



2009년 7월 7일

비 무 신 홍 수



기상청
Korea
Meteorological
Administration

목차

CONTENTS

1. 사례 개요

2. 실황분석

- 2.1. 일기도 분석 /08
- 2.2. 위성 분석 /18
- 2.3. 레이더 분석 /26

3. 예측자료 분석

- 3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석 /35
- 3.2. 모델의 강수 예측 특성 분석 /43

4. 사례 발생 원인

- 4.1. 종관 및 중규모 환경 /51
- 4.2. 중규모 저기압과 호우시스템의 발달 /53
- 4.3. 부산 지역 호우 발생의 원인 /55

5. 사전 예측을 위한 검토 자료

- 5.1. 예측 일기도를 활용한 집중호우 분석 /63
- 5.2. 위성 /75
- 5.3. 레이더 /77
- 5.4. 수치모델 /80
- 5.5. 이번 사례가 다른 사례와 구별되는 특성 /82
- 5.6. 향후 예보를 위한 점검 사항 /83

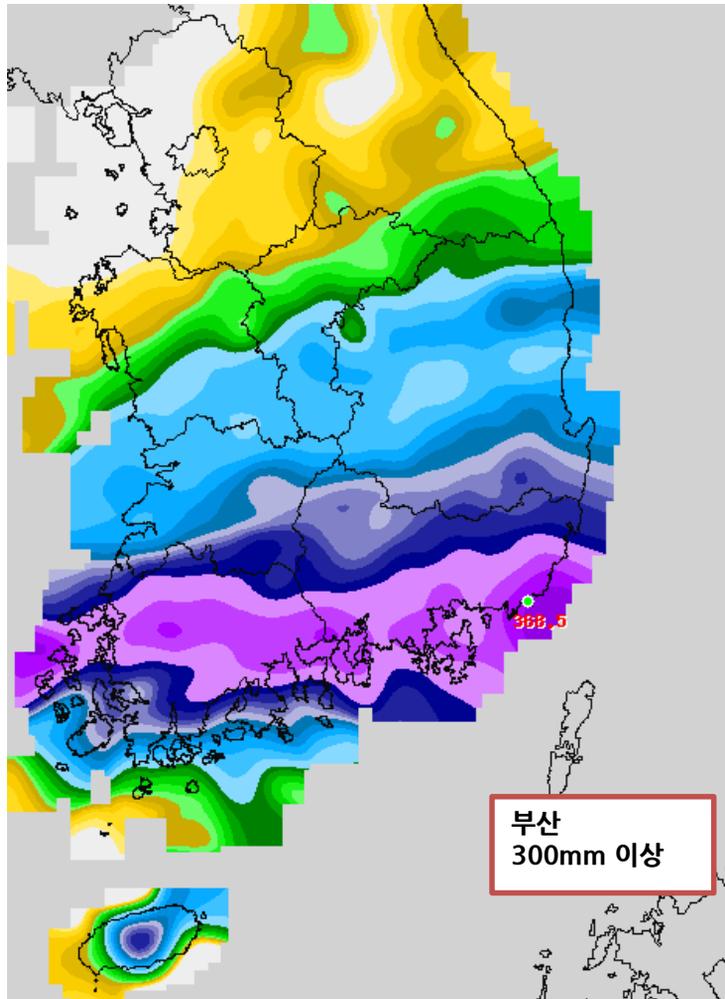
참고문헌 /86

1

사례 개요

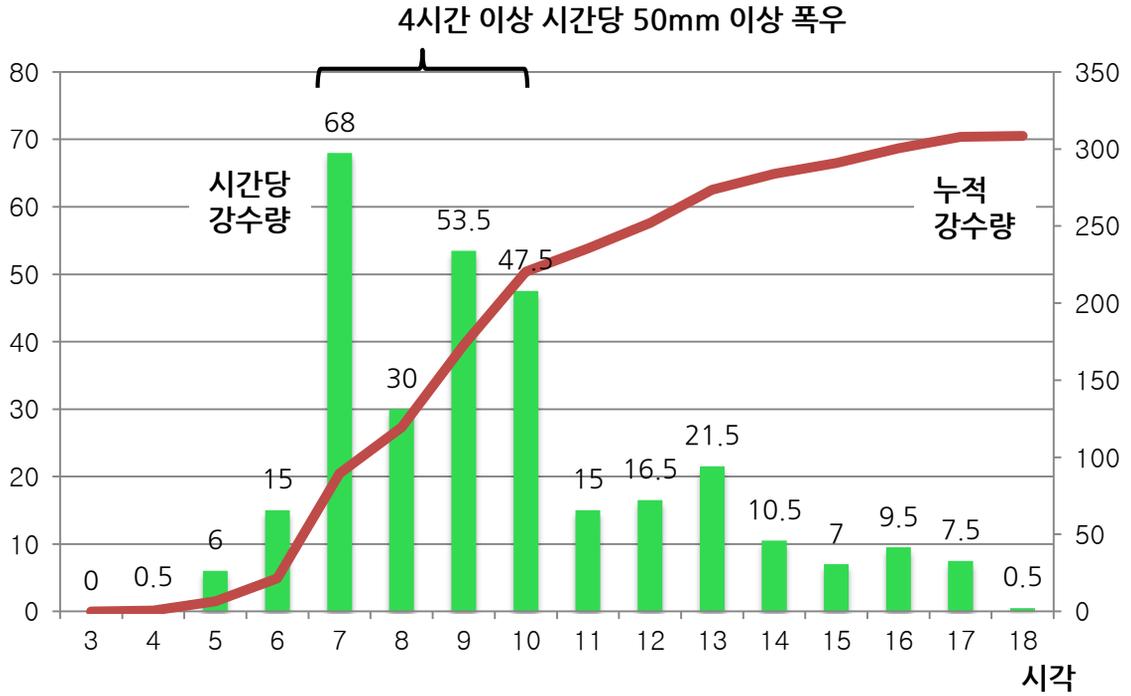
이번 사례는 부산에서 1991년 글래디스 태풍 이후 2번째 최다 강수량을 기록한 사례이다. 태풍영향을 제외하면, 일 최다 강수량을 기록한 사례가 되며, 사망 2명, 이재민 351세대 772명, 철도 유실, 주요 도로가 침수되는 피해가 발생하였다.

7월 7일의 일 강수량은 창원 268.0mm, 부산 310.0mm를 기록하였다.



[그림 1.1.1] 2009년 7월 7일 일 강수량 분포도

2009년 7월 7일 부산에서는 출근시간대인 아침 7시부터 오전 10시 사이에 약 4시간 동안 시간당 50mm 이상의 폭우가 쏟아져 출근길 교통대란이 발생하였다.



[그림 1.1.2] 2009년 7월 7일 부산 관측소의 시간당 강수량 추이변화

2

실황분석

2.1. 일기도 분석

2.1.1. 분석일기도 및 관측자료 분석

1) 장마전선 활성화 특성 이해

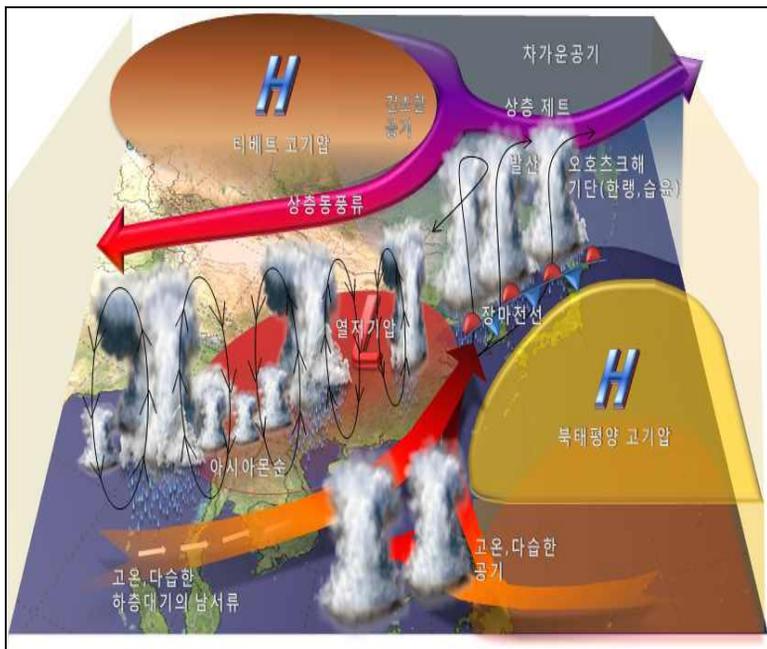
장마의 어원에 따르면 장마란 단순히 오랜 기간 지속되는 비를 의미하지만, 현재 통용되고 있는 장마의 의미는 두 가지 관점으로 분류된다. 첫 번째는 여름철 일정한 기간 지속되는 비를 의미하는 것으로 일반인이 사용하는 장마의 개념이다. 반면, 두 번째는 기상학적인 개념으로 정체전선의 일종인 장마전선이 한반도에 영향을 미치면서 내리는 비를 의미한다. 일반적으로 기상청과 같은 기상 관서에서는 두 번째 관점에 따라 장마의 시작과 종료를 공표하고, 이 기간 동안에 발생하는 대부분의 강수를 장마전선 상에서 발생하는 강수로 간주한다. 장마(Changma)는 우리나라의 주요 강수시기로, 동아시아 몬순(East Asian Monsoon) 시스템의 일부로 보는 것이 일반적이다.

장마전선은 그림 2.1.1에서와 같이 여름철에 접어들면서 한반도를 포함하는 동아시아 지역은 남쪽의 온난 습윤한 열대성 기단과 북쪽의 한랭 습윤한 한대성 기단이 만나서 형성되는 정체전선의 일종으로 분류된다.

기후학적으로 6월 하순이 되면 우리나라 주변으로 상층 제트 기류가 북상하여 강한 경압불안정이 형성되고, 북태평양 고기압의 본격적인 발달과 더불어 하층 남서풍에 의한 습윤한 공기 유입이 강화되면서 장마전선이 북상하기 시작한다. 이러한 중관규모 환경에서 정체전선이 걸쳐 있는 지역으로 강한 남서풍에 따른 습윤한 공기의 유입량이 증가하고, 상층 기압골의 주기적인 발달, 북쪽 한기와 남쪽 난기 사이에서 발생하는 대류 불안정 등이 복합적으로 작용하면서 비교적 오랜 기간 동안 많은 양의 비가 내리게 된다. 이러한 현상을 우리나라는 장마, 중국은 메이유(Meiyu), 일본은 바이우(Baiu) 라고 부른다.

그런데 이 과정에서 한 가지 의문이 제기될 수 있다. 과연 장마전선은 북태평양 고기압과 대륙 혹은 해양 기단과의 접촉에 의해서 형성된 정체전선으로, 대표적인 원인 기단인 북태평양 고기압의 확장 및 축소에 따라 남북으로 진동한 후에 북태평양 고기압이 완전히 동아시아 지역을 지배하는 7월 말 이후에 북쪽으로 밀려 올라가는 것으로 이해해도 되는 것일까?

만약 그렇다면 장마전선에 동반된 강수 시스템의 예측과 추적은 북태평양 고기압의 활동과 주변 기단의 움직임을 추적하는 것만으로도 비교적 용이하게 이루어질 수 있을 것이다. 그렇지만 오랜 예보 경험을 가진 예보관들은 장마전선에 의한 강수의 발달 가능성을 사전에 예측하고 정확하게 예보하기가 쉽지만은 않다는 것을 잘 알고 있을 것이다.



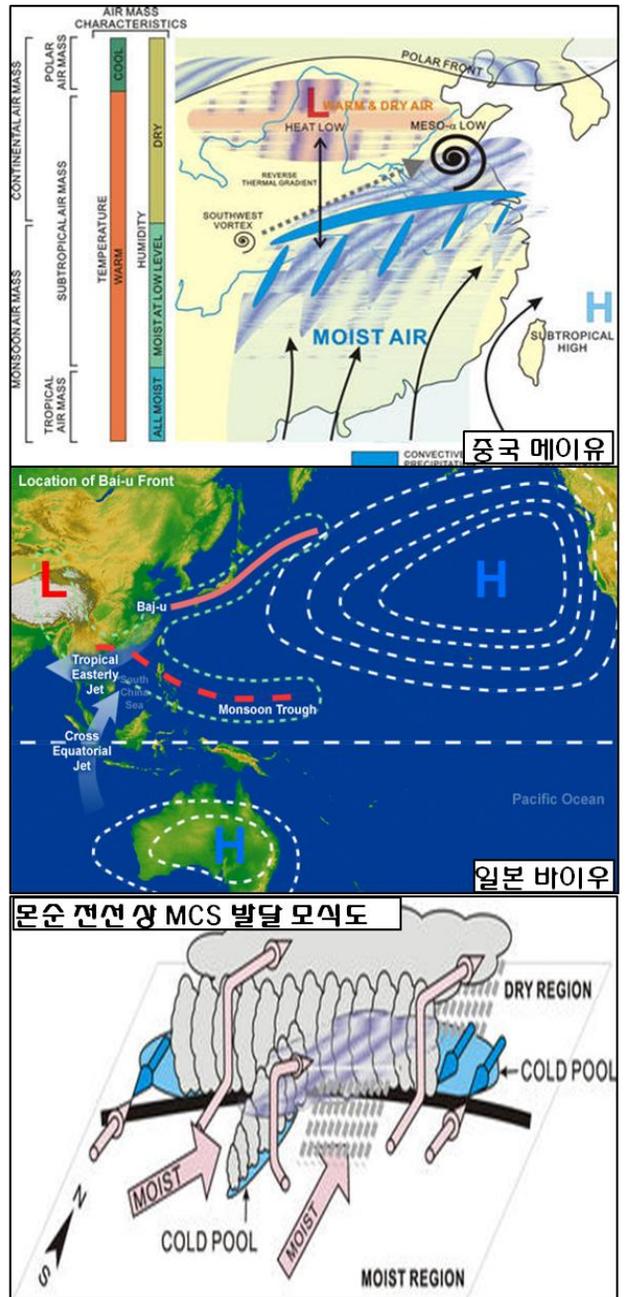
[그림 2.1.1] 장마전선 활성화 모식도

어떤 경우에는 장마 기간 동안 장마전선 자체를 분석하는 것만으로도 어려움을 겪기도 하고, 전혀 예상하지 못하는 상황에서 갑자기 장마전선이 강하게 발달하기도 하며, 때로는 긴 기간 동안 정체하면서 집중호우를 야기하기도 하지만 때로는 짧은 기간 동안 약한 비만 내리고 다시 소강상태에 빠져버리기도 한다. 이렇게 장마전선 상에서 발생하는 강수의 예측이 어려운 이유는 장마 전선이 대규모 동아시아 몬순 시스템의 일부로 인식되지만 중규모대류계(MCSs)를 동반하는 집중호우로 발달하는 과정은 즉, 장마전선이 활성화(Activation)되는 과정에는 매우 복잡한 역학적 상호작용이 포함되어 있기 때문이다.

그림 2.1.2는 메이유 전선, 바이우 전선의 형성 모식도와 전선 상에 발생한 중규모대류계의 종관, 중규모 역학 모형을 보인 것이다. 중국 메이유 전선은 열대성 몬순기단과 온대성 대륙기단의 경계에서 형성된 습도차이가 큰 특징으로 나타나고, 일본 바이우는 해양성 아열대기단인 북태평양 고기압과 해양성 한대기단인 오호츠크해고기압 사이의 온도와 습도 차이가 큰 특징을 가지고 있다.

일반적인 중위도 기압계에 동반된 전선을 분석할 때, 가장 먼저 고려하는 것이 온도의 불연속인데 몬순에 동반되는 전선은 습도의 불연속이 가장 우선되는 불연속 요소가 된다. 그리고 메이유와 바이우 전선 상에서 발달하는 중규모대류계의 구름밴드는 북쪽의 한랭 건조한 공기와 남쪽의 고온다습한 공기의 충돌과 강제상승, 구름밴드 내부에서 와도(Vortex)의 이동과 성장, Cold Pool의 역할 등과 같은 중규모 역학에 의해서 발달 및 유지되는 경향성을 가진다.

우리나라 장마전선은 중국의 메이유 및 일본의 바이우와 유사한 특징을 가진다고 인식되고 있지만 실제로 더 복잡한 현상이라고 할 수 있다. 한반도의 장마전선은 북태평양 고기압의 확장에 따라 북쪽으로 이동한 이후에도 그 자체만으로는 집중호우를 유도할 만큼 강한 형태를 가지지 못하지만, 강하게 발달한 상층 기압계가 동반될 때 활성화되어 집중호우를 동반하는 중규모대류계로 성장하기 시작한다.



[그림 2.1.2] 메이유, 바이우 전선 및 강수 모식도

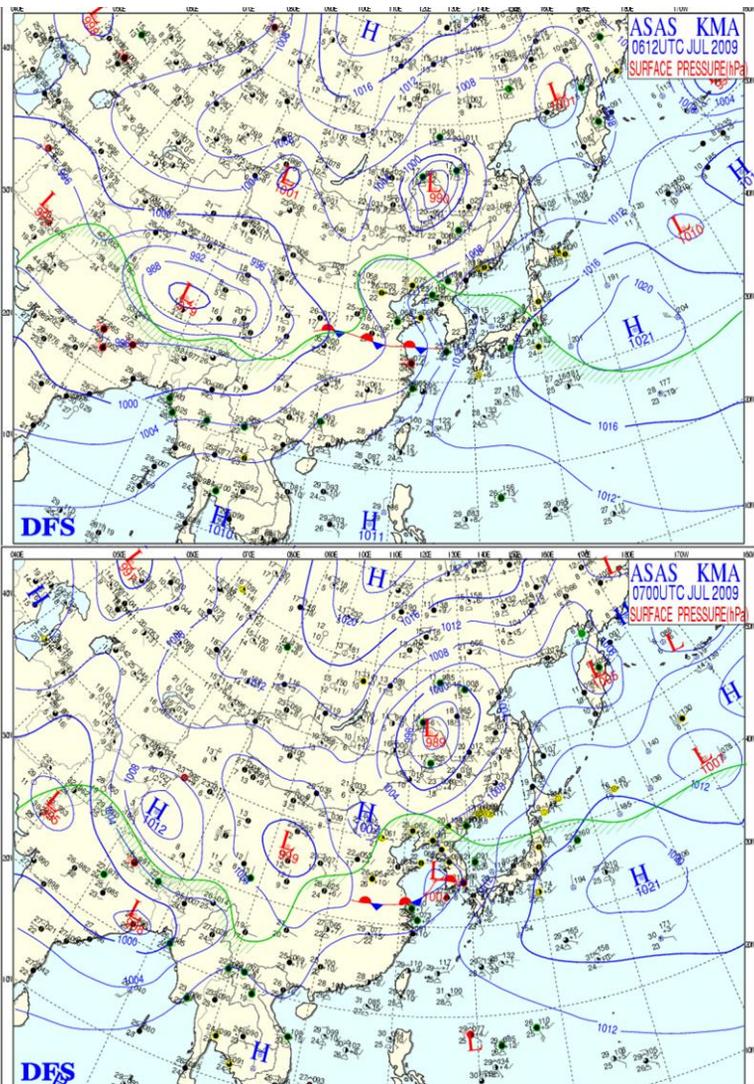
2) 지상 및 하층 일기도 분석

그림 2.1.3은 2009년 7월 6일 12UTC와 7일 00UTC 지상일기도를 보인 것이다. 6일 이전에는 중국 중부지방에 위치하고 있는 장마전선이 위도 35°N 까지 북상한 이후 약화되어 중국 내륙에서 분리된 정체전선의 형태로 존재하고 있었고, 한반도는 북태평양 고기압의 영향으로 맑고 더운 날씨가 지속되었다.

6일에는 한반도 주변에 중상층운 구름대의 유입으로 높게 흐려지는 날씨를 보였고, 12UTC에는 장마전선이 동진하여 남서해안까지 진출하고 있었다. 그렇지만 여전히 한반도는 전체적으로 북태평양 고기압의 영향권에 위치하고 있으며, 중국 북동부지역의 고기압이나 중국 내륙의 고기압의 영향력은 미미한 수준이었다. 6일 12UTC까지 한반도는 전체적으로는 온난 습윤한 기단의 영향을 받고 있었음을 알 수 있다.

그런데 7일 00UTC로 진행되면서 한반도 주변 지상 기압계의 변화가 눈에 띄게 되는데 중국 북동부 지역에 위치한 대륙 저기압이 활성화된 대륙 고기압과 북태평양 고기압 사이에서 크게 발달하기 시작하였고 한반도 남서해상에 있던 장마전선의 전면에서 중심을 가지는 저기압이 발달하기 시작한 것이다. 장마전선 전면에서 형성된 저기압은 장마전선 상의 불안정, 상층 기압골과 결합하여 장마전선을 활성화시켜 강한 중규모대류계를 포함한 비구름대를 형성하게 되고 저기압 전면에서 강한 뇌우 활동이 경남 남해안 부근에서 관측되고 있다.

내륙 대륙 고기압과 북태평양 고기압 사이에서 중국 북부지역에서 상층 기압골과 연관되어 있는 것으로 보이는 저기압이 발달하면서 이에 대응하는 저기압이 남서해상에서 발달한 것이다. 그리고 남서해상에 위치한 저기압은 일본 남동쪽에 중심을 둔 북태평양 고기압 세력에 둘러싸이면서 갈기는 기압계 패턴을 가지게 되어 강한 남서기류가 남해안 지역으로 유입되어 하층 수렴에 의한 강수 발달에 유리한 기압 배치를 가지게 되었다.



[그림 2.1.3] 7월 6일 12UTC(상)와 7일 00UTC(하) 지상일기도

2.1. 일기도 분석

그림 2.1.4는 925hPa 2009년 7월 6일 12UTC와 7일 00UTC 925hPa 분석일기도이다. 6일 12UTC에 중국 동해안 부근까지 진출한 장마전선의 남쪽에는 습윤한 공기가 위치하고 있는 반면 북쪽에는 상대적으로 건조한 공기가 위치하고 있고, 중국 남부에서 한반도 남쪽으로 온난 습윤한 기류가 유입되기 시작한다.

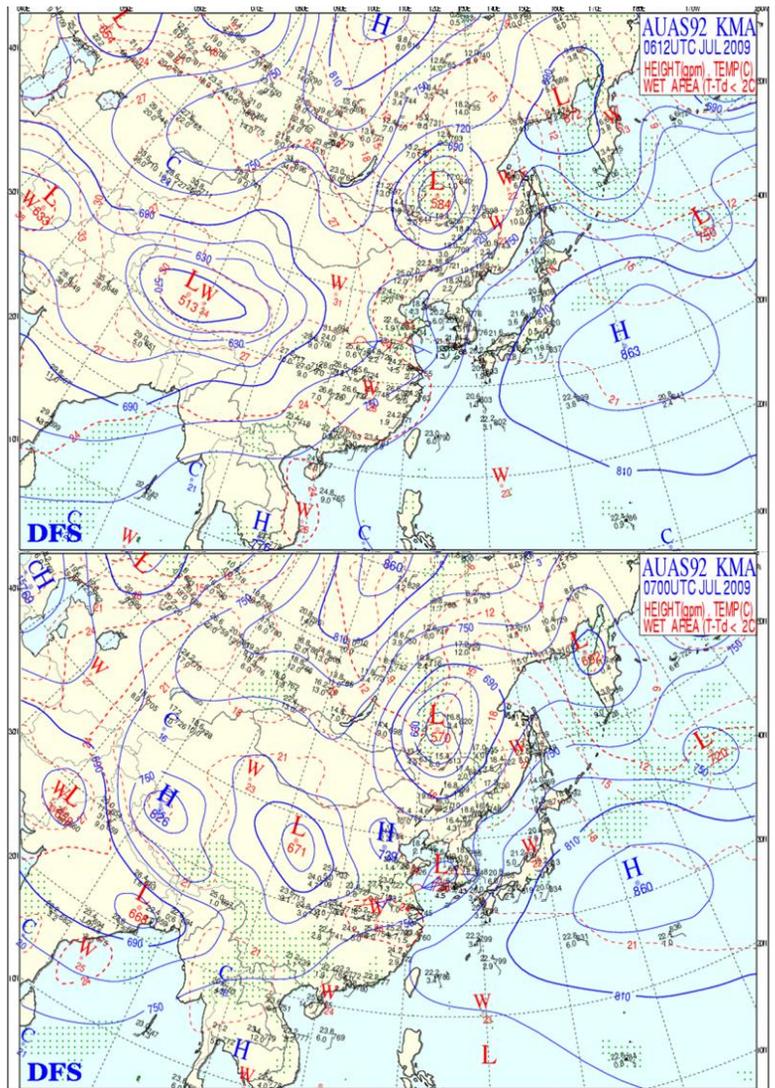
한반도는 여전히 북태평양 고기압 세력의 영향권에 놓인 가운데, 북쪽에는 기압능이 남쪽에는 상대적인 기압골이 형성되어 있다. 그리고 지상일기도와 마찬가지로 중국 북부의 기압골은 크게 발달하지 못하고 동쪽의 고기압 세력에 의해서 정체되어 있는 형태를 가진다.

7일 00UTC가 되면 중국 북동부 지방의 기압골이 정체하면서 강화되고 상대적으로 장마전선의 전면에서 저기압 중심이 형성되어 한반도 남서해상에 위치하고 있다.

중국 중남부의 온난핵이 동쪽으로 진출하고 한반도 남부에서 기압경도가 강화되면서 남서기류의 풍속이 6일 12UTC에 비해서 5m/s 이상 증가하여 하층 제트의 기준에 해당하는 12.5m/s까지 증가하고 있다.

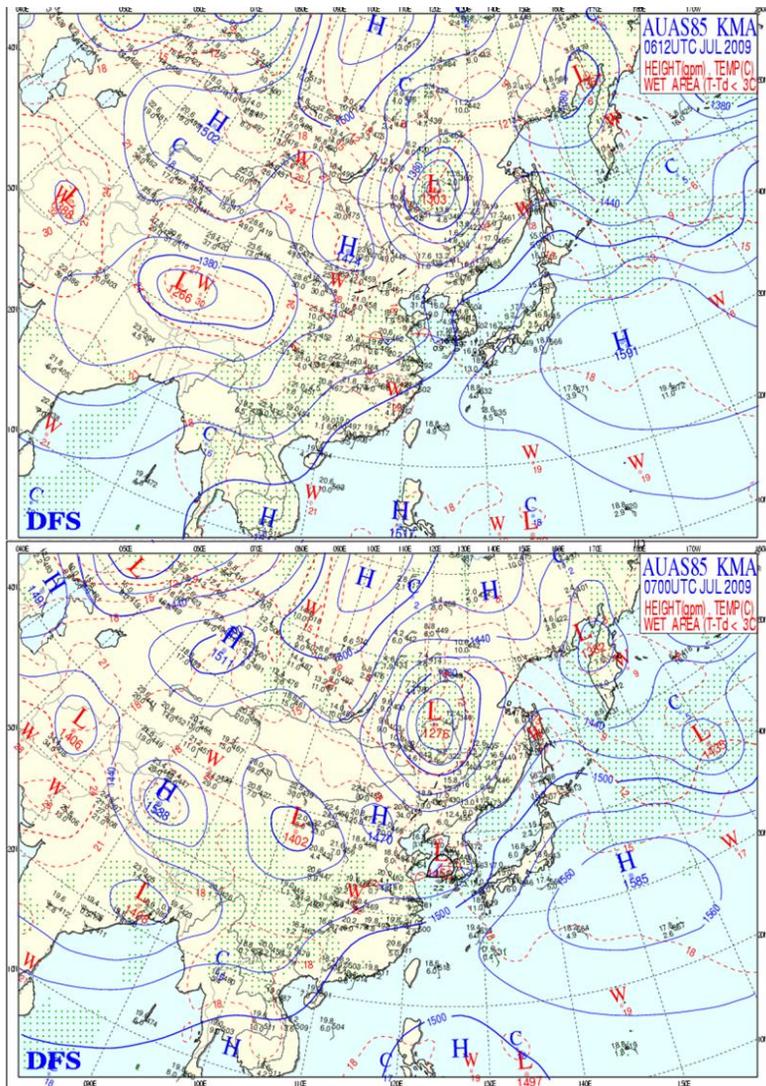
남서쪽으로부터 강한 온난이류에 의해서 많은 수증기와 열이 한반도 남해안 지역으로 유입되고 있다. 그리고 중국 북부에 위치한 기압골이 더욱 강화되면서 한반도 북부지방으로는 온도 골이 형성되어 한반도 남부지방을 중심으로 강한 온도경도에 의한 대기 불안정이 강화되는 기압패턴을 보인다.

장마전선을 중심으로 북쪽에서는 한랭 건조한 공기가, 남쪽에서는 온난 습윤한 공기가 유입되면서 장마전선 주변에서의 온도와 습도 불연속이 증가하게 되고 독립적인 저기압이 형성된 것이다.



[그림 2.1.4] 7월 6일 12UTC(상)와 7일 00UTC(하) 925hPa 분석 일기도

그림 2.1.5는 2009년 7월 6일 12UTC와 7일 00UTC 850hPa 분석일기도이다. 장마전선의 활성화에 따라 집중호우를 동반하는 중규모대류계와 관련된 일기도 분석에서 850hPa 일기도에서 찾아야 하는 변수들은 온도선의 변화와 상층골의 발달에 의한 한반도 주변에서의 경압불안정이 얼마나 강화되는가 하는 것이다. 대부분의 경우 한반도에서 강한 대류활동이 발생하기 위해서는 850hPa 고도의 북동쪽에 한랭 건조한 공기가 남서쪽에는 온난 습윤한 공기가 위치하여 남서기류를 타고 온난 습윤한 공기가 한반도로 유입되면서 한랭 습윤한 공기와 충돌에 의한 강한 대류불안정이 형성되어야 한다. 6일 12UTC에 한반도는 북태평양 고기압에 의한 기압능에 위치하고 있고, 중국 중부지방에는 남북 습도경도와 남북 온도차에 기인한 장마전선이 형성되어 있으나, 전선을 표시하지 않아도 크게 이상하지 않을 만큼 그 차이는 뚜렷하게 구분되지 않을 정도이다. 또한, 발해만 북서쪽의 기압골도 습도 차이만 존재할 뿐 크게 온도 불연속을 동반하고 있지는 못한 상태를 보이고 있다.



[그림 2.1.5] 7월 6일 12UTC(상)와 7일 00UTC(하) 850hPa 분석 일기도

다만 등고선을 따라 남쪽으로부터 지속적으로 온난 습윤한 공기가 한반도 서해상으로 유입되어 불안정이 점차 확대되는 형태를 보이고 있다.

7일 00UTC에는 한반도 부근에서 뚜렷한 온도경도가 나타나는데, 한반도 북동쪽으로부터 확장된 온도 골이 발해만 부근까지 확대되어 있는 반면 중국 남부지방으로부터 한반도 남부지방까지는 강한 온도 능이 형성되어 있고, 남서기류가 12.5m/s 이상 강화되어 한반도 남부지방으로 온난 습윤한 공기를 지속적으로 유입시켜 한반도 서해상에서 저기압이 발생하는데 크게 기여한 것으로 보인다. 또한 중국 북동부 지역의 기압골도 강화되면서 한반도 북서쪽에 위치한 상대적으로 한랭 건조한 공기의 이류와 경압불안정을 유도하는 역할을 하고 있다.

지상 일기도에서 850hPa 일기도까지 하층 대기의 특성은 북쪽의 한랭 건조한 공기의 유입과 남서쪽에서의 온난 습윤한 공기의 유입이 충돌하면서 한반도 서해안으로 저기압 중심이 형성되면서 남북 습도 불연속에 따른 단순한 정체전선의 성격을 가졌던 장마전선이 활성화되도록 유도하는 패턴을 가졌다. 그리고 서해상에 위치한 하층 저기압에

따른 온난 습윤한 남서 또는 남동기류의 유입은 해안선 부근에서 대기하층 수렴을 강화시켜 저기압 전면대에 해당하는 부산을 포함한 경남 남해안 지역에 예상보다 훨씬 빠른 시간대에 훨씬 많은 시간 당 최대 73mm의 집중호우를 야기시키는데 결정적인 역할을 한 것으로 평가할 수 있다.

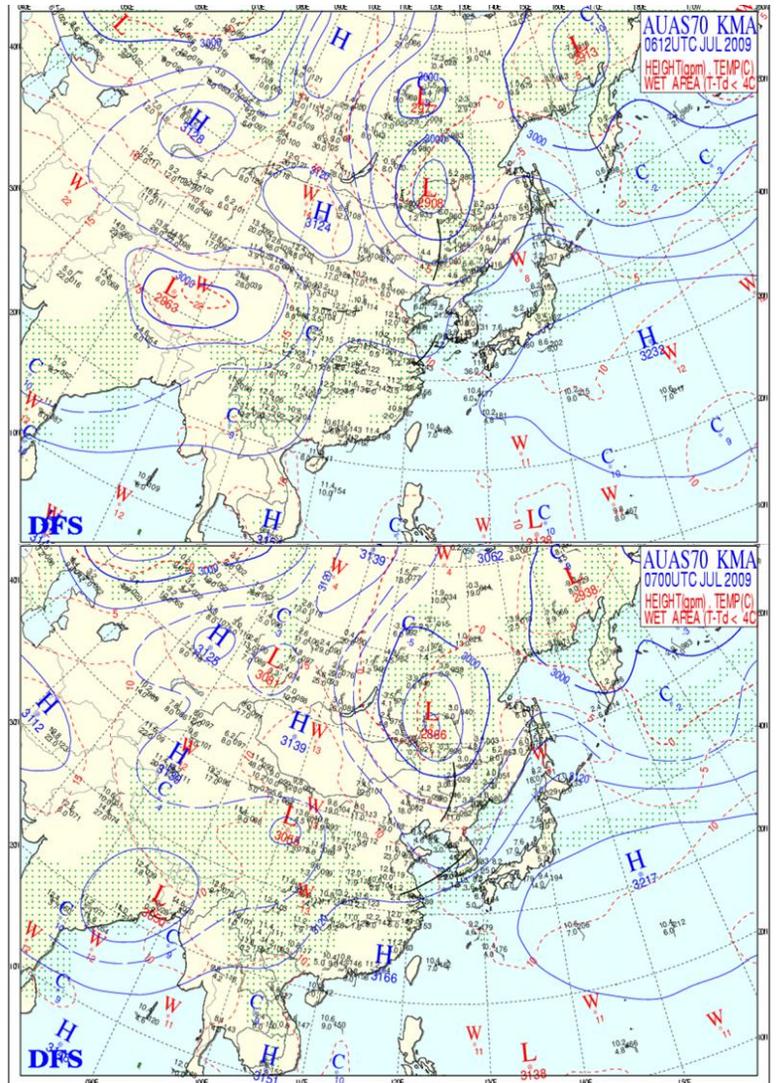
3) 중상층 일기도 분석

그림 2.1.6은 2009년 7월 6일 12UTC와 7일 00UTC 700hPa 분석일기도이다. 700hPa 고도의 기압계는 대기 중상층과 대기하층의 연결고리 역할을 하며 700hPa 고도에서 발달하는 기압골은 하층의 저기압계를 더욱 강화시키는 역할을 한다.

