

초급 예보관 훈련용 교재

수치예보



목차

- 1장. 수치예보모델의 원리
- 2장. 예측성 및 앙상블 예보
- 3장. 통합모델(Unified Model)
- 4장. 자주 사용하는 모델 자료
- 5장. 수치예보 모델의 한계
- 6장. 슈퍼컴퓨터와 수치예보시스템
- 7장. 초단기 기상분석 및 예측시스템
- 8장. 동네예보

1장. 수치예보모델의 원리

- 1.1 수치모델의 역사
- 1.2 수치예보모델의 원리
- 1.3 좌표계
- 1.4 분광 및 격자점 모델
- 1.5 경계조건 및 지면특성
- 1.6 모델링 과정
- 1.7 모수화
- 1.8 카오스 특성의 관리

학습목표

- 수치예보모델의 기본 원리를 이해한다.
- 수치예보모델에 사용되는 좌표계를 이해한다.
- 수치예보모델의 종류와 장단점을 이해한다.
- 수치예보모델에 필요한 경계조건을 이해한다.
- 모델링 과정과 모수화 원리를 이해한다.

1.1 수치모델의 역사

수치예보(Numerical Weather Prediction : NWP)란 대기현상의 역학 및 물리적 원리에 대한 지배방정식들을 컴퓨터를 활용하여 연속적으로 수치적분함으로써 현재의 대기상태를 분석하고 나아가 미래의 대기상태를 정량적으로 예측하는 일련의 과정으로 정의할 수 있다. 이 점에 있어서 가장 선구자라 할 수 있는 영국의 기상학자 리차드슨(Richardson)은 1922년에 대기운동을 지배하는 미분방정식을 해석적 방법이 아닌 단순한 덧셈, 뺄셈의 대수적 방법(수치적 방법 : Numerical Method)으로 계산하여 미래의 일기를 예보할 수 있다고 주장하였다. 그리고 그는 실제 지상 관측 자료를 이용하여 6시간 후의 지상기압 예측을 시도하였으나 6시간에 기압이 60hPa이나 증가하는 비현실적인 결과를 도출하였다.

이처럼 큰 오차가 발생한 것은 컴퓨터가 없었기 때문에 사람들이 직접 계산하는 과정에서 발생한 계산 오차뿐만 아니라 관측 자료의 부족, 관측 자료의 초기화 기술 부족, 미분방정식에 대한 수치적 해법 기술 부족 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하였음이 밝혀졌다.

1950년대에 전자컴퓨터의 개발과 함께 앞에서의 문제점들이 하나둘씩 개선되면서 현재의 수치예보시대가 시작되었다. 특히 미국의 프린스턴 대학 연구그룹에서 선도적인 역할을 하였으며 차니(Charney, 1948)는 다루고자 하는 대기현상의 복잡성에 따라 지배방정식을 단순화하는 기법이 필요함을 주장하고 직접 준지균 모델(Quasi-geostrophic Model)을 개발하여 리차드슨이 미처 깨닫지 못했던 문제점들을 해결하였다. 그 후 차니와 엘리오슨(Ellison, 1953)은 대기중층 기압골의 이동과 발달과정을 정량적으로 예측하여 처음으로 수치예보의 가능성을 제시하였다.

1.1.1 현업용 모델

1950년대와 1960년대에 컴퓨터의 속도와 메모리 성능이 크게 향상됨에 따라 좀 더 복잡한 경압모델들이 개발되게 되었다. 이들 모델들은 단순화하지 않은 원시방정식들에 기초하였으며 보다 상세한 물리과정들을 포함하게 되었다. 또한 1960년대 말에는 다층 모델이 개발되었으며 이를 이용하여 강수예보를 시도하게 되었다. 1970년대와 1980년대에 이르러 좀 더 강력한 컴퓨터의 활용이 가능해짐에 따라 수치모델의 수준도 비례해서 향상되었으며 수치예보에 대한 기대가 커짐에 따라 컴퓨터, 인력 등 많은 자원들이 투입되기 시작하였다.

1.1 수치모델의 역사

1.1.2 현황

현재는 대부분의 연구소와 현업용 예보기관에서 다양한 종류의 컴퓨터 수치예보모델을 이용하여 모든 규모의 기상현상을 모의하고 있다. 현재 10여 개의 나라가 전지구모델을 운영하고 있으며 많은 나라에서 자기영역의 지역모델을 운영하고 있다.

1.1.3 모델의 유형

수치모델은 다루는 현상에 따라 다음과 같이 크게 4 종류로 구분할 수가 있다.

- 기후모델

이 모델은 장시간에 걸친 대류권과 성층권에서의 일반적인 대기상태 변화를 모의한다. 최근에는 기후가 변화하고 있음이 밝혀짐에 따라 많은 모델들이 활발하게 개발 및 활용되고 있다. 이 모델들은 종종 **대기대순환모델**(GCM : General Circulation Model)이라고 하며 기본 원리에 있어서는 현업용 종관모델과 유사하다. 최근에는 기후 시스템에 대한 인식이 확산되면서 보다 정확한 기후모의와 예측을 위하여 대기권뿐만 아니라 수권, 빙권, 생물권 그리고 지권과 대기권사이의 상호작용을 현실화하려는 노력들이 진행 중이다.

- 현업용 종관모델

이 모델은 매일 매일의 날씨를 예보하는데 이용된다. 이들은 전구 또는 일부 제한된 영역을 포함할 수 있다. 이들의 해상도는 종관규모 일기계의 상태와 행태를 묘사할 수 있는 수준이다.

- 중규모 모델

이 모델은 특히, 지형에 의해 강제된 국지적 날씨변동을 예측하는데 사용된다. 수평해상도 1km 수준의 모델을 개발하기 위하여 많은 연구들이 진행중이나 현업차원에서 이 정보의 활용은 조금은 먼 훗날이 될 것이다.

- 특화된 모델

많은 종류의 특화된 모델들이 있다. 이들은 안개, 적란운, 층적운, 하층 난류와 같은 현상의 물리과정을 이해하는데 연구도구로 활용된다.

1.2 수치예보모델의 원리

대기를 모델링함에 있어서 주된 제약점은 컴퓨터를 사용해야 한다는 점으로 모델에서의 대기는 컴퓨터 프로그램으로 처리할 수 있도록 구조화되어야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 대기는

- 사용하는 격자계에 기초해서 공기는 육면체나 공기덩이로 세분화되어야 하며
- 실제 대기에서 관측이 이루어지는 것과 같이 육면체에서의 대기 속성도 가능한 한 구체화 되어야 하며
- 육면체내의 공기의 운동은 그것에 작용하는 모든 힘들의 합에 의해서 이루어져야 한다.

온도, 기압 그리고 비습 등과 같이 각 공기덩이에 지정된 요소 값들은 그 공기덩이의 평균(대표)값을 의미하며 주어진 물리법칙에 따라 시간적으로 변화되어야 한다.

1.2.1 모델 해상도

1.2.1.1 공간 해상도

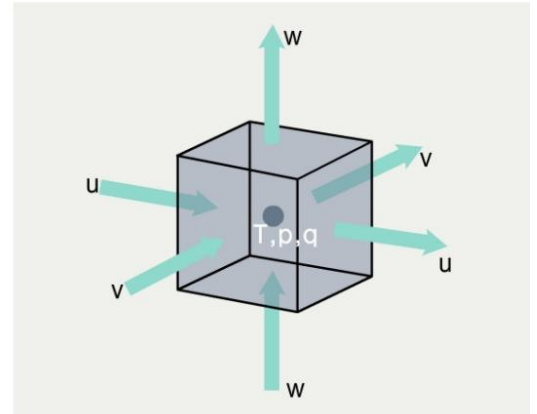
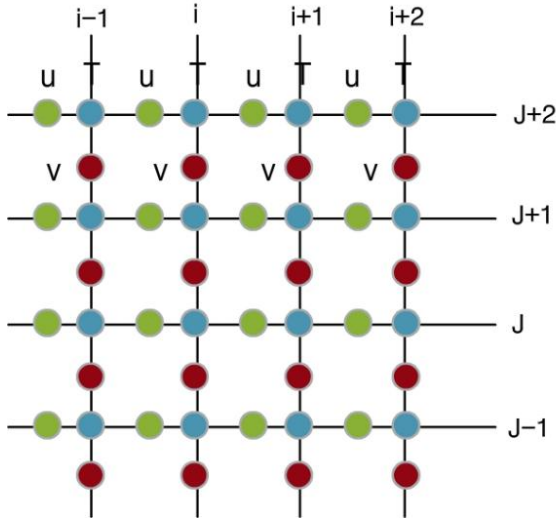
우리가 수치모델링 하고자 하는 대기는 분자규모에서부터 행성규모까지 그 규모의 범위가 매우 다양하다. 수치모델은 한정된 컴퓨터 자원을 이용하여야 하고 현재 관측시스템의 관측 한계 때문에 대기를 무제한으로 작게 분해하여 모의할 수가 없다.

여기서 공간해상도란 대기를 컴퓨터 계산에 적합하게 나타내는 격자점과 격자점 사이의 거리 즉, 격자점이 대표하는 공간규모(수백m ~ 수백km)로 이해할 수가 있으며 이를 수평해상도라 한다. 공간해상도가 우수할수록 즉, 격자점의 크기가 작을수록 수치모델이 모의할 수 있는 기상현상의 규모도 작아진다.

일반적으로 모델의 해상도는 사용가능한 컴퓨터의 성능, 모델이 모의할 영역의 크기, 모델이 모의하고자 하는 가장 작은 기상현상의 규모 등에 의해 결정된다. 즉, 컴퓨터의 성능이 우수할수록, 모의영역이 작을수록 그리고 모의하고자 하는 현상의 크기가 작을수록 모델을 고해상도로 구성하게 된다.

1.2 수치예보모델의 원리

모델대기는 연직방향으로도 수십 개의 층으로 나누어지는데 각 층은 지구 표면에 대해 고정된 개수의 격자점을 포함한다. 모델대기의 최상단 고도와 함께 연직 층수는 모델 대기의 연직 해상도를 결정한다. 각 격자점에는 각 격자점이 포함하는 대기요소들의 평균 상태를 나타내는 일련의 값들을 갖는다(그림 1.1).



[그림 1.1] 격자점들과 격자 상자

1.2.1.2 시간 분해능

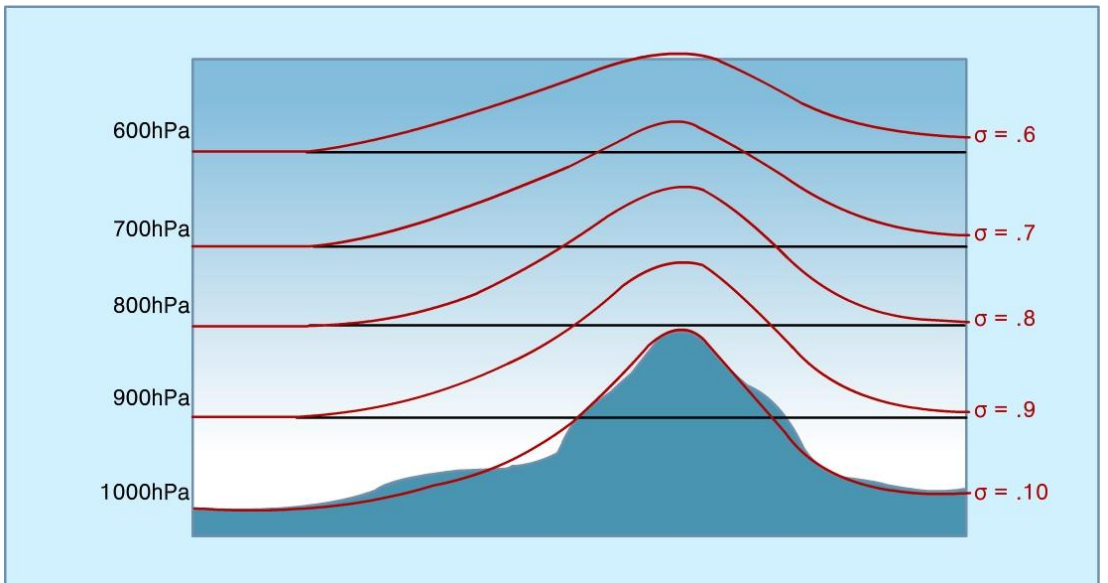
공간 분해능 문제와 관련된 것이 시간 분해능이다. 수치모델에서의 적분은 일정한 시간간격으로 연속적으로 진행되어야 하며 이 시간간격은 다시 컴퓨터의 성능에 의해 좌우된다. 시간간격(적분시간)이 짧을수록 보다 많은 수의 계산이 수행되어야 한다. 미래의 새로운 대기상태를 결정하기 위해서 각 공기덩이와 관계된 전체 방정식 계(Set)들이 이 적분시간 간격으로 동시에 계산되어야 한다. 이로부터 새로운 힘의 장이 계산되고 다음 적분에서 공기덩이들이 어떻게 이동할지를 계산한다.

시간분해능은 주어진 적분시간내에 공기덩이가 모델 격자 거리보다 먼 거리를 이동하지 않도록 공간분해능과 조화를 이루어야 한다. 만약 v 가 가장 빠른 속도이고 $d(\text{km})$ 가 격자거리라 하면 적분시간은 d/v 보다 길어서는 안 된다. 적분이 진행되는 과정에서 각 공기덩이의 이동을 따라 대기상태를 예측하는 것이 아니라 매 적분시간마다 각 격자내 공기의 새로운 상태(기압, 온도, 습도, 바람 등)들이 계산된다.

1.3 좌표계

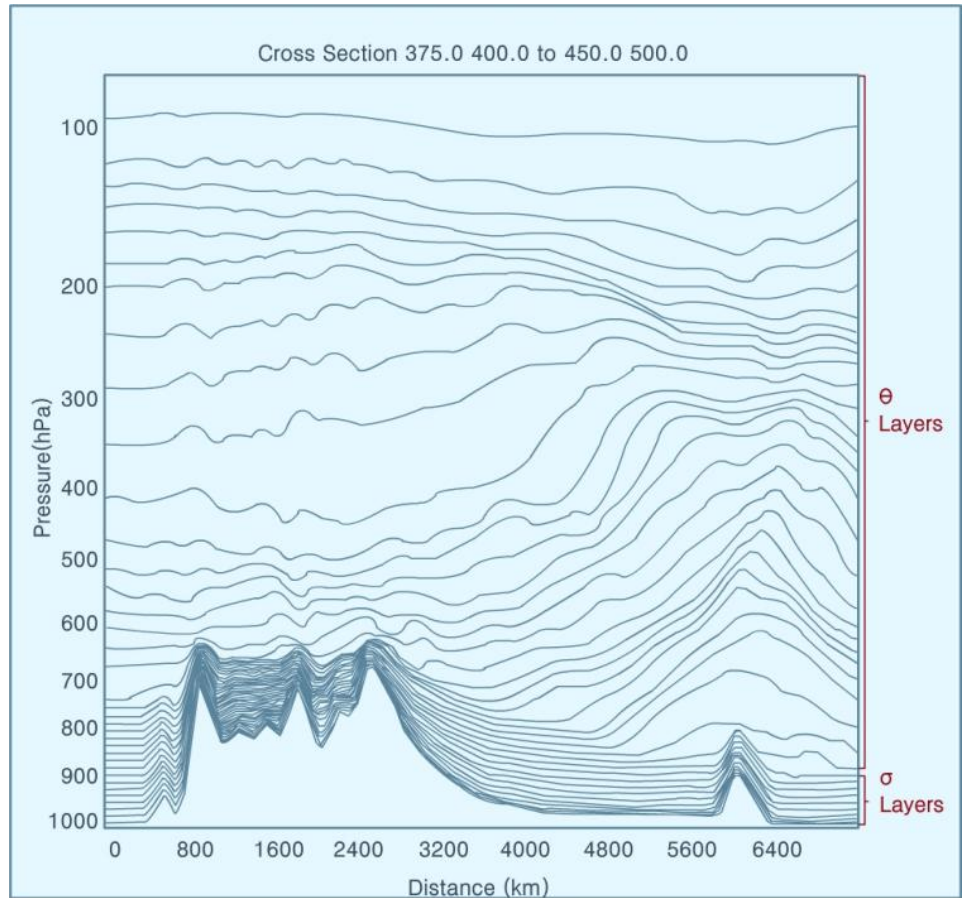
현재 우리가 수행하고 있는 관측은 3차원 공간(위도: ϕ , 경도: λ , 고도: z 또는 기압면(p))에서 일정한 시간간격으로 이루어진다. 수치모델에서 사용하는 연직좌표계는 일반적으로 사용하는 z 와 p 좌표계 대신 다음과 같은 지형을 따르는(Terrain Following) 연직좌표계들이 이용된다.

연직 좌표계로 z 나 p 를 사용하지 않는 가장 큰 이유는 지구가 평평하지 않은 관계로 높은 지형이 있는 지역에서는 공간미분항에 대해 연속적으로 계산을 하지 못하는 문제점이 발생하기 때문이다. 이 점에 대해서는 통합모델 - UM(Unified Model)에서 상세히 설명할 것이다.



[그림 1.2] 시그마 좌표계

1.3 좌표계



[그림 1.3] 잡종(Hybrid) 좌표계

연직좌표상에서의 불연속 문제를 강연하기 위해 필립스(1957)는 그림 1.2 처럼 지형을 따르는 시그마(σ) 좌표계를 개발했다. 시그마 좌표 또는 이의 변형(η : eta 좌표)은 UM 등 대부분의 수치모델에서 사용되고 있다.

η 좌표의 경우 지면근처에서는 지형을 따르는 시그마 좌표계를 사용하다가 일정고도 이상에서는 고도좌표계(은위좌표계를 사용하는 모델도 있음)를 사용한다. 이것은 지면 근처에서는 공기의 운동이 지형을 따르다가 고도가 높아질수록 지형으로부터 자유로워지는 특성을 반영한 좌표계로 잡종 좌표계(Hybrid Coordinate)라 한다(그림 1.3).

연직좌표계에서 연직층의 분포는 일정하지 않는데 주로 지상 경계층에서는 중요한 지면-대기 상호작용을 적절하게 모의할 수 있도록 간격이 조밀하다. 또한 250hPa 고도 근처에서도 상층 제트와 대류권계면의 연직구조를 보다 적절히 모의하기 위하여 연직 고도면을 조밀하게 배치한다.

1.3 좌표계

간단한 형태로 시그마 좌표는 $\sigma = p/p_s$ 로 정의되며 p 는 모델 대기에서의 임의 고도의 기압이고, p_s 는 해면기압이 아닌 지표면의 기압이다. 가장 낮은 좌표면($\sigma=1$ 일 때)은 실제 지형을 평활해서 이은 것과 같다. 시그마 모델에서 사용되는 지형경사들은 언제나 어느 정도는 매끄러움을 주목해야 한다.

그 외의 시그마 면들은 평활하게 만든 지형에 평행한 면인 모델 최하층($\sigma=1$)에서부터 등압면에 거의 평행하게 수평인 최상층($\sigma=0$)까지 점차적으로 변한다.

우리나라 기상청에서 운용되고 있는 영국기상청에서 개발한 UM 모델의 η 좌표계는 다음과 같이 정규화된 고도좌표계이다.

$$\eta = z/H$$

여기서 H 는 모델영역 고도이고 z 는 지표면으로부터의 고도를 나타낸다. 따라서 η 는 지형면에서 0이고 모델의 상단에서는 1이며 가장 최하층은 단순히 지형을 따른다. 지상에서부터 처음으로 평평한 에타 고도까지 연직고도 좌표 Z 는 다음과 같이 계산된다.

$$Z = \eta H + h(1 - \eta/\eta_l)^2$$

여기서 h 는 지형의 고도이고 η_l 은 η 면에서의 일차 상수이다.

일차상수 η_l 면 이상에서는

$$Z = \eta H$$

격자점 모델의 수평해상도는 일반적으로 남북방향과 동서방향에서의 격자점 사이의 위도와 경도거리로 표시된다.

따라서 동서방향의 격자점 크기는 고위도로 갈수록 작아지며 적도지역에서보다 중위도 지역에서 수평해상도가 더 좋다. 그렇지만 극 근처에서의 고해상도는 수치적 불안정을 유발시킨다. 이것은 결과적으로 발달하는 비정상적 단파 운동들을 제거함으로써, 즉 단파운동 장들을 제거함으로써 피할 수 있지만, 이것은 유효 해상도를 낮추게 된다.

1.4 분광 및 격자점 모델

격자점 형태가 아닌 방법으로도 수치형태의 기상장을 표현하는 방법이 있는데 그것은 구면조화함수를 이용하는 것이다. 이 함수들은 2개의 정수로 표현되는데 하나는 동서방향의 파수이고 다른 하나는 자오면지수로 남북 방향의 진폭을 나타낸다. 파수는 파장에 반비례하며 지구의 대원(둘레) 길이에 포함되는 최대 파수로 정의된다.

구면조화함수로 기상장을 표현할 때는 일정 거리상에 위치한 격자점에서의 불연속적인 값으로 나타내는 것이 아니라 이들의 형태(Shape)로 나타내는 것이다. 일반적으로 대기구조는 파 형태로 잘 근사될 수 있으며 또한 어떠한 형태든 많은 수의 파의 중첩으로 나타낼 수 있다. 해상도는 표현될 수 있는 가장 작은 파로 정의된다.

예를 들어, 해상도가 T106(파수 106에서 절단)인 모델이 있다면 이 모델은 파수가 106보다 작은 모든 파를 처리할 수 있으며 파의 거리는 약 400km 이다(지구의 둘레 약 40,000km 를 106으로 나누면 400km가 나온다). **격자점 모델**에서는 파의 형태와 이류를 적절히 표현하기 위해서는 3-4개의 격자점이 필요하므로 T106의 모델의 공간해상도는 약 100km 이다.

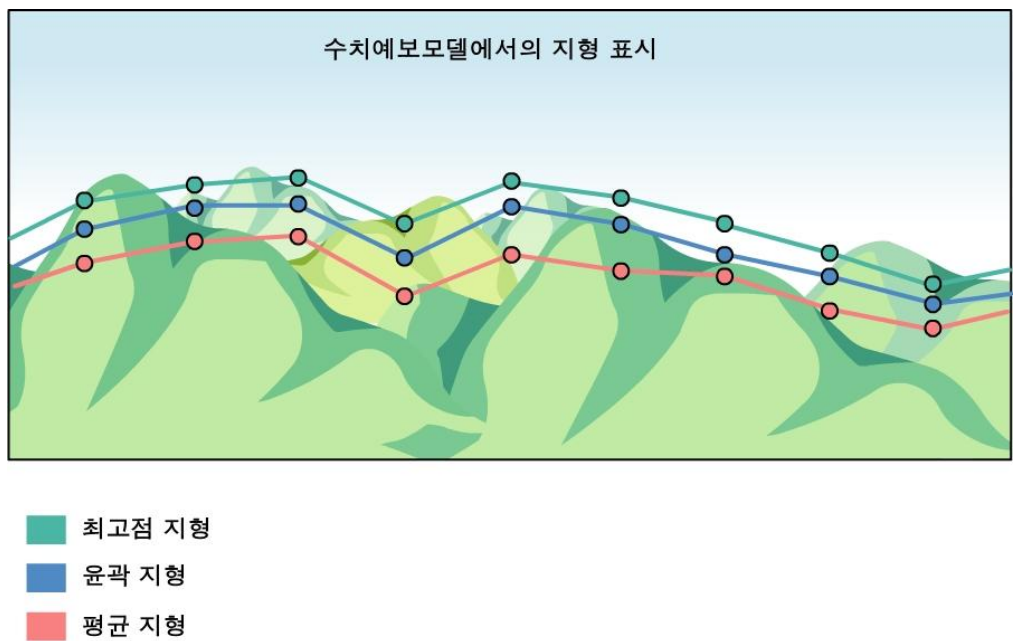
분광모델에서는 운동방정식의 해를 구하게 위해서 **유한차분 근사법**을 사용하는 대신 분광법을 사용한다. 이 방법은 계산적으로 효율적이며 정확할 뿐만 아니라 수학적으로 정교한 해를 제공한다. 이 방법의 단점은 국지적 현상, 예를 들어 구름 모수화와 같은 아격자 규모 과정, 을 계산할 수 없는 점이다. 따라서 매 계산 단계마다 격자점 모델 값에서 분광형태로, 분광모델에서 격자모델로 끊임없이 변환과정을 거쳐야 한다. 대부분의 현업용 전구 모델들은 분광법을 사용하는 반면 대부분 지역모델은 유한차분법을 사용한다. 우리나라 기상청에서 사용되는 모든 현업모델은 유한차분법을 사용한다.

1.5 경계조건 및 지면특성

모델들은 공기가 지표면을 뚫고 들어가거나 지표면 밖으로 나가지 않는 그리고 대기권 상단에서 이탈하지 않는다는 명백한 사실을 모의하여야 한다. 모델 하단과 상단에서 연직속도($d\sigma/dt$ or $d\eta/dt$)가 0이고 지형을 따른 연직좌표계(σ or η)를 사용하면 이러한 요건을 충족한다. 측면경계 조건은 실제대기에서는 발생하지 않으며 대기모델에서 정의할 때는 명백히 비현실적이다. 전구모델에서는 측면경계조건이 필요하지 않다(양 극 지역에서는 격자거리가 좁아짐으로 해서 일부 문제가 발생함). 제한 지역모델에서는 더 큰 지역모델 혹은 전구모델의 동시적분 값으로부터 내삽하여 측면경계값으로 이용한다. 경계지역 근처에서는 두 모델사이의 불일치성을 최소화하기 위하여 두 모델의 모의자료를 가중평균하여 사용한다.

모델의 지표면고도, 지형은 고해상도 자료를 격자점에 대해 평균하여 이용한다. 따라서 모델에서의 지표면고도는 각 격자점 내 실제고도의 평균에 해당된다(그림 1.5). 지형은 국지 및 종관규모의 기상현상에 큰 영향을 주는데 모델에서는 평활화된 고도를 사용하기 때문에 기상학적으로 중요한 많은 현상들이 적절히 모의되지 못한다.

모델 지표면고도는 고도의 변화가 큰 산악지역에서 실제고도와 차이가 가장 크다. 일부 모델에서는 산맥이 대기흐름에 미치는 영향을 보다 정확히 계산하기 위하여 평균고도를 격자점내 고도의 표준편차를 이용하여 높이기도 한다. 이런 유형의 지형을 에워쌈(최고점 : Envelope) 지형이라 한다.

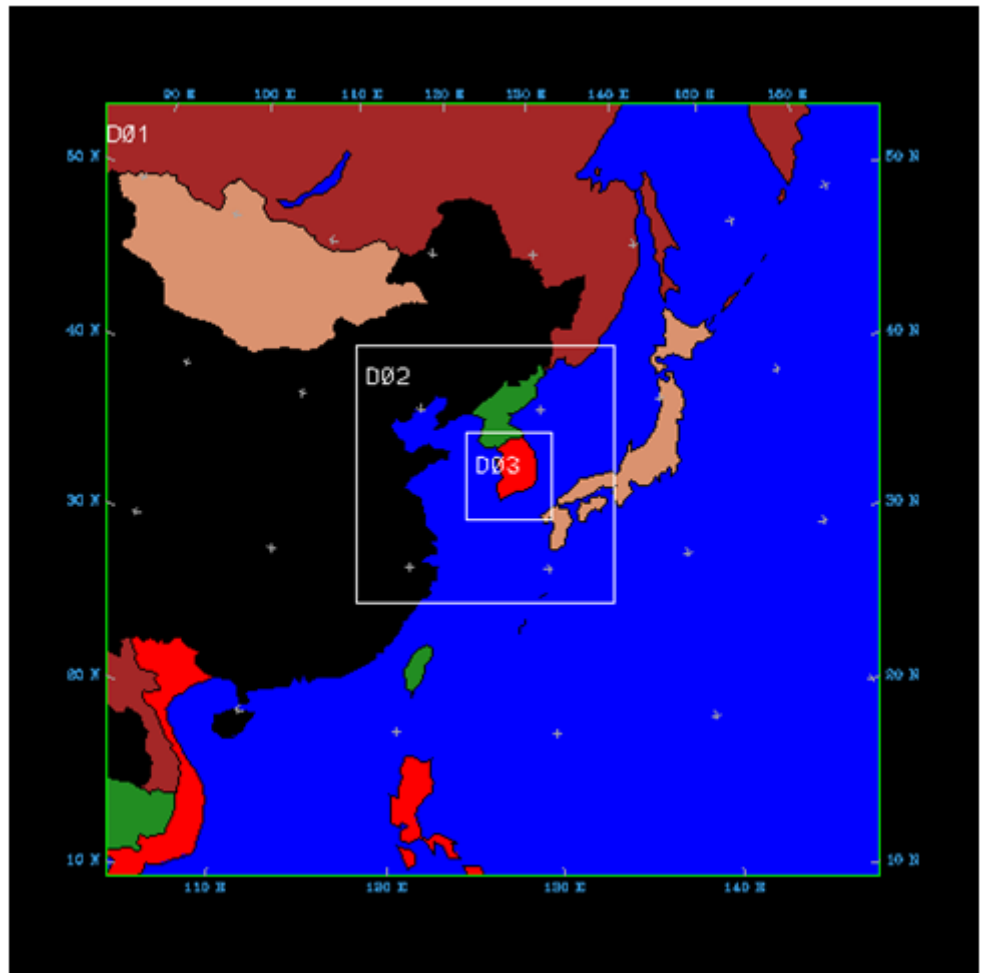


[그림 1.5] 수치모델에서 사용되는 평활화된 지형(3개의 선)과 실제 지형

1.5 경계조건 및 지면특성

1.5.1 표면 특성

각 격자점은 바다가 점유하는 비율이 50% 이하 또는 이상 여부에 따라서 육지 또는 바다로 정의된다. 해빙지역도 관측된 빙하경계선 자료를 이용하여 정의된다. 육지의 격자점에 대해서는 기후학적 분류자료를 이용하여 눈 깊이, 빙하면적, 거칠기길이, 토양 젖음도(Soil Wetness), 식생유형 그리고 토양유형 등을 처방한다. 일부모델에서는 토양 젖음도가 모델내의 수문순환에 의해 예단된다.



[그림 1.6] 중규모 모델의 육지/바다(푸른색) 마스크 예

1.6 모델링 과정

1.6.1 자료

수치예보모델을 수행하기 전에 모델내에서 대기의 초기상태를 가능한 한 정확하게 준비하는 것이 중요하다. 모든 관측자료가 늘 다 사용되는 것은 아니지만 실측자료가 다양한 출처로부터 수집되며 관측자료의 출처 예를 표 1.1에 나타내었다.

[표 1.1] 모델에서 사용되는 자료와 정보의 출처 예

자료 유형	사용된 정보
지표면 SYNOP	평균 해수면 기압, 기온, 풍향, 풍속, 기압변화량 등
해수면 SYNOP	평균 해수면 기압, 풍향, 풍속
라디오존데(TEMP)	온도, 바람, 상대습도
항공기 보고	온도, 바람
위성 탐측	온도

1.6.2 품질검사

정도의 차이는 있지만 모든 자료에는 오차가 포함되어 있다. 따라서 모든 자료들은 향후의 예측에 심각한 영향을 줄 정도로 큰 오차를 포함하고 있는지를 탐지하기 위한 품질검사를 받아야 한다.

관측자료가 수집되면 자동품질검사 시스템이 작동되며 어느 자료든 큰 오차를 포함하는 것으로 판명되면 자료동화과정에서 제외되도록 꼬리표(Flag)를 단다.

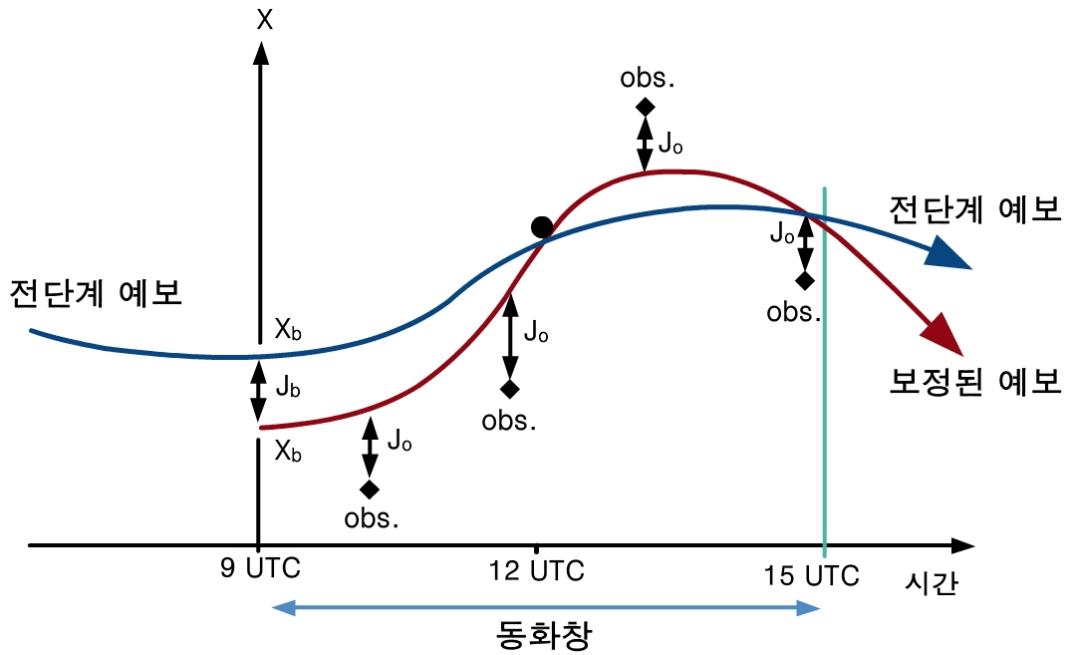
검사목록의 일부

- 정상적 표기(Correct Coding)
- 기후(Climate)로부터의 비정상적 차
- 시간적 연속성
- 배경장과의 유사성
- 인접 관측자료와의 유사성

1.6 모델링 과정

1.6.3 자료동화 - 모델대기와의 자료혼합

우리는 대부분 육지에 위치하면서 시·공간적으로 불규칙하게 분포하고 다양한 유형의 정확도가 다른 자료들을 갖고 있다. 예보를 하기 위해서 우리는 이 자료들에 포함되어 있는 정보를 대기상태에 대한 최상의 초기 추정치와 함께 각 격자점에서 혼합해야 한다. 후자는 주로 전 단계에서의 모델 모의 예측결과로 배경장이라 불린다. 이 자료동화과정은 그림 1.7에 나타내었다.



[그림 1.7] 단일 변수 x 에 대한 4차원 변분자료동화에 대한 간단화된 모식도. 동화창 시작점에서의 모델 상태 X_a 는 이어지는 단기에측과정에서 전단계의 예측장 X_b 에 대한 J_b 와 관측에 대한 J_o 사이에 통계적으로 잘 일치화되도록 조정되어짐

동화될 자료를 포함한 동화창내에서 모델이 수행됨에 따라 다양한 거리함수(그림에서 J)가 계산되어진다. 이 거리들은 모델이 배경장(J_b)과 오차특성에 따라 가중치가 부여된 관측으로부터 벗어남을 측정한다.

이 거리들의 함수로 비용함수가 정의되며 변분분석이라 불리는 수학적 과정으로 최소화된다. 비용함수의 속성은 동화창 시작점에서 모델 상태에 대한 최상의 추정치를 산출하기 위하여 변분과정이 정확도가 낮은 자료보다 높은 자료에 더 적합하도록 하는 것이다.

1.6 모델링 과정

이런 유형의 자료동화는 관측자료의 시공간상의 퍼짐(Spread)을 고려하기 때문에 4차원 변분 자료동화라 불린다. 우리나라 기상청의 현재 스킴은 2010년 5월에 도입된 4차원 변분자료동화이다(기상청 동화방법). 4차원 변분자료동화 이전의 자료동화는 그림에서 시간차원이 없었고 관측과 배경장 모두가 동시에 유효하다고 가정하였기 때문에 3차원이었다.

1.6 모델링 과정

1.6.4 예보모델

실행 중(Evolving)인 모델대기로 자료동화를 하였으므로 이제 우리는 미래에 대해 모델을 수행시킬 단계에 와 있다. 모델들은 모델에서 처리할 수 있는 형태의 자료를 필요로 함으로 NWP 변수들이 정의된다. 이 변수들은 원시방정식들에 의해 처리되며 이 과정을 통해 대기는 일정시간(적분시간 간격) 후의 미래대기로 변화해간다. 산출물은 요구될 때마다 사용자가 원하는 어떤 형태로도 제공할 수 있다.

1.6.4.1 NWP 변수들

주어진 시간과 장소에서 대기의 물리적 상태를 나타내기 위해서는 대기의 운동, 질량 그리고 수분에 대해 기술하여야 한다. 모델이 직접 산출한 변수들, 실제 대기에서 직접 관측된 변수들 그리고 1차 모델 산출물로부터 진단된 변수들은 서로 구분이 되어야 한다.

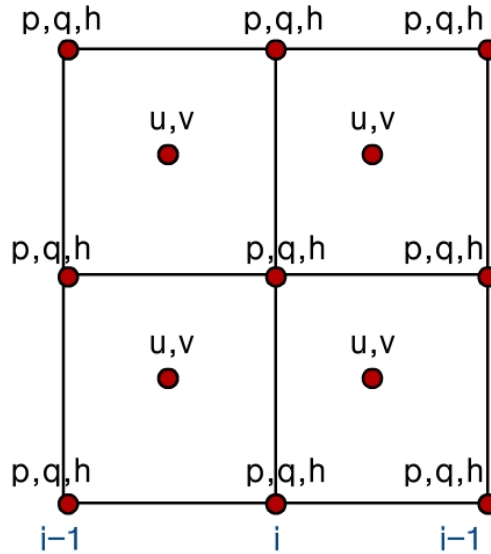
[표 1.2] NWP 변수들

	운동	질량	수분
실제대기에서 직접 관측된 변수들	dd, ff	p, p^*	T_d
모델예보에서 직접 산출된 변수들	u, v	p, p^*, θ	q, 구름 물 & 얼음
모델결과로부터 진단된 변수들	$d\sigma/dt, d\eta/dt$	ρ	강수

기본적인 수분변수인 비습(q)은 더 많은 모델에서 구름 내 액체수 함량과 얼음 함량의 명시적 표현으로 점점 세밀하게 표현되고 있다. 모델에서 사용되는 모든 기본 변수들은 각 격자점에서 표현된다.

하지만 많은 수의 모델에서는 바람장(u, v)을 격자점들 사이에 위치하도록 하는 아라카와(Arakawa) B 격자라고 하는 변형된 격자계를 사용한다(그림 1.8). 이 방법은 한 점에서 모든 변수를 갖고 있을 때 발생하는 계산상의 문제점을 피하기 위한 것이다. 또한 이 방법은 두 격자점 사이의 기울기(Gradient)에 바람을 위치시킴으로써 바람을 보다 잘 나타낼 수 있게 해준다.

1.6 모델링 과정



[그림 1.8] 아라카와(Arakawa) B-격자, 선이 교차하는 곳이 격자점

1.6.4.2 원시방정식

원시방정식계는 다음의 조합을 나타낸다.

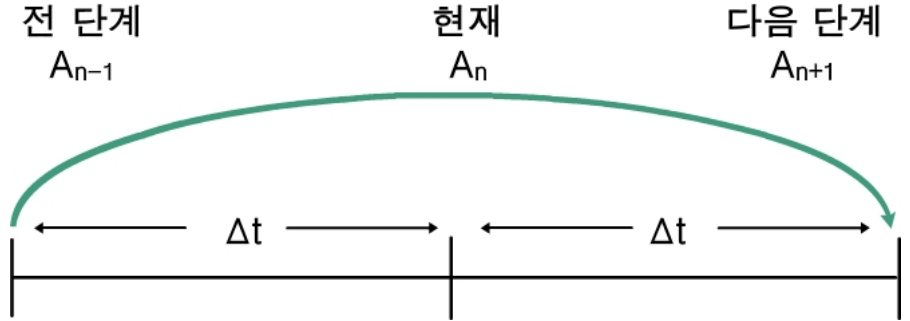
- 수평운동성분에 대한 뉴턴(Newton)의 제2법칙
- 이상기체 방정식(상태방정식)
- 열역학 제1법칙
- 질량보존의 법칙(연속방정식)

이들은 정역학평형상태의 운동에 적용된다. 이 방정식들은 대기의 기본역학을 설명하는데 충분하다. 또한 대기의 보다 완벽한 설명을 위하여 물 관련 성분들의 행태를 기술하는 방정식도 포함된다..

1.6 모델링 과정

1.6.4.3 예보방정식

시스템이 시간상으로 어떻게 진화해 가는지를 이해하기 위해서 시간 n 에서의 변수 A 를 생각하자. 시간상으로 변화해 가기 위해서 우리는 A_n 에서 A_{n+1} 로 이동하기를 원한다.



[그림 1.9] 모델에서 시간상의 3 표본의 예

이 문제는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$A_{n+1} = A_{n-1} + 2\Delta t \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)_n$$

여기서 Δt 는 모델의 적분시간간격이고 A_{n-1} , A_n , A_{n+1} 는 각각 연속적 시간상에서의 A 값을 의미한다.

우리는 $\left(\frac{\partial A}{\partial t} \right)_n$ 을 알아야 하는데 이것은 시간변화율을 공간기울기와 관련시키는 원시방정식으로부터 산출된다. 예를 들어 단순화된 뉴턴(Newton)의 제 2법칙은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

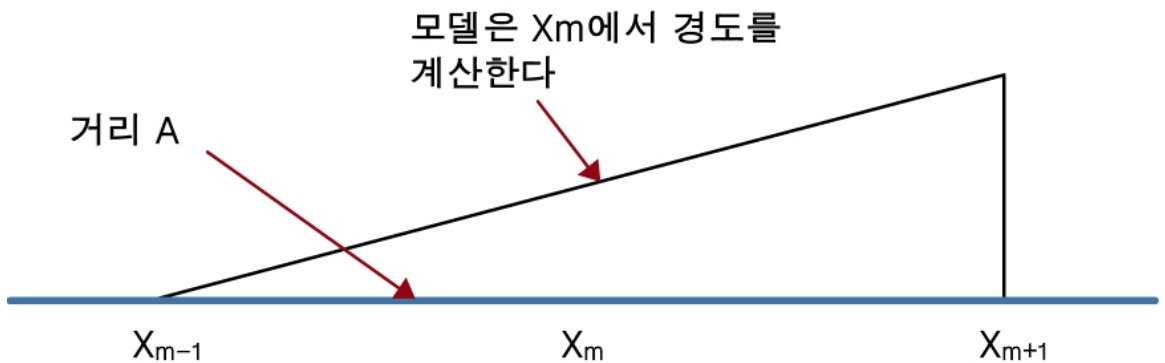
1.6 모델링 과정

이것은 공기덩이의 가속도를 지구자전에 의한 전향력과 공간상의 기압경도력에 연결시킨다. 따라서 우리가 시간 n 에서 공간상의 기압경도력을 계산할 수 있다면 시간 $n+1$ 에서의 바람(u)을 계산할 수가 있다.

변수 A 와 격자간격일 Δx 때 격자점 x_m 에서의 공간상의 경도는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_m = \frac{A_{m+1} - A_{m-1}}{2\Delta x}$$

우리는 이것을 아래 그림 1.10에서와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 1.10] 공간 차분화의 예

예를 들어 우리가 격자점 x_m 에서 기압경도력을 계산하고 싶다면 그 모델은 두 격자점(x_{m-1} , x_{m+1})사이의 경도를 계산하여야 한다. 운동의 규모가 작아질수록 정역학평형 근사가 점점 적합하지 않게 된다. 따라서 단일 대류운동규모를 모의할 수 있는 고해상도 모델들에서는 이 방정식들을 모델 방정식으로 사용하지 않는다. 비정역학계에서는 기압과 고도 사이에 단순한 관계가 성립되지 않기 때문에 방정식의 복잡성이 증가된다.

1.7 모수화

예보과정에서 해가 계산되는 운동에 대한 원시방정식들은 다양한 규모의 대기운동을 설명할 수 있다. 하지만 방정식의 해를 구하기 위해서는 유한 차분근사가 사용되어야 하고 연속적인 기상장이 몇 개의 불연속적인 수들의 조합으로 표현되는 사실에 의해 정확도가 한계를 가질 수밖에 없다.

모델에서 대부분의 대규모 운동은 잘 표현이 되지만 규모가 격자점 규모로 작아질수록 표현에 문제가 생기며 특히 아격자 규모의 운동은 완전히 모델의 분해능 밖이다. 소나기 구름과 같은 작은 규모의 현상들은 국지적인 기상현상에 큰 영향을 줄 수 있으며 나아가 전체 대기 시스템의 가장 중요한 요소일 수도 있다. 그러한 현상이 발생할 때 모델에서 그들의 평균효과가 대규모 운동에 포함되도록 그들의 영향은 **모수화**되어야 한다. 다음 모수화 되는 과정들의 예이다.

1.7.1 대류

대류는 대규모 전체 대기에서 수분과 열의 분배에 중요한 역할을 한다. 각 대류세포의 영향을 각각 명시적으로 나타낼 수가 없기 때문에 이를 모수화 스킴으로 나타내어야 한다.

1.7.2 난류혼합

에디 운동은 특히 바람의 시어가 강한 지역에서 운동량, 열 그리고 수분의 수평 및 연직 확산에 중요한 영향을 미친다. 이 난류는 다양한 규모로 발생하며 대규모 흐름에서의 운동에너지를 소산시킨다. 그러한 과정을 통해서 난류는 유체의 흐름에 마찰 저항을 주며 이러한 과정은 특히 경계층에서 중요하다. 여기서 난류운동은 지구표면으로부터의 열과 수분을 자유대기로 연직 수송시키는 역할을 한다.

1.7 모수화

1.7.3 중력파

중력파는 안정적으로 성층화된 대기에서 발생할 수 있다. 대기에서 파동운동과 같은 이들은 불균일한 지형에 의해 시작되며 산맥의 풍하쪽에서 발생하는 풍하파(Lee Wave)와 구별된다. 이들은 상당히 높은 고도까지 전파될 수 있으며 평균류와 상호작용하여 평균류로부터 운동량을 뽑아내면서 소멸한다. 이들은, 특히 고위도 지역에서, 최소한 경계층에서 작용하는 마찰력과 같이 상층대기에 중요한 항력을 가한다.

파동의 규모는 난류 에디보다는 크지만 아격자 규모이기 때문에 이들의 영향은 모수화되어야 한다. 모델에서 중력파 항력이 포함되기 전까지는 상층 편서풍을 계통적으로 강하게 예보하는 경향이 있었으며 그 결과 모델대기에서 시스템들이 너무 빨리 이동하고 지상저기압은 너무 강하게 모의되었다.

1.7.4 복사

복사에 의한 열전달에 포함된 과정은 서로 다른 표면(구름을 포함)과 대기 구성요소(오존, 수증기)에 의한 파장별 복사 에너지의 방출, 흡수 그리고 반사이다. 이 과정들은 모수화하기에는 매우 복잡하고 계산시간도 많이 소요된다.

1.7.5 강수

강수는 예보에 있어서 확실히 중요한 요소이지만 핵심적인 과정이 마이크로 규모여서 명시적으로 나타낼 수가 없다. 응결 또는 동결된 물은 대기에 구름으로 떠있거나 강수로 낙하한다. 구름이 다양한 파장대의 복사와 상호작용하듯이 강수가 증발함에 따라 잠열과정을 통하여 주변에서 열을 흡수할 것이다. 이 모든 영향들과 다른 것들이 모수화 스킴을 통하여 나타내어져야 한다.

1.8 카오스 특성의 관리

1980년대에 카오스 이론이 기상학 연구분야에서 전반적으로 받아들여졌다. 이 이론은 수치 모델러들이 3-4일 후의 일기예보 문제에 대한 해답을 구할 수 없다는 점을 깨닫게 하였다. 따라서 리차드슨(L. F. Richardson)의 아이디어는 결코 실현될 수 없는 데 그것은 모델이 아무리 우수해도 거기에는 유일한 해가 존재하지 않기 때문이다. 그 결과 특히 3일에서 10일에 대한 예보법이 결정론적 기법(유일한 해)에서 확률론적 기법(가능한 해의 범위)으로 변경되었다.

1.8.1 앙상블 예보

이 예보법은 카오스 이론이 제기한 한계에 대응해서 발달되기 시작하였다. ECMWF는 지난 수십년 동안 이 분야 연구에서 선도적인 역할을 해왔다. 기본적인 접근법은 아래와 같다.

- 카오스 이론은 초기조건과 모의결과에는 항상 불확실성이 있다고 주장한다.
- 하나의 모델을 실행시키면 가능한 다양한 해 중에서 하나의 해만 산출한다.
- 서로 다른 예보 상태에 대한 확률을 추정하기 위해서는 많은 수의 모델을 실행시켜야 한다.
- 이들 다양한 모델들의 모의결과들은 대기의 예측 가능성에 대한 척도를 제시할 것이다.
- 다양한 모델결과들을 분석하면 가장 가능성이 높은 대기상태를 찾는 데 도움이 될 것이다.

연습문제

1. 수치예보의 원리를 설명하시오.
2. 격자점모델과 분광모델의 특징과 장단점을 설명하시오.
3. 모수화의 정의와 필요성 그리고 모수화가 필요한 과정을 제시하시오.
4. 연직좌표계로 시그마(σ) 좌표계를 정의하고 이러한 좌표계가 필요한 이유를 설명하시오.
5. 지면경계조건 중 하나인 지형을 처방하는 방법에 대해 설명하고 실제 지형과 처방된 지형사이의 차이가 수치모델의 모의수준에 미치는 영향에 대해 논하시오.

2장. 예측성 및 앙상블

2.1 서론

2.2 카오스란 무엇이며, 왜 중요한가?

2.3 앙상블 시스템의 설계

2.4 현업에서의 앙상블

학습목표

- 대기현상의 비선형적 특성을 이해한다.
- 앙상블 방법의 필요성과 앙상블 원리를 이해한다.
- 앙상블 예측 시스템 구현 방법을 이해한다.
- 앙상블 예측 시스템의 예측 결과 활용방안을 안다.

2.1 서론

기상예보에 있어서 **수치예보** 또는 **수치일기예보**(Numerical Weather Prediction : NWP)는 아주 자신만만한 용어이다. 이 용어는 과거 수치모델 개발자들의 기상예측에 대한 낙관성을 반영하고 있다. NWP 모델들은 한 때 대기 예측의 모든 문제들을 풀어줄 해결책같이 보였었다. 만약 이 모델들이 완벽하다고 가정하면, 이를 통해 대기의 모든 변화상황을 완벽하게 설명할 수 있을 것으로 보였기 때문이다.

그러나 상황은 점차 달라지기 시작했다. 대기의 변화상황이 소위 ‘카오스’적으로 변한다는 것에 주목함에 따라, 학자들의 관점 또한 달라지기 시작했다. 또한 우리는 대기의 현재 상황조차 ‘아주 정확히’ 알 수 없다는 것도 깨닫게 되었다. 그 결과 대기 상태 변화에 대한 예측의 신뢰성에 의문이 생기게 되었다. 특히 5일 전후를 기준으로 하는 중기 예측에 대한 자신감이 감소했다.

그로 인해, NWP 모델을 사용하는 많은 대기과학자들은 대기의 작은 상황 변화에 주목하기 시작했고, 이를 예측 가능한 궁극적인 대기의 상황이라고 고려하게 되었다. 이를 **앙상블 예측**(Ensemble Forecasting)이라 한다.

앙상블 기술은 주로 중기 예측에 사용된다. 이 교재 또한 중기 예측에 관하여 집중할 것이다. 그러나 이러한 아이디어는 추후 단기 기상 예측 또는 기후 예측 같은 다른 분야에도 사용될 수 있을 것이다.

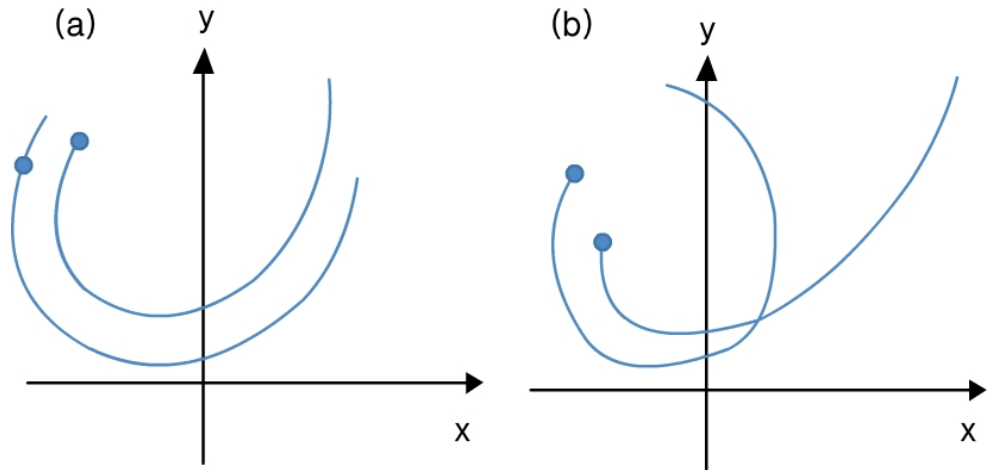
2.2 카오스란 무엇이며, 왜 중요한가?

카오스 체계(Chaos System)란 현재 상황에서의 한 작은 변화가 나중에는 전체 상황에 있어 커다란 변화를 야기할 수 있다는 것을 의미한다.

이는 ‘결정론적 혼돈(Deterministic Chaos)’ 이라 정의하는 것이 이해하기 더 쉬울 것이다. 카오스 체계란 어느 정도 결정론적인 성격을 지니고 있으며, 때에 따라서 그리고 시간이 지남에 따라 유사 결정론적 성격을 보여주기 때문이다. 그러나 그 전에 숙고해야 할 점은 결정론의 기준을 어느 정도로 잡아야 할지를 정의하는 것이다(체계의 예측가능성 또한 마찬가지). 아마도 초기의 상황변화에 따라 다양할 것이다.

2.2.1 간단한 예시

그림 2.1은 카오스 원칙을 나타낸 것이다. 위상 공간에서 계의 모든 가능한 상태의 궤적(Locus)을 체계의 끌개(Attractor of the System)라고 한다. 예측성의 수준은 끌개상에서 가능한 최종 상태의 퍼짐 정도로 주어진다. 그림 2.1의 경우, 종점으로부터 두 선 사이의 거리가 주어져 있다.



[그림 2.1] 위 그림은 두 개의 변이점 (x, y) 을 통하여 대기의 간단한 변화 형태를 나타낸 것임. 대기는 초기의 작은 차이를 갖는 왼쪽 두 점에서부터 차츰 변화를 하게 됨. (a)와 (b)는 서로 다른 경우의 수를 의미함. (a)의 두 곡선은 비슷한 경로를 따라 감. 이러한 대기는 예측가능성이 매우 높음. (b)의 두 곡선은 많이 다른 경로를 보여주는데, 이런 대기는 예측가능성이 매우 낮음

2.2 카오스란 무엇이며, 왜 중요한가?

서로 다른 초기조건의 영향에 대한 모든 실험들이 수행될 수 없으므로 대기가 혼돈체계 구성을 따른다고 확실히 증명되지는 않았으며 실제 대기 상에 끌개가 존재하는지는 미지수다. 그러나 대기가 혼돈 체계와 비슷한 구성인 것은 확실해 보인다.

2.2.2 함의(Implication)

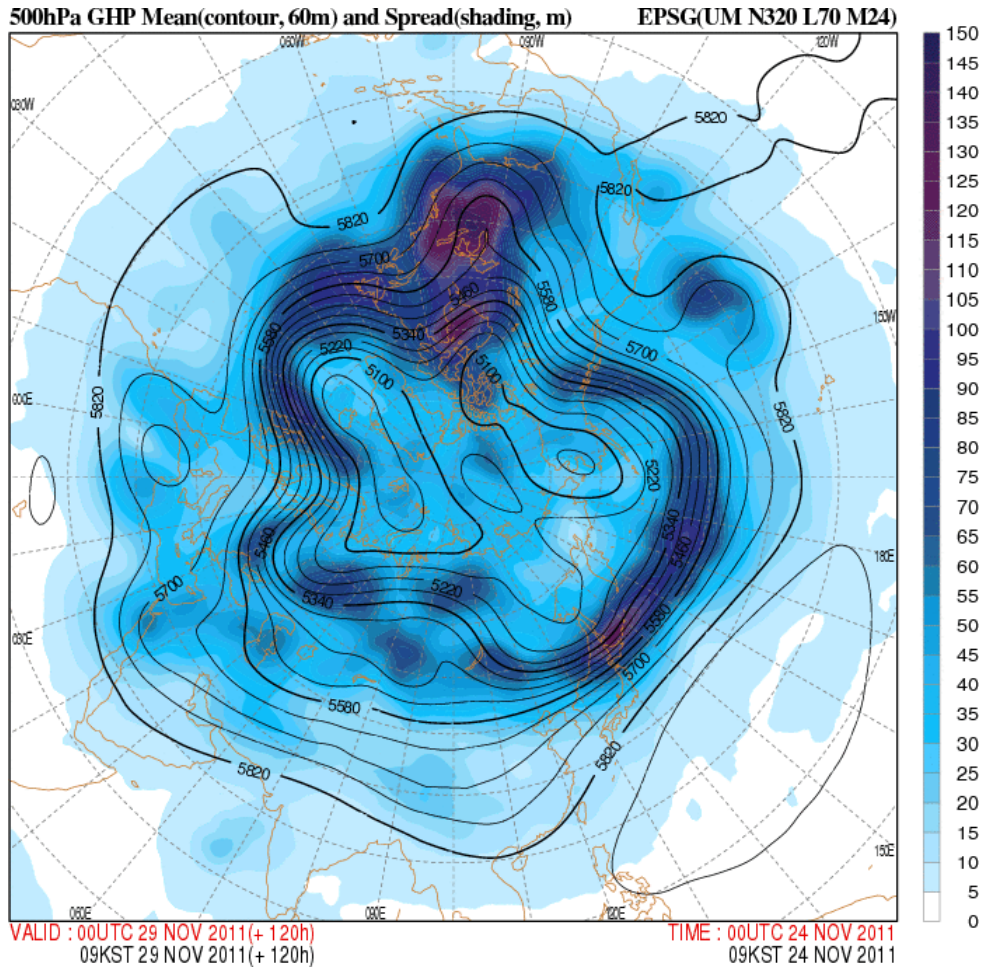
실제 대기의 예측 가능성은 그때그때 다르지만, 직접 측정될 수 있는 것은 아니다. 그러므로 앙상블 예측을 통하여 이를 평가하는 것이 제일 적절하다고 할 수 있다. 혼돈의 개념정의는 앙상블 예측에 있어 가장 기초적인 접근방법이다. 약간의 차이를 갖는 초기조건들을 이용하여 많은 NWP 모델의 실행을 통하여 앙상블은 다음을 결정할 수 있을 것이다.

- 대기의 종결상황에 대한 예측 가능한 경우의 수
- 이러한 종결상황의 분포도를 통한 대기 예측가능성

2.2.3 현업 예

그림 2.2는 기상청의 전구 앙상블 모델 시스템(UM)으로 2011년 11월 29일에 120시간 예측한 500hPa 고도와 앙상블 멤버간 퍼짐(Spread)을 나타낸 것이다. 등고도선의 간격은 60gpm이며 음영으로 표시된 지역은 앙상블 멤버간에 고도 편차(퍼짐)가 큰 지역들이다. 앙상블간 편차는 북미 지역과 오토츠크해 지역에서 100gpm 이상으로 크게 나타나고 있으며 상대적으로 만주지역에서는 편차가 작게 나타나고 있다. 앙상블이 어떻게 구성되는지에 관한 자세한 사항은 다음 절에서 다루기로 한다.

2.2 카오스란 무엇이며, 왜 중요한가?



[그림 2.2] 기상청 전구 모델의 500hPa 고도에 대한 120시간 예보에서 등치선의 분포로 음영이 있는 지역은 앙상블 멤버간에 상당히 큰 편차가 있는 지역을 나타낸다.

표준편차가 커질수록, 불확실성이 높아지고 따라서 대기의 예측가능성은 떨어진다.

불확실성이 커지는 영역은 종종 상층 기압골이 발달하는 것과 관련이 있음을 주의 깊게 보아야 한다. 위의 예시에서는 1개 사례만을 보였기 때문에 예측의 불확실성(퍼짐)이 시간에 따라 어떻게 이동하는가를 볼 수는 없지만 시간별로 역추적해보면 앙상블 멤버간에 변동이 심한 지역이 어디인지를 알 수 있을 것이다.

2.3 앙상블 시스템의 설계

2.3.1 앙상블 시스템의 필요성

NWP 예측 모델 실행의 필수 전제는 현재 대기의 초기상태를 분석하는 것이다. 이는 관측자료를 모델에 동화함으로써 얻어진다. 이 분석에는 오류가 있을 수 밖에 없으며 이는 ‘불확실성의 구(Ball of Uncertainty)’로 불린다. 대기가 갖는 비선형성으로 인하여 초기조건의 작은 차이가 적분시간이 길어질수록 전혀 다른 상태로 변화해 갈 수가 있다. 또한 현재 우리가 사용하는 모델들은 공간해상도, 강수 및 지면 물리과정 모수화 등 모든 면에서 완벽하지가 않다. 따라서 불완전한 초기조건과 모델의 상호작용으로 예측시간이 길어질 수록 예측수준이 낮아질 수 밖에 없다. 즉, 예측결과의 불확실성이 증가하게 된다.

이 NWP 모델들의 효율적으로 앙상블하기 위해서는 다음과 같은 조건이 필요하다.

- 이러한 초기조건과 불확실성을 모두 반영할 수 있는 다양한 초기조건의 표본이 필요하다. 분석에 있어서 어떤 변화는 결과적으로 사소한 차이만 보였지만, 다른 지역에서의 변화는 결과적으로 커다란 변화를 보였다. 당연히 이 후자 그룹들을 효과적으로 초기조건의 표본화로 하는 것이 바람직하다.
- 각 섭동들이 동일한 확률 크기를 대표할 수 있도록 섭동을 만드는 것이 중요하다. 이는 차후 다양한 산출물들의 확률에 대한 근거로 해석될 수 있어서 결과들을 해석함에 있어 유용하다.
- 위의 것들을 최소한의 비용으로 해야 한다(즉 최소한의 계산으로써 해야 함).

2.3 앙상블 시스템의 설계

2.3.2 앙상블을 선택하는 방법

주어진 ‘최상의 추정’ 분석(우리는 이를 기준이라 부름), 다른 앙상블 멤버를 정의하기 위한 이러한 최상의 추정분석으로부터 섭동을 추가하기 위한 다양한 방법들이 이용되고 있다.

