

# 대기확산모델링 이론 및 활용

2002. 5.

## 제 1 장 대기확산 및 대기경계층 특성

오염원에서 배출된 대기오염물질은 대기 중에서 매우 복잡한 확산 및 반응과정을 거치면서 수용체에 영향을 미치게 되고, 대기확산형태는 대기층의 밀접한 관계가 있다. 따라서 먼저 대기확산과정과 대기층의 구조에 대해서 논하고자 한다.

### 1.1 대기확산

공장 굴뚝이나 차량과 같은 오염원에서 배출된 오염물질은 대기 중에 분산과정을 거쳐서 수용체(receptor)에 도달하여 영향을 미치게 된다. 그림1-1은 오염원에서 배출된 1차오염물질이 대기 중에서 분산과정을 거치면서, 반응에 의해서 형태가 다른 2차오염물질로 변형되거나, 또는 건성 침착 (dry deposition) 및 습윤침착 (wet deposition)에 의해서 대기 중에서 제거 과정을 거치면서 수용체에 도달하는 것을 보여 주고 있다. 배출된 오염물질은 광화학반응 등의 여러 형태의 대기반응을 통해서 변형되거나, 또는 강우에 용해되어 제거되는 습윤침착이 일어나고, 지표부근에서는 오염물질이 확산운동에 의해서 지표면에서 포착되어 제거되는 건성침착이 일어난다. 따라서 같은 량의 오염물질이 배출되더라도 수용체에 도달하는 오염물질농도는 오염물질의 확산을 결정하는 대기 기상조건, 주변 지형조건, 오염물질의 반응성 및 침착성에 따라서 매우 상이하게 나타난다 (김기현, 1999).

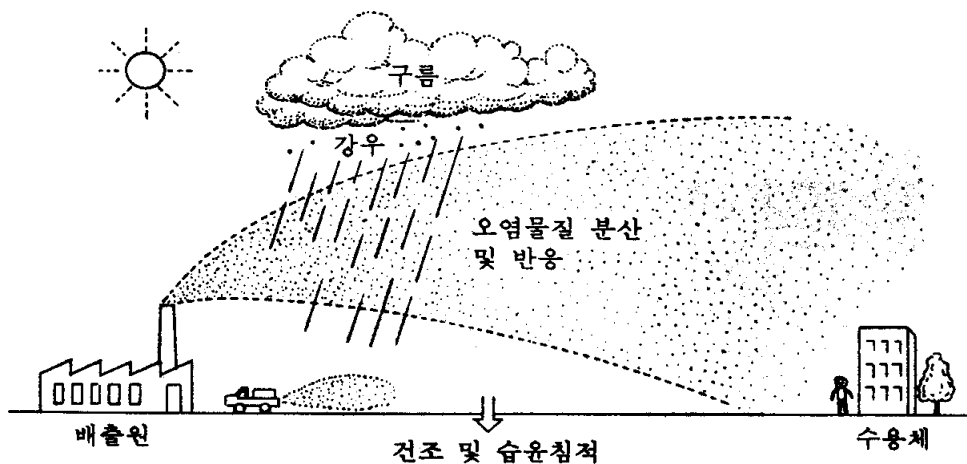


그림 1-1. 대기 중에 배출된 오염물질의 확산과정

이와 같은 복잡한 대기확산 과정을 거쳐서 수용체에 도달하는 오염물질의 농도를 대기 환경 영향평가 및 대기 정책수립 등을 위해서 정량적으로 해석할 필요가 있다. 배출된 오염물질이 수용체에 미치는 영향을 파악하는데 실측이 가장 확실하고, 정확한 방법이다. 그러나 실측은 많은 비용과 시간을 요구할 뿐만 아니라, 현재 존재하는 배출원에 대해서만 그 영향을 파악할 수 있는 단점이 있고, 광범위한 공간에서 몇 지점의 농도를 측정하여 전체적인 대기확산 형태를 파악하는데도 어려움이 있다. 따라서 배출원이 주변지역에 미치는 대기 환경 영향평가나, 대기질 관리대책 수립에는 대기확산 모델링을 주로 이용되고 있다. 대기확산 모델링은 복잡한 대기 확산현상을 단순화거나, 또는 가상의 조건하에서 배출원과 수용체사이의 인과관계를 규명하는 것이다.

이러한 대기확산 모델링은 물리모델(physical model)과 수식모델(mathematical model)로 크게 구분된다. 물리모델은 대기내 확산현상을 실제로 재현하여 인과관계를 해석하는 것이다. 물리적 현상을 재현하는데는 대기현상의 공간적 범위가 매우 넓으므로 실험 조건 설정 및 측정분석이 용이하지 않다. 따라서 물리모델은 관찰 대상을 축소 제작하여 수조(water tank)나 풍동(wind tunnel)에서 실험하는 축소모형실험이 주로 이용된다. 한편 수식모델은 대기내 오염물질의 확산현상을 방정식(governing equation)으로 표시하고, 이 수식을 여러 대기조건하에서 엄밀해(exact solution)나 수치해(numerical solution)를 구하여 확산현상을 해석하는 것이다. 대기확산 모델링은 그 방법과 정확도가 매우 다양하게 구성되어 있기 때문에 사용 목적에 따라서 적절한 모델을 선정해야하고 그 모델의 적용범위에 대해서도 이해해야 한다.

## 1.2 대기경계층 특성

### 1.2.1 수직 구조 변화

대기(大氣, Atmosphere)는 그림1-2와 같이 물리적·화학적 특성에 따라서 고도별로 대류권(troposphere), 성층권(stratosphere), 중간권(mesosphere), 열권(thermosphere) 등으로 분류된다. 지표면으로부터 고층대기로 올라갈수록 대기조성이 변하고, 밀도는 낮아진다. 우리 인간 활동과 밀접한 관계가 있는 대류권은 통상 지표로부터 약 11km까지 이다. 대기중에 수분은 대류권역에만 존재하므로 구름이 끼고 비가 오는 기상 현상은 이 권역에 국한되어 발생한다. 따라서 대류권역내 지표면으로부터 수km의 고도까지를 환경권 대기(ambient air)라고 하여 특별히 구분하기도 한다.

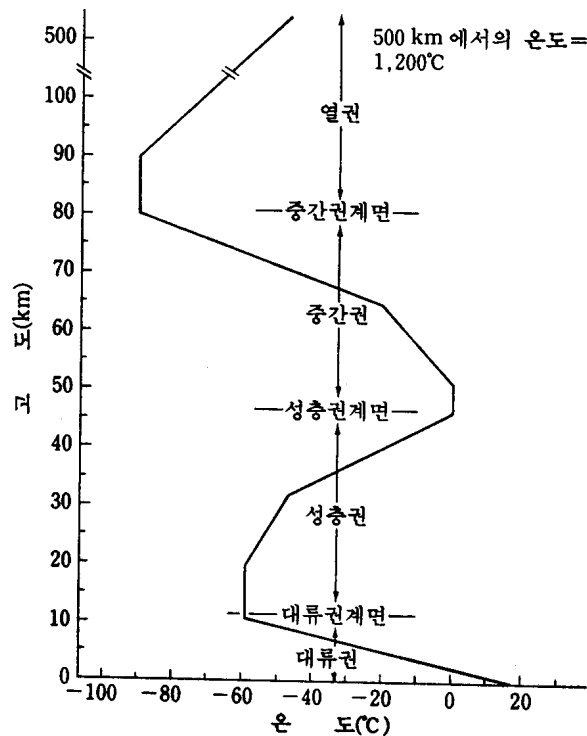


그림 1-2. 고도에 따른 대기권의 분류 및 온도 변화

### 1.2.2 대기경계층의 일변화

대류권내에서 하루 중에 변화하는 지표면 온도에 의해서 영향을 받는 고도가 지표면으로부터 약 1-2km 범위인데, 이를 특히 대기경계층(ABL, Atmospheric boundary layer) 또는 행성대기층 (PBL, Planetary Boundary Layer)라고 한다. 그림1-3에 나타난 바와 같이 대기경계층은 하루중에 낮에 대기가 불안정하여 열대류에 의해서 난류혼합이 활발하게 일어나는 대류경계층(convective boundary layer, convective mixed layer), 야간에 안정된 대기가 형성되고, 난류혼합이 억제되는 안정경계층(Stable boundary layer, nocturnal boundary layer)이 형성된다. 대류경계층의 혼합층의 높이는 통상 1-1.5km에 이르고, 지표면에서 대기로 전달되는 현열에 의해서 형성되는 열적 혼합 경계층이다. 안정경계층의 높이는 0.5km이내이고, 이 경계층은 고도에 따라서 증가하는 풍속의 차이로 인해서 발생하는 기계적 혼합층이다. 한편 그림1-3에는 나타나 있지 않지만, 해질 무렵 또는 해뜰 무렵에 짧은 시간 동안에 발생하는 중립경계층(Neutral Boundary layer)도 존재한다. 이와 같이 하루 중에 변화하는 대기경계층의 특성에 따라서 대기확산의 양상도 크게 다르게 나타난다.

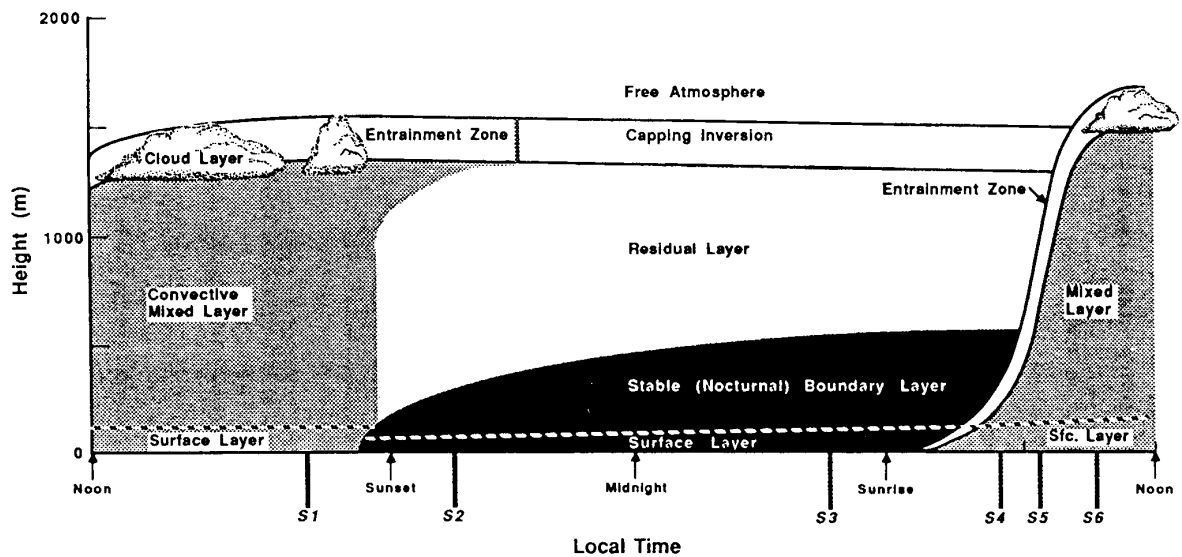


그림 1-3. 하루 중 대기경계층의 시간에 따른 변화

## 제 2 장 대기확산모델의 종류

### 2.1 모델의 분류

대기확산모델을 대상지역의 규모에 따라 나누는 방법은 여러 가지가 있지만 대체로 국지확산모델(local dispersion model), 지역대기질모델(regional air quality model), 지역간이동모델(interregional transport model)의 3가지로 나눌 수 있다.

국지확산모델이라는 용어는 아직까지 사용된 바가 없으므로 개념을 정립할 필요가 있다. 국지확산모델의 규모를 도로변이나 도시의 일부분 정도의 크기로부터 도시를 포함하는 크기까지로서 수평적으로 대략 100km 이내로 하고 지역대기질모델의 규모를 100km에서 1000km까지로 하며 지역간이동모델의 규모를 수평거리로 1000km에서 수천 km까지로 구분하기로 한다.

지역대기질모델은 우리나라의 수도권지역, 호남지역, 영남지역 등의 지역을 대상으로 하며 주로 지역 내의 광화학오염을 연구하는데 사용되며 지역간이동모델은 장거리이동 모델(long range transport model)이라고도 하며 주로 산성우의 생성과 이동을 연구하는데 사용된다. 지역대기질모델과 지역간이동모델을 사용하는 데는 전문적인 지식이 필요하므로 모델 전문가가 주로 사용하며 사용빈도도 비교적 많지 않다. 한편 국지확산모델은 개개의 도시나 좁은 지역에 적용되므로 사용빈도도 많고 또한 비전문가가 사용하는 경우도 많게 된다.

확산모델 전반에 걸쳐서 모델의 적용대상과 요구되는 기능을 개괄하고 확산모델을

분류하여 특징을 기술하였다. 미국에서 개발된 모델들의 일부는 우리나라에서도 흔히 쓰이고 있으나 대기오염물질의 확산은 그 지역의 기상조건과 지형조건에 의존하므로 미국과 같이 평탄한 지형에 적합하게 개발된 모델을 우리나라와 같이 삼면이 바다로 둘러싸인 반도이며 산악이 많은 복잡한 지형에서 그대로 쓰는 것은 문제가 있다. 그러므로 우리나라의 지형과 기상특성에 적합한 모델을 선택하거나 개발할 필요가 있다(장영기와 송동웅, 1995; 김용국과 이종범, 1992).

