

大氣汚染 拡散모델 開發에 關한 研究

Development of Air Pollution Dispersion Model for the Seoul Area

金良均·崔德一·李敏熙·趙康來·羅振均·鄭長海*

國立環境研究所 大氣研究部

*忠北大學校

* J.H. Jeong

Chungbuk National University

Y.K. Kim, D.I. Choi, M.H. Lee, K.R. Cho, J.G. Na

Department of Air Pollution Research

National Environmental Protection Institute

ABSTRACT

This study was performed to develop and to evaluate an air quality model for determining long-term average concentration of sulfur-dioxide for the Seoul area. CDMQC, TCM-2, and ISCLT were applied and tested in this comparison studies with same point source, area source emission data, and meteorological data to calculate seasonal concentration.

Mean emission height of area sources was assumed 6m. Six different values of initial sigma Z for eah stability class were used for area sources. And decay half life was not considered in the model calculations.

The results are highly correlated with measurements, the correlation coefficients of calculated and measured for CDMQC, TCM-2, and ISCLT are 0.85, 0.93, and 0.96, respectively.

1. 緒 論

大氣汚染管理 측면에서는 現在의 大氣質의 把握과 더불어 未來의 大氣汚染物質 排出源이 大氣質에 어떤 影響을 미칠 것인가를 알아야 할 必要가 있다. 그러나

排出源으로 부터 排出된 大氣汚染物質들이 大氣中으로 擴散되는 것은 自然現象의 하나로써 눈으로 確認한다든가 任意地點에서 汚染度를 測定하는 것만으로는 全體現象을 把握하기란 不可能한 일이다. 이러한 擴散現象을 究明하기 爲해서 여러가지 方法이 있으나, 가장 많이 이용되고 있는 方法으로는, 複雜한 自然現象을

大幅으로單純化시킨 假定하에 만들어진 數學的 모델(Model)을利用하는 Computer simulation方法이 있으며, 이러한 Model을 이용하여 任意地域에 대한 大氣汚染度를 豫測하는 過程을 Modeling이라 부르고 있다.¹⁾

本 研究의 目的은 지금까지 開發된 많은 모델中에서 使用하기에 간편하고, 必要한 data를 쉽게 얻을 수 있으며, 우리나라의 서울과 같은 大都市 地域에 알맞는 一次汚染物質의 長期 平均濃度 豫測모델을 구하기 위하여 모델들의 基本原理 檢討와 Test를 통하여 適正性 與否를 알아보는 데 있다.

本 研究에서는 大氣中의 아황산가스(SO₂)를 Modeling하기 위하여 현재 이 目的으로 가장 널리 쓰이고 있는 Gaussian plume model中, Climatological Dispersion Model(CDM), Industrial Source Complex Model(ISC), Texas Climatological Model(TCM)²⁾을 서울 地域에 적용하고 이들의 結果를 實測値와 比較分析하였다.

이들 모델들은 모두 一次汚染物質, 즉 大氣中에서 化學反應을 잘 일으키지 않으며, 比較的 安정한 氣상 物質 또는 분진을 대상으로 하고 있다.³⁾ 이中에서 CDM은 Air Quality Display Model(AQDM)을 개량한 것으로서 국내에서 수차례 이용된 바 있으며,^{4,5,6)} ISCLT, TCM과 더불어 1개월 이상의 장기 大氣汚染 平均濃度를 豫測하는데 使用하도록 만들어졌다.

또한 모델간에 比較를 용이하게 하기 위하여 氣象資料, 排出源 資料, 汚染度實測 資料 등이 각 모델에 同一하게 使用되었다. 이 資料들은 지금까지 整理된 資料中 세가지 모두 가장 充實하다고 생각되는 1981年 7~9月的 서울지역 資料를 利用하였다.

2. 擴散 모델의 原理와 檢討

本 研究에 使用된 大氣汚染 擴散 모델들은 美國 環境廳의 Office of Air Quality Planning and Standards(OAQPS)에서 環境影響評價를 위해서 만든 User's Network for Applied Modeling of Air Pollution(UNAMAP)⁷⁾라는 Computer program package에 收錄되어 있다. UNAMAP은 1973年 처음 만들어진 이후 계속 修正, 補強되어 現在 Version 6가 配布되고 있다. 國立環境研究所는 UNAMAP Version 5를 保有하고 있으며 여기에는 FORTRAN

source codes로 쓰여진 31個의 Air quality simulation model들이 들어있다.

2.1 Climatological Dispersion Model(CDM)

CDM은 都市地域에서 點汚染源과 面汚染源들로 부터 排出된 SO₂나 Particulates 같은 準安定 汚染物質을 對象으로 長期 平均濃度(계절 또는 年平均)를 計算하는데 適宜하게 개발 되었다.⁸⁾ K.L. Brubaker等(1977)⁹⁾은 본래의 CDM에 實測値와 計算値를 比較하여 보정된 豫測값을 얻을 수 있도록 한 Calibration package와 任意地點에 대해 各 排出源이 미치는 汚染寄與度를 計算할 수 있는 Program, 그리고 平均化 時間別 濃度를 計算할 수 있는 Program을 追加하여 CDMQC라는 이름으로 修正, 發表하였다. CDMQC에서 CDM의 本 內容은 바뀌지 않았으므로 여기서는 CDMQC를 使用한다.

CDM의 基本原理는 安定한 氣상 物質이 높은 高度로부터 排出되어 風下方向으로 퍼져 나갈때 風下側 任意地點에서의 長時間 平均濃度 分布가 Gaussian 分布로 되는 것에 根據를 두고 있으며 따라서 Gaussian Plume 公式를 도입하고 있다.¹⁰⁾ Meade와 Pasquill(1958)¹¹⁾은 이 式을 여러 可能한 風向의 發生 頻에 따라 한 排出源이 어떤 피해 지점에 미치는 長期 平均濃度를 計算할 수 있도록 修正하였다. CDM은 이 結果를 大氣安定度別 風向·風速의 出現 頻와 연결하여 多重 排出源으로 부터의 被害地點 濃度를 計算하도록 하였다. CDM에서의 安定度 및 風速等級과 地上에서 排出口까지의 平均風速을 求하기 위한 指數法則 安定度別 混合高等은 뒤에 자세히 說明하였다.

