

난류 모수화 방법에 따른 대기경계층 수치모의 특성에 관한 연구

전원배 · 이화운* · 이순환¹⁾

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 환경문제연구소
(2009년 8월 31일 접수; 2009년 11월 9일 수정; 2009년 11월 26일 채택)

Numerical Study on Characteristics of Turbulence Scheme in Planetary Boundary Layer

Won-Bae Jeon, Hwa Woon Lee*, Soon-Hwan Lee¹⁾

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Institute of Environment Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Manuscript received 31 August, 2009; revised 9 November, 2009; accepted 26 November, 2009)

Abstract

This paper investigates the characteristics of turbulence schemes. Turbulence closures are fundamental for modeling the atmospheric diffusion, transport and dispersion in the boundary layer. In particular, in non-homogeneous conditions, a proper description of turbulent transport in planetary boundary layer is fundamental aspect. This study is based on the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) and combines four different turbulence schemes to assess if the different schemes have a impact on simulation results of vertical profiles. Two of these schemes are Isotropic Deformation scheme (I.Def) and Anisotropic deformation scheme (A.Def) that are simple local scheme based on Smagorinsky scheme. The other two are Mellor-Yamada scheme (MY2.5) and Deardorff TKE scheme (D.TKE) that are more complex non-local schemes that include a prognostic equation for turbulence kinetic energy. The simulated potential temperature, wind speed and mixing ratio are compared against radiosonde observations from the study region. MY2.5 shows consistently reasonable vertical profile and closet to observation. D.TKE shows good results under relatively strong synoptic condition especially, mixing ratio simulation. Validation results show that all schemes consistently underestimated wind speed and mixing ratio but, potential temperature was somewhat overestimated.

Key Words : Turbulence scheme, PBL, RAMS

1. 서론

대기 경계층은 지표면과 자유대기를 연결하는 고도 2 km 이하의 대기층을 말하는데, 경계층 내에서는

인간의 활동이 이루어지기 때문에 이 층 내의 대기질은 인간의 건강에 직접적으로 영향을 미친다. 또한 안정한 자유대기에 비하여 태양복사에 의한 일중 변동이 급격한 지표면과 맞닿아 있기 때문에 경계층의 대기환경은 상대적으로 급격히 변화하는 경향이 있다. 특히, 지표면의 직접적인 영향에 의한 열적, 기계적 난류로 인해 연직 혼합이 활발하게 나타나며, 지표 냉각에 의한 기온역전 등의 요인들에 의해 매우 복잡한 형

*Corresponding Author : Hwa Woon Lee, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-(0)51-510-2291
E-mail: hwlee@pusan.ac.kr

태의 대기유동장이 나타난다. 대기경계층 내에서는 지표면의 비균질성에 의해 기류의 변화가 일어나게 되며, 이는 각종 기상 현상을 유발하게 된다(이와 박, 1996; Lee와 Kimura, 2001). 특히, 해안선을 경계로 열속의 뚜렷한 차이가 나타나는 연안지역의 경우 거칠기와 열 및 수분속의 수평변화가 크기 때문에 복잡한 형태의 대기유동장이 나타난다. 이러한 대기 경계층 내에서의 기상현상은 지표 거칠기, 지표면 부근의 연직쉬어, 대기 불안정 등에 의해 발생하는 난류의 영향을 크게 받는데 특히, 운동량, 열, 수증기량의 연직 수송은 난류 확산의 영향을 크게 받게 된다(이 등, 2002; 하 등, 2002). 이러한 연직방향으로의 난류 수송 및 확산의 차이는 지상에서의 수렴 및 발산 강도의 차이를 유발하므로, 수평 방향으로의 유동장 차이와도 밀접한 관련을 가지게 되기 때문에 연안지역에서의 대기유동장 수치모의 시에는 난류 확산에 대한 올바른 이해가 매우 중요하다.

수치모형에는 일반적으로 이론적 특징에 따른 다양한 종류의 난류 모수화 방법이 포함되어 있기 때문에 적절한 난류 모수화 방법의 선택적 사용이 가능하다. 특히, 대기 경계층 내의 유동장 수치모의 시에는 난류 모수화 방법의 차이에 따른 연직 방향으로의 열속, 수분속 및 운동량속 전달의 차이가 크기 때문에 수치모의 결과의 차이가 크게 나타날 수 있다. 기상 모형별 난류 모수화 방법의 특성들에 대한 연구는 다양하게 이루어져 왔으며(Trini Castelli 등, 2006; Zhang 과 Zheng, 2004), 각 난류 모수화 방법에 따른 국지 기상장의 차이에 대한 연구 또한 다양하게 이루어져 왔다. Zängel 등(2008)은 산악지형에서 난류 모수화 방법에 따른 연직 기상요소의 차이에 관해 연구한 바 있고, Srinivas 등(2007)은 인도의 첸나이 연안지역을 대상으로 기상 수치 모형 MM5 (5th generation Mesoscale Model)의 난류 모수화 방법에 따른 해륙풍 모의 결과의 차이를 살펴보았다. 그리고 모수화 방법에 따른 연직 혼합강도와 혼합고 예측 정확도가 다르게 나타나는 것을 보였다. 이러한 수치 연구들은 주로 정확한 수치모의 결과를 위한 대상 지역의 지형적 특성을 고려한 적절한 난류 모수화 방법의 선택에 관한 것들이며, 기상상태에 따른 모수화 방법에 대한 특성연구는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 한반도 남부 광

양 지역을 대상으로 대기 수치모형 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)의 난류 모수화 방법에 따른 대기 경계층 내에서의 연직 기상장 변화를 수치모의하고, 이들의 종관적인 환경에 따른 반응 특성을 살펴보았다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상지역 및 관측 개요

본 연구는 전라남도 남동부에 위치한 광양만 일대를 연구대상지역으로 설정하였다. 이 지역은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 산지 및 강과 바다를 포함하는 매우 복잡한 지형을 가지고 있다. 북쪽은 백운산을 중심으로 하여 높고 낮은 산들이 동서로 늘어서 있으며, 광양만을 중심으로 남서쪽으로는 여수반도가 자리 잡고 있고 동남쪽으로는 남해도가 자리 잡고 있다. 특히, 이 지역은 최근에 생겨난 매립지와 간척지들로 인해 해안선의 형태가 매우 복잡한데 이러한 지형적 특징에 의해 풍계가 매우 국지적으로 나타난다. 또한 해륙풍과 산곡풍 또는 지형에 의한 미세 기류의 영향으로 바람의 이유와 확산의 양상이 매우 다양하게 나타나는 특징을 가진다. 이러한 대상지역의 연직 기상요소 분포를 파악하고, 수치모의 결과와 비교하기 위해 라디오존데를 이용한 집중관측을 실시하였다. 관측지점은 광양시 금호동 일대의 위도 34.93°, 경도 127.73° 지점이며, 관측일시는 2007년 8월 24일 07시, 12시, 15시, 21시 그리고 25일 06시, 12시로 총 6회 관측을 실시하였다. 관측요소는 기온, 기압, 풍향, 풍속, 수증기량이었으며 각 요소들의 연직 분포를 관측하였다.

