

연돌에서 분출되는 매연의 확산

Dispersion of the Plume Emitted From a Stack

유 정 열 * · 노 승 타 ** · 이 태 식 **

Jung-Yul Yoo, Sung-Tack Ro, Taik-Sik Lee

1. 서 론

근래에 이르러 환경은 많은 사람들의 관심이 되고 있다. 고도로 발달된 과학기술의 부산물로서 날로 더욱 심해지고 있는 환경오염은 에너지위기 만큼이나 심각하고 장기적인 피해를 우리 인류에게 끼칠 수 있으며 이의 극복 내지는 감소를 위해 온갖 노력이 기울여지고 있다.

이러한 환경오염 문제 중에 공기오염의 효과를 들 수 있는데, 이로 인하여 호흡기장애, 가시도의 감소, 동식물에 대한 피해, 산성 강우등의 절박한 문제들이 대두되고 있는 것이다.

공기오염의 원인이 되고 있는 전체 오염물질의 방출량을 방출원천별로 비교했을 때⁽¹⁾, 수송수단(이동오염원)에 의한 오염이 가장 크게 나타나고, 정치설비(고정오염원)에 의한 오염이 다음으로 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났으나, 문제가 많이 되고 있는 오염물질 중의 하나인 아황산가스의 방출량에 있어서는 정치설비에 의한 효과가 가장 두드러지게 나타나는 것으로 알려졌다. 그러므로 공기오염도의 환경기준치를 설정하여 각종 공장시설들에 대해서도 오염물질 방출량의 허용치를 제한할 필요가 있는 것이다.

고정오염원으로 인한 공기오염을 조절하기 위해서는 두 가지 기초적인 접근 방법을 채택

하고 있다. 첫째는 바로 오염원에서 공기오염물질의 방출량을 극소화시키는 것으로서, 적극적이고 완전한 가까운 방법이라고 할 수 있다. 그러나, 보다 소극적이기는 하지만 자연대기의 난류를 이용하여 오염물질이 위험한 농도로서 지면에 도달되기 전에 확산시켜 버리는 방법도 많이 연구되고 있다.

대기는 인위적으로 대기중에 방출된 많은 물질들을 희석하고, 분산시키며 파괴하는 큰 능력을 갖고 있으므로 이 방법으로서 어느 정도 방출량을 조절할 수 있는 것이다.

여기서는 우선 대기의 기상조건, 특히대기온도 변화율이 고도를 갖는 고정오염원으로부터 방출되는 연기의 확산에 어떤 영향을 미치는가를 고찰하고, 확산된 연기의 농도분포를 예측하기 위한 수학적 모형을 설정하는 방법을 보인다. 이와 같은 모형들에서는 대부분 실제연돌 높이에다 연기의 상승, Δh 를 더한 유효연돌 높이를 사용하는데, Δh 를 추정하는 여러 가지 방법들을 비교 검토한다. 다음으로 계산에 필요한 기상자료 및 확산계수들을 구하는 방법들에 대하여 간단한 제안설명이 주어진다. 마지막으로 전형적인 문제에 대한 계산예를 보임으로써, 이 보고서에서 건의 되었던 방법들이 어떻게 활용될 수 있는가를 예시하고자 한다.

2. 대기의 안정성

오염물질들을 대기 중에 확산시키는 데는 기후에 의한 영향이 매우 크게 작용하는데, 지구

* 서울대학교 공과대학 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

상의 기후는 태양으로부터의 복사열, 지구의 형상 및 운동, 지구의 대기와 지구표면의 지형동에 의하여 형성된다.⁽²⁾ 오염물질의 수송 및 확산에 있어서 기상조건이 어떤 영향을 미치며, 그에 따른 연기의 확산운동에는 어떤 종류가 있는가에 대해서는 여러 곳에서 광범위하게 취급되고 있으므로(예를 들면 Slade⁽³⁾, Smith⁽⁴⁾, Stern⁽⁵⁾ 등), 여기서는 다만 연기의 상승 및 분산을 나타내는 방정식들에 있어서 기본적으로 고려되어야 할 대기의 안정성에 대해서만 간단히 살펴보도록 한다.

여기서 대기의 안정성이란 수직방향 운동을 약화시키거나 강화시키는 경향을 의미한다. 또는 존재하고 있는 난류를 억제하거나 증가시키는 경향을 의미한다고도 말할 수 있다. 대기의 안정성은 바람의 전단, (wind shear)과 수직방향의 온도구조에 관계되는데, 일반적으로 후자를 사용하여 대기조건을 지시하고 있다.

2.1 건조 단열온도 변화율(Dry Adiabatic Lapse Rate)과 포텐셜 온도(Potential Temperature)

작은 체적의 공기가 대기 중에서 위로 배제될 때, 낮은 압력을 만나게 되어, 팽창하게 되고 그에 따라 온도가 내려가게 된다. 작은 체적의 공기가 상승하는 동안에 공기와 그 주위 사이에 열교환이 없다고 가정하면, 상승하는 동안의 공기의 냉각률을 이론적으로 계산 할 수 있는데*, 이것을 건조 단열온도 변화율(dry adiabatic lapse rate)이라고 정의하며, 온도를 T라고 표시하면 대략

$$\left(\frac{dT}{dZ}\right)_{\text{adia.}} \approx -\frac{1^\circ\text{C}}{100\text{m}} = -\frac{5.4^\circ\text{F}}{1000\text{ft}}$$

의 값을 갖는다. 실제로는 난류로 인하여 이론적으로 고립된 체적은 파괴되고 열교환은 반드시 발생되기 때문에 위의 가정에서 사용된 것과

같은 과정은 실제로 발생할 수 없으나, 건조 단열온도 변화율은 기상 상태를 연구하는데 있어서 매우 중요한 의미를 갖는다.

만일 건조한 공기 덩어리가 어떤 초기상태에서 1000mb의 표준 압력으로 단열적으로 이동되었을 때 얻게되는 온도를 포텐셜 온도(potential temperature)라고 하며 이것은 건조 단열온도 변화율과 밀접한 관계가 있다. 왜냐하면 고도에 따른 대기온도의 감소율이 $-1^\circ\text{C}/100\text{m}$ 인 대기는 고도에 따라서 일정한 포텐셜 온도를 갖기 때문이다. 고도에 따라서 포텐셜 온도가 증가한다면 대기는 안정하게 되고, 감소한다면 대기는 불안정하게 되며, 설명은 다음 절에서 주어진다.

2.2 대기온도 변화율(Environmental Lapse Rate)

수직방향의 실제온도 분포를 대기온도 변화율(environmental lapse rate)이라고 하며, 그림 2-1에 그 예들이 도시되어 있다.

(1) 초단열(Superadiabatic)

태양열이 강하게 쬐여지거나 찬 공기가 따뜻한 표면 위로 운반되는 날에는 고도에 따른 온도의 감소율이 통상 $-1^\circ\text{C}/100\text{m}$ 를 초과한다(따라서 음의 potential 온도 구배를 갖게된다). 즉 이 때는 위로 배제되었던 작은 체적의 공기의 밀도가 주위의 밀도보다 작게 되므로 상향운동을 계속하려는 경향을 갖게 된다.

그림 2-1a에 나타낸 초단열 조건은 강한 대류, 불안정성(instability), 난류성을 조장한다. 통상 초단열 조건은 지상 200m의 대기 구역에 국한되어 있다.

(2) 중립(Neutral)

대기중의 온도 감소율이 거의 건조 단열 온도 변화율과 동일한 경우를 중립 조건이라 하며, 이 조건 하에서는 배제된 공기 덩어리가 부력을 더 얻거나 잃지 않으려는 경향을 갖는다.

