서울
2011년 7월 27일
우면산 산사태
기상청
Korea
Meteorological
Administration

목차

CONTENTS

1. 사례 개요

2. 실황분석

2.1. 일기도 분석 /08

2.2. 위성 분석 /23

2.3. 레이더 분석 /31

3. 예측자료 분석

3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석 /42

3.2. 모델의 강수 예측 특성 분석 /50

4. 사례 발생 원인

4.1. 종관 및 중규모 환경 /60

4.2. 호우 시스템의 진화 /64

4.3. 호우 발생 원인 /67

5. 사전 예측을 위한 검토 자료

5.1. 예측 일기도를 활용한 집중호우 매개변수 분석 /76

5.2. 위성 /91

5.3. 레이더 /94

5.4. 수치모델 /102

5.5. 이번 사례가 다른 사례와 구별되는 특성 /103

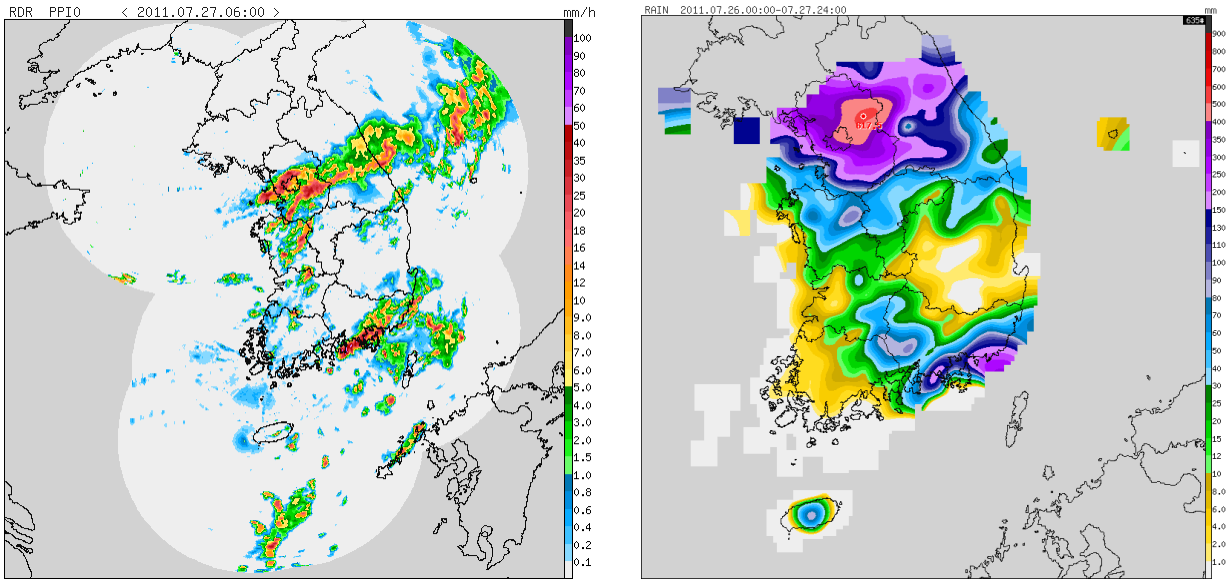
5.6. 향후 예보를 위한 점검 사항 /104

참고문헌 /108

1

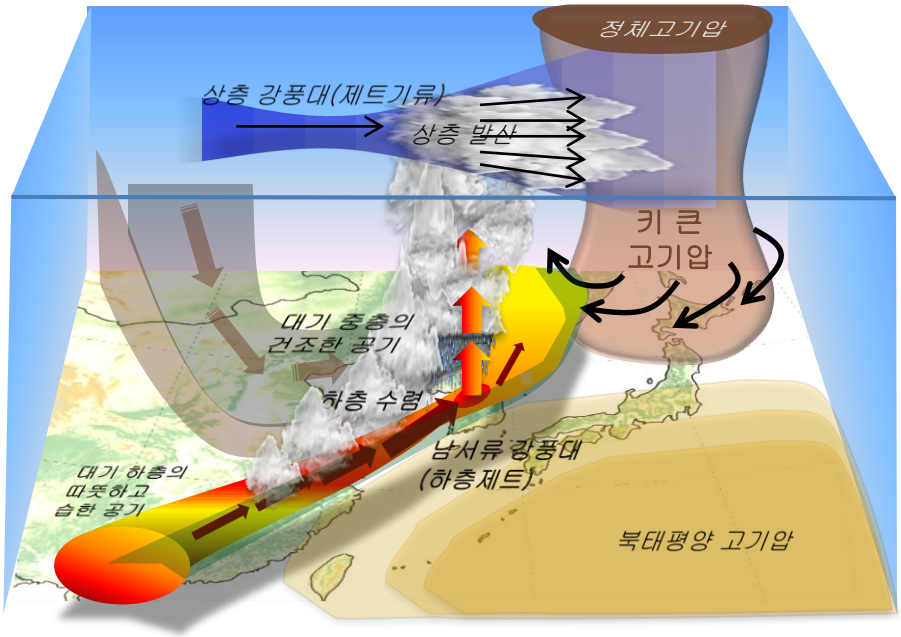
사례개요

7월 27일 오전, 춘천과 서울 우면산 지역에서 대형 산사태가 발생하여 사망 57명, 실종 12명의 인명피해와 주택파손, 차량침수, 정전 등 약 2천 5백억(서울시 추정)의 재산피해가 발생하였다.



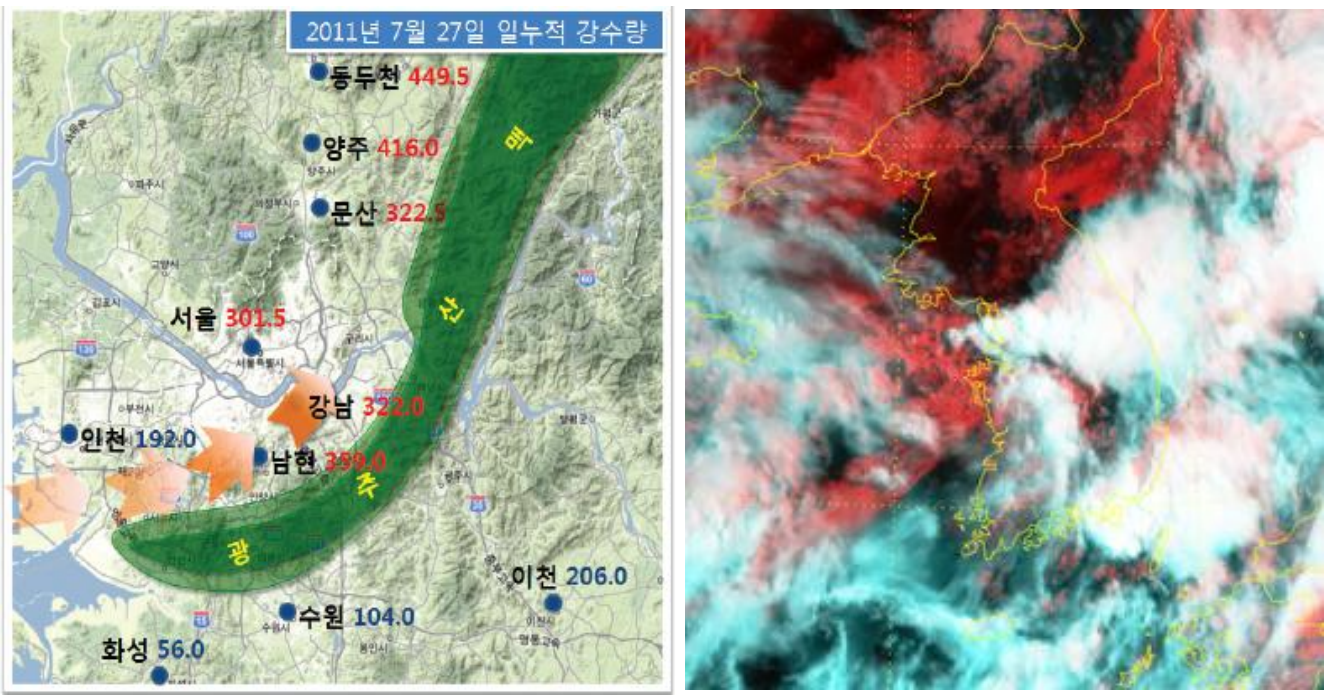
[그림 1.1.1] 2011.7.27. 06시 레이더 영상(왼쪽)과 27일 누적강수 분포(오른쪽)

- 강수가 집중되었던 7월 27일의 강수량은 서울 및 경기북부에 300mm 이상(최대: 양주시 은현면 466.5mm), 중부지방의 연평균 강수량은 1100 ~ 1400mm로 하루 동안 연강수량의 약 1/4정도가 내렸다.
- 동두천(449.5mm/일)과 문산(322.5mm/일)의 경우 관측이래 일 최다 강수량 1위를 기록하였다.
- 서울 우면산 산사태가 있었던 27일 오전 서울 관악구에는 시간당 113mm(남현동, 오전 8시 41분), 서초구에도 시간당 86mm(서초동, 오전 8시 43분)의 비가 내렸다.
- 주거지 인근에서 발생하는 산사태의 경우 정전, 침수보다 심각한 인명피해를 동반할 수 있었음을 보여준 사례였다.



[그림 1.1.2] 우면산 모식도

서울·경기북부 지방을 중심으로 비가 집중된 이유는 관악산 북쪽에서 광주산맥(경기도)의 북쪽으로 강한 남서기류가 유입되었기 때문이다.



[그림 1.1.3] 서울 지역 집중호우 모식도(좌), 위성영상 2011년 7월 27일 08시 45분(우)

2

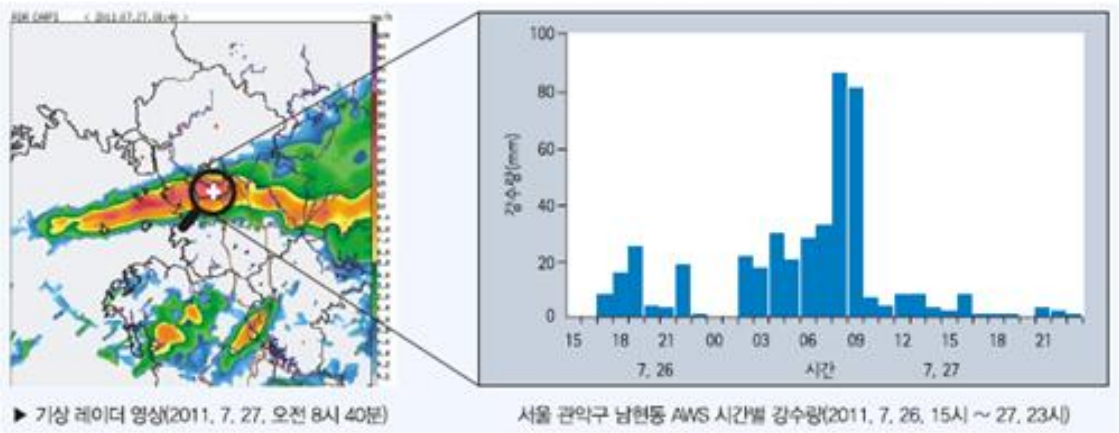
실황분석

2.1. 일기도 분석

2.1.1. 분석일기도 및 관측자료 분석

1) 일기도 및 관측자료 종합적 이해

한반도에서 발생하는 집중호우는 종관 환경의 강약에 무관하게 중규모대류계(MCSs)를 동반하는 경우가 대부분이다. 따라서 집중호우 사례에 접근함에 있어서 이들 중규모대류계의 발생, 유지, 소멸되는 단계에서의 대기 상하층의 종관규모, 중규모 환경의 변화 경향을 이해하는 것이 무엇보다도 중요하다. 또한 중규모대류계를 형성하는 객체인 스톰 내부에서의 상호작용과 역학에 대한 이해가 동시에 이루어져야 제대로 된 예측이 가능하다고 할 수 있겠다. 따라서 예보관들은 사례에 접근하거나 예보를 시작함에 있어서 먼저 중규모대류계 혹은 저기압계의 3차원적 구조를 종합적으로 머리에 그릴 수 있는 능력을 구비할 필요가 있다. 이번 집중호우 사례는 비슷한 시스템이 3일 동안 계속해서 유지되면서, 강수강도가 매우 강해서 2011년 서울 우면산 일대에 산사태를 일으키고 도시 기능이 마비되는 등 대규모 돌발 홍수를 일으킨 사례이다.



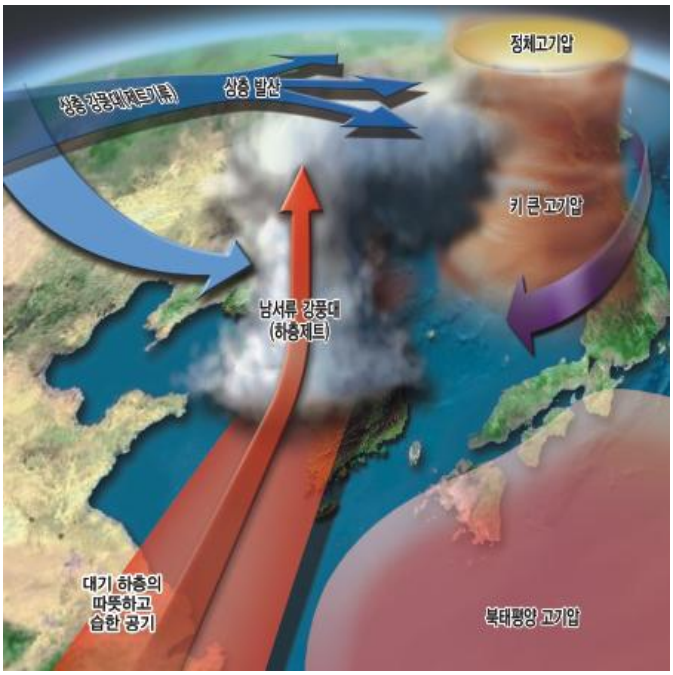
[그림 2.1.1] 2011년 7월 27일 레이더 영상과 서울 남현 AWS 시간당 강수분포

그림 2.1.1에서 볼 수 있듯이 아주 좁고 강한 중규모대류계에 동반된 강한 대류성 에코들이 경기만에서 서울, 경기 남부지역으로 좁게 형성되어 있으며, 시간당 20mm에 가까운 강한 강수들이 연속적으로 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 2011년 7월 27일 새벽부터는 시간당 20mm가 넘는 강수들이 6시간 동안 지속된 이후에 또 다시 시간당 80~100mm의 집중호우가 동일한 지역에 집중되어 나타나고 있다.

집중호우에 의한 홍수는 강우강도(R)와 유지기간(D)의 함수라는 점에서 보면 강우강도와 유지기간 모두 돌발홍수를 가져오는데 매우 유리한 조건이었음을 알 수 있다. 경험이 많은 예보관이면 이러한 비슷한 형태의 레이더 영상과 강수 시계열도가 눈에 익을 것이다.

장마가 종료된 이후부터 8월 상순 사이 북태평양 고기압 가장자리의 불안정에 의해서 발생하는 집중호우 중에서 많은 경우가 중부지방에 발생하는데, 특히 이번 사례는 1996년 철원·연천 집중호우 사례와 많이 닮아있는 것을 알 수 있다. 약 15년의 차이를 두고 발생한 사례이지만, 발생한 날짜도 7월 26일에서 28일로 같을 뿐만 아니라, 처음 집중호우가 시작되는 단계인 첫날은 집중호우를 야기하는 중규모대류계가 주로 북한 황해도 지방을 중심으로 많은 비를 내린 후, 점차 남하하면서 일시적으로 소

멸하는 것처럼 보였다가, 갑자기 재발생해서 길게는 거의 24시간 동안 선형대류선(Convective Line or Squall Line) 형태로 일정한 장소에 머물면서 집중호우와 대형 산사태를 야기해서 많은 인명 피해를 일으켰다는 점에서 매우 닮아있다. 1996년 사례는 장마 후에 대류불안정에 의해서 발생한 중규모 대류계의 전형적인 사례로 많은 수치예보 모델링 연구와 관측 연구가 진행되었는데, 한번 소멸했던 MCSs가 다시 발생하는 과정을 여러 모델에서 제대로 모의하지 못했던 것으로 기억되는데, 이번 사례의 경우도 수치예보 모델에서는 정확한 강수구역과 강수량을 예측하지 못한 한계를 가지고 있는 것으로 보인다. 그렇지만 종관환경에 대한 정확한 이해와 중규모대류계에 의한 집중호우가 발생하는데 유리한 대기의 3차원적 구조에 대한 이해가 충분하다면 좁은 지역에 많은 비가 내릴 가능성이 있었다는 것을 인지할 수 있었을 것으로 보인다.



[그림 2.1.2] 2011년 7월 26~28일 우면산 호우 모식도

그림. 2.1.2는 2012년 기상청에서 발간한 「집중호우 Top 10」에서 제시된 2011년 7월 26일~28일 집중호우의 모식도이다.

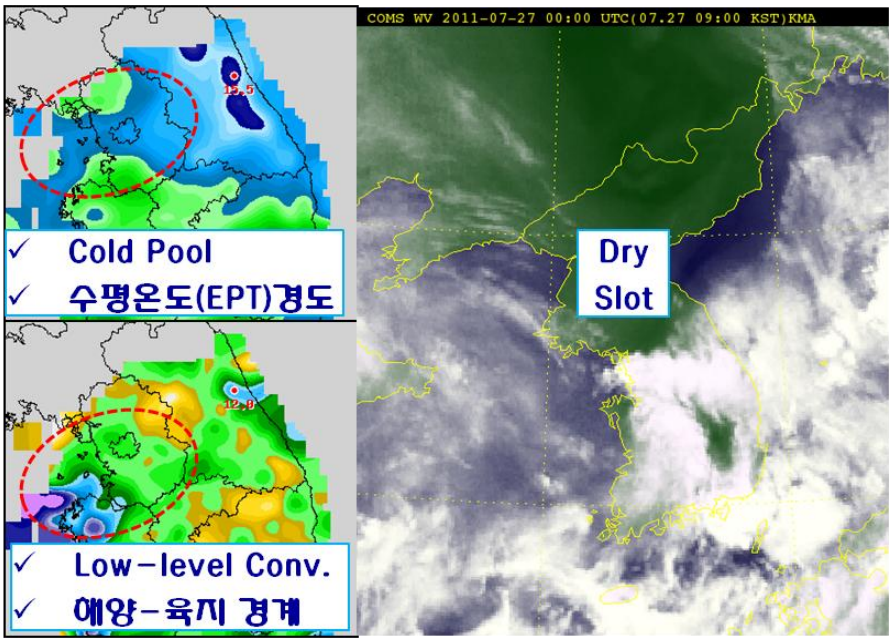
먼저 북태평양 고기압이 일본 남부까지 확장해 있는 가운데 한반도에는 북태평양 고기압 주변부의 잠재대기불안정 구역에 놓여있게 된다. 이러한 종관규모 불안정이 강하게 유지되고 있는 가운데, 대기하층에 해당되는 850hPa 고도에서는 강한 하층제트를 따라 따뜻하고 습한 공기가 남서쪽에서 한반도 중부지방으로 강하게 유입되고(붉은 화살표)있는 것을 볼 수 있다. 하층제트는 많은 수증기와 열을 수송하여 기존 종관규모 대기불안정에 대류불안정을 더해서 강한 중규모대류계의 발달을 유도하는데 크게 기여하고 있다.

그리고 대기 중층에서의 Dry Slot(하늘색 화살표)도 주목할 필요가 있다. 대기 중층에서의 Dry Slot의 역할은 2010년 9월 21일 수도권 집중호우 사례에서 상세하게 다루었듯이 북태평양 고기압과 함께 Dry Slot의 전면에서 종관규모 강제상승을 일으켜 중규모대류계 내부의 스톰들이 더욱 강하게 발달하고 그 강도가 유지되는데 매우 중요한 역할을 한다.

대기 하층에서의 수증기와 열의 공급, 그리고 대기 중층에서의 강제 상승 운동이 대기 상층의 발산 구역과 만나게 되면, 중규모대류계는 대류권 최상부까지 급격하게 발달하게 된다. 상층 제트기류에 동반된 상층 발산 구역이 한반도 중부지방으로 유입되기 시작하면서 대기의 3차원 구조는 중규모대류계의 발생과 발달 그리고 유지에 필요한 거의 표준에 가까운 모습을 갖추게 된다.

그런데, 기존 사례들에서는 집중호우의 지속시간이 6시간에서 12시간에 불과한 것에 비해서 이번 집중호우 사례는 3일 동안 중부지방에 지속적인 강수가 유지되었는데, 이러한 차이점은 오호츠크해 부근에 위치한 강한 블로킹 고기압에 기인한 것으로 보인다. 이 블로킹 현상이 존재함에 따라 서쪽에서

접근하는 기압골이 동쪽으로의 이동이 제한된 상태에서 북쪽 기압골과 남서쪽 북태평양 고기압 사이의 중규모대류계에 의해서 형성된 시스템이 갇혀서 정체하게 된 것이다. 그리고 종관규모 강제력이 존재한다고 해서 무조건 중규모대류계가 오랜 기간 동안 정체되는 것이 아니라, 중규모 혹은 스톰규모의 내부 역학도 중요한 역할을 하는데, AWS 온도와 바람 그리고 한반도 부근 수증기영상을 분석해 보면, 대기하층에서 Cold Pool과 강한 상당온위 남북경도가 존재하고, 이 구역을 따라 강한 중규모 수렴, 그리고 중층 Dry Slot에 의한 강제 상승이 중규모대류계가 급격하게 발달하고 유지되는 지역에서 분석되고 있다.



[그림 2.1.3] 2011년 7월 27일 00UTC AWS 온도, 바람, 수증기 영상

그림. 2.1.3의 좌측 상단의 그림에서 AWS 온도 분석장을 보면 경기만에서 한반도 중부지방에 강한 수평온도경도를 가지는 Cold Pool이 형성되어 있는 것을 보여주고 있다. 강수가 있는 지역은 강수에 포함된 강한 밀도류와 구름의 차폐로 인해서 낮은 기온을 보이는 반면, 비 강수구역은 기온이 높게 올라 강한 온도경도가 형성되어 있다. 이와 함께 해상에서 불어 오는 강한 기류가 육지를 만나면서 급격하게 풍속이 약화되면서 강한 수렴이 경기만 부근에서 형성되어 있는 것을 알 수 있다.
그리고 앞에서 언급되었던 Dry Slot의 존재가 수증기 영상을 통해서 뚜렷하게 나타나고 그 바로 남쪽에서 강한 대류활동이 발생하고 있음을 알 수 있다. 대기의 3차원적 구조와 지상 부근의 종합적인 대기분석을 통해서 중규모대류계에 동반된 집중호우가 오랜 시간 동안 유지되는데 필수적인 중규모대류계 내부의 스톰의 지속적인 재생성과 생애가 긴 단일 스톰의 발생에 필요한 경계, 수렴, Cold Pool, 강제상승이 종관규모 환경과 결합되어 긴 시간 동안 좁은 지역에 집중호우에 동반된 돌발홍수가 발생하게 만들었다는 것을 알 수 있다.

2) 지상 및 하층 일기도 분석

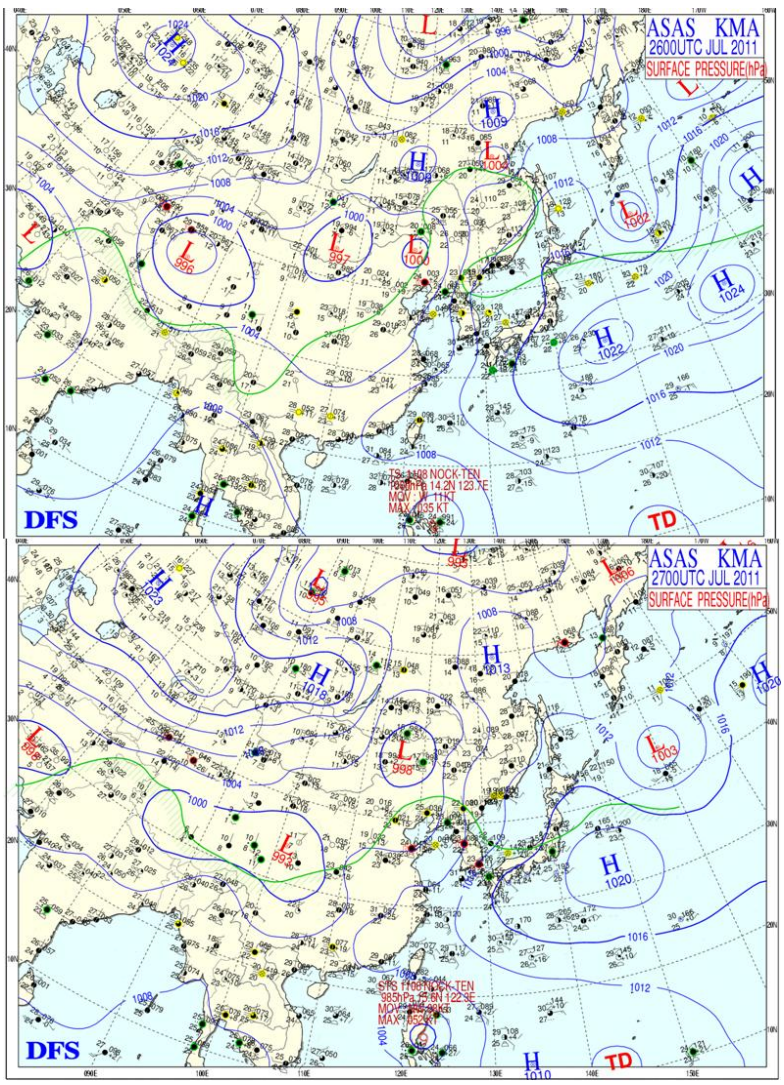
그림 2.1.4는 집중호우를 야기한 중규모대류계가 발생하기 시작한 7월 26일 00UTC와 27일 00UTC의 일기도이다. 26일 00UTC에는 중심기압 1022hPa의 북태평양 고기압이 일본 남쪽 해상에 중심을 두고 남북으로 확장하면서 한반도 지역으로는 북태평양 고기압과 중국 내륙의 저기압 사이에서 등압선이 남북으로 서면서 기압경도력이 동서방향으로 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이때 위성영상을 보면 강한 대류성 구름밴드가 발해만 부근에서 북서에서 남동으로 등압선과 유사한 방향으로 형성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 지상기압 배치가 27일 00UTC가 되면 크게 변화하게 되는데, 북태평양 고기압의 세력이 일본남해안을 따라 서쪽으로 크게 확장하면서 한반도의 등압선은 남북으로 서있던 모양에서 동서방향으로 눕는 형태를 가지게 된다. 즉 기압경도력의 방향이 동서방향에서 북서-남동 방향으로 기울어지게 되었음을 의미한다. 이에 따라 한반도 주변에서 형성되는 중규모대류계를 동반한 구름밴드의 형태도 남북에서 동서방향으로 눕는 것을 위성영상을 통해서 확인할 수 있다.

여름철 공식적인 장마가 종료된 이후 발생하는 집중호우 사례의 지상일기도에서 공통적으로 찾을 수 있는 몇 가지 요소들을 이 지상일기도들에서도 찾아볼 수 있다.

먼저 북태평양 고기압 주변의 불안정 구역의 형성이다.

2010년 9월 21일 사례에서 상세하게 설명되었듯이 북태평양 고기압은 키가 큰 고기압으로 그 중심에는 강한 하강기류가 존재하지만, 그 주변에서는 이 하강기류를 보상하기 위한 상승기류가 형성되어 조건부 잠재불안정 상태를 유도한다. 종관규모 잠재불안정 구역은 그 자체로는 중규모대류계를 직접 유도하지는 못하지만, 주변에 충분한 수증기와 경계 그리고 중규모 불안정이 형성되면 강한 대류활동을 유도하는데 유리한 조건을 제공한다.

지상일기도에서 보면 한반도를 포함한 지역에 광범위하게 수증기가 높은 구역이 존재하고 있음을 알 수 있다. 중국 내륙에 형성되어 있는 북태평양 고기압에 상대적인



[그림 2.1.4] 7월 26일(상), 27일(하) 00UTC 지상일기도

저기압 세력의 역할도 주목할 필요가 있다. 상대적으로 키가 작은 내륙의 열적저기압들은 지표면 부근의 불안정을 강화시키면서 상층 기압골과 결합하여 중규모대류계를 형성하는데 필요한 지표면 부근의 경계를 제공하는 역할을 하게 된다.

또한 집중호우 사례들에서 공통적으로 등장하는 태풍이 이번 사례에서도 나타나고 있다. 7월 27일 00UTC부터 열대성 저기압으로 약화되기 시작한 제 8호 태풍 녹텐(NOCK TEN)이 대만 남쪽으로 북상하면서 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 많은 수증기와 열이 한반도 지역으로 유입되도록 유도하고 있다. 태풍은 한반도에 직접 내습하여 집중호우로 인한 피해를 야기하기도 하지만, 많은 경우 중국 남부지역에서 수증기와 열을 한반도 지역으로 공급하여 집중호우를 동반한 중규모대류계의 발달에 중요한 에너지들을 공급하는 역할을 한다. 태풍의 간접적인 영향과 한반도 집중호우의 원격상관관계에 대한 더 많은 연구와 이를 예보칙에 활용할 수 있는 방안을 찾는 것이 중요할 것으로 보인다.

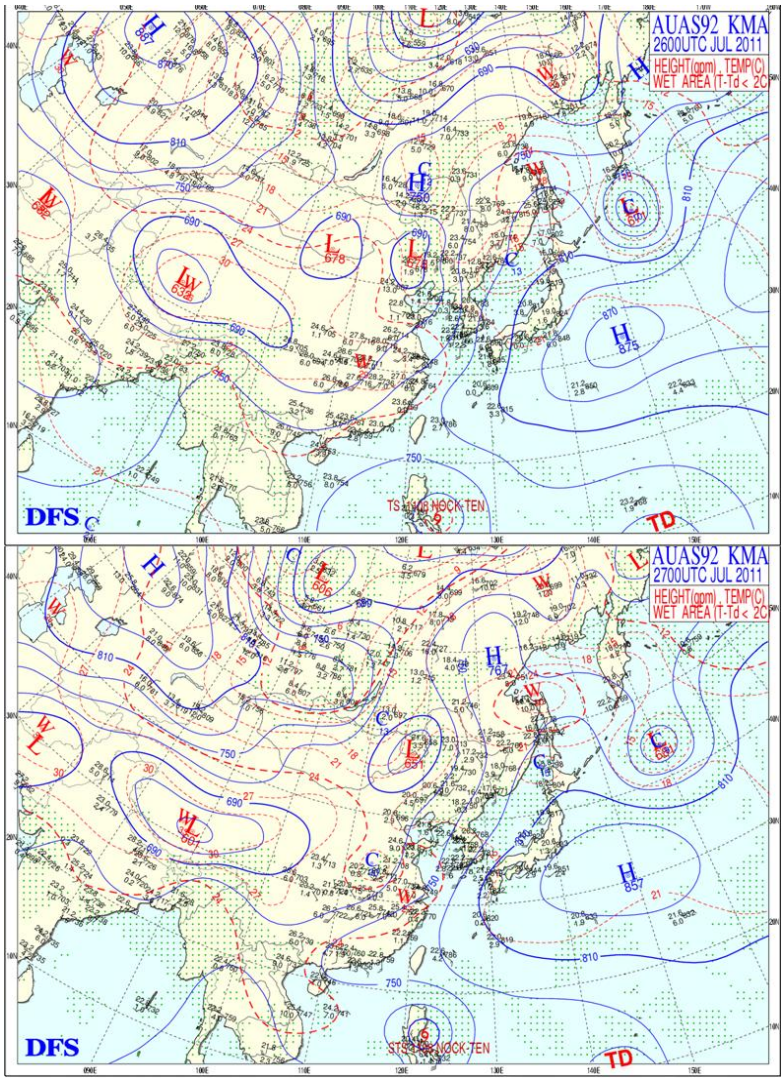
27일 00UTC 지상일기도의 하늘 상태를 보면 한반도 대부분의 지역이 구름으로 덮여 있는 상태임에도 불구하고 남부지방과 중국 동해안 지역의 기온이 31℃ 까지 오른 반면 강한 강수가 내리고 있는 중부지방으로는 23℃ 내외의 기온분포를 보이고 있다. 이는 중부지방에는 강수를 포함한 강한 대류운이 형성된 반면 남부지방에는 모루구름 혹은 상층운이 형성되어 있었음을 의미한다. 이러한 큰 남북 온도 경도와 구름 형태의 차이는 한반도 남부와 북부 사이에 뚜렷한 종관규모 경계가 형성되어 있는 모습을 잘 보여주고 있으며, 이러한 경계의 존재는 지상 기압계의 발달 여부에 따라 중규모 대류불안정의 형성과 중규모대류계의 발생에 매우 유리한 종관 환경을 제공하고 있음을 보여주고 있다.
이러한 지상 기압배치가 지속되는 가운데 중규모대류계가 발생하면 지속적인 수증기 공급과 불안정이 유지되어 그 후방으로 연속적으로 강한 대류성 구름들이 발생하는 후방 발달(Back-building) 형태의 중규모대류계가 발생하고 기압경도력의 방향을 따라 대류선이 유지되면서 정체하는 것으로 알려져 있는데, 위성영상과 레이더 영상 분석이 이러한 특성을 잘 보여주고 있다.

지상 일기도 분석을 통해서 찾을 수 있었던 2011년 7월 26일에서 28일까지의 우면산을 포함한 수도권 집중호우 사례는 북태평양 고기압의 활성화와 대륙에서의 상대적인 기압골 사이에서 형성된 대기불안정이 한반도 상공에서 발생하고 지속되었다는 것을 알 수 있었다.

그림 2.1.5는 7월 26일 00UTC와 27일 00UTC 925hPa 분석일기도를 보여주고 있다. 925hPa 고도는 하계 집중호우 예보에 있어서 하층에서의 지속적인 수증기 및 열에너지 공급과 대류잠재 불안정 구역의 판단에 주로 활용된다. 26일 00UTC 925hPa 분석일기도에서 한반도는 남쪽에서 확장하는 북태평양 고기압과 대륙에서 형성되어 있는 저기압 세력의 주변부에 놓여있는 것을 알 수 있다.

한반도 주변의 기압배치와 온도 분포에서 주목해야 할 것은 동해북부 해상에 중심을 둔 한랭 핵과 발해만 북쪽의 저기압에서 기인한 온도 골(Thermal Trough)의 존재이다. 한반도 대부분의 지역은 남서쪽에 중심을 둔 온난핵(붉은색 W)으로부터 형성된 온도 능(Thermal Ridge) 구역에 놓여있는 반면, 한반도 북부와 산둥반도 지역은 온도 골에 놓여있다.

바람의 방향을 보면 등고도면에 나란하게 약 10m/s 정도의 남풍이 형성되어 있는 것을 알 수 있는데, 이 남풍를 따라 대만 남쪽의 태풍 녹텐에 동반된 수증기와 에너지가 한반도 서쪽으로 유입되고 있었음을 의미한다.



[그림 2.1.5] 7월 26일(상), 27일(하) 00UTC 925hPa 일기도

중규모대류계가 한반도 중부지방에서 강하게 발달 유지되는 시기인 7월 27일 00UTC가 되면 925hPa 일기도의 등고도선과 등온선의 형태 그리고 바람의 변화가 뚜렷하게 분석된다.
먼저 지상일기도와 마찬가지로 한반도 주변의 등고도선이 남쪽 북태평양 고기압의 확장과 함께 남북방향에서 북동-남서 방향으로 눕는 형태를 가진다. 그리고 이 등고도선을 따라 15m/s의 풍속을 가지는 강한 남서기류가 한반도 중부지방으로 유입되기 시작한다.

또 한가지 주목해야 할 것이 한반도 서쪽에서의 등온선의 변화이다. 24시간 전에 중국 양자강 부근에 위치해 있던 온난 핵(붉은색 W)의 중심이 중국 동해안까지 진출해 있고 그 북서쪽에 새로운 한랭 핵(푸른색 C)이 위치하고 있다. 이 온난핵으로부터 이어진 온도 능이 한반도 중부지방까지 이어지면서 강한 남서기류와 함께 많은 수증기와 열

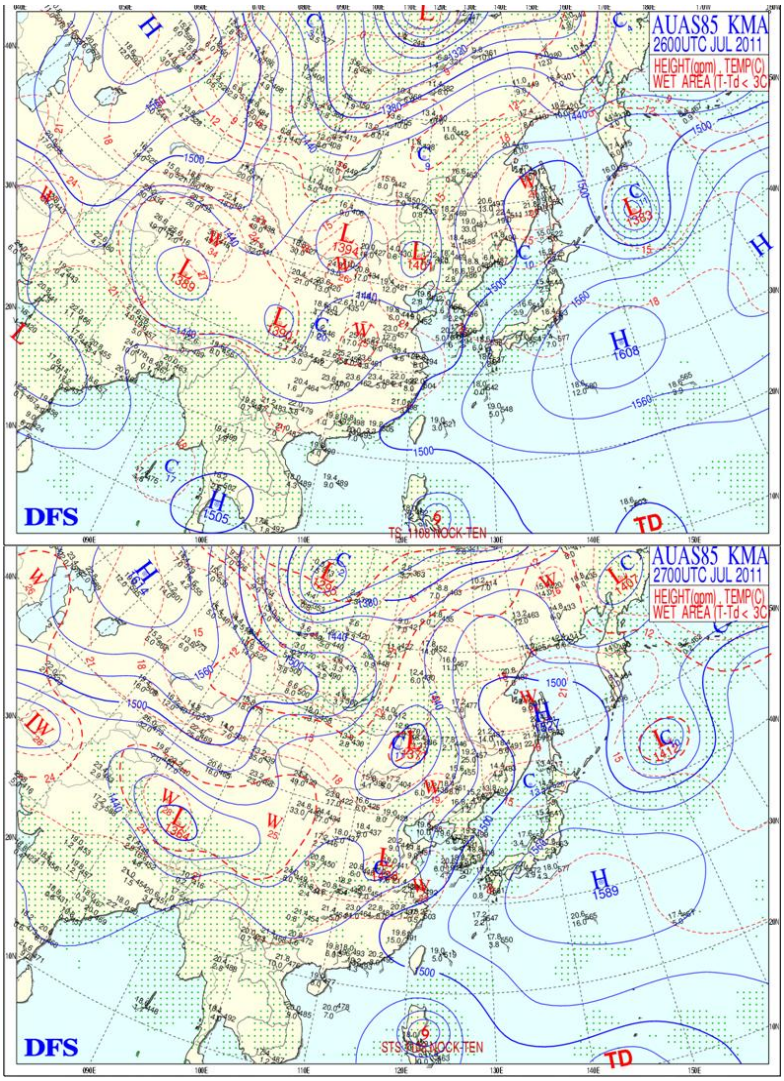
이 한반도 중부지방으로 공급되고 있었던 것이다.
925hPa에서 수증기가 아주 좁고 긴 습설(Moisture Tongue) 형태로 발달하면서 한반도 중부지방으로 유입되는 모습은 많은 집중호우 사례들에서 찾아 볼 수 있으므로 습설, 온난 핵, 하층 남서기류가 강화되는 지역은 곧 전선발생(Frontogenesis) 구역에 해당하기 때문에 그 지역을 적절히 분석하고 예측하는 것이 집중호우 예보의 중요한 키가 될 수도 있다. 수증기 위성영상에서의 암역(하강기류)이 온도 골의 전면에서 뚜렷하게 나타나고 있는데, 이러한 하강기류 영역에서 강제적으로 하강한 공기가 수증기와 열에너지가 모여지는 한반도 중부지방에서의 상대적인 상승운동을 만들면서 강한 대류활동이 발생하는데 크게 도움을 준 것으로 판단할 수 있다.
925hPa 분석일기도에서는 강한 온난이류에 동반된 지속적인 수증기 공급, 온도 골과 능의 발달에 따른 전선발생 구역 형성으로 중규모대류계의 발달과 유지에 필요한 수증기와 열에너지 그리고 강한 상승운동과 대류 잠재 불안정 구역이 한반도 중부지방에 형성되었다는 것을 잘 설명해 주고 있다.

그림 2.1.6은 7월 26일 27일 00UTC 850hPa 일기도이다.

26일 00UTC 한반도 서쪽과 중국 내륙 지방으로 습윤구역이 존재하고 있는 가운데 한반도 대부분은 해상 동해 북부해상과 한반도 북서쪽에 위치한 온도 골에 위치하고 있다.

그리고 지상일기도와 비슷하게 북태평양 고기압의 가장자리가 한반도 남부지방까지 확장된 가운데 우리나라 중북부지방과 중국 북부지방에는 상대적인 저기압들이 형성되어 있다. 실제로 이 시기에는 강한 대류활동이 한반도가 아니라 발해만 북쪽에서 발생하고 있었다. 그리고 850hPa 고도의 바람도 5m/s 내외로 하층제트의 기준인 12.5m/s에 미치지 못하고 있으며, 풍향도 남풍으로 한반도 보다는 한반도 북서쪽에서 대류활동이 발생하는데 유리한 조건을 만들어 내고 있다.

27일 00UTC가 되면 이러한 기압패턴이 크게 변화하게 되는데, 북태평양 고기압이 중국 남부지방까지 확장되는 가운데 중국 북동부에 위치한 상층 기압골은 깊어지면서 약간 동진하여



[그림 2.1.6] 7월 26일(상), 27일(하) 00UTC 850hPa 일기도

한반도 부근에서의 기압경도력이 증가하기 시작한다. 그리고 남서기류의 풍속이 15m/s까지 증가하면서 남서쪽으로부터 열과 수증기가 한반도 중부지방으로 유입되는데 유리한 패턴이 만들어지기 시작한다. 이에 따라 거의 한반도 전역이 습윤 구역에 놓이게 된다.

주목해야 할 것이 등온선 패턴의 변화이다. 북태평양 고기압의 확장에 따라 상대적으로 형성된 저기압이 한랭 핵을 가지고 발달하고 있는 반면 남쪽의 온난 핵이 발달하면서 동진하여 서해안까지 진출하고 있고 26일까지 온도 골 곡에 놓였던 한반도 중부지방이 온도 능에 놓이게 되고 바로 북쪽에 온도 골이 형성되어 한반도 중부지방을 중심으로 하층 제트에 의한 수증기와 열의 수송, 북태평양 고기압 주변의 상대적인 상승운동에 의한 강한 대류불안정과 저기압 발생구역이 만들어지게 된다.

그리고 한 가지 더 주목해야 할 것이 일본 열도를 따라 강한 고기압이 발달하기 시작했다 점이다.

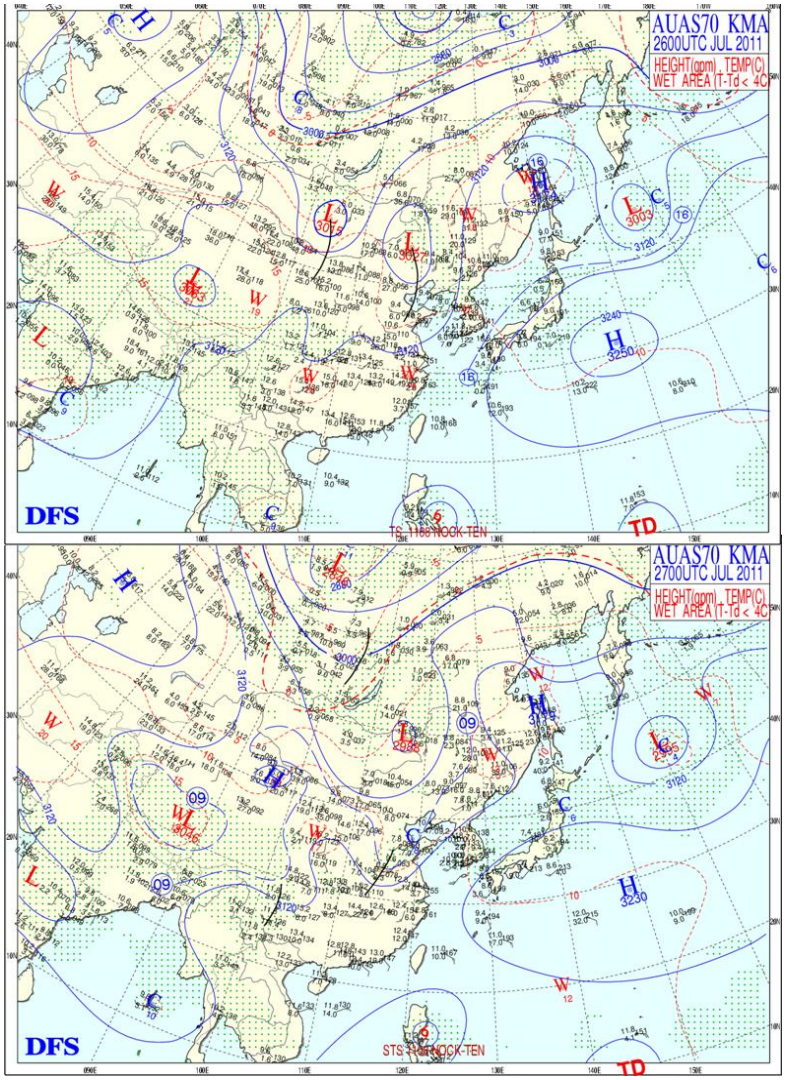
북서태평양으로부터 사할린 부근까지 형성된 기압능은 전체적인 시스템의 이동을 제한시켜 한번 발생한 중규모대류계를 포함한 강수계의 동진이 저지되는 반면 남서쪽에서 지속적인 대류 에너지 즉 열과 수증기가 공급되도록 하여 긴 시간 동안 한반도 중부지방에서 지속적인 대류활동이 유지되도록 한 것으로 판단된다.

