

APEC기후센터

극한기후패턴변화에 따른 한반도 지역수문변동 및 집중호우에 대한 초단기 예측 기술개발

박경원 기후변화연구팀

APEC기후센터
연구보고서

극한기후패턴변화에 따른 한반도 지역 수문변동 및 집중호우에 대한 초단기 예측 기술개발

Regional Impacts of Hydrometeorological Variability by Extreme Climate
Pattern Changes and Its Heavy Rainfall Short-Term Forecast System over
the Korean Peninsula

박경원 기후변화연구팀

연구보고서 2015-15

발간사

기후변화에 따른 기상이변이 세계 곳곳에서 발생하고 있으며 이로 인하여 홍수 빈도와 강도가 증가하는 현실에서 집중호우 태풍 등으로 인한 기상재해로 인명 재산상의 피해가 기하급수적으로 증가하고 있습니다. 최근 10년간 1일 100mm 이상의 집중호우 발생 빈도가 1.5배 증가하였으며, 기후변화 영향으로 홍수피해가 대형화 되고 있습니다. 최근 들어 우리나라에서도 광화문과 우면산, 부산 온천천 등의 도시홍수로 인한 피해가 확산되고 있습니다.

따라서 이러한 자연재해로 인한 피해 저감을 위해서 집중호우를 예보 및 관측하는 일은 홍수를 통한 피해 예방을 위해서 대단히 중요합니다. 현재 집중호우는 지상관측자료와 레이더자료에 의존하고 있으나, 먼 해양에서 갑자기 발생하여 도시에 영향을 미치는 스톰에 대해서는 지상관측자료와 레이더의 관측센서의 한계로 어려움이 있습니다. 이에 반해 위성을 이용한 관측은 지역적 한계를 벗어나 광범위한 지역에 대한 관측을 가능하게 합니다.

본 연구는 기후변화로 인한 홍수 피해 저감 목적 일환으로 위성자료를 이용한 홍수 예·경보의 시스템을 구축하여 지자체의 피해를 줄이는 정책적 활용방안을 제시하고자 하였습니다. 위성을 이용하여 구름의 이동방향을 미리 예측하여 도시지역의 홍수가 발생하기 전에 사전 정보를 제공함으로써 홍수재해를 줄이는 기초자료로 활용이 가능합니다.

이번 연구결과로 개발된 홍수 예측 모니터링 시스템은 지자체의 도시홍수의 예·경보 시스템으로 정책적 활용이 가능하며, 향후 APEC 지역의 홍수 모니터링 시스템으로 이용할 수 있을 것입니다.

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

2015. 3월
APEC 기후센터 소장
정진승

ABSTRACT

Precipitation forecasting and rainfall retrieval algorithm at very short lead times is a difficult and important earth science goal and warning system and the implications of forecasting extend into aviation, flood forecasting and other areas. Using correlation analysis for the generation of motion vectors to advect a composite COMS rainfall field is the method of forecasting utilized in this work. The technique uses the GMS-5 in the infrared(IR) band to compute real-time precipitation amounts based on a power-law regression algorithm. This regression is derived from a statistical analysis between TRMM/PR-derived rainfall estimates and TRMM/VIRS-derived Black body temperature collocated in time and space. We examined the accuracy of the rainfall rate estimates daily for storm systems. The forecasting system is a correlation-based forecasting algorithm that utilizes spatial filtering to eliminate the potentially adverse effects of transient, small-scale rainfall features in the correlation step. We are used in this work to evaluate the benefits of COMS image filtering as compared to a situation where the filtering is absent. This system generates a spatially variable motion vector field for input rainfall field advection. Forecasts made using this enhancement are compared to forecasts made using a single motion value for all input pixels in order to determine the benefits of allowing for differential motion within the storm envelope. The results from three storm cases show that image filtering provides improvement in forecast accuracy however, we determine any benefits from using spatially variable motion vector requires more work. This work the development and testing of a correlation-based forecasting algorithm for short term times. This system builds on advancements made to provide highly accurate precipitation forecasting prototype system. Initial testing shows that forecasts system are more accurate than persistence forecasts, and are approximately as accurate as forecasts generated by other system with a uniform advection method. This technique is more effective prototype system than the previous algorithm.

목차

극한기후패턴변화에 따른 한반도 지역수문변동 및 집중호우에 대한 초단기 예측 기술개발

발간사	i
ABSTRACT	iii
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 주요 피해 현황	7
2.1.5 도시지역 홍수현황	8
3. 국내외 기술 동향	10
3.1 국외동향	10
3.1.1 미국	10
3.1.2 일본	13
3.2 국내동향	15
4. 연구 자료 및 방법	19
4.1 연구자료	19
4.1.1 TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission)	19
4.1.2 천리안 위성	29
4.2 연구방법	33
4.2.1 강수알고리즘	33
4.2.2 분석결과	43
4.2.3 초단기 강우예측 모형	50
4.3.3 정량적 평가지수	54

5. 연구내용	57
5.1 사례연구	57
5.1.1 부산 8월 25일 집중호우	57
5.1.2 태풍 불라벤	64
5.1.3 부산 9월 3일 검증	74
6. 결론 및 토론	81
REFERENCES	84

1. 서론

우리나라에서 발생하는 기상재해는 90%이상이 폭풍, 집중 호우, 태풍 등에 의한 강수현상에 기인한다. 특히 태풍과 장마는 여름철 동안 집중호우를 수반하여 막대한 인명/재산 피해를 유발하고 있다. 최근들어 서울 강남 집중호우, 우면산 산사태, 2014년 부산 온천천 범람 및 기장에서 발생한 홍수를 보게 되면, 집중 호우에 동반된 강우 사상들이 수 km에서 수십 km 정도의 중간규모로 지속시간과 발달시간이 매우 짧기 때문에 이러한 강수를 예측하기가 쉽지 않고, 단시간에 국지적, 집중적으로 쏟아지는 집중호우로 연결되어 피해가 심각한 상황이다.

따라서 기상관측과 예보분야에 있어 강수의 비중은 매우 크며, 기상 예보 분야 종사자들은 호우로 인한 피해를 줄이기 위해 강수의 유무, 강수시기와 강수량의 정량적 예측에 많은 관심과 노력을 기울이고 있다. 그러나 집중호우는 국지성, 돌발성, 야행성 등의 특성을 갖기 때문에 충분한 시간적 여유를 둔 정확한 예보는 현재의 예보 기술로는 매우 어려운 실정이다.

이에 따라 위성을 이용하여 강수량 추정하고 초단기 예측하는 방법이 이용되어 왔는데 위성을 이용한 강수량 추정방법은 과거에 운형 분류와 지상 관측 강수량 사이에 경험적인 관계를 이용하는 방법이 자주 이용되어 왔다. 특히 Barret et al(1980)은 열대 지역이나 아열대 지역에서처럼 대류성 강수가 주요 강수 메카니즘일 때 사용할 수 있는 경험적인 방법을 이용하여 일강수량을 추정하였다. 또한 Tsonis et al(1985)은 클러스터 분석기법을 사용하여 강수 구름과 비강수 구름을 구분하였고 Lovejoy et al(1979)은 강수를 통계적으로 분류하는 방법을 통해 비가 올 확률분포를 산출하였다. 그러나 위성의 가시자료와 강수량을 추정하는 이와같은 방법에는 고유한 한계가 있음이 지적되었다. Gruber(1973)은 가시 및 적외 기법만으로 대류활동의 세부적인 부분을 유추하는 것은 부적절함을 지적하였고, Atlas(1982)도 정지기상으로부터 얻은 가시와 적외 기법을 개개 스톨의 강수량을 추정하기 위해서 적용하는 것은 위험함을 지적하였다. 그럼에도 불구하고 홍수감시 예보차원으로 현업적인 강수 모니터링의 필요성으로 80년대부터 위성자료를 이용한 강수 추정이 현업화 되기 시작하였다. 일본에서는 레이더와 위성자료

를 이용하는 강수 산출 알고리즘을 개발하였고 또한 미국에서도 Vicente et al(1998)의 방법으로 홍수예보를 하고 있다.

우리나라에서도 레이더와 위성자료, AWS와 위성자료를 이용한 강수량 알고리즘을 개발하기 위한 노력이 계속되어 오고 있다. 하지만 우리나라 지상레이더를 이용하여 강수량을 산출하는 방법은 반사인자를 통한 Z-R관계식을 주로 이용하는데, 이 방법은 여름철에 집중호우, 태풍과 같이 집중호우가 있을 경우 이용되는 알고리즘이 아니기 때문에 좋은 집중호우에 대해서 주로 과소 추정하는 경향이 있으며, AWS는 강수지역의 균질한 분포성을 띄지 못하고 지점수의 제한으로 발생하는 자료의 불충분함으로 지역별 강수산출에 있어서 아직 현업에 이용되지 못하고 있는 실정이다.

집중호우와 태풍에 의한 홍수 대처의 일환으로 위성을 이용한 중·단기 강수예측은 현재 예보에 있어서 직면한 가장 어려운 문제점 중의 하나이며, 대체적으로 부정확하다. 많은 모델들이 강수예측 정확도 향상에 기여해 왔지만 불연속적이고 돌발적으로 발생하는 집중호우 강우량을 예보하기란 어렵다. 따라서 오랫동안 초단기 강우 관측의 정확도를 향상 시키려는 노력이 있어왔으며, 이렇게 개발된 초단기 예측시스템은 단시간 집중호우나 태풍에 의한 강수를 관측하는데 매우 유용하다. 0-6 시간에 대한 초단기 예측은 수치예보 모델과 외삽법을 이용한 방법이 많이 활용되고 있다(Glickman 2000). 두 방법은 각기 다른 시간과 공간 스케일에 대해서 각각의 이점이 있다. 일반적으로 수치해석을 이용한 방법은 외삽법과 비교해서 상대적으로 낮은 해상도에서 유용하다(Browning and Collier 1989). 반면에 도시홍수나 유역단위의 공간스케일에 있어서 수치해석을 이용한 모델 예측은 유용하지 않다. 30-100km단위의 수치해석모델 결과값은 돌발적으로 발생하는 작은 셀 단위의 집중호우를 정책 결정자들이 원하는 만큼의 결과값을 도출할 수 없다. 수치해석모델은 일반적으로 6-24h의 날씨예보에 강점을 가지게 때문에 초단기 강우예측에 있어서는 외삽법을 기초로 한 방법이 매우 유용하다. 초단기 예보기법은 높은 공간 해상도와 시간 스케일에 맞춰 개발이 되어 왔다(Browning and Collier 1989; Hamil and Nehrkorn 1993; Wilson et al. 1998; Pierce et al. 2000). 외삽법 알고리즘은 다른 초단기 예측 방법보다 높은 정확성을 가진다(Browning 1980). 외삽법을 기초로 한 예측모형 또한 문제점이 있는데, 많은 외삽 예측 모델이 초단기 강우예보를

함에 있어서 강우 구조에 대한 물리적 매커니즘을 포함하지 않고 통계적 방법을 주로 이용한다. 또한 많은 파라미터 값을 어떻게 결정하는가에 따라서 효과적으로 강우예측의 어려움이 존재한다. 파라미터 값을 셀 단위로 하여 예측을 할 경우에는 픽셀 단위에 이동벡터는 pattern recognition 알고리즘 방법으로 많이 이용하게 되고, 이방법은 각각의 픽셀의 이동벡터를 구함으로써 예측하는 방법이다(Einfalt et al. 1990; Chen and kavvas 1992; Dixon and Wiener 1993; Johnson et al. 1998; Handwerker 2002). 반면에 큰 스케일을 이용한 이동벡터는 보통 상관분석법을 이용하여 단기 예측을 하게 된다(Austin and Bellon 1974; Rinehart and Garvey 1978; Browning et al. 1982; Tuttle and Foote 1990; Bremaud and Pointin 1993; Bellon and Zawadzki 1994; Li et al. 1995; Wolfson et al. 1999). 최근에는 다중스케일에 따른 예측방법을 이용하는데, 이 방법은 예측하려는 비 구름의 사이즈나 강도에 대한 변화량도 설명가능하다(Grecu and Krajewski 2000; Germann and Zawadzki 2002). 이와같이 외국에서는 여러 가지 방법을 이용하여 초단기 강우예측 시스템을 개발하여 홍수 예·경보에 이용하고자 하는 많은 연구가 진행되어 왔으나, 한국에서는 관측범위가 짧은 레이더만을 이용하여 초단기 예보를 하고자 하는 연구가 있어왔다. 하지만 태평양에서 발생하여 우리나라로 접근하는 태풍이나 서해에서 갑자기 발생하여 한국에 영향을 주는 집중호우에 대해서는 관측시스템의 한계로 더 빨리 예측을 하기 힘든 실정이다. 더불어 위성을 이용한 위성 강우 관측과 초단기 홍수 예보 시스템은 이제 시스템의 중요성을 인정하고 연구를 시작하는 단계이다.

따라서 본 연구에서는 지상관측소나 지상레이더보다 효과적으로 태풍이나 집중호우에 강수량을 추정하는 TRMM위성의 PR(Precipitation Radar) 센서에 따른 강수량 추정값과 동시각 동지역을 관측하는 가시적외복사계(VIRS)에서 생산된 적외값을 이용하여 강수량 알고리즘을 산출하고 외삽법에 의한 초단기 강우예측 시스템을 개발하여 홍수 예·경보에 이용하고자 한다.

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(Table. 1).

Table 1. Damage for Flood

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
계	321	5,147,917			

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 55m/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 이르렀지만 동쪽으로 불과 100km 가량 떨어진 부산의 강수량은 60mm 안팎에 지나지 않아 대조적인 모습을 보였으며, 태풍 진행방향의 서쪽으로 꽤 떨어진 경기도, 충청도 등지에서는 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 구역에서는 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 강우량은 341mm가 내렸고, 이중 26일 09시부터 27일 09시까지 306mm가 집중되었다(Fig. 1).

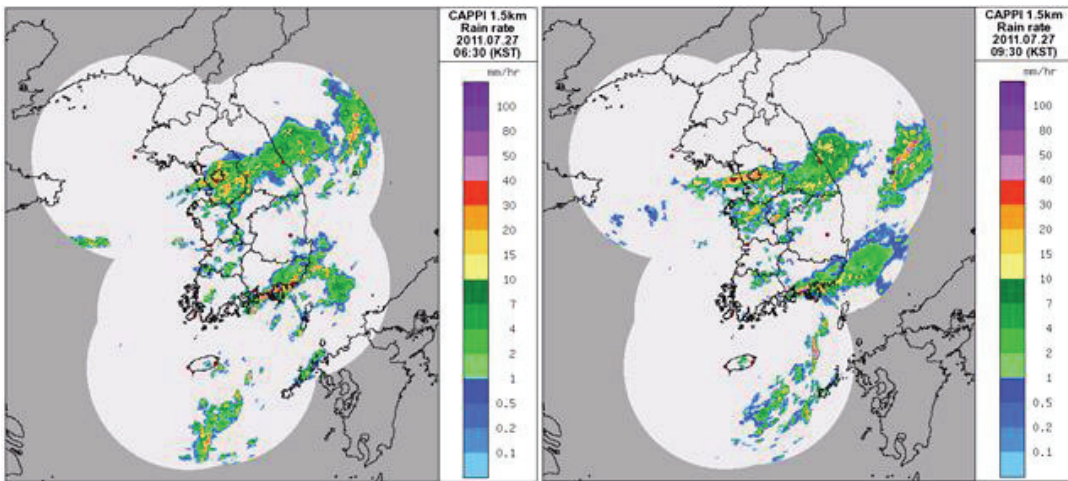


Figure 1. Radar image for Womensan landslide

2.1.4 주요 피해 현황

2000년대 전후로 많은 피해를 받은 주요 호우사상에 대해서 Table. 2에 나타내었다.

Table 2. Damage for Flood

연 도		2002년	2003년	1998년	1999년	2002년
주요피해원인		태 풍 (RUSA) 8/30~9/1	태 풍 (MAEMI) 9/12~9/13	집중호우 7/31~8/18	집중호우 및 태풍(OLGA) 7/23~8/4	호 우 8/4~8/11
구 분	단위					
통과구역	-	전남,충북,강원	경남, 경북 대구, 강원	전 국 (제주제외)	-	전 국
최대풍속	m/sec	제주고산:43.7 흑산도 : 33.3 여수 : 29.1	제주 : 60.0	-	완도 : 46.0 무안 : 41.0 광주 : 39.6 마산 : 37.0	-
최대일 강우량	㎜	강릉 : 870.5 동해 : 319.5 속초 : 295.5 대관령 : 712.5	남해 : 453 대관령 : 397 고흥 : 304	강화 : 481.0 보은 : 407.5 양평 : 346.0	철원 : 280.3 춘천 : 237.2	양평 : 320.0
주요피해 지역	-	전 국	전 국 (서울, 인천제외)	전 국 (제주제외)	전 국	전 국 (제주제외)
이 재 민	인	63,085	61,844	24,531	25,327	8,107
사망 및 실종	인	246	131	324	67	23
건 물	동	7,634	50,987	2,793	2,373	1,177
농 경 지	ha	17,749	4,847	7,796	3,879	2,127
농 작 물	ha	231,847	162,183	78,079	190,518	30,367
선 박	척	827	5,928	22	582	43
공공시설	개소	22,388	21,611	20,664	14,251	12,744
기 타	-	1(식)	1(식)	7,165	8,107	1(식)
피해액 (천원)	(가)	5,703,186,511	4,576,441,921	1,369,981,281	1,176,425,732	1,017,164,327
	(나)	5,147,917,215	4,222,485,994	1,247,817,345	1,049,042,054	918,131,949
피 해 순 위		1	2	3	4	5

주1) 공공시설의 수치는 학교시설 피해물량을 제외한 전체 개소 수임

주2) 피해액의 (가)는 2005년도 가격기준임

주3) 피해액의 (나)는 당해년도 가격기준임

▶ 자료 : 재해연보 2005(소방방재청, 중앙재난안전대책본부, 2006)

2.1.5 도시지역 홍수현황

집중호우로 인한 도시지역 침수피해는 1980년 이전까지는 내수피해와 외수피해가 혼잡되어 발생하였으나 1980년대 이후부터는 대부분이 내수피해에 의해 발생하고 있다. 주요 수계에 인접한 도시지역의 경우 상류에 대규모 다목적댐 건설 및 하천제방의 설치 등에 따라 홍수시 외수에 의한 피해는 경감된 반면, 급격한 도시화의 진행에 따른 우수 유출계수의 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, 배수펌프 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 단시간내에 집중호우가 발생하여 서울시에서 침수피해가 발생했는데, 이에 대한 주요 원인은 배수불량, 하수관거의 용량 부족으로 나타났다. 타 도시지역의 경우에도 집중호우시 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).

○ 2001 호우피해

- 서울지역

- 강우가 집중된 중랑천 연안에 위치한 지역은 노면수가 신속히 배제되지 못하고 상당한 깊이로 정체됨으로써 많은 지하층의 침수피해 발생
- 도시하천의 과다 점용 : 서울전역에서 일부구간을 제외한 대부분의 하천이 복개되어 있고, 이와 더불어 하천중단 교각은 하천의 통수능을 저해하고, 수위를 상승시킬 수 있으며, 홍수시의 하천 수위 상승은 범람위험이 있고, 원활한 내수배제를 악화시키며 경우에 따라서는 제내지로의 역류를 발생시킴으로써 홍수위험을 가중시킴
- 도시개발에 따른 유출 요인의 증가 : 산발적 도시 재개발 및 재건축으로 인하여 기존의 배수체계가 왜곡될 수 있으며, 유출계수를 증가시킴

- 도로의 확장을 위해 하폭 축소시킴 : 중랑천 유역의 의정부와 경기도 지역의 급속한 도시화와 탄천 상류부 용인지역의 도시화는 하천통수능에 추가 부담으로 작용
 - 하천연안 저지대의 주거 밀집 지역 : 과거의 농지 또는 홍수시 일정정도 침수를 허용하는 지역이었던 저지대가 지하천의 배수와 역류방지시설이 전제되지 않은 상태에서 주거지역으로 변모함으로서 침수에 노출
- 인천지역
- 중구신포시장과 동구 중앙시장의 경우 만조와 겹쳐 강우시에 해안가 저지대의 내수(우수)배제가 곤란하여 하수가 역류로 인한 침수피해를 발생
 - 계양구 굴포천 유역은 하천의 수위상승으로 인한 내수배제 불가로 매년 침수피해가 발생
 - 급속한 도시화로 인한 우수 유출량 증가로 기존 하수관거의 용량부족과 경인운하와 관련된 하천공사의 부진 등이 침수의 큰 원인
 - 다세대 주택 지하층 등 건물 자체의 배수설비 취약으로 인해 우수 역류현상이 발생
- 경기도 남부지역
- 단기간의 집중호우로 인한 도심지 침수로 사유시설의 피해 극심
- 2002년도 태풍 루사 피해
- 강원 강릉지역
- 도시지역의 과도한 토사유출 발생 : 자연녹지를 비롯한 대부분의 사면에서 사면붕괴 발생하여 토사가 도시하수로 유입 퇴적되어 하수도의 기능 마비
- 2003년 태풍 매미의 대구시 지역 홍수
- 배수펌프장 등 별도의 배수시설의 보강없이 저지대 생활공간 조성
 - 도심지역을 관통하는 하천에 철도 및 도로 교량이 밀집되어 하천 통수능 저해
 - 도시기반시설 즉 전기 및 상수도 시설 등의 복구지연시 장기침수 발생

- 급격한 도시화로 인한 불투수면적의 증대로 인한 재해요인 증가
- 2006년 7월 태풍 및 집중호우에 의한 일산 신도시의 피해
- 일산 신도시(476만평)는 1992년 한강의 계획홍수위 이상, 성토, 저지대가 없는 계획도시로 조성되어 시가지 내 침수피해가 없었으나 인근 기존 마을과 개별 개발지역의 침수피해와 시간당 최대 103mm, 12시간 동안 400mm의 기록적인 집중호우가 내려 일시적인 배수정체로 도로가 침수되어 교통대란 발생
 - 일산신도시의 하수도는 5~10년 빈도, 도로측구는 10년 빈도로 설계된 반면, 시간강 강우는 80년 빈도 이상 집중되어 도시 배수시스템으로 감당할 수 없었으며, 배수로 정비 미흡으로 피해 가중

3. 국내외 기술 동향

3.1 국외동향

3.1.1 미국

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.

