

## 우리 나라 국지 대기순환 모델 결과의 검증에 관한 고찰

### Study on the Evaluation of Local Air Circulation Model Predictions in Korea

오 현 선 · 김 영 성\* · 김 용 준<sup>1)</sup>  
한국과학기술연구원 지구환경연구센터, <sup>1)</sup>기상청 기상연구소  
(2001년 11월 8일 접수, 2002년 1월 24일 채택)

Hyun Sun Oh, Young Sung Ghim\* and Yong Joon Kim<sup>1)</sup>  
*Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology,*  
*<sup>1)</sup>Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration*  
(Received 8 November 2001; accepted 24 January 2002)

#### Abstract

The application of local air circulation models in the field of air pollution research has become more and more popular with increasing demands of detailed wind data for obtaining precise information on spatial and temporal variations. However, the prediction of air circulation near the surface is generally not a simple task because of intricate interactions between surface and air. Particularly in Korea, many areas are mountainous with a complicated shoreline. Because considerable errors could be introduced into the model predictions, it is necessary to confirm their feasibility by comparing model predictions with observations. In this paper, the results from the evaluation of model predictions in selected publications in Korea as well as their procedures were reviewed. Various aspects of errors in the model predictions, such as possible sources, vulnerable conditions, and reduction methods, were discussed.

**Key words** : meteorological model, wind components, terrain effect, atmospheric stability

#### 1. 서 론

기상현상을 모의하기 위한 수치모델 예측 기술은 관측기술이 발달하고 기상현상에 대한 이해가 커짐에 따라 단기 예측부터 중, 장기 예측에 이르기까지 발전되어 왔다. 처음 기상 모델의 주요 관심은 일기 예보였으나 대기오염 문제가 두드러지면서 대기 화

산 계산에 이용하거나 대기 화학 반응과의 접목 등이 시도되고 있다. 또한 계산 용량의 한계, 기술적 문제 등으로 주로 격자크기가 큰 대규모 대기순환을 다루던 기상모델은 국지 관측이 활발해지고 대기 운동에 대한 정보와 지식이 발달하면서 다양한 규모의 대기순환을 모의하게 되었다 (Holton, 1992).

수치모델은 원하는 시간과 공간에 대하여 관측이 충분치 않을 때 현실의 재현 뿐 아니라 예측이 가능하며, 컴퓨터 기기의 발달은 수치모델에 소요되는

\* Corresponding author  
Tel : (02) 958-5817, E-mail : ysghim@kist.re.kr

시간을 크게 단축시킴으로써 최근 이용이 급증하고 있다. 그럼에도 수치모델 예측 기술은 정확도를 향상시키기 위하여 지속적인 연구가 필요한데, (1) 모델의 기본 방정식이 대기의 변환 과정을 표현하는데 한계가 있다는 근원적 문제 외에도, (2) 미분 형태의 기본 방정식을 적분하는 과정을 포함한 수치해석의 많은 처리과정이 근사적이며, (3) 결과의 관측과 분석과정에서도 오차가 발생할 수 있기 때문이다(이동규 등, 1994). 특히 지표 근처의 국지 기상의 모의는 지형, 지물 뿐 아니라 토양 등 복잡한 지표 특성의 영향 때문에 수치모델의 여러 부분 중에서 가장 개선이 필요한 분야의 하나이다. 그러나 인간의 생활과 건강에 영향을 주는 대기오염 물질의 이동 및 확산이 주로 지표근처의 대기운동과 관련하여 이루어지므로, 대기환경 문제와 관련된 지표 근처 기상 변화의 정확한 예측은 더욱 중요하다.

기상 모델의 검증에 대하여 명확한 기준이 마련된 것은 아니나 많은 연구들이 정밀한 조사를 통하여 가능한 대로 객관적인 검증을 하도록 권하고 있다(Seaman, 2000). 이에 따라 우리 나라 기상청에서 현업에 이용되는 기상예보를 위한 모델도 비교적 객관적인 검증 절차를 거치고 있다(기상청, 2000). 우리 나라에서 이용되거나 개발되고 있는 여러 수치모델도 모의 결과에 대하여 나름대로 검증이 시도되는 것으로 추측되나 의외로 검증 방법이나 결과에 대한 언급은 많지 않다. 본 연구에서는, 우리나라에서도 점차 수요가 늘고 있는 해륙풍 등을 포함한 국지규모 대기순환 모델을 대상으로 지금까지 시도된 검증 방법과 결과를 조사하고 오차 원인들을 알아보고자 한다.

