

# An Object-Based Verification Method for Microscale Weather Analysis Module: Application to a Wind Speed Forecasting Model for the Korean Peninsula

Hea-Jung Kim<sup>a,1</sup> · Hwa-Ryun Kwak<sup>b</sup> · Sang-il Kim<sup>c</sup> · Young-Jean Choi<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Department of Statistics, Dongguk University;

<sup>b</sup>Institute of Statistical Information and Technique, Dongguk University;

<sup>c</sup>Center for Atmospheric Science and Earthquake Research

(Received November 12, 2015; Revised December 7, 2015; Accepted December 11, 2015)

---

## Abstract

A microscale weather analysis module (about 1km or less) is a microscale numerical weather prediction model designed for operational forecasting and atmospheric research needs such as radiant energy, thermal energy, and humidity. The accuracy of the module is directly related to the usefulness and quality of real-time microscale weather information service in the metropolitan area. This paper suggests an object based verification method useful for spatio-temporal evaluation of the accuracy of the microscale weather analysis module. The method is a graphical method comprised of three steps that constructs a lattice field of evaluation statistics, merges and identifies objects, and evaluates the accuracy of the module. We develop lattice fields using various evaluation spatio-temporal statistics as well as an efficient object identification algorithm that conducts convolution, masking, and merging operations to the lattice fields. A real data application demonstrates the utility of the verification method.

Keywords: lattice field of evaluation statistics, microscale weather analysis module, object-based verification method, spatio-temporal data, time series statistic

---

## 1. 서론

정부는 기상정보 선진화사업의 일환으로 차세대도시농림융합기상사업단(2012년 설립)을 발족시켜 도시 및 농림지역을 대상으로 국지규모의 기상정보 및 수요자 맞춤형 실시간 기상정보 서비스플랫폼인 차세대도시농림융합스마트기상서비스(weather information service engine; WISE)를 개발하는 사업을 진행하고 있으며, 2019년부터 WISE가 수도권에서 시범 운영될 계획이다 (Korea Meteorological Administration, 2011). 이 사업은 초고분해능(1km × 1km 미만)의 관측 인프라를 구축하여 얻은 기상정보를 통해 도시농림지역과 그 주변의 대기 경계층을 포함한 대기하층을 보다 정확하게 예측할 수 있는

---

This work was funded by the Weather Information Service Engine Program of the Korea Meteorological Administration under Grant KMIPA (2012-0001-1).

<sup>1</sup>Corresponding author: Department of Statistics, Dongguk University, 30, Pildong-ro 1-gil, Jung-gu, Seoul 04620, Korea. E-mail: kim3hj@dongguk.edu

다양한 미기상해석모듈(micro scale weather analysis module)을 개발하여, 도시농림지역의 경제 및 사회활동에 유용한 기상정보를 실시간으로 정확하게 제공할 뿐 아니라 최근에 들어 대도시의 양적인 팽창으로 인해 유래 없이 발생한 도심의 기상재해를 예방하는 것을 목표로 하고 있다(www.wise2020.org).

WISE개발에는 초고분해능에 적합한 WRF(weather research and forecasting model)기반의 도시미기상모델의 개발이 필요하며 (Kim 등, 2008; Boo와 Oh, 2000; Toshiaki 등, 1999), 이러한 모델은 초고속 물리과정모듈 및 자료동화모듈을 포함하는 다양한 미기상해석모듈을 기반으로 개발된다. 미기상해석모듈이란 복사에너지, 열, 습도 등의 순환을 시-공간적으로 세밀하게 설명하고 모의실험 할 수 있도록 개발한 초고분해능(1km × 1km 이내)의 기상모델이다. 따라서 WISE의 정확성과 신뢰성을 담보하기 위해서는 먼저 WISE개발에 사용되는 미기상해석모듈의 결과물(진단 및 예측 정보)의 정확도를 검증할 수 있는 진단 및 평가도구가 필요하다. 특히, 미기상해석모듈의 진단 및 평가에는 그 모듈로부터 생성되는 출력물의 시-공간적인 특성에 맞게 정확도를 검증할 수 있는 다차원적인 평가방법이 필요하다 (Mora-Ramirez와 García, 2012).

기존에 사용되고 있는 기상모델 진단·평가 방법에는 Wilks (1995)와 Doswell 등 (1990)이 개발한 기술통계에 의해 기상모델을 검증하는 측도지향접근법(measure-oriented approach)과 Davis 등 (2006a, 2006b), Skok 등 (2009, 2010), Hitchens 등 (2012), Li 등 (2015) 외 여러 학자에 의해 여러 형태로 개발된 객체기반-진단·평가법(method for object-based diagnostic and verification; MODE)이 있다. 전자는 예측모델의 성능을 총체적으로 점검하기에는 유용하나 특정 예측오차들에 대한 구체적인 정보를 제공하는 기능이 없으며 예보관이나 기상분석관의 경험적인 판단과도 상당히 불일치하여, 간헐적이고 국지적인 기상정보의 품질에 대한 검증을 할 수 없는 약점을 가지고 있다 (Davis 등, 2006a). 이에 반해, 후자는 모델검증결과가 전문가의 주관적인 검증결과와 유사하며, 피드백을 통해 예측모델의 개선이 가능할 뿐 아니라, 예측값 사용지침을 사용자에게 제공할 수 있는 기능을 가지고 있어, 미국기상연구소의 DTC(developmental testbed center)는 WRF(weather research and forecasting) 모델검증에 MODE를 사용하고 있다 (Developmental Testbed Center, 2013). 그러나 MODE는 WRF모델이 출력한 횡단면예측자료의 정확성을 단순하게 검증하여 모델을 진단·평가하는데 초점을 두고 있어, 시-공간적인 출력물을 생산하는 미기상해석모듈의 검증에 필요한 진단·평가기능이 미비한 문제점을 가지고 있다.

본 연구는 미기상해석모듈이 생산하는 출력물의 정확성과 변동성을 시-공간적으로 진단·평가하는 기능을 개발하여 MODE를 개량 및 확장시킨 객체기반-진단평가법(extended MODE; 이하 EMODE로 표기)를 제안하고, 실증적 자료 분석 예를 통해 개발된 EMODE가 미기상해석모듈 출력물의 시-공간적인 특성을 반영시켜 모듈을 검증하는데 유용한 것임을 보이고자 한다. 이를 위한 본 논문의 체제는 다음과 같다. 2장은 미기상해석모듈이 생산하는 출력물의 정확성과 변동성을 시-공간적으로 진단·평가하는데 사용되는 통계를 제안하고 그 사용법에 대해 설명한다. 3장은 미기상해석모듈이 예측한 시계열 출력장의 결측값 처리 및 해상도 향상 단계와 함께, EMODE의 절차인 출력장 합성(convolution), 가면화(masking), 객체식별 및 병합(object identification), 모듈의 정확성 검증을 단계별로 설명한다. 4장은 EMODE를 한반도의 풍속시계열자료에 적용시켜, EMODE가 미기상해석모듈의 정확성 검증에 유용한 것임을 보인다. 마지막으로, 5장은 본 논문의 결론에 대해 논한다.

