

# GPM 위성과 공간정보시스템을 이용한 홍수 예보감시 시스템 개발

Development of Early Warning System for Flood using GPM Satellite  
and GIS System

박경원



# GPM 위성과 공간정보시스템을 이용한 홍수 예보감시 시스템 개발

Development of Early Warning System for Flood using GPM Satellite  
and GIS System

박경원



## 발간사

전 세계적인 기후변화는 최근 들어 기정사실화되고 있으며, 이에 따른 지구촌의 기상이변으로 태풍, 홍수 등의 자연재해가 급격하게 증가하고 있습니다. 특히 2015년은 강력한 슈퍼 엘니뇨 발생에 따라 미국 중부 지방 홍수, 산사태 등 자연재해가 세계 곳곳에서 발생하고 있습니다. 기온상승에 따른 강수 강도의 시공간적인 변동으로 인하여 과거에 볼 수 없었던 규모의 집중호우와 대규모 홍수 재해 또한 예상됩니다.

이러한 기후변화에 따른 집중호우 피해 저감을 위해 가장 필요한 대책은 호우를 정확히 관측하고 예측하는 기술입니다. 현재 집중호우 관측 및 예측은 주로 지상 관측자료에 의존하고 있으나, 위성을 이용할 경우 지역적 한계를 벗어나 광범위한 지역에 대한 집중호우 감시 및 예측이 가능해집니다.

이 연구는 기후변화로 인한 홍수 피해 저감 목적 일환으로 최근 전지구 강수량 관측목적으로 발사된 GPM(Global Precipitation Mission) 위성자료와 한국 정지궤도 위성자료를 이용하여 보다 정확한 강수량을 관측할 수 있는 모형을 개발하였습니다. 본 모형은 향후 예측 모형의 고도화와 더불어 보다 정확한 강수 정보를 제공함으로써 홍수재해를 줄이는 데 크게 기여할 것으로 생각합니다.

나아가 연구결과를 활용한 집중호우 예·경보 시스템은 한반도 지역의 홍수 재해 피해 저감에 활용이 가능하며, 향후 APEC 지역의 자연재해 대책을 수립하는데 중요한 기초자료를 제공할 수 있을 것입니다.

A P E C C L I M A T E C E N T E R

끝으로 본 연구를 맡아 수행해주신 APEC 기후센터 박경원 선임연구원의  
노고에 감사를 드립니다.

2016년 1월  
APEC 기후센터  
소장 정진승

---

## ABSTRACT

This study develops a method for precipitation retrieval algorithm and a rain/no rain cloud classification system using Korea geostationary satellite images as well as GPM (Global Precipitation Mission), DPR (Dual Precipitation Radar), and GMI (GPM Microwave Imager) sensors. This method can be applied to rainfall observations in the Korea region. Co-located GPM CMB Level 2 precipitation with rain flags, precipitation type flags, land/ocean flags, convective/stratiform flags, cloud top height flags, and COMS geostationary satellite 5 channels are employed to develop real-time flood forecasting and monitoring systems for self-governing bodies. Shortwave infrared, water vapor, and infrared 1 channels are used to classify rainfall clouds from clear sky conditions. The new algorithm was used to perform validation when compared with old algorithm based on Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite for Busan city flood case at August 25, 2014. The results show that the new algorithm based on the GPM satellite is more accurate in estimating satellite rainfall. Rainfall cloud classification, which distinguishes rainfall clouds from non-rainfall clouds, is also improved. Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) compared the early-run, late-run, and final-run products for the Busan City flood case using radar and ground station data. The early-run produced an overestimation when compared with the late-run product. The late-run is more accurate than the early-run when compared with the final run. The converted Python module was successful in improving the computing power for the parallel computing method.



# 목 차

1. 서론	1
2. 홍수사례연구	4
2.1 주요 홍수발생 현황	4
2.1.1 2002년 집중호우	4
2.1.2 태풍 매미	5
2.1.3 우면산 산사태	6
2.1.4 도시지역 홍수현황	7
3. 국내외 기술 동향	8
3.1 국외동향	8
3.1.1 미국	8
3.1.2 일본	9
3.2 국내동향	11
3.2.1 기후변화에 대비한 차세대 홍수방어기술	11
3.2.2 국토부 : 국토관측센서	12
4. 연구 자료 및 방법	15
4.1 연구자료	15

4.1.1 GPM (Global Precipitation Mission)	15
4.1.2 천리안 위성	29
<b>5. 연구 방법</b>	<b>33</b>
5.1 연구지역 및 자료 DB	33
5.2. 연구방법	39
5.2.1 rain/no rain 구름분류	39
5.2.2 GPM 기반 강수 산출 알고리즘	41
5.3 위성 및 레이더 강우 결합 방법	43
5.4 집중호우 강우예측 모형	44
5.4.1 위성자료 기반의 집중호우 강우예측모형의 Computing Power 개선	44
5.4.2 위성자료 기반의 집중호우 강우예측모듈의 Computing Power 개선	46
<b>6. 연구내용</b>	<b>48</b>
6.1 사례연구(부산 8월 25일 집중호우)	48
6.2 GPM IMERG 검증	56
6.3 강수 알고리즘 적용(구름분류-레이더 활용)	65
6.4 GPM기반 강수 알고리즘 검증	69
6.5 위성 레이더 결합 검증	71
6.6 예측모형 Python 변환 결과	72
<b>7. 결론 및 토론</b>	<b>75</b>
<b>8. 활용 및 적용</b>	<b>77</b>
<b>Ⅰ 참고 문헌</b>	<b>79</b>

## 1. 서론

최근 기후변화에 따른 기상이변과 지구 온난화 현상의 가속으로 인한 지역별 국가별 홍수발생 빈도 증가 및 집중호우의 대형화 복합화 등 다양한 이상기후 현상이 빈번히 발생하고 있는 실정이며, 재해와 재난으로부터 안전한 지속가능한 복지도시 구현과 국민의 삶의 질 추구에 따른 정책적 요구가 점차 커지면서, 홍수재해에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 집중 호우, 태풍 등의 자연재해는 강수현상에 기인한다. 최근들어 서울 강남 집중호우, 2011년 우면산 산사태, 2014년 부산 온천천 범람 및 기장에서 발생한 홍수를 보면, 집중 호우에 동반된 홍수 사상들이 수 km에서 수십 km 정도의 중간규모로 지속시간과 발달시간이 매우 짧기 때문에 이러한 강수를 예측하기가 쉽지 않고, 단시간에 국지적, 집중적으로 쏟아지는 돌발홍수로 인하여 많은 인명과 재산피해가 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 집중호우 관측과 예보분야에 있어 강수의 비중은 매우 크며, 수문분야 전문가들은 호우로 인한 피해를 줄이기 위해 강수의 유무, 강수시기와 강수량의 정량적 예측에 많은 관심과 노력을 기울이고 있다. 그러나 홍수에 대해서 구조적 홍수방어기술은 상당한 수준에 도달해 있으나 예측, 평가, 예보 등 비구조적인 대응기술 및 구조적/비구조적 연계기술은 대단히 미흡한 실정이다. 또한 집중호우는 국지성, 돌발성, 야해성 등의 특성을 갖기 때문에 모델을 통한 6시간 후의 예보는 하고 있으나, 1-2시간의 홍수 감시 및 예측기술은 현재의 모델을 통한 예보 기술로는 매우 어려운 실정이다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 위성과 레이더, 지상관측자료(AWS)를 이용하여 강수량 관측하고 예측하는 방법이 이용되어 왔다. 하지만 우리나라 지상레이더를 이용하여 강수량을 산출하는 방법은 반사인자를 통한 Z-R관계식을 주로 이용하는 데, 이 방법은 Z-R관계식에 의해 여름철에 집중호우, 태풍과 같이 비가 집중적으로 오는 경우에는 대체적으로 과소 추정하는 경향이 있으며, 관측범위의 한계로 서해상에서 갑자기 발생하여 한반도에 영향을 주는 비구름대나 열대지방에서부터 올라오는 태풍 같은 경우 태풍이 레이더 반경안에 들어오기 까지 자료를 얻기 어려운 문제점이 있으며, 지상관측자료(AWS)는 강수 면적 지역의 균질한 분포성을 띄지 못하고 관측 지역의 제한으로 발생하는 어려움이 있는 실정이다.

반면에 정지궤도 위성 등 Multi Sensor를 이용한 강수량을 측정하고 위성/수문 모형 융합 홍수 예측 감시 시스템 기술을 개발할 경우, 홍수기에 집중적으로 발생하는 국지성 강우 및 돌발 홍수 예측으로 선제적으로 대응이 가능하며, 더불어 홍수재해와 재난을 사전에 예방하였을 경우, 그 피해저감 효과는 연간 침수피해의 50% 이상 절감 효과가 있을 것으로 판단된다.

정지궤도위성을 이용하여 강수량을 추정하는 방법은 전통적으로 적외(IR) 채널을 이용하는 방법이다(Alder and Mark 1984; Scofield 1987). 정지궤도 강수인자를 이용하는 방법(GPI; Arkin and Meisner 1987)과 convective-stratiform을 이용하는 방법(CST; Alder and Negri 1988)은 전통적으로 널리 알려진 방법이다. 기본적으로 적외채널을 이용하여 높은 구름과 낮은 운정온도는 강한적운형 구름으로 강한 비구름을 동반하는 방법을 사용한다(Miller et al. 2001). 이러한 방법은 강수입자와 얼음 입자들의 강수량으로 변환되는 물리적 과정을 동반하지 않기 때문에 warm 구름 등의 강수량을 추정하는데 어려움을 겪는다(Kidd et al. 2003). 마이크로파를 이용한 강수량 추정방법은 직접적으로 강수량을 추정하기 때문에 정지궤도보다 더 정확한 강수량을 얻을수 있다(Ferraro 1997; Ferraro and Li 2002; Kummerow et al. 1996; Olson et al. 2006).

하지만 이러한 위성들은 주로 극궤도 위성을 이용하기 때문에 정지궤도 위성보다 상대적으로 대단히 낮은 시간 해상도 및 센서에 의한 낮은 공간해상도를 가진다(Morrissey and Janowiak 1996; Soman et al 1995). 따라서 최근에는 적외채널과 마이크로파 채널을 결합한 방법을 이용한다(Adler et al. 1993; Kummerow and Giglio 1995; Xie and Arkin 1996; Xu et al. 1999; Todd et al. 2001; Huffman et al. 1995, 2001). 하지만 현업 실시간으로 사용하기엔 물리적 컴퓨팅 시간 제한이 있다.

따라서 최근에는 Auto-Estimator(AE) 방법(Vicente et al.1998), SCaMPR(self-calibration multivariate precipitation retrieval algorithm) 방법(Kuligowski 2002) 방법들이 많이 이용된다. Yan and Yang(2007)은 두 개의 MODIS 채널( $0.65\mu\text{m}$ ,  $1.38\mu\text{m}$ )을 이용하여 멀티 회귀식을 이용하여 남부 지역에 적용한 방법도 이용된다. 위성강수 알고리즘 개발이외에 위성강우를 수문모형과 결합하여 수문학적 분야에 활용하기 위한 연구도 많이 진행되어 왔다(Hong et al. 2006; Artan et al. 2007; Shrestha et al. 2008;

su et al. 2008; Pan et al. 2010; Su et al. 2011; Huan Wu et al. 2012). TRMM 기반의 위성강우 자료를 이용하여 GFMS(Global Flood Monitoring System)을 개발하여 현업 운영중에 있으며, Yilmaz et al. 2010은 GFMS 시스템이 다양한 홍수사상에 대한 평가를 실시하였고, Wang et al. 2011는 이전 연구자들이 기 개발된 수문모형에 위성강우를 입력자료로 이용하였으나 위성강우에 맞는 분포형 수문모형을 개발하여 홍수 사상에 적용하고 있으며, 현재 계속 업데이트를 하고 있다.

강수를 예측하는 방법은 수치예보와 외삽법을 이용한 방법이 많이 이용된다(Glickman 2000). 일반적으로 수치해석, 외삽법을 이용한 방법은 상대적으로 유용하며(Browning and Collier 1989). 수치해석을 이용한 방법은 6-24h 등의 내일 날씨를 예보할 때 주로 이용되며, 1-2h의 짧은 시간에는 유용하지 않다. 반면에 외삽법은 1-2h 예측을 할 때 유리하다(Wislon et al;Pererce et al 2000). 하지만 외삽법을 이용한 방법은 컴퓨팅 성능에 따라 실시간 사용에 제한적인 방법이 될 수 있다. 따라서 병렬 컴퓨팅을 통한 컴퓨팅 계산 시간 확보는 매우 중요하다.

본 연구에서는 최근 성공적으로 발사된 GPM, COMS 기반 강우 관측 알고리즘을 개발하고 GPM IMERG 자료와 함께 2014년 부산 홍수사상에 적용하여 비교 검증하였다. 컴퓨팅 계산 시간 확보를 위한 Matlab 기반 강우예측 모형을 Python 기반 예측 모형으로 변환하여 병렬 컴퓨팅을 위한 기반 기술 구축하였고, 기 개발된 시스템을 시뮬레이션으로 돌려서 정책결정자들이 지자체에 활용 가능한 기술을 제시하였다.

## 2. 홍수사례연구

### 2.1 주요 홍수발생 현황

#### 2.1.1 2002년 집중호우

제주도 동해상을 거쳐 8월 31일 18시경 전남 고흥군으로 상륙하여 9월 1일 15시경 동해 속초지역으로 지나면서 열대성 저기압으로 약화되면서 소멸한 태풍 루사는 전국적으로 피해를 낳았고, 특히 강릉지방의 경우 연평균강수량(1,402mm)의 62%인 870.5mm가 하루 만에 내렸다.

전국적으로 인명피해 321명(사망 209명, 실종37명, 부상75명), 이재민 21,318세대(63,085명)가 발생했고 주택 27,562동이 침수되고 농경지 17,794ha가 유실되었으며, 전국의 총 재산피해액은 5조1,479억원이었고, 지역별 피해현황은 아래와 같다(표 1).

표 1 홍수 피해사례

피해지역	인명피해 (인)	재산피해액 (백만원)	피해지역	인명피해 (인)	재산피해액 (백만원)
서울특별시	-	610	강원도	178	2,530,523
부산광역시	6	12,565	충청북도	10	160,500
대구광역시	1	4,306	충청남도	1	36,434
인천광역시	-	696	전라북도	18	292,840
광주광역시	3	5,173	전라남도	16	379,705
대전광역시	-	700	경상북도	53	865,805
울산광역시	4	5,823	경상남도	31	789,855
경기도	-	11,231	제주도	-	51,151
<b>계</b>	<b>321</b>	<b>5,147,917</b>			

## 2.1.2 태풍 매미

2003년 9월 4일 괌 부근 해상에서 발생한 열대저기압은 느리게 발달하면서 북서쪽으로 나아가 약 이틀이 지난 9월 6일 오후 3시 무렵 제14호 태풍 매미가 되었다. 이렇게 열대저기압에서 태풍으로 인정되기까지 발달 속도가 매우 느렸기 때문에 당초 기상청 등은 이 같은 느린 발달 경향이 이후에도 계속 이어질 것이라 예상하고 있었지만 태풍은 9월 9일의 무렵 일본 사키시마 제도 남동쪽 먼 바다에 접근하면서부터 급속히 발달하여 9월 10일에는 중심 기압 910hPa / 최대풍속 55 m/s에 달하는 최강급의 태풍으로 성장하였다. 1분 평균 최대풍속 75m/s의 카테고리 5급이며 일본의 기준으로 맹렬한 태풍이다. 최성기를 맞이한 태풍은 진로를 서서히 북쪽으로 바꾸기 시작했고 9월 11일 새벽에는 일본 오키나와 현 미야코 섬을 통과해 동중국해로 들어갔다. 9월 12일 오후 3시에는 중심 기압 935hPa, 최대풍속 45m/s의 세력으로 제주도 남동쪽 해상에 이르렀다. 같은 날 오후 8시 30분경에는 약간 더 쇠약해진 중심 기압 950hPa 최대 풍속 40m/s의 중형의 강한 태풍으로서 경상남도 고성군 일대에 상륙 이후 빠른 속도로 한반도 남동부를 관통하여 상륙 후 약 6시간 만인 9월 13일 오전 2시 30분경에 울진 앞 바다로 빠져나와 동해상으로 진출했다. 태풍 매미는 강수에 있어 큰 영향을 끼친 태풍이다.

전체적인 강수량은 큰 비를 수반한 대표적인 태풍으로 꼽히는 2002년의 제 15호 태풍 루사나 1981년의 제18호 태풍 아그네스 등이 몰고 왔던 호우와 같이 극단적으로 많은 것은 아니었으나, 남해 410mm 강릉 307.5mm 고흥 291.0mm가 기록되는 등 남해안과 영동 지방을 중심으로 최대 450mm에 달하는 많은 비가 내렸다. 무엇보다 태풍이 다소 빠른 속도로 한반도를 가로질러 나감에 따라 비구름대가 한반도에 머무른 시간이 그렇게 긴 편이 아니었음에도 불구하고 이만한 강수량이 기록된 것으로서, 비교적 단시간에 강수가 집중되는 형태를 보였다.

위에 언급된 강수량의 대부분은 태풍이 한반도 가까이에 존재했던 12일 오후 늦게부터 13일 새벽 사이에 기록된 것이다. 또한 지역별로 강수량의 편차가 꽤 크게 나타났는데, 주로 태풍의 중심권이 통과한 제주도, 전남 동부, 경남 서부, 대구 근방 지역에서 총강수량 200mm 이상의 기록적인 호우가 관측된 반면, 그 외의 지역에서는 상대적으로 적은 비가 기록되었다. 그리하여, 남해의 강수량은 약 400mm에 이르렀지

만 동쪽으로 불과 100km 가량 떨어진 부산의 강수량은 60mm 안팎에 지나지 않아 대조적인 모습을 보였으며, 태풍 진행방향의 서쪽으로 꽤 떨어진 경기도, 충청도 등 지에서는 그보다 적은 강수를 기록했다.

### 2.1.3 우면산 산사태

우면산 산사태는 계절적 강우의 영향으로 사면붕괴 등 지역에서 산사태 및 토석류가 발생하였다. 또한 근처 래미안 아파트 유역에서는 반파 6세대의 피손피해와 사망 3명의 인명피해가 발생하였다. 당시 기상청에 의한 기상사항은 2011년 7월 북태평양 고기압을 따라서 강한 남서풍을 타고 들어온 고온 다습한 공기가 중국 대륙의 건조하고 찬공기와 정체되면서 대기가 불안정해지면서 발생하였고, 2011년 7월 24일 09시를 기준으로 우면산 산사태 발생시각인 27일 09시까지 서울관측소(108) 지점의 72시간 강수량은 341mm가 내렸고, 이중 26일 09시부터 27일 09시까지 306mm가 집중되었다(그림 1).

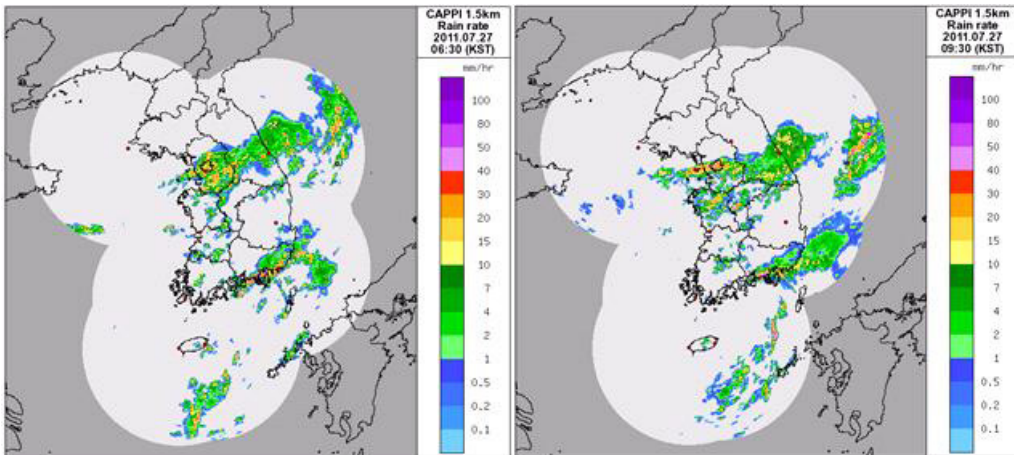


그림 1 우면산 산사태 레이더 영상

### 2.1.4 도시지역 홍수현황

집중호우로 인한 도시지역 침수피해는 1980년 이전까지는 내수피해와 외수피해가 혼합되어 발생하였으나 1980년대 이후부터는 대부분이 내수피해에 의해 발생하고 있다. 주요 수계에 인접한 도시지역의 경우 상류에 대규모 다목적댐 건설 및 하천제방의 설치 등에 따라 홍수 시 외수에 의한 피해는 경감된 반면, 급격한 도시화의 진행에 따른 우수유출계수의 증대, 불투수층 면적의 증가로 인한 침투유출량 증가 등으로 인하여 내수피해가 증가하고 있다. 이밖에 집중호우로 인한 과다 유량으로 배수통제 시설의 파손 및 붕괴, 배수하천의 수위 증가로 인한 배수로 및 하수도의 역류현상, 배수 펌프 작동 사고, 수문의 오작동, 배수시설의 부적절한 관리 등도 도시지역 침수피해의 원인으로 나타났다.

서울시의 경우 1990년 대홍수 이후 하천제방 등에 대한 보강을 실시한 이후 외수피해를 비롯한 대규모의 침수피해는 발생하지 않았으나, 국지적으로 침수피해가 발생하였다. 1998년의 경우 단시간 내에 집중호우가 발생하여 서울시에서 침수피해가 발생했는데, 이에 대한 주요 원인은 배수불량, 하수관거의 용량 부족으로 나타났다. 타 도시지역의 경우에도 집중호우 시 배수계통과 빗물펌프장의 용량 부족 및 오작동 등으로 인한 내수피해가 전체 침수피해의 주를 이루고 있는 것으로 나타났다. 도시지역에서 발생한 주요피해와 그 원인들은 다음과 같다(자료출처 : 환경친화적인 홍수방지방안 마련을 위한 연구).

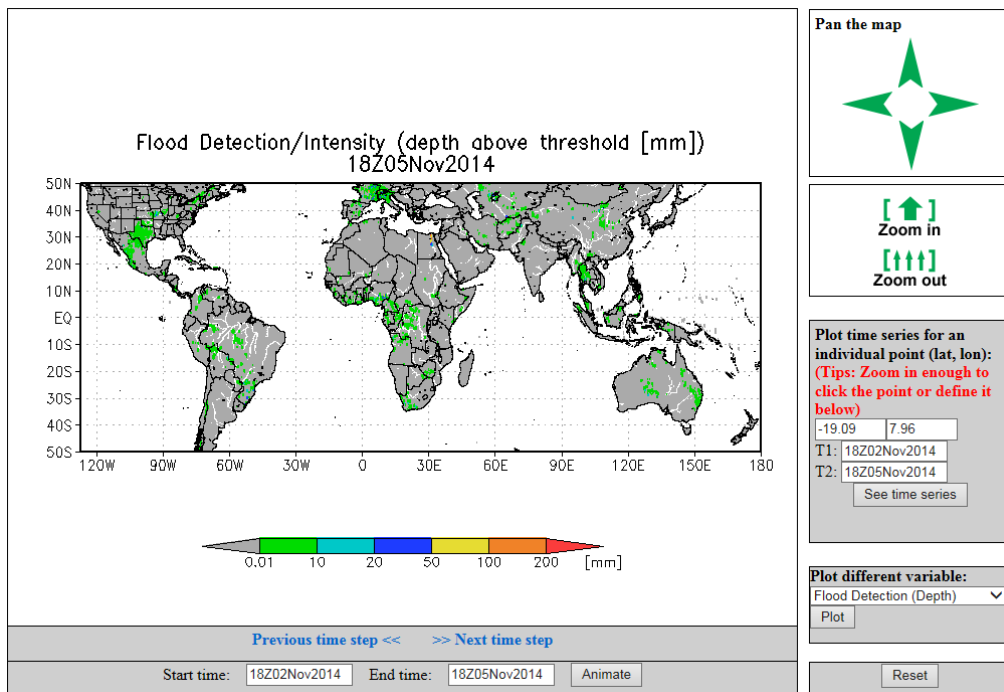
### 3. 국내외 기술 동향

#### 3.1 국외동향

##### 3.1.1 미국

###### 3.1.1.1 Global Flood Monitoring System(GFMS)

GFMS는 실시간으로 TMPA(TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis)자료를 입력값으로 수문학적 유출모형을 사용하여 홍수 모니터링 시스템을 구축하여 이용중에 있다(Fig. 2). 홍수 탐지 및 강도 측정은 13년간의 TMPA 값을 이용하여 산출된다. 이 시스템은 1/8°해상도로 줌인기능으로 원하는 지역을 확대해서 볼 수 있으면 간단히 유출량에 대한 이미지를 표출할 수 있다. 수치모델(NWP)에 기반한 단기예측(4-5일)에 대한 홍수 예측값도 산정하여 모의한 결과를 알 수 있다.



