

선박배출 오염물질의 영향을 고려한 부산지역 대기질 모델의 개발

이 화 운 · 김 유 근 · 원 경 미
부산대학교 대기과학과
(1999년 1월 28일 접수)

The Development of Air Quality Model Considering Shipping Source in Pusan Region

Hwa-Woon Lee, Yoo-Keun Kim, and Gyeong-Mee Won
Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea
(Manuscript received January 28 1999)

Air quality modeling about coastal urban region such as Pusan should be consider shipping source emitted from ships anchoring and running. It has been proved at our previous studies that the ratios of air pollutants emission amount in coastal area to inland are 12.2% for NO₂ and 11.7% for SO₂ and the air quality of coastal urban area considerably counts on ships. Also the dispersion pattern of the air pollutants followed local circulation system in this region. Therefore this study has been developed air quality model which can describe the formation, transport, transformation and deposition processes of air pollutants considering shipping source. Currently, restriction for emission amount of ships does not exist, so our study will be useful to set the emission standard and for devising air quality policy in coastal urban region.

Key words : air quality modeling, coastal urban region, shipping source, emission standard, air quality policy

1. 서 론

도시 근방에 산과 바다가 근접해 있는 연안도시의 경우 해륙풍, 산곡풍과 같은 국지순환이 오염물질의 수송과 농도에 영향을 미치게 되는데, 이런 경우 일반풍이 약하면 오염된 대기는 해안선 부근에 체류되는, 이른바 체류오염의 효과가 현저해지는 관계로 연안지역에서의 대기오염 농도는 내륙보다도 높은 상태가 된다¹⁾. 이러한 대기오염의 분포양상은 대기오염물질의 배출량과 난류 확산 및 수송, 화학반응, 침적현상 등에 의해 결정되어지므로 이들을 지배하는 기상인자들에 대한 이해는 대기오염 현상을 파악하는 데 필수 요소라고 할 수 있다^{2~4)}.

기존의 연구에서는 대기질을 모델링하는데 있어서 배출량을 고려해 줄 때 일정한 값으로 하거나 점, 선, 면오염원별로 구분하여 실제 지역에 대해 산정한 값들을 사용하는 데 이는 모두 내륙지역에 대한 것이었다. 그러나 연안지역에 위치한 도시지역인 경우 해륙풍순환과 같은 국지풍계의 영향을 지배적으로 받아 연안지역에 위치한 산업시설이나 선박으로부터 배출된 대기오염물질들이 내륙지역까지 운송되는 것이 예상되어진다⁵⁾. 따라서 연안도시의 대기질 예측 모델링은 복잡한 지형에서의 배출특성과 기상학적, 화학적, 그리고 물리적 과정을 포함하는 복잡한 시스템으로 구성되어야 한다.

본 연구의 대기질 모델링에서 대상으로 하는 연안도시인 부산광역시는 한국 제일의 항구도시로서 한국의 수출, 수입물량의 다수가 이 곳을 통하고 있으며 국내산업의 발전에 따른 항만건설이 촉진되어 부두를 통한 외항선, 여객선, 어선 등의 입항, 출항 및 정박하는 선박은 수적인 면 뿐 아니라 크기면에 있어서도 급격히 증가하고 있는 추세이다. 특히 전국 컨테이너 화물의 95% 이상을 담당하고 있는 실정이다⁶⁾.

이상에서 볼 때 해륙풍이 탁월한 지형적 특성과 함께 선박에 의한 대기오염의 영향은 분명히 존재할 것으로 보이므로 연안 도시지역에서는 다른 대도시의 대기질 모델링과는 달리 내륙지역의 점, 선, 면오염원별 대기오염물질 배출량에다 선박에 의한 대기오염물질 배출량의 영향을 포함할 필요성이 제기되어진다.

본 연구의 선행연구⁷⁾에서 연안도시인 부산지역의 내륙지역과 연안지역의 배출량을 산정한 결과, 내륙지역의 배출량에 대한 선박배출량의 비율은 SO₂ 11.7%, NO₂ 12.2%로 나타났다. 이는 해안이 내륙지역의 면적에 비해 좁은 영역을 차지함에도 불구하고 상당히 높은 양을 나타내었는데, 연안 도시지역의 대기질에 크게 기여할 것으로 추정되어졌다.

따라서 부산지역의 실제 대기환경에 적용하기 위한

대기질 모델은 내륙과 연안역의 지형과 배출원의 영향이 고려된 대기내 오염물질의 생성, 발달, 수송, 광화학 반응 및 제거과정을 묘사할 수 있어야 된다. 본 연구에서는 연안 도시지역의 적합한 대기질 모델을 개발하기 위해 연안의 선박에서 배출된 오염물질의 영향을 고려하였다.

그리고 개발된 대기질 모델을 통해 부산지역 대기오염에 대한 규명과 예측 및 방지대책을 수립할 수 있으므로 해서 부산지역의 대기질 개선과 환경영향평가지기 초자료로 활용할 수 있을 뿐 아니라 선박에서 배출되어지는 배출원의 영향을 고려함에 따라 부산 연안의 선박에 의한 대기오염물질의 배출규제를 가할 수 있으리라고 본다.

2. 대기질 예측모델의 구조

도시의 기본적인 기상현상을 표현하는 기상모델과 지표면 상태의 열적 영향을 표현하는 지표면 열수지모델을 결합하여 도시 대기유동장 모델을 만들고, 다음으로 대기유동장 모델에 부산지역의 연안과 내륙에서 배출되어지는 오염원의 영향이 고려된 배출원과 대기오염물질의 움직임을 예측하기 위한 대기오염물질의 이류·확산 모델, 대기중에서 화학반응을 고려하기 위한 광화학 반응모델 및 대기오염물질의 지표면으로의 침적을 계산하기 위한 침적모델 부분으로 나누어 대기오염물질의 농도를 예측할 수 있는 대기질 모델을 구성하였다.