[표 2-1] 대기확산 모델의 분류

방법	모델	비고
이론	가우시안플룸모델	가우시안플룸식 사용
	퍼프모델	가우시안퍼프식 사용
	상자모델	상자내에서의 물질 수지
	라그랑지안모델	이동좌표계상의 농도
	오일러리안모델	3-D 고정좌표계상의 농도
기간	단기모델	단기간 평균농도( 1 - 24시간 )
	장기모델	장기간 평균농도(계절평균 또는 년평균농도)
규모	도로변모델	수평거리 < 1km
	국지모델	수평거리 < 10km
	도시모델	수평거리 < 100km
	지역모델	수평거리 < 1000km
	지역간모델	수평거리 > 1000km
지형	평탄지형모델	평탄지역
	복잡지형모델	복잡지형(계곡, 분지 등)
	해안가모델	해안지역 또는 해상
물질	분진모델	1차 입자상물질 또는 2차생성 에어로졸
	비반응물질모델	반응성이 낮은 기체
	광화학모델	광화학반응물질
	산성강하물모델	건성침착 또는 습성침착
상태	정상상태모델	정상상태를 가정
	비정상상태모델	기상조건 또는 배출조건 시간변화 고려
배출원	점오염원모델	발전소, 소각장등 대규모 굴뚝
	면오염원모델	주택지, 상업지역 등 다수의 소형 오염원
	선오염원모델	도로상의 자동차 배출
	복합오염원모델	점, 면, 선 오염이 복합되어 있는 지역

## 2.2 대기 분산방정식

대기 중에 배출된 오염물질의 분산 (dispersion)은 바람을 따라서 풍하지역으로 이동하는 이류(wind convection)에 의한 분산과 난류 운동에 의한 확산(diffusion) 이동으로 크게 구분된다. 이와 같이 이류 및 확산에 의한 오염물질의 분산현상을 물질수지

(material balance) 개념을 이용하여 유도된 **분산방정식**으로 나타내면 아래와 같다.

$$\underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_I + \underbrace{U \frac{\partial C}{\partial x}}_{II} + \underbrace{V \frac{\partial C}{\partial y}}_{III} + \underbrace{W \frac{\partial C}{\partial z}}_{IV} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial C}{\partial x})}_{III} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial C}{\partial y})}_{III} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial C}{\partial z})}_{IV} + S \quad (2-1)$$

I 항 : 오염물질이 시간에 따른 변화를 나타내는 항

II 항 : 이류에 의한 오염물질의 이동을 나타내는 항

III 항 : 난류 확산에 의한 오염물질의 이동을 나타내는 항

IV 항 : 오염물질이 반응에 의한 생성 및 소멸을 나타내는 항

(2-1)식에 의하면, 대기 중에서 오염물질의 농도는,  $C(x, y, z)$ , 대기 기상상태 및 지형 조건에 따라서 변하는 바람장( $U, V, W$ ) 및 난류확산계수( $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$ )와 오염물질의 반응식을 알면, 이론적으로 계산이 가능하다. 그러나 시시각각 변하는 바람장과 그에 따른 난류확산계수를 추정하는데는 현실적으로 많은 어려움이 있다. 또한 오염물질의 대기 반응과정이 매우 복잡하기 때문에 몇몇의 특정 오염물질을 제외하고는 그 반응과정을 현재 완전히 이해하고 있지 못하다.

따라서 사용목적에 따라서 여러 종류의 대기분산모델이 이용된다. 먼저 오염물질의 분산을 계산할 때에 바람장과 오염물질 분산을 동시에 계산하는 **바람장모델** (prognostic model)이 있다. 이 모델은 지형과 대기조건에 따른 바람장 운동방정식을 추가로 풀어서 바람장을 계산하기 때문에 비교적 정교하나, 계산과정이 복잡하고, 많은 노력과 비용이 요구된다. 따라서 바람장모델은 주로 연구를 목적으로한 특수한 경우에만 제한적으로 사용된다. 한편 기상관측을 통해서 기상조건이 주어진 경우에는 바람장을 알기 때문에 바람장을 별도로 계산할 필요는 없고, 단지 위의 분산 방정식을 주어진 배출조건에 따라서 농도를 계산하면 된다. 이와 같은 모델을 **진단모델** (diagnostic model)이라 하고, 이 진단모델은 간단하고 모델 예측의 정확도도 비교적 높기 때문에 일반적인 널리 이용된다. 본 장에서는 (2-1)식의 분산방정식을 관측된 바람장 조건하에서 분산을 계산하는 진단모델을 중심으로 서술하고자 한다.

## 2.3 가우시안 연기모델 (Gaussian Plume Model)

대기오염물질의 분산을 계산하는데 가장 많이 사용되는 모델이 가우시안 연기모델이다. 가우시안 연기모델은 모델식이 간단하면서도 대기분산현상을 비교적 정확히 계산할 수 있기 때문에 현재 대기 환경 영향평가 및 대기질 대책수립에 널리 이용되는 모델이다.

### 2.3.1 가우시안 연기모델 유도

먼저 그림 2-1(a)에 나타난 바와 같이 점오염원에서 배출되는 오염물질의 연기가 분산되는 형태를 고려해보자. 이 때에 바람이 불어 가는 **풍하** (downwind)지역을  $x$ -방향으로

좌표를 설정하고, 주 바람과 수평방향으로 직교하는 **풍횡** (crosswind) 방향을 y-방향으로, 지표면과 수직한 **연직** (vertical) 방향을 z-방향으로 좌표를 설정한다. (2-1)식이 복잡하여 엄밀해가 존재하지 않으므로 엄밀해를 구하기 위해서 아래와 같은 가정을 고려하여 (2-1)식을 간략화 한다.

(가우시안 모델에 도입된 가정)

- ① 연기의 분산은 **정상상태** (steady state)이다. 정상상태에서는 시간에 따라서 농도 및 기타 기상조건 등이 변하지 않으므로  $\partial C / \partial t = 0$ 이다.
- ② x-방향을 주 바람 방향으로 고려하면, y-방향(풍횡방향)의 풍속은  $V = 0$ 이다.
- ③ 연직방향의 풍속 (W)은 통상 수평방향의 풍속(U)보다 상대적으로 크기가 작기 때문에 연직방향의 풍속을 무시한다. 즉  $W \doteq 0$ .
- ④ x-방향으로 오염물질의 이동은 주로 이류에 의한 이동량 ( $U \partial C / \partial x$ )이 난류확산에 의한 이동량 ( $\partial / \partial x K_{xx} \partial C / \partial x$ )보다 상대적으로 크기 때문에 x-방향으로 난류확산에 의한 이동량을 무시할 수 있다. 즉  $\partial / \partial x (K_{xx} \partial C / \partial x) \doteq 0$ .
- ⑤ 연기내 대기반응은 무시한다. 즉  $S = 0$ .
- ⑥ 난류확산계수는 일정하다.
- ⑦ 풍속 U는 일정하다. 일반적으로 풍속은 고도에 따라서 증가하나, 가우시안모델에서는 일정하다고 가정한다.

위의 가정들을 도입하여 (2-1)식을 간략화 하면 다음과 같다.

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = K_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (2-2)$$

(2-2)식에 의하면, 연기는 풍하지역인 x-방향으로 이류에 의한 이동을 하면서 y- 및 z-방향으로는 난류확산에 의해서 대기분산이 이루어진다는 것을 의미한다. (2-2)식은 편미분방정식이므로 엄밀해를 구하기 위해서는 경계조건이 요구된다. 그 엄밀해는 경계조건에 따라서 다르게 구해지므로 먼저 그림 2-1(a)과 같이 좌표(0, 0, 0)에 위치한 점오염원에서 배출되는 연기분산을 고려하면, 이 때 엄밀해는 아래와 같다 (Seinfeld, 1986).

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4 \pi x (K_{yy} K_{zz})^{1/2}} \exp\left[-\frac{y^2}{K_{yy}} \frac{U}{4x}\right] \exp\left[-\frac{z^2}{K_{zz}} \frac{U}{4x}\right] \quad (2-3)$$

여기서 Q(q/s)는 오염원에서 연속적으로 단위시간당 배출되는 오염물질 배출량이고, U는 배출원에서 주변 대기 풍속이다. 한편 (2-3)식은 농도분포가 y- 및 z-방향에 대해서 각각 가우시안(Gaussian) 분포를 나타내기 때문에 **수평분산 표준편차** ( $\sigma_y$ )와 **연직분산 표준편차** ( $\sigma_z$ )를 아래와 같이 각각 정의함으로서 연기농도에 대한 가우시안 분산식으로 나타낼 수 있다.



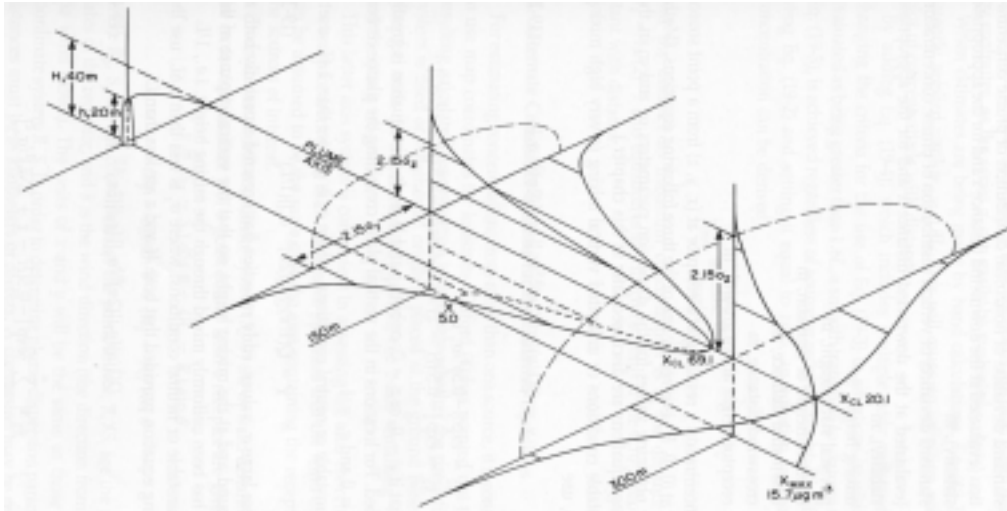


그림 2-1(a). 지표면 ( $z=0$ )에서 연기 분산

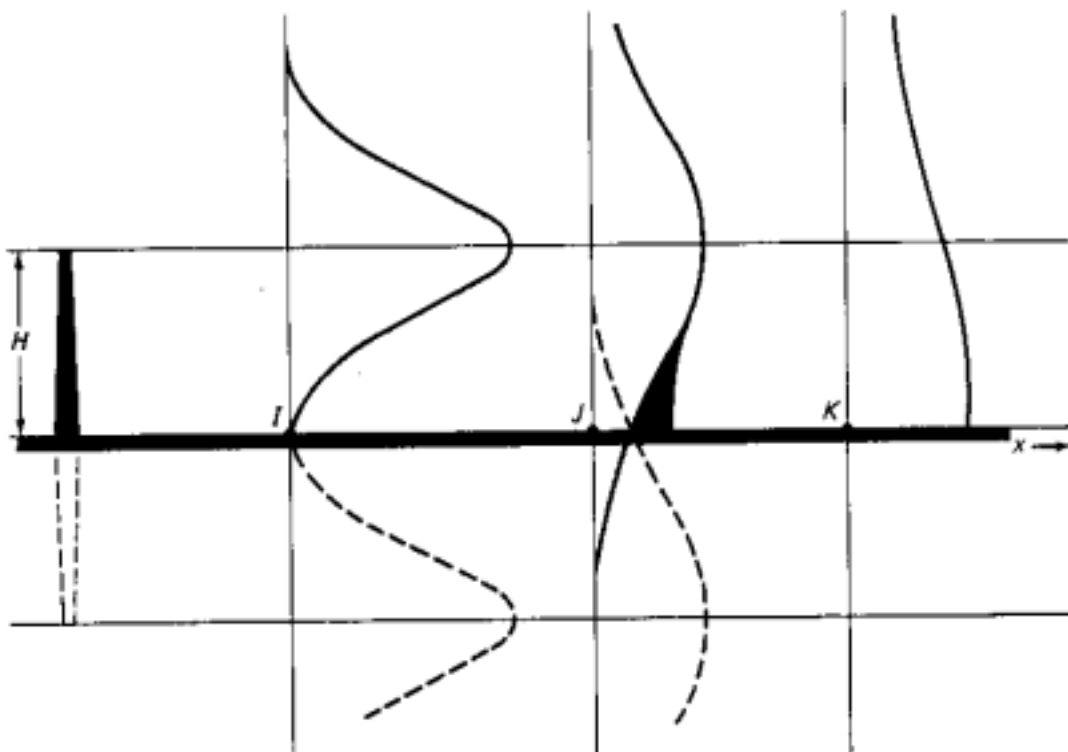


그림 2-1(b). 지표에서 연기가 반사되어 지상에서 중첩

(수평 및 연직 분산계수)

$$\sigma_y^2 \equiv \frac{2 K_{yy} x}{U}, \quad \sigma_z^2 \equiv \frac{2 K_{zz} x}{U} \quad (2-4)$$

(가우시안 분산식)

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 \pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{z^2}{2 \sigma_z^2}\right] \quad (2-5)$$

위 식은 점오염원에서 배출된 오염물질이 주위에 오염물질의 분산을 방해하는 요소가 없을 때에 연기분산의 형태가 가우시안 분포를 가지면서 풍하지역으로 분산되는 것을 나타낸다. 그림 2-1(a)에 나타낸 연기의 분산을 설명하면 다음과 같다. 연기의 최대농도는 연기 중심선에서 나타나고, 연기 중심선에서 농도는 연기가 풍하지역으로 바람을 따라 이동하면서 풍향 및 연직방향의 난류확산에 의해서 분산이 일어나면서 점차 감소한다. 이에 따라서 연기의 분산폭도 점차 풍하지역으로 이동하면서 넓어진다. 연기가 풍하지역으로 이동하면서 중심선에서 최대농도가 감소하고, 연기분산폭이 증가하는 것은 (2-4)식에서  $x$ 가 증가함에 따라서  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 가 증가하는 것으로 쉽게 설명할 수 있다.

