WRF-CMAQ 모델을 이용한 한반도 CH₄ 배출의 기여농도 추정 및 검증

문윤섭^{1,*} · 임윤규¹ · 홍성욱² · 장은미³

¹한국교원대학교 환경교육과, 363-791, 충청북도 청원군 강내면 태성탑연로 250

²국가기상위성센터 위성분석과, 365-831, 충청북도 진천군 광혜원면 구암길 64-18

³지인컨설팅 부설연구소, 110-070, 서울특별시 종로구 새문안로 3길 36 용비어천가 325호

Verification and Estimation of the Contributed Concentration of CH₄ Emissions Using the WRF-CMAQ Model in Korea

Yun-Seob Moon^{1,*}, Yun-Kyu Lim¹, Sungwook Hong², and Eunmi Chang³

¹Department of Environmental Education, Korea National University of Education,
Chungbuk 363-791, Korea

²Satellite Analysis Division, National Meteorological Satellite Center, Chungbuk 365-831, Korea

³Ziinconsulting INC, Seoul 110-070, Korea

Abstract: The purpose of this study was to estimate the contributed concentration of each emission source to CH₄ by verifying the simulated concentration of CH₄ in the Korean peninsula, and then to compare the CH₄ emission used to the CH₄ simulation with that of a box model. We simulated the Weather Research Forecasting-Community Multiscale Air Quality (WRF-CMAQ) model to estimate the mean concentration of CH₄ during the period of April 1 to 22 August 2010 in the Korean peninsula. The CH₄ emissions within the model were adopted by the anthropogenic emission inventory of both the EDGAR of the global emissions and the GHG-CAPSS of the green house gases in Korea, and by the global biogenic emission inventory of the MEGAN. These CH₄ emission data were validated by comparing the CH₄ modeling data with the concentration data measured at two different location, Ulsungdo and Anmyeondo in Korea. The contributed concentration of CH₄ estimated from the domestic emission sources in verification of the CH₄ modeling at Ulsungdo was represented in about 20%, which originated from CH₄ sources such as stock farm products (8%), energy contribution and industrial processes (6%), wastes (5%), and biogenesis and landuse (1%) in the Korean peninsula. In addition, one that transported from China was about 9%, and the background concentration of CH₄ was shown in about 70%. Furthermore, the CH₄ emission estimated from a box model was similar to that of the WRF-CMAQ model.

Keywords: WRF-CMAQ model, flux of CH₄ emissions, contributed concentration of CH₄

요약: 이 연구의 목적은 한반도에서 CH₄ 농도의 수치모의 검증을 통하여 CH₄ 배출원의 기여 농도를 추정하는 것이고, 이 수치모의에 사용된 CH₄ 배출량을 상자모델로부터 추정된 CH₄ 배출량과 비교하는 것이다. 한반도에서 2010년 4월 1일부터 8월 22일까지 CH₄의 평균 농도를 추정하기 위해 WRF-CMAQ 모델이 사용되었다. 모델에서 CH₄ 배출량은 전지구 배출량인 EDGAR와 한국에서의 온실기체 배출량인 GHG-CAPSS로부터 인위적 배출 인벤토리와 전지구 자연적 인벤토리

*Corresponding author: ysmoon@knue.ac.kr

Tel: +82-43-230-3769

Fax: +82-43-230-3785

인 MEGAN이 적용되었다. 이들 CH_4 배출량은 안면도 및 울릉도에서 측정된 CH_4 농도와 모델링 농도 자료를 비교함으로써 검증되었다. 울릉도에서 국내 배출원으로부터 추정된 CH_4 의 기여 농도는 약 20%로 나타났고, 이것은 한반도 내 농장(8%), 에너지 기여 및 산업공정(6%), 일반폐기물(5%), 생체 및 토지이용(1%) 등 CH_4 배출원으로부터 기원하였다. 그리고 중국으로부터 수송된 CH_4 의 기여 농도는 약 9%였고, 나머지 배경농도는 약 70%로 나타났다. 박스모델로 추정된 CH_4 배출량은 WRF-CMAQ 모델에서 사용한 CH_4 배출량과 유의미한 결과를 얻었다.

주요어: WRF-CMAQ 모델, CH_4 배출량의 플럭스, CH_4 의 기여 농도

서 론

지구온난화에 의한 기후변화는 인간의 생활과 건강에 직접적인 영향을 미치며, 기후 의존형 산업에 심각한 위협을 가져올 수 있다. 지구온난화의 원인 중 가장 현실적인 문제는 인간 활동에 의한 대기 중 온실가스 농도의 상승이다. 최근에는 온실가스 배출량을 줄이려는 노력이 전 세계적 이슈가 되고 있다. 우리나라도 국제기후변화협약에 의거, 온실가스 배출량을 산정하여 국가 보고서 형태로 유엔에 제출하여야 하며, 이는 온실가스 중장기 감축 정책의 기본 자료로 활용 되어, 앞으로 실행될 수 있는 배출권 거래제도와 탄소세 등 정책의 근간이 될 전망이다(IPCC, 2001; IPCC 2006).

