

## 연안도시지역에서 대기오염의 3차원 수치예측모델링 - II. 대기오염물질의 이동과 확산예측 -

원 경 미 · 이 화 운  
부산대학교 대기과학과  
(2000년 11월 27일 접수; 2001년 10월 10일 채택)

## 3-D Numerical Prediction Modeling of Air Pollution in Coastal Urban Region - II. Movement and Diffusion Prediction of Air Pollutants -

Gyeong-Mee Won and Hwa-Woon Lee

Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea.  
(Manuscript received 27 November, 2000; accepted 10 October, 2001)

To investigate air quality away from the coastal urban source region, we used a hybrid Eulerian - Lagrangian method which can describe the formation, transport, transformation and deposition processes in complex terrain, with inclusion of shipping sources that were considered to be important emission in the coastal urban region. The result of the Eulerian advection - diffusion prediction was quite similar to that of the Lagrangian particle diffusion prediction. It showed that pollutants emitted from piers can affect the part of inland, especially Dongrae and the coastal area. Those emitted from Sasang and Janglim industrial complexes can affect Hwamyong and the coastal, respectively. During the daytime the concentration was low due to large deposition flux and terrain effect.

Key words : air quality, air pollutants, coastal urban region, complex terrain, hybrid Eulerian-Lagrangian model, shipping sources, deposition flux

### 1. 서 론

1990년 제29회 MEPC(Marine Environment Protection Committee)의 보고시에 의하면 각국의 국내 해상수송을 포함하지 않은 국제해상 수송에만 기인하는 SOx, NOx의 배출량은 각각 지구 전체의 SOx, NOx 배출량의 4%, 7%를 차지하고 있어 선박에서의 배출가스도 대기오염에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다. 이에 따라 선박에서의 대기오염 문제가 급속히 확산되기 시작하면서 대책의 필요성이 요구되어졌다. 이는 화석연료의 연소에 의해 CO<sub>2</sub>, SOx, NOx 등의 대기오염물질이 발생되어 기후 온난화 현상과 산성우 등의 환경문제가 될

수 있다는 것과, 고정배출원이나 자동차 등 내륙에서의 배출규제를 위해서도 선박이 대기에 미치는 영향을 고려하지 않을 수 없다는 것이다. 또한 선박에서는 육상에서 사용하지 않는 저질연료가 선박에서 사용되어지고 있다는 점 등을 감안하여 볼 때 선박에서 배출되는 대기오염물질의 비율이 높아질 수 있어 대기환경을 악화시킬 수 있는 가능성이 크다.<sup>1)</sup> 따라서 연안도시지역인 경우 내륙의 여러 발생원에서 발생하는 대기오염물질이외에 해안으로부터 수송되어 지는 SOx, NOx의 영향을 받을 수 있으므로 연안도시지역의 대기질 관리를 위한 규제 대상 물질이 된다.

기존의 연구들에서는 오염물질의 이동을 라그랑지 입자 확산 모델 (Lagrangian Particle Dispersion Model)을 이용하여 기상 예측모델에서 얻은 평균 바람장과 난류장을 따라 방출된 물질들의 확산과 수송을 묘사하여 왔다.<sup>2),3)</sup> 또한 오염물질의 농도 예

Corresponding Author: Hwa Woon Lee, Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National Univ., Busan 609-735, Korea  
Phone : +82-51-510-1753  
E-mail : hwlee@hyowon.pusan.ac.kr

측을 위해 오일러 이류, 확산모델(Eulerian Advection-Diffusion Model)이 사용되어지는데, 이상인 등<sup>4)</sup>이 STEM II를 이용하여 한국과 중국 동부지역 대기오염물질의 이동과 화학, 침착을 고려한 수치모의를 하였다. 정관영<sup>5)</sup>은 대기오염물질의 장거리 수송의 대표적 예인 황사의 이동경로를 추적하기 위해 착지점의 4개 층에서 3차원 기상장을 이용하여 후진 유적선을 구한 다음, 착지점의 농도에 대한 각각 발원지에서의 기여도를 추정하였다. Hess<sup>6)</sup>는 대규모 점오염원이 대기질에 미치는 영향의 예측과 평가를 위한 hybrid 오일러-라그랑지 광화학 모델을 개발하였다.

따라서 본 연구에서는 부산연안 도시의 특정 배출원에서 배출되어진 대기오염물질의 확산과 수송 특성에 따른 대기질 변화를 연구하기 위하여 기상장을 따라 이동하는 오염물질의 농도를 광화학반응과 침착과정을 모사해 줄 수 있는 오일러 이류확산 모델과 난류확산 특성을 고려하여 이동하는 오염물질의 연속적인 위치를 결정해 주는 라그랑지 입자 확산모델을 혼용하는 hybrid 오일러-라그랑지 방법을 사용하였다. 또한 연안도시지역의 배출특성을 고려하여 선박 배출량을 배출원에 포함하여 모델링하였다.

