

大氣汚染物質 排出管理에 있어서의 微氣象知識의 利用

朴 玉 鉉
東亞大學校 工科大学 環境工學科

Use of Micrometeorological Information in Air Pollutants Emission Management

Park, Ok-Hyun

Department of Environmental Engineering, College of Engineering,
Dong-A University, 600 Busan, Korea

1. 序 論

오늘날 大氣汚染은 全世界的으로 一般化 추세에 있다. 降水에 의한 환원(washing out), 沈降 등의 除去機構에도 不拘하고 background level은 增加 추세에 있으며, 世界 대부분의 都市에서 惡化일로에 있다.

一般的이고도 代表的인 大氣汚染物質로서는 SO_x , NO_x , Oxidants, 분진, 炭化水素化合物 등을 들 수 있다. 1차 汚染物質들은 主로 燃燒過程에서 發生하며, Oxidants(光化學 Smog의 構成物質中에서 KI와 反應해서 I_2 를 遊離시키는 O_3 , PAN, PBN 등의 總酸化性物質)는 産業工程 및 燃料의 燃燒過程에서 排出되는 NO_x 와 炭化水素化合物을 起因物質로 해서 光化學反應에 의해 生기는 것이다. 公害工場으로 인한 大氣汚染의 制御는 立地, 自然의 物質의 淨化能力(運搬, 擴散, 稀釋)의 利用과 化工裝置를 利用한 排出 汚染物質處理로 大別해서 考察할 수 있다.

公害物質 排出工場의 立地 選定時 考慮해야 할 地形및 氣象要素는 여러가지가 있겠다. 基本的으로 特別히 避해야 할 地形은 大氣中에 排出된 汚染物質의 水平 및 鉛直方向 移動및 擴散에 不利

한 氣象이 造成되는 地形인 盆地, 골짜기 등과 隔離氣流로 因하여 이 物質들이 地上에 떨어져 떨어져 丘陵의 背斜面 等으로서, 風配圖 靜穩繼續時間, 大氣安定度 그리고 氣象의 局地性 등이 特別히 基本的으로 考慮되어야 한다." 일단 立地가 決定되고 나면 化工裝置를 利用한 排出 汚染物質處理를 하되 處理效率의 增加에 따라 所要 經費는 指數函數의으로 增加하기 때문에 環境基準과 自然의 淨化能力의 범위내에서 多小의 未處理 汚染物質을 自然에 放流하므로써 處理經費(施設費 및 運營費)를 최대한 줄이려는 것이 오늘날까지의 세계各國의 大氣汚染制御를 위한 접근 경향이다. 여기에서는 自然의 物理的 淨化能力을 最大한 利用하기 위한 하나의 接近으로 微氣象資料의 利用, 主로 Gaussian 擴散 model 利用方法 등에 관해서 記述한다.

2. 煙突設計

2.1. 煙氣의 排出速度

特別히 高風速時에 煙氣가 거의 水平으로 흐를 때 主된 空氣흐름으로부터 격리되어서 煙突뒤에 形成된 渦流에 煙氣가 휘말려서 地表 部近으로 떨어져 地上에 높은 汚染을 유발하는 downdraft

를 排除하기 위해서는 $V_s \geq 1.5u$ 이어야 한다. 여기서 V_s 는 煙氣의 排出速度, u 는 煙突 높이에서의 風速이다. 보통 V_s 는 大煙突의 경우 14~30 m/s(火력발전소의 경우 V_s 가 20~30m/s 정도 되도록 nozzle을 붙이는 例가 많다)²⁾ 小煙突의 경우 10~15 m/s 정도로 取한다.

煙突의 자연통풍력外에 바로 이 出口速度를 浬案하여 連續方程式에서 구한 煙道 各 區間 혹은 部位에서의 流速으로 속도수두 決定을 통해 壓力損失值를 계산해서 요구되는 fan의 排風力을 (1)式³⁾과 같이 決定해야 하며, 公害制御裝置에서의 壓力損失值만을 감안해서 Fan의 動力을 決定하는 것은 잘못이다.

$$(r_a - r_g)H_s + \text{blower pressure} \geq \frac{r_g \cdot N_s^2}{2g} + \Sigma \Delta h_s + \Sigma \Delta h_b \quad (1)$$

2.2. 실제 煙突高

(1) Downwashing 방식을 위한 實際 煙突高

건물 주변에 形成되는 기계적 난류에 煙氣가 휘달려 떨어져서 結果적으로 地上汚染濃度を 증가시키는 現象을 Downwashing이라고 하는 바 downwashing 현상은 有效煙突高를 높임으로서 排除할 수 있다. 一般的으로 downwashing 현상은 건물의 風下측에 건물 높이의 최소 2 배에서 5~10 배 거리에 걸쳐 생기며 有效煙突高가 그의 10 배를 半徑으로 하는 地域內의 最高건물 높이의 2.5 배 이상이어야 한다.²⁾

어떤 方向으로부터의 downwashing을 일으키는 임계풍속(critical wind speed)이 決定되면 風配圖를 利用하여 그 方向으로부터 오는 風速이 임계풍속보다 큰 빈도를 決定하므로써 年中 그 風向時의 downwashing이 發生하는 平均 時間數를 計算할 수 있다. 건물의 길이 方向이 主風向과 45° 兪각을 이룰때 downwashing 효과가 가장 크고 두 方向이 平行할 때 가장 작음을 유의할 必要가 있다.⁴⁾

(2) 地上最大汚染濃度を 考慮한 실제煙突高

i) 만약 有效煙突高가 모든 大氣의 安定조건하에서 같다고 하면 最大地上汚染濃度は 가장 낮은 風速時에 생긴다.

