발 간 등 록 번 호
11-1360000-001654-14

OPEN
공공누리
공공저작물 자유이용허락

실황 분석

Why? How!

5

예 보 국
재해기상대응팀

CONTENTS

1. 실황분석 ····· 1

1. 1. 실황분석의 이해 ····· 1

1. 2. 실황분석의 중요성 ····· 1

1. 2. 1. 우리나라 여름철 실황분석의 특성 ····· 2

1. 2. 2. 수치모델의 여름철 기압계 특성 ····· 5

1. 3. 실황분석의 방법과 절차 ····· 18

1. 3. 1. 메커니즘 분석의 중요성 ····· 18

1. 3. 2. 실황분석에 이용하는 관측 자료 ····· 19

1. 4. 실황분석에 기반한 예보 ····· 29

1. 4. 1. 실황분석을 이용한 초단기/단기 예보 ····· 29

1. 4. 2. 실황분석을 기반으로 한 예보 생산 제언 ····· 32

1. 4. 3. 지역 예보관의 역할 ····· 32

2. 사례분석 ····· 35

2. 1. 겨울철 실황분석 사례 ····· 35

2. 1. 1. 발해만 기압골에 의한 강수 사례(2019년 12월 19일 사례) ····· 35

2. 1. 2. 발해만 기압골에 의한 강수 사례(2019년 1월 12일 사례) ····· 42

2. 2. 여름철 실황분석 사례 ····· 48

2. 2. 1. 남쪽 저기압 강수 사례(2019년 7월 10~11일 사례) ····· 48

Why? 실황분석의 필요성

실황분석이란, 현재의 기상 현상을 파악한 뒤 왜 이러한 현상이 나타났는지 그 원인을 분석하고 앞으로 어떻게 진행될 것인지 예상하는 일련의 모든 과정을 말한다. 또한, 현재 상황과 모델 결과물을 비교하여 차이점을 분석하고 그 오차를 예보에 활용하는 과정이기도 하다.

예보를 생산하기까지 『관측 - 실황분석 - 수치모델자료 분석 - 예보 생산 - 통보』의 단계를 거치는데, 수치모델자료를 분석하기에 앞서 실황분석이 반드시 선행되어야 한다. 만약 실황분석을 하지 않는다면 수치모델의 오차를 예보에 그대로 반영하게 되어 예보와 실황이 다르게 전개될 때 유연하게 대처하기 어렵다. 결국, 예측 실패의 가능성이 커진다.

How! 실황분석의 방법

1 STEP 1	**실황 파악 및 메커니즘 분석**	위성, 레이더 영상을 이용해 우리나라 주변에 나타나는 기상 현상들을 파악한다. GTS 전문, 고층관측자료 등 다양한 관측 자료를 통해 현상의 원인 및 발달 메커니즘을 분석한다.
2 STEP 2	**실황 기반 시나리오 작성**	개념모델을 이용하여 기상 현상을 이동/발달/약화시키는 요소를 찾아 실황에서 어떻게 나타나고 있는지 분석한 뒤 앞으로의 변화 경향을 예측한다. 실황에서 분석한 요소들을 토대로 1차 예보 시나리오를 작성한다.
3 STEP 3	**실황과 모델 간 차이 인식**	수치모델이 모의하는 구름과 강수의 메커니즘을 분석한다. 메커니즘을 이루는 요소들에 대해 모델이 실황을 잘 반영하고 있는지 파악한다. 차이가 있다면 정량적으로 비교한다.
4 STEP 4	**실황분석 적용 최종 시나리오 생산**	실황분석을 적용한 최종 예보 시나리오를 생산한다.

실황분석 기반 초단기 예보 업무 절차

단계	수행 내용	이용자료	점검
1단계 감시	구름 위치 파악: 위성영상 한반도 영역 모든 구름 수평, 연직으로 동종의 구름 영역을 구분 각 구름 영역의 이동 속도 계산	위성영상, 레이더영상	☐ ☐ ☐
2단계 분석	구분한 동종의 각 구름대 운저, 운정 고도 수치화 구름 발생 메커니즘 분석(운저는 트리거, 운정은 강도 관련) 이동 방향에 위치한 지역에 발달, 약화 가능성 분석	GTS, 위성영상, 단열선도, AWS 등	☐ ☐ ☐
3단계 예측	지향류 분석으로 6시간 이내 구름 유입시각 예측 3차원 바람 관측 자료를 이용한 구름대의 변동성 실황과 수치모델(KIM)의 차이점 분석 초단기예측모델(KLAPS)과 예측 결과 비교, 조정	GTS, 위성영상, 단열선도, AWS, 연직바람관측, 통합분석시스템, 모델예상장, 모델진단 등	☐ ☐ ☐ ☐
4단계 결정	강수(구름) 시작과 종료시각, 강도 등 정확한 수치로 결정 초단기 예보와 초단기 예측모델과 실황과의 차이점 분석 구체적 시각을 명시한 통보문 작성	GTS, 위성영상, 단열선도, AWS, 연직바람관측, 통합분석시스템, 모델예상장, 모델진단 등	☐ ☐ ☐
5단계 조정	초단기 예보와 단기예보의 접경시간(+6시간) 수정 기존 결정사항과 변화하는 상황 제시 실황과 수치모델(KIM)의 차이점 분석 모델분석서 작성(원인에 따른 결과)	GTS, 위성영상, 단열선도, AWS, 연직바람관측, 통합분석시스템, 모델예상장, 모델진단 등	☐ ☐ ☐ ☐

실황분석 기반 단기 예보 업무 절차

시간	업무 구분	수행 내용
8시	실황 파악	위성 영상, 레이더 영상을 비롯한 관측 자료를 검토하여 우리나라 주변의 기상 현상 파악 위성 영상의 구름과 암역(Dry slot)은 3차원 구조로 해석
9시	메커니즘 분석	우리나라에 영향을 주는 시스템의 3차원 개념모델 분석 각 개념모델의 특징에서 시스템의 발달·약화에 영향을 주는 중요 기상 요소의 강도 변화 및 모델 차이 분석
10시	GTS 전문 분석	전일 21시 관측 GTS 전문 묘화, 기압계 파악, 기상 현상의 원인 분석
11시		09시 관측 GTS 전문 묘화, 12시간 동안 기압계 변화 경향 파악 기상 현상의 원인 및 영향을 줄 시스템의 발달·약화 경향 찾기 실황기반의 예보 시나리오 작성
12시	수치모델 분석	수치모델은 현상을 어떻게 모의하고 있는지, 시스템이 어떻게 진행되는지 파악 수치모델이 예측하는 구름이나 강수의 역학적 해석 필요 (ex) 대류성 혹은 층운형 강수인지, 중층에서 발생하는지, 하층 기반의 강수인지
	모델과 실황 비교	관측 자료와 수치모델 예상장을 비교하여 시스템에 영향을 주는 위치에서 정량적 차이 분석
13시	다중 예상 시나리오 작성	모델과 실황을 비교하여 나타난 오차를 예보에 반영하여 실황 기반의 예보 시나리오 수정 시스템의 특징에 기반한 역학적 기상요소 중심의 다중 유사사례 분석 (제2, 3의 시나리오) 변동 가능성을 고려한 향후 분석 요소 점검
17시	매뉴얼과 시나리오 중심의 실황 감시	실황분석 업무 수행, 매뉴얼에 기반한 변동 가능성 점검 변동 발견 시 차선의 시나리오 중 확률 높은 시나리오 선택 및 예보 수정, 정보 발표

※ 분석 시 유의 사항

- 위성 영상과 레이더 영상으로 실황을 파악할 때는 구름, 강수 등 현상과 함께 생성 원인, 이동 방향, 추후 변화 경향(발달 또는 약화) 등도 분석한다.
- 실황분석은 항시 업무로 수행하며, 각 매뉴얼의 특징을 참고하여 수시로 점검해야 한다.

1. 실황분석

1. 실황분석

Why?

기상 예보는 일반적으로 『관측 - 실황분석 - 수치모델자료 분석 - 예보 생산 - 대국민 통보』의 단계를 거친다. 현재를 제대로 이해하는 것은 다음을 예측하는 기반이다. 그러나 우리는 여러 가지 상황에 부딪혀 바로 다음 단계로 넘어가고자 하는 조급함을 이기지 못할 때도 있다. 따라서 본 가이던스에서는 현재에 집중해야 하는 이유가 무엇인지 이해하고, 실황분석을 어떻게 해야 하는지에 대해 이야기하고자 한다.

1. 1. 실황분석의 이해

실황분석이란 기상관측자료를 분석하여 현재의 기상 상황을 파악하는 것이다. 그러나 본 가이던스에서 다루고자 하는 실황분석은 그보다 확장된 개념이다. 현재, 어디에, 어떤(무엇) 기상 현상이 있는지 파악하는 것뿐만 아니라 왜 이런 현상이 나타나는지 원인을 분석하고 나아가 앞으로 어떻게 진행될 것인지를 예상하는 일련의 과정을 말한다. 우리나라 주변에 중점을 두고 분석한다면 실황분석은 곧 초단기 예보로 이어진다. 여기에 더하여 수치모델은 기상 현상을 어떻게 모의하고 있는지 예상 일기도를 분석하고, 수치모델 예상장과 실황을 비교하여 차이점을 파악해 그 오차를 예보에 활용한다면 단기예보를 위한 실황분석이 된다. 만약 이 과정을 거치지 않는다면 수치모델 자료가 실황을 잘 나타내고 있는지, 어떤 오차를 안고 있는지 파악하지 못한 채 그대로 수용하게 된다.

1. 2. 실황분석의 중요성

시스템이 우리나라에 가까워질수록 실황분석에 중점을 두는 것은 예보 정확도를 높이는 데에 크게 기여 한다. 제대로 된 실황분석으로 수치모델 자료가 없어도 24시간 이내의 단기 예측을 할 수 있기 때문이다. 더불어 실황분석은 예보관의 예보기술을 향상시킬 수 있는 중요한 작업이기도 하다.

특히 여름철 실황분석은 매우 중요하다. 우리나라 여름철 기압계는 남북으로 기온과 고도의 차이가 거의 없는 순압대기 혹은 상당순압대기 구조이다. 그러나 현업에서 사용하는 수치모델들은 경압대기에 최적화되어 있으므로 순압대기에 가까운 여름철 기압계를 예측하는 데에 많은 오차를 포함한다.

많은 분석 요소 중에서도 지상과 대기의 수증기량은 수치모델과 실황 간에 큰 오차를 보인다. 여름철 높은 온도에서는 수증기량이 약간만 증가하더라도 강한 대류성 구름이 만들어지고 반대로 약간만 감소하더라도 날씨가 맑아질 수 있다. 따라서 수증기의 양에 집중한 실황분석은 여름철 강수를 예보하는 데에 아주 중요한 작업이다.

1. 2. 1. 우리나라 여름철 실황분석의 특성

우리나라는 지리적으로 서쪽의 유라시아 대륙, 동쪽의 북태평양 사이에 있다. 유라시아 대륙은 봄철부터 지표의 눈이 녹고 일사가 강해지면서 가열되기 시작한다. 비열 차이로 인해 육지가 해양보다 빨리 가열되는 것은 익히 알고 있는 사실이다. 여름이 시작되는 6월부터 유라시아 대륙에는 열적 저기압이 대규모로 형성되고 해양에는 북태평양 고기압이 강해지면서 우리나라는 서쪽의 저압부와 동쪽의 고압부 사이에 놓인다. 저기압과 고기압의 순환을 따라서 열적 저기압의 남쪽인 벵골만과 남중국해, 그리고 북태평양 고기압의 남쪽인 적도 태평양에서부터 따뜻하고 습한 공기가 우리나라로 공급된다. 강수의 재료인 수증기가 충분히 뒷받침되는 하층 기압계가 만들어지는 것이다.

강한 상승 운동이 없더라도 중하층 대기에 수증기가 풍부하다면 호우가 발생할 수 있는 잠재력이 충분하므로 이러한 기압계는 여름철 강수 발달에 큰 역할을 한다.

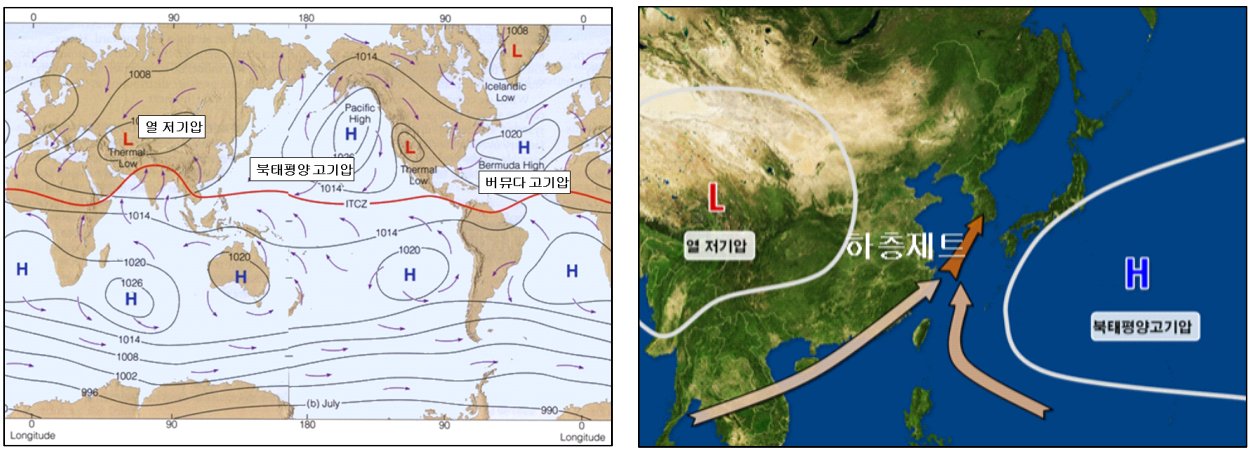


그림 1-1. 여름철(7월) 기압계 모식도
(좌) 전지구 지상 기압계, (우) 우리나라 부근 지상 기압계 (출처: 손에 잡히는 예보기술, 2014).

강수는 과포화 상태의 공기덩이에서 수증기가 응결하면서 수적을 형성하고 이것이 성장 과정을 거치면서 지상으로 떨어지는 현상이다. 일반적으로 공기덩이가 포화 상태가 되려면 수증기량이 많아지거나 공기덩이의 기온이 하강하여 포화수증기압이 낮아져야 한다. 앞서 우리나라의 여름철 기압계 특징으로부터 여름철 하층 대기의 수증기 공급이 원활한 구조임을 알고 있다. 수증기가 충분히 공급된 상태에서 공기덩이가 상승한다면 건조 공기가 상승할 때보다 쉽게 포화가 된다. 그림 1-2처럼 기온의 연직 구조가 같다 하더라도 하층에 수증기가 공급되면 그림 1-2 (좌)의 조건보다 낮은 고도에서 구름이 발달할 수 있다.

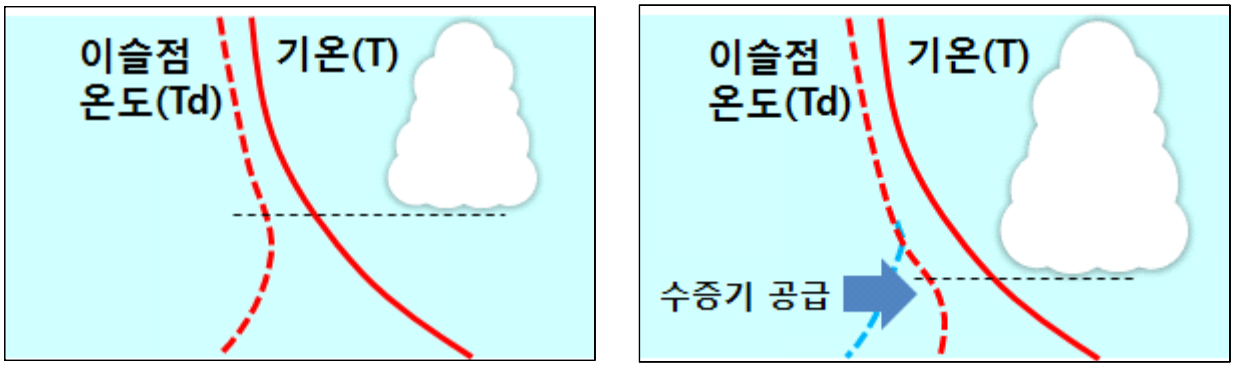


그림 1-2. 하층 수증기 공급에 따른 구름 발달 모식도. 빨간색 실선은 대기의 연직 기온(T) 곡선, 빨간색 점선은 이슬점 온도(Td) 곡선, 검은색 점선은 상승응결고도(LCL)에 해당한다.

Clausius-Clapeyron 방정식은 온도에 따른 포화 수증기압을 나타내며 그림 1-3과 같이 지수 함수 그래프로 표현된다. 이것은 기온 변화량이 같다 하더라도 높은 온도 구간에서의 온도 변화에 따른 최대 수증기압 변화량이 낮은 온도 구간에서보다 더 크게 나타난다는 것을 보여준다. 따라서 기온이 높은 여름철에는 약간의 기온 변화에도 수증기 함유량이 급격하게 변한다.

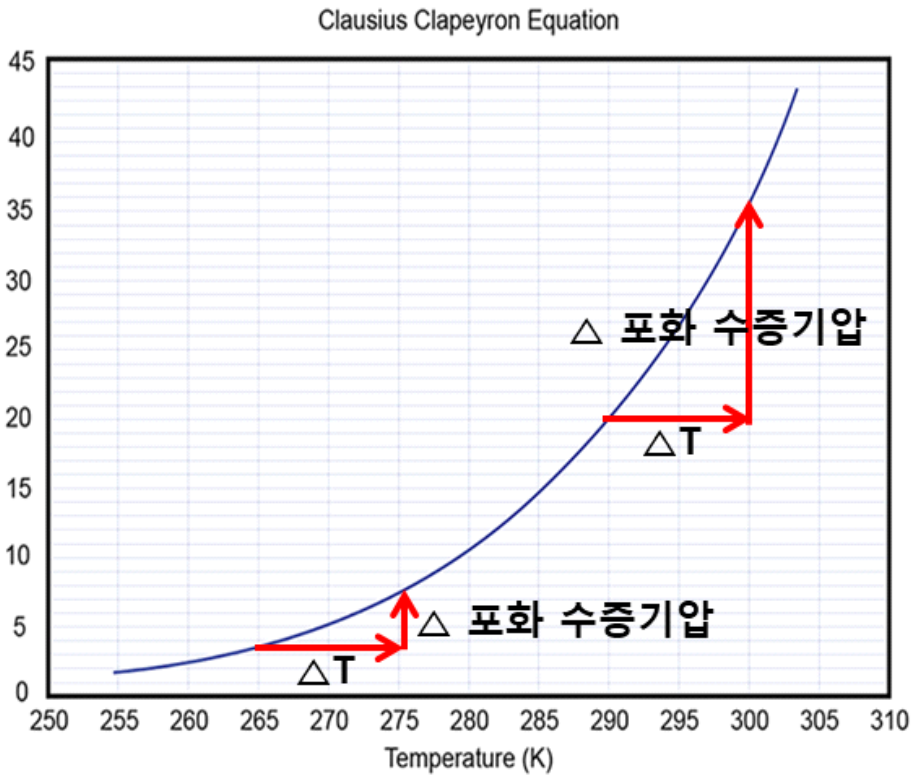


그림 1-3. 온도에 따른 수증기압 포화곡선(Clausius-Clapeyron Equation)

수증기량의 분석이 중요한 이유는 또 있다. 그림 1-4는 기상청에서 사용하는 Skew T - Log P diagram이다. 이 그림을 보면 지상(약 1000hPa)에서 기온이 약 -12℃인 1kg의 건조공기가 가질 수 있는 최대 수증기량은 1.5g에 불과하다(A). 이 때 지상에서 공기덩이가

포화되어 상승하는 경우, 가질 수 있는 수증기량이 적으므로 액체 혹은 고체로 응결될 때 방출하는 잠열도 적다. 따라서 건조단열기온감률(약 100m 상승 시 1℃ 기온 하강)과 비슷한 구조를 보인다. 반면, 33℃의 기온에서 포화되어 상승하는 공기는 약 33g의 다량의 수증기를 가질 수 있기 때문에(B) 많은 잠열을 방출한다. 따라서 이 공기덩이가 상승할 때에는 기온 하강률이 작아 상대적으로 주변 공기보다 따뜻하고 밀도가 낮다. 이로써 공기덩이가 계속 상승할 수 있는 구조가 만들어진다.

그런데 대기는 일반적으로 조건부 불안정 상태이다. 조건부 불안정 대기란 안정하고 불포화 상태인 공기덩이가 강제로 상승하는 과정에서 포화(구름 형성)되고, 이윽고 주위의 공기보다 따뜻해지는 고도까지 이르는 것을 말한다. 상승하는 공기덩이의 기온이 주변보다 높아지면 다른 도움 없이도 계속해서 상승할 수 있게 되므로 이러한 상태를 불안정하다고 한다. 공기덩이의 기온이 주변보다 높아지기 시작하는 고도를 자유대류고도(Level of Free Convection, LFC)라 하고, 자유대류고도에 도달한 공기덩이는 지속적인 상승 운동을 하면서 큰 CAPE(대류가용위치에너지; 자유대류고도나 대류응결고도에서 부력에 의해 상승하는 공기덩이가 가질 수 있는 최대 가용 에너지)를 갖게 된다.

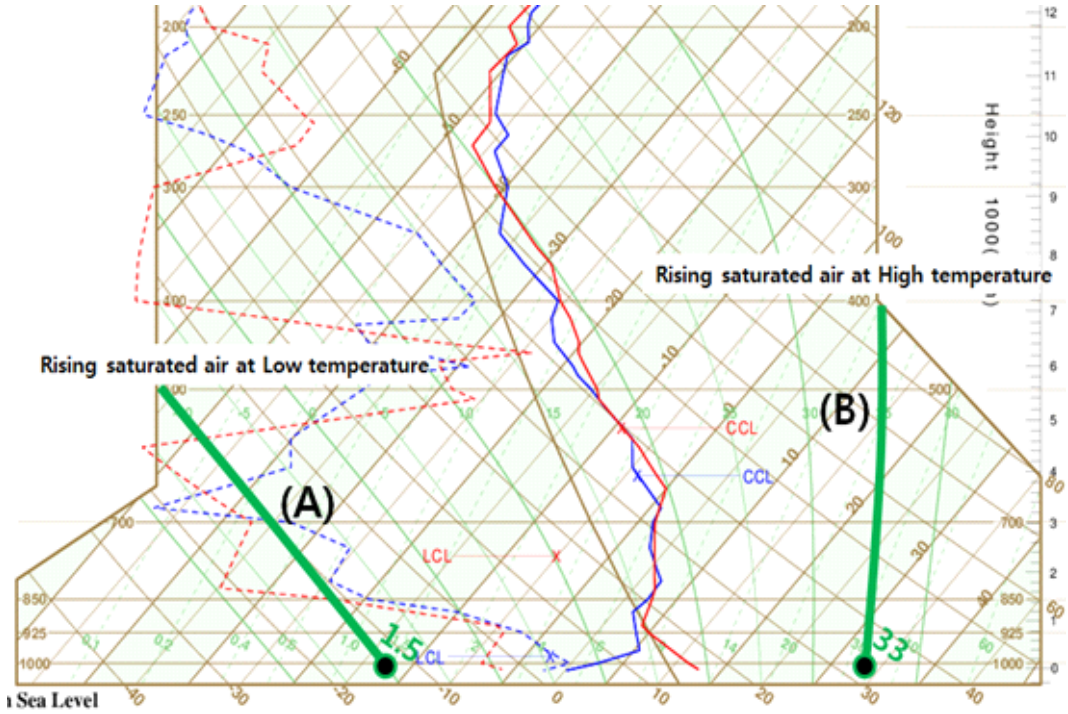


그림 1-4. 온도에 따른 포화단열감률의 변화(초록색 숫자: 포화혼합비)
(A) 낮은 온도(-12℃)에서의 포화단열감률, (B) 높은 온도(33℃)에서의 포화단열감률.

여름철은 기온이 높으므로 수증기를 함유할 수 있는 그릇이 크다. 하층에 수증기가 충분히 공급된 상태에서 공기덩이가 상승한다면 수증기가 액체나 고체로 상변화를 하는 과정에서 방출하는 잠열이 크기 때문에 다른 강제력이 없어도 계속 상승하면서 큰 CAPE를 갖는다. 이 때 대기가 충분히 불안정해지면 적란운의 형태까지 발달할 수 있고 천둥과 번개도 동반한다.

여름철 집중호우를 야기하는 대표적인 형태는 중규모 대류계(Mesoscale Convective Systems, MCSs)이다. 중규모 대류계는 깊은 대류 운동이 지속적으로 발생하거나 대류 운동에 의해 중규모 연직 순환이 발생하는 현상이다. 복합적인 뇌우와 지속적인 강수가 나타나는 지역이 연결되기 때문에 수평 규모가 최소한 100㎞ 이상이다.

뇌우가 형성되기 위해서는 풍부한 수증기, 불안정한 대기, 강한 상승 운동이 갖춰져야 한다. 따라서 여름철 실황분석에는 기온의 작은 변화에도 급변하는 인자인 하층 수증기량의 분석이 중요하다.