우리나라 국가단위 온실가스 배출량 산출은 에너지경제연구원에서 배출량 분석을 종합하여 지식경제부에서 발표하고 있으며, 1990년부터 작성하였다. 에너지경제연구소의 배출량은 1996년의 IPCC(Intergovernment Panel for Climate Change)지침을 따르고 있다(IPCC, 1996). 분야별로는 에너지경제연구소에서 에너지 및 산업공정 부분을, 농업과학기술원에서 농업 부분을, 축산기술연구소에서 축산 부분을, 임업연구원에서는 토지이용 및 임업 부분을, 그리고 환경부에서 폐기물 부분을 담당하고 있다. 최근에는 IPCC에서 2006년 가이드라인을 발표하여 2012년에 채택 될 것으로 예상하고, 2006년 가이드라인을 적용하여 연구하고 있다(Korea Energy Economic Institute, 2008; Kim, 2009). 그러나 우리나라 국가 온실가스 통계는 국가 전체 통계량을 적용한 하향식 방법이기 때문에 계절별, 월별, 일별 변화를 포함하는 시간분배와 오염원의 위치에 따른 공간적 분배를 할 수 없으므로 온실가스 모델링 입력 자료로 사용하기가 매우 어렵다. 한편, 국립환경과학원에서는 2007년부터 작성한 온실가스 배출량 지원시스템인 GHG-CAPSS(Green House Gas-Clean Air Policy Support System)를 이용하여 지자체별, 업소별 배출량을 상향식으로 산정하고 있

고 이를 온실가스 모델링에 이용할 수 있다. 참고로 GHG-CAPSS와 에너지경제연구원에서 산정한 우리나라 국가 온실가스 배출량은 부분별 배출량 비교에서 큰 차이가 없음을 보고하고 있다(Seok, 2009).

하지만 우리나라 온실가스 배출량 산정 방법은 대부분 연료사용량에만 근거한 단순한 산정 방법을 따르고 있어, 불확실성이 크다. 국내외 정책의 기초자료로 사용하기 위해서는 더 자세하고 세밀한 배출량 산정 방법이 필요하며, 이와 함께, 산정된 배출량을 검증하고 신뢰도를 평가할 수 있는 시스템 마련이 시급하다. 그러한 시스템의 한 방법으로서 온실가스 모델링은 온실가스 배출량의 신뢰성을 간접적으로 평가할 수 있을 뿐만 아니라 그 농도의 변화를 모의함으로써 온실가스 배출의 기여도를 파악할 수 있다.

온실가스 중 메테인(CH_4)은 지구온난화지수(GWP: Global Warming Potential)가 이산화탄소보다 21배나 높다. CH_4 의 인위적 배출원은 생체연소(biomass burning), 화석연료 연소와 같이 열적 연소 상태에서 주로 발생하며, 논·벼나 매립지 등의 혐기적인 장소에서 서식하는 미생물과 소와 같은 반추동물의 위나 장에 서식하는 미생물에 의해 발생 된다. CH_4 의 자연적 배출원은 환개미 대사과정, 늪 또는 습지, 담수 등에 서식하는 미생물에 의해, 그리고 저온 고압 조건의 툰드라 기후대 토양이나 해수에 분포하는 메테인하이드레이트 형태로 존재한다. 대기에서 CH_4 농도의 증가는 탄화수소 라디칼에 의한 CH_4 산화, 토양 온도나 강수에 따른 모든 습지에서의 CH_4 발생량 변화, 해저 또는 툰드라 지역에서 메테인하이드레이트의 방출 등에 기인한다(Berrittella and Huissteden, 2009). CH_4 의 수명은 8-9년이지만 풍부한 OH조건에서 CH_4 의 수 십 년 수치의 결과에서는 CH_4 의 대기 중 유효 체류기간이 12년으로 보고되고 있다(Prather, 1996; Wild et al., 2001). CH_4 의 대기 중 주요 화학은 CH_4 -CO-OH사이클에 의해 유도되고, 풍부한 OH 조건에서 상승, 수송 및 산화물이 결정된다. 하지만 OH는 질소산화물과 오존에 의해 재분배

되므로 특별히 오존의 생성은 CH₄의 파괴를 유도하므로 관련 화학의 수치 모델링을 통하여 이를 파악하는 것이 요구되는 실정이다(Stevenson et al. 2004; Lee et al., 2009). 현재 CH₄ 모델링의 관련 국내외 선행 연구는 시작단계에 있다.

따라서, 본 연구의 목적은 한반도를 포함한 동북아시아 CH₄ 배출량과 함께 WRF(Weather Research Forecasting)-CMAQ(Community Multiscale Air Quality) 모델 내 CH₄-CO-OH 사이클을 이용하여 CH₄ 농도와 그 배출 기여도를 추정하는 것이다. 또한 상자 모델에 근거하여 CH₄ 배출량을 추정하고 이를 모델 결과와 비교하는 것이다.

자료 및 연구방법

온실가스(CH₄) 배출량

국립환경과학원에서는 매년 온실기체 배출량을 일반 대기 오염물 배출량 지원 시스템인 CAPSS와 연계하여 각각의 배출원의 시·공간적인 특성을 추적할 수 있다. 이것은 연 단위로 산정된 배출량을 시간별 모델링 입력 자료로 구성하는데 대단히 중요한 요소로 시·군·구 기초자치단체별·배출원 분류별 연돌제원, 사용연료 종류 및 연료량, 배출량 등의 정보를 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 GHG-CAPSS 배출량 자료를 기반으로 배출량 입력 자료를 구성하였다. 그러나 국내 온실가스 배출량 자료는 산림과 토지이용에 의한 배출량과 주변국의 배출량 자료를 포함하지 않고 있어, 식생과 토양 분포에 따른 배출량을 따로 추가하여 보완할 필요가 있기 때문에, EDGAR(Emissions Database for Global Atmospheric Research) v4.2 온실가스 배출량을 바탕으로 동아시아 및 북한 지역의 배출량을 추가하였다. EDGAR 배출량은 GEIA(Global Emissions Inventory Activity) 프로젝트의 일환으로, 전 지구에 대해서 1°×1° 간격으로 배출량이 산정되며 매년 업데이트 되고 있다. EDGAR 배출량은 CO₂, CH₄, N₂O 등의 온실가스 뿐만 아니라 CO나 NO_x 및 오존의 전구물질까지 포함하고 있다(GEIA, 2001).

