

복잡한 지형의 임해지역에서 대기 분산계수의 평가

Estimation of Atmospheric Dispersion Coefficients in A Coastal Area with Complex Topography

박 옥 현 · 천 성 남

부산대학교 공과대학 환경공학과

(1998년 5월 25일 접수, 1998년 8월 17일 채택)

Ok-Hyun Park and Sung-Nam Chun

Dept. of Environmental Engineering, Pusan National Univ., Pusan, Korea, 609-735

(Received 25 May 1998; accepted 17 August 1998)

Abstract

To estimate the dispersion coefficients in a coastal area with complex topography, several schemes using empirical equations expressed with σ_y and σ_z in lateral and vertical directions, respectively have been examined. Estimation results using these equations and meteorological data obtained from SODAR system were compared with previously measured dispersion coefficients in other coastal areas. Validations of estimation results have been performed by comparing the measured concentrations with predicted ones employing in Boryung coastal area.

Important conclusions were drawn as follows; (1) Variations of lateral and vertical wind direction revealed different height dependency in upper and lower mixed boundary layer. (2) Because of turbulent constraint effect by large water body in a coastal region, the lateral and the vertical dispersion coefficients were smaller than those of P-G system. (3) As a result of examining the performance measure of these schemes through checking of coincidence between measured and predicted concentrations, vertical dispersion coefficients were smaller than those of P-G system, and the Cramer scheme was found to be more appropriate rather than others in the coastal area surrounding Boryung power plant.

Key words : Dispersion coefficient, Coastal Area, Dispersion model, Model performance measure

1. 서 론

특정배출원으로부터 방출된 오염물의 풍하측 농도평가를 위해 확산예측식을 사용하는 경우의 오염농도 평가 정확도는 배출원 자료 및 기상 자료의 정확도에 의해 좌우되며, 후자중에서 횡방향 및 연

직방향 분산계수(오염농도 확산폭), σ_y 및 σ_z 가 차이는 비중에 크다. 이들을 평가하기 위해 지금까지 보편적으로 사용되어져 오고 있는 Pasquill-Gifford nomogram (Turner, 1970)은 풀로 덮인 평탄한 지형 (조도길이 3 cm)의 미국 Nebraska주 O'Neill 부근에서 지표면 방출 plume에 대해 풍하 800m까지의 거리에 걸쳐 확산실험을 수행했던 Prairie grass project

의 결과를 거리의 함수로 나타낸 것이다.

그러나, 많은 대기오염 확산 모델에 이 P-G system을 적용할 때, 해당지역의 표면 피복상태, 난류의 연직방향 불균일성, 표면조도, 평균화 시간 그리고 육지와 수계(水系)의 분포 등과 같은 지역적 특성의 차이에 의한 난류 변동을 충분히 고려하지 않으면 실제 측정 농도와 오염농도 평가치 사이에 오차를 유발할 수 있다.

더욱이 지형이 복잡한 임해지역에서의 난류 특성은 P-G system이 구해진 평탄한 사막지역에서의 그것과 다음과 같은 몇가지 대표적 특징들에 의해 현저히 달라질 수 있다. 육지경계층과 수계경계층 사이에서 확산현상의 차이를 가져오는 중요한 요인 중의 하나는 수계의 존재에 따른 현열 flux의 차이에 의한 것으로 수계에서의 이값은 육지에서의 그것보다 작기 때문에 해양에서의 혼합고가 낮고, 대기가 안정해 짐으로써 오염물질 확산이 억제된다. 또한 수계에서의 대기안정도는 일변화 및 연변화 특성을 나타내며, 이것은 육지에서의 안정도 변화와 완전히 일치하지 않는다(Nieuwstadt, 1977). 또한 특정시간에 바다와 육지에서의 난류강도가 지표면 조도 및 가열의 차이에 따라 달라지므로 plume이 바다를 지나서 육지를 만나면 σ_y 및 σ_z 값에 변화가 생긴다. 일례로 Long Island에서 여름 한낮 바다에서 육지로 불어오는 공기에 의한 상대난류강도, $\frac{(u')^2}{u}$ 의 증가량은 0.05~0.30 정도였던 것으로 보고 되고 있다(Strimaitis *et al.*, 1983). 또한 임해지역에선 plume이 지형장애물을 만나게 되고, 이때 plume의 거동은 지형장애물의 형상, 대기안정도, plume의 고도 및 운동량 등의 요인에 의해 결정된다(Hanna *et al.*, 1985).

이와 같이 복잡한 지형으로 구성된 임해지역에서의 수평 및 연직방향 분산계수 평가법은 지금까지 일반적으로 적용되어 오고 있는 평탄지역에서의 그것과는 다소 상이한 접근법을 요구할 것인 바, 본 연구에서는 SODAR를 이용해 측정된 바람자료를 바탕으로 수평 및 연직방향 분산 계수를 평가하였다. 또한, 정규연 확산식에 이들 분산계수를 적용해서 계산한 보전성 물질농도와 측정자료들을 비교하므로써 분산계수 평가방법들에 대한 상대적 우월성을 검토하였다.

