

대기오염물질 확산예측 모델(model)고찰

T.E.M(Texas Episodic)과 Valley Model

현재 및 장래의 효과적이고 유용한 대기오염 관리를 위하여 대기 환경에 가해지는 여러 가지 대기오염 물질로 인한 환경에의 영향을 정확히 파악하고 예측하는 일련의 과정은 매우 중요하다.

이러한 장래 대기질 예측과 관리를 위한 대기환경관리 대책의 한가지 방법으로서 대기확산모델은 바람, 기온 등 대기확산에 영향을 미치는 자연현상 등을 간단한 수식으로 단순화하여 오염물질 부하에 따른 대기환경 상태를 파악하는 것이다.

그간 우리나라에서는 대기확산 모델은 대기질 (Air Quality)관리를 위한 정책수립, 환경영향평가 등에 주로 사용되어 왔으며, 최근 들어 세계적인 조류에 발맞춘 기업의 환경친화경영에 있어서 보다 전향적인 환경관리의 일환으로 그 활용도가 높아지고 많은 관심을 일으키고 있다.

이러한 대기오염물질 확산 모델중 단기(short term)예측 모델로 현재 많이 활용되는 TEM과 산악이 많은 우리나라 지형을 고려한 Valley모델에 관하여 고찰하고자 한다.



환경보전협회 홍보부 대리 박 룡

1. 대기확산모델의 일반 이론

(1)가우스모델 (Gaussian Model)

대기확산 모델의 개념은 크게 세가지로 구분(김취강 등, 1987)되는데, 결정론적 모델(Determinational model)과 체계적 모델(Statistical model) 및 물리적 모델 (Physical model)등이 있다.

여기서 결정론적 모델이란 대기확산의 복잡한 자연현상을 나타내는 물리적 과정들을 여러 가지의 방정식 등의 해를 사용하여 수학적으로 단순화시켜 예측이 가능토록 한 개념상의 모델이다.

통계적 모델이란 기상 인자와 기타의 인자 사이에서 실험적으로 구해지는 통계적 관계를 이용하여 대기의 농도를 계산하는

모델이며, 물리적 모델은 실험실체에서 실제와 유사한 축소형의 물체 혹은 상황을 만들고 여기서 실험을 행해 얻은 결과를 토대로 해서 현상을 예측하는 경우를 말한다.

가우스모델이란 위에서 언급한 세가지 모델 중 후자에 속하는 모델의 하나로서 오염물질의 농도를 구하는 식이 가우스식, 즉 연기의 확산 폭이 정규분포를 이룬다는 가정을 이용한 모델을 말한다.

따라서 착지점의 농도를 간단한 가우스식으로 구하게 한 만큼, 다음과 같은 기본적인 가정들이 가우스식에 의한 농도 계산시에 요구된다.

- 1) 대기오염 배출원에서 오염배출이 연속적이어서 풍하방향의 확산은 무시한다.
- 2) 배출물질은 가스가거나, 직경 약 20um이하 먼지 및 Aerosol로서 장기간 공중에 부유한다.
- 3) 배출된 오염물질은 흘러가는 동안 없어지거나 다른 물질로 바뀌지 않고, 지표면에서 반사된다.
- 4) 평균풍향을 X축으로 하고 풍속은 굴뚝의 유효고도로부터 $\pm 2\sigma z$ 범위의 고도에 대한 평균풍속을 택한다. $2\sigma z$ 가 He보다 크면 지표로부터 $+2\sigma z$ 까지의 평균풍속을 사용한다.
- 5) 연기의 성분은 X방향에 직각인 방향으로 가우스 분포를 이룬다.
- 6) 오염분포의 표준편차는 약 10분간의 대표치이다.

