



PREFACE

It is our pleasure to present this report on the APEC Climate Center (APCC)'s research activities in 2013, which has been a very productive year for our Center.

APCC has expanded its research scope, in response to regional societal and scientific needs. While building expertise in climate prediction remains a priority, we are extending our reach to include policy-relevant climate applications and value-added climate information products.

APCC has accelerated efforts to better our service to the region. As one of the main services provided by APCC, the MME 3-month prediction information has been productively applied by scientists in developing countries that are unable to produce their own prediction information. Furthermore, in order to better prepare for climate-related hazards in a timely manner, APCC launched its 6-month MME prediction service in September 2013. We also began to release forecasts of the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO), starting from July 2013, as the world's first operational BSISO forecast service. Our researchers also achieved great success in publishing their papers in noted academic journals. Dr. Ok-Yeon Kim, for example, published a paper in *Climate Dynamics* and her research was later selected as one of the Research Highlights by another distinguished journal, *Nature Climate Change*. The following research report provides more information about our research outcomes from 2013.

We will continue to promote the best use of our research outcomes in various scientific and application areas. Our successes and achievements would not have been possible without the support of our valued partners. In this regard, I extend my thanks to you and I hope you enjoy this 2013 Research Report.

Chin-Seung Chung
Director, APEC Climate Center

CONTENTS

미계측 유역 수문모형 활용을 위한 고해상도 위성강우 정확도 평가

■ 박경원 | 기후변화연구팀

1. 서론	94
2. 연구 자료 및 방법	96
2.1 연구자료	96
3. 연구내용	103
3.1 분석 방법	103
3.2 분석결과	109
3.3 사례적용	116
4. 결론 및 토론	123



APCC

RESEARCH REPORT 2013-04

미계측 유역 수문모형 활용을 위한 고해상도 위성강우 정확도 평가

박경원 | 기후변화연구팀

ABSTRACT

The heavy rain that has occurred recently in Korea due to climate change and long-term rainfall variability and the resulting damage to property and human life reveal the importance of analyzing the characteristics of rainfall variability. Satellite retrieval of precipitation information from COMS is important to understanding the hydrological cycle from the regional to the global scale. Accurate measurement of precipitation is also important for heavy rain in order to reduce the damages caused by heavy precipitation, it is in the interest of meteorology and climate change to dedicate efforts to the quantitative prediction of precipitation. Rainfall is a highly discontinuous process, in terms of both space and time. Accurate and reliable measurements of rainfall over extensive areas of ocean presents a formidable challenge to meteorologists. Even with our best efforts, ground-based measurements only cover a small fraction of the globe. In addition to large uncertainties in the derived estimates, there are problems related to nonuniformities in coverage, quality, and logistics of operations. The observation and monitoring of clouds from space using remote sensing techniques has the potential for providing rainfall information at the desired time and spatial scales. The assessment of precipitation contributes to improving weather forecasting, at small and large spatial scales, and studying rainfall leads to better understanding of climate variability. We used the COMS satellite and TRMM 3B42 combined passive microwave satellites, including the Microwave Imager (TMI) on TRMM, the Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) on the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) satellites, the Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System (AMSR-E) on Aqua, and the Advanced Microwave Sounding Unit-B (AMSU-B) on the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) satellite series. Satellite-based precipitation retrievals for applications has been studied at the National Environmental Satellite Data and Information Service (NEDIS) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and data from the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) have been used within the Interactive Flash Flood Analyzer (IFFA) system (Scofield 1987). Iguchi et al., (1994) and Kozu et al., (1996) developed a retrieval algorithm for precipitation using the TRMM precipitation radar. Kemmerow et al. (1996) and Olson et al. (1999) estimate precipitation using TRMM with sensor-specific versions of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF). The associated vertical profiles of hydrometeors are then used to provide an estimated surface precipitation rate. We also made use of additional satellite data: the TRMM combined estimate, which employs data from both TMI and the TRMM precipitation radar (PR) as a source of calibration (TRMM product 2b31; Haddad et al. 1997a,b). Huffman et al. (1997,2007) developed 3-hourly precipitation using passive microwave data. Combined with a multi-satellite data assimilation system is needed to develop timely monitoring capability for unexpected precipitation in the Asia-Pacific region. The purpose of this report is to evaluate the performance of retrieved precipitation of heavy rainfall events to establish a baseline of performance and directions for improvement at daily and monthly time scales at a spatial resolution of 4km latitude/longitude. We used reference data from a relatively dense station network (ASOS data from KMA) of about 61 rain gauges over South Korea. The COMS-based precipitation estimates were evaluated from April 2011 to April 2012 using 30-min mean rainfall and 8-min mean rainfall, along with ground measurements. Five methods were explored to evaluate the results comparing COMS rainfall

and ASOS rainfall, specifically statistical methods, such as Root Mean Square Error (RMSE), ; Mean Absolute Error (MAE), Mean Error (ME), BIAS, and efficiency (EFF). The evaluation showed that the 30-min mean rainfall from COMS is underestimated in comparison with ASOS data. However, the 8-min mean rainfall is overestimated without a classification of rain/no rain. Finally, we applied the methodology to case studies, including landslides at Woomeon Mountain, Typhoon Bolaven, and the crash of Lao Airlines Flight 3013. These results can be applied to the development of data services and monitoring systems using the Korea COMS satellites for the Korean peninsula and the Asia Pacific region and, perhaps, a new data assimilation system, combining NASA with COMS. It may also be applied to understanding the nature of the energy and hydrological cycles, forecasting climate change in the Asia-Pacific region, and supporting data for short-term climate forecasts.

1. 서론

집중호우와 태풍은 가장 일반적이고 중요한 자연재해이다(smith and ward 1998). 이러한 재해로 인한 피해는 기후변화 도시화 등으로 매년 크게 증가하고 있으며, 필리핀을 강타한 하이옌 같은 슈퍼태풍으로 인한 인명피해 및 재산피해가 나날이 증가하는 추세이다. 따라서 집중호우와 태풍에 대한 강수량을 정확히 추정하는 것은 대단히 중요하며, 이에 많은 연구자가 홍수 예측 시스템에 대해서 연구해왔다(Dutta et al. 2000; Al-Sabhan et al. 2010; Hong et al. 2007; Reed et al. 2007; Yilmaz et al. 2010). 그러나 대부분의 홍수 예보 시스템은 관측장비가 잘 갖추어진 지역적 기반으로 만들어 졌기 때문에(Reed et al. 2007; Cloke and Pappenberger 2009;Pappenbergerand Buizza 2009; Voisin et al. 2011) 북한이나 동남아시아처럼 미계측유역에서 발생하는 홍수에 대해서는 충분한 관측장비가 없어 홍수 예측 시스템을 개발하기 더욱 어렵다. 이에 대한 대안으로 원격탐사 자료를 이용하여 홍수 예측 시스템을 구축해왔고, 최근에 들어서 고해상도 위성 강우 자료를 이용한 수문모형에 대한 연구가 있어왔다. (Hong et al. 2006; Artan et al. 2007;Shrestha et al. 2008; Su et al. 2008; Pan et al. 2010; Su et al. 2011). 그 중에서 가장 알려진 위성강우자료는 NASA에서 만든 TMPA(Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis; Huffman et al. 2007)로 3시간 간격 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 공간 해상도로 많은 연구자들이 사용하였다. TMPA는 여러 수동 마이크로파

복사계와 강우 레이더의 결합으로 만들어진 자료로 GFMS(Global Flood Monitoring System; Hong et al. 2007)의 입력자료로 이용되고 있으며 또한 집중호우에 대한 경보 시스템의 원격탐사 강수량 입력자료로 이용하여 연구되고 있다. (Martina et al. 2005; Georgakakos 1986). 그동안 집중호우 경보, 예보 시스템은 지상관측자료, 레이더, 수치 예보 자료등 다양한 자료를 사용하여 왔으며, 집중형·분포형 수문모형등을 이용하여 예경보 시스템을 발전시켜 왔다(Alfieri et al. 2012 and Gourley et al. 2012). 이러한 다양한 방법과 모델링 경보 시스템은 강수량의 정확도에 가장 크게 의존하는데 전통적으로 지상관측자료가 가장 많이 사용되어 왔다. 상대적으로 다른 센서에 비해서 가장 직접적이고 정확한 관측방법이다. 하지만 지상관측자료는 관측범위가 매우 한정적이고, 이런 한정된 관측범위는 지역적이고 여러변수에 영향을 받는 강수 패턴의 복합적인 지역에서는 정확한 강수를 측정하는 것을 어렵게 한다는 연구결과도 있다(Creutin and Borga 2003). 지상관측자료로 기상레이더를 많이 상요하게 되는데 1-4km에 이르는 지면 해상도와 5분 정도의 시간 해상도를 가지기 때문에 기상레이더를 이용하여 집중호우를 경보하는 시스템을 꾸준히 개발하여 활용하였다(Ogden et al. 2000; Delrieu et al. 2005; Vivoni et al. 2006; Borag et al. 2007). 그러나 지상 기상레이더를 이용하여 강수량을 측정하는 방법은 기상레이더 캘리브레이션, 반사도와 강우강도와와의 추정방법, 대기 감쇄, 지표면 clutter등의 문제로 에러를 포함한다(Krajewski and Smith 2002). 위의 어려움들로 인하여 특히 실시간 레이더 강수량을 적용할 때 큰 문제점으로 작용하여 왔다(Gourley et al. 2010, 2011). 이에 반해 위성 강수 관측은 다른 센서의 제한적인 문제에 대한 보완적인 의미로 사용이 가능하다. 정지궤도 위성을 이용하여 집중호우에 대한 활용은 미국 NOAA(the National Oceanic and Atmospheric Administration) NESDIS(the National Environmental Satellite Data and Information Service)에서는 1770년대 초부터 GOES(the Geostationary Operational Environmental Satellite)위성을 이용하여 IFFA(the Interactive Flash Flood Analyzer)을 개발하여 사용하여 왔다(Scofield and Oliver 1977; Scofield 1987; Borneman 1988; Kuligowski 1997). 하지만 우리나라에서는 위성자료를 이용한 수자원 분야 활용에 대한 연구는 2000년대 이후에나 수행되었다(Kang et al., 2006; Shin, 2008). 하지만 이들 연구들은 원격탐사 지표면의 정보를 이용하는데 그쳤고, 위성강우 자료 사용은 최근에야 연구가 시작된 실정이다(Kim, 2013).



우리나라에서 수문모형을 이용한 모델링과 예보에 위성강우를 이용하는 것은 충분히 도전적인 일이다. 매우 높은 지면·시간 해상도를 가지는 집중호우를 관측하기 위해서는 충분히 이러한 집중호우를 관측할 수 있는 고해상도 센서가 필요하다. 4km의 지표면 해상도와 8분 간격 시간해상도의 천리안 위성 적외채널을 이용한 집중호우의 응용은 해상도 높은 센서로 충분히 좋은 대안이 될 수 있다. 이 보고서의 목적은 최근 발사된 고해상도 천리안 위성의 평균 30분의 시간해상도의 강수자료와 평균 8분의 시간해상도를 가지는 천리안 위성의 강수자료와 지상관측자료와 비교를 통해서 한반도 지역에 대한 수문학적 활용 가능성을 알아보려고 하였다.

2. 연구 자료 및 방법

2.1 연구자료

2.1.1 천리안 위성

국가기상위성센터에 따르면 천리안 위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite, COMS)은 지구적도상공 36,000km 고도, 동경 128.2도에 위치하여 기상관측, 해양관측 통신서비스 임무를 수행하는 우리나라 최초의 정지궤도 복합위성으로 2003년부터 국가 우주개발 중장기 계획에 따라 기상청, 교육과학기술부, 국토해양부, 방송통신위원회 공동사업으로 추진하여 한국항공우주연구원이 총괄주관 연구기관으로 개발을 책임지며, 프랑스의 EDAS Astrium사와 미국의 ITT가 해외 협력회사로 참여 2010년 6월 27일 남미 프랑스령 기아나 꾸르 우주센터에서 성공적으로 발사하여 현재 한반도를 비롯하여 전구를 27분 이하의 시간 간격으로 관측하고 있다(Figure 1). 위성의 제원은 중량이 2,497kg으로 7년의 위성수명으로 발사되었다. 기상관측센서, 해양관측센서, 통신 탑재체(Ka-band)을 탑재하고 있으며 그동안 일본으로부터 30분 간격으로 기상위성자료를 수신하고 있는 상황에서 평상시 15분 간격, 악기상시 최대 8분 간격의 관측이 가능하다.