一般的으로 風速이 빠를수록 有效煙突高이

(H_e)는 작아지기 때문에 最大地上汚染濃度は 風速에 起因하는 汚染物質의 회석과 有效煙突高이 間에 平均이 이뤄지는 어떤 中間 風速時에 나타나고 이때의 풍속을 임계풍속이라고 하며 이는 安定度에 따라 달라지는데 이를 決定하기 위해서는 우선 풍속의 함수로써 有效煙突高를 決定하고 나서 各 風速및 安定度에 대한 最大地上汚染濃度を 安定도와 有效煙突高의 함수로써 Fig. 1로부터 計算할 수 있다.⁴⁾ 風速의 함수로써 最大地上汚染濃度を 全對數紙에 나타내면 各 安定度제급에 대한 曲線들이 얻어지는데 임계풍속은 各 曲線들에 있어서 最大地上濃度を 나타내는 점에 있어서의 風速이다. 이 임계풍속과 해당 安定度에서의 有效煙突高가 煙突設計를 위한 Gaussian 擴散모델 應用과정에 쓰인다. 물론 실제 연돌고는 위의 有效煙突高에다 임계풍속시의 煙의 상승고를 뺀 값이다.

概略적으로 最大地上汚染도가 $H_e = \sqrt{2} \cdot \sigma_z$ 인 곳(汚染原으로부터의 거리)에서 생긴다고 가정할 수 있으며, 그 거리에서 σ_y (橫方向퍼짐의 표준편차)와 σ_z (鉛直方向퍼짐의 표준편차)의 積은 다음과 같이 表示된다.⁵⁾

$$\sigma_y \cdot \sigma_z \cong \frac{0.117Q}{u \cdot \chi_{\max}} \quad (2)$$

汚染強度 Q (g/s), 초과되어선 안될 χ_{\max} (g/m³) 농도를 알면[英國 基準에 의하면 χ_{\max} 값은 3分 平均濃度 1.700 ppm(4444 μ g/m³)이다] 어떤 주어진 풍속 u (m/s)에 대해 必要한 $\sigma_y \cdot \sigma_z$ 積算值를 決定할 수 있으며 Fig. 2⁴⁾는 $\sigma_y \cdot \sigma_z$ 積算值를 各 安定度 제급에 따라 거리의 함수로서 나타내고 있다. $\sigma_y \cdot \sigma_z$ 積算值和 設計距離, x_d (그 距離 너머에서는 汚染濃도가 미리 決定된 어떤 값보다 작은 그러한 距離)는 Fig. 2에서 安定도 제급을 決定할 것이며, 이렇게 결정된 安定도 제급과 設計距離에 해당하는 σ_z 를 구하여 $H_e = \sqrt{2} \cdot \sigma_z$ 로부터 H_e 를 計算한다. 그 H_e 가 決定된 풍속에서 요구되는 실제 設計煙突高 $\{H_s = H_e - (\text{그 풍속에서의 煙상승고 } \Delta H)\}$ 이며 요망되는 最高煙突高를 決定하기 위해서는 다른 風速值에 대해서도 위와 같은 절차를 거쳐서 H_s 를 決定하여 그 중 최대치를 찾아야 한다.

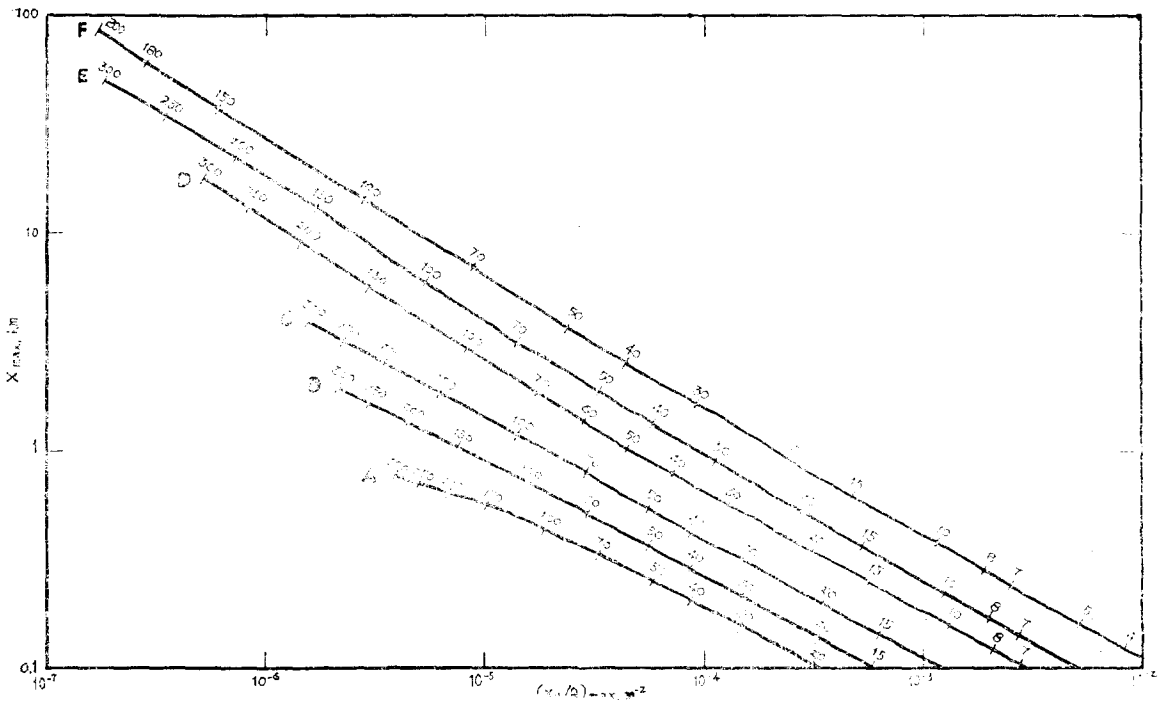


Fig. 1. Distance of maximum concentration and maximum Zu/Q as a function of stability (curves) and effective height (meters) of emission (numbers)