위와 같은 가정들을 근거로 하여, 풍하방향(오염원으로부터 바람이 흘러가는 방향)에서의 오염물농도를 구하는 방법은 식 (2-1)과 같이 간략히 표현된다.

$$(x,y,z) = \frac{Q}{(2\pi \cdot \delta y^2 \cdot z \cdot u)} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\delta y^2}\right)\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{z^2}{\delta z^2}\right)\right\} \dots \quad (2-1)$$

Q : 오염물 배출량(M/T)

u : 풍속(L/T)

y : 연기 중심선으로부터의 수평거리(L)

Z : 지면에서의 높이 (L)

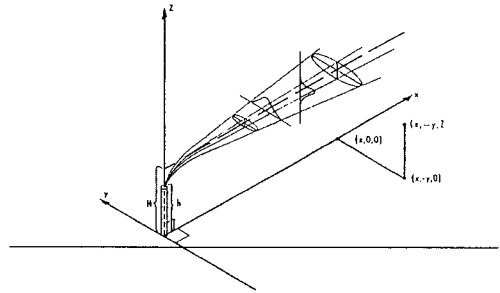
y : $\sqrt{(2Eyx/u)}$ 인 확산 표준편차 (L)

z : $\sqrt{(2Ezx/u)}$ 인 확산 표준편차 (L) 단, Ey, Ez는 각각 y 및 z 방향의 확산 계수 (L**2/T)

He : 연기 중심선의 높이 (L) = 유효 굴뚝 높이 (effective

stack height)

C : 오염물질 농도 (M.(L**3))



<fig 1> Coordinate system for the Gaussian plume equation

<fig 1>은 식(2-1)에 의한 가우스 모델의 대표적인 연기 확산 모형을 나타내는데 연기의 최종 확산 실제 높이는 굴뚝 높이 (physical height)와 연기 상승량의 합인 유효 굴뚝 고도 He 임을 볼 수 있다.

(2) 대기 확산 모델의 종류

대기오염 예측을 위해 기존에 개발된 모델은 수십 종에 이른다. 현재 우리나라에서 널리 이용되는 대기오염 예측 모델은 주로 미국의 NTIS(National Technical Information Service)에서 보급하는 UNAMAP(User's Network for Applied Modelling of Air Pollution)에 수록된 모델들이며 그 중에서도 많이 이용되고 있는 모델들을 살펴보면 <Table 1>과 같다.

Model	Developed	Object	Object	Modeling	Terrain
	Country	Source	Pollutant	Term	
APRAC-3	USA '82	Line	CO	Short	Flat
ATDL	USA '73	Area	ALL	Long	Flat
ADDM	USA '69	Point, Area	SO2, TSP	Long	Flat
AUSPLUME	AUS '86	Point, Area	SO2	Short	Flat
BLP	USA '82	Line, Point	ALL	Short	Flat
BOX	USA '60	Area	SO2, TSP	Short	Flat
CALINE-3	USA '86	Line	CO, TSP	Short	Flat
CDM	USA '73	Point, Area	SO2, TSP	Long	Flat
CDMOC	USA '73	Point, Area	SO2, TSP	Short	Flat
COMPLEX-1	USA '86	Point	ALL	Short	Complex
CRSTER	USA '77	Point	SO2, TSP	Short	Flat
Davis	USA '61	Area	SO2	Short	Flat
Hanna-Gifford	USA '74	Area	SO2, TSP	Short	Flat
HIWAY-2	USA '80	Line	SO2, TSP	Short	Flat
INPUFF	USA '86	Point	SO2, TSP	Short	Flat
ISCLT	USA '79	Area	SO2, TSP	Long	Flat
ISCST	USA '79	Point	SO2, TSP	Short	Flat
LONZG	USA '82	Point, Area	SO2, TSP	Short	Flat
MESOPUFF-2	USA '85	Point, Area	SO2, TSP	Long, Short	Flat
Miller-Holzworth	USA '72	Area	SO2, TSP	Long, Short	Flat