## 2. 미기상해석모듈 출력물의 정확성 진단·평가통계

이 장은 미기상해석모듈의 정확성을 시-공간적으로 검증하기 위해 사용한 RMSE(root mean square prediction error), 시계열 변동패턴(또는 스펙트럼함수)의 동일성 검정통계, 시계열 그룹들의 변동패턴 동일성 검정통계, 그리고 시계열 그룹들의 평균계열의 동일성 검정통계를 설명한다. 이들 통계는 위-경

도 격자점에서 미기상해석모듈이 출력하는 예측시계열과 관측 장비를 통해 얻은 관측시계열 간에 존재하는 예측오차와 변동패턴의 차이를 시-공간적인 특성에 맞게 진단·평가하여 미기상해석모듈의 정확성과 변동성을 동시에 검증할 수 있게 한다.

## 2.1. RMSE 출력장

미기상기상모듈의 검증에서 가장 중요한 평가기준은 모듈예측물의 정확도(또는 적합도)이다. 정확도는 모듈의 예측값이 이미 관측된 자료를 어느 정도 재현시킬 수 있는지를 나타내는 척도이다.  $\{X_{1,t}(s), t \in T\}$ 와  $\{X_{2,t}(s), t \in T\}$ 는 검증대상인 미기상해석모듈이 출력격자장  $S$ 위의 격자점  $s$ (위도-경도 격자점)에서  $n$ 기간 동안 출력한 예측시계열과 관측한 관측시계열이라 할 때, 미기상해석모듈이 출력한 예측값의 RMSE 출력장(lattice field)이란 격자장  $S$ 위의 각 격자점  $s \in S$ 들이

$$\text{RMSE}(s) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_{1,t}(s) - X_{2,t}(s))^2}, \quad s \in S \quad (2.1)$$

의 값으로 이루어진 것을 의미한다 (Figure 4.1(a)).

## 2.2. 두 시계열 변동패턴의 동일성 검정통계

일정기간 동안 격자점  $s$ 에서 미기상해석모듈이 출력한 예측시계열을  $\{X_{1,t}(s), t \in T\}$  그리고 관측시계열을  $\{X_{2,t}(s), t \in T\}$ 라 하고, 그들의 평균을 각각 0이라 가정하자. 본 연구에서는 다음에서 설명되는 검정통계와 검정결과값( $p$ -값)을 시계열 변동패턴의 동일성측도로 사용한다. 편의상 수식에서 격자점을 나타내는 표현 “( $s$ )”는 생략하고 이들 측도를 설명한다.

2차 정상성을 만족시키는 이변량시계열  $\{X_t = (X_{1,t}, X_{2,t})^\top, t \in T\}$ 은 Wold 모형인 다음의 무한이동평균모형으로 설명된다 (Wold, 1954).

$$\tilde{X}_t = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \Psi_j \epsilon_{t-j} \quad (2.2)$$

여기서,  $T = \{t; t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ ,  $\tilde{X}_t = X_t - \mu$ ,  $2 \times 2$ 이동평균계수행렬  $\{\Psi_j = (\psi_j(\alpha, \beta))_{\alpha, \beta=1,2}\}$ 의 각 원소들은  $\sum_{j=-\infty}^{\infty} |j|^{1/2} |\psi_j(\alpha, \beta)| < \infty$ 을 만족시키며,  $\{\epsilon_t = (\epsilon_{1,t}, \epsilon_{2,t})^\top, t \in T\}$ 는 양정치인 공분산행렬  $\Sigma = (\sigma_{\alpha, \beta})_{\alpha, \beta=1,2}$ 를 가진 이변량 백색잡음과정을 나타낸다.

Wold 모형인 (2.2)로부터 얻어지는 자기공분산행렬의 계열을  $\Gamma(k) = E[X_t X_{t+k}^\top], k \in T$ 로 나타내고, 이 계열에서 정의되는  $(r, s)$ -원소들의 절대값의 합이 모두 유한이면,  $\{X_t, t \in T\}$ 의  $2 \times 2$ 스펙트럼 밀도함수행렬은 진동수  $\lambda$ 의 함수형태로 존재하며 다음과 같다 (Shumway와 Stoffer, 2010).

$$f(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \Gamma(k) e^{-i\lambda k}, \quad \lambda \in [-\pi, \pi], \quad (2.3)$$

여기서  $f(\lambda) = (f_{r,s}(\lambda))_{r,s=1,2}$ 의  $r$ -번째 대각원소인  $f_r(\lambda) = f_{r,r}(\lambda)$ 는  $r$ -번째 단변량 시계열인  $\{X_t, t \in T\}$ 의  $2 \times 2$ 의 스펙트럼 밀도함수를 나타낸다. 따라서 식 (2.3)에서 정의된 두 개 단변량 시계열(즉,  $\{X_{r,t}, t \in T\}, r = 1, 2$ )의 스펙트럼 밀도함수들의 동일성검정은 다음의 귀무가설이 사용된다.

$$H_0 : f_1(\lambda) = f_2(\lambda), \quad \text{a.e. } \lambda \in [-\pi, \pi]. \quad (2.4)$$

Dette와 Pararoditis (2007)는 Marahaj (2002), Gómez와 Drouiche (2002) 등이 제안한 여러 검정법과 달리, 시계열의 확률분포 및 독립성에 대한 가정 없이, 비모수적으로 가설 (2.4)를 검정할 수 있도록 다음의 검정통계량을 제안하였다.

$$T_n = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^2 \int_{-\pi}^{\pi} \left( \frac{\hat{f}_r(\lambda)}{\hat{f}(\lambda)} - 1 \right)^2 d\lambda \approx \frac{2\pi}{N} \sum_{r=1}^2 \sum_{j=-\nu}^{\nu} \left( \frac{\hat{f}_r(\lambda_j)}{\hat{f}(\lambda_j)} - 1 \right)^2. \quad (2.5)$$

단,  $n$ 은 자료의 크기,  $N = 2n$ ,  $\nu = [(n-1)/2]$ ,  $\hat{f}_r(\lambda) = \sum_{j=-[(n-1)/2]}^{[(n-1)/2]} K_h(\lambda - \lambda_j) I_r(\lambda_j) / n$ 는 스펙트럼 밀도함수  $f_r(\lambda)$ 의 커널추정량을 나타내며,  $\lambda_j = 2\pi j/n$ 는 푸리에 진동수이다. 또한,  $I_r(\lambda_j)$ 는  $\lambda_j$ 에서의 주기도(periodogram)통계,  $\hat{f}(\lambda) = \sum_{r=1}^2 \hat{f}_r(\lambda) / 2$ 이며,  $K_h(\cdot) = h^{-1}K(\cdot/h)$ 는 평활커널  $K$ 와 평활밴드가  $h = L/n$ 인 커널함수를 나타낸다.

귀무가설 (2.4)하에서 검정통계량  $T_n$ 은 0에 점근적으로 수렴하는 성질을 가져, 가설검정은 각각역을  $T_n$  분포의 우측에 두는 우 단측검정을 한다. 또한, 검정에 사용될  $p$ -값 (또는 유의수준  $\alpha$ 인 임계값)은 Dette와 Pararoditis (2007)가 제안한 붓스트랩 방법을 사용하여 계산한다.