이 조건은 그림 2-1b에 표시되어 있으며 구름이 낀 날씨 및 적당하거나 강한 바람이 부는

* 계산과정은 참고문헌(6)의 pp. 158-161 또는 (7)의 pp. 79-80 등을 참조.

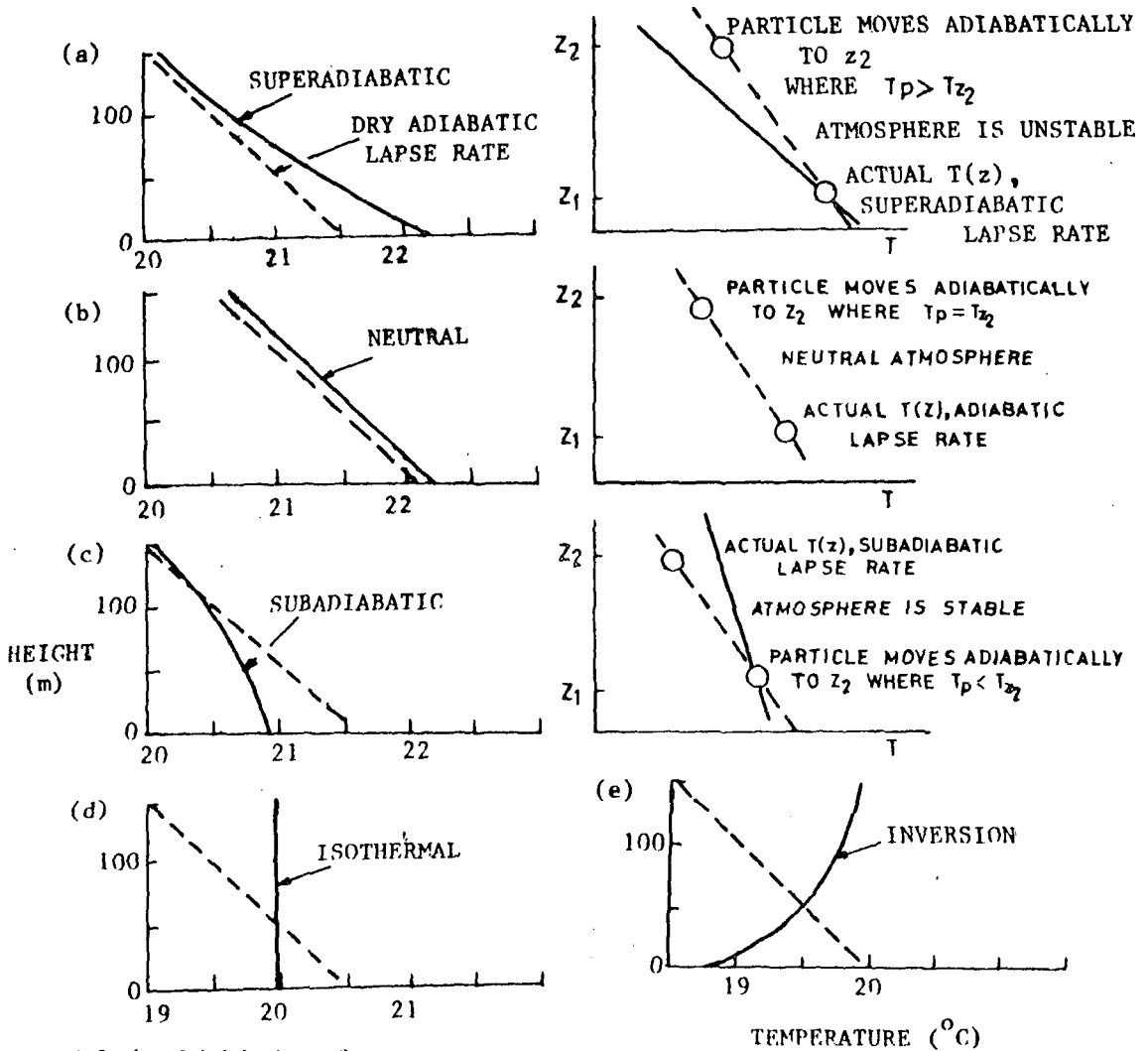


그림 2-1. 전형적인 온도구배.

전형적인 수직 온도 분포의 예들이 건조단열 온도변화율 ($-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)과 비교되었다. 점선은 건조단열 온도 변화율을 나타내는데 그 위치는 중요하지 않고, 단지 기울기만이 중요하다.

날씨와 관계가 있다.

(3) 아단열 (Subadiabatic)

대기중의 온도가 $-1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 보다 더 낮은 비율로 감소할 때는 대기는 안정성 (stability) 을 갖게 된다. (그림 2-1c ; 따라서 양의 포텐셜 온도 구배를 갖는다). 이 때는 위로 배제된 작은 공기 덩어리의 밀도가 주위의 밀도보다 커지므로 원래의 위치로 하강하려는 경향을 갖게 되는 반면, 아래로 배제된 작은 공기 덩어리의 밀도는 주위의 밀도보다 작아지므로 원래의 위

치로 상승하려는 경향을 갖게 된다.

(4) 등온 (Isothermal)

고도에 따른 주위의 온도가 일정할 때, 대기층은 등온이라 하며, 아단열 조건에서의와 같이 공기 덩어리의 수직운동을 저항하려는 경향이 있다 (그림 2-1d).

(5) 역전 (Inversion)

고도에 따라서 온도가 증가하는 안정된 대기층은 수직운동에 대하여 강한 저항을 하며, 따라서 난류를 억제하려는 경향이 있다. 그러므로

이 경우에는 연기의 분산이 매우 제한받게 되며, 공기오염에 있어서 매우 중요한 의미를 갖게 된다(그림 2-1e).

A 복사 역전(Radiation Inversion) 또는 표면 역전(Surface Inversion)

하루종일 날씨가 맑게 개인 날에는, 늦은 오전과 오후에 걸쳐서는 태양열로 인하여 지상의 온도가 높아지지만, 야간에는 차가운 밤 하늘로의 복사로 인하여 지면의 온도가 지면 근처의 대기 중의 온도보다 낮아진다. 이와 같은 현상을 복사 역전 또는 표면 역전이라하며 주로 야간에 형성되었다가 오전 중에 소멸된다.

B. 고층 역전(Elevated Inversion)

때때로 어떤 높이까지의 대기의 온도가 감소되다가, 그 위에서는 역전층으로 덮이고, 그보다 더 위에서는 다시 정상적으로 고도에 따른 온도 감소가 있게 된다. 이런 역전들은 다음과 같은 원인들로부터 발생된다. 첫째, 침강(subsidence)을 들 수 있는데, 이 때는 안티사이클론(anticyclone; 고기압 중심부)에서의 공기가 낮은 고기압 구역으로 서서히(예를 들면, 약 1000m/day) 하강함에 따라 압축이 되어서 그 온도가 상승하는 반면, 지표 근처의 공기는 덜 하강하게 되고 영향도 덜 받게 된다. 이 침강을 다른 관점에서 본다면, 안티사이클론의 변동리의 고기압 구역으로부터 흘러 나간 공기를 대체시키기 위해서 공기가 흘러 내리기 때문에 발생된다고도 할 수 있다. 맑게 개인 하늘은 주로 고기압 구역에서 볼 수 있기 때문에, 지표에서 복사 역전도 동시에 형성되는 수가 많다.

대기오염으로 유명한 Los Angeles 분지는 변함없는 안티사이클론인 태평양 고기압으로 인한 침강 현상이 자주 나타나는 데다, 동쪽과 북쪽으로는 산들로 둘러 싸여 있기 때문에, 그와 같이 심각한 공해문제를 안고 있는 것이다.