## 2. 수치모델의 검증 방법

검증 방법에 대한 절대적인 기준이 있는 것은 아니지만 관측값과 비교하여 예측값의 신뢰도를 확인하고자 할 때 크게 다음과 같은 두 가지 방법이 가능하다. 즉, (1) 관측이 이루어지지 않은 변수에 대하여 이의 증거가 될만한 현상과 비교하는 주관적 검증과 (2) 동일 변수를 1:1로 직접 비교하거나 그 변화 패턴을 통계적인 방법으로 비교하는 정량적 검증이 그들이다(Pielke, 1984). 정량적인 방법으로는

평균제곱근 오차(root mean square error,  $RMSE$ ), 평균을 뺀 평균제곱근 오차( $RMSE_c$ ), 그리고 관측값과 예측값의 표준편차( $\sigma^o$ ,  $\sigma^p$ )를 이용한 방법이 제시되고 있다(Keyser and Anthes, 1977).

$$\begin{aligned} RMSE &= \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_i^p - \phi_i^o)^2 \right]^{1/2} \\ RMSE_c &= \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N ((\phi_i^p - \bar{\phi}^p) - (\phi_i^o - \bar{\phi}^o))^2 \right]^{1/2} \\ \sigma^p &= \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_i^p - \bar{\phi}^p)^2 \right]^{1/2} \\ \sigma^o &= \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N (\phi_i^o - \bar{\phi}^o)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

상첨자  $p$ 와  $o$ 는 각각 모델 예측값과 관측값,  $\bar{\phi}$ 는 평균값,  $N$ 은 자료수이며, ①  $\sigma^p \approx \sigma^o$ , ②  $RMSE < \sigma^o$ , ③  $RMSE_c < \sigma^o$ 의 조건을 만족할 때 모델 예측은 신뢰할 만하다고 알려져 있다.

바람, 기온, 혼합비, 지상기압 등의 변수에 대하여 식(1)과 같이  $RMSE$  등을 이용한 검증이 많이 시도되나 모의결과가 매우 좋은 것으로 판단될 때도 변수에 따라서는 위의 조건을 만족하지 못하는 경우가 있다(Pielke, 1984). Seaman (2000)은 오차의 통계적 수치 뿐 아니라 관측값과 예측값, 또는  $RMSE$ 의 수평, 수직 분포를 함께 살펴볼 것을 권하고 있으며, 추적자 실험도 유용한 검증 수단으로 제시하고 있다.

우리 나라 기상청에서 운영중인 수치예보 모델의 검증에도  $RMSE$ 와 평균편차(mean bias) 등이 이용되고 있다(기상청, 1997, 1998). 또한 예측값과 관측값이 같은 격자 간격으로 주어질 때 예측의 정확도를 판단하기 위하여 기압 또는 지오포텐셜 고도에 대하여 숙련도(SI Score)를 이용하기도 하는데(Teweles and Wobus, 1954),

$$SI = \frac{\sum |e_G|}{\sum |G_L|} \times 100 \quad (2)$$

여기서  $e_G$ 는 예측값과 관측값의 차이,  $G_L$ 은 두 격자점 사이 관측값 또는 예측값의 차이 중 최대값이다. 식(2)의 숙련도는 결국 두 격자점 사이 스칼라 양 변화의 상대적 정확도를 의미한다. 이론적으로 0에서 200까지 분포할 수 있으나 실제로는 보통 20에서 70까지 나타나며, 20일 때 완전한 예보, 70

**Table 1. 예보 시간에 따른 해상 풍향의 편향비율 (기상청, 1998).**

예보 시간	시계바늘 반대방향		시계바늘 방향		적중 비율 (%)
	평균편차 (도)	비율 (%)	평균편차 (도)	비율 (%)	
12시간	30.7	59	31.2	38	3
24시간	35.3	59	32.3	38	3
36시간	39.8	58	38.0	40	2
48시간	44.5	57	43.4	41	2

일 때 실패한 예보로 판단한다(기상청, 1997; 이동규 등, 1994).

