



논문

대형 폭발사고로 인한 스모크의 모니터링과 이동경로 예측: 2015년 텐진항 폭발사고를 중심으로

Monitoring and Prediction of Smoke Emitted from the Large Explosion Accident: 2015 Tianjin Explosion Case

이권호*, 박승식¹⁾

강릉원주대학교 복사위성연구소, 대기환경과학과, ¹⁾전남대학교 환경에너지공학과

Kwon-Ho Lee*, Seung-Shik Park¹⁾

Research Institute for Radiation-Satellite, Department of Atmospheric & Environmental Sciences,
Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Republic of Korea

¹⁾Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University,
Gwangju, Republic of Korea

접수일 2023년 3월 14일
수정일 2023년 3월 27일
채택일 2023년 3월 28일

Received 14 March 2023
Revised 27 March 2023
Accepted 28 March 2023

*Corresponding author
Tel : +82-(0)33-640-2319
E-mail : kwonho.lee@gmail.com

Abstract Satellite remote sensing data with a trajectory modelling have been a valuable tool for severe aerosol event monitoring. In this study, we present the results of explosion smoke monitoring for large accident in Tianjin, China by using the combination of geostationary satellite observation data and forward trajectory analysis. The integrated analysis with the continuous satellite detected smoke data and matching forward trajectories, air mass transport patterns for the smoke aerosol plume. Explosion smoke detection based on the Himawari-8 observation data using infrared brightness temperature difference technique was used as input to the forward trajectory analysis by the HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model. These integrated analysis for China's Tianjin explosion in 12 August 2015 reveals remarkable spatial coherence for source-transport pattern. The result showed that the forward trajectories of explosion smoke are consistent with the area of satellite detected smoke plume. The success rate of the 24 hour smoke forecast result was about 92.68% in this study. These results support the feasibility of using the integration of satellite observed and model derived data for emergency monitoring and forecasting.

Key words: Explosion, Smoke, Geostationary satellite, Trajectory, Remote sensing

1. 서론

대형 폭발사고는 주로 화학물질을 저장, 취급, 이송하는 과정 및 화학공장에서 발화성 물질을 생산 또는 가공하는 공정에서 발생한다. 대규모 화학공장이나 화학저장소 등과 같은 장소에서 폭발사고가 발생하는 경우에는 막대한 환경오염과 피해가 발생한다 (Pearson, 1988). 그러나 화학 폭발 현장에서 발생하는 유독성 스모크의 현황 및 이동에 관한 정보의 획득이 중요함에도 불구하고, 불시에 발생하는 폭발사고 시점으

로 인하여 환경오염의 정도를 즉시 측정하기 어렵다. 특히, 중국은 대규모 산업시설이 밀집된 곳에서 폭발사고가 발생한 사례가 보고되고 있으며, 그 대표적인 사례로는 2015년 8월에 발생한 텐진항 폭발사고, 2015년 8월에 발생한 산둥성 화학공장 폭발사고, 2015년 9월에 발생한 저장성 화학공장 폭발사고, 2016년 6월에 발생한 후베이성 화학공장 폭발사고, 2017년 2월에 발생한 안후이성 화학공장 폭발사고 등이 있다. 이러한 화학물질의 폭발사고에서는 다량의 화학종과 연소성 배출물질이 배출되지만 이에 대한

정보를 정량적으로 분석한 사례는 매우 드물다.

최근까지, 가장 강력한 화학 폭발사고 중 하나인 중국 텐진항(Tianjin port)의 화학물질 폭발사고(북위 39.040°, 동경 117.737°, 2015년 8월 12일 LT 23:30분 경 최초 폭발)는 대규모 폭발로 인한 유독성 스모크의 영향을 종합적으로 파악하는 계기가 되었다(Willey *et al.*, 2015). 그리고 중국의 산업화에 따른 대규모 공업 단지의 확장과 함께 대규모 화학공장 폭발사고가 잇따라 발생하고 있음에 따라, 이로 인해 발생한 대기오염물질이 해당 지역뿐만 아니라 원거리 풍하 지역에 미치는 영향에 대한 종합적인 자료가 필요하게 되었다. 따라서, 대규모 공단의 화재나 폭발성 화학물질의 폭발 시 발생하는 스모크 플룸(smoke plume)의 탐지와 이동경로 모니터링은 스모크로 인하여 유발되는 각종 피해(예: 환경, 보건, 교통 안전, 경제적 손실 등) 예방 및 경감을 위한 목적이 있어 매우 중요한 역할을 차지한다.

인공위성 관측자료는 주기적인 지구관측을 하고 있는 장점으로 인하여 폭발사고 발생 시 현지 접근이 어려운 점을 극복할 수 있다. 그리고 인공위성을 이용한 환경 감시는 넓은 지역을 관측할 수 있는 장점으로 인하여 폭발사고 지점에서 발생한 스모크의 범위와 중장거리 이동에 관한 분야에서 유용하게 사용할 수 있다. 선행 연구에서는 광역 대기 에어로솔 모니터링 기법으로서 인공위성을 사용한 방법이 제시되었으며(Lee, 2013a, 2012), 인공위성과 궤적분석 모델을 이용하여 대기질 예측 기법 및 그 타당성에 관한 연구도 수행되었다(Lee *et al.*, 2014, 2006). 그리고 이러한 방법은 화산폭발로 인하여 발생한 광역 화산재 탐지 및 화산재의 영향 범위 평가를 위하여 사용되기도 하였다(Lee and Jang, 2014a, 2014b). 따라서, 인공위성 관

측자료와 기상학적 모델링의 통합분석 기법은 대기오염물질의 분포와 오염물질을 포함한 대기에 대한 이동정보를 제공할 수 있으므로, 대기 오염 현황과 예측에 관련된 분야에서 매우 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구에서는 대형 폭발사고로 인하여 배출된 스모크 플룸의 현황 모니터링 및 이동 예측을 위한 방법으로서 인공위성과 궤적분석 모델을 사용한 방법론을 제시하였으며, 2015년 텐진항 폭발 사례를 연구 대상으로 하였다. 이를 위하여 정지궤도 위성인 HIMAWARI-8의 연속 관측자료를 이용하여 폭발사고에서 발생한 스모크 플룸의 시공간적 특성정보를 산출하였으며, 궤적분석 모델을 수행하여 스모크를 포함하는 대기의 이동경로를 분석하였다. 정지궤도 위성자료를 통한 스모크 영역에 대한 시공간적 분포정보와 궤적분석을 통한 이동 예상경로의 시각화 정보는 대기오염물질의 영향 지역을 평가하기 위한 수단으로 사용될 수 있다.