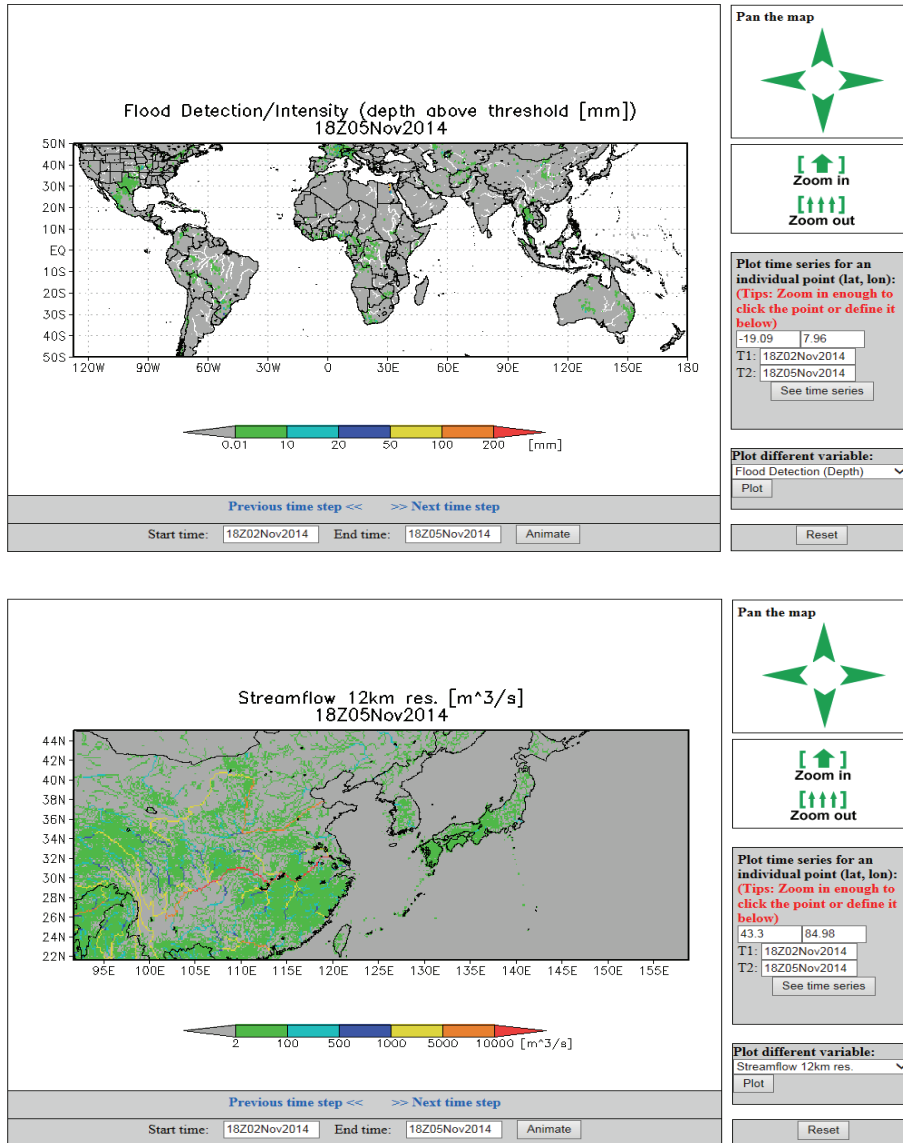


Figure 2. Global Flood Monitoring System(GFMS) (자료출처: <http://flood.umd.edu/>)

2) 미국 위성 강우 현황

GPM은 미국과 일본에 의해 최초 기획되었으며 현재 전 세계적인 관심을 끌고 있는 국제 위성 프로젝트이다. WMO의 승인을 받아서 시작된 GPM은 강수 구조를 관측하는 코어위성과 보정 값을 제공하고 전 지구적인 강수 관측을 할 여러개의 보조 위성들과 세계 각지의 다양한 강수 관측 기기를 갖춘 검보정 관측소들 그리고 전구 강수 분포 지도를 제공하고 기후 연구 자료를 처리하는 시스템들로 구성되어 있다. 일본의 JAXA는 코어 위성과 한 대의 보조 위성과 발사, 마이크로파 복사계, 강수 자료 처리 시스템, 프로젝트 관리 시스템 그리고 지상 검보정 관측소를 제공할 계획을 가지고 있다. 일본의 JAXA는 코어 위성의 레이더를 제공할 것이다. 유럽의 ESA는 보조위성을 제공할 수 있는지에 대한 가능성을 타진하고 있으며, 인도와 프랑스는 Megha-Tropiques 프로젝트를 통해서 GPM에 기여하고자 한다. 한국은 보조 위성의 탑재체를 제공하며, 검보정 관측소로서의 역할을 할 수 있을 것이며, 기타 여러 국가들이 GPM에 중요한 역할을 수행하고자 한다.

미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 기관 중 JPL(Jet Propulsion Laboratory)는 GPM을 위해 새로운 이중 채널(15와 35GHz)의 레이더를 개발중에 있으며, 레이더의 지면 테스트와 알고리즘 개발, 검증에 대한 계획을 가지고 있다. GSFC(Goddard Space Flight Center)는 수동, 능동 마이크로파 자료를 이용하여 강수추정을 위한 알고리즘 개발, 다양한 위성에서 산출한 강수를 모아서 연관된 자료 산출, 위성자료 동화, 기후분석과정 연구 등에 대한 전문적 기술과 경험을 발전시켜 왔으며, GPM 자료를 이용하여 중규모 시뮬레이션과 예보를 향상시키고 모델내의 물리적 매개변수를 발전시킬 것이다. GHCC(Global Hydrology and Climate Center)는 SSM/I 자료 센터의 역할을 수행한 경험을 바탕으로 GPM에서 나오는 마이크로파 자료의 생산과 보관, 배급처 역할을 할 수 있으며, 주요 지면 보정 센터의 역할도 수행할 것이다. CRL(Communications Research Laboratory)은 일본 JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)와 협력하여 35GHz밴드 시스템을 개발할 계획을 발표하였고, 복원 알고리즘과 복원에 대한 검증에 기여할 것이다. 한편 NASA와 달리 미국의 해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 지국 NESDIS는

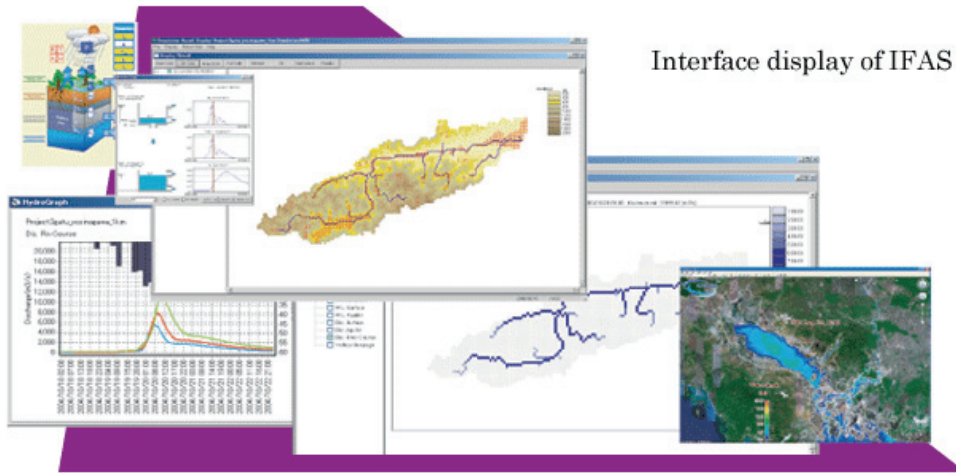
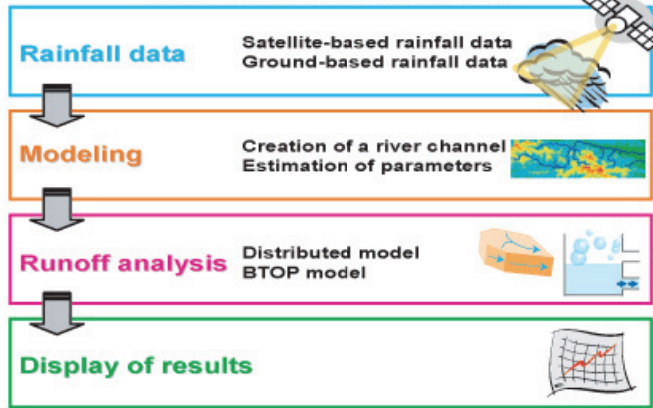
청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 지국 NESDIS는 NASA와 GPM에 대한 협력관계를 맺고 NOAA가 현재 보유하고 있는 기술들을 상호협력 관계에 있다. 우선 SSM/I 알고리즘을 개발한 NESDIS(National Environmental Satellite, Data and Information Service)의 마이크로파 원격탐사 분야의 기술과 AMSU(Advanced Microwave Sounding Unit) 알고리즘과 산출물 Aqua AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) 과학 팀의 기술 등의 전문 기술 및 정보 등을 제공할 것이며, NDSC(National Climate Data Center), NWS(National Weather Service) 등의 게이지 자료와 오차분석 기술, 항공기와 지면 복사계 자료, 해양 게이지 자료 등의 검증에 위한 자료들을 제공하고자 한다. 또한 자료 획득, 배포 저장까지의 모든 기회를 제공한다(서울대학교,2003)

3.1.2 일본

1) IFAS(Integrated Flood Analysis System)

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

Main Structure of IFAS



Interface display of IFAS

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

2) 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 진행하고 있다. 유럽은 ESA(European Space Agency)와 EGPM(European GPM)기관은 EC의 승인에 따라 유럽의 과학준비그룹을 만들었으며, 정확한 강수 자료를 획득하여 북유럽의 강설과 약한 비를 감지하고, 지중해 부근의 위험한 돌발홍수를 만들어 내는 폭풍을 감지하며, 강수자료 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-Tropiques라는 이름의 프로젝트를 실행하기로 하였다. 이 위성은 물 순환이 적도지역의 대기기후과정에 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

1) 국내 위성 강우 현황

우리나라는 1970년 처음으로 기상 위성 영상을 수신하게 되었고, 1989년 기상 위성 수신 분석 시스템(MESDAS; Meteorological Satellite Data Analysis System)이 도입되었다. 현재는 정지기상위성과 극궤도 위성 자료를 정기적으로 수신하여 구름 영상 제작 및 강수 분포 산출, 수치 분석을 통한 태풍 강도 및 진로 분석, 대기 연직 구조, 총 오존량 등 다양한 자료를 매일 생산하고 있다. 이 위성 자료들은 예보 분석 업무에 크게 활용되고 있을 뿐만 아니라 영상 통신망을 통하여 전국적으로 이용되고 있다(기상청, 1994). 한편 진행이 단시간에 이루어지는 집중호우를 예보하기 위한 순간예보 기법에

인공위성 자료를 이용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 태풍, 집중호우 등의 악기상 감시는 준 연속적으로 수증기 유출입 및 구름발달을 감시할 수 있는 위성자료의 이용이 가장 효율적이기 때문이다. 최근에는 위성자료를 이용한 강수량 추정 알고리즘도 많이 개선되어 정확도 있는 관측 부재 지역의 강수량을 산출할 수 있는 단계에 도달하였다(기상연구소, 1998). 유정문 등(2003)은 MSU(Microwave Sounding Unit)자료를 이용하여 열대 태평양에서의 강수알고리즘을 개발하여 자료가 부족한 해양에 대한 강수 자료를 제공하고, 담수 순환과 공기와 바다의 상호작용에 대한 이해하는데 도움이 된다. 이에 현재까지 국내에서 연구된 위성자료를 이용한 강수 산출 기법들의 종류와 현재까지의 연구 동향을 재조명하여 향후 GPM사업의 강수 산출 기법 개발 분야의 연구 방향성 제시 및 활용 가능성을 모색하고자 한다.

2) 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.

○ 실시간 홍수예보기술 개발

- IT, GIS, 레이더, 위성 관련기술을 활용하여 미래 지향적으로 개선·구축하고 기존의 30분~1시간 단위 홍수예보를 10분 단위로 전환하며, 예측정확도를 향상하고 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 최적

연계방안 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) 국토부 : 국토관측센서

SRA(위성영상, X-Net, 수문레이더, AWS 등)와 같은 국토관측센서에 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(Fig. 4).

- (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 대

한 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 대응체계를 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
- 빅데이터 기반 Glocal(Global+Local) 수자원 정보서비스 플랫폼기술 개발
SRA 기반의 Glocal 수문 관측자료 및 생성자료와 수재해 관련 분석정보를 효율적으로 관리하고 맞춤형 정보를 제공할 수 있는 포털 시스템 개발 기술



Figure 4. Flood Monitoring System using SRA

4. 연구 자료 및 방법

4.1 연구자료

4.1.1 TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission)

4.1.1.1 TRMM 위성

TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)는 NASA의 위성 발사 로드맵에 따라 잠열에 관계하는 요소와 열대와 아열대의 강수량을 모니터링하기 위해 미국과 일본이 합작으로 1997년 11월 27일에 쏘아 올린 위성이다(Fig. 5). 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 응결열 분포를 취득한다. 비록 한반도에는 남부지방에만 하루 2차례 정도 지나가지만 강수밴드의 3차원 구조를 파악할 수 있을뿐더러 우리나라에 있는 지상 레이더의 강수량 추정값보다 비교적 정확한 값을 나타내기 때문에 본 연구에 이용하였다. 저위도 중심의 궤도를 갖고 이전의 기상위성들의 한계를 극복한 첨단 센서(강우레이더, 가시적외복사계, 마이크로파 복사계, 낙뢰관측장치)를 장착해 지구를 순환하며 열대강우를 원격 관측한다. TRMM 연구진들은 Goddard Project Scientist의 지휘 아래 지구의 대기순환에 영향을 주는 잠열의 역할을 이해하기 위한 연구를 진행 중이다. 수치예보, 태풍 모니터링, 장마기의 중규모 요란 감시 등에의 활용이 이루어지고 있다.

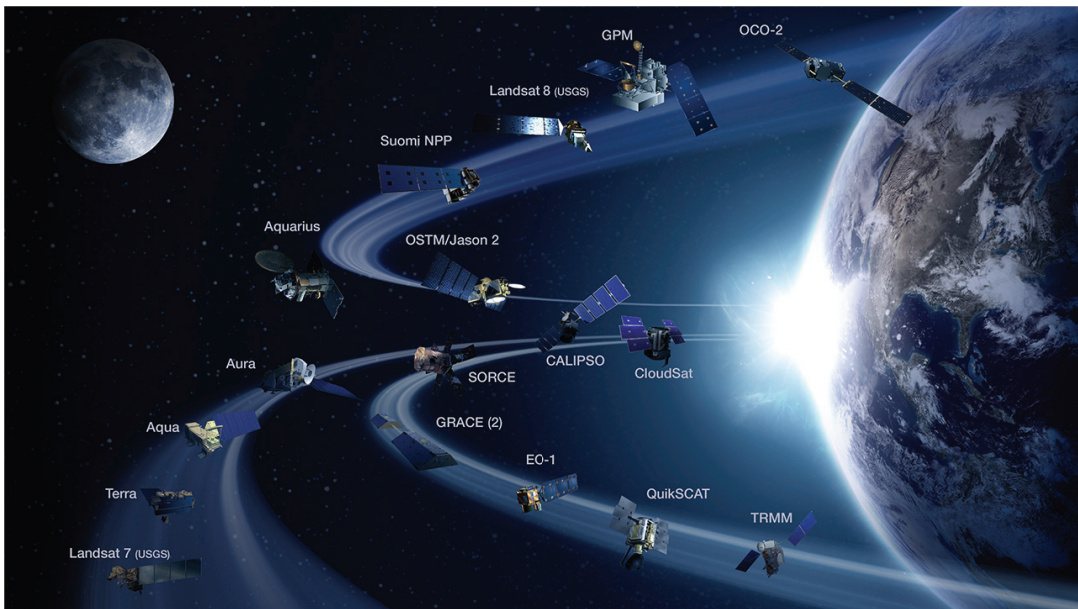


Figure 5. Roadmap for satellite of NASA

열대와 아열대의 다년간에 걸친 강우를 연구해 그에 대한 데이터의 수집

- 지구의 강우와 기후의 변화가 해양, 공기, 육상에 미치는 영향의 연구
- 열대 강우 과정의 향상된 모델을 제공하고 기상과 강우량을 예측하기 위한 지구 순환의 영향을 연구
- 위성 강우측정의 운전과 기술의 향상과 평가, 테스트

4.1.1.2 TRMM 궤도

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 관측 밀도가 높으며, 1일 3회 정도 한반도 부근을 동서로 횡단한다. TRMM이 한반도를 지나칠 때의 위성궤도를 Fig 6.에 두었다.

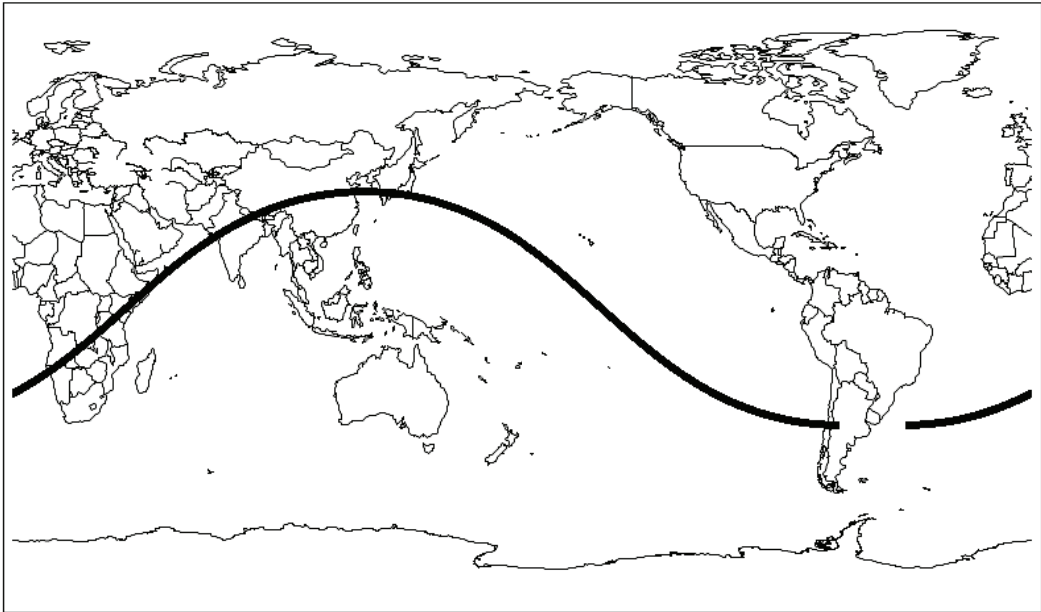


Figure 6. Orbit of TRMM

4.1.1.3 TRMM 탑재센서

○ TRMM 마이크로웨이브 영상기(TMI)

대양 상의 강우량 관련 자료를 제공하며 강우레이더, 가시적외 채널 자료와 함께 강수의 윤곽 획득한다(Fig. 7).

- 관측진동수: 10.7, 19.4, 21.3, 37, 85.5GHz
- 관측편광: 수직/수평 (21.3GHz 채널은 수평편광만)
- 수평분해능: 6~50km
- 관측 폭: ~760km

○ 가시적외 스캐너(VIRS)

구름의 높이와 성질을 알아내고 강우비율을 추측하는 방법 개발, 시험에 이용. 강

수량이 가시광선과 적외선 영역으로 판단되는 방법 도모.

- 관측파장: 0.63, 106, 3.75, 10.8, 12 μ m
- 수평분해능: 2km
- 관측 폭: ~720km

○ 강우레이다(PR)

강우의 3차원구조, 바다와 육지의 강우량 측정치를 제공하고 강우구조 정보를 통해 TMI의 측정치의 정확도를 높여줌.

- 관측진동수: 13.796GHz, 13.802GHz
- 수평분해능: 4.3km - 관측 폭: ~215km
- 관측 가능 고도: 지상에서 15km 높이
- 관측 수직분해능: 250m

○ 구름과 지구복사에너지 시스템(CERES)

지구복사와 대기의 최상단부에서 지구 표면까지의 대기복사를 측정.

- 관측파장대: 0.3 ~ 5 μ m (단파 채널), 8 ~ 12 μ m (장파 채널), 0.3 ~ >50 μ m (총 채널)
- 수평분해능: 10km
- 관측 폭: \pm 80도

○ 번개영상 센서(LIS)

구름 안에 있거나 구름에서 땅으로 떨어지는 번개의 분포와 가변성을 찾아내고 조사하는 여과조사장치(filter imaging system).

- 관측파장: 0.77765 μ m
- 수평분해능: 10km
- 관측 폭: ~ 600km

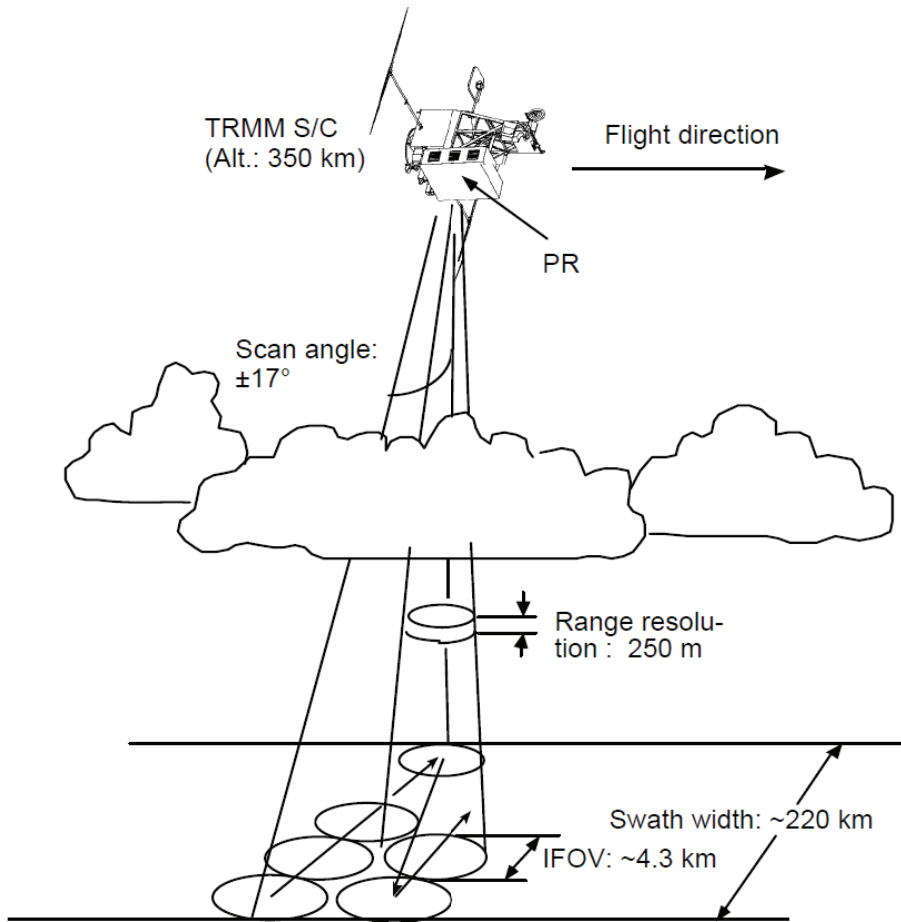


Figure 7. Sensor of TRMM

4.1.1.4 TRMM 자료 처리

TRMM/PR은 최초로 위성에 탑재된 강수관측 레이더로서 13.8GHz 주파수 대를 사용하여 탐사폭은 약 220km, 수평 해상도는 4.3km로 고해상도의 강수 관측 자료를 생산한다. 강수 레이더(PR)은 0.7mm/hr 정도의 약한 강수의 관측도 가능하며 강수의 분포, 강수 형태, 강수 구름의 두께 등에 대한 정보를 제공한다. 2012년 8월 27일 한반도를 지나간 태풍 볼라벤에 대한 COMS 영상 이미지와 TRMM 2A25 이미지를 중첩시켜 Fig. 8에 나타내었다. 중첩된 이미지에서 2A25 3차원 정보를 Fig. 9에 두었고, 특히 주목할 만한 것은 지표에서 약 20km까지에 달하는 강수 구름의 3차원 수직 구조 정보를 제공하기 때문에 강수 구름의 특성 파악에 매우 유용하다(Fig. 10). PR자료는 수신전력 값(원시자료)으로부터 레이더 반사인자(레벨 1), 강수량 자료(레벨 2)까지 데이터가 만들어져 있다. 글림에서 알 수 있듯이 2A25에 한 관측자료에 대한 많은 정보들이 있으며, 여기서 필요한 강수량 정보와 위, 경도에 관한 정보 관측시간 및 관측지점의 육지와 해양에 대한 분류도 알 수 있다. 본 연구에 이용한 자료는 지표로부터 20km 까지 연직 분해능 250의 강수량자료(레벨1)자료이다. Table 3은 TRMM/PR센서의 제원을 표로 나타낸 것이다.

