

## 삼차원 수치모델을 이용한 점오염원의 대기환경영향 평가

### Air Quality Impact Analysis for Point Sources Using Three-Dimensional Numerical Models

김영성\* · 오현선 · 김진영 · 강성대<sup>1)</sup> · 조규탁<sup>2)</sup> · 홍지형<sup>3)</sup>

한국과학기술연구원 지구환경연구센터

<sup>1)</sup>기상연구소 예보연구실, <sup>2)</sup>서울대학교 환경계획연구소

<sup>3)</sup>국립환경연구원 대기연구부

(2001년 4월 9일 접수, 2001년 8월 14일 채택)

Y.S. Ghim\*, H.S. Oh, J.Y. Kim, S.-D. Kang<sup>1)</sup>, K.-T. Cho<sup>2)</sup> and J.H. Hong<sup>3)</sup>

*Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology*

<sup>1)</sup>*Forecast Research Laboratory, Meteorological Research Institute*

<sup>2)</sup>*Environmental Planning Institute, Seoul National University*

<sup>3)</sup>*Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research*

(Received 9 April 2001; accepted 14 August 2001)

#### Abstract

The increase of carbon monoxide in the ambient air due to the emissions from point sources without control was estimated using three-dimensional numerical models. The target area was Ulsan where one of the largest industrial complexes was located. As a typical example using numerical models for air quality impact analysis of criteria pollutants that will determine whether the air quality standards would be exceeded or not, the following approaches were suggested. They include: (1) investigation of pre-existing atmospheric conditions, (2) identification of major factors causing high concentrations, (3) selection of episode days, (4) preparation of three-dimensional meteorological data, (5) confirmation of agreement between measured and predicted concentrations in the emission conditions of episode days, and (6) estimation of the impact due to changes of the emission conditions. In the present work, daily meteorological conditions for the specific period were classified into four clusters of distinctive features, and the episode days were selected individually from each cluster. Emphasis was placed on the selection of episodes representing meteorological conditions conducive to high concentrations especially for point sources that were sensitive to the wind direction variations.

**Key words** : air quality modeling, high concentration occurrence, meteorology classification, episode selection, carbon monoxide

---

\* Corresponding author  
Tel : +82-(0)2-958-5817, E-mail : ysghim@kist.re.kr

## 1. 서 론

환경기준물질의 대기환경영향 평가에서는 대상 오염원의 오염물질 배출에 의하여 주변지역의 오염물질 농도가 환경기준을 초과하는지를 살피는 것이 보통이다. 가우시안 모델은 다양한 미래의 변화에 대하여 상위 수 % 내의 최고농도를 보수적으로 예측할 수 있는 가장 효과적 수단의 하나로써 환경영향 평가에 널리 이용되고 있다(USEPA, 1999, 1990). 여기서 보수적이란 미래의 실측 농도가 모델 계산에 의한 농도를 넘지 않도록 여유를 두고 예측하는 것을 의미하며 모델의 정확도가 높아질수록 여유는 줄고 모델 예측은 현실에 근접하게 된다.

최근 수년 사이 국내에서는 3차원 수치모델을 오염원의 대기환경영향 평가에 이용하고자 하는 시도가 적지 않다(예를 들면, 문길주 등, 1997). 이와 같은 현상은 우리 나라 많은 지역이 반경 수 km 내에 구릉이나 산지가 위치하여 가우시안 모델로써는 환경영향을 정확히 예측하기 어려울 것이라는 우려에 기인한 바가 크다. 실제로 대상지역 내 지형이 복잡할 경우 가우시안 모델 이용은 다음의 두 가지 점에서 쉽지 않다. 첫째, 지형이 복잡하여지면 대상지역 내 기상의 공간 변화도 커지므로 오염원을 중심으로 균일한 기상장을 가정하는 가우시안 모델의 오차도 그만큼 커질 수 있다(김영성 등, 2000). 둘째, 가우시안 모델이 복잡지형을 다룰 수 있다 하여도 지형 전면의 농도를 계산하기 위한 모델일 뿐 와류 등 후면의 변화까지를 모사할 수 있는 것은 아니며 따라서 높은 지형이 중첩되어 있다면 후면에 위치한 또 다른 지형의 효과는 정확하게 고려될 수 없다(김영성 등, 1998).

3차원 대기질 수치모델은 입력 조건의 대상지역 내 대기질의 모습을 상세히 예측한다. 정확한 수치모델일수록 대기질 예측의 정확도가 높아질 것을 예상할 수 있으나 입력 조건에서의 대기질 모습임에는 변함이 없다. 뿐만 아니라 대부분의 3차원 대기질 수치모델은 이에 상응하는 3차원 기상모델의 결과를 이용함에 따라 특정일의 현상을 다루는 것이 보통이다. 일부 기상모델의 경우 평균 기상 등 다양한 조건에서 3차원 기상장을 얻을 수 있으나(예를 들면, 오현선과 김영성, 2000), 보편적이지는

않다. 특정일을 대상으로 하든, 특정 현상을 대상으로 하든, 일부 현상을 다루게 됨에 따라 대상으로 한 기상현상이 환경영향평가의 목적에 적합한가가 중요하다. 환경기준의 초과 여부를 조사하게 되는 기준물질의 환경영향평가라면 선택한 기상현상이 미래의 다양한 변화에 대하여 충분히 높은 농도를 줄 수 있는 조건인지 확인이 되어야 한다.

본 논문에서는 3차원 수치모델을 대기환경영향 평가에 이용할 경우 가능한 방법론으로써 배출 자료가 주어졌다는 전제 아래, (1) 대상지역의 대기환경 특성 분석, (2) 기상의 분류, (3) 사례일의 선정, (4) 기상 및 대기질 모델링, (5) 결과 분석의 순차적 접근을 제시하고자 한다. 울산지역 일산화탄소를 대상으로, 임의로 선택한 배출시설에서 가동 중인 방지설비의 운행을 중지할 때 충분히 많은 양의 일산화탄소가 배출되는 경우를 가상하여 환경기준의 초과 여부를 조사하였다. 이 때 충분히 많은 양이란 우리 나라 대부분의 지역에서 일산화탄소 배출의 90% 이상을 차지하는 차량 배출에 비하여서도 많은 양을 의미하며, 방지설비가 가동되는 정상 상태에서의 배출량은 차량으로부터 배출량의 1~2% 정도로 충분히 작다(환경부, 2000). 농도 분포를 토대로 차량 배출에 대한 점오염원 배출의 특성을 조사하기 위하여 차량에 의한 배출 분포와 배출량을 별도로 추정하였다.

## 2. 배출 자료

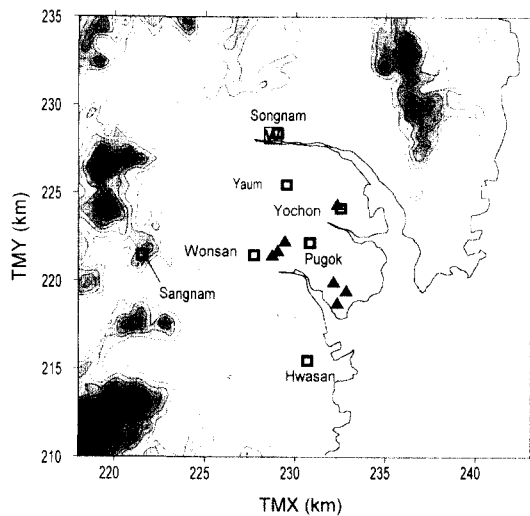
표 1은 대상 배출시설의 일산화탄소 배출 현황이다. 방지설비를 가동하지 않을 때 환경기준의 초과 여부를 조사하기 위한 것이므로 이 때의 배출량은 배출시설로부터 가능한 최대 배출량인 설계값이 된다. 이미 언급한 것과 같이 표 1의 배출의 설계값은 인근 지역의 차량 배출량을 초과하는 큰 값이다. 그러나 방지설비를 가동할 때의 배출량은 정상 운전 조건에서의 실측값이며, 평상시의 농도 추정과 함께, 지역 내 측정망 측정치와 계산치를 비교함으로써 모델 결과의 검증에 이용된다. 그림 1은 배출시설의 위치와 주변 지형의 모습이다. 북동쪽에 300여 m의 산지와 남서쪽으로 600여 m의 산지가 있고 시설 주변의 반경 수 km 내에도 굴퓏 높이보다 높은 구릉들이 산재해 있다. 남동쪽이 울산만이고,

