

## 연안도시지역에서 대기오염의 3차원 수치예측모델링 - (I) 침적현상이 대기질에 미치는 영향예측

### 3-D Numerical Prediction Modeling of Air Pollution in Coastal Urban Region

#### - (I) An Effect Prediction for Deposition Phenomenon affecting on Air Quality

원 경 미 · 이 화 운

부산대학교 대기과학과

(1999년 5월 12일 접수, 1999년 9월 14일 채택)

Gyeong-Mee Won and Hwa-Woon Lee

*Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea*

(Received 12 May 1999; accepted 14 September 1999)

### Abstract

Air quality modeling for coastal urban region has been composed of a complex system including meteorological, chemical and physical processes and emission characteristics in complex terrain. In this study, we studied about an effect prediction for deposition phenomenon affecting on air quality in Pusan metropolitan city. In air quality modeling including ship sources, a situation considered deposition process have better result than not considered when compared with observed value. Air pollutants emitted into urban air during the daytime nearly removed through urban atmosphere polluted. Also these phenomena correlated concentration variation connect with sea/land breezes and terrain effect. Therefore we conclude that the concentration was low at daytime when deposition flux is high, and deposition effect on industrial complex and Dongrae region is considerable in particular.

**Key words :** Air quality modeling, coastal urban region, deposition phenomenon, air quality, ship sources, sea/land breezes, terrain effect, deposition flux

### 1. 서 론

도시가 연안에 위치해 있을 경우 대기흐름장은 국지순환제인 해륙풍과 산곡풍의 복합적인 요소에 의해 크게 영향을 받게 되므로, 연안도시에서 대기

오염물질의 농도를 예측하고자 할 때는 연안도시의 흐름장 특성과 배출특성을 잘 고려할 필요가 있다. 그러나 기존의 연구들에서는 연안지역의 대기흐름장 특성은 잘 묘사할 수 있었으나, 연안지역에서 입, 출항 및 정박하는 선박에서 배출되는 배출량은 고려하지 못하고 내륙지역에서 배출되는 점, 선, 면

오염원의 배출만을 고려하여 모델링하였다. 실제 부산과 같은 제 1의 항구도시에서는 남한의 수출, 수입물의 다수가 부산을 통하고 있고, 여러 항과 부두에서의 외항선, 여객선, 어선 등의 입항과 출항 및 정박이 수적인 면 뿐 아니라 크기면에서도 급격히 증가하고 있는 상황이므로, 내륙지역에서 자동차 수의 급증에 따른 오염문제 못지않게 상당히 중요한 문제로 대두되고 있다(부산광역시, 1996a).

본 연구의 선행연구(이화운 등, 1997a)에서 연안 도시인 부산지역의 내륙지역과 연안지역의 배출량을 산정한 결과, 내륙지역의 배출량에 대한 선박배출량의 비율은  $SO_2$  11.7%,  $NO_2$  12.2%로 나타났다. 이는 해안이 내륙지역의 면적에 비해 좁은 영역을 차지함에도 불구하고 상당히 높은 양을 나타내었는데, 연안 도시지역의 대기질에 크게 기여할 것으로 추정되어졌다. 또한 해륙풍순환과 같은 극지풍계의 영향을 지배적으로 받아 연안지역에 위치한 산업시설이나 선박으로부터 배출된 대기오염물질들이 내륙지역에 까지 수송되는 것이 예측되었다(이화운 등, 1997b).

연안도시지역의 대기질 수치모델링에 관한 연구로는 Kitada 등(1986)과 Mahrer(1992) 등이 해륙풍과 산곡풍의 복합적인 극지류가 존재할 때 가상의 유체입자의 이동을 모사하고, 화학반응을 고려한 대기오염물질의 농도를 예측하였다. 또한 原達己(1997)은 일본 대관탄을 대상으로 자동차, 선박, 군소발생원, 항공기 등의 배출량을 산정하여 대기중 고농도 오존을 예측하였다. 田和則(1996)은 선박에서 배출되는 배출량을 추정하고, 이를 모델링한 후 실제 측정농도와 비교분석하여 대기환경에 미치는 영향을 분석하였다.

또한 대기에서 오염물질의 전성침적 제거에 대한 선행연구(Hicks *et al.*, 1980; Garland, 1978; Wesley and Hicks, 1977)의 결과에 의하면,  $SO_2$ 의 경우 대기로 배출된 배출량의 1/3 이상이 제거되어지므로, 전성침적에 대한 적절한 모수화는 지상농도를 추정하는 데 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다. 또한 박순웅(1995)은 지상정규 관측자료와 지역산성 침적 모델(RADM)에 사용된 경험 상수를 이용하여 전성침적속도를 추정하는 방법을 연구하였고, 이를 라그란지 입자확산 모델에 적용시켜 지상오염 농도를 추정해 보았다. 전성침적을 고려한 경우가 지상에서

오염물질이 완전 반사되는 경우에 비하여 지상최대 오염농도가 10% 가량 감소됨을 나타냈다.

따라서 연안도시의 대기질 예측 모델링은 복잡한 지형에서의 배출특성과 기상학적, 화학적, 그리고 물리적 과정을 포함하는 복잡한 시스템으로 구성되어 지는데, 본 연구에서는 연안도시지역인 부산광역시를 대상으로 침적현상이 대기질에 미치는 영향에 중점을 두어 고찰하였다.

## 2. 선박배출원을 고려한 대기질 예측 모델의 구성

대기질 예측모델은 오일러안 연속방정식계에 기초를 두며, 대기오염물질의 배출과 반응을 생성함에 포함시킨 이류·확산방정식은 지형을 고려한  $z'$  좌표계에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u \frac{\partial C_i}{\partial x} - v \frac{\partial C_i}{\partial y} - w^* \frac{\partial C_i}{\partial z^*} + \left( \frac{\bar{s}}{s - zG} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z'} \left( K_V^{(c)} \frac{\partial C_i}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H^{(c)} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + q_{spi} + R_i \quad (1)$$

여기서  $C_i$ 는 오염물질의 농도,  $i$ 는 오염물질의 종류,  $u, v, w^*$ 는  $x, y, z'$ 방향의 속도성분,  $K_V^{(c)}$ 와  $K_H^{(c)}$ 는 오염물질의 수직, 수평확산계수,  $q_{spi}$ 는 배출량,  $R_i$ 는 반응항에 의한 생성·소멸율을 나타낸다.

지형을 고려한 좌표계에서 수직 고도  $z^*$ 는

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

이고, 여기서  $z$ 는 고도,  $z_G$ 는 지형고도,  $\bar{s}$ 는 계산영역 상면의 고도,  $s$ 는 질량보존을 고려하여 상면의 경계 높이가 시간과 장소에 대해 변하는 물질표면이다.

### 2.1 내륙지역 및 연안지역에서 오염물질의 배출량 산정

#### 2.1.1 내륙지역의 배출량 산정

가정난방에 의한 배출량은 격자별(1 km × 1 km) 총 연료사용량에 먼 오염원에 대한 배출계수(EPA, 1985)를 곱하여 산정하였다. 격자별 총 연료사용량은 격자내 주택유형 분포비에 주택유형별 연료 종류별 사용비를 곱해서 다음과 같이 산정하였다.