2. 자료 및 방법

2.1 텐진 폭발사고 사례

본 연구의 사례는 중국 텐진 빈하이 신구의 텐진항에서 2015년 8월 12일에 발생한 대형 폭발사고이며, 폭발사고 중 인명피해도 가장 많이 발생한 것으로 알려져 있다(Zhao, 2016; Huang and Zhang, 2015; Willey *et al.*, 2015). Li *et al.* (2015)의 보고에 따르면, 텐진 폭발로 인해 약 17,000개의 거주지와 170개의 사업장이 피해를 입었으며, 114명이 사망하고 722명이 부상 치료를 위해 병원으로 이송된 것으로 알려져 있다. 텐진 폭발사고는 현지 시간 기준으로 2015년 8월 12일 오후 11시 36분경(15:36 UTC)에 발생한 것으로 최초

Table 1. Characteristics of the Tianjin explosion.

Location (Lat, Lon)	Period	Type	Chemical	Parameters
BinHai, Tianjin (39.039°N, 117.737°E)	12 Aug. 2015 15:36 UTC	Explosions, Fire	NaCN, NH ₄ NO ₃ , KNO ₃ , etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Two large explosions occurred within 30 seconds. • Eight additional explosions on 15 Aug.

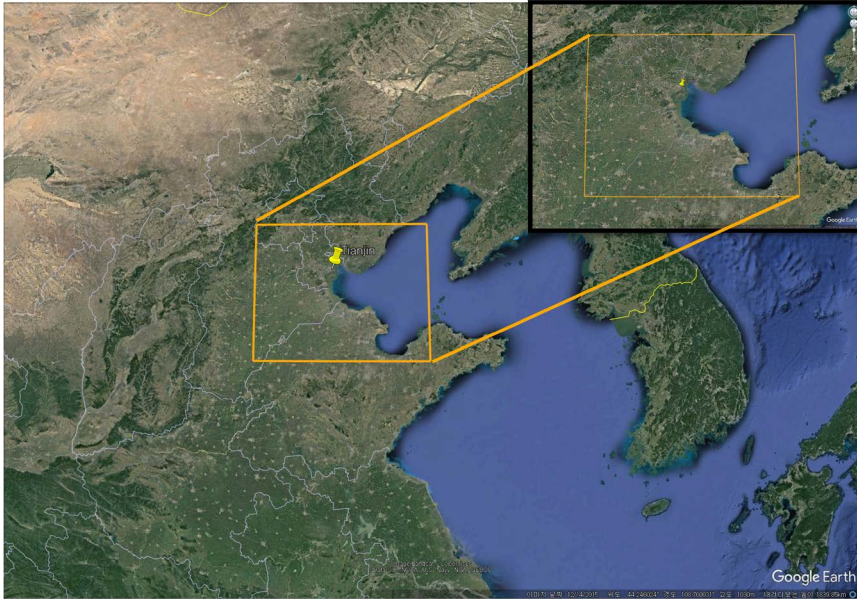
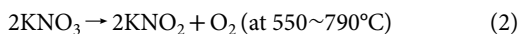
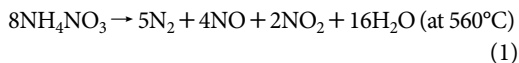


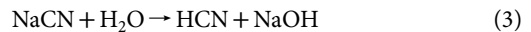
Fig. 1. Map of the study area (37~40°N, 115.5~120.5°E). The locations of explosion accident in China (Tianjin (39.039°N, 117.737°E) is indicated by yellow pin.

보고되었으며, 30초 간격으로 두 차례의 강한 폭발이 발생하였다. 그리고 화재 진압에 실패하였고, 이후 8월 15일에 소규모 폭발이 연속 발생하였다. 표 1에는 폭발사고에 관한 지리적 위치, 기간, 폭발 타입, 화학종, 기타 상세 설명을 나타내었으며, 해당 사고 발생 지점은 그림 1과 같다.

폭발사고 당시 주요 화학물질은 약 700톤의 NaCN, 약 800톤의 NH_4NO_3 , 약 500톤의 KNO_3 로 추정되었다 (<https://theconversation.com/explainer-how-dangerous-is-the-sodium-cyanide-found-at-tianjin-explosion-site-46229>). 이 중 NH_4NO_3 와 KNO_3 의 가열로 인한 화학 반응식은 다음의 식 (1) (Chaturvedi and Dave, 2013; Feick and Hainer, 1954) 및 식 (2) (Freeman, 1957)와 같으며, 비료 또는 화약의 원료로 사용되어 온도 조건에 따라 NO와 NO_2 를 생성하는 것으로 알려져 있다.



NaCN은 끓는점 $1,496^\circ\text{C}$ 로서 위의 두 화학물질보다는 안정하지만 물에 쉽게 용해되어 HCN을 발생하는 맹독성물질이므로, 폭발 상승 기류에 의한 독성물질의 확산이 문제가 될 수 있다.



그리고 이러한 폭발의 직접적인 원인은 밝혀지지 않았으나 현장 기록에서는 텐진항에 야적된 각종 화물, 건축 시설 및 기타 화학물질의 연소로 인하여 질은 스모크가 발생되었음이 확인되었다 (<https://www.nytimes.com/interactive/2015/08/13/world/asia/tianjin-china-explosions-maps.html>). 따라서, 폭발에 따른 주요 대기오염물질은 탄소성 입자, 질소산화물 그리고 비산 먼지의 혼합상태로 고려될 수 있다.

2.2 자료

대형 폭발로 인한 대기오염물질의 시공간적 분포 및 이동 변화 양상을 정성적, 정량적으로 분석하기 위하여 인공위성자료와 지상관측자료 그리고 기상 자료가 사용되었으며, 각 자료 목록에 대한 상세 설명은

Table 2. Specification of measurement instruments used in this study.

Data	Instrument	Measured parameters	Resolution
Satellite	Himawari-8/AHI	Level 1b calibrated radiance	1~2 km/pixel
Meteorology	NOAA's NCEP Global Forecast System (GFS)	Temperature, humidity, wind speed, wind direction, visibility, solar radiation	0.25 degree

표 2와 같다. 위성 관측자료의 관측영역은 보하이만을 중심으로 텐진과 한반도 일부를 포함하는 지역(동경 115.5~120.5°, 북위 37~40°)이며, 관측기간은 첫 폭발이 발생한 2015년 8월 12일과 연속 소규모 폭발이 발생한 8월 15일을 집중적으로 분석하였다.