### 2.3. 두 시계열그룹 변동패턴의 동일성 검정통계

두 개의 격자점 그룹(또는 객체)에서 그룹  $r$ 에 속한  $N_r$ 개의 시계열들 중에서  $k$ 번째 격자점에 대해 미 기상해석모듈이 출력한 예측시계열을  $\{X_{1rk,t}; r = 1, 2, k = 1, \dots, N_r, t \in T\}$ 로 표기하자. 단  $T = 0, 1, 2, \dots$ . 그러면  $r$ 번째 그룹의 속한  $N_r$ 개 시계열들의 스펙트럼함수추정량은

$$\hat{f}_r(w_j) = \frac{1}{N_r - 1} \sum_{k=1}^{N_r} |Y_{1rk}(w_j) - Y_{1r\cdot}(w_j)|^2, \quad r = 1, 2 \quad (2.6)$$

이 된다. 단  $Y_{1rk}(w_j)$ 과  $Y_{1r\cdot}(w_j)$ 는 시계열  $\{X_{1rk,t}; r = 1, 2, k = 1, \dots, N_r, t \in T\}$ 와 그룹평균 시계열의 이산형푸리에변환(DFT)을 각각 나타내고,  $w_j = j/n$ 는 푸리에 진동수이다. 각각  $N_1$ 개와  $N_2$ 개 시계열로 이루어진 두 시계열그룹의 스펙트럼함수(또는 변동패턴)의 동일성 검정은 귀무가설인

$$H_0 : f_1(w) = f_2(w), \quad |w| < \frac{1}{2} \quad (2.7)$$

을 사용한다. 귀무가설 (2.7)하에서 검정통계량은

$$\frac{\hat{f}_1(w)}{\hat{f}_2(w)} \sim F_{2L(N_1-1), 2L(N_2-1)} \quad (2.8)$$

으로 자유도가  $2L(N_1 - 1)$ 과  $2L(N_2 - 1)$ 인  $F$ -분포를 따른다. 여기서  $\hat{f}_r(w)$ 는 빈도밴드  $L$ 와 추정식 (2.6)을 사용하여 얻은  $r$ 그룹의 목표진동수(target frequency)  $w$ 인 평활스펙트럼의 추정량이다 (Shumway와 Stoffer, 2010).

### 2.4. 두 시계열그룹의 평균시계열의 동일성 검정통계

$\{X_{1rk,t}; r = 1, 2, k = 1, \dots, N_r, t \in T\}$ 를 그룹  $r$ 에 속한  $N_r$ 개의 시계열들이라 하고, 모두 동일한 평균시계열  $\{\mu_{r,t}, t \in T\}$ 와 정상자기공분산(stationary autocovariance)  $\gamma_h(r)$ 을 가졌다고 하자. 시계열  $\{X_{1rk,t}, t \in T\}$ 와  $\{\mu_{r,t}, t \in T\}$ 의 이산형 푸리에변환(discrete Fourier transform; DFT)을 통해 각 진동수  $\{w_j = j/n, (0 < w_j < 1/2)\}$ 별로 계산한 DFT 쌍은 근사적으로 서로 무상관이며,

$$Y_{1rk}(w_j) = n^{-\frac{1}{2}} \sum_{t=1}^n X_{1rk,t} e^{-2\pi i w_j t} \quad \text{와} \quad Y_{1r\cdot}(w_j) = n^{-\frac{1}{2}} \sum_{t=1}^n \mu_{r,t} e^{-2\pi i w_j t}$$

로 표기된다. 한편 DFT인  $Y_{1rk}(w_j)$ 의 근사적 확률밀도함수는

$$p(w_j) \approx f_r(w_j)^{-1} \exp \left\{ -\frac{|Y_{1rk}(w_j) - Y_{1r.}(w_j)|^2}{f_r(w_j)} \right\} \quad (2.9)$$

이다 (Shumway와 Stoffer, 2010). 여기서  $f_r(w_j)$ 는 시계열  $\{X_{1rk,t}, t \in T\}$ 의 스펙트럼 함수이며 식 (2.6)에 의해 추정된다.

2개 그룹의 평균 시계열의 동일성 검정의 귀무가설은

$$H_0 : \mu_{1,t} = \mu_{2,t}, \quad t \in T. \quad (2.10)$$

이다. Giri (1965)과 Hannan (1970)은 식 (2.9)에 정의된 DFT인  $Y_{1rk}(w_j)$ 의 정규근사이론을 사용하여 귀무가설 (2.10)하에서 모든 진동수  $w_j$ 에서 근사적으로  $F$ -분포를 따르는 검정통계량인

$$T^2(w_j) = \frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2} \frac{|Y_{11.}(w_j) - Y_{12.}(w_j)|^2}{\hat{f}(w_j)} \sim F_{2,2(N_1+N_2-2)} \quad (2.11)$$

을 제안하였다 (단,  $\hat{f}(w_j) = \{(N_1 - 1)\hat{f}_1(w_j) + (N_2 - 1)\hat{f}_2(w_j)\}/(N_1 + N_2 - 2)$ ).

물론, 검정통계량 (2.11)을 사용하여 귀무가설 (2.10)을 검정하기 위해서는 검정통계량 (2.8)을 사용하여 각 시계열그룹이 가진 스펙트럼행렬의 동일성에 대한 검정을 선행해야 된다. 한편 모든 진동수에서 계산되는  $T^2(w_j)$ 통계량들의 평균형태인

$$d^2 = \frac{N_1 + N_2}{JN_1N_2} \sum_{j=1}^J T^2(w_j) \quad (2.12)$$

을 두 시계열그룹의 평균시계열  $\{\mu_{r,t}, t \in T\}$ 의 유사성 측도로 사용하면, 두 시계열  $\{X_{1rk,t}, t \in T\}$  그룹의 유사성평가에 유용한 통계가 될 것이다. 여기서, 시계열의 길이  $n$ 이 짝수이면  $J = n/2$ 을 홀수이면  $J = (n - 1)/2$ 로 사용한다. 한편,  $d^2$ 값의 통계적 유의성은  $T^2(w_j)$ 값들의 유의성에 의해 설명이 가능하다.

### 3. 객체기반-진단-평가방법(EMODE)

기상분야에서는 새로운 기상해석모듈이 개발되면, 시범지역을 정하고 모듈을 적용시켜 생성한 기상정보와 실제 관측한 기상정보를 비교분석하여 개발된 모듈의 성능(예측 및 상황정보의 정확성)을 검증하고, 검증결과의 피드백을 통해 모듈을 개선시킨다. 본 연구에서 제안하는 객체기반의 진단·평가방법은 미기상해석모듈의 시-공간적 출력물의 특성에 맞게 고안된 것이다. 또한, 기존의 방법과는 달리 제안된 방법은 시범지역에 속한 모든 지점(또는 위-경도 격자점)에 대해 일일이 모듈의 성능을 검정하는 방법을 택하지 않고, 식별된 객체만을 대상으로 모듈의 성능을 심층적으로 분석하는 방법이다. 여기서 객체란 시범지역에 속한 지점들 중에서 모듈의 예측값이 관측값과 유의한 차이를 보이는 지점들의 군집을 의미한다. 따라서 시범지역에서 식별되는 객체가 없으면, 미기상해석모듈의 정확성에 대한 검증은 종료된다. 만약 한 개 이상의 객체가 시범지역에서 식별되면, 이들에 대한 심층적인 분석 결과의 피드백 작업을 통해 시범지역에서 객체가 식별되지 않도록 모듈의 성능을 개선시킨다.

이와 같은 절차에 의해 미기상해석모듈을 통계적으로 진단·평가할 수 있도록 제안한 방법을 EMODE라 하고, EMODE에 사용되는 세부적인 진단·평가절차는 모듈의 정확성 평가통계장(lattice of verification statistics) 구축, 객체식별 및 병합, 미기상해석모듈의 정확성 검증의 세 단계로 나누어진다.