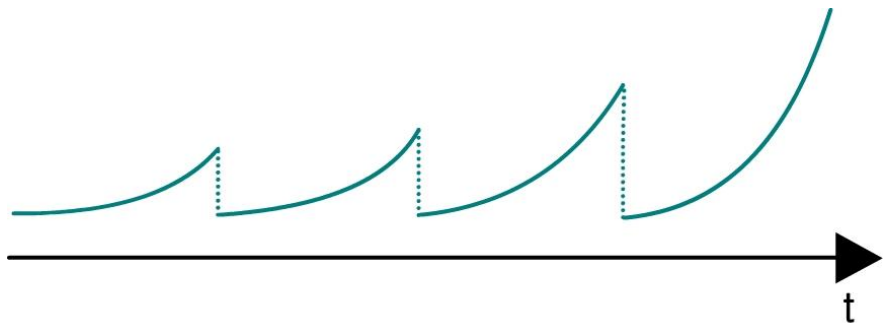
2.3.2.1 무작위법

이 방법은 빠르고 쉽지만, 비효율적이라는 단점이 있다. 앙상블은 기준으로부터 크게 벗어나는 결과들을 멤버화하기보다는 기준에 수렴하는 앙상블 멤버들에 지배되기 쉽다. 하지만 예측의 가능한 퍼짐에 대해 유용한 정보를 제공하는 것은 기준으로부터 크게 벗어나는 멤버(초기조건)들이다.

2.3.2.2 증식법

무작위 선택의 한계를 뛰어넘기 위해, **기준예보**로부터 효과적으로 벗어나는 대기의 경로를 잘 파악할 수 있는 방법이 필요하다. 성공적인 것으로 알려진 한 방법이 바로 **증식법**(Breeding)이다.

분석 자료로부터 추출된 한 쌍의 무작위 섭동(분석 오차 범위내)이 초기에 계산된다. 이러한 분석들은 주어진 순환의 수만큼 추후 예보-분석의 순환을 통하여 실행된다. 즉, 모델들은 섭동분석으로부터 수시간에 대해 예보로서 실행되고 그 후 관측자료가 동화되고 하는 이러한 일련의 과정들이 수회 반복된다. 이러한 과정은 기준예보로 재수렴하는 경향을 제거하는 데 효과가 있는 것으로 알려지고 있다(즉 빠르게 성장하는 모드를 ‘증식’). 그 후 최종 예보가 실행되는데 이러한 과정은 아래 그림 2.3에 나타내었다.



[그림 2.3] 앙상블 예보를 위해 빠르게 성장하는 모드를 ‘증식’하는 과정을 나타내는 개념도. 수평선으로부터의 곡선의 벗어남은 앙상블 멤버가 기준적분(Control Integration)으로부터 벗어남을 의미한다. 위 그림은 4회의 예보-분석 순환의 구현을 보여주고 있다. 각 분석에서 모델은 기준적분으로 수렴하게 하였음에도 연속적 예보에서 기준으로부터의 벗어남은 증가하고 있다.

2.3 앙상블 시스템의 설계

2.3.2.3 고유 벡터

이는 증식법보다 좀 더 복잡하고 정밀한 방법이다. 이 방법은 섭동의 최대 성장 방향을 명시적으로 찾는 것을 포함한다(초기분석의 **고유 벡터**라고 한다. 약자로는 SV).

SV를 취득하는 법에 대한 자세한 설명을 생략하면, 일반적인 SV에 대한 접근방법은 다음과 같다. 처음 분석장을 이용하여 48시간의 예보를 수행한다. 종료 상태로부터 수반모델을 이용하여 48시간의 ‘되감기(역) 예보’를 수행한다. 순방향 예보의 시작과 종료 시점 상태로부터 선형 행렬이 계산될 수 있는데 이 행렬에 초기상태를 곱하면 종료 상태를 제공할 것이다. 두 번째 행렬은 되감기 예보를 위해 계산된다. 이 선형 행렬로부터 고유벡터가 계산된다.

수반 모델 사용의 필요성은 많은 암시를 갖는다. 이는 단순화된 모델을 필요로 하며, 특히 물리과정들이 보다 단순하게 나타내어져야 한다. 모델의 운영 버전 기준으로 해상도가 떨어질 가능성도 높다. 이러한 단순화에도 불구하고, 고유벡터 방법은 여전히 계산시간이 많이 소요되고 증식법보다도 고려해야 할 것이 많다.

2.3 앙상블 시스템의 설계

2.3.3 모델의 오류

앞 절의 내용은 분석에서 발생한 오류가 모델에 미치는 영향에 대해 이야기 하였다. 물론 예보의 오류에 있어 다른 원인도 존재한다. 즉 모델 자체의 오류이다.

그러나 이것 또한 앙상블 방법으로 해결할 수 있다. 서로 다른 예보기관들에서의 NWP 모델들이 종종 서로 다른 예보를 하기 때문에, 특히 중기 예측의 경우, 여러 모델의 결과를 종합하여 사용하는 것은 실제 대기의 가능한 해를 추출하는 다른 방법을 제공한다.

2.3.4 멤버 수 vs 해상도

앙상블 시스템을 설계하는데 있어 고려해야 할 또 다른 점은 가능한 한 많은 수의 앙상블 멤버를 갖는 것과 가능한 높은 해상도(신뢰성)의 멤버(그러므로 멤버 수는 줄어든다)를 갖는 것 중 어느 것이 더 중요한 지다. 사실 이 문제의 정답은 전자와 후자를 적절하게 조화시키는 것이라 하겠다.

2.4 현업에서의 앙상블

2.4.1 현업 시스템

현재 중기 예측을 위해 전구 모델들의 현업용 앙상블을 운영하고 있는 NWP 센터는 다음과 같다.

- ECMWF : 고유벡터 접근법을 사용하고 50개의 앙상블 멤버로 10일 까지 예보한다.
- NCEP : 증식법을 사용하며 16일까지 예보하고 17개의 앙상블 멤버들이 있다.
- 현업운영 중인 나라 : CMC(캐나다), Met Office(영국), JMA(일본), Meteo France(프랑스), CMA(중국)

많은 다른 국가들 또한 앙상블 시스템을 개발하고 있다. 증식법은 비용문제로 인해 가장 많이 사용하는 방법이다.

표 2.1은 기상청의 앙상블 예측 시스템의 특성과 변천과정을 나타낸 것이다. 2011년 이전까지는 GDAPS 기반의 앙상블 예측시스템을 운영하다가 2011년 3월 이후부터는 통합모델 기반의 앙상블 예측시스템을 운영중이다. 초기장은 4차원 변분법에서 생성된 자료를 사용하여 연직 층수도 50개에서 70개로 세분화하고 있다. 섭동방식도 증식법에서 ETKF를 사용하고 있으며 멤버수도 16개에서 24개로 크게 늘려 운영하고 있다. 또한 모델 자체의 오류를 반영하기 위하여 물리변수가 오차범위 내에서 변경이 가능하도록 하고 있다.

[표 2.1] 기상청에서의 앙상블 예측 시스템의 특성과 변천과정

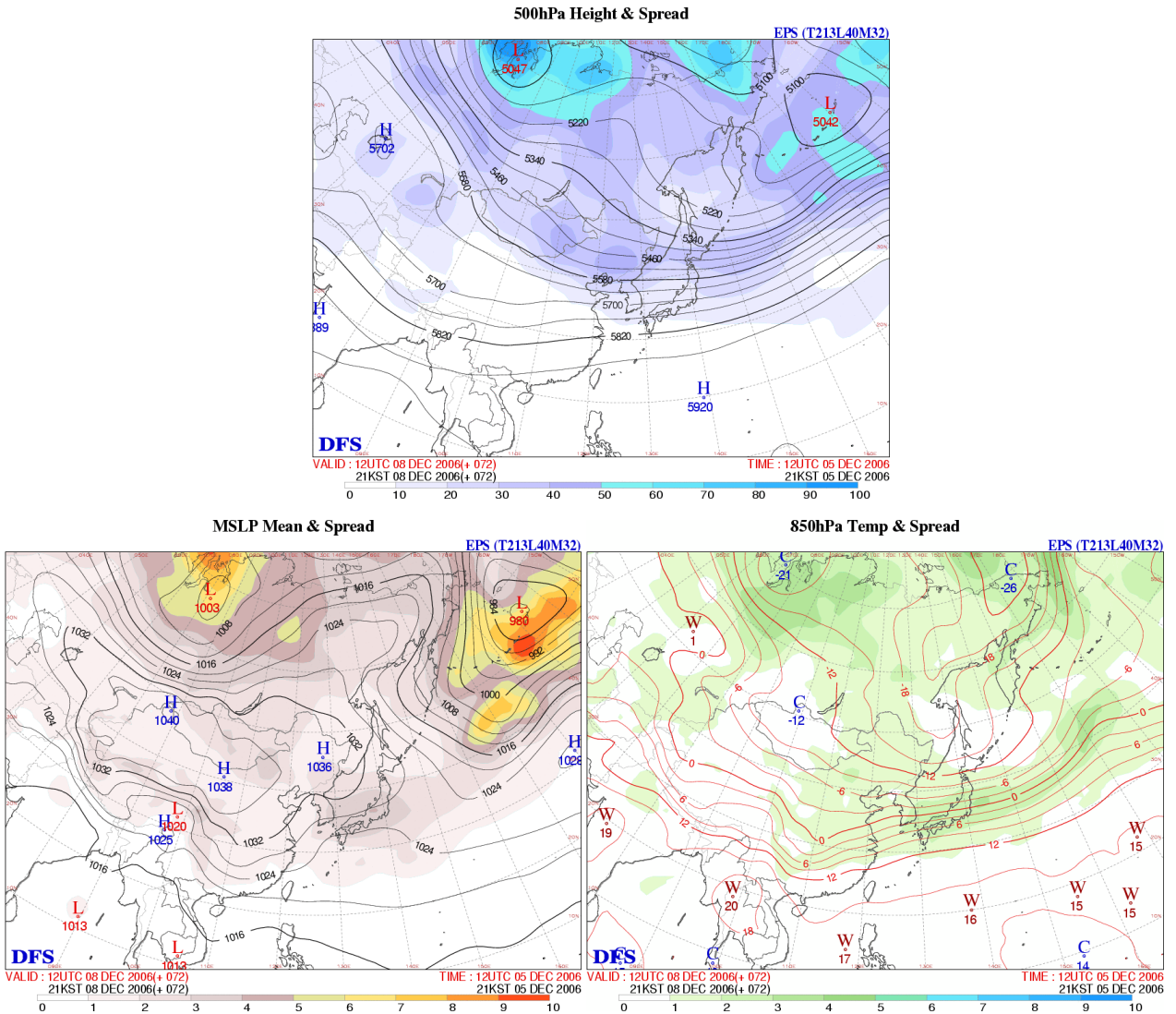
운영시기	2001.3.1	2003.11.1	2006.7.1	2008.9.1-	2011.3-5.	2011.5-
슈퍼컴	1 st (NEC SX5)		2 nd (Cray x1E)		3rd (Cray XE6)	
자료동화	2dOI → 3dOI	3dOI → 3dVar	3dVar	3dVar(self-cycle)	4dVar(from global model)	
모델	GCAPS (JMA GSM)				UM(UKMO)	
수평분해능	T106		T213(60km)		40km	
연직층수	21	30	40		50	70
조기섭동(영역)	Breeding (Global)	Breeding + Factor Rotation (NH)			ETKF	
모델오차	NO				RP,SCV	RP,SKEB
운영횟수	1(12UTC)		2(00, 12UTC)		2 (00, 12UTC)	
예측기간	10		10		10	
멤버수	16 (16 members +1)		(16+1*2)		24	
후처리	NO		Bias Correction (Bo Cui) (상층 변수)		NO	NO

2.4 현업에서의 앙상블

2.4.2 앙상블 결과물의 시연

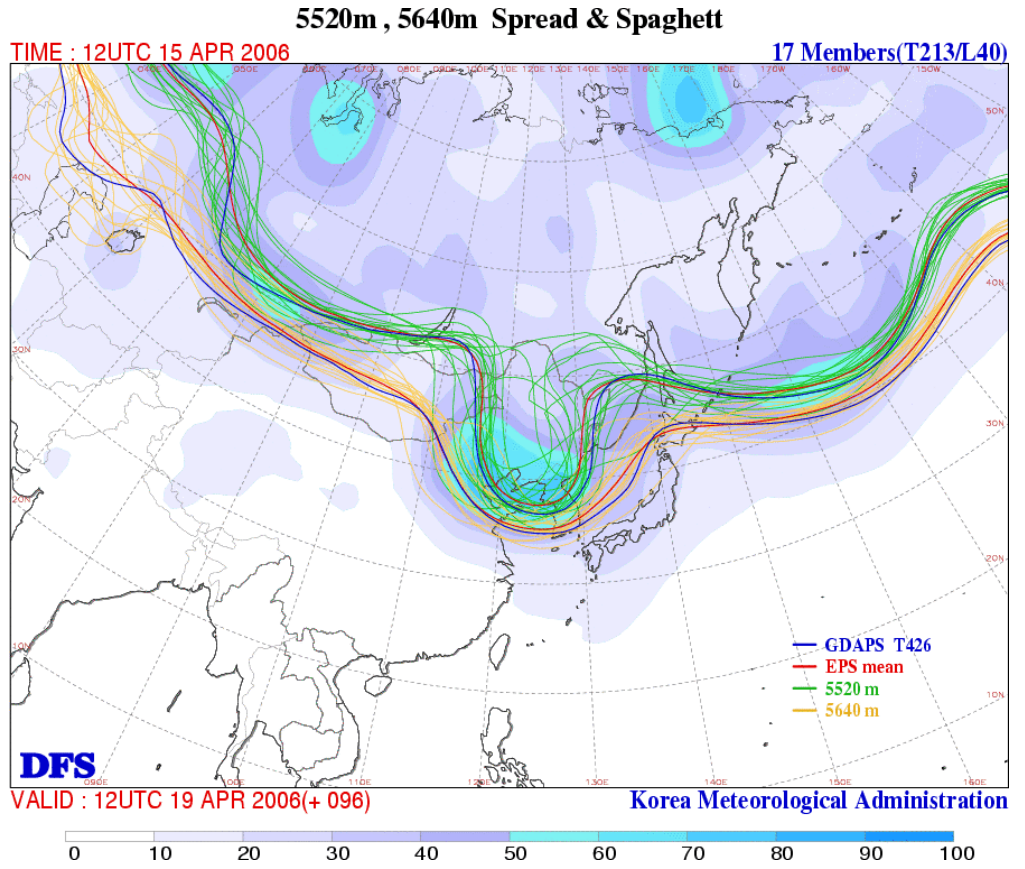
2.4.2.1 정보의 통합

앙상블예보에 있어서 한 가지 문제점은, 처리해야 할 정보의 양이 방대하다는 것이다. 이러한 정보들이 예보관에게 효과적으로 전달되려면 정보 자체가 간결하게 요약되어야 한다. 이를 위해 자주 사용되는 방법이 앙상블 멤버들의 평균, 편차 그리고 스파게티(Spaghetti)도이다. 동일한 사례에 대한 군집화의 두 사례를 그림 2.4와 2.5에서 보여준다. 앙상블 멤버간의 편차는 주로 고위도 지역에서 크게 나타나고 있으며 이러한 현상은 지상 및 상층에서 유사하게 나타나고 있다.



[그림 2.4] 기상청 앙상블 시스템에서 예보한 500hPa 고도장, 해면 기압, 850hPa 기온의 앙상블 평균과 편차장

2.4 현업에서의 앙상블



[그림 2.5] 기상청 앙상블 예측 시스템에서 예보한 500hPa 고도장의 스파게티 그림

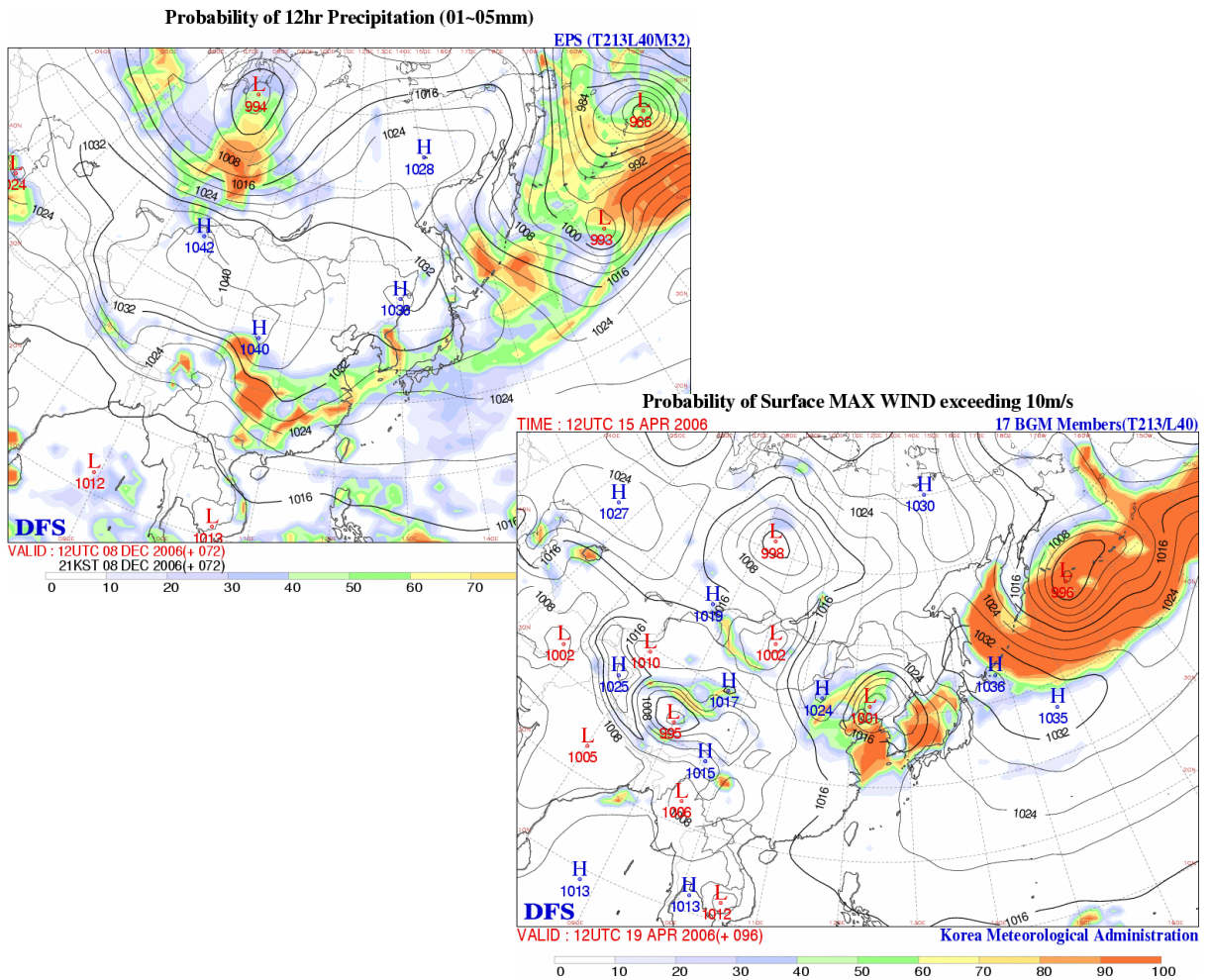
한반도 상공에 기압골이 깊게 발달하는 것으로 예보하고 있지만 앙상블 멤버간에 편차가 크게 나타나고 있음을 볼 수가 있다. 스파게티 그림은 동아시아 지역에 해당하는 범위의 500hPa 등고선 5,520m와 5,640m, 5,580m와 5,700m, 5,640m와 5,760m, 5,700m와 5,820m, 5,760m와 5,880m 중에서 계절에 따라 네 가지 종류의 등고선을 표출한다.

2.4 현업에서의 앙상블

2.4.2.2 확률 예보

앙상블 멤버들의 통계적 분포는 확률적 관점에서 해석할 수 있다. 예를 들어서, 과반수의 멤버가 고기압을 나타낸다면, 고기압의 발생 가능성이 높다고 볼 것이다.

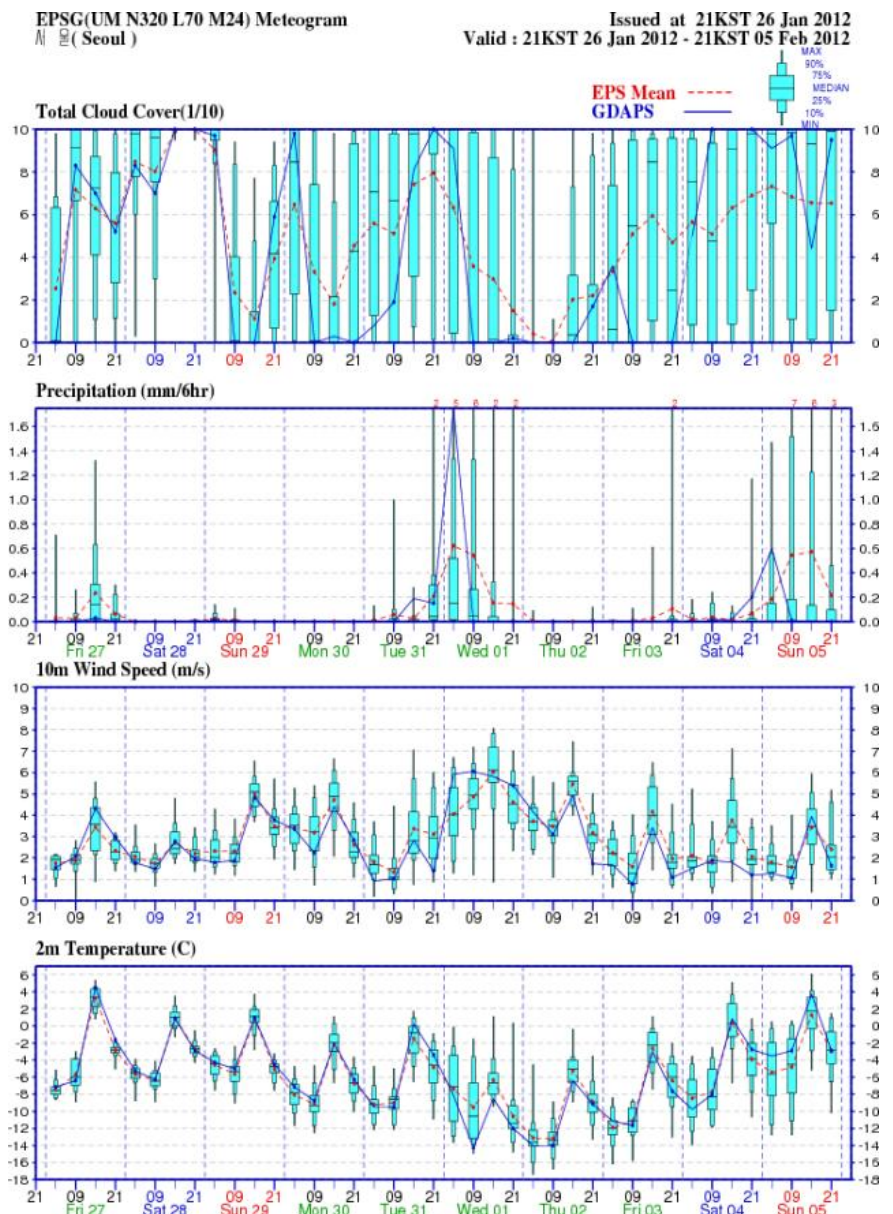
이러한 해석은 각각의 멤버들이 동등한 예측성을 갖는다는 가정하에 이뤄진 것이다. 첫 번째 근사로서 이것은 일반적으로 타당하다. 따라서 앙상블 결과들은 사실상 확률분포로 나타낼 수가 있다. 그림 2.6은 12시간에 5mm 이하의 강수가 발생할 확률과 최대풍속이 10m/s 이상일 강풍 확률을 나타낸 것이다.



[그림 2.6] 12시간 누적 강수량이 1~5mm 일 확률과 일 최대풍속이 10m/s 이상일 확률. 그림에서 색이 붉은 색으로 갈수록 발생 확률이 높음을 의미

2.4 현업에서의 앙상블

Box & Whisker Plot을 이용하여 앙상블 예측 시스템의 통계적 특징을 시각화한 EPSgram도 사용한다(그림 2.7). EPSgram은 구름량, 강수량, 10m 바람, 2m 기온에 대하여 남한 20개, 북한 5개 지점에서 가장 근접한 격자점의 예보 자료를 시계열(Plumes)로 표출한다. EPSgram은 여러 기관에서 앙상블 예보의 결과물로 사용 중인 시각적 표출 방법으로서 각 변수에 대해 최대, 최소값과 중간값 및 25%, 75%에 해당하는 멤버의 예측값을 표시하여 각 멤버들의 예측값의 편중 정도와 단일 예보의 불확실성의 정도를 파악할 수 있다.



[그림 2.6] 지점별 시계열도의 EPSgram (강수량, 지상기온, 지상바람, 강풍)

2.4 현업에서의 앙상블

앙상블 예측 시스템으로부터 얻어진 앙상블 멤버들의 평균장과 편차장 뿐만 아니라 모든 멤버의 예측 시나리오를 함께 고려한다면 예보에 활용도가 더욱 높아질 수 있다. 이를 위한 방안으로 각 멤버의 예측장을 우표처럼 작게 붙여 하나의 지면에 표출하는 방법을 Stamp Map이라 하며, 현재 500hPa 고도와 MSLP/강수량에 대하여 모든 앙상블 예측장을 Stamp Map으로 제공하고 있다. 또한 각 멤버의 예측장과 함께 비교하기 위해서 앙상블 모든 멤버들에 대한 시나리오 이외에 고해상도 전지구모델 예보장을 함께 표출함으로써 특이 기상의 예측 가능성을 검토할 수 있게 하였다.

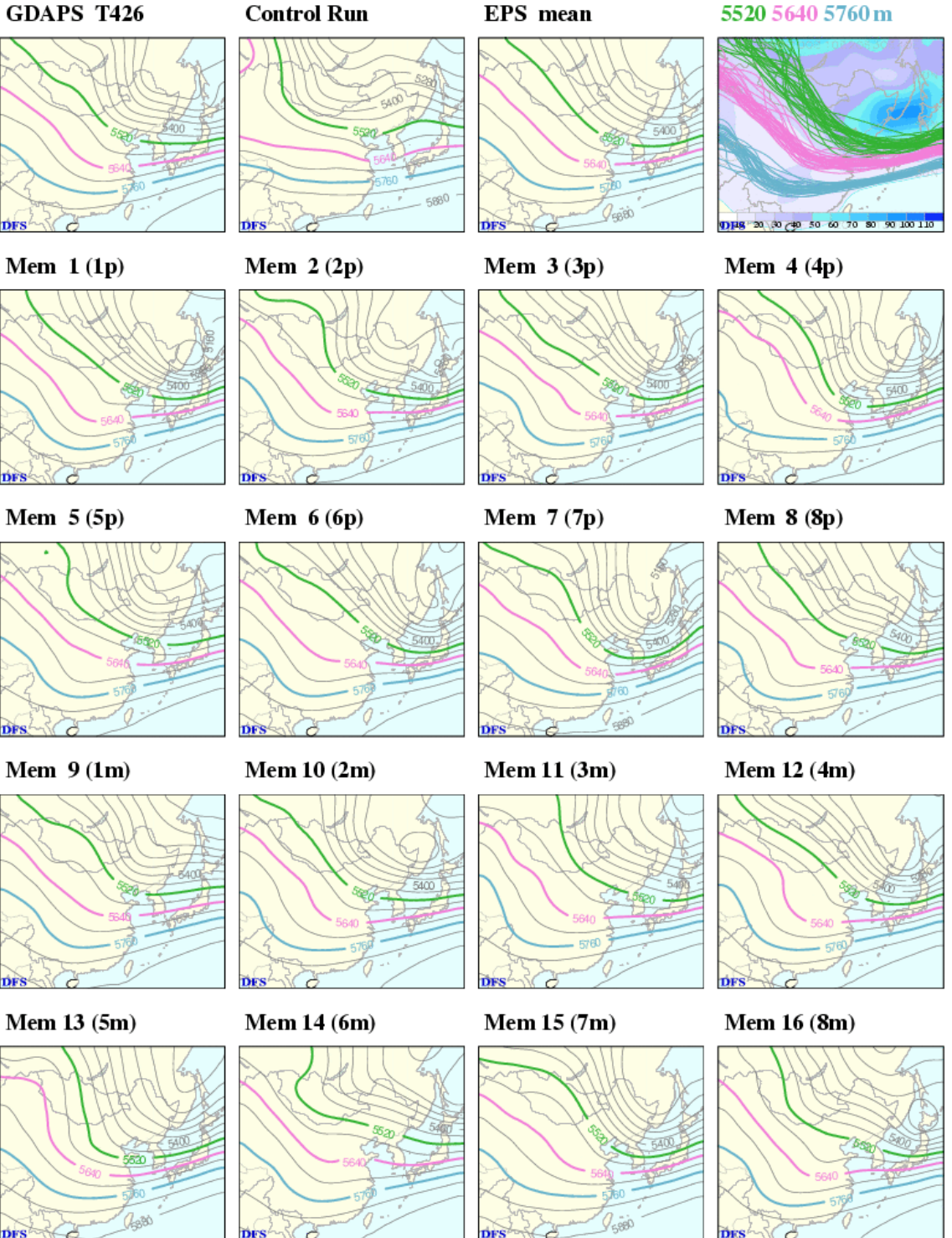
특히 Stamp Map의 효과적인 활용을 위해 앙상블 평균장, 편차장 및 스프레티도 참고 자료로 표출하도록 하였다. 또한 각 계절별로 대표적인 세 고도를 선택하여 색깔을 달리 표현함으로써 작은 그림에서 한눈에 시나리오 간의 각기 다른 기압 패턴을 파악하기에 용이하게 하였다. 그림 2.8은 500hPa 고도장의 Stamp Map의 예이며 각각 5,520m, 5,640m, 5,760m의 세 고도를 선택하여 색깔을 달리 표현하였다.

2.4 현업에서의 앙상블

Stamp Map for 500hPa height

VALID : 12UTC 16 DEC 2006(+ 144)
21KST 16 DEC 2006(+ 144)

EPS (T213L40M32)



[그림 2.8] 500hPa 고도장의 Stamp Map의 예

요약

앙상블은 예보관들에게 큰 도움이 되는 현실적인 도구를 제공한다. 또한 그것은 철학적으로도 아주 중요한 것을 알려주는데, 어떠한 예보에도 항상 내재된 불확실성을 사용자들에게 상기시켜준다. 특히 중기 예측의 경우, 결정론적인 모델이 도움이 되는지에 대한 의문이 생긴다. 기상 예측에 있어 앙상블의 사용은 확대될 것이 확실해 보인다.

연습문제

1. 앙상블 예측 시스템의 필요성에 대해 설명하시오.
2. 앙상블 시스템 구축시 고려해야 할 모델의 해상도와 앙상블 멤버 수 중 어느 것이 더 중요한지 설명하시오.
3. 방대한 양의 앙상블 멤버 자료들을 효과적으로 활용하는 기법들에 대해 설명하시오.
4. 결정론적 예보와 확률적 예보의 장점과 단점에 대해 설명하시오.
5. 기준 예보로부터 앙상블 멤버를 구성하는 방법들을 제시하고 각각에 대해 간단하게 설명하시오.

3장 . 통합모델(Unified Model)

- 3.1 서론
- 3.2 통합적 접근법
- 3.3 좌표계와 해상도
- 3.4 지표의 특성
- 3.5 모델의 변수들
- 3.6 경계조건
- 3.7 대기과 지면과정의 모수화
- 3.8 자료 동화
- 3.9 운영상의 예시

학습목표

- 통합모델의 특성을 이해한다.
- 수치모델에서 수평 및 연직해상도가 갖는 의미를 이해한다.
- 모델 수행에 필요한 경계조건에 대해 이해한다.
- 모수화의 필요성과 원리에 대해 이해한다.
- 자료 동화의 필요성과 원리에 대해 이해한다.

3.1 서론

통합모델(Unified Model : UM, 혹은 통합모델들이라고 불리는 게 나온 모델들)은 영국기상청에서 수치모델 시스템으로 사용되어 왔다. 이는 특히 현업용 NWP, 계절예보 및 기후모델링 등과 같은 여러 모델들의 기능을 하나의 구조 안에서 조합하였기 때문에 그렇게 불린다. 영국 기상청은 이렇게 다양한 응용기능을 갖는 공통의 모델을 사용하는 유일한 센터이다.

UM은 유연성 있게 설계되었다. 모델들은 전 지구 혹은 제한된 지역에도 적용할 수 있으며 모든 수준의 해상도가 가능하다. 과학적 구성요소들은 다양한 방법으로 조합될 수 있고 모델들은 장기간(기후분석에 적합할 정도로) 혹은 단기간(NWP용)에 대해 운영될 수 있다. 그러나 몇 개의 표준 구성이 주로 사용된다. 주요 버전은 다음과 같은 영역에 속한다.

- 현업용 NWP : 현재 기상청에서 사용되는 모델은 전 지구 예측모델(GDAPS)과 지역모델(RDAPS) 그리고 앙상블 예측 시스템과 초단기분석시스템(KLAPS) 등이 있다.
(참고로 영국 기상청에서는 전 지구 예측모델, 북대서양과 유럽 모델(NAE), 영국 지역 모델(UKV - 영국변수), 아프리카 지역 모델(아프리카 지역 중규모 모델), 독일과 Crisis 영역을 포함하는 중규모 모델(CAMMs), 남아시아 모델(SAM), 포클랜드의 CAMM과 아프리카 북동부지역을 포함하는 모델들이 있다.)
- 기후 연구 : 해양-대기 접합모델과 함께 전 지구와 지역 대기의 1개씩 모델만 사용한다. 장기(1개월 이상) 및 여러 계절 예보일 경우 해양-대기 접합모델을 사용한다.
- 해양모델링 : 모델들은 우리나라 주변 해역(황해, 남해와 동해)과 다른 해양의 현업 예측(Operational Forecasting)을 위해 사용한다.
- 파동 모델링 : 역시 전 지구적인 모델과 아시아 그리고 한반도 수역을 포함하는 지역모델이 있다.

이 외에도 태풍, 황사, 조석 등을 예측하기 위한 모델들과 다양한 유형의 통계모델들이 운용 중이다.

3.1 서론

3장의 목적은 원칙적으로는 현업용 NWP에 사용하는 대기 모델의 주요 과학적 특성과 구성을 설명함에 있다. 3장은 NWP에 대한 최소한의 기초지식을 갖고 있다는 전제 하에 작성되었다. 목차들은 다음과 같다.

- 2절은 UM 시스템의 통합적 접근법과 일부의 S/W에 대하여 설명한다.
- 3~6절은 현업용 모델의 구성에 대해 설명한다. 모델의 좌표계와 해상도, 모델 내 변수들 및 경계 조건의 처방 등에 대해 알아본다.
- 7~9절은 모델의 과학적 특성에 대해 살펴본다. 역학 및 물리과정의 표현 방법과 자료동화에 대해 설명한다.

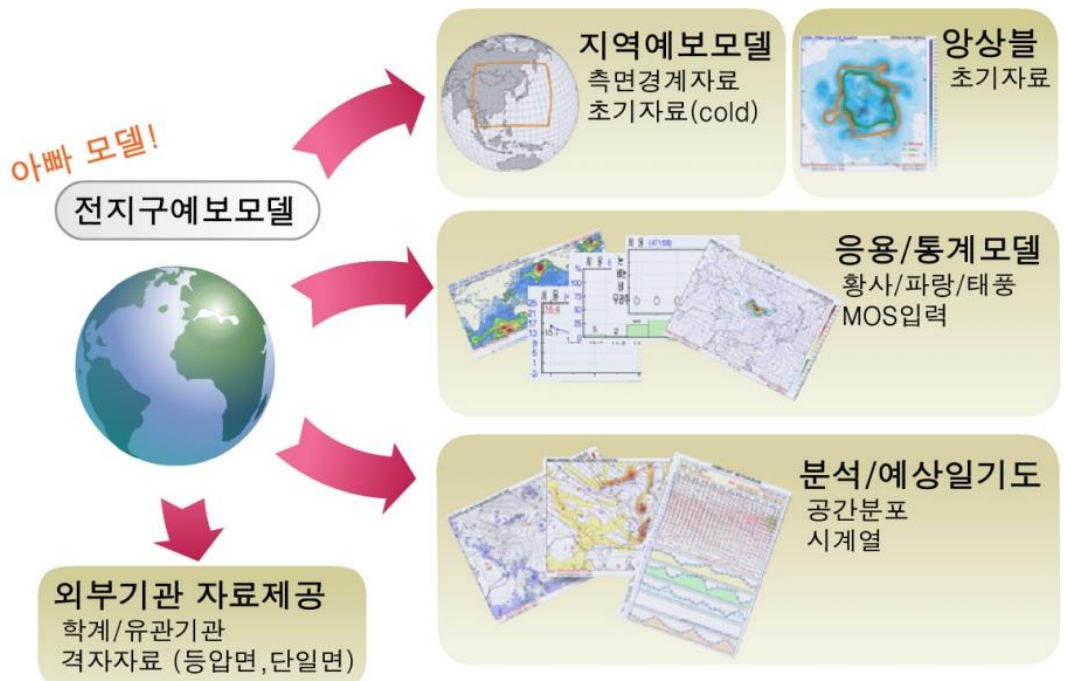
3.2 통합적 접근법

많은 응용에서 공통의 모델링 시스템을 사용하면 다음과 같은 장점들이 있다.

- 프로그램이 공유될 수 있으며, 컴퓨터의 코드 또한 적게 필요하게 된다.
- 전체 프로그램 시스템이 작아서, 적은 비용으로 시스템을 유지할 수 있다.
- 기술자들이 모델 간 현업적 링크를 보다 쉽게 할 수 있다. 예를 들어
 - 대기 예측 모델이 해양과 파동모델의 구동을 위한 지상장을 제공한다.
 - 전구모델이 지역 예측 모델에 경계조건을 제공한다.
 - 대기와 해양모델의 결합은 기후연구에서 광범위하게 사용된다.
- 서로 다른 분야(특히 NWP와 기후 연구)에서의 모델링 전문기술은 같은 목표를 향하고 있으며 따라서 보다 효율적으로 활용할 수 있다.

통합적 접근법은 모든 코드를 모듈화하고, 모델들이 코드를 최대한 공유하고 모든 응용을 단일 제어로 할 때 가능하다.

모듈화 방식은 코드 버전 간 교체를 쉽게 하고, 모델 간 호환성을 향상시켜 준다. 또한 기상코드 내의 부프로그램(Subroutine)간 인터페이스가 다른 기상센터와의 동의하에 표준화되어 다른 기관들과의 협력을 촉진시켜준다.

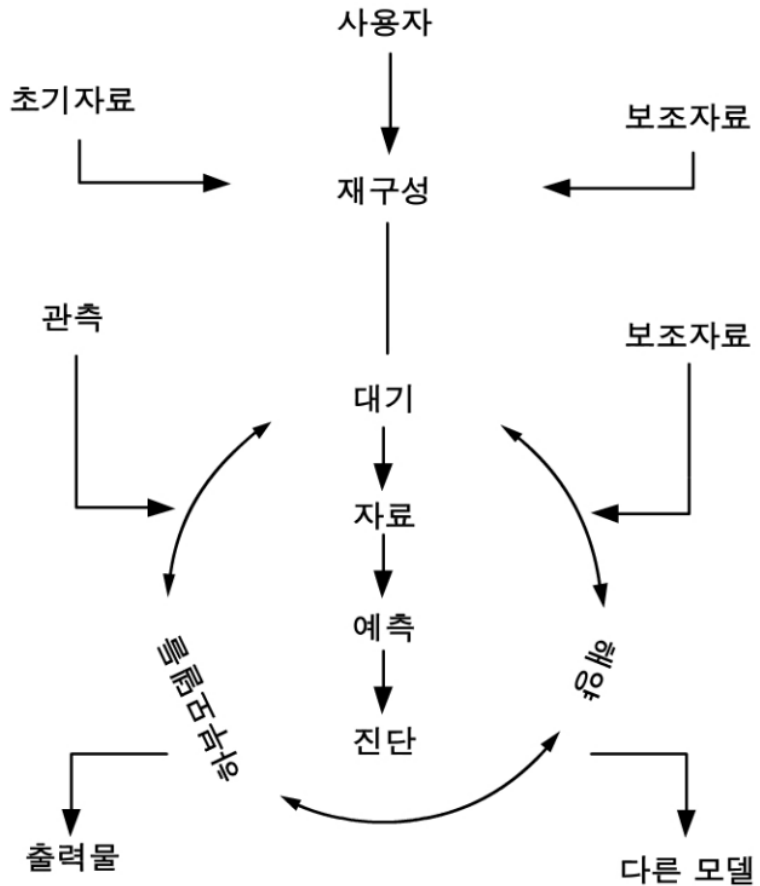


[그림 3.1] 전구 통합모델과 다른 모델간의 상호 작용

3.2 통합적 접근법

그림 3.2는 통합모델의 구성 성분을 보여준다. 제어 구조는 다음과 같은 사항을 포함한다.

기상청에서 UM은 슈퍼컴퓨터 3호기에서 실행되고 있다(2012년 현재). 통합모델은 컴퓨터 시스템에 관계없이 호환이 가능하도록 설계 및 개발되어서 다른 유형의 컴퓨터에서도 작동된다.



[그림 3.2] 통합모델 시스템 요소들의 개념도

3.3 좌표계와 해상도

표 3.1은 기상청 전지구예보모델의 구성에서 사용되는 격자(Grid)계를 상세하게 나타낸 것이다. 현업용 전구 모델은 표준 위경도 좌표계의 격자점 모델로 격자점 사이의 위도와 경도 거리가 각각 0.5625도와 0.375도이다. 이러한 구조에서 남북방향의 해상도는 약 40km이고 동서방향의 해상도는 위도가 증가할수록 해상도가 향상된다. 하지만 위도 55도 이상의 고위도 지역에서는 격자간격이 조밀해짐에 따라 지나치게 발생하는 여분의 작은 규모 변동을 제거하기 위해서 기상장들을 필터링해야 하기 때문에 동서방향의 증가된 해상도는 효율적이지 않다.

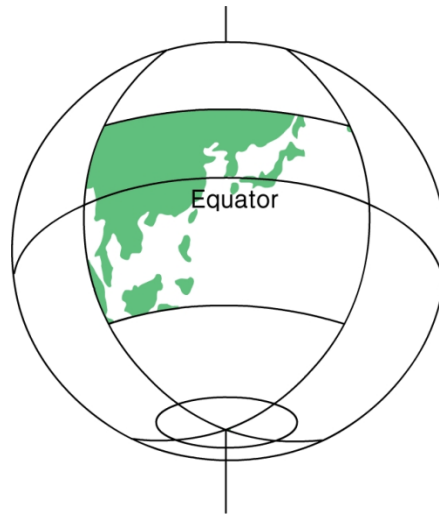
[표 3.1] UM의 구성

기상청 전지구예보모델(UM N320L50) 구성	
지배방정식	Complete Equation(비정역학 방정식계)
수평해상도	N320(40km 0.5625 × 0.375)
연직층수	L50(모형상단고도 ~ 63km)
예측기간	10.5일(252 시간)
시간적분간격	900 초
초기자료생산	4차원 변분자료동화(4DVAR)
공간이산화법	유한차분법(Finite Difference Method)
시간적분/이류	반암시/반라그랑지법(Semi-implicit Semi-lagrangian Scheme)
복사물리과정 모수화	Edwards-slingo General 2-stream Scheme
지면물리과정 모수화	MOSES-II Land-surface Scheme
경계층물리과정 모수화	MOSES-II Non-local PBL
대류물리과정 모수화	Mass Flux Convection with CAPE Closure
미세물리과정 모수화	Mixed-phase Precipitation
중력과향력 모수화	G.W. Drag due to Orography(GWDO)

3.3 좌표계와 해상도

통합 모델에서는 실제 위도/경도 좌표계 대신에 회전(Rotated)된 위/경도의 좌표계를 사용한다. 계산상의 북극은 현실에서의 52.43N, 306.97N RDAPS로 이동된다. 이는 적도지역을 포함하는 모델들이 상대적으로 균일한 격자간격을 가지는 장점을 이용하기 위한 것이다.

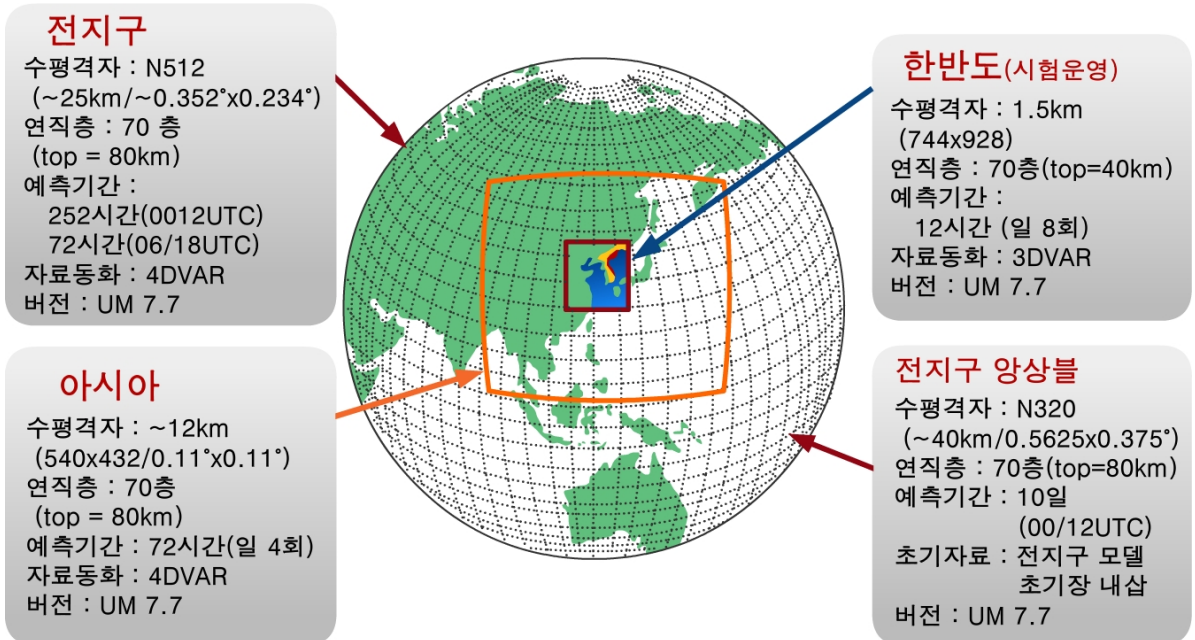
이것은 ELF(Equatorial Lat. -long. Fine-mesh) 좌표로 명명되기도 한다. 그림 3.3은 ELF 격자가 무엇을 의미하는 지를 나타내고 있다.



[그림 3.3] ELF 격자의 예. 모델 영역이 격자간격이 상당히 균일한 적도지역에 위치. 이 원리는 기상청 지역모델에도 사용됨

3.3 좌표계와 해상도

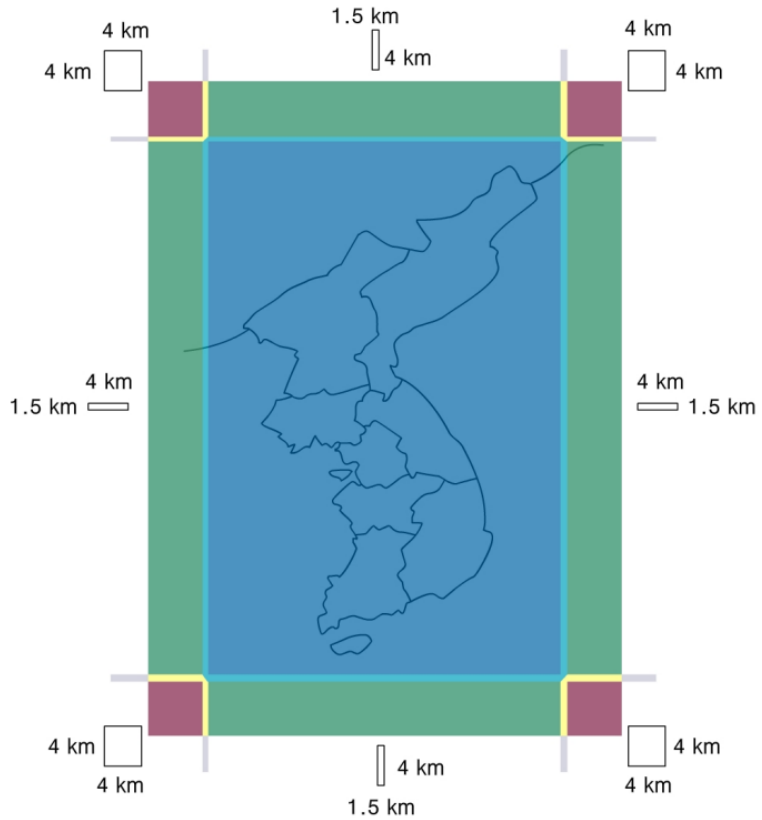
기상청에서 현재 운용중인 전지구모델의 해상도는 약 25km이고 지역모델의 경우 통합모델은 약 12km, KWRP는 10km이다. 또한 한반도 지역 통합모델의 해상도는 1.5km로 고해상도이다



[그림 3.4] 기상청에서 운용중인 모델의 종류와 모의 영역 및 해상도

3.3 좌표계와 해상도

가변격자계를 사용하는 통합모델의(KORV) 모의영역 중앙에서는 $1.5 \times 1.5\text{km}$ 의 해상도를(그림 3.5에서 파란색) 갖지만 모의영역의 가장자리에서는 12km 로 해상도가 저하되며, 모의영역 중심의 북쪽과 남쪽에서는 위/경도 해상도가 각각 $4\text{km} \times 1.5\text{km}$ (그림 3.5에서 보라색), 모의영역 중심의 동쪽과 서쪽에서는 위/경도 해상도가 각각 $1.5\text{km} \times 4\text{km}$ (그림 3.5에서 녹색)이다.



[그림 3.5] 가변격자계를 사용하는 통합 모델에서의 해상도 변화(KORV 예시)

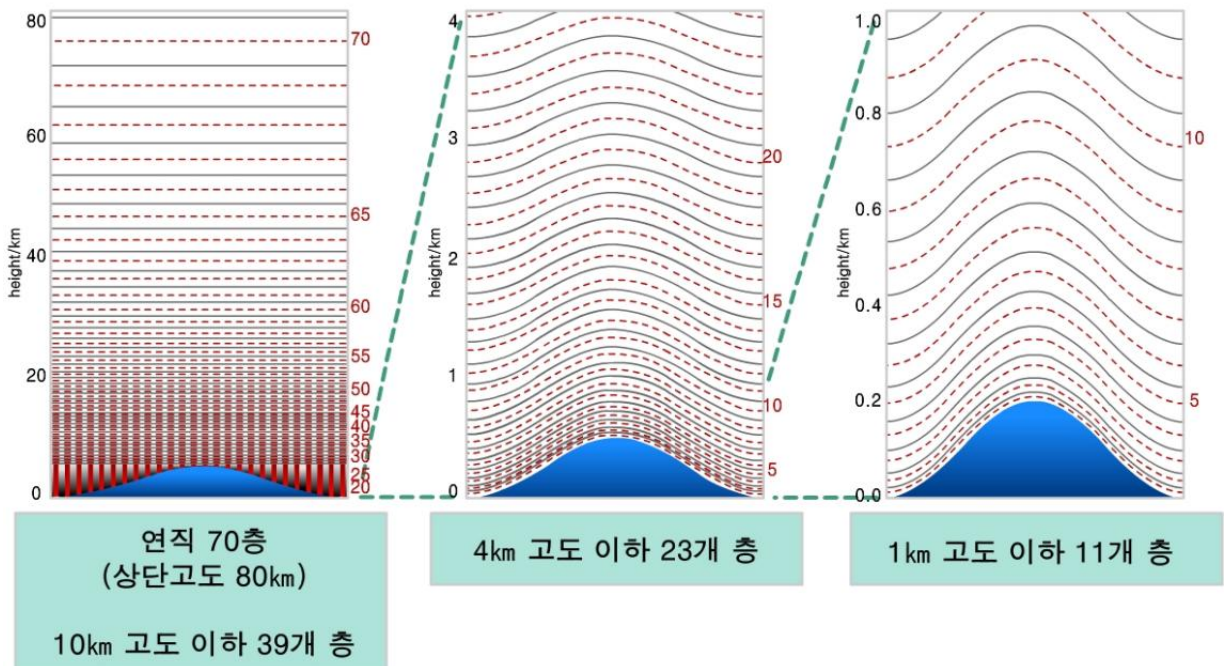
KLAPS 모델의 경계에서는 가변 해상도가 사용되는데, 이는 전구 또는 저 해상도 지역예보모델로부터 제공받는 경계조건을 위한 과도한 디스크 사용량을 줄이고, 적절한 비용으로 한반도 모의 영역으로부터 경계지역을 최대한 멀게 하기 위함인데 이것은 특히 경계영역에서 불안정한 대기 흐름에 중요하다.

UM은 관심지역의 격자간격이 균일하도록 좌표상의 극을 이동시키기만 한다면 지구상의 어느 곳에서도 지역모델로 사용될 수 있다.

3.3 좌표계와 해상도

2011년 5월 기상청에서는 전구 모델의 연직 층수를 50층에서 70층으로 세밀화하였다. 연직 층수가 70개일 때의 대기전체, 대류권 중하층 그리고 경계층에서의 연직 층수를 그림 3.6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 연직 해상도는 대기의 급격한 변동을 보다 정확히 모의하기 위하여 지면근처에서 가장 조밀하다. 또한 해상도는 제트 기류 근처에서 상대적으로 높다. 제트 기류는 지상에서의 기상현상 발달과 민간항공에 중요하다. 모델의 최상층 고도는 전 지구 모델이 약 80km이고 지역모델은 약 80km이다.

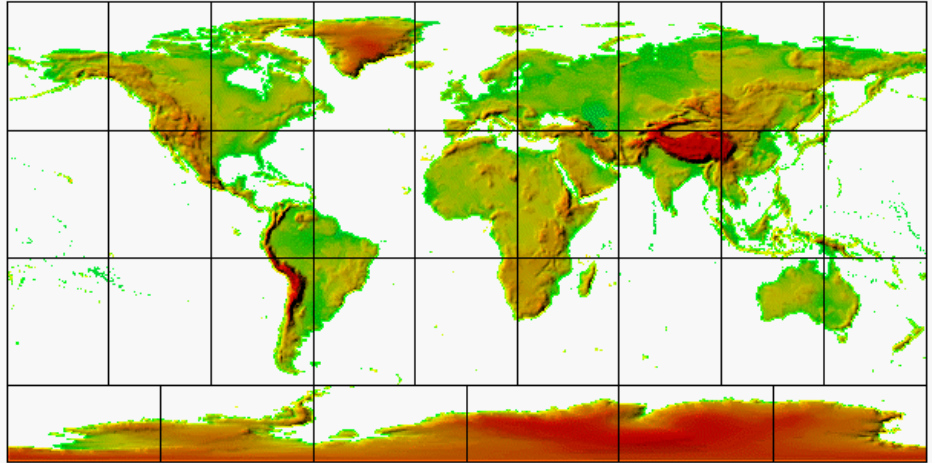
모든 모델에서 η (Eta)라 불리는 고도 기반의 혼합(또는 잡종, Hybrid) 좌표계가 사용되고 있다. 대기 하층에서는 지형을 따르는 시그마 좌표계를 사용하는데 이것이 현실적인 경계조건을 처방을 용이하게 한다. 대기상층에서는 고도면을 이용하며 17.5km 이상에서는 고도면이 평평하다. 두 고도 사이에서는 두 좌표계의 혼합을 사용하는데 지상에서 멀어질수록 지형 형태로부터 벗어나기 시작해 나중에는 고도가 점점 일정해진다. 하지만 지형이 높은 곳에서는 층이 얇아진다.



[그림 3.6] 전 지구 모델에서 연직 층수가 70층으로 세밀화 되었을 때의 연직 층 분포

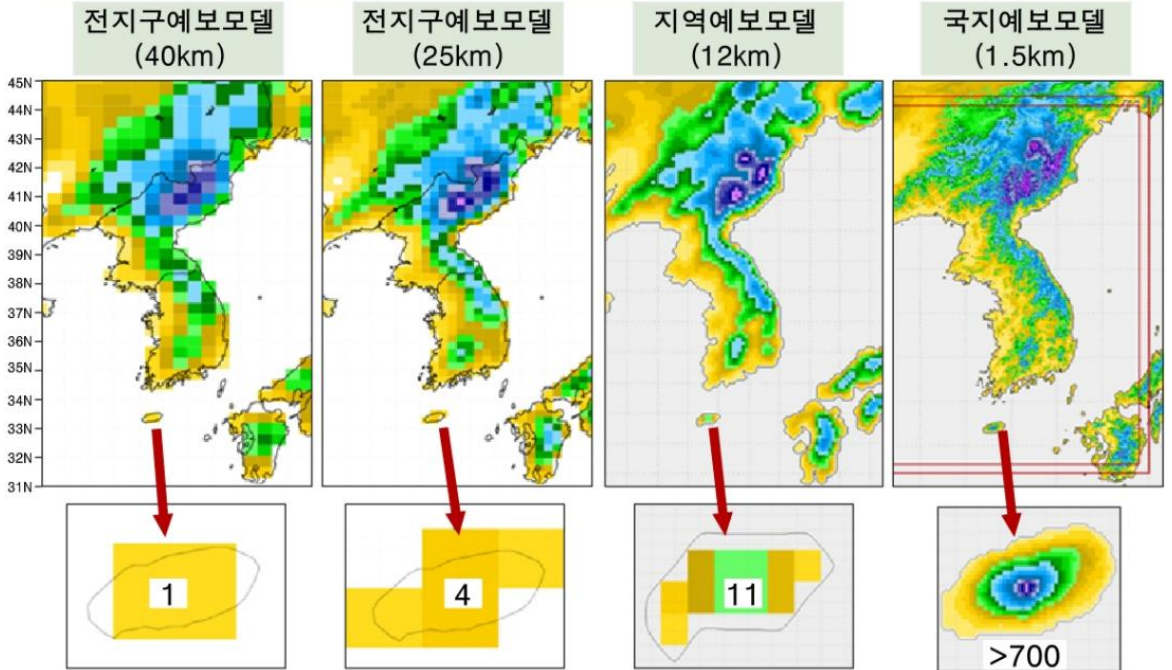
3.4 지표의 특성

모델은 여러 가지 측면에서의 지표면을 필요로 한다. 지형, 지면피복 분류, 수문학적 특성 그리고 바다에서는 해수면 온도가 필요하다.



[그림 3.7] 전구 모델에서의 지형(평균해수면으로부터의 고도)

서울의 격자점 개수 비교 : 전지구: ~1개 / 지역:~5개 / 국지:~330개

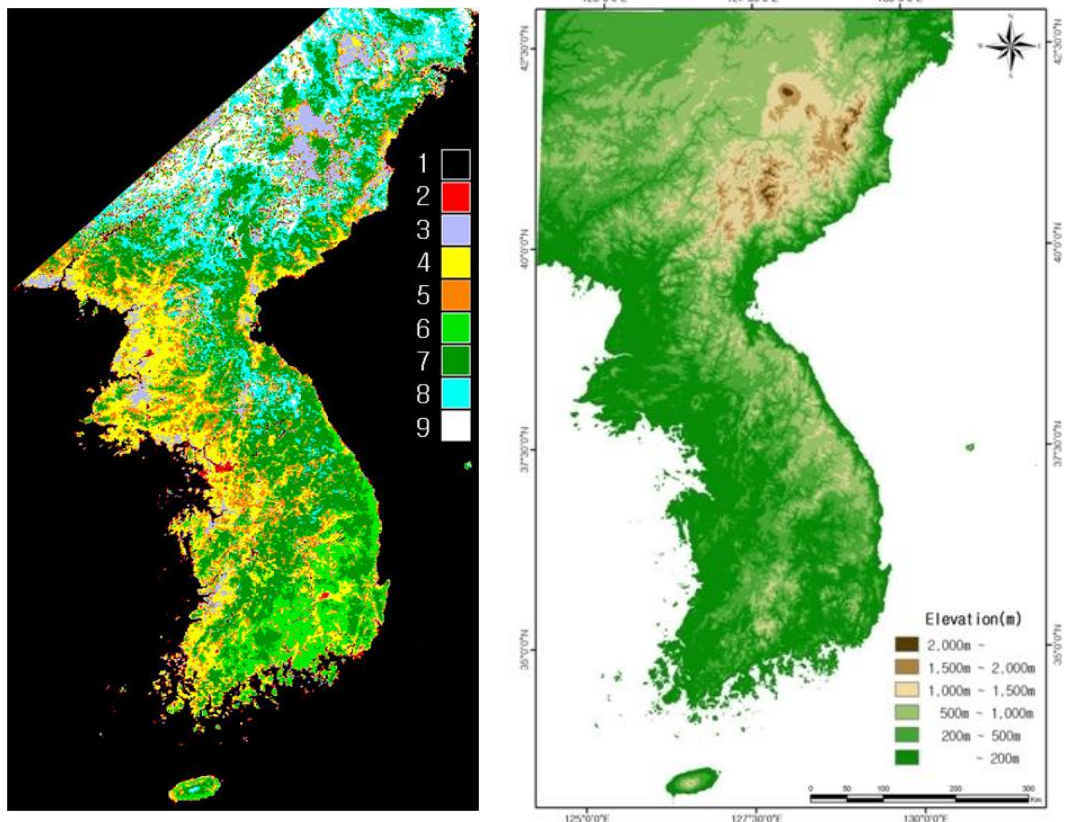


[그림 3.8] 모의 영역 및 해상도에 따른 지형의 상세화 예

3.4 지표의 특성

전구 모델에서의 지형을 그림 3.7, 그리고 모의 영역 및 해상도에 따른 지형의 상세화 예를 그림 3.8에 나타내었다. 비교해보면 대규모 산맥의 경우는 적절하게 그 특징이 묘사된 반면, 작은 산의 경우 상세함이 적절하게 묘사되지 못하고 있음을 볼 수 있다. 특히 제주도의 경우 해상도가 12km까지는 한라산이 전혀 나타나지 않다가 1.5km로 고해상도가 되어야 한라산이 산 형태로 나타나기 시작한다. 지형자료는 GLOBE(Global Land One-km Base Elevation : 전구 1km 고도자료) 자료로부터 도출된 것이다.

육상에서는 식생과 토양 유형의 지리적 분포도 처방된다(그림 3.9). 지면피복의 경우 1km 해상도 자료로부터 도출하였고 고도자료는 30m 해상도 자료로부터 도출한 것이다. 이들이 토양의 열전도율과 열 용량, 지표의 수문, 반사율과 거칠기 길이 등을 결정한다.



[그림 3.9] 한반도의 지면피복 분류(왼쪽)과 상세 지형 예(오른쪽)

3.4 지표의 특성

NWP에서 해수면의 온도는 매일 갱신되는 분석 자료를 이용하여 처방한다. 해빙은 기후학적 자료로 처방되는데, 가능할 경우 관측 자료를 이용하여 보완되며 이때 해빙의 두께는 2m로 가정된다.

