

都市地域의 垂直, 水平 擴散係數 算定

Evaluation of the Horizontal and Vertical Dispersion Coefficients for the Urban Area

羅振均 金良均 李錫玠 權寧洙 曹千鎬
Jin Gyun Na Yang Gyun Kim Suk Jo Lee Young Soo Kwon Chun Ho Cho

Abstract

Meteorological measurement was performed for evaluation of the horizontal and vertical standard deviation (σ_y , σ_z), surface roughness length and atmospheric stability during the period of March to October 1985

The major results are as follows;

- 1) The average value of surface roughness length was 144cm at NEPI.
- 2) In frequency distribution of atmospheric stability, neutral state (D class) was dominant in Seoul (29%) and Pusan (30%). Unstable states (A. B. C. class) were 26% in Seoul and 24% in Pusan. Also, stable states (D. E. F class) were 74% in Seoul and 76% in Pusan.
- 3) Standard deviations of horizontal and vertical direction were evaluated as a function of downwind distance and atmospheric stability at NEPI, Jamsil and Pujeondong (Pusan). Standard deviation of horizontal direction was largest at NEPI among 3 areas because of mechanical turbulence resulting from difference of surface roughness length.

1. 緒 論

Plume에 대한 水平 및 垂直 擴散 係數를 決定하기 위한 方法에는 여러가지가 있으나 1961年 Pasquill¹⁾이 Plume의 水平 方向의 擴散 θ 와 垂直 方向의 擴散 h 를 大氣 安定度 等級(A~F)과 風下 距離의 함수로 나타낸 以後 F. A Gifford²⁾에 의하여 σ_y , σ_z 에 관한 이른바 Pasquill-Gifford(P-

G)curve가 完成되었다. 또한 Turner³⁾는 大氣安定度 等級을 日射量 대신 太陽 高度와 雲量, 雲高를 測定한 資料를 利用하여 分類하였으며 σ_y 와 σ_z 를 風下距離보다는 移動 時間($t=x/u$)의 함수로 나타냈다. 또한 Brookhaven National Laboratory (BNL)⁴⁾에서는 108m의 氣象觀測用 塔에서 觀測한 風向의 Fluctuation에 따라 區分한 5개의 亂流 形態에 대하여 σ_y 와 σ_z 를 算定한 바 있다.

本 研究에서는 大氣汚染 擴散 모델링에 必要한

入力資料中 垂直, 水平 擴散 係數에 關하여 지금 까지 外國에서 遂行하였던 算定技法을 檢討하였으며, 서울 및 釜山地域에 Sodar와 Weather Station 을 設置하여 觀測한 資料를 利用하여 그 地域의 擴散 係數를 算定하였다.

2. 理論的 考察

Taylor⁶⁾는 Stational하고 均質한 大氣의 상태에서 排出源으로부터 排出되는 粒子의 變位(x)를 다음과 같이 表示하였다.

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}^2}{dt} &= 2\bar{x} \frac{dx}{dt} \\ &= 2\bar{x}v \\ &= 2 \int_0^t v'(t)v'(t+\xi) d\xi \\ &= 2\bar{v}^2 \int_0^t R(\xi) d\xi \\ x^2 &= 2\bar{v}^2 \int_0^T \int_0^t R(\xi) d\xi dt \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

여기에서
 $R(\xi)$: 時間 t의 粒子의 速度와 時間 t+ ξ 의 粒子의 速度 사이의 Lagrangian Correlation Coefficient
 $[v'(t)v'(t+\xi) \bar{v}^{-2}]$

v' : 水平 風速의 變化

t : 粒子의 移動 時間

x^2 을 水平 및 垂直 方向의 擴散 係數 σ_y 와 σ_z 로 나타내면

$$\sigma_y^2 = 2\bar{v}^2 \int_0^T \int_0^t R(\xi) d\xi dt \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_z^2 = 2\bar{w}^2 \int_0^T \int_0^t R(\xi) d\xi dt \dots\dots\dots (3)$$

w^2 : 垂直 風速의 變化

Lagrangian Correlation Coefficient $R(\xi)$ 는 $\xi = 0$ 일 때 1이되며 ξ 가 커질수록 0에 가깝게 된다.⁶⁾ 따라서,

