

## 유해 대기오염물질의 난류확산 수치모의에서 침적항과 부력항 추가에 따른 효과

### Addition Effect of the Deposition and Buoyancy Terms in Modeling Turbulence Diffusion of Hazardous Air Pollutants

원경미 · 이화운\* · 지효은 · 김철희 · 송창근<sup>1)</sup>  
부산대학교 대기과학과, <sup>1)</sup>University of Houston  
(2005년 11월 22일 접수, 2006년 1월 12일 채택)

Gyeong Mee Won, Hwa Woon Lee\*, Hyeoun Ji,  
Cheol-Hee Kim and Chang-Keun Song<sup>1)</sup>  
*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University,*  
<sup>1)</sup>*Department of Geosciences, University of Houston*  
(Received 22 November 2005, accepted 12 January 2006)

#### Abstract

Hazardous Air Pollutants (HAPs) are characterized by being relatively heavier and denser than that of ambient air due to the various reasons such as higher molecular weight, low temperature and other complicated chemical transformations (Witlox, 1994). In an effort to investigate transport and diffusion from instantaneous emission of heavy gas, Lagrangian Particle Dispersion Model (LPDM) coupled with the RAMS output was employed. Both deposition process and buoyancy term were added on the atmospheric diffusion equations of LPDM, and the locations and concentrations of dense gas particle released from instantaneous single point source (emitting initially for 10 minutes only) were analyzed.

The result overall shows that adding deposition process and buoyancy terms on the diffusion equation of LPDM has very small but detectable effect on the vertical and horizontal distribution of Lagrangian particles that especially transported for a fairly long traveling time. Also the slumping of dense gas can be found to be ignored horizontally compared to the advection by the horizontal wind suggesting that it was essential to couple the Lagrangian particle dispersion model coupled with the RAMS model in order to explain the dispersion of HAPs more accurately. However, during the initial time of instantaneous emission, buoyancy term play an important role on the vertical locations of dense particles for near surface atmosphere and around source area, indicating the importance of densities of HAPs in the beginning stage or short duration for the risk assessment of HAPs or management of heavy vapors during the explosive accidents.

**Key words :** HAPs (Hazardous Air Pollutants), RAMS, Lagrangian Particle Dispersion Model (LPDM), Instantaneous emission, Deposition process and buoyancy term

---

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)51-510-2291, E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

## 1. 서 론

유해 대기오염물질 (Hazardous Air Pollutants: HAPs)은 독성, 발암잠재성, 축적성 및 대기 중의 지속성 등으로 인하여 사람의 건강이나 재산, 동·식물의 생육에 직접 또는 간접적인 피해를 줄 우려가 있는 대기오염물질을 일컫는다. 대체로 일반오염물질에 비해 위해성이 매우 커서 보다 엄격한 관리가 요구되는데, 현재 국내에서는 측정기술의 미비와 대기 중의 농도 및 배출량 등에 대한 축적된 자료 등이 매우 부족하여 관리가 미흡하고 관련된 연구들이 시작 단계에 있는 실정이다. 반면, 선진 각국에서는 유해 대기오염물질의 효율적인 관리를 위해 배출실태 조사 및 배출목록의 작성, 대기 모니터링, 인체 및 생태계 등에 미치는 위해성 평가 등의 지속적인 연구를 토대로 유해 대기오염물질에 대한 저감정책 수립의 기초자료를 생성하고 있다(차준석, 2005).

현재 국내의 대기환경보전법에서는 특정 대기유해물질로 25종만을 규제하고 있으며, 선진국(미국 188종, 독일 154종, 일본 234종)에 비하면 그 숫자가 매우 적어 최근 들어 독성, 위해성 및 배출량 등의 자료에 근거하여 규제대상물질을 추가, 확대하려는 계획을 추진하고 있다. 환경부의 대기배출원 조사(SODAM) 결과(환경부, 2004, 2003)에 의하면, 25종의 유해 대기오염물질 중 2002년의 경우에 염화수소가 321톤(36.5%)으로 가장 많이 배출되었으며 그 다음으로 벤젠 247톤(28.1%), 포름알데히드 108톤(12.3%), 시안화수소 76톤(8.7%)의 순으로 배출되었다. 2003년의 경우 염화수소의 배출량이 2,462,175톤(66.4%)으로 급격히 증가하는 추세를 보였으며, 벤젠 431,522톤(11.64%), 염소 168,829톤(4.55%), 시안화수소 168,327톤(4.54%)순으로 나타났다. 2003년은 3종 사업장의 조사대상 추가로 인해 오염물질의 배출량이 전반적으로 2002년에 비하여 다소 증가한 추세였다.

특히, 독성과 폭발성을 가진 유해 대기오염물질의 경우 큰 분자량을 가지거나 중합체인 경우가 많아 주변 공기보다 무겁다는 특징을 가지고 있다. 예를 들어, 1984년 12월 인도의 보팔(Bhopal)에서 일어난 폭발사고 시 누출된 메틸이소시아네이트(Methyl isocyanate, MIC)는 그 분자량이 57.05로서 20°C 정

상온도에서 일반 공기의 2배나 밀도가 높다. 따라서 유해 대기오염물질의 확산 및 수송은 중력 침강(gravitational slumping) 및 혼입과정(entrainment process)에 의한 희석효과(dilution effect) 등을 고려하여야 하는 등 일반 대기오염물질과는 다른 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 모의하기 위하여 기존의 연구에서는 non-buoyant gaseous tracer의 확산 및 수송에 한정하여 라그랑지안 모델링에 적용하였으나, 라그랑지안 모델에 밀도차에 의한 부력 보정을 통하여 heavy gas의 중력 침강 효과와 희석효과를 묘사할 수 있는 방법론이 Gopalakrishnan and Sharan (1997)에 의해 제시되면서 인도 보팔시의 폭발사고에 적용하는 등의 성과를 올렸다.

따라서 본 연구에서는 유해 화학물질인 HAPs의 효율적인 관리와 저감대책 수립에 필요한 기초자료 생성을 목적으로 유해 대기오염물질의 대기 내 거동 특성을 고찰하기 위해 HAPs의 난류확산과정을 수치 모의하였다. 수치모의는 Gopalakrishnan and Sharan (1997)이 제시한 이론에다 침적효과를 추가함으로써 난류확산 수치모의에서 침적항과 부력항 추가에 따른 효과를 고찰하였다.

## 2. 연구 방법

대기 난류확산장에서의 유해 대기오염물질의 침적 및 중력 침강 효과를 수치모의하기 위해 대기확산모델로는 지역대기환경모델로 최근 많이 사용되고 있는 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)를 사용하여 난류확산장을 계산하였고, 이를 침적항과 부력항이 추가된 라그랑지안 모델과 결합하여 유해 대기오염물질의 수송 과정을 모의하였다.