**Table 1. CO emissions from selected facilities in Ulsan.**

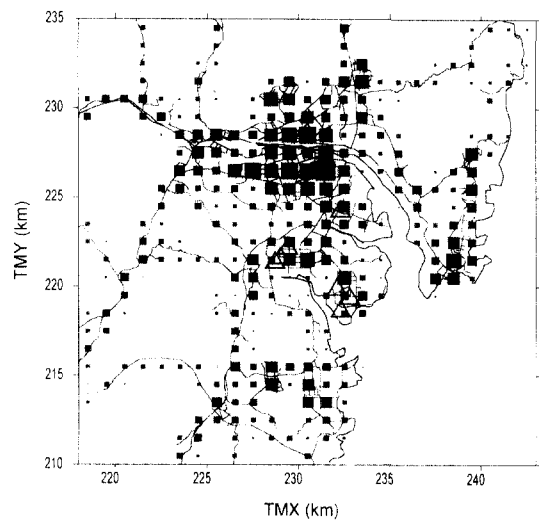
Emission conditions		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Stack height (m)		41	40.5	10.2	32	41	34.9	33.6
Stack diameter (m)		1.1	2.83	1.51	1.5	1.82	1.61	2.0
Flue gas velocity (m/s)		12.8	14.4	14.7	12.3	13.1	14.4	11.7
Flue gas temperature (°C)	w/o control <sup>a</sup>	30	42	40	55	50	35	80
	w/ control <sup>b</sup>	30	151	190	45	168	53	230
Emission rate (g/s)	w/o control <sup>a</sup>	214.38	275.47	94.92	106.28	158.30	185.94	79.17
	w/ control <sup>b</sup>	0.31	6.12	5.10	0.02	2.48	4.81	0.23

<sup>a</sup> Design value.

<sup>b</sup> Measured value in normal operating conditions. With control, CO is oxidized to CO<sub>2</sub> on platinum catalysts.



**Fig. 1. Locations of CO emission facilities denoted by solid triangles. Open rectangles denote air quality monitoring stations. 'W' is the surface weather station. Filled contours represent topography above sea level at intervals of 50 m.**



**Fig. 2. Distribution of CO emissions from vehicles. Shaded rectangles are proportional to CO emission at the grid point. The largest emission rate is 12.1 g/s. Open triangles denote CO emission facilities given in Table 1. Solid lines represent roads except shorelines. Dotted lines represent topography.**

북서쪽부터 북동쪽 산지 사면을 지나 남동쪽의 울산만으로 태화강이 흐른다. 북쪽의 성남부터 서쪽의 상남, 남쪽의 화산까지 환경부 대기오염 측정소들이 분포해 있다.

그림 2는 차량에 의한 대상 지역의 일산화탄소 배출 분포이다. 울산광역시에 대하여 차종별로 등록 대수, 주행거리, 배출계수를 조사하여 차종별 배출량을 구한 후 GIS 기법에 의하여 도로별 차선과 길이를 조사하여 1×1 km 격자에 할당한 것이다. 차종별 등록 대수와 주행거리는 1999년 자료를 환경부 교

통공해과로부터 입수하였으며, 배출계수는 1997년 환경부와 국립환경연구원(1998) 자료를 이용하였다. 이로부터 산출한 울산광역시의 일산화탄소 배출 총량은 연간 25,880톤이었는데, 환경부(2000)의 1999년 울산 지역 이동오염원의 연간 배출 총량 25,350톤보다 약간 많으나 매우 근접한 수치이다. 차량 배출의 일변화는, 1995~1999 기간 서울지방경찰청의 정기 교통량 조사자료 중 비교적 공업지역의 특성을 지니고 있다고 추정되는 성산대교와 성수대교의

조사 자료를 평균하여 이용하였다.

### 3. 대상지역의 대기환경 특성

그림 3은 1991년부터 1998년까지 8년간 울산지역 7개 측정소의 일산화탄소 연평균 농도와 3 ppm 초과 고농도 발생시간 수이다. 연평균은 1995년 이후 현저히 감소하여 1995년 1.3 ppm에서 1998년에는 0.7 ppm까지 낮아졌다. 3 ppm 초과 고농도 발생은 1990년대 초부터 급격히 감소하여 1995년 이후는 100시간 정도의 수준을 유지하고 있다. 연평균이 크게 변하고 있기는 하나 기준물질의 환경영향 평가에서 중요한 것은 고농도이다. 따라서 아직 3 ppm 초과 고농도 발생이 많았던 1991~1994년과 고농도 발생이 줄어 안정된 경향을 보이고 있는 1995~1998년의 두 부분으로 나누어 고농도 발생 특성의 변화를 살펴보았다.

그림 4는 일산화탄소 고농도 발생의 월별 변화를 비교한 것이다. 1994년까지 전반에는 12월에 고농도 발생이 적기는 하나 대체로 겨울에 많고 여름에 적어 기온에 반비례하는 모습을 보이고 있으나 1995년 이후에는 이와 같은 경향을 보기 힘들다. 그림으로 제시하지는 않았으나 일변화를 보면 1994년까지는 고농도 발생이 밤동안 계속 증가하여 일출 무렵 가장 빈도수가 많아지는데 비하여 1995년 이후는 아침 출근 무렵 급격히 높다. 측정소별로는, 1994년까지 상남리와 야음동 등 주거지역에서 고농도 발생 비율이 높았으나 1995년 이후는 그림 2에서 차량 배출이 집중된 성남동에서 고농도 발생 비율이 높다. 이와 같은 일련의 변화들은 울산지역의 일산화탄소 고농도 발생의 주요 원인이 1994, 1995년을 지나며 난방연료 사용에서 차량 배출로 바뀌었을 가능성을 시사하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 1995~1998의 4년을 대상으로 울산지역의 기상 특성을 분석하였다.

먼저 오염물질 확산에 직접 영향을 미치는 기상 요소인 바람 특성을 살펴보았다. 그림 1에서 볼 수 있는 것과 같이 울산지역은 기상대가 해안에 근접하였음에도 불구하고 전체적으로 무풍이 많고 특히 여름과 가을, 밤부터 아침까지 10시간 가까이 무풍이 가장 빈번하다. 사실 울산의 무풍 비율은 1961~

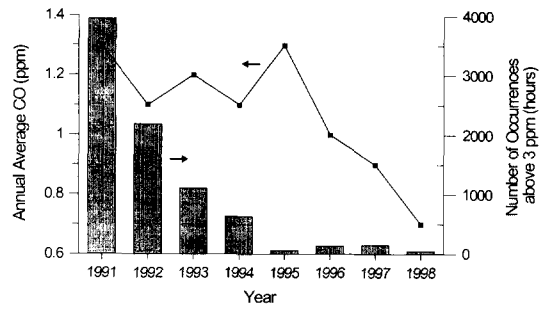


Fig. 3. CO concentration variations in Ulsan during 1991 ~ 1998.

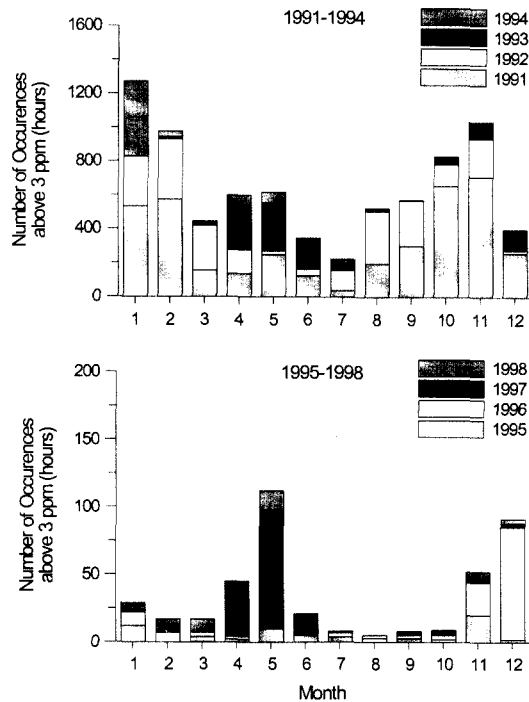


Fig. 4. Monthly variations in high CO hours above 3 ppm during 1991 ~ 1994 and 1995 ~ 1998.