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

여기서,  $F_i^{Gn}$ 은 G구에 속하는 n격자내의 i종류(i; 연탄, 등유, 경유, B-C유, 프로판, LNG)의 연료사용량,  $F_i^G$ 는 G구에서 i종류의 연료사용량,  $H_k^{Gn}$ 은 G구에 속하는 n격자내의 주택유형이 i인 주택비율(i; 일반주택, 아파트, 기타),  $P_k^n$ 은 n격자내의 k유형주택에서 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(EPA, 1985)를 곱하여 4, 5종 배출업소에 의한 먼 오염원 배출량을 산정하였다.

선 오염원에 의한 배출량의 산정은 격자별 차량의 운행대수와 각 차량별 일일 평균 주행거리를 곱하여 각 격자에 대한 1일 총 운행거리를 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} & \text{격자별 } l\text{차종의 1일 총 운행거리} \\ &= l\text{차종의 1일 평균 주행거리} \times l\text{차종의 등록된 대} \\ & \text{수} \times \text{격자별 도로길이율} \quad (4) \\ & (l; \text{자가용, 택시, 버스, 트럭}) \end{aligned}$$

구해진 격자별 1일 총 운행거리에 선 오염원에 대한 배출계수(국립환경연구원, 1992)를 곱하면 선 오염원에 대한 배출량을 산정할 수 있다.

점 오염원은 부산광역시 공해 배출업소자료(부산광역시, 1996b) 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.

2. 1. 2 연안지역의 배출량 산정

대상선박은 부산항을 입, 출항하는 여객선, 컨테이너선, 유조선, 화물선, 어선 등으로 하며, 선박에 탑재되어 있는 기관으로서의 주엔진 디젤기관, 보조엔진 디젤기관, 보조 보일러 등이 있는데, 각각의 기관은 선박의 운항상황이나 정박에 따라 달리 가동되므로 항행중과 정박중으로 나누어 산정하였다. 배출량의 산정에는 대상선박 1척마다의 운항제원(선

종, 총 톤수, 탑재기관의 종류, 대수 등)과 탑재기관의 가동상황(부하율, 하역시간 등)을 가지고 1km × 1km 격자별, 항로별로 선박교통량 비중과 주야울 등을 고려하여 산정하였다.

배출량의 산정에 필요한 선박항행에 관한 자료는 성능시험과 설문조사, 방선조사를 실시하였던 외국의 선행연구(日本船用機關學會, 1995; 日本船舶は"い煙研究會, 1985)에서 인용되었거나 부분적으로 부산항의 실정에 맞게 변형시킨 것을 종합한 것이다.

1) 항행중의 배출량

어느 선박이 1회의 입항 혹은 출항에서 사용하는 연료의 양 및 오염물질의 배출량은 다음의 산정식에 의해 구하였다.

주엔진(main engine) 디젤기관의 경우,

$$W = 0.21 \cdot (P \cdot A_i)^{0.95} \cdot T_i \quad (5)$$

$$S = W \cdot s \cdot 1/100 \cdot 64/32 \quad (6)$$

$$N = 1.49 \cdot (P \cdot A_i)^{1.14} \cdot T_i \cdot 10^{-3} \cdot 46/22.4 \quad (7)$$

보조엔진(auxiliary engine) 디젤기관의 경우,

$$W = 0.17 \cdot (P \cdot A_i)^{0.98} \cdot T_i \cdot d \quad (8)$$

$$S = W \cdot s \cdot 1/100 \cdot 64/32 \quad (9)$$

$$N = 1.49 \cdot (P \cdot A_i)^{1.14} \cdot T_i \cdot d \cdot 10^{-3} \cdot 46/22.4 \quad (10)$$

보조 보일러(auxiliary boiler)의 경우,

$$W = F \cdot A_i \cdot T_i \quad (11)$$

$$S = W \cdot s \cdot 1/100 \cdot 64/32 \quad (12)$$

$$N = W \cdot n \quad (13)$$

로 하였다. 여기서, W는 연료사용량(kg/척), P는 정격출력(PS),  $A_i$ 는 항행모드별 부하율,  $T_i$ 는 항행모드별 운전시간(h), F는 정격 연료소비량(kg/h · 척), S는 유황산화물 배출량(kg/척), s는 연료 중의 유황분(중량%), N은 질소산화물 배출량(kg/척), n은 질소산화물 배출계수(kg/kg)이다.

2) 정박중의 배출량

어느 선박이 1회의 정박에서 사용하는 연료량 및 오염물질의 배출량은 다음의 보조엔진 디젤기관과 보조 보일러의 산정식에 의해 구해진다.

보조엔진 디젤기관의 산정식은

$$W = 0.17 \cdot P^{0.98} \cdot (A_1^{0.98} \cdot T_1 \cdot d_1 + A_2^{0.98} \cdot T_2 \cdot d_2) \quad (14)$$

$$S = W \cdot s \cdot 1/100 \cdot 64/32 \quad (15)$$

$$N = 1.49 \cdot P^{1.14} \cdot (A_1^{1.14} \cdot T_1 \cdot d_1 + A_2^{1.14} \cdot T_2 \cdot d_2) \cdot 10^{-3} \cdot 46/22.4 \quad (16)$$

와 같고, 보조 보일러의 산정식은

$$W = F \cdot (A_1 \cdot T_1 + A_2 \cdot T_2) \quad (17)$$

$$S = W \cdot s \cdot 1/100 \cdot 64/32 \quad (18)$$

$$N = W \cdot n \quad (19)$$

로 하였다. 여기서,  $A_1$ 은 하역시의 부하율,  $A_2$ 는 비하역시의 부하율,  $T_1$ 은 하역시간(h),  $T_2$ 는 비하역시간(h),  $d_1$ 은 하역시의 가동기관수(기),  $d_2$ 는 비하역시의 가동기관수(기)이다.

### 2.2 대기유동장 모델

지형좌표계에 의한 3차원 중규모 대기유동의 기초방정식은 운동방정식과 온도방정식, 비습방정식, 연속방정식, 정역학방정식, 지중온도방정식으로 구성된다.

연직방향의 확산계수는 대기경계층을 지상으로부터 50m까지를 접지층, 그 위를 에크만층으로 나누어 각각 다른 모델화를 행하였다. 접지층내에서의

수송저항은 Monin-Obukhov의 상사이론을 풍속 및 은위의 연직분포에 적용한 Businger *et al.*(1971)의 무차원 풍속, 은위표현식을 이용하여 운동량과 열플럭스 및 연직방향 확산계수를 구하였다. 에크만층은 대기상태에 따른 난류효과를 잘 표현한다고 생각되는 Yamada(1975)에 의한 종결모델(Closure model)을 사용하여 난류확산계수를 계산하였다.

지표면 열수지방정식은 복사열로 태양복사플럭스와 장파복사플럭스, 대류열로 현열플럭스와 잠열플럭스, 그리고 지중열플럭스, 인공열로 구성된다.

3차원 중규모 대기유동을 나타내는 방정식의 차분식은 explicit method로 이류항에는 풍상차분법, 확산항은 Mahrer와 Pielke(1975)의 Dufort-Frankel법, 시간에 대해서는 전진차분법을 사용하고, 나머지 항들은 중앙차분법을 사용한다. 각 변수에 대한 격자망은 변수의 정의점이 다른 불균등 격자망을 이용하였다.

계산의 초기조건과 경계조건 및 대기유동장에 대한 자세한 내용은 이화운 등(1998)의 연구에 잘 나타나 있다.