1) Diffusion Time ξ 가 작을 경우($\xi \ll t_L$), 즉 $R(\xi) = 1$

$$\sigma_y^2 = \bar{v}^2 T^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma_z^2 = \bar{w}^2 T^2 \dots\dots\dots (5)$$

2) Diffusion Time ξ 가 클 경우($\xi \gg t_L$)

$$\sigma_y^2 = 2 \left(\int_0^t R(\xi) d\xi \right) \bar{v}^2 T \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma_z^2 = 2 \left(\int_0^t R(\xi) d\xi \right) \bar{w}^2 T \dots\dots\dots (7)$$

여기에서 (6)식과 (7)식을 α_y 와 α_z 에 關하여 정리하면

$$\sigma_y = v'(2t_L)^{1/2} T^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma_z = w'(2t_L)^{1/2} T^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

$t_L = \int_0^t R(\xi) d\xi$: Lagrangian Integral Time Scale

또한 Pasquill은 Taylor의 方程式으로부터 擴散 係數를 다음과 같이 表示하였다.

$$\sigma_y = \sigma_v T f_1(T/t_L) \dots\dots\dots (10)$$

$$\sigma_z = \sigma_w T f_2(T/t_L) \dots\dots\dots (11)$$

σ_v, σ_w : 水平 및 垂直 風速의 標準偏差

f_1, f_2 : Universal Function (=Lagrangian Correlation Coefficient)

한편 Haugen(1959)⁷⁾은 Bivane으로 Praire Grass에서 實施한 현장실험에서 水平 및 垂直 方向의 標準偏差($\sigma_\theta, \sigma_\phi$)와 風速의 標準偏差(σ_v, σ_w)에 대하여 $\sigma_v/u \approx \sigma_\theta, \sigma_w/w \approx \sigma_\phi$ 의 關係가 있음을 알았다. 그러므로 $\sigma_v T \approx \sigma_\theta X$ 와 $\sigma_w T \approx \sigma_\phi X$ 로 각각 나타낼 수 있으며 식(10)과 식(11)에 이와 같은 關係를 代입하여 정리하면

$$f_1(T/t_L) = \sigma_y / \sigma_\theta X \dots\dots\dots (12)$$

$$f_2(T/t_L) = \sigma_z / \sigma_\phi X \dots\dots\dots (13)$$

여기에서 σ_θ : 水平 風向의 標準偏差

σ_ϕ : 垂直 風向의 標準偏差

X : 風下距離 (Downwind Distance)

따라서 Diffusion Time이 짧은 경우, 식(12)와 식(13)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_y = \sigma_\theta X \dots\dots\dots (14)$$

$$\sigma_z = \sigma_y X \dots \dots \dots (15)$$

3. 觀測 및 調査方法

3.1 觀測

1985年 3月부터 10月까지 連續的으로 氣象 資料를 얻기 위하여 서울 및 부산에서 3곳을 選定하여

每 時間 風向, 風速 등을 觀測하였으며 觀測場所 및 器機는 Table 1과 같다. 그러나 環境研究所에서 Sodar에 의한 高度別 氣象觀測은 器機의 事情으로 因하여 3月부터 5月까지만 實施하였다.