2. 자료의 수집과 처리

2.1 자료의 수집

본 연구에서 확산계수 평가를 위하여 사용된 기상자료는 보령화력발전소에 설치된 SODAR를 운영하여 얻었다. 보령화력발전소는 충남 보령시 북쪽으로 약 10 km 지점의 해안에 위치하고 있으며 주변 지형으로는 보령화력발전소로부터 북동쪽 7 km 지점을 지나면서 높이 580 m의 조서산을 비롯한 일련의 산계가 위치하며, 남동쪽으로는 차령산맥의 남단에서 갈라져 나온 약 200 m 높이의 낮은 산맥들이 위치하고 있다. 발전소를 중심으로 내륙쪽 반경 약 5 km이내의 지형은 해발 약 50~70 m의 야산이 대부분의 면적에 걸쳐 분포하는 형태를 나타내며, 발전소 동남쪽 약 3 km 지점에 위치한 해발 229 m의 봉대산을 정점으로 하는 일련의 산계가 남북방향으로 위치하고 있다.

이 지역은 서해안과 먼해 있어 해안 지역의 기후 특성을 나타내며 발전소에서 1992년부터 지금까지 측정된 기상자료에 의하면 겨울철엔 북풍, 여름철엔 남서풍이 주풍으로 나타났고, 연 평균 풍속은 약 3.12 m/s였으며 1992년도의 지표층 대기안정도는 50% 정도가 중립으로 평가되었으며, 1985~1989년 사이에 Tethered-sonde로 측정된 연직방향 온도분포로부터 계산된 최대 혼합고는 430~2190 m의 범위를 보이고 있다(전력연구원, 1997).

본 연구에서는 미국 Radian사의 Echsonde-600 SODAR 시스템을 사용하여 취득된 1997년 1월부터 1997년 7월 사이의 기상자료중 결손 기록이 적은 57일의 것을 분석대상 자료로 취하였다. Echsonde-600 SODAR 시스템은 크게 3개의 음파 송·수신 안테나와 시스템 제어 및 자료 처리 컴퓨터로 구성되며, 음파 송수신 안테나는 외부 소음에 의한 영향을 최소화할 수 있도록 안테나를 둘러싸는 커버, 즉 Cuff가 설치되어 있다. 세 개의 안테나 중 하나는 연직 방향으로 고정되어 있으며, 나머지 두 개는 각각 동서 및 남북 방향으로 15° 만큼 기울여 설치하여, 각 방향으로 송·수신된 음파의 진동수 변동을 파악하고 Doppler 효과에 의해 풍속을 계산한다.

측정기간 중 SODAR는 세 개의 안테나에서 교대로 150 ms의 파장을 가지는 음파를 공기중으로 내

Table 1. Operating parameters of the SODAR used in this study.

Parameters	Operating Condition
Pulse length	150 ms
Ping amplitude	18 dB
Gain	40 dB
Lowest wind gate	50 m
Top wind gate	700 m
Wind gate width	25 m
Lowest backscatter gate	50 m
Top backscatter gate	700 m
Backscatter gate width	10 m

보내고, 난류로 인한 대류의 비균일성 (inhomogeneity)에 의해 유발되는 음의 분산량을 최저 측정점 50 m에서 최고 측정점 700 m 높이까지 25 m간격으로 수집하도록 운전되었으며, 상세한 운전조건은 표 1과 같다.

2. 2 자료처리

대기중에서 총 수평방향 분산계수 σ_{yt}^2 는 난류에 의한 기여분 σ_y^2 , 부력plume에 의한 퍼짐 증가량의 기여분 σ_{yb}^2 , 바람전단에 의한 기여분 σ_{ys}^2 및 구조물이나 지형에 의한 연의 퍼짐 기여분 σ_{yb}^2 등과 같은 성분들로 구성되며 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$\sigma_{yt}^2 = \sigma_y^2 + \sigma_{yb}^2 + \sigma_{ys}^2 + \sigma_{yb}^2 \quad (1)$$

연직방향에 대해서도 수평방향에 대한 것과 마찬가지로, 총 연직방향 분산계수 σ_{zt}^2 는 난류에 의한 기여분 σ_z^2 , 부력plume에 의한 퍼짐 증가량의 기여분 σ_{zb}^2 및 구조물이나 지형에 downwash 기여분 σ_{zs}^2 등과 같은 성분들의 합으로 나타내어진다. 이중 난류에 의한 수평 및 연직방향 퍼짐, σ_y 및 σ_z 는 각 대기안정도에 따라 거리의 함수로 표현되는 P-G system을 사용하는 것이 일반적이나, 이 방법은 전술한 바와 같이 서로 다른 지표면의 조도, 지형조건, 평균화 시간 및 토지이용 등의 차이에서 오는 난류의 변화를 고려하지 못하는 제한점을 가지고 있다.

대기 중에서 오염물질의 확산은 난류에 의해 지배되므로 이들을 기상, 풍하거리, 시간 등과 관련된 것 기 위한 기법에 관한 연구가 수행되어 식 (2) 및 식 (3)과 같은 관계식이 만들어졌다 (Katarzyna, 1989).

$$\sigma_y = \sigma_y t f_y \left(\frac{x}{uT_y} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_z = \sigma_z t f_z \left(\frac{x}{uT_z} \right) \quad (3)$$

여기서 σ_y, σ_z : 각각 수평방향 및 연직방향에서의 풍속의 표준편차

t : 오염물질의 풍하방향 이동 시간

f_y, f_z : 수평 및 연직방향으로의 이동시간의 항을 포함하는 무차원 함수

T_y, T_z : 수평 및 연직방향 Lagrangian 시간 스케일

x : 풍하거리

u : 평균풍속

수평방향 및 연직방향 풍향각의 표준편차가 작은 경우 근사법 (approximation)에 의해 식 (2) 및 (3)의 $\sigma_y \cdot t$ 와 $\sigma_z \cdot t$ 는 각각 $\sigma_\theta \cdot x$ 와 $\sigma_\phi \cdot x$ 로 표시될 수 있다. 여기서, σ_θ 와 σ_ϕ 는 각각 수평 및 연직방향 풍향의 표준편차 (단위: radian)이다 (Irwin, 1983). 식 (2) 및 식 (3)에 포함된 무차원 함수 f_y 및 f_z 에 대해서는 Draxler (1976)를 비롯한 몇몇 연구자들 (Irwin, 1983; Cramer, 1976; Pasquill, 1976)이 배출원의 높이와 대기안정도 등에 따라 몇가지 평가식들을 제안하였으며 이들을 표 2에 정리하였다.