Figure 1 COMS Satellite

기상탑재체는 미국 GOES-8호 ~ GOES 13호 및 일본 MTSAT-2에 탑재된 기상센서와 동일한 센서를 탑재하고 있다. 총 5개의 센서를 가지고 있는데, 가시광선(VIS : visible) 센서는 태양광의 가시광선 영역인 $0.5 \sim 0.9\mu\text{m}$ 파장대의 지구반사량을 관측하는 복사계로 측정된 영상을 말한다. 가시채널은 태양광이 있는 주간에만 관측이 가능하고 하층운, 안개, 적설, 해빙 등의 기상요소를 관측이 유용하다. 단파적외 채널은 $3.7\mu\text{m}$ 의 파장대로 주간에는 태양광의 지구반사량을 측정 가능하며, 야간에는 지구 복사량을 측정하여 하층운, 야간 안개, 산불등의 관측에 이용된다. 수증기 채널은 $6.7\mu\text{m}$ 의 파장대에서 대기의 수증기 흡수에 따른 복사량을 측정하며 이 채널을 이용하여 대류권 상층 및 중층의 수증기량 관측이 가능하다. 적외 1, 적외 2채널은 각각 $10.8\mu\text{m}$, $12.0\mu\text{m}$ 의 파장대를 가지며, 지구표면이나 구름에서 의 온도를 측정하여 구름탐지, 바람장, 강우강도, 해수면 온도 등의 기상 물리값으로 변환하여 이용된다. 센서의 각 채널의 정보는 Talbe. 1에 정리하였다.

Table 1 Performance of Sensor

채널	파장(μm)	공간해상도	활용분야
가시광선	0.67	1km	주간 구름영상, 황사·산불·연무관측, 대기운동벡터
단파적외	3.7	4km	야간안개 및 하층운, 산불감지, 지면온도 추출
수증기	6.7	4km	중상층 대기 수증기량, 상층대기 운동파악
적외1	10.8	4km	구름정보, 해수면 온도, 황사관측
적외2	12.0	4km	구름정보, 해수면 온도, 황사관측

기상청 국가기상위성센터는 기상자료처리시스템(CMDPS) 개발하여 천리안 5개 센서 관측자료를 이용하여 16종의 분석자료를 생산하고 기상예보 및 수치예보 입력자료, 기후 변화예측 등에 활용하고 있다. 기상자료처리시스템 산출 기상요소와 데이터 처리 방식에 대해서는 각각 Table 2와 Figure 2에 나타내었다.

Table 2 Analysis data from CMDPS

산출자료	내용	활용
구름탐지	구름 유무 정보	날씨 및 수치예보
청천복사휘도	구름이 없는 지역의 복사량 추정	날씨 및 수치예보
대기운동벡터	수증기의 이동경로 추적	수치예보
해수면 온도	바다의 표면온도	수치예보 및 기후감시, 해양
지표면 온도	동아시아 지역의 지면온도	수치예보 및 기후감시, 황사예측
해빙/적설역 탐지	극지방의 해빙과 눈이 쌓인 지역 추정	수치예보 및 기후감시
표면도달일사량	지면에 도달하는 태양에너지	농업기상, 기후연구
상층수증기량	대류권 상층부의 수증기량	수치예보 및 기후감시
가강수량	대류권이 수증기 총량	수치예보 및 기후감시
구름분석	구름형태 및 양, 구름입자의 특성 추정	수치예보 및 기후감시
운정고도 및 고도	구름 정상부의 높이 및 온도 추정	수치예보 및 기후감시
안개	하층운과 안개를 구분하여 안개 탐지	항공기상
강우강도	구름의 종류에 따른 강우강도	날씨 및 수치 예보
지구방출복사	대기상한에서의 지구장파 복사량 추정	수치예보 및 기후감시
에어로솔 탐지	대기 중에 떠있는 황사 관측	황사예보 및 환경감시
에어로솔 광학두께	에어로솔에 의한 대기 혼탁정도 추정	황사예보, 환경감시 및 기후연구

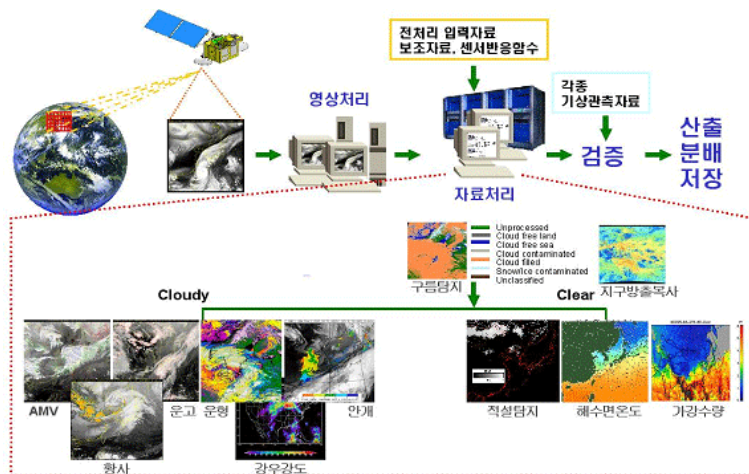


Figure 2 Concepts of CMDPS(COMS Meteorological Data Processing System)

기상영상기는 실제 기상관측을 수행하는 센서모듈과, 위성체에 전달되는 전력을 기상영상기에 적합하게 전환해서 안정하게 공급해주는 전력모듈, 센서모듈을 제어하는 동시에 영상기와 위성체 사이의 전력 및 각종 전기신호 교환을 담당하는 전자모듈로 구성되어 있다.

2.1.2 TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission)

미국의 항공우주국(NASA)을 중심으로 일본의 항공우주국(JAXA)와의 협력으로 공동 개발하여 1997년 11월 27일 발사되었다(Table 3). 지구의 강우분포에서 열대와 아열대 지방에 내리는 비는 전지구의 2/3 이상을 차지하고 대기가 받아들이는 에너지의 3/4를 제공하고 있어 대기대순환의 주요 에너지원으로 작용하고 있다. 이러한 전지구적 기후변동의 메커니즘을 해명하기 위해 TRMM은 열대지방의 3차원 강수량 분포를 얻어 기후변화 연구에 이용한다. 저위도 중심의 궤도를 갖고 이전의 기상위성들의 한계를 극복한 첨단 센서(강우레이더, 가시적외복사계, 마이크로파 복사계, 낙뢰관측장치)를 장착해 지구를 순환하며 열대강우를 원격 관측한다.

Table 3 Characteristic of TRMM

Launch weight	Approx. 3.62 ton
Launcher	H-II Rocket
Launch date (JST)	November 28, 1997
Altitude	Approx. 350 km
Inclination	Approx. 35 degrees
Shape	At lift-off: 5.1 m (length), 3.7 m (diameter) in orbit: 5.1 m (length), 14.6 m (in paddle direction)
Weight	Total: 3620 kg [3524 kg] Fuel: 890 kg Dry weight: 2730 kg [2634 kg]
Data transmission	via TDRS 32Kbps (Real Time), 2Mbps (Play Back)
Design life	3 years and 2 months
Mission instrument	Precipitation Radar (PR) TRMM Microwave Imager (TMI) Visible and Infrared Scanner (VIRS) Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Lightning Imaging Sensor (LIS)

TRMM 연구진들은 고다드 나사센터의 지휘 아래 지구의 대기순환에 영향을 주는 잠열의 역할을 이해하기 위한 연구를 진행하고 있으며, TRMM 위성은 수치예보, 태풍 모니터링, 장마기의 중규모 요란 감시 등에의 활용되고 있다. 임무는 열대와 아열대의 다년간에 걸친 강우를 연구해 그에 대한 기후 데이터의 수집과 지구의 강우와 기후의 변화가 해양, 공기, 육상에 미치는 영향의 연구하고 열대 강우 과정의 향상된 모델을 제공하고 기상과 강우량을 예측하기 위한 지구순환의 영향을 조사하며 최종적으로 위성 강우측정의 기술의 향상과 평가, 테스트를 하게된다. TRMM 위성은 극궤도위성도 아니고 정지기상위성도 아닌 적도 중심의 궤도상을 비행한다. 위성궤도의 고도는 350km이고, 남북위도 35도에서 저위도 방향으로 공전한다. 초기에는 위도 30도에서 공전 궤도를 계획하였으나 장마관측의 중요성에 대한 일본 측의 주장이 받아들여져 35도로 확장되었다. 센서의 스캔 폭에 의해 37°N-37°S 범위의 관측이 가능하다. 그 결과, 한반도 중부 이남은 관측영역에 포함되어 중규모 강수계의 3차원적인 구조를 관측한 자료를 얻을 수 있다. 위성이 공전 위도 부근에 대해서는 관측밀도가 높으며, 1일 3회 정도 한반도 부근을 동서로 횡단한다(Figure 3).

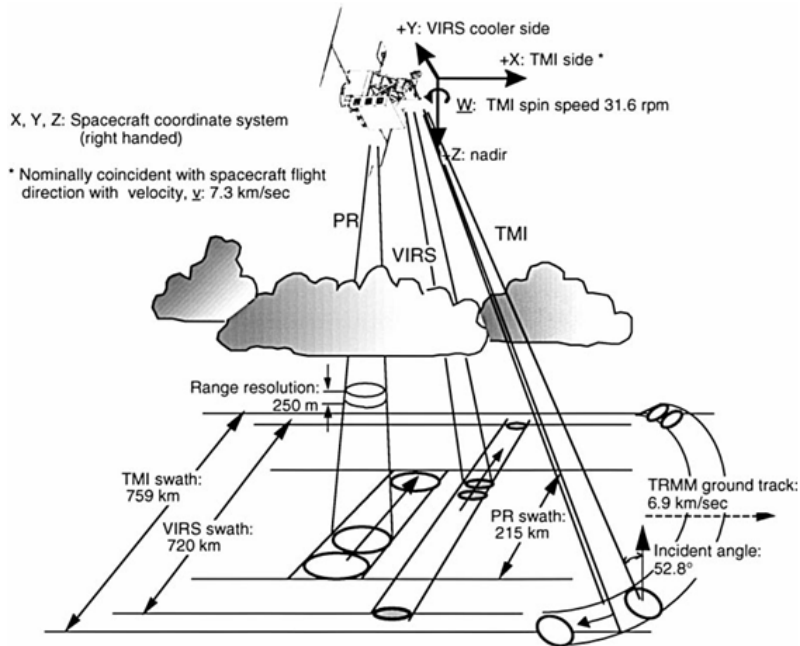


Figure 3 Orbit of TRMM

2.1.2.1 TRMM 센서

TRMM 마이크로웨이브 영상기(TMI)는 강우량 관련 자료를 제공하며 강우레이더, 가시적외 채널 자료와 함께 강수의 윤곽 획득이 가능하며 채널 주파수는 10.7, 19.4, 21.3, 37, 85.5 GHz이며 관측편광은 수직/수평 관측이 가능하다(Table 4). 21.3 GHz 채널은 수평편광만 관측한다. 수평분해능은 6에서 50km이며, 위성 최대 관측 폭은 760km에 이른다.