### 2.3 광화학반응 모델

광화학반응 모델에서 사용한 반응 메카니즘은 이화운(1987)의 연구에서 사용한 PRM(Photochemical Reaction Model)이며, 이는 총 18개의 반응식으로

Table 1. Photochemical Reaction Mechanism.

No	Reaction	Rate coef.	Unit
1	$NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O$	$K_1$	$min^{-1}$
2	$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	$2 \times 10^{-5}$	$ppm^{-2}min^{-1}$
3	$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$	28	$ppm^{-1}min^{-1}$
4	$HO + NO_2 + M \rightarrow HNO_3$	0.011	$ppm^{-1}min^{-1}$
5	$HO_2 + NO \rightarrow HO + NO_2$	300	$ppm^{-1}min^{-1}$
6	$RCHO + h\nu \rightarrow CO + \alpha_1 RO_2 + (1 - \alpha_1)/2 HO$	$K_1 \times 0.0042$	$min^{-1}$
7	$RCHO + HO \rightarrow \alpha_1 RO_2 + (1 - \alpha_1) \times (CO + HO_2)$	21000	$ppm^{-1}min^{-1}$
8	$RO_2 + NO \rightarrow \alpha_2 RCHO + \alpha_3 HO_2 + NO_2$	470	$ppm^{-1}min^{-1}$
9	$RO_2 + NO_2 \rightarrow PAN$	$K_9(6)$	$ppm^{-1}min^{-1}$
10	$HC + O \rightarrow \alpha_4 HO_2 + \alpha_5 RO_2 + \alpha_6 RCHO$	5500	$ppm^{-1}min^{-1}$
11	$HC + HO \rightarrow RO_2$	22000	$ppm^{-1}min^{-1}$
12	$HC + O_3 \rightarrow \alpha_4 HO_2 + \alpha_5 RO_2 + \alpha_6 RCHO$	0.0123	$ppm^{-1}min^{-1}$
13	$2HO_2 \rightarrow H_2O_2$	5300	$ppm^{-1}min^{-1}$
14	$O_3 + NO_2 \rightarrow NO_3 + O_2$	$K_{14}(0.048)$	$ppm^{-1}min^{-1}$
15	$NO_3 + NO_2 \rightarrow N_2O_5$	6800	$ppm^{-1}min^{-1}$
16	$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$	$K_{16}$	$ppm^{-1}min^{-1}$
17	$N_2O_5 \rightarrow NO_3 + NO_2$	15	$min^{-1}$
18	$NO_3 + NO \rightarrow 2NO_2$	11000	$ppm^{-1}min^{-1}$

구성되어 있다(Table 1). 여기서  $K_1 \sim K_{16}$ 은 반응속도상수,  $h\nu$ 는 파장 430 nm 이하의 태양에너지,  $M$ 은 질소 및 산소( $=10^6$  ppm), 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 양론 계수로서 chamber 실험에 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  $K_1$ 은 광분해 속도상수이며 태양의 고도와 에너지의 강도에 따라 변화한다. 여기서  $K_1$ 은 야외대기에서 계산을 행한 Kitada와 Peter(1980)에 따라 천정각  $Z$ 와 고도  $z$ 의 함수로서 두었다.

또한  $K_{16}$ 은 NO<sub>2</sub>의 소멸반응에 중요한 것으로 chamber의 제질과 반응종의 기체의 혼합상태에 의해 크게 영향을 받으며, 연구자들에 따라 사용하는 값은 차이가 있는데, 초기의 계산에서는  $K_{16}=1.0 \times 10^{-20}$  ppm<sup>-1</sup>min<sup>-1</sup>을 이용하였으나, 池田(1977) 및 그의 연구에서 계산한 NO<sub>2</sub>의 농도가 다른 모델보다는 높게 나타나는 동시에 최고농도가 급격히 나타남으로 산술평균하여  $K_{16}=1.5 \times 10^{-13}$  ppm<sup>-1</sup>min<sup>-1</sup>을 이용하였다.

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 선형미분방정식의 해를 구하는 지수함수근사법을 사용하여 구하였다. 이는 선행연구(이화운 등, 1992)에서 계산상의 안정성을 검토한 바 있다.

2.4 건성침적 모델

건성침적은 식(1)의 지표면 경계조건에서 다루어진다. 건성침적 속도의 개념은 지표로 침적되는 침적량을 계산하기 위해서 사용되어진다.

$$F_d = V_d \times C, \tag{20}$$

여기서  $F_d$ 는 건성침적 속(flux)이며,  $V_d$ 는 건성침적 속도,  $C$ 는 constant layer에서의 농도이다. 가스에 대한 건성침적 속도는 3가지 저항에 의해 다음과 같이 표현되어지는데,

$$V_d = \frac{1}{(R_a + R_b + R_c)} \tag{21}$$

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

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

$$R_a = \frac{\ln(z_d/z_0) - \varphi_H}{\kappa u_*} \tag{22}$$

여기서  $z_d$ 는 deposition layer의 top이고,  $z_0$ 는 roughness length,  $\varphi_H$ 는 보편함수,  $\kappa$ 는 von karman 상수,  $u_*$ 는 마찰속도이다.

점성층을 통한 수송에 대한 저항은 Pleim et al.(1984)과 Wesely와 Hicks(1977)에 의해 근사된

$$R_b = \frac{1}{u_*} \left( \frac{\nu}{D_j} \right)^{2/3} \tag{23}$$

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

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{cut}} + \frac{1}{R_{cw}} + \frac{1}{R_g} \tag{24}$$

로 나타내었다. 여기서  $R_p$ 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 건성침적 모델에 관한 자세한 내용 및 수치실험결과는 원경미와 이화운(1998)의 연구에 수록되어 있다.

3. 연안도시지역 대기오염의 수치예측 모델링

3.1 계산조건 및 계산방법

계산에 사용되어진 영역은 Fig. 1과 같이 부산광역시를 나타내는 성긴격자 영역(coarse mesh grid, 80 km × 80 km, 수평격자간격; 5 km)과 부산지역만을 나타내는 상세격자 영역(fine mesh grid, 31 km × 31

km. 수평격자간격, 1 km)이다. 대기오염 농도 예측모델의 수치모의 실행은 부산광역시를 포함하는 성긴격자 영역의 계산을 먼저 수행하고, 이를 경계치로 하여 상세격자 영역을 계산하는 nesting 방법을 사용하였다. 경계조건의 설정방법은 Clark와 Rarley (1984)의 수치실험에 의해 계산 정밀도가 높은 2차 삼입식을 사용하였다. 실행결과는 부산지역의 지형적 특성이 세밀하게 나타나는 상세격자 영역에서 실행한 결과만을 도시하였다.

계산대상으로 하는 오염물질은 선박배출에 기인된 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>이고, 수치모의를 위한 지표면에서의 초

기농도는 각 오염물질에 대하여 1995년 8월의 평균 농도를 입력하였으며, 이들 값들은 지표면 부근에서 측정된 값으로, 연직방향으로의 농도분포는 높이 100 m까지는 같은 값으로 두었고, 100 m 이상에서는 계산영역 상한에서 1/10이 되게 선형적으로 감소하도록 모델화하였다.

상면 경계조건으로는 계산영역 상면에서 처음 설정한 초기 농도 값을 가지도록 하였고, 지표면에서는 침적현상을 고려하는 경우 계산되어진 침적 속  $F_d$ 와 지상배출량  $q_v$ 를 이용하여 다음 식과 같이 두었다.

