

동해안의 복잡지형에서 기상장 개선에 따른 CALPUFF 모델의 평가

Evaluation of the CALPUFF Model Using Improved Meteorological Fields in Complex Terrain of East Sea Coast

이 종 범 · 김 재 철*
강원대학교 환경과학과

(2008년 5월 26일 접수, 2009년 1월 12일 채택)

Chong Bum Lee and Jea Chul Kim*

*Department of Environmental Science Kangwon National University,
Chuncheon 200-701, Korea*

(Received 26 May 2008, accepted 12 January 2009)

Abstract

Donghae city is one of the most representative cement industrial city in Korea. The area is faced with the East Sea to the East and with high montane region of Tae-Back mountain range to the West. Many pollutant sources of air pollution are located near the coast, but the largest point sources of the region are located at the bottom of the mountain area in Donghae city. The local wind is highly affected by local topography and plays an important role in transport and dispersion of contaminants from the pollution sources.

This study was designed to evaluate enhancement of MM5 predictions by using Four Dimensional Data Assimilation (FDDA), the SONDE data and the national meteorological station, data only. The alternative meteorological fields predicted with and without FDDA were used to simulate spatial and temporal variations of NO_x in combined with Atmospheric Dispersion Models (CALPUFF).

For the modeling domain, the alternative meteorological fields with 1.1 km spatial resolution were interpolated to the CALMET with 0.5 km resolution. The vertical layers set to have 35 and 12 layers for MM5 and CALPUFF, respectively.

MM5 with the FDDA did not resulted in significant improvement of meteorological field prediction in Donghae region, which is primarily because of complex geography and wind scheme. The result of CALPUFF, however, showed reduction of uncertainty errors by using the interpolation scheme of the actual measurement data.

Key words : Donghae, FDDA, MM5, CALPUFF

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)33-250-8571, E-mail : kjc25@kangwon.ac.kr

1. 서 론

기상은 배출원, 화학종, 에어로졸, 입자상 물질 증가 등의 대기에서 일어나는 여러 과정을 포함하고 있기 때문에 기상인자들에 대한 정확한 이해는 대기 오염 현상을 이해하는 데 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 따라서 정확한 대기질 모사를 위해 3차원 바람장의 정확성이 요구되는데 대기질 모델에 제공되는 기상장은 모델 모사 결과에 정 반대 영향을 주는 중대한 불확실성을 내포하고 있다(Sistla *et al.*, 1996). 특히 복잡지형과 coastline에서 기상장을 재현하는데 심각한 불확실성을 초래한다(Seaman, 2000). 자료동화는 기상관측자료를 이용한 기상모델의 오차를 개선하는 방법이지만 관측자료의 공간 대표성에 의해 모델결과가 다르게 변할 수 있다(이종범 등, 2006).

대표적인 시멘트 공업도시인 동해지역은 서쪽으로 복잡한 지형과 높은 태백산맥이 형성되어 있으며 동쪽에는 바다가 위치한다. 일부 오염배출원은 해안에 위치해 있지만 대형 점오염원들이 동해시의 서쪽인 산 아래에 위치하고 있다. 따라서 지형 및 지리적 영향을 많이 받는 국지풍 바람장의 형성은 오염물질의 수송 및 확산에 큰 영향을 미친다(김재철, 2006; Zhou *et al.*, 2006). 또한 동해시 대기오염측정소에서 시간별 측정되는 오염물질 농도의 경우 불규칙적으로 증가하는 pick를 자주 보이고 있으며, 특히 시간

변화에 따른 NO의 농도가 고농도를 기록하는 사례를 자주 보이고 있다. 선행 연구로서 복잡지형 해륙풍에 의한 기상모델의 모사능력 평가(Srinivas *et al.*, 2007)와 자료동화에 따른 기상모델과 광화학모델의 모사 능력 평가(Kim *et al.*, 2007; Barna and Lamb, 2000)에 관한 연구는 많이 진행되었지만, 기상모델의 기상장 개선에 따른 확산모델 모사능력 평가는 상대적으로 적다(이종범 등, 2007; 이화운 등, 2005).

본 연구는 자료동화에 이용될 수 있는 기상 측정 자료 중 지상기상 관측소자료와 상층기상 관측소자료 등을 이용하였다. AWS(Automatic Weather Station)자료는 국지적인 기상 조건을 나타내기는 하지만 유인 기상 관측소에 비하여 기상상태의 대표성이 결여될 수 있다. 따라서 본 연구는 전국 5개소의 SONDE자료와 기상대자료만을 이용하여 자료동화 전·후 계산된 기상모델의 기상장 개선 효과를 비교 검증하고, 기상장 차이에 따른 대기확산모델의 NO_x 농도 모사에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 연구 방법

대상지역은 동해시와 함께 대규모 점오염원을 포함한 지역이며, 대상기간은 그림 1의 (A)처럼 NO의 농도가 평소에 보다 높게 나타난 12월 16일부터 20일까지 5일간 모델링을 실행하였다.