본 연구에서 사용된 인공위성자료는 정지궤도위성인 Himawari-8 위성의 원시 관측자료를 복사 보정(radiometric calibration)한 자료인 Level-1B (L1B) 자료를 사용하였다. Himawari-8 위성의 관측영역은 전구 영역이지만, 본 연구의 대상지역인 중국 동부 지역과 한반도 일부를 포함하는 영역만 추출하여 사용하였다. Himawari-8 위성의 다파장 영상센서인 Advanced Himawari Imager (AHI)는 16개 채널(중심 파장 0.47 μm , 0.51 μm , 0.64 μm , 0.86 μm , 1.6 μm , 2.3 μm , 3.9 μm , 6.2 μm , 6.9 μm , 7.3 μm , 8.6 μm , 9.6 μm , 10.4 μm , 11.2 μm , 12.4 μm , 13.3 μm)에서 지구 관측을 수행하며, 약 10분 간격으로 전구 영역을 관측하는 최신 위성 센서이다(JMA, 2017). AHI의 공간해상도는 0.470~0.856 μm 파장 범위의 가시 채널에서 1 km 해상도(0.640 μm 는 500 m), 적외 채널에서 2 km 해상도로 측정 가능하며, 시간해상도는 최대 2.5분에 한 번씩 관측하고 있다. 기존의 정지궤도 위성은 3~5개의 제한된 채널과 2~4 km 정도의 공간해상도를 가지고 있었으나, AHI는 고해상도의 다중채널 영상정보를 제공함으로써 지구환경변화에 대한 정보를 보다 상세한 수준의 관측정보를 획득할 수 있게 해준다.

그리고 폭발로 인하여 생성된 배출물질을 포함한 공기의 이동 궤적분석을 위한 모델은 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)의 The Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPPLIT) 모델(version 4.2-September

2019) (Draxler and Rolph, 2003; Rolph, 2003)이다. HYSPLIT 모델은 스모크 플룸의 예상 이동경로를 분석하기 위하여 전진 궤적(Forward trajectory)을 실행 조건으로 하였으며, 기상 모델 입력자료는 미국 해양 기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공되는 기상 예측 모델인 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/Global Forecast System (GFS) 자료를 사용하였다. GFS 자료는 하루 동안 6시간 간격으로 4회(00, 06, 12, 18 UTC) 생산되고 있으며, 공간해상도는 경위도 0.25°의 등간격으로 경도 1,440개, 위도 721개의 격자 단위로 구성되어 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 폭발사고 기원의 스모크 탐지

텐진항 폭발사고는 각종 화학물질과 항구에 적재된 물질(차량, 컨테이너, 각종 구조물 등)이 함께 연소되어 생성된 스모크가 발생하였으므로, 탄소성 입자와 질소산화물이 혼합된 암색 스모크로 가정하여 광학적 탐지를 수행하였다. 그림 2는 텐진항 폭발 이후 약 8시간이 지난 2015년 8월 13일 UTC 23:00의 Himawari-8/AHI 가시 채널 칼라합성영상(color composite image)이다. 이와 같은 인공위성의 가시채널을 이용한 칼라합성영상은 인간의 눈으로 인식하는 자연색에 가까운 색으로 재구성하여 생성된 영상정보를 제공한다(Lee, 2013b). 그림 2의 칼라합성영상은 야간에 발생한 강력한 폭발 이후 스모크가 주변 지역으로 확산된 시점이므로, 발생원(39.040°N, 117.736°E)에서 동쪽으로 검은 스모크 플룸의 형태가 존재하며, 기류에 의하여 이

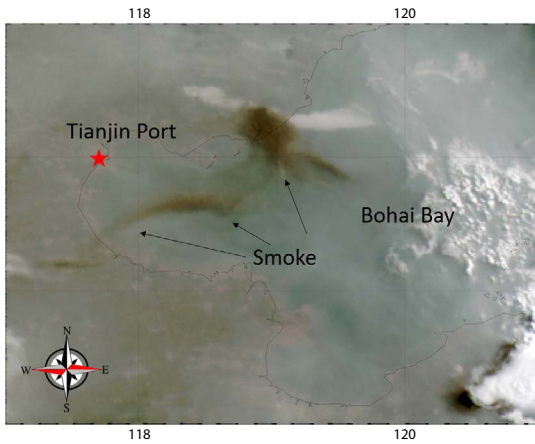


Fig. 2. Himawari-8/AHI RGB color composite image on 12 August 2015, UTC 23:00 (explosion after 8 hours). Red star represents the location of the Tianjin explosion (39.040°N, 117.736°E). Black smoke plume from the explosion has been moving toward Bohai bay.

동하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 칼라합성영상은 가시광선 채널을 사용하므로 주간 동안에만 유효한 영상정보를 제공한다. 따라서, 실제 폭발이 발생한 시간으로부터 스모크 플룸을 확인하기 위하여 가시광선 채널 이외의 적외선 채널을 이용하여 스모크 플룸을 탐지할 수 있어야 한다.

AHI 센서가 측정하는 물리량은 지구로부터 반사된 가시광 영역의 복사에너지(또는 반사도)와 지구가 방출하는 적외선 영역의 복사량(또는 밝기 온도)이며, 가시광선 영역의 복사량에 영향을 미치는 요인은 지표 반사도 및 지구대기 중 입자상 에어로솔과 가스상 물질에 의한 광 흡수도 또는 반사도이다. 기존의 위성을 이용한 에어로솔의 탐지 기법은 주로 위성이 관측한 복사량에서 가시광 영역에서 에어로솔 입자에 의한 반사도만을 분리하는 방법이 사용된다. 그러나 이 방법은 에어로솔 이외에 다른 조성물질의 영향을 최소화하는 과정에서 발생하는 오차와 에어로솔의 반사도를 에어로솔 광학두께값으로 변환하는 과정에서 입자의 광학특성값에 대한 모호성 그리고 주간에만 사용 가능한 단점이 있다. 한편, 적외선 영역에서는 입자상 물질의 크기가 파장보다 작기 때문에 물질의 방출

률 또는 흡수도에 영향을 받는다. 적외선 채널을 사용하는 방법도 마찬가지로 에어로솔 이외에 다른 조성물질의 영향을 최소화하는 과정에서 발생하는 오차와 에어로솔의 흡수도를 에어로솔 광학두께값으로 변환하는 과정에서 입자의 광학특성값에 대한 모호성이 단점이지만, 주야간 연속 관측자료를 사용할 수 있는 장점이 있다.

