

차세대 정지궤도 기상위성관측의 편익과 활용 확대 방안: GOES-16에서 얻은 교훈

김지영* · 장근일

기상청 국가기상위성센터

(접수일: 2018년 4월 9일, 수정일: 2018년 5월 4일, 게재확정일: 2018년 6월 7일)

Benefits of the Next Generation Geostationary Meteorological Satellite Observation and Policy Plans for Expanding Satellite Data Application: Lessons from GOES-16

Jiyoung Kim* and Kun-Il Jang

National Meteorological Satellite Center, Korea Meteorological Administration, Chungbuk, Korea

(Manuscript received 9 April 2018; revised 4 May 2018; accepted 7 June 2018)

Abstract Benefits of the next generation geostationary meteorological satellite observation (e.g., GEO-KOMPSAT-2A) are qualitatively and comprehensively described and discussed. Main beneficial phenomena for application can be listed as tropical cyclones (typhoon), high impact weather (heavy rainfall, lightning, and hail), ocean, air pollution (particulate matter), forest fire, fog, aircraft icing, volcanic eruption, and space weather. The next generation satellites with highly enhanced spatial and temporal resolution images, expanding channels, and basic and additional products are expected to create the new valuable benefits, including the contribution to the reduction of socioeconomic losses due to weather-related disasters. In particular, the new satellite observations are readily applicable to early warning and very-short time forecast application of hazardous weather phenomena, global climate change monitoring and adaptation, improvement of numerical weather forecast skill, and technical improvement of space weather monitoring and forecast. Several policy plans for expanding the application of the next generation satellite data are suggested.

Key words: Geostationary, meteorological satellites, benefits, GEO-KOMPSAT-2A, GOES-16

1. 서 론

세계 최초의 기상위성 TIROS-1호가 1960년 4월 1일 발사되면서 우주공간에서 기상현상을 감시하고 위성영상 분석 결과를 기상예보에 활용하는 시대가 열렸다. TIROS-1호는 미국 항공우주국(NASA)의 실험용 극궤도 위성으로 78일간 운영되었지만 최초의

전구 관측을 통해 기상예보, 기후연구, 지구시스템 과학 등 다양한 분야의 발전을 이끌었으며, 후속 위성 발사에도 크게 기여하였다(Anderson, 2010; Choi, 2010). 1975년 10월에 NASA는 최초의 현업용 지구 정지궤도 기상위성인 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) 위성 1호를 발사하여 적도상 공 약 36,000 km에서 지구 반구의 동일지역 기상을 상시 감시할 수 있는 체계를 처음으로 구축하였다. 지난 2016년 11월에 미국은 16번째의 정지궤도기상위성 GOES-16 (GOES-East)을 발사하였고, 2018년 3월에 GOES-S (GOES-West)를 발사할 예정이다. 한반도를 포함한 동아시아와 서태평양 지역에 대한 정지

*Corresponding Author: Jiyoung Kim, National Meteorological Satellite Center, 64-18 Guam-gil, Gwanghyewon-myeon, Jincheon-gun, Chunbuk 27803, Korea.
Phone: +82-43-717-0235, Fax: +82-43-717-0210
E-mail: aceasia@korea.kr

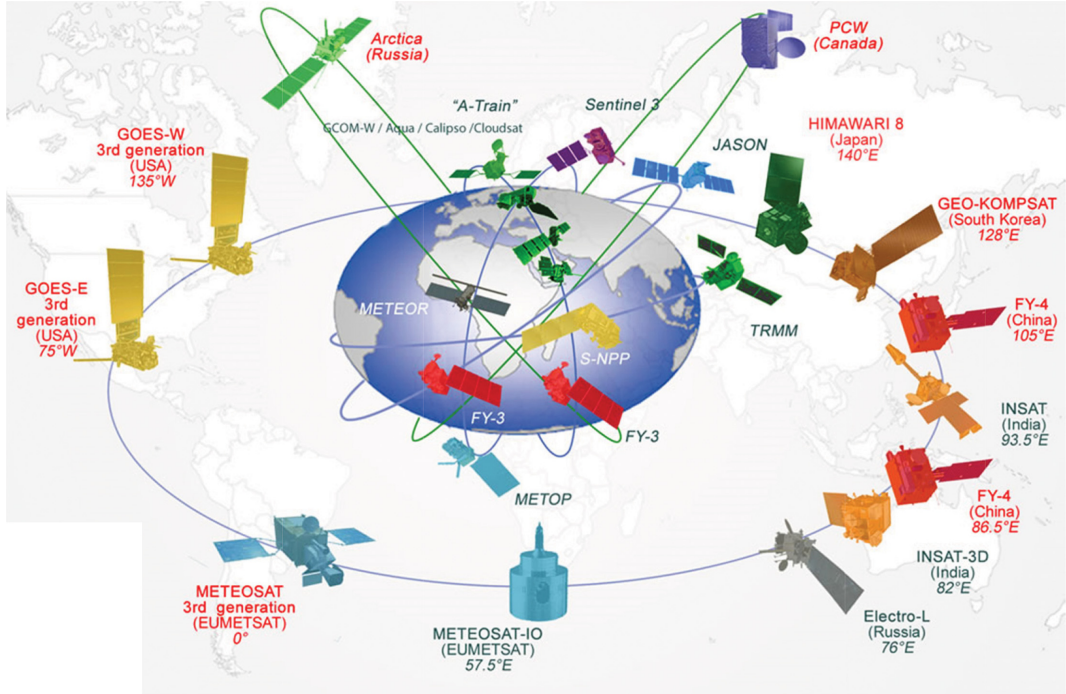


Fig. 1. Schematic overview of the space-based meteorological observation (courtesy of World Meteorological Organization).