6일 12UTC에 한반도를 지나는 등고도선은 3120gpm으로 한반도는 전체적으로는 북태평양 고기압 권에 들어있는 반면 한반도 남서해상으로는 상대적으로 풍부한 수증기를 포함하고 있는 약한 기압골이 형성되어 있으며, 약한 남서기류를 따라 온난 습윤한 공기가 한반도 남해상으로 진출하기 시작하고 있는 형태를 보이고 있다. 북쪽의 기압골은 거의 정체하고 있으며 그 북서쪽에서 한랭한 공기가 침범하기 시작하지만, 그 세력이 한반도까지 영향을 미치지 못하고 있는 상태이다.

7일 00UTC가 되면 6일 야간에 한반도 상에 위치하고 있던 3120gpm 등고도선이 한반도 남해상으로 물러난 가운데, 한중 국경 부근에 위치해 있던 3060gpm 등고도선이 한반도 남부지방까지 확장하면서 강한 기압경도가 남해안을 따라 형성되고 있다. 그리고 이 강한 기압경도는 강한 남서기류를 유도하였고 한반도 남부지방을 중심으로 남북 온도, 기압, 습도 경도가 강화되면서 한반도 대기 중층에 강한 상층 기압골이 더욱 깊어지게 하는 역할을 한 것으로 보인다.

한반도 남부지방에 위치한 기압골을 중심으로 강한 남서기류를 따라 온난 습윤한 공기가 한반도 남해상으로 유입되고 있고, 바로 북쪽으로는 북쪽 기압골에 동반된 한랭한 공기가 강하게 남쪽으로 이류 하면서 한반도 남부지



[그림 2.1.6] 7월 6일 12UTC(상)와 7일 00UTC(하) 700hPa 분석 일기도

방에 강한 경압불안정이 형성되어 하층 기압계의 급격한 발달을 유도하여 중국으로부터 접근하는 구름 밴드 내부에서 강한 중규모대류계의 발달을 촉발하는 역할을 한 것이다.

그림 2.1.7은 2009년 7월 6일 12UTC와 7일 00UTC 500hPa 분석일기도를 보인 것이다. 2013년과 2014년에서 다른 북태평양 고기압 가장자리의 불안정에 의한 중규모대류계에 의한 집중호우 사례들과 이번 장마전선 상에서 발생한 집중호우 사례의 가장 큰 차이점을 보이는 것이 500hPa 고도와 200hPa 고도의 기압배치이다.

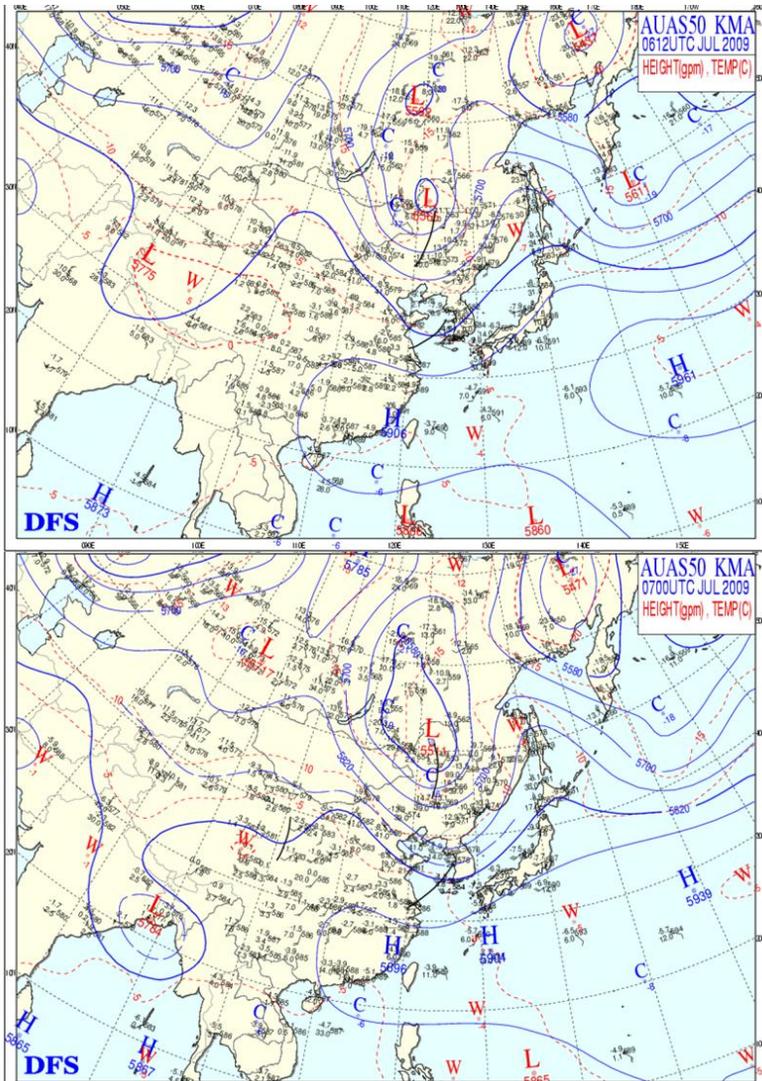
북태평양 고기압 가장자리에서의 대류 잠재불안정에 의한 중규모대류계 사례들을 되짚어 보면, 500hPa 고도에서는 한반도 북서쪽 먼 곳에 약한 상층골이 존재하고 한반도 상공에는 약한 기압능이 존재해서 남서에서 서풍기류를 형성하여 한반도 대기 중층으로 건조한 공기를 유입시켜 하층에서 발

달한 중규모대류계를 더욱 발달시키는 열적 불안정을 제공한다. 그런데 상층에서의 건조공기 유입은 대기 하층에서 발생한 중규모대류계의 발달을 돕는 매개변수 역할만을 수행하지만 경압불안정에 의한 하층 저기압의 발달에 직접적인 역할을 하지 못한다.

장마전선과 같은 정체전선 상에서 갑자기 저기압 중심을 가진 기압골이 형성되기 위해서는 상층에서의 강한 경압불안정 구역 이류가 필수적이다.

6일 12UTC 500hPa 일기도를 보면 북태평양 고기압이 5880gpm 등고도선을 따라 일본 남해안에서 중국 남부지방까지 확장하고 있는 가운데 흔히 장마전선의 이동을 추적하는데 활용되는 5820gpm과 5760gpm 등고도선은 각각 한반도 남부지방과 발해만 부근에 형성되어 있다. 그리고 한반도 상공에는 중국 북동쪽에 중심을 둔 분리 저기압이 오히츠크해 부근에 발달하고 있는 강한 상층 기압능에 의해서 동진이 제한을 받고 있으며, 한반도 중부지방으로 약한 기압골이 형성되어 있는 모습을 볼 수 있다.

그리고 등온선은 등고도선과 나란하게 동서로 누워 있는 형태를 보이고 있는



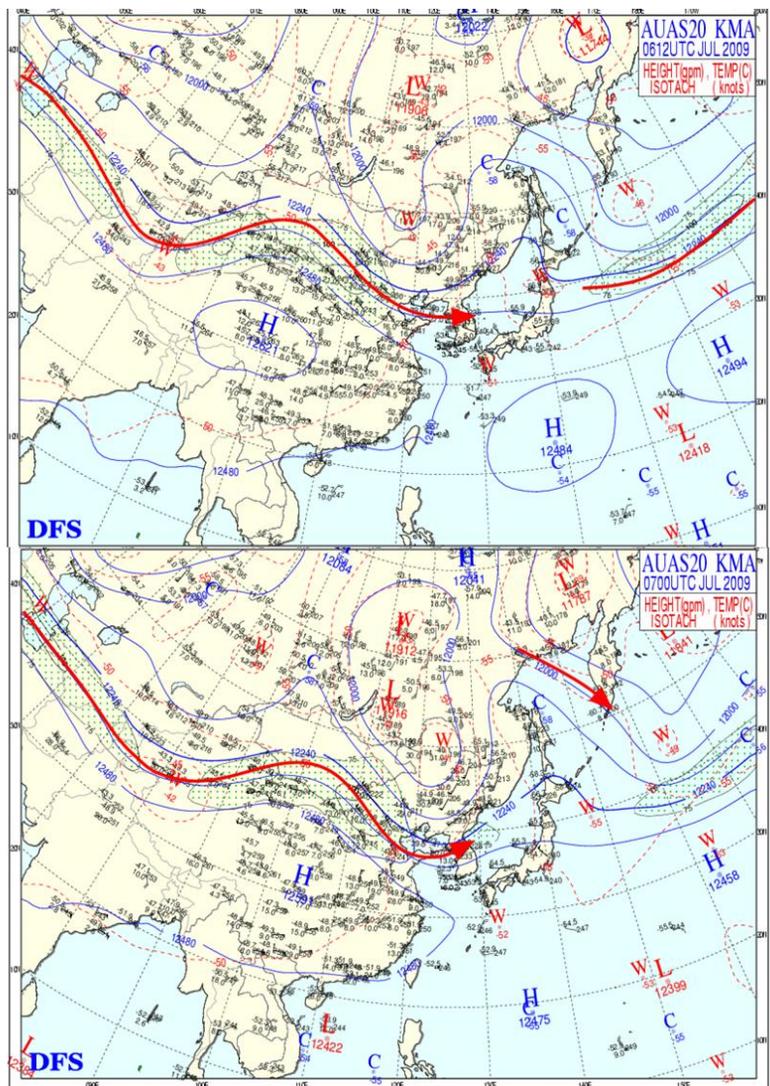
[그림 2.1.7] 7월 6일 12UTC(상)와 7일 00UTC(하) 500hPa 분석 일기도

데 위성영상과 지상 일기도를 보면 아직까지 강하게 발달한 저기압 시스템은 중국 내륙에 위치하고 있지만, 상층에서 강한 기압골에 의한 경압불안정이 하층으로 전달되면 하층 기압계의 전면에서 강한 저기압이 발생할 수 있는 조건들을 제공하고 있다.

7일 00UTC에는 500hPa 고도에서 지상 및 하층 기압계의 북서쪽에 상층 기압골이 급격하게 발달되어 있는 모습을 볼 수 있다. 5820gpm 등고도선은 12시간 전보다 약간 남하하여 남해안 부근을 지나고 있는 반면 한중 국경 북쪽을 지나고 있는 5760gpm 등고도선이 위도 5° 정도 남하하여 한반도 북부지방을 통과하고 있다. 따라서 한반도 중부지방과 남부지방을 중심으로 기압경도력이 증가하여 풍속을 증가시켜 기압골의 전면에서는 온난한 남서기류를 강화시키고 기압골의 후면에서는 한랭 건조한 북서기류를 강화시켜 한반도 상공에 강한 와도를 동반한 경압불안정이 강화되는 형태를 보였다. 이러한 하층 저기압계의 북서쪽에 형성된 대기 중층에서의 경압불안정은 하층 기압계의 발달을 더욱 강화시키는 역할을 한 것으로 추정할 수 있다.

그림 2.1.8은 2009년 7월 6일 12UTC와 7일 00UTC 200hPa 분석일기도이다. 북태평양 고기압 가장자리에서 발생하는 중규모대류계에 의한 집중호우 사례들에서는 일반적으로 상층 제트기류가 북위 45°N에서 북위 50°N을 지나면서 한반도 상공에는 약한 기압능을 형성해서 한반도 상공에 상층 발산구역을 형성하여 일단 형성된 중규모대류계의 대류 활동이 대류권 상단까지 발달하도록 유도하는 역할을 했다. 이에 반해 장마전선의 활성화에 따른 이번 집중호우 사례에서는 하층 기압계의 서쪽에 깊은 상층골이 형성되어 상층의 경압불안정에 의해서 하층의 저기압계가 발달하도록 하는 역할을 한 것으로 보인다.

6일 12UTC 일기도에서 를 보면 한반도는 상층골의 전면에 위치하여 상층 제트기류의 출구에 위치하게 된다. 따라서 (Zonal한 제트와 곡률을 가지는 제트 사이에 출구 지역 발산장 혼란 방지를 위함) 한반도 중부와 남부지역에서는 강한 발산장이 형성되면서 상승 운동이 점차 강화될 수 있는 형태를 가지고 있어 향후 하층 기압계의 발달을 유도할 가능성을 보여주고 있다.



[그림 2.1.8] 7월 6일 12UTC(상)와 7일 00UTC(하) 200hPa 분석 일기도

7월 00UTC에는 일본열도를 따라 기압능이 강화되고 그 후면으로 기압골이 강화되고 있다. 특히 12240gpm 등고도선이 남하하여 한반도 주변에 기압경도력이 강화되어 한반도 상공으로 상층제트가 본격적으로 유입되기 시작한다. 저기압성 곡을 가지는 상층제트가 한반도 중부지방으로 유입되면서 한반도 남부지방에는 경압불안정과 함께 강한 연직 상승구역이 형성되어 하층의 기압계를 급격하게 발달시키는 역할을 하였다. 지상에서 상층까지의 전체적인 분석일기도는 경합불안정에 의해서 세력이 약한 정체전선으로 존재하던 장마전선이 활성화되어 집중호우를 동반한 중규모대류계를 포함하는 저기압계로 발달하는데 적합한 형태를 보여주고 있다.

4) 단열선도 분석

장마전선의 활성화에 의한 중규모대류계 내부의 강한 대류활동도 다른 사례들과 마찬가지로 중규모 환경은 풍부한 수증기, 강한 대기불안정, 강한 상승운동, 그리고 강수과정에 의해서 결정된다. 실제로 중규모대류계가 처음 발생하고 그 직접적인 영향을 받았던 광주 단열선도는 강한 비와 구름으로 인해 라디오존데의 비양이 대기 하층으로 제한되어 관측자료가 중규모 환경을 분석하기에는 부족해서 남서쪽에 위치한 흑산도에서 관측한 자료를 사용하여 중규모환경을 분석할 수밖에 없는 한계가 있다.

7월 6일 12UTC에서는 지상의 상대습도가 90%이고 지상에서 850hPa, 700hPa에서 500hPa, 400hPa에서 200hPa 고도까지 습윤층이 존재하고 있지만 대기 하층이 전체적으로 포화에도 도달할 만큼은 충분한 수증기가 존재하지 못하였고, 대기 하층에 약한 역전층이 존재해서 강한 대류활동의 발생에 충분한 조건을 제공하고 있지 못하였다. 그런데 가강수량은 59.1mm로 매우 높은 수준이었으므로 만약 다른 조건에 의해서 강한 상승운동과 수증기가 지속적으로 공급되는 조건이 만들어진다면 강한 집중호우를 만들어 낼 수 있는 상태로 발달할 수 있었음을 보여 주고 있다.

이번 집중호우가 장마전선의 활성화 즉 지상에서 상층까지 강한 경압불안정을 동반한 사례였기 때문에 종관규모에서 약한 대류불안정이 존재한다고 하더라도 강한 대류활동으로 성장할 수 있는 여지는 충분히 있었다고 할 수 있다. 다른 불안정 지수들을 보면 SSI 지수 0.1, LI 지수 3.8, KI 지수 35 등으로 분포를 보여주고 있다. SSI 지수 0.1은 독립적인 단일 뇌우 발달 가능성이 높았음을 의미하며, 500hPa 고도의 주변 공기와 지표면에서 500hPa 고도까지 건조단열 상승한 공기가 가지게 되는 온도와의 차이를 나타내는 LI 값은 음의 값을 가질 때 공기 덩어리의 온도가 상대적으로 높기 때문에 지속적인 상승운동을 가질 수 있다는 점에서 강한 뇌우 발생 가능성을 나타내는데, 본 사례에서는 값 3.8을 가졌다는 것은 아직까지 중규모환경 자체에 의해서 강한 상승운동을 유도할 정도는 아닌 것으로 판단할 수 있다.

KI 값은 대기 하층과 중층의 온도와 노점 온도들을 활용하기 때문에 단순한 온도 프로파일 뿐만 아니라 수증기의 존재에 따라 값의 변화가 크게 나타날 수 있다. 보통의 경우 20 이상의 값을 가지면 독립적인 뇌우 발생 가능성이 높고, 40 이상의 값이면 뇌우 발생 가능성이 100%에 도달하며, 보통 중규모대류계의 지속적인 발생과 유지를 위해서는 30 이상의 값이 필요한 것으로 알려져 있다.

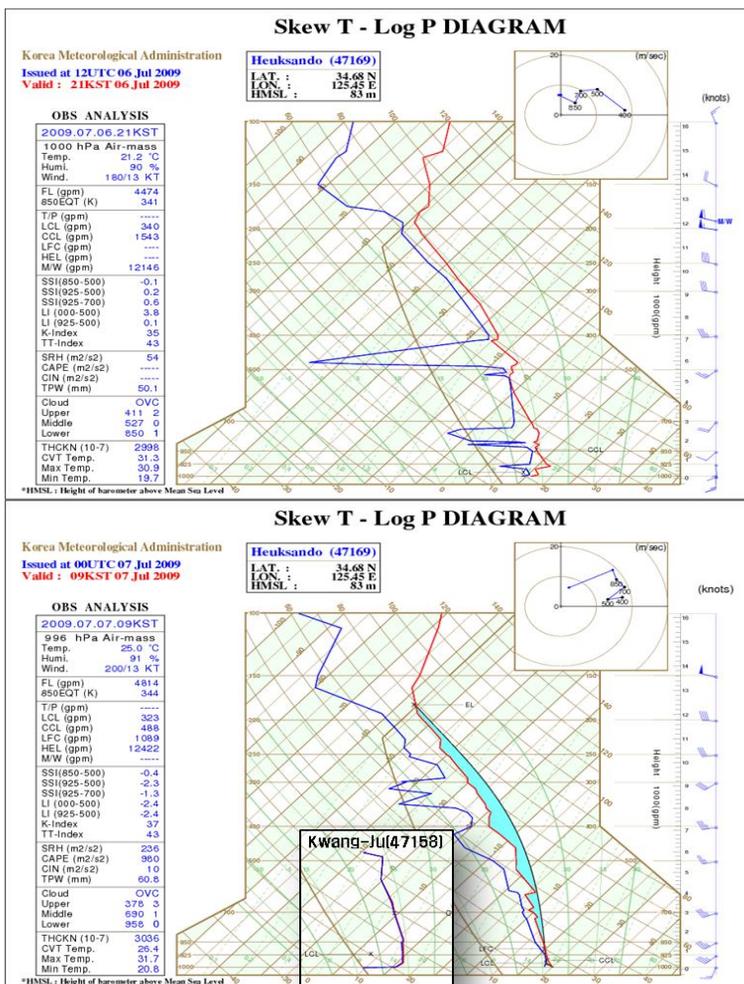
세 가지 전통적인 불안정 지수들은 약한 혹은 중정도의 단일 뇌우 발생 가능성을 보여주고 있다. 비록 중규모환경 그 자체는 강한 대류활동을 직접 보장할 정도는 아니지만, 종관규모 강제력 즉 경압불안정이 동반된다면 강하게 발달 할 수 있는 조건이었음을 의미한다.

2.1. 일기도 분석

바람 연직분포도 대기 하층에서 상층까지 순전되는 대류활동 발생에 유리한 연직 바람시어 형태를 보여주고 있지만 풍속이 매우 약하고, 대기 중층에 해당하는 500hPa 고도까지 남서기류가 존재하고 있어서 대기 상층에서 기압골이나 와도장이 접근하지 않으면 강한 대류에는 부적합한 상황이었다.

7일 00UTC 오산 단열선도는 12시간 전과 전혀 다른 모습을 가지고 있다. 먼저 지표면에서 700hPa 까지 대기는 거의 포화되어 있었으며 평균 상대습도가 90%에 접근하고 있고, 가장수량이 69.8mm까지 도달하고 있다. 가장수량 69.8mm는 강한 저기압의 발달에 동반된 충분한 중규모 대규모 수증기 수송이 없으면 태풍의 경우를 제외하고는 관측되지 않을 정도로 높은 값으로 시간당 강수량이 100mm까지 도달할 수 있는 정도로 높은 값이었다. 또한 SSI는 0.4, LI -2.4, KI 37로 강한 대류활동 발생에 충분한 수준으로 증가하고 있었다. 특히 중규모대류계의 강한 발달과 관련성이 매우 높은 불안정 지수인 CAPE의 값이 1000J/kg에 가까운 980J/kg까지 높아진 상황에 주목해야 한다.

지상 수증기와 불안정도 지수들을 고려해 볼 때 서해상에서는 이미 강한 대류활동이 존재할 정도로 대류불안정이 형성되어 있었음을 의미한다.



[그림 2.1.9] 7월 6일 12UTC(상)와 7일 00UTC(하) 흑산도 단열선도

LFC 고도는 1089gpm 정도로 높아져 있는데 그림 2.1.9 하단의 지표면에서 500hPa의 관측자료를 보면 LFC 고도가 지표면에 가까운 것을 알 수 있다. 따라서 중규모 강제력과 함께 중규모 환경도 충분히 강한 뇌우가 발생할 수 있는 조건이었음을 알 수 있다.

강한 상승운동의 상단을 보여주는 평형고(Equilibrium Level)가 약 13km 고도에서 나타나는데 이는 지상에서 대류권계면까지 강한 상승운동이 존재할 수 있다는 단열선도의 정보와 잘 일치한다. 단열선도 분석을 통해서 6일 야간에는 중규모 강제력이 제공된다면 언제든 지 강하게 대류활동으로 전환될 수 있는 조건이었고, 실제로 강한 대류활동이 발생한 7일에는 중규모환경이 대류활동을 보장해 줄 정도로 충분한 조건이었다. 따라서 앞선 분석 일기도에서 제시되었던 중규모 강제력이 중규모 대류계의 발달을 촉진시켰고, 중규모대류계가 발생한 이후에는 중규모환경 즉 스톰 내부의 자체 에너지가 더해져서 더욱 강한 대류활동을 유도하는 조건이었음을 잘 보여주고 있다.

2.2. 위성 분석

2.2.1. 집중호우 기간 동아시아 영역 위성영상의 특성

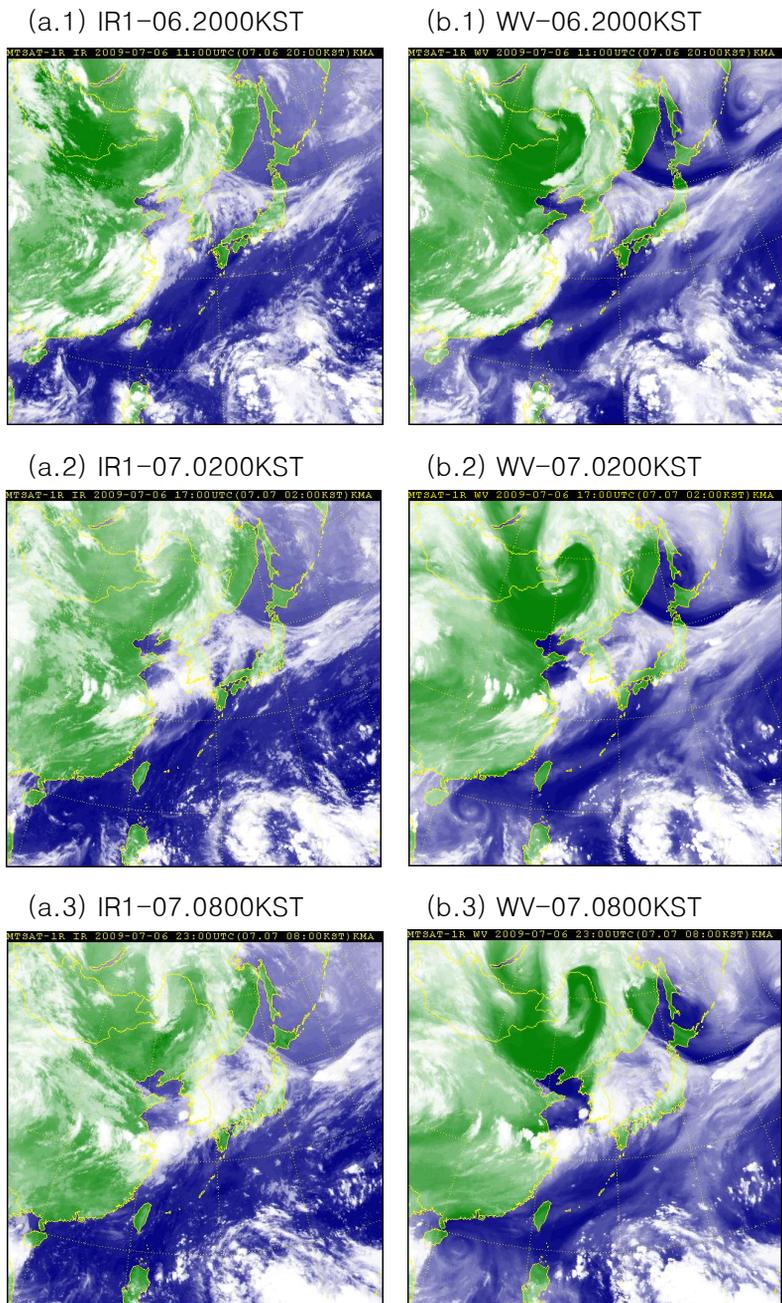
2009년 7월 6~7일 전남(200mm 내외), 경남, 부산(300mm 내외) 지역에 집중되었던 집중호우는 장마전선의 활성화에 따른 집중호우로 장마전선 전면에서 발생한 강한 균집형 중규모 대류계의 영향에 의해 발생하였으며 부산 지역의 경우 7일 새벽부터 오후까지 시간당 최대 73mm의 강한 강수가 내렸다.

본 집중호우 기간 위성영상의 특성을 분석하기 위해 대류세포의 발생 시간인 2009년 7월 6일 20:00KST부터 집중호우가 발생하였던 7월 7일 08:00KST까지 6시간 간격으로 동아시아 지역의 MTSAT-1R 적외영상과 수증기영상을 분석하였다.

동아시아 지역의 적외영상 그림 2.2.1(a)에서 장마전선의 영향으로 서해상에 하층운과 대류운이 광범위하게 존재하며, 한반도에는 상층운이 분포해 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 구름대가 발달해 있다.

7일 02:00KST에는 상해에서 남서해안에 이르기까지 강한 대류활동이 발생하고 있음을 볼 수 있으며, 6시간 후에는 이 대류 시스템이 한반도 남부지방에 상륙하여 더욱 발달하고 있다. 또한 서해상에서는 새로운 대류세포가 발생하고 있다.

수증기영상인 그림 2.2.1(b)에서는 발해만 위로 상층 기압골이 존재하며, 기압골 후면에서는 광범위하게 암역이 존재하고 있고, 몽골 동쪽에 Head형 경계가 나타나고 있다. 또한, 연해주에는 상층에서의 침강에 의한 Inside 형 경계가 발달하고 있으며, 이 경계의 특성상 이동속도 및 변화가 느리게 진행되고 있다.



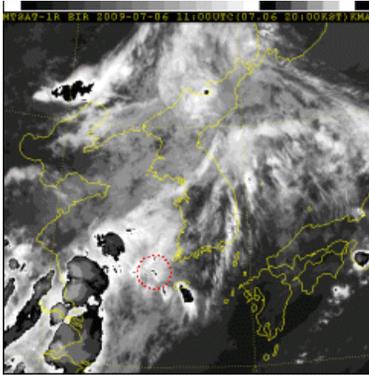
[그림 2.2.1] 집중호우 기간 동아시아 영역의 (a)적외영상과 (b)수증기영상

시간이 지남에 따라 암역이 남동진하여 집중호우의 발생 시간인 7일 08:00KST에는 서해와 중부지방에 위치하여 암역과 명역의 경계를 생성하고 있다. 또한, 장마전선 남쪽 경계 즉, 북태평양 고기압의 가장자리에서도 암역이 동서로 광범위하게 발달하고 있어 장마전선의 활성화에 유리한 환경이 조성되고 있다.

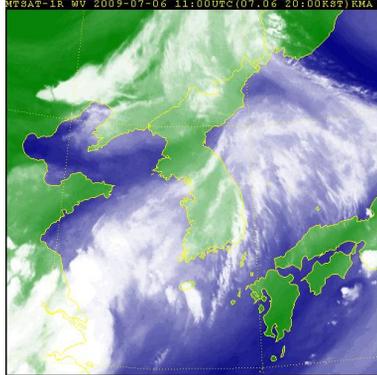
2.2.2. 대류세포 발생 시 한반도 영역 위성영상의 특성

대류세포 발생 시 위성영상의 특성을 분석하기 위해 대류세포의 발생 시간인 2009년 7월 6일 20:00KST부터 22:00KST까지 1시간 간격으로 한반도 지역의 적외 강조영상과 수증기영상을 분석하였다.

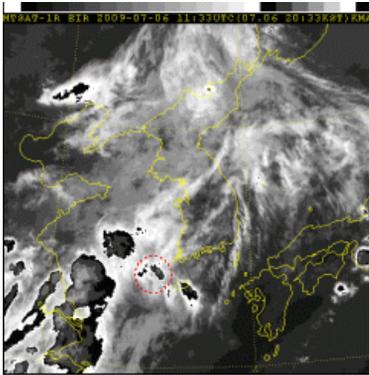
(a.1) EIR-06.2000KST



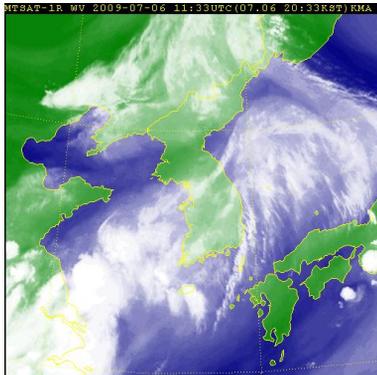
(b.1) WV-06.2000KST



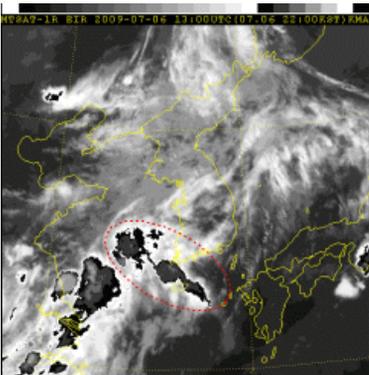
(a.2) EIR-26.2030KST



(b.2) WV-06.2030KST



(a.3) EIR-06.2200KST



(b.3) WV-06.2200KST

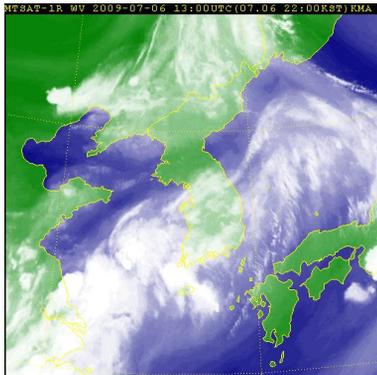


그림 2.2.2(a.1)에서 상해, 우리나라 남서해상 등에서 다수의 대류세포들이 발생하였으며, 시간이 지남에 따라 주위의 대류세포들과 병합하여 거대한 대류세포로 발달하면서 동진하였다. 대류세포 북쪽에는 중/하층운이 광범위하게 분포하고 있으나 남동쪽 해역은 맑은 상태이다.

그림 2.2.2(b)에서 상해에서 우리나라 동해에 이르기까지 수증기 벨트가 형성되고 있으며 서해상 곳곳에서 대류세포들이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 또한 상층 기압골이 남동진 함에 따라 암역의 위치가 산둥반도에서 우리나라 중북부 지역에 걸쳐 분포하고 있지만 강도가 강하지 않고 대류세포의 발생 위치와 떨어져 있다. 따라서 이 사례에서 대류세포의 발생은 암역과 명역의 경계에 의한 것이 아니고 장마전선 상에서의 불안정에 의해 시작된 것으로 볼 수 있다. 하지만 대류세포 발생 해역의 남쪽과 북쪽에 암역이 광범위하게 존재하여 이들 해역에서 대류가 발생하는 데 유리한 환경을 조성하고 있음을 알 수 있다. 이러한 중규모 대류계는 전남지역에 상륙한 후 지형 등의 영향으로 급격히 발달된 후 Back-building 형태로 계속 발달하였다.

[그림 2.2.2] 대류세포 발생 시 한반도 영역의 (a)적외 강조영상과 (b)수증기영상

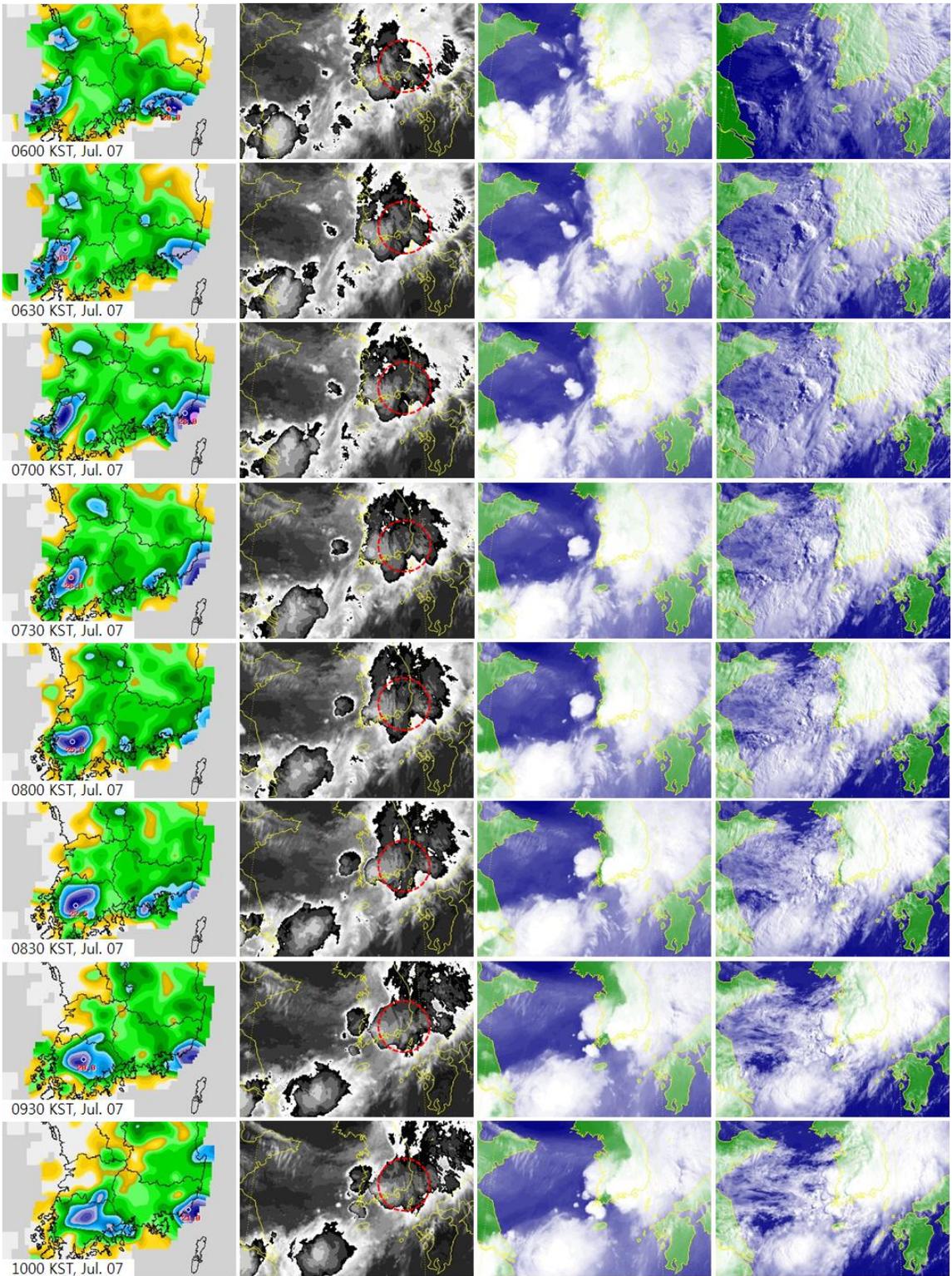
2.2.3. 집중호우 시 위성영상의 특성

집중호우 시 강수 및 대류계의 시간적 변동 특성을 상세히 분석하기 위하여 AWS 강수, 적외 강조, 수증기 그리고 가시영상을 그림 2.2.3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 7월 7일 06:00KST에는 강수는 전남 서부지역과 경남 남해안지역에 집중되다가 시간이 지남에 따라 강수구역이 동진함을 볼 수 있다. 특히, 경남 남해안지역에 위치하였던 대류계는 08:00KST에 바다로 빠져나간 후 08:30KST에 다시 남해에서 새로운 강수대가 발달하고 있다. 이 강수대는 빠르게 동진하여 부산 지역에 위치하였던 강수대와 병합되면서 강우강도가 급격히 강해지고 있다.