AHI 센서의 각 채널에서 대기 조성물질에 의한 복사량 변화 영향을 알아보기 위하여 주요 대기 조성물질의 파장별 굴절률을 비교하였다. 그림 3과 4는 AHI 센서의 각 채널별 상대반응함수(음영)와 입자상 물질(탄소, 먼지, 물, 얼음)의 파장별 굴절률을 나타낸다. 입자 산란 이론에 의하면, 입자의 굴절률($m = n - ik$)에서 굴절률의 정수 부분(n)이 광 산란에 대한 기여도와 관계 있으며 굴절률의 허수 부분(k)은 광 흡수와 관계가 있다. 따라서 입자상 물질에 대한 굴절률의 파장별 변화를 통하여 위성 센서에 감지되는 복사에너지에 영향을 미치는 정도를 파악할 수 있게 된다. 그림 4의 soot와 같은 탄소입자의 경우는 AHI 가시채널에서 모두 균일하게 큰 광 흡수성을 나타내고 있어 산란광을 이용한 탐지 방법으로는 적합하지 못하다. 그러나 AHI 적외 채널에서는 파장이 길어질수록 광 흡수도가 점차 커지는 선형 증가 패턴을 나타내고 있다. 따라서, 폭발 이후 발생한 탄소성 입자에 대한 탐지를 위하여 AHI 적외 채널에서 탄소성 입자에 흡수 특성을 응용하였다. 즉, 탄소성 입자는 $12.4 \mu\text{m}$ 에서의 광 흡수 특성이 $8.6 \mu\text{m}$ 에서의 광 흡수 특성보다 크기 때문에, 위성센서에서 관측된 두 파장에서 밝기 온도차($BT_{12-8.6} = BT_{12} - BT_{8.6}$)는 음의 값을 나타낼 것이다. 이는 기존의 $11 \mu\text{m}$ 와 $12 \mu\text{m}$ 두 개의 적외 채널을 이용하여 화산재를 탐지한 방법(Prata, 1989)과 모래폭풍 탐지(Legrand *et al.*, 1992)에 사용한 것과 유사하다.

인공위성이 관측하는 적외복사량은 지표에서 방사되는 양과 대기 중에서 방사되는 양에 대한 함수로 표현 가능하며, 다음의 식 (4)와 같이 적외 영역에서의 복사전달 방정식에 관한 기초 이론으로 설명된다.

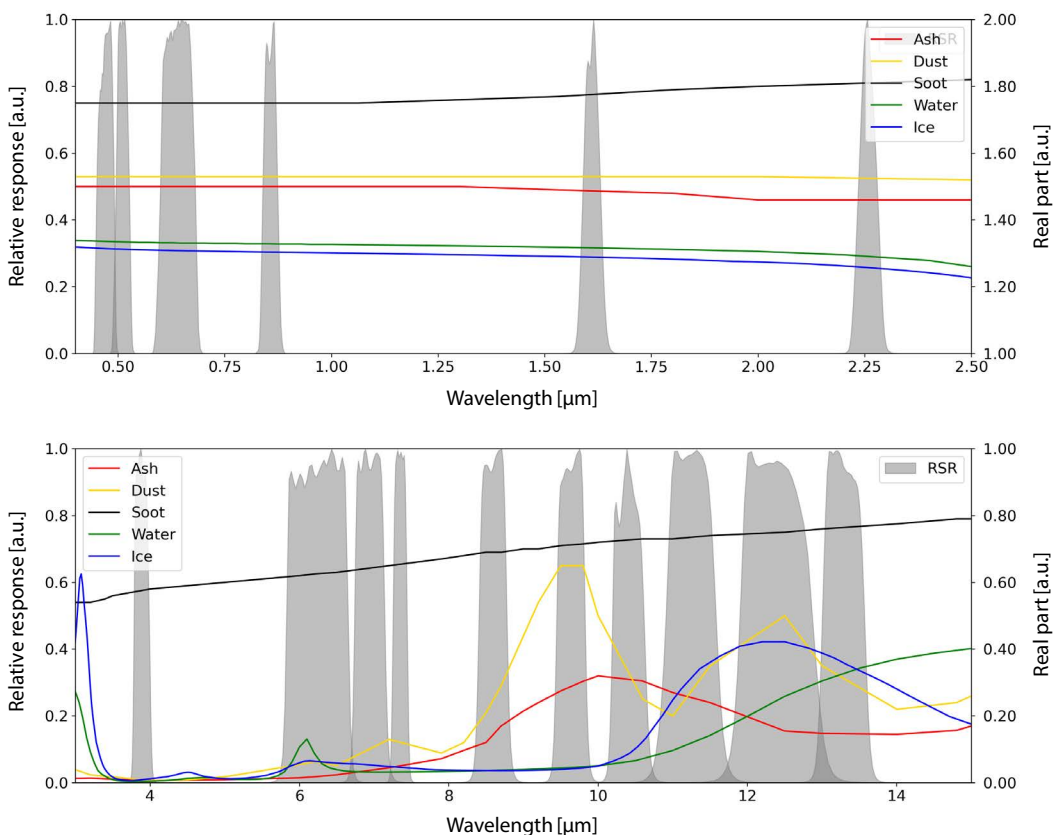


Fig. 3. The relative spectral response functions of AHL and real parts of refractive indices for dust (Koepke *et al.*, 1997), soot (WCP, 1986), water (Hale and Querry, 1973), and ice (Warren and Brandt, 2008) particles.

$$T_{sat} = \epsilon T_s + (1 - \epsilon) T_g \quad (4)$$

식 (1)에서 위성이 관측하는 밝기 온도는 T_{sat} , 반 투과성 스모크 플룸의 상단 온도를 T_s , 스모크 플룸의 방사율을 ϵ , 흑체 특성을 가지는 지표의 온도를 T_g 라고 하면, $T_g > T_s$ 가 된다. 여기에서 ϵ 는 스모크 입자에 의한 파장별 광 흡수도(light absorption)와 관련이 있으므로, 파장별 흡수도가 다른 채널의 관측자료를 비교하여 스모크 플룸에 의한 영향을 직접적으로 판단할 수 있는 수단이 된다. 그리고 동일 지역에서 스모크 플룸에 의한 영향이 없는 시간의 관측값(즉, T_s 를 무시할 수 있는 경우)과 스모크 플룸에 의한 영향이 있는 시간의 관측값을 비교하게 되면 T_s 에 의한 영향을 간접

적으로 정량화할 수 있게 된다. 따라서, Tianjin 폭발이 일어나기 이전의 여러 시간대의 위성 관측자료와 폭발 이후의 관측자료의 비교를 통하여 스모크 플룸의 영역을 탐지하였다.