3.5 모델의 변수들

모델에서 사용되는 변수들은 몇 개의 그룹으로 나눌 수 있다. 모델에서 계산되는 주요 요소는 주요 예단변수(Primary Prognostic)라고 한다. 대기 모델에서 사용되는 변수들이 다음에 제시되어 있다.

이들은 각 격자점에서 매 적분시간마다 계산된다. 대기권에서 계산되는 변수는 a)-e)이고, 지상의 격자점 변수는 f)-k)가 있다.

- a) 수평 바람 성분(u, v)
- b) 연직 바람(w)
- c) 온위(θ)
- d) 비습(q)
- e) 구름 물과 얼음(q_i, q_f)
- f) 지상기압(p_s)
- g) 토양 온도(T_s)
- h) 토양수분 함량(SMC)
- i) 캐노피 수분 함량
- j) 적설량(Snowdep)
- k) 지표면 온도(T^*)

다음의 변수들은 모델 계산에 있어 꼭 본질적인 것은 아니나, 주요 예단변수들로부터 계산되는 것들이다. 이들은 제 2의 예단변수라고 불린다. 이들은 모수화 스킴으로 계산된다.

- l) 경계층의 깊이(Z_H)
- m) 해면의 거칠기 길이(Z_o)
- n) 대류운의 양(CC_a)
- o) 대류운 운저(CC_b)
- p) 대류운 상단(CC_t)
- q) 층운의 양(C_a)
- r) 오존 혼합비

r)의 경우(오존 혼합비) 성층권에서의 응용을 위해서는 예단변수로 사용하고 다른 응용에서는 상수로 처리한다.

위의 변수들 외에도 모델들은 모델에 의해 이루어지는 수동적 변수들인 29개에 달하는 추적자들(Tracers)이 이동을 예측한다. 예를 들어, 오염분산을 연구하는데 사용될 수도 있다.

3.6 경계조건

모델의 경계 조건을 처방하기 위해서는 다른 변수들이 필요하다. 이들은 하단 경계(지표)와 측면 경계라는 두 개의 그룹이다. 전지구모델을 제외한 동아시아 및 한반도 영역과 같이 지역예보 모델들은 측면 경계 조건을 제공해 주어야 한다.

모델의 하단경계에서 필요로 하는 변수들은 보조자료(Ancillary Data)라고 한다. 이들은 다음을 포함한다.

- s) 땅과 바다의 마스크
- t) 토양유형
- u) 식생유형
- v) 격자박스내의 지형의 평균과 분산
- w) 해수면온도(SST)
- x) 해빙의 비율(ICEc)
- y) 해빙두께(ICEt)
- z) 해류

해양-대기 모델이 접합된 모델을 수행할 때는 w)-z) 변수들은 보조자료가 아닌 예단변수들로 사용된다.

만약 제한지역 모델이 실행될 경우, 측면 경계조건이 처방되어야 한다. 앞에서 제시한 목록 중 예단변수 a)에서 e)는 매 적분시간마다 제공되어야 한다. 동아시아 및 한반도 지역 모델의 경우 이러한 경계조건은 전구 모델 예측자료에서 제공된다. 이들은 지역예보 모델 격자계로 내삽되며 모델의 최외곽 경계 8개 격자점에 적용된다. 지역예보 모델에 경계조건을 제공하기 위해서는 전구 모델의 예측이 선행되어야 한다.

통합모델과 KWRP 등은 비정역학 방정식과 함께 ‘원시 방정식’이라 불리는 운동방정식을 이용한다. 이 방정식들은 연직가속도를 포함하고, 코리올리의 효과를 정상적으로 반영하며 지구의 곡률 효과를 고려하는 구면 기하학적 항을 포함한다. 이 방정식에 대한 자세한 설명은 부록에 수록되어 있다.

3.6 경계조건

모델은 표 3.1에 나타낸 적분시간 간격을 이용해 방정식들을 전방으로 적분한다. 반 라그랑지안 스킴이 사용되는데 이 스킴은 질량과 질량이 곱해진 온위의 보존에 뛰어나다(이러한 보존은 UM의 기후 버전에서 특히 중요하다).

모델에 의해 발생하는 인위적인 고속의 증력파를 처리하는데 있어, 모델이 불안정해지는 것을 방지하기 위하여 분리-명시적(Split-explicit) 스킴과 함께 정상적 적분시간 간격의 3분의 1의 적분시간이 사용된다. 유한차분 스킴은 바람장을 온도장 사이의 격자점에 저장하는 아라카와(Arakawa) C-grid를 사용하는데, 이 방법은 모든 변수들을 동일 격자점에 저장하는 것 보다 높은 정확도와 더 나은 수치상의 안정성을 제공한다.

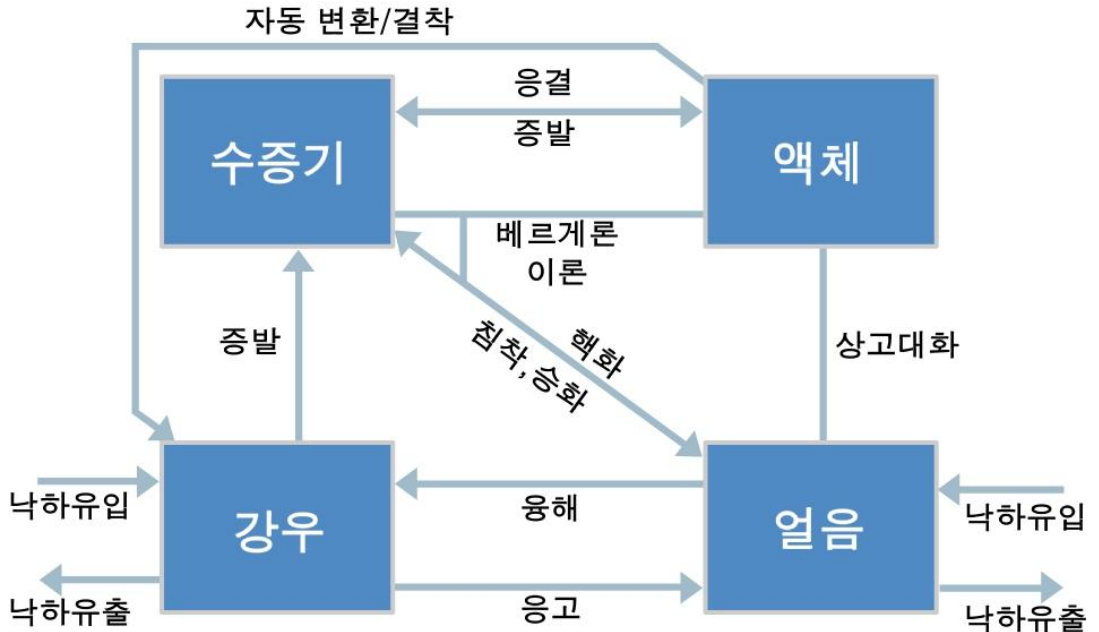
3.7 대기과 지면과정의 모수화

많은 물리과정들은 모델에서 처리할 수 있는 것보다 규모가 작다. 따라서 이들 과정의 세부사항들이 명시적으로 모델에 포함되지 않더라도 이들의 총괄적인 영향은 모델에 포함되어야 한다. 이러한 것을 ‘모수화’라고 한다.

대부분의 사례에서 UM은 현업과 기후버전에서 동일한 모수화가 사용된다.

- 대규모 구름과 강수

대규모 구름 스킴은 대류가 아닌 다른 과정들에 의해 생성되는 구름을 다룬다. 모델에서 역학적 상승은 이러한 구름 생성에서 가장 중요한 과정이나, 구름은 복사 냉각과 난류 수송에 의해서도 발생할 수 있다. 그림 3.10은 이 스킴에 의해 표현되는 수송과 강수 과정을 보여준다.



[그림 3.10] 혼합상 강수과정과 수송

전구, 동아시아 및 한반도 지역 모델은 혼합상 구름과 강수 스킴을 사용하는데 이 스킴에서는 주요 예단변수로 비습(q), 그리고 구름 내 액체수와 얼음의 혼합비율(q_l, q_f)을 사용한다(구름 내 액체수와 얼음 혼합비는 구름 내 습윤공기 1kg에 대한 구름 액체수 및 얼음의 무게 비율로 나타낸다). 이들로부터 각 격자점에서의 정량적인 운량이 계산된다(층운의 양, 변수 (p), 5절). 격자 공간 내에서 상대습도의 변화를 가정하는데 그 결과 상대습도 100% 이하에서도 구름이 발생하게 한다.

3.7 대기과 지면과정의 모수화

구름 물은 주로 자동변환(Autoconversion)이라는 과정을 통해 강수로 변환되며 변환율은 구름혼합비에 비례해서 증가된다. 자동변환 방정식은 상층의 격자에서 강수가 내릴 시 결착과 병합과정 모의를 통해 변환율을 증가시키는 항을 포함한다. 이러한 방식으로 과중-증식(Seeder-feeder)의 관계가 표현된다.

스킴의 입력 변수는 온도, 액체수 혼합비 그리고 수증기의 혼합비이다. 격자기둥의 상층으로부터 시작해서 물과 얼음이 아래층으로 낙하하는 것이 예단되고 상변화와 잠열방출을 나타내기 위하여 전달방정식이 이용된다.

강수에 대한 구름 물 함량 임계치가 육지와 바다에 대해 다르기 때문에 육지보다 바다 격자에서 강수가 빨리 시작된다. 이것은 해상에서 상대적으로 적은 수의 구름 응결핵이 존재함으로 인해 동일한 구름물 함량하에서 해상 구름의 입자 수는 작고 크기는 더 큰 관측 사실을 고려한 것이다. 이것은 또한 충돌-병합에 의한 강수입자의 성장이 크기가 작은 육지 구름에서보다 더 효율적임을 의미한다. 해상에서 소나기를 내리는 대류운의 두께 임계값이(육지에서는 4km인데 비하여 해상에서는 1.5km) 작은 것도 같은 이유로서 설명된다.

구름의 형성에서와 같은 방법으로 격자 내에서 구름물의 비균일한 분포가 한도는 격자 내에 결합되지 않은 구름 내 수분의 분포로써 만들어진다. 그러므로 불포화된 격자 내에서도 강수량이 0이 아닐 수도 있다.

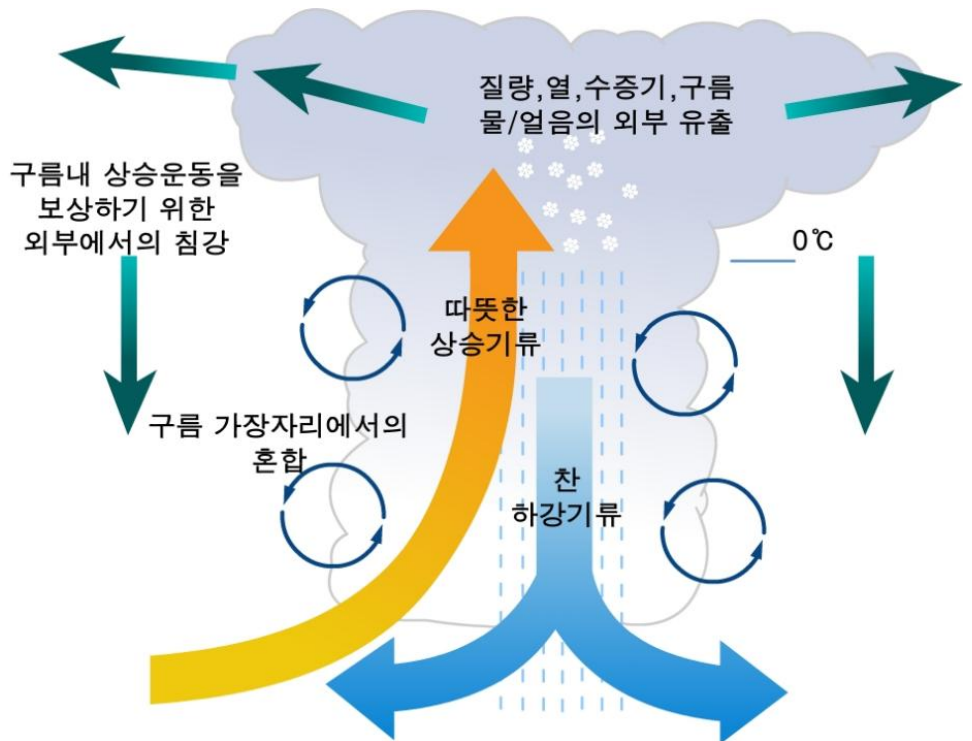
3.7 대기과 지면과정의 모수화

구름내에서의 빙정은 작은 물방울이 얼거나, 수증기의 승화에 의해 직접 형성되고 성장한다. 구름 내 작은 물방울들은 0도(관측과 일치) 이하에서도 얼지 않은 상태, 과냉각된 상태로 존재한다. 동결된 강수는 생성되자마자 낙하하는 것으로 가정된다. 강수의 증발과 용해는 아래층에서의 온도와 습도가 허용하는 범위 내에서 발생하며 이때 잠열의 소비에 의해 주위대기가 냉각된다.

지상층에서의 구름비율은 격자점내 임의의 점에서 안개 발생확률로 해석될 수 있다. 안개확률 진단은 이 변수와 함께 에어러솔 농도에 근거한다.

3.7.1 대류와 대류성 강수

적운과 적란운의 대류를 설명하기 위해 구름 모델이 사용된다. 이 하나의 모델은 격자 영역내에 몇 개의 대류 플룸(Plume)을 나타낸다. 상승기류와 강수에 의한 하강기류 모두가 고려된다. 그림 3.11은 모델에서 처리되는 과정들을 보여준다.



[그림 3.11] 대류 구름 모델

3.7 대기과 지면과정의 모수화

대류는 대기기둥의 두 층 사이에 충분한 부력이 있을 때 시작된다. 상승하는 공기덩이의 크기를 결정하기 위해서, 모든 공기기둥에 내재되어 있는 CAPE(가용 잠재 대류에너지)의 크기를 측정해야 한다. 정의된 시간내에 CAPE를 소멸시키는 데 필요한 상승하는 공기덩이의 질량이 계산된다. 구름과 주위대기와의 혼합은 주위 공기가 구름으로 유입 되는 것과 구름이 외부공기로 유출되는 두 가지 과정으로 표현된다. 대류는 질량, 열, 수증기 그리고 구름 물/얼음들이 주위 대기로 완전히 혼합되면 종료된다.

격자에서 강수는 다음으로 진단되는데, 그 조건은 다음과 같다.

- (i) 구름 물/얼음 함량이 임계치를 초과할 때
- (ii) 구름의 두께가 임계치를 넘을 때

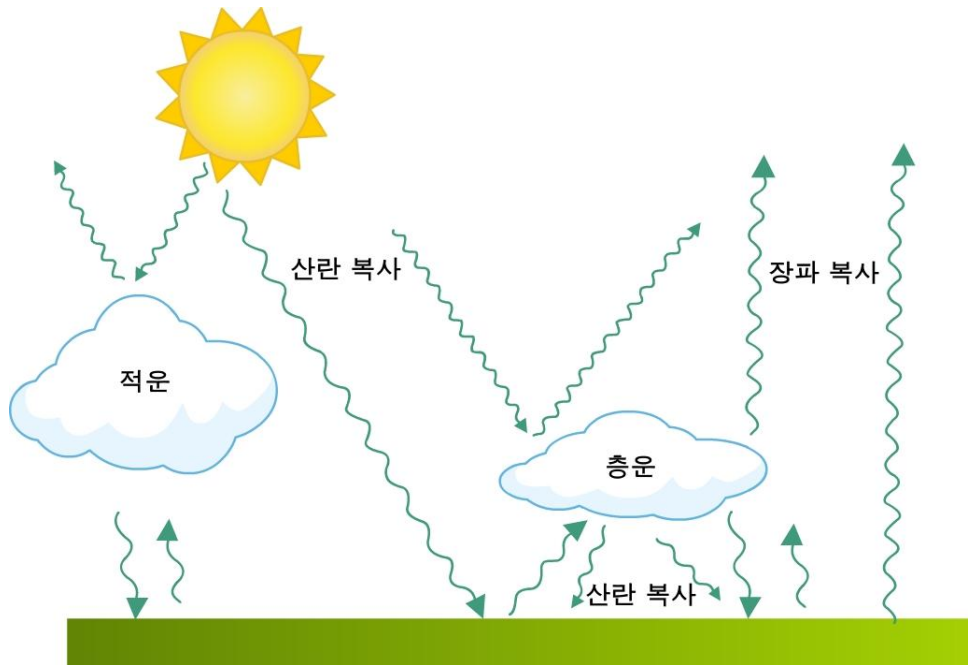
구름의 두께 임계치는 바다에서는 1.5km 그리고 육지에서는 4km 이다. 그러나 만약 구름의 상부 온도가 -10도보다 낮을 경우, 임계 두께는 육지와 바다 모두에서 1km로 줄어든다. 대규모 강수에서와 같이, 대류 스킴도 강수의 증발과 녹음을 고려한다.

통합 모델에 있어서, 강한(깊은) 대류는 명시적으로 나타내지만, 약한(얕은) 대류는 위에서 설명한 대류 스킴으로 모수화한다. 강함과 약함의 정의는 격자공간 내 CAPE 값에 의해 정해지는데, 여기서 CAPE 종결 시간규모는 깊은 대류에서 CAPE 크기에 선형적으로 비례해서 증가된다.

3.7 대기과 지면과정의 모수화

3.7.2 복사 과정

이 모수화 스킴은 복사속에 의한 열전달을 모의하는데, 입사 태양 복사에 의한 단파와 대기 기체, 구름 그리고 지표면으로의 방출에 의한 장파 두 그룹으로 나누어진다. 그림 3.12는 이러한 과정을 나타낸 것이다.



[그림 3.12] 구름과 지표면과의 장파, 단파 상호작용

단파복사속은 주로 태양의 천정각(위도와 계절, 하루 중 시간에 따라 변한다), 구름의 양과 지표면의 반사율에 관계된다.

장파속은 방출하는 매개체의 양과 온도 그리고 그것들의 방출율(주어진 온도에서 흑체가 방출하는 최대 복사에 대한 실제 복사되는 양의 비율)에 좌우된다. 복사학적으로 활동적인 대기 성분(수증기, 이산화탄소와 오존)의 영향이 각각 매우 다르기 때문에 각각 계산되어야 한다. 각 기체의 방출율은 매우 복잡하게 파장의 함수이다. 모수화 스킴에서는 장파의 여러 개 파장대를 밴드 형태로 단순화 시켜 처리하는데 각 밴드에 대해 기체별 1개의 방출율을 가정한다. 유사하게 단파의 스펙트럼 또한 불연속적인 파 밴드로 처리된다.

구름들은 상당한 정도로 장파 및 단파 복사와 상호작용을 한다. 구름들은 수평상으로 균질한 평면으로 처리된다. 격자 공간에서는 대류운과 함께 여러 층의 구름들이 고려된다. 구름의 영향은 운량, 고도 및 구름 물과 얼음함량에 좌우된다.

3.7 대기과 지면과정의 모수화

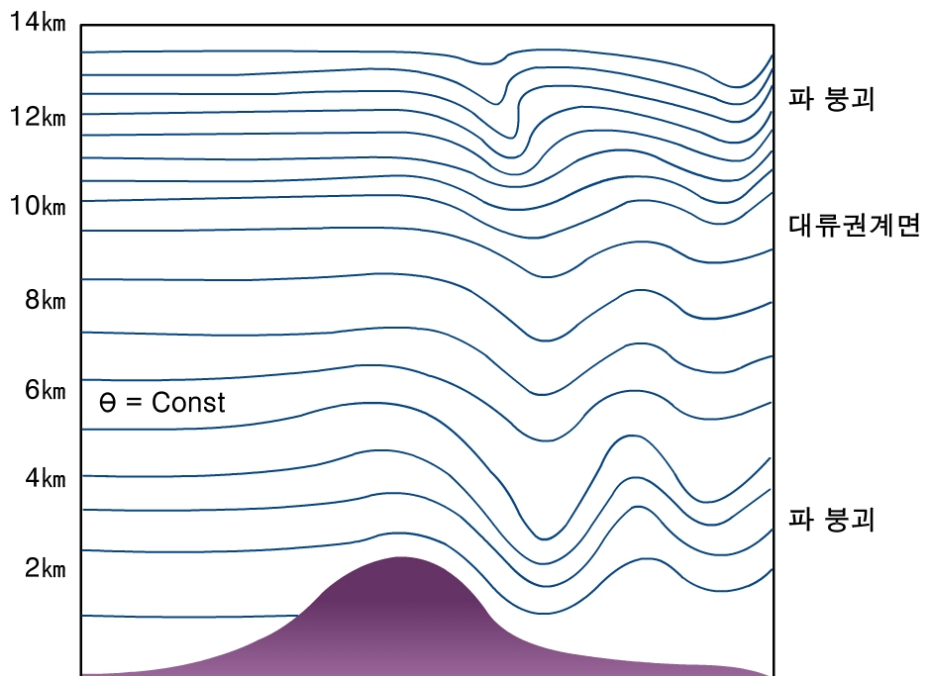
복사 가열과 냉각률은 수증기나 구름/얼음의 형태로 되어있는 수분에 크게 의존한다. 하지만 전체적으로 물의 존재는 대기권에서 잘 관측되지 않으며, 그 결과 모든 예단 변수들 중에서 가장 예측수준이 낮다.

지표의 반사율(즉 입사 태양복사에 대한 반사복사의 비율)은 해빙과 적설 분포와 함께 식생과 토양 유형에 좌우된다.

모수화 스킴이 너무 복잡하기 때문에, 전구 모델에서는 3시간에 한 번, 지역예보모델에서는 한 시간마다 복사속을 계산하도록 단순화 한 방법이 사용되고 있다. 이러한 빈도수는 구름의 변화에 대한 모델의 온도 반응을 결정한다. 단과 스킴의 경우 불충분한 계산 빈도에 의해 발생하는 오류를 최소화하기 위하여 매번 갱신된 태양 각도를 고려한다.

3.7.3 중력과 항력

안정된 상태에서 산을 타고 넘어가는 기류는 대기에서 파동을 유발한다. 이러한 ‘중력파’는 대기에서 항력을 작용하는데 이는 대류권계면까지 확장할 수 있다. 그림 3.13은 이러한 과정을 나타낸 것이다. 전구 및 지역예보 모델들은 이러한 항력을 모수화 하는 스킴을 포함하고 있다.



[그림 3.13] 등온위면으로 나타낸 중력파

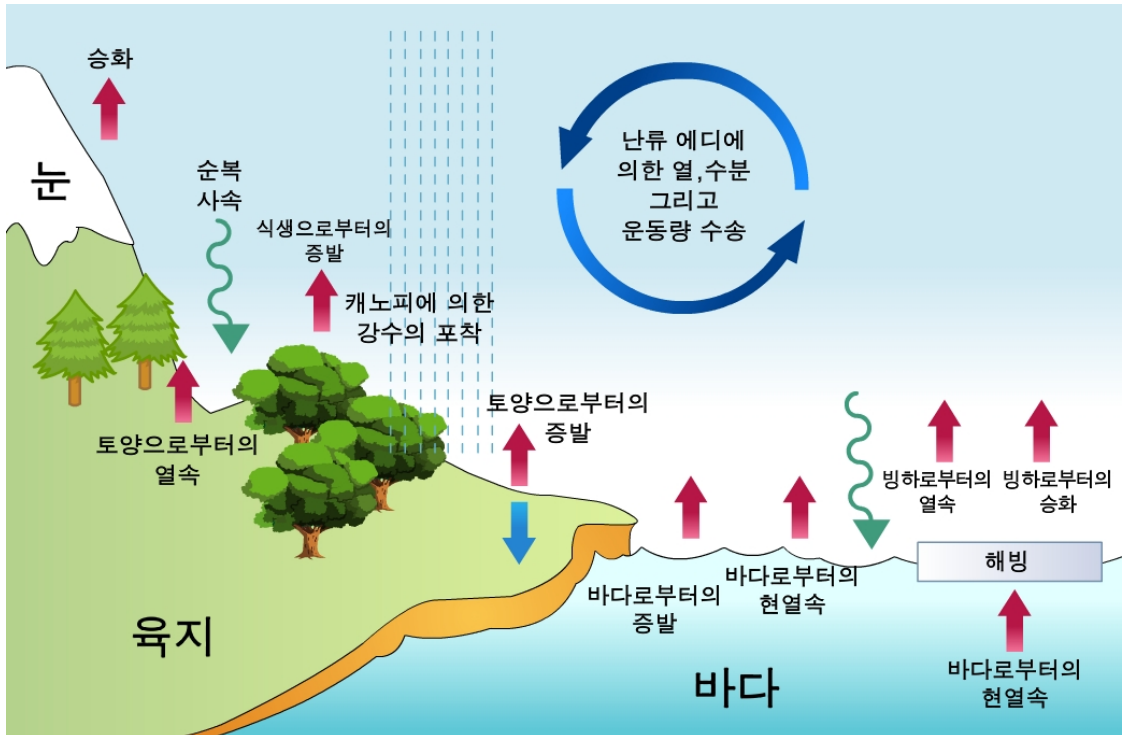
3.7 대기과 지면과정의 모수화

부가된 응력(Stress)은 지형의 아격자 크기 변동과 풍속에 비례한다. 파동들은 연직으로 전파되며 상승과 바람 시어 증가를 통해 안정도를 약화시킨다. 이러한 현상은 바람 시어 크기가 유지 불가능해질 때까지 지속된다. 이 지점에서 파동의 ‘붕괴’가 진단되고 항력이 작용되며, 대기 흐름에 불연속을 야기시킨다. 이는 시어 불안정과 함께 난류의 발생을 의미하며 작은 규모의 난류운동이 대규모 흐름의 운동에너지 흡수한다.

붕괴는 등온위면이 경사지고 역전된 경계층과 하부 성층권에서 주로 발생한다. 이러한 효과는 제트 기류를 약하게 하고 지상 저기압의 키를 작게 하며 다른 경우보다 빠르게 저기압을 약화시키는 겨울철 산악지역에서 가장 크게 일어난다.

3.7.4 지중, 지표와 층간의 과정

‘자유’ 대기에서의 과정들을 나타냄과 함께 지표면 또는 지표면 근처에서 대기에 영향을 주는 과정들도 표현되어야 한다. 이것들은 경계층, 지표 교환, 토양 과정과 수문들을 포함한다. 그림 3.14는 이러한 과정들을 나타내고 있다.



[그림 3.14] 지중, 지표 그리고 경계층의 과정

3.7 대기과 지면과정의 모수화

난류 혼합작용은 경계층의 구조를 결정하는데 있어 필수적인 역할을 하며 모델의 해상도보다 매우 작은 규모로 발생한다. 이것은 지표와 대기사이의 중요한 현열, 수분과 운동량 속을 결정한다. 혼합의 양은 경계층의 구조에 의해 좌우된다. 그러므로 격자점에서 바람과 온도의 연직구조 그리고 구름이 경계층이 6개의 가능한 유형 중 어느 유형인가를 결정하는 데 이용된다. (안정, 중립, 기타). 혼합의 양은 선택된 유형에 좌우된다.

난류 혼합에 대한 거칠기 길이는 다른 요인들과 함께 식생의 비율에 의해 결정된다. 산악지역에서 거칠기 길이는 아격자 규모의 산등성이와 계곡의 효과를 나타내는 지형성분을 갖는다. 적설은 거칠기 길이는 줄이고, 반사율은 증가시키며 상부 지상 2층에서의 열속을 줄여준다. 거칠기 길이는 호수, 경사면, 건물에 영향을 고려한다. 바다에서 거칠기 길이는 파도와 대기 하층사이의 상호작용을 나타내기 위하여 풍속에 비례하게 증가된다. 이들 계산에서 수면에 상대적인 풍속을 결정하기 위하여 해류가 사용된다.

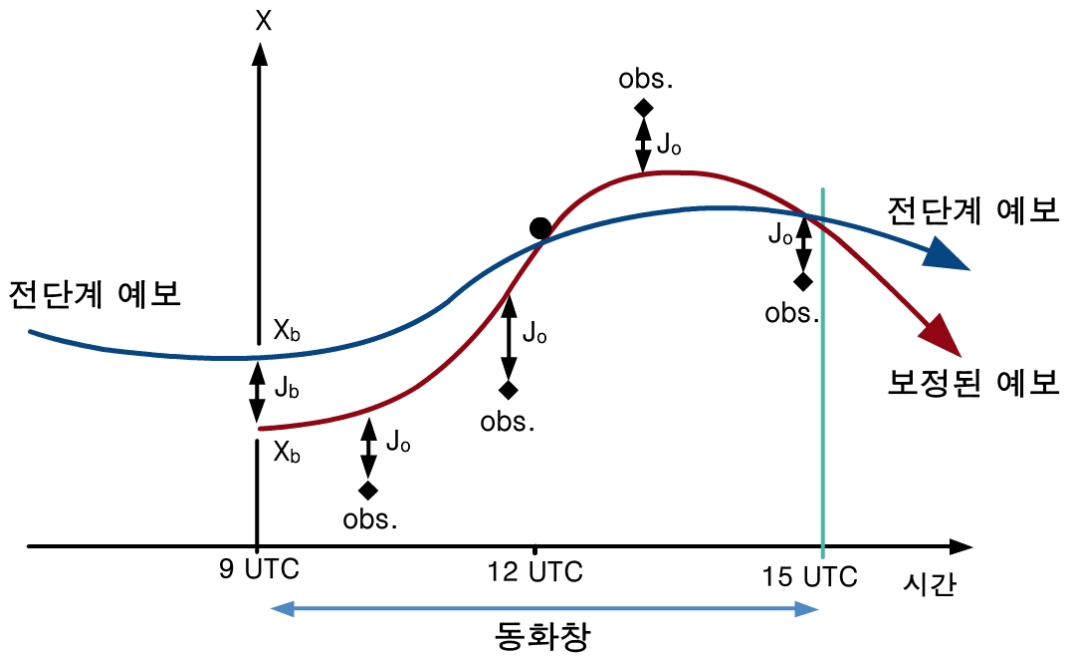
영국 기상청의 지표 교환 스킴(MOSES)은 지표 과정을 처리한다. 이 모델에서 열과 물의 지중 속을 나타내기 위하여 4층 토양 모델이 사용된다. 표면온도를 계산하기 위하여 열평형방정식이 사용되며 이것은 입사 태양 복사, 유출 장파복사, 현열(토양과 대기로 향하는 하향 및 상향) 그리고 잠열(물의 증발과 눈의 녹음에 의한) 속에 대한 항을 포함하고 있다. 눈이 있으면 토양을 고립시킨다. 토양수분은 강수량, 응결 그리고 눈 녹음에 의해 증가되며, 증발, 지표면 유출 그리고 더 깊은 토양으로의 침투에 의해 감소된다.

식물 캐노피(Vegetation Canopy)는 모델의 수문에 있어 여러 가지 방법으로 일정 역할을 한다. 이는 증발산 작용을 통하여 대기에 수분 공급원 역할을 하며, 낙하하는 비의 포착과 직접적인 응결을 통해 물을 획득하고 저장하며, 이러한 물을 흘러내림(Throughfall) 과정을 통해 토양으로 보낸다.

3.8 자료 동화

3.8.1 변분 동화

자료 동화는 모든 수치예보시스템에서 필수적인 부분이고 UM의 현업적 구성에서도 자료 동화를 필요로 한다. 다른 센터에서와 같이 기상청에서도 관측에 포함된 정보와 모델 자료를 혼합하기 위하여 변분동화라 불리는 시스템을 채택하고 있다. 그림 3.15에 이 과정이 도식적으로 설명되어 있다.



[그림 3.15] 단일 변수 x 에 대한 4차원의 변분 동화에 대한 단순화된 그림. 동화 창의 시작에서 모델 상태 x_a 는 이전의 예측점에 대한 적합도 J_b 와 계속되는 단기예측 동안 관측에 대한 적합도 J_o 사이에 통계적으로 잘 일치하도록 조정됨

동화될 자료를 포함한 동화창이 실행되는 동안 모델이 수행됨에 따라 다양한 거리함수(또는 비용함수)들(그림에서 J)이 계산된다. 이들 거리들은 예상되는 에러 특성에 따라 가중되는 배경장(J_b)과 관측(J_o)으로부터 각각 모델과의 거리를 측정한다. 비용함수는 이들 거리들로 정의되며 변분적 분석이라는 과정을 통해 최소화된다. 비용함수의 속성은 변분과정이 정확도가 더 높은 자료에 더 일치하게 맞추려고 시도하는 것이며 그래서 동화창 시작점에서 모델에 최적 추정치를 제공하는 것이다. 비용함수에 대한 더 자세한 사항들은 부록에 있다.

이러한 유형의 동화는 관측의 시간 및 공간 퍼짐까지 고려하기 때문에 4차원 변분법이라고 불린다. 4-D VAR 방법은 전지구 및 지역예측 모델에서 모두 사용된다.

3.8 자료 동화

변분과정은 모델의 전 예보나 배경으로부터 시작하며 본질적으로 반복과정이다. 매 반복 단계마다 대기의 초기 상태에 대한 정교한 추정이 이루어지며 이 반복 과정은 비용함수가 최소로 수렴될 때까지 계속된다.

상당한대로, 이러한 과정은 계산량이 엄청날 수 있으나 이 계산량을 최대한 줄일 수 있는 기술이 채택되었다. 비용함수는 분석의 추정치(초기에는 배경장)로부터 벗어남(섭동)의 향으로 표현되지만, 반복 과정에서 방정식에 의해 선형화된다. 최소화(Minimisation)는 전체 예측 모델과 같은 해상도에서 행해진다.

비록 다양한 역학적 제약조건이 변분 동화에 내재되어 있지만, 결과적인 초기장은 예보가 시작될 수 있을 정도로 충분히 역학적으로 평형이 이루어지지 않았다. 불연속적인 초기화 단계를 채택하는 것 보다는, 분석증분을 취하고 예보모델의 n 적분 단계에 대해 $1/n$ 을 더하는 방법을 이용한다.

접근에 있어서 분석이 증대되고 n 의 시간동안 $1/n$ 의 예측단계들을 다시금 해야 한다. 만약 n (시간)이 충분히 클 경우, 각 적분 단계에서 과생되는 불균형은 모델이 균형 잡힌 상태로 빠르게 조절되도록 충분히 작다. 숫자 n 크기는 동화 창 동안에 수행된 적분단계 수이다(전지구모델에서는 6시간)이고 지역예보 모델에서는 3시간이다.

관측 자료가 각 모델로 동화되는 다른 유형은 표 3.2에 요약되어 있다

[표 3.2] GM, UKV, NAE와 독일 모델에서의 관측자료 동화

전구모델	지역모델	고해상도 모델
SURFACE(synop, buoy, ship), SONDE(temp, pilot, WPF, dropsonde), AIRCRAFT(amdar, airep),	전구모델자료 + SURFACE(aws, amedas)	전구모델자료 + RADAR (RF, radial velocity)
SCATWIND (ascats, ers2), IASI, AIRS, SSMIS, ATOVS (gtovs, rars, ears), GPSRO (cosmic, gras), SATWIND (mtsats, goes, msg, meteosat, modis),	=전구모델 자료	SCATWIND (ascats, ers2), ATOVS(gtovs, rars, ears)

모델에 동화되기 이전에, 모든 관측자료는 품질검사 과정을 거친다. 그들은 기후학적 자료(완전히 비현실적인 자료를 제거하기 위해), 모델 배경자료 그리고 이웃한 관측소의 관측자료들과 비교된다.

3.9 운영상의 예시

예측모델들은 슈퍼컴퓨터 3호기에서 매일 동일한 시간에 규칙적인 주기로 실행된다. 표 3.3은 기상청에서 현재 운용중인 전지구, 다양한 규모 및 목적별 지역예보모델들의 상세한 특성을 보인 것이다.

[표 3.3] 기상청에서 현재 운용중인 모델들의 주요 목적, 특성, 운영횟수 및 예측기간

모델	구분	수평분해능(연직층수)	운영횟수/일	예측 기간	목적
전지구예보모델(GDAPS)	25km(70층)		2회(00, 12Z)	10일	전지구 날씨
			2회(06, 18Z)	3일	
	40km(70층) 24멤버 앙상블		2회	10일	전지구 확률예측
지역예보모델	12km(70층), RDAPS		4회	3일	아시아 날씨
	10km(40층), KWRF		4회	3일	아시아 날씨
초단기분석시스템(KLAPS)	5km(40층)		24회	12시간	한반도 지역
태풍모델(DBAR)	35km		4회 (태풍 발생 시)	3일	태풍경로 및 강도 예측
파랑모델	약 50km(GWW3)		2회	10일	전지구 해상파고
	약 50km(ReWW3)		2회	3일	아시아 해상파고
	약 1km(CoWW3)		2회	1일	한반도 6개 연안
조석/폭풍해일모델	약 8km		2회	3일	아시아 해일고
황사단기예측모델(ADAM)	30km(29층)		2회	3일	아시아 황사예보
통계모델	MOS(UM전구)	254 지점	2회	66시간	동네예보
	칼만필터(UM전구)	6 지점	2회	10일	기온예보
	칼만필터(UM지역)	41 지점	2회	2일	기온예보
	칼만필터(KWRF)	41 지점	2회	2일	기온예보

전지구예모텔(GDAPS)은 6시간 동화 주기로 운영한다. 전지구예모텔의 실행은 다음과 같은 그룹으로 분류한다.

1. 전지구예모텔은 00Z와 12Z에서 유효한 분석장으로 부터 T+ 240까지의 예보를 2회/일로 실행한다. 또한 GDAPS는 중간 분석장인 06Z와 18Z로 부터 T+ 48까지 예보를 수행한다.

GDAPS의 주목적은 예보관들이 단기 예측, 중기 예측, 항공기 예보에 필요한 지역 중관 지침을 제공하고 그리고 지역예보모델을 위한 경계조건을 제공하는 것이다.

3.9 운영상의 예시

- 주기적 분석(at 00Z, 06Z, 12Z와 18Z)을 위해 갱신(Update) 실행이 수행된다. 이 실행들은 다음 단계의 동화주기가 시작되기 전에 분석장을 즉시 재계산하여 가장 최근에 도착한 관측자료들이 동화에 사용되게 함으로써 최상의 분석장을 도출하게 한다.

12km 해상도의 지역예보 모델(RDAPS)와 10km 해상도의 지역예보 모델(KWRF)은 각각 하루에 4회(03Z, 09Z, 15Z와 21Z) + 72시간까지의 아시아 지역의 예보를 수행한다. 초단기분석시스템(KLAPS)에서는 한반도 지역에 대해 24시간까지의 예보를 하루에 24회 수행한다.

요약

기상청의 통합모델은 현업 예보를 위해 다양한 구성으로 실행된다. 전지구 모델, 아시아 지역예보모델 그리고 한반도 지역을 위한 5km 초단기예측시스템으로 이루어지며 이 모델들의 주 특성들은 다음과 같다.

- 모델들은 각각 그리고 기후 연구를 위한 통합모델과도 공통의 컴퓨터 코드와 운영체제를 공유한다.
- 모델들은 일정한 간격의 위도-경도 격자를 사용한다. 전지구모델(GDAPS)은 25km의 수평 해상도를 사용하며, 지역예보모델(RDAPS)은 12km를, KWRF는 10km를 갖는다. 현재 전지구 및 지역예보모델들의 연직 층수는 모두 70개의 연직층을 갖는다.
- 지역예보모델(RDAPS)과 KWRF의 측면 경계 조건은 전지구예보모델(GDAPS)에 의해 제공된다.
- 대기 역학과정은 매우 정교하게 처리된다. 각 모델의 적분시간 간격은 전지구모델에서는 7.5분, 지역예보모델에서는 200초가 사용된다.
- 다음의 물리적 과정은 모수화된다. 대류운과 강수, 층운과 강수, 복사, 경계층과 지면 과정, 그리고 중력과 항력이다.
- 관측정보들은 4차원 변분동화 방법을 이용하여 전지구모델과 지역예보모델로 동화된다.
- 전지구예보모델은 00Z와 12Z에서 유효한 분석장으로 부터 T+ 240까지의 예보를 2회/일로 실행한다. 또한 GDAPS는 중간 분석장인 06Z와 18Z로부터 T+ 72까지 예보를 수행한다. 12km 해상도의 지역예보모델(RDAPS)과 10km 해상도의 지역예보모델(KWRF)은 각각 하루에 4회(03Z, 09Z, 15Z와 21Z) + 72시간까지의 아시아 지역의 예보를 수행한다.

요약

통합모델은 아직 계속 수정 보완중에 있다. 앞으로 예상되는 변화들은 다음과 같다.

- 모든 모델들의 수평해상도와 연직 층수가 향상될 것이다. 모델의 비-정역학적 속성이 이러한 향상을 가능케 할 것이다.
- 대규모와 대류운/강수 기법들을 조합함으로써 모루운(Anvil)의 생성과 다른 기법들의 향상을 유도할 것이다.
- 역학과 모수화 스킴들의 결합을 향상시키고 ENDGAME(Even Newer Dynamics for Global Atmospheric Modelling of Environment)의 일부로 연직좌표계를 향상시킨다.
- FLUME(Flexible UM 환경)이라 불리는 시스템을 개발하여 영국 기상청과 다른 곳에서 개발된 새로운 모델과 스킴들이 아주 쉽게 UM에 결합될 수 있도록 한다.

부록

직교(x, y, z)좌표계에서의 운동방정식들은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega v \sin\phi - 2\Omega u \cos\phi + F_x \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + 2\Omega u \sin\phi + F_y \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2\Omega u \cos\phi - g + F_z \quad (3)$$

UM에서는 전향력의 모든 성분들이 포함된 원시방정식들이 사용된다. 방정식 (1)과 (3)에 유사한 근사화 하지 않은 완전한 운동방정식들이 사용된다. 모델이 비정역학이라 미래에 해상도 향상이 가능하며 (3)에서 연직가속도항을 무시하지 않는다. (3)식에서 전향력 항 $2\Omega u \cos\phi$ 도 포함한다.

UM 방정식의 또 다른 특징은 천수대기 근사를 사용하지 않는 점이다. 이것은 지표로부터 대기상단 사이에서는 지구중심으로부터의 거리가 매우 조금 변한다는 것에 기초한다. 이러한 가정을 사용하는 모델들에서는 지구중심으로부터의 거리는 상수로 정의된다. 실제 대기에서는 각 운동량 보존 원리에 의하여 상승하는 공기덩이가 지구 자전축으로부터 멀어져 고도가 높아짐에 따라 약하지만 상대적으로 동풍 운동량을 획득하게 될 것이다. 적도에서 지표면으로부터 대류권계면까지 상승하는 공기덩이는 동풍성분에서 2ms^{-1} 의 변화를 경험하게 된다. 이 효과도 UM에서는 포함하고 있다.

변분 자료동화에서 최소화되어야 하는 비용함수는 다음과 같다.

$$J = (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + (y_o - H(x))^T (E + F)^{-1} (y_o - H(x)) + J_c$$

여기서

J : 비용함수

x : 모델 상태를 나타내는 벡터

x_b : 모델 배경장을 나타내는 벡터

B : 모델배경오차에 대한 공분산 행렬

y_o : 관측벡터

H : 관측에 대한 모델의 예측을 제공하는 전방모델연산자

E : 관측에러에 대한 공분산 행렬

F : 전방모델 연산자 에러에 대한 공분산 행렬

J_c : 우리가 적용하고 싶은 역학적 평형 같은 강제력(구속조건)

부록

이렇게 간단한 형태의 비용함수 J 는 2개의 차항의 합으로 표시할 수 있다. 첫 항은 배경장으로부터 분석장의 편차를 측정하며 배경오차 공분산 행렬에 역비례하게 가중된다. 두 번째 항은 관측자료로부터 모델 예측자료의 편차를 측정하며 관측과 전방모델 연산자 에러 공분산 행렬의 조합에 반비례하게 가중된다. 위 공식에서 E 는 측기에러를, F 는 본질적으로 대표성과 관계되는 오차를 의미한다.

연습문제

1. 통합모델과 가변격자계의 장점에 대해 논하시오.
2. 수치모델에서 산출되는 주요 예단변수들을 제시하시오.
3. 수치모델의 실행에 필요한 지표면(하단) 경계조건에 대해 설명하시오.
4. 모수화의 정의와 모수화가 필요한 물리과정을 제시하시오.
5. 자료동화와 비용함수를 정의하고 현재 기상청의 자료동화 시스템에 대해 설명하시오.

4장. 자주 사용하는 모델 자료

- 4.1 서론
- 4.2 모든 고도에서 사용하는 일반 모델 변수
- 4.3 지상변수
- 4.4 925hPa
- 4.5 850hPa
- 4.6 700hPa
- 4.7 500hPa
- 4.8 300hPa
- 4.9 그 외 자주 사용되는 모델 변수
- 4.10 예보 단열선도
- 4.11 앙상블
- 4.12 지침, 신뢰와 검증

학습목표

- 모델의 모의자료 표현방법에 대해 안다.
- 지상에서의 기상요소 표출 및 해석법에 대해 안다.
- 대기권에서의 기상요소 표출 및 해석법에 대해 안다.
- 기타 예보에서의 모델자료 사용방법과 주의점에 대해 안다.

4.1 서론

4.1.1 모델 자료 표시 방법

후처리된 모델 자료를 표시하는 방법에는 여러 가지가 있다. 기상청의 컴퓨터 시스템의 화면상에 표출할 수도 있고, 사용가능한 온라인상의 웹사이트에서도 표출할 수도 있다. 자동적으로 생산되는 일기도는 전구 모델의 각각의 실행으로부터 직접 생산된다. 일기도 가운데 가장 기본적인 정보를 제공해주는 형태로서 전구모델의 예보장이 있다.

전구모델의 예보장은 기본적으로 여러 기압고도 (지상, 850, 700, 500, 200hPa)에서의 일기 예보 정보를 제공한다. 각각의 일기도는 고도별로 정해진 간격으로 표시된 그 기압의 고도장을 배경으로 하고 있으며, 그 기압면에서 유용한 다른 정보들 강수량, 해면기압, 고도, 기온, 혼합비, 와도, 풍속, 상당온위 등을 적절히 표현한다.

일기도들은 00UTC 및 12UTC 시각의 모델 결과로부터 T+0 부터 T+72 까지는 3시간 간격, T+84 까지는 6시간 간격, T+252 까지는 12시간 간격으로 표현된다. 06UTC 및 18UTC 시각의 모델 결과는 T+72까지 표시된다.

그 밖에 전구 모델 예보장은 눈혼합비, 강설량, 강수량, 면적강수량, 지상 습수, 하층의 습수, 10m 바람 등의 예보 요소를 표출한다. 또한 보조일기도로서 925, 850, 700hPa의 전선강도, 저기압 이동경로, 층후 이류, 상승속도, 와도 이류, 고도변화, 유선, 가강수량 등의 일기도들이 작성된다.

4.1.2 일기도 명명법(Chart Labelling Conventions)

전구 모델 일기도는 모델 실행을 나타내는 문자정보를 포함하고 있다.

- TIME은 정보가 발생된 시간을 의미(UTC [세계시간]과 KST [한국시간]가 병기됨)
- 모델 정보(GDAPS는 전 지구 모델, UM은 모델명, N512L70은 수평격자와 연직층수를 표시)
- 일기도에 표현된 변수명

4.1 서론

각 일기도는 그 일기도가 언제 유효한가를 나타내는 다음과 같은 것들을 갖고 있다.

VALID : 09UTC 13 NOV 2011 (+ 069h)

- 유효시각 정보(0900 UTC 11월 13일)
- TIME 이후 유효시각(69시각)

화면에 보이는 정보는 주로 위와 비슷한 방식으로 명명되며, 사용된 예보 모델, 모델 실행 시작 시각(TIME 또는 TIME 이후 시간), 그리고 모델 변수들이 유효한 때(유효시각)를 포함하고 있어야 한다.

4.2 모든 고도에서 사용하는 일반 모델 변수

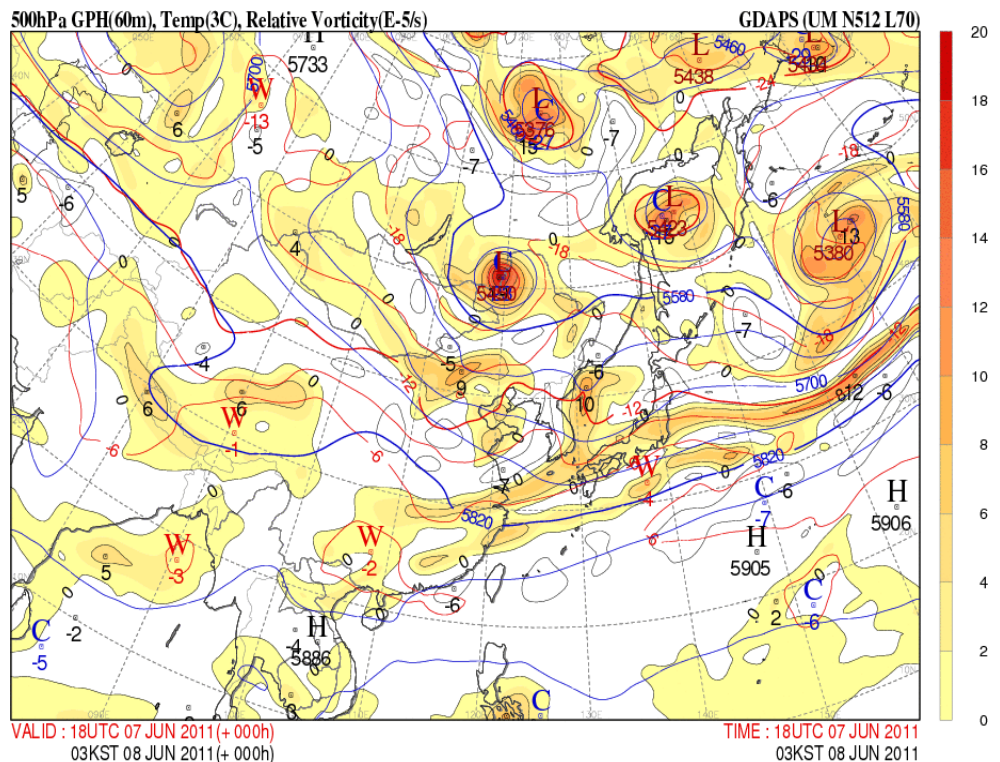
여기서는 대기의 여러 고도에서 유용한 몇 개의 변수(또는 장 : Fields)들에 대해서 설명한다.

4.2.1 지오퍼텐셜 고도

다양한 등압면의 고도는 등압면마다 정해진 간격 단위로 표시하며, 예를 들어 관습적으로 500hPa에서는 60m 간격으로 표시한다.

상층대기(주로 300hPa과 500hPa 일기도)에서의 등압면 지오퍼텐셜 고도의 값은 특히 상층대기에서의 기압골과 기압마루를 찾는 데에 유용하게 쓰인다.

기상청에서는 고도장(푸른 색), 온도(붉은 색) 그리고 상대와도(음영)도 함께 표현한다(그림 4.1). 온도가 상대적으로 높은 곳에는 W, 낮은 곳에는 C로 표시한다. 등고도선과 등온선의 간격은 각각 60m와 3°C이다.



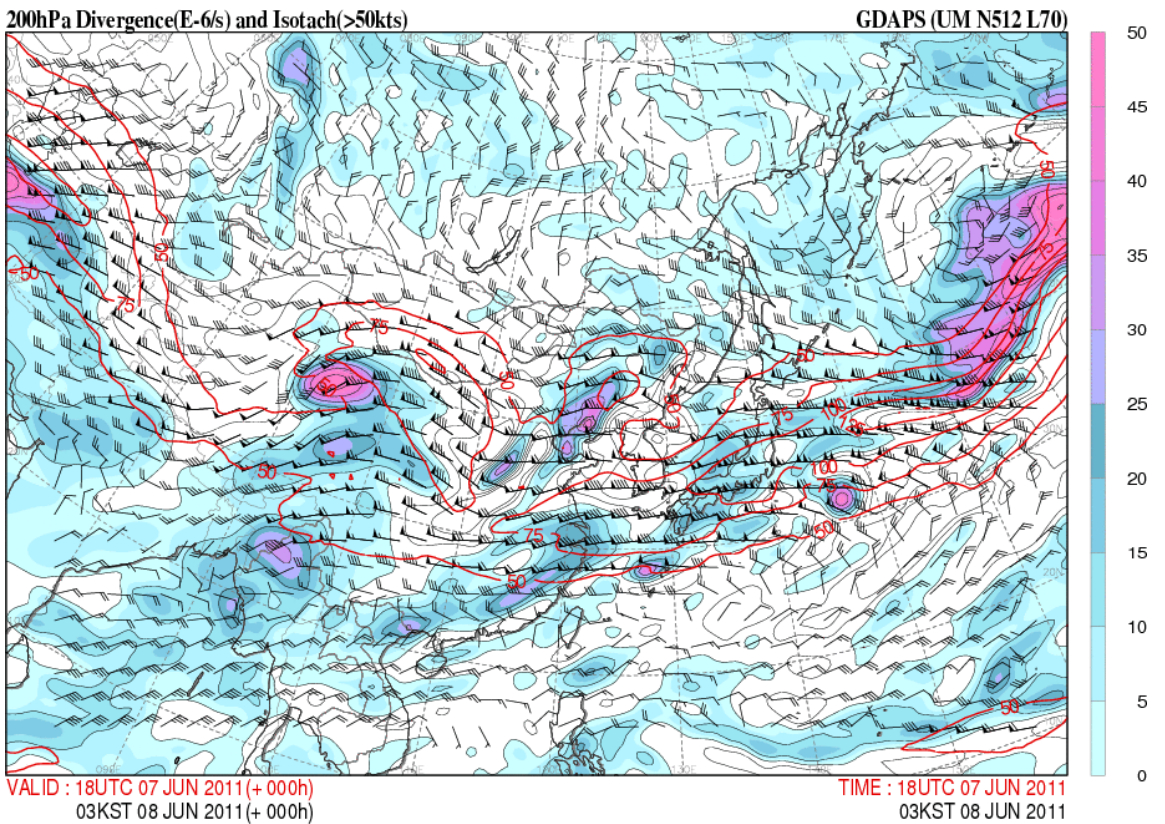
[그림 4.1] 해상도 24km 전구 UM 모델로 예측한 500hPa 에서의 고도장(gpm)과 온도장(°C)

4.2 모든 고도에서 사용하는 일반 모델 변수

4.2.2 바람

바람은 풍향과 풍속으로 나타내는데 풍향은 북쪽을 기준으로 해서 시계 방향으로 나타내고 풍속은 깃가지로 도시되며 특히 풍속이 강한 지역(200hPa에서는 > 25m/s, 850hPa에서는 > 15m/s)에는 등풍속선을 추가로 나타낸다.

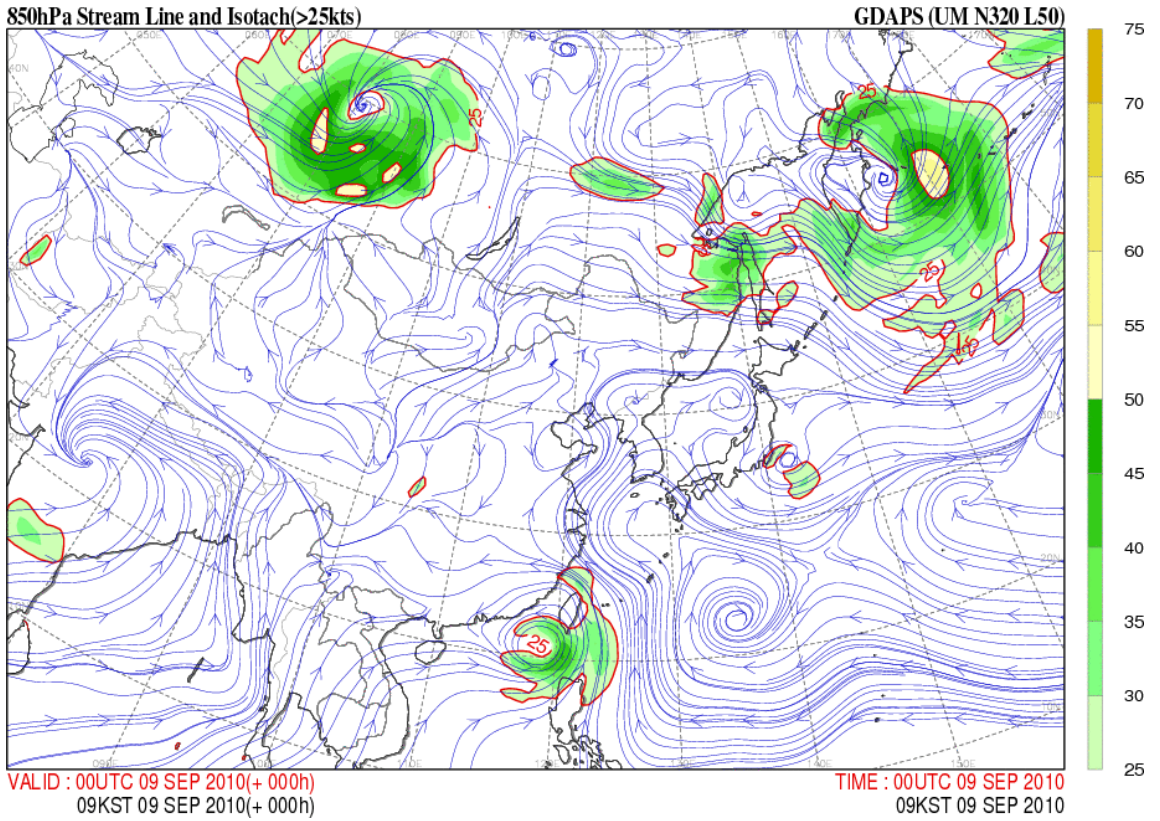
그림 4.2는 200hPa 면에서의 바람장을 발산장과 함께 나타낸 것이다. 우리나라 남쪽에서 일본열도에 이르기까지 풍속 50m/s 이상의 강한 제트가 존재함을 알 수 있다.



[그림 4.2] 해상도 24km 전구 UM 모델로 예측한 200hPa에서의 바람장(삼각깃 : 25m/s, 완전깃 : 5m/s, 반깃 : 2.5m/s)과 발산장

4.2 모든 고도에서 사용하는 일반 모델 변수

바람들은 깃가지로 표시되기도 하지만 등풍속선과 유선도 공통적으로 사용된다.



[그림 4.3] GDAPS에서 예측한 850hPa 에서의 유선과 풍속

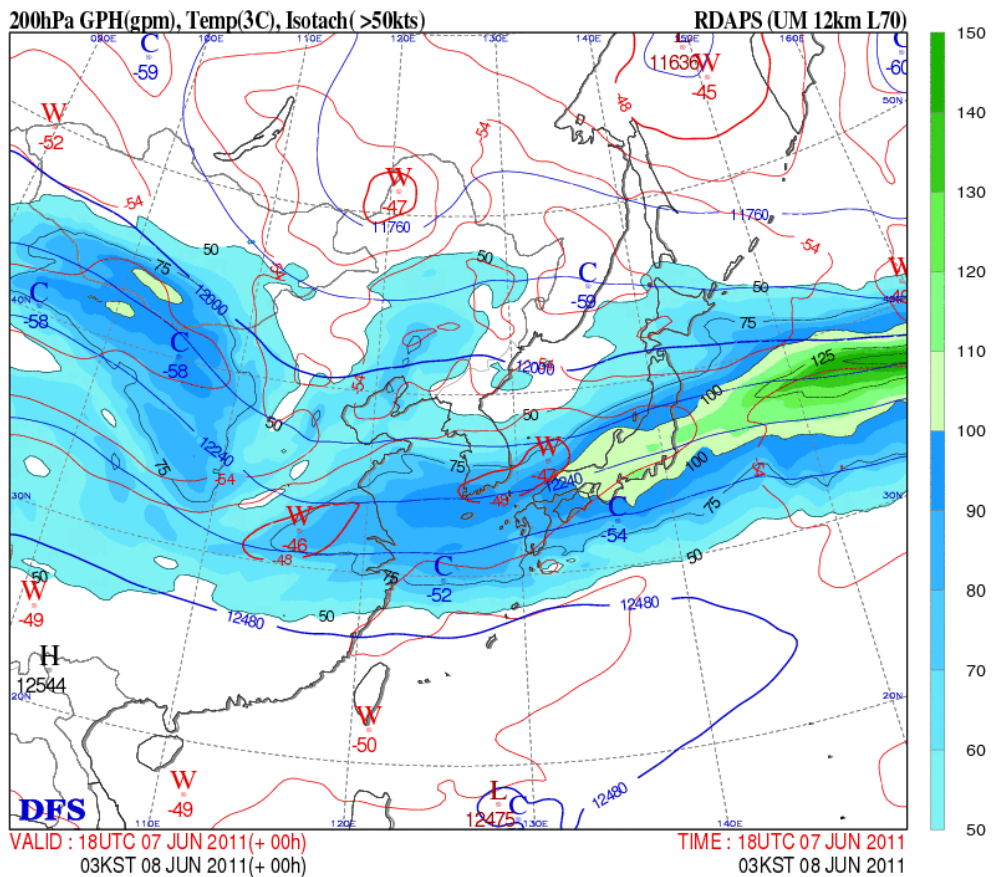
4.2 모든 고도에서 사용하는 일반 모델 변수

4.2.3 기온

기온 또한 자주 사용하는 모든 기압고도에서 나타낸다.

기온은 주로 숫자, 등치선 또는 색으로 표시하며 그림 4.1과 그림 4.4에서는 붉은 색 선으로 나타내었다.

그림 4.4에서 기온이 상대적으로 높은 곳과 낮은 곳에는 W와 C를 표시하였으며 동아시아 지역에서의 200hPa 면의 기온은 -45°C 에서 -54°C 의 분포를 보이고 있다.