그리고 누락된 식생분포에 의한 온실가스 배출량은 MEGAN(Model of Emissions for Gases and Aerosols from Nature)을 이용하여 산정하였다. MEGAN은 GIS(Geographic Information System) 식생 자료와 중 규모 기상 모델 결과를 입력 자료로 사용하여 식생

분포와 잎면적지수, 배출계수 등을 이용하여 식생의 배출량을 산정하는 모델로서 크게 세 가지 모듈을 가지고 있다. 첫 번째 모듈인 MG2IOAPI는 입력자료로 사용되는 GIS 식생 자료와 기상자료를 주요 모듈이 읽을 수 있는 형태로 변환하는 모듈이다. 두 번째 모듈은 MEGAN이며 이 모듈의 주요 부분으로 읽어 들인 입력자료를 바탕으로 배출량을 산정하는 모듈이다. 마지막 모듈은 MG2MEGAN이며, CBM4(Carbon-Bond Mechanism version IV), CBM5(Carbon-Bond Mechanism version V), RADM2(Regional Acid Deposition Model 2), SAPRC99(Statewide Air Pollution Research Center 99) 등 여러 가지 화학 메커니즘을 지원하는 모듈이다(Guenther et al., 1999). 또한 MEGAN은 전 지구에 대해서 30°×30° 간격의 GIS 식생 입력 자료를 제공하고 있어 전 지구규모 뿐 아니라 중규모 대기질 모델링의 입력 자료를 생산하는데 적합하고, 20종의 기본 물질을 이용하여 총 138가지의 물질에 대한 배출량을 산정할 수 있다. 그리고 MEGAN은 CMAQ, CAMX(Comprehensive Air quality Model with Extensions) 등의 지역 광화학 모델뿐만 아니라 MOZART(Model for Ozone and Related Chemical Tracers), GOES(Goddard Earth Observing System)-Chem 등의 지구 화학수송 모델, SMOKE(Sparse Matrix Operator kernel Emissions) 배출량 모델의 한 프로세서로도 활용할 수 있으며, 최근에는 WRF-Chem을 위한 online 모듈도 개발되어 폭넓게 활용할 수 있는 장점이 있다(Moon et al., 2011). 기본 물질 20종 중, 주요 물질에 대한 MEGAN 내 배출계수를 Table 1에 나타내었다.

CH₄ 모델링을 수행하기 위해서는 상기 온실가스 배출량으로부터 격자화된 시·공간적 CH₄ 배출량 자료가 필요한데 SMOKE 모델을 이용하여 이를 산출하였다. SMOKE 모델은 MCNC(Microelectronics Center of North Carolina)의 EMC(Environmental Modeling Center)에서 1995년 만든 배출 모델이다(Coats, 1995). 정책결정, 연구·조사 등에 필요한 대기질 모델링 입력자료를 만들기 위해 개발하였으며, 복잡한 행렬계산을 수행할 수 있게 고안되었다. SMOKE 모델은 사용자가 정의한 화학 메커니즘에 따라 배출량을 계산할 수 있으며, 이동오염원의 배출량을 계산하는 MOBILE, 자연 식생오염원의 배출량을 계산할 수 있는 BEIS(Biogenic Emissions

Table 1. Input parameters for MEGAN

Class Name	Methane	Acetone	Methanol	Nitrogen gasses	Myrcene
Broadleaf Trees	300	100	400	5	20
Needleaf Trees	300	100	400	5	75
Shrubs	300	100	400	41	22
Crops/Grasses	300	100	400	200	0.3
Dimensionless parameter for γ	0.05	0.11	0.09	0.07	0.09
Light Dependent Fraction	0.75	0.00	0.00	0.00	0.05

Fig. 1. Domain for the CH₄ modeling.

Inventory System)를 포함하고 있다. 본 연구에서는 CH₄ 산화과정을 포함하여 34종의 화학 메커니즘을 가진 SAPRC99를 채택하였고 식생배출량 산정을 위한 MEGAN 모델도 SMOKE 모델과 함께 사용하였다. 또한 SMOKE 모델에는 CAPSS 배출량의 배출원 분류별 연변화, 일변화, 요일변화 특성을 정의한 각각의 시간분배계수를 입력하였다. 이 때 시간분배계수는 점에 대해서는 굴뚝 TMS(Telemetry System) 자료를, 면과 선에 대해서는 차종별 운행 분포 자료를 참고하였다. 그리고 공간분포를 정의하기 위해서는 시·군·구 경계와 인구, 산업 및 토지이용도를 포함한 GIS 자료를 사용하였다. 동시에 CAPSS 배출량의 배출원 분류와 GHG-CAPSS의 배출원 분류체계(SCC)를 연계할 수 있도록 하여 CH₄ 배출량뿐만 아니라 CH₄ 산화관련 CO나 O₃ 전구물질 등의 대기질 입력 자료 산출도 용이하게 하였다.

CH₄ 모델링

CH₄ 모델링에서 가장 중요한 두 가지는 배출량과 함께 기상 입력자료라고 할 수 있다(Liu et al., 1994). 종합적인 CH₄ 농도 평가를 위해서는 종관규모의 기상과 국지 및 도시 규모의 기상이 함께 고려되어야 하며, 이를 위해서 다중격자 체계가 필요한데

Table 2. Physical schemes, grid resolution, and time step for the WRF modeling (NCAR, 1994; NCAR, 2003)

	Domain 1	Domain 2
PBL scheme	YSU scheme	
Cumulus scheme	new Eta scheme	
Explicit moisture scheme	WSM 6-class	
Radiation scheme	RRTM longwave scheme	
Vertical grid	27 layer	
Horizontal grid	160×97	97×97
Horizontal Resolution	27km	9km
Time step	60s	20s

(Gery et al., 1989), 차세대 기상 예보 모델인 WRF가 이를 만족하고 있다(Dudhia, 1993). 따라서 본 연구에서는 WRF 모델을 이용하여 도메인을 크게 동아시아 영역과 한반도 영역으로 나누어 모델링을 수행하였다. 각 도메인의 구성과 영역은 Fig. 1에 나타냈으며, 사용된 물리 모수와 방안들과 모델링 수행 옵션은 Table 2와 같다(Koo et al., 2007; Lee et al., 2009).