폭발 과정은 고열의 방출 현상이므로 지표 수준의 열변화를 감지할 수 있는 적외선 채널의 사용이 효과적이다. 그림 5에서는 제시된 흑체(blackbody) 이론에 따른 지표열 조건이 적외선 복사에너지량 변화에 미치는 영향을 보여준다. 이 결과에서는 약 500~1,000°K 영역대의 온도를 가지는 물체는 파장 3~4 μm 근처에서 최대 에너지가 발산됨을 알 수 있다. 이러한 이론적 계산 결과를 이용하면 위성탑재 센서의 3~4 μm 채널을 사용하여 폭발사고가 발생한 지리적 위치정보를 획

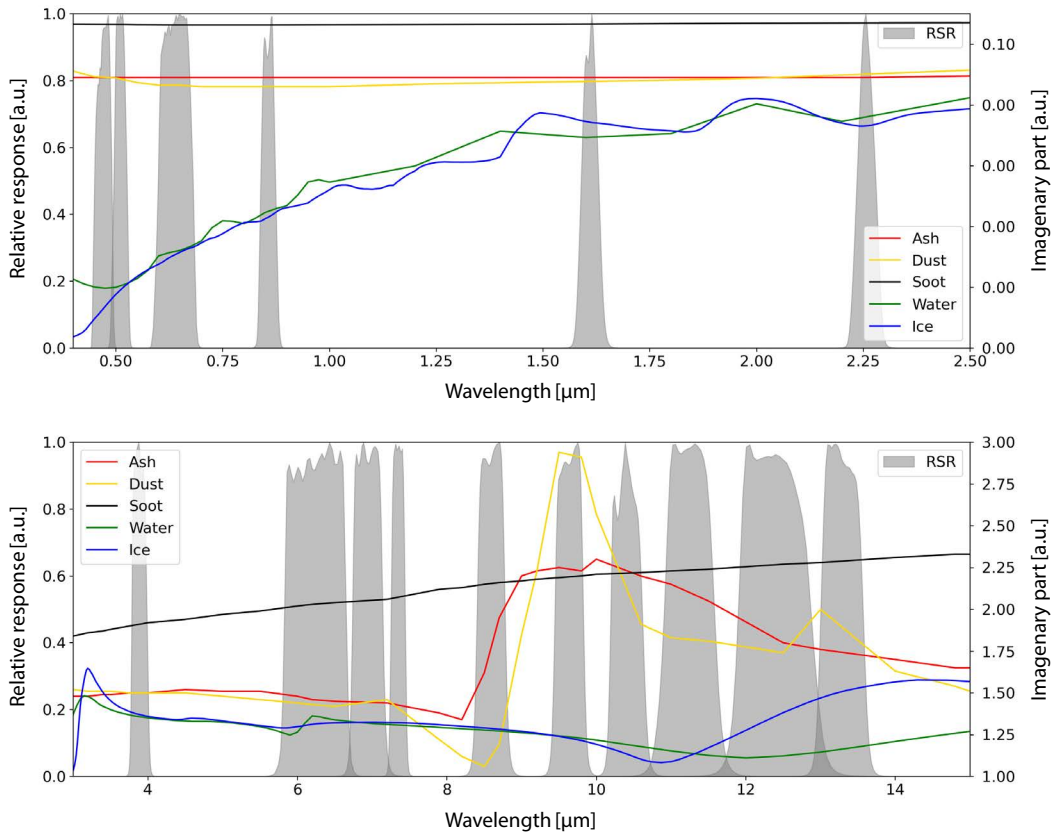


Fig. 4. The relative spectral response functions of AHL and imaginary parts of refractive indices for dust (Koepke *et al.*, 1997), soot (WCP, 1986), water (Hale and Query, 1973), and ice (Warren and Brandt, 2008) particles.

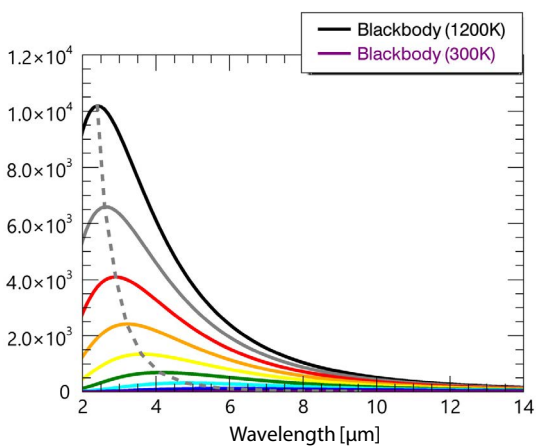


Fig. 5. The effect of surface heat conditions on the change in the amount of infrared radiant energy according to the blackbody theory.

득할 수 있다. 폭발성 화재 탐지 후, 폭발 원점의 위치 정보와 대상 지역의 기상자료를 이용하여 배출물질의 이동경로와 배출물질의 분포 현황 감시가 가능하다.

그림 6은 폭발성 화재 탐지를 위한 민감도 실험을 위한 복사전달 모의 결과로서, 적외선 영역에서 스모크 입자 증가에 따른 파장별 복사에너지 변화량 모의를 통하여 입자상 물질에 의하여 가장 민감한 적외선 파장영역을 파악할 수 있다. 그림 5에서 에어로솔 광학두께 (Aerosol Optical Thickness, AOT)의 증가는 복사량의 감소와 관련이 있으며, 특히 약 9 μm , 11 μm , 12 μm 부근의 파장에서 광 흡수가 크게 일어남이 확인된다. 따라서, 해당 적외선 파장 근처의 위성영상을 이용하여 탐지가 가능할 것으로 판단된다.

그림 7은 Tianjin 폭발 시점 이전(2015년 8월 12일 UTC 15:10)과 이후(2015년 8월 12일 UTC 15:30)의 AHI 센서의 3.8 채널 영상의 밝기 온도 영상 사례로서 폭발 원점으로부터 배출되는 열에너지의 위치지점이 탐지되었다. 정지궤도 위성인 Himawari-8/AHI 관측자료는 10분 단위의 관측자료를 제공하므로 단시간 동안의 변화탐지가 가능하다. 보다 상세하게는 3.8 μm 채널 영상의 열원 탐지 결과는 폭발이 발생한 지점의 주변 영역 대비 높은 온도($BT > 300^\circ\text{K}$)와 시간

적 변화가 증가한 조건($\Delta BT > 0^\circ\text{K}$)을 가지고 있는 화소에 대하여 폭발 지점으로 탐지하였다.