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

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

여기서 C_i 는 오염물질의 농도, i 는 오염물질의 종류, $K_V^{(c)}$ 는 오염물질의 확산계수, q_{spi} 는 배출량, R_i 는 반응항에 의한 생성 소멸율을 나타낸다.

지형을 고려한 좌표계에서 수직 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 시간과 장소에 대해 변하는 물질표면이다.

2.1 배출원

2.1.1 내륙지역의 배출량 산정

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

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

여기서, F_i^{Gn} 는 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} 는 G 구에 속하는 n 격자내의 주택유형이 k 인 주택비율 (k ; 일반주택, 아파트, 기타), P_k^n 는 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(EPA, 1985)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 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} & \text{격자별 } l \text{차종의 1일 총 운행거리} \\ & = l \text{ 차종의 1일 평균 주행거리} \\ & \times l \text{ 차종의 등록된 대수} \times \text{격자별 도로길이를} \quad (4) \\ & l = 1, 2, 3, 4 \text{ (자가용, 택시, 버스, 트럭)} \end{aligned}$$

구해진 격자별 일일 총 운행거리에 선 오염원에 대한 배출계수⁹⁾를 곱하면 선 오염원에 대한 배출량을 산정할 수 있다.

점 오염원은 부산광역시 공해 배출업소자료⁹⁾ 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 선박오염원의 배출량 산정

대상선박은 부산항을 입, 출항하는 여객선, 컨테이너선, 유조선, 화물선, 어선 등으로 하며, 선박에 탑재되어 있는 기관으로서서는 주기 디젤기관, 보기 디젤기관, 보조보일러 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)을 가지고 1km×1km 격자별 항로별로 선박교통량 비중과 주아울 등을 고려하여 산정하였다¹⁰⁾.

배출량의 산정에 필요한 선박항행에 관한 자료는 성능시험과 설문조사, 방선조사를 실시하였던 외국의 선행연구^{11,12)}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.

주기(main engine) 디젤기관의 경우,

$$W = 0.21 \cdot (P \cdot A_1)^{0.95} \cdot T_1 \quad (5)$$

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

$$N = 1.49 \cdot (P \cdot A_1)^{1.14} \cdot T_1 \cdot 10^{-3} \cdot 46/22.4 \quad (7)$$

보기(auxiliary engine) 디젤기관의 경우,

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

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

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

보조 보일러(auxiliary boiler)의 경우,

$$W = F \cdot A \cdot T \quad (11)$$

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

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

로 하였다. 여기서, W는 연료사용량(kg/척), P는 정격출력(PS), A₁는 항행모드별 부하율, T₁는 항행모드별 운전시간(h), F는 정격연료소비량(kg/h·척), S는 유황산화물 배출량(kg/척), s는 연료 중의 유황분(중량%), N은 질소산화물배출량(kg/척), n은 질소산화물 배출계수(kg/kg)이다.

(2) 정박중의 배출량

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

보기 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, A₁은 하역시의 부하율, A₂는 비하역시의 부하율, T₁은 하역시간(h), T₂는 비하역시간(h), d₁은 하역시의 가동기관수(기), d₂는 비하역시의 가동기관수(기)이다.

2.2 대기유동장 모델

기본적인 기상현상을 표현하기 위하여 이용한 기초방정식은 운동량, 질량, 열에너지 등의 보존식에 기초한 운동방정식, 온도방정식, 비습방정식, 연속방정식, 정역학방정식이다. 지형좌표계에 의한 3차원 증규모 대기유동의 기초방정식은 다음과 같다.

운동방정식은

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} = & f_v - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial x} + g \frac{z^* - \bar{s}}{s} \left(\frac{\partial z_G}{\partial x} \right) - g \frac{z^*}{s} \frac{\partial s}{\partial x} \\ & + \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(m)} \frac{\partial u}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{dv}{dt} = -f_u - c_p \theta \frac{\partial \Pi}{\partial y} + g \frac{z^* - \bar{s}}{s} \left(\frac{\partial z_G}{\partial y} \right) - g \frac{z^*}{s} \frac{\partial s}{\partial y}$$

$$\begin{aligned} & + \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(m)} \frac{\partial v}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

이다. 온도방정식은

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} = & \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(\theta)} \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

이고, 비습방정식은

$$\begin{aligned} \frac{dq_v}{dt} = & \left(\frac{\bar{s}}{s - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_V^{(q)} \frac{\partial q_v}{\partial z^*} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial q_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial q_v}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

이고, 연속방정식은

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} - \frac{1}{s - z_G} \left(u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) \\ + \frac{1}{s - z_G} \left(\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

정역학방정식은

$$\frac{P_i}{\partial z^*} = - \frac{s - z_G}{s} \frac{g}{c_p \theta} \quad (25)$$

지중 온도 방정식은

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (26)$$

이다.