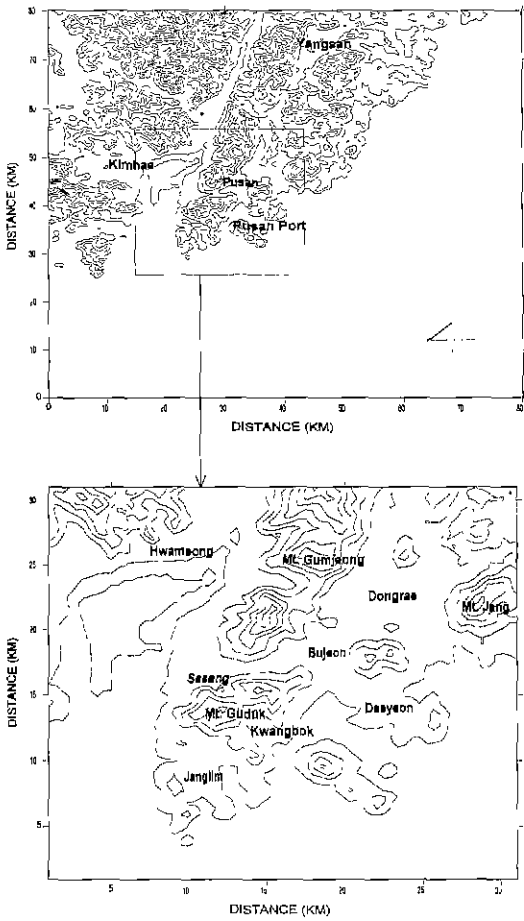


Fig. 1. Calculation region of the coarse mesh grid in Pusan coastal urban area. The inner box shows fine mesh grid domain (contour interval: 100 m).

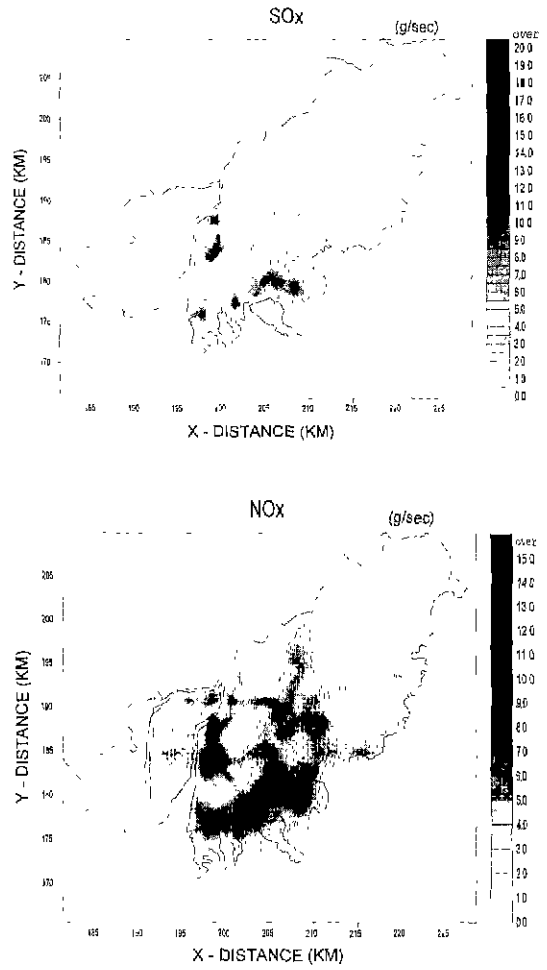


Fig. 2 Emission distribution of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> emitted from total sources in Pusan coastal urban area.

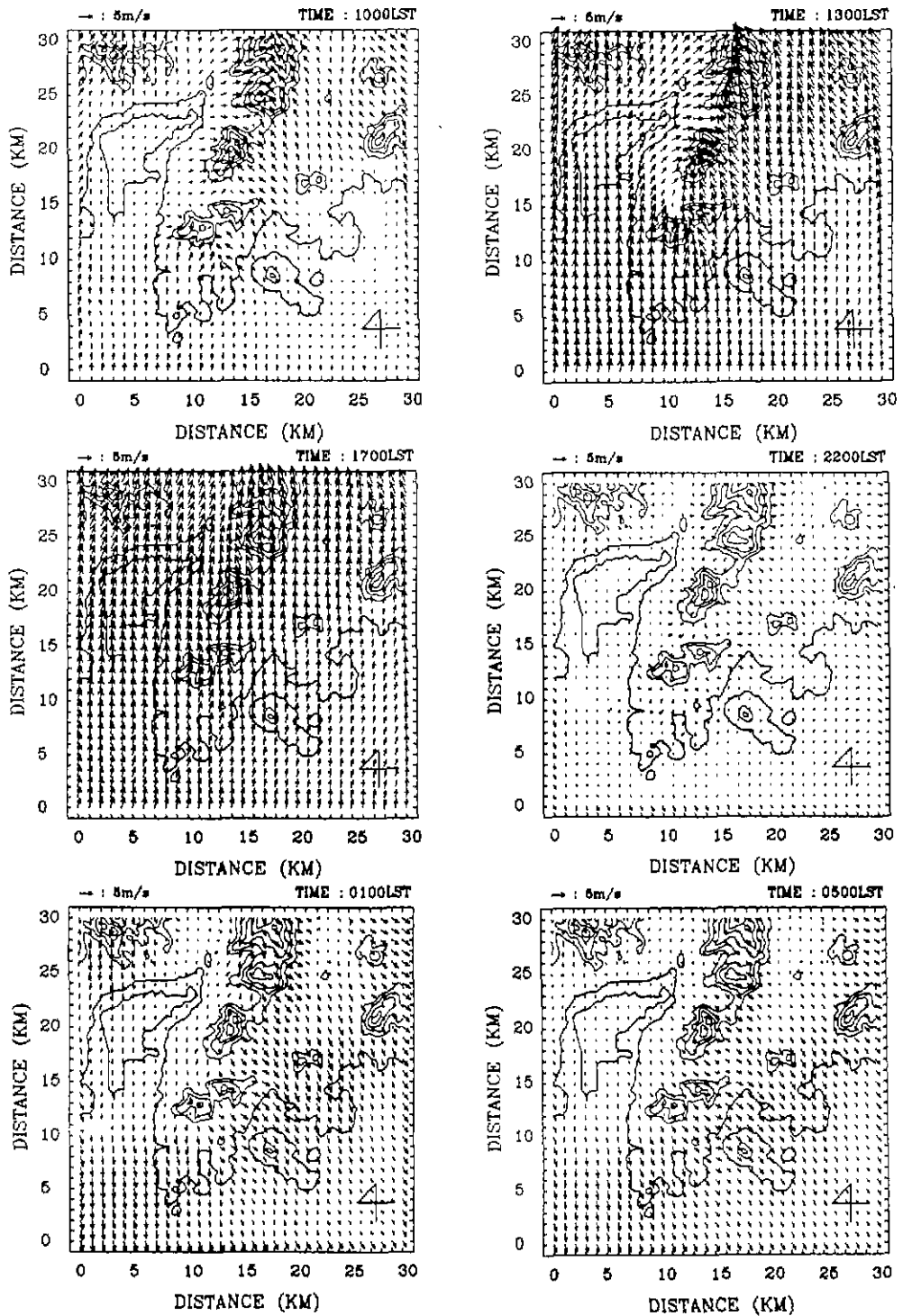


Fig. 3. Horizontal wind fields at  $z^*=50$  m in the fine mesh grid region.