Table 1. Actually demanded stack height expressed as a function of wind speed

u (m/s)	ΔH (m)	$\sigma_y \cdot \sigma_z$ (m ²)	Stability to give $\sigma_y \cdot \sigma_z$ at 1500m	σ_z (m)	$H' = \sqrt{2} \cdot \sigma_z$ (m)	$h = H' - \Delta H$ (m)
0.5	204	4.24×10^4	0.9 (A~B)	190	269	65
1.0	102	2.12×10^4	0.6 (B~C)	120	170	68
1.5	68	1.41×10^4	0.9 (B~C)	96	136	68
2.0	51	1.06×10^4	0.2 (C~D)	76	108	57
2.5	41	8.48×10^3	0.4 (C~D)	64	91	50
3.0	34	7.06×10^3	0.6 (C~D)	53	79	45
5.0	20	4.24×10^3	0	42	60	40
7.0	15	3.03×10^3	0.5 (D~E)	34	48	33

〈計算例〉單一煙突로부터 H_2S 를 每日 0.5 ton 씩 放出할 것으로 豫想되는 pulp 處理工場을 建設하려 한다. 工場 부지는 計劃된 工場 위치로부터 최소 1,500 m 까지 到해 있다. 最近의 汚해지점은 그 工場의 北東쪽 1,700 m 떨어져 위치한 주민 500 여명의 작은 읍이다. 工場 관리인들은 30 分 이상의 어떤 기간 동안에도 地上最大汚染濃度가 20 ppb(대략 $2.9 \times 10^{-5} \text{g/m}^3$) 이하에서 유지되도록 함이 바람직하다고 決定했다

풍향빈도는 계획된 工場位置로부터 이 읍쪽으로 바람이 전체시간의 10 내지 15 %에 해당하는 시간동안 부는 것으로 나타내고 있다. 煙突高는 얼마여야 하겠는가?

풍속이 2m/s 이하일 때 煙氣의 상승고는 꽤될 것이므로 2m/s의 設計風速은 充分할 것이라고 가정된다. 굴뚝 직경은 2.44 m, 배가스 온도 121°C, 가스배출속도는 13.7 m/s, 기온 20°C 壓力 920 mb 라고 가정하라.

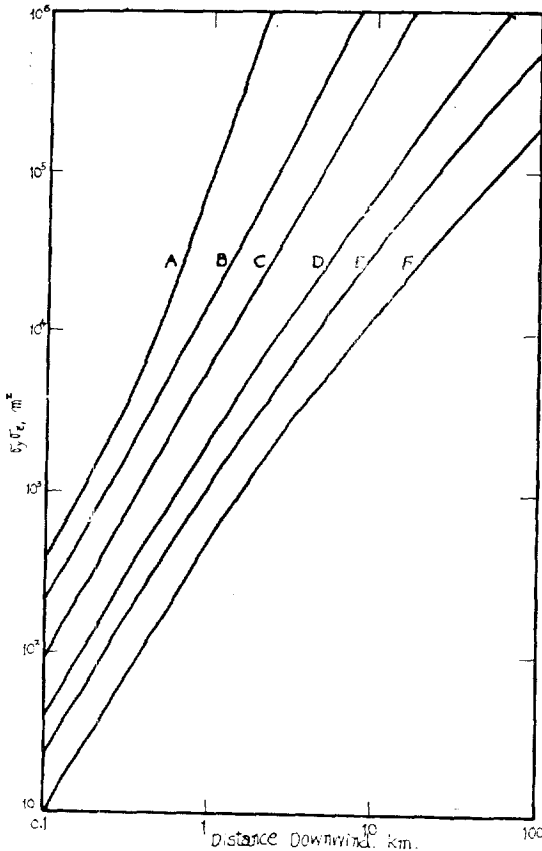


Fig. 2. The product of $\sigma_y \sigma_z$ as a function of down wind distance from the source

$$\begin{aligned} \text{[解]} \quad Q &= \frac{1,000(\text{lb/day}) \times 453.6(\text{g/lb})}{86,400(\text{s/day})} \\ &= 5.25(\text{g/s}) \end{aligned}$$

ΔH 는 Holland의 공식(煙突 직경이 1.7~4.3 m, 온도가 82~204°C의 煙突을 이용한 실험 결과 만들어진 식)인 식 (16)으로부터

$$\begin{aligned} \Delta H &= \frac{13.7 \text{ m/s} \times 2.44 \text{ m}}{u} \\ &\left[1.5 + 2.68 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{mbr} \times \text{m}} \times 920 \text{ mbr} \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{394^\circ \text{K} - 293^\circ \text{K}}{394^\circ \text{K}} \right) \times 2.44 \text{ m} \right] = \frac{102}{u} \end{aligned}$$

$\sigma_y \cdot \sigma_z$ 積算値와 u 와의 관계는 식 (2)로부터

i) 실제 연돌고는 Table 1에서 보인 바와 같

$$\begin{aligned} \sigma_y \cdot \sigma_z &= \frac{0.117 Q}{\chi_{\max} \cdot u} = \frac{0.117(5.25)}{2.9 \times 10^{-5} u} \\ &= \frac{2.12 \times 10^{-4}}{u} \end{aligned}$$

이 결정된다. 그러므로計劃된工場位置에서 1,500 m 떨어진 곳에서 피해지점 許容濃度 以下の汚染度を 유지하기 위한 실제 연돌고 : 68m

ii) Lund의 Industrial Pollution Control Handbook³⁾에 의하면 煙氣의 上昇高 決定을 위한 Davidson-Bryant 식이 적용될 수 있는 排出 조건 시(排氣溫度가 氣溫보다 35°C 以下の 차이를 가지고 排氣의 排出速度가 15m/s 以下이며 직경 0.5m 以下⁴⁾)의 設計 煙突高는 地上最大汚染濃度를 나타내는 Bosanquet-Pearson의 식 (3)을 이용하여 식 (4)와 같이 決定된다.

$$C_{\max} = \frac{2.15 q_A \cdot 10^5}{u \cdot H_e^2} \cdot \left(\frac{p}{q} \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_s &= 3.7 \times 10^2 \sqrt{\frac{q_A}{u \cdot C_{\max}}} \\ &- \left[d \left(\frac{V_s}{u} \right)^{14} \cdot \left(1 + \frac{T}{T_g} \right) \right] \quad (4) \end{aligned}$$

(3) 煙突高의 選定

만약 地上最大汚染濃度를 考慮해서 算定한 煙突高가 $2\frac{1}{2}$ 法則을 적용해서 산정한 것보다 크면 前者를 選定한다.