3.2 調査方法

3.2.1 氣象觀測 資料의 處理

本 研究에서는 F. Pasquilli가 提案한 바와 같이

Table 1. Meteorological Observation Stations and Instruments

City	Observation Station	Instruments
Seoul	<ul style="list-style-type: none"> National Environmental Protection Institute (NEPI) Jamsil A.P.T. Area 	<ul style="list-style-type: none"> Electronic Weather Station (Climatronics) Sodar (Remtech) Electronic Weather Station (Climatronics)
Pusan	Pujeondong	<ul style="list-style-type: none"> Mechanical Weather Station (M.R.I)

風向, 風速을 連續的으로 觀測하여 얻은 資料를 分析하여 구하는 方法을 利用하였으며 바람의 觀測 記錄紙로부터 다음과 같은 過程을 거쳐 風向의 標準偏差를 구하였다*.

- 1) 觀測 資料中에서 1~4時間사이의 Sampling Time($\bar{\tau}$)을 취한다.
- 2) Sampling Time동안의 平均 風向($\bar{\theta}$)을 구한다.
- 3) Sampling Time을 다시 3分~5分으로 細分하여 Short Term (s)에 대한 平均 風向($\bar{\theta}_s$)을 구한다.
- 4) Sampling Time동안의 風向의 標準偏差(σ_{θ_s})를 구한다.

垂直 方向의 擴散 係數(σ_z)를 구하기 위한 垂直 方向의 標準偏差(σ_E)는 Sodar에 의하여 10분마다 觀測된 垂直 風速의 標準偏差(σ_w)와 平均風速(\bar{u})을 利用하여 다음과 같이 구하였다.

$$\sigma_E = \sigma_w / \bar{u} \dots \dots \dots (16)$$

3.2.2 Lagrangian과 Eulerian Time Scale

앞에서 언급한 바와 같이 Taylor는 水平 및 垂直 方向의 擴散(식2, 3)을 짧은 時間동안 平均한 風速의 Lagrangian 標準偏差로 나타냈는데 時間과 空間의 變化에 따른 Lagrangian觀測은 實際로 遂行하기가 어려우므로 Hay와 Pasquilli¹⁾은 Lagrangian Time Scale과 固定된 任意의 地點에 대한 Eulerian

Time Scale과의 關係를 β 로 表示하였다. 즉,

$$\beta = t/s = x/\bar{u}s$$

本 研究에서는 β 값을 구하기 위한 實驗을 하지 못하였으므로 Hay와 Pasquilli가 영국의 Porton에서 現場實驗을 통하여 얻은 값을 使用하였다. 이 實驗에서 β 값은 風速의 變化 및 大氣의 安定狀態와는 無關하게 1.1에서 8.5까지 變化하였으며 平均값은 4.0으로 나타났다.

3.2.3 大氣 安定度

중앙기상대(서울)와 부산支臺에서 觀測한 資料를 利用하여 Joint Frequency Function (J. F. F)으로 3月부터 10月까지 大氣 安定度 等級別 發生頻度 分布를 調査하였다. 또한 本 研究에서는 調査 對象地域으로 選定된 3地點에서 보다 局地的인 大氣 安定狀態를 把握하기 위하여 各 地點에서 觀測한 風向, 風速 資料를 利用하여 風向의 變化에 대한 標準偏差로서 安定度 等級을 決定하는 方法을 利用하였다(Irwin, 1980)¹⁰⁾. 여기에 나타난 安定度 等級別 風向의 變化값은 거칠기 길이가 15cm인 곳을 基準으로 하여 決定된 값이며 地表面의 性質이 다른 地域에 適用하려면 그 地域의 거칠기 길이에 따라 補正하여 使用하여야 한다. 거칠기 길이는 調査 地域中 環境研究所에서만 Sodar로 觀測한 高度別 風速資料를 利用하여 구하였으므로 그 外의 地

域의 거칠기 길이는 지금까지 報告된 代表값(잠실 : 30cm, 부전동 : 100cm)을 利用하여 安定度 等級

을 決定하기 위한 風向 變化的 標準偏差를 구하였다(Table 2).