2.2. 연구 사례일

대기 경계층 내에서의 기상요소 변화를 살펴보기 위해 종관장의 영향이 크지 않고 날씨가 맑았던 2007년 8월 24일 09LST부터 26일 09LST까지를 수치모의 사례기간으로 선정하였다. 이 기간 동안 대상지역의 풍속은 약했으며, 고기압 하의 안정된 대기와 강한 일사에 의해 기계적 난류 보다는 열적 난류가 우세하였고 대기경계층의 일변화가 뚜렷하게 나타났다. Fig. 2는 사례기간동안의 지상 종관 일기도를 나타낸 것으로, 24일의 경우 한반도 전체가 확장된 북태평양 고기

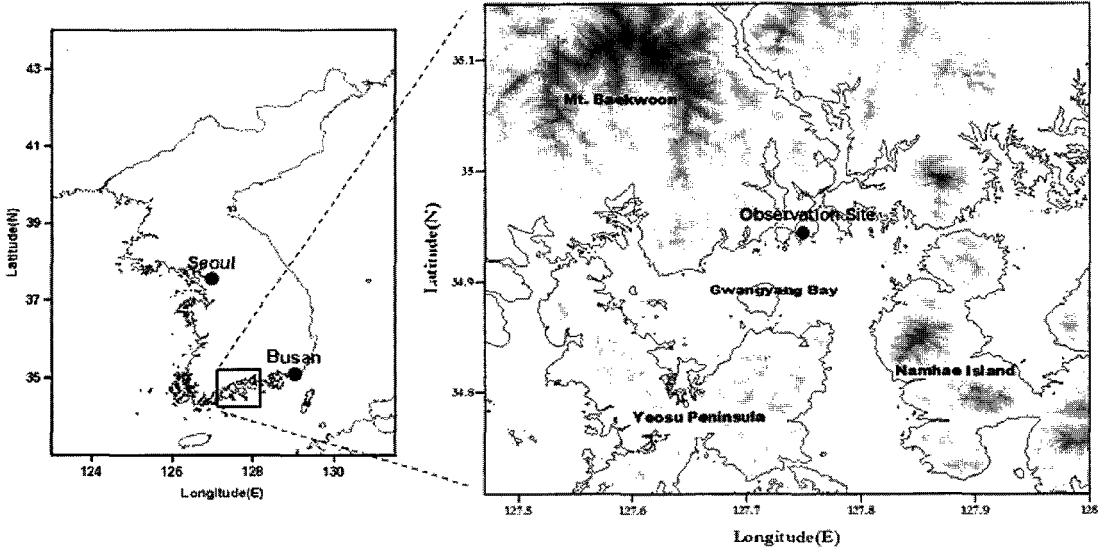


Fig. 1. Map of Korean Peninsula(left panel) where Gwangyang area(square) is highlighted. The inset figure in the right panel shows domain used in RAMS and radiosonde observation site is denoted(●).

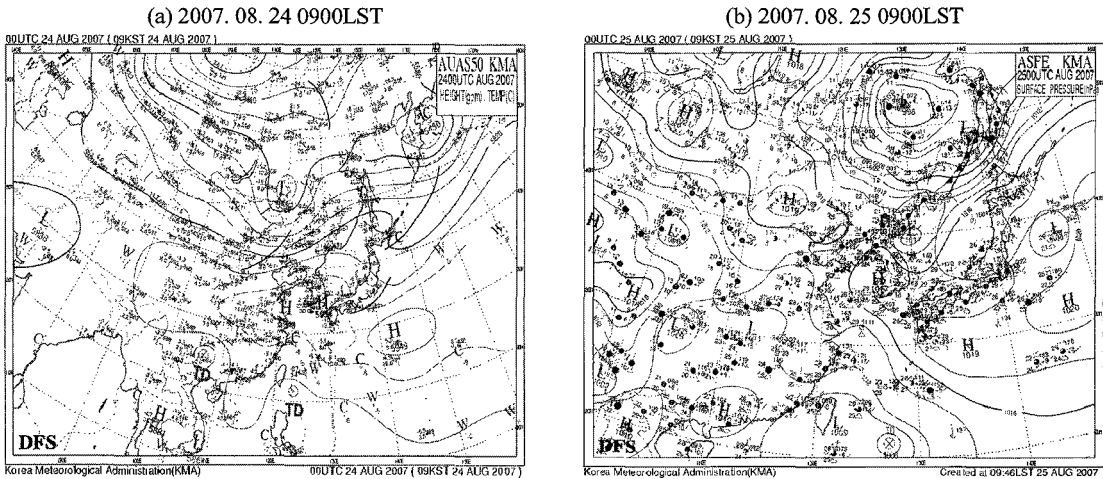


Fig. 2. Surface weather chart at (a) 0900LST on 24 and (b) 0900LST on 25 August.

압의 연변에 위치하여 매우 맑은 날씨를 유지하고 있으며, 전체적으로 남동풍 계열의 바람이 지배적으로 나타나고 있으나 그 풍속은 매우 약하게 나타났다. 그리고 정체성 고기압에 의한 대기의 침강으로 매우 안정적인 대기의 상태가 유지 되었다. 25일의 경우 우리나라가 북태평양 고기압의 가장자리에 위치해 맑은 날씨를 보였으나, 시베리아지역에서 접근한 저기압의 영향으로 전날에 비해 풍속이 다소 강하게 나타났으며 특히, 상층의 지균풍이 강하게 나타났다.

2.3. 모형 개요 및 실험 설계

본 연구에 사용된 모형은 RAMS로서 미국 콜로라도 주립대학에서 개발되어 다양한 기상현상을 규명하는데 사용되는 3차원 기상모형이다(Pielke 등, 1992). RAMS는 비정수형 지배방정식을 기초로 제작되었으며, 연직 지형 준거 좌표계를 기준으로 격자가 형성된다. 또한 전 지구 규모의 대기 순환에서부터 미규모 국지 순환에 이르는 다양한 규모의 기상현상 규명에 이용되며, 진단장 및 예보장의 생성이 가능하다. 수평 좌

표계는 Arakawa-C 격자 구조(Mesinger와 Arakawa, 1976)로 증규모 및 국지규모의 기상현상 해석에 매우 유리하고, 연직 좌표계는 지형을 따르는 시그마 좌표계 (σ_z terrain-following coordinate system)를 사용한다. 다중격자체계의 사용으로 여러 개의 단방향 및 쌍방향 등지격자를 사용할 수 있으며 물리량 모수화와 관련된 방법들을 선택적으로 적용 가능한 장점이 있다.