궤도기상위성 관측은 일본이 1977년 7월에 GMS (Geostationary Meteorological Satellite)를 발사하면서 시작되었다. 이후 일본은 GMS-2, 3, 4, 5호에 이어 MTSAT (Multi-functional Transport Satellite)-1R, MTSAT-2를 발사하였으며, 그 후속으로 2014년 10월에 Himawari-8호 위성, 2016년 11월에 Himawari-9호 위성 등 총 9대의 정지궤도기상위성을 성공적으로 발사하였다. 한국은 천리안위성을 2010년 6월에 성공적으로 발사함으로써 미국, 유럽, 일본, 러시아, 중국, 인도에 이어 세계 7번째로 기상위성 보유국에 진입하였다. 또한 천리안위성의 기대수명(7년)이 도래함에 따라 그 후속위성으로 천리안위성 2A호가 2018년 11월에 발사될 예정이다. Figure 1은 현업운영을 목적으로 계획된 정지궤도 및 저궤도 기상위성 현황을 나타낸 것이다.

최근에 발사되었거나 조만간 발사예정인 GOES-16/S, Himawari-8/9, 천리안위성 2A호(이하 차세대 기상위성으로 칭함)은 기존의 정지궤도 기상위성에 비해 시공간 해상도, 관측채널 수 등 탑재체 성능이 획기적으로 개선되었다(Schmit et al., 2017). 이에 따라 위성관측정보의 다양한 활용을 통한 정보의 가치와 편익도 크게 증가할 것으로 기대되고 있다. 이 연구를 통해 천리안위성 2A호 발사를 계기로 차세대 기상위성 관측의 편익과 활용 확대를 위한 방안을 종합적으

로 고찰하고자 한다.

2. 천리안위성 2A호와 GOES-16 위성의 산출물 비교

천리안위성 2A호는 기존의 천리안위성에 비해 시간해상도(전지구 관측주기가 3시간 간격에서 10분 간격으로 18배 향상, 한반도 관측주기가 15분 간격에서 2분 간격으로 7.5배 향상), 공간해상도(가시채널은 1 km에서 0.5~1 km 간격으로, 적외채널은 4 km에서 2 km 간격으로 약 4배 향상), 관측채널(5개에서 16개로 약 3배 향상), 산출물 종류 등의 성능 향상이 이루어질 예정이다. 이를 통해 초단기 예보 분야(대류운, 강수, 구름, 안개 등), 태풍/해양 분야(태풍의 위치와 강도, 해양 및 해상풍 등), 융합분야(가뭄, 홍수, 토양수분, 산불 등), 기후변화/환경분야(핵심기후변수, 미세먼지, 황사 등)와 같은 다양한 분야에서 천리안위성 2A호의 산출물이 폭넓게 활용될 것으로 기대된다. 또한 우주기상 관측요소 3종(즉 particle detector, magnetometer, satellite charging monitor)을 관측할 수 있는 우주기상 탑재체(Korean Space Weather Monitor, 이하 KSEM)가 포함되어 지구정지궤도상에서의 양성자 및 전자 플럭스, 자기장 세기, 위성대전 등 우주기상에 대한 현지관측(in-situ measurement)이 이루어질

Table 1. GEO-KOMPSAT-2A baseline (blue and bold) and additional (black and italic) products by sensors. Three space weather products are also presented.

Sensors	Products
Advanced Meteorological Imager (AMI)	<p>[Scene/Surface] Cloud Detection Fog Detection Land Surface Temperature Sea Ice Cover Sea Surface Temperature Snow Cover <i>Fire Detection</i> <i>Ocean Current</i> <i>Snow Depth</i> <i>Surface Albedo</i> <i>Surface Emissivity</i> <i>Vegetation Green Fraction</i> <i>Vegetation Index</i></p> <p>[Cloud/Rainfall] Cloud Phase Cloud Top Height Cloud Top Pressure Cloud Top Temperature Rainfall Rate <i>Cloud Amount</i> <i>Cloud Droplet Effective Radius</i> <i>Cloud Ice Water Path</i> <i>Cloud Layer/Height</i> <i>Cloud Liquid Water Path</i> <i>Cloud Optical Depth</i> <i>Cloud Type</i> <i>Rainfall Potential</i> <i>Probability of Rainfall</i></p> <p>[Radiation/Aerosol] Aerosol Detection Aerosol Optical Depth (AOD) Asian Dust Detection Asian Dust Optical Depth Radiances Volcanic Ash Detection and Height <i>Aerosol Particle Size Distribution</i> <i>Longwave Radiation Downward (Surface)</i> <i>Longwave Radiation Upward (Surface)</i> <i>Longwave Radiation Upward (TOA)</i> <i>Shortwave Radiation Downward (Surface)</i> <i>Shortwave Radiation Reflected (TOA)</i> <i>Shortwave Radiation Absorbed (Surface)</i> <i>Visibility</i></p>

예정이다.

