

스펙트럼분석 기반의 미기상해석모듈 평가알고리즘 제안 및 시계열 군집분석에의 응용[†]

김해중¹ · 광화륜² · 김유나³ · 최영진⁴

¹동국대학교 통계학과 · ²동국대학교 통계정보기술연구소 ·

⁴기상기술개발원 차세대도시농림융합기상사업단

접수 2014년 11월 7일, 수정 2014년 12월 4일, 게재확정 2014년 12월 15일

요약

기상분야에서는 다양한 미기상해석모듈 (micro scale weather analysis module)을 개발하여 초고분해능의 기상정보서비스를 실시간으로 제공하고자 노력하고 있다. 이와 같은 연구들은 최근 대도시의 양적인 팽창으로 인해 발생하는 도시 미기상 (micro meteorology)의 급격한 변화에 효과적으로 대처할 수 있는 경제적·사회적 활동을 가능케 한다. 따라서 미기상해석모듈의 정확성은 도시 미기상정보서비스의 품질 및 효용성에 직결된다. 본 논문은 미기상해석모듈이 생성하는 시-공간적인 특성을 가진 양적인 결과물의 정확성에 대한 평가체계를 설계하였다. 이와 더불어 평가체계의 구성에 사용될 평가도구로서 시계열평균의 동일성검정 알고리즘을 스펙트럼 분석기법으로 구축하였으며, 동일성검정통계의 함수를 거리측도로 사용하는 시계열 군집분석법도 함께 개발하였다. 또한, 사례연구를 통해 제안된 군집분석법과 평가알고리즘의 유용성을 보였다.

주요용어: 다변량스펙트럼분석, 미기상해석모듈, 시계열평균의 동일성검정, 시-공간적 자료, 평가체계 설계.

1. 서론

최근에 들어 대도시의 양적인 팽창으로 인해 유래 없이 발생한 도시의 기상재해는 인명은 물론 막대한 경제적·사회적 피해를 유발하였다. 이러한 기상재해를 예방하기 위해, 차세대 도시농림융합기상사업단 (2012년 설립)은 2019년 시범 운영을 목표로 마이크로스케일의 관측 인프라를 기반으로 한 국지규모의 기상정보 및 수요자 맞춤형정보서비스 플랫폼 (WISE)을 구축하는 사업을 진행하고 있다 (Korea Meteorological Administration, 2011 참조). 따라서 WISE (weather information system engine)의 정확성과 신뢰성 검증에 필요한 국제적 기준의 평가체계는 이 사업에 필수적이다.

WISE구축에는 초고분해능에 적합한 WRF (weather research and forecasting model)기반의 도시 미기상모델의 개발이 필요하며 (Kim 등, 2008; Boo와 Oh, 2000; Toshiaki 등, 1999), 이러한 모델은

[†] 이 논문은 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발 (WISE) 사업의 지원으로 수행되었음 (153-3100-3133-302-350).

¹ 교신저자: (100-715) 서울시 중구 필동 3가 26번지, 동국대학교 통계학과, 교수.
E-mail: kim3hj@dongguk.edu

² (100-715) 서울시 중구 필동 3가 26번지, 동국대학교 통계정보기술연구소, 연구원.

³ (100-715) 서울시 중구 필동 3가 26번지, 동국대학교 통계학과, 석사과정.

⁴ (121-835) 서울시 마포구 월드컵북로 434, SAIT 12층 기상기술개발원 차세대도시농림융합기상사업단, 단장.

초고속 물리과정모듈 및 자료동화모듈을 포함하는 다양한 미기상해석모듈 (이하 WISE 미기상해석모듈로 표기)을 기반으로 개발된다. 이에 WISE의 정확성과 신뢰성을 담보하기 위해서는 먼저 WISE 미기상해석모듈의 결과물 (진단 및 예측 정보)에 대한 평가체계의 설계가 필요하다. 특히, 미기상해석모듈의 평가는 미기상해석 모듈의 시-공간적인 특성에 맞게 설계된 다차원적인 평가체계가 필요하다 (Mora-Ramirez와 Garcia, 2012). 그러나 Kim 등 (2014)의 연구에 의하면 이러한 평가체계가 개발되어 운용된 사례는 없는 실정이다.

이 점에 착안하여, 본 논문은 미기상해석모듈의 출력물을 시-공간적 특성에 맞게 평가할 수 있는 평가체계를 설계하고, 이에 필요한 평가도구와 통계적 기법들을 제안하고자 한다. 이와 더불어, 제안된 통계적 기법의 유용성을 실증적으로 검증해 보이고자 한다. 따라서 본 논문의 체계는 다음과 같다. 2절은 미국기상청이 현재 활용하고 있는 기상해석모듈에 대한 평가체계를 벤치마킹하여 WISE 미기상해석모듈의 평가체계를 설계하고, 3절에서는 두 개 이상 그룹의 p 차원 시계열 $\{Z_t\}$ 들의 평균계열인 $\{\mu_t\}$ 의 동일성 검정법을 시계열스펙트럼분석 이론 하에서 설명하고, 이를 통해 WISE 미기상해석모듈 출력물의 정확성을 시-공간적 특성에 맞게 평가할 수 있는 시계열평균의 동일성검정 알고리즘을 구축한다. 4절은 Woo 등 (2014)과 Lee 등 (2014) 외 여러 연구에서 사용한 기존의 군집분석법과는 달리 알고리즘에 사용되는 동일성검정통계의 특정함수를 거리측도로 하는 시계열 군집분석법을 개발하고, 한반도 서남해안 속한 지역들의 군집분석 및 풍속평균의 동일성분석을 실행하여 앞 절에서 제안한 WISE 미기상해석모듈의 평가체계의 유용성을 실증적으로 보인다. 마지막으로, 5절은 본 논문의 결론과 향후 과제를 논한다.

2. WISE 미기상해석모듈의 평가체계 설계

2.1. 평가체계

선진기상국가 대부분이 운용하고 있는 기상해석모듈의 평가체계는 Figure 2.1과 같이 평가자료 입력 단계, 평가통계 계산단계, 분석 및 적합성 진단단계, 모듈 수정단계, 수정모듈의 출력물 생성단계로 이루어진 일련의 절차를 단계적으로 반복하여 기상모델에 적용될 수 있는 정확한 기상해석모듈을 최종적으로 개발할 수 있도록 설계되어 있다. 각 단계의 세부적인 수행내용은 다음과 같다.

- (i) 입력단계: 평가용 입력 자료는 평가대상인 기상해석모듈을 사용하여 특정장소에서 일정기간 동안 생성한 시계열자료 (예측자료 또는 상황자료)와 동일 장소의 기간 동안 시범 관측을 통해 수집한 시계열자료로 이루어진다.

