

論文

중규모 수치예측 모델을 이용한 한반도 시일링 예보 및 현업 운영 개선에 관한 연구

이승재*, 김영철**

A Study on the Operational Ceiling Forecasting and its Improvement Using a Mesoscale Numerical Prediction Model over the Korean Peninsula

Seung-Jae Lee*, Young-Chul Kim**

ABSTRACT

This paper reviews a ceiling prediction method based on a mesoscale meteorological modeling system in South Korea. The study was motivated by the tendency of higher model ceiling height than the observed in daily operational forecasts. The goal of the paper is to report an effort to improve the operational ceiling prediction skill by conducting numerical experiments controlling a model parameter. In a case experiment, increasing constant values used in the relationship between extinction coefficients and concentration showed better performance, indicating a short-term strategy for operational local ceiling forecast improvement.

Key Words : Ceiling(시일링), Numerical Prediction(수치예측), MM5(중규모모델 버전5), Hydrometeor(대기수상), Extinction(소산)

1. 서론

기상관측 실무에서는 구름이나 차폐현상에 의해 하늘상태가 ‘구름많음’(broken), ‘흐림’(overcast), ‘차폐’(obscuration) 중 하나로 보고될 때, 그 구름이나 차폐현상의 최저 층으로 여겨지는 고도를 ‘시일링(ceiling)’이라고 말하고 있다. 이 조건들을 만족하지 않을 때에는 시일링을 무한대(unlimited)로 간주한다. 권운층의 고도를 모르는 경우에는 고도 값 대신에 사선(/)으로 표시하고, 그 밖의 경우에는 지표면으로부터의 고도를 feet 값으로 표현한다. 차폐(obscuration)가 발생한 경우에는 그 차폐현상의 밑바닥 높이가 아닌, 그 차폐현상 속에서의

연직시정을 나타낸다. 한편 항공기상관측에서는 전운량이 5/8이상일 때의 운저 고도를 나타내는 것으로 시일링을 정의하며, 시일링 고도 앞에 시일링 분류를 지시하는 문자(CIG)가 온다[1].

정확한 시일링 예보는 항공기 운항 여부와 위험 기상 발생 시 항공기 운항의 안전성확보에 결정적 역할을 하기도 한다. 시일링에 대한 국내의 관측적인 연구로는, 박용대[2]가 1961-1962년 기간 동안 시일링 고도의 시간적인 변화 특성 및 노점차와의 관계를 보였고, 박수희와 김종석[3]은 오호츠크해 고기압이 발달하면서 동해안 및 인접 내륙으로 발생하는 저고도 시일링 사례를 통해, 저고도 시일링의 발생 원인을 분석하고 국지 예보칙을 마련한 바 있다. 수치예보 모델을 이용한 시일링 예보로는 Stoelinga and Wanner[4]의 방법이 주로 사용되어져 왔다. 이 방법은 복사량의 감소가 소산계수와 거리에 의해 결정된다는 Beer-Lambert 법칙을 사용하여 시일링 고도를 계산한다. 그러나 악기상

2011년 3월 1일 접수 ~ 2011년 3월 11일 심사완료

* 국립기상연구소 예보연구과

** 한서대학교 항공운항학과

연락처 E-mail: yckim@hanseo.ac.kr

이 발생하는 사례에 대해, 이 방법에 근거한 시일링 예측 값은 관측 값보다 높게 나오는 경향을 보이고, 시일링이 급격하게 떨어지는 시점을 잘 포착하지 못하는 문제점들이 예보기관의 현업 운영에서 보고되어져 왔다.

본 연구에서는 수치 기상예측 모델(numerical weather prediction model)을 이용한 시일링 예측 원리와 방법을 살펴보고, 현업 운영에서 나타난 시일링 예측의 문제점을 개선할 수 있는 단기적인 한 방안에 대해서 논한다.