둘째로, 해양풍에 의한 역전을 들 수 있는데, 주간에 따스해진 육지의 공기가 상승하게 되고 그 밑으로 서늘한 바다의 공기가 흘러들어 올 때 발생된다. 셋째로, 대기 중의 한랭전선이나

온난전선이 통과함에 따라 고층 역전들이 형성될 수 있다.

3. 연기의 상승(Plume Rise)

연기는 연돌로부터 방출되는 즉시 수평으로 이동하지는 않는다. 가벼운 바람이 불 때에는 연기는 상당히 상승하게 되며, 이런 경우에는 지면으로부터 연기 중심선까지의 높이는 연돌의 높이 h_s 에다 연기 상승 Δh 를 합한 값이 된다.

이를 유효연돌높이(effective stack height), h_e 라고 한다(그림 3-1) :

$$h_e = h_s + \Delta h. \dots\dots\dots (3.1)$$

다음 장에서 소개하고자 하는 가우스 확산 모형(Gaussian Diffusion Model)에 이 높이를 적용하여 연기분산을 계산한다. 연기의 높이는 오염물질의 농도 계산에 있어서 $\exp(-\frac{1}{2} \frac{h^2}{\sigma^2})$ 의 형태로 관계되므로 (예 : 식 (4.1)), 하류에서의 지상 농도를 감소시키는 데 있어서, 연기 상승으로 인한 높이의 추가는 대단히 중요하게 된다. 여기서는 Δh 를 산출하는 방법에 대하여 논하고자 한다.

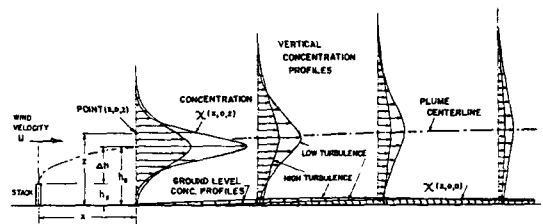


그림 3-1. 지면에 수직인 xz 평면내의 연기농도 분포 및 중심선의 위치.

연기상승 Δh 는 연돌 출구로부터 연기의 중심선까지의 높이로 주어지는 데, 연돌로부터 하류방향으로의 거리 x의 함수로 나타낸다(그림 3-1). 연돌 출구에서의 방출물질의 상태와 대기 조건에 의존하는 이러한 관계를 예측하는 것이 연기상승 방정식 및 기타 연기상승 결정방법들의 목적이다.

연기상승 현상을 해석하기 위하여 방출온도, 방출속도 등과 같은 방출변수들을 취급하는 데 있어서, 운동량에 영향을 미치는 것과 부력에 영향을 미치는 것으로 나누어서 고려한다. 많은 경우에 있어서 부력이 더 지배적이므로, 연기상승 방정식에 있어서 운동량의 효과를 무시하거나, 실험변수를 적당히 선택하므로써 간접적으로 포함 시킨다. 이런 연기를 “buoyant plume” 이라고 하며, 한편 초기 운동량에 의해서 상승되는 연기를 “jet” 라고 한다. 단항식으로 표시되는 상승 방정식들은 buoyant plume 인가 또는 jet 인가에 따라서 각각 운동량 또는 부력을 생략하는 수가 많다. 연기상승에 대한 운동량 및 부력의 중요성은 Holland⁽⁸⁾에 의하여 인식되었다. 그의 방정식은 연기상승에 대한 운동량과 부력의 효과를 별도로 설명하는 두 개의 항들로 구성되어 있는데, 후에 제안된 방정식들 중 Holland의 방정식을 수정하므로써 유도된 것들이 많이 있다.

과거 수년동안 상당히 많은 연기상승 방정식 및 기술들이 문헌에 소개되었다. 이것은 연기 중심선에 대한 연기의 분산에 대하여는 비교적 적은 수의 방정식들이 주어진 사실과 상당한 대조를 이룬다(4 장 참조). 연기상승 방정식들은 실험적인 것과 이론적인 것으로 구분되는 데, 양자 간의 경계는 명확하지 않다. 이론식들은 주로 부력 및 운동량 또는 에너지 보존법칙을 적용하므로써 유도되는 데, 이 법칙들을 적용하는 특정목적에 따라서 내용 및 결과는 다양하게 된다. 실험식들은 그 근거가 되는 자료에 맞게 고안됐으므로, 그 식들이 나타내는 특정한 조건에 대해서는 정확하게 들어 맞지만 조금만 다른 조건에 적용하더라도 매우 부정확하게 된다. 그러므로 문헌에 나타나는 우수한 연기상승 연구 결과들은 너무 많아서 일일이 열거할 수 없겠으나, 모든 연돌 및 대기조건에 대해서 우월하게 적용될 수 있는 단 하나의 방정식이 존재하지 않는다는 것은 놀라운 일이 아닌 것이다.

대규모의 화석연료를 사용하는 발전 시설들에 의해서 생성된 대규모 오염원천들이 공기오염 연구에 있어서 중요한 역할을 하므로 이 방면의 연구가 많이 진행되고 있다. 이런 원천들에 대해서는 비교적 정확한 연기상승 자료들이 사용될 수 있는데, 대부분의 경우에 부력이 중요한 역할을 담당한다. 소규모 buoyant plume 및 jet 에 대해서는 관심이 훨씬 덜 기울여지고 있으며 따라서 해석 기술이 덜 정확하다.

연기상승 방정식들의 정확성을 논하기란 대체로 매우 곤란하다. 주어진 연돌에 대해서 동일한 변수들의 값을 택하더라도 적용되는 연기상승 방정식에 따라서 많은 차이가 나는 데, 이것은 대기 운동에 영향을 주는 다른 변수들을 한개의 방정식에 모두 포함시키기에는 너무 복잡하고 수가 많기 때문이다. Briggs⁽⁹⁾는 그가 연구한 많은 수의 방정식들의 계산치가 10 배 정도 차이가 난다고 하였다. 따라서 연기상승 방정식들을 무분별하게 적용하지 않도록 대단히 주의할 필요가 있다. 때로는 방정식들을 적절한 판단하에 적용하면 좋은 결과를 얻을 수도 있다. Stern⁽⁵⁾은 특별한 선택기준이 없는 한, 우선 일차적으로 Briggs의 방정식들을 적용해 볼 것을 권고 하고 있다. 왜냐하면 그의 방정식들은 광범위한 실측자료에 근거를 두고 있으며, 또한 다른 방정식들과 일치되는 단순한 이론적인 기초를 동시에 갖추고 있기 때문이다. 추가적인 방정식을 적용하므로써 일차적인 계산을 수정하고, 주어진 문제에 해당없는 항들을 제거할 수 있는 것이다. 여러 종류의 상승방정식들에 대한 전반적인 토의가 Stern⁽⁵⁾에 의해서 가장 체계적으로 이루어졌으므로, 어떤 특정한 상승방정식들에 대한 정보를 얻기 위해서는 Stern 및 그에 인용된 문헌들을 참고하는 것이 바람직하다.

일부 방정식들에서는 연돌로부터의 거리 x 의 함수로서 연기상승이 주어지는 데, 대부분의 방정식들에서는 연돌로부터의 거리가 먼 곳에서 일정한 값을 갖을 때의 연기상승만이 주어진다.

이 일정한 값을 최종상승(또는 최대상승, 점근상승 등)이라고 부른다.

방정식들에 포함되는 주위의 대기에 관한 변수들을 정의하기 위하여 기준고도가 규정되어야 한다. 별다른 설명이 없는 한 실제 연돌 높이를 기준고도로 취한다. 풍속에 대한 기준고도는 특히 중요한데, 연기고도까지의 평균풍속을 사용하는 수도 있으나, 대부분 연돌출구에서의 풍속을 사용한다.