적외 강조영상에서 서해상에서부터 한반도 남부지방에 이르기까지 강하게 발달한 대류세포들이 광범위하게 분포하고 있으며, 시간이 지남에 따라 “V” 형태의 대류운이 발달되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 서해상에서 계속해서 새로운 대류세포들이 발생한 후 동진하고 있다. 또한 수증기영상에서는 상층기압골이 동진함에 따라 기압골 후면에 위치한 암역이 한반도로 다가오는 것을 볼 수 있다. 가시, 적외 강조영상에서는 서해상에 하층운 및 적운이 광범위하게 발달하고 있음을 볼 수 있으나 수증기 영상에서는 암역이 존재하고 있다. 따라서 상층에서의 건조공기의 하강이 이 해역에서 새로운 대류세포의 발달을 억제하고 있음을 볼 수 있으며 암역이 동진함에 따라 남부지역의 대류세포들도 동진하고 있다.

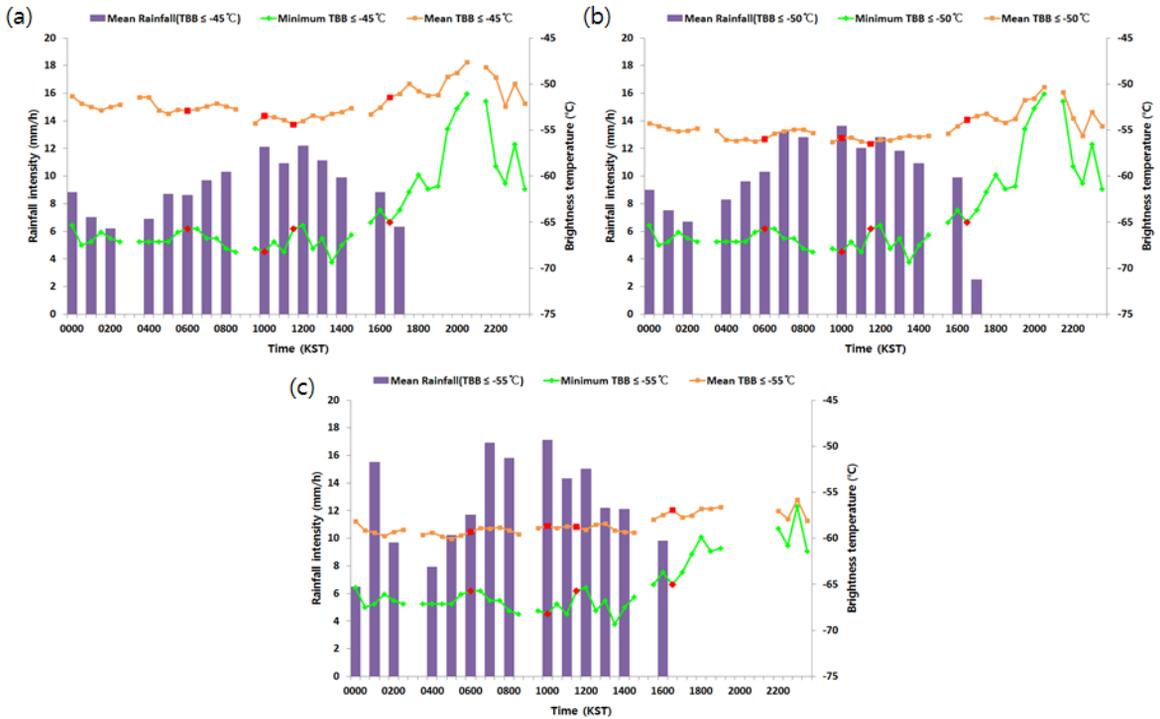
적외 강조영상에서 대류세포는 전라남도 지역에서 강하게 발달하며, 부산 지역의 집중호우는 전라남도지역에서 발달한 대류운의 풍하쪽에서 별도로 발달한 작은 대류계에 의해 발생한 것으로 보인다. 하지만 적외 강조 및 수증기 영상만으로는 부산 지역에 내린 집중호우의 원인을 찾기는 쉽지 않다. 이때 가시영상에서는 대류활동이 강하였음을 의미하는 강한 요철과 함께 아침 이른 시간이라 대류세포 서쪽에 그림자가 발생하고 있음을 볼 수 있다.

(a) AWS강수분포(15min) (b) 적외 강조영상(EIR) (c)수증기영상(WV) (d) 가시영상(VIS)



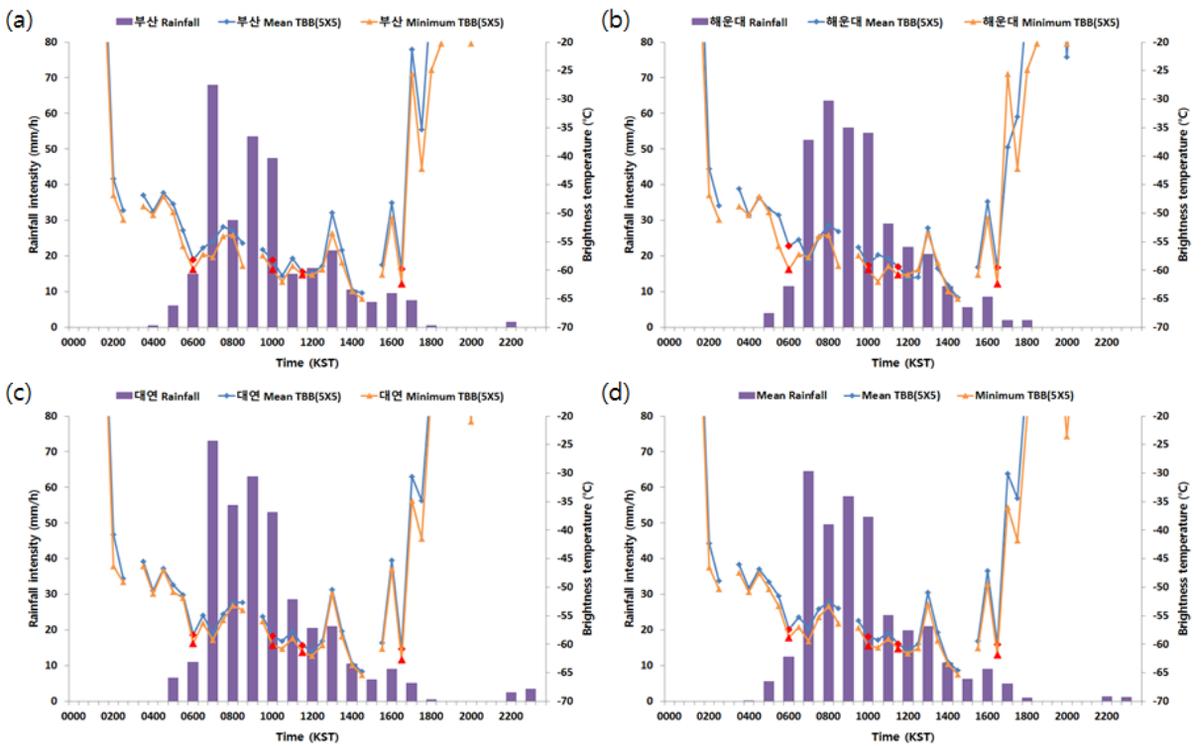
[그림 2.2.3] 집중호우 시 한반도 영역의 (a) AWS강수분포(15min), (b) 적외 강조영상(EIR), (c) 수증기영상(WV), (d) 가시영상(VIS)

그림 2.2.4는 한반도 남부지역에 위치한 대류세포에 대해 임계치(-45℃, -50℃, -55℃)별 평균 및 최소 휘도온도와 평균 강우강도를 시계열로 나타낸 것이다. 두 임계치(-45℃, -50℃)에서의 시간변화는 강우가 있을 때 최소휘도온도가 -65℃ 이하로 낮게 나타나고, 강우가 종료됨에 따라 최소휘도온도가 급격히 높아지고 있다. 하지만 평균휘도온도의 경우에는 강우강도의 시간변화와 특별한 관계를 보이지 않고 있다. 이는 대류세포가 발달한 후 성숙기에 도달할 경우 강우가 발생하는 중심과 강우가 약하게 발생하거나 발생하지 않는 모루운 등 전체의 평균을 구한 점과 관련 있는 것으로 보인다.



[그림 2.2.4] 2009년 7월 7일 대류세포의 임계치별 평균 및 최소 휘도온도와 평균 강우강도 시계열
 (a) 휘도온도 -45℃ 이하의 대류세포, (b) 휘도온도 -50℃ 이하의 대류세포, (c) 휘도온도 -55℃ 이하의 대류세포

그림 2.2.5는 부산 지역 인근의 AWS 3지점(부산, 해운대, 대연)을 선정하여 AWS 지점에서 5X5 화소들의 평균 및 최소 휘도온도와 강우강도의 시계열을 나타낸 것이다. 부산 지역에서는 7월 7일 06:00~10:00KST에 시간당 50mm 이상의 강한 강우가 발생하였으며, 이 때 각각의 AWS 지점의 최소/평균 휘도온도 모두 -55℃ 이하로 나타나고 있어 대류계가 강하게 발달하였음을 알 수 있다. 강우강도가 급격히 약해진 14:00KST 이후에는 평균 및 최소 휘도온도 모두 더욱 낮게 나타나고 있으나 두 값이 동일하여 대류가 정지되었음을 알 수 있다. 일반적으로 AWS 지점의 평균 및 최소 휘도온도가 동시에 낮아지면서 두 온도차가 크게 나타날 때 강우강도가 강하게 발생하는 특성을 보이고 있으며 휘도온도의 시간변화가 강우강도의 변화보다 조금 선행됨을 볼 수 있다.



[그림 2.2.5] 2009년 7월 7일 부산 지역의 휘도온도와 강우강도 시계열 (a)부산 AWS 강우강도, (b)해운대 AWS 강우강도, (c)대연 AWS 강우강도, (d)3지역(부산, 해운대, 대연)의 평균 강우강도

2.2.4. 요약

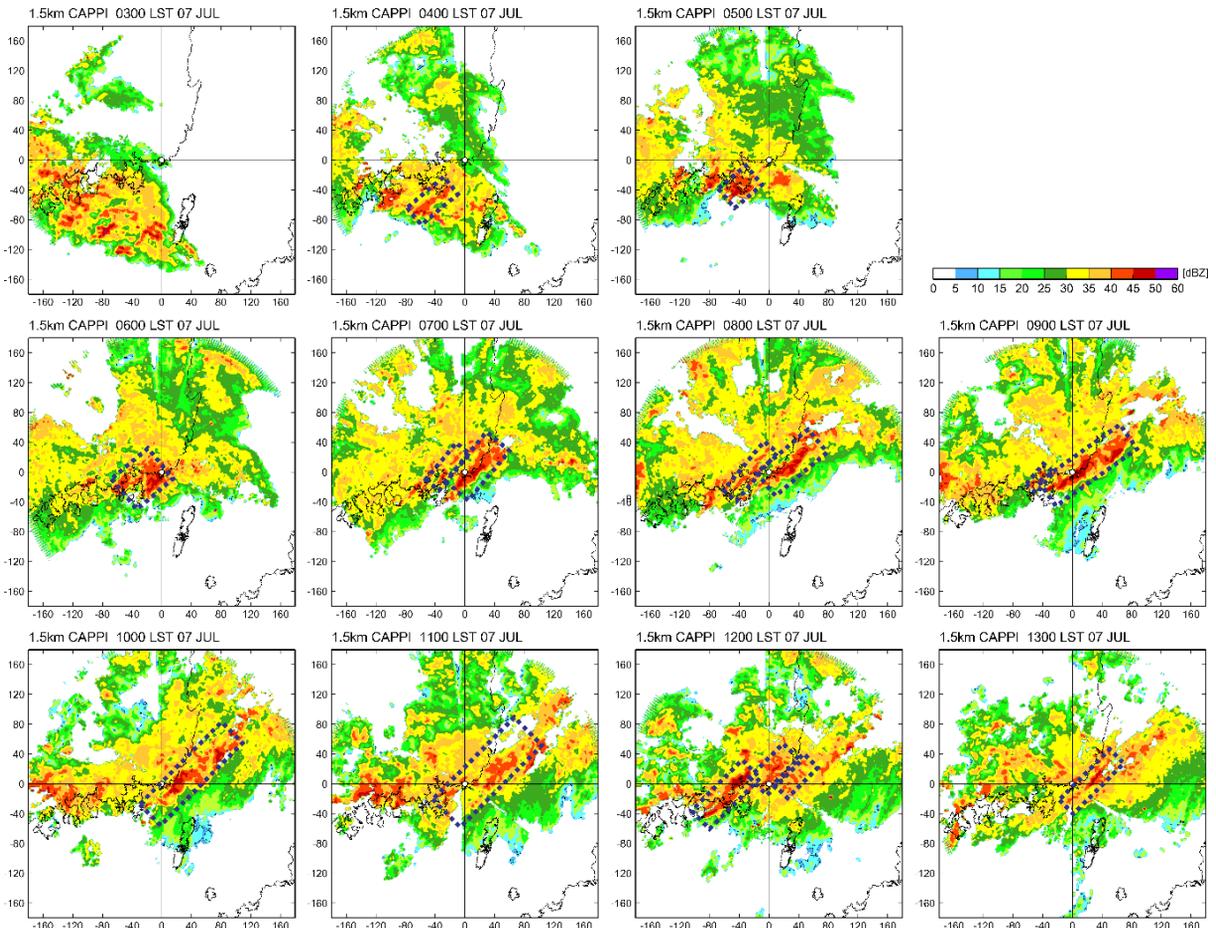
2009년 7월 7일 사례의 특징은 적외영상에서 장마전선의 영향으로 서해상에 하층운과 대류운이 광범위하게 존재하며, 한반도에는 상층운이 분포하였다. 수증기영상에서는 남서해상에서부터 우리나라 남부지방에 이르기까지 대기상층에 다량의 수증기가 존재함을 보인다. 또한 중국북부와 연해주에 각각 Head 형과 Inside형의 경계가 존재하여 장마전선의 북상과 동진을 저지하고 장마전선 남쪽에는 북태평양 고기압 가장자리에서의 하강운동에 의해 암화가 강화됨에 따라 우리나라 남부지역에 위치한 장마전선이 활성화되기에 매우 유리한 환경이 조성되었음을 보인다. 또한 수증기영상에서는 상층 기압골이 동진하여 기압골 후면에 위치한 암역이 한반도로 접근함에 따라 상층에서의 건조공기의 하강이 이 해역에서 새로운 대류세포의 발달을 억제하고 있음을 볼 수 있으며, 암역이 동진함에 따라 남부지역의 대류세포들도 동진하고 있다. 그 결과 전남에서부터 부산 지역에 이르기까지 대부분의 남부 지역에 200mm 이상의 많은 비가 내렸으며 특히 부산 지역의 경우 짧은 시간에 국지적으로 300mm 이상의 폭우가 발생하였다. 위성영상의 확대와 강우의 공간분포에서 부산 지역의 집중호우는 전남지역에 호우를 유발한 대류계가 이동해 온 것이 아니라 여수와 거제 사이에서 발달한 다른 대류계에 의해 발생한 것을 알 수 있다. 하지만 이 대류계의 최저 온정온도는 대부분 $-55\sim-60^{\circ}\text{C}$ 로 나타나 다른 사례들에 비해 다소 약하게 발달하였지만 강우강도는 시간당 70mm로 매우 강하게 발생하여 이에 대한 상세한 분석이 필요하다. 또한, 전남과 부산 앞바다에서 동시에 매우 강한 대류계가 발생한 것에 대해서도 연구가 필요하다.

2.3. 레이더 분석

2.3.1. 레이더 수평반사도

그림 2.3.1은 2009년 7월 7일 0300KST에서 1300KST까지 1.5km CAPPI 영상을 나타낸 그림으로 한반도 남부에 강수시스템이 넓게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. 레이더로 확인 되는 중규모 대류시스템은 meso- α 규모의 시스템 내에 meso- β 규모의 대류셀이 분포함으로써 다중규모 강수시스템의 형태를 보였다. 해당 사례는 서쪽에서부터 발생한 강수시스템이 한반도로 유입되어 강수를 내리게 되는 사례이지만, 레이더 영상분석을 통해 일정지역에 추가적으로 발달이 있었음을 알 수 있다.

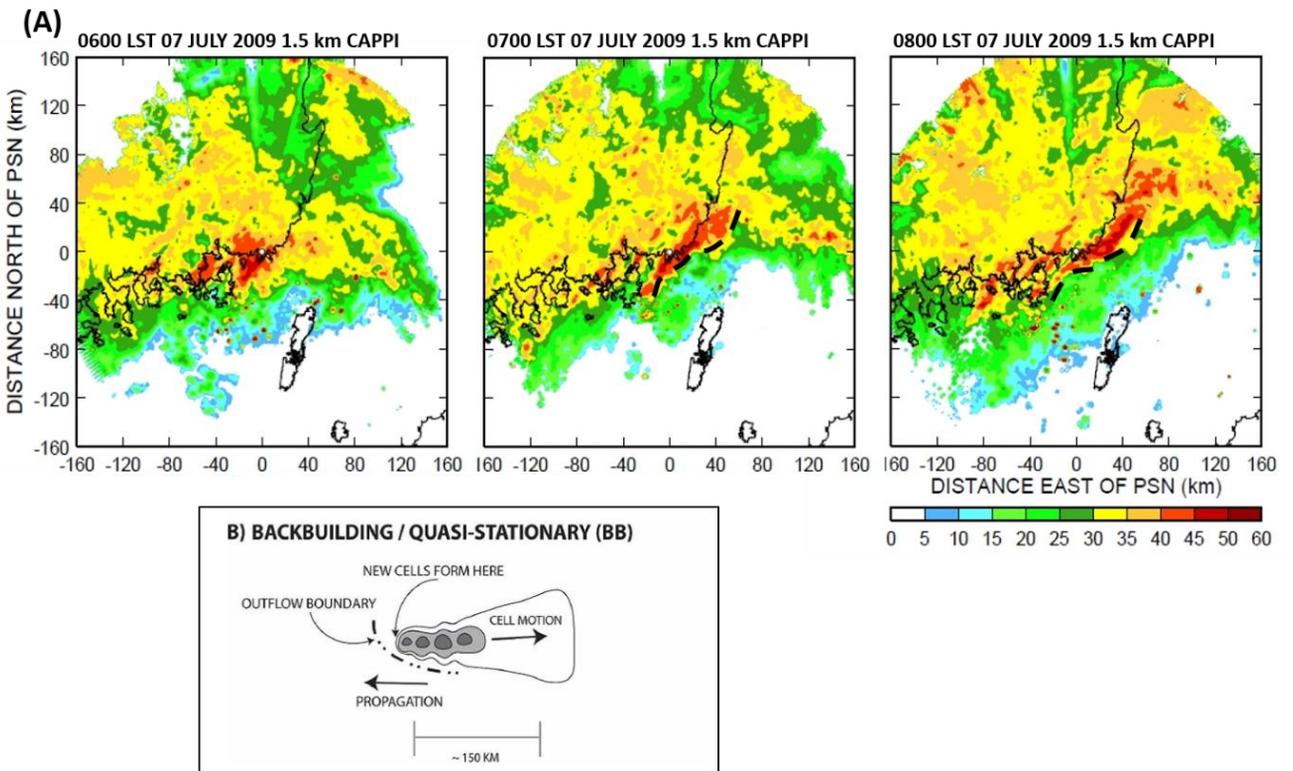
0300KST 남서쪽에서부터 이동해 오는 강수시스템은 0500KST에 대부분 한반도 남부경남 일대에 영향을 미쳤다. 0400KST부터 구덕산 레이더(부산시 서구 소재) 남서쪽 약 80km 거리에서 40dBZ 이상의 강한 반사도 영역이 발달하는 것을 확인할 수 있으며, 이 강한 반사도 영역은 1200KST까지 지속적으로 유지되어 부산지역에 영향을 미쳤다. 0700KST의 강한 반사도 영역은 뚜렷한 선형의 형태를 1100KST까지 유지하게 되며, 선형의 강한 반사도 영역 후면에 새로 발달한 선형 셀을 0800KST에서 확인할 수 있다. 이와 같이 기존의 셀 후면에서 새로 발생된 셀은 병합을 통해 기존 셀의 세력을 유지할 수 있게 해주는 역할을 하였고, 그로 인해 부산일대에 지속적이고 강한 강수를 유발할 수 있었을 것으로 사료된다.



[그림 2.3.1] 2009년 7월 7일 0300KST부터 0300-1300KST의 1.5km 수평반사도

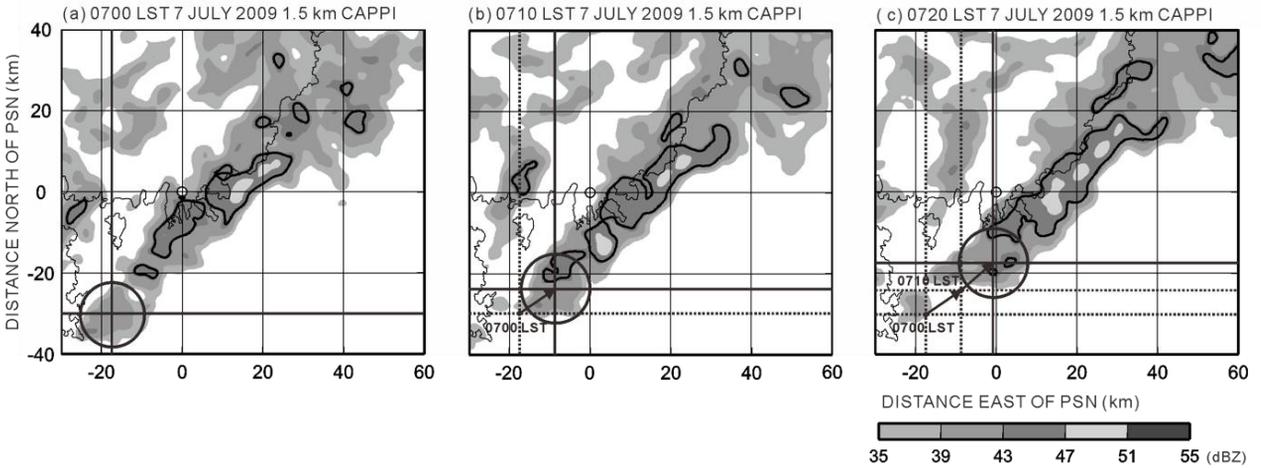
CAPPI 영상

그림 2.3.2는 시스템의 형태적 분류를 위해 나타낸 그림이다. 0600-0800KST의 1시간 간격 CAPPI 영상은 선형의 셀이 부산지역에 지속적으로 발달된 모습을 잘 나타내며, 후면에서 지속적으로 선형의 셀들이 발달하고 있는 모습을 보여준다. 전체적인 시스템 분포는 Schumacher and Johnson(2005)이 제시한 TL/AS(Training Line/Adjoining Stratiform)와 유사하게 나타나지만, 선형으로 강하게 발달한 영역에 대해서는 지속적인 후면 셀과의 병합이 일정 지역에 유지됨을 근거로 Back-building/Quasi-stationary로 분류할 수 있다.



[그림 2.3.2] 0600-0800KST의 1시간 간격 1.5km 수평반사도 CAPPI(A)와 Schumacher and Johnson(2005)이 제시한 Back-building/Quasi-stationary 모식도 (B)

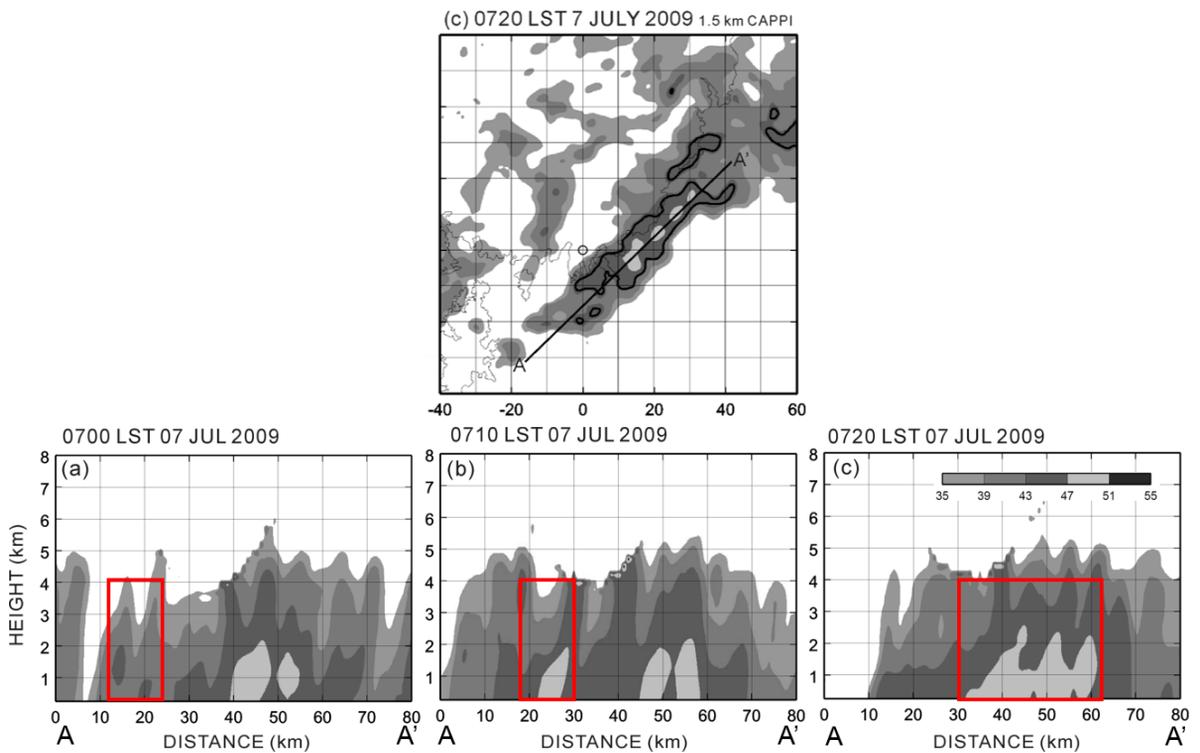
그림 2.3.3은 강하게 발달한 선형의 영역에 있는 대류 셀에 대한 이동벡터와 수평반사도를 나타낸 그림이다. 0700KST에 검은색 원으로 표기된 셀은 0710KST에 북동쪽으로 약 5m/s의 속도를 가지고 이동하였다. 이후 0720KST에는 전 시각보다 느려진 이동속도를 보였지만 이동방향의 변화는 거의 없었다.



[그림 2.3.3] 0700-0720KST의 10분 간격 1.5km 수평반사도 CAPPI와 셀의 이동에 따른 이동벡터

2.3.2. 레이더반사도의 연직 단면분석

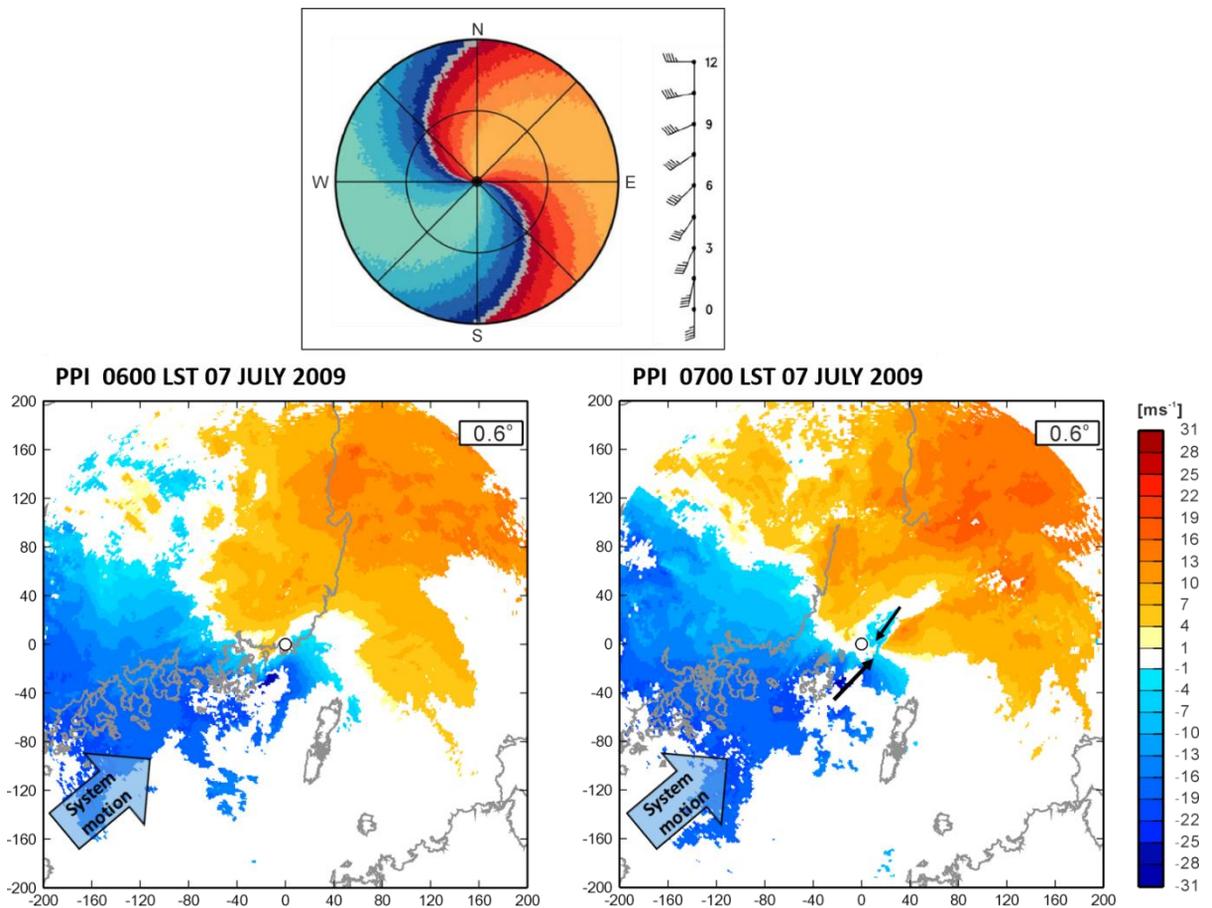
그림 2.3.4은 선형으로 강하게 발달한 영역에 대한 반사도 연직단면을 나타내었다. 10분 간격의 연직 단면도는 선형의 셀 후면에서 발달하는 대류 셀과 병합되는 모습을 잘 나타내준다. 0700KST에 A지 점으로부터 약 10km 거리에 있는 셀(붉은색 네모상자)은 0710KST에 코어가 47dBZ 이상으로 발달하였고, 0720KST에 기존의 셀 코어와 병합되었다.



[그림 2.3.4] 1.5km 수평반사도 CAPPI 영상(0720KST)과, A-A'의 연직단면도(0700-0720KST)

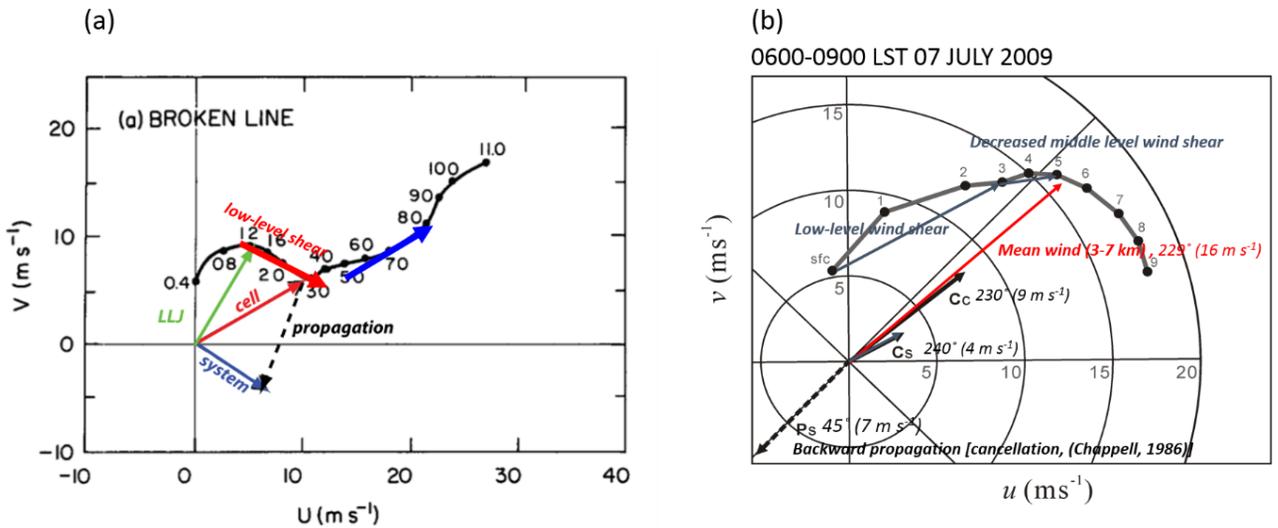
2.3.3. 레이더 시선속도 및 시스템 이동방향

그림 2.3.5는 시스템의 이동을 파악하기 위한 시선속도 자료의 PPI(0.6°)영상이다. 시선속도를 통해 판단되는 시스템 이동은 북동방향이며, 시스템 후면 남서풍의 바람은 빠른 속도(> 16m/s)로 부산지역에 유입되고 있다. 또한, 선형으로 강하게 발달했던 에코가 존재하던 부산지역에는 20m/s 이상의 시선속도가 나타난다. 0600KST의 시선속도는 그림 2.3.5의 온난이류가 나타나는 시선속도 패턴과 유사한 형태를 보이며, 이러한 형태의 시선속도는 고도에 따른 풍향이 순전방향으로 회전하고 상하층 간의 풍속시어가 작은 특징이 있다. 0600KST와 0700KST의 시선속도에서 확인할 수 있듯, 하층의 속도를 대변할 수 있는 레이더 주변의 높은 시선속도 값은 하층지역에 강한 바람이 존재함을 의미하며, 이러한 경우 상층고도의 강한 풍속과의 풍속차이가 적어 고도별 풍속시어가 작게 나타나게 된다. 0700KST의 경우 구덕산 레이더 인근 북서쪽으로 음의 시선속도 값이 나타남으로 남풍계열과 북동계열 바람에 따른 수평시어가 국지적으로 강하게 나타난다.