1. 2. 2. 수치모델의 여름철 기압계 특성

수치모델이 모의하는 여름철 기압계는 다음과 같은 점을 주의해야 한다.

1. 여름철에는 하층 대기로 수증기 공급이 원활해지면서 강한 대류 운동을 일으킬 수 있으므로 하층 수증기량에 대한 분석이 중요하다.
2. 수치모델은 북태평양 고기압의 일변화에 대한 진동폭이 크다. 21시~03시에는 강수대를 실황보다 남쪽으로, 03~09시에는 북쪽으로 모의하는 경향이 있다.
3. 수치모델은 500hPa 고도장의 급격한 변화를 따라가지 못한다.
4. 500hPa 북태평양 고기압보다 200hPa 티베트 고기압에 대한 수치모델의 예측성이 높다. 따라서 폭염에 대한 중기예보 시에는 200hPa 일기도를 활용한다.
5. 하층제트 북단에서 집중호우가 발생하며, 수치모델은 야간에 강화되는 하층제트를 과소모의 하는 경향이 있다.

하층 수증기량의 분석이 중요한 이유는 앞 절에서 설명하였다. 이번 절에서는 실황분석 시 북태평양 고기압과 폭염, 하층제트 등 다른 요소에 대해 주의할 점을 알아보도록 하자.

북태평양 고기압

온난 습윤한 성질을 가진 북태평양 고기압은 일사가 강한 여름에 세력을 확장하였다가 겨울로 넘어가면서 수축하는 계절적 변동을 보인다. 이와 같은 원리로 하루 동안에도 확장과 수축을 반복하는데 일사가 강한 낮에는 가열되어 확장하였다가 밤사이 기온이 떨어지면 냉각되어 수축한다.

그림 1-5의 지난 20년간(1998년~2017년) 관측한 광주의 500hPa 지위고도를 시간대별로 보면 03시에 최솟값, 15시에 최댓값을 보이는데 그 차이는 약 7gpm 정도이다. 500hPa 지위고도가 연직적으로 7gpm 낮아진다는 것은 수평적으로는 70㎞나 이동한다는 것을 의미한다. 강수대가 기압골의 남동진 등의 다른 강제력 없이도 북태평양 고기압의 수축을 따라 밤사이 남하하는 것이다. 행정 구역상 도(道)의 남북거리가 80~100㎞이므로 이러한 강수대의 이동은 방재 측면에서 큰 의미가 있다.

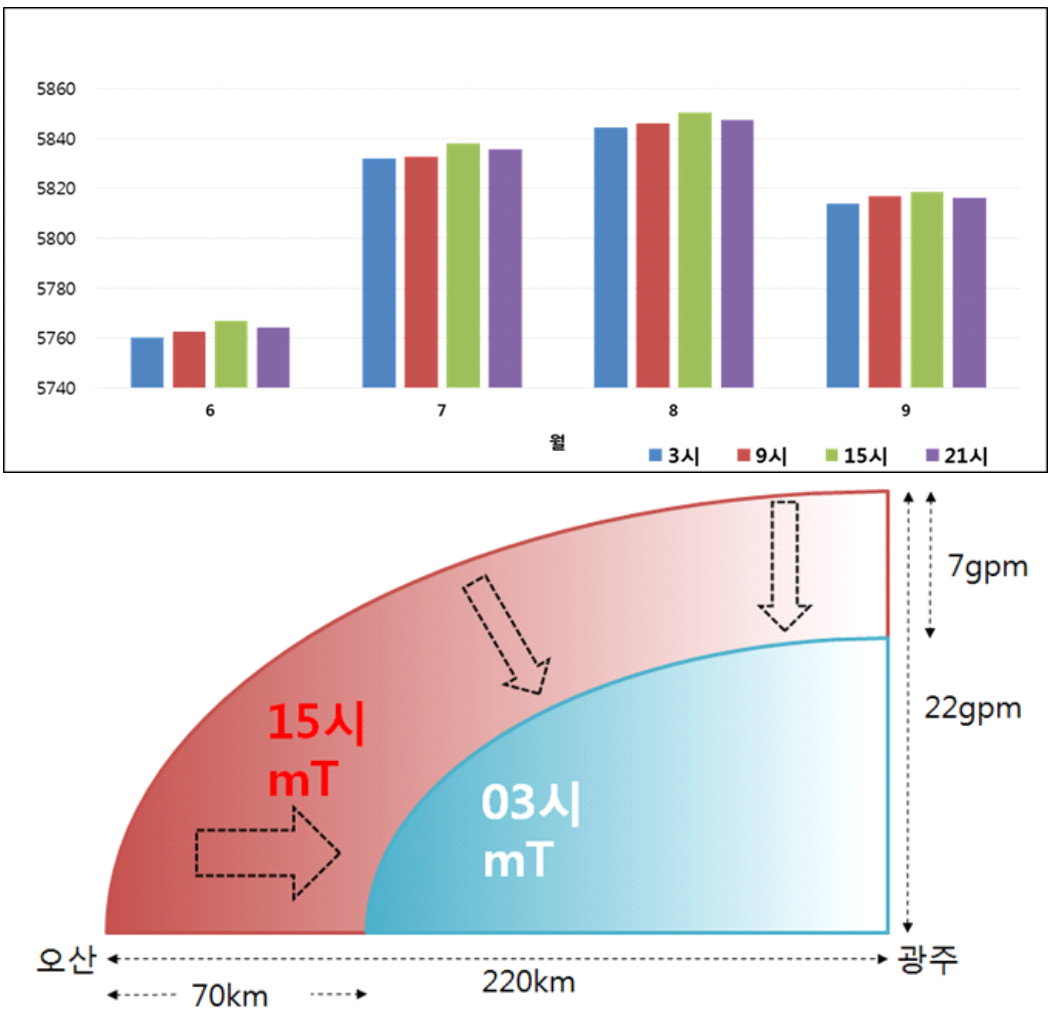
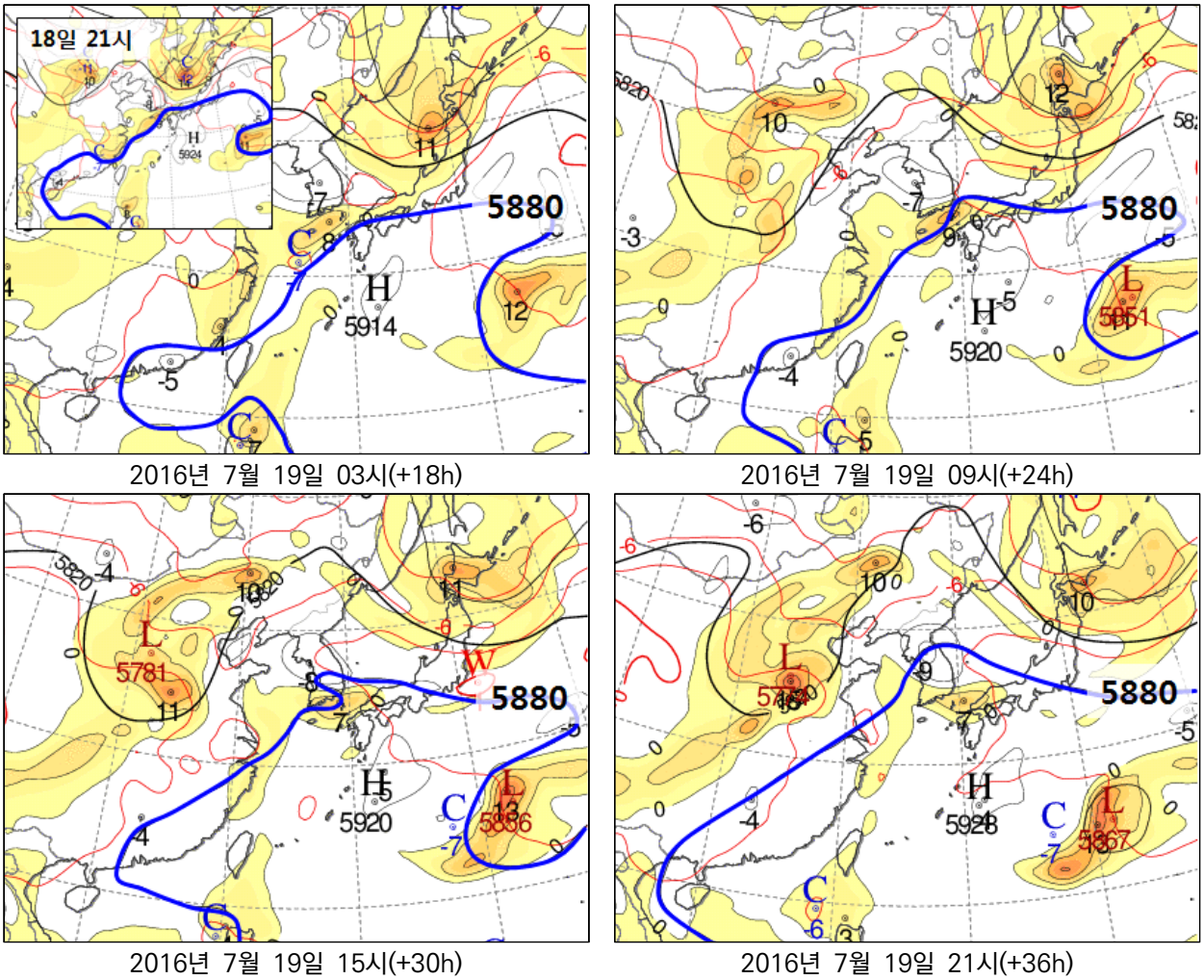


그림 1-5. (상) 20년간(1998~2017년) 6~9월 사이 광주의 500hPa 지위고도(gpm)의 시간대별 변화
(하) 광주를 기준으로 한 북태평양 고기압의 일변화 모식도



2016년 7월 19일 03시(+18h) 2016년 7월 19일 09시(+24h)

2016년 7월 19일 15시(+30h) 2016년 7월 19일 21시(+36h)

그림 1-6. 2016년 7월 19일 03시부터 21시까지 북태평양 고기압의 일변화에 대한 UM의 500hPa 모의 경향(2016년 7월 18일 09시 생산)

그림 1-6은 2016년 7월 18일 09시에 생산한 500hPa 고도/기온에 대한 UM의 예상장이다. 기후학적으로 500hPa의 5880gpm 등고도선과 북태평양 고기압 가장자리가 잘 일치한다고 알려져 있으므로(Choi and Byun, 2007; Bao, 1987; Huang and Tang, 1964) 5880gpm을 기준으로 북태평양 고기압의 모델 예측 경향을 살펴보았다. 7월 19일 03시 예상장을 보면 북태평양 고기압(5880gpm)의 서쪽과 북쪽 경계가 18일 21시보다 수축한 것을 알 수 있다. 그러나 19일 09시에는 북쪽 경계가 규슈 북부에서 대한해협으로 확장하기 시작하고 19일 21시에는 북한지방까지 북상하는 것으로 모의하고 있다.

위와 같이 UM에는 북태평양 고기압의 일변화(Diurnal cycle) 경향이 반영되어 있다. 그러나 21시에 북태평양 고기압이 가장 확장하는 것으로 모의하였다. 이는 500hPa 지위고도가 3시에 최솟값, 15시에 최댓값을 보이는 관측 경향과는 다르다.

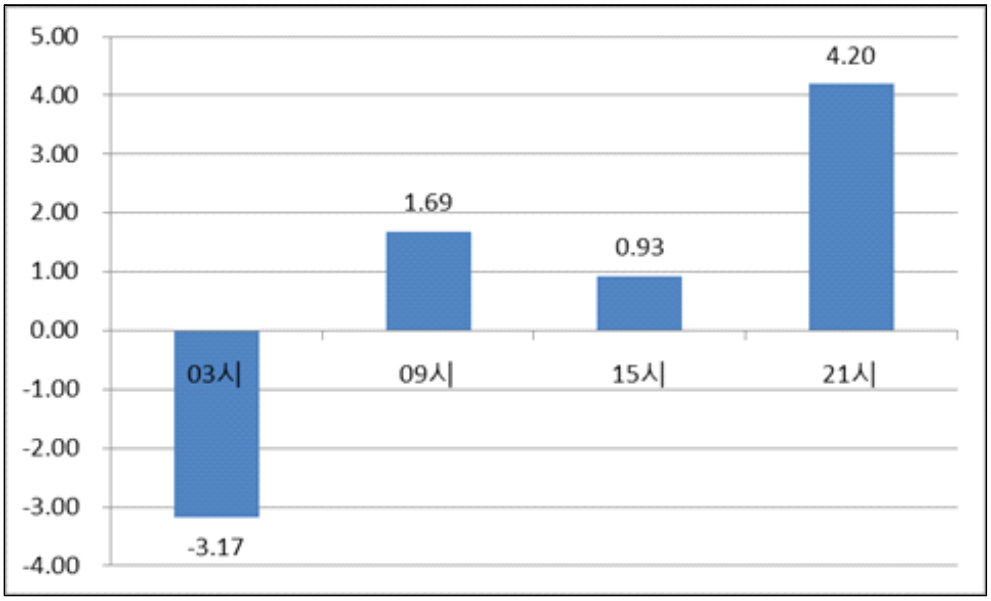
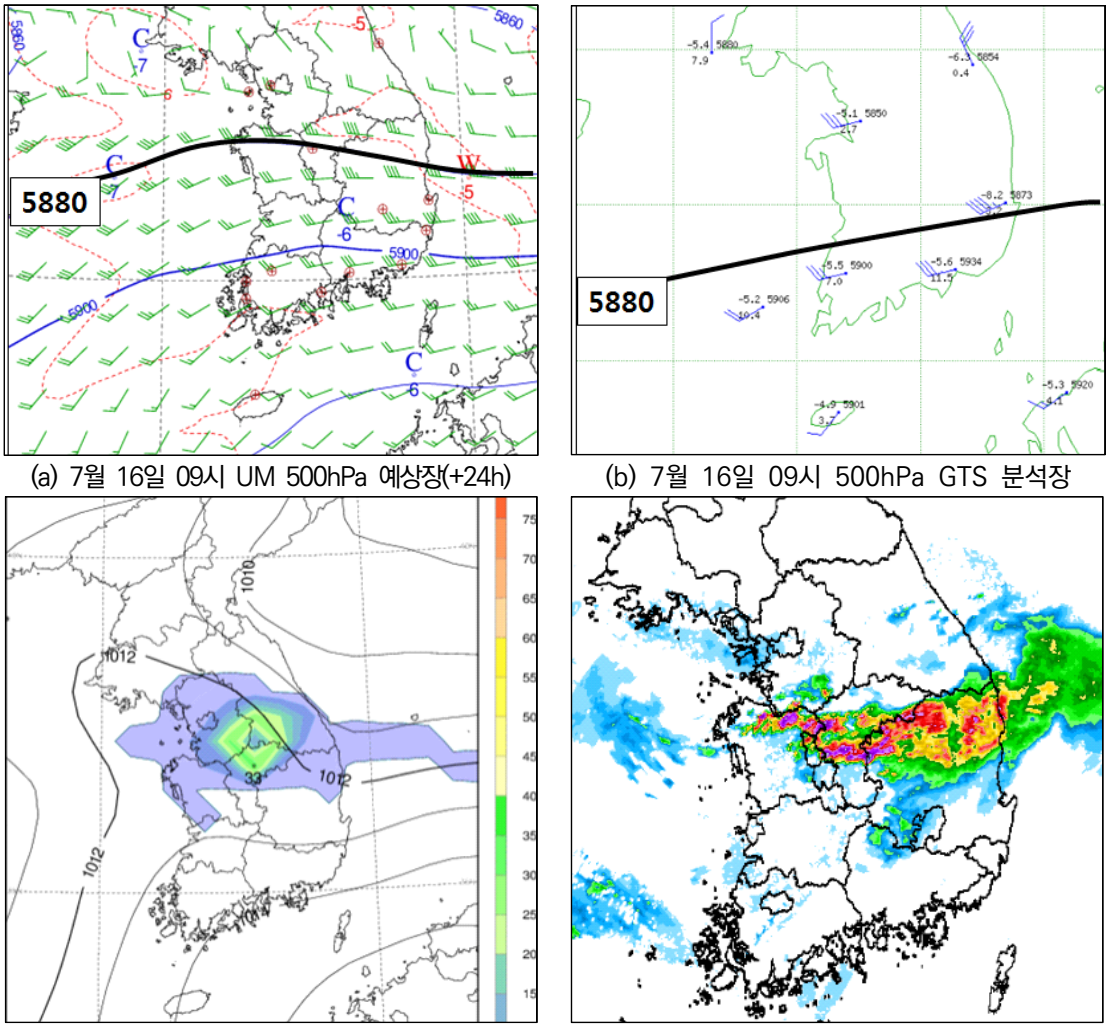


그림 1-7. 광주의 500hPa 지위고도(2016~2018년, 7~8월)에 대한 UM의 시간대별 편차
수치모델 예상 지위고도에서 실황의 지위고도를 뺀 값이다.

그림 1-7은 500hPa 지위고도에 대한 UM의 시간대별 편차(2016~2018년 7~8월, 광주)를 나타낸다. 수치모델 예상 지위고도에서 관측된 지위고도를 뺀 값으로 음의 편차는 모델이 지위고도를 실황보다 과소모의 하는 것이고, 양의 편차는 모델이 과대모의 하는 것을 의미한다. 그래프를 보면 21시 양의 편차 → 03시 음의 편차 → 09시 양의 편차로 바뀌는데, 이것은 밤사이 북태평양 고기압이 수축할 때에는 모델이 등고도선을 실황보다 남하하는 것으로 모의하고, 아침에 확장할 때에는 실황보다 더 북상하는 것으로 모의하는 것을 의미한다.

기단의 경계에서 발달하는 장마전선의 경우 북태평양 고기압의 일변화를 따라 밤사이 고기압이 수축할 때 남하하고, 낮에 고기압이 확장할 때 다시 북상하는 경향을 보인다. 장마전선이 남하하다가 다시 북상하는 위상으로 전환할 때(새벽~아침) 잠시 정체하게 되는데, 이 때 한 구역에 머무르면서 집중호우가 발생하기 쉽다. 그러나 수치모델은 북태평양 고기압의 수축 및 확장에 편차를 가지고 있으므로 장마전선이 남하하는 위치와 북상하는 위치에도 오차를 보인다. 이로 인해 장마전선에 의한 집중호우 구역에도 오차가 나타난다.



(a) 7월 16일 09시 UM 500hPa 예상장(+24h)　(b) 7월 16일 09시 500hPa GTS 분석장

(c) 7월 16일 09시 UM 지상 예상장(+24h)　(d) 7월 16일 09시 레이더 영상

그림 1-8. UM의 2017년 7월 16일 09시 예상장(7월 15일 09시 생산)과 09시 실황 관측 자료 (a) 500hPa 예상장, (c) 지상 예상장. (b) 500hPa GTS 분석장, (d) 레이더 영상

2017년 7월 16일 09시에 대한 UM(7월 15일 09시 생산) 예상과 실황을 비교해보자(그림 1-8). 수치모델은 500hPa 5880gpm 등고도선을 충청북부에 걸쳐 있는 것으로 모의하였다. 강수 구역도 5880gpm 북단인 중부지방과 충청북부, 경북북부로 예상하였고 특히 경기남부, 강원영서남부, 충청북부에 30㎜ 이상의 강수량이 집중될 것으로 모의하였다. 그러나 실황 GTS 자료를 기반으로 분석한 5880gpm 등고도선은 예상보다 남쪽인 남부지방에 걸쳐 있는 것으로 나타났다. 또한, 레이더 영상에서도 볼 수 있듯이 예상보다 좁은 띠 형태의 강수대가 충청도와 경북 북부에 걸쳐 있고 특히 강한 강수대는 예상보다 남쪽인 청주 부근에 있었다.

폭염

수치모델이 북태평양 고기압을 모의하는 데에 오차가 있다는 것은 장마전선 뿐만 아니라 폭염을 예측하는 데에도 영향을 준다. 북태평양 고기압이 확장하여 우리나라를 완전히 장악하면서 장마는 끝나고, 따뜻하고 습한 기단의 영향을 받으며 폭염이 시작하기 때문이다. 수치모델은 500hPa의 지위고도의 변화를 잘 모의하지 못하므로 폭염, 특히 중기예보 기간의 기온 예측성이 낮다.

우리나라 상층 기압계를 지배하는 기단은 북태평양 고기압과 티베트 고기압(Tibetan high)이다. 평균 해발고도가 약 4㎞ 이상인 티베트 고원에는 여름철 강한 일사 가열로 인해 열적 저기압이 형성되고 이와 반대로 상층(200hPa)에는 거대한 고기압이 만들어지는데 이것을 티베트 고기압이라고 한다. 대개 7월 중순~하순 경 티베트 고기압이 티베트 고원에서부터 우리나라 상공까지 확장하고 북태평양 고기압이 일본 남동쪽 해상에서 우리나라 상공까지 확장하면서 거대한 동서 고기압 벨트가 만들어진다. 이 때 우리나라에는 하층에서부터 200hPa까지 견고한 고기압이 형성되고 이 고기압으로 인해 열기가 빠져나가지 못하면서 폭염이 나타난다.

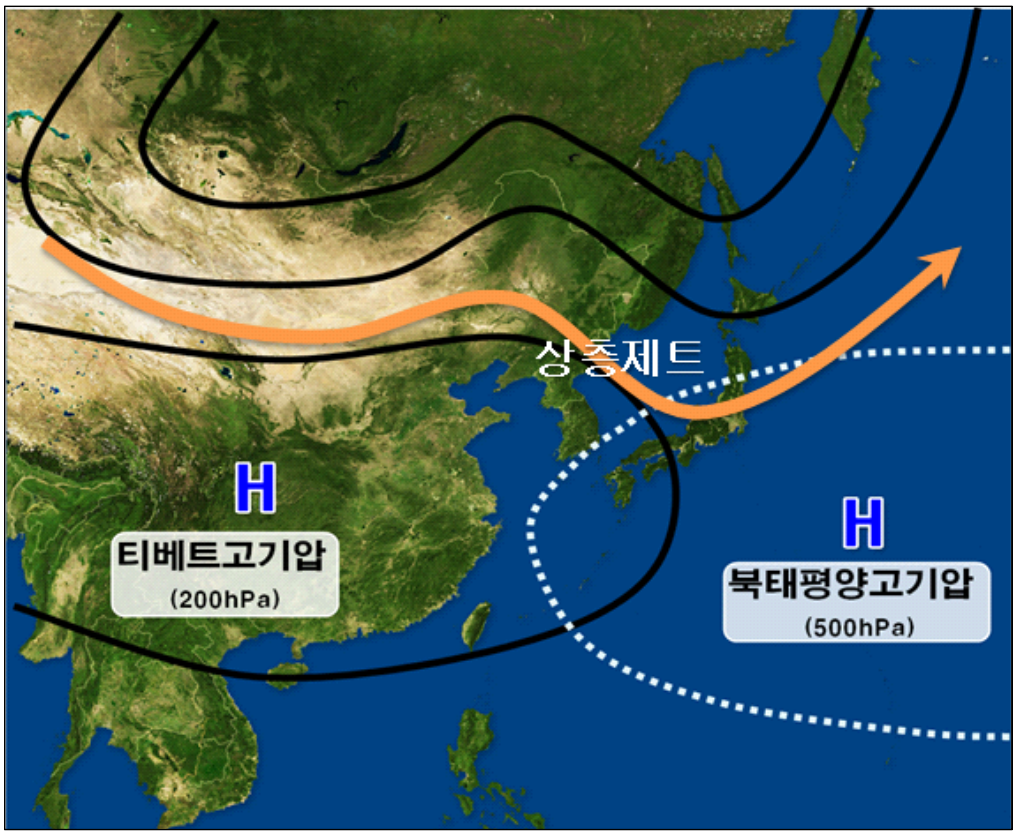


그림 1-9. 여름철 우리나라 부근 상층 기압계 모식도
(주황색 화살표: 200hPa 제트)

앞서 언급했듯이 중기예보를 위한 수치모델의 폭염 예측성은 현저히 떨어진다. 특히 MOS는 기후적인 통계자료를 포함하기 때문에 이례적인 폭염을 따라가지 못하는 모습을 보인다. 예측 기간이 길어질수록 평년값을 쫓아가기 때문이다.

표 1-1에 있는 2018년 8월 1일부터 10일까지 서울의 최고기온 변화를 보자. 8월 1일에 39.6℃의 최고기온을 기록한 뒤 5일까지는 기온이 낮아지는 경향이지만 6일부터는(9일을 제외하고) 다시 35℃를 넘었다. 그러나 그림 1-10의 UM과 ECMWF(8월 1일 09시 생산)의 기온 예측을 보면 예측 기간 후반으로 갈수록 예상 최고기온이 35℃를 넘지 않는다. 또한, 모델 간의 편차도 크다. 만약 이와 같은 모델의 기온 경향을 따라 중기예보를 한다면 폭염이 끝난다는 신호를 주게 되는 셈이다.