Table 2. Wind Fluctuation Criteria for Estimating Pasquill Stability Category

Pasquill Stability Category	Standard Deviation of the Horizontal Wind Direction Fluctuations (in degrees)		
	NEPI ($Z_0=144\text{cm}$)	Pujeondong ($Z_0=100\text{cm}$)	Jamsil ($Z_0=30\text{cm}$)
A	> 35.3	> 32.9	> 25.9
B	27.5 to 35.5	25.6 to 32.9	20.1 to 25.9
C	29.6 to 27.5	18.3 to 25.6	14.4 to 20.1
D	11.8 to 19.6	10.0 to 18.3	8.6 to 14.4
E	6.0 to 11.8	5.5 to 10.0	4.4 to 8.6
F	< 6.0	< 5.5	< 4.4

4. 結果 및 考察

4.1 地面의 거칠기 길이(Surface Roughness Length)

거칠기 길이는 地面의 狀態에 따라 다르며 風向 變化的 標準偏差에 의하여 大氣 安定度 等級을 定하는 重要한 因子가 된다. 따라서 本 研究所 부근

의 거칠기 길이를 구하기 위하여 음파기상탐지기(Sodar)를 設置하여 3월부터 5월까지 高度別 風速의 變化를 觀測하였다. 高度에 따른 風速의 變化(Table 3)를 살펴보면 300m 高度에서 弱한 風速帶를 形成하고 있었으며 3개월 平均 風速에서 알 수 있는 바와 같이 약 570m에서부터 風速이 弱하여져 上層의 평탄하고 一定한 氣流인 경도풍으로 變해하고 있음을 알 수 있다.

Table 3. Vertical Distribution of Average Wind Speed (m/sec)

Alt. (m)	Month	March	April	May	March~May
60		2.97	3.45	3.57	3.32
90		3.63	3.69	4.32	3.80
120		3.92	4.09	4.45	4.10
150		4.59	4.34	5.03	4.58
180		4.12	3.72	4.60	4.05
210		4.71	4.09	5.70	4.67
240		5.36	4.18	6.69	5.16
270		5.30	4.21	8.16	5.42
300		2.51	3.76	4.59	3.19
330		6.55	4.26	7.66	5.91
360		6.53	4.40	7.14	5.87
390		7.07	4.84	7.25	6.38

420	6.95	5.04	7.37	6.38
450	6.73	5.23	7.12	6.30
480	7.67	5.89	6.58	6.92
510	7.56	6.31	7.88	7.29
540	8.67	6.12	5.50	7.29
570	7.38	6.08	6.74	6.75
600	5.70	6.27	3.88	5.60
630	7.73	5.31	6.10	6.51

거칠기 길이(Z_0)는 月別로 127~177cm의 값을 보였으며 平均값은 144cm로 나타났다(Fig. 1 참조). 이 값은 다른 報告에서와 같이 높은 건물이 密

集되어 있는 대도시의 값보다는 작으며 건물이 散在되어 있는 도시에서의 값의 범위에 해당한다.