또한 CDM의 主要 特徵에 擴散函數와 plume 上昇의 適用이 있다. 擴散函數로 특히 垂直擴散係數 σ_z 를 安定도와 風下距離의 函數로 하여 Pasquill(1961, 1962)^{12,13)}과 Gifford(1961)¹⁴⁾가 만든 圖表에 맞도록 한 經驗式으로 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_z(P) = ap^b$$

여기서 파라메터 a와 b는 <표 1>에 보인 바와 같이 安定도와 風下距離 區間 P에 따라 달리 주어진다. 各 安定도에 대하여 Initial σ_z 라 부르는 초기값, 즉 $\sigma_z(0)$ 값이 要求되고 이는 都市地形의 거칠기에 따라 달라진다.

CDM에서는 面汚染源일 境遇 이 값을 모든 安定도에

PARAMETRIC VALUES FOR $\sigma_z(P)$

Stability class	Distance, meters					
	100 to 500		500 to 5000		5000 to 50,000	
	a	b	a	b	a	b
1	0.0383	1.2812	0.2539×10^{-3}	2.0886	-	-
2	0.1393	0.9467	0.4936×10^{-10}	1.1137	-	-
3	0.1120	0.9100	0.1014	0.9260	0.1154	0.9109
4	0.0856	0.8650	0.2591	0.6869	0.7368	0.5642
5	0.0818	0.8155	0.2527	0.6341	1.2969	0.4421
6	0.0545	0.8124	0.2017	0.6020	1.5763	0.3606

대해 30 m로 假定하고 있으며 點汚染源에 대해서는 굴뚝 높이에 따라 다르게 주고 있다. 즉, 굴뚝 높이가 20 m 이하일 때는 Initial σ_z 는 30 m 굴뚝이 20~50 m일 때는 50 m에서 굴뚝 높이를 뺀 값이 Initial σ_z 이며, 굴뚝이 50 m 이상일 때는 Initial σ_z 는 0이다. 또 面汚染源에 대해서 平均 排出高度가 適用되며 대강 建物 높이로 할 수 있으나 CDM에서는 모든 面汚染源에 대하여 20 m로 假定하였다.

다음으로 CDM에서는 plume 上昇을 計算하기 위해서 Briggs (1971)¹⁵⁾의 2/3 乘法則을 適用하며, 汚染物質이 大氣中에서 自然的으로 除去될 것을 생각하여 半減期를 適用하였다.

2.2 Texas Climatological Model (TCM)

이 모델의 Version 2를 TCM-2¹⁶⁾라 하고 있으며 CDM과 마찬가지로 大氣 汚染物質의 長期 地上平均濃度를 豫測하도록 設計한 Computer program이다. TCM-2도 SO₂, CO, 분진과 같은 非化學反應性 汚染物質을 대상으로 하고, 炭化水素, 옥시탄트 窒素酸化物 等에는 適用하지 않는다.

基本原理는 安定狀態의 Gaussian plume 假說을 基礎로 하여 Briggs의 plume 上昇式, Pasquill-Gifford의 擴散係數式, 그리고 汚染物質의 指數函數의 減衰項을 넣어 半減期를 適用하고 있다.

Computer 入力資料로서 CDM에서와 마찬가지로 平均氣溫과 576 境遇의 大氣安定度別 風向·風速의 出現頻度가 들어가지만 混合高는 使用되지 않는다. 또 入力되는 點汚染源과 面汚染源이 CDM에서는 各各 200 個와 2,500 個로 제한되지만 TCM-2에서는 제한이 없다.

TCM-2가 CDM이나 ISC와 가장 다른점은 面汚染源에 대한 演算方法이다. 즉, 面汚染源에 의한 濃度는 Gifford와 Hanna¹⁷⁾가 제시한 단순 모델을 使用하며 다음 式과 같다.

$$x_A = FQ/U$$

여기서 x_A 는 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주어지는 濃度, Q는 $\mu\text{g}/\text{s}-\text{m}^3$ 으로 주어지는 Receptor 近處의 面汚染源의 排出率, U는 m/s로 주어지는 地上 平均風速, F는 無次元 常數로서 Gifford와 Hanna는 이 값을 SO₂의 경우 50으로 提案하였다.

2.3 Industrial Source Complex (ISC) Dispersion Model

ISC 모델은 두가지 Computer program으로 構成되어 있다. 즉, 하나는 Single source (CRSTER) Model¹⁸⁾을 擴張하여 만든 short-term program ISTST¹⁹⁾와 다른 하나는 AQDM²⁰⁾ 및 CDM⁶⁾의 基本 骨格을 結合시켜 만든 Long-term program IS-CLT이다. 汚染源의 形態로 stack, Area 및 Volume source를 擇하고 있으며, 이 중 stack 및 Volume source에 대한 地上濃度 計算을 위해 Gaussian plume equation을 쓰고, Area source에 대해서는 連續排出 線汚染源 公式를 쓰고 있다. 또한 plume 上昇式, wind-profile 指數法則, 擴散算數, 汚染物質의 자연감쇄항 등은 CDM, TCM-2와 동일하나, 특히 빌딩 wake effect와 stack-tip Down-wash를 고려하는 것이 특이하다.

ISCST는 短期, 즉 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 및 24時間 平均 地上濃度를 計算하며 ISCLT는 季節 및 年平均 濃

도를 계산한다. ISCLT는 다시 Rural Mode, urban Mode, Urbane Mode 2로 나뉜다. Rural Mode는 Rural mixing height를適用하고 擴散算數도 pasquill category를 그대로 使用한다. 그러나 Urban Mode의 경우 Urban mixing height를 使用하고 Mode 1에서는 安定度 E 및 F급을 D급으로 대체하며 Mode 2에서는 E와 F를 한데 묶고 A等級을 제외한 나머지 安定度等級을 한단계씩 올려서 使用한다. 이 Urban Mode 2는 都市地域에서도 而汚染源의 비중이 더 클때 適用한다.²¹⁾ 本 研究에서도 이를 고려하여 ISTLT Urbane Mode 2를 대상으로 하였다.

3. 모델의 適用 및 開發

3.1 資料의 準備

3.1.1 氣象資料

排出源으로부터 排出된 大氣汚染物質들의 移動 및 擴散에 直接 影響을 주는 氣象要素는 주로 風向·風速과 氣溫의 垂直 分布이다. 이들은 大氣의 安定도와 混合도를 결정지어주며 汚染物質들은 混合層 內에서 바람과 安定도에 따라 移動 및 擴散이 進行된다.