표 1-1. 2018년 8월 1일부터 10일까지 서울의 최고 기온(℃)

8월	1일	2일	3일	4일	5일	6일	7일	8일	9일	10일
최고 기온	39.6	37.9	37.9	34.9	33.9	35.3	35.9	35.3	32.5	36.8

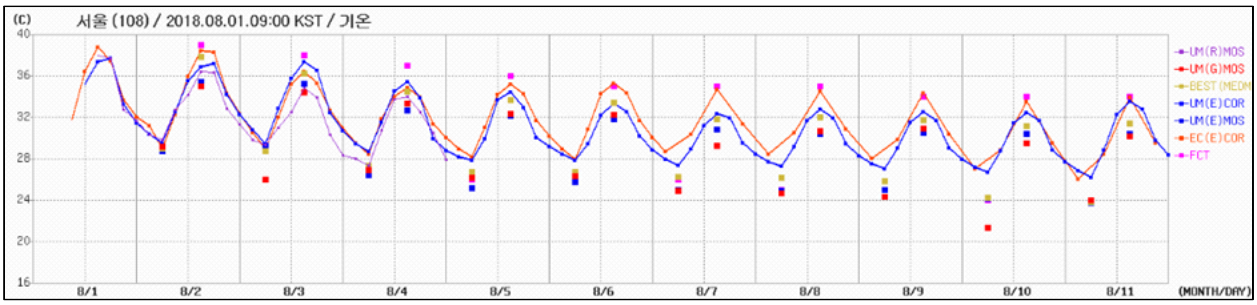


그림 1-10. 중기예보 기간('18년 8월 1일~10일) 서울의 낮 최고기온에 대한 수치모델별 예측('18년 8월 1일 09시 생산)
(파란색 선: UM 예측값, 주황색 선: ECMWF 예측값, 분홍색 점: 예보한 낮 최고기온)

그렇다면 중기예보에서 낮 최고기온을 예보할 때 어떤 자료를 참고해야 할까? 우리는 폭염이 언제까지 이어지는지에 대한 정보를 제공해야 하므로 폭염의 원인인 티베트 고기압 또는 북태평양 고기압의 동향을 살펴야 한다.

그림 1-11은 2018년 8월 포항의 200hPa과 500hPa 지위고도에 대한 UM의 편차를 나타낸 것이다. 09시 발표 모델을 기준으로 초기장부터 최대 12일까지의 예측성을 보여준다. 두 고도장에 대해 모두 음의 편차(과소모의)를 보이지만 가장 큰 특징은 500hPa의 경우 3일 이후에 대한 예상 지위고도가 20gpm 가량 차이가 나는 반면 200hPa은 7일 이후부터 10gpm 이상 편차가 나타나기 시작한다. 3~7일 사이의 200hPa 모델 편차가 500hPa에 비해 작은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 500hPa보다 200hPa에 대한 수치모델의 예측성이 더 신뢰할 만하다는 것을 보여준다.

2017년도 또한 이와 비슷한 결과를 보여준다. 200hPa은 예측 기간이 6일이 넘어가면

10gpm 이상 음의 편차가 나타났고, 500hPa은 예측 기간 3일 이후부터 10gpm 이상 음의 편차를 보였다.

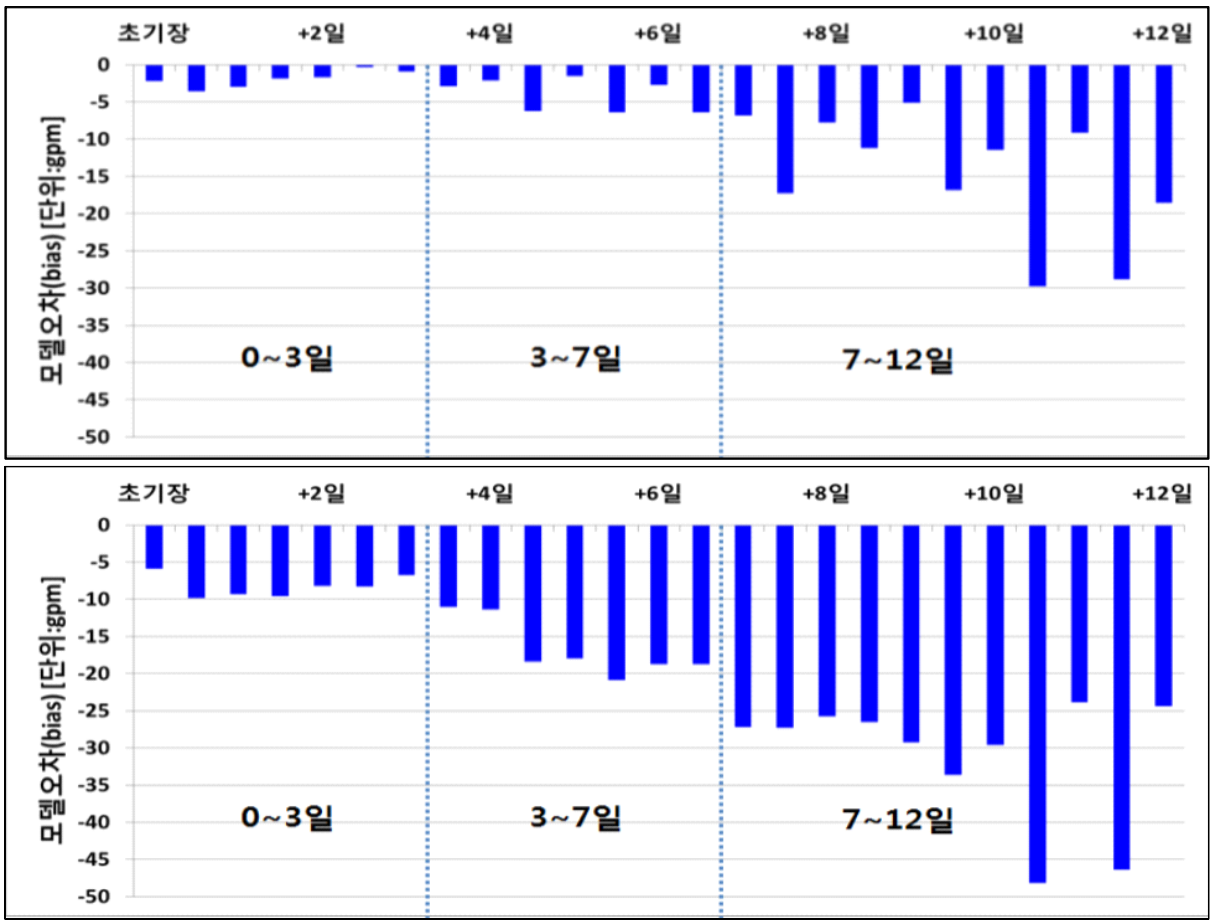


그림 1-11. 2018년 8월 포항의 (상) 200hPa과 (하) 500hPa 지위고도에 대한 UM의 편차

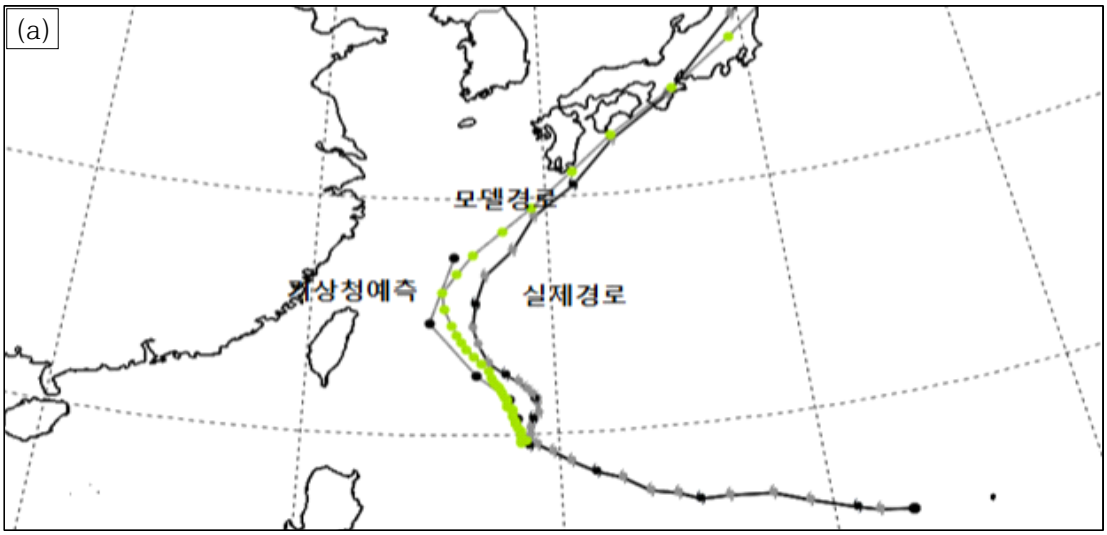
200hPa과 500hPa의 지위고도에 대한 수치모델의 음의 편차가 크다는 것은 모델이 북태평양 또는 티베트 고기압의 세력을 약하게 모의한다는 것을 의미한다. 특히 예측 기간이 길어질수록 음의 편차는 커지는 경향을 보인다. 이러한 수치모델의 특징을 고려하지 않는다면 중기 예보 기간에 대한 폭염 예측에 실패한다. 따라서 폭염을 예측할 때에는 500hPa의 북태평양 고기압보다 편차가 적은 200hPa의 티베트 고기압을 분석하는 것이 기온 예보 정확도를 높이는 데 도움이 된다.

태풍

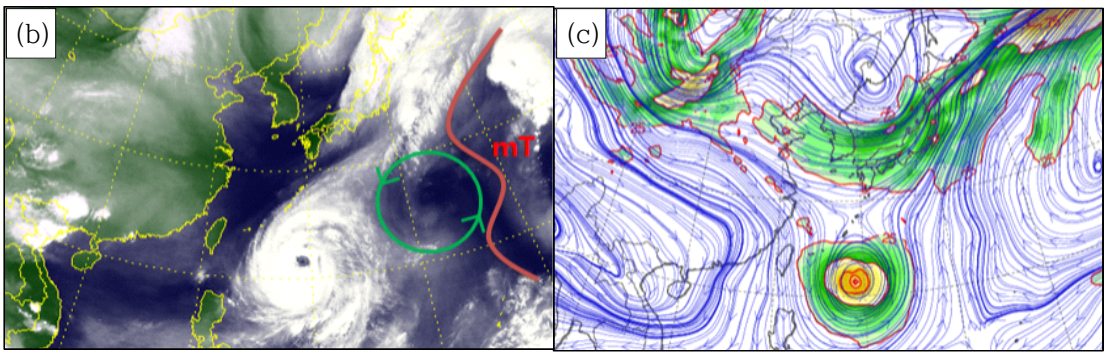
태풍 예보는 태풍의 진로, 발달 강도, 이동 속도 등을 포함한다. 이 중 태풍 예보에서 가장 중요한 것은 태풍의 진로 결정이다. 태풍 진로에 대한 예보는 실황분석이 매우 중요하다.

태풍의 이동 경로를 결정하는 데에는 두 가지 요인이 작용한다. 첫째, 태풍 자체의 회전으로 발생하는 β-효과와 둘째, 종관 기압계에 의해 결정되는 지향류이다.

그런데 수치모델은 일반적으로 태풍의 중심 기압을 잘 예측하지 못할 뿐만 아니라 아열대 고기압에 대한 예측력도 좋지 않다. 따라서 태풍 예보를 할 때 실황분석을 제대로 하지 않는다면 β-효과와 지향류를 잘 못 반영하게 되므로 예보가 빗나간다. 그러므로 태풍 경로를 예측하기 위해서는 정확한 실황분석이 필수이다.



(a) 2018년 제24호 태풍 짜미(TRAMI)의 예상 이동 경로와 실제 이동 경로



(b) 2018년 9월 27일 09시 수증기 영상 (c) 2018년 9월 27일 500hPa 유선 예측장

그림 1-12. (a) 2018년 제24호 태풍 짜미(TRAMI)의 9월 25일 09시 기준 진로 예측
(b) 2018년 9월 27일 09시의 천리안 위성 수증기 영상
(빨간 선: 북태평양 고기압 가장자리, 초록색 원: 저기압성 회전 의미)
(c) 2018년 9월 27일 09시 500hPa 유선/풍속장(9월 27일 09시 생산).

2018년 제 24호 태풍 짜미(TRAMAI)의 사례를 보자. 그림 1-12와 같이 짜미의 최종 이동 경로는 수치모델이 모의한 것만큼 서진하지 못하고 예상보다 동쪽에서 전향하며 북상하였다. 수치모델은 북태평양 고기압이 확장하면서 태풍도 고기압의 흐름을 따라 서쪽으로 이동할 것이라고 모의하였다. 그러나 당시 수증기 영상을 보면 태풍의 북동쪽에 또 다른 저기압성 회전이 존재하는 것을 볼 수 있다(그림 1-12 (b)).

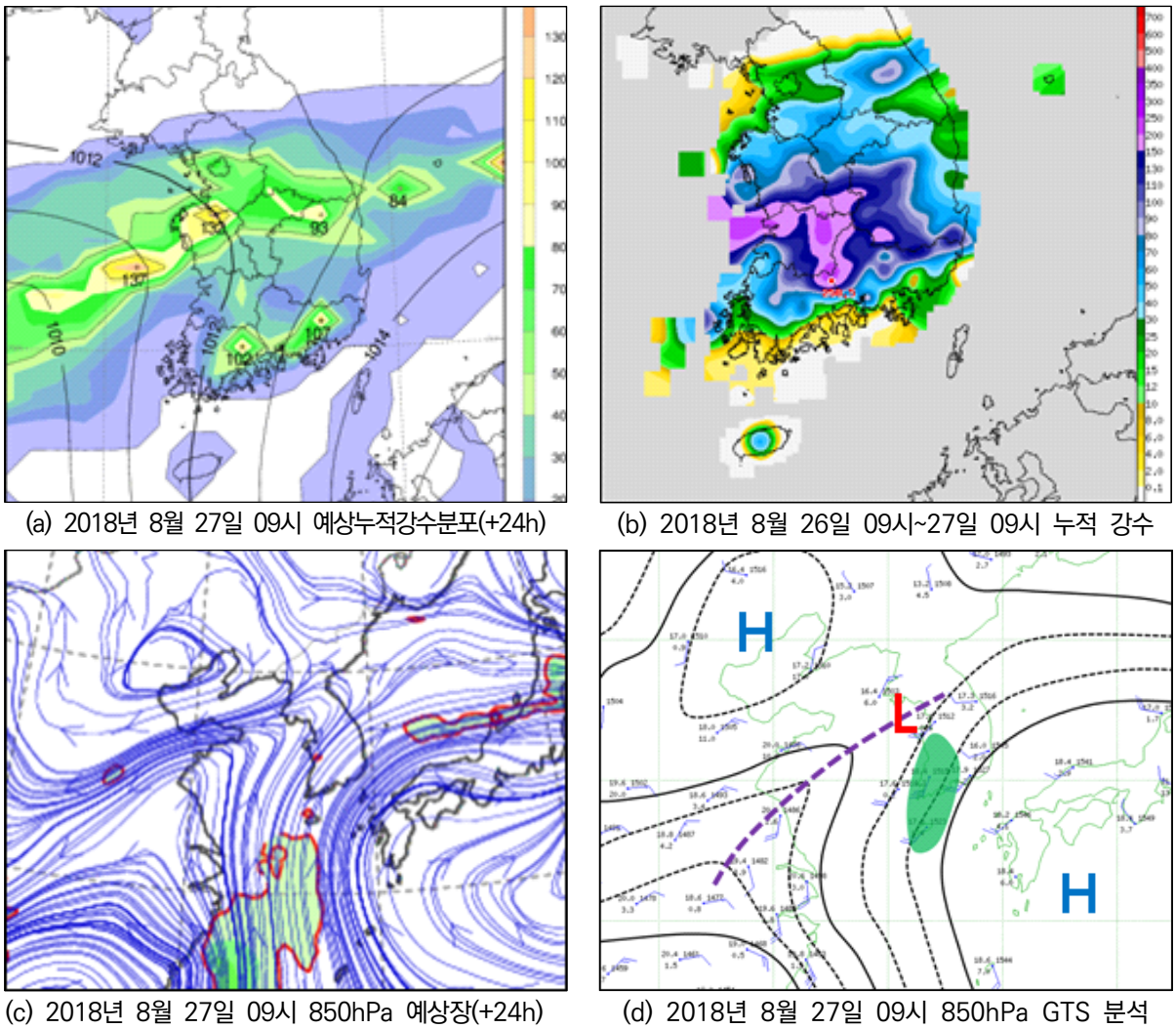
이것은 수치모델의 초기장(그림 1-12 (c))에서조차 뚜렷하게 나타나지 않는 흐름이었다. 결국, 이 작은 저기압성 회전이 북태평양 고기압이 확장하는 것을 막았고 태풍이 고기압 가장자리를 따라 서쪽으로 끌려 이동하는 것을 방해하였다.

이렇듯 수치모델이 중규모의 저기압을 잘 모의하지 못하기 때문에 태풍의 이동 경로를 예측하기 위해서는 북태평양 고기압뿐만 아니라 태풍의 이동에 영향을 주는 다른 흐름이 있는지 살펴보아야 한다. 즉, 실황에서 중규모 저기압에 대한 크기와 위치의 파악이 중요하다.

하층제트

700hPa 이하 고도에서 부는 25kts 이상의 남서풍인 하층제트(Low-level jet, LLJ)는 많은 양의 수증기와 열을 저위도에서 고위도로 수송하는 역할을 한다.

하층제트는 호우구역을 동반한다. 남서풍을 타고 북쪽으로 이동하는 공기덩이는 주위보다 따뜻하므로 상승을 한다. 이 때 하층제트가 상층제트의 발산 구역과 만나게 되면 급격한 연직운동으로 바뀌면서 대류성 구름을 발달시킨다. 이것을 상하층 제트 커플링이라고 한다. 더불어, 하층제트가 실어 나르는 수증기를 포함한 고온의 공기덩이가 상승하여 상변화에 의한 잠열을 방출하면서 상승 운동이 더욱 활발해지기 때문이기도 하다.



(a) 2018년 8월 27일 09시 예상누적강수분포(+24h)
(b) 2018년 8월 26일 09시~27일 09시 누적 강수
(c) 2018년 8월 27일 09시 850hPa 예상장(+24h)
(d) 2018년 8월 27일 09시 850hPa GTS 분석

그림 1-13. 2018년 8월 27일 09시 UM 예상장(8월 26일 06시 생산) 및 실황 비교
(a) 8월 27일 09시 예상 누적강수 분포, (b) 8월 26일 09시~27일 09시 누적 강수분포도
(c) 8월 27일 09시 850hPa 유선장, (d) 8월 27일 09시 850hPa GTS 분석장

그림 1-13의 2018년 8월 27일 사례를 보면 24시간 전 모델이 예상한 집중 호우구역보다 실제로는 더 남쪽에서 강수가 집중되었다는 것을 알 수 있다. 정체전선을 동반한 저기압이 통과하기 전 온난이류에 의해 강수가 내린 것으로, UM은 하층제트가 제주도남쪽해상에 위치할 것으로 모의하였다. 그러나 모델 예상과는 다르게 우리나라 남서쪽에 하층제트가 발달하면서 하층제트의 전면인 충청도에 대류성 강수가 발생하였다. 또한, 하층제트를 따라 많은 수증기가 유입되면서 강수 집중 구역의 강수량도 증가하였다.

이처럼 여름철에는 850hPa 또는 925hPa의 강풍대 위치를 분석하는 것이 중요하다. 상승운동이 일어나는 하층제트 북단의 위치와 하층제트에 동반되어 유입되는 수증기량에 따라 호우구역이 결정되기 때문이다.

한편, 하층제트는 낮보다 야간에 더 강화되는 특성이 있다. 하층제트는 행성 경계층 고도 부근에 위치하기 때문이다. 지면의 일사 가열, 마찰 등의 영향으로 난류가 발생하는 혼합층을 행성 경계층(Planetary Boundary Layer, PBL)이라고 하는데, 내륙으로 유입되는 하층제트를 방해하는 역할을 한다. 지면의 냉각으로 대기가 안정해지는 야간에는 행성 경계층의 고도가 낮아지는데 난류 등 방해 요소가 낮보다 약해지므로 하층제트가 내륙까지 유입되기 쉽다. 하층제트를 동반한 호우 시스템의 영향을 받는 경우 낮보다 야간에 집중호우가 더 잘 발생하는 이유이다.

그러나 수치모델은 하층제트의 일변화를 잘 모의하지 못한다. 그림 1-14의 850hPa 20kts 이상 풍속에 대한 UM의 편차(모델값-실황값)를 보면, 15시를 제외한 일사의 영향을 받지 않는 시간에는 음의 편차가 나타난다. 이는 수치모델이 야간의 하층제트를 약하게 모의할 뿐만 아니라 집중호우에 대한 예측성도 낮다는 것을 의미한다.

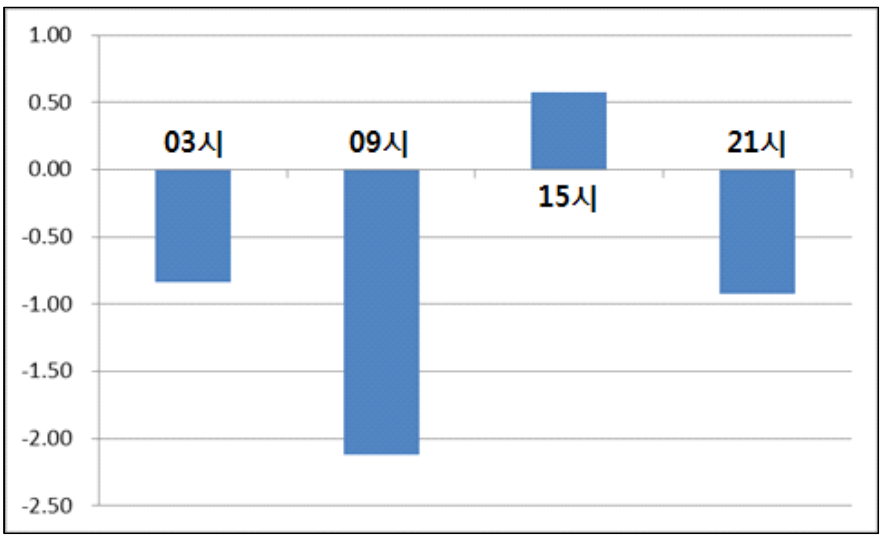


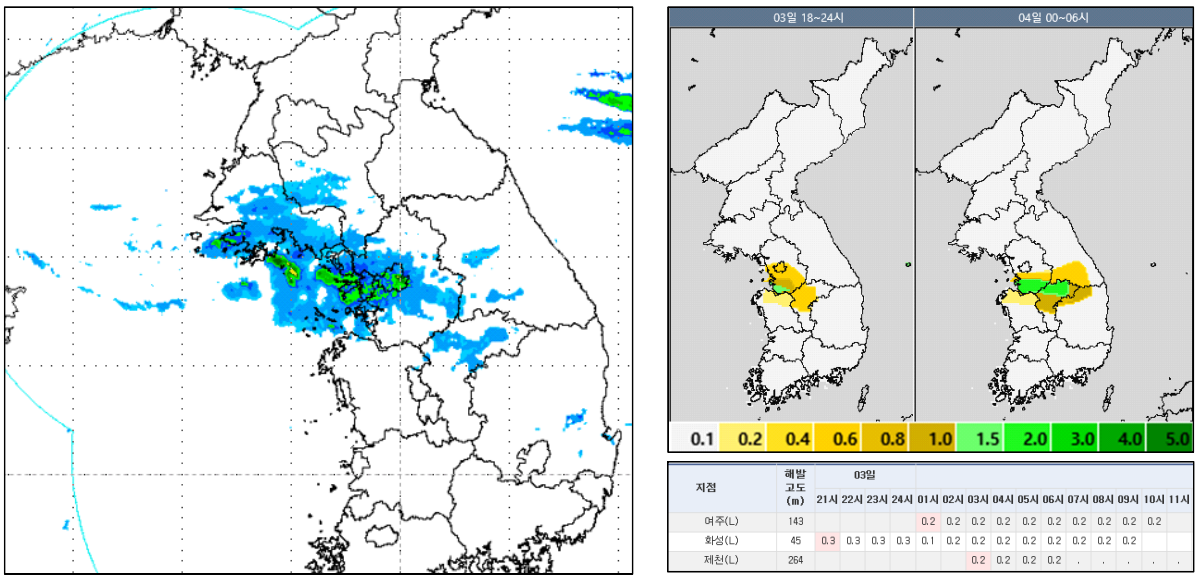
그림 1-14. 2016년~2018년까지 6월~9월 사이 UM의 850hPa 20kts 이상 풍속에 대한 시간대별 편차

그러므로 하층 수증기량과 대류성 강수의 발달 구역을 분석하기 위해 하층 풍속에 대한 모델과 실황의 비교가 중요하다. 특히 집중호우의 빈도가 높은 09시에 모델이 풍속을 과소모의 하는 경향도 크므로 강수량을 산정할 때 집중호우 구역뿐만 아니라 야간의 하층제트 강화 효과에 대해서도 고려해야 할 것이다.

