

적응시간 간격 알고리즘을 이용한 KIM의 계산 효율성 개선

남현¹⁾ · 최석진^{2)*}

¹⁾(재)차세대수치예보모델개발사업단, ²⁾강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2023년 4월 4일, 수정일: 2023년 5월 16일, 게재확정일: 2023년 6월 13일)

The Improvement of Computational Efficiency in KIM by an Adaptive Time-step Algorithm

Hyun Nam¹⁾ and Suk-Jin Choi^{2)*}

¹⁾Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS), Seoul, Korea

²⁾Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 4 April 2023; revised 16 May 2023; accepted 13 June 2023)

Abstract A numerical forecasting models usually predict future states by performing time integration considering fixed static time-steps. A time-step that is too long can cause model instability and failure of forecast simulation, and a time-step that is too short can cause unnecessary time integration calculations. Thus, in numerical models, the time-step size can be determined by the CFL (Courant-Friedrichs-Lewy)-condition, and this condition acts as a necessary condition for finding a numerical solution. A static time-step is defined as using the same fixed time-step for time integration. On the other hand, applying a different time-step for each integration while guaranteeing the stability of the solution in time advancement is called an adaptive time-step. The adaptive time-step algorithm is a method of presenting the maximum usable time-step suitable for each integration based on the CFL-condition for the adaptive time-step. In this paper, the adaptive time-step algorithm is applied for the Korean Integrated Model (KIM) to determine suitable parameters used for the adaptive time-step algorithm through the monthly verifications of 10-day simulations (during January and July 2017) at about 12 km resolution. By comparing the numerical results obtained by applying the 25 second static time-step to KIM in Supercomputer 5 (Nurion), it shows similar results in terms of forecast quality, presents the maximum available time-step for each integration, and improves the calculation efficiency by reducing the number of total time integrations by 19%.

Key words: CFL-Condition, Adaptive Time-Stepping, KIM, Numerical Forecasting Model

1. 서 론

수치예보(NWP) 모델은 통상적으로 일정한 시간 간격을 사용하여 적분함으로써 미래 상태를 계산한다. 종종 시간 간격의 크기는 시뮬레이션 전에 선택되고

시뮬레이션 전반에 걸쳐 일정하게 유지되는 매개변수로 간주하여 사용자가 구성한다. 너무 긴 시간 간격은 모델 불안정 및 시뮬레이션 실패를 유발할 수 있고, 너무 짧은 시간 간격은 예보 값을 얻기까지 더 많은 계산을 필요로 하기 때문에 사용자는 시간 간격 길이 선택에 주의해야 하며 일정 부분은 경험에 의존한다.

그러나 명시적으로 수치해의 안정성을 담보하는 시간 간격의 크기는 편미분방정식을 수치적으로 수렴시키기 위한 필요조건인 다음과 같은 CFL 조건(Courant-

*Corresponding Author: Suk-Jin Choi, Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheon-gil, Gangneung, Gangwon 25457, Korea.
Phone: +82-33-640-2318, Fax: +82-33-640-2320
E-mail: sjc@gwnu.ac.kr

Friedrichs-Lewy condition)을 참고할 수 있다.

$$0 \leq C = |\mathbf{u}| \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq C_{max} \quad (1)$$

여기서 C 는 CFL 수(Courant-Friedrichs-Lewy number), C_{max} 는 수치 적분 기법에 따른 해석적 최대 CFL 수, \mathbf{u} 는 속도, Δt 는 시간 간격, Δx 는 격자 간격을 의미한다. CFL 조건 식(1)에 따르면 시간 적분을 안정적으로 계산하기 위한 모델의 시간 간격 Δt 는 고정된 격자 간격 Δx 에 대해서 주어진 C_{max} 를 상한으로 하여 모델 시뮬레이션에 따른 속도 \mathbf{u} 의 크기에 의존하여 변할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 맥락에서, 모델 시뮬레이션 전반에 걸쳐 예상되는 최대 속력을 상정하고 이에 따라 계산된 시간 간격을 모델 시뮬레이션 적분 과정에서 동일하게 사용하는 것을 고정시간 간격 알고리즘(static time-step algorithm)이라 부르며, 모델 시뮬레이션 적분 단계마다 최대 속력 및 허용 최대 CFL 수(이하, C_{ref})에 기반하여 시간 단계별 최대 간격을 제시하는 방법을 적응시간 간격 알고리즘(adaptive time-step algorithm, 이하 Adap-dtA)이라 한다.

적응시간 간격 알고리즘은 Hutchinson (2007)이 WRF-ARW에 적응시간 간격을 적용하기 위해 제시한 방법으로, 이후 많은 연구자들이 지역모델 모의 실험에서 계산 효율성을 향상시키기 위해 사용하고 있다 (Morel et al., 2014; Siuta et al., 2016; Andraju et al., 2019; Jeworrek et al., 2019, 2021; Gamage et al., 2022). 이 방법을 적용한 대부분의 연구들은 지역모델에서 예측 정확도와 계산 효율성을 주제로 각각의 실험들이 수행되어왔으며, 수치 결과들의 예측 정확성이 고정시간 간격을 적용했을 때의 결과들과 큰 차이가 없음을 보였다. 특히, Collier et al. (2015)에서는 히말라야 중부 유역의 계절적 패턴을 이해하기 위해 고해상도 지역모델을 이용하여 실험을 수행하였으며 그 과정에서 고정시간 간격 대신 적응시간 간격을 적용하였다. 이 연구는 계산 시간을 절감하기 위해 적응시간 간격을 적용하고, 고정시간 간격보다 4배 큰 적응시간 간격을 사용하더라도 예측 성능은 유지됨을 보였다.

본 연구에서는 전지구모델인 한국형 통합 모델 (Korean Integrated Model, 이하 KIM)에 적용된 고정시간 간격 기반의 시간 분할 3차 Runge-Kutta 기법에 Adap-dtA를 적용하고, 10일 예보 실험을 수행하여 계산 시간 절감 등의 성능을 평가하고자 한다. 현업모델에서 사용하고 있는 25초의 고정시간 간격 수치 결과와 비교함으로써 시간 이산화 적분 횟수 감소에 따른 계산 시간 절감 효과를 보이고자 한다. KIM의 시간간격에 대한 이론적 고찰은 Choi (2018)에서 수행

된 바 있다. 이론적인 이류확산 방정식을 대상으로 분석한 것으로써, 이를 실제 사례에 적용하고 모든 상황에서 실패 없는 모의를 담당할 현업모형임을 감안하여, 보수적으로 상정한 것이 25초의 적분 간격이다. 현재 25초는 12 km 해상도에 대해서 2023년 현업모델 KIM의 적분 간격으로 사용하고 있다. 25초는 최대 순간 풍속 540 m s^{-1} (성층권 제트의 최대 순간풍속 200 m s^{-1} + 램파(lamb wave) 속도 $340 \text{ m s}^{-1} = 540 \text{ m s}^{-1}$)에 시간간격을 약 10 km(12 km 해상도의 육면체구격자에서의 실제 최소 격자 거리), CFL~1.4(3차 Runge-Kutta 시간 적분법의 최대 CFL = 1.73)로부터 얻어진 값이다. 본 논문은 4장으로 구성되어 있다. 2장에서는 Adap-dtA를 KIM에 적용하기 위해 알고리즘을 구체적으로 설명하고, 이에 대한 성능 검증을 위해 KIM에서의 10일 예보 실험을 설계하였다. 3장에서는 Adap-dtA를 적용했을 때 얻어지는 KIM의 계산 성능 개선 및 예보품질에 대한 검증 결과들을 살펴본다. 모든 실험들은 해상도 12 km의 KIM에서 수행하였다. 마지막으로 요약 및 결론을 4장에 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 적응시간 간격 알고리즘