### 2.1 RAMS 모델링

사용된 RAMS는 미국 남부 Florida 지역에 적용했던 해륙풍 모델(Pielke, 1974)로서 이후 콜로라도 주립대에서 추가 개발된 구름모델과 지형변환에 의한 대기순환 모델을 결합시킨 기상모델이다(ATMET, 2002; Walko *et al.*, 1995). 기초 방정식은 연속 방정식과 운동 방정식, 열역학 방정식, 수분에 대한 물질 방정식이며, 기본적으로 압축성 유동을 모의하나 정역학 근사를 사용할 때에는 비압축성 유동 혹은 압

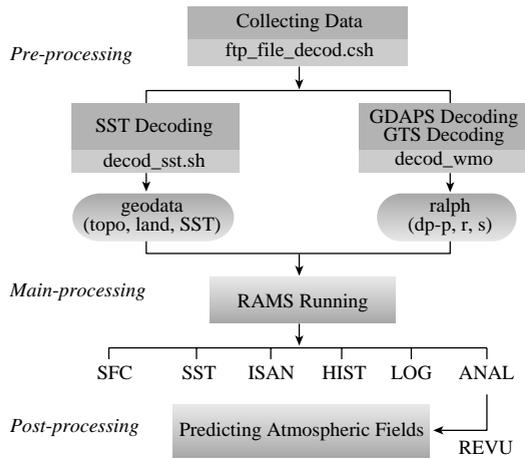


Fig. 1. A flow chart for wind field generation by RAMS modeling.

축성 유동으로부터 음파를 제거한 비탄성 유동을 가정할 수 있다.

RAMS 모델의 운영체제(그림 1)는 전처리 과정으로 관측자료의 수집(collecting data)과 모델형식으로의 자료변환(decoding) 과정을 거쳐 모델을 실행(RAMS running)하는 주처리과정, 실행 결과를 후처리 프로그램(REU)을 통해 필요한 기상정보를 확보하는 후처리과정으로 구성된다. 주처리과정을 수행하기 위한 준비단계로서 geodata와 ralph 디렉토리에 RAMS 입력자료를 생성한다. geodata에 있는 지형 자료(DEM30s, Micro43, topo10m)와 식생 자료(ogedata), 해수면온도 자료(SST43)는 RAMS 모델에서 제공하는 것이다.

본 연구의 선행연구(원경미 등, 2005, 2004)에서는 RAMS 모델의 초기 입력자료들로서 기후학적으로 월 평균된 SST (Sea Surface Temperature)자료 대신 매일 관측되는 NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) 극궤도 위성 SST자료와 지상 및 상층의 GTS (Global Tele-communication Station) 자료를 모델형식으로 변환하여 사용함으로써 초기 입력자료 개선에 따른 향상된 모델의 예측도를 검증할 수 있었다. 초기 기상장으로는 기상청의 전지구예측모델 자료인 GDAPS (Global Data Assimilation System)를 사용하여 RAMS 모델형식으로 변환한 후 모델영역의 기압장 dp-p자료로, GTS는 상층기상관측

자료 dp-r자료와 지상기상관측자료 dp-s자료로 사용된다.

## 2. 2 Lagrangian Particle Dispersion 모델링

라그랑지안 입자확산 모델은 라그랑지안 좌표계의 개념을 적용하여 좌표계의 원점을 공기괴의 움직임에 따라 이동시키면서 오염물질의 위치를 추적하여 농도를 계산하는 모델이다(Park, 1994; Arritt, 1985; McNider, 1981; Smith, 1968). 가스 및 입자상 오염물질을 각각의 입자로 가정하여 평균바람장과 난류바람장에 의해 움직인다고 생각하여 그 입자들의 위치를 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$X(t+\Delta t) = X(t) + (\bar{U} + u')\Delta t \quad (1)$$

$$Y(t+\Delta t) = Y(t) + (\bar{V} + v')\Delta t \quad (2)$$

$$Z(t+\Delta t) = Z(t) + (\bar{W} + w')\Delta t \quad (3)$$

여기서, X, Y, Z는 한 입자의 공간 좌표계 내의 위치이며,  $\bar{U}$ ,  $\bar{V}$ ,  $\bar{W}$ 는 입자가 위치한 곳에서의 기상 모델에서 얻어지는 평균 바람 그리고  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$ 는 Markov chain process (Legg and Raupach, 1982; McNider, 1981)에 의하여 계산되는 난류 바람성분을 나타내며,  $\Delta t$ 는 적분 시간 간격을 표시한다. x방향의 난류 바람 성분은

$$u'(t+\Delta t) = e^{-\frac{\Delta t}{T_L}} u'(t) + \sqrt{1 - e^{-\frac{2\Delta t}{T_L}}} \sigma_u \xi = R_L u'(t) + \sqrt{1 - R_L^2} \sigma_u \xi, R_L = e^{-\frac{\Delta t}{T_L}} \quad (4)$$

같이 계산되어지며,  $\sigma_u$ 는 X축 방향의 바람의 표준편차를 나타낸 것으로 상사이론(similarity theory)을 이용하여 매개변수화 하였다(Stull, 1991). 그리고  $\xi$ 는 Gaussian white noise로서 평균은 0이며 편차가 1인 정규 무작위 변량,  $R_L$ 은 난류 속도 성분의 라그랑지안 자기상관 계수이다.

농도의 계산은 배출되는 입자의 크기가 각 입자의 난류 확산 길이에 비례하며, 각 입자내의 질량 분포를 가우시안 확률 밀도 함수를 따른다고 가정하는 Kernel density 방법을 사용하였다(de Haan, 1999; Yamada and Bunker, 1986). 주어진 시, 공간에서의 농도는 각 입자의 질량 분포에 의해 결정되는 확률을 배출된 총 입자 개수(n)에 대하여 모두 더함으로써

써 계산할 수 있다.