Table 4 Channel of TMI

Observation Frequency	10.65, 19.35, 21.3, 37 and 85.5 GHz
Polarization	Vertical / Horizontal (21.3 GHz Channel : Vertical only)
Horizontal Resolution	6 - 50 km
Swath Width	~ 760 km
Scan Mode	Conical Scan (49 deg.)
Data Rate	8.8 kbps
Weight	50 kg
Power	39 W

강우레이더 (PR) 강우의 3차원구조, 바다와 육지의 강우량 측정치를 제공하고 강우구조 정보를 통해 TMI의 측정치의 정확도를 높여준다. 관측주파수는 13.796 GHz, 13.802 GHz 이며 수평분해능 4.3km, 수직 분해능은 250m이다(Figure 4). 최대 관측 폭은 대략 215km로 TMI에 비해서 상대적으로 관측 폭은 적다.

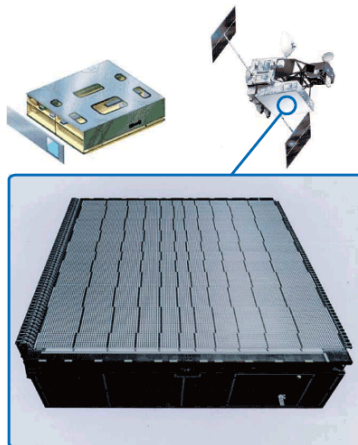


Figure 4 Precipitation Radar

2.1.3 자동기상관측시스템(ASOS)

기상청은 기상관서의 자동기상관측장비(ASOS;Automated Synoptic Observing System, 종관기상관측시스템)와 무인으로 운영되는 자동기상관측장비(AWS;Automate Weather System)를 이용하여 지상기상관측업무를 수행하고 있다. 종관기상관측장비(ASOS)는 주로 지방청과 기상대에 설치되어 기상상태를 관측하고 국제전문의 작성 및 통계표 작성과 같은 관측업무를 자동으로 처리한다. 관측방법은 기압, 기온, 풍향, 풍속, 습도, 강수량(0.1mm, 0.5mm), 강우유무, 일사량, 일조시간, 지면온도, 초상온도 등 11개 요소를 자동관측하고, 5개 요소(시정, 운량, 운형, 증발량, 지중온도)는 수동으로 관측하고 있다(Figure 5.). AWS는 ASOS와 유사한 장비로 습도대신에 이슬점온도를 관측하고, 강수량센서로는 0.5mm 전도형 강수량계를 사용하고 일사를 관측하지 않는다는 점이 다르다. AWS는 기상관측소가 없는 곳에 설치되어 집중호우, 우박, 뇌우, 돌풍 등과 같은 국지적인 악기상 현상을 실시간으로 감시하고 있고, 특히 산악지역이나 섬처럼 사람이 관측하기 어려운 곳에 설치되어 집중 호우와 같은 돌발 악기상을 감시하며, 관측된 자료는 수치예보모델의 초기 입력 자료로 유용하게 사용된다. 관측방법은 풍향, 풍속, 기온, 강수량, 강수유무 등 5개 요소를 자동으로 관측한다.

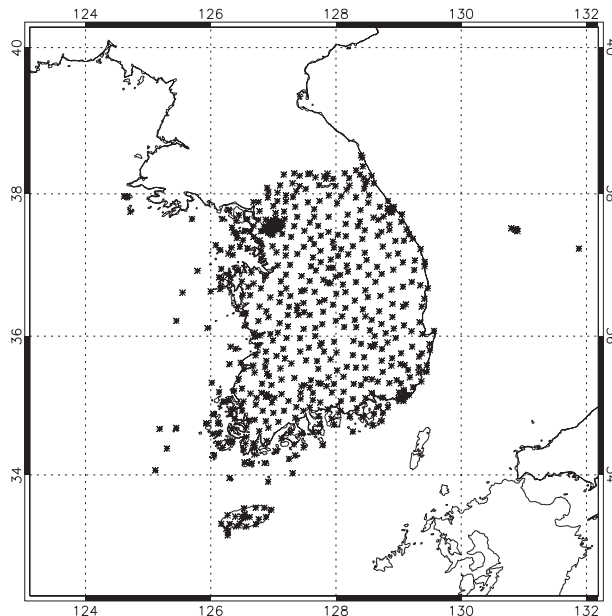


Figure 5 Locations of AWS

3. 연구내용

3.1 분석 방법

3.1.1 연구지역과 대상유역

연구지역은 천리안 위성이 관측 가능한 한반도 지역을 대상으로 정했다. 한반도 지역은 다른 관측영역에 비해서 시간당 8회 관측으로 다른 동아시아, 북반구, 전구에 비해서 관측 빈도 횟수가 많다. 관측대상의 지역은 그림과 같이 두었다(Figure 6).

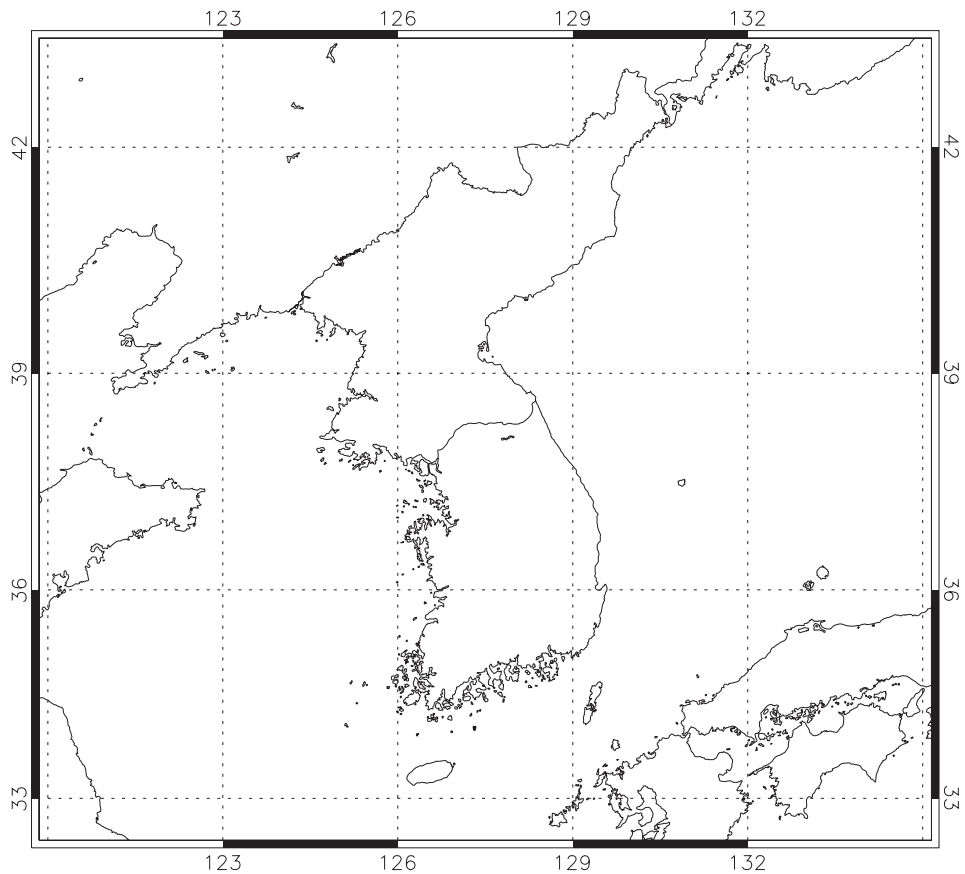


Figure 6 Study Area

천리안 강수자료의 수문학적 이용에 대한 평가를 하기 위해서 대상유역을 크게 4개의 대권역으로 분류하였다. 대권역은 산맥에 따라 형성된 자연적인 독립된 대하천을 중심으로 분류하였다. 4개의 대권역은 한강, 낙동강, 금강, 섬진·영산강으로 각각의 유역에 대해서 천리안 강수자료의 분석을 수행하였다(Figure 7).

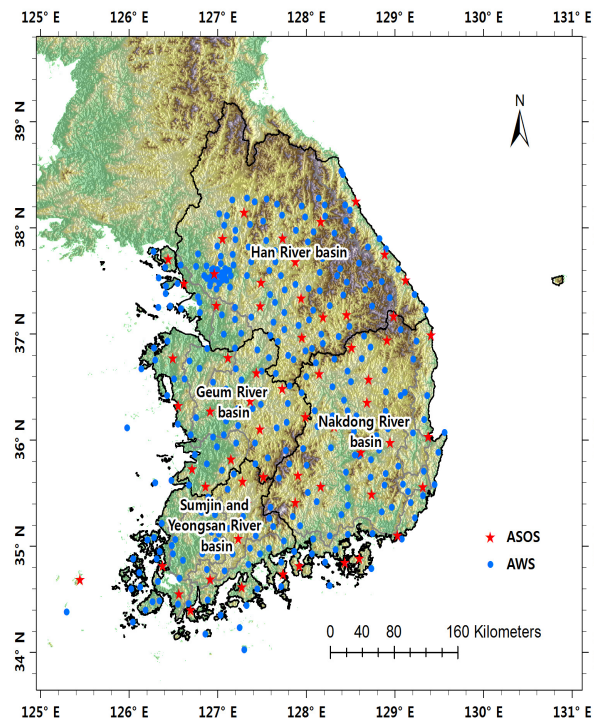


Figure 7 The four major river basins

지상관측자료로는 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 61개 지점에 대하여 천리안 위성의 수집기간인 2011년 4월부터 2012년 4월까지 1년간의 일강수량 자료를 수집하였다(Figure 8). 수집된 강수자료는 4대 대권역별로 다시 분류하여 평균하여 이용하였다. 각 권역별로는 한강 권역에 서울, 인천, 관측소 등을 포함한 총 18개 지점이, 낙동강 권역에 대구, 부산 등 총 20개 지점이, 금강 권역에는 청주, 대전, 천안 등을 포함한 총 13개 지점, 그리고 섬진·영산강 권역에는 목포, 여수, 순천 등 총 10개 지점의 관측자료를 이용하였다(Figure 9).

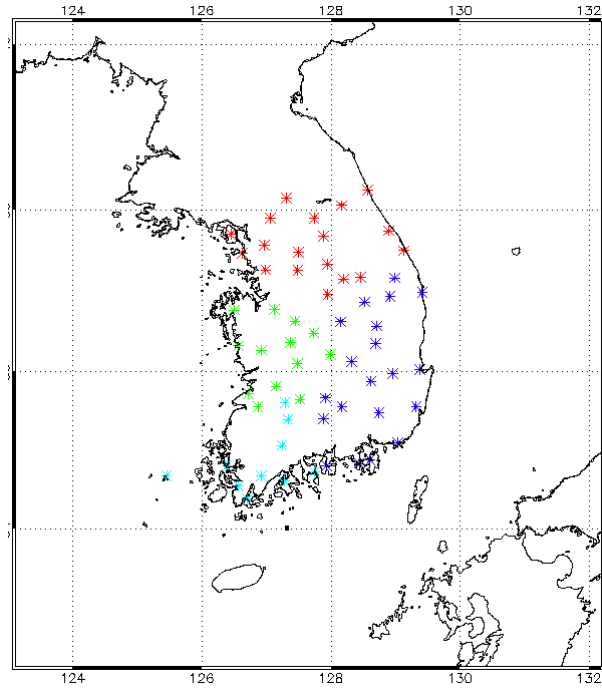
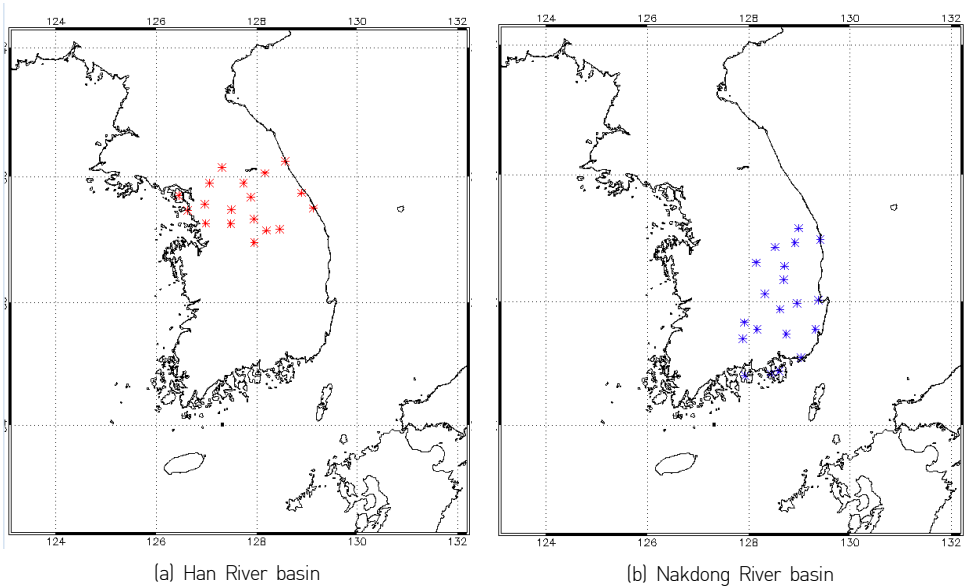