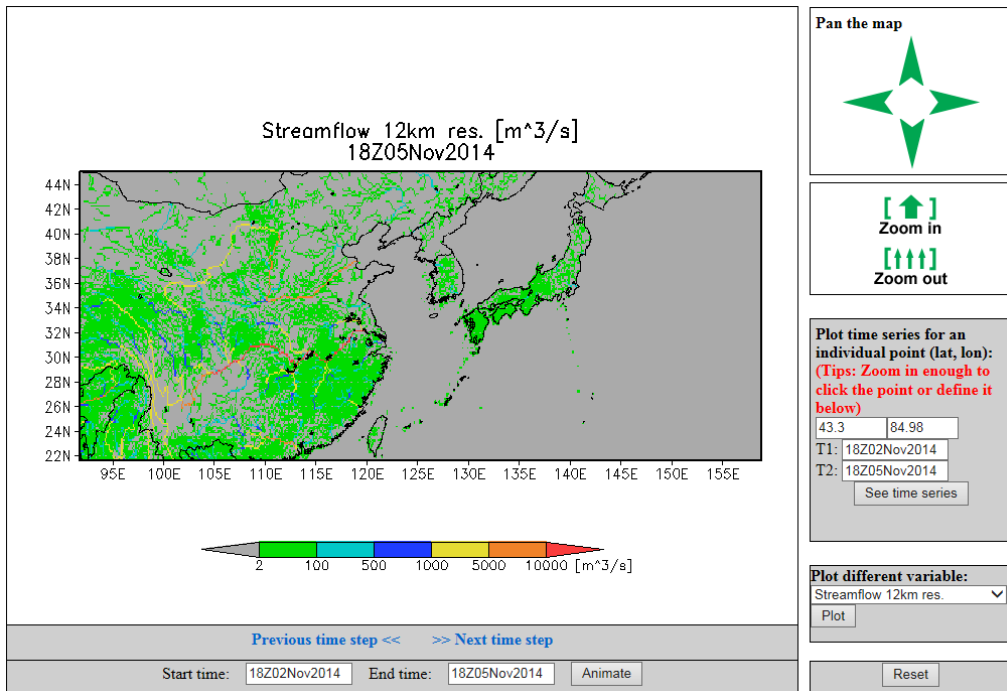


그림 2 Global Flood Monitoring System(GFMS)  
(자료출처: <http://flood.umd.edu/>)

### 3.1.2 일본

#### 3.1.2.1 Integrated Flood Analysis System(IFAS)

IFAS시스템은 홍수-유출 분석 시스템으로 효과적으로 홍수 예측을 할 수 있는 시스템이다. 이 시스템은 위성자료를 입력자료로 사용할 뿐만 아니라 지상관측자료값도 이용하여 분포형 유출모형을 모의하여 홍수 예측하는 시스템이다(그림 3).

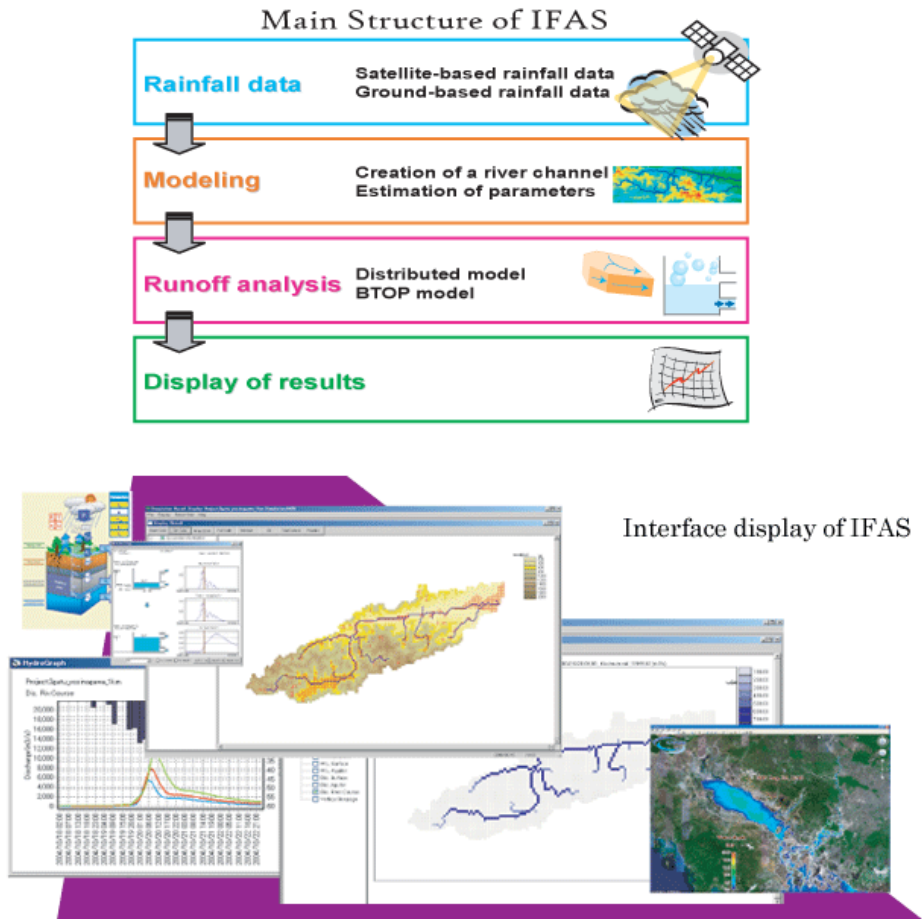


그림 3 Integrated Flood Analysis System(IFAS)  
[자료출처: <http://icharm.pwri.go.jp/>]

### 3.1.2.1 일본 위성 강우 현황

일본은 DPR(Dual-frequency Precipitation Radar)개발 연구가 계속적으로 진행 중이며, 현재 Ku-band 레이더의 연구가 진행 중이다(Iguchi et al., 2000). 이후 DPR의 강수 산출 알고리즘과 복사계 자료를 조합한 강수 알고리즘에 대한 연구를 하고 있으며, 수치 예보와 홍수 경고 시스템과 같은 응용 분야에 대한 연구를 진행 중이다.

유럽은 ESA(European Space Agency)와 EGPM(European GPM)기관은 EC의 승인에 따라 유럽의 과학준비그룹을 만들었으며, 정확한 강수 자료를 획득하여 북유럽

의 강설과 약한 비를 감지하고, 지중해 부근의 위험한 돌발홍수를 만들어 내는 폭풍을 감시하며, 강수량 동화를 통해 전구와 지역 수치일기예보 모델의 예보기술을 향상하고자 하는 것이다. 유럽 전역에 검증을 위한 사이트 구축 중에 있다.

프랑스와 인도는 각각 CNES(Centre National d'Etudes Spatiales)와 ISRO(Indian Space Research Organization)은 2001년 5월에 대기 연구를 위해 Megaha-Tropiques 라는 이름의 프로젝트를 실행하기로 하였다. 이 위성은 물 순환이 적도지역의 대기기 후과정에 어떻게 영향을 미치는가를 연구하기 위한 것으로 2006년에 발사될 예정이다. 이 위성은 MADRAS(Microwave Analysis and Detection of Rain and Atmospheric Structures)라는 마이크로파 복사계와 수증기 사운더 및 광대역의 복사관측계로 구성되어 있다. 이 위성이 GPM관측에 참여할 계획이며, 개발 중에 있다.

## 3.2 국내동향

### 3.2.1 기후변화에 대비한 차세대 홍수방어기술

기후변화에 대비하여 홍수위험도가 크게 증가하는 상황에서 홍수피해 저감을 위한 구조적 및 비구조적 대책수립 및 실행을 통한 통합홍수관리(Integrated Flood Management)를 개발하고 있다. 기술개발 전략으로서는 첨단 홍수예보기술 개발, 유역 차원의 홍수방어 및 관리기술 개발, 기후변화 대응한 홍수 관리기술 개발로 구분된다.

- IT, GIS, 레이더, 위성 관련기술을 활용하여 미래 지향적으로 개선·구축하고 기존의 30분~1시간 단위 홍수예보를 10분 단위로 전환하며, 예측정확도를 향상하고 점 단위가 아닌 공간단위 동적 홍수예보 실시
- 기존의 홍수예측시스템을 연속유출 예측시스템으로 전환하며, 하천예보 결과를 신속하고 효율적으로 전달할 수 있는 조기경보 및 전달 시스템 구축
- 유역단위 통합홍수방어 및 관리기술 개발
- 유역관리 개념에 의한 유역별 특성에 적합하도록 구조적 홍수대책과 비구조적 홍수대책의 통합

- 홍수유형변화를 고려한 홍수 분담 및 방어체계 구축이 필요하고, 이수-치수 최적연계방안 구축
- 기후변화 대응 홍수 관리기술 개발
- 기후변화에 따라 나타나는 태풍의 규모 및 강도의 증가(슈퍼 태풍화)에 대한 대비가 필요함
- 기후변화와 관련하여 국지성 호우의 발생빈도 증가로 인하여, 초과홍수량의 분배 및 경감을 위한 능동적 대응기술 개발과 실용화가 필수적임
- 강수의 시·공간 변화 형태는 지역적 특성이 매우 강하므로 다양한 시·공간규모에 대한 검토와 대응이 필요함

### 3.2.2 국토부 : 국토관측센터

SRA(위성영상, X-Net, 수문레이더, AWS 등)와 같은 국토관측센터에 의해 획득된 관측 자료를 융합·처리하여 수문인자를 생성하고, 물안보 강화 및 수해 경감을 위해 필요한 분석 및 관련 정보를 제공할 수 있는 기반기술 및 포털 시스템 개발을 목표로 사업을 추진 중이다(그림 4). 3세부 과제에서 수행하는 위성강우를 이용한 홍수 활용은 TRMM, GPM 기반의 3B42, IMERG 자료를 이용하여 미계측 지역의 하루내지는 이틀 후 홍수사상에 대한 정보를 입수하는 것이 목적이다. 반면에 본 연구에서 수행하고자 하는 방법은 GPM 위성과 COMS 위성을 데이터베이스화 하여 COMS 기반 강수 산정 알고리즘을 개발하여 실시간으로 집중호우 예측 및 모니터링 하여 집중호우 예·경보 시스템 개발하는데 있다.

#### (인프라 활용성)

- 국가적으로 운영되고 있는 다양한 국토관측 센서를 수재해 관리에 효율적으로 활용할 수 있는 시스템 부재 (데이터 정확도) 다양한 관측자료를 연계, 융합하여 활용하지 못하고 일부 관측자료에 의존함에 따라 정확도 및 신뢰도가 낮음

(지역적 접근성)

- 수재해 관련 정보 획득의 공간범위가 남한지역에 국한되어 있어, 글로벌 물 산업 진출을 체계적으로 지원할 수 있는 고유데이터가 부재 수자원 감시·평가를 위해 가용한 국내외 관측자료를 융합하고, 맞춤형 정보를 생산함으로써 수재해 예측정보의 정확도를 기존 71%에서 95%로 향상
- X-net 구축/운영을 통해 실증기술을 확보함으로써 돌발홍수 등에 대응할 수 있는 혁신적 강우관측 기반을 마련하고, 이를 통해 국지적인 침수재해 평가/예측 및 지역 맞춤형 재해평가 체계 실현
- SRA 정보를 활용하여 한반도 미계측 지역 및 동남아 등 물산업 거점 국가에 대한 수자원 정보를 생산할 수 있는 기반을 마련하고, 관련 정보를 정부부처 및 민간기업 등에게 제공함으로써 물산업 해외시장 진출 토대 마련- 국토관측센서 기반 수문 인자 및 정보 생성기술 개발
- 국토관측센서 및 X-net 실증 테스트베드 구축을 통해 획득된 자료를 활용하여 수재해 감시/평가/예측 등에 필요한 관련 정보를 생성하는 기술
- 물안보 강화를 위한 선제적 가뭄/하천건천화 평가 및 예측기술 개발
- 위성영상 및 수문레이더 정보 등을 활용하여 (미)계측 지역에서의 수자원 변동을 감시하고, 가뭄과 하천건천화를 효율적으로 평가·예측함으로써 물안보 대응 체계를 강화할 수 있는 기술
- 수해 경감을 위한 맞춤형 홍수재해 평가 및 예측기술 개발
- SRA 및 첨단 모니터링 시스템을 활용해 광역 및 국지홍수의 피해 범위, 규모 등을 평가·산정하고, 정확히 예측함으로써 수재해를 획기적으로 저감할 수 있는 기술



그림 4 수재해 융합 정보 사업단

## 4. 연구 자료 및 방법

### 4.1 연구자료

#### 4.1.1 GPM (Global Precipitation Mission)

##### 4.1.1.1 GPM 위성

GPM위성은 2014년 2월 28일 오전 3시 37분 일본 다네가시마 우주센터에서 성공적으로 발사가 되었다. 전지구강수관측위성(Global Precipitation Measurement, GPM)은 지구의 강수량, 태풍, 호우 예보 등을 관측하는 위성으로 2005년부터 제작되기 시작한 이 위성은 미국 항공우주국(NASA)의 위성 기술 로드맵에 따라 일본 우주항공국(JAXA)의 합작으로 공동 개발되었다(그림 5).

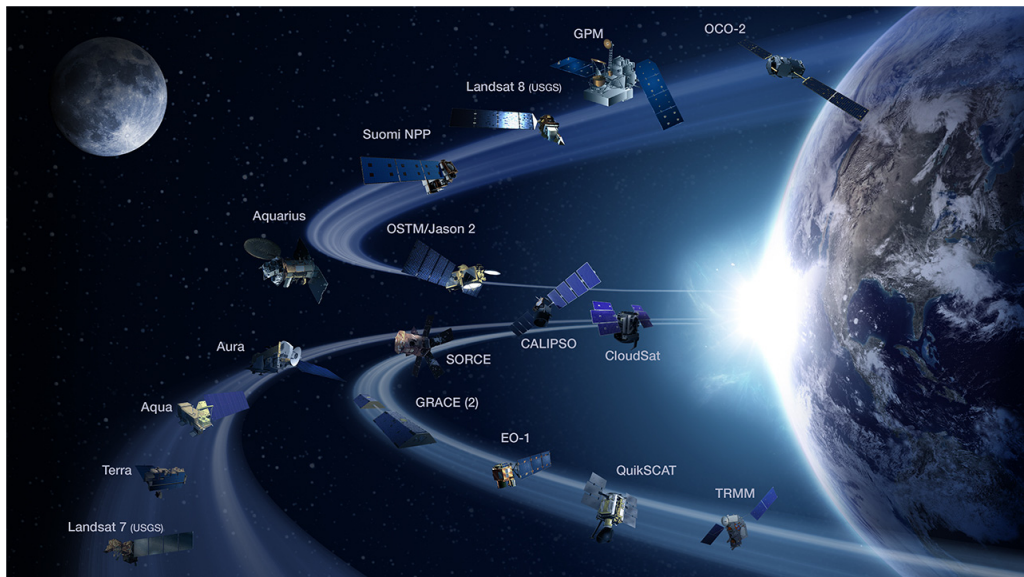


그림 5 NASA 위성 개발 계획

##### 4.1.1.2 GPM 듀얼레이더(DPR)

GPM 위성의 핵심 센서인 DPR(Dual Precipitation Radar)는 태풍의 구조뿐만 아니라 시간과 위치에 따라 변화하는 태풍을 감시할 수 있으며, 강수량을 3D로 관측이 가

능하다. 미국에서 개발된 마이크로파 라이오미터(GPM Microwave Imager, GMI)는 강수량과 강설량의 강도를 관측할 수 있고, 두 센서를 탑재한 GPM 핵심 관측위성과 기존의 강수량을 관측할 수 있는 여러 기상위성자료가 결합되어 지구 전체의 약 90%로 해당되는 곳의 강수량과 강설량을 매 30분마다 관측할 수 있는 위성이다(그림 6).

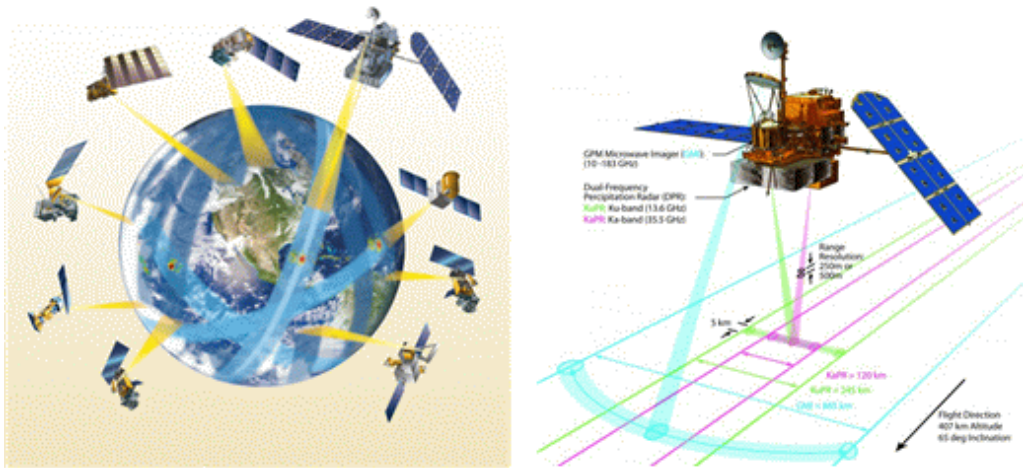


그림 6 GPM 핵심 코어 위성

GPM 코어 위성 중에 가장 중요한 센서 중의 하나인 듀얼레이더(Dual-frequency Precipitation Radar, DPR)는 Ku밴드 레이더(KuPR), Ka밴드 레이더(KaPR)레이더로 구성되어 있으며, KuPR 센서는 13.6GHz로 이전 TRMM 위성의 센서와 같으며, 수직 해상도 250m, 수평해상도 5km이다(그림 7). KaPR센서는 GPM코어 위성에서 새롭게 탑재된 센서로 35GHz의 주파수를 가지며, 수직 해상도 250/500m이며, 수평해상도는 KaPR센서와 같은 5km 해상도로 관측하게 되며 각각 센서의 제원은 다음과 같다(표 2).



그림 7 GPM 듀얼레이더(DPR) 센서

표 2 GPM 듀얼 레이더 제원

Item	KuPR	KaPR
Swath Width	245 kilometers(km)	120 kilometers(km)
Range Resolution	250 meters(m)	250/500 meters(m)
Spatial Resolution	5.2 km(Nadir at the height of 407km)	5.2km (Nadir at the height of 407km)
Beam Width	0.71 degrees(Center Beam)	0.71 degrees(Center Beam)
Transmitter	128 Solid State Amp	128 Solid State Amplifiers
Peak Transmit Power	1012.0 Watts(W)	146.5 Watts(W)
Pulse Repetition Freq.	4000 to 4500 Hertz(Hz)	4000 to 4500 Hertz(Hz)
Pulse Width	two 1.6 microseconds( $\mu$ s) pulses	two 1.6 microseconds( $\mu$ s) pulses in matched beams two 3.2 micorseconds( $\mu$ s) pulses in interlaced scans
Beam Number	49	49(25 in matched beams and 24 in interlaced scans)
Minimum measurable rain rate	0.5mm/h	0.2mm/h
Beam matching error	Uner 1000m	
Observable range	19km to Surface (to-5 km near nadir)	19km to Surface (to-5km near nadir)
Dynamic range	From -5dB below the system nosie level to +5dB above the nominal maximum suface echo level	From -5dB below the system noise level to +5dB above the nominal maximum surface echo level
Receiver power accuracy	$\pm$ 1dB	$\pm$ 1dB
Scan Angle (in Observation Mode)	$\pm$ 17° Cross Track	$\pm$ 8.5° Cross Track
Frequencies	13.597 and 13.603 GHz	35.547 and 35.553 GHz
Bandwidth	14 MHz	14 MHz
Max. Mass	472 kilograms(kg)	336 kilograms(kg)
Science Data Rate(max)	109 kilobits per second(kbps) (The Total of KuPR and KaPR is 190 kbps)	81 kilobits per second(kbps) (The Total of KuPR and KaPR is 190 kbps)

#### 4.1.1.3 GPM 마이크로파 이미저(GMI)

GMI센서는 GPM위성에 탑재되어 있는 마이크로 라디오미터 센서이다. 407km 곡원 궤도로 관측하며, 관측고도는 635km이다(그림 8). GMI는 10GHz부터 183GHz까지 각각의 수직 수평 전자파로 총 13개의 채널을 가지고 있다(표 3). 1.2m 크기의 메인 안테나가 회전하면서 관측을 하며, 지상 Swath 거리는 885km이다. 13개의 채널 중 10-23GHz이 강수입자에 민감하며 36-89GHz는 강수 및 강설입자에 민감하고, 166-183GHz 채널은 강설입자에 민감하다(그림 9).



그림 8 GPM GMI 센서

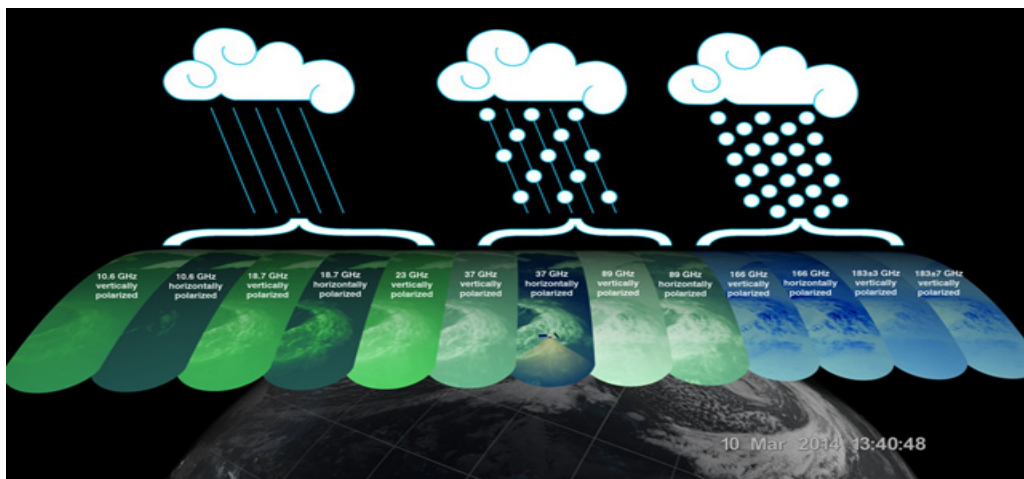


그림 9 GPM GMI 센서 특징

표 3 GPM GMI 센서 제원

Chan. #	Center Freq (GHz)	Pass-band width (MHz)	Pol.	Sampling Interval (ms)	Nadir Angle(deg)	Nominal Earth Incidence Angle	Beam Width[deg]	Foot-print[km×km]	Earth samples per scan	Cold samples per Scan	Hot samples per Scan	NEDT (K) Max
1	10.65	100	V	3.6	48.5	52.82	1.732	32.1×19.4	202	4	4	0.96
2	10.65	100	H	3.6	48.5	52.82	1.732	32.1×10.9	202	4	4	0.96
3	18.70	200	V	3.6	48.5	52.82	0.977	18.1×10.9	202	4	9	0.84
4	18.70	200	H	3.6	48.5	52.82	0.977	18.1×10.9	202	4	9	0.84
5	23.80	400	V	3.6	48.5	52.82	0.862	16.0×9.7	202	4	9	1.05
6	36.50	1000	V	3.6	48.5	52.82	0.843	15.6×9.4	202	9	20	0.65
7	36.50	1000	H	3.6	48.5	52.82	0.843	15.6×9.4	202	9	20	0.65
8	89.00	6000	V	3.6	48.5	52.82	0.390	7.2×4.4	202	9	30	0.57
9	89.00	6000	H	3.6	48.5	52.82	0.390	7.2×4.4	202	9	25	0.57
10	166.0	4000	V	3.6	45.36	49.19	0.396	6.3×4.1	202	9	25	1.50
11	166.0	4000	H	3.6	45.36	49.19	0.396	6.3×4.1	202	9	25	1.50
12	183±3.0	2000	V	3.6	45.36	49.19	0.391	5.8×3.8	202	9	25	1.50
13	183±7.0	2000	V	3.6	45.36	49.19	0.391	5.8×3.8	202	9	25	1.50

#### 4.1.1.4 GPM 위성 자료처리

GPM 자료는 Level 0, Level 1A, Level 1B, Level 1C, Level 2, Level 3자료의 형태로 제공된다(표 4). Level 0 자료는 기본적인 정보와 데이터 missing에 대한 정보로서 일반 유저에게는 제공되지 않는 정보이다. Level 1A 자료는 센서에 대한 정보, 고도, 위치, 센서, 위성 상태등의 정보로써 이 정보 또한 일반 유저에게는 제공되지 않는다. Level 1B, Level 1C자료는 기하적인 보정된 자료로 반사도값, 휘도온도값을 제공한다. Level 2자료는 반사도값과 휘도온도에서 강수량 산정 알고리즘에 따라 강수량으로 변환된 값을 제공한다. Level 3자료는 통계적인 방법을 이용하여 시공간적으로 격자화 된 자료를 제공한다. Level 3자료 중에서 GPM 핵심위성 자료만으로 보간하여 격자화된 자료를 제공한다. GPM 코어 위성과 여러 마이크로파 협력 위성, 정지궤도 위성에서 산출되는 강수량을 결합하여 시간해상도 30분 10km의 공

간 해상도로 제공되는 자료는 GPM IMERG자료이다.

각각의 Level의 자료의 단계별 흐름도는 그림 10에서 볼수 있다. Level 2에서 GPM위성 이중강우레이더(DPR)에서 KuPR센서에 제공하는 강수량, KaPR센서에서 제공하는 강수량이 있으며, KuPR, KaPR의 강수량값을 서로 보정하여 제공하는 DPR 강수량값도 제공한다. 또한 GMI(GPM Microwave Imager) 센서는 미국 수동 마이크로파 알고리즘 팀의 GPROF 알고리즘 기반으로 GMI Level 2 강수량을 제공한다. DPR 강수량값과 GMI 강수량 값을 결합한 자료는 CMB 자료로서 본 연구에서 COMS 적외채널과의 데이터베이스화를 통하여 COMS 강수량 산정 알고리즘 개발시 이용하였다.

표 4 GPM 자료 Level 단계 정의

Processing level	Descriptions
Level 0	The processing input APID Sorted Data(data originated in GPM core satellite, packet-synchronized in accordance with CCSDS standard and divided by APIDs). From the primary and secondary headers of the packets, they check the time range, the continuousness(data missing) and so on. Level 0 data, which they output, are not provided to users.
Level 1A	The processing input Level 0 data and output Level 1A data. Level 1A data store sensor output engineering values, satellite attitude/position, sensor status, transform coefficients and so on in the time range, or scene, of respective files. L1A data are archived as master data, but not provided to users.
Level 1B, Level 1C	The processing input Level 1A data, conduct geometric corrections, and convert into received powers, brightness temperatures and so on.
Level 2	The processing input Level 1 products and derive physical quantities regarding precipitation, e.g. earth surface scattering cross-sections, precipitation types, bright band height, attenuation-compensated radar reflectivity factor, precipitation intensity, and so on.
Level 3	The processing input Level 1 or 2 products and conduct spatial and/or temporal statistical processing. The output products cover whole globe. The time coverage of the products are one month, one day or one hour(this goes for GSMaP).