CH₄ 모델링을 위해서는 상기 제시된 SMOKE CH₄ 배출량 및 기상 자료와 함께 화학 수송 모델인 CMAQ이 사용되었다(EPA, 1999). CMAQ 모델은 메인 모델인 CCTM(CMAQ Chemical Transport Model)을 통해 수평이류계산, 연직이류계산, 이류과정계산에서 질량보존, 수평 및 연직 확산, 가스상 화학반응, 액상 반응 및 구름혼합, 에어로졸 동역학 및 크기 분포, 플럼 화학, 에어러솔의 침적, 그리고 광해리 등 을 추정할 수 있다.

CMAQ 모델의 초기 및 경계 자료의 불확실성을 효과적으로 상쇄하기 위해서 CH₄ 모델링을 등지격자화 하여 동아시아 영역부터 모델링하여 국내 도메인의 경계 자료로 사용하였다. 또한 CH₄의 초기 농도 자료에 의한 불확실성을 줄이기 위해 3일 이상의 모델링을 수행하였고 동시에 3일의 결과를 제외하고 모델링 결과를 제시하였다(Umeda and Martien, 2000).

Fig. 2. Box model for calculating of CH₄ emissions.

그리고 모델 내 화학메커니즘에 대해서는 SAPRC99를 채택하였고, 층의 수는 27로 하였다.

한편 WRF-CMAQ 모델의 CH₄ 농도 검증으로부터 한반도의 CH₄ 배출량의 기원별 기여도를 산출하였다. 동시에 CH₄ 배출량의 검증을 위해 Fig. 2와 같은 상자 모델을 사용하였다. 상자의 크기는 상층으로 5 km, 남북으로 405 km의 크기이다. A면으로 유입된 기류는 B면을 통해 완전히 빠져나가는 정상상태, 비압축성 유체를 가정하였다. 또한 공간에서 CH₄ 평균 농도는 균일하며 배출원은 지면으로 CH₄의 방출과 동시에 혼합되어 전 지역에 균등 분포하고 단기간에 화학반응이나 제거 및 흡수되지 않는다고 가정하였다. 상자 모델을 이용한 농도변화와 배출량 사이 관계식은 다음과 같다.

$$\nabla q = [(V/L) \times (q_A - q_B) + (Q/LHS)] \nabla t \quad (1)$$

여기서 ∇q 는 농도 변화($q_A - q_B$), q_A 는 유입 농도, q_B 는 유출 농도, q_C 는 상자내 농도, V 는 평균풍속, L 은 통과길이, Q 는 상자 내에서 배출되는 총배출량, LHS 는 길이×높이×폭, 그리고 ∇t 는 통과시간을 나타낸다.

결과 및 토의

SMOKE CH₄ 배출량

SMOKE 모델을 이용하여 동아시아 및 국내, 그리고 식생분포에 의한 CH₄ 배출량을 산정하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3a의 동아시아 CH₄ 배출량의 경우는 EDGAR 배출량의 격자 크기가 1°×1°인 것을 27 km×27 km 격자 크기로 맞추면서 크게 단순화되었

다. 전남 지역에서 CH₄의 배출량 오차가 가장 크게 나타났는데 국내 GHG-CAPSS 배출량 경우는 최대 6-12 molessec-1 (Fig. 3b)를, 동아시아 EDGAR의 경우는 최대 2 molessec-1 (Fig. 3a)를, 그리고 MEGAN 식생분포 배출량의 경우는 2-4 molessec-1 (Fig. 3c)를 나타내었다. 결과적으로 전남지역 CH₄의 GHG-CAPSS 인위적 배출량 자료는 동아시아 CH₄의 인위적 배출량과 약 3-6배 오차를 나타내었고, 식생분포 배출량의 경우는 현재 추정된 값이 없는 것을 고려하면 약 3배가 누락되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 이들 배출량 자료를 이용하여 CH₄의 모델링을 수행할 경우 중국으로부터 유입된량은 약 3-6배가 과소평가될 수 있다. 참고로 우리나라 CH₄의 MEGAN 식생 배출량은 30°×30°의 공간 분해능을 가지므로 태백산맥과 함께 주요 식생 분포를 따라 잘 묘사한다고 볼 수 있다.

WRF-CMAQ의 기상과 CH₄ 모델링 검증

WRF-CMAQ의 CH₄ 모델링 사례일은 한반도의 풍상측인 안면도와 풍하측인 울릉도에 대해 CH₄ 농도 관측이 이루어진 2010년 4월 1일부터 8월 22일까지 선택하였다. 그리고 CH₄ 모델링 검증을 위해서는 서풍이 가장 우세했던 5월 3일부터 15일까지의 WRF-CMAQ 모의 결과에 대해 서울에서 기온 및 풍속을, 그리고 울릉도에서 CH₄ 농도 관측 값을 각각 비교하였다. 또한 CH₄ 모델링 결과의 신뢰도를 높이기 위해 또 다른 사례일로 2006년 8월 4일부터 6일까지 서산과 안면도의 이들 관측 값을 비교하였다.

Fig. 4는 서울 기상 관측소에서 2010년 5월 3일부터 15일까지 측정된 기온과 풍속을 WRF 모델 결과

Fig. 3. Spatial distribution of CH₄ emissions in (a) East Asia and (b-c) Korea. (a) and (b) are anthropogenic emissions of CH₄, and (c) is biogenic emissions of CH₄.

