

# 풍향 측정자료를 이용한 연기의 수평확산폭 산출 Estimation of Lateral Dispersion Parameter of Plume Using Observed Wind Direction Fluctuation

이종범, 김정식, 김용국, 조창래

강원대학교 환경학과

## I. 서론

대기오염 농도분포를 산출하기 위하여 가우시안 플룸식(Gaussian Plume equation)을 사용하는 확산모델이 널리 사용되고 있다. 이러한 모델들의 실행을 위해서는 기상자료와 배출량자료 등의 입력자료를 필요로 한다. 대기오염물질의 확산은 그 지역의 기상조건과 지형조건에 의존하므로 모델 예측의 정확도를 높이기 위해서는 이들 입력자료의 정확성이 요구된다. 특히, 기상자료가 부정확할 경우 오차가 크게 나타나게 되는데 오차의 중요한 요인 중의 하나는 플룸(plume)의 수평확산폭( $\sigma_y$ )과 연직확산폭( $\sigma_z$ )의 부정확성이다. 따라서 모델 특성에 맞는 정확한  $\sigma_y$ 를 구할 필요가 있다.

$\sigma_y$ 의 산출방법으로는 Pasquill-Gifford scheme이 널리 사용되며 대기의 안정도와 풍하거리 따른  $\sigma_y$ 를 구하는 방법이다. Pasquill-Gifford scheme은 이용하기 편리하다는 장점이 있으나 산출한  $\sigma_y$ 는 넓고 평탄한 지역에서 확산실험에 의하여 구한 값이므로 우리나라와 같이 복잡한 지형에서는 사용이 부적합하다(김과 이, 1992).  $\sigma_y$ 를 구하는 또다른 방법으로서 풍향변동 성분을 측정하여  $\sigma_y$ 를 구하는 방법이 있다. 이 방법은 확산의 중요한 요인인 풍향변동값을 직접 이용하므로 지역에 따른 확산 특성이 반영되어 그 지형에 적합한  $\sigma_y$ 를 구할 수 있다.

본 연구에서는 춘천측후소노장에 설치되어있는 12m 높이의 기상탑에서 장시간 측정된 자료를 분석하여 대기안정도 및 풍속과 평균화시간(averaging time)에 따른 풍향변동량( $\sigma_\theta$ )의 특징을 파악하고 지역의 특성에 알맞는  $\sigma_y$ 를 산출하는 것을 목적으로 하였다.

## II. 연구방법

본 연구를 위하여 전형적인 분지 형태를 갖춘 평탄한 농경지에 12m 높이의 기상탑을 설치하였다. 여기는 춘천시의 변두리지역으로서 약 2km 거리에 의암호가 위치하고 있으며 반경 약 5km 거리에는 고도 300-400m의 낮은 산들이 둘러싸여 있는 분지 중앙부에 해당한다.

기상탑의 측정요소로는 기상탑의 3m 및 12m 고도에서의 기온과 풍속 그리고 12m의 풍향 및 풍향의 표준편차( $\sigma_\theta$ )이며 측정기간은 1992년 5월부터 1994년 12월까지 측정된 자료 중 1992년 12월부터 1994년 11월까지 24개월간 측정된 자료를 이용하였으며 풍속이 1m/sec이상인 경우만을 분석에 이용하였다.

풍향의 표준편차( $\sigma_\theta$ )로부터  $\sigma_y$ 를 산출하기 위하여 Pasquill(1976)이 제안한 다음과 같은 관계식을 이용하였다.

$$\sigma_y = \tan \sigma_\theta \times Fy(t_{Ly}) \quad (1)$$

여기에서 x는 풍하 거리(downwind distance)로서 풍속과 60분 평균화시간의 곱으로 계산된다.  $\sigma_\theta$  자료는 sampling time 5초, 평균화시간은 10분으로 하였다. 매 10분간 측정된 풍향성분 자료로부터 60분 평균화시간에 대한  $\sigma_\theta$ 를 계산하였으며 방법은 다음과 같다(김과 이, 1992)

$$(\sigma_\theta)^2 = \overline{[\sigma_{\theta 0}]^2} + [\sigma(\theta)]^2 \quad (2)$$

여기에서  $\overline{[\sigma_{\theta 0}]^2}$ 는 매 10분간 수록된 풍향의 표준편차에 대한 평균값이며,  $\sigma(\theta)$ 는 60분간에 대한 매 10분간의 평균풍향의 표준편차 값 6개의 표준편차이다. 또한 Fy는 식(3)에서 보는 바와 같이 수평방향의 라그랑지 적분시간 스케일에 의존하는 무차원 함수이다.