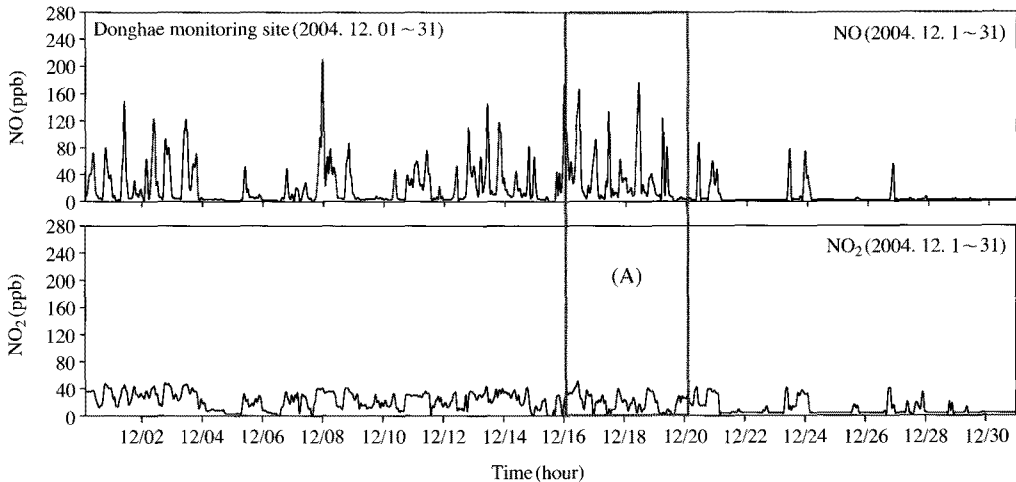


Fig. 1. Hourly NO, NO₂ concentration observed at Donghae air pollution observation station during Dec. 2004.

2.1 모델 실행

모델의 실행과정은 자료동화 전·후 기상장 변화와 확산모델의 기상장을 생성하기 위해 MM5를 EXP-1과 EXP-2로 구분하여 실행하였다. 기상모델인 MM5의 도메인 영역은 기상청 예보자료인 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System) 자료를 이용하여 초기장을 형성한 후 30 km부터 10 km, 3.3 km Nesting 과정을 거쳐 최종 1.1 km 영역의 동해지역을 모사하였다(표 1).

또한 확산모델의 경우 MM5 1.1 km 도메인 영역 내 동해시를 중심으로 0.5 km 격자의 도메인을 설정하여 모델링을 실행하였다(그림 2). 표 2는 자료동화 전·후 기상모델의 물리적 parameter를 나타낸 것으로서 EXP-1의 경우 자료동화를 실행하지 않았고, EXP-2는 자료동화를 실행하여 각각 기상장 결과의 차이를 비교하였다. Land Surface Model의 경우 five-

Table 1. Modeling grid size.

Cross point	Domain		MM5	
	D01	D02	D03	D04
X	78	42	36	57
Y	66	30	33	51
Grid size (km)	30	10	3.3	1.1
Vertical layer	33	35	35	35

layer Soil model을 각각 사용하였다.

확산모델의 경우 CALMET과 CALPUFF 동일한 격자영역과 연직층을 설정하였다(표 3). 기상장 생성을 위하여 MM5 기상결과에 지상기상대 자료와 AWS 기상자료 및 상층기상자료를 내삽하여 CALPUFF의 입력자료로 사용하였다. CALPUFF에서는 산화반응을 고려하여 동해시 대기오염물질 측정소의 시간별 오존자료를 입력하였고, MESOPUFF-II sch-

Table 2. MM5 model physics matrix and sensitivity experiments.

MM5v3.7	Scheme				FDDA data	Nudging coefficients
	Radiation	PBL	Explit	Cumulus		
EXP-1	CLOUD	MRF	Mixed-phase	Grell	no	-
EXP-2	RRTM	MRF	Mixed-phase	Grell	Met.st* + sonde	Go=4 × 10 ⁻⁴ Ga=1.5 × 10 ⁻⁴

*Met.st : Meteorological station, sonde : upper-air station

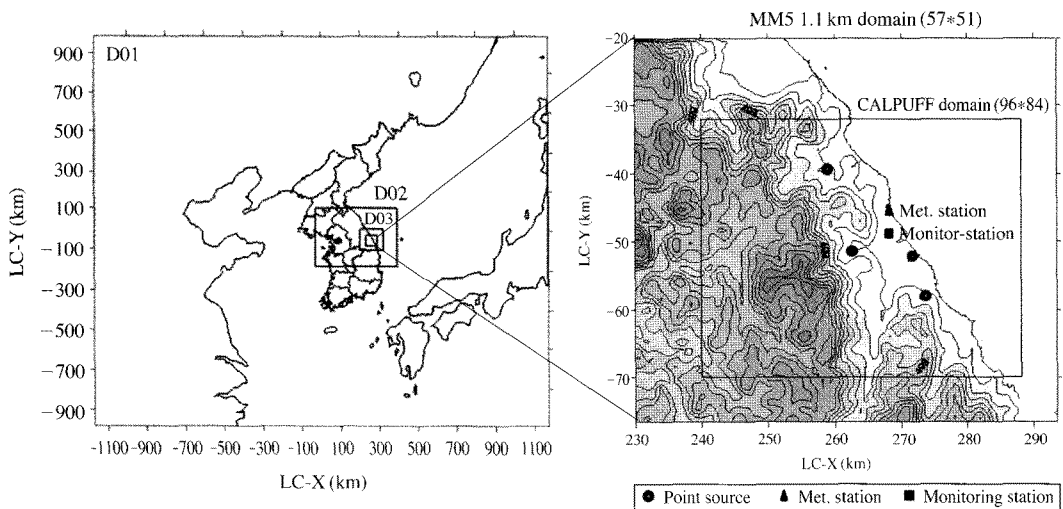


Fig. 2. Domains used in MM5 model (left panel). The inset figure in the right panel shows the innermost domain covering Donghae region with topographic details where the elevation contours are drawn at 100 m interval. ■ block rectangles represent emission source of N.

