

CALPUFF 모델을 이용한 기후변화에 따른 일산화탄소의 대기오염 영향 분석

하민진* · 이태경** · 이임학*** · 전의찬****

*스마트에코, **세종대학교 기후변화협동과정, ***서울시립대학교 환경공학과, ****세종대학교 환경에너지공간융합학과

Analysis about CO Diffusion Change Caused by Climate Change Using CALPUFF

Ha, Minjin*, Lee, Taekyeong**, Lee, Im Hack*** and Jeon, Eui Chan****†

*SMaRT ECO, Seoul Korea,

**Cooperate Course for Climate Change, Sejong University, Seoul, Korea,

***Dept. of Environmental Engineering, University of Seoul, Korea,

****Dept. of Environment and Energy, Sejong University, Seoul, Korea

ABSTRACT

In this study CALPUFF was used to estimate the influence of temperature rise, according to the observation value of temperature rise based RCP scenario, on meteorological elements (wind direction, wind speed, mixing height) and the change of pollutant diffusion. According to the result, applying estimated value of year 2050 temperature rise, the mixing height is increased as per the temperature rise, so the range of atmospheric diffusion is widened. In summer case, by applying temperature rise of 4°C and comparing with before applying temperature rise, there was change of diffusion range as per the change of temperature between 10 AM to 11 PM. And the range of diffusion was wider than that of before temperature rise. In winter case, by applying estimated value of temperature rise, 2.3°C, diffusion range has been changed between 8 AM to 4 PM, showing different diffusion aspect from summer. Also, according to the result of air pollution level assessment with temperature rise, it was proved that the ratio of area with increasing air pollution level has been getting higher by increase of temperature.

Key words: Climate Change, Air Pollutant, CALPUFF, Air Pollution Assessment

1. 서 론

기후변화로 인해 기온의 상승과 대기오염의 상호작용에 대한 관심이 높아지는 추세이다. 기후변화가 대기오염 농도에 미치는 영향은 기후 특성에 따라 두 가지로 나타낼 수 있다. 첫 번째는 기온 상승으로 인한 환경거동적 측면에서 혼합고와 안정도 등의 변화이며, 두 번째는 대기오염 특성에 따른 광화학반응과 연계된 생성과 분해과정에 미치는 영향이다. Park (2010)에 따르면 기후변화에 따른 기온 상승은 대기의 혼합고와 안정도에 영향을 주면서 대기오염물질의 거동적인 측면이 변화된다. 또한 미세먼지, SO_x, NO_x, VOC 농도는 대기의 혼합고 및 안정도 변화에 민감하게 영향을 받는다.

기후변화로 인한 기온 상승은 기상요소(풍향, 풍속, 혼합고,

안정도, 기온)를 변화시킬 수 있으며, 기상요소의 변화는 대기오염물질의 농도 변화에 영향을 줄 수 있고, 대기오염물질 농도의 변화는 사람의 건강에 영향을 줄 수 있다. 기후변화에 따른 대기질 변화에 대한 연구에는 Moon *et al.*(2009), Kim *et al.*(2010)의 연구가 있다. Moon *et al.*(2009)의 연구에 따르면 기후변화로 인한 기온상승으로 대기오염물질(SO₂, CO, NO_x, O₃) 농도가 전반적으로 상승하는 것으로 나타났다. Kim *et al.*(2010)의 연구는 기후변화에 따른 오존농도의 특성을 분석한 연구로 기후변화로 인한 기온상승이 미래 오존농도에 영향을 미칠 수 있다는 연구결과를 보여주고 있다.

본 연구에서는 가우시안 퍼프(Puff) 모형인 CALPUFF 모델을 사용하여 2050년 RCP 8.5 시나리오에 따른 2050년의 기온 상승이 기상요소(풍향, 풍속, 혼합고)와 대기오염물질의 확산

† Corresponding author: ecjeon@sejong.ac.kr

Received September 5, 2016 / Revised December 26, 2016 1st, March 6, 2017 2nd / Accepted April 3, 2017

및 대기오염도 변화에 미치는 영향을 분석했다.

2. 연구 방법

2.1 연구의 범위 및 방법

본 연구에서 사용하는 CALPUFF 모델은 모델의 특성상 예측지점만 모델링 영역으로 지정할 경우, 지정된 영역 외 주변 지역에서는 오염물질의 배출이 없는 것으로 인식된다. 따라서 농도 및 확산 변화의 정확성을 높이기 위해 연구 대상지역을 서울시와 서울시의 경계로부터 4방위로 15 km씩 이격된 지점으로 설정하였다.