본 연구에서는 SODAR에서 얻어지는 수평 및 연직방향 풍향의 표준편차 σ_θ 와 σ_ϕ , 그리고 표 2에 나타난 f_y 와 f_z 를 식 (2)와 식 (3)에 적용하여 σ_y 와 σ_z 를 평가하였다. 이때 적용된 σ_θ 와 σ_ϕ 의 평균화 시간은 15분이었으며, σ_θ 와 σ_ϕ 가 얻어진 고도는 SODAR의 자료취득 gate의 최저점인 50 m 고도였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수평 및 연직방향 분산계수의 고도 의존성

σ_y 및 σ_z 의 평가에 앞서 σ_θ 와 σ_ϕ 의 고도에 따른 변화를 살펴보기 위해 불안정 대기조건 하에서 SODAR로부터 각각의 고도에서 얻어진 σ_θ 와 σ_ϕ 값의 평균을 표준편차와 함께 그림 1 및 2에 나타내었다.

이때의 혼합고는 Singal의 경험식 (Singal, 1984)을 사용한 경우 950 m, σ_w 의 연직방향 분포가 최대값을 나타내는 고도의 2배를 혼합고로 취하는 방법

Table 2. Summary of equations on f_y and f_z characterizing of lateral and vertical dispersion.

Source	Lateral dispersion	Vertical dispersion	
Draxler (1976)	i) Elevated releases $1/f_y = 1 + 0.9(T/1000)^{0.5}$	i) Elevated releases unstable $1/f_z = 1 + 0.9(T/500)^{0.5}$ stable $1/f_z = 1 + 0.945(T/100)^{0.806}$	
	ii) Surface releases unstable $1/f_y = 1 + 0.9(T/300)^{0.5}$ stable $1/f_y = 1 + 0.9(T/300)^{0.5}$ $T < 550$ sec $1/f_y = 1 + 28/(T)^{0.5}$ $T > 550$ sec	ii) Surface releases unstable $f_z = (0.3/0.16)(T/100 - 0.4)^2 + 0.7$ stable $1/f_z = 1 + 0.9(T/50)^{0.5}$	
	Cramer (1976)	$f_y = (50/x)[(x-5)/45]^{0.5}$	$f_z = 1$
	Irwin M ₃ (1983)	$1/f_y = 1 + 0.9(T/1000)^{0.5}$	unstable $f_z = 1$ stable $1/f_z = 1 + 0.9(T/50)^{0.5}$
Irwin M ₄ (1983)	$1/f_y = 1 + 0.9(T/1000)^{0.5}$	unstable $1/f_z = 1 + 0.9(T/500)^{0.5}$ stable $1/f_z = 1 + 0.9(T/50)^{0.5}$	
Pasquill (1976)	$1/f_y = 1 + (x/2500)^{0.5}$ $x < 10,000$ m $1/f_y = 3(x/10,000)^{0.5}$ $x > 10,000$ m	Pasquill - Gifford dispersion scheme	

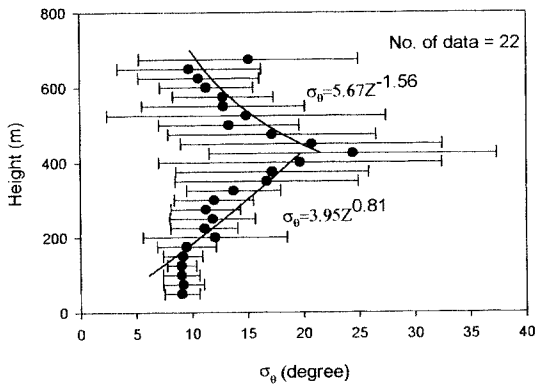


Fig. 1. Variation of σ_θ with height in unstable atmosphere.

(Deardorff, 1972)을 사용한 경우 1200 m 그리고 $\sigma_w^{3/2}$ 값의 연직방향 분포에서 구하는 방법 (Weil, 1980)을 사용한 경우 1050 m로 나타나 σ_θ 및 σ_ϕ 의 최대치가 나타나는 고도 약 400 m가 대류경계층 높이의 약 40~50% 정도에 해당함 (Wyngaard, 1985)을 확인할 수 있었다. σ_θ 및 σ_ϕ 의 연직방향 분포는

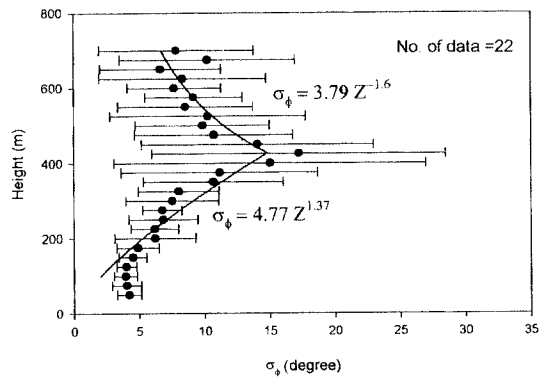


Fig. 2. Variation of σ_ϕ with height in unstable atmosphere.