GOES-16 위성은 기존의 GOES 위성에 비해 4배의

Table 1. Continued

Sensors	Products
Advanced Meteorological Imager (AMI)	<p>[Atmosphere/Aviation] Atmospheric Motion Vector Overshooting Top Detection Stability Index Total Ozone Vertical Moisture Profile Vertical Temperature Profile <i>Aircraft Icing</i> <i>Convective Initiation</i> <i>SO₂ Detection</i> <i>Total Precipitable Water</i> <i>Tropopause Folding Turbulence</i></p>
Particle Detector (PD)	Energetic Particle Flux
Magnetometer (MAG)	Geomagnetic Field
Satellite Charging Monitor (SCM)	Satellite Charging Status

공간 해상도, 3배의 관측채널, 5배 빠른 재해기상(high impact weather) 현상 범위 적용(coverage) 등 성능 향상이 이루어졌으며, 낙뢰활동 및 우주기상에 대한 실시간 감시도 가능하게 되었다(Hillger, 2008; Goodman et al., 2012). 이러한 GOES-16 위성의 성능 향상을 통하여 미국 해양대기청은 뇌우와 토네이도에 대한 예보 선행시간 연장, 허리케인의 진로와 강도 예보 개선, 산불과 화산 폭발 현상의 탐지 정확도 향상, 태양 플레어(flare)와 코로나 질량 방출(coronal mass ejections) 감시 기능 향상, 지자기 폭풍(geomagnetic storm) 예보 개선 등이 이루어질 것으로 기대하고 있다(Goodman, 2015).

Table 1, 2는 천리안위성 2A호와 GOES-16호 위성의 기본 산출물 종류를 각각 요약한 것이다. 천리안 위성 2A호는 AMI (Advanced Meteorological Imager) 센서를 통해 장면/지표와 관련하여 구름, 산불, 안개 탐지 등 13종, 구름/강수와 관련하여 운량, 운형, 운고, 강우강도, 강수확률 등 14종, 복사/에어로졸과 관련하여 에어로졸 탐지, 광학 깊이, 입자크기분포, 시정, 화산재 탐지 등 14종, 대기/항공과 관련하여 착빙, 대기 운동벡터, 안정도 지수, 가강수량 등 11종을 포함하여 총 52종의 산출물이 생산되어 제공될 예정이다. 또한 우주기상탐재체를 통하여 고에너지 입자 플럭스, 자기장의 세기, 위성의 대전상태에 대한 3종의 우주기상 관측정보도 함께 생산될 예정이다(Table 1). GOES-16호 위성은 ABI (Advanced Baseline Imager)를 통해 에어로졸, 구름, 산불, 대기운동벡터, 강우강도, 가강수량, 화산재 탐지 등 총 25종의 산출물이 생산되고 있고, GLM (Geostationary Lightning Mapper)을 통해

Table 2. GOES-16 baseline products by sensors adopted from Schmit et al. (2017).

Senors	Products
Advanced Baseline Imager (ABI)	Aerosol Detection (including Smoke and Dust) Aerosol Optical Depth Clear Sky Masks Cloud and Moisture Imagery Cloud Optical Depth Cloud Particle Size Distribution Cloud Top Height Cloud Top Phase Cloud Top Pressure Cloud Top Temperature Derived Motion Winds Derived Stability Indices [Convective Available Potential Energy, Lifted Index, K Index, Showalter Index, Total Totals] Fire/Hot Spot Characterization Hurricane Intensity Land Surface (Skin) Temperature Legacy Vertical Moisture Profile Legacy Vertical Temperature Profile Radiances Rainfall Rate/Quantitative Precipitation Estimation Sea Surface Temperature (Skin) Shortwave Radiation_Reflected: TOA Shortwave Radiation_Downward: Surface Snow Cover Total Precipitable Water Volcanic Ash: Detection and Height
Geostationary Lightning Mapper (GLM)	Lightning Detection: Events, Groups and Flashes
Space Environment In-Situ Suite (SEISS)	Energetic Heavy Ions Magnetospheric Electrons and Protons: Low Energy Magnetospheric Electrons: Med and High Energy Magnetospheric Protons: Med and High Energy Solar and Galactic Protons
Magnetometer (MAG)	Geomagnetic Field
Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Suite (EXIS)	Solar Flux: Extreme Ultraviolet (EUV) Solar Flux: X-ray Irradiance
Solar Ultraviolet Imager (SUVI)	Solar EUV Imagery

낙뢰탐지 자료가 생산되며, SEISS (Space Environment In-Situ Suite), MAG (magnetometer), EXIS (Extreme Ultraviolet and X-ray Irradiance Suite), SUVI (Solar Ultraviolet Imager) 등 4종의 관측을 통해 양성자, 전자, 이온 등 에너지 등급별 입자 플럭스, 자기장, 태양의 극자외선 및 X선 복사량 등에 대한 관측자료가 생산되고 있다. Table 3은 천리안위성 2A호와 GOES-16호 위성에 탑재된 AMI와 ABI 센서의 채널 별 중심파장을 비교한 것이다. Himawari-8호 위성에 탑재된 AHI (Advanced Himawari Imager) 센서에 대한 사

항은 일본 기상청 발표자료를 참고하여 함께 제시하였다(JMA, 2016). Table 3에 나타난 바와 같이 AMI, ABI, AHI 센서는 모두 16개 채널로 구성되어 있고 각 위성간 중심 파장은 대체로 일치한다. 하지만 가시광선 녹색영역(일사량 추정에 사용)인 0.511 μm 채널은 GOES-16/S의 ABI에는 없고, 1.38 μm 채널(낮 동안의 권운 탐지에 사용)은 히마와리-8/9의 AHI에 없으며, 2.24(혹은 2.26) μm 채널(낮 동안 지표/구름 성질 관측에 사용)은 천리안위성 2A호의 AMI에 채택되지 않았다. 각 채널의 특성과 주요 사용 목적은

Table 3. Spectral band summary of 3 imagers, AMI (Advanced Meteorological Imager), ABI (Advanced Baseline Imager), and AHI (Advanced Himawari Imager) from Chollian-2A, GOES-16/S, and Himawari-8/9 satellites, respectively. The band information is characterized by approximate central wavelength in micrometers. Descriptive name and primary purpose in the table are adopted from Schmit et al. (2005 and 2017).