적응시간 간격 알고리즘(Adap-dtA)은 명시적 시간 적분법을 사용하는 수치 모델의 시간 이산화 적분 과정에서 적분마다 매번 다른 크기의 시간 간격을 적용하여 시간 적분을 진행하는 방법이다(Hutchinson, 2007). 즉, Adap-dtA는 시간 적분을 수행할 때의 시간 간격 $\Delta t_k (= t_{k+1} - t_k)$ 를 얻기 위한 일련의 과정이다. Adap-dtA를 KIM에 적용하기 위해서는 1) 연직 및 수평 방향에 대한 CFL 수를 각각 구하고 허용 최대 CFL 수 C_{ref} 를 입력 받아 그 값들에 기반하여 최대 가용 시간 간격 Δt_k^* 를 추정한 후, 2) 안정적인 시간 적분을 위한 시간 간격의 최대·최소 범위 및 최대 증가율과 같은 매개변수들을 활용하여 그 크기를 제한하여 Δt_k^{**} 를 제시하고, 3) 정해진 특정 지점(출력물 생산 시각, 특정 물리과정의 계산 시각, 커플러 수행 시각 등)을 맞추도록 시간 간격 Δt_k^{**} 을 재조정함으로써 최종적인 시간 간격 Δt_k 를 결정한다.

Adap-dtA를 이용하여 시간 간격 Δt_k 를 결정짓기 위한 첫 번째 단계는 연직 및 수평 방향에 대한 CFL 수를 기반으로 최대 가용 시간 간격 Δt_k^* 를 계산하는 것이다. 이 때, 다음의 설명과 같이 수평 및 연직 방향에 대하여 각각의 최대 가용 시간 간격을 구하며, 이 두 시간 간격 중 최솟값을 Δt_k^* 로 결정한다. 시간 단계 k 의 예보장을 구하는데 사용한 시간 간격을 $\Delta t_{k-1} (= t_k - t_{k-1})$ 라 하자. 만약 k 번째 시간 단계의 전 도메인

최대 CFL 수 $C_k = \max(|\mathbf{u}_k|) \frac{\Delta t_{k-1}}{\Delta x}$ 가 조건 $0 < C_k \leq C_{ref}$ 을 만족하면, 주어진 시간 간격 크기 Δt_{k-1} 를 더 증가시켜 다음 단계의 시간 간격으로 사용해도 수치해의 안정성을 저해하지 않을 수 있다. 이 경우, 다음 시간 단계로 전진하기 위해 사용할 시간 간격 Δt_k^* 는 이전 단계의 시간 간격 Δt_{k-1} 를 증가시키도록 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta t_k^* = \left[\frac{C_{ref}}{C_k} \right] \times \Delta t_{k-1} \quad (2)$$

반면, $C_k > C_{ref} > 0$ 인 경우, 시간간격 Δt_{k-1} 가 수치해의 안정성을 보장하는 허용 범위를 벗어났으므로 수치해의 안정성을 보장하기 위해서 시간 간격은 주어진 시간 간격 크기보다 작게 설정되어야 한다. 크기 비율은 C_{ref} 와 C_k 를 1:3으로 외분하는 점을 이용하여 다음과 같이 시간 간격 크기를 정의한다(Hutchinson, 2007).

$$\Delta t_k^* = \left[\frac{3C_{ref} - C_k}{2} \times \frac{1}{C_k} \right] \times \Delta t_{k-1} \quad (3)$$

이와 같은 처방은 보다 안정적인 수치해를 얻기 위하여 식(2)의 크기 비율 $\frac{C_{ref}}{C_k} (< 1)$ 보다 더 작은 값으로 Δt_k^* 를 구하기 위해서이다. 참고로 식(3)은 Δt_k^* 는 양수임에 따라 조건 $C_k < 3C_{ref}$ 을 암시적으로 포함한다. $C_k \geq 3C_{ref}$ 인 경우는 이미 모델이 불안정한 상태에서 모의 실패에 도달하기 때문에 이 경우는 고려하지 않는다.

두 번째 단계는 시간 간격의 최대 증가율 r_{inc} 및 최대-최소 범위 $[\Delta t_{min}, \Delta t_{max}]$ 을 고려하여 Δt_k^* 를 Δt_k^{**} 로 조정하는 것이다. 식(2)-(3)을 이용하여 구한 시간 간격 Δt_k^* 는 다양한 예보 상태에 따라 민감하게 반응하여 매 단계별 그 값의 변동성이 클 수 있고, 급격한 시간 간격의 변화는 향후 시간 적분으로 계산될 수치 오차의 증가를 야기할 수 있기 때문이다. 따라서 다

음의 제한 식에 따라 Δt_k^{**} 를 구한다.

$$\Delta t_k^{**} = \max(\min(\min(\Delta t_k^*, (1+r_{inc})\Delta t_{k-1}), \Delta t_{max}), \Delta t_{min}) \quad (4)$$

즉, 새롭게 설정될 Δt_k^{**} 는 Δt_{k-1} 의 $(1+r_{inc})$ 배(즉, $r_{inc} = 0.1$ 이면, 1.1배)를 넘지 않으며, 그 값이 상한 Δt_{max} 와 하한 Δt_{min} 의 사이값이 되도록 하는 것이다. 이 과정에서 r_{inc} 와 Δt_{max} 에 의한 제한 조건은 수치해가 갑자기 커짐으로써 수치해의 변동성이 커지고 이로 인해 해의 불안정성을 유발할 수는 있는 문제들을 방지한다. 특히, 시간 간격의 하한값 Δt_{min} 의 제한 조건은 계산 비용 절감 효과를 저해하는 현상을 방지한다. 시간 간격에 대해 최소 범위의 제한을 두지 않으면, 임의의 적분 단계에서 Δt_{min} 보다 작은 시간 간격의 크기가 정해지는 경우가 발생하고, 첫 번째 단계에서의 CFL 수의 결과에 의해서 보다 큰 시간 간격을 제시하여도 최대 증가율 r_{inc} 에 의해서 시간 적분 다음 단계에서는 제시한 큰 시간 간격을 무시하고 작은 크기의 시간 간격으로 적분이 진행된다. 전체 적분 기간 동안 이러한 과정이 반복되면 작은 시간 간격에서 정상 궤도의 시간 간격이 되기 위해서 불필요하게 많은 계산이 소요될 수 있다.