2. 수치모델에서의 시일링 계산

시일링은 수평방향으로의 가시거리 개념인 시정(visibility)의 다른 형태로서, 강수나 안개, 구름이 있을 때 연직 방향으로의 시정 개념이라고 말할 수 있다. 시정과 시일링에 대한 예측 방정식은 수치 기상예측 모델에 명시적으로 포함되어 있지 않으므로, 모델이 모의(simulation)한 기상 변수들로부터 진단하여야 한다.

그러므로 모델 결과 값을 이용해 시일링 예보를 하기 위해서는 시일링을 산출하는 후처리 과정(post-process)이 필요하다. 본 연구에서 사용된 모델의 명시적(explicit) 수분 물리과정은 혼합상(mixed phase) 방안[5,6]이며, 구름물(cloud water), 빗물(rain water), 눈(snow), 얼음(ice) 등 4가지의 수분 상(phase)을 고려한다.

Stoelinga and Wanner[4]가 사용한 Beer-Lambert 법칙에 따르면, 어떤 물체로부터 거리 x 만큼 떨어져 있는 관측자에게 얼마만큼의 복사량이 도달하는가는, 물체가 방출하는 복사량(I_0)과, 물체와 관측자 사이의 거리(x), 그리고 그 사이에 존재하는 매개체의 소산성(β)에 의해 결정된다. 이것을 수식으로 표현하면

$$\frac{I(x_{obs})}{I_0} = \exp\left[-\int_0^{x_{obs}} \beta(x) dx\right] \quad (1)$$

이다. 여기서, $I(x_{obs})$ 는 거리 x 만큼 떨어진 지점에서 관측되는 복사량, I_0 는 물체가 방출하는 복사량, β 는 소산계수(extinction coefficient), 즉 소산을 일으키는 입자의 단위체적당 단면적이다.

소산계수는 수평 시정(visibility)의 경우에는 상수로 취급될 수 있지만[7], 시일링 계산의 경우에는 연직거리(z)의 함수이다. 또, $\frac{I(x_{obs})}{I_0}$ 는 관측지점에서 관측자가 육안으로 그 물체를 식별할 수 있는 대비 임계값(threshold of contrast)으로써, 통상 0.02의 상수로 둔다. 그래서 식 (1)을 시일링 계산을 위해 다시 써 보면

$$-\ln(0.02) = \int_0^{z_{cld}} \beta(z) dz \quad (2)$$

가 된다. 즉, 수치모델에서 각 수평격자 위에서 식 (2)를 이용하여 z_{cld} 를 계산하면 그 지점에서의 시일링 고도를 구하게 되는 것이다. 시일링은 소산계수 β 를 계산함으로써 구할 수 있으며, β 가 작을수록 시일링 고도는 높아진다.

시일링은 수치모델이 예측한 대기수상(大氣水象, hydrometeor)에 대한 혼합비(mixing ratio)가 임의의 방향으로의 시일링과 어떤 관련이 있는지 밝혀내는 문제로 요약할 수 있다. 모델 결과로부터 각 대기수상의 농도와 양을 알 수 있으며, 각 수분상에 대하여 소산계수와 농도와의 관계는 Stoelinga and Warner[4]의 논문에서 정의된 값들이 사용된다(Table 1). 다만, 기존의 현업 시일링 예보(Table 1에서 CTL)에는 cloud liquid water와 rain에 대해서 그 상수 값이 Stoelinga and Warner[4]보다 2배 큰 값이 사용되고 있다.

이와 같이, 기존의 시일링 예보에 사용된 소산계수 계산 방법은 cloud liquid water와 snow에 대해서는 초기 질량일 경우를, rain과 cloud ice는 초기 질량의 2배를 상수 값으로 하고 있다.