지상 일기도, 925hPa, 850hPa 분석 일기도는 북태평양 고기압 주변의 대류불안정, 대기 하층에서의 지속적인 수증기와 열의 공급, 한반도 남쪽과 북쪽의 온도 능과 골의 형성 등으로 인해 종관규모 강제력과 전선 발생에 유리한 조건 이외에도 하층제트, 공기의 강제 단열상승에 의한 연직운동 발달 패턴이 한반도 중부지방을 중심으로 형성되면서 중규모대류계의 발생과 지속적인 발달에 큰 도움을 주는 환경을 제공하고 있었음을 알 수 있다..

3) 중상층 일기도 분석

그림 2.1.7은 7월 26일과 27일 00UTC 700hPa 분석일기도이다. 700hPa 고도는 대기 하층의 일사나 마찰의 영향을 거의 받지 않으면서 동시에 상층의 편서풍대의 영향도 거의 받지 않기 때문에 기단의 경계를 판단하는데 매우 중요한 정보를 제공한다. 따라서 등고선 패턴이 매우 간략하고 상층 기압골과 기압능의 위치를 판단하는데 유리하며 중층운 구름대의 위치와 역할을 확인하는데 좋은 정보를 제공한다.

26일 00UTC에 한반도는 북서쪽에 위치한 상층 기압골 전면의 영향을 받고 있다. 이에 따라 한반도 대부분 지역에 습윤구역이 분포하고 있는데, 위성 영상에서 넓은 구역에 중층운이 분포하고 있는 것과 잘 일치한다. 그리고 상층 기압골을 따라 형성된 온도 골이 발해만 부근에 형성되어 있고 그 오른쪽인 한반도 남부지방에 온도 능이 형성되어 있다.



[그림 2.1.7] 7월 26일(상), 27일(하) 00UTC 700hPa 일기도

따라서 아직까지 한반도 상에는 강한 대류활동이 존재하지 않고 중국 북부지방으로 온도 골과 온도 능을 따라 강한 대류활동이 남북 방향으로 강화되는 것을 볼 수 있다.

27일 00UTC가 되면 두 가지 뚜렷한 차이가 발생한다. 먼저 북태평양 고기압 세력이 일본 남부에서부터 한반도 남해 지역까지 확장하기 시작한 가운데 발해만 부근에는 한랭 핵을 동반한 기압골이 그 깊이는 얕아졌지만 북동쪽에서 남서쪽으로 누워서 나타난다. 이것은 한반도 중부지방을 중심으로 북태평양 기단과 대륙 기단의 경계가 형성되어 있다는 것을 의미하며 이 경계를 따라서 강한 대류활동이 발생할 가능성이 매우 높았음을 의미한다.

그리고 한반도 북부지방에는 상대적으로 건조한 구역이 나타나는 가운데 한반도 남쪽에는 온도 능과 함께 습윤구역이 위치하고 있는 것을 볼 수 있다.

중층운 구름이 존재하여 일사의 영향을 받지 않는 지역과 구름이 존재하지 않는 지역의 경계가 기단의

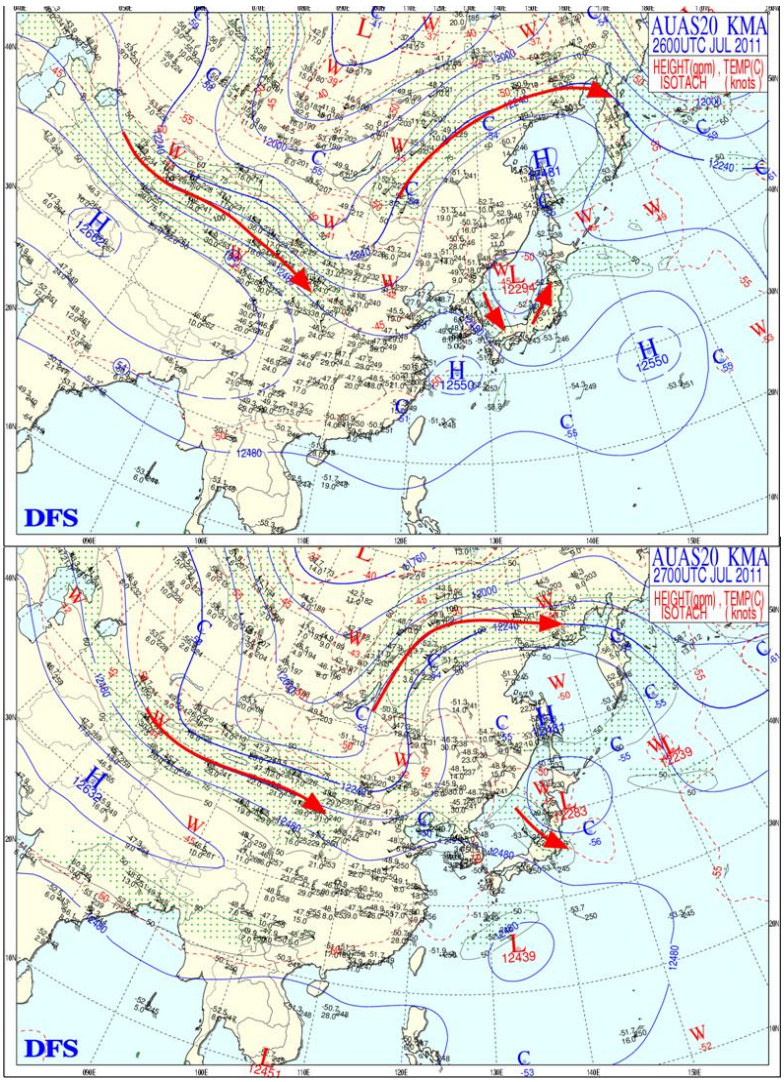
경계지역과 일치하면 수증기 영상에서 중층운 분포 지역의 남쪽의 암역(하강기류) 전면에서 강한 중규모대류계가 발생하게 되는데 이러한 조건에 잘 만족하고 있음을 알 수 있다. 남해안까지 북태평양 고기압이 빠르게 확장하면서 기류가 남풍에서 거의 남서~서풍으로 전환되고 있으며, 고기압 가장자리를 따라 온난 구역이 존재하면서 상대적으로 온난이류가 한반도 남부지방으로 유입되고 있음을 알 수 있다.

지상에서 850hPa 고도까지의 풍향에 비해서 700hPa 고도의 풍향은 서풍에 가깝게 나타나고 있는데, 이는 대기 하층에서 중층까지 전체적으로 바람이 순전(Veering)하고 있음을 의미하며 이러한 형태의 연직시어는 기단 경계를 따라 발생한 중규모대류계의 조직적인 발달과 유지에 크게 도움을 준다.

700hPa 일기도도 925, 850hPa 일기도와 마찬가지로 북태평양 고기압의 확장과 대륙 저기압의 발달에 기인한 강한 남북온도 경도에 따른 전선발생 구역이 한반도 중부지방에 형성되었음을 보여준다.

그림 2.1.8은 26일과 27일 00UTC 500hPa 분석일기도이다.
여름철 북태평양 고기압 가장자리에서 발생하는 불안정과 중규모대류계에 의한 집중호우 예보에 있어서 500hPa 일기도는 북태평양 고기압 주변의 불안정 구역의 위치와 강도를 해석하는데 좋은 정보를 제공한다.

보통 여름철 장마전선은 500hPa 5820gpm 선을 따라 형성되는 하층의 습기 불연속선을 따라 남북으로 진동하면서 오랜 기간 동안 영향을 미친다. 기후학적으로 장마가 종료된 이후 8월말까지 한반도는 북태평양 고기압의 영향권에 들어가면서 5880gpm 선과 5820gpm 선 사이에서 강한 대류불안정이 형성되게 되는데, 고기압의 중심으로 갈수록 강한 하강기류가 존재한다는 점에서 상대적으로 5880gpm 선과 5820gpm 선 사이의 폭이 좁아지면 이는 곧 등온위면의 경사가 급해지면서 상대적인 상승운동으로 인한 대류잠재불안정 구역이 강화되어 강한 중규모대류계의 발생 가능성이 매우 높아짐을 의미하게 된다.



[그림 2.1.8] 26일(상), 27일(하) 00UTC 500hPa 일기도

26일 00UTC에 5820gpm 선이 발해만 부근에 중심을 둔 상층 기압골과 한반도 북동쪽까지 확장된 북태평양 고기압 사이에 형성되어 있다.
그리고 상층 기압골을 따라 온도 골이 형성되어 있고, 한반도 남부지방으로는 온도 능이 형성되어 있으며, 5880gpm 선이 한반도 남해안까지 확대되어 있다. 따라서 강한 불안정 구역은 한반도 상공이 아닌 한반도 북서쪽에 위치하고 있었음을 의미한다.

27일 00UTC 일기도에서는 산둥반도 부근에 형성되었던 기압골이 더욱 발달한 가운데 한반도 북부지방에서 산둥반도 지방으로 5820gmp 선이 가로로 눕는 형태를 보이는 가운데 5880gmp 선은 그 자리에 머물면서 한반도 중부지방을 중심으로 강한 조건부 대류불안정 구역이 형성되고 있다.
그리고 -5℃ 등온선이 한반도 북쪽으로 밀려 올라가고 한반도 서해안 지방에 -3℃의 온난핵이 형성되면서 강한 남북 온도경도가 형성되어 있음을 알 수 있다. 이러한 등고도선 배치와 온도 배치는 중규모대류계의 유지와 발달 예측에 중요한 시그널을 제공한다.
등고도선이 동서로 가로지르면서 좁아지게 되면 이에 따라 상층의 동서기류가 강화되게 되고 강화된 동서기류는 하층에서 수렴된 수증기와 공기가 상층 발산구역으로 전달되는데 중요한 상대와도의 발달과 연결되어 발생한 중규모대류계의 지속적인 발달과 유지에 중요한 역할을 수행하게 된다.

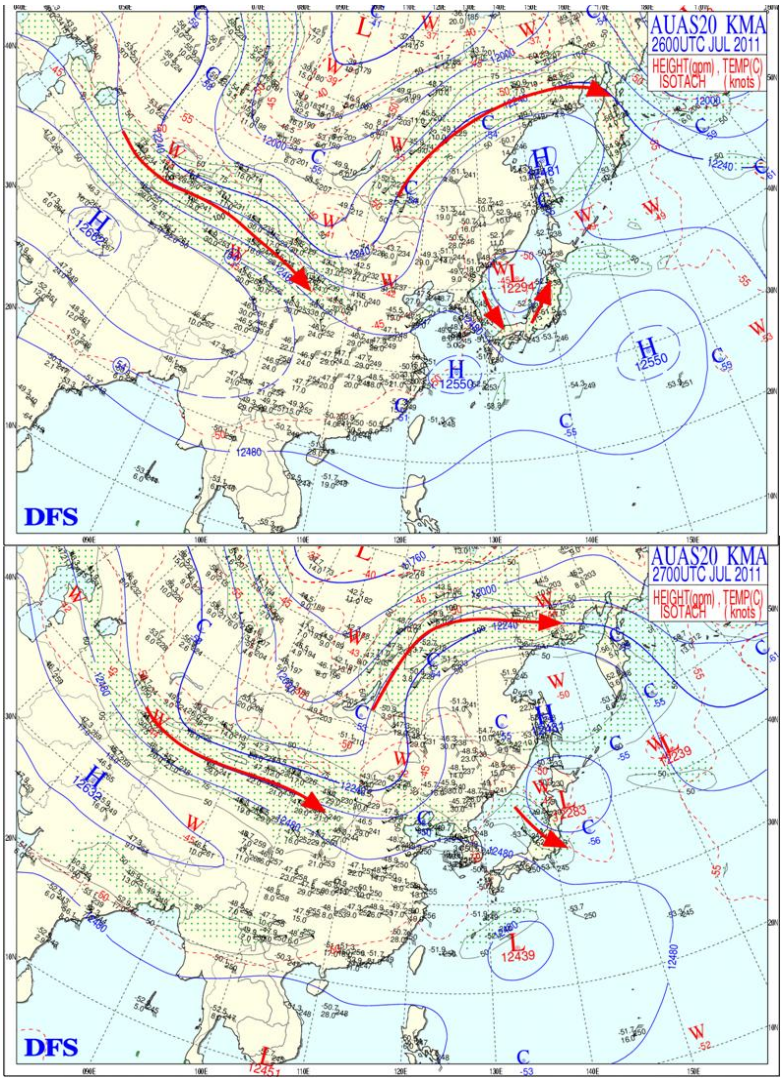
일반적인 저기압의 경우에는 대기 하층에서 대기 상층까지 기압골이 동에서 서쪽으로 기울어져 강한 경압불안정을 동반하면서 발달하는 형태를 보이지만, 대부분의 중규모대류계에 동반된 집중호우는 대기 하층에는 기압골이나 안장부가 형성되지만 대기 중층 이상에서 동서기류는 강하면서 동시에 대류불안정 구역이 좁아지는 형태를 보여준다.

등온선의 변화도 주목해야 한다. 북태평양 고기압의 확장으로 인해 빙결고도(Freezing Level)가 약 500hPa 바로 하부에 형성되어 있음을 알 수 있다. 대기 하층에서 중층까지 상대적으로 따뜻한 공기가 배치된 상태에서는 보통 중규모대류계 내부의 온도가 외부의 온도에 비해서 상대적으로 높은 점을 감안할 때 중규모대류계에 동반되어 내리는 강수 현상이 대부분 충돌·병합에 의해 수적들이 성장하기 때문에 짧은 시간에 많은 강수량을 기록할 수 있는 '따뜻한 비(Warm Rain)' 과정을 통해서 이루어짐에 따라 강수 효율을 증가시키는데 중요한 역할을 수행한다.
결국 500hPa 일기도에서는 중규모대류계의 발생에 필요한 좁은 잠재불안정 구역의 확인과 중규모대류계의 발달과 유지에 필수적인 강한 동서기류의 존재, 높은 강수효율을 가지는 따뜻한 비 과정에 따라 중규모대류계에 의한 집중호우 발생 가능성에 대한 시그널들을 확인할 수 있다.

그림 2.1.9는 26일과 27일 00UTC 200hPa 일기도이다. 여름철에는 대류권계면 고도가 약 15km 고도까지 발달하기 때문에 300hPa 보다는 200hPa 이상 고도의 제트기류 위치와 등풍속선 및 등고도선을 분석하는 것이 예보에 유리하다.

26일 00UTC에서 한반도는 대부분 북태평양 고기압의 가장자리에 들어있다. 북태평양 고기압의 세력이 강하게 확장하면서 제트기류 자체는 북위 50°N 부근까지 북상해서 한반도 부근에서는 강한 곡을 따라 남서기류가 주로 형성되는 조건을 만들고 있다. 따라서 한반도 지역은 약한 남서기류의 영향권에 들어있으며, 동해에 중심을 둔 기압골을 따라 25m/s 이상의 분리된 제트 곡이 형성되어 있다. 따라서 한반도는 제트 후면의 상층 수렴구역에 놓이게 되고, 한반도 북서쪽은 상층 발산구역에 놓이게 된다.

이러한 기압배치에서는 한반도 상공에 강한 대류계가 발생하기 곤란하게 되고 강한 대류활동은 발해만 북서쪽의 상층골 전면에서 발달하게 된다. 한반도가 북서기류의 영향권에 놓여 있음을 알 수 있다.



[그림 2.1.9] 7월 26일(상), 27일(하) 00UTC 200hPa 일기도

이에 반해 27일 00UTC에는 한반도 상층의 기압배치가 크게 변화하게 된다. 먼저 북위 50°N을 지나던 제트기류의 축은 큰 변화가 없지만 제트기류의 곡이 펴지면서 한반도 부근에서는 남서기류에서 북서기류로 바뀌고 풍속도 점차 증가하기 시작한다. 그리고 전일 온난 구역에 속해있던 한반도가 점차 한랭 구역에 접어들게 된다.

상층 골이 한반도로 접근함에 따라 한반도 상공에서 제트기류에 의한 발산역이 형성되기 시작하고 상층 동서기류의 강화에 따라 하층 수렴과 상층 발산이 서로 커플링되기 시작하였다는 것을 의미한다. 비록 일반적인 강한 중위도 기압골에 비해서 경압불안정의 강도는 약하기는 하지만, 하층과 상층의 상호작용에 의해서 중규모대류계가 발생하면 지속적인 발달과 유지에 유리하게 작용하였음을 의미한다.

한반도 주변 하층과 상층 일기도 분석을 통해서 대기 하층에서는 중규모대류계에 의한 집중호우 발생과 유지에 필수적인 수증기와 온난이류 그리고 대류불안정이 크게 발

생할 수 있는 종관적인 강제력이 집중호우 사례 발생 시기에 접근할수록 뚜렷하게 강화되기 시작하였고, 대기 중상층에서는 이러한 하층의 조건들에 의해서 발생한 중규모대류계가 더욱 발달하고 유지하는데 유리한 종관규모 대류잠재 불안정 구역과 상층 발산 구역이 시간이 지남에 따라 점차 좁아지고 강화되는 모습을 발견할 수 있는데 이러한 대기 하층과 상층의 기압 패턴은 장마 이후 북태평양 고기압의 가장자리에서 발생하는 불안정과 중규모대류계에 의한 다른 집중호우 사례들과 많이 닮아있는 모습을 보인다.

4) 단열선도 분석

단열선도는 온도와 습도, 그리고 바람 연직 프로파일을 통해 대기의 3차원적 구조와 대기 불안정 정도 파악에 여러 가지 유용한 정보를 제공한다. 중규모대류계 내부의 강한 대류활동에 의한 높은 강우강도는 풍부한 수증기, 강한 대기불안정, 강한 상승운동, 그리고 강수과정에 의해서 결정된다.

7월 26일 00UTC 오산 단열선도에서는 925hPa 고도에서부터 850hPa 고도까지 그리고 700hPa고도에서 600hPa 고도까지 약한 습윤층이 존재하지만 지표면 부근의 상대습도가 73% 이고, 대기 하층에서 대기 중층까지의 평균 습도는 70% 내외로 습도가 높은 수준이기는 하지만 강한 대류활동에 필요한 충분한 수증기는 존재하지 않는 것을 알 수 있다. 그런데 가강수량은 52.3mm로 매우 높은 수준이었으므로 만약 다른 조건에 의해서 강한 상승운동과 수증기가 지속적으로 공급되는 조건이 만들어진다면 강한 집중호우를 만들어 낼 수 있는 상태로 발달할 수 있었음은 보여 주고 있다.
다른 불안정 지수들을 보면 SSI 지수 0.4, LI 지수 -0.6, KI 지수 36 등으로 분포를 보여주고 있다. SSI 지수 0.4는 독립적인 단일 뇌우 발달 가능성이 높았음을 보여준다.

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 음의 값 -0.6을 가졌다는 것은 약한 불안정 수준이었음을 알 수 있다.

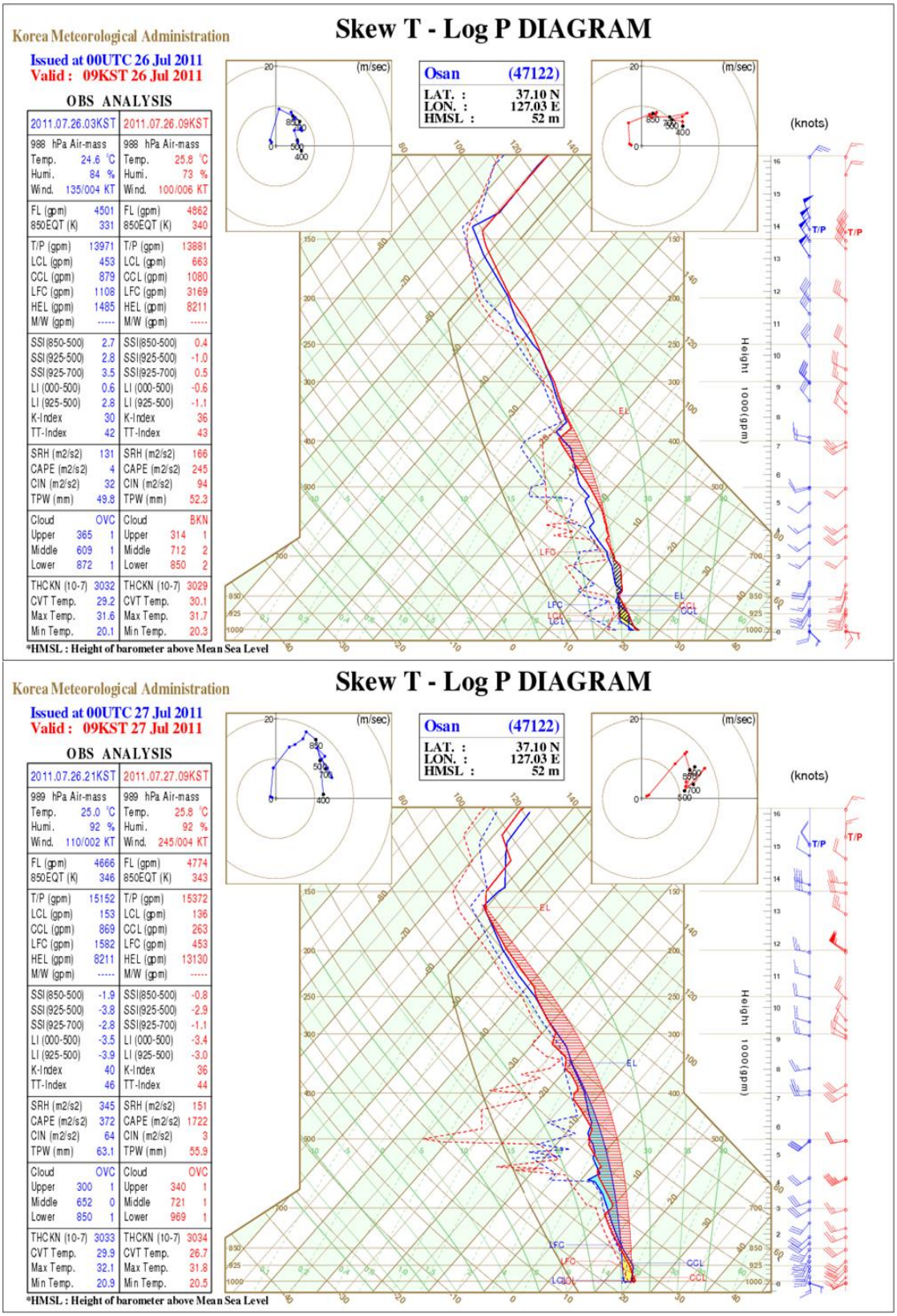
KI 값은 대기 하층과 중층의 온도와 노점 온도들을 활용하기 때문에 단순한 온도 프로파일 뿐만 아니라 수증기의 존재에 따라 값의 변화가 크게 나타날 수 있다. 보통의 경우 20 이상의 값을 가지면 독립적인 뇌우 발생 가능성이 높고, 40 이상의 값이면 뇌우 발생 가능성이 100%에 도달하며, 보통 중규모대류계의 지속적인 발생과 유지를 위해서는 30 이상의 값이 필요한 것으로 알려져 있다.
세 가지 전통적인 불안정 지수들은 약한 혹은 중정도의 단일 뇌우 발생 가능성을 보여주고 있다.
그렇지만 북태평양 고기압 주변의 불안정과 중규모대류계에 의한 집중호우 발생 가능성을 예측하는데 중요한 정보를 제공하는 대류가용잠재불안정(CAPE)은 245로 강한 열적 불안정과 하층 수렴에 의한 강제 상승이 존재하지 않으면 강한 대류활동 발생 가능성이 낮은 것으로 분석되었고, 자유대류고도(LFC)의 높이도 3169gpm에 달해 종관규모의 강한 경압불안정이나 전선과 같은 강제 상승 조건이 만들어지지 않으면 강한 대류활동이 만들어지지 못할 것이라는 것을 잘 보여주고 있다.

바람의 연직분포도 대기 하층에서 상층까지 순전되는 대류활동 발생에 유리한 연직 바람시어 형태를 보여주고 있지만 풍속의 변화가 거의 없고, 대기 중층에 해당하는 500hPa 고도까지 남서기류가 강하고 이 남서기류가 400hPa 고도까지 유지됨에 따라 발생한 대류의 연직 성장을 위한 대기 중층의 Dry Slot이 유입되지 않는 조건으로 이 또한 강한 대류 활동을 뒷받침하기에 충분하지 못한 상태를 보여주고 있었다.

27일 00UTC 오산 단열선도는 24시간 전과 전혀 다른 모습을 가지고 있다. 먼저 지표면에서 700hPa까지 대기는 거의 포화되어 있었으며 평균 상대습도가 90%를 넘어서고 있고, 가강수량이 55.9mm까지 증가하여 대기 하층으로 충분한 수증기가 공급되고 있었음을 알 수 있다.
또한 SSI 지수 0.8, LI -3.4, KI 36으로 강한 대류활동 발생에 충분한 수준으로 증가하고 있었다. 특히 북태평양 고기압 주변의 불안정에 의한 중규모대류계의 강한 발달과 관련성이 매우 높은 불안정지수인 CAPE의 값이 1722J/kg 급격하게 증가해 있다.
1000J/kg 이상이면 중규모대류계 발달이 활발해지고, 1500J/kg 이상이면 매우 강한 중규모대류계의 발달과 유지가 이루어진다는 점에서 볼 때 한반도 상공에는 이미 강한 대류불안정이 형성되어 있었음을 알 수 있다. 또한 LFC 고도가 453gpm까지 낮아져 있는 것을 알 수 있는데, 이는 한번 발생한 대류성 스톰들이 내부의 에너지에 의해서도 충분히 발달할 수 있는 조건이었음을 알 수 있다. 그리고 대기 중층의 건조 구역의 유입도 뚜렷하게 나타나고 있어 강력한 대류활동에 적합한 형태를 보여주고 있다.

바람 연직분포를 보면 대기 하층에서의 풍속이 강해져서 강한 하층제트에 의해서 남서쪽으로부터 지속적인 수증기가 한반도 중부지방으로 유입되고 있음을 잘 보여주고 있다. 강한 상승운동의 상단을 보여주는 평형 고도(Equilibrium Level)가 약 13km 고도에서 나타나는데 이는 대류권계면 고도까지 강하게 대류 활동이 발달할 수 있었음을 의미한다.

구름운정고도 위성영상을 보면 구름이 대류권계면을 넘어 16km 이상까지 발달하고 있었음을 보여주는데, 이는 지상에서 대류권계면까지 강한 상승운동이 존재할 수 있다는 단열선도의 정보와 잘 일치한다. 레이더 분석에서 스톰들의 연직적인 구조가 잘 보여 질 것으로 예상되는데, 수평영상인 레이더 기본영상과 합성영상 모두에서 시간당 60~80mm 이상의 강수를 가진 에코들이 관측된 것으로 보아 대류성 스톰들의 질량 중심이 대류권 하부에 있는 이른바 저중심 대류성 스톰이었을 가능성이 매우 높고, 이에 따라 대부분의 강수가 따뜻한-비 과정을 통해서 발생하면서 강수 강도를 더욱 키운 것을 알 수 있는데, 이는 Freezing Level 고도인 4.8km 이하에서 거의 포화되어 있고, 대기 중층에 건조층이 존재하는 가운데 그 상부에 얼음으로 이루어진 중상층운이 존재해서 Feed-seed 작용에 의한 강우 효율 증대가 기대되는 형태로 시간당 100mm에 육박하는 강수량이 발생할 수 있는 대기 구조가 형성되어 있었음을 의미한다.



[그림 2.1.10] 7월 26일(상), 27일(하) 00UTC 오산 단열선도

2.2. 위성 분석

2.2.1. 개요

한반도를 포함한 광역에 대해 동일 센서로 수분이내의 관측이 가능한 천리안과 같은 정지궤도기상위성의 최대 장점은 중규모 대류계와 같이 짧은 시간 내에 국지적인 규모로 발달하는 악기상을 실시간으로 감시하고 나아가 초단기 예측의 기본 자료를 제공할 수 있다는 점이다. 천리안과 같은 대부분의 정지궤도 기상위성에는 가시, 적외 1, 2, 수증기 그리고 단파적외 채널 센서가 탑재되어 있다.

현재 가장 앞서가는 유럽의 MSG/MTG(Meteosat Second/Third Generation)에는 12채널의 SEVIR[1]가 탑재되어 있으며(oiswww.eumetsat.org/.../msg.../msg_channels.php), 미국 (GOES-R)과 일본 그리고 우리나라 정지궤도 기상위성 2호에는 16개 채널을 갖는 AMI[2]가 탑재될 예정이다. 미국이나 유럽 등 위성 및 초단기예보분야 선진국에서는 정지궤도 위성들이 갖는 이러한 장점과 레이더 그리고 수치모델 자료들을 통합적으로 이용하여 강우강도 추정에서부터 1~3시간의 초단기예측을 위한 다양한 시스템들을 개발하여 현업 운용중이다(Vincente et al., 1988; Roberts and Rutledge, 2003; Koenig and de Coning, 2008; Roebeling et al., 2009; Sieglaff et al., 2011).

정지궤도위성자료로부터 강수 추정은 대부분 적외영상의 휘도온도 자료를 이용하며, 대류시스템 탐지 또한 적외채널 휘도온도의 시공간적 변화율을 이용한다(Vincente et al., 1988; Suh et al., 2004; Sieglaff et al., 2011; Estelle De Coning, 2013). 그 결과 두꺼운 권운이나 고층운 그리고 강한 대류계가 발달함에 따라 대류권계면 고도에서 편서풍의 영향으로 풍하쪽에 광범위하게 분포하는 모루운 등과 같이 휘도온도가 낮으면서도 강수를 유발하지 않거나 강수를 유발하여도 약한 강수를 유발하는 경우에는 강수 추정 및 대류 탐지 수준이 낮게 된다. 또한 위성자료만을 이용할 경우 대부분의 경우 대류탐지 선행시간이 1시간 이내로 짧은 것으로 알려지고 있다 (예: Sieglaff et al., 2011). 특히, 상층에 권운이 있거나 대류 시스템이 연속적으로 발생할 경우 탐지수준이 더욱 낮은 것으로 알려지고 있다. 최근에는 구름이 없는 환경에서도 상층 수증기 분포에서부터 중-상층 대기의 3차원 구조와 흐름에 대한 정보를 제공해주는 수증기 채널을 이용하여 암역, 상층제트, 잠재와도편차(Potential Vorticity Anomaly 또는 Dynamic Tropopause Anomaly), 경계(Boundary) 등을 분석하고 이로부터 전선 등 다양한 종관 및 중규모 현상들의 발생 및 발달에 대한 정보를 취득한다 (국가기상위성센터, 2011; Brunner et al., 2007; Sieglaff et al., 2011; Cintineo et al., 2013; http://rammb.cira.colostate.edu/training/visit/training_sessions/water_vapor_imagery_analysis_for_severe_weather/). 여기서는 천리안과 일본의 MTSAT-1R 자료를 이용하여 우면산 및 부산 지역에 집중호우를 유발시켰던 중규모 대류계의 특성과 강원도 동해안 지역에 대설을 유발시켰던 하층운의 특성을 분석한다.

국가기상위성센터에서는 천리안 외에도 일본의 MTSAT-2, 중국의 FY-2D 그리고 Terra/Aqua 등 정지 및 극궤도 위성자료를 수신하여 기본적인 영상자료 외에도 해수면온도, 바람장, 운량, 운정온도, 운형, 운상, 가강수량, 안개, 황사, 태풍 중심 등 다양한 산출물 자료를 제공하고 있다. 국가기상위성센터에서 제공하는 자료들을 최대한 많이 이용하여 기상현상을 분석하는 것이 필요하지만 여기서는 중규모 대류계 현상의 분석과 예보에 중요한 것으로 판단되는 적외영상, 적외강조영상, 수증기 그리고 합성영상을 중심으로 설명한다.

[1] Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager

[2] Advanced Meteorological Imager

2.2.2. 집중호우 기간 동아시아 영역 위성영상의 특성

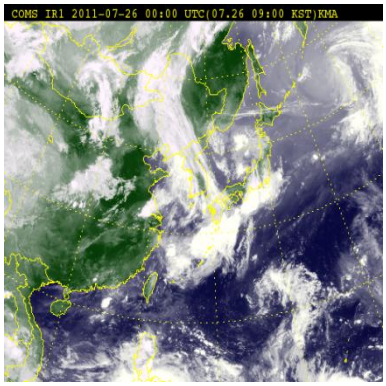
서울, 경기, 영서 등 중부지역에 기록적인 폭우를 내렸던 2011년 7월 26~28일 사례는 시간 최대 100mm 이상의 강도를 기록하였을 뿐만 아니라 72시간 누적 700mm 이상을 기록한 사례이다.

본 집중호우 기간 위성영상의 특성을 분석하기 위해 대류세포 발생 시간인 2011년 7월 26일 09:00KST부터 집중호우가 발생 하였던 7월 27일 09:00KST까지 12시간 간격으로 동아시아 지역에서 천리안의 적외영상과 수증기영상을 분석하였다.

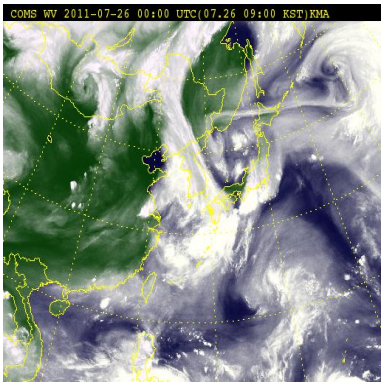
그림 2.2.1의 적외영상에서는 한반도에 남북 방향으로 구름이 광범위하게 분포하고 있으며, 수증기영상에서는 발해만에 암역이 강하게 발달하였고, 우리나라 중부지방 상층에는 수증기가 광범위하게 존재함을 보이고 있다. 12시간 후에는 남북방향의 구름대가 동쪽으로 이동하고, 발해만에 위치했던 암역도 서해상으로 확장되고 있다.

집중호우가 발생한 시각인 그림 2.2.1(a.3)에서는 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 동서 방향으로 구름대가 발달된 것으로 보인다. 특히 북한 지역은 구름도 없고 상층에 수증기도 많지 않은 상태이나 우리나라 중부지역에는 강하게 발달한 구름들이 보이고 있다. 상해-우리나라 중부-일본열도에 걸쳐있는 장마전선을 제외한 중국 중부지역, 동중국해, 만주 그리고 서태평양 등 전체적으로 하강운동이 광범위하게 발생하고 있어 장마전선의 활성화에 유리한 환경을 조성하고 있다.

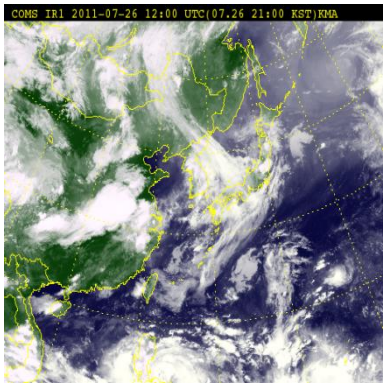
(a.1) IR1-26.0900KST



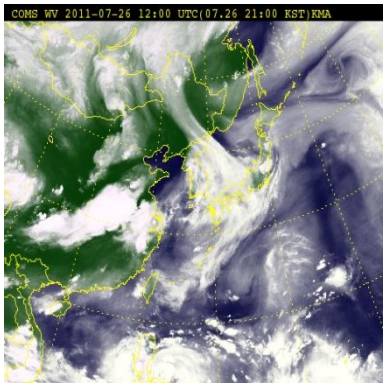
(b.1) WV-26.0900KST



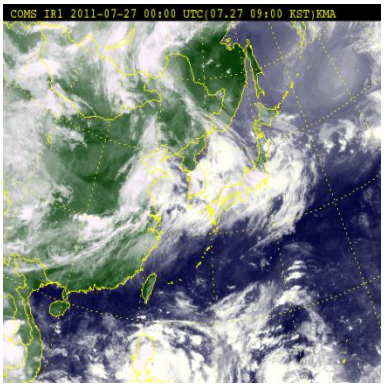
(a.2) IR1-26.2100KST



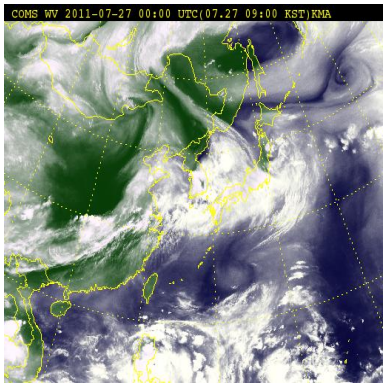
(b.2) WV-26.2100KST



(a.3) IR1-27.0900KST



(b.3) WV-27.0900KST

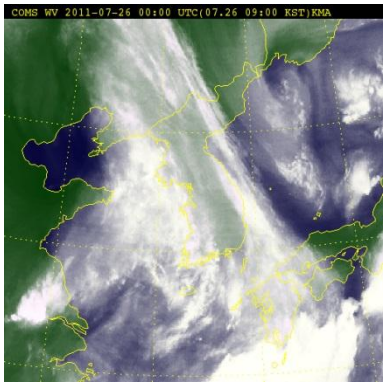


[그림 2.2.1] 집중호우 기간 동아시아 영역의 (a)적외영상과 (b)수증기영상

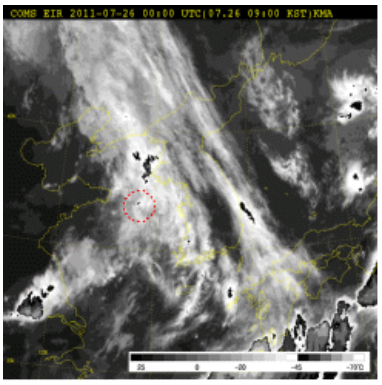
2.2.3. 대류세포 발생 시 한반도 영역 위성영상의 특성

대류세포 발생 시 위성영상의 특성을 분석하기 위해 대류세포의 발생 시간인 2011년 7월 26일 09:00KST부터 11:00KST까지 1시간 간격으로 한반도 지역의 적외강조영상과 수증기영상을 분석하였다.

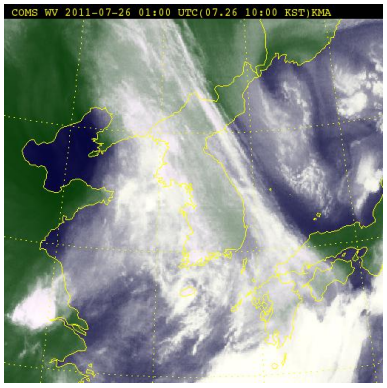
(a.1) WV-26.0900KST



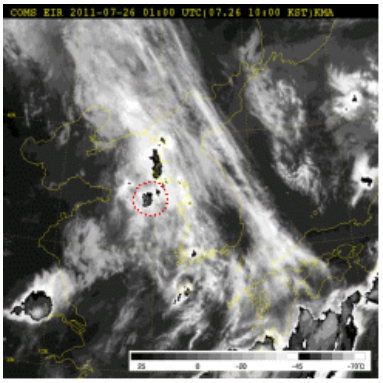
(b.1) EIR-26.0900KST



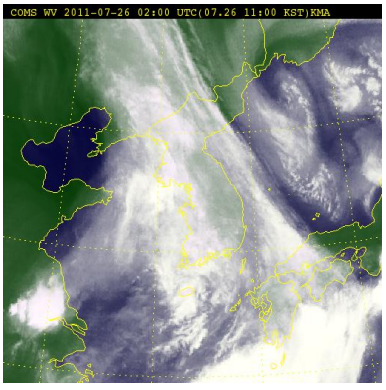
(a.2) WV-26.1000KST



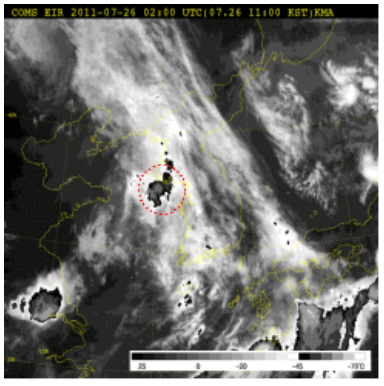
(b.2) EIR-26.1000KST



(a.3) WV-26.1100KST



(b.3) EIR-26.1100KST



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

그림 2.2.2의 적외강조영상과 수증기영상에서 한반도 내륙과 서해상에 상층운과 하층운이 광범위하게 분포한 것을 볼 수 있으며, 산둥반도와 경기만 사이의 서해상에서 대류세포가 처음 발생하였다. 그림 2.2.2(a)에서 산둥반도와 발해만 지역에 상층 기압골에 의한 암역을 볼 수 있으며, 암역이 동진함에 따라 암역의 전방인 명역에서 대류세포가 발생하였다. 적외강조영상에서 경상도 지역이 맑은 것으로 나타나며, 수증기영상에서는 약하지만 상층에 암역이 나타나고 있는데 이 또한 수증기가 서울, 경기 지역으로 집중 이류되는데 기여한 것으로 판단된다. 또한 한반도 서부 상층에 수증기가 많이 분포하고 있고 동해안에도 남북방향으로 하강운동(암역)이 존재하여 시스템의 이동을 지연시키고 있어 한반도 내륙지역의 대류계 발달에 유리한 환경이 조성되어 있음을 볼 수 있다.

그림. 2.2.2(b)에서 발생한 대류세포는 시간이 지남에 따라 점점 발달하였으며, 그림. 2.2.2(b.3)에서 북쪽의 대류 세포와 병합하면서 한반도 내륙에 상륙하였다.

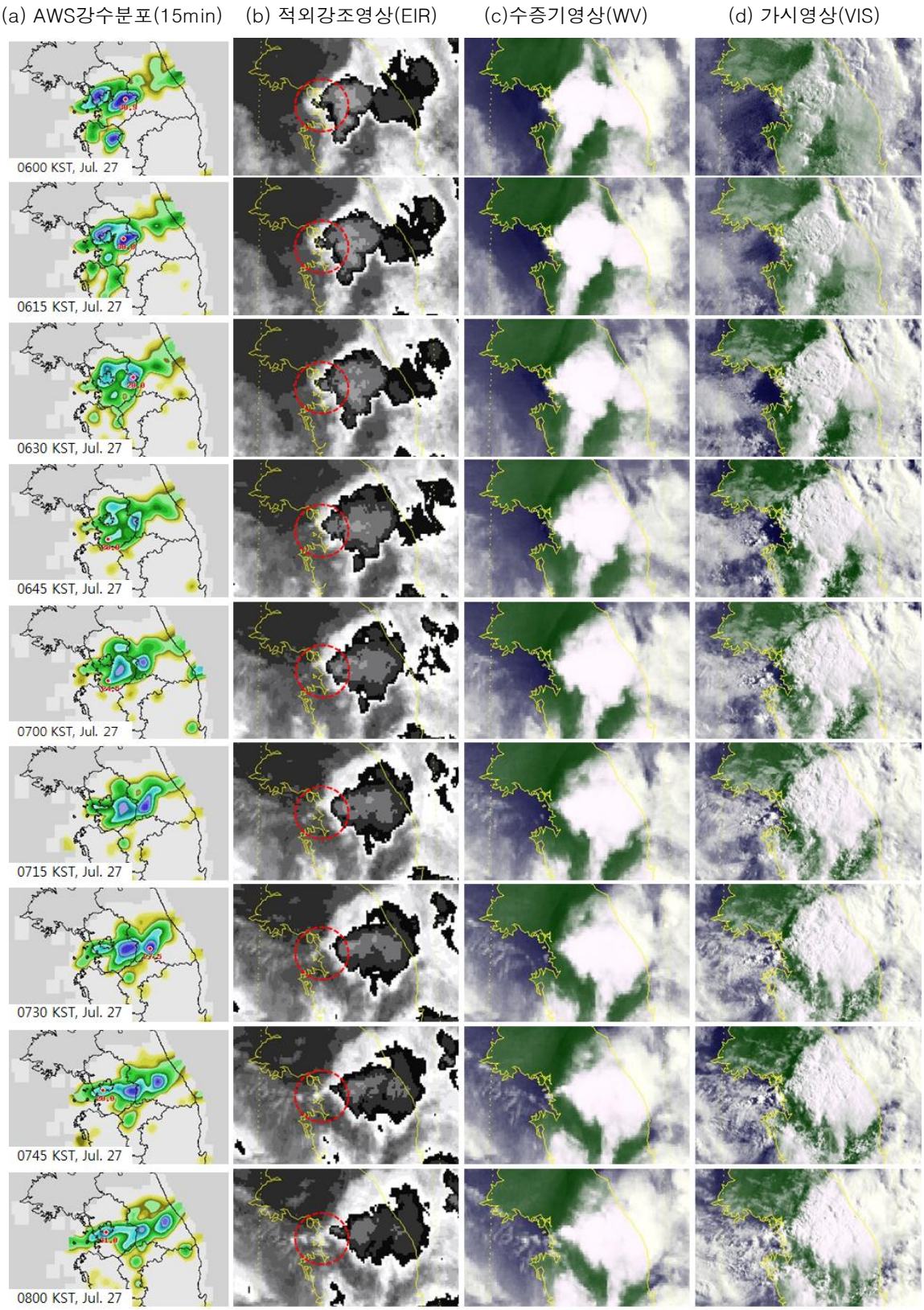
2.2.4. 집중호우 시 위성영상의 특성

그림 2.2.3의 적외강조영상에서 서울, 경기, 충청 등에서 동시에 발생하였던 덩어리 형태의 대류세포들이 시간이 지남에 따라 병합되면서 급격히 발달하고 있음을 볼 수 있다. 이 과정에서 강하게 발달하는 중규모 대류계의 대표 형태인 “Enhanced-V” 형태의 강한 대류가 서울-경기를 중심으로 발달하는 것을 볼 수 있다.