약 100 m (약 0.1z_i)까지의 높이에선 거의 일정한 값을 나타내나 이후 약 400 m (약 0.4z_i) 근방까지 급격히 증가하며, 이 고도 이상에선 지수 함수적으로 감소함을 나타내었다. 100~425 m 사이 및 425~700 m 사이에서 얻어진 σ_θ 의 고도의존관계식은 각각 $\sigma_\theta = 3.95 Z^{0.81}$ 및 $\sigma_\theta = 5.67 Z^{-1.56}$ 이었으며 σ_ϕ 에 대해서

는 각각 $\sigma_y = 4.77 Z^{1.37}$ 및 $\sigma_z = 3.79 Z^{-1.60}$ 으로 나타낼 수 있었다(여기서, $Z=z/z_1$, z : 고도, z_1 : 혼합고). 따라서 50m 높이에서 얻어지는 σ_y 및 σ_z 의 정보로부터 결정되는 σ_y 및 σ_z 의 평가치는 약 100m 높이(약 $0.1z_1$)까지에서 방출원에 적용될 수 있을 것이며, 이를 넘어서는 높이의 배출원의 경우에 대해서는 횡방향 및 연직방향에 대한 σ_y 및 σ_z 의 고도 의존 관계식(Smith, 1973; 박옥현, 1983)을 사용하여 σ_y 및 σ_z 를 보정해서 사용하여야 할 것으로 사료된다. 평균화 시간에 대해서도 마찬가지로 식(4)를 사용하여, 평가하고자 하는 대상 농도의 평균화 시간에 맞게 σ_y 및 σ_z 를 보정해야 한다(Angell and Pack, 1965).

$$\sigma_y(t_2) = \sigma_y(t_1) \left[\frac{t_2}{t_1} \right]^q \quad (4)$$

여기서, t_2 및 t_1 은 각각 평균화 시간 혹은 실제적인 샘플링 시간(단위: 분) q 는 평균화 시간 보정 척수로 Angell과 Pack(1965)은 이값을 0.2로 취하였으며, t_1 가 1시간 이상, 100시간 이하의 경우엔 이값

이 0.25~0.30 범위에 이르는 것으로 보고하고 있다(박옥현, 1990).

3.2 복잡한 지형의 임해지역에서 수평 및 연직방향 분산 계수의 변화

표 2에 나타낸 σ_y 및 σ_z 평가를 위한 scheme들을 적용해서 평가된 σ_y 및 σ_z 의 풍하거리에 따른 변화를 그림 3 및 그림 4에 나타내었다.

그림 3 및 그림 4에 나타낸 자료값들은 임해지역에서 실측된 σ_y 및 σ_z 값들을 이전의 연구들(Harrison and Mars, 1976; Hosker, 1975; Raynor *et al.*, 1974; Smith and Nieman, 1969; Slade, 1962)에서 인용하여 나타낸 것이다. 안정한 조건일 때의 Reynor 등의 σ_y 실측치들이 큰 범위에 걸쳐 산포하는 주된 이유는 매우 안정한 조건시의 plume의 meandering 효과 때문이다.

표 2에 나타낸 각 scheme의 f_y 값을 적용하여 해안지역에서 σ_y 값을 평가한 결과에 따르면 대기오염 물질의 확산평가를 위해 일반적으로 사용되는 P-G system보다 이들 scheme이 σ_y 값을 작게 평가하는

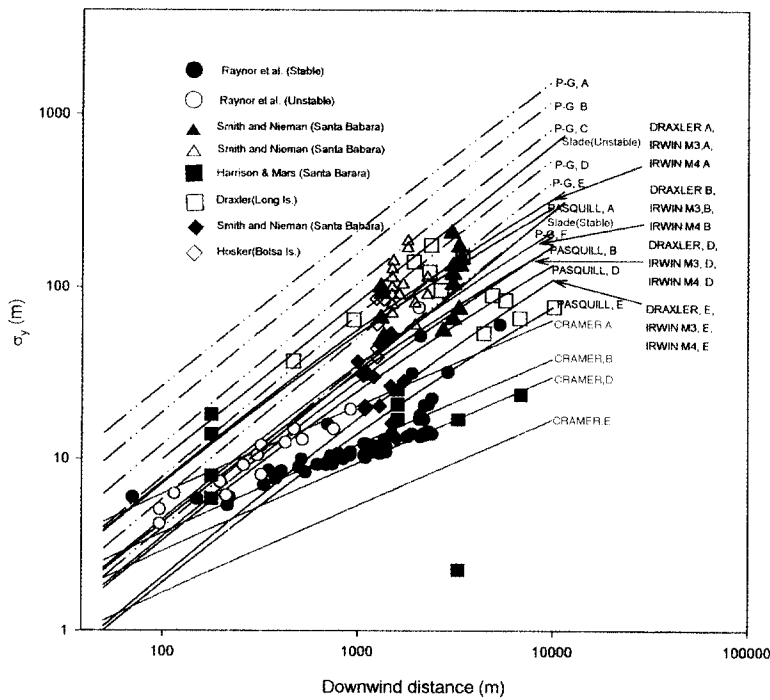


Fig. 3. Comparisons of various σ_y scheme.