와 비교하여 나타낸 것이다. 기온은 2010년 5월 4일에서 5일 사이에 최고 기온을 과소평가한 것을 제외하면 모델값의 정합도(IOA, Interrelation of Agreement)와 제곱근오차(RMSE, Root Mean Square Error)가 각각 0.83과 3.21°C로 나타났다. 4일과 5일에 기온을 과소평가한 것은 이 시기에 한반도를 통과한 저기압의 위치와 관련이 있는 것으로 판단된다. 한편 이동성 고기압이 한반도를 지배했던 5월 9일부터는 기온의 일변화 양상을 더욱 잘 묘사하고 있다. 풍속의 경우는 때때로 나타나는 급격한 변화에 민감하지 못하지만 IOA와 RMSE가 각각 0.69와 1.56 m s⁻¹로 나타나고 있다. Fig. 5는 서산 기상 관측소에서 2006년 8월 4일부터 6일까지 측정된 기온과 풍속을 WRF 모델 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 하루 동안 기온이 변화하는 패턴과 최대기온이 나타난 시각이 상당

히 일치하여 IOA와 RMSE가 각각 0.91과 1.43°C로 나타났다. 다만, 전체적으로 최대기온이 나타나는 시간대에 기온이 약간 낮게 묘사되었으며, 밤에는 전반적으로 기온을 높게 묘사하는 경향이 있었다. 이것은 수치모델의 시 가장 작은 도메인의 분해능이 9 km이고 해안가에 위치한 관계로 국지기상에 대한 세밀한 변화의 묘사 부족과 지형고도 자료의 단순화(smoothing) 결과로 판단된다. 바람의 경우는 IOA와 RMSE가 각각 0.70과 0.76 m s⁻¹로 국지기상 변화를 충분히 묘사하지 못하여 풍속의 변화가 관측값에 비해 크게 단순화된 경향을 나타내었다. 기상요소들의 일변화 경향은 신뢰성이 있는 결과로 사료되나, 더욱 정밀하고 정확한 결과를 도출하기 위해서는 대상지역에 보다 세밀한 도메인을 설정하여 수치모델의 할 필요가 있다고 사료된다.

Fig. 4. Time series of (a) air temperature, (b) wind speed between measured and simulated data during the period from 3 to 15 May 2010 at the Seoul meteorological monitoring site.

Fig. 5. Same as Fig. 4 except for 4 to 6 August 2006 at the Seosan meteorological monitoring site.

Fig. 6. The spatial distribution of CH₄ concentration at 1200LST on 6 May 2010 in East Asia.

Fig. 7. The spatial distribution of mean concentration of CH₄ (a) during the period from April to August 2010, and (b) at 0000LST (left panel) and 1200LST (right panel) on 6 August 2006 in the Korean peninsula.

Figs. 6 and 7은 상기 두 기상 사례 일에 대한 동아시아 영역과 한반도 영역의 CH₄ 농도를, 그리고 Fig. 8은 울릉도 및 안면도에서 이들 결과값과 관측

값을 비교하여 시계열로 나타낸 것이다. Fig. 6에서처럼 우리나라는 서풍이 강한 날 중국으로부터 CH₄이 수송될 수 있지만, Fig. 7a에서와 같이 4월에서 8

Fig. 8. Time series of CH₄ concentration between measured and simulated data during the period (a) from 3 to 14 May 2010 at the Ulnungdo meteorological monitoring site, and (b) from 4 to 6 August 2006 at the Anmyeondo global atmospheric observing site.

월의 5개월간 수치모의 한 CH₄의 평균 농도에서는 주로 CH₄ 배출량이 높은 지역인 수도권, 울산권, 전남권을 중심으로 CH₄ 농도가 높음을 알 수 있다. 이 수치모의 기간 동안 한반도 상의 CH₄ 평균 농도는 약 2.0 ppm으로 지구 관측 평균인 1.8 ppm 보다 높은 농도를 나타내었다. 실제로 울릉도에서 2010년 4월 1일부터 2010년 8월 22일까지 관측된 CH₄의 평균 농도는 1.887 ppm으로 지구 평균보다 조금 높게 나타났다. 또한 이 기간 동안 한반도에서는 서풍이 우세하였다는 것을 알 수 있는데, 풍상측인 서해 연안 지역보다 풍하측인 동해 연안 지역이 상대적으로 높은 농도를 나타내었기 때문이다. 한편 Fig. 7b와 같이 단기간의 CH₄ 수치모의 경우는 온실기체로서 CH₄의 배경농도를 설명하기 어려운 단점이 있는 반면에 Fig. 8과 같이 CH₄의 고농도 현상을 추정하는데 도움을 줄 수 있다.

Fig. 8a에서 CH₄ 농도의 장기간 수치모의 경우는 IOA와 RMSE가 각각 0.54와 0.04 ppm으로 관측값을 50% 이상 반영하고 있지만 가끔 나타나는 농도의 급격한 변화는 비슷한 시간대의 바람 변화와 연관이

있는 것으로 판단된다. Fig. 8a의 2010년 5월 5일 울릉도에서 CH₄ 고농도 사례 일을 분석하기 위해 Figs. 9, 10a, and 10b와 같이 지상 일기도에서의 바람 벡터와 후방궤적을 분석하였다. Fig. 9에서 2010년 5월 3일에서 5일 12시까지의 기압 분포와 바람 벡터를 보면 중국 대륙에 위치한 정체성 저기압의 영향으로 울릉도 부근에서는 남풍 또는 남서풍 계열의 바람이 지속적으로 불고 있기 때문에 주변 CH₄ 배출원이나 한반도 대륙쪽에서의 장거리 수송이 가능하게 되었다. 하지만 6일 12시의 경우는 중국 만주쪽으로 이동한 저기압으로 인해 울릉도는 이전보다 강한 서풍이 불게 되었고 이로 인해 CH₄ 농도가 감소하였을 것이다. Figs. 10a and 10b는 울릉도 기상대에서 5월 4일과 5일 12시 500, 1,500, 3,000 m의 세 고도에서 72시간 추적한 공기의 후방궤적으로 남서풍으로부터 공기가 이동하여 왔음을 알 수 있다. Fig. 8b에서 2006년 8월 6일 안면도의 CH₄ 고농도 현상은 8월 6일 이전 서해 이북에서 발달한 고기압성 바람과 관계되는데, Fig. 11에서 나타난 것처럼 서해 이북에 발달한 고기압성 바람이 여름철 남동풍

Fig. 9. The spatial distribution of wind vector (arrows) and surface air pressure (contours) at 1200LST (a-d) on 3-6 May 2010 in the Eastern Asia area.