Band number (Descriptive name, Band)	Central wavelength (μm)			Primary purpose
	AMI	ABI	AHI-8	
1 (Blue, VIS)	0.47	0.47	0.47	Daytime aerosol over land and coastal water mapping
2 (Green, VIS)	0.511	-	0.510	Solar insolation estimates
3 (Red, VIS)	0.64	0.64	0.64	Daytime clouds, fog, insolation, and winds
4 (Vegetation, Near-IR)	0.856	0.864	0.857	Daytime vegetation/burn scar, aerosol over water, and winds
5 (Cirrus, Near-IR)	1.38	1.373	-	Daytime cirrus cloud detection
6 (Snow/Ice, Near-IR)	1.61	1.61	1.61	Daytime cloud top phase, particle size, snow and ice discrimination
6-1* (Cloud particle size, Near-IR)	-	2.24	2.26	Daytime land/cloud properties, particle size, vegetation, and cloud phase
7 (Shortwave window, IR)	3.83	3.90	3.89	Surface and cloud, fog at night, fire, atmospheric motion vectors, and volcanic ash
8 (Upper-level water vapor, IR)	6.24	6.19	6.24	High-level atmospheric water vapor, winds, and rainfall
9 (Midlevel water vapor, IR)	6.95	6.93	6.94	Midlevel atmospheric water vapor, winds, and rainfall
10 (Lower/midlevel water vapor, IR)	7.34	7.34	7.35	Lower-level atmospheric water vapor, winds, and SO ₂
11 (Cloud-top phase, IR)	8.59	8.44	8.59	Total water for stability, cloud-top phase, rainfall, dust, and SO ₂
12 (Ozone, IR)	9.63	9.61	9.64	Total column ozone, turbulence, and winds
13 (Clean longwave window, IR)	10.40	10.33	10.41	Surface and cloud
14 (Longwave window, IR)	11.21	11.21	11.24	Imagery, SST, clouds, and rainfall
15 (Dirty longwave window, IR)	12.36	12.29	12.38	Total water, ash, and SST
16 (CO ₂ , IR)	13.31	13.28	13.28	Air temperature, cloud heights and amounts

Schmit et al. (2005, 2008, 2017)에 발표된 내용을 바탕으로 Table 3에 함께 제시하였다.

3. 차세대 기상위성 관측의 활용과 편익

차세대 기상위성은 기존의 위성에 비해 시공간 해상도, 관측채널 수, 산출물의 종류 등이 크게 향상되며, 그에 따른 위성정보의 활용도 더욱 다양화 될 것으로 예상된다. 차세대 기상위성의 대표적인 10개의 활용분야(태풍, 위험기상, 해양, 미세먼지, 산불, 안개, 착빙, 화산 폭발, 우주기상)에 대하여 예상되는 활용 분야와 편익을 정성적 측면에서 살펴 보았다(NAS, 2000, 2008; Bard et al., 2008; Goodman, 2015; Brown and Wooldridge, 2016; COMET Program, 2016).

3.1 태풍

태풍, 허리케인, 사이클론 등 열대성 저기압은 전세계적으로 많은 인명과 재산 피해를 일으키는 대표적인 위험기상 현상이다. 차세대 기상위성은 열대성저기압 관측에 있어서 가장 핵심적이고 중요한 자료를 제공한다. 고해상도의 열대성저기압 분석 영상은 폭풍우의 중심위치 결정과 이동에 대한 감시 기능을 향상시키고, 해수면 온도의 보다 정확한 관측은 열대성저기압의 발달에 필요한 에너지 산출에 더 나은 정보를 제공하게 한다. 아울러 차세대 기상위성 기반의 바람, 수증기, 에어로졸 관측자료의 향상은 열대성저기압을 모의하는 수치모델의 예측정확도 향상에 실질적으로 기여할 수 있다(NAS, 2000; Kim et al., 2017). 앞서 언급한 바와 같이 차세대 기상위성 자료의 향상된 시공간 해상도 및 다양한 채널 관측은 예보관, 재

난 대응 의사결정자, 일반인, 방송 등 다양한 사용자 그룹에 열대성저기압의 위치, 강도, 변화 양상 등에 대해 결정적인 정보를 제공한다. 특히, 차세대 기상위성의 향상된 성능은 열대성저기압에 대한 예보 개선을 통해 인명과 재산의 보호 및 피해 경감, 강풍·호우·해일 등 풍수해에 대한 재해예방, 농업·수산업·도로·교통·항만 등 다양한 산업분야에서 편익을 창출할 수 있다.