[그림 2.3.5] 온난이류가 나타나는 시선속도 패턴(상)와 0600, 0700KST의 시선속도 PPI(0.6°) 영상

그림 2.3.6(좌)은 Bluestein과 Jain(1985)이 조사한 해외에서의 사례를 통해 시스템과 셀, 그리고 하층제트(LLJ)의 바람시어가 고도에 따라 어떻게 나타나는가를 보여주고 있다. 부산사례의 경우 하층제트와 셀의 이동방향으로 분석된 고도에 따른 바람시어(Low-level Wind Shear)는 해외 사례보다 작게 나타나며, 시스템의 이동방향과 셀의 이동방향의 차이 또한 작게 나타났다. 새로운 셀의 성장을 의미하는 후방전파(Backward Propagation)는 셀의 이동 방향과 반대되는 방향으로 나타남으로써 전형적인 Back-building 형태의 특징이 나타났다.



[그림 2.3.6] 해외 사례(Bluestein and Jain, 1985)에서 나타난 강수시스템의 호도그래프(a)와, 07일 0600-0900KST의 셀과 시스템의 이동에 따른 호도그래프(b)

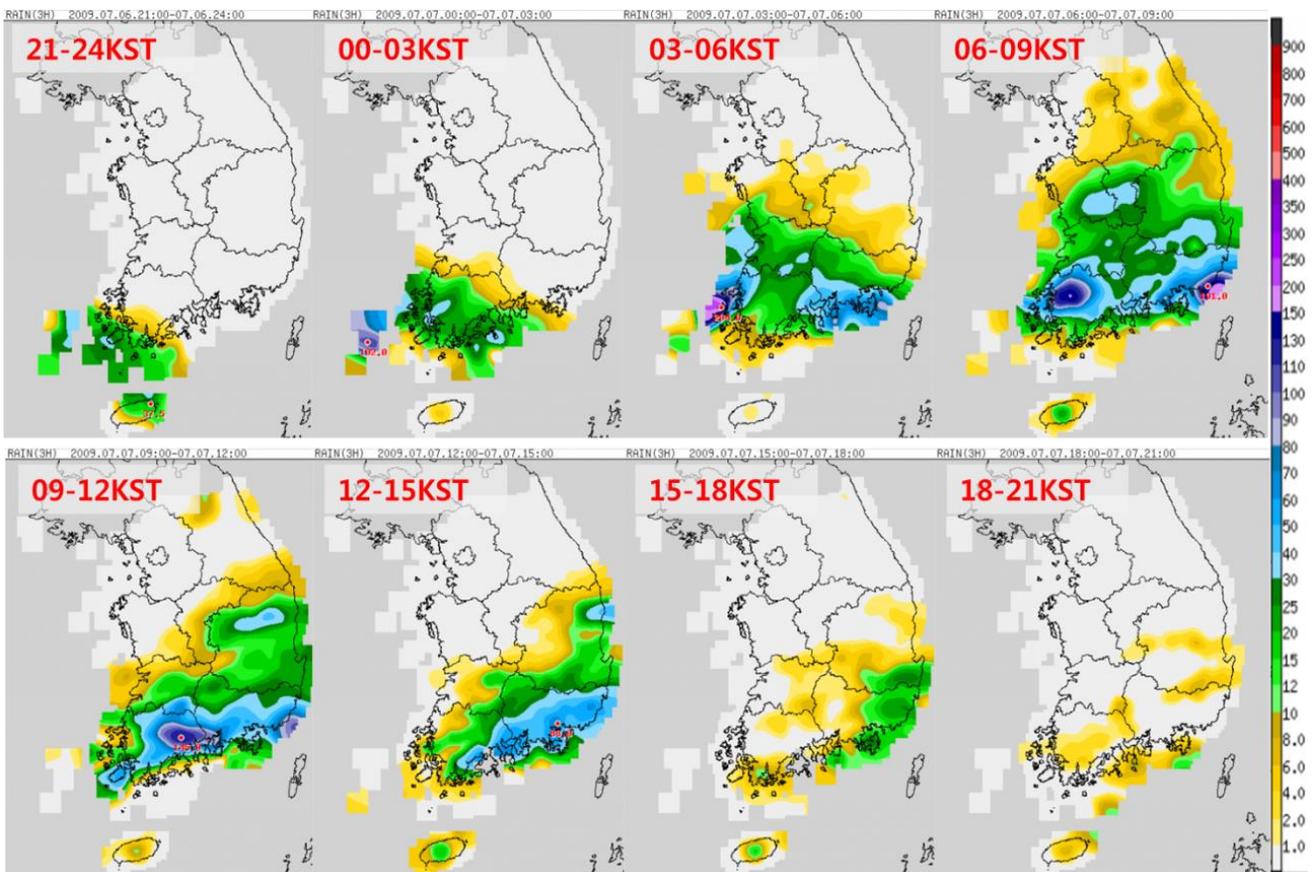
3

예측 자료 분석

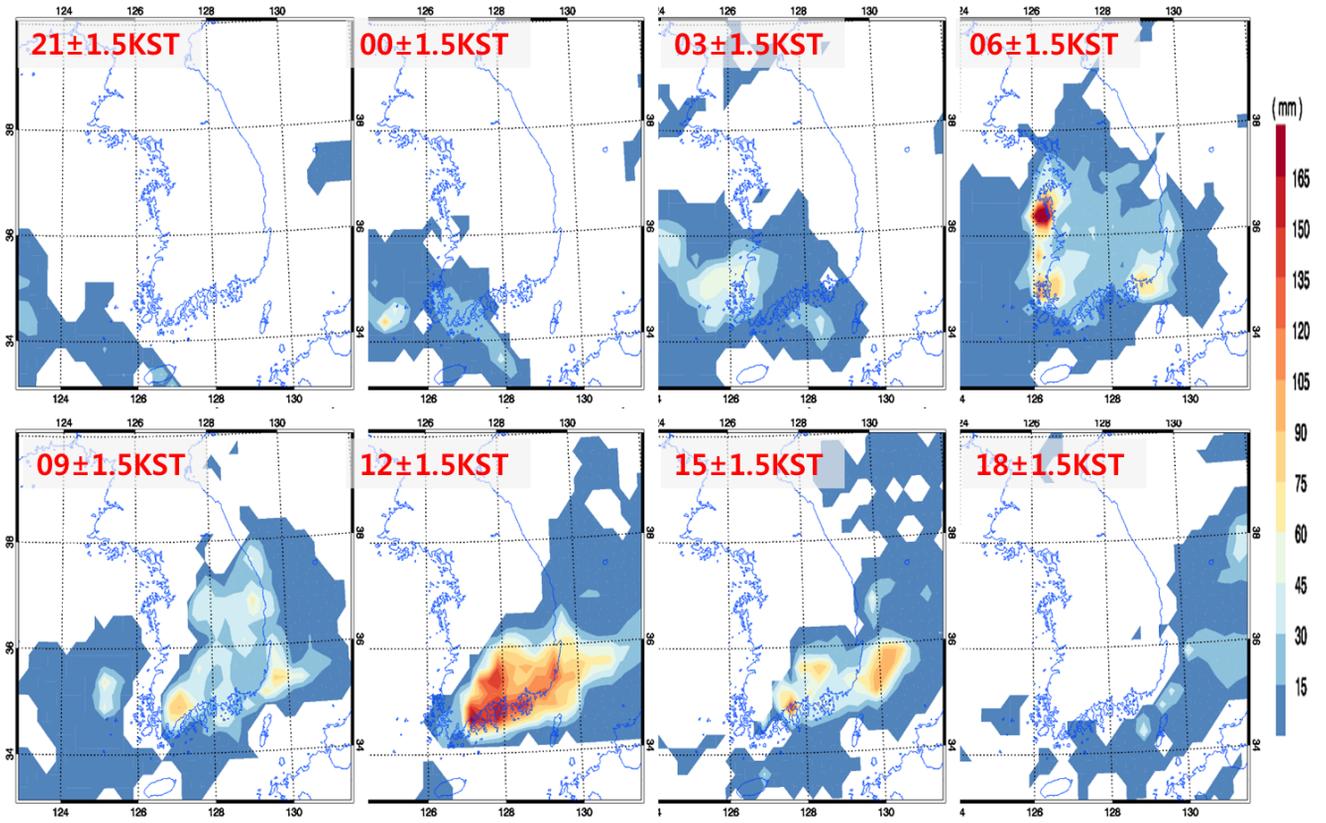
3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석

3.1.1 지역예보모델(RDAPS) 강수 예측

그림 3.1.1과 3.1.2는 2009년 7월 6일과 7일동안 AWS와 TMPA 위성 추정된 3시간 누적 강수량의 공간분포를 보여주고 있다. AWS 3시간 누적 강수량은 7월 6일 21KST에 전남 및 제주 지역을 중심으로 강수가 시작되어 전라남북도 지역과 경남 지역으로 확대되었다 7월 7일 15KST를 기점으로 강수가 약해지는 특징을 보여주고 있다. 주로 남부지역으로 강한 강수가 내렸고, 전남해안 지역(최대 ~200mm/day)과 부산 지역(최대 ~300mm/day)으로 특히 많은 강수가 기록되었다. 이 그림에서 추정되는 강수셀의 공간 규모는 meso- γ 규모로, 뚜렷한 호우셀이 전남해안(03-06KST), 전남/부산(06-09KST), 전남(09-12KST) 지역에서 짧은 시간동안 나타나고 있다. 위성 추정 강수의 분포도 한반도 내륙에 대해서는 AWS관측과 유사한 패턴을 보여주고 있으며, 발달한 호우셀들이 해양보다는 내륙에서 대체로 발생되었음을 보여주고 있다. (참고: 7월 7일 06KST에 태안반도 주변에 나타나고 있는 150mm/3-hr의 강한 호우셀은 위성 추정 오류로 판단된다.)

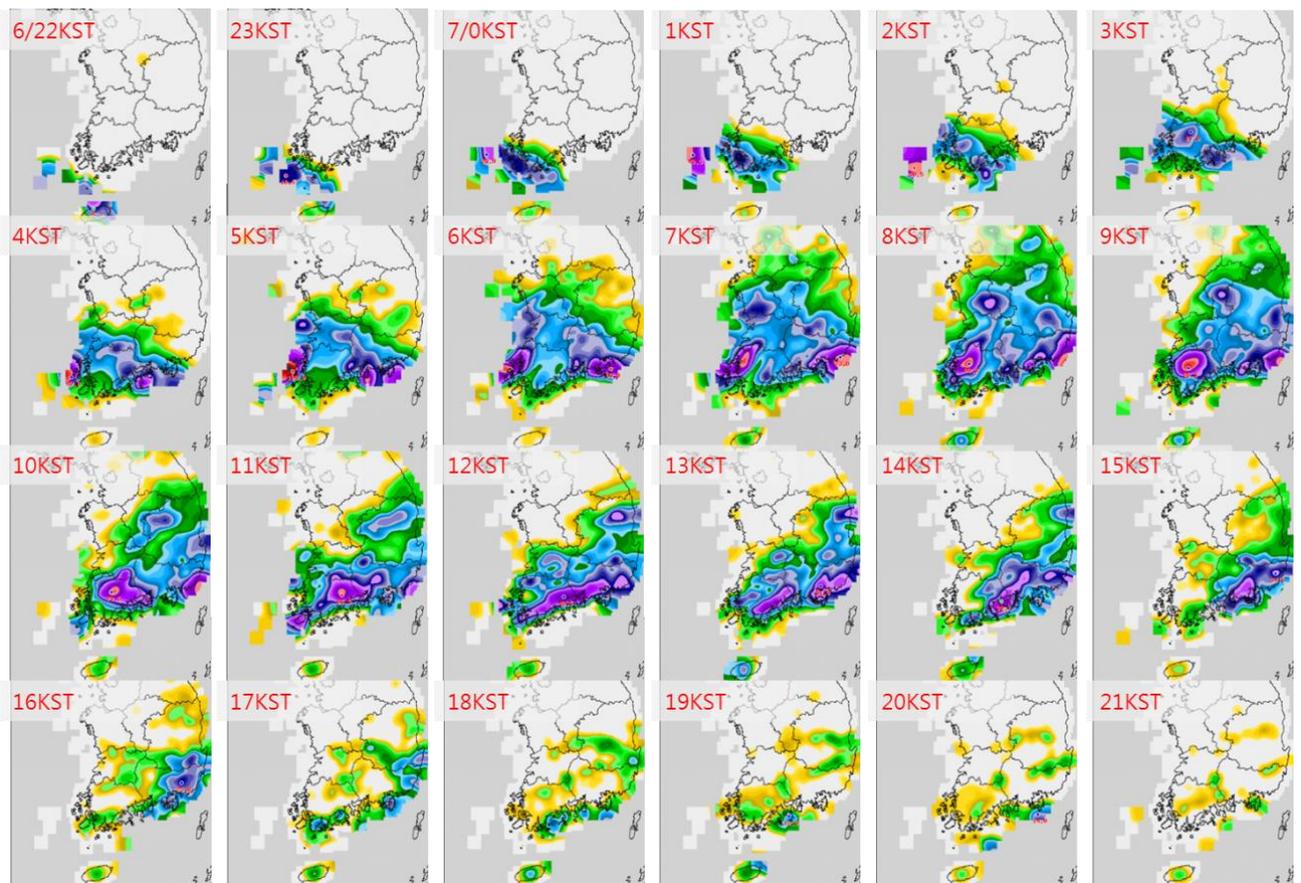


[그림 3.1.1] 2009년 7월 6일 21KST에서 7월 7일 21KST까지의 AWS 측정 3시간 누적 강수량 공간분포



[그림 3.1.2] 2009년 7월 6일 21KST에서 7월 7일 21KST까지의 TMPA 추정 3시간 누적 강수량 공간분포

그림 3.1.3은 2009년 7월 6일 21KST에서 7월 7일 21KST까지 AWS에서 측정된 1시간 간격의 누적 강수량을 나타낸다. 3시간 누적 강수량의 공간 분포에서 보였듯이 남부해안지역에서 시작된 강수가 점차 내륙으로 확대되었다가 다시 줄어드는 패턴을 명확하게 확인할 수 있다. 또한 전라남도 해안, 광주, 부산 등의 지역에서는 수십 km 규모의 강한 강수셀 (>50mm/hr)에 의한 집중호우가 발생하고 있다. 이 기간의 남부 및 부산 지역의 호우는 장마전선 상에서 발생한 중규모 대류계의 형성으로 기인한 것으로, 하층제트를 통한 많은 수증기 수렴과 이로 기인된 대류불안정 종관 환경에서 발생하였다. 수치모델의 예측 결과는 모델이 이러한 종관 환경과 중규모 대류계의 발달 기작을 얼마나 정확하게 예측할 수 있는가에 달려있다.

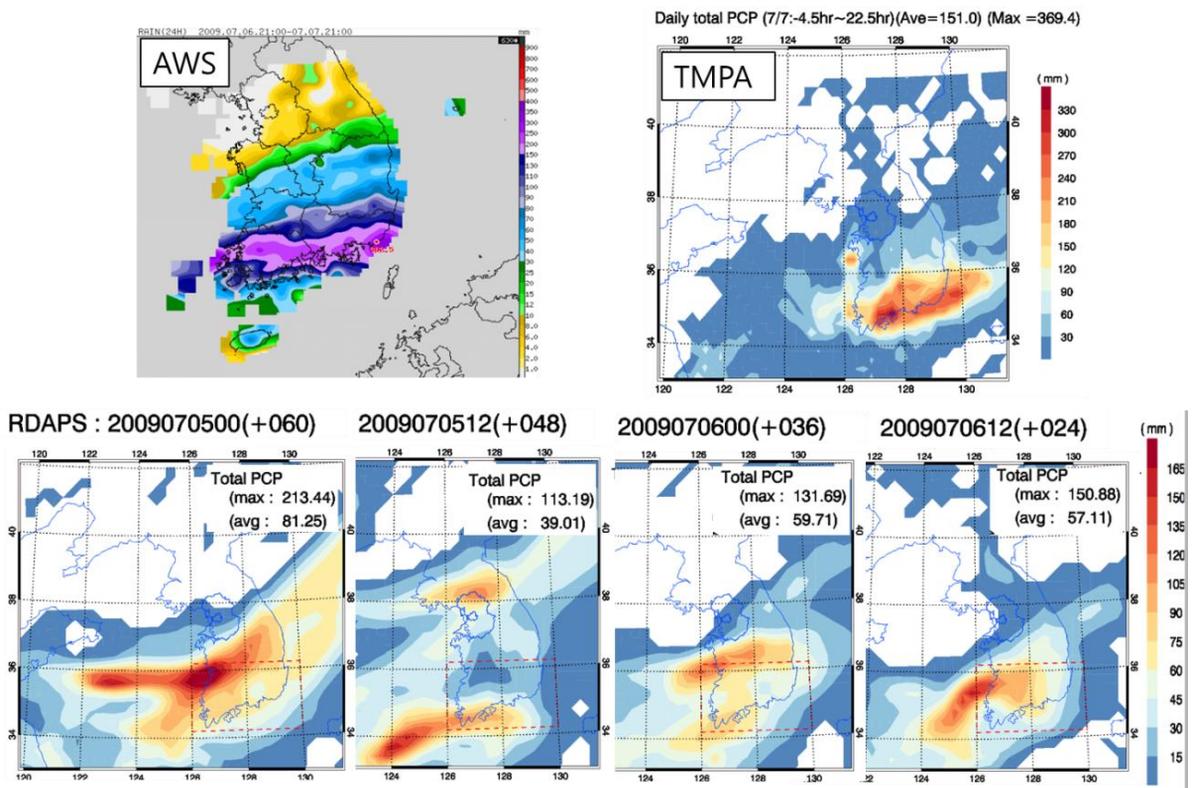


[그림 3.1.3] 2009년 7월 6일 22KST에서 7월 7일 21KST까지의 AWS 측정 1시간 누적 강수량 공간분포

3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석

그림 3.1.4는 2009년 7월 7일 일누적 강수량에 대해 AWS 관측, TMPA 위성추정, 그리고 지역예보 모델(RDAPS)의 적분선행 시간별 예측 결과를 비교하고 있다. 이 사례 시기에 사용된 기상청 현업 지역예보모델은 MM5 기반의 30km 격자 해상도를 가지고 있었으며, 현재의 UM기반의 지역예보모델(RDAPS)이 아니며 국지예보모델(LDAPS)도 운용되지 않았다. 또한 MM5 기반의 지역예보모델의 유효 해상도는 약 200km를 가지고 있어, 종관 규모 현상의 모의에는 대체로 적합하나 meso- β 이하의 대기 운동 영역에 대해서는 바람의 수렴/발산의 큰 감쇄가 일어나며 정확한 모의가 어렵다(2010년 1월 4일 중부지방 대설 사례 분석서 참조).

지역예보모델의 예측 결과는 AWS 관측과 위성추정 강수 자료(TMPA)에서 나타나는 남부지역의 동-서 방향으로 뻗어있는 강한 강수 영역(일누적 150mm/day 이상)을 잘 모의하지 못하고 있다. 전남-경남 지역으로 뻗은 강수대의 위치나 강수량 뿐만 아니라 부산 지역에서의 호우 발생도 예측하는데 실패하고 있다. 다만 모형에 의해 모의된 넓은 강수영역으로부터 모델 내 대류불안정 발생 영역이 넓게 나타나고 있음을 알 수 있으며 부산 지역은 여기에 포함되고 있다. 모델의 예측 시간이 사례 시각에 가까운 2009070612UTC 적분 결과는 2011년 8월 9일 전라북도 호우 사례(2010년 8월 9일 전라북도 호우 사례 분석집 참조)와 유사한 강수 공간 패턴을 보여주고 있다. 2009070500UTC 모델 결과에서부터 2009070612UTC의 결과는 강수 영역과 강수량의 예측 일관성이 아주 낮았다는 사실을 보여주며, 이들 모델 예측 결과로부터는 부산 지역의 집중 호우 예보는 매우 어려웠다고 판단할 수 있다.



[그림 3.1.4] 2009년 7월 7일 일누적 강수량의 모델 예측 및 관측 비교. AWS 측정(좌상), TMPA 위성 추정(우상), 지역예보모델(RDAPS)(하)

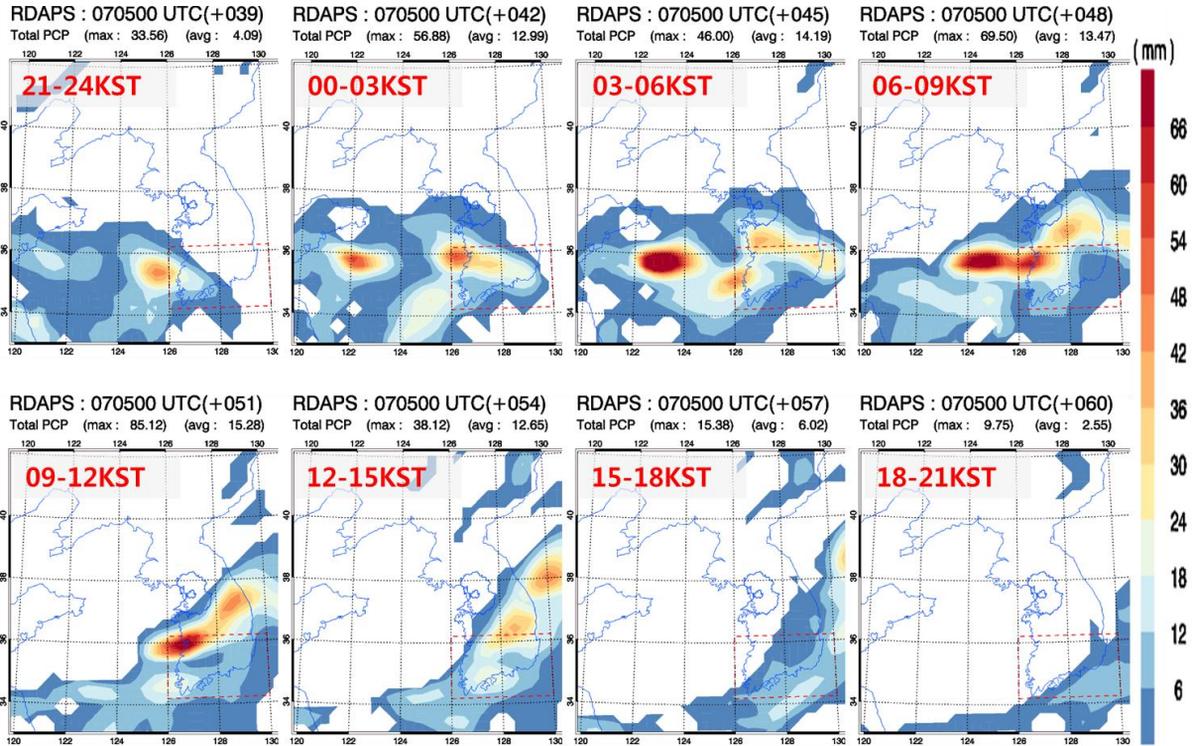
그림 3.1.5에서 3.1.8은 각각 2009070500UTC에서부터 2009070612UTC의 사례일의 3시간간격 누적 강수량의 공간 분포를 보여주고 있다. 그림 3.1.9는 동일 모델 예측 결과의 공간 평균된 3시간 누적 강수량과 위성 추정 강수량의 시간에 따른 변화를 비교하고 있다.

호우 발생 2일전(그림 3.1.5)에서는 집중호우 형태의 강수 예측을 보여주고 있으나, 강수 영역과 강수량(강수강도)은 관측과 큰 차이를 보여주고 있다.

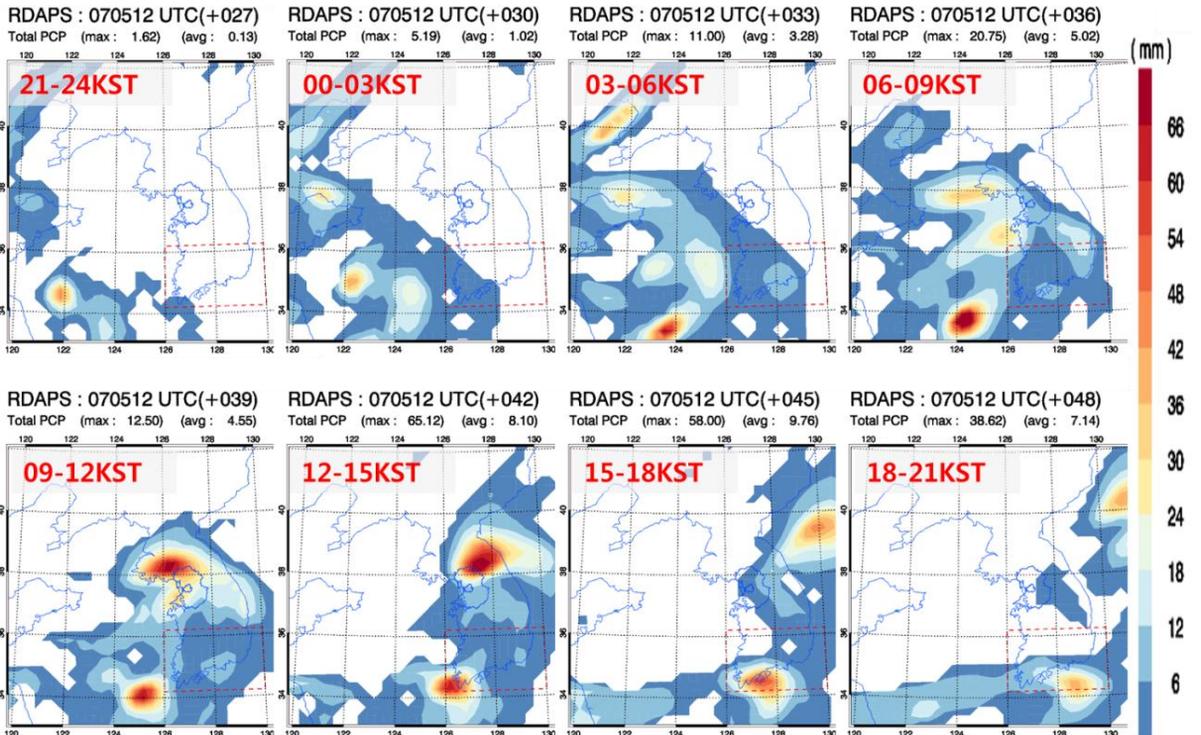
호우발생 1.5일전과 1일전(그림 3.1.6과 3.1.7)에서도 이전 시각의 예측 결과와 유사하게 호우셀 형태의 강수 예측이 나타나고 있으나 여전히 관측과는 다른 호우 영역과 강수 강도를 보여주고 있다. 호우 발생 약 12시간 전 수치 예측 결과(그림 3.1.8)에서도 호우 발생영역 및 강수량은 관측과 큰 차이를 보일 뿐만 아니라 이전 시각들의 예측과도 상당한 차이를 보여주고 있다. 선행 예측 결과들과 마찬가지로 호우셀 형태의 강수를 모의하고 있으나 셀의 공간 규모는 관측에 비해 다소 크게 모의하며 강수량(강도)는 적게 모의하고 있다.

한반도 남부 지역(그림 3.1.4 점선) 평균한 위성추정 강수량과 비교하였을 때 모델 예측 강수량은 약 4~5배 과소 모의 하고 있으며 강수 시작 시점도 약 6시간 내외의 차이를 보여주고 있다. 호우 발생 시각에 가까워짐에도 모의되는 강수역의 일관성이 보이지 않는 것은 모델이 장마전선 상에서 발달하는 중규모 대류셀의 예측성의 한계를 보여주는 것으로 판단할 수 있다. 특히, 당시 지역예보모델의 초기화는 적분시작 이전 12시간의 분석장 너징을 통해 이루어졌으며, 분석장이 한반도와 주변의 종관 및 중규모 기상 조건을 정확하게 나타내지 못하고 있었음을 추정할 수 있다. 앞서 설명하였듯이 지역 예보모델의 상대적으로 낮은 유효 해상도 또한 사례일의 호우 예측 한계를 나타낸 중요한 요인으로 판단된다.

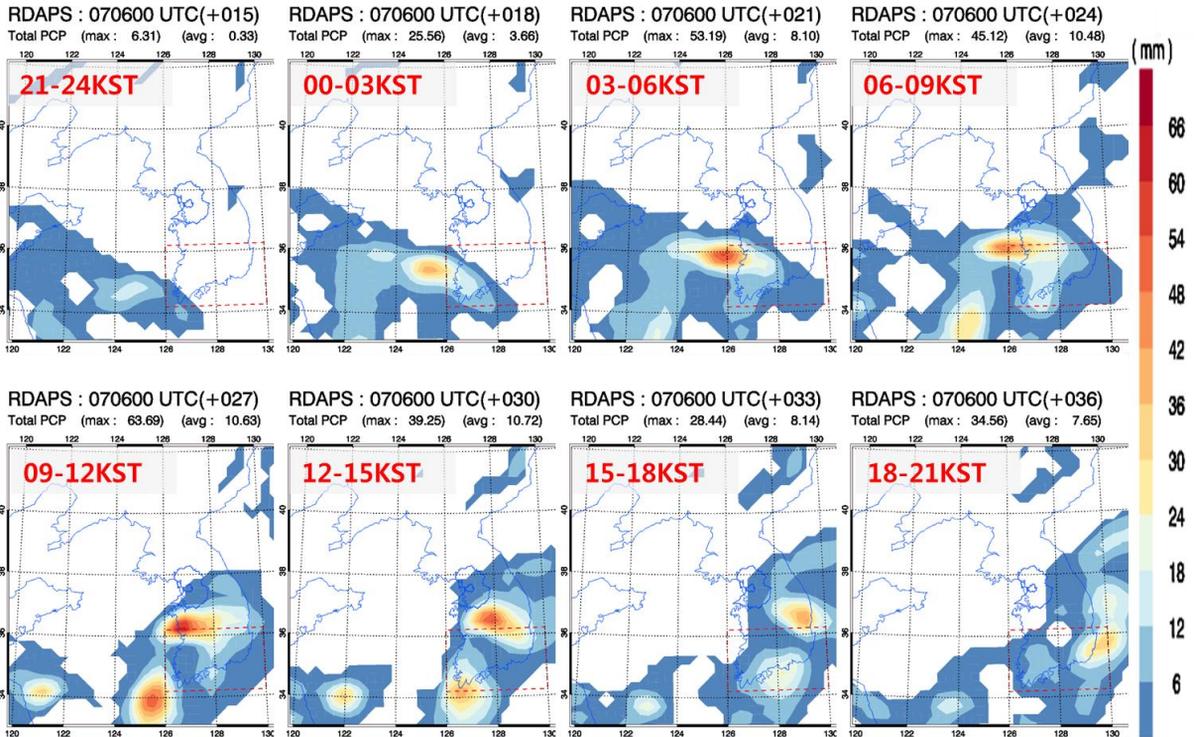
3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석



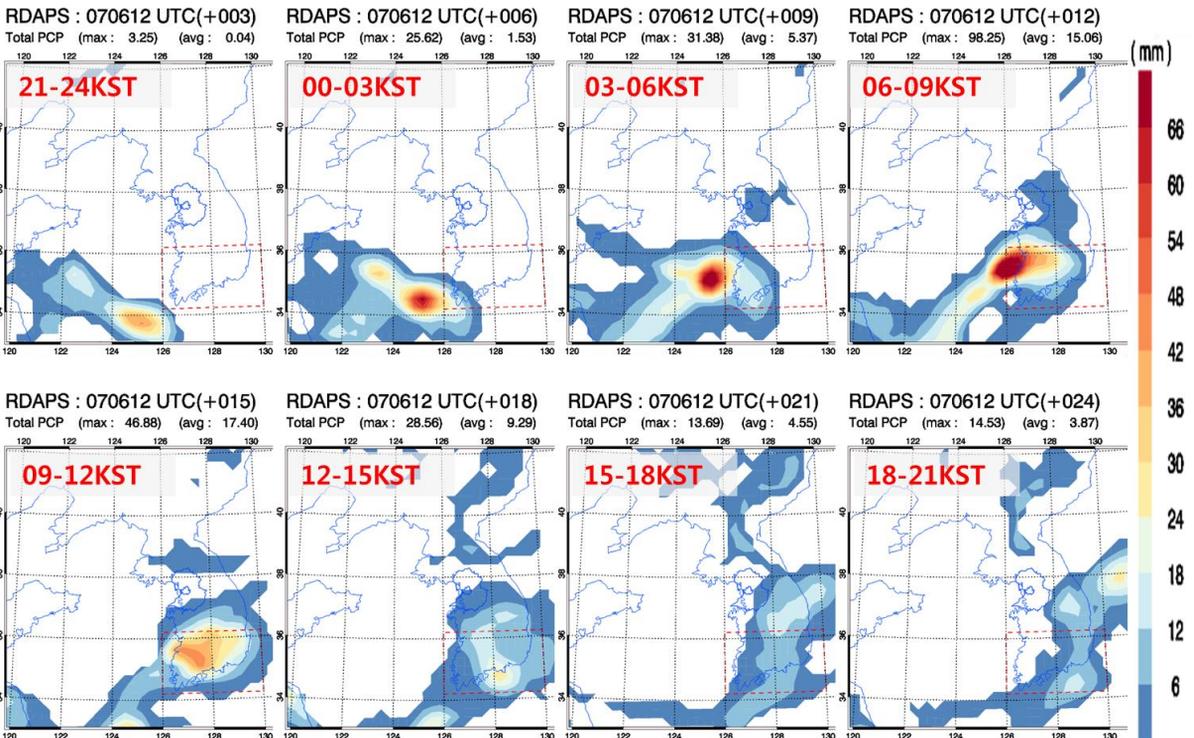
[그림 3.1.5] 지역예보모델(2009070500UTC)의 2009년 7월 6일 21KST에서 7월 7일 21KST까지의 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량



[그림 3.1.6] 지역예보모델(2009070512UTC)의 2009년 7월 6일 21KST에서 7월 7일 21KST까지의 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량