Table 3 . Mission requirements to TRMM PR.

Item	Specification
Frequency	Around 14GHz
Sensitivity	≤0.5 mm/h
Hor. resolution	≤ 5 km
Range resolution	≤ 250 m
Swath width	≥ 200 km
Observable range	Sea surface ~ 15 km

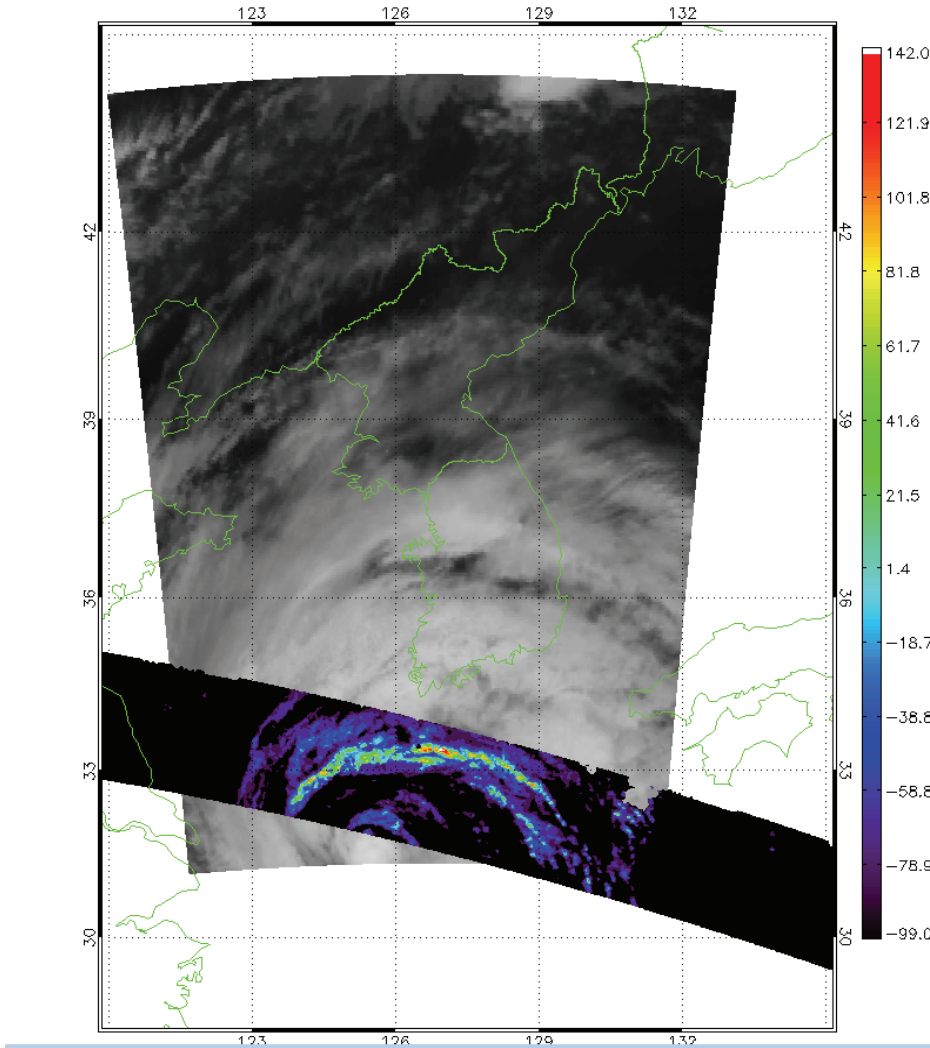


Figure 8. Composite map of TRMM 2A25 rainfall image and COMS IR image

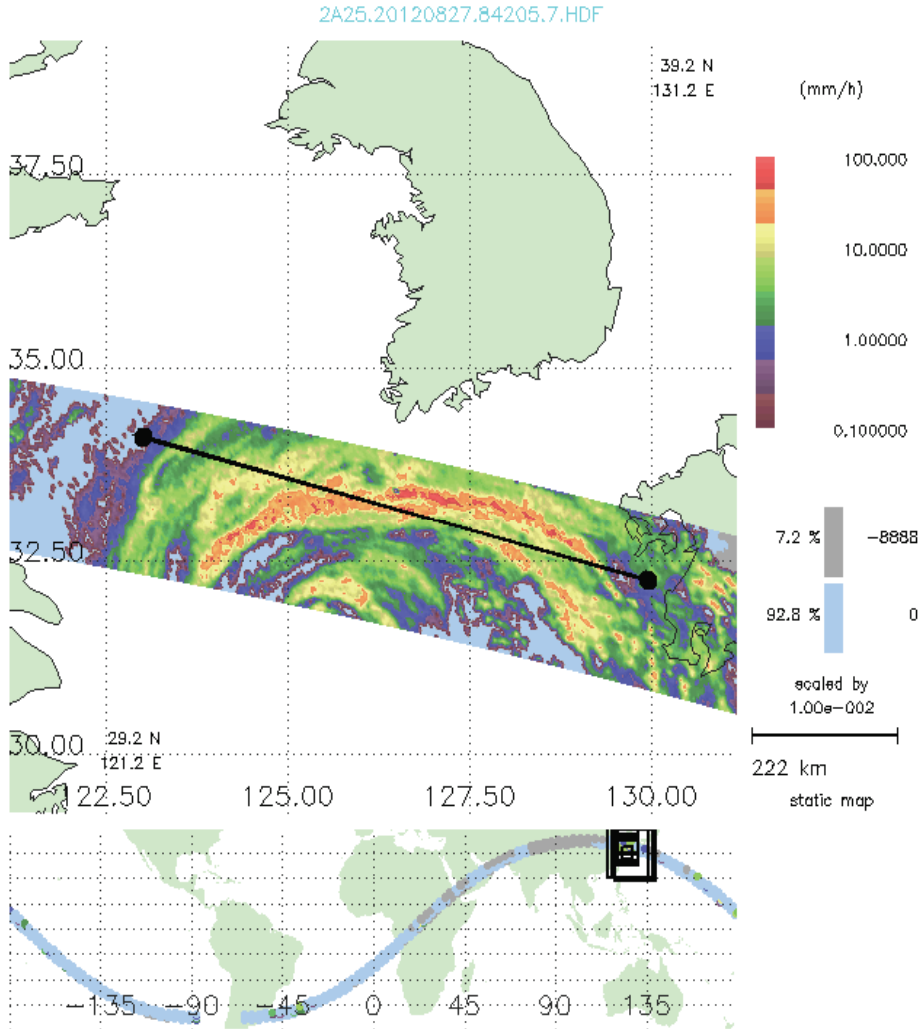
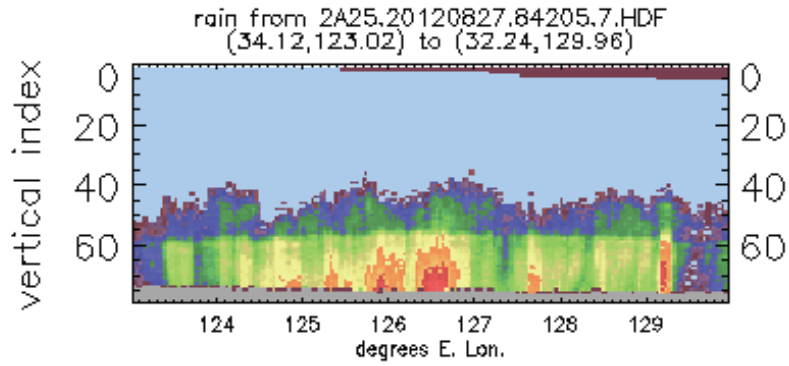
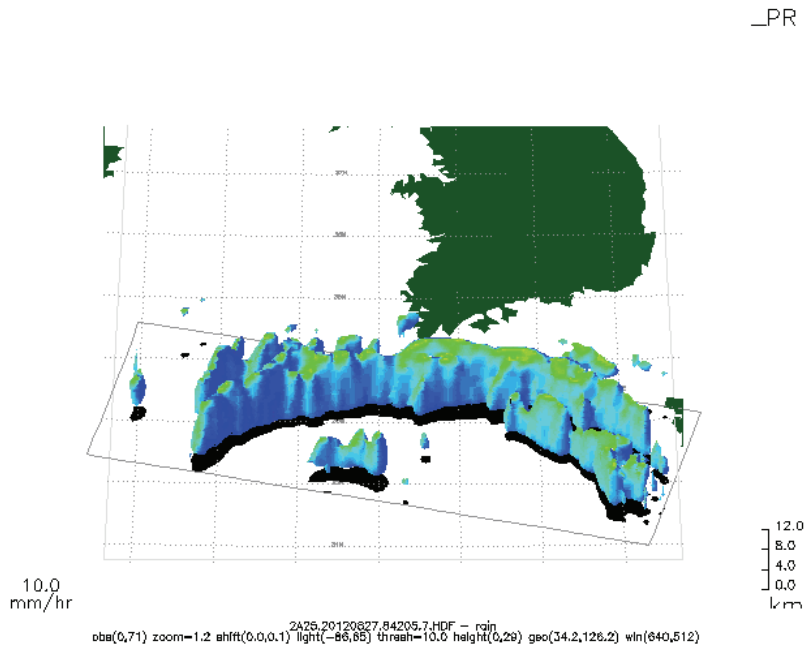


Figure 9. TRMM rainfall image for Bolaven Typhoon



(a)



(b)

Figure 10. Vertical profile rainfall (a) and TRMM 3D rainfall image (b) for Bolaven Typhoon

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 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. 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 μm 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 μm 의 파장대로 주간에는 태양광의 지구반사량을 측정 가능하며, 야간에는 지구 복사량을 측정하여 하층운, 야간 안개, 산불등의 관측에 이용된다. 수증기 채널은 6.7 μm 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 μm , 12.0 μm 의 파장대를 가지며, 지구표면이나 구름에서의 온도를 측정하여 구름탐지, 바람장, 강우강도, 해수면 온도 등의 기상 물리값으로 변환하여 이용된다. 센서의 각 채널의 정보는 Table. 4에 정리하였다.

Table 4. Performance of COMS 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

Table 5. Geostationary sensor for USA, JAPAN, EU, China

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 36,000km 떨어진 적도 상공에서 지구를 관측하기 때문에 천리안위성의 위치에서 지구의 크기는 아주 작아 보여서 이를 보완하기 위하여 위성 탑재된 기상영상기에는 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 촬영모드는 약 27분이 소요되며, 한반도 영역만 촬영하는데에도 1분 가량이면 관측이 가능하다(Fig. 11). 자료는 2011년 4월부터 현재까지 자료를 국가기상위성센터로 한반도 지역자료를 바이너리 자료를 수신하여 적외 채널을 TBB온도값으로 변환하여 사용하였으며 이 자료 중에서 이동벡터 산출은 15분 자료를 사용하였다.

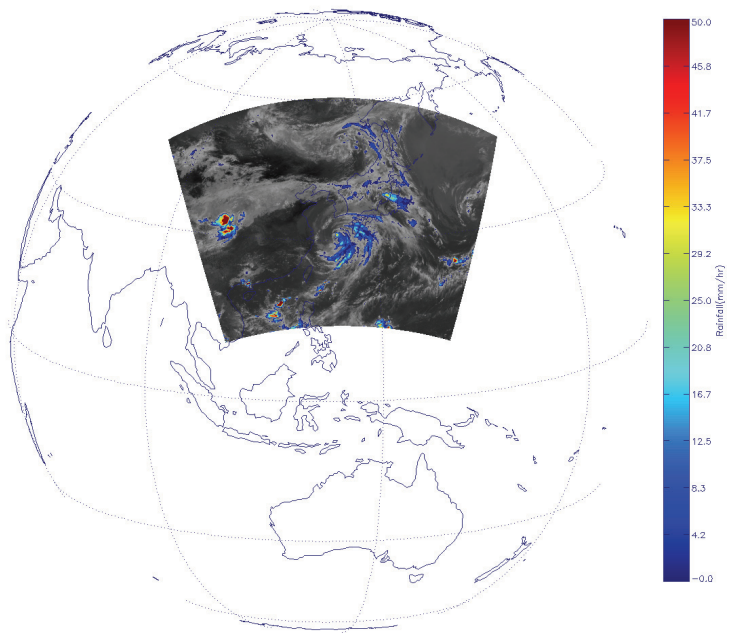
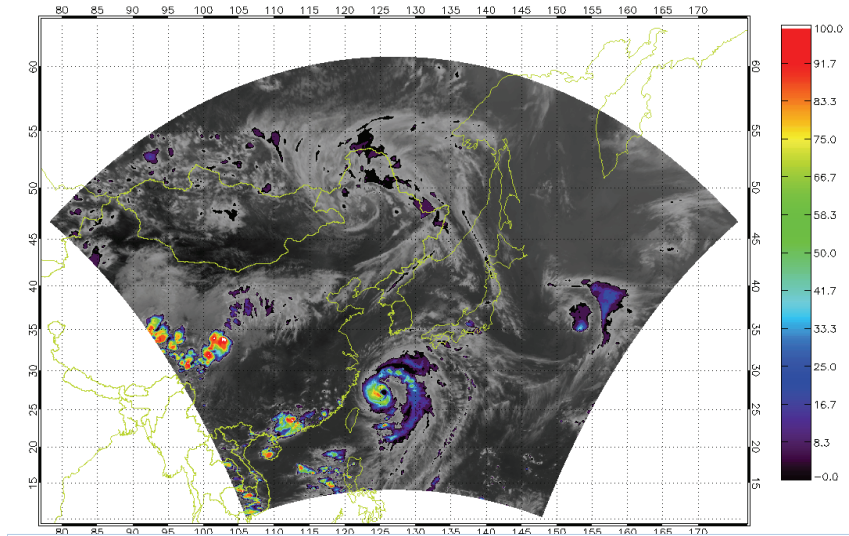


Figure 11. COMS measurement area for East Asia mode

4.2 연구방법

4.2.1 강수알고리즘

천리안 위성자료는 현재 국기기상위성센터에서 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. 6). 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-R 관계식을 만들어서 사용하였고 정지궤도 위성과의 회귀식을 통해서 강우강도값으로 변환하여 사용하였다(Fig. 12).

Table 6. Area of Measurements from COMS

FD* (Full Disk)	지구전구관측	
--------------------	--------	--

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

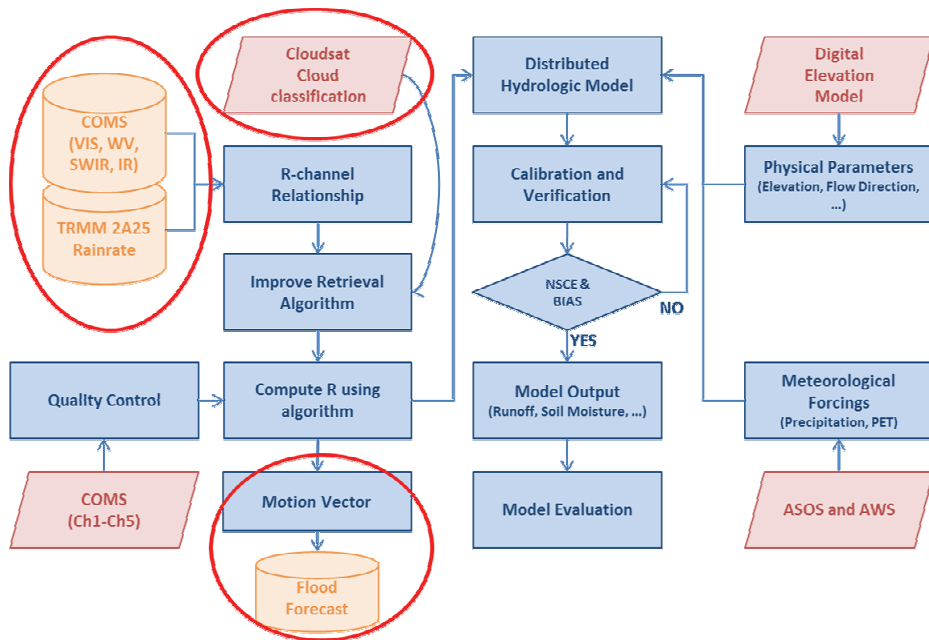


Figure 12. Flowchart of COMS data processing

지상관측자료와는 달리 균질한 강수자료를 제공하는 TRMM PR센서로부터 얻을 수 있는 강우강도와 VIRS로부터 얻을 수 있는 복사휘도값과의 시공간이 같은 자료를 만들어 한반도에 적합한 Z-R관계식을 만들고자 하였다. 일반적으로 레이더를 이용한 강술 알리즘은 에코 강도와 강우율의 관계를 Z-R관계식이라는 경험식을 이용하여 산출하는데 관계식은 다음과 같다.

$$Z = A \cdot R^b$$

여기서 Z는 반사도 인자이고 R은 강우율이고 A와 b는 상수이다. 이 관계식은 강수 유형 내에서 상당히 변하며, 강수형태와 지역에 따라 상수 A와 b의 값도 변한다. 따라서 TRMM 위성이 우리나라 내에서 가지는 Z-R관계식 중 A와 b의 값을 산출하기 위해서 TRMM의 PR 반사인자와 지상 우량계 강우강도를 먹급수 회귀방정식이란 통계적 방법을 이용하여 지상에서 3.75km까지 0.5km 간격으로 A와 b값을 구했다. 상관계수 값은 0.5km에서 0.73으로 가장 높았으며 이 때 A, b 각각의 값은 303, 0.72이다. Fig. 13은 A와 b의 값을 구할 때의 반사인자와 강우강도와의 관계를 나타내고 Table 7는 고도별 A,b값과 상관계수값을 나타내었다. 새롭게 산출한 Z-R 관계식 또한 간접 추정하는 방법으로서 내포된 에리값을 가지게 된다. 그럼에도 불구하고 한반도에 집중8우가 내릴 경우의 강수값을 산출하기 위하여 Z-R관계식을 산출하였다.

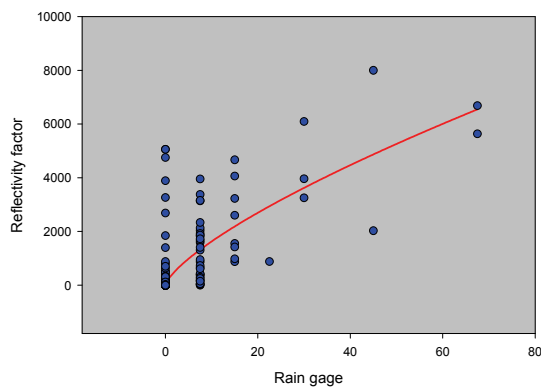


Figure 13. Comparison of the reflectivity with the rain intensity

Table 7. A, b value in altitude

고도 (km)	상관계수	A	b
0.25	0.71	405	0.63
0.5	0.73	303	0.72
0.75	0.69	328	0.70
1	0.69	314	0.72
1.25	0.66	348	0.68
1.5	0.64	321	0.72
1.75	0.64	301	0.77
2	0.60	296	0.79
2.25	0.58	412	0.76
2.5	0.54	836	0.44
2.75	0.49	975	0.37
3	0.40	546	0.44
3.25	0.44	98	0.87
3.5	0.51	43	0.91
3.75	0.59	13	1.12

강수량 알고리즘을 산출하기 위해 먼저 TMMM 위성이 관측한 한반도 부근의 집중호우 사례를 분류하였다. TRMM 위성이 우리나라를 지나가는 주기가 하루에 2회 정도에 불과하고 PR 센서가 한반도 남부지역이 최대 관측 가능하며, 집중호우 등 비가 많이 내리는 강우사상에 대해서 TRMM 위성이 동시간에 관측할 수 있는 경우가 아주 작다. 많은 연구사례를 선택하는데 어려움이 있었다. 그래서 육지내에서 일어나는 호우뿐만 아니라 가까운 해양에서 발생하는 강우형태도 포함을 하였다. 우리나라에서는 주로 여름철에 국지성 집중호우 현상과 태풍에 의한 호우로 수해를 입는 것이 큰 특징을 이루기 때문에 홍수예방 차원에서 알고리즘을 만들기 위한 첫 단계로서 이러한 현상을 중심으로 총 4가지 사례를 선정하였다. 자료를 다양한 집중호우현상을 알고리즘에 넣기 위해서 1998년 여름 지리산에 있었던 집중호우와 1998년 가을에 있었던 태풍에 의한 호우, 1999년 중부 지방을 강타했던 구름 중에서 서해상에서 TRMM이 관측한 자료와 연이어 한반도를 지나간 올가 태풍의 사례 등 총 4가지를 선택하였다.

이러 각 사례에서 관측한 TRMM의 PR값중 Level 1자료인 반사인자 값인 1C21 자료를 NASA로부터 자료를 입수하였고 같은 시각의 가시·적외복사계(VIRS)의 데이터도 입수하였다. PR에 의한 값은 지상에서 250m 간격으로 20단계의 반사인자값으로 이루어져 있는데 앞에서 새롭게 산출한 Z-R관계식에 값을 넣어 강우강도로 환산하였다. VIRS에서는 복사값을 플랑크 법칙에 의해서 TBB값으로 환산하였다. 일반적으로 적외 값에서 TBB가 낮을수록 일반적으로 대류활동이 활발하고 강수가 많다고 알려져 왔다. 본 연구에서는 일반강수량보다는 여름철에 나타나는 집중호우를 추정하므로 적외온도값(TBB)을 240k이상으로 제한하고 이보다 낮은 경우만 강수량을 부여하였다. 위의 조건에 맞는 TRMM의 PR과 VIRS값에 일치하는 총 Pixel 수는 약 12000여개이다. PR의 강우강도와 VIRS의 TBB온도에 관한 산포도를 Fig 14에 나타내었다. 이들을 관계 회귀식에 넣어 강수량알고리즘을 산출하였는데 식은 다음과 같다.

$$R = 0.361565 \times 10^{10} \times \exp(-0.029797 \times T^{1.2}) \quad (1)$$

여기서 R은 강우강도로 단위는 mm/h이고 T는 휘도 온도로 단위는 켈빈온도이다. 이 알고리즘에 의한 적외채널의 TBB온도에 따른 강우강도의 관계를 Fig. 15에 나타내었다.