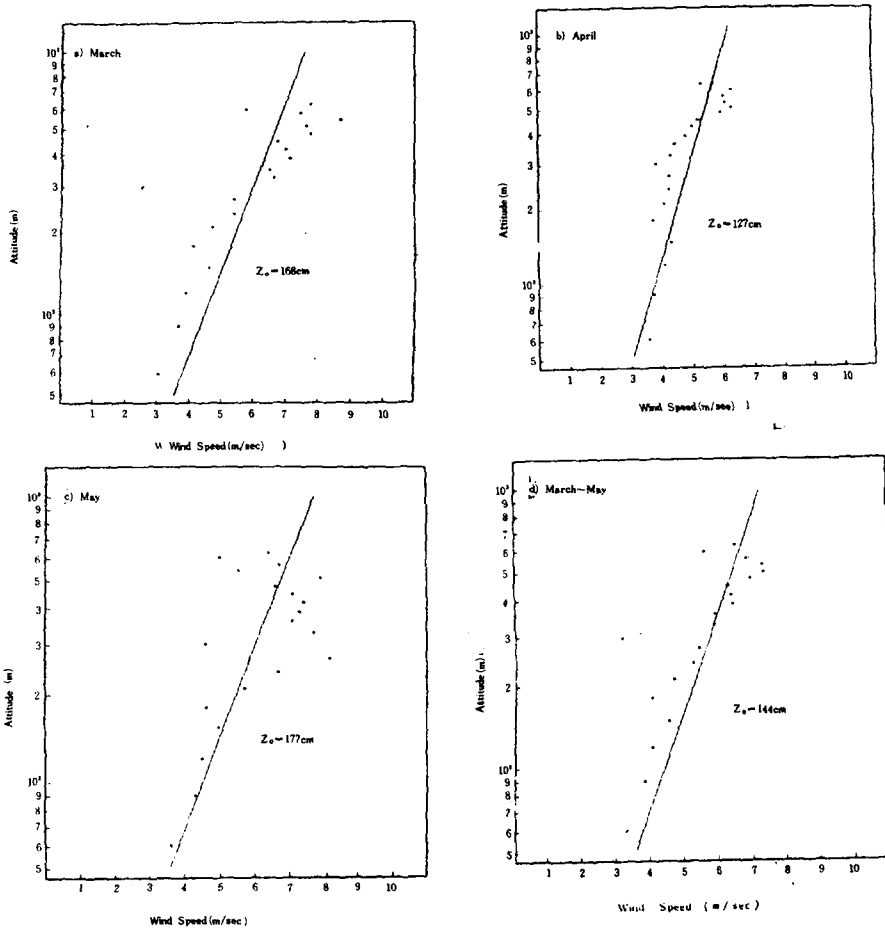


Fig. 1. Vertical distribution of wind speed for estimating roughness length at NEPI on March~May 1985.

4.2 大氣 安定度와 垂直, 水平 擴散 係數

Meteorological Joint Frequency Function으로 구한 大氣 安定度 等級別 發生頻度 分布는 서울과 부산에서 D等級인 中立狀態가 29%와 32%로 가장 많았으며 不安定한 狀態인 A, B, C等級과 安定한 狀態인 D, E, F等級으로 分類할때 서울에서는 26%와 74%, 부산에서는 24%와 76%로 各各 나타나 安定한 狀態가 지배적으로 많음을 알 수 있다. 또한 風向의 標準偏差를 利用하여 3地點에서 구한 安

定度 等級別 發生頻度 分布는 不安定한 狀態와 安定한 狀態가 環境研究所와 부전동에서 10%와 90%, 그리고 잠실에서 17%와 83%로 各各 나타났다(Table 4 참조). J.F.F로 每 時間別로 구한 安定度 等級別 發生頻도와 比較할때 安定한 狀態가 더욱 많이 나타난 것은 觀測 資料로부터 Sampling Time(2時間)을 취할때 낮時間보다는 比較的 大氣가 安定한 밤 時間의 資料가 많이 選定되었기 때문이다.

Table 4. Frequency Distribution of Atmospheric Stability

(Unit: %)

Stability Class \ Region	Seoul Pusan (by J.F.F.)		NEPI Jamsil Pujeon dong (by Wind Direction Fluctuation)		
	A	1	1	1	1
B	9	9	1	4	3
C	16	14	8	12	6
D	29	32	33	42	37
E	12	16	43	36	43
F	33	26	14	5	10

環境研究所에서 水平方向의 擴散 係數는 大氣가 가장 安定한 F等級일때 風下距離 100m에서 11m로 가장 작았으며 A等級일때 5,000m에서 3,117m로 가장 크게 나타났다(Table 5 참조). 그리고 風下距離와 擴散 係數의 相關性은 全 大氣 安定度 等級에서 0.86以上이었다. 垂直方向으로의 擴散은 (Table 6)水平方向 係數보다 작게 나타나 汚染物

質은 水平擴散에 더 많은 影響을 받고 있음을 알 수 있으며 相關度는 0.94以上으로 水平 擴散보다 높게 나타났다.

