

## 1D6) WRF-CMAQ 모형을 이용한 질량 보존적 온라인 및 오프라인 대기질 모델링에 관한 연구

### Mass Consistent On-line and Off-line Air Quality Modeling using WRF-CMAQ System

김승범 · Daewon W. Byun<sup>1)</sup>

연세대학교 지구환경연구소, <sup>1)</sup>University of Houston

#### 1. 서 론

대기질 모델링에 있어서 질량 보존은 매우 중요한 물리적 구속 조건이다. 대기질 모형에 기상장을 공급하는 다양한 방법들이 개발되어 있으나 도시 및 지역 규모 대기질 모형들에서는 중규모 기상 모형들을 이용하여 기상장을 공급하는 방법이 일반적으로 활용되고 있다. 예를 들어, MM5 (Grell et al., 1995) 와 RAMS (Pielke et al., 1992)는 오일러리안 대기질 모형과 연동되어 사용되어지고 있는 대표적 중규모 기상 모형들이다. 그런데, 이들 중규모 기상 모형들로부터 대기질 모형으로 공급된 밀도와 바람장이 대기질 모형에서의 질량 보존에 관한 연속 방정식 (continuity equation)을 흔히 만족시키지 못한다는 사실이 여러 연구들을 통해 밝혀졌다. 이를 대기질 모델링에서의 질량 비일관성 문제 (mass inconsistency problem)라 한다. 이 문제를 극복하기 위해 다양한 질량 보정 (mass adjustment) 방법들이 개발되어 대기질 모형들에서 사용되어지고 있다. 하지만 이 방법은 실제적인 물리과정이 아니기 때문에 이 문제를 해결하기 위한 보다 근본적인 방안이 강구되어야만 한다. Byun (1999a, 1999b)은 질량 비일관성 문제를 해결하기 위해서는 근본적으로 기상 모형과 대기질 모형에서 역학적 일관성이 있어야함을 지적한 바 있다.

한편, 최근에 들어 기상모형과 대기질 모형을 연결시키는 방법으로 두 가지 방안이 제시되고 있다. 온라인 (on-line) and 오프라인 (off-line) 모델링. 온라인 모델링은 기상 모형과 대기질 모형이 완전히 결합되어 동시에 기상과 대기질에 대한 적분을 수행하는 모델링 방법이고 오프라인 모델링은 임의 시간 간격의 기상 모형 결과들을 내삽하여 대기질 모형에 필요한 기상장을 공급하는 모델링 방법이다. 온라인 모델링은 오프라인 모델링에 비해 막대한 계산 시간을 요구하여 대기질 모델링의 궁극적 목적 중 하나인 배출원 파악 등 실제적 적용에 어려움이 있으나 많은 학자들은 매 적분 시간마다 기상 모형에서 계산되어지는 역학 및 열역학 관계식들을 만족하는 기상장들이 대기질 모형으로 공급되어지면 질량 비일관성 문제가 해결될 수 있다고 간주하고 있다.

최근에 미국 국립대기연구센터 (National Center for Atmospheric Research, NCAR)에서 기존의 중규모 예측 모형인 MM5를 대체하는 차세대 기상 모형인 Weather Research and Forecasting (WRF) 모형이 개발되고 있다. 이 모형의 가장 큰 특징들 중의 하나는 완전 압축 비정수 방정식 (fully compressible non-hydrostatic equation set)을 사용하는 미국 환경청 (US EPA)의 대기질 예측 모형인 CMAQ과 동일한 역학적 및 열역학적 열개를 사용한다는데 있다. 본 연구에서는 WRF-CMAQ 시스템을 이용하여 기상 모형과 대기질 모형에서의 역학적 일관성이 질량 비일관성 문제에 미치는 영향과 오프라인 모델링에서 시간 내삽된 질량 속 변수들과 기상장 전달 시간의 이 문제에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

#### 2. 연구 방법

위에서 언급한 질량 비일관성 문제와 연관된 논의들을 조사하기 위해 각 모형의 최신 버전들인 WRF v.2.0.3.1과 MM5 v. 3.6.3, 그리고 CMAQ v.4.4 모형들이 사용되었다. MM5로부터 CMAQ으로의 기상장 공급은 CMAQ의 전처리 모듈 중의 하나인 MCIP v2.3을 이용하였고, WRF와 CMAQ의 연결은 새로 개발된 WRF-CMAQ Interface Processor (WCIP) (Kim and Byun, 2002)을 이용하였다. 수치 실험은 미국 Texas 주 동남부의 Houston-Galveston 지역에 대해 2000년 8월 27일 00UTC에서 8월 28일 00UTC

까지 총 24시간에 대해 행해졌다. 모형의 수평 격자 간격은 4km이고 연직으로는 신장 격자 (stretching grid)을 사용하였다. WRF와 MM5의 경우 161×146×43개의 격자를 사용하였고 CMAQ의 경우는 90×90×43개의 격자를 사용하였다. 기상 모형에서의 적분 시간 간격은 10초로 하였다. 선택된 날의 종관 기상 특징은 구름이 없는 매우 맑은 날로써 구름 및 복사 과정 등에 의한 역학적 변화가 적은 날을 일부러 택하였다.

### 3. 결과 및 고찰

1시간 간격의 기상 모형 결과를 이용한 초기치와 경계치를 1로 주는 IC1\_BC1 추적자 실험 결과 WRF 모형의 결과가 MM5의 결과 보다 훨씬 적은 질량 일관 오차 (mass consistency error)를 보여주었으나 WRF와 CMAQ간에 동일한 역학 체계를 갖추었음에 불구하고 질량 비일관성 문제가 완전히 해결되지 않음을 알 수 있었다 (그림 1).