대류세포들이 이러한 진화과정을 거치는 동안 강수의 중심 영역도 서울, 경기 충청 등 내륙 중서부 지역에서 점진적으로 서울-경기지역에 동서로 발달하면서 강수의 중심도 동쪽으로 이동되고 있다. 수증기영상에서는 북서쪽에서 접근하는 강한 암역 전방에서 다수의 대류세포가 발생한 후 병합되면서 더욱 강하게 발달하는 것을 볼 수 있다.

수증기영상에서 특이한 점은 중규모 대류계 주위에 강하게 발달하고 있는 암역으로 대류계 주변에서의 하강운동 또는 건조공기의 유입이 다른 곳에서의 새로운 대류세포의 발달을 억제함과 동시에 현재 발달하고 있는 대류계의 급격한 발달에 유리한 환경을 이루고 있는 점이다. 또한 가시영상에서는 구름의 요철이 뚜렷하게 보이며, 경기만에서 발생한 대류세포들이 내륙으로 상륙해 전방의 대류세포와 병합하면서 Back-building 형태로 지속적인 발생을 보인다.

본 보고서의 특성상 영상동화를 나타낼 수 없지만 중요한 것은 적외강조 및 수증기 영상의 동화를 통해 중규모대류계의 이동과 발달 유무, 그리고 암역의 존재, 암화유무 등을 종합적으로 판단하면 짧은 시간(1~2시간) 후의 집중호우 지역을 추정할 수 있을 것으로 보인다. 특히 본 사례는 강하게 발달한 암역이 남동진할 때 암역의 전방에서 발생하였던 대류세포가 전방의 대류세포에 접근하면서 강화되는 암역의 에워싸임에 따라 더욱 강하게 발달된 것으로 판단된다.

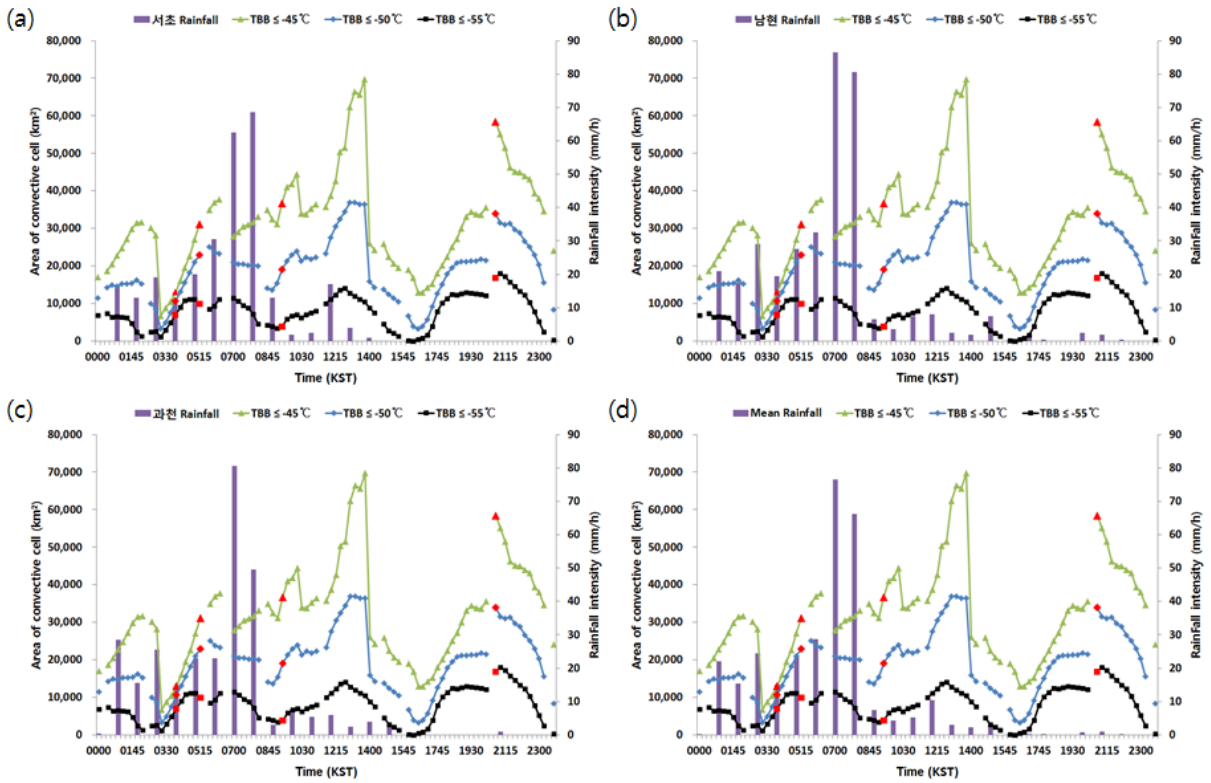


[그림 2.2.3] 집중호우 시 한반도 영역의 (a)AWS 강수분포(15min), (b)적외강조영상(EIR), (c)수증기영상(WV), (d)가시영상(VIS)

그림 2.2.4는 2011년 7월 27일 우면산 지역 인근의 AWS 3지점(서초, 남현, 과천)에서의 강우강도와 3개의 임계치 온도에 근거한 대류세포 면적의 시계열을 나타낸 것이다.

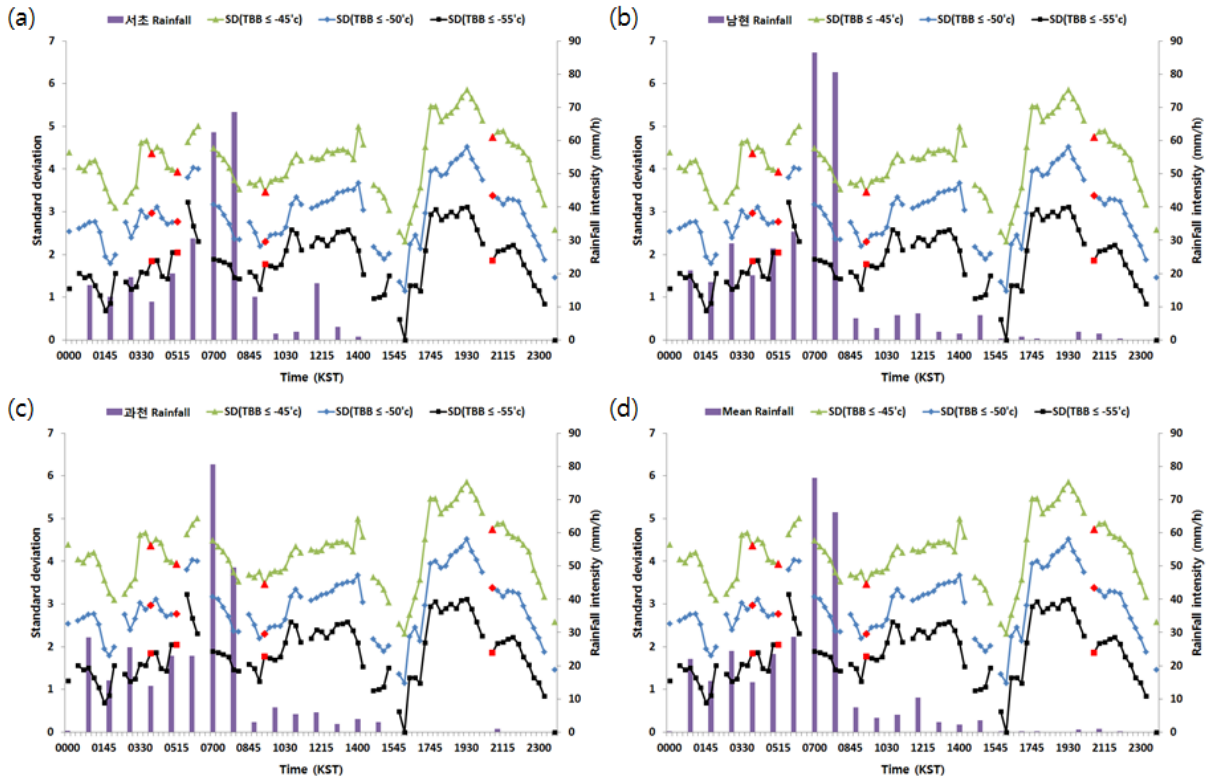
위성영상의 시간적 분석결과 27일 대류세포의 병합은 4회 발생하였으며, 대류세포의 소멸시기인 21:45KST에 발생한 마지막 병합을 제외하면 병합 시 임계온도에 관계없이 대류세포의 면적이 증가되는 것으로 나타났다. 이는 대류세포가 병합될 때 대류강도가 강해질 수 있음을 나타낸다. 또한 대류세포의 면적이 증가될 때 강우강도도 증가되는 유사한 시간변동 패턴을 보였으며, 대류세포 면적의 시간변화가 강우강도의 시간변화보다 약 30분 정도 선행하는 것으로 나타나 대류세포의 면적 변화를 통해 강우강도의 시간변화를 예측할 수 있음을 보이고 있다.

집중호우가 발생하기 전 시간인 03:30KST에 세 임계치(-45℃, -50℃, -55℃)에서 대류세포 면적이 모두 급격히 증가되다가 -55℃ 이하의 대류세포 면적 증가가 멈춘 후 순차적으로 -50(-45)℃ 이하의 대류세포 면적 증가도 둔해지고 있다. 하지만 강우강도는 -45℃ 이하의 대류세포 면적 증가가 멈춘 후 급격히 강해지고 있어 흥미롭다. 또한 08:00KST 이후 우면산 지역에서는 강우강도가 현저히 약해진 반면 대류세포의 면적은 2번의 큰 증가와 감소를 보인다. 이는 본 연구에서 대류세포의 면적을 한반도 전체로 계산한 것과 관련이 있는 것으로 보이며, 대류세포의 면적이 증가할 때 강우강도가 강하게 나타날 수 있지만 적외영상의 특성상 항상 그렇지는 않음에 따라 대류세포의 면적만으로 특정지역의 집중호우를 예측하는 것에는 한계가 있음을 제시한다.



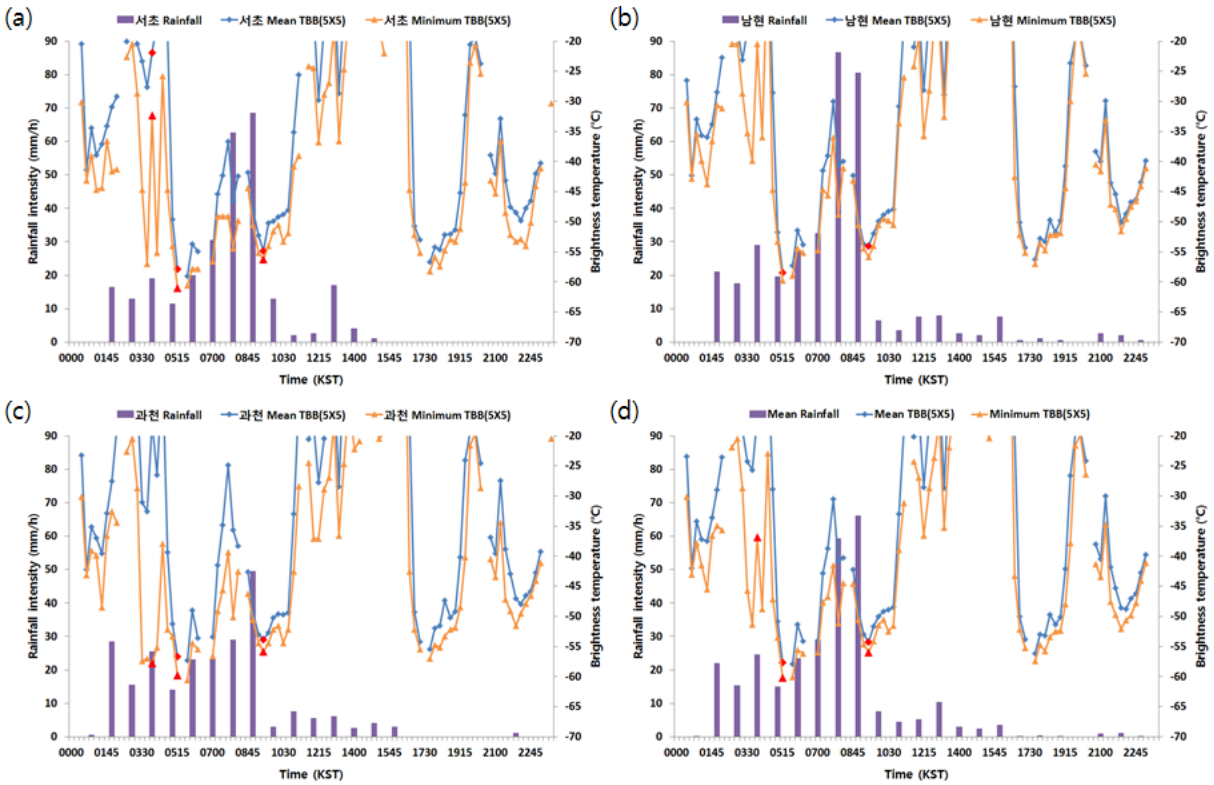
[그림 2.2.4] 2011년 7월 27일 대류세포의 면적과 우면산 지역의 강우강도 시계열 (a)서초 AWS, (b)남현 AWS, (c)과천 AWS, (d)3지역(서초, 남현, 과천)의 평균

그림 2.2.5는 그림 2.2.4와 동일한 지점들에서 대류세포의 휘도온도 표준편차와 AWS 강우강도의 시계열을 나타낸 것이다. 휘도온도의 표준편차의 크기는 대류강도의 공간변화를 의미할 수 있는데 표준편차의 크기는 지리적 위치 및 시간에 관계없이 임계온도가 높을수록 크게 나타나고 있다. 하지만 대류세포의 휘도온도 표준편차와 강우강도는 특별한 관계를 보이지 못하고 있는데 이는 적외채널의 화소 크기가 4km인 것과도 관계가 있는 것으로 보인다.



[그림 2.2.5] 2011년 7월 27일 대류세포의 휘도온도 표준편차와 우면산 지역의 강우강도 시계열
(a)서초 AWS, (b)남현 AWS, (c)과천 AWS 강우강도, (d)3지역(서초, 남현, 과천)의 평균

그림 2.2.6은 그림 2.2.4와 동일한 AWS 지점들에서 5x5 화소들의 평균 및 최소 휘도온도와 강우강도의 시계열을 나타낸 것이다. 강우초기에는 운정온도가 약 -35℃ 로 높을 뿐만 아니라 5x5 화소들의 평균과 최소 휘도온도 사이에 큰 차이가 발생하고 있다. 하지만 강우강도가 급격히 강해지기 약 1시간 전부터는 운정온도가 -55℃ 이하로 급격히 낮아지면서 평균과 최소 휘도온도가 유사해지고 있다. 하지만 강우강도가 최대인 시점에서는 다시 대류세포의 휘도온도가 높아짐과 동시에 최소와 평균 휘도온도 차가 커지고 있다. 강우강도가 시간당 50mm 이상으로 강함에도 불구하고 이처럼 운정온도가 낮지 않은 것은 일반적으로 집중호우나 우박 등 위험기상을 유발하는 강력한 중규모 대류계에서는 대류가 연직으로 발생하지 않는 점과 Sohn et al.(2013)에서 밝힌 바와 같이 우리나라에서 집중호우 발생 시 대류권계면 이상으로 발달하는 강한 대류보다는 하층에서의 강한 수증기 이류가 중요한 것도 하나의 이유가 될 것이다.



[그림 2.2.6] 2011년 7월 27일 우면산 지역의 휘도온도와 강우강도 시계열 (a)서초 AWS, (b)남현 AWS, (c)과천 AWS, (d)3지역(서초, 남현, 과천)의 평균

2.2.4. 요약

위성의 적외영상은 구름의 유형, 운정온도와 대류핵의 모양, 대류 시스템의 이동속도 및 방향에 대한 정보, 수증기영상은 암역과 명역의 위치, 두 역사이의 경계의 이동 및 강화여부, 상층기압골의 위치 및 중·상층 대기의 흐름, 적외강조영상은 대류세포의 중심, 형태, 위치와 강도에 대한 정보를 제공할 수 있다. 또한 가시영상은 주로 하층운, 안개, 구름의 두께, 층운과 대류운의 구분, 구름의 요철 등을 통한 대류 시스템의 주변 환경 및 발달정도 등에 대한 정보를 제공한다. 이러한 정보를 바탕으로 우면산 지역 집중호우 사례에 대한 위성영상 자료의 특성에 대해 분석하였다. 위험기상 사례에 대한 위성영상 분석의 목적은 1) 적어도 30분 ~ 1시간 전에 이러한 위험기상의 발생(종료) 징후를 사전에 탐지할 수 있는지, 2) 발생된 위험기상의 지속성 여부, 이동성 및 발달여부에 대한 근거를 제시할 수 있는가 등이다.

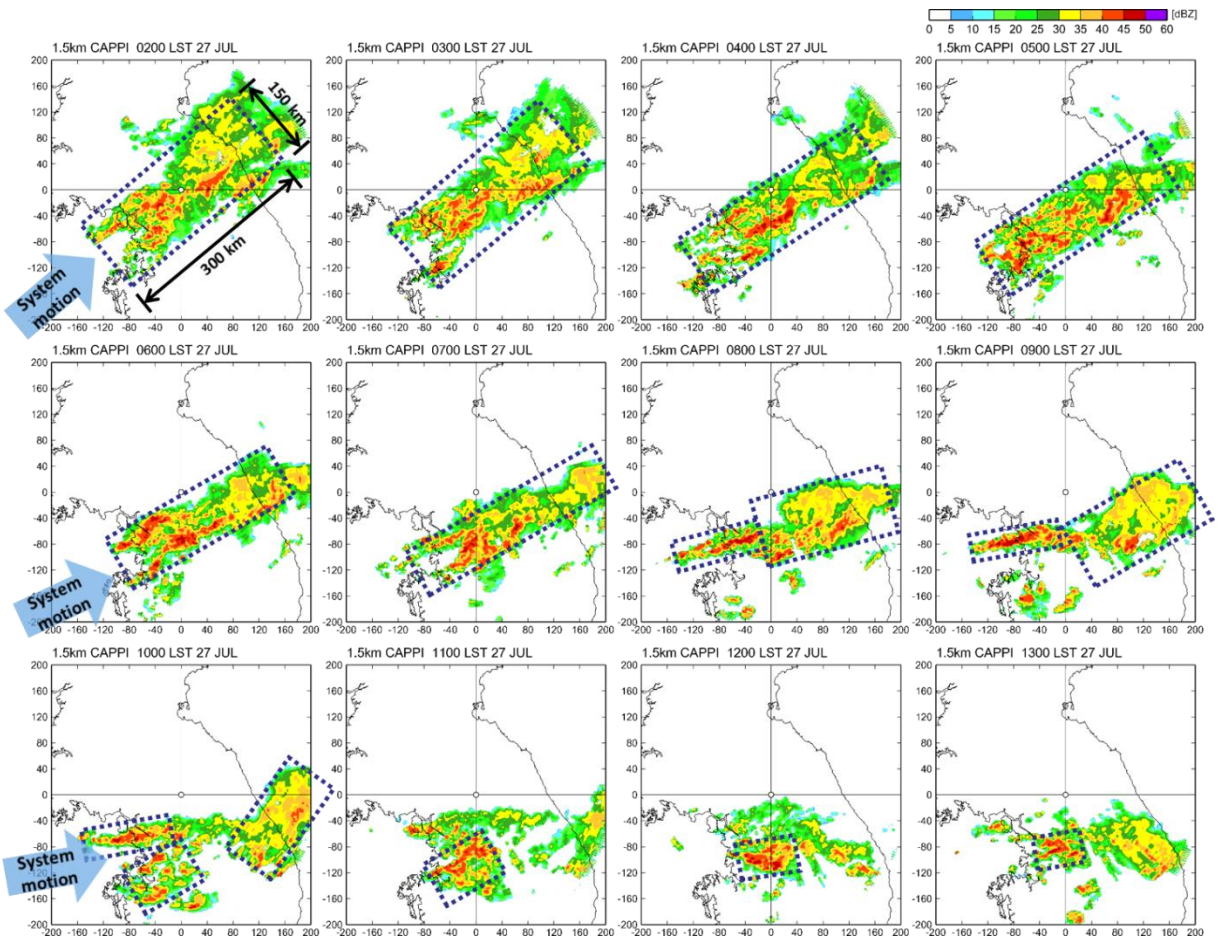
2011년 7월 27일 사례의 특징은 적외영상에서 한반도 남북 방향으로 구름이 광범위하게 분포하고 있으며, 집중호우가 발생한 시각에는 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 동서 방향으로 구름대가 발달한 것을 볼 수 있었다. 또한 수증기영상에서는 우리나라 북쪽과 남쪽에 광범위한 암역이 존재하여 우리나라 중부지방을 중심으로 동서방향으로 강한 대류계가 발달할 수 있는 환경이 조성되었음을 볼 수 있다. 특히, 집중호우가 발생한 시점에서의 수증기영상에서는 남동방향으로 이동하면서 강화되던 암역이 중규모 대류계 주위를 에워쌈에 따라 암역에서의 하강운동 또는 건조공기의 유입이 다른 곳에서의 새로운 대류세포의 발달을 억제함과 동시에 현재 발달하고 있는 대류계의 급격한 발달에 유리한 환경을 조성한 점이다. 또한 대류세포가 병합되면서 대류세포의 면적이 급격히 증가될 때 강우강도도 증가되고 있으며, 대류세포 면적의 시간변화가 강우강도의 시간변화보다 약 30분 정도 선행하는 것으로 나타나 대류세포의 면적 변화를 통해 강우강도의 시간변화를 추정할 수 있음을 제시하고 있다.

2.3. 레이더 분석

2.3.1. 레이더 수평반사도

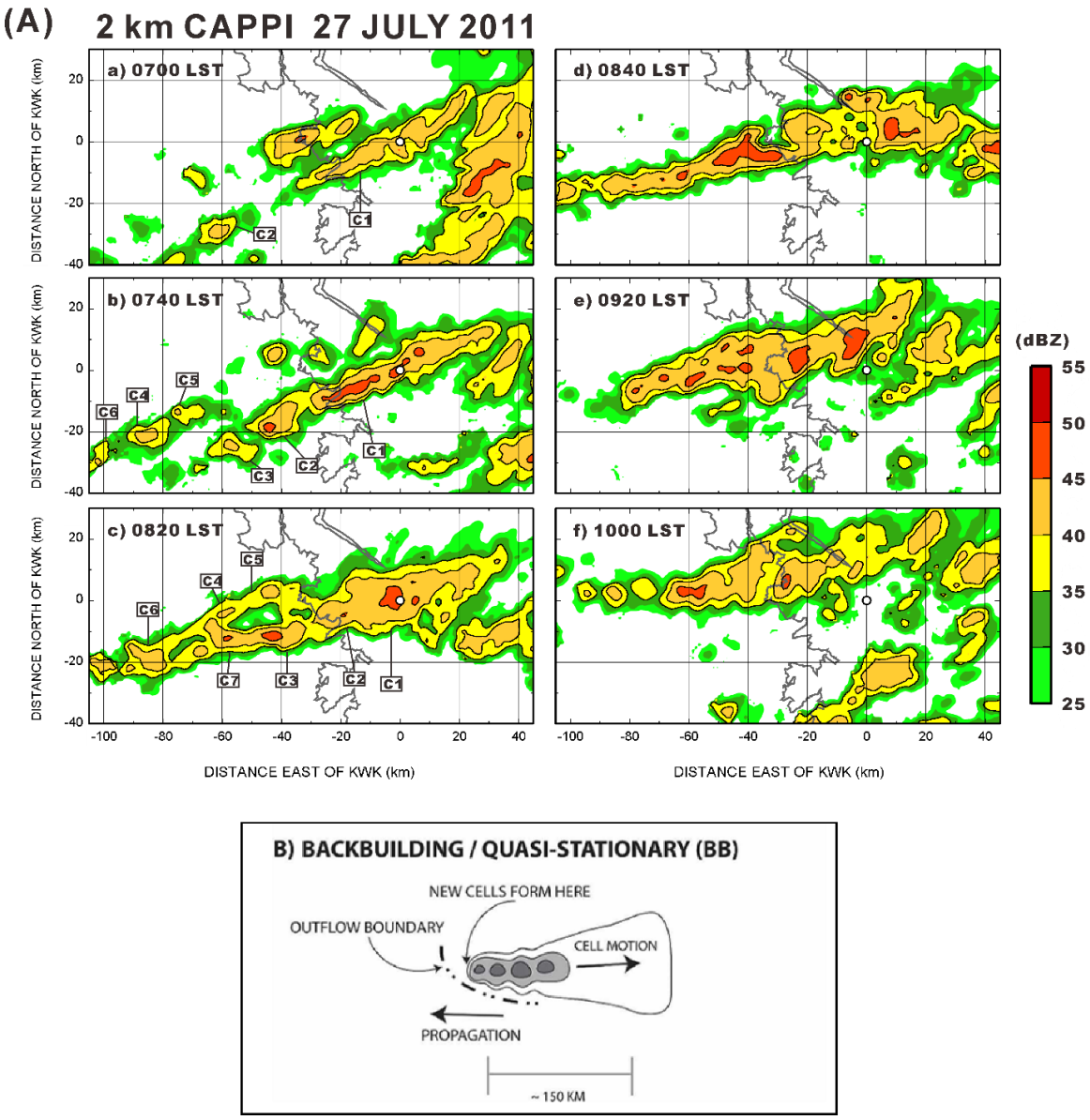
그림 2.3.1은 2011년 7월 27일 0200KST에서 1300KST까지 1.5km CAPPI영상을 나타낸 것으로 한반도 중부지방 일대에 강수시스템이 지속적으로 발달하여 머무르고 있는 것을 확인할 수 있다. 이날 지속적으로 발생된 강수시스템은 대부분 경기만 일대에 발생하여 북동쪽이나 동쪽으로 이동하였다.

그림 2.3.1 에서 와 같이 0200KST부터 0500KST까지 대부분의 시스템은 북동쪽으로 두껍게 늘어진 밴드 형태를 보였으나, 0600KST부터 시스템 밴드의 방향은 동북동으로 변하였고, 1000KST 이후 동쪽으로 늘어진 형태를 보였다. 특히, 0200KST 에 두껍게 늘어진 밴드형태(길이: 약 300km 이상, 폭: 약 130km) 의 강수시스템은 0700KST에 얇게 늘어진 형태로 변하였으며, 0800KST에는 시스템의 서쪽 끝 모서리 부분이 더욱 얇아지는 형태를 보였다. 0700-1000KST에 유지되었던 서쪽 끝 모서리 부분 meso-β 규모의 밴드형태 강수시스템은 서울 인근지역에 3시간 동안(0700-1000KST) 173mm 이상의 강한 강수를 기록하였다. 0800KST의 동쪽 시스템의 경우 상대적으로 넓은 지역에 구름이 분포 하였으나 서쪽보다는 약한 반사도 영역을 나타내었다. 1100KST 이후 밴드형태의 강수시스템은 나타나지 않지만, 한반도 중앙 지역에 지속적으로 meso-β 규모의 MCSs가 발생하였다.



[그림 2.3.1] 2011년 7월 27일 0200-1300KST 1시간 간격 1.5km 수평반사도 CAPPI

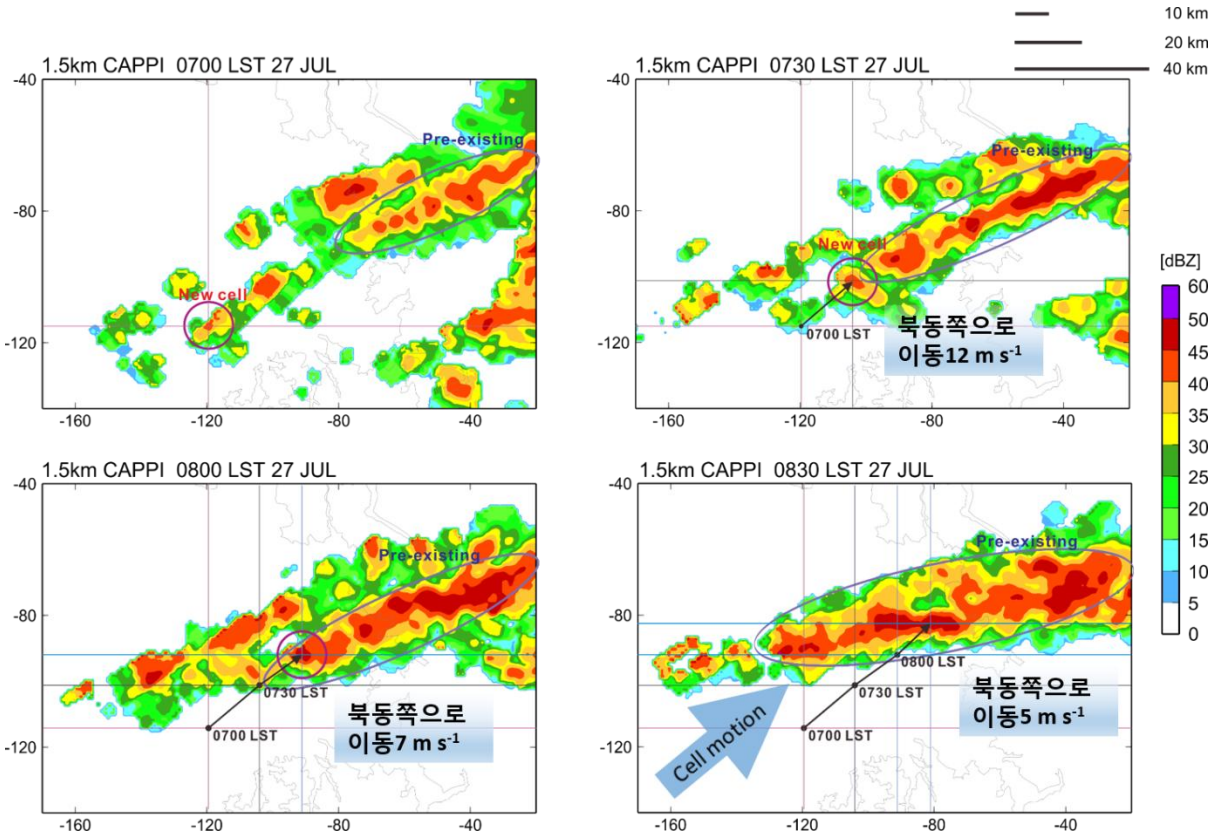
그림 2.3.2는 강수시스템 내 강수 셀의 구분과 병합되는 모습을 보다 뚜렷이 구별하기 위하여 2km 고도에서의 수평반사도 값을 나타내었다. 그림에서와 같이 meso-β 규모의 밴드형태 강수시스템은 다중규모의 셀과 선형의 대류시스템으로 구성되어 있었으며, 기존 셀은 후면에서 새로 발생된 셀과 지속적으로 병합하여 강수 시스템을 유지하고 있는 Back-building 형태의 특징을 가지고 있었다.
Back-building 시스템은 한반도의 집중호우를 유발하는 주된 형태의 강수시스템으로 후면에서 발생한 셀과의 지속적인 병합으로 유발되는 강한 에코가 국지적인 영역에 머무르게 되는 특징을 가지고 있다. 특히 0840KST에서 확인되는 선형의 대류시스템은 0700KST에 나타나는 C1 시스템이 유지된 것으로, 새로운 셀(C2, C3, C4, C5, C6, C7)과 지속적으로 병합하여 서쪽으로 길게 늘어지면서 성장하고 있고, 시스템의 전반적 이동이 거의 없는 특징으로 나타난다.



[그림 2.3.2] 0700-1000KST의 40분 간격 2km 수평반사도 CAPPI(A)와 Schumacher and Johnson(2005)이 제시한 Back-building/Quasi-stationary 모식도(B)

그림 2.3.3은 27일 강수를 가장 많이 기록하게 된 선형 대류시스템의 기존 셀(Pre-existing Cell)과 새로운 셀(New Cell)이 병합되는 과정을 이동벡터와 함께 나타낸 그림이다.

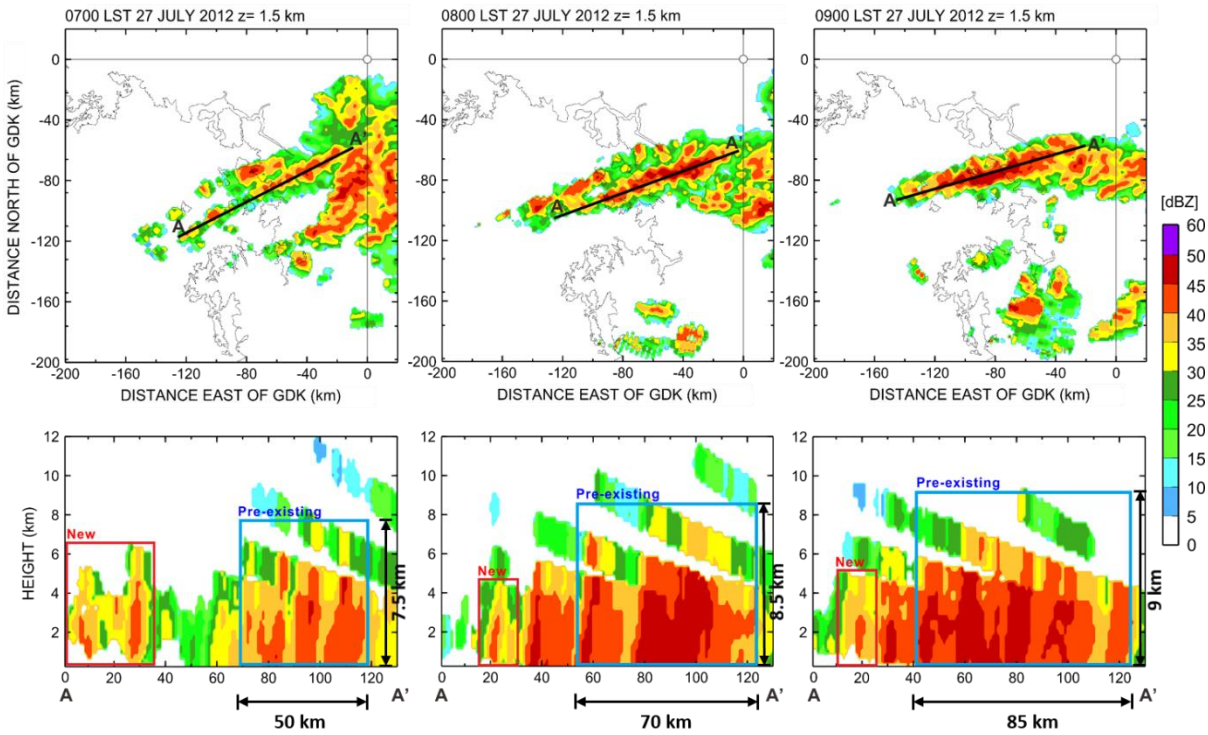
0700KST에 나타나는 새로운 셀은 0730KST에 북동쪽으로 12m/s의 속도로 이동하였고, 셀 병합이 나타난 0800KST에는 이동방향의 변화가 거의 없이 7m/s로 이동하였다. 기존 셀과 완전히 병합된 후 셀 코어의 이동속도는 0830KST에 5m/s로 나타났다. 따라서 병합된 후 선형의 대류시스템 내부의 이동속도는 현저하게 낮아지는 것으로 나타나며, 이동속도 감소는 시스템이 서쪽으로 길게 늘어지며 성장하는 원인이 될 수 있었다.



[그림 2.3.3] 0700-0830KST의 30분 간격 1.5km 수평반사도 CAPPI와 셀의 이동에 따른 이동벡터

2.3.2. 레이더반사도의 연직 단면분석

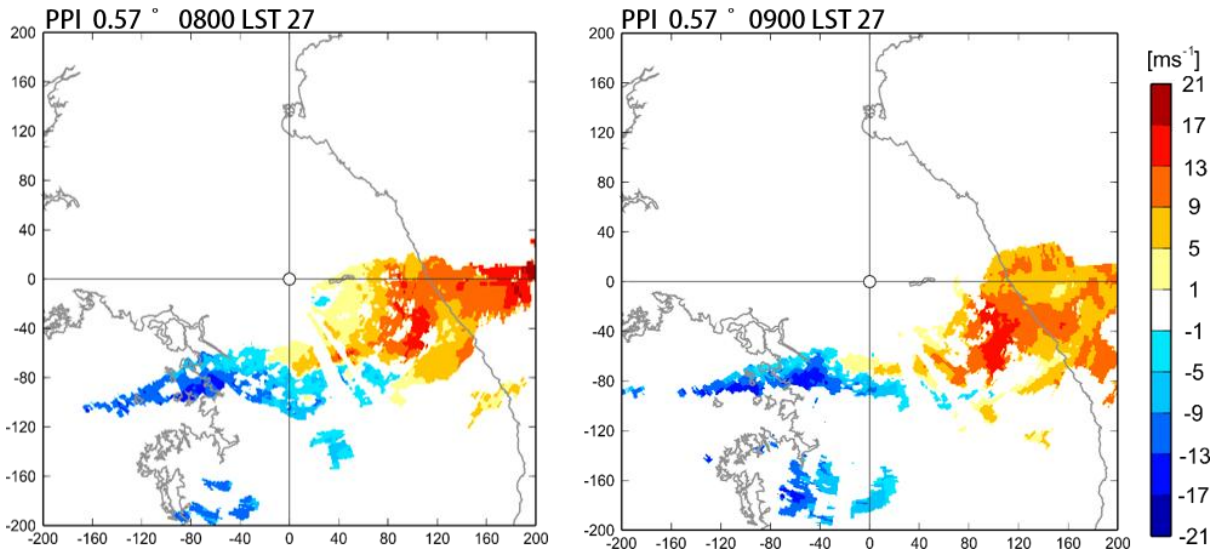
그림 2.3.4는 0700-1000KST에 발생한 선형 대류시스템에 대한 반사도 연직단면을 나타내었다. 그림에 나타난 모든 시간에서 서쪽 해상에서 발생한 새로운 셀과 기존의 셀이 뚜렷이 구분되어 나타났으며, 기존의 대류 셀은 새로 발생된 대류 셀과의 지속적인 병합으로 수평적인 길이와 연직적인 높이가 성장하는 형태를 보였다. 0700KST에 40dBZ 이상의 영역이 수평길이는 약 50km, 높이 약 7.5km에서 나타났으며, 0900KST에는 길이 85km, 높이 9km 정도까지 선형 대류시스템을 이루고 있었다.



[그림 2.3.4] 0700-0900KST 1시간 간격 1.5km 수평반사도 CAPPI 영상과, A-A' 의 연직단면도

2.3.3. 레이더 시선속도

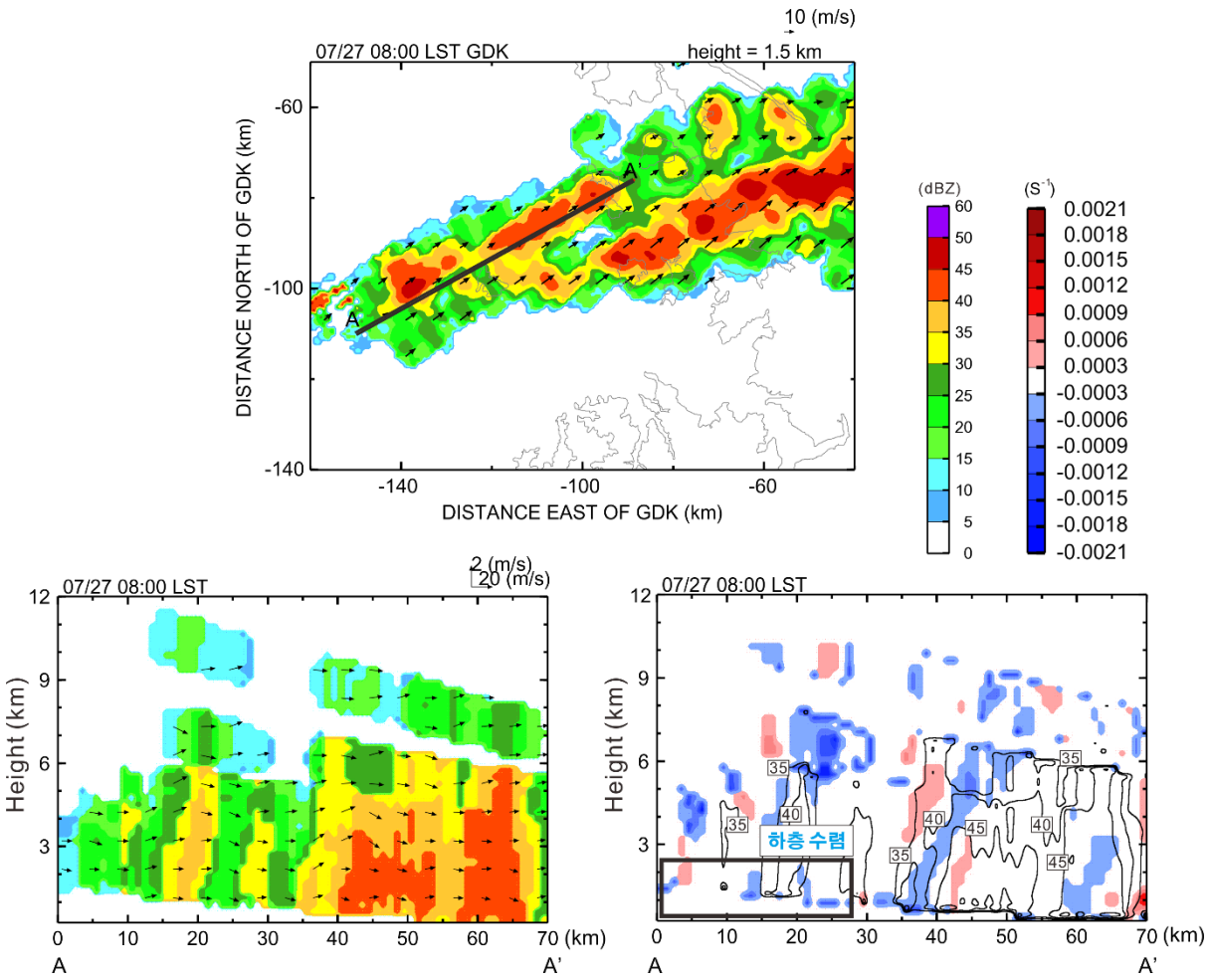
동서방향으로 늘어진 선형 대류시스템의 경우, 형태적인 특성상 시선속도 자료를 통해 대기의 바람패턴을 파악하기 힘든 경우가 많다. 해당사례의 경우에도 마찬가지로 시스템의 규모에 비해 시선속도 자료가 부족하여 대기상황을 적절히 판단할 수 없었다(그림 2.3.5). 따라서 3차원 바람장 자료를 산출하여 대기 흐름을 판단하는 것이 적절하다고 사료된다.



[그림 2.3.5] 0800KST와 0900KST의 시선속도 PPI(0.57°) 영상

2.3.4. 이중바람장 분석

수평 바람 벡터에서 나타나는 1.5km 고도의 바람은 대부분 남서풍(약 15m/s) 으로 나타나며, 뚜렷한 수평 바람의 변화는 나타나지 않았다. 선형의 대류 셀을 중심으로 하여 수직류의 연직단면도를 나타낸 그림 2.3.6(좌측하단)에는 새로 발달한 셀과 기존 셀의 풍상층 지역(Upstream Region)에서 주로 상승류가 나타나고 있다. 그림 2.3.6의 하단 우측 네모상자에 나타나는 하층수렴은 새로운 대류셀의 발달에 하층수렴의 영향이 크게 작용하였음을 알 수 있다.