Table 1 The relationship between concentration (C) and extinction coefficient (β)

Hydrometeor	Stoelinga and Wanner[4]	CTL	EXP
cloud liquid water, fog	$\beta = 144.7C^{0.88}$	$\beta = 144.7C^{0.88}$	$\beta = 144.7C^{0.88}$
rain	$\beta = 1.1C^{0.75}$	$\beta = 2.2C^{0.75}$	$\beta = 2.2 \times 20 C^{0.75}$
cloud ice	$\beta = 163.9C^{1.00}$	$\beta = 327.8C^{1.00}$	$\beta = 327.8 \times 20 C^{1.00}$
snow	$\beta = 10.4C^{0.78}$	$\beta = 10.4C^{0.78}$	$\beta = 10.4C^{0.78}$

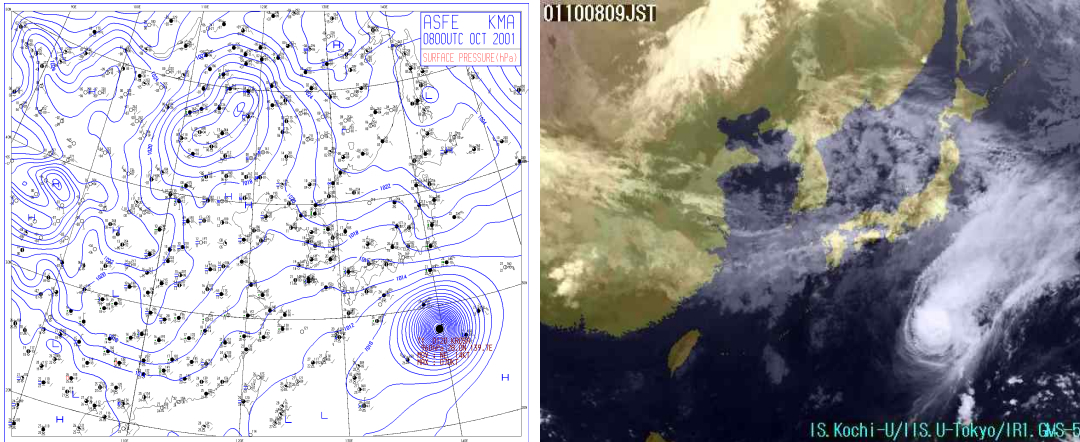


Fig. 1 A surface weather chart (top) and an infrared satellite image valid at 0000 UTC 8 October 2001.

원래 Stoelinga and Warner[4]와 상수 값에서 2배의 차이를 보인 이유는 악기상일 때 관측 값보다 높게 나타나는 시일링 모델 예측 값을 관측 값에 가깝게 하기 위해 조정한 사항으로 보인다.

3. 수치실험

대기수상의 농도 C 는 아래와 같은 식으로 결정이 된다.

$$C = 4\overline{D}_l \epsilon_0 \quad (3)$$

여기서, \overline{D}_l 는 초기 질량의 평균 입자의 지름이며, ϵ_0 는 permittivity of free space 이며 l 는 초기 값 이런 입자의 지름을 을 나타내는 첨자이다. β 는 C 와 관계가 있으므로 위 식을 이용하면 β 는 입자의 지름과도 관계가 있게 된다.

$$D_l = 16.3M_l^{1/2} \quad (4)$$

과 같이 정의되며, M_l 는 평균 질량을 나타낸다. 여기서 우리는 β 는 질량 M_l 과도 관계가 있음을 알 수 있고, 질량 M_l 의 최대값을 사용함으로써 β 를 크게 하면, 기존에 높게 나오는 시일링 고도 예보 값을 낮출 수 있음이 추론 가능하다.

즉, 시일링 고도는 소산계수와 관련성이 있으며 이런 소산계수를 결정하는 농도 C 와의 관계를 어떻게 정의하느냐에 따라 시일링 값의 차이는 현저하

게 나타난다. 그러나 식(1)에서도 알 수 있듯이 시일링 고도 계산 시 소산계수 β 는 지수 안에 들어가는 값이므로 초기 질량의 2배로는 높은 시일링 값을 낮추는데 크게 기여하지 못함을 알 수 있다. 따라서 서론에서 언급한 시일링 고도가 관측 값보다 예보 값이 더 높게 나오는 문제점을 단기적으로 보완하기 위하여, Table 1과 같이 소산계수 β 와 농도 C 의 관계를 보정하는 실험을 수행하였다.