## 2. 선박배출원을 고려한 대기질 예측 모델의 구성

### 2.1 오일러 이류, 확산 모델

지형을 고려한  $z^*$  좌표계에서 오일러 이류, 확산 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u \frac{\partial C_i}{\partial x} - v \frac{\partial C_i}{\partial y} - w^* \frac{\partial C_i}{\partial z^*} + \left( \frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left( K_V^{(\rho)} \frac{\partial C_i}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H^{(\rho)} \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H^{(\rho)} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + a_{spi} + R_i \quad (1)$$

여기서  $C_i$ 는 오염물질의 농도,  $i$ 는 오염물질의 종류,  $u, v, w^*$ 는 각각  $x, y, z^*$  방향의 속도 성분,  $K_V^{(\rho)}$ 와  $K_H^{(\rho)}$ 는 오염물질의 수직, 수평확산계수,  $a_{spi}$ 는 배출량,  $R_i$ 는 반응항에 의한 생성·소멸율을 나타낸다.

지형을 고려한 좌표계에서 연직 고도  $z^*$ 는

$$z^* = \frac{z - z_G(x, y)}{s(x, y, t) - z_G(x, y)} \quad (2)$$

이고, 여기서  $z$ 는 고도,  $z_G$ 는 지형고도,  $\bar{s}$ 는 계산영역 상면의 고도,  $s$ 는 질량보존을 고려하여 상면의 경계높이가 시·공간으로 변화하는 물질표면이다.

### 2.1.1 내륙지역 및 연안지역에서 오염물질의 배출량 산정

가정난방에 의한 배출량은 격자별(1km×1km) 총 연료사용량에 면 오염원에 대한 배출계수<sup>7)</sup>를 곱하여 산정하였다. 격자별 총 연료사용량은 격자내 주택유형 분포비에 주택유형별 연료 종류별 사용비를 곱해서 다음과 같이 산정하였다.

$$F_i^{Gn} = F_i^G \times \sum_{k=1}^n \left[ \frac{H_k^{Gn} P_k^n}{\sum_k H_k^{Gn}} \right] \quad (3)$$

여기서,  $F_i^{Gn}$ 은  $G$  구에 속하는  $n$  격자내의  $i$ 종류 ( $i$ ; 연탄, 등유, 경유, B-C유, 프로판, LNG)의 연료사용량,  $F_i^G$ 는  $G$  구에서  $i$ 종류의 연료사용량,  $H_k^{Gn}$ 은  $G$  구에 속하는  $n$  격자내의 주택유형이  $k$ 인 주택비율 ( $k$ ; 일반주택, 아파트, 기타),  $P_k^n$ 은  $n$  격자내의  $k$ 유형주택에서 사용하는 연료종류의 비율이다. 그리고 4, 5종의 배출업소에 의한 배출량의 산정은 각 업소들의 주소와 행정지도를 이용해 각 업소별 위치를 격자내 설정하여 격자별로 연료사용량에 점 오염원 배출계수<sup>7)</sup>를 곱하여 4, 5종 배출업소에 의한 면 오염원 배출량을 산정하였다.

선 오염원에 의한 배출량의 산정은 격자별 각 차량의 운행대수와 각 차량별 일일 평균 주행거리를 곱하여 각 격자에 대한 1일 총 운행거리를 구하고, 구해진 격자별 1일 총 운행거리에 선 오염원에 대한 배출계수<sup>8)</sup>를 곱하여 선 오염원에 대한 배출량을 산정하였다.

점 오염원은 부산광역시 공해 배출업소자료<sup>9)</sup> 중 연간 고체연료로 환산한 연료 사용량이 1,000톤 이상인 대기분야 1, 2, 3종의 배출업소를 대상으로 하였다. 격자별로 각 업소에 대해 연료종류에 따라 연료사용량을 계산하고 점오염원에 대한 배출계수를 곱하면 점오염원에 의한 배출량을 산정할 수 있다.

연안지역의 배출량 산정에서 대상선박은 부산항을 입, 출항하는 여객선, 컨테이너선, 유조선, 화물선, 어선 등이며, 선박에 탑재되어 있는 기관으로서 는 주기 디젤기관, 보기 디젤기관, 보조 보일러 등이 있는데, 각각의 기관은 선박의 운항상황이나 정박에 따라 달리 가동되므로 항행중과 정박중으로 나누어 산정하였다. 배출량의 산정에는 대상선박 1척마다의 운항제원(선종, 총 톤수, 탑재기관의 종류, 대수 등)과 탑재기관의 가동상황(부하율, 하역시간 등)으로 1km×1km 격자별, 항로별로 선박교통량 비중과 주야율 등을 고려하여 산정하였다.

배출량의 산정에 필요한 선박항행에 관한 자료는 성능시험과 설문조사, 방선조사를 실시하였던 외국의 선행연구<sup>10),11)</sup>에서 인용되었거나 부분적으로 부

산량의 실정에 맞게 변형시킨 것을 종합한 것이다. 자세한 산정과정은 선행연구<sup>12), 13)</sup>에 수록되어 있다.

2.1.2 기상장

기본적인 기상현상을 표현하기 위하여 이용한 3차원 중규모 대기유동의 기초방정식은 운동량, 질량, 열에너지 등의 보존식으로, 운동방정식, 열역학방정식, 비습방정식, 연속방정식, 정역학방정식이다<sup>14)</sup>.