이를 **가우시안 연기모델** (Gaussian Plume Model)이라 하고, 농도 계산시 수평 및 연직 방향의 분산 표준편차와 풍속을 알면, (2-5)식으로부터 농도를 계산할 수 있다. 표준편차 값들은 대기조건에 따라서 변하는데 계산방법은 2.3.2에서 논하기로 하자.

### 2.3.1.1 지표면에서 연기 배출시 농도 계산

한편 그림 2-1(b)와 같이 점오염원이 지표면에 위치할 경우에는 지표에서 침착이 일어나지 않는다고 가정하면, 지표에서 연기가 반사되어 지상에서 중첩이 된다. 따라서 농도는 지표면이 없는 경우의 2배가된다. 즉

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{z^2}{2 \sigma_z^2}\right] \quad (2-6)$$

### 2.3.1.2 굴뚝에서 연기 배출시 농도 계산

굴뚝에서 배출되는 연기 온도는 주변의 대기온도보다 높아 **열부력** (thermal buoyancy)이 있고, 또한 배출가스 속도에 의한 **관성력** (momentum)에 의해서 실제 굴뚝 높이보다 더 높게 상승한다. 이 때에 최종적으로 연기가 상승한 높이를 **유효굴뚝높이** (effective stack height,  $H_e$ )라하고 이는 **굴뚝높이**( $h_s$ )와 **연기상승높이**( $\Delta h$ )의 합으로 표시된다. 즉 굴뚝에서 배출된 연기는 그림 2-2(a)에서 보여주듯이 유효굴뚝높이( $H_e$ )까지 상승한 후에  $z = H_e$  지점에서부터 분산이 일어난다고 가정할 수 있다. 굴뚝의 유효높이를 계산하는 방법은 2.3.4에서 설명한다.

이 때의 연기농도는 배출원 좌표가  $z$ -방향으로  $H_e$ 만큼 연직 이동한 지점에서 가우시안 분포를 가지므로 (2-5)식에서  $z$ 대신에  $(z-H_e)$ 를 대입하면 된다.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 \pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{(z - H_e)^2}{2 \sigma_z^2}\right] \quad (2-7)$$

식에서  $U$ 는 굴뚝 배출구에서 주변 대기 풍속이다.

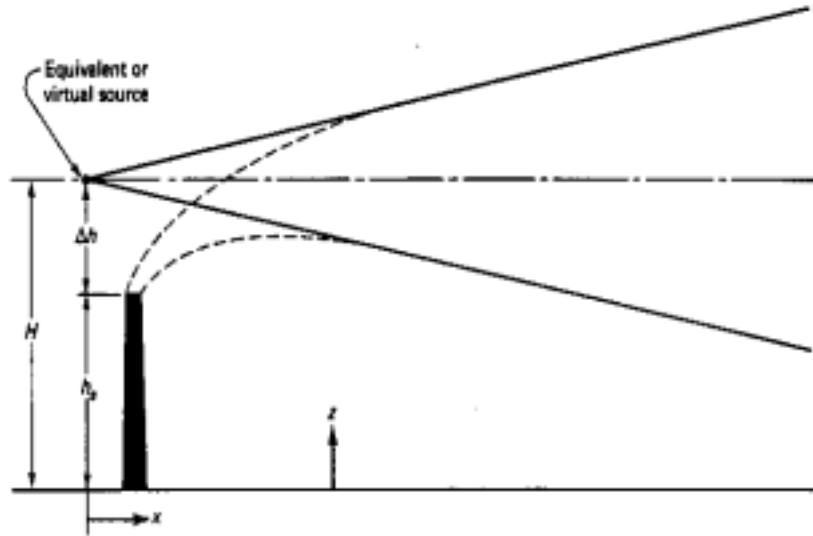


그림 2-2(a) 굴뚝에서( $z = H_e$ ) 배출된 연기의 분산

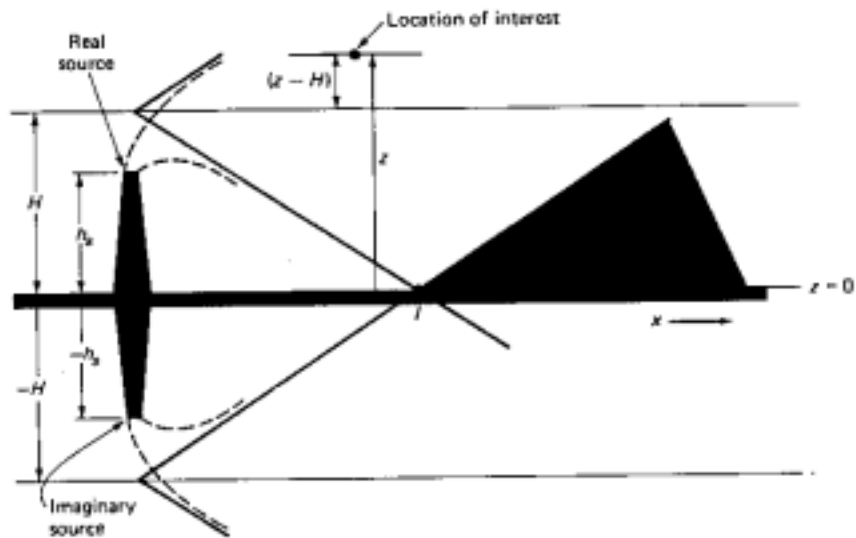


그림 2-2(b) 굴뚝연기의 지표 반사

한편 굴뚝에서 배출된 굴뚝연기는 대기 중에서 분산되다가 연기가 지표에 도달하면 그림 2-2(b)에 나타난 바와 같이 지표면에서 반사된다. 이 때에 농도를 계산하기 위해서 가상의 배출원을 지하  $z = -H_e$  지점에 있다고 가정하면, (2-7)식에서 계산한 농도와 지하에 위치한 가상 배출원에서의 농도를 합하면 지표반사시 연기농도를 계산할 수 있다.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 \pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right] \left( \exp\left[-\frac{(z - H_e)^2}{2 \sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + H_e)^2}{2 \sigma_z^2}\right] \right) \quad (2-8)$$

### 2.3.1.3 착지농도 계산

연기농도 분포에서 수용체에 가장 직접적으로 영향을 미치는 것은 지표면에서 농도인 착지농도 (ground level concentration)이다. (2-8)식에  $z = 0$ 을 대입하여 정리하면 착지농도,  $C(x, y, 0)$ 를 구할 수 있다.

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{H_e^2}{2 \sigma_z^2}\right] \quad (2-9)$$

또한 가장 높은 농도는 연기 중심선에서 나타나므로 중심선에서 착지농도,  $C(x, 0, 0)$ 는 (2-9)식에  $y=0$ 을 대입하여 구할 수 있다.

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{H_e^2}{2 \sigma_z^2}\right] \quad (2-10)$$

한편 앞에서 유도한 가우시안 연기모델은 모델식 유도에서 많은 가정이 도입되었기 때문에 적용범위에 한계가 있다. 즉 기상조건이 시간에 따라서 급격히 변하는 경우와 바람장이 일정한 속도로 형성되지 않고 공간에 따라서 서로 다를 경우, 연기내 오염물질이 서로 반응하는 경우에는 본 모델을 적용할 수 없기 때문에 정교한 다른 모델을 사용해야 한다.

그 밖에 면 및 선 오염원과 같은 여러 형태의 연기분산에 대해서도 앞에서 서술한 방법을 근거로 연기분산모델식들을 유도할 수 있는데 더 자세한 내용은 문헌(Hanna et al., 1982; Turner, 1970)을 참조하길 바란다.

## 2.3.2 분산 표준편차

앞에서 유도한 가우시안 연기모델식은 연기의 분산 형태가 표준편차의 값에 따라서 결정된다. 즉 표준편차가 크면 분산이 잘 일어난다. 따라서 가우시안 연기모델에서 대기조건에 따른 연기의 분산형태를 잘 결정하기 위해서는 분산표준편차가 대기기상조건을 잘 반영하도록 결정돼야 한다.

Pasquill(1974)과 Gifford(1976)는 대기상태를 대기안정도에 따라서 A, B, C, D, E, 및

F의 6개 안정도등급으로 분류하고 각각의 등급에 대해서 표준편차를 제시하였다. 표 2-2은 대기의 안정도의 분류를 나타낸 것이다. 또한 풍속, 일사량, 운량 등의 간단한 기상 관측자료로부터 안정도등급을 결정하는 것은 표 2-3에 있다. 각각의 대기안정도등급에 대해서 풍하거리에 따른 **수평분산 표준편차( $\sigma_y$ )**와 **연직분산 표준편차( $\sigma_z$ )**는 그림 2-3 및 2-4에 나타내었다. 그림을 살펴보면, 표준편차 값은 풍하거리가 증가할수록 커진다. 이는 표준편차를 나타내는 (2-4)식에서도 알 수 있고, 풍하거리에 따라서 연기의 분산폭이 증가한다는 것을 의미한다.

Pasquill-Gifford의 분류는 실제 대기조건과 연기분산과의 관계를 잘 나타내고 있다. 예로서 낮에 바람이 약하고, 일사량이 많으면, 태양복사열에 의해서 지표가 쉽게 가열되어 대기경계층이 불안정해지므로 대기 안정도 등급은 매우 불안정한 등급인 A등급이다. 이 때에는 난류확산운동이 활발하므로 연기분산도 매우 잘 일어난다. 그림 2-3와 2-4에서 알 수 있듯이 분산표준편차의 값들도 가장 크게 나타난다. 한편 밤에 구름이 없으면, 지표면이 복사냉각에 의해서 쉽게 냉각되므로 지표부근에 강한 복사 역전층이 형성되어 매우 안정한 대기경계층을 형성하므로 대기등급은 매우 안정등급인 F등급으로 분류된다. 이 때에는 난류확산운동이 억제되므로 대기분산이 미약하기 때문에 표준편차 값도 작게 나타난다. 한편 바람이 강할수록 기계적 난류가 증가하므로 중립대기조건 D등급으로 분류된다.

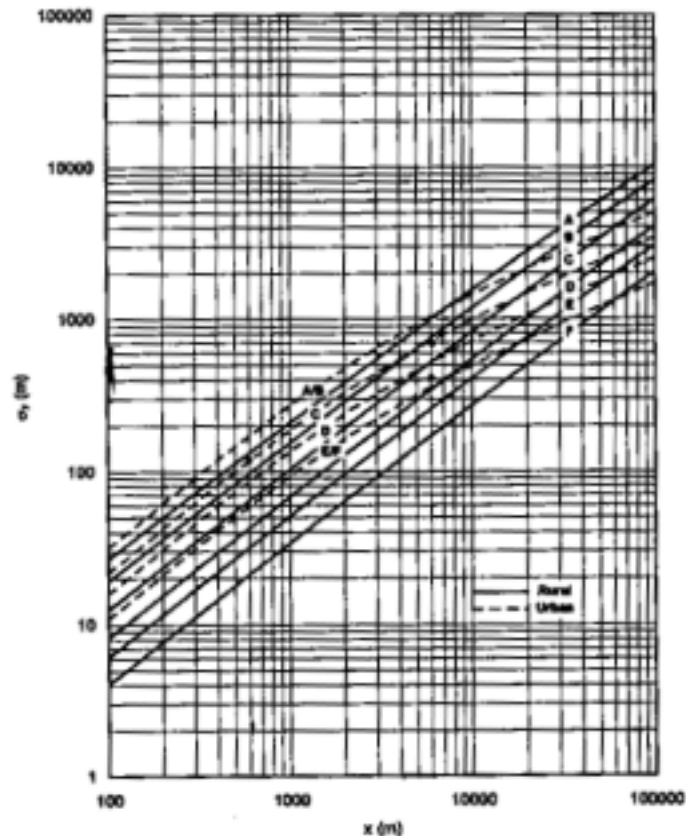


그림 2-3. 안정도등급에 따른 수평분산 표준편차( $\sigma_y$ )