계열의 바람과 마주하게 됨으로써 안면도에서의 풍향은 북서풍, 북풍, 북동풍으로 바뀌게 되었다. 이로 인해 서울 및 경기도와 대단위 발전 시설이 위치하고 있는 충청남도 북부 지방의 배출원으로부터 CH_4 이 수송되었을 가능성이 높다. 하지만 8월 6일 12시 이후에는 안면도를 포함한 한반도 전역에서 서풍이 우세하게 나타나 서쪽의 깨끗한 공기가 이류 됨으로써 CH_4 농도가 배경농도로서 낮게 관측되었을 것으로

판단된다. Figs. 10c and 10d는 안면도 기후감시관측소에서 8월 4일과 5일 0시 500, 1,500, 3,000 m의 고도에서 72시간 추적한 공기의 후방궤적으로 상공에서는 남풍 또는 남동풍의 영향을 받지만 지표면 근처 500 m에서는 북쪽 및 주변 지역으로부터 공기가 이동하여 왔음을 알 수 있다. 또한 Fig. 7b에서 8월 6일 오전 6시와 12시의 CH_4 농도의 공간적 분포를 살펴보면 지표면에서 북풍 및 북동풍 바람이 우

Fig. 10. Backward trajectories at three levels(500 m, 1500 m, 3000 m) using the NOAA HYSPLIT model at 1200LST on (a) 4 and (b) 5 May 2010 at the Ulnungdo meteorological monitoring site, and at 0000LST on (c) 4 and (d) 5 August 2006 at the Anmyeondo global atmospheric observing site.

세한 6시의 농도 분포가 서풍이 우세한 12시의 경우에 비해 높게 나타났다는 것이 이를 뒷받침하고 있다. Fig. 8b에서 CH₄ 농도의 단기간 수치모의 경우는 IOA와 RMSE가 각각 0.64와 0.23 ppm으로, 전체적인 농도가 관측값 보다 낮게 묘사되었고 시간이 지날수록 저평가되어 나타났다.

한편, 검증기간에 비교된 기온과 풍속, CH₄ 농도의 관측값과 모델값의 정합도(IOA, Interrelation of

Agreement)와 제곱근오차(RMSE, Root Mean Square Error)를 정량적으로 나타낸 결과를 Table 3에 제시하였다. IOA는 모델의 정합도를 나타내며 값이 1이면 완전하게 일치, -1이면 반대의 결과를 나타내는 통계 지수이고, RMSE는 모델값과 관측값의 차이를 나타내는 평균제곱근오차로 계산식은 다음과 같다.

$$IOA = 1 - \frac{\overline{(a_{\text{model}}(x,t) - a_{\text{obs}}(x,t))^2}}{\overline{(a_{\text{model}}(x,t) - a_{\text{model}})^2} \times \overline{(a_{\text{obs}}(x,t) - a_{\text{obs}})^2}} \quad (2)$$

Fig. 11. The spatial distribution of wind vector (arrows) and air temperature (filled colors) (a) at 1800LST on May 4, (b) at 0000LST on May 5, (c) at 0000LST on May 6, and (d) at 1200LST on 6 May 2010 in the Korean peninsula.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (a_{\text{model}(x,t)} - a_{\text{obs}(x,t)})^2}{N}} \quad (3)$$

여기서 $a_{\text{model}(x,t)}$ 는 모델값, $a_{\text{obs}(x,t)}$ 는 관측값, $\overline{a_{\text{model}}}$ 는 모델값 평균, $\overline{a_{\text{obs}}}$ 는 관측값 평균, N 은 총 수를 나타낸다.

Table 3은 2010년 5월 3일부터 15일까지 서울에서 기온과 풍속, 울릉도에서 CH_4 농도의 IOA와 RMSE 결과를 일부 나타낸 것으로, IOA는 각각 0.83, 0.69, 0.54, 그리고 RMSE는 각각 3.21°C , 1.56 m s^{-1} , 0.04 ppm 으로 나타났다. 결과적으로 불확실성이 큰 배출량과 함께 일부 기상 요소의 오차, 그리고 모델 내 화학 메커니즘 오차 등으로 인해 CH_4 농도의 정합도

Table 3. Verification of air temperature and wind speed between measured and simulated data during the period of 3 to 15 May 2010 at the Seoul meteorological monitoring site, and that of CH_4 concentration at the Ulnungdo meteorological monitoring site

	IOA	RMSE
Air temperature($^\circ\text{C}$)	0.83	3.21
Wind speed(m/sec)	0.69	1.56
CH_4 concentration(ppm)	0.54	0.04

결과가 다소 낮게 나타났지만 IOA가 0.5 이상이고 RMSE가 낮은 것으로 보아 의미 있는 결과로 판단된다.

