

대구상공에서의 대기 오염 물질 확산에 관한 연구

윤 일 회* · 민 경 덕 · 박 동 재

경북대학교 *지구과학교육과, 천문기상학과
(1994년 4월 8일 접수)

A Study on the Diffusion of Atmospheric Pollutants over Taegu

Ill-Hee Yoon*, Kyung-Duck Min and Dong-Jae Park

**Dept. of Earth Science, Dept. of Astronomy and Meteorology, Kyungpook National
University, Taegu, 702-701, Korea
(Manuscript received 8 April 1994)*

Abstract

Meteorological parameters in the atmospheric boundary layer and the vertical and horizontal dispersion parameters were determined by analyzing the data obtained by the special upper-air observations of one clear day for each season from October 1991 to August 1992. The concentration of the atmospheric pollutants over Taegu was analyzed by using the application of the Gaussian diffusion model.

In the diurnal variation of diffusion of atmospheric pollutants, vertical diffusion due to turbulence is active in daytime while horizontal diffusion due to wind is active in nighttime. The mean concentration of pollutants in the side of downwind is higher during the daytime than the nighttime. Thus, the height of the mixed-layer at the nighttime considered as the most important parameter of the mean concentration of pollutants. In the seasonal variation of diffusion of atmospheric pollutants, vertical diffusion due to strong solar radiation is active in summer case day, and horizontal diffusion due to strong wind is active in winter case day. In winter case day, the mean concentration of pollutants in the side of downwind is maximum in the daytime. However, in summer case day, that is maximum in the nighttime.

Key Words : dispersion parameters, atmospheric boundary layer, Gaussian diffusion model, atmospheric pollutants, concentration of pollutants

1. 서 론

대도시의 대기 오염 문제는 인구, 산업 시설 그리고 교통량의 증가에 의하여 날로 심각하게 대두되고 있다. 배출된 대기 오염 물질은 사람의 건강을 위협할 뿐아니라, 각종 건축물의 수명을 단축

시키고, 태양 광선을 반사하거나 산란하여 일조량과 시정을 감소시킨다. 이러한 대기 오염 물질의 농도를 정확히 예측하기 위해서는 배출원의 파악은 물론 배출된 오염 물질의 종류와 확산, 수송 그리고 화학적 변화 과정을 잘 이해하여야 한다. 특히 일정한 배출량을 가진 고정 오염원에 의한

국지 규모의 대기 오염 물질의 농도 예측은 오염 물질의 수송과 확산에 의하여 결정되므로 이를 지배하는 정확한 기상 자료에 대한 지식이 없이는 불가능한 것이다(Draxler, 1990). 그러나 일반적으로 얻을 수 있는 기상 자료인 지상 및 상층 자료는 시·공간상으로 너무 띄엄띄엄 분포되어 있으므로 국지 규모의 대기 오염 모델에 직접 이용할 수 없다. 그러므로 국지 규모의 대기 오염 물질의 농도 예측을 위해 특별 관측이 필수적으로 수반되어야 한다. 그러나 특별 관측망을 구성하기 위해서는 인력, 장비 및 막대한 경비 등이 소요된다.

기상 조건과 대기 오염 물질의 확산에 관한 연구로서 국외에서는 혼합고 및 역전층의 높이 추정에 관한 연구(Holzworth, 1972), 지면에서의 SO₂의 농도와 혼합고와의 관계에 관한 연구(Moses *et al.*, 1971; Gifford, 1972)가 있다. 그리고 관측된 바람과 대기 오염 물질의 농도와의 관계를 밝히는 연구(Hanna, 1973; Gifford, 1975)등이 있다.

국내의 연구로는 신용배(1982)는 충남 보령군 고정리(고정 화력발전소 소재)를 모델 적용 대상 지역으로 선정하고 개발한 기상 자료 프로그램으로 얻은 기상 자료와 배출원 조사를 통한 오염원 자료 등을 이용하여 가우스 확산 이론에 근거를 둔 대기질 수치 모델에 적용하였다. 정관영(1989)은 해안근처의 대기 오염 물질의 농도는 해륙풍의 영향을 강하게 받음을 보여주었다. 대기 오염 물질의 농도에 미치는 기상 변수 특히, 대기 안정도와 바람 그리고 혼합고에 대한 영향을 알아보기 위해 기상연구소(1990, 1991)는 경인지역에서 특별 관측을 실시하였고, 이 관측 자료를 2차원 상자 모델과 K-모델에 적용하였다. 박영주(1990)는 서울시의 오염 물질의 연직 분포는 혼합층의 성장에 따라 다르게 나타남을 보였다. 또한 이태영 등(1990)은 서울의 대기 오염 농도 예측 모형의 개발에 관한 연구를 한 바 있다. 장근일(1991)은 서울시의 3차원 바람구조의 특징에 관한 연구에서 서울시의 오염 문제를 다루는데 있어서 바람 자료가 중요함을 보였다. 윤일희(1991)는 5년간(1983.12~1988.11)의 남한의 지상 기상 관측 자료를 이용하여 3차원 바람장을 구하고 라그랑지안 무작위 입자 확산 모형을 이용하여 오염 물질의 수송과

확산을 추정한 바 있으나 대구시에 대한 연구는 전무한 실정이다.

이 연구에서는 대구 지방에서의 기상 조건에 따른 대기 오염 물질의 확산을 알아 보기 위해 1991년 10월 부터 1992년 8월 까지 계절별로 하루씩 파이발(Pibal) 및 라디오존데(radiosonde) 관측을 실시하여 이들 관측에서 얻어진 기상 자료들을 토대로 마찰 온도, 마찰 속도, 대류 속도 척도 및 연직수평 확산 계수를 계산하고자 한다. 또한 계산된 대기 경계층의 기상 변수 및 확산 계수를 가우스 확산 방정식에 대입하여 대기 오염 물질의 농도 분포를 추정하고자 한다.