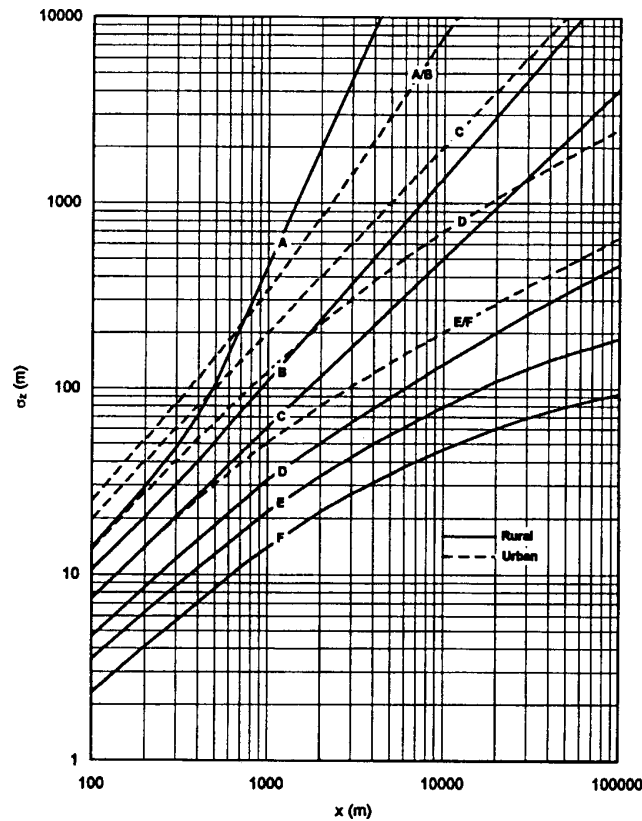


그림 2-4 안정도 등급에 따른 연직분산 표준편차( $\sigma_z$ )

Pasquill-Gifford 안정도 등급의 분류는 간단한 기상자료로 가우시안 분산식에서 요구되는 분산표준편차를 간단히 산정할 수 있기 때문에 가우시안 분산모델에 주로 사용된다. 그러나 Pasquill-Gifford에 의한 분류는 평탄한 교외지역을 대상으로 하기 때문에 도시지역에서의 도시 열섬효과에 따른 분산 형태의 차이를 고려할 수 없다. 도시지역에서 분산표준편차의 계산에는 McElroy와 Pooler (1968)의 분산표준편차를 이용한다.

한편 앞에서 설명한 Pasquill-Gifford의 분산표준편차는 시료채취시간을 10분을 기준으로 작성되었기 때문에 위의 표준편차로 계산한 농도 값은 시료채취시간이 10분에 해당되는 농도이다. 이와 다른 시료채취시간에 대한 농도 값을 계산하기 위해서는 시료채취시간에 따른 보정이 요구된다 (Turner, 1970).

[표 2-2] 대기 안정도등급과 대기 안정도의 관계

대기등급	대기 안정도
A	매우 불안정
B	불안정
C	약한 불안정
D	중립
E	약한 안정
F	매우 안정

[표 2-3] 기상조건에 따른 대기 안정도등급 분류 방법

고도 10m에 서 풍속(m/s)	낮			밤	
	일사량			운량	
	강	중간	약	대부분 흐림	대부분 맑음
< 2	A	A-B	B	E	F
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

한편 그림 2-3와 2-4에서 분산표준편차를 읽는 것은 사람에 따라서 차이가 발생할 소지가 있고, 또한 수식모델을 computer로 계산시 불편하므로 Martin(1968)은 분산표준편차를 아래의 식으로부터 계산하는 방법을 제시하였다.

$$\sigma_y = a x^b, \quad \sigma_z = c x^d + f \quad (2-11)$$

식에서 x의 단위는 km이고,  $\sigma_y$  및  $\sigma_z$ 의 단위는 m이다. 식의 상수 값들은 대기안정도와 풍하거리에 따라서 변하는데 그 값들은 표 2-4에 있다.

[표 2-4] (2-11)식에서 대기 안정도등급별로 풍하거리에 따른 상수 값.

대기안정도 등급	a	b	x < 1 km			x > 1 km		
			c	d	f	c	d	f
A	213	0.894	440.8	1.941	9.27	459.7	2.094	-9.6
B	156	0.894	106.6	1.149	3.3	108.2	1.098	2.0
C	104	0.894	61.0	0.911	0	61.0	0.911	0
D	68	0.894	33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13.0
E	50.5	0.894	22.8	0.678	-1.3	55.4	0.305	-24.0
F	34	0.894	14.35	0.740	-0.35	62.6	0.180	-48.6

### 2.3.3 최대착지농도 계산

오염원에서 배출된 오염물질이 주변지역에 미치는 영향을 해석할 때에 가장 관심을 갖는 것은 특정 배출원에 의해서 주변지역의 농도가 최대 얼마 증가할 것이며, 또한 이 최대농도가 나타나는 지점이다. 이와 같이 중요한 의미를 갖는 최대착지농도를 계산하는 방법은 아래와 같다.

일반적으로 불안정 또는 중립 안정도의 대기 상태인 경우에는 표준편차의 비( $\sigma_y/\sigma_z$ )가 일정하다. 이를 이용하기 위해서 (2-10)식을 다시 나타내면 아래와 같다.

$$C(\sigma_z) = \frac{Q}{U \pi \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_z} \right)} \frac{1}{\sigma_z^2} \exp \left[ - \frac{H_e^2}{2 \sigma_z^2} \right] \quad (2-12)$$

식에서 농도는 Q, U, 및  $\sigma_y/\sigma_z$  가 상수이므로 농도는 오직  $\sigma_z$  의 함수이다. 따라서 최대 농도 값과 착지점을 구하기 위해서 미분학의 최대값 이론을 이용한다.  $C(\sigma_z)$ 를  $\sigma_z$ 로 미분하여  $dC/d\sigma_z = 0$ 인  $\sigma_z$ 를 구하면 아래와 같다.

$$\sigma_z = \frac{H_e}{(2)^{\frac{1}{2}}} = 0.707 H_e \quad (2-13)$$

연기의 유효굴뚝높이로부터 최대농도가 발생하는  $\sigma_z$ 을 식에서 계산하고, 그림 2-4를 이용하여  $\sigma_z$ 에 해당되는 x값을 읽으면, 이 x값이 최대농도 착지점( $x_{\max}$ )이다. (2-12)식에 (2-13)식을 대입하여 정리하면 아래와 같이 최대착지농도( $C_{\max}$ )를 구할 수 있다.

$$C_{\max} = \frac{0.1171 Q}{U \sigma_y \sigma_z} \quad (2-14)$$

한편 최대착지농도가 유효굴뚝높이와의 상관관계는 (2-13)식을 (2-14)식에 대입하여 정리하면 구할 수 있다.

$$C_{\max} = \frac{2 \times 0.1171 Q}{U} \left( \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \right) \left( \frac{1}{H_e^2} \right) \approx K \left( \frac{1}{H_e^2} \right) \quad (2-15)$$

식에서 K는 상수를 의미한다. 최대착지농도는 대략적으로 유효굴뚝높이의 자승에 반비례하는 것을 알 수 있다. 유효굴뚝높이가 2배로 증가하면, 최대착지농도는 1/4로 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 연기의 유효굴뚝높이가 대기오염물질의 피해를 최소화 할 수 있는 매우 중요한 변수임을 쉽게 짐작할 수 있다.

### 2.3.4 유효굴뚝 높이 계산

굴뚝에서 배출된 연기가 열부력(buoyancy) 및 관성력(momentum)에 의해서 상승하는데 상승높이는 굴뚝조건 및 대기조건에 따라서 큰 편차를 보인다. 일반적으로 연기가 굴뚝에서 배출되는 조건 및 대기조건으로부터 안정도에 따라서 연기상승높이( $\Delta h$ )와 유효굴뚝높이( $h_e$ )를 계산하는 과정을 그림2-5에 나타내었다.

Holland 식

$$\Delta h = \frac{v_s d_s}{u} \left[ 1.5 + 2.68 \times 10^{-3} P_a \left( \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) d_s \right] \quad (2-16)$$

$v_s$  : 배출되는 연기속도  $d_s$  : 굴뚝 내경

$u$  : 굴뚝 끝에서의 풍속  $P_a$  : 대기압

$T_s$  : 배출되는 연기온도  $T_a$  : 대기온도



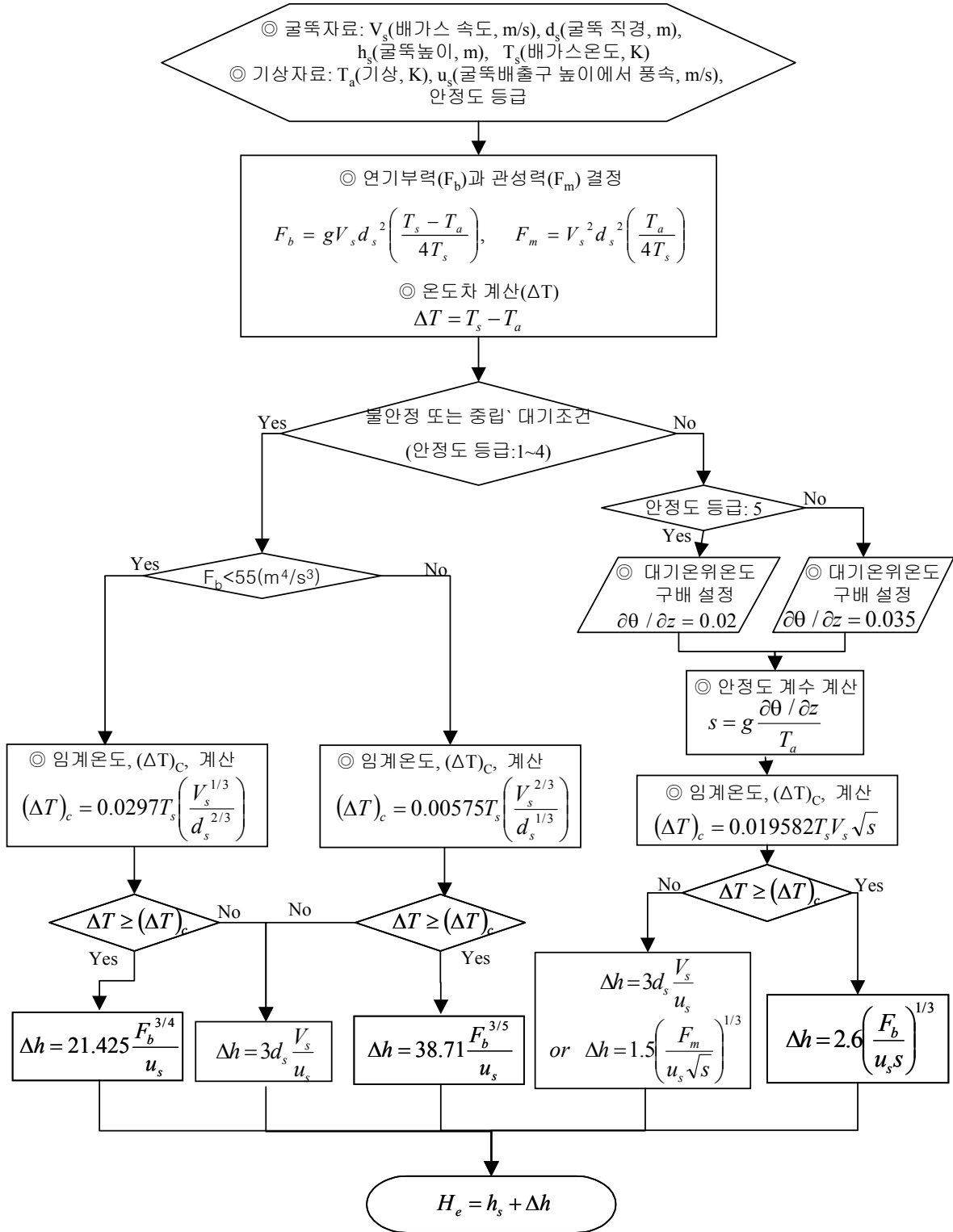


그림 2-5. 유효굴뚝높이 계산

### 2.3.5 굴뚝 및 건물 세류현상

만일 배출연기속도가 수평방향의 대기풍속의 1.5배보다 작은 경우에는 굴뚝연기가 연직 방향으로 상승하지 못하고 오히려 굴뚝높이보다 낮아지는 굴뚝세류현상(Stack-tip downwash)이 발생하는데 이 경우에 유효굴뚝높이는 실제 굴뚝높이보다 낮아진다.

$$h_e = h_s + 2 d_s \left( \frac{v_s}{u_s} - 1.5 \right) \quad \text{for } v_s < 1.5 u_s \quad (2-17)$$

또한 굴뚝주변에 건물이 존재할 때에도 굴뚝높이에 세심한 주의가 요구된다. 그림 2-7에 나타내었듯이 건물주위에는 와류지역이 형성된다. 통상 풍하지역으로 건물높이의 5-10배에 이르는 지역에 와류가 형성되고, 연직방향으로는 건물높이의 2배에 해당되는 높이까지 와류가 형성된다. 만일 굴뚝이 건물주변에 위치하고, 이 와류지역내에 배출연기가 혼입되면, 연기가 상승하지 못하고, 와류지역으로 혼입되는 건물세류현상 (building downwash)이 발생한다. 통상 이와 같은 건물 세류현상을 방지하기 위해서는 굴뚝의 높이( $h_s$ )를 주변 건물높이의 2.5배 이상 높게 설계한다.