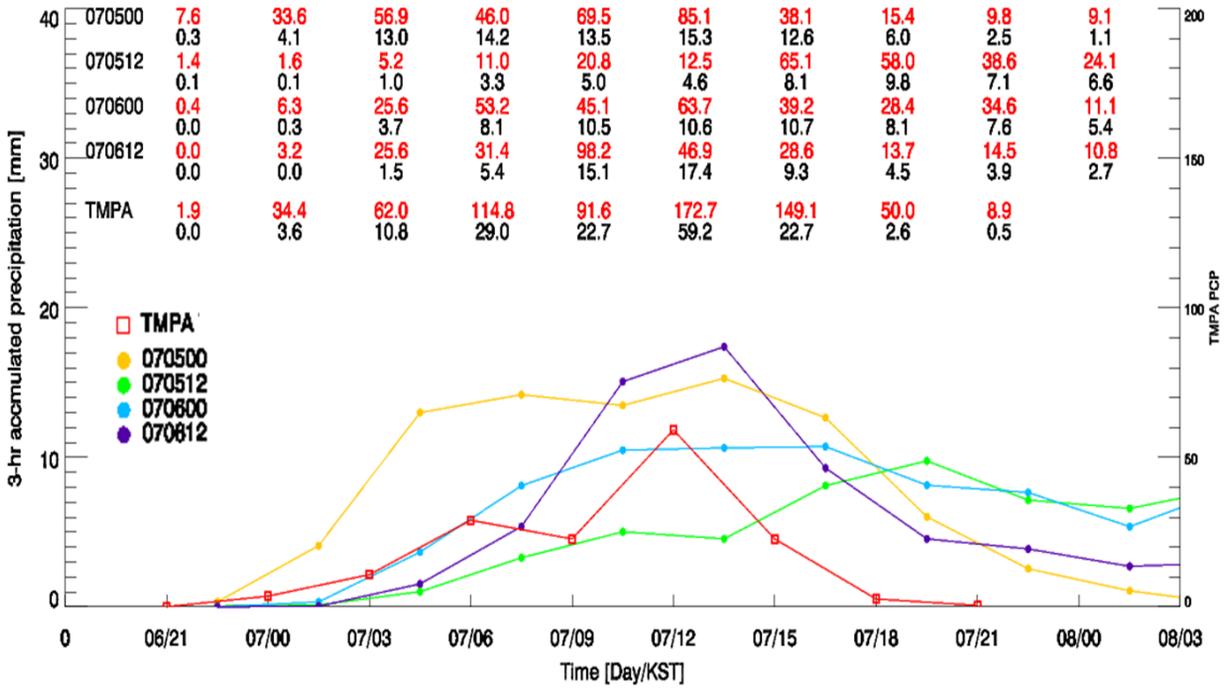


[그림 3.1.7] 지역예보모델(2009070600UTC)의 2009년 7월 6일 21KST에서 7월 7일 21KST까지의 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량



[그림 3.1.8] 지역예보모델(2009070612UTC)의 2009년 7월 6일 21KST에서 7월 7일 21KST까지의 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량

3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석

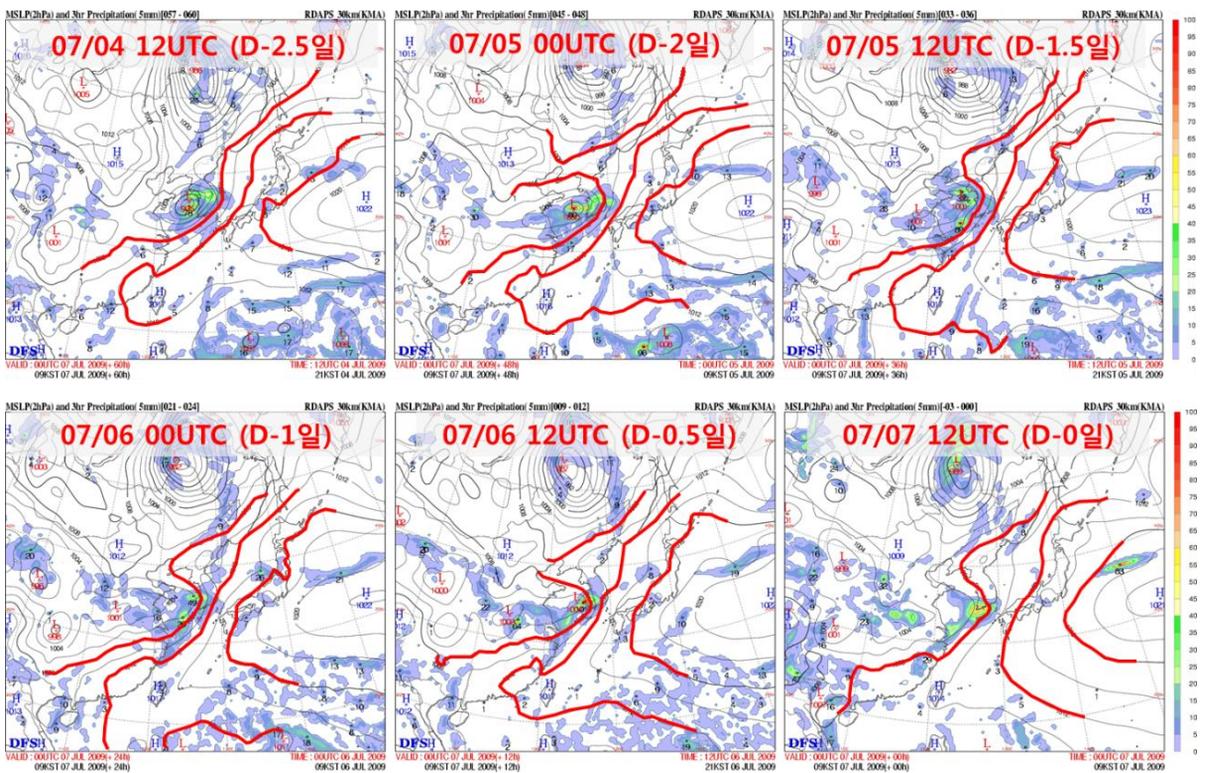


[그림 3.1.9] 지역예보모델(RDAPS)의 2009년 7월 6일 21KST에서 8일 03KST까지의 공간평균 예측 강수량. 모델 강수량과 위성 추정 강수량(TMPA)은 각각 3시간 누적 강수량을 나타냄. 최대값은 한반도 남부 지역(그림 3.1.4의 적색 사각형 표시 지역)의 공간 최대값을 의미. 흑색 숫자는 평균값을 적색 숫자는 최대값을 나타냄. 모델 예측 강수량을 나타내는 축(왼쪽)과 위성 추정 강수량(TMPA)을 나타내는 축(오른쪽)이 다른 것 유의해야 함

3.2. 모델의 강수 예측 특성 분석

3.2.1. 지역예보모델(RDAPS)의 강수 예측 특성

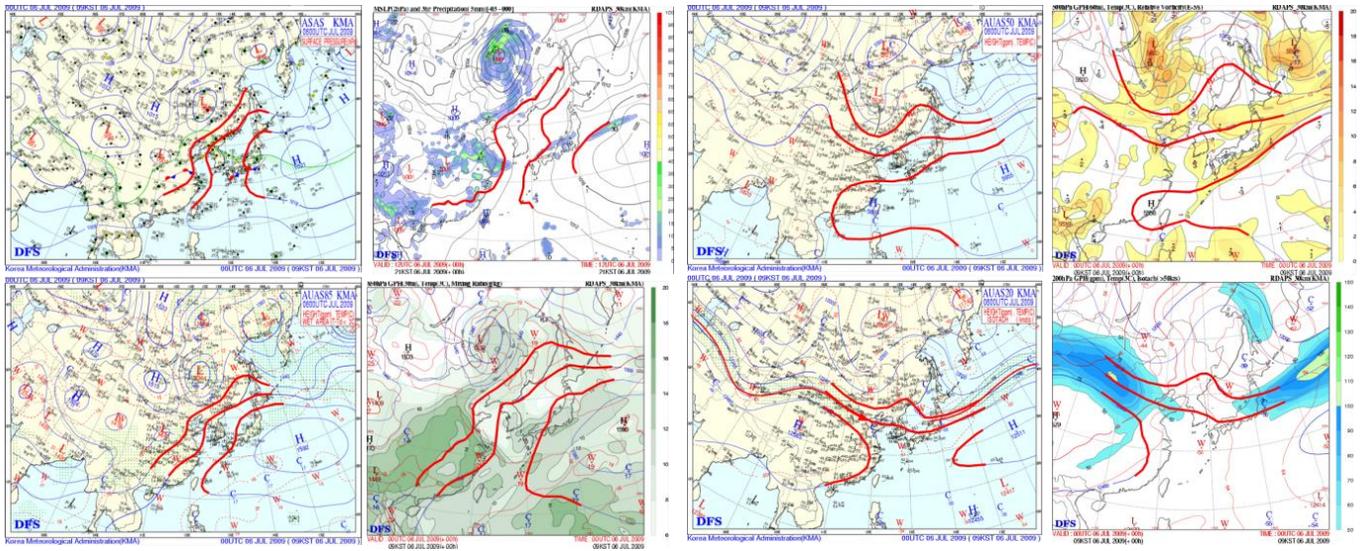
그림 3.2.1은 지역예보모델(RDAPS)의 적분 시작 시간별(2009070412UTC~ 2009070712UTC) 호우 발생일인 7월 7일 09KST의 예측 지상 기압계와 강수 분포를 비교하고 있다. 서해상에 발달한 중규모 저기압의 존재는 사례 발생 2.5일 예측 결과에서도 나타나고 있으며, 이 저기압의 강도와 위치는 한반도 북쪽에 위치한 저기압과 서태평양의 고기압의 세력의 차이와 함께 지속적으로 수정되고 있다. 한반도 주변의 중규모 저기압과 중관 규모 기압계의 정확한 위치와 강도는 정확한 관측 정보의 자료 동화를 통해 개선되는 것이 보통이나, 앞서 설명하였듯이 사례 발생시에 운용되었던 모델의 자료동화 방법의 한계와 유용한 관측 정보의 부재로 정확한 모델 예측이 어려웠다고 볼 수 있다. 강수 예측의 실패는 이러한 원인들의 결과로 나타나게 된다.



[그림 3.2.1] 지역예보모델(RDAPS)의 적분 수행 시간별 사례일(7월 7일 09KST)에 대한 예측 지상 기압계와 강수 분포 비교

3.2.2. 지역예보모델 (RDAPS)의 초기장 분석

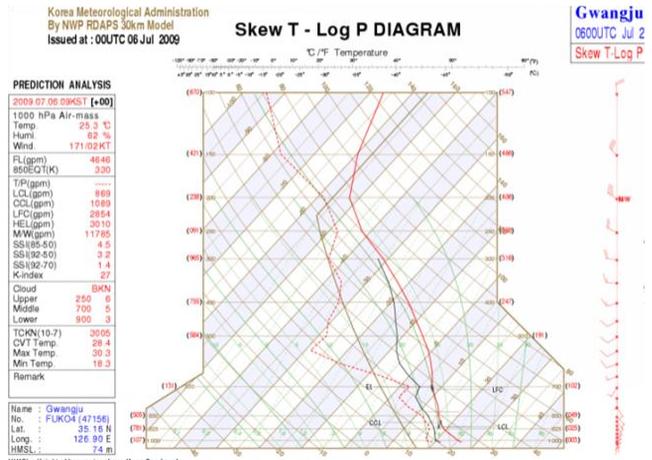
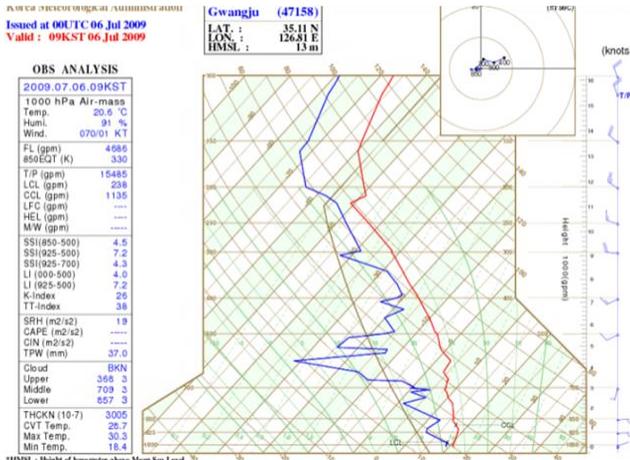
본 사례에 대한 지역예보모델의 낮은 예측성의 원인을 살펴보기 위해 그림 3.2.2는 009070600UTC 적분시작 모델의 주요 고도별 모델 초기장과 분석일기도를, 그림 3.2.3에서는 광주 지점에서의 모델 초기장과 관측장을 비교하고 있다. 종관 규모의 기압 배치(한반도 북쪽 저기압과 서태평양 고기압)는 모델과 분석 일기도가 유사하게 나타나지만 한반도 주변의 기압 배치를 자세히 살펴보면 기압경도와 서태평양 고기압의 확장 정도에 의미있는 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다. 광주 지점에서의 연직 기상장 분포를 살펴보면, 925hPa이하의 하층 대기의 안정도와 700-400hPa 사이의 건조 공기 영역에서 모델-관측의 큰 차이가 나타나고 있다. 이러한 모델 초기장의 오차는 +3h, +6h, +9h 예측장과 지상 분석일기도에서 호우와 직접 관련된 장마전선과 한반도 주변 기압 배치에 차이를 유발한다(그림 3.2.4).



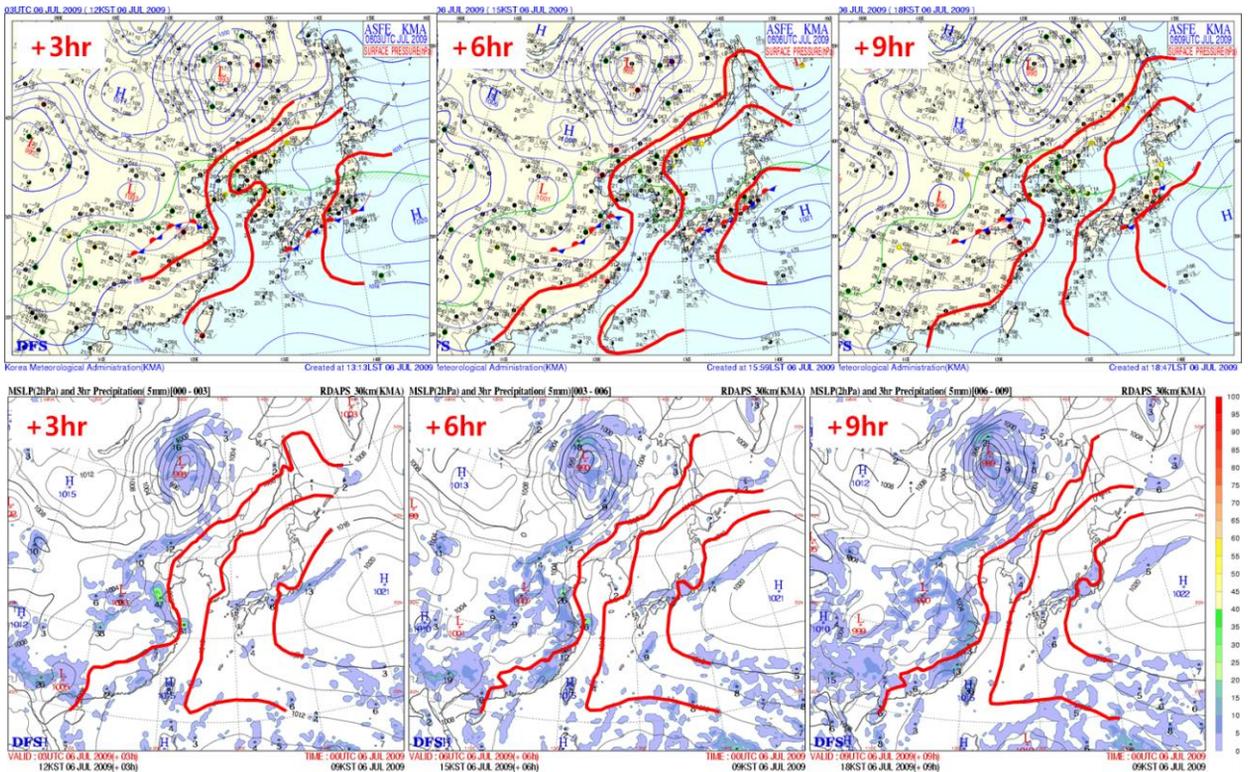
[그림 3.2.2] 지역예보모델(2009070600UTC)의 초기장과 분석 일기도 비교(지상: 좌상, 850hPa: 좌하, 500hPa: 우상, 200hPa(우하))

관측 (47158)

RDAPS 초기장



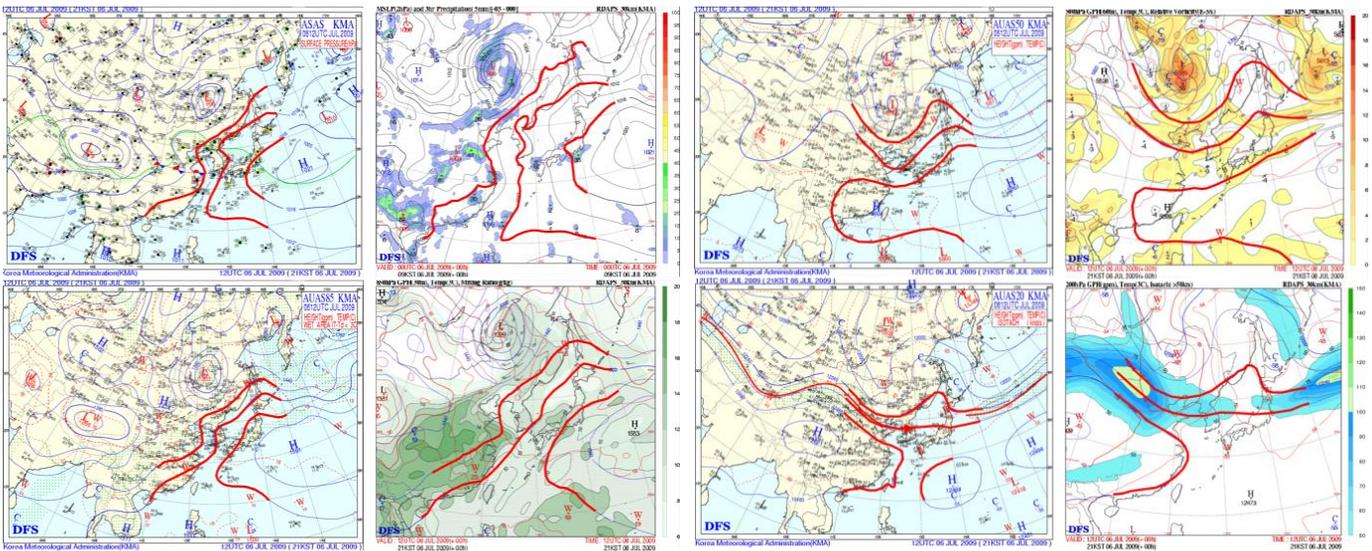
[그림 3.2.3] 지역에보모델(2009070600UTC)의 초기장과 관측 상층 기상장의 비교(광주 지점: 47158)



[그림 3.2.4] 지역에보모델(2009070600UTC)의 +3h, +6h, +9h 예측장과 분석일기도 비교

3.2. 모델의 강수 예측 특성 분석

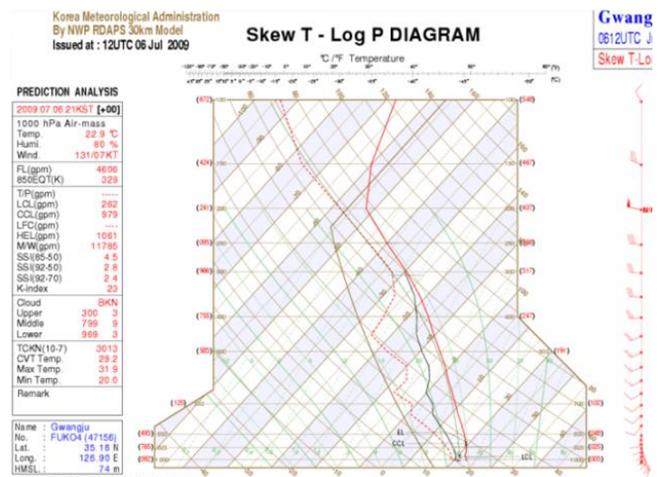
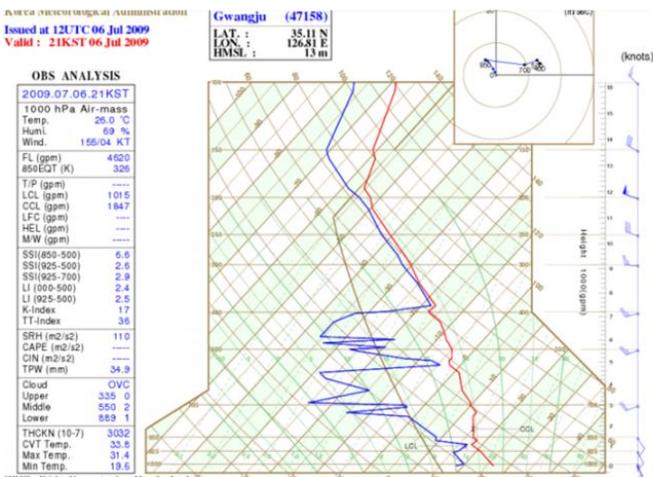
그림 3.2.5~3.2.7은 지역예보모델의 적분시작 시각 2009070612UTC 예측 결과에 대해 위와 동일한 분석 결과를 보여주고 있다. 앞선 시각의 모델 예측 결과와 유사하게 모델의 한반도 주변의 중규모 기압 배치는 분석일기도와 다소 차이를 보이고 있다. 광주 지점에서의 연직 기상장 분포에서 나타나는 특성 또한 유사하여, 관측에서 나타나는 700-400hPa 중층 건조 영역이 모델에서는 보다 습윤하게 초기화되었음을 보여준다. 모델의 +9h 예측장과 지상 분석일기도를 비교해보면, 초기장의 오차는 서태평양 고기압의 보다 강한 저지에 의해 서해상 중규모 저기압의 내륙 진입이 늦어지는 결과로 예측되고 있으며, 많은 강수가 서해상에 내리는 것으로 모의하고 있다(그림 3.1.8).



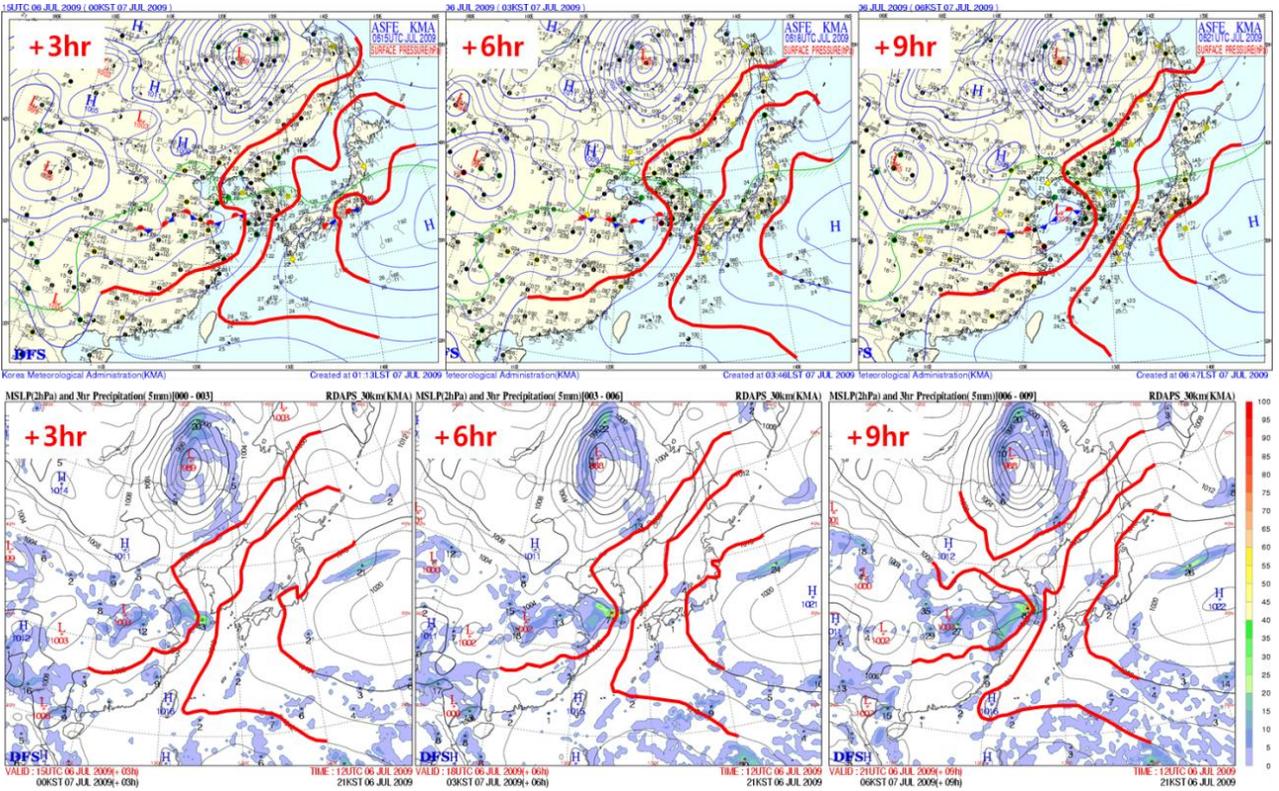
[그림 3.2.5] 지역예보모델(2009070612UTC)의 초기장과 분석 일기도 비교(지상: 좌상, 850hPa: 좌하, 500hPa: 우상, 200hPa(우하))

관측 (47158)

RDAPS 초기장



[그림 3.2.6] 지역예보모델(2009070612UTC)의 초기장과 관측 상층 기상장의 비교(광주 지점: 47158)



[그림 3.2.7] 지역예보모델(2009070612UTC)의 +3h, +6h, +9h 예측장과 분석일기도 비교

4

사례 발생 원인

4.1. 종관 및 중규모 환경

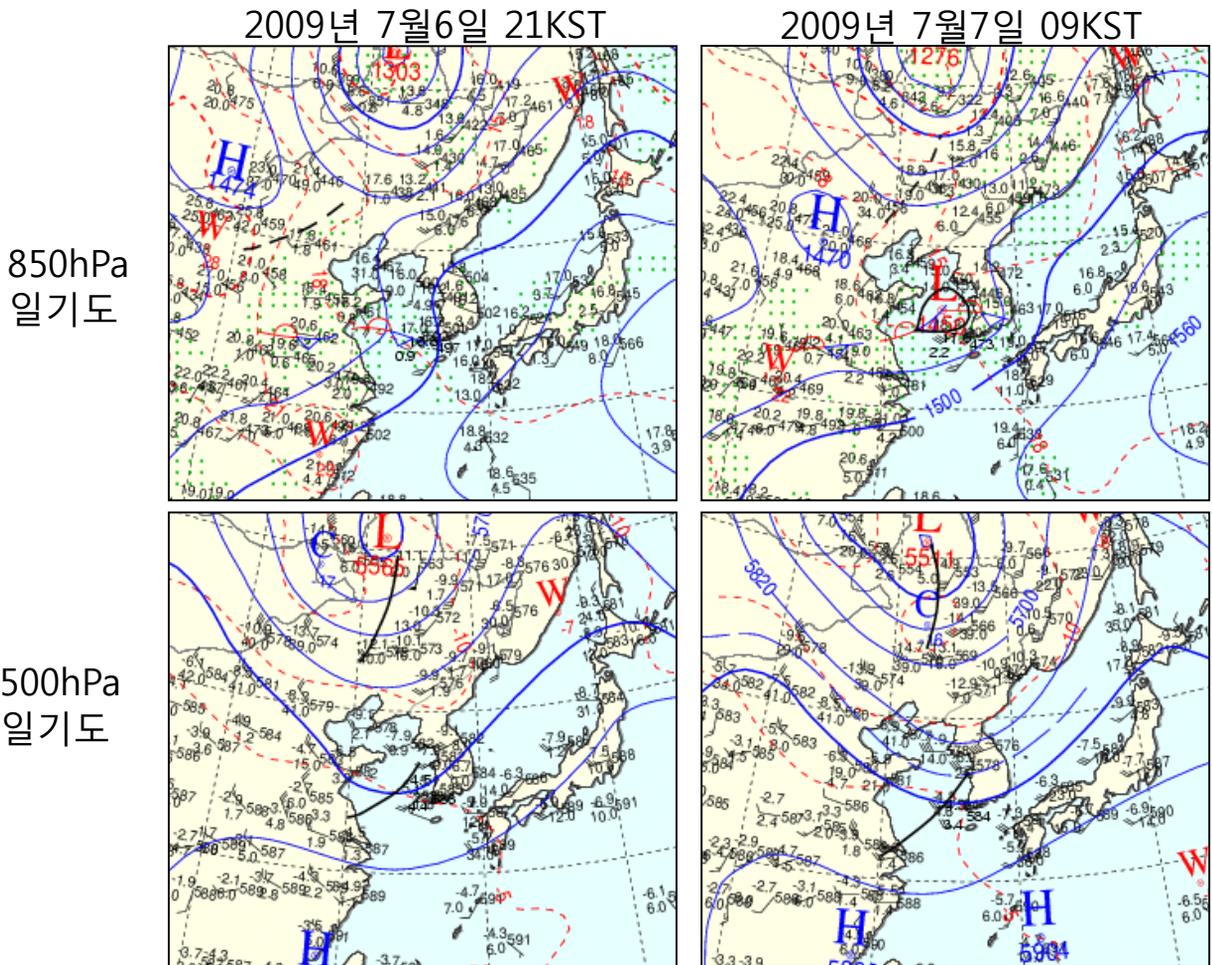
4.1.1. 상층 고도 패턴

- 850hPa 등압면

2009년 7월 6일 21KST, 산동반도 남쪽에 북서-남동 방향의 축을 갖는 골이 황해상으로 발달하였으며, 12시간 후(7일 09KST)에는 이 골에서 발달한 중규모 저기압이 한반도 서해안에 접근하고 있다. 이 때문에 한반도 남부지방과 남해상에 강한 고도 경도가 존재하게 된다. 경압불안정에 의한 종관규모 저기압이 북쪽(북위 50° 부근)에 자리잡고 있으며, 앞에서 언급한 중규모 저기압은 종관규모 저기압과는 별개의 환경에서 발생한 것으로 판단된다.

- 500hPa 등압면:

황해상에 하층 중규모 저기압과 연관하여 500hPa 골이 발달하였는데, 이 골은 경압불안정이 아닌 다른 강제(예, 잠열가열)에 의해 발달한 것으로 판단된다.



[그림 4.1.1] 850hPa(위)와 500hPa(아래) 일기도. 왼쪽은 2009년 7월 6일 21KST, 오른쪽은 7월 7일 09KST의 것임

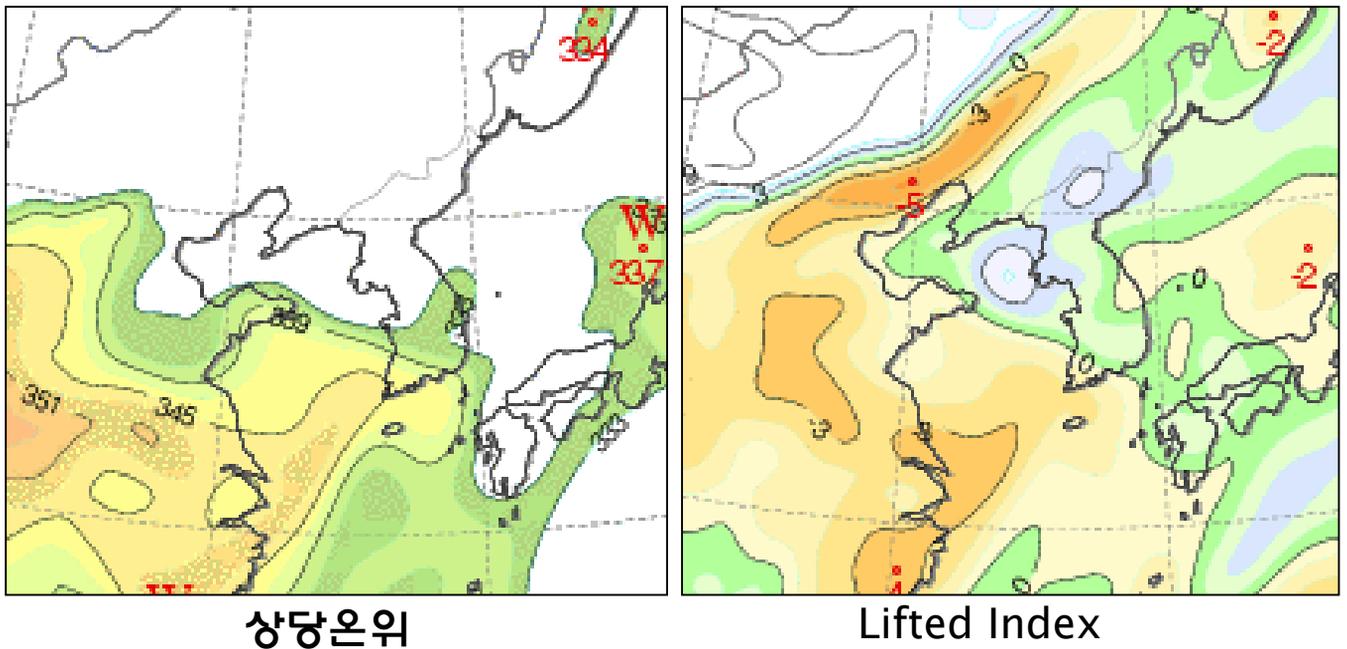
4.1.2. 중규모 저기압과 호우 발달을 가져오는 강제와 열역학적 환경

1) 강제

중규모 저기압은 경압불안정이 약한 환경에서 발생하였으며, 종관규모 강제의 역할은 미약한 한 것으로 판단된다. 한편, 중규모 저기압 발달에 따른 저기압 남동부와 서태평양 고기압 사이의 하층 제트 발달이 호우 발달에 중요한 강제로 작용하는 것으로 판단된다.

2) 열역학적 환경

중규모 저기압의 동진에 따라 고상당온위 공기가 한반도 남부로 수송되며(그림 4.1.2 왼쪽), 수분 증가에 따라 대기불안정도(LI)도 증가하여 한반도 남부 지역의 불안정도가 증가하였다(그림 4.1.2 오른쪽).