수평격자의 크기는 250 m 로 하여 복잡한 지형적 특징을 모형에 잘 반영할 수 있도록 하였고, 격자의 수는 가로 200, 세로 200개로 하여 광양만을 포함하도록 하였다. 연직층수는 30개로 하였으며 각 층의 고도는 최하층인 50 m 고도부터 1.15배의 비율로 증가하도록 설정하였다. 적운 모수화 에는 Kuo의 방법(Kuo, 1974)을 사용하였으며, 복사 모수화에는 단파와 장파 모두 Mahrer와 Pielke의 방법(Mahrer와 Pielke, 1977)을 사용 하였다. 2층의 다중 층을 적용하여 지중온도와 수분을 예측하는 다층 지중 모형을 적용하였다. 난류 모수화 방법을 제외한 모든 초기와 경계조건을 같이 적용하여 2007년 8월 23일 21LST 부터 2007년 8월 25일 21LST 까지 총 48시간을 수치모의 하였으며, 초기 및 경계 자료는 CDAS (Climate Data Assimilation System) 자료를 사용하였다. 수치모의 된 기상요소의 연직 분포와 라디오존데 관측 자료와의 비교를 통해 각 난류 모수화 방법별 수치모의 특성을 분석하고자 하였으며 실험개요는 Table 1과 같다.

2.4. RAMS의 난류 모수화 과정

본 연구에 적용된 RAMS의 난류 모수화 방법은 총 4가지로 Mellor와 Yamada의 방법(Mellor와 Yamada, 1982) (이하 MY2.5), 비등방성 변형 방법 (이하 A.Def), 등방성 변형 방법 (이하 I.Def), Deardorff의

방법(Deardorff, 1980) (이하 D.TKE)이다. 이들 방법들은 기본적으로 K-이론에 기반 하며, 에디 확산 계수의 계산 방법에 차이가 있다. 모수화 방법 MY2.5는 에디 확산 계수의 계산에 있어 수평과 연직의 확산 계수를 달리 계산한다. 수평 에디 확산 계수의 계산에는 Smagorinsky의 방법(Smagorinsky, 1963)을 사용하며, 연직적으로는 Helfand와 Labraga의 방법(Helfand와 Labraga, 1988)을 이용한다. Smagorinsky의 방법은 유체의 국지적 변형률에 기반을 두며, 에디 확산 계수를 계산함에 있어 Brunt- Vaisala 진동수(Hill, 1974)와 Richardson 수(Lilly, 1962)와 같은 무차원 수 그리고 경험 상수 값을 사용한다. 수평방향의 에디 확산 계수는

$$K_{m-horiz} = \rho_0 \max [K_{min-h}, (C_x \Delta x)^2 \{S_2^{0.5}\}] \text{ 이며,}$$

여기서 ρ_0 는 공기의 밀도, C_x 는 혼합거리이론에서 수평거리계산에 적용되는 무차원수, S_2 는 수평 에디 변형을 나타낸다. Helfand와 Labraga의 방법은 에디 확산 계수의 계산에 경험 상수값과 난류 혼합 길이 그리고 난류 운동 에너지 값을 사용하며, 난류 혼합 길이의 계산은 Blackadar의 방법(Blackadar, 1962)을 사용한다.

연직 방향의 에디 확산 계수는 $K_{m-vert} = S_m l (2E)^{1/2}$ 이며, 난류 혼합 길이 l 은

$$l = \frac{kz}{1 + kz/l_\infty}, \quad l_\infty = a_\infty \int \frac{z \sqrt{E} dz}{\sqrt{E} dz} \text{ 로 표현된다. (여기}$$

서, z 는 고도, k 는 Von Karman 상수, E 는 난류 운동 에너지)

A.Def는 수평 에디 확산 계수의 계산 시 Smagorinsky의 방법을 사용하며, 연직 확산 계수의 경우 수평 확산 계수와의 비례 관계를 이용하여 계산된다. 또한 A.Def

Table 1. Details of the grids and the physics options used in RAMS

| | Case1 | Case2 | Case3 | Case4 |
|-------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------|
| Horizontal Grid | | 200 x 200 | | |
| Grid Resolution | | 250 m | | |
| Vertical layers | | 30 layers | | |
| Radiation Scheme | | Mahrer-Pielke | | |
| Cumulus Scheme | | Kuo | | |
| Turbulence Scheme | Mellor-Yamada | Anisotropic Deformation | Isotropic Deformation | Deardorff TKE |
| Initial data | | NCEP/NCAR Reanalysis data(CDAS) | | |
| Time period | | 2007.8.23 21LST ~ 2007.8.25.21LST | | |

는 수평적인 운동 규모와 연직적인 운동 규모가 다르다는 것을 가정한다. 반면, I.Def의 경우 A.Def와 동일 하지만 수평적인 운동 규모와 연직적인 운동규모가 같다고 가정 하는 차이점을 가진다. D.TKE는 난류 운동 규모의 등방성을 가정하며, 난류 운동 에너지와 난류 혼합 길이의 계산을 통해 에디 확산 계수를 계산한다. D.TKE에서의 난류 혼합 길이 l 은 다음과 같이 표현된다.

$$l = \frac{kz}{1 + kz/l_\infty}, \quad l_\infty = 0.009u_* / f \quad (\text{여기서, } u_* \text{는 마찰속도, } f \text{는 코리올리 수})$$

3. 수치모의 결과

대기 경계층 내에서 난류 모수화 방법의 차이에 따

른 연직 기상요소의 수치모의 결과 차이를 살펴보기 위해 온위, 풍속, 수증기량의 연직 분포를 관측치와 함께 비교해 보았다. 대기가 비교적 안정한 상태에서의 결과와 불안정한 상태에서의 결과를 살펴보기 위해 종관장의 영향이 매우 약했던 24일과 상대적으로 강했던 25일의 결과를 각각 살펴보았다. 또한 일중 대기의 상태가 비교적 안정적인 새벽 시간대와 연직 혼합이 활발해 대기가 불안정한 오후 시간대의 결과를 비교해 보기 위해 난류 모수화 방법별 차이가 비교적 크게 나타났던 24일 07시, 15시 그리고 25일 06시, 12시의 결과를 집중적으로 비교 분석 하였다.