Figure 8 Locations of ASOS



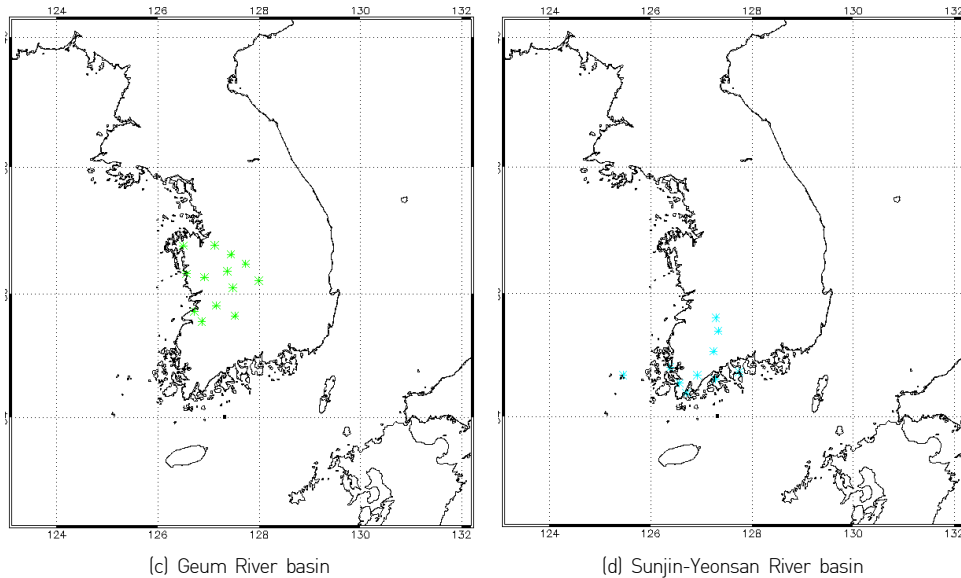


Figure 9 Locations of ASOS for (a)Han River basin (b)Nakdong River basin (c)Geum River basin (d)Sunjin-Yeonsan River basin

3.1.2 천리안 위성 자료

천리안 위성자료는 현재 국기 기상위성센터에서 자료를 제공하고 있다. 일본 정지궤도 위성 MTSAT-2는 북반구 24회 전지구 24회 남반구 8회 하루 관측한다. 이에 반해 천리안 위성은 전구 동아시아 한반도 한반도 지역 북반구 지역으로 지역과 시간을 달리해서 자료를 제공하고 있다(Table 5). 특히 한반도 지역에서는 8분 관측자료를 제공한다. 본 연구에서는 한반도 지역 천리안 데이터를 2011년 4월부터 2012년 9월까지 자료를 수집하였다. 자료는 레벨 1자료로 가시, 수증기 단파적외 적외1, 적외2 데이터를 받았으며, 적외1 자료를 이용하였다. 각 센서 원본자료는 기상청이 제공하는 기상센서의 Digital Count값과 실제 물리량인 Radiance와 휘도온도의 변환 관계식을 이용하였다. 기존의 적외채널을 이용한 알고리즘 개발시 지상관측값과의 관계를 많이 이용하였으나, 본 연구에서 사용된 알고리즘은 TRMM 위성에 있는 PR센서의 강우강도와 TRMM VIRS센서로부터 얻을 수 있는 휘도온도와의 데이터베이스 값에서 한반도에 적합한 새로운 Z-R관계식을 만들어서 사용하였고 정지궤도 위성과의 회귀식을 통해서 강우강도값으로 변환하여 사용하였다(Figure 10).

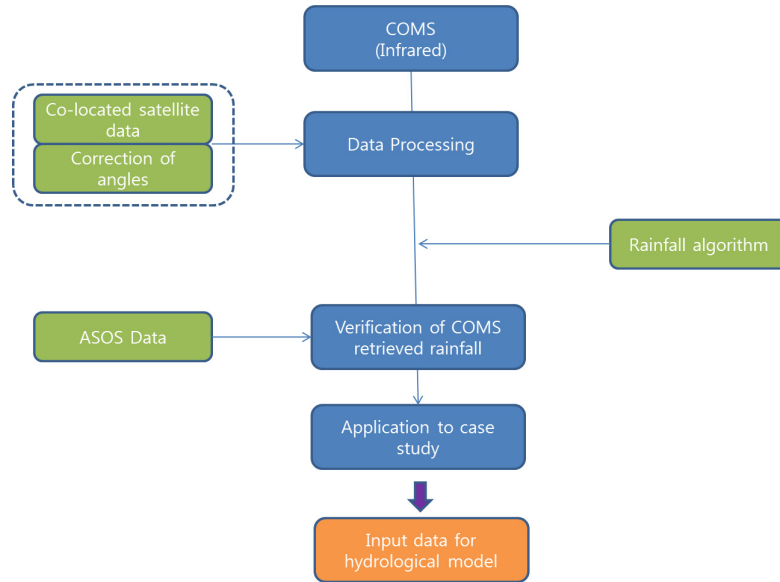


Figure 10 Flowchart of COMS data processing

Table 5 Area of Measurements from COMS

FD* (Full Disk)	지구전구관측	
ENH* (Extended Northern Hemisphere)	확장북반구 영역	
LA* (Local Area)	지역관측	



3.1.3 정량적 평가지수

본 연구에서는 천리안 위성 강수 강수자료가 종관기상관측시스템 자료와 비교하기 위해서 천리안 위성 강우 추정값과 지상관측자료의 차이를 평가하기 위해서 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error;RMSE), MAE(mean absolute error), ME(mean error), BIAS(bias), EFF(efficiency) 등 다섯 가지 통계적 방법을 이용하였다. 오차들의 절대값의 평균(MAE)는 천리안 위성과 지상관측자료 비교시 천리안 위성의 추정 알고리즘에서 얻은 강수량값이 지상관측자료에 얼마나 근접하는가를 측정하는 지수로서 값이 낮을수록 지상관측 참값에 근접한다. ME는 천리안 위성과 지상관측자료 사이의 평균적인 오차를 측정하며, 값이 낮을수록 평균적인 오차가 적다는 것을 뜻한다. 또한 ME에서 양의 값은 천리안 위성강수자료가 지상관측자료에 비해서 과대 추정된 것을, 음의 값은 지상관측자료에 비해 과소 추정된 것을 나타낸다. BIAS는 천리안 강수자료가 지상관측 강수자료를 기준으로 얼마나 치우쳐 있는가를 측정하기 위한 평가지수로서 최적값은 1이고, 1보다 큰 경우 위성강수가 지상관측강수에 비해 과대 추정을 1보다 작은 경우 과소 추정을 의미한다. EFF는 지상관측 강수량의 평균치 대비 천리안 강수자료의 효율을 측정하는 지수로서 최적값은 1이다.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{sat,i} - X_{obs,i}| \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{sat,i} - X_{obs,i}) \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n X_{sat,i}}{\sum_{i=1}^n X_{obs,i}} \quad (4)$$

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{sat,i} - X_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \overline{X_{obs}})^2} \quad (5)$$

여기서, $X_{sat,i}$ 와 $X_{obs,i}$ 는 각각 i 번째 일(day)에 대하여 천리안 강수자료와 ASOS 지상관측 강수량을 나타낸다. 또한 n 은 전체 분석에 사용된 자료의 기간(일)을 의미한다.

3.2 분석결과

2011년 4월부터 2012년 4월까지 1년간 일단위 천리안 위성 강수자료와 ASOS의 한강, 낙동강, 금강, 섬진강 및 영산강 권역별 비교결과를 보면 천리안 위성 30분자료를 평균한 값은 전체적으로 과소추정하고, 천리안 8분자료는 전체적으로 과대추정을 하는 것으로 나타났다. Figure 11은 COMS위성의 30분 평균 강수량 자료와 ASOS자료를 비교한 것이고 Figure 12는 COMS 평균 8분 평균 강수량과 지상관측자료를 비교한 것이다. 비교결과 COMS 30 평균 강수량의 경우 지상관측자료와의 상관계수는 0.5992, 0.512, 0.541, 0.487로 한강 대권역이 가장 상관계수가 높은 것으로 나타났으며, 각각의 제공근오차는 11.07, 10.27, 12.02, 10.25 mm/day로 비슷하며, 금강대권역이 가장 오차가 상대적으로 크게 나타났다. 천리안 위성 8분 평균 자료는 ASOS자료와의 상관계수는 0.6, 0.528, 0.548, 0.5로 전체적으로 천리안 30분 평균값과 비슷했으며 제공근오차는 22.819, 19.971, 27.017, 21.298 mm/day로 낙동강대권역이 가장 낮았으며 금강대권역은 27mm/day로 가장 오차가 큰 것으로 나타났다.

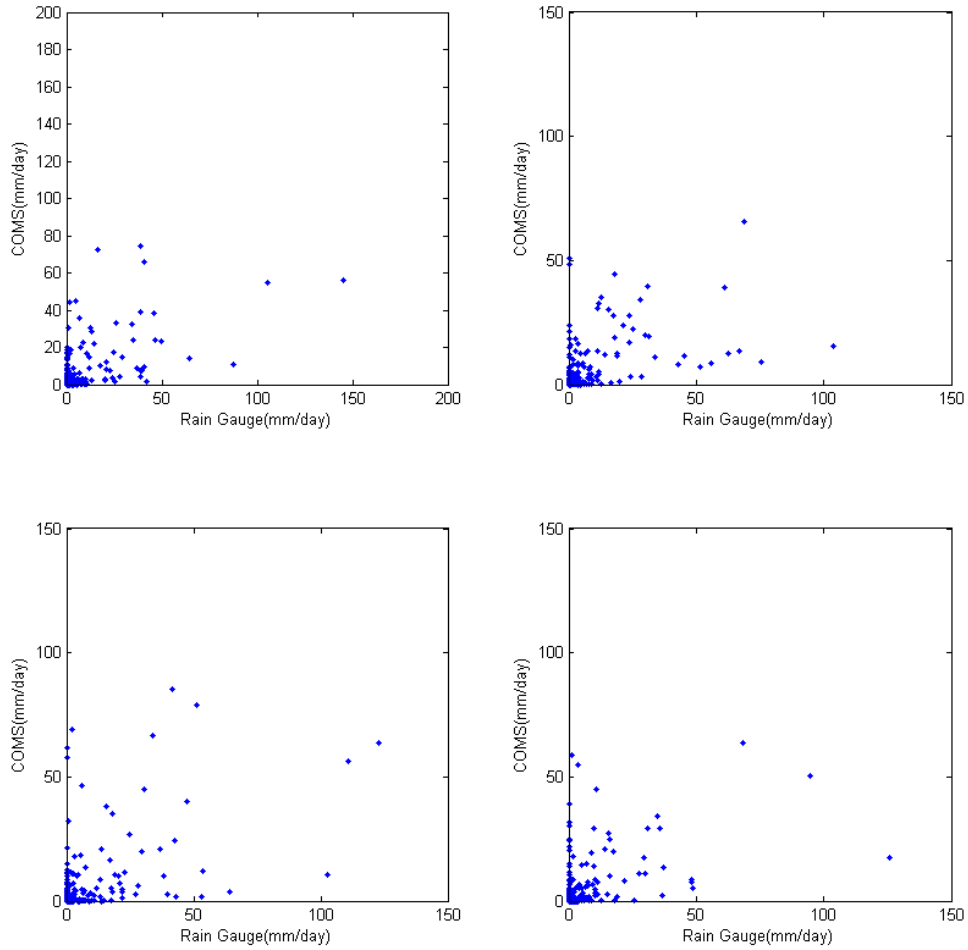


Figure 11 Scatterplot comparison with retrieved satellite rainfall and rain gauge for mean of 30min from COMS