대기오염물질 분석 대상지역은 2011년도 대기환경연보의 도로변 대기 측정망 자료를 토대로 선정하였다. 대기환경연보(2011)의 서울 도로변 대기측정망 분석결과에 따르면 양재로 측정소의 NO₂, CO, 미세먼지 농도가 가장 높게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 오염물질 분석 대상지역을 양재로를 포함한 서초구로 설정하였다.

위와 같이 설정된 모델링 영역을 CALMET 모델을 이용하여 기온상승에 따른 기상요소(풍속, 풍향, 혼합고)의 변화를 분석하였다. 그 결과를 바탕으로 CALPUFF 모델을 이용하여 2050년 기온상승에 따른 대기오염물질의 확산 및 대기오염도 변화를 분석하였다.

2.2 CALPUFF 모델 및 입력자료

본 연구에서 사용하는 CALPUFF 모델은 시간 및 공간에 따른 바람장의 변화를 PUFF(연기덩어리)의 이동에 고려할 수 있는 비정상상태 모델이다. CALPUFF 모델은 점·면 오염원에 대한 시간적인 농도 변화 분석 가능, 오염원으로부터 수백 킬로미터 범위의 모델링, 시간, 일, 연 단위의 농도 예측뿐만 아니라, 복잡한 지형 상황도 모델링이 가능하다는 특징을 갖고 있다.

CALPUFF 모델은 1) 진단(diagnostic) 및 예측(prognostic) 기상장 생성 모듈을 포함한 기상 모델, 2) 화학적 제거 및 건·습식 침적, 복잡지형 알고리즘, 빌딩 다운워시, 연기침강(Plume fumigation) 및 기타 효과들을 다루는 가우시안 퍼프 확산 모델, 3) 기상 자료와 농도 및 침적량(deposition fluxes)에 대한 결과를 볼 수 있는 후 처리 프로그램으로 구성되어 있다.

2.2.1 CALMET 입력자료

CALPUFF 모델을 구동하기 위해서는 기상장을 생성하는 기상 처리 시스템인 CALMET 모델을 사용해야 한다. CALMET 모델은 지표기상 관측 자료와 고층기상 관측 자료를 공간적

으로 내삽하여 격자점에서 풍향, 풍속을 구하는 진단적 방법을 사용하고, 시간 단위의 바람과 온도를 3차원 GRID 기상장을 만드는 프로그램이다. CALMET 모델을 구동하기 위해 입력해야 하는 조건은 Table 1과 같고, 모델링 영역은 서울시와 서울시 경계로부터 4방위로 15 km씩 이격된 지점을 포함하고 있다(Fig. 1).

2.2.2 지형 및 기상 입력자료

연구 대상지역의 지형적 특성은 기상장과 대기오염물질의 확산분석에 영향을 미치기 때문에 모델 사용 시 연구 대상지역의 지형자료를 입력해야 한다. 지형자료 입력을 위해 환경

Table 1. The input data of CALPUFF modeling

Items	Input	
	Capital area (70 km × 70 km)	
Grid origin (reference point)	X (Easting)	288,185.00
	Y (Northing)	4,129,011.00
Grid spacing (ΔX)	1 km	
Domain size	Nx (no. x grid cells)	71
	Ny (no. y grid cells)	71
NO. of vertical layers	10	
Cell face heights (m)	0, 20, 40, 80, 160, 300, 600, 1,000, 1,500, 2,200, 3,000	
Time zone	UTC+0900	
Projection	UTM 52 ZONE	
Origin of projection	Latitude	37N 37N
	Longitude	126E 127E
False easting	0.0	
False northing	0.0	
Datum	WGS-84	
Continent/ocean	Asia	
Geoid-ellipsoid	Korean geodetic system 1995 :WGS 84	
Region	South Korea	
Modeling period	In January 14~17, 2011 / in July 16~19, 2011	

3. 연구결과

3.1. 기온 상승에 따른 기상요소의 변화

기온 상승 시 기상요소(풍향, 풍속, 혼합고)의 변화는 2011 년도의 최고 기온을 기록한 7월 18일을 기준으로 분석하였다. 분석기간 내 배출량은 동일할 것이라는 가정 하에 배출농도가 가장 높은 1개 지점을 면오염원으로 설정하여 시간별 기상 요소의 변화를 분석하였다. 설정한 분석기간의 눈·비·태풍 등의 기상변화를 제외하고, 일간 변화를 알아보기 위해 지표 및 고층기상자료에 동일하게 2℃로 기온을 상승시켜 변화를 분석하였다.