3.1 Buoyant Plumes

Smith⁽⁴⁾는 연기의 온도가 대기온도보다 훨씬 높고($\geq 50^\circ\text{C}$) 체적방출률이 클 때($\geq 50 \text{ m}^3/\text{sec}$)는 buoyant plume으로 취급할 것을 제안하였다. 또한 Briggs⁽¹⁰⁾는 뜨거운 연기에 대하여 하류 방향으로 5초×풍속 정도의 거리까지는 부력이 운동량에 의한 힘보다 훨씬 더 지배적이라는 것을 지적했다. 그러므로 발전시설, 제련소 또는 기타 대규모 산업오염원을 취급할 때는 부력의 효과만을 고려하면 된다.

(1) 거리 x 에 따른 연기상승 $\Delta h(x)$

최근에 제안되는 대부분의 연기상승 방정식들은 변수들이 여러가지 값의 지수를 갖는 단항지수 법칙의 형태로 주어지며, 일반적으로는 다음과 같이 표현된다. (Stern⁽⁵⁾):

$$\Delta h(x) = K_1 Q_h^a X^b U^c. \dots\dots\dots (3.2)$$

여기서 X = 연돌로부터 하류 방향으로의 거리 (그림 3-1),

U = 풍속,

Q_h = 단위시간 당 방출열량,

K_1 = Δh 에 영향을 미치는 다른 변수들에 의존하는 상수로서, 특정한 지수들의 조합을 제외하고는 유차원수,

a, b, c = 이론적 또는 실험적인 고찰로부터 정해진 지수들.

Q_h 는 사용될 수 있는 연돌의 방출물질 자료에 따라서 여러 방법으로 계산된다. 만일 방출물질

이 공기와 같은 분자량 및 비열을 갖는다면, Q_h 는 다음 식으로 주어진다:

$$Q_h = Q_m C_p (T_s - T). \dots\dots\dots (3.3)$$

여기서 C_p = 정압비열,

T = 대기의 절대온도,

T_s = 연돌출구에서의 방출물질의 절대온도,

Q_m = 방출물질의 단위시간당 질량방출률.

Q_m 은 다른 특성치들로 다음과 같이 표시될 수 있다:

$$Q_m = \rho_s A_s V_s. \dots\dots\dots (3.4)$$

여기서 ρ_s = 연돌 출구에서의 방출물질의 밀도,

A_s = 연돌 출구의 면적 = πr_s^2 ,

r_s = 연돌 출구의 반경,

V_s = 연돌 출구에서의 방출물질의 방출속도.

Q_h 는 밀도에 관하여 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$Q_h = A_s V_s T C_p (\rho - \rho_s). \dots\dots\dots (3.5)$$

여기서 ρ 는 대기의 밀도이다.

Briggs⁽⁹⁾, Briggfelt⁽¹¹⁾, Fay 등⁽¹²⁾ 및 기타 여러 사람들은 이론적인 근거 및 많은 실측자료들로부터 식 (3.2)의 지수들의 값으로서는 $a = \frac{1}{3}$, $b = \frac{2}{3}$ 및 $c = -1$ 이 좋다는 것을 보였다. 앞으로 인용되거나 또는 일일이 인용되지 않은 여러 연구결과에서는 a 와 b 에 대해서 여러 다른 값들이 사용된다.

부력을 나타내는 매개변수 F_b 및 F_{ba} 가 Briggs 및 기타 연기상승 방정식에서 사용된다:

$$F_b = \frac{g Q_h}{\pi C_p \rho T}. \dots\dots\dots (3.6)^*$$

여기서 g 는 중력가속도 ($= \frac{m}{\text{sec}^2}$)이다. 만일

* Perkins⁽⁶⁾는 식(3.3)으로부터 $F_b = \frac{g V_s r_s^2 (T_s - T)}{T}$

를 사용할 수 있음을 설명하였다.

방출물질이 공기와 같은 분자량과 비열을 갖는
 다면, 온도에 관하여 다음과 같은 형태가 얻어
 지며
$$F_{ba} = \frac{gV_s r_s^2 (T_s - T)}{T_s}, \dots\dots (3.7)$$

밀도에 관해서는
$$F_{ba} = \frac{gV_s r_s^2 (\rho - \rho_s)}{\rho} \dots\dots (3.8)$$

로 표시된다. 화석 연료의 연소를 포함하는 많
 은 경우에 있어서 F_{ba} 는 F_b 에 대하여 좋은 개
 락치를 주기에 충분하다.

어떤 특별한 거리 x^* 에 의하여 양분된 두
 구역에 있어서 각각 별도의 연기상승 방정식
 이 거리 x 의 함수로 주어진다. Briggs⁽⁹⁾는
 모든 기상조건에 대하여 $x < x^*$ 에서

$$\Delta h(x) = C_1 F_b^{1/3} U^{-1} X^{2/3} \dots\dots (3.9)$$

가 뒤를 이론적으로 유도하였으며, $C_1 = 1.6$ 의
 값을 제안하였다.

또한 $x > x^*$ 의 구역에 있어서는 다음의 식이
 더 정확함을 보였다 :

$$\Delta h(x) = 1.6 F_b^{1/3} U^{-1} x^* \left[\frac{2}{5} + \frac{16}{25} \frac{x}{x^*} + \frac{11}{5} \left(\frac{x}{x^*} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{4}{5} \frac{x}{x^*} \right)^{-2} \dots\dots (3.10)$$

거리 x^* 는 대기의 난류특성 및 부력·매개 변
 수의 함수이며, (3.9)식에 개략적으로 사용하
 기에 적합한 다음의 관계가 주어진다 :

$$x^* = 2.16 F_b^{2/5} h_s^{3/5} (h_s < 305m), \dots (3.11a)$$

$$x^* = 67 F_b^{2/5} (h_s > 305m). \dots\dots (3.11b)$$

단위는 $x^*[m]$, $F_b[m^4 \text{ sec}^{-3}]$ 및 $h_s[m]$ 로 주
 어진다.

Briggs⁽⁹⁾는 20 MW 또는 그 이상의 열량을
 방출하는 화석 연료 발전소에 대하여 최종상승
 이 연돌높이의 10배 정도되는 거리에서 얻어
 진다고 가정하여, 그 거리까지 $C_1 = 1.6$ 으로 하
 여 식(3.9)를 사용하면 좋은 개략치를 얻을
 수 있다고 하였다 :

$$\Delta h(x) = 1.6 F_b^{1/3} X^{2/3} U^{-1} (x < 10 h_s). \dots\dots (3.12)$$

Briggs⁽¹³⁾는 여러 연구결과로부터 식(3.8)
 의 형태로 연기상승 자료들을 검토하였는데,
 대부분의 자료가 C_1 의 값이 1.6으로부터 1.8
 까지의 범위에 잘 들어 맞음을 발견하였다.

Carpenter 등⁽¹⁴⁾은 TVA 석탄연소 화력발전
 所に 대한 각종 연기분산 모형의 연구에 있어
 서 식(3.9)의 형태로 연기상승을 표시했는데,
 대류 안정성의 효과를 상수 C_1 에 포함시켰다.
 즉,

$$\Delta h(x) = C_1 F_b^{1/3} U^{-1} X^{2/3} \dots\dots (3.13)$$

로서, F_{ba} 는 부력 매개변수로서 식(3.8)로 정
 의되며, C_1 은 포텐셜 온도구배로서 다음과 같
 이 주어진다 :

$$C_1 = 1.58 - 0.414 \frac{\partial \theta}{\partial z}. \dots\dots (3.14)$$

여기서 θ 는 포텐셜 온도이며 $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ 는 °C/100m의
 단위를 갖는다.