마지막 단계는 예보 모델의 적분 진행 시 도달해야 하는 특정 시각을 맞추기 위해 시간 간격을 조정하는 것이다. 여기서 특정 시각이란 출력물의 생산, 복사 과정과 같은 특정 물리 과정의 계산, 집합 모델과의 연계를 위한 커플러 수행 등이 간헐적으로 수행되는 계획된 시각을 뜻한다. 이것은 적분 과정 중 꼭 맞춰야만 하는 시각(t_{preset})에 도달하기 위하여 탄력적으로 시간 간격이 조절되는 Adap-dtA에서 시간 간격 조정이 불가피 해집을 의미한다. 따라서 식(4)에 의해서 계산된 시간 간격 Δt_k^{**} 에서 최종적인 시간 간격 Δt_k 를 결정하기 위한 마지막 단계로써 다음의 과정을 둔다(Fig. 1).

적분 단계에 따른 모델시각(t_{k-1})과 고정된 규정 시각(t_{preset}), 그리고 그 시각들의 차이 $\Delta t_{preset} (= t_{preset} - t_{k-1})$ 을 정의한 후, Δt_k^{**} 와 Δt_{preset} 을 크기 비교하여 최종 시간 간격 Δt_k 를 결정한다. 이때의 경우는 크게 두

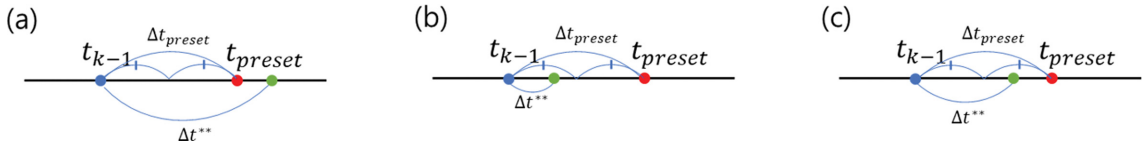


Fig. 1. Classification of cases of time-step t_k^{**} (green point) in considering current model time t_{k-1} (blue point) and preset time t_{preset} (red point); (a) $\Delta t_k^{**} \geq \Delta t_{preset}$, (b) $\Delta t_k^{**} < \frac{1}{2} \Delta t_{preset}$ and (c) $\frac{1}{2} \Delta t_{preset} \leq \Delta t_k^{**} < \Delta t_{preset}$, where $\Delta t_{preset} = t_{preset} - t_{k-1}$ and $\Delta t_k^{**} = t_k^{**} - t_{k-1}$.

가지로 나뉜다. 전진 될 모델 시각 t_k^{**} ($= t_{k-1} + \Delta t_k^{**}$) 이 시각 t_{preset} 을 지나치는 경우와 그렇지 않은 경우이다. 지나치는 경우(즉, $\Delta t_k^{**} \geq \Delta t_{preset}$)라면 최종 시간 간격 Δt_k 을 간단히 Δt_{preset} 로 제한하여 사용할 것이다 (Fig. 1a). 이때, 최종 시간 간격 Δt_k ($= \Delta t_{preset}$)가 너무 작은 값으로 결정되어 버리지 않도록 세밀한 조정이 필요하다. 너무 작은 시간 간격은 재귀적으로 다음 번 시간 적분 단계에서 식(4)와 같이 최대 증가율 r_{inc} 에 의해서만이 커질 수 있고, 정상 궤도의 시간 간격이 되기 위해서 불필요한 많은 계산이 소요되기 때문이다. 따라서, 다음 번 시간 적분 단계의 급격히 작은 Δt_{k+1}^{**} 의 출현을 미연에 방지하기 위해, 지나치지 않는 경우(즉, $\Delta t_k^{**} < \Delta t_{preset}$)에는 세부 기준 $\frac{1}{2}\Delta t_{preset}$ 을 수립하여 사용하도록 설계하였다. $\Delta t_k^{**} < \frac{1}{2}\Delta t_{preset}$ 인 경우는 최종적으로 사용될 시간 간격 Δt_k 를 Δt_k^{**} 로 사용하여, t_{preset} 에 도달하기 위해 시간 적분이 계속 진행된다(Fig. 1b). 반면, $\frac{1}{2}\Delta t_{preset} \leq \Delta t_k^{**} < \Delta t_{preset}$ 인 경우는 Δt_k 를 $\frac{1}{2}\Delta t_{preset}$ 로 제한하여, 다음 번 시간 적분 단계의 급격히 작은 Δt_{k+1}^{**} 의 출현을 미연에 방지한다 (Fig. 1c).

위의 조건들을 요약하면 다음과 같다.

$$\Delta t_k = \begin{cases} \Delta t_{preset} & \text{if } \Delta t_k^{**} \geq \Delta t_{preset} \\ \Delta t_k^{**} & \text{if } \Delta t_k^{**} < \frac{1}{2}\Delta t_{preset} \\ \frac{1}{2}\Delta t_{preset} & \text{if } \frac{1}{2}\Delta t_{preset} \leq \Delta t_k^{**} < \Delta t_{preset} \end{cases} \quad (5)$$

식(5)에 의해서 매 적분 다른 시간 간격을 사용하는 Adap-dtA가 반드시 정해진 특정시점 t_{preset} 에서 그 시간 간격을 맞출 수 있다. 수치예보 모델에서 시간 적분이라고 하는 일련의 과정에서 정해진 시각 t_{preset} 의 준수는 간헐적으로 큰 시간 간격의 사용을 방해할 수

도 있지만 예보 모델에 있어서는 필수적이기 때문에 이 과정은 항상 고려되어야만 한다.

2.2 실험 설계

본 연구에서는 전지구모델인 KIM(버전 3.7.01)에 Adap-dtA를 적용하여 계산 성능 및 예보 품질의 유효성 검증을 수행하였다. KIM은 극 지역의 특이점 문제 해결을 위해 육면체구(cubed-sphere) 격자 체계가 적용되었고, 분광요소법(spectral element method) 기반의 비정역학 코어(Choi et al., 2014; Choi and Hong, 2016)와 물리 과정 등으로 구성되어 있다(Hong et al., 2018). 해상도는 수평으로는 약 12 km (NE360NP3), 연직으로는 약 80 km까지 91층으로 구성되어 있다. 2023년 현재 현업에서 사용 중인 KIM의 설정과 같이, 12 km 해상도에서 고정시간 간격 25초(Δt_0)를 사용한 모의를 기준실험(Control experiment, CTL)으로 두고, CTL과 동일하나 Adap-dtA를 적용한 모의를 비교실험(Experiment, EXP)으로 하였다. 실험에서는 2017년 1월 및 7월 각각 한 달 동안 10일 예보를 수행하였다. 컴퓨터 자원으로는 모든 실험은 LENOVO SD650 시스템의 슈퍼컴퓨터 5호기 그루(GURU) 및 마루(MARU)에서 10개의 노드(노드당 76개 CPU)를 이용하여 수행되었다. KIM의 12 km 해상도에서 Adap-dtA를 적용하기 위해 필요한 외부 입력 변수들은 Table 1에 정리하였다. 이 값들은 12 km 해상도에서 안정적으로 모델이 구동 되면서 동시에 시간 절감 효과를 볼 수 있도록 KIM에 최적화된 값들로, 여러 민감도 실험들을 통해 경험적으로 얻어진 값들이다. KIM은 이상적인 상황에 가까운 병렬확장성을 가지고 있음이 이미 알려진 사실이므로 본 논문의 결과들은 현업 환경과 같은 다른 컴퓨팅 환경에서도 그대로 적용될 것으로 예상된다(Choi and Hong, 2016). 또한, KIM의 시간 이산화 기법은 수평 방향으로는 시간 분할 Runge-Kutta 기법이 적용되었고 연직 방향으로는 암시적 기법이 적용되었기 때문에 본 연구에서는 각각의 연직 및 수평 방향에 따라 기준이 되는 C_{ref} 의 값을 다르게 고려하였다. Table 1에서 제시한 C_{ref_V} 및 C_{ref_H} 의 수치적 값은 여러 민감도 실험 수행의 결과로부터 경

Table 1. Input data for controlling the adaptive time-step algorithm at KIM with a resolution of 12 km.