CALMET의 후처리모델인 PRTMET을 통해 기상요소의 변화를 분석한 결과, 기상요소 중에서 혼합고는 변화가 있었지만(Fig. 2), 풍향(Fig. 3), 풍속(Fig. 4)의 변화는 없는 것으로 나타났다. 혼합고의 변화를 살펴보면 한강 부근의 변화가 가장 두드러지고, 서울 경계를 벗어난 수도권지역에서도 변화가 나타나, 온도 상승 시 대기오염물질이 더 넓은 범위로 확산할 것이라 판단된다.

이와 같이 기온 상승에 따른 혼합고의 변화는 CALMET의 대기불안정 상태에서 혼합고 생성 과정은 식 (1)과 같다.

$$h_{t+dt} = \left[h_t^2 + \frac{2 Q_h (1 + E) dt}{\Psi_1 \rho c_p} - \frac{2 d\theta_t h_t}{\Psi_1} \right]^{1/2} + \frac{d\theta_{t+dt}}{\Psi_1} \quad (1)$$

식 (1)에서

h_{t+dt} : $t+dt$ 시간에서의 혼합고

h_t : t 시간에서의 혼합고

Ψ_1 : 혼합층 위에서의 온위온도 체감율

$d\theta$: 혼합층 고도에서 온도차이

E : 상수(0.15)

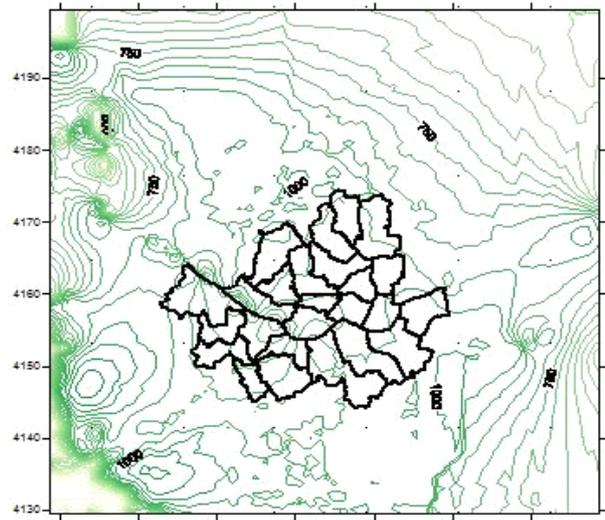
Q_h : 현열

c_p : specific heat of air at constant pressure
(996 m²/(s²°K))

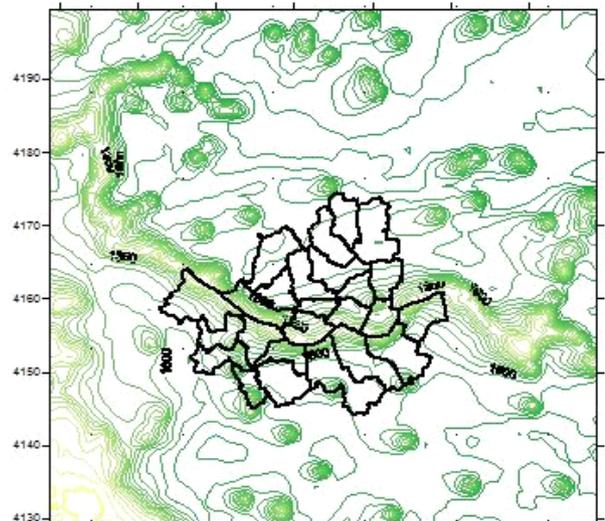
ρ : 공기 밀도

$$d\theta_{t+dt} = \left[\frac{2 \Psi_1 E Q_h d_t}{\rho c_p} \right]^{1/2} \quad (2)$$

식 (1)에서 혼합고는 현열(Q_h)의 영향을 가장 많이 받게 되어 있는데, 현열이란 물체 온도의 오르내림에 수반하여 출입



(a) Before the temperature rise



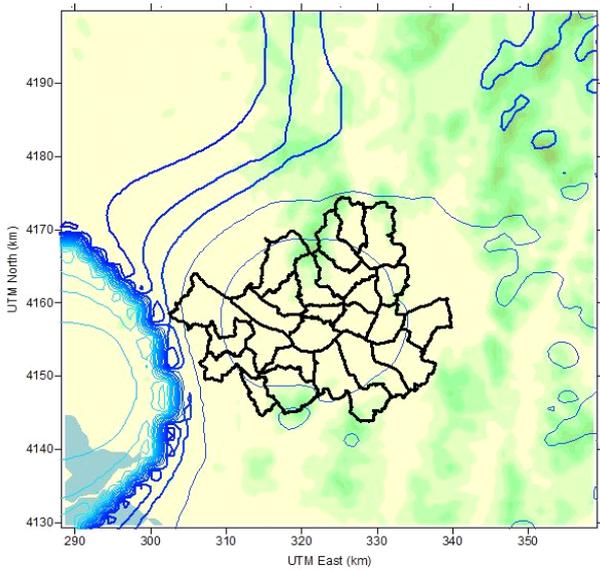
(b) After 2°C rise

Fig. 2. Mixing height change in the modeling area.