이 경우의 풍속 U 는 연돌출구 및 연기상단
 사이의 평균치를 취하였다. 식(3.14)에 의하여
 적용될 수 있는 범위 내에서 세 가지 형식의 안
 정성이 강조되었는데, 다음과 같이 안정성이 감
 소되는 순서로 C_1 의 값을 정하였다.

안정성의 구분	$\frac{\partial \theta}{\partial z}$ (°C/100m)	C_1
1	1.3	1.04
2	0.3	1.46
3	-0.06	1.60

TVA 연기상승에 관한 후속연구에서 Mont-
 gomery 등⁽¹⁵⁾은 세가지 안정성 조건에 대해서
 다음과 같이 별도의 상승 방정식들을 주었다 :

중립 안정성 ($-0.17 < \partial \theta / \partial z \leq 0.16$, 평균 = 0.05)

$$\Delta h(x) = 2.50 x^{0.56} F_b^{1/3} U^{-1} (x < 3000m) \dots\dots (3.15)$$

약한 안정성($0.16 < \partial\theta/\partial z \leq 0.70$, 평균 = 0.43)
 $\Delta h(x) = 3.75 x^{0.49} F_{ba}^{1/3} U^{-1} (x < 2800m)$
 (3.16)

강한 안정성($0.70 < \partial\theta/\partial z < 1.87$, 평균 = 1.06)
 $\Delta h(x) = 13.8 x^{0.26} F_{ba}^{1/3} U^{-1} (x < 1960m)$
 (3.17)

단위는 $\Delta h(x)$ [m], x [m], F_{ba} [$m^4 sec^{-3}$], U [$m sec^{-1}$] 및 $\partial\theta/\partial z$ [$^{\circ}C/100m$] 이다.

(2) 최종상승

연기의 최종상승을 정확하게 정의하기란 대단히 어렵다. 특히, 불안정한 대기에서는 부력이 무한정으로 작용하기 때문에 연기상승의 한계가 이론적으로는 존재하지 않는다. 최종상승은 실험자료에 대한 실제적인 고찰로부터 구하여야 하며, 많은 경우에 선정된 하류방향 거리에서 $\Delta h(x)$ 방정식을 종결지으므로써 구하는 방법이 채택되고 있다.

Holland⁽⁸⁾는 연기상승의 해석에 대해서 많은 노력이 기울여지지 않고 있을 때 이미 다음과 같은 방정식을 유도하였다 :

$$\Delta h = (1.5 V_s d_s + 4 x 10^{-5} Q_h) U^{-1}. \quad (3.18)$$

여기서 d_s 는 연돌출구의 직경으로서 단위는 Δh [m], V_s [$m sec^{-1}$], d_s [m] 및 Q_h [$cal sec^{-1}$] 이다. 두 개의 항은 각각 운동량 및 부력의 효과를 나타낸다. 위의 식은 많은 연기상승 연구에 포함되었는데, 연기상승을 과소평가 했다는 것이 여러 연구결과에서 밝혀졌다. 그 이유는 Holland의 부력 상승 자료가 연돌로부터 충분히 먼 하류방향에서 측정되지 않았기 때문이라고 설명되었다.

Moses와 Carson⁽¹⁶⁾은 광범위한 크기의 연돌로부터 얻은 실측 자료들을 근거로 다음과 같은 방정식을 제안하였다 :

$$\Delta h = C_3 + C_4 (V_s/U)^a d_s + C_5 Q_h^b / U. \quad (3.19)$$

연기상승 자료들을 세 가지 안정성의 범위로 나누어서, 각 범위에 대해서 다음의 방정식들을 얻었다. :

불안정 ($\partial\theta/\partial z < -0.22$)
 $\Delta h = 3.47 (V_s/U) d_s + 10.53 Q_h^{1/2} / U \dots (3.20)$

중립 ($-0.22 \leq \partial\theta/\partial z < 0.85$)
 $\Delta h = 0.35 (V_s/U) d_s + 5.41 Q_h^{1/2} / U \dots (3.21)$

안정 ($\partial\theta/\partial z \geq 0.85$)
 $\Delta h = -1.04 (V_s/U) d_s + 4.58 Q_h^{1/2} / U \dots (3.22)$

단위는 $\partial\theta/\partial z$ [$^{\circ}C/100m$], Δh [m], V_s [$m sec^{-1}$] 및 Q_h [$kcal sec^{-1}$] 이다.

Briggs (9) 및 (13)는 바람부는 조건뿐 아니라 무풍에 대해서도 최종상승을 고려하였다. 우선 중립 및 불안정 조건에 대해서는 식 (3.9)에 $x = 3x^*$ 를 대입하여 다음과 같이 표시하였다 :

$$\Delta h = 1.6 F_b^{1/3} U^{-1} (3x^*)^{2/3}. \quad \dots (3.23)$$

특히 20 MW 이상의 열방출율을 갖는 화석연료 발전소에 대해서는 식 (3.9)에 $x = 10h_s$ 를 대입하여 좋은 개략치를 얻었다 :

$$\Delta h = 1.6 F_b^{1/3} U^{-1} (10h_s)^{2/3}. \quad \dots (3.24)$$

다음으로 안정조건에 대해서는 부력 매개 변수, 풍속 이외에도 안정의 효과를 나타내기 위한 안정 매개 변수 s 를 다음과 같이 정의 하였다 :

$$S = \frac{g}{\theta} \frac{\partial\theta}{\partial z}. \quad \dots (3.25)$$

안정조건하에서 바람이 있을 때는 차원에 대한 해석으로부터

$$\Delta h = C_2 (F_b/US)^{1/3} \quad \dots (3.26)$$

의 형태를 갖는 식을 이론적으로 유도 하였다. Briggs는 $C_2 = 2.9$ 를 제안하였고, Fay 등⁽¹²⁾은 2.27의 값을 제안하였다. 그러나 Briggs⁽¹³⁾은 후에 C_2 의 값이 2.4와 2.6의 범위 내에 있을 때 대부분의 자료들에 잘 맞는 것을 발견 하였다. 안정조건 하에서 바람이 없을 때는 다음의 식이 적용된다 :

$$\Delta h = 5.0 F_b^{1/4} S^{-3/8}. \quad \dots (3.27)$$

Carpenter 등⁽¹⁴⁾은 TVA 발전소에 대한 연기

분산모형의 연구에 있어서 대략 1200m 거리에서 최대상승에 도달한다는 것을 발견하고 식 (3.14)에 대입한 값을 취하였다. :

$$\Delta h = 114 C_1 F_{ba}^{1/3} U^{-1} \dots\dots\dots (3.28)$$

단위는 Δh [m], F_{ba} [$m^4 \text{ sec}^{-3}$] 및 U [$m \text{ sec}^{-1}$]이며, F_{ba} 는 식 (3.8)로부터, C_1 은 식(3.14)로부터 주어진다.

Montgomery 등⁽¹⁵⁾은 TVA 발전소에 대해서는 1824 m의 거리에서 최종상승에 도달한다고 제안하였으며, 이 거리에 대하여 다음의 식을 유도하였다.

$$\Delta h = \frac{173 F_{ba}^{1/3}}{U \exp(0.64 \partial\theta/\partial z)} \dots\dots (3.29)$$

Moses 와 Kramer⁽¹⁷⁾는 26개의 서로 다른 연돌로부터 615회의 관찰에 근거하여 17개의 연기상승 방정식을 해석하므로써, 통상의 연기상승 방정식으로부터 얻을 수 없는 통계학적 성질들을 포함하는 표의 형식으로 연기상승을 나타내는 기술을 개발했다. 즉 평균치(mean), 표준 편차(standard deviation), 누적 백분율빈도 분포(cumulative percentile frequency distribution) 및 interquartile range 등을 고려했다. 그들은 또한 이와 같은 각종 통계학적 기준으로부터 여러 연기상승 방정식들의 정확성을 비교 검토하였다.