모델 결과의 검증에는 평균오차나 편차 (mean error or bias), 절대평균오차 (absolute mean error), 최대오차 (maximum error), 상관계수 등이 이용되기도 한다(기상청, 1997, 1998; 김맹기와 강인식, 1995; Kim and Kimura, 1995). 모델 결과의 검증은 스칼라 양에 한정되는 것이 보통이며, 풍향과 같은 벡터의 검증은 표 1과 같이, 전체 예보된 횟수에 대하여 예보된 풍향이 관측 풍향의  $\pm 45^\circ$  이내에 들어오는 횟수를 백분율로 구하거나 풍향의 예보값이 관측에 비해 시계방향 또는 반 시계방향으로 편향된 비율로 조사하기도 한다.

### 3. 우리 나라 현황

기상청에서는 1997년부터 자료 동화 체계를 갖추어 전구예보 시스템 (GDAPS, Global Data Assimilation and Prediction System)과 지역예보 시스템 (RDAPS, Regional Data Assimilation and Prediction System)으로 수치예보 자료를 생산하고 있으며, 그 밖에 태풍모델, 해양모델, 최고/최저 기온과 강수 확률모델을 운영하고 있다(기상청, 1997). 기상청에서 운영중인 수치 예보 모델은 예보 대상이 우리나라를 모두 포함하기 때문에 규모가 작은 RDAPS도 수평격자의 크기가 40 km에 이를 만큼 크나 현업으로 운영 중인 모델을 대상으로 한 공식 결과라는 점에서 먼저 살펴보았다. 기상청에서는 12시간 간격으로 예측과 동시에 검증이 이루어지는데 월평균 또는 연평균 검증 결과만을 제시하고 있다. 표 2는 기상청의 전구예보 시스템과 지역예보 시스템의 연평균 RMSE 값을 나타낸 것이다. 모의 대상이 상해

**Table 2. 전구예보 시스템과 지역예보 시스템에 의한 24시간과 48시간 예보의 연평균 평균제곱근 오차 (1997. 2~1998. 1 기간; 기상청, 1998).**

예보 시간	전구예보		지역예보	
	850 hPa 에서의 기온 ( $^{\circ}\text{C}$ )	500 hPa 에서의 지오포텐셜 고도 (m)	850 hPa 에서의 기온 ( $^{\circ}\text{C}$ )	500 hPa 에서의 지오포텐셜 고도 (m)
24시간	1.7	20.6	2.8	33.3
48시간	2.2	33.2	3.6	39.5

한 지역예보 모델의 오차가 전구예보 모델의 오차보다 크며, 일면 당연하지만 단기예보보다 장기에보의 오차가 크다.

표 3은 국내 학회에 발표된, 해륙풍 등 지표 근처의 국지규모 대기순환 운동을 모의한 기상모델 결과를 관측자료와 비교한 결과를 조사한 것이다. 편 의상, 대기 경계층의 물리적 과정을 모의하기 위하여 개발된 모델과 기존의 상용 중규모 모델을 적용한 사례를 나누어 정리하였다. 표 3을 보면 우리나라의 국지순환 모델 결과는 대부분 정량적인 통계 방법보다 예측값과 관측값의 시·공간 변화 경향 등을 그림을 이용하여 검증하고 있는데, 모의 기간이 1~2일로 짧고 영역도 작기 때문에 해석된다. 그림을 이용한 검증은 오차의 존재를 한 눈에 볼 수 있는 장점이 있으나 그림만을 이용한 검증은 표현 방법에 따라 왜곡 해석될 가능성이 있다. 이와 같이 볼 때 이화운 등(1998)은 상관 관계를 이용한 정량적 검증을 시도하였다는 점에서 주목할 만하다.

Lee and Shin (1989), 현종훈과 이동규 (1990), 임승욱과 이동규 (1994), 이승우와 이동규 (1998)는 각각 한반도 남부, 제주도, 수도권 지역을 대상으로 지형의 영향과 해륙풍의 발달을 조사하였다. 모두 관측 지점에서 바람벡터를 모의결과와 비교하였는데, 일치하는 경우와 오차가 큰 경우가 공존하여 전체적인 정확도를 판단하기는 어려웠다. Lee and Shin (1989), 이승우와 이동규 (1998)의 결과에서는 해안 지역의 관측값과 모의결과가 대체로 일치하였으나 내륙으로 진입할수록 지형의 영향을 받아 오차가 커지는 현상이 나타났다. 현종훈과 이동규 (1990), 임승욱과 이동규 (1994)의 연구에서는 해륙풍 전환될 때 풍향의 변화가 적절히 모의되지 못하였다.