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q\Delta t}{(2\pi)^{3/2}} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sigma_{xk}\sigma_{yk}\sigma_{zk}} \exp\left(-\frac{(x_k-x)^2}{2\sigma_{xk}^2}\right) \exp\left(-\frac{(y_k-y)^2}{2\sigma_{yk}^2}\right) \exp\left(-\frac{(z_k-z)^2}{2\sigma_{zk}^2}\right) \quad (5)$$

여기서  $Q$ 는 방출율,  $\sigma_{xk}, \sigma_{yk}, \sigma_{zk}$ 는  $k^{th}$  라그랑지안 입자와 관련된  $x, y, z$ 축 방향의 난류 확산 길이인 Taylor 가설(Taylor, 1921)에 의해 난류 속도의 표준편차를 이용하여 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{xk}(t+\Delta t) = \sigma_{xk}(t) + \sigma_{xk}\Delta t \quad \text{for } t < 2T_{L,x}$$

$$\sigma_{xk}^2(t+\Delta t) = \sigma_{xk}^2(t) + 2T_{L,x}\sigma_{xk}^2\Delta t \quad \text{for } t > 2T_{L,x} \quad (6)$$

그리고 heavy gas의 중력 침강 효과와 혼입과정에 의한 희석효과를 고려하기 위하여 부력 보정에 의한 연직 속도항  $W_B$ 를 라그랑지안 입자의 연직 방향 위치를 결정하는 방정식에 첨가하였다(Cogan, 1985).

$$Z(t+\Delta t) = Z(t) + (W(t) + W_B)\Delta t \quad (7)$$

부력 보정에 의한 연직 가속도를 계산하기 위한 Langevin equation (Van Dop, 1992)은

$$\frac{dW_B}{dt} = \left[ \frac{\rho_{air} - \rho_i}{\rho_i} \right] g - \frac{W_B}{T_L} \quad (8)$$

로 주어진다. 여기서  $\rho_{air}, \rho_i$ 는 각각 주변공기의 밀도와  $i$ 번째 plume 입자의 혼합밀도를 의미하며  $g$ 는 중력가속도이다. 혼합밀도는 입자의 난류변수인 난류 확산 길이  $\sigma_{xk}, \sigma_{yk}, \sigma_{zk}$ 로 입자의  $x, y, z$ 축으로의 반경을 매개변수화하여 생기는 가상적인 입자의 부피와 공기의 밀도 및 입자의 밀도로부터 계산되어진다(Gopalakrishnan and Sharan, 1997).

지표층에서의 오염 물질 flux,  $F$ 는 Fick의 확산 과정에 따라 다음 같이 추정된다.

$$F = -K \frac{C}{z} \quad (9)$$

여기서  $K$ 는 기체성 오염물질의 에디 확산계수이고  $C$ 는 오염물질 농도를 나타내는데, 공기 역학적 저항을  $R_a$ , 준 laminar 저항  $R_b$ , 지표층 저항  $R_c$ 와 건성침적 속도를  $V_d = (R_a + R_b + R_c)^{-1}$ 로 정의한다면, 건성침적 flux  $F_n$

$$F = \frac{C}{R_a + R_b + R_c}, F = V_d \cdot C \quad (10)$$

로 표현할 수 있다.

습성침적 flux는 제거율(scavenging ratio)  $\Lambda$ 와 오염물질 농도  $C$ 의 곱으로 추정하며

$$F_w = \Lambda \cdot C \quad (11)$$

여기서 제거율  $\Lambda$ 는 제거계수  $S_p$ , 6시간당 강수  $P_6$  그리고 혼합층의 높이  $h$ 를 이용하여 다음과 같이 매개변수화 하였다.

$$\Lambda = \frac{S_p P_6}{h} \quad (12)$$

라그랑지안 입자모델링에 대한 보다 더 자세한 설명은 송창근(2004)과 Song *et al.* (2003)의 선행연구에 있다. 또한 본 연구에서 사용된 라그랑지안 입자모델의 메인 모듈에 대한 검증을 위해 울진원전 부지 지역 근처에서 1997년 5월 27일 실시한 SF6 추적자 확산 실험결과와 수치모델 결과를 상호비교해 보았을 때 (Park and Moon, 2001), SF6 추적자 실험의 내용을 라그랑지안 입자확산모델에서 잘 재현하였다.

### 2.3 수치실험방법

이상과 같이 본 연구는 선행연구들(원경미 등, 2005, 2004; 송창근, 2004; Song *et al.*, 2003)에 바탕을 두어 진행되었고, 난류확산 수치모의의 대상영역은 우리나라 대기환경의 축소지역이라 할 수 있는 수도권 영역을 포함한 경기도 일대 지역으로 하였다. 이 영역은 대규모의 점배출원을 가지면서 복잡한 지형적 구조와 연안지역의 특성을 모두 갖춘 지역으로

**Table 1. Model input parameters for the RAMS modeling.**

• Initialization time : 1200 UTC 6 Aug 2004
• Model grid structure
horizontal grid resolution : 48, 12, 3, 1 (km)
vertical levels : 26 layers (vertical stretch ratio : 1.15)
soil layers : 11 layers
Arakawa C grid (u,v,w 1/2 Δx)
• Cumulus parameterization scheme : Kuo
• Radiation scheme : Mahrer & Pielke
• Initial atmospheric field : GDAPS (Global Data Assimilation)
• Input dataset : DEM30s, Micro43, ogedata topo10 m, SST43, GTS

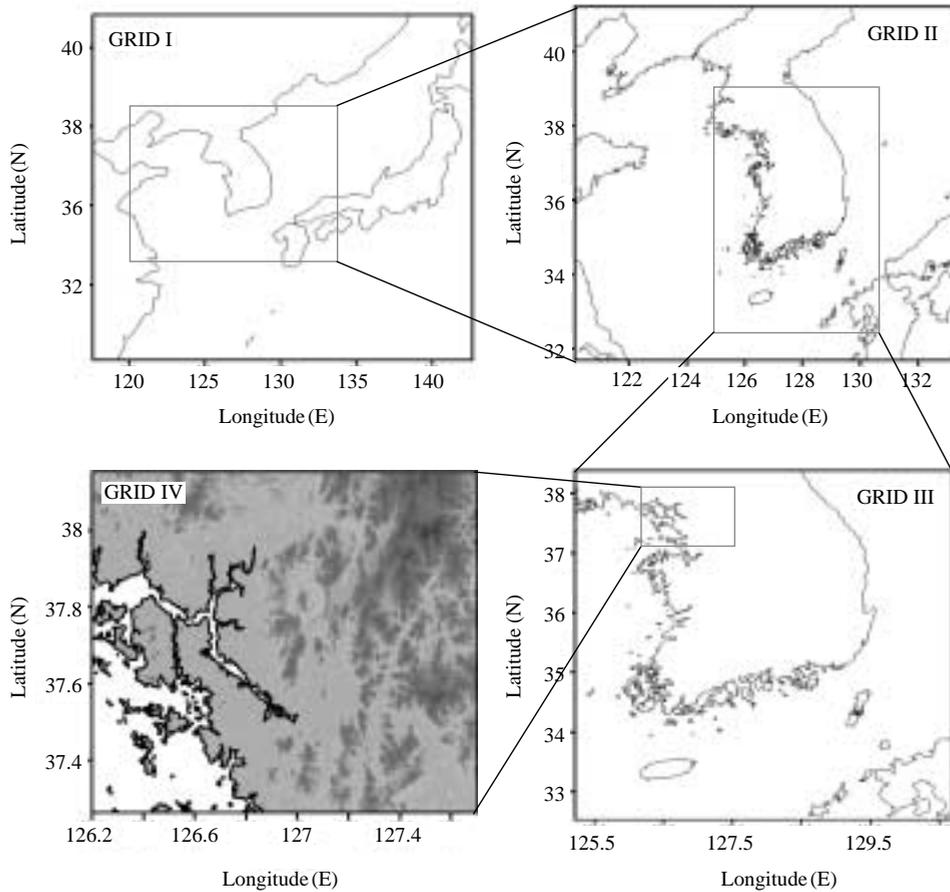


Fig. 2. Modeling domains with the three nested grids.