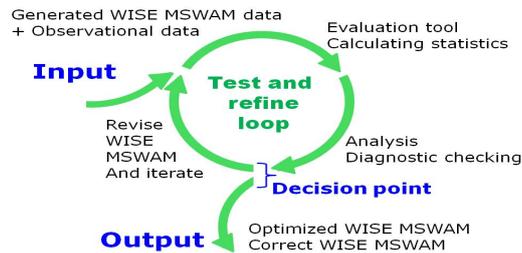


Figure 2.1 Evaluation system of micro scale weather analysis module (MSWAM)

- (ii) 평가통계 계산단계: 이 단계에서 사용되는 평가도구로서 미국기상청은 MET (model evaluation

tools; Developmental Testbed Center, 2013)를, 영국기상청은 SVS (standard verification system)를, 일본기상청은 MVI (model evaluation indices)를 각각 개발하여 기상모델출력정보의 정확성 평가에 필요한 평가통계를 계산한다. 참고로 Kim 등 (2014)은 MET, SVS 및 MVI에서 계산 가능한 양적평가통계 (quantitative verification statistic)들을 비교 분석하였다.

- (iii) 분석 및 적합성 진단단계: 계산된 평가통계에 적절히 고안된 분석기법을 적용하여, 평가대상인 기상해석모델의 정확성 평가, 모듈의 오류발견 및 수정의 필요성 여부를 판단하는 절차이다. 만약 이 단계에서 평가대상인 기상해석모델이 관측된 시계열에 적합한 것으로 판단되면 평가절차를 종료하고, 그렇지 않으면 다음의 단계를 실행한다.
- (iv) 모듈 수정단계: 기상해석모델이 관측된 시계열에 부적합한 원인들을 적합성 진단 결과를 통해 파악하고 수정하여 모듈의 적합성 (설명력 및 예측력)을 향상 시키는 단계.
- (v) 수정모델의 출력물 생성단계: 수정된 기상해석모델에 의해 입력단계 (i)에서 평가용 자료에 사용될 시계열자료 (예측자료 또는 상황자료)를 생성하는 단계.

따라서 기상해석모델 평가체계는 적합성 진단단계에서 평가가 종료될 때 까지 단계 (i)-(v)를 반복하는 평가절차로 이루어져 있다. 이상의 평가체계는 기상학 분야의 기상모델링 분야에서 모형평가, 모형의 오류발견 및 수정, 그리고 모형의 예측력향상에 이바지해 왔으며, WISE 미기상해석모델의 평가에도 동일한 평가체계를 사용할 계획이다. 다만, 기존의 기상해석모델의 평가체계와는 달리 WISE 미기상해석모델의 정확한 평가를 위해서는 복사과정모델이 생산하는 경계층고별 복사열과 같이 도시기상의 시-공간적 특성을 초고분해능으로 나타낸 다차원 시계열출력물을 평가하는 통계가 필요하다. 즉, 다차원 시계열출력물의 평균패턴, 변동패턴, 자기공분산행렬 및 주기성 등의 분석을 위한 다양한 평가통계가 필요하다. 안타깝게도 이들 평가통계들이 선진기상 국가에서 사용하고 있는 기존의 평가도구 (MET, SVS 및 MVI)에 포함되어 있지 않아, WISE 미기상해석모델의 평가체계에 적합한 평가도구의 개발이 필요하다.

2.2. 미기상해석모델 평가도구 (MET_WISE)

WISE구축을 위해서는 Kim 등 (2008), Boo와 Oh (2000), Toshiaki 등 (1999)의 제안과 같이 초고분해능에 적합한 WRF 기반의 도시미기상모델이 필요하며, 기상모델링을 위해 다양한 WISE 미기상해석 모델들이 현재 개발되고 있다. 따라서 WISE 미기상해석모델의 정확성 평가 및 수정을 위한 평가체계 및 평가도구도 초고분해능인 WISE 미기상해석모델의 결과물평가에 맞게 개발되어야 된다. 이러한 평가체계의 설계를 위해서는 대도시 미기상의 시-공간적인 특성을 평가할 수 있는 다차원 시계열에 대한 평가도구를 개발하여, 이를 기존의 평가체계에 추가로 반영시켜야 될 것이다 (Mora-Ramirez와 Garcia, 2012). 이 절은 현재 기상학분야에서 많이 사용되는 평가도구인 MET를 구성하는 평가기법을 간단히 설명하고, WISE 미기상해석모델의 시-공간적인 특성을 평가할 수 있는 평가통계를 개발하여 MET를 확장시킨 평가도구인 MET_WISE를 제안한다.

MET의 구성은 Figure 2.2에 나타난 것과 같이 자료준비 및 정제 (cleaning) 과정인 “평가자료 입력”, “입력자료 변환”, “자료 PLOT”과 자료 분석과정인 “평가통계계산” 및 “분석”으로 이루어졌다. Figure 2.2의 5열에서 첫 번째 6개로 표시된 MET 평가도구 중에서 Point-Stat, Grid-Stat, Mode, Wavelet-Stat가 현재 기상모델의 평가에 주로 사용된다. Point-Stat은 격자예보장 (gridded forecast field)을 기상관측소나 레이윈존데 (rawinsonde)등 관측지점에서 실측된 자료 (point data)와 비교하는 평가도구인데 반해, Grid-Stat는 평가대상인 격자에서 관측된 자료들로 만든 격자관측장 (gridded observation field)과 이에 대응하여 기상모델로 예측한 격자예보장과의 차이를 기술통계 및 신뢰구간을 통해 기상모델의 정도를 평가하는 도구이다.