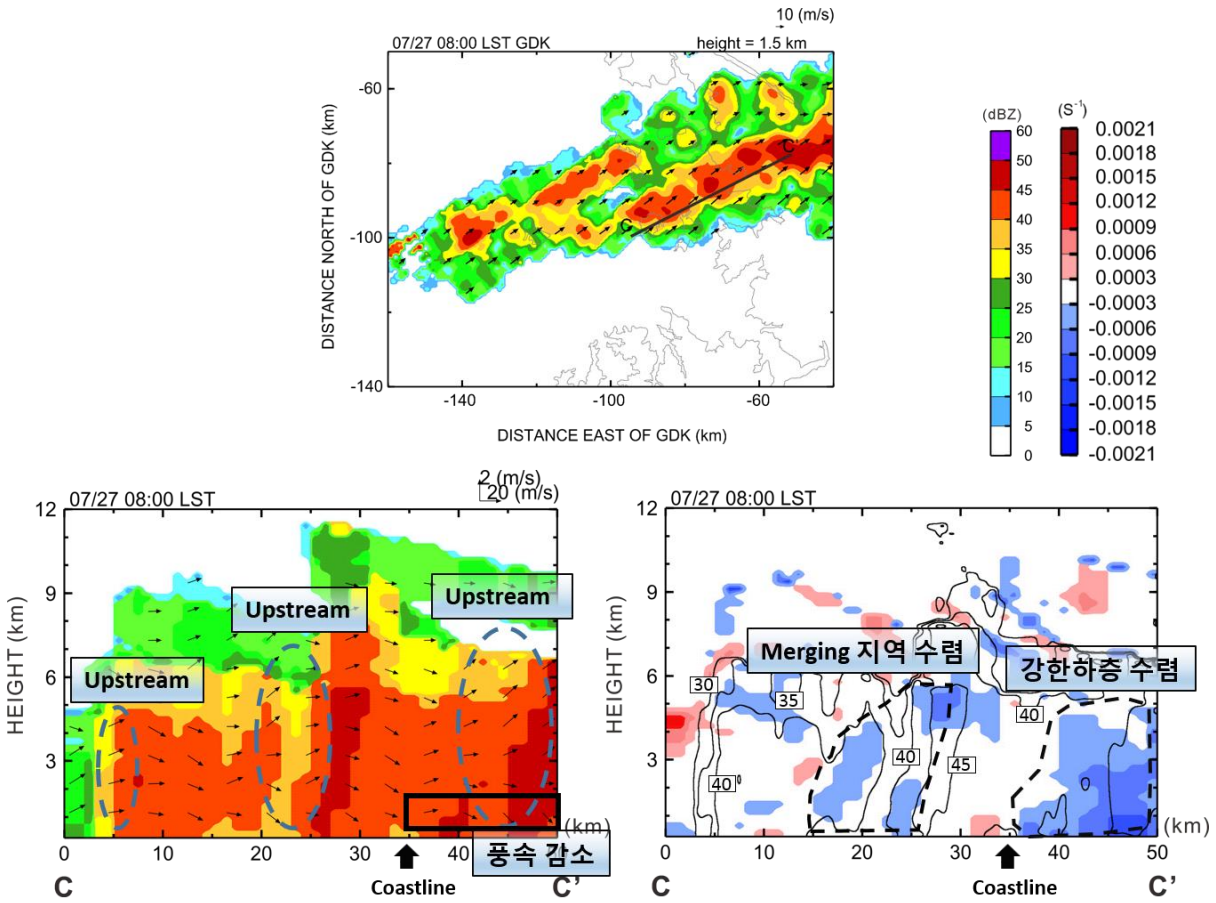


[그림 2.3.6] 이중 도플러 레이더 분석결과(2011. 07. 27. 0800KST). 1.5km 수평반사도 CAPPI와 수평 바람 분포(상), A-A' 선에 따른 연직 반사도 U&W 벡터(좌측하단), 발산(Shaded; 우측하단)에 대한 연직단면도

그림 2.3.7은 해상에서 발생하고 있는 대류 셀에 대한 연직단면도인 그림 2.3.6과는 다르게 위치하고 있는 대류 셀을 따라 연직단면도를 나타낸 그림이다.

선 C-C'에 따라 위치 하고 있는 대류 셀의 경우 해안선을 걸치며 위치하고 있다. 대류 셀 내부의 상승류 지역은 크게 세 지역(새로운 셀의 상승류 지점, 셀 병합지점, 내륙지점)으로 나뉠 수 있으며(그림 2.3.7 하단좌측), 해당 상승류 지역은 우측하단에 나타난 발산장에 따라 나타나고 있다.

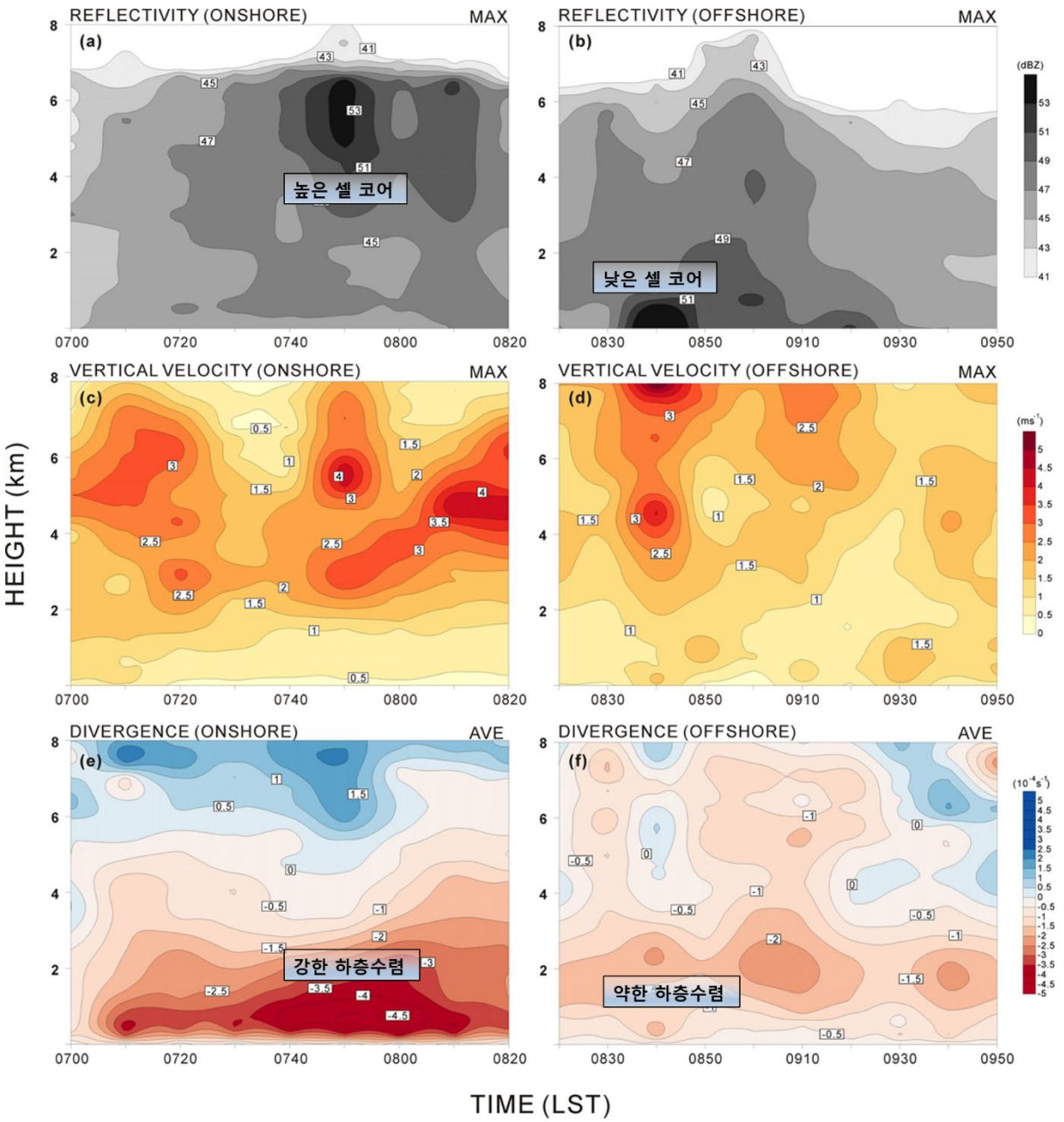
연직단면으로 나타난 대류 셀의 발산장은 새로운 셀의 하층과 셀 병합지역, 내륙지역에 수렴지역이 나타났으며, 특히 내륙지역에 발생한 하층수렴은 다른 지역의 수렴보다 상대적으로 강하게 나타났다. 내륙하층지역에서 나타나는 강한 수렴은 지표면 거칠기의 불연속성이 하층의 풍속을 감소시켜 유발하는 것으로 사료된다.



[그림 2.3.7] 이중 도플러 레이더 분석결과(2011.07.27. 0800KST). 1.5km 수평반사도 CAPPI와 수평 바람분포(상), B-B' 선에 따른 연직 반사도 U&W 벡터(좌측하단), 발산(Shaded; 우측하단)에 대한 연직단면도

그림 2.3.8은 하층의 수렴 강도에 따른 대류 시스템의 반사도, 상승류, 발산의 분포차이를 나타내고자 내륙과 해양을 구분하여 고도에 따른 시간분포도를 나타낸 그림이다.

내륙의 경우 시스템 내부 최고 반사도가 나타나는 코어 부분이 4-6km 고도에 위치 하였고, 상승류가 최대 4m/s 이상 나타났다. 또한, 하층 1km 이하에서 강한 수렴값이 분포하고 있었다. 해양의 경우 코어 부분이 2km 이하의 낮은 고도에서 나타났고 상승류값이 대부분 3m/s 이하로 내륙지역보다 낮은 상승류가 나타났다. 그리고, 하층의 수렴값 또한 내륙보다 낮게 나타났다.



[그림 2.3.8] 0700-0950KST의 고도에 따른 최대 반사도, 최대 상승속도, 발산 분포도(좌측: 내륙, 우측: 해양)

3

예측 자료 분석

3.1. 모델의 강수 예측 결과 분석

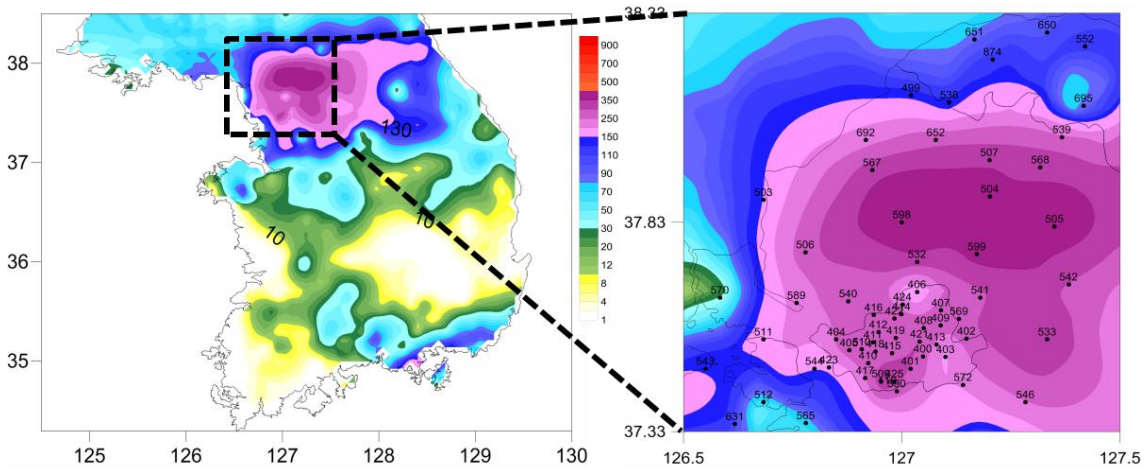
3.1.1. 지역예보모델(RDAPS)와 국지예보모델(LDAPS)의 강수 예측

그림 3.1.1은 2011년 7월 27일에 AWS에서 측정된 일누적 강수량의 공간분포를 보여주고 있다. 수도권 전지역으로 150mm 이상의 호우가 발생하였으며, 특히 서울/경기 북부 지역을 중심으로 300mm 이상의 강수가 집중되었다.

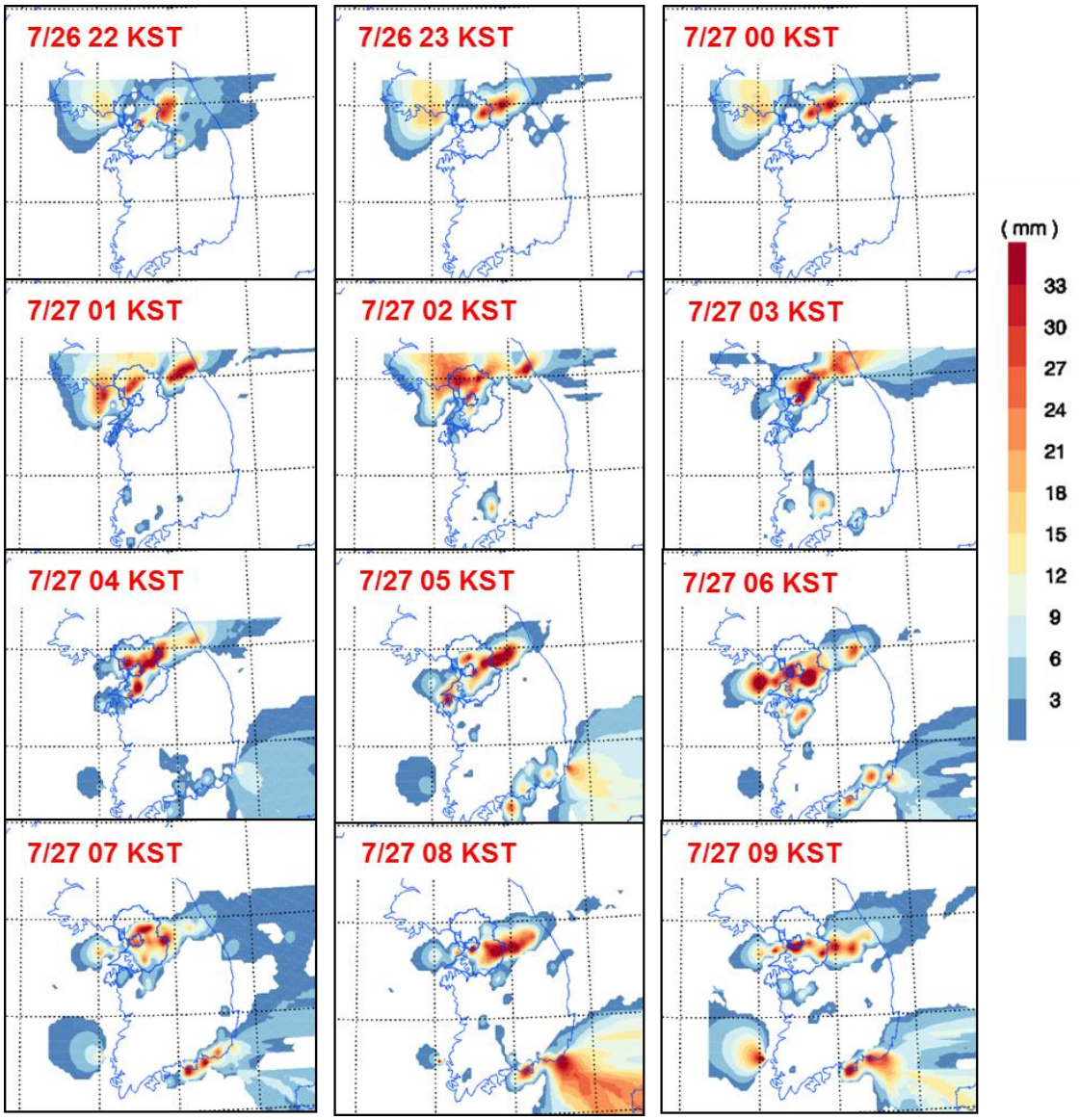
일 최대 강수량은 양주(AWS598) 지점에서 약 416mm를 기록하였으며, 최대 강수 강도는 서울 남현동 지점에서 113mm/hr을 기록하였다. 같은 기간동안 부산과 영남해안 이외의 경북/전남/전북 지역에서는 강수가 거의 기록되지 않은 대비되는 모습이 나타났다.

AWS에서 측정된 시간별 강수량을 살펴보면(그림 3.1.2), 7월 26일 22시에서부터 27일 09시 사이에 시간당 25mm 이상의 강한 강수셀이 수도권 지역을 중심으로 다수 발생하고 있으며 공간 규모는 대략 수십 km 이하의 공간 규모를 가지고 있다. 부산/경남 지역 강수도 유사한 호우셀이 서울/경기 지역과는 시차를 두고 발생하였음을 보여준다. 이들 강수셀들은 강한 대류불안정 조건에서 발달한 대류셀에 기인한 것으로, 대류셀들의 시/공간적 규모가 메조-β 혹은 메조-γ 정도임을 추측할 수 있다.

강수셀의 시/공간 규모는 2010년 9월 21일 수도권 호우 사례나 2011년 8월 9일 전라북도 호우 사례와 유사하나, 강한 중규모 수평 수렴에 의해 동서로 길게 뻗은 강수 밴드가 유지되었던 수도권 호우사례보다는 강한 하층 수증기 수렴과 열적 대류 불안정 조건에서 발생했던 전라북도 호우 사례에 더 근접한 특징을 가지는 것으로 판단할 수 있다.



[그림 3.1.1] 2011년 7월 27일 AWS 측정 일누적 강수량 공간분포

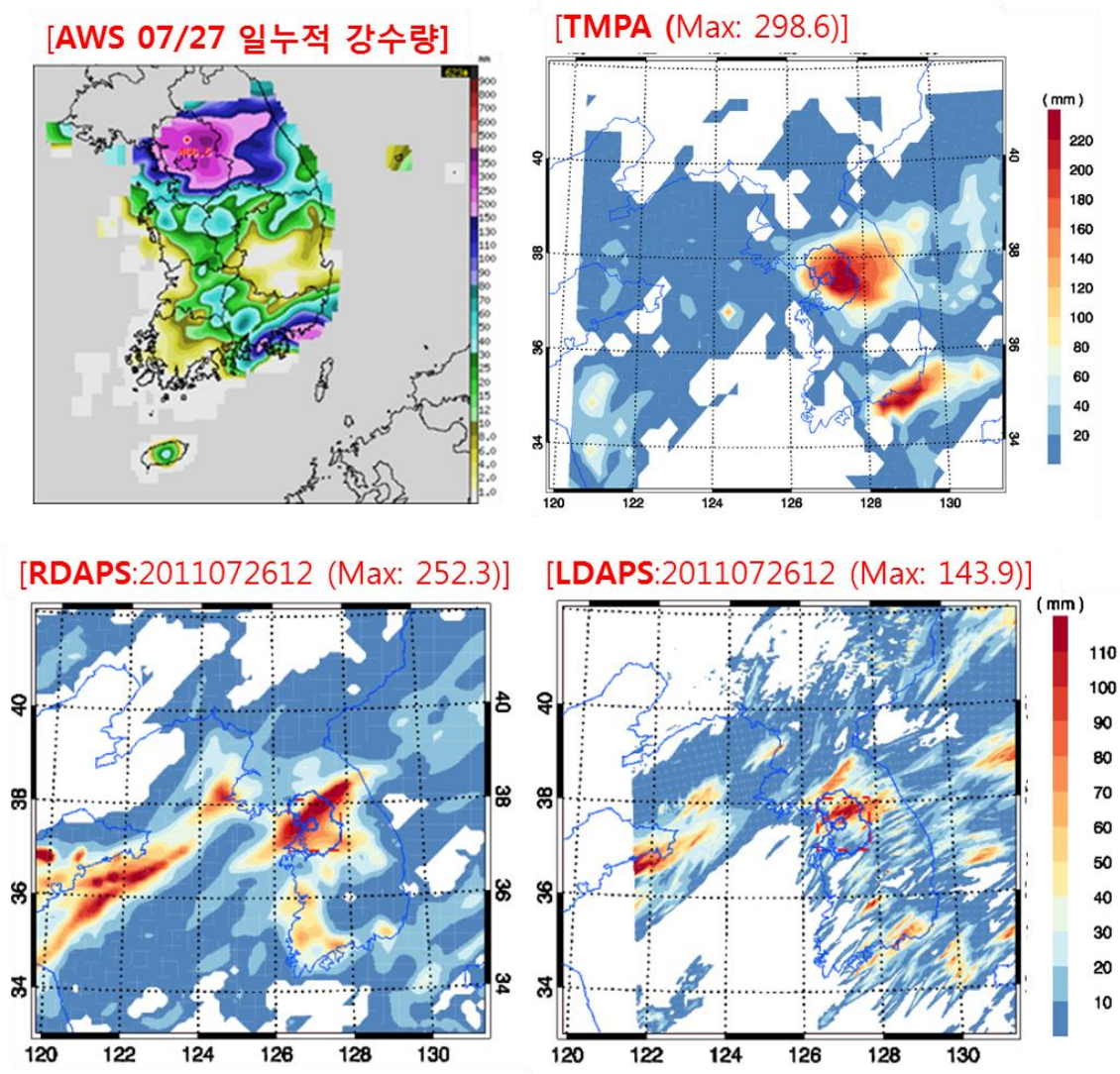


[그림 3.1.2] 2011년 7월 26일 22KST에서 27일 09KST까지 AWS 측정 시간별 강수량의 공간분포

그림 3.1.3은 AWS에서 관측된 7월 27일 일누적 강수량과 TMPA 위성 추정 누적 강수량, 그리고 지역예보모델(RDAPS)와 국지예보모델(LDAPS)에 의해 예측된 일누적 강수량의 공간 분포를 나타내고 있다. 서울/경기 북부 지역의 호우는 강한 남서풍에 의한 수증기 유입과 이로 인한 대류 불안정 영역에서의 발생하는 강수 현상으로 두 모델이 모두 호우 가능성을 예측하고 있으나, 강수량은 관측에 비해 다소 과소 모의(약 50-70% 수준) 되고 있다.

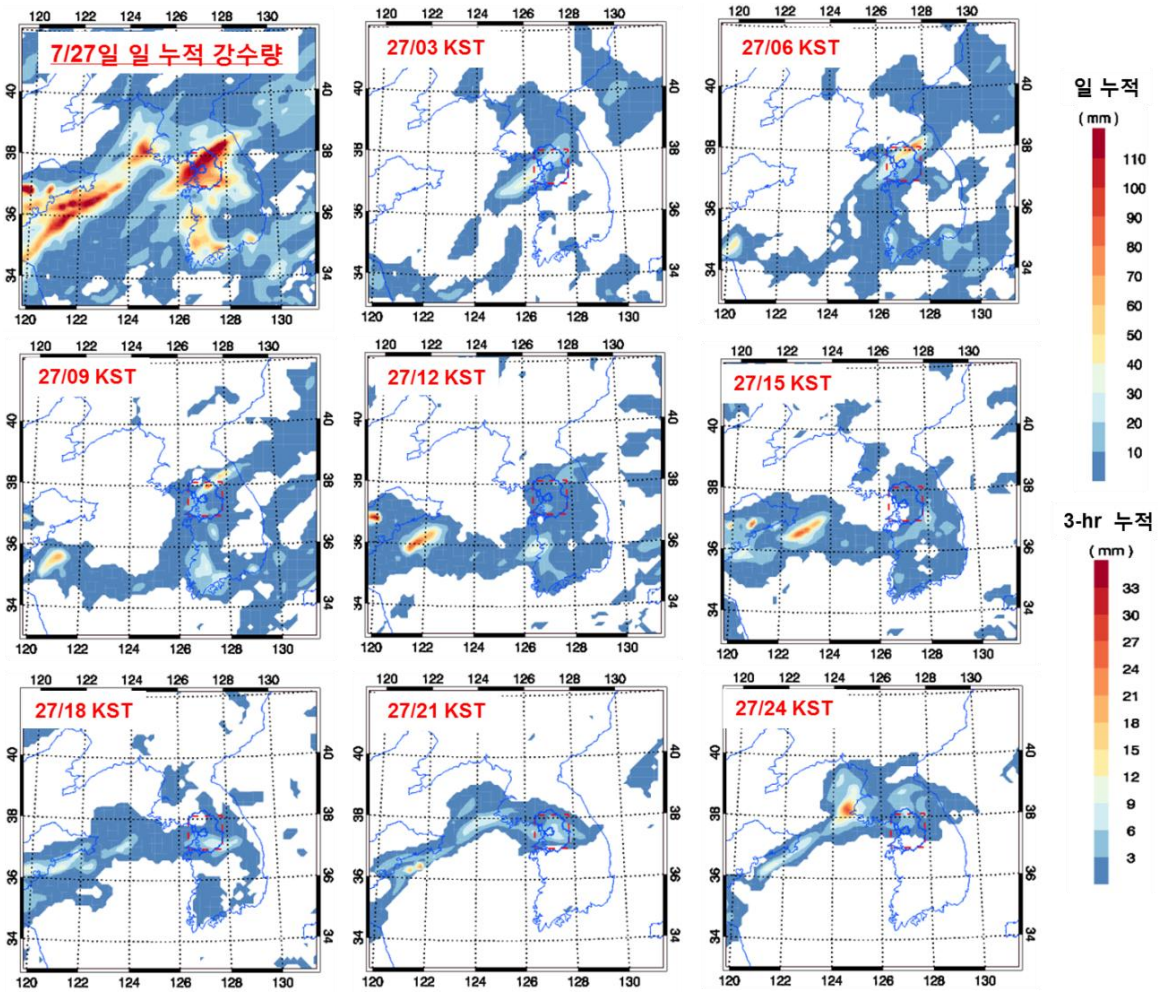
수도권 지역으로 영역 평균(붉은색 박스로 표시된 영역)된 강수의 경우, AWS 관측은 평균 213mm (최대 약 396mm), RDAPS의 예측 결과는 평균 89mm(최대 252mm), LDAPS은 평균 47mm(최대 144mm)를 나타내었다. 지역예보모델은 전라남북도와 경상남도를 걸쳐 10-50mm의 강수 발생 영역에 대해서는 서쪽으로 치우쳐서 전라남북도 지역으로 40-60mm의 강수를 예측하고 있으며, 부산 및 경상남도 해안 지역의 강한 강수 영역은 약하게 모의하고 있다. 이는 넓게 분포하고 있는 대류 불안정 영역과 지형 효과의 영향으로 적운모수화를 통해 주로 계산되는 모델의 강수가 관측에 비해 서쪽으로 치우치는 것으로 추정할 수 있다. 한편 국지예보모델에 의해 예측되는 강수 영역은 지역예보모델의 강수에 비해 보다 세밀한 강수셀을 모의하는 특징을 보여주고 있으나, 차이점들도 명확하게 나타나고 있다. 남서해상 지역의 무강수 지역의 예측은 지역예보모델이 과대 모의한 것에 비해 잘 모의하고 있으며, 부산 및 경상남도 해안 지역의 강한 강수 영역도 예측하고 있다. 다만 전라남북도와 경상남도를 걸쳐 발생한 강수 영역에 대해서는 지역예보모델의 결과와 상이한 면을 보여주고 있으며, 예측된 강수량도 관측에 비해 낮게 모의되고 있다.

두 모델의 강수 예측의 차이는 모형의 해상도와 물리과정의 차이뿐 만 아니라 지역예보모델과 국지예보모델의 초기장 및 배경장을 전지구예측모델로부터 직접 제공받는다는 사실에서도 기인하는 것으로 볼 수 있다.



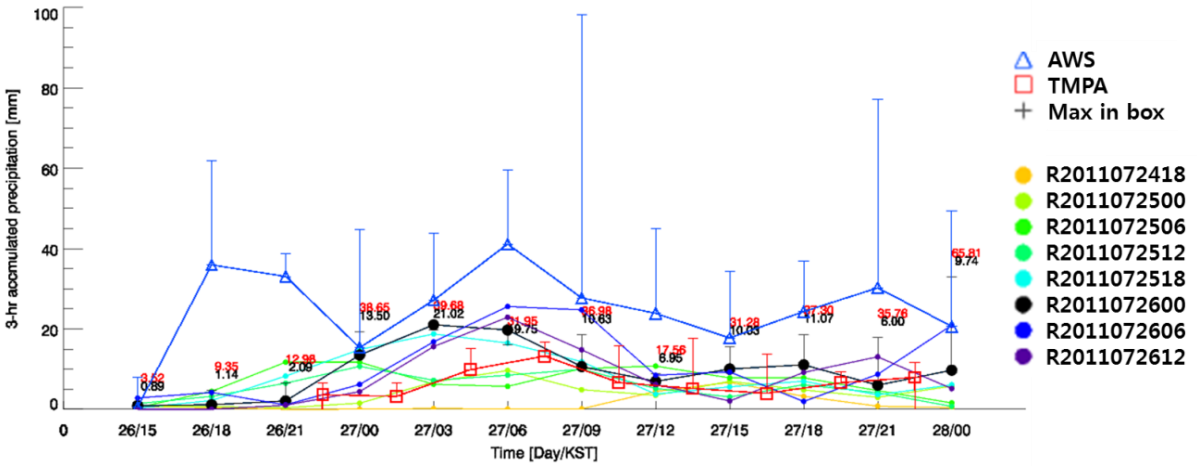
[그림 3.1.3] 모델 및 관측 2011년 7월 27일 일누적 강수량의 비교. AWS 측정(좌상), TMPA 위성 추정(우상), 지역예보모델(RDAPS)(좌하), 국지예보모델(LDAPS)(우하). 모델의 예측 시작 시각은 2011072612UTC으로 전일 예측 결과를 도시하였음

그림 3.1.4는 사례 전일(2011072612 UTC) 적분된 지역예보모델의 2011년 7월 27일의 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량의 공간분포를 나타낸다. 27일 오전(03-09KST)에 서울/경기 북부 지역을 중심으로 30-60mm/3hr의 다소 강한 강수가 지속되는 강수밴드를 예측하고 있다.
지역예보모델은 낮은 격자 해상도로 강수 밴드에서 발생하는 대류셀의 발달을 명시적으로 모의하지 못하기 때문에 지상 관측 강수 패턴에서 관찰되는 강한 강수셀은 명료하게 나타나지 않는다. 또한 관측에 비해 강수 영역에 넓게 나타나는 특징을 보이며, 이는 적운 모수화에 의한 영향으로 판단된다.



[그림3.1.4] 지역예보모델(RDAPS)의 2011년 7월 27일 일누적 및 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량. 모델의 예측 시작 시각은 2011072612UTC으로 전일 예측 결과를 도시하였음

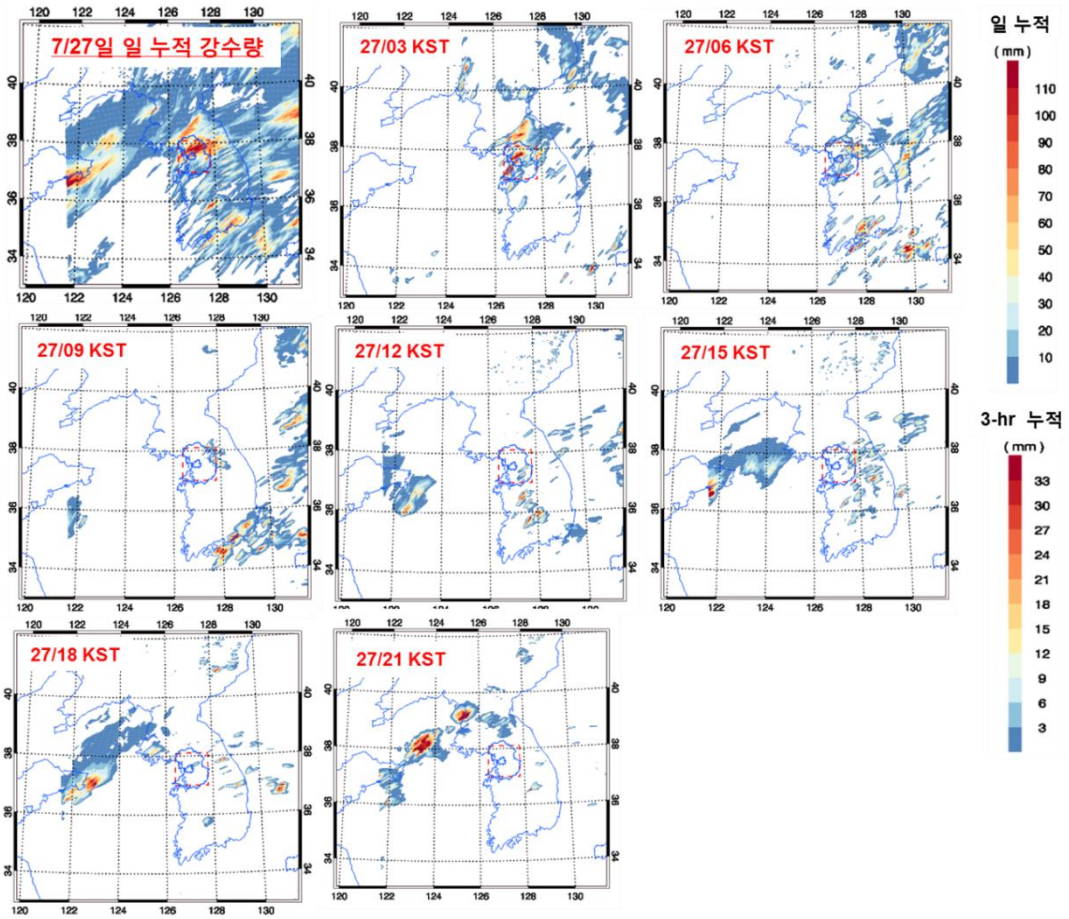
시간별 관측 및 예측 강수량 비교 결과(그림 3.1.5)에서 보면, 수도권 지역AWS 관측 강수는 26일 야간부터 지속적으로 20-40mm/3-hr의 값을 유지하고 있는 반면, 지역예보모델은 관측 강수를 상당히 과소 모의하고 있다. 특히, 26일 야간부터 시작된 강수의 시작 시점을 정확히 예측하지 못하고 있다. 적분 시작 시각 2011072518UTC 이전의 수치 예측 결과는 관측 강수에 비해 더더욱 낮은 강수량인 10mm/3-hr 내외를 보이고 있으나, 이후의 모델 적분 결과에서는 강수량 모의 수준은 관측의 60-70% 수준을 보여주고 있으며 최대 강수량이 나타나는 시점의 차이도 수시간 정도의 차이를 나타내고 있다. 종합적으로, 지역예보모델의 강수 예측 결과는 수도권 지역의 호우 가능성을 예측하고 있지만 정확한 강수량, 강수 강도와 시점의 예측은 관측과 다소 차이가 존재하였다. 또한 한반도 내 강수 영역 및 강수량의 예측에서도 관측과 차이를 보였다.



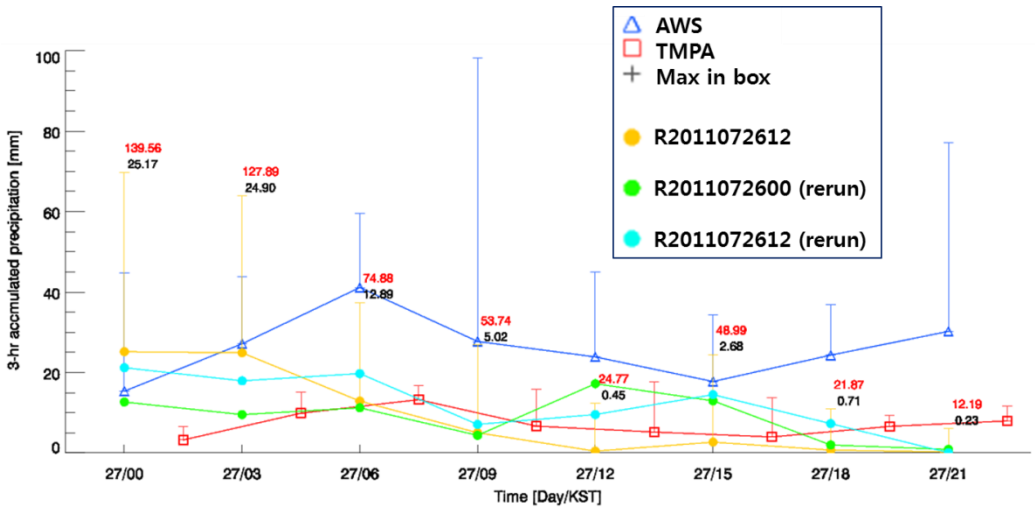
[그림 3.1.5] 지역예보모델(RDAPS)의 7월 26일 15KST에서 28일 00KST까지의 공간평균 예측 강수량. AWS 관측 강수량과 TMPA 위성 추정 강수량은 각각 3시간 누적 강수량을 나타낸다. 최대값은 경기도 지역(그림 3.1.3의 적색 사각형 표시 지역)의 공간 최대값을 의미

그림 3.1.6은 사례 전일(2011072612UTC) 적분된 국지예보모델의 2011년 7월 27일의 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량의 공간분포를 나타낸다. 지역예보모델과 달리 국지예보모델은27일 오전(03-06KST)에 서울/경기 북부 지역을 중심으로 90mm/3hr 이상의 강한 강수셀을 모의하고 있다. 이는 모델의 높은 유효해상도와 명시적 구름 물리과정에 의한 강수 계산 결과로 볼 수 있다. 반면, 지역예보모델에서 모의되었던 대류 불안정 지역을 나타내는 강수 밴드는 명확하게 모의되지 못하고 있으며 06KST 이후에는 수도권 지역의 강수는 거의 모의되지 않는다.

시간별 관측 및 예측 강수량 비교(그림 3.1.7)는 이러한 결과를 잘 보여주고 있다. 수도권 지역AWS 관측 강수는 26일 야간부터 지속적으로 20-40mm/3-hr의 값을 유지하고 있는 반면, 국지예보모델 예측 강수는 27일 06KST이후 거의 사라진다. 이러한 예측 결과는 지역예보모델에 비해서도 훨씬 낮은 값을 보이고 있다. 사례 발생 이후 분석을 위해 재수행한 모델의 결과(Rerun)에서는 강수량이 27일 기간 동안 10-20mm/3-hr로 지속되는 것으로 나타나고 있다. 종합적으로, 국지예보모델의 강수 예측 결과는 수도권 지역의 호우 가능성을 예측하고 있지만 강수량과 강수 시점의 예측에서 지역예보모델의 결과에 비해 낮은 예측 능력을 보이고 있다. 다만 강수 강도는 최대 140mm/3-hr로 지역예보모델의 결과에 비해 관측에 유사한 예측 결과를 보였다. 이 사례의 강수 예측은 종관규모 예측에 유리한 지역예보모델의 수도권 호우 가능성과 중규모 수치예측에 유리한 국지예보모델의 강수 강도를 종합하여 판단하여야 할 필요가 있다고 볼 수 있다.



[그림 4.1.1] 국지예보모델(LDAPS_R2011072612)의 2011년 7월 27일의 일누적 및 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량. 모델의 예측 시작 시각은 2011072612UTC으로 전일 예측 결과를 도시하였음

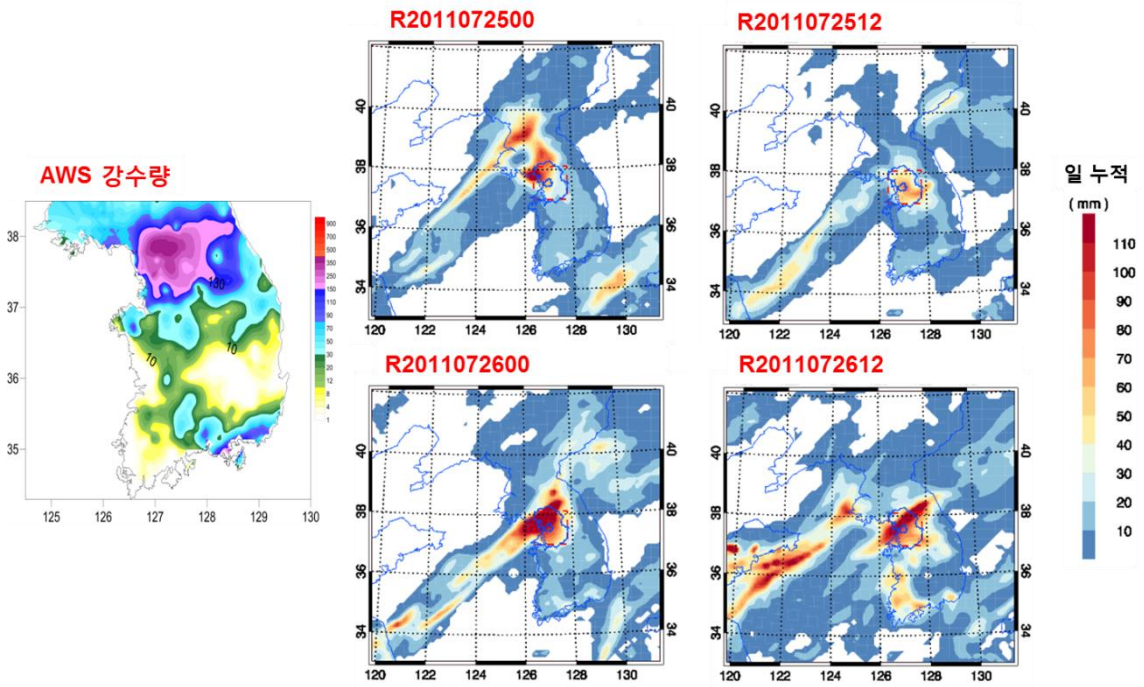


[그림 3.1.7] 국지예보모델(LDAPS)의 7월 27일 00KST에서 27일 21KST까지의 공간 평균 예측 강수량. AWS 관측 강수량과 TMPA 위성 추정 강수량은 각각 3시간 누적 강수량을 나타냄. 최대값은 경기도 지역(그림 3.1.3의 적색 사각형 표시 지역)의 공간 최대값을 의미. 재수행(Rerun) 결과는 사례 발생 이후 분석을 위해 재수행 된 모델의 예측 결과를 나타냄

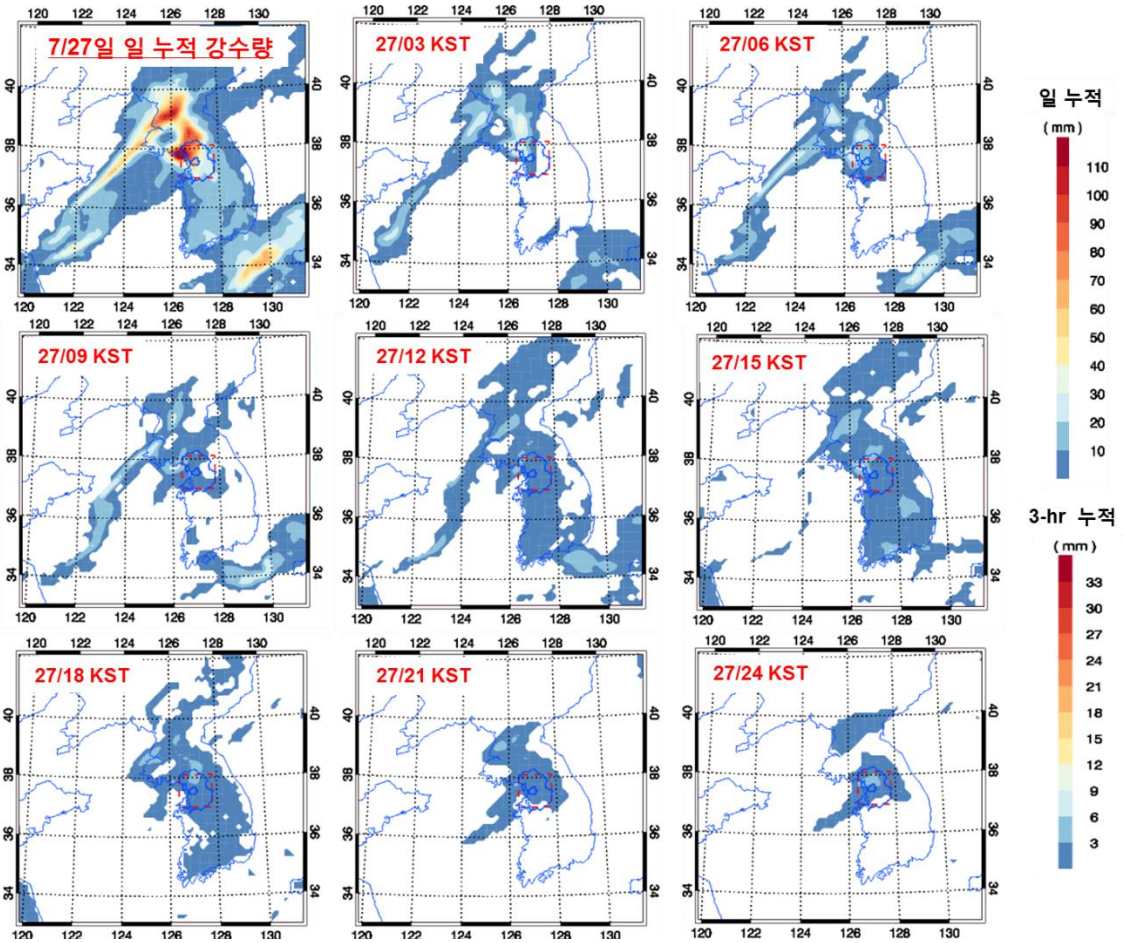
3.2. 모델의 강수 예측 특성 분석

3.2.1. 지역예보모델(RDAPS)의 강수 예측 특성

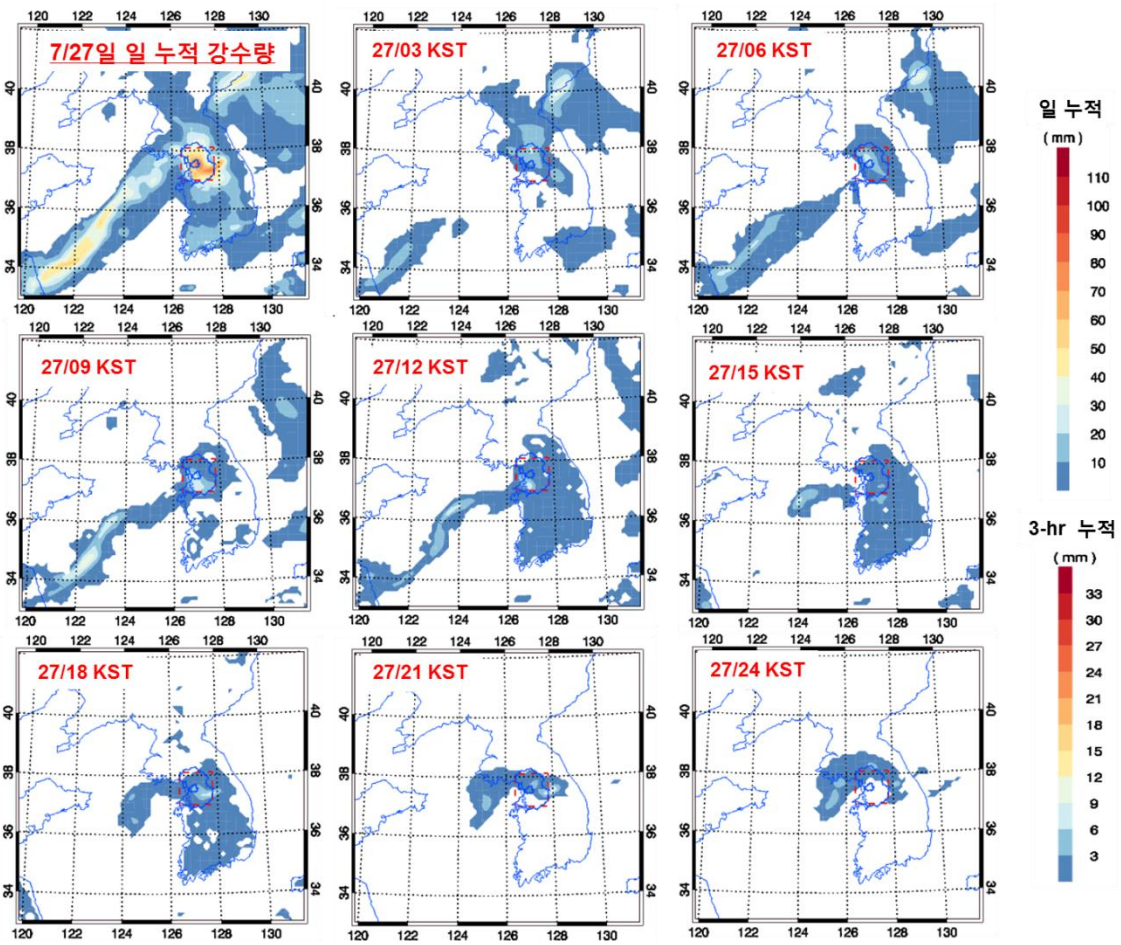
2011년 7월 27일의 수도권 호우 사례는 종관 규모의 한반도 남동쪽의 북태평양 고기압과 대륙의 저기압 사이에 한반도가 위치하여 하층으로 지속적인 수분 유입으로 인한 대류불안정 조건의 형성으로 호우가 발생하였다. 이 사례의 지역예보모델의 예측 결과의 신뢰도를 확인하기 위해서는 예측 선행 시간별 강수 예측 결과의 일관성을 살피는 것이 중요하다. 그림 3.2.1에서 그림 3.2.4는 지역예보모델(RDAPS)의 예측 선행 시간별 2011년 7월 27일에 대한 일누적 강수량과 시간별 누적 강수량 예측 결과를 비교하고 있다. 모의된 강수 영역을 통해 남서쪽으로부터의 수증기 유입과 대기불안정 영역을 파악할 수 있다. 수도권 지역에서의 호우 가능성은 D-2(2011072500UTC) 예측 결과에서도 어느정도 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 일누적 강수량과 최대강수 발생 영역은 예측 선행 시간별로 다소 큰 차이를 보이고 있다. 사례일(27일)에 가까워질수록 모델이 더 높은 강수량을 예상하고 있으나, 중국 산둥반도 주변의 강수 영역과 전라남북도와 경상남도 주변의 강수 영역에 대해서는 여전히 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 이유는 역학적 종관 강제력이 약한 상황에서 열적 대류불안정에 기인한 강수가 발생하는 경우에 모형이 이러한 종관 조건을 초기화 과정에서 적절히 반영하지 못하는 것에 기인한다.