2. 상층 관측 및 자료

가우스 확산 모델의 입력 자료로 필요한 대기 경계층의 기상 변수 및 확산 계수를 구하기 위해 상층 특별 관측을 실시하였다. 관측은 1991년 10월부터 1992년 8월까지의 기간 중 각 계절별로 일기 상태가 양호한 특정 일에 파이발 및 라디오존데 관측을 실시하였다(Table 1). 파이발 관측은 매시마다 그리고 라디오존데 관측은 3시간마다 관측하는 것을 원칙으로 하였으나, 기상 상태의 변화나 관측 장비의 고장 등으로 인한 부득이한 경우에는 관측 시각을 변경하였다. 파이발 관측은 수소 개스를 넣은 고무 풍선(30g)을 띄워 일정한 시간 간격으로 고도와 방위각을 경위의로 측정하여 고도에 따른 풍향과 풍속을 계산하였다. 라디오존데 관측은 수소 개스를 넣은 풍선(100g)에 기온, 기압, 습도 등과 같은 기상 요소를 측정할 수 있는 라디오존데(Model AS-3A)를 매달아 띄워 자료들이 송신되면 이들 자료들은 자료 처리기(ADAS : Model AIR-3C)로 수신되어 여러가지 기상 변수들을 계산하게 된다.

상층 특별 관측에서 얻을 수 있는 자료 외에 가우스 확산 모델에 필요한 변수를 구하기 위해 대구의 지형 자료를 50,000 분의 1 지형도에서 1km 간격으로 고도값을 읽어 1-2-1 filter 를 사용하여 평활하였다(Fig. 1). 상층 특별 관측을 실시한 경북대학교 제2과학관은 대구 시내의 중심지에서 약

Table 1. Date and time of Pibal and Airsonde observation. (○:observed, ×:not observed)

Season	Observation date	Observation time	Pibal	Airsonde	
AUTUMN	Oct. 12, 1991	1100 LST	○	×	
		1200	○	○	
		1300	○	×	
		1400	○	×	
		1500	○	○	
		1600	○	○	
		1700	○	×	
		1800	○	○	
2100	○	×			
WINTER	Jan. 27, 1992	1000	○	×	
		1100	○	×	
		1200	○	×	
		1300	○	×	
		1400	○	×	
		1500	○	×	
	Jan. 28, 1992	1200	×	○	
		1500	×	○	
	Feb. 9, 1992	2000	○	×	
		2200	○	×	
		Feb. 10, 1992	0000	○	×
			0200	○	×
			0300	×	○
			0400	○	×
0600	○	×			
0700	×	○			
0800	○	×			
SPRING	May 2, 1992	1200	○	○	
		1300	○	×	
		1400	○	×	
		1500	○	○	
		1600	○	×	
		1700	○	×	
	May 3, 1992	1800	○	○	
		2100	○	×	
		2300	○	×	
		0100	○	×	
		0300	○	○	
		0600	○	×	
0700	○	×			
0800	○	×			
SUMMER	Aug. 29, 1992	1200	○	○	
		1300	○	×	
		1400	○	×	
		1500	○	×	
		1600	○	×	
		1700	○	×	
		1800	○	○	
		2000	○	×	
		2200	○	×	
		Aug. 30, 1992	0000	○	×
	0200		○	×	
	0300		○	○	
	0500		○	×	
	0700	○	×		
0900	○	○			
Total			53	16	

3km 북북동쪽에 위치하며, 관측 지점의 해발 고도는 약 70m이다.

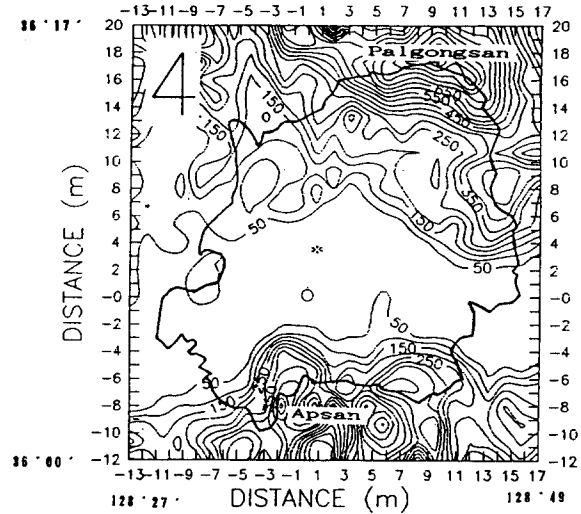


Fig. 1. Topography of Taegu. The contour interval in the figure is 50m, and the heavy solid line represents the boundary of Taegu city. * denotes the source point of the atmospheric pollutants.

3. 분석 방법

이 연구에 필요한 가우스 확산 모델의 계산에 사용되는 가장 중요한 변수인 연직 및 수평 확산 계수를 구하기 위하여 지표면 거칠기 길이, 마찰 속도, 마찰 온도, 대류 속도 척도와 같은 대기 경계층 매개 변수와 혼합층의 높이가 필요하다. 이 장에서는 상층 특별 관측에서 얻어진 자료를 이용하여 각각의 변수들을 계산하는 방법에 대하여 기술되어 있다.

3.1 지표면 거칠기 길이

지표면 거칠기 길이(surface roughness; Z_0)는 지형·지물이 있는 지면 근처에서 풍속이 0이 되는 고도이다. 이 길이는 난류 확산의 하층 경계 기준으로 사용되며, 지표층 내에서는 운동량 속이나 열 속 등의 연직 분포를 결정하는 중요한 변수이다. 그러나 실제 지면은 매우 복잡한 지형 지물로

이루어져 있기 때문에 어느 한 관측 지점의 거칠기 길이를 지형 지물에 의하여 결정하기란 쉽지 않다. 이 변수의 크기는 지표면의 상태 그리고 토지 이용도에 의해 결정되며 본 연구에서는 Vukovich *et al.*(1976)와 Hjelmfelt(1982)에 의해 구하여진 방법에 따라 아래와 같은 식으로 구하였다.

$$Z_0 = Z_L + 0.001 \cdot Z_G \quad (1)$$

여기서 Z_L 는 토지 이용도를 나타내며 일반적으로 해발 500m 까지 30cm, 500~1000m 까지 20cm, 1000m 이상의 경우 10cm 로 주어진다. Z_G 는 관측 지점의 해발 고도(m)로서 이 연구에서는 5만분의 1 지형도에서 격자 거리 1km 간격으로 해발 고도를 읽어 격자점의 지형 고도 값을 만들고 1-2-1법에 의하여 평활한 후 얻은 값인 70m를 사용하였다.

