

중거리에서 대류경계층 연직방향 plume 확산의 일반화 Generalization of Vertical Plume Dispersion in the Convective Boundary Layer at Long Distances on Mesoscale

박 옥 현 · 서 석 진
부산대학교 환경공학과

(1999년 7월 27일 접수, 2000년 2월 10일 채택)

Ok-Hyun Park and Seog-Jin Seo

Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received 27 July 1999; accepted 10 February 2000)

Abstract

In order to generalize the vertical dispersion of plume at long distances on mesoscale over complex terrain, dispersion coefficients data have been obtained systematically according to lapsed time after release by using a composite turbulence water tank that simulates convective boundary layer.

Dispersion experiments have been carried out for various combined conditions of thermal turbulence intensity, mechanical turbulence intensity and plume release height at slightly to moderately unstable conditions. Results of tracer dispersion experiments conducted using water tank, camera and image processing system have been converted into atmospheric dispersion data through the application of similarity law.

The equation $\sigma_z/z_i = a X/(b+c X^2)^{0.5}$, where σ_z : vertical dispersion coefficient, z_i : mixing height, X : dimensionless downwind distance, was confirmed to be an appropriate and general equation for expressing σ_z variation with turbulence intensity and plume release height. The value of "a" was found to be principally affected by mechanical turbulence intensity and that of "b" by mechanical turbulence intensity and release height. It was confirmed that the magnitude of "c" varies with release height.

Results of water tank experiments on the relationship of σ_z vs downwind distance x have been compared with actual atmospheric dispersion data such as CONDORS data and Bowne's nomogram. Operating conditions of a composite turbulence water tank for simulating the field turbulence situations of CONDORS experiments and Bowne's $\sigma_z(x)$ nomogram for suburban area have also been investigated in terms of water temperature difference between convection water tank and bottom plate heating tank, grid plate stroke, mixing water depth, length scale and velocity scale. Moreover the effect of mechanical turbulence intensity on vertical dispersion has been discussed in the light of release height and downwind distance.

Key words : composite turbulence water tank, vertical dispersion coefficient, similarity law, Bowne's nomogram, CONDORS experiment

1. 서 론

현재까지 연직 방향 분산계수 α_z 평가를 위해 평탄한 지형상 근거리에서 실측한 결과들을 나타낸 회귀곡선들을 중거리 이상 장거리까지 연장하여 무리하게 사용해왔는 바 이런 접근이 대기확산 예측 부정확의 큰 요인이 되었다. 또한 열대류 수조 혹은 염수를 이용해서 成層化한 수조를 이용한 확산실험 대부분은 평탄한 지형상에서의 자유대류조건을 모의할 수 있을 뿐이며, 복잡한 지형에서 평균 풍속 \bar{u} 가 중정도 이상 ($\bar{u} > 6\omega_*$, 여기서 ω_* : 대류속도)인 실제 대기 환경에서의 확산은 제대로 모의할 수 없음을 알게 되었다 (Willis와 Deardorff, 1981). 그리하여 박옥현 등(1999)은 실측 자료가 크게 부족한 중거리 연직방향 분산계수를 기계적 난류와 열적 난류가 동시에 발생하는 복합인 요란 수조에서 plume 방출 후 경과시간에 따라 체계적으로 측정하고, 상사법칙을 적용해서 대기중에서의 자료로 변환한 결과를 기존의 대기 현장측정치와 대조해서 교정하는 문제의 가능성 내지 타당성을 검토하였다. 이 연구에서는 박옥현 등(1999)에 의해 타당성이 확인된 방법에 따라 복합인 요란수조에서 어떤 실험 조건들(예: 대류수조 온도 T_w , 그것과 가운 수조 온도와의 차이 ΔT , 격자판의 왕복운동거리 S_r 및 빈도 f , 방출고 z_s , 그리고 혼합수심 z_m 등)의 組合에서 측정하면 실제 지형 및 기상조건에서의 거리 x 에 따른 α_z 현장측정치들과 거의 일치하는 실험 결과를 가져오는지를 밝히는 작업을 수행함으로써 거대한 현장 확산 실험비용을 절감할 수 있도록 하였다. 또한 체계적인 충분한 조사결과를 바탕으로 복잡지형에서의 특히 중거리 대류경계층 연직방향 확산에 관한 일반성 있는 어떤 결론들을 도출하고자 하였다.

이들 작업을 수행하는 과정에서 기계적 난류가 연직방향의 전체 확산능에 미치는 영향을 plume 방출고도 및 풍하거리에 따라 분석하였다.

2. 분석에 사용된 확산 데이터

2.1 복합인 요란 수조를 사용해서 측정한 확산 실험 데이터

복잡한 지형, 중거리(약 10~100 km) 연직방향 분

산계수 데이터를 적은 경비로 체계적으로 대량 생산하기 위해서 복합인 요란 수조를 이용한 확산실험을 수행하였던 바, 수조장치의 구조, 장치의 규격 및 조작, 트레이서 제조 및 방출, 컴퓨터를 이용한 영상처리법 등을 포함한 트레이서 분산 측정 방법, 그리고 상사법칙의 적용을 통해 수조 확산계수를 대기자료로 전환하는 방법 등은 박옥현 등(1999)에 의해 이미 보고 되었다.