3.1. 연직 온위 분포

Fig. 3은 각 난류 모수화 방법별 연직 온위 분포의

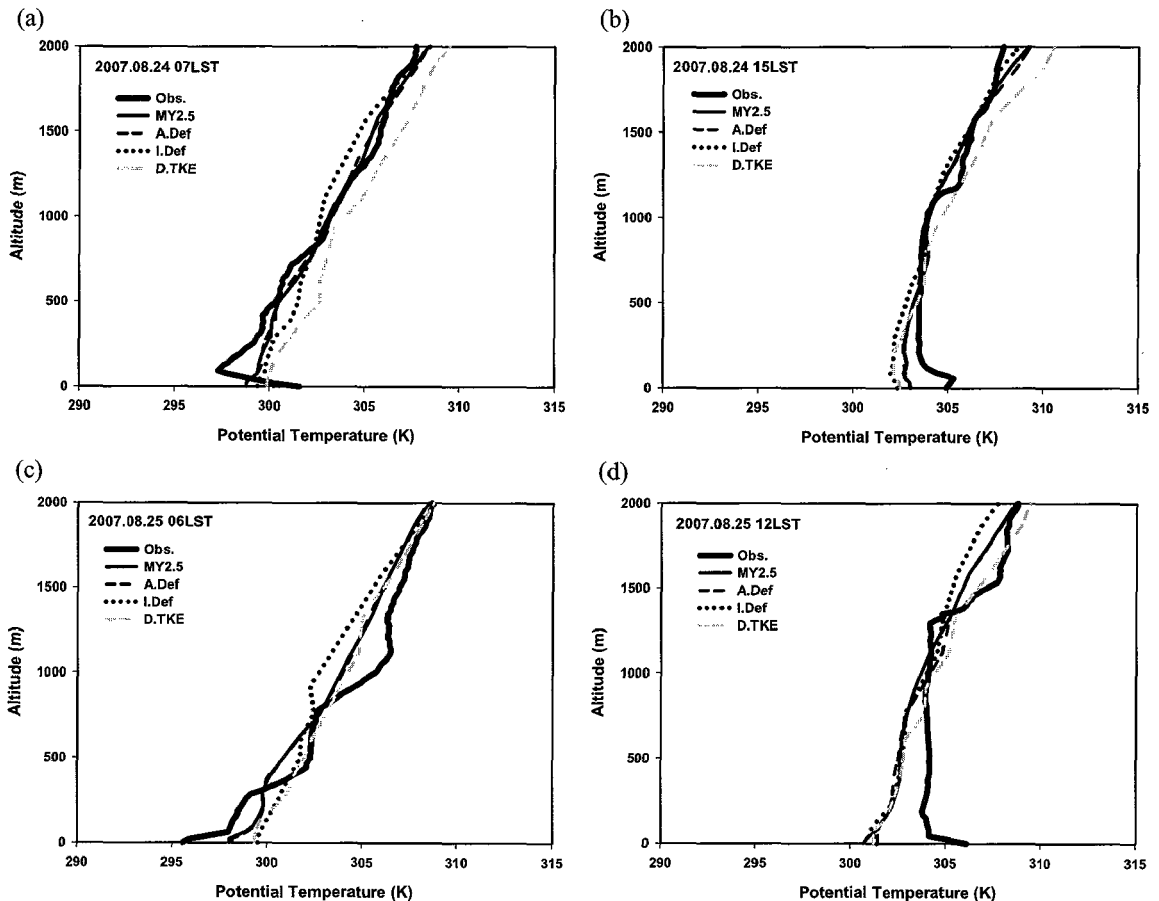


Fig. 3. Simulated vertical potential temperature for each turbulence scheme and measured radiosonde data at (a) 07LST on 24, (b) 15LST on 24, (c) 06LST on 25 and (d) 12LST on 25 August 2007.

모의 결과를 관측치와 함께 나타낸 것이다. 종관 대기가 안정한 24일 07시의 관측 연직 온위 분포를 보면, 지표면 부근 고도 100 m까지의 하층 대기 역전층이 잘 나타난다. 이는 Fig. 2에서 설명한 바와 같이 안정한 종관 상태에 의하여 발생한 복사 역전으로 판단되지만, 수치실험에서는 모수화 방법에 관계없이 대기의 복사 역전을 잘 모사하지는 못하고 있다. 하지만 접지 역전을 제외하면 전체적인 온위 분포는 모든 모수화 방법에서 잘 표현되었다. 특히 MY2.5의 경우 2 km이내의 모든 고도의 온위분포를 매우 높은 정밀도로 표현한다. 반면 D.TKE는 온위를 전 층에서 과대 모의하는 경향을 나타낸다. 태양 복사에너지가 가장 강한 24일 15시의 경우, 고도 700 m 까지 혼합층이 성장하고 있으며, 약간의 강도 차이는 있지만 모든 모수화 실험에서 이를 잘 나타낸다. 새벽 시간대의 결과와 달리 각 모수화 방법별 결과의 차이가 크지는 않았지만, D.TKE의 경우 다른 방법들에 비해 온위를 과대 예측하였다.

25일 06시의 경우 24일 07시에 관측된 복사역전이 나타나지 않는다. 이는 종관 기상환경에 따라 강한 풍속이 나타나기 때문에 지표 복사 역전이 나타나지 않는 것으로 판단된다. MY2.5의 결과가 관측치와 가장 유사하게 나타나고 있는 가운데, 약 300 m 고도를 기준으로 그 하층에서는 온위를 과대 예측하는 경향이 나타났고 반대로 그 상층에서는 과소 예측하는 경향이 나타났다. MY2.5는 다른 방법들에 비해 하층의 온위는 낮게, 상층의 온위는 높게 모의 하여 관측치와의 일치도가 높게 나타났다. 주간 시간대인 24일 12시의 경우 일사에 의해 혼합고가 약 1300 m 고도까지 성장하여 종관 풍속이 약한 24일에 비해 높게 나타났다. 이는 강한 종관 풍속에 의해 기계적인 혼합강도가 크게 나타난 결과로 보여진다. 새벽 시간대의 결과와 달리 각 모수화 방법별 결과의 차이가 크지는 않았지만, I.Def에서 온위가 가장 과소 예측되었고, D.TKE의 경우 자유대기와 대기혼합층의 경계면인 유입대 부근에서의 온위 변화가 다른 과정들에 비해 잘 표현되어 관측치와의 일치도가 높게 나타났음을 확인 할 수 있다. 한편, Fig. 4는 각 시간대의 실험별 온위의 Root Mean Squared Error(이하 RMSE) 값을 나타낸 것인데 MY2.5, A.Def, I.Def의 경우 24일의 결과가 25일의

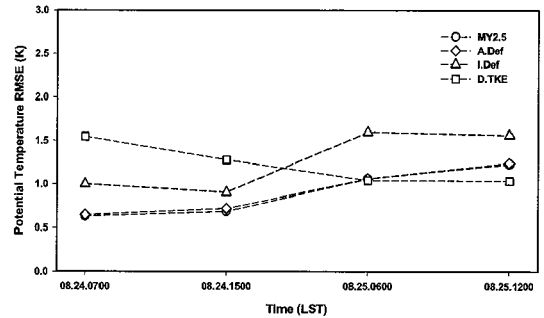


Fig. 4. Time evolution of potential temperature RMSE at surface level.

결과보다 좋게 나타났음을 볼 수 있는 반면, D.TKE의 경우 반대로 25일의 결과가 더 좋게 나타났음을 확인할 수 있다. 앞서 일기도 분석에서 살펴본 바와 같이 25일의 경우 우리나라 상층에 기압골이 접근하면서 24일에 비해 다소 강한 종관 상태를 보였다. D.TKE의 경우 상대적으로 안정한 대기 상태에서의 온위 모의에 있어서는 다른 모수화 방법들에 비해 좋지 않은 결과를 보였지만, 반대의 상태에서는 정확한 온위 모의 결과를 보여주었음을 확인 할 수 있다.

온위의 분석결과를 종합해 보면 MY2.5와 A.Def가 유사한 결과를 보였지만, 관측치와의 일치도에 있어서 MY2.5가 가장 좋은 결과를 보였다. I.Def의 경우 다른 방법들에 비해 상층에서의 온위를 과소 예측하는 경향이 강했고, D.TKE 또한 전체적으로 온위를 과대 예측하는 경향이 강했다. 하지만 D.TKE는 종관장의 영향이 상대적으로 강한 경우에는 다른 방법들에 비해 좋은 결과를 보여주었다.