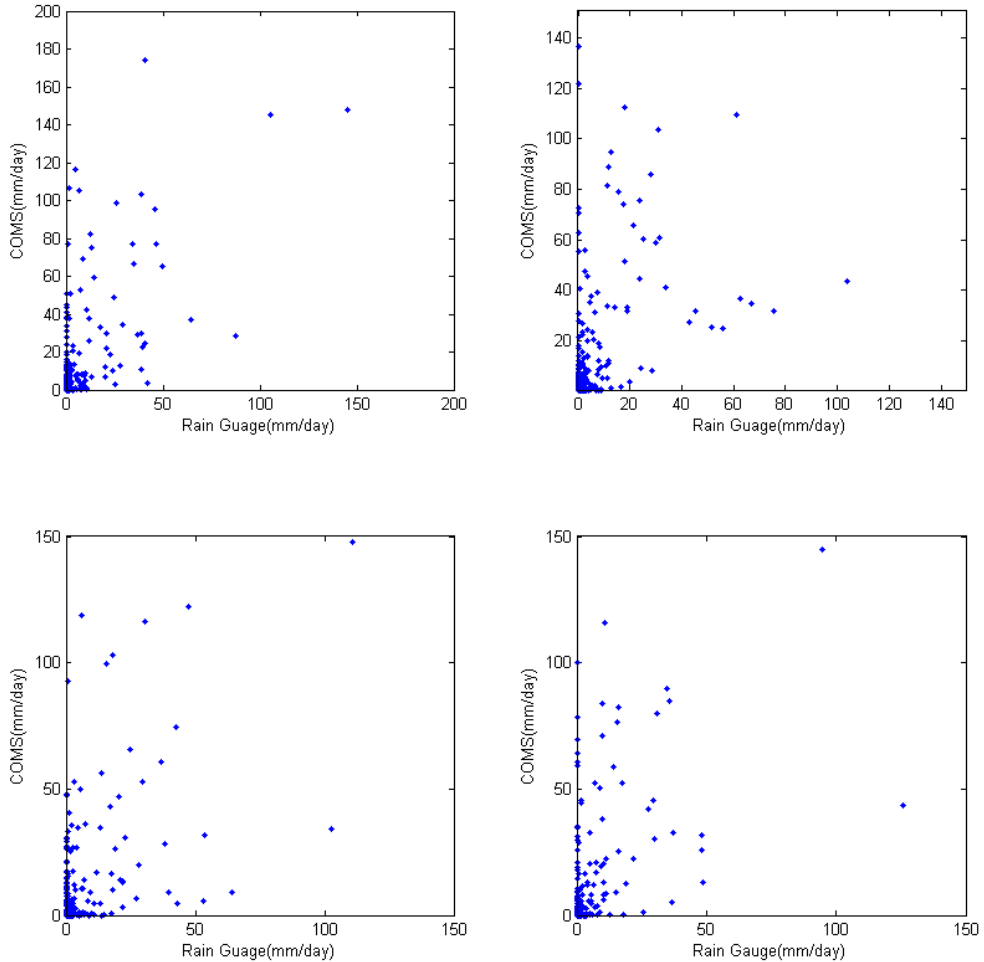


Figure 12 Scatterplot comparison with retrieved satellite rainfall and rain gauge for mean of 8min from COMS

2011년 4월부터 2012년 4월까지 월평균강수량을 비교한 결과를 Figure 13와 Figure 14에 나타내었다. Figure 13와 같이 천리안 30분 유역 평균 강수량 값이 지상관측자료에 비해서 여름, 가을에 상대적으로 과소 추정하였으며 겨울 봄에는 과대 추정하였다. 8분 평균 강수량은 Figure 13와 Figure 14에서도 보듯이 모든 계절에서 과대 추정하였다. 30분 자료와 8분자료를 평균하여 지상관측자료와 비교한 결과 여름에는 평균한 값이 지상관측자료와 잘 맞았으며, 그 외 계절에서는 30분자료가 8분자료에 비해서 더 좋은 결과값을 나타내었다. 구름/비구름에 대한 분류가 없어 상층운 같이 비가 오지 않지만 적외 채널에서는 낮은 온도



로 측정되는 값의 에러가 8분 간격으로 더해져 과대 추정하는 것으로 보인다. 여러 가지 기법을 통해 구름/비구름이 분류가 될 경우에는 현재 보다 더 좋은 결과 값이 도출 될 것으로 기대된다. 30분 자료의 경우 여름에 지상관측자료의 값보다 과소추정하게 되는데 여름철의 지속적인 강우에 대해서 30분 천리안의 자료는 시시각각 변화하는 강수량을 잘 모의 못하는 것으로 추정된다. 따라서 여름의 경우 8분 자료가 현재는 과대추정하고 있으나, 향후 구름분류가 잘 이루어질 경우 지속적인 강수량에 대해서 30분자료보다 잘 모의할 것으로 기대된다.

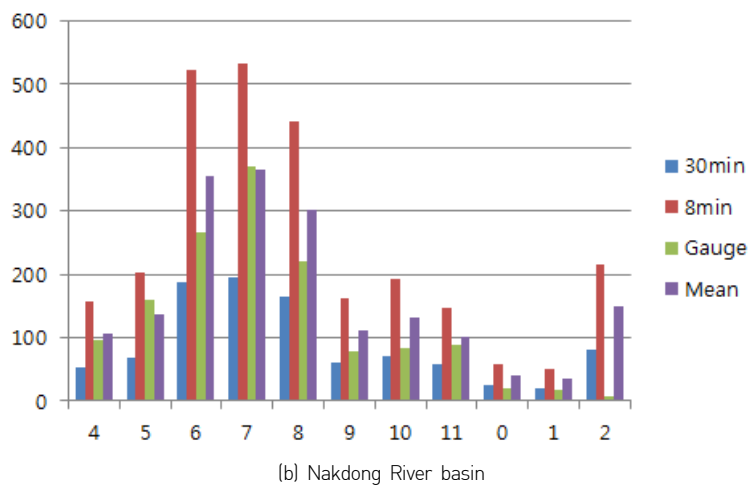
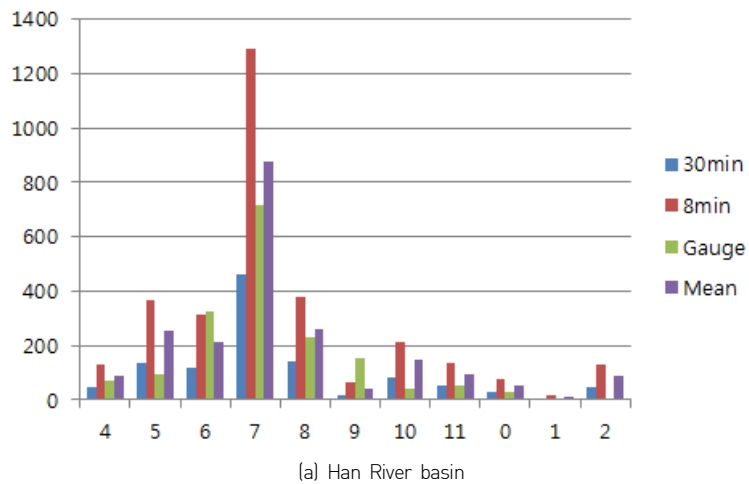


Figure 13 Comparison with monthly COMS 8min, 30min, mean rainfall of retrieved satellite rainfall and rain gauge for (a)Han River basin (b) Nakdong River basin

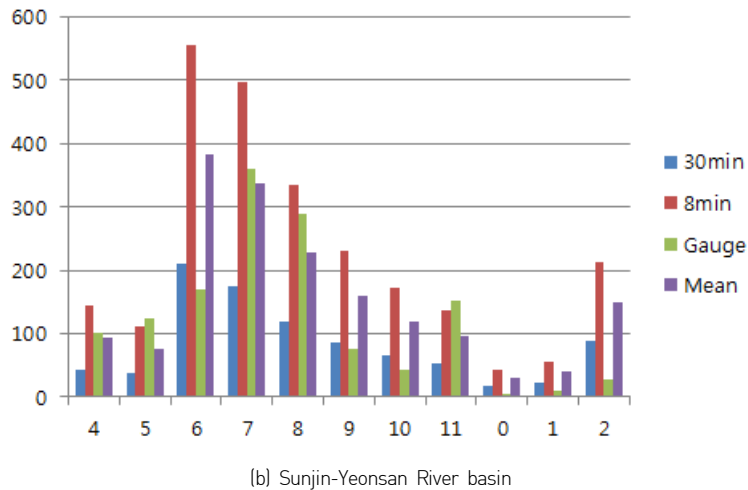
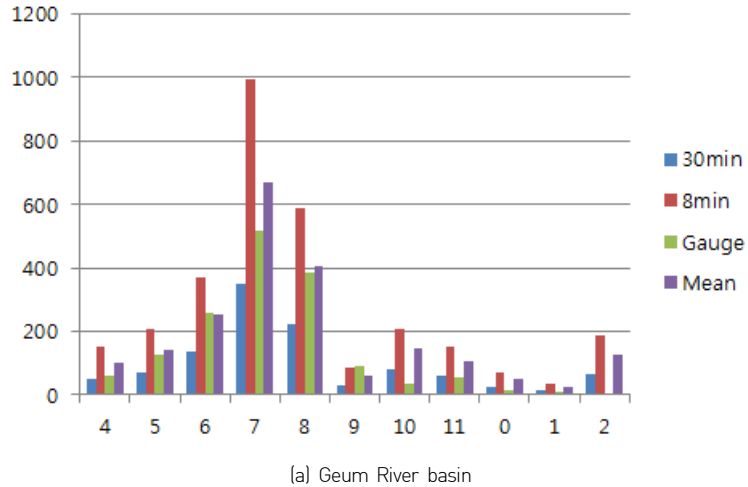


Figure 14 Comparison with monthly COMS 8min 30min mean rainfall of retrieved satellite rainfall and rain gauge for (a) Geum River basin (b) Sunjin-Yeonsan River basin

Table 6에서는 각각 천리안 30분 평균 일강수량과 8분 평균 강수량에 대한 평가지수를 4대강 유역별로 나타낸 것이다. 통계적 평가 결과값 MAE의 경우 천리안 30분 일강수량의 경우 전체적으로 천리안 8분 자료보다 낮은 것으로 나타났으며, 8분자료의 경우 섬진·영산강의 MAE 7.15mm 로 가장 낮았으며, 30분의 자료는 3.57mm 로 8분자료와 마찬가지로 섬진·영산강의 MAE가 가장 낮게 나타났다. ME의 경우에는 8분자료에서는 4.78mm



로 낙동강이 가장 낮았으나, 다른 권역과 크게 차이 나지 않았다. 30분 자료의 경우에도 -0.29mm로 섬진·영산강의 권역이 가장 우수하였으나, 30분자료와 마찬가지로 4대강 권역별로 뚜렷한 차이가 없었다. 그러나 30분 자료의 ME의 경우는 결과값이 음의 자료로 과소추정하는 것을 볼수 있으며, 8분 자료는 결과값이 양의 값으로 과대추정하는 것을 나타냈으며, 전체적으로 Me값도 상대적으로 30분 자료가 8분자료보다 우수한 것으로 나타났다. BIAS 또한 천리안 위성의 30분자료가 8분자료에 우수한 경우로 나타났으며, 30분, 8분의 각각 권역별 결과값은 크게 차이가 나지 않았다. EFF의 경우도 마찬가지로 30분 자료가 8분자료로 우수한 것으로 나타났으며, 섬진·영산강 권역이 가장 낮은 것으로 나타났다.