WPTDS	USA '82	Point	SO2, TSP	Long, Short	Complex
WPTER	USA '86	Point	SO2, TSP	Short	Complex
PAL	USA '78	Point, Line, Area	SO2, TSP	Short	Flat
PBM	USA '85	Area	ALL	Short	Flat
PBM	USA '82	Point, Area	SO2, TSP	Short	Flat
PLUVIE-2	USA '83	Point	ALL	Short	Flat
PTPLU-2	USA '86	Point	ALL	Short	Flat
RAM	USA '78	Point, Area	SO2, TSP	Short	Flat
Roll Back	USA '75	Area	ALL	Long, Short	Flat
ROADWAY-2	USA '86	Line	ALL	Short	Flat
RTM-3,2	USA '87	Point	SO2, TSP	Short	Complex
SCM-3,2	KOREA '90	Point, Area	SO2, TSP	Long	Complex
SCIM	USA '73	Point, Area	SO2, TSP	Short	Flat
SHORTZ	USA '82	Point, Area	SO2, TSP	Short	Flat
Street Canyon	USA '67	Line	CO	Short	Flat
TOM-2	USA '76	Point, Area	SO2, TSP	Long	Flat
TEM-8	USA '76	Point, Area	SO2, TSP	Short	Flat
TUPOS	USA '86	Point	SO2, TSP	Short	Complex
UAM	USA '77	Area	SO2, TSP	Short	Flat
VALLEY	USA '79	Point, Area	SO2, HF	Long, Short	Complex

Table 1. Types of Dispersion Models

2) 점오염원(Point Source)의 계산

가우스 모델은 대기가 균일한 상태라는 전제하에서 확산이 수평.수직방향 모두 정규분포를 나타낸다고 가정한다. 따라서 T.E.M-8 모델에서는 다음과 같은 조건을 기초로 한다.

- i) 배출율은 일정하고 풍하방향의 확산은 무시하며 이류만 고려한다.
- ii) 평균풍속에 의해 이동하고 수평바람 영역은 동질이고 수직방향의 직접적 바람 전단력 (Wind shear)은 무시한다.
- iii) 순간적 풍향변화로 인한 효과를 무시한다.
- iv) 대상 오염물질은 비반응성 기체이거나 Aerosol일 때 사용한다.
- v) 대기중 난류현상에 의해 확산하며 수평.수직방향의 농도 분포는 연기 중심선 부근에 분포한다.

T.E.M-8에서의 지상농도 계산식은 다음과 같다.

$$C = \frac{Q \times 10^6}{\pi \cdot y \cdot z \cdot u} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta y} \right)^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\delta z} \right)^2 \right\} \quad (2-2)$$

2. T.E.M-8 모델과 Valley모델

(1) T.E.M-8 모델

a. T.E.M-8 모델의 원리

T.E.M-8 (Texas Episode Model-8)은 대기오염 물질의 단기 지상 농도를 예측하기 위하여 75년 Texas Air Control Board에서 개발한 모델이다. T.E.M-8은 Gaussian 확산식, Briggs의 연기상승식, Pasquill-Gifford의 확산계수식, 오염물질의 지수 함수적 분해 등의 가정에 기초를 두고 있다.(Texas Air Control Board, 1979)

1) T.E.M-8 모델의 입력자료

T.E.M-8의 입력자료는 첫번째 제어변수(Control Parameter)로서 출력자료의 유형결정, 오염원의 공간좌표, 오염농도의 평균화 시간선택, 계산인자의 자료 등을 입력하며 두번째는 계획변수(Scenario Parameter)로서 평균화 시간 유형에 따라 풍향, 풍속, 안정도, 온도, 혼합고 등을 입력하며 세째부분은 면오염원의 위치, 크기, 배출율 등을 입력하며 넷째 부분은 점오염원의 위치, 오염원의 배출율, 굴뚝 높이, 굴뚝 직경, 오염물의 배출속도와 배기온도 등을 입력한다.

여기서 C: 지상농도 (ug/m³)

Q: 오염물질 배출량 (g/sec)

y: 수평확산 표준편차 (m)

z: 수직확산 표준편차 (m)

u: 풍속 (m/sec)

y: 연기 중심선으로부터 수평방향의 거리

H: 굴뚝의 유효고도(m)

이때 거리 x에서 확산계수 y, z는 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\delta y = a \cdot x^b \quad (2-3)$$

$$\delta z = c \cdot x^d \quad (2-4)$$

(2-3)식에서 사용되는 안정도와 풍하거리에 따른 a, b의 값은 <table 2>와 같고 (2-3)식에서 사용되는 c, d의 값은 <table 3>과 같다.

이때 평균화 시간에 따른 수평확산계수 y는 다음식과 같이 결정한다.

$$\delta y = \frac{\delta y_s}{(t/t)R(s)} \quad (2-5)$$

여기서 δy_t : t시간동안의 y방향 확산표준편차
 y_s : 10분동안의 y방향 확산표준편차
 t_s : 10분

R(s): 안정도에 따른 보정함수로서 <table.4>와 같다.