氣象 入力資料의 하나로서 本 研究에 使用된 모델들은 共通의으로 Joint-Frequency Function (JFF)⁸⁾ 이라고 불리는 大氣安定度別 風向·風速의 出現頻度を 必要로 하고 있다. 大氣安定도는 太陽 및 地球의 輻射 에너지와 風速에 따라 달라지며 따라서 JFF를 求하기 위해서는 최소한 03時, 09時, 15時, 21時에 각각 觀測한 日氣, 全雲量, 雲型과 每時間 觀測한 風向·風速 資料가 使用된다.

이 JFF를 구하기 위한 氣象資料는 中央氣象臺 서울 觀候所에서 1981年 觀測한 日氣象 統計表²²⁾에서 拔萃하였다. 이 資料는 다시 모델전산 program에 入力시키기 위해 star program으로 一次 가공한다. <표 2>에는 日氣象 統計表의 例와 <표 3>에 JFF를 求하기 위한 star program의 Input Data Format의 例를 실었다. 또한 <표 4>에는 이의 結果인 1981年度 7月~9月の 서울 地域 大氣 安定度別 風向·風速의 出現頻도를 나타내었다.

이 <표 4>에 보이고 있는 stability class 1~6은 각 모델에 使用되고 있는 大氣安定度 等級이며 pasquill-Gifford의 安定度 分類法과는 약간의 差異

가 있다. 즉, CDMQC와 TCM-2에서는 1~3 等級까지는 정상적으로 P-G安定度 等級인 A, B, C class가 각각 使用되고 있으나 4, 5등급으로는 P-G의 中立 D class를 Neutral Day(DD), Neutral-Night(DN)으로 나누고 있으며 6등급에는 E, F, G를 한데 묶었다. ISCLT에서는 Rural mode, urban mode 1, 2에 따라 적용 安定度 등급이 다르며 本 研究에서는 Urban mode 2를 사용하였고 이들의 관계를 <표 5>에 나타내었다.

한편 <표 6>에 보인 것과 같이 각 모델 共通으로 風速을 6等級으로 나누고 있으며 風向은 16方位를 적용하고 있다.

각 모델에 使用되는 地面에서 굴곡의 有效高度까지의 平均風速을 求하기 위해서 다음식이 使用되었다.²³⁾

$$U = u_{10} (z/z_{10})^p$$

여기서 u 는 地面으로부터 高度 z 인 높이 的 速度, u_{10} 은 地上 10m(z_{10})에서의 風速이고 p 는 大氣安定도에 따르는 指數이다. 이 指數 p 와 大氣安定도와 的關係는 <표 7>에 나타내었다.

한편 混合高는 TCM-2에서는 적용하지 않고 있으며 ISCLT와 CDMQC에서 同一하게 Holzworth (1972)方法²⁴⁾으로 測定한 오후 混合高(HT)와 아침 混合高(HMIN)를 大氣安定度別로 다르게 적용하고 있다. 즉, ISCLT에서는 安定도가 A일 때 1.5HT, BC일 때 HT, D일 때 HT와 HMIN의 平均值, E, F일 때는 HMIN값을 쓰고 있다. 또 CDMQC에서는 A일 때 1.5HT, B, C, DD일 때 HT, DN일 때 HT와 HMIN의 平均值, E, F일 때 HMIN값이 使用된다. 本 研究에서는 HT를 1,800 m, HMIN을 150 m로 하였다.^{4,5)} 또한 平均氣溫은 각 모델 共通으로 당시의 측정값인 24.3°C로 하였다.

3.1.2 排出源 資料

3.1.2.1 點汚染源

SO₂ 排出源 중에 큰 비중을 차지하는 것으로 産業 및 商業活動과 住居生活 등을 통한 大型 排出源을 들 수 있다. 本 研究에서는 環境廳에서 每年 실시하고 있는 大氣汚染 物質 排出源調查(emission source inventory: EIS) 資料를²⁵⁾ 電算處理하여 <표 8 參照> 排出源別로 SO₂의 排出率을 求했다. 각 모델에 入力되는 點汚染源의 수는 200個가 적당하므로 中央 集中 난방식 아파트를 包含하여 大型排出業所中에서 排

METEOROLOGICAL JOINT FREQUENCY FUNCTION

STABILITY CLASS 1

Wind direction	Sector	Wind speed class					
		1	2	3	4	5	6
N	1	.000460	.000110	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
NNE	2	.000460	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
NE	3	.000460	.000340	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
ENE	4	.000460	.000110	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
E	5	.000460	.000230	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
ESE	6	.000110	.000110	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SE	7	.000340	.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
S	8	.000110	.000140	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SSW	9	.001030	.000110	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SW	10	0.000000	.000340	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
W	11	.000460	.000800	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
WNW	12	.000340	.000340	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
W	13	.000230	.000910	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
WNW	14	.000110	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
NW	15	0.000000	0.000110	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
NNW	16	0.000000	0.000110	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

STABILITY CLASS 2

Wind direction	Sector	Wind speed class					
		1	2	3	4	5	6
N	1	.004110	.000340	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
NNE	2	.004450	.000570	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
NE	3	.011640	.003420	.000570	0.000000	0.000000	0.000000
ENE	4	.001940	.000460	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
E	5	.001710	.001140	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
ESE	6	.000910	.000230	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SE	7	.001940	.000570	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SSE	8	.001830	.000340	.000230	0.000000	0.000000	0.000000
S	9	.003420	.002280	.000230	0.000000	0.000000	0.000000
SSW	10	.002400	.001940	.001260	0.000000	0.000000	0.000000
SW	11	.003650	.003310	.001940	0.000000	0.000000	0.000000
WSW	12	.001600	.002280	.002400	0.000000	0.000000	0.000000
W	13	.003200	.003650	.001600	0.000000	0.000000	0.000000
WNW	14	.000800	.000680	.000110	0.000000	0.000000	0.000000
NW	15	.001030	.000680	.000110	0.000000	0.000000	0.000000
NNW	16	.000910	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

STABILITY CLASS 3

Wind direction	Sector	Wind speed class					
		1	2	3	4	5	6
N	1	.007420	.000570	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
NNE	2	.007880	.001140	.000230	0.000000	0.000000	0.000000
NE	3	.015980	.006050	.001600	0.000000	0.000000	0.000000
ENE	4	.001710	.000800	.000460	0.000000	0.000000	0.000000
E	5	.001370	.001140	.000230	0.000000	0.000000	0.000000
ESE	6	.000680	.000340	.000230	0.000000	0.000000	0.000000
SE	7	.001140	.000230	.000340	0.000000	0.000000	0.000000
SSE	8	.001140	.000230	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
S	9	.001600	.000910	.001480	.000110	0.000000	0.000000
SSW	10	.002170	.001260	.004140	.001030	0.000000	.000230
SW	11	.003420	.004680	.006160	.002630	.000110	0.000000
WSW	12	.002850	.004790	.011420	.002740	0.000000	0.000000
W	13	.004790	.009700	.017240	.002280	.000110	0.000000
WNW	14	.001260	.001260	.000910	.000110	0.000000	0.000000
NW	15	.001030	.000460	.000460	0.00000000	0.000000	0.000000
NNW	16	.001260	0.000000	.000110	0.000000	0.000000	0.000000