3.2 호우, 뇌우, 우박 등 위험기상

여름철 장마기간을 중심으로 대기가 열역학적으로 심하게 불안정한 조건이 될 때 뇌우, 우박, 돌풍 등을 동반하는 국지적 호우 현상들이 빈번하게 발생한다. 이러한 현상들은 태풍과 더불어 기상재해로 인한 사회경제적 피해의 대부분을 차지한다. 따라서 이러한 현상의 발생 전조 상황을 다양한 채널의 고해상도 차세대 기상위성을 통하여 적시에 감시·탐지·추적하고 위험기상 기상예보에 활용하는 것은 기상재해에 대한 선제적 대응과 재해예방에 매우 중요하다. 기존의 천리안위성은 한반도 지역에 대한 관측주기가 15분 간격인 것에 비해 천리안위성 2A호는 2분 간격으로 시간해상도가 크게 향상되고, 관측 채널수도 5개에서 16개로 향상됨에 따라 급격하게 발달하는 뇌우구름의 생성·성장·발달·소멸의 전반적인 과정을 조기탐지·예측하는 성능이 크게 향상될 것으로 기대된다. 특히, 천리안위성 2A호에서 새롭게 산출되는 대류 초기탐지(Convective Initiation), 운정 부근의 구름 상태(Cloud-top Phase) 관측, 뇌우 운정 탐지(Overshooting Top Detection) 등의 산출물은 연직적으로 높게 발달하는 대류운(deep convection)에 대한 초기 성장단계부터 최성기와 쇠퇴기에 이르기까지의 급격한 상황 변화를 감시하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다. 고해상도의 차세대 기상위성 자료와 이들에 의해 유도되는 대기운동벡터는 중규모 수치모델링에 필요한 입력자료를 제공함으로써 뇌우를 동반하는 중규모 대류시스템의 성장, 발달, 소산과정을 수치 모의하는데 중요하게 활용될 수 있다. 또한 고해상도의 차세대 기상위성 관측자료를 기상레이더 및 낙뢰 관측자료와 융합하면 호우, 뇌우, 우박 등을 동반하는 위험기상 현상의 조기탐지, 추적, 초단기 예보에 효과적으로 활용될 수 있다. 기상위성관측의 특별한 장점 중 하나는 지구대기 및 그 표면에 대한 장기간의 전지구적 관측을 연속적으로 수행할 수 있다는 것이다. 이러한 특성을 지닌 위성관측 자료는 기후변화와 기후변동성의 감시와 이해에 매우 중요하게 활용되고 있다. 기온, 강수, 해수면 온도, 기상·기후 현상(태풍, 가뭄 등), 엘니뇨/라니냐, 에어로졸, 식생, 해빙, 적설 등을 감시·관측하는 차세대 기상위성 자료는 기후변화 및 기후변동성 감시와 진단에 기여 한다. 기후변화와 기후변동성에 대

한 과학적 이해의 증진은 위험기상 현상의 발생빈도, 강도, 지속기간 등에 대한 시공간적 변화를 해석하고 설명할 수 있는 근거를 제공하기 때문에 궁극적으로는 위험기상 예측 능력 향상을 통한 기상재해 예방, 효율적 대응, 피해 경감에 기여할 수 있다.

3.3 해양

해양, 연근해 및 해안지역은 해양 물류·교통, 수산업, 거주, 해양생태 등 각종 사회경제적 활동이 매우 활발하고 자연생태학적으로도 매우 중요한 지역이다. 이들 지역은 위험기상의 발생 시 강풍, 폭풍 해일, 호우, 홍수 등의 현상에 의해 대규모의 재해가 발생할 수 있는 지역이다. 차세대 기상위성은 광범위한 해양과 해안 지역에 대해 기존의 위성에 비해 고해상도로 기상 및 해양 상황을 감시할 수 있는 기능을 갖추고 있다. 특히 폭풍우 탐지·추적, 강수 추정 및 초단기 예보, 해수면 온도 등의 정보는 예보관의 특보 발표 및 해양 관련기관의 의사결정 과정에 직접적으로 활용됨으로써 해양, 연근해 및 해안지역에 대한 인명과 재산상의 손실과 피해를 경감하는 등의 편익을 창출할 수 있다. 또한 차세대 기상위성을 통해 산출되는 태풍, 호우, 안개 등에 대한 향상된 성능의 산출물들은 해양, 연근해 및 해안지역에 대해서도 육상과 비슷한 수준의 편익효과를 창출할 수 있다.

3.4 미세먼지 및 대기환경

미세먼지를 비롯한 대기오염 물질에 의한 대기질 악화는 인간, 동물, 자연환경에 매우 다양한 형태로 피해를 유발할 수 있다. 기존의 위성에 비해 차세대 기상위성은 다양한 분광채널과 고해상도 자료를 산출하여 제공할 수 있는 향상된 기능을 가지고 있다. 차세대 기상위성을 이용하여 광범위한 지역에 대한 대기오염 물질(대표적인 예로, 미세먼지, 황사, 화산재, 오존, 이산화황 등)의 배출원 감시, 시공간적 분포 및 농도 추정, 장거리 수송·확산과정 분석 등 다양한 산출 정보를 적시에 제공하는 것은 미세먼지 예·경보 및 대기환경 정보 서비스 개선에 기여할 수 있다. 한편으로 차세대 기상위성을 통하여 산출되는 고해상도의 대기운동벡터 자료는 미세먼지 농도 예측에 사용되는 전구 및 지역 수치예보모델의 정확도 개선을 통하여 미세먼지 예보 정확도 개선에 기여할 수 있다. 또한 천리안위성 2A호에 이어서 발사되는 천리안위성 2B호의 환경 및 해양 탑재체를 통해 관측되는 자료를 공동으로 활용하면 더욱 정확하고 유용한 미세먼지 등 대기오염 관측정보를 산출할 수 있다.