$$K_V^{(c)} = \frac{\partial C}{\partial z} = F_d - q_M \quad (25)$$

측면 경계조건으로는 유입측에서는

$$\frac{\partial C_i}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial C_i}{\partial y} = 0 \quad (26)$$

로 하였고, 유출측에서는 경계에서 내측의 2점 값으로부터 선형외삽하였다

배출원은 내륙지역의 차량이나 해안의 선박과 같은 이동발생원과 공장이나 가정 등의 고정발생원에 대해서는 부산지역에서의 시간변화에 따른 배출강도를 고려하여 배출비율을 설정하였다. 부산광역시에서 1995년도에 대해 내륙지역과 연안지역의 배출량을 산정한 결과(Fig. 2), SO<sub>2</sub>의 분포는 부산광역시의 주 오염원이 되는 사상과 장림공단지역에서의 배출이 많은 부분을 차지하고 있을 뿐만 아니라, 연안부근에서도 배출이 많이 되고 있는 것을 볼 때 선박배출에 의한 영향이 크다고 할 수 있다. NO<sub>2</sub> 배출의 경우 전 지역에 고루 분포하기는 하지만 공단지역과 연안부근의 배출이 많은 것을 볼 수 있다.

계산방법은 대기유동장 예측모델에 대기중에서의 이류, 확산과정과 광화학반응, 침적과정을 고려한 대기오염 농도 예측모델을 결합하여 오염물질의 농도를 계산하였고, 대기유동장 모델의 계산대상일은 해륙풍이 발생하는 8월의 전형적인 여름날로 하였다. 대기유동장의 수치모의 결과는 Fig. 3과 같이 해륙풍의 일변화에 따른 극지순환의 형태가 잘 나타나고 있는데, 자세한 내용은 원경미와 이화운(1998)의 연구에 수록되어 있다.

### 3.2 대기오염물질의 이동 및 확산예측

부산 연안도시지역에서 선박배출원을 고려한 대기오염물질의 이동 및 확산은 대기유동장과 광화학반응 및 침적과정을 모두 모사할 수 있는 오일리아 이류, 확산 모델을 이용하여 수치모델링한 농도로서 예측하였다.

SO<sub>2</sub>의 경우(Fig. 4) 아침시간(1000LST)에 비교적 농도가 높고 밤시간대에 낮은 전형적인 일변화 형태를 보였다. 특히 부산지역에서 배출강도가 큰 장림과 사상공단에서 농도가 높게 나타날 뿐 아니라 연안주위 제1항로를 따라 입, 출항과 정박하는 선

박에서 배출된 SO<sub>2</sub>는 낮시간 연안부근에서 고농도를 유지하였다. 이는 공단지역에 비하면 규모나 강도면에서 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. 해풍발달과 함께 낮시간대(1000LST~1700LST)에 고농도로 나타났던 내륙지역은 밤시간대(2200LST~0500LST)에 접어들수록 농도가 낮아지면서 내륙쪽으로 이동했다가 다시 육풍과 함께 해안부근으로 내려와 새벽무렵 연안의 농도가 다소 높아지는 해륙풍순환에 따른 극지순환 형태를 잘 볼 수 있다.

NO<sub>2</sub>의 경우(Fig. 5) 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

### 3.3 침적현상이 대기질에 미치는 영향예측

연안도시지역 대기오염의 수치예측 모델링을 통해 대기오염물질의 이동 및 확산을 예측하였는데, 이러한 대기오염의 예측에서 침적현상에 따른 대기질변화 특성을 고찰해 보았다.

#### 3.3.1 침적속도의 일변화

침적속도의 일변화를 보여주는 Fig. 6에서 하루를 주기로 변화하는 해륙풍 순환의 효과가 시간의 경과에 따라 잘 나타나고 있다. 해륙풍 순환과 함께 나타난 오염물질의 침적속도 변화는 지표면의 영향을 많이 받아 지형이 특히 복잡한 지표면에서 침적속도가 크게 나타났다. 지역별로는 동해내륙지역과 북쪽 화명동지역이 대체로 침적속도가 컸다. 시간별 변화를 보면, 아침시간에는 침적속도의 값은 작지만 점차 증가되면서 오후시간인 1300LST 무렵 침적속도의 최대를 보였다. 그 후 약간씩 감소하다가 1900LST 이후에는 낮은 침적속도 분포를 나타냈으며, 야간에는 복잡한 산지지형과 해안지역을 제외하고



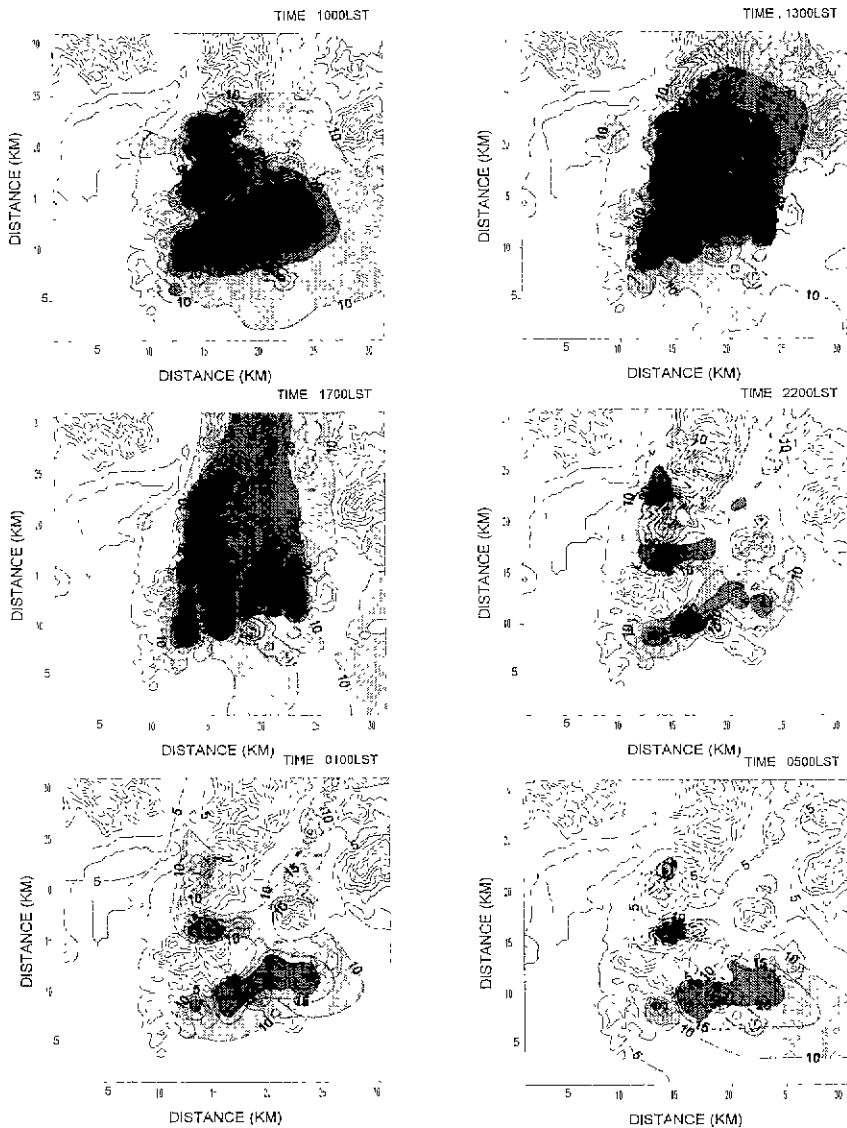


Fig. 4. Concentration distribution of SO<sub>2</sub> simulated from air quality modeling.

