

수치 예보를 이용한 구름 예보

Cloud Forecast using Numerical Weather Prediction

김영철*(한서대학교), 함숙정*(공주대학교), 전수경(부경대학교)

1. 서 론

구름이란 대기 중의 수증기가 상공에서 응결하거나 승화하여 매우 작은 물방울이나 얼음의 결정으로 변한 것들이 무리지어 공기 중에 떠있어 우리 눈에 보이는 현상을 말한다.(김광식, 1992)

구름이 형성되기 위해서는 대기 중의 수증기가 냉각되어 포화상태에 도달해야하며 그 대기 속에 응결이나 승화에 중심 역할을 할 수 있는 응결핵이 풍부하게 존재해야만 한다. 그리고 대기가 냉각되어 포화에 도달하기 위해서는 상승 운동이 필요한데, 여기에는 공기의 수렴에 의한 거나 열적 대류에 의한 상승, 전선에 의한 상승, 산악에 의한 강제상승 등이 있다.

구름은 형성된 고도에 따라 하층운, 중층운, 상층운 및 수직으로 발달하는 구름으로 분류한다. 그리고 형태에 따라서는 층운형, 적운형, 권운형, 및 비구름의 의미를 갖는 난운형으로 분류된다. 따라서 구름의 관측은 두 가지 분류기준을 조합하여 만들어진 10종 운형을 사용하여 관측하고 있다.

구름은 항공기 운항에 있어서 매우 중요한 기상 요소 중의 하나이다. 낮게 형성된 하층운은 저시일링(low ceiling)을 유발하여 항공기의 이착륙을 어렵게 하며 이는 항공기의 결항과 지연 발착의 원인이 된다. 한편 중상층운은 구름 속에 다량의 과냉각 수적이 존재하여 비행중인 항공기에 착빙 현상을 일으켜 항공기 성능을 저해하고 이로 인해 항공기에 치명적 사고를 유발할 수 있다. FAA 산하, NASDAC(National Aviation Safety Data Analysis Center)의 분석에 의하면 1991~2001년 사이에 총 22,655건의 항공기 사고 중 기상 현상이 직접적인 원인이 되어 발생한 사고는 4,771건으로서 전체 사고의 22.1%에 달했다. 기상 관련사고 4,771건을 현상

별로 분석하면 바람이 44.4%, 시정/시일링이 22.9%, 난류가 9.4%, 착빙이 7.5%, 그리고 밀도 고도, 강수, 뇌우, 바람시어의 순으로 분석되어 구름관련 요소가 두 번째와 네 번째 순위로 나타났다으며 강수나 뇌우 요소에도 구름의 형성과 발달이 밀접하게 관련된다. 한편 시정/시일링 요소 속에는 저시일링이 36.9%, 구름이 14.2%로 나타나서 과반수 이상이 구름과 관련된 것으로 분석되었다.

따라서 구름의 관측과 예보는 강수 예보뿐만 아니라 항공기상 지원에 있어서 필수적인 요소가 된다. 그러나 구름 관측은 운고 측정 장비가 사용되기는 하지만 아직도 육안에 의한 관측이 주를 이루고 있어서 자료의 객관성이 부족하며 예보 역시 구름의 시간적인 변화와 다양성 때문에 상당한 어려움이 따르는 작업 중의 하나이다. 따라서 관측자나 예보관의 경험이나 주관적 판단에 많이 의존하고 있는 실정이며, 객관적 판단 기준이 모호한 상태이다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 여러 가지 방법 중의 하나로서 수치예보 모델을 이용하여 객관적인 구름 예보 자료를 생산하고 이를 이용하여 객관적인 운저고도(층), 운량, 구름대 이동 위치를 결정하여 항공기상 지원에 활용하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 2004년 7월 24일 사례에 대해 종관 일기도, 위성영상자료를 사용하여 종관 특성을 알아보고 기상 수치예보 모델인 MM5를 사용하여 구름 예보자료를 산출함으로써 수치예보를 이용한 구름예보자료 산출 및 구름 예측 가능성을 판단하고자 한다.