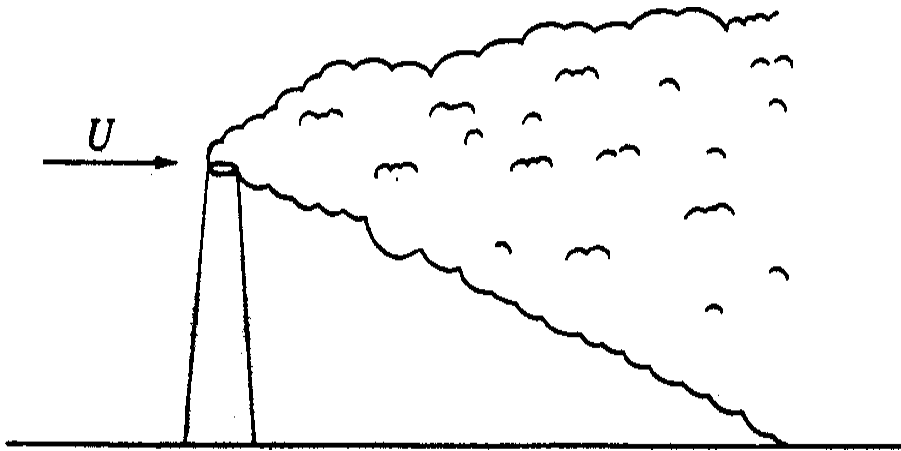


그림 2-6. 굴뚝 세류현상

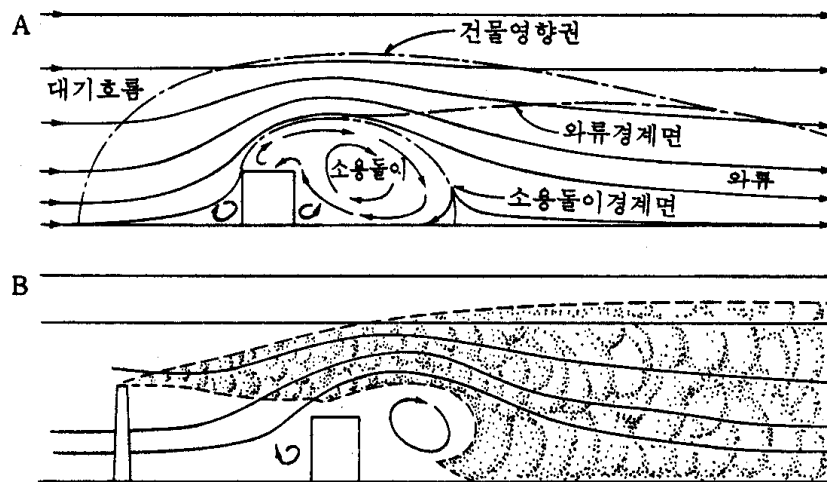


그림 2-7. 건물 세류현상

### 2.3.6 가우시안 모델의 계산 예제

#### <예제 1>

화력발전소에 굴뚝높이가 100m이고, 배출연기온도는 300 C이다. 또한 배출연기속도는 30m/sec이며, 굴뚝내경은 4m이다. 주변 대기의 온도는 20 C이고, 굴뚝 끝에서 풍속 5m/s이며, 대기 압력은 1000 mbar이다. 이 때의 연기의 유효굴뚝높이를 Holland식을 이용하여 계산하여라.

(풀이)

(2-16)식을 이용하면,

$$\Delta h = \frac{v_s d_s}{u} \left[ 1.5 + 2.68 \times 10^{-3} P_a \left( \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) d_s \right]$$

예제에서 주어진 값들을 대입하면,

$$\begin{aligned} \Delta h &= \frac{30m/s \times 4m}{5m/s} \left[ 1.5 + 2.68 \times 10^{-3} \times 1000 \times \left( \frac{573 - 293}{573} \right) \times 4 \right] \\ &= 162m \end{aligned}$$

그러므로 유효굴뚝높이는  $H_e = h_s + \Delta h = 100m + 162m = 262m$ 이다.

#### <예제 2>

예제 1의 화력발전소의 굴뚝에서 SO<sub>2</sub>의 배출량(Q)이 200g/s라면, 이 때에 연기중심선을 따라서 풍하지역으로 2km 떨어진 지점에서 착지농도(mg/m<sup>3</sup>)를 계산하여라. 단, 대기 안

정도등급은 C등급으로 가정한다.

(풀이)

연기중심선을 따라서 풍하지역으로 2km인 지점에서 착지농도는  $C(x = 2000m, 0, 0)$ 는 (2-10)식에서 계산할 수 있다. 즉

$$C(x=2000m, 0, 0) = \frac{Q}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{H_e^2}{2 \sigma_z^2}\right]$$

여기서 굴뚝조건은  $H_e = 262m$ 이고,  $Q = 200 \times 10^3 \text{ mg/sec}$ 이며,  $U = 5 \text{ m/s}$ 이다. 한편 그림 2-3에서 안정도등급이 C등급이고, 풍하거리  $x = 2000m$ 일 때에  $\sigma_y$ 을 읽으면,  $\sigma_y = 205m$ 이다. 마찬가지로 방법으로 그림 2-4에서  $\sigma_z$ 을 읽으면  $\sigma_z = 120m$ 이다. 이 값을 식에 대입하면,

$$C(x=2000m, 0, 0) = \frac{200 \times 10^3 \text{ mg/s}}{\pi \times 5 \text{ m/s} \times 205 \text{ m} \times 120 \text{ m}} \exp\left[-\frac{262^2}{2 \times 120^2}\right] = 0.04776 \text{ mg/m}^3$$

<예제 3>

예제 1 및 2와 같은 조건하에서 풍하지역으로 2km 떨어지고 연기중심선에서 풍횡지역으로 250m 위치한 지점에서 착지농도를 구하라.

(풀이)

(2-9)식과 (2-10)식을 관찰하면,

$$\begin{aligned} C(x=2000m, y=250m, 0) &= C(x=2000m, 0, 0) \times \exp\left(-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right) \\ &= 0.04776 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \times \exp\left(-\frac{250^2}{2 \times 205^2}\right) = 0.0227 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

<예제 4>

예제 1-3의 배출조건에서 최대착지농도와 최대농도 착지점을 계산하여라.

(풀이)

먼저 최대 착지농도 착지점을 구하기 위해서 (2-13)식에서 최대농도 착지점에 해당되는  $\sigma_z$ 을 구한다. 즉

$$\sigma_z = 0.707 H_e = 0.707 \times 262m = 185.2m$$

이 때에  $\sigma_z = 185.2m$ 이고, 안정도등급 C에 해당되는 풍하지점(x)을 그림 2-4에서 읽으

면,  $x = 3000m$ 이고, 이 지점이 최대농도 착지점이다. 즉  $x_{max} = 3000m$  이다.

한편 최대농도 착지점  $x_{max} = 3000m$ 이므로 이 지점에서  $\sigma_y$ 값을 그림 2-3에서 읽으면,  $\sigma_y = 310m$ 이다.

위에서 구한 값들을 (2-14)식에 대입하여 계산하면,

$$C_{max} = \frac{0.1171 Q}{U \sigma_y \sigma_z} = \frac{0.1171 \times 200 \times 10^3 \mu g/m^3}{5m/s \times 185.2m \times 310m} = 0.0816 \frac{mg}{m^3}$$

## 2.4 장기모델 (Long term model)

장기모델에서는 월, 계절, 및 연간 기상조건을 종합하여 작성된 기상종합빈도함수 (joint frequency function of meteorological data)를 기상입력자료로 하며, 아래의 가우시안 sector 평균 방정식을 이용하여 농도를 계산한다.

$$C(x, y, z) = \frac{K}{\sqrt{2 \pi R \Delta \theta'}} \sum_{i,j,k} \frac{Q f S V D}{u_s \sigma_z} \quad (2-18)$$

위 식에서  $i$ 는 풍속 분류,  $j$ 는 풍향 분류,  $k$ 는 안정도 분류를 각각 나타내는 하첨자이고,  $Q$ ,  $V$ ,  $D$ ,  $u_s$ , 및  $\sigma_z$ 은 단기모델에 관한 확산식인 식(2-1)과 의미는 동등하나, 단지 장기모델에서는 미리 분류된 특정 풍향, 풍속, 및 안정도에 해당되는 값이다. sector 평균 모델은 sector를 22.5도 간격으로 분류하고, 이 각도 구간 내에서는 각도 방향으로 농도는 균일하다고 가정하기 때문에 인접한 sector내의 경계에서 각도 방향으로 농도 차이가 크게 나타난다. 이를 보정하기 위해서 sector간 smoothing function인  $S$ 를 사용한다. 한편 기상종합빈도함수( $f$ )는 풍향, 풍속, 운량, 운고, 기온 등의 지표기상요소에 의해서 계산되는 확률 빈도 함수이다.

## 2.5 퍼프 모델

퍼프(puff) 모델은 그림 2-8에 나타난 바와 같이 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기를 작게 잘라서 각각의 연기덩어리(puff)를 이동, 확산시켜서 농도를 계산한 후 모든 연기덩어리의 농도를 종합하여 대상지역의 농도분포와 시간변화를 계산하는 모델이다. 보통 굴뚝 1개당 1시간에 수개의 퍼프를 배출한다.

각각의 연기덩어리의 중심(puff center)은 그 연기덩어리가 위치한 지점과 해당시각의 풍향, 풍속에 의하여 이동되며 연기덩어리의 중심에서 확산에 의하여 연기가 퍼지는 형태는 정상분포(Gaussian distribution)를 이룬다는 가정 하에 임의의 시간간격별로 농도분포를 계산한다(이종범, 1999; 조창래, 1993).

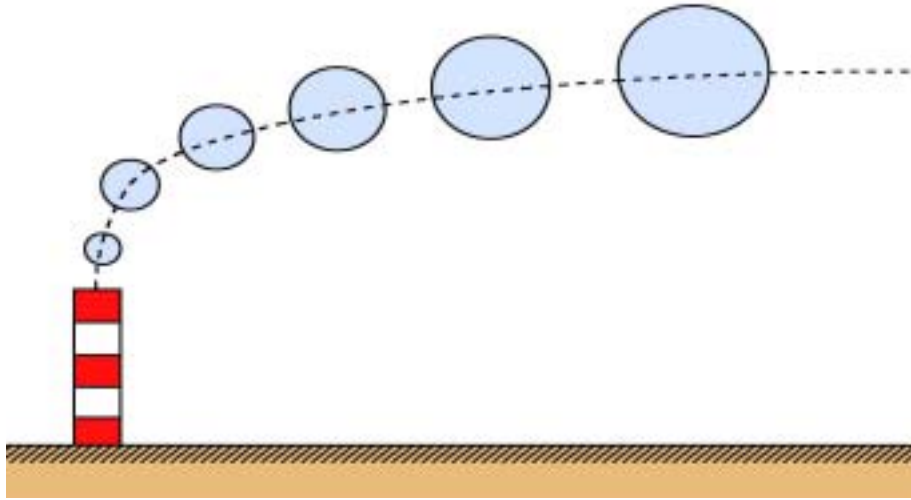


그림 2-8. 굴뚝에서 배출되는 오염물질의 확산을 계산하는 퍼프모델

굴뚝에서 배출된 puff은 바람을 따라서 3차원 공간을 이동하는데 그 puff의 중심위치는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} x(t + \delta t) &= x(t) + \delta t U(t) \\ y(t + \delta t) &= y(t) + \delta t V(t) \\ z(t + \delta t) &= z(t) + \delta t W(t) \end{aligned} \quad (2-18)$$

여기서  $x$ 와  $y$ 는 서로 직각의 관계를 갖는 수평방향의 좌표를 나타내고,  $z$ 는 연직방향의 좌표를 의미한다.  $U$ ,  $V$ 는  $x$ ,  $y$  방향으로의 평균바람의 속도를 나타내고  $W$ 는 연직방향의 속도이다.  $\delta t$ 는 입자의 이동에 대한 시간구간이다.

배출된 PUFF은 바람장을 따라서 이동하면서, 아래의 확산식에 의하여 PUFF의 크기가 성장한다.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g \exp\left[-\frac{d_a^2}{2\sigma_x^2}\right] \exp\left[-\frac{d_e^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (2-18)$$

여기서,  $g$ 는 PUFF가 지표면 및 혼합층에서 반사되는 항을 나타낸다.

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{H_e + 2ih}{(2\sigma_z)}\right)^2\right] \quad (2-19)$$

$C$ 는 수용점에서 지표농도,  $Q$ 는 오염물질 배출량,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ 은 확산계수이고,  $h$ 는 혼합층

높이,  $d_a$  및  $d_c$ 는 PUFF 중심으로부터 거리이다. PUFF 모델의 대상영역은 수십 m부터 수백 km까지이고, 본 모델을 성공적으로 수행하기 위해서는 정밀한 3차원 바람장 자료가 요구되는데 이를 위해서는 바람장 모델인 MM5 등의 기상 전처리 program이 추가로 요구된다. 기상변화에 따른 모델별 수행능력을 비교해 보고자 정상상태만을 고려할 수 있는 가우시안 모델과 비정상상태를 고려할 수 있는 PUFF 모델을 동일한 입력조건을 사용하여 계산을 수행한 후 결과를 나타내었다.