대기오염의 시나리오 연출 시에도 적용 가능한 곳이다. RAMS는 한반도를 중심으로 3개의 동지 격자계 (nested grids system)를 포함하도록 하였다(그림 2). 모델링 대상일은 2004년 여름철의 가장 맑은 날(8월 7일)로 선정하였고, 모델 입력변수들은 표 1에 요약되어 있다. 라그랑지안 입자확산을 위한 배출조건은 표 2와 같이 하였다. 배출원의 위치 (UTM좌표; 296633, 4161911)는 상세 모델링 영역 (fine grid)내 인천소재 어느 페인트취급 사업장으로 선정하였으며, 오염물질의 누출 (emission duration)은 600초 (10분)까지 하였다. 라그랑지안 입자배출은 RAMS 기상장 모델링에서 나온 바람장 (RAMS 08071500)을 따라 오후 1500LST부터 1시간동안 5초 간격으로 연속 배출되고, 농도계산 시간간격 (display time interval)은

Table 2. Emission condition for the Lagrangian particle dispersion modeling.

1. position of source (x-UTM) : 296633. (y-UTM) : 4161911. (z-alt, m) : 10.
2. emission rate(g/sec) : 5/ 50/ 500
3. emission duration (sec) : 600.
4. emission temperature (K) : 303.15
5. emission molecular weight : 17.04/ 29/ 78.12
6. particle releasing time interval (sec) : 5.
7. display time interval (sec) : 300.
8. emission initial time (h) : 040807 1500
9. simulation time (h) : 1.
10. meteorological field : RAMS08071500
11. dry deposition : yes/ no
12. wet deposition : yes/ no
13. buoyancy effect : yes/ no

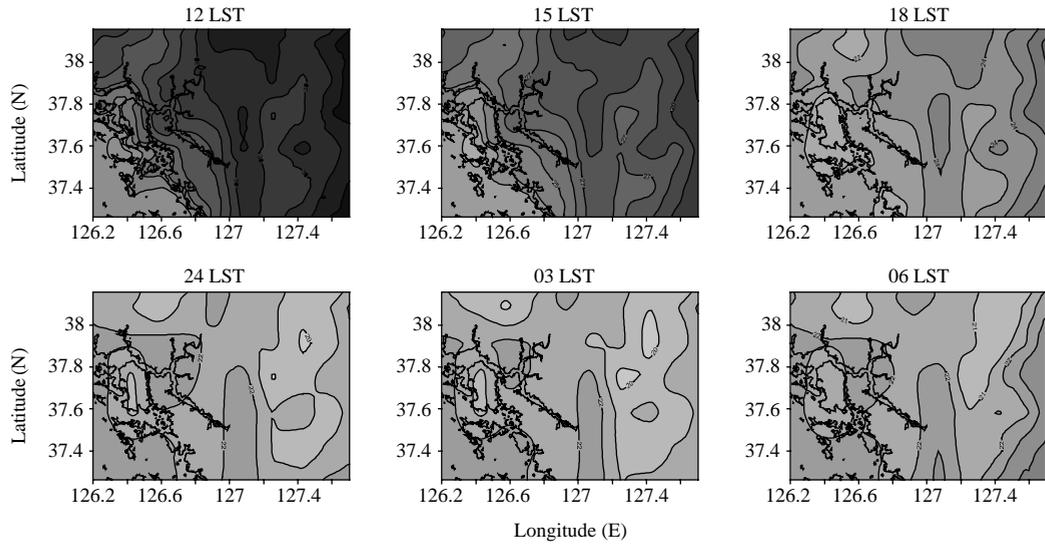


Fig. 3. Horizontal distribution patterns of temperature field simulated by RAMS.

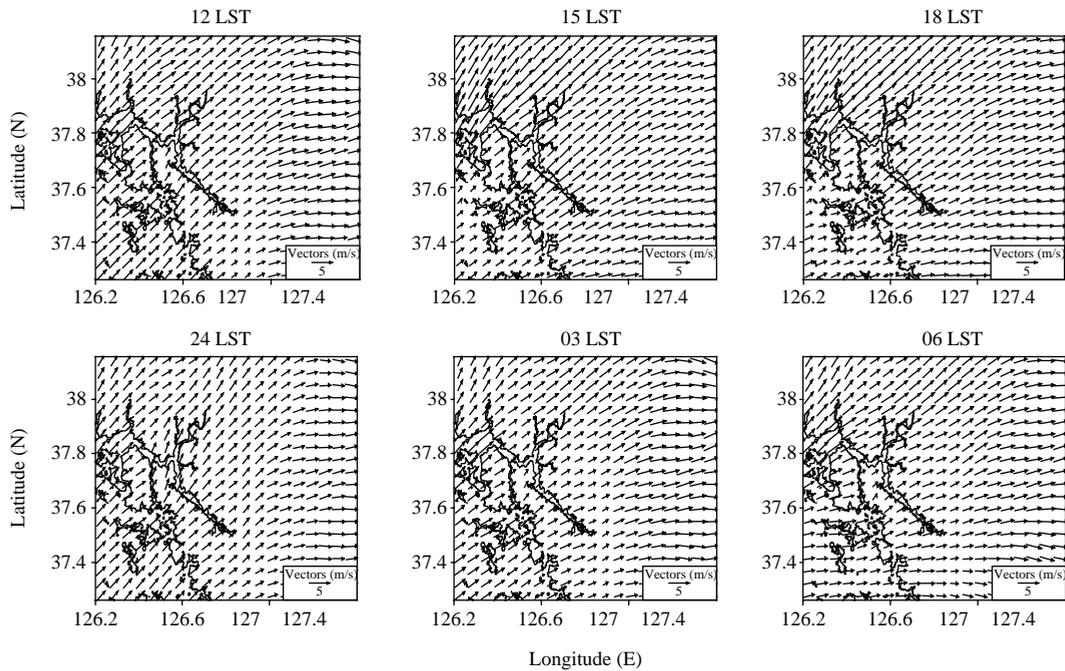


Fig. 4. Horizontal distribution patterns of wind field simulated by RAMS.