3.2. 연직 풍속 분포

Fig. 5는 각 난류 모수화 방법별 연직 풍속 분포의 모의 결과를 관측치와 함께 나타낸 것이다. 관측된 풍속의 연직 분포를 보면 지표면 거칠기의 영향으로 풍속이 급감하는 접지층 내에서의 풍속 감소(Deardorff, 1978)가 나타나고 있는데, 수치 실험에서는 이러한 경향이 잘 모의되지 못했고 전체적으로 풍속이 과대 예측되었다. 24일 07시의 결과에서는 MY2.5와 A.Def는 고도에 따른 풍속의 변화가 크지 않았던 반면, D.TKE는 고도별 풍속의 변화가 가장 크게 나타났다. I.Def의 경우 유입대 부근으로 갈수록 풍속을 과대 예

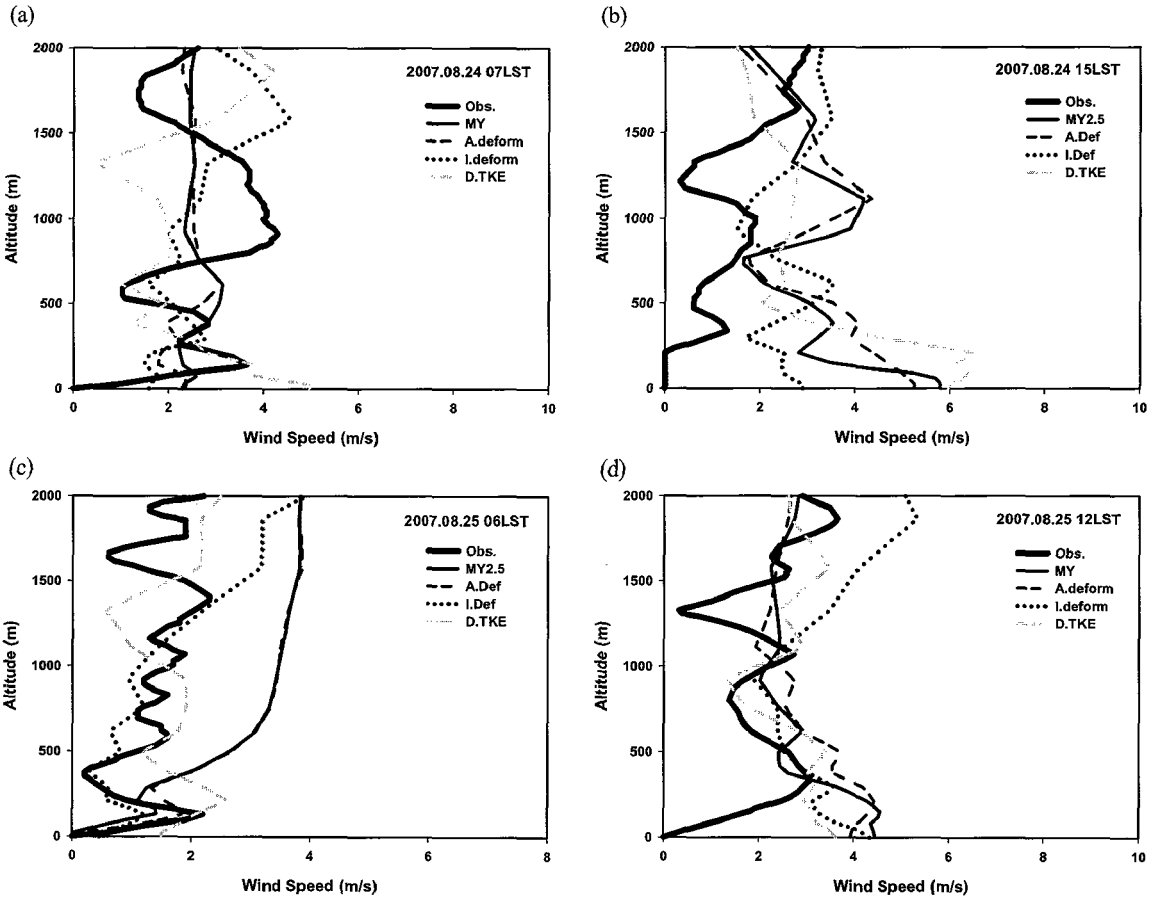


Fig. 5. Same as Fig. 3, but for wind speed.

측하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 24일 15시의 경우 연직 혼합이 활발한 혼합층 내에서의 난류 모수화 방법별 풍속 차이가 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 전체적으로 풍속이 과대 예측되는 경향이 나타났으며, I.Def가 다른 방법들에 비해 관측치와 가장 잘 일치하는 모습을 보여주었다. D.TKE는 07시의 결과와 마찬가지로 하층에서는 풍속을 과대 예측, 상층에서는 과소 예측함으로써 고도별 풍속 변화가 가장 크게 나타났다. 25일 06시의 결과를 보면 난류 모수화 방법별 풍속의 차이가 크게 나타나지 않았지만 MY2.5의 경우 다른 과정들에 비해 전체적으로 풍속을 과대 예측한 모습을 볼 수 있다. I.Def와 D.TKE가 관측치와의 높은 일치도를 보였지만, 24일 07시의 결과와 마찬가지로 유입대 부근에서는 풍속이 과대 예측 되는 모습을 확인 할 수 있었다. 25일 12시의 결과 또한 실험

별 차이가 크지 않았으며, D.TKE와 MY2.5의 결과에서 관측치와의 일치도가 높게 나타났다. I.Def의 경우 하층에서는 좋은 결과를 보였으나, 약 1100 m 고도 이상에서는 풍속을 과대 예측함으로써 관측치와 가장 낮은 일치도를 보였다. Fig. 6에 나타난 각 시간대의 난류 모수화 방법별 풍속의 RMSE값을 살펴보면 전체적으로 I.Def가 좋은 결과를 보였음을 확인 할 수 있었다. 특히, I.Def의 경우 대기가 상대적으로 안정적이었던 24일, 그리고 상층에서 보다는 하층에서의 모의 결과가 좋게 나타났음을 알 수 있는데 이는 D.TKE와는 반대 결과이다.

풍속의 모의 결과를 종합해 보면 모든 모수화 방법에서 풍속을 과대 예측하는 경향이 나타났으며, MY2.5와 A.Def는 고도별 풍속의 변화가 크지 않은 가운데 비교적 정확한 풍속 모의결과를 보여주었

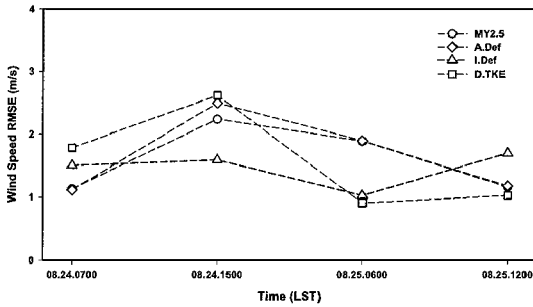


Fig. 6. Same as Fig. 4, but for wind speed.