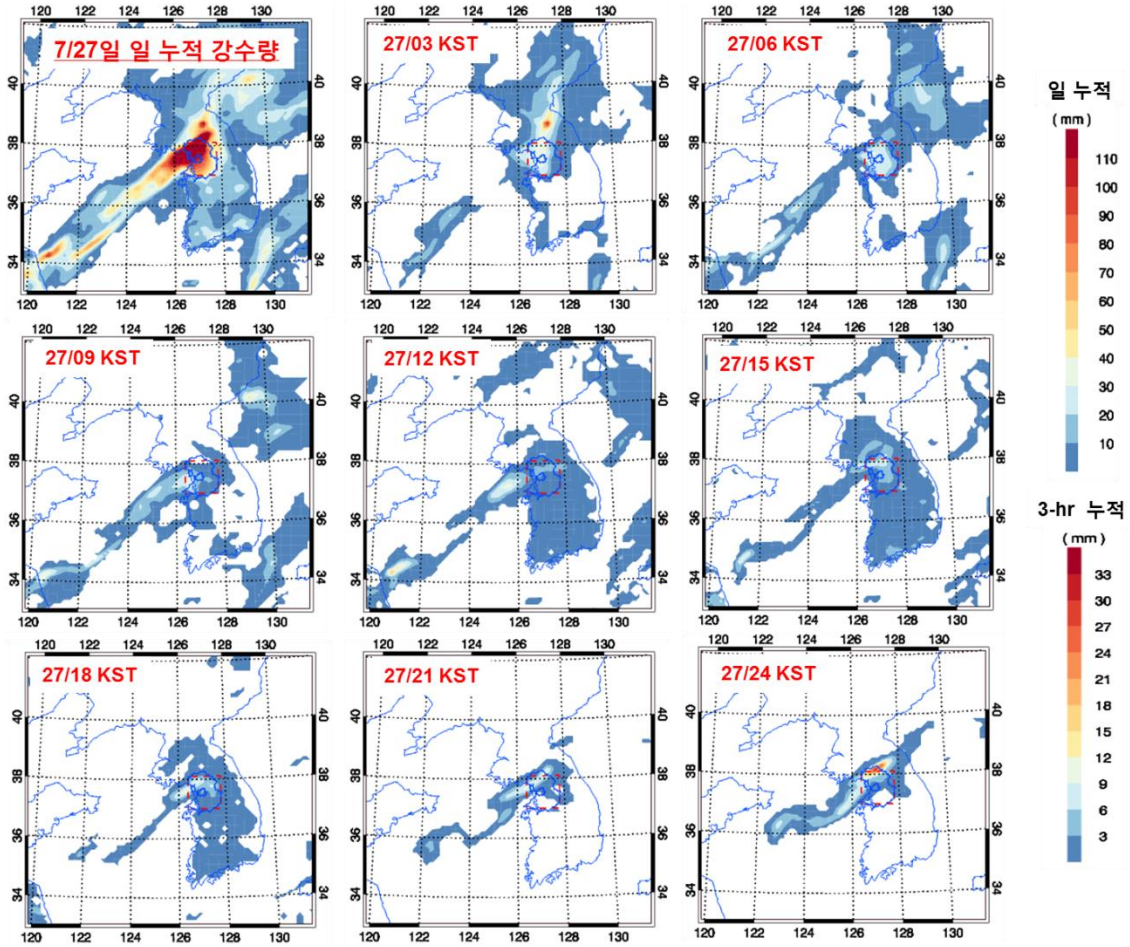
[그림 3.2.1] 2011년 7월 27일 AWS 관측 일누적 강수량과 지역예보모델(RDAPS)의 적분시작 시간별 예측 일누적 강수량의 공간 분포 비교



[그림 3.2.2] 지역예보모델(RDAPS_R2011072500)의 2011년 7월 27일 일누적 및 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량

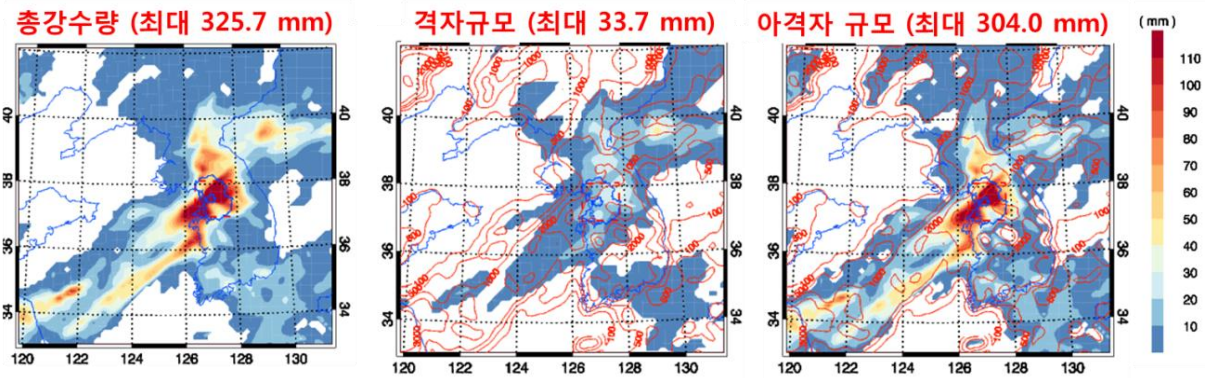


[그림 3.2.3] 지역예보모델(RDAPS_R2011072512)의 2011년 7월 27일 일누적 및 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량

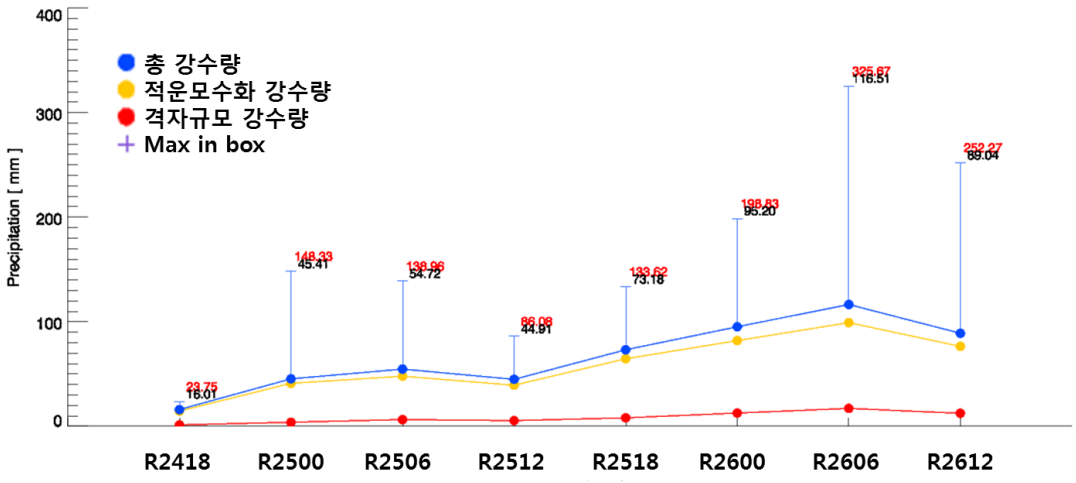


[그림 3.2.4] 지역예보모델(RDAPS_R2011072600)의 2011년 7월 27일 일누적 및 시간별(3-hr 간격) 예측 강수량

그림 3.2.5는 지역예보모델(RDAPS)에 의해 계산되는 격자 규모 및 아격자 규모 강수량의 예측 특성 비교하고 있다. 지역예보모델의 경우 성긴 격자 크기(12km)를 사용하므로 강수량의 계산은 격자 규모의 명시적 구름 물리과정과 아격자 규모의 적운 모수화 과정을 통해 계산하고, 각 격자점에서의 강수량은 격자 규모 강수량과 아격자 규모 강수량의 합으로 계산한다. 그림은 한반도와 그 주변으로 대류가용잠재에너지(CAPE)가 아주 높은 대류불안정 영역이 존재하고 있음을 잘 보여주고 있으며, 이 불안정 영역 내에서 모델의 강수가 발생하고 있음을 보여주고 있다. 특히, 적운모수화에 의해 계산되는 강수의 공간분포는 대류가용잠재에너지 등치선과 매우 높은 상관 관계를 보여주며, 전체 강수량의 대부분이 이 과정을 통해 계산되고 있음을 보여준다. 그림 3.2.6은 지역예보모델의 적분 선행 시간별 예측 강수량에서 격자규모와 아격자 규모의 강수량을 비교하고 있다. 지역예보모델에서의 계산되는 강수량의 약 85%이상은 적운모수화 과정을 통해 계산되고 있음을 보여준다. 지역예보모델의 강수 영역이 관측에 비해 다소 넓게 예측되는 이유는 여기에 있다고 볼 수 있다.



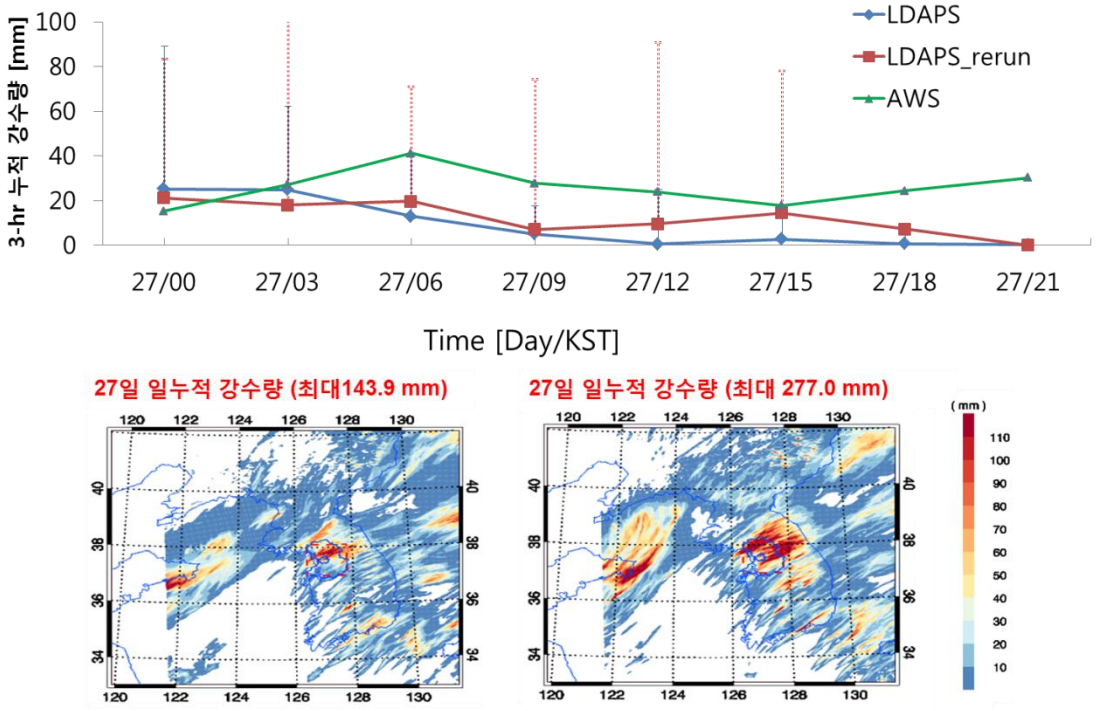
[그림 3.2.5] 지역예보모델(RDAPS)의 격자 규모 및 아격자 규모 강수량 예측 특성 비교(R2011072606). 총강수량은 격자규모 강수량과 아격자 규모 강수량의 합으로 계산됨. 등치선은 대류가용잠재에너지(CAPE)값을 의미하며, 100, 500, 1000, 2000 J kg-1을 나타냄



[그림 3.2.6] 적분 시작 시간별 지역예보모델(RDAPS)의 격자 규모 및 아격자 규모 강수량 예측 특성 비교. R2011072418에서 R2011072612까지 6시간 간격의 모델 적분 결과의 7월 27일 일누적 강수량의 공간 평균값(흑색 글씨)과 최대값(적색 글씨)을 나타냄

3.2.2. 국지예보모델 (LDAPS)의 강수 예측 특성

국지예보모델은 높은 유효해상도와 격자규모 구름 물리 과정을 통해 지역예보모델에 비해 강한 대류셀에 의한 강수를 보다 명시적으로 모의할 수 있는 특징을 가진다.
사례 발생시에 예측을 위해 사용되었던 국지예보모델의 예측 결과와 분석을 위해 사후에 수행한 예측 결과의 차이는 이러한 사실을 잘 보여주고 있다(그림 3.2.7). 그림은 국지예보모델이 중규모 강수셀과 강수 강도를 관측에 보다 가깝게 모의하는 특징을 잘 보여주고 있으며, 강수 지역과 강수량에서 큰 차이가 나타날 수 있음을 함께 보여준다. 재수행된 예측 결과에서 강수량과 강수강도 예측이 관측에 조금 더 가까워진 결과를 보여주고 있어 수도권 지역에 대한 호우 가능성의 예측은 향상되었으나, 여전히 관측에 비해 낮은 강수량을 나타내고 있다.

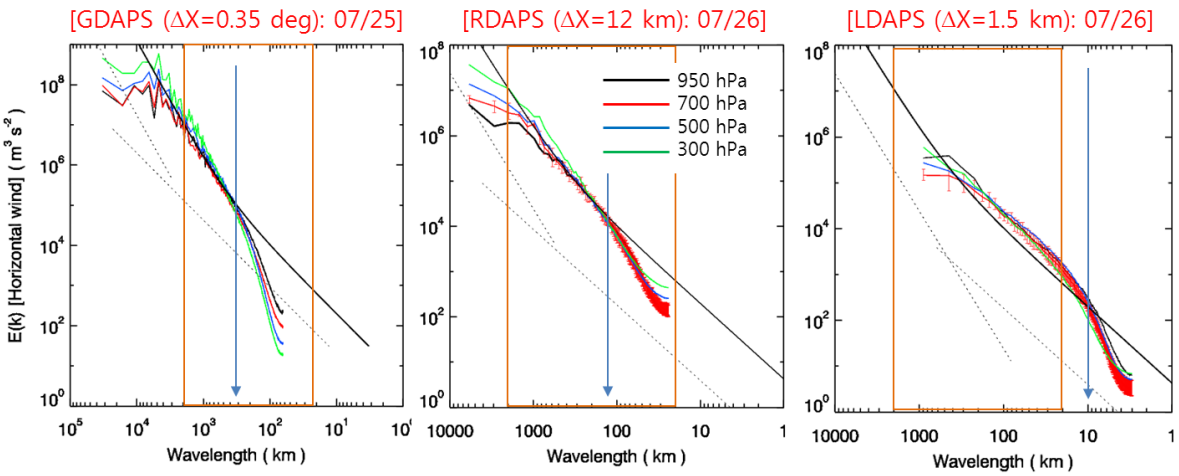


[그림 3.2.7] 국지예보모델(LDAPS)의 7월 27일 00KST에서 27일 21KST까지의 공간 평균 예측 강수량 (상)과 일누적 강수량의 공간 분포(하). 최대값은 경기도 지역(그림의 적색 사각형 표시 지역)의 공간 최대값을 의미. 재수행(Rerun) 결과는 사례 발생 이후 분석을 위해 재수행 된 모델의 예측 결과를 나타냄

3.2.3. 모델의 운동에너지 스펙트럼 분석

그림 3.2.8은 전지구예보모델(GDAPS), 지역예보모델(RDAPS), 국지예보모델(LDAPS)의 모델의 유효 해상도를 알아보기 위한 운동에너지 스펙트럼 분석 결과를 보여주고 있다.

GDAPS는 20N~50N 영역 평균, RDAPS와 LDAPS은 각각 수치모의 영역 평균하였으며, 일 평균값으로 계산하였다. 운동에너지 스펙트럼 분포를 통해 전지구예보모델의 유효 해상도는 ~300km (~10 ΔX), 지역예보모델의 유효 해상도는 100~120km(8~10 ΔX), 국지예보모델의 유효 해상도는 10~15km(6~8 ΔX)로 각각 분석할 수 있다.
지역예보모델의 경우 중규모 meso-α 이상의 대기 현상을 모의하는데 적합하며, 국지예보모델의 경우 meso-β 및 meso-γ규모(>~수 km) 이상의 대기 현상을 모의하는데 적합함을 알 수 있다. 또한 각 모델의 유효 해상도보다 작은 규모의 현상들의 운동에너지는 모델의 수치적/물리적 요소에 의해 크게 감쇄가 일어남을 알 수 있다. 호우를 유발하는 대류셀 규모의 수평 수렴/발산은 국지예보모델에서도 크게 감쇄가 일어나고 있으며, 이는 강한 대류불안정 영역에서 기습적으로 발생하는 대류셀의 수치모의가 매우 어려움을 의미하게 된다.



[그림 3.2.8] 전지구예보모델(GDAPS), 지역예보모델(RDAPS), 국지예보모델(LDAPS)의 고도별 운동에너지 스펙트럼 분석 결과 비교. 주황색 박스는 중규모 영역(2-2000km)을 나타내고, 화살표는 각 모델의 유효 해상도를 보여줌

4

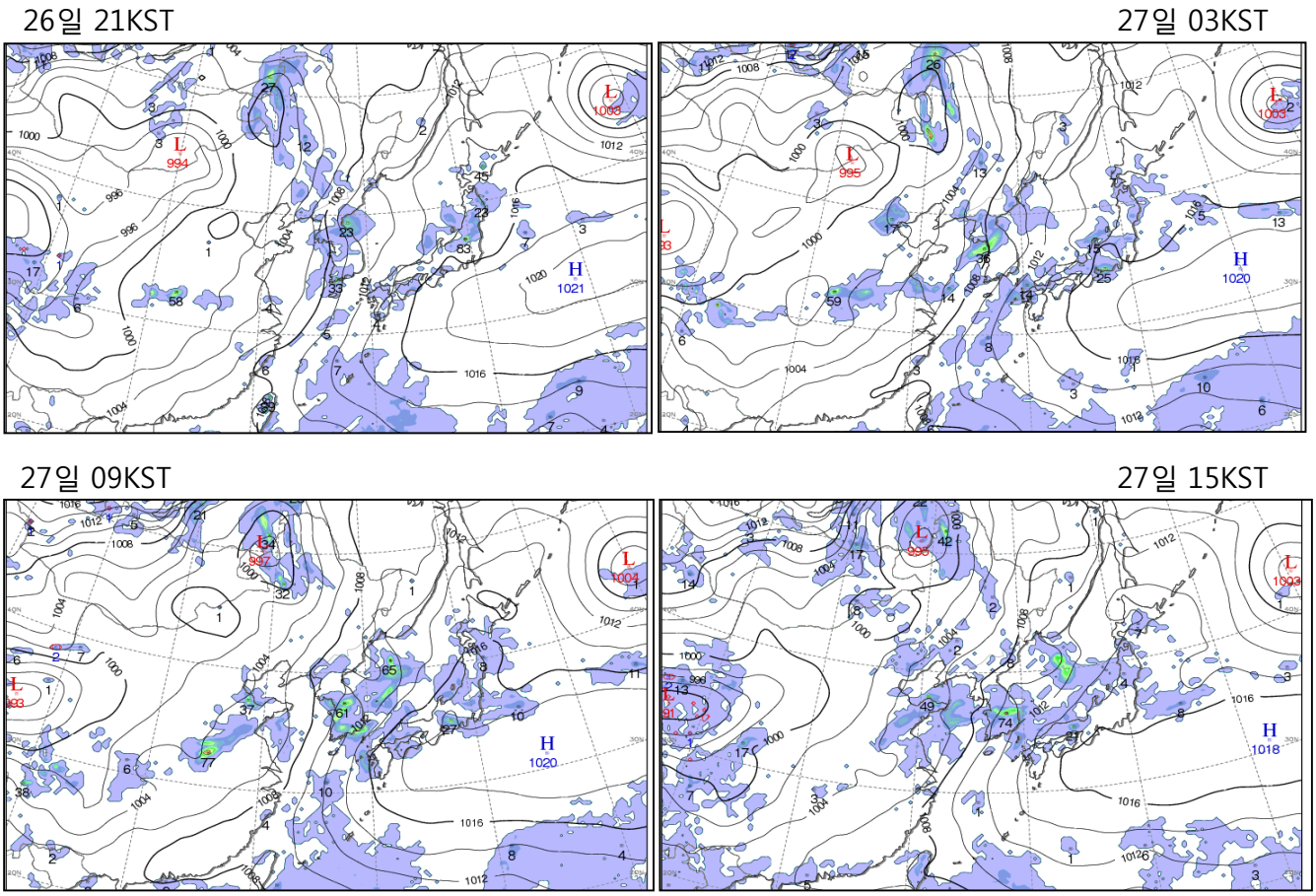
사례 발생 원인

4.1. 종관 및 중규모 환경

4.1.1. 해면 기압 패턴

본 호우 사례가 발생하는 기간 동안, 한반도 동쪽에는 서태평양 고기압, 서쪽에는 대륙 저기압이 위치하여, 그 사이에 남서-북동 방향으로 놓인 등압선들이 비교적 조밀하게 한반도를 덮고 있다(그림 4.1.1). 이로 인해 황해와 한반도 서해안 지역에는 강한 남~남서풍대가 나타나고 있다.

지상에서의 또 다른 중요한 특징은 중규모 기압능이 신의주-원산만 사이에서 동서방향으로 발달 해 있고, 이와 함께 약한 중규모 기압골이 중부 지역을 동서방향으로 가로 지르고 있는 것이다.

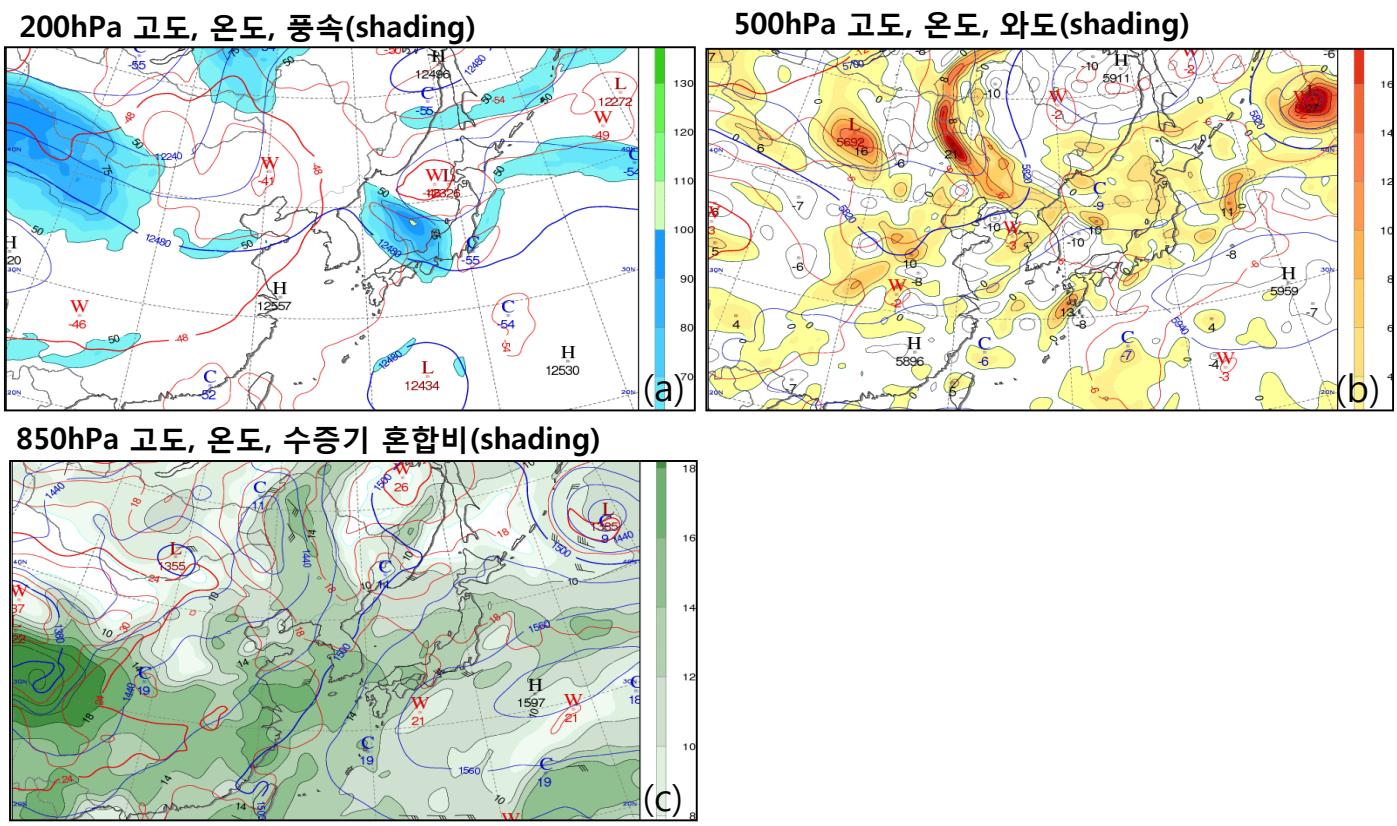


[그림 4.1.1] RDAPS 재분석장: 2011년 7월 26일 21KST~27일 15KST의 아시아 지역 지상일기도

4.1.2. 상층 기상 패턴과 종관 규모 강제

한반도와 그 주변은 경압 불안정이 약한 것으로 나타났으며, 그와 연관하여 상층 바람도 비교적 약한 지역에 속하는 것으로 나타났다(그림 4.1.2). 이 그림에 따르면, 상층 강제(와도 이류, 상층 제트 강제 등)는 약한 편이다.

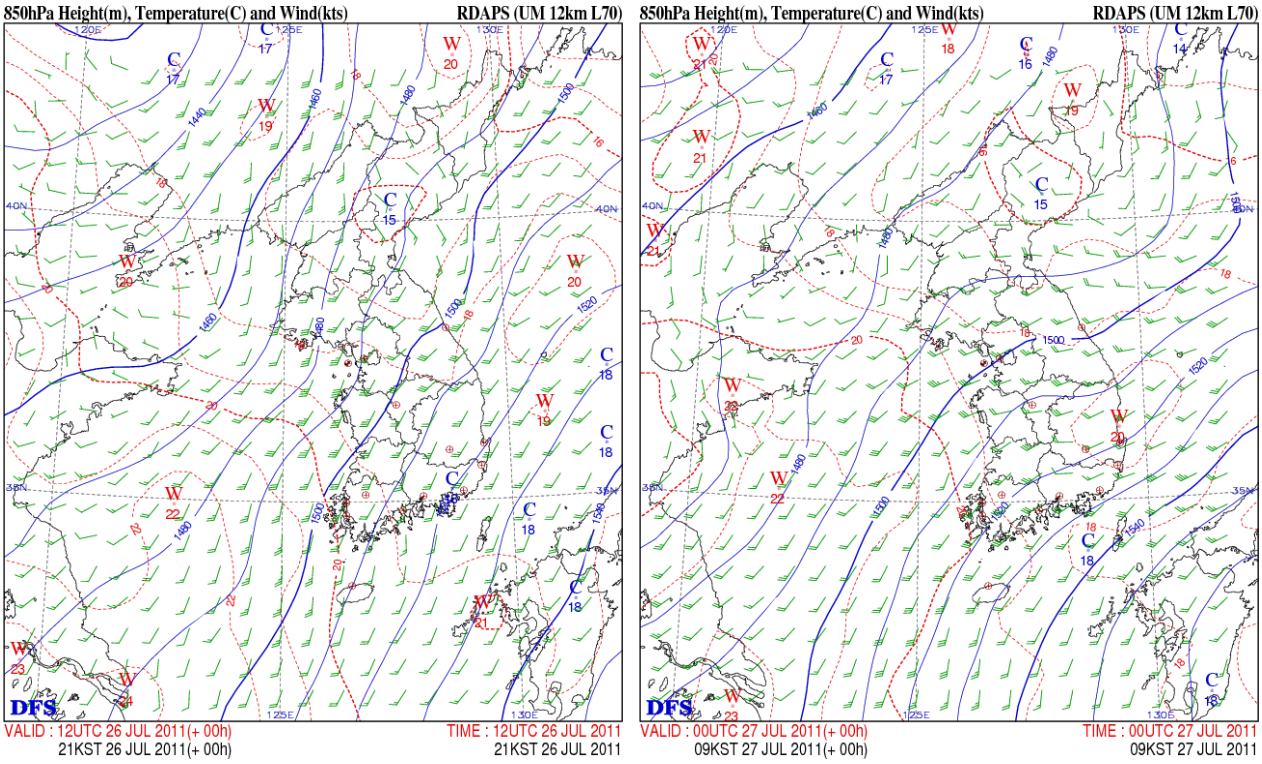
하층(850hPa)에서는 호우 발달에 중요한 조건들이 나타나고 있다. 한반도와 황해 남부에서 강한 남서풍대가 나타나고 있고, 수증기 혼합비 최대 구역이 한반도 풍상측에 위치하고 있어 남서쪽으로부터의 온난 습윤 공기를 공급할 수 있는 경로가 형성되어 있다(그림 4.1.2).



[그림 4.1.2] RDAPS 재분석장 : 2011년 7월 26일 21KST의 (a) 200hPa 고도(청색 실선), 온도(적색 실선), 풍속(Shading), (b) 500hPa 고도(청색 실선), 온도(적색 실선), 와도(Shading), (c) 850hPa 고도(청색 실선), 온도(적색 실선), 수증기 혼합비(Shading)

4.1.3. 한반도 주변의 850hPa 바람 구조

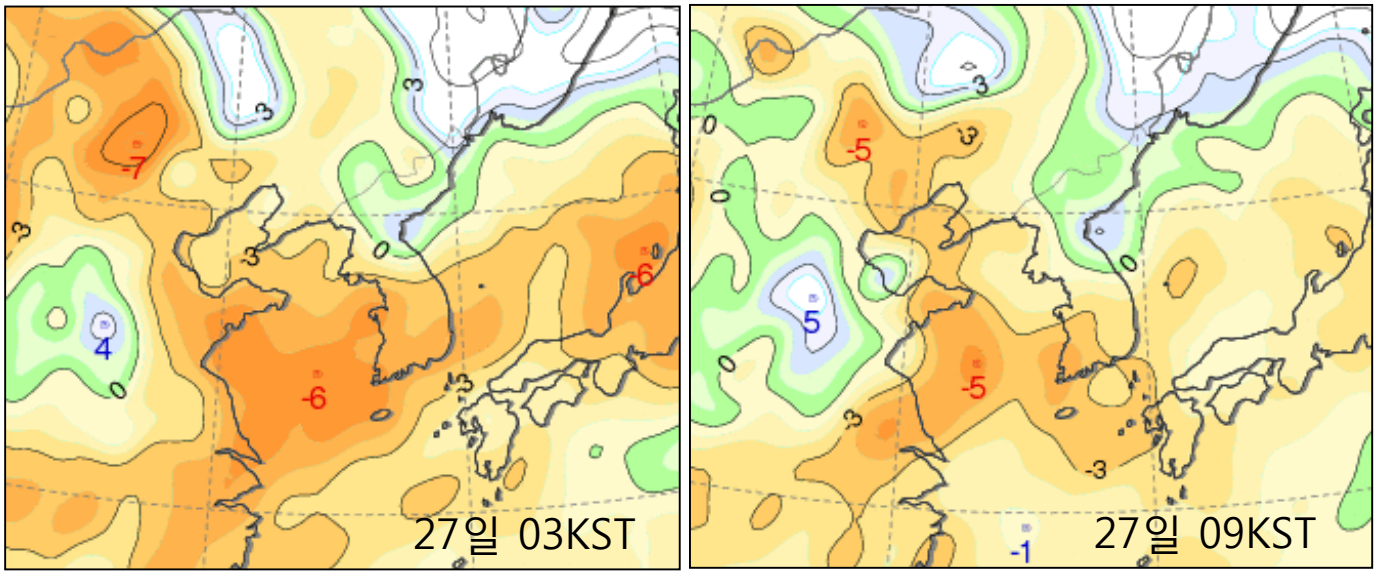
호우 기간 동안 한반도 하층에는 중요한 고도 패턴 변화가 있었다. 7월 26일 21KST에는 850hPa 등고도선이 대체로 남서-북동 방향으로 서 있으나, 27일 09KST에는 원산 앞 동해상에서의 기압골 발달로 인해 한반도의 등고선이 대략 동서 방향으로 누워있는 형태를 보이고 있다. 바람 분포도 7월 26일 21KST에 황해상에서는 대체로 남풍~남남서풍이 불고 한반도에서는 남서풍이 주로 불고 있는데 비해, 27일 09KST에는 황해 중부와 남부 모두에서 남서풍이 지배적이고 남한지역에서는 서풍이 불고 있다. 특히, 중부지방에서 바람의 변화 모습을 잘 보이고 있다.



[그림 4.1.3] 850hPa Height and Winds for 21KST 26(Left) and 09KST 27(Right) July 20113

4.1.4. 대기 안정도

호우 기간 동안 황해와 남한 지역은 대체로 불안정한 편으로 나타났다. 27일 03KST(수도권 호우 전반기)에는 경기도 인근 해상에 비교적 큰 CAPE가 나타나고 있으며(Not Shown), Lifted Index (LI)도 경기도 해안과 해상에서 -3 이하의 값이 나타나고 있다(그림 4.1.4).
27일 09KST에는 경기도 해상과 해안이 03KST에 비해 안정화되어 CAPE는 많이 감소하였으나, 해안에는 여전히 LI가 음의 값을 보이고 있다. 참고로 27일 오산에서의 CAPE는 03KST에 663J kg-1 그리고 09KST에 1722J kg-1로 강한 대류계의 발달이 가능한 것으로 보인다.



[그림 4.1.4] Lifted Index for 03KST 27(Left) and 09KST 27(Right) July 2011

4.2. 호우 시스템의 진화

4.2.1. 수도권 강수계의 기간 별 주요 특징

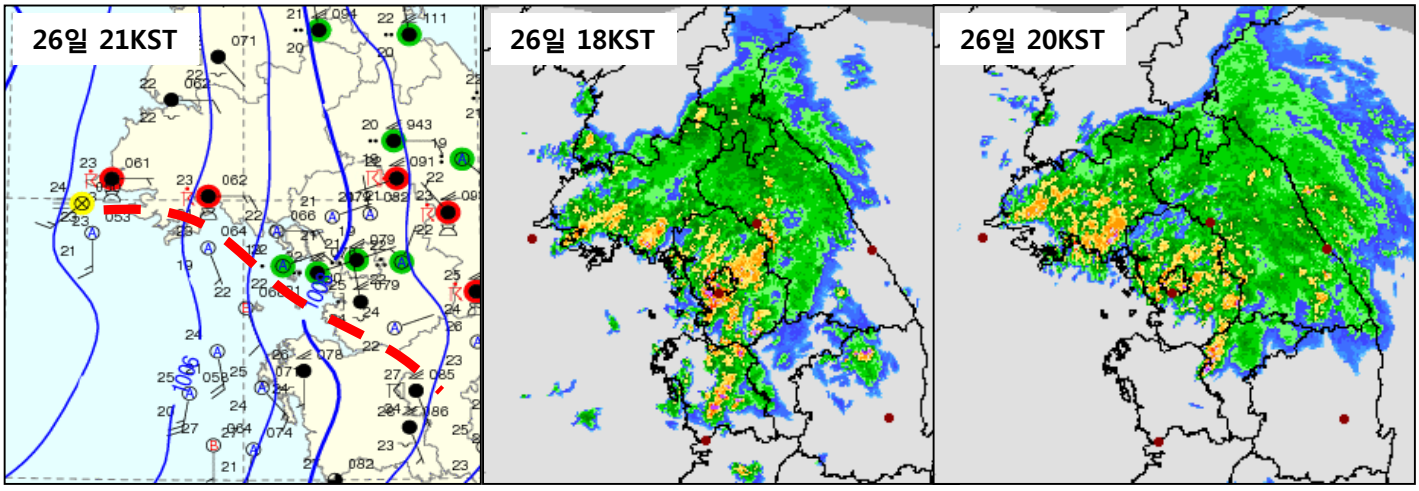
이 호우 사례는 중부지역에서 7월 26일 오후부터 시작하여 27일 넘어서까지 이어진 비교적 긴 호우 사례 이었다. 그리고 기간에 따라 다른 강수계 패턴을 보이는 모습을 보여주었다.

26일 15~20KST에는 주로 경기도와 황해남도의 해안선을 따라 강한 강수계 발달하였고(그림 4.2.1), 27일 01KST부터는 비교적 넓은 강한 강수 밴드가 남서-북동 방향으로 발달하여 서해로부터 강수계가 진입하며 수도권에 호우를 가져왔다(그림 4.2.2). 그러나 27일 06~11KST 에는 폭이 좁은 밴드형 강수계가 서해상에서 발달한 후, 내륙으로 이동하면서 수도권에 매우 강한 호우를 일으켰다(그림 4.2.3).

4.2.2. 호우 시스템의 진화

1) 7월 26일 오후의 강수계와 지상 바람

이 기간의 강수계는 주로 중부 서해안 지역에서 강한 강수계들이 나타나고 한반도 중북부 넓은 지역에 층운계 강수를 보이는 것으로 분석된다(그림 4.2.1). 이 같은 강수계 분포를 나타내는 이유는 해안 지역에 강한 대류를 일으킬 강제가 존재했기 때문인 것으로 보인다. 참고로 지상일기도에 나타난 지상 바람을 보면, 황해상에는 남풍계의 강한 바람이 불고 있으나 경기도와 황해남도 해안에는 동풍이 뚜렷하게 나타나고 있어 하층 바람의 수렴이 이 해안을 따라 존재하고 있음을 보여준다. 이 지역의 대기가 불안정한 상태이기 때문에 해안선을 중심으로 나타나는 수렴은 대류계 발생을 가능케 할 것으로 분석된다. 한편, 한반도 중북부의 중층 바람이 남서풍이므로(그림 4.1.2, 4.1.3), 대류계와 연관된 층운이 이 지역에 널리 나타날 수 있었을 것으로 추정된다.



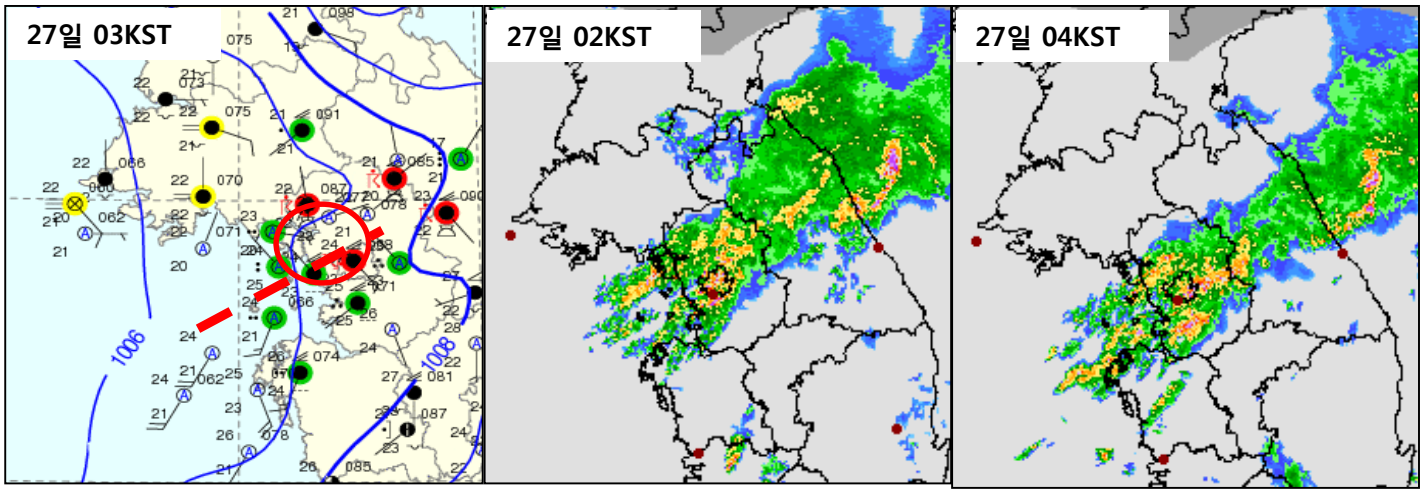
[그림 4.2.1] 2011년 7월 26일 21KST의 지상일기도(왼쪽), 18KST(가운데)와 20KST(오른쪽)의 레이다 영상

2) 7월 27일 새벽의 강수계와 지상 바람

이 기간에는 대체로 해상에서 발생한 다수의 선형 대류계들이 북동진하여 수도권에서 넓은 밴드를 형성하는 모습을 보여준다(그림 4.2.2).