그런데 만약 後者가 크면 Fig. 3³⁾을 利用해서 최종 연돌고가 決定된다.

3. 被害地點 汚染濃度計算

3.1. 正規擴散모델

i) 風下方向을 x 軸으로 그에 垂直하는 橫 및 鉛直方向을 y 및 z 軸으로 나타낼때 煙氣의 中心에서는 $y=0$ $z=H_e$ 이며 $y=2.15\sigma_y$ 및 $z=H_e \pm 2.15\sigma_z$ 에서의 汚染物質의 濃度가 중심축에서의 최대濃도의 $\frac{1}{10}$ 程度되는 正規分布를 하고 있는 有效煙突高 H_e 인 圓錐型煙氣의 (x, y, z) 에서의 濃度를 計算하는데 쓰이는 Gaussian Plu-

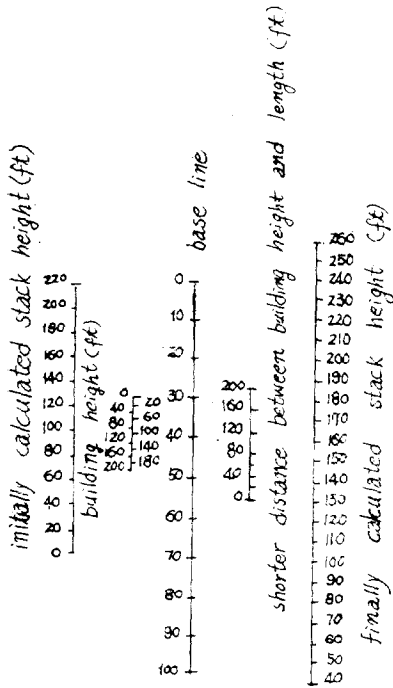


Fig. 3. Determination of final stack height

me dispersion model 은 式 (5)와 같다.

$$\chi_{(x,y,z,H_e)} = \frac{Q}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot U_{He}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_e - z}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_e + z}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (5)$$

沈着性 粒子狀物質濃度 決定時엔 { } 内の 前後項사이 기호가 (-)가 됨을 留意해야 한다. 물론 큰 침강성물질의 경우엔 式 (5)는 적용할 수 없다.

地上 汚染源이면서 煙氣 上昇이 없는 경우는 $H_e = 0$, $z = 0$ 를 代入한다.

ii) 逆轉 붕괴시에는 式(6)⁹⁾을 利用한다.

$$\chi = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{yf} \cdot u \cdot H_f} \quad (6)$$

iii) 沒入型 煙氣(trapping plume) 확산시엔

式 (7)⁹⁾을 쓴다.

$$\chi = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{yl} \cdot u \cdot H_l} \quad (7)$$

iv) 연막탄과 같이 瞬間的으로 汚染物質을 방출한 경우엔 式 (8)을 使用하며, 배출당시부터 地表面에서 反射되는 地上순간汚染源인 경우엔 (x,y,z) 에서의 농도는 式 (8)을 利用해서 算定한 값의 2 배이다.¹⁰⁾

$$X_{(x,y,z)} = \frac{Q}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot \sigma_x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x - u \cdot t}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\} \quad (8)$$

v) 자동차 密度가 높은 高速道路와 같은 線汚染源의 경우 그 排出源이 떨어진 方向과 風向이 직교할때 式 (9)를 利用해서 $\chi_{(x,y,z)}$ 를 算定한다.

$$\chi_{(x,y,z)} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - h}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z + h}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (9)$$

3.2. 正規擴散모델 使用 各論

i) U_{He} 計算

地上 10 m에서 측정된 風速은 특히 逆轉조건 하에서 地表面 혹은 낮은 出口에서 排出된 汚染物質 擴散解析에 쓰인다.

실제 U_{He} 는 $H_e + 2\sigma_z$ 에서 $H_e - 2\sigma_z$ 까지의 風速의 平均값이어야하나, 이를 구하기는 어려우므로 $U_{He} = \left(\frac{H_e}{10m}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot U_{(10m)}$ 로 구하고 P 값은 불안정시 0.1, 중립조건에서 0.14, 안정시 0.5 정도의 값을 취한다. E.L Deacon의 風速 수직분포에 관한 model은 정교한 것이나 많은 변수를 갖고 있으므로 통상 공학적 접근에 사용하지 않는다. 地表面 조도와 地形이 변하는 비도시지역(nonurban area)에서는 주간(불안정)에 P 의 값

이 0.1~0.3, 야간(역전을 포함한 안정시)에는 0.2~0.8의 값을 가지고, 평탄하고 흔히 트인 시골지역에서는 보통 0.06(불안정시)~0.33(안정시)의 값을 갖는다.¹²⁾ 중립조건시에도 $P = 0.14$ 라고 하는 統計的인 값이 一般的으로 쓰이고 있으나, 경도풍이 형성된 공기층까지의 高度가 클수록 P 값은 커지고 그 高度가 520m 일때 $P = 0.4$ 까지 된다는 보고가 있다.¹²⁾

Pasquill의 각 安定度 계급에 따른 統計學的 “ P ” 값은 Fig. 4¹³⁾에 도시하였다.