Table 3. 국지 순환모델 결과의 검증.

연구자	모델	모의대상 및 목적	정역학/ 비정역학	수 평 격자간격	검증방법/결과
(a) 모델 개발					
Lee and Shin (1989)	중규모모델	한반도 남부 대기순환	정역학	10 km	바람 벡터 비교/해안지역은 관측결과와 거의 일치 하였으나 내륙지방의 풍속 오차가 큼.
신동빈과 이태영 (1989)	2차원 중규모모델	동해안과 서해안의 해륙풍 발달 비교	정역학	10 km	바람 벡터 비교/해풍으로의 전환시간이 관측결과와 잘 일치.
박영연과 이태영 (1990)	중규모모델	서울지역 겨울철 바람장에 대한 지형 효과	정역학	2.7~ 2.8 km	관측지점의 풍향, 풍속 평균값 비교/복잡지형에서 오차가 큼.
한종일과 박순웅 (1992)	2차 난류종결모델	대관령 산악지형에서의 야간 경사류	-	500 m	풍향 비교/대체로 유사하나 모델이 실제지형을 반영하지 못할 때 오차가 커짐.
김철희와 진종갑 (1992)	해륙풍모델	1984~1988년 한반도에서의 해륙풍	정역학	4 km	중관풍이 약한 서풍일 때 맑은 날 평균 바람 비교/야간보다는 혼합이 잘되는 주간에 오차가 작음.
오은주 등 (1995)	중규모모델	1994. 8 부산 연안지역 해륙풍 및 산곡풍	정역학	1 km	해륙풍이 발달한 7일간 평균값과 v-velocity 및 바람벡터 비교/대기가 안정한 야간과 새벽에 오차가 큼.
이화운 등 (1998)	중규모모델	부산 연안지역 해륙풍 및 산곡풍	정역학	1 km	AWS <sup>a</sup> 평균 바람벡터와의 상관관계 분석/비교적 상관성이 큼.
(b) 기존 모델 적용					
현종훈과 이동규 (1990)	MM4 <sup>b</sup>	중관풍 영향이 없을 때 제주도의 해륙풍 및 산곡풍	정역학	4 km	1980~1988 기간 주풍을 제거한 평균값과 비교/해륙풍 전환시간대에 풍향, 풍속 오차가 큼.
임승욱과 이동규 (1994)	MM4	1988. 5. 1 제주도 해륙풍 및 산곡풍에 대한 중관바람의 영향	정역학	4 km	측정지점의 바람비교/해륙풍 전환시간대 풍향의 오차가 큼.
김민정과 이동규 (1998)	ARPS <sup>c</sup>	한반도 남서 연안지역 바람장 및 구름, 강수형성	비정역학	4 km	직접비교 없음/국지풍 순환과정이 유사한 경향을 나타내고 있음을 설명.
이승우와 이동규 (1998)	MM4	수도권 및 서해안 지역 해륙풍	정역학	4 km	바람 벡터 비교/해안지역보다 내륙에서 오차 큼.
오현신과 김영성 (2000)	RAMS <sup>d</sup>	여수지역 해륙풍순환	비정역학	333.3 m	풍향, 풍속, 기온의 일변화를 맑은 날 평균값과 비교/대체로 유사하나 계산치의 풍향, 풍속 변화가 큼.

<sup>a</sup>Automatic Weather Station; <sup>b</sup>Mesoscale Model; <sup>c</sup>Advanced Regional Prediction System; <sup>d</sup>Regional Atmospheric Modeling System

2차원 중규모 모델을 이용하여 동해안과 서해안의 해륙풍의 발달을 비교한 신동빈과 이태영(1989)의 연구에서는 풍향, 풍속의 오차를 판단하기는 어려우나 지형의 영향에 의하여 동해안의 해풍이 더 빨리 발달하고 더 빨리 육풍으로 전환되는 현상이 관측결과와 일치하는 것을 보여주었다. 역시 한반도의 해륙풍을 모의한 김철희와 진종갑(1992)은 비교 결과를 제시하지는 않은 채 논의를 통하여 야간에 내륙의 강한 바람과 주간에는 바람장의 모습 등이 관측결과와 잘 일치함을 주장하였다.