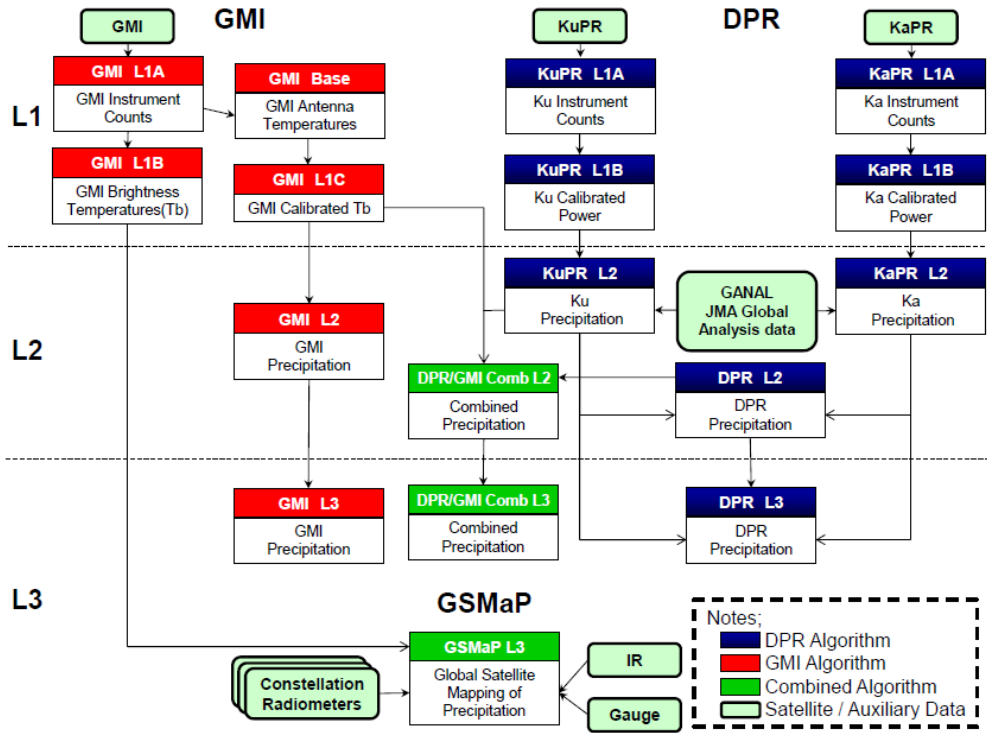


그림 10 GPM 자료처리 시스템(출처 : JAXA)

GPM 위성에서 제공하는 핵심 레이더 강수량값은 일반적으로 다음과 같은 과정을 통하여 산출된다. 먼저 이중강수레이더를 이용한 강수량은 KuPR과 KaPR에서 얻게 되는 에너지를 변환하여 관측한다(그림 11). 이 강수 알고리즘은 강수타입이나 강수 높이, 밝은때 높이 등의 정보도 제공한다. 알고리즘은 TRMM/PR 강수알고리즘을 배경으로 개발되었으며, 이중강우레이더에 대한 정보가 추가되었다. 여러 모듈로 이루어진 알고리즘은 동시에 TRMM/PR과 KuPR에 적용될수 있도록 설계되었다(그림 12). 입력자료는 레벨 1 자료들(received power profile, etc.)이며, 레이더 방정식은 다음과 같다. 출력데이터는 레벨 2 강수연직분포 자료이다.

$$P_r(r) = \frac{C|K|^2}{r^2} Z_{m0}(r) \tag{1}$$

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K|^2} \int \sigma_b(D) N(D) dD \tag{2}$$

$Z_e$ 는 강수입자 지름  $D$ 와  $N(D)$ 로 나타낼수 있다.  $Z_e$ (Effective radar reflectivity factor)와  $k$ (specific attenuation) 관측레이더반사인자를 이용하여 식 (3)과 같이 쓸수 있다. 그리고  $Z-R$ 관계식을 이용하여 강수량을 산정한다.

$$10\log_{10}Z_m(r) = 10\log_{10}Z_e(r) - 2 \int_0^r k(s)ds \quad (3)$$

위의 식을 다음(4)과 같이 풀어서 강수량 산정하거나

$$Z_e(r) = \frac{Z_m(r)}{[1 - 0.2(\ln 10)\beta \int_0^r \alpha(s)Z_m(s)^\beta ds]^{1/\beta}} \quad (4)$$

강수에 의해 감쇄값(PIA, Path integrated attenuation)을 이용하여 강수량 산출한다(5).

$$PIA = -\frac{10}{\beta} \log_{10} [1 - 0.2(\ln 10)\beta \int_0^{r_s} \alpha(s)Z_m(s)^\beta ds] \quad (5)$$

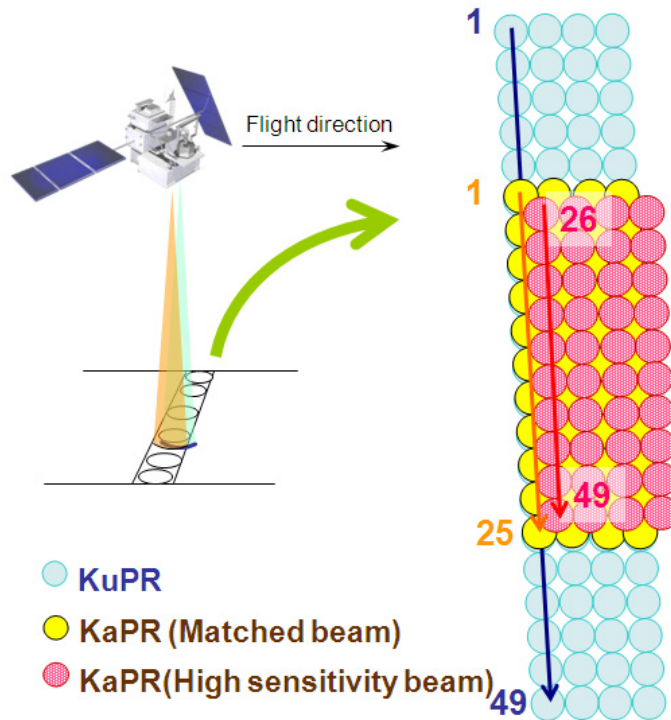


그림 11 DPR 자료처리 시스템(출처 : JAXA)

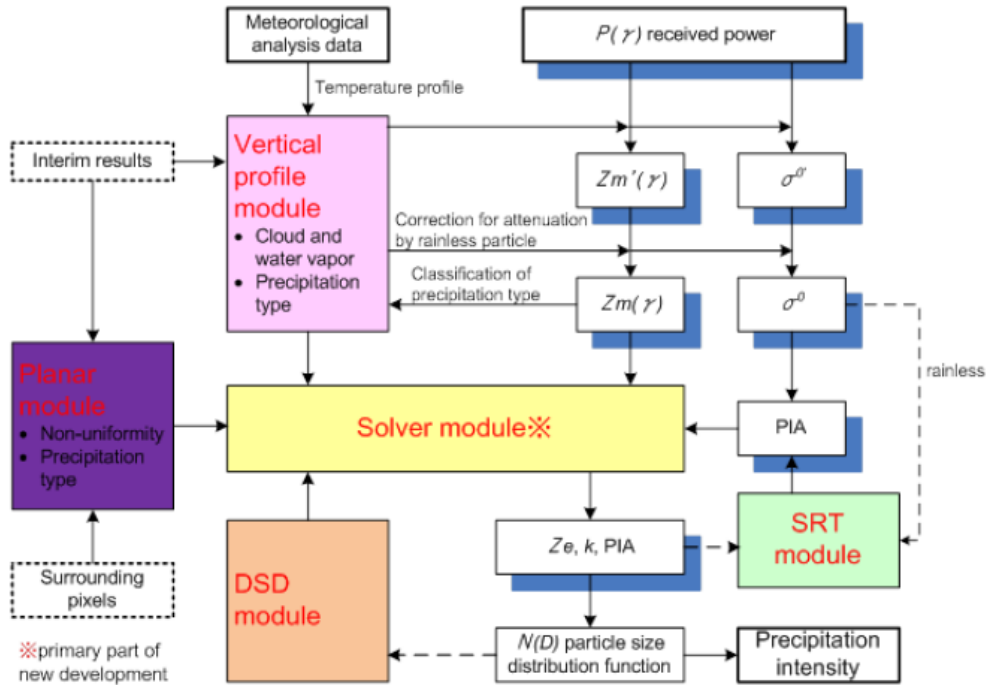


그림 12 DPR 강우 추정 알고리즘(출처 : JAXA)

GPM GMI 센서의 알고리즘은 베이저안 기법을 베이스로 구름모델의 a-priori 연직프로파일 데이터베이스와 이와 연계한 휘도온도와의 관계에서 Bayesian inversion 방법을 이용하여 강수량을 산출하게 된다. 산출 알고리즘은 모델의 연직 강수 프로파일 R과 GMI 센서에서 얻게되는 휘도온도( $T_b$ )을 기반으로 산출하며, 수식으로 나타내면 다음과 같다(6).

$$\Pr(R/T_b) = \Pr(R) \times \Pr(T_b|R) \tag{6}$$

모델을 이용하는 방법 이외에 경험적 데이터베이스를 이용하여 강수량을 산정할수 있는데 이때는 GPM radar 강수량값과 GPM GMI의 휘도온도를 이용하여 a-priori 데이터 베이스를 구축하게 되며, 이 데이터베이스로부터 강수량을 산출한다.

## 4.1.1.4 GPM IMERG

GPM IMERG(the Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) 위성자료는 Level 3자료로 GPM 핵심 코어 단일 위성으로 만든 Level 3 강수량값과 구별되며, 이 자료는 GPM 코어위성과 마이크로파 센서를 탑재하고 강수량을 산출할수 있는 모든 마이크로파 협력위성 및 적외(IR)채널을 탑재한 정지궤도 위성들의 강수량 값을 블렌딩하여 산출한 30분간 10km의 해상도 자료이다. 마이크로파 협력위성들은 미국, 유럽, 인도, 프랑스, 일본 등 다양한 나라와 기관에서 운영하는 위성들로 이루어지며, 이들 기관에서 운영하는 센서와 위성에 대한 자세한 설명은 표 5와 같다. 표 6은 협력 위성의 센서에 대한 자세한 특징을 보여주고 있으며, 각각의 센서들을 비교 되면 기본적으로 파장이 상대적으로 긴 10-85GHz대역의 센서들과 89-183GHz의 짧은 파장대를 이용하는 위성들로 나눌수 있으며, 목적에 따라 달리 이용되고 있다. GPM GMI센서는 10-183GHz의 모든 영역대의 파장대 자료를 제공하고 있다(표 6).

표 5 GPM IMERG 운영기관 및 위성과 탑재센서

센서	위성	기관
SSMI	DMSP	DoD
SSMIS	DMSP	DoD
AMSR2	GCOM-W	JAXA
MADRAS	Megha-Tropiques	CNES/IRO
SAPHIR	Megha-Tropiques	CNES/IRO
MHS	NOAA	NOAA
AMSU-A	NOAA	NOAA
MHS	MetOp	EUMETSAT
AMSU-A	MetOp	EUMETSAT
ATMS	NPP	NASA
ATMS	JPSS	NOAA

표 6 GPM IMERG 협력위성 센서

GMI	10.65 V low	10.65 H lw	18.7 V low	18.7 H low	23.8 V low	36.5 V low	36.5 H low	89.0 V high	89.0 H high	165.5 H high	165.5 H high	183± 3 high	183± 3 high
TMI	10.65 V low	10.65 H low	19.35 V low	19.35 H low	21.3 V low	37.0 V low	37.0 H low	85.5 V high	85.5 H high				
AMSR E	10.65 V low	10.65 H low	18.75 V low	18.75 H low	23.8 V low	36.5 V low	36.5 H low	89.0 V high	89.0 H high				
SSMIS			19.35 V low	19.35 H low	22.23 V low	37.0 V low	37.0 H low	91.66 V high	91.66 H high		150 H high	183± 3 high	183± 3 high
AMSU B								89.0 V low		150H low		183± 3 low	183± 3 low
GMI Ch.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

GPM IMERG 자료를 산출하는 방법은 TRMM위성에서 각각의 기관마다 Level 3을 만들어서 제공했던 NASA TRMM 3B42, NOAA CPC(Climat Prediction Center) CORMPH (NOAA CPC Morphing Technique), UC Irvine대학의 PERSIANN(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Infromation using Artificial Neural Networks) 자료들이 있었으나, 이번 GPM IMERG 자료는 각 기관의 역할을 분담하여 최종 격자화된 자료를 산출한다(그림 14). NOAA CPC에서 CMORPH 칼만필터를 이용하여 마이크로파와 적외센서를 결합한 자료를 제공하며, UC Irvine대학에서는 적외채널을 이용하여 산출한 강우강도 값을 제공한다. NASA GSFC에서 최종적으로 모든 강수량 자료를 결합하여 수집 제공하게 된다(그림 13). 자료는 관측후 Latency 6시간 후 자료(Early run product), 18시간 후의 자료(Late run product)와 최종적으로 지상관측자료와 보정한 4개후 자료(Final run product)을 생산하여 제공한다.

원래 연구에서는 Early run자료와 COMS자료를 데이터베이스화 하여 매년 집중 호우 강우사상에 대하여 강수량 산정 알고리즘을 개발하려고 하였으나, 처음 NASA에서 제시하였던 Latency 4시간의 Early 자료가 6시간으로 2시간 미루어 졌으며,

Early run자료를 데이터베이스화 하려고 했던 한반도 주변의 태풍에 대한 사례가 없는 관계로 GPM DPR, GMI 강수 합성 자료인 CMB 강수자료를 이용하였다. GPM IMERG자료는 향후 APEC 기후센터의 관심지역인 APEC 개발도상국 지역과 태평양 도서국에 대한 홍수의 정보로서 제공이 가능하기 때문에 먼저 한반도 지역에서 자료가 잘 맞는지 알아보기 위하여 지상관측자료와 비교하였다.

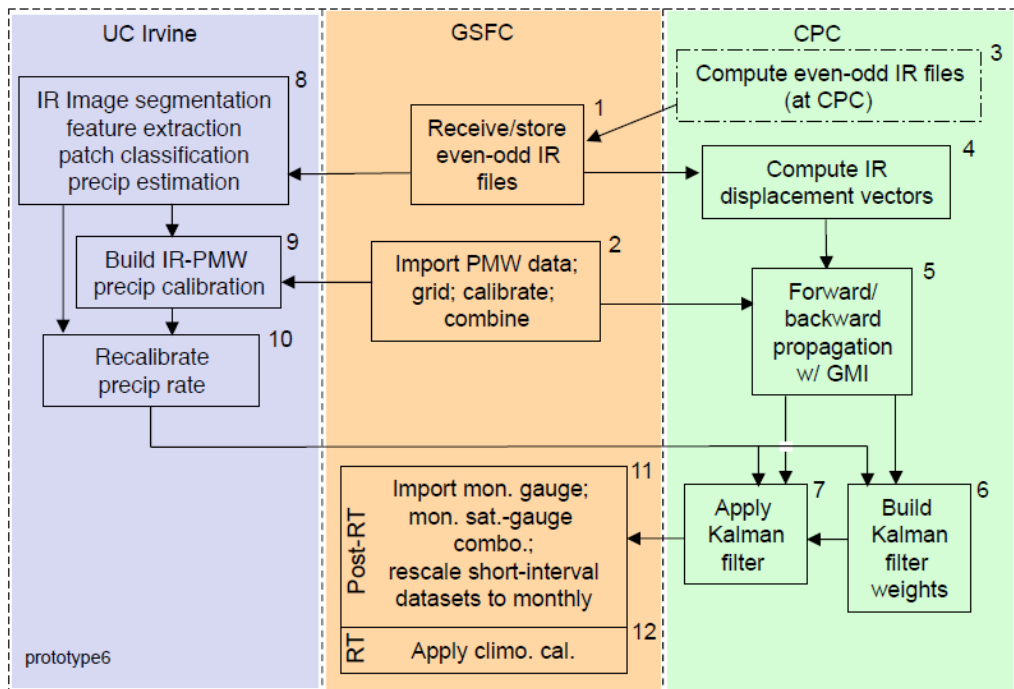


그림 13 GPM IMERG 강우 추정 알고리즘(출처 : NASA)

표 7 GPM IMERG 산출물

Reasolution	Regions-Dates	Latency	Format
0.1°-30 minute	Gridded, 90N-90S March 2014 to present	6 hours (NRT/early run)	HDF5
0.1°-30 minute	Gridded, 90N-90S March 2014 to present	18 hours (NRT/late run)	HDF5
0.1°-30 minute	Gridded, 90N-90S March 2014 to present	4 months (final run)	HDF5/NETCDF
0.1° Monthly	Gridded, 90N-90S March 2014 to present	4 months (final run)	HDF5

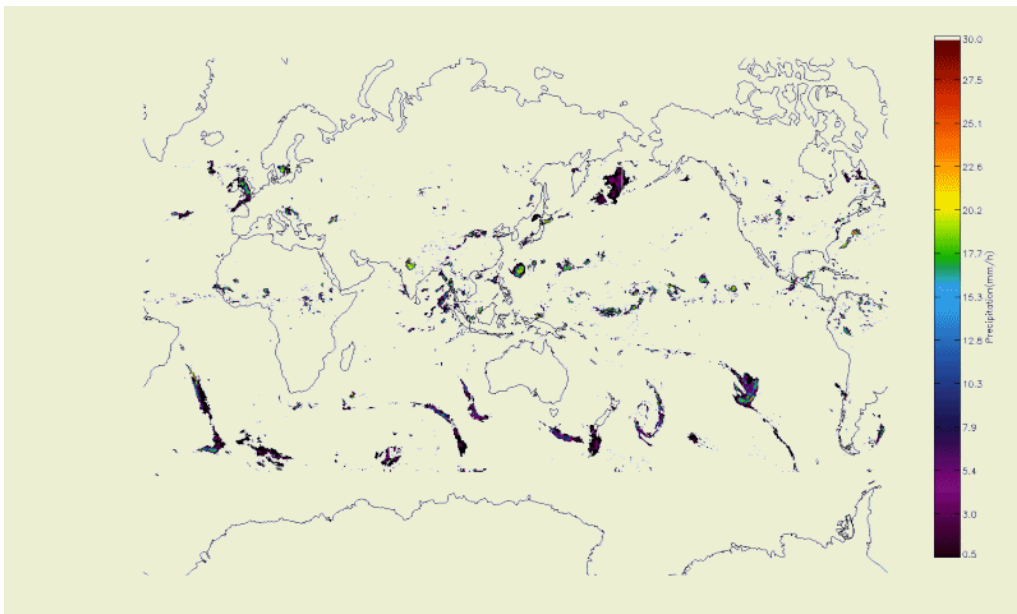


그림 14 GPM IMERG 전지구 30분 관측데이터

## 4.1.2 천리안 위성

### 4.1.2.1 천리안 위성 센서

국가기상위성센터에 따르면 천리안 위성(Communication, Ocean and Meteorological Satellite, COMS)은 지구적도상공 36,000km 고도, 동경 128.2도에 위치하여 기상 관측, 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.

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. 기상탑재체는 미국 GOES-8호 ~ GOES 13호 및 일본 MTSAT-2에 탑재된 기상센서와 동일한 센서를 탑재하고 있다(Table. 5). 총 5개의 센서를 가지고 있는데, 가시광선(VIS : visible) 센서는 태양광의 가시광선 영역인 0.5 ~ 0.9 $\mu$ 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 $\mu$ m의 파장대로 주간에는 태양광의 지구반사량을 측정 가능하며, 야간에는 지구 복사량을 측정하여 하층운, 야간 안개, 산불등의 관측에 이용된다. 수증기 채널은 6.7 $\mu$ m의 파장대에서 대기의 수증기 흡수에 따른 복사량을 측정하며 이 채널을 이용하여 대류권 상층 및 중층의 수증기량 관측이 가능하다. 적외 1, 적외 2채널은 각각 10.8 $\mu$ m, 12.0 $\mu$ m의 파장대를 가지며, 지구 표면이나 구름에서 의 온도를 측정하여 구름탐지, 바람장, 강우강도, 해수면 온도 등의 기상 물리값으로 변환하여 이용된다. 센서의 각 채널의 정보는 표 8에 정리하였다.

표 8 COMS 센서 특징

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

표 9 전지구 정지궤도 위성 센서 특징

위성	번호	채널	파장범위(μm)	해상도
미국 GOES-13 (=GOES N) 2006.5.24	1	VIS	0.55-0.75	1km
	2	IR	3.8-4.0	4km
	3	WV	6.5-7.0	4km
	4	IR	10.2-11.2	4km
	5	IR	13.0-13.7	8km
유럽 MSG-2 (=MATEOSAT-9) 2005.12.21	1	High.Res.VIS	0.6-0.9	1km
	2	VIS 0.6	0.56-0.71	3km
	3	VIS 0.8	0.74-0.88	3km
	4	IR 1.6	1.50-1.78	3km
	5	IR 3.9	3.48-4.36	3km
	6	IR 8.7	8.30-9.10	3km
	7	IR 10.8	9.80-11.80	3km
	8	IR 12.0	11.00-13.00	3km
	9	WV 6.2	5.35-7.15	3km
	10	WV 7.3	6.85-7.85	3km
	11	IR 9.7	9.38-9.94	3km
	12	IR 13.4	12.40-14.40	3km
일본 MTSAT-1R 2005.2.26	1	VIS	0.55-0.75	1km
	2	IR 1	3.8-4.0	4km
	3	IR 2	6.5-7.0	4km
	4	IR 3(WV)	10.2-11.2	4km
	5	IR 4(Near IR)	13.0-13.7	4km
중국 FY-2C 2004.12.24	1	VIS	0.55-0.90	1.25km
	2	IR3	3.5-4.0	5km
	3	WV	6.3-7.6	5km
	4	IR1	10.3-11.3	5km
	5	IR2	11.5-12.5	5km

#### 4.1.2.2 천리안 지구 관측

천리안위성은 지상으로부터 약 36,000 km 떨어진 적도 상공에서 지구를 관측하기 때문에 천리안위성의 위치에서 지구의 크기는 아주 작아 보여서 이를 보완하기 위하여 위성에 탑재된 기상 영상기에는 망원경이 함께 부착되어 있고, 이 망원경 앞에 달린 스캔 거울이 좌우/상하로 움직이면서 지구로부터 반사된 태양복사에너지와 적외선 에너지를 망원경으로 전달하며, 디텍터가 디지털화해 기록하고 이어붙이는 방식으로 영상을 만들어내고 있다.

좌우(동서방향)로 한 번 스캔한 값들의 집합을 한 스캔라인이라고 하며, 이 한 스캔라인은 위성에서 볼 때, 남북방향 8 km 정도의 폭으로 이루어져 있다. 위성에서 보이는 둥근 지구의 모습을 모두 촬영한다면 1천 번이 넘는 스캔라인 관측이 이뤄져야 하며, 한 스캔라인을 관측하는데는 약 1초 가량이 소요되고, 따라서 전지구 촬영 모드는 약 27분이 소요되며, 한반도 영역만 촬영하는데에도 1분 가량이면 관측이 가능하다(그림 15).

자료는 2011년 4월부터 현재까지 자료를 국가기상위성센터로 한반도 지역자료를 바이너리 자료를 수신하여 적외 채널을 TBB온도값으로 변환하여 사용하였으며 이 자료 중에서 이동벡터 산출은 15분 자료를 사용하였다.

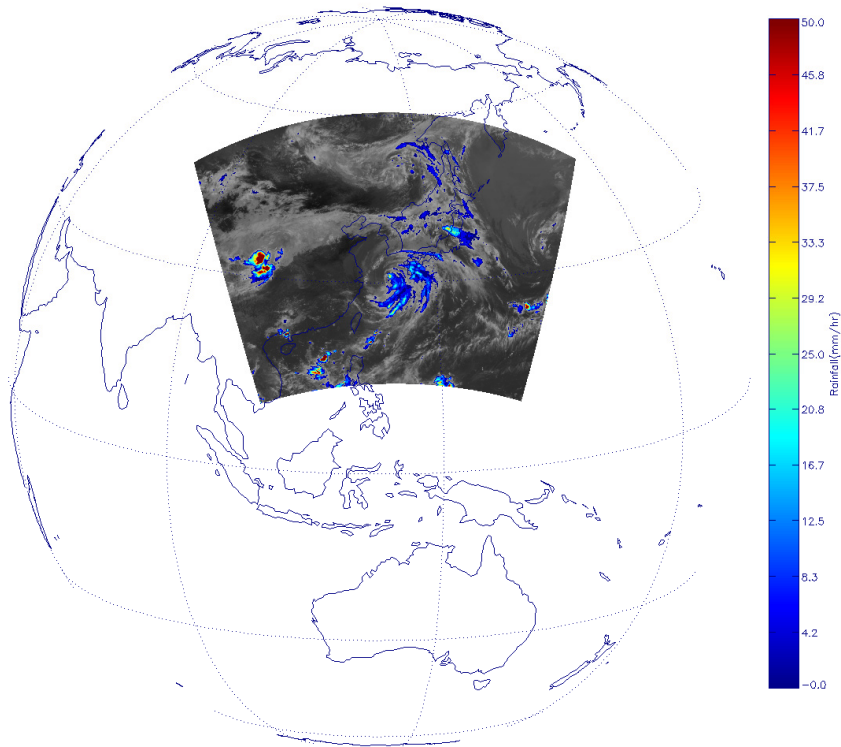
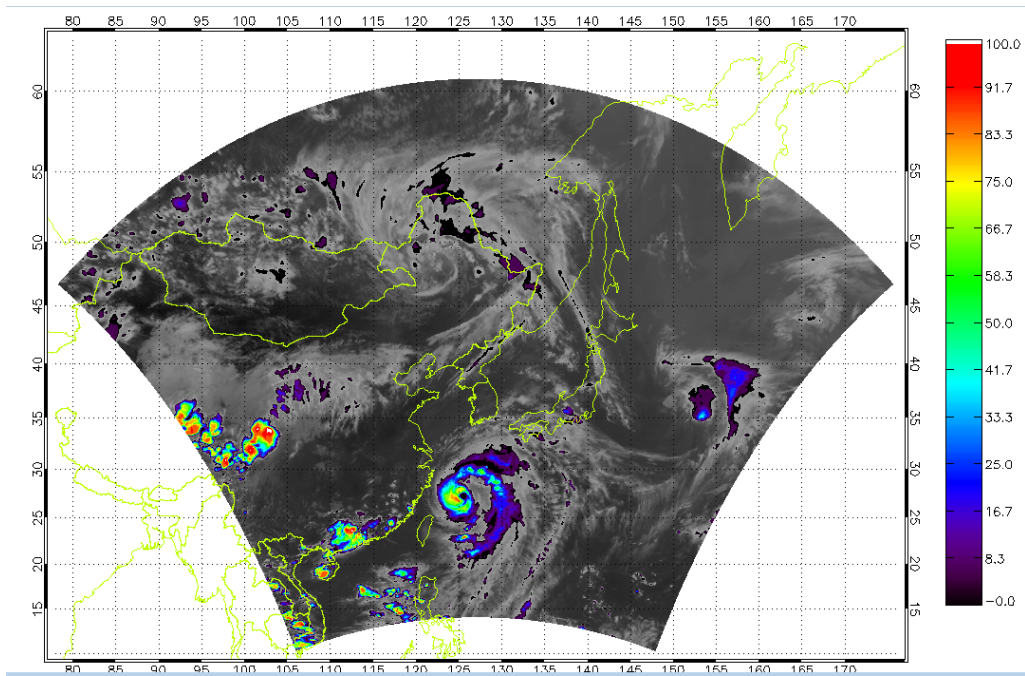


그림 15 COMS East Asia 모드로 지구관측

## 5. 연구 방법

### 5.1 연구지역 및 자료 DB

관측지역은 위도 30도부터 45도 경위120도부터 135도까지 지역을 연구지역으로 정하였다. 연구지역내 COMS 관측 영상은 다음과 같다(그림 16).