2.1.3 광화학반응

광화학반응 모델에서 사용한 반응 메카니즘은 이화운<sup>15)</sup>의 연구에서 사용한 PRM(Photochemical Reaction Model)이며, 이는 총 18개의 반응식으로 구성되어 있다(Table 1). 여기서 K1~K18은 반응속도상수,  $h\nu$ 는 파장 430nm 이하의 태양에너지, M은 질소 및 산소(= 106ppm), HC는 비메탄계 탄화수소, R은 알킬기, HO<sub>2</sub>, RO<sub>2</sub>, HO는 유리기,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ 는 화학 반응 계수로서 chamber실험에 따라 각각 0.5, 1.1, 0.87, 1.5, 0.5, 1.0으로 두었다. 반응식 중에서 반응속도상수는 수많은 감도해석으로부터 반응식의 중요성을 검토하여 결정된 것으로, 그 중 K1은 광분해 속도상수이며 태양의 고도와 에너지의 강도에 따라 변화한다.

광화학반응 모델을 구성하고 있는 반응식을 각 물질의 반응속도에 대해 정리하면 연립 상미분방정식으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 주요물질(NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub>, HC, RCHO) 농도의 시간변화는 1차 선형 미분방정식의 해를 구하는 지수함수근사법을 사용하여 구하였다. 이는 선행연구<sup>16)</sup>에서 계산상의 안정성을 검토한 바 있다.

2.1.4 건성침착

건성침착은 식(1)의 지표면 경계조건에서 다루어진다. 건성침착속도의 개념은 지표로 침착되는 침착량을 계산하기 위해서 사용되어진다.

$$F_d = V_d \times C_r \tag{11}$$

여기서  $F_d$ 는 건성침착 속(flux)이며,  $V_d$ 는 건성침착속도,  $C_r$ 는 constant layer에서의 농도이다. 가스에 대한 건성침착속도는 3가지 저항에 의해 다음과 같이 표현되어지는데,

$$V_d = \frac{1}{(R_a + R_b + R_c)} \tag{11}$$

여기서  $R_a$ 는 공기 역학적 저항(aerodynamic resistance),  $R_b$ 는 점성층 저항(quasi-laminar sublayer resistance), 그리고  $R_c$ 는 지표면 저항(canopy resistance)이다.

공기 역학적 저항은 저층 대기에서의 풍속과 안정도 그리고 land-used type의 지표 거칠기로 계산되며 다음과 같이 표현된다.

Table 1. Photochemical Reaction Mechanism.

No	Reaction	Rate coef	Unit
1	$NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O$	K <sub>1</sub>	min <sup>-1</sup>
2	$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	$2 \times 10^{10}$	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
3	$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$	28	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
4	$HO + NO_2 + M \rightarrow HNO_3$	0.011	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
5	$HO_2 + NO \rightarrow HO + NO_2$	300	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
6	$RCHO + h\nu \rightarrow CO + \alpha_1 RO_2 + (1 - \alpha_1) \cdot 2HO$	$K_1 \times 0.002$	min <sup>-1</sup>
7	$RCHO + HO \rightarrow \alpha_1 RO_2 + (1 - \alpha_1) \times (CO + HO_2)$	21000	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
8	$RO_2 + NO \rightarrow \alpha_2 RCHO + \alpha_3 HO_2 + NO_2$	470	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
9	$RO_2 + NO_2 \rightarrow PAN$	$K_9(6)$	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
10	$HC + O \rightarrow \alpha_4 HO_2 + \alpha_5 RO_2 + \alpha_6 RCHO$	5500	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
11	$HC + HO \rightarrow RO_2$	22000	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
12	$HC + O_3 \rightarrow \alpha_4 HO_2 + \alpha_5 RO_2 + \alpha_6 RCHO$	0.0123	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
13	$2HO_2 \rightarrow H_2O_2$	5300	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
14	$O_3 + NO_2 \rightarrow NO_3 + O_2$	$K_4(0.048)$	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
15	$NO_3 + NO_2 \rightarrow N_2O_5$	6800	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
16	$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$	K <sub>16</sub>	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>
17	$N_2O_5 \rightarrow NO_3 + NO_2$	15	min <sup>-1</sup>
18	$NO_3 + NO \rightarrow 2NO_2$	11000	ppm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup>

$$R_a = \frac{\ln(z_r/z_0) + \psi_H}{\kappa u_*} \tag{12}$$

여기서  $z_r$ 은 deposition layer의 높이이고,  $z_0$ 는 거칠기 길이,  $\psi_H$ 는 보편함수,  $\kappa$ 는 von Karman 상수,  $u_*$ 는 마찰속도이다.

점성층을 통한 수송에 대한 저항은 (Pleim et al<sup>16)</sup>, Wesely와 Hicks<sup>17)</sup>)

$$R_b = \frac{1}{u_*} \left( \frac{\nu}{D_j} \right)^{2/3} \tag{13}$$

을 사용하였다. 여기서  $D_j$ 는 j종류의 가스의 diffusivity이고,  $\nu$ 는 공기의 점성도이다.