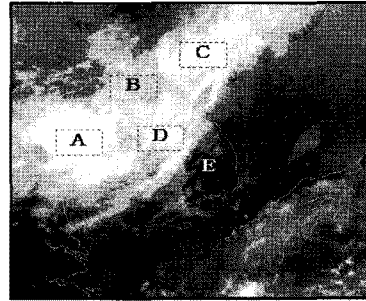
2. 종관 분석

1. 종관 개요

사례 분석을 위해 사용된 종관장은 2004년 7월 24일의 종관장으로서 우리나라 전면으로 다

가오는 기압골에서 발생된 구름대를 수치예보 모델에 이용하여 모사하였다. 모델 결과 자료는 2004년 7월 23일 0000UTC에 수행된 24시간 예보 자료이며 관측 및 실험 자료는 7월 24일 0000UTC의 자료이다.

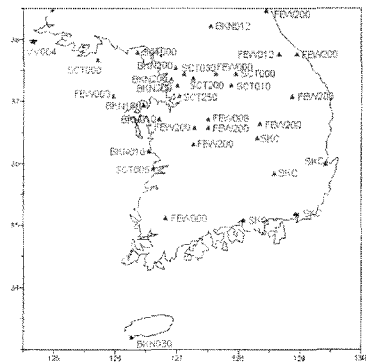
본 사례 분석에서는 하층운 모의 성능이 우수한 사례를 선정한 후, 해당 사례의 중상층운의 모의 성능에 대해서 관측 값과 비교하였다.



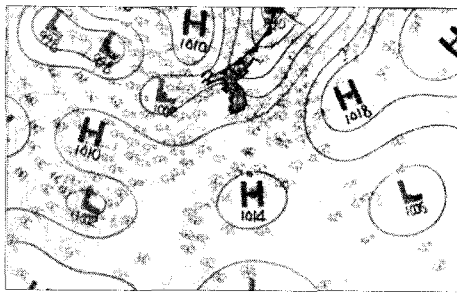
<그림 2> '04년7월24일 0000UTC GOES-9 한반도 합성영상

2. 종관 분석

2004년 7월 23일은 기압골 후면에서 하층운이 열게 끼었으나 고기압의 영향으로 맑은 날씨를 보였다. 한편 7월 24일은 중국 내륙으로부터 이동해온 저기압이 산둥반도에 위치하면서 우리나라 중북부 내륙과 북서지방으로 기압골이 깊게 이어지면서 전선면을 따라 전선성 구름대가 형성되었다. 24일 0000UTC까지는 서해안 지방으로 짙은 안개로 인한 시정 악화를 가져왔으나 기압골 전면인 내륙지방에는 구름이 없는 맑은 날씨를 보였다. 그러나 점차 구름대가 남동진하면서 서해북부 지방부터 약한 강수가 관측되었다<그림1>.



<그림 3> '04년7월24일 0000UTC 하층운관측자료



<그림 1> '04년7월24일 0000UTC 지상일기도

위성영상<그림 2>과 관측값<그림 3>을 살펴보면, 분석의 편이를 위하여 5개 지점을 선정하였다. A지점은 지상 저기압 상층에 하층부터 발달한 찬운정을 지닌 두터운 적란운이 형성되었다. 이 구름은 25일 남동진하여 서해 연안에 위치하면서 강수를 보인다. B지점은 중하층운이, C지점은 중하층운이 발달한 가운데 상층에 열게 구름이 관측되었다. D지점에는 중부 내륙에서는 중상층운이 관측되었으며 기압골 전면 인접한 곳에 하층운이 열게 나타나고 있으며 서해 연안으로는 중하층운과 안개가 관측되었다. E 지점에서는 고기압의 영향으로 구름 없이 맑은 하늘이 관측되었다.

3. 수치예보 실험

1. 모델 개요 및 구성

본 연구에 사용된 MM5는 PSU/NCAR에서 개발된 MM5V3.7을 기반으로 하고 있으며 모델 구성은 <표 1>과 같다. 모델은 수평해상도 90-30-10km이며, 등지격자체계로 구성되어 있다.