트레이서 방출후 경과시간 $t(=x/\bar{u}$, 여기서 x : 풍하거리, \bar{u} : plume 단면에 걸쳐 평균한 풍속)별로 z_s , ΔT , S_r 등의 실험조건 변화에 따른 분산을 사진촬영 및 영상처리 전산작업을 통해 체계적으로 측정함으로써 약 100 km까지의 거리 x 에 따른 분산계수 α_z 변화를 파악하였다. 이 데이터들을 전대수지상에 각 안정도 조건별로 나타내면 25개 點들로 하나의 회귀곡선이 제도되어 만곡부분에서의 변화에 대한 상세한 고찰이 가능하게 되었다. 또한 체계적 확산측정에 의해 각 실험조건들과 plume 방출후의 경과시간 t 혹은 풍하거리 x 등에 따라 분산계수가 변화하는 과정의 분석이 가능하게 되었다.

2.2 현장 대기 확산 실험 데이터

복합인 요란수조를 이용해서 생산된 대류 경계층에서의 연직방향 분산계수 α_z 데이터와 대조하기 위한 대기 현장 분산계수 데이터로 CONDORS(: Convective Diffusion Observed with Remote Sensors) 데이터가 사용되었다. CONDORS 데이터는 원격 감지장치인 Lidar를 사용하여 300 m 높이의 기상탑에서 방출된 oil fog의 지표부근 χ/Q (; 여기서 χ : 평균화농도, Q : 배출강도)를 구하고, 이를 동시 방출된 SF_6 확산 측정치와 비교해서 탁월한 일치를 확인한 뒤에 계속 수행된 대기 현장 확산실험 결과이다. 측정이 이루어진 미국 Colorado州 Boulder(E 105°, N 40°) 주변 15 km 이내 지형은 완만한 起伏이 있고 한 낮 부근 대류조건이 형성된 동안에 기류통로가 특별히 형성되거나 대규모 渦動에 영향을 주지 않으며, 실험이 고도로 대류적인(highly convective)경계층에서 이뤄졌다고(Eberhard *et al.*, 1988) 하나 일반적으로 대류조건시 혼합고가 1~3 km 범위에 걸친다(Willis와 Deardorff, 1981)고 일반적으로 알려져 있고, 또한 기계적 난류 생성시에 열적난류만 조성되는 경우보다 ω_* 값이 증대 되는데도 측정기간

중 ω_* 값이 1~2.2 m/s 범위에 속한다는 점, 측정기간이 낮은 여름에서 이른 가을까지 였다는 점, 그 기간중 혼합고 범위가 500~1,500m였다는 점, 그리고 Boulder의 위도 및 지형 등을 종합적으로 고려할 때 CONDORS 확산 실험기간 중 대기안정도는 중립 내지 中 정도 불안정 등급에 해당하는 것으로 보아진다.

CONDORS 데이터 이외에 Bowne(1974)가 시골, 교외, 도시 지형에 대해 각각 제안하였던 σ_z 노모그램들이 사용되었다. 도시지형에 대한 σ_z 자료는 McElroy(1969)가 Fort Wane, St. Louis 및 Johnstown에서의 기존 확산실험 데이터를 수집한 것이며 시골지역에 대한 것은 Hilsmeier와 Gifford(1962)의 $\sigma_z(x)$ 곡선들이 Holtzworth에 의해 보고된 혼합고에 맞도록 먼 거리에서 휘어지게 수정한 것이고 교외지역에 대한 Bowne 노모그램 곡선들은 미국 Ontario

주정부 환경과에 의해 수행된 확산모델 검증 프로그램을 통해 실증된 것이다(Bowne, 1974).

3. 분석

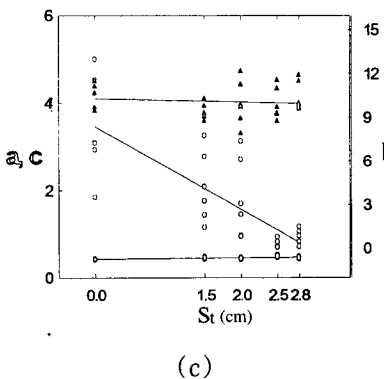
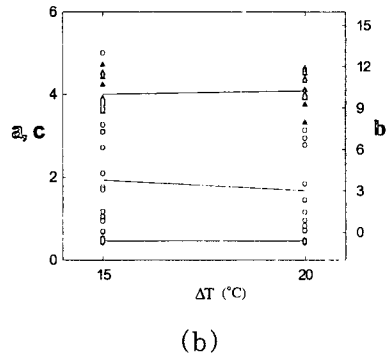
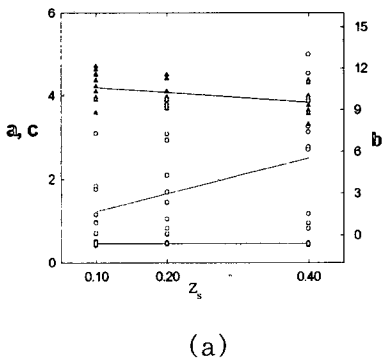
3.1 거리에 따른 연직방향 분산계수 결정식

복합인 요란 수조를 이용한 실험 데이터를 대기 현장 실험으로 구한 $\sigma_z(x)$ 데이터 분포에 적합시키기 위해 식(1)에 적용하여 구한 계수 a, b, c를 표 1에 나타내었다. 이들 계수 값들은 격자판의 연직방향 진동 빈도가 1Hz일 때의 것들이다.