Parameter	Default in KIM	Meaning
Δt_0	25 (s)	Initial time-step size (as the Static time-step size)
Δt_{max}	40 (s)	Maximum value of adaptive time-step size
Δt_{min}	10 (s)	Minimum value of adaptive time-step size
t_{preset}	1, 2, ...	Preset time (every hour)
C_{ref_V}	0.7	Vertically reference CFL number
C_{ref_H}	0.5	Horizontally reference CFL number
r_{inc}	0.1	Maximal increasing rate of time-step size

험적으로 얻어진 값이다. 그리고, t_{preset} 값을 매시간마다의 값으로 설정한 이유는 물리 과정 중 계산 주기가 가장 짧은 것이 복사 과정이며 그 업데이트 주기는 1시간으로 설정되어졌다. 참고로 본 논문의 모든 실험에서 KIM 출력물의 생산 주기는 6시간이므로, t_{preset} 값을 설정할 때 출력물의 생산 주기는 이미 고려됨을 알 수 있다.

3. 실험결과

3.1 적응시간 간격 알고리즘의 계산성능 유효성 검증

2017년 1월, 7월 각각 한 달 동안 10일 예보 실험들을 수행했을 때 EXP의 시간 간격 크기는 CTL에서 사용한 고정시간 간격 25초(= Δt_0)보다 대부분 큰 시간 간격이며 이로 인해 10일 적분 기간 동안 CTL 대비 EXP의 총 적분 횟수가 감소하는 것을 확인하였다. 비록 매 적분마다 꼭 맞춰야만 하는 시점 t_{preset} 을 고려하여 계산 과정에서 제시된 적응시간 간격이 Δt_0 보다 작은 경우도 빈번히 존재하지만 매 적분 계산된 적응시간 간격 크기의 전체 평균은 Δt_0 보다 큰 값을 Fig. 2를 통해 확인할 수 있었다. Figure 2는 모든 예보 실험을 대상으로 계산된 적응시간 간격 크기를 boxplot으로 보기 쉽게 표현하였다. Figure 2의 왼쪽 그림은 겨울(2017년 1월) 기간 동안의 10일 예보 실험(31개의 사례 실험)에서 제시된 적응시간 간격의 크기를 보여주며 중위값(red line)은 약 31초, 평균 시간 간격의 크기(blue dot)는 약 30.5초이다. 겨울철의 경우, 적응시간 간격의 평균 시간 간격 크기는 CTL의 고정시간 간격 25초 대비 약 22% 큰 값이다. Figure 2의 오른쪽 그림은 여름철(2017년 7월) 기간 동안 10

일 예보 실험에서 적응시간 간격 크기를 보여주며 중위값(red line)은 약 32초, 평균 시간 간격 크기(blue dot)는 약 31.5초이며 적응시간 간격의 평균 시간 간격 크기는 CTL 대비 약 26%의 큰 값을 제시하였다. 이 실험들을 통해 겨울철보다 여름철에 고정시간 간격 대비 큰 값의 적응시간 간격을 제시함을 알 수 있다. 이는 현재 고정시간 간격의 크기가 여름철에 상대적으로 작게 제시되고 있으며 모델 운용의 계산 시간을 고려한다면 분명 비효율적임을 알 수 있다.

Figure 3에서는 2017년 1월, 7월 기간 동안의 10일 예보 실험 수행에 대한 CTL과 EXP의 모델 운영 시간을 비교하였다. CTL의 경우 10일 예보에 대한 평균 모델 운용 시간은 2시간 18분 44초가 걸리는 반면 EXP의 경우 평균 모델 운용 시간은 약 1시간 50분 35초 소요된다. 12 km 해상도의 KIM에 Adap-dtA를 적용함으로써 여름 및 겨울 기간 동안 고정시간 간격의 크기 대비 약 20%의 큰 시간간격을 제시함에 따라 전체 운용 시간이 약 20% 감소함을 Fig. 2 및 Fig. 3을 통해 알 수 있다. 본 연구에서 계산된 평균 모델 운용 시간은 각각의 날짜에 1회만 실행 후 측정된 결과들이다. 비록 운용 시간의 정확성을 위해서 각각의 실험에서 여러 번 반복 실험을 수행한 후 그 평균값을 계산해야만 하지만 비슷한 구조의 실험을 두 달 동안 62개 반복 수행하는 것이기 때문에 각 날짜에 대해서 1회씩 실험한 결과들을 가지고 평균 운용 시간을 추론하였다.

Figure 4d에서는 2017년 1월 및 7월 기간 동안 각각의 날짜에서의 10일 예보 실험에 대한 CTL과 EXP의 총 적분 횟수를 보여준다. 왼쪽 y축의 최댓값이

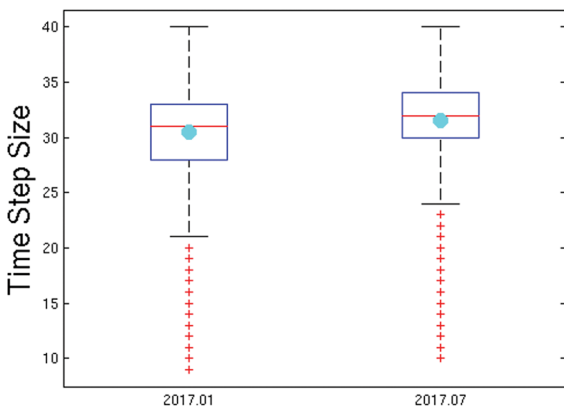


Fig. 2. The boxplot of adaptive time-step size during (left) January 2017 and (right) July 2017. For each period, the median and average value of the adaptive time-step size are expressed as a blue dot and red line in box, respectively.

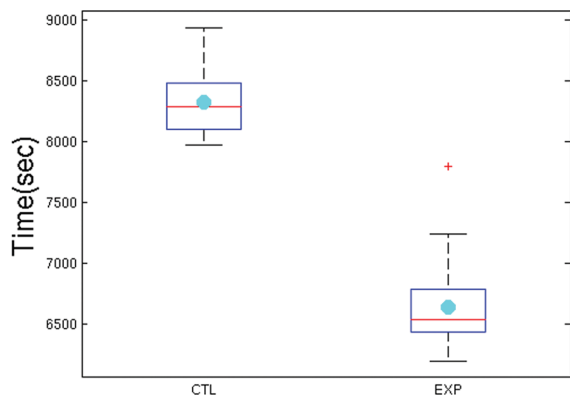


Fig. 3. The boxplot of wall-clock time for using (left) CTL and (right) EXP during January and July 2017. For each experiment, the median and average value of the wall-clock time are expressed as a blue dot and red line in the box, respectively.