퍼프모델은 시간에 따른 풍향, 풍속의 변화와 풍향, 풍속의 지역차이를 고려할 수 있으며 시간에 따른 퍼프의 배출량변화도 고려할 수 있다. 그러므로 플룸모델이 정상상태모델인데 비하여 퍼프모델은 비정상상태모델로서 해륙풍 순환과 같은 풍향변화(비정상 상태)를 나타내는 지역에 유용한 모델이다. 따라서 퍼프모델은 우리나라와 같이 삼면이 바다로 되어 있고 도시나 공단 등이 해안지역에 위치하여 해륙풍 순환의 영향을 받는 경우에 적합한 모델이다.

모델영역은 수km에서 수백 km에 이르며 퍼프모델을 적용하여 수천km의 장거리에 대하여 계산한 경우로서 러시아의 체르노빌 핵발전소의 방사능물질의 확산과 걸프전쟁 시 쿠웨이트 유전 화재에 의한 매연확산에 적용한 경우 등이 있다.

이 모델은 원래 점오염원을 대상으로 하지만 초기의 수평확산폭을 넓게 지정함으로써 면오염원도 취급할 수 있다. 또한 대상지역 내의 고정 배출원으로부터 배출된 대기오염물질의 농도예측시 오염물질이 풍하측으로 수송되면서 부력에 의한 확산, 건성 및 습성침착(dry and wet deposition) 등에 의한 영향을 고려할 수 있다. 그러나 대기중에서의 화학반응을 고려하지 못하므로 오존 등 반응성 물질에는 적합하지 못하다.

## 2.6 라그란지안 입자 확산모델

### (LPDM, Lagrangian Particle Dispersion Model)

최근에 소각로나 발전소 굴뚝들과 같은 점오염원에서 배출되는 오염물질의 확산을 계산하기 위해서 LPDM을 사용하는 것이 일반적인 추세이다. LPDM은 오일러리안 모델에 비해 확산 계산시 수치격자를 사용하지 않으므로 오차를 유발하는 수치확산이 없어 계산의 신뢰도가 비교적 높은 편이다. LPDM은 그림10에 나타낸 바와 같이 점오염원에서 일정한 비율로 가상의 입자를 배출하고, 이 입자에 실제 오염물질의 배출량과 입자의 배출비율을 고려하여 개개의 입자에 오염물질의 질량이 부여된다. 이 배출된 입자는 대기 중에서 난류 바람장을 따라서 이동하게 되면, 그 입자 위치를 입자의 중심을 좌표로 한 라그란지안 좌표를 이용하여 추적하게 된다. 위와 같이 바람장을 따라서 입자가 각각 이동하면 계산 영역내 분포하는 입자들로부터 농도를 계산한다(구윤서, 1999a, 1999b).

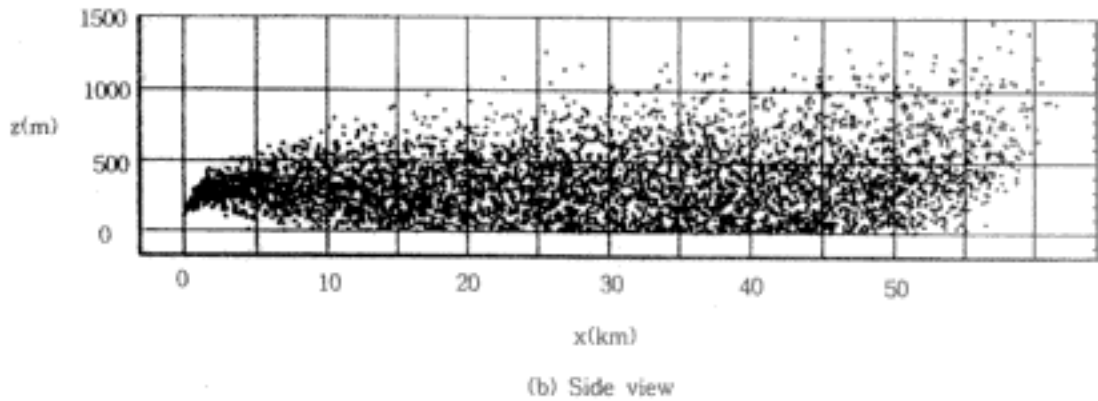


그림 2-9 굴뚝에서 배출되는 오염물질의 확산을 라그랑지안 모델로 모사한 사례

LPDM은 대기중의 입자상, 가스상의 오염물질을 입자로 가정하여 각각의 입자가 평균바람장 (Mean wind field)과 난류바람장(Turbulent wind field)에 의해 움직인다고 생각하여 그 입자들의 궤적을 계산하는 Markov process이다. 오염원에서 배출된 각 입자들이 바람에 의해 대기내 3차원 공간에서 이동하는 입자의 중심좌표는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$x(t + \delta t) = x(t) + \delta t [U(t) + u'(t)]$$

$$y(t + \delta t) = y(t) + \delta t [V(t) + v'(t)]$$

$$z(t + \delta t) = z(t) + \delta t [W(t) + w'(t)]$$

여기서  $x$ 와  $y$ 는 서로 직각의 관계를 갖는 수평방향의 좌표를 나타내고,  $z$ 는 연직방향의 좌표를 의미한다.  $U$ ,  $V$ 는  $x$ ,  $y$  방향으로의 평균바람의 속도를 나타내고  $W$ 는 연직방향의 속도이다. 소문자에 상첨자는 난류성분을 의미한다.  $\delta t$ 는 입자의 이동에 대한 시간구간이다.

LPDM을 적용하기 위해서는 공간적으로 3차원 평균바람장 및 난류바람장이 입력자료로 요구되기 때문에 LPDM 수행에 앞서 먼저 정교한 바람장 모델을 수행해야 한다.

## 2.7 광화학 모델

대기 중에서 질소화합물이나 탄화수소계열의 유기화합물들은 햇빛을 받으면 여러 복잡한 형태의 광화학 반응을 거쳐서 2차오염물질로 변형된다. 특히 도시지역에서 오존 농도를 예측하기 위해서는 광화학 반응을 고려하여 모델계산을 수행하여야 한다. 이 경우에는 앞에서 기술한 가우시안모델, 상자모델을 이용할 수 없고, 여러 오염물질의 복합적인 반응기구를 고려하여 오염물질보존방정식인 아래의 방정식을 유한차분법 (finite difference method)을 이용하여 수치해를 구한다.



$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial C}{\partial z}) - u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w \frac{\partial C}{\partial z} + R + D + S$$

여기에서 C는 농도,  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ 는 각각 X, Y, Z축 방향의 확산계수, u,v,w는 각각 풍속의 X, Y, Z축 방향의 성분, R은 대기 중에서의 화학반응항, D는 침적에 의한 농도 변화항, S는 배출에 의한 오염물질 공급항이다.

대상으로 하는 이 모델은 3차원 공간을 고정좌표계(Eulerian coordinate)의 여러 개의 격자(grid)로 세분하여 각 격자별로 이류, 확산, 화학반응 과정을 계산하여 오염농도의 3차원 분포와 시간변화를 계산하는 모델이므로 이 모델을 오일러리안모델(Eulerian model)이라고도 한다.

대기 중에서의 화학반응에 의하여 생성되는 오존과 같은 2차 오염물질의 농도를 산출하기 위하여서는 대기 중에서의 화학반응을 고려할 수 있는 모델이다.

대표적인 광화학 계산모델은 미국 System Application Inc. (1996)에 의해서 개발되었고, 미국 환경보호청에서 추천하는 모델인 UAM-V (Urban Airshed Model-V)가 있다. 이 모델은 기상 관측대에서 측정한 바람장이나, 또는 다른 바람장모델에서 계산한 바람장을 입력자료로 하여 38개의 화학물질에 대해서 92개의 반응기구를 고려하여 도시지역의 오존농도 및 기타 질소화합물의 농도를 계산하는 것이다.

## 2.8 Box model

상자모델(Box model)은 가장 간단하게 어느 지역에서 배출량, 혼합고, 및 평균풍속으로부터 그 지역의 평균농도를 계산할 수 있는 방법이다. 예로써 서울과 같은 도시지역을 대상으로 하여 그림 11과 같은 가상의 상자를 구성할 수 있다. 상자의 높이는 대상지역의 혼합고( $H_m$ )에 해당되고, 대상지역은 폭을 W, 길이를 L로 나타낼 수 있다. 이 때에 상자 내에서는 혼합이 매우 잘 일어나서 상자내 농도(C)는 균일하며, 바람은 x 방향에서 균일하게 U라는 속도로 불고 있다고 가정하면, 상자를 경계로 오염물질에 대한 물질수지식이 아래와 같이 성립한다.

$$\begin{aligned} (\text{상자내 오염물질의 축적량}) &= (\text{오염물질의 유입량}) - (\text{오염물질의 유출량}) \\ &\quad + (\text{오염물질의 배출량}) + (\text{반응에 의한 오염물질 생성량}) \\ &\quad - (\text{반응에 의한 오염물질 소멸량}) + (\text{침착에 의한 오염물질 소멸량}) \end{aligned}$$

식의 유도를 간편하게 하기 위해서 오염물질의 반응과 침착을 무시하고, 각각의 항목을 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$(\text{상자내 오염물질의 축적량}) = LWH_m \frac{dC}{dt}$$

$$(\text{오염물질의 유입량}) = WH_m U C_{in}$$

$$(\text{오염물질의 유출량}) = WH_m U C$$

$$(\text{오염물질 배출량}) = WL q, \text{ 여기서 } q \text{는 단위 면적당 오염물질 배출량(g/m}^2\text{-s)이다.}$$

따라서 물질수지식은 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$LWH_m \frac{dC}{dt} = WH_m U C_{in} - WH_m U C + WL q$$

여기서  $C_{in}$ 은 상자로 유입되는 공기 중에 오염물질의 배경농도(background concentration)를 의미한다. 풍속, 혼합고, 및 상자내의 배출량과 농도가 시간에 따라서 변하지 않는다고 가정하면, 축적항은 무시할 수 있다. 따라서 상자내 농도는 아래와 같다.

$$C = C_{in} + (LQ) / (H_m U)$$

상자모델은 공간적으로 농도분포를 파악할 수 없고, 시간에 따른 농도변화를 유추할 수 없지만, 어느 특정지역에서 배출량, 풍속, 및 혼합고가 그 오염물질 농도에 미치는 영향을 간단히 계산할 수 있는 장점이 있다.

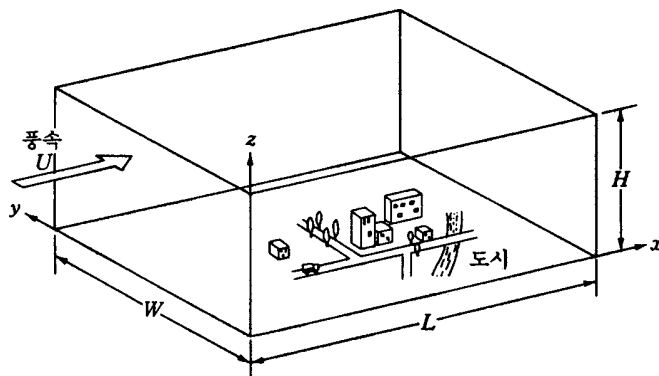


그림 2-10 상자모델의 도식도

## 2.9 경험적 모델

### 가. 통계 모델(Statistical model)

통계적 모델은 앞에서 설명한 가우시안 연기모델과는 다르게 기상조건 및 지형조건과 대기농도와의 물리적 인과관계에 기초하지 않고 단지 측정한 오염물질의 농도를 근거로 오염물질의 농도에 영향을 주는 인자인 기상조건(풍향, 풍속, 일사량 등)과의 통계적 상관관계를 유추해내는 경험적 모델의 일종이다. 즉 기상자료를 독립변수로 하고, 측정한 농도 값을 종속변수로 하여 독립변수와 종속변수간의 상관관계를 통계적 기법을 이용하여 구하는 것이다. 따라서 이 통계적 모델을 수행하기 위해서는 기존에 측정한 기상자료 및 오염물질 농도에 관한 자료가 확보돼야 가능하다. 통계적 상관관계를 유추하는 기법에는 중회기분석법, 신경망모델 등의 여러 방법이 이용된다.

통계모델의 예로서 Wolf와 Liou(1978)는 미국 북동부지역에서 중회기분석법을 이용하여 하루중의 최고오존농도 예측모델을 아래와 같이 제시했다.

$$[O_3] = 0.871[O_3]_p + 2.443T_m - 1.605T_p + \frac{361}{U_a} - 67.76$$

여기서,

$[O_3]$  : 당일 최고 오존농도

$[O_3]_p$  : 전일 풍상측의 최고오존농도

$T_m$  : 당일 최고기온

$T_p$  : 전일 풍상측의 최고기온

$U_a$  : 혼합층내 평균 풍속.