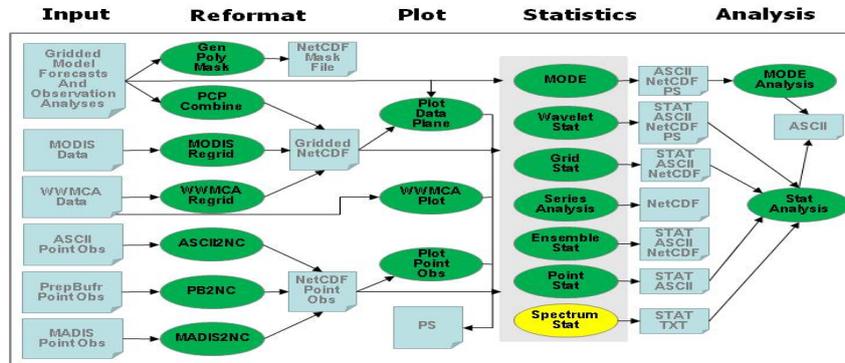


Figure 2.2 MET.WISE structure and modules. Elliptic areas represent software and modules, and rectangle areas represent input and output files

한편 MODE (method for object-based diagnostic evaluation)는 Grid-Stat과 평가의 목적은 같으나 기상모델의 정도를 Brown 등 (2007)과 Davis 등 (2006a), Davis 등 (2006b)이 제안한 객체기반 공간적 검증기법 (object-based spatial verification technique)으로 평가하는 평가도구이며, Wavelet-Stat는 격자관측장과 격자예보장의 일치 여부를 이들의 2차원-Harr Wavelet 필터에 의해 구해지는 예측 강도로서 평가하는 도구 (intensity-scale verification technique)로서, Casati 등 (2004)이 제안한 방법을 사용한다. 이상과 같이 MET는 다양한 목적의 평가도구들을 구비하고 있지만, 이들은 모두 횡단면 (cross-sectional)자료나 횡단면의 격자망의 평가를 위해 개발된 것으로 미기상해석모델의 다차원적 시계열의 평가에는 적용될 수 없는 도구들이다.

본 연구는 먼저 WISE 미기상해석모델에 의해 생성되는 다차원적 시계열출력물 (또는 시계열 격자예보장)과 이에 대응하는 관측시계열 (또는 시계열 격자관측장)의 일치성을 평가하여 WISE 미기상해석모델의 정확도를 객관적으로 검증할 수 있는 평가도구를 시계열 스펙트럼분석법을 사용하여 개발하고 Spectrum-Stat이란 평가도구를 만든다. 그리고 6개의 도구로 이루어진 MET의 구성에 Spectrum-Stat을 추가시켜 MET의 평가기능을 확장시킨 MET.WISE를 제안한다. Figure 2.2는 MET.WISE의 체계와 함께 본 연구에서 새로이 추가되는 Spectrum-Stat가 포함될 위치를 보여주고 있다.

3. 다차원 시계열평균의 동일성 검정

이상과 같이 본 연구에서 제안하는 평가체계는 Figure 2.2에 나타난 반복적 평가절차를 따르도록 설계되지만, 단계 2에서 사용되는 평가도구를 MET.WISE로 사용하는 점에서 MET, SVS, MVI 등을 사용하는 기존의 평가체계와 차별된다. MET.WISE에서 평가도구로서 포함되는 Spectrum-Stat은 Figure 3.1과 같이 일/다차원 시계열평균패턴의 동일성 검정 과 일/다차원 시계열변동패턴의 동일성 검정에 의해 실행되는 평가기법들로 구성되어 있다. Spectrum-Stat를 구성하는 일/다차원 시계열변동패턴의 동일성 평가기법은 Kim 등 (2014)이 제안하고 실증분석을 통해 그 유용성이 확인된 시계열 스펙트럼계산 및 동일성 검증 알고리즘을 사용할 것이다. WISE 미기상해석모델에서 생성되는 단/다변량 시계열과 관측시계열의 일치성을 시-공간적 특성에 맞게 평가하기 위해서는 시계열변동패턴의 동일성 평가와 더불어 시계열평균패턴의 동일성 평가도 역시 Spectrum-Stat에서 이루어져야 된다. 따라서 이 장에서는 Spectrum-Stat에 포함될 일/다차원 시계열평균패턴의 동일성 평가 기법을 제안한다.

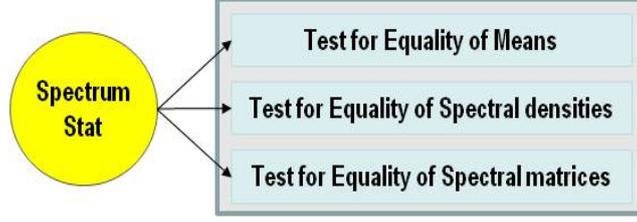


Figure 3.1 Components of Spectrum Stat

3.1. 평균시계열의 동일성 검정

$\{\mathbf{y}_{jkt} = (y_{jkt1}, y_{jkt2}, \dots, y_{jktp})^\top, t \in T\}$ 는 j 그룹에 속한 k 번째 개체로부터 얻은 p -차원 관측시계열을 나타내고, j 번째 그룹 ($j = 1, \dots, J$)의 속한 N_j ($k = 1, \dots, N_j$)개 개체들의 관측시계열은 모두 동일한 평균시계열벡터 $\{\boldsymbol{\mu}_{jt}, t \in T\}$ 와 정상자기공분산 (stationary autocovariance) $\Gamma_j(h)$ 를 가졌다고 하자. 단, $T = 0, \dots, n$ 이고 시차 $h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 이때 시계열 $\{\mathbf{y}_{jkt}, t \in T\}$ 와 $\{\boldsymbol{\mu}_{jt}, t \in T\}$ 의 이산형 푸리에변환 (discrete Fourier transform; DFT)을 통해 각 진동수 $\{w_\ell = \ell/n, (0 < w_\ell < 1/2)\}$ 별로 계산되는 DFT벡터 쌍은 다음과 같고, 두 DFT는 근사적으로 무상관이 된다.

$$\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell) = n^{-1/2} \sum_{t=1}^n \mathbf{y}_{jkt} e^{-2\pi i w_\ell t} \text{와 } \mathbf{M}_j(w_\ell) = n^{-1/2} \sum_{t=1}^n \boldsymbol{\mu}_{jt} e^{-2\pi i w_\ell t}. \quad (3.1)$$

한편 DFT벡터 $\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell)$ 의 근사적 확률밀도함수는

$$p(w_\ell) \approx |\mathbf{f}_j(w_\ell)|^{-1} \exp \left\{ -(\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell) - \mathbf{M}_j(w_\ell))^* \mathbf{f}_j(w_\ell)^{-1} (\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell) - \mathbf{M}_j(w_\ell)) \right\}$$

이다 (Shumway와 Stoffer, 2006, pp.416). 여기서 $\mathbf{f}_j(w_\ell)$ 는 p -차원 시계열 $\{\mathbf{y}_{jkt}, t \in T\}$ 의 $p \times p$ 스펙트럼행렬이며, 이것의 최대우도추정량은

$$\hat{\mathbf{f}}_j(w_\ell) = \frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} (\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell) - \mathbf{M}_j(w_\ell)) (\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell) - \mathbf{M}_j(w_\ell))^*$$

이다. 여기서 $(\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell) - \mathbf{M}_j(w_\ell))^*$ 는 $(\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell) - \mathbf{M}_j(w_\ell))$ 의 공액복소수를 나타낸다.