$$\sigma_z/z_i = a X / (b + c X^2)^{1/2} \tag{1}$$

여기서
$$X = \frac{x}{\bar{u}} \cdot \frac{\omega_*}{z_i}$$

식(1)을 나타낸 점근선은 거리 X_1 (; plume 단면질



- number of data: 30
- (a) $a = -0.0027Z_s + 0.45, r = 0.02$
 - $b = 12.87Z_s + 0.40, r = 0.45$
 - $c = -1.17Z_s + 4.31, r = 0.42$
 - (b) $a = -0.0003\Delta T + 0.46, r = 0.03$
 - $b = 0.16\Delta T + 6.17, r = 0.11$
 - $c = 0.02\Delta T + 3.75, r = 0.12$
 - (c) $a = 0.0127St + 0.43, r = 0.55$
 - $b = 2.86St + 8.42, r = 0.79$
 - $c = -0.039St + 4.10, r = 0.11$

Fig. 1. Dependency of a, b and c on grid plate stroke S_s , dimensionless release height Z_s , and temperature difference ΔT between convection water tank and bottom plate heating tank. \circ ; a, \square ; b, \triangle ; c

량 중심이 최종적으로 안정되는 고도선을 두번째로 통과한 풍하 무차원거리로 정의)을 기준으로 해서 그 이전의 근거리에서는 $\sigma_z/z_i \approx (a/\sqrt{b})X$ 에, 그 이후의 중거리 이상에서는 $\sigma_z/z_i = a/\sqrt{c}$ 에 접근한다. 각계수의 의미를 검토하였던 바, a는 근거리에서 X에 따른 σ_z/z_i 의 분포를 나타내는 곡선의 기울기에 비례하며, b는 곡선의 σ_z/z_i 축 절편값과 유관하며 난류강도가 약할수록 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한 a/\sqrt{c} 는 혼합고(수심)의 영향을 받음을 확인하였다.

Briggs *et al.* (1986)은 CONDORS 실험 기간에 적

Table 1. Values of a, b and c in equation $\sigma_z/z_i = aX/(b+cX^2)^{1/2}$ for fitting water tank experiment results to the distribution of data from field experiments.

St(cm)	T_w (°C)	ΔT (°C)	Z_s	a	b	c
0	23	15	0.1	0.427	7.324	4.221
			0.2	0.442	7.273	3.820
			0.4	0.423	13.01	3.900
		20	0.1	0.410	3.535	4.367
			0.2	0.432	6.824	4.501
			0.4	0.430	11.62	4.370
1.5	7	15	0.1	0.452	3.287	3.590
			0.2	0.435	4.281	3.690
			0.4	0.452	7.799	3.765
		20	0.1	0.458	1.476	4.096
			0.2	0.475	2.318	4.093
			0.4	0.441	6.348	3.932
2	10	15	0.1	0.417	0.912	4.719
			0.2	0.443	3.094	4.411
			0.4	0.429	6.149	3.644
		20	0.1	0.459	0.874	3.959
			0.2	0.462	2.363	3.910
			0.4	0.450	7.403	3.309
2.5	13	15	0.1	0.519	0.109	4.517
			0.2	0.464	0.055	3.760
			0.4	0.477	0.828	3.577
		20	0.1	0.467	0.175	3.902
			0.2	0.473	0.109	3.747
			0.4	0.466	0.464	4.315
2.8	15	15	0.1	0.434	0.110	4.497
			0.2	0.483	1.166	3.902
			0.4	0.472	1.518	3.866
		20	0.1	0.432	0.157	4.633
			0.2	0.453	0.497	3.960
			0.4	0.444	0.878	3.990

용된 모든 방출고도에서 즉, 무차원 방출 고도 Z_s 값이 0.01 이하에서 0.45에 이르기까지 거리에 따른 σ_z 데이터들의 적합식으로 식(2)를 제안하였다.

$$\sigma_z/z_i = 0.6X/(1 + 5X^2)^{1/2} \quad (2)$$

그런데 30회에 걸쳐 난류강도와 방출고도를 변경하면서 $Z_s < 0.5$ 에서 이뤄진 수조실험 으로부터 얻은 a의 평균은 0.45, b 및 c의 그것은 각각 3.40 및 4.03이었다. 따라서 식(2)의 일반성은 없는 것 같고, 각 계수값들은 이 경험식을 만들 때 이뤄졌던 실험 상황과 동일 기상, 지형 및 방출고도 조건에서 의의를 가질 것 같다. 따라서 이 계수들을 난류강도 및 방출 고도 등에 따라 구할 수 있는 관계식을 수립해야 식(1)의 유용성이 증대될 것이다.

그 계수값들의 Z_s (; 무차원방출고도 z_s/z_i), T_w (; 대류수조 초기온도, °C), ΔT 및 S_i 에의 의존성을 그림 1에 나타내었다. 이 그림은 a는 S_i 에, c는 Z_s 에, 그리고 b는 S_i 와 Z_s 에 크게 지배됨을 나타내고 있다. ΔT 가 중거리 σ_z 값을 결정하는 주된 변수이면서(그림 4의 설명 참조) a 및 b 값 결정에 영향을 주지 않는 것처럼 분석된 것은 큰 차이가 없는 ΔT 값 두 개만에 국한해서 실험이 이뤄졌기 때문인 것 같다.