잠실에서의 擴散 係數는 (Table 5) 13~2,956m의 變化를 보이고 있으며 環境研究所의 값과 比較할 때 A等級일때 風下거리 3,000m에서 986m로 가장 커다란 差異를 나타냈으며 B等級일 경우에는

Table 5. Standard Deviation of Horizontal Direction (σ_y) as a Function of Downwind Distance (x)

X (m) \ Station	NEPI ($Z_0=144\text{cm}$)						Jamsil ($Z_0=30\text{cm}$)						Pujeondong ($Z_0=100\text{cm}$)					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
100	125	92	66	42	32	11	73	59	53	33	20	13	104	90	66	38	25	13
300	280	167	121	79	51	24	146	116	95	61	34	21	182	165	113	71	45	25
500	312	234	191	124	77	40	296	197	142	99	58	34	378	253	186	115	73	36
1000	624	460	363	243	144	72	589	396	268	192	109	70	785	488	356	229	136	69
2000	1457	1001	754	516	318	152	909	800	574	396	223	132	1312	1088	708	489	292	154
3000	2507	1763	1155	809	461	219	1521	1247	830	623	338	187	2125	1570	1154	698	442	128
5000	3117	2531	1710	1179	735	385	2956	1850	1295	955	528	320	3013	2232	1721	1128	692	365

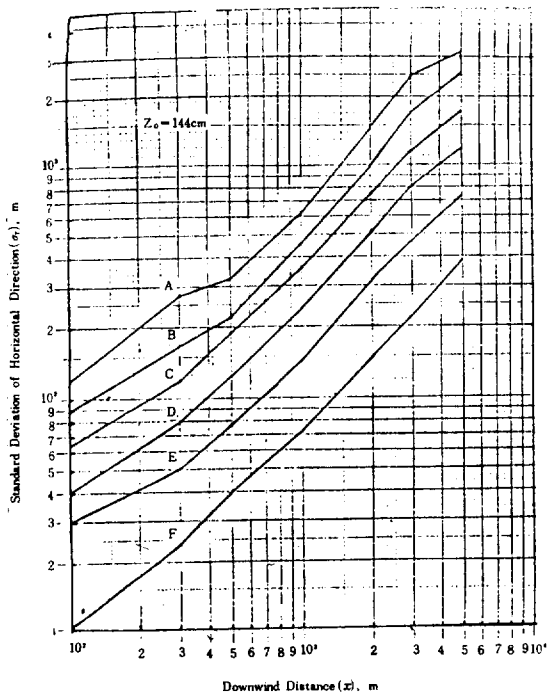


Fig. 2 Standard deviation of horizontal direction (σ_y) at NEPI.

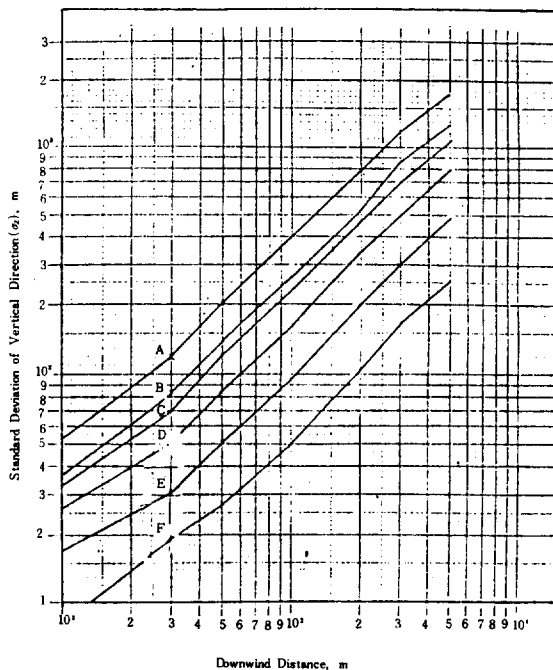


Fig. 3. Standard deviation of vertical direction (σ_z) at NEPI.