보다 세밀한 지점의 예보까지를 산출하기 위하여 남한 영역에 대해 수평해상도 10km 영역까지 설정하였으며 예보는 48시간예보를 생산한다.

모델에 사용된 초기자료는 기상청 GDAPS 1.875도 자료와 NOAA SST 일주일평균자료를 이용한다. GTS자료를 객관분석기법을 적용함으로써 보다 상세지역의 예보 성능을 향상시키고자 하였다.

<표 1> MM5 모델 구성

	Domain1	Domain2	Domain3
모델 버전	MM5 Version 3.7		
수평 해상도	61x71 (90km)	88x97 (30km)	85x97 (10km)
예보 영역	90 sec	90 sec	30 sec
적분 간격	60시간	60시간	48시간
연직 해상도	23층(Top 100hPa)		
예보 기간	60시간		
모델중심위치	37.0°N x 127.0°E		
초기자료	GDAPS분석장(1.875°x1.875°)		
경계자료	GDAPS예보장		
관측자료	GTS 지상·상층 자료		
해수면온도자료	NOAA SST Weekly mean (1.0°x1.0°)		
물리	Reisner		
리	적운모수화과정	Grell	Kain-Fritsch
업	행성경계조건	MRF	Blackadar
선	복사과정	Cloud Radiation	

2. 구름예보 산출법

수치예보모델에서 구름예보를 산출하는 방법으로 상대습도 값을 이용한 방법과 혼합비를 이용한 방법이 있다. 두 가지 방법에 의한 구름예보의 성능 정도를 파악하기 위하여 동일 사례에 대해 구름예보를 비교하였다.

1) 상대습도를 이용한 구름예보

각 격자점에서 구름의 양은 상대습도를 이용한 실험식으로부터 계산되어진다. 계산 시 기준고도에 따라 상·중·하층운 예보가 가능하다. 연직 격자 상에서 해당 층에 대해 설정한 상대습도 임계값을 넘는 경우에 대하여 기준에 따라 구름의 양이 결정된다. 운량은 scatter, broken, overcast를 색상을 달리하여 표시하였다. 구름 예보를 산출하는 경험식은 아래와 같다. 식에서 RH는 상대습도를 나타내며, N은 운량을 나타낸다.

$$N_{\text{하층운}} = (10.0 \times \frac{RH_{\text{하층}}}{100} - 8.5) / 1.5$$

$$N_{\text{중층운}} = 4.0 \times \frac{RH_{\text{중층}}}{100} - 3.0$$

$$N_{\text{상층운}} = 10.0 \times \frac{RH_{\text{상층}}}{100} - 3.0$$

운량(현천분류)	기준
맑음(Clear)	$N \leq 0.2$ 또는 $RH_{\text{하층}} \leq 85$ $RH_{\text{상층}}, RH_{\text{중층}} \leq 75$
구름 조금(Scatter)	$0.2 < N \leq 0.4$
구름 많음(Broken)	$0.4 < N \leq 0.9$
흐림(Overcast)	$N > 0.9$

하층운 예보는 지면에서부터 5000ft까지이며, 모델 자료의 최하층에서부터 850hPa 사이의 최고 상대습도($RH_{\text{하층}}$)를 계산하고 구름 분포(N)에 따라 운량이 결정된다. 중층운 예보는 5,000ft에서 10,000ft까지이며, 모델 자료 850hPa부터 700hPa 사이의 최고 상대습도 계산($RH_{\text{중층}}$)를 계산하고 구름 분포(N)에 따라 운량이 결정된다. 상층운 예보는 10,000ft에서 16,000ft까지이며, 모델 자료 700hPa부터 500hPa사이의 최고 상대습도($RH_{\text{상층}}$)를 계산하고 구름 분포(N)에 따라 운량이 결정된다.