1990의 30년 동안 17.7%로, 인근의 포항(4.8%), 대구(7.8%), 부산(3.6%) 보다 월등히 높다(기상청, 1991). 무풍을 제외하고 풍향 변화를 살펴보면, 대체로 밤에는 육풍인 북서풍이 약하고, 낮에는 해풍인 동풍 계열의 바람이 강하여 우리나라의 전형적 해륙풍 특성을 보이고 있다. 그러나 겨울에는 종관풍

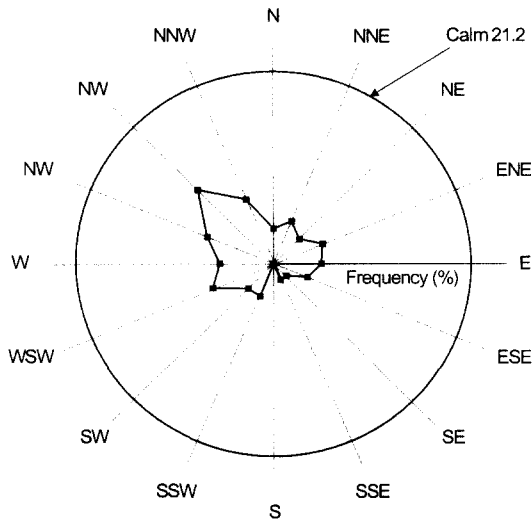


Fig. 5. High CO occurrences by wind direction for the period of 1995~1998. Calm means wind speed is less than 0.3 m/s.

의 영향과 낮에도 일사가 충분치 않아 해륙풍이 발달하지 못하고 있다(오현선과 김영성, 2000).

그림 5는 풍향에 따른 일산화탄소 고농도 발생 비율을 조사한 것이다. 무풍에서 고농도 발생 비율이 21.2%로 압도적이다. 다음으로 북서풍이 11.5%로 고농도 발생비율이 높는데, 주로 밤에 풍속이 낮은 육풍이 북서풍인 지역 특성에 기인한 결과로 해석된다.

#### 4. 조사대상 사례일의 선정

##### 4.1 군집 분석

편중되지 않은 대표적 조건에서 환경영향을 조사하기 위하여 먼저 1995년부터 1998년까지 4년간의 대상일을 기상 특성에 따라 분류하였다. 분류에는

K-평균 군집분석법을 이용하였으며(SPSS, 1997) 계절 특성을 감안하여 군집 수를 4로 지정하였다. 군집 분석을 위한 변수로는 일 최고, 최저 기온, 일 최대, 최소 풍속, 평균 풍향을 이용하였다. 일산화탄소 농도의 공간 분포에 따른 특성이 있을 수 있다고 생각되어 측정소별 일산화탄소 농도를 변수로 시험하였으나 기상 변수와 함께 이용하였을 때는 기상 변수만을 이용하였을 때와 분류 결과가 동일하였고, 별도로 이용하였을 때는 군집 간 뚜렷한 차이를 발견하기 어려웠다.

표 2는 각 군집의 평균 기상과 일산화탄소 농도, 발생 비율이다. 각 군집별 특성을 요약하면 다음과 같다.

(1) 군집 1 - 1995년과 겨울에 가장 많으며, 평균적으로 본 하루 중의 풍향은 거의 북서풍이다. 전체적으로 풍속이 높으나 기온이 낮은 까닭에 농도가 가장 높다. 난방에 의하여 농도가 높은 과거의 특성을 지닌 날로 분류할 수 있다.

(2) 군집 2 - 봄, 여름에 많고, 오전에는 서풍이 약하나, 오후에는 남서풍이 비교적 강하다. 기온이 낮지 않음에도 군집 1보다는 낮으나 일산화탄소 농도가 높다.

(3) 군집 3 - 여름에 가장 많고 따라서 기온도 높다. 해륙풍의 특성이 비교적 분명하여 일출 부근 아침 풍속이 특히 낮다. 그러나 낮에는 강한 일사와 함께 혼합층이 발달할 수 있어 농도가 가장 낮다(오현선과 김영성, 2000).

(4) 군집 4 - 연도별로는 1998년에, 월별로는 9, 10월에 발생 빈도가 높으며, 한반도에서는 비교적 깨끗한 북동풍의 빈도도 높다. 오후의 농도는 군집 3보다 높으나 아침의 농도는 가장 낮다.

##### 4.2 사례일의 선정

조사대상 사례일은 군집 특성에 가장 가까운 전

Table 2. Typical conditions and frequency of the clusters.

Cluster	Temperature (°C)		Wind speed (m/s)		Average wind direction	CO (ppm)		Frequency (%)
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum		Maximum	Minimum	
1	12.8	3.5	4.67	0.32	NW	1.16	0.87	27.4
2	23.5	13.2	4.42	0.16	SW	1.10	0.79	22.7
3	23.8	15.1	4.03	0.09	SE	1.04	0.76	18.3
4	18.2	11.0	4.17	0.35	NE	0.97	0.79	31.6

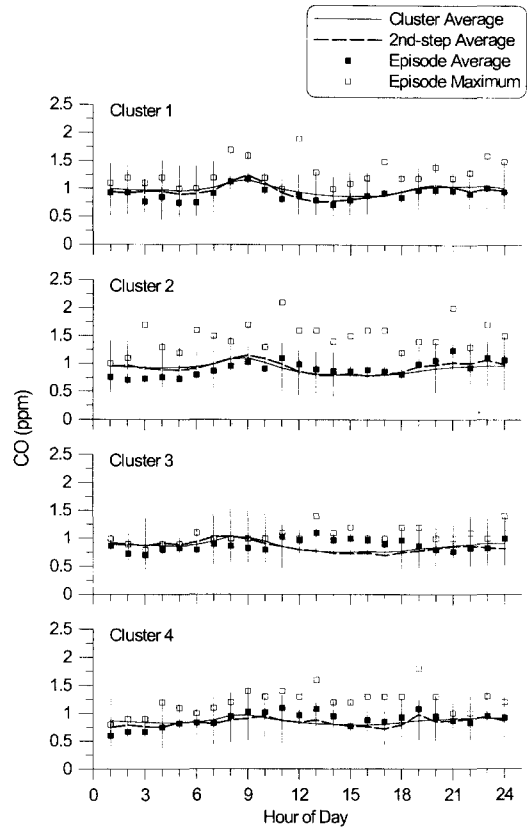
**Table 3. Selection procedures for episode days.**

Selection procedure	Number of days in the cluster and episode days			
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
Total number of days	400	331	268	461
(Step 1) Select days whose distance from the cluster center is less than or equal to 10	55	38	32	55
(Step 2) Select days when calm occurs at least 6 hours	5	10	14	3
(Step 3) Select episode days considering the cluster characteristics and wind speed <sup>a</sup>	97/12/27 (8)	98/11/14 (8)	96/5/30 (8)	97/11/14 (11)

<sup>a</sup> Figure in the parentheses indicate the number of clam hours.

형적인 날 중에서 일산화탄소 고농도 발생 가능성이 높은 무풍이 많은 날을 선정하였다. 표 3은 사례 선정 과정을 정리한 것이다. 군집 특성에 가까운 전형적인 날은 군집 중심에 가까운 날부터 대략 전체 일수의 10% 정도가 되도록 중심으로부터 거리가 10 이하인 날을 선정하였다. 2단계로는 하루 24시간 중 무풍이 6시간 이상인 날을 선정하였는데, 역시 최소 풍속이 가장 낮았던 군집 3의 날수가 14일로 가장 많다. 최종 사례일은 무풍의 비율이 높은 날 중에서 군집 특성과 연도별, 계절별 분포를 고려하여 선정하였다. 무풍의 비율을 강조하는 과정에서 군집 특성 중 군집 1이 1995년에 많은 등 연도별 특성이나 군집 4가 9, 10월에 많은 것과 같은 계절 특성은 부각되지 않고 있다. 또한 군집 3을 제외하고는 종관풍의 영향이 클 수 있는 11, 12월의 날들이 무풍 비율이 높아 사례일로 선정된 것도 주목할 만하다.