3.2 마찰 온도

마찰 온도(friction temperature; θ_*)는 지표 현열속의 크기와 방향을 나타내는 변수로서, Z/L 의 함수로 표현할 수 있다. 지표층 상사 이론에 따르면 아래와 같이 온위의 연직 분포의 함수로서 나타낸다(McBean, 1979).

$$\theta_* = \frac{k [\theta(Z_3) - \theta(Z_2)]}{\ln\left(\frac{Z_3}{Z_2}\right) - \psi_H\left(\frac{Z_3}{L}\right) + \psi_H\left(\frac{Z_2}{L}\right)} \quad (2)$$

여기서 Z_3, Z_2 는 지표로부터의 임의의 고도이며, L 은 Monin-Obukhov 길이 척도이다. $\theta(Z)$ 는 고도 Z 에서의 온위를 나타내며 이 연구에서는 라디오존데 관측 자료에서 얻은 온위의 연직 구조에서 구하였다. ψ_H 는 안정도 함수이며, L 이 양인 경우와 음인 경우는 다음의 식(3)-(6)과 같이 주어진다 (Dyer, 1974; Yaglom, 1977; Businger *et al.*, 1971; Wieringa, 1980a, b).

$L < 0$ 인 경우 아래의 식(3)과 같이 정의된다.

$$\psi_H = \ln\left(1 + \frac{y^2}{2}\right) \quad (3)$$

여기서 y 는 아래의 식(4)와 같이 주어진다.

$$y = \left[1 - 16 \frac{Z}{L}\right]^{1/4} \quad (4)$$

그리고 $L > 0$ 인 경우는 아래의 식(5)와 같이 정의된다.

$$\psi_H = -5 \frac{Z}{L} \quad (5)$$

여기서 Monin-Obukhov 길이 척도(L)은 아래의 식(6)과 같이 주어진다.

$$L = - \frac{T u_*^3 \rho C_p}{g k H} \quad (6)$$

여기서 T 는 지표층의 평균 기온이고, g 는 중력가속도, u_* 는 마찰 속도, H 는 현열속이며, ρ 와 C_p 는 각각 공기의 밀도와 정압 비열이다. 그리고 k 는 von Kármán 상수로서 여기서는 0.4로 사용하였다.

이 연구에서는 상층 특별 관측에서 얻어진 바람의 연직 구조와 온위의 연직 구조의 자료를 이용하여 L 의 값을 계산하였다. 여기서 사용한 방법은 아래의 식(7)을 이용하여 Richardson Number (Ri)를 구한다.

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \left[\frac{\partial U}{\partial Z} \right]^{-2} \quad (7)$$

대기가 불안정한 경우($\partial \theta / \partial Z < 0$)에서는 고도(Z)와 Ri 를 가로축과 세로축으로 하는 그래프에서 1차 회귀선을 구하여 그 직선의 기울기를 L 의 값으로 취하였다. 대기가 안정한 경우($\partial \theta / \partial Z > 0$)에서는 고도(Z)와 $Ri/(1 - Ri)$ 를 가로 및 세로축으로 하는 그래프를 그리고 1차 회귀선의 직선의 기울기를 L 의 값으로 취하였다(Nieuwstadt, 1978; McBean, 1979; Berkowicz와 Prahm, 1982).

3.3 마찰 속도

마찰 속도(friction velocity; u_*)는 바람 시어(wind shear)에 의하여 발생되며, 난류 경계층, 특히 지표 경계층내의 마찰에 의한 기류 속도 변화의 크기를 나타내는 변수로서 지표층 내에서 풍속의 연직 구조를 결정하는데 매우 중요하다. 마찰 속도는 Z/L 의 함수로 표현할 수 있고, McBean (1979)에 따르면 지표층 상사 이론에 따라 다음과 같이 마찰 속도를 풍속의 연직 구조 함수로 나타낼 수 있다.

$$u_* = \frac{k U(Z)}{\ln\left(\frac{Z_1}{Z_0}\right) - \psi_M\left(\frac{Z_1}{L}\right) + \psi_M\left(\frac{Z_0}{L}\right)} \quad (8)$$

여기에서 $U(Z)$ 는 어떤 임의의 고도 Z 에서의 풍속으로서 본 연구에서는 Pibal 관측에서 얻은 풍속의 연직 구조에서 그 값을 취하였다. ψ_M 는 안정도함수이며, L 의 값이 양인 경우와 음인 경우는 다음의 식(9)-(11)와 같이 주어진다(Dyer, 1974; Yaglom, 1977; Businger *et al.*, 1971; Wieringa, 1980a,b; Paulson, 1970).