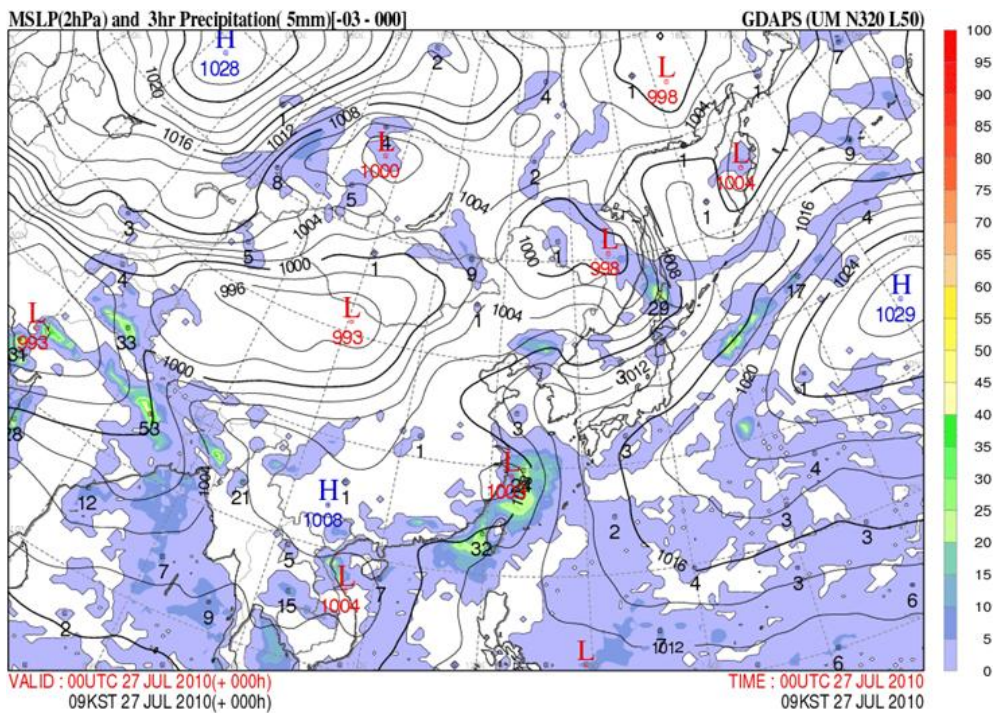


[그림 4.4] 해상도 12km 지역 UM 모델로 예측한 200hPa에서의 고도장(gpm)과 온도장($^{\circ}\text{C}$)

4.3 지상변수

4.3.1 평균해면기압(MSLP)

기압은 통합모델(UM)의 기본적인 예단변수로서 모델 역학 방정식들의 계산으로부터 직접 산출된다. 모델 장에 표시된 기압은 해수면고도로 경정된 기압이다. 기압은 주로 2 또는 4hPa 간격의 등압선(주로 검정)으로 표시된다(그림 4.5). 상대적으로 기압이 높은 곳에는 H를, 낮은 곳에는 L을 표시한다. 그림 4.5에서는 몽골과 연해주지역을 중심으로 중심기압 993~998hPa의 저기압들이 위치함을 볼 수 있다.



[그림 4.5] GDAPS에서 예측한 해면기압(hPa) 및 강수량(mm)

4.3.2 1.5m 높이에서의 기온

모델에 표시된 지상 기온은 지상에서부터 1.5m 위의 기온을 나타낸 것이며, 이것은 주로 숫자, 등치선, 또는 색칠하는 방법으로 표시한다.

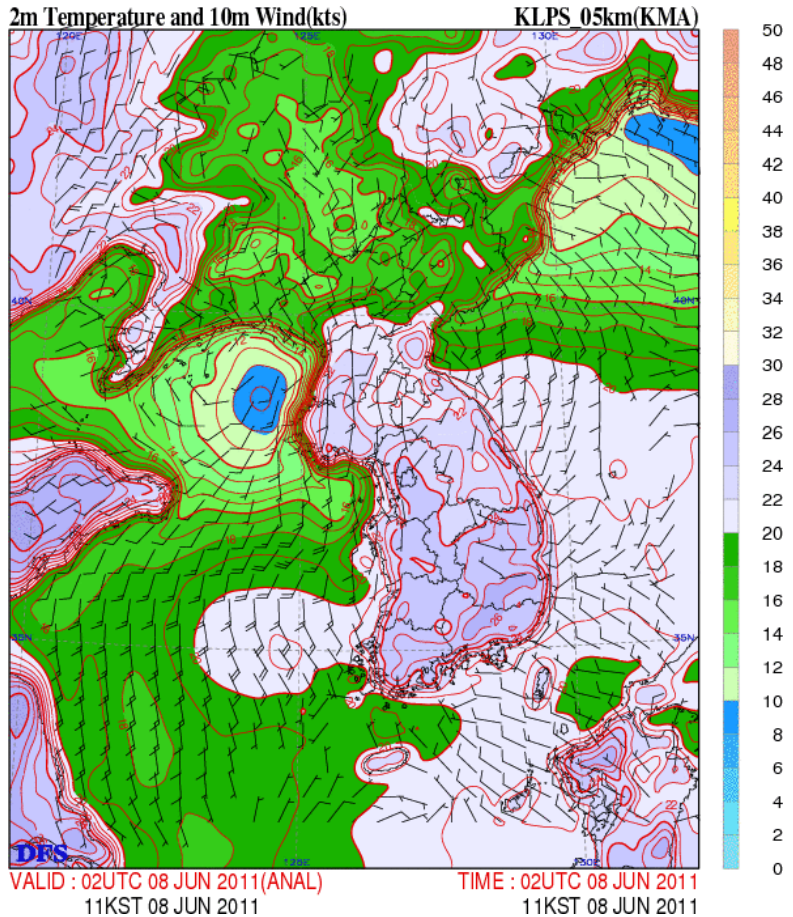
모델 산출물 통계(Model Output Statistics : MOS)방식의 모델 자료 후처리가 가능하다. 보다 상세한 것은 기온예보에 대한 기상청의 ‘기온 예보법 실무과정’을 참고하기 바란다.

4.3 지상변수

4.3.3 10m 높이에서의 바람

바람의 속도는 노트 단위의 깃가지를 사용하여 표시한다. 이것은 지상에서 부터 10m 상공의 바람, 즉 표준 측정 장비와 같은 높이에서의 바람이다.

바람은 유선으로도 표시가 가능한데, 이는 대류가 가능한 상황에서 수렴하는 지역을 찾기 위한 예보관들에게 유용하게 이용된다.



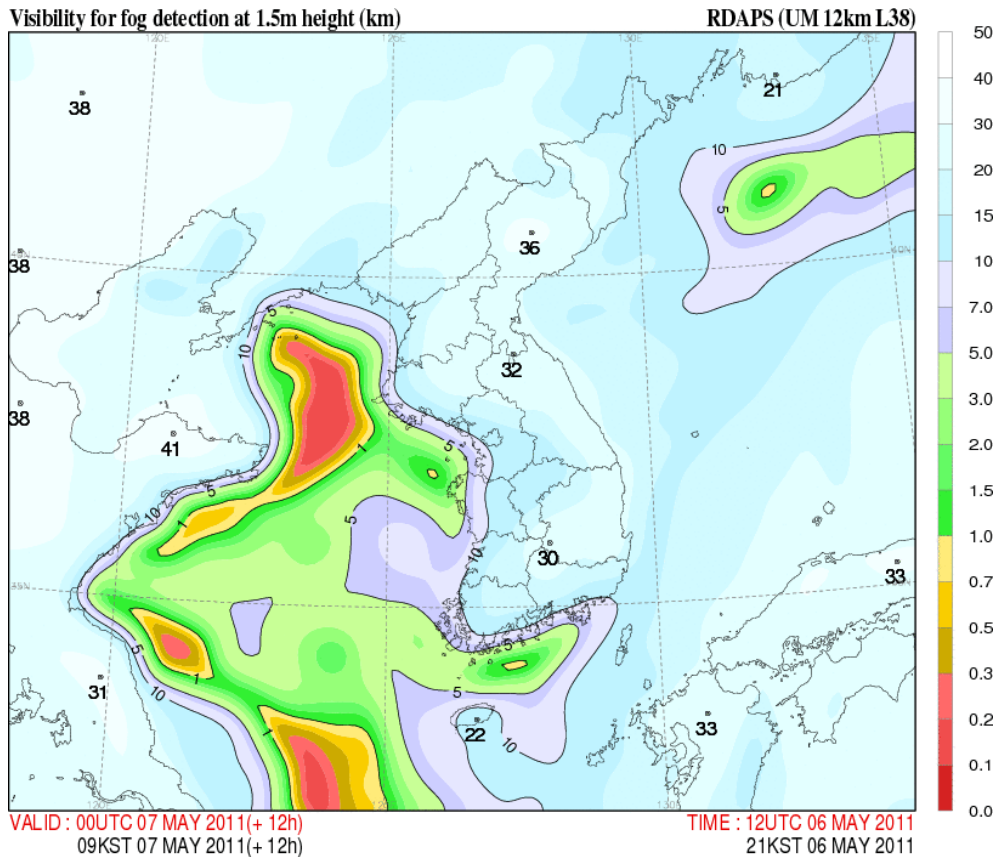
[그림 4.6] KLAPS에서 분석한 지상 2m에서의 온도와 10m 고도에서의 바람장 분포

4.3 지상변수

4.3.4 시정

시정의 표준 단위는 미터(m)와 킬로미터(km)이며, 이것은 등치선이나 색칠하는 방법으로 표현한다.

낙하하는 강수를 고려하지 않고 상대습도와 에어러솔 양의 변화만을 고려한 시정을 사용할 때는 주의를 하여야 한다. 따라서 모델이 비 또는 가랑비와 함께 시정을 5,000m 로 예보한다면 실제의 시정은 이보다 상당히 짧을 수 있다.



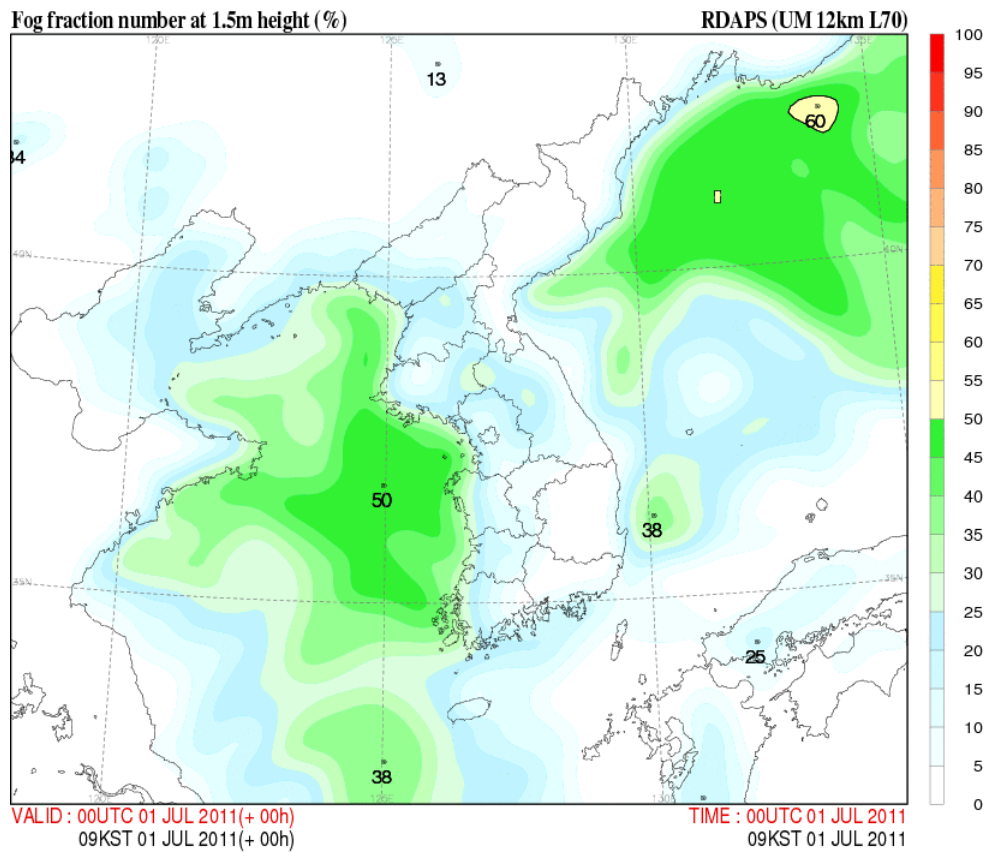
[그림 4.7] RDAPS에서 예상한 1.5m 고도에서의 시정(m)

4.3 지상변수

4.3.5 안개비율

모델에서의 안개비율은 지상층에서 단순히 모델에 의해 진단된 운량 비율 (%)이다.

1.5m 고도에서의 안개 비율을 그림 4.8과 같이 나타내며 서해와 오후츠크해역에서 안개비율이 40% 이상으로 높게 나타나고 있고 그 밖의 지역에서는 안개비율이 매우 낮게 나타나고 있다.



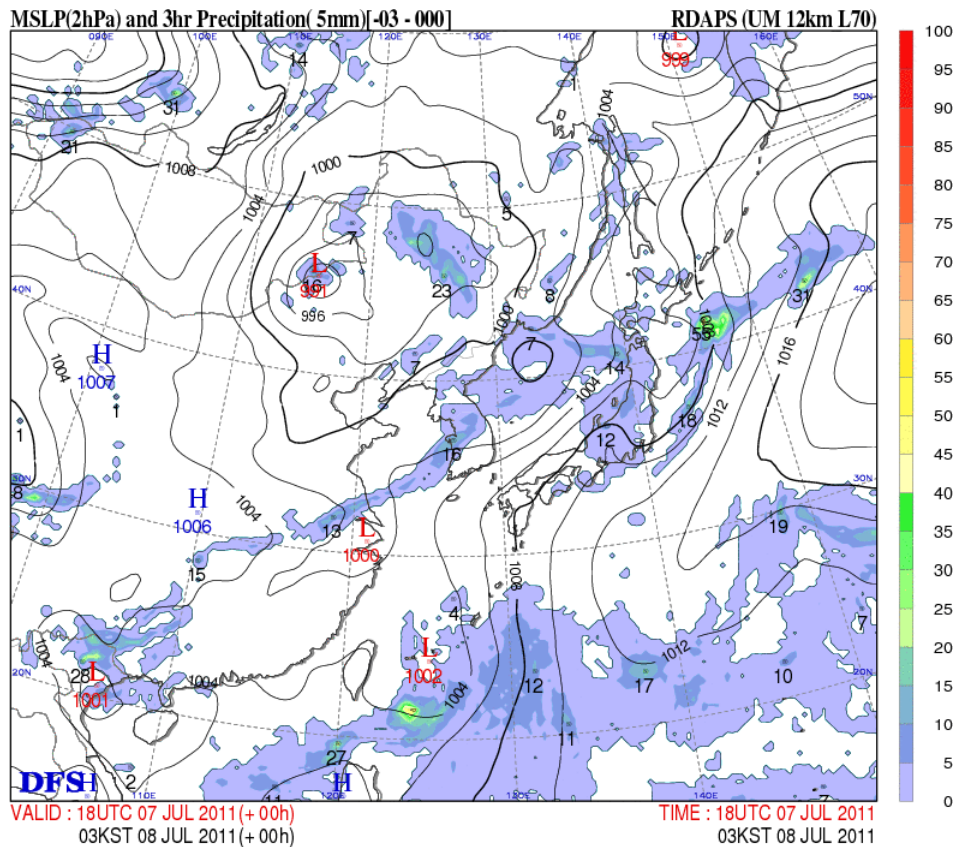
[그림 4.8] RDAPS에서 예측한 1.5m 고도에서의 안개비율

4.3 지상변수

4.3.6 강수

강수의 경우 최근에는 강수강도 또는 누적 강수량을 주로 색으로 표시하며 그림 4.9는 지상기압과 함께 3시간 누적강수량을 5mm 간격으로 나타낸 것이다.

2011년 7월 7일 18UTC에는 중국 상해에서 우리나라 중부지방 - 동해에 걸쳐 동서방향으로 길게 확장된 강수대를 예보하고 있다. 여기서 강수 강도는 격자 영역에 대해 평균된 것임을 알아야 한다.

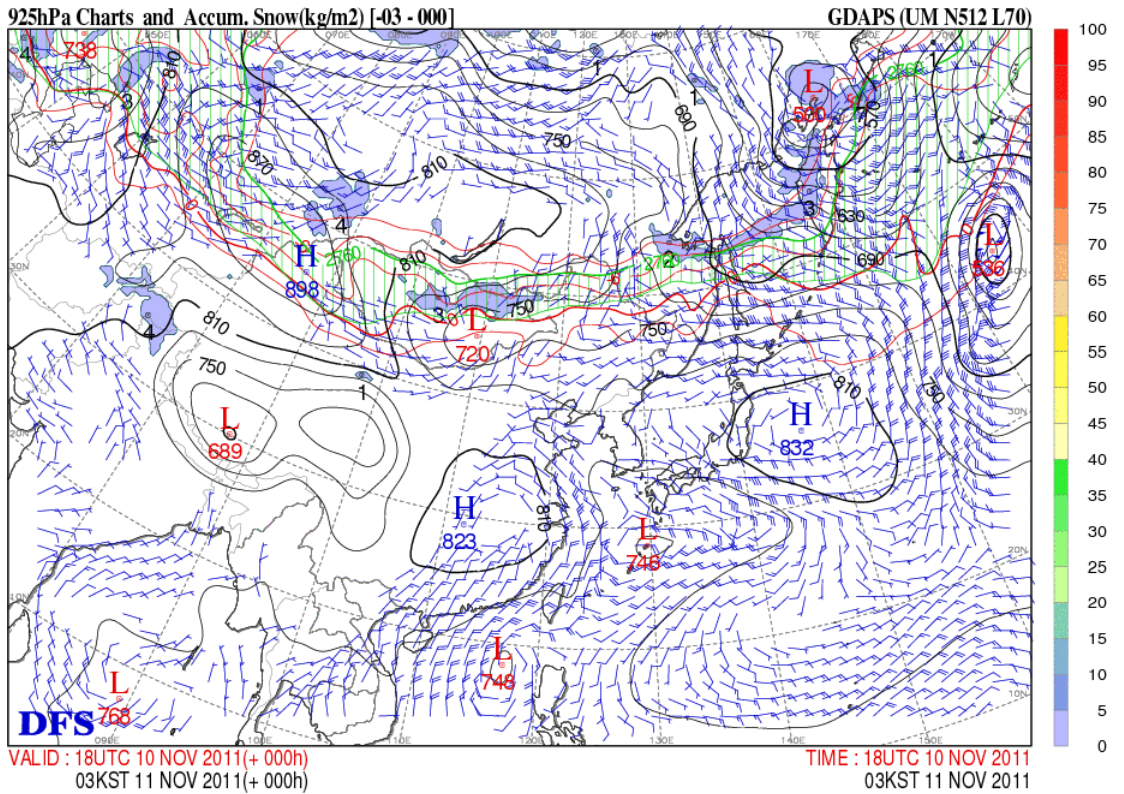


[그림 4.9] RDAPS에서 예측한 2011년 7월 7일 18 UTC의 해면기압과 3시간 누적 강수량 분포

4.3 지상변수

4.3.7 강설

강설량 예보장에는 925hPa의 고도장, 5kts 이상의 바람장이 그려지며, 전 구 및 지역모델이 추정한 누적 강설량은 색칠로 표시된다(그림 4.10 참조). 동시에 강설 예보를 판단하기 위한 참고자료로서 0도 근처의 기온선, 1000-700hPa 층후 중 2,760m선이 병기된다.



[그림 4.10] 925hPa 면에서의 등고도선(검정색), 등온선(빨간색), 바람 벡터, 1000-700hPa 층후선(초록색)과 함께 나타난 강설량(색칠 표시)

4.4 925hPa

925hPa 면은 지상 고/저기압 위치를 확인하고 온도분포를 이용하여 전선의 위치를 결정하는데 활용한다(그림 4.11 참조).

겨울철 아침 최저기온은 역전층 하부에서 나타나므로 최저기온 예보에 활용한다. 925hPa 기온은 겨울철 대륙성 고기압의 확장에 따른 한기의 남하와 관련된 강설현상의 분석에 주로 활용된다.

해수면 온도와 하층 대기온도의 차이가 클수록 현열의 연직 수송에 의해 하층대기가 불안정한 기단으로 변화하기 쉽기 때문이다. 또한 역전층의 깊이를 이용하여 안개 등의 예보에 활용한다. 전선강도 분석도, 강설량, 눈 혼합비, 습수 분석을 비롯하여 청천난류(CAT)을 예측하기 위해 925hPa 면 일기도가 제공된다.

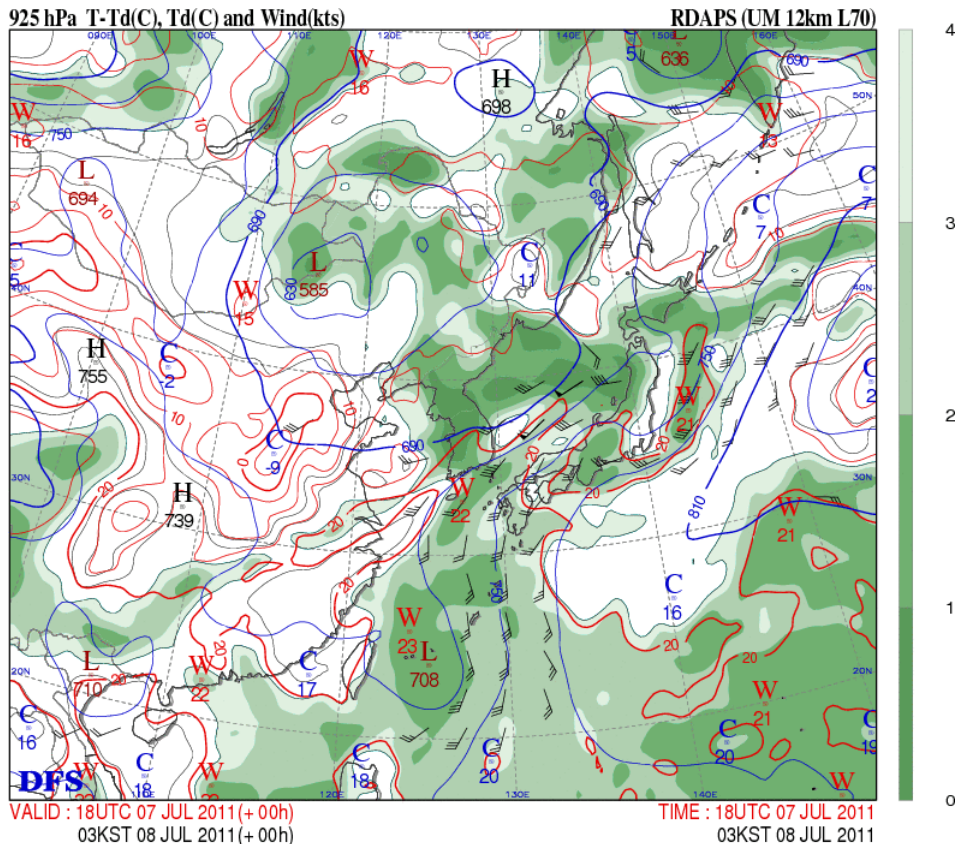
4.4 925hPa

4.4.1 전선발생

그림 4.11은 925hPa 면에서의 습수(칠한 부분), 등온선, 등고선, 그리고 바람을 동시에 나타낸 것이다. 등고선은 810gpm을 기준으로 30gpm 간격으로(단, 겨울철에는 60gpm 간격) 도시하고 온도는 3°C 간격으로 도시하며 습수가 4°C 이하에 대해서 그림과 같이 색칠을 한다.

우리나라 남해안 지역으로 20m/s 이상의 강한 남풍~남서풍이 불고 있음을 볼 수가 있다. 또한 우리나라 대부분 지역에서 습수가 1°C 이하로 작게 나타나고 있어 구름 및 강수발생 가능성이 높음을 알 수 있다.

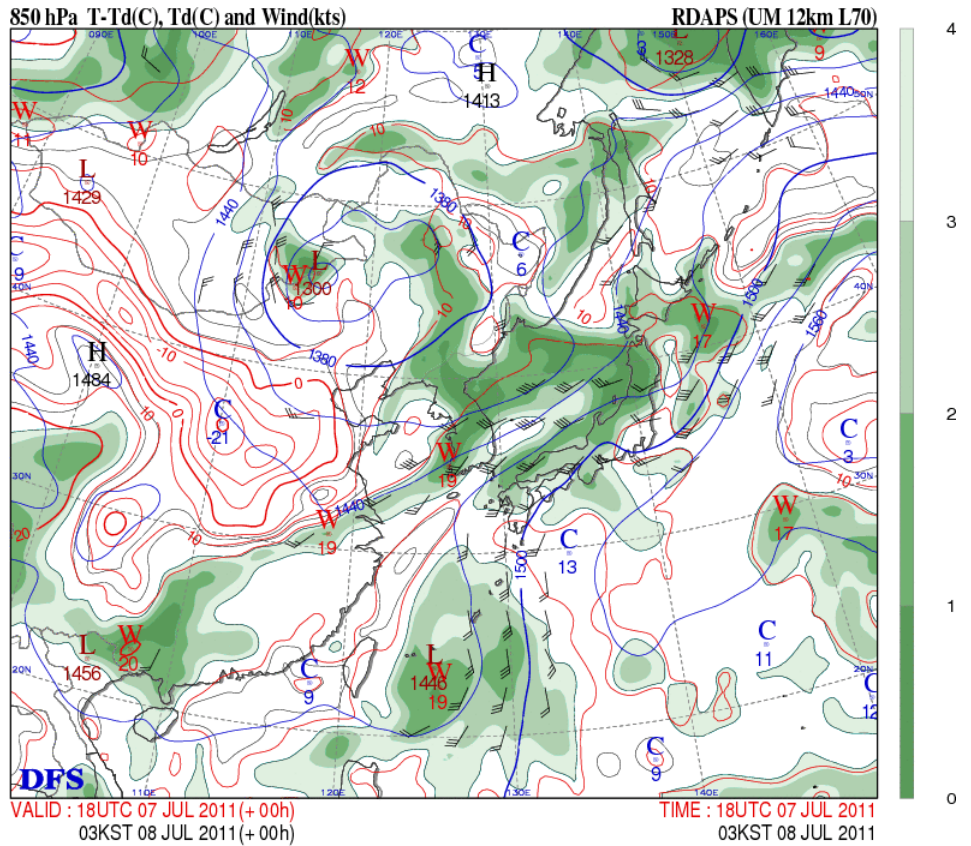
그림 4.11은 925hPa 상에서의 전선강도 예측 정도를 나타낸 것이다. 그림에 표시된 전선발생함수는 수평기온경도(온위경도)의 시간적 변화를 의미한다. 이 값이 양이면 전선의 강화를 의미하고 음이면 전선의 소멸 또는 약화를 의미한다. 전선의 활성화 정도는 전선에 수직한 방향으로 등온선의 조밀도의 강화/쇠약 여부로 판단할 수 있다.



[그림 4.11] 925hPa 면에서의 등온선(붉은 색), 등고도선(푸른 색)과 함께 나타낸 바람장(삼각깃: 25m/s, 완전깃: 5m/s, 반깃: 2.5m/s)

4.5 850hPa

850hPa 면은 대략 대기의 1,500m 면과 동일하며, 이 고도에서 가장 유용한 모델 변수들은 습구온위와 1000-850hPa 층후이다. 이 고도에서는 온도가 지형, 복사의 영향을 받지 않으므로 전선분석에 자주 이용되며 습수($T-T_d$)가 3°C 이하인 곳은 색칠을 하여 습윤지역임을 나타낸다. 또한 악기상 발생시에는 국지적으로 25m/s 이상의 강풍이 부는 하층 제트기류가 나타나기도 한다.



[그림 4.12] 850hPa 면에서의 습수(음영), 노점온도(붉은 색)와 함께 나타낸 바람

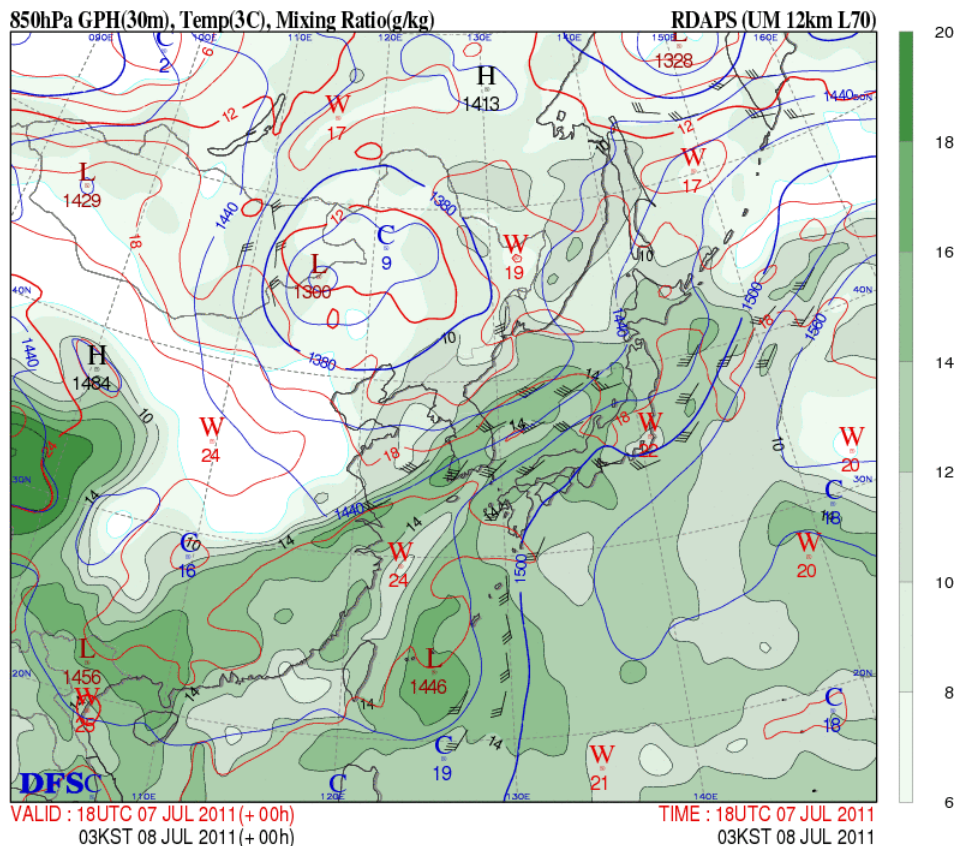
4.5 850hPa

4.5.1 습구온위

습구온위(θ_w)는 850hPa 면을 분석하는 데에 제일 유용하게 쓰이는데, 그 이유는 동일 기단내에서는 θ_w 가 보존되고 θ_w 의 강한 경도는 전선을 의미하기 때문에 기단들을 특성화하기 쉽기 때문이다. 지상에서의 전선은 θ_w 경도 지역에서 온난한 지역에 위치하는 경향이 있다. 폐색전선은 등온선에서의 마루화(Ridging)로 확인할 수 있다.

분석 자료와 비교해 볼 때, 모델 전선은 특정 습구온위 값을 따라가는 경우가 많다. 이는 모델의 연속되는 예보 자료에서 전선을 추적할 수 있게 한다.

그림 4.13은 12km 해상도의 지역예보모델(UM)로 예측한 2011년 7월 7일 18UTC의 850hPa에서의 고도장, 온도장 그리고 혼합비를 함께 나타낸 것이다. 중국 남부에서 우리나라-일본열도에 이르는 넓은 지역에 혼합비가 14g/kg 이상의 많은 수증기가 존재함과 동시에 강한 남서풍이 불 것으로 예측하고 있음을 볼 수 있다.



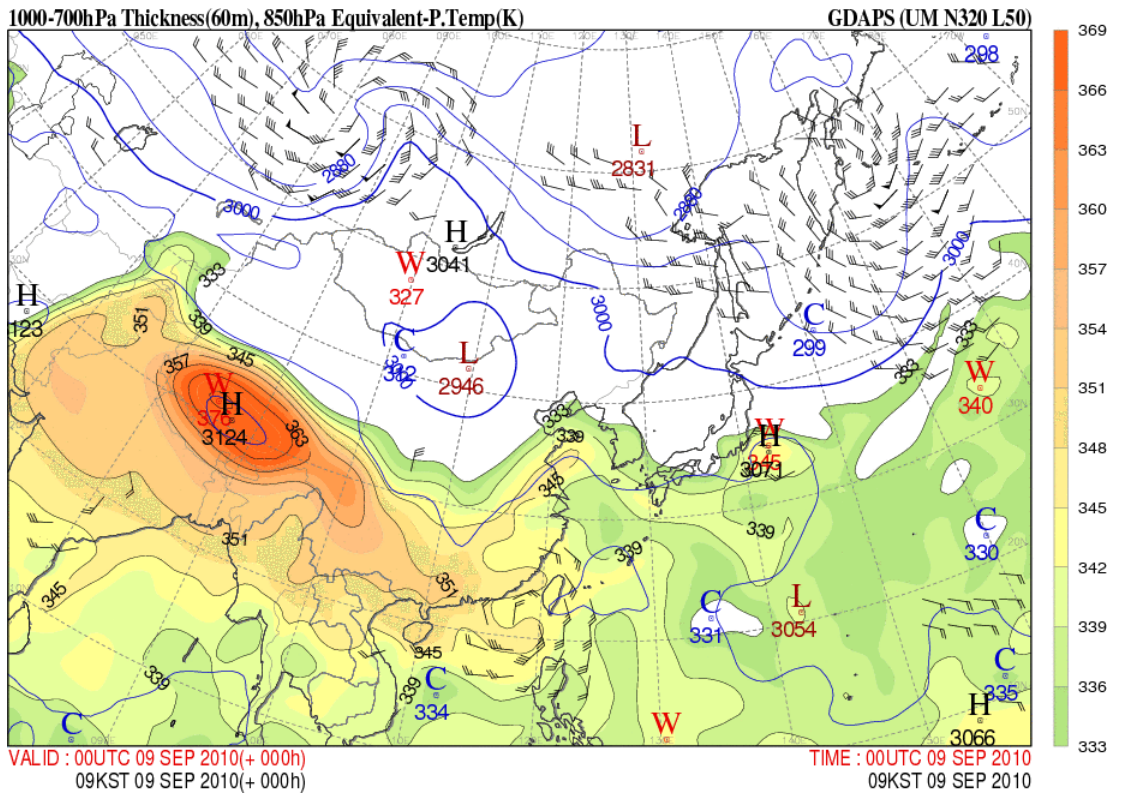
[그림 4.13] 850hPa 면에서의 지위고도(푸른색), 등온선(붉은색), 혼합비(음영)

4.5 850hPa

4.5.2 1000-850hPa 층후

1000-850hPa 층후는 눈 내릴 가능성을 평가하는 보이든(Boyden) 방법과 칼렌(Callen)과 프레스콧(Prescott)의 최고기온 방법에서 사용되는 중요한 요소이다.

층후는 온도에 비례하기 때문에 1000-700hPa의 층후를 알면 850hPa의 고도를 대략 알 수 있다. 동아시아 지역에서 1000-700hPa의 층후는 60m 간격으로 도시하며 파란 색 등치선으로 나타낸다.



[그림 4.14] 전구모델의 1000-700hPa 층후, 850hPa 상당온위

4.6 700hPa

700hPa 면은 대략 대기의 3,000m 고도와 동일하며 이 고도에서 가장 유용하게 사용되는 변수는 상대습도이다.

4.6.1 상대습도

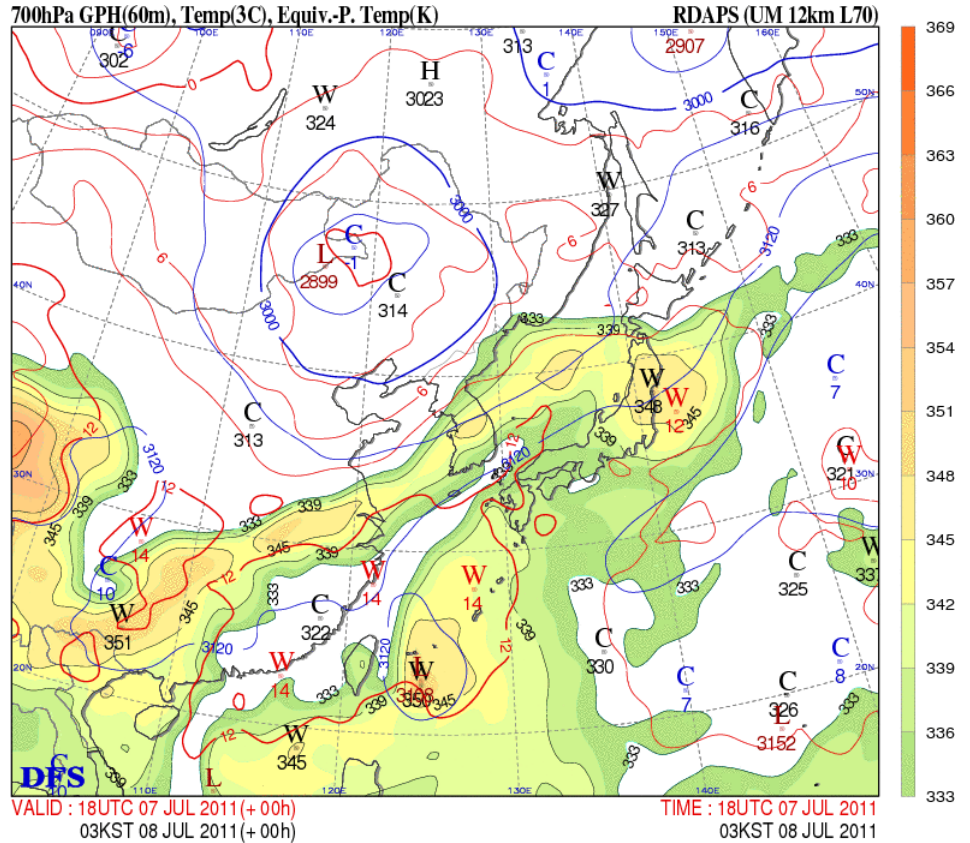
이 고도에서의 상대습도 분석은 때때로 전선대와 강수 가능성과 관련되어 있는 중층운 발생 가능성에 대한 좋은 단서를 제공한다.

주요 관심지역

- > 95% - 활동적인 전선상에서 전형적인 두꺼운 중층운과 중간 또는 강한 강수를 의미
- > 76% - 광범위한 중층운과 강수의 가능성을 제시한다.
- < 19% - 이 고도에서 구름이 극히 일부 있거나 전혀 없음을 나타낸다.

4.6 700hPa

그림 4.15는 12km 해상도의 UM이 예측한 2011년 7월 7일 18UTC 700hPa 면에서의 상당운위를 나타낸 것으로 상당운위가 333K 이상에 대해 칠을 하였다. 앞에서와 같이 상당운위가 333K 이상의 습윤하고 잠재 불안정한 영역이 중국남부에서 한반도-일본열도에 이르는 광범위한 지역에서 발달하는 것으로 예측하고 있다.



[그림 4.15] 700hPa 면에서의 지위고도(푸른색), 등온선(붉은색), 상당운위(음영)

4.7 500hPa

500hPa면은 약 5,500m 고도에 해당되며 비발산고도이다. 1000-500hPa의 층후는 이 고도에서 온난 및 한랭 이류가 발생하는 위치를 찾는 데 가장 많이 분석되는 장이다. 500hPa 온도는 또한 찬 공기 풀을 탐지하는 데에 유용하게 쓰이며 그 결과 강화된 대류가 가능한 지역을 찾는 데도 사용될 수 있다. 일반적으로 500hPa 골 전방에 위치한 지상 저기압은 발달하지만 후방에 있으면 약해진다. 또한 기압골의 축이 500hPa 면까지 수직일 때 지상 저기압은 발달하며 기압골 아래에 지상 고기압이 있으면 이 고기압은 키가 낮은 고기압으로 일기가 좋지 않다.

4.7.1 1000-500hPa 층후

1000hPa과 500hPa 면 사이의 대기 연직 층후는 전체 대기에서 하부의 열적 구조를 정의한다. 작은 층후는 찬 공기를 나타내며, 이와 비슷하게 층후가 두꺼울 경우에는 이 층에서 공기가 따뜻함을 뜻한다.

고도 장에서와 같이 층후선도에서도 숫자로 분석될 수 있다. 층후 골 또는, '찬 공기 풀'(포위된 찬 공기)은 주로 불안정한 대기와 소나기가 잦은 날씨와 관련되어 있다.

1000-500hPa 층후들은 60m 간격의 등치선으로 표시하도록 한다.

일반적으로 장마의 판단은 1000-500hPa 층후도의 5,760m 또는 5,820m 선을 참고한다. 1000-500hPa 층후를 이용한 비/눈 예보 경계에 대한 판단은 5,360-5,400m 층후선을 기준선으로 삼는다. 고도가 높은 지역에서는 5,460이나 5,520m 층후지역에서 눈이 발생할 수 있는데 이는 하층의 기압면이 중층 한기에 가까운 낮은 기압값을 가지기 때문이다.

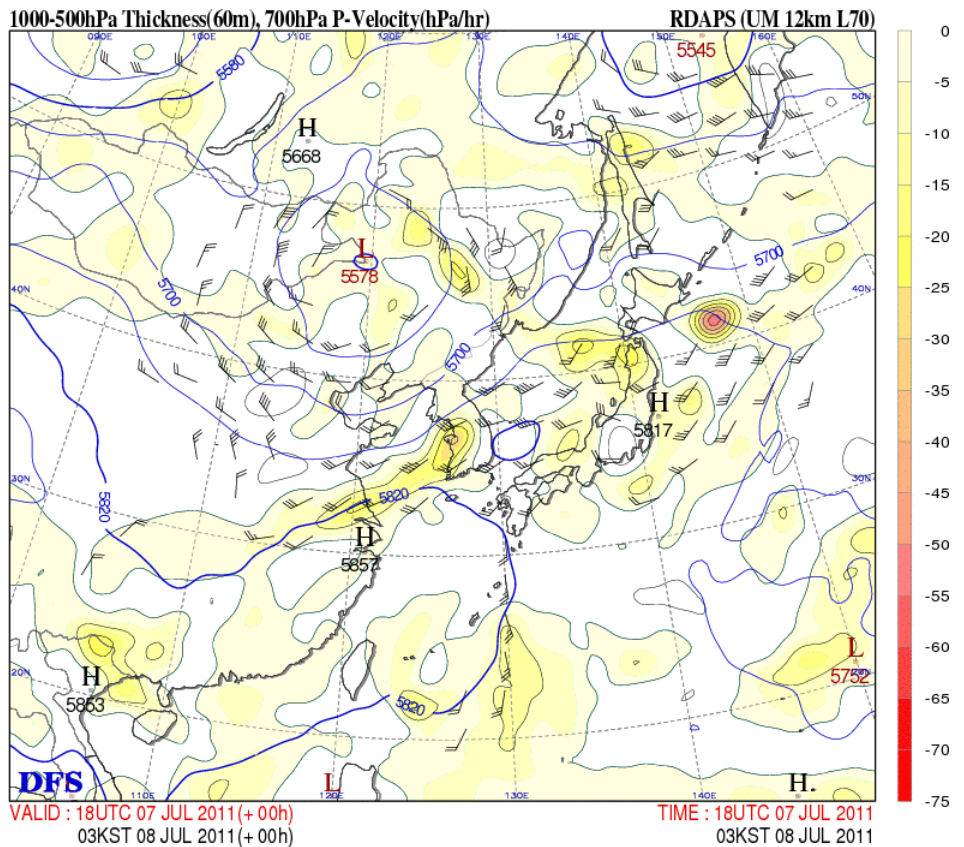
500hPa 일기도상에 고도와 층후장을 중첩하면 층후가 변하는 지역을 나타낼 수 있고 고도와 층후가 교차하는 지역은 온난 및 한랭이류가 발생하는 지역임을 보여준다.

4.7 500hPa

그림 4.16은 12km 해상도의 UM이 예측한 2011년 7월 7일 18UTC 1000-500hPa 층후도를 700hPa에서의 연직속도와 함께 나타낸 것이다.

산둥반도와 한반도를 중심으로 남북방향의 층후 경도가 크게 나타나고 있으며 만주와 몽고 경계지역에 'Cold Pool'이 존재함을 알 수가 있다.

또한 북서풍과 남서풍에 의해 한반도에서 한랭건조한 공기와 온난습윤한 공기가 수렴함을 볼 수가 있다. 그 결과 한반도 서해안을 중심으로 15hPa/hr 이상의 강한 상승운동이 발생하는 것으로 예측하고 있다.



[그림 4.16] 700hPa 면에서의 연직속도와 함께 나타낸 1000-500hPa 층후선도 (푸른색)

4.8 300hPa

300hPa 일기도는 약 9,000m 고도면으로 생각할 수 있다. 이 고도에서는 제트류가 존재하여 다른 고도에서보다 보통 공기의 흐름이 매우 강하다. 강한 공기흐름은 중규모와 같은 큰 규모의 공기흐름을 조절함으로 기압골과 기압마루를 통한 역학적 분석이 매우 중요한 층이다. 공기 흐름의 강한 가속과 감속은 상층에서의 발산과 수렴역을 형성하고 나아가 지상의 기상현상을 발달시킨다. 일반적으로 제트기류 입구의 좌측에는 하강기류, 우측에는 상승기류가 존재하고 반대로 제트기류 출구에서는 좌측에 상승기류, 우측에 하강기류가 존재한다.

4.8.1 등풍속선

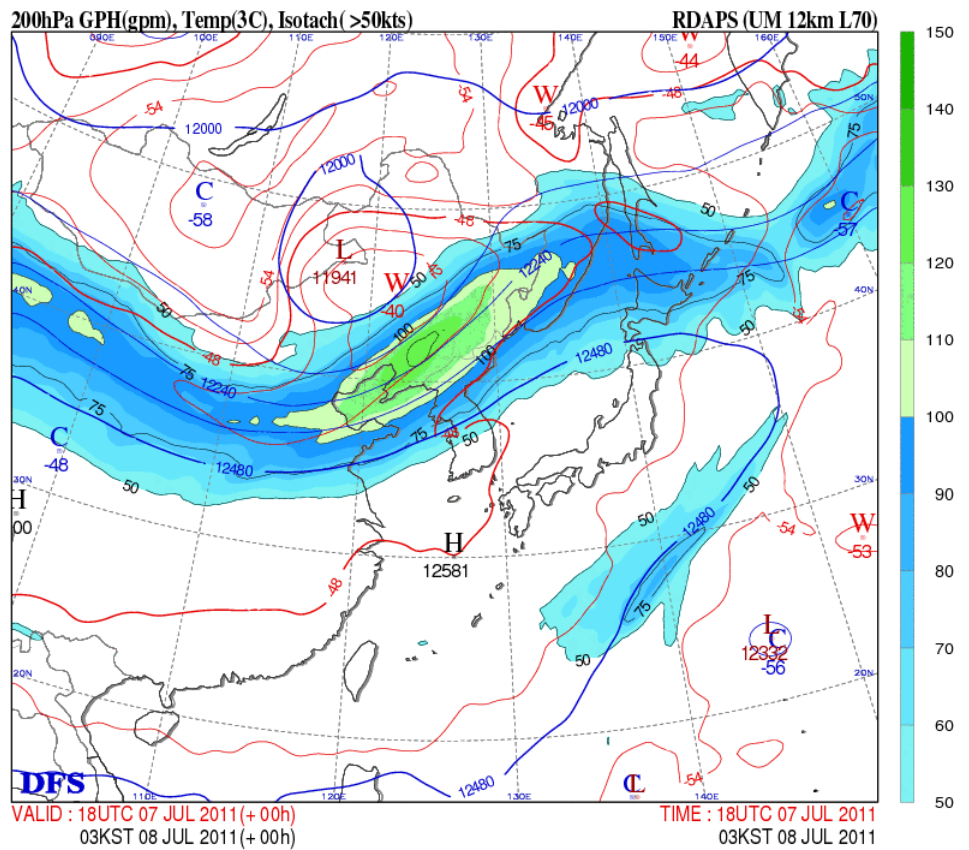
등풍속선은 제트류와 특히 제트류 핵심의 위치를 찾는 데 도움을 준다. 이 등풍속선 그림에서는 제트류의 입구와 출구를 확인할 수 있으며 이를 통해 기압의 변화도 알 수 있다.

300hPa 바람 일기도가 제트류를 가장 잘 나타내는 일기도가 아닐 수 있다. 제트류의 고도는 변동성이 매우 커서 그것이 항상 300hPa에 있지만은 않을 것이다.

4.8 300hPa

그림 4.17은 12km 해상도의 UM으로 예측한 2011년 7월 7일 18UTC의 200hPa 바람장을 나타낸 것이다. 위도 북위 40도를 따라 25m/s 강한 제트류가 발달하고 있으며 특히 한반도 북쪽에 50m/s 이상의 매우 강한 제트류가 발달하고 있다.

즉, 한반도 북쪽 지역의 상층에서 속도차에 의한 강한 발산이 일어나고 있음을 제시한다. 상층 제트의 위치와 강도는 앞의 그림들에서 보여준 연직 속도 등과 일치한다.



[그림 4.17] 200hPa 면에서의 등온선, 등고도선 그리고 등풍속선

4.9 그 외 자주 사용되는 모델 변수

그 외 특정 고도에 한정될 수 없지만 자주 사용하는 다른 모델 변수들이 있다.

4.9.1 대류권계면 높이와 온도

대류권계면 높이와 온도는 항공에서 제일 중요하게 다루고 있다. 그 이유는, 적은 맞바람과 난류가 적어 안정된 대기상태인 낮은 성층권에서 비행하는 것을 선호하기 때문이다. 또한 차가운 온도로 인하여 비행기 엔진이 더 효과적으로 일을 할 수 있다.

4.9.2 결빙고도

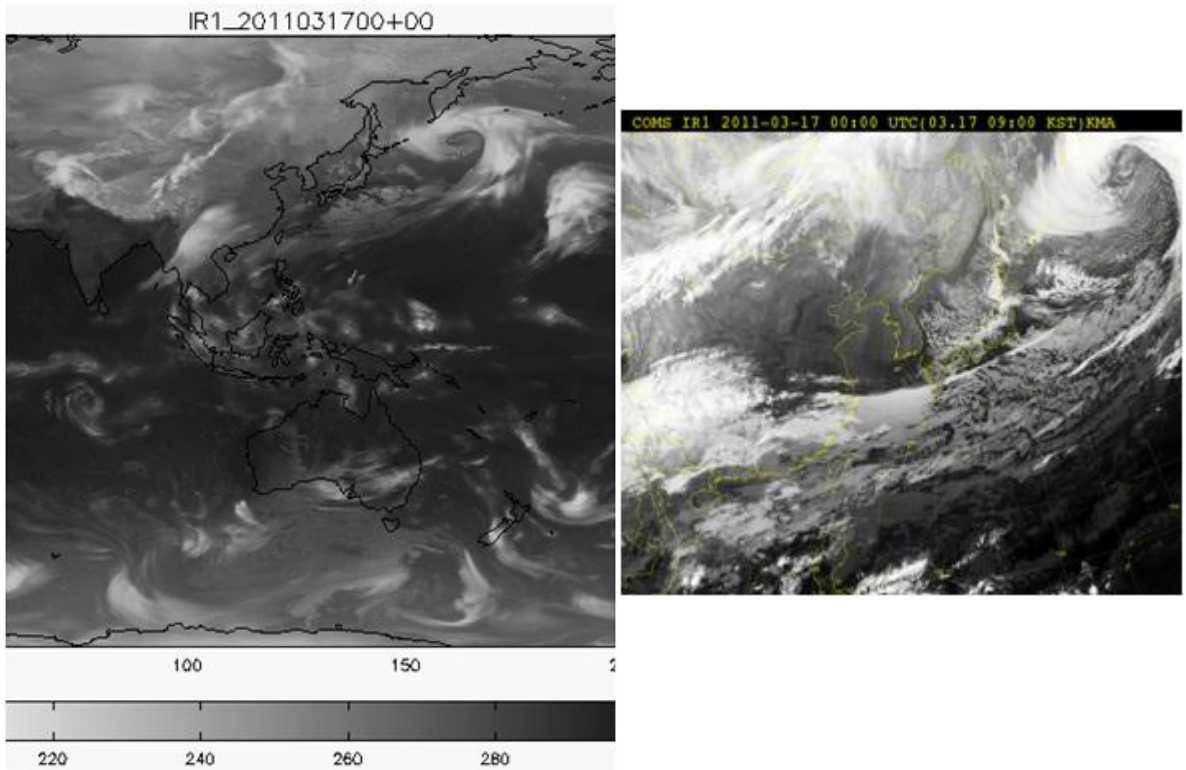
결빙 고도는 미터단위(m)나 gpm으로 표시할 수 있다. 대기에 영하 층이 존재할 경우 제일 높은 결빙고도만이 기입됨으로 주의해야 한다. 결빙 고도를 평가할 때에는 단열선도(Skew-T Log P)를 같이 보는 것이 필요하다.

4.9 그 외 자주 사용되는 모델 변수

4.9.3 총운량

운량은 모델에 의해서 진단될 수 있으며 음영 처리로 표시할 수 있다. 대안으로는 위성의 적외영상과 동등하게 표출할 수 있다. 그림 4.18은 수치모델의 모의결과를 위성의 적외영상과 동일하게 표출한 것과 같은 시간대의 우리나라 최초의 정지궤도 복합위성 천리안 영상자료를 나타낸 것이다.

우리나라를 중심으로 중국 남부에서 일본 열도에 이르기 까지 대부분 구름이 없으며 중국 남서부와 오호츠크해 동쪽에 저기압성 회전을 보이는 강한 구름대를 모의하고 있다. 또한 천리안 영상은 몽고와 중국 북서부에 위치한 구름대도 비교적 잘 모의하고 있다.



[그림 4.18] 수치모델이 모의한 적외영상과 천리안의 적외영상

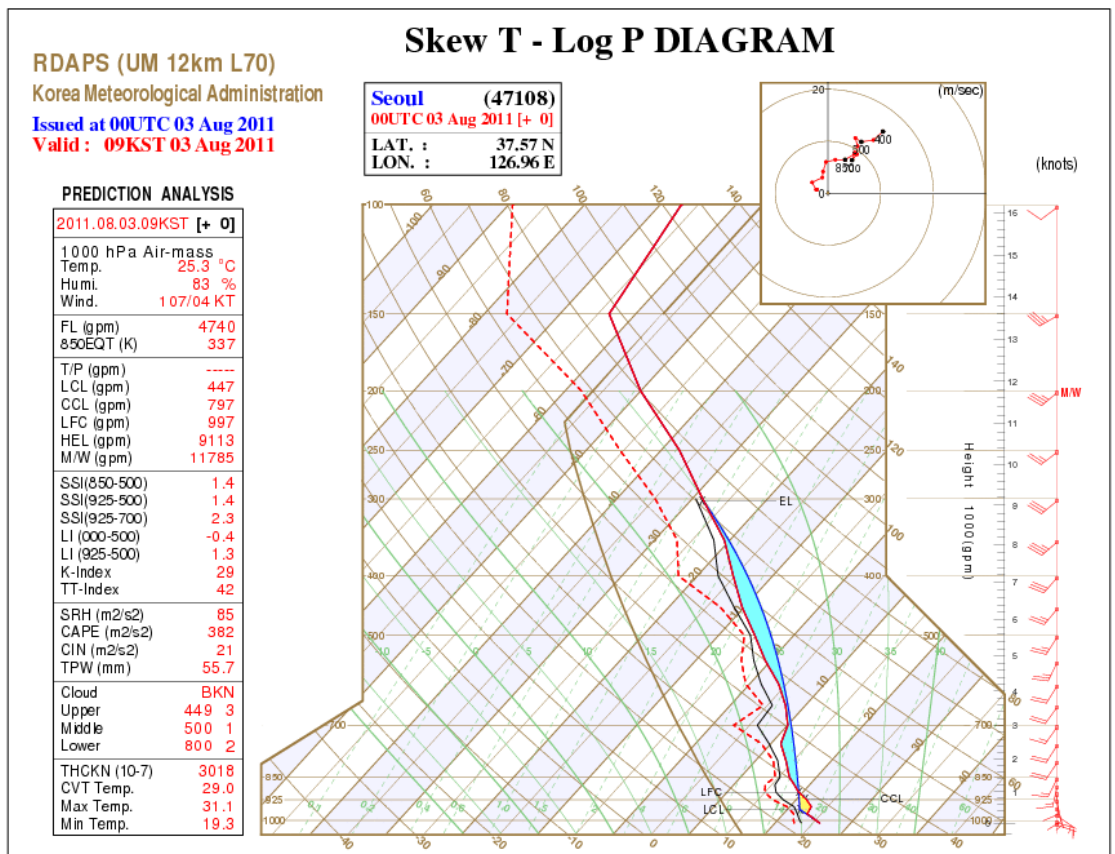
4.9.4 운저고도

가장 낮은 구름의 고도는 비행 조종사와 등산하는 사람에게 매우 중요하다.

4.10 예보 단열선도

예보 단열선도는 예보관에게 매우 중요한 도구로 사용이 되며, 전 지구 모델과 지역예보 모델 자료가 기상청 시스템에서 사용 가능하며 기상청 시스템의 각 격자점에 대해 제공된다. 단열선도에서는 기본적으로 기온, 이슬점 온도, 습구온도, 상당온도, 혼합비, 풍향, 풍속, 라디오존데의 궤적 등이 기입된다.

또한 그림 4.19에서와 같이 상승응결고도(LCL), 자유대류고도(LFC), 평형고도(EL), 대류응결고도(CCL), 빙결고도(FL) 등을 찾아 표기된다. 단열선도 상의 면적은 에너지량으로 환산 가능하므로 대류 가용 에너지(Convective Available Potential Energy, CAPE), 대류억제도(Connective Inhibition, CIN) 등을 표시할 수도 있다. 또한 다양한 안정도 지수, 구름관련 정보 등이 표시된다.



[그림 4.19] 서울 지점의 단열선도

4.11 앙상블

앙상블은 중기 예보관에게 자주 이용되어지지만 이제는 단기예보관들이 더 많이 사용하는 추세이다. 기상청의 전지구 그리고 지역 앙상블 예측 시스템(MOGREPS)은 24개 앙상블 멤버로부터 길게는 10일까지의 예보를 산출한다. 이 자료들은 다양한 방법으로 표시되는데 가장 자주 사용되는 표시방법에 대해 설명할 것이다.

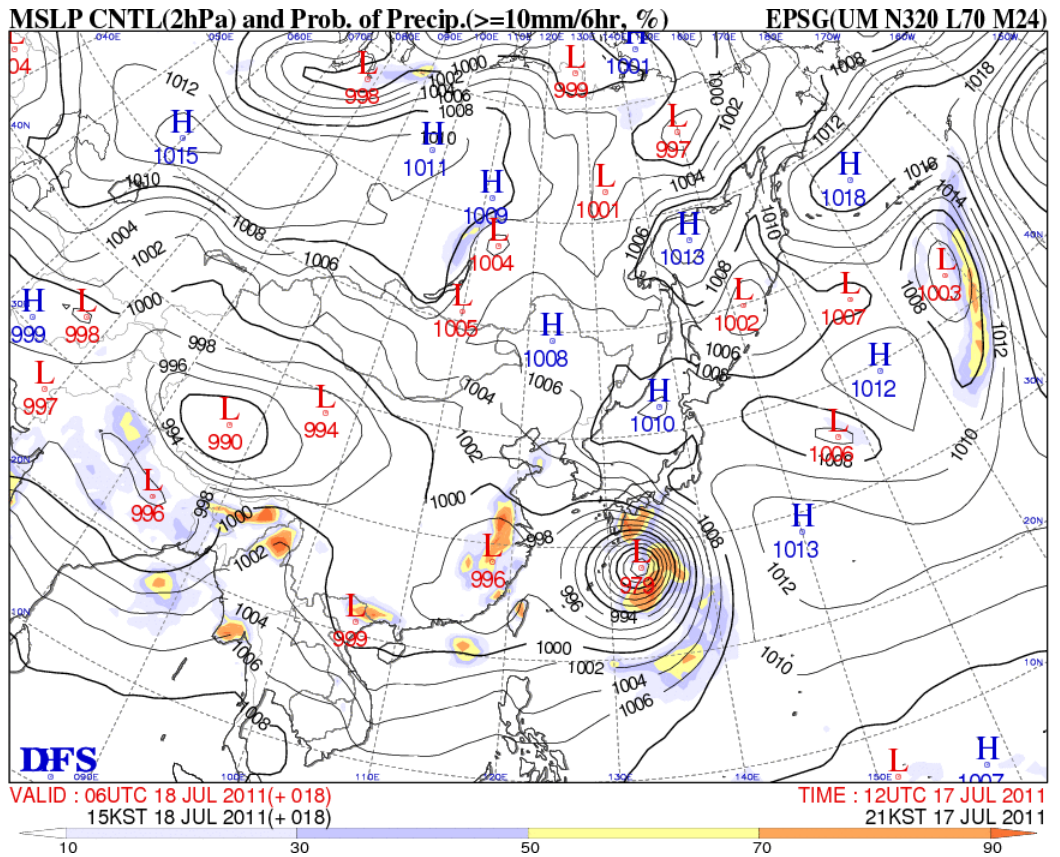
4.11.1 클러스터

앙상블 자료를 표시하는 가장 전형적인 방법은 클러스터 유형이다. 클러스터링은 사용자가 각 앙상블 멤버들을 모두 확인하지 않아도 될 수 있도록 각 앙상블의 정보를 요약해 표시하는 방법이다(한 페이지에 표시될 때 그들이 차지하는 크기 때문에 포스티지 스탬프(Postage Stamp)로 알려져 있다). 이것은 모델들의 예보 사이에서 생겨나는 다양한 패턴들을 보여준다. 24개 앙상블 예보를 모두 한 페이지에 요약하여 보여준다. MOGREP는 각 클러스터내에서 멤버들의 퍼짐(Spread)도 함께 나타낸다.

4.11 앙상블

4.11.2 확률지도

자료는 모수의 확률이 특정 임계값에 도달할 때(예를 들어 24 - 시간 강수량이 10mm를 넘어설 확률) 확률지도로 나타낼 수 있다(그림 4.20). 확률지도에서 나타내는 요소로는 강수량, 풍속, 돌풍, 강설, 시정, 운량, 그리고 온도 등이 있다.



