년 3월

발행처 | 국가기후환경회의  
서울 종로구 새문안로 7 콘코디언빌딩 13층  
T. 02-6744-0500

문 의 | 국가기후환경회의 과학기술협력과

본 보고서의 내용은 연구자 등의 견해이며, 국가기후환경회의의 공식입장과 다를 수 있습니다



미세먼지 문제 해결을 위한  
**국가기후환경회의**



본 인쇄물은 친환경용지와 공기름 잉크를 사용하여 만들어졌습니다.