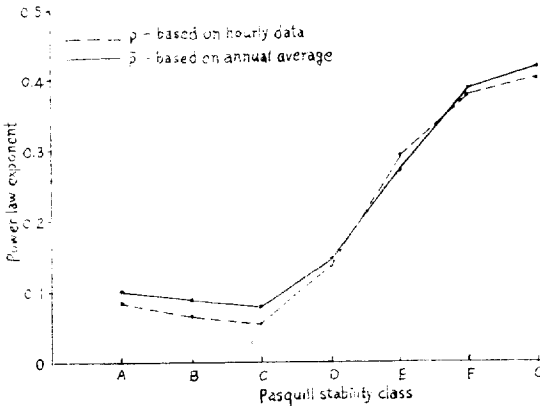


Fig. 4. Comparison of power law exponent by using hourly data(p) vs annual average wind speed data(\bar{p})—10 to 60 mΔT

ii) H_e 의 決定

有效 煙突高, H_e 는 실제 煙突高, H_s 와 煙氣의 上昇高, ΔH 를 합한 것으로서 수많은 半經驗式이 만들어져 있다. 실제 잘 쓰이는 重要的 式들을 요약하면 다음과 같다.

① 현저한 排出速度를 가지고 氣溫보다 10°C 以下 差의 溫度를 가진 매연에 대해서는 주로 排出速度에 의해 ΔH 가 決定된다.¹⁴⁾

$$\Delta H = 1.5 \left(\frac{V_s}{u} \right) \cdot D \quad (10)$$

② 高溫의 煙氣에 대해서는 風速(m/s)5(s)의 距離 以上에서 浮力에 의한 연기의 上昇이 현저해지는데 이 경우의 Briggs의 半經驗式들은 (가)~(다)와 같다.

(가) 安定 혹은 중립 부근의 氣象조건下에서

$$\Delta H = 2.3 \left(\frac{F}{u \cdot s} \right)^{1/3} \quad (11)$$

$$F = g \cdot V_s \left(\frac{D}{2} \right)^2 \left(\frac{T_s - T_a}{T_a} \right)$$

$$S = \frac{g}{T} \left(\frac{dT}{dz} + \Gamma \right)$$

(나) 不安定 및 중립조건하에서

$$\Delta H = 150 \frac{F}{u^3} \quad (12)$$

(다) 靜穩・安定조건하에서

$$\Delta H = \frac{5 F^{1/4}}{s^{3/8}} \quad (13)$$

③ 각 安定조건하에서 煙氣 上昇을 하나의 常數값만을 다르게 주어서 구할 수 있는 Moses-Carson의 式은 다음과 같다.

$$\Delta H = A \left[-0.029 \frac{V_s D}{u} + 5.35 \frac{Q_h^{1/2}}{u} \right] \quad (14)$$

④ 排氣溫度가 氣溫보다 35°C 以下の 차이를 가지고 排氣의 배출속도가 15 m/s 以下이며 直径 0.5 m 以下の 煙突 設計時에 보통 많이 쓰이는 Davidson-Bryant의 式은 다음과 같다.¹⁵⁾

$$\Delta H = D \left(\frac{V_s}{u} \right)^{1/4} \left[1 + \frac{\Delta T}{T_s} \right] \quad (15)$$

式 (15)는 大煙突에 있어서 上昇高가 낮은 環型煙에 대해서도 적용이 可하다.¹⁷⁾

⑤ 直径이 1.7~4.3 m 이고 排氣溫度가 $82 \sim 204^\circ\text{C}$ 의 큰 煙突들의 경우 잘 쓰이는 Holland의 式¹⁾은

$$\Delta H = \frac{V_s \cdot D}{u} \left(1.5 + 2.68 \times 10^{-3} P_a \frac{T_s - T_a}{T_s} \cdot D \right) \quad (16)$$

실제의 煙의 上昇高는 不安定時에는 Holland式으로 計算한 ΔH 값의 1.1~1.2 배, 安定조건시에는 0.8~0.9 배에 해당한다.

⑥ 실제 汚染源에서 被害地點 혹은 피해지점 濃度를 算定코저하는 지점까지의 距離에서 ΔH 가

Table 2. Values of I, J, K with stability for calculating σ_y

Stability	I	J	K
A	5.357	0.8823	-0.0076
B	5.058	0.9024	-0.0096
C	4.651	0.9181	-0.0076
D	4.230	0.9222	-0.0087
E	3.922	0.9222	-0.0064
F	3.533	0.9181	-0.0070

Table 3. Values of I, J, K with stability for calculating σ_z

Stability	I	J	K
A	6.035	2.1097	0.2770
B	4.694	1.0629	0.0136
C	4.110	0.9201	-0.0020
D	3.414	0.7371	-0.0316
E	3.057	0.6794	-0.0450
F	2.621	0.6564	-0.0540

Table 4. Stability classification criteria^{(21), (22)}

Classification	Pasquill's Stability Category	Richardson No. (at $z = 2m$)	$\sigma_o(^{\circ})$	$\Delta T/\Delta Z(^{\circ}C/100m)$
very unstable	A	-1.0~-0.7	25.0	1.9
moderately unstable	B	-0.5~-0.4	20.0	-1.9~-1.7
slightly unstable	C	-0.7~-0.13	15.0	-1.7~-1.5
neutral	D	0	10.0	-1.5~-0.5
slightly stable	E	0.03~0.05	5.0	-0.5~ 1.5
moderately stable	F	0.05~0.11	2.5	1.5~ 4.0
very stable	G		1.7	> 4.0

σ_o : standard deviation of wind direction for averaging time 15 to 60min.