그림 8은 Tianjin 폭발 사례에 대하여 적외채널 온도차 기법을 적용하여 산출된 결과이다. AHI 위성 관측자료로부터 산출된 스모크 영역은 적외채널 온도차 결과 음수의 값을 가지는 화소들이다. 연속적인 AHI 스모크 탐지 결과의 비교를 통하여 폭발 원점에서 생성된 스모크에 대한 수평적인 분포 범위를 정량적으로 산출할 수 있다. AHI 적외영상의 화소는 공간 해상도가 약 2 km^2 로 알려져 있으며, 스모크 영역으로 탐지된 결과 8월 12일 UTC 19:20에 최대 353화소를 고려하면 스모크 영역은 약 706 km^2 에 해당한다. 그리고 폭발 원점으로부터 대기 중으로 배출된 스모크는 지속적으로 남서 방향으로 이동과 확산하였음을 알 수 있다. 이 기간 동안 인공위성영상에서 탐지된 스모크 플룸은 약 120 km에 해당하는 거리를 이동하고 있는 모습이 관측되었다. 이러한 스모크 플룸의 장거리 이동 특성은 폭발 원점에서 배출된 스모크의 대기 중 배출 조건과 기상 조건에 따라 주변 지역으로 이동, 확산하는 범위가 다르게 나타날 것이다.

대규모 폭발 이후 대기 중으로 배출된 스모크 플룸의 이동 권역 예측을 위하여 위성자료로부터 실제 관측된 폭발 원점에 대한 지리적 정보와 스모크 플룸의 속성정보를 입력자료로 하는 정방향 궤적분석(for-

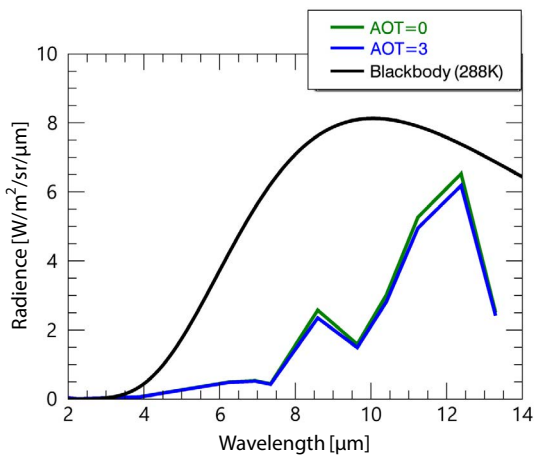


Fig. 6. Radiative transfer simulation results showing the changes of spectral radiance according to the increase of AOT in the infrared wavelength ranges.

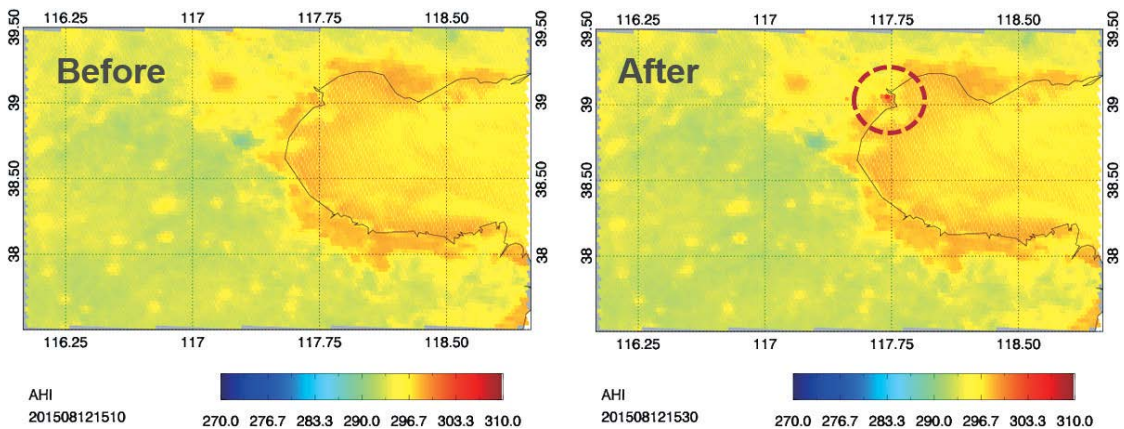


Fig. 7. Himawari-8/AHI 3.8 μm brightness temperature images on 12 August 2015, UTC 15:10 (left) and 15:30 (right).

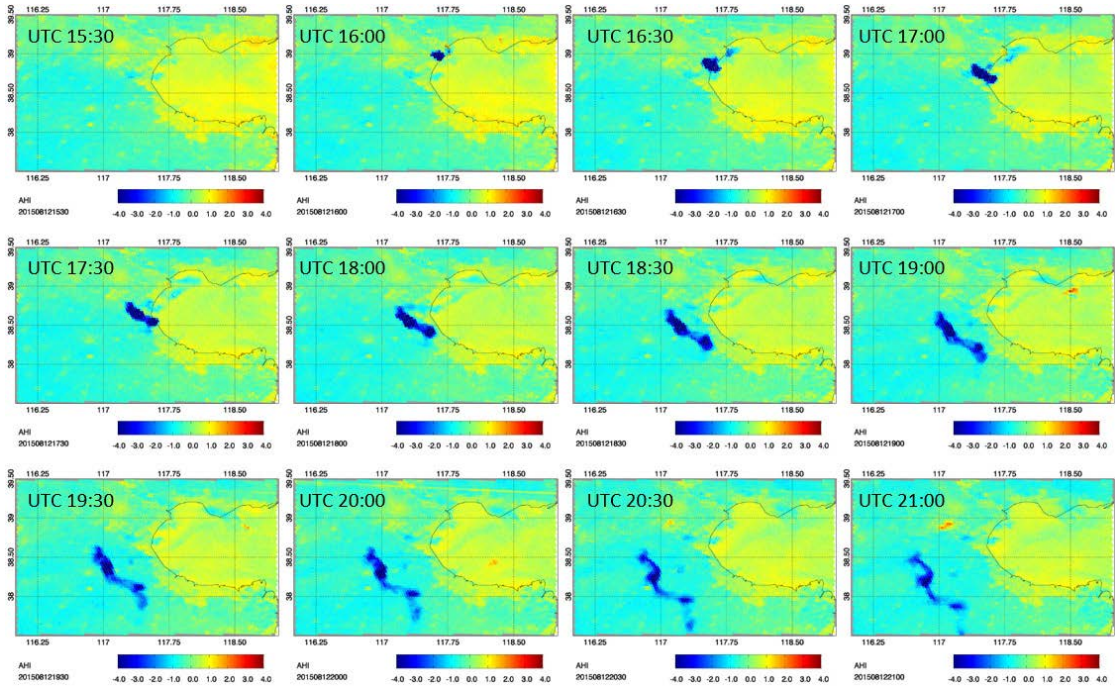


Fig. 8. Himawari-8/AHI BT-D images on 12 August 2015 from UTC 15:30 to 21:00.