다. I.Def와 D.TKE는 하층과 상층의 풍속 변화가 크게 나타났으며 특히, I.Def의 경우 하층 풍속의 모의 정확도가 높게 나타났고, 상대적으로 안정한 상태에서의 모의 결과가 좋게 나타났다. 반면, D.TKE는 상대적으로 불안정한 상태에서 뛰어난 풍속 모의 결과를 보여주었다.

3.3. 연직 수증기량 분포

난류 모수화 방법별 수증기량 연직 분포의 모의 결과를 관측치와 함께 Fig. 7에 나타내었다. 전체적으로 관측치에 비해 수증기량이 과대 예측되는 결과를 볼 수 있는데, 새벽 시간대에는 하층에서의 실험별 결과 차이가 크게 나타났던 반면, 상층으로 갈수록 차이가 작아지는 경향을 보임을 확인 할 수 있다. 반면, 주간 시간대의 경우 혼합층 내에서의 활발한 연직 혼합에 의해 하층에서는 실험별 결과의 차이가 크지 않지만 상층으로 갈수록 그 차이가 커짐을 볼 수 있다. 앞서 살펴본 연직 온위의 결과에서는 다른 방법들에 비해 과소예측 되는 결과를 보였던 I.Def의 경우 수증기량 모의에 있어서는 오히려 다른 과정들에 비해 과대 예측 하는 결과를 보였다. 마찬가지로 다른 난류 모수화 방법들에 비해 온위를 과대 예측 했던 D.TKE의 경우

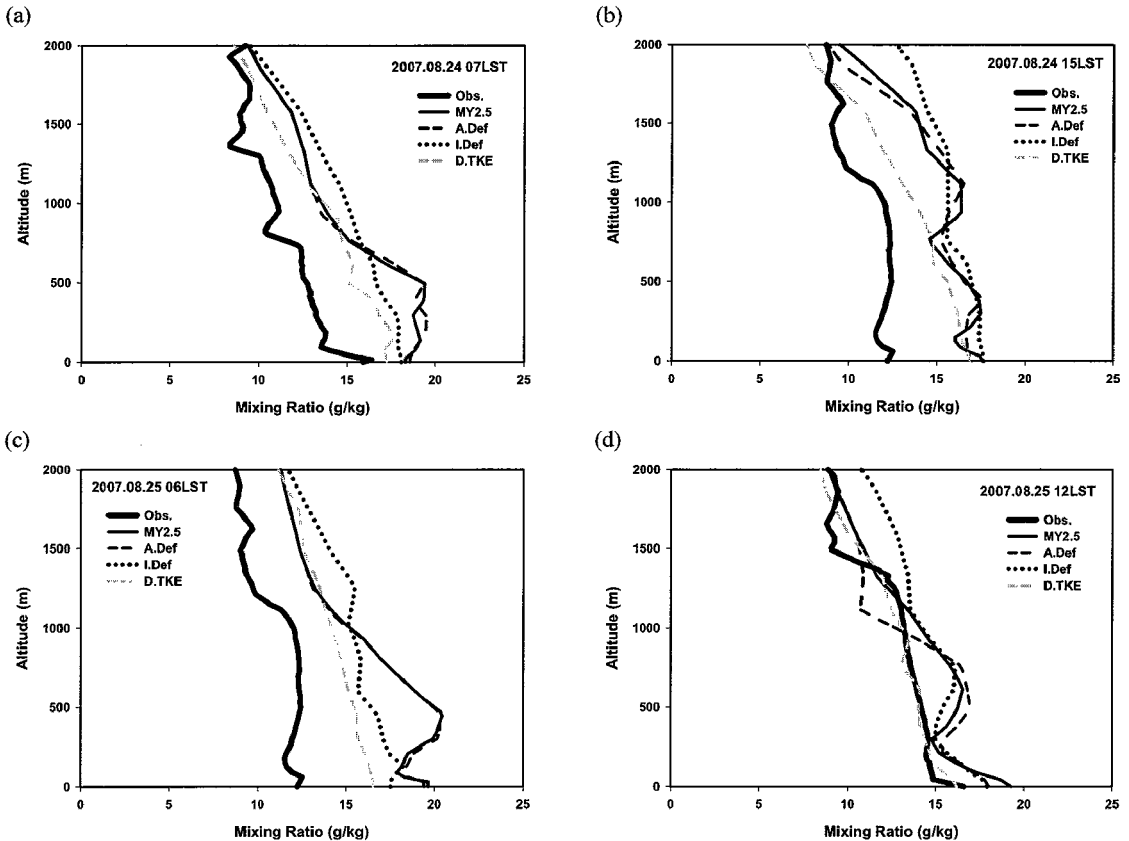


Fig. 7. Same as Fig. 3, but for mixing ratio.

또한 수증기량 모의 결과에 있어서는 다른 과정들에 비해 과소 예측 하여 관측치와의 일치도가 가장 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히, 하층보다는 상층으로 갈수록 관측치와의 일치도가 높아짐을 확인 할 수 있었는데, 이는 앞서 온위 분석결과에서 언급한 바와 같이 대기경계층 최상부와 자유대기와의 에너지 교환을 D.TKE에서 적절하게 표현한 결과로 사료된다. 한편 Fig. 8은 각 시간대의 실험별 수증기량의 RMSE값을 나타낸 것이다. 온위의 RMSE 결과와 마찬가지로 MY2.5, A.Def, I.Def는 모두 유사한 결과를 보여주고 있는 반면, D.TKE의 경우 다른 과정들과 결과의 차이를 보이고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 7의 연직 분포 모의 결과에서 확인 할 수 있었던 결과와 마찬가지로 D.TKE의 경우 수증기량 모의에 있어서 다른 과정들에 비해 뛰어난 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

이러한 수증기량 모의 결과에 대한 분석을 위해

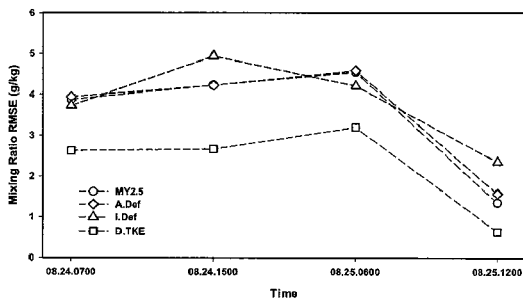


Fig. 8. Same as Fig. 3, but for mixing ratio.

지상에서의 순열속과 잠열속의 시계열을 분석해 보았다. Fig. 9는 지상에서의 순열속과 잠열속의 시간 변화를 나타낸 것인데, 대기가 매우 안정적이었던 24일의 경우 난류 모수화 방법에 따른 차이가 크게 나타나지 않았다. 하지만 25일에는 D.TKE와 다른 과정들과의 차이가 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있는데, 12시의 순열속 값을 보면 다른 과정들에 비해 D.TKE에서 상대적으로 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 특히, 잠열속 값의 경우 다른 모수화 방법들에 비해 D.TKE에서 매우 크게 나타나고 있는 것을 볼 때 D.TKE가 상향으로의 잠열속 전달에 있어 다른 모수화 과정들에 비해 높은 정확도를 가지는 것으로 보여진다. 이는 수증기량의 연직 분포 결과에서 D.TKE가 관측치와 가장 유사한 결과를 나타낸 이유라고 사료된다.