강한 대류계들이 서울에 계속 나타나고 있음을 볼 수 있다. 03KST의 지상일기도에 나타난 바람의 모습도 강수밴드를 중심으로 수렴하는 모습을 잘 보여주고 있다. 해상에서 밴드 남쪽의 지상 바람이 강하게 나타나고 있어 강수계로의 수렴과 수분 수송이 강한 것으로 분석된다.

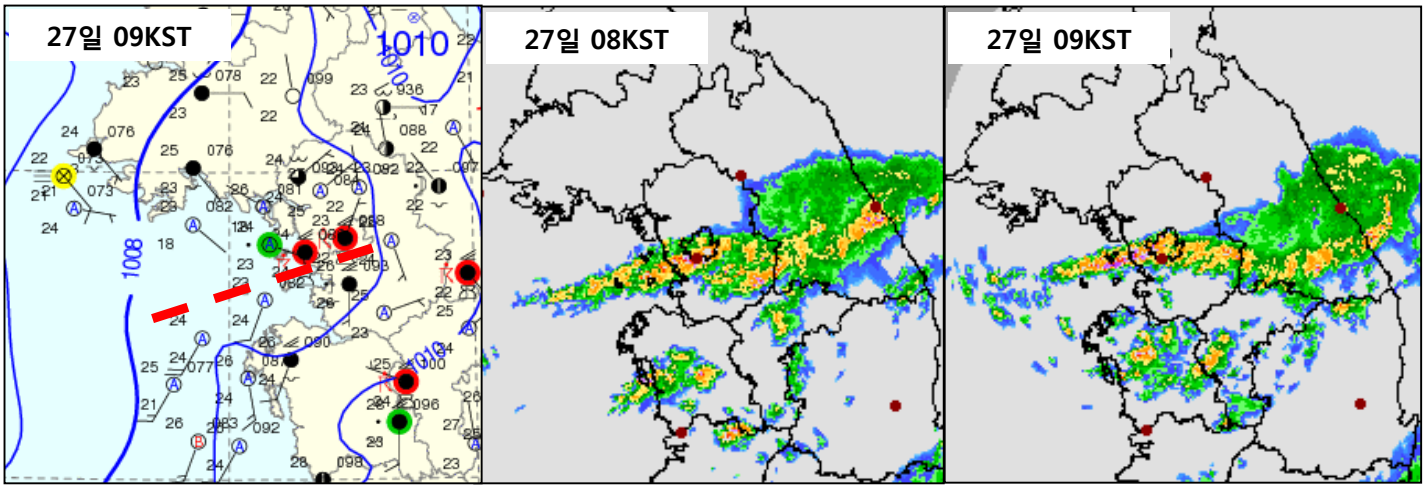
이 기간 동안 층운계 강수계의 폭이 지난 시간대에 비해 상대적으로 좁아진 것은 이 시간의 중하 층(예, 850hPa) 바람의 방향 변화와 연관된 것으로 분석된다(예, 그림 4.1.3).



[그림 4.2.2] 2011년 7월 27일 03KST의 지상일기도(왼쪽), 02KST(가운데)와 04KST(오른쪽)의 레이다 영상

3) 7월 27일 오전의 강수계와 지상 바람

이 기간에는 대체로 해상에서 발달한 비교적 폭이 좁은 대류 밴드의 대류계들이 서울 방향으로 이동하면서 강한 대류계로 발달하여 서울 부근에서 강한 에코가 이어지는 것을 보여준다(그림 4.2.3). 이 기간 동안 강수계의 폭은 새벽 시간대에 비해 더욱 좁아진 것을 보여준다. 이날 새벽 시간대에는 해상에서의 대류계 발생이 여러 지점에서 일어난 후 중하층 바람을 따라 북동진하면서 여러 밴드가 만들어지고 결과적으로 육지에서 비교적 넓은 강수밴드를 형성한 데 비해, 07-09KST에는 해상에서 단일 밴드 상에서 대류계가 발달하였고 중하 층 바람을 따라 조건부 불안정이 더 강한 육지로 이동하면서 강한 단일 밴드를 형성하였다(예, 그림 4.1.3). 해양에서 단일 밴드가 만들어지는데 대한 원인은 단일 수렴선이 발달하였기 때문인 것으로 보이나 정확한 규명을 위해서는 더 깊은 연구가 필요한 것으로 판단된다.



[그림 4.2.3] 2011년 7월 27일 09KST의 지상일기도(왼쪽), 08KST(가운데)와 09KST(오른쪽)의 레이더 영상

4.3. 호우 발생 원인

4.3.1. 발생 원인

1) 호우 발생에 호의적인 환경

강한 남서풍대의 발달 및 지속 (황해와 서해안 지역)은 풍부한 수증기의 지속적 공급을 가져올 뿐만 아니라 중규모 수렴대 발달에도 중요한 역할을 할 수 있는 것으로 본 사례에서도 호우를 가져오는 중요한 환경이 된 것으로 판단되고, 불안정한 대기 조건이 지속되었다.

2) 호우 시스템 유발 요인의 지속적 조성

중부 서해안 지역과 내륙에 호우시스템 유발 요인이 지속적으로 조성된다.
유발 기구: 강한 남서풍대와 연관된 중규모 수렴(예, 그림 4.2.1, 4.2.1, 4.2.3, 4.3.1, 4.3.2).

3) (호의적 환경 + 호우시스템 유발 기구)의 지속적 존재가 호우 발생과 지속의 원인

중부 서해안 지역에서 강한 대류계가 지속적으로 발생하여 수도권으로 진입하거나, 수도권에서의 강수계 발달된다.

4.3.2. 호우 시스템 유발 요인의 형성 과정

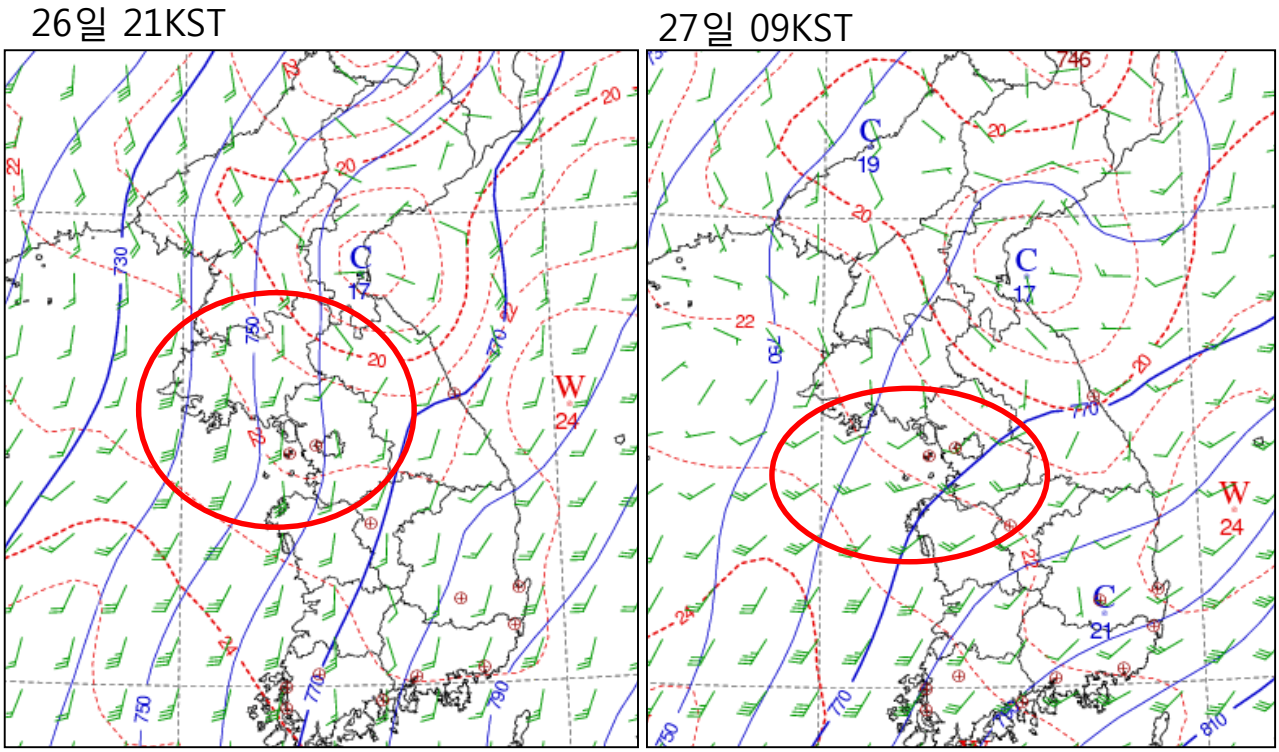
1) 강한 남~남서풍대의 지속

정체적 종관 규모 기압 배치는 그림 4.1.1과 그림 4.1.2를 통해 확인 할 수 잇다.
북한 지역에 정체하는 중규모 기압능은 황해와 한반도의 등압선을 남서-북동 방향으로 서게 함으로써 황해와 서해안의 남풍대 유지에 일부 기여한다.

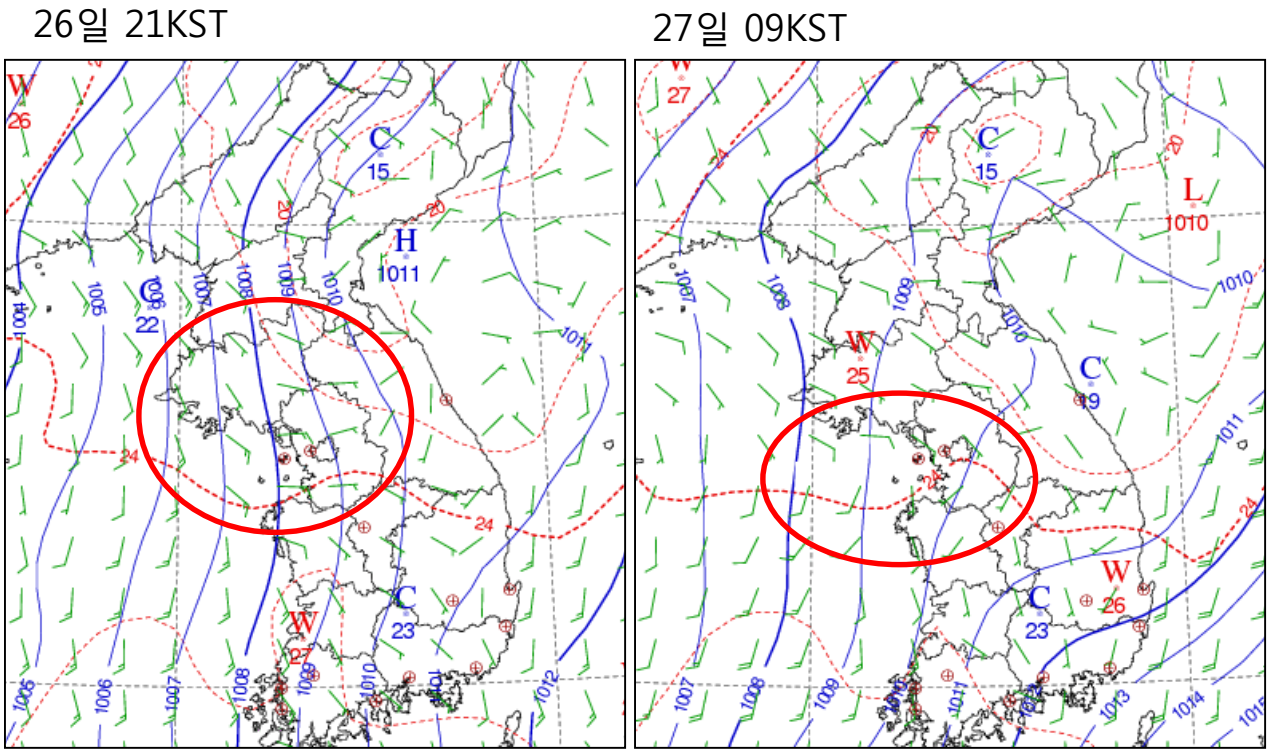
2) 호우 시스템 유발 조건의 형성

중부 해안 지역에서의 수렴 구역이 형성된다(26일 21KST; 그림 4.2.1, 4.3.1, 4.3.2).
 - 남풍대가 발달한 상황에서 육지에서의 지표 마찰 효과와 대류계 발달의 영향으로 인해 내륙 지역에서 동풍 성분이 증가하였고, 비교적 강한 남풍이 불어 들어오는 해안 지역에서 하층 수렴이 나타났을 것으로 추정된다.

경기도를 포함한 중부 내륙에서의 수렴 지역이 형성된다(27일 09KST; 그림 4.3.1, 4.3.2).
 - 중부와 강원도 앞 바다에 기압골이 발달하면서 남한 지역 등압선이 SW-NE로부터 WSW-ENE 방향으로 변화한다.
 → 수도권을 포함한 경기도 지역에 상대적으로 약한 기압경도
 → 남서풍대 전면에서의 강한 수렴 구역 조성(경기도와 해안 지역)
 (지면마찰효과가 아닌 대기 과정에 의한 하층 대기 수렴 유발 요인)



[그림 4.3.1] 2011년 7월 26일 21KST(왼쪽)와 27일 09KST(오른쪽)의 925hPa 고도(청색 실선), 등온선(적색 점선) 그리고 바람. 적색 서클은 풍속과 풍향의 급변 지역을 표시한 것임



[그림 4.3.2] 그림 4.3.1과 같음. 단, 지상 일기도(해면기압, 지상 온도와 바람)

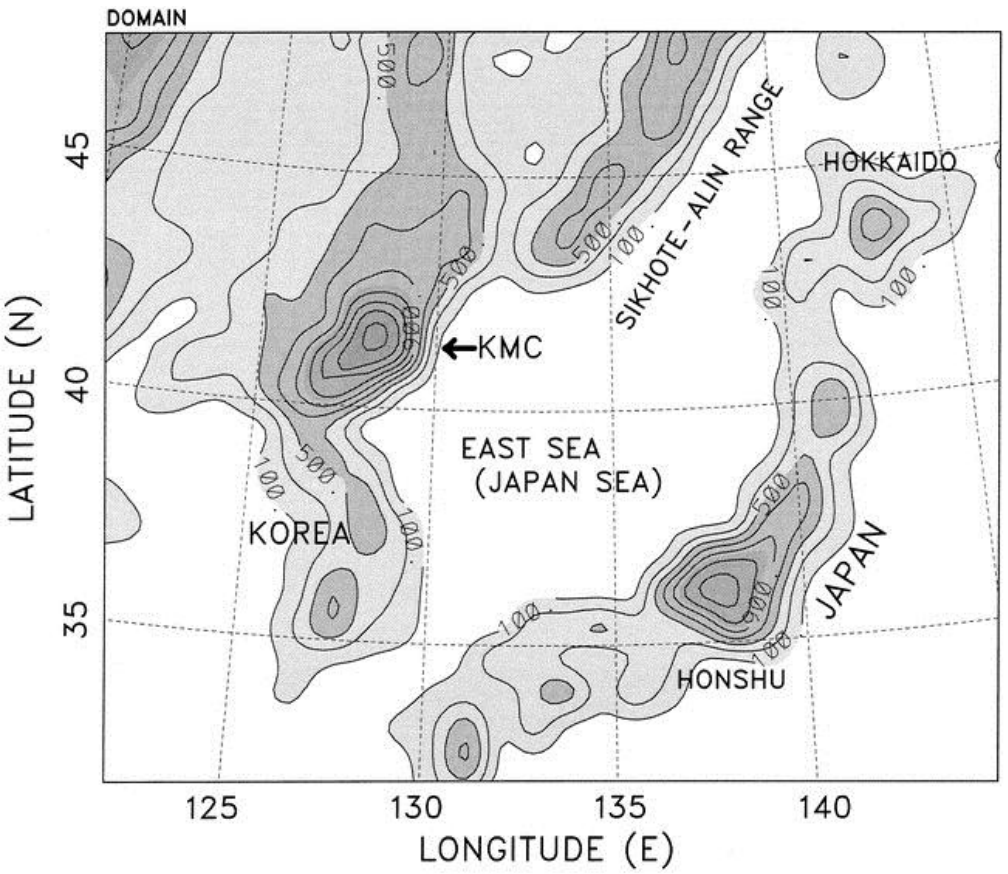
4.3.3. 호우 지속과 북한 지역 중규모 기압능의 관계

1) 호우 지속 요인

호우 유지에 가장 중요한 조건은 강한 남풍대(또는 남서풍대)의 지속적 존재와 강수계 유발 요인의지속적 조성이라 할 수 있다. 본 사례의 경우, 한반도 동쪽의 서태평양고기압과 서쪽의 대륙 저기압이 유지되는 정체적 대규모 기압 배치가 강한 남풍대 유지를 가능케 하는데 가장 중요한 원인인 것으로 판단된다. 한편, 북한 지역에 정체하는 중규모 기압능은 황해와 한반도의 등압선을 남북 방향으로 서게 함으로써 황해와 서해안 지역의 남풍대 유지에 기여하면서 결과적으로 중부지역 호우 발생에도 영향을 주었을 가능성이 있다.

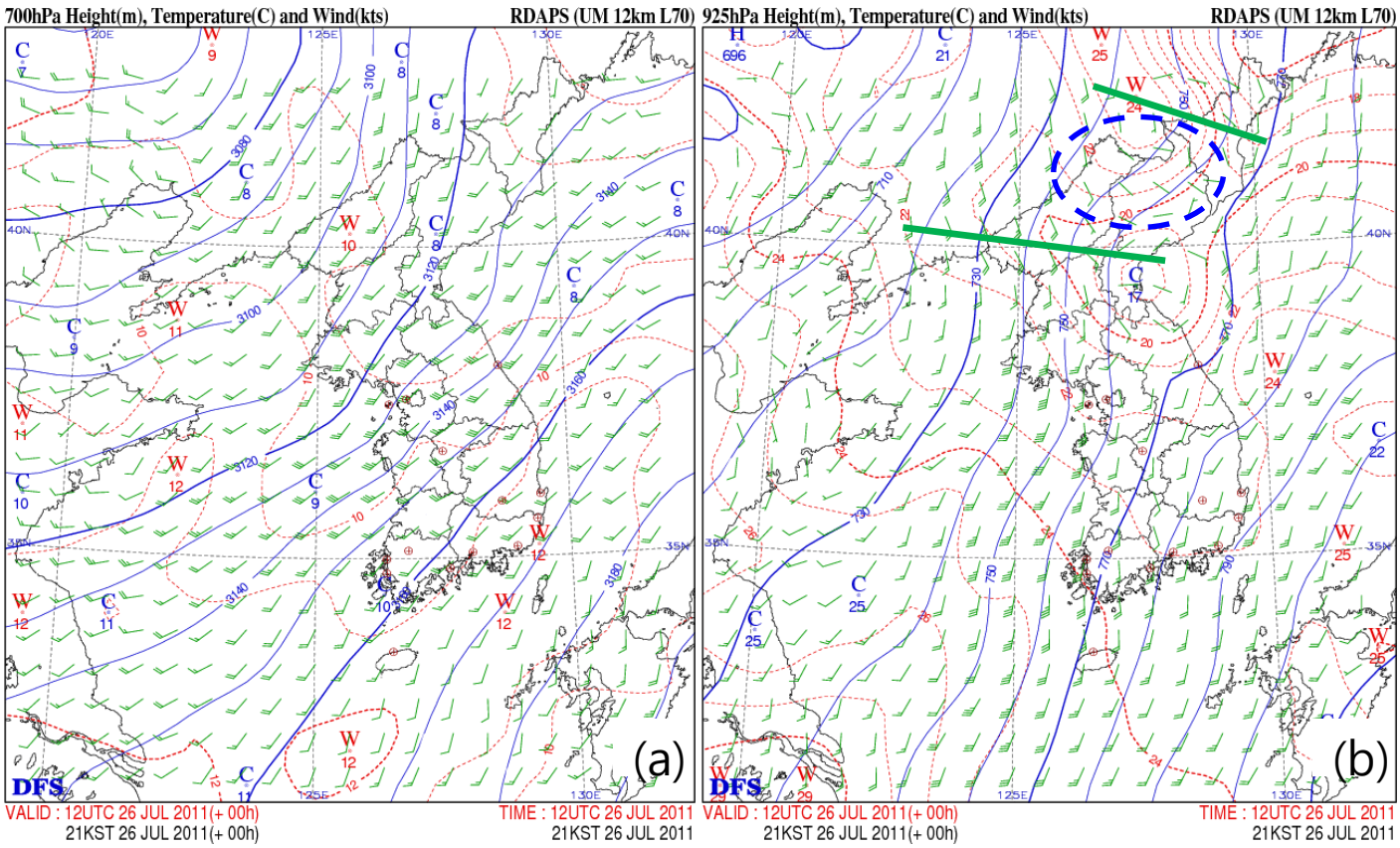
2) 중규모 기압능의 발달 원인

북한지역에 나타난 중규모 기압능의 발달은 개마고원을 포함한 북한 지역 지형(KMC, 그림 4.3.3)에 의한 Blocking 효과 때문인 것으로 보인다(이주영, 이태영, 2014).



[그림 4.3.3] 동아시아 지역의 평활된 지형. KMC는 Korean Mountain Complex의 약자임 (출처: Lee and Park, 1996)

북한 지형의 효과는 그림 4.3.4에서도 볼 수 있는데, 700hPa에서는 남서풍이 산악을 넘어가지만 925hPa에서는 KMC 풍상측에서 남서풍이 갈라져 KMC를 넘지 못하고 옆으로 갈라져 흐르고, 이 때 풍상측에서는 중규모 기압능, 풍하측에서는 중규모 기압골이 나타나는 것에서 알 수 있다. 그리고 풍상측에 한냉 지역이 그리고 풍하측에 온난 지역이 나타나는 것도 지형과 연관된 것이라 하겠다.

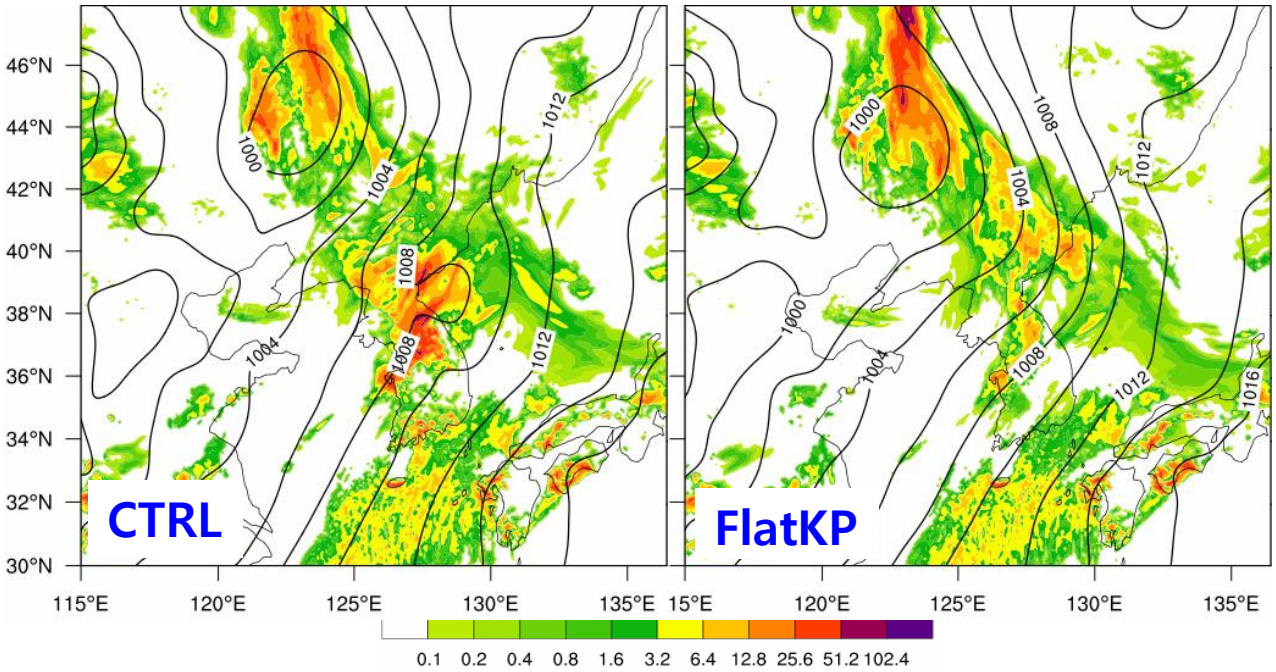


[그림 4.3.4] 2011년 7월 26일 21KST의 RDAPS 재분석장: (a) 700hPa와 (b) 925hPa 고도(청색 실선), 등온선(적색 점선)과 바람. 굵은 청색 파선 서클은 개마고원을 포함한 산악 지역을 나타내며, 굵은 초록색 실선은 기압능과 기압골을 나타냄

3) 북한 지형의 역할

이 사례에서의 기압 패턴과 강수량에 대한 지형의 효과는 이주영·이태영(2014)의 연구 결과를 인용하여 소개하고자 한다.

이들의 결과 중 Control 실험(CTRL) 결과와 한반도를 모두 평지로 바꾼 실험(FlatKP)의 결과 비교 하나를 그림 4.3.5에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 북한 산악이 존재할 때는 북한 산악 풍상측에 기압능이 존재하지만, 평지로 놓았을 때는 기압능이 나타나지 않고 한반도 북서쪽의 저기압으로부터 이어지는 기압골이 북한지역을 남동 방향으로 가로지르는 것으로 나타나, 북한 산악이 기압패턴에 상당한 영향을 미친 것으로 판단된다. 중부지방 6시간 강수량 분포도 상당한 차이를 보여주고 있다.



[그림 4.3.5] 지형 효과 실험: Control 실험(CTRL, 왼쪽)과 한반도를 모두 평지로 가정하고 수행한 실험(FlatKP, 오른쪽)에 의해 모사된 2011년 7월 26일 21KST의 해면기압(실선)과 모사된 6시간 누적 강수량(mm, Shading). 출처: 이주영, 이태영(2014)

4.3.4. 요약

1) 2011년 7월 26-27일 중부지역 호우의 발생 원인

① 호우 발생에 호의적인 환경
- 강한 남서풍대의 발달 및 지속, 그리고 이로 인한 풍부한 수증기의 지속적 공급 + 불안정한 대기

② 호우 시스템 유발 기구 존재
- 중부 서해안 지역과 내륙에 호우시스템 유발 요인이 지속적으로 조성된다.
- 유발 기구: 강한 남서풍대와 연관된 중규모 수렴에 의한 상승한다.

③ (호의적 환경 + 호우시스템 유발 기구)의 지속적 존재가 수도권 호우의 발생 원인

2) 호우 시스템 유발 요인

① 중부 해안 지역에서의 수렴 구역 형성
- 강한 남풍 상황에서 육지의 지표 마찰과 대류계 영향으로 인해 해안에 하층 수렴구역 발생이 가능 (추정)

② 중부 해안과 내륙에서의 수렴 구역 형성
- 기압 분포 변화로 인해 남서풍대 전면 (경기도와 해안 지역)에서 강한 수렴 구역 발달

3) 호우 지속의 요인

① 정체적 대규모 기압 배치가 강한 남서풍대 유지를 가능케 함으로써 호우 유지의 가장 중요한 원인으로 판단된다.

② 북한 지역에 정체하는 중규모 기압능은 남풍대 유지에 일부 기여함으로써 중부지역 호우의 발생과 지속에 영향을 주었을 것으로 추정됨. 이 중규모 기압능은 북한 산악의 효과로 발달한 것으로 판단된다.

5

사전 예측을 위한 검토 자료

5.1. 예측 일기도를 활용한 집중호우 매개변수 분석

2013년 고급훈련 기술서 중 “2010년 9월 21일 추석 전후 수도권 호우” 부분에서 집중호우를 야기한 중규모대류계는 하계 전선(장마) 및 경압불안정에 동반된 중규모대류계, 하계 태풍 동반 중규모대류계, 장마 후 북태평양 고기압 가장자리의 불안정에 의한 중규모대류계 등 3 가지로 크게 분류할 수 있고, 종관규모 강제력 매개변수들과 중규모 환경 변수들에 대해서 상세하게 기술하였다. 따라서 본 절에서 다루는 내용들을 보다 상세하게 이해하기를 원하는 예보관들은 2013년 고급훈련 기술서를 먼저 정독할 것을 추천한다.

5.1.1. 우면산 집중호우를 유도하는 예측 매개변수 검토

1) 종관규모 강제력 예측 매개변수

지금부터는 예보관들이 예보를 결정하는데 필요한 종관규모 강제력을 보여주는 매개변수들과 대류계 주변 환경을 보여주는 변수들이 분석일기도와 모델자료에서 어떻게 나타나고 있었는지를 살펴보기로 하겠다. 결론을 먼저 말하면, 집중호우가 발생하기 24시간 전에 예측한 수치모델 자료들은 중부지방에서의 집중호우 가능성에 대한 시그널을 충분히 보여주고 있었고, 실제로 기상청 통보문을 보면 25일 모델 결과자료를 활용한 26일 새벽 예보에서는 30~80mm 정도의 강수량을 예보했지만, 26일 오후에 발표된 예보에서는 집중호우 가능성을 예측하고 최대 150mm까지 강수량을 늘린 것을 볼 수 있다. 실제로 이 집중호우 사례에 대해서는 기상청의 예보 부정확성을 비판하는 내용은 거의 없었고, 초단기예보 지원에 대한 아쉬움을 표시하는 보도들은 조금 있었다.

그림 2.1.2에서 기술했듯이 우면산 집중호우 사례는 북태평양 고기압 가장자리의 상승운동에 의한 대류잠재불안정, 내륙에 위치한 저기압에 동반된 건조공기와 온난 습윤한 공기의 충돌에 의한 상승운동, 상층 Blocking에 의한 대기의 흐름 제한 등과 같은 종관규모 강제력과 중규모대류계 주변의 풍부한 수증기, 대기불안정, 그리고 중규모 강제상승이 서로 복합적으로 작용하여 집중호우에 필요한 풍부한 강제력들을 만들어져 지속적인 집중호우가 중부지방에 집중되었다.

그림 5.1.1은 지상에서 상층까지 종관규모 강제력을 판단할 수 있는 14개의 매개변수들을 정리한 것이다.

✓지상~상층 종관규모 매개변수

- SFC : 북태평양 고기압 가장자리, 기압경도, Precipitable Water
- 925/850 : Moisture Flux, LLJ, Convergence, Warm Advection, High EPT
- 700 : Gradient of EPT, P-velocity, Moisture
- 500 : Geopotential Heights(WPSH), Ridge, W-SW Flows, Dry Slot, Blocking
- 200 : Ridge, Exit of ULJ, Divergence

[그림 5.1.1] 종관규모 매개변수 종합

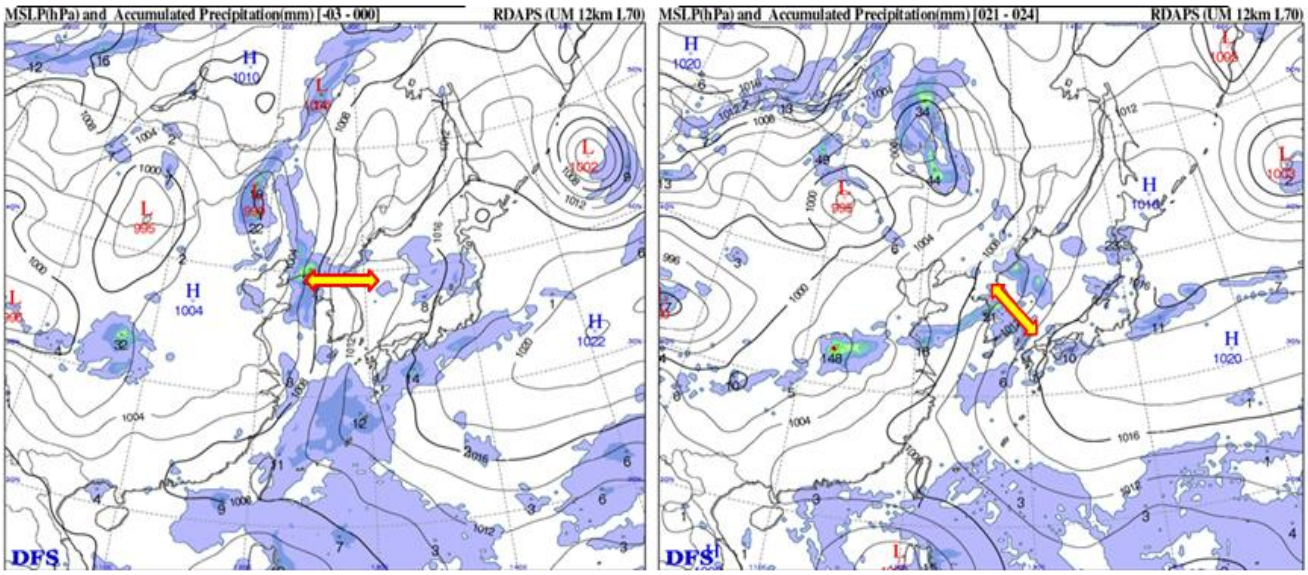
지상 예측일기도에서는 (1) 북태평양 고기압 가장자리에 놓여서 중규모 대류잠재불안정 구역에 놓였는지, (2) 기압경도의 방향이 중규모대류계의 위치와 방향에 어떤 영향을 미쳤는지, (3) 단열선도에서 분석했던 가강수량은 얼마나 충분했는지를 살펴보고, 925hPa과 850hPa 예측일기도를 통해 (4)습윤속은 충분했는지, (5)하층제트는 중규모대류계가 발달하는 지역으로 유입되고 있는지, (6) 하층 수렴구역은 집중호우 구역과 일치하는지, (7) 온난이류와 높은 상당온위를 가진 공기가 중규모대류계 지역으로 진출하고 있는지를 살펴볼 것이다. 700hPa에서는 (8) 좁은 구역에서 강제 대류상승을 야기하는데 유리하도록 큰 상당온위 경도가 형성되어 있는지, (9) 연직운동과 습기의 분포가 중규모대류계 발달에 적합했는지 살펴보고, 500hPa과 200hPa 예측일기도를 통해서 (10) 북태평양 고기압의 역할을 제대로 예측하고 있는지, (11) 기압능과 서풍 혹은 남서기류가 유입되고 있는지, (12) 그리고 이들 기류를 따라 유입되는 건조층에 의한 Dry Slot은 제대로 표현되고 있는지, (13) 대기의 흐름을 방해해서 지속적인 중규모대류계의 발달을 야기하는 Blocking 현상은 예측하고 있는지, (14) 200hPa 고도에서의 상층제트와 상층발산이 하층 수렴과 종관규모 불안정에 의한 상승운동을 역학적으로 도와주고 있는지를 살펴볼 것이다.

2) 대기 분석 및 예측장을 활용한 매개변수 분석

그림 5.1.2는 RDAPS에서 26일 00UTC에 분석된 지상일기도와 24시간 예측 일기도를 보인 것이다.

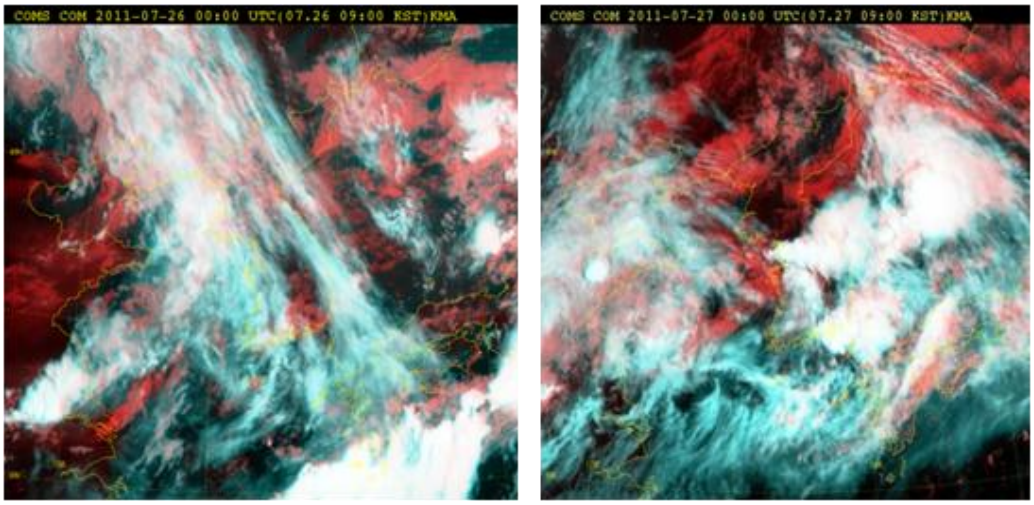
26일 지상일기도 분석장과 26일 지상일기도(그림 2.1.4 지상일기도 참조)는 매우 비슷한 모습을 보여주고 있다. 26일 00UTC 분석장에서 일본 열도를 따라 형성된 북태평양 고기압과 대륙 저기압 사이에 한반도가 위치하고 있으며, 24시간 예상 지상일기도에서는 북태평양 고기압이 일본 남쪽에서 한반도 남해안까지 확장하여 한반도 남부지방이 북태평양 고기압 가장자리에 놓여있는 모습을 잘 모의하고 있다. 그리고 기압경도력의 방향(노란색 화살표)이 북태평양 고기압의 확장에 따라 26일 한반도 서쪽에서 동서방향으로 형성되어 있던 기압경도력이 27일 00UTC에는 한반도 중부지방을 중심으로 북서-남동 방향으로 기압경도력을 강화시키면서 눕는 모습을 보여주고 있다.

기압경도력의 수직 방향으로 강한 강수구역이 형성되어 있는 것을 보여주고 있는데 26일 한반도 서쪽 발해만 부근에 남북으로 서 있던 강수구역이 27일 00UTC에는 한반도 중부지방에 좁게 동서로 가로질러 형성되어 있는 것을 잘 볼 수 있다. 이러한 지상일기도 패턴의 변화는 해당 시간의 위성 영상을 통해서 증명되고 있다.

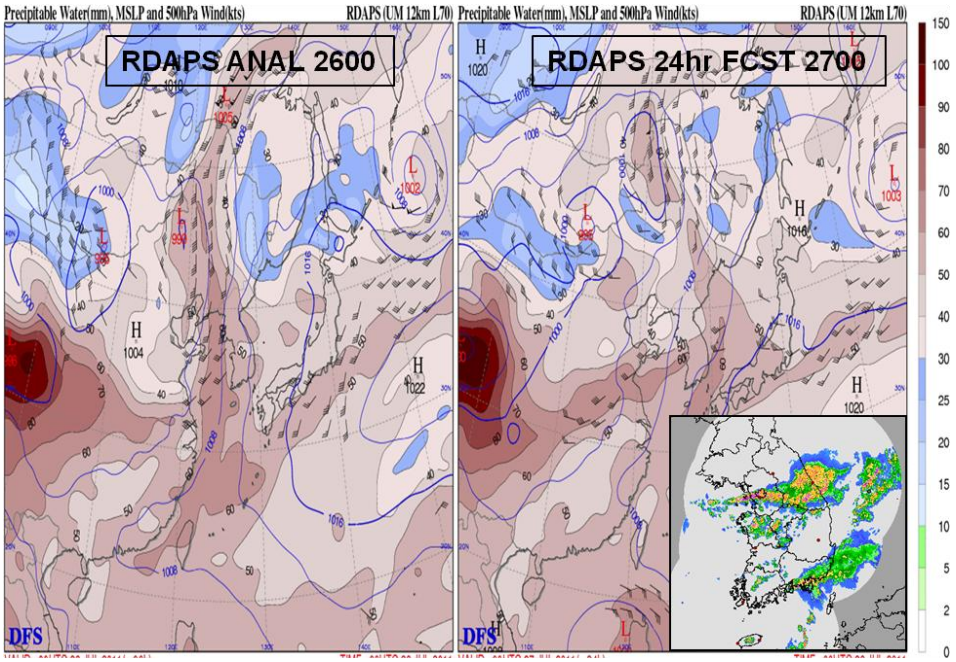


[그림 5.1.2] RDAPS ANAL(2600UTC), 24hr FCST(2700) Surface Charts

그림 5.1.3에서 볼 수 있듯이 26일 00UTC에 한반도 서쪽발해만 부근에 남북방향으로 형성되었던 강하게 발달한 중규모대류계가 27일 00UTC에는 한반도 중부지방에서 동서로 강하게 발달한 중규모대류계가 존재하고 있는 모습을 잘 보여주고 있다. 이는 지상 예측장에서 분석된 매개변수들이 집중호우 발생과 유지에 큰 종관규모 강제력으로 작용하고 있었음을 보여주고 있다.



[그림 5.1.3] 26일 00UTC(좌), 27일 00UTC(우) 합성 위성영상



[그림 5.1.4] RDAPS ANAL(2600UTC), 24hr FCST(2700) PW(Shading), 500hPa Wind Barb and Radar Reflectivity at 2700UTC

그림 5.1.4는 지상에서의 가강수량(Precipitable Water)의 변화 경향을 잘 보여주고 있다.

모델에서 예측되는 가강수량의 집중호우 판단기준은 40mm로 알려져 있다.
26일 00UTC 분석장에서는 60mm 이상의 높은 가강수량을 가진 구역이 한반도 서쪽에 위치하고 있는데 가강수량이 500hPa의 풍향을 따라 중국 동해안에서 서해상을 따라 좁게 남북 방향으로 형성된 형태를 보인 반면 27일 00UTC 예상도에는 중국 중부지방으로부터 한반도 중부지방으로 60mm 이상의 가강수량을 가지는 구역이 습설 형태로 형성되어 있는 모습을 잘 예측하고 있다.

레이더 영상(그림 5.1.4 오른쪽 하단)에서 높은 가강수량을 가진 공기가 남서기류를 따라 유입되는 중부지방에 강한 대류선을 가진 중규모대류계가 발달할 수 있는 중규모 강제력을 가강수량 예상도가 잘 보여주고 있다. 그리고 가강수량이 높은 한반도 중부와 남부지방에 산발적으로 대류성 스톰들이 발달하고 있는데 반해 한반도 북부 지방으로는 전혀 대류성 스톰들이 나타나고 있지 않은데 한반도 북부지방의 낮은 가강수량 지역과 이 매우 잘 일치한다.

RDAPS 분석 및 예측장을 통해서 (1) 북태평양 고기압 가장자리에 놓여서 중규모 대류잠재불안정이 형성되어 있었고 (2) 기압경도의 방향과 강도에 따라 동서로 누운 중규모대류계가 좁은 지역에 형성되었으며, (3) 높은 가강수량에 의해서 한반도 중부지방에서 집중호우가 발생하기에 유리한 종관규모 강제력을 제공하고 있었다는 것을 알 수 있었다.

그림 5.1.5의 위 부분은 850hPa 습윤속, 바람, 수렴구역의 26일 분석장과 27일 00UTC 예측장을 보여주고 있다(925hPa 고도의 습윤속, 바람, 수렴구역도 850hPa과 일치하는 형태를 가지고 있음).

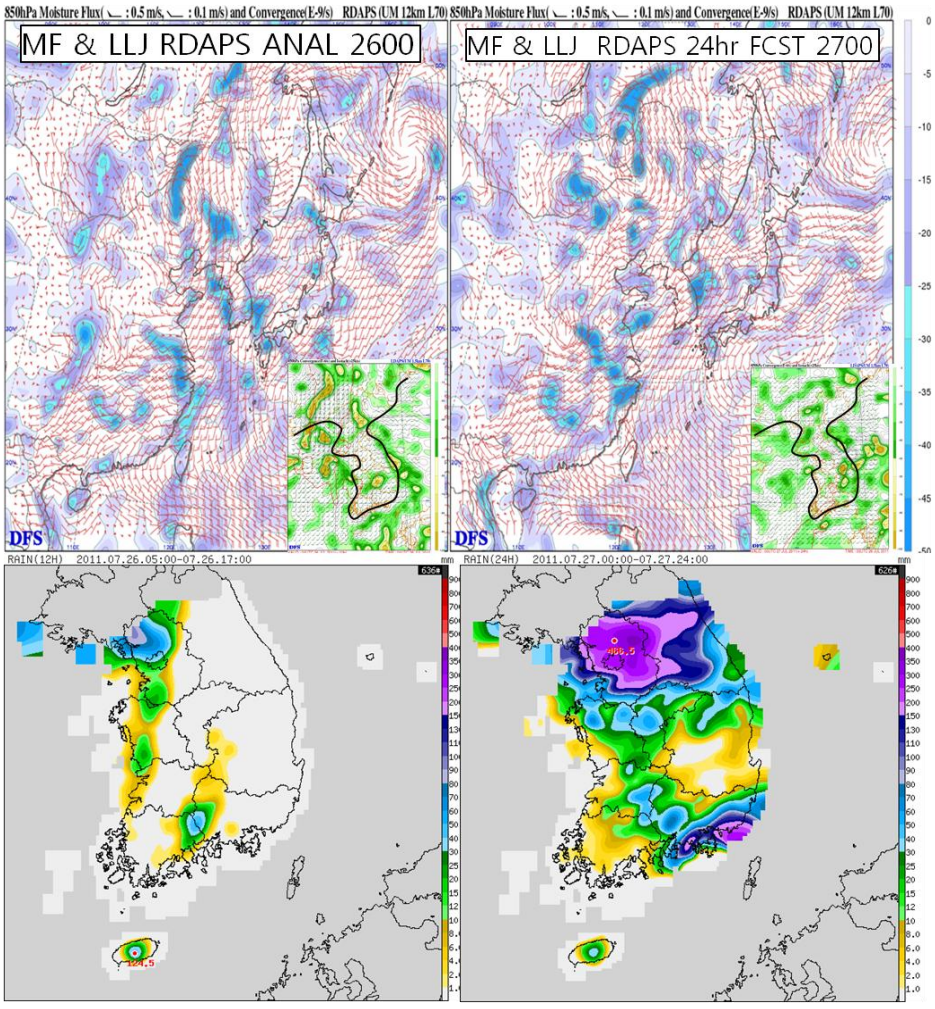
26일 00UTC 분석장에서는 한반도 서해안 부근으로 남풍 계열의 하층제트에 동반된 습윤속 그리고 수렴 구역이 경기만과 옹진반도 부근에 집중되어 나타나고 있다.