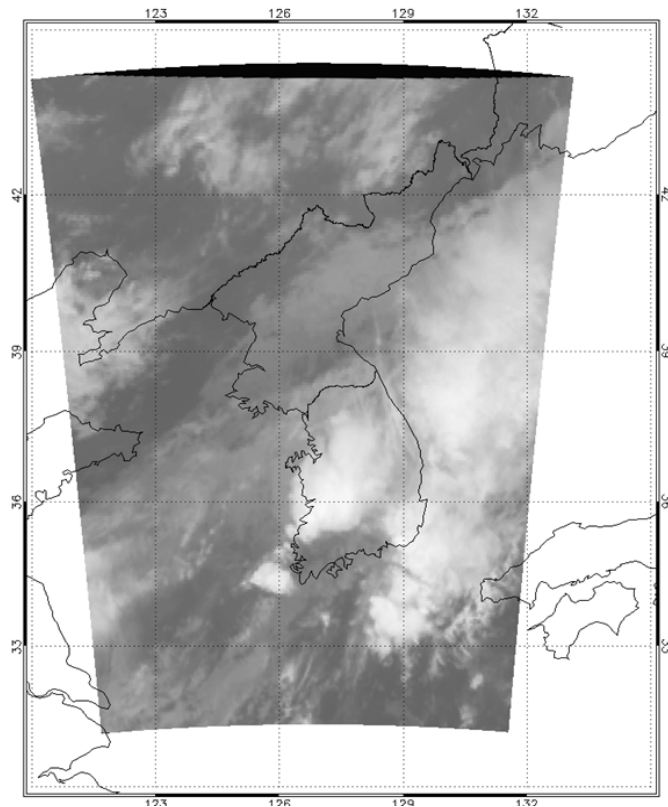


그림 16 연구지역

천리안 위성자료는 현재 국기기상위성센터에서 자료를 제공하고 있다. 일본 정지 궤도 위성 MTSAT-2는 북반구 24회 전 지구 24회 남반구 8회 하루 관측한다. 이에 반해 천리안 위성은 전구 동아시아 한반도 지역 북반구 지역으로 지역과 시간을 달리 해서 자료를 제공하고 있다(표 10). COMS Level 1 자료는 적외영상 1, 적외영상 2, 단파적외영상, 가시영상, 수증기 영상, 합성영상, 강조영상 자료를 제공하고 있으며 각각의 자료에 대한 영상자료와 raw 자료인 바이너리 자료를 내려 받을 수 있다.

동아시아, 북반구 지역 및 한반도 자료는 각각 15분 간격의 자료이며, 본 연구에서 사용된 COMS 자료는 한반도 지역의 자료는 00, 13, 15, 28, 30, 43, 45, 58분의 자료로 13, 28, 43분의 자료가 더 제공이 된다. 집중호우의 특성상 최근 짧은 시간에 많은 양의 강수량이 내리기 때문에 집중호우를 더 많이 관측하는 한반도 지역자료를 선택하였다.

자료는 바이너리 자료로 용량은 3MB자료로 가시, 수증기, 단파적외, 적외1, 적외2 데이터를 받았으며, rain/no rain 구름분류로는 가시, 수증기, 단파적외, 적외 채널을 이용하였고, 강수량 산정 때는 기본적으로 적외1 자료를 이용하였다. 이진 바이너리 자료는 국가위성센터에서 제공하는 Digital Count값으로 제공 받았고, 이 자료는 국가기상위성센터에서 제공하는 Conversion table를 이용하여 실제 물리량인 Radiance와 휘도온도로 변환하였다.

강수량 산정 알고리즘을 개발하기 위한 기본 데이터베이스 자료로 2014년 7월 한 달 동안의 모든 COMS자료를 수집하였다. 5개 채널의 모든 한달 동안의 COMS 자료는 25,800여개의 데이터로 자료는 위도 경도 자료이다.

표 10 COMS 전지구 관측모드

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

GPM 자료는 Level 2 자료로 GPM 위성이 다양한 궤도로 한반도 지역을 관측하며 비행하게 되는데 2014년 8월 7일 한반도지역에 비가 내렸을 때 GPM 위성 KuPR DPR, GM의 궤도와 Swath 반경에 대한 정보는 그림 17과 같다. 8월 7일 하루 동안 DPR 전지구 관측범위와 GMI 전지구 관측범위는 그림 18과 같다.

GPM 기반 강수량 알고리즘을 산출하기 위한 데이터베이스 구축을 위해서는 집중 호우 및 태풍 등의 한반도 부근에서 홍수를 대표 할 수 있는 사례만으로 데이터베이스를 구축할 수 있다. 하지만 GPM 위성이 현재 2014년 3월 발사이후로 2014년 2015 년도에 태풍이 한반도를 지나간 경우는 없었을 뿐 만 아니라 검증사례로 이용한 2014 년도 부산 8월 25일 부산 홍수사상이외에 큰 집중호우와 태풍사례가 없었다. 또한 GPM 위성이 한반도를 관측하는 주기가 하루에 2-3회 정도에 불과하고, 집중호우 등의 비가 많이 내리는 강우사상에 대해서 GPM 위성이 동 시간에 관측할 수 있는 경우가 아주 적다.

따라서 강우 산출 알고리즘 개발을 위한 데이터베이스로 여름철 비가 많이 오는 2014년 7월의 모든 COMS 자료와 한반도 지역을 관측한 GPM 자료를 이용하였다. GPM 자료의 각 픽셀자료마다 위도 경도 자료와 COMS의 가장 근접한 픽셀을 이용하여 위치를 맞추었으며, 그 때 GPM이 관측한 시간대에 COMS 자료를 추출하였다. GPM 위성과 COMS 위성의 시간차는 5분 이내의 자료는 동시간대의 자료로 인정하여 데이터베이스를 구축하였다. 위치와 시간이 맞는 각 픽셀에 대하여 GPM 위성은 강수량 자료 뿐만 아니라 다음과 같은 정보를 제공한다.

#### Precipitation

0 No precipitation

1 Precipitation

-9999 Missing value

#### Land surface type

0 - 99 Ocean

100 - 199 Land

200 - 299 Coast

300 - 399 Inland water

-9999 Missing value

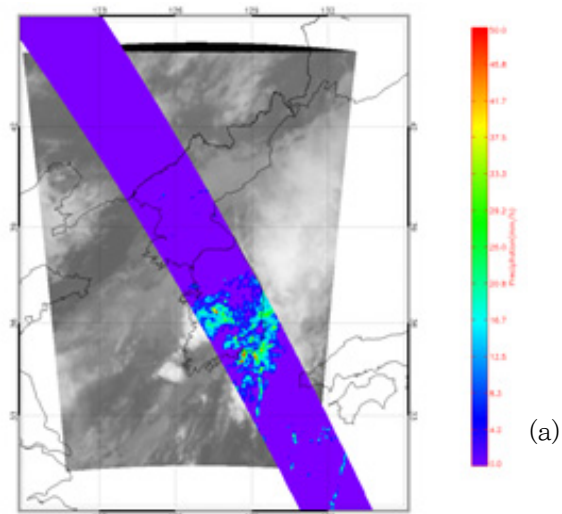
Precipitation type

1 stratiform

2 convective

3 other

또한 이전 TRMM 위성 레이더 센서는 한반도 위도상 최대 지리산까지 밖에 관측이 안되는 부분이 GPM 위성은 위도 60도까지 관측하므로 한반도 전역을 관측할 수가 있다. 따라서 육지뿐만 아니라 한반도 내 해양에서 발생하는 강우사상에 대해서도 데이터를 포함을 하였다.



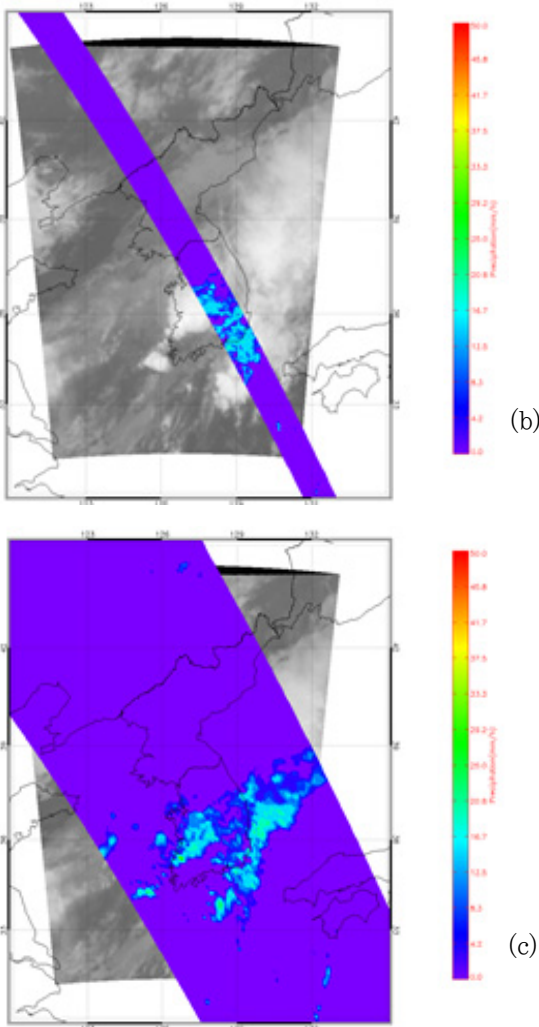
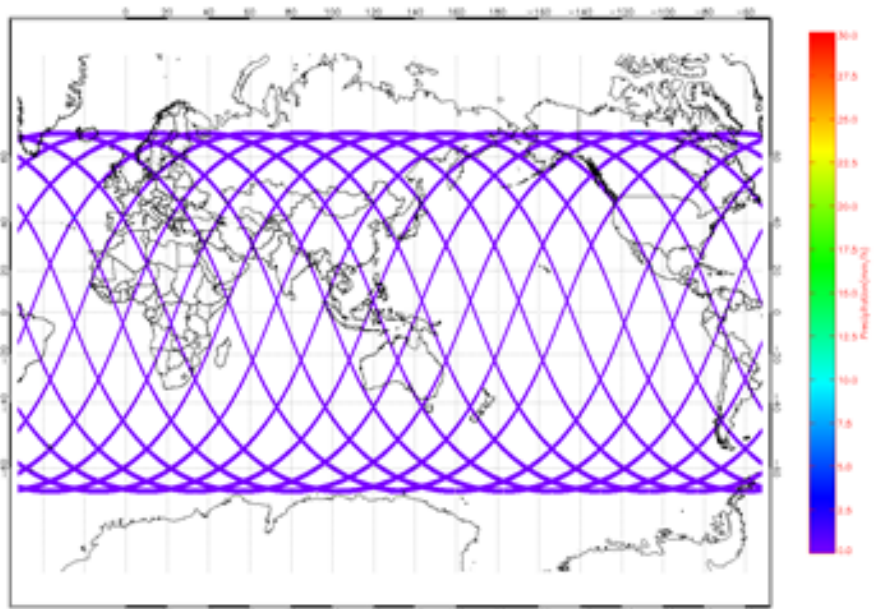
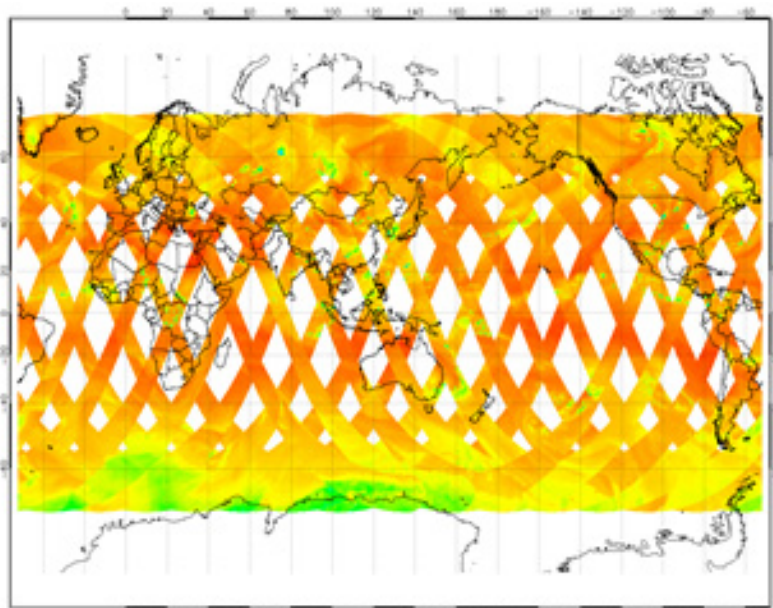


그림 17 2014년도 8월 7일 GPM KuPR(a), DPR(b), GMI(c) Swath 강우 관측



(a) GPM DPR 하루 관측궤도



(b) GPM GMI 하루 관측궤도

그림 18 2014년도 8월 7일 GPM DPR(a), GMI(b) 하루 관측 궤도

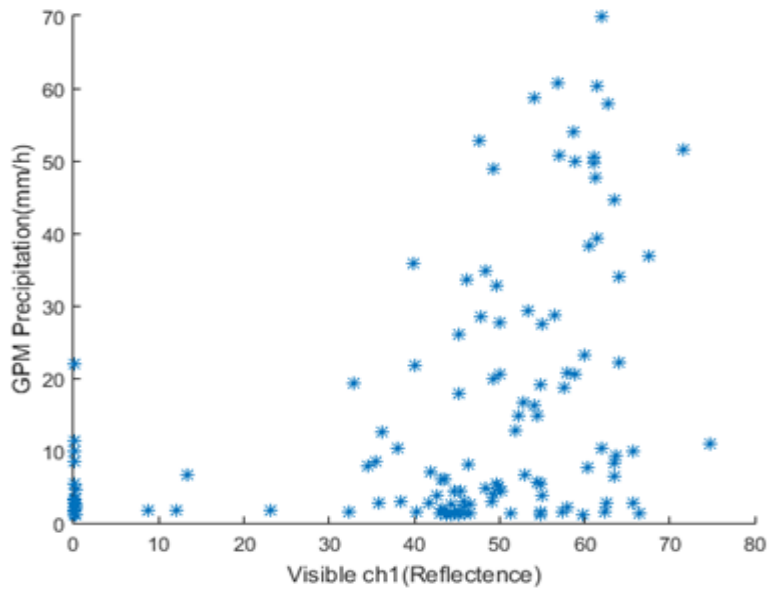
## 5.2. 연구방법

### 5.2.1 rain/no rain 구름분류

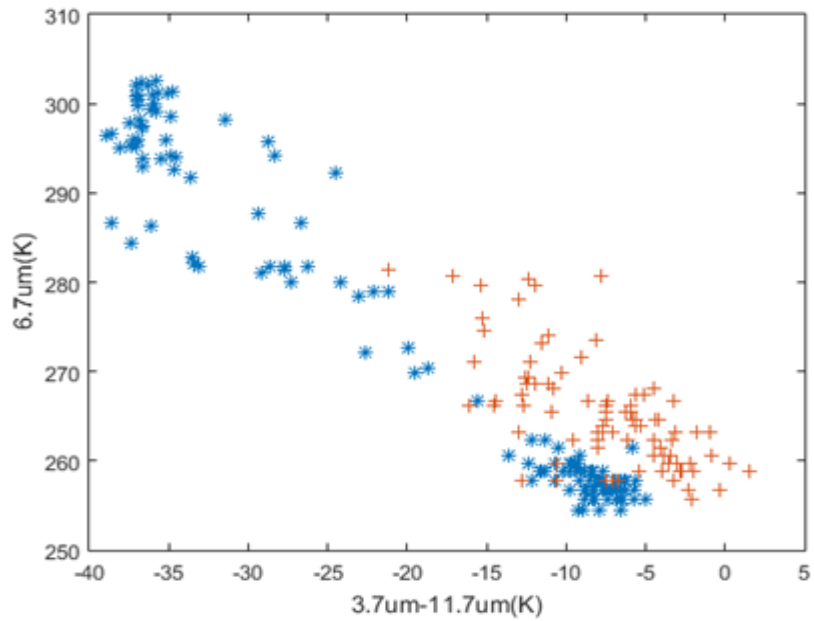
COMS 위성을 비롯하여 정지궤도 위성을 이용하여 강수 산출 알고리즘을 적용하여 강수량을 산정할 때 가장 크게 나타나는 에러 값은 적외채널을 이용하여 구름의 운정 온도로 강수량을 산정할 때 운정 온도는 높지만 비가 많이 오는 경우와 상층운 등 실제적으로 비가 오지 않지만 비가 많이 내리는 것으로 판단되어 지는 경우이다. 먼저 rain/no rain 구름 분류를 위하여 데이터베이스로 구축한 여러 가지 Flag 값을 이용하였다.

구름분류는 2014년 7월 한달 동안 GPM CMB 자료 중 강수 flag 1의 값인 강수가 있을 경우의 GPM과 COMS 자료의 데이터베이스 자료와 강수 flag가 0인 강수가 없을 때의 GPM과 COMS자료 데이터베이스 자료를 이용하여 구름분류를 시도하였다. 먼저 일반적으로 잘 알려진 COMS의 적외 온도가 250K이하일 때는 비가 오는 것으로 결정하였다. 낮에는 그림 20 (a)에서 볼 수 있듯이 Visible 채널 반사도 값이 40%이상일 때만 비가 오는 결정계수 값으로 결정하였다. 그림 19 (b)는 단파 적외에서 적외1 채널값을 뺀 차와 수증기 채널의 관계식으로 에서 구름분류를 하였다. 단파 적외 1채널 값을 뺀 값은 -15이상이고 수증기 채널 255k 이상 280k 일 때 강수가 있는 구름으로 결정하였다. 정지궤도 위성 강수량을 산출할 때 가장 많은 에러값은 얇은 상층운이 온도가 낮고 강수가 없는 구름인데 알고리즘에서는 강수가 온도에 반비례하기 때문에 비가 많이 내리는 값으로 표시가 된다. 일반적으로 단파 적외(3.7 $\mu$ m)와 적외 채널의 차분온도와 적외 채널을 이용하여 얇은 상층운을 판별하려고 하였으나 2014년 7월 한달 동안의 데이터베이스로는 정확히 얇은 상층운을 판별하기 어려웠다.

이러한 구름분류는 미계측 지역이 많은 APEC 개발도상국에 적합할 것으로 판단되며, 한반도내에서는 관측망이 잘 구축된 지상레이더를 결정 값으로 이용하는 것도 좋은 방법 중의 하나라고 판단된다. 향후 APEC 개발도상국이나 태평양 도서국에 적용하기 위해서는 구름분류를 위하여 현재 COMS위성에 탑재되어 있는 해양 탑재체 GOCI센서를 이용하여 낮에라도 운형판별에 대한 적용성을 검토할 필요가 있으며, COMS2 위성에서는 현재보다 많은 16개의 채널로 보다 향상된 구름분류가 가능할 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 19. (a) 가시채널을 이용한 강수구름분류 (b) 단파적외, 적외1, 수증기 채널값을 이용한 강수구름 분류

### 5.2.2 GPM 기반 강수 산출 알고리즘

이전 연구에서는 TRMM 기반 KuPR 단일레이더 자료와 COMS 자료를 이용하여 알고리즘을 산출하였다면 본 연구에서는 GPM KuPR KaPR을 결합한 DPR 강우강도와 GMI 센서에서 얻은 강우강도를 결합하여 정확도가 보다 향상된 GPM CMB Level 2 자료를 이용하여 GPM 기반 강우 산출 알고리즘을 개발하고자 하였다(그림 20).

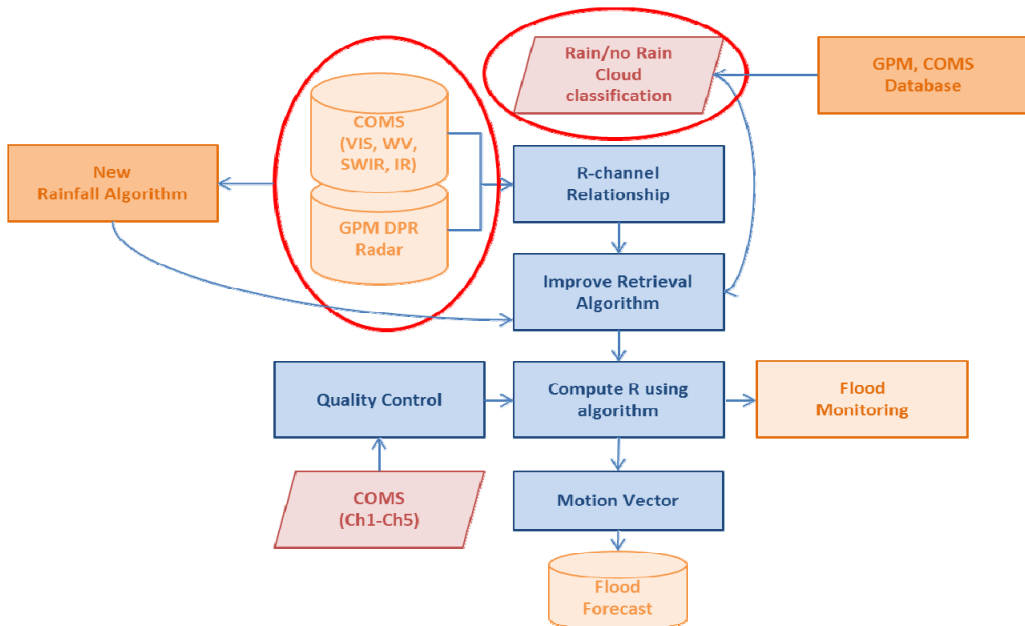


그림 20 강우 알고리즘 흐름도

기 구축된 데이터베이스에서 집중호우에 잘 맞는 GPM기반 산정 알고리즘을 개발하기 위해서 먼저 데이터베이스에서 강수타입구름을 Convective 구름에 관련한 GPM 강수자료와 COMS 적외 채널 자료를 뽑아내고, 적외 채널의 온도는 250K 이하 조건 자료를 뽑아내었다. 한반도 육지내의 자료만 이용하고자 하였으나, 2014년 7월 한달 동안 육지 내 자료는 충분하지 않아서 연구지역내의 육지와 해양 자료 모두 사용하였다. 모든 조건에 맞는 GPM CMB 강우강도 각각의 픽셀 강우자료와 COMS의 적외 채널 TBB온도의 관계식으로 부터 경험적 회귀식으로 산출하여 강수 산정 알고리즘을 구하였고 식은 다음과 같다.

$$R = 0.13882107 \times 10^8 \times \exp(-0.0594 \times T) \tag{7}$$

여기서 R은 강우강도로 단위는 mm/h이고 T는 휘도 온도로 단위는 COMS 적외 채널 켈빈온도이다. 강수 산정 알고리즘은 그림 21에 나타내었다.

향후 GPM 자료가 계속적으로 관측하여 자료가 수집된다면 육지와 해양 지역 및 집중호우와 태풍으로 나누어서 강수량 산정 알고리즘을 고도화 하고자 한다.