수증기량의 모의 결과를 종합해 보면 모든 모수화 방법에서 수증기량이 전체적으로 과대 예측되는 경향을 확인할 수 있었다. MY2.5와 A.Def는 특히 하층에서의 수증기량을 과대 예측 하였던 반면, I.Def는 상층에서의 모의결과가 과대 예측 되었다. D.TKE는 다른 방법들에 비해 높은 정확도로 수증기량을 모의 하여 관측치와의 일치도가 높게 나타났다.

3.4. 통계 분석

수치모의 결과의 통계적 분석을 위해 Mean Bias (이하 MB), RMSE 그리고 Index Of Agreement(이하 IOA) 값을 이용하였다. MB와 RMSE값은 모형에서 예측된 결과와 실제 관측치의 평균적 차이를 나타내

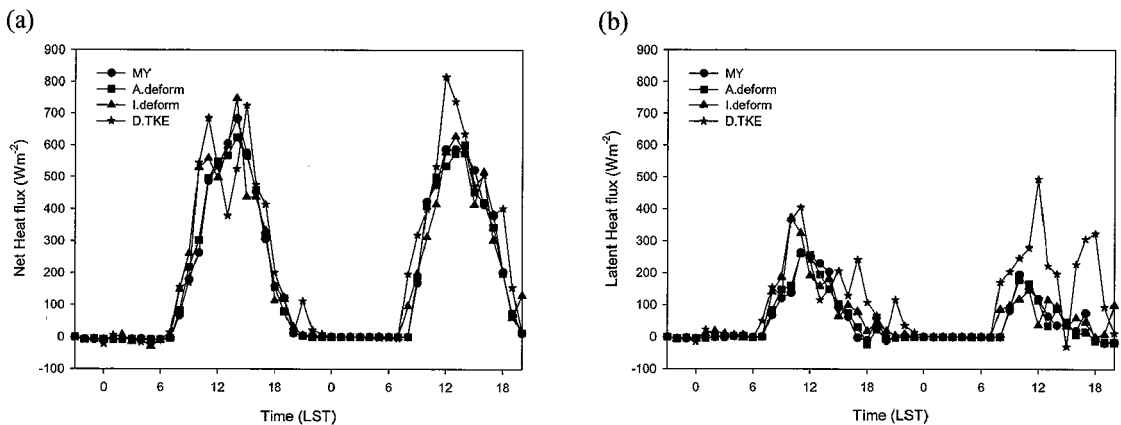


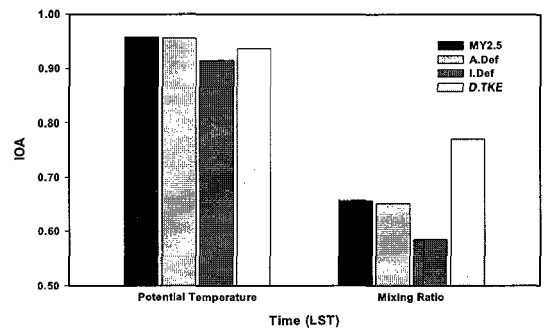
Fig. 9. Diurnal variation of net heat flux and latent heat flux at surface level for each case.

Table 2. Evaluated Root Mean Squared Error and Mean Bias of potential temperature and mixing ratio, "Total" refers to mean value

| Potential Temperature | RMSE | | | | MB | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | MY2.5 | A.Def | I.Def | D.TKE | MY2.5 | A.Def | I.Def | D.TKE |
| 08.24 0700 LST | 0.63 | 0.65 | 1.00 | 1.55 | -0.25 | -0.27 | -0.16 | -1.43 |
| 08.24 1500 LST | 0.69 | 0.72 | 0.90 | 1.28 | 0.12 | 0.09 | 0.30 | -0.25 |
| 08.25 0600 LST | 1.06 | 1.06 | 1.60 | 1.04 | 0.49 | 0.48 | 0.61 | 0.17 |
| 08.25 1200 LST | 1.23 | 1.24 | 1.56 | 1.04 | 0.63 | 0.59 | 0.87 | 0.21 |
| Total | 0.90 | 0.92 | 1.27 | 1.23 | 0.25 | 0.22 | 0.40 | -0.32 |
| Mixing Ratio | MY2.5 | A.Def | I.Def | D.TKE | MY2.5 | A.Def | I.Def | D.TKE |
| 08.24 0700 LST | 3.87 | 3.94 | 3.73 | 2.62 | -3.48 | -3.52 | -3.56 | -2.32 |
| 08.24 1500 LST | 4.22 | 4.22 | 4.94 | 2.66 | -2.40 | -2.33 | -2.89 | -1.26 |
| 08.25 0600 LST | 4.54 | 4.58 | 4.21 | 3.19 | -3.18 | -3.20 | -3.12 | -2.40 |
| 08.25 1200 LST | 1.34 | 1.57 | 2.35 | 0.64 | -0.66 | -0.52 | -1.42 | -0.09 |
| Total | 3.50 | 3.58 | 3.80 | 2.28 | -2.43 | -2.39 | -2.75 | -1.52 |

는 개념이므로 그 값이 작을수록 모형의 모의 능력이 뛰어난 것을 의미한다. 반면 IOA값은 모형의 예측결과와 관측치와의 일치도를 나타내는 개념으로서, 0~1사이의 값을 가지고 1일 때 두 결과가 완벽한 일치도를 가진다.

모형값과 관측치의 MB 및 RMSE값을 Table 2에 정리하였다. 대기 경계층 내에서는 활발한 열적, 기계적 혼합에 의해 대기가 불안정하기 때문에 정확한 연직 풍속의 모의가 쉽지 않다. 본 연구의 수치 실험 결과 또한 모든 모수화 방법에서 관측치와의 일치도가 충분히 높지 못했기 때문에 풍속의 결과는 통계분석에서 제외하였다. 온위의 결과에서는 MY2.5가 가장 좋은 결과를 보여주었으며, D.TKE는 다른 방법들에 비해 온위를 과소 예측 하는 경향을 나타내었다. 수증기량의 결과를 보면 전체적으로 관측치에 비해 모델값이 과소 예측 되는 결과를 확인 할 수 있으며, 다른 방법들에 비해 D.TKE에서 좋은 결과가 나타났음을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 10은 전체 기간 동안의 요소별 평균 IOA값을 나타낸 것인데 온위의 경우 MY2.5가 0.96으로 나타나 다른 방법들에 비해 좋은 결과를 보여주었고, 수증기량의 경우 D.TKE가 0.77로 가장 좋은 결과를 나타내었다. 통계 분석 결과를 종합해 보았을 때, MY2.5가 기상요소 및 종관장의 상태에 따른 결과의 차이가 가장 작게 나타났으며 전체적인 결과 또한 가장 좋게 나타났었다. D.TKE는 종관장이 상대적으로 강한 경우에 다른 과정들에 비해 좋은 결과를 보

**Fig. 10.** Evaluated mean Index Of Agreement of potential temperature and mixing ratio.

여 주었고 특히, 수증기량의 모의에 있어서 뛰어난 결과를 보여주었다. 하지만 비교적 안정적인 대기 상태에서의 결과는 가장 좋지 않게 나타나 모의 결과가 종관장의 상태에 매우 민감하게 반응함을 확인할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 난류 모수화 방법에 따른 대기 경계층 내에서의 연직 기상장 변화를 수치모의 하여 방법별 특징을 비교, 분석해 보았다. 광양만 권역을 대상으로 2007년 8월 23일 21시부터 25일 21시까지를 수치모의 기간으로 선정하였으며, 동일한 조건 하에서 난류 모수화 방법만을 달리한 실험을 실시하였다. 난류 모수화 방법별 연직 온위, 풍속, 수증기량 모의 결과를 라디오존데 관측자료와의 비교를 통해 분석 하였다.