여기서,

$$\frac{\partial s}{\partial t} = - \frac{1}{s} \int_0^{\bar{s}} \frac{\partial}{\partial x} [u(s - z_G)] + \frac{\partial}{\partial y} [v(s - z_G)] dz^* \quad (27)$$

$$\begin{aligned} w^* = & w \frac{\bar{s}}{s - z_G} + \frac{z^* - \bar{s}}{s - z_G} \left(u \frac{\partial z_G}{\partial x} + v \frac{\partial z_G}{\partial y} \right) \\ & - \frac{z^*}{s - z_G} \left(\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\Pi = \left(\frac{P}{P_{\infty}} \right)^{R_c} \quad (29)$$

$$\theta = T \left(\frac{P_{\infty}}{P} \right)^{R_c} \quad (30)$$

$$f = 2 \Omega \sin \phi \quad (31)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + w^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad (32)$$

이고, 여기서 u, v, w는 각 x, y, z방향의 속도성분(m/s), w*는 지형좌표계에 의한 연직방향의 속도성분(m/s), t는 시간(s), θ는 온도(K), q_v는 비습(kg/kg), T는 온도(K), T_s는 지중온도(K), K_s는 토양의 열확산계수(m²/sec), R_d

Table 1. Photochemical Reaction Mechanism

No.	Reaction	Rate coef.	Unit
1	$NO_2 + hv \rightarrow NO + O$	K_1	min^{-1}
2	$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	2×10^{-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	$RCHO + hv \rightarrow CO + \alpha_1 RO_2 + (1 - \alpha_1)/2HO$	$K_1 \times 0.0042$	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	$ppm^{-1}min^{-1}$

는 건조공기의 기체상수(J/kg · K), P 는 기압(hPa), C_p 는 정압비열(J/kg · K), P_{00} 는 기준 고도의 기압(hPa), f 는 Coriolis parameter(s^{-1}), ϕ 는 위도(deg), Ω 는 지구의 회전각속도(rad/s), g 는 중력가속도(m/s^2), K_H 는 수평 방향 확산계수(m^2/s^2), 그리고 $K_x(m)$, $K_y(\theta)$, $K_z(q)$ 는 각각 운동량, 열, 비습의 연직방향의 확산계수(m^2/s^2)이다.

2.3 광화학반응 모델

광화학반응 모델에서 사용한 반응 메커니즘은 이화운¹³⁾의 연구에서 사용한 PRM(Photochemical Reaction Model)이며, 이는 총 18개의 반응식으로 구성되어 있다(Table 1). 여기서 $K_1 \sim K_{18}$ 은 반응속도상수, $h\nu$ 는 파장 430nm 이하의 태양에너지, M 은 질소 및 산소(= $10^6 ppm$), HC 는 비메탄계 탄화수소, R 은 알킬기, HO_2 , RO_2 , HO 는 유리기, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ 는 화학 양론 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 K_1 은 광분해 속도상수이며 태양의 고도와 에너지의 강도에 따라 변화한다. 여기서 K_1 은 야외대기에서 계산을 행한 Kitada와 Peter에 따라 천정각

Z 와 고도 z 의 함수로서 다음과 같이 나타내었다.

$$K_1 = B \exp(-A / \cos Z) \quad (33)$$

여기서,

$$A = 1.2 - (1.25 - 0.16(z/10000 - 2.15))^2 \quad (34)$$

$$B = 60 - 0.122 + (0.02102 - 1.6 \times 10^{-3}(z/10000 - 1.15))^2 \quad (35)$$

$$\cos Z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (36)$$

이다.

또한 K_{16} 은 NO_2 의 소멸반응에 중요한 것으로 chamber의 재질과 반응중의 기체의 혼합상태에 의해 크게 영향을 받으며, 연구자들에 따라 사용하는 값은 차이가 있는데, 초기의 계산에서는 $K_{16} = 1.0 \times 10^{-20} ppm^{-1}min^{-1}$ 을 이용하였으나, 池田¹⁴⁾ 및 그의 연구에서 계산한 NO_2 의 농도가 다른 모델보다는 높게 나타나는 동시에 최고농도가 급격히 나타나므로 산술평균하여 $K_{16} = 1.5 \times 10^{-13} ppm^{-1}min^{-1}$ 을 이용하였다.

광화학반응모델을 구성하고 있는 반응식을 각 물질의 반응속도에 대해 정리하면 연립 상미분방정식으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 주요물질($NO_2, NO, O_3, HC, RCHO$) 농도의 시간변화는 1차 선형미분방정식의 해를 구하는 지수함수근사법을 사용하여 구하였다. 이는 선행연구¹⁵⁾에서 계산상의 안정성을 검토한 바 있다.

2.4 전성침적모델

전성침적은 식(1)의 지표면 경계조건에서 다루어진다. 전성침적속도의 개념은 지표로 침적되는 침적량을 계산하기 위해서 사용되어진다.

$$F_d = V_d \times C, \tag{37}$$

여기서 F_d 는 전성침적 속(flux)이며, V_d 는 전성침적속도, C 는 constant layer에서의 농도이다. 가스에 대한 전성침적속도는 3가지 저항에 의해 다음과 같이 표현되어지는데,

$$V_d = \frac{1}{(R_a + R_b + R_c)} \tag{38}$$

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 안정도 그리고 land-used type의 지표 거칠기로 계산되며 다음과 같이 표현된다.

$$R_a = \frac{\ln(z_r/z_0) - \psi_H}{x u_r} \tag{39}$$

여기서 z_r 는 deposition layer의 top이고, z_0 는 roughness length, ψ_H 는 보편함수, x 는 von karman 상수, u_r 는 마찰속도이다.

점성층을 통한 수송에 대해서는 입자에 대한 분자확산이나 브라운 확산만이 의미를 갖는다. 지표와 접촉하고 있는 얇은 층에서의 가스상 입자의 수송에 대한 저항은 Pleim et al.¹⁶⁾과 Wesely와 Hicks에 의해 근사된

$$R_b = \frac{1}{u_r} \left(\frac{v}{D_j} \right)^{2/3} \tag{40}$$

을 사용하였다. 여기서 D_j 는 j종류의 가스의 diffusivity 이고, v 는 공기의 점성도이다.