Table 6 The Statistics results for daily retrieved rainfall compared with ASOS data

	COMS(8min)				COMS(30min)			
	MAE	ME	BIAS	EFF	MAE	ME	BIAS	EFF
한강	8.30	5.58	2.15	-1.44	4.63	-1.00	0.79	0.35
낙동강	7.50	4.78	2.14	-1.16	3.86	-0.89	0.78	0.24
금강	8.82	5.40	2.12	-2.01	4.67	-1.11	0.76	0.30
섬진/영산강	7.15	4.96	2.46	-2.37	3.57	-0.29	0.91	0.12

4대강 권역별 비교분석에 이어 상대적으로 비교 영역을 좁혀서 천리안 위성의 품질평가에 대해서 자료를 처리하였다. ASOS 4개 지점을 선택하여 4개의 지점을 포함하는 천리안 위성의 추정된 강우량을 비교하여 보았다. 선택된 ASOS지점은, 114(영중), 119(수원), 202, 203(부항2)이며, 각각의 값의 평균값을 이용하였다. 각각의 지점에 대한 정보는 Figure 14에 나타내었다.

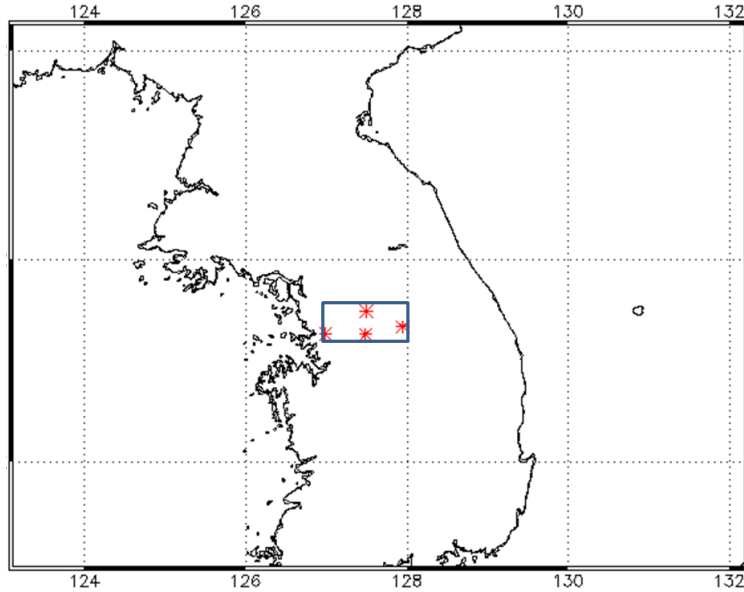


Figure 15 The study area for verification comparison COMS measurement and ASOS station rainfall data

Figure 16과 Figure 17은 COMS 30분, 8분 평균 강수량 자료와 ASOS 4개 지점에 대한 2011년 4월부터 2012년 4월까지 1년간의 강수량을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와같이 8분 자료는 여름 극치 강수에 비교적 잘 모의 하고, 그 외 기간에는 과대추정하는 것을 알수 있다. 반대로 30분 자료는 여름에는 매우 과소추정하지만, 반대로 그 외 기간에는 지상관측자료와 비교한 결과 비교적 잘 묘사하고 있는 것으로 나타났다. 향후 여름에는 8분 평균 강수량 자료를 그 외 기간에는 30분 자료를 이용하는 것이 유용할 것으로 판단된다.

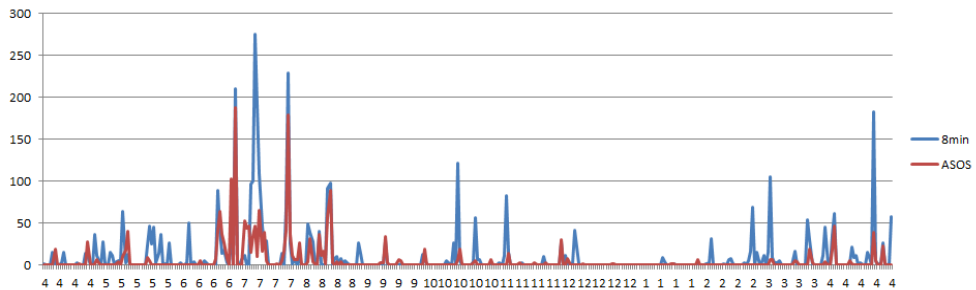


Figure 16 Comparison COMS 8min daily retrieved rainfall and ASOS daily rainfall data

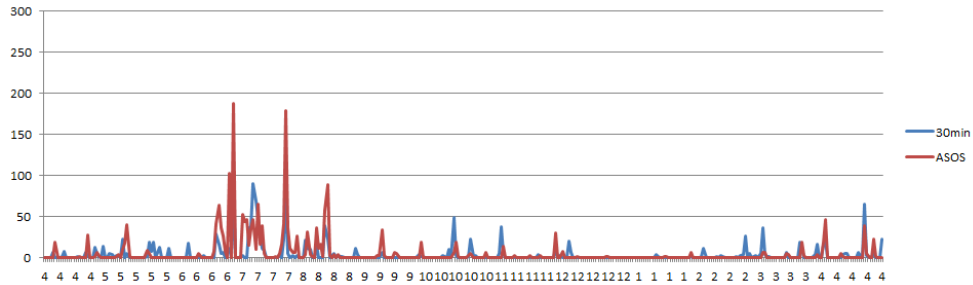


Figure 17 Comparison COMS 30min daily retrieved rainfall and ASOS daily rainfall data

3.3 사례적용

3.3.1 우면산 산사태

우면산 산사태 최종보고서에 의하면 2011년 7월말 집중호우는 북태평양 고기압을 따라서 강한 남서풍을 타고 들어온 고온 다습한 공기가 중국 대륙의 건조하고 찬공기 정체되면서 대기가 불안정해지면서 발생하였다. 2011년 7월 24일 09시를 기준으로 우면산 산사태 발생시각인 27일 09시까지 서울 관측소 지점의 72시간 강우량은 341.0mm가 내렸고 이중 26일 09시부터 27일 09시까지 306.0mm가 집중되었다. Figure 19과 Figure 20은 7월 27일 06시 기준의 천리안 위성과 TRMM의 위성강우로 홍수 모니터링을 모의하는 것을 볼수 있다. 2011년 7월 27일부터 한국 중부에 막대한 양의 비가 내리면서 막대한 피해가 속출했다. 특히 27일 오전에 서울특별시 관악구에 시간당 110.5mm의 집중호우가 내리는 등 중부지방을 중심으로 시간당 수십 ~ 113mm의 비가 쏟아지면서, 산사태, 하천 범람, 하수구 역류 등으로 서울 도심이 물바다가 되고 교통이 통제되었다. 수도권 전철 1호선 오류동역이 일시적으로 침수되어 운행이 중단되기도 했고, 작년에도 수해가 났던 강남역 사거리가 침수되면서 물에 갇히는 사태가 발생하기도 하였다. 광화문 일대도 범람했고, 청계천도 큰 물에 휩싸여 사람들의 출입이 통제되었다. 강남구의 삼성동 포스코 사거리도 물에 잠겼고 일부 지역에는 정전사태가 일어나기도 하였다. 특히 서울시 서초구 우면동에 위치한 우면산 주위에서 산사태가 여럿 발생, 형촌마을과 전원마을 등에서 18명이 사망하였다(Figure 18).



Figure 18 Landslides of Womeon Mountain at 09:00 am 27 July, 2011

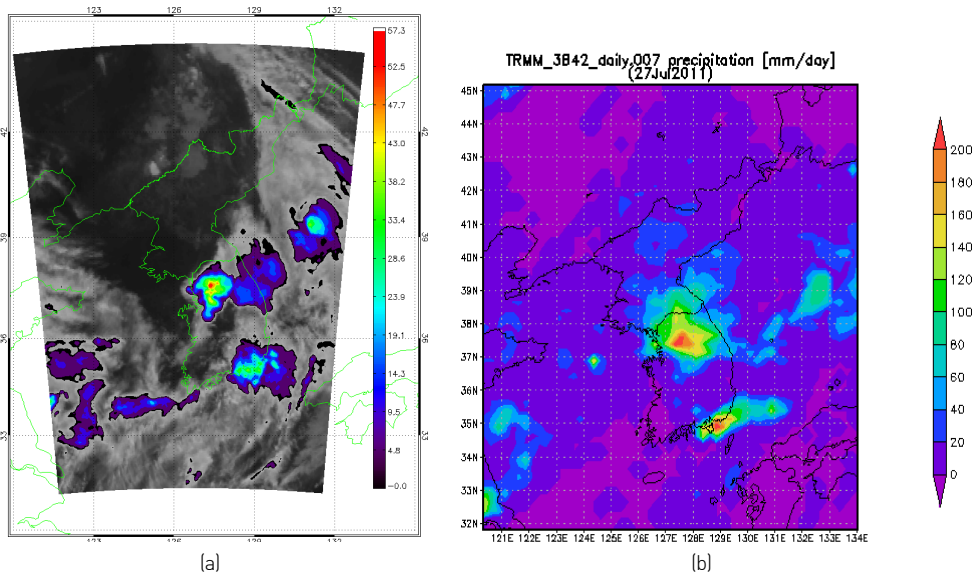


Figure 19 Monitoring landslides of Womeon Mountain with COMS satellite-based precipitation estimates and TRMM 3b42 daily product at 09:00 am 27 July, 2011

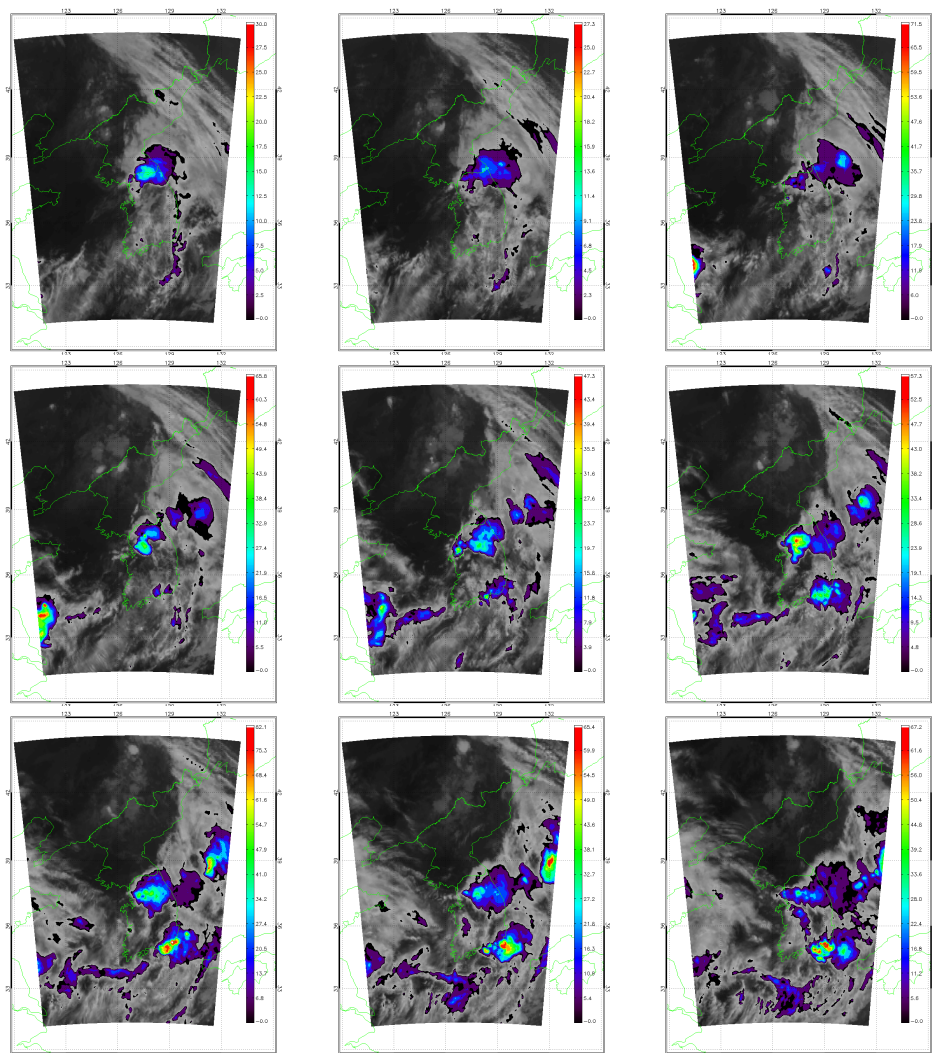


Figure 20 Monitoring case of landslides of Woomeon Mountain with COMS real-time satellite-based precipitation estimates 01 - 09 am 27 July, 2011