1. 3. 실황분석의 방법과 절차

1. 3. 1. 메커니즘 분석의 중요성

실황을 분석하기 위해서는 다양한 관측 자료와 모델 산출물을 이용한다. 다양한 자료를 실황분석에 이용하는 것은 단순한 현상 파악에서 벗어나 시야를 확장할 필요가 있기 때문이다. 즉, '어떤 기상 현상이 어디에 있다'에 그치지 않고 '왜 생겼는지' 메커니즘을 분석하는 것이 중요하다. 메커니즘 분석은 우리나라에 영향을 줄 시스템에 대해 3차원적인 개념모델을 분석하는 것으로 기상 현상의 원인과 구조를 알고 나면 그 현상을 더욱 발달시키거나 반대로 약하게 만드는 요소가 무엇인지 드러나고 그 요소들의 상태를 파악함으로써 다음을 예측할 수 있게 된다.



지점	해발고도(m)	03일 21시	22시	23시	24시	01시	02시	03시	04시	05시	06시	07시	08시	09시	10시	11시
여주(L)	143					0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
화성(L)	45	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2		
제천(L)	264							0.2	0.2	0.2	0.2	.	.	.	.	.

그림 1-15. 2019년 12월 3일 21시 이후의 예보와 실황.
(좌) 12월 3일 21시 레이더 영상
(우상) 12월 3일 18시부터 4일 6시까지 예상 적설 분포도(12월 3일 17시 발표)
(우하) 12월 3일 21시부터 4일 10시까지 관측한 적설 집계표

그림 1-15 (좌)는 2019년 12월 3일 21시의 레이더 영상이다. 경기만과 수도권에 강수 에코가 있다. 4시간 전인 3일 17시에 경기남부와 충청북부 1~5㎝, 서울, 충북남부, 강원영서남부, 경북북부내륙에 1㎝ 내외의 적설을 예보하였다. 그러나 대부분 지역에서 비나 진눈깨비가 내리면서 적설은 여주와 제천에만 0.2㎝를 기록하였다. 강수 시간과 구역 등은 잘 예측했으나 강수 형태를 놓쳤다. 강수의 메커니즘을 간과했기 때문이다.

2019년 12월 3일 밤~4일 새벽에 있었던 강수는 발해만 기압골 전면에서 난기가 유입되면서 형성된 온난이류 강수대였다. 저기압이 UM이 예상했던 경로(충청남도)보다 북쪽(경기남부)으로 지나갈 것으로 분석하여 수치모델이 모의하지 못한 서울까지 강수를 도입한 것은 좋았으나 그만큼 저기압 전면의 온난역이 북상하므로 하층 기온이 상승한다는 점을 간과하였다(겨울 예보 사례분석 7-2 참고). UM은 저기압의 경로를 실황보다 남쪽으로 예상했기 때문에 저기압의 북쪽에 있어 난기 유입이 제한되는 중부지방에 적설을 과대모의 했다.

위 사례를 통해 기상 현상의 메커니즘 분석이 실황분석에서 아주 중요한 작업이라는 것을 알 수 있다. 시스템을 이끄는 메커니즘을 알면 어떤 요소에 관심을 두고 집중적으로 감시하고 분석해야 하는지 판단할 수 있다.

1. 3. 2. 실황분석에 이용하는 관측 자료

실황분석을 할 때 우리가 주목해야 할 현상의 위치와 시간 규모에 따라 활용할 수 있는 자료는 매번 다르다. 기상 현상이 우리나라에 접근하기 직전이거나 이미 나타난 상태라면 위성, 레이더, GTS 관측 전문 외에도 AWS, 고층관측자료, 연직바람관측자료 등 다양한 관측 자료를 이용하여 현상의 발달 상태와 진행 상황 등을 파악하고 어떤 메커니즘으로 발달한 것인지도 분석할 수 있다.

단기예보(1~2일 후)에 영향을 주는 시스템의 경우에는 위성과 레이더, GTS 관측 전문을 이용하여 현재 시스템이 위치한 지역에서의 발달 상태와 메커니즘을 분석한다. 메커니즘 분석을 통해 시스템을 강하게 또는 약하게 만드는 요소가 무엇인지 알 수 있고, 이것을 이용하여 앞으로의 이동 방향과 발달 경향을 예상할 수 있다. 더불어 우리나라에 영향을 줄 때 어떤 메커니즘에 의해 강수가 만들어지는지(난역에서 내리는 강수인지 또는 한랭전선에서의 강수인지 등), 낙뢰 등 다른 위험 기상 현상도 동반하는지도 분석해야 한다.

그러나 수일 후에 발달하여 우리나라에 접근하는 시스템은 활용할 수 있는 자료가 많지 않다. 아직 시스템이 뚜렷하게 발달하지 않은 상태일뿐더러 이동하면서 변동성도 크기 때문에 위성 영상과 GTS 전문 분석을 통해 전체적인 기압계의 흐름을 파악하고 어떤 요인이 강수 시스템 발달을 뒷받침하는지 예측해야 한다. 이 과정을 통해 지속적으로 감시해야 할 요소가 무엇인지 알 수 있다.

이번 절에서는 실황분석에서 가장 많이 활용하고 반드시 분석해야 하는 관측 자료에 대해 살펴보자.

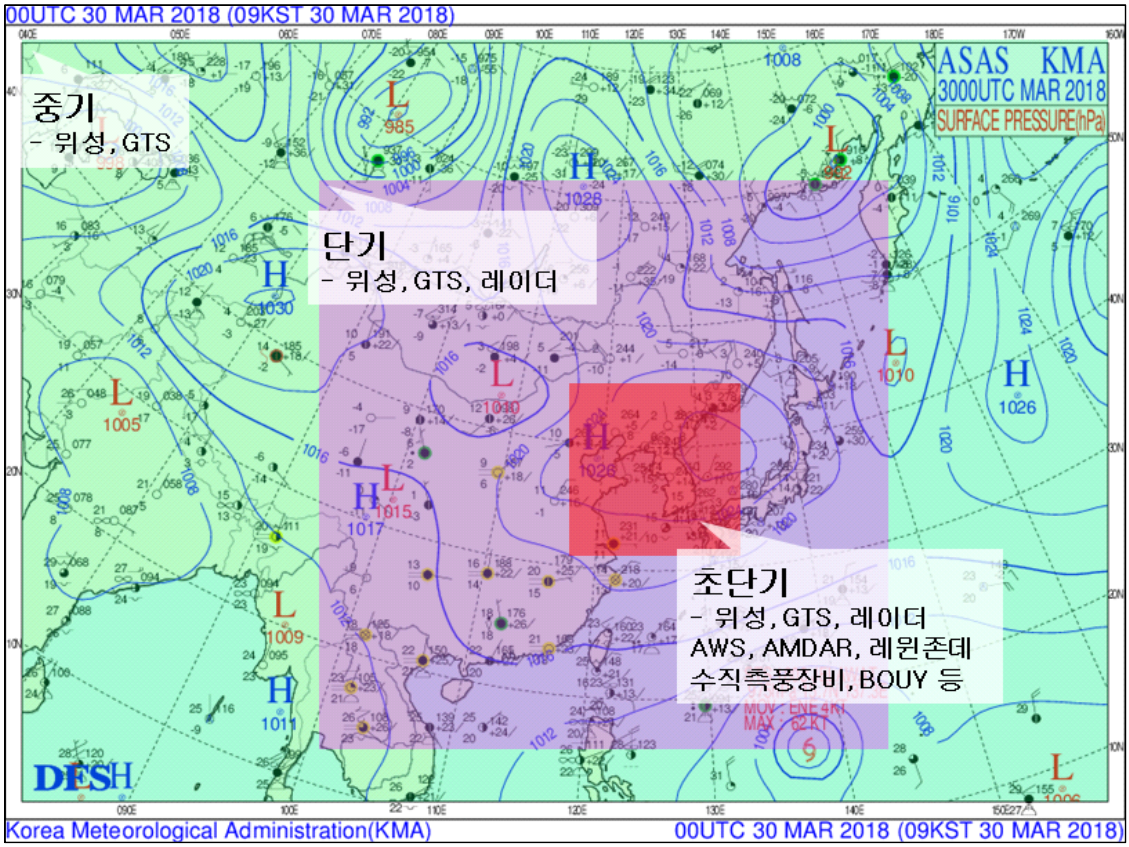


그림 1-16. 시간 및 공간 규모에 따라 실황분석에서 활용할 수 있는 관측 자료

① 위성 영상

수증기, 적외, 합성 영상 등의 위성 자료를 이용해 상층 대기의 흐름과 건조역(암역)의 위치, 우리나라 주변에 분포하고 있는 구름의 종류와 발달 정도를 파악하고, 수치모델이 실황을 잘 반영하고 있는지 비교한다. 특히, 여름철 발달하는 대류운은 시간에 따른 변화가 크므로 위성 영상을 통한 구름의 실황 감시가 중요하다.

위성영상을 이용한 실황분석에는 ㉠ 우리나라 주변의 구름대 파악 ㉡ 구름의 종류, 운저고도, 이동 방향과 속도, 지향류 분석 ㉢ 구름 발달 메커니즘 분석을 포함해야 한다.

위성 영상에 나타나는 구름과 건조역은 3차원 구조로 해석해야 한다. 이를 종합해 구름의 발달, 약화, 이동 등 앞으로 진행될 상황을 예측할 수 있다.

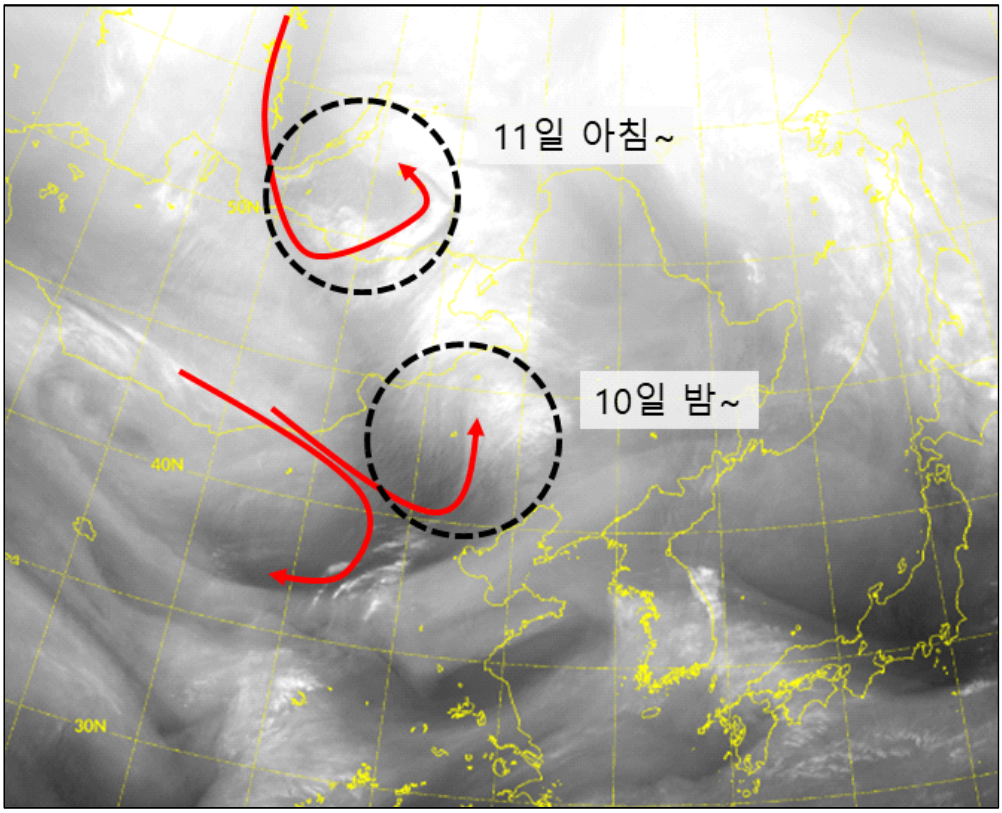


그림 1-17. 2019년 12월 10일 09시 수증기 위성 영상. 검은색 점선은 각각 10일 밤과 11일 아침에 우리나라에 영향을 주는 건조역(빨간색 화살표: 기류의 흐름)

그림 1-17은 2019년 12월 10일 09시의 수증기 위성 영상이다. 12시간 후인 10일 밤에 영향을 주는 건조역이 발해만 북서쪽에 있다. 이 건조역 전면에서 하층 기압골이 형성될 것이다. 이에 따라 발해만 기압골 전면의 온난이류에 의한 강수를 서울과 경기북부에 예보하였다. 12시간 전 모델 예상보다 기압골이 깊어지는 경향이었다. 그렇다면 기압골이 발달하는 것으로 보고 강수 예보를 확대해야 할까?

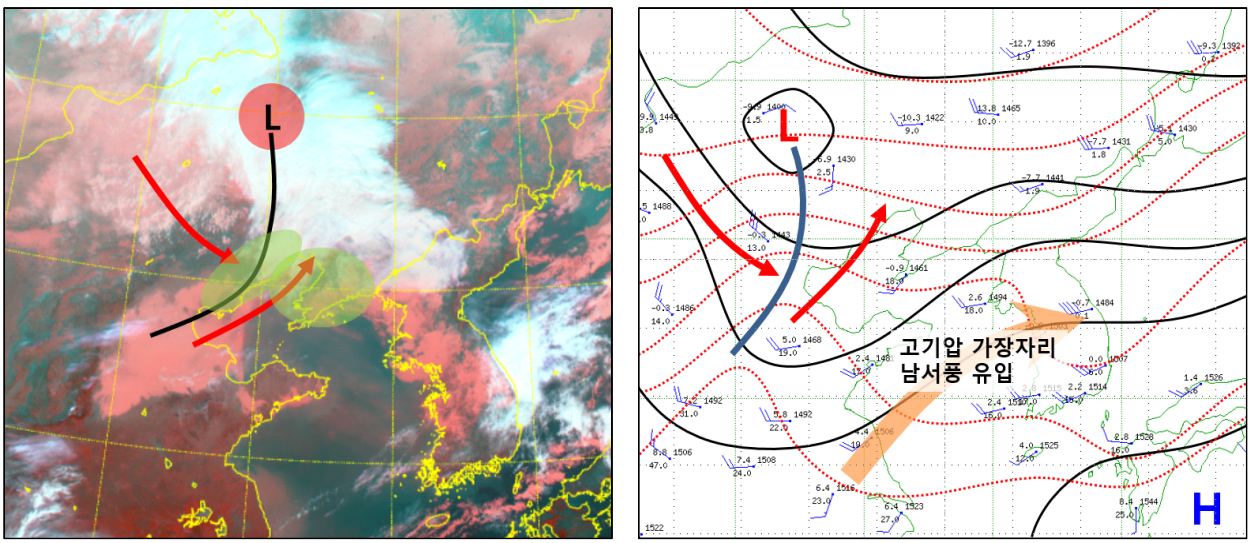


그림 1-18. (좌) 2019년 12월 10일 12시 합성 영상과 (우) 09시 850hPa GTS 분석장

그림 1-18의 합성 위성영상을 보면, 상층에는 기압골이 있으나 하층에는 12시에도 아직 기압골 전면의 온난이류 영역에서 구름대가 발달하지 않았다. 또 제주도 남쪽 해상에 있는 고기압 가장자리를 따라 남서풍이 지속적으로 불면서 기온이 상승하여 cold pool이 쌓일 수 없는 상태였다. 따라서 기압골이 접근하더라도 온도경도가 약해 온난이류 강수가 발달하기는 어렵다. 이 사례는 상층 기압골이 통과하지만, 하층이 안정하므로 상층의 파동이 하층까지 전달되지 않았다.

강수에 불리한 또 다른 요인은 발해만 북서쪽으로 남하하는 건조역의 흐름이 두 갈래로 나누어져 있다는 것이다. 다시 그림 1-17로 가서 빨간색 화살표로 표시된 기류의 흐름을 보자. 하층 기압골 발달을 유도하는 건조역과 분류된 흐름이 있다. 발해만 북서쪽의 건조역이 전시간보다 깊어지긴 했지만 더 이상 강화하기 힘든 구조였다.

이렇듯 우리가 위성영상을 해석할 때 평면적으로 구름의 이동 방향, 속도, 건조역의 이동 등만 추적해서는 안 된다. 상층의 움직임이 하층과 연결되는지 3차원적인 해석을 하는 것이 중요하다.

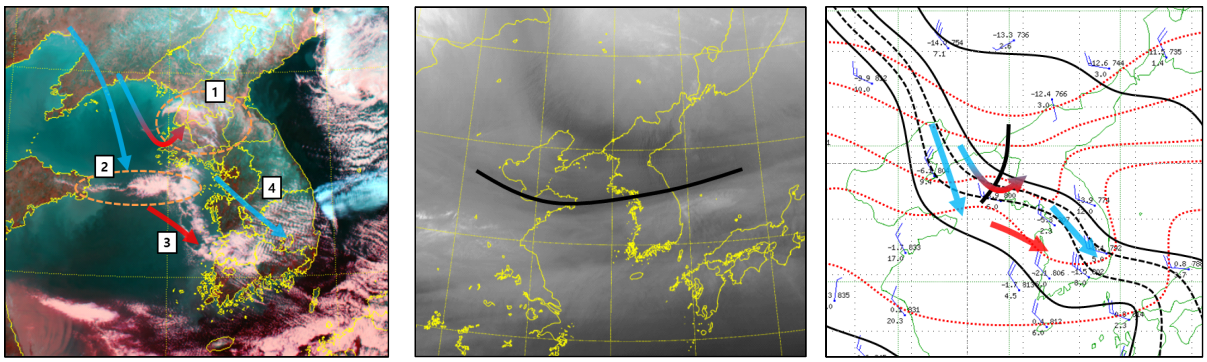


그림 1-19. (좌) 2020년 1월 20일 12시 합성 영상, (중) 12시 수증기 영상, (우) 09시 925hPa GTS 분석장

그림 1-19 (좌)는 2020년 1월 20일 12시에 관측된 우리나라 주변의 천리안 합성 영상이다. 우리나라에 각각 다른 모양의 하층운이 분포하고 있다. 구름의 발달 메커니즘을 찾으려면 합성 영상만 봐서는 알기 힘들다. 그러므로 위성영상을 분석하는 작업이지만 다른 관측 자료도 함께 활용해야 한다. 여기서도 구름 발생 원인을 파악하기 위해 수증기 영상과 925hPa의 GTS 전문 분석장을 살펴보았다.

황해도에 있는 1번 구름은 하층 기압골에 의한 구름이다. 925hPa GTS 전문 분석장(그림 1-19 (우))에서 다롄(북북서풍)과 백령도(서북서풍)의 풍향을 보면 서한만에 기압골이 있다는 것을 알 수 있다. 이 기압골의 전면에서 형성된 구름이 황해도로 북동진한 것이다. 한편, 그림 1-19의 수증기 영상에서 산둥반도부터 경기북부에 이르는 건조역을 찾을 수 있는데 이것은 상층의 한기가 침강하고 있음을 알려준다. 상층의 한기가 남하하는 전면에 해당하는 지점에서 한랭이류에 의한 구름이 형성(2번 구름)되어 있다. 즉, 상층 건조역에서 기인한 하층 기압골에서 발달한 구름대가 분리되어 일부는 지상 저기압과 함께 황해도로 이동하고(1번), 나머지는 한기이류를 따라 서해상으로 남하(2번)하고 있다.

서해중부해상에 형성되어 있는 3번 구름은 온난이류에 의한 것이다. 925hPa 일기도를 보면 서해상에는 온도능, 내륙에는 온도골이 있다. 서해안에 북서풍이 불고 있지만 기온선을 보면 온난이류의 흐름이 있는 것을 알 수 있다. 한편, 창원과 포항의 전문을 보면 925hPa에서 북서풍이 25kts 이상으로 강하게 불고 있다. 따라서 4번 구름은 강한 북서풍을 타고 한기가 내려오면서 발달한 적운형 구름이다.

이와 같이 구름 발생 메커니즘을 각각 분석해야 하는 이유는 어떤 구름이 강수를 유발하는 구조이고, 어디에 집중해야 하는지 알 수 있기 때문이다.

② 레이더 영상

레이더 영상을 통해 우리나라 주변의 강수대 분포와 움직임을 파악할 수 있다. 수치모델 예상장이 실황의 강수 분포를 잘 반영하고 있는지 비교한다.

레이더 영상을 이용한 실황분석에는 ㉠ 우리나라 주변의 강수대 파악 ㉡ 강수대의 연직 분포 고도, 강수 강도, 이동 방향과 속도, 지향류 분석 ㉢ 강수 발달 메커니즘 분석을 포함해야 한다.

위성 분석과 마찬가지로 강수의 발달 메커니즘을 분석하는 것이 가장 중요하다. 메커니즘 분석을 통해 강수대에 영향을 주는 주요 요소를 파악하여 현재의 강수대가 추후 강해질 것인지 또는 약해질 것인지, 어느 고도의 흐름을 따라 이동하는지 예상할 수 있다. 메커니즘 분석을 위해서는 레이더 영상뿐만 아니라 다양한 관측 자료와 분석일기도 등을 활용한다.

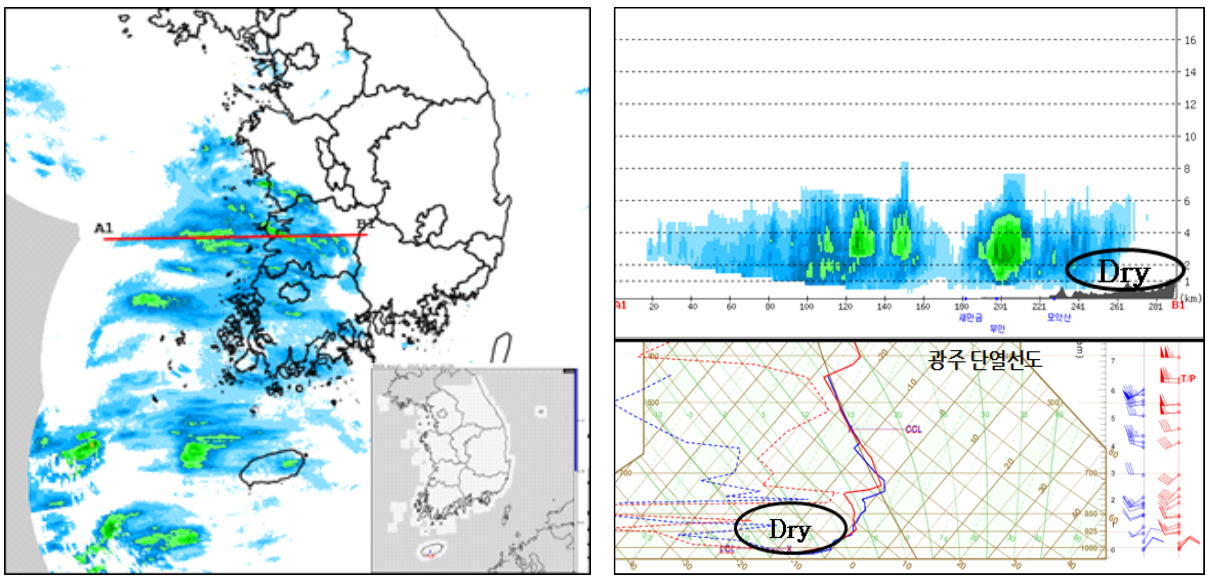


그림 1-20. (좌) 2019년 1월 4일 12시 레이더 합성 영상과 AWS 강우감지 분포도,
(우상) A1에서 B1까지의 12시 레이더 연직 단면, (우하) 09시 광주 단열선도

그림 1-20은 2019년 1월 4일 상해 부근에 저기압이 발달했을 때의 레이더 영상이다. 상해 부근에 있는 저기압의 온난역에서 발달한 강수대가 남서풍을 따라 전라도까지 유입되었으나 AWS에는 강우감지가 되지 않았다. 레이더 연직 단면과 광주의 단열선도를 보면 하층에 건조역이 있는 것을 알 수 있는데, 이를 통해 저기압에 동반된 중층운이 먼저 유입된 것임을 알 수 있다. 따라서 강수 현상이 나타나고 있지 않지만 850hPa 이하 층에 습윤역이 유입되면 강수가 시작할 것으로 예상할 수 있다.