26일 북한 해주190mm, 개성140mm의 집중호우가 발생했다는 사실과 26일 AWS 24시간 누적 강수량에서 경기도 북부지방에 강수가 집중되어 있는 것이 850hPa 습윤 속, 하층제트, 그리고 수렴 구역 분석장에서 잘 표현되고 있다. 24시간 예측장을 보면 풍속이 25kts 이상으로 증가한 남서 계열의 하층제트가 한반도 중부지방을 중심으로 강하게 유입되고 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 비록 한반도 상공에는 수렴구역이 뚜렷하게 나타나지는 않지만 중국 양쯔강 부근에서 한반도 경기만 지역으로 좁은 수렴구역이 형성되어 있는 형태를 잘 모의하고 있다.

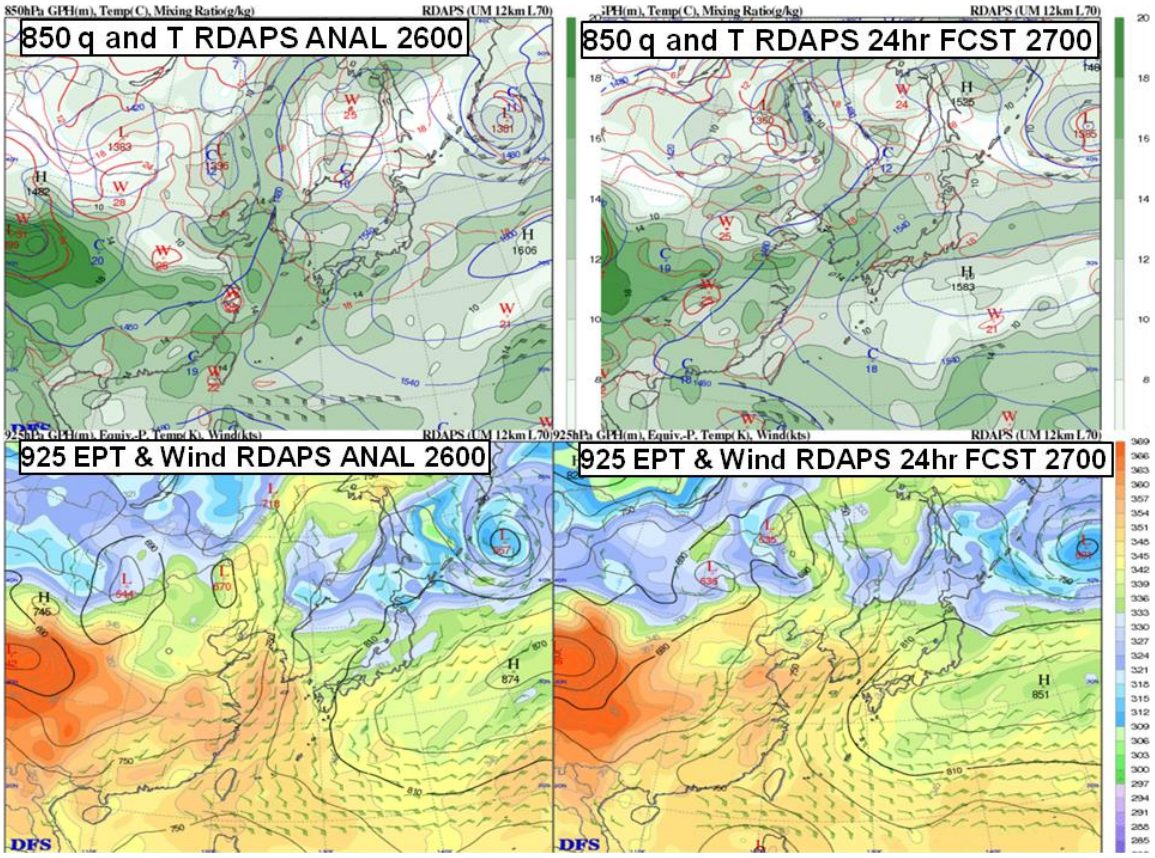
하층제트에 동반된 강한 습윤속의 지속적인 유입과 수렴 구역을 따라 한반도 중부지방에 강한 중규모대류계가 형성될 가능성이 높다는 사실을 예측장이 잘 보여주고 있다.

그리고 27일 AWS 24시간 누적 강수량을 보면 중부지방에 최대 466.5mm의 중심을 가지는 300mm 이상의 집중호우가 발생하고 있다.

이러한 형태의 강수량 수평분포는 다중-세포 선형 중규모대류계(Multi-cell Line MCSs)에 의해서 나타나는 전형적인 모습으로 다중-세포 선형 중규모대류계는 대기 하층에 해당하는 850hPa 과 925hPa에서 강한 습윤속이 하층제트를 따라 유입되는 구역과 수렴구역이 일치할 때 잘 발생하는 것으로 알려져 있다.



[그림 5.1.5] RDAPS ANAL(2600UTC), 24hr FCST(2700) Moisture Flux, Wind and Convergence at 850hPa(Upper), and 24hr Accumulated Precipitation from AWS(Lower)



[그림 5.1.6] RDAPS ANAL(2600UTC), 24hr FCST(2700) GPH, Temperature and Mixing Ratio at 850hPa(Upper), and GPH, EPT and Wind Barb at 925hPa(Lower)

그림 5.1.6은 중규모대류계의 지속적인 발달과 유지를 위해서 필수적인 대기 하층에서의 온난이류와 높은 상당온위의 분포를 보여주고 있다.

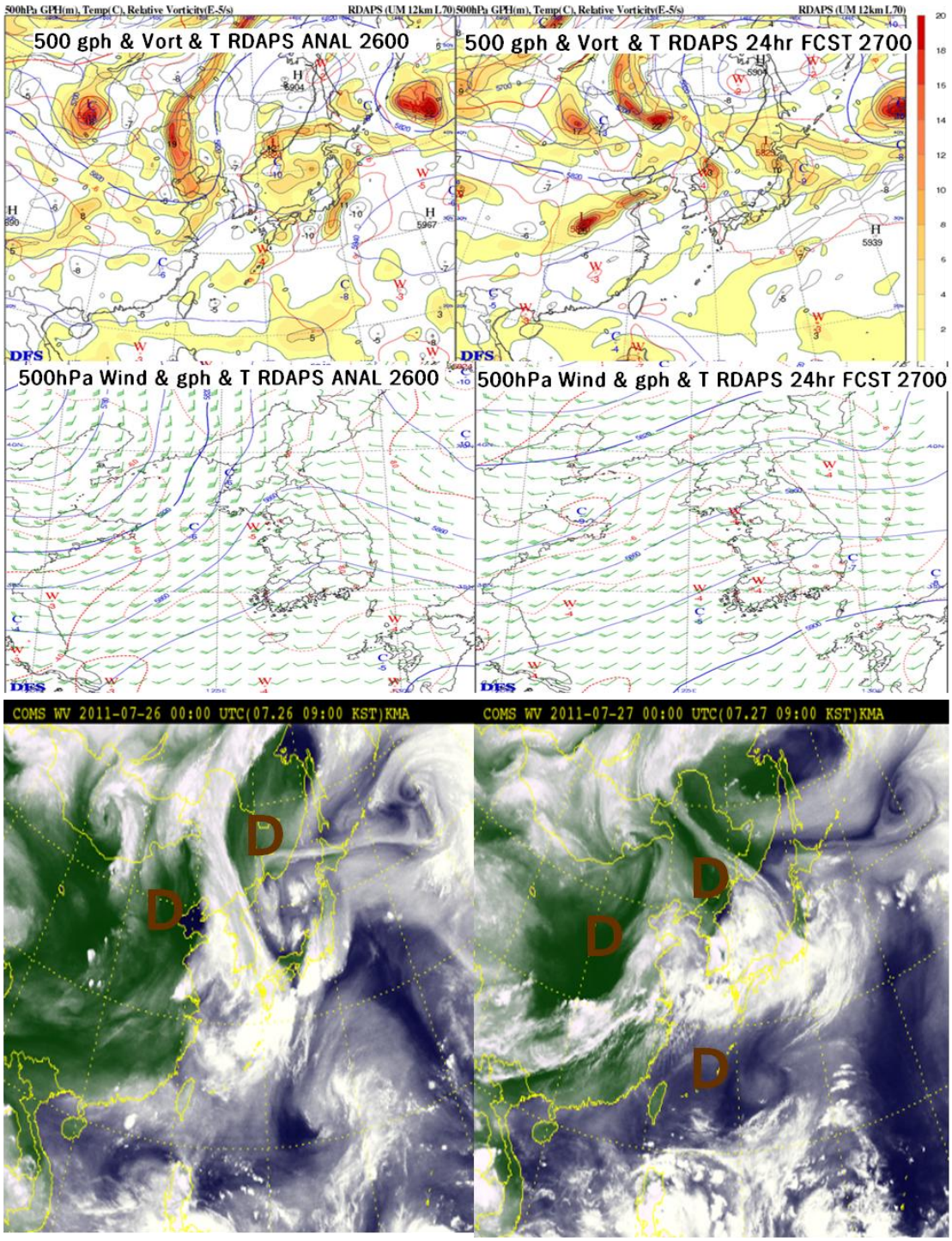
26일 분석장에서 중국 내륙 지방에 온난 구역이 위치하고, 한반도 북동쪽에 한랭 구역이 형성되어 있는 가운데, 등고도선을 따라 남서기류가 한반도 서해상으로 유입되고 있는 모습을 나타내고 있다. 그리고 높은 혼합비를 가지는 습윤한 공기가 서해상에 위치하고 있다. 따라서 한반도 북서쪽과 서해상에서 강한 대류 활동이 발생할 가능성이 매우 높음을 알 수 있다. 그런데 27일 00UTC가 되면 북태평양 고기압 세력이 중국 남부지방까지 확대됨에 따라 등고도선이 한반도 중부지방으로 눕는 형태로 변화하게 되고, 동시에 온난 구역이 한반도 서해상을 지나 한반도 중부지방으로 축을 형성하면서 확대되고 있다.
또한 18g/kg 이상의 높은 혼합비를 가지는 좁은 습설이 한반도 중부지방에 걸쳐 형성되어 있다. 따라서 하층 제트와 함께 유입되는 온난이류를 따라 많은 수증기를 포함한 구름이 한반도 중부지방에 유입되면서 중규모대류계의 발달과 유지에 유리한 하층에서의 종관규모 강제력이 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 이러한 형태는 쿠릴 열도 부근에 형성되기 시작하는 Blocking-high의 영향으로 28일까지 계속 지속되는데 72시간 예측장에서도 이러한 형태가 유지되는 모습을 잘 모의하고 있다.

상당온위의 특성 상 수평경도가 강한 지역에서 강한 상승운동이 발생하는데 Dry Slot과 높은 상당온위를 가지는 공기가 경계를 이루고 있는 한반도 중부지방에서 강한 대류불안정이 형성될 것이고 이 대류불안정 구역을 따라 강한 중규모대류계가 발달할 가능성이 높다는 사실을 잘 보여주고 있다. 대류불안정이 곧 강한 상승운동으로 이어질 것이라는 것은 700hPa 연직 운동을 통해서 확인할 수 있다.

26일 서해상에 위치했던 700hPa 연직 운동 구역이 27일 00UTC에는 중국 남부지방으로부터 서해를 건너 중규모대류계의 활동이 가장 활발했던 한반도 중부지방에 형성되면서 대류불안정과 결합하여 매우 강한 동서방향 대류선을 가지는 중규모대류계가 한반도 중부지방에 유지되는데 결정적인 역할을 하였음을 알 수 있다.

하층의 풍부한 수증기와 에너지의 공급, 그리고 대기 중층과 하층의 연결고리 역할을 하는 700hPa 고도에서의 높은 상당온위 수평경도와 연직 운동의 존재는 매우 강한 강우 강도를 가지는 중규모대류계가 오랜 시간 동안 동일한 지역에 머물러 집중호우를 야기하기 충분한 종관규모 조건을 제공하고 있었음을 알 수 있다.

700hPa 분석 및 예측장에서는 (8) 좁은 구역에서 강제 대류상승을 야기하는데 유리하도록 매우 큰 수평 상당온위 경도가 한반도 중부지방에 집중적으로 형성되었고 (9) 연직운동과 습기의 분포가 중규모대류계 발달과 유지에 적합해서 지속적인 중규모대류계의 발달과 유지에 큰 역할을 수행하였음을 알 수 있었다.



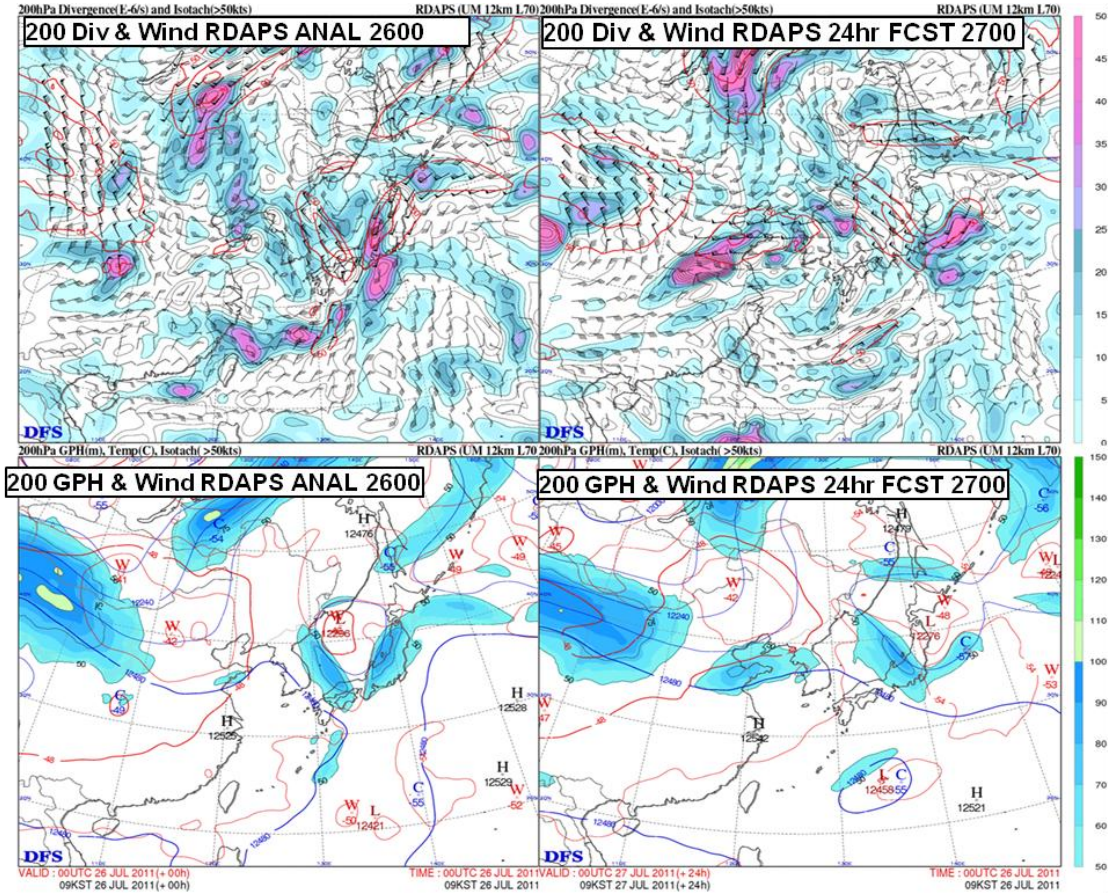
[그림 5.1.8] RDAPS ANAL(2600UTC), 24hr FCST(2700) GPH, Relative Vorticity and Temperature at 500hPa(Upper), and GPH, Wind Barb and Temperature at 700hPa(Middle), Water Vapor Imagery at 2600UTC and 2700UTC(Lower)

그림 5.1.8은 500hPa 고도의 등고도선, 상대와도 본포와 바람장 그리고 수증기 위성영상을 보여주고 있다. 2013년 훈련기술서에서 다루었듯이 북태평양 고기압 주변부는 상대적으로 강한 잠재불안정을 갖는 상승구역이 위치하게 된다.

26일 분석장에서는 한반도 남부지방으로 5880gpm 선이 형성되어 있는 가운데 발해만 부근에 강한 상대와도를 가지는 상층기압골이 형성되어 발해만 부근에서 강한 상승운동이 발생할 가능성이 높다는 사실을 잘 보여주고 있다.
그리고 27일 00UTC 예측장을 보면 500hPa 상층골이 북동진하면서 5820gmp 선이 펴지면서 산둥반도와 한반도 중부지방으로 큰 양의 와도를 가지는 불안정 구역이 형성되어 있음을 알 수 있다. 그리고 북태평양 고기압의 가장자리가 한반도 남부지방까지 확장하면서 한반도 중부지방에 강한 상승운동이 복합적으로 형성되기 시작하였음을 알 수 있다.
26일 분석장에서 한반도 상에 위치하고 있던 기압능이 27일에는 약간 펴지면서 기류의 흐름이 서풍 내지 남서풍 계열로 변화되게 되고 이를 따라 한랭 구역과 온난 구역이 뚜렷하게 구분되는 모습을 볼 수 있다. 이러한 대기 중층의 기압배치는 뚜렷한 Dry Slot과 강한 상승 운동에 의한 대류활동 구역을 잘 보여주는 수증기 영상을 통해서 어느 곳에서 중규모대류계 활동이 강화되는지를 잘 알 수 있다.

그림 5.1.8의 하단을 보면 상대와도가 강한 구역의 서(북서)쪽과 동(남동)쪽에서 강한 Dry Slot이 형성되고 이는 북태평양 고기압의 중심부를 따라 형성되는 하강기류에 의한 Dry Slot과 결합하여 한반도를 중심으로 강한 종관규모 강제 상승운동이 형성되는 모습을 잘 나타내고 있다. 그리고 다른 사례에 비해서 2011년 7월 26일에서 28일까지 중부지방에서 발생한 집중호우 사례는 오랜 기간 동안 유지되었는데 이는 지상 일기도에서부터 계속해서 언급된 Blocking-high가 매우 중요한 역할을 한 것으로 볼 수 있다.

Blocking 현상은 기압배치를 동일한 형태로 유지시키고 기압계의 동진을 막아서 종관규모 강제력이 수 일 혹은 수 주 동안 유지되는데 결정적인 역할을 한 것으로 분석된다. 500hPa 고도의 등고도선을 보면 26일부터 27일까지 오호츠크해 부근에서 강한 Blocking이 형성되어 있음을 잘 보여주고 있다.



[그림 5.1.9] RDAPS ANAL(2600UTC), 24hr FCST(2700) Divergence and Wind at 200hPa(Upper), and GPH, Temperature and Isotachs > 50kts at 200hPa(Lower)

그림 5.1.9에 의하면 200hPa 고도까지 동일한 지역에 키 큰 정체성 고기압이 머물면서 한반도 중부지방에 중규모대류계에 의한 집중호우가 발생하는데 매우 중요한 역할을 하였음을 알 수 있다.

500hPa 분석장과 예측장을 통해서 (10) 북태평양 고기압이 확장하면서 종관규모 잠재 불안정 구역이 한반도 남부지방에 형성되는데 결정적인 역할을 했으며, (11) 기압능과 서풍 혹은 남서기류 그리고 높은 상대와도를 가지는 구역의 변화에 따라 집중호우를 야기하는 중규모대류계의 발생 구역이 변화하고 (12) 서풍기류와 상대와도의 주변을 따라 형성된 Dry Slot이 상승운동을 더욱 강화시켰으며, (13) 대기의 흐름을 방해해서 지속적인 중규모대류계의 발달을 야기하는 Blocking 현상이 뚜렷하게 분석되고 예측되었다.

그림 5.1.9는 200hPa의 발산장, 바람 분포 분석장과 예측장을 보이고 있다. 대기 상층의 흐름 그 자체는 지상에서 대기 중층까지 잘 조직화된 시스템이 존재하지 않으면 중규모대류계의 발생과 발달을 직접 유도하지는 못하지만 하부에 잘 조직화된 종관규모 강제력에 의한 중규모대류계가 존재하면 그 대류활동이 대류권 상부까지 연직으로 확장하는데 큰 역할을 한다.

일반적으로 200hPa 고도에서 중규모대류계의 상부에 기압능이 형성되고, 상층 제트기류의 출구가 위치하고, 강한 발산구역이 존재하면 그 중규모대류계는 매우 발달하고 상대적으로 오랜 기간 동안 그 세력을 유지하게 된다.

26일 한반도 상공에는 강한 기압능의 동쪽에 위치하고 있는 가운데 한반도 동쪽에 상층제트 곡이 형성되어 있는 모습을 볼 수 있다. 이러한 상태에서는 한반도 상에는 상층 수렴 구역이 형성되기 때문에 중규모대류계의 발달에 적합하지 않은 상태에 놓이게 된다. 그런데 27일 예측장을 보면 한반도 주변에서의 200hPa 패턴이 크게 변화하고 있음을 알 수 있다.

먼저 상층의 50kts 이상의 풍속을 가지는 상층제트의 출구가 한반도 북부지방에 형성되고 이 상층제트를 따라 강한 발산구역이 한반도 북서부와 중부지방에 형성되기 시작한다. 이에 따라 한반도 중부지방에 형성된 중규모대류계는 급격하게 연직으로 성장하여 강한 집중호우를 유도하는데 필요한 잘 조직화된 대류 시스템으로 발달하게 되는 것이다.

200hPa 고도의 분석 및 예측장을 통해 (14) 200hPa 고도에서의 상층 제트와 상층 발산이 하층 수렴과 종관규모 불안정에 의한 상승운동을 역학적으로 도와주고 있었음을 알 수 있다. RDAPS 분석장과 예측장을 통해서 지상에서 200hPa 고도에 이르기까지 종관규모 강제력을 유도하는 매개변수들을 살펴본 결과 서울을 포함한 중부지방에 중규모대류계에 의한 집중호우가 발생하는데 매우 유리한 종관규모 환경이 조성되었음을 매우 잘 보여주고 예측하였음을 알 수 있다.

3) 중규모 환경 예측 매개변수 분석

실제 집중호우를 동반한 중규모대류계의 예측에 있어서종관규모 강제력의 예측 만큼 중요한 것이 중규모 환경에 대한 정확한 분석과 예측이라고 할 수 있다.

✓풍부한 수증기 공급

- 대기하층의 강한 Moisture Flux 지속
- SFC~500hPa 높은 상대습도
- 40mm 이상의 높은 가강수량

✓대기 불안정

- CAPE 값의 급격한 증가
- Lifted Index<0, KI>30
- Lower LFC

✓중규모 강제상승

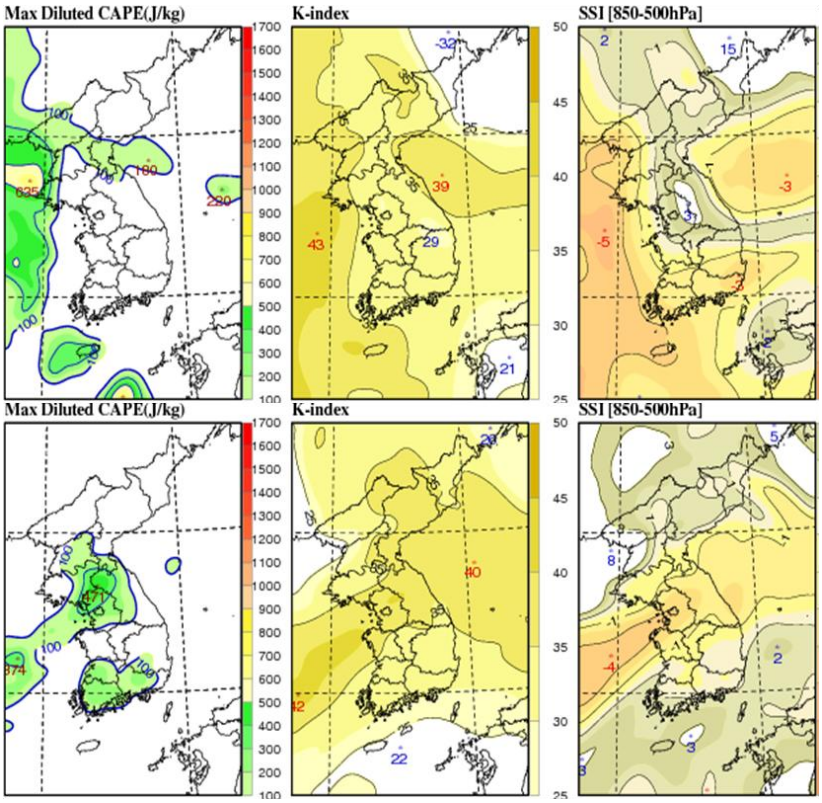
- 경계와 지형효과

[그림 5.1.10] 중규모 환경 예측 매개변수 종합

그림 5.1.10은 중규모 환경의 분석 및 예측에 필수적인 매개변수들을 정리한 것이다. 중규모대류계가 발생해서 일정 기간 동안 생애를 유지하기 위해서는 대류성 스톰들이 발생하는 지역에 풍부한 수증기가 공급되어야 하고, 대기 불안정이 확대되어야 하며, 중규모 강제상승을 유도할 수 있는 요소들이 존재하고 있어야 한다.

중규모대류계의 발달과 유지를 예측하는데 중요한 역할을 하는 중규모 환경변수의 하나인, 풍부한 수증기 공급을 예측하기 위해서 필요한 세부 예측변수로는 대기 하층의 강한 습윤속의 유지와 지표면에서 500hPa 고도까지의 높은 상대습도, 40mm 이상의 높은 가강수량을 들 수 있는데 그림 5.1.4에서 그림 5.1.8의 분석장과 예측장을 통해서 중규모대류계가 발달한 한반도 중부지방에 풍부한 수증기가 공급되었음을 알 수 있었다.

단열선도 분석을 통해서 중규모 환경이 강한 중규모대류계의 발달에 적합한 충분한 대기불안정을 제공하고 있었음을 보였다. 그렇다면 RDAPS 예측장은 어느 정도 이러한 정보를 적절하게 제공하고 있었는지 알아보도록 하자.



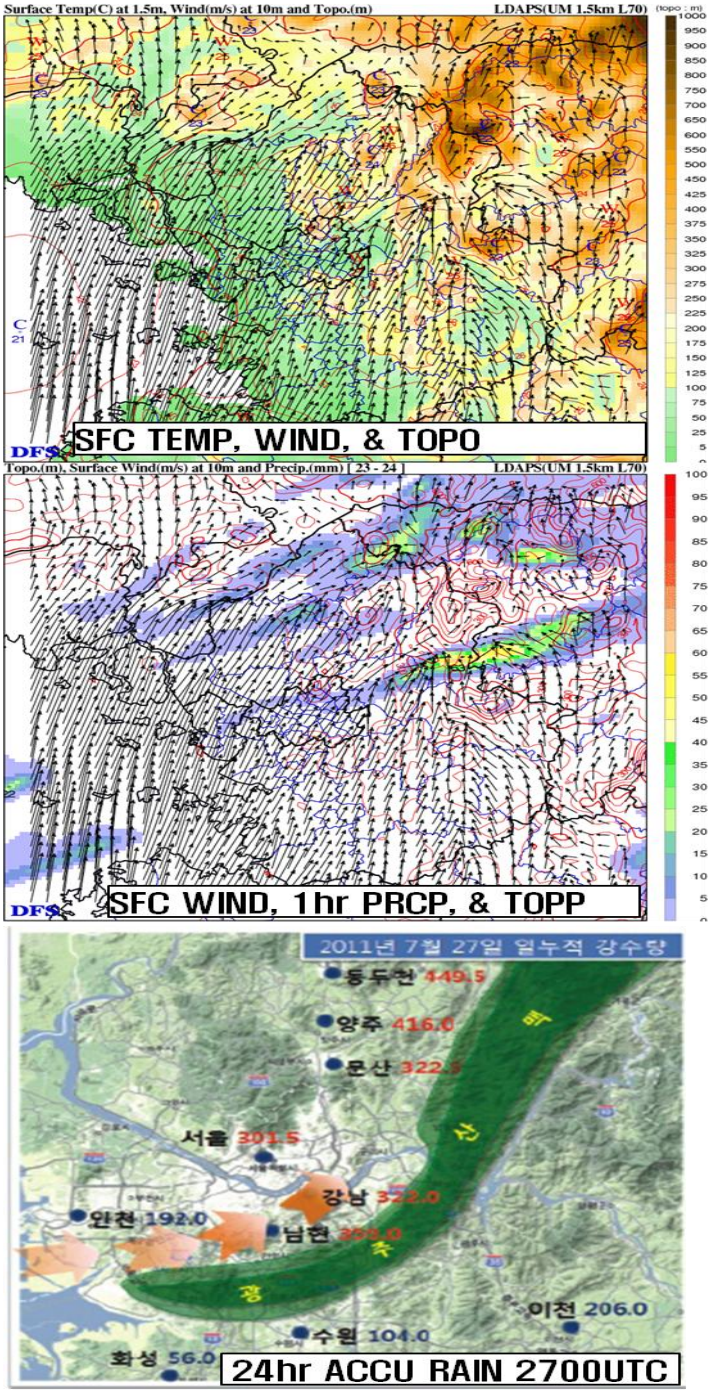
[그림 5.1.11] RDAPS ANAL(2600UTC), 24hr FCST(2700) CAPE, KI and SSI indices

그림 5.1.11은 26일 00UTC RDAPS에서 예측한 CAPE, KI 지수, 그리고 SSI 지수를 보이고 있다.

26일 분석장에서 CAPE 지수는 옹진반도 부근에 625J/kg의 중심을 두고 서해상을 따라서 상대적으로 높은 CAPE구역을 보이고 있으며, K 지수는 서해상과 동해상에 각각 40 정도의 높은 값을 보이는 반면 한반도 지역은 30 이하의 값을 보여서 주고 있다. 그리고 SSI는 서해상에는 -5 이상의 매우 불안정한 구역이 형성되어 있는 반면 한반도 상공에는 3 이상의 상대적으로 안정된 구역이 존재하고 있었다는 것을 보여주고 있다.
그런데 27일 00UTC 예측장에서는 대류불안정 구역이 한반도 중부지방으로 바뀌어 있는 것을 볼 수 있다.

먼저 높은 370J/kg 이상의 CAPE 값을 가지는 지역이 서해상에서 경기만을 따라 한반도 중부지방에 형성되어 있다. 그리고 K 지수도 동서로 40 이상의 값을 갖는 불안정 구역이 형성되는 것을 예측하고 있고, SSI가 -4 이하인 지역이 한반도 중부지방을 가로질러 형성되어 있다.

위성 영상과 레이더 영상을 통해서 이 지역에서 강한 대류활동이 발생하고 있었다는 것을 확인할 수 있다. 대류불안정이 발생하면 적운모수화를 통해서 빠르게 불안정을 해소하는 수치모델의 특성 상 CAPE 값이 실제 관측값인 1700J/kg까지 모의하는 것은 사실상 불가능하기 때문에 500J/kg 내외의 값을 가지는 것 만으로도 중규모대류계의 발달과 유지에 매우 중요한 정보를 제공한다.
또한 한 지점이 아니라 높은 CAPE 값을 가지는 지역이 연결되어 있고, 이 지역이 열과 수증기 에너지가 공급되는 경로와 일치한다는 점에서 매우 중요한 중규모 예측 매개변수였음을 보여주고 있다.
그리고 K 지수와 SSI도 중규모대류계가 한반도 중부지방에서 발달할 것이라는 것을 잘 예측하고 있다.



[그림 5.1.12] LDAPS 24hr FCST SFC Temperature, Wind and TOP(Upper), SFC Wind, 1hr Precipitation and TOPO(Middle), and 24hr Accumulated Precipitation(Lower)

그림 5.1.12는 LDAPS에서 예측된 경기만 부근의 바람장과 지형정보, 그리고 실제 7월 27일 24시간 누적강수량을 보이고 있다.

27일 00UTC 24시간 예측장을 보면 경기만을 중심으로 서해로부터 경기만 지역으로 유입되는 강한 기류들이 지형을 만나면서 풍속이 저하되어 해안선 부근에 강한 수렴구역을 형성하고 강한 남서기류가 광주산맥(5.1.12 제일 위쪽 주황색 Shading)의 남쪽과 북쪽에서 유입되고 있는 것을 볼 수 있다.

그리고 강한 하층 수렴 구역을 따라 시간당 50mm가 넘은 강한 강수를 포함한 대류선이 서울 동쪽과 북쪽에 위치하고 있는 것을 알 수 있다. 실제 관측자료에서 많은 비가 내린 관악구와 강남구의 집중호우는 상대적으로 약하게 모의하고 있지만 서울 북동부 지역에서의 강한 강수를 적절하게 모의하고 있었는데, 이는 지형과 대기 하층의 수렴과 같은 경계의 역할을 수치모델 예측장에서도 충분히 인지하고 이를 예보에 반영할 수 있었음을 잘 보여주고 있다.

5.2. 위성

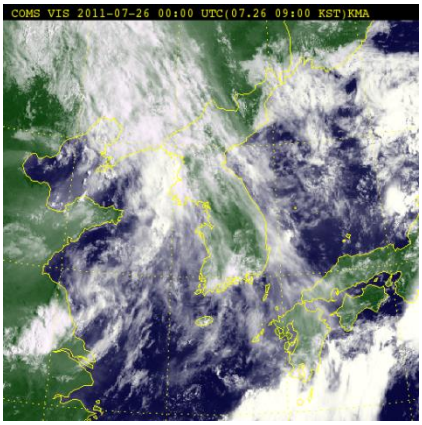
5.2.1. 우면산 집중호우 사례의 사전 예측

2011년 7월 26-27일의 한반도 남동쪽에는 북태평양 고기압이, 북서쪽 대륙에는 저기압이 위치함에 따라 우리나라에 남서-북동 방향으로 등압선이 조밀하게 발달하고 그에 따라 서해상과 한반도 서해안 지역에 강한 남~남서풍대가 발달하였다. 즉, 집중호우에 필수적인 하층제트에 의한 강한 수증기 이류가 집중호우기간 내내 지속되었다. 또한 상층 기압계의 이동이 저지고기압에 의해 정체되는 현상이 보인다. 이렇게 집중호우 발생에 유리한 환경에서 서울-경기 등에 발생한 집중호우 시의 위성 영상 특성은 다음과 같다.

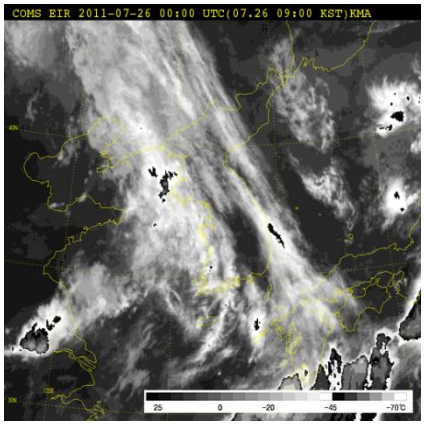
호우 발생 전의 수증기영상에서는 우리나라 서부지역과 서해안 지역에 수증기가 광범위하게 분포함을 알 수 있으며(그림 2.2.2, 그림 5.2.1) 중부지방에 호우가 시작된 후에는 중규모 대류계 주변, 특히 대류계 북서쪽에서 접근하던 암역이 대류세포를 추월함에 따라 대류시스템을 에워싸게 되었다 (그림 2.2.3). 즉, 대류계 주변에 위치한 암역과 그 암역의 암화가 주변에서 새로운 대류세포의 발달을 억제함과 동시에 현재 발달하고 있는 "Enhanced-V" 형태의 대류계가 더욱 강하게 발달하게 작용한 것으로 보인다.따라서 대류세포의 발달유무를 분석하기 위해서는 수증기영상에서 암역의 위치와 강도 그리고 암화의 유무를 파악하는 것이 중요하다. 가시영상과 적외강조영상에서 집중호우 발생 전 서울-경기 등에서 개별적으로 발생한 중규모 대류계가 시간이 지남에 따라 Cluster 형으로 군집화 되면서 상호작용과 병합을 통해 “Enhanced-V” 형태로 발달하고 있다(그림 2.2.3, 그림 5.2.2).

이 과정에서 운정온도는 낮아지고 대류세포의 면적은 넓어짐과 동시에 풍하쪽에서는 모루운이 발달하고 있음을 볼 수 있다. 또한 대류계 주변에는 북쪽 지역을 제외하고 하층운이 광범위하게 발달하고 있다. 전체적으로 보면 대류세포의 면적이 증가될 때 강우강도도 증가되는 패턴을 보였으며, 가장 강한 비가 내렸던 07:00KST보다 약 30분~1시간 전에 대류세포의 면적이 급격히 증가되었던 점도 흥미로운 점이다(그림 2.2.4).

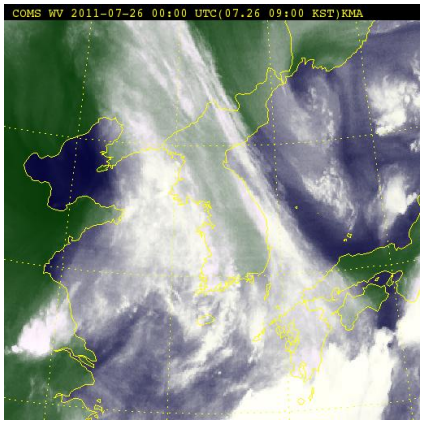
(a) VIS-26.0900KST



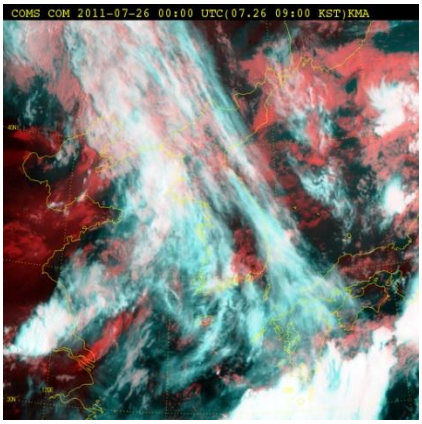
(b) EIR-26.0900KST



(c) WV-26.0900KST



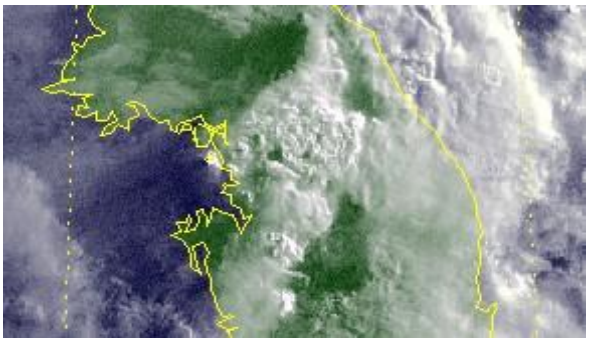
(d) COM-26.0900KST



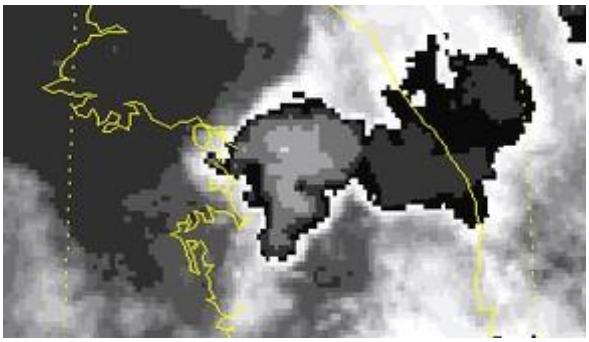
[그림 5.2.1] 대류세포 발생 시 한반도 영역의 (a)가시영상, (b)적외영상, (c)수증기영상, (d)합성영상

그림 5.2.1은 대류세포 발생 시 한반도 영역에서의 위성영상을 나타내며, 대류세포는 상층기압골이 동진함에 따라 암역과 명역의 경계(Boundary)부근에서 발생하는 것을 보이고 있다. 그림 5.2.2에서는 집중호우 시 우면산 지역의 위성영상으로 대류세포가 급격한 발달을 보일 때 "V" 형태의 대류운이 나타났으며, 강한 강수강도를 나타내었다. 또한 대류세포의 발생 지역 후방에서 건조관입(Dry Intrusion: 암화)이 있을 시 대류세포를 더욱 발달시켜 많은 강수를 유발할 수 있음을 보였다.

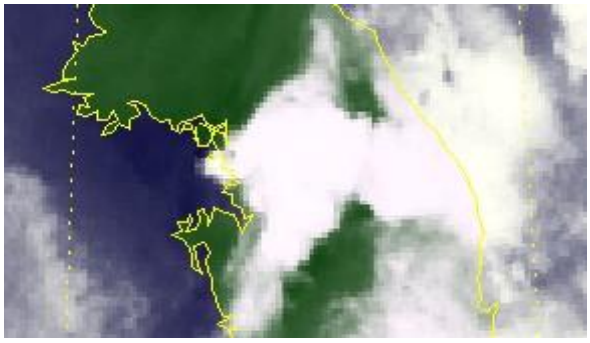
(a) VIS-27.0600KST



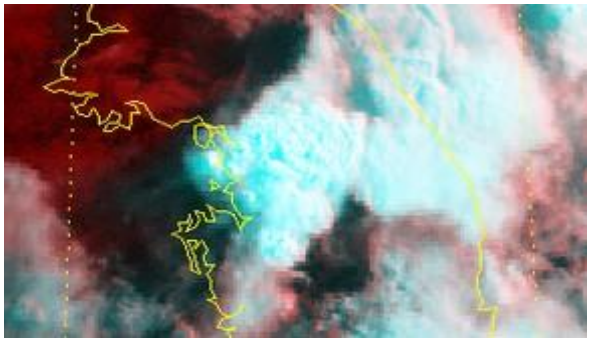
(b) EIR-27.0600KST



(c) WV-27.0600KST

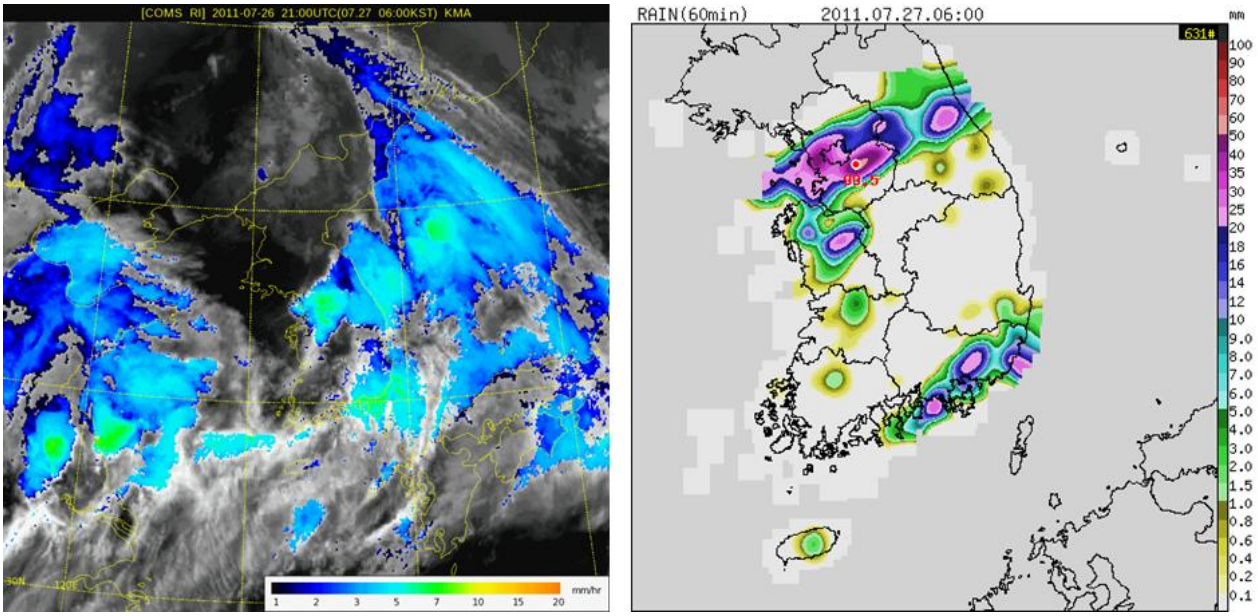


(d) COM-27.0600KST



[그림 5.2.2] 집중호우 발생 시 한반도 영역의 (a)가시영상, (b)적외영상, (c)수증기영상, (d)합성영상

집중호우의 예측에서는 발생위치, 시각 및 정량적 강도가 정확해야 하는데 그림 5.2.3에서 보는 바와 같이 위성영상으로부터 추정(예측이 아님)한 강우강도는 AWS 관측과 비교할 때 발생위치(서울, 경기, 강원, 경남해안지역)는 유사하였으나 강도는 관측 강도의 10분 1 수준으로 나타나고 있다. 이처럼 위성으로부터 추정한 강수강도가 관측에 비해 현저히 적은 이유는 강우강도 추정 알고리즘의 문제도 있겠지만 Sohn et al.(2013)에서 밝힌 바와 같이 우리나라에서 집중호우를 유발하는 대류계가 미국 등에서의 대류계와 같이 강하게 발달하지 않는 것도 하나의 이유가 될 것이다. 따라서 위성영상자료는 대류계의 위치, 개략적 강도 및 이동방향 추정에 참고자료로 활용하여야 할 것으로 보인다.