3.2 Jets

Smith⁽⁴⁾는 적은 체적 방출율을 갖는 원천에서 방출온도는 대기온도보다 별로 높지 않으나 ($< 50^\circ\text{C}$), 방출속도는 상당한 크기를 가질 경우 ($\geq 10 \text{ m/sec}$), jet로 취급할 것을 제안하였다. 그러나, jet에 대한 정보는 buoyant plume에 비해서 훨씬 적게 알려져 있다. 따라서 Briggs⁽⁹⁾는 jet 방정식들은 덜 정확하다는 사실을 강조하였다.

Briggs⁽⁹⁾는 다음과 같이 Rupp 등⁽¹⁸⁾의 결과를 제시하였다.

$$\Delta h = 1.5 \frac{V_s}{U} d_s = 1.5 R d_s \dots\dots (3.30)$$

여기서 $R=V_s/U$ 이며, Briggs 자신은 $R > 4$ 인 때는 상수 1.5 대신에 3.0을 사용할 것을 제안하였다. 한편, Smith⁽⁴⁾는 다음의 식을 주었다.

$$\Delta h = d_s \left(\frac{V_s}{U}\right)^{1.4} \dots\dots\dots (3.31)$$

위에서의 세 방정식들을 비교해 본 결과, Rupp의 식이 가장 작은 연기상승 값을 주는 것을 알 수 있는데, 연기상승을 과소 평가하는 것이 과대평가(따라서 지면농도를 과소 평가)하는 것보다 더 보수적이므로 Rupp의 식을 채택한다 (Perkins⁽⁶⁾).

Briggs⁽¹⁰⁾는 jet로 인한 최종상승은 하류방향 거리 x 의 함수로서 $(x/d_s)^{1/3}$ 의 의존도를 갖는다고 가정하여 다음과 같은 식으로 표시하였다 :

$$\frac{\Delta h}{d_s} = 1.89 \left(\frac{R}{1+3/R}\right)^{2/3} \left(\frac{x}{d_s}\right)^{1/3} \dots\dots (3.32)$$

4. 연기의 분산

지상에 위치하거나 높은 곳에 위치한 오염원으로부터 방출되는 오염물질의 대기 중의 농도를 결정하는 여러가지 방법이 있다. 그러나, 넓은 범위의 대기조건에 걸쳐서 대기 확산을 표시하는 데는 Gauss 모형이 가장 효과적인 것임이 알려졌다. 이에 관한 문헌은 Slade⁽³⁾ 및 Turner⁽¹⁹⁾ 등을 포함하여 여러 곳에서 찾을 수 있다. 그림 4-1에서는 연기의 경계와 농도분포가 순간적인 스냅사진 및 수분이나 수시간에 걸친 노출의 형식으로 보여진다. 연기의 순간적인 사진은 오염원의 하류방향으로 서서히 폭이 넓어지면서 구불구불한 동작을 하는 연기를 나타내며, 장시간의 평균들에서는 더 규칙적인 연기의 모양과, 더 미끄러운 농도분포가 주어진다. 이것은 Gauss 분포에 가까운 것이며, 여기서는 이 분포를 사용하여 연기분산 문제를 취급한다.

오염원에서는 오염물질이 짧은 시간동안만 뿜

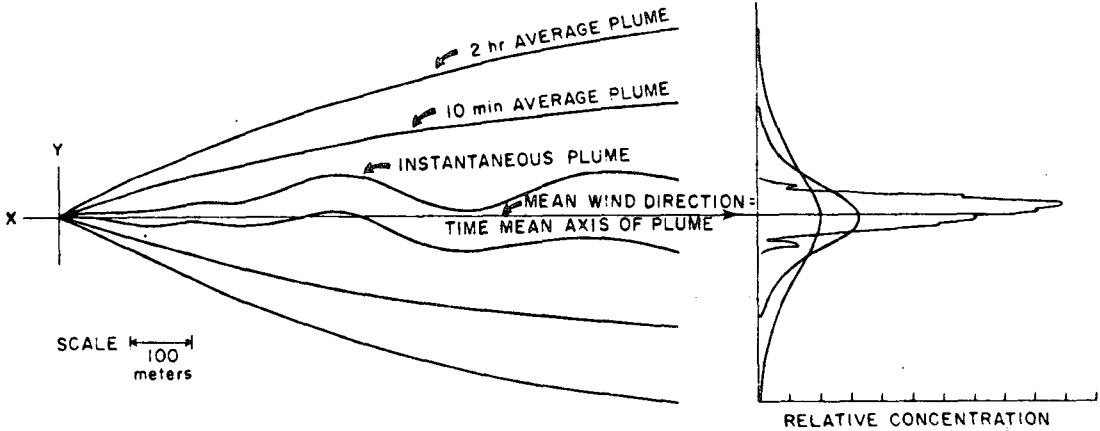


그림 4-1 왼쪽의 그림은 순간적으로 관측된 연기의 연기의 약도 및 10분이나 2시간에 걸쳐서 평균된 연기의 약도이다. 오른쪽의 그림은 해당되는 연기단면 분포양식이다⁽³⁾.

어져 나오거나 오랜 시간동안 연기로서 방출되기도 하는데, 주로 연기분산의 계산에 중점을 둔다. 연돌로부터의 방출물질은 기체만으로 구성되어 있거나, 기체와 분진물로 구성되어 있다. 만일 입자의 직경이 20 μ 보다 작다면, 가라앉는 속도가 매우 느리기 때문에, 근본적으로 기체와 같은 방식으로 이동하므로 기체의 경우와 같은 방정식을 적용한다. 큰 입자의 경우에는 가라앉는 속도가 상당히 되므로 연돌근처에서 기체의 경우보다 더 높은 지면분포를 갖는다.

4.1 Gauss 분산 방정식

Gauss 분포 및 Gauss 분산 방정식의 유도과정에 관한 문헌은 여러 곳에서 찾을 수 있으나, 특히 Wark 및 Warner⁽⁷⁾에 기초적인 설명이 주어졌다. 높은 위치에 있는 오염원으로부터 방출되는 오염물질의 대기 중의 농도를 결정하는 방정식은 다음과 같다.

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]$$

$$\times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (4.1)$$

여기서, χ = 농도(단위/㎥, 예를들면 gm/㎥),
 Q = 오염물질 방출율(단위/sec, 예를들면 gm/sec),
 σ_y, σ_z = 횡류방향 및 수직방향 표준 편차(m),
 U = 평균풍속(m/sec),
 h_e = 유효연돌 높이(m),
 x, y, z = 하류방향, 횡류방향 및 수직방향 거리(m).

식(4.1)을 유도하는 데 있어서, 오염물질이 대기 중으로 분산되는 동안 그 질량이 보존된다고 가정하였다. 위 식은 지표가 오염물질의 흡입역할을 하므로서 오염물질의 손실이 발생하는 것을 고려할 수 있도록 수정될 수 있다. 괄호내의 두 번째 항 [(z+h_e) 항]은 지면을 완전한 연기의 반사체로 취급하는 지면반사 항으로서, 연기의 하단이 지면에 닿는 즉시 위로 반사되어 하류방향으로의 연기분산에 추가된다고 가정하였다. 이것은 그림 4-2에서 참조할 수 있는 바와 같이, 마치 가상적인 원천이 -h_e에 위치하고 있는 것과 수학적으로 동등한 효과를 나

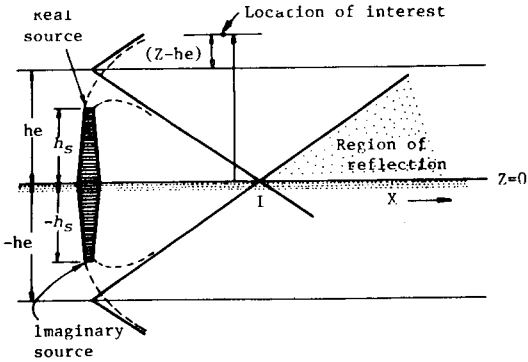


그림 4-2 지면에서 반사되는 기체를 수학적으로 묘사하기 위한 가상적인 원천.