그리고 식물이 있는 지표의 경우 식물이 성장하는 시기의 지면에 대한 침적현상은 식물체에 의한 uptake에 비해 무시될 정도로 적다. 특히 밤에 잎의 표피와 드러나온 식물들의 표면에 대한 침적은 지면에 대한 침적보다 더욱 중요하다. 여기서 지표의 성질에 따라 가장 큰 차이를 보이는 것이 canopy 저항이므로 다른 층의 저항보다 지표의 성질을 잘 고려해서 계산하여야 한다.

canopy 저항은

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_{cut}} + \frac{1}{R_{cw}} + \frac{1}{R_g} \tag{41}$$

로 나타낼 수 있다. 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.

3. 선박배출원을 고려한 대기질 수치모의

3.1 계산조건 및 계산방법

내륙지역의 차량이나 해안의 선박과 같은 이동발생원과 공장이나 가정 등의 고정발생원에 대해서는 교통량

의 일변화 및 시간변화에 따른 배출강도를 고려하여 배출비율을 설정하였다.

계산대상으로 하는 오염물질은 선박배출에 기인된 SO₂, NO₂이고, 수치모의를 위한 지표면에서의 초기농도는 각 오염물질에 대하여 1995년 8월의 평균 농도를 입력하였으며, 이들 값들은 지표면 부근에서 측정된 값으로, 연직방향으로의 농도분포는 높이 100m까지는 같은 값으로 두었고, 100m이상에서는 계산영역 상한에서 1/10이 되게 선형적으로 감소하도록 모델화하였다.

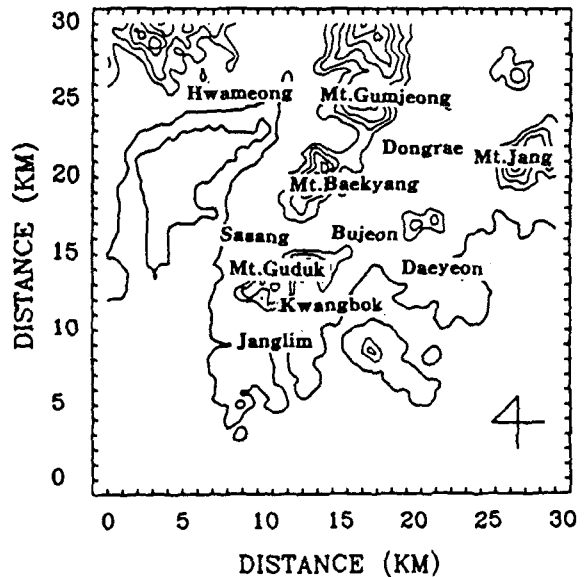
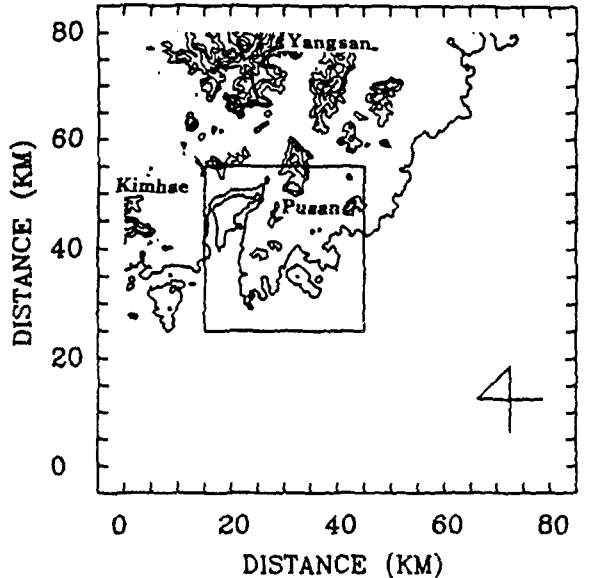


Fig. 1. Calculation region of the coarse mesh grid in Pusan coastal urban area. The inner box shows fine mesh grid domain. (contour interval : 100m)

상면 경계조건으로는 계산영역 상면에서 처음 설정한 초기 농도 값을 가지도록 하였고, 지표면에서는 침적현상을 고려하여 계산되어진 침적속 q_d 와 지상배출량 q_{sf} 를 이용하여 다음 식과 같이 두었다.

$$K_V^{(c)} \frac{\partial C}{\partial z} = F_d - q_{sf} \quad (42)$$

와 같이 하였다.

측면 경계조건으로는 유입측에서는

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C_i}{\partial y} = 0 \quad (43)$$

로 하였고, 유출측에서는 경계에서 내측의 2점 값으로부터 선형의삽하였다.

계산방법은 대기유동장 예측모델에 대기중에서의 이류, 확산과정과 광화학반응, 침적과정을 고려한 대기오염 농도 예측모델을 결합하여 오염물질의 농도를 계산하였다. 대기유동장 모델의 계산대상일은 해륙풍이 발생하는 8월의 전형적인 여름날로 하였다.

계산에 사용되어진 영역은 Fig. 1과 같이 부산광역시를 나타내는 성긴격자 영역(coarse mesh grid, 80km × 80km, 수평격자간격 ; 5km)과 부산지역만을 나타내는 상세격자 영역(fine mesh grid, 31km × 31km, 수평격자간격 ; 1km)이다. 대기유동장의 수치모의 실행은 부산광역시를 포함하는 성긴격자영역의 계산을 먼저 수행하고, 이를 경계치로 하여 부산지역만을 포함하는 상세격자영역을 계산하는 방법을 사용하였다. 경계조건의 설정방법은 Clark와 Rarley¹⁷⁾의 수치실험에 의해 계산정밀도가 높은 2차 삼입식을 사용하였다. 실행결과는 부산지역의 지형적 특성이 세밀하게 나타나는 상세격자 영역에서 실행한 결과만을 도시하였다.