J 개 그룹 시계열평균벡터의 동일성 검정은 다음의 귀무가설 하에서 이루어진다.

$$H_0 : \boldsymbol{\mu}_{1t} = \boldsymbol{\mu}_{2t} = \dots = \boldsymbol{\mu}_{Jt} \equiv H_0 : \mathbf{M}_1(w_\ell) = \mathbf{M}_2(w_\ell) = \dots = \mathbf{M}_J(w_\ell), w_\ell \in (0, 1/2). \quad (3.2)$$

Khatri (1965)과 Hannan (1970)은 식 (3.1)에 정의된 벡터 DFT $\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell)$ 의 정규근사이론을 사용하여 귀무가설 (3.2) 하에서 모든 진동수 w_ℓ 에서 근사적으로 카이제곱분포를 따르는 검정통계량을 제안하였다.

$$-2 \left(\sum_{j=1}^J N_j - J - p - 1 \right) \log \left(\frac{|SPW(w_\ell)|}{|SPW(w_\ell) + SPB(w_\ell)|} \right) \sim \chi_{2(J-1)p}^2. \quad (3.3)$$

단, $SPW(w_\ell) = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{N_j} (\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell) - \mathbf{Y}_j(w_\ell)) (\mathbf{Y}_{jk}(w_\ell) - \mathbf{Y}_j(w_\ell))^*$ 는 급내교차-스펙트럼파워행렬 (within cross-power matrix), $SPB(w_\ell) = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{N_j} (\mathbf{Y}_j(w_\ell) - \mathbf{Y}_{..}(w_\ell)) (\mathbf{Y}_{.k}(w_\ell) - \mathbf{Y}_{..}(w_\ell))^*$ 는 급간교차-스펙트럼파워행렬 (between cross-power matrix)이다.

본 연구의 평가체계에 포함될 Spectrum-Stat은 귀무가설 (3.2)를 $J = 2$ 인 경우에 검정하는 절차를 포함시켜 미기상해석모듈이 생성하는 다차원 출력물과 실제 관측된 시계열벡터간의 일치성을 평가하는 기법으로 사용할 것이다. $J = 2$ 인 경우, 식 (3.3)은 Hotelling's T^2 통계량인

$$T^2(w_\ell) = \frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2} (\mathbf{Y}_1(w_\ell) - \mathbf{Y}_2(w_\ell))^* \hat{\mathbf{f}}_{pool}^{-1}(w_\ell) (\mathbf{Y}_1(w_\ell) - \mathbf{Y}_2(w_\ell))$$

이 된다. 단, $\hat{\mathbf{f}}_{pool}(w_\ell) = SPW(w_\ell)/(N_1 + N_2 - 2)$ 이며, 검정통계량 (3.4)는 $p = 1$ 인 단변량 시계열 평균의 동일성 검정에도 바로 적용된다. 그리고 특정 진동수 w_ℓ 에서 설정되는 귀무가설 (3.2)를 검정하기 위한 근사적 검정통계량은

$$\frac{(N_1 + N_2 - 2)p}{N_1 + N_2 - p - 1} T^2(w_\ell) \sim F_{2p, 2(N_1 + N_2 - p - 1)} \quad (3.4)$$

이다 (Giri, 1965). 물론, 검정통계량 (3.3)이나 (3.4)를 사용하여 귀무가설 (3.2)를 검정하기 위해서는 각 시계열그룹이 가진 스펙트럼행렬의 동일성에 대한 검정이 선행되어야하고, 이를 위한 검정법들은 Kim 등 (2014)에 자세히 설명되어 있다. 한편 모든 진동수에서 계산되는 Hotelling's T^2 통계량들의 평균형태인

$$d^2 = \frac{N_1 + N_2}{LN_1 N_2} \sum_{\ell=1}^L T^2(w_\ell) \quad (3.5)$$

를 두 시계열그룹의 평균 시계열벡터 $\{\boldsymbol{\mu}_{jt}, t \in T\}$ 의 유사성 측도로 사용하면, (3.5)는 p 차원 시계열 $\{\mathbf{y}_{jkt}, t \in T\}$ 들의 일치성 평가에 유용한 통계가 된다. 여기서, 시계열의 길이 n 이 짝수이면 $L = n/2$ 이 홀수이면 $L = (n - 1)/2$ 이 된다.

3.2. 평가 알고리즘

기상분야에서는 새로운 기상해석모듈이 개발되면, 시범지역을 정하고 모듈을 적용시켜 생성한 기상정보와 직접 관측한 기상정보를 비교분석하여 개발된 모듈의 정확성을 평가한다. 이러한 평가 작업은 기상해석모듈의 성능 (예측 및 상황정보의 정확성) 점검과 오류의 수정에 필요하다. 이 절에서는 3.1절의 다차원 시계열 평균의 동일성 검정통계를 사용하여 미기상해석모듈의 성능을 평가하는 기법을 제안한다. 이를 위해, 다변량 시계열 $\{\mathbf{y}_{jkt}, t \in T\}$ 의 DFT통계를 사용하여 구축한 평가알고리즘은 다음과 같다.

[평가 알고리즘]

선택된 N_j ($k = 1, \dots, N_j, j = 1, 2$)개 시범지역에서 관측 장비를 사용하여 “관측한 p 차원 시계열”을 $\{\mathbf{y}_{1kt} = (y_{1,1kt}, y_{2,1kt}, \dots, y_{p,1kt})^\top, t = 1, \dots, n\}$, 평가대상인 미기상해석모듈이 생성한 “출력물시계열”을 $\{\mathbf{y}_{2kt} = (y_{1,2kt}, y_{2,2kt}, \dots, y_{p,2kt})^\top, t = 1, \dots, n\}$ 라 하자.

[단계 1] 식 (3.1)에서 정의된 $\{\mathbf{y}_{1kt}, t = 1, \dots, n\}$ 와 $\{\mathbf{y}_{2kt}, t = 1, \dots, n\}$ 의 DFT통계로부터 계산된 검정통계량 (3.4)을 사용하여, 모든 진동수 (w_ℓ)별로 설정된 귀무가설 (3.2)를 유의수준 α/L ($\alpha = .05$)를 사용하여 차례로 검정한다. 여기서 L 은 식 (3.5)에 정의된 값을 나타낸다. 만약 L 개 진동수 중에서 적어도 한 개 진동수에 대한 귀무가설이 기각되면 [단계 2]를 진행하고, 모든 진동수가 채택되면 개발된 미기상해석모듈의 정확도가 높은 것으로 판단하고 평가를 종료한다.