eme를 이용한 화학 메커니즘을 사용하여 모델링 하였다. 그 밖에 연직 확산을 고려한 Bias의 경우 지표에서 5층까지는 상층기상대의 영향을 고려하지 않았으며, 그 이후로 factor값을 설정하여 9층부터 상층기상대의 영향만을 고려한 모델링을 하였다. CALMET에 사용된 parameter는 표 4에 나타내었다 (Earth Tech, Inc. 1999).

지형 및 토지이용도의 경우 기상모델과 확산모델에 동일하게 적용하였다. 지형의 경우 USGS (United States Geological Survey)의 1° 자료 대신 SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission)의 3초 지형자료를 이용하여 대상지역의 실측 지형과의 오차를 최소화하였으며, 토지이용도의 경우 환경부의 대분류 토

지피복자료를 이용하여 모델에 사용하였다.

연직층의 경우 MM5 기상모델은 최하층을 35층으로 세분화하여 기상청에서 제공하는 RDAPS자료 최하층인 85 m를 3개층으로 세분화 하여 각각 23 m와 45 m로 설정하여 지표기상장을 충분히 반영 할 수 있도록 하였다. CALPUFF의 경우 최하층과 최상층을 각각 20 m와 5,200 m로 설정하고 총 12층으로 세분화하여 모사하였다.

2.2 배출량 입력

CALPUFF의 입력자료로 사용된 배출량은 굴뚝자동감시체제 (TMS : Tele-Metering System) 실측자료를 사용하여 계산하였다. 모델실행에 필요한 배출량은 26개 굴뚝에서 30분 간격으로 측정되는 TMS 실측자

Table 3. Map Projection and Grid control parameters of CALPUFF model.

Parameters		Configuration	
		X	Y
Grid control	Reference grid	240 km	-70 km
	Grid cells	96	84
	Projection origin (deg.)	38 N, 126 E	
	Grid spacing (ΔX)	0.5 km	
	Vertical layers	12	
	Cell face heights (m)	0, 20, 40, 80, 160, 300, 600, 1000, 1500, 3000, 4000, 5200	
Map projection	Projection	Lambert Conformal Conic (LCC)	
	Geoid-Ellipsoid	Korean Geodetic System 1995 : WGS 84	
	Region / Datum	South Korea/WGS-84	

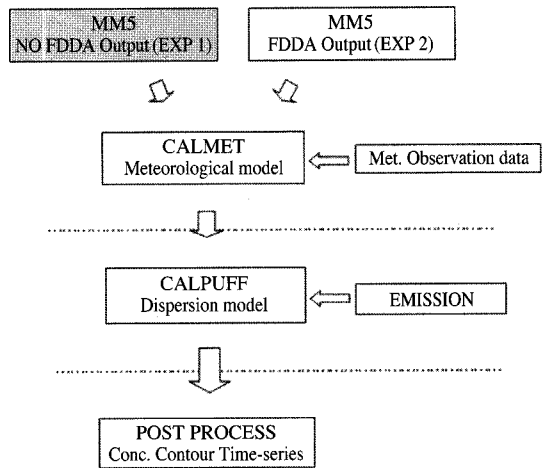


Fig. 3. Processing steps of CALPUFF modeling system.

Table 4. Meteorological and Wind Field Parameters of CALPUFF model.

Parameters		Configuration			
Temperature	Interpolation type	1/R			
	Radius of influence	20 km			
Wind field	Radius of influence of terrain features	10 km			
	Initial Guess Vertical varying winds (Biases)	-1, -1, -1, -1, -1, 0.5, 0.5, 0.8, 1, 1, 1, 1			
	Varying Radius of Influence (km)	RMAX1	30	RMIN	0.1
		RMAX2	30	R1	10
RMAX3		50	R2	50	
Mixing Ht.	Overland / Overwater (m)	Min.	20	Max.	5200

료를 사용하여 배출가스 유량을 계산하였고, 실측자료 중 가동중지라고 표기된 시기의 배출량은 0으로 입력하여 계산하였다. 표 5는 배출량으로 사용된 굴

Table 5. Characteristics of point sources in the model domain.

	LON (deg)	LAT (deg)	Stack height (m)	Stack diameter (m)	Elevation (m)
Ssangyong	129.057	37.483	44	6.0	110
	129.058	37.482	66	5.7	110
	129.058	37.482	80	4.5	110
	129.051	37.480	89	4.0	90
	129.051	37.480	89	4.0	90
	129.051	37.479	89	4.0	90
Dongyang	129.185	37.423	40	3.4	50
	129.185	37.423	45	3.4	50
	129.185	37.423	50	5.0	50
	129.185	37.423	65	3.5	50
	129.185	37.423	65	3.5	50
	129.182	37.423	80	5.5	60
Halla	129.016	37.592	60	4.2	120
	129.016	37.593	102	4.7	120
	129.016	37.593	102	4.7	120
	129.016	37.593	102	4.7	120
Power	129.152	37.482	150	4.0	50

뚝의 제원을 나타내었다.