3.3.2 태풍 블라벤

블라벤은 2012년 8월 20일 발생하여 서해안을 따라 이동하며 한반도에 많은 비와 순간 최대 초속 51.9m/s의 바람으로 재산상의 큰 피해를 입혔다(Figure 21). 또한 북한도 블라벤의 직접적인 영향으로 사망·실종자가 109명에 달하는 것으로 보도되었다. 태풍 블라벤은 필

리핀 기상청(PAGASA)에서 지정한 이름으로 2012년에 북서태평양에서 발생한 15번째 태풍이자 제4호 태풍 구출에 이어 2번째 슈퍼태풍으로 중심기압이 910 hPa까지 도달한 태풍이었다. 태풍 볼라벤은 제14호 태풍 덴빈과 후지와라 효과가 발생해 중국으로 서진하게 되는 초기 예상진로가 한반도로 북서진하게 되는 진로로 바뀌어져 한반도에 엄청난 피해를 입혔다. Figure 22는 태풍이 한반도 지역으로 올라오는 순간부터 천리안 위성에서 8분 간격으로 태풍 볼라벤을 모니터링 했으며 그 중 3시간 간격의 볼라벤 태풍 이동에 대한 모니터링을 나타내었다. 태풍이 이동궤도에 따른 집중호우 모니터링이 가능하며, 지상관측자료와 레이더 관측망이 없는 북한지역의 미계측지역에서도 천리안 위성을 이용한 모니터링이 가능함을 알 수 있었다. 북위 28.4도에서 중심기압이 935 hPa, 북위 30.5도에서 중심기압이 945 hPa까지 떨어지는 등 상당한 고위도 지역에서도 매우 강한 세력을 유지하였다. 대한민국에서는 태풍 볼라벤으로 인해 800억원의 재산피해액이 집계되었다. 북한에서는 태풍 볼라벤이 동반한 폭우로 인해 많은 지역에서 홍수와 산사태가 발생했다. 북한 보도에 따르면 황해남도, 황해북도, 함경남도, 평안남도와 남포특별시에 108km/h가 넘는 강풍이 불었고, 이중 가장 피해가 심했던 도(道)는 함경남도로 48명이 숨졌고 45명이 실종자로 등재되었으며 집 2,405동이 파괴되었고 1,500동이 반파되었다. 평안남도에서는 8명이 숨졌고 집 714동이 파괴되었다. 또한 함경북도에서는 2명이, 양강도에서는 1명이 사망했다. 전국에서 집 8,950동이 완파되었고 최소 59명이 숨졌고 50명이 실종되었으며 21,800명의 이재민이 발생하였다.

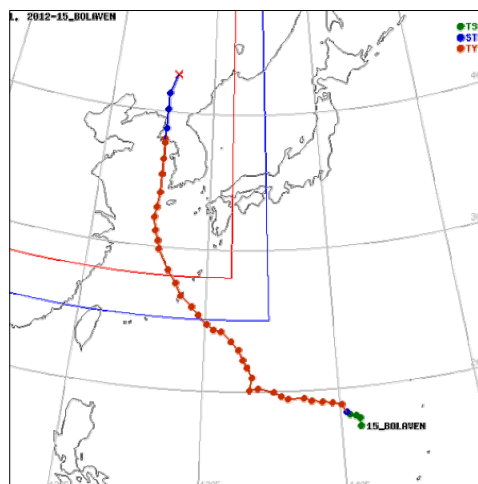


Figure 21 The Track of Typhoon BOLAVEN

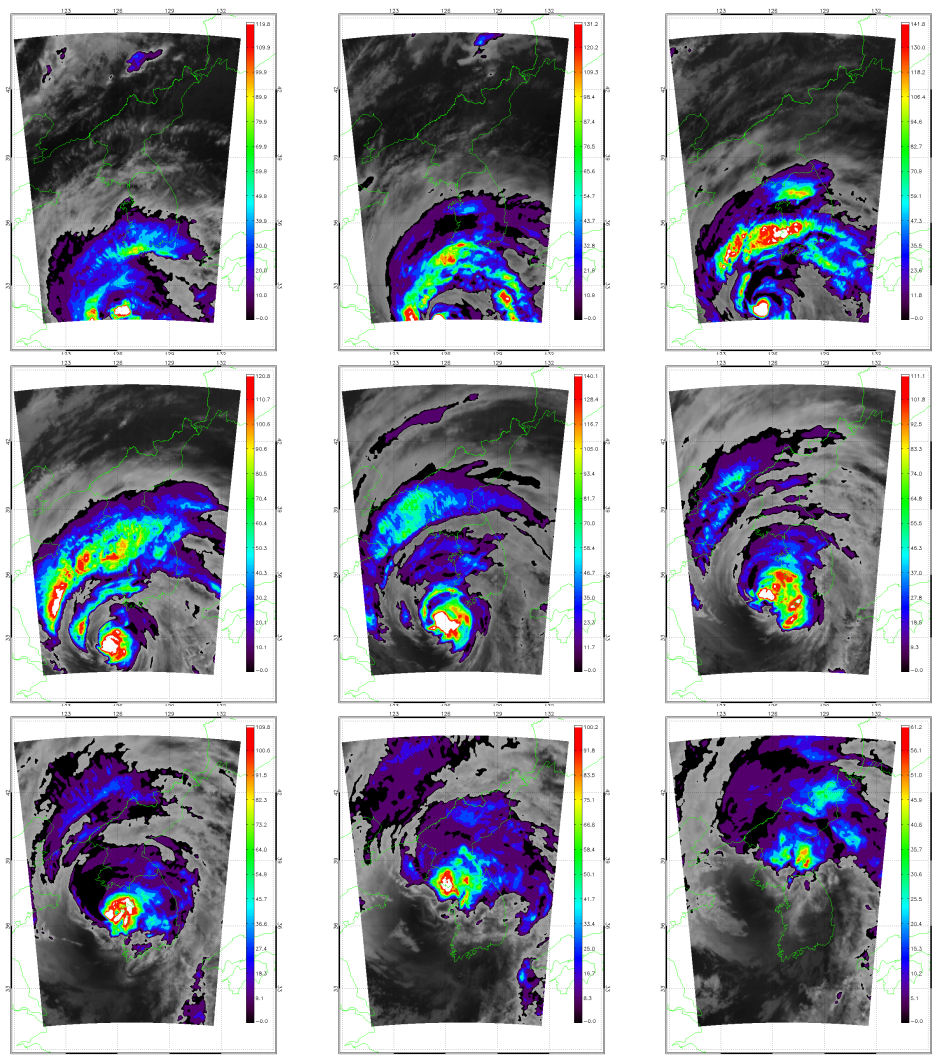


Figure 22 Monitoring track of Typhoon BOLAIVEN with COMS real-time retrieved precipitation

3.3.3 라오스 비행기 추락

라오항공 301편 추락 사고(QV301)는 2013년 10월 16일 라오항공 소속 RDPL-34233 항공기가 라오스의 비엔티안 왓파이 국제공항을 이륙하여 301편으로 운항하던 중, 도착지인 팍세 공항의 기상악화로 인하여 메콩 강으로 추락해 발생한 사고이다(Figure 23). 이

사고로 인해 탑승객 전원이 사망하였는데, 이 중에는 한국인 3명도 포함되었다. 당시 라오스 상공으로 태풍이 지나가고 있었으며, 추락지점인 10월 16일 오후 4시(현지 시간)에 천리안 위성을 이용하여 당시 기상상황에 대한 자료를 Figure 24에 나타내었다. 착륙지점인 팍세 공항 주변에 비구름이 있었음을 알수 있다. 미계측지역인 라오스에 대한 항공사고에 대한 위성자료를 이용하여 강수량을 추정함으로써, 정확한 항공사고의 원인을 파악하는데 도움이 되리라 판단된다.