3.5 산불

대규모의 산불은 산림자원의 소실, 자연생태계의 파

피, 때로는 인명과 재산 상의 피해 등을 유발한다. 따라서 산불과 식생에 관련된 일련의 감시-탐지(발화여부, 발화시점, 발화지점, 잠재적 발화예상 지역 등), 산불의 확산 방향과 규모 관측, 산불 발생 전후 상태 비교 등에 대한 자세한 정보는 산불 피해예방, 소방기관의 진화대책 수립과 긴급한 의사결정, 산림 관련 기관의 사후 수습 대책 수립(예로, 산불 발생지역의 호우로 인한 홍수, 산사태, 산불 잔해물의 부유와 퇴적 등)에 매우 중요하다. 산불의 규모가 클수록 광범위한 지역에 대한 감시는 지상관측이나 항공기관측 만으로는 한계가 있다. 따라서 천리안위성 2A호와 같은 고해상도의 차세대 정지궤도 기상위성관측 자료는 산불에 대한 효과적인 감시에 중요하게 활용될 수 있다. Table 3에 제시된 바와 같이 차세대 기상위성의 근적외선(Near-IR) 영역의 0.86 μm 채널 및 단파적외선(Shortwave IR) 영역의 3.8 μm 채널의 고해상도 관측 자료는 식생과 산불 감시에 각각 효과적으로 사용될 수 있다. 기존의 극궤도 기상위성에 탑재된 고해상도의 분광기(예로 Aqua, Terra 위성에 탑재된 MODIS 등) 역시 식생 및 산불의 탐지에 중요하게 활용되고 있으나 극궤도 위성의 특성 상 지구상의 특정지역을 연속적으로 관측할 수 없는 한계가 있다. 따라서 고해상도의 차세대 기상위성 산출물은 특정지역에 대한 영상을 연속적으로 관측할 수 있기 때문에 기존 극궤도 위성의 한계를 극복할 수 있으며, 향후에 극궤도 위성 자료와의 융합적 기술 개발을 한다면 두 종류의 위성에 의한 시너지 효과가 반영된 새로운 형태의 향상된 산불과 식생 관측자료를 산출할 수 있다.

3.6 안개

안개로 인한 시정(visibility)의 악화는 육상, 해상, 항공 교통 안전에 부정적인 영향을 초래하며, 때로는 대형 인명사고를 유발하는 직접적인 원인이 되기도 한다. 차세대 기상위성을 통해 산출되는 새로운 형태의(고해상도, 다채널) 상세하고 정확한 안개와 하층운 정보(즉 생성, 발달, 소산)는 이들 현상에 대한 감시와 탐지 기능을 크게 향상시킬 수 있다. 천리안위성 2A를 비롯한 차세대 기상위성은 안개 및 하층운의 탐지와 초단기 예보 기능 향상을 통하여 교통사고 예방과 경감, 교통안전에 기여 및 이들 현상에 의한 사회적 비용절감에 기여할 수 있다.

3.7 착빙

착빙은 항공기의 안정적인 운항에 위협이 되고, 항로변경 등을 통해 운항에 영향을 주는 대표적인 항공기상 현상이다. 차세대 기상위성은 고해상도로 구름의 생성과 운형 감시 기능 향상을 통하여 항공기 조종사가 착빙 구름과 조우하는 시점과 위치를 미리 파악

할 수 있도록 하는데 도움을 줄 수 있다. 특히 다양한 운정의 상태정보(예로 기온, 상, 크기 분포, LWC (liquid water content), IC (ice content)) 등은 착빙 탐지에 매우 유용하게 활용될 수 있다. 고해상도의 새로운 항공기상 정보는 비행계획 수립, 항공로 조정 및 변경, 항공기상 위험경보, 항공기 안전 등에 기여함으로써 궁극적으로는 운항 시간 단축, 항공연료 비용절감 등의 편익을 창출할 수 있다.

3.8 화산 폭발

화산 폭발에 의해 발생하는 화산재, 스모그, 이산화황 등의 유해물질은 항공기 운항 및 인체의 건강에 심각한 위협 요인 중 하나이다. 화산 폭발로 배출된 물질들은 항공기 엔진에 영향(심할 경우 엔진 손상도 가능), 시정 감소, 항로 변경, 공항 운영방해 등의 다양한 영향을 통하여 항공기 운항의 지연 또는 취소, 공항 폐쇄 등의 형태로 운항 안전, 항공사 비용 손실, 승객 불편 등을 초래할 수 있다. 화산 폭발에 의해 공기 중으로 배출된 유해 물질들은 바람에 의해 장거리 이동 및 확산되면서 항공 승객과 승무원, 풍하 측 거주민들의 건강에 심각한 위협을 초래할 수 있다. 차세대 기상위성을 통해 산출되는 자료는 화산재 구름, 이산화황 및 기타의 화산 배출물질에 대한 탐지 기능을 개선시킴으로써 예보관들이 적시에 정확하게 화산과 관련된 위험정보를 발표하는데 기여할 것으로 기대되고 있다. 기존 위성은 화산재 탐지 관측 채널이 다소 제한된 반면에 차세대 기상위성은 16개의 관측 채널을 통해 더 정확한 화산재 탐지가 가능하고, 영상의 시공간 해상도가 대폭 향상됨에 따라 고해상도의 전지구 관측영상을 매 10분 마다 업데이트할 수 있기 때문에 신속하고 정확한 화산재 정보 서비스가 가능하다. 또한 차세대 기상위성에서 산출되는 향상된 바람관측 자료는 화산재 확산 수치모델 정확도를 향상시킴으로써 정확한 화산재 확산 예측정보 산출에 기여할 수 있다.