2) 혼합비를 이용한 구름예보

MM5의 모델에서 사용된 명시적 수분물리 과정은 표<1>에서 제시된 바와 같이 Reisner et al.(1998)의 방법이 사용된다. 이 Reisner scheme은 Lin et al.(1983), Rutledge and Hobbs(1983), Murakami(1990)등의 결과에 기반을 두고 개발되었다. 이 방법에서 계산되는 수분의 예측변수는 수증기(water vapor), 구름 물(cloud water), 빗물(rain water), 구름 얼음입자(cloud ice), 눈(snow), 그리고 싸락눈(graupel)이다.

따라서 수치예보 자료 중에서 구름과 관련된 변수 값인 구름 물 혼합비(cloud water mixing ration, g/kg)과 구름 얼음입자 혼합비(cloud ice mixing ration, g/kg)의 합으로 표시되는 총 구름 혼합비(total cloud mixing ration, g/kg)를 이용하여 구름을 계산한다. 또한 상·중·하층운에 대한 계산 결과는 산술적이지 않고 지수적으로 나타낸다.

구름의 양은 <그림 4>와 같이 음영(shading)으로 표시되며, 색이 진할수록 overcast, 열을수록 scatter를 나타낸다. 구름의 양을 가지화하기 위하여 총 구름 혼합비를 이용한 구름 예보값을 위성영상 및 관측값과 비교하여 수치적으로 분류하였다.

다음은 총 구름 혼합비 기준에 따라 구름의 양을 분류한 것이다.

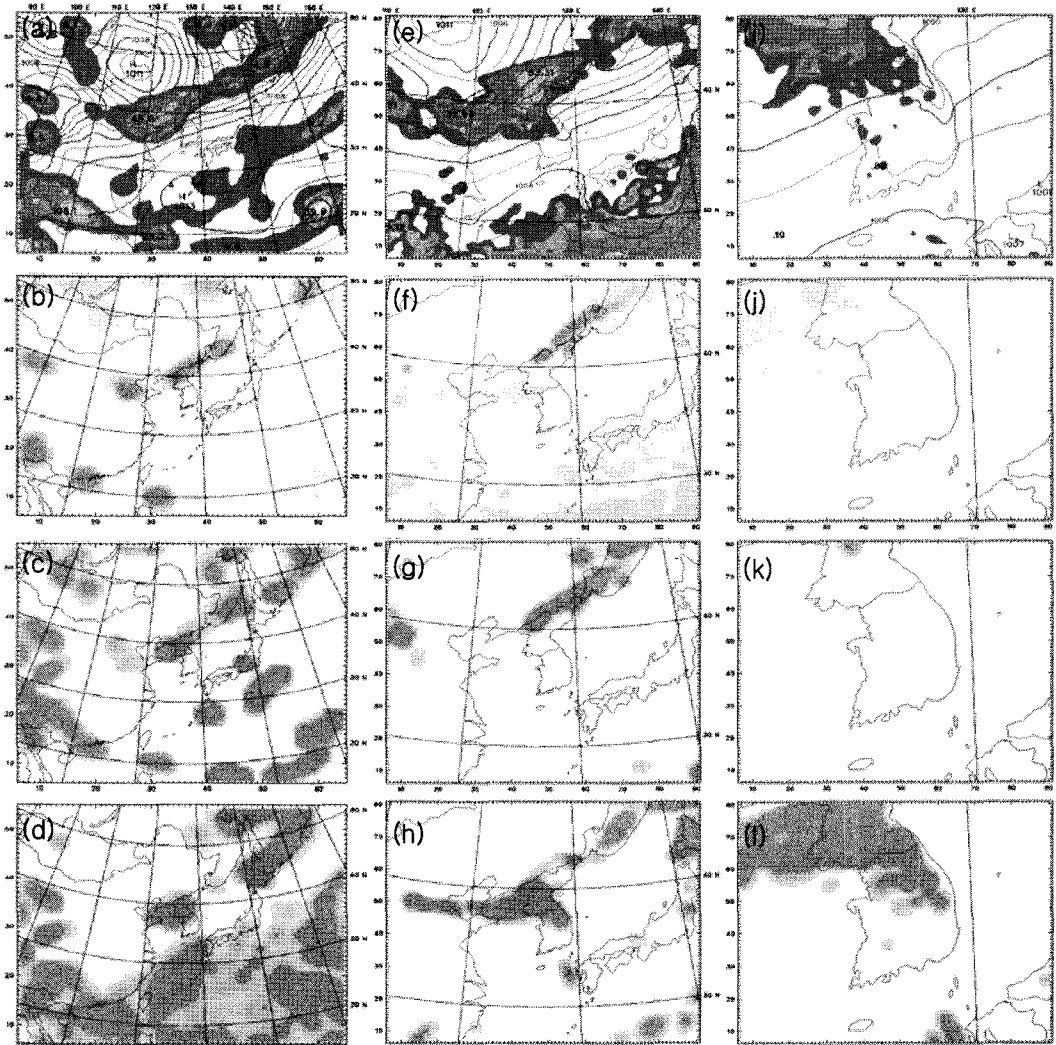
운량	총 구름 혼합비(qcl) 값
Clear	$qcl < 0.00005$
Scatter	$0.00005 \leq qcl < 0.0002$
Broken	$0.00005 \leq qcl < 0.0016$
Overcast	$qcl \geq 0.0016$