그림 3은 본 연구의 모델 실행 과정을 도식화하여 나타내었다. 여기서 생성된 기상장을 확산모델인 CALPUFF에 적용하여 농도를 각각 비교·분석하였다.

3. 결 과

3.1 자료동화 전·후의 MM5결과 비교 및 통계분석

기상모델의 자료동화 전·후의 차이를 비교하기 위하여 동해기상대 위치의 MM5 모델결과를 실측과 비교하였다. 그림 4의 점선(EXP-1)은 자료동화 전의 MM5모델 결과를 나타내었고, 실선(EXP-2)의 경우 자료동화 후의 MM5 모델결과를 나타내고 있으며, 실측은 점(OBS)으로 표시하였다. 그림 4에서 온도는 자료동화 전·후에 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 풍속의 경우 EXP-1에서 실측보다 2m/s 이상 강하게 모사되었던 풍속이 EXP-2의 결과에서 실측과 유사한 경향을 나타내고 있다. 풍향의 경우 북서내지

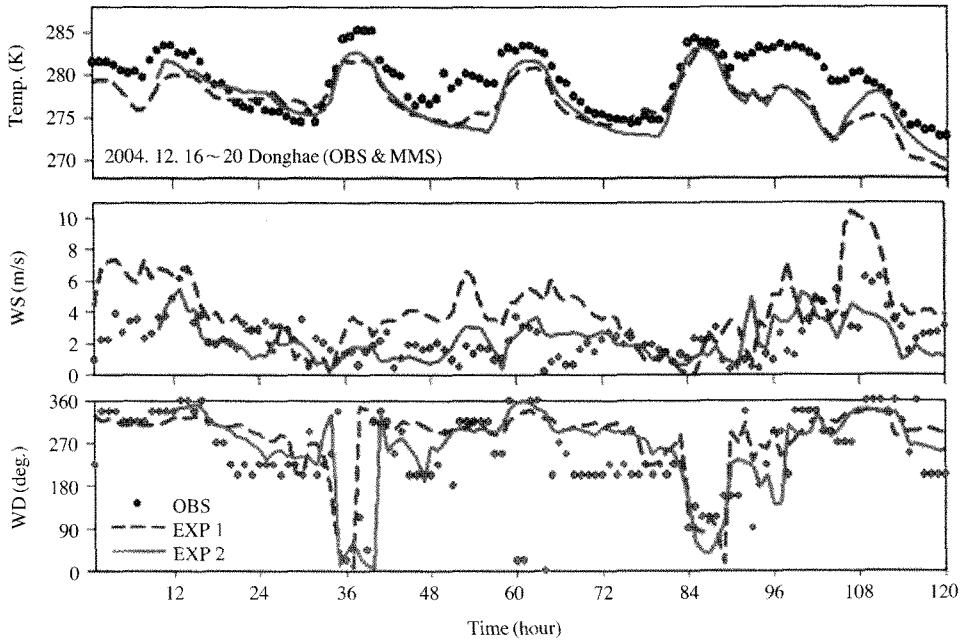


Fig. 4. Comparisons of variations observed at Donghae Weather Station and calculated by MM5 for 16~20, December 2004.

Table 6. Definition of the traditional evaluation statistical measures.

Correlation coefficient (r)	$r = \frac{(C_o - \bar{C}_o)(C_p - \bar{C}_p)}{\sigma_{C_o} \sigma_{C_p}}$
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (C_p - C_o)^2}$
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSEs = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (C^* - C_o)^2}$
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSEu = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (C^* - C_p)^2} \quad C^* = a + bC_o$
Fractional Bias (FB)	$FB = \frac{\bar{C}_p - \bar{C}_o}{0.5(\bar{C}_p + \bar{C}_o)}$
Mean Bias (MB)	$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_p - C_o)$

C_p : predicted concentration, C_o : observed concentration

남서풍이 불었던 실측 측정결과를 두 모델결과 모두 큰 차이 없이 유사한 패턴으로 모사하고 있다.

또한 상층 기상관측소 위치(속초 : 105)의 모델결과와 실측자료를 비교하기 위하여 1,000, 980, 925, 908, 850, 675, 500 mb 높이의 12시간 간격 기상장을 5일간 총 10회 비교하였다. 실제 측정할 온도와 EXP-2의 결과가 EXP-1보다 유사한 패턴을 보였으며, 바람성분을 나타내는 V값의 경우 EXP-1에 비하여 EXP-2의 결과가 실측의 시간 변화 패턴을 잘 모사하였다(그림생략).

대기질 모델의 평가에는 경우에 따라 여러 가지 통계적 방법이 모델을 평가하기 위하여 사용된다(Song *et al.*, 2006). 본 연구에서는 표 6에서 제시한 6가지의 방법을 이용하여 기상 모델을 평가하였다(이종범 등, 2007).

통계 결과에서 r값의 경우 1.0에 가까울수록 모델의 결과가 신뢰성이 있고, 표준화 평방근오차(RMSE)의 경우 직선회귀식에 의해 systematic과 unsystematic components로 나뉘며(Willmott, 1982), 편차의 경우 관측과 측정농도의 잔차를 정의 하는 오차평가 방법이며, 평균편차(MB)와 부분편차(FB)로 나누어서 산출하였다.