일반 좌표계를 사용하는 CMAQ에서 두 연속적 기상장 산출 시간  $t_n$ 과  $t_{n+1}$  사이의 임의 시간  $t = (1-\alpha)t_n + \alpha t_{n+1}$ 에서의 질량 속 변수들 (mass flux variables)은 질량 보존을 위해 다음과 같이 결정된다.

$$(\hat{v}_s)_a = \frac{(\rho J_s \hat{v}_s)_a}{(\rho J_s)_a}; (\hat{v}_s)_a = \frac{(\rho J_s \hat{v}_s)_a}{(\rho J_s)_a} \quad (1)$$

여기서  $\hat{V}_s$ 와  $\hat{v}_s$ 는 각각 수평 그리고 연직 반대바뀐 (contravariant) 바람 성분들이고,  $\rho$ 는 밀도,  $J_s$ 는 일반 좌표계 (generalized coordinate system)에서의 Jacobian을 의미한다. 식(1)의 각 우변항에 보이는 Jacobian 가중 밀도가 곱해진 바람 성분들이 오염물질의 질량 보존과 연관된 질량 속 변수들을 말한다. 질량 보존된 시간 t에서의 반대바뀐 바람 성분들은 비단 식(1)과 같은 방법 외에도 다양한 방법으로 구해질 수 있다. 식(1)에 보여진 방법을 포함한 총 4가지 방법을 다양한 시간 간격에 대해서 실험해 본 결과 순간적인 WRF 바람장이 질량 일관성을 지님을 알 수 있었다. 이로 인해 WRF의 결과를 사용할 경우 질량 보정 없이도 식(1)에 보여진 CMAQ의 질량 보존적 시간 내삽만으로도 오염물질의 질량을 잘 보존할 수 있음을 알 수 있었다.

온라인 모델링을 통해서 질량 비일관성 문제가 해결된다고 하더라도 매 적분시간 마다 대기질 적분을 수행하는 매우 비경제적이다. 따라서 온라인 모델링의 경우에서도 바람장의 질량 균일성이 유지되는 적분시간 간격을 찾는 것은 경제적으로 매우 유용한 일이다. 질량 균일성을 지닌 WRF 모형의 경우 10분과 1시간 간격의 기상장을 온라인 모델링의 경우인 10초 간격의 기상장을 사용한 결과와 비교한 결과 1시간 간격의 기상장을 사용한 결과는 많은 차이를 보였지만 10분 간격의 기상장을 사용한 결과와 10초 간격의 기상장을 사용한 결과가 아주 유사하였다 (그림 2). 따라서 WRF처럼 질량 일관성을 지닌 바람장을 만들어내는 기상 모형의 경우 기상장 적분시간 간격보다 더 큰 시간 간격에 대해서도 바람장들이 질량 일관성을 지님을 알 수 있었다.

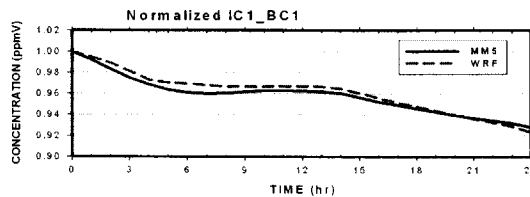


Fig. 1. Temporal variation of averaged tracer concentration with IC (initial condition)=1.0 and BC (boundary condition)=1.0 for MM5 (solid) and WRF (dashed) during 24 hours.

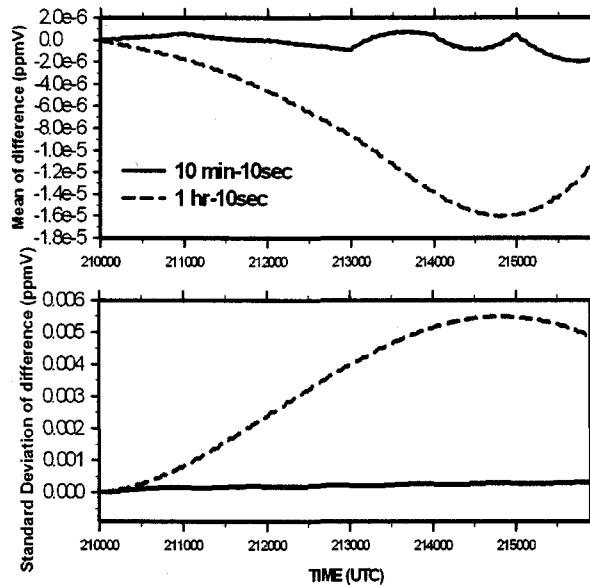


Fig. 2. Mean (upper panel) and standard deviation (bottom panel) of the difference of tracer concentration for 10 sec, 10min and 1hr experiments.

#### 참 고 문 헌

- Byun, D. W., 1999a: Dynamically consistent formulations in meteorological and air quality models for multi-scale atmospheric applications: Part I. Governing equations in generalized coordinate system, *J. Atmos. Sci.* 56, 3789-3807.
- Byun, D. W., 1999b: Dynamically consistent formulations in meteorological and air quality models for multi-scale atmospheric applications: Part II. Mass conservation issues. *J. Atmos. Sci.* 56, 3808-3820.
- Kim S.-B. and D. W. Byun, 2002: Development of WRF-CMAQ Interface Processor (WCIP). 2002 Models-3 Users' Workshop, October 21-23, 2002, Research Triangle Park, NC, USA.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1995: A Description of the Fifth-Generation Penn. State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 122 pp.
- Pielke, R. A., and Coauthors, 1992: A comprehensive meteorological modeling system-RAMS. *Meteor. Atmos. Phys.*, 49, 69-91.