[그림 4.20] 앙상블모델에서 생산된 강수확률로서 6시간 동안 10mm가 넘는 강수에 대한 확률을 표시(색칠 표시)

4.11 앙상블

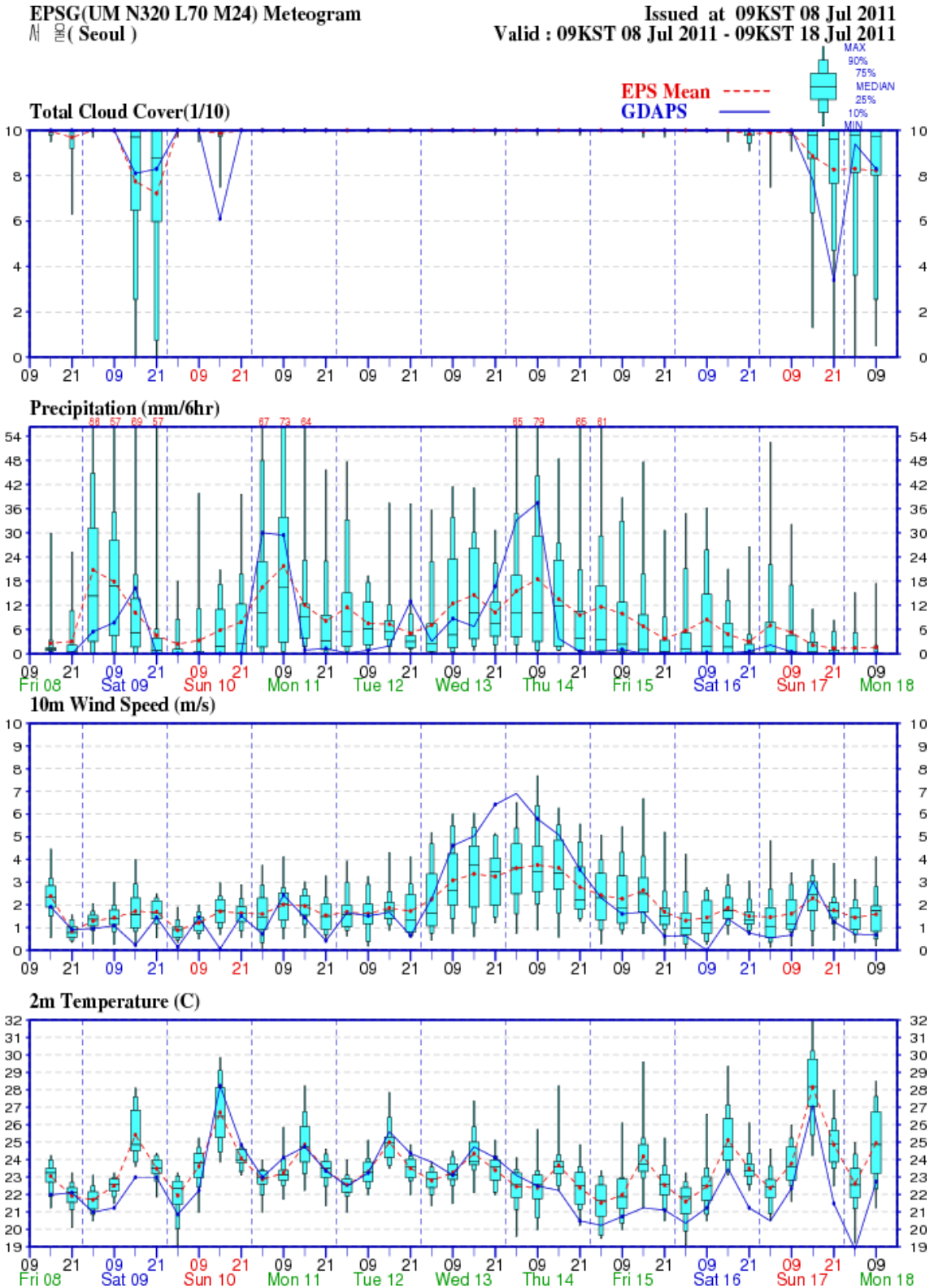
4.11.3 메테오그램

자료는 특정 장소 또는 메테오그램(Metogram) 형태로 표시될 수 있다. 앙상블의 기준(Control) 멤버 값의 변화(Evolution)는 빨간색으로 표시한다. 'Box-and-Whiskers' 도표는 수염(Whisker)의 '끝'이 앙상블 멤버들의 최저와 최고의 자료를 나타내기 때문에 제일 관심 있어 하는 도표이다. 박스는 25%와 75% 백분위수의 범위를 제시하며 박스를 가로지르는 선은 중앙값을 뜻한다(제일 가능성이 높다는 의미는 아니다).

그림 4.21은 기상청의 앙상블 예측 시스템에서 총운량, 강수, 바람 및 기온에 대해 앙상블 방법으로 예측한 것의 시계열을 'Box-and-Whisker' 형태로 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 바와 같이 상자를 가로지른 선은 중앙값을, 두꺼운 상자와 얇은 상자는 각각 상(하)위 25, 10%를 나타내며 수염의 양끝은 각각 앙상블 멤버가 예측한 최고와 최저값을 나타낸다.

앙상블 자료는 이러한 세련된 그래프 형태와 높은 해상도로 인해 모든 예보자료들 중에서 주목받고 있다. 하지만 결정론적인 예보에서와 같이 앙상블 자료에 대해서도 비판적인 안목으로 동일한 품질검사와 조사가 필요하다. 앙상블 자료는 예보를 위한 하나의 도구이지 예보 자체를 대체하는 것이 아니라는 점을 기억하는 것이 중요하다.

4.11 앙상블



[그림 4.21] 'Box-and-Whiskers' 형태로 표시된 메테오그램 상에서의 앙상블 자료. 앙상블의 멤버의 평균은 붉은색으로 표시하였고 전지구모델 자료는 푸른색으로 표시

4.12 지침, 신뢰와 검증

4.12.1 현업기관 지침

기상청 내부망에서 사용가능한 가장 최근의 현업기관 지침과 분석이 모델 출력자료에 대한 평가를 제공하며 지침을 활용하기 위해서는 상담을 하여야 한다. 특히, 예측 시간과 개발과정에서의 가능한 결함(한계)에 대해 주의를 기울여야 할 것이다. 모델 자료 분석에 있어서의 가능한 결점에 대해 주석이 작성될 것이며, 차후의 개발 또는 이전의 모델 실행과의 변화로 인한 정확도 변화에 대한 암시가 주어질 것이다. 좀 더 자세한 내용은 운영센터로부터의 지침 해석에 대한 기상청 노트를 참조하기 바란다.

4.12.2 최신 모델 예보

가장 최근의 모델예보는 가장 정확하며 연속적인 모델 실행 자료간의 연속성은 신뢰수준을 증가시킬 것이다. 그러나 모델 예측은 항상 실제 기상현상으로 수렴이 보장된 것이 아니며 비정상적 모델 결과가 발생하여 예보관을 혼란스럽게 할 수도 있다. 연속적인 모델 결과들 사이에 큰 차이가 발생할 때에는 조심스러워야 한다. 이러한 상황에서는, 현업기관 지침서에서 제시한 조언을 받아들이고 감소된 신뢰도를 고려해서 예보를 하여야 할 것이다. 기상현상들이 발달하는 초기 조짐을 잘 감지하기 위해서는 실제 상황을 조심스럽게 감시하여야 한다.

4.12.3 관측 자료와 비교

현재 예보 자료는 표준 과정으로 특히 발생중이거나 빠르게 이동하는 상황일 때에는 실제 상황에 대해 검증되어야 한다.

간단한 검증으로는 관측된 지상기압과 예보된 T+6이나 T+12의 값들과 비교하는 것이다. 만약 일치성이 양호하다면, 이것은 그 다음의 예보에 확신을 준다. 그러나 만약 큰 차이가 난다면, 나머지 예보 기간 중에서 계속 이 자료를 사용할지를 고려해봐야 한다.

예를 들어, 서쪽 지역의 해안관측소에서 예보된 것보다 더 강한 저기압이 보고된다면 접근하는 저기압은 예상했던 것 보다 강하게 발달할 수 있음을 제시한다. 반면에, 저기압이 예보된 것보다 현업기관에 실제 더 가까워져서 예보보다 낮고 더 빨리 동쪽으로 이동하였을 수도 있다. 이러한 상황에서는 저기압의 중심을 찾는데 위성영상을 이용하는 것이 좋다.

4.12 지침, 신뢰과 검증

또 다른 검증 기술로서, 실제와 예보된 강수 분포를 비교하는 것이 있다. 만약 T+6 예보가 현실적이라면 T+12와 T+18 예보 또한 자신감을 가져도 된다. 반면에, 예를 들어, 모델에서 맑은 후에 중간강도의 지속적인 강수대가 서쪽에 위치한 지점들에 계속해서 영향을 주는 것으로 나타났다면 예보 변경을 심각하게 검토해봐야 할 것이다.

하지만, 모델 결과들을 너무 성급히 묵살해서도 안 된다. 서쪽 해안가의 지점에서 강수가 예보되기 수 시간 전부터 단속성 약한 비를 보고하였다면 당신의 예보지역에 대한 예보 변경을 고려할 필요가 없다. 주 강수대가 모의되기 전에 앞서 강수발생은 불규칙하게 발생할 수 있으며 이것이 반드시 책임 예보 지역에 영향을 주진 않을 것이다.

앞에서 말한 것과 같이, 위성 영상은 자료가 부족한 지역에서 현상의 위치와 특성 그리고 발달을 검증하는데 유용하다. 특히 정지궤도 위성인 우리나라의 COMS 기상위성 영상은 조밀한 시간간격으로 생산되므로 표준 검증 시간에 사용할 수 있어서 유용하며 이 영상자료들은 가급적 충분히 사용해야 한다. 모델의 검증은 매우 중요하며 어떠한 모델 산출물도 검증 없이 사용되어선 안 된다.

연습문제

1. 수치예보모델 결과의 검증의 필요성과 검증결과 활용방안에 대해 설명하시오.
2. 앙상블 결과의 활용방안과 주의사항에 대해 설명하시오.
3. 모의결과를 후처리하는 목적과 방법에 대해 아는 대로 설명하시오.
4. 1000-500hPa 층후도 작성법과 이 층후도를 활용하는 방안에 대해 설명하시오.
5. 습구온위(θ_w)를 정의하고 850hPa 고도에서 θ_w 를 이용하여 전선을 찾는 원리를 설명하시오.

5장. 수치예보의 한계

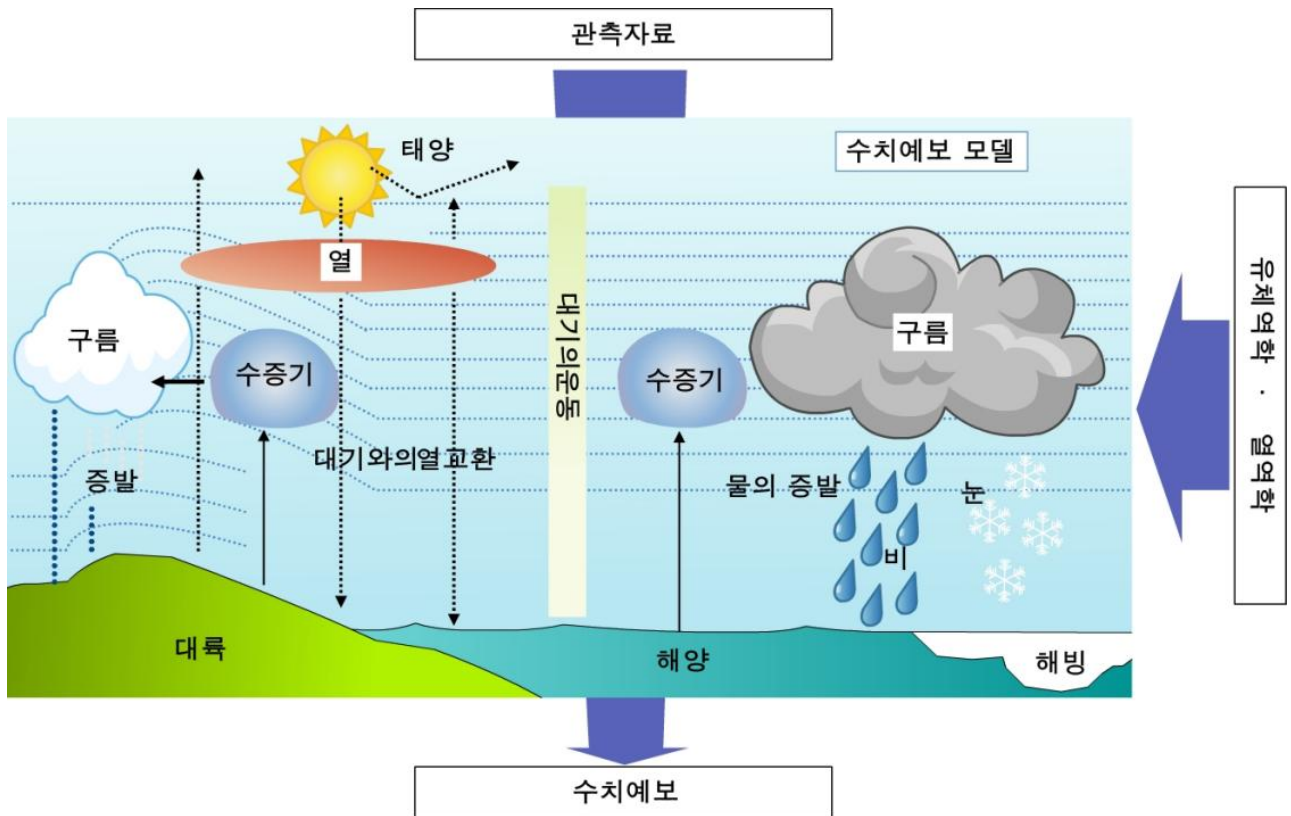
- 5.1 서론
- 5.2 해상도의 한계
- 5.3 모델 지형의 한계
- 5.4 동화 기법의 한계
- 5.5 모수화의 한계

학습목표

- 수치모델의 일반적인 한계를 이해한다.
- 수평 및 연직 해상도가 수치모델에 미치는 영향을 이해한다.
- 수치모델에서 지형의 처방이 미치는 영향을 이해한다.
- 자료동화의 개념과 자료동화의 한계를 이해한다.
- 모수화의 필요성과 모수화의 한계를 이해한다.

5.1 서론

비록 기상청 현업 모델이 매우 정교하고 신뢰할만한 도구라 하더라도 그것의 결과 값을 실제 관측 값처럼 받아들여서는 안 됨을 인식해야 한다. 왜냐하면 그림 5.1에서와 같이 수치예보는 매우 복잡한 대기의 여러 물리 과정들을 근사적으로 구현해 낸 것이기 때문이다.



[그림 5.1] 수치예보 모델에서 다루는 대기역학 및 물리과정의 개념도

예보관의 입장에서 모델들의 장점과 단점을 제대로 파악하는 것은 매우 중요하다. 관측자료의 분석을 통해 현재 날씨의 상황을 추적하는 것과 같이 예보관은 NWP 산출물의 분석과 평가의 중요성을 인식하고 그 한계점도 이해해야 한다.

5.1 서론

예보관은 모델의 모의에서 암시된 발달을 일으키는 주요 과정들과 발생 가능한 날씨 상황 측면에서 그들의 중요성을 파악하기 위해 노력해야 한다. 단순히 모델이 강수를 예측한 것을 인지하는 것만으로는 충분하지 않고 그 강수의 본질적 원인을 이해해야 한다는 것이다. 이와 유사하게 예보관은 강수가 예상되지만 아무것도 예보되지 않은 상황도 인정해야 하고 예보관의 예상과 모델 예측 사이의 다른 점을 조화시켜야 한다.

예보관은 실제 현상과 모델에 의한 예측을 비교하는 것에 익숙해져야 한다. 잘 일치한다면 다음 단계의 예보에 대한 신뢰도가 높아질 것이고, 일치하지 않는다면 예보관에게 아이디어 수정이 필요함을 제시할 것이다.

이 노트에는 수치예보의 주된 한계점을 논의한다. 각 모델의 특성은 계속해서 변화하기 때문에 각 모델에 대해 자세한 것이 설명되어 있지는 않지만 매일 모델을 가지고 일하는 예보관들과의 상담을 통해 예보에 영향을 주는 각 모델의 장단점에 대해서는 알 수 있을 것이다.

5.2 해상도의 한계

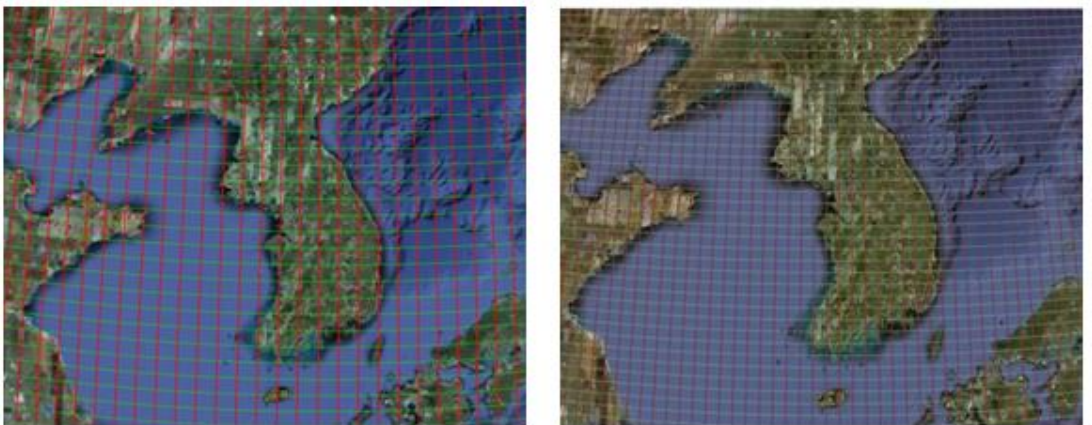
5.2.1 수평

중위도지방 전구 모델의 격자 간격은 약 25km이다. 그러므로 전선과 같은 현상의 최소한 폭은 대략 이정도 길이로 나타낼 수 있다. 이는 예보될 전선 위치의 정확도를 효과적으로 정의한다. 이동속도가 약 27km일 때 이것은 약 한 시간의 이동을 의미하므로 전구 모델을 사용할 때 정확한 시간 예보에 대한 기대치를 너무 높게 잡으면 안 된다.

전선과와 같은 형태를 충분히 나타내려면 어느 모델에서든 최소한 4개의 격자가 필요하다. 분석할 때에는 존재하던 파동이 전구 모델에서는 종종 사라지기도 하는데 그 이유는 그것의 규모가 작고 최종적으로는 저기압으로 발달할 수도 있기 때문이다. 모델이 자주 적절한 위치와 시간에 파동의 발달을 모의하기도 하지만 그것의 상세 위치와 진폭은 부정확할 수가 있다.

12km 해상도의 지역예보 모델이 현업화됨에 따라 전선과의 문제가 줄어들었다. 그러나 규모가 약 50km보다 작은 현상들은 지역예보 결과에 나타나지 않는다. 예를 들어 소나기나 뇌우와 같은 조직화된 클러스터는 모의되지 못한다.

해상도의 한계 때문에 모델에서는 육지가 해수면으로 처방되기도(반대의 경우도 마찬가지) 하는데 이는 예보에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 정상적으로 육지/바다가 처방되었다면 소나기가 예상되는 상황임에도 소나기가 예측되지 않을 수도 있고 그 반대도 일어날 수 있다.



[그림 5.2] 수평해상도의 개선

5.2 해상도의 한계

5.2.2 연직

전지구와 지역 모델은 현재 지표면을 포함하여 70층을 가지고 있고, 70층은 비교적 고해상도의 연직층이긴 하지만 여전히 연직 해상도 한계에 의한 문제점을 갖고 있다.

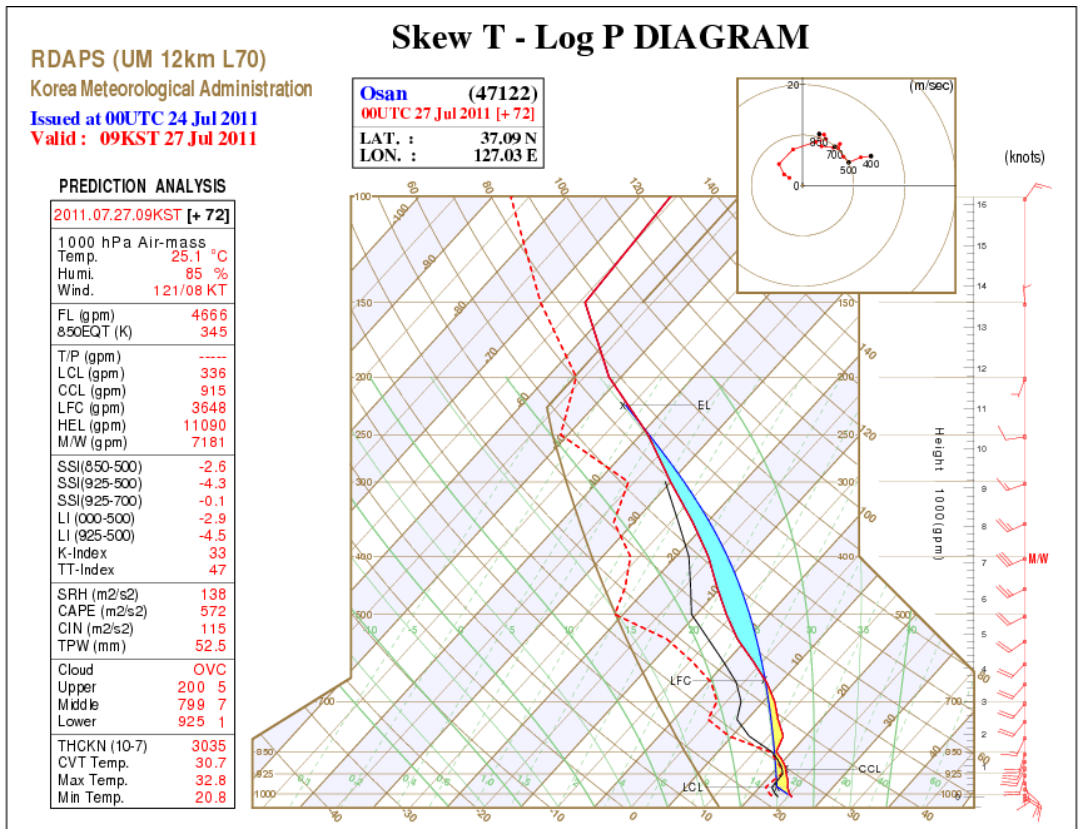
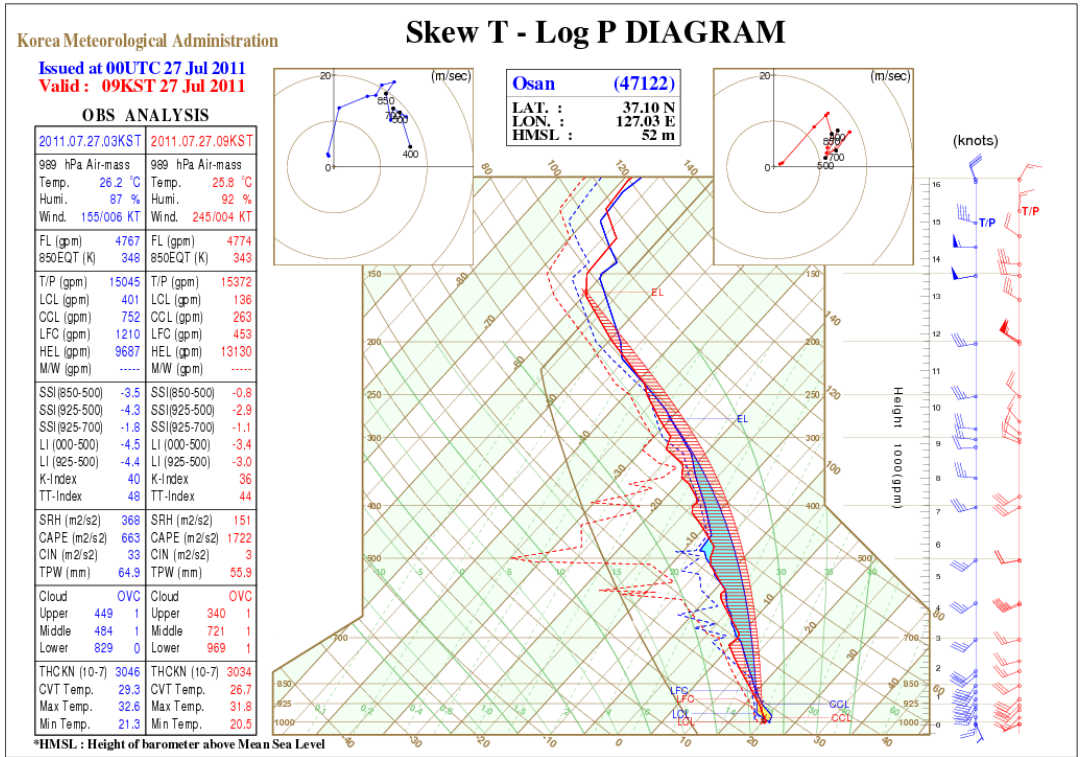
UM N512L70

- 수평분해능 : 25km
- 연직층수 : 70층
- 상단고도 : 80km
- 모델버전 : UM vn7.7

이것은 특히 대기에서 역전이 발생할 때 분명히 나타난다. 왜냐하면 모델 층에서의 온도는 그 층의 평균 온도로 나타내기 때문에 모델에서의 역전은 보통 실제 대기보다는 약하게 표현된다.

어는 비가 내리는 상황에서 대기 최하층의 세부사항을 모의하는 것은 매우 중요하다. 그러나 차가운 공기 위의 따뜻한 공기는 잘 모델화되지 않는다. 아래의 예에서 보는 바와 같이 모델은 바람의 급격한 변화에서부터 온도와 노점온도의 큰 변동과 역전층의 강도 등 대기의 상세한 연직구조를 적절히 모의하지 못한다.

5.2 해상도의 한계



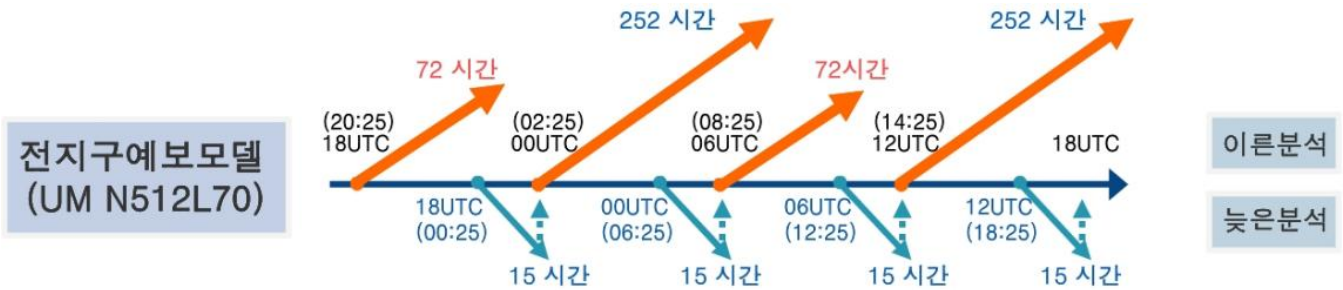
[그림 5.3] 오산에서 관측된 대기 연직구조와 RDAPS로 예보한 오산에서의 대기연직구조

5.2 해상도의 한계

5.2.3 시간

공간 해상도에서와 같이 큰 문제는 없다. 전지구모델은 7분 30초, 지역예보모델은 3분 20초 그리고 고해상도 모델은 50초의 시간 간격으로 적분된다. 이것은 아마도 유효한 자료가 표출되는 빈도 이상인데, 출력 시스템에 따라서는 표출 빈도가 6시간 이상이 될 수 있다.

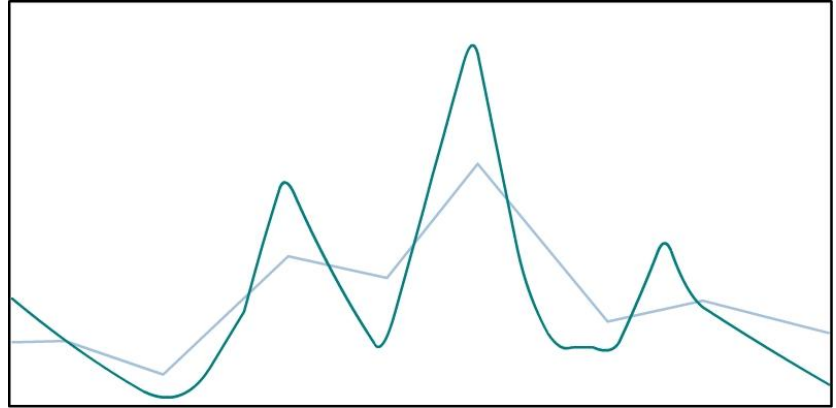
이 문제는 특히 6시간 주기에서 순간 강수가 없을 때 누적 강수량이 하나의 차트에 나타내어질 때 주목할 필요가 있다. 이는 강수가 중간에 발생하였음을 의미한다. 특정 시간에서의 모델 자료 표출(정보)은 모델이 오직 그 시간에 해당되는 상황을 모의한 것임을 기억해야 한다.



[그림 5.4] 수치예보 시간의 한계

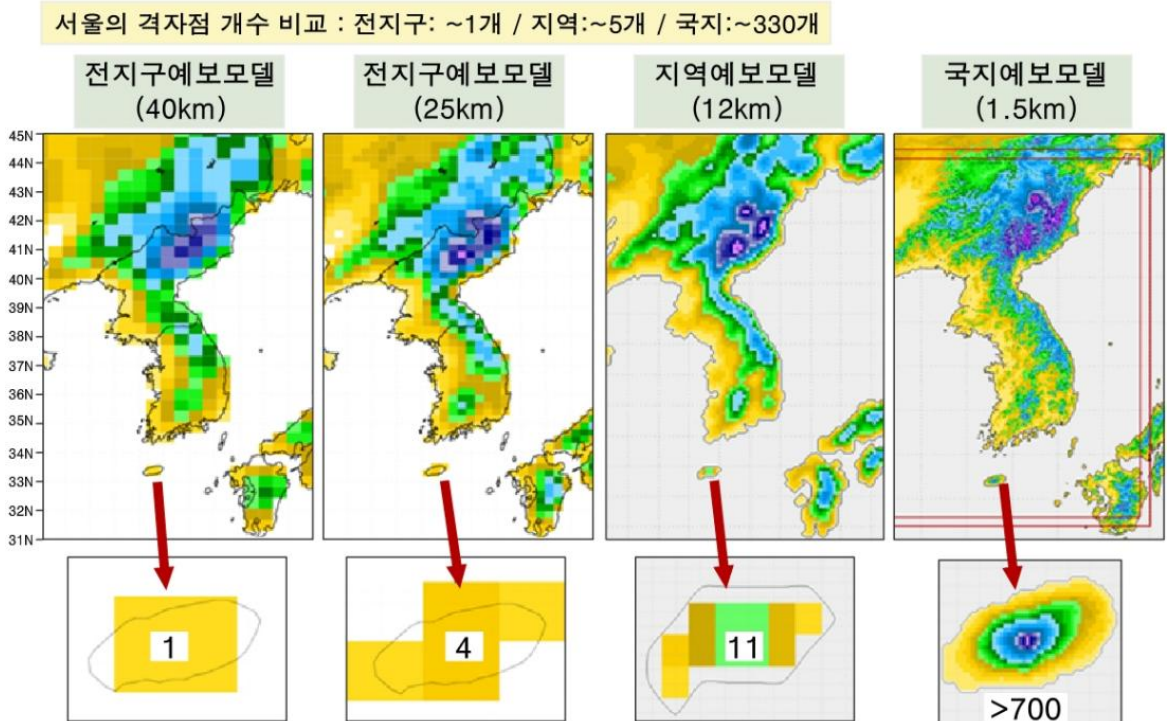
5.3 모델 지형의 한계

컴퓨터 모델들은 그들의 해상도 때문에 육지의 모양을 완벽하게 표현하지는 못한다. 대부분의 모델들은 고도가 가장 높은 최고점(산정)을 낮게 나타내고 최저점(계곡)을 높게 나타내어 실제 지형을 평탄하게 표현한다(그림 5.5). 기상청 모델의 해상도 향상이 산악의 표현을 개선시킬 것을 직관적으로 알 수 있다.



[그림 5.5] 모델이 지형을 평활화 하는 예(녹색: 실제 지형, 청색: 모델)

그림 5.6은 모델의 해상도가 40km에서 1.5km로 향상될 때 한반도에서의 육지/바다 경계와 지형을 나타낸 것이다.



[그림 5.6] 모델의 해상도에 따른 육지 바다 경계 및 지형의 상세화 예

5.3 모델 지형의 한계

해상도가 25km 인 전지구모델에서는 제주도가 불과 격자점 몇 개로 처방됨에 따라 한라산이 잘 나타나지 않고 있다. 그리고 태백산맥 등도 매우 단순하게 나타나고 있다. 하지만 해상도가 1.5km인 국지예보모델에서는 제주도가 실제 섬과 유사하게 처방되고 있으며 한반도에서의 산맥들도 비교적 상세하게 나타나고 있다.

또한 해상도가 증가된 만큼 모델에서 가장 높은 지점의 높이가 증가했음을 주목해야 한다. 특히 낮은 해상도 모델에서는 가장 높은 산맥과 산의 고도가 심각하게 낮게 평가될 것이다(또한 평활화 작용에 의해 계곡(움푹 패인 곳)의 고도는 높게 평가 될 것이다). 그러므로 기상 현상에 대한 지형의 많은 영향들이 모델에서는 낮게 평가되는 경향이 있는 것이다. 따라서 다음의 과정들이 종종 적절하게 모의되지 못한다.

- 비-그늘 효과
- 산악에 의한 강수 강화
- 씨뿌리기와 되먹임 현상(Seeder - Feeder 현상)
- 고지대에서 증가되는 대류
- 눈의 진단
- 풍상층에서의 증운 형성
- 산악과 활동
- 윈현상

- 풍하측 바람
- 깔때기 효과(Funnelling)
- 활승과 활강 바람
- 다른 지역적 현상(예 : 해륙풍)

국지예보모델에서 지표면 표현을 향상시켜 상황을 개선시켰지만, 여전히 완벽하지는 않다. 예보관들은 여전히 모델 지형의 한계를 인식할 필요가 있고 그들의 예보에 있어서 그것들을 올바르게 수정해야 한다.

5.4 동화 기법의 한계

모델은 모의 대기가 실제 대기과 근접하도록 각 모델 수행 시마다 ‘실제’ 자료를 동화할 필요가 있다. 사용되는 요소들은 한계가 있는데, 예를 들어 지상 관측으로부터 오직 바람과 기압만을 전구모델과 지역예보 모델에 사용할 수 있다.

[표 5.1] 전구모델, 지역모델 그리고 고해상도 모델에서 관측자료의 동화

전구모델	지역모델	고해상도 모델
SURFACE (synop,buoy,ship), SONDE (temp,pilot,WPF,dropsonde), AIRCRAFT (amdar,airep),	전구모델자료 + SURFACE (aws, amedas)	전구모델자료 + RADAR (RF, radial velocity)
SCATWIND (ascats,ers2), IASI , AIRS , SSMIS , ATOVS (gtovs,rars,ears), GPSRO (cosmic, gras), SATWIND (mtsats,goes.msg,meteosat,modis),	=전구모델 자료	SCATWIND (ascats,ers2), ATOVS (gtovs,rars,ears)

모델은 입력자료의 수준만큼만 모의할 수 있으며 관측이 적은 지역에 대한 모의 결과가 좋지 않을 수 있음을 쉽게 추정할 수 있다. 이것이 자료가 빈약한 지역에서 발생한 기압골의 붕괴가 잘 모델화되지 않는 이유 중의 하나이다(또한 공간 해상도에 관한 문제도 있다).

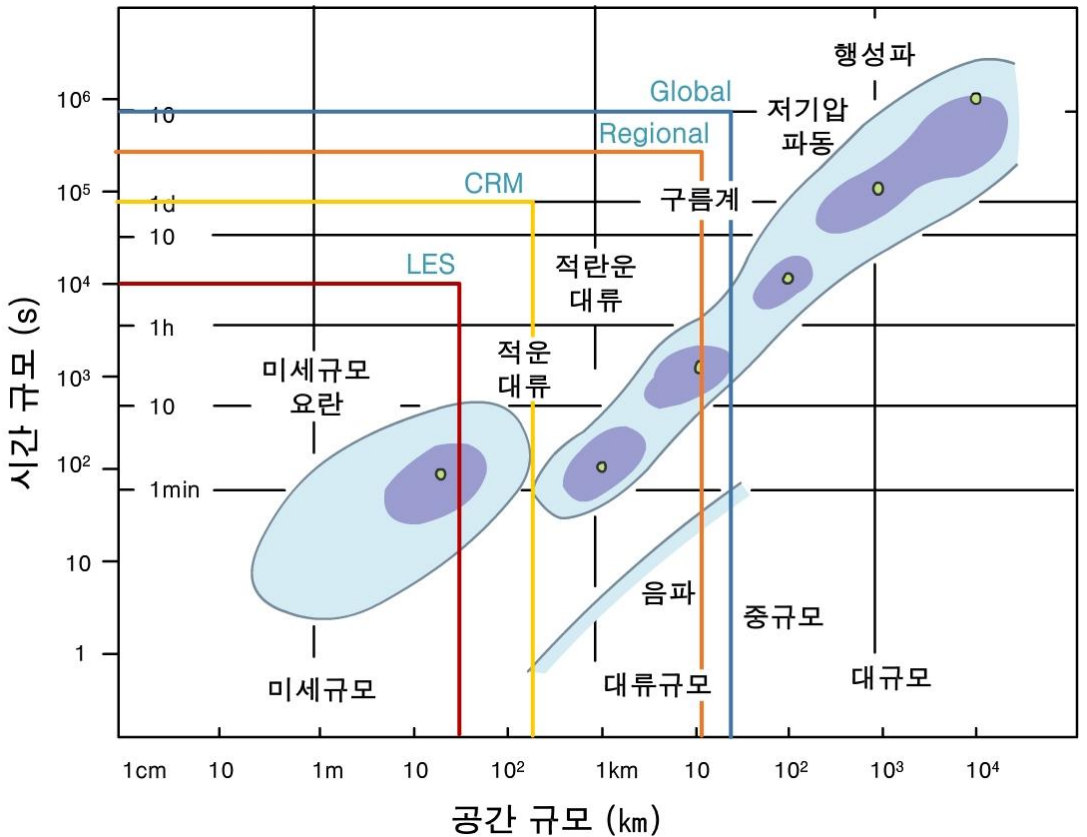
또 다른 문제로 주변에 다른 관측점들이 없다면 동화될 자료가 크게 편이 될 수 있다는 것이다. 그 예로 주어진 모델 실행의 동화과정에서 사용된 탐측자료는 대기의 대표 샘플이 되지 않을 수도 있다. 라디오존데는 주변보다 더 많은 수증기 지역을 통과할 수 있으며, 이로 인해 모델은 넓은 지역에서 더 많은 수증기가 있는 것으로 분석하게 한다.

수증기 관측 전처리 시스템(Moisture Observation Pre-processing System : MOPS)의 출현으로 위성과 다른 출처의 자료들이 대기의 수분 함유량을 분석하는데 활용됨에 따라 모델의 수분(습기) 표시가 향상되었다. 그러나 예보관은 여전히 동화과정을 면밀히 고려하고 이 지역에서 모델의 에러를 조사하고 수정해야 한다.

5.5 모수화의 한계

많은 물리 과정들이 모델에 의해 처리되는 것보다 더 작은 규모로 발생하므로 이 과정들은 모수화 되어야 한다. 즉, 모델의 격자 크기로는 모든 대기의 현상을 해석할 수가 없다.

예를 들어 난류, 대류 구름, 복사, 산란 등은 아격자규모의 운동에 의한 격자 규모의 영향을 해석하기 위하여 격자점의 변수를 모수로 사용하여 그 통계적 영향을 표현해 주어야 한다.



[그림 5.7] 대기운동의 규모와 모수화

이것은 기상학적인 과정을 나타내는 이상적인 방법이 아니기 때문에 다음과 같은 몇 가지 문제점들을 수반할 수 있다.

대류와 대류 강수 모수화 기법 : 대류 모수화 기법은 오직 대류의 형성에 유리한 조건을 갖춘 격자 내에서만 소나기를 만들어 낸다. 소나기는 모델에 의해 이루어지지 않으므로 겨울에 따뜻한 바다에서 발생한 소나기는 실제로는 지형적으로 이루어지기 좋은 내륙으로 확장하지 않는다.

5.5 모수화의 한계

대류 모수화 기법의 또 다른 문제는 강수 주기와 불충분한 강우율 변동이다. 대기 상태가 소나기 발달에 유리하지만 소나기 발달에 필요한 시간이 충분하지 않은 낮에 소나기가 진단되면 소나기를 너무 빨리 내리게 하는 경향이 있다. 이와 유사하게 모델은 실제로는 강수 또는 뇌우가 발달한 후 몇 시간 동안 지속됨에도 불구하고 소나기 형성에 대해 기온이 너무 낮아 지는 저녁에는 강수를 너무 빨리 종결(Kill Off)시킨다.

모델은 또한 실제 관측에서 나타나는 강우율의 변화를 충분히 생산해내지 못한다(예, 강도가 약한 소나기부터 강도가 강한 소나기까지 전범위에 걸쳐 강한 대류가 발달한다). 강수율은 약한 강수 강도 쪽에서 최대가 되는 경향이 있으므로 강한 소나기의 빈도를 작게 추정한다.

지역 및 국지예보모델에서는 강한 대류가 이제 명시적으로 해결되었지만 약한 대류는 여전히 모수화되어야 한다.

대규모 구름과 강수 물리 기법 : 모델은 수평에서 수증기를 너무 빠르게 확산시키는 경향이 있다. 실제로는 전선 구름이나 층운 판에 예리한 경계가 있긴 하지만 모델은 근접한 격자점으로 수증기를 이동시켜 이를 평탄하게 만들면서 불연속을 평활화 한다.

강수 물리 기법은 강수가 육지 격자점보다 바다 격자점 모델에서 더 쉽게 형성되도록 한다. 이것은 바다에서 구름 응결핵 수가 적게 있어서 작은 수의 큰 구름 방울을 만들어 낼 수 있음을 고려한 것이다. 이것은 충돌-병합에 의한 강수의 성장이 육지에서의 비슷한 구름 보다 (바다에서) 더 효과적임을 의미하고, 약한 비/이슬비가 모델에서 인위적으로 설정한 육지/바다의 경계에 따라 변한다는 것을 의미한다.

복사 모수화 기법 : 모수화 기법이 매우 복잡하고 매우 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 플럭스는 간단하게 전구 모델에서는 3시간마다, 지역예보 모델에서는 1시간마다, 국지모델에서는 5분마다 계산된다. 이러한 간격으로 모델의 온도 반응을 결정하기 위하여 운량과 같은 양의 변화를 계산해낸다. 그러나 너무 긴 계산 주기에 따른 오차를 최소화하기 위하여 단파 모수화 기법에서 태양 각은 적분시간마다 계산된다.

연습문제

1. 수치모델의 모의수준이 낮은 이유를 아는대로 설명하시오.
2. 수치모델에서 지형을 평활화하여 처방하는 이유를 설명하시오.
3. 모수화의 필요성과 모수화가 필요한 물리과정을 제시하시오.
4. 자료동화를 정의하고 관측자료가 부족한 지점에서의 문제점을 설명하시오.
5. 모델의 공간해상도는 대부분 균일한 반면 연직 해상도는 매우 다르게 처방된다. 고도별 모델의 연직층수 분포를 설명하고 그렇게 처방하는 원인을 설명하시오.

6장 . 슈퍼컴퓨터와 수치예보시스템

6.1 기상청 슈퍼컴퓨터의 활용

6.2 수치예보시스템

학습목표

- 수치예보에서 슈퍼컴퓨터의 중요성에 대해 이해한다.
- 기상청의 슈퍼컴퓨터 도입 및 활용 현황에 대해 이해한다.
- 슈퍼 컴퓨터에서 현업으로 운용중인 모델들의 특성에 대해 이해한다.
- 현업 수치예보시스템의 수행 및 자료 흐름도를 이해한다.
- 자료동화 과정에서 이른 분석과 늦은 분석을 이해한다.

6.1 기상청 슈퍼컴퓨터의 활용

슈퍼컴퓨터란 현재의 기술로 구현할 수 있는 최고의 작업 처리 능력이나 최상의 연산 속도를 지니는 고성능 컴퓨터로 대부분 첨단 과학기술 분야의 연산을 목적으로 한다.

슈퍼컴퓨터의 성능은 주로 Flops로 나타내는데 이는 Floating Point Operations Per Second의 약자로 이는 초당 수행하는 부동소수점 연산을 나타낸다. 흔히, Tflops라 하면 1초에 1조(10^{12})번의 부동소수점 연산을 수행할 수 있는 성능의 컴퓨터임을 의미한다.

부동소수점연산(浮動小數點演算, Floating Point Operation)이란 숫자 2,147을 $2.147 + e3$ 와 같이 고정소수점 부분과 지수부분으로 나타내는 산술 연산을 말하며 매우 작거나 큰 수가 경제적으로 기억될 수 있으며 일관된 정확도를 가지는 계산이 가능하다.

[표 6.1] flops 단위 표시

Name	flops	Name	flops
yotta flops	10^{24}	tera flops	10^{12}
zetta flops	10^{21}	giga flops	10^9
exa flops	10^{18}	mega flops	10^6
peta flops	10^{15}	kilo flops	10^3

6.1 기상청 슈퍼컴퓨터의 활용

6.1.1 슈퍼컴퓨터의 도입

6.1.1.1 슈퍼컴퓨터 1호기

기상청은 슈퍼컴퓨터 1호기로 일본 NEC사의 SX-5 벡터시스템을 1999년 12월부터 현업 운영하였다. 이 시스템의 최대 이론 성능은 약 224Gflops이며, 실제성능은 212Gflops로서 당시 슈퍼컴퓨터 Top 500 순위(2001.11월 기준)에서 142위(기상분야 16위)에 올라있었으며, 슈퍼컴퓨터 2호기 도입에 따라 2005년 11월 30일 사용이 중단되었다.



[그림 6.1] 기상청 슈퍼컴퓨터 1호기 NEC SX-5(1999.12 ~ 2005.11)

6.1.1.2 슈퍼컴퓨터 2호기

기상청 슈퍼컴퓨터 2호기는 미국 CRAY 사의 X1E 클러스터 시스템이다. 2대의 클러스터로 구성되어 각 각 512개의 X1E 벡터 MSP(CPU)를 가지며 2005년 12월부터 수치예보시스템의 현업운영과 현업백업 및 연구지원을 목적으로 운영되었다.



[그림 6.2] 기상청 슈퍼컴퓨터 2호기 Cray X1E(2005.12 ~)

6.1 기상청 슈퍼컴퓨터의 활용

슈퍼컴퓨터 Top 500의 성능순위(2005. 11월 기준)를 보면 CRAY사의 X1E는 16위를 기록하였다. 전체 CRAY X1E 시스템의 최대 이론 성능은 18.5Tflops이고 실제 성능은 15.7Tflops이며 4TB의 메모리를 갖고 있다.

기상청의 슈퍼컴퓨터 2호기 전체성능은 18.5Tflops이지만, 장애에 대비하여 시스템을 9.2Tflops씩 2대로 분리하여 메인 시스템의 명칭을 「바람(Baram)」, 서브 시스템은 「신바람(Shinbaram)」 설정하여 운영하였다.

또한 기상청은 장비의 설치 공간 및 전원, 항온항습의 확보를 위해 기상청 내부가 아닌 외부의 IDC(Internet Data Center)에 슈퍼컴퓨터 2호기를 설치하여 안정성을 확보하였으며, 기상청과 IDC간의 통신은 1Gigabit의 전용회선 4회선으로 구성하였다.

슈퍼컴퓨터 3호기의 성공적인 현업운영으로 슈퍼컴퓨터 2호기는 더 이상의 현업업무에는 투입되지 않고 있으며, 국가표준 기후변화 시나리오 생산에 중점적으로 사용되고 있다.

6.1 기상청 슈퍼컴퓨터의 활용

6.1.1.3 슈퍼컴퓨터 3호기

2010년 12월 하반기에 최종적으로 도입 완료된 기상청 슈퍼컴퓨터 3호기는 미국 CRAY사의 XE6 시스템이다. 계산성능 758TF, 공유저장장치 약 2.5PB, 백업저장장치 4.5PB로 구성된 되어 있다. 3호기 시스템의 명칭은 대국민 공모를 통하여 「해담(백업 시스템)」과 「해온(메인시스템)」으로 각각 결정되었다.

슈퍼컴퓨터 3호기는 AMD 사의 최신 Multi-core(12-core)프로세서와 Gemini 인터커넥트 기술로 구성된 슈퍼컴퓨터시스템이다. 슈퍼컴퓨터에서 계산을 담당하는 컴퓨팅 블레이드에는 4개의 컴퓨팅 노드가 탑재되어 있으며, 각각의 노드에는 AMD사의 2.1GHz 12-core 소켓 2개와 DDR3 32GB의 메모리가 장착되어 있다. 부트영역, I/O영역, 로그인 영역 등 다양한 서비스를 제공하는 서비스 블레이드에는 4개의 각각 서비스 노드가 장착되어 있으며, 각 노드에는 AMD 사의 2.2GHz 6-core 소켓 1개와 DDR2 16GB의 메모리가 장착되어 있다. 하나의 서비스 블레이드는 컴퓨팅 블레이드와 공유저장장치(Lustre File System)간의 I/O 대역은 DDR 4×(16Gbps)기반 Infiniband 스위치로 연결되어 있으며, 이론적으로 최대 32GB/s까지 제공할수 있다. 슈퍼컴퓨터 3호기 전체 컴퓨팅 블레이드의 Core 개수는 90,240개로 구성되어 있다.

슈퍼컴퓨터 3호기는 365일 무중단 운영을 위하여 메인시스템(해온), 백업 및 연구용 시스템(해담), 동일한 구조의 시스템 2조로 구성되어 있으며 2011년 6월 현재 20위(해온), 21위(해담)에 랭크되어 있다.

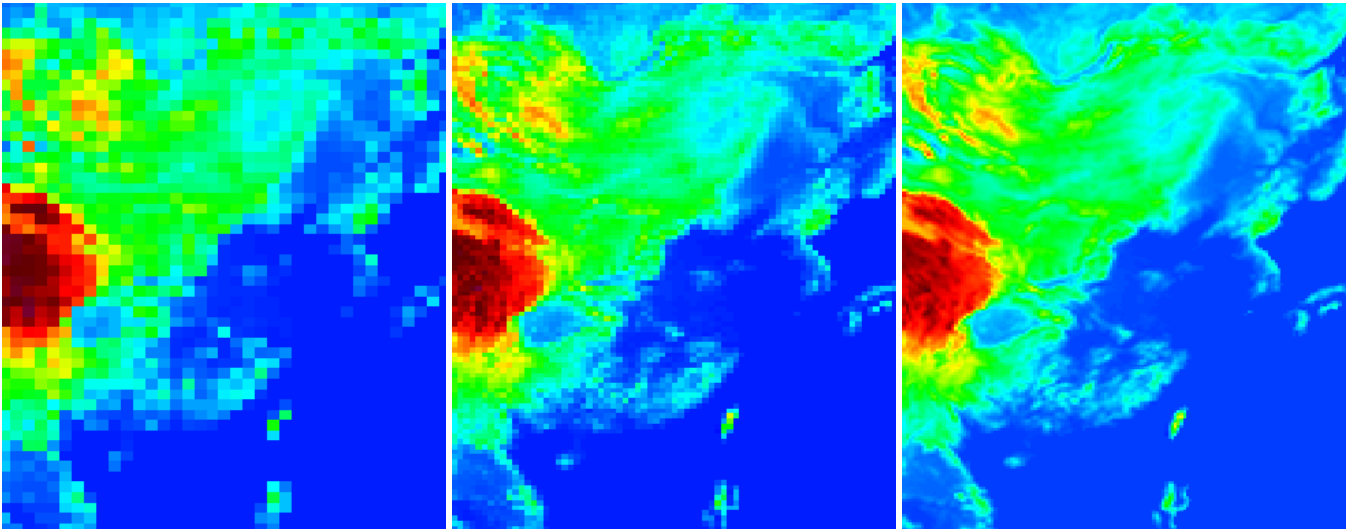


[그림 6.3] 슈퍼컴퓨터 3호기 XE6 '해온'(左), '해담'(右)

6.1 기상청 슈퍼컴퓨터의 활용

[표 6.2] 슈퍼컴퓨터 주요 사양 및 주요 현업모델 비교

구분	1호기	2호기	3호기
기기명	NEC SX5	Cray X1E	Cray XE6
운영연도	2000	2005	2010
이론성능	224 Gflops	18.5 Tflops	758 Tflops
메모리	224 GBytes	4 TBytes	119.8 TBytes
Storage	3.78 TBytes	400 TBytes	2.5 PBytes
Tape Backup	14 TBytes	2 PBytes	4.5 PBytes
전지구모델	T213L30(110km)	T426L50(40km)	UM N512L70(25km)
지역모델	MM5 30km	MM5 30km	UM 12km L70
		KWRF 10km	KWRF 10km



[그림 6.4] 해상도별 모델의 지형효과(왼쪽부터 100km, 50km, 25km)

6.2 수치예보시스템

6.2.1 수치예보시스템

수치모델 운영 담당부서에서 관리하는 수치모델을 이용하여 수치모델 자료를 생산하고 이를 제공하여 예보에 활용하게 되는 것을 수치예보 현업 시스템이라 한다. 2005년 12월 1일부터 기상청 슈퍼컴퓨터 2호기 Cray X1E를 이용하여 현업 수치예보 시스템을 수행했으며, 2010년 5월 14일 부터 슈퍼컴퓨터 3호기를 이용하여 통합 수치예보 시스템(Unified Model, UM)에 기반을 둔 수치모델을 현업시스템으로 수행하고 있다.

현재 기상청의 수치예보시스템은 크게 전지구예보시스템 (Global Data Assimilation and Prediction System : GDAPS), 지역예보시스템 (Regional Data Assimilation and Prediction System : RDAPS), 초단기 분석 및 예측 시스템(Korea Local Analysis and Prediction System : KLAPS)과 여기서 파생된 각종 응용 시스템으로 구성되어 있다. , 파랑예보모델 (WaveWatch-III, WWIII)은 전지구파랑모델, 지역파랑모델, 국지예보용 모델이 있다. 통계예보모델로는 중기기온모델, 3시간기온모델, 칼만필터 모델 등이 있다. 이들 모델들은 예측대상에 따라 일 1회에서 4회까지 운영되고 있으며, 생산된 예측 결과는 즉각적으로 예보관에게 제공되어 대국민 일기예보 서비스에 활용되고 있다.

2011년 5월 23일부터 기상용 슈퍼컴퓨터 3호기를 통해 현업 운영중인 전지구예보모델(UM N512L70)은 약 25km의 수평해상도, 연직 70개층으로 이루어져 있으며, 모델 상한은 0.1hPa 이다. 1일 4회 10.5일 까지의 예보 자료를 제공하고 있다. 지역예보모델(UM 12km L70)은 수평해상도가 12km, 연직 70층으로 이루어져 있으며, 72시간까지의 예보자료를 1일 4회 제공하고 있다. 또 다른 지역예보모델(KWRF 10km L40)은 수평 10km, 연직 40개층의 해상도를 가지며, 72시간 예보자료를 1일 4회 제공하고 있다.

또한, 2010년 6월 15일부터 초단기예보의 대국민 서비스가 실시됨에 따라 매 시간 관측 자료를 이용한 초단기분석시스템(KLAPS)을 개선하여 운영하고 있으며, 이를 초기장으로 한 초단기예측시스템을 구축하여 매 시간 12시간의 기상 예측장을 생산·제공하고 있다.

기상청에서는 총 20여종의 수치예보 모델들이 하루 100여회 수행되고 있으며, 이 수치모델들은 하루에 약 1.6TB의 데이터를 생산함과 동시에 80,000장이 넘는 분석 및 예보 일기도들을 생산하고 있다. 표 6.3은 2011년 12월 현재 기상청에서 현업 운영 중인 수치예보 시스템 현황이다.

6.2 수치예보시스템

[표 6.3] 기상청 현업 모델 현황 및 주요 응용분야

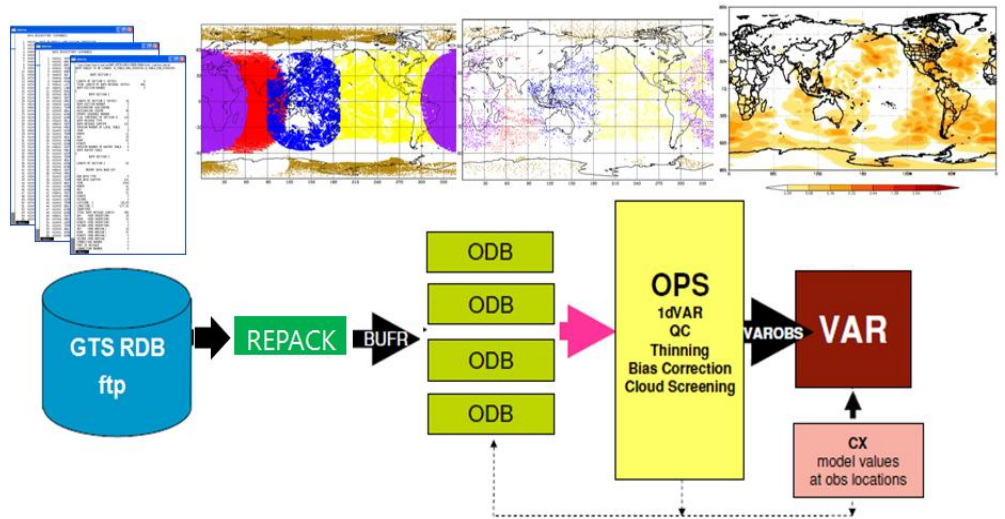
모델		구분	수평분해능 (연직층수)	운영 횟수 /일	예측 기간	목적
전지구	전지구예보모델(GDPS)		25km (70층)	4회	10.5일	대상 : 전지구 날씨 예측 용도 : 동네예보, 주간예보
지역	지역예보모델(RDPS)		12km (70층)	4회	72시간	대상 : 아시아 날씨 예측 용도 : 동네예보
	지역예보모델(KWRF)		10km (40층)	4회	72시간	대상 : 아시아 날씨 예측 용도 : 동네예보
파랑	전지구파랑모델(GWW3)		약 50km	2회	10.5일	대상 : 전지구 해상파고 용도 : 동네, 주간 해상예보
	지역파랑모델(RWW3)		약 8km	2회	72시간	대상 : 아시아 해상파고 용도 : 해상동네예보
	연안파랑모델(CWW3)		약 1km (6개 연안)	2회	24시간	서해중부/남부, 남해서부/동부, 동해중부/남부
해일	폭풍해일모델(RTSM)		약 9km	2회	72시간	용도 : 아시아 해상파고예보
황사	아시아확장(ADAM2)		30km	2회	72시간	용도 : 황사 수송 예측
태풍	태풍모델(DBAR)		약 35km	4회	72시간	용도 : 태풍진로예측
양상블	전지구 양상블모델(EPSP)		40km (70층)	2회	10일	용도 : 주간예보
통계 모델	전구UM 기반	중기 기온 (GDLM)	6개 주요도시	1회	10일	용도 : 주간 기온예보
	지역UM 기반	3시간기온 (RDLM)	주요 예보지점	2회	48시간	용도 : 동네 기온예보
		칼만필터 (KLMN)		2회	48시간	
	KWRF 기반	3시간기온 (KDLM)		2회	48시간	
칼만필터 (KWKM)		2회		48시간		
초 단기	초단기 배경분석(KL15)		15km (22층)	8회	-	대상 : 동아시아 영역 용도 : 초단기모델 의 배경장 생성
	초단기 배경예측(KLBG)		15km (40층) 5km (40층)	4회	30시간	
	초단기 분석(KL05)		5km (22층)	24회	-	대상 : 한반도 영역 용도 : 3차원 분석 /예측 생산
	초단기 예측(KLFS)		5km (40층)	24회	12시간	

6.2 수치예보시스템

6.2.2 관측자료 전처리

기상청은 2010년 5월 현업 수치예보시스템을 영국기상청의 통합모델을 기반으로 개선하였다. 통합모델은 여러 가지 위성자료에 대한 관측연산자가 장착되어 있어, 기존에는 사용이 용이하지 않았던 위성자료의 활용이 가능하게 되었으며, 기타 일반 관측자료의 사용도 이전 일본모델 기반의 GDAPS보다 급격히 증가하였다. 통합모델은 여러 가지 위성자료에 대한 관측연산자가 장착되어 있어, 기존에는 사용이 용이하지 않았던 위성자료의 활용이 가능하게 되었으며, 기타 일반 관측자료의 사용도 이전 일본모델 기반의 GDAPS보다 급격히 증가하였다.

GTS 및 ftp로 수신된 관측자료들(그림 6.5)은 기상청의 종합기상정보시스템의 데이터베이스에 입력되고, 이 자료는 통합모델에서 사용할 수 있는 형식으로 변환되어 매 분석시간마다 통합모델용 데이터베이스(ODB : Observational Data Base)를 생산해 낸다. ODB는 통합모델의 품질검사 및 1DVAR 과정을 포함하는 OPS(Observation Processing System)과정을 거쳐 최종 자료동화에 입력되는 관측자료형식으로 만들어진다. OPS를 거친 관측자료, 관측점에 해당하는 배경값과 오차값은 4DVAR 과정의 입력자료로 사용된다.



[그림 6.5] 관측자료 전처리 과정

6.2 수치예보시스템

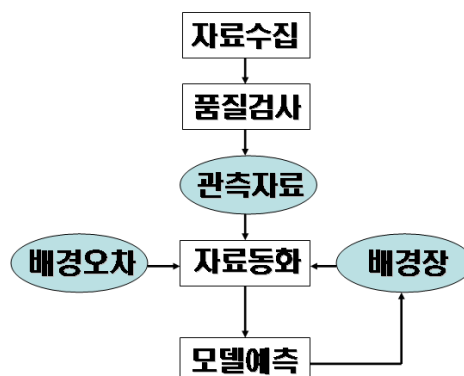
6.2.3 자료동화시스템

시·공간적으로 조밀한 관측자료는 수치모델의 자료동화 알고리즘(품질검사, 4차원 변분법(4DVAR))을 이용하여 개선된 초기장을 제공해주며, 이는 수치모델 성능 개선의 가장 큰 요인이 되고 있다. 이에 기상청은 2007년 4DVAR와 최신 물리과정을 포함하는 영국기상청의 통합모델 도입을 결정하였으며, 통합 모델의 장점 중 하나는 4DVAR를 채택하여 위성자료를 비롯한 다양한 비종관 관측자료의 활용이 용이하다는 것이다. 이는 바로 양질의 초기자료를 생산함으로써 수치모델 예측성능 개선과 직결된다.

현재까지 알려진 최고의 자료동화 기법은 4차원 변분법으로서 ECMWF, 영국, 일본과 같은 선진국들은 대부분 4차원 변분법 기술을 사용하고 있다. 기상청의 경우, 2009년까지는 4차원 변분법의 전 단계인 3차원 변분법을 사용하여 왔으나 2010년부터 영국 기상청의 통합모델 도입과 함께 통합모델에 연동되어 있는 4차원 변분자료동화 시스템을 활용하고 있다.

현재 기상청 모델 중 자료동화 시스템이 접합된 모델은 전지구모델, 지역모델 그리고 KWRF 등이다. 영국기상청에서 도입된 전지구모델과 지역모델은 4차원 변분법이 연동되어 있고 미국 대기과학연구소(NCAR)의 WRF모델을 기반으로 개발된 KWRF 모델에는 3차원 변분법이 연동되어 있다.

변분법의 가장 중요한 장점은 위성, 레이더와 같은 비종관 자료를 동화하는데 유리하다는 점이다. 기상청에서도 그동안 비종관 자료의 활용을 위해 변분법 개발에 집중적으로 투자해 왔으며 그 결과 1999년 1차원 변분법을 시작으로, 2004년부터 3차원 변분법을 거쳐, 2010년 최고수준의 4차원 변분법을 모델에 활용하는 단계에까지 이르렀다.