### 3.1. 평가통계출력장 구축

위도 및 경도로 특정되는 시범지역 내의  $s$ 지점 ( $s = 1, \dots, S$ )에서  $n$ 기간 동안 시범 관측망(총  $S$ 지점)을 통해 관측한 시계열을  $\{X_{2,t}(s), t = 1, \dots, n\}$ , 개발된 미기상해석모델로부터 동일지점과 기간에 대해 예측한 시계열을  $\{X_{1,t}(s), t = 1, \dots, n\}$ 이라 하자.

- (1) 결측값 보정: 시범 관측망(총  $S$ 지점)을 통해  $s$ 지점에서 관측한 시계열자료  $\{X_{2,t}(s), t = 1, \dots, n\}$ 의 특정시점들에서 한 개 또는 다수의 결측값이 발생되었으면,  $R = 2$ 인 식 (3.1)을 사용하여 결측값을 보정하는 이동평균대체법을 사용한다 (Davis 등, 2006a). 이동평균대체법 사용할 수 있는 대체법에는 다중대체법(multiple imputation), 미래예측값(forecasts)과 과거예측값(backcasts)의 평균대체법 등이 있다 (Little과 Rubin, 2002).  $\{X_{1,t}(s), t = 1, \dots, n\}$ 는 개발된 미기상해석모델의 출력물이므로 결측값은 생기지 않는다.
- (2) RMSE 출력장 구축: 결측값이 보정된 두 시계열 자료 쌍이  $\{X_{r,t}(s), t = 1, \dots, n\}$ ,  $r = 1, 2$ 라 하자. 미기상해석모델 출력물의 정확성을 평가하기 위해  $S$ 개의 각 지점에서 관측된 시계열과 예측된 시계열 쌍으로부터 그 지점의  $\text{RMSE}(s)$ ,  $s = 1, 2, \dots, S$ 를 식 (2.1)에 의해 계산하고, 시범지역의 모든 격자점의 위-경도에 대해 높이를  $\text{RMSE}(s)$ 값으로 표시한 3-차원의 RMSE 격자장을 만든다 (Figure 4.1(a)).
- (3)  $T_n$  출력장 구축: 미기상해석모델 출력물이 가진 변동패턴의 정확성을 평가하기 위해 식 (2.5)에 제시된 시계열 변동패턴의 동일성 검정통계 ( $T_n(s)$  값)와 검정통계값의  $p$ -값을 계산하고, 시범지역에 속한  $s$ 격자점의 위-경도에 대해 높이를  $T_n(s)$ 값으로 표시한  $T_n$  격자장을 구축한다 (Figure 4.2(a)).
- (4) 출력장의 해상도 향상: 출력장의 해상도의 향상이 필요한 경우 총  $S$ 개 관측지점으로 구성된 시범지역을  $K \times K$ 개의 등격자점으로 분할한다. 그리고 분할에 의해 새로 얻어진 격자지점과  $S$ 개 관측지점으로 구성된 새로운 시범지역 격자장을 만든다. 이때 분할에 사용된  $K$ 값은 해상도 향상의 목적에 맞는 값으로 설정하며, 분할에서 얻어진 등격자점들과 기존의  $S$ 개 관측지점이 최대한 겹치도록 한다.

분할작업을 거친 시범지역 출력장에서 새로 생긴 격자점  $s' \in S'$ 에는 평가통계인  $\text{RMSE}(s')$ 값과  $T_n(s')$ 값이 결측된 상태이다. 이들 결측값은 다음의 보정함수를 사용하여 대체한다. 격자점  $s'$ 의 위-경도 좌표가  $(x, y)$ 인 경우

$$(x, y)\text{지점의 평가통계 보정값} = \sum \phi(u, v)f(x - u, y - v) \quad (3.1)$$

이다. 여기서  $f$ 는 평가통계출력장(evaluation statistic field)를 나타내며,  $(x, y)$ 와  $(u, v)$ 는 출력장에 있는 격자의 좌표이며,  $\phi$ 는 원형필터함수(circular filter function)인

$$\phi(u, v) = \begin{cases} 1/H, & \text{if } (x - u)^2 + (y - v)^2 \leq R^2, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2)$$

이다. 그리고  $H =$  (중심이  $(x, y)$  격자점이고 반지름이  $R$ 인 원형지역에서 포함되어 시범관측된 격자점의 수)이다. 즉  $(x, y)$  격자점의 결측값 보정은 반지름이  $R$ 인 원형지역 내에서 관측된 값들의 2차 공간 이동평균에 의해 이루어지며, 반지름  $R$ 값은 결측값 보정에 사용되는 이동평균의 평활계수(smoothing coefficient)와 같은 역할을 한다 (Davis 등, 2006a).

따라서 해상도 향상 방법은 먼저 분할작업을 거친 시범지역 출력장에서 새로 생긴 격자점들  $s' \in S'$ 에 대해 보정함수식 (3.1)을 사용하여  $\text{RMSE}(s')$ 값과  $T_n(s')$ 값을 계산한다. 이 값들을 RMSE 출력장의

$s'$  지점과  $T_n$  출력장의  $s'$  지점에 해당되는 위-경도  $(x, y)$ -축에 대한  $z$ 축의 높이로 각각 표시하여 출력장의 해상도를 향상 시킨다 (Figure 4.1(a), Figure 4.2(a)).

### 3.2. 객체식별 및 병합

3.1절에서 제안된 방법으로 얻어진 시범지역의 평가통계 출력장을 대상으로 다음에 설명되는 합성작업과 분계점(threshold level)을 사용한 가면화 작업을 실시하여 객체를 식별한다.

- (1) 출력장 합성: 평가통계 출력장인 RMSE 출력장과  $T_n$  출력장에서  $z$ 축의 값이 큰 지점은 시범지역 중에서 미기상해석모듈의 예측값과 관측값 시계열 간에 차이가 큰 지점(또는 격자점)을 의미한다. 따라서 시범지역에서 이러한 지점들이 한 구역에서 집단을 이루면 그 구역은 객체가 될 것이다. 그러나 객체의 특성 지닌 지역과는 달리, 한 두 개 지점에서만 국소적으로  $z$ 축의 값(평가통계값)이 큰 곳이 출력장에 산재하면 이들 지역과 객체를 식별하는 작업이 어려워지게 될 것이다.

객체의 식별에서 이러한 어려움을 제거하기 위한 방법으로 출력장을 합성하는 방법을 사용한다. 출력장 합성이란 평가통계 출력장 상의 모든  $(x, y)$  지점에서 계산된 평가통계를 식 (3.1)인 보정식에 의해 이동평균시키는 작업을 말한다. 이 작업은 국소적인 곳에서 나타났던 큰 평가통계값( $z$ 축의 값)들을 이동평군을 통해 평활시키는 효과가 있어 객체의 식별을 쉽게 할 수 있는 출력장을 만들어 준다 (Figure 4.1(b), Figure 4.2(b)).

- (2) 합성된 출력장의 가면화: 앞에서 설명한 합성방법에 의해 평활된 시범지역의 출력장 상에서 평가통계가 유의한 지점을 식별하여 그 지점의 값은 1, 그 외 지역에 속한 지점은 0의 값으로 대체시키는 작업을 합성된 출력장의 가면화라 한다. 이것은 객체가 출력장에서 육안으로 쉽게 식별될 수 있도록 합성된 출력장을 변형시키는 작업이며, Figure 4.1(c), Figure 4.2(c)와 같은 형태로 변형된 출력장이 가면화 작업의 결과이다.