Table 4. The contributed concentration of CH₄ emissions estimated by the WRF-CMAQ modeling during the period of July to August 2006 in Ulsungdo

Emission sources of CH ₄	The contributed concentration(ppb) of CH ₄ emissions
Energy combustion and industrial processes	113.2 (6.0%)
Agriculture · stock farm products	155.4 (8.2%)
Wastes	99.8 (5.2%)
Biogenic and land use	12.7 (0.7%)
Transported from Eastern Asia	165.3 (8.7%)
Background concentration	1,351.2 (71.2%)

CH₄의 배출원 기여도와 상자 모델을 이용한 배출량 검증

CH₄ 모델링 시스템의 수행 능력을 검증하기 위해서는 Fig. 8과 같이 시간별 시나리오 농도를 관측값과 비교하여 나타내는 것이 필요하나 실제 CH₄ 기여도를 산정하기 위해서는 Fig. 7a와 같이 장기적인 평균 농도를 산출하여 추정하는 것이 배경농도 기여뿐만 아니라 오차를 줄일 수 있다. 또한 Fig. 2의 박스 모델에서 유입 유출에 따른 단위시간당 단위면적당 발생량을 추정하기 위해서는 평균적으로 서풍이 우세한 기간이 필요하다. 따라서 서풍이 우세한 2010년 4월 1일부터 2010년 8월 22일까지 CH₄ 배출량을 장기 수치의 하역 평균농도를 구하였고, 풍하측이고 CH₄ 측정이 가능한 울릉도에서 각 배출원별로 모델링을 수행하여 각각의 평균 기여 농도를 산출하였다(Table 4). 그리고 중국을 포함한 동아시아지역으로부터 CH₄의 기여도를 산출할 경우에는 동아시아 지역의 배출량에서 GHG-CAPSS의 국내 CH₄ 배출량과 식생 및 토지 영역의 자연적 CH₄ 배출량을 제외하고 수치모의 하였다. Table 4는 울릉도에서 이 기간 동안 CH₄의 전체 평균농도에 대한 각 배출원별 평균 기여 농도와 기여 퍼센트를 나타낸 것이다. 그리고 이 기간 동안 울릉도 기상 관측소에서 측정된 CH₄의 평균 농도는 1.887 ppm이었다.

울릉도에서 CH₄의 각 배출원별 기여도를 살펴보면 배경 기여농도가 71.2%로 가장 높게 나타났고, 중국을 포함한 동아시아 영역으로부터 수송된 기여 농도가 8.7%, 그리고 농업 및 농장으로부터 8.2%, 에너지 연소 및 산업 공정으로부터 6%, 폐기물로부터 5.2%, 식생 및 토지로부터 0.7%로 나타났다. CH₄의 배경 기여농도가 높다는 것은 대기 중에서 CH₄-OH-CO 화학 제거 반응이 느리고 잔류 시간이 길다는 것을 의미하는데 약 5개월의 화학수송모델 수치모의 시간이 CH₄ 배경농도를 잘 반영한다고 볼 수 있다

(Prather, 1996; IPCC, 1996). 주목할 만한 사항은 GHG-CAPSS의 국내 CH₄ 배출량에서 동아시아 영역과 식생 및 토지로부터 누락된 CH₄ 배출량이 약 10%의 기여 농도를 나타내었다는 사실이다. 하지만 5개월의 제한된 기간과 CH₄ 모델 자체의 불확실성이 있으므로 추후 연구에서는 보다 장기간의 수치모의와 보다 많은 연구 사례를 통해 이를 정량적으로 제시할 필요가 있다.

Fig. 2의 상자 모델 영역에서 5개월 동안 수치모의된 유출입 농도, 평균농도 및 평균 풍속을 식 (1)을 대입하여 추정한 한반도의 CH₄ 배출 농도 플럭스는 단위시간당, 단위면적(1 km²)당 0.0374 ppm으로 나타났다. 농도 플럭스를 이용하여 한반도 전체 CH₄ 배출량을 산정하면 약 43,277 kg h⁻¹로 실제 이 기간의 시간당 평균 배출량인 46,863 kg과 근소한 차이를 나타내었다. 따라서 CH₄ 모델의 예측된 농도 기여도와 배출량 검증을 통해서 알 수 있듯이 GHG-CAPSS의 국내 온실기체 배출량은 장거리 수송 부문과 식생 및 토지 이용에 따른 부문 등을 보완했을 경우 상자 모델에서 추정한 배출량과 유의미하다는 것을 알 수 있다.

결론

본 연구는 우리나라에서 산정되고 있는 GHG-CAPSS내 CH₄ 배출량의 정확도를 검증하는 차원에서 WRF-CMAQ의 CH₄ 모델링을 통해 CH₄의 배출원 기여 농도 평가와 배출량 자체를 검증하였다. 모델링 사례일은 서풍이 우세하면서 CH₄ 관측이 가능한 풍상측인 안면도와 풍하측인 울릉도를 고려하여 2010년 4월 1일부터 8월 22일까지 선택하였고 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, GHG-CAPSS 내 CH₄ 배출량에서 누락된 식생 및 토지이용에 따른 배출량과 동아시아 영역의

배출량을 SMOKE 배출량 모델을 이용하여 산출하였다. 식생 및 토지이용에 따른 CH₄ 배출량은 MEGAN 모델을 통해 산출하였고, 동아시아 배출량의 경우는 EDGAR를 고려하였다.

둘째, SMOKE CH₄ 배출량과 기상 입력 자료를 통한 모델링 결과는 정성적인 기류의 이동과 농도분포 뿐만 아니라 정량적인 통계 수치에서도 신뢰할 만한 수준을 나타내었다.