하층운은 일반적으로 수직으로 구성되며 하층운 고도는 지상에서부터 약 5000ft(1km)까지이며 안개나 강수로 인한 시정 악화가 존재할 수 있으므로 하층운 예보 시에는 안개나 강수에 대한 감시가 함께 요구된다. 중층운은 일반적으로 과냉각 수적

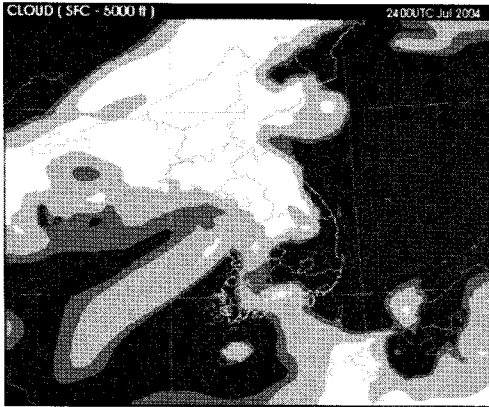
으로 구성되어 항공기가 비행할 때 착빙이 발생할 확률이 대단히 높으며 고도는 약 10,000ft(3km)까지이다. 상층운은 일반적으로 빙정, 과냉각 수적으로 구성되어 고도는 약 20,000ft(6km)까지이다.

3. 수치예보 모델 결과

저기압이 산둥반도로 이동되어오면서 북쪽으로 길게 형성된 전선성 구름밴드는 7월 23일 0000UTC 24시간 예보에서도 확인할 수 있다. 그리고 서북부 지방의 강수도 <그림 4>에서 90km, 30km, 10km 해상도 예보에서도 모두 관측과 유사하게 모사하고 있음을 확인할 수 있다<그림 4(a, e, I)>.



<그림 4> 04년 7월 23일 0000 UTC 24시간 예보 (a-d) 90km 해상도 모델 결과, (e-h) 30km 해상도 모델 결과, (i-l) 10km 해상도 모델 결과, (a,e,i) 12시간 누적 강수량 예보, (b,f,j) 상층운 예보, (c,g,k) 중층운 예보, (d,h,l) 하층운 예보. 운량 표시는 색이 진할수록 Overcast, 옅을수록 Scatter임.



<그림 5>'04년7월23일0000UTC 하층운 24시간예보. 운량표시는 Clear(질은청색), Scatter(열은청색), Broken(하늘색), Overcast(흰색).