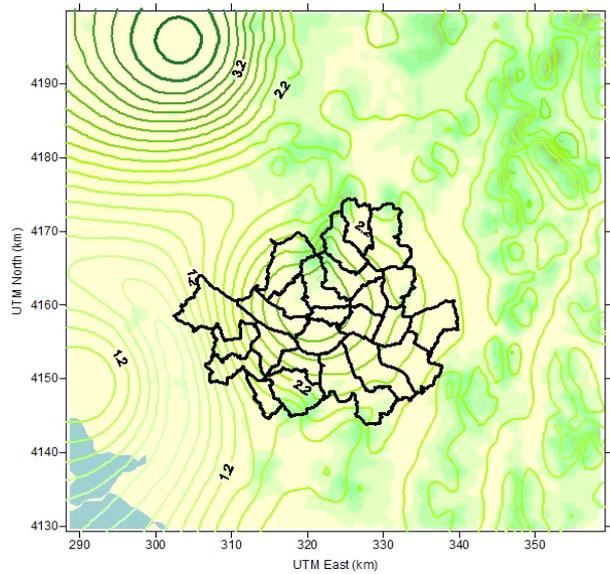
하는 열이다. 지면으로부터 10 m 높이에서 측정하는 대기 온도가 상승하면 현열이 증가한다는 의미이고, 현열이 증가하면 식 (1)에 의하여 혼합고의 상승하는 결과를 나타내게 된다.

3.2 RCP 8.5 시나리오에 따른 CO의 확산 변화와 대기오염 평가

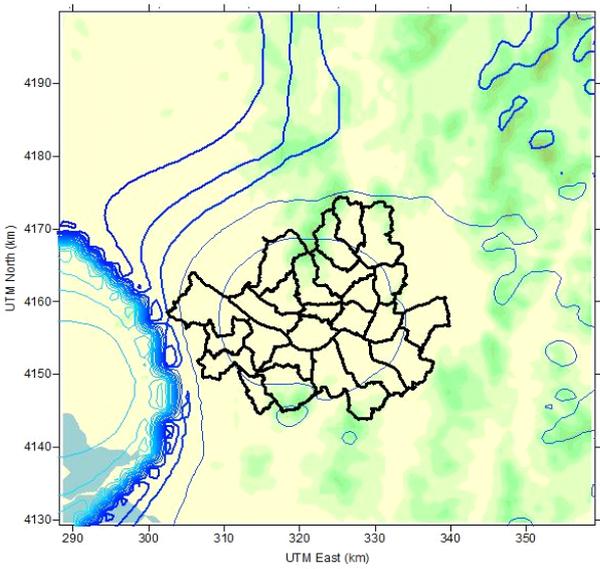
본 연구에서는 동일한 양의 대기오염물질이 배출된다는 가정 하에 온도 변화에 따른 CO의 확산 변화를 알아보는 것이 목적이므로, 농도에 대한 변화는 고려하지 않고, 기온에 따라



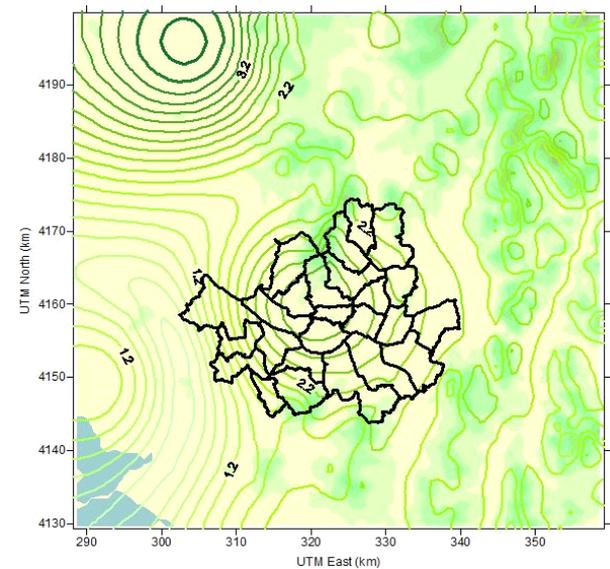
(a) Before the temperature rise



(a) Before the temperature rise



(b) After 2°C rise



(b) After 2°C rise

Fig. 3. Wind direction change in the modeling area.