Figure 23 The crash of Lao Airlines ATR-72

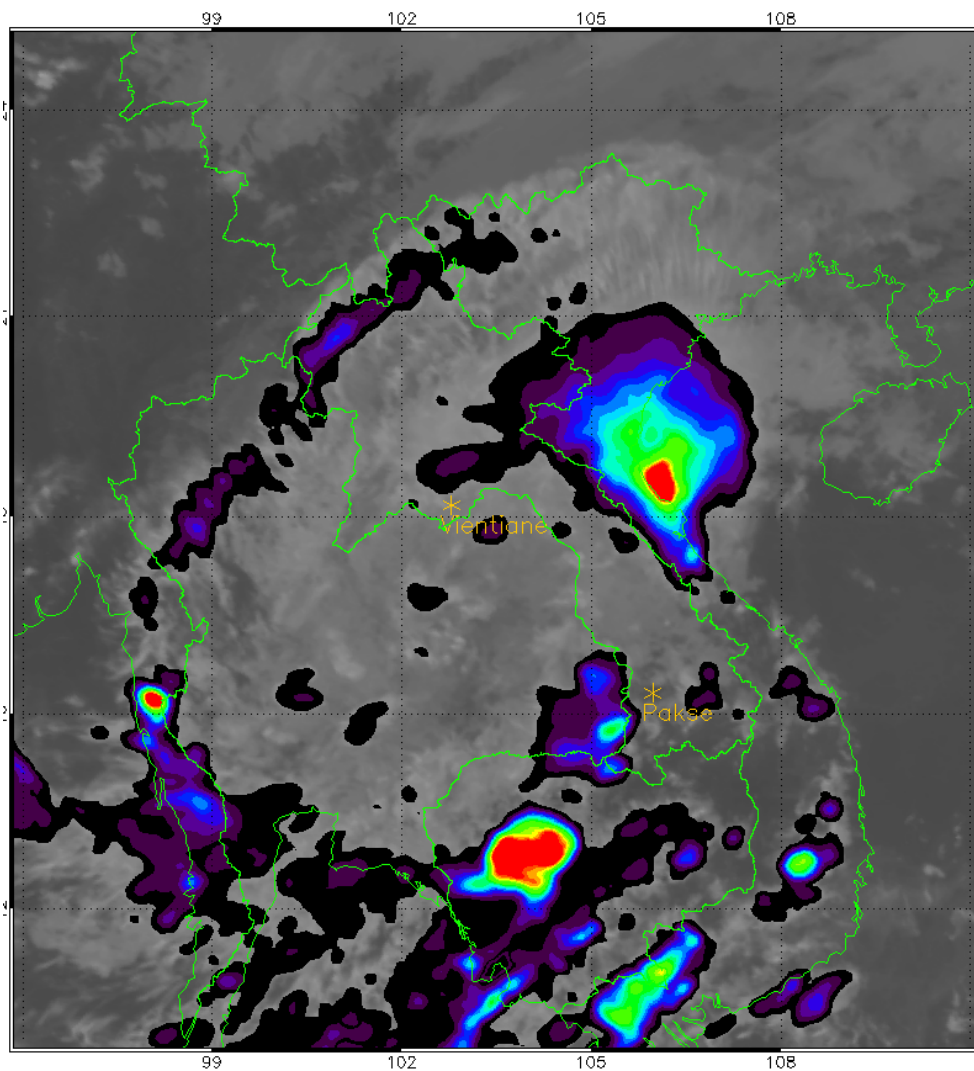


Figure 24 Monitoring the crash of Lao Airlines ATR-72 on 19 Oct, 2013

4. 결론 및 토론

본 연구는 천리안 30분 자료와 천리안 8분 평균 강수량자료에 대해서 ASOS(지상관측 자료)와 한강, 낙동강, 금강, 섬진-영산강으로 4대강 권역별로 천리안 위성의 평균 면적 강수량과 ASOS 권역별 평균 강수량의 비교검토를 통해서 향후 천리안 위성의 수문학적 활용성과 우면산 산사태, 태풍 볼라벤, 라오스 항공기 추락과 같은 여러 분야에 대한 활용 가능성에 대한 조사를 하였다. 천리안 위성이 발사되고 자료를 얻을 수 있는 2011년 4월부터 2012년 4월까지 대략 1년간에 대한 천리안 위성의 30분, 8분 평균 일평균, 월평균 강수량을 지상관측자료와 비교한 결과 천리안 위성 30분자료는 경우 지상관측자료와의 한강, 낙동강, 금강, 섬진강의 상관계수는 0.5992, 0.512, 0.541, 0.487로 한강 대권역이 가장 상관계수가 높은 것으로 나타났으며, 각각의 제공근오차는 11.07, 10.27, 12.02, 10.25 mm/day로 비슷하며, 전체적으로 여름철에 과소추정하였으며, 겨울철에는 과소 추정하였다. 반면에 8분 일강수량자료의 각각 권역에 대한 상관계수는 0.6, 0.528, 0.548, 0.5로 전체적으로 천리안 30분 평균값과 비슷했으며 제공근오차는 22.819, 19.971, 27.017, 21.298 mm/day로 나타났으며, 4대강 대권역 모든 지역과 모든 계절에서 과대추정하였다. 현재 구름/비구름에 대한 분류가 정확히 적용 되지 않아 비구름이 아닌 상황에서도 천리안 위성은 강수량이 있는 것으로 적용되며, 이 에러값이 모여서 ASOS에 비해서 과대 추정하는 것으로 판단된다. 반면에 30분자료는 여름철의 지속적인 강우에 대해서는 8분 자료에 비해서 정보량이 적어서 과소추정하는 경향을 보였다. 정량적 평가지수(RMSE, MAE, ME, BIAS, EFF)를 비교한 결과 30분자료가 8분자료에 비해서 전체적으로 우수하며, 정량적 평가지수에서도 30분자료는 과소추정, 8분자료에서는 과대추정하는 것을 확인할 수 있었다. 천리안 활용가능성에 대해서 우면산 산사태, 볼라벤, 라오스 비행기 추락과 같은 케이스에 적용하여 보았다. 서울지역과 같이 지역이 작고 갑자기 발생하는 집중호우와 같은 경우 서울시와 함께 집중호우 모니터링이 가능할 것으로 판단되며, 빠르게 한반도를 지나가는 태풍의 경우는 소방방재청에 함께 태풍에 대한 실시간 모니터링이 가능하다. 또한 여러 크고 작은 항공사고 에 대해서 국토부에게 관측이 없는 지역의 사고 당시의 기상상황에 대한 직접적인 정보를 제공이 가능하다. 또한 천리안 위성의 수문학적 활용 가능성에 대해서는 상대적으로 최근에 활발히 연구되고 있는 TRMM 3B42v6와 CMORPH,



GSMaP의 외국에서 몇시간 또는 몇일후 제공되는 위성 강수 자료에 비해 실시간으로 자료를 수집할 수 있어 천리안위성의 수문학적 활용이 더욱 확대 될것으로 기대한다. 향후 추가적으로 구름/비구름 분류 알고리즘 개발과 천리안 기반의 유출 분석 기법 개발, 북한과 같이 미계측지역에 대한 천리안 위성의 활용, 매개변수 지역화 기법 개발, 1-3시간 초단기 예보 기술 개발 등의 후속 연구가 계속 진행된다면 현재 알고리즘보다 좀더 정확한 강수량 추정이 가능하며, 더불어 내년 발사예정인 GPM 위성의 국내 수문학적 활용과 홍수 모니터링 적용에 대한 연구도 더불어 이루어진다면 국내 최초 정지궤도위성인 천리안 위성의 기후변화에 따른 국내외 활용이 더욱 증대될것으로 기대된다.

REFERENCES

- Alfieri, L., P. Salamon, F. Pappenberger, F. Wetterhall, and J. Thielen, 2012: Operational early warning systems for waterrelated hazards in Europe. *Environ. Sci. Policy*, 21, 35-49.
- Al-Sabhan, W., M. Mulligan, and G. A. Blackburn, 2003: A realtime hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW. *Comput. Env. Urban Syst.*, 27, 9-32.
- Artan, G., H. Gadain, J. Smith, K. Asante, C. J. Bandaragoda, and J. Verdin, 2007: Adequacy of satellite derived rainfall data for streamflow modeling. *Nat. Hazards*, 43, 167-185, doi:10.1007/s11069-007-9121-6.
- Cloke, H. L., and F. Pappenberger, 2009: Ensemble flood forecasting: A review. *J. Hydrol.*, 375 (3-4), 613-626, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.06.005.
- Creutin, J. D., and M. Borga, 2003: Radar hydrology modifies the monitoring of flash-flood hazard. *Hydrol. Processes*, 17, 1453-1456.
- Delrieu, G., and Coauthors, 2005: The catastrophic flash-flood event of 8-9 September 2002 in the Gard region, France: A first case study for the Ce`vennes-Vivarais Mediterranean Hydrometeorological Observatory. *J. Hydrometeor.*, 6, 34-52.
- Dutta, D., S. Herath, and K. Musiak, 2000: Flood inundation simulation in a river basin using a physically based distributed hydrologic model. *Hydrol. Processes*, 14, 497-519.
- Gourley, J. J., Y. Hong, Z. L. Flamig, L. Li, and J. Wang, 2010: Intercomparison of rainfall estimates from radar, satellite, gauge, and combinations for a season of record rainfall. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49, 437-452.
- Gourley, J. J., Y. Hong, Z. L. Flamig, J. Wang, H. Vergara, and E. N. Anagnostou, 2011: Hydrologic evaluation of rainfall estimates from radar, satellite, gauge, and combinations on Ft. Cobb basin, Oklahoma. *J. Hydrometeor.*, 12, 973-988.
- Gourley J. J., J. M. Erlingis, Y. Hong, and E. B. Wells, 2012: Evaluation of tool used for monitoring and forecasting flash floods in the United States. *Wea. Forecasting*, 27, 158-173.
- Georgakakos, K. P., 1986: A generalized stochastic hydrometeorological model for flood and flash-flood forecasting: 1. Formulation. *Water Resour. Res.*, 22, 2083-2095, doi:10.1029/WR022i013p02083.
- Hong, Y., K. Hsu, H. Moradkhani, and S. Sorooshian, 2006: Uncertainty quantification of satellite precipitation estimation and Monte Carlo assessment of the error propagation into hydrologic response. *WaterResour.Res.*, 42,W08421, doi:10.1029/2005WR004398.
- Hong, Y., R. F. Adler, F. Hossain, S. Curtis, and G. J. Huffman, 2007:A first approach to global runoff simulation using satellite rainfall estimation. *Water Resour. Res.*, 43, W08502, doi:10.1029/2006WR005739.
- Kang, S.M., Shin, H.J., Kwon, H.J. and Kim, S.J. (2006). "Extraction of snowmelt factors using NOAA satellite images and meteorological data." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 10, pp. 845-854.



- Kim, J.P. (2013). *Application of multi-satellite precipitation estimates for daily runoff simulation of the watersheds in South Korea*, Ph.D. Dissertation, Kyungpook National University. pp. 19.
- Krajewski, W. F., and J. A. Smith, 2002: Radar hydrology: Rainfall estimation. *Adv. Water Resour.*, 25, 1387-1394.
- Martina, M. L. V., E. Todini, and A. Libralon, 2005: A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2, 2663-2706.
- Ogden, F. L., H. O. Sharif, S. U. S. Senarath, J. A. Smith, M. L. Baeck, and J. R. Richardson, 2000: Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado flash flood of 1997. *J. Hydrol.*, 228, 82-100.
- Pan, M., H. Li, and E. Wood, 2010: Assessing the skill of satellitebased precipitation estimates in hydrologic applications. *Water Resour. Res.*, 46, W09535, doi:10.1029/2009WR008290.
- Pappenberger, F., and R. Buizza, 2009: The skill of ECMWF precipitation and temperature predictions in the Danube basin as forcings of hydrological models. *Wea. Forecasting*, 24, 749-766.
- Reed, S., J. Schaake, and Z. Zhang, 2007: A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations. *J. Hydrol.*, 337 (3-4), 402-420, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.02.015.
- Shrestha, M. S., G. A. Artan, S. R. Bajracharya, and R. R. Sharma, 2008: Using satellite-based rainfall estimates for streamflow modelling: Bagmati Basin. *J. Flood Risk Manage.*, 1, 89-99, doi:10.1111/j.1753-318X.2008.00011.x.
- Shin, S.C., Hwang, M.H. and Ko, I.H. (2008). "Development of a monitoring technique of dryness and wetness in watershed using climatic water budget." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 173-184.
- Smith, K., and R. Ward, 1998: *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. Wiley, 394 pp.
- Su, F. G., Y. Hong, and D. P. Lettenmaier, 2008: Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in La Plata basin. *J. Hydrometeorol.*, 9, 622-640.
- Su, F. G., H. Gao, G. J. Huffman, and D. P. Lettenmaier, 2011: Potential utility of the real-time TMPA-RT precipitation estimates in streamflow prediction. *J. Hydrometeorol.*, 12, 444-455.
- Voisin, N., F. Pappenberger, D. P. Lettenmaier, R. Buizza, and J. C. Schaake, 2011: Application of a medium-range global hydrologic probabilistic forecast scheme to the Ohio River basin. *Wea. Forecasting*, 26, 425-446.
- Vivoni, E. R., D. Entekhabi, R. L. Bras, V. Y. Ivanov, M. P. Van Horn, C. Grassotti, and R. N. Hoffman, 2006: Extending the predictability of hydrometeorological flood events using radar rainfall nowcasting. *J. Hydrometeorol.*, 7, 660-677.
- Yilmaz, K. K., R. F. Adler, Y. Tian, Y. Hong, and H. F. Pierce, 2010: Evaluation of a satellite-based global flood monitoring system. *Int. J. Remote Sens.*, 31, 3763-3782, doi:10.1080/01431161.2010.483489.



APCC RESEARCH REPORT 2013-04

- Development of a Seasonal Hydrologic Forecast Technique Based on APCC Multi-Model Ensemble Forecasts
- Remote Sensing of Hydrological Drought Based on Precipitation and Evapotranspiration Estimates
- Assessment of High Resolution Satellite-Based Rainfall Estimates for Hydrologic Modeling of Ungauged Basins
- Regionalization of Distributed Hydrologic-Model Parameters for Runoff Prediction using Satellite-Derived Precipitation for Ungauged Basins in South Korea

APEC Climate Center

12, Centum 7-ro, Haeundae-gu, Busan 612-020,
Republic of Korea
Tel: +82-51-745-3900 Fax: +82-51-745-3949
www.apcc21.org

비매품



9 788989 733367
ISBN 978-89-97333-96-7
ISBN 978-89-97333-92-9 (세트)