오은주 등(1995)과 이화운 등(1998)은 부산 연안 지역을 대상으로 여름철 해륙풍이 발달한 맑은 날의 관측값을 평균하여 모의결과와 비교하였다. 오은주 등(1995)은 바람의 남북성분만을 관측값과 비교하였는데, 해풍이 발달한 주간보다 대기가 안정한 새벽과 야간에 오차가 컸다. 이화운 등(1998)은 바람 벡터와 함께 관측값과 예측치의 상관성을 조사하였는데, 해안 근처 관측지점에서 풍향, 풍속 모두 상관성이 매우 크게 나타났다. 오현선과 김영성(2000)은 여수반도에서의 수치모의를 통하여 바람 성분과 기온의 일변화를 여름철과 겨울철 맑은 날의 평균값을 대상으로 비교하였다. 비정역학 방정식을 이용하여 격자간격을 약 333 m까지 세밀하게 모의하였으며 예측값은 여수관측소의 관측결과와 대체로 유사하였다.

해륙풍 외에 박영현과 이태영(1990)은 서울 지역을 중심으로 겨울철의 바람장을 모의하였고 한종일과 박순웅(1992)은 산악 지형에서 야간 경사류를 모의하였다. 박영현과 이태영(1990)은 풍향, 풍속 예측값을 서울의 5개 지점에서 관측값 평균과 비교한 결과, 비교적 복잡지형에 위치한 기상청 위치에서 오차가 크고, 단순지형에 위치한 지점에서 모의결과는 관측값과 잘 일치하였다. 한종일과 박순웅(1992)은 모델에 적용한 지형이 실제 지형을 잘 나타내고 있는 곳에서는 관측결과와 잘 일치하였으나, 모델에서 지형의 모습이 완만하게 변형된 곳에서 오차가 발생한 것으로 보고하였다. 김민정과 이동규(1998)는 국지풍 모의와 함께 강수발생을 모의하기 위하여 비정역학 모델을 이용하였는데, 국지풍 모의결과와 관측된 바람의 순환과정이 유사하다는 것을 설명하고 있을 뿐, 강수 모의결과와 관측자료의 비교에 대하여서는 설명이 충분하지 않았다.

그 밖에 송병현 등(1999)은 여의도를 중심으로 한 지역에 대한 미기상적 바람장을 모의하였으나 상세한 관측자료가 없어 모의결과를 검증하는데는 한계가 있었다. 국지 순환이 아닌 대규모 대기순환을 대상으로 한 경우에는 대상 영역이 넓고 격자간격이 크기 때문에 그림을 이용하여 오차의 지역적 분포 등을 조사하기도 한다(조민수 등, 1997; Oh *et al.*, 1994).

#### 4. 오차의 원인

자연의 물리적 법칙을 완전하게 수치화할 수 없다는 수치 모델의 근본적 한계를 제외한다면 표 3의 연구들은 대부분 지형의 영향을 가장 큰 오차의 원인으로 생각하고 있다. 즉, 계산 과정의 불안정성을 제거하기 위하여 가파른 경사 등을 완만하게 처리하는 경우가 많은데 이러한 과정에서 제곱과 산지의 모습이 달라지기 때문이다.

산지나 해안 등 지표면의 특성이 다양할수록 국지규모 대기순환 모델로부터 정확한 결과를 얻기 위하여서는 모델이 허용하는 한 입력자료가 시간적, 공간적으로 상세하여야 한다. 특히 대기오염 물질의 확산, 이동과 관련된 대기운동은 때로는 분 단위의 시간 변화와 함께 각각 수 km, 수 m 이내 수평, 수직 방향으로 큰 변화를 일으킬 수 있다. 그러나 실제 모델 입력자료는 이와 같이 상세하기 어려우므로 지표면 근처의 모델링은 격자규모에 제한이 있을 수밖에 없다. 그러나 수직격자의 해상도가 낮은 경우 하층의 역전층과 같은 현상을 재현할 수 없으며, 실제로 초기 및 경계조건에 이용되는 관측자료의 해상도가 오차의 원인이 되기도 한다(Nicholls *et al.*, 1995). 표 3에서 이용된 모델의 수평 격자 간격은 대부분 약 4 km이며, 비정역학 방정식을 이용한 경우 수평격자 크기가 최소 333 m까지 시도되었다. 그러나 관측자료가 충분히 조밀하지 않는 상황에서 모델의 격자 거리만을 줄일 수 없으며, 이러한 한계를 극복하고자 자료동화 방법이 이용하기도 한다(김용상 등, 1997). 수치모델에 있어서 자료동화의 적절한 활용은 오차를 약 25~60% 감소시킬 수 있다는 연구사례들이 보고되고 있다(Seaman, 2000; 이상미, 1999; Fast, 1995).