[그림 6.6] 자료동화의 주요구성

6.2 수치예보시스템

6.2.4 전지구예보모델

수치예보시스템의 중심이 되는 현업 전지구예보모델은 영국 통합모델을 기초로 구축되었으며, 수평적으로 1024×769개의 격자(N512)로 구성되어 약 25km의 분해능을 가지며, 연직적으로는 약 80km 고도까지 70층으로 구성되었다. 수평적으로 Arakawa-C 격자를, 연직적으로 Charney-Phillips 방식을 채택하고 있다.

전지구예보모델은 4차원 변분법 기반의 자료동화가 접합되어 있기 때문에 6시간 주기 순환예측에 필요한 각종 배경장을 생산하기 위한 일 4회의 15시간 예측을 수행한다. 일 1회 06UTC에는 해수면온도, 해빙자료 및 동서평균 오존량을 갱신하기 위한 배경장 갱신과정이 별도로 수행된다. 해수면온도와 해빙자료는 영국 국립해양예측센터(National Centre for Ocean Forecasting, NCOF)의 1/20° 해상도 자료를 모델 해상도에 맞게 내삽하여 갱신되며, 토양수분과 토양온도는 별도의 지면분석과정을 통하여 일 4회 갱신된다. 전지구예보모델의 기본 구성체계는 표 6.4와 같다.

[표 6.4] 전지구예보모델(UM N512L70)의 구성체계

기상청 전지구예보모델(UM N512L70) 구성	
지배방정식	Complete equation(비정역학 방정식계)
수평해상도	N512 (25km 0.352°X0.234°)
연직층수	L70(모형상단고도 - 80km)
예측기간	10.5일 (252시간)
시간적분간격	600초
초기자료생산	4차원 변분자료동화(4DVAR)
공간이산화법	유한차분법(Finite Difference method)
시간적분/이류	반암시/반라그랑지법(Semi-implicit Semi-Lagrangian scheme)
복사물리과정 모수화	Edwards-Slingo general 2-stream scheme
지면물리과정 모수화	MOSES-II land-surface scheme
경계층물리과정 모수화	MOSES-II Non-local PBL
대류물리과정 모수화	Mass flux convection with CAPE closure
미세물리과정 모수화	Mixed=phase precipitation
중력파항력 모수화	G.W. drag due to orography (GWDO)

6.2 수치예보시스템

6.2.5 지역예보모델

지역예보모델은 전지구예보모델에 비하여 상대적으로 작은 영역에 대한 계산을 수행하기 때문에 이로부터 얻어지는 여분의 계산자원을 분해능의 증가에 활용할 수 있는 장점을 가진다. 따라서 일반적으로 지역예보모델은 전지구예보모델에 비해 고분해능으로 구성되며, 전산기술의 발달에 따라 점점 고분해능화가 가속화되고 있다.

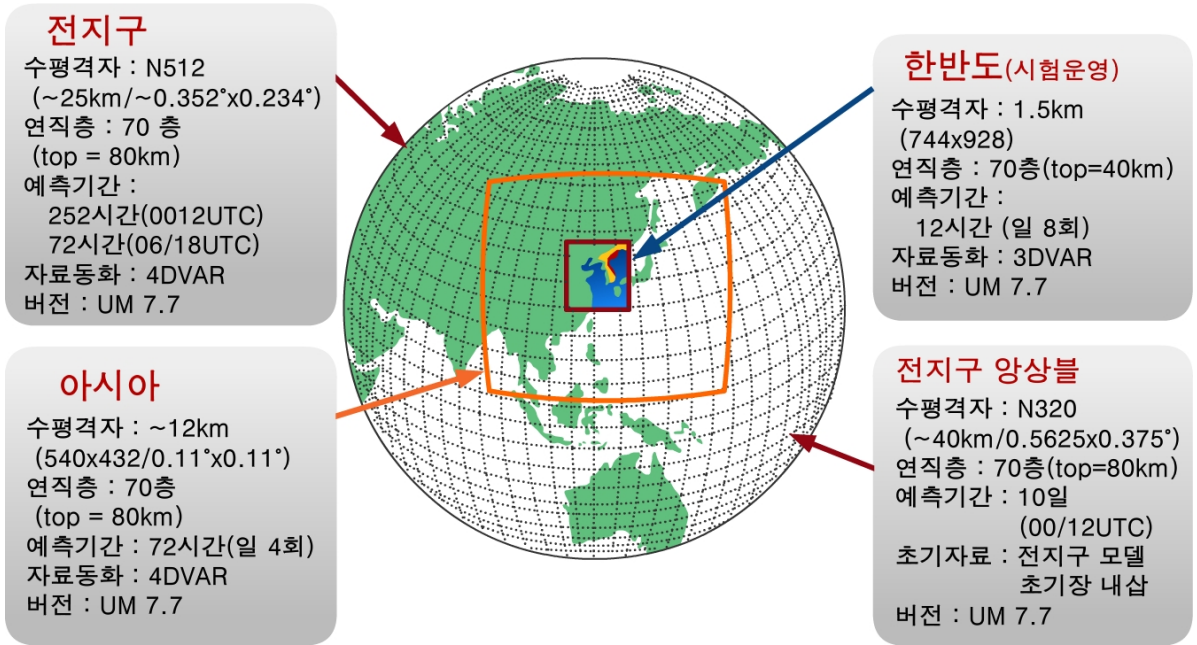
지역예보모델은 단기예측 정보를 생산함과 동시에 보다 작은 영역의 지역예보모델 수행을 위한 측면경계자료 및 각종 응용모델의 수행을 위해 필요한 초기·경계 입력자료를 생산하는 중간자적 역할을 함께 수행한다. 일례로 기상청 현업 지역예보모델인 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)는 72시간의 기본 단기예측자료 이외에도 통계모델, 지역 파고모델, 폭풍해일모델 및 동네예보모델 등의 수행에 필요한 입력자료를 생산한다.

RDAPS의 공간 해상도는 12km이며, 연직으로 약 80km까지 70층으로 구성되며, 3시간 간격으로 전지구모델로부터 경계장을 제공받아 1일 4회(00, 06, 12, 18UTC) 72시간 예측을 수행한다. RDAPS는 4차원 변분자료 동화 기법을 이용하여 6시간 간격의 자체 분석 및 예측 순환 체계를 현업 운영하고 있다. 자체 분석 시스템에는 윈드프로파일러, AWS 등 한반도에서 관측되는 비종관 자료가 활용되고 있다.

또 하나의 지역모델인 KWRF는 통합 전지구모델로부터 경계장을 제공받아 3차원 변분자료 동화 기법을 이용하여 6시간 간격의 분석-예측 순환 시스템을 구축하여 2010년 6월부터 현업 운영하였다.

6.2 수치예보시스템

현업 수치예보 시스템의 주요 모델인 전지구 모델과 지역모델에 대한 간단한 소개는 그림과 같다.



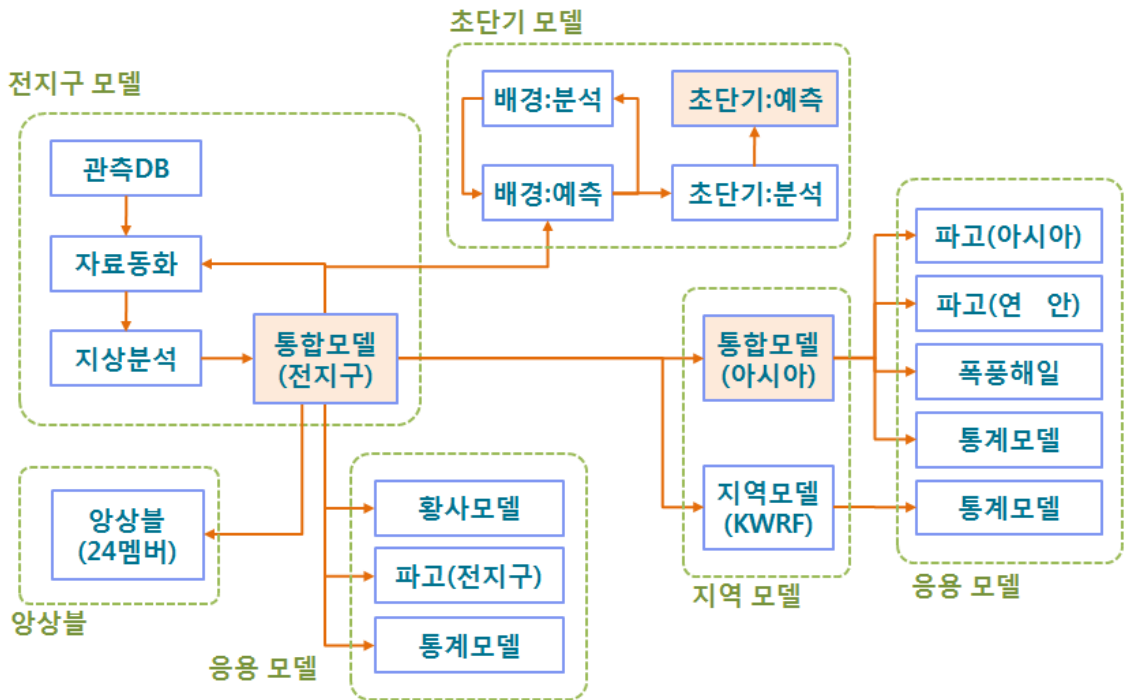
[그림 6.7] 전지구 수치예보시스템과 지역예보시스템 비교

6.2 수치예보시스템

6.2.7 현업 수치예보 모델의 구성

수치예보시스템은 앞서 설명한 바와 같이 관측자료 전처리, 자료동화, 전지구모델, 지역모델, 응용모델로 구성되고, 다음과 같이 순차적으로 운영되고 있다. 먼저 GTS를 통하여 수집한 관측자료를 데이터베이스화하는 ODB(Observation Data Base) 과정을 거친다. 각 ODB의 관측자료는 자료의 품질 검사(OPS)과정을 수행하여 자료동화를 위한 입력자료가 작성된다.

검증된 관측자료를 바탕으로 자료동화과정(VAR)을 통해 4차원 변분동화과정(4DVAR)이 수행되어 배경장과 관측자료를 이용한 분석장을 생성하게 된다. 분석장을 바탕으로 기상변수에 대한 모수화과정과 물리과정을 이용한 역학적 계산을 통해 미래시간에 대하여 예측된 기상 예보장을 산출하게 된다. 전지구 예보 시스템에서 예보장은 지역모델과 응용모델에 초기자료와 경계자료를 제공하게 된다.



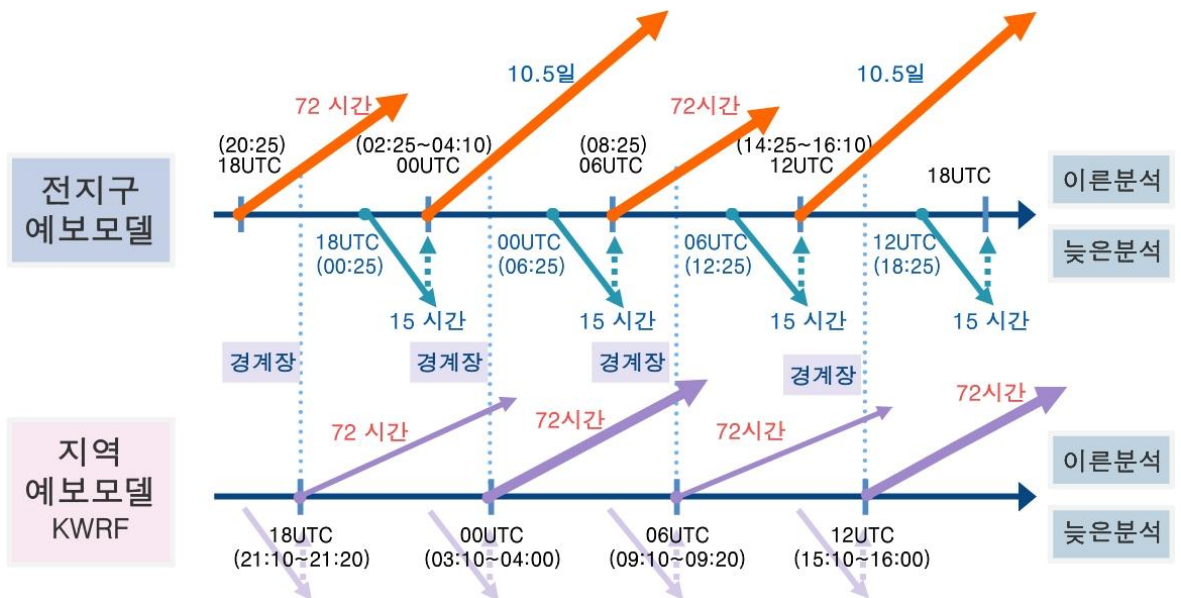
[그림 6.9] 현업 수치예보시스템의 수행 및 자료 흐름도

6.2 수치예보시스템

수치예보시스템의 운영은 보다 많은 자료를 수집하여 수치예보시스템에 활용하기 위하여 전지구 예보시스템은 이른 분석 4번과 늦은 분석 4번으로 총 8번에 걸쳐 수행된다. 이른 분석은 기상예보에 사용하기 위하여 정해진 예보시간에 예보 가이드스 제공이 목적이다. 늦은 분석은 관측자료 수집시간을 길게 하여 보다 많은 관측자료를 반영한 향상된 배경장을 생성시키기 위해 수행된다.

수치예보 현업 시스템은 4회에 걸쳐 수행되는 늦은 분석 사이클 시스템을 바탕으로 예보 가이드스 및 분석장 제공을 위하여 4회의 이른 분석이 수행된다고 할 수 있다. 이른 분석 00UTC의 예보자료를 생성하기 위해서는 현지시간으로 오전 11시25분에 수치예보시스템이 수행된다.

00UTC의 이른 분석 수행 이후에도 전 세계적으로 많은 관측자료가 입전되므로 예보 가이드스 제공을 위하여 수행된 이른 분석보다 많은 관측자료를 적용한 늦은 분석을 수행하여 향상된 자료를 생성하게 된다. 00UTC의 늦은 분석 6시간 예보장은 06UTC의 이른 분석과 늦은 분석의 배경장으로 사용하게 된다. 따라서 늦은 분석 06UTC 6시간 예보장이 이른 분석 12UTC의 배경장으로 사용하게 된다.



[그림 6.10] 수치예보 현업 시스템의 이른 분석과 늦은 분석 체계

연습 문제

1. 슈퍼컴퓨터를 정의하고 수치예보에서 슈퍼컴퓨터가 필요한 이유를 설명하시오.
2. 현재 현업에서 운용중인 슈퍼 컴퓨터의 성능에 대해 설명하시오.
3. 현재 기상청의 슈퍼 컴퓨터에서 운용중인 모델들에 대해 설명하시오.
4. 자료동화 과정에서 이른 분석과 늦은 분석의 차이점과 목적을 설명하시오.
5. 모델의 공간해상도를 2배 향상시키려면 현재보다 몇 배 빠른 슈퍼컴퓨터가 필요한가?

7장 . 초단기 기상분석 및 예측시스템

7.1 서론

7.2 초단기 기상분석시스템

7.3 초단기 기상예측시스템

학습목표

- 정상적인 수치예보가 아닌 초단기 분석 및 예측 시스템이 필요한 이유를 이해한다.
- 기상청의 초단기 분석 및 예측 시스템의 분석 및 예보 원리를 이해한다.
- 기상청의 초단기 분석 및 예측 시스템에 활용되는 자료들을 이해한다.
- 초단기 분석 및 예측 시스템에서 레이더, 낙뢰 및 위성 등 원격탐사 자료가 갖는 중요성을 이해한다.
- 초단기 예측 시스템에서 강수 유형을 구분하는 원리에 대해 이해한다.
- 기상청의 초단기 분석 및 예측 시스템의 개선과정을 이해한다.

7.1 서론

한반도에서는 국지적인 재해기상의 빈도와 강도가 증가함에 따라 인명과 재산 피해가 점점 증가되고 있다. 이와 같은 기상현상은 기존의 단기예보 체계에서 예측하기에는 많은 어려움이 존재한다. 따라서 이에 대응할 수 있는 예측기술 개발이 필요하다.

국립기상연구소에는 국지분석시스템을 활용한 단시간 강수 예측시스템을 구축하여 초단기 강수 예측성 향상을 위한 연구를 진행해 왔다. 이를 위해 다양한 집중호우 사례에 대한 연구뿐만 아니라 실시간 운영 체계를 구축하여 그 결과를 분석하여왔다. 그 결과 물리적 초기화를 통해 6시간 이내의 강수 예측에 뚜렷한 향상이 있음을 제시했다(기상연구소, 2005).

이러한 초단기 강수 예측성 향상을 위해서는 레이더와 낙뢰 자료의 활용이 매우 중요하다는 것을 알 수 있었다. 예측성이 낮은 초단기에 대한 예측 지원 요구에 따라 기존의 단시간 강수 예측시스템을 활용한 체계를 운영하게 되었다.

특히, 초단기 예측은 모델 수행의 선행시간을 최대한 줄여 가능한 빠른 지원을 할수록 그 유용성이 높아지게 된다. 따라서 국지분석시스템을 기반으로 구축된 3차원 분석시스템을 이용함으로써 단시간 강수 예측장의 제공을 보다 앞당길 수 있었다(기상연구소, 2006). 이러한 결과는 한반도뿐만 아니라 북미지역에서도 LAPS 초기장을 이용한 WRF 모델의 예측은 강한 강수의 단기 예측에 특히 높은 강수예측 성능을 보였다(Etherton and Santos, 2008).

7.1 서론

2006년도에 현업화되어 운영되고 있는 초단기 기상분석시스템을 지속적으로 개선하였고, 개선된 분석자료를 초기장으로 초단기 기상예측시스템(Korea Local Analysis and Prediction System, KLAPS)을 새롭게 구축하였다. 국지분석시스템의 개선에는 현업시스템의 변경에 따른 수정 및 관측망의 확대 및 변경 사항을 반영하였으며, 특히 배경장을 생산하는 모델을 교체하였다. 이를 통해 더욱 상세해진 분석장 제공이 가능하였다.

새롭게 구축된 초단기 예측시스템은 WRF 모델을 기반으로 개발되었으며, 그 예측장을 활용도를 높이기 위해서 수행체계를 최적화하여 그 결과를 1시간 이내에 예보관들에게 제공할 수 있도록 하였다. 2008년 시험운영을 통해 초단기 강수예측에 매우 유용하게 이용될 수 있는 것으로 판단하여 2009년 8월에 현업화하여 지원하기 시작하였다.

2010년에는 3시간 간격으로 발표하는 기존 동네예보 단기 예보와 이음새 없는 예보를 위해 동네예보 실황 및 초단기예보 지원을 위한 자료로 KLAPS가 이용되고 있다. 매시간 생산되는 분석장으로부터 동네예보 실황 요소를 지원하고, 매시간 생산되는 예측장을 통해서도 초단기예보 요소를 지원하고 있다.

7.2 초단기 기상분석시스템

기상청에서는 예측 능력 향상을 위해 관측망의 확대가 이루어져왔다. 그리고 정보통신기술 발전과 함께 통신 속도의 향상으로 각종 위성자료 및 주변국의 관측 자료도 준 실시간으로 수신 가능하게 되었다. 이와 같은 정보는 종합기상정보시스템(COMIS : COmbined Meteorological Information System)에서 관측 종별로 그래픽 또는 문자로 실시간 예보관에게 제공되고 있다.

그러나 이와 같이 관측 형태에 따라 별도로 제공되는 관측 정보는 별도의 모니터링과 분석을 요구하게 되므로, 모든 관측 자료를 망라해서 대기의 상태를 입체적으로 조망하기에는 부족한 측면이 있다. 이에 실시간으로 가용한 모든 관측 자료와 수치예측 자료를 사용해서 3차원 분석 자료를 생산하여 예보관에게 제공할 수 있는 시스템이 요구되었다(기상청, 2006).

이러한 시스템의 구축과 관련하여 가용한 분석시스템에 대한 기술적 검토가 있었다. 기상청 내에서 연구개발이 진행된 3차원변분자료동화(3DVAR) 시스템과 국지분석시스템이 논의 대상이 되었다. 3차원변분자료동화는 모형면에서 분석이 이루어지기 때문에 연직내삽오차가 적다는 장점이 있지만, 분석시간이 길고 비종관 자료를 분석에 사용하기 위해서는 별도의 연산자 개발이 필요하였다.

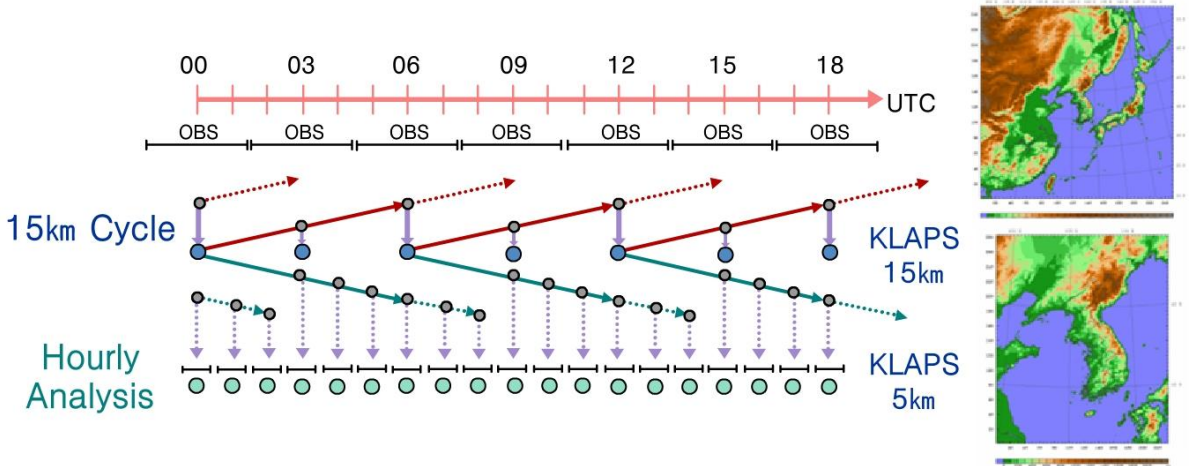
이에 반해 국지분석시스템은 기압면 분석으로 사이클 체계에서 연직 내삽 오차가 유입될 수 있는 단점이 있지만, 계산시간이 짧고 새로운 관측자료의 입력이 용이하며 다양한 응용지수 산출이 가능하다는 장점이 있었다. 관련 부서들과의 논의 결과로 국립기상연구소에서 개발이 진행된 국지분석시스템을 활용하기로 결정되었다.

3차원 분석시스템 개발은 2006년도 현업화 업무로 지정이 되어, 관련 부서들의 협력을 통해 개발이 진행되었다. 2006년 4월 15일부터 시험 운영을 5월 15일에는 현업 운영을 시작하였다. 그 이후 지속적인 개선이 수행되었고, 시스템 이름을 초단기 기상분석시스템으로 명명하였다.

7.2 초단기 기상분석시스템

초단기 기상분석시스템의 체계는 기본적으로 기존에 개발된 체계와 유사하게 구성을 하였다(그림 7.1). 그렇지만 초단기 기상분석시스템은 현업 운영되어야 했기 때문에 기상청의 기본 정책인 디지털예보 영역에 맞추어야 했다.

따라서 분석의 격자간격은 5km, 중심 위도는 38.0 °N, 중심경도 126.0 °E 로 새롭게 구성을 하였다. 3차원분석시스템은 251×251의 격자수를 갖는 15km 영역과 283×235 격자수를 갖는 5km 영역으로 구성을 하였다. 5km 격자 영역은 경계 영향을 줄이기 위해 디지털예보영역의 격자를 포함하여 남북과 동서로 좀더 넓게 하였다. 기상청 전지구모형 예측자료를 경계장으로 15km 영역 모형이 6시간 사이클 체계로 수행된다.



[그림 7.1] 초단기 기상분석시스템의 체계도

7.2 초단기 기상분석시스템

이때에 15km 분석은 예측장을 배경으로 매 3시간 마다 이루어진다. 5km 분석장은 매시간 이루어지는데 배경장으로 15km 영역의 예측장과 함께 등지내삽되어 생산되는 5km 예측장을 이용한다. 따라서 이를 위해서 5km 영역에 대해서 모형은 매시간 결과자료가 생산되도록 하였다. 5km 분석은 미리 수행된 모형 자료를 이용하므로 15km 영역의 모형 수행은 모형 초기시간에 비해 지체가 가능하다.

따라서 5km 분석에 이용되지 못하는 GTS 자료와 라디오존데, 항공기 관측자료 등의 상층 관측자료가 15km 영역의 분석에서는 포함될 수 있도록 분석이 늦게 이루어지게 하였다. 그래서 간접적이지만 5km 영역에 GTS 자료와 라디오존데 자료의 영향이 주어지도록 하였다. 이와 같이 15km 영역의 예측장 생산이 지체가 발생하기 때문에 5km 영역의 3시간 예측부터 배경장으로 이용된다.

초단기 기상분석시스템은 분석시간에서 10분 이내에 분석이 이루어져야 했다. 따라서 분석시간 약 6분 이후에 분석이 시작되어야 하므로, 그 시간 이전에 수신이 되는 관측자료만 활용이 가능하다. 그래서 활용할 수 있는 관측자료가 어떠한 것인지 관측자료의 입전 현황 분석이 필요했다. 현재 기상청의 모든 관측자료는 실시간으로 종합정보시스템(COMIS)에 수신이 되므로 종합정보시스템에 관측 자료의 수신시간을 자료별로 조사하였다.

현재 항공기상 관측자료는 기상청에서 관측되는 자료와 공군에서 관측된 자료가 수신되고 있다. 수신된 자료를 살펴보았을 때에 기상청 관측자료는 관측시간 00분이 되면 10개가 수신되어 대부분의 관측자료가 수신이 된다. 공군 관측자료는 시간에 따른 변화가 있지만 정시 6분에 대부분 33개 정도의 관측자료가 수신됨을 알 수 있다.

실제로 항공기상 관측자료는 정시자료를 약 10분 전에 관측하기 때문에 6분 이내에 대부분의 자료가 수신이 되며 3차원분석시스템에 활용이 가능하다. 이와 같이 다양한 관측자료에 대해서 매시간 수신되는 관측자료의 수를 조사하고 실질적으로 이용할 수 있는 관측자료를 파악하였다.

7.2 초단기 기상분석시스템

정지기상위성 MTSAT-2 자료는 매시 00분과 33분 두 번의 관측이 이루어지는데, 00분 자료는 일부 시간에는 관측이 이루어지지 않기 때문에 3차원 분석시스템에는 33분 자료를 사용하였다. 이 자료는 매시 약 48분에 수신 완료되어 활용이 가능하다. 또한 우리나라 최초의 정지궤도 기상위성인 천리안이 2011년 4월 1일부터 현업 운용됨에 따라 15분 주기의 천리안 자료 활용을 준비 중이다.

자동기상관측자료와 낙뢰자료는 관측 후 약 5분 이내에 자료를 활용할 수 있으며, 레이더 자료는 관측 사이트마다 관측과 수신 시간에 차이가 있지만 약 10분 정도의 관측시간과의 차이가 있다.

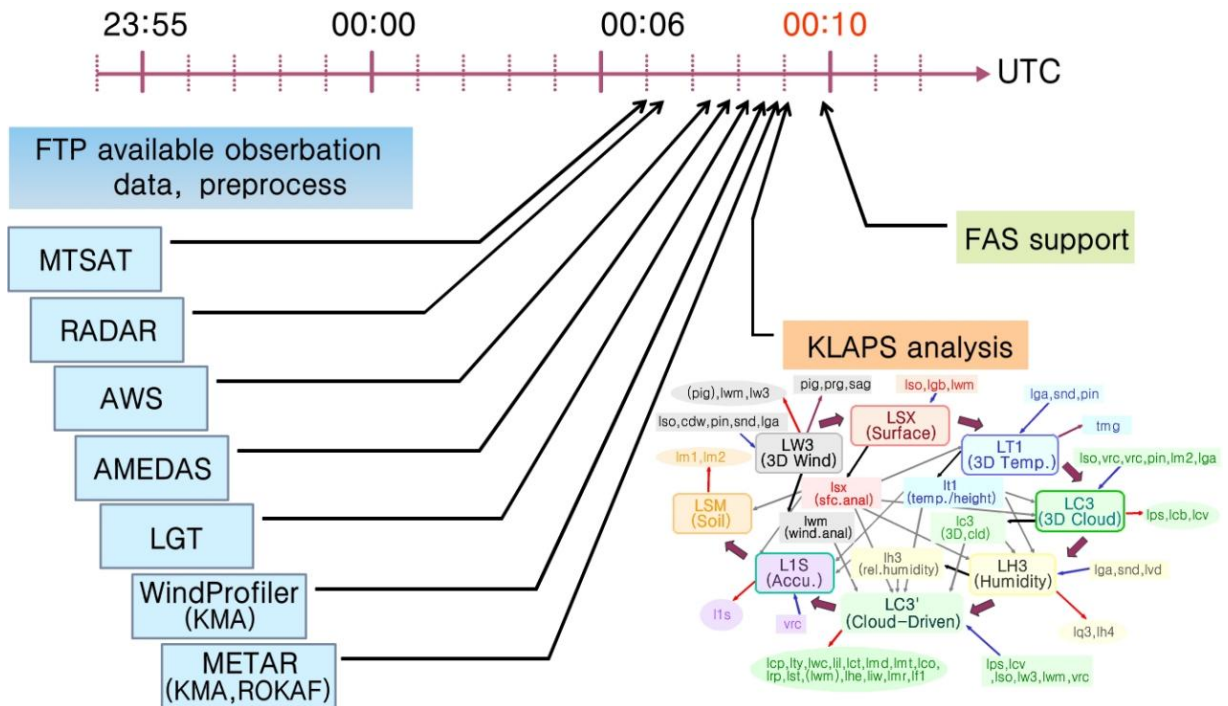
따라서 분석시간 10분 전 자료를 사용한다. 수직측풍장비의 관측도 레이더 자료와 마찬가지로 관측시간과 수신에 약 10분 정도의 차이가 있어, 분석시간 10분 전 자료를 활용하기로 하였다. 항공기상 관측자료는 앞서 언급한 것처럼 정시자료를 약 10분 전에 관측하기 때문에 6분 이내에 대부분의 자료가 수신이 된다.

일본 지상관측자료(AMEDAS)도 실시간 수신이 되어 5분 이내에 활용이 가능하다. 따라서 레이더와 국내 수직측풍장비의 관측자료를 10분 이전 자료를 활용하게 되면, 위성, 레이더, 수직측풍장비, AWS, 항공기상 관측자료의 자료를 정시 6분에 활용이 가능하게 된다. 이러한 관측자료 파일은 종합기상정보시스템에서 전후처리 시스템으로 FTP로 전송이 되고 3차원 분석시스템에서 처리할 수 있는 자료 형태로 각각 전처리 작업이 이루어진다(그림 7.2). 이후에 초단기 기상분석시스템의 바람, 온도, 습도 등의 분석 과정이 적용되며, 최종 분석장이 매시 약 10분에 생산이 된다.

이에 반해 관측자료 중에는 수신 시각에 지체가 있어 초단기 기상분석시스템 매시간 분석에 이용되지 못하는 것이 있다. GTS는 언급한 것처럼 관측 시각과 수신이 차이가 있으며, 각 사이트에서 관측된 자료가 독립적으로 전송되기 때문에 시간이 지날수록 활용할 수 있는 관측자료가 증가하게 된다.

7.2 초단기 기상분석시스템

GTS 자료 중에서 지상자료는 분석시각에서 50분 정도가 지나면 약 90 % 정도의 자료가 수신이 되는 반면에 상층 자료의 경우는 약 1시간 30분이 지나야 대부분의 자료가 수신된다. 항공기 기상관측자료(ACARS)는 현재 미국 GSD(구 FSL)로부터 자료를 받고 있는데 약 1시간 30분 이후에 자료를 활용할 수 있다. 일본 수직측풍장비는 정시 약 20분 이후에 활용이 가능하다. 이러한 자료는 비록 매시 분석에는 이용되지 못하지만 15km 영역의 분석에 활용이 되고 있다. 따라서 이러한 관측자료가 15km와 등지격자 5km 영역에서 간접적으로 분석장에 효과를 미치게 된다.



[그림 7.2] 매시간 분석과정 흐름도

2008년도에는 레이더 및 윈드프로파일러 장비가 확대됨에 따라 관측자료 추가하였다. 추가된 레이더 자료는 성산포자료가 포함되었으며, 윈드프로파일러는 2007년도 이후 신규 설치된 자료를 포함하여 12대의 관측자료가 실시간 입력되고 있다. 또한 MTSAT-1R 위성의 HiRID 송신서비스 중단 및 HRIT 정규서비스 실시에 따른 입력체계를 구축하였다.

7.2 초단기 기상분석시스템

개발이후에 정보가 변경된 AWS, AMEDAS 지점 정보를 최신으로 갱신하였다. 그리고 기상청으로 실시간 전송되는 국내 AMDAR 자료도 활용될 수 있도록 하였다.

항공기관측자료인 AMDAR는 기존에는 미국 GSD(Global Systems Division)에서 전세계 자료를 취합하고 전송이 되어 입전시간 지연으로 인해 5km 해상도의 국지분석시스템에서는 활용할 수 없었지만, 국내 자료를 실시간 활용할 수 있음에 따라 본 연구를 통해 이용체계를 구축하였다. 국내 AMDAR 자료는 현재 정시기준으로 10분전부터 입전된 자료를 처리하는데 평균 2~3대의 항공기에서 관측된 자료가 분석에 활용된다. 정시 6분부터 관측자료를 전송하고 처리하기 때문에 수신시간이 늦은 GTS와 같은 일부 자료를 제외하고는 활용가능한 대부분의 관측자료를 최대한 입력 가능하도록 하였다.

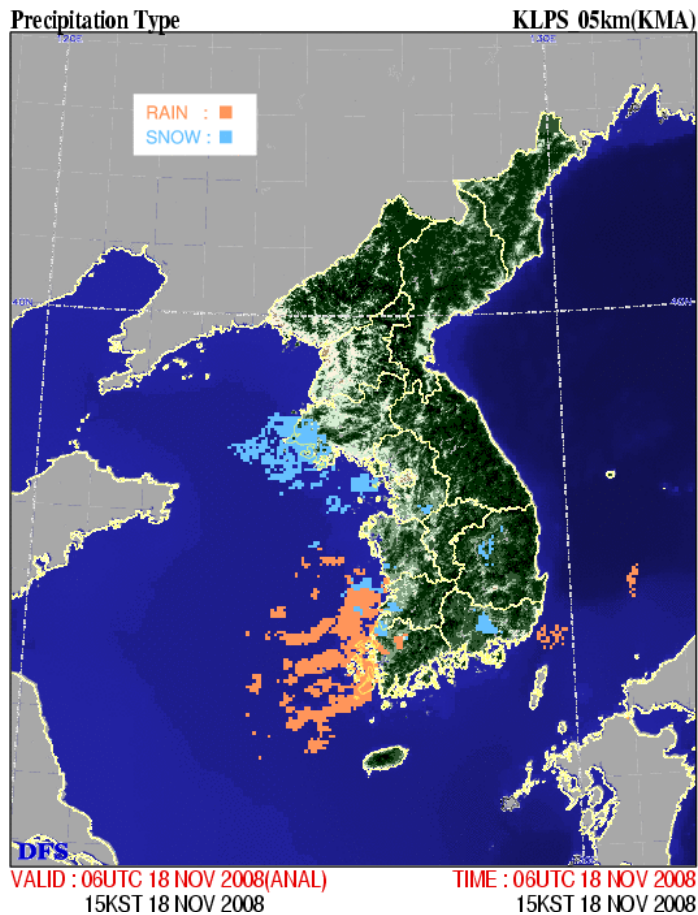
그리고 국지분석시스템에 배경장을 생산하는 기반모델을 변경하였다. 기존 시스템은 MM5V3를 이용하였다. 그 이후에 기상청 현업 지역모델이 KWRF로 변경됨에 따라 효율적인 운영을 위해서 배경장 생산모델도 WRF로 변경하기로 하였다. KLAPS 시스템은 기본적으로 WRF 결과자료를 처리할 수 있는 과정이 포함되어 있었지만, WRF 버전 2.1 이전의 체계에 맞춰져 있었다. 따라서 WRF 버전 2.2 이후에 변경된 전처리과정 등을 반영하기 위해 수정이 요구되었다. 이를 위해서 WRF 결과를 초단기 기상분석시스템에 입력과정을 개발하였다. 여기에는 WRF 모델결과의 완화 등의 과정이 포함되었다.

한편 국지분석시스템에서는 위성, 레이더, 항공기상관측 등 다양한 관측자료를 이용한 구름분석과정이 포함되어있다. 이러한 분석과정에서 구름정보와 상관된 바람과 온도에 대한 조절은 이루어져야 한다. 모델적분초기시각에 구름 또는 대기 물 변수를 지정한다고 하더라도 이를 뒷받침할 수 있는 대기 흐름이 정의되지 않으면 증발에 의한 냉각과 하강기류의 형성이 유발될 수 있다. 따라서 이를 보완하기 위하여 여러 종류의 관측으로부터 3차원 구름의 분포를 분석하고, 이와 역학적 균형을 이루는 초기장을 생산하는 일련의 물리적 초기화 과정이 국지분석시스템에는 포함되어 있다 (Schultz et al., 2001. Shaw et al., 2001).

7.2 초단기 기상분석시스템

강수현상시에 강우와 강설의 구분은 온도보다는 습구온도에 기반을 둔다. 이것은 환기효과(Ventilation Effects)로 떨어지는 강수의 온도가 습구온도를 유지시키기 때문이다. 만약 대기가 충분히 건조하다면 0℃ 이상의 온도에서도 강설이 일어난다는 것은 익히 알려진 것이다. 경험적으로 이러한 강우와 강설 구분의 습구온도 임계값은 약 1.3℃ 근처이다. 따라서 지면에서의 습구온도가 이 임계값 이상이면 강우, 0℃이하이면 강설, 두 경계값 사이는 강우와 강설이 혼합되어 나타날 수 있다.

국지분석시스템에서 계산된 지상온도, 습도, 기압자료를 이용해서 습구온도를 계산하고 구름분석을 통해 파악된 강수현상이 나타나는 격자에서 이 습구온도를 적용해서 강수유형 자료를 산출할 수 있는 것이다. 국지분석시스템을 활용하여 매시간 생산되는 강수유형자료가 실시간으로 예보관들에게 지원될 수 있도록 하는 체계를 구축하였다(그림 7.3). 강수유형 자료는 레이더 자료가 관측 가능한 범위 내에서 결정이 된다.



[그림 7.3] KLAPS에서 산출하여 지원하는 강수유형 자료(주황색은 강우, 하늘색은 강설을 의미)

7.2 초단기 기상분석시스템

검증을 위하여 강수유형 판별 결과를 관측자료와 비교를 하였다. 사용된 자료는 국내 기상대 매시간 관측자료이다.

국내식 기상현상 코드번호에서 비와 관련된 번호와 눈과 관련된 코드를 분석하여 강우, 강설, 강우강설혼합의 자료를 추출하였다. 그리고, 국지분석시스템에서 5km 마다 생산된 강수유형 자료를 기상대 근처의 3×3 격자에 대해서 강우, 강설, 혼합을 구분하였다. 9개의 격자 중에서 강우나 강설만 있는 경우는 강우, 강설로 판별하고 두 강수유형이 모두 있는 경우는 혼합으로 분류하였다.

2006년 겨울(2006년 11월 16일부터 2007년 3월 15일)과 2007년 겨울(2007년 11월 16일부터 2008년 3월 15일)의 기간에 대해서 기상대에서 강우, 강설, 혼합의 관측 수에 비해 국지분석시스템에서 강수 현상을 판단한 경우는 2006년 겨울은 약 54%, 2007년 겨울은 약 50%에 불과하였다.

따라서 국지분석시스템에서 전반적으로 강수현상을 적게 분석하고 있는 것이다. 이러한 원인은 위성과 레이더를 이용한 3차원 구름분석이 실제보다 구름을 적게 분석하는 것을 의미한다. 강우와 강설 유형만 보면 2006년에는 약 92%, 2007년에는 82% 정도의 정확도를 보인다. 관측에서 강수가 나타났지만 KLAPS 분석에서 강설 및 혼합형으로 보는 경우가 반대의 경우보다 많았다.

KLAPS에서 판단된 강수유형 산출자료는 특히 정규 관측자료가 부족한 북한 지역이나 서해상을 이동하는 저기압 시스템에 의한 강설 예보에 유용하게 활용될 수 있다. 현재 강수유형은 분석장에 대해서 적용이 되었다. 하지만, 이러한 결과를 활용해서 수치모형 예측에 사용이 가능할 것이다. 이 경우에 사회적으로 많은 영향을 끼치는 강설현상에 대한 예보 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다.

7.2 초단기 기상분석시스템

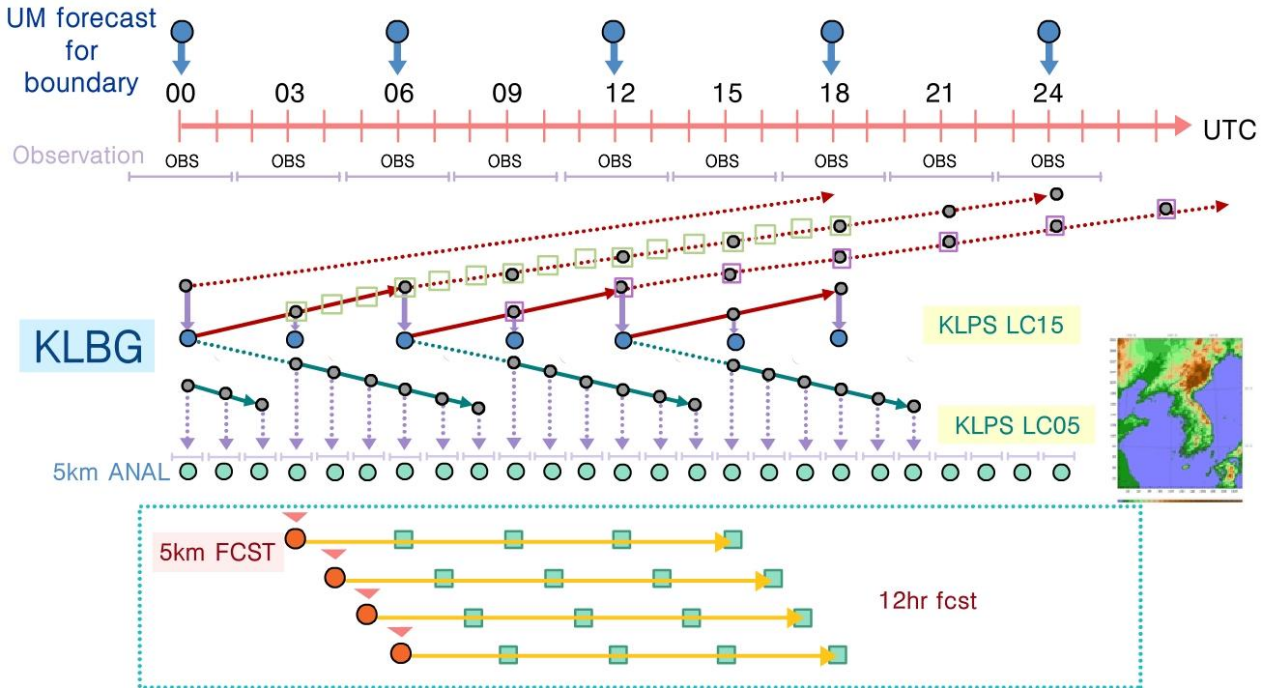
2010년도에 동네예보 실황장을 제공하기 위해서 분석장의 개선이 있었다. 우선 기존 WRF v2.2 기반의 배경장 생산 모델이 최신 WRF v3.1 기반으로 변경이 되었으며, 민간항공기 관측자료 활용 고도 변경, 레이더 자료 처리 개선, 구름분석을 위한 위성자료 활용 과정을 개선하였다. 산출되는 KLAPS 분석장 중에서 지상기온, 습도, 풍향, 풍속, 운량, 하늘상태, 강수량의 7개 요소에 대해서 동네예보로 제공하고 있다.

이 중에서 기온은 분석장과 관측지점의 고도차이를 보정하였고, 해안 지역도 행정구역에 맞춰 일부 변경하였다. 강수량은 10분간격의 레이더반사도 자료와 1시간 누적 AWS 강수자료를 합성하여 한반도 근처의 강수량을 산출하여 제공하고 있다.

7.3 초단기 기상에측시스템

초단기 기상에측시스템은 위성, 레이더 등의 비종관 자료를 활용하여 구름 분석이 포함된 초기장을 이용하므로 수치모델의 적분 초기부터 강수를 적절히 모의 가능하다. 따라서 모델 적분초기의 강수 스핀업 문제를 완화할 수 있다.

북미 사례에서 LAPS 초기장을 이용한 WRF 모델의 예측은 강한 강수의 단기 예측에 특히 높은 강수예측 성능을 보였다(Etherton and Santos, 2008). 그리고, 일 2회의 잦은 예측으로 단시간에 급격히 발달하는 강수시스템을 예측하는데 유용하고, 빠른 지원이 가능하므로 초기시각으로부터 1시간 이내에 예측장이 활용가능하다. 그림 7.4는 매시간 수행되는 초단기 기상에측시스템의 체계도를 나타낸 것이다.



[그림 7.4] 초단기 기상에측시스템의 체계도

초단기 예측시스템의 수평해상도는 5km, 수평격자수는 283×235 이며 연직으로는 40층이다. 명시적 물리과정은 WDM-6 방안을 사용하였고, 적운 모수화 방안은 사용하지 않았다. 초단기 예측시스템은 2008년 8월 시험운영이 시작되었고 2009년 8월 현업운영으로 결과가 공식적으로 지원된다. 2010년 6월 KLAPS v3.0으로 업그레이드 되었고, 동네예보와 초단기 예측에 자료를 제공하고 하고 있다.

7.3 초단기 기상에측시스템

초단기 기상에측시스템의 특징인 구름분석의 효과를 살펴보았다. 이미 언급한 것처럼 구름분석이 포함된 초기장을 이용하므로 스핀업 문제를 완화하여 수치모델의 적분 초기부터 강수를 적절히 모의 가능하다. 현재 KLAPS에서는 구름분석을 위해 위성영상자료, 레이더 반사도 볼륨자료, 지상항공관측자료 등이 이용된다. 이러한 자료를 이용해서 3차원적인 구름의 구조를 만들어 낸다. 그리고, 이와 관련되어 습도장뿐만 아니라 구름주위의 바람장에 적절하게 생산하게 된다.

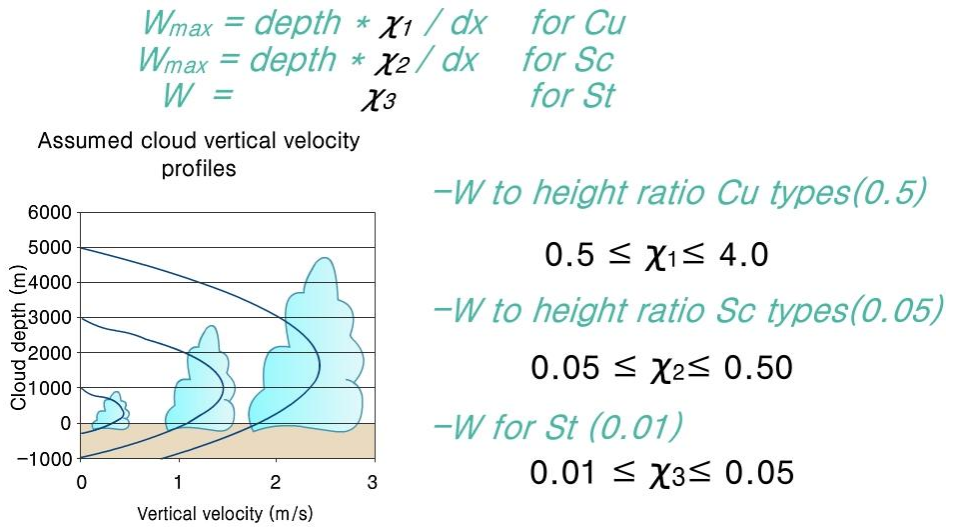
또한 기상청에서 실시간 관측되고 있는 낙뢰자료를 이용하는데 이를 통해서 구름내부의 연직속도에 대하여 더욱 현실적으로 향상시키고 있다. 이러한 구름분석자료는 수치모형에서 초기시간부터 강수 형성이 가능하도록 한다.

그림 7.5는 구름분석이 포함되지 않은 초기장과 국지분석을 통한 구름분석이 포함된 초기장을 이용한 1시간 누적강수와 이때의 레이더 영상자료를 나타낸 것이다. 구름분석이 포함되지 않은 예측에서는 서해상에만 강수 현상이 있고 레이더 영상자료에서 볼 수 있는 한반도에 존재하는 강수대를 예측하지 못하고 있다. 이에 반해 구름분석이 포함된 예측에서는 한반도에서의 강수대를 뚜렷하게 예측하고 있다. 심지어 레이더 영상에서 볼 수 있는 주장수대보다 약간 동쪽에 있는 강수대도 모의하는 것을 볼 수 있다. 이것은 모델 초기시각에 분석과정에서 입력된 레이더 정보 등이 매우 적절하게 분석에 활용되어 수치예보의 강수 모의에 작동하고 있음을 알 수 있다. 이러한 모형초기의 구름분석효과는 일반적으로 약 9~12시간까지 긍정적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

[그림 7.5] 구름 분석이 포함되지 않은 경우(a)와 포함된 경우(b)에 수치모델에서 1시간 누적강수 모의결과 비교

7.3 초단기 기상예측시스템

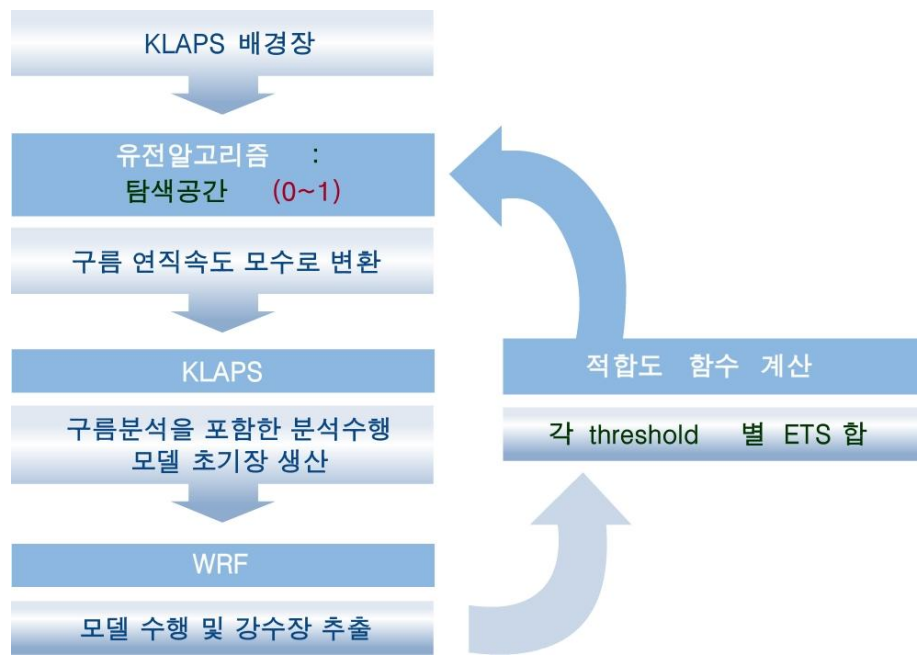
2009년도에는 초단기 기상예측시스템의 예측성능 향상을 위하여 다양한 개선을 추진하였다. 우선은 초기 연직속도 결정 모수 최적화를 통해 초기화 과정을 개선하였다. 이를 위해 구름 연직속도 모수 탐색을 위한 유전 알고리즘(GA : Genetic Algorithm) 코드 결합하였다. KLAPS에서는 구름 유형에 따라 구름 내부의 연직속도가 결정되며, 운형에 따라 서로 다른 모수(x_1, x_2, x_3)를 가진다(그림 7.6). 적운형, 층적운형, 층운형 구름의 모수 각각에 대해 유전 알고리즘 적용하였다.



[그림 7.6] 운형에 따른 KLAPS의 연직 속도 결정 방법

7.3 초단기 기상예측시스템

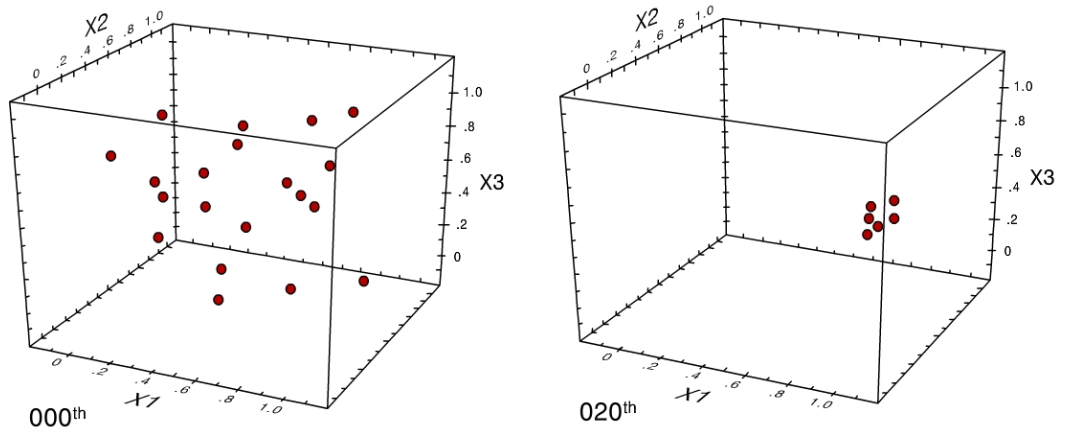
강수사례에 대한 최적의 모수를 탐색하기 위한 수치실험을 설계하고 수행하였다. 유전 알고리즘에서 20개의 개체에 대해서 30세대까지 실험을 수행하면서 최적의 모수를 탐색하였다. 이때 적용한 적합도 함수는 6시간 누적강수량 1~50mm까지의 각 기준값에 대한 ETS의 누적 값이다. 2008년 6월 17일 사례에 대해서 탐색실험 수행하였다. 최적의 모수탐색을 위해 KLAPS 분석과정과 WRF 모델 결합한 유전 알고리즘 적용하고 해당 모수들로 구성된 각 모델 결과에 대해 적합도 함수 계산하게 되는 이 흐름도는 그림 7.7에 나타내었다.



[그림 7.7] 모수탐색 흐름도

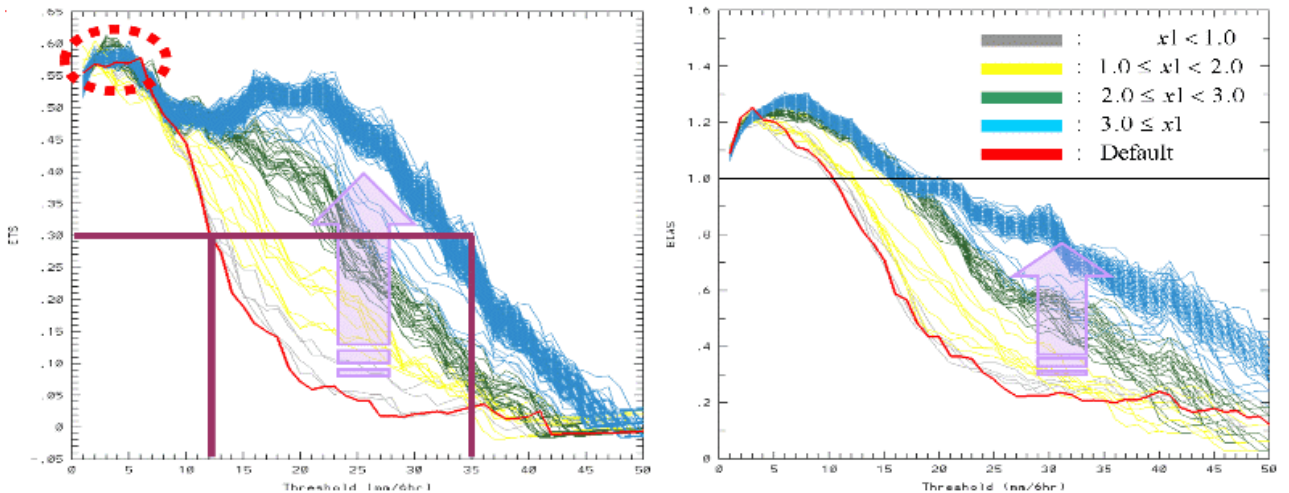
7.3 초단기 기상예측시스템

세대에 따른 모수 분포 진화 특성을 살펴보았다(그림 7.8). 유전알고리즘 탐색 공간(0~1)에서 각 모수들은 세대가 지날수록 점차적으로 수렴하여 약 20세대에서는 상당한 수렴정도 보였다. 특히 x_1 (적운 모수)은 5~6세대에서 대부분 수렴하였다.



[그림 7.8] 적운 모수 x_1 의 0세대(왼쪽)과 20세대(오른쪽)의 모수 분포

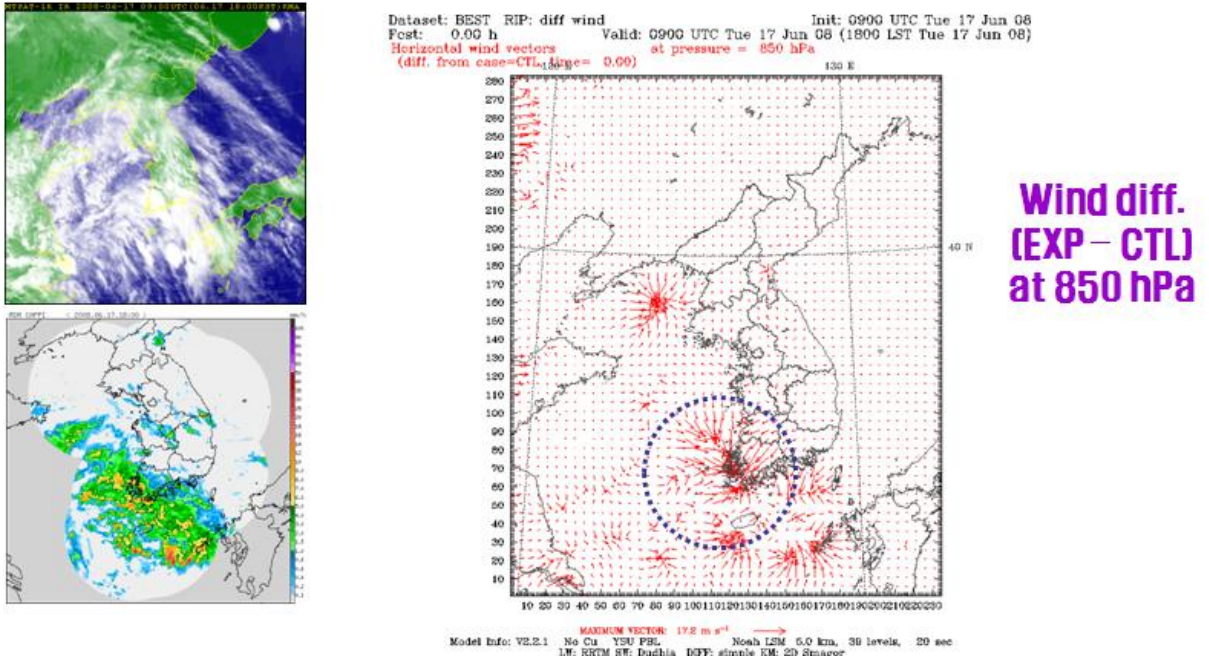
구름 연직속도에 대한 강수예측민감도 분석을 수행하였다(그림 7.9). 3개의 모수 중 적운형에 대한 모수(x_1)가 강수 예측성에 가장 민감하였다. 모수 값이 증가할수록 적합도 함수가 증가되는 경향이 산출됨을 보였다. 특히 15mm/6hr에서 높은 ETS 값을 산출하고 BIAS도 개선되는 것을 알 수 있었다.



[그림 7.9] 적운 모수별 6시간 누적 강수 문턱 값에 따른 적합도 함수(ETS) 분포

7.3 초단기 기상에측시스템

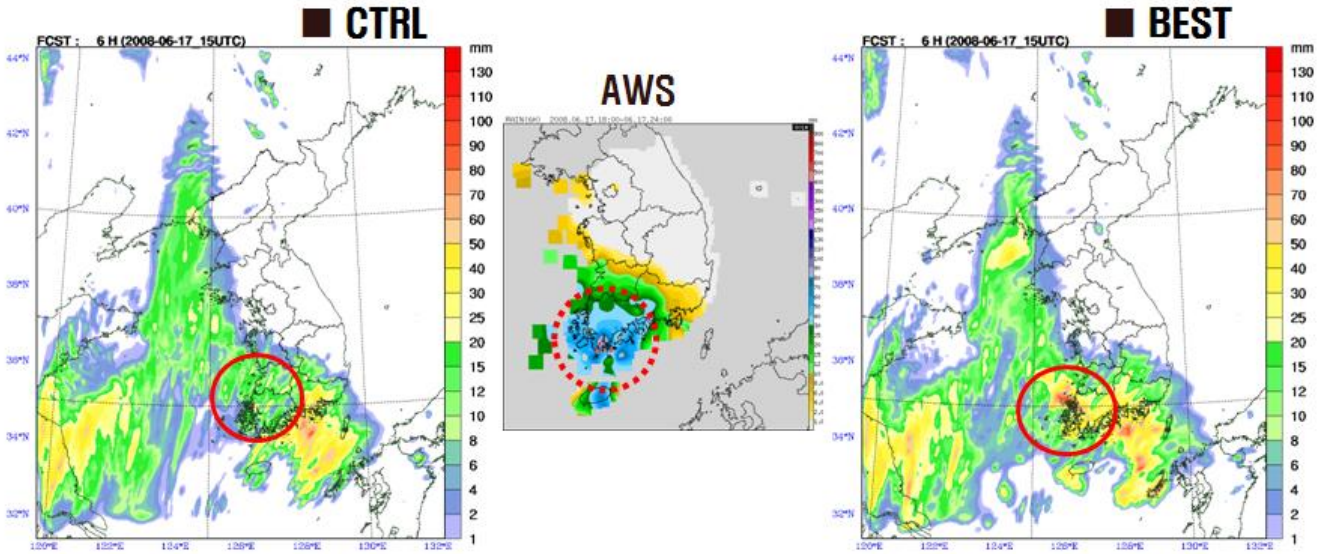
모수에 따른 분석 및 예측 결과를 비교하였다. 먼저 분석장 비교 분석에서 850hPa 고도 바람장, 특히 레이더와 위성 관측 지역에서 차이가 뚜렷함을 알 수 있었다(그림 7.10). 이를 통해 모수 변경에 따른 구름 분석의 효과를 확인할 수 있었다.