$\Delta T/\Delta Z$: temperature gradient

Table 5. Pasquill's stability classification

Surface wind speed (at 10m)(m/s)	Day			Night	
	Incoming solar radiation			Thinly overcast or $\geq 4/8$ low cloud**	$\leq 3/8$ cloud
	strong	Moderate	slight		
<2	A	A-B	B		
2~3	A-B	B	C	E	F
3~5	B	B-C	C	D	E
5~6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

**The degree of cloudiness is defined as that fraction of the sky above the local apparent horizon which is covered by clouds

형성되는 지점까지의 거리, x_1 을 뺀 거리에 해당하는 σ_y, σ_z 를 구해서 Gaussian 확산모델을 써야 한다. x_1 을 구하는 식¹⁸⁾은 다음과 같다.

$$x^{\frac{2}{3}} = \frac{1}{1.6} \Delta H \cdot U_{He} \cdot F^{-\frac{1}{3}} \quad (17)$$

iii) σ_y 및 σ_z 의 결정

Turner의 nomogram에서 각 거리 및安定度 계급에 따라 읽게되는 σ_y 및 σ_z 값은 修正의 여지가 있는 것으로 알려지고 있다.¹⁹⁾ 그 nomogram에서 구한 擴散계수 값들은 式 (18)과 Table 2 및 Table 3을 利用해서 구한 값들과 잘 일치한다.

$$\sigma = \exp [I + J(l_n x) + K(l_n x)^2] \quad (18)$$

Table 2와 Table 3에 나타난 安定度 계급은 Turner의 nomogram에 나타난 것과 같이 정의된다. 一般적으로 통용되는 安定度 구분은 Table 4와 같다.

Table 4에 準據하여 安定도를 구분하려면 많은 經費를 要하는 測定을 해야 하므로 Pasquill, F.는 보통 기상 관측소에서 일상 측정하는 風速 雲量, 日射量 등의 組合으로 위의 각 계급을 구분하였는데 이것이 通用되는 Pasquill의 安定度 계급 Table이다. 그런데 우리나라와 같이 地形의 기복이 심한 나라에서는 매우 드물게 分布하고 있는 기상관측소에서 觀測된 제원으로 배출원 주변지역의 安定度を 구분하기 곤란한 경우가 많다.

Table 5에서 中立條件이란 풍속에 관계없이 주간 혹은 야간에 구름이 짙게 덮여있는 상태로 가정할 수 있다. 여기서 밤이란 일몰전 1시간부터 일출후 1시간까지를 뜻한다. Pasquill의 安定度 區分은 低空擴散 研究에만 사용됨²⁰⁾을 유의해야 하며, 地上 약 20m까지의 공기층에 걸쳐 잘 적용되나 一般적으로 평탄, 광활한 地域 혹은 시골지역상의 약 200~300m에 이르는 高度의 공기층에 적용되어 왔다. 그 공기층도 氣溫의 層 區分이 이루어진(氣溫成層) 경우에는 그 사용에 주의를 要한다. 式 (18)을 使用해서 算定한 σ_y 와 σ_z 들을 평탄하나 건물들이 밀집한 지역에 그대로 적용하면 실제농도보다 높은 농도를 算出하게 될 것이다.

iv) 地域 汚染源에 對한 正規擴散 方程式의 適用

많은 수의 汚染원을 가진 公營단지등에서의 公氣 汚染물질의 확산문제를 다룸에 있어서 종종 그 地域에서의 모든 排出物質들을 組合해서 그 地域을 확산이 개시되는 초기에 이미 풍하방향에 직교하는 橫方向 汚染物質濃度分布의 표준편차 값이 σ_{y0} 인 어떤 排出源으로 간주해서 근사적으로 접근한다. 그래서 그 地域이 네모형으로 생겼고, 한쪽 길이를 S라하면 $\frac{S}{4.3} = \sigma_{y0}$ 이고, 각 安定度에 따라 σ_{y0} 를 횡방향 확산계수로 취할 수 있는 가상적인 距離, x_y 를 Turner의 nomogram에서 구할 수 있을 것이고, 그러면 그 地域에서 風下距離 x 지점에서의 汚染度는 $x + x_y$ 의 函數로서 σ_y 값을 決定하므로써 點汚染源에 대해 적용하는 正規(Gaussian)擴散 方程式을 使用할 수 있다.

〈計算例〉한변의 길이가 1,524 m인 어떤 矩形의 주거지역에서의 汚染物質 排出量은 6g/s로 평가되었다. 이 지역의 排出物質로 인한 바로 風下方向에 있는 인접 bloc의 중앙지점에서의 地上汚染濃度는 얼마인가? 단, 風速은 2.5m/s이고 하늘은 얇게 구름으로 덮혀 있으며 汚染物質排出源들의 平均有效煙突高는 20 m라고 가정한다.

〔解〕 安定度는 “E” class(주거지역이 이미 형성되어 있으므로 그 지역에 해당하는 擴散係數들은 실제로 약간 불안정한 氣象조건시의 값들에 해당될지도 모른다)에 해당한다. 點汚染源에 적용하는 Gaussian 擴散方程式을 쓰기 위해 $\sigma_{y0} = \frac{1524 \text{ m}}{4.3} = 354 \text{ m}$. 安定度 “E”일때 가상거리 에 대한 $x_y = 8.5 \text{ km}$ 이다. $x = 1524 \text{ m}$ 에 대한 $\sigma_z = 28.5 \text{ m}$. $x = 1524 + 8,500 = 10,024 \text{ m}$ 에 대한 $\sigma_y = 410 \text{ m}$.

$$\begin{aligned} \therefore \chi &= \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H_e}{\sigma_z} \right)^2 \right] \\ &= \frac{6(\text{g/s})}{\pi \times 410 \times 28.5 \times 2.5(\text{m}^3/\text{s})} \\ &\quad \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{20}{28.5} \right)^2 \right] \\ &= 5.1 \times 10^{-5} \text{ g/m}^3 \end{aligned}$$

v) 평균시간(averaging time)에 따른 평가능도의 변화

濃度の平均化時間을 길게 취하면 주로 풍향 변동이 증가함으로 인한 횡방향 확산계수 σ_y 의 증가때문에 平均濃度는 감소한다. sampling time이 2시간 이하인 경우 式 (19)로 C_s 를決定할 수 있다.²⁴⁾

$$C_s = C_R \cdot \left(\frac{t_R}{t_s} \right)^p \quad (19)$$

여기서 유의해야 할 사항은 Turner의 nomogram에서 구한 擴散係數들은 평균시간이 약 10분이므로 그 계수들을 적용해서 어떤 풍하거리에서 구한 C_R 은 약 10分間の 平均時間에 對한 濃度라는 점이다.