3.9 우주기상

태양의 주기적인 활동변화 및 태양표면에서의 급격한 폭발 현상(플레어, 코로나 질량 방출 등)에 의해서 지구로 유입되는 태양풍(solar wind)은 위성 운영, 항공 승무원과 승객의 방사선 피폭, 전력망(electric power grid) 장애, 통신 및 네비게이션 장애 등 사회인프라에 매우 다양한 형태로 영향을 미칠 수 있다. 미국 경제전문가들의 분석에 따르면, 우주기상의 부정적 영향 규모가 연간 2억~4억 달러 정도로 추정되며, 이보다 훨씬 더 큰 규모의 잠재적 피해 가능성이 늘 상존하는 것으로 평가하고 있다. 미국의 위성에 대한 우주기상 비용은 연간 1억 달러로 추정되고 있고, 지하

기 폭풍에 의한 고에너지 입자의 유입으로 극 항로를 운항하는 항공기의 비행경로 변경에 따른 비용은 각 비행 당 10만 달러를 초과하는 것으로 추정된 바 있으며, 지자기 폭풍에 대한 경보를 미국의 전력산업계에 적절한 시간 내에 제공하면 연간 1.5억 달러의 비용을 절감할 수 있을 것으로 추정된 바 있다(COMET Program, 2016). 또한 태양의 주기적 활동변화에 따라 지구로 유입되는 고에너지 입자(주로 양성자, 전자, 이온 등)는 지구의 대기권 전체 및 대류권의 기상과 기후에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Kim and Jang, 2017). 따라서 우주기상 현상으로 인한 사회경제적 영향과 피해를 사전에 적절히 대응하고 피해를 최소화하기 위해 위성기반의 우주기상 관측은 매우 중요하다. 차세대 기상위성에는 태양의 극자외선 및 X선 복사량 관측, 태양자외선 이미지, 지구자기장, 다양한 에너지 대역의 양성자, 전자, 이온 등을 관측할 수 있는 센서들이 탑재되어 있다. 이러한 관측을 통해 생산되는 자료는 우주기상 예보관들에게 태양의 활동상황을 보다 정확하게 감시하고 예측하며, 대규모 태양 폭발에 따른 부정적 영향과 피해를 경감하는데 중요하게 기여할 수 있을 것이다. Table 1에 제시된 바와 같이 천리안위성 2A호에 탑재된 3종의 우주기상 관측센서는 정지궤도기상위성 동반구(동경 128도)에서의 고에너지 입자플럭스, 지구자기장, 위성대전을 독자적으로 측정함으로써 GOES-16 위성과 함께 우주기상 현상 감시와 예측 기술 향상에 기여할 수 있다.

4. 천리안위성 2A호 관측자료 활용 확대 방안

2018년 11월에 발사예정인 천리안위성 2A호는 2절에서 언급한 바와 같이 기존의 천리안위성에 비해 위성영상의 시공간 해상도, 채널수, 산출물이 크게 향상되었다. 또한 Table 3에 제시된 바와 같이 일본의 히마와리-8/9호 위성 및 미국의 GOES-16/S 위성과 채널 특성이 거의 동일한 차세대 정지궤도 기상위성으로 손색이 없다. 천리안위성 2A호는 발사 후 약 6개월 정도의 궤도상 시험(In-Orbit-Test, IOT)를 거쳐 현업적으로 운영될 계획이다.

천리안위성 2A호에서 생산되는 자료가 효과적으로 활용될 수 있는 방안에 대하여 2017년 11월에 국가기상위성센터 주관으로 개최된 제3차 기상위성 사용자 컨퍼런스를 통해 토론된 내용을 중심으로 제시하고자 한다. 첫째, 천리안위성 2A호 자료의 최우선적인 사용자인 기상청 현업 근무자들에 대하여 산출물의 장단점 및 특성에 대한 교육, 소프트웨어 사용 훈련, 매뉴얼 발간 등을 통해 새로운 산출물과 그 사용법에 대한 적응 및 이해를 높이는 것이 필요하다(Mohr, 2014). 둘째, 기상위성 자료는 일반적인 기상자료와 달

리 자료의 형식(format) 및 사용방법이 쉽지 않기 때문에 사용자들이 쉽게 사용할 수 있는 지원도구를 제공하는 것이 필요하다. 특히 위성자료의 사용에 관심이 있는 대다수의 일반사용자들에게 이는 매우 중요하다. 셋째, 천리안위성 2A호 자료에 대한 접근성을 높일 필요가 있고, 고해상도의 천리안위성 2A호 용량 증가에 따른 자료의 신속한 이용이 가능한 서비스 시스템 환경 구축이 필요하다(대용량 자료로 인한 네트워크 과부하 발생이 가능). 넷째, 고해상도 천리안위성 2A호의 장점을 살려 위성자료를 이용한 기상인자 추출 등을 통하여 활용도를 높일 필요가 있다. 다섯째, 기존의 기상위성 관련 연구가 학계 및 연구소에 치중된 면이 있으나 천리안위성 2A호가 민간에서도 활발하게 사용되기 위해서는 산업계에서도 기상위성 활용 연구가 활성화 될 수 있도록 지원이 필요하다. 여섯째, 동남아(필리핀, 미얀마, 베트남 등)를 비롯한 국외사용자들에 대한 천리안위성 2A호의 활용도 향상을 위하여 한국국제협력단(Korea International Cooperation Agency, KOICA) 사업을 통해 위성 수신기를 보급하고, 개발도상국의 국가별 실정에 적합한 맞춤형 기술지원을 하는 것이 필요하다. 마지막으로, 사용자와의 소통과 환류를 강화하고 사용자 요구사항 및 개선 의견을 주기적이고 지속적으로 수렴하여 그 결과를 산출물 개선과 활용 서비스 개선에 반영할 필요가 있다.

5. 결론 및 토의

차세대 기상위성은 기존의 위성에 비해 시공간 해상도, 관측채널 수, 산출물의 종류가 획기적으로 개선됨에 따라 다양한 분야에서의 위성정보가 활용될 것으로 예상된다. 이 연구에서는 대표적인 10개의 활용분야(태풍, 위험기상, 해양, 미세먼지, 산불, 안개, 착빙, 화산 폭발, 우주기상)에 대하여 천리안위성 2A호 등 차세대 기상위성의 효율적 활용 방안과 예상되는 편익을 정성적으로 살펴 보았다. 특히, 미국의 GOES-16호 위성 관측을 바탕으로 그 동안 논의 되었던 편익은 2018년 하반기 발사를 앞두고 있는 천리안위성 2A호의 사용자들에게도 비슷하게 적용될 수 있을 것이다. 이 연구에서는 또한 천리안위성 2A호의 활용 확대를 위한 고려사항에 대하여 국내의 산·학·연 커뮤니티의견을 함께 제시하였다.