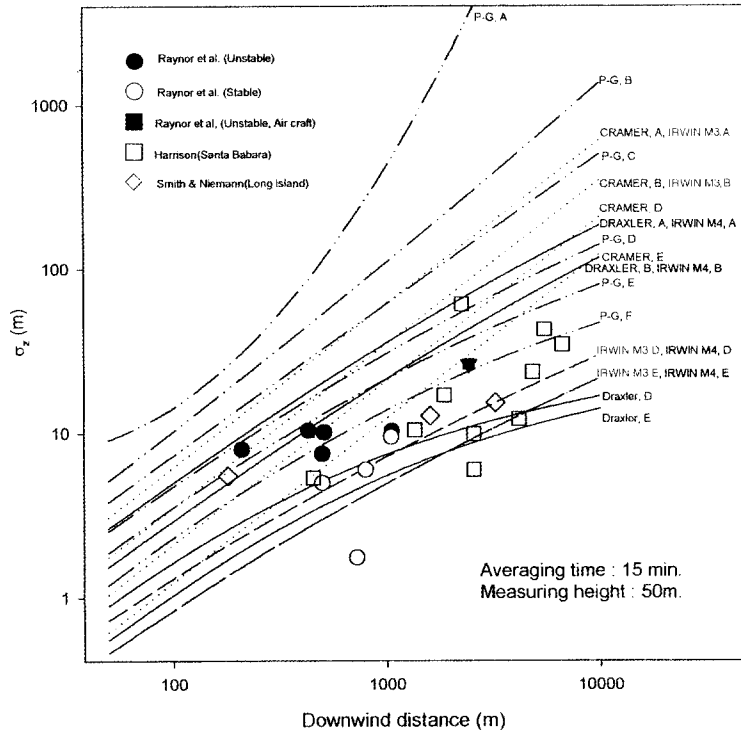


Fig. 4. Comparisons of various σ_z scheme.

경향이 있으며, 이 값은 해안지역에서 측정된 이전의 실측값과 대체로 일치하는 경향이 있음을 나타내고 있다. 이 처럼 해안지역에서 평가된 σ_z 값이 P-G system의 그것보다 작게 나타나는 것은 해안지역이 바다와 같은 큰 수계에 접하고 있고, 물의 비열이 흙에 비해 상대적으로 높아, 바다의 열용량이 커짐에 따라 대기 난류를 일으키는 근원이 되는 일사량과 같은 에너지의 많은 부분을 흡수하게 되고, 또한 열전도에 있어 흙과 물 사이엔 현저한 차이가 있어 수계(水系)는 서서히 데워지고 서서히 식기 때문에 해수면에 접한 대기층의 난류강도가 저감되기 때문인 것으로 보인다.

그림 4에 나타난 σ_z 에 대해서도 σ_y 와 유사한 결과를 얻었으며, 이전의 연구들(Hosker, 1975; Raynor et al., 1974; Smith and Nieman, 1969)에서 실측된 σ_z 값의 변동 범위는 대체로 Draxler A~E 곡선이 나타내는 거리에 따른 σ_z 값들의 범위내에 머무는 것으로 나타났다.

그러나, 각 scheme에 따라 평가된 σ_y 및 σ_z 의 크기 순은 y방향인가 z방향인가에 따라 다르며 값의 차이도 크게 나타나고 있으므로, 어느 scheme에 따라 평가된 분산계수들이 임해 지역에서 대기오염 농도를 보다 정확히 평가하는데 기여하는가의 문제는 특정 배출원에서 방출된 오염물에 의해 풍하지역에서 형성되는 대기오염농도 실측치와 모델링 결과치의 비교 고찰을 통해 판단해야 할 것이다.

3.3 대기 오염 농도 평가

3.2에서 구해진 σ_y 및 σ_z 값들을 적용하여 실제 대기오염 농도를 평가해 보기 위하여 보령화력 발전소 반경 10km내에 설치된 총 8개의 대기오염 측정소(전력연구원, 1997)에서 얻어진 SO₂ 농도 측정치와 정규연 분산모델에 위의 분산계수를 적용해서 구한 평가치를 비교하였다.

보령화력발전소는 3000 MW의 전력을 생산하는 대단위 발전단지로서 높이 150 m, 직경 6.9 m의 6개

연돌이 설치되어 있으며, 이들 연돌로부터 방출되는 SO₂ 평균배출량은 약 2,400 g/sec, 배출가스 온도는 126°C, 배기가스 배출속도는 16 m/sec 정도이다. 배출원과 측정소를 잇는 방위각과 풍향을 고려하여 실측자료의 분석 대상일로 취한 날의 발전소 운전 기록으로부터 배출원 자료를 얻었으며, 바람자료는 SODAR 자료를 사용하였고, 기압과 일사량에 관한 자료는 대기오염 감시망 설치시 함께 설치한 기상탑에서 얻어진 자료를 사용하였다.