〔計算例〕 地表上 汚染源의 바로 風下에 있는 어느점에서 3내지 15分間の 濃度가 $3.4 \times 10^{-3} \text{g/m}^3$ 이었다. 安定度와 風速에 변화가 없다고 가정하면 이점에서 2시간 동안의 平均濃度는 얼마나 될 것인가?

〔解〕 $t_R = 3 \text{ min}$, $t_s = 2 \text{ hr}$, $p = 0.2$ 라고하면

$$C_{(2\text{hr})} = \left(\frac{3}{120} \right)^{0.2} \times 3.4 \times 10^{-3} \\ = 1.6 \times 10^{-3} (\text{g/m}^3)$$

$t_R = 15 \text{ min}$, $t_s = 2 \text{ hr}$, $p = 0.17$ 이라고 하면

$$C_{(2\text{hr})} = \left(\frac{15}{120} \right)^{0.17} \times 3.4 \times 10^{-3} \\ = 2.4 \times 10^{-3} (\text{g/m}^3)$$

따라서 2시간 동안의 평균농도는 $1.6 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-3} (\text{g/m}^3)$ 間에 있을 것이라고 평가된다.

vi) 正規擴散모델의 利點 및 그 적용결과의 정확도⁴⁾

수많은 擴散모델들 중에서도 正規擴散모델이 가장 많이 사용되어지는 바, 그 잇점은

(가) 단지 두가지의 擴散 parameter들만이 사용되어지며

(나) 이들 확산 parameter들은 煙氣의 퍼짐의 표준편차의 항으로 이미 상당히 많이 발표되어 있어서 모델을 사용할 수 있는 단계에 있다는 것이다. 그러나, 正規擴散式을 이용한 汚染濃度 計算의 결과는 절대로 정확한 것은 아니며

실제 汚染濃度值의 2배 범위내에 접근하던 대체로 만족하다고 본다. 계산 결과值가 부정확한 경우 및 그 중요한 이유는 다음과 같다.

(가) 風下 長距離에서의 실제 煙氣의 風下方向에 직교하는 연직방향 퍼짐의 표준편차 σ_z 와 Turner의 nomogram에서 읽은 동일 거리에 해당하는 σ_z 사이엔 수배의 오차가 있다.

(나) 특정 지점에서의 濃度平價를 要하는 경우에는 어떤 시간 간격에 걸친 평균풍속과 x 軸 (主風向의 좌표축) 위치 결정에 있어서의 곤란 때문에 상당히 不正確한 계산 결과를 초래한다. 따라서, 정규확산 모델을 이용하고자 할 때는 그 모델의 여러가지 가정과 제약, 적용한제 등을 분명히 하여 둘 필요가 있을 것이다. 여기서는 지면관계로 그 자세한 내용은 생략하기로 한다.

3.3. 地上最大濃度 및 그 距離의 算出

i) 圓錐型 擴散으로 인한 最大地上濃度 形成地點까지의 거리 χ_{\max} 는 통상 煙突높이의 10~20배 거리에서 形成된다고 하나 χ_{\max} 를 구하는 1차근사법으로 $H_e = \sqrt{2}\sigma_z$ 가 성립되는 거리를 취하는 수도 있다.⁵⁾ 구체적인 모델로서 式(20)이 있다.

$$\chi_{\max} = \left(\frac{H_e^2}{C_z^2} \right)^{\frac{1}{2-n}} \quad (20)$$

式 (20)은 Gaussian 擴散모델중의 σ_y 및 σ_z 와 Sutton의 擴散 parameter C_y 및 C_z 간의 관계를 利用해서 Gaussian 擴散式을 微分處理하여 구한 것으로 이식은 매연중의 粒子狀 汚染物質의 地上最大濃度를 나타내는 지점까지의 거리를 구하는 경우에는 적용되지 않는다.

ii) 원추형煙 擴散時의 最大 地上 gas 汚濃濃度 C_{\max} 를 구하는 Sutton의 式²⁶⁾은

$$C_{\max} = \frac{2Q}{\pi \cdot e \cdot H_e^2 \cdot u} \cdot \frac{C_y}{C_z} \quad (21)$$

式 (20) 및 式 (21)에 나타난 C_y , C_z 및 n 값은 Table 6과 같다.

Pasquill에 의하면 式 (21)은 式 (22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{\max} = \frac{2Q}{\pi \cdot e \cdot H_e^2} \cdot \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y} \right) \quad (22)$$

Table 6. Sutton's diffusion parameter

Plume height(ft)	Superadiatic		hypoadiabatic		inversion	
	C_y	C_z	C_y	C_z	C_y	C_z
0	0.42	0.24	0.24	0.14	0.120	0.070
50	0.32	0.24	0.20	0.14	0.100	0.070
100	0.23	0.23	0.13	0.13	0.060	0.060
150	0.21	0.21	0.12	0.12	0.060	0.060
200	0.19	0.19	0.11	0.11	0.055	0.055
300	0.16	0.16	0.09	0.09	0.045	0.045
Index "n"	0.20		0.25		0.3~0.5	

3.4. 排出許容濃度の決定

$C_{0.05x}$ 를 評價해서 배출조건을 제어하기 위해서는 汚染으로부터 보호해야 할 재산(박물관, 과수원등), 주거지, 기타 환경을 결정하고 어떠한 영향이 汚染物質의 평균농도 및 노출시간에 어떻게 관계하는지(準據值)를 먼저 문헌 및 기타 자료를 통해 확인하고 $C_{0.05x} \times 10 \text{ min} < \text{농도} \times \text{노출시간}$ 이 되도록 하기 위한 Q 를 決定한다. 여기서 濃度 및 노출시간은 어떤 영향을 유발할 수 있는 汚染物質의 平均濃度 및 노출시간이며 左側項의 10 min은 Turner의 nomogram에서 σ_y 및 σ_z 가 구해진 대략적인 averaging time이다.