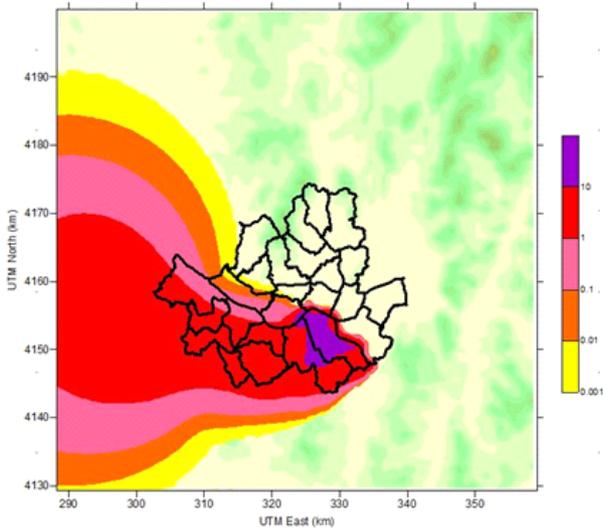
Fig. 4. Wind speed change in the modeling area.

CO가 확산되는 범위의 변화만 분석하였다. RCP 8.5 시나리오를 바탕으로 2050년의 여름철 기온 상승 예측치인 4°C를 적용하여 분석한 결과, Fig. 5와 같이 대기오염물질의 확산 범위가 넓어지는 것으로 나타났다.

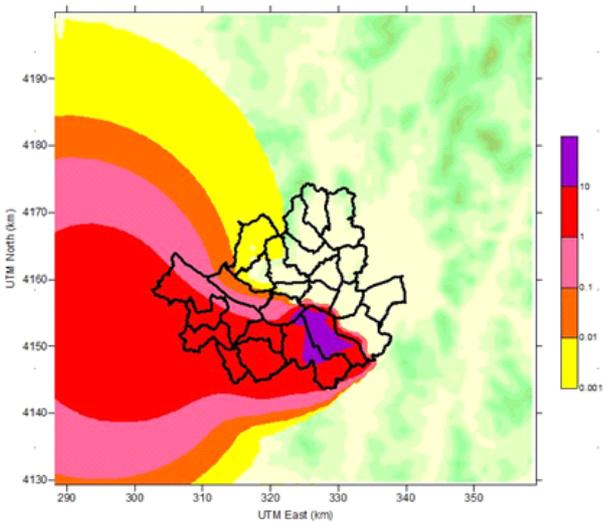
대기오염물질은 여름철 분석기간인 7월 18일의 경우, 인천 방향인 서쪽으로 확산됐다. 기온 상승에 따른 확산 변화를 알아본 결과, 2050년의 동일한 날의 기온이 4°C 상승했을 경우 0~11시까지 확산 범위의 변화가 크게 나타나지 않았고, 12시

부터 21시까지 확산 범위가 변화한 것으로 분석되었다. 확산의 범위는 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상(보라색)부터 0.001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하(노란색)로 구분되었을 때 0.001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 구간의 변화가 가장 크게 나타났으며, 0.01~1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 범위에서도 확산되는 넓이가 달라지는 것으로 분석되었다.

온도 상승 전에 비해 온도를 4°C 상승 시 CO는 서북(경기도 파주시)과 서남(경기도 안산시)방향으로 넓게 확산되는 것으로 나타났다. 2050년의 기온 상승 예측 기온인 4°C를 적용



(a) On July 18, 2pm- Before the temperature rise



(b) On July 18, 2pm- After 4°C rise

Fig. 5. Spread degree of air pollutant on July 18, at 2 pm.

(7월 18일)한 대기오염물질의 오염도 평가를 실시한 결과, 0시부터 10시까지는 오염도 감소 면적이 증가 면적에 비해 많은 비율을 차지하였다. 하지만 오전 12시부터 오염도가 증가한 면적이 더 많아지기 시작하면서 14시에는 전체면적(모델링 영역)의 34.1%가 오염도 증가 면적으로 분석되었다(Table 4) (Fig. 6).