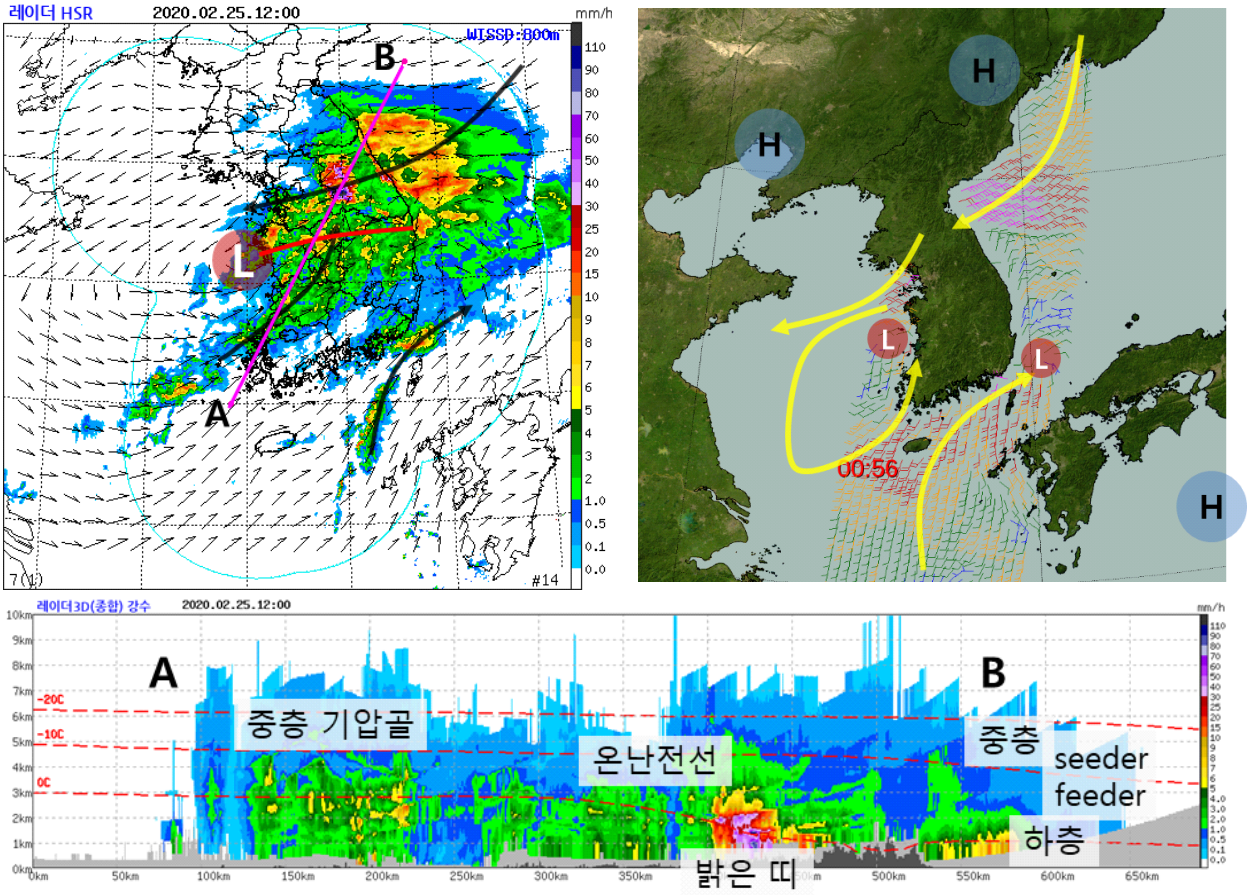


그림 1-21. (좌상) 2020년 2월 25일 12시 레이더 영상, (우상) 2월 25일 09시 ASCAT 해상풍 자료
(하) A-B 사이의 레이더 연직 단면

레이더 영상의 연직단면은 메커니즘을 분석하는 데 유용하다. 또한, WISSDOM 바람장을 중첩하여 강수대 주변의 기류 흐름을 파악할 수도 있다.

그림 1-21은 2020년 2월 25일 12시의 레이더 영상이다. 서해중부해상의 저기압에 동반된 강수대가 우리나라 전역에 영향을 주고 있다. 강원영서에는 시간당 30㎜ 이상의 강한 강수대도 발달하여 있다.

먼저 레이더 영상에 고도 800m(925hPa에 해당하는 고도)의 WISSDOM 바람 자료를 중첩하였다. 서울.경기도와 강원도에는 온난전선의 북쪽에서 저기압 중심으로 들어가는

동풍이 불고 있다. 이 기류는 북쪽 고기압에서부터 동해상으로 유입되는 동풍도 더해져 있다. 충청도를 비롯한 남부지방에는 저기압 전면에서 남서풍이 유입되고 있다. 한편, 대한해협으로는 북태평양 고기압 가장자리에서 남서풍이 유입되면서 또 다른 강수대를 형성하고 있다. 위성의 해상풍 관측 자료에서도 이와 같은 기류의 흐름을 파악할 수 있다.

다음으로 동해북부해상에서부터 전남서해상까지 연직단면을 잘라보자. 강수의 메커니즘을 뚜렷하게 구분할 수 있다. 충청이남까지는 남서풍이 불고 있지만, 충청도와 남부지방의 강수 메커니즘은 엄연히 다르다. 남부지방에 비를 내리고 있는 강수대는 연직단면에서 3㎞ 부근(약 700hPa 고도)에 주강수대가 분포한 것으로 보아 중층 기압골에 의해 형성된 강수이다. 한편, 충청도의 강수는 지상에서부터 발달한 것으로 온난전선의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 강원영서에 있는 시간당 30㎜ 이상의 강한 강수대는 연직단면을 보면 기온 0℃ 부근에 강한 강수대가 있는 것으로 보아 밝은 띠 영역이다. 동풍이 유입되고 있는 강원동해안은 중층과 하층에 각각 강수 중심이 분리된 것으로 보아 seeder-feeder에 의해 강수대가 발달하고 있다.

이렇듯 메커니즘과 강수 집중구역, 강수대 이동과 발달 경향 등을 분석하기 위해서는 레이더 영상을 다각도로 분석해야 한다.

③ GTS 전문 분석

GTS 관측 전문을 이용하여 동아시아 또는 한반도 주변 영역의 바람장, 온도장, 고도장, 습윤역의 분포, 이슬점 온도 분포 등을 분석할 수 있다. 단기예보 기간에 우리나라에 영향을 주는 강수대가 중국에 있을 때는 중국의 강수량, 강수 분포 등도 파악할 수 있다. 일기도를 분석할 때에는 GTS 관측 전문을 직접 묘화하거나 선진예보시스템의 통합기상분석 또는 실황기반 통합기상분석을 이용한다.

앞서 위성 영상과 레이더 영상을 분석할 때 메커니즘 파악을 위하여 GTS 분석장을 함께 이용하였다. GTS 전문을 분석하는 것은 수치모델 예상장보다 세밀하게 분석할 수 있어 시스템의 발달 메커니즘을 파악하는데 용이하다. 관심 있는 시스템이 위치한 지역이나 시스템의 발달과 약화에 영향을 주는 요소가 위치한 곳을 중심으로 분석할 수 있기 때문이다.

GTS 전문을 이용한 실황분석은 ㉠ 12시간 강수량 자료로 강수량과 강수 구역 확인 ㉡ 전일 21시와 당일 09시 관측 전문을 이용한 일기도 분석 ㉢ 일기도를 통해 기압계와 기상현상 발달 메커니즘 분석 ㉣ 수치모델 예상장과 비교를 포함해야 한다.

GTS 관측 자료로 분석한 일기도를 수치모델 예상장과 비교하여 모델이 실황을 잘 반영하고 있는지 분석할 수 있는데, 수치모델 예상장과 비교할 때에는 강수 구역뿐만 아니라 기압골의 위치와 기압골이 동반하고 있는 습윤역, 강풍대, 온도골과 온도능의 분포, 고·저기압의 위치와 강도 등을 비교한 뒤 그 차이를 예보에 반영한다.

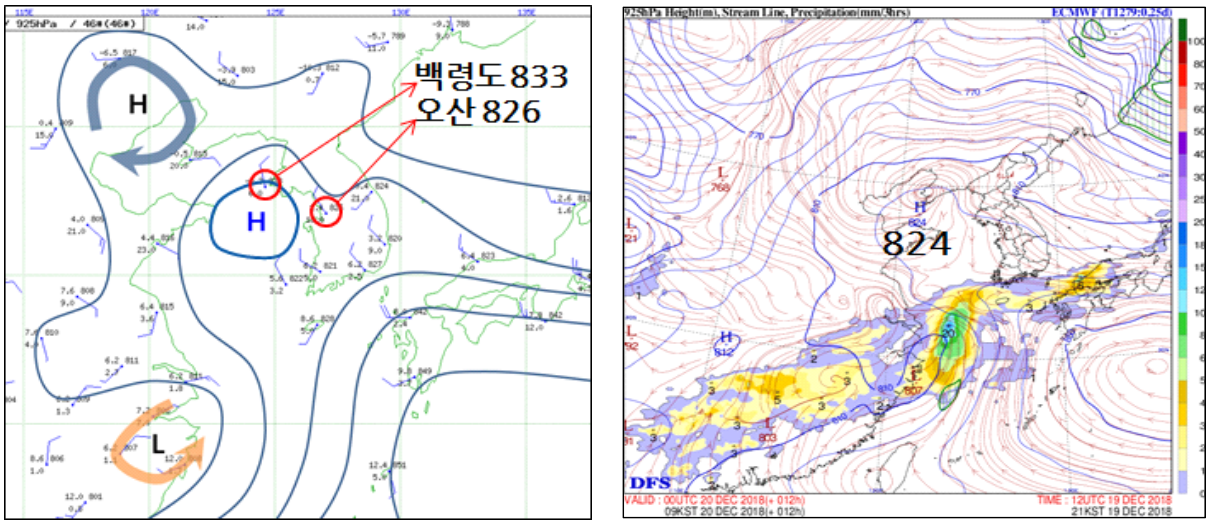


그림 1-22. (좌) 2018년 12월 20일 09시 925hPa GTS 분석 일기도(백령도: 833gpm, 오산: 826gpm)
(우) 2018년 12월 20일 09시 ECMWF 925hPa 예상장(12월 19일 21시 생산, 고기압 중심: 824gpm)

그림 1-22는 상해 부근 저기압에 동반된 강수대가 북상하여 남해안에 영향을 줄 것인지 예상하기 위해 925hPa의 GTS 전문을 이용하여 분석한 것이다. 수치모델의 925hPa 예상장과 달리 우리나라 북서쪽에 있는 고기압은 발해만 북서쪽과 서해상으로 분리되어 있고 특히, 서해상 고기압의 중심은 모델보다 남동쪽에 있다. 또한, 백령도와 오산의 지위고도(gpm) 관측값과 수치모델의 고기압 중심 지위고도 예상값을 비교해 보면 고기압의 세력도 수치모델 예상보다 강하다는 것을 알 수 있다. 따라서 고기압의 중심도 예상보다 남쪽에 있고 세력도 강하므로 남쪽 강수대의 북상을 저지할 수 있다. 남해안까지 비가 내릴 것으로 모의하는 수치모델과 달리 강수대는 서해상 고기압으로 인해 북상하지 못할 것이다.

④ 모델예측성능 진단

선진예보시스템의 예.특보 가이던스에서 제공하는 자료로 기온, 이슬점 온도, 풍속, 습도, 지위고도 등에서 대해 수치모델(UM, ECMWF, KIM)과 실황의 편차를 정량적으로 보여준다.

수치모델을 기준으로 실황과의 편차를 계산하기 때문에 양의 편차(빨간색)는 실황 관측값이 수치모델 예상값 보다 작다는 것이고(모델 과대모의), 음의 편차(파란색)는 관측값이 수치모델 예상값 보다 크다는 것(모델 과소모의)을 의미한다.

모델예측성능 진단을 통한 수치모델과 실황의 비교는 메커니즘 분석이 반드시 선행되어야 한다. 기온과 풍속의 단순한 차이를 비교하는 것이 아니라 유의미한 지역에서의 유의미한 편차를 찾아야하기 때문이다. 메커니즘 분석을 통해 알아낸 주요 요소, 즉 시스템을 강하게 또는 약하게 만드는 요소들을 비교하여 그 의미를 해석해야 한다. 실황뿐만 아니라

수치모델의 결과물을 해석할 때에도 개념모델을 이용한 입체적인 분석을 해야 유의미한 편차를 찾을 수 있다.

만약 수치모델이 남쪽 저기압 전면에 있는 하층(주로 850hPa) 남서류의 풍속을 과대모의한다고 하자. 단순히 남서류의 풍속이 실황에서 약하다는 것을 밝혀내는 일은 평면적인 해석이다. 이 남서류는 남쪽 저기압의 발달 메커니즘과 관련이 있기 때문이다. 수치모델이 저기압 전면의 남서풍을 강하게 모의하는 것은 저기압을 실황보다 더 발달시키고 북상시킨다는 의미이다. 그러나 실황에서는 남서풍이 예상보다 약하게 불기 때문에 수치모델이 모의하는 것보다 저기압 강도는 약할 수 있고 저기압의 이동 경로도 예상보다 남쪽으로 쳐질 수 있다. 따라서 강수량은 더 적고 강수대 북단의 경계도 더 남쪽에 있을 것이다.

위 예시처럼 하나의 요소에서 발생한 차이가 결국 결과에 영향을 준다. 우리가 수치모델 자료를 대할 때 있는 그대로 받아들이는 것이 아니라 비판적인 시각으로 실황과 비교해야 하는 이유이다.

저기압 전면 남서풍의 강도 외에도 기압골을 발달시키는 골 후면 북서풍의 강도와 온도골, 온난이류 강수와 관련된 cold pool의 강도, 하층 수증기량을 나타내는 이슬점 온도 등을 비교할 수 있다.

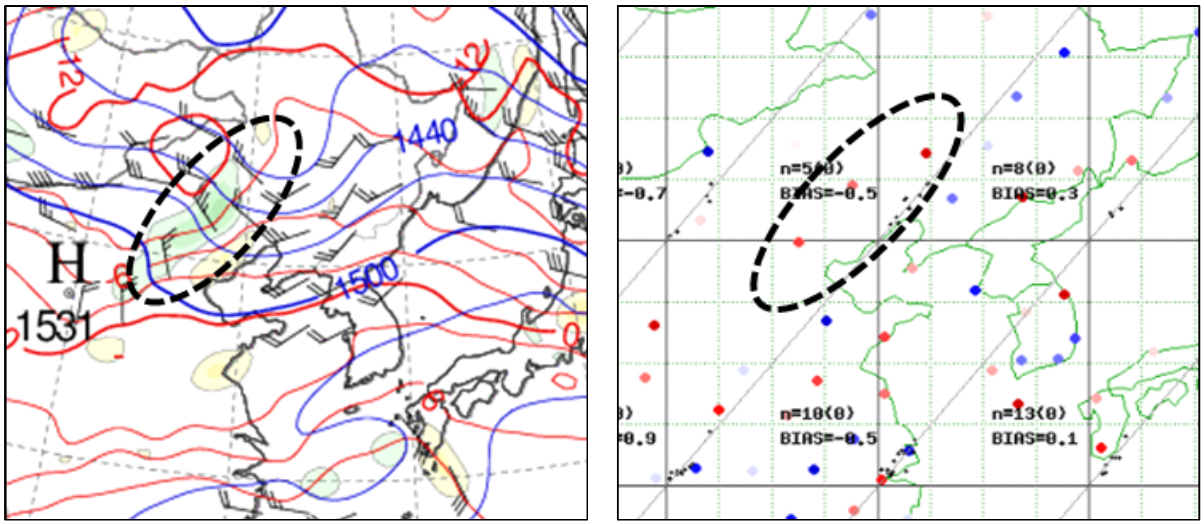


그림 1-23. (좌) 2018년 12월 21일 09시 UM 850hPa 기온, 고도 예상장(12월 20일 21시 생산), (우) 850hPa 풍속에 대한 UM 편차(점선: 기압골 후면 한기이류 영역)

그림 1-23 (좌)의 850hPa 예상장을 보면 발해만 북서쪽에 기압골이 있다. 기압골 전면에는 남서풍이 불면서 난기이류가 있고, 기압골 후면에는 북서풍이 불면서 온도골을 동반한다. UM의 편차도(그림 1-23 (우))를 보면 북서풍이 나타나는 세 지점에서 풍속 편차가 양의 값을 보인다. 이것은 모델이 예상하는 것보다 실제 풍속이 약하다는 것(모델 과대모의)을 의미하며 그 차이는 3~6kts 정도이다. 기압골 후면의 북서풍은 기압골의 발달과 관련이 있다.

북서풍은 기압골 후면에서 한기이류를 이끌어 기압골을 발달시키기 때문이다. 여기에서는 북서풍이 수치모델 예상보다 약하게 불고 있으므로 실제 기압골은 예상만큼 발달하지 않은 것이다. 따라서 기압골이 동반하고 있는 강수대도 수치모델이 모의하는 것보다 약하고 강수 구역도 남쪽으로 남하하지 못할 것이다.

⑤ UM/ECMWF/KIM 모델 비교

UM과 ECMWF, KIM이 모의하는 결과물이 다른 경우가 많다. 특히 상층 기압골의 위치와 강도 그에 따른 지상 예상장의 강수 영역, 강수량, 저기압의 이동 경로와 속도 등이 다를 때에는 어떤 모델을 기준으로 예보를 해야 할지 고민이 될 수밖에 없다. 그러므로 UM, ECMWF, KIM 중 어떤 모델이 실황과 더 유사한지, 강수 메커니즘을 개념모델에 맞게 합리적으로 모의하고 있는지 분석해야 한다. 이를 통해 신뢰성이 높은 모델을 선정하여 예보에 활용한다.

이 과정을 수행하기 위해서는 먼저 각각의 수치모델이 기상 현상을 어떻게 모의하고 있는지, 시스템이 어떻게 진행하는지 분석해야 한다. 그뿐만 아니라 수치모델에서 모의하는 구름과 강수의 역학적인 해석도 반드시 해야 한다. 이러한 과정을 먼저 거친 다음 실황과 비교하는 단계로 넘어간다.

⑥ 그 외 다양한 관측 자료 이용

앞서 설명한 자료 외에도 연직바람관측장비(윈드 프로파일러), 고층관측자료(레윈존데), 자동기상관측자료(AWS), 낙뢰관측자료 등 COMIS와 선진예보시스템에서 제공하는 다양한 산출물을 이용하여 실황분석을 할 수 있다. 통합기상분석시스템에서 관측 자료와 수치모델 자료를 중첩하여 고도장을 직접 비교해 볼 수 있고 중국 관측지점의 예상 단열선도도 표출하여 분석할 수 있다. 상황에 따라 효율적으로 자료를 취사선택하여 실황분석에 활용해야 한다.

1. 4. 실황분석에 기반한 예보

수치모델이 발달하면서 방대한 일기도들이 쉴 새 없이 쏟아지고 있다. 예보관은 한정된 시간 안에 많은 자료를 똑같이 다룰 수 없으므로 자료를 어떻게 효율적으로 이용하느냐가 예보기술에 중요한 축이 되었다. 그러나 수치모델에만 의존해서는 안 된다. 자칫하면 균형을 잃고 예보관의 의견과 일치하는 모델 자료만 선택하여 편향된 시각을 가질 수 있기 때문이다. 또한, 수치모델이 예측하지 못하는 현상이 발생하면 현상에 대한 메커니즘을 이해하기 어려울 뿐만 아니라 적절하게 대응하기 힘들어진다. 이것이 실황분석을 중심으로 한 현상의 이해가 예보의 바탕이 되어야 하는 이유이자 더 나아가 예보 업무의 절차로 활용해야 하는 이유이다.

1. 4. 1. 실황분석을 이용한 초단기/단기 예보

실황분석을 이용한 초단기와 단기 예보 업무 절차의 기본은 다음과 같다.

그림 1-24. 실황분석에 기반한 예보 업무 절차

단계 1. 실황 파악 및 메커니즘 분석

실황분석에서 가장 먼저 해야 할 일은 위성 영상, 레이더 영상을 이용하여 우리나라와 주변의 기상 현상을 파악하는 것이다. 상승 운동이 어디에서 나타나고 있는지 확인하고 강수가 있다면 강수대의 위치와 강도를 파악한다.

여름철 깊은 대류에 의해 발달하는 구름은 위성 영상에서 뚜렷하게 나타난다. 수증기 영상에서 암역으로 표현되는 건조역을 3차원 구조로 해석하여 기압골과 대류성 강수의 발달 가능성을 파악한다.

가장 중요한 것은 우리나라에 영향을 주는 상승 운동에 대하여 위성과 레이더 자료뿐만 아니라 다양한 관측 자료를 바탕으로 메커니즘을 분석하는 일이다. 각 개념모델의 특징으로부터 시스템의 발달과 약화에 영향을 주는 기상 요소가 무엇인지 파악하고 이를 실황에서 찾는다.

특히 전일 21시와 당일 09시의 GTS 전문을 이용하여 일기도를 그리는 것은 기압계의 이동과 기상 현상의 원인을 분석하는 데에 많은 도움이 된다. 여름철은 작은 변화만으로도 강한 강수를 일으킬 수 있으므로 전 시간과 비교하여 무엇이 달라졌는지 파악하는 것이 중요하다.

또한, 상승 운동의 시간적, 공간적인 변화와 추이(발달 시기, 속도, 이동 방향 등)도 분석하고 주변의 기압계 분포와 고/저기압의 강도, 이동 등 변화 경향도 파악한다.

강수의 구조를 파악하기 위해 단열선도의 해석도 필요하다. 강수의 연직 구조, 불안정도, 하층 수증기량 등을 분석할 수 있다.

주의해야 할 점은 현재 상황만 파악하는 것이 아니라 수증기 영상 등을 통해 수일 전부터 현재까지 나타나는 기류의 흐름과 순환을 파악해야 한다는 것이다. 상층 흐름을 파악하는 것은 초단기와 단기 예보뿐만 아니라 폭염 전망과 같은 중기예보를 하는 데에도 중요하다.

단계 2. 실황 기반 시나리오 작성

단계 1에서 파악한 메커니즘을 바탕으로 기상 현상이 추후 더욱 강해질 것인지, 약해질 것인지, 어떤 층의 기류를 따라 어디로 이동할 것인지 예측한다. 메커니즘을 이루는 주요 인자들을 알면 우리나라 주변에 시스템 발달을 도와주거나 방해하는 요소를 찾아 방향성을 예측할 수 있다.

초단기 예보는 9시간 내(상황이 이어지는 경우 최장 12시간 이내)의 변화에 대해 예측한다.

단계 1에서 2까지 이르는 동안 수치모델 예측 자료를 배제하고 실황 자료를 기반으로 1차 예보 시나리오를 작성한다.

단계 3. 실황과 모델 간 차이 인식

수치모델이 모의하는 구름이나 강수의 메커니즘을 분석하고 모델이 모의하는 강수의 시나리오를 시간적, 공간적, 양적으로 검토한다.

단계 2에서 예상한 시나리오를 수치모델을 통해 확인한다. 강수 영역 및 강수 강도, 저기압의 이동 경로 등에 대해 실황과 수치모델을 비교하여 차이점을 분석한다. 수증기 영상 비교를 통한 기단의 위치, 건조역의 위치와 강수의 발달 정도 등도 비교한다.

메커니즘을 바탕으로 시스템의 발달과 약화에 영향을 주는 요소에 대해 GTS 전문, 각종 관측 자료, 수치모델 편차 등을 이용하여 정량적인 차이를 파악한다. 이를 통해 모델이 실황의 어떤 요소를 반영하지 못하고 있는지, 모델 자료를 해석할 때 어떤 점을 고려해야 하는지 알 수 있다.

특히 여름철에는 200hPa과 500hPa의 지위고도, 850hPa 강풍대의 위치와 풍속도 비교해야 한다는 것을 잊지 말아야 한다.

실황과 수치모델을 비교하기 위해서는 수치모델이 예측하는 구름과 강수의 역학적 해석이 반드시 선행되어야 한다.

단계 4. 실황분석을 적용한 최종 예보 시나리오 생산

(1) 실황분석을 기반으로 수치모델과 통합한 최종 예보 시나리오를 작성한다.
(2) 변동 가능성을 대비하기 위해 지속적으로 감시하고 분석해야 할 요소를 점검한다.
(3) 시스템의 특징에 기반한 역학적 기상 요소를 중심으로 유사사례를 찾아 제2, 제3의 시나리오를 준비한다.

모든 예보 업무가 위 절차에 꼭 맞아 떨어지는 것은 아닐 것이다. 그럼에도 불구하고 실황분석은 항상 수행되어야 하며, 각 시스템의 특징을 참고하여 시스템이 어떻게 진행되고 있는지 파악하기 위해 수시로 점검해야 한다.

1. 4. 2. 실황분석을 기반으로 한 예보 생산 제언

실황분석을 수행할 때 반드시 포함해야 할 사항은 다음과 같다.

- 위성, 레이더 등 가용 가능한 관측 자료를 활용하여 예보 및 특보 현상에 대한 상황 분석이 수행되었는지 점검해야 한다.
- 관측 자료를 근간으로 기상 현상의 발생 메커니즘 분석이 과학적 개념모델과 합당한지, 수반되는 기상 현상의 발달과 약화 요소가 분석되었는지 점검해야 한다.
- 기상 현상의 중요 발생 메커니즘에 대한 수치모델의 예측 결과와 실황과의 차이를 정량적으로 비교하여 예보 및 특보에 적용했는지 점검해야 한다.
- 날씨 현상의 변동 가능성을 고려한 복수의 예측 시나리오가 분석 결과와 합당한지 점검해야 한다.
- 향후 진행될 기상 현상에 영향을 줄 기상 요소에 대한 감시 목록이 명료하게 제시되었는지 점검해야 한다.

실황분석을 할 때는 분석해야 할 대상과 시간에 따라 분석 요소, 관측 자료, 수치모델 자료를 유연하게 선택해야 한다. 이러한 작업은 메커니즘 분석이 철저히 이루어지지 않으면 진행이 어렵다. 시스템의 메커니즘을 알아야 어느 시점에, 어떤 자료를 보고, 무엇을 분석할지 비로소 그림이 그려질 것이다.

1. 4. 3. 지역 예보관의 역할

실황분석은 예보를 위해 선행해야 하는 필수 과정이다. 특히, 단기 예보에서의 실황분석은 종관 규모 시스템을 이해하는 작업이다. 현재 나타나고 있는 기상 현상, 우리나라에 영향을 줄 것으로 보이는 시스템의 구조와 특징을 파악하고 흐름을 이해해야 한다.