Table 1의 CTL과 EXP는 rain과 cloud ice에 대해서 β 를 늘리기 위해, 농도 C 와 소산계수와의 관계에 나타난 상수 값을 원래의 2배로 한 현행 시스템과, 20배로 새롭게 조정된 실험을 나타낸다. 이렇게 보정 값을 현행의 10배로 늘려서 질량의 최대 값을 사용하는 것이 시일링의 수치예측에 어떤 효과를 가져 오는지를 다음 절에서 사례 실험을 통해서 살펴보았다.

4. 사례 실험

사례 기간은 저고도 시일링 값이 장기간 관측되었던 2001년 10월 8일 사례로서, 북쪽에서 다가오는 저기압으로 인해 강수를 동반한 악기상이 발생했던 경우였다 (Fig. 1). 시일링 수치예보를 위해 4차원 자료동화(FDDA, Four Dimensional Data Assimilation)를 적용하고, 미세물리(microphysics) 방안으로 혼합상(mixed phase)을 사용하는 것이 좋은 결과를 보인다는 Stoelinga and Warner [4]에 근거하여, 본 연구에서는 시일링 예보를 위해 수치모델 *MM5* [8]를 사용하였으며, 12시간 F

DDA 수행 및 혼합상 미세물리 방안을 사용하였다. 또 현업 모델과는 달리 $\Delta t=3600$ 로 하여 모델결과가 좀더 빈번하게 1시간 간격으로 저장되도록 하였다. 그 외의 모델 구성 및 사양은 이승재와 김영철[9]을 따른다.

Fig. 2는 사례실험 결과로서 종전의 시일링 예보 값(a)과 상수 값을 보정한 값(b)을 비교하고 있다. Fig. 2에서 보면 상수 값을 보정한 (b)가 (a)에 비해 전반적으로 낮은 시일링 값을 예측하는 것을 알 수 있다. 이는 기존 CTL 시일링 예보가 중층운 시일링을 잘 모사하지 못하는데 비해, 상수 값을 보정한 EXP 시일링 예보는 그러한 문제점을 어느 정도 개선한다고 여겨진다.

Fig. 3은 동일 사례에 대해 서울 지역에서의 시일링 시계열을 나타내고 있다. 관측 값으로는 공군 지상관측자료인 SAKO 자료를 사용하였다. Fig. 3에서 ◆는 SAKO 자료이며, ■는 기존 CTL 시일링 예보 값이고 ▲는 상수 값을 20배로 보정한 EXP 시일링 예보 값이며, 세로축은 시일링 고도 값으로서 1000 feet 단위이다. 그림에서 시일링이 급격하게 떨어지는 시점의 예보는 CTL 예보 값이나 EXP 예보 값 모두 정확히 예측하지 못하였으나, 9일 09시와 18시에 갑자기 값이 크게 나와 예보오차를 높은 현행의 시일링 예보의 문제점이, 보정 실험의 경우에는 다소 완화되는 것이 확인된다.

5. 결론

본 연구에서는 관측 값보다 높게 나오는 기존의 시일링 수치예보를 보완하기 위하여, 각 수분 상에 대한 소산계수 보정에 대한 수치실험을 수행하였다. 그리고 공군의 지상관측자료인 SAKO 자료의 시일링 고도 값을 이용하여, 기존의 방법 및 새로운 방법에 대한 예측 성능을 상호 비교하였다. 중규모의 수치예보 모델로는 각 기지의 국지적 특성을 잡아내기 힘든 모델 자체의 한계성이 있어서, 시일링의 전환시점의 포착 등에 있어서 예보에 근본적인 어려움이 있다. 그러나, 본 연구에서는 종관장의 예보 경향보다 각 기지별 예보 값의 정확도가 실질적으로 유효한 의미를 가진다는 것을 염두에 두고, 각 기지별 현업 시일링 예보 향상에 초점을 맞추었다.