2050년의 RCP 8.5 시나리오를 바탕으로 겨울철 기온 상승 예측치인 2.3°C를 적용할 경우, 대기오염물질의 확산 범위가 넓어지는 것으로 나타났다. 대기오염물질은 겨울철 분석기간

Table 4. Increase and reduction area ratio of air pollution level in the modeling area in summer

Time	Increase area ratio of air pollution level (%)	Decrease area ratio of air pollution level (%)
0	1.2	2.1
1	3.3	3.9
2	5.7	10.9
3	6.0	11.7
4	11.5	6.0
5	7.0	10.4
6	8.5	15.3
7	9.3	17.2
8	10.0	12.8
9	11.5	12.4
10	15.5	12.8
11	13.8	12.2
12	24.6	14.0
13	19.9	14.3
14	34.1	9.8
15	31.7	8.5
16	24.8	8.5
17	19.7	8.3
18	13.8	6.8
19	11.7	5.5
20	11.0	5.7
21	11.3	5.6
22	9.9	7.3
23	10.0	6.2

인 1월 16일의 경우 Fig. 7과 같이 성남방향인 남동쪽으로 확산됐다. 기온 상승에 따른 확산 변화를 알아본 결과, 2050년의 동일한 일자에 기온이 2.3°C 상승할 경우, 8시부터 16시까지 확산 범위가 변화한 것으로 분석되었다.

확산의 범위는 여름철과 유사하게 0.001 µg/m³ 이하(노란색) 구간의 변화가 가장 크게 나타났으며, 0.01~1 µg/m³ 이상 범위에서도 확산되는 넓이가 달라지는 것으로 분석되었다. 또한, 여름철의 분석 결과보다는 1 µg/m³ 이상의 범위의 확산정

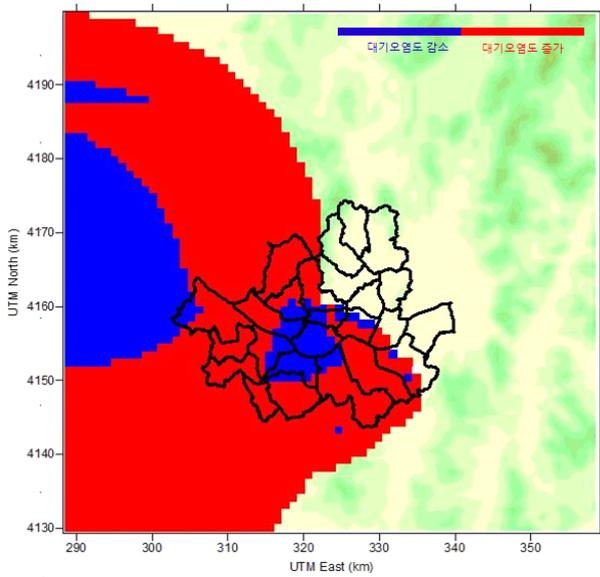


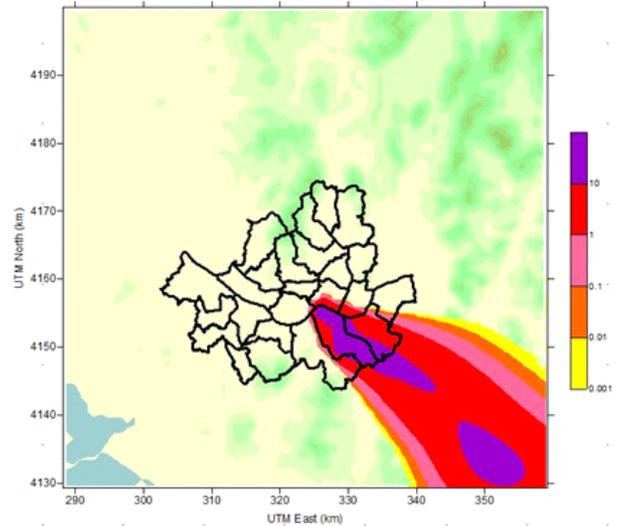
Fig. 6. Increase and reduction area of air pollution level on July 18, at 2 pm.

도가 조금 더 큰 폭의 변화를 보였으며, 이는 여름철에 비해 겨울철의 대기오염물질의 확산이 잘 이루어지지 않는 것으로 판단할 수 있다.