지상기상대(동해) 측정결과와 상층기상대(속초)의 측정결과와의 통계분석 결과를 표 7과 8에 각각 나타내었다. 지상기상 자료의 경우 EXP-1에 비하여 자료동화를 실시한 EXP-2의 정확도가 개선되는 경향을

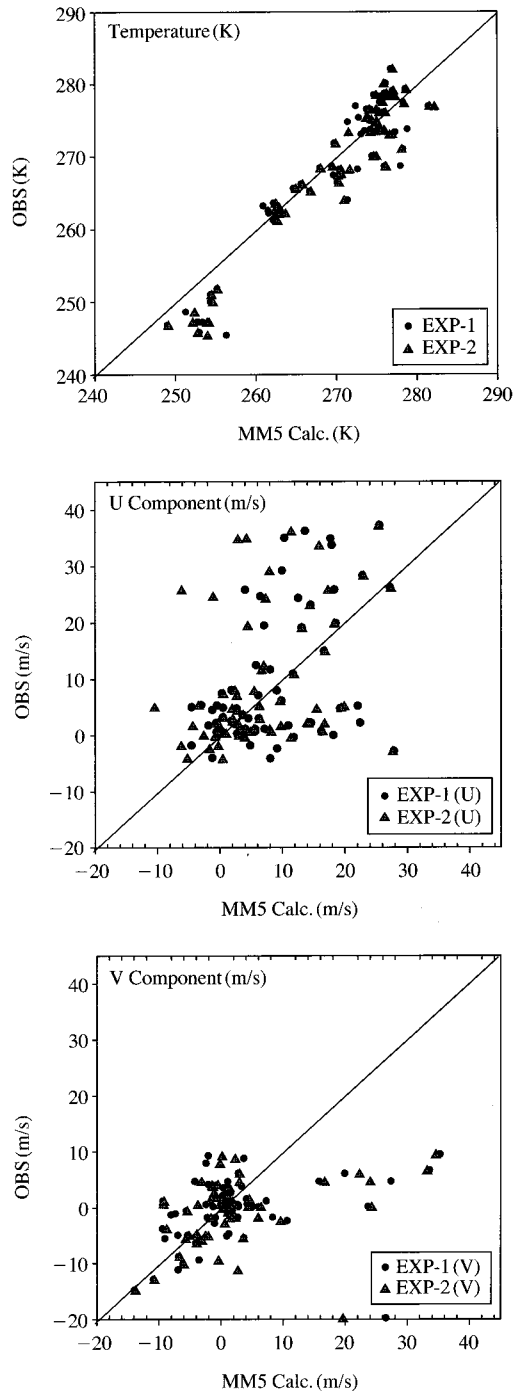


Fig. 5. Scatter plot of observed and calculated temperature (top), U (medium), V Component (bottom) for 16~20, December 2004 in Sokcho Upper-air Stations.

Table 7. Summary of MM5 simulations performance for surface temperature and wind speed (Donghae Weather Station).

Ground station		r	RMSE	RMSEs	RMSEu	MB	FB	No. of data
Temp. (k)	EXP 1	0.76	3.34	2.689	1.98	-2.45	-0.009	111
	EXP 2	0.78	3.16	2.450	1.99	-2.26	-0.008	
WS (m/s)	EXP 1	0.45	2.31	1.476	1.78	1.39	0.467	
	EXP 2	0.48	1.32	0.811	1.05	-0.09	-0.042	

Table 8. Statistics for meteorological variable for Sockcho Upper-air Station.

Upper-air station		r	RMSE	RMSEs	RMSEu	MB	FB	No. of data
Temp. (k)	EXP 1	0.94	3.83	1.79	3.38	-1.48	-0.01	66
	EXP 2	0.95	3.59	1.97	2.99	-1.66	-0.01	
U (m/s)	EXP 1	0.46	10.53	2.68	10.18	0.22	0.03	
	EXP 2	0.36	11.72	4.64	10.76	1.93	0.24	
V (m/s)	EXP 1	0.32	9.91	8.38	5.30	-2.83	-4.19	
	EXP 2	0.34	9.34	7.71	5.28	-2.72	-4.37	