STABILITY CLASS 4

Wind direction	Sector	Wind speed class					
		1	2	3	4	5	6
N	1	.004340	.000680	.000340	0.000000	0.000000	0.000000
NNE	2	.005840	.003540	.000570	.000110	0.000000	0.000000
NE	3	.016320	.022370	.007420	.002170	0.000000	0.000000
ENE	4	.003200	.002050	.000570	.000230	0.000000	0.000000
E	5	.002850	.001940	.001260	0.000000	0.000000	0.000000
ESE	6	.001600	.000910	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SE	7	.001370	.002050	.000570	0.000000	0.000000	0.000000
SSE	8	.001480	.001710	.000800	.000110	0.000000	0.000000
S	9	.001830	.003650	.001830	.001370	0.000000	0.000000
SSW	10	.001370	.005480	.007390	.006510	.000910	.000110
SW	11	.003650	.011070	.014380	.009820	.001480	.000110
WSW	12	.001830	.012210	.014270	.010730	.000570	0.000000
W	13	.000110	.018950	.024090	.021460	.003420	.000230
WNW	14	.000570	.004110	.001940	.000800	.000110	0.000000
NW	15	.001030	.001830	.000680	.000110	0.000000	0.000000
NNW	16	.000230	.000230	0.000000	0.000000	.000110	0.000000

Wind direction	Sector	Wind speed class					
		1	2	3	4	5	6
N	1	.004680	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
NNE	2	.006850	.001260	.000230	0.000000	0.000000	0.000000
NE	3	.009590	.006740	.006620	.001830	0.000000	0.000000
ENE	4	.001710	.000570	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
E	5	.000800	.000460	.000110	0.000000	0.000000	0.000000
ESE	6	.000110	.000110	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SE	7	.000800	.000910	.000110	0.000000	0.000000	0.000000
SSE	8	.001600	.001370	.000340	0.000000	0.000000	0.000000
S	9	.002400	.001260	.000800	.000460	0.000000	0.000000
SSW	10	.003200	.002970	.003880	.002050	.000570	0.000000
SW	11	.003420	.005820	.004340	.002050	0.000000	0.000000
WSW	12	.001600	.005020	.004110	.003200	.000910	0.000000
W	13	.003540	.004680	.007760	.008790	.001140	.000340
WNW	14	.000910	.001940	.001600	.000680	0.000000	0.000000
NW	15	.001030	.000460	.000460	.000230	0.000000	0.000000
NNW	16	.001480	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

STABILITY CLASS 6

Wind direction	Sector	Wind speed class					
		1	2	3	4	5	6
N	1	.027970	.001260	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
NNE	2	.035270	.003080	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
NE	3	.034930	.012440	.001710	0.000000	0.000000	0.000000
ENE	4	.004680	.001260	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
E	5	.003420	.000570	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
ESE	6	.002510	.000230	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SE	7	.003200	.000340	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SSE	8	.003200	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
S	9	.005480	.000800	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SSW	10	.007080	.005480	.001370	0.000000	0.000000	0.000000
SW	11	.015410	.018260	.004450	0.000000	0.000000	0.000000
WSW	12	.015300	.017350	.005710	0.000000	0.000000	0.000000
W	13	.034700	.031160	.010620	0.000000	0.000000	0.000000
WNW	14	.015300	.010620	.005020	0.000000	0.000000	0.000000
NW	15	.010960	.004000	.000570	0.000000	0.000000	0.000000
NNW	16	.005820	.000570	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

〈표 5〉 Pasquill-Gifford stability class and model program nomenclature

Nomeclature	P-G stability class		
	CPMQC	ISCLT Urban mode 2	TCM-2
1	A*	A	A
2	B	A	B
3	C	B	C
4	DD**	C	DD
5	DN***	D	DN
6	E & F	D	E & F

*A : Extremely unstable

**DD: Neutral-Day

***DN: Neutral-Night

****F: Very stable, The program redefines extremely stable G stability as very stable F stability

〈표 6〉 Wind speed class

Class	Speed interval		Central wind speed (m/sec)
	Knots	m/sec	
1	<3	<1.80	1.50
2	4-6	1.81-3.34	2.46
3	7-10	3.35-5.40	4.47
4	11-16	5.41-8.49	6.93
5	17-21	8.50-11.06	9.61
6	> 21	>11.07	12.52

〈표 7〉 Exponents for adjustment of wind speed to stack height

Stability Class	Exponent		
	CDMQC	ISCLT	TCM-2
1	0.10	0.10	0.10
2	0.15	0.15	0.15
3	0.20	0.20	0.20
4	0.25	0.25	0.25
5	0.25	0.30	0.25
6	0.30	0.30	0.30

出率 이 큰 순 으로부터 200 個를 選擇하였다.

排出量 및 排出率을 計算하기 위하여 燃料 및 産業工程에 대한 排出係數는 주로 美國 EPA 資料²⁶⁾를 이용

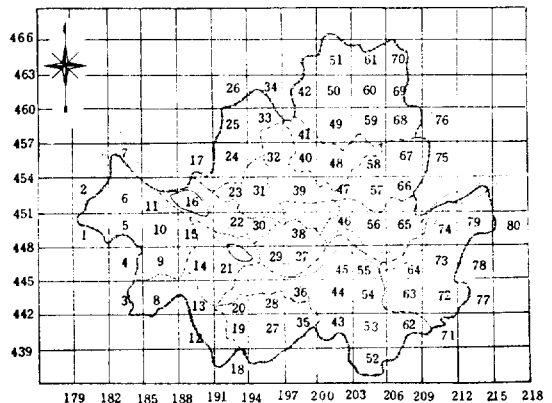
하였지만, 家庭用 무연탄의 排出係數는 國立環境研究所 資料²⁷⁾를 使用하였다. 또한 自動車에서의 排出量은 油類中 含有된 硫黃成分이 SO₂로 전환되는 것으로 가정하였다. 1981年 7月~9月 동안 서울의 200 個 點 汚染源으로부터 排出된 SO₂ 가스 총량은 약 4,970 ton으로 나타났다.