그리고 canopy 저항은 다른 층의 저항보다 지표의 성질을 잘 고려해서 계산하여야 하므로

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_{cut}} + \frac{1}{R_{cw}} + \frac{1}{R_g} \tag{14}$$

로 나타내었다. 여기서  $R_b$ 는 기공저항(stomatal resistance)과 엽육저항(mesophyll resistance)을 포함하고,  $R_{cut}$ 는 건조한 표피저항(dry cuticle resistance),  $R_{cw}$ 는 습한 표피저항(wet cuticle resistance),  $R_g$ 는

지표면저항(ground resistance)를 각각 나타낸다. 본 연구에서 사용한 건성침착 모델에 관한 자세한 내용 및 수치실험결과는 원경미 등의 연구<sup>18)</sup>에 수록되어 있다.

### 2.2 라그란지 입자 확산예측 모델

대기오염물질의 이동경로는 2.1.2의 기상장에서 계산되어진 바람장과 난류장을 고려한 라그란지 입자확산 모델을 사용하여 오염물질의 연속적인 위치를 계산하였다.

배출된 입자의 연속적인 3차원적 위치를 결정하는 방법으로 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$X_i(t + dt) = X_i(t) + \frac{1}{2} \left[ \frac{du_i}{dt} \right] dt^2 \quad (15)$$

이다. 만약,  $\frac{du_i}{dt} = constant$ 이면, 위 식은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$X_i(t + dt) = X_i(t) + [u_i(t)]dt \quad (16)$$

여기서  $X_i(t)$ 는 오염물질의 현재의 위치를 나타내고,  $X_i(t + dt)$ 는  $dt$  후의 오염물질의 새로운 위치를 나타내며,  $dt$ 는 시간변화를 표시하고,  $u_i$ 는 입자가 위치한 곳에서의 종관바람의 중규모 바람성분과 난류성분을 합한 바람성분이다.

## 3. 대기오염의 이동과 확산 예측 모델링

### 3.1 계산조건 및 계산방법

내륙지역의 차량이나 해안의 선박과 같은 이동발생원과 공장이나 주택 등의 고정발생원에 대해서는 부산지역 교통량의 일변화 및 시간변화에 따른 배출강도를 고려하여 배출비율을 설정하였다.

계산대상으로 하는 오염물질은 선박배출에 기인한 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>이고, 수치모의를 위한 지표면에서의 초기농도는 각 오염물질에 대하여 지형특성에 따라 국지순환계가 잘 발달하는 전형적인 여름철의 평균농도를 입력하였으며, 이들 값들은 지표면 부근에서 측정된 값으로, 연직방향으로의 농도분포는 높이 100m까지는 같은 값으로 두었고, 100m이상에서는 계산영역 상한에서 1/10이 되게 선형적으로 감소하도록 모델화하였다.

상면 경계조건으로는 계산영역 상면에서 처음 설정한 초기 농도 값을 가지도록 하였고, 지표면에서는 침착현상을 고려하여 계산되어진 침착 속  $F_d$ 와 지상배출량  $q_{sf}$ 를 이용하여 다음 식과 같이 두었다.

$$K_V^{(c)} \frac{\partial C}{\partial z} = F_d - q_{sf} \quad (15)$$

측면 경계조건으로는 유입측에서는

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C_i}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

로 하였고, 유출측에서는 경계에서 내측의 2점 값으로부터 선형외삽하였다.

계산에 사용되어진 영역은 Fig. 1과 같이 부산광역시를 나타내는 성긴격자 영역(coarse mesh grid, 110km×110km, 수평격자간격; 5km)과 부산지역만을 나타내는 상세격자 영역(fine mesh grid, 31km×31km, 수평격자간격; 1km)이다. 대기오염 농도 예측모델의 수치모의 실행은 부산광역시를 포함하는 성긴격자영역의 계산을 먼저 수행하고, 이를 경계치로 하여 상세격자영역을 계산하는 nesting 방법을 사용하였다. 경계조건의 설정방법은 Clark와 Rarley<sup>19)</sup>의 수치실험에 의해 계산정밀도가 높은 2차 삼입식을 사용하였다. 기상장과 라그란지 입자확산 모델의 실행결과는 성긴격자 영역에서 나타내었고, 오일러이류, 확산 예측 모델링은 부산지역의 지형적 특성이 세밀하게 나타나는 상세격자 영역에서 실행한 결과만을 나타내었다.