Atmospheric stability class	R (s)
A = 1	.675
B = 2	.55
C = 3	.425
DD = 4	.3
DN = 5	.3
E = 6	.175
F = 7	.175

*주:DD(Neutral Day), DN(Neutral Night)

Table 2. Power law exponents & coefficients of δy

Atmospheric Stability Class	Down Wind Distance					
	100m < x ≤ 500m		500m < x ≤ 5000m		x > 5000m	
	a	b	a	b	a	b
A = 1	.0383	1.281	.0002539	2.089	.0002539	2.089
B = 2	.1393	.9467	.04936	1.114	.04936	1.114
C = 3	.1120	.9100	.1014	.926	.1154	.9109
DD = 4	.0856	.8650	.2591	.6869	.7368	.5642
DN = 5	.0818	.8155	.2537	.6341	1.297	.4421
E = 6	.1094	.7657	.2542	.6358	.9204	.4805
F = 7	.05645	.8050	.1930	.6072	1.505	.3662

Table 3. Power law exponents & coefficients of δz

Atmospheric Stability Class	Down wind Distance			
	x < 10,000 m		x ≥ 10,000 m	
	c	d	c	d
A = 1	.495	.873	.606	.851
B = 2	.310	.897	.523	.840
C = 3	.197	.909	.285	.867
*DD = 4	.122	.916	.193	.865
*DN = 5	.122	.916	.193	.865
E = 6	.0934	.912	.141	.868
F = 7	.0625	.911	.080	.884

Table 4. Exponent for adjustment of y to different averaging times

높이에 따라 풍 속의 변하는데 높이 Z에서의 풍속은 다음식과 같이 구한다.

$$U_z = U_s (Z/Z_s)P(s) \quad (2-6)$$

여기서 U_z : 높이 z에서의 풍속 (m/s)

U_s : 안정도 S에서 높이 10m에서의 풍속 (m/s)

Z_s : 10m

P(s) : 안정도에 따른 상수로서 <table.5>와 같다.

Atmospheric stability class	P (s)
A = 1	0.10
B = 2	0.15
C = 3	0.20
DD = 4	0.25
DN = 5	0.25
E = 6	0.30
F = 7	0.30

Table 5. Exponent for adjustment of wind speed to stack height

다음 연기상승에 의한 유효굴뚝높이를 구하기 위한 연기상승식은 Briggs식이 쓰였는데 배출속도에 의한 운동력(momentum)상승인지 배출온도에 따른 부력(buoyancy)에 의한 것인지 구분하고 또 이때의 대기안정도에 따라 가장 적합한 식으로 계산된다.

유효 굴뚝높이는 여기서 구한 연기상승높이와 굴뚝높이의 합으로 구해진다.

배출속도가 수평속도의 1.5배 이하인 경우에는 와류(Stack-Tipdownwash)현상을 고려하는데 이것은 유효굴뚝높이에서 다음식에서 계산되는 보정값(C)를 뺀 것이다.

$$C = 4 (1.5-V/U)R \quad (2-7)$$

여기서 R : 연돌직경

U : 굴뚝높이에서의 풍속

V : 배출속도

역전층을 고려할 때는 일정거리 이상에서 농도 분포가 일정해지는 구간을 설정하고 혼합고가 2.15 z가 된다고 가정한다. 이

때의 농도는 다음식과 같다.

$$c = \frac{1000}{QKy \sqrt{2\pi L}} \dots\dots\dots (2-8)$$

여기서 L = 2.15 z

$$Ky(x,y,S,t) = \frac{1000}{\delta y} \exp - \frac{y^2}{\delta y} \quad 2$$

(10/t)R(s) (10/t)R(s)

단, y = x tan Δ

x : 풍하거리

y : 연기중심선에서 수평방향의 거리

S : 대기안정도

R(s) : 대기안정도에 따른 함수로 <Table 4>와 같다.

t : 평균화시간 (min)

3) 점오염원(Point Source)의 계산

면오염원으로부터 농도를 계산하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

i) 각 면오염의 배출율은 일정하고 배출은 면의 중심에서 한다.

ii) 면오염의 크기는 착지의 격자크기와 같으며 면오염원 격자로부터 4개의 격자까지 영향을 준다

iii) 풍향각에 따라 영향을 받는 격자의 위치가 바뀐다.