3.2 대기유동장의 수치모의

연안도시인 부산의 실제 지형을 고려한 대기유동장을 상세격자 영역에 각각 나타내었다(Fig. 2). 이것은 부산지역만을 세밀히 나타내는 바람장으로 성긴격자 계산영역에서는 볼 수 없는 지형사이를 흐르는 배수류 등의 지역풍들이 잘 나타났다.

1000LST에 해안 주위로 해풍이 나타나기 시작하며, 지형 주위에서는 곡풍이 강하게 발달하였다. 특히 낙동강 삼각주 주위는 지형의 영향으로 바람이 강하였고, 성긴격자 영역에서 나타나지 않았던 서풍이 백양산과 구덕산 사이에서 나타났다. 1300LST에는 금정산과 백양산을 중심으로 바람장의 수렴대가 조성되고, 해안선 주위에서는 아주 뚜렷한 해풍이 불고 있다. 특히 산주위에는 해풍과 곡풍의 합쳐진 지역풍으로 바람은 더 강하였고, 백양산과 구덕산 사이 골을 흐르는 배수류가 발생하였다. 또한 사상에서 부전동으로 부는 서풍과 부전동에서 사상으로 부는 동풍이 서로 부딪혀 두 산의 골에서 바람이 약해졌다. 1700LST에는 지형에 의한 지역풍들은 거의 소멸되고, 남풍인 해풍이 아주 우세하게 바람장을 지배하였다. 2200LST에서는 바람이 약한 안정한 상태이므로 육풍은 나타나지 않지만, 지형에 의한 약한 산풍이 서서히 불기 시작하였고, 지형이 없는 평지에서는 바람이 거의 나타나지 않았다. 0100LST에서는 육풍과

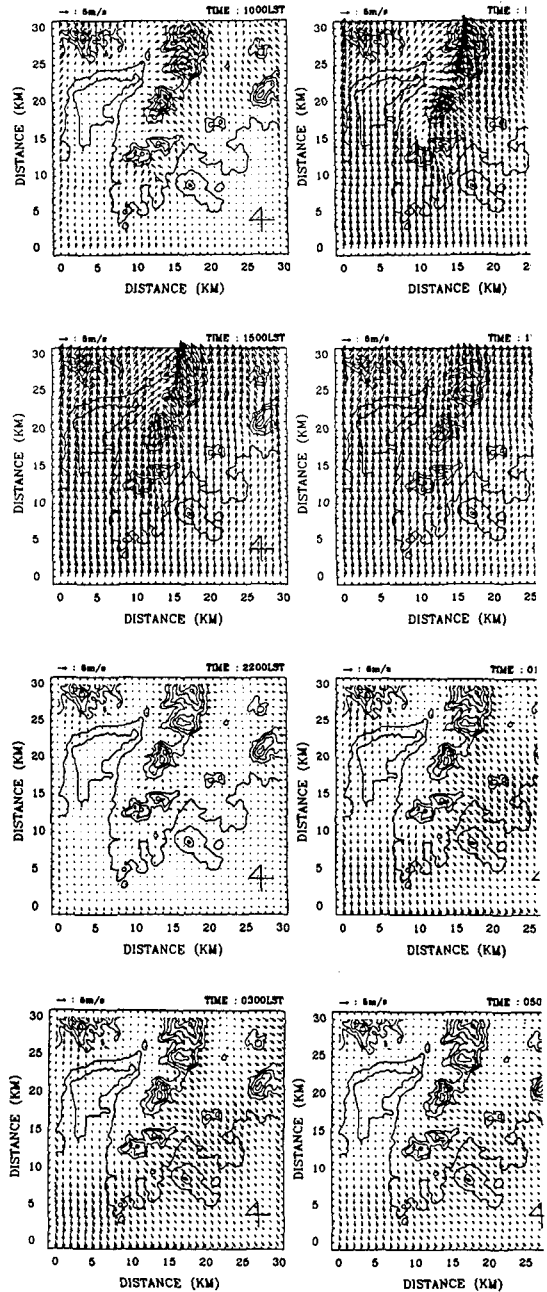


Fig. 2. Horizontal wind fields at $z'=50m$ in the fine mesh grid region.

산풍이 합성되어 흐름은 강해졌으며, 특히 해안에 위치한 지역인 남포동과 장산, 낙동강 주위는 더 강한 바람이 발생하였다.

이와 같은 결과로, 부산지역의 바람장은 해륙풍보 산곡풍이 먼저 발달하며, 해안 근처에 지형이 존재할 우 해륙풍과 산곡풍이 합성되어 더 강한 흐름장을 나타냈다. 또한 대체로 지형의 동쪽에서 강한 바람의 형