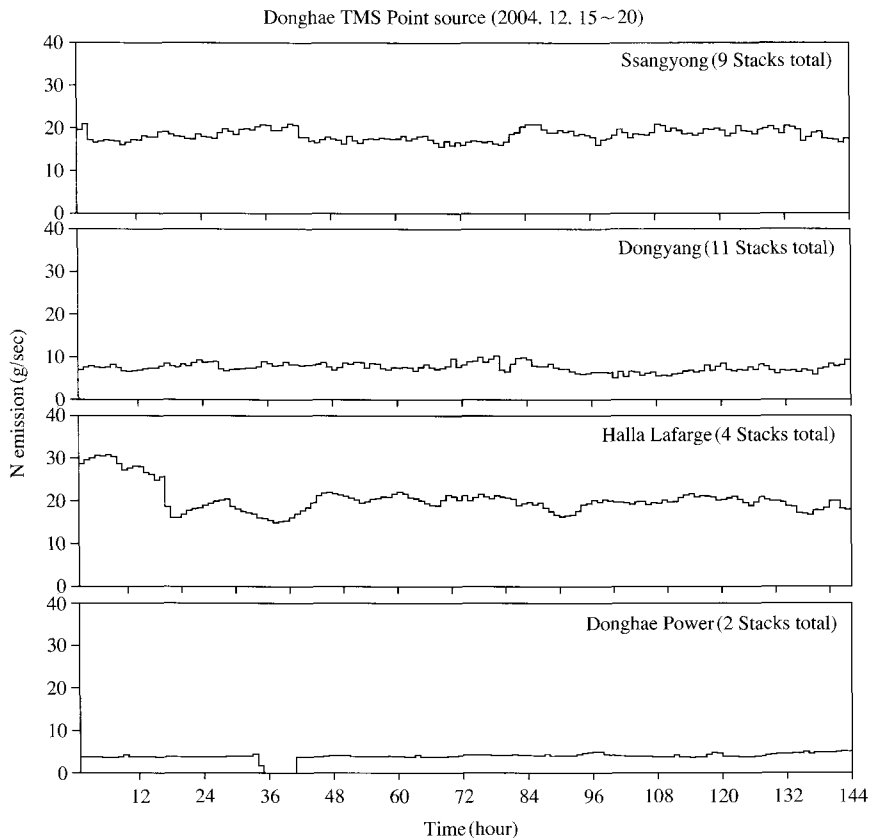


Fig. 6. Operation rate of emission for each point source during December 15~20, 2004.

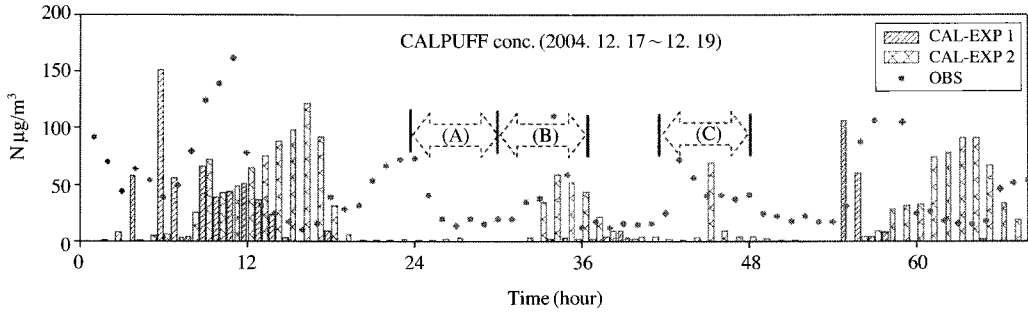


Fig. 7. Simulated and observed hourly N ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) concentrations for Donghae Air pollution observation station during 17~19 December 2004.

Table 9. Summary of CALPUFF experiments performance statistics for hourly average concentration of N ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ground station	RMSE	RMSEs	RMSEu	MB	FB	No. of data
N ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) CAL-EXP 1	58.50	45.39	36.91	-23.59	-0.702	68
CAL-EXP 2	51.88	40.54	32.37	-20.37	-0.578	

보였고, 특히 풍속의 경우 EXP-2의 결과가 자료동화를 실시한 정확도가 현저히 향상되었다.

상층기상대의 경우 지표 1,000 mb부터 500 mb까지 7층을 분석한 결과 자료동화를 실시한 EXP-2의 결과가 실측과 유사한 패턴을 나타내고 있고, 바람성분을 나타내는 U성분과 V성분의 내삽 결과가 자료동화 전의 기상결과보다 다소 향상되었다(그림 5).

3.2 CALPUFF 확산모델 결과

3.2.1 오염원의 배출량 및 모델 농도 산출

본 연구에서 확산모델의 결과와 비교한 대상물질은 동해시 대기오염 측정소의 질소산화물이다. 대기 중의 질소산화물은 대부분 일산화질소의 형태로 배출되며, 산화 되어 이산화질소 및 이산화질소로 존재한다. 그러나 CALPUFF 모델은 대기 중 화학반응을 단순화하여 고려하므로 본 연구에서는 일산화질소 중의 N 질량과 이산화질소 중의 N 질량을 합산하여 N의 총질량(g)으로 CALPUFF 모델에 입력하였다. 그러므로 CALPUFF의 결과도 N의 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 계산된다. 이 모델결과와 실측농도를 비교하기 위해서는 김재철(2006)의 방법에 따라서 실측 NO와 NO₂ 모두 N 질량으로 환산하였으며, N의 총질량으로 환산한 값을 모델결과와 비교하였다. 그림 6은 대상

기간 동안 각각 대규모 점오염원에서 배출된 질소산화물의 농도를 N 질량단위로 환산하여 평균한 결과를 나타낸 것이다.