그림 6은 사례일 선정 과정의 일산화탄소 농도이다. 군집 평균부터, 2단계 선정, 사례일 선정까지 무풍의 비율이 증가함에도 일산화탄소 농도는 증가되지 않고 있다. 뿐만 아니라 그림 5에서는 3 ppm 초과 고농도의 21%가 무풍 조건에서 발생하였으나 무풍 시간이 8~11시간에 이르는 사례일의 최고 농도는 2~2.5 ppm에 근접할 뿐 3 ppm을 초과하지 못하고 있다. 가장 쉽게 생각할 수 있는 원인은, 사례일의 무풍 조건들이 고농도의 가능성이 있음에도 고농도가 발생하지 않은 나머지 79%에 들었을 가능성이 있다. 그러나 무풍의 비율이 상대적으로 높은 2단계 선정일의 평균도 군집 평균과 크게 다르지 않아 단지 무풍이라는 점 때문에 일산화탄소 농도가 상승하지는 않는 것으로 추정된다.



**Fig. 6. Comparison of cluster average, 2nd-step average, and episode average and maximum CO concentrations measured at air quality monitoring stations. Vertical lines represent standard deviations from cluster means.**

이와 같은 사실은 측정소 농도만을 변수로 한 군집 분석이 의미 있는 결과를 주지 못하였던 사실과

연관지어 생각할 수 있다. 즉, 1995~1998 기간 울산지역의 일산화탄소 농도는 체계적으로 조건이 갖추어진 지역이나 조건이 갖추어졌을 때 높아지기보다는 소규모 배출 등 국지적 원인에 의하여 높아졌다는 것이다. 이와 같은 경우 그림 5의 결과는 국지적 원인이 발생하였더라도 다른 조건보다는 무풍 조건에서 고농도로 이어질 가능성이 많음을 보여주는 것으로 해석할 수 있다.

만일 울산지역 고농도 상승이, 1994년 이전과 같이 난방이 주요 원인이어서 기온이 낮은 겨울철 밤에 농도가 크게 높아지는 것과 같은 단순한 구조에서 비롯된다면 이와 같은 혼란은 없었을 수 있다. 차량이 주요 배출원으로 등장하면서 일산화탄소와 같은 1차 오염물질의 경우도 변화 요인이 다양하여졌고, 본 연구에서는 1995~1998 기간의 고농도 발생을 분석하여 그 중 일관된 요소로서 무풍을 주요 지표로 사례일을 선정한 것이다. 따라서 본 연구는, 정리하면, 차량이 주요 배출원인 상황에서 차량 배출에 의한 일산화탄소 농도가 상승할 가능성이 큰, 무풍 비율이 높은 사례일의 기상 조건을 토대로 표 1의 배출시설의 방지 시설이 가동되지 않아 일산화탄소가 추가로 배출될 때 울산지역에 미치는 영향을 조사하는 것으로 요약할 수 있다.

### 5. 기상 및 대기질 모델링

#### 5.1 기상모델 이용

3차원 수치모델 분석이 가우시안 확산 모델 분석과 가장 크게 다른 점은 실제 대기 현상을 재현한 가운데 목표로 하는 변화가 추가되었을 때 주변지역의 변화를 살핀다는 사실이다. 본 연구에서는 사례일의 대상지역의 3차원 기상을 재현하기 위하여 중규모 기상모델로써 MM5 (PSU/NCAR Mesoscale Model; Dudhia *et al.*, 2001)를 이용하였다. 전체 영역은 그림 7과 같으며, 격자 I부터 격자 III까지 격자 간격을 27, 9, 3 km 순으로 줄이며 대상 영역까지 영역을 축소하였다. UCAR (University Cooperation for Atmospheric Research, Boulder, CO)에서 제공하는 격자 I 영역 내 지상 및 고층기상 관측치와 재해석 (reanalysis) 자료를 초기치로 이용하였고, 6시간 간격으로 갱신하며 경계치로 이용하였다. 본 연구에서

는 사례일 전 24시간을 초기치로부터 적응 (spin up) 을 위한 시간으로 설정하였으나 MM5는 다른 모델에 앞서 모델링에 필요한 자료를 제공하여야 하므로 6시간을 더 먼저 시작하였다. 따라서 MM5의 모사 시간은 사례일 24시간을 포함하여 총 54시간이었다.

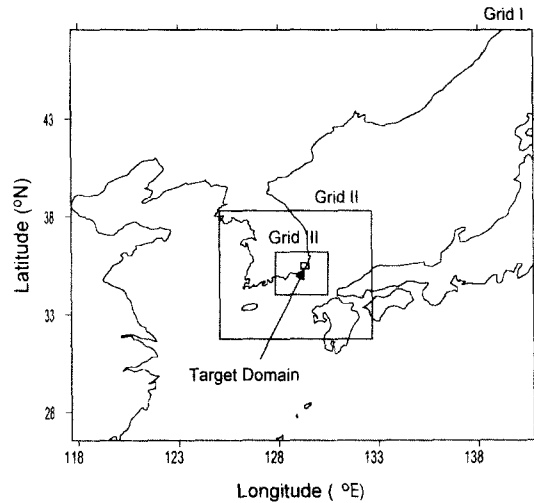


Fig. 7. Grid locations for MM5 modeling.

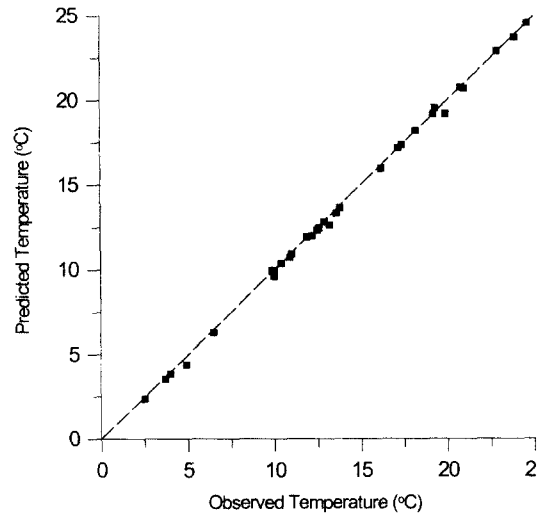


Fig. 8. Comparison of predicted and observed temperatures.

최종적으로 대상 영역의 기상 예측에는 진단 모델인 Calmet (Scire *et al.*, 2000a)을 이용하였다. 별도의 진단 모델을 이용한 이유는, MM5가 기본적으로 중규모 모델이기 때문에 수 km 이하의 미세 규모 변화 예측은 혼하지 않을 뿐 아니라 중첩 격자를 이용하여 격자 규모를 줄일 수 있다 하여도 계산 시간이 크게 증가하기 때문이었다 (Seaman, 2000). 본 연구에서는 3 km 간격의 MM5 계산 결과를 초기치로 그림 1의 대상 영역보다 약간 큰 영역의 기상 변화를 500 m 격자 크기로 계산하였으며, 관측치로는 Calmet 영역보다 충분히 큰 약 120 × 120 km 영역의 지상 및 고층 기상 관측자료를 이용하였다. 이때 MM5 계산 결과는 풍속이 대체로 빠르는데 비하여, 특히 울산지역의 관측치는 앞에서도 언급한 바와 같이 풍속이 낮았다. 따라서 관측치의 영향 반경에 따라 관측치의 영향이 커져 영역 내 풍속이 전반적으로 낮아지거나 MM5 계산 결과의 영향이 커져 기상대 위치를 제외한 외곽에서는 풍속이 높아지는 현상이 발견되었다. 본 연구에서는 몇 개의 영향 반경을 시험하여 일산화탄소 농도 계산치가 실측치와 비교적 잘 일치하는 것으로 판단되는 50 km를 관측치의 영향 반경으로 설정하였다.