設計 排出許容濃度 決定을 위해서는 위의 準據值와 기상조건 이외에도 유가폐물의 회수경제 장치의 법규개정 전망, 인접 공장의 증설, 공해 물질 배출공장의 상품생산 예상증가량, 기존 오염제어장치 능력 그리고 공장 운전과정등 여러 가지를 考慮해야 한다.

사용 기호

A : 安定度에 따라 달라지는 常數

중립조건시: 2.7, 등온조건시: 1.0, 역전조건시: 0.7

C_{max} : 地上 最大 汚染濃度(ppm)

C_R : Sample time t_R 동안의 평균농도

C_S : Sample time t_S 동안의 평균농도

C_y : 풍하방향에 직교하는 Sutton의 횡방향

확산계수

C_z : 풍하방향에 직교하는 Sutton의鉛直방향 확산계수

D : 연돌직경(m)

$\frac{dT}{dz}$: 온위구배($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

F : 부력 parameter($\text{length}^4/\text{s}^3$)

H_e : 유효 연돌높이

H_f : $H_e + 2.15\sigma_z(\text{m})$

H_s : 煙突高

H_t : 混合高(m)

h : 피해지역 地表面으로부터 측정한 排出源의 높이(m)

$\Sigma\Delta h_b$: boiler에서 煙突까지(가스처리장치를 포함)이르는 경로에서 생긴 압력손실의 합

$\Sigma\Delta h_s$: 煙突에서의 압력손실의 합

I, J, K : 各 type의 σ 에 대해 주어진 安定度계급에 따라 구한 경험상수

n : 安定度에 따른 指數

p : 壓수 0.17~0.2

P_a : 기압(mb)

$\frac{p}{q}$: 擴散 parameter, 0.63

Q : 汚染物質 排出率(kg/s)

Q_h : 폐열 방출율(kcal/s)

q_A : 大氣溫度 상태로 환산한 경우의 가스상 오염물질 배출속도(m^3/s)

s : 安定度 parameter($1/\text{s}^2$)

T_a : 氣溫($^{\circ}\text{K}$)

T_s : 排氣溫度($^{\circ}\text{K}$)

ΔT : 대기온도-기온($^{\circ}\text{K}$)
 t : 순간적으로 오염물질이 방출된 이후에 경과된 시간
 u : 풍속(통상 지상 10m에서의 풍속값을 사용)(m/s)
 U_s : 연돌 출구위치에서의 풍속(m/s)
 U_{He} : H_c 에서의 풍속(m/s)
 V_s : 배기의 排出速度(m/s)
 X : 거리(Km)
 z : 피해지역 지표면으로부터 측정점까지의 높이(m)
 γ_a, γ_g : 대기 및 배가스 비중량
 σ : 横 및 鉛直方向 확산계수(m)
 σ_x : 풍하방향 오염물질 퍼짐의 표준편차(확산계수)(m)
 $\sigma_{yf} = \sigma_y + 0.47H_c$ (m)
 $\sigma_{yt} = \sigma_y + 0.47\left(\frac{H_t}{1.1} - 2.15\sigma_z\right)$ (m)
 σ_y, σ_z : 横 및 鉛直方向 연기퍼짐의 표준편차(m)
 Γ : 건조단열감율($+1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)

참고 문헌

1. 日本會編 大氣汚染研究 全國協議會, 第三小委員會編, 大氣汚染 핸드ブック(3), 氣象編, ニコナ社, 東京, 1965, pp. 379-391.
2. *Ibid.*, pp. 237-239.
3. 日本 大氣汚染研究 全國協議會, 第五小委員會編, 大氣汚染 핸드ブック(4), 燃燒編, ニコナ社, 東京, 1965, pp. 194-195.
4. Turner, D.B., *Workbook of atmospheric dispersion estimates*, EPA, 1970.
5. Staff of Research and Education Association (ed). *Modern Pollution Control Technology*, Vol. 1, New York, 1978, pp. 2-8~9.
6. Rubin E.S. and W.D. Boehmer, *JAPCA*, **27** (1977), 577.
7. Lund, H.F., ed., *Industrial Pollution Control Handbook*, Mc-GrawHill, New York, 1971, pp. 7-17~18.
8. Whaley, H., *Atm. Env.*, **3** (1969), 177.
9. Carpenter, S.B., T.L. Montgomery, J.M. Leavitt, W.C. Colbaugh and F.M. Thomas, *JAPCA*, (1971) 491.
10. Perkins, H.C., *Air Pollution*, McGraw-Hill, New York, 1974, Ch. 3.
11. 大氣汚染, 핸드ブック 7(4), pp. 33-336.
12. Stern, A.C. ed., *Air Pollution*, Vol. 1, Academic Press, New York, 1976, p. 412.
13. Touma, J.S., *JAPCA*, **27** (1977), 863.
14. Briggs, G.A., 大氣汚染 핸드ブック(3), p. 204.
15. Perkins, H.C., Ch.9.
16. Stern, A.C. ed., p. 432.
17. Park, O.H., *JKICHE*, **18** (1980), 411.
18. Haugen, D.A. ed., *Lectures on air pollution and environmental impact analysis*, AMS, Massachusetts, 1975, p. 79.
19. Park, O.H., *JKSCE*, **29** (1981), 53.
20. McMullen, R.W., *JAPCA*, **25** (1975), 1057.
21. U.S. Atomic Energy Commission, *Safety Guide 23 for Nuclear Power Plants, On-Site Meteorological Program*, 1972.
22. Pasquill, F. and F.B. Smith. *The physical and meteorological basis for the estimation of the dispersion of windborne material*, Proc. of 2nd international clean air congress, 1971, pp. 1067-1071.
23. Gifford, F.A., *Nuclear Safety*, **2** (1960), 47.
24. Stewart, N.G., H.J. Gale and R.N. Crooks, *Int. J. Air Poll.*, **1** (1958) 87.
25. Park, O.H., *JKICE*, **17** (1979) 345.
26. Brummage, K.G., *Atmos. Env.*, **2**(1968), 197.