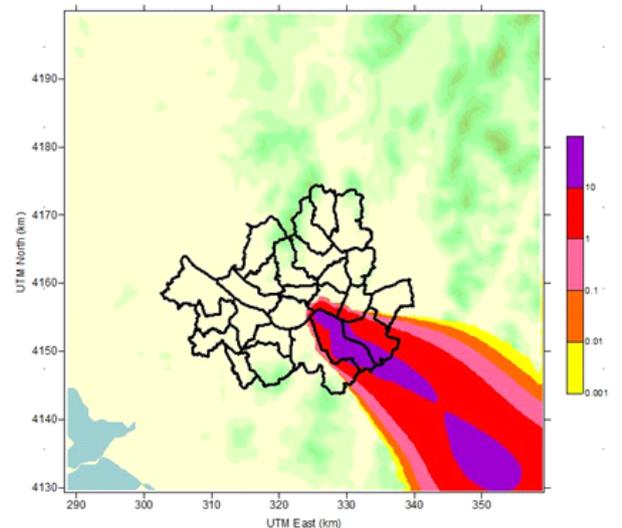
대기오염물질은 온도 상승 전에 비해 온도를 2.3℃ 상승 시 남동(경기도 성남시)과 동남(경기도 하남시)방향으로 배출돼 넓게 확산되는 것으로 나타났다. 이에 따라 2050년의 기온 상승 예측 기온인 2.3℃를 적용한 1월 16일의 대기오염물질 확산 정도 변화에 따른 대기오염도의 증가 및 감소 평가를 실시한 결과, 여름철의 결과와 달리 2시, 7시, 18~21시, 23시를 제외하고, 대기오염도가 증가하는 면적이 넓어지는 결과가 나타났다. 오전 8시부터 오염도가 증가한 면적이 오염도 감소 면적보다 더 커지기 시작하면서 10시에는 전체면적(모델링 영역)의 14.1%가 오염도 증가 면적으로 분석되었다(Table 5) (Fig. 6).

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 대기오염물질의 배출량이 동일한 상태에서 기온 상승에 따른 오염물질의 확산범위 변화와 이에 따른 대기질의 오염도 평가를 실시했다. 기존의 기상자료에 기온을 상승시킨 CALMET(기상모델) 모델링 결과에서는 풍향 및 풍속의 변화는 없었으나, 기온상승 시 혼합고가 높아지는 결과도 출되었다. 이는 기온 상승은 혼합고를 상승시키고, 혼합고의 상승으로 대기오염물질의 확산이 더 넓은 범위까지 이루어진다고 판단할 수 있다.



(a) On January 16, 10am- Before the temperature rise



(b) On January 16, 10am- After 2.3℃ rise

Fig. 7. Spread degree of air pollutant on January 16, at 10 am.

어진다고 판단할 수 있다.

CALPUFF(대기확산모델) 모델링을 통한 여름과 겨울철의 대기오염물질의 확산 변화를 분석한 결과, 여름과 겨울의 대기오염물질의 시간대별 확산 변화가 다른 것으로 나타났다. 여름의 경우, 4℃의 기온상승을 적용하기 전과 후를 비교하였을 때, 0시부터 9시의 대기오염 확산의 큰 변화가 없었으나, 10시부터 23시까지 기온 상승에 따른 확산범위가 넓어지는 것으로 분석되었다. 확산범위의 변화가 미미했던 시간대는 일출 및 일몰의 전과 후로 일사량이 적은 시간대이고, 10시부터

Table 5. Increase and reduction area ratio of air pollution level in the modeling area in winter

Time	Increase area ratio of air pollution level (%)	Decrease area ratio of air pollution level (%)
0	7.7	5.1
1	6.7	5.7
2	4.1	7.5
3	7.2	6.2
4	8.7	4.7
5	10.0	6.9
6	9.5	3.6
7	4.6	4.8
8	7.0	3.7
9	7.3	4.8
10	14.1	0.6
11	13.7	0.7
12	12.4	0.1
13	11.1	1.7
14	12.3	0.1
15	12.4	1.6
16	8.3	4.7
17	5.9	7.9
18	5.5	8.6
19	8.1	10.7
20	8.3	7.2
21	4.9	7.1
22	11.9	5.2
23	5.6	7.8

19시까지의 일사량이 높아져 태양복사량이 증가하여 지면과 인접한 대류권의 공기가 데워진 영향으로 대기오염물질의 확산이 잘 일어난 것으로 사료된다. 겨울철의 경우, 2050년의 기온 상승 예측치인 2.3℃를 적용하여 분석한 결과, 여름철과 달리 8시부터 16시까지 확산 범위가 변화한 것으로 분석되었고, 이는 겨울철의 일출과 일몰 시간대가 여름과는 다르기 때문인 것으로 사료된다.

혼합고가 증가함에 따라 대기오염물질의 확산 범위가 넓어

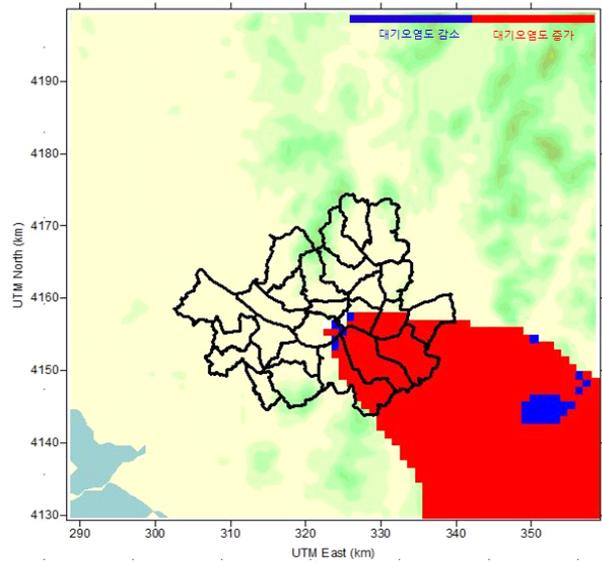


Fig. 8. Increase and reduction area of air pollution level on January 16, at 10 am.