[그림 4.1.2] 2009년 7월 7일 09KST의 RDAPS(30km) 재분석장: 850hPa 상당온위(왼쪽)와 Lifted Index(오른쪽)

4.2. 중규모 저기압과 호우시스템의 발달

4.2.1. 장마전선에서의 기압골과 중규모 저기압의 발달

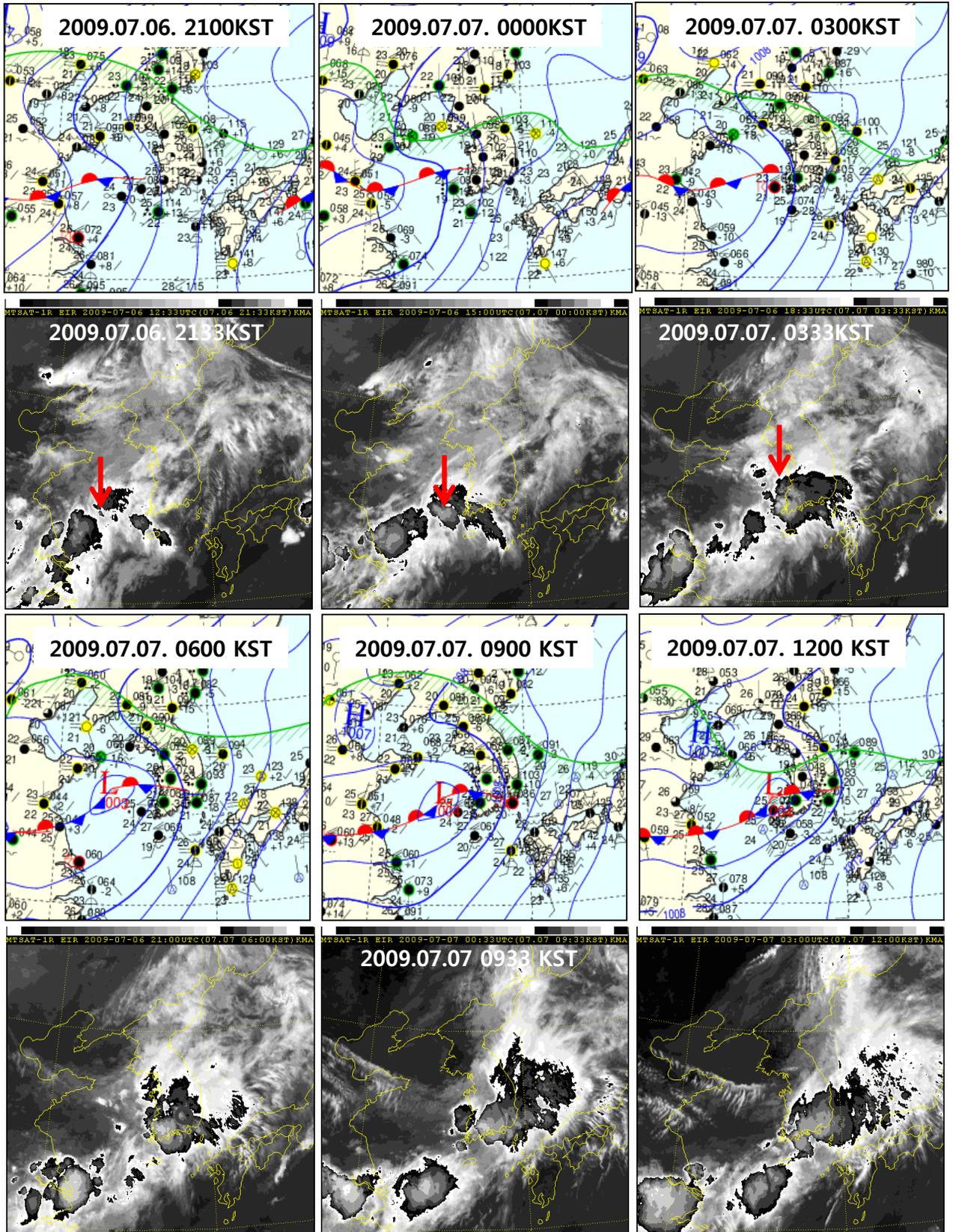
장마전선 상의 중규모 저기압은 호우시스템 발달과 유지를 가져오는 가장 중요한 구조라 하겠다(그림 4.2.1). 그 이유는 중규모 저기압 발달이 저기압 남동부의 남풍~남서풍을 더욱 강화시키고 이는 대류계 발달을 위한 수분 공급과 수렴 발생을 더욱 강화 시켜주기 때문이다.

- 중규모 저기압 발달: 산동 반도 남쪽에 동서 방향으로 놓여있는 정체 전선을 따라 기압골이 발달하면서 하층 공기의 수렴 구조가 존재하였다(6일 21KST ~ 7일 03KST). 기압골이 동진하면서 전면(동쪽)에서 기압경도가 강화되고 중규모 저기압이 발달하였다(6일 21KST ~ 7일 06KST).
- 중규모 저기압의 느린 이동: 7일 06KST ~ 15KST 사이에는 서태평양 고기압의 존재로 인해 중규모 저기압이 느리게 동진하다가 15KST 이후부터 상대적으로 빠르게 동진하면서 호우 지역이 남부 지방을 벗어나게 되었다(그림 4.2.1). 15KST 이후에 중규모 저기압의 이동이 빨라지는 것은 한반도 주변의 조건(한반도 북쪽의 종관규모 저기압과 서태평양 고기압) 변화와 연관된 것으로 추정된다.

4.2.2. 구름무리 호우시스템의 발달과 유지(그림 4.2.1)

- 7월 6일 21KST에 산동 반도 남쪽 기압골 부근 황해상에서 본 사례 조사가 관심을 갖는 대류계의 발달이 시작 된다. 동쪽 대류계(붉은 화살선으로 표시)가 한반도 남서해안에 접근하면서 [동진하는 기압골 전면(동쪽)에서 기압경도가 강화될 때] 구름무리형 호우시스템으로 발달한다(7월 7일 00 ~ 03KST).
- 중규모 저기압의 동쪽 부분에서 구름무리가 발달하며(06 ~ 15KST), 중규모 저기압이 강도를 유지하면서 느리게 동진함에 따라 구름무리도 강한 발달 상태를 유지한 채 느리게 동진하였다(7일 03 ~ 16KST). 이 느린 이동 때문에 부산을 포함한 남부 지방에 지속적 호우가 발생하였다.

4.2. 중규모 저기압과 호우시스템의 발달

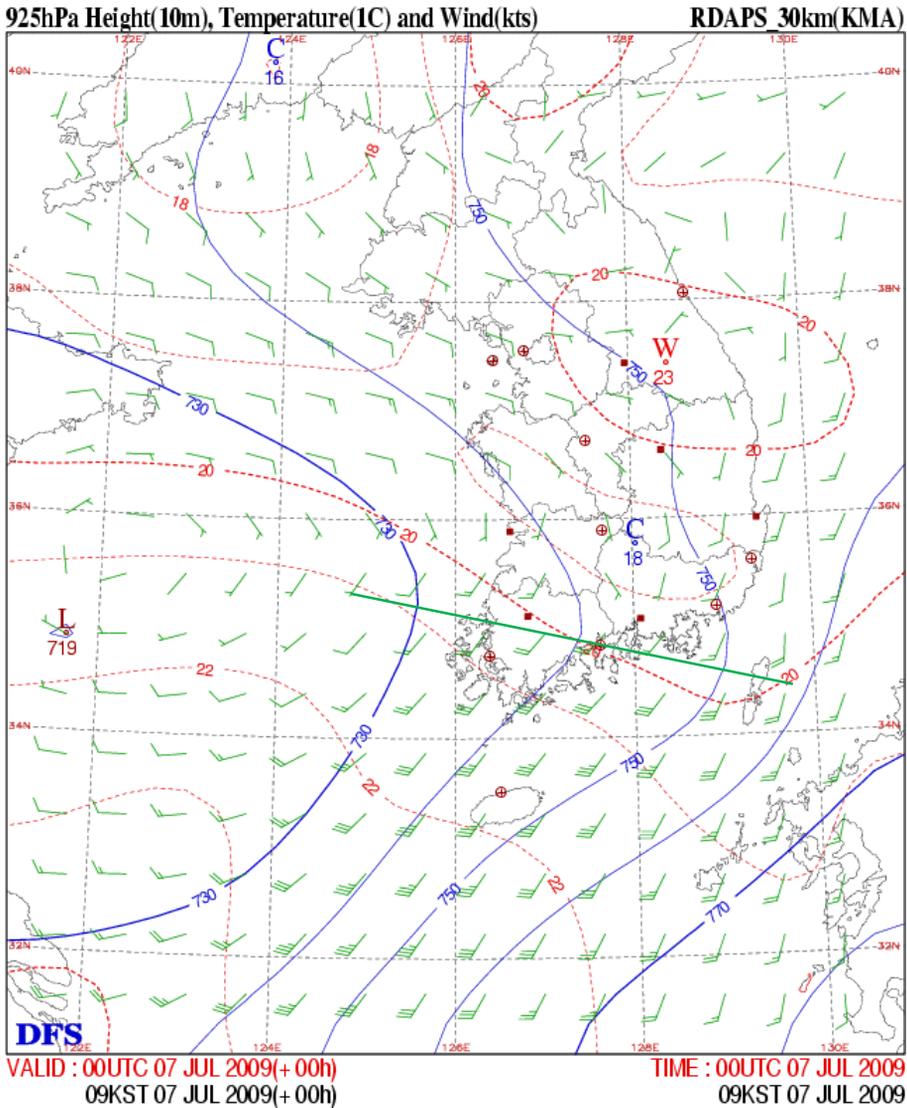


[그림 4.2.1] 지상 일기도(위)에 나타난 중규모 저기압과 위성 사진(아래)에 나타난 구름 무리 발달의 모습

4.3. 부산 지역 호우 발생의 원인

4.3.1. 호우 발달의 핵심 조건과 구조

장마 기압골에서 발달하는 중규모 저기압(기압골)이 호우를 가져오는 가장 중요한 구조라 하겠다(그림 4.2.1과 4.3.1.).

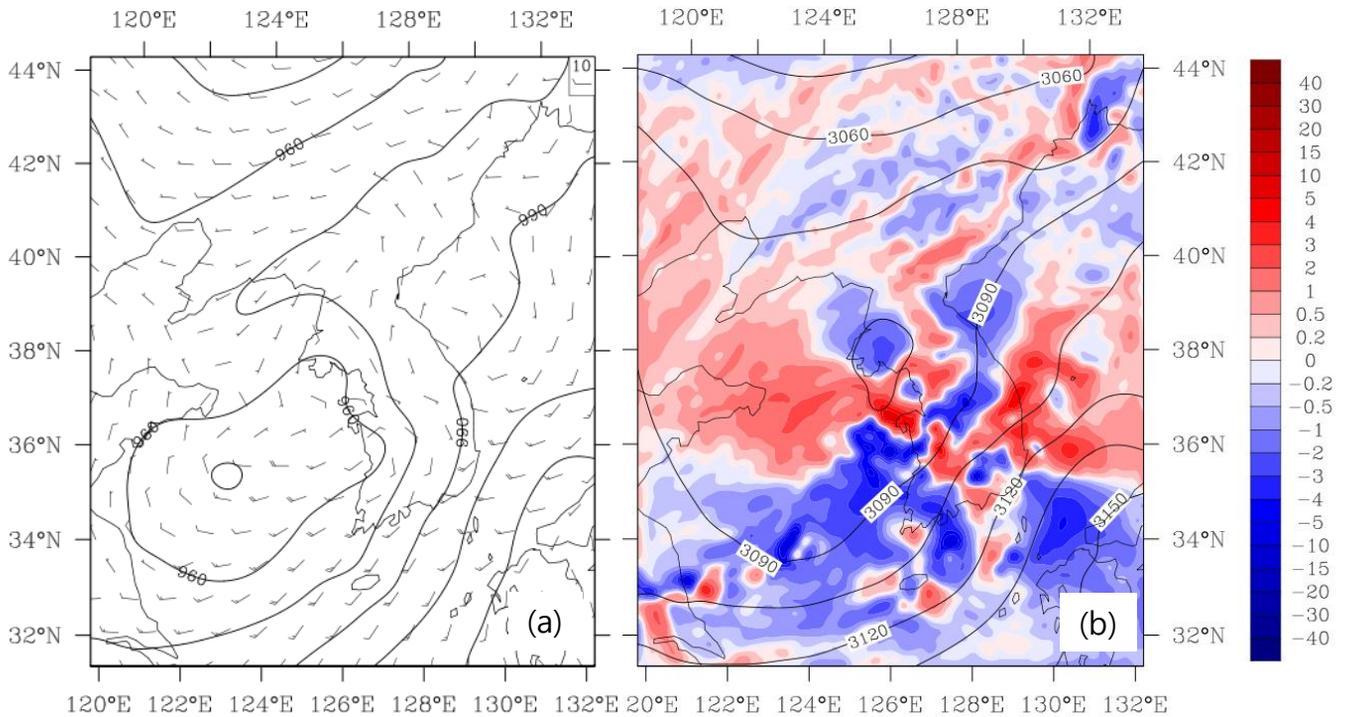


[그림 4.3.1] RDAPS 재분석장: 2009년 7월 7일 09KST의 925hPa 고도(청색 실선), 온도(적색 점선)와 바람

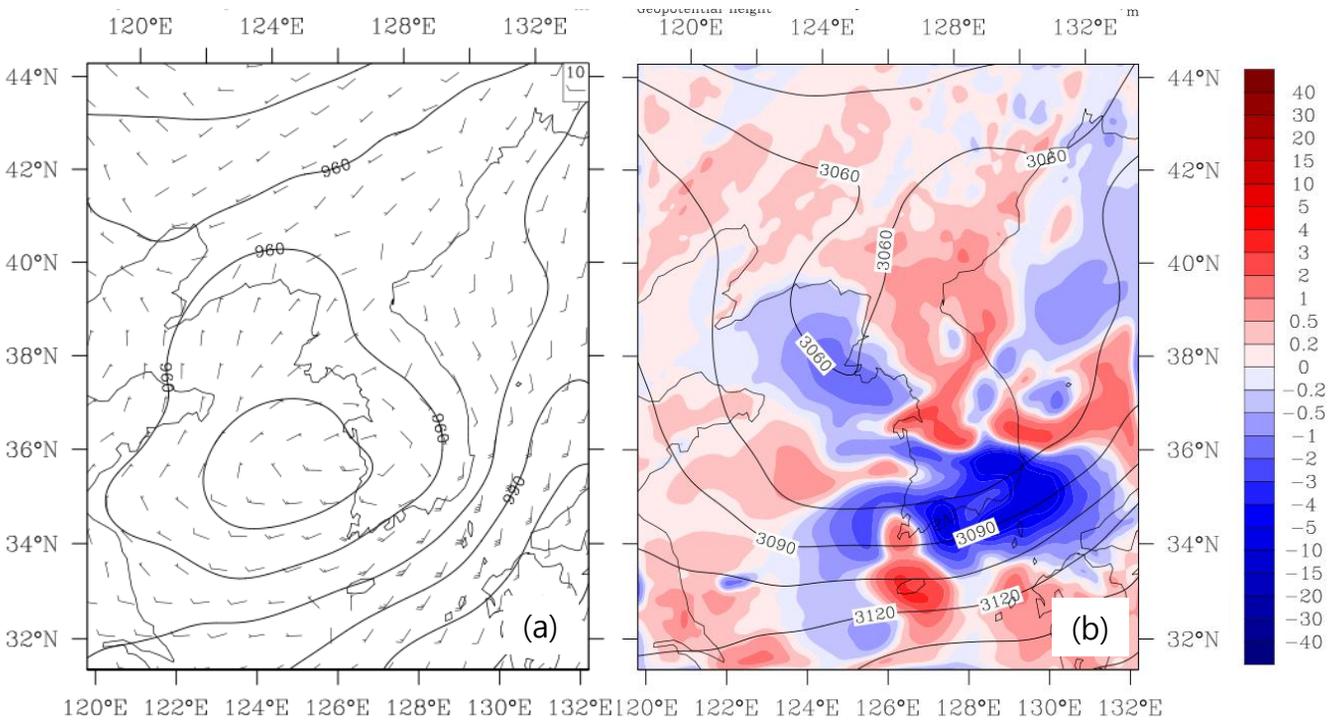
4.3. 부산 지역 호우의 발생 원인

중규모 저기압(또는 기압골) 남동쪽 부분에서 하층제트 발달이 강화되고, 하층제트 전면에서의 중규모 수렴 또한 강해짐으로써 호우가 발달할 수 있는 환경과 유발 조건들이 갖추어진다(그림 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4).

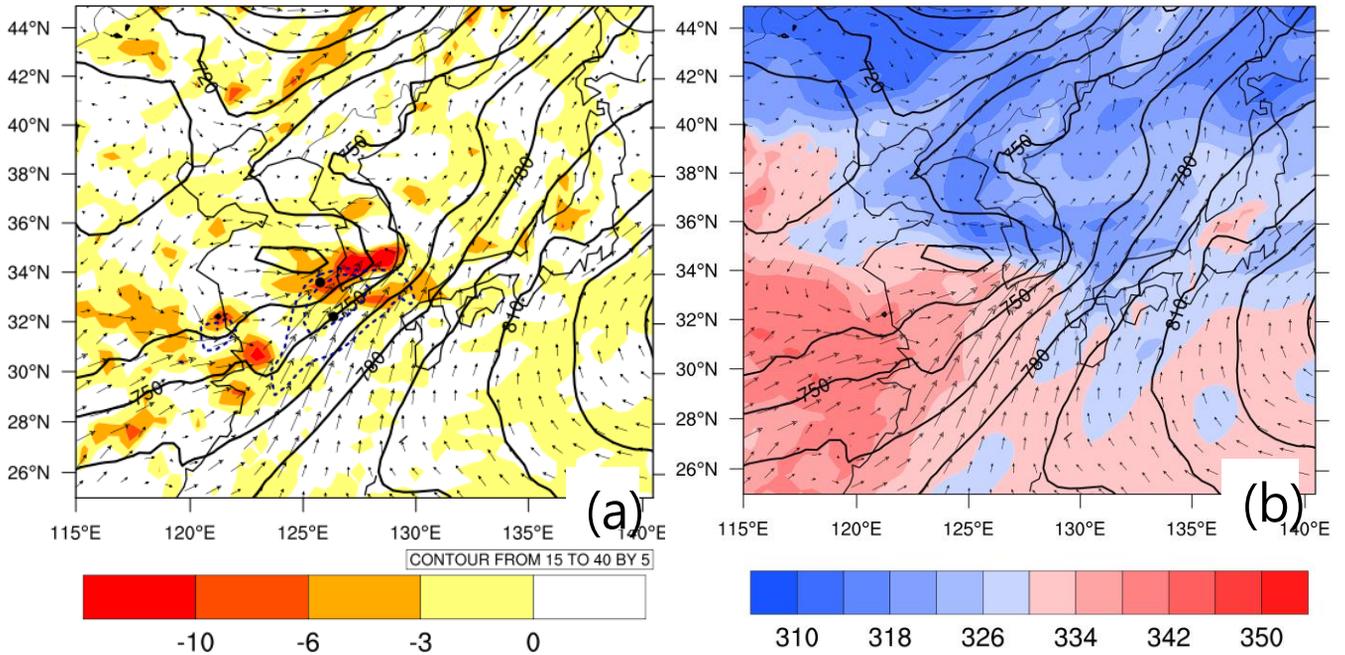
부산 지역은 동쪽으로 연장된 수렴선상에 위치하여 호우 발달의 유리한 조건에 놓여있다.



[그림 4.3.2] RDAPS(30km) 재분석장: 2009년 7월 7일 09KST의 (a) 900hPa 고도(실선)와 바람, (b) 700hPa 고도(실선)와 연직 기압속도(Shading)



[그림 4.3.3] 그림 4.3.2와 같음. 단, 2009년 7월 7일 12KST의 것임

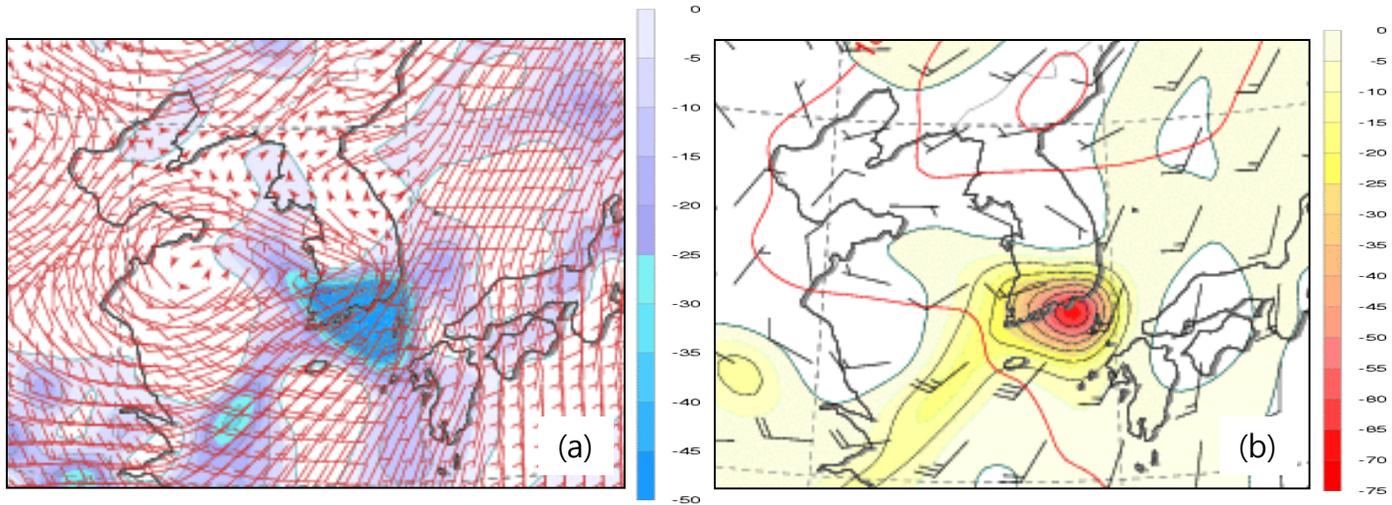


[그림 4.3.4] NCEP CFSR 재분석장: 2009년 7월 7일 09KST의 (a) 925hPa 고도(실선), 수렴(Shading), 바람, (b) 925hPa 고도(실선)와 상대온위(Shading)

4.3. 부산 지역 호우의 발생 원인

중규모 수렴지역으로의 충분한 수분 공급(불안정성 공급)과 수렴 지역에서의 강한 Lifting도 아울러 나타나고 있다(그림 4.3.5).

많은 양의 강수가 발생한 가장 중요한 이유 중의 하나는 7일 06KST ~ 15KST 기간 동안에 느리게 동진하는 중규모 저기압이라 하겠다(그림 4.2.1).



[그림 4.3.5] RDAPS(30km) 재분석장: 2009년 7월 7일 09KST의 (a) 850hPa 수분속과 수렴(Shading), (b) 700hPa에서의 연직 기압속도(Shading)

4.3.3. 요약

1) 2011년 7월 26-27일 중부지역 호우의 발생 원인

2009년 7월 7일 부산지역에서 발생한 호우의 발생 원인은 다음과 같다:

호우를 가져온 호우시스템의 발생은 장마전선에서 발달한 중규모 저기압과 연관된 것으로 분석되었다. 그 이유는 풍부한 양의 수증기 공급 구조와 호우시스템 발달을 초래하는 구조가 중규모 저기압에 동반되어 나타나기 때문인데, 즉, 중규모 저기압의 남동 부분에 발달한 하층제트는 많은 양의 수증기를 공급하고, 하층제트 전면에 나타나는 중규모 수렴은 호우시스템을 발달시키고 유지시키는 역할을 한다. 부산을 포함한 영남지역에 강한 강수가 7일 06시부터 16시까지 지속된 데는 세력이 강한 서태평양 고기압의 존재로 인해 동진하는 중규모 저기압의 이동 속도가 느렸기 때문으로 추정된다.

5

사전 예측을 위한 검토 자료

5.1. 예측 일기도를 활용한 집중호우 분석

5.1.1. 장마전선 상 중규모대류계의 전파와 집중호우 이해

1) 느린 전방전파 개념을 적용한 강수 시스템 이동 해석

집중호우를 유도하는 전방전파(Forward Propagation) 집중호우의 특성을 살펴보기 전에, 먼저 집중호우를 야기하는 중규모대류계의 전파에는 어떤 것이 있는지 간략히 알아보자.

2012년 예보관 기술서 중규모대류계 부분에 좀 더 상세한 내용이 기술되어 있으므로 더 관심이 있는 예보관은 이 자료를 참조하기를 권한다. 여러 가지 논문들이 있지만, 일반적으로 가장 많이 받아들여지고 미국이나 유럽의 예보 관련 지침서에서 주로 다루고 있는 분류는 Juying and Scofield (1989)의 관측 연구를 통해서 분류한 것으로 전방전파, 후방전파, 준-정체전파, 재-발생 시스템 등이 있다. 여기에서 일반적으로 전방전파는 중규모대류계의 동쪽(북동, 동, 남동에 상관없이)에 강한 대류활동이 발달하면서 전체적으로 시스템이 동쪽으로 이동하는 것처럼 보인다는 것을 의미한다.

우리가 지금까지 다루었던 모든 집중호우 사례에서 나타났던 중규모대류계는 후방전파(Back-building) 혹은 준-정체(Quasi-stationary) 전파 형식 즉 전방에서 발달된 시스템의 후방에서 새로운 대류계들이 발달하여 병합되고, 최성기에 도달한 중규모대류계가 선형으로 발달하면서 거의 일정한 지역에 정체되는 패턴을 보였다. 그런데 이번 장마전선의 활성화에 따른 집중호우 사례는 큰 그림에서 볼 때 전방전파 중규모대류계의 모습을 보이고 있다. 그런데 우리가 일반적으로 알고 있는 전방전파 경향을 가지는 중규모대류계는 이동이 빠르고 강한 돌풍전선을 동반하기 때문에 좁은 지역에 집중호우를 야기하기에는 부족한 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 이번 집중호우 사례를 전방전파로 볼 수 있는 이유는 부산 경남 일대에 집중호우를 야기했던 중규모대류계는 전방전파의 일종인 “느린 전방전파 중규모대류계(Slowly Moving Forward-propagation MCSs)”로 분류할 수 있는 충분한 조건들을 구비하고 있었기 때문이다. 물론 전체 집중호우를 야기한 구름 밴드 내부의 중규모대류계들에 포함되어 있는 스톱 규모 운동들은 후방전파 혹은 준-정체 특성을 가지는 경향도 있지만 전체적인 구름 밴드의 이동과 발달 경향은 전방전파 특성을 보여주고 있다.

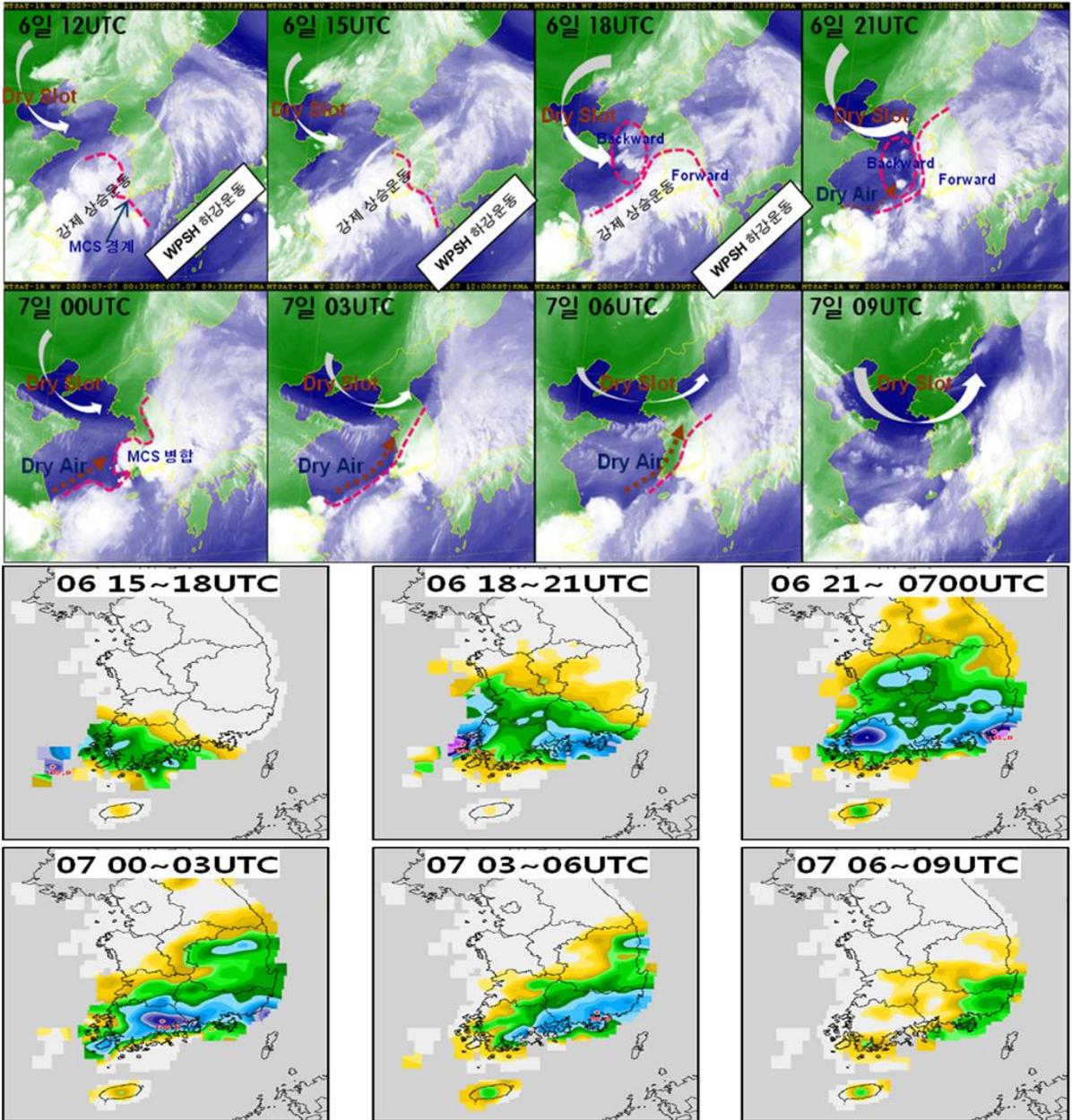
그림 5.1.1의 수증기 위성영상을 보자. 6일 12UTC에 북쪽으로부터의 Dry Slot의 침범과 북태평양 고기압의 하강 운동 사이에서 강한 상승운동이 형성되고 있는 상태에서 장마전선의 활성화에 따라 장마전선 전면대에서 강한 대류성 스톰들을 포함한 구름 밴드가 한반도 서해상까지 이동하고 있다.

그리고 3시간 후인 15UTC에는 이 강한 구름밴드의 전단이 한반도 남서해안에 도달하면서 전라남도 지역으로 강한 집중호우가 시작되었고 18UTC에는 먼저 도달했던 중규모대류계가 최성기에 도달해서 3시간 동안 100mm가 넘는 강수가 남서해안에서 기록되었다. 그런데 15UTC 이후 전선이나 발달된 저기압계를 동반하지 않은 북태평양 고기압 가장자리에서 집중호우를 야기한 중규모대류계의 형태와 다른 양상을 보인다.

기존 사례들에서는 발생한 전방의 중규모대류계 후방에서 새로운 스톰들이 발생하면 지속적으로 동일한 지역으로 이동해 들어오는 양상을 보였지만, 이번 사례의 경우에는 15UTC 위성영상에서 남해상에 위치하고 있던 강하게 발달한 구름밴드가 대기하층의 기압계에서 형성된 남서기류를 타고 북동진하여 18UTC에 영남 남해안까지 진출하고 있는 특성을 가지고 있다.

18UTC부터 21UTC까지 이미 부산과 경남 서해안에는 3시간 동안 60~70mm 정도의 누적 강수량을 기록하였다. 그리고 15UTC에 전라남도 서해안에 도달했던 중규모대류계는 18UTC 이후 그 진출이 멈춘 상태에서 전라남도 지역에 유지되고, 그 후방에 Dry Slot과 중규모 강제력 그리고 기존 중규모대류계로부터의 유출기류가 복합적으로 작용하여 서해상에서 새로운 스톰들이 형성되기 시작한다. 따라서 전라남도 서해안 지역에는 18UTC에서 21UTC까지 3시간 동안 200mm가 넘는 강한 집중호우가 내렸다.

그리고 6일 21UTC부터 7일 00UTC까지 서해상에서 발생한 대류성 스톰들이 기존에 서해안 지역에 영향을 미쳤던 중규모대류에 병합되면서 전라남도 지방에 100~150mm의 강수가 내렸는데, 주목할 점은 이때 부산을 포함한 경남 남해안 지역에 6일 21UTC를 전후로 시간당 70mm 이상의 집중호우와 시작되었고 7일 00UTC에는 3시간 만에 200mm 정도의 강한 비가 내렸다는 점이다. 이것은 호남지역을 중심으로 영향을 미쳤던 중규모대류계와 부산 지역에 영향을 미쳤던 중규모대류계는 서로 다른 별개의 대류계로 보아야 한다는 것을 의미한다. 즉, 기존의 중규모대류계 전방에서 새로운 중규모대류계가 생성되어 기존 시스템이 전파되어 들어오기 전에 이미 집중호우를 일으키고 있었다는 것을 의미한다.

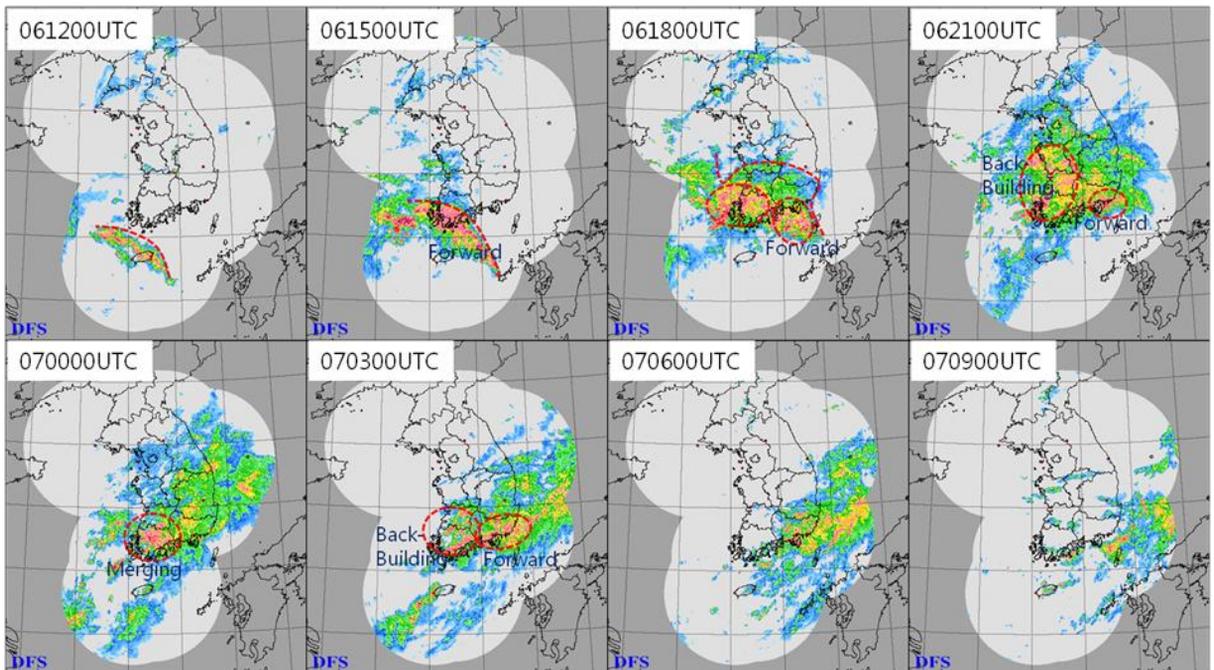


[그림 5.1.1] 7월 6일 12UTC ~ 7일 09UTC 수증기 영상(상)과 3시간 누적 강수량(하)

7일 03UTC 이후에는 느린 속도로 강수 구름밴드 전체가 동쪽으로 이동하는 경향을 보이는데 레이더 영상(그림 5.1.2 참조)을 보면 00UTC까지 호남지역에 머물러 있었던 중규모대류계에 동반된 강수에코들은 덕유산과 지리산을 포함하는 소백산맥에 가로막혀 동진이 제한되는 반면 그 전방인 경남 남해안에서 새로운 수렴대에 의해서 강한 대류밴드가 형성되어 있다는 사실을 확인할 수 있다.