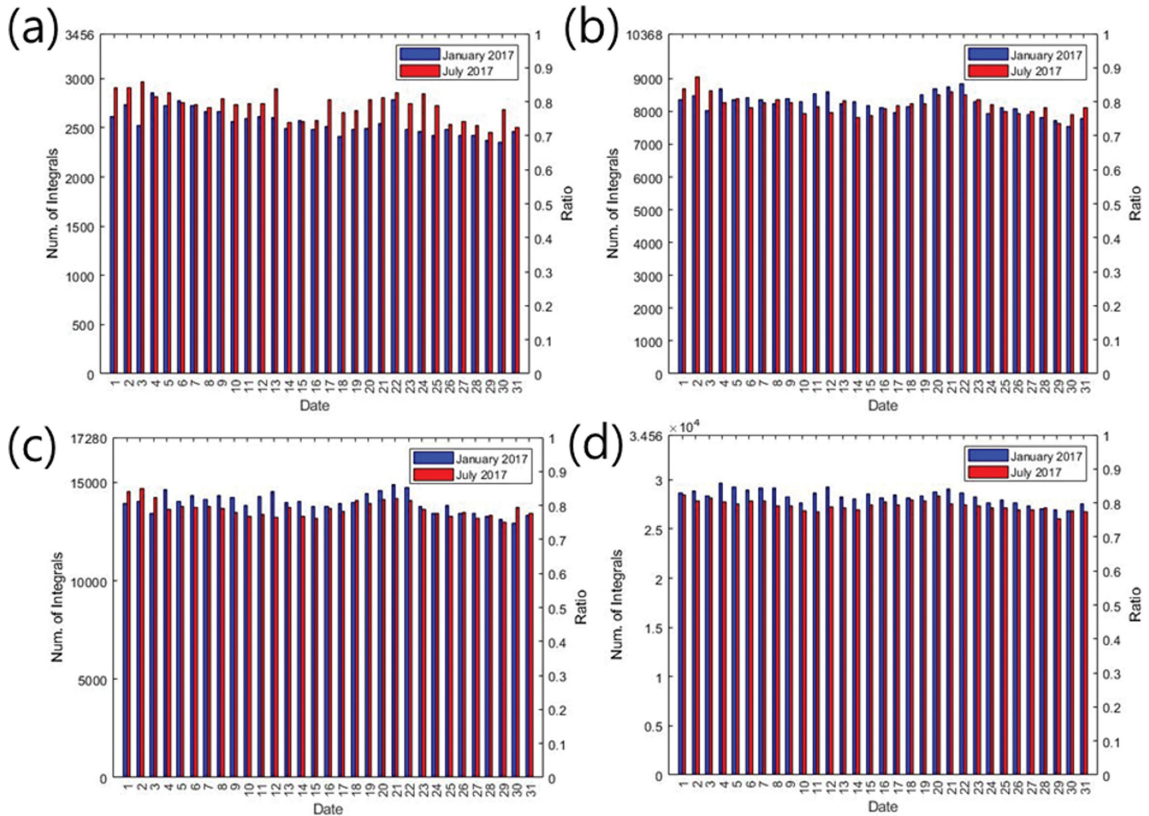


Fig. 4. The number of time integrations for January 2017 (blue bar) and July 2017 (red bar) in EXP, compared to in CTL by using fixed time-step size ($\Delta t_0 = 25$ sec). The maximum value on the y-axis (left) is the total number of integrations of CTL. The y-axis (left) and y-axis(right) represent the total number of integrations and the integral number ratio of EXP to CTL, respectively. (a) 1-day, (b) 3-day, (c) 5-day, and (d) 10-day forecast experiments.

CTL의 총 적분 횟수를 의미한다. CTL의 경우 총 적분 횟수는 12 km 해상도에서 25초 고정시간 간격을 사용하면 34560번으로 고정되어져 있다. 반면, EXP의 경우는 매 적분마다 다른 시간 간격을 적용하기 때문에 전반적으로 약 20%의 큰 시간 간격으로 약 19% 적은 적분 횟수로 계산됨을 확인하였다. 마찬가지로 Figs. 4a-c에서는 각각 1일, 3일, 5일 예보 실험에 대한 CTL과 EXP의 총 적분 횟수를 보여준다. 각각의 결과에서 적응시간 간격 알고리즘에 의해서 약 24%, 21%, 20% 적은 적분횟수로 계산됨을 확인하였다. 이는 Fig. 2에서 보여주듯이 Adap-dtA에 의해서 고정시간 간격 25초보다 큰 시간 간격을 제시하는 횟수가 증가함으로 총 적분 횟수는 감소하고 전체 계산이 절감이 되는 것을 자연스럽게 보여준다. 따라서 수치적 결과들을 기반으로 KIM에 Adap-dtA를 적용했을 경우 고정시간 간격 대비 시간 이산화 적분 횟수 감소에 따른 전체 운용에 대한 계산 효율성이 개선됨

을 본 실험들을 통해 확인할 수 있었다.

3.2 적응시간 간격 알고리즘의 예보품질 유효성 검증

앞에서 적응시간 간격 적용에 따라 10일 예보 실험에서 고정시간 간격 대비 적분 횟수가 감소하고 전체 모델 운용 시간이 단축됨을 확인하였고, 다음으로는 Adap-dtA가 예측장에 미치는 영향을 가시적으로 분석하였다. 스코어 카드를 이용하여 각각 2017년 1월, 7월 한 달에 대한 IFS 분석장 대비 주요 지역·변수·고도·예측시간에 대해 예측장을 검증하였다. 예측장 비교 결과는 Fig. 5a (2017년 1월), Fig. 5b (2017년 7월)에서 평균제곱근오차(Root Mean Squared Error; RMSE)와 이상상관(anomaly correlation coefficient; ACC) 값을 비교하여 수치적 결과들을 제시하였다. 검증영역은 북반구, 남반구, 적도, 동아시아이고, 검증인자는 평균해수면 압력(Mean Sea Level Pressure, MSLP), 지위고도(HGT), 기온(TEMP)이다. 검증 고도



Fig. 5. The score card of EXP for regional averaged RMSE and ACC of MSLP, HGT, TEMP compared to CTL against IFS analysis during the period (a) January 2017 and (b) July 2017. The vertical levels range from 850 hPa to 100 hPa. Green color indicates EXP has better forecast performance than CTL.

는 100 hPa, 250 hPa, 500 hPa, 850 hPa이고 초기장을 포함해 24시간 간격으로 240시간 예측장까지 검증하였다. 스코어 카드에서 EXP가 CTL에 비해 오차가 감소한 영역을 녹색으로 표시하였다. 검증 기간 동안 범례범위 -50%~50%에서 북반구 및 동아시아 지역에서 예보 후반부에서 EXP가 CTL과 비교했을 때 약 ±5% 차이가 나는 것을 확인하였다. 그러나 다른 영역 및 예보 초·중반에는 검증인자들에 대해서 EXP의 결과들이 CTL의 결과들과 거의 유사함을 보였다. 이는 예보 품질면에서는 고정시간 간격과 적응시간 간격의 결과들이 큰 차이가 없음을 의미한다.