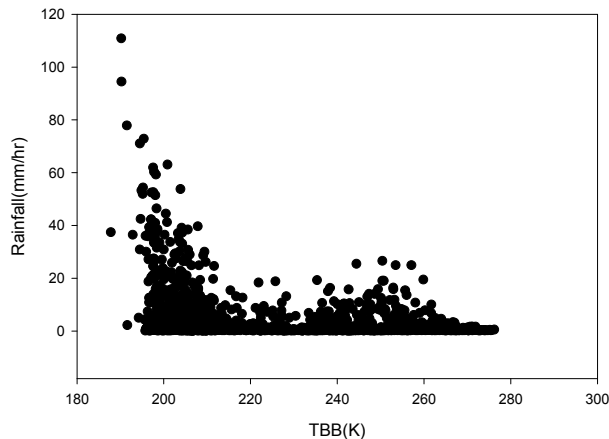


Figure 14. Scatterplot for each temperature

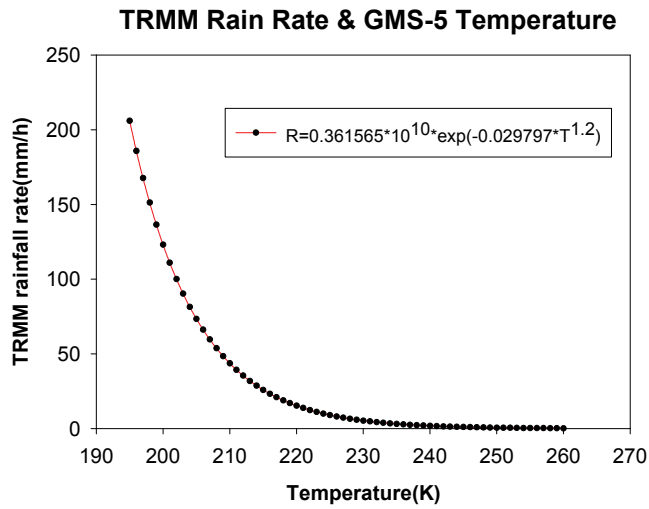


Figure 15. Mean rainfall rate for each temperature 195.0 to 260.K

개발된 천리안 강수알고리즘 강수자료 수문학적 이용에 대한 평가를 하기 위해서 대상유역을 크게 4개의 대권역으로 분류하였다. 대의권역은 산맥에 따라 형성된 자연적인 독립된 대하천을 중심으로 분류하였다. 4개의 대권역은 한강, 낙동강, 금강, 섬진·영산강으로 각각의 유역에 대해서 천리안 강수자료의 분석을 수행하였다(Fig. 16).

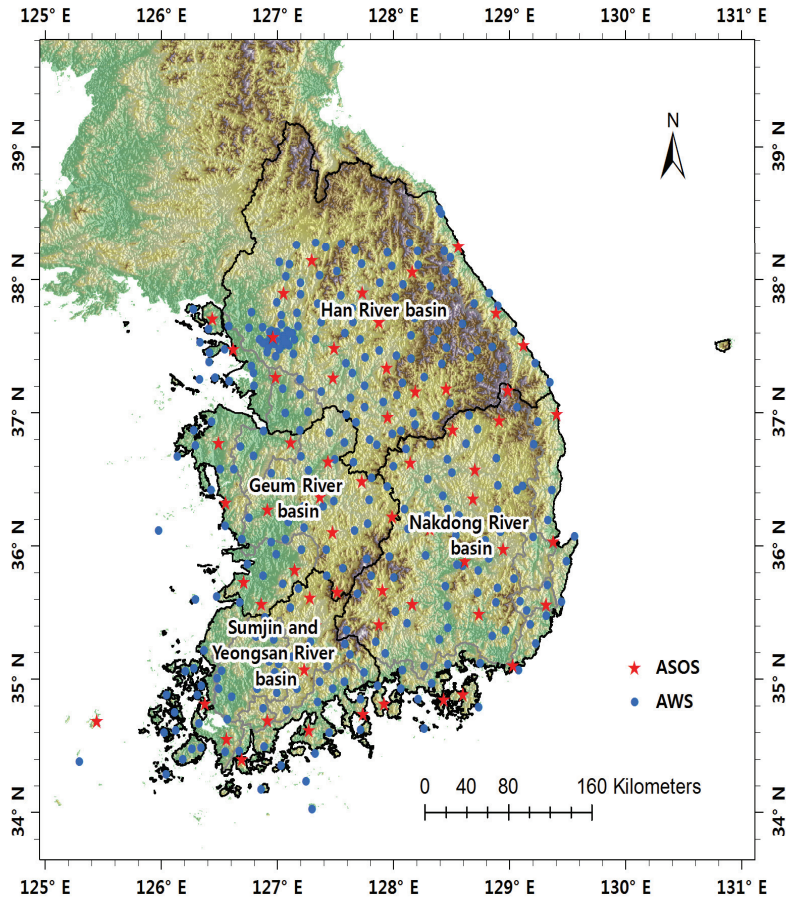


Figure 16. The four major river basins

지상관측자료로는 중관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 61개 지점에 대하여 천리안 위성의 수집기간인 2011년 4월부터 2012년 4월까지 1년간의 일강수량 자료를 수집하였다(Fig. 17). 수집된 강수량 자료는 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 섬진영산강 권역에는 목포, 여수, 순천 등 총 10개 지점의 관측자료를 이용하였다(Fig. 18).

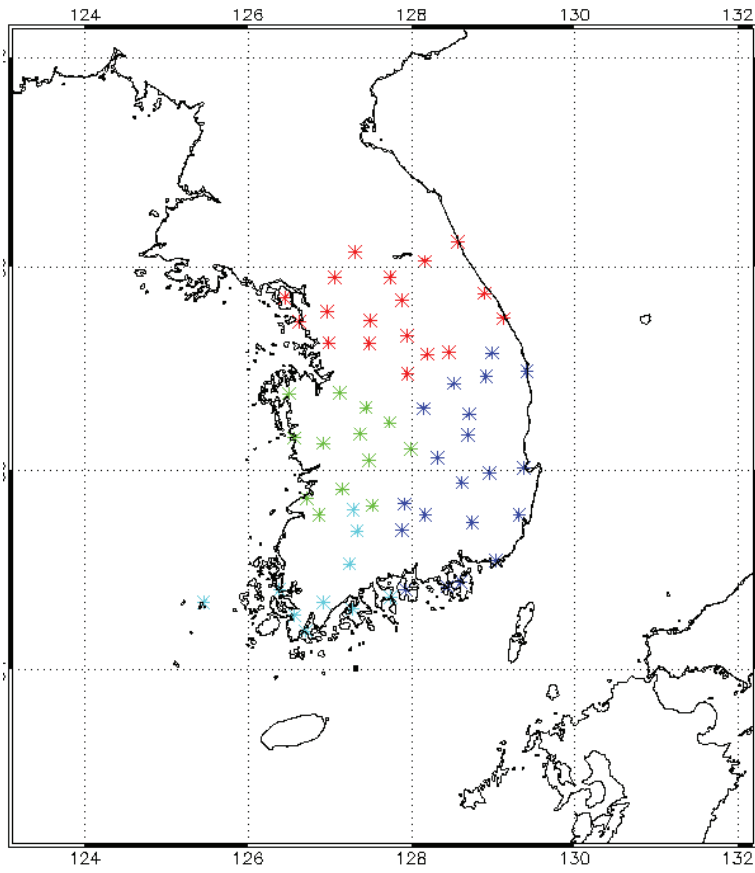


Figure 17. Locations of ASOS

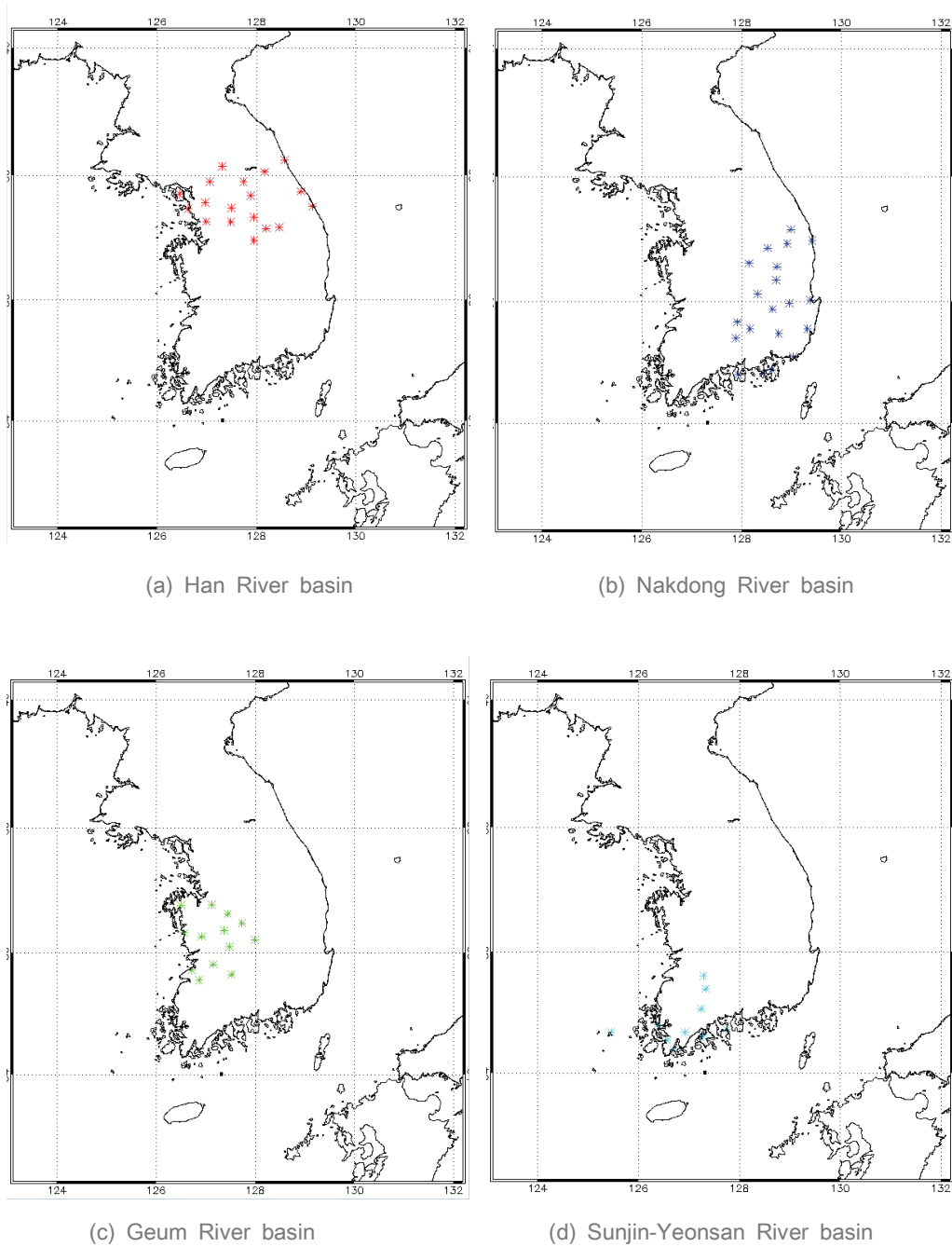


Figure 18. Locations of ASOS for (a)Han River basin (b)Nakdong River basin (c)Geum River basin (d)Sunjin-Yeonsan River basin

본 연구에서는 천리안 위성 강수 강수자료가 종관기상관측시스템 자료와 비교하기 위해서 천리안 위성 강수 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.

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

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

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

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n X_{sat,i}}{\sum_{i=1}^n X_{obs,i}} \quad (5)$$

$$EFF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{sat,i} - X_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \overline{X_{obs}})^2} \quad (6)$$

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.

4.2.2 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. 그림 19는 COMS위성의 30분 평균 강수량 자료와 ASOS자료를 비교한 것이고 그림 20은 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 제공 근오차는 11.07, 10.27, 12.02, 10.25mm/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, 21.298mm/day로 낙동강대권역이 가장 낮았으며 금강대권역은 27mm/day로 가장 오차가 큰 것으로 나타났다.

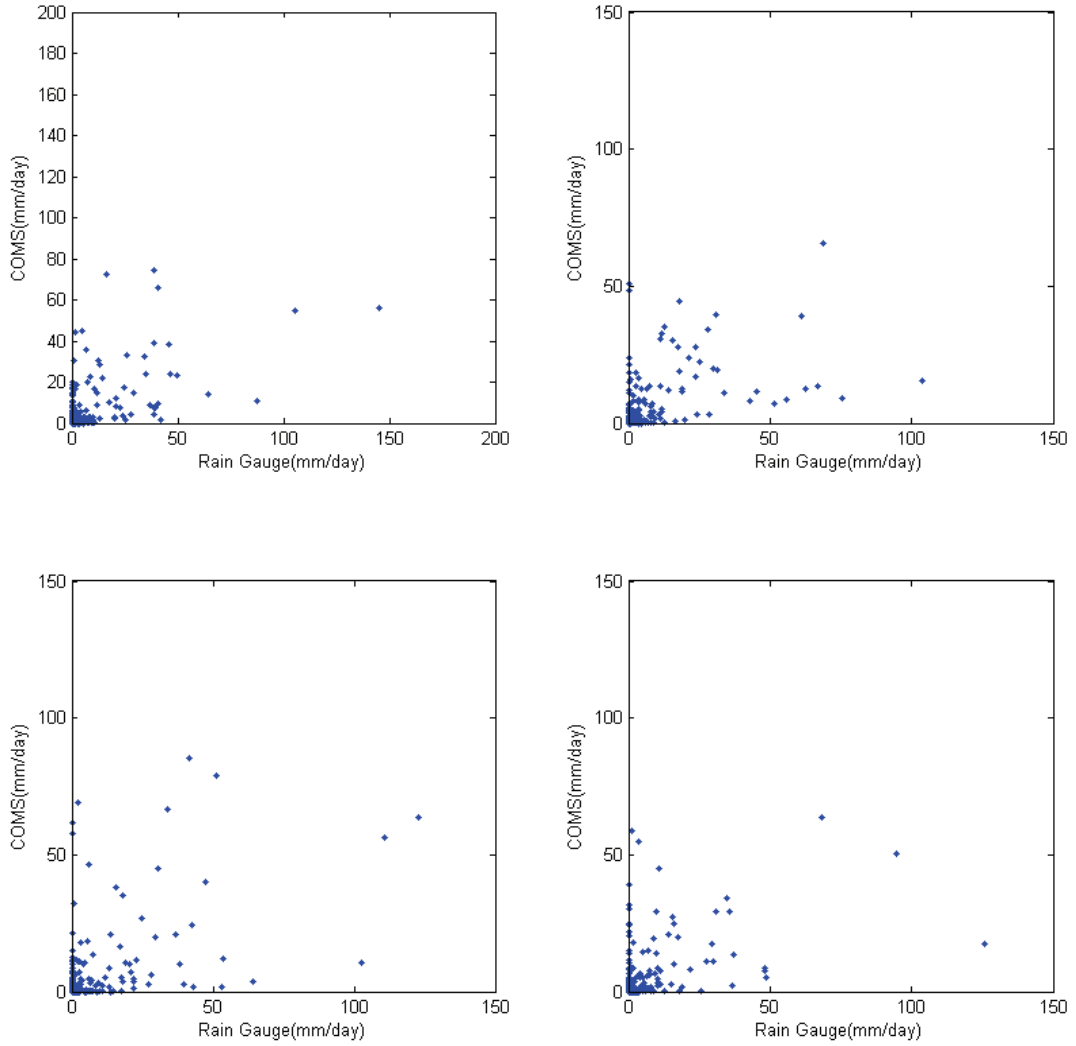


Figure 19. Scatterplot comparison with retrieved satellite rainfall and rain gauge for mean of 30min from COMS

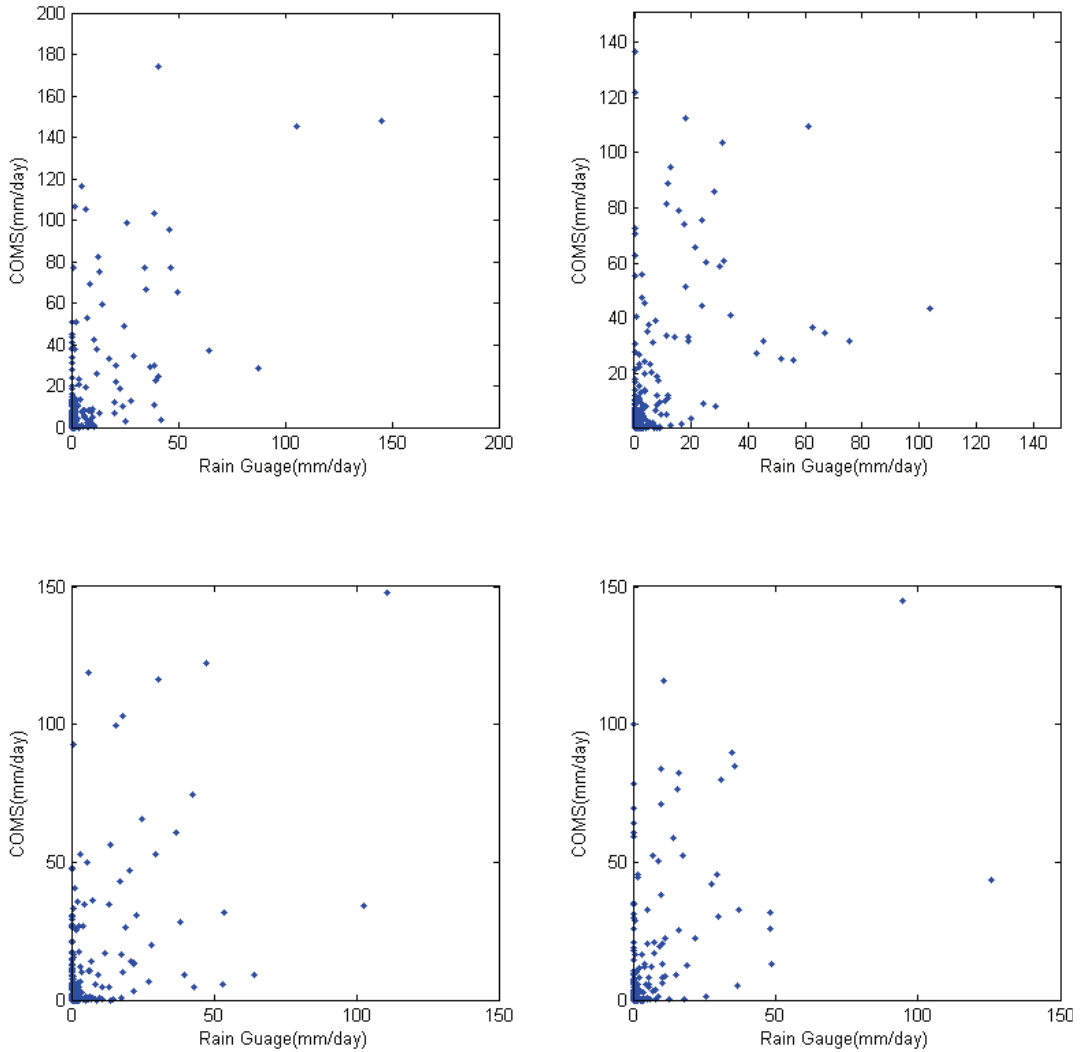


Figure 20. scatterplot comparison with retrieved satellite rainfall and rain gauge for mean of 8min from COMS

2011년 4월부터 2012년 4월까지 월평균강수량을 비교한 결과를 Fig. 21과 Fig. 22에 나타내었다. Fig. 21과 같이 천리안 30분 유역 평균 강수량 값이 지상관측자료에 비해서 여름, 가을에 상대적으로 과소 추정하였으며 겨울 봄에는 과대 추정하였다. 8분 평균 강수량은 Fig. 21과 Fig. 22에서도 보듯이 모든 계절에서 과대 추정하였다. 30분 자

료와 8분자료를 평균하여 지상관측자료와 비교한 결과 여름에는 평균한 값이 지상관측 자료와 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 온도로 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.