그러나 지역의 예보관은 종관 규모의 시스템이 각 지역에는 어떤 영향을 줄 것인지에 대한 시나리오를 만들어야 한다. 여름철 집중호우를 일으키는 것은 주로 중규모 현상이기 때문이다. 종관 규모 시스템에 대한 분석과 이해를 바탕으로 지역적으로 나타나는 중규모 또는 국지 현상에 대한 감시와 분석을 이어나가야 한다.

종관 규모의 시스템이 지역을 통과하는 시간, 시스템의 변화 경향 등을 고려하면서 지형과 국지풍의 영향 등 기상 현상을 국지적으로 강하게 하거나 약하게 만드는 요소들을 찾고 각 지역별 연구 결과도 활용하여 예상 시나리오를 작성한다.

실황분석

2. 사례 분석

2. 사례분석

2. 1. 겨울철 실황분석 사례

2. 1. 1. 발해만 기압골에 의한 강수 사례(2019년 12월 19일 사례)

2019년 12월 19일 12시 경 발해만에 구름대가 형성되어 있다. 6시간 후 중부지방으로 유입되어 강수를 내릴 것인지 2019년 12월 19일 14시 시점으로 실황분석을 이용한 초단기 예보를 해보자. 수치모델은 2019년 12월 18일 21시 생산 자료를 이용하였다.

(단계 1. 실황 파악 및 메커니즘 분석) 위성과 레이더 영상의 구름과 강수 메커니즘 분석

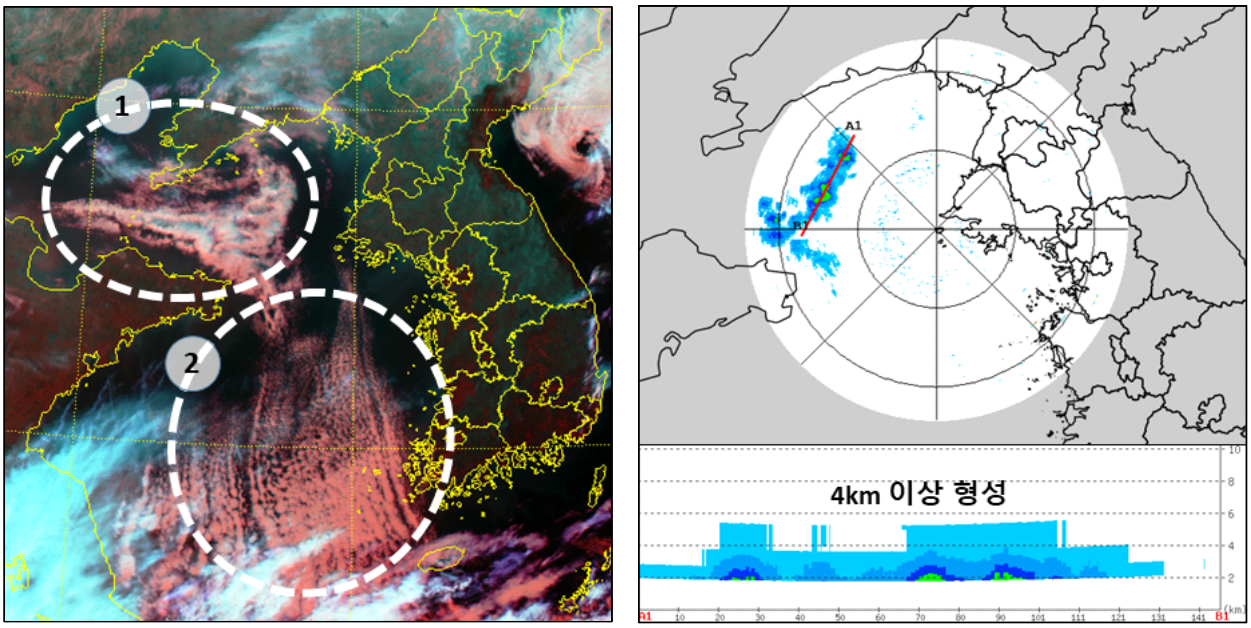
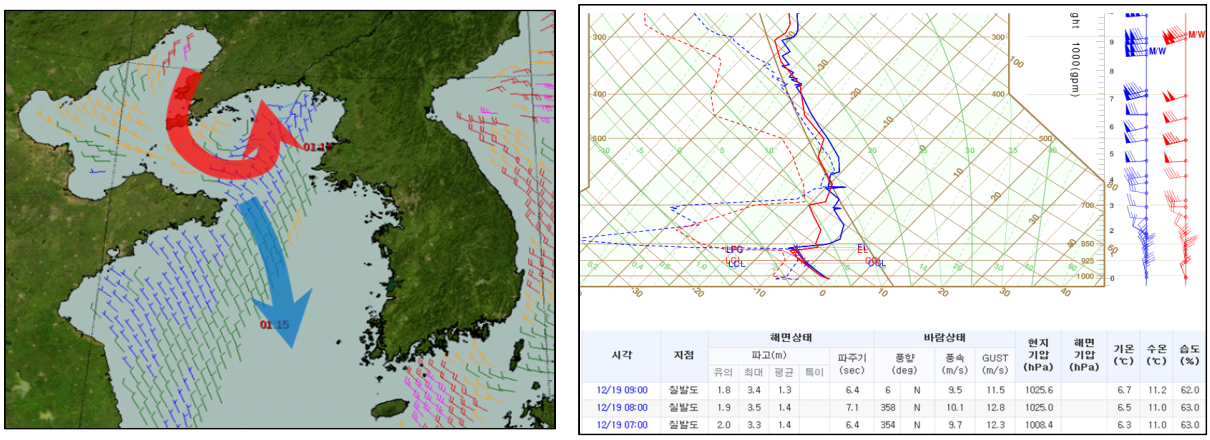


그림 2-1. 2019년 12월 19일 12시 자료
(좌) 한반도 주변 위성 합성 영상, (우) 레이더 영상과 A1~B1의 연직단면

실황분석에서 가장 먼저 해야 할 일은 위성 영상과 레이더 영상에 나타난 구름과 강수 에코를 파악하고 메커니즘을 찾는 것이다. 2019년 12월 19일 12시 합성영상을 보면 발해만과 산둥반도 이남 서해상에 각각 다른 모양의 구름대가 있는데 이 구름대의 형성 메커니즘을 밝혀야 한다.

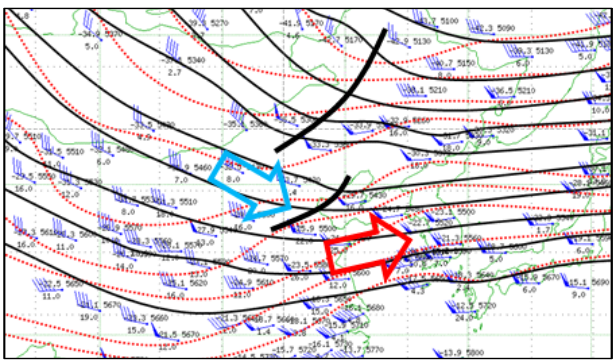


시각	지점	해면상태					바람상태				현지기압 (hPa)	해면기압 (hPa)	기온 (℃)	수온 (℃)	습도 (%)
		파고(m)				파주기 (sec)	풍향 (deg)		풍속 (m/s)	GUST (m/s)					
		유의	최대	평균	특이										
12/19 09:00	칠발도	1.8	3.4	1.3		6.4	6	N	9.5	11.5	1025.6		6.7	11.2	62.0
12/19 08:00	칠발도	1.9	3.5	1.4		7.1	358	N	10.1	12.8	1025.0		6.5	11.0	63.0
12/19 07:00	칠발도	2.0	3.3	1.4		6.4	354	N	9.7	12.3	1008.4		6.3	11.0	63.0

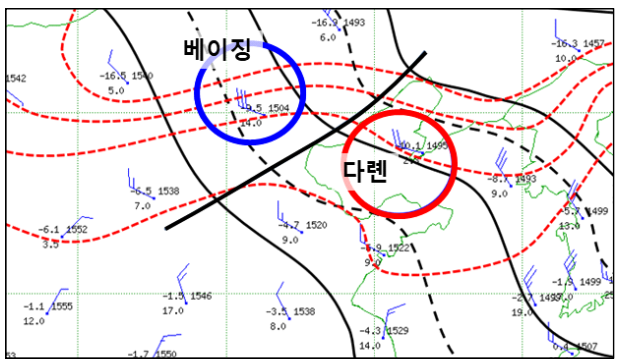
그림 2-2. 2019년 12월 19일 09시 자료
(좌) 위성의 해상풍 자료, (우상) 흑산도 단열선도, (우하) 칠발도 수온

그림 2-2의 2019년 12월 19일 09시 위성의 해상풍 관측 자료를 보면 요동반도 부근에 저기압성 회전이 뚜렷하게 나타난다. 따라서 발해만에 있는 구름(그림 2-1 (좌)의 1번)은 저기압성 회전으로 인해 발달한 것임을 알 수 있다. 한편, 산둥반도 이남 서해상에 형성되어 있는 구름(그림 2-1 (좌)의 2번)은 서해상으로 북북서풍의 기류를 타고 한기가 남하하면서 해수면과 기온 차에 의해 발생한 것이다. 12월 19일 09시를 기준으로 칠발도의 수온은 11.2℃, 흑산도의 850hPa 기온은 -2.7℃로 850hPa의 해기차는 13.9℃이다. 흑산도의 단열선도를 보면 850hPa 부근에 기온 역전층이 있어 그 하층에서 한기가 이류하고 있으며 구름의 높이는 1.5km 정도임을 알 수 있다.

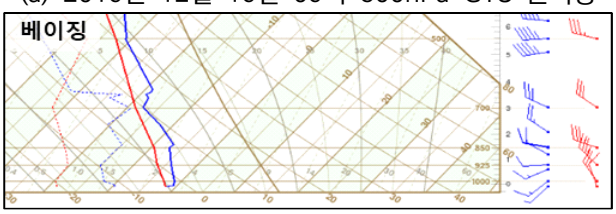
한편, 발해만 구름대는 레이더 영상에 나타나 있듯이 강수를 포함하고 있으며 강수 에코는 연직 고도 4㎞까지 발달해 있다. 발해만 구름대의 메커니즘을 자세히 분석하기 위해 2019년 12월 19일 09시 GTS 전문을 살펴보았다.



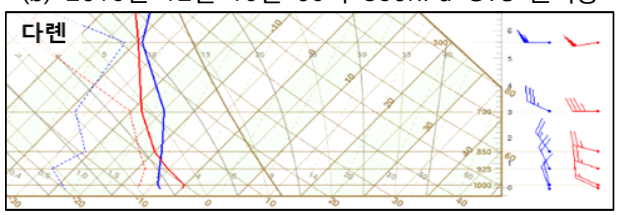
(a) 2019년 12월 19일 09시 500hPa GTS 분석장



(b) 2019년 12월 19일 09시 850hPa GTS 분석장



(c) 2019년 12월 19일 09시 베이징 단열선도



(d) 2019년 12월 19일 09시 다롄 단열선도

그림 2-3. 2019년 12월 19일 09시 자료

2019년 12월 19일 09시 500hPa GTS 전문을 바탕으로 일기도를 분석해보면 발해만 서쪽에 기압골이 있는 것을 알 수 있다. 850hPa 일기도에도 발해만 서쪽에 기압골이 나타나는데 기압골 전면인 다롄에는 난기 이류, 후면인 베이징에는 한기 이류가 있다. 상층 기압골의 지원으로 하층 기압골까지 잘 발달해 있는 상태이며 기압골 전면의 온난이류 영역이자 수증기가 공급되는 해상에서 구름대가 발달하였다.

(단계 2. 실황 기반 시나리오 작성) 메커니즘 분석을 바탕으로 예측 시나리오 작성

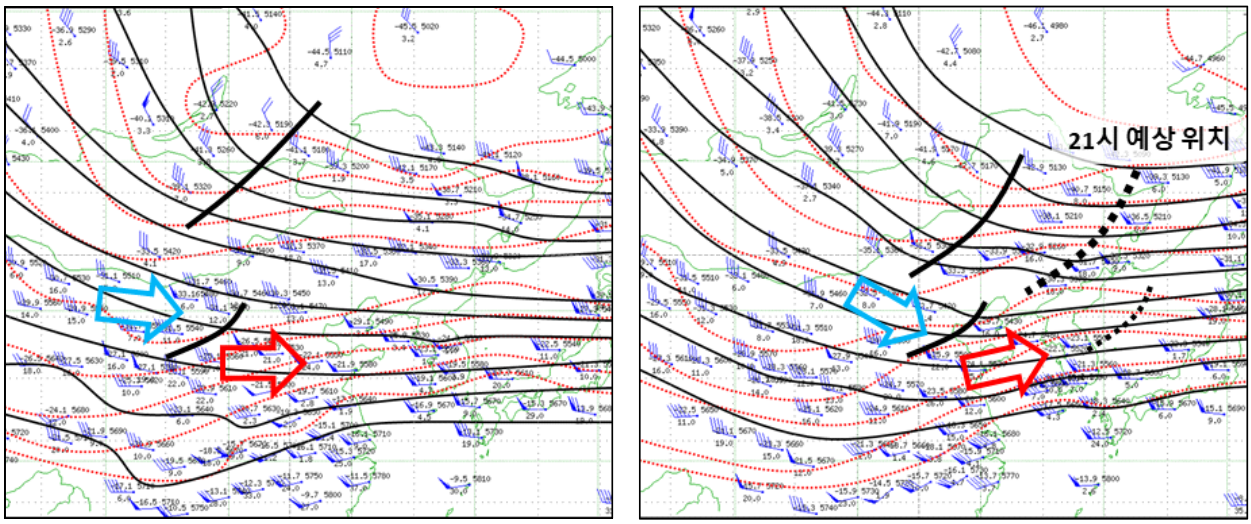


그림 2-4. (좌) 2019년 12월 18일 21시 500hPa GTS 분석장 (우) 12월 19일 09시 500hPa GTS 분석장. (실선: 기압골, 점선: 12시간 후 기압골의 예상 위치)

기압골의 이동 속도를 알기 위하여 2019년 12월 18일 21시 500hPa GTS 전문으로 일기도를 묘화하였다. 18일 21시부터 19일 09시까지 12시간 동안 기압골의 이동 속도를 고려하였을 때 19일 21시에는 이미 한반도를 통과하여 동해북부해상에 있을 것으로 예측할 수 있다. 즉, 우리가 예보하고자 하는 19일 밤에는 상층 기압골이 지나간 후에 하층의 강수대가 따라오는 형태이므로 상층 기압골의 지원을 받지 못하는 강수대가 현재의 강도를 유지하면서 유입될 것이다.

한편, 서해안형 강설이 발달하려면 850hPa 해기차가 15℃ 이상이어야 하고, 850hPa 풍향이 340° 일 때는 서해안에, 330° 이하일 때는 내륙까지 유입될 가능성이 높다(겨울 예보 가이던스 Why? How! '호수 효과에 의한 서해안 강설 메커니즘의 이해와 예보 활용' 참고). 그러나 단계 1에서 언급했듯이 흑산도를 기준으로 850hPa 해기차는 13.9℃이므로 해기차에 의한 구름대는 발생하더라도 강설의 조건은 만족하지 않는다. 또한, 850hPa 풍향도 340°이므로 구름대도 내륙까지 유입되지는 못하고 서해안에만 영향을 줄 것이다.

(단계 3. 실황과 모델 간 차이 인식) 모델과 실황의 차이를 정량적으로 확인

메커니즘 분석을 통해 산둥반도 이남 서해상의 구름대는 우리나라에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알았다. 그러나 발해만의 강수대는 밤사이 어디에, 얼마나 영향을 줄 것인지 예상해야 한다. 먼저, 수치모델은 발해만의 구름대를 잘 모의하고 있는지 확인해보자.

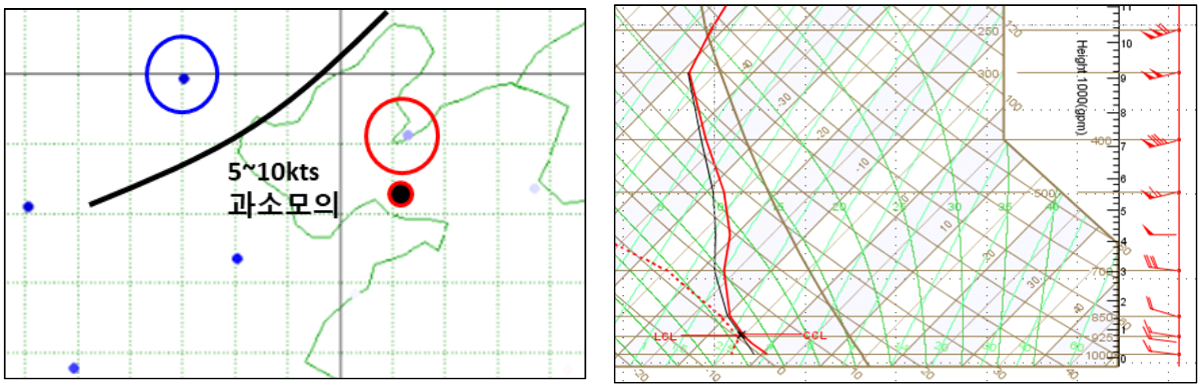


그림 2-5. 2019년 12월 19일 관측자료
(좌) 09시 850hPa UM 모델-실황 풍속 편차(파란색 점: 음의 편차, 빨간색 점: 양의 편차, 검정 실선: 기압골)
(우) 12시 산둥반도 북쪽 해상(임의 지점)의 예상 단열선도

그림 2-5의 850hPa의 풍속 편차(UM 기준)를 보면 발해만 기압골이 있는 전면(다롄)과 후면(베이징)에서 모두 음의 편차가 나타났다. 약 5~10kts 가량 풍속을 과소모의하고 있는데 이는 수치모델 예상보다 기압골 주변의 풍속이 강하다는 것을 의미한다. 따라서 실황의 기압골이 예상보다 더 발달한 상태이다.

현재 구름이 있는 산둥반도 북쪽 해상의 임의 지점(그림 2-5 (우)의 검은색 점)의 UM 예상 단열선도를 추출해 보면 850hPa(고도 약 1.5㎞)까지 포화층이 그려져 있다. 그러나 단계 1에서 강수 에코가 연직 고도 4㎞까지 발달해 있는 것을 이미 확인하였다(그림 2-1). 즉 수치모델이 모의한 것보다 구름대가 더 두껍게 형성된 것이다. 이것 역시 기압골이 예상보다 더 발달한 것임을 알려준다.

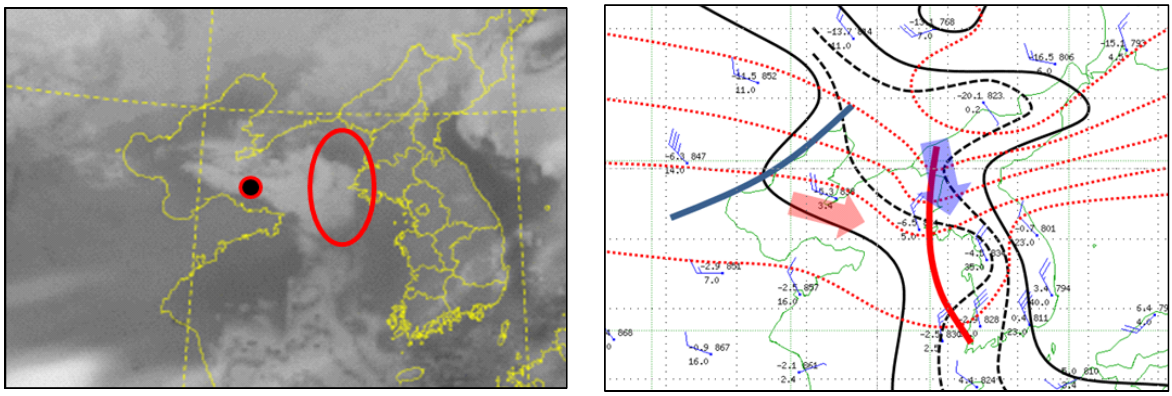


그림 2-6. (좌) 2019년 12월 19일 12시 UM 적외모의영상(빨간색 원: 실황과 차이 나는 영역, 검은 점: 산둥반도 북쪽 해상 임의 지점(그림 2-5의 단열선도 지점))
(우) 12월 19일 09시 925hPa GTS 분석장(파란색 선: 기압골, 빨간색 선: 온도골 축)

다음으로 위성 영상과 수치모델의 적외모의영상을 비교하여 차이를 찾아보자. 수치모델이 예상한 적외영상에도 발해만에 구름대가 발달해 있다. 그러나 옹진반도 부근으로 영역을 좁혀 보면 실황의 위성 영상과 다른 점이 있다. 그림 2-6 (좌)의 빨간색 원 영역처럼 수치모델은 옹진반도까지 구름이 유입되는 것으로 모의하고 있으나 실제 위성 영상에는 옹진반도 부근 해상까지 확장하지 못하고 구름의 단면이 깨끗하게 잘려있는 것을 볼 수 있다(그림 2-1).

발해만 구름대가 수치모델과 달리 확장하지 못한 이유를 알아야 이후에 어떻게 진행할지 예상할 수 있다. 2019년 12월 19일 09시 925hPa GTS 전문으로 일기도를 그려보면 평안도에서부터 서해안으로 온도골이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 20kts 이상의 북북서풍을 따라 한기가 남하하고 있다. 그러나 그림 2-7 (좌)의 UM 풍속 편차를 보면 서해안을 중심으로 3~4kts 가량 모델이 과소 모의하고 있는데, 이는 수치모델이 예상하는 것보다 서해안으로 남하하는 한기 이류가 강하다는 것을 의미한다.

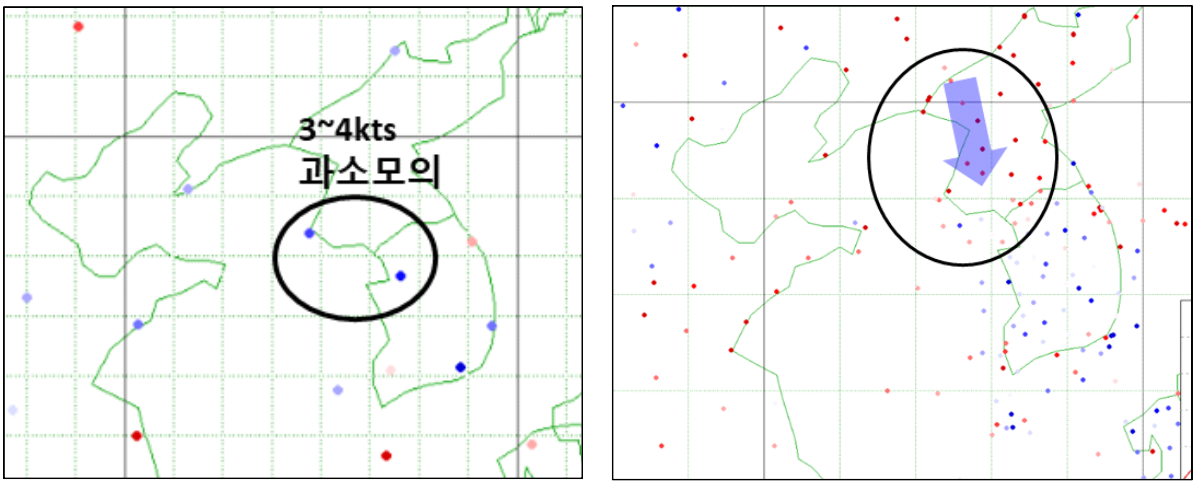


그림 2-7. 2019년 12월 19일 09시 UM의 (좌) 925hPa 풍속 편차와 (우) 지상 기온 편차
(파란색 화살표: 바람 방향)

지상 기온 편차에도 이러한 하층 한기 이류의 강도 차이가 잘 나타난다. 그림 2-7 (우)을 보면 북한과 서해상, 경기북부까지 양의 편차가 집중해 있다. 예상보다 지상의 기온이 더 낮게 형성된 것이다. 특히 북한은 최대 4℃까지 차이가 났다. 이로써 북쪽에서 남하하는 강한 한기가 발해만 구름대의 유입을 가로막는 역할을 하고 있다는 것을 알 수 있다.

(단계 4. 실황 분석 적용 최종 시나리오 생산)

- 수치모델에 실황분석을 적용하여 예상 시나리오 작성

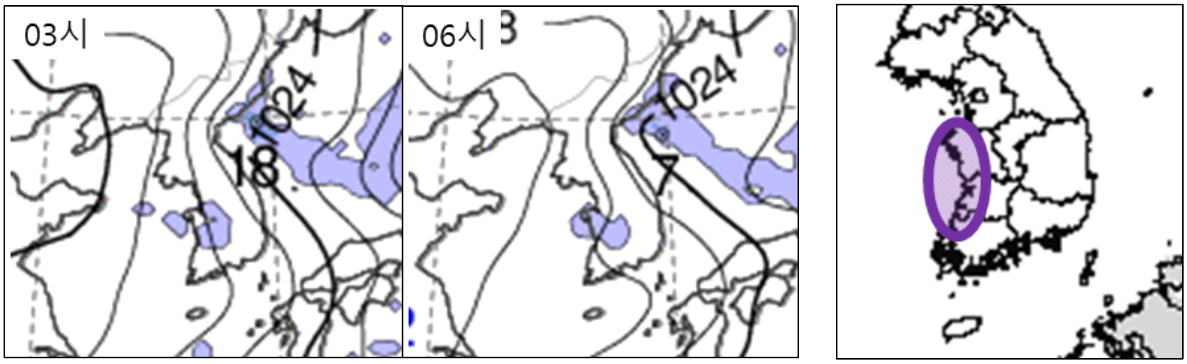


그림 2-8. (좌) 2019년 12월 20일 03시와 06시 UM 지상 예상장(2019년 12월 18일 21시 생산 모델) (우) 실황분석에 기반한 예상 강수구역(보라색 원).