위와 같은 가정에서 면오염원에 의한 농도는 다음식과 같다.

$$C_x = \sqrt{2/\pi} \frac{Q(\Delta\alpha/2)(1-b(s))}{u a(s)(1-b(s))} \dots\dots\dots(2-9)$$

$$C_i = \sqrt{2/\pi} \frac{Q(\Delta\alpha/2)(1-b(s))}{u a(s)(1-b(s))} \dots\dots\dots(2-10)$$

((2i + 1)1-b(s) - (2i - 1)1-b(s))

여기서 C_x : 중앙으로 부터의 오염농도

C_i : I번째 (I=1, 2, 3, 4)각에서의 오염농도

Q : 오염물 배출속도

a(s), b(s) : Gifford and Hanna (Urban Air Pollution Modeling,1971)에 의해서 결정된 상수로서 <Table6>과 같다.

u : 풍속

Δα : 격자공간크기

Atmospheric stability class	a (s)	b (s)
A = 1	0.4	0.91
B = 2	0.4	0.91
C = 3	0.33	0.86
DD = 4	0.22	0.80
DN = 5	0.15	0.75
E = 6	0.06	0.71
F = 7	0.06	0.71

Table 6. Value for a(s)& b(s) used in equation (2-9) & (2-10)

(2) VALLEY 모델

a.Valley의 원리

Valley는 산악지대의 위치한 제련소에서의 오염물에 의한 대기오염상태를 파악하기 위해 1977년 미국에서 개발된 모델이다.(Edward W.Burt,1977).Valley의 주목적은 전원지형이나 산악지형의 24시간 평균농도를 구하는 것이지만, 필요에 따라서는 다수의 점오염원에 대한 예측농도나 평탄지형 도시지역에서의 농도 및 장기의 예측농도 산출도 가능하다.

오염원은 점오염원과 면오염원을 합하여 최고 50개까지 입력이 가능하고, 착지점농도의 산출은 방사형의 극좌표에 16방위로 각 방위당 7개 지점씩 총112지점에 대해 행해지는데, 이때 각 착지점의 농도는 인쇄용지상에 지도와 같은 척도로 인쇄되게 할 수 있다. Valley의 지상농도 계산식은 식(2-11)로 표현된다.

$$x = 2.03 \cdot 106 \cdot Q \cdot K \cdot ((c-y)/c) \cdot ((401 - D)/400) \cdot F$$

$$\sum_{N=j}^{+i} \exp \left\{ -0.5 \left(\frac{H + 2NL}{\delta z} \right)^2 \right\}$$

$$\left[\exp \left\{ -0.639 Xp / (3600 \cdot u \cdot I) \right\} / (u \cdot) \right] \cdot (2-11)$$

x = 오염물농도 (g/(m**3), ppm)

= 오염원과 착지점간의 거리 (m)

y = 연기중심선과 착지점간의 수직거리

H = 연기중심선의 높이

L = 혼합고 (m)

Q = 오염물배출율(g/sec)

c = 22.5° 풍하구간의 수직거리

F = 농도단위결정계수

K = 표준상태로의 변환계수
 N = 착지점까지의 연기반사횟수
 X_p = 오염원에서 착지점까지의 거리(m)
 u = 평균풍속(m/sec)
 I = 오염물의 반감기(hr)

$D =$ 착지점고도 - 연기중심선고도 식(2-11)에서 보는 바와 같이 Valley는 여타 가우스모델과는 달리 수평방향 (y 방향)으로의 확산을 수평확산계수 y 에 의해 구하지 않고 선형재삼계수(Linear Interpolation Factor)인 $(c-y)/c$ 를 이용해 구한다. 즉, 이 계수를 고려하여 풍하구간에서 수직거리 y 만큼 떨어진 착지점의 농도는 y/c 에 비례하여 감소하는 것으로 간주하여 오염물 농도를 계산한다.