3. 2 수조실험으로 구한 연직 방향 분산계수 데이터와 CONDORS 데이터의 비교

방출고도 및 要因別 난류 강도를 변화시키면서 수행된 수조 실험결과를 검증하기 위하여 (i) 완만한 구릉지형, 조도길이 3cm의 지형에서 (ii) 늦은 여름부터 이른 가을 사이에 (iii) 평균 풍속 2m/s 이상 6m/s 이하 이고 (iv) 맑은 날씨일 때 (v) $Z_s = 0.32$ 높이에서 방출된 plume의 퍼짐을 측정한 CONDORS 현장 실험 데이터와 본 실험 결과를 비교할 수 있도록 그림 2를 작성하였다. CONDORS 확산 데이터들의 회귀 곡선을 횡단하는 종축 방향 실선들은 교차점에 상응하는 X의 전후에 걸친 각 X범위에 해당하는 σ_z/z_i 값들의 산포범위를 나타낸 것이다.

수조 실험 결과들은 $Z_s = 0.4$ 일 때 열적 난류 강도 즉 ΔT 값 별로, 또한 기계적 난류 강도 즉 격자판의 일정한 빈도(1Hz)에서의 상하운동폭 S_i 값 별로 여러 곡선들로 나타내었다. 장거리 σ_z/z_i 값들의 분포를 보면 열적 난류만 있는 경우와 복합적 난류가 있는 경우는 약간의 차이를 보이는데, 이는 복합적난류가

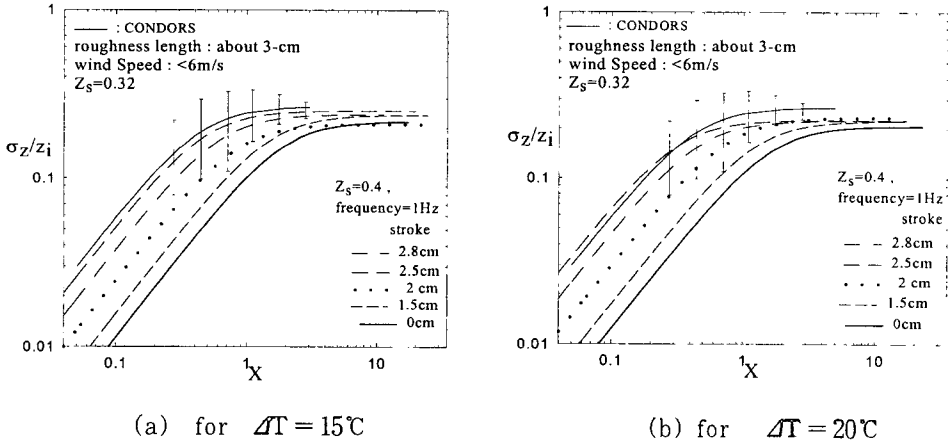


Fig. 2. Comparison of dimensionless vertical dispersion coefficients from CONDORS field experiments with those from water tank experiments.

작용할 때에는 혼합고가 열적난류만 있을 때 보다 다소 커지므로서 장거리에서의 최대 σ_z 값이 다소 커진 한편 σ_z 값의 무차원화를 위해 나누어 준 z_i 값으로 열적 난류만 발생하는 경우의 작은 값을 일관해서 취한데 이유가 있는 것으로 보아진다. 또한 ΔT 가 20°C인 경우와 15°C인 경우에 있어서도 장거리 σ_z/z_i 값의 분포가 약간의 차이를 보이는 바 그 원인도 위와 같이 고찰된다.

CONDORS 현장 실험 데이터 회귀곡선과 실험실에서 얻은 데이터 회귀 곡선의 기울기 등이 일치되는 경우는 $\Delta T=15^\circ\text{C}$ 인 경우임을 알 수 있다. 이는 $\Delta T=15^\circ\text{C}$ 가 늦여름에서 이른 가을 사이의 중립 내지 중정도 불안정 조건을 모의하는 하나의 수조 조 작 조건임을 의미한다.

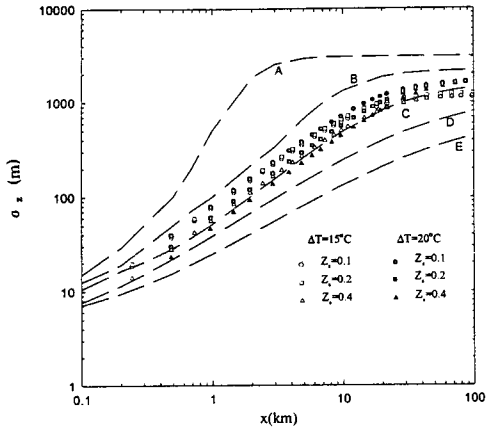
왕복운동 거리가 2.5 cm일 때가 2.8 cm일 때보다 σ_z/z_i 값이 크게 측정되었는데 이는 과도한 기계적 요란이 연직방향 plume 분산에 영향을 주는 난류강도를 오히려 억제함을 시사하며 이는 거친 지형상에 빠른 속도의 바람이 불면 불안정하던 대기도 중립조건쪽으로 변화되는 현상과 유사한 것 같다.