$L < 0$ 인 경우 아래의 식(9)와 같이 정의된다.

$$\psi_M = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2 \tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

여기서 x 는 아래의 식(10)과 같이 주어진다.

$$x = \left[1 - 16 \frac{Z}{L} \right]^{1/4} \quad (10)$$

$L > 0$ 인 경우는 다음의 식(11)과 같이 주어진다.

$$\psi_M = -5 \frac{Z}{L} \quad (11)$$

3.4 대류 속도 척도

태양 복사 에너지가 강한 낮에는 강한 열 속(Heat Flux)이 지표로부터 대기로 향한다. 이 때

나타나는 부력 효과를 나타내기 위하여 대류 속도 척도(convective velocity scale ; w_*)를 사용한다. 이 연구에서는 Deardorff(1970)의 방법에 의해 그 값을 계산하였다.

$$w_* = \left(\frac{g}{\theta_m} (-u_* \theta_*) Z_i \right)^{1/3} \quad (12)$$

여기서 θ_m 는 혼합층내에서의 고도에 따른 온위의 평균값이며, u_* 는 식(7)에서 구한 마찰 속도이고, θ_* 는 식(2)에서 구한 마찰 온도이다. 그리고 Z_i 는 혼합층의 높이(m)를 나타낸다. 혼합층은 대기 오염 물질이 연직으로 확산되는 상한을 결정하며, 지표로부터 난류에 의하여 연직 혼합이 활발히 일어나는 층으로 대기 오염 물질의 확산에서 혼합층의 높이는 매우 중요한 변수이다. 이 연구에서는 온위의 연직 구조에서 고도에 따라 온위가 거의 변하지 않다가 온위가 고도에 따라서 양의 기울기로 변하는 곳의 높이를 혼합층의 높이로 하였다. 그리고 온위의 연직 구조로 판단할 수 없는 경우에는 식(7)을 이용하여 구한 Ri 의 연직 구조에서 Ri 의 값이 2.0 이상을 나타내는 곳의 고도를 혼합층의 높이로 취하였다.

3.5 대기 오염 물질의 농도 분포 추정

1) 가우스 확산 모델

대구 지방의 대기 오염 물질의 농도의 분포를 추정하기 위하여 계산 과정이 비교적 간단하고 폭넓게 사용되고 있는 가우스 확산 모델을 사용하였다. 가우스 확산 모델에서는 점 오염원에서 방출된 대기 오염 물질의 플룸(plume)안에서 물질들의 분포는 연직 방향이나 수평 방향 모두 가우스 분포를 가진다고 가정한다. 플룸의 표준 편차 혹은 확산 계수는 풍하 거리에 따른 방향으로의 평균 풍속과 난류의 구조의 함수로 이론적으로 계산되어질 수 있다. 풍하측으로의 어떤 공간에서의 농도를 계산하기 위한 가장 일반적인 가우스 확산 방정식은 아래와 같이 주어진다(Gifford, 1975).

$$X(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \sigma_z \sigma_y u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left[\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right\} + \left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right\}\right] \quad (13)$$

여기서 $X(x, y, z)$ 는 공간 (x, y, z) 에서의 오염 물질의 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타내고, Q 는 오염 물질의 방출률로서 이 연구에서는 $100 \mu\text{g}/\text{s}$ 로 가정하였다. 그리고 u 는 혼합층의 평균 풍속으로 Pibal 관측에서 얻은 풍속의 연직 구조에서 계산하였으며, H 는 유효 굴뚝높이, 즉, 풀름의 중심선의 고도를 나타내지만 이 연구에서는 단순히 굴뚝의 높이로서 100m 로 가정하였다.

2) 연직 및 수평 확산 매개 변수

연직 확산 계수를 구하기 위하여 이 연구에서는 Deardorff와 Willis(1975)에 의해 정의된 다음의 식(14)를 사용하였다.

$$\frac{\sigma_z}{Z_i} = \frac{0.5 X}{(1 + 0.91 X)^{1/2}} \quad (14)$$

또한, 수평 확산 계수를 구하기 위해서는 본 연구에서는 Weil과 Brower(1982)에 의해 정의된 다음의 식(15)를 사용하였다.

$$\frac{\sigma_y}{Z_i} = X \left(0.56^2 + 1.26 \frac{u_*}{w_*}\right)^2 \quad (15)$$

대류 경계층에서의 연직 확산 계수(σ_z)와 수평 확산 계수(σ_y)는 위의 식(14)~(15)에서 보는 바와 같이 다음의 식(16)에서 정의된 무차원 풍하 거리(X)의 함수로서 정의된다(Deardorff와 Willis, 1975).

$$X = (w_*/Z_i) (x/U) \quad (16)$$

여기서, w_* 는 대류 속도 척도이며, Z_i 는 혼합층의 높이, x 는 풍하 거리, U 는 혼합층 안에서의 평균 풍속을 나타낸다.

위의 수평 및 연직 확산 계수를 구하기 위한 식(14)~(15)는 지면 근처에서 대류가 활발한 주간에

적용하기 위한 것들 이므로 지면에 역전층이 형성되는 새벽과 야간에 일어나는 대기 오염 물질의 확산을 알아보기 위해서 다른 방법으로 이들 계수를 구하여야 한다. 본 연구에서는 안정층에서의 수평 및 연직 확산 계수를 구하기 위해 PG-system을 사용하였다 (Venkatram과 Wyngaard, 1988). 특히 Briggs(1973)에 의해 제안된 것으로 아래식들을 사용하여 연직 및 수평 확산 계수를 계산하였다.

$$\sigma_z = 0.14 \cdot (1 + 0.0003x)^{-1/2} \quad (17)$$

$$\sigma_y = 0.16 \cdot (1 + 0.0004x)^{-1/2} \quad (18)$$

4. 분석 결과

4.1 대기 경계층의 매개 변수

상층 특별 관측에서 얻어진 기상 자료로 부터 얻어진 혼합고와 혼합층안에서의 평균 풍속과 평균 온위값을 Table 2에 나타내었다. 혼합층내의 평균 풍속은 계절적인 특징은 나타내지 못하였으나, 평균 온위의 값은 일변화와 계절적인 특성을 잘 나타내고 있다. Table 3에는 상층 특별 관측에서 얻어진 기상 자료를 이용하여 계산한 대기 경계층의 기상 매개 변수의 값을 나타내었다. 여기서 지면 거칠기 길이(Z_0)의 추정값은 0.37m 이다. Monin-Obukhov 길이와 마찰 온도는 주간에는 음의 값을 야간에는 양의 값을 나타내었다. 그리고 계산된 대류 속도 척도의 값은 주간에만 유효한 값을 가졌다.