수직방향으로의 확산은 Pasquill-Gifford에 의한 ($\delta z = a x_p^b + d$)에 의해 구해지며 이때의 계수 a, b, d 값은 안정도와 풍하거리에 따른 함수이다. <Table 7.>

Stability	$X_p > 1000m$			$1000m > X_p > 100m$			$100m > X_p$		
	a,	b,	d,	a,	b,	d,	a,	b,	d,
A	0.001	1.89	9.6	0.001	1.89	9.6	0.1742	0.936	0.
B	0.0476	1.11	2.0	0.0476	1.11	2.0	0.1426	0.922	0.
C	0.119	0.915	0.	0.119	0.915	0.	0.1233	0.905	0.
D	2.61	0.45	-25.5	0.187	0.755	-1.4	0.0804	0.881	0.
E	52.6	0.15	-126.	0.1345	0.745	-1.1	0.06	0.854	0.
F	33.6	0.14	-75.	0.362	0.55	-2.7	0.0434	0.814	0.

Table 7. Constants used in calculating the vertical diffusion coefficient

b. Valley의 지형고려의 특징

Valley 모델의 가장 중요한 특징은 지형에 의한 영향이 고려되는 것으로 ISCST나 MPTER과는 달리 착지점이 굴퓍높이보다 높기 위치하더라도 농도의 계산이 가능하도록 되어 있다. 즉 식(2-11)에서와 같이 Valley 모델은 평탄지형을 대상으로 하는 가우스식에다 $(401-D)/400$ 항을 더 고려함으로써 구름지 뿐만 아니라 산악지형까지 고려가 가능하다.

Valley 모델은 대기안정도에 따라 연기의 최종 높이가 각기 다른 형태를 갖는 것으로 본다. 즉 안정상태에서는 연돌에서 배출된 여기가 지형에 관계없이 계속 일정한 최종 연기높이(Final Plume Height)를 유지하고, 불안정 및 중립상태에서는 지형이 높아짐에 따라 연기도 지면을 따라 평행으로 상승하는 것으로 본다 <Figure2> 즉 중립 및 불안정상태에서는 식(2-

11)의 D에 1이 들어가 지형의 영향이 무시되지만, 안정상태에서는 유효 굴퓍높이 이상 400M의 높이까지는 연기가 선형적으로 감소하는 것으로 가정하여 연기중심선 이상의 높이에 있는 착지점의 농도를 계산한다. 즉 $(401 - D)/400$ 여기서, 중립상태 및 불안정상태에서의

$D=1$ 안정상태에서는 $1, \langle D/401$
 (단, $D =$ 착지점고도 - 연기중심선고도)

으로 되어 지형의 고저차로 인한 지표농도상 변화가 고려된다.

MODEL	ISCST	MPTER	Valley
Terrain	Rolling	Rolling	Complex
Object area	Urban, Rural	Urban, Rural	Urban, Rural
Modeling term	Short	Short	Long, Short
No. of source	Optional	250 Point	50 Point & Area
No. of receptor	360	180	112
Plum rise equation	Briggs	Briggs	Briggs

Figure 2. Depiction of plum height in complex terrain, as in Valley

<Figure 2>는 안정도와 지형에 따른 연기의 확산모양을 나타낸다. 그림의 윗부분은 중립상태 및 불안정상태에서의 연기이동을 아랫부분은 안정상태에서의 연기이동을 보여주는데, 안정상태에서는 연기중심선 이상의 지점에서는 연기중심선 상부의 400m 지점까지 농도가 선형적으로 감소하며 계산되는 원리를 알 수 있다.

참고적으로 주요 지형고려 모델의 특징을 요약하면 <Table8>과 같다.

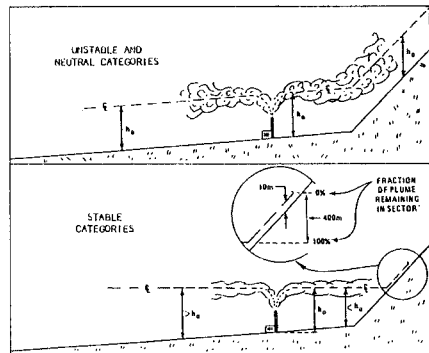


Table 8 Dispersion Models for terrain adjustment