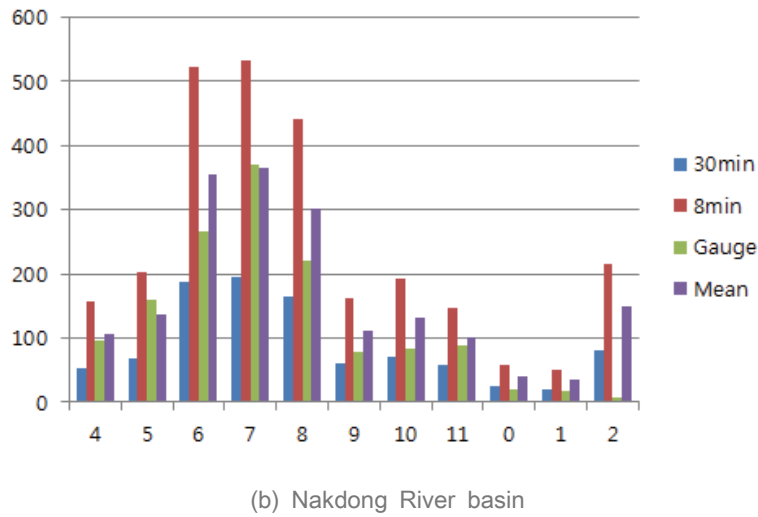
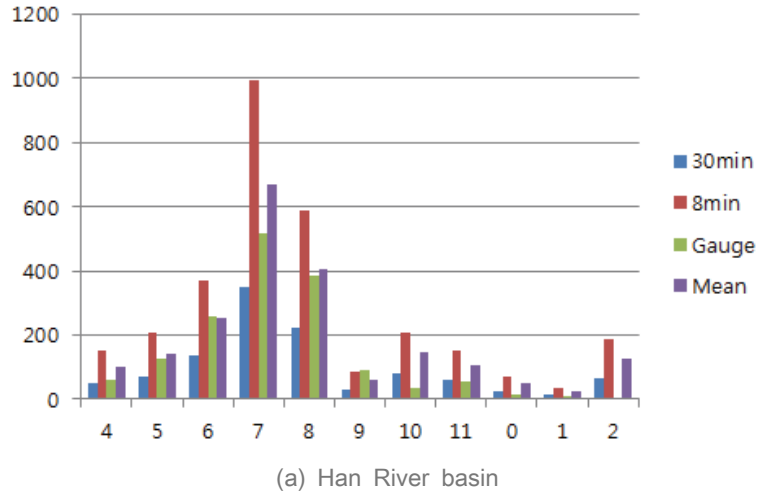
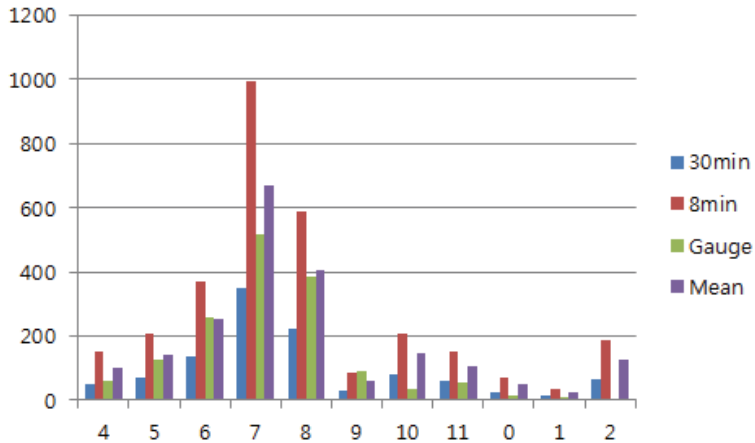
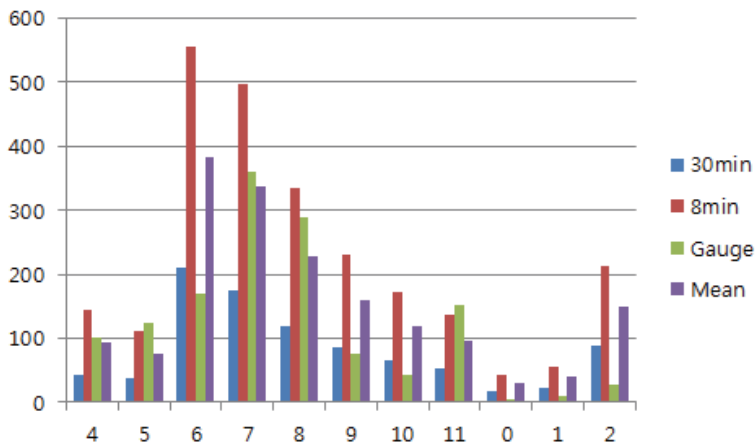


Figure 21. Comparison with monthly COMS 8min, 30min, mean rainfall of retrieved satellite rainfall and rain gauge for (a)Han River basin (b) Nakdong River basin



(a) Geum River basin



(b) Sunjin-Yeonsan River basin

Figure 22. 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. 8에서는 각각 천리안 30분 평균 일강수량과 8분 평균 강수량에 대한 평가지수를 4대강 유역별로 나타낸 것이다. 통계적 평가 결과값 MAE의 경우 천리안 30분 일

강수량의 경우 전체적으로 천리안 8분 자료보다 낮은 것으로 나타났으며, 8분자료의 경우 섬진·영산강의 MAE 7.15mm 로 가장 낮았으며, 30분의 자료는 3.57mm로 8분자료와 마찬가지로 섬진·영산강의 MAE가 가장 낮게 나타났다. ME의 경우에는 8분자료에서는 4.78mm로 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 볼 수 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 30분자료가 8분자료로 우수한 것으로 나타났으며, 섬진·영산강 권역이 가장 낮은 것으로 나타났다.

Table 8. 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

4.2.3 초단기 강우예측 모형

4.2.3.1 예측 방법

1) Region matching algorithms

Region matching 알고리즘은 기상 및 기후분야에서 광범위하게 사용하는 방법중의 하나이다. 이 방법은 두 작은 지역에서 차이나 나는 부분을 찾는 방법이다. 이 알고리즘은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\min_d C(d_x, d_y, x_0, y_0, t_0) = F[S(x, y, t_0), s(x - d_x, y - d_y, t + \delta t)] \quad (6)$$

여기서 C는 두 연속되는 데이터 벡터 cost function이며, F는 두 개의 이동된 이미지의 유사성을 찾는 function이다. 이것의 목적은 이동벡터(d_x, d_y)를 찾는 것이다. 일반적으로 두 이미지의 불일치 값을 줄이는 것인데 이것을 표현하면 다음과 같다.

$$\min_{d_x, d_y} \sum_{i=1}^N [s(x_i, y_i, t_0) - s(x_i - d_x, y_i - d_y)]^2 \quad (7)$$

Caffori and Rocca는 maximum likelihood 알고리즘을 사용하여 최소치를 구했다. Region matching 알고리즘은 매우 정확하다. 그러나 문제점이 있는데 이 문제점은 매우 복잡한 계산능력이 필요하기 때문에 실시간 응용분야에서는 적당하지 않다.

2) Phase differencne methods

만약 두 개의 이미지 $s(x, y)$, $g(x, y)$ 가 있다고 고려하면

$$g(x, y) = s(x - d_x, y - d_y) \quad (8)$$

$s(x, y)$ 의 푸리에 변환 $S(w_x, w_y)$ 의 이동한 것을 다시 쓰면

$$s(x - d_x, y - d_y) \Leftrightarrow S(w_x, w_y) e^{[-2\pi(w_x d_x + w_y d_y)]} \quad (9)$$

여기서 두 이미지의 시간을 t_0 과 t_1 에 따른 푸리에 변환 $S_0(w_x, w_y)$, $S_1(w_x, w_y)$ 는

$$\psi_0(w_x, w_y) - \psi(w_x, w_y) = \delta\psi(w_x, w_y) = -2\pi(w_x d_x + w_y d_y) \quad (10)$$

이것은 다음과 같은 식이 된다.

$$-2\pi \begin{bmatrix} w_{x1} & w_{y1} \\ \vdots & \vdots \\ w_{xN} & w_{yN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta\psi(w_{x1}, w_{y1}) \\ \delta\psi(w_{x2}, w_{y2}) \\ \vdots \\ \delta\psi(w_{xN}, w_{yN}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

위상차방법은 단지 정형화된 환경에서만 적용될 수 있다. 푸리에 변환 방법과 마찬가지로 컴퓨팅 능력에 대한 문제를 가지고 있다.

3) Spatio-temporal methods

연속되는 두 이미지를 다음과 같이 표현된다.

$$s(x, y, t) = s_0(\alpha(x, y, t)) \quad (12)$$

$$v_x(x, y, t) \frac{\delta s}{\delta x} + v_y(x, y, t) \frac{\delta s}{\delta y} + \frac{\delta s}{\delta t} = 0 \quad (13)$$

$$v_x(x, y, t) = \frac{\left(\frac{\delta\alpha_y}{\delta y} \frac{\delta\alpha_x}{\delta t} - \frac{\delta\alpha_x}{\delta y} \frac{\delta\alpha_y}{\delta t} \right)}{\left(\frac{\delta\alpha_x}{\delta y} \frac{\delta\alpha_y}{\delta y} - \frac{\delta\alpha_x}{\delta y} \frac{\delta\alpha_y}{\delta x} \right)} \quad (14)$$

$$v_y(x, y, t) = \frac{\left(\frac{\delta\alpha_x}{\delta x} \frac{\delta\alpha_y}{\delta t} - \frac{\delta\alpha_y}{\delta x} \frac{\delta\alpha_x}{\delta t} \right)}{\left(\frac{\delta\alpha_x}{\delta x} \frac{\delta\alpha_y}{\delta y} - \frac{\delta\alpha_x}{\delta y} \frac{\delta\alpha_y}{\delta x} \right)} \quad (15)$$

$$\frac{\delta s}{\delta x} = \frac{\delta s_0}{\delta \alpha_x} \frac{\delta \alpha_x}{\delta x} + \frac{\delta s_0}{\delta \alpha_y} \frac{\delta \alpha_y}{\delta x} \quad (16)$$

$$\frac{\delta s}{\delta y} = \frac{\delta s_0}{\delta \alpha_x} \frac{\delta \alpha_x}{\delta y} + \frac{\delta s_0}{\delta \alpha_y} \frac{\delta \alpha_y}{\delta y} \quad (17)$$

$$\frac{\delta s}{\delta t} = \frac{\delta s_0}{\delta \alpha_x} \frac{\delta \alpha_x}{\delta t} + \frac{\delta s_0}{\delta \alpha_y} \frac{\delta \alpha_y}{\delta t} \quad (18)$$

Spatio-temporal 방법은 간단 변환 벡터에 기반으로 이것은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$s(x, y, t) = s_0(x - v_x(t - t_0), y - v_y(t - t_0)) \quad (19)$$

$$v_x \frac{\delta s}{\delta x} + v_y \frac{\delta s}{\delta y} + \frac{\delta s}{\delta t} = 0 \quad (20)$$

이 방법의 가장 큰 문제점은 각 이미지 가장자리에서 문제가 발생한다.

4.2.3.2 외삽법을 이용한 예측 방법

상관계수 방법은 panofsky and brier(1958) 이후로 기상학분야에서 많이 사용되어 왔다. 상관계수를 이용하여 강수량을 예측하는 방법은 hilst and russo(1960)에 처음으로 사용되었다. 이 연구는 연속되는 비구름의 이미지에서 발생하는 차에 대한 최대상관계수를 구하는 방법을 이용하였다. 이러한 방법은 wilson(1966)에 의해서 더 발전되었다. wilson은 레이더의 연속되는 이미지의 다양한 스케일에서의 레이더 에코의 이동에 근거하여 상관분석값을 산출 적용하였다. leese et al(1971)은 레이더 대신 구름 이미지의 교차상관에 기반한 이동벡터를 사용하였다. 이 방법은 처음으로 한 지역을 선택하여 공간적 속도의 상관을 이용한 방법을 이용하였다. 여기서의 상관계수방법은 전통적으로 사용되던 상관분석방법에서 발생하는 에러를 줄이는 하나의 대안이 되었으며, region matching 방법과 phase difference 방법에 비해서 훨씬 빠른 계산으로 실시간 초단기 예측(0-2h)에서는 매우 효과적으로 사용할 수 있다. COMS에서 외삽법을 이용한 구름

벡터를 구하기 위해서 연속되는 이미지를 $s(x,y)$ 와 $g(x,y)$ 라고 두면 교차상관식은 다음과 같다.

$$R_{gs}(n_1, n_2) = E[s(k_1, k_2)g^*(k_1 - n_1, k_2 - n_2)] \quad (21)$$

$$R_{gs}(n_1, n_2) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{(2N+1)} \sum_{k_1=-N}^N \sum_{k_2=-N}^N s(k_1, k_2)g^*(k_1 - n_1, k_2 - n_2) \quad (22)$$

$g(x,y)$ 는 아래와 같이 표현되며

$$g(x,y) = s(x - d_x, y - d_y) \quad (23)$$

교차상관방법은 최종적으로 표현된다.

$$R_{gs}(n_1, n_2) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{(2N+1)} \sum_{k_1=-N}^N \sum_{k_2=-N}^N s(k_1, k_2)s^*(k_1 - n_1 - d_x, k_2 - n_2 - d_y) \quad (24)$$

간단히 설명하면, 교차상관식의 최대값은 다음과 같다.

$$n_1 = d_x, \quad n_2 = d_y$$

따라서 두 이미지의 이동된 교차상관계수값을 구하면 이동벡터를 산출할수 있다. 천리안 자료는 이전 일본 정지궤도 위성 GMS 위성자료와 달리 한반도 영역을 대상으로 적외채널 자료들을 8-15분 간격으로 받아볼 수 있어서 집중호우 예보에 매우 유리하다 (Fig. 24).

초단기 강우예측을 하기 위해서 연속되는 구름의 교차상관을 통해서 이동벡터를 산출하여 예측 모형을 산출하였다. 교차상관 기법은 연속되는 구름 자료에 대해서 두 윈도우사의 상관계수의 최대치를 찾아냄으로써 구름의 이동방향과 이동속도를 산출하는 방법이다. 이 기법은 연속되는 천리안 위성영상에서 이전 T_1 에서 다음 관측 $T_2 = (T_1 + \Delta T)$ 의 구름이 이동할수 있는 최대 반경내에서 최대상관을 가진 윈도우를 찾고 벡터를 산출하게 된다 (Fig. 23).

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 고려되어야 실시간 초단기 예측정보가 가능하다. 이번 연구에서 개발된 이동벡터는 3×3 픽셀 보간법을 통해서 처리시간을 3분으로 단축시켜 실시간 초단기 예보가 가능하게 하였다. Fig. 25는 COMS위성의 자료처리 및 구름이동벡터 산정, 외삽법을 이용한 초단기 예측에 대한 전체적인 계산과정을 보여주는 흐름도이다.

기 개발된 이동벡터의 결과값을 한반도 지역의 천리안 적외채널 영상에 적용하여 1시간 이후의 이동벡터를 산출하였다(Fig. 26;Fig 27).

4.3.3 정량적 평가지수

본 연구에서는 강우예측시스템의 성능을 평가하기 위해서 천리안 관측 위성 영상 이미지와 예측된 위성 영상 이미지의 차이를 평가하기 위해서 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error : RMSE)와 상관계수(C.C : Correlation Coefficient) 등 두가지 통계적 방법을 이용하였다. 평균제곱근 오차는 강우예측시스템에서 예측한 추정값과 COMS 원래 영상에서 관측되는 값의 차이를 나타낸다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (25)$$

여기서, $X_{sat,i}$ 와 $X_{obs,i}$ 는 각각 i 번째 예측시간에 대하여 천리안 원 영상이미지와 COMS을 이용하여 예측한 영상이미지 값을 나타낸다. n 은 전체 분석에 사용된 영상 이미지 픽셀값을 의미한다.

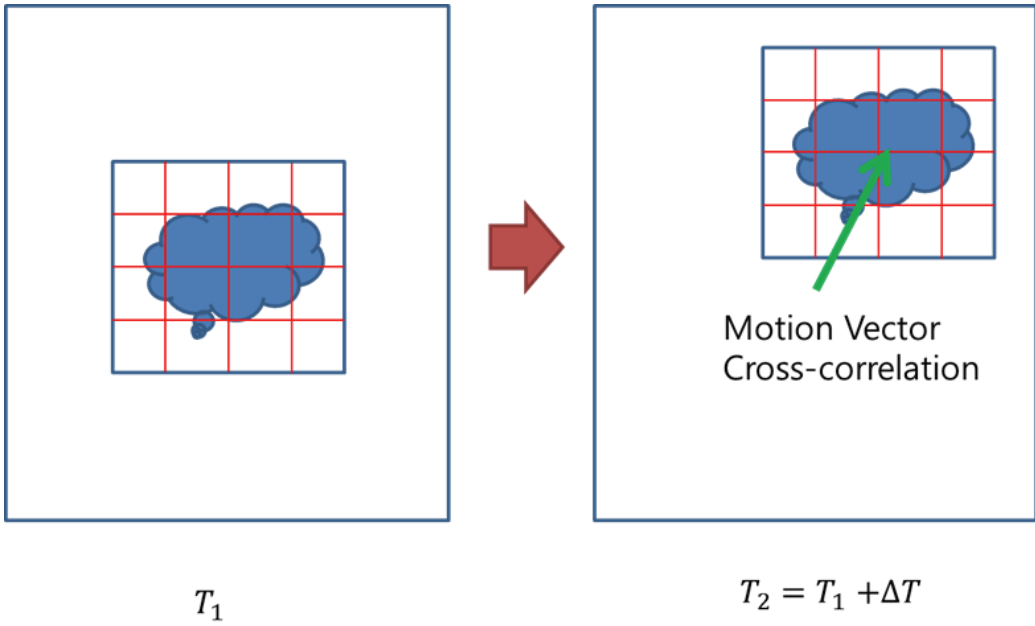


Figure 23. Illustration of correlation analysis and derivation for the motion vector

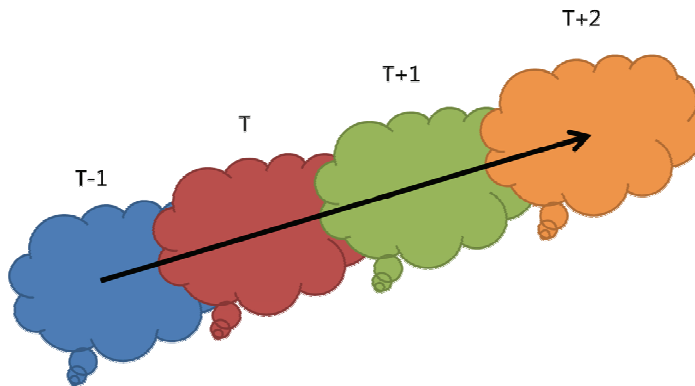


Figure 24. Illustration of cloud cluster forecasting

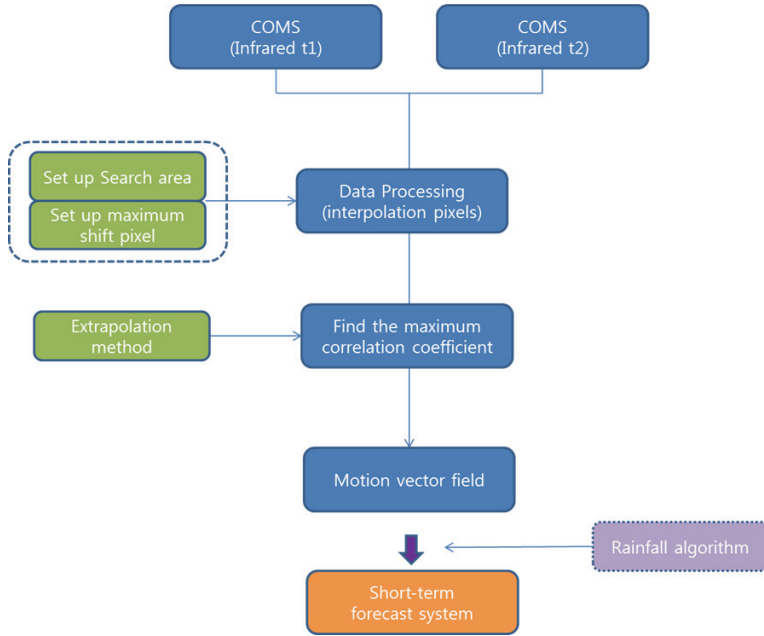


Figure 25. Flowchart of motion vector using COMS satellite

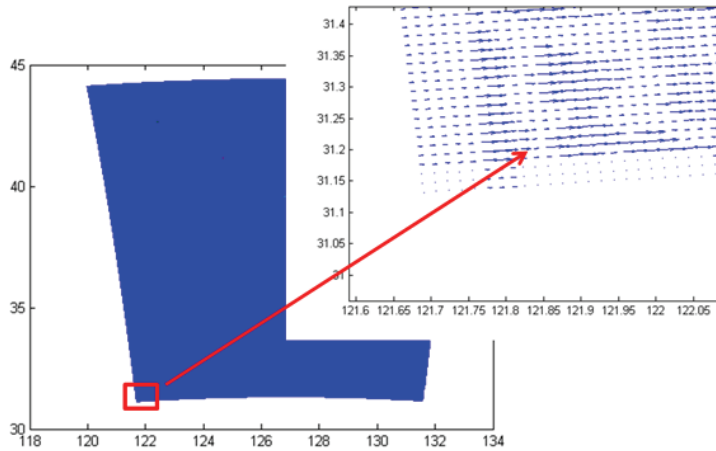


Figure 26. Motion vector field using COMS IR image

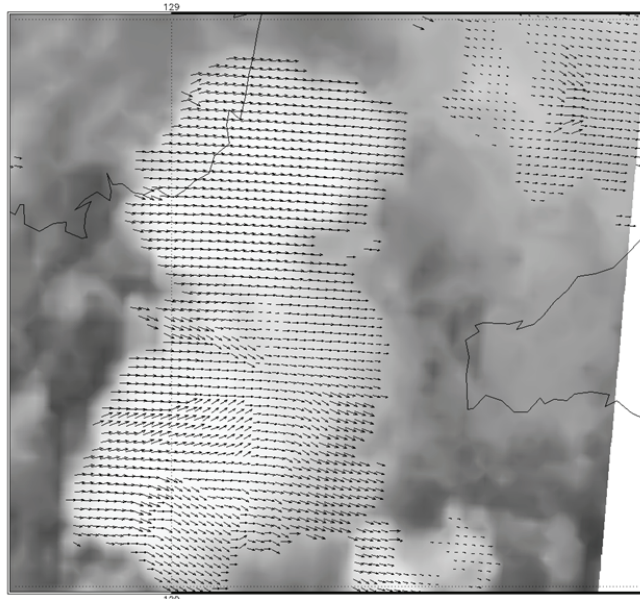


Figure 27. Cloud motion vector field from COMS IR image 15min later

5. 연구내용

5.1 사례연구

5.1.1 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(Fig. 28; Table. 9). 부산시 및 기장군 일원에는 시간당 130mm, 100년에 한번 발생할 정도의 기습 집

중호우로 인하여 인명피해는 10명으로 사망 5명, 실종 5명이며, 이재민은 86세대 135명, 주택 86동이 침수되었고 농작물은 412ha가 침수 되었다.

Table 9. Rainfall on 25 Aug, 2014 for different regions

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



Figure 28. Rainfall map from ground station on 25 Aug, 2014

부산 및 기장에 많은 집중호우가 내린 이유는 22년만에 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 공기가 되고, 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 북태평양기단의 뜨거운 공기와 한국 북서쪽에 위치하고 있던 시베리아 기단 사이에 통로가 만들어지고 급기야 한국 남서쪽에서 저기압이 형성되어 정체전선이 만들어졌기 때문에 홍수로 인한 침수피해를 입었다.

Fig. 29는 오전 11시부터 오후 3시까지 30분 간격으로 COMS 한반도 적외채널을 나타내었다. 서해안쪽에서 발달한 비구름대가 빠른 시간을 통해서 동쪽으로 이동하며, 경남과 부산일대에 많은 집중호우가 있었다. 이 중에서 부산에 영향을 미쳤던 영상이미지 12시 45분 영상과 1시 영상을 이용하여 이동벡터를 산출하여 1시 이후 15분 간격으로 이동벡터를 산출하고 14:15(KST) 이미지를 Fig. 30에 나타내었다. 2시 관측된 적외 채널 이미지를 Fig. 31에 나타내었고, 1시간 후를 예측한 2시 영상에 대한 전체 적외영상과 강우알고리즘을 적용한 강수 영상 이미지와 부산 지역을 중심으로 확대한 영상을 Fig. 32에 나타내었다. 관측된 영상 이미지와 예측된 이미지를 비교 분석하면 대체적으로 결과값이 양호하다는 것을 알 수 있다. 1시간 예측성능의 정량적 평가 비교결과는 상관계수값은 0.78이고 TBB 온도에 대한 RMSE값은 10.7535로 비교적 좋은 값을 나타내었다.