타낸다. 오염물질의 농도에 대한 지면반사의 효과가 그림 4-3에 표시되어 있다. 위치 I에서 Gauss 곡선은 근본적으로 농도에 중복이 없으나, I로부터 하류에서는 x가 증가함에 따라 중복도 증가한다. 지면(z=0) 위로 연장된 하부 곡선부분을 원래의 상부 곡선에 추가시킴으로서 그만큼 상부 농도 곡선이 변경됨을 알 수 있다. 위치 J로부터 더욱 하류에서는 반사에 의하여 추가된 부분 때문에 농도 곡선은 K에서의 같은 모양을 갖는다.

만일 연기의 하단이 지면에서 부분적으로나 또는 완전히 흡수된다고 하면, 이 지면반사 항은 각각 축소되거나, 생략되어야 한다. 이것은 어떤 기체 방출물질과 초목 간에 발생된다고 할 수 있다.

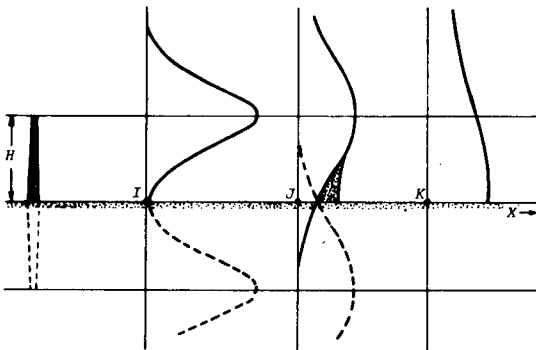


그림 4-3 지면반사가 하류의 오염물질 농도에 미치는 영향.

지면에서의 농도를 표시하는 식은 식(4.1)에 $z=0$ 을 대입하므로써 얻어질 수 있다 :

$$x(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] \dots \dots \dots (4.2)$$

여기서는 완전한 지면반사를 포함시켰다. 표면 흡수를 가정한다면 적당한 인수를 곱하므로써 방정식을 축소시켜야 하는데, 물론 완전흡수의 경우에는 ½을 곱한다.

주어진 x에 대해서 최대 지면농도는 연기 중심선 바로 밑에서 ($y=0, z=0$) 발생한다. 완전반사를 가정하면 다음 식이 얻어진다 :

$$x(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] \dots \dots \dots (4.3)$$

Stern⁽⁵⁾은 x가 변함에 따라 σ_y 의 σ_z 가 일정한 비를 갖는 경우에 최대 지면농도를 다음 식으로 주었다 :

$$x(x_{max}, 0, 0) = \frac{2Q}{\pi h_e^2 e U} \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \dots \dots \dots (4.4)$$

여기서 x_{max} 는 최대농도가 발생하는 거리를 나타내며, 그 값은 σ_z 가 x의 함수로서 그림 4-5에서와 같이 도표로 주어지거나 해석적인 방법으로 주어질 때 다음식으로부터 간접적으로 찾아낸다 :

$$h_e = \sqrt{2} \sigma_z \dots \dots \dots (4.5)$$

연기상승이 없이 지면에 위치해 있는 오염원에 대한 문제는 각종 연돌 효과가 존재하지 않을 때의 확산 연구에 많이 사용되며, 그 방정식은 (4.1)에 $h_e=0$ 을 대입하여 얻어진다 :

$$x(x, y, z; h_e=0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right] \dots \dots \dots (4.6)$$

완전 지면반사를 가정하였으나, 연기가 분산되는 동안 연기 중심선은 지면에 위치하고, 계속해서 연기가 지면에 접촉하게 되므로 표면흡수

를 고려할 필요가 있다. 지면농도에 대해서는 다음 식이 주어진다 :

$$x(x, y, 0; h_e = 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \dots\dots\dots (4.7)$$

어떤 위치 x에서 최대농도는 중심선에서 발생되며, 다음 식이 주어진다 :

$$x(x, 0, 0; h_e = 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \dots\dots\dots (4.8)$$

점 오염원에 대해서는 x가 0에 가까워짐에 따라 σ_y 및 σ_z 도 0에 가까워지므로, 최대 지면농도는 무한에 가까워진다.

평균풍속 U는 Z의 함수로서 식(2.1)로 주어지는데, 전체연기를 통한 평균치를 사용한다⁽¹⁹⁾. 그러나 대부분의 경우에 있어서 기상 자료가 충분치 못하므로 평균치를 결정하는 것이 불가능하다. 따라서, 통상적으로 실제 연돌높이 h_s 에서의 시간 평균풍속을 사용한다 ((4), (6) 및 (7)).

4. 2 확산계수 (Diffusion Coefficient)

분산되는 연기의 횡류방향 및 수직방향 표준편차를 나타내는 σ_y 와 σ_z 는 x의 함수일 뿐만 아니라, 대기의 안정성 조건과도 관계가 있다. Stern⁽⁵⁾은 σ_y 와 σ_z 에 관하여 여러사람들이 대기 중에서 실험 측정된 결과들을 비교 검토하였다. 여기서는 가장 널리 채택되고 있는 Turner⁽¹⁹⁾에 의하여 제안된 σ_y 및 σ_z 에 대한 도표들을 그림 4-4 및 4-5로서 제시하였는데, 그는 대기의 안정성 조건을 표 4-1에서와 같이 A로부터 F까지 여섯 개의 범주로 분류하였다.

표 4-1 안정성 범주의 개요

표면풍속 (10m 높이 에서) m sec ⁻¹	주 간			야 간	
	일조복사열 강	중간	약	약간 구름이 끼거나 낮은 구름 $\geq 4/8$	$\leq 3/8$ 구름
< 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

주간 또는 야간에 구름이 낀 날씨에 대해서는 중립조건 D를 가정한다(Turner⁽¹⁹⁾).

Turner는 또한 위의 상호관계들을 구하는데 있어서 다음과 같은 제한조건들을 근거로 하였다 :

1. 대략 10분간의 채취시간
2. 대기 내의 최저 수 백 m까지의 높이
3. 개활지에 상응하는 표면

표 4-1에서 강한 일조 복사열이란 맑은 하늘에서 태양고도가 60° 이상인 것을 가리키고, 약한 일조 복사열이란 맑은 하늘에서 태양고도가 15° 내지 35°인 것을 가리킨다. 구름낀 날씨에는 태양 복사가 감소되고, 이것을 고려하여서 안정성 범주를 선택하여야 한다.

도시 지역에 있어서는 heat island 효과 및 거친 표면에 의해서 발생된 기계적 난류 때문에 확산계수의 값이 더 커진다.