또한, EXP 및 CTL 예보 실험의 강수 예보 성능을 비교해 보았다. Figure 6 (2017년 1월), Fig. 7 (2017년 7월)에서 왼쪽 및 오른쪽의 결과들은 각각의 TMPA

강수 자료 대비 아시아(상), 적도(중), 전지구(하) 지역에 대한 CTL과 EXP의 누적 강수량 분포의 BIAS와 Equivalent Threat Scores (ETS) 검증 결과를 보여준다. BIAS 및 ETS 검증은 모델의 예보와 강수 관측이 주어진 임계 값을 잘 맞췄는지 검증하는 도구로서 결과 값이 BIAS는 1에 가까울수록, ETS의 경우는 그 값이 클수록 수치예보 모델이 TMPA 강수 자료 대비 완벽한 예보를 했다는 것을 의미한다. CTL과 EXP의 누적 강수량을 비교하면 적도 및 전지구에서 약한 강수에 대해 EXP의 결과들이 아주 조금이나마 개선됨을 보여주며 그 밖의 다른 영역에 대해서는 큰 차이 없이 TMPA 대비 고정시간 간격 및 적응시간 간격을 적용했을 때의 수치결과의 BIAS와 ETS의 값이 유사함을 보여준다.

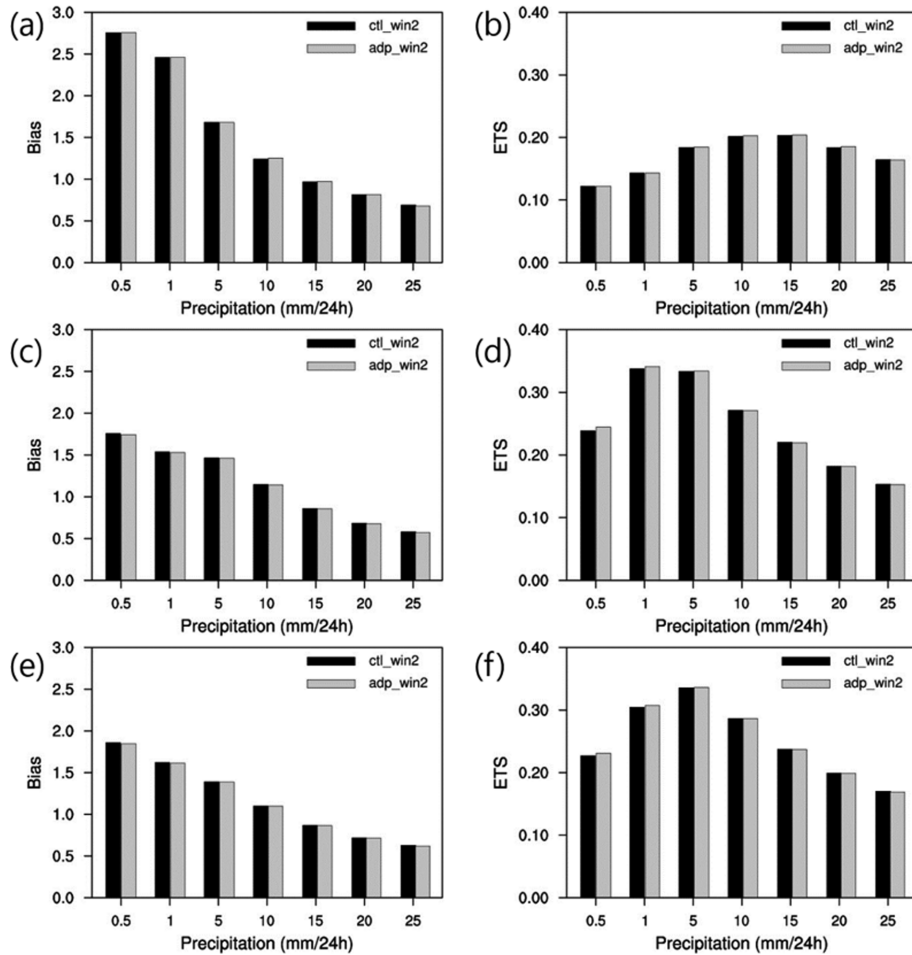


Fig. 6. BIAS (left panel) and ETS (right panel) for 24-h precipitation forecasts against TMPA observation for the 5-day forecast period during 1-31 January 2017 from CTL (black bar) and EXP (gray bar); (a, b) Asia, (c, d) Tropics, and (e, f) global.

마지막으로 동아시아에서 EXP 및 CTL 예보 실험의 해면기압(Mean Sea Level Pressure, MSLP)과 6시간 누적 강수의 공간 분포를 비교해 보았다. Figure 8 (2017년 1월 1일), Fig. 9 (2017년 7월 20일)에서 왼쪽 및 오른쪽의 결과들은 CTL(상), EXP(하)의 각각 5일 예보 및 10일 예보 결과이다. 이 결과들은 Fig. 5의 스코어카드에서도 설명하듯이 해면기압 및 6시간 누적 강수 공간 분포 등의 분석을 통해 동아시아 지역에서 예보 초·중반에는 EXP의 결과들이 CTL의 결과들과 거의 유사하며 적분 시간이 길어지면서 예보 후반부에서 EXP가 CTL과 비교했을 때 크게 다르지 않음을 확인시켜준다.

결론적으로, KIM의 시간 이산화 기법에 Adap-dtA를 적용함으로써 예보 품질면에서 EXP의 수치적 결과들이 CTL과 유사한 예측 성능을 보였으며 총 적분

횟수의 감소로 계산 절감의 효과를 보였다. 이는 Adap-dtA를 적용함으로써 수치적 차이는 거의 나지 않으면서 계산 시간이 개선되었음을 본 실험들을 통해 확인할 수 있었다.

4. 요약 및 토의

본 연구에서는 고정시간 간격을 적용하는 KIM의 시간 이산화 기법에 새롭게 적용시간 간격 알고리즘을 적용하고 매 적분마다 최대 가용 시간 간격을 제시하여 그에 따른 수치적 결과들을 분석하였다. 적용시간 간격 알고리즘을 KIM에 구현하기 위해서 연직 및 수평 방향에 대한 CFL수를 각각 계산하여 적분 단계마다 최대 가용 시간 간격을 제시하고, 수치해의 안정성 유지와 최소 계산량을 고려하여 제시된 시간