3.1.2.2 面汚染源

面汚染源의 對象으로는 첫째 點汚染源으로 使用된 200 個 排出業所를 除外한 나머지 排出業所와 燃料를 使用하는 商街, 들쭉 灼事 및 난방용으로 無煙炭을 使用하는 一般家庭, 세계 서울 市內를 運行중인 自動車로 分類하였다. 面汚染源에서의 排出量을 計算하기 위해서 便宜上 〈그림 1〉과 같이 서울을 80 個의 Grid로 分割하였다. 이 Grid는 TM座標에 따라 가로, 세로 3 km의 間隔으로 하였으나 必要에 따라서는 더 넓게 또는 더 좁게 하여도 無妨하다.

EIS에 의하여 把握된 群小 排出業所들은 所在가 確認되므로 TM座標에 따라 各 Grid에 分配하여 排出量을 計算한다. 그러나 一般家庭과 商街에 한해서는 서울의 各 洞別 面積과 人口密度로부터 該當 Grid의 地形을 고려하여 Grid別 燃料使用量을 推算하고 이로부터 各 Grid別 가정과 상가에 의한 SO₂ 排出寄與率을 換算하였다. 또한 自動車에 대해서는 國立環境研究所에서 調査한 서울의 道路別 交通量 分布와 平均車速, 道街幅 등으로부터 各 Grid別 自動車에 의한 SO₂ 排出寄與率을 求하였고 이들을 〈표 9〉에 나타내었다.

앞에 言及한 排出係數와 서울市 및 勸資部 발표 燃料使用量 資料로부터 面汚染源 총 排出量을 計算한 후 各 Grid의 寄與率을 곱하여 모델 入力資料인 Grid別 SO₂ 排出率을 作成하였다. 1981年 7月~9月の



〈그림 1〉 서울의 연오염원 번호(가로: TM-X, 세로: TM-Y)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	1111110001	197.0	454.0	26	1	2	0	0	17	19	8111	30	15	128	390
2	1111110002	197.0	454.0	24	1	32	5	0	9	19	8202	12	6	200	290
3	1111110003	197.0	454.0	27	1	5	1	0	1	19	8202	12	6	200	290
4	1111110003	197.0	454.0	24	1	15	8	6	12	19	8203	20	10	180	400
5	1111120005	197.0	453.5	24	1	98	1	0	32	19	8111	28	6	750	1500
6	1111120006	197.0	453.5	24	1	841	0	0	441	19	7810	30	20	150	300
7	1111120006	197.0	453.5	24	1	251	0	0	141	19	7810	30	20	150	300
8	1111120007	197.0	453.5	24	1	24	17	10	20	0	0	28	4	100	400
9	1111120008	197.0	453.5	24	1	20	14	8	18	4	8105	20	10	250	420
10	1111120009	197.0	453.5	24	1	18	14	10	16	19	8110	18	12	240	250
11	1111120010	197.0	453.5	24	1	16	12	8	14	0	0	0	0	0	0
12	1111120011	197.0	453.5	24	1	20	16	10	18	0	0	0	0	0	0
13	1111120011	197.0	453.5	24	1	14	10	5	5	0	0	0	0	0	0
14	1111130012	197.0	452.5	24	3	45	0	0	30	19	7712	45	17	105	250
15	1111130012	197.0	452.5	24	3	35	0	0	20	19	7712	45	17	105	250
16	1111130013	197.0	452.5	24	1	27	0	0	9	4	7709	21	15	160	2220
17	1111130014	197.0	452.5	24	1	64	0	0	34	19	8202	48	20	100	740
18	1111130015	197.0	452.5	24	1	60	0	0	34	7	6805	45	15	100	450
19	1111130016	197.0	452.5	24	1	16	14	8	14	4	7905	18	8	200	270
20	1111130017	197.0	452.5	24	1	27	2	0	13	4	7808	25	10	110	330
21	1111130017	197.0	452.5	26	1	5	2	0	4	4	7808	25	10	110	330
22	1111130018	197.0	452.5	24	1	166	0	0	52	19	7806	27	22	160	180
23	1111130018	197.0	452.5	24	1	167	0	0	53	19	7806	27	22	160	180
24	1111130019	197.0	452.5	22	1	18	0	0	14	19	7809	20	10	280	50
25	1111130020	197.0	452.5	24	1	23	0	0	13	4	7602	25	12	95	250
26	1111130021	197.0	452.5	27	1	219	0	0	153	19	8101	15	6	270	48
27	1111130022	197.0	452.5	24	1	25	0	0	6	19	8111	22	18	140	360
28	1111130023	197.0	452.5	24	1	51	0	0	30	19	8110	32	7	120	420
29	1111130024	197.0	452.5	26	1	5	0	0	2	4	7510	20	13	220	200
30	1111130025	197.0	452.5	24	1	32	25	24	25	4	7111	40	12	65	340

- A) 일련번호
- B) 업소번호
- C) TM-X 좌표
- D) TM-Y 좌표
- E) 연료종류 또는 공정종류
- F) 단위(연료사용량 및 공정중 생산량 또는 부산물량)
- G) 연료사용량 및 공정중 생산량 또는 부산물량(1/4 분기)
- H) 연료사용량 및 공정중 생산량 또는 부산물량(2/4 분기)
- I) 연료사용량 및 공정중 생산량 및 부산물량(3/4 분기)
- J) 연료사용량 및 공정중 생산량 및 부산물량(4/4 분기)
- K) 방지기 분류번호
- L) 방지기 설치년월
- M) 굴뚝높이(단위: m)
- N) 굴뚝직경(단위: $10^{-1} \times m$)
- O) 배출가스속도(단위: $10^{-2} \times m/sec$)
- P) 배출가스온도(단위: °C)