4.2 대기 오염 물질의 농도 분포

Fig. 2는 가을 관측 결과 나타난 기상 자료를 이용하여 풍하 거리와 고도에 따른 오염 물질의 농도를 나타낸 것이다. 굴뚝의 높이를 100m 로 하였고 오염 물질의 방출률을 $100\mu\text{g}/\text{sec}$ 로 정하였다. 혼합고는 두 시간대에서 모두 2000m 이고 유입되는 공기의 배경 오염 농도는 $0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 하였다.

Table 2. Mixed-layer height, mean wind velocity and temperature at Taegu and Pohang.

SEASON	Obs. Date	T A E G U				P O H A N G	
		Obs. Time	M.L.H.	Mean Wind Vel.	Mean Temp	Obs. Time	M.L.H
AUTUMN	Oct.12, 1991	1200LST	1,700m	6.5m/s	293.8K	0900LST	1,700m
		1500	—	8.6	—	—	—
		1600	2,000	7.8	296.2	—	—
		1800	2,000	5.9	294.9	2100	1,800
WINTER	Jan.28, 1992	1200	450	—	276.5	0900	450
		1500	—	—	281.0	2100	—
	Feb.10, 1992	0300	1,100	6.7	271.7	2/9 2100	1,200
		0700	1,200	9.8	272.1	0900	1,200
SPRING	May 2, 1992	1200	2,200	9.8	291.9	0900	2,300
		1500	2,300	6.6	294.1	—	—
		1800	—	8.7	294.8	2100	2,300
	May 3, 1992	0300	—	6.9	287.8	0900	2,000
SUMMER	Aug.29, 1992	1200	2,200	6.6	305.9	0900	1,000
		1800	2,300	10.9	305.7	—	—
	Aug.30, 1992	0300	1,300	9.6	299.7	2100	1,000
		0900	—	6.5	299.9	0900	800

* M.L.H : Mixed-layer height.

Table 3. Micrometeorological parameters used in this study.

Observation Date	Time (LST)	L (m)	u. (m/s)	θ . (K)	w. (m/s)
Oct. 12, 1991	1200	-42	0.09	-3.50	2.61
	1600	-64	0.33	-0.13	1.42
	1800	181	0.34	0.03	—
Feb. 10, 1992	0300	72	0.45	0.04	—
	0700	16	0.29	0.02	—
May. 2, 1992	1200	-85	0.54	-1.06	3.47
	1500	-147	0.42	-0.88	3.04
	1800	11	0.38	0.001	—
May. 3, 1992	0300	64	0.41	0.17	—
Aug. 29, 1992	1200	-35	0.40	-0.23	1.86
	1800	-105	0.43	-0.06	1.21
Aug 30, 1992	0300	127	0.67	0.06	—
	0900	-3	0.63	-0.39	—

1600LST의 경우(Fig.2a)가 1800LST(Fig.2b)보다 연직 혼합이 활발하게 일어났다. 1800LST의 경우 1600LST의 경우 보다 오염 물질의 농도를 나타내는 등치선이 풍하측으로 조금더 기울어 연직 혼합이 감소되고 바람에 의한 수송이 증가되었음을 나타내고 있다. 지표면에서의 오염 물질의 농도를 보면 1600LST의 경우 $10\mu\text{g}/\text{m}^2$ 의 농도가 약 풍하 거리 6.5km에서 나타나는 반면 1800LST에는 풍하 거리 약 10.5km에서 나타났다.

Fig. 3은 겨울 관측 결과 나타난 기상 자료를 이용하여 풍하 거리와 고도에 따른 오염 물질의 농도를 나타낸 것이다. 1월 27일에 실시한 주간 관측은 고도에 따른 바람 관측이 이루어지지 않았기 때문에 농도 분포를 나타내지 못했다. 혼합고는 각각 1100m 와 1200m 이다. 두시간대 모두 야간이기 때문에 지표면에서의 강한 대류로 인한 연직 확산보다는 바람에 의한 수평 확산이 활발하게

이루어졌다. 두시간대에서 뚜렷이 구분되는 점은 없으나 0700LST의 경우(Fig.3b)가 0300LST의 경우(Fig. 3a)보다 수평 확산이 조금 더 강하게 나타났다.

Fig. 4는 봄 관측 결과 나타난 기상 자료를 이용하여 풍하 거리와 고도에 따른 오염 물질의 농도를 나타낸 것이다. 1200LST에 혼합고가 2200m에서 1500LST에 혼합고가 2300m로 약간 높아졌다. 이는 1200LST의 경우 보다 일 최고 기온이 나타나는 1500LST가 태양 복사 에너지의 지표면 가열로 대류가 활발하였음을 보여주었다. 이와 더불어 확산의 형태도 1500LST의 경우가 1200LST에 비해 연직 확산이 활발하게 나타나 동일한 결과를 보여 주었다. 지표면에서의 농도도 연직 확산이 활발한 1500LST의 경우가 1200LST에 비해 멀리까지 확산되지 못하여 같은 풍하 거리에서 1200LST보다 낮은 값을 보였다. 야간의 경우 주간에 비해 연직 확산이 급격히 감소하였다. 야간의 오염 물질의 확산의 형태는 지표면에서의 대류로 인한 연직 확산보다는 주로 바람에 의한 수평 확산이 일어남을 보여주었다. 1800LST와 0300LST의 계산된 확산 결과를 비교해 보면 지표면 근처에서 1800LST의 경우보다 0300LST의 경우가 풍하 거리상으로 더 멀리까지 확산되었음을 보여주었다.