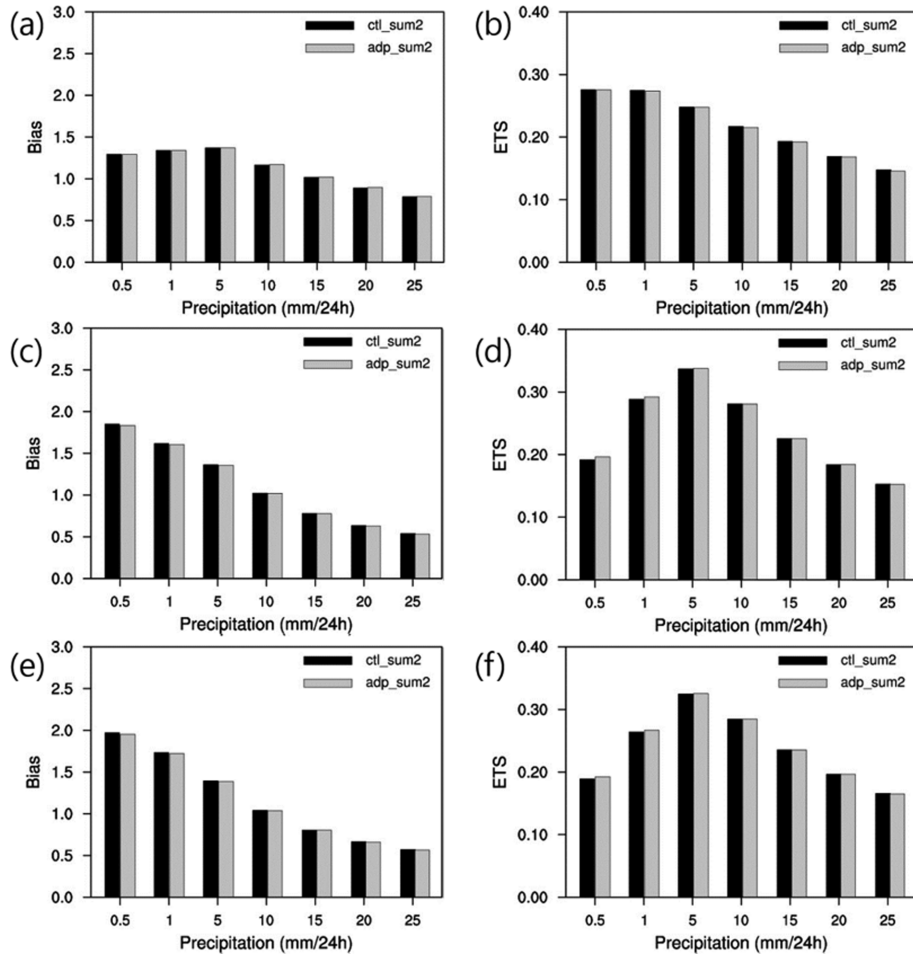


Fig. 7. BIAS (left panel) and ETS (right panel) of 24-h precipitation forecasts against TMPA observation for 5-day forecast period during 1-31 July 2017 from for CTL (black bar) and EXP (gray bar); (a, b) Asia, (c, d) Tropics, and (e, f) global.

간격의 크기에 최대·최소 범위 및 최대 증가율을 설정하여 그 값을 조정하였다. 마지막으로 예보 모델의 적분 진행 시 도달해야 하는 특정 시각을 맞추기 위해 시간 간격을 제한하여 최종 적분 시간 간격 크기를 결정하였다. 이렇게 최종적으로 얻어진 시간 간격 크기를 이용하여 KIM의 12 km 해상도에 적응시간 간격 알고리즘의 변수들을 세팅하고 수치적 결과들을 비교하였다.

슈퍼컴퓨터 5호기에서 10개의 노드(노드당 76개 CPU)를 이용하여 2017년 여름 및 겨울철에 대해서 10일 예보 실험들을 각각 한 달 동안 수행함으로써 적응시간 간격을 적용하는데 있어서 계절에 따른 차이는 크지 않으며 2023년 현재 현업에서 사용 중인 KIM의 설정과 같이, 12 km 해상도에서 25초 고정시간 간격을 적용했을 때의 수치결과들과 비교했을 때

예보 품질면에서 5% 이내의 오차를 보였고 이는 적응시간 간격을 적용하여도 고정시간 간격을 적용했을 때의 예보 품질의 성능을 유사하게 유지함을 의미한다. 그리고 동아시아 지역에서 발생한 집중호우 등의 사례 검증에서도 해면기압 및 6시간 누적 강수 공간 분포 등의 분석을 통해 예보의 결과가 크게 다르지 않음을 확인하였다. 또한, 계산에 의해 제시된 적응시간 간격과 적분 횟수 감소에 따른 전체 모델 운용시간 감소의 효과를 보였으며 시간 이산화 적분 횟수에서는 19% 감소하여 전반적인 계산 효율성에 개선 효과를 보였다.

예보 실험들의 성능 결과를 종합해보면 예측 실험 수행 결과들의 계산 성능 유효성 검증을 했을 때 명백하게 계산 시간 개선 효과가 있음을 확인하였다. 또한, 예보 품질 유효성 검증에서도 오차 분석 및 강수

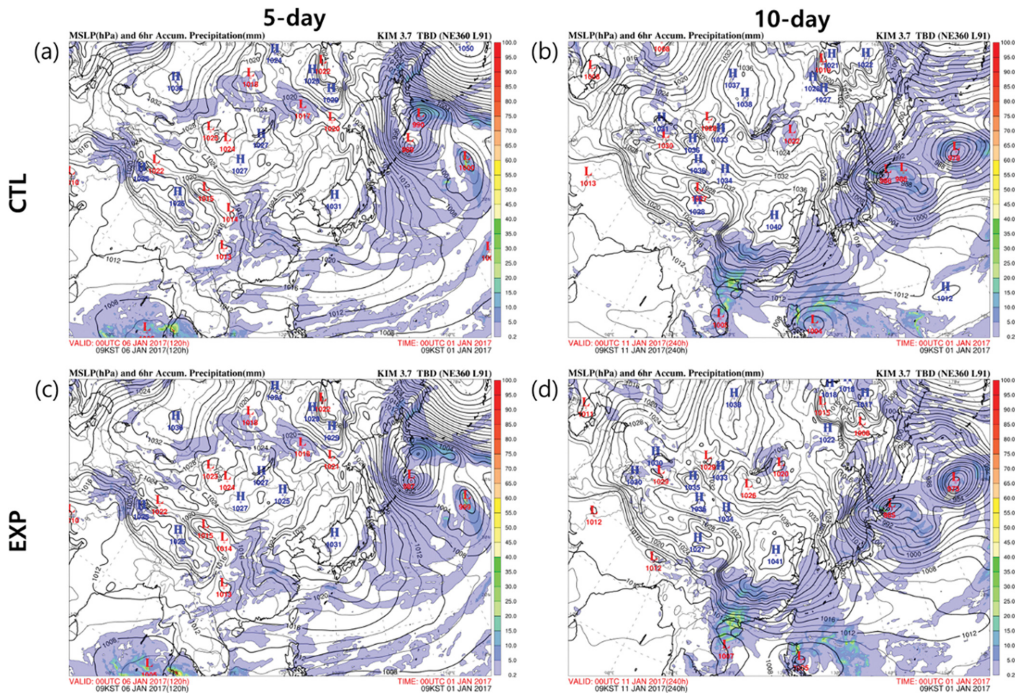


Fig. 8. In 5-day (left panel) and 10-day (right panel) forecasts, spatial distribution of MSLP and 6 hour accumulated precipitation over East Asia for 1 January 2017 from (a, b) CTL, (c, d) EXP.