단위 : %

Grid No.	가정, 상가	자동차	Grid No.	가정, 상가	자동차	Grid No.	가정, 상가	자동차	Grid No.	가정, 상가	자동차
1	0.027	-	21	1.986	3.45	41	0.249	-	61	0.625	1.27
2	0.018	-	22	1.256	2.79	42	0.050	-	62	0.099	-
3	0.337	-	23	2.566	1.71	43	0.126	-	63	0.032	-
4	0.148	0.06	24	1.809	0.10	44	0.531	2.83	64	0.422	1.92
5	0.685	0.60	25	1.235	0.35	45	1.145	4.69	65	2.429	3.08
6	0.675	0.40	26	0.093	0.19	46	3.367	2.23	66	3.015	0.82
7	0.046	-	27	1.150	0.41	47	3.765	7.54	67	2.337	0.91
8	1.311	0.55	28	3.655	0.59	48	3.444	2.28	68	0.858	1.41
9	1.941	0.82	29	1.582	3.22	49	3.700	-	69	0.756	-
10	1.971	0.42	30	5.243	5.66	50	0.986	0.26	70	0.315	-
11	0.177	-	31	1.993	1.93	51	0.192	-	71	0.037	0.08
12	0.406	0.48	32	1.596	1.32	52	0.036	0.48	72	0.283	0.16
13	3.065	1.81	33	0.286	-	53	0.118	0.38	73	1.120	0.61
14	1.673	3.31	34	0.093	-	54	0.441	0.50	74	1.571	0.82
15	1.157	1.61	35	0.523	0.39	55	0.482	1.46	75	0.337	-
16	0.561	0.35	36	1.908	1.10	56	2.148	3.62	76	0.037	0.26
17	-	-	37	0.580	2.42	57	3.915	2.44	77	0.754	-
18	0.827	0.36	38	0.801	6.90	58	4.136	1.84	78	-	-
19	2.916	0.12	39	1.880	8.12	59	1.281	0.24	79	0.761	0.28
20	3.578	1.40	40	0.665	0.75	60	1.468	1.61	80	0.172	-

<표 10> Measured mean concentration of SO₂ at receptors in Seoul, 1981.7~9

Receptor No.	coordinates		Measured concentration (μg/m ³)	Receptor ID
	X (km)	Y (km)		
1	197.70	451.10	96.50	Gwanghwamun
2	190.20	446.80	129.30	Yeongdeungpo
3	198.70	449.90	62.90	Namsan
4	193.90	456.60	31.30	Bulkwangdong
5	195.30	439.30	29.60	Sinlimdong
6	200.30	448.60	109.70	Hannamdong
7	202.10	456.10	82.80	Gileumdong

서울에서 群小 排出業所, 一般家庭 및 商街로부터 油類使用에 의한 SO₂ 排出量은 약 4,190 ton, 無煙炭에 의한 것은 약 11,470 ton, 自動車에 의해서는 약 2,130 ton으로 計算되었다.

3.1.3 汚染度 實測資料

SO₂를 비롯한 大氣汚染度를 測定하기 위하여 環境廳에서는 全國 主要都市 및 工業團地 地域에 大氣汚染 常時 測定網을 運營하고 있으며 1985年 現在 서울에

는 서울시 산하 10個所와 함께 20個 測定所가 있다. 測定된 모든 資料는 電算處理하여 統計分析을 거쳐 Data Base化되고 있다. 그러나 1981년에 서울에는 光化門, 永登浦, 南山, 佛光洞, 新林洞, 漢南洞, 吉音洞 등 7個 測定所가 가동 되었으며 여기서는 이때의 資料를 利用하였다. 이곳의 SO₂ 測定器는 溶液傳導率法을 使用하며 每時間 平均値가 얻어진다. 7월부터 9月の 地點別 平均値를 求하여 <표 10>에 定理하였다. 이 Data는 Modeling에 의한 豫測値와 比較하는데 使用된다.

3.2 Model parameter 修正과 結果分析

서울은 대체로 年中 風速이 弱하고 大氣安定度는 安定한 等級이 더 자주 出現하는 편이므로 大氣汚染物質은 擴散이 잘 되지 않을 것으로 생각된다.⁵⁾ 여기에 使用된 모델들은 모두 氣候的 擴散 모델이기 때문에 각 모델의 性能을 檢討 容易하기 위해서는 資料의 充實性 뿐만 아니라 季節的 要因이 考慮되어야 하며, 他季節에 비해 比較的 擴散이 좋은 7~9月을 擇한 것도 이 理由이다.

Model parameter 중 제일 먼저 考慮된 것이 Area Source의 排出高度이다. 都市에서는 地形, 建物 등의 影響과 住居 및 商業活動에 따른 加熱로 인해 排出高度가 높아진다. CDM에서는 이를 Constant effective height로 20 m라고 假定하였다. 그러나 本 研究를 통하여 數次의 모델링 結果를 分析해 서울에서는 平均 6 m가 適當하다고 判斷하였다.

다음으로 Area source에서 垂直 擴散係數의 初期값 $\sigma_z(0)$ 이다. 都市地域에서 排出高度가 낮을 때에

는 $\sigma_z(0)$ 값이 適用되어야 한다는 보고가 있다.²⁸⁾ 이는 大氣安定度의 함수이며 安定度等級에 따라 달라진다. CDM에서는 이를 安定度에 관계없이 30 m로 假定하고 있으나 分析 結果와 자문²⁹⁾을 토대로 安定度 A일 때 14.0 m, B일 때 10.9 m, C일 때 7.4 m, DD일 때 4.2 m, DN일 때 2.5 m, E와 F일 때 1.4 m로 하였다. 단, TCM-2에서처럼 Area Source를 Box model化하였을 때는 이 값을 適用하지 않는다.

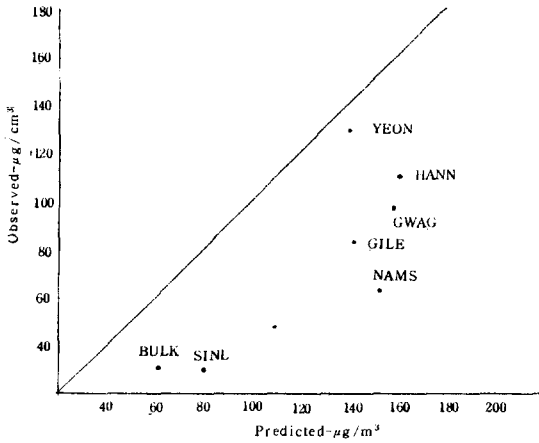
또 각 모델에서 考慮하고 있는 것은 物理的 吸收, 化學的 反應에 따른 汚染物質의 自然減衰에 대한 半減期의 適用이다. SO₂ 境遇 大氣中에서 氣象條件에 따라 濃도가 50% 減少하는데 걸리는 時間이 20分~1時間이라는 보고가 있다.³⁰⁾ 이 半減期를 CDM에서는 30分 TCM-2와 ISCLT에서는 使用者가 選定하도록 하고 있다. 서울에서 SO₂에 대한 半減期를 適用하였을 때 각 모델 豫測値 모두 實測値와 상당한 차이를 보이기 때문에 이 값을 無限대로 취하였다.