Fig. 5는 여름 관측 결과 나타난 기상 자료를 이용하여 풍하 거리와 고도에 따른 오염 물질의 농도를 나타낸 것이다. 1200LST와 1800LST의 경우 각각 혼합고의 높이는 2200m와 2300m였다. 1800LST의 경우보다 1200LST의 경우가 연직 혼합이 활발하게 일어났다. 1800LST의 경우 1200LST의 경우 보다 등치선이 풍하측으로 기울어 연직 혼합이 감소되고 바람에 의한 수송이 증가되었음을 나타내었다. 지표면에서의 오염 물질의 농도를 보면 같은 풍하 거리에서의 오염 물질의 농도가 역시 1200LST보다는 1800LST의 경우가 크게 나타나 대류가 활발한 시간대에서는 연직 확산보다는 수평 확산이 강하게 일어남을 보여 주었다. 이 결과는 앞의 가을에서 나타난 결과와 일치한다. 야간의 경우 주간 보다 혼합고가 상당히 낮아져 대류에 의한 혼합이 일어나지 거의 일어나

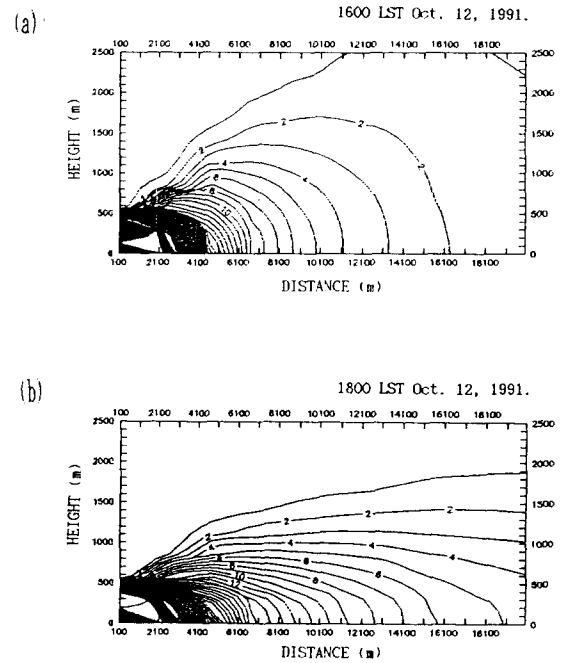


Fig. 2 Distribution of concentration of atmospheric pollutants($\mu\text{g}/\text{m}^3$) at (a) 1600LST and (b) 1800LST October 12, 1991.

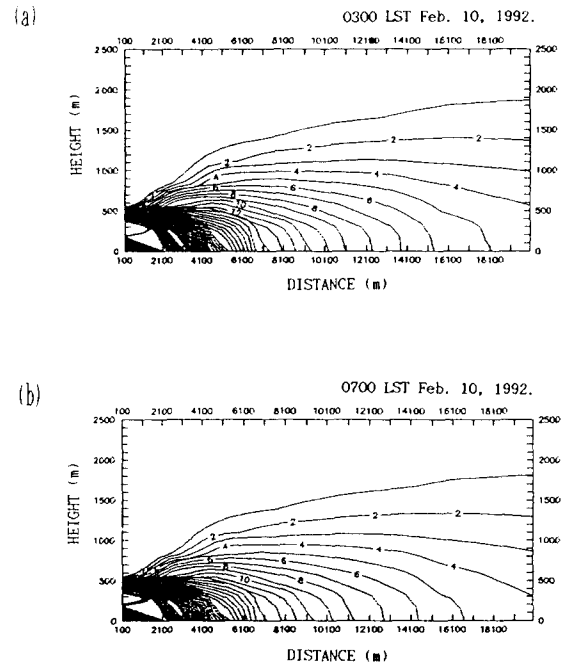


Fig. 3 Same as in Fig. 2, except for at (a) 0300LST and (b) 0700LST 10 February, 1992.

지 않았음을 보여준다. 이와 마찬가지로 오염 물질의 확산에 있어서도 연직 확산 보다 수평 확산이 더 강하게 일어나 오염 물질이 풍하측으로 더 많이 그리고 더 멀리까지 확산됨을 보여주었다. 0300LST와 0900LST의 경우를 비교해 볼 때 0300LST의 경우가 더 멀리 까지 오염 물질이 확산된 것으로 나타났다.

5. 결론

이 연구는 지난 1991년 10월 부터 1992년 8월 까지 각 계절별로 일기 상태가 양호한 날을 하루씩 택하여 상층 특별 관측을 실시하여 얻어진 관측 자료로부터 기상 변수 및 확산 매개 변수를 결정하였다. 그리고 이 변수들을 가우스 확산 모델에 적용하여 대구시의 대기 오염 물질의 농도 분포를 분석해 보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

대기 오염 물질의 확산의 일변화의 경우, 주간에는 난류에 의한 연직 확산이 활발하여 혼합층내의 전층에 걸쳐 오염 물질의 확산이 일어나는 반면 야간에는 대류에 의한 연직 확산보다는 바람에 의한 수평 확산이 크게 나타났다. 풍하측의 어떤 공간에서 오염 물질의 평균 농도는 야간의 경우가 주간의 경우보다 크게 나타났다. 이는 야간의 낮은 혼합고가 오염 물질의 농도를 높여주는 중요한 변수임을 알 수 있다. 대기 오염 물질의 확산의 경우 계절적으로 연직 확산은 일사가 강하여 지표 및 대기의 온도가 높은 여름에 가장 강하게 나타났다. 풍하 방향으로의 수평 확산은 풍속이 강하게 나타날 겨울이 강하게 나타났다. 풍하측의 어느 공간에서의 대기 오염 물질의 농도는 주간의 경우는 혼합고가 낮은 겨울철이 높고, 야간의 경우에는 수평 확산보다는 연직 확산이 크게 나타날 여름철이 높게 나타났다.