그림 2(a)에서 보듯이 기계적 난류 강도가 비교적 작은 경우의 σ_z/z_i 데이터와 열적 난류만 있는 경우의 σ_z/z_i 데이터를 제외하고는 CONDORS 현장 측정 σ_z/z_i 범위에 포함되는 것으로 보아, 수조 실험을 통한 연직방향 대기확산 시뮬레이션은 만족스런 것으로 보아진다. CONDORS 연직방향 확산데이터 회

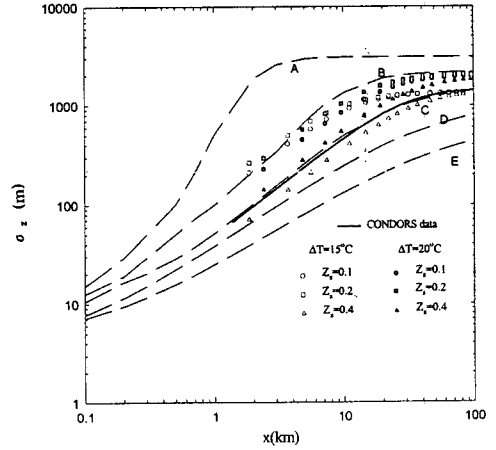
귀곡선을 가장 잘 모의하는 실험 데이터 회귀 곡선은 대기의 혼합고 z_i 1.5 km를 모의하기 위해 수조에서 수심을 50 cm로 취하고, 즉 길이 축적을 1/3,000로 취하고 격자 판의 진동빈도 1 Hz일 때 상하왕복 운동거리 St 가 2.5 cm, ΔT 가 15°C, 무차원 방출고 Z_s 가 0.4인 경우에 구해진 것이다. Fig. 2(a)는 $Z_s=0.4$ 에 대한 수조 실험결과와 $Z_s=0.32$ 인 경우의 CONDORS 대기현장 실험결과 사이엔 σ_z/z_i 값에 있어 약간의 차이가 있음을 나타내고 있는데 이 차이가 방출 고도 교정으로 작아질 수 있음은 박옥현 등 (1999)에 의해 보고된 바와 같다.

3.3 수조실험으로 구한 연직 방향 분산계수 데이터와 Bowne 노모그램의 비교

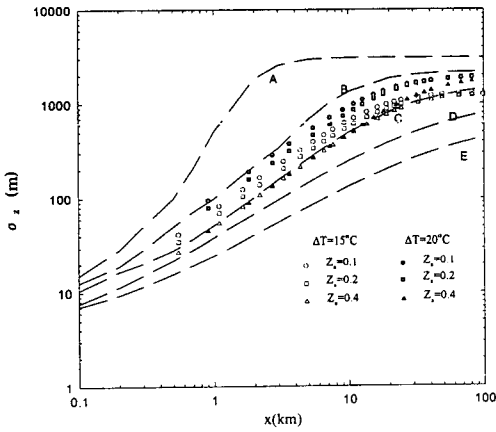
본 수조실험에서 구한 방출 후 경과시간 t 값에 따른 σ_z/z_i 값들의 분포를 나타내는 회귀식들을 구하고 相似법칙을 적용하여 실제 현장에서의 풍하거리 x 에 따른 σ_z 값들을 산정하였다. 이 자료들을 앞에서 비교한 바 있는 CONDORS 확산실험지역이 교외 지역임을 고려하여 Bowne (1974)가 교외지역에 대해 작성한 $\sigma_z(x)$ 노모그램과 비교할 수 있도록 그림 3에 나타내었다. $X < 0.25$ ($x < \text{약 } 2 \text{ km}$)에서 Z_s 값이 0.1 및 0.2에 해당하는 σ_z 값들이 동일거리 x 에서 $Z_s = 0.4$ 의 경우보다 더 크게 측정된 것은 실제 대기 중에서의 현상(박옥현과 천성남, 1986; Deardorff와 Willis, 1975)과 배치되는 바 이는 대체로 grid판이



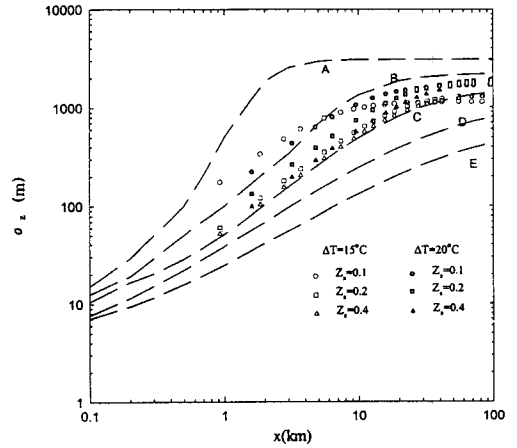
(a)



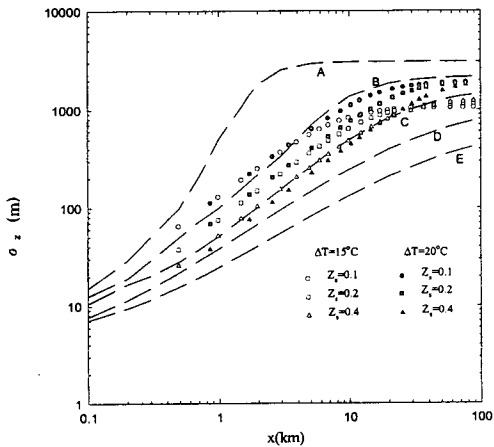
(d)



(b)



(e)



(c)

Fig. 3. Comparison of vertical dispersion coefficient values from Bowne's suburban nomogram (; dashed curves) with those from laboratory experiments using a composite turbulence water tank. (a); for $St=0, f=0$, (b); for $St=1.5\text{ cm}, f=1\text{ Hz}$, (c); for $St=2.0\text{ cm}, f=1\text{ Hz}$, (d); for $St=2.5\text{ cm}, f=1\text{ Hz}$, (e); for $St=2.8\text{ cm}, f=1\text{ Hz}$.