수치모델은 그림 2-8과 같이 19일 밤, 충청내륙과 전라내륙까지 강수가 들어오는 것으로 모의하고 있다. 이러한 강수대 유입에 유리한 점은 실황에서 상하층 기압골이 수치모델 예상보다 발달해 있다는 점이다. 레이더의 연직 단면 자료와 예상단열선도를 비교해 보아도 구름의 꼭대기가 더 높다.

그러나 불리하게도 우리나라에 강수가 예상되는 19일 밤은 500hPa 기압골이 이미 통과한 시점이다. 상층 기압골은 동해상에 있는 상태이므로 하층의 기압골은 상층의 지원을 받을 수 없다.

한편, 구름모의영상에 드러나 있듯이 발해만 구름대는 수치모델이 예상하는 것보다 동쪽으로 확장하지 못한 상태이다. 이것은 북쪽에서 남하하는 하층 한기가 강해 서쪽에서 들어오는 구름대를 막는 역할을 하고 있기 때문이다.

이와 같은 분석 내용을 종합해 볼 때 발해만의 강수대는 예상보다 강하게 발달한 상태이지만 6시간 후 우리나라에 도달할 때는 서해안에만 영향을 주고 내륙까지 유입되기는 힘들 것이다.

2. 1. 2. 발해만 기압골에 의한 강수 사례(2019년 1월 12일 사례)

2019년 1월 12일 제주도와 남부지방에 예상되는 강수에 대해 하루 전인 1월 11일 14시 브리핑 시점에서 단기예보 실황분석을 해보자. 수치모델은 1월 10일 21시 생산 자료를 이용한다.

수치모델 예상장을 보면 상해 부근으로 500hPa 약한 단파골이 통과하고 지상에는 상해부터 남부지방까지 강수대가 광범위하게 분포해 있다. 또한, 대만 부근에서 발달한 지상 저기압이 북상하여 제주도 남쪽 해상을 지나는 것으로 모의하고 있다.

이 사례의 단기예보 실황분석은 남부지방의 강수 메커니즘은 무엇인지, 강수대가 어디까지 북상할 것인지에 중점을 두어야 한다.

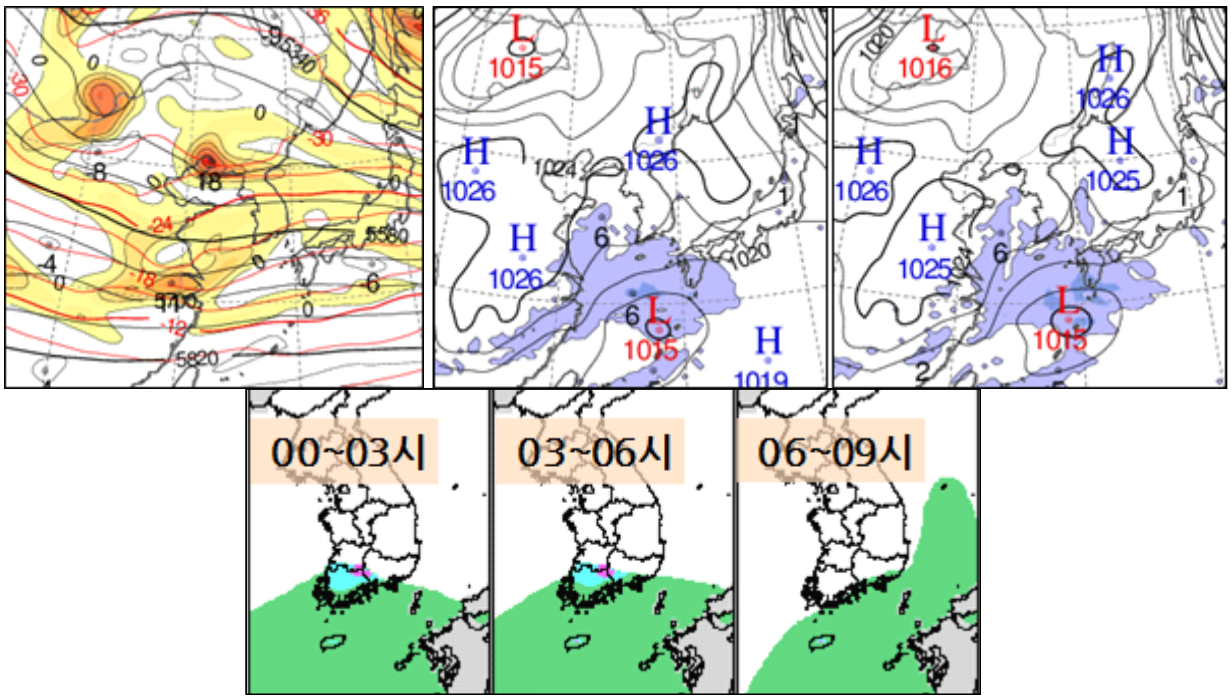


그림 2-9. (상) 2019년 1월 12일 03시 500hPa 예상장과 03시, 06시 지상 예상장(1월 10일 21시 생산 모델).
(하) 2019년 1월 11일 05시에 발표한 동네예보 강수 분포도.

(단계 1. 실황 파악 및 메커니즘 분석) 위성 영상과 중국의 강수량(GTS) 확인

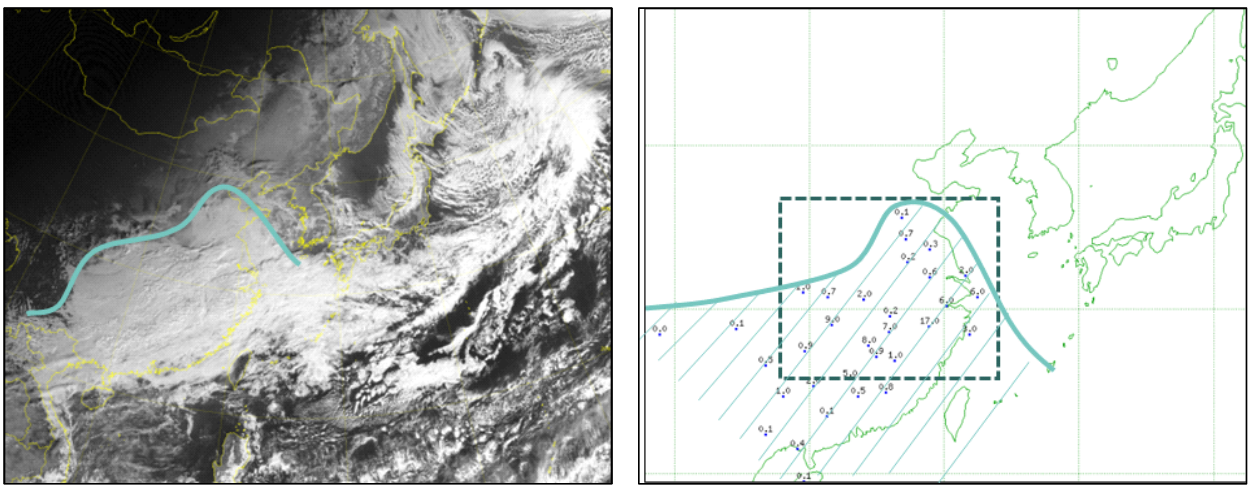


그림 2-10. 2019년 1월 11일 (좌) 09시 히마와리 가시 영상과 (우) 09시 GTS 전문 6시간 강수량

2019년 1월 12일 우리나라에 영향을 줄 강수대는 예보 시점(11일)에는 아직 중국 내륙에 있었다. 2019년 1월 11일 09시 GTS 전문에 기록된 6시간 강수량(그림 2-10 (우))을 보면 중국 남부지방에서부터 산둥반도 남쪽까지 기록되었다. 히마와리 위성 영상(가시 영상)에도 강수량이 기록된 영역과 비슷하게 구름이 분포하고 있는 것이 보인다. 그러나 1월 10일 21시에 발표된 수치모델의 지상 예상장에는 상해 부근과 그 서쪽 내륙으로만 강수를 모의하고 있다. 수치모델이 모의하는 강수 영역과 실제 강수 영역에 차이가 있다. 따라서 이 강수대의 발달 메커니즘은 무엇이고, 왜 예상보다 넓은 구역에서 비가 내리고 있는지 이유를 밝혀야 한다.

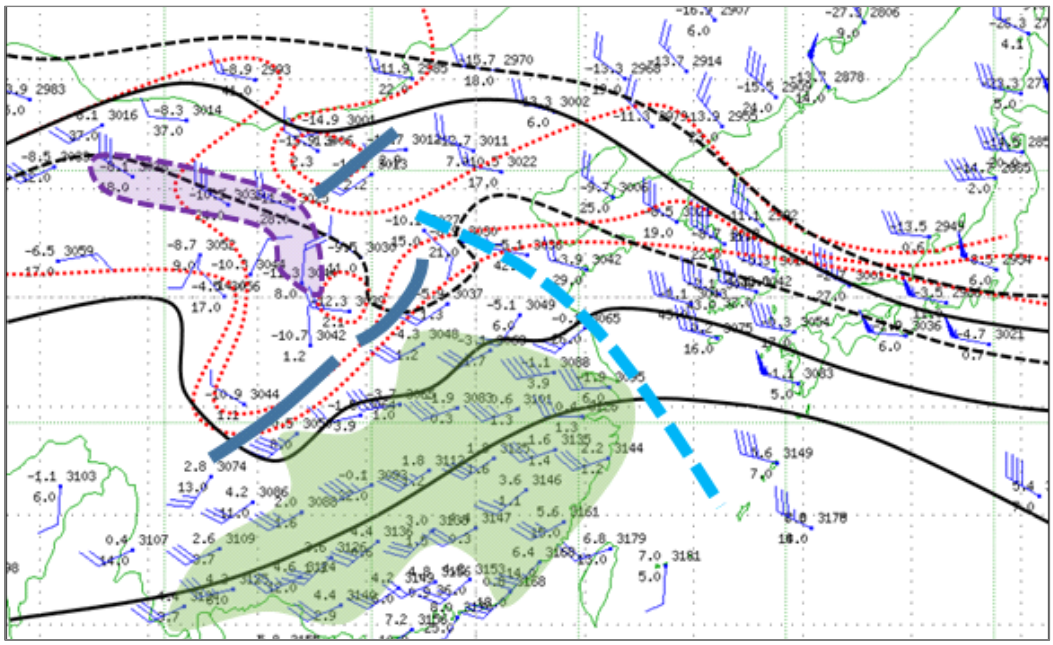


그림 2-11. 2019년 1월 10일 21시 700hPa GTS 분석장(파란색 실선: 700hPa 기압골, 하늘색 점선: 700hPa 기압능, 보라색 영역: 기압골 후면으로 유입되는 북서풍, 초록색 영역: 남서풍이 30kts 이상 구역)

강수대의 원인을 분석하기 위해 12시간 전인 2019년 1월 10일 21시 700hPa GTS 전문으로 분석장을 그렸다(그림 2-11). 몽골 남쪽과 산둥반도 서쪽에 각각 기압골이 나타났다. 산둥반도 서쪽 두 개의 기압골은 후면에 한기(온도골)를 동반하고, 기압골 전면인 중국남부지방에는 30~40kts의 강한 남서풍이 불고 있었다. 한편, 산둥반도에서 동중국해까지는 기압능이 서 있어 하층 고기압을 견고하게 만드는 역할을 하고 있었다.

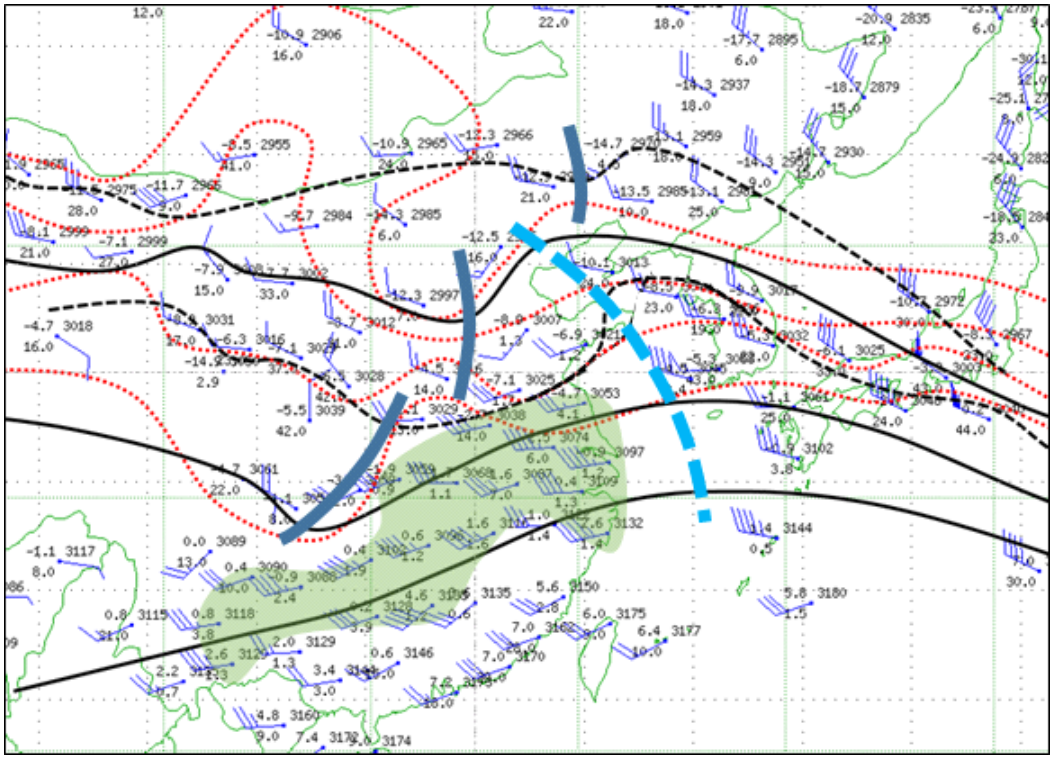


그림 2-12. 2019년 1월 11일 09시 700hPa GTS 분석장

12시간 후인 2019년 1월 11일 09시 700hPa 분석장(그림 2-12)을 보자. 몽골 남쪽의 기압골은 발해만 북쪽으로 빠르게 동진하였고 기압능도 서해상으로 동진하였다. 산둥반도 서쪽의 기압골은 한기가 후면에 계속 남아있어 기압골 세력이 유지되고 있었다. 기압골 전면에 있는 강풍대는 40kts 이상으로 12시간 전보다 풍속이 강해지고 산둥반도 남쪽까지 북상하였다. 따라서 기압골과 강풍대의 위치 등을 고려하였을 때 중국내륙의 강수대는 700hPa 기압골에 기인한 것임을 알 수 있다.

(단계 2. 실황 기반 시나리오 작성) 메커니즘 분석을 바탕으로 예측 시나리오 작성

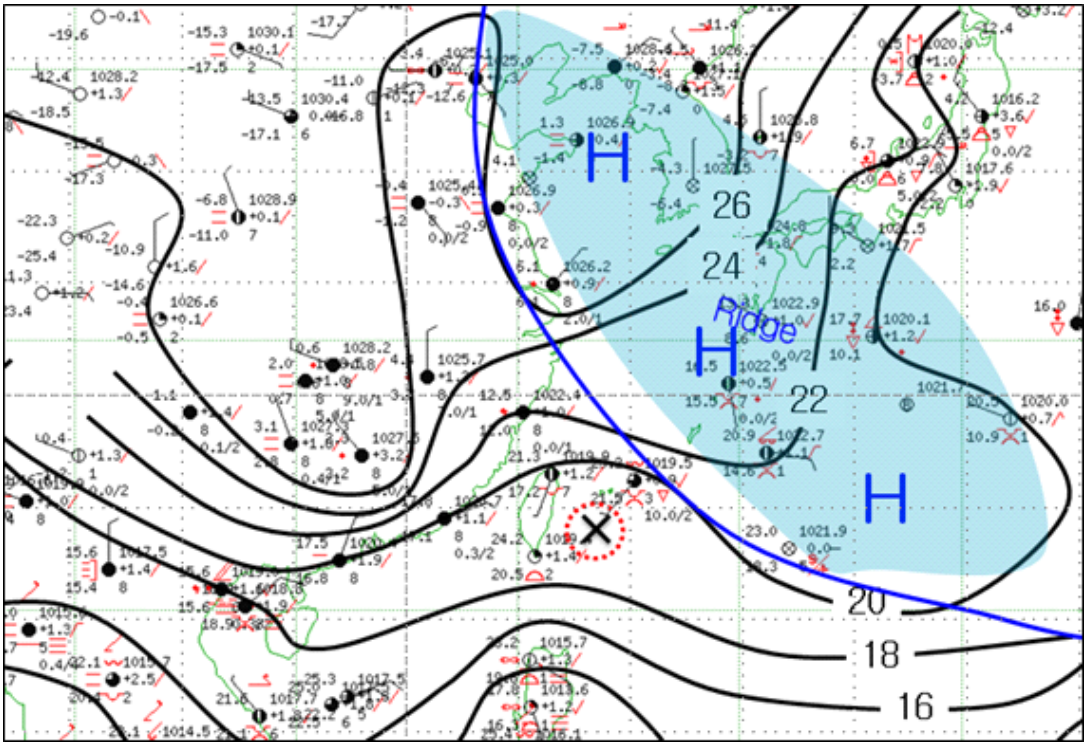


그림 2-13. 2019년 1월 11일 09시 지상 GTS 분석장(대만 부근의 빨간색 원: 지상 저기압)

2019년 1월 11일 09시 지상 GTS(그림 2-13) 분석장을 보면, 대만 부근 해상에 지상 저기압이 있는 것을 알 수 있다. 그러나 서해상에서 일본 남동쪽 해상까지 700hPa 기압능에 의해 발달한 지상 고기압이 버티고 있다. 그러므로 대만 부근의 저기압은 이 견고한 고기압을 뚫고 북상하기 어려워 보인다. 따라서 수치모델이 모의하고 있는 제주도와 남부지방의 강수는 대만 부근에 있는 저기압의 영향이 아니다.

반면에 단계 1에서 보았듯이 산둥반도 서쪽의 700hPa 기압골은 후면에 한기를 동반하면서 동진하였다. 12시간 동안 기압골 전면 강풍대도 북상하고 풍속도 강해졌다. 이동 방향과 속도를 고려하면 산둥반도 서쪽의 기압골이 서해상으로 동진하여 우리나라에 영향을 줄 것임을 알 수 있다.

(단계 3. 실황과 모델 간 차이 인식) 모델과 실황의 차이를 정량적으로 확인

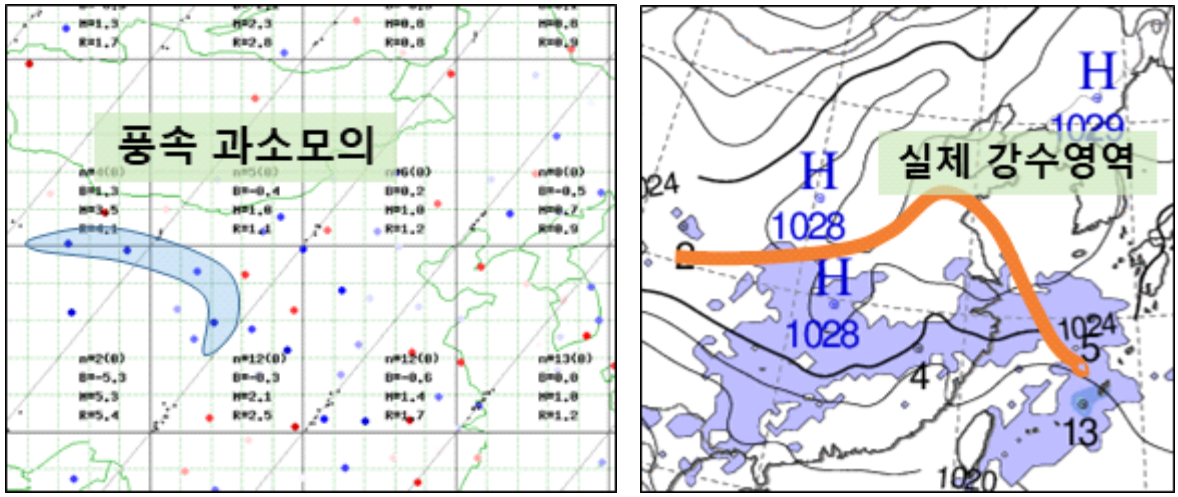


그림 2-14. (좌) 2019년 1월 10일 21시 UM 700hPa 풍속 편차, (우) 1월 11일 09시 지상 예상장(1월 10일 21시 생산)
(파란색 영역: 기압골 후면의 북서풍 관측 지역, 주황색 선: 강수량 기록된 영역의 북단 경계)

수치모델은 산둥반도 서쪽 기압골의 강도를 전일부터 과소모의 하였다. 2019년 1월 10일 21시 700hPa 풍속 편차(그림 2-14 (좌))를 보면 기압골 후면의 북서풍 영역에 음의 편차(3~9kts)가 나타난다. 이것은 북서풍이 수치모델 예상보다 강하게 불고 있음을 의미한다. 700hPa 기압골이 예상보다 발달해 있음을 시사하기도 한다.

또한 수치모델은 강수 영역도 과소모의 하였다. 그림 2-14 (우)를 보면 1월 10일 21시에 발표된 수치모델의 지상 예상장에는 상해 부근과 그 서쪽 내륙에만 강수를 모의하고 있다. 단계 1에서 확인한 실황의 강수 영역과 같이 산둥반도 부근으로 북상하지 못하고 북위 30° 부근에 처져 있다.

(단계 4. 실황 분석 적용 최종 시나리오 생산)

- 수치모델에 실황분석을 적용하여 예상 시나리오 작성

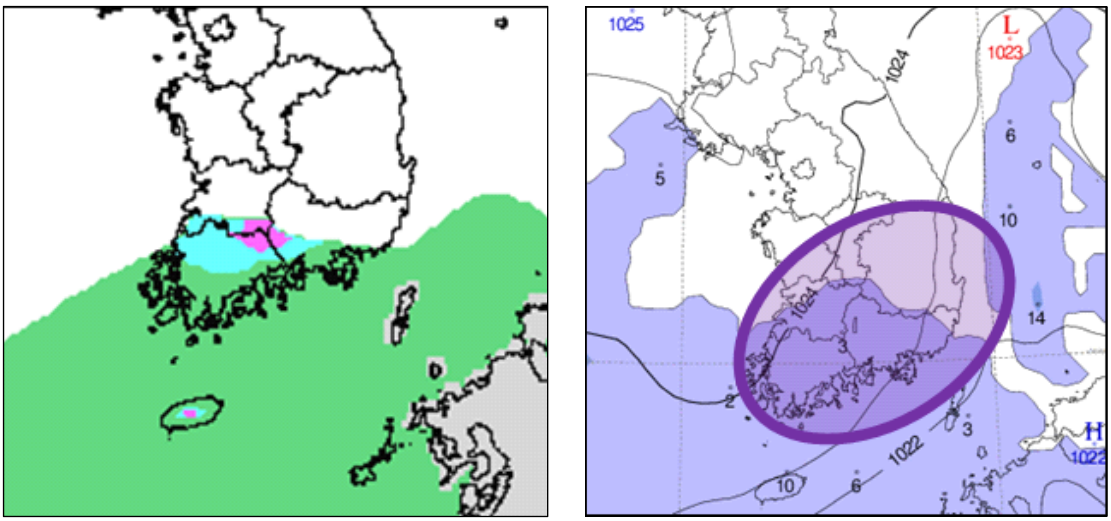


그림 2-15. (좌) 2019년 1월 11일 05시에 발표한 예상 강수 영역
(우) 실황분석에 기반한 예상 강수 영역

수치모델이 모의하고 있는 제주도와 남부지방의 강수는 대만 부근의 남쪽 저기압이 북상하여 영향을 받는 것이 아니라 산둥반도 서쪽의 700hPa 기압골에 의한 것이다. 기압골 후면의 북서풍이 수치모델 예상보다 3~9kts 강하게 남하하면서 골이 깊어지고 그 전면의 남서풍 강풍대도 북상하고 있으나 수치모델은 이것을 잘 모의하지 못하고 있다.

따라서 수치모델은 남부지방에만 강수를 모의하고 있으나 700hPa 기압골이 서해상으로 동진함에 따라 강수 영역은 예상보다 북쪽으로 확대해야 할 것이다.