RMSE 출력장에 대해 가면화 작업을 실시할 경우, 통계적으로 유의한 지점 (또는 1의 값을 가지는 지점)의 선정에 필요한 분계값(threshold)은 RMSE값들의 95% 분위수이며, RMSE값이 분계값 이상인 지점은 1의 값으로 대체한다. 또한 출력장에서 얻어지는 객체의 수에 따라 검증목적에 맞게 분위수를 조정하여 사용할 수 있다. 한편  $T_n$  출력장의 가면화 작업에는 식 (2.5)에 정의된 검정통계값인  $T_n$  값에 대응하는  $p$ -값을 분계값으로 사용한다. 따라서  $p$ -값이 유의수준  $\alpha$ 보다 적은 지점들은 이 작업에서 1의 값을 가진다.

- (3) 객체식별 및 병합: 평가통계출력장의 모든 격자지점의 평가통계값들을 모두 0이나 1값으로 대체시켜 얻은 가면화된 출력장의 값과 3.1절에서 해상도를 향상시켜 얻은 평가통계출력장의 값을 지점별로 곱하면 객체가  $m$ 개 얻어진다. 그리고 식별된 객체들을 대상으로 병합작업을 실시하여 서로 인접해 있으면서 평가통계값들이 유사한 객체들을 찾아 한 개의 객체로 묶는 병합작업을 실시한다.

인접한 지역에서 식별된 객체1과 객체2에 속한 지점들의 수가 각각  $N_1$ 과  $N_2$ 이고, 이들 지역에서 미기상해석모듈에서 출력된 객체1과 객체2 지점의 예측시계열 그룹을 각각  $\{X_{11k,t}; k = 1, \dots, N_1, t \in T\}$ 와  $\{X_{12k,t}; k = 1, \dots, N_2, t \in T\}$ 라 하자(각 그룹은  $N_1$ 개과  $N_2$ 개의 예측시계열로 구성됨). 두 객체의 병합여부는 두 예측시계열 그룹의 변동패턴(또는 스펙트럼함수)의 동일성 검정에 이어 평균시계열의 동일성검정을 통해 이루어진다. 두 시계열 그룹이 가진 변동패턴의 동일성 검정통계량을 포함한 검정절차는 2.3절에 설명되었고, 두 시계열 그룹이 가진 평균시계열의 동일성 검정 절차는 2.4절에 자세히 설명되었다. 만약 각 검정에서 귀무가설이 채택되면 객체1과 객체2를 병합하여 한 개의 새로운 객체로 식별하게 된다. 이러한 병합작업을 지리적으로 가까운 객체

쌍들에 대해 차례로 실시하여 미기상해석모듈의 진단 및 평가에 사용될 객체  $m'$ 개( $m' \leq m$ )를 최종적으로 식별한다 (Figure 4.1(d), Figure 4.2(d)).

### 3.3. 모듈의 정확성 검증

검증대상인 미기상해석모듈의 평가통계출력장에서 식별된 객체가 없으면 그 모듈의 정확성은 검증된 것으로 평가할 수 있다. 만약 평가통계출력장에서 객체들이 식별되면 이들을 심층적으로 분석하고, 분석 결과의 피드백을 통해 미기상해석모듈을 개선할 수 있도록 한다. 식별된 객체의 분석에는 예측과 관측 시계열 간에 존재하는 시-공간적인 차이를 매칭법(matching), 아노말리분석(anomaly analysis) 등 여러 방법들이 개발되어 있으며, 이러한 분석을 통해 미기상해석모듈의 개선사항들을 도출해 낼 수 있다 (Skok 등, 2010).

## 4. 한반도 풍속 예측법 검증에의 응용

이 장은 Ha 등 (2010)이 개발하여 현재 기상청에서 사용하고 있는 초단기 기상분석 및 예측 시스템(Korea local analysis and prediction system; 이하 KLAPS로 표기)의 정확성 검증을 통해 EMODE의 유용성을 보이고자 한다. 이를 위해 한반도 지역(남한)에서 KLAPS으로 예측한 풍속시계열과 동일한 지역에서 관측된 풍속시계열 자료를 EMODE에 적용시켜 KLAPS의 정확성을 평가하였다. 참고로 KLAPS는 풍속시계열 예측에 Christian 등 (2004)이 제안한 최근접 규칙(nearest-neighbor rule)을 사용하고 있다.

### 4.1. 사례연구 자료설명

KLAPS의 정확성검증에 사용된 자료는 남한 지역인  $0.1 \times 0.1$  위도-경도 격자점(670개 지점)에서 2013년 7월 초(7월 9일 21시부터 7월 12일 21시까지)와 2013년 8월 말(8월 23일 21시부터 8월 26일 21시까지)에 AWS(automated weather station)에서 관측된 시간별 평균풍속(<http://www.kma.go.kr/weather/observation/currentweather.jsp>)와 KLAPS를 사용하여 동 시간대에 예측한 시간별 평균풍속(m/s)자료(<http://www.nimr.go.kr>)이다.

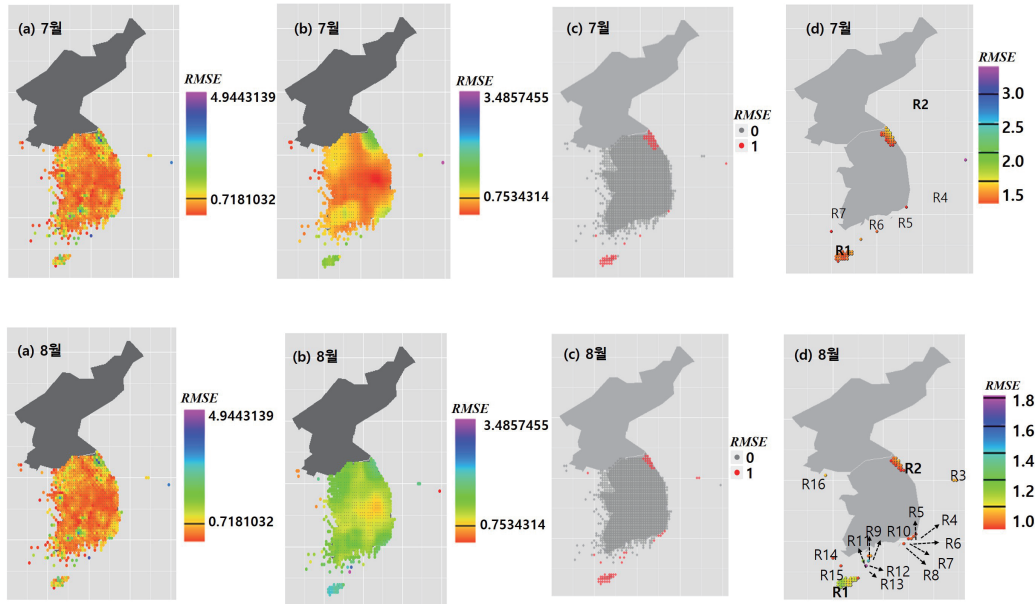
### 4.2. EMODE적용

위도 및 경도로 위치를 나타낸  $s$ 지점(또는 격자점) ( $s = 1, \dots, 670$ )에서  $n = 73$  시간동안 관측망을 통해 관측한 7월 초 (또는 8월 말) 시간별 평균풍속시계열을  $\{X_{2,t}(s), t = 1, \dots, n\}$ , 동일 지점에서 기상 모델에 의해 예측한 7월 초 (또는 8월 말)의 풍속시계열을  $\{X_{1,t}(s), t = 1, \dots, n\}$ 이라 하자.