[단계 2] $\{\mathbf{y}_{1kt}, t = 1, \dots, n\}$ 와 $\{\mathbf{y}_{2kt}, t = 1, \dots, n\}$ 를 분해시켜 p 개의 단변량 관측시계열과 미기상해석모듈 결과물시계열 쌍인 $\{y_{i,1kt}, t = 1, \dots, n\}$ 과 $\{y_{i,2kt}, t = 1, \dots, n\}$ 을 구한다, $i =$

$1, \dots, p$. 그리고 각 단변량 시계열 쌍의 DFT를 구하여 [단계 1]에서 기각된 진동수 ($w_{\ell'}$)에서 계산된 DFT통계의 평균의 동일성검정을 차례로 시행한다. 이때 사용할 검정통계량은 (3.4)에 $p = 1$ 을 대입시킨 것이고, 귀무가설은 (3.2)의 단변량 형태인 $H_0 : m_{1i}(w_{\ell'}) = m_{2i}(w_{\ell'})$ 이며, 유의수준은 α/p 값을 사용한다. 단, $\mathbf{M}_1(w_{\ell'}) = (m_{11}(w_{\ell'}), m_{12}(w_{\ell'}), \dots, m_{1p}(w_{\ell'}))^{\top}$.

[단계 3] 만약 [단계 2]에서 시행된 진동수 ($w_{\ell'}$)별 동일성검정에서 기각된 시계열 쌍이 $\{y_{i',1kt}, t = 1, \dots, n\}$ 과 $\{y_{i',2kt}, t = 1, \dots, n\}$ 이면, 두 시계열의 평균시계열 변동패턴을 면밀하게 비교분석하여 미기상해석모델의 오류를 발견하고 수정하는 작업을 통해 모듈을 개선시킨다. 개선된 미기상해석모델로부터 $\{\mathbf{y}_{2kt} = (y_{1,2kt}, y_{2,2kt}, \dots, y_{p,2kt})^{\top}, t = 1, \dots, n\}$ 을 다시 생성시켜 [단계 1]을 반복 수행한다.

[단계 1]을 통해 개선된 미기상해석모델의 평가가 종료될 때까지 위의 세 단계를 차례로 반복하여 실시한다. 참고로 제안된 평가 알고리즘을 실행하기 위해서는 Kim 등 (2014)의 방법을 사용하여 $\{\mathbf{y}_{1kt}, t = 1, \dots, n\}$ 와 $\{\mathbf{y}_{2kt}, t = 1, \dots, n\}$ 이 가진 스펙트럼행렬의 동일성검정 (Spectrum-Stat에 탑재될 예정)이 채택되어야 한다. 만약 이 검정에서 스펙트럼행렬의 동일성이 기각되면, 평가대상인 미기상해석모델은 시범지역의 기상변동패턴을 정확하게 설명할 수 없어 모듈의 개선이 필요한 것으로 판단한다. 한편, 알고리즘의 [단계 1]에서 귀무가설이 기각되면, 미기상해석모델 중에서 적어도 한 개의 시계열 생성모델의 성능이 좋지 않아 출력된 정보가 시범지역의 시-공간적인 특성을 정확히 반영하지 못하는 것으로 평가한다. 따라서 제안된 알고리즘이 Spectrum-Stat에 탑재되면 미기상해석모델의 정확성 평가 및 개선에 유용한 도구가 될 것이다. 또한, 다음 장에서 소개될 시계열 군집분석법은 제안된 평가 알고리즘이 시계열들의 군집분석에도 응용될 수 있는 것임을 보여준다.

4. 시계열 군집분석법에의 응용

이 절은 평가알고리즘에서 사용된 검정통계값의 함수를 거리측도로 사용하여 병합적 시계열군집분석법을 개발한다. 그리고 개발된 군집분석법을 한반도 남서해안 6개 지역에서 관측된 기상시계열 자료에 적용하여 그 유용성을 보인다.

4.1. 시계열 군집분석법

군집대상인 j 번째 개체 ($j = 1, \dots, J$)로 부터 N_j ($k = 1, \dots, N_j$)번 독립적으로 반복 관측된 p 차원 시계열을 $\{\mathbf{y}_{jkt} = (y_{1,jkt}, y_{2,jkt}, \dots, y_{p,jkt})^{\top}, t = 1, \dots, n, k = 1, \dots, N_j\}$ 라 할 때, 이들 시계열을 대상으로 한 군집분석은 다음의 단계로 이루어진다.

[단계 1] $\{\mathbf{y}_{jkt} = (y_{1,jkt}, y_{2,jkt}, \dots, y_{p,jkt})^{\top}, t = 1, \dots, n, k = 1, \dots, N_j\}$ 의 이산형 푸리에변환인 DFT벡터를 각 진동수 $\{w_{\ell} = \ell/n, (0 < w_{\ell} < 1/2)\}$ 별로 계산한다. 즉,

$$\mathbf{Y}_{jk}(w_{\ell}) = n^{-1/2} \sum_{t=1}^n \mathbf{y}_{jkt} e^{-2\pi i w_{\ell} t}.$$

[단계 2] $J C_2$ 개의 개체 쌍 (j 번째와 j' 번째 개체 쌍)을 대상으로, 각 쌍에서 계산된 시계열 DFT를 사용하여 Hotelling's T^2 통계값인

$$T_{jj'}^2(w_{\ell}) = \frac{N_j N_{j'}}{N_j + N_{j'}} (\mathbf{Y}_j(w_{\ell}) - \mathbf{Y}_{j'}(w_{\ell}))^* \hat{\mathbf{f}}_{pool}^{-1}(w_{\ell}) (\mathbf{Y}_j(w_{\ell}) - \mathbf{Y}_{j'}(w_{\ell}))$$

를 계산하여 $J C_2 \times J C_2$ 거리행렬 $\mathbf{D} = \{d_{jj'}^2\}$ 을 구한다. 단, 두 개체 (j 번째와 j' 번째 개체 쌍)의 거리측도 (distance measure)는 Hotelling's T^2 통계값의 평균형태인

$$d_{jj'}^2 = \frac{N_j + N_{j'}}{LN_j N_{j'}} \sum_{\ell=1}^L T_{jj'}^2(w_\ell), \quad j \neq j' \quad (4.1)$$

이다.

[단계 3] 거리행렬 $\mathbf{D} = \{d_{jj'}^2\}$ 에 계층적군집법의 병합적 (agglomerative hierarchical) 군집 알고리즘 (최단연결법, 최장연결법, 평균연결법, Ward법)을 적용시켜 J 개 개체의 안정적인 군집 G 개를 구한다. 이때 사용되는 군집의 수 결정과 안정성검토 방법은 Timm (2002)에 자세히 설명되어 있다.