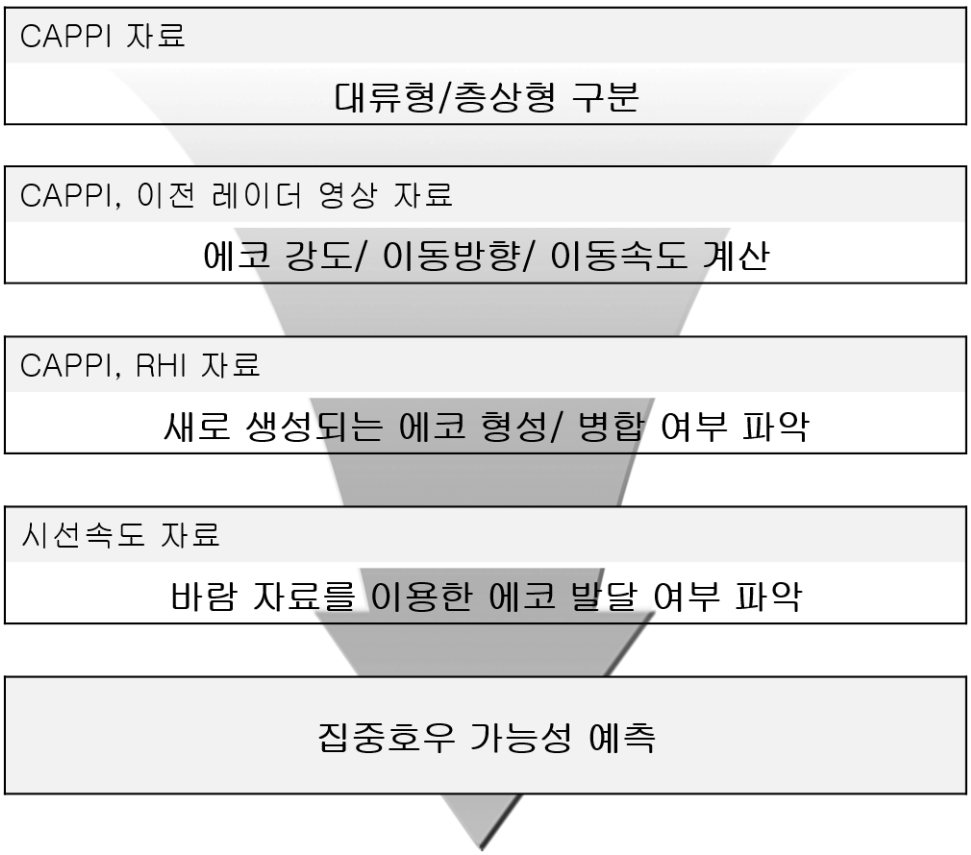


[그림 5.2.3] 집중호우 발생 시 국가기상위성센터 천리안위성자료처리시스템(COMS Meteorological Data Processing System: CMDPS)의 강우강도 추정 알고리즘으로 추정한 강우강도(왼쪽)와 AWS 측정 강우강도 분포(오른쪽), 2011년 7월 27일 0600KST

5.3. 레이더

레이더 자료를 이용한 집중호우 가능성 예측방법은 그림 5.3.1 과 같다.

1. CAPPI 자료를 이용한 대류형/층상형 구분
2. CAPPI와 이전레이더 영상 자료를 이용한 에코강도/이동방향/이동속도 계산
3. CAPPI와 연직단면 자료를 이용하여 새로 생성되는 에코 형성/병합 여부 파악
4. 시선속도자료 및 이중바람장 자료를 이용한 에코 발달 여부 파악
5. 집중호우 가능성 예측

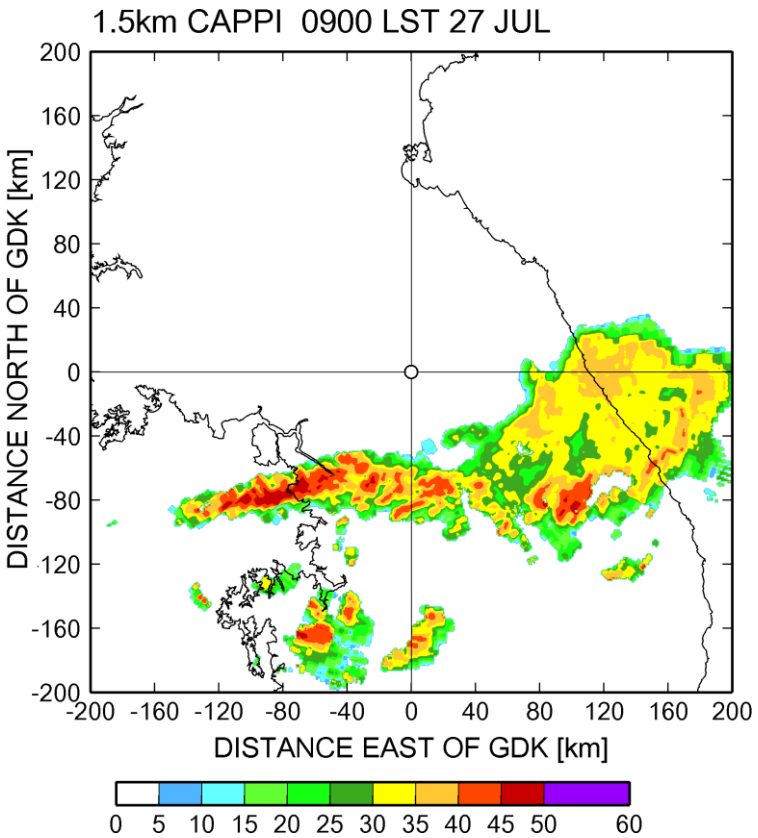


[그림 5.3.1] 레이더 자료를 이용한 집중호우 가능성 예측방법 흐름도

meso-β 규모의 밴드형태 강수시스템은 레이더로 분석, 예측하기에 적당한 규모이므로, 레이더 자료의 효율적 활용은 시스템에 대한 이해와 예보를 향상시킬 수 있다. 본 사례에 대하여 레이더 자료를 이용한 집중호우 가능성 예측방법 흐름도를 적용하여 단계별 검토 결과를 다음과 같이 나타내었다.

5.3.1. CAPPI 자료를 이용한 대류형/층상형 구분

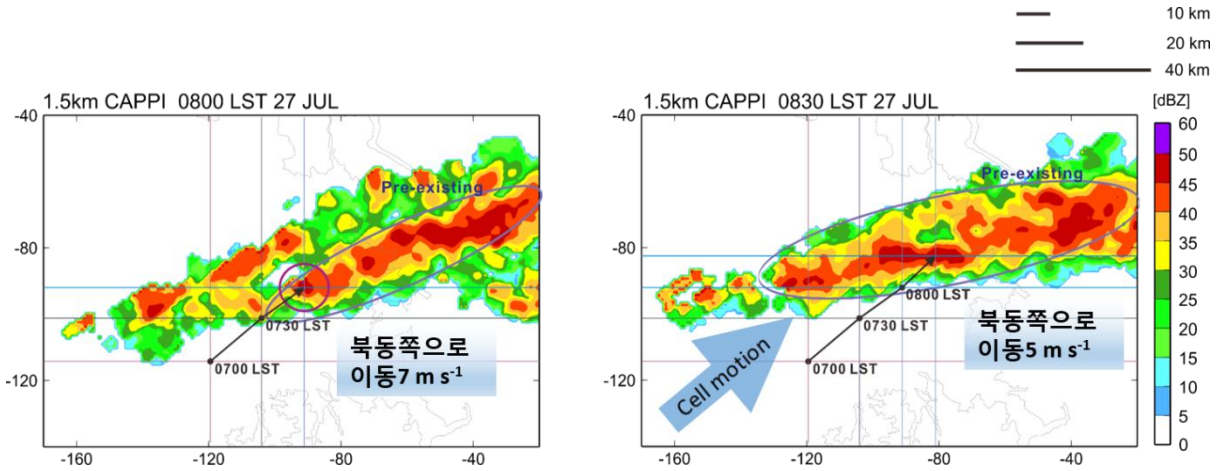
CAPPI 자료를 통한 강수시스템의 층상형/대류형 구분은 강우강도와 강수지역분포 예측에 있어 가장 기본적인 판단요소이다. 그림 5.3.2 는 광덕산 레이더의 1.5km CAPPI 영상이다. 서쪽 끝 모서리 부분부터 강하게 발달한 에코지역은 대류형 지역으로 판단되며 해당 지역에는 많은 양의 강수를 기록하였다. 상대적으로 약한 반사도가 분포하고 있는 동쪽의 에코는 층상형으로 구분되며 서쪽의 대류형보다 넓게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다.



[그림 5.3.2] 2011년 7월 27일 0900KST 1.5km 수평반사도 CAPPI

5.3.2. CAPPI와 이전레이더 영상 자료를 이용한 에코강도/이동방향/이동속도 계산

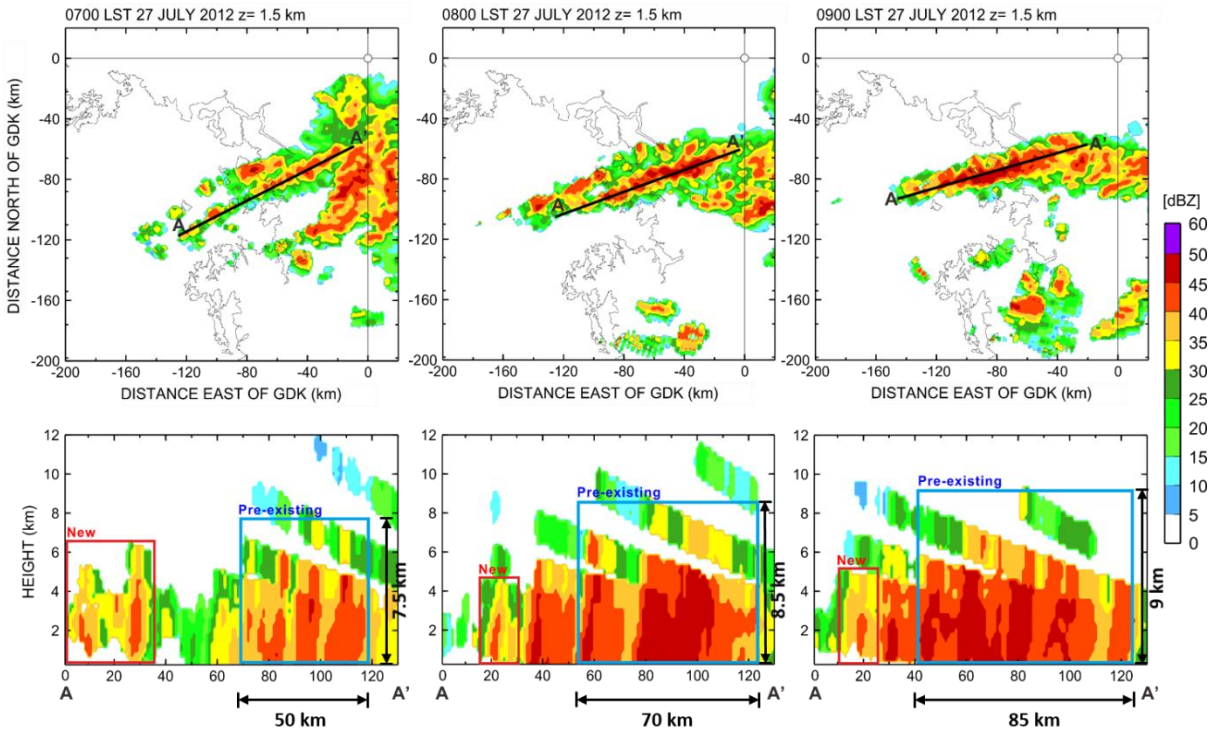
대류형 지역의 에코 강도는 그림 5.3.3에서와 같이 국지적으로 45dBZ 이상으로 발달하였으며, 에코는 북동쪽으로 이동하였다. 에코의 이동을 추적한 결과 0700KST 부터 12m/s의 빠른 이동속도를 보였지만, 병합 후 나타나는 이동속도는 절반 이하인 5m/s로 나타났다. 에코의 이동속도 저하는 기존에 머물고 있던 셀(Pre-existing Cell) 의 영향으로 판단되며, 후면에 지속적으로 빠른 속도의 에코유입과 병합 후 느린 이동은 시스템이 서쪽으로 성장할 수 있었던 요인으로 추정된다.



[그림 5.3.3] 0800, 0830KST의 1.5km 수평반사도 CAPPI와 셀의 이동에 따른 이동벡터

5.3.3. CAPPI와 연직단면 자료를 이용하여 새로 생성되는 에코 형성/병합 여부 파악

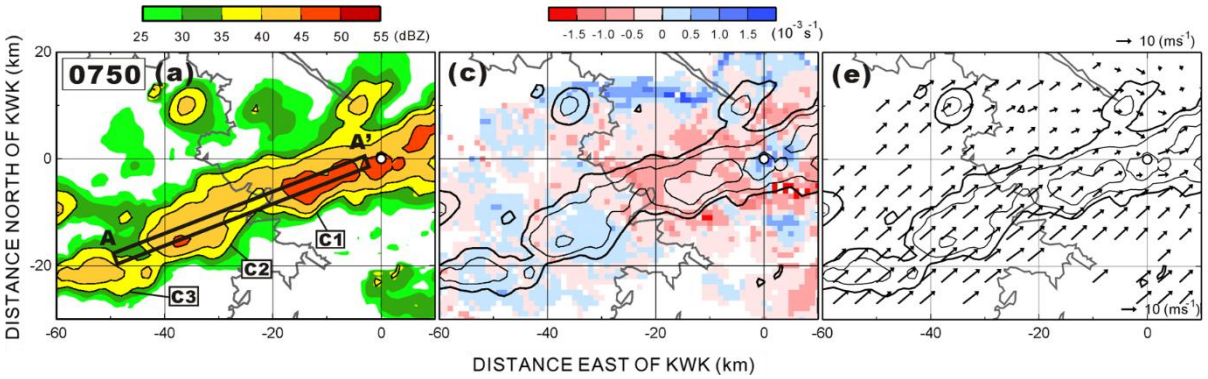
후면에서 발생한 새로운 셀과 기존의 셀의 지속적인 병합은 밴드형태의 강수시스템이 Back-building 형태의 특징을 가지는 것으로 판단할 수 있으며, 시스템을 따라 나타난 연직단면도로부터 지속적인 병합으로 인해 기존 셀의 규모가 점차 커진 것을 알 수 있다.



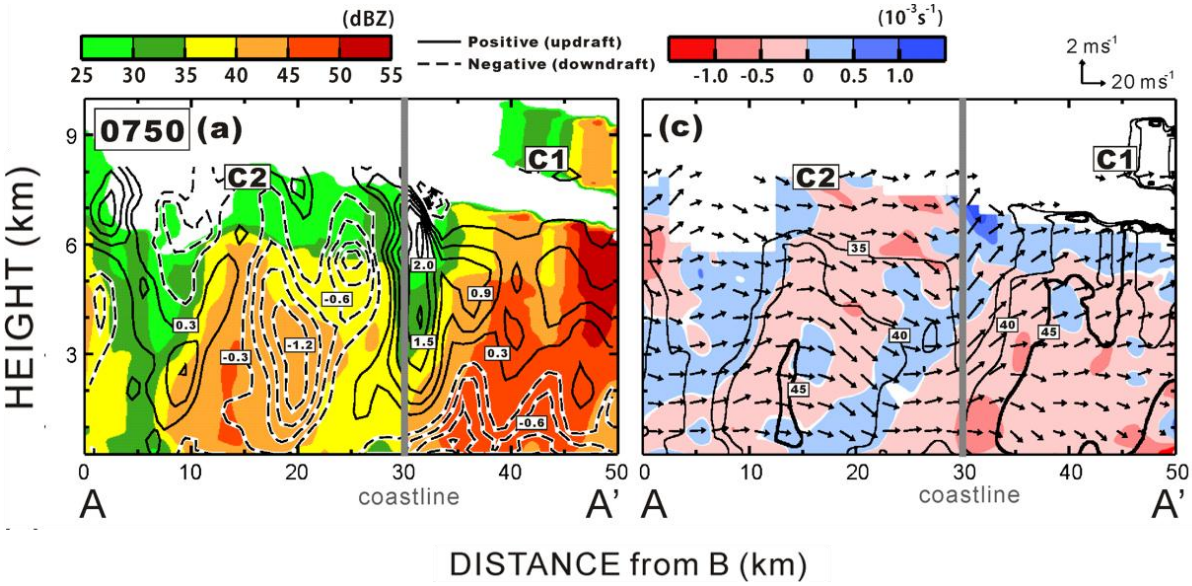
[그림 5.3.4] 0700-0900KST 1시간 간격 1.5km 수평반사도 CAPPI 영상과, A-A'의 연직단면도

5.3.4. 시선속도자료 및 이중바람장 자료를 이용한 에코 발달 여부 파악

해당 사례의 경우, 형태적인 특징으로 인해 제한적인 시선속도 자료를 제공하기 때문에 시스템의 개략적인 이동방향에 대한 판단이 힘들다. 따라서, 3차원 바람장을 통해 이동방향을 판단할 수 있으며, 시스템 내부의 구조를 파악할 수 있다. 그림 5.3.5는 강하게 발달한 지역을 중심으로 수평 반사도, 발산, 바람벡터의 분포를 나타낸 그림이다. 내륙에서 강하게 발달한 0750KST의 경우, 대부분 남서풍의 바람방향이 나타났으며 해안선을 기준으로 내륙하층에 강한 수렴을 보였다. 0.5km 고도의 바람은 해양에서 약 13m/s의 속력을 보였지만 내륙으로 들어와서 약 11m/s로 감소하는 경향이 나타났다. 이러한 하층바람의 풍속감소는 해안선을 기준으로 내륙에 강한 수렴을 발생시켰을 것으로 사료된다. 해당영역을 기준으로 연직단면을 나타낸 그림 5.3.6 은 해안선을 기준으로 내륙에 발생하는 수렴지역을 명확히 나타내준다. 그림 5.3.6(c)에 나타난 발산장의 연직단면을 통해 내륙하층의 강한 수렴이 해안선을 기준으로 나타나는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 해안선으로부터 발생된 상승류는 내륙의 에코 발달에 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 결론적으로, 해안선을 걸쳐서 발달한 선형의 대류시스템은 지면 거칠기의 불연속성으로 인해 하층으로부터 강한 수렴이 나타났으며, 이는 에코발달의 중요한 원인으로 사료된다.



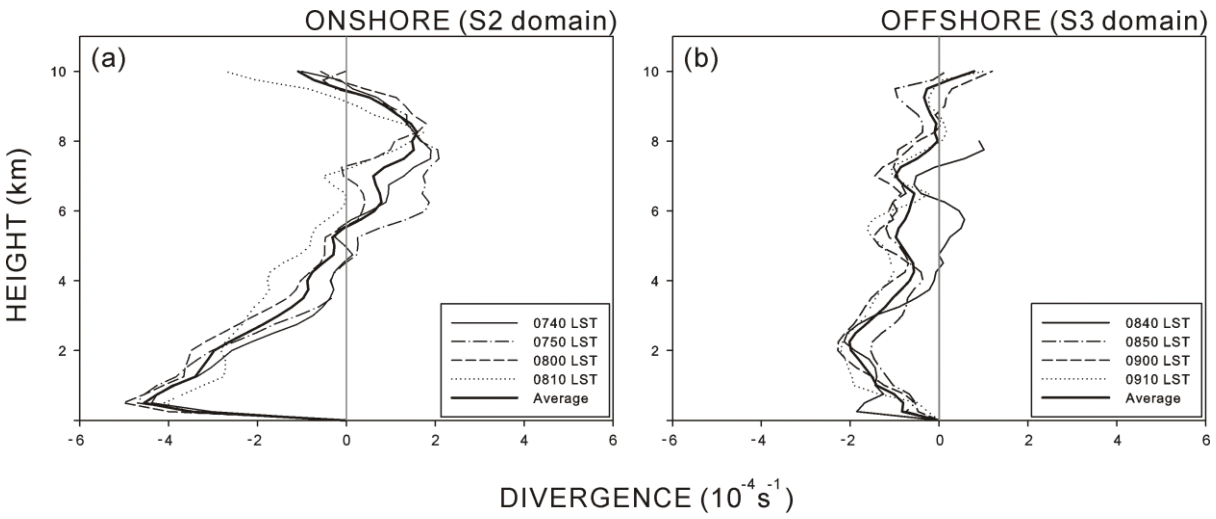
[그림 5.3.5] 0750KST에 대한 수평 반사도(2km), 발산(0.5km), 바람벡터(0.5km) 분포



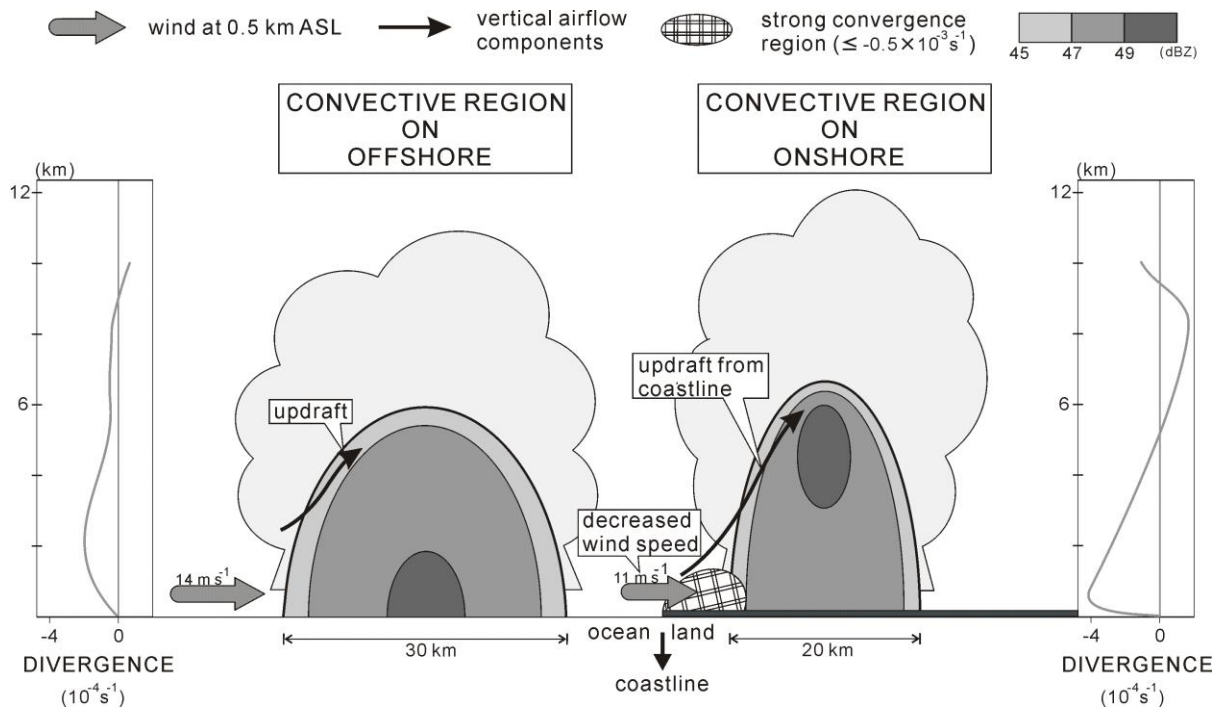
[그림 5.3.6] 그림 5.3.5(a)에 나타난 네모상자(A–A')에 따른 반사도, 발산, 상승류의 연직단면

종합의견

2011년 7월 26-27일 발생한 중부지역 집중호우는 하층대기의 높은 열적 에너지로 인해 생긴 불안정한 대기환경에서 발생한 호우사례이며 수도권 지역에 3시간동안 최대 173mm h^{-1} 의 강수를 내리며 홍수와 산사태 피해를 발생시켰다. 집중호우를 유발한 밴드형태의 강수시스템 서쪽 끝 모서리 부분은 기존 셀이 새로운 셀과 지속적으로 병합하는 과정을 통해 발달하였으며 지면 거칠기의 불연속성으로 발생한 하층에서의 풍속 감소와 강한 수렴은 내륙지역 강수 발달에 영향을 미쳤다(그림 5.3.8). 내륙의 구름은 해양에서 보다 높이 발달하였고, 셀 중심부의 높이 또한 보다 높고 좁게 나타났다. 내륙하층의 강한 수렴은 그림 5.3.7(a) 와 같이 1km 고도 이하에서 가장 강하게 나타났으며, 내륙의 에코중심부는 해양보다 높고, 보다 강한 상승류가 나타났다. 본 사례에서 나타난 특징들은 Back-building 형태의 강수 시스템은 국지적인 영역에 집중호우를 유발할 수 있고, 해안선으로부터 발생되는 하층의 강한 수렴은 상승류의 강화와 에코중심부의 높이에 크게 영향을 끼칠 수 있음을 시사한다.



[그림 5.3.7] 시스템 내부의 고도에 따른 발산(내륙, 해양)



[그림 5.3.8] 2011년 7월 27일 발생한 집중호우의 지역에 따른 차이(해양,내륙)를 나타낸 모식도(Lee at al., 2014)

5.4. 수치모델

수치모델을 이용한 호우 사례의 예측을 위해서는 한반도 주변의 종관규모 및 중규모 기상 조건이 모형에 정확히 반영되고 있는지 확인하여야 한다. 대체로 정확한 초기장 및 배경장의 사용은 모델의 적분시작 시간별 예측 결과의 일관성으로 나타난다. 혹은 서로 다른 모델간의 예측 결과의 일관성으로 나타난다. 수치모델의 결과는 정량적 강수를 계산하지만 수치해의 오차를 발생시킬 수 있는 원인 요소들이 많으므로, 다양한 호우 조건에서 모델의 예측 특성을 이해하고, 이를 예보에 반영하여 모델이 가지는 한계를 최소화하여야 한다.

본 사례의 경우 호우 발생을 위한 상/하층의 역학적/열적 종관 조건이 잘 만족되고 있는 것으로 분석되지만, 2010년 9월 21일 수도권 호우 사례에 비해 중규모 수렴에 의한 역학적 강제는 약하였고, 상대적으로 강한 하층 수증기 수렴에 의한 열적 대기불안정 조건이 우세한 것으로 분석할 수 있다. 대류가용잠재에너지가 높은 조건에서 지역예보모델(RDAPS)은 주로 적운모수화 과정을 통해 강수가 발생하는 특징이 있으며, 대체로 강수영역은 대기불안정 지역으로 넓게 나타남에 유의해야 한다. 일반적으로 대류불안정이 존재하는 전역에서 강수가 발생하는 것은 아니지만 지역예보모델 예측 강수는 대류불안정 조건에 민감하다. 반면 국지예보모델(LDPAS)은 명시적 구름 물리 과정에 의해 강수가 계산되므로 지역예보모델의 결과에 비해 좁은 강수영역을 예측한다. 모의된 강수강도와 강수량은 사례일에서 보듯이 중규모 기압배치나 하층 수증기 수렴 정도에 따라 다양한 값으로 나타날 수 있다. 사례일의 경우 지역예보모델과 국지예보모델 모두 관측 강수량의 절반 수준으로 모의하였다. 최대 강수 강도의 예보는 국지예보모델(LDPAS)의 결과가 지역예보모델의 결과에 비해 높은 값을 나타내며 상대적으로 관측과 유사하였다.

강한 대기불안정이 발생한 기상 조건하에서는 수치예보모델들의 예측 일관성이 낮게 나타나는 특징이 있다. 이는 모델의 초기장 및 배경장의 정확도와 밀접한 관련이 있으며, 수치모델들의 예측 성능이 낮음을 의미한다. 따라서 좀 더 정확한 예보를 위해서는 시간에 따른 수치모델들의 예측 결과의 일관성과 예측 호우 시각이 가까워짐에 따른 모델의 예측 결과의 변화를 잘 살필 필요가 있다. 지역예보모델과 국지예보모델은 초기화 과정에서 관측 자료 동화를 활용하기 때문에 호우 시각에 근접할수록 예측 성능은 대체로 높아지게 된다.

5.5. 이번 사례가 다른 사례와 구별되는 특성

이 호우 사례는 중부지역에서 7월 26일 오후부터 시작하여 27일 넘어서까지 이어진 비교적 긴 호우 사례이었다. 그리고 이 기간 중 시간에 따라 단계적으로 강수계 패턴이 변화해가는 모습을 보여주었다 (그 마지막 단계인 27일 06~11KST에는 좁은 밴드형 강수계가 수도권에 매우 강한 호우를 일으킴). 이와 같이 긴 시간 동안의 호우 지속과 시간에 따라 달라지는 강수계 구조가 이번 사례의 특성이라 하겠다. 그리고 개마고원을 포함한 북한 지형이 중부 지방 호우에 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 특이한 사례라 하겠다.

5.5.1. 이번 사례의 특이점

1) 호우 지속을 가져오는 요인

정체적 대규모 기압 배치가 강한 남서풍대 유지를 가능케 함으로써 호우 유지의 가장 중요한 원인을 제공한 것으로 판단되며, 북한 지역에 정체하는 중규모 기압능은 황해상과 서해안지역에서 남풍대 유지되는데 일부 기여함으로써 중부지역 호우의 발생과 지속에 영향을 주었을 것으로 추정된다. 이 중규모 기압능은 북한 산악의 효과로 발달한 것으로 판단된다.

2) 강수계 유형의 시간 변화 원인

호우 지속 시간이 길었기 때문에 호우 기간 중 한반도 주변(특히 중부와 북한 지역)의 기압 패턴과 바람 분포가 달라지는 것에 따른 변화로 보인다. 예를 들어, 강수계 유발 요인(예, 수렴 구역 위치와 패턴 등)과 강수계의 조직화와 유형 형성에 기압계와 바람장의 변화가 작용한 것으로 판단된다.

3) 북한 지형의 영향

북한지역에 나타난 중규모 기압능의 발달은 개마고원을 포함한 북한 지형에 의한 Blocking 효과 때문인 것으로 보이며, 이는 한반도 중부의 호우 발달에도 상당한 영향을 미치는 것으로 보인다(이주영, 이태영, 2014). (남한 호우 발달 및 지속과 관련하여서는 처음으로 제기된 것으로 보임).

5.5.2. 유사 사례 발생 예보를 대비한 점검

1) 북한 지형의 효과에 대한 종합적 파악의 필요성

남한 지역에서 발생하는 호우에 대한 북한 지형의 영향이 더 많은 사례에서 나타나는 지를 확인할 필요가 있다(예, 호우 발생과 중규모 기압능의 존재 여부 등의 확인 등).

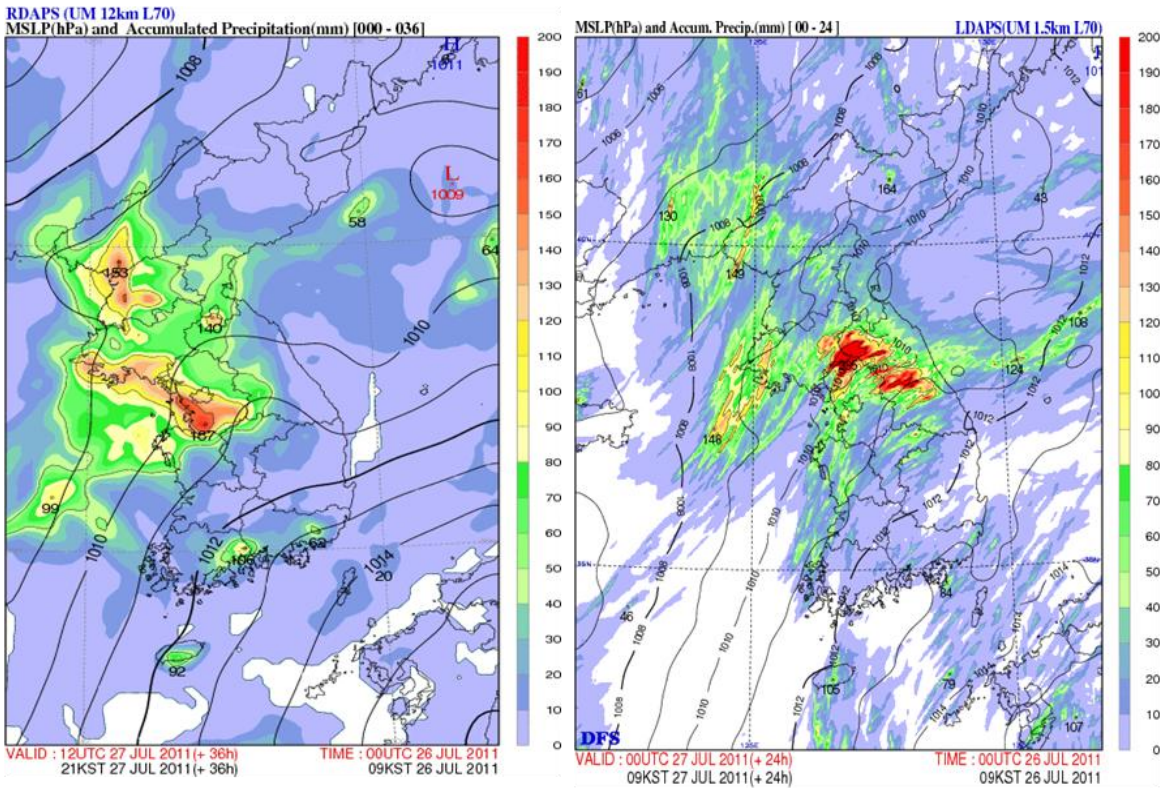
2) 호우 지속 사례들에 대한 이해 정립의 필요성

지속적 호우 사례들에 대한 예측 능력 개선을 위해, 지속 사례들을 수집하여 그 환경과 지속 원인에 대한 이해를 정립시킬 필요가 있다.

5.6. 향후 예보를 위한 점검 사항

5.6.1. 집중호우는 종관규모 강제력이 강한 지역에서 어디에서도 발생 가능

고해상도 수치예보 모델이 곧 정확한 예보와 연결되지 않는다는 사실은 많은 예보관들이 주지하고 있는 사실이다. 그렇지만 많은 경우 예보관들은 모델의 최종 자료라고 할 수 있는 누적강수량을 토대로 강수량과 강수구역을 결정하는 경향을 가지고 있다. 그리고 이러한 경향은 저기압이나 장마전선과 기압계에 동반된 상대적으로 넓은 지역에서 발생하는 강수의 경우에는 어느 정도 신뢰성을 가질 수 있으나 중규모대류계에 동반된 아주 국지적인 집중호우의 경우에는 전혀 다른 결과를 낳을 수 있다.



[그림 5.6.1] RDAPS 36hr ACC. PRCP(left) and LDAPS 24hr ACC. RPCP(right)

그림 5.6.1을 보자. 왼쪽은 RDAPS 모델에서 예측한 26일 00UTC에서 27일 12UTC까지 36시간 누적강수량을 보인 것이고, 오른쪽은 LDAPS 모델에서 예측한 24시간 누적 강수량을 보인 것이다. 먼저 최대 누적강수량이 187mm인 RDAPS 모델의 예측장은 집중호우의 중심이 경기남부 지역에서 모의되고 있는 반면, 최대 누적강수량이 395mm인 LDAPS 모델의 강수 중심은 경기 북부와 경기 영서 지역에 나타나고 있는 모습을 보이고 있다.

예보관의 입장에서 강수량과 집중호우 지역을 예보하는데 매우 혼란을 겪을 수 있다. 이러한 경우에 추천하고 싶은 것은 종관규모 강제력이 나타나는 구역 어디에서든 중규모대류계에 의한 집중호우가 발생할 수 있다는 것을 주지하고 집중호우 지역을 경기남부에서 경기북부지방까지 넓게 예보하고, 강수량은 모델에서 모의하는 양보다 많이 예보하는 것이다. 물론 이때 유의해야 할 점은 고해상도 모델의 경우에는 종관규모 강제력이 약하더라도 국지적으로 강한 대류에 의한 강수를 모의하는 경우가 있다는 사실이다. 그렇지만 예보관들은 종관규모 강제력을 같이 동반하는 경우에는 대규모 상승운동이나 불안정이 존재하는 전 지역이 집중호우 발생 가능지역이라는 사실은 항상 주지하고 있어야 한다.

5.6.2. 중규모대류계에 의한 집중호우 예보 능력은 현상에 대한 명확한 지식에 비례

2.1절에서 논의했듯이 2011년 우면산 집중호우 사례는 기존에 다루었던 집중호우 사례들과 뚜렷한 차이점을 보이고 있는데, 기존 사례들은 중규모대류계에 동반된 집중호우 기간이 6시간에서 길어야 12시간에 불과했지만, 이번 사례는 6배 이상 긴 72시간 동안 지속적으로 중부지방을 중심으로 집중호우가 내렸다는 것이 큰 특징이라고 할 수 있다.

어느 정도의 예보 경험을 가진 예보관들도 모델에서 72시간 동안 시스템이 머무르는 것을 예측하고 있다고 하더라도 대규모 기압골이나 전선 동반 없이 3일 동안 계속해서 비가 내릴 거라고 예보에 반영하기는 힘들었을 것이다. 그렇다면 이 중규모대류계는 어떠한 행태학적 특성을 가지고 있는 것일까? 이미 종관규모 강제력의 분석과 예측에서 블로킹 현상에 의해서 오랜 기간 동안 집중호우를 동반한 중규모대류계가 일정한 지역에 지속적으로 발생할 수 있을 것이라는 것을 인지한 예보관들은 종관규모 환경의 변화와 위성, 레이더 자료에서 나타나는 중규모대류계의 변화 경향을 정밀하게 추적하고 이것을 초단기예보에 반영하고 나아가 향후 24시간 예보에도 반영할 수 있을 것이다.

그림 5.1.14는 위성영상을 통해 26일 00UTC부터 28일 18UTC까지 72시간 동안의 중규모대류계의 변화 경향을 보여주고 있다. 우면산과 중부지방에 집중호우를 야기한 중규모대류계는 72시간 동안 우리나라 중부지방을 중심으로 발생과 소멸을 반복하면서, 초기 단계인 발생에서 발달기(26일 00UTC~09UTC) 1차 전환기(소강, 26일 12UTC)를 지나, 기존 시스템의 남쪽에서 갑자기 재발생하여 선형(Squall Line)으로 발달(26일 15UTC)한 이후 거의 9시간 동안 강한 세력을 유지한 후 2차 전환기(소강, 27일 06UTC)에 접어든다.
그리고는 기존 시스템이 발달한 그 후방에서 지속적으로 대류성 스톰들이 발생해서 동일지역으로 유입되는 Back-building MCSs의 전형적인 행태(27일 09UTC~18UTC)를 가진 후, 특이하게 전체 시스템이 남진 혹은 동진해서 소멸되는 것이 아니라, 북태평양 고기압의 확장과 함께 시스템이 북상하면서 28일 21UTC이후 소멸하는 행태를 보였다. 여기에서 강조하고 싶은 것은 이러한 중규모대류계의 움직임이 대류계 그 자체의 역학에 의해서만 이루어진 것이 아니라 종관규모 강제력의 변화에 따라 변화하고 있다는 사실이다. 따라서 위성과 레이더 영상에서 특이한 행태의 움직임을 포착한 예보관들은 그 행태가 중규모대류계의 어떠한 행태학적 특성과 연관되어 있는지 살핀 후, 종관규모 강제력의 변화 경향과 행태학적 변화가 어떤 상관관계를 가지는지를 살펴 이를 초단기 예보와 향후 12시간 혹은 24시간 강수량과 강수지역 예보에 반영하여야 한다.

이번 사례의 경우에도 기존 집중호우 사례 연구들에서 보여진 것과 비슷하게 처음 시스템이 발생할 때는 대류성 스톰들이 대류계의 이동방향의 전면에서 발생하는 전방전파, 지역형 MCSs 특성을 보이지만, 후반으로 갈수록 점차 선형으로 바뀌고 후방전파 혹은 정체되는 형태를 가지게 되는데 이는 종관규모 강제력에 의해서 이러한 움직임이 강제되었기 때문으로 분석할 수 있다.

5.6.3. 일기도 분석, 수치예보 모델 및 관측자료 활용 능력 제고

수치예보 모델의 발달로 많은 예보가 모델 결과를 반영하는 현대에 있어서도 상하층 일기도의 분석은 여전히 매우 중요하다고 할 수 있다.
경험이 많은 예보관들이나 역학적인 접근으로 일기도를 해석하는 사람들은 여전히 일기도의 연속적인 분석을 통한 예보 기법을 선호하는 편이다. 그렇지만 단순한 일기도 분석만으로는 Blocking 현상에 의해서 동일한 시스템이 장기화되거나, 중규모대류계와 종관규모 강제력이 복합적으로 작용해서 발생하는 국지적인 집중호우의 경우에는 분명한 예보 한계가 존재한다. 이 경우에는 수치예보 모델과 레이더, 위성 등 원격탐사 자료를 적극 활용할 필요가 있다. "예보는 과학이 아니라, 예술(Art)이다"라는 명제를 다시 한번 명심할 필요가 있다. 대기가 일정한 법칙에 의해서 움직여지기 때문에 과학적인 접근과 연구를 통해서 모든 예보가 가능할 것이라는 믿음은 버려야 한다.

예보는 현업적인 것으로 다양한 주변 환경의 변화에 따라 능동적으로 대체해 나가야 한다. 전쟁에서 승리하기 위해서 정해진 법칙이 없이 상황에 따라 적절한 대처법이 필요하듯이 예보에서도 왕도가 존재하지 않는다.

다양하게 변화하는 기상 상황을 파악하고 그 변화 경향을 정확하게 인지해서 예보에 반영하기 위해서는 분석, 모델 해석, 관측자료 활용 능력 등을 동시에 길러 나가야 할 것이다.

참고문헌

1. 국가기상위성센터, 2011: 기상위성영상의 이해(I), 137-142.
2. 국가기상위성센터, 2011: 기상위성영상의 이해(II), 7-93.
3. 이주영, 이태영, 2014: 2011년 7월 26-28일의 중부지역 호우의 발생에 관한 연구. 논문 제출 준비 중.
4. Brunner, J.C., Ackerman, S.A., Bachmeier, A.S., and Rabin, R.M., (2007) A Quantitative Analysis of the Enhanced-V Feature in Relation to Severe Weather. Wea. Forecasting, 22, pp 853-872
5. Cintineo, J. L, M. J. Pavolonis, J. M. Sieglaff, and A. K. Heidinger, 2013: Evolution of Severe and Nonsevere Convection Inferred from GOES-Derived Coloud Properties. J. Appl. Meteor., 52, 2009-2023.
6. Estelle de Coning, 2013: Optimizing Satellite-Based Precipitation Estimation for Nowcasting of Rainfall and Flash Flood Events over the South African Domain. Remote Sens, 5, 5702-5724.
7. Koenig, M., and E. de Coning, 2008: The MSG global instability indices product and its use as a nowcasting tool. Wea. Forecasting, 24, 272--285.
8. Roberts, R. D., and S. Rutledge, 2003: Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and WSR-88D data. Wea. Forecasting, 18, 562--584.
9. Roebeling, R. A., and I. Holleman, 2009: SEVIRI rainfall retrieval and validation using weather radar observations. J. Geophys.Res., 114, D21202, doi:10.1029/2009JD012102.
10. 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.
11. Sieglaff, J. M, L. M. Cronce, and W. F. Feltz, 2011: Nowcasting Convective Storm Initiation Using Satellie-Based Box-Averaged Cloud-Top Cooling and Cloud-Type Trends. J. Appl. Meteor., 50, 110-126.
12. Sohn, B.-J., G.-H. Ryu, H.-J. Song, and M.-L. Ou, 2013. Characteristic Features of Warm-Type Rain Producing Heavy Rainfall over the Korean Peninsula Inferred from TRMM Measurements. Mon. Wea. Rev., 141: 3873-3888.
13. Suh, M. S, J. R. Lee, and C. H. Kwak, 2004: Evaluation of NOAA/NESDIS Auto-estimator for heavy rainfall events over Korean peninsula. J. Korean Meteor. Soc., 40(6), 685-696.
14. Vicente, G. A., R. A. Scofield, and W. P. Menzel, 1998: The operational GOES infrared rainfall estimation technique. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79, 1883--1898.

서울 우면산 산사태

2011년 7월 27일

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

기상청 Korea Meteorological Administration