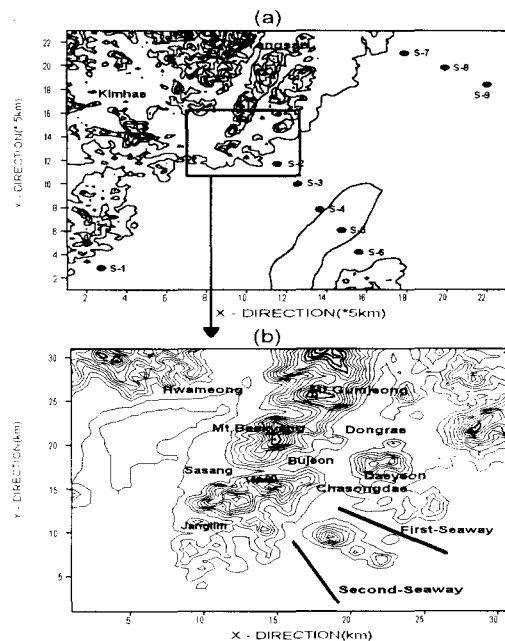


Fig. 1 (a) The model domain of the coarse mesh grid in the coastal urban area of Pusan.

(b) The inner box shows the fine mesh grid domain. (contour interval : 100m)

계산방법은 기상장 예측모델에 대기중에서의 이류, 확산과정과 광화학반응, 침착과정을 고려한 대기오염 농도 예측모델을 결합하여 오염물질의 농도를 계산하였고, 기상장의 계산대상일인 해륙풍이 발생하는 8월의 전형적인 여름날로 하였다. 부산 연안

도시지역에서 선박배출원을 고려한 대기오염물질의 이동 및 확산은 기상장과 광화학반응 및 침착과정을 모두 묘사할 수 있는 오일러 이류, 확산 모델을 이용하여 추정하였으며, 특정 배출원에서의 수송과정은 라그랑지 입자확산모델을 이용하여 예측하였다. 부산광역시 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>의 배출량 분포를 Fig. 2에 나타내었다. SO<sub>2</sub>는 부산광역시의 주 오염원이 되는 사상과 장림공단지역에서의 배출이 많은 부분을 차지하고 있을 뿐만 아니라, 연안부근에서 높게 나타나고 있다. NO<sub>2</sub> 배출의 경우 전 지역에 고루 분포하기는 하지만 공단지역과 연안부근의 배출이 많은 것을 볼 수 있다.

3.2 기상장 수치모의

Fig. 3은 지상 50m고도에서의 시간에 따른 모델 바람의 분포를 나타낸 것이다. 1000LST에 해풍이 발달하기 시작하며 1300LST~1700LST에는 낮은 지형에 의한 지형류는 거의 나타나지 않고, 곡풍에 해륙간의 큰 온도차로 인한 해풍이 합세하여 전체적으로 남풍이 우세하게 나타나고 있으며, 동도사 오른쪽의 높은 지형으로 수렴대가 나타나고 있다. 2200LST에는 뚜렷한 해풍의 발달을 보기 어렵고 0100LST~0500LST에는 육풍이 불고 있으나 낮 시간대에 비해 바다와 육지간의 온도차가 적어 그 풍속은 작게 나타났다. 자세한 분석내용은 선행연구<sup>(2))</sup>에 수록되어 있다.

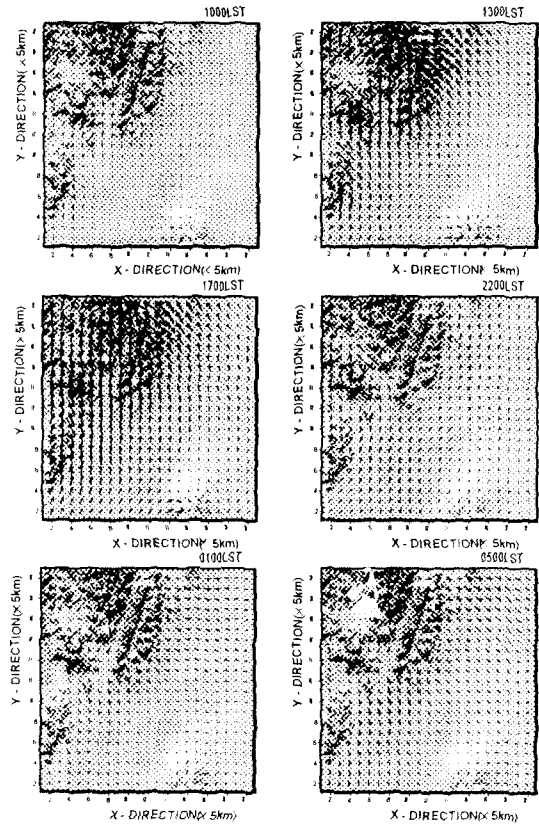


Fig. 3. Horizontal wind fields at z\*=50m in summer.

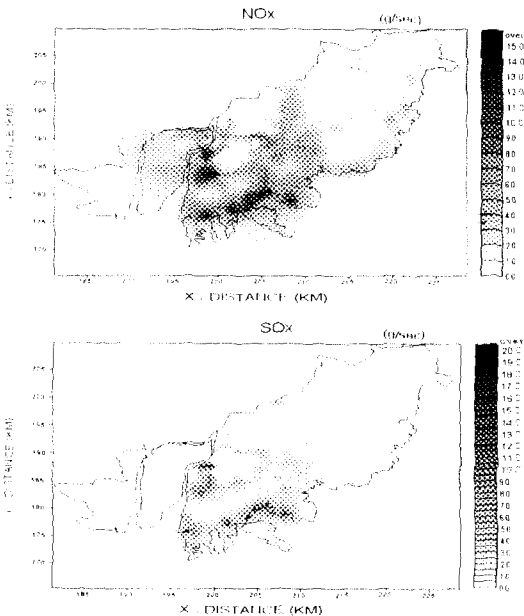


Fig. 2. Spatial distributions of total SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> emissions (g/sec) in Pusan.