그림 8은 4개 사례일에 대하여 울산 기상대 위치에서의 기온을 기상대에서 관측한 기온과 비교한 것이다. 기온은 풍향, 풍속에 비하여 편차가 컸음에도 불구하고 두 값은 1:1 선상에서 거의 완벽하게 일치하고 있다. 이와 같은 결과는 내삼과 질량 보전의 계산 과정에서 상대적으로 큰 값은 작아지고, 작은 값은 커지면서 기온기가 1보다 작아지는 여타의 진단 모델 결과와는 다른 것으로 (Kim *et al.*, 2000) Calmet의 관측치 보전 능력이 우수한 때문으로 해석되었다.

## 5.2 농도 계산

점오염원 형태의 일산화탄소 배출시설에 의한 농도는 라그랑지안 모델인 Calpuff (Scire *et al.*, 2000b)를, 면오염원 형태의 차량에 의한 농도는 오일러리안 모델인 CIT (California Institute of Technology) 모델 (McRae *et al.*, 1992)을 이용하여 계산하였다. 이와 같이 모델 이용을 분리한 이유는, 점오염원 배출물의 추적에는 라그랑지안 모델 계산이 정확할 뿐 아니라 효과적이거나 오염원 수가 많은 면오염원 형태

의 차량 배출물의 농도 계산에는 오일러리안 방식의 모델 계산이 효과적이라고 판단하였기 때문이다. CIT 계산에서 초기치와 경계 조건은 인근지역 대기질 측정소 측정치를 내삽하여 이용하였다 (김진영과 김영성, 2001). 앞에서 언급한 바와 같이 불완전한 초기조건의 영향을 없애고 점오염원과 차량 배출이 모델 계산에 적응하기 위한 시간으로써 사례일 앞의 24시간을 할애하였으며 영향 분석에는 사례일 24시간의 계산치만을 이용하였다. 그러나 8시간 평균은 연속 평균 (running average)을 계산함에 따라 사례일 전날 18시부터 계산에 포함시켰다.

그림 9는 방지설비가 가동되는 평상 조건의 배출 시설과 차량 배출에 의한 계산치와 측정치를 비교한 것이다. 계산치는 측정치를 준 측정소가 위치한 격자점에서의 계산치이며, 측정소 위치에서의 평균과 상한, 하한을 비교하였다. 1시간 평균의 경우 사례 2와 같이 계산치의 상한이 높은 경우도 있으나 대체로 유사한 범위에서 변하고 있음을 볼 수 있다. 1시간 평균에서도 동일하지만 8시간 평균의 경우 사례 1의 오전의 농도가 측정치보다 낮다. 그러나 대체로 8시간 평균은 1시간 평균에 비하여 계산치와 측정치가 훨씬 잘 일치하는 모습을 보이고 있다.

그림 10은 사례 2에서 계산치의 상한이 높아진 이유를 알아보기 위하여 계산치의 상한이 상승하는 동안의 바람과 농도 분포를 조사한 것이다. 그림 9에서 사례 2의 계산치의 상한이 가장 높은 것은 17시이나 그림 10을 보면 계산치의 상한이 이와 같이 높아진 직접적 원인은 15시 바람의 정체 때문이다. 영역의 남서쪽에서 바람이 정체된 가운데 농도가 높아 이중 일부가 서쪽 상남리 측정소 위치에서 탐지되었으며 이후 남남서풍을 따라 이동하여 17시 북쪽 성남동에 고농도 영역이 인접하면서 계산치의 상한이 크게 높아진 것이다. 그러나 측정치에서는 이와 같은 현상이 두드러지지 않은 것으로 보아 계산치에서 남서쪽 고농도 영역의 농도가 너무 높았거나 크기가 컸거나 위치가 다소 어긋났을 가능성이 있다.

그림 9에서 계산치와 측정치의 비교가 상당히 양호하였음에도 불구하고 본 연구의 농도 계산은 다음과 같은 근본적인 제약 조건을 가지고 있다. (1) 울산지역의 일부 배출시설과 차량 배출만을 고려하였고, (2) 차량 배출에 있어서도 주중, 주말 등의 변



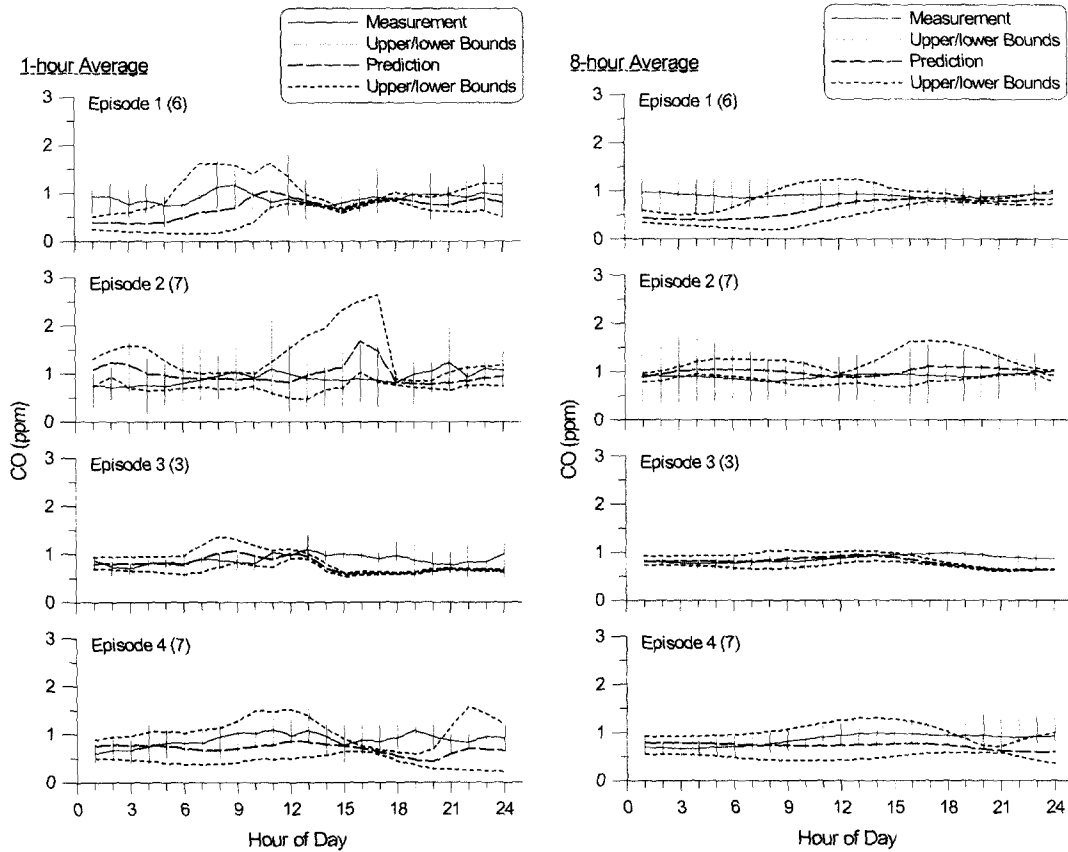


Fig. 9. Comparison between measured and predicted concentrations at the location of monitoring stations. Figures in the parentheses indicate the number of monitoring stations that give measurement data on that day. Upper and lower bounds as well as mean concentrations are presented.

확가 없을 뿐 아니라 언제나 동일한 일변화 모습을 적용하였다. (1)의 경우 1999년 울산지역에서 차량 배출의 비중이 91%이고, 여기에 표 1 배출시설의 배출이 추가되어 몇 %라도 상승한다면 일단 중요한 변화를 포괄하기에는 충분할 것으로 생각된다. 그럼에도 나머지 배출의 분포에 따라 국지적으로라도 고농도를 발생시킬 수 있음은 물론이다. 그러나 김진영과 김영성(2001) 등 다른 모델링의 예를 볼 때 (1) 보다는 (2)의 문제가 더욱 심각할 것으로 추정된다. 사례 1의 계산치와 측정치의 일변화 차이 등 사례별 기상요소의 변화로 설명되지 않는 대부분의 차이는 (2)의 문제가 원인일 가능성이 크다.