수치실험 결과, 보정 계수의 조절은 rain과 cloud ice에 대해 소산계수를 높여주어 현행보다 관측 값에 더욱 가까운 시일링 예보 값을 얻어낼 수 있었다.

이는 각 대기수상에 대해서 초기 질량 값을 사용

한 Stoelinga and Warner[4]에 비해, 질량의 최대 값(M_{max})을 사용하면 좀 더 관측 값에 근접한 예보 값이 산출됨을 실제 사례에 대한 수치실험을 통해 확인한 것이다.

농도와 소산계수 관계식의 상수 값을 보정하는 것은 근본적인 해결책은 되지 못한다. 그러나 계수를 조정하는 방법은 시일링 국지 예보의 단기적 skill 향상에 어느 정도 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 단기적인 처방과 아울러서, 중장기적으로는 모델의 분해능 증가, 구름과 관련된 물리과정 모수화(parameterization) 개선, 물리과정 조합의 최적화, 모델 결과 후처리 및 통계 기법의 도입 등이 뒤따라야 할 것이다.

참고문헌

- [1] AMS, 2000: Glossary of Meteorology. 2nd Edition.
- [2] 박용대, 1965: 씨일링(Ceiling) 변화에 대한 소고 - 김포국제공항 관측야장에서 -, 한국기상학회지, 1, 1, 39-46.
- [3] 박수희, 김종석, 1998: mP에 의한 저고도 시일링, 한국기상학회 가을학술발표회, 221-224.
- [4] Stoelinga and Wanner, 1999: Nonhydrostatic, Mesobeta-Scale Model Simulations of Cloud Ceiling and Visibility for an East Coast Winter Precipitation Event. J. Appl. Met., 38, 385-404.
- [5] Reisner, J., R. T. Bruintjes, and R. J. Rasmussen, 1993: Preliminary comparisons between MM5 NCAR/Penn State model generated icing forecasts and observations. Preprints, Fifth Intl. Conf. on Aviation Weather Systems, Vienna, VA, Amer. Meteor. Soc., 65-69.
- [6] Reisner, J., R. J. Rasmussen, and R. T. Bruintjes, 1998: Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124B, 1071-1107.
- [7] 김영아, 서장원, 윤용훈, 김지호, 2003: 시정 산출 알고리즘 및 안개 예측 모델을 이용한 안개 사례 연구. 대기, 13, 432-435.
- [8] Warner, T. T., Y.-H. Kuo, J. D. Doyle, J. Dudhia, D. R. Stauffer, and N. L. Seaman, 1992: Nonhydrostatic, mesobeta-scale, real-data simulations with the Penn State University/National Center for Atmospheric Research mesoscale model. Meteor. Atmos. Phys., 49, 209-227.
- [9] 이승재, 김영철, 2002: 남한지역 상공에서 관측된 항공기난류의 수치예보와 검증, 한국기상학회지, 38, 5, 493-507.