는 낮은 값을 나타냈다.

따라서 부산지역의 경우 낮동안에는 해풍의 영향과 지표면의 영향에 의해 불안정한 대기의 상태가 지속되면서 침적속도는 크게 나타났으며, 밤시간에는 육풍의 영향이 있기는 하였지만 지표복사 냉각으로 인해 대기가 안정화되면서 낮시간과 대조적으로 낮게 나타났다.

### 3. 3. 2 대기오염물질의 침적 속 변화

각 물질에 대한 침적 속의 일변화 경향(Fig. 7)을 보면, 대기가 불안정한 낮시간의 경우 큰 값을 나타내었고, 안정한 밤시간의 경우는 작은 값을 보였다. 또한 대류활동이 활발한 이른 오후시간대에 침적속이 최대로 됨을 볼 수 있다. 이러한 경향은 침적속도의 일변화 경향과 비례하여 나타나는 것으로

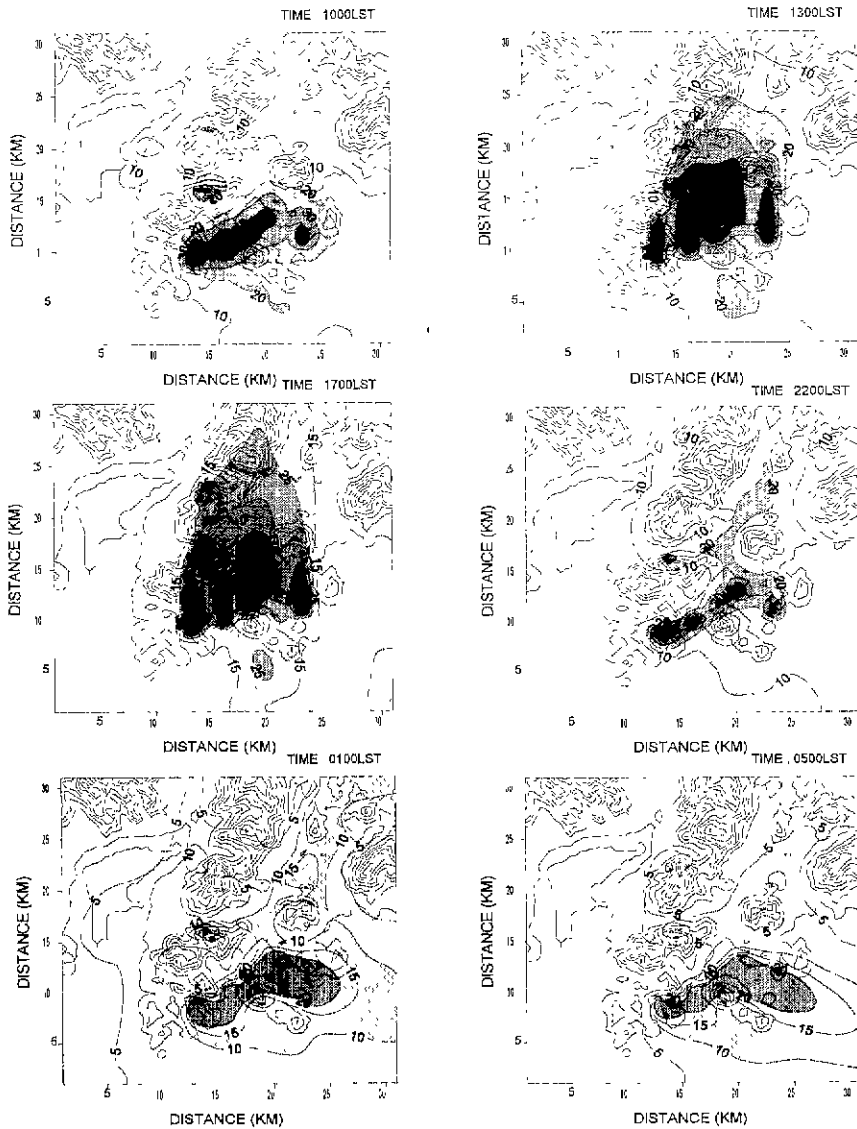


Fig. 5. Concentration distribution of NO<sub>2</sub> simulated from air quality modeling.

지형이 복잡한 지형일수록 침적 속이 크게 되어 대기질에 큰 영향을 줄 것으로 예측되어진다.

3.3.3 침적현상이 대기질에 미치는 영향

침적현상이 대기질에 미치는 영향을 예측하기 위해 선박배출원을 포함한 대기질 예측 농도(Figs. 4-5)에서 건성침적과정을 고려하지 않은 농도와와의 차이를 계산하였다.

SO<sub>2</sub>의 경우(Fig. 8) 시간적으로 볼 때 침적 속이 큰 낮시간에는 침적이 잘 일어나 각 지역간 농도차가 밤시간에 비해 크게 나타났다. 특히 동래주변 내륙지역에서 침적에 대한 영향이 가장 컸으며, 공단지역과 북쪽내륙 지역에서도 침적에 대한 영향이 크게 나타났다. 이는 Fig. 6의 침적 속도 변화에서 보았듯이 이 지역의 침적 속도가 컸기 때문이다. 또