300초 (5분)로 설정하였다. 즉 유해대기오염물질의 누출은 10분 동안 지속되지만, 본 연구의 수치실험에

서는 5초 간격으로 1개씩 배출되는 라그랑지안 입자의 위치와 농도를 매 5분마다 1시간 동안 계산한 것

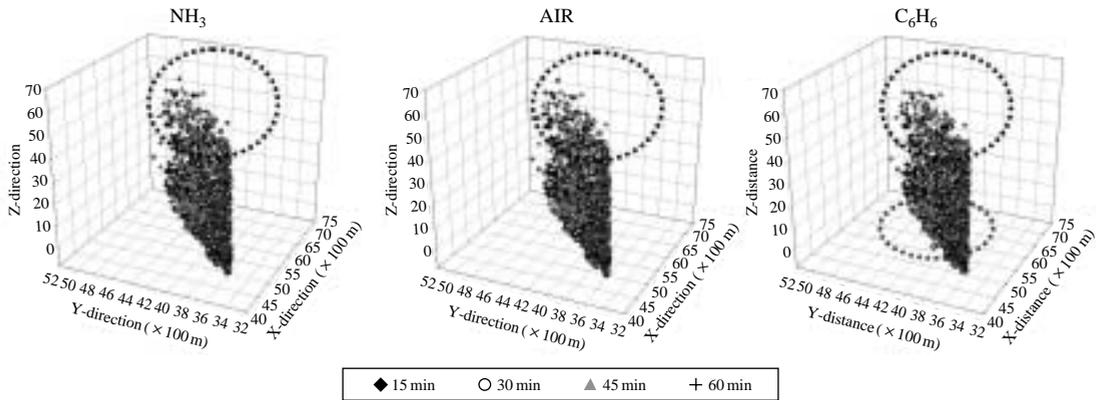


Fig. 5. 3D dispersions of hazardous chemicals are plotted in the 15 minute interval after instantaneous release of  $NH_3$ , Air and  $C_6H_6$  according to the RAMS wind field at 1500LST.

이다 - 5분마다 60개씩의 입자가 방출된다. 수치실험 변수로는 배출율 (emission rate), 물질 분자량 (molecular weight), 건·습침적 (dry·wet deposition) 및 부력효과 (buoyancy effect)의 고려여부 등으로 하였다. 여기서 고려된 물질은  $NH_3$ , 공기,  $C_6H_6$ 이며, 부력효과를 자세히 보기위해 공기보다 분자량이 작은  $NH_3$ , 분자량이 큰  $C_6H_6$ 이 각각 선택되었다.

### 3. 수치모의 결과 및 고찰

수치모의 결과는 라그랑지안 입자확산 실험에 중점을 두었으므로 1 km 간격으로 계산되어지는 상세 영역의 결과만 나타내었다. 그림 3과 4에서는 모델링 영역의 수치모의된 기상장을 나타낸다. 낮시간 복사 가열에 따라 내륙지역의 온도가 최고 32°C 정도까지 상승하는데, 특히 고온역은 내륙 깊숙이 들어갈수록 잘 나타나고 있으며, 일몰 후 복사냉각에 따른 온도 하강은 조금씩 나타나지만 다음 날 새벽까지도 비슷한 온도수준을 유지하고 있음을 볼 수 있다. 이는 이날의 온도편차가 약 10°C로서 작은 편이었는데, 서울특별시를 중심으로 한 경기도 주변까지 여름철에 자주 볼 수 있는 지속적인 고온현상을 함께 볼 수 있다. 이러한 온도분포를 따라 발생하는 바람은 바다와 육지간의 온도차가 큰 주간에 좀 더 강한 풍속과 바다쪽에서 불어오는 바람이 탁월하였고, 야간에는 낮보다는 약화된 바람이 불고 있다.

RAMS에서 계산되어진 바람장을 따라 난류 확산되어지는 현상을 그림 5에 나타내었다. 각 물질별로 1500 LST에서 배출이 시작되어 15분 간격으로 1시간 동안의 분산형태를 각각 나타낸 것이다. 여기서는 배출율을 50 g/sec로 고정하였고 모두 침적과 부력효과를 고려한 것이다. 1500 LST의 바람(그림 4)은 남서풍이 탁월한 것으로 그러한 주풍을 따라 입자들이 확산되고 있으며, 공기를 기준으로 분자량이 작은  $NH_3$ 는 3차원 공간에서 공기와의 거의 유사한 유형을 보이지만,  $C_6H_6$ 와 비교해 볼 때 수평적인 분포에서는 거의 유사하지만 연직적으로는 보다 높이 확산되어 퍼져나감을 볼 수 있다. 특히  $C_6H_6$ 의 경우 지표면 부근에 침적되는 현상이 다른 물질들에 비해 많이 나타났다. 이는 기존의 라그랑지안 분산예측에 침적항과 부력항을 추가함으로써 나타낼 수 있는 효과로 볼 수 있다.

그림 6은 각 물질별로 배출율을 따라 1시간 평균한 10 m 고도 부근의 농도분포를 나타낸다. 여기서 농도의 변화는 각 물질별로 배출율을 일정 비율로 증가시킴으로써 나타난다. 배출율을 10배씩 증가시켰을 때 배출율이 증가될수록 농도도 증가되었으며, 같은 배출율 조건인 경우 무거운 물질일수록 10 m 고도부근 농도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 5에서 고찰한 바와 같이 침적과 부력항 추가에 따른 10 m 고도 아래 지표면 부근으로의 중력낙하된 입자들이 보다 많음을 보여 주고 있다. 특히 배출이 시작된 오염원 부근에 농도가 높으면서 거리가 멀어