대기의 상태가 상대적으로 안정적이었던 24일과 종관장의 영향이 다소 강했던 25일의 결과를 비교 분석해 본 결과, 온위의 경우 접지 역전을 제외한 전체적인 연직 분포를 각 모수화 방법에서 잘 모의 하였으나, 정확한 풍속의 모의에는 어려움을 보였다. 수증기량 또한 모든 난류 모수화 방법에서 다소 과대 예측되는 결과를 보였다. MY2.5가 종관장의 영향에 관계없이 대기 경계층 내에서의 기상 요소 모의에 있어서 가장 높은 정확도를 보였고, A.Def는 MY2.5와 전체적으로 유사한 결과를 보였다. I.Def는 풍속의 모의결과와 특히, 안정적인 종관 상태에서의 수치 모의에 있어서는 좋은 결과를 보였지만 유입대 부근에서는 온위와 풍속이 과대 예측되는 경향을 보였다. D.TKE의 경우 안정한 상태에서의 모의 결과는 가장 좋지 못했지만, 상대적으로 불안정한 상태에서의 모의 결과는 뛰어났다. 특히, 하층보다는 자유대기와 대기경계층의 경계면인 유입대 부근에서의 모의 결과가 뛰어남을 확인할 수 있었다. 또한 수증기량 모의 결과에서도 D.TKE가 종관 상태와 상관없이 가장 높은 정확도를 보였는데, 이는 지상에서의 순열속 및 현열속 모의 결과의 분석을 통해 D.TKE가 상향으로의 잠열속 전달에 있어 다른 모수화 방법들에 비해 높은 정확도를 가지기 때문으로 판단되었다. RMSE값과 MB값 그리고 IOA값을 이용한 통계 분석 결과 MY2.5가 종관장의 영향이 약할 때와 강할 때의 결과의 차이가 가장 작았으며, 전체적으로도 가장 좋은 결과를 보여주었다. 또한 D.TKE는 다른 방법들에 비해 종관장이 강한 경우에 좋은 결과를 보여주고 있음을 통계분석을 통해서 확인할 수 있었다.

이상의 결과에서 난류 모수화 방법의 차이에 따른 수치모의 결과는 기상 상태 및 기상요소에 따라 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 그러므로 대기경계층내의 연직 기상장 수치모의 시에는 사례일의 일기와 수치모의 하고자 하는 기상요소에 대한 충분한 고려가 이루어져야 할 것이다. 하지만 본 연구는 대상 사례일이 고기압하의 맑은 날에 한정되어 있으므로, 이러한 결과들을 모든 기상상태에 대해 일반화하기에는 무리가 따른다. 따라서 상황에 맞는 난류 모수화 방법의 적절한 선정을 위해서는 추가적으로 종관장의 영향이 강해 기계적 난류가 탁월한 경우 그리고 흐린날과 강수일 등을 대상으로 한 다양한 분석을 통해 좀 더 구체적이고 일

반화 된 결론에 대한 도출이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진개발사업(CATER2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 이순환, 이화운, 김유근, 2002, 복잡지형에서 도시화에 따른 대기오염 확산에 관한 시뮬레이션, 한국대기환경학회지, 18(2), 67-83.
- 이영희, 박순용, 1996, 지표면 거칠기 길이의 변화에 따른 대기경계층의 구조변화, 한국대기환경학회지, 33(3), 445-456.
- 하경자, 신선희, 김재환, 2002, 해안지역에서의 평균류와 난류의 상호작용, 한국기상학회지, 38(5), 395-408.
- Blackadar, A. K., 1962, The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral Atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, 67, 3095-3102.
- Deardorff, J. W., 1978, Observed characteristics of the outer layer. In *Short Course on the Planetary Boundary Layer* (A. K. Blackadar, ed.), American Meteorological Society, Boston, MA.
- Deardooff, J. W., 1980, Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model, *Boundary-Layer Meteorology*, 18, 495-527.
- Helfand, H. M., Labraga, J. C., 1988, Design of a non singular level 2.5 second-order closure model for the prediction of the atmospheric turbulence, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45, 113-124.
- Hill, G. E., 1974, Factors controlling the size and spacing of cumulus clouds as revealed by numerical experiments, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, 646.
- Kuo, H. L., 1974, Further Studies of the Parameterization of the Influence of Cumulus Convection on Large-Scale Flow, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(5), 1232-1240.
- Lee, S. H., Kimura, F., 2001, Comparative studies in the local circulations induced by land-use and by topography, *Boundary Layer Meteorology*, 101, 157-182.
- Lilly, D. K., 1962, On the numerical simulation of buoyant convection, *Tellus*, XIV, 2, 148-172.
- Mahrer, Y., Pielke, R. A., 1977, A numerical study of the airflow over irregular terrain, *Beitrag zur*

- Physik der Atmosphere, 50, 98-113.
- Mellor, G. L., Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Reviews Of Geophysics*, 20(4), 851-875.
- Mesinger, F., Arakawa, A., 1976, Numerical method used in atmospheric models, GARP Publication Series, No. 14, WMO/ICSU joint Organizing Committee, 64.
- Pielke, R. A., Cotton, W. R., Walko, R. L., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Wesley, D. A., Lee, T. J., Copeland, J. H. 1992, A comprehensive meteorological modeling system-RAMS, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 49(1), 69-91.
- Smagorinsky, J., 1963, General circulation experiments with the primitive equations. Part I, The basic experiment, *Monthly Weather Review*, 91, 99-164.
- Srinivas, C. V., Venkatesan, R., Singh, A. B., 2007, Sensitivity of mesoscale simulations of land-sea breeze to boundary layer turbulence parameterization, *Atmospheric Environment*, 41, 2534-2548.
- Trini Castelli, S., Hara, T., Ohba, R., Tremback, C. J., 2006, Validation studies of turbulence closure schemes for high resolutions in mesoscale meteorological models, *Atmospheric Environment*, 40, 2510-2523.
- Zängl, G., Gohm, A., Obleitner, F., 2008, The impact of the PBL scheme and the vertical distribution of model layers on simulations of Alpine foehn, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 99, 105-128.
- Zhang, D. L., Zheng, W. Z., 2004, Diurnal Cycles of Surface Winds and Temperatures as Simulated by Five Boundary Layer Parameterization, *American Meteorological Society*, 43, 157-169.