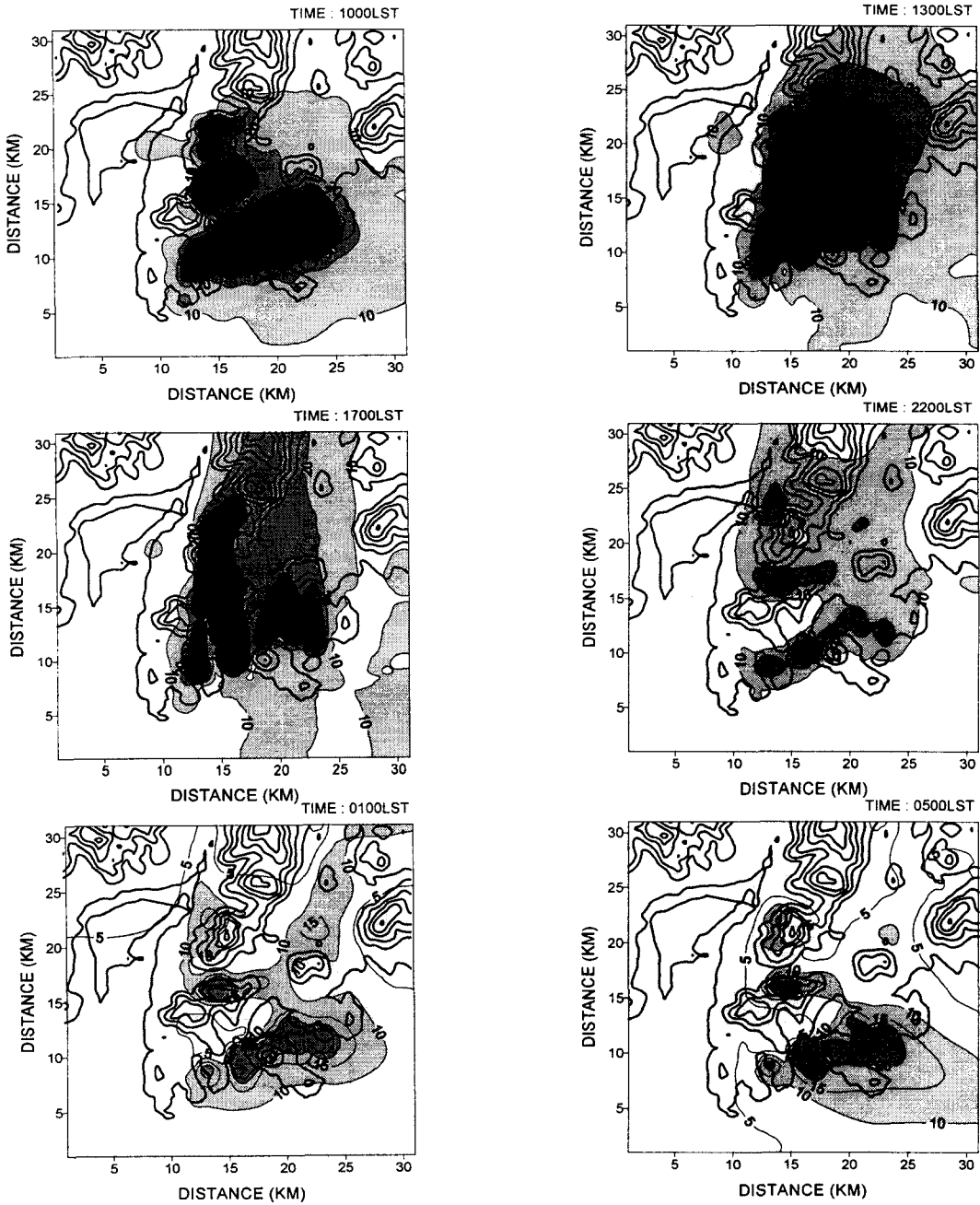


Fig. 3. Concentration distribution of SO_2 simulated from air quality modeling.

를 보여주었다. 그리고 상세격자 영역의 바람장은 위의 특징 뿐아니라 지형과 지형사이 배수류와 해안을 따라 성긴격자 영역에서는 남풍으로만 나타나던 해풍이 낙동강 삼각주 주위에서는 남서풍으로 나타나며, 금정산과 백양산, 구덕산을 따라 남서풍과 남풍의 수렴대가 형성되는 세밀한 특성을 보였다.

3.3 대기질 농도 예측결과

부산 연안도시지역에서 선박배출원을 고려한 대기오염물질의 이동 및 확산은 대기유동장과 광화학반응 및 침적과정을 모두 모사할 수 있는 오일리안 이류, 확산모델을 이용하여 수치모델링 한 농도로써 예측하였다.