2. 2. 여름철 실황분석 사례

2. 2. 1. 남쪽 저기압 강수 사례(2019년 7월 10~11일 사례)

상해 부근 저기압에 의한 강수 예보를 마지막으로 수정할 수 있는 초단기 실황분석 사례이다. 저기압은 어떤 경로로 진행할지 그에 따른 강수 집중 구역과 강수량은 어떻게 나타날지 2019년 7월 10일 14시 브리핑 시점으로 초단기 실황분석을 해보자.

(단계 1. 실황 파악 및 메커니즘 분석) 위성 영상과 레이더 영상 확인

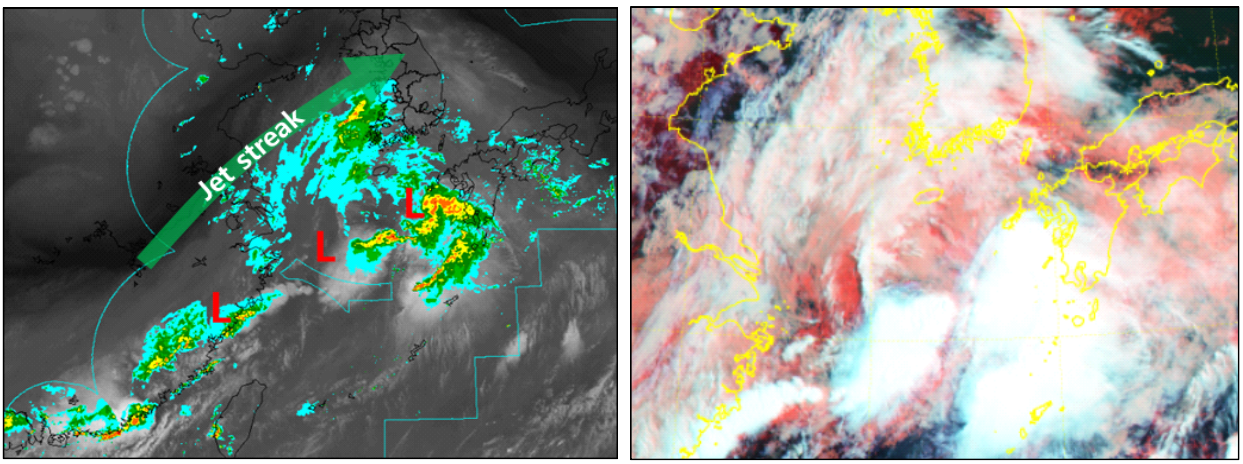


그림 2-16. 2019년 7월 10일 09시 수증기 영상과 레이더 중첩 영상(좌), 09시 합성영상(우)

그림 2-16의 2019년 7월 10일 09시 레이더 영상과 위성 합성 영상을 보면 강수대는 200hPa의 강풍축 남단인 규슈 부근 해상에서부터 상해 부근까지 이미 발달해 있는 상태이다. 합성영상을 보면 상해 부근 해상과 큐슈 부근에 두 개의 구름 덩어리가 있는데 상해 부근의 구름대는 점차 저기압성 순환으로 조직화하면서 북동진하여 제주도에 가깝게 북상하고 있다.

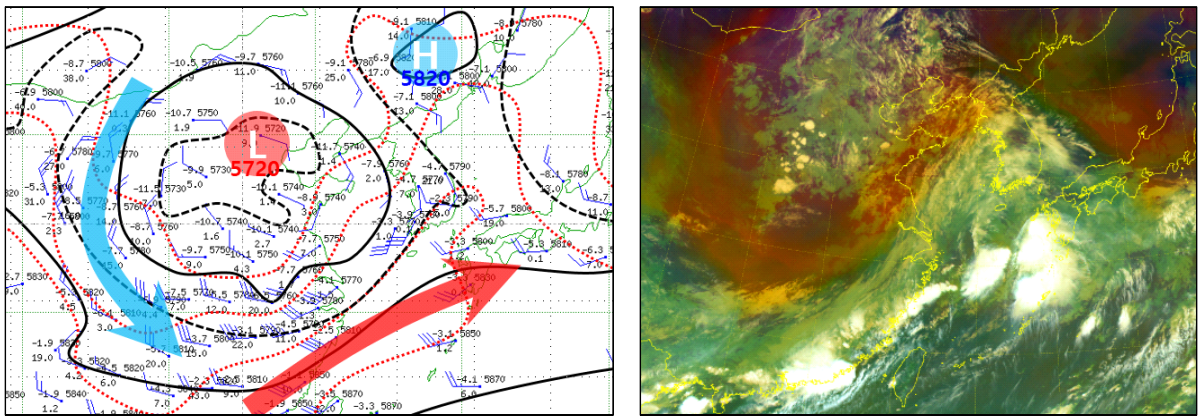


그림 2-17. 2019년 7월 10일 09시 500hPa GTS 분석장(좌), 09시 기단 RGB 영상(우)
(화살표: 저기압 후면의 한기(파란색), 북태평양 고기압 가장자리의 난기(빨간색) 흐름)

규슈 부근에서부터 상해 부근까지 발달한 강수대는 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 중국 남부지방으로 따뜻한 수증기가 공급되는 가운데 발해만 서쪽에 중심을 둔 500hPa 절리저기압의 후면에서 찬 공기가 남하하면서 서로 다른 공기가 만나 밀도 차이에 의해 발달한 것이다. 하층에서는 저기압성 회전이 형성되면서 조직화하고 있었다.

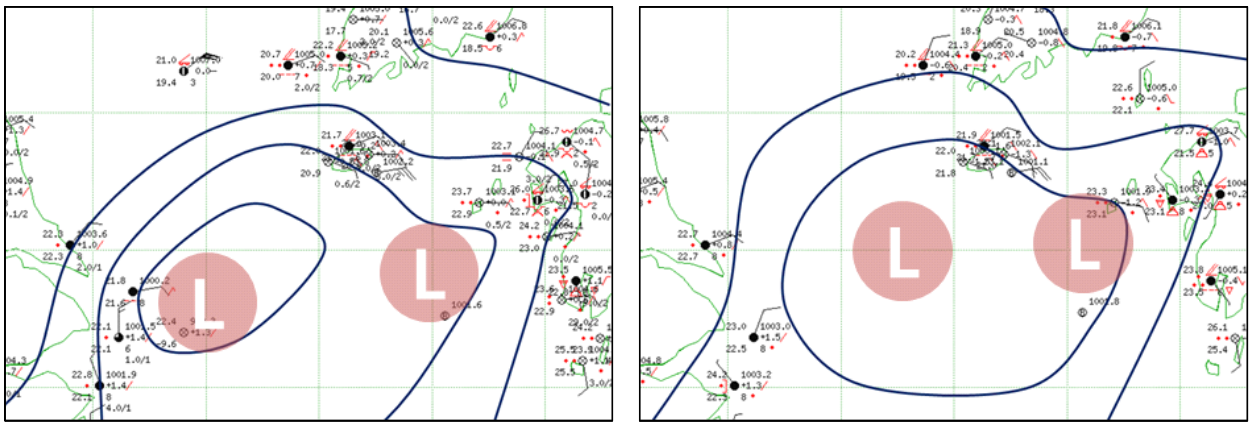


그림 2-18. 2019년 7월 10일 09시 지상 GTS 분석장(좌), 12시 지상 GTS 분석장(우)

2019년 7월 10일 09시와 12시 지상 GTS 전문을 이용하여 저기압의 중심을 찾아보면 위성 영상에서 확인하였듯이 규슈 부근과 상해 부근에 2개로 분리된 것이 잘 나타난다. 강한 대류성 강수대는 수증기가 유입되는 오른쪽 저기압에 동반되어 있고 왼쪽 저기압에 동반된 강수대는 점차 발달하는 상태이다.

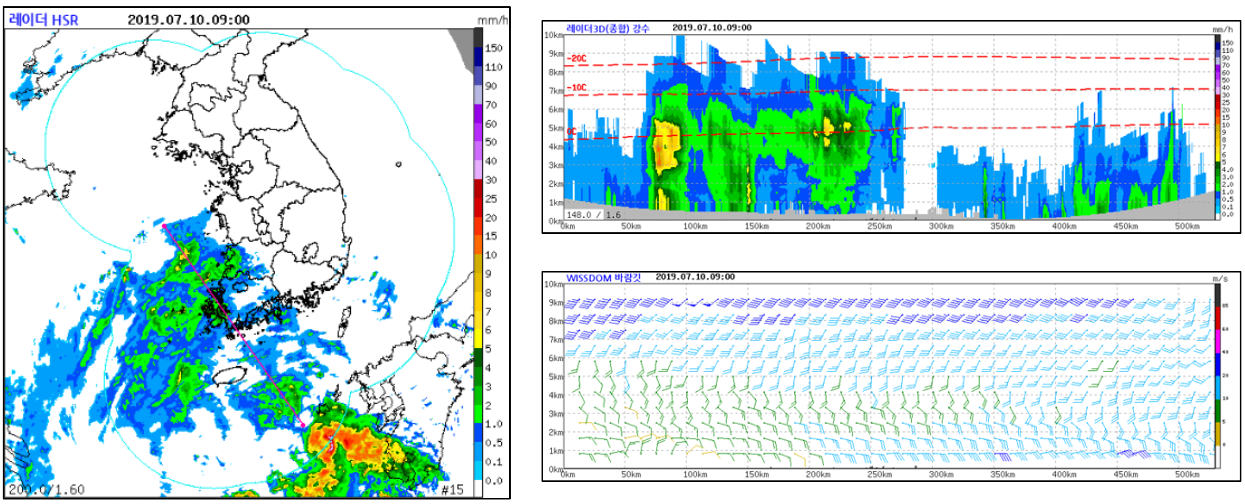


그림 2-19. 2019년 7월 10일 09시 레이더 영상(좌), 연직 단면(우상), WISSDOM 연직 바람 분포(우하)

그림 2-19와 같이 레이더의 연직 단면을 잘라보면 제주도 서쪽~전라해안 강수와 제주도 남동쪽 해상의 강수대가 서로 다른 기작을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 왜냐하면, 전라해안의 에코는 3㎞ 이상 고도에 떠 있으나 제주도 남동쪽에 있는 에코는 하층을 기반으로 하기 때문이다. 즉 제주도 서쪽~전라해안에 있는 것은 중상층 기압골 전면에서 형성된 에코이고 제주도 남동쪽의 에코는 제주도 남쪽에 있는 하층 저기압 순환에서 비롯된 25kts의 강한 동풍에 동반된 것이다.

(단계 2. 실황 기반 시나리오 작성) 메커니즘 분석을 바탕으로 예측 시나리오 작성

제주도 서쪽~전라해안의 강수대는 중상층 기압골에 의한 것이므로 상층의 흐름을 따라 북동진할 것이다. 반면에 제주도 남동쪽 해상의 강수대는 하층의 동풍 흐름을 따라 서진한다. 따라서 제주도는 이 두 강수대의 영향을 같이 받게 되므로 강수량이 증가할 것이다.

한편, 이 사례에서 중점을 두어야 할 점은 저기압의 이동 경로와 그에 따른 강수량, 강수 집중구역이다. 200hPa 강풍축과 하층저기압 북쪽 동풍류 강풍축이 만나는 곳에서 형성되는 CCB 형태의 강한 강수대가 어디에 형성될 것인지, 저기압의 북쪽에서 동풍이 유입되는 동해안의 강수량은 많을 것인지도 고려해야 한다.

(단계 3. 실황과 모델 간 차이 인식) 모델과 실황의 차이를 정량적으로 확인

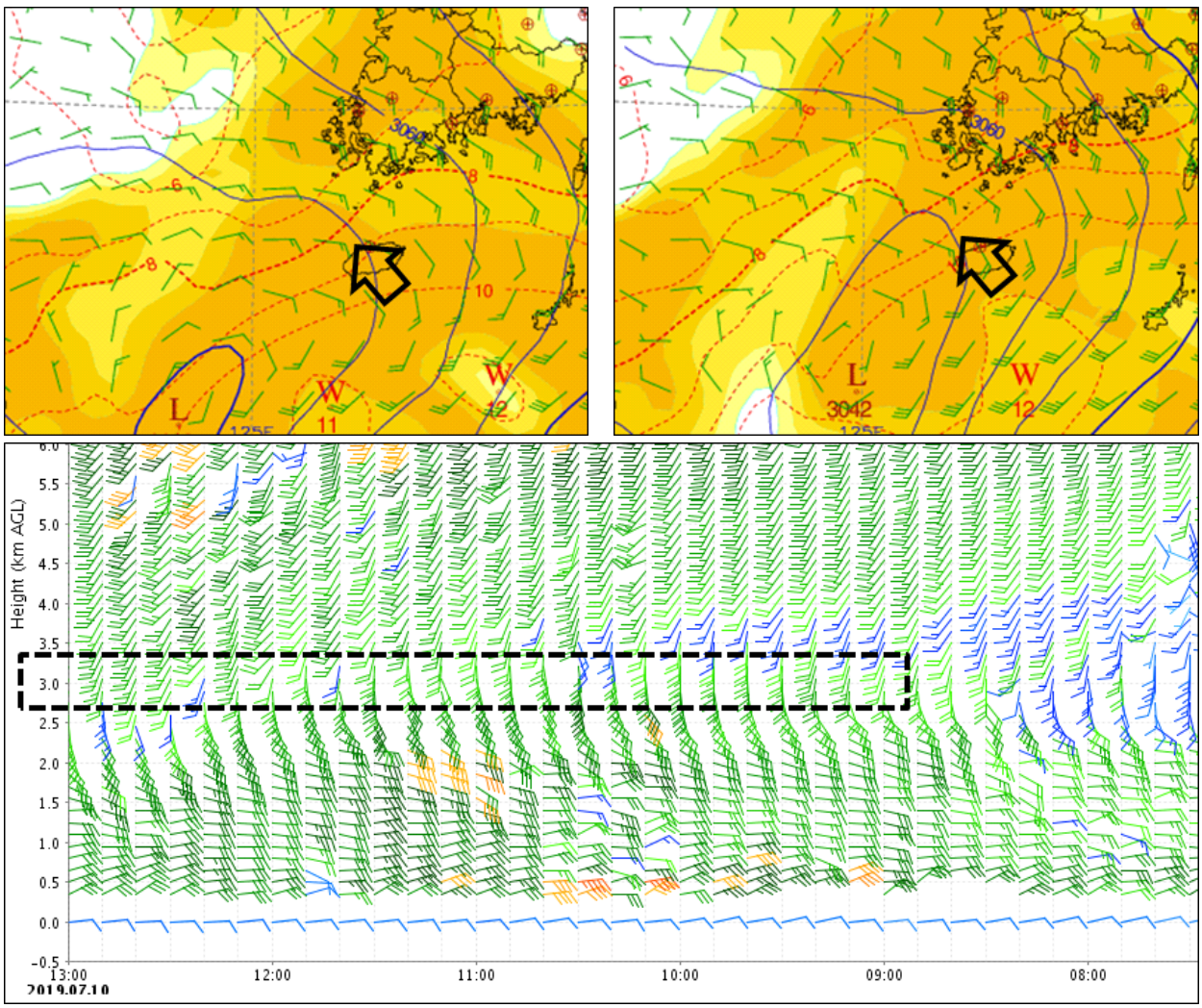


그림 2-20. (상) 2019년 7월 10일 09시와 12시 UM 700hPa 상세바람예상장
(하) 10시 30분부터 13시 사이에 관측한 태풍센터의 연직바람관측 자료

2019년 7월 10일 09시와 12시에 예측한 UM의 700hPa 상세바람장(그림 2-20 (상))을 보면 700hPa까지 저기압성 회전이 나타나면서 제주도에는 저기압 전면에서 남동풍이 부는 것으로 모의하고 있다. 그러나 10시 30분부터 13시 사이 태풍센터에서 관측된 연직바람관측 자료를 보면 3㎞ 고도에는 남풍~남서풍이 불고 있다(그림 2-20 (하)). 700hPa에 해당하는 3㎞ 고도에 남서풍이 부는 것은 제주도가 700hPa 기압골 전면에 있다는 뜻이다. 850hPa 이하 층에는 동풍이 불고 있는 것으로 보아 저기압성 회전은 주로 850hPa 이하에 형성되어 있다. 따라서 제주도의 강수대는 상하층이 분리된 형태로 전형적인 하층 동풍 유입에 따른 지형성 강수가 내리고 있다.

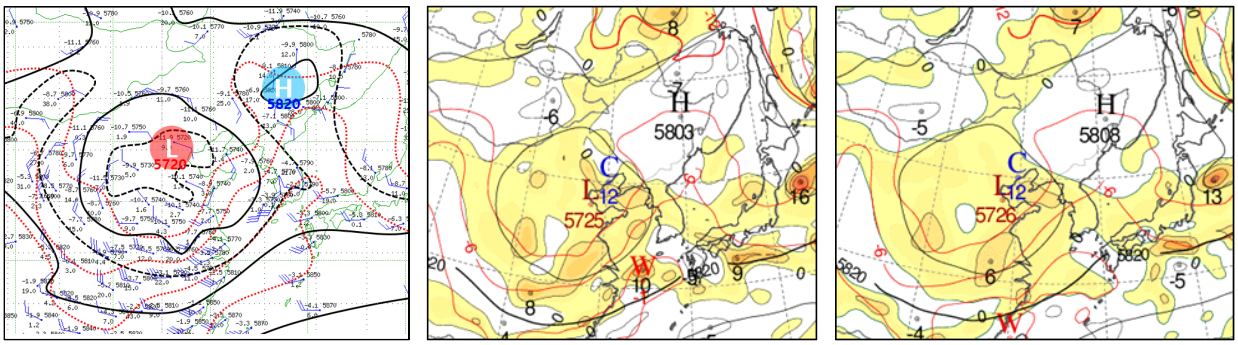


그림 2-21. 2019년 7월 10일 09시 자료
(좌) 500hPa GTS 분석장, (중) UM 500hPa 예상일기도, (우) ECMWF의 500hPa 예상일기도(7월 9일 21시 생산)

2019년 7월 10일 09시를 기준으로 수치모델과 실황 간 500hPa 지위고도를 비교했다. 중국북동지방 고기압의 중심이 수치모델 예상보다 남서쪽에 있다. 또한, 고기압 중심의 지위고도 값도 5820gpm으로 관측되어 수치모델(UM은 5803gpm, ECMWF는 5808gpm)보다 고기압 세력이 강하다. 발해만 서쪽의 절리저기압도 역시 중심 강도가 5720gpm으로 수치모델(UM 5725gpm, ECMWF 5726gpm)보다 강하게 관측되었다.

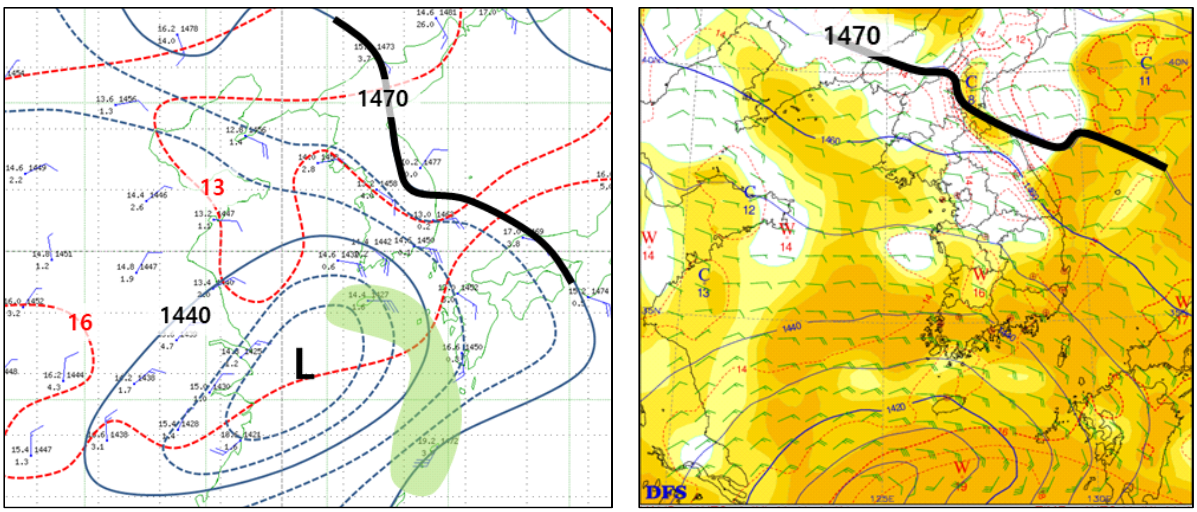


그림 2-22. 2019년 7월 10일 09시 자료
(좌) 850hPa GTS 분석장, (우) UM의 850hPa 상세바람 예상장(7월 9일 21시 생산)

850hPa에서도 수치모델과 실황의 차이를 찾을 수 있다. 그림 2-22는 2019년 7월 10일 09시의 850hPa GTS 분석장과 UM의 850hPa 상세바람 예상장이다. 1470gpm 등고도선이 수치모델 예상보다 강원동해안으로 더 남하한 것을 알 수 있다. 이 상태에서 저기압이 북상하면 남북간의 기압경도력이 예상보다 강할 것이다. 그러므로 지상저기압의 경로가 예상보다 서쪽으로 이동한다 하더라도 동해안에는 강수가 많이 내릴 가능성이 크다.

(단계 4. 실황 분석 적용 최종 시나리오 생산)

- 수치모델에 실황분석을 적용하여 예상 시나리오 작성

실황과 수치모델의 편차에서 나타났듯이 중국북동지방 고기압이 예상보다 강하고 중심이 남서쪽에 있어 지상 저기압의 북진 성분이 강화될 것이다. 수치모델이 예상하는 경로보다 서쪽으로 치우치면서 북상할 수 있다.

절리저기압의 세력도 예상보다 강한데, 중국북동지방의 고기압은 버티고 절리저기압은 예상보다 강하게 회전하면서 상층의 시스템이 정체하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 지상 저기압의 이동 속도는 느리고 저기압 전면의 남서풍이 강해질 수 있다는 것을 의미한다. 저기압이 느리게 이동하면 제주도는 강수의 지속 시간이 길어지며 강수량이 증가할 것이다.

한편, 수치모델이 중부지방에 많은 강수를 모의하고 있는 것은 저기압의 북쪽에서 형성되는 CCB 강수대를 표현한 것이다. 저기압이 예상보다 서쪽에서 북상한다면 CCB 역시 수치모델이 모의하는 지역보다 서쪽에서 형성될 것이다. 따라서 CCB는 경기서해안이 아니라 서해상에서 발달해 저기압을 따라 북진하며 중부지방이 아닌 황해도에 많은 강수를 내릴 것이다.

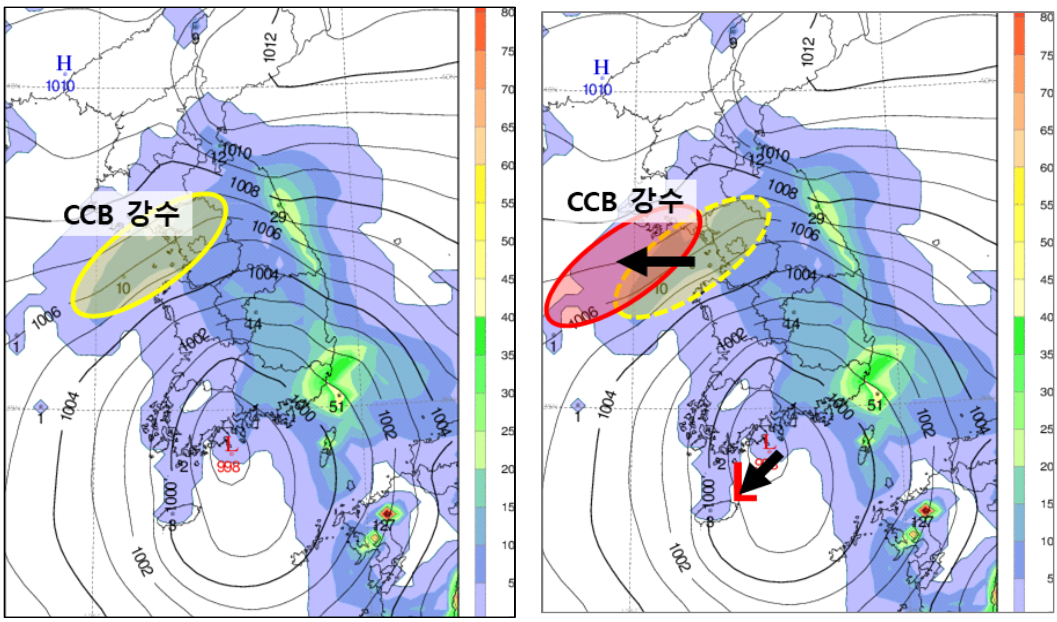


그림 2-23. 2019년 7월 11일 03시 자료
(좌) UM 예상 강수분포, (우) 실황분석을 적용한 예상 강수분포

참고문헌

1. 기상청, 2014 : 손에 잡히는 예보기술
2. James R. Holton, Gregory J.Hakim : An introduction to dynamic meteorology
3. 기상청, 2012 : 예보관 중급과정 훈련교재 - 대기물리
4. 윤순창, 이갑복, 1990 : 순압 대기에서의 태풍의 이동 성향에 관한 연구, 한국기상학회지, 26권 1호, 33-36.