[단계 4] 검정통계량 (3.3)을 사용하여 G 개 군집시계열의 평균패턴의 동일성 검정을 실시한다. 단, g 번째 군집에 속한 개체의 시계열은 $n_g (g = 1, \dots, G)$ 개 이며 $\sum_{g=1}^G n_g = J$ 이다.

참고로 J 개 개체가 너무 많거나 또는 $N_j = 1 (j = 1, \dots, J)$ 인 경우는 비계층적 군집법 중에 가장 많이 사용되는 K-평균법 (K-means method)을 시행한다. 이때 군집분석에 사용될 각 개체의 관측벡터는 [단계 1]에서 계산되는 j 번째 개체의 시계열관측벡터 $\{\mathbf{y}_{jkt}, t = 1, \dots, n\}$ 의 각 진동수 $\{w_\ell = \ell/n, (0 < w_\ell < 1/2)\}$ 별 DFT벡터의 평균값 $\mathbf{Y}_j = \sum_{\ell=1}^L \sum_{k=1}^{N_j} \mathbf{Y}_{jk}(w_\ell) / (LN_j)$ 이 된다.

4.2. 모의실험

병합적 시계열군집분석법의 [단계 2]에서 새로이 개발된 거리측도는 두 개체 간의 거리를 스펙트럼 이론 하에서 정의하였다. 즉 각 개체에서 관측된 다변량 시계열의 빈도수 별 스펙트럼에서 계산된 Hotelling's T^2 통계값들의 평균형태인 (4.1)을 거리측도로 사용하였다. 따라서 새로이 제안된 거리측도의 값이 두 쌍의 다변량 시계열에 포함된 평균시계열 벡터들의 유사성 (similarity) 정도에 따라 민감하게 반영하는지의 여부는 제안된 시계열군집분석의 유효성과 직결된다. 이 절에서는 간단한 모의실험을 통해 (4.1)에서 정의된 거리측도의 민감성 진단을 통해 제안된 시계열군집분석법이 유효한 것임을 보이고자 한다.

모의실험에 사용된 이변량시계열 모형은 식 (4.2)이며, δ_j 값에 따라 평균시계열벡터 $\{\mathbf{x}_t(\delta_j); t = 1, \dots, n\}$ 가 상이한 13개의 이변량 시계열을 생성하게 구성하였다.

$$\begin{cases} \mathbf{y}_{jt} = \mathbf{x}_t(\delta_j) + \mathbf{v}_t, & t = 1, \dots, n, \\ \mathbf{x}_t(\delta_j) = \Phi_1(\delta_j)\mathbf{x}_{t-1} + \boldsymbol{\varepsilon}_t, & \delta_j = 0.05 \times j; j = 0, \dots, 12, \\ \mathbf{v}_t = \Phi_2\mathbf{v}_{t-1} + \mathbf{e}_t, & \mathbf{e}_t \sim N_2(\mathbf{0}, \Sigma), \quad \boldsymbol{\varepsilon}_t \sim N_2(\mathbf{0}, \Sigma). \end{cases} \quad (4.2)$$

단, $\Phi_1(\delta_j) = \begin{pmatrix} -0.1 - \delta_j & 0.5 \\ 0 & 0.3 + \delta_j \end{pmatrix}$, $\Phi_2 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0.1 & 0.1 \end{pmatrix}$ 으로 두어 모형 (4.2)가 정상성조건 (stationarity condition)을 만족하게 하였으며, $\Sigma = \begin{pmatrix} 1 & -0.2 \\ -0.2 & 1.04 \end{pmatrix}$ 이다.

모형 (4.2)로부터 $n = 150$ 시점으로 이루어진 13개의 상이한 평균시계열벡터를 가진 이변량 시계열자료를 $N_j = 20$ 번과 50번 반복하여 생성하였다. 이렇게 생성된 자료로부터 $\delta_j = 0$ 인 모형과 $\delta_j \neq 0$ 인 모형 간의 거리측도 (d_{0j}^2 으로 표기)를 (4.2)에 의해 계산한 결과를 Figure 4.1과 Table 4.1에 나타내었다. Figure 4.1과 Table 4.2는 δ_0 ($\delta_j = 0$)인 모형과 $\delta_j \neq 0$ 인 모형 간의 거리측도를 계산한 d_{0j}^2 값들이 δ_j 값이 커짐에 따라 단조증가하는 형태를 보이고 있다. 이는 본 논문에서 새로이 개발된 거리측도인 (4.2)가 두 쌍의 다변량 시계열에 포함된 평균시계열 벡터들의 유사성 (similarity) 정도에 따라 민감하게 반영하는 것이며, 이 거리측도를 사용한 시계열군집분석법은 유효한 기법이 됨을 나타낸다.

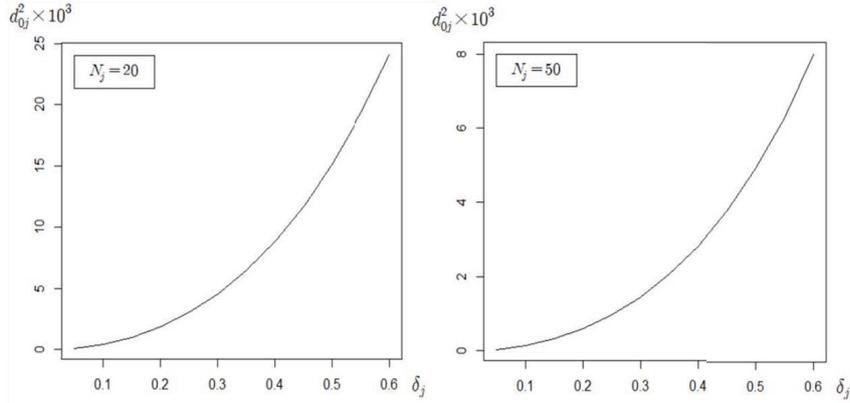


Figure 4.1 Monotone increasing pattern of $d_{0j}^2 \times 10^3$ over δ_j

Table 4.1 Calculated distance $d_{0j}^2 \times 10^3$ over different values of δ_j and N_j

$\delta_j \setminus N_j$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
20	0.10	0.43	1.01	1.86	3.03	4.56	6.50	8.89	11.79	15.27	19.36	24.08
50	0.03	0.14	0.32	0.59	0.96	1.44	2.06	2.83	3.77	4.92	6.30	7.99

4.3. 사례연구 자료설명

앞에서 제안된 시계열 군집분석법의 유용성을 실증적 사례연구에 의해 보이고자 한다. 이를 위해 사용된 자료는 2004년 7월 1일부터 8월 30일까지 남서해안의 광주, 목포, 완도, 장흥, 진도, 해남 6개 기상 관측소에서 관측된 시간별 평균 풍속 (㎞/h)와 시간별 평균 습도 (%)이다. 관측된 이변량 시계열 자료는 현재 반복 측정된 자료가 없어, 7월 1일부터 8월 30일까지의 자료를 짝수 시간에 관측된 자료와 홀수 시간에 관측된 자료로 분리하여 수집하였으며, 이들을 두 번 반복 관측된 시계열 자료인 것으로 간주하고 분석에 사용하였다.