정규연 확산식에 대입하기 위한 배출가스의 상승고 계산은 기온의 고도에 따른 구배에 관한 정보를 요구하지 않으며 단지 일반적으로 측정되는 기상 및 배출원 자료만을 사용하여 상승고 계산이 가능한 Holland 식(Holland, 1958)을 사용하였다.

$$\Delta H = \frac{W_s D}{\bar{u}_s} \left[1.5 + 2.68 \times 10^{-3} PD \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \right] \quad (5)$$

- 여기서, ΔH : 연의 상승고 (m)
- W_s : 굴뚝 끝에서의 가스 배출속도 (m/s)
- D : 굴뚝 직경 (m)
- T_s : 굴뚝가스 온도 (°K)
- T_a : 대기 온도 (°K)
- \bar{u}_s : 굴뚝 끝에서의 평균풍속 (m/s)
- P : 기압 (mbar)

이 식을 이용하여 평가된 유효 연돌고는 분석 대상일 동안 약 311~361 m에 걸치는 것으로 나타났다. 연돌에서 방출된 배출가스는 방출시의 운동량과 부력에 의해 상승하면서 동시에 바람에 의해 풍하 방향으로 이동하게 되므로 연의 상승고에 이를 동안 이동한 풍하거리 x는 식 (6)으로 표현되는 2/3법칙(Briggs, 1981)을 사용하여 계산하였다.

$$\Delta H = 1.6F^{1/3} (\bar{u})^{-1} x^{2/3} \quad (6)$$

여기서, F는 부력 flux로서 $\frac{g}{T_s} (T_s - T_a) W_s r_s^2$ 로 표현되며, r_s는 상승연의 초기 반경으로 연돌의 반경과 같고, x는 풍하거리 (m)이다.

본 연구의 대상지역처럼 복잡한 지형의 경우에는 기류가 지형을 따라 이동하는 흐름형상을 모의할 필요가 있고 이를 위해서는 Eulerian 좌표계를 사용하는 것보다 Lagrangian 좌표계를 사용하는 것이 보다 합리적인 것으로 알려져 있으므로(Hinds, 1970),

본 연구에 있어서도 대기오염 농도 계산을 위한 소요 비과시간 평가를 위해서 4.0의 Lagrangian/Eulerian 시간 스케일 비값(Hay and Pasquill, 1959)을 적용하였다.

측정된 대기오염농도 자료는 각 측정소에서 얻어진 5분 평균 농도자료를 1시간 평균 농도자료로 환산하여 1시간의 평균화 농도 계산치와 비교하였다.

그림 5는 각 σ_y 및 σ_z scheme을 적용해서 구해진 분산계수들을 확산모델에 적용하여 구한 SO₂ 농도의 예측치와 실측치를 비교하여 나타낸 것이다.

그림 5에서 점선은 FAC2 (a factor of 2: 예측치가 실측치의 1/2배에서 2배까지의 범위)의 범위를 나타낸다. 전체 자료로 보면 약 49% 정도가 FAC2의 범위에 드는 것으로 나타났으나, 각 scheme 별로 다소 차이가 있음을 나타내며 이런 문제는 후술(後述)되는 모델 평가 측도(measure)의 계산에서 다시 다루어질 것이다.

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 Cramer scheme을 적용해서 구한 분산 계수들을 확산식에 입력해서 평가한 오염농도 계산치가 실측치와 보다 잘 일치하는 것으로 나타난 반면 Draxler scheme으로 평가한 농도 계산치는 실제보다 오염농도를 과소평가하는 경향을 보여준다. 이는 그림 4에 나타낸 여러

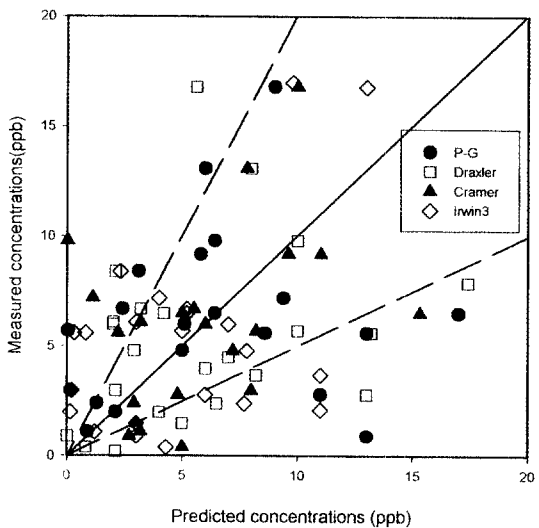


Fig. 5. Comparisons of measured concentrations and the predicted ones.

σ , scheme중에서 Draxler scheme에 따른 σ 값이 가장 작고 이 값이 약 450 m를 넘어서는 유효연돌고를 가지는 높은 배출원에 적용됨에 따라 연기가 지상으로 충분히 확산되지 못한 것으로 처리됐기 때문으로 보아진다. 측정농도가 3~10 ppb임에도 불구하고 모델링 결과치가 0 ppb에 가까운 경우들은 plume 상승고 결정식의 부정확성, 풍향자료의 부정확성 등 여러가지 요인에 기인할 수도 있는 것이므로 이들에 관한 체계적인 검토가 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

3.4 모델평가 측도에 의한 예측농도의 정확도 평가

각 scheme별로 농도예측의 정확도를 확인하기 위해 다음과 같은 몇가지 모델평가 측도(performance measure)를 검토하였다.

FAC2(a factor of 2)는 측정 농도값의 2배에서 1/2 배까지의 범위에 포함되는 예측농도값의 빈도수를 평가하여 모델의 정확도를 확인하는 것이다.

편의 분율(Fractional Bias, FB)는 식(7)과 같이 정의된다.

$$FB = \frac{(C_{o,max} - C_{p,max})}{0.5(C_{o,max} + C_{p,max})} \quad (7)$$

여기서, $C_{o,max}$, $C_{p,max}$ 는 각각 최대 측정농도 및 최대 예측농도이다.

이 값은 -2(극단적 과대평가)부터 2(극단적 과소평가)까지의 값을 가지는데, -0.67부터 0.67까지의 FB값은 계산된 값이 FAC2(a factor of 2) 범위안에 포함됨을 의미한다.