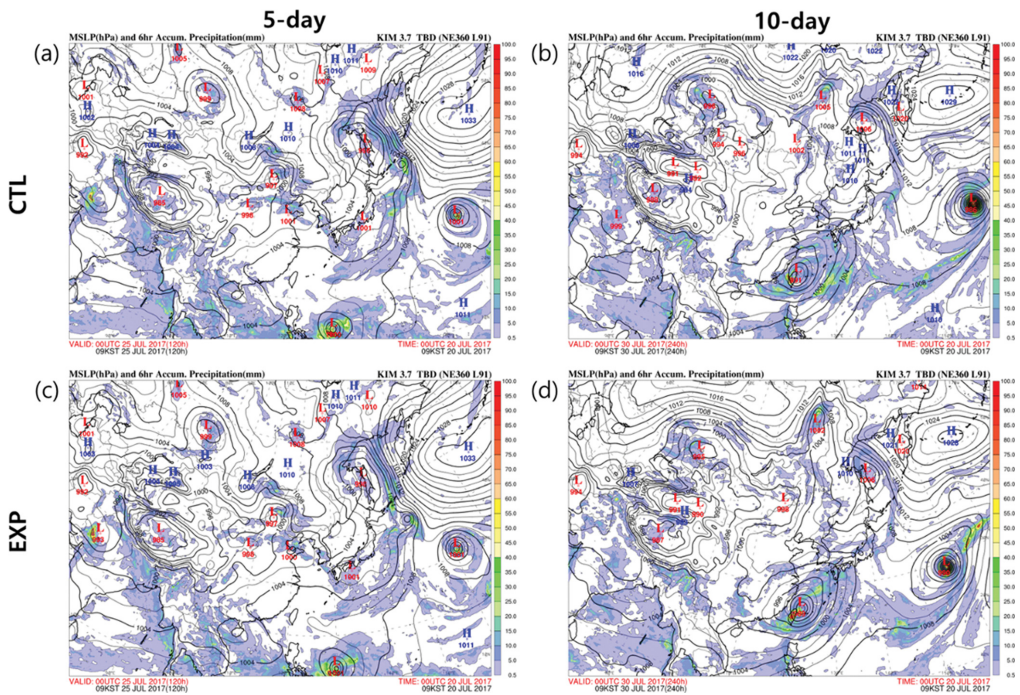


Fig. 9. In 5-day (left panel) and 10-day (right panel) forecasts, spatial distribution of MSLP and 6 hour accumulated precipitation over East Asia for 20 July 2017 from (a, b) CTL, (c, d) EXP.

분포 분석에서 CTL과 EXP에서 유사한 결과를 보임을 확인하였다. 이는 KIM의 실험 결과에서 예보 품질은 유지하면서 시간 이산화 성능 개선에 긍정적인 역할을 하고 있음을 의미한다. 그러나 출력물 생산 주기, 복사 과정과 같은 특정 물리 과정의 계산 주기가 짧아지면 적응시간 간격 알고리즘 중 마지막 단계인 t_{preset} 을 맞추기 위한 과정을 보다 많이 수행해야만 한다. 이는 분명 실제 계산 효율성을 저해하는 원인이 될 수도 있다. 시간 간격의 크기가 큰 저해상도의 경우에는 시간 적분을 진행하는 과정에서 CFL수에 의해 큰 시간 간격을 유지하다 t_{preset} 을 맞추기 위해 작은 시간 간격을 제시하기 때문에 계산 효율성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 하지만 작은 시간 간격을 사용하는 고해상도에서는 t_{preset} 을 맞추기 위해 작은 시간 간격을 제시하더라도 기존의 고정시간 간격과 큰 차이가 나지 않기 때문에 이러한 과정이 계산 효율성을 저해하더라도 전체 적분 시간 동안 제시되는 고정시간 간격보다 큰 시간 간격으로 인해 이러한 문제들을 극복할 수 있을 것이다. 따라서, 추후 KIM의 8 km 고해상도에서도 적응시간 간격 알고리즘을 적용하여 고정시간 간격 대비 보다 큰 시간 간격을 제시함으로써 고해상도에 따른 계산량의 증가에 대한 계산 절감의 효과를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 기상청 출연사업인 (재)차세대수치예보모델개발사업단의 가변격자체계 기반 통합형수치예보모델 개발(KMA2020-02212) 및 2023년도 강릉원주대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

REFERENCES

- Andraju, P., A. L. Kanth, K. V. Kumari, and S. V. B. Rao, 2019: Performance optimization of operational WRF model configured for Indian Monsoon region. *Earth Sys. Environ.*, **3**, 231-239, doi:10.1007/s41748-019-00092-2.
- Choi, S.-J., 2018: Structure of eigenvalues in advection-diffusion equation by the spectral element method on cubed-sphere grid. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 293-301, doi:10.1007/s13143-018-0020-4.
- _____, F. X. Giraldo, J. Kim, and S. Shin, 2014: Verification of a non-hydrostatic dynamical core using horizontal spectral element method and vertical finite difference method: 2D Aspects. *Geosci. Model Dev.*, **7**, 2717-2731, doi:10.5194/gmd-7-2717-2014.
- _____, and S.-Y. Hong, 2016: A global non-hydrostatic dynamical core using the spectral element method on a cubed-sphere grid. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 291-307, doi:10.1007/s13143-016-0005-0.
- Collier, E., and W. W. Immerzeel, 2015: High-resolution modeling of atmospheric dynamics in the Nepalese Himalaya. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **120**, 9882-9896, doi: 10.1002/2015JD023266.
- Gamage, T. D., U. Sonnadara, S. Jayasinghe, and S. Basnayake, 2022: Forecasting the track and the intensity of the cyclone Burevi using WRF. *J. National Science Foundation of Sri Lanka.*, **50**, 675-684, doi:10.4038/jnsfr.v50i3.10761.
- Hong, S.-Y., and Coauthors, 2018: The Korean integrated model (KIM) system for global weather forecasting. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 267-292, doi: 10.1007/s13143-018-0028-9.
- Hutchinson, T. A., 2007: An adaptive time-step for increased model efficiency. In *Extended Abstracts, Eighth WRF Users' Workshop*, 4 pp.
- Jeworrek, J., G. West, and R. Stull, 2019: Evaluation of cumulus and microphysics parameterizations in WRF across the convective gray zone. *Wea. Forecasting.*, **34**, 1097-1115, doi:10.1175/WAF-D-18-0178.1.
- _____, and _____, 2021: WRF precipitation performance and predictability for systematically varied parameterizations over complex terrain. *Wea. Forecasting*, **36**, 893-913, doi:10.1175/WAF-D-20-0195.1.
- Morel, B., B. Pohl, Y. Richard, B. Bois, and M. Bessafi, 2014: Regionalizing rainfall at very high resolution over La Réunion Island using a regional climate model. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 2665-2686, doi:10.1175/MWR-D-14-00009.1.
- Siuta, D., G. West, H. Modzelewski, R. Schigas, and R. Stull, 2016: Viability of cloud computing for real-time numerical weather prediction. *Wea. Forecasting.*, **31**, 1985-1996, doi:10.1175/WAF-D-16-0075.1.