4.4. 군집분석결과

Figure 4.2는 6개 지역 기상시계열 자료의 스펙트럼밀도함수를 나타낸 것이다. 두 그림에 의하면 풍속 시계열과 습도 시계열의 스펙트럼함수형태가 완도, 진도와 광주, 목포, 장흥, 해남의 2개의 군집으로 구분되는 것처럼 보인다. 이들 지역의 스펙트럼밀도함수를 군집분석 절차인 [단계 1]과 [단계 2]에 적용시켜 d_{jj}' (단, $j \neq j'$)를 계산하였다. 이 두 단계로부터 구한 거리행렬 $D = \{d_{jj}'\}$ 와 Hotelling's T^2 검정통계를 사용하여 시행한 평균 시계열의 동일성 검정 결과는 Table 4.2와 같다.

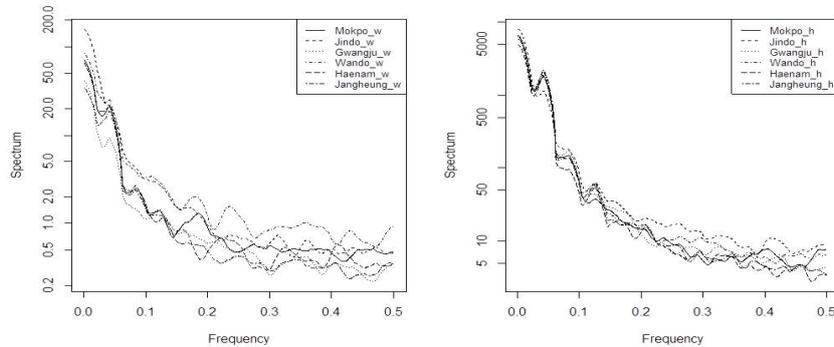


Figure 4.2 Spectral density of wind velocity & humidity of 6 regions in July and August

Table 4.2 Distance matrix of 6 regions and test results

	Gwangju	Mokpo	Wando	Jangheung	Jindo	Haenam
Gwangju	0					
Mokpo	1439.4980*	0				
Wando	523.4802*	1341.9410*	0			
Jangheung	307.8875*	588.1063*	246.9373*	0		
Jindo	1679.3500*	8716.9380*	299.9241*	403638.5000*	0	
Haenam	127.4294*	1983.2140*	7806.9410*	600.1583*	16390.2700*	0

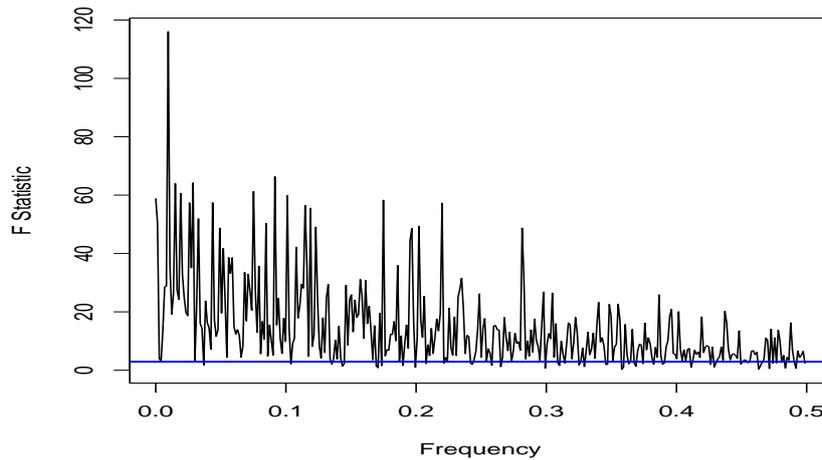
* : p-value <0.05

군집분석 [단계 3]은 앞에서 구한 $D = \{d_{jj'}^2\}$ 에 최단연결법, 최장연결법, 평균연결법, Ward군집방법을 차례로 적용시켜 군집분석을 실시하였다. 이들 중에서 세 가지 군집방법이 동일한 군집결과를 보였으며 그 결과는 Table 4.3과 같다. 따라서 군집분석결과 6개 지역의 풍속-습도시계열 평균시계열패턴은 군집1 완도, 진도와 군집2 광주, 목포, 장흥, 해남의 두 가지 평균시계열패턴으로 나눌 수 있어 Figure 4.1이 보여준 것과 동일한 결론을 얻었다.

Table 4.3 Results of clustering

clustering method	cluster	
	1	2
single	Mokpo	Gwangju, Wando, Jindo, Jangheung, Haenam
complete	Wando, Jindo	Gwangju, Mokpo, Jangheung, Haenam
average	Wando, Jindo	Gwangju, Mokpo, Jangheung, Haenam
Ward	Wando, Jindo	Gwangju, Mokpo, Jangheung, Haenam

마지막 [단계 4]에서는 [단계 3]에서 구한 군집 1과 군집 2에 속한 지역의 이변량 시계열들을 대상으로, 평균패턴의 동일성을 검정통계량 (3.4)에 의해 검정하였다. Figure 4.3은 군집 1 완도, 진도와 군집 2 광주, 목포, 장흥, 해남에서 관측된 기상시계열 자료의 평균패턴이 가진 스펙트럼함수를 사용하여 계산한 검정통계값 (F 값)과 임계값 ($F_{0.05}(4, 18) = 2.9277$ 이며, 수평선으로 표시됨)을 진동수별로 도시한 것이다. Figure 4.3에 의하면, 군집 1과 군집 2의 풍속-습도시계열 평균패턴들이 대부분의 진동수에서 서로 유의한 차이가 있음을 알 수 있다.