진다는 분석결과를 바탕으로 기온 상승에 따른 대기질의 오염도를 평가한 결과, 시간대 별로 일사량이 증가한 시간대인 10시부터 대기오염도가 증가 면적의 비율이 높아지는 것으로 나타났으며, 일 별로 대기오염도의 증가/감소 비율을 분석한 결과, 설정한 분석기간의 대기오염도가 증가한 면적이 감소한 면적의 비율에 비해 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 기온이 상승해 동일한 농도의 대기오염물질이 배출될 경우, 더 넓은 범위로 오염물질이 이동하고, 대기질의 오염도 증가한다고 판단할 수 있다. 또한, 일사량이 증가한 시간대는 일출 전과 일몰 후의 대기질에 비해 대기질의 오염도가 높아진다고 해석될 수 있다.

본 연구의 결과를 통해 기후변화로 인해 기온이 상승할 경우, 대기오염물질이 더 넓은 범위로 확산되고, 대기질 오염도 증가한다는 것을 확인했다. 향후 과제로는 분석대상항목을 늘려 일반대기오염물질과 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆)의 상관관계 분석, 확산에 따른 인체영향 등, 종합적인 연구가 필요하다.

REFERENCES

Do SH, Lee CK, Ahn SY, Choi SW. 2008. Odor impact assessment in west Daegu/Daegu dyeing industrial complex using CALPUFF model. Korean Society of Odor Research and Engineering 2008(11).

- Do SH. 2010. Air quality and health risk assessment for the city of Daegu using CALPUFF diffusion model. Kye Myoung University.
- Kim DR, Lee JB, Moon KJ, Song CK, Yoo JA, Choi WJ, Hong YD. 2010. Characteristics of ozone concentration to climate change. KOSAE.
- Kim HN. 2014. Assessment of urban area CO₂ concentrations using the atmospheric dispersion model for micro areas. Sejong University.
- Kim JC, Lee JB. 2006. Simulation of NO_x diffusion emitted from large point source in Donghae city using CALPUFF dispersion model. Korean Society for Atmospheric Environment. Proceeding of the 41st Meeting of KOSAE (2006). pp 259-260.
- Kim JC, Lee JB. 2008. Estimation of air pollution concentration in the Seoul metropolitan area CALPUFF model for long term. Korean Society for Atmospheric Environment. Proceeding of the 46th Meeting of KOSAE(2008). pp 229-230.
- Ko KJ, Koo YS. 2008. An evaluation of CALMET modeling according to input meteorological condition. Korean Society for Atmospheric Environment. Proceeding of the 47th Meeting of KOSAE(2008). pp 404-405.
- Kwak BK, Kim JH, Jeon WJ, Shin CB, Lee SW, Park HS, Lee JH. 2007. Simulation of benzene concentration between cities in Seoul metropolitan area using CALPUFF with fine grid resolution. The 2007 Environmental Societies Joint Conference. pp 339-340.
- Lee JB, Ham HJ, Kim JC. 2011. CALPUFF model air quality simulation of metropolitan area using CAPSS emission. Korean Society for Atmospheric Environment(2001) 2011 (10).
- Ma YI, Kim YJ, Park YJ, Kim JC, Sum WY. 2004. Estimation and evaluation of contribution between cities in Seoul metropolitan area using CALPUFF and the ratio between emission and concentration. Proceeding of the 38th Meeting of KOSAE(2004). pp 82-83.
- Moon NK, Hong SY, Lee YS, Park RJ, Kim JW, Im KS. 2009. The impact of climate change on regional scale air quality(I). Korea Environment Institute.
- Park JM. 2010. The sensitivity assessment for the air pollution concentrations by climate change: Focusing on temperature and emission rate. Seoul National University.
- Sung MA. 2006. Numerical simulation on the impact to air pollutants dispersion of the change of meteorological condition due to urbanization in Daegu. Kye Myoung University.
- Yoon HY. 2002. An evaluation of the CALPUFF model and ISCST3 model by the tracer field experiments. An Yang University.