<표 11>은 지금까지의 論議에 따라, 서울의 SO₂ 濃도에 대하여 實測値와 모델 豫測値를 比較해 본 것이며, 이 比較를 그래프로 圖示한 散亂圖表가 <그림 2, 3, 4>에 있다. 一般的으로 SO₂의 Background 濃도는 0(零)에 가깝다. 따라서 <그림 2, 3, 4>의 實線은 모델이 完璧한 性能을 發揮할 때 만들어지는 回歸線을 나타낸다. <표 11>에서 보면 CDMQC에서는 4%~172%, TCM-2는 45%~189%, ISCLT는 99%~518%씩 높게 豫測하고 있다. 특히 큰 차이를 보이는 곳은 南山과 新林洞에서이다. 新林洞 測定所의 경우, 地形的으로 서울대학교 캠퍼스 內에 位置하여 主 汚染源의 影響이 작다고 생각되며, 南山은 海拔 270 m 정도에서 試

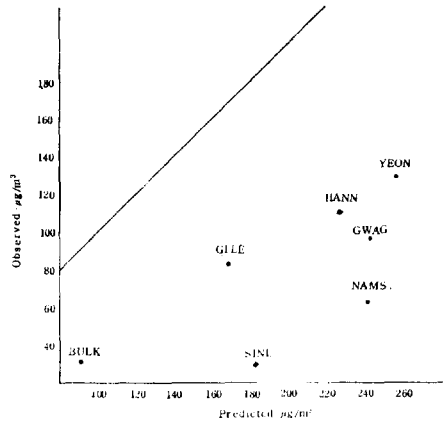
<표 11> Comparison of SO₂ modeling results in Seoul

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

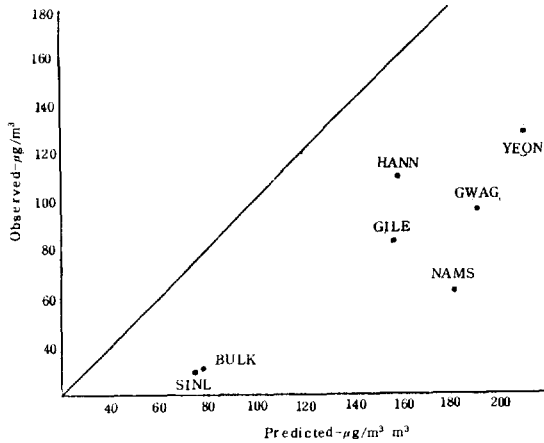
Receptor	Observed arithmetic mean	Model predictions			Ratio of predicted to observed		
		CDMQC	TCM-2	ISCLT	CDMQC	TCM-2	ISCLT
Gwanghwamun	96.5	158.17	191.89	243.74	1.64	1.99	2.52
Yeongdeungpo	129.3	140.23	210.91	257.53	1.09	1.63	1.99
Namsan	62.9	151.95	181.95	242.16	2.42	2.89	3.85
Bulkwangdong	31.3	61.34	77.65	91.13	1.96	2.48	2.91
Sinlimdong	29.6	80.38	74.65	182.91	2.72	2.52	6.18
Hannamdong	109.7	161.04	159.28	227.91	1.47	1.45	2.08
Gileumdong	82.8	141.54	157.29	168.64	1.71	1.90	2.04



〈그림 2〉 Comparison of observed and predicted sulfur dioxide concentrations with CDMQC



〈그림 4〉 Comparison of observed and predicted sulfur dioxide concentrations with ISCLT



〈그림 3〉 Comparison of observed and predicted sulfur dioxide concentrations with TCM-2

料採取를 하고 있으므로 地面濃度를 나타낸다고 할 수 없다.

最小自乘法을 이용하여 7個 測定所의 實測濃度와 各 모델의 豫測濃度에 대한 線型回歸式과 各各의 相關係數를 구한 結果 다음과 같다.

$$\text{CDMQC} ; y = 0.76x - 1.83, r = 0.81$$

$$\text{TCM-2} ; y = 0.61x - 1.75, r = 0.87$$

$$\text{ISCLT} ; y = 0.47x - 1.36, r = 0.72$$

여기서 相關係數의 95% 信賴水準은 0.75로서, IS-CLT 경우를 除外하고 相關關係는 良好함을 알 수 있으나, 앞에 말한 新林洞과 南山을 包含시키지 않으면 이 統計式들은 實質的으로 向上된다. 또한 各 모델들은 上記式에 따라 x에 豫測值를 대입하여 補正值 y를 얻을 수 있다. 이렇게 하여 求한 補正值를 實測值와 比

〈표 12〉 Comparison of observed and model calibrated sulfur dioxide concentrations in Seoul.

Receptor	Observed arithmetic mean	Model calibrated		
		CDMQC	TCM-2	ISCLT
Gwanghwamun	96.5	119.08	116.16	112.77
Yeongdeungpo	129.3	105.36	127.84	119.23
Namsan	62.9	114.32	110.05	112.03
Bulkwangdong	31.3	45.06	45.96	41.31
Sinlimdong	29.6	59.61	44.12	84.29
Hannamdong	109.7	121.27	96.12	105.36
Gileumdong	82.8	106.36	94.88	77.61

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

較하여 <표 12>에 나타내었다. 이 比較에 따른 實測値와 補正値의 標準誤차는 CDMQC에서 $28.05\mu\text{g}/\text{m}^3$, TCM-2가 $21.93\mu\text{g}/\text{m}^3$, ISCLT에서 $29.07\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 相關係數는 CDMQC가 0.96, TCM-2가 0.95, ISCLT가 0.85로 나타났다.

한편 位置上 問題가 있는 新林洞과 南山을 除外한 5個 測定所 資料로만 分析해 보면 相關係數가 CDMQC는 0.85, TCM-2는 0.93, ISCLT는 0.96으로 되어 앞의 結果와 反對인 順位를 보이고 있다.

지금까지 論議한 結果 서울에서 SO_2 에 대한 長期地上 平均濃度를 豫測하기 위해 Gaussian plume dispersion model로서 CDMQC, TCM-2, ISCLT의 適用은 적절하다고 생각되나, 다만 事前에 正確한 基本資料의 確保와 充分한 檢討가 行해져야 할 것이며, 또한 어느 모델이 가장 適切할 것인가를 모델 檢定을 통해 미리 確認해야 할 것이다.