SO_2 의 경우 (Fig. 3) 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 1항

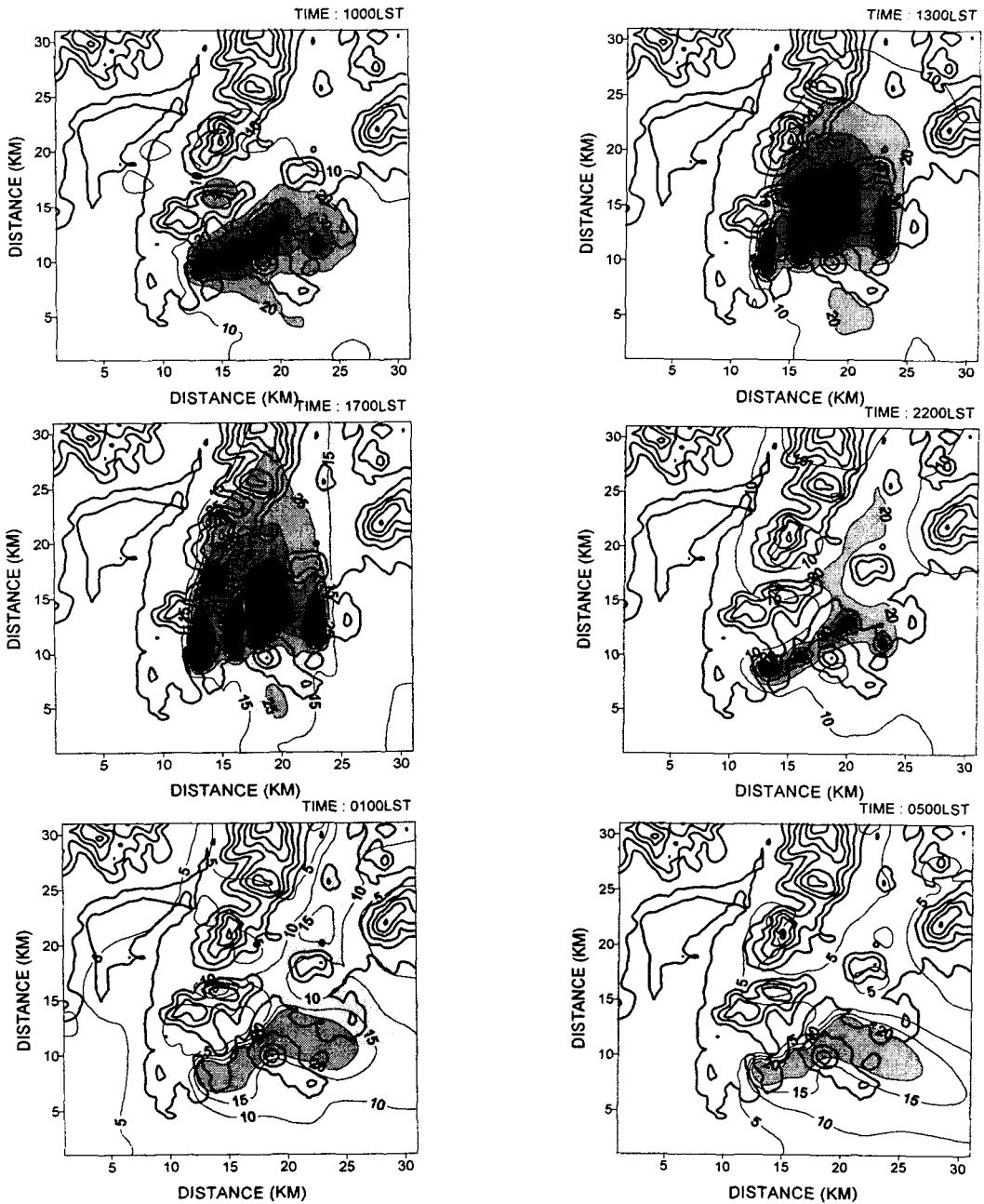


Fig. 4. Concentration distribution of NO_2 simulated from air quality modeling.

로를 따라 입, 출항과 정박하는 선박에서 배출된 SO_2 는 낮시간 연안부근에서 고농도를 유지하였다. 이는 공단지역에 비하면 규모나 강도면에서 작지만 최고치는 거의 비슷할 정도의 높은 수준이었다. 또한 낮시간 해풍과 함께 내륙으로 이동하는 SO_2 는 공단지역에서 북쪽 화명동지역으로 이류, 확산됨을 예측할 수 있고, 연안부근지역에서 동래 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 국지순환 형태를 볼 수 있다.

NO_2 의 경우 (Fig. 4) SO_2 와 유사한 해륙풍순환에 따른 일변화 형태를 보였다. 공단지역과 연안주위의 농도가 높았으며, 공단에서 배출된 NO_2 는 북쪽내륙으로 이동하기도 하나 연안쪽으로도 이류, 확산됨을 예측할 수 있고, 연안의 NO_2 는 내륙지역으로 이류, 확산됨을 예측

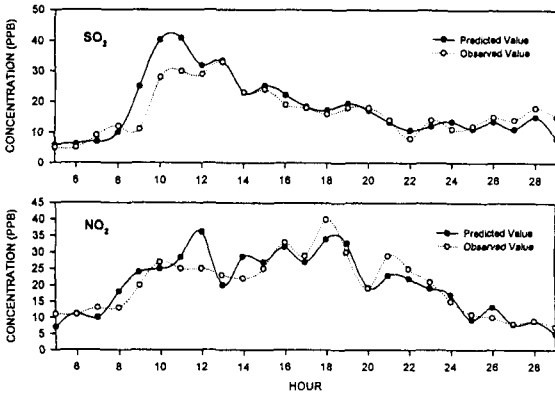


Fig. 5. Comparison of the observational and predictive concentration at Gamjeondong on August 1995.

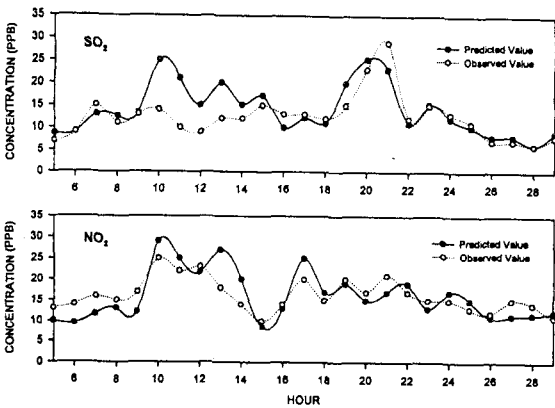


Fig. 6. Comparison of the observational and predictive concentration at Daeyeondong on August 1995.

할 수 있다. 밤시간 육풍을 따라 해안으로 내려와 연안의 농도를 높히는 양상은 SO₂와 동일하였다.