방출고에 근접하므로써 트레이서들이 와동에 의해 서가 아니라 격자판의 상하운동에 의해 직접 강제적으로 분산됐음을 의미하므로 이들 근거리 데이터들은 그림 3에서 배제하였다. Z_s 값이 0.1 및 0.2의 경우에도 $x > 2$ km에서의 σ_z 값을 결정하는 과정에서 격자판 상하운동으로 인한 초기 퍼짐의 효과는 식 (3)을 사용하여 배제하였다.

$$\sigma_z^2 = 2K_z t = \sigma_z^2(\text{tot}) - \sigma_z^2(0) \quad (3)$$

여기서 $\sigma_z^2(\text{tot})$; 방출 후 t시간 경과시의 연직방향 총분산, $\sigma_z^2(0)$; 방출초기 격자판 운동에 의한 분산, K_z ; 연직방향 와동확산률이며 중거리 이하에서는 t의 증대에 따라 값이 변화한다.

$X > 0.25$ ($x > \text{약 } 2$ km)에서는 $Z_s < 0.5$ 인 경우 상대적으로 보다 낮은 높이에서 방출된 plume일수록 보다 큰 σ_z 값을 나타내므로 (박옥현과 천성남, 1996) 그림 3에 나타난 $x > 2$ km에서의 방출고도별 σ_z 값들의 상대적 크기순서 자체는 합당하다.

복합인 요란 수조에서 구한 확산 데이터는 일반적으로 실제 지형 및 기상조건에서 측정된 확산 데이터와 합치되도록 교정해서 사용해야하므로 횡축에 나타난 무차원 거리, 혹은 무차원 시간 X에 대한 종축상 σ_z/z_i 값들의 분포는 길이 축척 인자 (ϵ_l) 즉 z_i 축척비를 변화시키면서 종축 방향으로 이동시키고, 또한 속도 축척 인자 (ϵ_v) 즉 ω_* 축척비를 변화시키면서 σ_z/z_i 자료집단을 횡축방향으로 이동시키므로써 결국 X에 대한 σ_z/z_i 관계를 x에 대한 σ_z 의 관계로 변환시킨 수조 실험결과를 Bowne 노모그램과 합치시켰다. 그림 3(a)에서 열적 난류만 조성되어 있는 경우의 실험 결과를 보면, 안정도 등급별 x에 대한 σ_z 곡선들이 ΔT 및 Z_s 에 따라 약간의 기울기 차이를 보이나 σ_z 값들은 대체로 대기 안정도 C 등급 혹은 B~C등급에 해당하는 분포를 나타낸다. $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ 혹은 20°C 일 때 $Z_s = 0.4$ 인 경우 즉, 방출고가 지표면에서 먼 경우에 수조에서 구한 σ_z 값들은 모두다 교외 지역에서 대기가 약간 불안정한 C 등급일 때의 Bowne 노모그램과 거의 일치함을 나타내고 있다.

격자판의 연직방향 왕복운동거리가 커질수록 초기에는 복합적인 난류가 확산에 기여하는 경우에 열적 난류만 존재하는 경우보다 σ_z 값들을 더 증대시키지만 약 30 km 이상의 중거리에서 전체 혼합고

에 걸쳐 plume이 거의 고르게 퍼지는 단계에 접근함에 따라 열적 난류만 조성된 실험에서 구한 σ_z 값이나 복합적인 난류가 조성된 실험에서 구한 그것은 거의 같아진다는 것을 알 수 있다. 그리고 본 수조 실험에서 얻은 σ_z 측정결과를 현장 σ_z 값으로 변환시킴에 있어, 횡축 $X = \frac{x}{u} \cdot \frac{\omega_*}{z_i}$ 크기를 정할 때 St

값이 큰 경우에는 대류속도 ω_* 를 크게 취하였던 바 이는 격자판 요동의 증대에 따라 열 flux 값이 증대됨을 확인했기 때문이다. 그림 3(d)는 $\Delta T = 15^\circ\text{C}$, $Z_s = 0.4$, 수심 = 50 cm, 격자판 진동빈도 1 Hz일 때 $St = 2.5$ cm, $\epsilon_l = 1/3,000$, $\epsilon_v = 1/100$ 인 경우에 대체로 약한 불안정 조건시의 CONDORS 현장 $\sigma_z(x)$ 데이터를 모의할 수 있고 이 곡선이 곧 교외지형에서 대기 안정도 C등급에 해당하는 Bowne의 $\sigma_z(x)$ 노모그램과 거의 일치함을 나타내고 있다.

複合因 난류강도가 커지고 방출고도가 낮아질수록 본 연구에서 얻은 $\sigma_z(x)$ 분포 곡선과 Bowne의 교외 지역 $\sigma_z(x)$ 노모그램은 특히 장거리에서 접근하는 σ_z 값들에 있어 상당한 차이를 보이는 바 이는 트레이서가 혼합고 전체에 걸쳐 거의 균일하게 분포하게 되는 거리 이후의 수조실험 $\sigma_z(x)$ 자료를 대기자료로 변환하는 과정에서 ΔT 및 S_i 각 조합의 경우들에 대해서 즉 상이한 대기 안정도를 모의하는 각 경우들에 대해서 변하는 z_i 를 적용하지 않고 초기 수심에 동일한 길이 축척의 역수를 곱한 값을 사용한테 부분적인 이유가 있는 것 같다. plume이 연직 방향으로 완전 혼합한 장거리에서 σ_z 값은 $0.287z_i$ 값에 가까워질 것으로 계산되나, Briggs (1993)은 CONDORS 현장실험에서의 σ_z 값이 $X > 1$ 에선 $0.27z_i$ 값에 접근한다고 보고하였다 (Fig. 2). 한편 미국 Utah州 Salt Lake City (41°N)의 7월 평균 오후 혼합고는 약 4.1 km라는 보고가 있고 (Holzworth, 1967), 일반적으로 대류 조건시 z_i 는 약 1~3 km 범위에 걸친다고 (Willis와 Deardorff, 1981) 하므로 안정도 B등급일 때 측정된 장거리에서의 최대 σ_z 값이 약 1.3 km로 나타난 본 실험결과 (그림 3)는 어느 정도는 타당성이 있는 것으로 보아진다. 그러나 Bowne $\sigma_z(x)$ 노모그램의 A등급 안정도에 대한 장거리 σ_z 접근치가 약 3 km ($z_i \approx 10$ km에 해당) 정도로 표현돼 있는 것은 비대류조건 즉, 대류권내에 고공 역전층이 존재하지 않는 경우를 나타낸 것으로