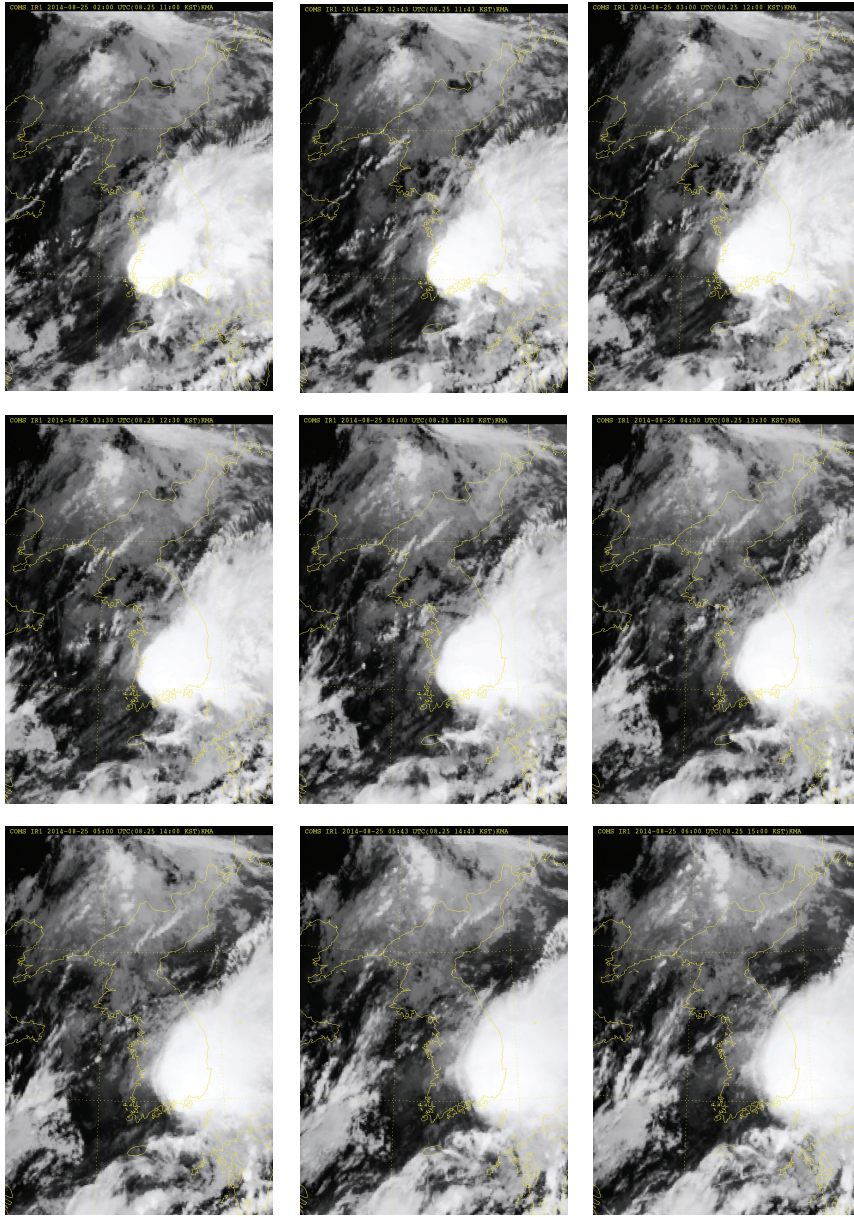
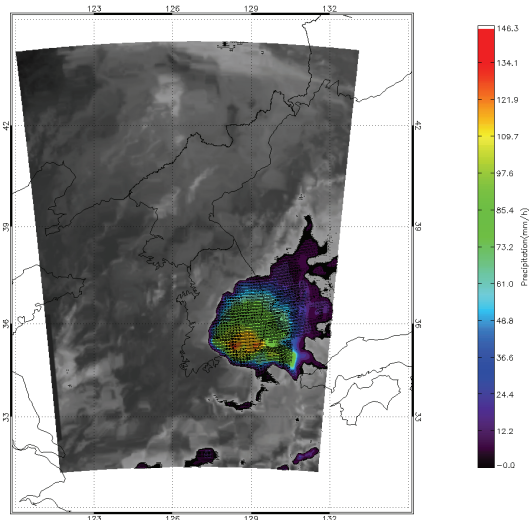
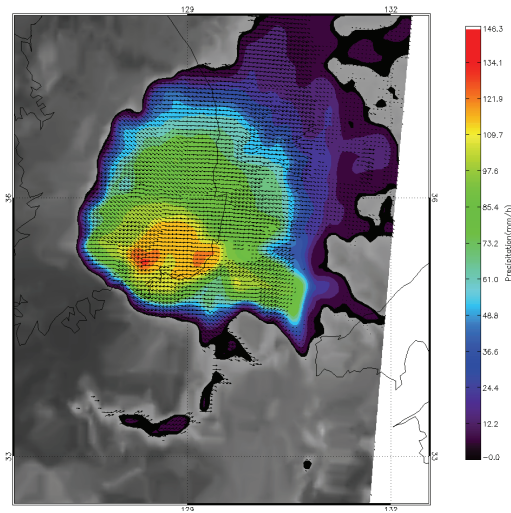


Figure 29. COMS IR image from 1100(KST) to 1500(KST)

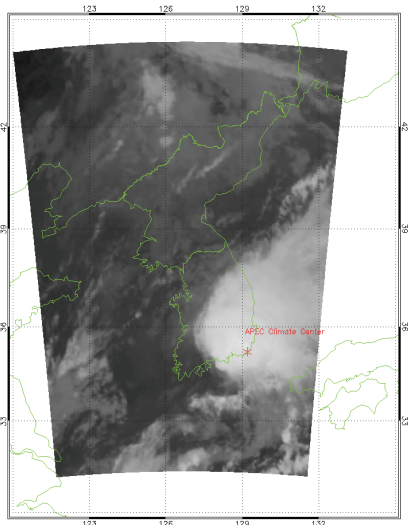


(a)

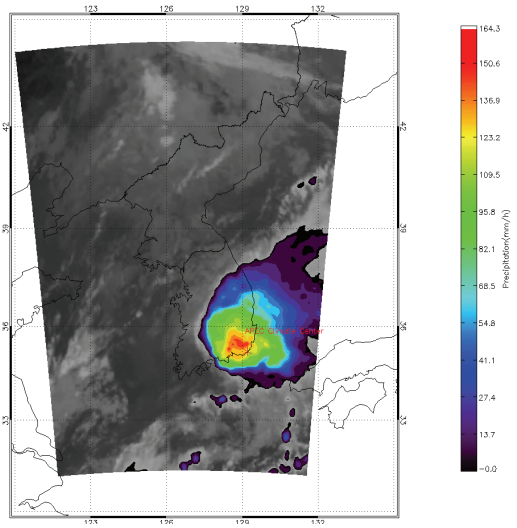


(b)

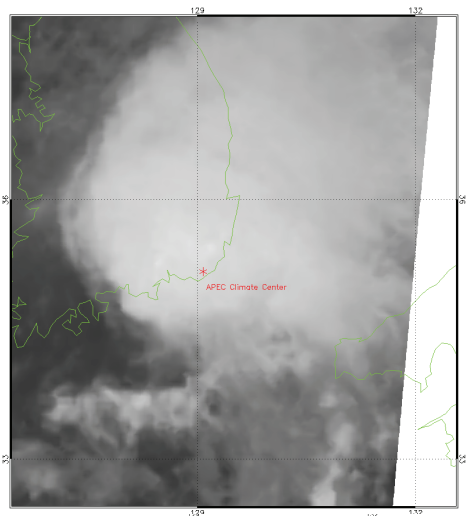
Figure 30. Motion Vector (a) forecasting of image and (b) zoom-in forecasting of image on 1415(KST) on 25 Aug 2014.



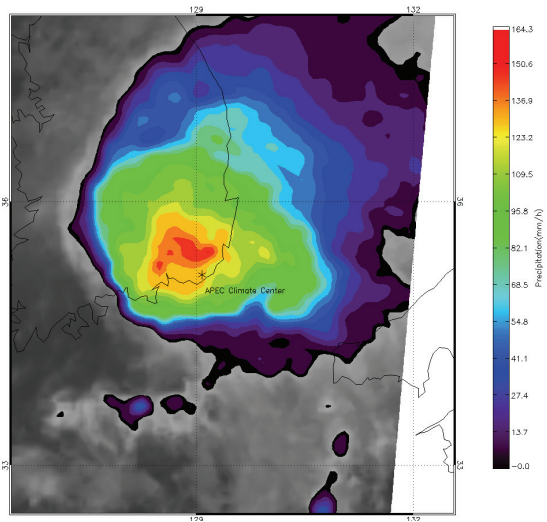
(a)



(b)

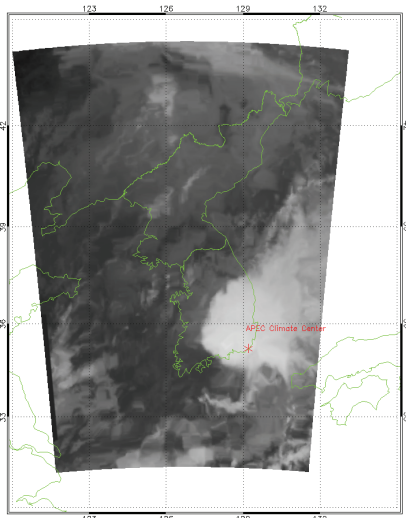


(c)

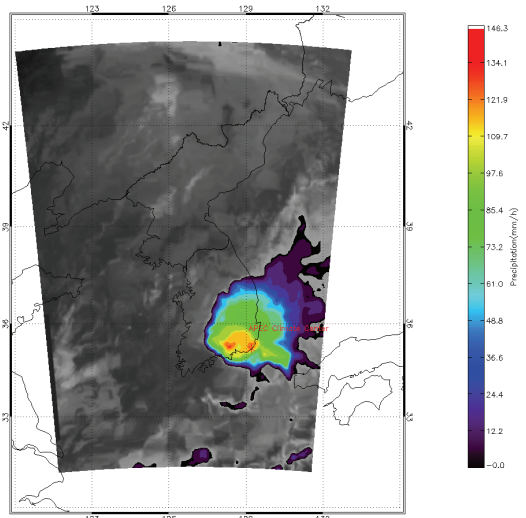


(d)

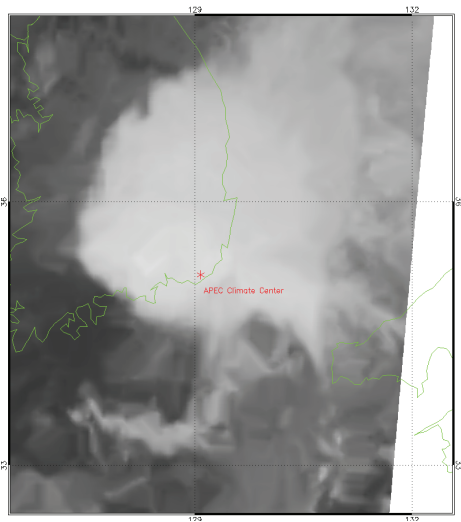
Figure 31. COMS IR measured image (a) (c) and rainfall image (b) (d) on 1415(KST) on 25 Aug 2014.



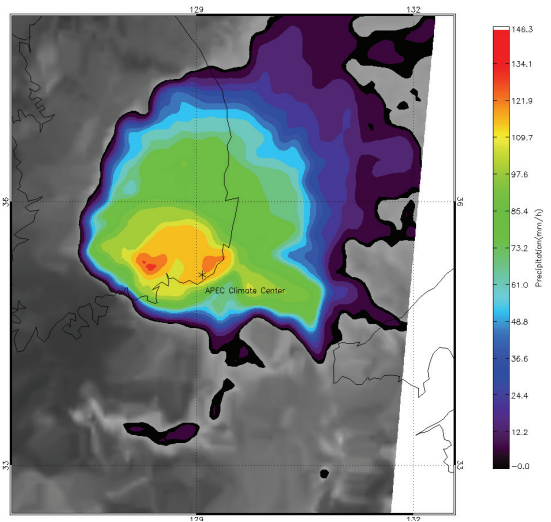
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 32. COMS IR forecasting image (a) (c) and rainfall forecasting image (b) (d) on 1415(KST) on 25 Aug 2014.

5.1.2 태풍 볼라벤

5.1.2.1 태풍 볼라벤 이동경로와 피해상황

태풍 볼라벤(태풍 번호: 1215, JTWC 지정 번호: 16W[1], 국제명: BOLAVEN, 필리핀 기상청(PAGASA) 지정 이름: Julian)은 2012년에 북서태평양에서 발생한 15번째 태풍이자 제4호 태풍 구출에 이어 2번째 슈퍼태풍으로 중심기압이 910hPa까지 도달해 현재 2012년에 발생한 모든 태풍 중 가장 강한 태풍이 되었다. 태풍 볼라벤은 제14호 태풍 덴빈과 후지와라 효과가 발생해 중국으로 서진하게 되는 초기 예상진로가 한반도로 북서진하게 되는 진로로 바뀌어져 한반도에 엄청난 피해를 입혔다. 대한민국에서 19명이 숨지고 조선민주주의인민공화국에서 59명이 숨지는 사고가 발생하는 등 피해가 속출했다. 특히 전라남도 완도군에서 최대순간풍속이 51.8m/s를 기록해 강풍으로는 2007년의 태풍 나리 이후 가장 강한 태풍이었고 전라남도 신안군 흑산도에서는 해면기압이 961.9hPa를 기록하여 기압으로는 2003년의 태풍 매미 이후 9년만의 극값을 세웠다. 또한 북위 28.4도에서 중심기압이 935hPa, 북위 30.5도에서 중심기압이 945hPa까지 떨어지는 등 상당한 고위도 지역에서도 '매우 강'한 세력을 유지했고 온대저기압으로 변질된 이후 남은 잔해들은 러시아 극동 지방까지 도달했다. 태풍 볼라벤은 2012년에 한반도에 영향을 준 3번째 태풍이었다.

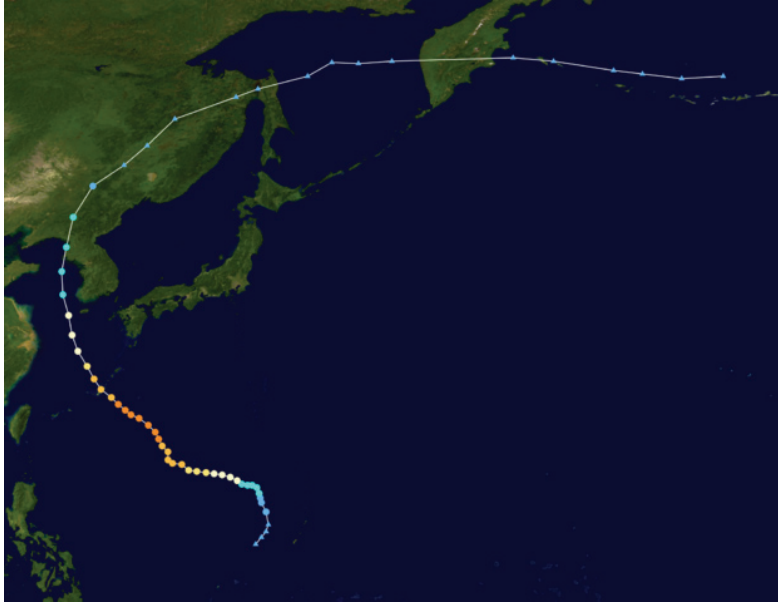


Figure 33. The track of Typhoon Bolaven

8월 20일 오전 9시, 괌 서쪽 해상에 있던 열대 저기압(TD)에 대해 일본 기상청의 태풍 발생 예보가 내렸었고, 같은 날 오후 3시, 괌 북서쪽 약 570km 부근 해상에서 중심 기압 1000hPa, 최대 풍속 18m/s, 강풍 반경 200km, 열대 폭풍(TS)급의 제15호 태풍 볼라벤이 되었다. 발생 직후부터 8월 24일까지 서북서진과 서진을 반복하며 이동하는 모습을 보였다(Fig. 33).

8월 21일 오후 3시, 괌 북서쪽 약 710km 부근 해상에서 중심 기압 985hPa, 최대 풍속 기압 975hPa, 최대 풍속 34m/s, 강풍 반경 280km의 강한 소형 태풍(TY)으로 급격하게 발달했다. 일본 오키나와를 향해 북쪽이나 서쪽으로 치우친 진행 방향을 교대로 보이기 시작했다. 또한 같은 날 오후 9시에는 일본 오키나와 남동쪽 약 700km 부근 해상에서 중심 기압 940hPa, 최대 풍속 47m/s, 강풍 반경 450km의 매우 강한 중형 태풍으로 더욱 발달했다. 8월 26일 오전 9시, 일본 기상청은 태풍 볼라벤이 오키나와 섬 나하 시 동남동쪽 해상에서 최성기를 맞이한 것으로 해석하였으며, 중심 기압은 910hPa, 최대 풍속은 100kt(약 55 m/s), 강풍 반경은 650km로 해석하였다.

이후 오키나와 섬을 지난 태풍 불라벤은 동중국해로 진출, 고위도로 북상하면서 점차 약화되기 시작했다. 그리고 8월 27일 오전 9시 무렵에는 일본 기상청 기준으로 중심 기압 950hPa, 최대 풍속 80kt(약 40m/s)를 기록하면서 매우 강한 태풍에서 강한 태풍으로 약화되었다.

8월 28일 새벽에는 황해 상으로 진출하면서, 한반도의 제주도과 남부 지방에 영향을 주었고, 아침부터 한반도에 직접적인 영향을 주었다. 대한민국 기상청은 태풍이 같은 날 오후 4시경에 북한 황해남도 강령군 장수리 부근에 상륙하였다고 분석했다. 이후 태풍 불라벤은 북한을 거쳐 중국으로 진입해 8월 29일 오전 6시에 북한 량강도 강계 북쪽 220 km 부근 육상에서 온대저기압으로 변질되었다.

대한민국에서 태풍 불라벤이 최초로 영향을 끼친 곳은 제주도였다. 이곳에서만 강풍으로 수많은 전신주와 가로등, 건물이 파손되었으며 정전이 발생해 7만 가구의 전기 공급이 중단되었다. 전라남도 완도군에서는 최대순간풍속이 51.8m/s가, 진도군에서는 43.6m/s가 각각 관측되었기도 했다. 8월 28일 전국에서 190만명에 달하는 주민이 정전 피해를 겪었고 3만 4천 가구를 제외한 모든 피해는 이 날 복구되었다. 또한 대한민국에서는 19명이 숨졌고 수백명이 대피하게 되는 사태가 벌어졌다. 언론기관들은 태풍 불라벤으로 인해 엄청난 피해를 입었다고 보도했다. 대한민국에서 배가 가장 많이 생산되는 전라남도 나주시에서는 약 1,400헥타르(배 작물의 60%에 해당한다.)에 달하는 농경지가 파괴되었다. 또한 전국에서 9,000헥타르(22,000 에이커)의 사과와 배 농장이 파괴되어 불라벤이 지나간 후 과일값은 엄청나게 뛰었다. 이 뿐만 아니라 단 하루만에 시금치는 124%가, 양배추는 72%가, 양상추의 값은 26%가 올랐다. 대한민국에서는 태풍 불라벤으로 인해 800억원(7천만 달러)의 재산피해액이 집계되었는데 이 중 170억원이 항공사의 손실액이었다.

5.1.2.2 태풍 불라벤 이동경로 예측 검증 결과

태풍에 대한 이동벡터 성능을 알아보기 위하여 태풍 불라벤에 대해서 강우예측시스템을 적용하여 보았다. 2012년 15:00 UTC 영상과 2012년 15:15 UTC 영상이미지로 태풍의 눈이 보이는 영상이미지를 선택하여 사례분석을 실시하였다. 외삽법을 이용한 이

동백터를 산출하여 Fig. 35와 Fig. 36에 나타내었다. 또한 Fig. 37와 Fig. 38은 15:30 UTC부터 16:15UTC 까지 한시간 15분 간격에 대한 COMS TBB온도값을 나타내었으며, Fig. 39와 Fig. 40은 같은 시간 같은 간격에 대한 COMS 예측 영상이미지에 대한 결과값을 두었다. 두 비교 영상 이미지에서 보면 원 천리안 관측영상에서 태풍 눈 주위의 원형 태풍 TBB값이 이동백터를 적용한 영상이미지를 보게 되면 원형 태풍 눈이 조금씩 무너지는 것을 볼 수 있다. 이것은 태풍의 성장과 같은 물리적 특성이 강우 예측 시스템에 포함이 되어 있지 않기 때문이다. 그러나 Fig. 34 결과값을 보면 전체적으로 부산지역의 집중호우에 비해 상관계수값과 평균 제곱근 오차가 상대적으로 더 양호한 결과값을 나타내었다. 태풍의 경우에는 갑자기 발생하는 집중호우와 달리 일정한 형태를 유지하며 이동하기 때문에 통계적인 방법에 기반한 강우예측시스템이 더 잘 맞는 것으로 판단된다.