3.3. 라그랑지 입자 확산예측

기상장 모델에서 얻어진 결과(Fig. 3)와 라그랑지 입자확산모델을 이용하여 연안에서 배출된 오염물질의 거동을 살펴 보았다. 오염물질의 배출은 선박의 입, 출항이 빈번한 연안부근 1항로와 2항로 4곳에서 오전 8시부터 시작하여 10분에 한 개의 입자를 연속 방출되어 24시간 동안 계속되었다.

Fig. 4에서 보면, 1000LST에는 방출된 오염물질들이 발달하는 해풍과 곡풍의 영향으로 북서 내륙 지역으로 이동하고 있으며, 1300LST에는 2항로에서 방출된 오염물질은 구덕산의 서쪽으로 이동하고 있고, 1항로와 신신대 부두에서 방출된 오염물질은 금정산과 백양산 사이로 수송되고 있다. 1700LST에는 발달한 남풍의 해풍으로 연안 오염물질이 내륙지역으로 빨리 수송되고 있다. 이러한 흐름이 2200LST에는 내륙으로의 수송이 둔화되고 0100LST부터는 육풍이 발달하여 오염물질들이 서서히 바다쪽으로 빠져나가고 있으나, 양산과 김해 그리고 금정산 부근에는 오염물질이 체류하고 있다.

따라서 연안근방 부두에서 배출된 오염물질들은 동해 주변의 내륙지역과 연안의 오염도를 높일 수 있음을 유추할 수 있다.

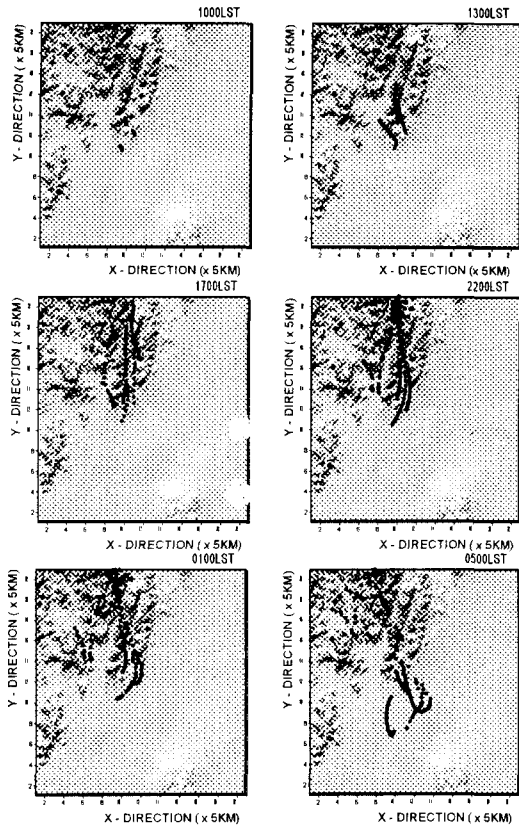


Fig. 4. Spatial distributions of particles emitted from coastal sources.

3.4 오일러 이류, 확산예측

SO<sub>2</sub>의 경우 (Fig. 5) 아침시간(1000LST)에 비교적 농도가 높고 밤시간대에 낮은 전형적인 일변화 형태를 보였다. 특히 부산지역에서 배출강도가 큰 장림과 사상공단에서 농도가 높게 나타날 뿐 아니라 연안주위 제 1항로를 따라 입, 출항과 정박하는 선박에서 배출된 SO<sub>2</sub>는 낮시간 연안부근에서 고농도를 유지하였다. 이는 공단지역에 비하면 규모나 강도면에서는 작지만 최고치는 거의 비슷할 정도의 높은 수준이었다. 또한 낮시간 해풍과 함께 내륙으로 이동하는 SO<sub>2</sub>는 공단지역에서 북쪽 화명동지역으로 이류, 확산됨을 예측할 수 있고, 연안부근 지역에서 동해 내륙지역으로 이류, 확산됨을 예측할 수 있다. 그러나 라그란지 입자 확산예측에서 북쪽 내

륙으로의 이류, 확산에 따른 농도의 증가를 예측할 수 있었으나, 예측된 농도변화는 크지 않았다. 이는 원경미 등<sup>21)</sup>의 연구에서 밝힌 것과 같이 이 지역에서의 침착효과가 컸기 때문이다.

해풍발달과 함께 낮시간대(1000LST~1700LST)에 고농도로 나타났던 내륙지역은 밤시간대(2200LST~0500LST)에 접어들수록 농도가 낮아지면서 내륙쪽으로 이동했다가 다시 육풍과 함께 해안부근으로 이동하여 새벽 무렵 연안의 농도가 다소 높아지는 해륙풍순환에 따른 국지순환 형태를 볼 수 있다.