4. 結 論

서울에서 二酸化황의 長期平均 地上濃度를 豫測할 수 있는 가장 適切한 모델을 開發하기 위하여 既存 CDMQC, TCM-2, ISCLT 등 3個의 모델에 同一한 資料를 入力시켜 比較分析하였다. 資料가 充實해야 하고, 系節의으로 擴散이 원만히 이루어질 수 있는 時期 등의 要件이 따랐기 때문에 1981年 7月~9月의 氣象資料, 排出源 調査資料, 汚染源 實測 資料가 利用되었다. 그리고 모델링 技法을 改善하기 위하여 本文에 모델들의 原理, 주의 사항, 모델링 過程 등을 言及하였다

특히 모델에 使用되는 各種 파라메터가 모델링 技法에 重要하였으며, 本 研究를 통해 몇가지 適當하다고 判斷되는 다음과 같은 파라메터들을 얻었다. 즉, 서울에서 面汚染源에 대한 排出高度는 6 m로 하는 것이 좋았고 面汚染源의 初期 垂直擴散係數는 大氣安定度가 A일 때 14.0 m, B일 때 10.9 m, C일 때 7.4 m, D일 때 2.5~4.2 m, E 및 F일 때 1.4 m가 適當하였으며, 大氣中에서 SO_2 의 半減期를 適用하지 않는 것이 適用할 때보다 더 좋았다.

이러한 過程을 통해 汚染度 實測値와 3개 모델의 豫測値의 相關分析을 行한 結果 CDMQC의 相關係數가 0.81, TCM-2가 0.87, ISCLT가 0.72이었고 最小自乘法에 의해 各 豫測値를 補正한 후의 相關係數는 CDMQC 0.96, TCM-2 0.96, ISCLT 0.85로 되

었다. 또 試料採取 位置가 適切하지 않다고 생각되는 新林洞, 南山의 測定値를 除外한 나머지 實測値와 各 모델 豫測値의 相關係數는 CDMQC 0.85, TCM-2 0.93, ISCLT 0.96으로 되어, 어느 모델이든지 基本 入力資料만 充實하다면 使用可能할 것으로 思料된다.

참 고 문 헌

1. Benarie, M.M. : Urban Air Pollution Modelling, The MIT Press, London (1980)
2. US EPA OAQPS : Guideline on Air Quality Models EPA-450/2-78-027, PB 288, 783, (1978)
3. US EPA, OAQPS : Guideline on Air Quality Models (Revised) Draft, (1984)
4. 玉致完外 : 서울 시내의 大氣汚染 擴散 현황과 測定 汚染度와의 比較分析에 관한 調査研究, 國立環境研究所 (1980)
5. 羅振均外 : 大氣汚染物質 擴散과 汚染度豫測에 관한 研究, 國立環境研究所 (1982)
6. 金丁勛外 : 大氣 環境基準 設定을 위한 研究, 한국 과학기술원 (1982)
7. US EPA, ORD, ESRL : Meteorology and Assessment Division, Environmental Operations Branch, UNAMAP (Version 5) EPA/DF-83/007, PB 83-244. 368, (1983)
8. Busse, A.D. and Zimmerman, J.R. : User's Guide for the Climatological Dispersion Model, Office of Research and Development, US EPA-R4-73-024, PB-227 346 (1973)
9. Brubaker, K.L. et al : Addendum to User's Guide for Climatological Dispersion Model, Argonne National Laboratory, EPA-450/3-77-015, PB-274 040 (1977)
10. Calder, K.L. : A Climatological Model for Multiple Source Urban Air Pollution, First Meeting of the NATO/CCMS Panel on Modeling (1971)
11. Pasquill, F., and Meade, P.J. : A Study of the average distribution of pollution around Staythorpe Int. J. Air Poll., 1, 60-70, (1958)
12. Pasquill, F. : The estimation of the dispersion of windborne material Meteorol. Mag., 90, 1063, 33-49 (1961)
13. Pasquill, F. : Atmospheric Diffusion, Van Nostrand Co., New York (1962)
14. Gifford, F.A. : Use of routine meteorological Observations for estimating atmospheric dispersion, Nuclear Safety, 2, 4, 47-51 (1961)
15. Briggs, G.A. : Some Recent Analyses of Plume Rise Observation. In : Proceedings of the Second

- International Clean Air Congress, Englund, H.M./ Baery, W.T. (ed.), Academic Press (1971)
16. Staff-Texas Air Control Board : User's Guide to the Texas Climatological Model, Texas Air Control Board, Permits Section, EPA/DF-81/001b, PB81-614 626, (1980)
 17. Gifford, F.A. and Hanna, S.R. : Urban Air Pollution Modeling, Proceedings of the Second International Clean Air Act Congress, Washington, D.C., 1970, Academic Press, 1140~1151, (1971)
 18. US EPA, OAQPS. : User's manual for single source (CRSTER) model, EPA-450/2-77-013, PB271 360, (1977)
 19. Bowers, J.F. et al. : Industrial Source Complex (ISC) Dispersion Model User's Guide (Volume I), Source Receptor Analysis Branch, US EPA, EPA-450/4-79-030, PB 80-133 044, (1979)
 20. TRW System Group : Air Quality Display Model Contract No. PH 22-68-60 USDHEW, Public Health Service, National Air Pollution Control Administration, Washington, D.C., PB189 194, (1969)
 21. Engineering-Science, Inc. : Han River Basin Environmental Master Plan Project, OOE of R.O.K., (1983)
 22. 中央氣象臺：日氣象統計表(1981)
 23. De Marrais, G.A. : Wind speed profiles at Brookhaven National Laboratory, J. Appl. Meteorol., 16, 181~189, (1959)
 24. Holzworth, G.C. : Mixing Heights, Wind Speeds, and Potential for Urban Air Pollution Throughout the Contiguous United States, Office of Air Programs, US EPA, AP-101, PB 207 103, (1972)
 25. 環境廳：大氣污染排出施設 調査表(1981)
 26. 金良均外：固體燃燒(暖房用)에 依한 汚染物質 排出에 關한 調査研究, 國立環境研究所, (1982)
 27. US EPA, OAQPS : Compilation of Air Pollutant Emission Factors, 3rd ed. AP-42, Part A and B, (1977)
 28. Pooler, F : A tracer study of dispersion over a city, J. Air Poll. Contr. Assoc., 16, 12, 677~681, (1966)
 29. Reed, G.T. : Private Consultantz, Engineering-Science, Inc. Arcadia, Calif. U.S.A., (1984)
 30. Weber, E. : Contribution to the residence time of sulfur dioxide in a polluted atmosphere, J. Geophys. Res., 75, 15, 2909~2914, (1970)