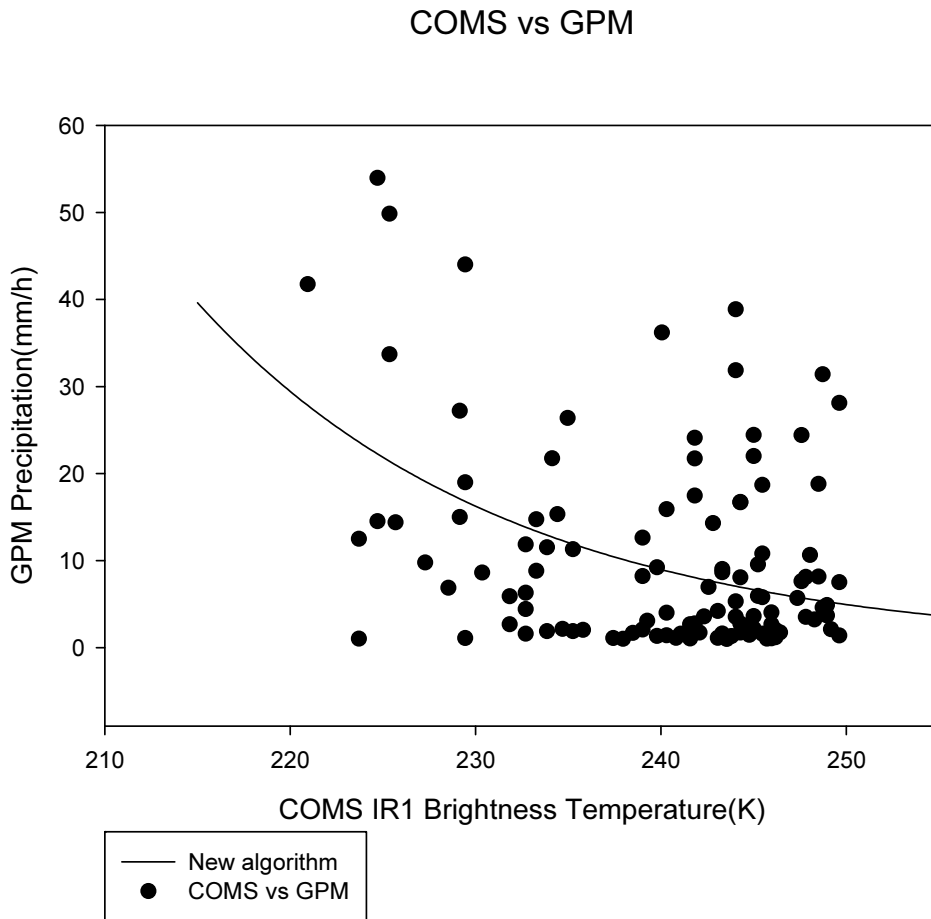


그림 21 GPM기반 강수 알고리즘

### 5.3 위성 및 레이더 강우 결합 방법

한반도 내의 집중호우에 대한 강우 산정방법은 위성 단독이나 레이더 자료만으로 강수량을 산정하기보다 위성과 레이더를 결합하여 강수량을 산출하는 것이 정확도를 높이는 하나의 방법이다. 집중호우 관측 시 TRMM 기반 강수 알고리즘은 과대 추정하는 경향이 레이더는 과소 추정하는 경향을 보인다. 앞에서 설명하였듯이 COMS 위성에서는 rain/no rain 구름에 대한 자체 운형판별에 어려움이 있기 때문에 COMS 위성에서 레이더가 rain/no rain 정보로만 이용되어도 COMS 정확도는 향상된다. 본 연구에서는 위성 레이더를 결합하기 위하여 레이더 30mm/h 이상 되는 강수 패턴을 위성 강수정보와 오버레이 하여 30mm/h 이하는 레이더에 더 많은 가중치를 30mm/h 이상에서는 위성에 가중치를 더 주는 방법으로 위성 레이더 결합을 시도하였다(그림22).

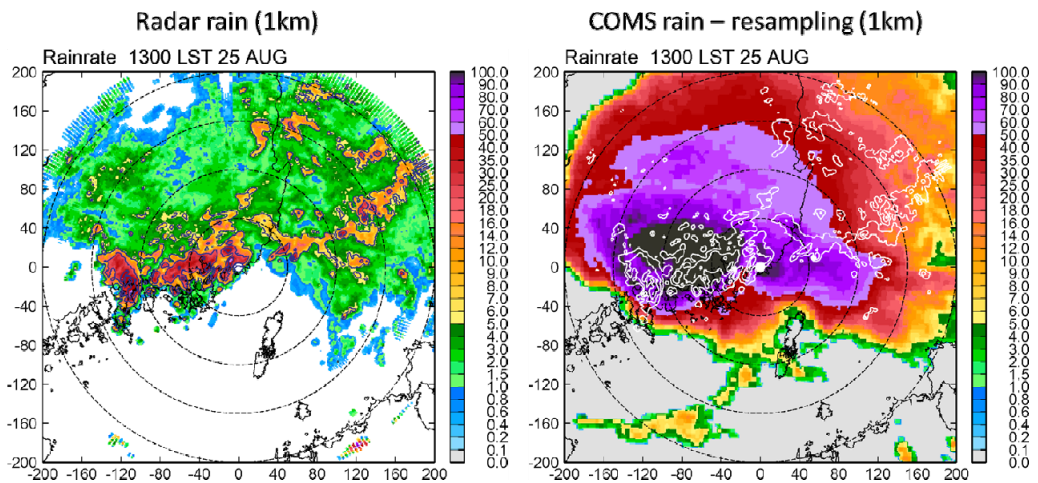


그림 22 레이더 강수 패턴 정보와 위성 강수정보 오버레이 영상 이미지

## 5.4 집중호우 강우예측 모형

### 5.4.1 위성자료 기반의 집중호우 강우예측모형의 Computing Power 개선

집중호우를 한 두시간 미리 예측하기 위해서는 일반적으로 연속되는 관측하는 영상 이미지로부터 구름의 이동벡터를 알아내고, 그 이동벡터를 기반으로 하여 향후 구름이 어디로 이동할지를 알 수가 있다(그림 23). COMS 위성에서는 한반도 지역에서 매 15분마다 일정하게 영상 자료를 얻게 되는데 연속적인 영상이미지로부터 교차상관계수 값을 구하면 이동벡터를 산출할 수 있다.

교차상관 기법은 연속되는 구름 자료에 대해서 두 윈도우 사의 상관계수의 최대치를 찾아냄으로써 구름의 이동방향과 이동속도를 산출하는 방법이다. 이 기법은 연속되는 COMS 위성영상에서 이전  $T_1$ 에서 다음 관측  $T_2 = (T_1 + \Delta T)$ 의 구름이 이동할 수 있는 최대 반경 내에서 최대상관을 가진 윈도우를 찾고 벡터를 산출하게 된다(그림 24).

윈도우의 크기에 따라서 상관계수 값이 달라져서 이동벡터가 불규칙으로 형성이 되거나 넓은 규모에서 갑자기 변화하는 구름의 이동벡터를 잘 표현 못하게 된다. 따라서 최적의 윈도우 크기를 결정하여야 하며, 거기에 따른 컴퓨팅 계산시간도 반드시 고려하여야 한다. 이번 연구에서 개발된 이동벡터는 각 픽셀마다 이동벡터를 산출하기 때문에 컴퓨팅 파워의 능력에 따라 계산되는 속도가 틀려진다. 일반적으로  $1 \times 1$  픽셀 기반의 이동벡터를 산출하기 위해서는 병렬 컴퓨팅을 적용하지 않고 처리시간은 10분대의 시간이 소요된다.

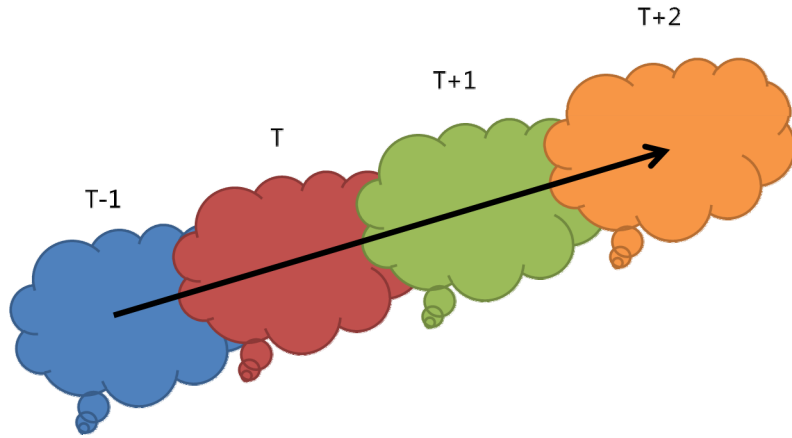


그림 23 구름벡터를 이용한 강우 예측 기법

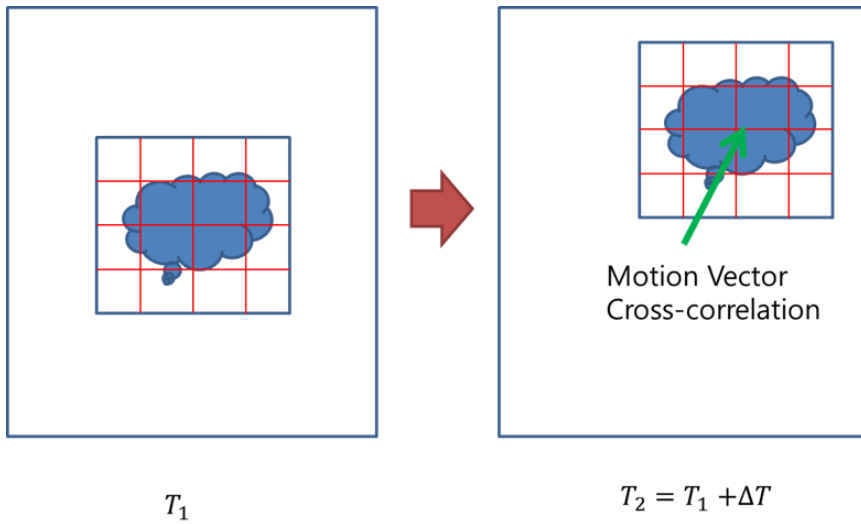


그림 24 교차상관방법을 이용한 구름벡터 산정

### 5.4.2 위성자료 기반의 집중호우 강우예측모듈의 Computing Power 개선

집중호우 예측을 예측할 때 중요한 사항은 1-2시간의 예측능력과 실시간 처리 성능에 있다. COMS에서 실시간으로 들어오는 영상이미지를 자료를 이용하여 이동벡터를 산출할 때 현재는 상업용 소프트웨어인 MATLAB으로 개발되어, 알고리즘의 계산 성능을 향상하는데 한계가 있다. 또한, 개발환경을 구축하는데 라이선스 비용이 발생된다. 이러한 한계점을 개선하기 위해서 Python 개발언어를 중심으로 FOSS (Free and Open Source Software) 기반의 개발환경을 구축하고 이식(Porting)하였다.

FOSS 기반의 개발환경은 Python 통합개발환경을 제공하는 Spyder를 중심으로 개발언어 Python, SciPy 라이브러리, Numpy 라이브러리를 이용하여 구축하였다 (표11).

표 11 FOSS 기반의 개발환경

Softwa re	License	Etc
Spyder 2.3.6	MIT License	Python IDEa
Python 2.7	GPL-compatibleb	Programming language
SciPy 0.14.0	SciPy licensec	Library for Python
Numpy 1.9.2	Numpy licensed	Library for Python

<sup>a</sup> 통합개발환경 (IDE, Integrated Development Environment)

<sup>b</sup> <https://www.python.org/download/releases/2.7/license/>

<sup>c</sup> <http://www.scipy.org/scipylib/license.html>

<sup>d</sup> <http://docs.scipy.org/doc/numpy/license.html>

Python 기반의 개발환경에서 기존에 작성된 MATLAB 소스코드를 Python으로 이식하였다. MATLAB 함수와 Python 함수의 대칭 함수목록은 표 12와 같으며, cart2pol, ind2sub, NCC(Normalized Cross Correlation) 알고리즘은 3<sup>rd</sup> 라이브러리(third-party library)에서 제공하지 않아 별도로 구현하였다.

표 12 집중호우 강우예측 모델에 적용된 MATLAB 함수와 Python 함수의 대칭

MATLAB Function	Python		Etc
	Library	Function	
./	numpy	divide	
fopen/fread	numpy	fromfile	binary data
isnan	numpy	isnan	
load	numpy	genfromtxt	
ones	numpy	ones	
prod	numpy	prod	
transpose	numpy	transpose	
zeros	numpy	zeros	
randn	numpy.random	standard_normal	
atan2	numpy/matha	atan2	
ceil	numpy/matha	ceil	
floor	numpy/matha	floor	
max	numpy/matha	max	
min	numpy/matha	min	
round	numpy/matha	round	
sqrt	numpy/matha	sqrt	
conv2	scipy.signal	convolve2d	
cart2pol		cart2pol	implementedb
ind2sub		ind2sub	implemented
NCC Algorithm		NCC Algorithm	implemented

a numpy와 math는 각각 matrix 변수와 일반 변수에 적용

b Python 개발언어로 직접 구현

## 6. 연구내용

### 6.1 사례연구(부산 8월 25일 집중호우)

강우예측시스템의 검증사례로 2014년 8월 25일 경남 및 부산 일대 홍수를 야기한 호우 사상에 대해서 적용하였다. 24일 밤부터 내리기 시작한 집중호우는 오후 1시부터 더 많은 비가 내려 금정산을 중심으로 시간당 최고 130mm의 집중호우가 쏟아졌다. 금정구에는 오후 4시 현재 242mm, 북구에는 222mm의 강수량을 기록했다(그림 25, 그림 26, 표 13). 부산시 및 기장군 일원에는 시간당 130mm, 100년에 한번 발생할 정도의 기습 집중호우로 인하여 인명피해는 10명으로 사망 5명, 실종 5명이며, 이재민은 86세대 135명, 주택 86동이 침수되었고 농작물은 412ha가 침수 되었다.

표 13 2014년도 8월 25일 강우량

구분	창원	북창원	양산	금산	순천	김해	완도	군산	부산
(8월 24일 이후,mm)	248.0	246.0	177.0	154.1	139.5	133.5	118.0	117.3	116.5

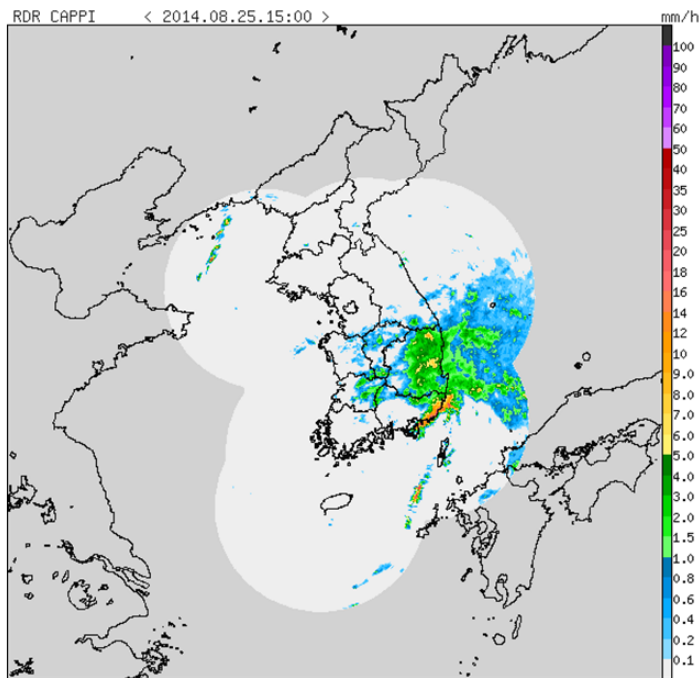


그림 25 2014년도 8월 25일 15시 레이더 영상(제공 : 기상청)

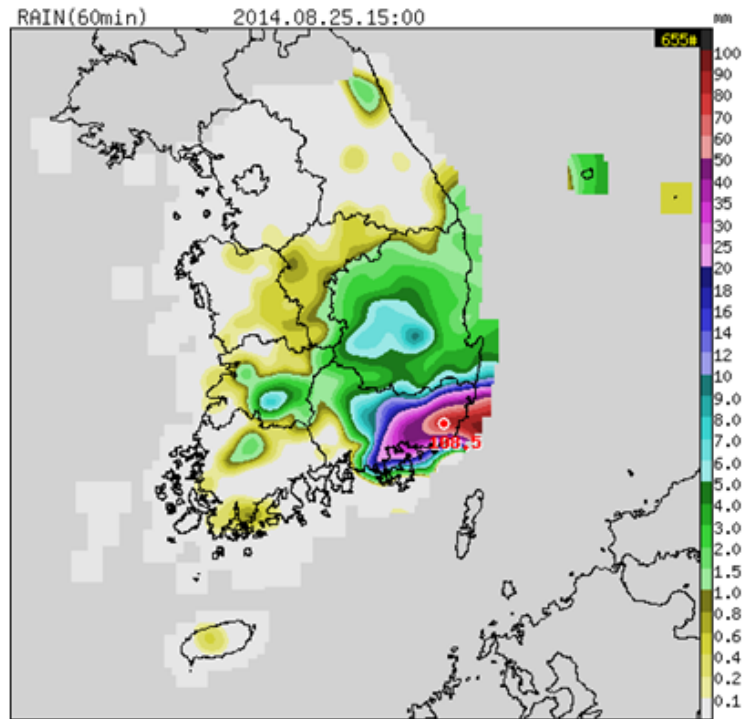


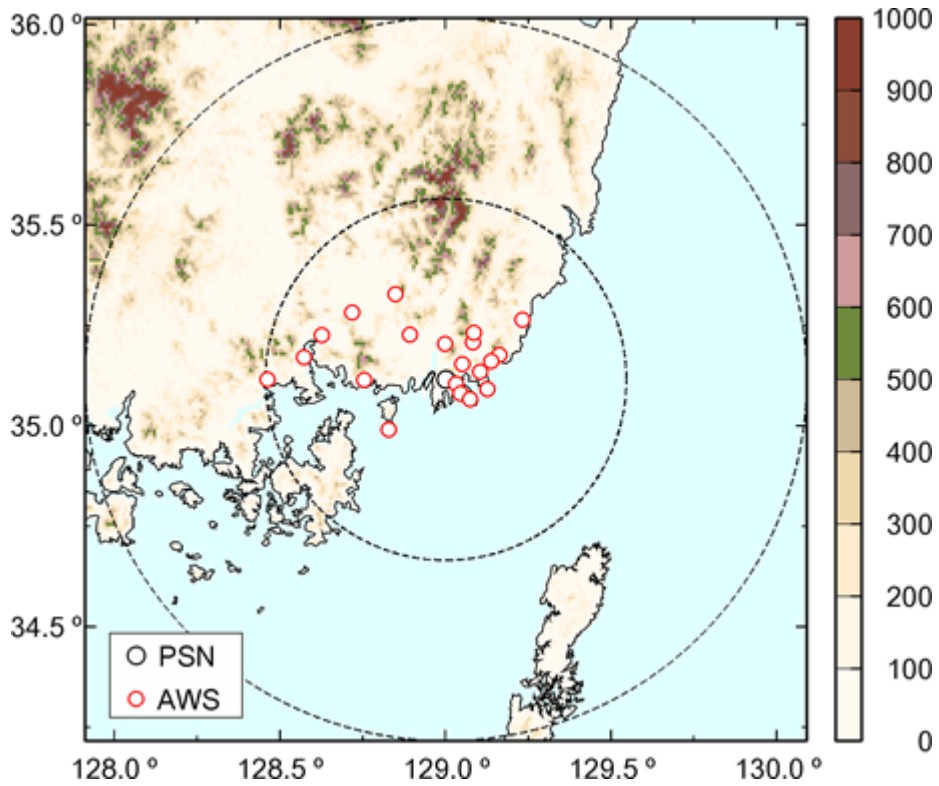
그림 26 2014년도 8월 25일 15시 AWS합성영상(제공 : 기상청)

부산 및 기장에 많은 집중호우가 내린 이유는 22년 만에 가장 늦은 장마로 고온다습한 북태평양고기압과 차가운 대륙고기압이나 오호츠크해기단이 세력다툼을 벌이면서 장마전선을 만들어 비가 내려야 하는데, 올해는 바이칼호 동쪽에서 강력한 고기압이 발달해 제자리에 머물러 있기 때문에 장마가 늦어졌다. 편서풍이 올해 발생한 블로킹에 막혀 블로킹 남과 북으로 불게 되는데, 북쪽으로 가는 바람은 같은 위도의 바람보다 더운 공기가되고, 남쪽으로 가는 바람은 차가운 공기가 된다. 바로 이 차가운 공기가 한반도 상공을 지나 북태평양고기압의 발달을 막으면서 장마가 늦어졌고 8월 말에 늦은 장마로 인한 집중호우가 발생하였다.

또하나의 이유는 엘니뇨의 영향 때문이다. 엘니뇨가 발생하는 해에는 북태평양고기압이 한반도쪽으로 크게 확장하지 못해 장마전선을 위로 밀고 올라오지 못하는 것이다. 우선 8월 집중호우의 원인은 일찍 일본쪽으로 물러난 북태평양 기단의 뜨거운 공기와 한국 북서쪽에 위치하고 있던 시베리아 기단 사이에 통로가 만들어지고 급기야 한국 남서쪽에서 저기압이 형성되어 정체전선이 만들어졌기 때문에 홍수로 인한

침수피해를 입었다.

GPM IMERG자료와 GPM 기반 새로운 강우 알고리즘을 비교 검증을 위하여 부산 홍수 사상이 있었던 2014년 8월 25일 일자 구덕산 레이더와 지상관측자료(AWS) 자료를 수집하였다. 구덕산 레이더는 GPM IMERG자료와 비교하기 위하여 30분 10km 간격의 격자로 격자화 하였고, COMS 자료와 비교하기 위하여 4km 격자화 하였다(그림 27). AWS자료는 부산주요지역의 8월 25일 하루 강우량을 나타내었다(그림 28). 그 중에서 특히 부산에서도 비가 많이 온 북구, 금정구, 동래, 기장 검증 관측자료를 이용하였다(그림 29, 그림 30). COMS자료는 그림 31에서 보듯이 오전 11시부터 오후 3시까지 서해안쪽에서 발달한 비구름대가 빠른 시간을 통해서 동쪽으로 이동하며, 경남과 부산일대에 많은 집중호우가 있었다. COMS는 평균 10분 간격의 격자화된 자료를 수집하였고 TRMM 기반 강우알고리즘과 GPM 기반 강우 알고리즘에 적용하여 검증하였다.



Radar site	PSN
Wavelength	11.06 cm (S-band)
Bin spacing	250 m
Range	240 km
Number of elevation angle	13 (0.05° ~ 15.83°)
Scan interval	10 minute
Location	35.1153°N, 29.0014°E