대구와 같이 규모가 수 십 km 정도의 국지 규모에서의 오염 물질의 확산에 관한 연구는 대기 경계층 내에서 보다 정확한 기상 자료를 요구한다. 이러한 대기 경계층에 대한 연구를 위해서는 보다 장기적이고 폭넓은 기상관측 자료가 요구된

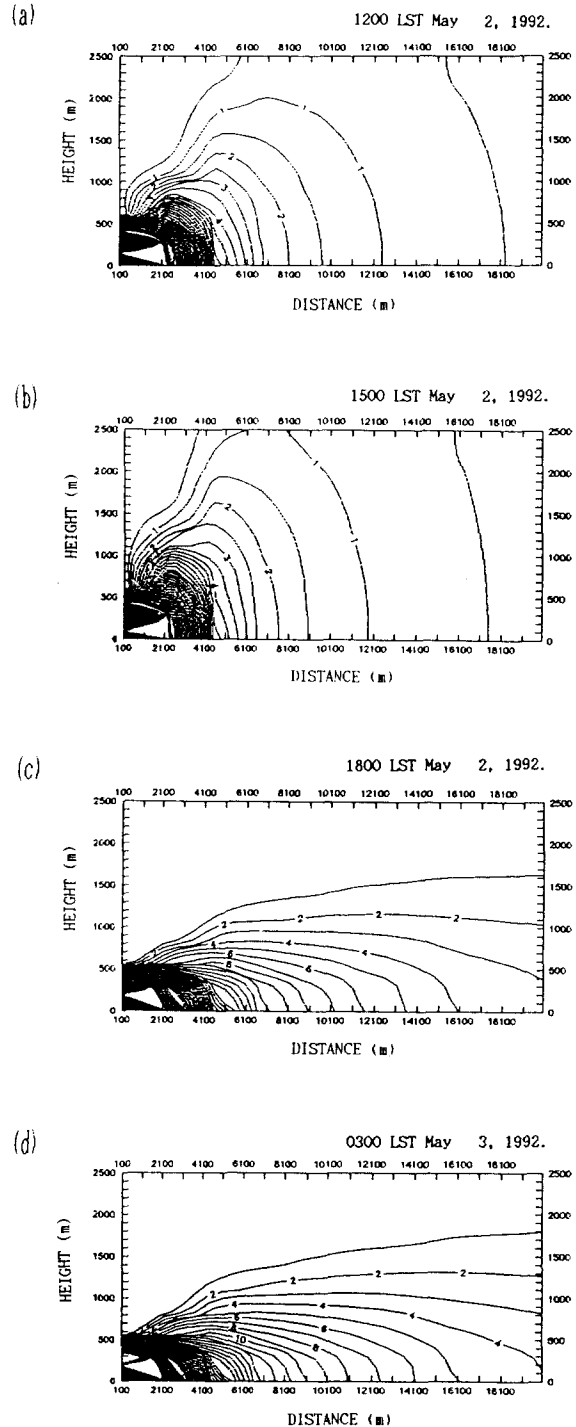


Fig. 4. Distribution of concentration of atmospheric pollutants($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (a) 1200LST, (b) 1500LST, (c) 1800LST, May 2 and (d) 0300LST May 3, 1992.

다. 그러므로 짧은 기간동안의 기상 관측 자료로는 만족할만한 결과를 얻을 수 없다. 좀더 정확하고 국지 규모에 알맞은 확산 형태에 관한 연구를 하기 위해서는 지속적이고 보다 정밀한 관측이 이루어져야만 하겠다.

감사의 글

이 연구에서 사용한 Airsonde System과 경위의를 제공해주신 서울대학교 박순웅 교수님께 감사드립니다. 관측을 도와준 K2에 근무한 예비역 공군 장병들과 경북대학교 지구과학교육과와 천문기상학과 대학원생 및 학부 학생들의 협조에 감사드립니다. 이 연구는 한국과학재단의 일반 기초 연구 사업의 지원(KOSEF 911-0506-019-2)에 의해서 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- 기상연구소, 1990, 경인지역의 지상풍계에 따른 대기오염 상태의 변화(I), MR 90-3, 51pp.
 기상연구소, 1991, 경인지역의 지상풍계에 따른 대기오염 상태의 변화(II), MR 91-3, 52pp.
 박영주, 1990, 서울시에서 혼합고의 일변화에 관하여. 서울대학교 대기과학과 석사 학위 논문, 65pp.
 신용배, 1982, 대기수질 환경관리 전산모델 연구 (BS E615(2)-2134-6), 한국과학기술원, 78pp.
 윤일희, 1991, 지상 관측 자료를 이용한 한반도의 대기질 추정. 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 110pp.
 이태영, 김정우, 박순웅, 1990, 대기 오염 예보 체제 개발 연구, 한국환경과학연구협의회, 99pp.
 장근일, 1991, 서울시의 3차원 바람구조의 특징. 서울대학교 대기과학과 석사학위 논문, 66pp.
 정관영, 1989, 지형을 포함한 2차원 해륙풍 모델과