## 6. 결과 분석

그림 11은 조사 대상 배출시설에서 방지설비를 가동할 때와 가동하지 않을 때 1시간 평균과 8시간 평균 일산화탄소 농도를 비교한 것이다. 측정치와 비교를 위하여 측정소 위치에서의 계산치만을 대상으로 하였던 그림 9와 달리 그림 11은 영역 전체에 대하여 평균과 상한, 하한을 구하여 표시하였다. 방지설비를 가동하지 않아 배출이 크게 증가하였음에도 방지설비를 가동할 때와 비교하여 농도가 상승하는 경우가 많지 않고, 농도가 상승하더라도 대부분 상승폭이 크지 않다. 이와 같은 사실은 배출시설의 배출이 증가한 경우에도 영역 내 최고 농도가

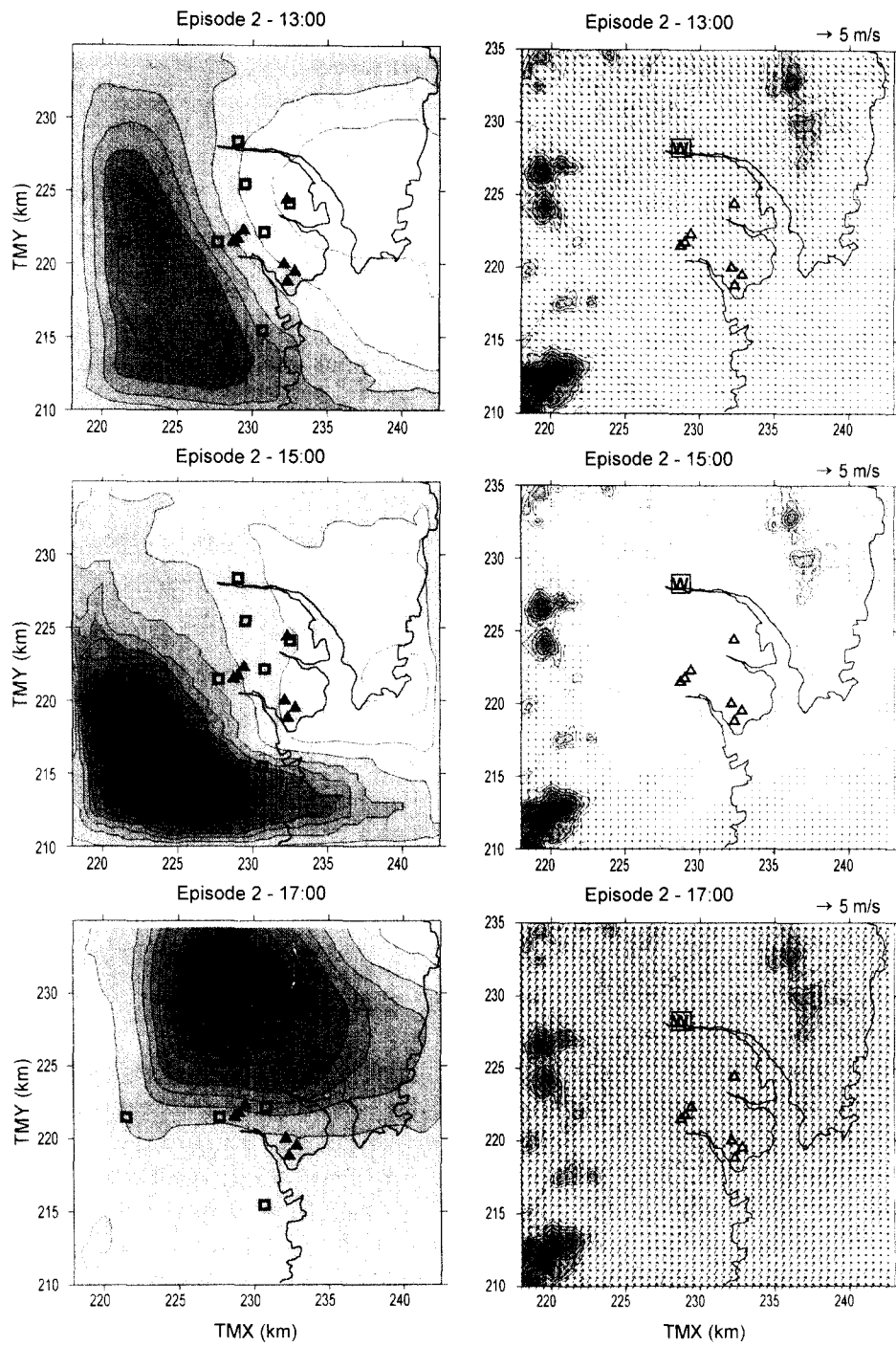


Fig. 10. Distributions of CO concentration and wind velocity at 13:00, 15:00 and 17:00 on Episode 2. Filled contours in the left panel represent concentration at intervals of 0.2 ppm. Solid triangles denote CO emission facilities. Open rectangles denote air quality monitoring stations.

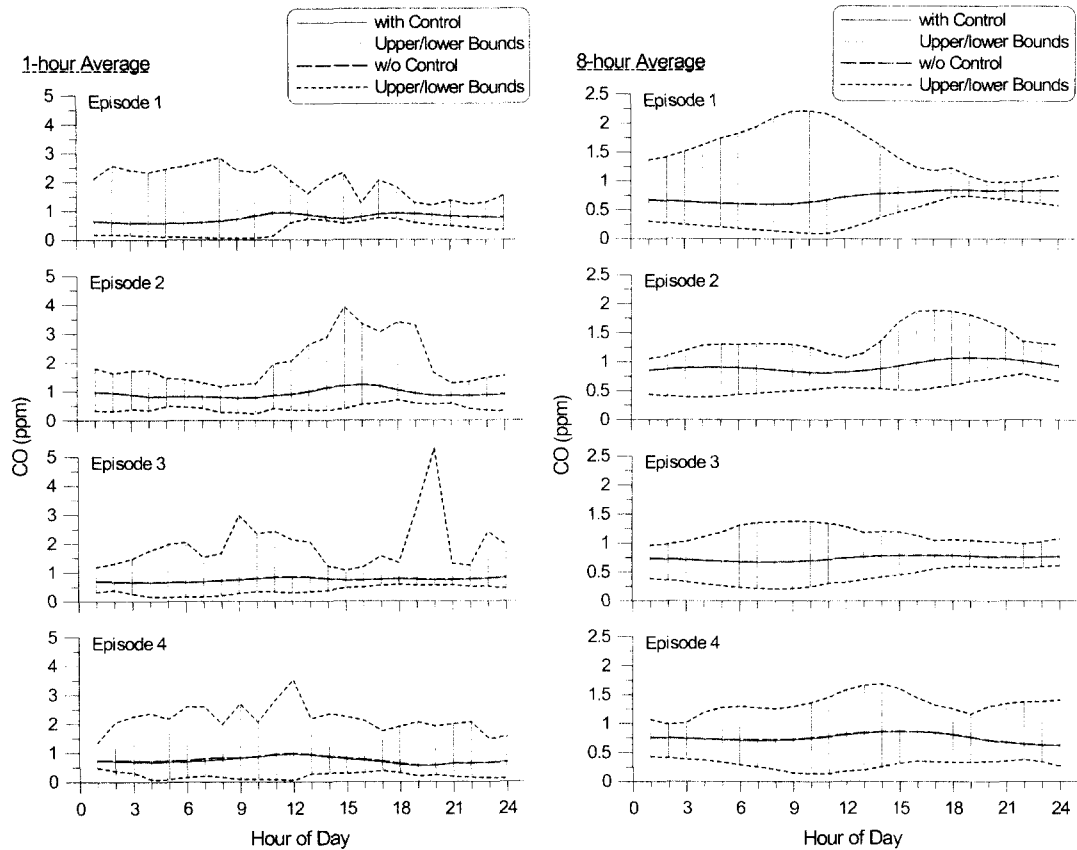


Fig. 11. Increases in CO concentration due to the emissions without control from the target sources. Upper and lower bounds as well as mean concentrations over the domain are presented.

Table 4. Maximum increases of CO concentration due to the emissions without control and highest concentrations<sup>a</sup> on the episode days along with their occurrence times.

Episode day	1-hour average (Occurrence time)		8-hour average (Occurrence time)	
	Maximum increase	Highest concentration	Maximum increase	Highest concentration
1	1.47 (15:00)	2.85 (08:00)	0.13 (18:00)	2.22 (10:00)
2	0.66 (13:00)	3.93 (15:00)	0.03 (12:00)	1.89 (17:00)
3	4.11 (20:00)	5.29 (20:00)	0.14 (15:00)	1.38 (09:00)
4	1.76 (12:00)	3.53 (12:00)	0.20 (05:00)	1.68 (14:00)

<sup>a</sup> Air quality standards are 25 ppm for 1-h average and 9 ppm for 8-h average.