3.4 대기질 관측결과와 모델결과의 비교

선박배출을 고려한 대기질 수치모델링 결과의 타당성을 검증하기 위해 대기질 관측자료와 비교, 고찰하여 보았다. 대기질 관측자료는 1995년 8월 해륙풍이 발생한 날(8월 1일, 3일, 4일, 5일, 6일, 7일, 8일, 12일, 14일, 16일, 17일, 18일, 27일)에 대해 환경부 산하 대기질 측정망자료를 이용하였으며, 모델치와의 비교를 위해 선박배출의 영향을 많이 받은 내륙지역의 감전동과 연안 부근의 대연동 지역을 선정하였다.

사상공단 위쪽에 위치하여 비교적 고농도 횡수가 많은 감전동지역에서의 모델결과와 관측결과를 비교해 보면(Fig. 5), SO₂의 경우 아침시간의 과대평가를 제외하고는 모두 잘 일치하고 있다.

또한 연안 부근에 위치하여 선박배출에 의한 영향을 크게 받을 것으로 예상되었던 대연동지역에서의 모델결

과와 관측결과를 비교해 보면(Fig. 6) SO₂의 경우 관측 결과에 비해 약간 높게 예측되었으며, NO₂의 경우 전체적으로 약간 낮게 예측되었으나 일변화 경향은 대체로 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

4. 결 론

부산지역의 바람장은 해륙풍보다 산곡풍이 먼저 발달하며, 해안 근처에 지형이 존재할 경우 해륙풍과 산곡풍이 합성되어 더 강한 흐름장을 나타내었다. 대기오염물질의 이동과 확산은 대기유동장에서 나타난 순환형태를 따라 예측되었다. SO₂의 경우 아침시간(1000LST)에 비교적 농도가 높고 밤시간대에 낮은 전형적인 일변화 형태를 보였는데, 특히 부산지역에서 배출강도가 큰 장림과 사상공단에서 농도가 높게 나타날 뿐 아니라 연안주위 제 1항로를 따라 입, 출항과 정박하는 선박에서 배출된 SO₂는 낮시간 연안부근에서 고농도를 유지하였다. 이는 공단지역에 비하면 규모나 강도면에서 작지만 최고치는 거의 비슷할 정도의 높은 수준이었다. NO₂의 경우 공단지역과 연안주위의 농도가 높았으며, 공단에서 배출된 NO₂는 북쪽내륙으로 이동하기도 하나 연안쪽으로도 이류, 확산됨을 예측할 수 있고, 연안의 NO₂는 내륙지역으로 이류, 확산됨을 예측할 수 있다.

선박배출을 고려한 대기질 모델링 결과를 대기질 관측결과와 비교, 고찰해 보면, 각 오염물질의 일변화 경향이 관측된 대기오염물질의 일변화 경향과 대체로 잘 일치하였다.

이상의 연구결과에서 대기질 모델링시 내륙지역에서의 배출만을 고려하였던 기존의 연구와는 달리, 연안의 선박배출량을 함께 고려함으로써 실제 대기현상을 보다 더 잘 묘사할 수 있었으며, 조건만 고려된다면 부산지역 뿐만 아니라 광범위한 연안도시지역을 대상으로 대기질 예측 및 대기질의 환경영향평가 monitoring에도 활용할 수 있을 것이고, 앞으로의 총량규제에 대비하여 실용성 있는 대기환경 정책개발에 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 1997년도 부산대학교 학술연구조성비의 지원을 받아 진행된 것으로 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Heidorn and Yap, 1986, A synoptic climatology for surface ozone concentration in southern Ontario, 1976-1981, *Atmos. Environ.*, 20(4), 695-703.
- 2) Lalas, D. P., Veirs, V. R., Karras, G. and G. Kallos, 1982, An analysis of the SO₂ concentration levels in Athenes, Greece, *Atmos. Environ.*, 16(3), 531-544.
- 3) McKendry, I. G., 1993, Ground - level ozone in Montreal, Canada, *Atmos. Environ.*, 27B(1), 93-103.
- 4) Liu, S. C., M. Trainer, F. C. Fehsenfeld, D. D.

- Parrish, E. J. Williams, D. W. Fahey, G. Huber, and P. C. Murphy, 1987, Ozone production in the rural troposphere and implications for regional and global ozone distributions, *J. Geophys. Res.*, 92, 4191-4207
- 5) 이화운, 김유근, 원경미, 오은주, 1997a, 연안도시지역의 대기유동장에서 대기오염물질의 확산과 이동에 관한 수치모의, *한국환경과학회지*, 6(5), 437-449.
 - 6) 부산광역시, 1996, 지정백서
 - 7) 이화운, 김유근, 원경미, 문운섭, 홍정혜, 장난심, 정우식, 1997b, 부산 대기정책 수립을 위한 선박오염 실태조사 및 예측, 부산광역시 과제번호 96-p-01.
 - 8) 국립환경연구원, 1992, 자동차 배출가스에 의한 오염물질 배출량에 관한 연구
 - 9) 부산광역시, 1996, 공해배출업소현황
 - 10) 원경미, 1998, 연안도시지역에서 선박배출원을 고려한 대기질 수치 모델링, 부산대학교 대학원 박사학위 논문
 - 11) 日本船舶は"い煙研究會, 船舶におけるのは"い煙量算定手法
 - 12) 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
 - 13) 이화운, 1987, 지역대기환경의 수치예측 모델에 관한 연구, 일본대판대학 박사학위 논문
 - 14) 池田有光他, 1977, 大氣汚染光化學反應機構のモデル化, *大氣汚染光化學會誌*, 11, 463-484.
 - 15) 이화운, 박종길, 1992, 대기오염물질의 광화학 반응 모델에 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 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, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 27, 1110-1116.
 - 17) 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.