그림 27 구덕산 레이더와 부산지역 AWS 관측지역

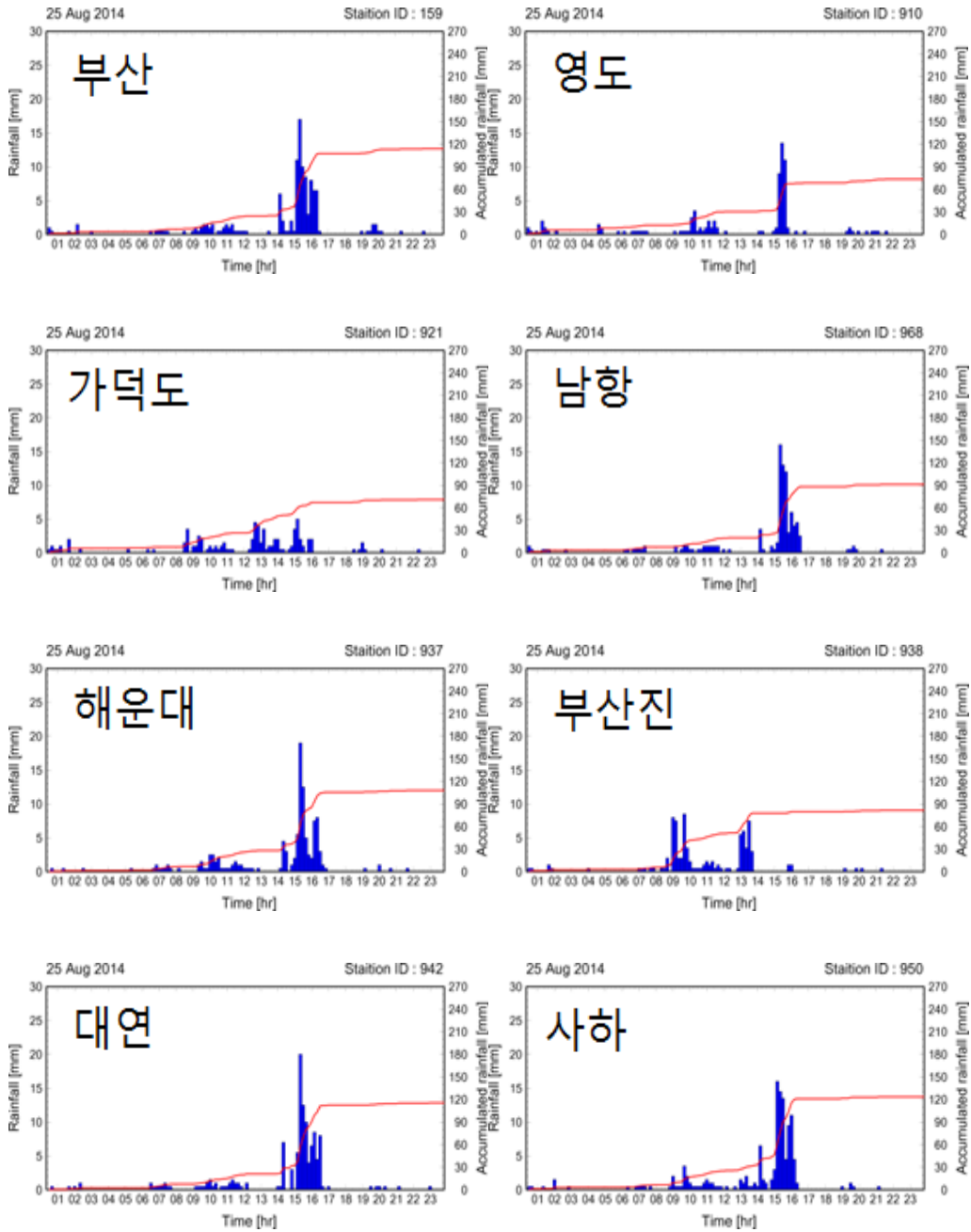


그림 28 2014년도 8월 25일 부산지역 AWS 강우량

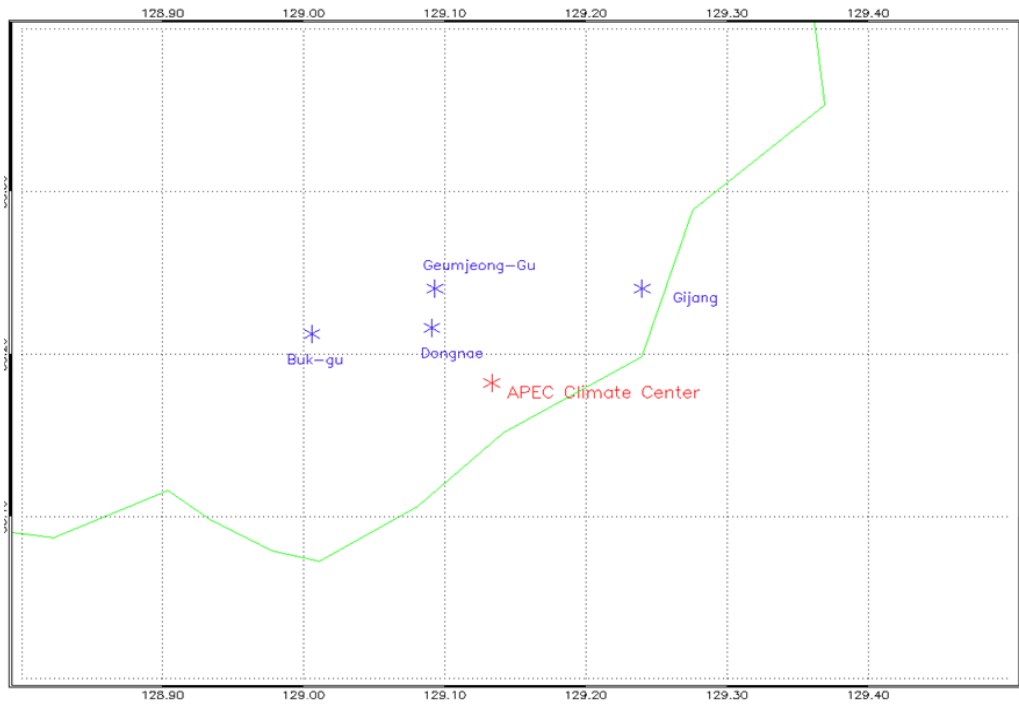


그림 29 2014년도 8월 25일 주요 검증 AWS 위치

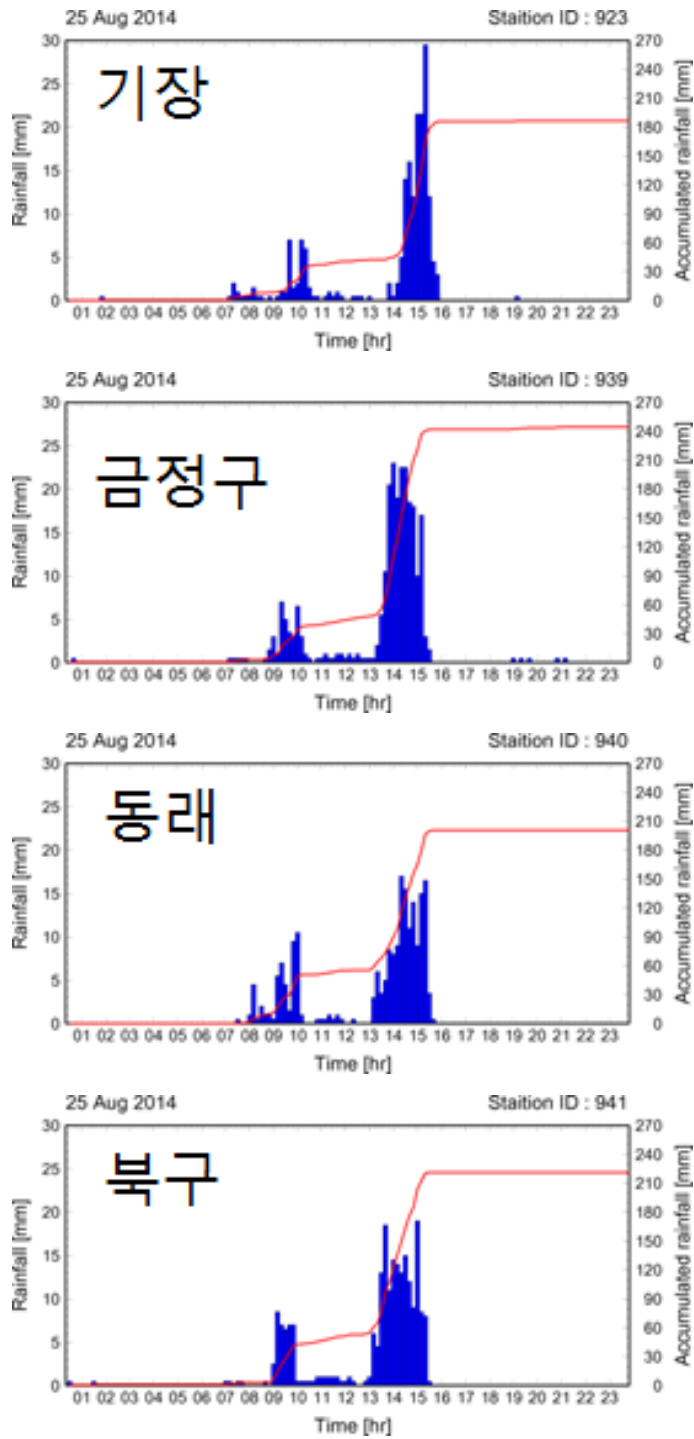


그림 30 2014년도 8월 25일 주요 검증 AWS 강우량

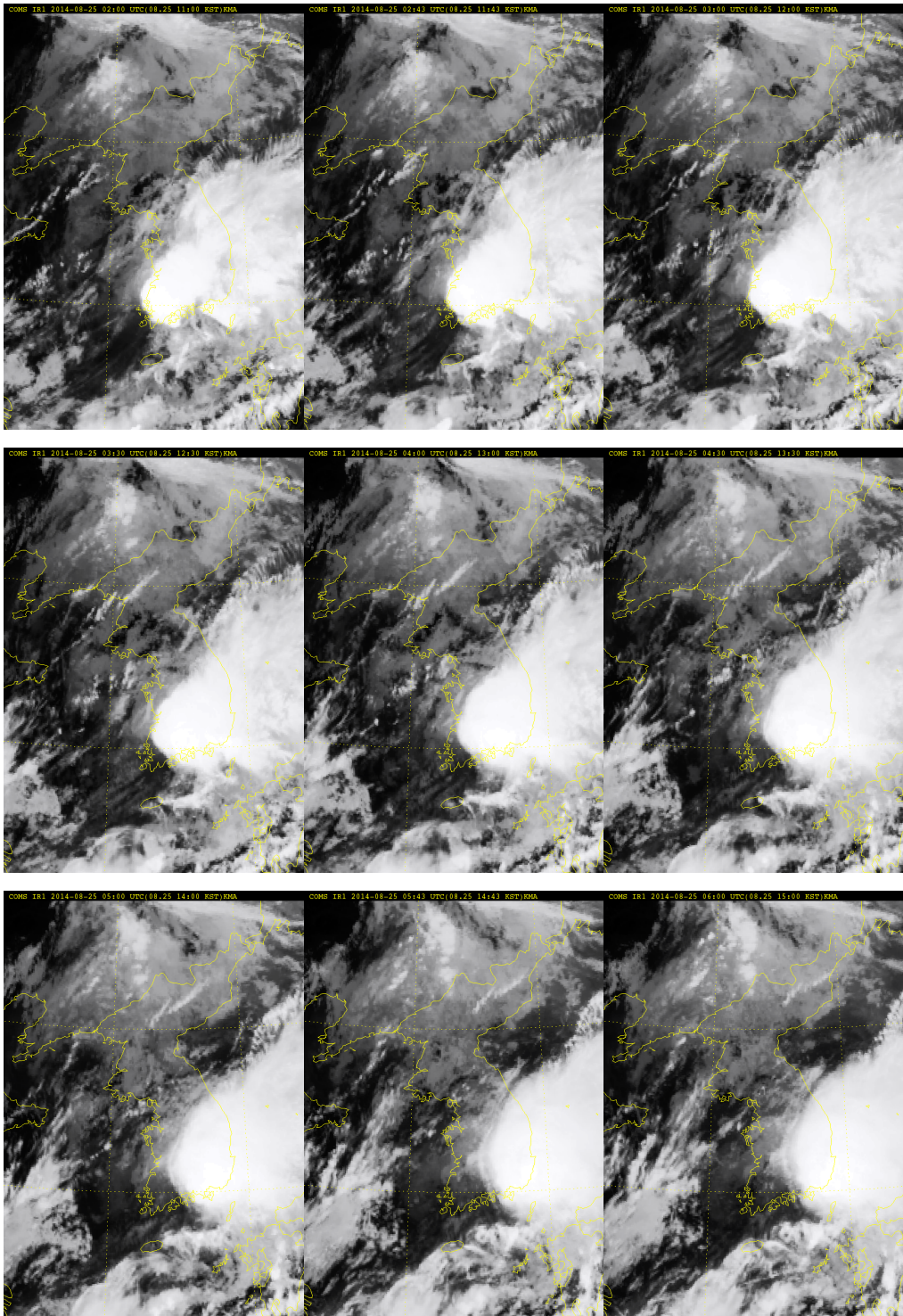


그림 31 2014년도 8월 25일 COMS 영상이미지

## 6.2 GPM IMERG 검증

GPM IMERG자료는 NASA Science팀에서 GPM 핵심코어 위성과 강수 산출 가능한 협력 위성을 결합하여 30분 10km의 해상도를 강수자료 만들어서 제공하고 있다. APEC 지역이나 태평양 도서국 지역의 홍수 정보로써 GPM IMERG 자료 활용이 가능한지 알아보기 위하여 먼저 한반도 지역에 대한 검증을 실시하였다. GPM IMERG 자료는 활용범위에 따라서 latency 6시간 후 자료를 제공하는 early run 데이터와 18시간 후에 제공하는 Late run 데이터, 그리고 최종적으로 지상관측자료와 보정한 Final run 자료를 제공한다.

Early, Late run 데이터는 최근 4월부터 현재까지 자료를 제공하고 있으며, Final run 자료는 2014년 3월부터 2015년 6월까지 자료를 제공하고 있다. 먼저 Early run 과 Late run 자료를 4월 5월 6월에 비교 검증하였다(그림 32). 표 14에서 알 수 있듯이 Early 와 Late run의 상관계수 값은 0.8정도이며, RMSE 값은 3.5mm/h이다.

표 14 2014년도 8월 25일 부산홍수사상 Early run/Late run 비교

	R	RMSE
4월	0.83	3.16
5월	0.79	3.70
6월	0.76	4.20

Early run, Late run, Final run자료가 중첩되는 4월, 5월, 6월에 대해서 Early run값과 Final run 값을, Late run과 Final run값을 비교하였다(표 15). Early run 자료보다 Late run 자료가 Final run 자료에 더 잘 맞는 것을 볼수 있다(그림 33). 시간에 의존도가 높은 홍수자료는 Early run 가뭄이나 농업에는 Late run 자료가 더 유용하다는 것을 알 수 있다.

표 15 2014년도 8월 25일 부산홍수 Early/Late run값과 Final run 검증

	Month	R
Early/ Final	4	0.52
	5	0.33
	6	0.48
Late/ Final	4	0.58
	5	0.55
	6	0.60

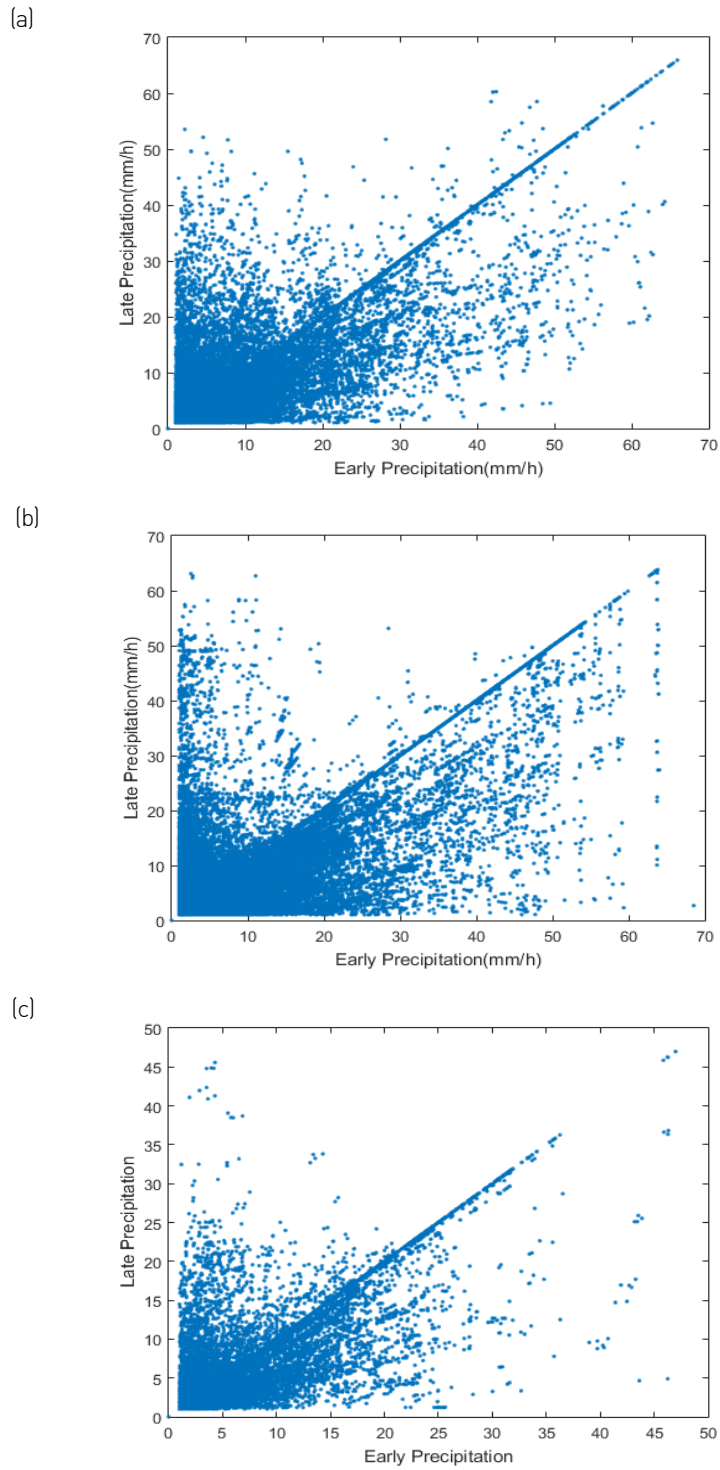


그림 32 Early run, Late run (a)4월, (b)5월, (c)6월 비교

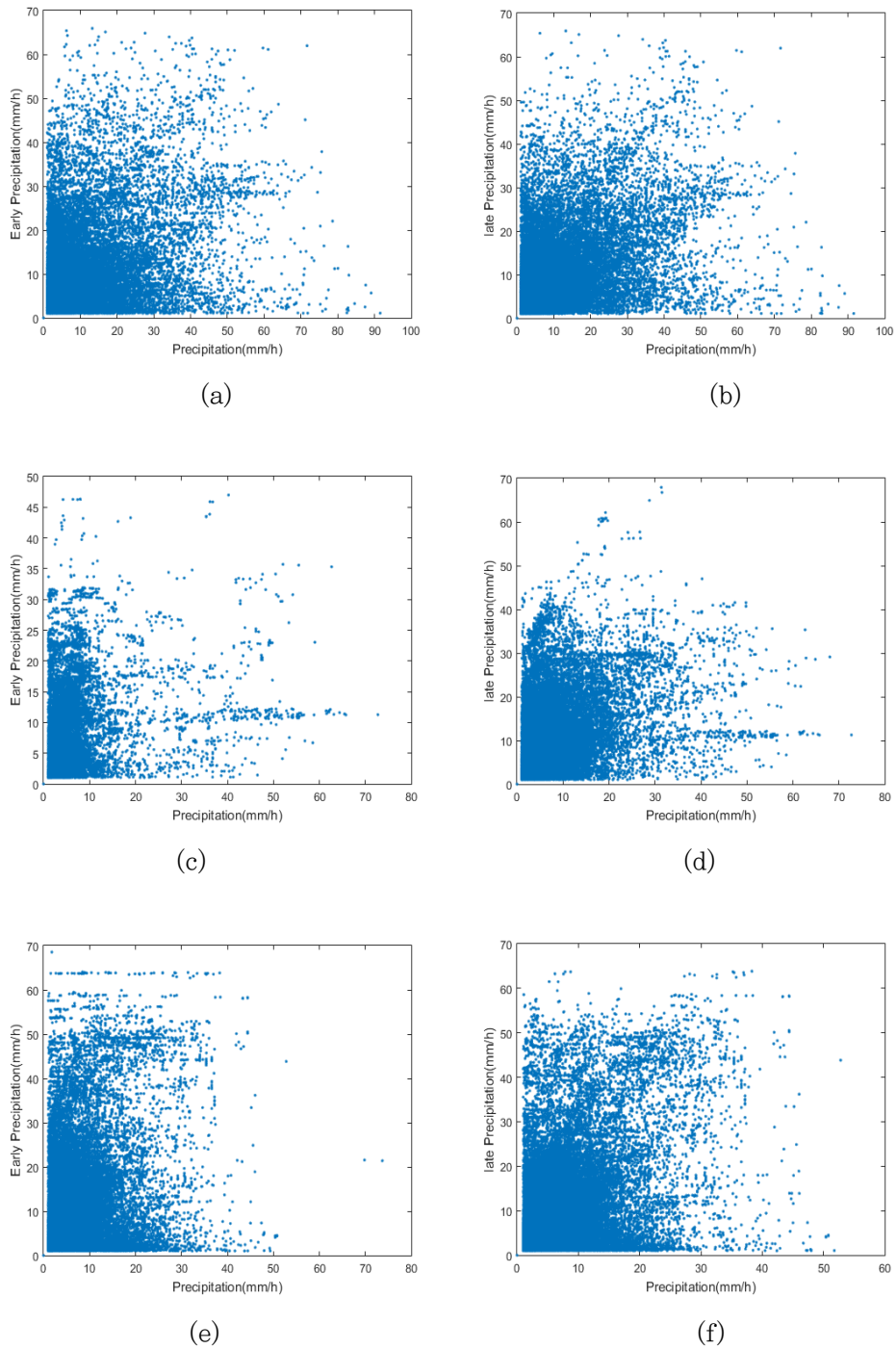


그림 33 Early run, Final run (a)4월, (c)5월, (e)6월 비교  
Late run, Final run (b)4월, (d)5월, (f)6월 비교

Final run 자료는 홍수사상에 대해서 얼마나 잘 맞는지 알아보기 위하여 레이더 자료와 지상관측자료와 2014년 8월 25일 홍수사상에 적용하였다. 그림 34은 30분 간격의 부산지역 GPM Final run 데이터 그림이고 그림35은 그 시간의 레이더 자료를 나타낸다. 그림에서 보듯이 IMERG Final run 자료가 상대적으로 레이더 자료보다 비가 많이 오는 것을 볼수 있다. 이 자료들을 AWS 비교해 보면 다음과 같다. 그림 36에서 볼 수 있듯이 IMERG자료가 레이더 자료에 비해서 지상관측자료에 잘 맞는 것을 알 수 있다. IMERG Final run 자료는 이미 지상관측자료로 보정이 되어서 잘 맞는 것으로 판단된다.

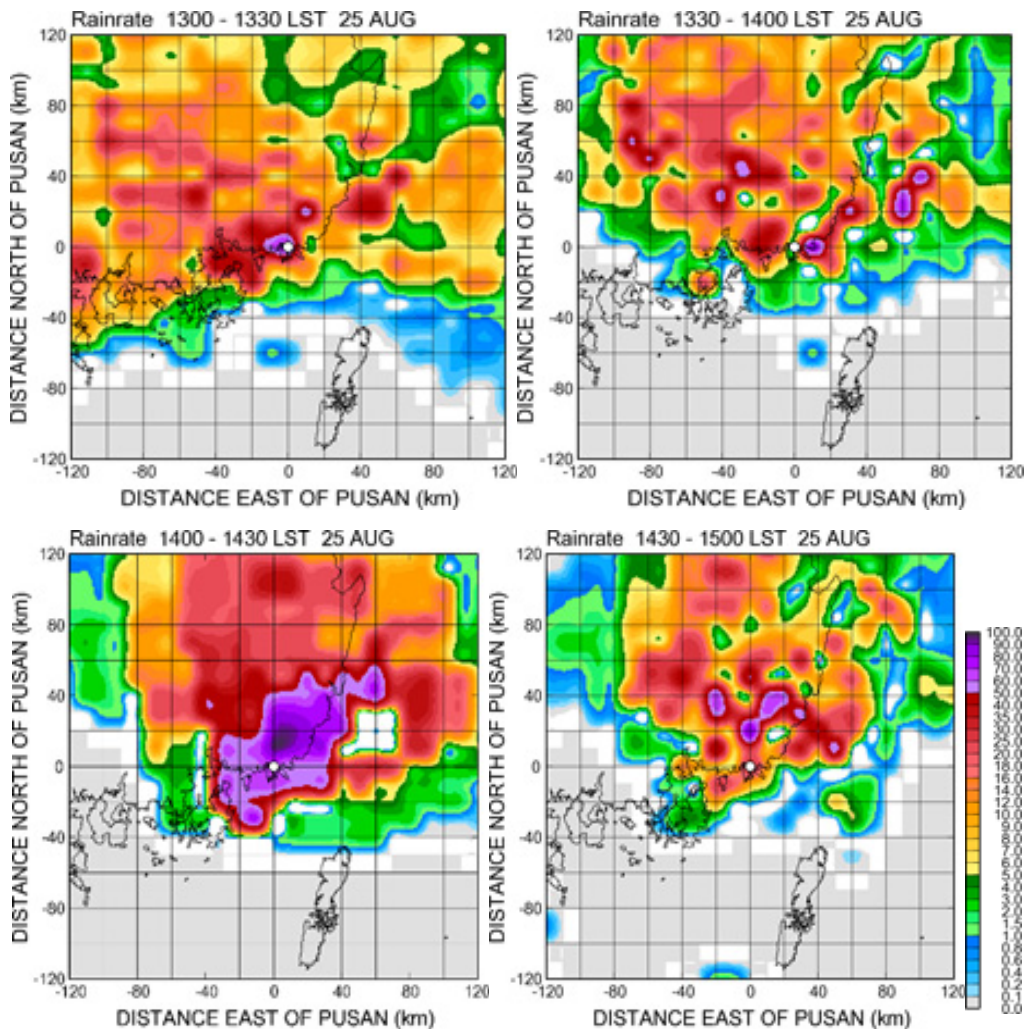


그림 34 GPM Final run 2014년도 8월 25일 영상



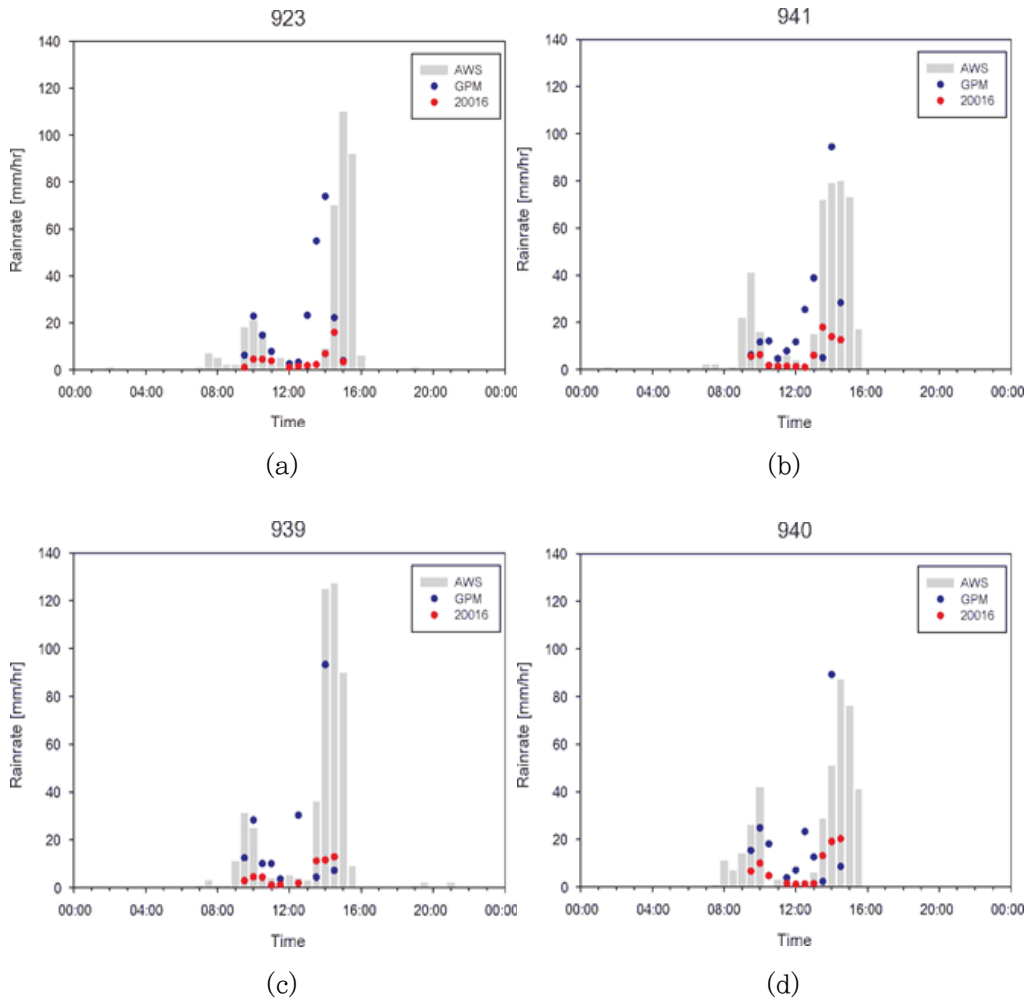


그림 36 2014년 8월 25일 GPM IMERG와 레이더 지상 관측자료(AWS) 비교  
(a)기장(923), (b)북구(941), (c)금정구, (d) 동래

Early run 자료는 Latency 6시간이후 처음으로 생산되는 자료로 GPM Level 3 자료 중 홍수사상에 대해서 중요한 자료 중의 하나이다. 앞에서 보았듯이 Late run 자료와는 비교적 자료가 맞지만 Final run 자료와 비교할 시 상대적으로 Late run 자료에 비교해서 정확성이 떨어진다. 최근에 Early run의 자료 검증을 하기 위해서 2015년 10월 1일자 부산지역에 내린 강수자료를 수집하여 비교하였다. 그림37와 그림 38의 위성영상과 레이더 영상에서 보듯이 패턴은 레이더 자료와 어느 정도 맞아거나 지상관측자료 비교에서는 레이더에 비교해서도 잘 맞지 않음을 알 수 있다(그림 39).