토양의 열, 수분 함유량 등 지표 특성과 관련된 관측자료가 부족한 것도 국지규모 대기순환 모델 이용에 큰 장애가 될 수 있다(Nicholls *et al.*, 1995). 특히 안정한 대기에서 지표의 열, 수분량의 교환은 토양의 수분 함유량에 매우 민감하므로 이들 자료가 부정확할 때 오차가 더욱 커지고(McQueen *et al.*, 1997) 대기가 안정할수록 지형의 영향이 커지면서 바람장의 모습이 복잡하여지는 것이 보통이므로(오현선과 김영성, 2000) 오차는 더욱 확대될 수 있다. 표 3의 김철희와 전종갑(1992), 오은주 등(1995)의 연구에서 대기가 안정할 때 오차가 더욱 커진 것은 이와 같은 이유 때문일 수 있다.

## 5. 결 론

수치 모의에 의하여 산출되는 주요 기상요소로는 기온, 습도, 기압 또는 고도, 바람 등이 있으나 본 연구에서는 바람 성분에 대한 모의결과의 검증은 주로 조사하였다. 기온에 비하여 바람은 지형 등 국지 변화에 민감하여 시·공간 변화가 다양하기 때문이었다. 바람 성분 외에 구름과 강수 등 대기 중 수분의 정량화도 쉽지 않아 강수현상을 목적으로 하는 모의실험을 제외하고는 대기 중 구름이나 수분의 영향은 최소화하는 것이 보통이다.

본 연구의 바람성분 모의에 대한 검증결과를 정리하면 공통적으로 대기가 안정할수록, 지형이 복잡할수록 지표의 영향이 커지면서 오차가 확대되는 경향이 있었다. 역으로 지형이 단순하거나 수직혼합이 활발하여 상대적으로 지형의 영향을 덜 받을 때 관측값과의 오차도 작았다. 이론적으로는 정확하고 상세한 지표 자료를 이용함으로써 오차를 줄일 수 있으나 특별 관측 등을 통하여 자료를 준비하지 않는 한 관측자료가 부족하여 쉬운 일이 아니다. 이와 같은 이유로 Seaman(2000) 등은 수치 모델링에서도 가능한 한 자료동화 형태의 관측값을 이용한 보정을 권하고 있다.

국지순환 모델이 좁은 영역에서 주로 일 단위 변화를 모의함에 따라 관측값의 수가 많지 않아 모의 결과와 관측값을 통계적으로 비교하는 대신 그림을 이용한 1:1 비교가 많았다. 반면, 모델을 상시 운영하면서 많은 자료를 확보하여 연단위 혹은 월단위

검증이 가능한 기상청의 예보모델의 경우 통계적 방법을 이용하는 등 훨씬 체계적 검증이 가능하다. 그러나 이와 같은 경우도 오차의 시·공간 분포를 살피기 위한 노력은 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원의 자체 지원으로 시작되어 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적인 확보기술개발사업(과제번호 5-7-1)의 일환으로 마무리 되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 기상청(1997) '96년도 기상청의 수치예보 검증, 기상청 수치예보과 기술보고서 97-1.
- 기상청(1998) '97 수치예보 모델 검증 결과 보고서, 기상청 수치예보과 기술보고서 98-3.
- 기상청(2000) 1999년 고분해능 모델의 성능과 평가, 기상청 수치예보과 기술보고서 2000-5.
- 김맹기, 강인식(1995) 한반도 주변 해상에서의 바람의 응력, 현열속, 잠열속에 대한 진단적 모델링, 한국기상학회지, 31, 1-13.
- 김민정, 이동규(1998) 한반도 남서 연안의 국지풍 순환과 지형성 강수에 관한 연구, 한국기상학회지, 34, 128-146.
- 김용상, 차주완, 서애숙, 정효상(1997) LAPS(Local Analysis and Prediction System)를 활용한 한반도 지역의 기상현상 분석, 한국기상학회 가을 학술발표회, pp. 31-34.
- 김철희, 전종갑(1992) 중관 바람을 고려한 한반도에서의 3차원 해륙풍 수치 모의, 한국기상학회지, 28, 165-181.
- 박영현, 이태영(1990) 서울에서의 겨울철 바람장에 관한 수치적 연구, 한국기상학회지, 26, 247-262.
- 송병현, 부경은, 박지용, 조하만, 이보람(1999) 여의도 공원 조성에 의한 국지 기상 변화 연구 : 바람장을 중심으로, 한국기상학회 봄 학술발표회, pp. 209-210.
- 신동빈, 이태영(1989) 한반도 중부 지방에서의 해륙풍 순환에 미치는 지형의 영향, 한국기상학회지, 25, 56-69.
- 오은주, 이화은, 김유근(1995) 산악성 해안도시 지역의 대