아울러 천리안위성 2A호 관측자료의 국제적 활용 확대를 위한 고려사항을 몇 가지 제안하고자 한다. 천리안위성 2A호의 전체적인 관측영역은 아시아, 서태평양, 오세아니아 지역으로 대별할 수 있다. 하지만 이들 지역에 대한 차세대 기상위성관측은 이미 2014년 10월에 발사된 히마와리-8호 위성을 통해 이루어

지고 있다. 따라서 후발 주자로서 천리안위성 2A호는 새롭게 산출되는 52종의 다양한 산출물을 통하여 각 국가별 사용자 수요에 부응하는 차별화된 서비스가 필요하다. 이를 위한 몇 가지 정책적 고려사항은 다음과 같다. 첫째, 지속 가능한 위성자료의 사용을 위한 사용자 환경을 충분히 고려할 필요가 있다. 특히, 동남아시아의 개발도상국에 대해서는 현재와 향후 수 년 동안의 사용자 환경에 대한 충분한 사전검토가 필요하다. 둘째, 52종의 산출물에 대하여 사용자 의견수렴 반영과 피드백 등 천리안위성 2A호의 활용 확대를 위한 지속적인 연구개발 및 서비스 개선이 이루어져야 한다. 셋째, 학계와 산업계의 협력적 역할분담과 관계형성이 필요하고, 기술개발과 활용 서비스가 위성정보 산업 활성화의 형태로 추진될 필요가 있으며, 이를 위한 정책적 지원이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국가기상위성센터의 R&D 과제 (NMSC-2016-3137)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이 연구에서 언급된 내용은 연구자 개인의 견해이며, 기상청의 공식적 입장이 아님을 밝힙니다.

REFERENCES

- Anderson, G. D., 2010: The first weather satellite picture. *Weather*, **65**, 87-87, doi:10.1002/wea.550.
- Bard, S. K., T. A. Doehring, and S. T. Sonka, 2008: Potential socio-economic benefits of GOES-R. 88th AMS Annual Meeting. 5th GOES User's Conference. New Orleans, LA, USA.
- Brown, M. E., and C. Wooldridge, 2016: Identifying and quantifying benefits of meteorological satellites. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 182-186, doi:10.1175/BAMS-D-14-00224.1.
- Choi, C. Q., cited 2010: How weather satellites changed the world [Available online at <https://www.space.com/8186-weather-satellites-changed-world.html>].
- COMET Program, cited 2016: GOES-R: Benefits of Next-Generation Environmental Monitoring [Available online at https://www.meted.ucar.edu/training_module.php?id=509#WxoWB6FOUk].
- Goodman, S. J., and Coauthors, 2012: The GOES-R proving ground: Accelerating user readiness for the Next-Generation Geostationary Environmental Satellite System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1029-1040, doi:10.1175/BAMS-D-11-00175.1.
- _____, 2015: Societal benefits and economic value of the GOES-R series satellites. *20th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, Phoenix, AZ, USA, Amer. Meteor. Soc. [Available online at <https://ams.confex.com/ams/95Annual/webprogram/Paper268833.html>].
- Hillger, D. W., 2008: GOES-R Advanced Baseline Imager Color Product Development. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 853-872.
- JMA (Japan Meteorological Agency), cited 2016: Imager (AHI) [Available online at http://www.data.jma.go.jp/mscweb/en/himawari89/space_segment/spsg_ahi.html].
- Kim, J., and K.-I. Jang, 2017: Climate influences of galactic cosmic rays (GCR): review and implications for research policy. *Atmosphere*, **27**, 499-509, doi:10.14191/Atmos.2017.27.4.499 (in Korean with English abstract).
- Kim, M., H. M. Kim, J. Kim, S. Kim, C. Velden, and B. Hoover, 2017: Effect of enhanced satellite-derived atmospheric motion vectors on numerical weather prediction in East Asia using an adjoint-based observation impact method. *Wea. Forecasting*, **32**, 579-594, doi:10.1175/WAF-D-16-0061.1.
- Mohr, T., 2014: Preparing the use of new generation geostationary meteorological satellites [Available online at <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/preparing-use-of-new-generation-geostationary-meteorological-satellites>].
- NAS (National Academy of Sciences), 2000: *From Research to Operations in Weather Satellites and Numerical Weather Prediction: Crossing the Valley of Death*. The National Academies Press, 80 pp.
- _____, 2008: *Satellite Observations to Benefit Science and Society: Recommended Missions for the Next Decade*. The National Academies Press, 40 pp.
- Schmit, T. J., M. M. Gunshor, W. P. Menzel, J. J. Gurka, J. Li, and S. Bachmeier, 2005: Introducing the next-generation advanced baseline imager on GOES-R. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 1079-1096.
- _____, J. Li, J. J. Gurka, M. D. Goldberg, K. J. Schrab, J. Li, and W. F. Feltz, 2008: The GOES-R Advanced Baseline Imager and the continuation of current sounder products. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 2696-2711.
- _____, P. Griffith, M. M. Gunshor, J. M. Daniels, S. J. Goodman, and W. J. Lebar, 2017: A closer look at the ABI on the GOES-R series. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 681-698, doi:10.1175/BAMS-D-15-00230.1.