GPM 10km 해상도 자료와 지상관측자료의 포인트 자료에서 가지는 에러 일수도 있으며, GPM Early run 모드가 가지는 에러 일수도 있다. 향후 AWS 자료를 면적강우량으로 변환하여 자료를 비교가 필요하다고 판단된다.

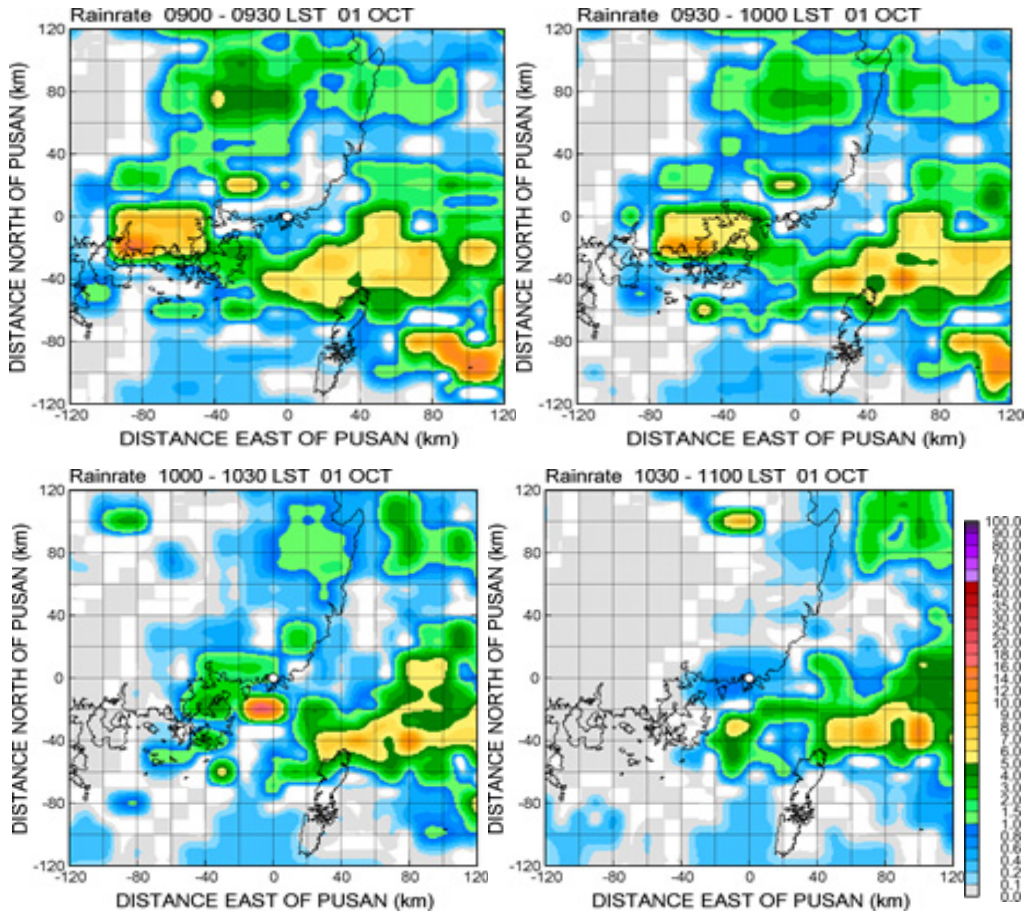


그림 37 GPM Early run 2015년도 10월 1일 영상

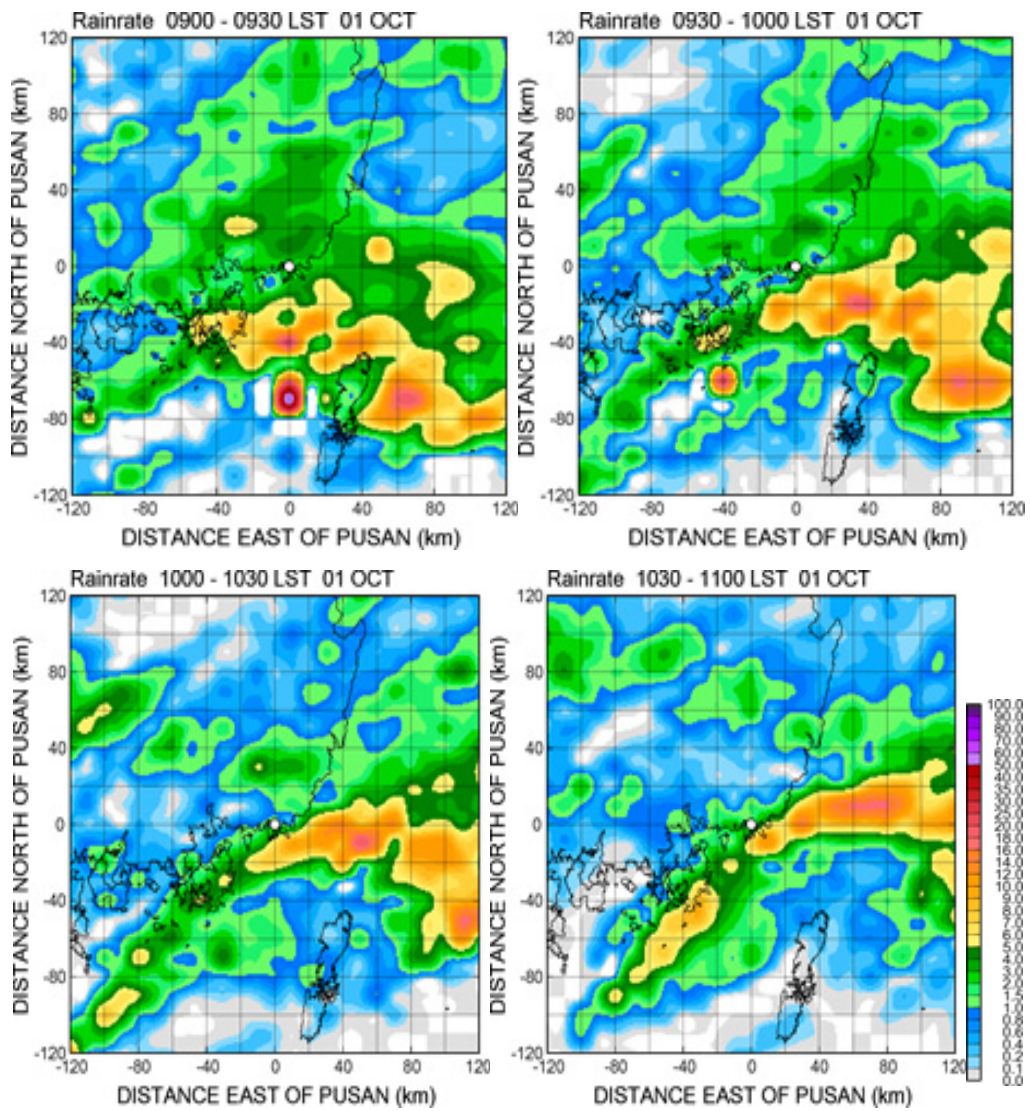


그림 38 레이더 2015년도 10월 1일 영상

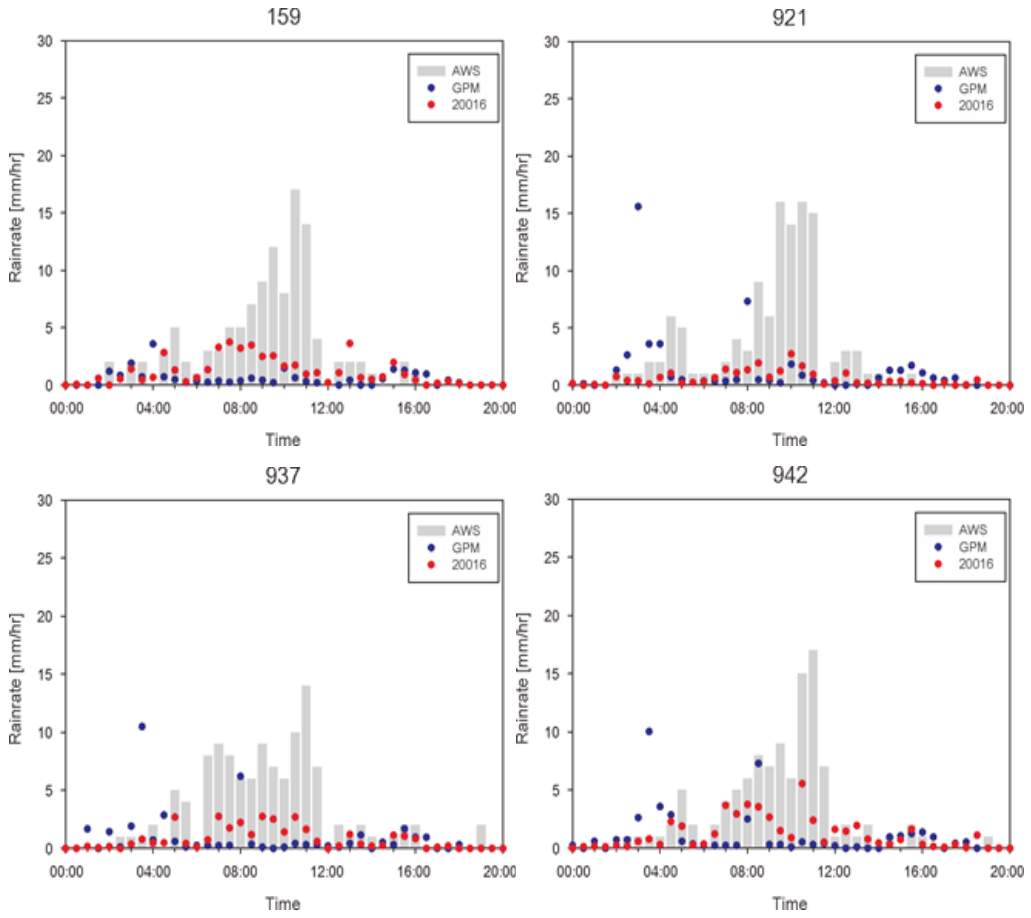
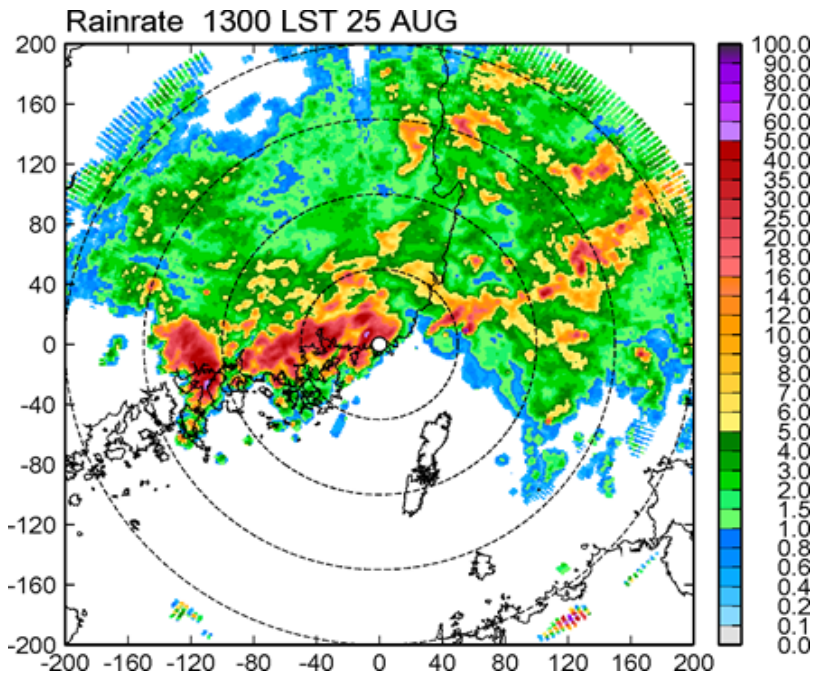


그림 39 2015년도 10월 1일 GPM IMERG Early run와 레이더 지상 관측자료(AWS) 비교(a) 기장(923), (b)북구(941), (c)금정구, (d) 동래

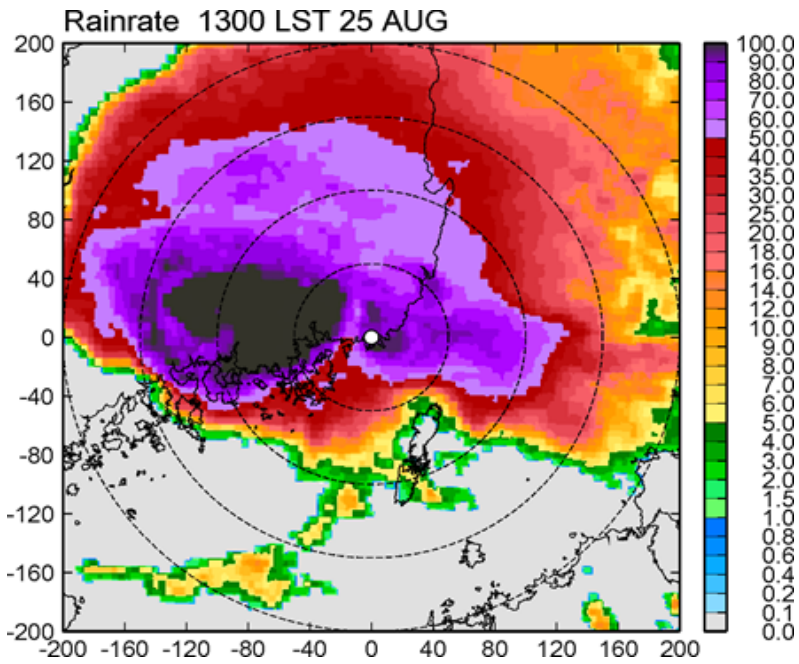
### 6.3 강수 알고리즘 적용(구름분류-레이더 활용)

Rain/no Rain 구름 분류함에 있어서 한국과 같이 레이더 기반 네트워크가 잘 구축된 나라에서는 지상 레이더를 이용하여 rain/no rain 구름 판단하는 것이 대단히 유용하다. 2015년 8월 25일 레이더 영상과 위성 영상을 그림40에 나타내었고, TRMM 기반 강수알고리즘을 적용하여 지상 관측 자료와 비교한 자료와 레이더를 이용하여 강수구름 유무만 판단하여 적용한 결과를 그림 41에 나타내었다. 기장(923)에서 11시 반에서 1시 반 사이에 지상관측자료는 강수가 없는 자료로 나오지만 COMS 알고리즘에서 산출한 강우량을 보면 비가 많이 내리는 것을 볼 수 있다.

레이더 자료를 보정계수로 한 그림을 보게 되면 비가 rain/no rain 구름 분류가 상당히 잘 되는 것을 볼 수가 있다. 금정구(939)도 10시부터 1시까지 레이더의 rain/no rain 구름 분류만 적용해도 정지궤도 기반 COMS가 가지는 간접적인 강우량 추정의 어려움을 많이 개선 시킬 수 있음을 알 수 있다(그림 42). COMS 알고리즘은 적외 채널 온도, 구름 운정 온도를 가지고 간접 강우량을 추정하기 때문에 비가 오지 않지만 상층운의 구름인 경우는 비가 오지 않지만 비가 많이 오게 되는 에러 값을 내포하게 된다. 향후 rain/no rain 구름분류뿐만 아니라 실질적으로 레이더와 위성자료를 결합하게 되면 더 좋은 결과값을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

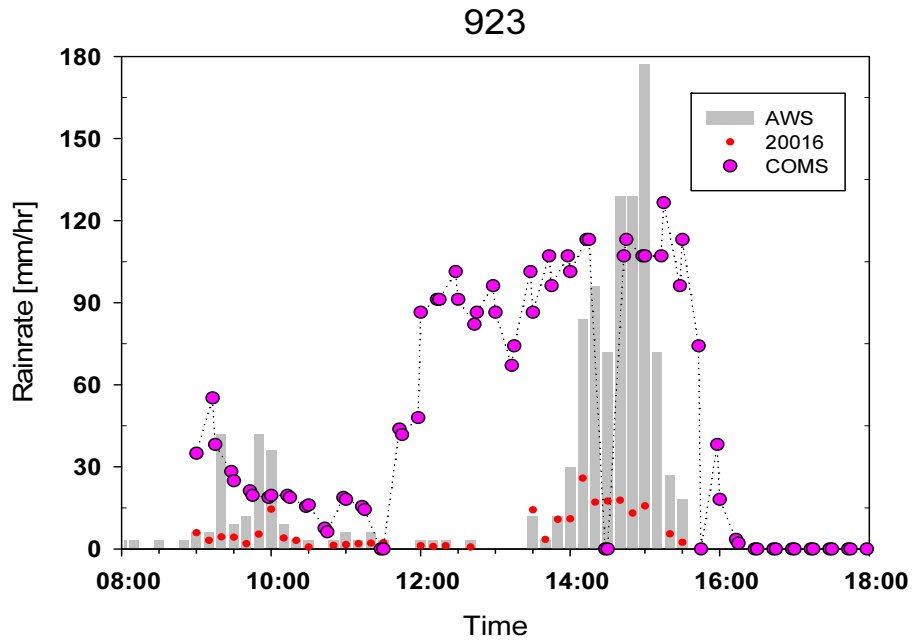


(a)

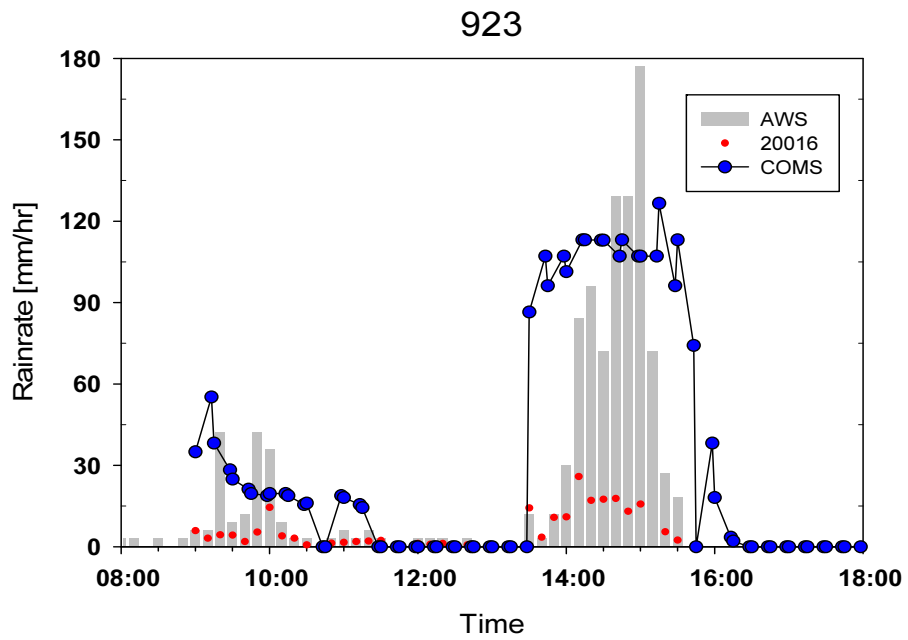


(b)

그림 40 2014년 8월 25일 13시 (a) 레이더 영상 (b) 위성 영상

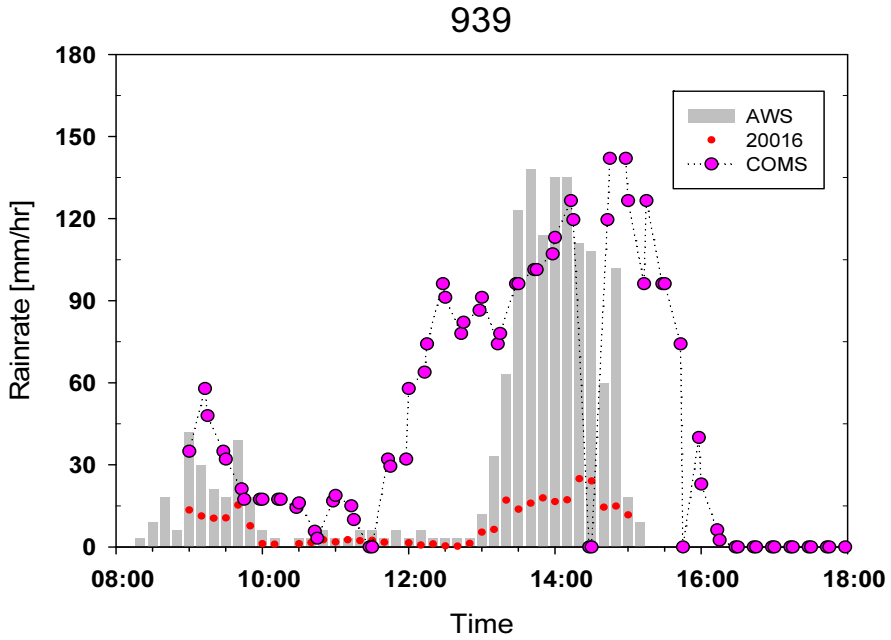


(a)

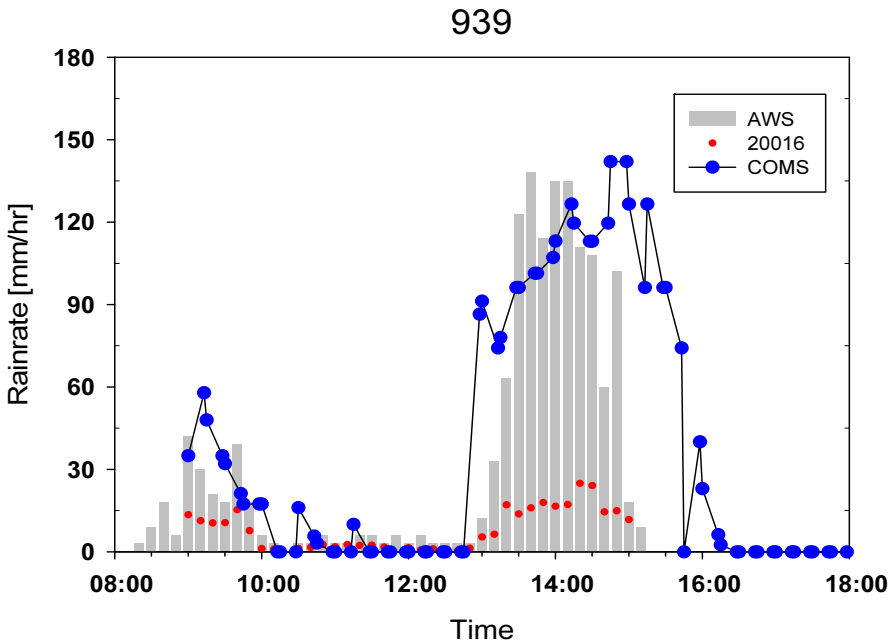


(b)

그림 41 기장지역 COMS 강수량 (a)위성 구름 보정 (b)레이더 구름 보정



(a)



(b)

그림 42 금정구지역 COMS 강수량 (a)위성 구름 보정 (b)레이더 구름 보정

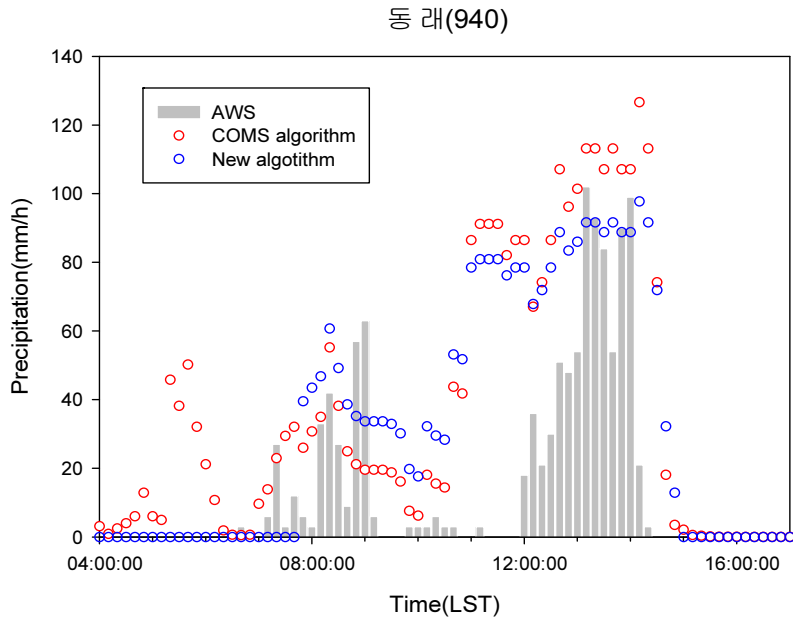
## 6.4 GPM기반 강수 알고리즘 검증

GPM기반 새롭게 개발한 강수 알고리즘의 비교 검증을 실시하였다. 2014년도 8월 25일 04:00시부터 16:00 COMS raw 자료를 수집하였다. 이전 TRMM 기반 알고리즘과 본 연구에서 개발한 GPM 기반 강수구름분류 기법이 들어간 새로운 알고리즘자료를 각각 비교분석하였다.

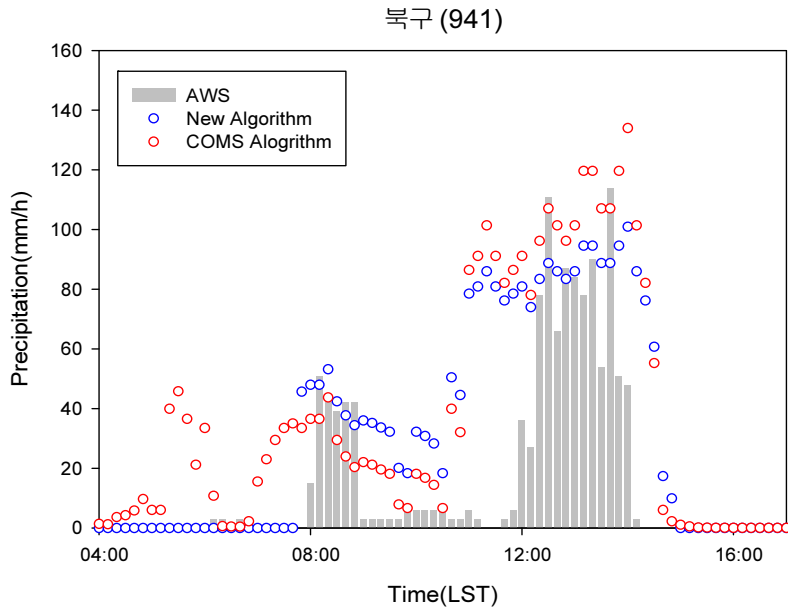
동래와 북구 4시에서 8시 사이의 그림이 보듯이 이전 TRMM 기반 알고리즘보다는 강수 구름과 구름이 잘 판별이 되었지만 9시부터 12시까지의 구름 분류는 어느 정도 어려움이 있었다. 강수량만 보게 되면 새롭게 개발된 GPM알고리즘이 50mm/h 이하에서는 이전 알고리즘보다 비가 더 많이 더 내리고 50mm/h 이상인 구간에서는 이전 알고리즘보다 강수량이 조금 더 적게 내린다. 100mm/h 이상 되는 구간에서 이전 알고리즘이 특히 과대 추정하는 경향이 많이 개선 된 것을 볼 수 있다.