대부분 차량 배출에 의하여 발생됨을 보여주는 것이다.

앞에서도 언급하였지만, 기준물질 환경영향 평가의 1차적 관심은 환경기준의 준수 여부이다. 따라서 표 4에서는 그림 11로부터, 방지설비를 가동하지 않

음으로써 농도가 가장 크게 상승한 경우와 사례별 최고 농도를 1시간 평균과 8시간 평균 각각에 대하여 조사하였다. 1시간 평균의 경우 사례 3에서 최대 4.11 ppm까지 상승하였으나 이 때 차량 배출에 의한 농도의 최고값은 1.18 ppm으로 그리 높지 않아

총 농도는 5.29 ppm에 그치고 있다. 즉, 4개 사례에서 가장 높았던 농도도 우리 나라의 1시간 평균 환경기준 25 ppm에는 크게 못 미치는 수준이다. 이와 같은 상황은 8시간의 경우도 다르지 않다. 오히려 점오염원 배출의 영향이 풍향에 민감하여 8시간 평균에서는 최대 상승이 사례 4에서 0.2 ppm 정도이다. 최고 농도는 사례 1에서 2.22 ppm이나 역시 환경기준인 9 ppm보다는 훨씬 낮아 1/4 수준이다.

본 연구에 앞서 동일한 배출시설에 대하여 가우시안 모델인 ISCST3 (Industrial Source Complex Dispersion Model, Short Term, Version 3; USEPA, 1995)를 이용하여 대기환경영향을 분석하였다(김영성 등, 미발표 자료). 배출량은 575 g/s으로 현재의 1,114 g/s의 약 절반 수준이었으며 1994년부터 1998년까지 5년의 기상 자료를 이용하였다. 분석 결과, 방지설비를 가동하지 않을 때 1시간 평균 최고 농도는 2.90 ppm, 8시간 평균은 1.58 ppm이었다. 이 때의 결과를 모든 배출조건이 동일한 상태에서 배출량만이 증가된 것으로 가정하여 현재의 배출 수준으로 환산하면 1시간 평균 5.62 ppm, 8시간 평균 3.06 ppm이 된다. 1시간 평균은 현재의 수치모델 분석에서 증가분으로 예측된 4.11 ppm에 비하여 약 40% 높으나 8시간 평균의 차이는 매우 크다. 여러 가지 해석이 가능할 수 있으나, 현실 자료만을 이용하여 방지설비 가동 중단에 따른 농도의 증가분을 계산하는 수치모델 분석과, 현실 자료를 이용하되 보수적으로 미래를 예측하고자 하는 가우시안 모델 분석의 상이함에서 비롯된 차이로 이해하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

앞에서는 언급하지 않았으나 그림 10을 보면 배출시설에 의한 농도 변화가 나타나지 않고 있다. 이는 기본적으로 그림 10의 경우 배출시설의 방지설비가 가동되는 상태이므로 배출량이 작은 때문일 수 있다. 그러나 그림 11과 표 4를 보면, 방지설비가 가동되지 않아 배출시설의 배출이 크게 증가하여도 대부분의 경우 차량 배출의 영향이 배출시설보다 월등 크다. 따라서 그림 10에서 배출시설의 영향이 나타나지 않은 것은 배출량 때문만은 아니다. 다른 원인으로는 두 오염원의 배출이 지표에 영향을 미치는 방식이 다르기 때문일 수 있다. 즉, 배출시설의 배출이 굴뚝에서 연기가 상승하며 이루어지는데 비

하여 차량 배출은 지표에 직접 영향을 미치기 때문이라는 것이다(김영성과 손재익, 1993). 그러나 이와 같은 차이를 감안하여도 그림 11에 나타난 배출시설의 영향은 사례에 따라 매우 변화가 심하다.

차량 배출과 비교하여 사례별로 배출시설의 영향이 변화를 보이는 이유를 살펴보고자 그림 12에서는 대표적 예로써, 방지설비의 가동 중단에 의하여 1시간 평균이 4.11 ppm까지 상승하였으나 8시간 평균은 거의 변하지 않았던 사례 3, 20시에 대하여 배출시설 배출과 차량 배출에 의한 농도 분포를 비교하였다. 참고로 사례 3, 20시의 기상은 남동풍이 2.5 m/s 이상 강하였다 북동풍이 불면서 풍속이 0.5 m/s 수준으로 떨어지고 기온도 낮아지는 중이었다. 먼저 1시간 평균의 경우를 보면 배출시설 배출의 영향은 남동풍이 강할 때 북서쪽으로 확산되었던 형태가 남아있는 상태에서 낮은 풍속의 북동풍과 함께 오염원에 아주 인접하여 남서쪽으로 좁지만 고농도 영역이 발달하고 있다. 반면 8시간 평균의 경우는 그 이전부터의 풍향 변화의 결과로, 막상 20시에 1시간 평균 농도가 크게 상승하였음에도 결과는 농도가 중첩되었던 배출시설 서쪽으로 최고 0.3 ppm 정도의 낮은 농도가 점점 나타날 뿐이다. 점오염원 형태의 배출시설의 영향이 8시간 평균에서 농도가 크게 낮아진 것과는 달리 면오염원 형태의 차량 배출은 전체적 분포가 부드러워졌을 뿐 절대 농도 값은 거의 유사하다.

결국 요약하면, (1) 본 연구의 배출시설 배출은 기본적으로 점오염원 형태의 배출이기 때문에, 방지설비를 가동하지 않아 배출이 크게 증가하더라도 지표 부근의 넓은 지역에서 배출이 이루어지는 차량 배출의 영향을 크게 넘어서는 고농도는 쉽지 않았다. (2) 배출이 밀집됨으로써 고농도가 나타날 수 있으나 이 경우 역시 배출이 운동량과 부력을 가지고 상승하다가 지표면으로 내려서는 과정에서 대부분 크게 확산되고 따라서 배출원에 인접한 곳에서 국지적 형태의 고농도가 가능할 따름이었다. (3) 일변화를 보이는 차량 배출에 비하여 변화가 거의 없는 산업체 배출 특성으로 인하여 8시간 평균에서는 영향이 커질 것을 예상할 수 있으나 오히려 평균화 시간이 늘어남에 따라 풍향 변화의 영향으로 8시간 평균의 상승폭은 1시간 평균보다도 월등 작았다.