NO<sub>2</sub>의 경우 (Fig. 6)는 SO<sub>2</sub>와 유사한 해륙풍순환에 따른 일변화 형태를 보였다. 공단지역과 연안주위의 농도가 높았으며, 공단에서 배출된 NO<sub>2</sub>는 북쪽내륙으로 이동하기도 하나 연안쪽으로도 이류, 확산됨을 예측할 수 있고, 연안의 NO<sub>2</sub>는 내륙지역으로 이류, 확산됨을 예측할 수 있다. 밤시간 육풍을 따라 해안으로 내려와 연안의 농도를 높이는 양상은 SO<sub>2</sub>와 동일하였다.

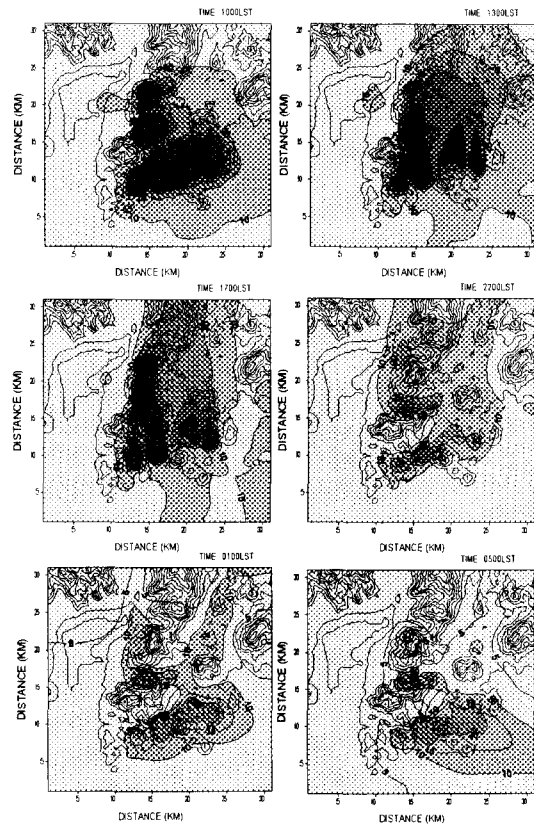


Fig. 5. Concentration distributions of SO<sub>2</sub> (ppb) simulated from air quality modeling at z\*=50m.

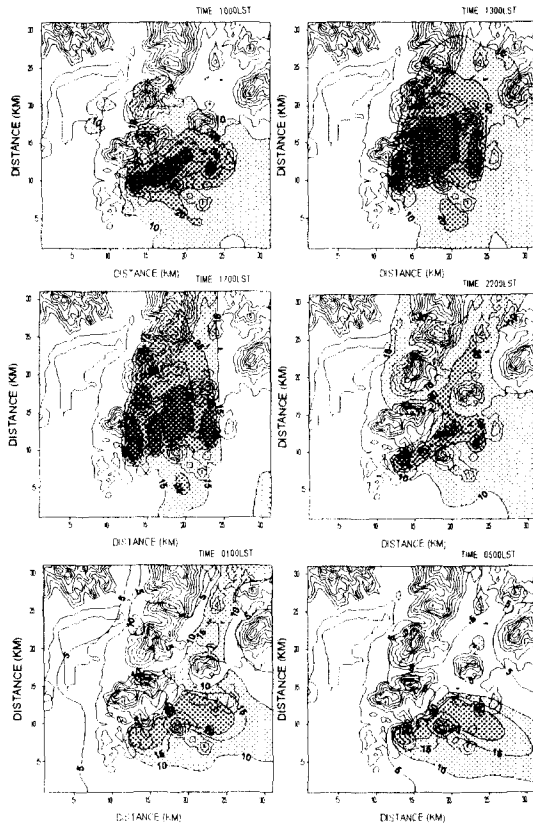


Fig. 6. Concentration distributions of NO<sub>2</sub> (ppb) simulated from air quality modeling at z\*=50m.

#### 4. 결론

연안도시인 부산지역의 여러 배출원에서 배출되어진 대기오염물질의 농도변화를 연구하기 위하여 오일러계에서 오염물질의 이류와 확산, 광화학 반응, 침착과정을 고려한 3차원 수치모델링을 수행하였으며, 확산과 수송특성은 대기오염물질의 수송과정을 잘 모의할 수 있는 라그랑지 입자 확산모델을 사용하여 고찰하였다.

대기오염물질의 라그랑지 입자 확산 예측결과, 4곳의 특정 배출원에서 배출된 오염물질들은 대기유동장을 따라 북쪽 내륙지역 및 북동 내륙지역, 동쪽 방향으로의 이동을 보였다. 또한 이동한 곳에서 체류하는 형태가 나타나기 시작하였는데 이러한 형태는 1500LST에 더 구체적으로 나타나 이 시간대에 오염물질의 체류에 따른 고농도를 예측할 수 있다.