2014년 8월 부산 홍수 사상에 대해서는 확실히 이전 버전의 알고리즘보다는 많이 개선되었음을 알 수 있다. 이는 GPM위성이 TRMM 위성의 단일 레이더 센서를 이용했을 때 보다 두 개의 레이더 센서와 많은 수의 마이크로파 센서를 이용한 GPM 위성이 보다 정확한 강수량을 제공하기 하였기 때문일 것으로 판단되며, 더불어 GPM에서 제공하는 convective/stratiform 등의 강수량 이외의 정보를 이용하여 좀더 집중호우에 특화된 알고리즘을 개발하였기 때문에 convectiv 집중호우의 부산 홍수 사상에 대해서 이전 알고리즘보다 더 향상된 결과가 나타난 것으로 판단된다(그림 43, 그림 44).

따라서 집중호우 및 태풍 등의 다양한 사례연구에서의 검증이 필요하며, 이번 검증은 홍수 사상에 대하여 면적 및 포인트 간의 비교 검증이라 향후 면적 강수량 비교 통한 비교 검증이 필요하다.



**그림 43** 2014년 8월 25일 동래 관측지역 TRMM 기반 알고리즘(빨간원), GPM기반 알고리즘(파란원) 비교 검증 결과



**그림 44** 2014년 8월 25일 복구 관측지역 TRMM 기반 알고리즘(빨간원), GPM기반 알고리즘(파란원) 비교 검증 결과

## 6.5 위성 레이더 결합 검증

본문에서 언급하였듯이 30mm/h의 레이더 패턴정보와 TRMM기반 영상 자료를 오버레이 하여 30mm/h 이하 레이더에 가중치를 준 강수정보와 30mm/h 이상에서 위성강우에 가중치를 준 결합된 강수정보를 산출하고 지상 관측 자료 AWS 합성장과 비교하였다. 레이더에서 패턴은 비슷하나 과소 추정하는 부분이 위성영상으로 대체되면서 정확도가 향상되었다. 향후 위성 레이더에 대한 결합방법에 대한 연구가 필요하다(그림 45).

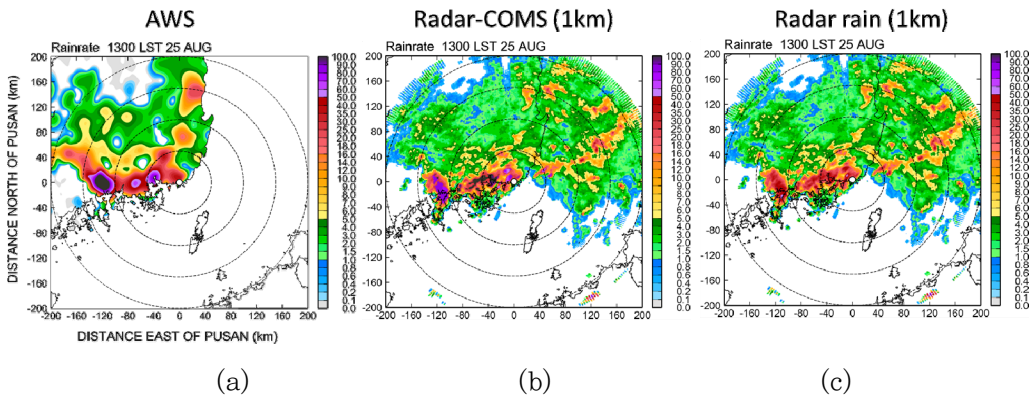


그림 45 2014년 8월 25일 13시 (a)AWS (b)COMS (c)구덕산 레이더 영상 이미지

## 6.6 예측모형 Python 변환 결과

Python으로 이식이후 MATLAB과 Python에서 계산된 15분 후 예측결과를 비교하였다. Matlab에 비교하여 Python 각각의 라이브러리에 대한 결과값의 거의 일치하였다(그림46, 표16). 두 계산 결과의 상관계수는 0.997591로 매우 유사하게 나왔다(표 17).

표 16 Matlab과 Python 계산 비교

NCC 구현방법	상관계수 (+15 min 예측)
Customized MATLAB Function <sup>a</sup>	0.997591
Scipy function <sup>c</sup>	0.996444

<sup>a</sup> Python으로 직접 구현한 NCC 함수

<sup>b</sup> SciPy 라이브러리의 함수

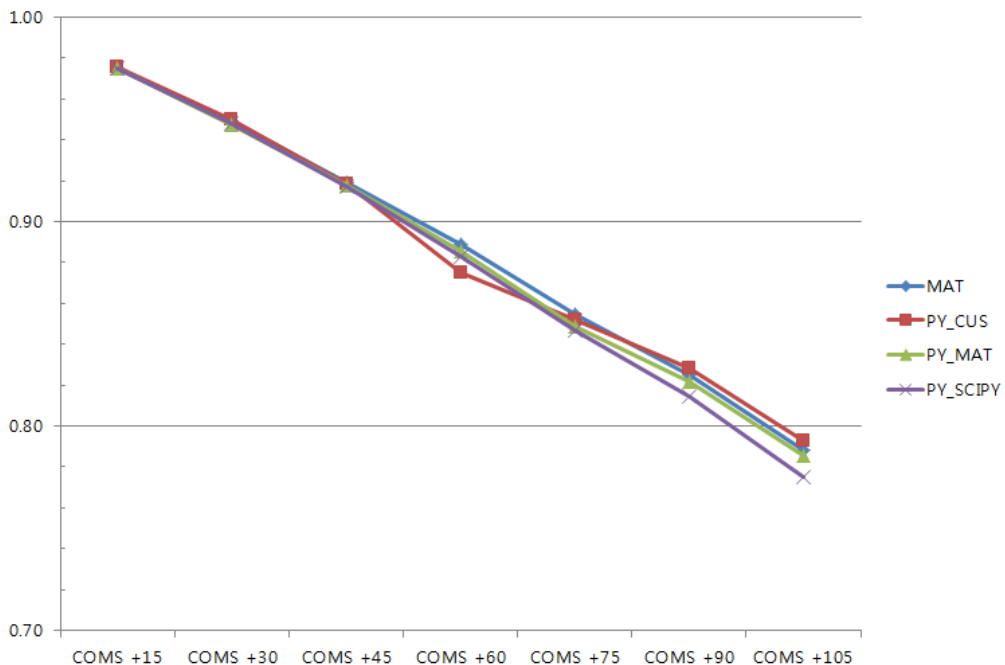


그림 46 Matlab과 Python 예측성능 비교

표 17 COMS 예측에 대한 Matlab과 Python 계산 비교

	Bolaven	15분 자료			30분 자료		
		cus	mat	scipy	cus	mat	scipy
+15	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201208271530.bin.txt	0.9253	0.9222	0.9244	0.9255	0.9222	0.9245
+30	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201208271545.bin.txt	0.9058	0.8998	0.9036	0.9068	0.9000	0.9030
+45	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201208271600.bin.txt	0.8846	0.8786	0.8817	0.8859	0.8787	0.8810
+60	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201208271615.bin.txt	0.8627	0.8533	0.8572	0.8644	0.8538	0.8566
+75	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201208271630.bin.txt	0.8319	0.8235	0.8253	0.8341	0.8231	0.8246
+90	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201208271645.bin.txt	0.8032	0.7926	0.7924	0.8049	0.7908	0.7911
+105	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201208271700.bin.txt	0.7709	0.7628	0.7592	0.7732	0.7607	0.7585
+120	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201208271715.bin.txt	0.7379	0.7272	0.7231	0.7426	0.7278	0.7226

	Bolaven	15분 자료			30분 자료		
		cus	mat	scipy	cus	mat	scipy
+15	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201408250330.bin.txt	0.9576	0.9556	0.9571	0.9572	0.9556	0.9573
+30	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201408250345.bin.txt	0.9265	0.9216	0.9243	0.9247	0.9215	0.9251
+45	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201408250400.bin.txt	0.8997	0.8951	0.8975	0.8985	0.8955	0.8988
+60	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201408250415.bin.txt	0.8765	0.8710	0.8729	0.8760	0.8715	0.8746
+75	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201408250430.bin.txt	0.8506	0.8459	0.8455	0.8509	0.8462	0.8479
+90	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201408250445.bin.txt	0.8313	0.8248	0.8220	0.8306	0.8243	0.8253
+105	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201408250500.bin.txt	0.8105	0.8049	0.7994	0.8109	0.8062	0.8039
+120	coms_le1b_ir1_ch1_lk_201408250515.bin.txt	0.7896	0.7846	0.7768	0.7917	0.7873	0.7822

그리고 예측결과를 다른 공간자료와 공간 질의(Spatial Query)를 통해 활용성을 증대시키기 위해 공간자료 포맷 중 하나인 ESRI Shape 파일 포맷으로 변환하였다. ESRI Shape 파일은 WGS84 좌표계에 지오메트리 타입은 Point로 생성된다(그림 47).

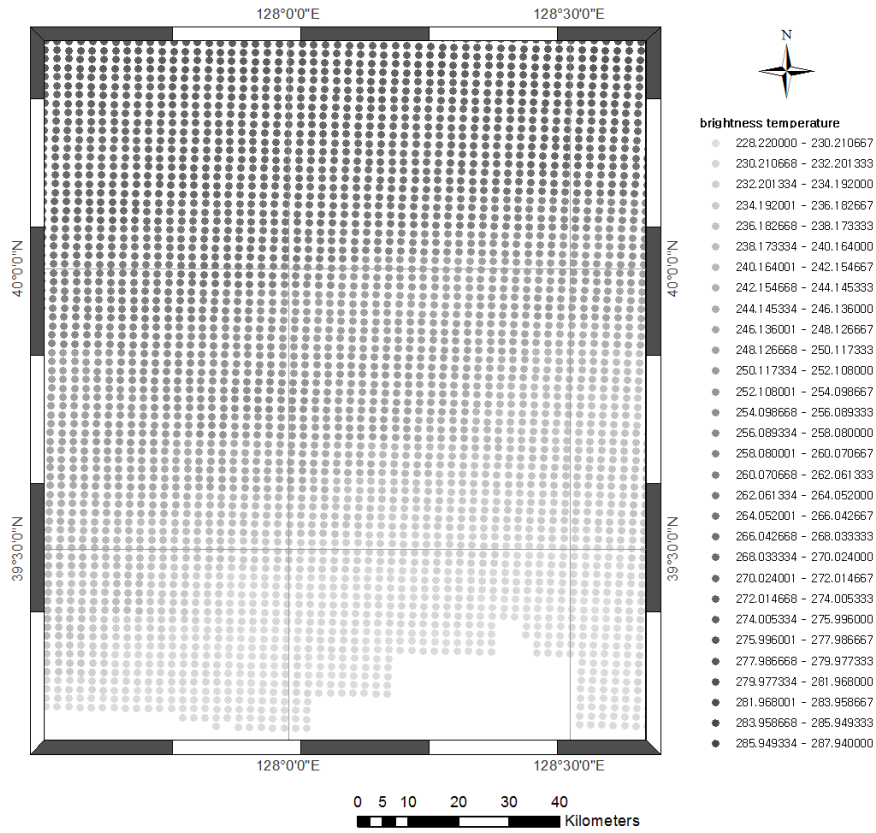


그림 47 ESRI Shape 파일 포맷으로 변환된 15분 후의 예측결과의 일부

## 7. 결론 및 토론

본 연구에서는 집중호우 홍수 예보 감시 예측시스템 개발을 위한 GPM 기반 강우 알고리즘 및 rain/no rain 구름 분류 개발과 GPM IMERG 홍수 사상에 적용하였다. 또한 기 개발된 집중호우 예측 시스템의 향후 병렬 컴퓨팅을 위한 Matlab 기반의 예측시스템을 Python 기반 예측 시스템으로 변환하였다. 작년 성공적으로 발사된 GPM 위성과 협력위성의 결합으로 생산되는 IMERG자료는 TRMM TMPA자료 25km×25km 3시간 간격의 자료보다 10km×10km 30분 간격의 자료로 업데이트 되었다.

실시간 자료를 이용하기 위해서 NASA에서는 GPM관측후 Latency 6시간의 Early run 자료, 18시간 후의 Late run 자료 그리고 지상관측자료로 보정된 4개후에 제공하는 Final run 자료를 제공하고 있다. 이 자료들의 홍수사상에 적용을 알아보기 위하여 Early/Late run 비교, Early/Final run, Late/Final run 자료들을 각기 자료가 있는 2015년 4월 5월 6월에 대해서 각각 비교하였다. Early/Late run자료들은 상관관계수 0.8정도로 비교적 잘 맞으며, Early/Late/Final run 자료들의 비교 결과를 보면 Late run 자료가 Early run 자료보다 Final run 비교 시, 잘 맞는 것을 알 수 있다. 결과로 볼 때 실시간 홍수 사상에서는 Early run이 유용하며, 가뭄이나 홍수 등의 응용분야에서는 Late run 자료가 유용할 것으로 판단된다. 마지막으로 제공되는 Final run 자료는 기후분야에 아주 유용하게 이용 가능하리라고 판단된다.

GPM기반 강우 알고리즘을 개발하기 위하여 GPM KuPR, KaPR 듀얼 강우레이더와 GMI기반 13개의 수동 마이크로파 센서를 결합하여 산출한 CMB Level2 자료와 강우 유무, convective/stratiform, 육지/해양 등의 정보들과 COMS의 가시(0.64  $\mu\text{m}$ ), 단파적외(3.7 $\mu\text{m}$ ), 수증기(6.7 $\mu\text{m}$ ), 적외 1(10.8 $\mu\text{m}$ )채널 등의 정보를 2014년 7월 한달 동안 한반도 지역의 모든 강우에 대해서 GPM 강우강도 값과 COMS의 각 채널 정보를 같은 위치 및 시간차 5분내의 모든 자료들을 데이터베이스화 하였다.

작년 여름 태풍이 한반도를 지나간 경우가 없기 때문에 태풍 경우 이외에 집중호우 경우의 데이터베이스에서 GPM 기반 강우 알고리즘과 rain/no rain 구름 판단 기법을 개발하여 부산 홍수사상 2014년 8월 25일 사례에 적용 검증하였다. 검증결과 이전 TRMM 기반 알고리즘보다 50mm/h 이하에서 과대 추정, 이상에서는 과소 추정하는 경향을 나타내었다. 지상관측자료(AWS) 비교결과 rain/no rain 구름 분류는

완벽하진 않지만 어느 정도 구름분류가 되었으며, 이전 TRMM기반에서 가지는 100mm/h 근처에 과대 추정하는 경향이 개선되는 것으로 판단되었다. Rain/no rain 구름분류에 있어서는 레이더 네트워크가 잘 갖추어진 한반도지역에서 레이더 자료를 단순히 rain/no rain의 결정인자로만 이용하더라도 정지궤도에서 가지는 비가 오지 않은 얇은 층상은 구름을 잘 분류해 내었다. 향후 홍수 사상에 레이더와 위성을 결합한 알고리즘 개발하여 적용한다면 지금보다 홍수사상에 대하여 더 정확한 관측이 가능하리라고 판단된다. 위성과 레이더를 결합한 강수정보는 COMS 단독으로 이용했을 때보다 지상관측자료의 영상이미지로만 비교하면 정확하다고 볼 수 있으며, 향후 다양한 방법으로 위성 레이더 결합 방법이 도출되어야 할 것으로 판단된다.

위성을 이용한 홍수 예측 기법은 예측 능력과 더불어 실시간 계산능력이 매우 중요하다. 그런 의미에서 향후 Matlab 기반에서 만들어진 모듈을 병렬기법이 가능한 모듈로 변화하기 위하여 Python 기반 예측 모형으로 변환하였다. Matlab 기반과 Python 기반 예측 모듈은 상관계수 0.96으로 거의 변환으로 인한 에러 값은 없는 것으로 판단된다. 내년 병렬기법을 개발하여 적용하게 되면 현재 10분대의 예측모형 계산능력 5분 이내로 계산이 가능해져 실시간 집중호우 예측 능력을 가질 것으로 판단된다.

향후 위성과 레이더를 결합한 알고리즘을 개발하게 된다면 좀 더 정확한 강우 모니터링이 가능할 것이며, 현재 2014년 7월 한달 동안의 데이터를 좀 다양한 홍수사상(집중호우, 태풍 등)을 업데이트 한다면 다양한 홍수 사상에 맞는 알고리즘 개발이 가능하리라고 판단된다. 기 변환된 Python으로 예측 기법은 병렬 컴퓨팅 기법을 추가한다면 실질적인 실시간 예측이 가능하게 되어 정책결정자들의 홍수로 인한 피해저감 대응에 효과적으로 이용이 가능할 것으로 판단된다.

## 8. 활용 및 적용

기 개발된 홍수 예보 감시 예측시스템을 활용하기 위한 개요를 그림 에 나타내었다. GPM과 COMS의 데이터베이스에서 알고리즘을 개발하고 필요시 수문 및 침수 모형과 결합하여 GIS 기반의 정보를 제공하여 정책결정자가 이용하게 된다(그림 48).

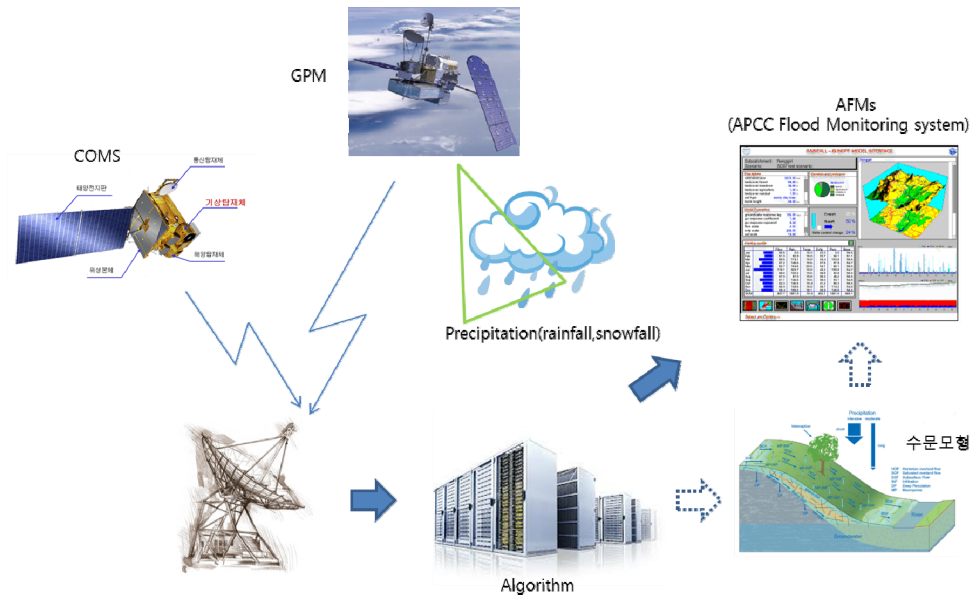


그림 48 APCC Flood Monitoring and Forecasting System 모식도

그림 49은 향후 개발하게 될 홍수 예보감시 시스템을 시뮬레이션한 것이다. 개발 될 시스템은 현재 COMS raw 구름 영상이미지를 볼수 있는 메뉴와 15분 간격으로 2 시간까지 예측 할 수 있는 메뉴가 탑재하게 되며, 메인 메뉴에서는 지도와 GIS 기반으로 홍수 강우 모니터링과 예측된 정보를 얻게 된다. 그리고 현재 정부 주도로 개발 하고 있는 스마트 CCTV와 센서 기반의 여러 가지 과거 피해 사상 등의 위치기반 정보들을 결합하여 실시간으로 홍수 예측이 된다면 해당지역의 CCTV와 과거 침수 지역 또는 지역 내 위험시설을 자동으로 팝업 하여 정책결정들이 피해저감 대응을 할 수 있도록 정보를 제공하게 될 것이다. 더불어 APEC 기후센터의 기후 서비스 지역인 APEC 개발도상국과 태평양 도서국에 시스템이 제공된다면 집중호우나 태풍으로 피해를 받고 있는 이들 지역에 많은 도움이 될 것이다.



## 참고 문헌

- Adler, R. F., and R. A. Mack, 1984: Thunderstorm cloud height-rainfall rate relations for use with satellite rainfall estimation techniques. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23, 280-296.
- Adler, R. F., and A. J. Negri, 1988: A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *J. Appl. Meteor.*, 27, 30-51.
- Adler, R.F., P. R. Keehn, and I. M. Hakkarinen, 1993: Estimation of monthly rainfall over Japan and surrounding waters from a combination of low-orbit microwave and geosynchronous IR data. *J. Appl. Meteor.*, 32, 335-356.
- Arkin, P. A., and B. N. Meisner, 1987: The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the Western Hemisphere during 1982-84. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 51-74.
- 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.
- Browning, K.A. and C.G. Collier, 1989: Nowcasting of precipitation systems. *Reviews of Geophysics*, 27(3), 345-370.
- Ferraro, R. R., 1997: Special sensor microwave imager derived global rainfall estimates for climatological applications. *J. Geophys. Res.*, 102, 16 715-16 735.
- Ferraro, R. R., and Q. Li, 2002: Detailed analysis of the error associated with the rainfall retrieved by the NOAA/NESDIS Special Sensor Microwave/Imager algorithm 2. Rainfall over land. *J. Geophys. Res.*, 107, 4680, doi:10.1029/2001JD001172.
- Glickman, Todd S., editor, 2000: *Glossary of Meteorology*. American Meteorological Society, second edition.
- 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.
- Huffman, G. J., R. F. Adler, B. Rudolf, U. Schneider, and P. R. Keehn, 1995: Global

- precipitation estimates based on a technique for combining satellite-based estimates, rain-gauge analysis, and NWP model precipitation information. *J. Climate*, 8, 1284-1295.
- Huffman, G. J., M. M. Morrissey, D. T. Bolvin, S. Curtis, R. Joyce, B. McGavock, and J. Susskind, 2001: Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *J. Hydrometeorol.*, 2, 36-50.
- Kidd, C., D. R. Kniveton, M. C. Todd, and T. J. Bellerby, 2003: Satellite rainfall estimation using combined passive microwave and infrared algorithms. *J. Hydrometeorol.*, 4, 1088-1104.
- Kuligowski, R. J., 2002: A self-calibrating real-time GOES rainfall algorithm for short-term rainfall estimates. *J. Hydrometeorol.*, 3, 112-130.
- Kummerow, C., and L. Giglio, 1995: A method for combining passive microwave and infrared rainfall observations. *J. Atmos.Oceanic Technol.*, 12, 33-45.
- Kummerow, C., W. S. Olson, and L. Giglio, 1996: A simplified scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometeor profiles from passive microwave sensors. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 34, 1213-1232.
- Miller, S. W., P. A. Arkin, and R. Joyce, 2001: A combined microwave/infrared rain rate algorithm. *Int. J. Remote Sens.*, 22, 3285-3307.
- Morrissey, M. L., and J. E. Janowiak, 1996: Sampling-induced conditional biases in satellite climate-scale rainfall estimates. *J. Appl. Meteorol.*, 35, 541-548.
- 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.
- Pereira Fo., Augusto J., Kenneth C. Crawford, and David J. Stensrud, 1999: Mesoscale precipitation elds. Part II: Hydrometeorologic modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 102-125.
- Olson, W. S., and Coauthors, 2006: Precipitation and latent heating distributions from satellite passive microwave radiometry. Part I: Improved method and uncertainties. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 45, 702-720.
- Scofield, R. A., 1987: The NESDIS operational convective precipitation-estimation technique. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1773-1792.
- 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.

- Soman, V. V., J. B. Valdes, and G. North, 1995: Satellite sampling and the diurnal cycle statistics of Darwin rainfall data. *J. Appl. Meteor.*, 34, 2481-2490.
- 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.
- Todd, M. C., C. Kidd, D. Kniveton, and T. J. Bellerby, 2001: A combined satellite infrared and passive microwave technique for estimation of small-scale rainfall. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 18, 742-755.
- Vicente G. A., 1996: Algorithm for rainfall rate estimation using a combination of GOES-8 11.0mm and 3.9mm measurements, Proceedings of the Eighth Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. Atlanta. Amer. Meteor. Soc., 274-278
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1996: Analyses of global monthly precipitation using rain-gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *J. Climate*, 9, 840-858.
- Xu, L., X. Gao, S. Sorooshian, P. A. Arkin, and B. Iman, 1999: A microwave infrared threshold technique to improve the GOES precipitation index. *J. Appl. Meteor.*, 38, 569-579.
- Wilson, J.W, 1966: Movement and predictability of radar echoes. Final Report 7471- 204, The Travelers Weather Research Center, Inc., Hartford, CT.
- Yan, H., and S. Yang, 2007:AMODIS dual spectral rain algorithm. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46, 1305-1323.
- Wang, J., and Coauthors, 2011: The Coupled Routing And Excess Storage (CREST) distributed hydrological model. *Hydrol. Sci. J.*, 56, 84-98.
- 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.



연구보고서 2015-12

---

**GPM 위성과 공간정보시스템을 이용한 홍수 예보감시 시스템 개발**

Development of Early Warning System for Flood using GPM Satellite  
and GIS System

박경원



**APEC 기후센터**

48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12

Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

[www.apcc21.org](http://www.apcc21.org)



ISBN 979-11-5698-097-1