## 나. 수용모델 (Receptor model)

앞에서 기술한 가우시안연기모델은 배출원을 중심으로 하여 주위에 미치는 영향을 파악하는 **배출원 중심모델** (source-oriented model)이다. 따라서 입력자료로 배출원자료, 기상자료 및 지형자료를 요구한다. 이와 같은 자료가 완벽할 시에는 가우시안 연기모델이 비교적 정확하게 농도를 계산할 수 있다. 그러나 입력자료가 미비 시에는 모델의 정확성을 기대할 수 없다.

차선의 방법으로 개발된 것이 **수용체 중심모델** (receptor-oriented model)이다. 수용모델은 측정소에서 측정한 오염물질의 농도자료를 기초로 하여 역으로 수용체 농도에 미치는 배출원의 영향을 정량적으로 해석하는 것이다. 이 때에 대상오염물질은 대기 중에서 반응이 일어나지 않거나, 비교적 반응성이 낮은 오염물질(예로서 납, 구리, 카드뮴 등의 금속물질)을 대상으로 한다. 예로서 A라는 공업도시에 대기질 측정망에서 납을 분석하여 대기 중의 납농도를 측정할 수 있다. 한편 이 도시에 납을 배출하는 배출원은 자동차, 제련소, 페인트 공장, 축전기 공장이라면, 이 지점에서 검출된 납은 자동차, 제련소, 페인트공장, 축전기 공장에서 배출되었거나 또는 외부에서 이류에 의해서 유입된 것으로 생각할 수 있다. 이 경우에 여러 통계적 기법을 사용하여 각각 배출원이 검출된 납 농도에 미치는 기여도를 분석할 수 있다.

## 2.10 대기확산모델 종류 및 관련 Website

대기확산모델은 network를 통한 전산망에서 획득이 가능하다. 가장 많이 이용되는 것이 미국 환경보호청에서 유지 관리하고 있는 규제용 대기모델 지원센터(Support Center for Regulatory Air Model; <http://www.epa.gov/scram/>)이다. 이 곳에서 미국에서 많이 사용되고 있는 대기확산모델을 download받을 수 있고, 이와 더불어 모델 운용에 필요한 참고책자나 기상 및 배출원자료도 구할 수 있다. 한편 유럽지역에서는 유럽 대기질 센터(European Topic Centre/Air Quality; <http://www.etcaq.rivm.nl/>)에서 유럽

지역에서 주로 사용되는 대기확산모델과 그에 따른 여러 관련 자료들을 구할 수 있다.

한국에서는 환경부에서 Website(<http://www.moenv.go.kr/>)를 운영하고 있다. 이 곳에서는 확산모델의 자료는 없으나, 한국 주요지역에서 대기질 농도, 오염물질 배출량, 대기환경기준, 대기오염물질 배출기준 및 기타 관련 법규 등의 유용한 자료를 구할 수 있다.

현재 대기확산에 많이 사용되고 있는 대기확산모델의 일부를 간략한 설명과 함께 표 2-5에 나타내었다.

[표2-5]대기확산모델종류

모델	비고	기존 모델 예
가우시안플룸모델	가우시안플룸식 사용	ISCLT3, ISCST3, CTDMPPLUS
퍼프모델	가우시안퍼프식 사용	CALPUFF
상자모델	상자내에서의 물질 수지	PBM
라그란지안모델	이동좌표계상의 농도	LPDM
광화학모델	3-D 고정좌표계상의 농도	UAM-V

## 2.11 대기모델의 선정 및 적용과정

대기질 환경영향 평가에 일반적으로 많이 사용되고 있는 모델은 모두 앞에서 설명한 가우시안모델을 근거로 하여 작성된 computer 모델을 주로 사용하고 있다. 그러나 가우시안 모델의 적용이 어려운 특수 상황에서는 다른 종류의 확산모델이 사용되고 있다. 어느 모델이든지 대기질 평가를 위해서 사용할 때에는 다음과 같은 일반적인 모델 수행 과정을 거친다.

먼저 대상으로 하는 오염물질의 반응특성 및 침착성을 파악하고, 배출원 주변의 지형자료 및 배출원자료를 수집한다. 대상지역 또는 인접지역에서 측정한 기상자료도 수집하여 모델 수행에 필요한 입력자료를 완성한다. 위에서 수집한 입력자료를 바탕으로 대기질 계산에 사용할 모델을 표3를 참조하여 선정한다. 예로서 평탄한 지역에서 비반응성 오염물질의 확산을 계산하려면, ISCST 및 ISCLT모델이 적합하고, 복잡지형에서는 CTDMPPLUS모델을, 도시지역에서 오존을 계산하기 위해서는 광화학반응을 고려한 UAM-V모델을 설정한다.

이와 같이 선정한 모델에 입력자료를 이용하여 주변농도를 계산한 후에 계산결과와 주변의 대기오염 측정망이나 실제 몇 개의 대표적인 지점을 선정하여 측정한 농도와 비교, 검토하여 모델의 신뢰도를 확보한다. 만일 신뢰도가 낮을 경우에는 입력자료에 오류가 있는지 검토하여 교정한다. 이와 같은 검증과정을 거쳐서 신뢰도를 확인한 모델로 최종적으로 계산을 수행하여 대기질영향평가 및 대기대책 수립 등에 이용한다.

## 제 3 장 대기확산모델의 적용분야

대기오염확산모델이 사용되는 분야는 매우 광범위하며 사용목적에 따라서 요구되는 기능도 다양하다. 모델이 사용되는 분야를 다음과 같이 8개 분야로 나눌 수 있다.

### 3.1 국토의 장기 개발계획

신도시, 공업단지, 발전소, 기간도로망 배치계획 등 토지이용의 방향을 설정하는 국토의 장기개발계획 수립시 그에 따른 대기질 변화를 예측하고 대책을 강구하기 위하여 확산모델을 사용한다. 요구되는 기능은 1차 오염물질의 장기평균농도와 광화학오염물질의 단기농도(episode) 산출이다.

### 3.2 도시 및 공단지역의 대기질 개선대책

도시의 대기질개선을 위한 연료정책검토, 공해유발 공업구조의 조정, 교통기관 오염의 저감대책, 배출원별 기여도 산출, 대기질 측정망 배치계획 등을 위하여 확산모델을 사용한다. 요구되는 기능은 1차 오염물질의 장기평균농도와 광화학오염물질의 단기농도 산출이다.

### 3.3 대기오염 피해파악

대기오염으로 야기되는 분쟁조정을 위한 피해파악을 위하여 확산모델이 사용되며 요구되는 기능은 주로 장기평균농도 산출이다.

### 3.4 배출허용기준 설정

특정지역의 환경기준달성을 위한 최대 배출허용량 산출, 총량규제시 배출량 할당, 지역별 오염영향권 설정과 환경용량 산정 등을 위하여 확산모델을 사용하며 요구되는 기능은 주로 장기평균농도 산출이다.

### 3.5 환경영향평가

공업단지, 도시개발 등 각종 건설사업의 시행, 발전소, 매립장 및 소각장 건설에 따른 장래의 대기질을 예측하고 연료 전환, 굴뚝높이 및 위치 조정 등의 대안을 평가하기 위하여 확산모델을 사용하며 요구되는 기능은 장기평균농도와 단기농도 산출이다.

### 3.6 대기오염 예보제

대도시의 오존 농도 등 단기농도를 예측하기 위하여 확산모델을 사용하며 요구되는 기능은 광화학오염물질의 단기농도 산출이다.

### 3.7 유해물질 누출사고 대책

핵발전소의 핵누출 사고나 공장의 유해물질 누출사고에 대비하기 위하여 확산모델을 사용하며 요구되는 기능은 실시간의 농도분포 산출이다.

### 3.8 지역간, 국가간의 오염물질 출입

산성우 등 국가간의 대기오염물질의 장거리 수송에 따른 국제적인 문제에 대비하기 위하여 확산모델을 사용하며 요구되는 기능은 산성우와 건성침적량 산출이다.

## 제 4 장 최근 대기확산모델링 동향

최근의 대기확산모델링은 Computer의 용량 및 계산속도가 크게 향상되어 모델 계산에 큰 장애요인이었던 모델 계산속도에 의한 제한적 요소가 많이 제거되었다. 따라서 진보된 확산이론을 도입한 새로운 모델들이 많이 개발되고 있고, 그 중의 일부 모델은 2000년도부터 미국 EPA(환경보호청)에서 새롭게 추천하고 있다. 미국 EPA에서 추천하고 있는 모델의 특징을 중심으로 최근 확산모델의 동향에 대해서 논하고자 한다.

### 4.1 ISC-PRIME

ISC3(Industrial Source Complex - 3)모델은 1995년도에 미국 EPA에 의해서 새롭게 개정되어 최근까지 가장 널리 사용되고 있는 모델이다. ISC3모델은 정상상태의 가우시안 확산모델이며, 그 기본방정식은 아래와 같다.

이 모델은 배출량과 기상조건이 시간에 따라 변화하지 않는 정상상(steady state)를 가정하여 확산현상을 계산하므로, 대기흐름이 시간에 따라서 변화가 심하거나, 복잡한 화학반응을 고려하지 못하는 것이 단점이다. 그러나 계산과정이 비교적 단순하여 컴퓨터의 계산량이 적으며 입력자료도 간단하므로 사용이 용이한 장점이 있기 때문에 환경영향평가에 현재 국내외적으로 가장 많이 사용되고 있는 모델이다.

그러나 ISC3모델은 굴뚝 주위에 위치한 건물에 의해서 빌딩세류현상(Building downwash) 현상을 정확히 모사하기 못하는 단점이 있었다. ISC3 모델에서는 건물과 굴뚝간의 거리에 따른 연기확산이 차이가 발생하는 것을 고려할 수 없고, 또한 그림12에 있는 바와 같이 건물 주위에 형성되는 와류(wake)에 의해서 배출된 연기가 기울어지는 것 등을 고려할 수 없었다. 따라서 이러한 건물 주위에서 세류현상을 보다 정확히 고려할 수 있는 기능을 보완하여 개정된 모델이 ISC-PRIME(Industrial Source Complex - Plume RIse Model Enhancement Model)모델이다. ISC-PRIME모델은 풍동실험과 실제 대기확산 실험을 통해서 건물주위에서 발생하는 세류현상을 기존의 ISC3모델보다 정확

히 모사할 수 있다고 알려진 모델이다.

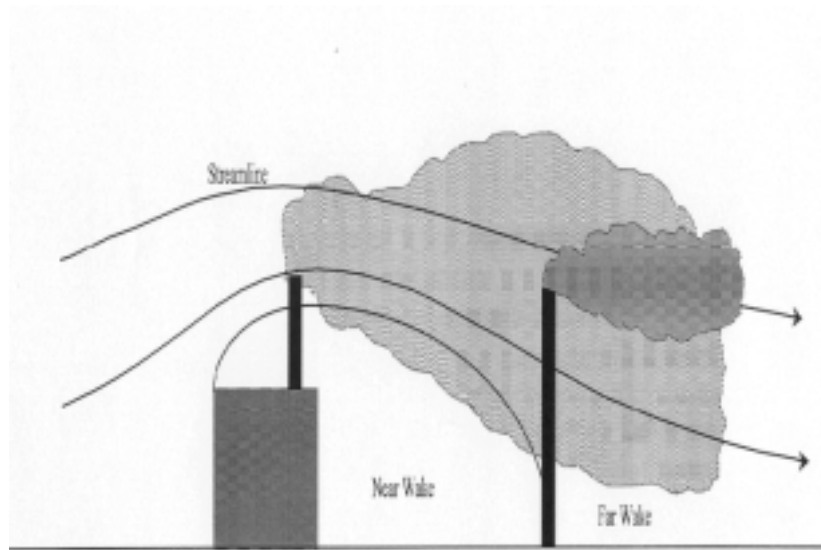


그림 4-1. 건물과 굴뚝의 위치에 따른 배출 연기확산 세류현상

## 4.2 AERMOD

AERMOD는 미국기상학회와 미국환경보호청이 공동으로 ISC3모델의 단점을 보완하기 위해서 개발한 확산 모델이다. ISC3모델에서는 공간적으로 수평연기확산계수( $\sigma_y$ ) 및 연직연기확산계수( $\sigma_z$ )가 일정하다는 가정을 사용하였다. 그러나 실제 대기에서는 고도에 따라서 그 값들이 크게 변하는 특성이 있다. 따라서 AERMOD에서는 고도에 따른 연기확산계수 및 풍속의 변화를 대기경계층 상사이론(similarity theory)을 이용하여 계산하여 확산모델에 반영하도록 개정된 모델이다. 즉 AERMOD는 ISC3모델이 가장 큰 단점이었던 대기상태가 공간적으로 균일하다는 가정을 보완한 모델이다. AERMOD는 기상처리용 program인 AERMET, 지형입력자료 작성을 위한 AERMAP, 그리고 확산계산을 위한 AERMOD로 구성되어 있다. AERMOD에서 사용하는 모든 용어 및 입력파일의 형태는 ISC3모델과 동일하게 구성하였기 때문에 ISC3모델에 익숙한 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 한 것이 특징이다.