또 다른 평가측도로써 식(8) 및 식(9)처럼 정의되는 기하평균 편의(Geometric Mean Bias) 및 기하분산편의(Geometric Variance Bias)가 있다.

$$MG = \exp(\overline{\ln C_o - \ln C_p}) = \exp(\overline{\ln(C_o/C_p)}) \quad (8)$$

$$VG = \exp[\overline{(\ln C_o - \ln C_p)^2}] = \exp[\overline{(\ln(C_o/C_p))^2}] \quad (9)$$

여기서, C_o , C_p 는 각각 측정농도 및 예측농도이다.

완벽한 모델에서는 MG 및 VG가 1.0이 된다.

평가치와 실측치의 오차에 대한 측도로써 R.M.S.E(Root Mean Square Error)값은 식(10)과 같이 정의

된다.

$$R.M.S.E = \sqrt{\frac{(C_o - C_p)^2}{n}} \quad \text{혹은} \quad \sqrt{\overline{(C_o - C_p)^2}} \quad (10)$$

평가치와 실측치의 일치도를 평가하는 또다른 측도로써 상관계수가 흔히 사용되는 바 이는 보편적으로 식(11)과 같이 정의된다.

$$r(C_o, C_p) = \frac{Cov(C_o, C_p)}{\sqrt{Var(C_o)Var(C_p)}} \quad (11)$$

여기서, $Cov(C_o, C_p)$ 는 실측치와 예측치의 공분산이며, $Var(C_o)$, $Var(C_p)$ 는 각각 실측치와 예측치의 분산을 나타낸다.

자료가 대부분의 대기오염 농도 자료처럼 대수정규 분포에 가까운 분포를 하는 경우 식(12)가 상관계수 계산에 사용되기도 한다.

$$r(C_o, C_p) = \frac{(\overline{\ln C_o - \ln C_o})(\overline{\ln C_p - \ln C_p})}{\sigma(\ln C_o) \sigma(\ln C_p)} \quad (12)$$

여기서, $\sigma(\ln C_o)$ 및 $\sigma(\ln C_p)$ 은 각각 측정치 및 예측치의 대수값에 대한 표준편차이다.

분산계수 평가용 각 scheme을 적용하여 구해진 농도 예측치들에 대한 모델 예측성능 평가측도값을 표 3에 정리하였다.

각 scheme별 FB값은 -0.46에서 0.53의 값을 나타내어 FB만을 기준으로 판단한 경우 예측치가 실측치의 2배에서 1/2 범위에 드는 것으로 나타났으나, 그림 5의 산포도에 실측치의 2배에서 1/2배에 해당하는 한계선을 그어 구한 FAC2의 값은 0.35에서 0.60의 값을 나타내고 있다.

표 3에 나타난 바와 같이 모델 평가 측도들로 부터 판단한 예측치와 실측치 사이의 일치도는 Cramer scheme과 Draxler scheme을 적용한 경우가 다른 scheme을 적용한 경우들에 비해 예측능이 높은 것으로 나타났다. 이같은 결과는 어느 정도 지역 의존적인 난류특성에 기인한 것으로 보여진다. 보령화력발전소가 위치한 임해지역에서의 σ 값은 P-G system으로 나타난 것보다는 작게 평가되는 경향이 있으며, Draxler scheme에 의한 것보다는 크게 평가됨을 나타내는 것 같고, Cramer scheme에 의한 σ 평가가 이 지역에서 대기오염 농도를 예측하는데 보다 적절한 것으로 판단된다.

Table 3. Calculation results of model performance measure for each σ scheme applied to Gaussian dispersion model.

Performance measure	Scheme			
	P-G	Draxler	Cramer	Irwin M ₃
FAC2	0.58	0.35	0.60	0.48
FB	-0.46	-0.03	0.09	0.53
MG	0.96	0.92	1.03	1.23
VG	28.70	3.06	18.65	7.22
R.M.S.E	10.01	5.04	6.06	4.22
r(eq.(11))	-0.21	0.26	0.29	0.48
r(eq.(12))	0.10	0.49	0.25	0.34

4. 결 론

1. σ_y 와 σ_z 의 고도의존관계식은 혼합층의 중간고도를 기준으로 상부와 하부에서 각기 다른 형태를 나타냄을 확인하였으며, 약 100 m의 고도까지는 거의 일정한 값을 나타내었다. 따라서 SODAR의 최저 측정 Gate인 50 m 고도에서 얻어지는 σ_y 와 σ_z 의 값으로부터 결정되는 σ_y 와 σ_z 의 평가치는 약 100 m 고도까지 방출되는 배출원에 적용될 수 있을 것이며, 이를 넘어서는 높이의 배출원에 대해서는 σ_y 와 σ_z 의 고도의존 관계식을 사용해서 보정해서 사용해야 할 것이다.

2. 복잡한 지형의 임해지역에서 σ_y 와 σ_z 로 부터 σ_y 와 σ_z 를 평가하는 여러 scheme들은 P-G system에 비해 σ_y 와 σ_z 를 작게 평가하였는 바, 이는 바다라는 대형 수체에 의한 난류의 억제 효과가 있기 때문으로 판단된다.