셋째, 사례일 동안의 CH₄ 농도 분포는 배출원이 많은 수도권, 울산권, 전남권에서 높게 나타났으며, 풍하측인 동해 연안이 풍상측인 서해 연안보다 상대적으로 높은 농도를 나타내었다. 또한 울릉도에서 CH₄의 인위적 배출원의 부분별 기여도는 동아시아 영역으로부터 장거리 수송 배출량이 가장 많았고 농업 부문이 두 번째로 큰 비중을 차지하였다. 한편, 한반도 대기를 하나의 상자 모델 가정하고 산출한 CH₄ 배출 농도 플럭스는 37.4 ppb h⁻¹ km⁻²로 나타났으며, 이 때 CH₄ 총 배출량은 약 43,277 kg h⁻¹로 실제 이 기간의 모델 입력 배출량인 46,863 kg h⁻¹과 근소한 차이를 나타내었다.

모델링은 수치계산을 통해 현상을 재현하는 것으로 모델링 입력자료 모두가 신뢰할 만한 양질의 자료이어야 만이 유의한 검증결과를 도출할 수 있다. 본 연구에서 시도한 CH₄ 모델링 결과, 관측값과의 일치도가 신뢰할 만하고 기여도 및 배출 농도 플럭스 계산에서도 CH₄ 특성과 배출량의 부분별 비율 및 총량에 가까운 값을 나타내고 있어, 모델링 입력 자료로 구축된 GHG-CAPSS 온실가스 배출량은 동아시아 영역과 자연적 기원의 식생 및 토지 이용 배출량을 추가할 경우 신뢰할 만한 수준인 것으로 판단되었다. 하지만 제한된 수치모의 기간과 CH₄ 화학수송모델 자체의 불확실성이 있으므로 보다 많은 연구 사례를 통해 이를 보완할 필요가 있다.

References

- Berrittella, C. and van Huissteden, J., 2009, Uncertainties in modeling CH₄ emissions from northern wetlands in glacial climates: effect of hydrological model and CH₄ model structure. *Climate of the Past Discussions*, 5, 817-851.
- Coats, C.J.Jr., 1995, High performance algorithms in the Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE) Modeling System. MCNC, Environmental Systems Division, Research Triangle Park, NC. 6 pp.
- Dudhia, J., 1993, A nonhydrostatic version of the penn stat/NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Monthly Weather Review*, 121, 1493-1513.
- Environmental Protection Agency, 1999, Science algorithms of the EPA model-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system. <http://www.epa.gov/asmdnerl/models3/doc/science/science.html>.
- GEIA (Global Emissions Inventory Activity), <http://www.geiacenter.org>
- Gery, M.W., Whitten, G.Z., Killus, J.P., and Dodge, M.C., 1989, A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling. *Journal of Geophysical Research*, 94, 12925-12956.
- Guenther, A., Archer, S., Greenberg, J., Harley, P., Helmig, D., Klinger, L., Vierling, L., Wildermuth, M., Zimmerman, P., and Zitzer, S., 1999, Biogenic hydrocarbon emissions and landcover/climate change in a subtropical savanna. *Physical Chemistry Earth Part B-Hydrology Oceans and Atmosphere*, 24(6), 659-667.
- IPCC (Intergovernment Panel for Climate Change), 2001, The scientific basis. Cambridge University Press, 991pp.
- IPCC (Intergovernment Panel for Climate Change), 1996, Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Reference manual. IPCC.
- IPCC (Intergovernment Panel for Climate Change), 2006, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC.
- Kim, H.R., 2009, Building up the inventory system of national greenhouse gases. *Statistics Korea*, 1-59. (in Korean)
- Koo, H.S., Kim, H.D., Kang, S.D., and Shin, D.W., 2007, A numerical study on the formation mechanism of a mesoscale low during East-Asia winter monsoon. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 28(5), 613-619. (in Korean)
- Korea Energy Economic Institute, 2008, Planning research for adapting to new guideline of IPCC of the national greenhouse gases for the climate change adaptation-Report I, II. Korea Energy Economic Institute, 9-361. (in Korean)
- Lee, H.R., Kim, K.E., and Lee, Y.H., 2009, Numerical simulation of the effects of moisture on the reinforcement of a tropopause fold. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 30(5), 630-645. (in Korean)
- Liu, S.C., Trainer, M., Fehsenfeld, F.C., Parrish, D.D., Williams, E.J., Fahey, D.W., Huber, G., and Murphy, P.C., 1994, Ozone production in the rural troposphere and implications for regional ozone distributions. *Journal of Geophysical Research*, 92, 4191-4207.
- McKendry, I.G., 1993, Ground-level ozone in Montreal Canada. *Atmospheric Environment*. 27B(1), 93-103.

- Moon, Y.S., Lim, Y.K., and Lee K., 2011, An estimation of concentration of Asian dust (PM₁₀) Using WRF-SMOKE-CMAQ (MADRID) during springtime in the Korean peninsula. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 32(3), 276-293. (in Korean)
- National Center for Atmospheric Research, 1994, Terrain and Land Use for the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Modeling System (MM5): Program TERRAIN: NCAR Technical Notes. NCAR/TN-397+IA.
- National Center for Atmospheric Research, 2003, Tutorial class notes and user's guide: MM5 Modeling System Version 3.
- Prather, M.J., 1996, Natural modes and time scales in atmospheric chemistry: theory, GWPs for CH₄ and CO, and run away growth. *Geophysical Research Letters*, 23, 2597-2600.
- Seok, G.S., 2009, Study on the improvement method for improving of reliability of the GHG-CAPSS. National Institute of Environmental Research, 10-150. (in Korean)
- Umeda, T. and Martien, P.T., 2000, Evaluation of a data assimilation technique for a mesoscale meteorological model used for air quality modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 41, 21-29
- Wild, O., Prather, M.J., and Akimoto, H., 2001, Indirect long term global radiative cooling from NO_x emission. *Geophysical Research Letters*, 28(9), 1719-1722.

2013년 1월 24일 접수
 2013년 5월 7일 수정원고 접수
 2013년 5월 28일 채택