7일 03UTC 이후가 되면 호남 지방은 점차 중규모대류계의 영향권에서 벗어나는 반면, 영남 지역으로는 저기압성 순환에 의한 남서기류가 유지되면서 06UTC까지 시간당 30mm 이상의 집중호우가 지속되고 있었다. 그리고 전체적인 장마전선에 동반된 집중호우를 야기하는 중규모대류계 시스템은 7일 09UTC 이후 동해안으로 빠지면서 한반도는 강수 영향권에서 점차 벗어나게 된다. 앞서서도 언급했듯이 여러 개의 중규모대류계(MCS)들이 병합되어 하나의 중규모대류계(MCSs, 중규모대류계라고 통칭해서 부르지만 다수의 중규모대류계가 전체 구름밴드를 형성하는 강수 시스템은 중규모대류계들로 불러야 한다)를 만드는 강수 시스템의 이동은 개개의 중규모대류계(MCS) 내부의 대류성 스톱들의 생성과 이동 경향에 따라 후방전과, 전방전과로 분류하는 것이 아니라 전체 중규모대류계(MCSs)를 아우르는 구름 밴드 그 자체의 이동 경향으로 전과의 종류를 분류하여야 하며, 이번 집중호우 사례의 경우에는 느리게 이동하는 전방전과 중규모대류계로 분류하는 것이 적합할 것이다.

레이더 영상을 보더라도 6일 18UTC 이후 뚜렷하게 구분되는 2개의 중규모대류계가 호남 지역과 영남 남해안 지역에 형성되었으며, 호남 지역에 있었던 중규모대류계는 후방전과 경향을 보인 반면 남해안 지역의 중규모대류계는 전방전과하는 경향을 보였고, 전체적인 시스템은 동쪽으로 느리게 이동하고 있었음을 알 수 있다. 각각의 중규모대류계 내부의 스톱들의 전과 경향에 대한 상세한 설명은 2장과 5장의 레이더 부분을 참조하기 바란다.



[그림 5.1.2] 7월 6일 12UTC ~ 7일 09UTC 레이더 영상

2) 느린 전방전파 중규모대류계 개념을 적용한 예측 일기도 해석

미국에서의 많은 관측 연구들을 통해서 밝혀진 느린 전방전파 중규모대류계의 특성은 첫째, 먼저 위성 영상에서는 전체적인 구름밴드의 이동이 매우 느리고, 강조 적외(Enhanced IR) 영상에서 가장 낮은 운정온도 구역이 전체 중규모대류계의 중심 서쪽에 위치하고, 시간의 흐름에 따라 중규모대류계가 발달하면서 가장 낮은 운정온도를 가지는 구역들이 서로 합쳐져 하나의 넓은 구역을 형성하는 경향을 보인다.

두 번째 특성은 중규모대류계가 발달하는 지역의 서쪽으로 하층제트를 동반하는 최대풍 구역이 형성되어 불안정한 공기를 중규모대류계 전면에 지속적으로 공급하고 있는 가운데, 중규모대류계의 발달을 초래하는 강한 상승운동 구역을 의미하는 수렴과 경계가 집중호우가 발생하는 지역의 바로 서쪽에 위치한다는 것이다.

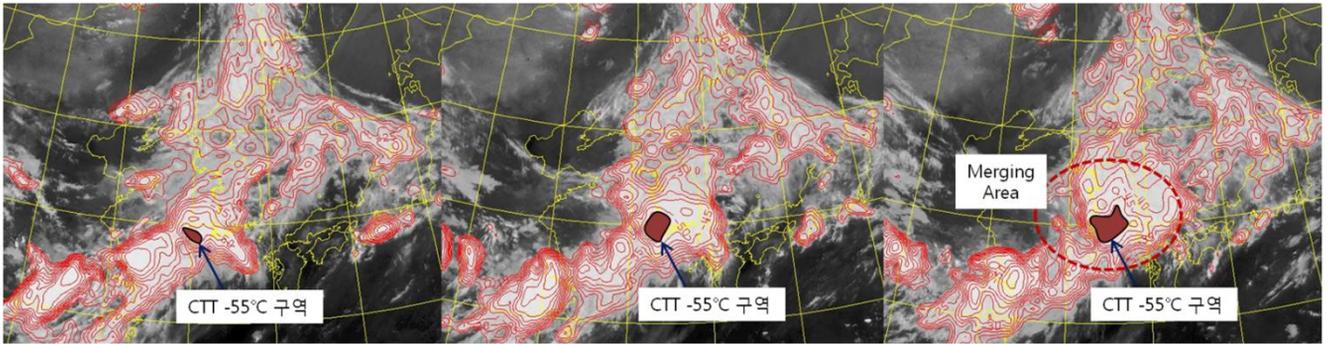
세 번째 특성은 느린 전방전파 중규모대류계는 1000-500 혹은 850-300 층후 분포의 변화구역에서 발생한다는 것이다. 집중호우를 동반하는 강한 대류활동은 1000-500 층후의 경도가 갑자기 약화되는 층후 분류(Thickness Diffluence) 구역에서 주로 발달하는데, 층후 경도가 약화되기 시작하는 구역의 남쪽에 강한 중규모대류계의 발달이 가능한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 층후의 경도가 강한 구역은 대기의 상하운동보다는 동서운동이 강하기 때문에 매우 안정된 구역을 의미하지만, 층후가 약한 지역은 상대적으로 불안정한 구역으로 대규모 상승운동이 형성되는 구역에 해당되기 때문이다.

네 번째 특성은 일반적으로 느린 전방전파 중규모대류계가 형성되는 구역의 바람은 후방전파 혹은 준-정체 전파 중규모대류계의 바람에 비해서 풍속이 상대적으로 강하지만, 평균적인 고도별 풍속에 비해서는 약하거나 중정도의 상태를 유지하며, 300hPa의 상층제트의 동서성분이 강하고 그 위치가 중규모대류계 발달지역의 북쪽일 때 발생이 유리하다는 것이다.

마지막으로 느린 전방전파 중규모대류계의 특성은 하층의 상당온위 수평 분포도를 통해서 찾을 수 있는데 전방전파 중규모대류계는 상당온위 능의 축(Theta-e Ridge Axis)이 형성되어 있는 구역의 남서쪽에서 주로 발달하고, 상당온위가 높은 구역의 부근이나 동쪽에서 발달하는 것으로 알려져 있다.

지금부터 6일 00UTC RDAPS 24시간 예측장을 통해서 이러한 특성들을 살펴보기로 하겠다. 참고로 RDAPS에서 예측한 강수 예상도에서는 호남 지역의 집중호우는 비교적 잘 모의했지만, 부산 경남 지역의 집중호우는 거의 예측하지 못하였다. 그렇지만 6일 12UTC에서 15UTC 사이에 남해안 부근에서 강한 중규모대류계가 형성되는 것을 파악한 예보자가 느린 전방전파 중규모대류계의 특성들을 이해하고 있었다면 모델에서 예측한 강수구역과 강수량만으로 7일 강수 예보를 결정하지는 않았을 것이다.

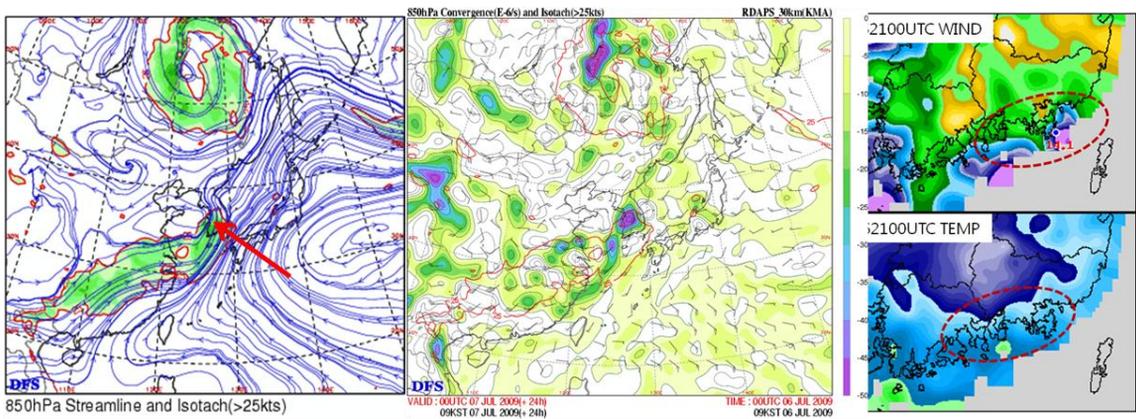
그림 5.1.3은 7월 6일 15UTC, 18UTC, 그리고 21UTC에 위성에서 분석한 운정 온도 영상이다. 한반도에 영향을 미치는 전체적인 구름밴드의 이동 속도가 매우 느리고, 부산 경남지역에 영향을 미치는 중규모대류계의 운정온도가 -45°C 에서 -50°C 분포를 보이고 있는 반면, 가장 온도가 낮은 지역은 경남지역이 아닌 중규모대류계 중심의 서쪽에 위치하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 6일 21UTC에 다 다르면 서쪽과 동쪽에 있었던 두 개의 최저 운정고도 구역이 병합하여 비교적 넓은 구역이 -55°C 이하(갈색 색칠) 구역으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 위성 영상 분석을 통해 느린 전방전과 중규모대류계의 특성을 분석할 수 있었다.



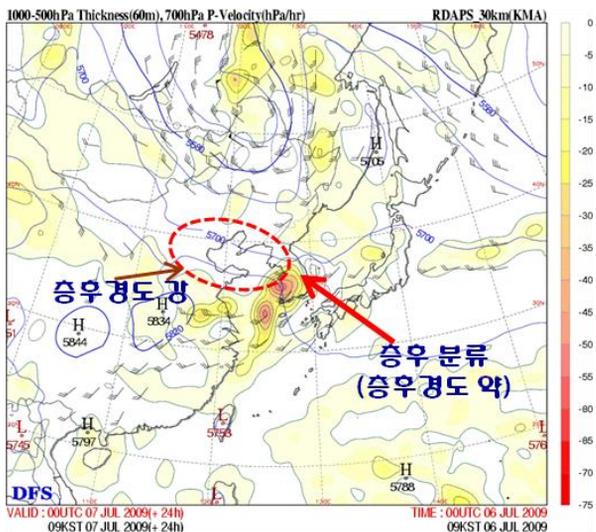
[그림 5.1.3] 운정온도 분석 영상, 0615UTC(좌), 0618UTC(중), 0621UTC(우)

그림 5.1.4는 RDAPS에서 24시간 예측한 850hPa 유선도, 수렴도, 그리고 6일 21UTC AWS에서 관측한 바람과 온도 구역을 보인 것이다.

850hPa의 저기압성 순환을 따라 한반도 남서부(호남) 지방으로 강한 온도경도와 하층제트가 유입되어 불안정한 공기가 지속 공급되고 있으며, 집중호우가 내린 부산 경남 지방은 하층제트 중심의 바로 동쪽에 위치하고 있다. 또한 집중호우가 발생한 부산 경남을 기준으로 850hPa의 강한 수렴구역이 북서쪽에 위치하고 있다. 그리고 실제 관측 자료에서도 부산 지역의 바로 서쪽과 남쪽에서 온도 남북경도가 증가하고 있고, 남해안을 중심으로 강한 지상 수렴구역이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 느린 전방전과 중규모대류계의 두 번째 특성도 수치예보 모델 예측장과 관측 자료를 통해서 확인할 수 있다. 1000-500 층후선도에서 층후가 분류되는 구역 즉 층후의 경도가 약화되기 시작하는 구역의 남쪽에서 강한 중규모대류계의 발달이 가능하다는 느린 전방전과 중규모대류계의 세 번째 특성도 RDAPS 모델 예측 결과를 통해서 확인할 수 있다.



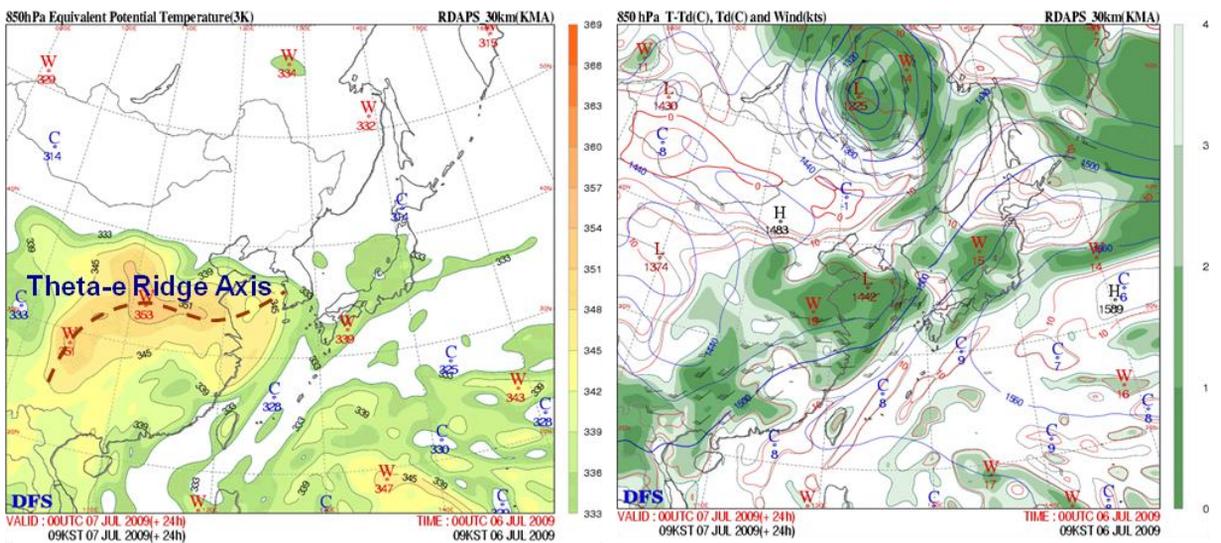
[그림 5.1.4] RDAPS 24시간 예측 850hPa 유선도(좌), 수렴도(중), 0621UTC AWS 바람과 온도



[그림 5.1.5] RDAPS 24시간 예측 1000-500 층후와 700hPa 연직속도

그림 5.1.5는 RDAPS에서 예측한 1000-500 층후선도이다. 상층 기압골의 후면에는 1000-500 층후의 경도가 강한 구역이 존재하고, 상층 기압골의 전면에는 층후의 경도가 약한 층후 분류 구역이 나타나게 된다. 일반적으로 층후의 경도가 강한 구역은 대기의 상하운동보다는 동서운동이 강하기 때문에 매우 안정된 구역을 의미하지만, 층후가 약한 지역은 상대적으로 불안정한 구역으로 대규모 상승운동이 형성되는 구역에 해당된다. 700hPa 고도의 연직속도 장을 보면 층후 분류 구역에서 강한 상승운동이 존재한다는 것을 알 수 있다. 따라서 층후 분류 지역에서 강한 상승운동이 발생하는 구역의 남쪽에 해당하는 영남지방에서 중규모대류계가 발달할 수 있는 좋은 조건이 형성되었다는 것을 알 수 있다.

그림 5.1.7은 RDAPS에서 예측한 7일 00UTC 850hPa 상당온위와 습수 예상도를 보인 것이다. 중규모대류계를 동반하는 구름밴드의 발달구역과 850hPa 상당온위 축이 나란하게 위치하고 있으며, 상당온위 구역의 남쪽으로부터 강한 하층제트와 함께 풍부한 수증기와 열이 한반도 남부지방 전체로 유입되고 있다. 따라서 느린 전방진과 중규모대류계의 특성을 하층의 상당온위 수평 분포도를 통해서 찾을 수 있는데 전방진과 중규모대류계는 상당온위 능의 축(Theta-e Ridge Axis)이 형성되어 있는 구역의 남서쪽에서 주로 발달하고, 상당온위가 높은 구역의 부근이나 동쪽에서 발달한다는 사실과 잘 일치하고 있다. 이상의 RDAPS 예측 일기도들을 통해서 느린 전방진과 중규모대류계가 부산 경남 지역에서 발달하는데 유리한 중관환경이 조성되고 있었음을 확인할 수 있었다.



[그림 5.1.7] RDAPS 24시간 예측 850hPa 상당온위(좌), 습수 및 바람(우)

5.1.2. 장마전선 상 집중호우 예측 매개변수 분석

1) 종관규모 매개변수

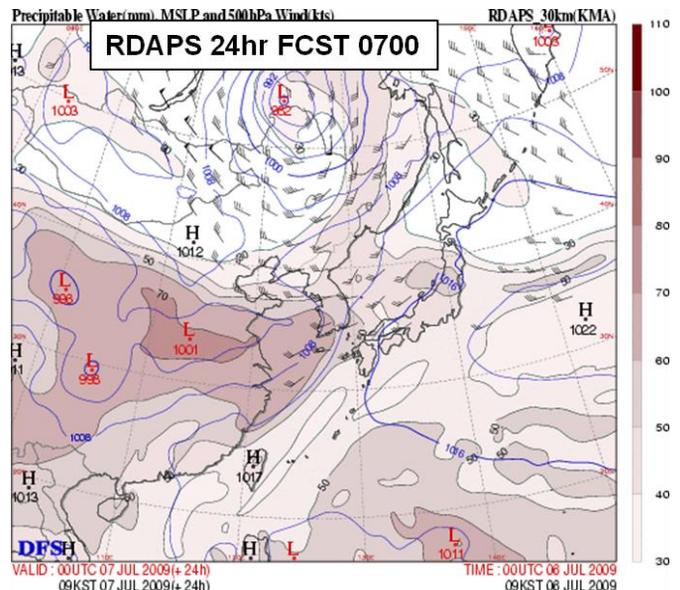
그림 5.1.8은 7월 6일에서 7일 사이 집중호우를 야기한 종관규모 강제력의 모식도를 보인 것이다. 장마전선의 활성화에 필수적인 하층 기압골, 그리고 바로 서쪽의 상층 기압골, 강한 상층제트 출구와 하층제트의 충돌로 인한 강한 상승운동, 북태평양 고기압 구역과 Dry Slot 부근의 하강운동에 의한 상대적으로 상승운동이 한반도 남부지방에 집중적으로 형성되어 있고, 하층제트를 따라 남서쪽으로부터 충분한 열과 수증기가 공급되면서 강한 중규모대류계가 발달했다는 것을 한 눈에 확인할 수 있다.

지상에서 상층까지의 종관규모 매개변수들은 기존 사례분석들을 통해서 충분히 살펴보고 앞선 2.1절 일기도 분석에서 장마전선이 활성화되는 과정에서의 상하층 종관규모 강제력에 대해서 충분히 다루었기 때문에, 모든 요소들에 대한 분석은 생략하고 이번 훈련기술서에서는 RDAPS에서 24시간 예측한 지상 가강수량, 850hPa 습윤 속, 700hPa 상대운위, 500hPa 등고도선과 상대와도, 200hPa 등고도선, 상층제트, 발산 구역 분포 등에 대한 예측 매개변수들에 대해서 설명하기도 하겠다.



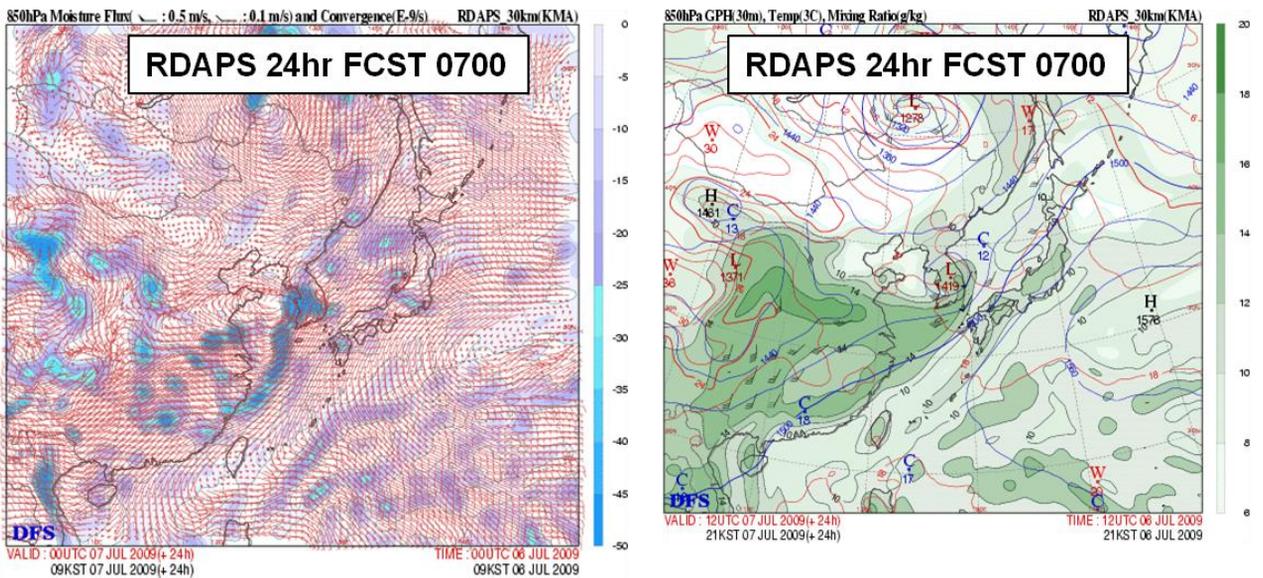
[그림 5.1.8] 7월 6일~7일 장마전선 활성화 모식도

그림 5.1.9는 7월 00UTC 지상 가강수량 예상도를 보인 것이다. 중국 남부지방으로부터 서해상을 거쳐 호남지방까지 50mm가 넘는 구역이 길게 연결되어 나타나고 있으며, 한반도 남부지역 전체도 집중호우 가능성을 예측할 수 있는 40mm 이상 구역에 포함되어 있다. 위성영상에서 동서로 길게 발달한 구름밴드와 레이더 영상에서의 강수 에코 분포와 비교적 잘 일치하고 있다. 그리고 하층 상승구역과 Dry Slot에 의한 하층 하강구역의 경계가 한반도 중부지방에 형성되어 남부지방 전체에서 강한 대류 불안정에 의한 집중호우가 발생할 가능성이 있었다는 것을 보여준다. 실제에 비해서 예측장에서 하층 가강수량 구역이 너무 호남지방으로만 집중되어 있었다는 한계를 가지지만 앞에서 설명했던 느린 전방전과 중규모대류계의 특성을 이해하고 원격탐사 자료들을 충분히 검토한 예보관이라면 부산 경남 지방의 집중호우 가능성도 예보에 반영할 수 있었을 것이다.

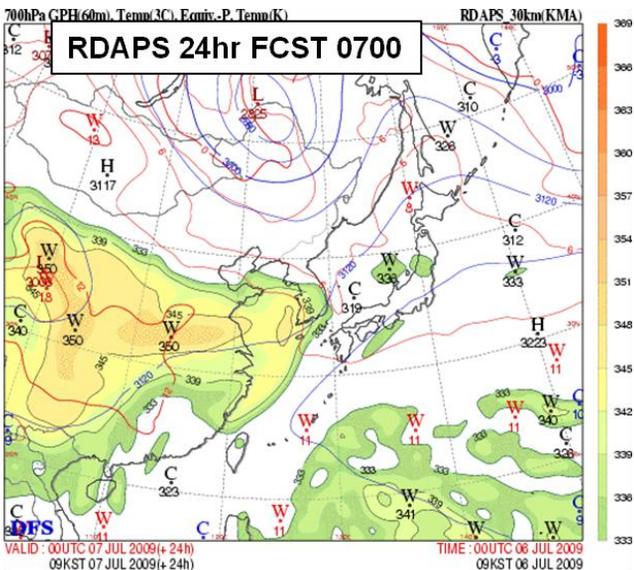


[그림 5.1.9] RDAPS 24시간 예측 지상 가강수량

그림 5.1.10은 850hPa 습윤 속과 혼합비 예상도이다. 강한 남서기류의 하층제트를 타고 많은 수증기가와 함께 높은 혼합비를 가지는 공기가 한반도 남부지방 전체에 공급되고 있었고, 강한 하층수렴구역도 남부지방 전체에 분포하고 있어서 강한 중규모대류계의 발달 가능성에 대한 정보를 제공하고 있었다. 또한 저기압성 회전을 따라 높은 혼합비를 가지는 공기들이 영남지방으로 충분히 공급될 것이라는 사실도 잘 예측하고 있다. 지상에서 850hPa 고도까지 충분한 수증기와 강한 수렴이 남부지방 전체에 형성되어 있다는 사실은 모델들이 강수 분포는 비록 호남지방에 한정되게 모의한다고 하더라도 이들 지역 어디에서든 강한 중규모대류계가 발달할 수 있었다는 사실을 보여주고 있다.



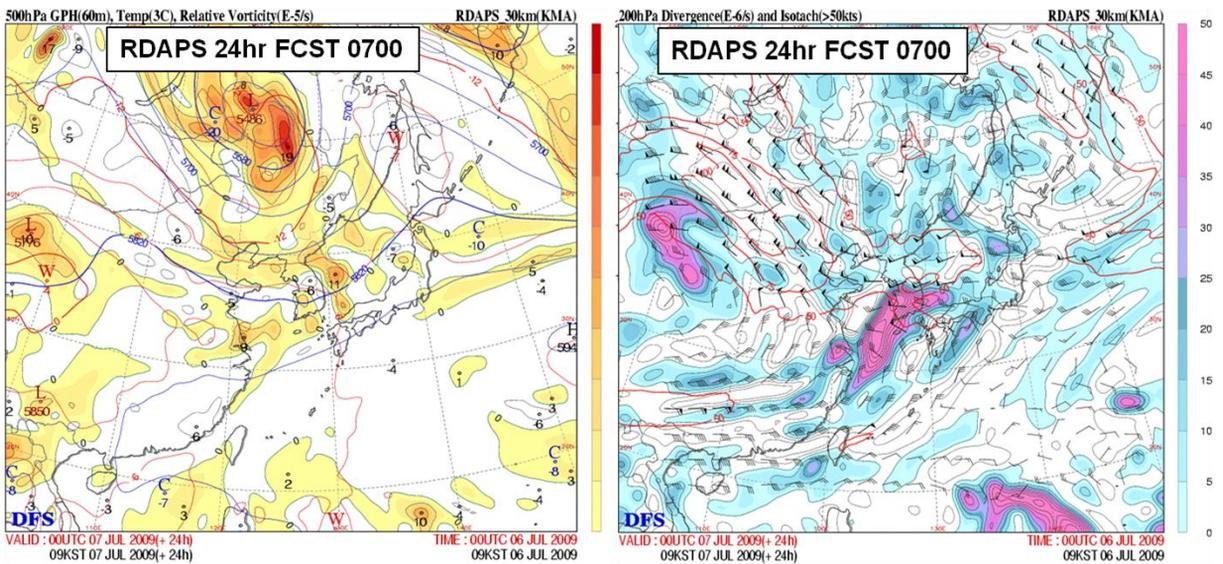
[그림 5.1.10] RDAPS 24시간 예측 850hPa 습윤 속과 수렴도(좌), 등고도선, 등온선, 혼합비(우)



[그림 5.1.11] RDAPS 24시간 예측 700hPa 상당온위(우)

그림 5.1.11은 700hPa 상당온위 예상도를 보인 것인데, 700hPa 상당온위 능의 축이 한반도 남부지방까지 확대되어 나타나고 있다. 상당온위의 수평경도가 높은 지역이 중규모 대류계의 발달 가능성이 높은 지역이라는 점과 풍부한 수증기와 열 공급으로 인해서 한반도 남부지방 전체가 대류불안정 구역에 놓여 있었다는 점에서 부산 경남 지방에 강한 대류계가 발달할 수 있었다는 사실을 어느 정도 인지할 수 있는 정보를 제공하고 있다.

그림 5.1.12는 중규모대류계의 발달 가능성에 대한 중요한 정보를 제공하는 대기 중층과 상층의 종관 규모 강제력을 보여주는 500hPa 등고도선과 상대와도, 그리고 200hPa 바람과 발산 예상도이다. 500hPa 고도에서 지상 및 하층 기압계의 북서쪽에 상층 기압골이 발달되어 있고, 중부지방과 남부지방을 중심으로 양의 와도 구역이 이루어지고 있는 것을 잘 보여주고 있다. 하층 저기압계의 북서쪽에 형성된 대기 중층에서의 경압불안정과 상대와도는 하층 기압계의 발달을 더욱 강화시키는 역할을 할 것이라는 것을 충분히 인지할 수 있다. 저기압성 곡을 가지는 상층제트가 한반도 중부지방으로 유입되면서 한반도 남부지방에는 경압불안정과 함께 강한 연직 상승구역이 형성될 가능성이 매우 높는데, 상층 발산역이 한반도 남부지역 전체에 형성되어 있는 것이 이 사실을 잘 보여주고 있다.

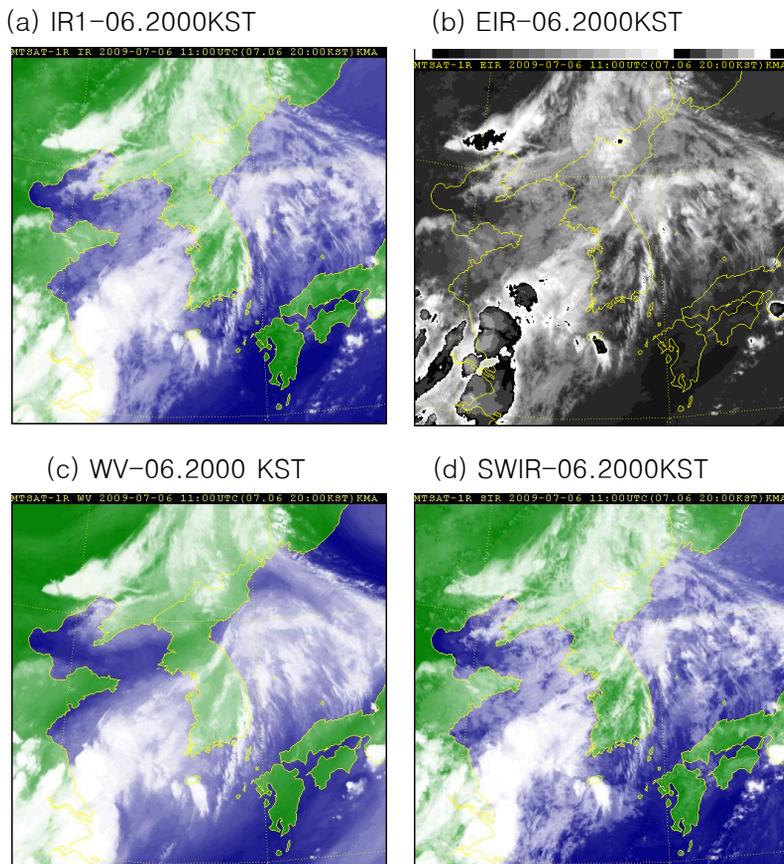


[그림 5.1.12] RDAPS 24시간 예측 500hPa 등고도선, 상대와도(좌), 200hPa 바람, 발산장(우)

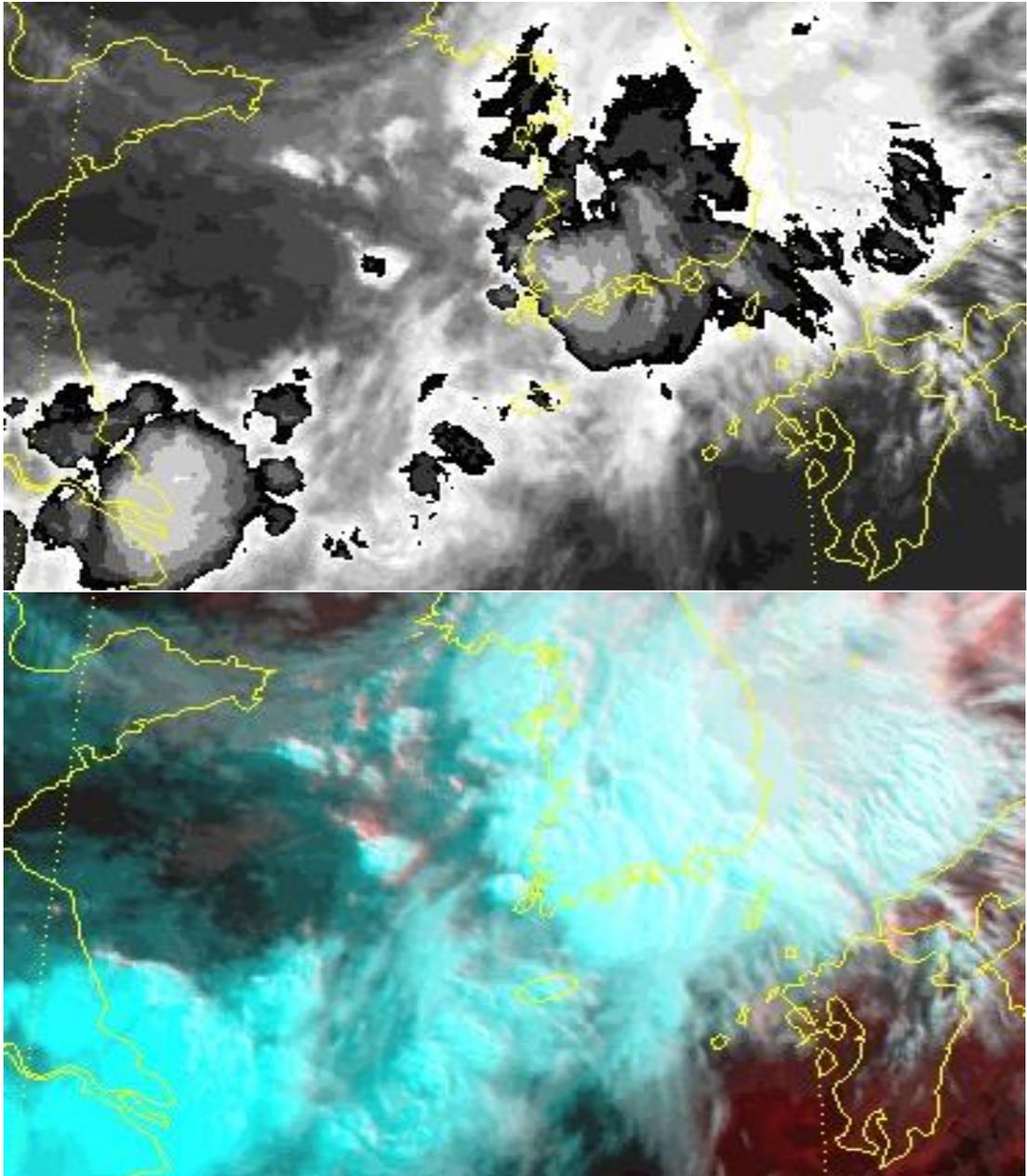
5.2. 위성

5.2.1. 부산 홍수 집중호우 사례의 사전 예측

2009년 7월 6~7일 전남, 경남, 부산 지역에 집중되었던 집중호우는 북태평양 고기압과 대륙의 저기압 사이에서 발달한 장마전선의 활성화에 따른 집중호우로 장마전선 전면에서 발생한 강한 근집형 중규모 대류계의 영향에 의해 발생하였다. 적외 강조영상에서는 활성화된 장마전선 상, 특히 상해에서 우리나라 서해상에 이르기까지 수증기 수렴역이 형성되고 있으며 이 수렴역에서 강한 대류세포들이 발생하여 동진하고 있다(그림 5.2.1). 본 사례도 전남해안지역에 발생한 대류세포가 운정 휘도온도가 -65°C 이하로 강하게 발달하면서 동진한 것과 여수와 거제도 중간에서 발생해서 부산 지역으로 이동한 두 대류세포에 의해서 발생하였다(그림 5.2.2). 부산 지역에서의 강우강도가 시간당 70mm 이상으로 강하였음에도 불구하고 최대 강우 시 운정온도는 $-55\sim-60^{\circ}\text{C}$ 로 전남에 위치한 대류계보다 약하게 발달하였다. 따라서 본 집중호우 사례에 대해서는 전남 등 남부 지역에 전체적으로 집중호우의 가능성을 제시하기는 용이하나 위성영상만으로 부산에서 발생한 집중호우에 대해서는 특별한 단서를 찾기가 쉽지 않았다. 하지만 수증기 영상에서 대류계 북서쪽에서 접근하는 암역은 장마전선의 북상을 저지함과 동시에 한랭 건조한 공기를 대류세포 주변에 하강시키고, 동쪽에 위치한 암역은 대류시스템의 이동을 억제하며 북서태평양 고기압의 영향으로 발달한 남쪽의 암역은 다량의 수증기가 장마전선으로 이루어지게 하여 우리나라 남부지역에서 장마전선의 활성화, 즉, 집중호우가 내리는데 유리한 환경을 조성하였다(그림 2.2.1 및 수증기영상 동화 참조).