**Figure 4.3** Tests of equality of means of spectra between cluster 1 and cluster 2

5. 결론 및 토의

WISE 미기상해석모듈은 서울과 같은 대도시의 복사에너지, 열, 습도 등의 순환을 초고분해능 ($1Km \times 1Km$ 이하의 해상도)으로 설명하고 모의실험 할 수 있게 개발한 모델이다. 본 논문은 선진 기상국가들이 사용하고 있는 고분해능 ($1Km \times 1Km$ 이상의 해상도)인 기상모델 출력물의 평가체계 및 평가도구들에 대해 논의하고, 이들을 확장시켜 WISE 미기상해석모듈의 정확도 평가에 사용될 수 있는 평가체계를 제시하였다. 이를 위해, 미국기상연구소가 개발한 고분해능 기상모델 출력물의 평가도구 (MET)에 Spectrum Stat를 추가시킨 MET-WISE를 개발하였다. 또한 이를 평가도구로 사용하는 WISE 미기상해석모듈의 평가체계를 제시하였다. Spectrum Stat은 시계열 스펙트럼분석기법을 사용하여 미기상해석모듈이 대도시 미기상의 시-공간적인 특성 (변동패턴 및 평균패턴)을 정확히 반영하는지를 검증할 수 있는 평가도구이다. 특히 Spectrum Stat에 포함된 시계열 평균패턴의 동일성 검정통계는 시계열 군집분석에서 거리측도로 사용될 수 있어, 시계열 군집분석법의 개발도 가능하게 하였다. 한반도 서남해안 6개 지역의 기상관측시계열을 사용한 사례연구를 통해 제안된 시계열 군집분석이 유용함을 보였다.

따라서 본 논문의 결과는 다음과 같이 요약된다. 첫째, 본 논문은 비모수통계적 방법인 시계열 스펙트럼분석기법에 의해 미기상해석모듈의 정확성에 대한 검증알고리즘을 제안하였다. 둘째, 동일성검정통계의 함수를 거리측도로 사용하는 시계열 군집분석법을 개발하여 사례연구를 통해 제안된 군집분석법과 평가알고리즘의 유용성을 보였다.

한편, WISE 미기상해석모듈의 개발과 시범관측사업은 현재 진행 중에 있어, 제안된 WISE 미기상해석모듈 평가체계 및 평가알고리즘의 유효성분석에 필요한 자료가 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 한반도 서남해안 6개 지역의 기상관측시계열을 사용한 군집분석을 통해 Spectrum Stat을 구성하는 평가통계들의 유용성을 보임으로서, WISE 미기상해석모듈 평가알고리즘의 유용성을 간접적으로 보였다. 앞으로, WISE 미기상해석모듈의 개발과 시범관측사업이 완료되면, WISE 미기상해석모듈 평가체계 및 평가알고리즘의 유효성 및 민감도를 실증적으로 분석할 것이다.

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.
- Brown, B. G., Bullock, R., Gotway, J. H., Ahijevych, D., Davis, C., Gilleland, E. and Holland, L. (2007). Application of the mode object-based verification tool for the evaluation of model precipitation fields. *Proceedings of AMS 22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting and 18th Conference on Numerical Weather Prediction*, American Meteorological Society, <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/124856.pdf>.
- Casati, B., Ross, G. and Stephenson, D. B. (2004). A new intensity-scale approach for the verification of spatial precipitation forecasts. *Meteorological Applications*, **11**, 141-154.
- 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.
- Developmental Testbed Center (2013). *Model evaluation tools version 4.1 (METv4.1)*, Boulder, Colorado, USA.
- Giri, N. (1965). On the complex analogues of T^2 and R^2 Tests. *The Annals of Mathematical Statistics*, **36**, 664-670.
- Hannan, E. J. (1970). *Multiple time series*, Wiley, New York.
- Khatri, C. G. (1965). Classical statistical analysis based on a certain multivariate complex gaussian distribution. *The Annals of Mathematical Statistics*, **36**, 98-114.

- Kim, H. J., Kwak, H. R., Kim, Y. N. and Choi, Y. J. (2014). Time series clustering algorithm for evaluation of micro scale weather analysis module: Application to cluster analysis of wind direction of six southwest AWS regions. *Journal of the Korean Data Analysis Society*, **16**, 2427-2437.
- 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.
- Lee, M., Lim, J., Park, C. and Lee, K. E. (2014). Functional clustering for clubfoot data: A case study. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **25**, 1069-1077.
- Mora-Ramirez, M. A. and Garcia, A. R. (2012). Evaluation of WRF-CHEM simulations with the unified post processor (UPP) and model evaluation tool (MET). *Proceeding of the 11th Annual CMAS Conference*, 15-17.
- Shumway, R. H. and Stoffer, D. S. (2006). *Time series analysis and its applications with R examples*, 2nd Ed., Springer, New York.
- Timm, N. H. (2002). *Applied multivariate analysis*, Springer, New York.
- Toshiaki, I., Shimodozono, K. and Hanaki, K. (1999). Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, **33**, 3897-3909.
- Woo, S. Y., Lee, J. W. and Jhun, M. (2014). Microarray data analysis using relative hierarchical clustering. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, **25**, 999-1009.

A spectrum based evaluation algorithm for micro scale weather analysis module with application to time series cluster analysis[†]

Hea-Jung Kim¹ · Hwa-Ryun Kwak² · Yu-Na Kim³ · Young-Jean Choi⁴

¹³Department of Statistics, Dongguk University

²Institute of Statistical Information and Technique, Dongguk University

⁴Center for Atmospheric Science & Earthquake Research

Received 7 November 2014, revised 4 December 2014, accepted 15 December 2014

Abstract

In meteorological field, many researchers have tried to develop micro scale weather analysis modules for providing real-time weather information service in the metropolitan area. This effort enables us to cope with various economic and social harms coming from serious change in the micro meteorology of a metropolitan area due to rapid urbanization such as quantitative expansions in its urban activity, growth of population, and building concentration. The accuracy of the micro scale weather analysis modules (MSWAM) directly related to usefulness and quality of the real-time weather information service in the metropolitan area. This paper design a evaluation system along with verification tools that sufficiently accommodate spatio-temporal characteristics of the outputs of the MSWAM. For this we proposes a test for the equality of mean vectors of the output series of the MSWAM and corresponding observed time series by using a spectral analysis technique. As a byproduct, a time series cluster analysis method, using a function of the test statistic as the distance measure, is developed. A real data application is given to demonstrate the utility of the method.

Keywords: Design of evaluation system, micro scale weather analysis module, multivariate spectral analysis, spacio-temporal data, test for equality of time series mean.

[†] This work was supported by the Korea Meteorological Administration Research and Development Program under Grant Weather Information Service Engine (WISE) project (153-3100-3133-302-350).

¹ Corresponding author: Professor, Department of Statistics, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea. E-mail: kim3hj@dongguk.edu

² Researcher, Institute of Statistical Information and Technique, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea.

³ Graduate student, Department of Statistics, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea.

⁴ Director, Center for Atmospheric Science & Earthquake Research, Seoul 121-835, Korea.