## 4.3 CALPUFF 모델

퍼프모델(Puff model)은 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기를 잘게 나누어진 각각의 연기덩어리(puff)를 배출된다고 가정하고, 이 배출된 퍼프가 공간적 해상도를 갖는 바람장을 따라서 이동 및 확산이 이루어지면 퍼프가 미치는 영향을 종합하여 농도를 계산하는 모델이다. CALPUFF는 시간 및 공간에 따른 바람장의 변화를 퍼프에 이동에 고려할 수 있기 때문에 비정상상태(Unsteady state)의 모델이다. 따라서 앞에서 설명한 정상상태 모델인 ISC3-PRIME 모델이나, AERMOD보다 정확히 시간에 따른 풍향 및 풍속의

변화를 확산에 반영할 수 있는 장점이 있다. CALPUFF모델은 복잡지형에서 산곡풍이나, 해안가에서 해륙풍 순환과 같은 급격한 바람장 변화를 나타내는 지역에 유용한 모델이다. 또한 CALPUFF모델에서는 기존의 알려진 MESOPUFF에서 고려하지 못했던 해안가에서 Fumigation 현상 등을 고려할 수 있는 장점이 있다. 따라서 CALPUFF모델은 우리나라와 같이 삼면이 바다로 되어있고 도시나 공단등이 해안지역에 위치한 경우 해륙풍 순환의 영향을 받는 풍하측 농도 예측에 대하여 적합한 모델이다. CALPUFF모델의 대상 영역은 수백 km까지이고, CALPUFF모델을 성공적으로 수행하기 위해서는 정밀한 3차원 바람장자료가 요구되는데 바람장자료를 작성하기 위해서 바람장모델인 MM5등의 전처리 program이 추가로 요구된다.

#### 4.4 국내 현황

국내에서 조사된 바에 의하면 1997 및 1998년도에 대기환경영향평가서 작성 시에 가장 많이 사용된 모델은 TEM, Miller-Holzworth 모델로 나타났다. 그러나 최근에는 ISC3모델이 많이 이용되고 있고, 차량에 의한 오염도 계산에는 CALINE 모델이 사용되고 있다. 현재 국내에서 많이 사용되고 있는 모델의 대부분은 미국에서 개발된 것으로 국내 기상자료체계에 부적합하고, 국내와 같이 복잡지형 및 해안가에서 모델의 신뢰성에 대한 많은 의문점이 제기되고 있는 것이 사실이다. 한국대기환경학회를 중심으로 1999, 2000년도에 각각 개최된 Workshop을 통해서 국내 대기확산 모델링 문제점에 대해서 검토하고, 모델 개발 및 응용관한 폭 넓은 논의가 있었으나, 아직도 국내 실정에 적합한 모델 개발을 위해서 적극적인 예산 지원과 전문가 집단의 결집된 노력이 요구되고 있다.

## 제 5 장 대기확산모델링의 응용

최근 정보기술의 획기적인 발달로 실시간 개념이 도입된 환경관리시스템은 이미 해외에서 개발 완료되어 상용화 단계이고, 국내에서도 각종 사업장에서 대기오염, 해양오염, 재난방제 등 환경문제 발생 상황을 실시간으로 확인, 감시할 수 있는 환경관리시스템에 대한 요구가 확대되고 있는 실정이다. 최근 대기환경분야에서 주목을 받고 있는 것은 그림5-1에 나타난 바와 같이 실시간으로 기상 및 배출량자료를 입력받아 대기확산모델을 수행하여 주변에 미치는 영향을 해석하는 실시간 대기배출시설 종합관리시스템이다. 이 관리시스템은 소각장, 발전소, 매립장, 악취물질 배출업소 및 기타 유해가스 취급사업장에서 배출되는 대기오염물질이 주변에 미치는 대기환경 영향을 실시간으로 평가하여 대기배출시설을 효율적이고, 환경 친화적으로 운영하는데 중요한 핵심 기술이다. 또한 현재 실시간으로 굴뚝에서 오염물질 배출가스농도를 측정하고 있는 굴뚝 TMS 자료를 활용하여 사업장 주변지역에 미치는 오염도 영향을 파악하고, 조업환경을 제어할 수 있



도록 데이터를 제공함으로써 친환경적인 사업장 운영을 유도할 수 있을 뿐 아니라, 비정상적인 조업으로 인하여 과도한 오염물질이 배출되었을 경우, 오염지역을 예측하여 응급 대응조치를 수행할 수 있다. 그림 5-2 및 그림 5-3는 사업장 및 광역을 대상으로 실시간 모델링 기법을 이용하여 굴뚝 배출원에 대한 대기배출시설 종합관리시스템의 적용 사례를 나타낸 것이다. 이와 같은 실시간 관리 시스템을 도입하면 투명한 사업장 운영으로 사업장 주변에서 발생하는 민원을 근본적으로 해결할 수 있고, 또한 향후 효율적으로 총량제를 도입하여 환경친화적으로 대기환경을 관리할 수 있다.

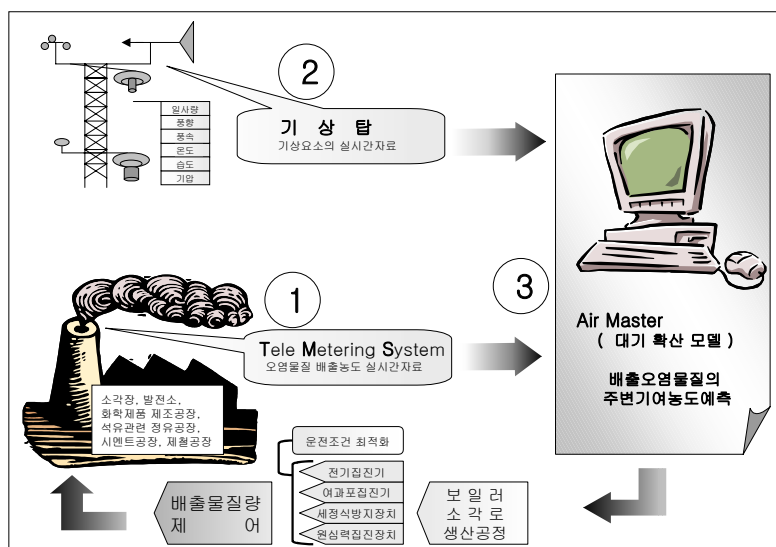


그림 5-1. 실시간 대기배출시설 종합관리 시스템 구성도

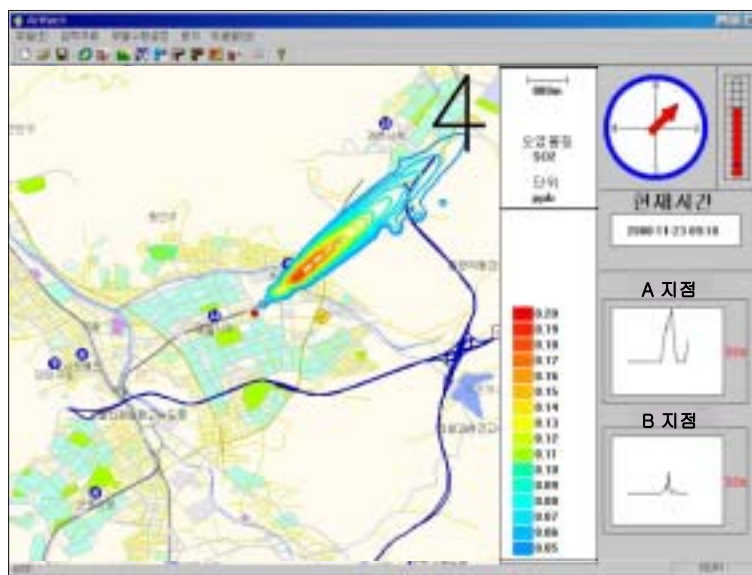
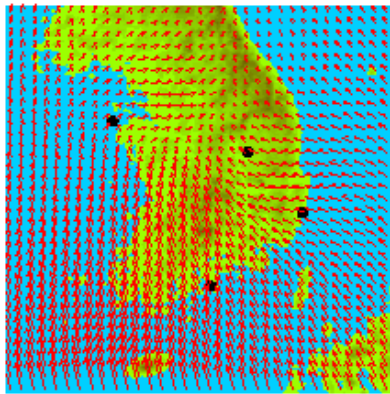
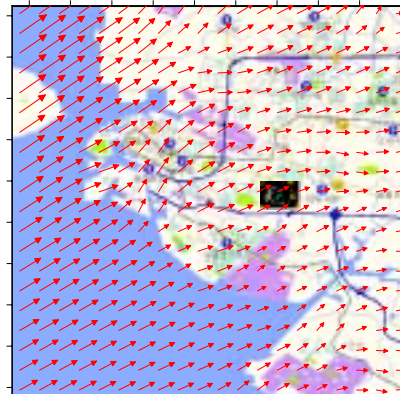


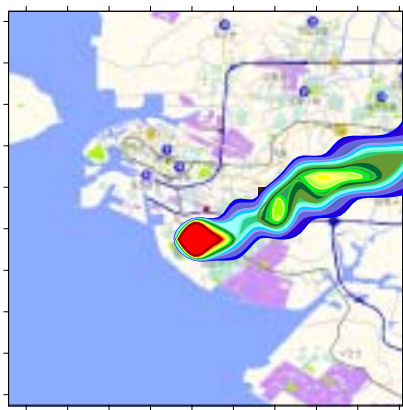
그림 5-2. 단위사업장(소각장)에서 실시간 관리시스템의 응용 사례



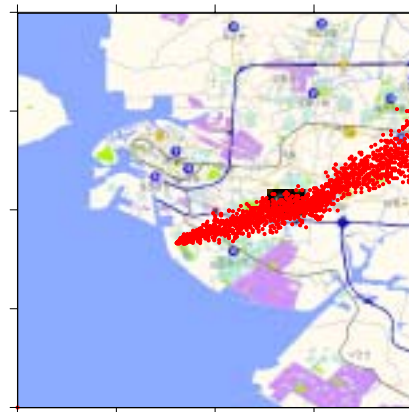
(a) 전국 규모 바람장



(b) 수도권 지역 상세 바람장



(c) Puff 모델링 결과



(d) Lagrangian 모델링 결과

그림 5-3. 광역 대상 실시간 관리시스템의 응용 사례

위에서 설명한 실시간 대기환경 관리시스템은 외국에서 이미 개발이 완료되어 실용화 단계이다. 프랑스에서는 대형 대기배출시설을 대상으로 실시간 대기환경관리시스템을 상업하여 판매하고 있고, 일본에서는 環境総合研究所(Environmental Research Institute)에서 SUPER MONITOR 라는 이름으로 실시간 지역별 대기환경관리시스템을 개발하여 市川市와 板橋区 (東京都)에서 적용하고 있다. 또한 대기오염측정망과 실시간 확산 모델링을 결합한 대기오염종합관리 시스템이 영국, 덴마크, 노르웨이, 스페인 등 인구의 밀집도가 높아 산업시설과 주거시설이 근접한 유럽지역을 중심으로 개발, 운영 중에 있다. 국내에서도 실시간 대기확산모델링 기법을 이용한 차세대 선진화된 환경관리 기법을 도입하면, 사업장 주변 민원을 해소하고, 효율적으로 대기환경을 관리할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 구윤서 외 9인 (2000) 대기확산모델링 software, AirMaster, 개발, 환경영향평가학회지, 9, 323-338.
2. 구윤서 (1999a) 라그랑지안 입자모델 개발, 대기환경학회지, 15, 673-681.
3. 구윤서 (1999b) 비평형 2.5 난류모델을 이용한 라그랑지안 입자모델 개발, 대기환경학회지, 15, 613-623.
4. 김기현, 구윤서 외 9인, 신제 대기오염개론, 향문사, 1999.
5. 김용국, 이종범 (1992) 대기안정도와 지형조건에 따른 풍향변동폭의 특성, 한국대기보전학회지, 8(2), 138-145.
6. 이종범 등(1999) 동북아 대기오염 장거리이동과 환경보전 협력방안에 관한 조사(VI), 국립환경연구원, pp494.
7. 장영기, 송동웅 (1995) 국내 대기오염모델링의 현황과 과제, 한국대기보전학회지, 11(1), 1-14.
8. 조창래 (1993) MESOPUFFⅡ모델을 이용한 수도권대기오염물질이 주변지역에 미치는 영향분석, 강원대학교 이학석사 학위 논문, 57pp
9. 한국대기환경학회, 대기모델링의 현황 및 모델링에 관한 Workshop, 1999.
10. 한국대기환경학회, 대기확산모델의 개발 및 응용에 관한 Workshop, 2000.

## [ 연구과제 ]

1. 대기의 연직구조는 기온분포에 기초하여 보통 4개의 권으로 나눌 수 있다. 이를 도시하고 각 권의 특징을 설명해 보자.
2. 최근에 대도시의 대기질은 선진국형으로 바뀌고 있다고 한다. 그렇게 생각되는 이유를 생각해 보자.

3. 대기오염확산모델을 분류하는 여러 가지 방법을 열거해 보자.
4. 대기오염확산모델의 활용분야를 열거하고 설명해 보자.
5. 가우시안 모델 적용의 한계점에 대해서 설명해 보자.
6. 퍼프 및 라그랑지안 모델의 특성에 대해서 생각해 보고, 모델수행에 필요한 입력자료의 구성에 대해서 생각해 보자.
7. 최근 미국 EPA에서 추천되고 있는 모델 종류 및 그 특성에 대해서 설명해 보자.
8. 실시간으로 대기확산모델을 환경관리에 이용할 수 있는 방법에 대해서 생각해 보자.