또한 오일러 이류, 확산을 예측한 결과, 부산지역에서 배출강도가 큰 장림과 사상공단에서 농도가 높게 나타날 뿐 아니라 연안주위 제 1항로를 따라 입, 출항과 정박하는 선박에서 배출된 오염물질이

낮시간 연안부근에서 고농도를 유지하였다. 이는 공단지역에 비하면 규모나 강도면에서 작지만 최고치는 거의 비슷할 정도의 높은 수준이었다. 또한 낮시간 해풍과 함께 내륙으로 이동하는 오염물질은 공단지역에서 북쪽 내륙지역으로 이류, 확산됨을 예측할 수 있고, 연안부근 지역에서 북동 내륙지역으로 이류, 확산됨을 예측할 수 있었다. 이 경우 내륙지역에서의 오염물질의 농도변화는 오염물질의 이류, 확산에도 불구하고 크지 않았다. 이는 라그랑지 이류, 확산 예측 결과에서도 이류, 확산에 따른 농도의 증가를 예측할 수 있었으나, 예측된 농도변화는 크지 않았는데, 이것은 오염물질의 침착에 의한 효과에 기인한 것으로 나타났다. 특히 침착 속이 큰 낮시간에는 침착이 잘 일어나 대기 중 농도는 낮게 예측되었고, 지형이 복잡한 공단지역과 북과 북동 내륙지역에서는 침착의 영향이 컸다.

#### 참고 문헌

- 1) 財田武彦, 1995, 大阪灣における船舶からの大氣汚染物質排出量の評価, 神戸商船大學大學院 碩士學位論文.
- 2) Segal, M., R. T. McNider, R. A. Pielke, and D. S. McDougal, 1988: A numerical model study of regional air pollution meteorology of the Greater Chesapeake Bay area Summer day case study, *Atmos. Environ.*, 16, 1381-1397.
- 3) 박순용, 1995, 건성침착이 지상오염농도에 미치는 영향, *한국기상학회지*, 31(2), 97-115.
- 4) 이상인, 조석연, 심상규, 1995, STEM II를 이용한 한국과 중국 동부 지역의 대기오염 물질 이동 화학/ 침착/ 모사에 관한 연구, *한국대기보전학회지*, 11(2), 163-170.
- 5) 정관영, 1996, 퍼프 유적선 모델에 의한 대기오염 물질의 장거리 수송량의 평가, *한국대기 보전 학회지*, 12(2), 167-177.
- 6) Hess G. D., 1989, A photochemical model for air quality assessment : model description and verification, *Atmos. Environ.*, 23 (3), 643-660.
- 7) U. S. Environmental Protection Agency, 1985: *Compilation of Air Pollutants Emission Factors*, 1, AP-42, 4th Edition.
- 8) 국립환경연구원, 1992, 자동차 배출가스에 의한 오염물질 배출량에 관한 연구.
- 9) 부산광역시, 1996, 공해배출업소현황.
- 10) 日本船舶は“い煙研究會, 1985, 船舶におけるのは “い煙量算定手法.
- 11) 日本船用機關學會, 1995, 船舶排出大氣汚染物質

- 消感手法檢討調査.
- 12) 이화운, 김유근, 원경미, 조인숙, 1999, 연안의 선박오염배출을 포함한 부산지역의 대기오염물질 배출량 산정, 한국대기환경학회지, 15(5), 587-598.
  - 13) 이화운, 김유근, 원경미, 1999, 선박배출 오염물질의 영향을 고려한 부산지역 대기질 모델의 개발, 한국환경과학회지, 8(1), 135-144.
  - 14) 이화운, 1987, 지역대기환경의 수치예측 모델에 관한 연구, 일본대판대학 박사학위논문.
  - 15) 이화운, 박종길, 1992, 대기오염물질의 광화학 반응모델에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 8(1).
  - 16) Pleim J., Venkatram A. and Yamartino R., 1984, ADOM/TADAP model development program, ERT P-B980-520, Prepared for OME, AES of Canada and the Umweltbundesamt, West Germany.
  - 17) Wesely M. L., and B. B. Hicks, 1977, Some factors that affect the deposition rates of sulfur dioxide and similar gases on vegetation, J. Air Pollut. Control Assoc., 27, 1110-1116.
  - 18) 원경미, 이화운, 1998, 부산의 지형적 특성을 고려한 O<sub>3</sub>의 건성 침착속도 시뮬레이션, 대기보전학회지, 14(5), 421-431.
  - 19) Clark, T. L., and R. D. Rarely, 1984, Severe downslope windstorm calculations in two and three spatial dimensions using anelastic interactive grid nesting : A possible mechanism for gustiness, J. Atmos. Sci., 41(3), 329-350.
  - 20) 이화운, 이동규, 이태영, 김유근, 원경미, 한한우, 1998, 연안 도시 지역의 대기 흐름 시뮬레이션, 한국기상학회지, 34(1), 75-86.
  - 21) 원경미, 이화운, 1999, 연안도시지역에서 대기오염의 3차원 수치예측모델링 - (I) 침착 현상이 대기질에 미치는 영향예측, 한국대기환경학회지, 15(5), 625-638.