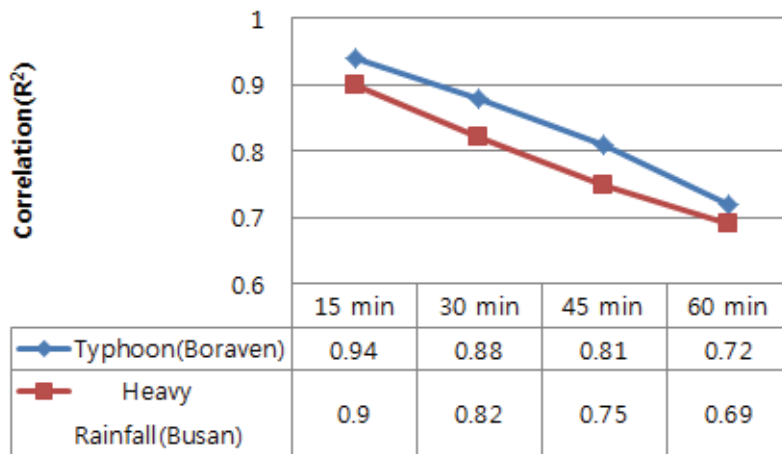
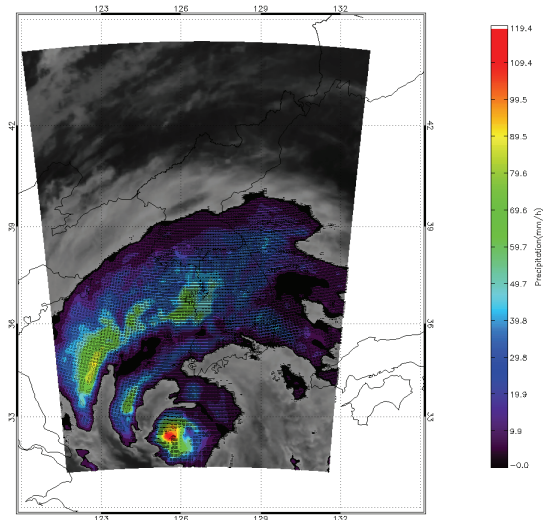
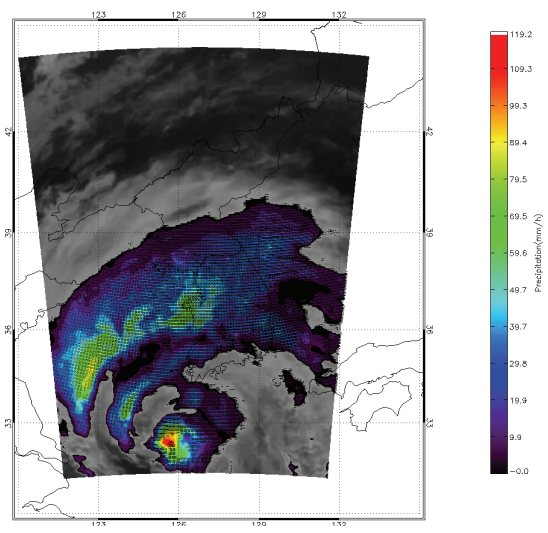


Figure 34. Correlation coefficient and root mean square error for different lead time

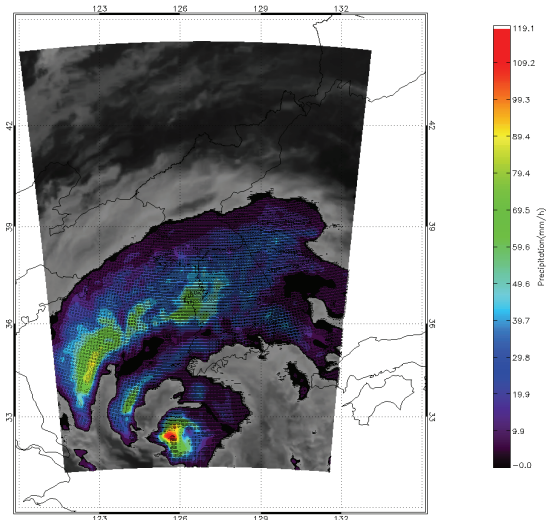


(a)

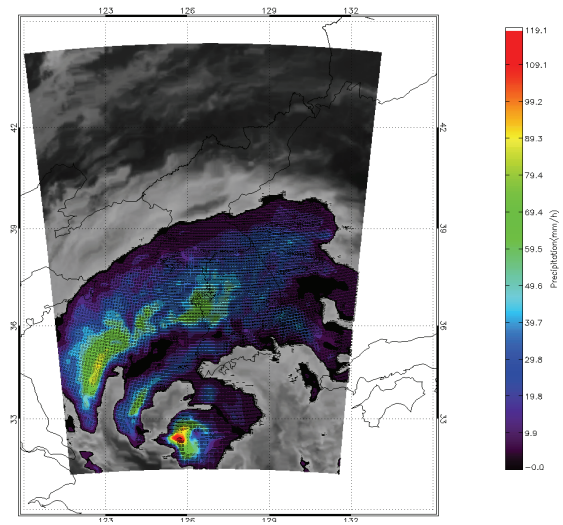


(b)

Figure 35. Motion vector with COMS IR image (a) 1530(KST) and (b) 1545(KST)

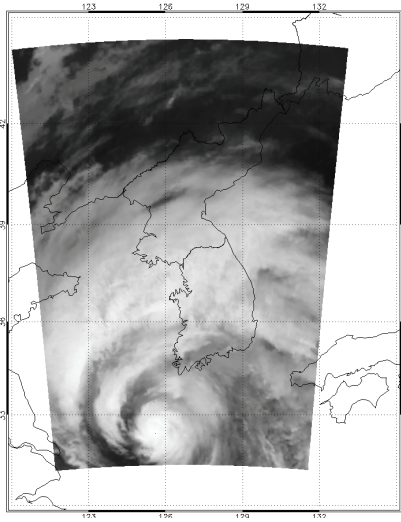


(a)

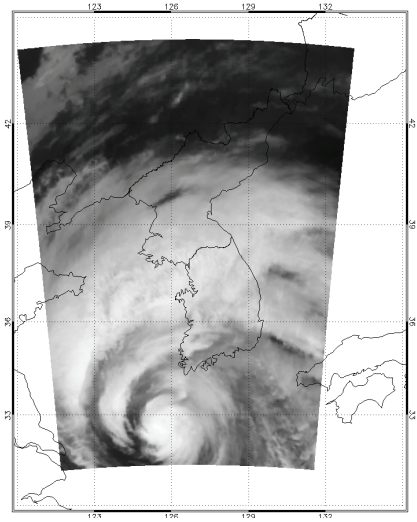


(b)

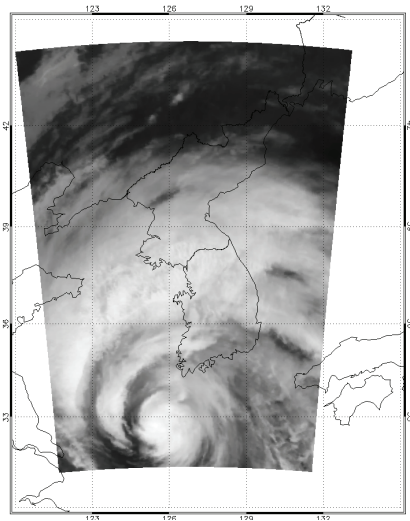
Figure 36. Motion vector with COMS IR image (a) 1600(UST) and (b) 1615(UST)



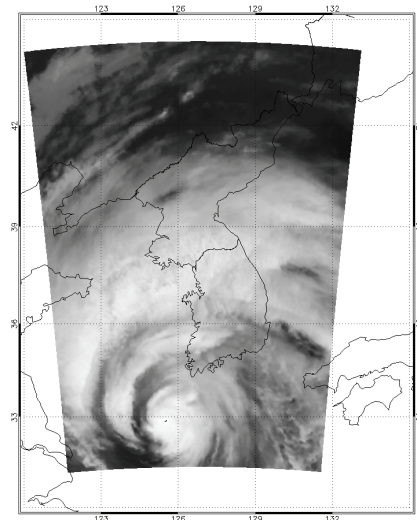
(a)



(b)

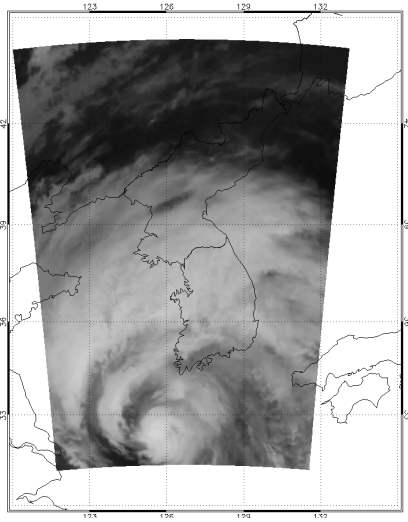


(c)

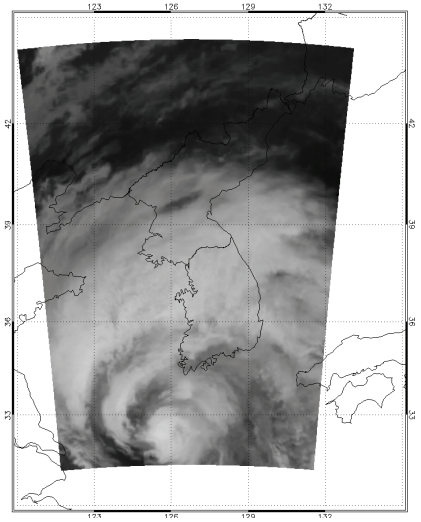


(d)

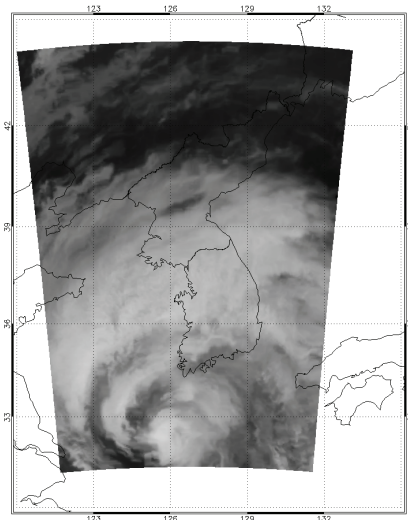
Figure 37. COMS measurement IR image (a) 12:30, (b) 12:45, (c)1:00 and (d)1:15(UTC)



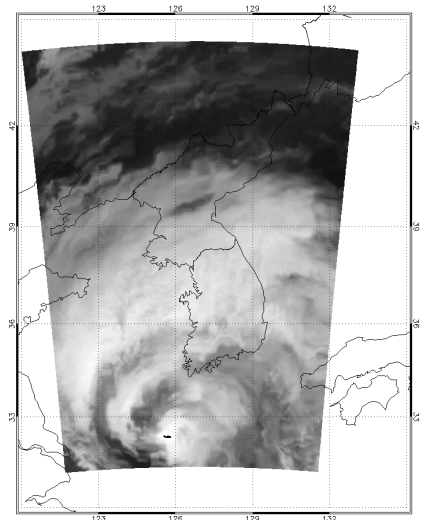
(a)



(b)

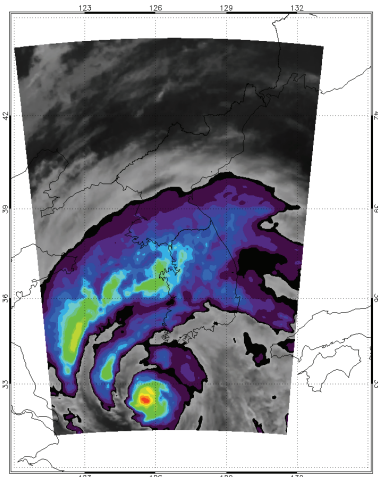


(c)

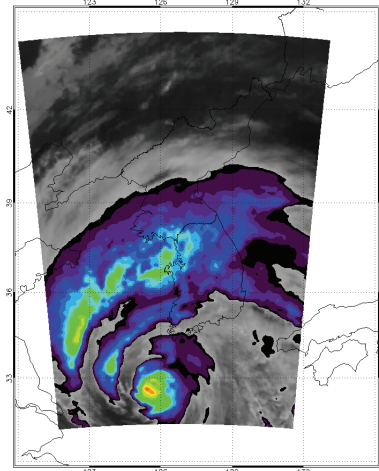
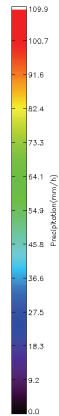


(d)

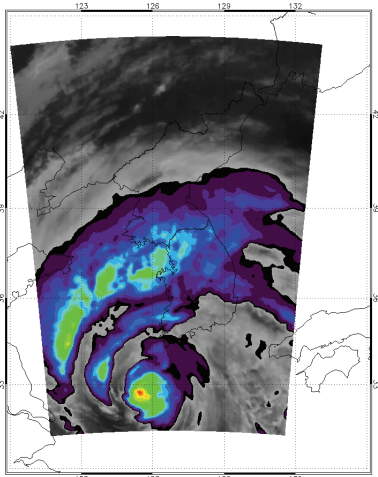
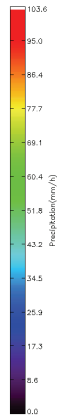
Figure 38. COMS forecasting IR image (a) 12:30, (b) 12:45, (c)1:00 and (d)1:15(UTC)



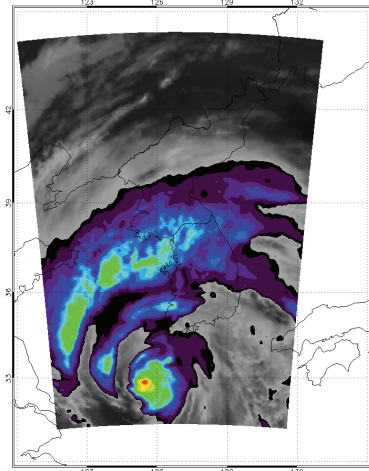
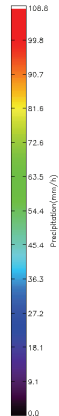
(a)



(b)



(c)



(d)

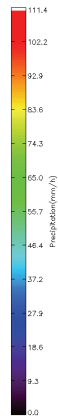


Figure 39. COMS measured rainfall image (a) 12:30, (b) 12:45, (c)1:00 and (d)1:15(UTC)

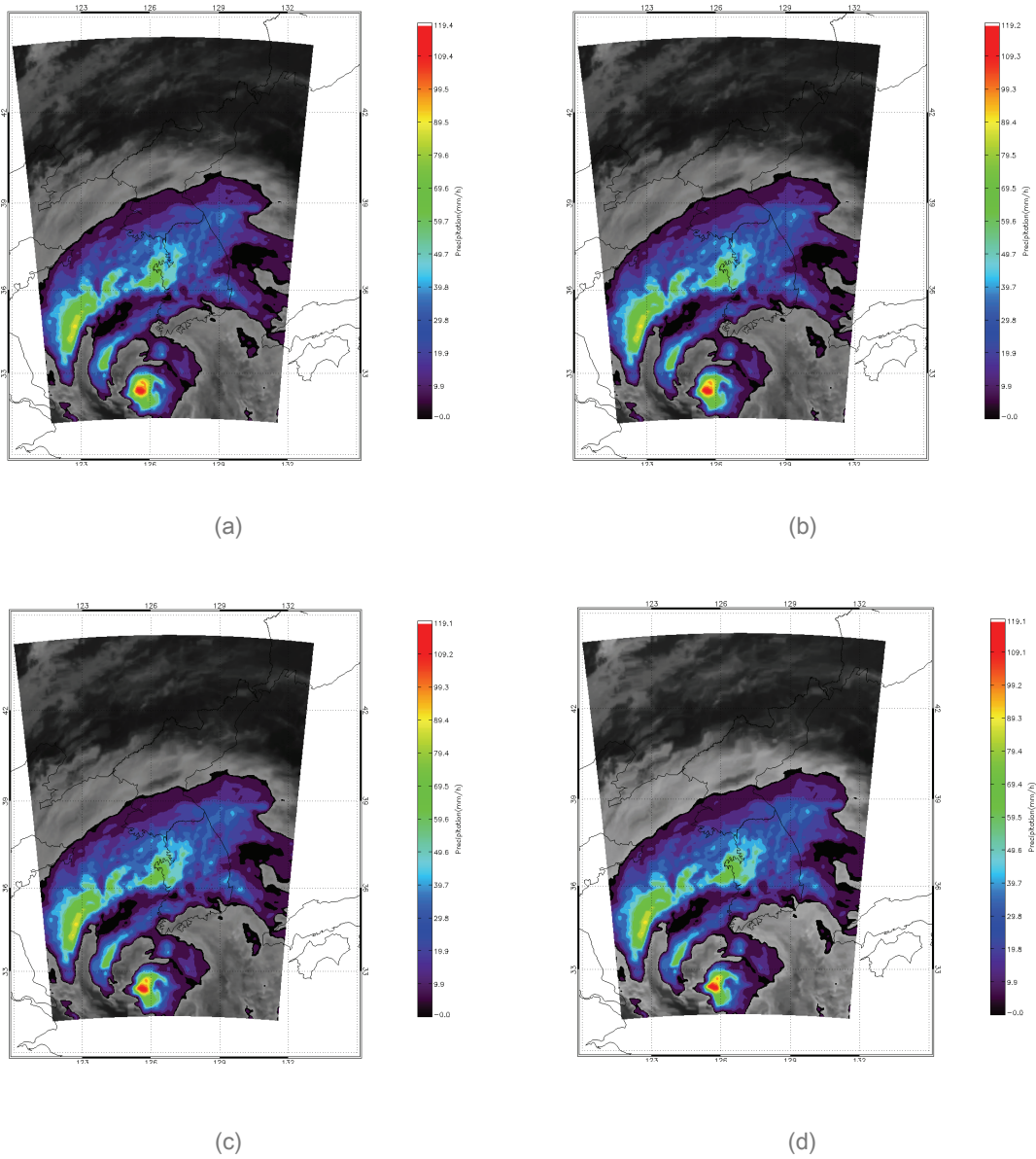


Figure 40. COMS forecasting rainfall image (a) 12:30, (b) 12:45, (c)1:00 and (d)1:15(UTC)

5.1.3 부산 9월 3일 검증

2014년 부산 9월 3일 부산에 내렸던 집중호우에 대한 비교 분석하였다. 2014년 9월 3일 오후 12시와 12시 15분 영상이미지를 중첩시켜 발생하는 이동벡터를 12시 30분, 45분 1시, 1시 15분 각각 예측 후 15분 간격으로 이동벡터를 산출하여 Fig. 42와 Fig. 43에 나타내었다. 또한 Fig. 44는 12시 30분, 12시 45분, 1시, 1시 15분에 실제로 COMS가 관측한 적외채널 TBB온도값이며, Fig. 45는 15분간 간격의 이동벡터를 적용하여 12시 30분, 12시 45분, 1시, 1시 15분 예측한 TBB온도값이다. Fig. 46와 Fig. 47은 TBB온도값의 앞서 구한 경우 알고리즘을 적용하여 비교 분석한 결과값이다. 결과값은 상관계수와 RMSE를 평가지수로 나타내었는데 15분 0.9에서 1시간 0.69로 양호한 값을 나타내었다. 15분간 간격의 TBB온도값에 대한 RMSE는 6.67, 9.29, 11.07, 12.49로 시간에 따라 예측능력이 떨어지는 것을 볼 수 있다(Fig. 41).

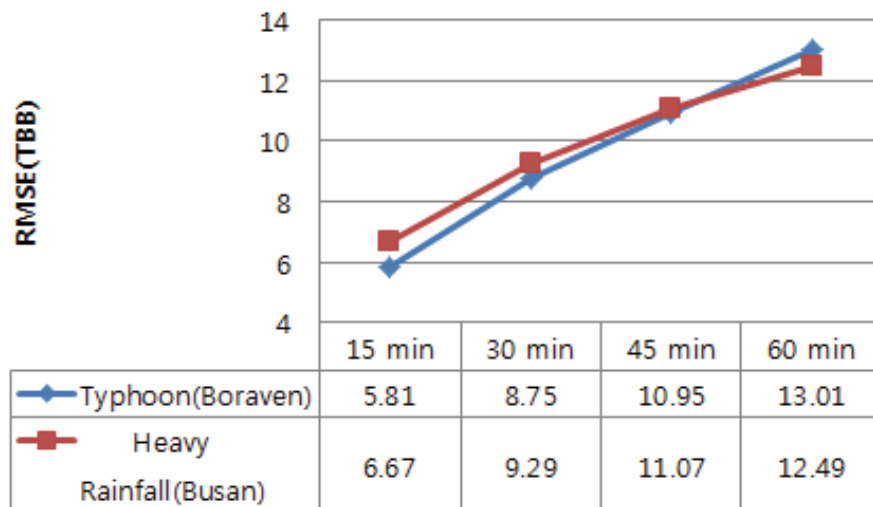
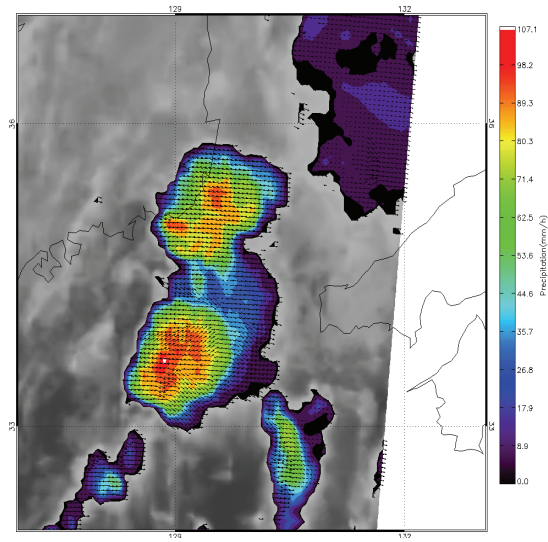
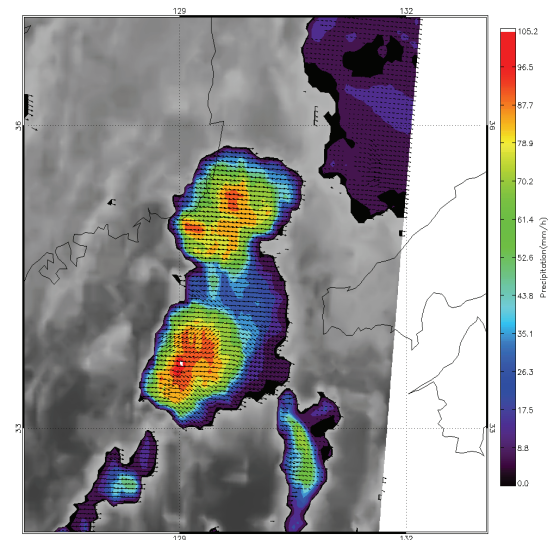


Figure 41. Correlation coefficient and root mean square error for different lead time

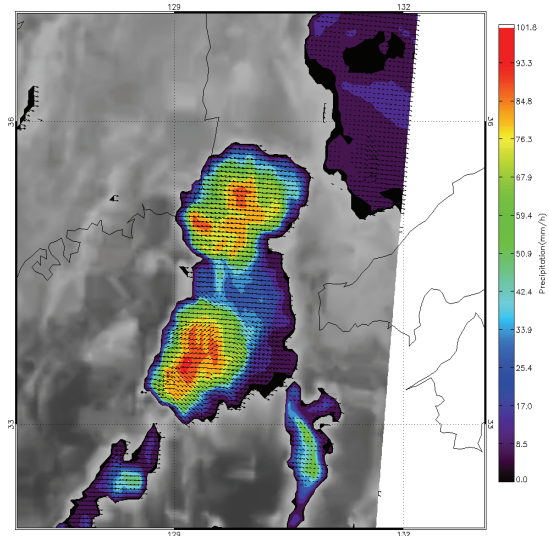


(a)

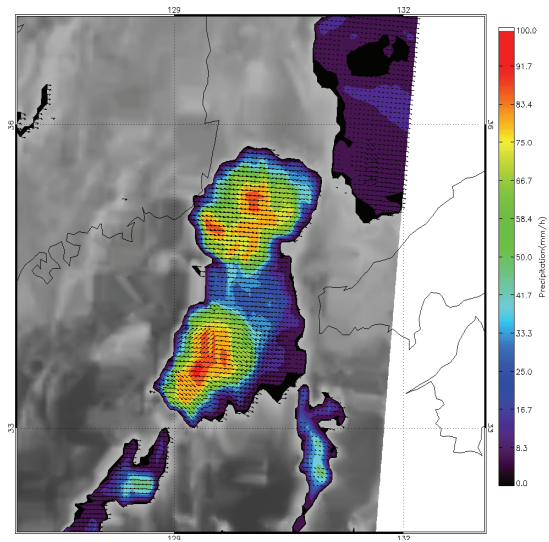


(b)

Figure 42. Motion vector with COMS IR image (a) 12:30(KST) and (b) 12:45(KST)

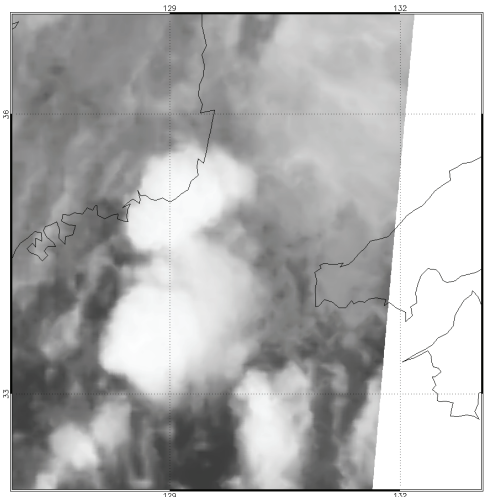


(c)