(단계 1) 한반도 남한 지역의 관측망인 670개 격자점에서 7월 초와 8월 말에 관측한 풍속시계열자료에 결측값이 존재하여 (7월 초 98개 지점, 8월 말 86개 지점), 이들을 이동평균대체법으로 보정하였다.

(단계 2) 각 격자점 별로 관측풍속시계열과 예측풍속시계열 간에 차이를 측정하기 위해 식 (2.1)으로 RMSE를 계산하고, 식 (2.5)의 검정통계량( $T_n$ )으로 두 시계열의 스펙트럼 밀도함수의 동일성 검정을 시행하였다. 지점별로 계산한 RMSE값을 모든 격자점에 반영시켜 670개 격자점으로 구성된 RMSE 출력장(또는 격자장)을 얻었고, 변동패턴의 동일성 검정통계값인  $T_n$ 값들을 사용하여  $T_n$  출력장을 얻었다.





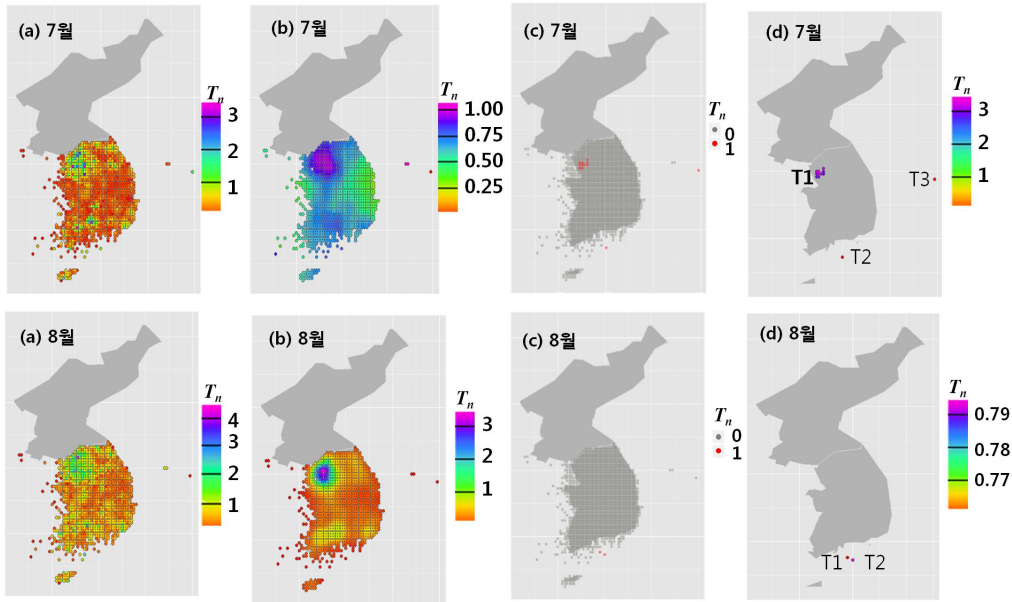
**Figure 4.1.** Application of EMODE process((a) Enhanced resolution, (b) Convolved, (c) Masked, (d) Objects) with RMSE of wind velocity field.

(단계 3) (i) RMSE 출력장의 해상도 향상 및 합성: [단계 2]에서 얻은 출력장들의 해상도 향상을 위해 기존의 것을  $0.1 \times 0.1$  위도-경도 출력장으로 세분화 시켰다. 세분화된 출력장은 총 4070개(위도  $55 \times$  경도 74개) 격자지점들로 구성되며, 원래의 격자지점(670개 지점)을 포함한다. [단계 2]에서 얻은 출력장(670개 격자점으로 구성)에 식 (3.1)의 보정함수( $R = 2$  사용)를 적용시켜 세분화된 남한 지역의 RMSE 격자장(4070개 격자점으로 구성)인 Figure 4.1(a)를 얻었다. Figure 4.1(a)는 RMSE값이 작을수록 검정색으로, 클수록 흰색으로 나타낸다. 또한 Figure 4.1(b)는 해상도가 개선된 RMSE 출력장을 반지름  $R = 4$  (Davis 등, 2006a)인 원형필터 보정함수 식 (3.1)에 의해 평활시킨 RMSE 합성출력장을 나타낸다.

(ii)  $T_n$  출력장의 해상도 개선 및 합성: RMSE 출력장의 해상도 개선 및 합성과 동일한 절차를 [단계 2]에서 얻은  $T_n$  출력장에 적용시켜 해상도가 개선된  $T_n$  출력장 Figure 4.2(a)와 합성출력장 Figure 4.2(b)를 얻었다.

(단계 4) RMSE합성출력장에 대한 가면화작업의 분계기준은 합성출력장에 나타난 RMSE값들의 95% 백분위수 값인 1.107375(7월)과 0.8417082(8월)로 정했다. 즉 총 4070개 격자지점으로 이루어진 RMSE합성출력장에서 7월은  $RMSE > 1.107375$ , 8월은  $RMSE > 0.8417082$  조건에 해당되는 격자점의 값은 1, 그 외 격자점은 0으로 대체시켰다. Figure 4.1(c)는 격자지점의 값이 1인 지점을 진한 색으로 표시한 것이다. 이와 동일한 작업을  $T_n$  합성출력장에 적용시켜서 가면화된  $T_n$  출력장을 얻는다. 다만  $T_n$  합성출력장의 가면화에 사용한 분계기준은 검정통계값  $T_n$ 의  $p$ -값을 기준으로,  $p$ -값  $< 0.05$ 인 격자지점은 1, 그 외 지점에는 0으로 두었다. Figure 4.2(c)는 격자지점의 값이 1인 지점을 진한 색으로 표시한 것이다.

(단계 5) 객체식별단계로서 객체들은 (단계 4)에서 얻은 가면화된 RMSE출력장과  $T_n$  출력장에 각



**Figure 4.2.** Application of EMODE process((a) Enhanced resolution, (b) Convolved, (c) Masked, (d) Objects) with  $T_n$  of wind velocity field.

**Table 4.1.** Location information of the identified object regions

구분	객체	지역	객체	지역
7월	R1	제주도 일부	T1	서울과 경기도 일부
	R2	강원도 일부	T2	남해 도서지역
	R3	독도	T3	독도
	R4~R7	남해안, 도서지역		
8월	R1	제주도 일부	T1, T2	남해 도서지역
	R2	강원도 일부		
	R3	울릉도		
	R4~R15	남해안, 도서지역		

각 (단계 2)에서 계산된 RMSE출력장 값과  $T_n$ 출력장 값을 격자지점별로 곱하여 Figure 4.1(d)과 Figure 4.2(d)를 얻었다. 그리고 각 그림에서 나타난 군집을 객체로 식별하였다. Figure 4.1(d)에서는 R1~R7(7월 초)과 R1~R16(8월 말) 지역으로 표기된 객체들이 식별되었고, Figure 4.2(d)에서는 T1~T3(7월 초) T1, T2(8월 말) 지역으로 표기된 객체들이 식별되었다. 객체로 식별된 지역에 대한 설명은 Table 4.1에 나타나있다.