한편 확산계수 σ_y 와 σ_z 는 횡류방향의 풍향편차 각도 σ_a 와 수직방향의 풍향 편차 각도 σ_e 와 관계가 있는데, Slade⁽³⁾는 풍향 및 안정성

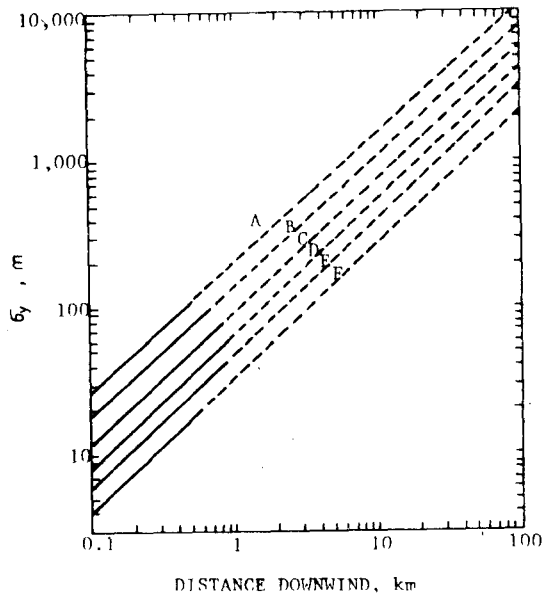


그림 4-4 원천으로부터 하류방향 거리의 함수로 주어지는 수평 확산계수⁽¹⁹⁾.

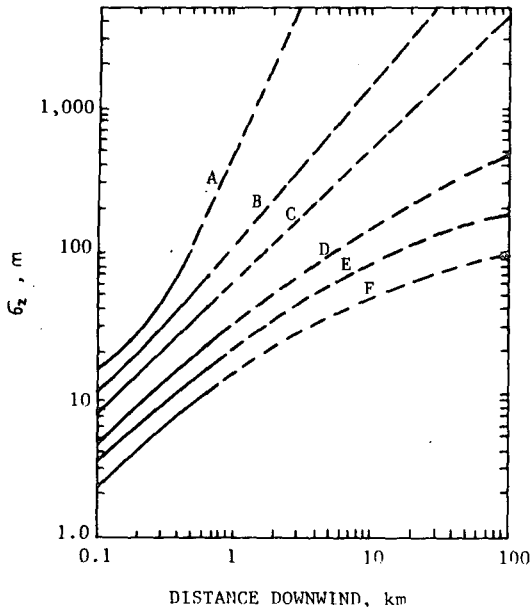


그림 4-5 원천으로부터 하류방향 거리의 함수로 주어지는 수직 확산계수(19).

조건의 함수로서 이런 각도들이 변하는 것에 대해서 토의하였다. Smith⁽⁴⁾은 σ_y 와 σ_z 의 관계 및 σ_x 와 σ_e 의 관계를 나타내는 식을 구하였는데, 다음 장에서 취급한다.

4.3 다수 연돌(Multiple Stacks)

산업시설들에 있어서 흔히 겪게 되는 실제적인 문제중의 하나로서 다수 연돌의 배열에 의한 복합된 효과를 고려하는 것이다. 직관적으로 이해할 수 있는 바와 같이, 오염원에 매우 가까운 곳에서는 연기들이 개별적인 농도분포 양식을 유지하나, 먼 곳에서는 전체 방출량과 같은 크기를 갖는 단일오염원에 의한 농도분포 양식을 갖는다. 그러나 이에 대한 연구는 많이 진전되어 있지 않으며, 대부분의 경우 최대 지면농도의 위치 근처에서의 계산을 위주로 고려한다.

Smith⁽⁴⁾는 다음의 식을 신중하게 고려하여 사용할 것을 제안하였다.

$$X_{\max(N)} = X_{\max(1)} N^{0.8} \dots\dots\dots (4.9)$$

여기서 $X_{\max(1)}$ 은 식(4.4)로부터 구한 단일 연돌에 대한 최대농도이며, N은 연돌의 개수를 나타낸다.

4.4 농도와 시간의 관계

이제까지 연기분산 문제의 한 인자로서의 시간에 대한 토의가 거의 없었다. 그러나 1시간을 초과하여 시간이 증가할 수록 평균풍향의 변동 때문에 연기는 더 널리 퍼지게 되어, 결국에는 주어진 채취지점에서의 농도 양식은 분산조건, 풍속 및 풍향의 장기분포에 의존하게 된다. 역으로, 1시간 동안의 평균농도를 결정하기 위한 절차는 어떤 비교적 장기에 걸친 변동을 이미 반영하고 있다. 따라서, 단기 최고 농도(short term peak concentration)은 때때로 1시간 평균치 보다 더 높으며 장기 평균농도(long term mean concentration)은 1시간 평균치보다 더 낮게 된다.

단기 최고농도는 다음 식으로부터 계산된다 (Smith⁽⁴⁾):

$$\frac{X_{\text{meak}}}{X_{\text{mean}}} = \left(\frac{3600}{t} \right)^r \dots\dots\dots (4.14)$$

여기서 t는 초로 나타낸 시간이며, r은 다음과 같이 분산조건에 따라 변한다:

분산조건	r
매우 불안정	0.65
불안정	0.52
중립	0.35

안정 조건에 대해서는 아무 값이 주어지지 않았는데, 이것은 이런 조건하에서는 정상적으로 높은 원천이 지면 농도를 산출하지 않기 때문이다.

지극히 장기간(예를 들면 한 달)에 걸쳐서는 기본 분산방정식을 간단히 수정한 식이 사용된다. 다음에 주어지는 식은 엄격하게 수학적으로 유도된 것은 아니지만 대략의 계산에는 만족스럽게 적용될 수 있다 (Smith⁽⁴⁾ 및 Stern⁽⁵⁾):

$$x(x, \phi, f) = \frac{360 f Q}{\phi 100 \pi^{3/2} 2^{1/2} \sigma_z U X} \exp\left(-\frac{h_e^2}{2 \sigma_z^2}\right) \dots\dots\dots (4.15)$$

여기서 ϕ 는 방향 부채꼴의 각도(도)이고 f 는 그 부채꼴 내의 바람과 관련기상조건 조합이 발생하는 빈도를 백분률로 표시한 것이다. 바람이 어떤 특정한 부채꼴 내에 있게 되면, 거기서 바람은 균일하게 분포되어 있다고 가정한다.

주어진 달에 관측된 분산조건, 풍속 및 풍향의 공동확률을 사용하므로써 일련의 장기 농도도표를 작성할 수 있고 또한 여러 경우에 대한 값들의 합을 구하므로써 원천 주위의 월 평균 농도가 주어진다.

4.5 모형의 한계성

연기분산 방정식의 모형에 대하여 이미 여러 가지 한계성이 지적되었다. 우선, 확산계수 σ_y 및 σ_z 들은 그리 정확하지 않았다. 다음에, 마찰 효과로 인한 고도에 따른 풍향의 변경을 무

시하였는데, 이것은 횡류방향으로 연기를 흐트러 뜨리는 경향이 있다. 또한, 오염물질들이 지면에 도달할 때 흡수 및 퇴적되는 데 대한 고려를 철저히 하지 않았다. 예를 들면 아황산가스는 초목과 상호작용을 하는 것으로 알려졌다. 연기가 하류로 이동함에 따라 반경이 20μ 이상되는 분진 형태의 오염물질들에 대해서 이전의 퇴적으로 인한 농도의 감소를 고려하기 위하여 보정항을 포함시켜야 한다(그러나 고도오염원 및 작은 입자들에 대해서는 이 입자가 대체로 20% 이하로 되며 장거리에서도 사용될 필요가 없다). 연기의 경로를 따라서 발생하는 화학반응도 무시되었다. 아황산가스의 경우에는, 서서히 SO_3 로 변화되고, 더 나가서 황산으로든 변화된다. 단기 평균으로부터 유도된 확산계수들을 한 시간 이상의 장기 평균 농도의 예측에 사용하는 것도 큰 오차를 초래한다. 이와 같은 모든 한계성들을 검토하였을 때 오염농도를 일차적으로 계산하기 위한 목적 이상으로 Gauss 연기분산 모형을 사용하는 것은 신중하게 고려해야 할 일이다. (계속)