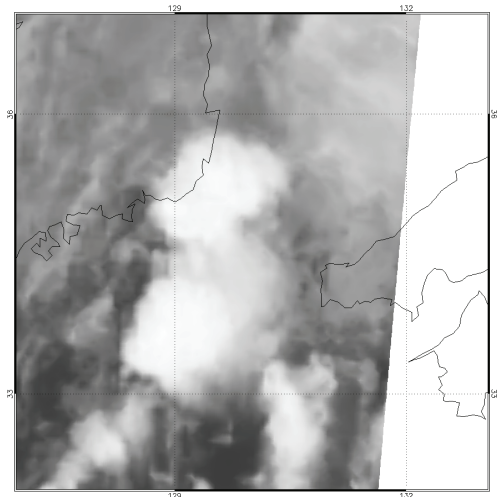


(d)

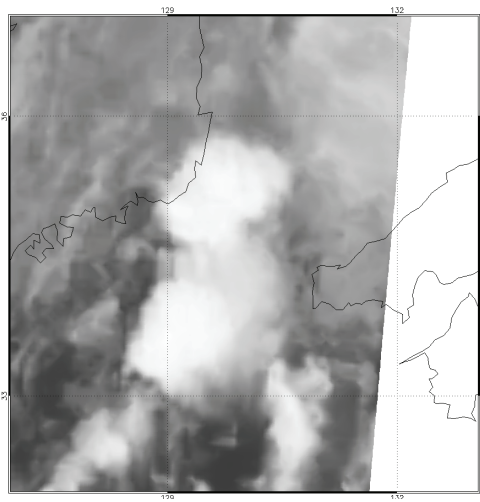
Figure 43. Motion vector with COMS IR image (a) 13:00(KST) and (b) 13:15(KST)



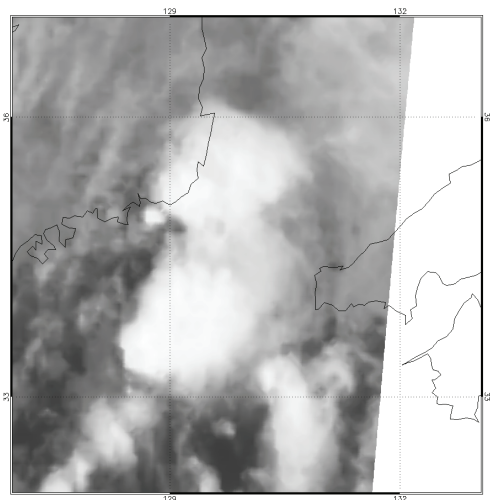
(a)



(b)

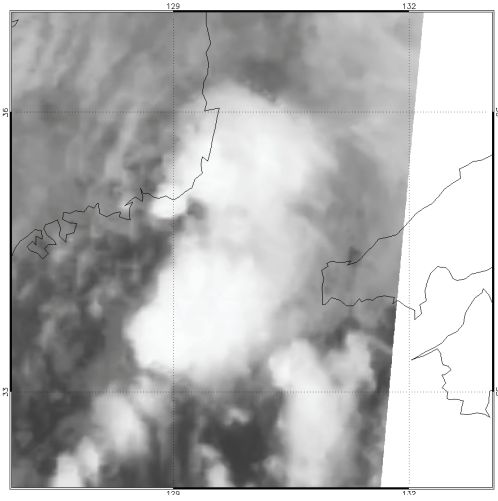


(c)

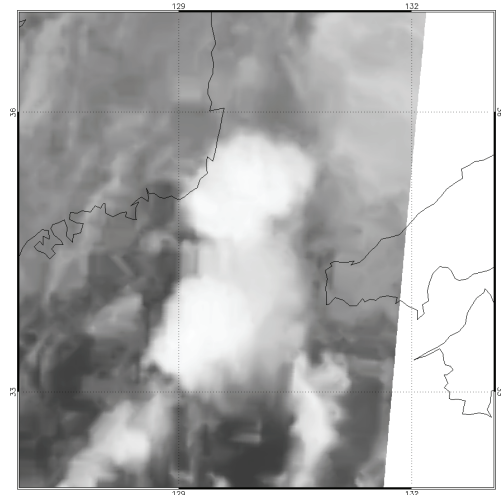


(d)

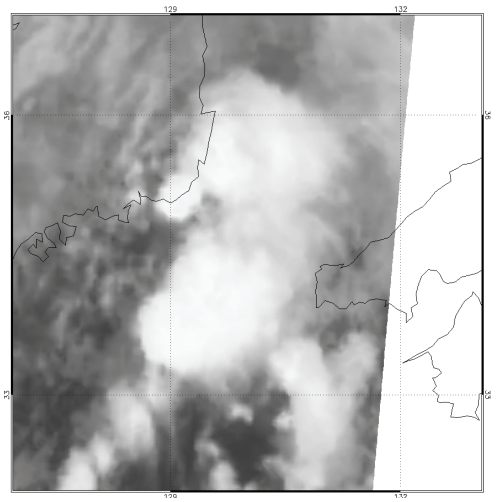
Figure 44. COMS measurement IR image (a) 12:30, (b) 12:45, (c)1:00 and (d)1:15(KST)



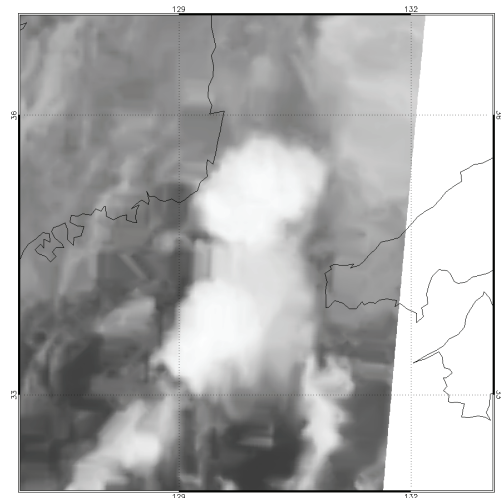
(a)



(b)

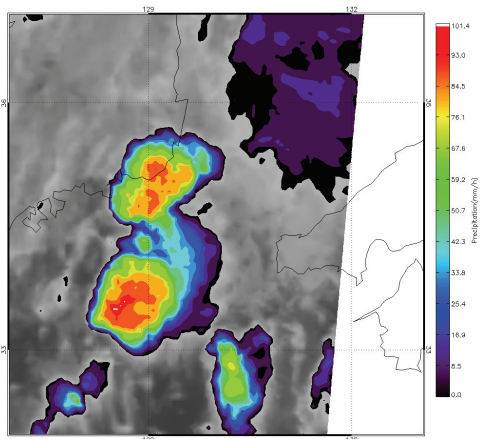


(c)

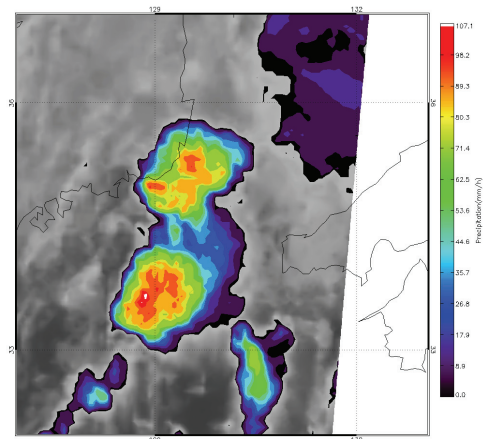


(d)

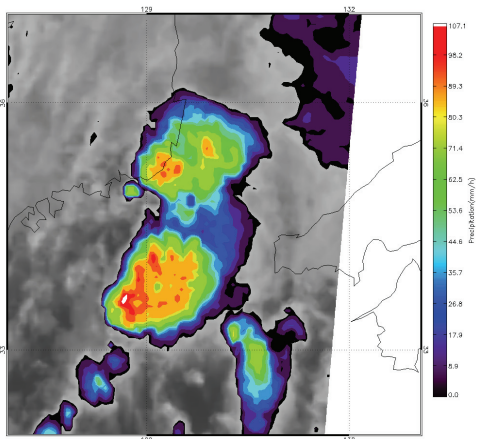
Figure 45. COMS forecasting IR image (a) 12:30, (b) 12:45, (c)1:00 and (d)1:15(KST)



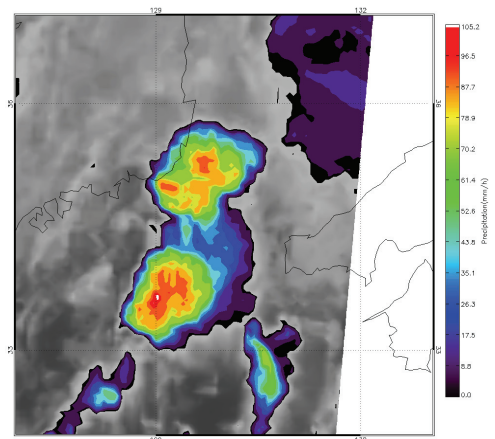
(a)



(b)

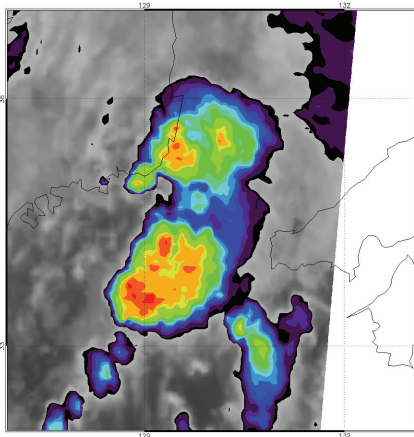


(c)

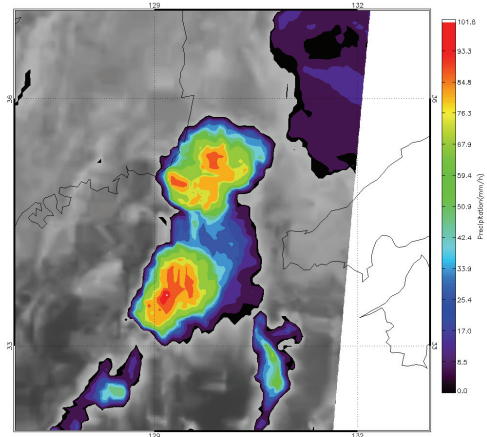


(d)

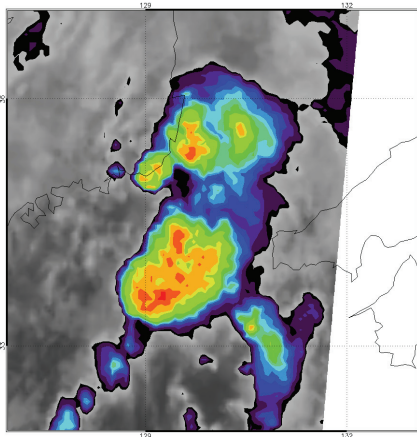
Figure 46. COMS measured rainfall image (a) 12:30, (b) 12:45, (c)1:00 and (d)1:15(KST)



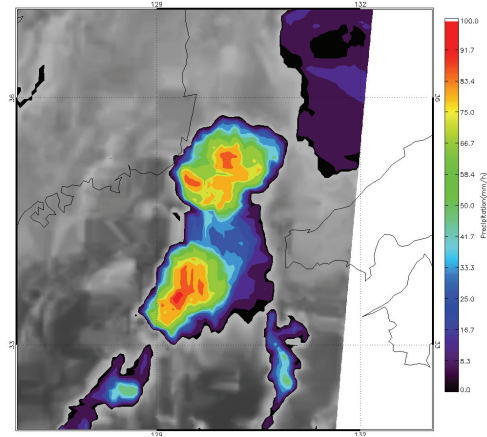
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 47. COMS forecasting rainfall image (a) 12:30, (b) 12:45, (c)1:00 and (d)1:15(KST)

6. 결론 및 토론

본 연구에서는 초단기 강우예측시스템 개발을 위한 강우알고리즘 개발과 COMS 위성 강우의 이동방향과 이동속도를 외삽법을 이용하여 산출하였다. 강우알고리즘은 TRMM 위성에서 제공받을 수 있는 TRMM/PR 자료와 TRMM/ VIRS 자료를 사용하여 역급수 회귀방정식에 의해서 강우강도를 산출하는 방법을 사용하였다. PR자료는 반사인자(Level 1)값을 이용하고 이 값과 AWS자료를 회귀분석식에 적용시켜 우리지형에 맞는 새로운 Z-R관계식을 유도하였다. 산출한 값은 $Z = 303R^{0.72}$ 이며 사례연구를 통해 지상 관측 값과의 상관관계수 값은 0.57로 TRMM센터에서 산출한 값보다 조금 높게 나왔다. 새로운 Z-R관계식을 얻은 값과 VIRS 자료에서 산출한 복사휘도값을 회귀분석시켜 강우 알고리즘을 산출하였다.

COMS의 연속되는 이미지에서 발생하는 구름이동벡터를 이용하여 초단기 강우예측 모형을 개발하였다. COMS의 연속되는 2개의 적외채널 자료를 이용하여 2개의 이미지의 차이에서 오는 비구름의 이동벡터를 외삽법으로 산출하였다. 실시간 초단기 강우예측 특성상 컴퓨팅의 계산능력의 효율성과 도시지역에서의 홍수에 대비하여 픽셀의 크기를 3×3 픽셀로 보관하여 이동벡터를 산출하였다. 3×3 픽셀을 보관하여 컴퓨팅 한 결과 보관하지 않고 컴퓨터로 결과를 얻기까지 대략 30분이 소요가 되었다며, 보관하여 결과 값을 산출하기까지 3분으로 10배 빠른 성능을 보여주었다. 더 넓은 지역을 보관하여 사용하면 지금보다 더 빠른 시스템을 구축할 수 있으나 도시지역 등 고해상도 지역을 관측할 수 있어야 하는 관계로 3×3 6km 지상 해상도로 결정하여 시스템을 구축하였다. 본 시스템은 두 이미지의 이동에 따른 통계학적 최대상관계수를 산출하여 분석한 결과이며, 개발된 모형을 검증하기 위해서 2011년 8월 27일 발생한 태풍 볼라벤과 2014년 경남, 부산 홍수때의 집중호우 사상과 2014년 9월 3일 발생한 부산 지역에 대한 집중호우에 대한 검증을 실시하였다. 대략 1시간 상관관계수값이 0.7정도로 매우 양호한 값을 보여주었다. 그러나 강우 예측 시스템이 갑자기 생성되어 발달하는 구름에 대해서는 물리적 매카니즘 없이 통계적 방법으로 예측하기 때문에 한계를 내포하고 있으며, 수시간을 예측하기엔 어려움이 있었다. 향후 지속적인 연구를 통하여 COMS위성이 가지고 있는 높은 시간해상도의 자료에 대한 선행연구가 필요하며, 현업적 홍수 예·경보 시스템

을 운영하기 위해서는 다양한 사례연구를 통해서 보다 많은 테스트가 필요할 것으로 보인다. 그럼에도 본 연구의 결과는 정확도 높은 홍수 예·경보 시스템의 구축에 기여할 것으로 판단된다.

- 실시간 위성자료수집과 알고리즘 처리를 통한 APCC 웹베이스 홍수 모니터링 및 서비스 시스템(AFMs; APCC Flood Monitoring System) 구축하여 end user가 원하는 지역 원하는 시간에 홍수 예측 및 모니터링이 가능하게 된다 (Fig. 48).

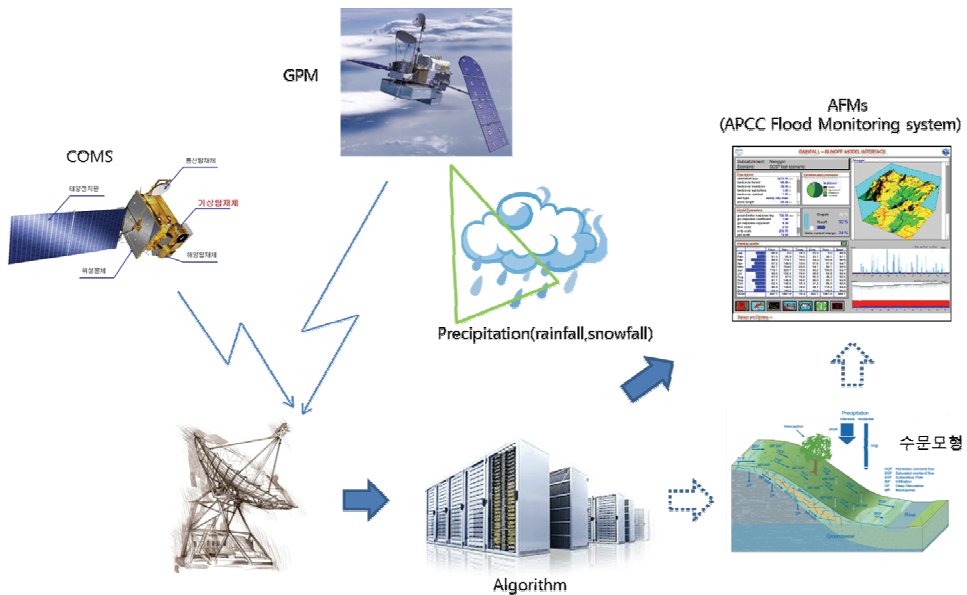


Figure 48. AFMs(APCC Flood Monitoring System)

- 한강홍수통제연구소의 도시홍수 시스템에 기 개발된 초단기 홍수 예측 모니터링 시스템이 2014년 연말 prototype(matlab 실행파일) 형태로 설치되며, 2015년 시스템 업그레이드 하고 서울 도림천에 시범 적용하여 2015년 여름 실시간 강우예측 성능을 테스트할 예정이다.

- 미계측지역(북한, 동남 아시아)와 같은 레이더나 지상관측소가 부재한 곳에서 위성을 이용한 홍수 예·경보 및 모니터링 시스템은 매우 유용하게 사용될 것이며, 향후 K-water에서 현업적으로 이용하게 될 위성 기반 홍수 모니터링 보조 시스템으로 정착이 가능하다.
- GPM 위성자료와 결합하여 2014년 부산, 경남의 홍수와 같이 단시간 집중적으로 내리는 호우 사상에 대한 예·경보 기술을 현업적으로 이용할 수 있다.

REFERENCES

- Arkin, P.A., 1979: The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during the GAGE over the B-scale array. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1382-1387
- Austin, G.L. and A. Bellon, 1974: The use of digital weather radar records for shortterm precipitation forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 100, 658-664.
- Bellon, A. and I. Zawadzki, 1994: Forecasting of hourly accumulations of precipitation by optimal extrapolation of radar maps. *Journal of Hydrology*, 157, 211-233.
- Bremaud, P.J. and Y.B. Pointin, 1993: Forecasting heavy rainfall from rain cell motion using radar data. *Journal of Hydrology*, 142, 373-389.
- Browning, K.A., 1980: Local weather forecasting. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, A371, 179-211.
- Browning, K.A. and C.G. Collier, 1989: Nowcasting of precipitation systems. *Reviews of Geophysics*, 27(3), 345-370.
- Browning, K.A., C.G. Collier, P.R. Larke, P. Menmuir, G.A. Monk, and R.G. Owens, 1982: On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. *Monthly Weather Review*, 110, 534-552.
- Chen, Zhi-Qiang and M.L. Kavvas, 1992: An automated method for representing, tracking and forecasting rain fields of severe storms by Doppler weather radars. *Journal of Hydrology*, 132, 179-200.
- Dixon, Michael and Gerry Wiener. TITAN, 1993: Thunderstorm identification, tracking, analysis, and nowcasting - a radar-based methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10(6), 785-797.

- Einfalt, Thomas, Thierry Denoeux, and Guy Jacquet, 1990: A radar rainfall forecasting method designed for hydrological purposes. *Journal of Hydrology*, 114, 229-244.
- Germann, Urs and Isztar Zawadzki, 2002: Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology. *Monthly Weather Review*, 130, 2859-2873.
- Glickman, Todd S., editor, 2000: *Glossary of Meteorology*. American Meteorological Society, second edition.
- Greco, M. and W.F. Krajewski, 2000: A large-sample investigation of statistical procedures for radar-based short-term quantitative precipitation forecasting. *Journal of Hydrology*, 239, 69-84.
- Hamill, Thomas M. and Thomas Nehrkorn, 1993: A short-term cloud forecast scheme using cross correlations. *Weather and Forecasting*, 8(4), 401-411.
- Handwerker, Jan, 2002: Cell tracking with TRACE3D - a new algorithm. *Atmospheric Research*, 61, 15-34.
- Hilst, G.R. and J.A. Russo Jr, 1960: An objective extrapolation technique for semiconservative elds with an application to radar patterns. Technical Memo 3, The Travelers Weather Research Center, Inc., Hartford, CT, Contract AF30-635-14459.
- Johnson, J.T., Pamela L. MacKeen, Arthur Witt, E. DeWayne Mitchell, Gregory J. Stumpf, Michael D. Eilts, and Kevin W. Thomas 1998: The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. *Weather and Forecasting*, 13, 263-276.
- Leese, John A., Charles S. Novak, and Bruce B. Clark, 1971: An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. *Journal of Applied Meteorology*, 10, 118-132.
- Li, L., W. Schmid, and J. Joss, 1995: Nowcasting of motion and growth of precipitation with

- radar over a complex orography. *Journal of Applied Meteorology*, 34, 1286-1300.
- Panofsky, Hans A. and Glenn W. Brier, 1958: *Some Applications of Statistics to Meteorology*. Pennsylvania State University, 1st edition.
- Pereira Fo., Augusto J., Kenneth C. Crawford, and David J. Stensrud, 1999: Mesoscale precipitation fields. Part II: Hydrometeorologic modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 102-125.
- Rinehart, R.E. and E.T. Garvey, 1978: Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, 273, 287-289.
- Tuttle, John D. and G. Brant Foote, 1990: Determination of the boundary layer airflow from a single Doppler radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7, 218-232.
- 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
- Wilson, J.W, 1966: Movement and predictability of radar echoes. Final Report 7471- 204, The Travelers Weather Research Center, Inc., Hartford, CT.
- Wolfson, M.M., B. E. Forman, R. G. Hallowell, and M. P. Moore, 1999: The growth and decay storm tracker. In *Eighth Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology*. American Meteorological Society.-

연구보고서 2015-15

극한기후패턴변화에 따른 한반도 지역수문변동 및 집중호우에 대한 초단기 예측 기술개발
Regional Impacts of Hydrometeorological Variability by Extreme Climate Pattern Changes and its
Heavy Rainfall Short-term Forecast System over the Korean Peninsula

박경원 기후변화연구팀



APEC Climate Center

612-020 부산광역시 해운대구 센텀7로 12
Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949

www.apcc21.org

 www.facebook.com/apcc21

 www.youtube.com/APECClimateCenter21

 www.twitter.com/apcc21

 www.plus.google.com/+APECClimateCenter21

 www.flickr.com/apcc21