[그림 5.2.1] 대류세포 발생 시 동아시아 영역의 (a)적외영상, (b)적외 강조영상, (c)수증기영상, (d)단파적외영상

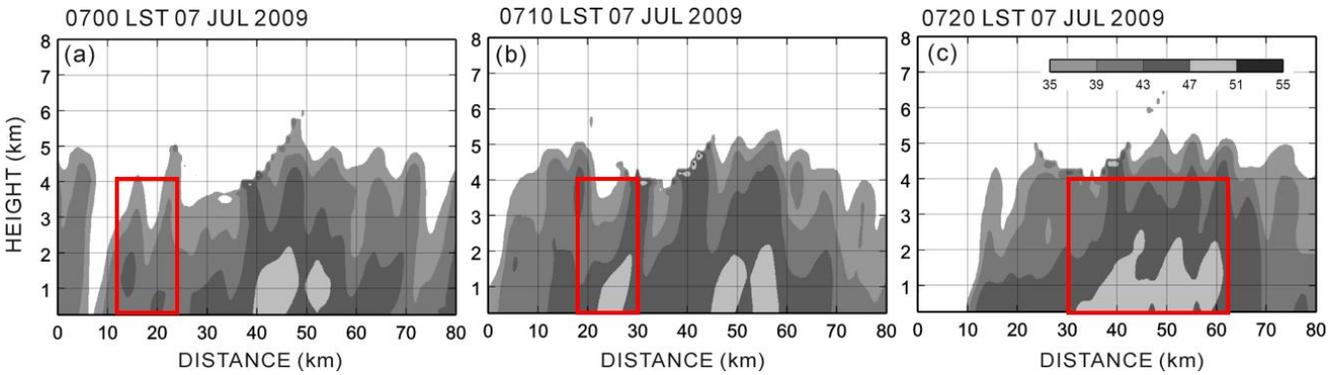


[그림 5.2.2] 집중호우 발생 시 한반도 영역의 (위) 적외 강조영상, (아래) 합성영상

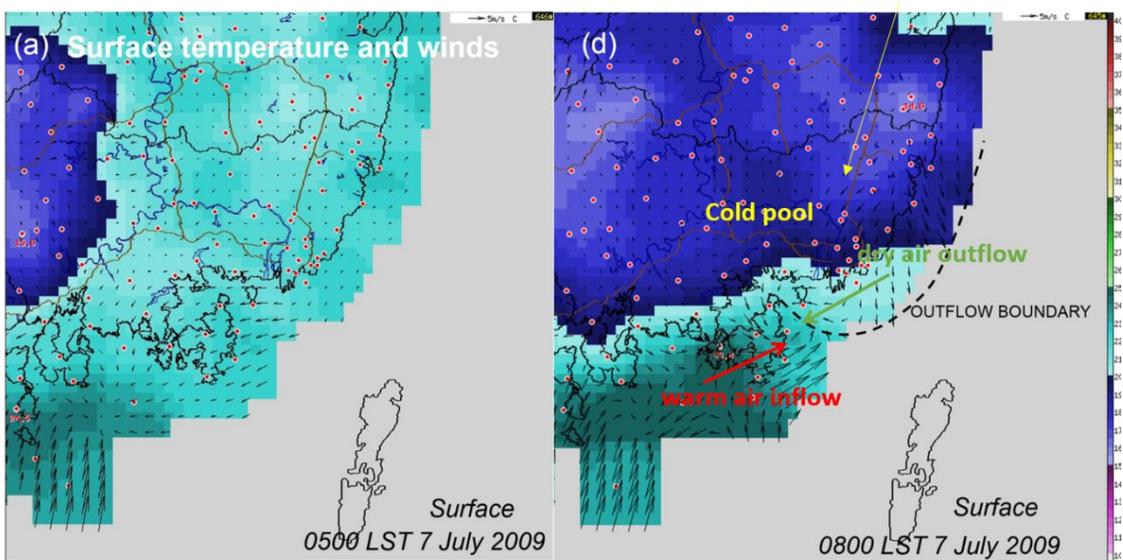
5.3. 레이더

부산지역에 발생한 집중호우는 집중 호우시스템을 유발할 가능성이 매우 높은 중관적인 상황하에서 발생하였다. 레이더로 분석된 호우유발 시스템은 meso-β 스케일을 가진 선형형태의 강수시스템이었으며, 후면에서 발생하는 새로운 셀과 지속적인 병합과정(그림 5.3.1)을 거치며 발달하여 일정지역에 많은 강수를 기록하였다. 새로운 셀과의 지속적인 병합은 호우시스템이 부산지역에 일정시간 위치할 수 있었던 주된 원인이었으며, 콜드 풀(Cold Pool)은 새로운 셀을 지속적으로 발생시킬 수 있었던 원인이라 판단된다.

그림 5.3.2는 지상 AWS 자료를 통한 지면의 온도와 바람의 분포를 나타낸 그림이다. 0500KST의 한반도 서쪽에는 상대적으로 차가운 지역이 위치하고 있었으며, 차가운 지역은 0800KST에 부산지역까지 발생하였다. 차가운 지역 남쪽으로는 Outflow Boundary가 형성되었으며 강수시스템이 위치하는 후면으로 남서풍의 온난 습윤한 공기가 유입되었다. 또한, Outflow Boundary 내에는 상대적으로 북서풍의 건조한 공기가 나타났다. 따라서 이러한 차가운 공기의 경계는 새로운 셀을 생성시키며 강수시스템을 강화 및 유지 시킬 수 있었던 역할을 하였을 것으로 사료된다.



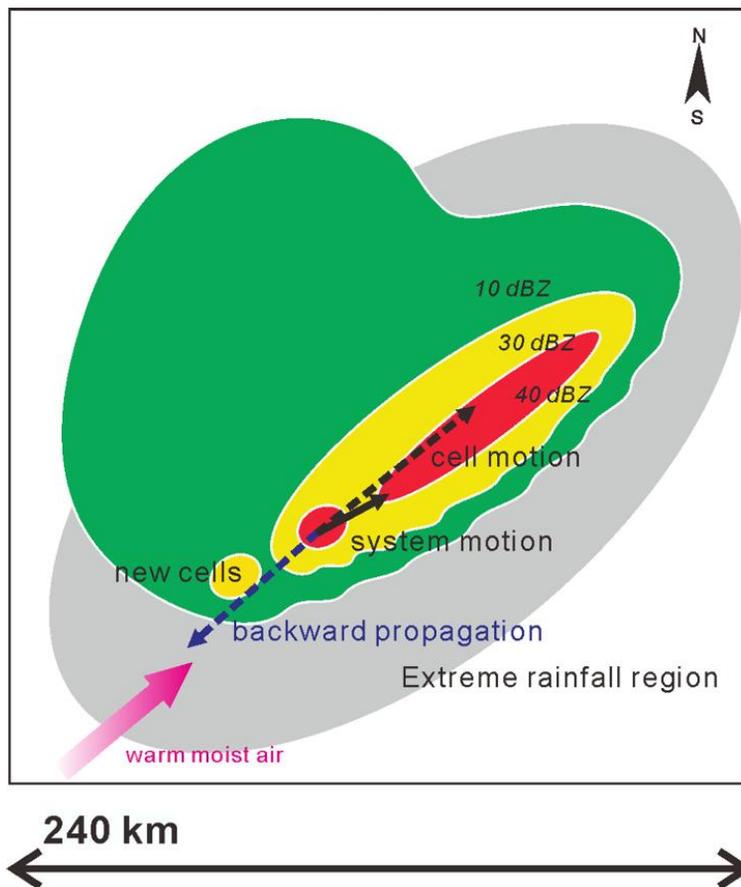
[그림 5.3.1] 호우를 유발한 시스템에 대한 연직단면도(0700-0720 KST)



[그림 5.3.2] AWS로 관측된 지상 온도와 바람분포(0500, 0800KST)

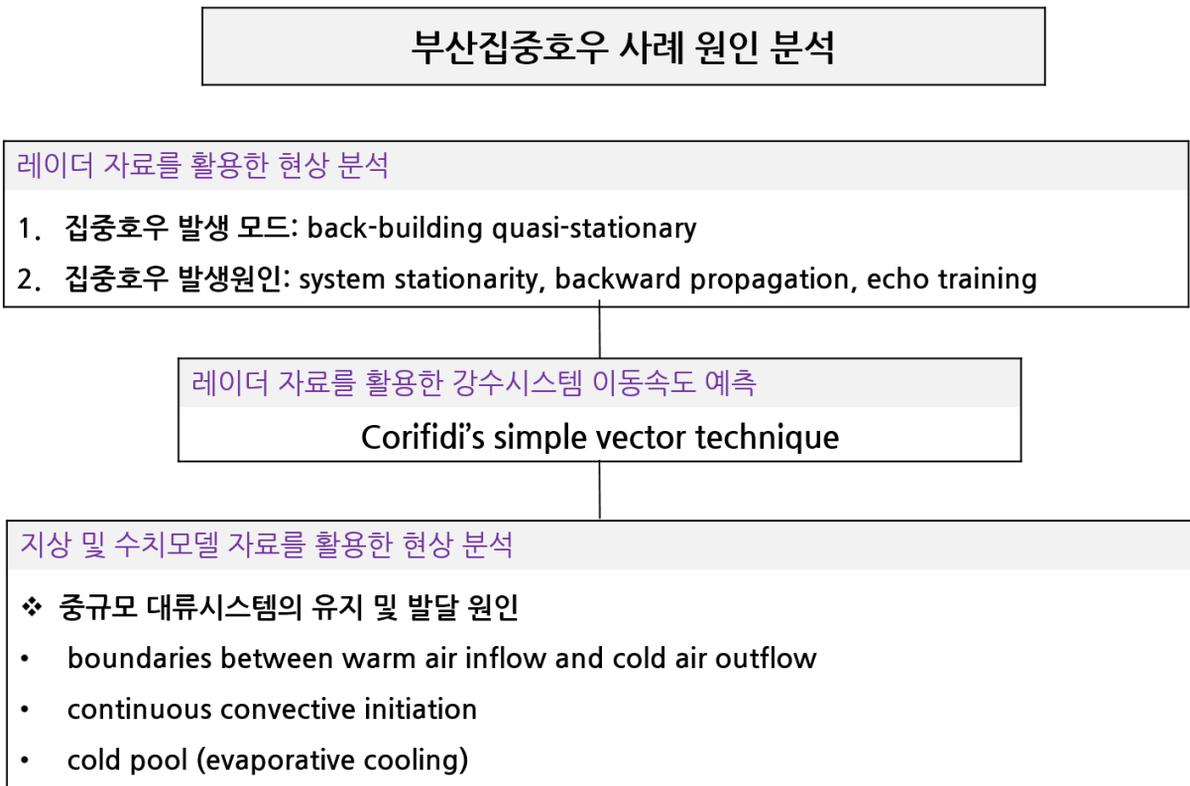
종합의견

2009년 7월 7일 발생한 부산지역 집중호우 사례의 경우 한반도 남서쪽의 저기압 발달과 중국 동남쪽에서의 난기와 습기가 다량으로 한반도에 유입되어 강수시스템이 발달한 사례이며, 부산지역에 310mm의 일 누적강수량을 기록하였다. 이때 발생된 중규모 대류시스템은 meso- α 규모의 시스템 내에 meso- β 규모의 대류셀이 분포함으로써 다중규모 강수시스템의 형태를 보였다. 후면의 강한 대류셀이 반복적으로 발달하여(> 40dBZ) 병합함으로써 중규모 대류시스템은 부산지역으로 준 정체하는 형태를 나타내었으며, 이러한 형태는 Bluestein과 Jain(1985)에서 언급된 Back-building 형태와 유사하였다(그림 5.3.3). 지속적인 Back-building 과정으로 후면에서 발달되는 대류셀은 중규모 대류시스템의 이동속도를 저하시킴으로써, 부산지역에 약 4시간 이상 정체하게 하였다. 이는 부산지역으로 집중호우를 유발하는 주요 원인으로 작용하였으며, 후면 대류셀은 지상에서 형성되는 차가운 지역(Cold Pool) 과 중규모 대류시스템의 Outflow 경계에서 형성되어 난기와 한기 경계는 대류 발달의 주요 원인이 되었다.



[그림 5.3.3] 2009년 7월 7일 호우사례 모식도

그림 5.3.4은 본 사례에 대한 레이더 화상분석 요지와 이동속도 예측, 그리고 레이더 자료에서 확인될 수 없는 사항들을 분석 하기 위해 사용해야 할 자료와 분석목록을 정리한 그림이다. 레이더 자료를 통한 Back-building 형태구분과 정체 유무 판단, 그리고 이동방향과 속도 예측은 집중호우를 발생시키는 강수시스템 예보를 위한 중요한 분석요인들로 사료되지만, 새로운 셀을 발달시키는 원인으로서는 중 규모영역의 영향으로 발생하는 하층수렴 외 차가운 지역으로 부터의 Outflow 경계가 중요한 원인이 될 수 있으므로, AWS 지상 온도와 바람 분포자료를 통해 차가운 지역의 경계를 확인하는 것도 바람직할 것으로 판단된다.



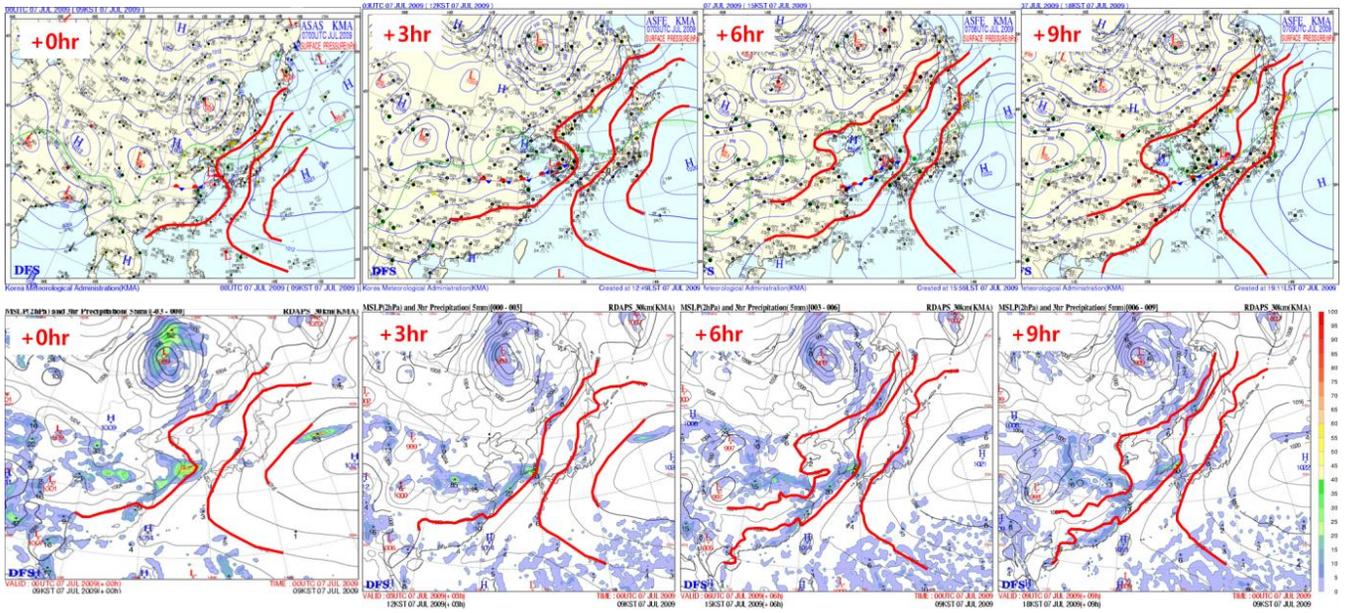
[그림 5.3.4] 2009년 집중호우사례 분석 및 예측 흐름도

5.4. 수치모델

수치모델을 이용한 집중호우의 정확한 예보를 위해서는 모델의 예측 결과의 일관성과 신뢰도를 바탕으로 판단되어야 한다. 관측자료와 분석일기도 분석을 통해 한반도 주변의 종관 및 중규모 기상 상태를 정확히 파악해야 하며, 모델의 초기 및 배경 조건으로 잘 입력되었는지 판단해야 한다. 일반적으로 정확한 초기 및 배경 기상장이 이용될 경우에는 모델의 적분시작 시간별 예측 결과의 일관성이 높게 나타나지만, 그렇지 못한 경우 본 사례에서처럼 초기화 조건에 따라 큰 차이를 보일 수도 있다(그림 5.4.1).

강한 열적 대기불안정이 발생한 기상 상황하에서 발생하는 집중호우는 지역예보모델의 예측 일관성이 낮게 나타나는 특징이 있다. 본 사례는 종관 규모의 장마전선과 이와 연관된 한반도 주변의 중규모 저기압의 형성에 기인된 집중호우 발생 사례로, 강한 하층 수증기 수렴으로 인한 대기불안정 영역이 형성되었으나, 정체전선 주변의 불안정 영역에서 중규모 대류계에 의해 집중호우가 발생했던 2010년 9월 21일 수도권 호우 사례(2010년 9월 21일 수도권 호우 사례 분석서)와는 한반도 주변의 역학적 중규모 수렴이 약하다는 차이가 있다. 반면 강한 하층 수증기 수렴과 강한 열적 대기불안정 조건하에서 발생한 대류셀에 의해 집중호우가 발생했던 2011년 8월 9일 전라북도 호우 사례(2011년 8월 9일 전라북도 호우 사례 분석서)에 보다 가까운 특징이 있다. 적운모수화에 의한 강수가 지배적인 지역예보모델의 특성상 강수영역은 불안정 지역으로 넓게 나타나며 강수량은 과소모의되는 경향이 있다.

본 사례의 경우 관측 자료의 부족과 자료동화 기술의 부족으로 모델의 종관 및 중규모 기상 조건의 초기화가 좋지 못하였으며, 모델의 유효 해상도가 중규모 대류계 모의에 적합하지 못하였던 사실로부터 수치모델의 예측 결과의 신뢰도가 낮았으므로, 이러한 점을 강수 예보에 반영하여야 한다. 수치모델 결과의 정량적 보정은 주어진 종관 및 중규모 조건에 대한 모델의 예측 성능의 지속적인 분석을 통해 이루어질 수 있다. 이번 사례의 수치예측에 사용된 모델은 MM5기반의 모델로, 현재 현업 활용되고 있는 UM 기반의 지역 및 국지예보모델(RDAPS/LDAPS)은 당시에 운영되지 않았음을 주지할 필요가 있다.



[그림 5.4.1] 2009년 7월 6일 12UTC부터 3시간 간격의 지상 분석일기도(상)와 지역예보모델(2009070612UTC)의 +0h, +3h, +6h, +9h 예측장(하) 비교

5.5. 이번 사례가 다른 사례와 구별되는 특성

이번 사례는 장마 기압골에서 발달하는 중규모 저기압(기압골)과 그와 연관된 중규모 대류계가 호우를 가져오는 사례로써, 이러한 호우 발생 구조는 여름철에 종종 발생할 수 있는 것이라 판단된다. 이번 사례의 특이점은 중규모 대류계의 느린 이동과 강한 상태의 유지로 보인다. 이 때문에 부산지역 등 남부에 많은 비가 발생한 것으로 볼 수 있기 때문이다.

5.5.1. 이번 사례의 특이점

1) 중규모 대류계의 느린 이동

2009년 7월 7일 06KST ~ 15KST 기간 동안에 호우시스템과 연관된 중규모 저기압이 느리게 이동한 이유는 강한 세력을 유지하고 있는 서태평양 고기압의 존재 때문인 것으로 판단된다. 강한 서태평양 고기압의 존재가 강한 호우의 지속을 가져오는데 기여했다고 볼 수 있겠다. 한편, 중규모 저기압이 15KST 이후부터는 상대적으로 빠르게 동진하면서 호우 지역이 남부 지방을 벗어나게 되는데, 15KST 이후에 중규모 저기압의 이동이 빨리지는 것은 한반도 주변의 조건(한반도 북쪽의 중규모 저기압과 서태평양 고기압) 변화와 연관된 것으로 추정된다.

2) 중규모 대류계 강도의 유지

발달하는 중규모 저기압 남동쪽 부분에는 기압경도 강화로 인해 하층 제트가 강화되고, 그 전면에는 중규모 수렴과 상승이 발달한다. 풍부한 수증기가 강한 하층제트에 의해 중규모 수렴지역으로 공급되고, 공급된 수증기는 강한 상승에 의해 강한 강수계를 발달시킨다.

중규모 저기압은 이와 같은 주변환경 및 대류계와의 상호 작용을 통해 호우 발달조건을 유지하면서 호우도 지속 발달할 수 있게 된다. 그리고 강한 서태평양 고기압이 가까이 존재함으로써 이런 상호 작용은 더욱 강화될 것으로 판단된다.

이와 같은 상호 작용 가운데는 중규모 대류계 내부 역학 과정에 의한 강도의 유지 기구가 존재할 수 있는 것으로 판단된다(2.3 레이다 분석, 5.3 레이다 부분 참조).

5.5.2. 유사 사례 발생 예보를 대비한 점검

- ① 한반도 주변의 기압 패턴 변화와 중규모 저기압 이동 특성(7일 06KST ~ 15KST 기간의 느린 이동과 그 후의 비교적 빠른 이동)의 관계 파악이 필요하다.
- ② 강한 서태평양 고기압이 존재할 때 나타나는 중규모 교란과 호우 시스템들의 정체 경향 그리고 강한 호우시스템 발달에 대한 이해 정립이 필요하다.

5.6. 향후 예보를 위한 점검 사항

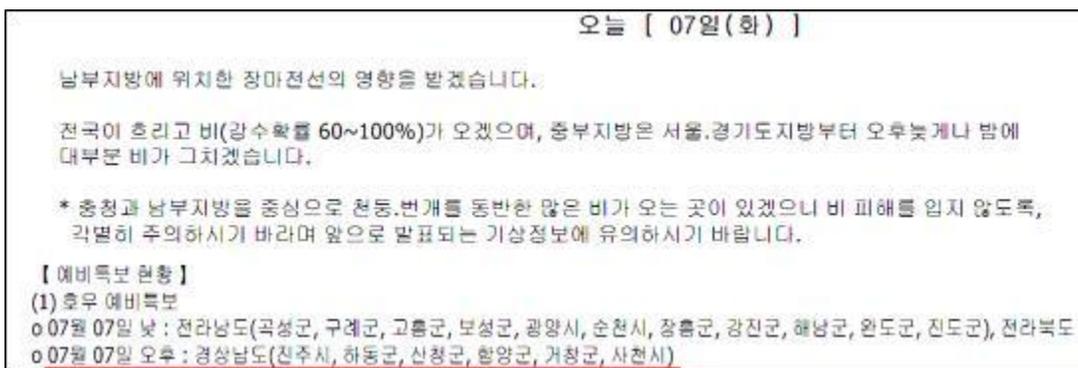
5.6.1. 부족한 정보를 제공하는 수치예보 모델로 부터

숨은 정보 찾기

그림 5.6.1은 7월 7일 05시에 발표한 기상청의 통보문의 일부이다. RDAPS 모델에서 충분히 남부지방의 집중호우 가능성을 예상할 수 있었고 실제로 호남지방에 집중호우가 시작된 시점에서 발표된 예보이기 때문에 충청과 남부지방을 중심으로 뇌우를 동반한 많은 비가 내릴 수 있다는 사실을 잘 예보하고 있었다. 그렇지만 예비특보 현황을 보면 경상남도 지역에 대한 호우예비 특보를 7일 오후로 발표하고 있다는 점은 매우 아쉬운 점이다.

중규모대류계의 전파 특성에 대한 이해도가 높거나 원격탐사 자료를 꼼꼼하게 살피는 예보관이었다면 부산 경남 지역에서도 새벽부터 집중호우가 발생할 가능성이 높았다는 사실을 충분히 인지할 수 있었을 것이다.

수치예보 모델과 분석 일기도를 활용함에 있어서 느린 전방전과 중규모대류계의 특성은 다음과 같다. 첫째, 먼저 위성 영상에서는 전체적인 구름밴드의 이동이 매우 느리고, 강조 적외(Enhanced IR) 영상에서 가장 낮은 운정운도 구역이 전체 중규모대류계의 중심 서쪽에 위치한다. 둘째, 중규모대류계가 발달하는 지역의 서쪽으로 하층제트를 동반하는 최대풍 구역이 형성되어 불안정한 공기를 중규모대류계 전면에서 지속적으로 공급한다, 셋째, 중규모대류계의 발달을 초래하는 강한 상승운동구역을 의미하는 수렴과 경계가 집중호우가 발생하는 지역의 바로 서쪽에 위치하며, 집중호우를 동반하는 강한 대류활동은 1000-500 층후의 경도가 갑자기 약화되는 층후 분류(Thickness Diffluence) 구역에서 주로 발달한다. 네 번째, 느린 전방전과 중규모대류계가 형성되는 구역의 바람은 후방전과 혹은 준-정체 전과 중규모대류계의 바람에 비해서 풍속이 상대적으로 강하지만, 평균적인 고도별 풍속에 비해서는 약하거나 중정도의 상태를 유지한다. 마지막으로, 전방전과 중규모대류계는 상당온위 능의 축(Theta-e Ridge Axis)이 형성되어 있는 구역의 남서쪽에서 주로 발달하고, 상당온위가 높은 구역의 부근이나 동쪽에서 발달하는 사실을 인지하고 모델 예측자료, 분석일기도, 그리고 원격탐사 자료들보다 세밀하게 살피서 예보에 반영할 필요가 있겠다.

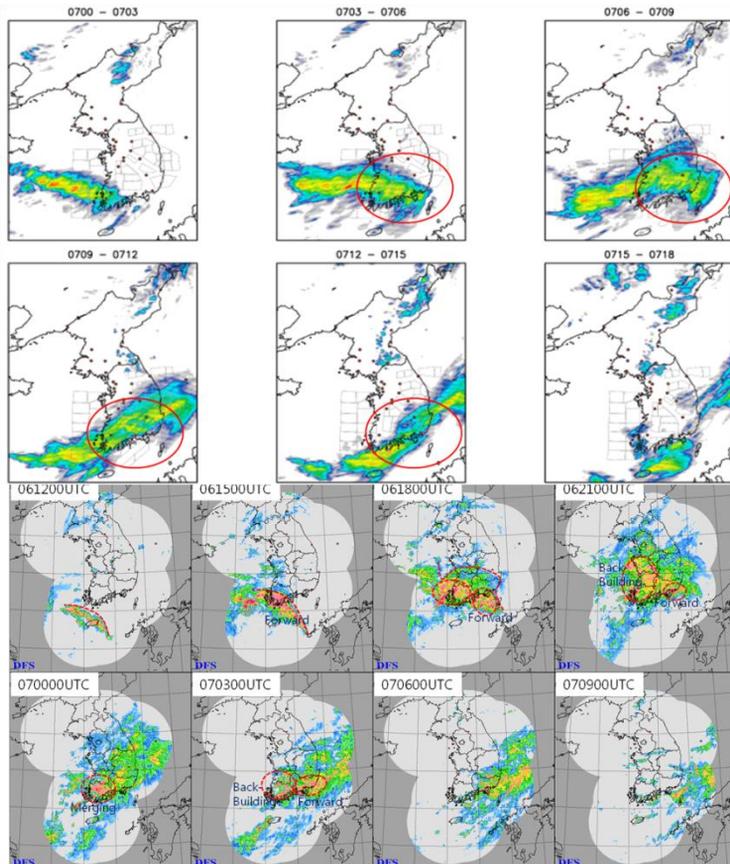


[그림 5.6.1] 2009년 7월 7일 05시 기상청 예보통보문

5.6.2. 수치예보 모델 간의 상이한 결과를 유도한 원인 이해하기

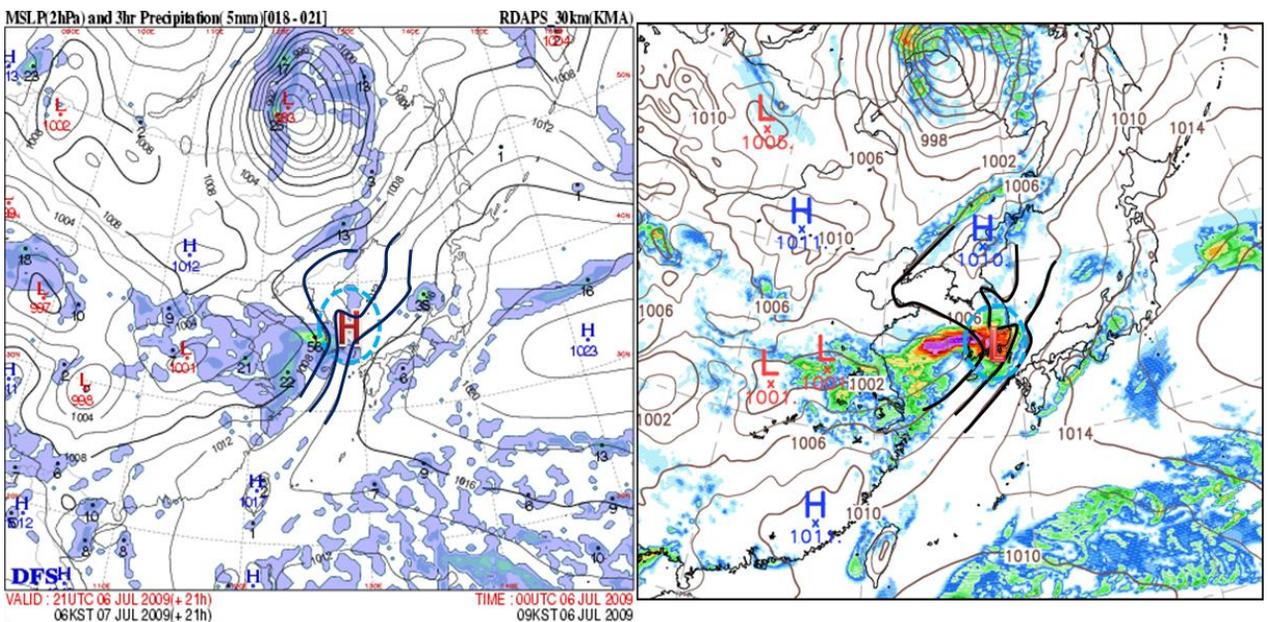
기상청에서는 RDAPS 모델뿐만 아니라 다양한 중규모 모델들도 동시에 운영하며 그 내용들을 예보관들에게 제공하고 있다. 앞에서 서술한 바와 같이 이번 사례에 대해서 RDAPS의 예측은 강수 구역과 강수량에 있어서 다소 아쉬운 점이 있었다. 그렇지만 다른 모델들에서 다른 예측 결과를 제공하고 있었다고 추정할 수 있다.

그림 5.6.2는 WRF 모델에서 예측한 강수예상도와 해당시간의 레이더 영상을 동시에 보인 것이다. 6일 15UTC(0700-0703LST)부터 서해상에서 강수가 시작되고 있는 것은 RDAPS 모델에서도 잘 모의하고 있었던 내용이다. 다만, 차이가 발생하기 시작하는 것은 7일 새벽 03시(18UTC) 부터이다. RDAPS 강수 예상도(3절 예측자료 참조)에는 영남 남해안에서 발달하고 있는 강수밴드를 제대로 모의하고 있지 못했다. 그리고 부산지역에 집중호우가 가장 강하게 발생했던 7일 06시에서 12시 사이에는 WRF 모델 결과는 레이더 영상과 비교했을 때 강수 밴드의 위치와 강도를 비교적 잘 모의하고 있었으나, RDAPS 결과는 이를 전혀 모의하고 있지 못하다. 여기에서 예보관들은 두 모델의 강수예측 차이가 있다는 사실만을 인지할 것이 아니라 그 차이가 어디에서 기인한 것인지 찾아서 분석해야 한다. 그래야 그 경험과 지식을 토대로 상이한 예측 결과를 보이는 모델 결과들 중에서 보다 정확한 정보를 캐 낼 수 있기 때문이다.



[그림 5.6.2] WRF 3시간 누적 강수 예상도(상), 레이더 영상(하)

그림 5.6.3은 RDAPS와 WRF 모델의 0700UTC 지상 예상도를 비교한 그림이다. 앞서서도 언급했지만 좌측의 RDAPS 모델은 강수 구역이 호남지방으로 제한되는 반면, WRF 모델은 서해안에서 영남지방까지 전역이 강수 구역으로 모의하고 있다. 그렇다면 어떤 차이가 이런 결과를 불러왔을까? 눈썰미가 좋은 예보관은 한반도 남동부 지역에서의 등압선 패턴이 서로 반대라는 사실을 알아차렸을 것이다. RDAPS 모델의 경우 영남지방에는 고기압성 흐름이 형성되는 등압선이 위치하고 있는 반면 WRF 모델의 경우에는 영남지방에 오히려 저기압성 순환이 발생할 수 있는 상태를 예측하고 있다. 이러한 패턴은 지상뿐만 아니라 850hPa 고도까지 유지된다. 그렇다면 결과는 자명할 것이다. 한 모델은 남해안을 따라서 수증기와 열의 공급이 차단되는 순환을 가지기 때문에 당연히 강수를 모의하지 않았을 것이고, 다른 모델은 오히려 수증기와 열이 지속적으로 공급되고 하층 수렴이 강화되는 것으로 모의할 것이다. 예보관들은 두 모델의 강수 모의가 다르다는 것을 인식하는 것으로 끝낼 것이 아니라, 그 차이가 어디에서 기인하는지 다른 자료들을 꼼꼼히 확인해야 하며, 원격탐사에서 나타나고 있는 현상들을 모델이 잘 설명하고 있는지를 비교, 분석할 수 있도록 준비해야 할 것이다.



[그림 5.6.3] 상이한 두 개의 모델 비교(예)

참고문헌

1. Bluestein, H. B. and Jain, M. H. 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: severe squall lines in Oklahoma during the spring, *J. Atmos. Sci.* 42, 1711_1732.
2. Schumacher, R. S. and Johnson, R. H. 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain producing mesoscale convective systems, *Mon. Weather. Rev.* 133, 961_976.

부산 홍수

2009년 7월 7일

발행처 기상청예보기술분석과
집필진 김영철(한서대학교)
서명석(공주대학교)
이동인(부경대학교)
이상현(공주대학교)
이태영(연세대학교)



기상청 Korea
Meteorological
Administration