3. 임해지역에서 구해진 σ_y 와 σ_z 를 Gaussian 분산식에 적용하여 예측된 농도와 실측농도의 일치도 평가와 관련된 여러 가지 통계 측도(測度)의 검토 결과에 의하면 보령화력발전소가 위치한 임해지역에서의 σ_y 값은 P-G system으로 구한 것보다는 작은 경향이 있으며, Draxler scheme에 의한 평가치 보다는 큰 것 같다. Cramer scheme에 의한 σ_y 평가가 이 지역에서 보다 적절한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 1996년도 한국과학재단 특징기초 연구과제 (과제번호: 96-0601-03-01-2)의 연구비지

원으로 수행된 연구의 일부입니다. 연구비를 지원하여 준 한국과학재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

박옥현 (1983) 높은 굴뚝에서 배출된 연속연의 풍하측 장거리에서의 횡방향 확산, 공학박사 학위논문, 부산대학교, pp.14-16.

박옥현 (1990) 대기확산의 이론과 모델링, 도서출판 중원, pp. 118-119.

전력연구원 (1997) 대형석탄화력 대기오염 감시망 구축 및 확산 예측기술 개발 최종보고서, pp. 40-64.

Angell, J.K. and D.J. Pack (1965) Atmospheric lateral diffusion estimates from tetroons, *J. Appl. Meteor.*, 4, 418-425.

Briggs, G.A. (1981) Plume rise and bouyancy effects in atmosphere science and power production, DOE Report DOE/TIC-27601.

Cramer, H.E. (1976) Improved techniques for modeling the dispersion of tall stack plumes, In *Proceeding of 7th International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and Its Application*, NO.51, NATO/CCMS, pp. 731-780.

Deardorff, J.W. (1972) Three dimensional and numerical modelling of the planetary boundary layer, *Workshop on Micrometeorology*, edited by Haugen, D.A., Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, pp. 271-309.

Draxler, R.R. (1976) Determination of atmospheric diffusion parameters, *Atmo. Env.*, 10, 99-105.

Hanna, S.R., G.A. Briggs, J.W. Deardorff, B.A. Egar, F.A. Gifford, and F. Pasquill (1977) AMS workshop on stability classification schemes and sigma curves - summary of recommendations, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 58, 1305-1309.

Hanna, S.R., L.L. Schulman, R.J. Paine, J.E. Plein, and M. Beer (1985) Development and evaluation of the offshore and coastal dispersion model, *JAPCA*, 35, 1039-1047.

Harrison, P.R. and S.J. Mars (1976) Monitoring of natural seeps in the Santa Babara channel off coast point, Report MRI-76-R-1408, Meteorological Research Institute, Altadena, California.

Hay, J.S. and F. Pasquill (1959) Diffusion from a continuous sources in relation to the spectrum and scale of turbulence, *Advces in Geophysics*, 6, 345-365.

Hinds, W.T. (1970) Diffusion over coastal mountains of

- southern California, *Atm. Env.*, 4, 107-124.
- Hollands, J.Z. (1958) A meteorological survey of the Oak ridge area, ORO-99, U.S. Atomic energy commission, ORO-99, pp. 541-558.
- Hosker, R.P. (1975) A comparison of estimation procedure for over water plume dispersion, In Symposium on Atmospheric Diffusion and Air Pollution, Santa Barbara, Calif., Amer. Meteor. Soc., Boston, Mass., pp. 281-288.
- Irwin, J.S. (1983) Estimating plume dispersion-A comparison of several sigma scheme, *J. of Clim. and Appl. Meteor.*, 22, 92-114.
- Katarzyna, J.R. (1989) Air pollution modelling in encyclopedia of environmental control technology, Vol. 2, edited by Paul N. Cheremisinoff, Gulf publishing Co., Houston, Texas.
- Nieuwstadt, F.T.M. (1977) The dispersion of pollutants over a water surface, In Proceedings 8th International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and Its Applications, NATO/CCMS DOC. NO. 80, 337-359.
- Pasquill, F. (1976) Atmospheric dispersion parameters in Gaussian plume modeling: Part II. Possible requirements for change in the Turner workbook volumes, Report EPA-600/4-76-0306, U.S. Environmental protection Agency, p. 53.
- Singal, S.P., B.S. Gera, and S.K. Aggarwal (1984) Nowcasting by acoustic remote sensing : experiences with the systems established at the National Physical Laboratory, New Delhi. *J. Sci. Ind. Res.*, 43, 469-488.
- Slade, D.H. (1962) Atmospheric dispersion over Chesapeake Bay, *Mon. Weather Rev.*, 90, 217-224.
- Smith, R.B. (1973) Application of data from field program for estimation of K-profile and vertical dispersion, TDN NO.86, Meteorol. office boundary layer research branch, Bracknell, Berkshire, U.K.
- Smith, T.B. and Niemann, B.L. (1969) Shoreline diffusion program, Oceanside, California, Vol. 3, Technical report, Report MR1-64-FR-860, Meteorology Research Institute, Altadena, California.
- Strimatis, D.G., A. Venkatram, and T.F. Lavery (1997) A model to estimate concentration during plume impingement, In Proceedings of the Sixth Symposium on Turbulence and Diffusion, Amer. Meteorol. Soc., pp. 28-31.
- Turner, D.B. (1970) Workbook of atmospheric dispersion estimates, U.S. Environmental Protection Agency, Publ. NO. Ap-26, p. 84.
- Weil, A., L. Eymard, M.E. Lequere, C. Klapisz, F. Baudin, and P.V. Grunderbeeck (1978) Investigations of the planetary boundary layer with an acoustic Doppler sounder, In Proceeding of the 4th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Amer. Meteor. Soc., Denver, CO, pp. 415-421.
- Wyngaard, J.C. (1985) Structure of the planetary boundary layer and implication for its modelling, *J. Clim. and Appl. Meteor.*, 24, 1111-1130.