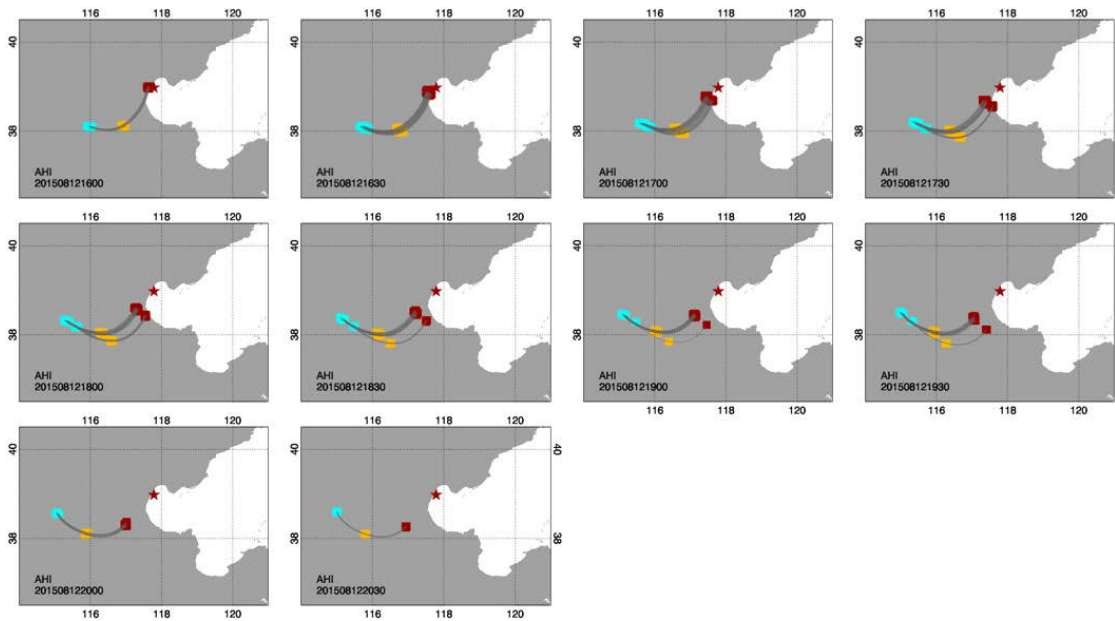


Fig. 9. HYSPLIT forward trajectory with smoke detected by Himawari-8/AHI BT-D images on 12 August 2015 from UTC 16:00 to 20:30.

ward trajectory) 모델링을 수행한 결과는 그림 9와 같다. 그림 9에서는 폭발 원점을 기준으로 위성 관측자료에서 스모크 플룸으로 탐지된 개별 화소의 위치를 출발 지점으로 하는 정방향 궤적분석을 수행하여, 각 궤적선이 6시간과 12시간 이후에 도달하는 것으로 예상되는 지점을 각각 표시하였다. 이러한 전진 궤적분석 결과는 스모크 플룸이 위치한 지점으로부터 향후 12시간 동안의 공기의 이동 궤적을 나타내므로, 현재의 위성 탐지 결과로부터 스모크 플룸의 시공간적인 분포양상을 확인 후, 단시간 동안의 스모크 플룸의 이동 및 확산 분포정보를 파악할 수 있는 중요한 수단이 된다. 그리고 궤적분석 모델로 예측된 스모크 플룸의 위치정보는 다시 실제 시간에 관측된 위성자료와 비교를 통하여 검증이 가능하다. 이러한 방법은 Lee et al. (2014)의 화산재 탐지 및 예측 모델링에 사용된 방법과 유사하다.

궤적분석 모델링 결과의 정확도 검증을 위하여 식 (5)와 같이 예측 대비 관측 비율(Forecast to Measurement Ratio; FMR)을 계산하였다.

$$FMR = N_m / N_f \times 100 (\%) \quad (5)$$

위 식에서 N_m 은 연구 사례 기간 동안 3시간 간격으로 12시간까지 예측된 스모크 플룸의 위치와 예측 시간에 해당하는 AHI 스모크 탐지 결과의 위치가 일치하는 지점을 나타내는 격자의 수이며, N_f 는 대상 지역 내에서 예측된 격자의 수를 의미한다. 즉, FMR은 HYSPLIT으로 예측한 유적선의 통과 지점에 대한 전체 경우의 수 대비 실제 위성 관측지점과의 비율로서, 모델과 관측 결과의 일치 여부를 판단할 수 있는 지수값이다. 전체 사례에 대하여 $N_f = 492$, $N_m = 456$ 으로서, FMR을 계산한 결과는 약 92.68%의 정확도를 가지는 것으로 확인하였다. 이러한 결과를 통하여 단기간 폭발성 스모크 감시 및 예측에 대하여 정지궤도 위성 관측자료와 궤적분석 모델링 자료의 통합 분석 기법이 매우 효율적으로 사용될 수 있는 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

대규모 폭발사고는 인명피해와 재산피해를 야기할 수 있으며, 급격한 연소로 인하여 생성된 대기오염물질은 주변 지역에 환경적 또는 사회적인 악영향을 미칠 수 있다. 정지궤도 인공위성 관측자료와 궤적 모델링자료는 현지 관측에 대한 한계를 극복할 수 있는 수단이며, 준 실시간으로 광역 대기환경 모니터링에 보다 효과적으로 활용 가능하다. 본 연구에서는 정지궤도 인공위성 관측자료와 궤적 모델링자료를 이용하여 2015년에 Tianjin 폭발사고를 대상으로 폭발 현장과 스모크 탐지, 스모크 이동 및 예측 결과에 대하여 분석하였으며, 주요 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, AHI 관측자료를 이용하여 분석된 가시채널 칼라합성영상과 적외채널 스모크 탐지 결과의 분석을 통하여 폭발사고의 지리적 위치와 각 시간별 스모크의 분포 및 이동 특성정보를 정량적, 정성적으로 획득하였다. AHI 칼라합성영상으로부터 폭발사고가 발생한 이후의 스모크 플룸에 대한 가시적인 영상정보를 포함하는 지역 현황을 확인하였으며, 적외채널을 이용하여 폭발 지점의 지리적 위치(북위, 동경)와 스모크 플룸의 공간적 영역 분포정보를 시각화하여 폭발로 인한 환경변화정보를 획득할 수 있었다.