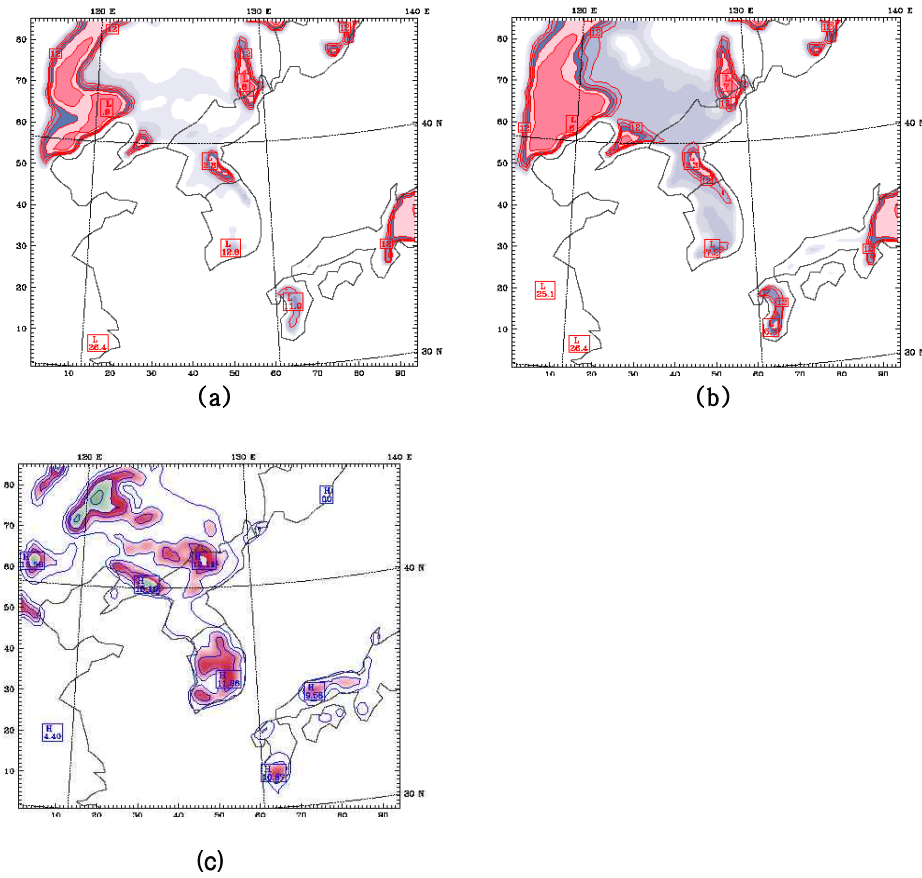


Fig. 2 Numerical experiments for a low ceiling case over the Korean Peninsula at 0400 UTC 9 October 2001. (a) CTL forecast (b) EXP forecast (c) Difference (CTL - EXP) where areas over 6000 feet are shaded.

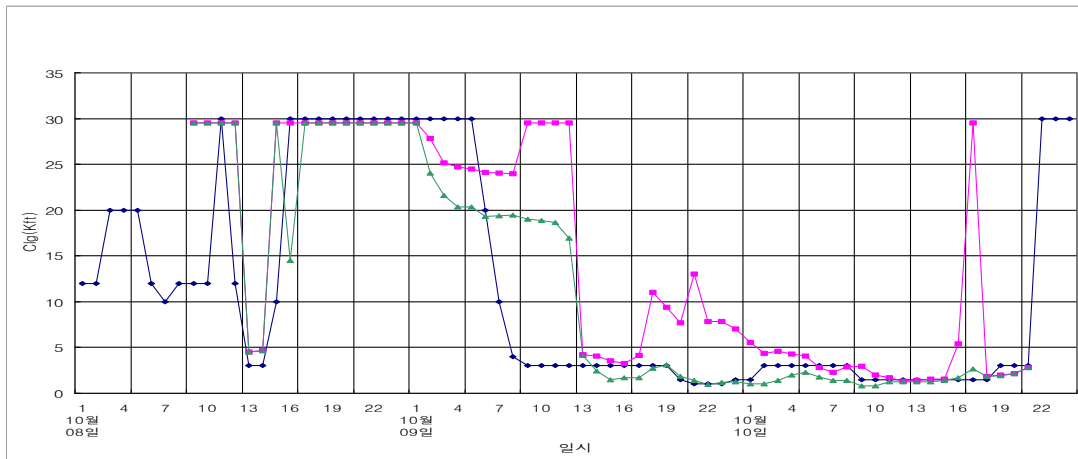


Fig. 3 Time-series of the two model-predicted ceiling forecasts (unit: 1000 feet) compared with the observed value (indigo line) at Seoul during 8-9 October 2001. The pink and green lines are corresponding to CTL and EXP, respectively.