이와 더불어, 앞에서 식별된 각 객체들의 병합여부는 2.3절과 2.4절에 설명된 두 시계열 그룹의 동일성 검정절차를 사용하여 검정하였고 그 결과 중 일부를 Figure 4.3에 나타내었다. 먼저 7월 초의 두 Figure 4.1(d)와 4.2(d)에서 식별된 객체들을 대상으로 병합작업을 위해 Table 4.2에 분류된 인접한 두 객체지역의 평균적 변동패턴과 평균시계열의 동일성 검정을 시행하였다(유의수준  $\alpha = 0.01$ ). 그 결과는 7월 초의 경우 두 예측시계열 그룹의 변동패턴과 평균시계열의 패턴 모두 동일하여 강원도 소재 두 지역(R2)이 병합되었고, 8월 말의 경우는 제주도 소재 두 지역(R1)의 시계열이 동일하여 병합되었다 (Figure 4.3 참조).

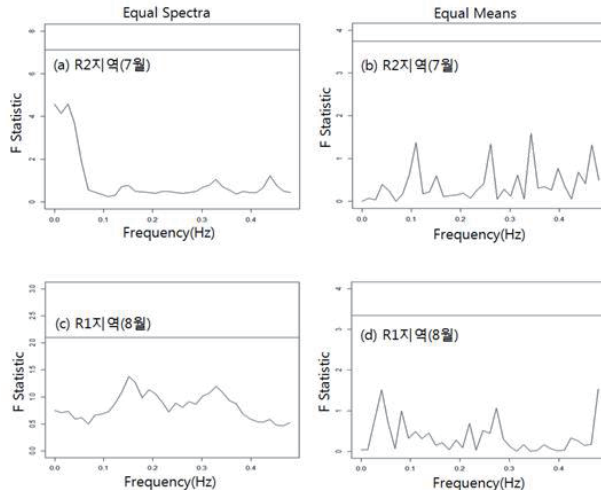


Figure 4.3. Test for equality of spectra (left panel) and group means (right panel) of two groups.

Table 4.2. Grouping of the identified object regions

구분	객체	그룹1	그룹2
7월	R1	제주도 서귀포시	제주도 제주시
	R2	강원도 양양군, 인제군, 속초시	강원도 고성군
	T1	경기도 하남시, 구리시, 남양주시	그룹1과 도서지역을 제외한 서울과 경기지역 일부
8월	R1	제주도 서귀포시	제주도 제주시

4.3. 분석결과

7월초 풍속자료의 RMSE출력장 (Figure 4.1(d))에서 식별된 객체(R1~R7 지역)와  $T_n$ 출력장 (Figure 4.2(d))에서 식별된 객체(T1~T3 지역)은 각각 남한에서 관측과 예측된 평균풍속 값들의 정확도와 변동 패턴의 차이가 유의한 지역 (Table 4.1 참조)들이다. 특히 독도(R3, T3 지역)은 관측 및 예측풍속의 정확도와 변동 패턴에서 모두 유의한 차이를 보이고 있으며, Figure 4.4(a)과 같이 독도지역에서는 관측된 풍속보다 KLAPS의 예측풍속이 더 높게 예측한 경향을 보여 정확도가 낮았을 뿐 아니라, 시간별 변동 패턴도 상이하게 예측하였다. 또한 Figure 4.4(b)는 객체 T1의 일부 지역인 서울강남구의 시간별 관측과 예측된 풍속을 나타낸 것으로 KLAPS의 예측이 이 지역의 풍속변동패턴을 관측풍속과 상이하게 예측된 것으로 나타났다.

한편 8월 말 풍속자료는 RMSE출력장에서 식별된 객체(R1~R16 지역)와  $T_n$ 출력장에서 식별된 객체(T1, T2 지역)이 관측과 예측된 풍속시계열 간의 차이가 유의한 지역 (Table 4.1 참조)들이다. 이들 중에서 남해안 도서지역인 R12의 풍속시도표 (Figure 4.4(c))에 의하면 KLAPS의 예측이 이 지역에서 풍속변동패턴은 정확하게 예측하지만 풍속을 정확하게 예측하지 못함을 나타내고 있다. 한편, Figure 4.4(d)는 KLAPS의 예측이 제주도 서귀포시(R1)에서 정확도 높게 풍속을 예측하고 있으나, 풍속의 변동패턴은 정확하게 예측하지 못하는 것을 나타내고 있다.

이와 같은 분석 결과는 한반도 KLAPS의 예측이 객체식별지역에서 풍속이나 풍속변동패턴을 정확하게 예측하지 못하고 있으며, 예측시스템의 정확도 향상을 위한 시스템 개선작업이 필요함을 나타낸다. 그리고 시스템 개선작업을 위해서는 객체식별지역에서 예측된 풍속이 관측풍속과 차이가 난 원인들을 기

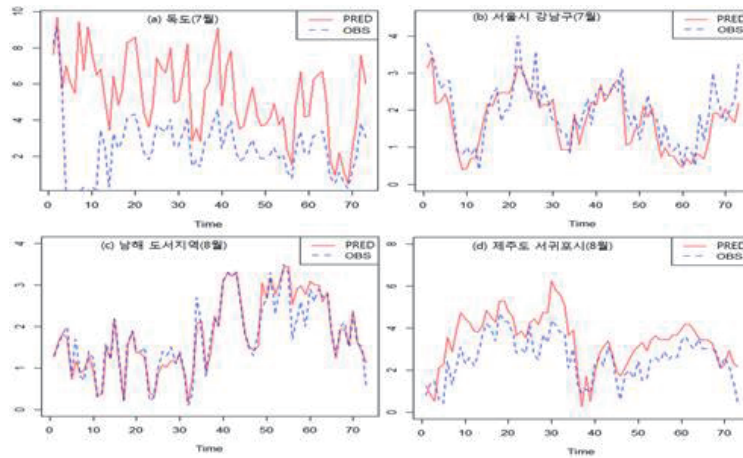


Figure 4.4. Time plot of observed (OBS) and predicted (PRED) wind velocity(m/s) for each object.

상학적으로 분석하는 연구가 시스템개발자들에 의해 이루어져야 된다.

## 5. 결론 및 토의

미기상해석모듈은 서울과 같은 대도시의 복사에너지, 열, 습도 등의 순환을 초고분해능 ( $1\text{km} \times 1\text{km}$  이하의 해상도)으로 설명하고 모의실험 할 수 있게 개발한 모델이다. 본 논문은 MODE를 확장시켜 미기상해석모듈이 출력하는 시-공간적인 예측 값들에 대한 정확도 평가 및 모듈의 진단방법인 EMODE를 개발하여 제시하였다. MODE는 미기상연구소의 DTC에서 개발되었고 선진기상국가의 기상관련기관과 기상모델 연구자들에 의해 많이 사용되고 있으며,  $1\text{km} \times 1\text{km}$  이상의 해상도의 WRF모델에 의해 얻어지는 횡단면 출력물(또는 예측자료)의 정확성을 평가하는 도구이다. 따라서 도시 및 농림지역을 대상으로 국지규모의 기상정보 및 수요자 맞춤형 실시간 기상정보서비스를 목적으로 개발될 미기상해석모듈의 성능을 시-공간적으로 검증하기에는 MODE의 기능이 부족하여 EMODE를 개발하였다. EMODE의 개발을 위해 네 종류의 시계열 평가통계와 평가통계출력장의 해상도보정법을 소개하였으며, 보정된 출력장에 대해 합성, 가면화 및 합병작업을 통해 최종적으로 객체를 통계적으로 식별하는 절차도 제안하였다. 또한 EMODE를 사용하여 한반도 KLAPS의 예측 정확성을 검증하는 사례연구를 통해 EMODE의 유용성을 보였다.