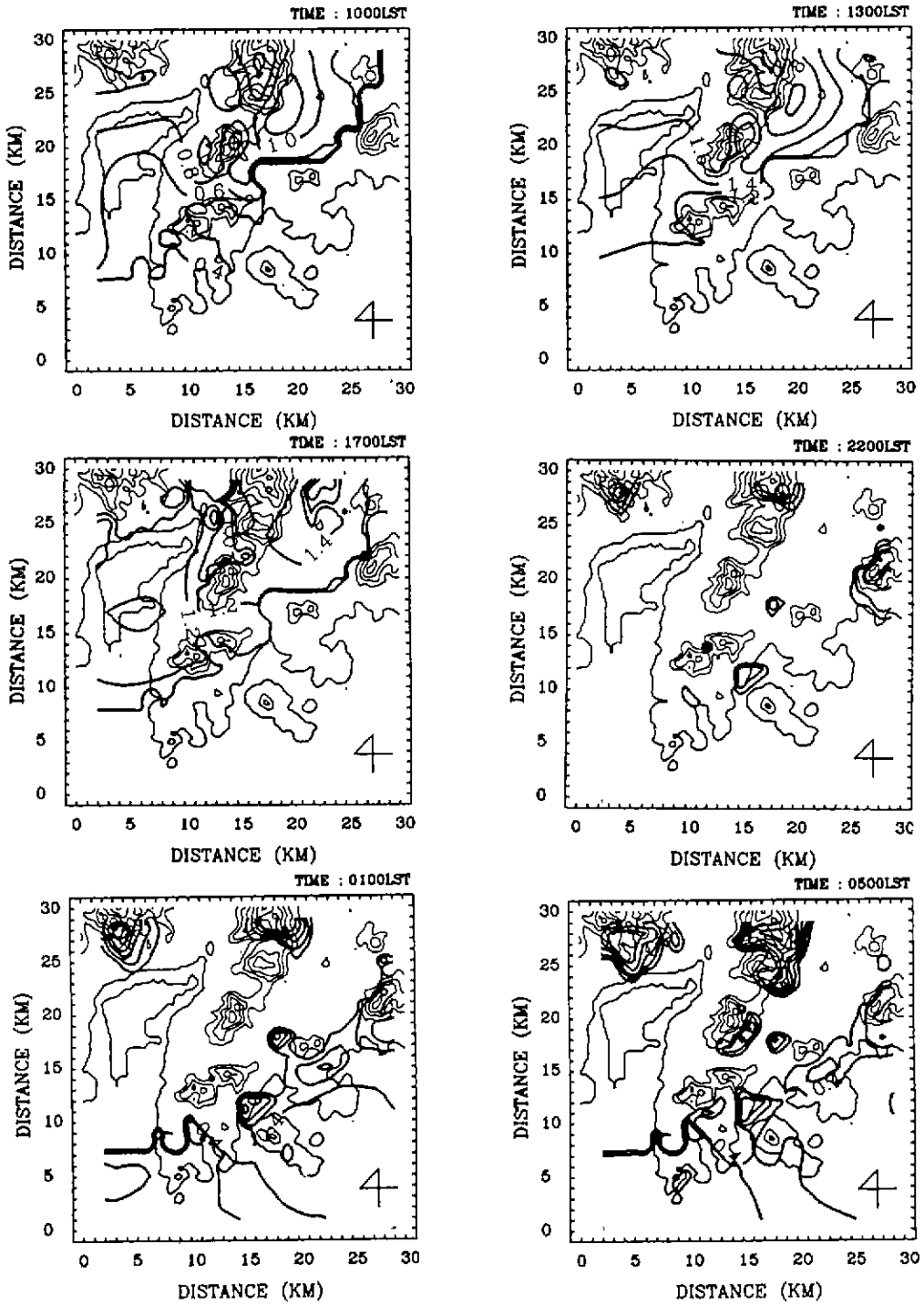


Fig. 6. Horizontal distributions of the estimated dry deposition velocity (cm/s) during the summertime in Pusan area.

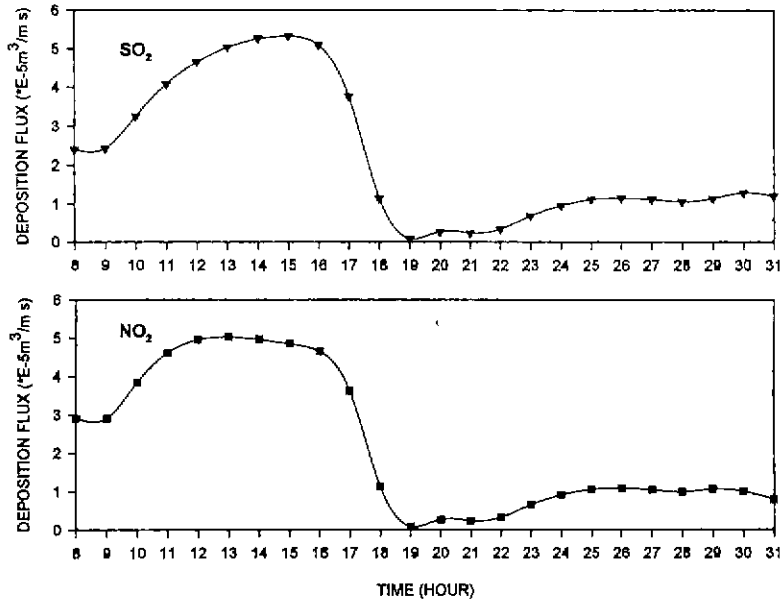


Fig. 7. Diurnal variation of deposition flux.

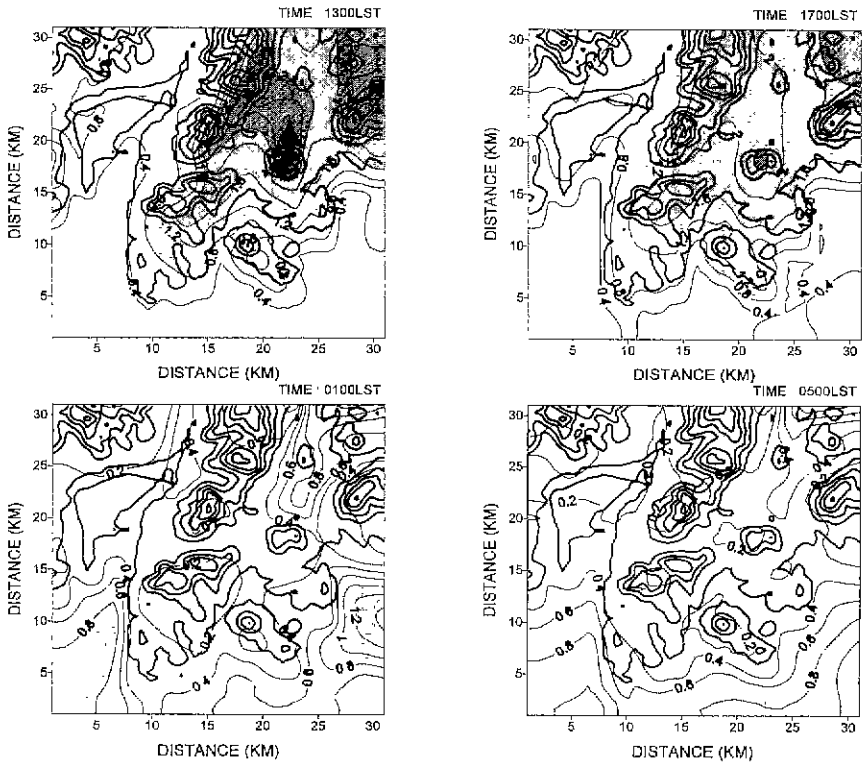


Fig. 8. Differential concentration of  $SO_2$  by deposition process.

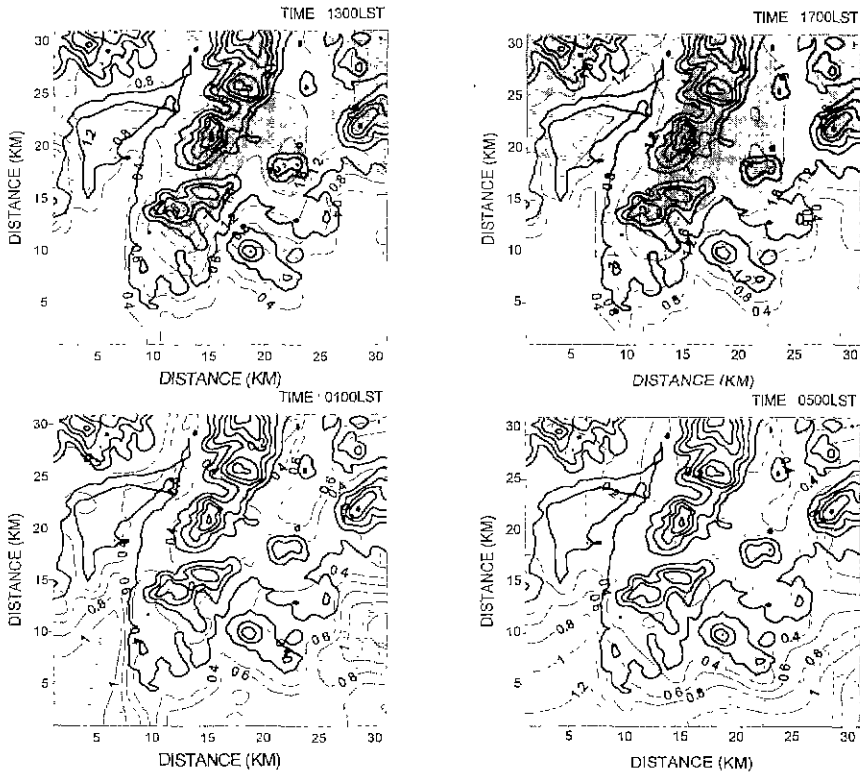


Fig. 9. Differential concentration of NO<sub>2</sub> by deposition process.