로 보아진다. 안정도 B등급 일 때, Bowne 노모그램 (; dash line) 의 장거리 $\alpha_z(x)$ 접근치 약 2km는 A등급과 C등급에 해당하는 그것들의 대략 중간 정도로 취한 것 같으나, 이는 대류조건시의 혼합고 범위를 고려할 때 표면층 대기 안정도 B등급 대류조건시 $\alpha_z(x)$ 값을 나타내는 것으로 보기 곤란하다. 안정도 등급 A, B, C, D 일 때의 대류 경계층 혼합고를 각각 3 km, 2 km, 1 km 및 0.8 km (Snyder, 1981)로 간주하면 고공 역전층 아래에서 오염물질이 거의 완전 혼합되는 장거리에서의 α_z 값은 각각 860 m, 574 m, 287 m 및 210 m가 될 것이다. 따라서 z_i 및 w_* 축척비를 조절하여 $\alpha_z(x)$ 노모그램 곡선의 만곡부 이전 부분은 Bowne의 노모그램과 일치시키고, 장거리에서의 거의 일정한 α_z 값을 위의 값들과 같아지도록 조절하면 대류조건시의 $\alpha_z(x)$ 노모그램이 제작될 수 있을 것으로 보아진다.

3.4 α_z 값에 영향을 미치는 기계적 난류강도의 거리에 따른 변화

그림 4는 복합인 요란 수조 내에서 plume의 연직

방향 확산에 기여하는 기계적 난류의 강도 $\overline{\omega'^2}$ 를 $(f \cdot St)^2$ 으로 무차원화하여 무차원 시간에 대해 제도한 것이다. 기계적 난류강도는 격자판을 요동시킨 실험시에 측정된 전체 난류강도에서 격자판을 요동시키지 않고 열적 요란만 발생되도록 한 실험시에 측정된 요란 강도를 감산하여 구하였다. 여기서 $f \cdot St$ 는 격자 판의 진동빈도와 상하 왕복 운동거리의 곱으로써 속도 차원을 가지는 난류속도를 바로 나타내는 것은 아니다. $f = 1\text{Hz}$ 이므로 Hopfinger와 Toly (1976)가 제안한 식 (4)를 고려할 때 $f \cdot St$ 는 난류속도를 어느 정도 가름하는 것으로 보아진다.

$$u = c \cdot f \cdot St^{3/2} \cdot M^{1/2} \cdot z^{-1} \tag{4}$$

여기서 u 는 와동속도, M 은 격자판 매쉬간격, z 는 수조 바닥으로부터의 높이이며 연직방향의 와동속도 u 가 곧 ω' 이다.

X 값이 작은 초기에는 plume의 연직 방향 확산에 기여하는 기계적 난류 강도 값이 비과시간 혹은 수송거리에 따라 어느 정도 증대하다가 $X > 1$ 에서 그 기계적 난류강도 값이 거의 0에 가까운 값들로 감

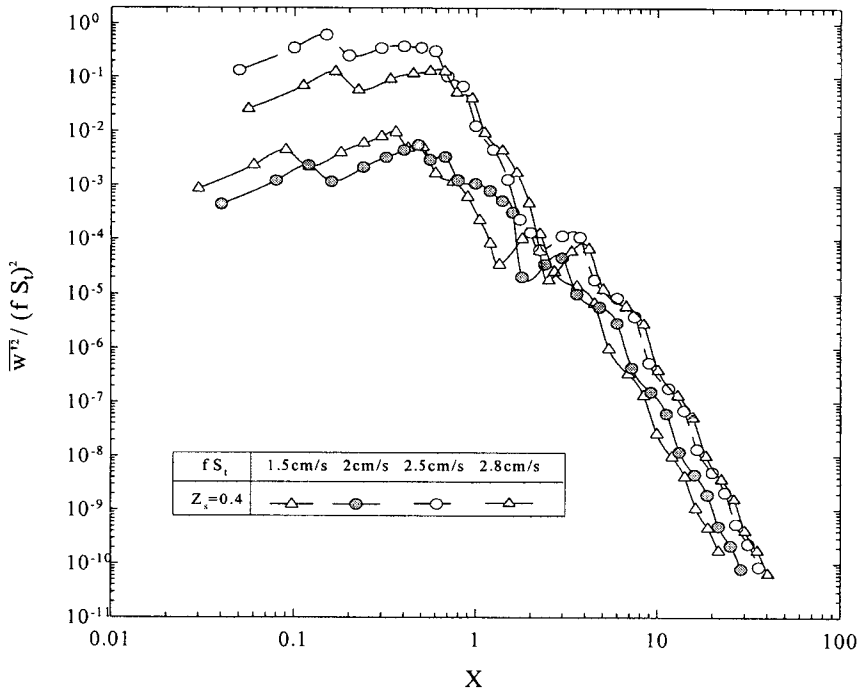


Fig. 4. Variation of mechanical turbulence intensity contributing to vertical dispersion with dimensionless distance.