3.2.2 확산모델 결과 비교

대상기간 동안 대기오염 측정소위치의 모델결과를 시간변화에 따른 실측농도와 비교하여 나타내었다(그림 7). 자료동화를 실행한 기상장의 결과(EXP-2)가 EXP-1에 비하여 실측 시간 패턴을 유사하게 묘사하는 결과를 나타내었고, 특히 18일의 경우 주간과 야간에 고농도를 나타낸 실측결과를 EXP-2의 결과에서 잘 묘사하였다. 또한 시간변화에 따른 모델결과의 오차를 파악하기 위하여 대기오염측정지점의 풍향·풍속 측정자료와 CALMET에서 계산된 바람장을 비교한 결과 18일의 경우 주·야간 모두 고농도가 나타나는 시간의 풍향을 EXP-1, 2 모두 유사하게 묘사하고 있었다. 하지만 풍속의 경우 EXP-2의 결과가 자료동화 후 낮게 계산되며 낮은 풍속의 고농도 패턴을 실측과 유사하게 묘사하고 있었다. 이와 유사하게 17일과 19일의 경우 실제 고농도 peak가 나타난 시간과 EXP-1, 2의 고농도 peak가 차이를 보이고 있는데 이런 결과 역시 실제 바람장과 모델결과가 큰 차이를 보이고 있기 때문으로 사료된다. 또 EXP-2의 고농도 peak를 나타내고 있는 18일 11시,

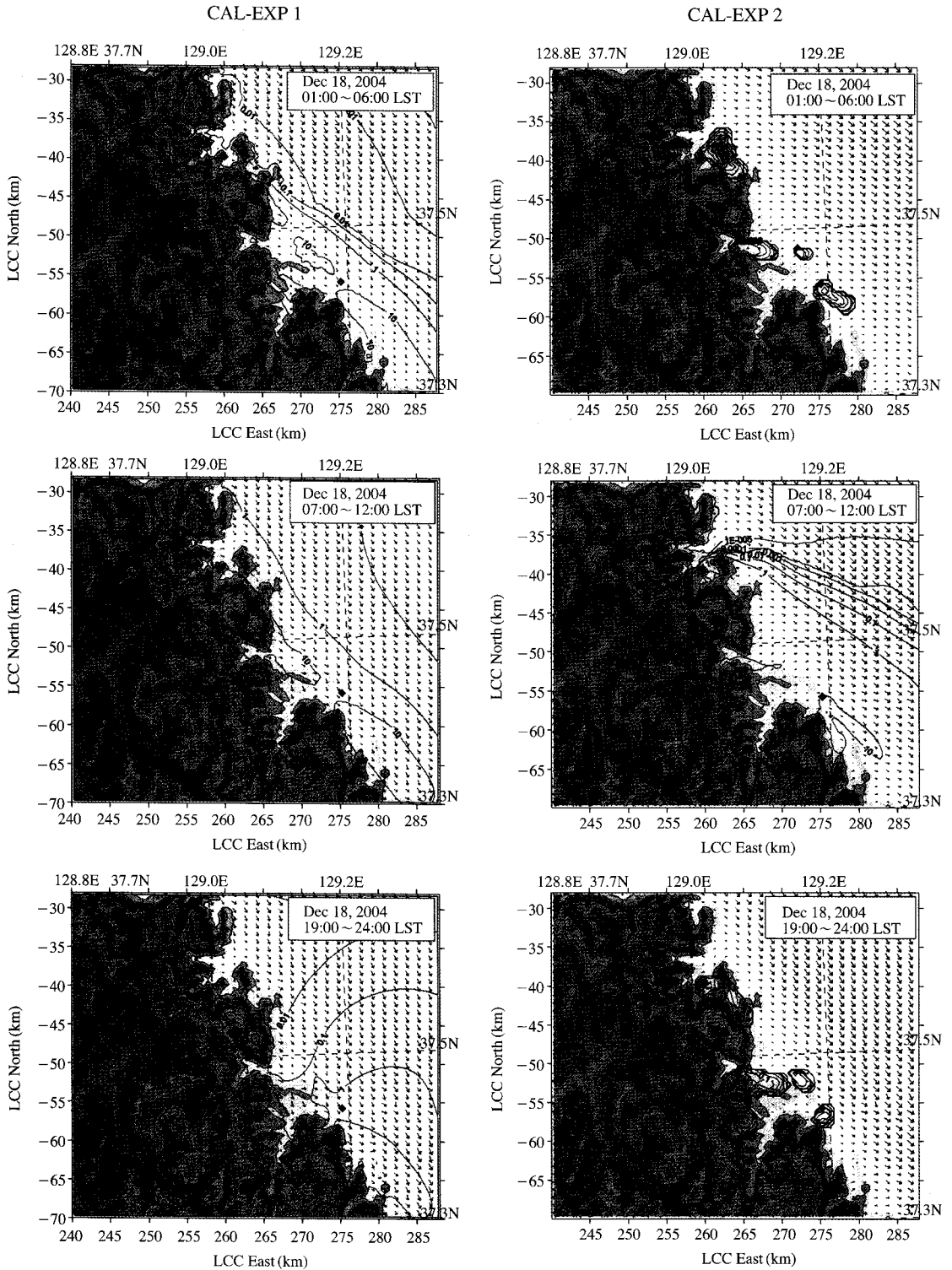


Fig. 8. Calculated concentrations of six hour average for 17~18 December 2004.

19시의 경우 실측과 CALMET의 풍향이 NNW로 일치했고, 풍속이 약하게 모사되며 실측과 유사한 패턴을 보였지만, 17일 16시와 19일 16시의 경우 낮은 풍속에 풍향이 실측과 틀러지며 오차를 나타내고 있다. 표 9는 기상장 차이에 따른 확산모델의 통계분석 결과를 나타내었다. RMSE의 경우 자료동화 후 오차가 작아지는 결과를 보이고 있으며, 편차 역시 EXP-2의 결과가 기상 결과에 의해 EXP-1에 비하여 향상되었다. 그림 8은 실측값과의 농도차가 가장 확연히 구분되었던 18일의 대상지역에 대하여 자료동화 전·후의 기상장을 사용한 확산 모델의 6시간 평균 등농도 분포를 각각 나타내었다.