둘째, AHI 관측자료를 이용하여 산출된 스모크 위치정보는 정방향 궤적 모델링을 통하여 단시간 이후의 이동 방향 예측이 가능하였으며, 분석 결과는 현재의 스모크 플룸의 위치로부터 미래의 스모크 플룸의 예상 이동경로 특성이 예측할 수 있었다. 이렇게 예측한 스모크 플룸에 대하여 실제 위성 관측자료와의 비교 결과는 약 92.8%의 예측 정확도를 확인할 수 있었으며, 기존의 지상 기반의 지점 관측 및 복잡한 모델링을 사용한 예측 방법의 시공간적 한계를 극복할 수 있었다.

마지막으로, 본 연구의 한계점으로는 인공위성 관측자료와 궤적 모델링의 시공간 분해능의 차이로 인하여 발생할 수 있는 불일치와 실제 기상조건이 궤적

모델링에서 사용되는 재분석 모델값과 불일치하는 조건에서 발생가능한 오차를 제시할 수 있다. 따라서, 관측과 모델링의 시공간 분해능이 일치된다면 보다 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2019R1I1A3A01062804). 본 연구의 공저자인 박승식 교수님은 오랜 기간 대기질 관측 연구를 수행하였으며, 공동 저자로 그를 모시게 된 것은 특권이 자 영광이었습니다. 박승식 교수님의 업적과 노고를 기리며 항상 감사할 것입니다.

References

- Chaturvedi, S., Dave, P.N. (2013) Review on Thermal Decomposition of Ammonium Nitrate, *Journal of Energetic Materials*, 31(1), 1-26. <https://doi.org/10.1080/07370652.2011.573523>
- Draxler, R.R., Rolph, G.D. (2003) HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Feick, G., Hainer, R.M. (1954) On the Thermal Decomposition of Ammonium Nitrate. Steady-state Reaction Temperatures and Reaction Rate, *Journal of the American Chemical Society*, 76(22), 5860-5863. <https://doi.org/10.1021/ja01651a096>
- Freeman, E.S. (1957) The Kinetics of the Thermal Decomposition of Potassium Nitrate and of the Reaction between Potassium Nitrite and Oxygen_{1a}, *Journal of the American Chemical Society*, 79(4), 838-842. <https://doi.org/10.1021/ja01561a015>
- Hale, G., Query, M. (1973) Optical Constants of Water in the 200 nm to 200 μm Wavelengths Region, *Applied Optics*, 12, 555-563. <https://doi.org/10.1364/AO.12.000555>
- Huang, P., Zhang, J. (2015) Facts Related to August 12, 2015 Explosion Accident in Tianjin, China, *Process Safety Progress*, 34, 313-314. <https://doi.org/10.1002/prs.11789>
- Japan Meteorological Agency (JMA) (2017) Himawari Standard Data User's Guide (v1.3, 3 July 2017) (PDF), Meteorological Satellite Center Technical Note.
- Koepke, P., Hess, M., Schult, I., Shettle, E.P. (1997) Global Aerosol Data Set, Report No. 243, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- Lee, K.H. (2012) Aerosol Direct Radiative Forcing by Three Dimensional Observations from Passive- and Active-Satellite Sensors, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(2), 159-171, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.2.159>
- Lee, K.H. (2013a) Three Dimensional Monitoring of the Asian Dust by the COMS/GOCI and CALIPSO Satellites Observation Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(2), 199-210, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.2.199>
- Lee, K.H. (2013b) Creating Atmospheric Scattering Corrected True Color Image from the COMS/GOCI Data, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 16(1), 36-46, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11108/kagis.2013.16.1.036>
- Lee, K.-H., Jang, E.-S. (2014a) Sensitivity Analysis of Volcanic Ash Inherent Optical Properties to the Remote Sensed Radiation, *Korean Journal of Remote Sensing*, 30(1), 47-59, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7780/kjrs.2014.30.1.5>
- Lee, K.-H., Jang, E.-S. (2014b) Monitoring of the Volcanic Ash Using Satellite Observation and Trajectory Analysis Model, *Korean Journal of Remote Sensing*, 30(1), 13-24, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7780/kjrs.2014.30.1.2>
- Lee, K.H., Lee, D.H., Kim, Y.J. (2006) Application of MODIS Satellite Observation Data for Air Quality Forecast, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(6), 85-862, (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H., Wong, M.S., Chung, S.-R., Sohn, E. (2014) Improved Volcanic Ash Detection Based on a Hybrid Reverse Absorption Technique, *Atmospheric Research*, 143, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.019>
- Legrand, M., Cautenet, G., Buriez, J.C. (1992) Thermal Impact of Saharan Dust over Land. Part II: Application to Satellite IR Remote Sensing, *Journal of Applied Meteorology*, 31, 181-193. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1992\)031<0181:TIOSDO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031<0181:TIOSDO>2.0.CO;2)

- Li, G.Q., Hou, S.K., Yu, X., Meng, X.T., Liu, L.L., Yan, P.B., Tian, M.N., Chen, S.L., Han, H.J. (2015) A Descriptive Analysis of Injury Triage, Surge of Medical Demand, and Resource Use in an University Hospital after 8.12 Tianjin Port Explosion, China, *Chinese Journal of Traumatology*, 18(6), 314-319. <https://doi.org/10.1016/j.cjtee.2015.11.012>
- Pearson, C.R. (1988) Assessment of Risk of Significant Environmental Contamination from Storage and Distribution Sites, Institute of Chemical Engineering Symposium, Series No. 110.
- Prata, A.J. (1989) Observations of Volcanic Ash Clouds in the 10-12-micron Window using AVHRR/2 Data, *International Journal of Remote Sensing*, 10, 751-761. <https://doi.org/10.1080/01431168908903916>
- Rolph, G.D. (2003) Real-time Environmental Applications and Display System (READY) Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Warren, S.G., Brandt, R.E. (2008) Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation, *Journal of Geophysical Research*, 113, 3681-3691. <https://doi.org/10.1029/2007JD009744>
- Willey, R.J., Murphy, J., Baulch, A. (2015) The Explosion in Tianjin, China, August 12, 2015, *Process Safety Progress*, 34, 312. <https://doi.org/10.1002/prs.11790>
- World Climate Program (WCP) (1986) A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation, WCP-112, WMO/TD-No. 24, World Meteorological Organisation, Geneva.
- Zhao, B. (2016) Facts and Lessons Related to the Explosion Accident in Tianjin Port, China, *Natural Hazards*, 84, 707. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2403-0>

Authors Information

- 이권호 (강릉원주대학교 대기환경과학과 교수)
(kwonho.lee@gmail.com)
- 박승식 (전남대학교 환경에너지공학과 교수)
(park8162@chonnam.ac.kr)