소된다. 이는 근거리에서는 기계적 난류가 α_z 값의 크기에 상당한 영향을 주지만 장거리로 수송되면서 점차 열적 난류가 지배적인 요인이 됨을 시사한다. 근거리에서 $f \cdot St$ 가 클수록 α_z 크기에 기여하는 기계적 난류강도 값들이 대체로 커지지만 임계 $f \cdot St$ 값이 2.5 cm/s 이상일 때 α_z 값에 기여하는 $\overline{w^2}$ 값에 한계가 있음을 나타내고 있다.

4. 결 론

1) 무차원 풍하거리 X 에 대한 무차원 연직방향 분산계수 α_z/z_1 의 관계식 $\alpha_z/z_1 = aX/(b + cX^2)^{1/2}$ (여기서 z_1 는 혼합고, a, b 및 c 는 계수)이 난류강도 및 plume 방출고도에 따른 α_z 변화를 체계적으로 표현하기 위한 적절하고도 일반적인 식인 것으로 확인되었다. 계수 a 값은 기계적 난류강도에 따라, b 값은 기계적 난류강도와 방출고도에 따라, 그리고 c 값은 방출고도에 따라 각각 변하는 것으로 밝혀졌다.

2) 완전한 기복이 있고 조도길이가 3 cm 정도인 구릉지역에 중립 내지 중정도 불안정 조건이 형성된 실제 대기 현장에서 실측한 CONDORS $\alpha_z(x)$ 데이터를 재현하기 위한 복합인 요란 수조 조작조건은 수심 50 cm, 길이축적 1/3,000, 속도축적 1/100, ΔT 15°C, 매쉬간격 5 cm 두께 1 cm인 격자 판의 상하운동빈도 $f=1$ Hz일 때 왕복운동거리 St 2.5 cm이다. 또한 도시근교지형에서 Pasquill의 대기안정도 $B \sim C$ 등급에 상응하는 Bowne의 $\alpha_z(x)$ 노모그램을 재현할 수 있는 복합인 요란수조 조작조건들이 확인되었다.

3) 근거리에서는 α_z 값 결정에 기여하는 기계적 난류 강도값이 풍하측 거리가 멀어짐에 따라 어느 정도 증대하다가 plume 단면 질량중심이 종말고도에 이른 풍하거리 X_1 이후에서는 α_z 크기 결정에 기여하는 기계적 난류 강도값이 감소한다. 즉 대류경계층에서 장거리 α_z 값은 열적 난류에 의해 지배적으로 결정된다.

4) 도시근교 지형에서의 대류조건시 풍하거리와 연직방향 분산계수 관계를 구하기 위해서는 Bowne $\alpha_z(x)$ 노모그램의 A, B 및 C안정도 등급에 해당하는 곡선들을 특히 만곡부 이후 부분에서 수정하여 사용해야 한다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 특정기초 연구과제 (No. KOSEF 96-0601-03-01-3)의 제 1 과제 연구비 지원을 받아 수행된 것입니다. 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

박옥현, 천성남 (1996) 대류경계층에서 부력성 plume의 확산에 관한 실험적 연구, 대한 환경공학회지, 18, 613-625.

박옥현, 서석진, 이상훈 (1999) 複合因 擾亂 水槽를 이용한 대류 경계층에서의 연직방향 plume 확산에 관한 실험적 연구, 한국대기환경학회지, 15(5), 639-647

Bowne, N.E. (1974) "Diffusion rates", J. Air Pollution Control Association, 24, 832-835

Briggs, G.A. (1993), "Plume dispersion in the convective boundary layer. Part II : Analyses of CONDORS field experiment data", J. Appl. Meteor., 32, 1388-1425.

Briggs, G.A., W.L. Eberhard, J.E. Jaynor, W.R. Moninger, and T. Uttal (1986) "Convective diffusion measurements compared with laboratory and numerical experiments." Preprints 5th Joint Conf. on Application of Air Pollution Meteorology, Chapel Hill, Amer. Meteor. Soc., 340-343.

Deardorff, J.W. and G.E. Willis (1975) "A parameterization of diffusion into the mixed layer," J. of Appl. Meteor., 14, 1451-1458.

Eberhard, W.L., W.R. Moninger, and G.A. Briggs (1988), "Plume dispersion in the convective boundary layer, Part I : CONDORS field experiment and example measurements," J. Appl. Meteor., 27, 599-616.

Hilsmeier, W. and F. Gifford (1962) "Graphs for estimating atmospheric dispersion," Atomic Energy Commission, Division of Technical Information, ORD-545, 10.

Holzworth, G.C. (1967) "Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the united states," J. of App. Meteor., 6, 1039-1044.

Hopfinger, E.J. and J.A. Toly (1976) "Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces," J. Fluid Mech., 78, 155-175.

McElroy, J.L. (1969) "A comparative study of urban and rural

dispersion," *J. Appl. Meteor.*, 8, 19-31.

Snyder, W.H. (1981) *Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion*, US EPA, Research Triangle Park, NC 27711.

Willis, G.E. and J.W. Deardorff (1981) "A laboratory study of dispersion from a source in the middle of the convectively mixed layer," *Atm. Env.*, 15, 109-117.