<그림 5>는 상대습도를 이용한 하층운 예보이다. <그림 5>에서 보면 Clear는 질은청색, Scatter는 열은청색, Broken은 하늘색, Overcast는 흰색으로 shading하여 하층운의 양을 표시하였다. '04년 7월 23일 24시간예보를 보면, 내륙의 운량, 특히 강원지방의 구름을 다소 많이 모의하였으나 구름대의 유입을 잘 예측하였다. 강원지방의 구름은 강수현상으로 인해 하층운을 과모의된 것으로 판단된다. 이것은 구름예보가 상대습도값을 이용하기 때문에 본 사례 유형의 강수현상이 있을 경우 상대습도를 높게 모의하여 일부지역의 구름을 과모의한 것으로 판단된다.

총 구름 혼합비를 이용한 하층운 예보<그림 4>에서 보면, A지점의 구름이 다소 약하게 모의되긴 하였으나 우리나라로 유입되는 구름대를 잘 모의하였다<그림 4(d, h, l)>. 특히 90km 해상도 예보는 30km 해상도 예보와 10km 해상도 예보에서 나타나는 강원지방의 하층운을 과 모의하지 않고 관측과 가장 유사한 모의성능을 보였다. 중층운 예보는 D 지점의 중층운을 모의하지 못하였으나 B, C, E 지점에 대해서는 좋은 모의 결과를 보였다<그림 4(c, g, k)>. 특히 90km 해상도 예보에서는 A 지점의 중층운도 잘 모의하고 있다. 상층운 예보는 A 지점의 질은 상층운은 90km 해상도 예보에서 잘 모의하고 있으며, D지점의 열은 상층운은 30km 해상도 예보에서 잘 모의하고 있다<그림 4(b, f)>. 그리고 C, E 지점에 대한 상층운예보는 좋은 모의 결과를 보였다. 따라서 본 사례는 90km와 30km 해상도 결과의 구름 예보가 관측과 가장 유사하게 모의하였다.

4. 결 론

객관적인 구름 예보를 위하여 수치예보를 이용한 구름 예보 산출을 시도하였다. 수치예보 결과 자료 중에서 구름과 관련된 변수인 구름 물과 구름 얼음입자 혼합비의 합으로 표시되는 총 구름 혼합비를 이용한 방법과 상대습도를 이용한 방법을 제시하였다. 2004년 7월 24일 사례에 대해 산출된 구름 예보 자료를 관측값과 비교한 결과, 두 가지의 구름 예보 산출 방법 모두 구름 예보 자료로서의 활용 가능성을 제시해 주었다. 상대습도를 이용한 구름 예보는 하층운 예보에 적절한 예보 성능을 나타냈으며, 총 구름 혼합비를 이용한 구름 예보도 상·중·하층운 예보 시 좋은 예보 성능을 나타내었다. 특히 본 사례에서는 총 구름 혼합비를 이용한 구름 예보가 하층운은 물론 중상층운 예보에도 좋은 모의 성능을 나타내었다. 구름의 관측과 예보가 강수 예보 및 항공기상 지원에 매우 중요한 요소임에도 불구하고 아직까지 이에 대한 구체적인 연구는 시도된 바가 없는 실정이다. 또한 구름 예보에 대한 정량적 검증 결과도 없는 실정이다.

본 논문을 통해서 수치예보 결과 자료를 이용한 구름 예보의 가능성을 어느 정도 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문의 결과를 토대로 향후에는 정량적으로 구름 예보 성능을 검증하는 연구가 수행됨으로써 항공기상 예보 지원에 있어서 구름 예보 정확성을 높이는데 기여할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] 김광식, "기상학사전", 향문사 1992
 [2] FAA, "NASDAC review of NTSB weather /related accident", 2005
 [3] Reisner J., R. M. Rasmussen, and R. T. Bruintjes, "Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1998, 1071-1107.
 [4] Lin, Y, -L., Farley, R.D. and Orville, H.D., "Bulk parameterization of the snow field in a cloud model", *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1983, 1065-1092.
 [5] Rutledge, S, A. and Hobbs, P. V., "The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. VIII", *J. Atmos. Sci.*, 40, 1983, 1185-1206.
 [6] Murakami, M., "Numerical modeling of dynamical and microphysical evolution of an isolated convective cloud-the 19 July 1981 CCOPE cloud", *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 68, 1990, 107-128.