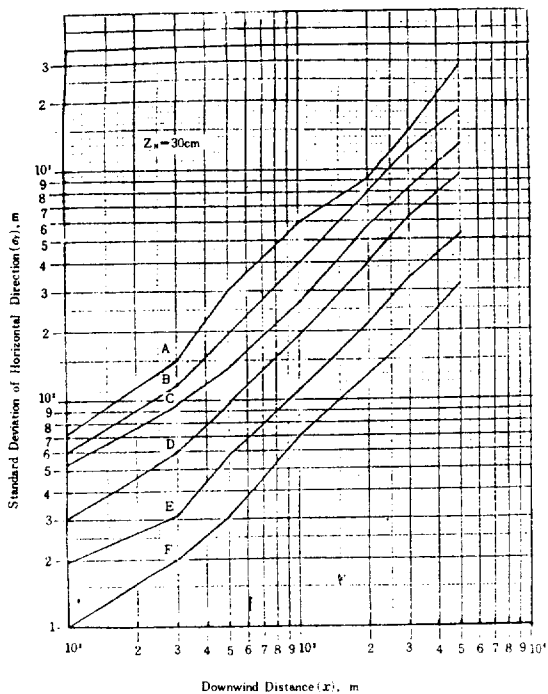


Fig. 4. Standard deviation of horizontal direction (σ_y) at Jamsil.

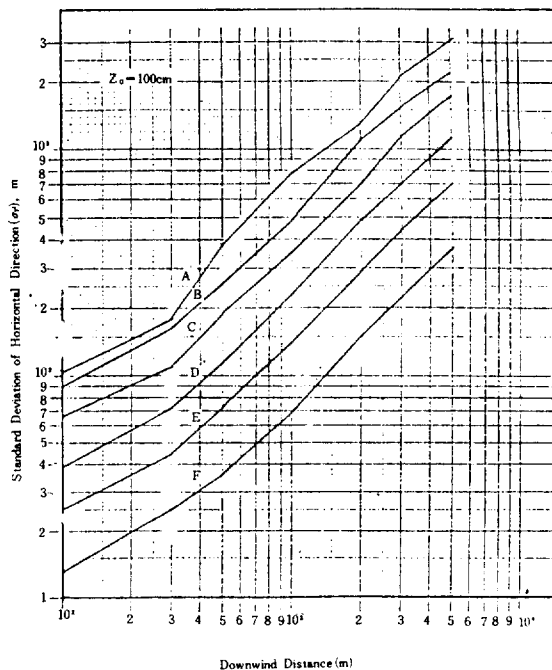


Fig. 5. Standard deviation of horizontal direction (σ_y) at Pujeondong.

Table 6. Standard Deviation of Vertical Direction (σ_z) as a Function of Downwind Distance (x) at NEPI

Stability X (m)	A	B	C	D	E	F
100	53	37	33	26	17	8
300	122	84	69	51	31	19
500	213	141	120	84	51	27
1000	404	265	227	162	95	50
2000	790	531	468	340	196	103
3000	1171	867	705	502	302	165
5000	1755	1276	1095	789	484	256

風下거리 5,000m에서 680m의 差異를 보였다. 부전동에서는(Table 5) 環境研究所의 값과 비슷하게 나타나고 있으나 A等級일때 3,000m에서 382m 작았으며 B等級일때 5,000m에서 299m의 差異를 보이고 있다(Fig. 2~5 참조). 따라서 地域의인 特性이 다른 3地點에서 算定한 값을 比較하면, 擴散係數는 環境研究所에서 가장 컸으며 부전동, 잠실의 順으로 나타났다. 즉 地面의 거칠기 길이가 큰 都市에서는 Heat Island 効果 및 地面의 狀態가 고르지 못하기 때문에 發生되는 機械的 亂流때문에 擴散係數의 값이 크다는 것을 알 수 있다.