본 연구는 대략  $10\text{km} \times 10\text{km}$ 의 해상도를 가진 KLAPS의 예측 정확성 검증사례를 통해 EMODE의 유용성을 간접적으로 보였다. 앞으로 WISE 미기상해석모듈의 개발과 시범관측사업이 완료되면,  $1\text{km} \times 1\text{km}$  이하의 해상도를 가진 미기상해석모듈출력물의 정확도를 EMODE에 의해 실증적으로 검증할 예정이다. 한편, EMODE에서 사용되는 다중검정의 유의수준 결정문제와 평가통계보정값의 이론적 성질 등 EMODE의 개발에서 해결되어야 할 사항들이 있으나, 이들에 대한 연구는 추가적인 연구과제로 남겨둔다.

## References

- Boo, K. O. and Oh, S. N. (2000). Characteristics of spatial and temporal distribution of air temperature in Seoul, *Journal of the Korean Meteorological Society*, **36**, 499–506.

- Christian, B., David, R. H. and Pierre, H. (2004). Medical image computing and computer-assisted intervention-MICCAI 2004, In *Proceeding of the 7th International Conference*, 26–29.
- Davis, C. A., Brown, B. G. and Bullock, R. G. (2006a). Object-based verification of precipitation forecasts. Part I: Methodology and application to mesoscale rain areas, *Monthly Weather Review*, **134**, 1772–1784.
- Davis, C. A., Brown, B. G. and Bullock, R. G. (2006b). Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: Application to convective rain systems, *Monthly Weather Review*, **134**, 1785–1795.
- Detle, H. and Pararoditis, E. (2007). *Testing equality of spectral densities* (Technical Report), Komplexitätsreduktion in Multivariaten Datenstrukturen, Universität Dortmund.
- Developmental Testbed Center (2013). *Model evaluation tools version 4.1 (MET v4.1)*, Boulder, Colorado, USA.
- Doswell, C. A., Davies-Jones, R. and Keller, D. L. (1990). On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables, *Weather and Forecasting*, **5**, 576–585.
- Giri, N. (1965). On the complex analogues of and tests, *The Annals of Mathematical Statistics*, **36**, 664–670.
- Gómez, R. M. P. and Drouiche, K. (2002). A test of homogeneity for autoregressive processes, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **16**, 231–242.
- Ha, J. C., Lee, D. H., Lee, J. S., Lee, H. C. and Chang, D. E. (2010). Korea local analysis and prediction system, In *Proceedings of the Autumn Meeting of Korean Meteorological Society*, 218–219.
- Hannan, E. J. (1970). *Multiple Time Series*, Wiley, New York.
- Hitchens, N. M., Baldwin, M. E. and Trapp, R. J. (2012). An object-oriented characterization of extreme precipitation-producing convective systems in the midwestern United States, *Monthly Weather Review*, **140**, 1356–1366.
- Kim, Y. H., Ryoo, S. B., Park, I. S., Koo, H. J. and Nam, J. C. (2008). Does the restoration of an inner-city stream in Seoul affect local thermal environment, *Theoretical and Applied Climatology*, **92**, 239–248.
- Korea Meteorological Administration (2011). Public satisfaction survey on national weather service in 2011, *Korea Meteorological Administration*, Korea.
- Li, J., Hsu, K., AghaKouchak, A. and Sorooshian, S. (2015). An object-based approach for verification of precipitation estimation, *International Journal of Remote Sensing*, **36**, 513–529.
- Little, R. J. A. and Rubin, D. B. (2002). *Statistical Analysis with Missing Data*, 2nd ed, Wiley, New York.
- Marahaj, E. A. (2002). Comparison of non-stationary time series in the frequency domain, *Computational Statistics and Data Analysis*, **40**, 131–141.
- Mora-Ramirez, M. A. and García, A. R. (2012). Evaluation of WRF-CHEM simulations with the unified post processor (UPP) and model evaluation tool (MET), In *Proceeding of the 11th Annual CMAS Conference*, 15–17.
- Shumway, R. H. and Stoffer, D. S. (2010). *Time Series Analysis and Its Applications With R Examples*, 3rd ed., Springer.
- Skok, G., Tribbia, J., Rakovec, J. and Brown, B. (2009). Object-based analysis of satellite-derived precipitation systems over the low and midlatitude Pacific Ocean, *Monthly Weather Review*, **137**, 3196–3218.
- Skok, G., Tribbia, J. and Rakovec, J. (2010). Object-based analysis and verification of WRF model precipitation in the low and midlatitude Pacific Ocean, *Monthly Weather Review*, **138**, 4561–4575.
- Toshiaki, I., Shimodozono, K. and Hanaki, K. (1999). Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, **33**, 3897–3909.
- Wilks, D. S. (1995). *Statistical Method in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, San Diego.
- Wold, H. O. A. (1954). *A Study in the Analysis of Stationary Time Series*, 2nd Ed., Almqvist and Wiksell, Uppsala.

# 미기상해석모듈 출력물의 정확성에 대한 객체기반 검증법: 한반도 풍속예측모형의 정확성 검증에의 응용

김혜중<sup>a,1</sup> · 곽화륜<sup>b</sup> · 김상일<sup>c</sup> · 최영진<sup>c</sup>

<sup>a</sup>동국대학교 통계학과, <sup>b</sup>동국대학교 통계정보기술연구소,

<sup>c</sup>기상기술개발원 차세대도시농림융합기상사업단

(2015년 11월 12일 접수, 2015년 12월 7일 수정, 2015년 12월 11일 채택)

---

## 요약

미기상해석모듈(microscale weather analysis module)은 복사에너지, 열, 습도 등의 순환을 시-공간적으로 세밀하게 설명하고 모의실험 할 수 있도록 개발한 초고분해능(1km × 1km 이내)의 기상모델이다. 본 논문은 미기상해석 모듈의 정확성을 시공간적으로 검증할 수 있도록 고안한 객체기반 검증법을 제안한다. 이 검증법은 통계그래픽을 사용하는 시각적인 방법이며, 미기상해석모듈의 평가통계출력장 구축단계, 객체식별 및 병합단계, 모듈의 정확성 검증 단계로 이루어진다. 이를 위해 두 가지 통계를 사용하여 삼차원의 평가통계출력장을 구축하였고, 구축된 출력장에서 정의되는 시계열통계들에 대해 합성(convolution), 가면화(masking) 및 병합작업(merging)을 시행하여 출력장에서 모듈검증대상 지역인 객체를 식별하는 알고리즘을 개발하였다. 또한, 사례연구를 통해 제안된 객체기반 검증법의 유용성을 보였다.

주요용어: 객체기반검증법, 미기상해석모듈, 시-공간적 자료, 시계열 통계, 평가통계출력장

---

이 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE)사업의 지원으로 수행되었습니다 (KMIPA-2012-0001-1).

<sup>1</sup>교신저자: (04620) 서울 중구 필동 1길, 동국대학교 통계학과. E-mail: kim3hj@dongguk.edu