[그림 7.10] 2008년 6월 17일 09UTC 850hPa 분석 바람 벡터장의 차이(오른쪽). 왼쪽은 동일 시각 위성(좌상)과 레이더(좌하) 관측 영상

7.3 초단기 기상에측시스템

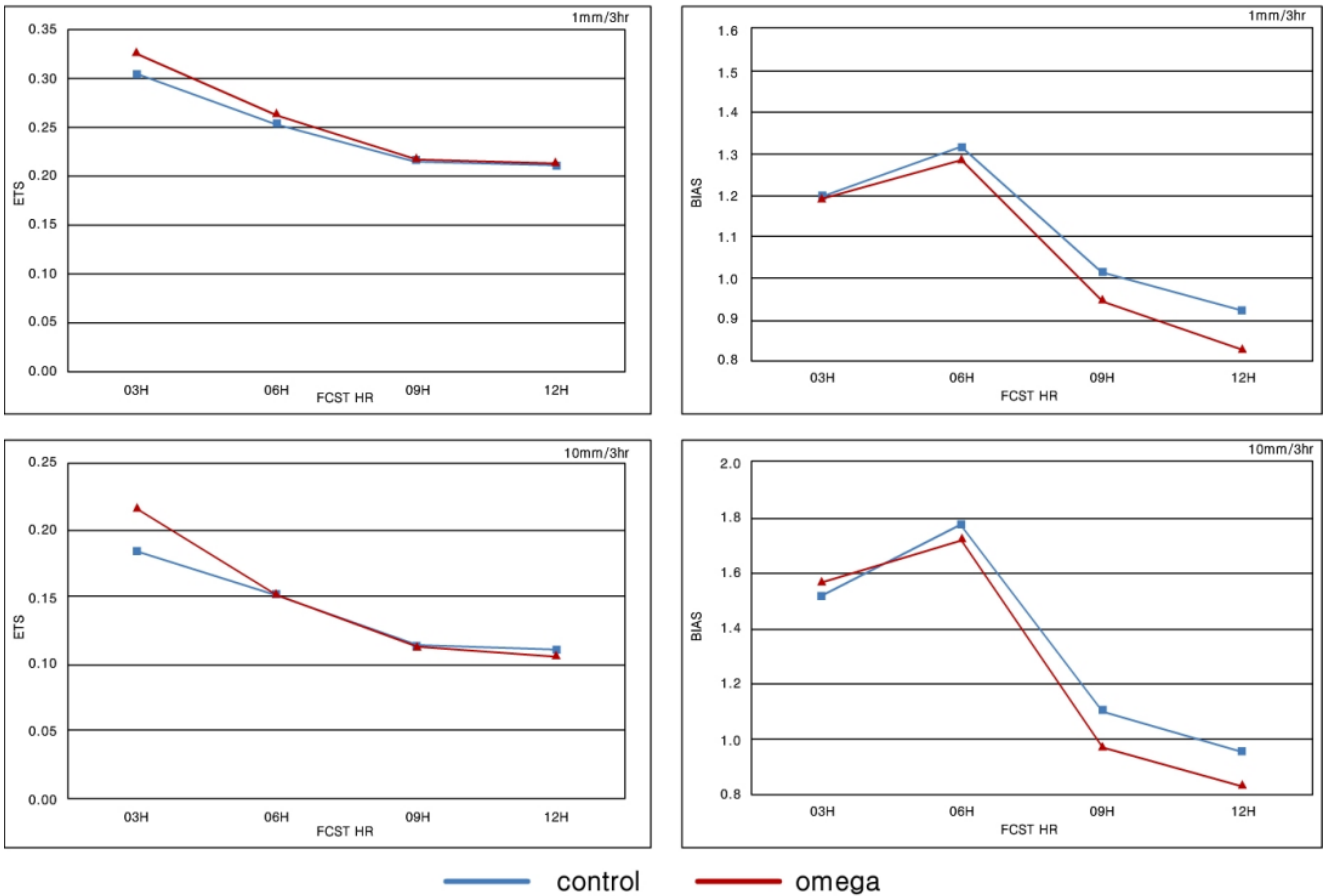
강수예측 비교 분석에서 새로운 적운 모수에 의해 전라남도와 앞 바다의 강수 시스템 예측 성능 향상됨을 보였다(그림 7.11).



[그림 7.11] 2008년 6월 17일 09UTC를 초기장으로 한 6시간 누적강수량 비교. 왼쪽(CTRL)은 기존 모수를 적용한 분석장을 초기장으로 한 예측장, 오른쪽(BEST)은 최대적합도 함수를 갖는 모수를 적용한 분석장을 초기장으로 한 예측장

7.3 초단기 기상예측시스템

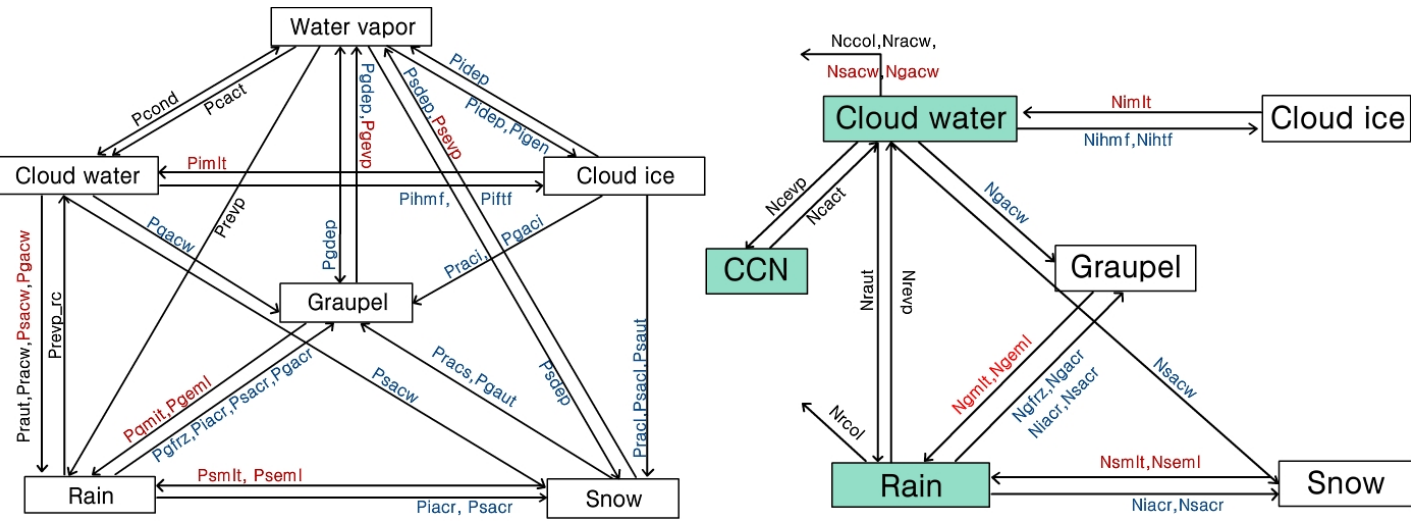
탐색된 모수를 이용하여 2008년도 여름철(6, 7, 8월)에 대해 예측을 수행 (매 3시간)하였다. 각 예측자료의 3시간 누적 강수량을 AWS 관측자료로 검증한 결과, 전반적으로 강수 예측능력이 향상되었다(그림 7.12). 특히 6시간 누적 12.5mm 기준으로는 ETS가 23.8%에서 25.5%로 향상되었다.



[그림 7.12] 표준실험(Control, 파랑)과 연직속도 최적 모수가 적용된 실험(Omega, 빨강)의 3시간 누적 강수의 문턱 값별 ETS(왼쪽)와 BIAS(오른쪽)

7.3 초단기 기상예측시스템

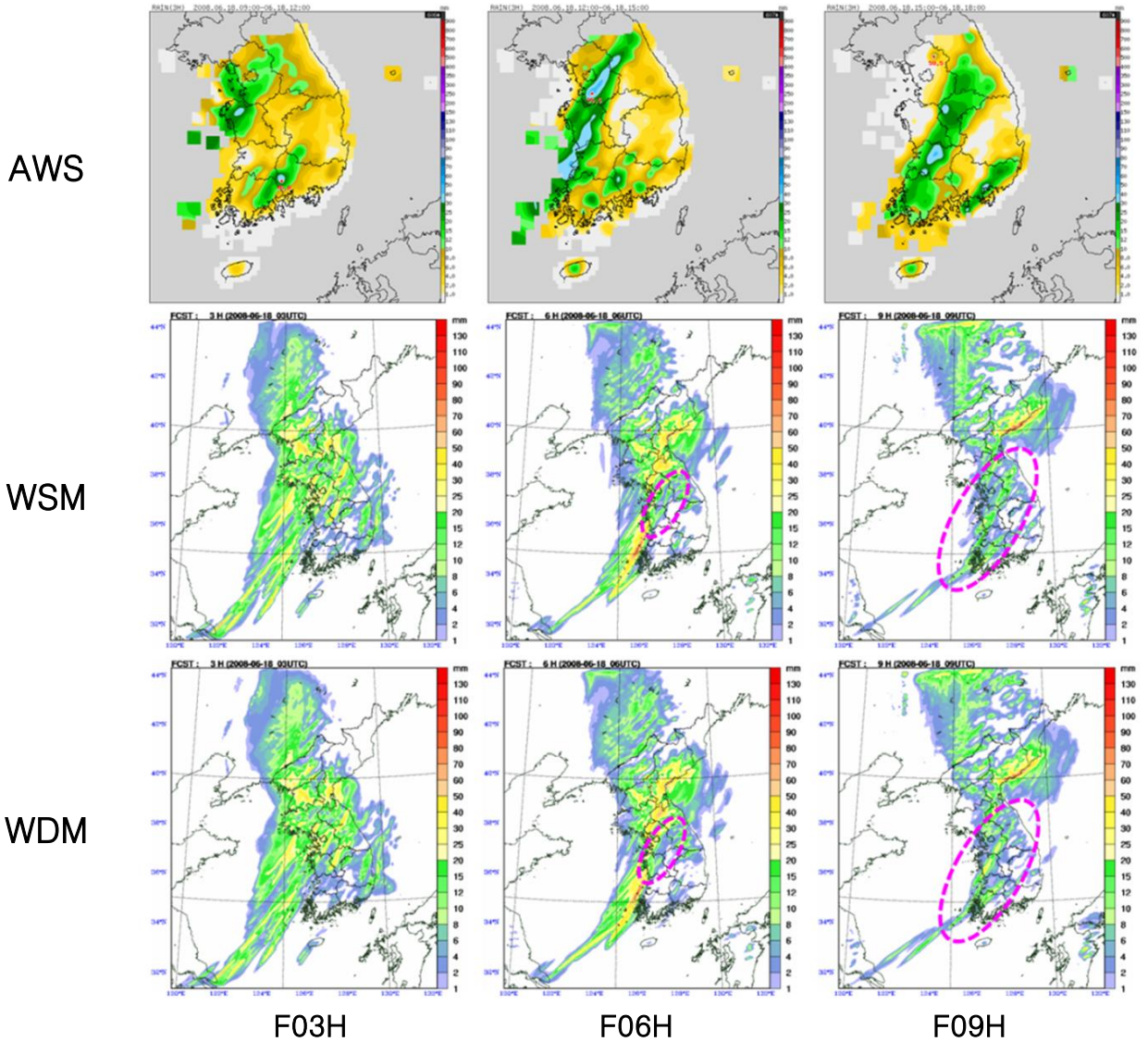
그리고, 초단기 기상예측시스템의 모델 물리과정을 개선하였다. 최근 Lim and Hong(2009)에 의해 이중모멘트 구름 미세물리과정이 새롭게 개발되었다. 초단기 기상예측시스템의 모델에 개선된 미세물리과정(이중 모멘트)을 적용하였다. 기존에 활용되었던 WRF 모델의 Single-Momont 6-class(WSM6) 미세물리과정은 수증기, 구름물, 구름 얼음, 눈, 비, Graupel의 6개 종류에 대해서 혼합비를 예측한다. WRF Double-Moment 6-calss(WDM6)는 WSM6에 구름물과 빗물에 대한 수농도를 추가로 예측하여 명시적인 구름응결핵과 결합되어 다양한 비입자의 크기 분포를 가진다(그림 7.13).



[그림 7.13] WDM6에서 혼합비과 수농도에 대한 미세물리과정 흐름도((Lim and Hong, 2009)

7.3 초단기 기상예측시스템

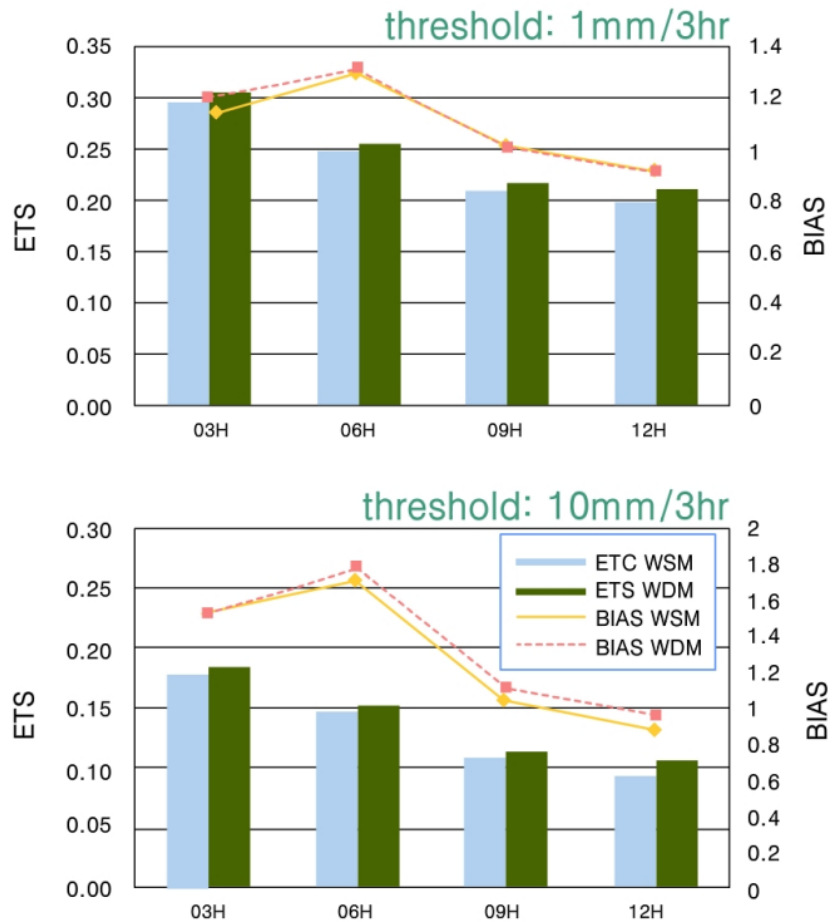
2008년 6월 18일 0000UTC를 초기시간으로 하여 WSM 방안과 WDM 방안을 이용하여 3시간 누적강수 모의 결과 비교하였다. 강수 패턴은 전반적으로 두 방안 모두 비슷한 형태를 나타내었다. 그러나 국지적인 강수량의 차이를 보였는데, 6시간 예측에서 WSM 방안에서 나타나는 한반도 중부의 강수지역이 WDM에서 약화되고, 9시간 예측에서는 WDM에서 모의된 강수대가 더 강하게 모의(그림 7.14 오른쪽 열에서 분홍색 점선 타원 안)되었다.



[그림 7.14] 2008년 6월 18일 03UTC부터 09UTC까지 3시간 누적 강수 분포도. 상단부터 AWS관측, 기존(WSM)과 새로운(WDM)의 미시물리과정

7.3 초단기 기상예측시스템

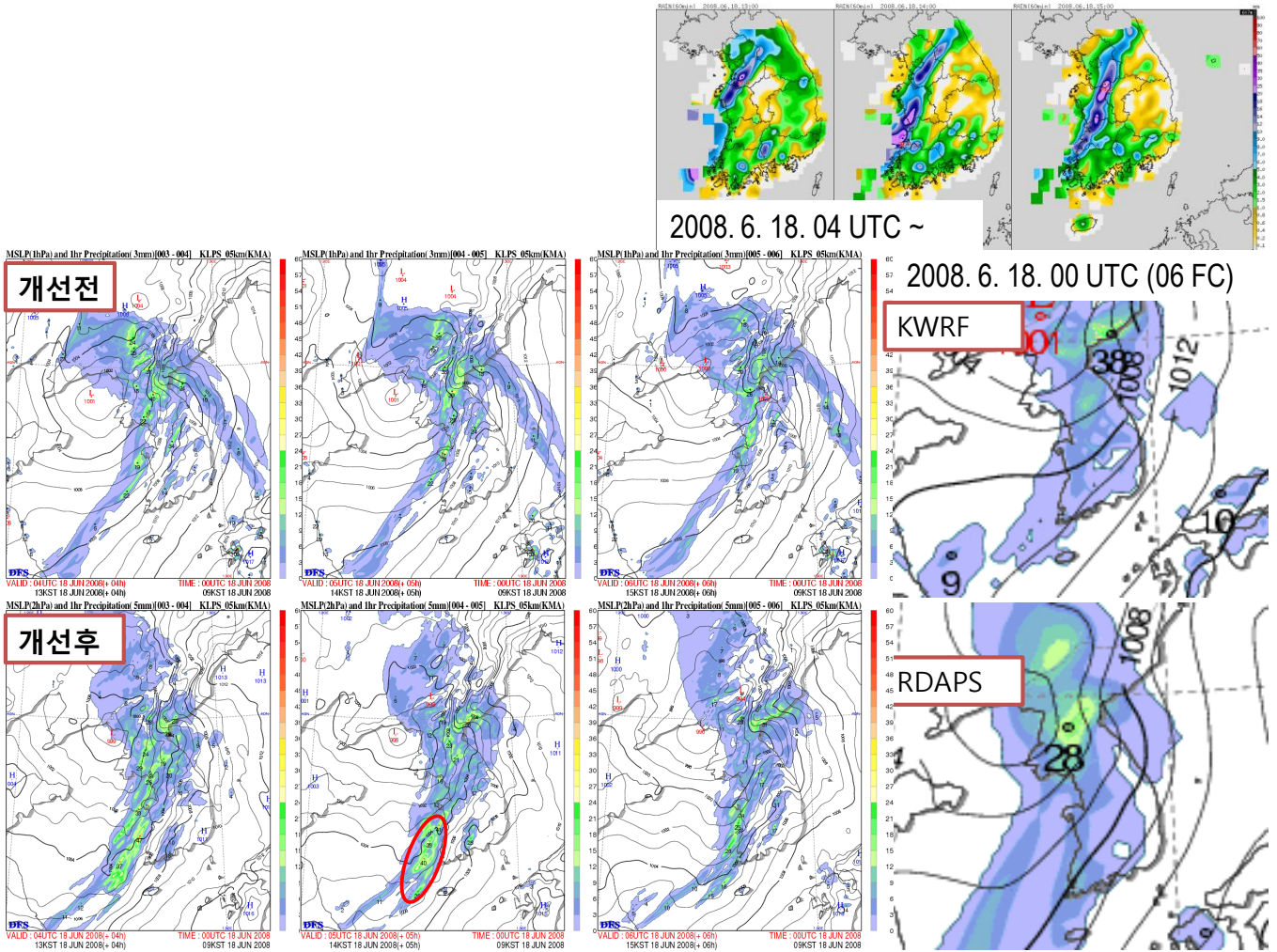
미세물리과정이 강수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 여름철 3개월('08.6-8)에 대해 민감도 실험을 수행하였다. 3시간 간격으로 총 736회의 모델예측결과 자료에 대해서 AWS 강수 검증하였다(그림 7.15). 3시간 누적 1mm의 약한 강도의 강수 기준과 3시간 누적 10mm의 중간 강도의 강수 기준에서 WDM 결과가 12시간 예측까지 모두 높은 ETS 보였다. BIAS는 WDM이 WSM보다 높은 값을 보여, WDM이 강수영역을 다소 넓게 예측하였다.



[그림 7.15] 기준실험(WSM, 파랑)과 새로운 미세물리과정이 적용된 실험(WDM)의 3시간 누적 강수의 문턱 값별 ETS와 BIAS

7.3 초단기 기상에측시스템

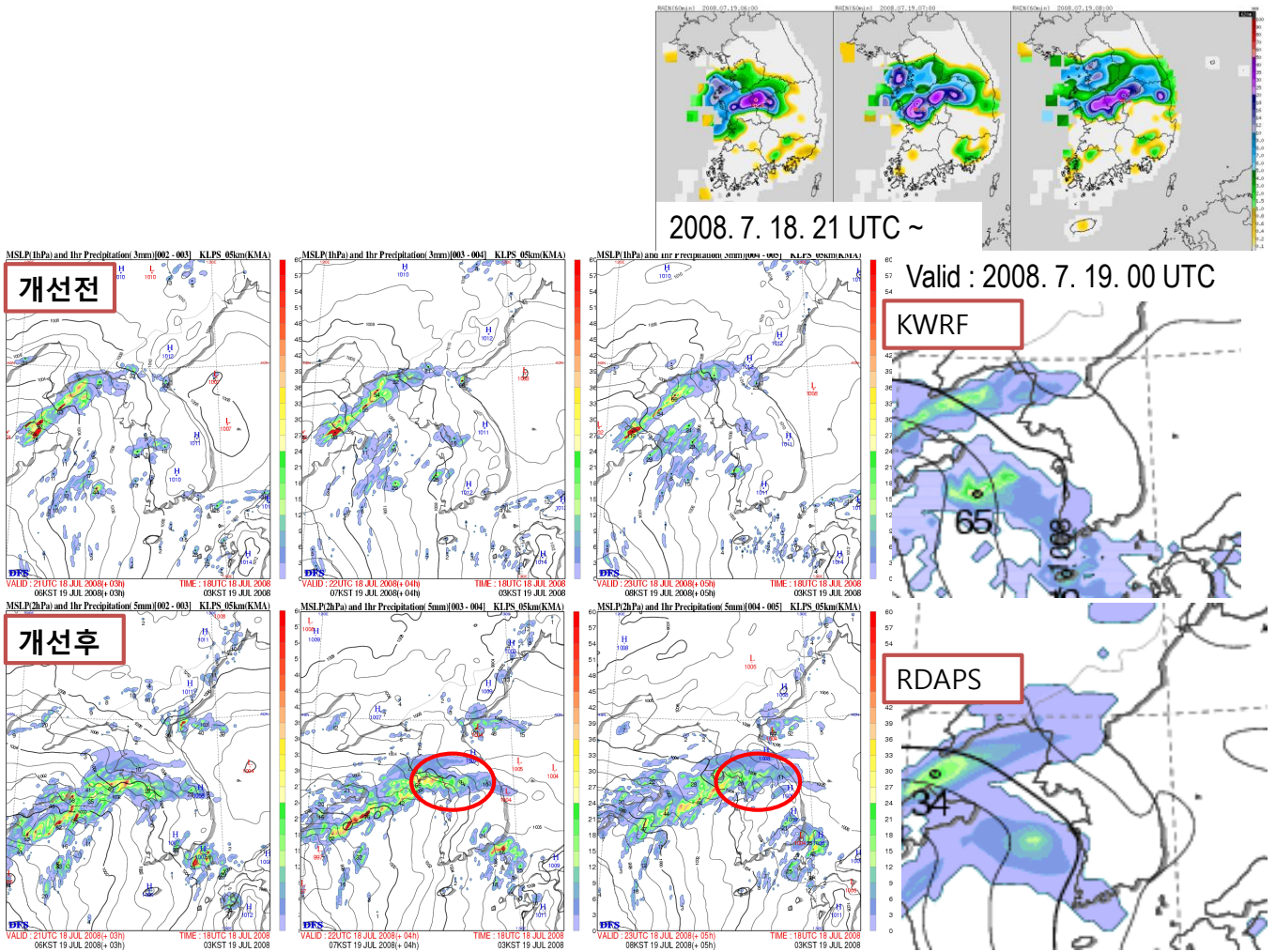
미세물리과정 개선이 강수 예측성에 미치는 영향을 사례분석을 통해 조사하였다. 그림 7.16은 2008년 6월 18일 저기압에 동반된 강수사례이다. 전반적으로 저기압과 동반된 강수를 자세하게 잘 모의하였으며 강수대의 이동을 관측과 더 유사하게 모의하였다. 특히 전라도 해안 지역의 강수를 잘 모의하였다.



[그림 7.16] 2008년 6월 18일 00UTC에 예측된 1시간 누적 강수량 분포도(개선 전, 개선 후). 왼쪽부터 04,05,06 UTC. 비교를 위해 AWS 관측(상단)과 06UTC에서 KWRP 및 RDAPS 예측장(오른쪽 열) 제시

7.3 초단기 기상예측시스템

그림 7.17은 태풍 전면에 형성된 2008년 7월 18일 사례이다. 북상하는 2008년 제7호 태풍 ‘갈매기(KALMAEGI)’의 영향으로 태풍전면에 형성된 강수대가 한반도에 영향을 주었다. 중부지방에 동서로 가로지르는 강수대를 관측과 유사하게 모의하였다.



[그림 7.17] 2008년 7월 18일 18UTC에 예측된 1시간 누적 강수량 분포도 (개선전, 개선 후). 왼쪽부터 21,22,23UTC. 비교를 위해 AWS 관측(상단)과 06UTC에서 KWRP 및 RDAPS 예측장(오른쪽 열) 제시. 단 19일 00UTC

7.3 초단기 기상예측시스템

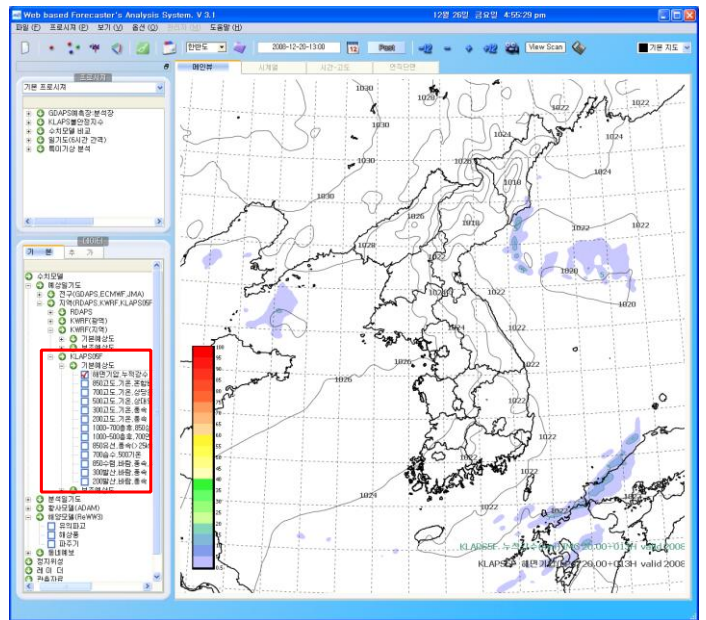
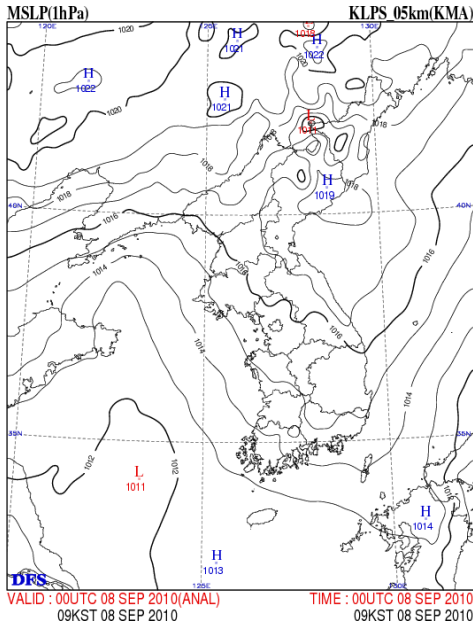
2010년도에는 초단기 동네예보 지원을 위한 개선 작업이 있었다. 모델을 기존 WRF v2.2에서 WRF v3.1로 업그레이드 하였으며, 기존 지면피복도에서 한반도 중부지역의 대부분을 사바나로 분류하였던 USGS 자료 대신에 MODIS 기반자료로 변경하였다.

또한 안정적인 배경 및 경계장 생산을 위해 15km 영역에서는 2개의 KLAPS 분석장을 이용한 4차원자료동화(FDDA)를 적용하였다.

그리고, 현업 전구모델이 GDAPS에서 통합모델(UM)로 변경됨에 따라, UM을 활용하는 체계를 바꾸었다. 또한 기존 일 8회의 3시간 간격의 예측 체계를 매시 생산되는 분석장을 초기장으로 1시간 간격으로 예측을 하는 체계로 변경하였다. 동네예보 지원을 위해서 수행시간을 최적화하여 매시 약 16분에는 6시간 예측자료가 지원되고, 매시 25분 이내에 12시간 결과를 제공할 수 있도록 하였다.

7.3 초단기 기상예측시스템

초단기 예측시스템의 결과는 기상청 홈페이지의 초단기예보, 종합정보시스템의 홈페이지와 웹기반 기상분석시스템을 통해서 지원이 되고 있다(그림 7.18). 종합정보시스템 홈페이지에서 초단기예측을 선택하면 해면기압과 1시간 누적강수량 등 16개의 기본예상도가 표출되고 있다. 웹기반 기상분석시스템에서도 분석장과 예측장까지 표출이 되고 있다. 수치모델, 예상 일기도, 지역, KLAPS05F 항목에서 지원되고 있는데 현재 13개의 기본예상도와 5개의 보조예상도가 지원되고 있다.



[그림 7.18] 홈페이지와 웹파스를 통한 초단기 기상예측시스템 결과 지원

요약

집중호우 등 위험기상을 유발하는 중규모 현상의 경우는 시공간 규모가 작기 때문에 12시간 또는 6시간 마다 수행되는 기존의 자료동화 체계로는 효과적인 탐지와 예측이 불가능할 수 있다. 따라서 예측의 효과가 12시간 또는 그 이내에 대하여 제한적으로 적용되는 방법이라 하더라도, 실시간 자료 수집체계를 통해 가능한 잦은 분석과 예측을 수행하는 전략이 필요하다.

레이더 반사도와 낙뢰 자료를 활용한 물리적 초기화 기법이 특히 스핀업 문제를 지니고 있는 단시간 예측에서 효과적일 수 있다. 초단기 기상분석 및 예측시스템(KLAPS)에서는 기존의 초단기 예측시스템을 개선하여 매시간 운영 및 지원되는 초단기 예측시스템을 구축하였다. 그리고, 효율적인 활용을 위해 그 결과가 약 25분 이내에 지원되도록 하였다. 이러한 예측은 단시간 강수예보에 유용한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

하계 사례에 대한 분석에서 종관시스템에 의한 강수에 대해서 대부분의 저기압에 의한 강수 사례에서는 1시간 간격의 예측이 강수의 일관성을 유지하면서 모의하였고, 종관시스템에 지배를 받는 상황에서는 강수의 패턴을 잘 모의하였다. 하지만 대기불안정에 의한 국지적 강수에 대해서는 불안정에 의한 강수가 구조화되기 전에 대해서는 예측성이 낮아진다. 그렇지만 레이더 에코 등에서 징후가 포착될 정도로 구조화되었을 때에는 즉각적으로 강수를 생성하였다.

초단기예측 시스템에서는 매시간 예측을 하기 때문에 국지적으로 발달하는 위험기상에 대해 상당한 수준의 정확도를 갖고 수 시간 이후까지도 예측이 가능하였다. 정량적인 검증에 있어서 12시간 예측까지 긍정적인 결과를 보이고 있고 이러한 효과는 10mm/hr의 강한 강수에서도 나타나는 것을 알 수 있었다.

연습 문제

1. 현재 운용중인 수치모델들이 실황(초단기)예보와 고해상도 예보에 적합하지 않은 이유를 설명하시오.
2. 기상청의 실황(초단기)예보 시스템의 주요 입력자료에 대해 설명하시오.
3. 초단기 예측 시스템에서 예보의 과정과 원리에 대해 설명하시오.
4. 기상청 초단기 예측 시스템에서 강수 유형을 구분하는 원리를 설명하시오.
5. 초단기 분석 및 예측 시스템에서 레이더, 낙뢰 및 위성 등 원격탐사 자료가 갖는 중요성을 설명하시오.

8장. 동네예보

8.1 동네예보의 이해

8.2 동네예보모델

학습목표

- 동네예보를 정의하고 다른 예보와 다른 점을 설명할 수 있다.
- 동네예보에서 생산 및 제공하는 예보요소 종류와 생산과정을 설명할 수 있다.
- 동네예보의 예보 발표 시각과 예보 기간을 이해한다.
- 동네예보의 생산과정과 서비스 정책을 설명할 수 있다.
- 동네예보에 사용되는 통계적 기법(PPM, MOS,..)을 이해한다.

8.1 동네예보의 이해

8.1.1 동네예보의 개념

동네예보는 현재의 시·군 단위의 예보와 달리, 세부 행정단위인 읍·면·동까지 상세하고 빠르게 날씨 정보를 알려주는 예보이다.

동네예보는 전국을 5km×5km 간격의 37,697개의 촘촘한 그물망(격자점)으로 나누어, 3시간 단위로 향후 48시간까지 예보를 3시간마다 그래픽예보, 시간별예보, 문자예보, 음성예보, 원시자료를 제공한다. 예보요소도 기존의 예보에서 제공하던 9종에서 12종으로 증가하였으며, 예보형식도 문·숫자 형식으로 제공하여 가공성이 높은 정보이다.



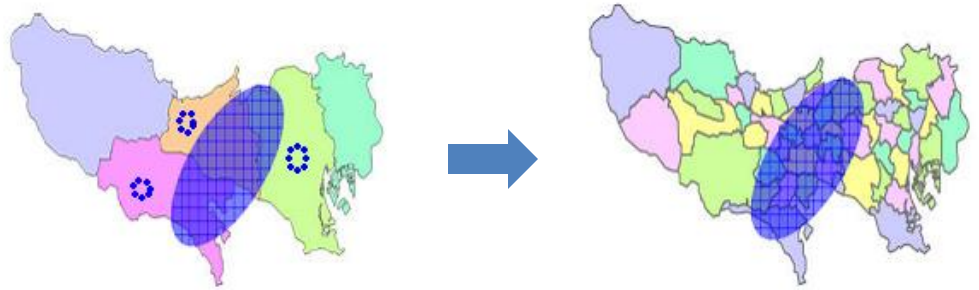
[그림 8.1] 기존예보(좌)와 동네예보(우)의 차이

동네예보는 기존 예보와 달리 다음과 같은 특징이 있다.

동네예보의 시간 분해능은 3시간이다. 동네예보는 3시간 간격의 정시를 중심으로 나타날 수 있는 일기를 예보하며, 정시 사이 동안 날씨 변화는 예보하지 않는다. 즉 하늘 상태가 10시에 ‘구름조금’이었다가 12시에 ‘맑음’으로 변화와 같은 예보는 동네예보 범위를 벗어난다. 기존의 예보의 시간 분해능은 6~12시간 정도이다.

8.1 동네예보의 이해

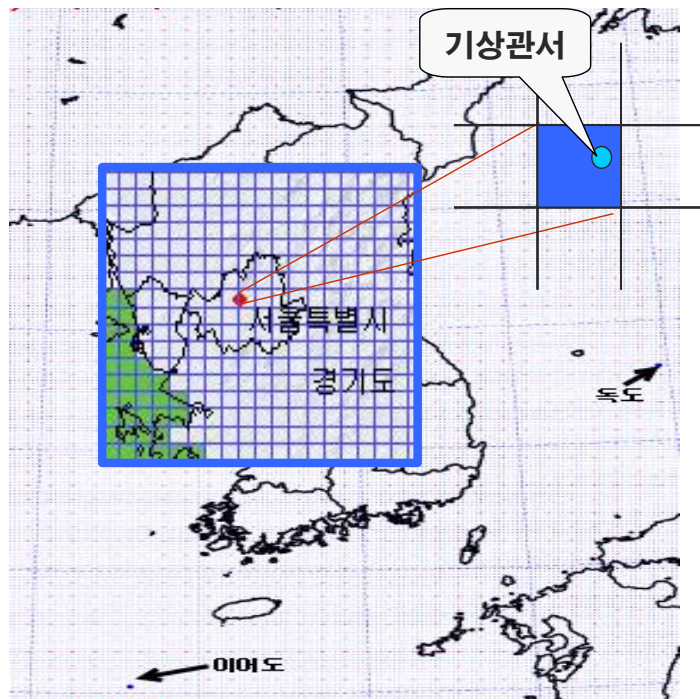
동네예보는 예보관이 판단한 예보를 정량적으로 나타낸다. 기존의 예보에서는 “오전 한때 경기북부지역 비”로 표현하지만, 동네예보에서는 예보관이 비가 내리는 지역을 3시간 간격으로 5km 단위의 격자마다 결정하여 비가 내릴 지역을 명확히 제공하는 예보이다. 따라서 기상청의 예보구역을 모르는 사람도 동네예보 홈페이지를 통하여 비가 예보된 지역과 시간을 정확히 알 수 있다.



[그림 8.2] 기존 예보(좌)와 동네예보(우)에서 강수표현 방법. 예보관이 빗금친 지역에 비가 온다고 판단하면, 기존예보는 3개 지역 모두에 비를 예보하지만 동네예보는 빗금친 지역만 비를 예보한다.

8.1 동네예보의 이해

동네예보는 기상관서 위치의 예보가 아닌 5km 간격의 격자를 대표하는 예보이다. 그림 8.3과 같이 격자를 대표하는 기온이 5℃(파란색)이고, 기상관서가 위치한 지점은 7℃(하늘색)라면, 동네예보는 격자를 대표하는 5℃를 예보한다. 그러나 기상관서의 예보는 인근지역을 대표하므로 5km 격자점을 대표하는 예보와 기상관서 위치의 예보는 특별한 사항이 없으면 동일할 것이다.



[그림 8.3] 동네예보의 최소 면적 단위인 5km×5km 격자 모식도

동네예보는 모든 예보요소가 정량화되고, 원시자료를 기상에서 사용하는 표준파일인 GRIB으로 제공하므로 가공성이 높은 예보이다. 기존의 예보는 문장 및 표 형식으로 제공되어 기상예보를 가공하기 위해서는 예보문을 정량적으로 번역하는 과정 등 가공처리에 제약이 있었다.

동네예보는 원시자료를 컴퓨터에서 쉽게 인식할 수 있는 표준파일 제공하므로 이와 같은 제한이 없어 가공성이 높아졌다. 그리고 일기예보가 가공성이 높아지게 되면 기상정보의 경제자원화를 촉진시키게 될 것이다.

8.1 동네예보의 이해

동네예보는 웰빙예보이다. 기상청은 위험기상으로부터 국민의 생명과 재산을 보호하기 위하여 특보를 발표하고 있다. 특보는 사고방지 및 재해저감에 최우선을 두는 예보이므로, 예보관은 보수적으로 특보를 생산한다. 최근 국민 생활수준 향상으로 국민 삶의 질 향상을 위하여 다소 보수적인 예보보다는 나타날 가능성이 가장 높은 예보를 요구하고 있으며, 동네예보가 이러한 역할을 담당할 것이다. 따라서 특보는 보수적인 예보인 반면, 동네예보에서는 공격적인 예보가 될 수 있다.

동네예보는 인터넷 기반의 예보이다. 동네예보는 기상청 대표홈페이지 또는 동네예보 홈페이지(WEM)를 운영하여 사용자가 원하는 예보만 제공한다. 이러한 서비스를 하기 위해서는 모든 동네예보를 준비해야 한다. 동네예보는 1일 5,800만 건의 예보를 생산하고 있으며 이를 유명일간지의 면수로 환산하면 19만 면에 해당한다. 따라서 신문 방송과 같은 기존의 대중매체를 이용하여 동네예보를 제공하는 것은 불가능하다.

방대한 정보 중 사용자가 원하는 정보만 효율적으로 제공하기 위해서는 인터넷과 같은 쌍방향 통신을 활용해야 한다. 동네예보는 동네예보 홈페이지를 통하여 국민 개개인이 원하는 일기예보를 제공한다. 방대한 예보자료에서 원하는 정보를 빠르게 검색하기 위하여 GIS 지도 합성 및 주소 찾기 등 효율적인 검색기능을 제공하고 있다. 다만 국가·사회적으로 문제가 되는 예보가 예상될 때 특정 지역의 동네예보를 대중매체를 통하여 제한적으로 전달할 수 있다.

8.1 동네예보의 이해

8.1.2 동네예보 예보요소 정의

동네예보에서 생산 및 제공하는 예보요소는 기온, 습도, 강수, 바람, 하늘상태, 유의파고 등이 포함되며, 예보요소에 따라 정시 기준인 요소와, 3~12 시간 동안 누적량을 예보하는 요소가 있다.

예보요소별 정의는 다음과 같다.

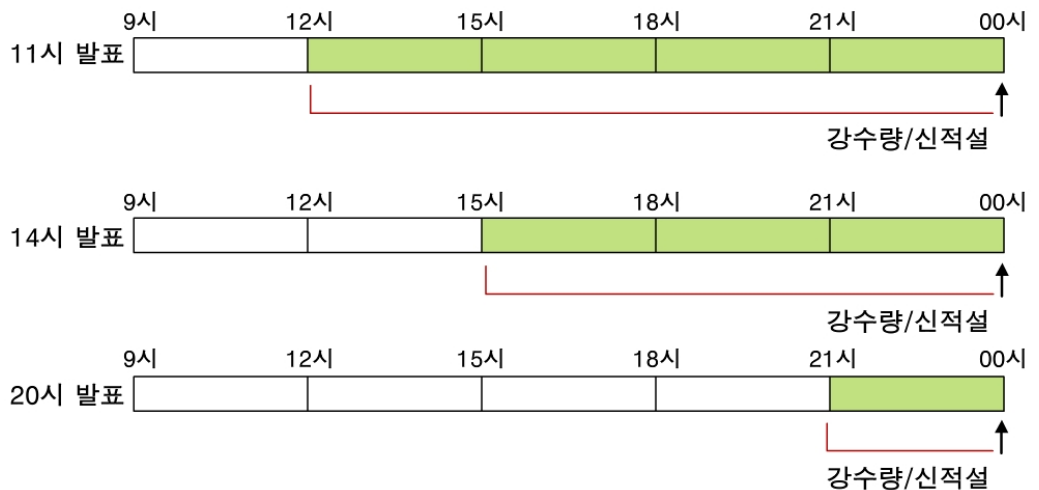
[표 8.1] 동네예보의 예보요소 정의

예보요소	시간단위	정의	단위
기온	정시	정시 평균기온	℃
최저기온	1일	3시~9시 기온 중 최저기온	℃
최고기온	1일	10시~18시 기온 중 최고기온	℃
상대습도	정시	정시 상대습도	%
풍향	정시	정시 평균풍향	8방위
풍속	정시	정시 평균풍속	m/s
하늘상태	정시	맑음(0~2), 구름조금(3~5) 구름많음(6~8), 흐림(9~10)	-
강수확률	3시간누적	3시간 동안 강수가 0.1mm 이상 내릴 확률	%
강수형태	3시간누적	비(액체), 비/눈(액체/고체 혼재), 눈(고체)	-
강수량	12시간 누적	00시, 12시 기준의 12시간 누적강수량	mm
신적설	12시간 누적	00시, 12시 기준의 신적설	cm
유의파고	정시	유의파고	m

- 기온은 3시간 간격의 정시기준으로 정시 1분전부터 정시까지의 평균기온이다.
- 최고기온은 10시~18시 기온 중 최고기온으로 낮 최고기온을 의미한다.
- 최저기온은 3시~9시 기온 중 최저기온으로 아침 최저기온을 의미한다.
- 상대습도는 정시 상대습도이다.
- 풍향은 정시 10분 전부터 정시까지 평균풍향을 8방위 단위로 나타낸다. 8방위는 북풍(N), 북동풍(NE), 동풍(E), 남동풍(SE), 남풍(S), 남서풍(SW), 서풍(W), 북서풍(NW)이다.

8.1 동네예보의 이해

- 풍속은 정시 10분전부터 정시까지 평균풍속이다.
- 하늘상태는 정시 전운량을 4단계로 구분한 것이다. ‘맑음’은 전운량이 0~2 일 때, ‘구름조금’은 전운량이 3~5 일 때, ‘구름많음’은 전운량이 6~8 일 때, ‘흐림’은 전운량이 9~10 일 때이다.
- 강수확률은 3시간 동안 강수량이 0.1mm 이상 내릴 확률이다.
- 강수형태는 3시간 동안 내린 강수를 액상, 고체상을 구분하는 요소로 ‘강수없음’, ‘비’, ‘비눈’, ‘눈’ 4단계로 구분한다. ‘비’는 강수가 액체로 내릴 때, ‘눈’은 강수가 고체로 내릴 때이다. ‘비눈’은 강수가 비와 눈이 섞여 내리거나 3시간 동안 비에서 눈 또는 눈에서 비로 내릴 때이다. ‘강수없음’은 강수가 3시간 동안 0.1mm 미만으로 내릴 때이므로 혼적강수도 ‘강수없음’에 해당된다.
- 강수확률 및 강수형태 누적시간은 정시 전 3시간부터 정시까지이다.
- 강수량은 12시간 동안 내린 누적 강수량이다.
- 적설은 12시간 동안 쌓인 신 적설이다. 12시간 동안 녹거나 바람 등으로 소멸된 적설은 인정하지 않는다.
- 강수량과 적설은 00시 또는 12시 기준으로 반일계(낮 12시, 밤 12시 기준)로 누적한다. 예보 발표시각이 11시, 23시 이외 시각에서 첫 번째 누적시간은 예보발표 시각 + 1시간부터 반일계까지이다. 따라서 예보 발표시각이 오후 8시이면 첫 번째 강수량의 누적시간은 3시간이다(그림 8.4).



[그림 8.4] 발표시각에 따른 첫 번째 강수량 및 적설 누적시간

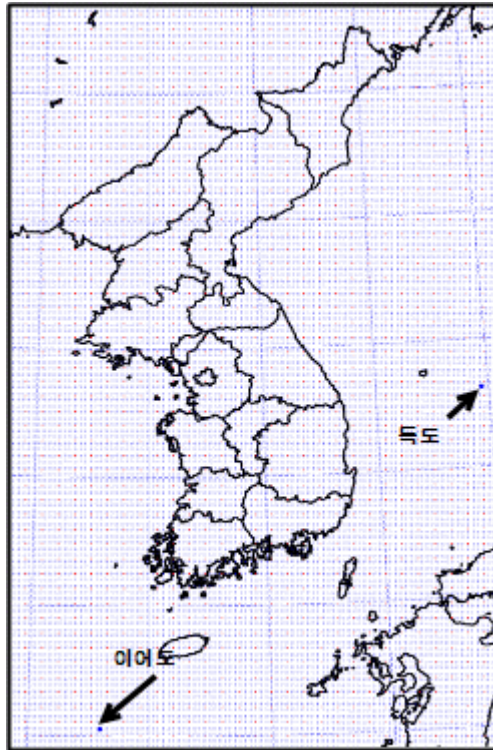
8.1 동네예보의 이해

8.1.3 예보영역

동네예보영역은 그림 8.5와 같이 한반도와 서해 5도를 포함한 우리나라와 인근 해역으로 남쪽으로는 이어도, 동쪽으로는 독도, 서쪽 끝으로는 백령도 까지 포함하고 있다. 이 영역은 5km×5km의 격자 간격으로 총 37,697개의 격자를 포함한다(동서 149개×남북 253개).

지구는 구형이지만 지표는 평면으로 변화하는 지도투영법은 2004년 제정된 기상청 표준 지도투영법인 Lambert-Conformal 투영법이다. 지도투영법에 사용된 상수들의 정밀도에 따라 지도 외각지역에 왜곡이 있을 수 있으므로 기상청 표준 지도투영법에서 제시한 규정을 그대로 따랐다. 예보영역의 모서리 위치는 다음과 같다.

- 좌하 : E 31.7944°, N 123.7613°
- 우하 : E 31.6518°, N 131.6423°
- 우상 : E 43.3935°, N 123.3102°
- 우상 : E 43.2175°, N 132.7750°



[표 8.5] 동네예보영역 (동서 149 × 남북 253 → 37,697개)

8.1 동네예보의 이해

8.1.4 예보발표 및 유효시간

동네예보는 3시간 간격으로 45~54시간까지의 예보를 발표한다. 예보 발표 시각은 0시, 2시, 5시, 8시, 11시, 14시, 17시, 20시, 23시로 매 3시간 간격으로 일 8회 발표한다. 하며, 이에 따른 예보 기간은 표 3.2와 같다. 12시간 누적강수량 및 12시간 신적설은 표 3.2에서 점선으로 나누어진 것과 같이 00시와 12시를 기준으로 해당되는 시간동안의 누적강수량을 의미한다. 따라서 오늘과 모래의 양 끝시간의 누적 강수량은 3시간, 6시간, 9시간의 누적 강수량이 되기도 한다.

[표 8.2] 동네예보의 예보 발표 시각과 예보 기간

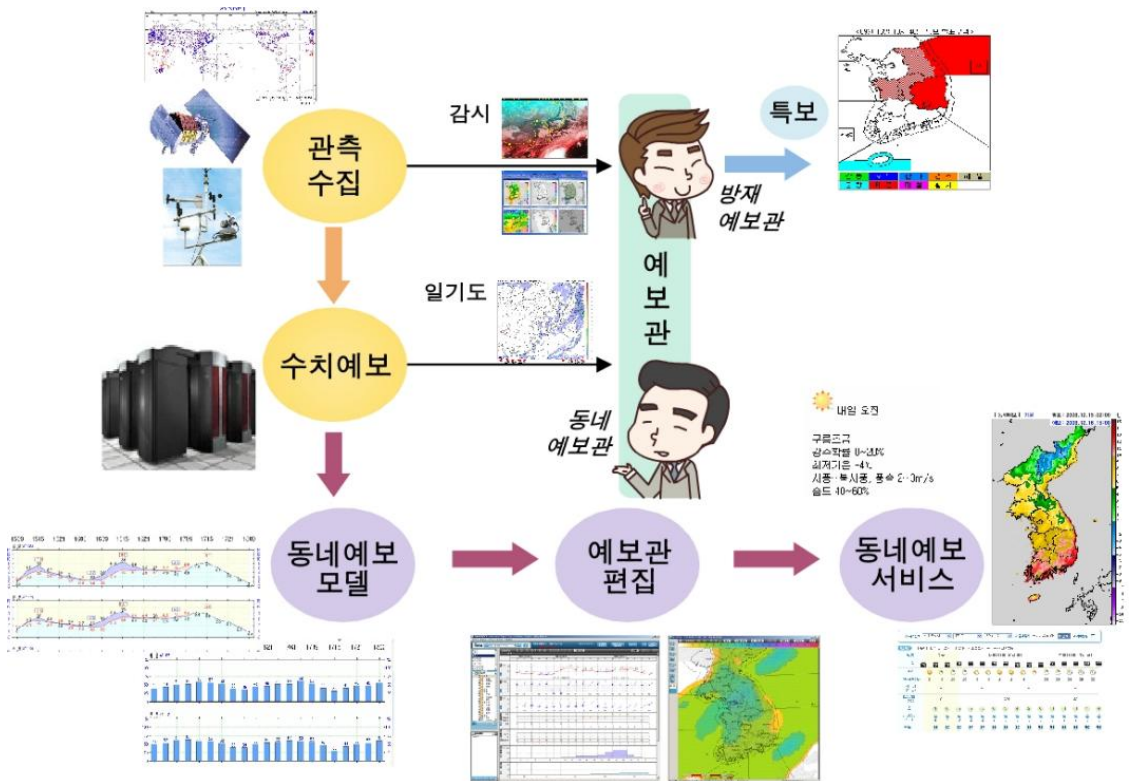
예보 발표 시각	예보 유효 시각					
	오늘		내일		모래	
5시	09 12	15 18 21 24	03 06 09 12	15 18 21 24	03 06 09 12	
8시	12	15 18 21 24	03 06 09 12	15 18 21 24	03 06 09 12	
11시		15 18 21 24	03 06 09 12	15 18 21 24	03 06 09 12	
14시		18 21 24	03 06 09 12	15 18 21 24	03 06 09 12	
17시		21 24	03 06 09 12	15 18 21 24	03 06 09 12	15 18 21 24
20시		24	03 06 09 12	15 18 21 24	03 06 09 12	15 18 21 24
23시			03 06 09 12	15 18 21 24	03 06 09 12	15 18 21 24
2시			06 09 12	15 18 21 24	03 06 09 12	15 18 21 24

8.1 동네예보의 이해

8.1.5 동네예보 생산 과정

동네예보는 그림 8.6과 같이 객관예보와 예보관의 최종 판단으로 생산된다. 먼저 전 세계로부터 수집된 관측자료와 슈퍼컴퓨터를 이용하여 수치예보 모델이 한반도 부근의 수치화된 수치예보자료를 생산하고, 동네예보모델은 수치예보자료의 예보특성을 분석하여 지역별 상세한 예보가이드를 생산한다. 동네예보모델로 생산된 예보가이드를 예보관에게 제공되고, 예보관은 동네예보 편집기를 이용하여 예보가이드를 수정 및 조정하여 최종의 동네예보를 생산한다. 이 과정에서 예보관은 다양한 분석 예보자료를 통하여 최종 예보를 결정하고 동네예보를 편집한다.

예보관이 생산한 동네예보는 5km 간격의 격자마다 수치화된 정보로 이루어져 있어 국민 등 동네예보 사용자를 이를 직접 활용하는 것은 한계가 있다. 따라서 다양한 예보사용자를 위하여 동네예보자료를 재가공하여 그래픽, 시간별예보, 문자예보, 예보통보문, 131예보 등과 같은 형태로 변환하여 대국민 서비스를 하고 있다.



[그림 8.6] 동네예보 생산 과정

8.1 동네예보의 이해

8.1.6 동네예보 자료 종류

동네예보는 기상청 대표홈페이지(kma.go.kr), 동네예보 홈페이지(digital.go.kr), 131 전화, 예보통보문, 이동통신, 전용라인을 통하여 제공하고 있으며 표 8.3과 같이 다양한 예보콘텐츠 형식으로 대국민 서비스 하고 있다.

그래픽예보는 12개 예보요소별 전국 분포도로 예보요소별 분포과약을 위하여, 시간별·도표예보는 읍·면·동별 기온·습도·바람 등 기상변화를 3시간 간격으로 제공하며 주로 개인적 목적에 활용을 위한 자료이다. 문자·음성예보는 오늘과 내일의 예보를 오전과 오후 단위로 문자 및 음성으로 제공하여, 시각 및 청각장애자도 이용 가능하다.

동네예보를 주로 인터넷을 이용하여 전달하지만 농어촌, 산지 등 인터넷 취약 지역은 동네예보를 활용하기 힘들다. 특히 인터넷을 직접 활용하지 않는 노인 등 정보통신 취약계층은 동네예보의 사각지대가 될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 동네예보는 기존의 예보전달체계를 병행하여 서비스 하고 있다. 언론사 등을 위한 예보통보문을 지속적으로 생산 서비스하고 있으며, 지역 유선방송, IPTV 등 예보 콘텐츠 다양화를 추진하고 있다.

[표 8.3] 동네예보 자료 종류

예보종류	내용
그래픽예보	일기예보 분포
시간별예보	그래프로 나타낸 특정지역 일기예보의 시간적 변화
도표예보	표형식으로 나타낸 특정지역 일기예보의 시간적 변화
문자예보	동네예보 원시자료를 번역하여 지방별, 읍면동별 예보를 문자로 표현
음성예보	동네예보를 음성으로 변환 및 서비스
개요	광역도시 및 도 단위 예보 개요
단기예보통보문	일기예보 요약 및 주요도시 예보
원시자료	동네예보 원시자료로 높은 수준의 예보사용자를 위한 가공처리 사용 기상표준 압축형식인 GRIB으로 제공

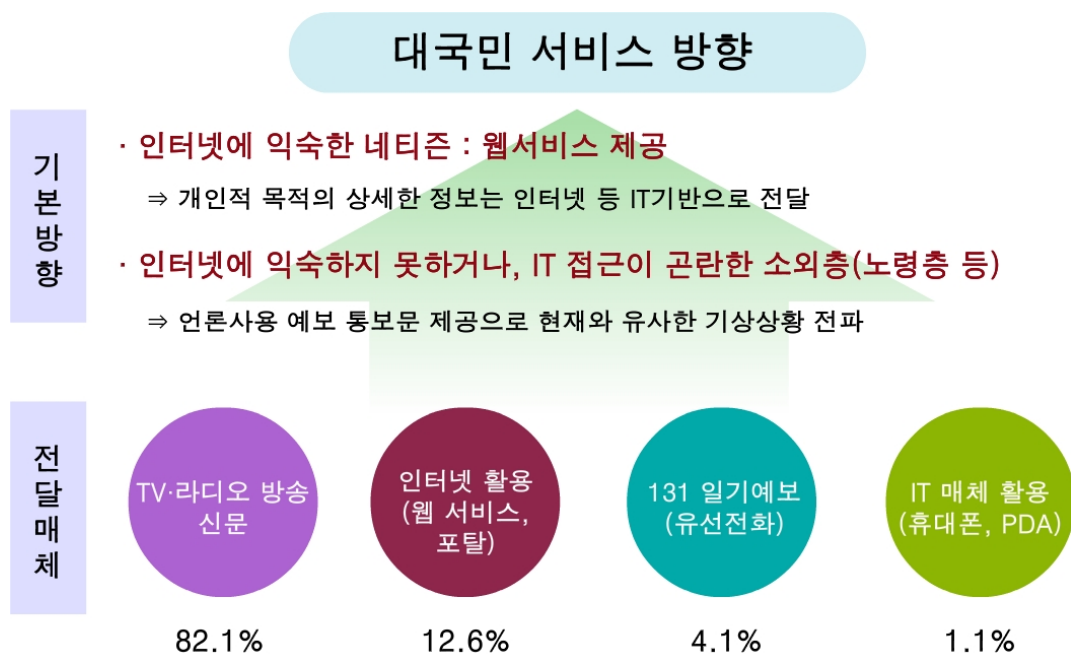
8.1 동네예보의 이해

8.1.7 동네예보의 민관 서비스 정책

동네예보는 기상청의 단기예보의 역할을 담당하므로 기존의 예보서비스 정책을 유지한다.

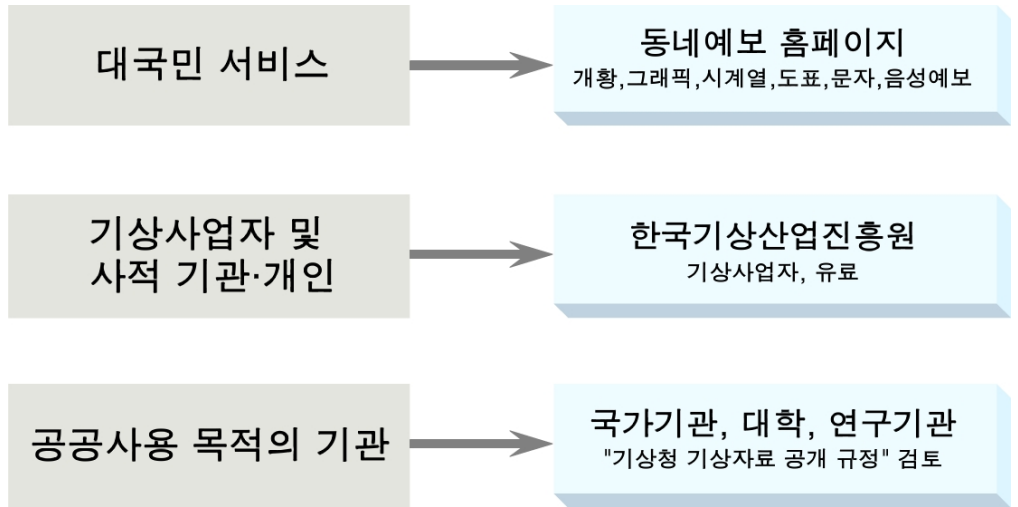
국민을 위하여 홈페이지, 131, 언론사용 예보통보문 등을 통하여 동네예보를 제공하며, 국가기관과 유관기관은 전용라인을 통하여 동네예보를 제공한다.

동네예보를 가공처리하여 부가가치를 창출하는 민간예보사업체에는 기상산업진흥원을 통하여 원시자료를 유료로 제공한다. 민간기업, 대학 등과 불특정 및 특수예보 사용자도 기상청에서 동네예보자료를 직접 제공하지 않고 기상산업진흥원을 통하여 간접적으로 서비스하고 있다. 그 외 기타 공익기관은 기상청 기상자료 공개 규칙에 따라 자료 제공 및 방법을 결정한다.



[그림 8.7] 동네예보 서비스 방향

8.1 동네예보의 이해



[그림 8.8] 동네예보 서비스 원칙

8.2 동네예보모델

8.2.1 동네예보모델의 필요성

현대 기상예보는 수치예보와 함께 발전하고 있으나, 수치예보모델은 역학 및 물리방정식으로 이루어져 있어, 기온, 바람 등과 같은 기본적인 예보요소만 예측한다. 그러나 동네예보는 강수형태와 같이 수치예보모델이 제공하지 않는 예보요소까지 제공해야하므로 예보관은 수치예보자료를 직접 분석하여 강수확률, 하늘상태 등과 같은 동네예보요소 생산해야한다. 동네예보는 12종의 예보를 48까지 예보를 3시간 마다 발표해야하므로, 예보관이 이러한 방법으로 제한된 시간 안에 모든 예보를 생산하는 것은 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 수치예보 모델과 예보관사이의 중간과정으로 동네예보모델을 도입되었다.

동네예보시스템은 동네예보모델 등을 이용하여 수치예보자료를 객관적으로 해석한 초기예보자료를 기상예보관에게 제공하고, 기상예보관은 제공된 초기예보자료를 조정 및 수정하는 예보체계로 운영된다.



[그림 8.9] 동네예보모델 역할

수치예보자료를 객관적으로 해석하는 방법으로는 여러 방법이 있으면, 통계적 방법으로 MOS(Model Output Statistics)모델과 PPM(Perfect Prog Method)모델 등이 있다.

8.2 동네예보모델

PPM은 과거에 축적된 종관기상관측자료와 예보요소간 관계식을 산출한 후, 수치예보모델이 완벽하다고 가정하고, 수치예보자료에 관계식을 적용하는 방법이다(Klein et al., 1960).

MOS는 수치예보모델의 계통오차와 위상오차를 설명하고, 수치예보모델이 생산하지 못하는 예보요소 및 격자점이 아닌 특정 지점에 대한 예보요소도 생산할 수 있다. 따라서 수치예보모델의 발전에 따라, MOS기법도 지속적으로 개발 및 현업화되고 있다(Dallavalle, 1996).

PPM은 모델 개발과 적용이 간편하지만 수치예보모델의 체계적 오차가 있는 경우 예측력은 다소 떨어진다. MOS는 수치예보모델의 체계적인 오차는 제거할 수 있으나 MOS 개발 및 적용에 고정된 수치예보모델을 이용해야 하는 등 제약이 있다. 한편 칼만필터는 PPM과 MOS의 중간형태이지만, 급격히 기상이 변할 경우 예측력이 떨어지는 단점이 있다(최와 조, 2001).