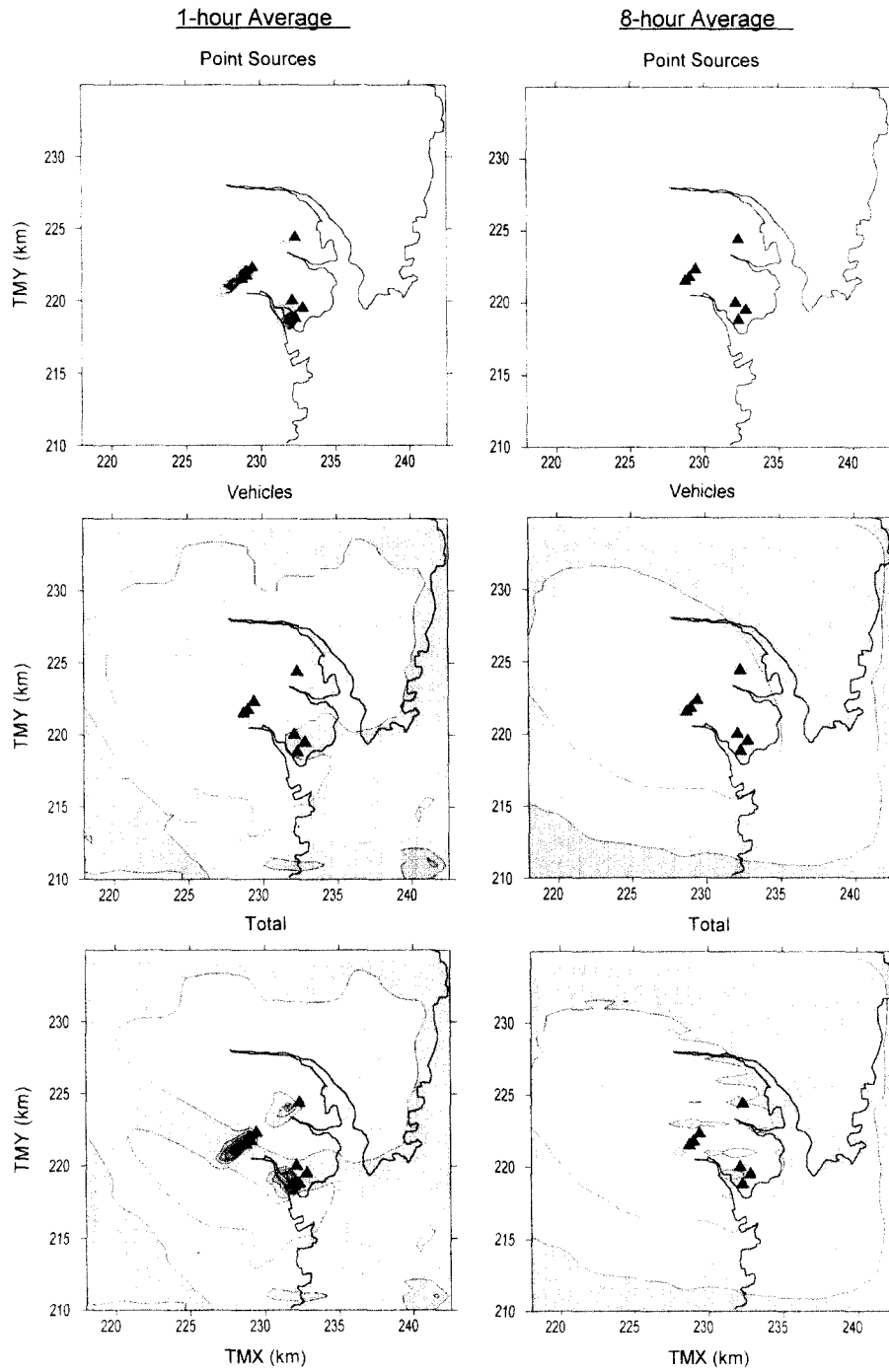


Fig. 12. Distributions of CO concentration at 20:00 on Episode 3 caused by the emission from the target sources, from vehicles, and from all sources. Solid triangles denote CO emission facilities. Filled contours represent concentration from 0.1 to 2.9 ppm at intervals of 0.2 ppm.

## 7. 결 론

점오염원 형태의 울산지역 배출시설을 대상으로 현재 가동 중인 일산화탄소 방지설비 가동을 중단 하였을 때 배출 증가로 인하여 주변지역의 일산화탄소 농도가 환경기준을 초과할 수 있는지의 여부를 삼차원 수치모델을 이용하여 조사하였다. 조사 결과 보다는 조사 과정에 중점을 두어, USEPA (1999) 등 지침을 참조할 수 있는 가우시안 모델과 달리 필요성과 함께 사용이 증가하고 있음에도 사용법에 대하여서는 논의가 미흡한 삼차원 수치모델에 대하여 이용의 한 전형을 제시하고자 하였다.

무엇보다도 삼차원 수치모델은 과거의 사례에 근거하여 미래를 예측하게 된다는 점을 강조하였다. 가우시안 모델도 과거의 사례를 이용하기는 하나 보통 3~5년의 기록을 이용하고, 최고농도를 중심으로 결과를 분석하며, 개발부터 활용에 이르기까지 보수적 예측이 가능하도록 곳곳에 안전 장치가 마련되어 있다. 반면 삼차원 수치모델은 특정한 날의 기록을 이용하며, 여유를 두기보다는 정확하고 상세한 예측을 지향한다. 당연히 사례일 혹은 대상 현상이 잘못 선정된다면 모델링이 아무리 정확하더라도 정당한 환경영향평가는 불가능하다.

본 연구에서는 (1) 대상지역의 과거 기록을 검토하여 대기환경의 변화를 분석하였고, (2) 기준물질에 대하여 환경기준 초과를 조사하는 만큼 고농도 발생 특성을 살펴보았으며, 이를 토대로 (3) 사례일을 선정하여 3차원 기상 자료를 마련하였으며, (4) 사례일의 배출 조건에서 계산치가 측정치와 합당한 범위에서 일치하는가를 확인한 후, (5) 목적하는 바 배출 변화에 의한 주변지역의 대기질 변화를 조사하였다. 그러나 대상 기간의 기상을 4개의 군집으로 분류하여 각각의 군집으로부터 사례일을 선정하였음에도 불구하고 과연 이들 사례들이(미래의 변화까지를 포함할 수는 없다 하여도) 과거에 고농도가 가능할 수 있는 기상을 충분히 대표하였는지는 현재로서는 판별이 곤란한 것이 사실이다. 기상의 분류와 사례 선정에 관하여 보다 많은 연구가 필요하며, 풍향 등 기상 변화에 민감한 점오염원의 환경영향 평가의 경우 더욱 그러하다.

## 감사의 글

본 연구는 한국석유화학공업협회와 울산지역환경보전협회의 지원으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 기상청 (1991) 한국기후표. 제II권 월별 평년값 (1991~1990).
- 김영성, 손재익 (1993) 점오염원과 먼오염원의 대기환경영향 분석, 한국대기보전학회지, 9, 168-173.
- 김영성, 오현선, 윤도영, 장영수 (1998) 복잡지형의 대기확산 모델 비교, 한국대기보전학회지, 14, 81-93.
- 김영성, 김병욱, 오현선, 김진영, 김종수 (2000) 바람장의 공간적·시간적 해상도가 누출물질 확산에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 16, 327-338.
- 김진영, 김영성 (2001) 상세한 기상관측 자료를 이용한 1997년 서울·수도권 고농도 오존 사례의 모델링, 한국대기환경학회지, 17, 1-17.
- 문길주, 김영성, 심상규, 김용표, 오현선, 김진영, 이종훈, 진현철, 박홍목 (1997) 부산환경시설 (폐기물 소각장)에서 배출되는 다이옥신 등 대기오염물질의 대기환경영향 사전 분석, BSI1701-5860-6, 한국과학기술연구원.
- 오현선, 김영성 (2000) 여수지역 대기확산의 수치 모사-II. 일사에 의한 일변화, 한국대기환경학회지, 16, 225-236.
- 환경부 (2000) 환경통계연감.
- 환경부, 국립환경연구원 (1998) 대기오염물질 배출량 ('97).
- Dudhia, J., D. Gill, Y.-R. Guo, K. Manning, J. Michalakes, A. Bourgeois, W. Wang, and J. Wilson (2001) *PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3*, National Center for Atmospheric Research, <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/documents/tutorial-v3-notes-pdf.html> (accessed in January 2001).
- Kim, J.Y., Y.S. Ghim, Y.P. Kim, and D.D. Dabdub (2000) Determination of domain for diagnostic wind field estimation in Korea, *Atmospheric Environment*, 34, 595-601.
- McRae, G.J., A.G. Russell, and R.A. Harley (1992) *CIT Photochemical Airshed Model*, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- Scire, J.S., F.R. Robe, M.E. Fernau, and R.J. Yamartino

- (2000a) *A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5)*, Earth Tech, Concord, MA.
- Scire, J.S., D.G. Strimaitis, and R.J. Yamartino (2000b) *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5)*, Earth Tech, Concord, MA.
- Seaman, N.L. (2000) Meteorological modeling for air-quality assessments, *Atmospheric Environment*, 34, 2231-2259.
- SPSS (1997) *SPSS Base 7.5 for Windows 사용자 안내서*, SPSS Korea, Seoul, Korea.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1990) *New Source Review Workshop Manual (Draft)*, Research Triangle Park, NC.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1995) *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. Volume I - User Instructions*, EPA-454/B-95-003a; *Volume II - Description of Model Algorithms*, EPA-450/B-95-003b, Research Triangle Park, NC.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1999) *Guideline on Air Quality Models*, 40 CFR Ch.1, Appendix W to Part 51.