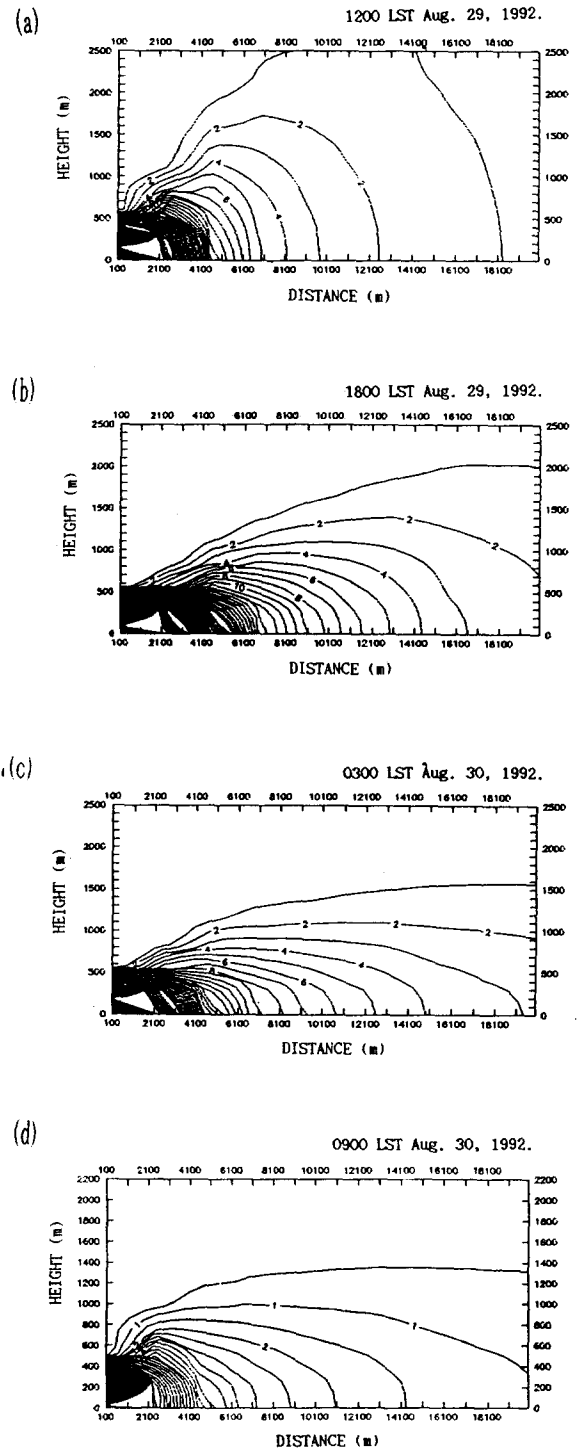


Fig.5 Same as in Fig. 4, except for at (a) 1200LST, (b) 1800LST on 29 August, (c) 0300LST, and (d) 0900LST August 30, 1992.

- 이를 이용한 오염 확산, 서울대학교 대기 과학과 석사학위 논문, 55pp.
- Berkowicz, R., and L. P. Prahm, 1982, Evaluation of the profile method for estimation of surface fluxes of momentum and heat. *Atmos. Environ.*, 16, 2809-2819.
- Briggs, G. A., 1973, Diffusion estimation for small emission. 1973 Annual Report, *Air Resources Atmos. Turb. and Diffusion Lab., Environmental Res. Lab.*, Report ATDL-106, USDOC-NOAA.
- Businger, J. A., J. C. Wyngaard, Y. Izumi and E. F. Bradley, 1971, Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, 28, 181-189.
- Deardorff, J. W., 1970, Convective velocity and temperature scales for the unstable planetary boundary and for Rayleigh Convection. *J. Atmos. Sci.*, 27, 1211-1213.
- Deardorff, J. W. and G. E. Willis, 1974, Physical modeling of diffusion in the mixed layer. *Preprints, Symp. on Atmospheric Diffusion and Air Pollution*, Santa Barbara, Amer. Meteor. Soc., 387-391.
- and —————, 1975, A parameterization of diffusion into the mixed layer. *J. Appl. Meteor.*, 14, 1451-1458.
- Draxler, R. R., 1990, The calculation of low-level winds from the achieved data of a regional primitive equation forecast model. *J. Appl. Meteor.*, 29, 240-248.
- Dyer, A. J., 1974, A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorol.*, 7, 363-372.
- Gifford, F. A., 1972, The Simple ATDL Urban Diffusion Model, Proceedings of the Fourth Meeting of the NATO/CCMS Expert Panel on Air Pollution Modeling, Paris.
- , 1975, Atmospheric Dispersion Models for Environmental Pollution Applications. *Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analyses*, ed. D. A. Haugen, pp.35-58, American Meteorological Society.
- Hanna, S. R., 1973, Urban Air pollution Models-Why?, Proceedings of Nordic Symposium on Air Pollution Modeling, Vedbeck, Denmark.
- Hjelmfelt M. R., 1982, Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary-layer airflow and vertical air motion : Simulations of urban vs non-urban effects. *J. Appl. Meteor.*, 21, 1239-1257.
- Holzworth, G., 1972, Mixing Depths, Wind Speed, and Potential for Urban Air Pollution throughout the Contiguous United States, Publication No. AP-101, Environmental Protection Agency.
- McBean, G. A. Ed., 1979, *The planetary boundary layer*. Tech. Note No. 165, WMO 530, 201pp.
- Moses, H., D. F. Gatz, A. C. Strong and G. A. Zerbe, 1971, Mixing Heights, Ventilation Rates, and Observed Ground SO₂ Concentrations, Quarterly Report, Atmospheric Science Group, Argonne National Laboratory, Argonne, I 11.
- Nieuwstadt, F. T. M., 1978, The computation of friction velocity u_* and the temperature scale T_* from temperature and wind velocity profiles by least-square methods. *Boundary-Layer Meteorol.*, 19, 235-246.
- Paulson, C. A., 1970, The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl.*

- Meteor.*, 9, 856-861.
- Venkatram A. and J. C. Wyngaard, 1988, *Lectures on Air Pollution Modeling*, American Meteorological Society, 390pp.
- Vukovich, F. M., J. W. Duna III and B. W. Crissman, 1976, A theoretical study of the St. Louis heat island : The wind and temperature distribution. *J. Appl. Meteor.*, 15, 417-440.
- Weil, J. C., and R. P. Brower, 1982, *The Maryland PPSP dispersion model for tail stacks*, Ref. No. PPSP-MP-36, Maryland Power Plant Siting Program, Martin Marietta Corp., Baltimore.
- Wieringa, J., 1980a, A revaluation of the Kansas mast influence on measurements of stress and cup-anemometer over-speeding. *Boundary-Layer Meteorol.*, 18, 411-430.
- , 1980b, Representativeness of wind observations at airports. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 51, 962-971.
- Yaglom, A. M., 1977, Comments on wind and temperature flux profile relationships, *Boundary-Layer Meteorol.*, 11, 2435-2447.