5. 結 論

서울(環境研究所, 잠실) 및 부산(부전동) 地域에 Weather Station과 Sodar를 設置하여 3월부터 10월까지 氣象 觀測을 하였으며 大氣汚染 豫測을 위한 擴散 係數를 算定하였다. 垂直方向의 擴散係數를 구하기 위한 垂直 氣象 觀測은 環境研究所에서만 實施하였으며 이 地域에 대한 거칠기 길이(Roughness Length)를 구하였다. 또한 중앙기상대에서 觀測한 資料를 利用하여 大氣 安定度를 分析하였으며 서로 다른 地面 狀態에서 大氣 安定度

等級을 決定하기 위한 風向 變化의 標準偏差를 구하였다. 本 研究의 結果를 要約하면 다음과 같다.

1) 環境研究所에서 觀測한 高度別 風速의 變化로 分析하여 구한 地面의 거칠기 길이는 月別로 127~177cm의 變化를 보이고 있으며 平均 144cm 이었다.

2) J. F. F로 구한 大氣 安定度는 서울과 부산에서 各各 D等級인 中立 狀態가 29%와 32%로 가장 많았으며 不安定한 狀態인 A, B, C等級은 26%와 24%, 그리고 安定한 狀態인 D, E, F等級은 74%와 76%로 나타나 大氣汚染物質의 擴散이 원활하지 않은 安定한 狀態가 많았다.

3) 地面의 거칠기 길이가 144cm, 100cm, 30cm일 때 大氣 安定度의 Category를 定하였는데 A等級은 風向의 標準偏差가 $>35.3^\circ$, $>32.9^\circ$, $>25.9^\circ$ 이었으며 가장 安定한 F等級은 $<6.0^\circ$, $<5.5^\circ$, $<4.4^\circ$ 로 各各 나타났다.

4) 水平 擴散 係數는 環境研究所에서 가장 컸으며 부전동, 잠실의 順으로 나타났는데 이것은 地面의 거칠기 길이가 큰 地域에서 發生되는 機械的 亂流에 의한 影響이다.

(原稿接受 '86. 4. 28)

Reference

- 1) F. Pasquill, The Estimation of the Dispersion of Windborne Materials, Meteorol. Mag. 90, 33-49, 1961.
- 2) F. A. Gifford, Jr, Use of Routine Meteorological Observation for Estimating Atmospheric Dispersion, Nuclear Safety, 2(4), 45-57. 1961.
- 3) D. B. Turner, A Diffusion Model for an Urban Area, J. Appl. Meteorol, 3(1), 83-91, 1964.
- 4) I. A. Singer and M. E. Smith, Atmospheric Dispersion at Brookhaven National Laboratory, Int. J. Air Water Pollut, 10, 125-135, 1966.
- 5) S. P. S. Arya, Atmospheric Dispersion Parameters in Gaussian Plume Modeling. APTI course 423, 5. 1, 5.41, 1970.
- 6) E. Inoue, On the Turbulent Diffusion in the Atmospheric, J. Met. Soc. Japan, 28. 13, 1950.
- 7) D. A. Haugen, Project Prairie Grass, A Field Program in Diffusion, Geophysical Research Papers, No. 59, 3, 1959.
- 8) E. P. A. Air Pollution Meteorology, Instructors Guide, APTI Course 411, 16. 1-17. 11, 1981.
- 9) F. Pasquill, Atmospheric Diffusion, 2nd, Ed., p.185-187, John Willey and Sons, 1974.
- 10) E. P. A. Guide Line on Air Quality Models(Revised) Office of Air Quality Planning and Standards, 9. 8-9. 20, 1984.