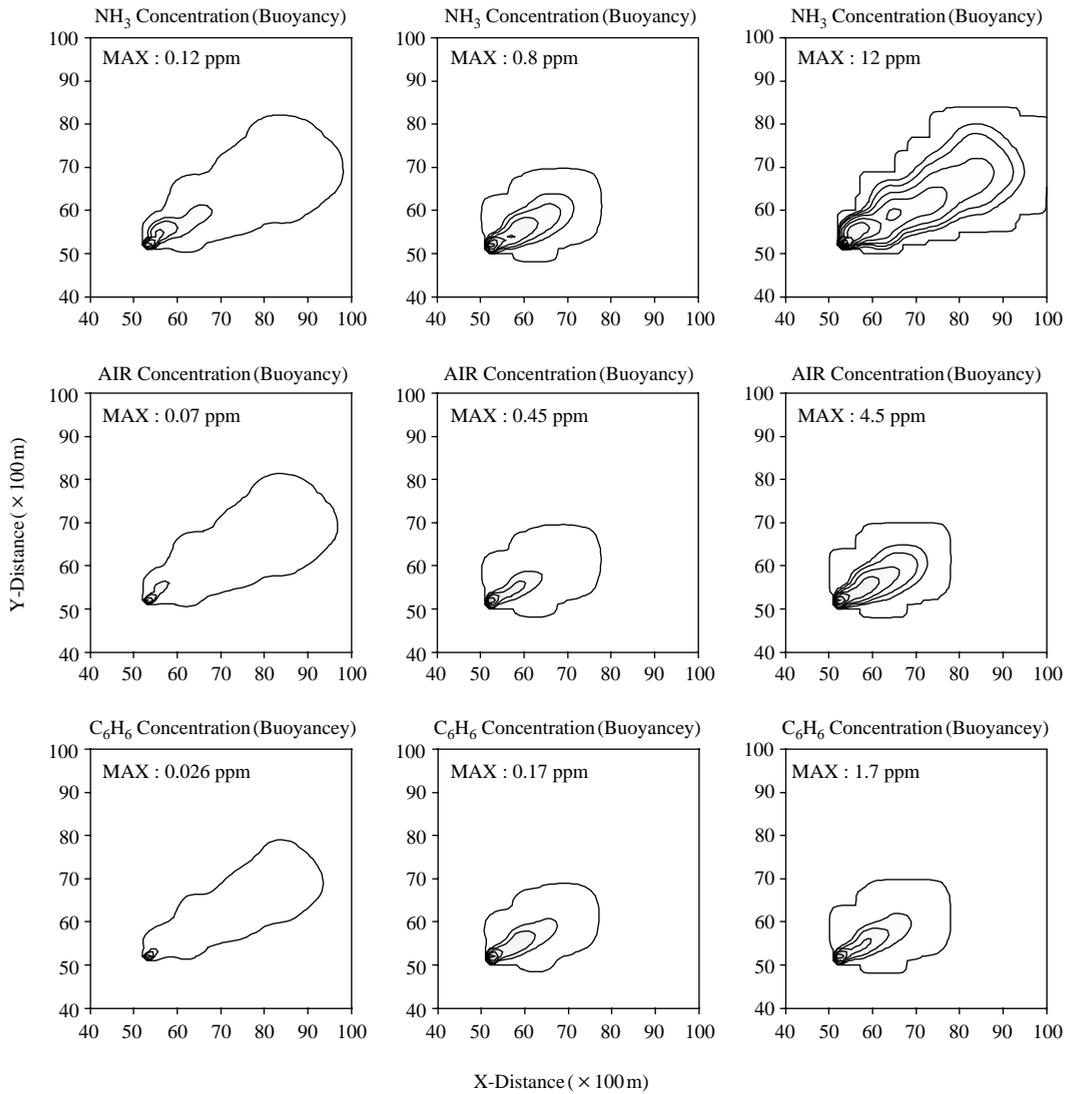


Fig. 6. Horizontal distributions of the simulated concentrations at the 10 m level for the chemicals and the emission rate of 5 g/s, 50 g/s and 500 g/s respectively.

질수록 이 시간의 탁월풍을 따라 퍼져나가 농도가 감소하는 것을 볼 수 있었다.

이상의 부력효과를 좀 더 자세히 보기 위해 C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> 물질에 대해 침적향과 부력향을 추가한 경우(부력 고려)와 추가하지 않은 경우를 각각 비교해 보았다. 3차원 공간상의 위치를 15분 간격으로 확인해 보면(그림 7) 부력을 고려한 경우 초기 확산시 수평적으로 약간 넓게 퍼진 형태로 시간이 경과 할수록 지표

부근에 침적되었다. 농도분포(그림 8)에서는 입자방출 후 물질 누출시간 10분까지는 농도가 증가되며, 부력효과를 고려한 경우의 농도가 그림 6의 분포에서처럼 부력을 고려하지 않은 경우에 비해 낮게 나타나지만, 누출이 끝난 15분이나 20분에는 모델링 영역내에서 전체적인 농도분포는 약간 차이가 있으나 최대 농도값이나 분포양상이 거의 비슷하게 나타났다. 이는 배출원에서 유해화학물질의 누출당시 배

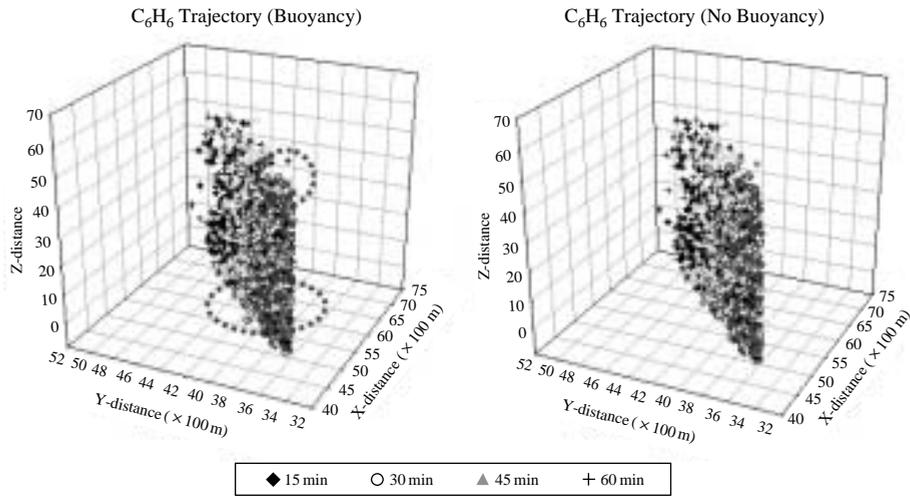


Fig. 7. 3D Lagrangian particle distributions plotted in the 15 minute interval (a) with buoyancy term and (b) without buoyancy term for  $C_6H_6$ .