- 기흐름장의 수치모의, 한국기상학회지, 31, 229-242.
- 오현선, 김영성 (2000) 여수지역 대기확산의 수치 모사-II. 일사에 의한 일변화, 한국대기환경학회지, 3, 225-236.
- 이동규, 홍성유, 봉종현, 이천우, 이희상 (1994) 한국의 현업 제한구역 수치예보모델 시스템의 연구, 한국기상학회지, 30, 413-422.
- 이상미 (1999) 대기오염 수치모의를 위한 기상장의 구성 및 기상장의 mass inconsistency가 대기오염 수치모의의 결과에 미치는 영향에 대한 연구, 서울대학교 대학원 대기과학과 이학박사학위논문.
- 이승우, 이동규 (1998) 수도권 지역에서 지표 및 지형효과에 따른 국지규모 대기순환의 수치실험, 한국기상학회지, 34, 1-19.
- 이화운, 이동규, 이태영, 김유근, 원경미, 한한우 (1998) 연안 도시 지역의 대기 흐름 시뮬레이션, 한국기상학회지, 34, 75-86.
- 임승욱, 이동규 (1994) 종관규모 배경에 대한 제주섬에서 대기흐름의 수치모의, 한국기상학회지, 30, 377-399.
- 조민수, 오성남, 김정우 (1997) 대기 대순환 모형의 수증기 분포 평가, 한국기상학회지, 33, 289-297.
- 한종일, 박순용 (1992) 간단화한 2차 모멘트 난류 종결을 이용한 산악지형에서의 야간 경사류의 수치 실험, 한국기상학회지, 28, 225-241.
- 현종훈, 이동규 (1990) 3차원 중규모 모델을 이용한 제주도에서의 해륙풍 모의, 한국기상학회지, 26, 121-136.
- Fast, J.D. (1995) Mesoscale modeling and four-dimensional data assimilation in areas of highly complex terrain, *J. Appl. Meteor.*, 34, 2762-2782.
- Holton, J.R. (1992) *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 3rd Ed., Academic, San Diego, Calif.
- Keyser, D. and R.A. Anthes (1977) The applicability of a mixed-layer model of the planetary boundary layer to real-data forecasting, *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1351-1371.
- Kim, Y.S. and R. Kimura (1995) Error evaluation of the bulk aerodynamic method for estimating heat flux over the sea, *J. Korean Meteor. Soc.*, 31, 399-413.
- Lee, T.Y. and D.B. Shin (1989) A numerical study of the air flow over South Korea, *J. Korean Meteor. Soc.*, 25, 276-288.
- McQueen, J.T., R.A. Valigura, and B.J. Stunder (1997) Evaluation of the RAMS model for estimating turbulent fluxes over the Chesapeake Bay, *Atmospheric Environment*, 31, 3803-3819.
- Nicholls, M.E., R.A. Pielke, J.L. Eastman, C.A. Finley, W.A. Lyons, C.J. Tremback, R.L. Walko, and W.R. Cotton (1995) Applications of the RAMS numerical model to dispersion over urban areas, in *Wind Climate in Cities*, J.E. Cermak, A.G. Davenport, E.J. Plate and D.X. Viegas (Eds.), Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands, pp. 703-732.
- Oh, J.H., Y. Noh, J.J. Baik, and S.M. Lee (1994) Implementation of cloud-topped mixed layer in a general circulation model, *J. Korean Meteor. Soc.*, 30, 615-630.
- Pielke, R.A. (1984) *Mesoscale Meteorological Modeling*, Academic, Orlando, Flor.
- Seaman, N.L. (2000) Meteorological modeling for air-quality assessments, *Atmospheric Environment*, 34, 2231-2259.
- Teweles, S. and H. Wobus (1954) Verification of prognostic charts, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 35, 455-463.