낮시간(B)의 농도 패턴은 자료동화 전·후 유사한 분포를 보이고 있다. 하지만 새벽(A)과 밤(C)의 확산모델의 N 질량 농도 분포가 기상장 변화에 따라 뚜렷하게 구분되고 있다. 따라서 기상모델의 FDDA를 사용하고 CALMET과정의 측정자료 보정을 통해 기상장을 개선했지만 동해시와 같이 복잡한 지형에서는 무시할 수 없는 오차가 존재하는 것을 확인하였고, 대기확산 모델의 한계점을 파악할 수 있었다.

4. 결 론

복잡한 산악지형과 해안이 위치한 동해지역은 지형 및 기상에 따라서 고농도 대기 오염농도가 자주 관찰된다. 이런 지형적인 영향과 복잡한 풍계에 의해 기상모델의 결과는 크게 개선되지 못했다. 이런 오차를 줄이기 위해 기상모델에 실측자료를 이용한 4차원 자료동화(FDDA)를 적용한 결과 정확도가 향상되었다. 자료동화의 효과를 알아보기 위해 확산모델에 적용한 결과 풍계에 따라 차이가 있지만, 야간 고농도 모사 등의 실제 측정결과와 비교한 결과 자료동화 전보다 자료동화 후의 결과가 다소 개선된 결과를 나타내었다.

따라서 자료동화를 이용한 기상모델의 개선효과는 기상장의 영향을 크게 받는 확산모델의 정확도 향상에 중요하며, 복잡한 지형에서의 자료동화는 3차원 기상장을 이용하는 확산모델에는 반드시 필요한 과정이다. 또한 이렇게 복잡한 지형과 바다의 영향을 받는 해안지역에서 여러 가지 개선을 통해 대기확산

모델을 실행해 봄으로써 모델의 모사능력의 한계를 파악 할 수 있었다.

향후 지상 기상자료 이외에 지형적 영향을 적게 받는 위성자료의 기상요소나 해양모델의 결과를 이용하는 등의 3차원적인 기상요소를 적용하여 기상모델의 기상장을 개선하게 된다면 복잡지형 뿐만 아니라 해안지역의 확산모델의 정확도를 향상시킬 수 있는 것이다.

감사의 글

본 연구의 일부는 한국지질자원연구원의 ‘원격탐사와 중규모기상모형을 이용한 대수계의 증발산과 지하수량 추정모형 개발’사업의 연구지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김재철 (2006) CALPUFF 모델을 이용한 동해시 지역의 산악지형하에서 대규모 점 오염원에서 배출되는 NOx의 확산현상 모사, 강원대학교 대학원 석사논문, pp. 21-24.
- 이종범, 김재철, 이강웅, 노철연, 김혜경 (2007) 추적기체의 확산 특징과 CALPUFF 모델에 의한 모사, 한국대기환경학회지, 23(4), 405-419.
- 이종범, 조석연, 전의찬 (2006) 「광화학 대기오염 생성과정 규명과 저감대책 수립」 최종보고서, 국립환경과학원, pp. 345-347.
- 이화운, 원혜영, 최현정, 김현구 (2005) 광양만권에서의 자료동화된 대기유동장이 대기오염 물질의 확산장에 미치는 영향에 관한 수치모의, 한국대기환경학회지, 21(2), 169-178.
- Barna, M. and B. Lamb (2000) Improving ozone modeling in regions of complex terrain using observational nudging in a prognostic meteorological model. Atmospheric Environment, 34(28), 4889-4906.
- Earth Tech, Inc (1999) CALMET model version 5.0 : A User's Guide for the CALMET, CALPUFF Dispersion Model.
- Kim, D. and W.R. Stockwell (2007) An online coupled meteorological and air quality modeling study of the effect of complex terrain on the regional transport and transformation of air pollutants over the West-

- ern United States. *Atmospheric Environment*, 41(11), 2319-2334.
- Seaman, N.L. (2000). Meteorological modeling for air-quality assessments. *Atmospheric Environment*, 34(12-14), 2231-2259.
- Sistla, G., N. Zhou, W. Hao, J.-Y. Ku, S.T. Rao, Bornstein, F. Freedman, and P. Thunis (1996) Effects of uncertainties in meteorological inputs on Urban Airshed Model predictions and ozone control strategies. *Atmospheric Environment*, 30(12), 2011-2025.
- Song, Y., M. Zhang, and X. Cai (2006) PM₁₀ modeling of Beijing in the winter. *Atmospheric Environment*, 40(22), 4126-4136.
- Srinivas, C.V., R. Venkatesan, and A.B. Singh (2007) Sensitivity of mesoscale simulations of land-sea breeze to boundary layer turbulence parameterization. *Atmospheric Environment*, 41(12), 2534-2548.
- Willmott, C.J. (1982) Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.
- Zhou, Y., J.I. Levy, J.S. Evans, and J.K. Hammitt (2006) The influence of geographic location on population exposure to emissions from power plants throughout China. *Environment International*, 32(3), 365-373.