MOS는 PPM이나 칼만필터에 비해 수치예보모델의 체계적 오차를 고려할 수 있는 이점이 있으나, 개발기간 및 통계모델로 예보가이던스를 제공하기 어려운 예보요소가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 MOS로 제공되지 않는 예보가이던스는 PPM이나 수치예보자료를 사용하여 제공한다. 강수량 등의 예보요소 산출은 수치예보자료를 사용한다.

8.2 동네예보모델

8.2.2 통계모델(고전적 방법, PPM, MOS) 원리

통계예보모델은 식 (1)과 같이 예보요소인 피 예보인자(Predictand, Y)와 모델의 입력자료가 되는 예보인자(Predictor, X) 간의 관계식인 F를 잘 정의해 줌으로써 만들어진다. 여기서 \hat{Y} 는 피예보인자의 예보값이고, X 는 예보인자들이다.

$$\hat{Y} = F(X) \quad (1)$$

식 (1)과 같은 예보모델을 만들 때 사용되는 방법은 고전적 방법, PPM 및 MOS 등 3가지가 있다.

고전적 방법(Classical Method)은 수치예보 모델이 발전되기 이전에 기후자료만을 사용하여 예보인자와 피 예보인자 사이의 관계를 어떤 시간 간격(Lag)을 통해 산출하는 통계적 방법이다. 즉, 예보모델은 식 (2)와 같이 표현된다. 여기서 \hat{Y}_t 는 시간 t에서의 피 예보인자의 예보값이고 X_0 는 시간 t=0에서 예보인자들이다.

$$\hat{Y}_t = F(X_0) \quad (2)$$

PPM은 수치예보 모델이 개발되고 그 예보 능력이 향상되자, 이를 이용하여 수치예보 모델 자체에서 예보되지 않는 예보요소(최고/최저기온, 강수 확률 등)와 특정 지역에 대한 예보자료를 산출하기 위해 개발되었다. Klein(1959)은 기후자료를 사용하여 예보모델을 식 (3)과 같이 만들었는데, 이때 사용된 예보인자 X_0 는 수치예보 자료에서 계산 가능한 자료이다. 여기서 \hat{Y}_0 는 시간 t=0에서의 피 예보인자의 예보값이고, X_0 는 시간 t=0에서 예보인자들이다.

$$\hat{Y}_0 = F(X_0) \quad (3)$$

$$\hat{Y}_t = F(\hat{X}_t) \quad (4)$$

산출된 예보모델 (3)에 수치예보 자료를 활용할 경우, 최종적으로 예보자료 생산에 사용하는 예보모델은 식 (4)와 같이 표현된다. 여기서 \hat{Y}_t 는 시간 t에서 예보하고자 원하는 예보요소의 예보값(즉 피 예보인자의 예보값)이며, \hat{X}_t 는 시간 t에서의 수치예보 자료로 계산된 예보인자들의 값이다. 따라서 이 기법은 ‘수치예보 모델이 실제의 대기상태를 완벽하게 예보한다’는 가정 아래, 기후자료로 만든 예보모델에 수치예보 자료를 적용한다. 이와 같은 연유로 이 기법을 PPM(Perfect Prog Method)이라 부른다.

8.2 동네예보모델

8.2.2 통계모델(고전적 방법, PPM, MOS) 원리

PPM이 수치예보 모델의 예보자료를 사용하지만, 완벽한 수치예보 모델은 존재하지 않기 때문에 관측자료에 기반한 Y_0 와 X_0 사이의 통계적 관계가 t 시간 예측된 수치예보 자료에서 성립된다고 보는 것은 무리이다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 Glahn과 Lowry(1972)는 예보인자와 피예보인자간 통계적 관계를 기후자료 대신 수치예보 자료를 사용하여 수치예보 모델 자체의 특성을 예보모델에 반영 할 수 있는 Model Output Statistics(MOS)를 개발하였다(식 5). 여기서 \hat{Y}_t 는 시간 t 에서의 피 예보인자 예보값이고, \hat{X}_t 는 시간 t 만큼 예측된 수치예보자료로 계산된 예보인자 들이다.

$$\hat{Y}_t = F_t(\hat{X}_t) \quad (5)$$

Murphy(1985)에 따르면 각 예보모델은 표 8.4에 나타난 바와 같이 다음의 특성을 가진다. 고전적 방법은 단시간 예보에 유용하다. 수치예보 모델의 특성상 모델 가동 후 예보 안정을 위해 3~6시간 정도가 소요된다고 보면 이 시간 내의 예보 자료에 대한 예보 정확도는 기대할 수 없기 때문에 4시간 이내의 단시간 예보는 PPM이나 MOS보다 예보 능력이 더 좋은 것으로 평가된다.

[표 8.4] 전통적방법, PPM, MOS의 예보원리 비교

Method	Development Equation at t=0	Forecast Equation at t=t
Classical Method		$\hat{Y}_t = F(X_0)$
PPM	$\hat{Y}_0 = F(X_0)$	$\hat{Y}_t = F(\hat{X}_t)$
MOS		$\hat{Y}_t = F_t(\hat{X}_t)$

8.2 동네예보모델

PPM은 예보모델을 전적으로 관측된 기후 자료를 사용하기 때문에 오랜 동안의 관측자료가 확보되면 안정된 예보모델을 얻을 수 있다. 또한 예보모델이 수치예보 모델의 예보자료와 독립적으로 개발되어 수치예보 모델이 교체 또는 개선되어도 예보모델을 다시 개발할 필요가 없다. 그러나 수치예보 모델의 특성이 직접 예보 결과에 표현되어 수치예보모델의 예보 능력이 떨어지면 PPM을 사용한 예보 결과도 떨어지는 단점이 있다. 그래서 이 예보자료를 분석하여 수치예보 모델의 개선 자료로 활용하기도 한다.

MOS는 예보모델 산출에 수치예보 자료를 직접 사용하기 때문에 수치예보 모델의 바이어스를 예보모델에 반영해 주는 장점이 있다. 그러나 MOS를 개발하기 위해서는 수치예보 자료가 일정 기간 동안 충분히 저장되어 있어야 하고 이 자료를 이용하여 예보모델을 만들고 적용할 때 수치예보 모델에 큰 변화가 없어야 한다. 또한 수치예보 모델이 교체 될 경우, 수치예보 자료를 일정 기간 동안 재 저장해서 예보모델을 재 산출해야 하는 단점이 있다.

8.2 동네예보모델

8.2.3 동네예보모델의 PPM

8.2.3.1 3시간 기온

3시간 기온은 수치예보모델의 2m 기온을 동네예보시스템의 지형고도로 기온감률을 적용하여 산출한다.

수치예보모델의 2m 기온은 수치예보모델의 하층대기자료를 상사이론에 적용하여 산출된다. 일반적으로 수치모델의 최하층 고도는 30개의 연직으로 이루어진 경우 50m 정도이며, 이층의 중간고도에서 산출되는 기온은 종관기상관측에서 이루어지는 1.5m의 기온과는 차이가 있다. 이러한 점을 극복하기 위하여 수치예보모델에서 산출되는 2m 기온을 3시간 기온, 최고/최저기온 산출에 사용하였다.

수치예보모델은 수치연산의 한계로 상대적으로 저해상도의 격자체계(RDAPS의 경우 30km)로 이루어져 있어 동네예보시스템 격자체계의 해상도인 5km를 만족하지 못한다. 즉 수치예보모델에서 산출되는 2m 기온은 평활화된 수치예보모델 지형고도의 2m 상공에서 정의되고 동네예보의 기온은 이보다 더 상세한 지형고도에서 정의된다. 그러므로 동네예보의 기온은 수치예보모델의 2m 기온을 두 예보시스템간의 기온이 정의되는 고도차를 고려한 기온감률로 보정하여 산출한다. 기온감률은 $0.0067^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 를 사용한다.

해상지역에서 지상기온은 겨울철 해상에서 지나치게 따뜻하게 모의할 가능성이 있으므로 모델에서 모의된 지상기온대신 850hPa의 기온을 $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 로 감율을 적용하여 사용한다. 단 850hPa의 고도는 1,500m로 설정한다.

8.2.3.2 최고기온

최고기온은 앞절에서 정의된 3시간 기온을 이용하여 산출하며, 10시~18시까지 3시간 기온 중 가장 높은 값을 최고기온으로 정의한다.

8.2 동네예보모델

8.2.3.3 최저기온

최저기온은 앞절에서 정의된 3시간 기온을 이용하여 산출하며, 03시~09시까지 3시간 기온 중 가장 낮은 값을 최저기온으로 정의한다.

8.2.3.4 바람(U, V)

바람은 앞에서 정의된 3시간 기온과 비슷하게 상사이론으로 수정된 10m 바람자료를 이용하며, 수치예보모델에서 산출되는 10m 바람자료를 수정없이 사용한다.

10m 바람은 국지적인 지형형태에 많은 영향을 받을 수 있어 저해상도의 수치예보자료를 고해상도의 지형경계조건에서 역학적으로 진단하는 모델이 필요하며 이는 추후 사업을 통하여 개발해야 할 것으로 보인다. 바람은 동서(U), 남북(V)성분으로 구분하여 생산하며 풍향/풍속으로의 변환은 지도투영법의 고려없이 그대로 사용한다. 이는 지도투영법 중심이 한반도이며 한반도 지역은 지도투영법으로 인한 풍향/풍속의 왜곡은 작다.

8.2.3.5 상대습도

상대습도는 수치예보모델에서 산출되는 수증기의 혼합비, 기온, 기압을 이용한 경험식을 이용하여 산출한다.

상대습도를 산출하는데 고려해야 할 사항은 어떤 기온, 기압, 혼합비를 사용하는지 결정해야 한다. 현재는 수치예보모델 최하층의 기온, 혼합비, 기압을 사용하였다.

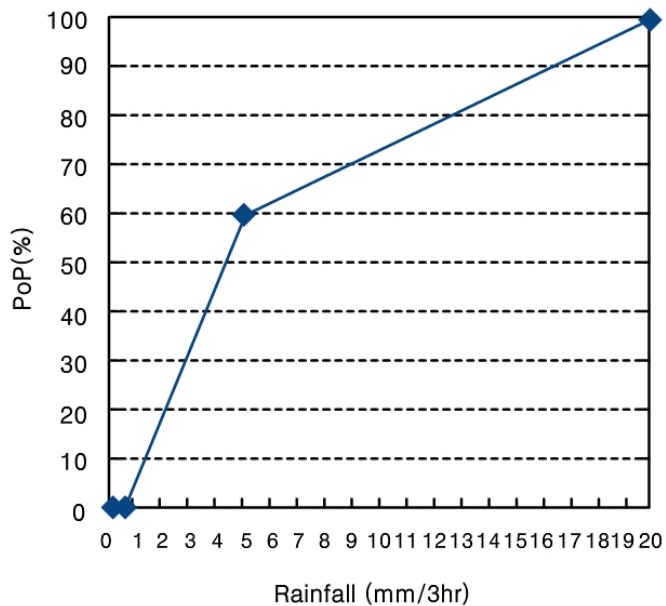
수치예보모델은 지상 2m에서 혼합비, 기온을 제공하지만 상사이론을 거치면서 혼합비와 기온의 연계성이 떨어지고, 모델에서 대기하층의 상대습도가 지상의 상대습도를 대표한다고 보았다.

실제로 모델 최하층의 혼합비는 대기하층에서 일정하고 기온에 따라 포화 수증기압이 달라지므로 상대습도가 수정되는 방안이 개발될 필요가 있다. 이를 위해 혼합비는 고정시키고 수치예보모델의 지형고도와 동네예보시스템간의 지형고도의 차이에 따라 지상기압 및 기온을 수정하여 상대습도를 수정하는 방안이 향후 검토되어야 될 것이다.

8.2 동네예보모델

8.2.3.6 강수확률

강수확률은 수치예보모델자료에서 제공하지 않는 예보요소로 MOS모델로 지원될 것이다. 그러나 MOS모델의 정상 운영 실패 등의 특이사항을 고려하여 다음과 같은 강수량 문턱값을 이용하여 강수확률을 산출한다. 여기에서 사용된 문턱값 및 증가율은 경험 많은 예보관의 의견을 반영한 것이다. 다음의 알고리즘을 이용하여 수치예보모델 강수량 대비 강수확률은 그림 8.10과 같다.



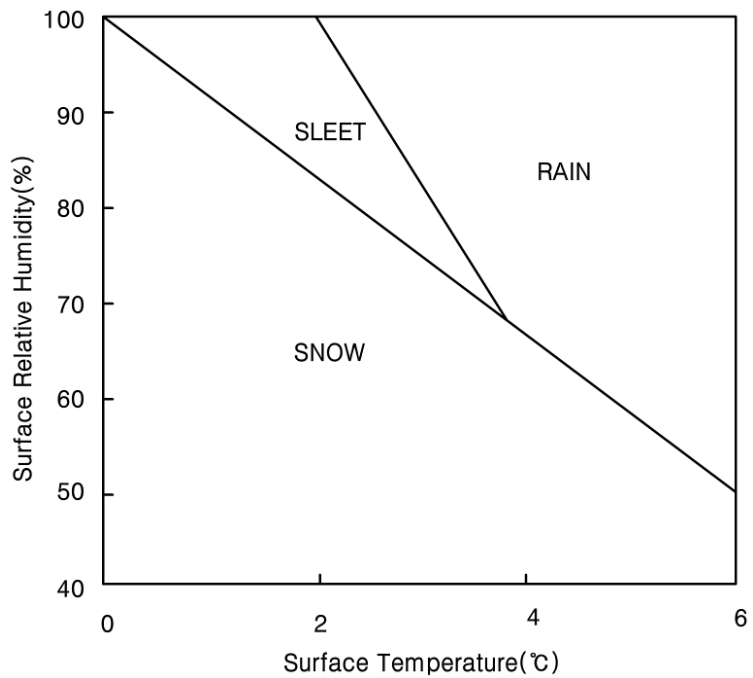
[그림 8.10] 수치예보모델 강수량을 이용한 강수확률 환산법

8.2 동네예보모델

8.2.3.7 강수형태

강수형태 알고리즘은 일본기상청에서 사용하는 Matsuo방안(Matsuo et al., 1981)과 미공군방안(AFWA, 1998) 등이 있다. 일본기상청에서는 Matsuo방안을 종합화하여 그림 8.11과 같은 판정그래프로 강수형태를 예보한다(KMA/NWPD, 1994). 이 방안은 강수형태를 지상기온 0°C 이하에서는 눈으로, 지상기온 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ 에서는 상대습도와 기온에 따라 눈, 진눈깨비, 비로 판정하며, 상대습도가 낮을 때는 눈으로 판정한다.

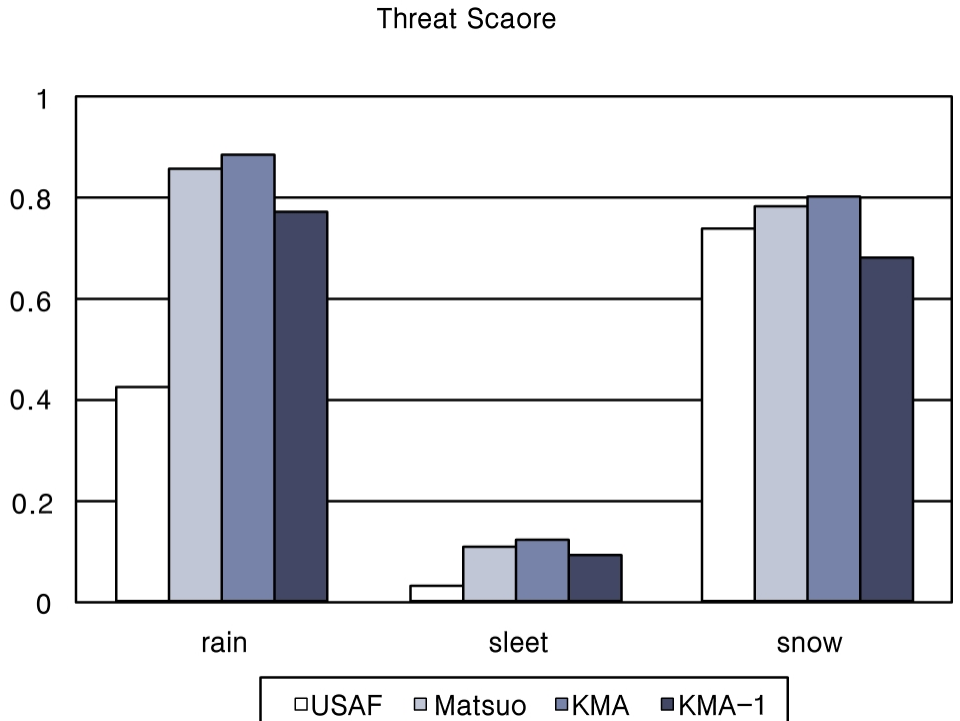
일반적으로 수치예보모델은 지상부근의 물리과정의 한계로 지상의 기상요소보다 상층 기상요소의 예측력이 높다. 그러므로 PPM모델에서는 Matsuo 방안에서 사용하는 지상의 상대습도 대신 850hPa 상대습도를 적용하였다(이하 KMA 방안).



[그림 8.11] Matsuo 방안을 이용한 강수형태판정 알고리즘

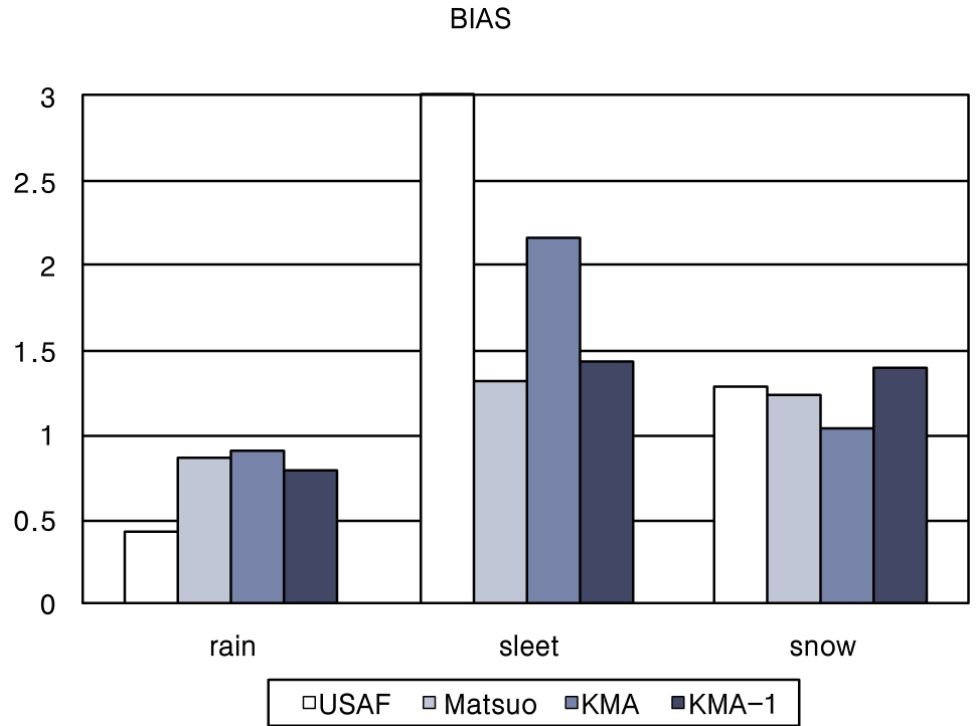
8.2 동네예보모델

그림 8.12는 미공군, Matsuo, KMA방안의 Threat Score(TS)로, 비, 눈, 진눈깨비 구간의 Score는 각각 0.43~0.89, 0.74~0.81, 0.03~0.12로 나타났다. 비 및 눈 구간이 진눈깨비 구간보다 강수형태의 판정능력이 매우 높았으며, 비 구간보다는 눈 구간의 판정능력이 조금 더 높았다. 그러나 진눈깨비 구간은 판정능력이 거의 없으며 이 결과는 Matsuo et al.(1981)의 결과와 일치한다. 강수형태의 BIAS는 비와 눈 구간에서 각각 0.43~0.91, 1.04~1.40으로 나타났으며, 비 구간은 음의 BIAS를, 눈 구간에서는 양의 BIAS를 보였다(그림 8.13). 진눈깨비 구간은 BIAS가 양이었으며, 특히 미공군방안과 KMA방안의 BIAS는 각각 9와 2.17로 매우 컸다. 그러나 이 구간의 Treat Score(TS)가 너무 낮아 예보현업에 사용하기 어려운 수준이므로, BIAS의 크기는 중요한 의미를 갖지 않는다.



[그림 8.12] 강수형태 알고리즘 검증결과. 검증기간은 2001-2004년의 1월, 2월, 3월, 11월, 12월이며 검증위치는 오산, 포항, 광주, 고산이다.

8.2 동네예보모델



[그림 8.13] BIAS를 제외하고 그림 8.12와 동일

비와 눈 구간에서 Matsuo, KMA방안은 비슷한 판정능력을 가지며, 그 중에서 KMA방안이 다른 방안보다 약간 더 우수하다. 눈 구간에서 양의 BIAS, 비 구간에서 음의 BIAS를 나타낸 것으로 판단된다. 실제로 검증기간 동안 강수가 있을 때 지상, 850hPa, 700hPa의 상대습도는 각각 78.3, 87.2, 70.6%였다. 이는 주어진 기온에서 상대습도가 높을 때는 비가, 낮을 때는 눈이 발생한다는 Matsuo et al.(1981)의 결과와 일치한다.

이상의 결과로부터 모든 방안에서 판정능력이 없는 진눈깨비 구간의 BIAS를 제외하면 KMA방안이 가장 우수하였다. 특히 강수형태 판정알고리즘이 수치예보자료를 이용하는 PPM모델에 적용되므로 KMA방안은 850hPa 상대습도를 이용하는 장점도 있다.

8.2 동네예보모델

8.2.3.8 하늘상태

하늘상태는 전운량을 4등분하여 맑음($0 \leq \text{전운량} \leq 2$), 구름조금($3 \leq \text{전운량} \leq 5$), 구름많음($6 \leq \text{전운량} \leq 8$), 흐림($9 \leq \text{전운량} \leq 10$)으로 구분된다(동네예보기획단, 2004). 전운량은 0 ~ 10까지 11단계로 나누어지며 목측으로 관측되는 요소이다.

하늘상태 판정알고리즘은 수치예보모델의 850hPa, 700hPa의 습수(기온과 이슬점온도 차이)를 이용하는 방안(이하 ‘NWP방안’이라 한다), 대기 상, 중, 하층의 최대 상대습도를 이용하는 미공군방안(AFWA, 1998), 기온과 습수를 이용하는 Arabey방안(Chernykh and Eskridge, 1996) 등이 있다.

NWP방안은 수치예보시스템의 Metogram에서 표출하는 예보가이드대로 기상예보관의 장기간 예보경험을 정량화한 방안으로 습수가 작으면 구름이 형성되고 습수가 크면 구름이 소멸된다는 간단한 원리를 이용한 것이다.

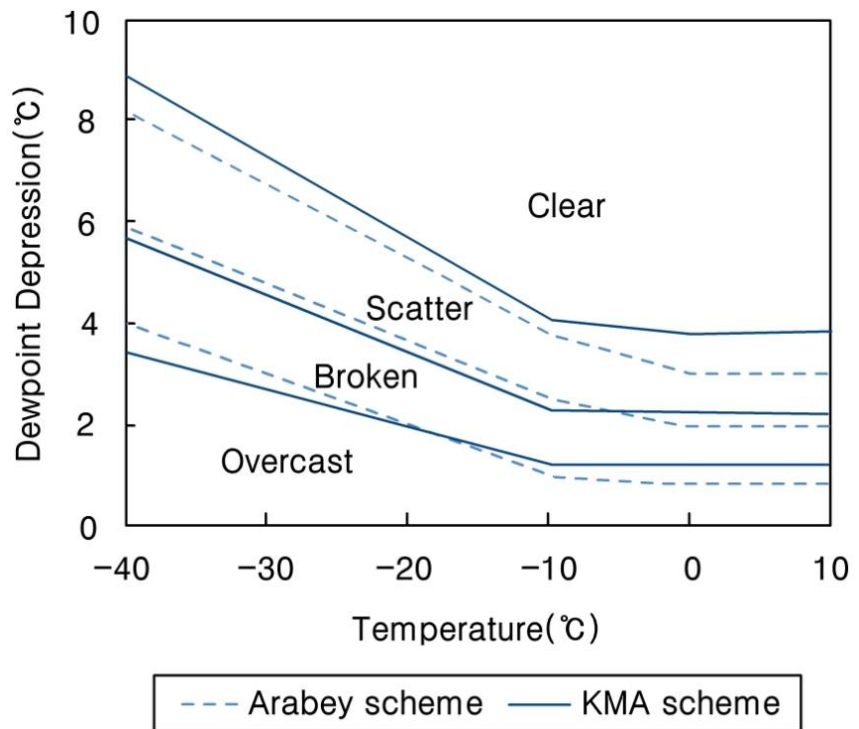
판정기준이 되는 고도는 850hPa과 700hPa이다. 전운량은 구름의 두께보다 구름의 수평적인 분포로 결정되므로, 850hPa 습수와 700hPa 중 습수가 작은 값을 사용한다. 판정에 사용하는 습수의 문턱값은 2°C 미만일 경우 흐림, 2°C 이상 4°C 미만일 때 구름많음, 4°C 이상 6°C 미만일 때 구름조금 그리고 6°C 이상일 때 맑음으로 판정한다. 이 방안은 미공군에서 습수를 이용하여 운량을 판정하는 방법과 비슷하며, 맑음의 판정기준이 AFWA(1998)의 문턱값보다 1°C 높다.

NWP방안은 상대습도관련 기상요소만을 이용하여 하늘상태를 판정하므로, 기온이 높을 때는 습수가 작아도 구름이 생기기 어렵고, 반대로 기온이 낮을 때는 습수가 크더라도 구름이 쉽게 생기는 현상을 적절히 반영하기 힘들다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 기온과 상대습도를 동시에 고려한 Arabey방안(Chernykh and Eskridge, 1996)이 개발되었다.

8.2 동네예보모델

이 방안은 습수와 기온을 동시에 고려하여 그림 8.14와 같이 하늘상태를 4종류로 판정한다(점선). 판정문턱값은 기온 0°C 이상, $0^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$, -10°C 이하 구간으로 구분하여 빙점, 과냉각점 별로 다르게 적용한다.

Arabey방안은 미국내 자료로 결정한 문턱값을 사용하므로, 한반도에 적용할 수 있도록 한반도 관측자료를 이용하여 판정문턱값을 그림 8.14의 실선과 같이 재설정하였다(이하 ‘KMA방안’이라 한다). KMA방안의 판정문턱값은 Arabey방안의 기온구간에 대하여 습수를 0.1°C 씩 반복적으로 변경하여 BIAS가 가장 작게 설정되었다. 판정문턱값 재설정에 사용한 자료는 오산, 광주, 포항기상대의 2000년~2004년 오전 9시 및 오후 3시 관측자료로, 산지나 해양지역 보다 평지에서 하늘상태를 판정하는데 초점을 맞추었다.



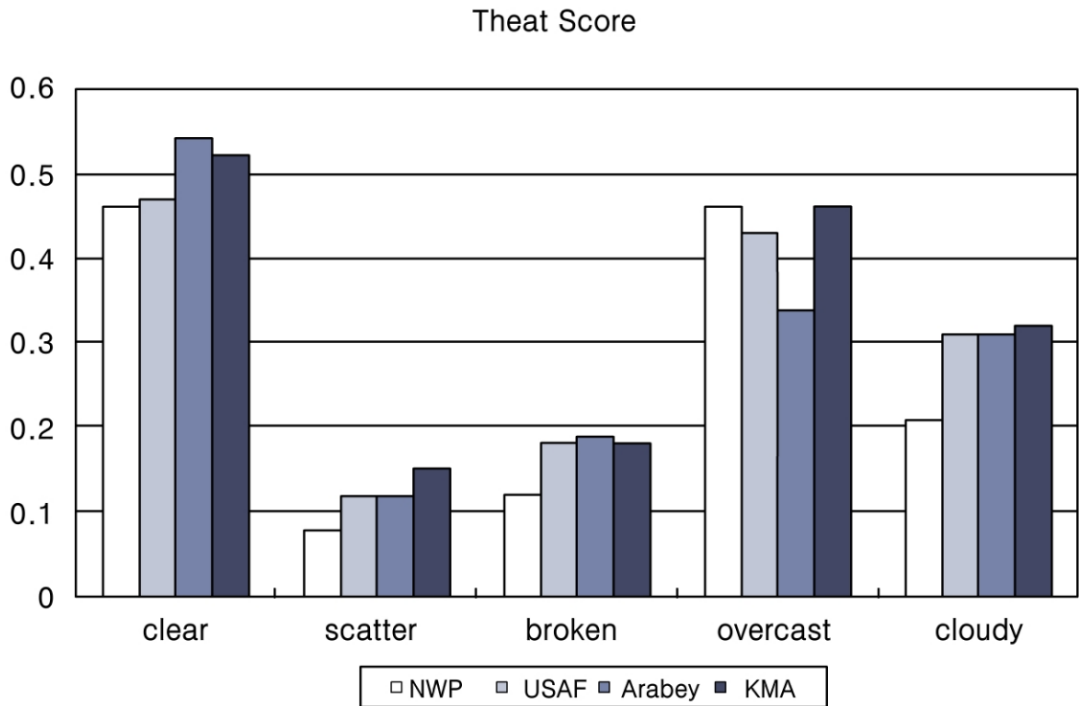
[그림 8.14] Arabey방안(점선)과 KMA방안(실선)을 이용한 하늘상태 판정 알고리즘

하늘상태 검증은 기상청 레디오존데의 등압면 기온, 습수자료와 종관기상 관측의 전운량(0~10) 자료를 사용하였다. 검증기간은 2000년~2004년까지 5년이며, 검증지역은 고층관측이 정기적으로 이루어지는 오산(수원), 포항 그리고 광주이다. 하늘상태는 목측으로 이루어지므로 야간에서는 주간보다 관측능력이 떨어질 수 있다.

8.2 동네예보모델

이러한 사항을 고려하여 오전 9시와 오후 3시 관측자료만 검증에 사용하였다. 또한 한반도 전 지역에서 적용할 수 있는 방안을 선정하기 위하여 남부섬 지역 특유의 기후특성을 가질 수 있는 고산기상대 자료는 사용하지 않았다.

그림 8.15는 NWP, 미공군, Arabey 그리고 KMA방안의 TS로 맑음, 구름조금, 구름많음 그리고 흐림 구간의 TS는 각각 0.47~0.52, 0.08~0.15, 0.12~0.19, 0.34~0.46 이었다. 맑음과 흐림 구간이 구름조금이나 구름많음 구간보다 판정능력이 높았다. 각 구간별로 보면 맑음 구간은 Arabey방안과 KMA방안이, 구름조금 구간은 KMA방안이, 구름많음 구간은 미공군방안, Arabey방안 그리고 KMA방안이, 흐림 구간은 NWP방안과 KMA방안이 각각 판정속련도가 높았다. 그러므로 KMA방안이 모든 구간에 대하여 판정능력이 우수함을 알 수 있다.



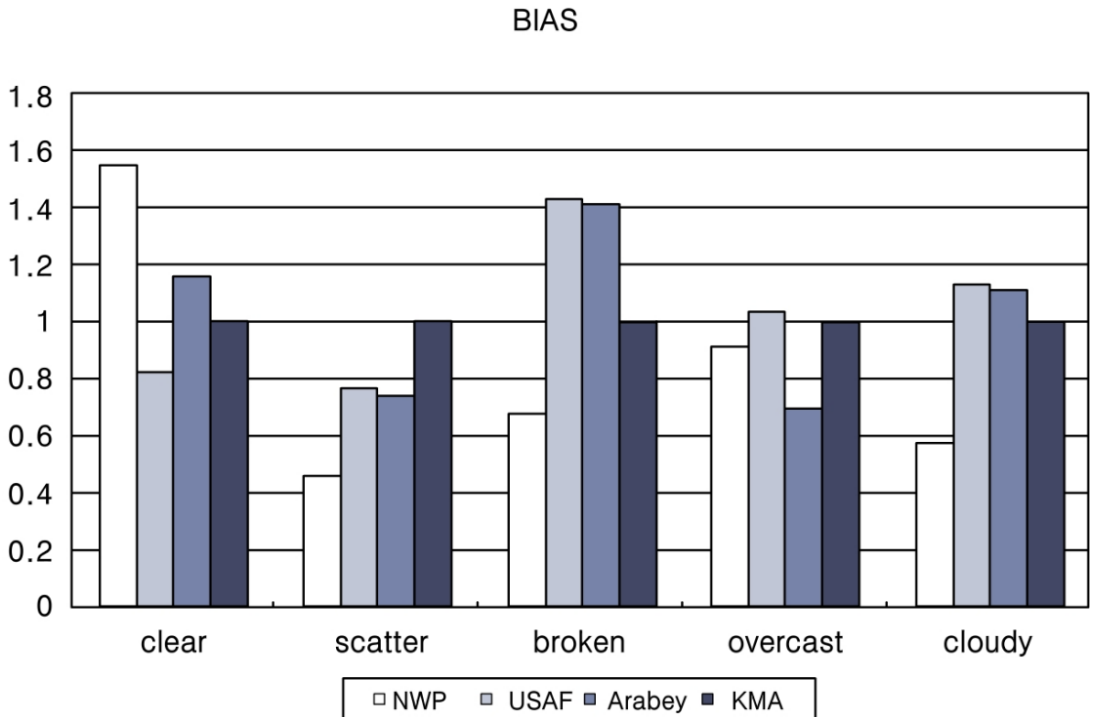
[그림 8.15] 하늘상태 판정 알고리즘의 Threat Score(TS). 검증기간은 2000년 ~ 2004년이며, 검증위치는 오산, 포항, 광주

8.2 동네예보모델

한편 구름조금과 구름많음 구간은 중간 단계 구간으로 맑음 및 흐림 구간에 비하여 정확한 판정을 하기 어려운 구간이다. 그러나 구름조금 및 구름많음 구간도 변별력 있는 판정구간임을 알아보기 위하여, 구름조금 및 구름많음 구간을 통합하여 하늘상태를 맑음(전운량 0-2), 구름(전운량 3-8) 그리고 흐림(전운량 9-10)으로 구분하였을 때의 구름 구간의 판정 능력을 검증하였다. 구름 구간의 TS는 0.21~0.32로 구름조금 및 구름많음 구간보다 약 0.2 정도 상승하였다. 이는 구름조금 및 구름많음 구간을 명확히 구분하기는 힘들지만, 맑음 및 흐림과 별도로 구분할 수 있음을 알 수 있다.

그림 8.16은 여러 방안의 BIAS를 보인 것이다. NWP방안을 제외하면 대부분 양의 BIAS를 보이고 있다. 미공군방안과 Arabey방안이, 구름조금 구간에서는 과소판정(BIAS 0.75)을, 구름많음 구간에서는 과대판정(BIAS 1.4)하였다. 그러므로 이 방안들은 구름조금 구간과 구름많음 구간사이의 문턱값을 구름많음 구간 방향으로 조정해야함을 의미한다.

이상의 결과에 따라 PPM모델의 하늘상태 판정은 KMA방안을 사용하였다.



[그림 8.16] BIAS를 제외하고 그림 8.15과 동일

8.2 동네예보모델

8.2.3.9 12시간 강수량

12시간 강수량은 시간에 따라 누적하는 시간이 달라지므로 PPM모델에서는 3시간 누적강수량을 제공한다. 수치예보모델의 강수는 격자규모 강수량과 아격자규모 강수량으로 구분하지만 여기에서 격자규모 강수량과 아격자규모 강수량을 합하여 제공한다.

8.2.3.10 12시간 적설

각 3시간 간격 강수형태에서 눈으로 판정된 경우에 대해서만 12시간 강설량을 적설 정보로 대치하여 제공한다. 12시간 강설량은 향후 MOS 등 다른 방법으로 제공할 예정이다.

강수량을 강설량으로 환산하는 일반적인 방법은 강수량 12시간 시간 범위에 대해 강수량을 누적하고, 그 강수량에 10배하지만 상대습도에 따라 적설량은 차이가 있다. 습설인 경우 같은 양의 강수일때 건설보다 적설량이 작게된다. 이러한 점을 극복하고, 객관적인 적설량을 생산하기 위하여 이태영(2003)의 기법을 적용한다.

이태영 기법은 MM5의 구름물리과정에서 산출되는 강수, 빗물, 눈, graupel의 혼합비를 이용하여 고체상수비를 산정하고, 고체상수비를 강수량에 곱하여 고체강수량을 결정한다. 고체상수량은 적설량으로 환산하는 비율에 곱하여 최종적인 적설량을 결정한다.

snf : 고체강수의 비

$$snf = \begin{cases} \frac{qsn + qgr}{qpr} = 1 - \frac{qra}{qpr} & , qpr \geq 0.0001g/kg \\ 0.5 & , qpr < 0.0001g/kg \end{cases}$$

qpr : 강수 혼합비, qra : 빗물 혼합비,
qsn : 눈 혼합비, qgr : graupel 혼합비

S_{we} : 고체 강수량

$$S_{we} = r_{tot} \times snf$$

S_{dp} : 신 적설량 = $17 \times S_{we}$

8.2 동네예보모델

8.2.3.11 유의파고

유의 파고는 수치예보자료를 진단하여 해상파고를 예측하는 해양모델(현재 ReWAM)의 예측자료를 사용한다. 유의파고는 해상에만 지원되는 예보 요소이므로 Sealand Mask 파일을 이용하여 해상영역 자료만 제공한다. 해상영역에서 해양모델과 동네예보에서 정의한 Sealand Mask 간에 불일치하는 부분은 동네예보에서 정의한 Sealand Mask를 우선시하였다. 만약 Sealand에서 해상이지만 ReWAM에서 육지로 설정된 지역은 0.5m로 설정하였다. 이것은 현재의 수치예보과의 해양 모델은 쇼월링을 고려하지 않으므로 해안지역의 유의파고는 0.5m와 같이 낮은 파고를 모의하므로 이상의 설정은 유의한 것으로 판단된다.

8.2.4 동네예보모델의 MOS

8.2.4.1 MOS의 개념

수치예보자료 중 850hPa 기온(해발 1,500m 기온)을 이용한 기온예보 방법을 예로 들어 보자. 수치예보 일기도에서 예보지점의 850hPa 기온을 읽고, 그 기온값에서 대기의 기온변화율(1km 하강할 때마다 기온은 약 6.7℃ 상승)을 고려하여 지상기온을 산출한다. 보통 850hPa 기온에 5~10℃를 더해 주는데, 이 값은 날씨상태, 지형분포, 수치예보모델의 특성에 따라 다른 값을 적용한다.

이러한 과정을 통계분석 등을 통하여 객관하여 객관적인 예보가이드를 생산하는 예보기술이 MOS이다. 앞의 예를 MOS에 적용하면, 먼저 수치예보 일기도의 850hPa 기온, 습도 등과 예보지점(기상대)의 기온과의 관계를 통계분석하여 방정식(여기에서는 850hPa 기온 + x℃)을 산출하고 이를 수치예보에 적용하여 기온을 예보한다.

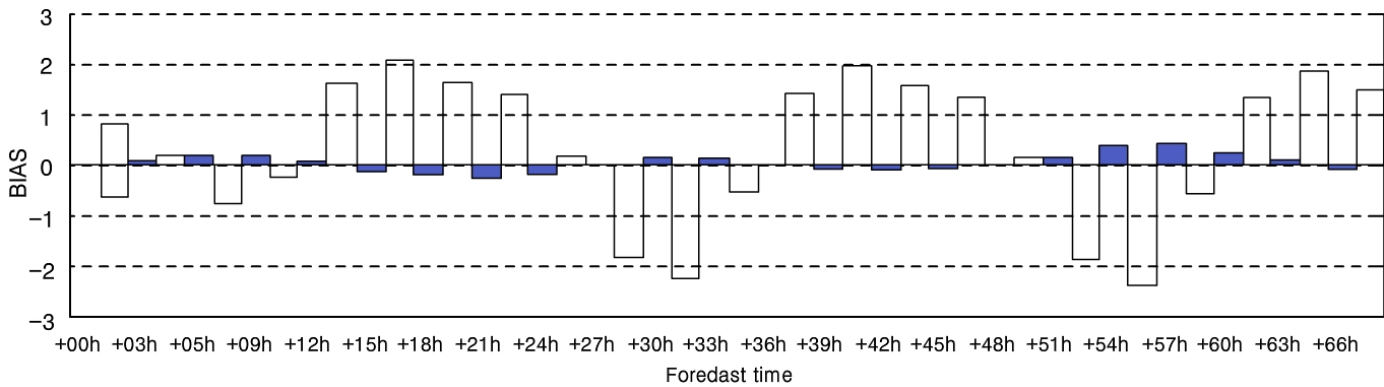
8.2.4.2 MOS 장점과 단점

MOS는 수치예보의 국지예보의 한계를 극복하기 위하여 개발된 모델이다. 먼저 MOS는 수치예보모델이 예측하는 예보요소에 크게 상관없이 관측요소를 직접 예측하는 예측모델이다. 수치예보모델은 기온, 바람 등과 같은 대기역학방정식의 변수만 예측하지만 MOS를 수치예보의 예보변수를 분석하여 하늘상태와 같은 목측관측 요소도 예측할 수 있다. 특히 MOS는 강수 확률과 같이 확률정보까지도 생산이 가능하다.

8.2 동네예보모델

둘째 MOS는 예보하는 위치의 관측자료를 직접 사용하므로 지역적 특성을 MOS에 직접 반영할 수 있다. 분지와 같은 지형이나 작은 호수와 같은 토지 이용도 특성과 같은 지역적인 특성은 관측위치의 특수한 기후형성에 영향을 주며 이러한 영향은 해당 지역의 관측자료와 수치예보자료간 통계분석을 통하여 MOS에 쉽게 반영할 수 있다.

마지막으로 MOS는 수치예보모델의 계통적 오차를 제거할 수 있다. 수치예보모델의 예측하는 대기 하층의 예보값은 수치예보모델의 해상도, 토지이용도, 물리과정에 절대적으로 영향을 받고 있으나, 이러한 과정은 인간이 이해하고 수치적으로 연산가능한 범위내에서 예측가능하다. 따라서 수치예보는 수치예보모델만의 고유한 특성이 있으며 이러한 특성은 계통적 오차를 유발한다. 그림 8.17은 RDAPS와 MOS에서 예측한 2m 기온의 BIAS이다. 수치예보모델은 예보시간에 따라 BIAS가 보여주지만 MOS는 이러한 BIAS를 거의 완벽히 제거할 수 있음을 보여준다.

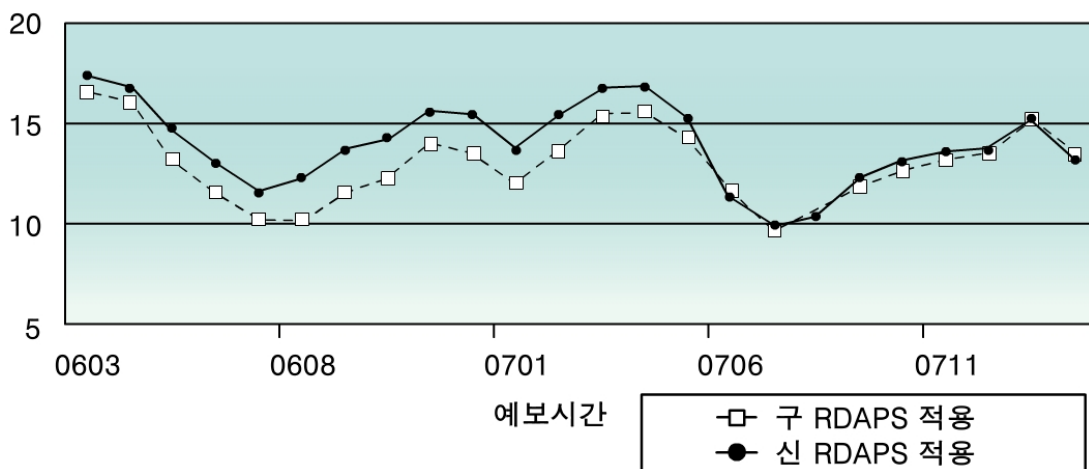


[그림 8.17] RDAPS(흰색)와 MOS(검은색)에서 예측한 기온의 BIAS

8.2 동네예보모델

MOS의 가장 큰 단점은 수치예보모델에 절대적으로 의존한다는 원리 자체의 한계이다. MOS에 적용한 통계는 수치예보모델과 관측사이의 통계로 MOS가 개발된 후 수치예보모델이 변경되면 기존의 MOS는 그만큼 제약이 따른다. 즉 수치예보모델이 변경되면 그에 따른 MOS 예보 정확도가 하락할 수 있다.

그림 8.18은 수치예보모델 변경에 따른 상대습도 MOS의 예보정확도를 나타낸 것이다. 상대습도 MOS는 2005년에 개발된 RDAPS를 기반으로 개발되었으나 MOS에 적용되는 RDAPS가 2008년 말에 변경되었다. 비록 2008년부터 적용된 RDAPS가 이전의 RDAPS보다 예보정확도가 높지만 MOS에 적용한 결과 구 RDAPS를 적용한 MOS의 예보 정확도가 높음을 보여주고 있다. 이러한 MOS의 단점에도 불구하고 국지예보정확도의 장점으로 인하여 MOS는 한국과 미국의 동네예보서 중요한 역할을 하고 있다.



[그림 8.18] 수치예보 변경에 따른 상대습도 오차(RMSE)

8.2 동네예보모델

8.2.4.3 MOS 개발 과정

MOS는 예보요소 정의, 수치예보모델 결정, 예보인자 결정, 통계모델 개발, 수치예보 적용 과정을 거쳐 개발 및 적용한다.

1. 예보요소 정의
2. 수치예보모델 결정
3. 예보인자(설명변수) 결정 및 생산
4. 예보요소와 예보인자간 통계모델
5. 통계모델의 실시간 수치예보 적용 및 예보 생산

예보요소는 예보 대상을 결정하는 과정으로 예보목적에 따라 예보대상, 예보위치, 시간에 따라 정의해야 한다. 예보요소가 최고기온과 같은 경우 관측자료를 그대로 사용하는 경우도 있지만 강수확률과 같이 관측자료를 가공하는 경우도 있다. 강수유무만 예측한다면 강수확률은 강수량이 0.1mm 또는 0.5mm 이상일 때 강수 사건으로 처리할 수도 있지만, 집중호우를 예측하기 위해서는 강수량 10mm 또는 30mm 이상을 강수 사건으로 처리 할 수도 있다.

예보하는 지역의 공간적 규모에 따라 예보요소는 광역예보요소나 특정 위치만을 위한 지점 예보요소 나눌 수 있다. 특히 예보 정확도는 예보대상의 시간 규모에 크게 영향을 받는다. 예보대상이 1일 또는 1시간 강수확률이 될 수 있다. 일반적으로 예보지점이 좁을수록 시간규모가 적을수록 예보정확도는 떨어진다. 예보요소의 시공간 규모는 예보의 사용목적 및 필요한 예보정확도에 따라 결정되어야 할 것이다.

예보요소가 결정되면 적용할 수치예보모델을 결정해야 한다. MOS에 적용될 수치예보모델은 모델자체의 개선 및 다른 수치모델로 변경될 가능성이 적은 수치모델을 선정해야하며 무엇보다도 국가기상청의 현업용 수치예보 모델중 하나로 안정적인 운영이 보장되는 수치모델을 선정해야한다.

8.2 동네예보모델

예보인자는 MOS의 설명변수로 사용되며 예보요소를 가장 잘 설명할 수 있는 변수로 결정한다. 예보인자는 850hPa 기온과 같이 수치예보모델이 예측하는 변수, 예보요소의 기후값과 같은 기후자료, 최근 관측자료가 있으며, 이상의 예보인자를 조합한 예보인자를 사용되기도 한다.

표 8.5는 강수확률에 주요하게 사용되는 예보인자로 강수량, 습윤층, 상대습도, 안정도지수 등이 있으며, 찬 계절과 따뜻한 계절별마다 사용되는 예보인자가 차이가 있다. 이는 예보인자도 계절적인 특성에 따라 달리 사용해야함을 보여준다.

[표 8.5] 강수확률 예보식에 사용된 주요 예보인자

찬 계절(1, 2, 3, 10, 11, 12월)	따뜻한 계절(4, 5, 6, 7, 8, 9월)
예보인자	예보인자
3시간 강수량	3시간 강수량
상대습도(925-300hPa)	유효습윤층
유효습윤층	RINX
700hPa 상대습도	습윤층 비습적분
850hPa 습수	상대습도(925-300hPa)
700hPa LCL	남풍*상대습도
	700hPa 상대습도

8.2 동네예보모델

통계모델은 하늘상태 PPM에서 적용한 그래프방법, 회귀분석 방법 등 다양한 통계모델을 적용할 수 있으며 그 중 다중선형회귀식이 가장 일반적으로 사용되고 있다.

다중선형회귀식은 식 (4) 같이 표현되며,

$$\hat{Y} = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i \quad (4)$$

식 (4)에 의해 추정된 예보요소 \hat{Y} 는 관측된 예보요소 Y 와 오차 E 만큼 차이가 있다고 한다면,

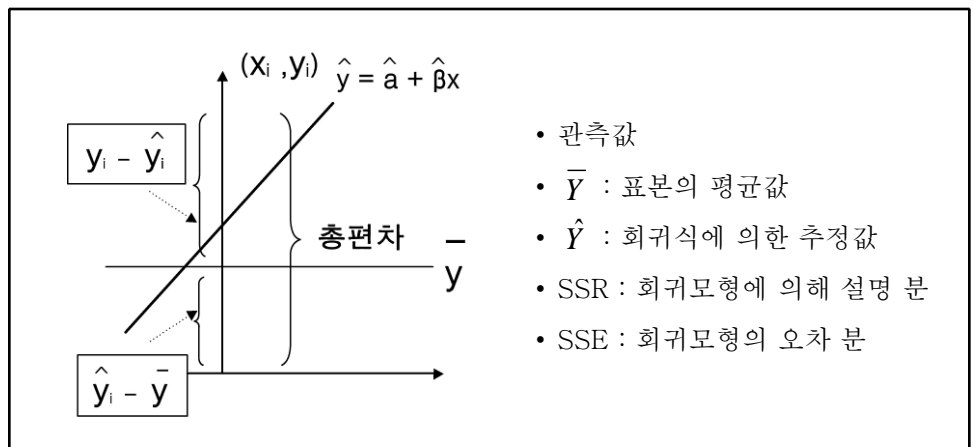
$$Y = \hat{Y} + E \quad (5)$$

라는 관계식으로 표현된다. 식 (4)의 계수 A_i 는 식 (5)의 오차를 최소로 하는 A_i 값으로 결정한다. 따라서 오차 E 는

$$\sum_i^n E_i^2 = \sum_i^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (6)$$

으로 표현되며 이 값이 최소가 되도록 처리한다.

회귀분석의 유의성은 분산분석표로 진단할 수 있다. 분산분석은 그림 8.19와 같이 총제곱합을 회귀제곱합과 잔차제곱합으로 나누어서 분석하는 방법이다.



[그림 8.19] 회귀직선과 분산분석과의 관계

8.2 동네예보모델

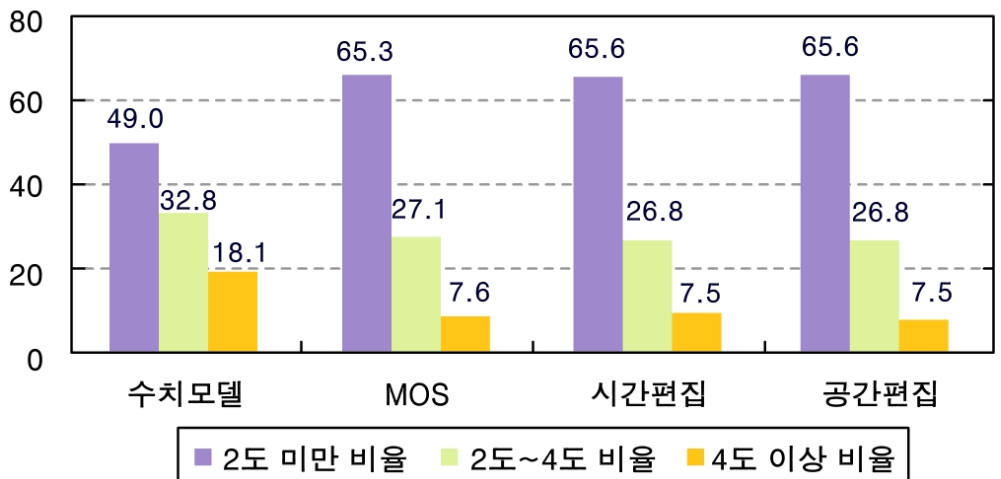
8.2.4.4 동네예보에서 MOS의 기여도

동네예보는 수치예보, 동네예보모델, 시간편집, 공간편집을 거쳐 최종 예보가 생산된다. 동네예보모델의 기여도는 예보요소와 MOS 적용여부에 따라 차이가 있다.

그림 8.20은 3시간 기온 오차의 비율로 오차가 2℃미만, 2~4℃, 4℃ 이상인 비율을 나타낸 것으로 기온예보가 적중했다고 생각하는 예보오차 2℃이하의 비율은 수치예보 49%인 반면에 MOS는 65.3%로 크게 증가하였다. MOS 예보를 사용하는 시간편집, 공간편집 예보의 2℃미만 오차는 65.6%, 65.6%로 검증기간동안 3시간 기온은 수치예보가 75%, MOS가 24%를 기여한다고 볼 수 있다. 특히 MOS의 장점으로서는 수치예보에서 오차 4℃이상인 비율을 18%에서 7.6%로 줄여 비정상적인 오차가 크게 감소시키는 역할을 하였다. 상대습도도 기온과 마찬가지로 상대습도의 오차가 10% 미만인 비율이 수치예보에서는 31%인 반면 MOS에서는 53%로 크게 향상시켰다.

하늘상태는 수치예보나 MOS가 제공하지 않는 예보요소로 수치예보자료를 해석하여 PPM으로 예보가이드를 제공하는 예보요소이다. PPM 및 예보관의 오차비율은 각각 56%, 42%로 예보관의 역할이 중요한 예보요소이며 MOS 개발이 시급한 예보요소이다. 특히 이 결과는 MOS의 중요성의 반증으로 볼 수 있겠다.

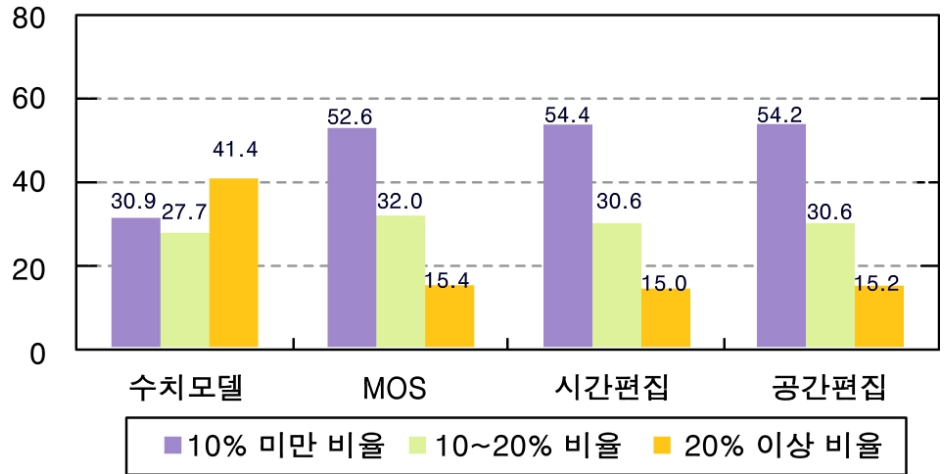
3시간 기온 오차 비율(08.11~09.03) 5시,17시 발표



[그림 8.20] 3시간 기온의 동네예보 단계별 오차

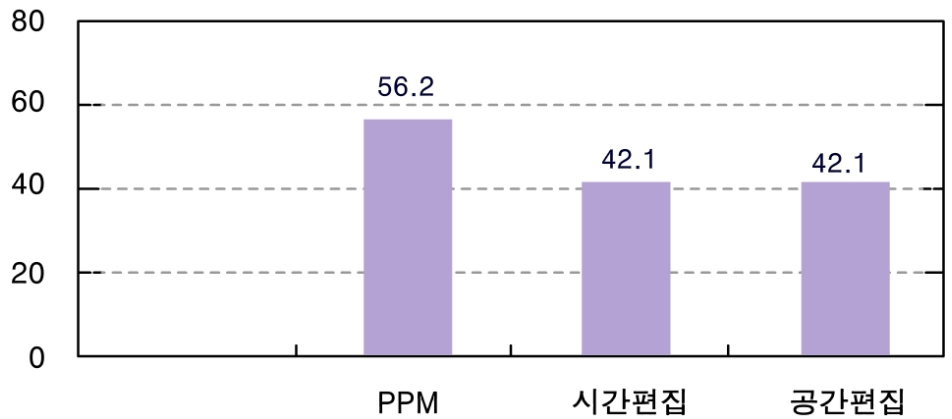
8.2 동네예보모델

상대습도 오차 비율 (08.11~0903) 5시,17시 발표



[그림 8.21] 상대습도의 동네예보 단계별 오차

하늘상태 오차 비율 (08.11~0903) 5시,17시 발표

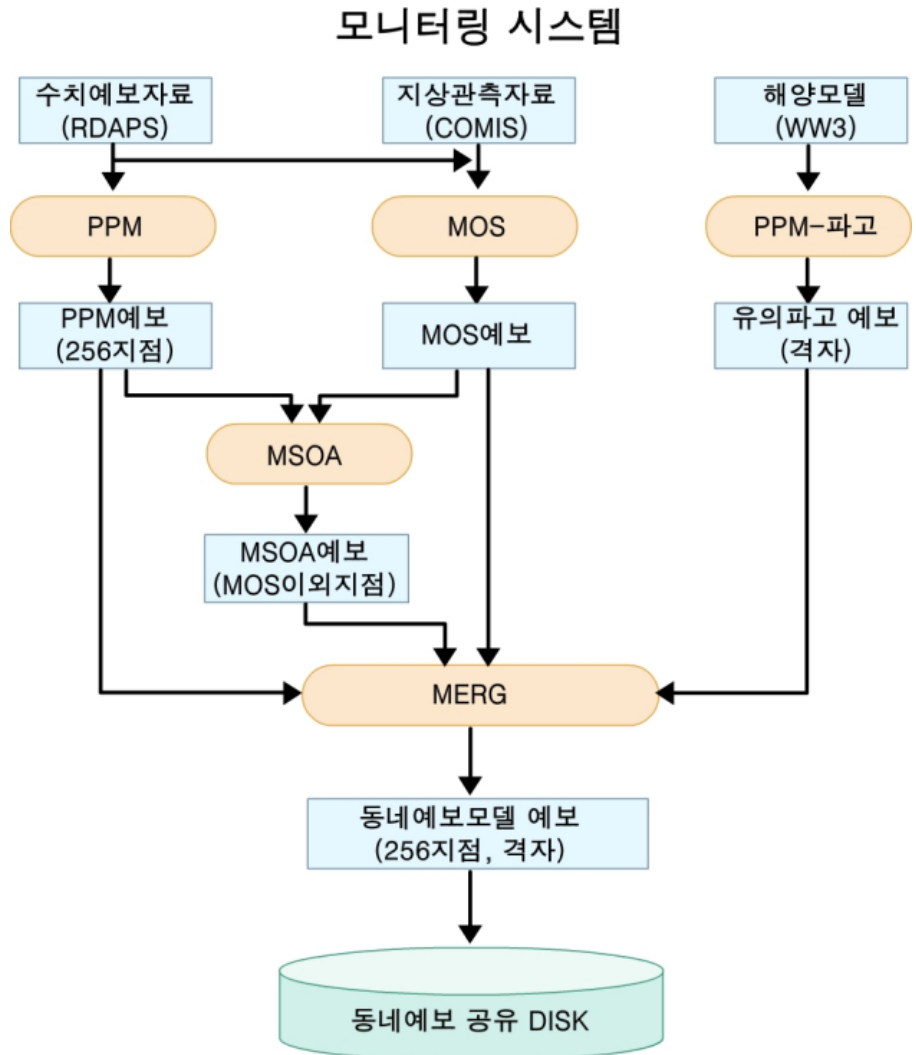


[그림 8.22] 하늘상태의 동네예보 단계별 오차

8.2 동네예보모델

8.2.5 동네예보모델의 운영체계

동네예보모델은 그림 8.23과 같이 NPPM, MOS, MSOA, MERG 4종의 모델이 유기적으로 구성되어 있다.



[그림 8.23] 동네예보모델 운영체계

8.2 동네예보모델

수퍼컴에서 수치예보가 완료되어 지역수치예보모델(RDAPS) 및 해양파고 모델(WW3)이 전송되면 파일명을 분석하여 모델초기시각을 결정하여 이에 따른 동네예보모델인 PPM, MOS를 차례로 실행시킨다.

PPM 및 MOS이 종료되면, PPM 자료와 MOS 자료를 이용하여 MOS가 제공하지 않는 지점의 예보자료를 생산하는 MSOA(MoS Objective Analysis)가 실행시킨다.

해양파고모델(WW3)이 전송되면 파일명을 분석하여 모델초기시각을 결정하고 이에 따른 유의파고 예보자료를 생산하는 PPM-파고를 실행시킨다.

MSOA 및 PPM-파고가 종료되면 NPPM, MOS, MSOA 자료 중 가장 예보 정확도가 높은 자료를 우선적으로 선정하는 MERG가 실행한다. 만약 특정 예보자료가 모델장애 등으로 생산되지 않으면 다음 순위자료를 선정한다.

최종적으로 생산된 동네예보모델은 그래픽편집기 및 동네예보 가이드스 웹페이지(COMIS3-예보-동네예보-MOS)로 전송하여 예보관이 사용할 수 있도록 준비한다.

동네예보모델에서 예보정확도는 MOS, MSOA, NPPM 순으로 높으면, 예보자료 안정성은 PPM, MOS, MSOA이다. 따라서 3종의 예보자료가 제공되었을 때 예보자료 선정 우선순위는 예보정확도를 고려하여 MOS, MSOA, PPM 순으로 선정한다. 예보자료가 장애 등으로 생산되지 않으면 다음 순위의 예보자료를 선정하므로 동네예보모델의 안정성은 더욱 높아진다.

연습문제

1. 동네예보를 정의하고 다른 예보와 다른 점을 설명하시오.
2. 동네예보에서 생산하여 제공하는 예보요소 종류와 생산과정을 설명하시오.
3. 동네예보의 생산과정과 서비스 정책을 설명하시오.
4. 동네예보에 사용되는 통계적 기법(PPM, MOS,..)을 설명하시오.
5. 동네예보의 문제점과 개선방안에 대해 설명하시오.