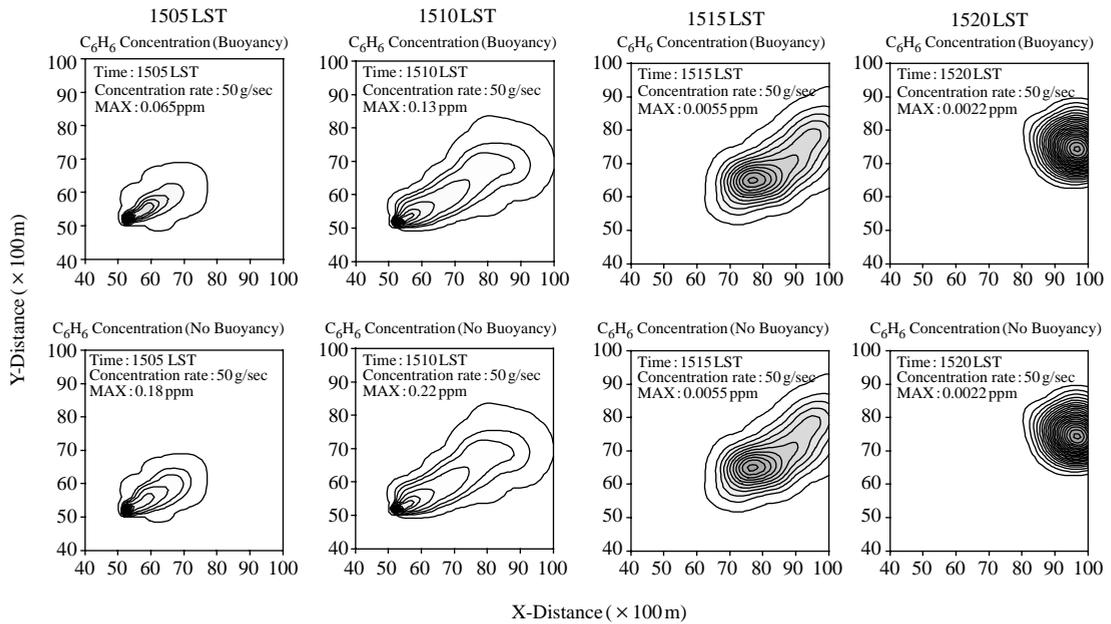


Fig. 8. Horizontal distributions of the simulated concentration at the 10 m level in the 5 minute interval with and without buoyancy effect.

출원근방이나 지표부근에 영향이 보다 큼을 나타내며, 누출이 정지된 이후부터는 부력항 및 침적항추가

에 대한 효과는 약화됨을 나타낸다. 또한 부력을 고려한 경우 농도가 낮은 것은 Gopalakrishnan and

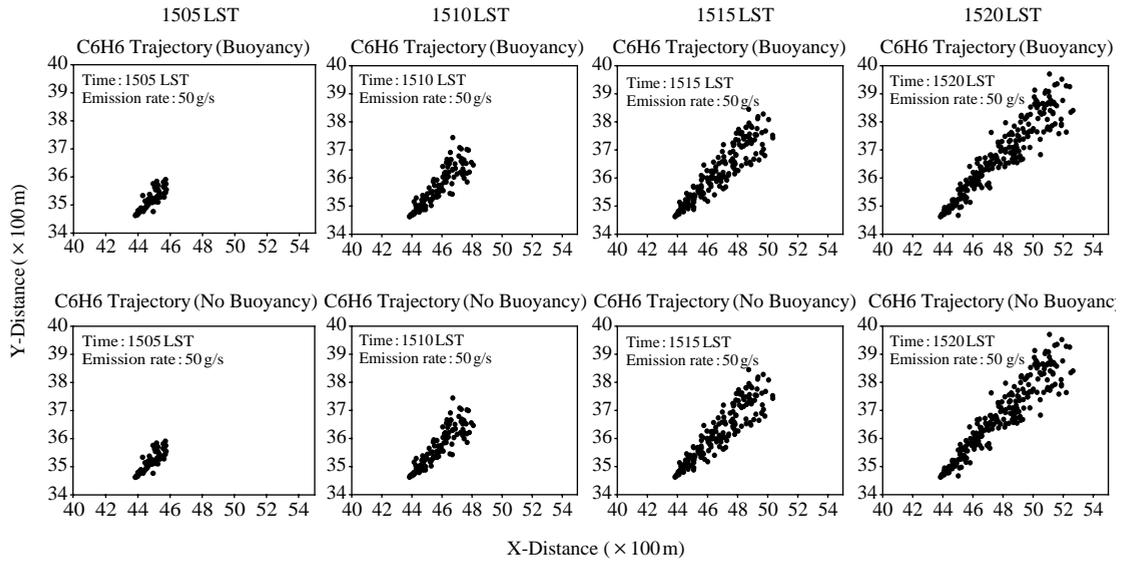


Fig. 9. Lagrangian particles distribution patterns projected horizontally on the x-y plane according to the RAMS wind field at the 10 m level.

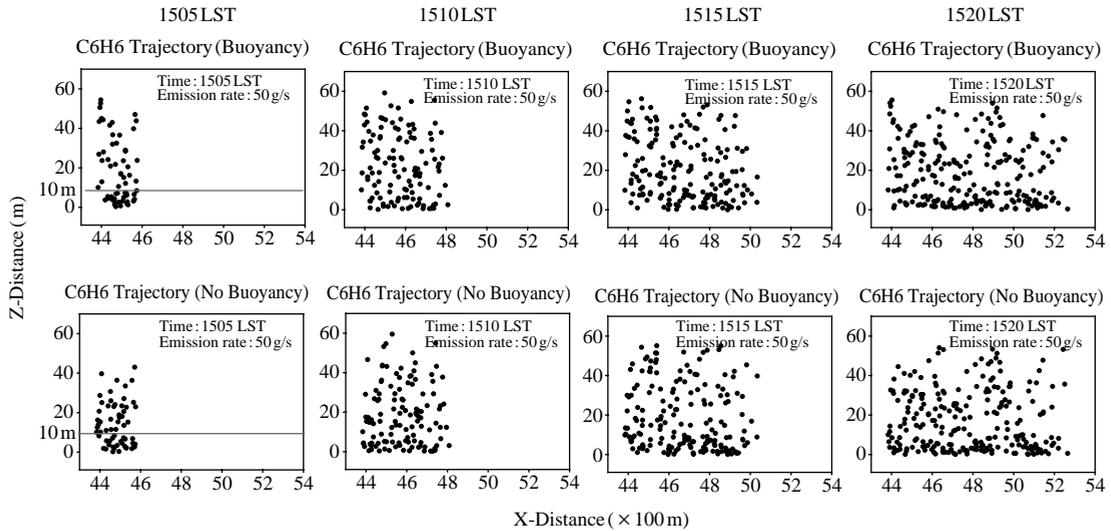


Fig. 10. Lagrangian particles distribution patterns projected vertically on the x-z plane.