한 해륙풍 순환에 따른 일변화 패턴이 잘 나타났다. 그런데 대기유동장의 수치모의에서 낮동안 발달하는 해풍의 영향에 따라 오염물질의 수송을 예측할 수 있었던(원경미와 이화운, 1998) 북쪽 내륙지역과 동태 내륙지역으로의 농도는 다른 고농도 지역에 비해 낮게 예측되어졌는데(Fig. 4). 이는 이 지역에 침적현상이 크게 작용하였기 때문으로 추정할 수 있으며, 침적을 고려하지 않은 경우라면 이들 내륙 지역이 고농도로 예측되었을 것이다. 이는 부산지역의 실측 대기질자료와 비교해 보았을 때 침적현상을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 실측치에 가까운 농도분포를 보였다(원경미, 1998).

NO<sub>2</sub>의 경우(Fig. 9) 모두 아침시간대에는 침적에 의한 효과가 거의 나타나지 않았으나, 1300LST부터 동태주변 내륙지역과 북쪽 내륙지역에서 침적의 효과가 크게 나타났다. 밤시간에는 낮시간에 비해 침적의 효과가 크지 않으나 0100LST에 연안부근에서 침적에 따른 농도의 차이가 약간 나타났다. 또한 해

륙풍 순환에 따른 농도변화도 잘 나타났다.

#### 4. 결 론

연안지역에서 선박배출을 포함한 대기질 모델링에서 침적현상을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 실측치에 가까운 농도를 보였으며, 낮동안 도시상공의 불안정한 대기로 배출된 오염물질들은 배출 후 도시상공을 통과하는 동안에 거의 침적 제거됨을 볼 수 있었다. 또한 이러한 현상은 해륙풍 순환과 복잡한 지형의 영향에 따른 농도변화와 관련되었다.

물질별 침적총량의 경시변화를 보면 오전중에 침적량은 증가하여 일중 최대에 달하다가 저녁에 감소하여 야간에는 거의 0에 가까운 값을 나타냈다. 이는 대기안정도에 따른 일변화와 지표면의 상태를 잘 반영한 것으로 침적량의 변화에 따른 대기질분포를 잘 설명할 수 있었다.

따라서 연안도시지역에서 침적현상이 대기질에 미치는 영향을 예측한 결과, 침적을 고려하지 않은 경우와 비교해 볼 때 침적현상을 고려함으로써, 침적 속이 큰 낮시간에는 침적이 잘 일어나 대기 중 농도는 낮게 예측되었으며. 특히 공단지역과 동래 주변 내륙지역에는 침적의 영향이 컸다.

참 고 문 헌

국립환경연구원 (1992) 자동차 배출가스에 의한 오염물질 배출량에 관한 연구.  
 박순용 (1995) 건성침착이 지상오염농도에 미치는 영향. 한국기상학회지, 31(2), 97-115.  
 부산광역시 (1996a) 시정백서.  
 부산광역시 (1996b) 공해배출업소현황.  
 원경미 (1998) 연안도시지역에서 선박배출원분 고려한 대기질 수치 모델링, 부산대학교 대학원 박사학위 논문.  
 원경미, 이화운 (1998) 부산의 지형적 특성을 고려한 O<sub>3</sub>의 건성침적 속도 시뮬레이션, 한국대기보전학회지, 14(5), 421-431  
 이화운, 이동규, 이태영, 김유근, 원경미, 한한우 (1998) 연안 도시 지역의 대기 흐름 시뮬레이션, 한국기상학회지, 34(1), 75-86  
 이화운 (1987) 지역대기환경의 수치예측 모델에 관한 연구. 일본대판대학 박사학위 논문  
 이화운, 김유근, 원경미, 오은주 (1997a) 연안도시지역의 대기유동장에서 대기오염물질의 확산과동에 관한 수치모의, 한국환경과학회지, 6(5), 437-449.  
 이화운 김유근, 원경미, 문윤섭, 홍정혜, 장난심, 정우식 (1997b) 부산 대기정체 수렴을 위한 선박오염 실태조사 및 예측, 부산광역시 과제번호 96-p-01  
 이화운 박종길 (1992) 대기오염물질의 광화학 반응모델에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 8(1).  
 池田有光他 (1977) 大氣汚染光化學反 機構のモデル化, 大氣汚染光化學會誌, 11, 463-484  
 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  
 日本船用機關學會 (1995) 船舶排出大氣汚染物質消滅手法檢討調査.  
 原達己 (1997) 大氣中の高濃度オキソタント豫測手法に

關する研究  
 田和則 (1996) 大阪湾へイエリアの大氣環境の測定と分析, 神戸商船船大學大學院 碩士學位論文  
 Businger, J.A., J.C. Wingaard, Y. Izumi and F. Bradley (1971) Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, J Atmos. Sci., 28, 181-189.  
 Clark, T.L and R.D. Rarely (1984) Severe downslope wind-storm calculations in two and three spatial dimensions using anelastic interactive grid nesting : A possible mechanism for gustiness, J Atmos. Sci., 41(3), 329-350.  
 Garland, J.A (1978) Dry and wet removal of sulfur from the atmosphere, Atmos Environ., 12, 349-362  
 Hicks B.B , M.L. Wesely, and J.L Durham (1980) Critique of methods to measure dry deposition . Workshop summary, EPA-600/9-80-050, Environmental Protection Agency, Washington, D C , 83.  
 Mahrer, Y. (1992) Air quality modeling in complex terrams, Air Pollution Modeling and its Application IX.  
 Mahrer, Y. and R.A. Pielke (1975) A numerical study of air flow over mountains using the two dimensional version of the university of Virginia mesoscale model, J. Atmos. Sci., 31, 2144-2155  
 Pleim T., A. Venkatam and R. Yamartino (1984) ADOM/TADAP model development program, ERT P-B980-520, Prepared for OME, AES of Canada and the Umweltbundesamt, West Germany  
 Toshihiro Kitada, Kiyomi Igarash, and Michio Owada (1986) Numerical Analysis Air Pollution in a Combined Field of Land/Sea Breeze and Mountain/Valley Wind J Climate and Applied Meteor., 25, 767-784.  
 U.S Environmental Protection Agency (1985) Compilation of Air Pollutants Emission Factors, 1, AP-42, 4th Edition  
 Wesely, M.L and B.B. Hicks (1977) Some factors that affect the deposition rates of sulfur dioxide and similar gases on vegetation, I. Air Pollut. Control Assoc., 27, 1110-1116  
 Yamada, T (1975) The critical Richardson number and the ratio of the eddy transport coefficients obtained from a turbulence closure model, J. Atmos. Sci., 32, 926-933