Sharan (1997)의 선행연구에서 보였던 중력 침강과 혼입과정에 의한 희석효과로도 해석할 수 있다. 이를 x-y평면(그림 9)과 x-z평면(그림 10)에 입자를 투영한 형태를 살펴보면, x-y평면상에서는 부력을 고려한 경우가 배출원에서 수평적으로 약간 더 퍼져 투영되

기는 하지만 두 효과가 거의 유사하게 나타나고 있다. 반면, x-z평면에 투영된 입자들의 분산형태는 서로 상이하게 나타났는데, 특히 부력을 고려한 경우 초기에는 좀 더 연직으로 확산되기도 하나 시간이 경과할수록 지표부근으로 침적하는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구

선행연구를 통해 개선된 초기자료를 이용하여 예측된 RAMS 기상장 결과는 유해 대기오염물질의 난류확산 특성을 고찰하기 위해 사용되어졌다. RAMS의 난류확산장을 따른 라그랑지안 수송과정에서 기존의 라그랑지안 분산과정에 유해 대기오염물질의 난류특성을 고려하여 침적효과와 부력효과를 추가하여 수치모델링하였다.

유해 대기오염물질들은 짧은 시간 내 오염원근방 대기내로 이동하여 영향을 미치면서 시간 경과에 따라 멀리, 높이 확산되기도 하지만 지표면부근에 쌓이는 것을 볼 수 있었다. 또한 배출율의 변화와 물질별 분자량의 차이에 따라서도 지표 부근 농도변화에 민감하게 영향을 미침을 예측할 수 있었다. 특히, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>와 같은 heavy gas의 경우 오염원근방과 지표부근 저층대기에 영향이 큼을 예측할 수 있었고, 초기누출시 침적과 부력효과에 따른 분포차이를 보이지만, 시간이 경과할수록 서로 유사한 분포를 보였다. 이는 침적항과 부력항의 추가에 따른 효과인 것으로 누출이 정지된 이후부터는 부력항 및 침적항 추가에 따른 효과는 약화됨을 알 수 있었고, 중력 침강과 혼합 과정에 의한 희석효과도 함께 확인할 수 있었다.

그리고 라그랑지안 입자들은 RAMS의 난류확산장에서 예측된 주 풍향을 따라 이동확산 되어지므로 정확한 난류확산장의 예측이 유해 대기오염물질의 거동 예측에 무엇보다 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

이상의 수치모델링 결과들은 유해 화학물질의 비정상적 누출에 대비한 대응지침을 제공할 수 있도록 개선되어진다면 유해 대기오염물질 저감대책 수립에 필요한 기초자료로 활용될 수 있으리라 본다. 이를 위해 앞으로 유해 대기오염물질의 대기내 화학반응의 추가와 대기내 확산을 검증할 수 있는 실험들이 병행되어진다면 이러한 수치모의에 향상을 주리라 본다.

#### 참 고 문 헌

송창근 (2004) Development of a 3-D Lagrangian Particle

Dispersion Model including the Photochemical Reaction, 서울대학교 대학원 지구환경과학부 박사학위논문.

원경미, 이화운, 정우식, 이귀옥, 김철희 (2004) 초기 입력 자료의 개선에 의한 RAMS 기상장 예측, 2004년 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 75-76.

원경미, 이화운, 김철희, 지효은 (2005) 구름효과에 따른 지표면 기상장 수치모의, 2005년 한국환경과학회 봄 학술대회 논문집, 127-128.

차준석 (2005) 국내 유해대기오염물질의 배출 인벤토리 구축, 유해대기오염물질의 관리실태 및 연구동향 자료집, 국립환경과학원, 155-197.

환경부 (2003, 2004) 화학물질 배출량조사 결과.

Artritt, R.W. (1985) Numerical studies of thermally and mechanically forced circulations over complex terrain, Ph. D. Dissertation, Dept. Atmos. Sci., Colorado State University, 151.

ATMET (2002) RAMS Technical description, RAMS Technical Manual at Atmospheric Meteorological and Environmental Technology site (<http://www.atmet.com>).

Song, C.-K., C.-H. Kim, S.-H. Lee, and S.-U. Park (2003) A 3-D Lagrangian particle dispersion model with photochemical reactions, Atmospheric Environment, 37, 4607-4623.

Cogan, J.L. (1985) Monte Carlo simulation of buoyant dispersion, Atmospheric Environment, 21, 867-878.

de Haan, P. (1999) On the use of density kernels for concentration estimations with in particle and puff dispersion model, Atmospheric Environment, 33, 2007-2021.

Gopalakrishnan S.G. and M. Sharan (1997) A lagrangian particle model for marginally heavy gas dispersion, Atmospheric Environment, 31, 3369-3382.

Legg, B.J. and M.R. Raupach (1982) Markov-chain simulations of particle deposition in homogeneous flows: the mean drift velocity induced by a gradient in Eulerian velocity variance, Bound. Layer Meteor., 24, 3-13.

McNider, R.T. (1981) Investigation of the impact of topographical circulations on the transport and dispersion of air pollutants, Ph.D. dissertation, Dept. of Envir. Sci., Univ. of Virginia Charlottesville.

Park, S.-U. (1994) Estimation of non-reactive pollutant concentration using the Lagrangian particle dispersion model, Journal of Korean Meteorological Society, 30(3), 419-486.

Park, S.-U. and J.-Y. Moon (2001) Lagrangian Particle

- Dispersion Modeling in the Complex Coastal Terrain of Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 37(3), 225-238.
- Pielke, R.A. (1974) A three dimensional numerical model of the sea breeze over south Florida, *Mon. Weath. Rev.*, 102, 115-139.
- Smith, F.B. (1968) Conditioned particle motion in a homogeneous turbulent field, *Atmospheric Environment*, 2, 491-508.
- Stull, R.B. (1991) *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer academic pub., 666.
- Taylor (1921) Diffusion by continuous movements, *Proc. London Math. Soc. Series 2*, 20, 196-212.
- Van Dop, H. (1992) Buoyant plume rise in a Lagrangian framework, *Atmospheric Environment*, 26A, 1335-1346.
- Walko, R.L., C.J. Tremback, R.A. Pielke, and W.R. Cotton (1995) An interactive nesting algorithm for stretched grids and variable nesting ratios. *J. Appl. Meteor.*, 34, 994-999.
- Witlox, H.W.M. (1994) The HEGADAS model for ground-level heavy gas dispersion-I. Steady state model. *Atmospheric Environment*, 28, 2917-2932.
- Yamada, T. and S. Bunker (1986) Development and application of a nested grid mesoscale model for transport and diffusion over complex terrain, *AMS/APCA Fifth Joint Conference on Air Pollution Meteorology*, 18-21 November Chapel Hill, NC.