$$Fy(T_{Ly}) = 1.414(T_{Ly}/t)(t/T_{Ly} - 1 + \exp(-t/T_{Ly}))^{0.5} \quad (3)$$

여기에서,  $T_{Ly}$ 는 수평방향의 라그랑지 적분시간 스케일이며,  $t$ 는 확산시간 스케일이다.  $T_{Ly}$ 는 안정도에 따라 달라지며 Hanna(1982)가 제안한 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$\begin{aligned} T_{Ly} &= 0.15 h/\sigma_v && (\text{unstable}) \\ T_{Ly} &= 0.11 (h/\sigma_v)(z/h)^{0.5} && (\text{stable}) \\ T_{Ly} &= 0.5 (z/\sigma_v)/(1+fz/u_*) && (\text{neutral}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서  $\sigma_v$ 는  $z$ 고도에서 평균풍향에 직각방향인 수평풍속의 표준편차이며,  $h$ 는 혼합층고도,  $u_*$ 는 마찰속도,  $f$ 는 코리올리파라미터이다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1 $\sigma_\theta$ 의 특징

평균화시간과 대기의 안정도에 따른  $\sigma_\theta$ 의 특징을 고찰하기 위하여 춘천기상탑에서 측정된 자료 중 1992년 12월부터 1994년 11월까지 2년간의 매 10분간의 측정된 풍향성분자료를 이용하여서 평균화시간 30, 60, 120분에 대한  $\sigma_\theta$ 를 산출하여 그림 1에 나타냈다. 그림 1에 보인 바와 같이 대기상태가 불안정한 경우와 안정한 경우에  $\sigma_\theta$ 는 큰 값을 나타내는 반면 중립 또는 약불안정한 경우 최소를 나타냈다. 풍속계급과  $\sigma_\theta$ 와의 관계에서는 대기의 상태가 강불안정과 강안정인 경우에 특히 풍속이 약할수록  $\sigma_\theta$ 가 크게 나타났다. 한편, 중립인 경우에  $\sigma_\theta$ 는 풍속이 약할 수록 작은값을 나타내었다.

평균화시간에 따른  $\sigma_\theta$ 의 단주기( $\overline{\sigma_{\theta 0}}$ ) 및 장주기( $\overline{\sigma(\theta)}$ )성분을 분석한 결과 강안정한 대기상태하에서 평균화시간이 길어질수록 장주기 풍향변동의 영향을 크게 받아서  $\sigma_\theta$ 가 커지는 것을 나타낸다. 이와 같이 평균화시간이 길어질수록 강안정인 경우  $\sigma_\theta$ 가 큰 폭으로 증가하는 주요인은 역학적 난류에 의한 단주기 풍향변동보다는 지형에 의한 장주기 풍향변동에 의한 것으로 사료된다.

#### 3.2 $\sigma_y$ 의 산출

기상탑에서 측정된  $\sigma_\theta$ 를 이용하여 식(1)에 의하여 6종류의 안정도별 풍하거리에 따른  $\sigma_y$ 를 구하였다. 그림 2는  $\sigma_y$ 와 풍하거리와의 관계를 나타낸 것으로서  $\sigma_y$ 는 매 2km마다 각 구간별 중앙값을 산출한 자료를 이용했다.

Table 1. Comparison between  $\sigma_y$  by Pasquill-Gifford method and  $\sigma_y$  by observed  $\sigma_\theta$  in Chunchon basin.

Distance	$\sigma_y$ by Pasquill-Gifford curve						$\sigma_y$ obtained using observed $\sigma_\theta$ in Chunchon					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
3 km	546	409	279	185	138	92	534	212	231	-	114	103
5 km	850	641	441	292	219	146	659	291	249	138	132	108
7 km	1136	861	597	395	296	197	763	473	298	164	155	121
9 km	1409	1071	746	495	370	247	853	666	363	185	172	139

대기의 상태가 강불안정(A 계급)인 경우에 풍하거리가 멀어짐에 따라  $\sigma_y$ 값의 증가폭이 작아지는 반면 대기의 상태가 불안정(B 계급)과 약불안정(C 계급)인 경우에는  $\sigma_y$ 값의 증가폭이 커짐을 나타낸다. 한편, 대기의 상태가 중립(D 계급)일때는 약안정(E 계급)일때와 유사한 크기의  $\sigma_y$ 를 나타냈다.

표 1은  $\sigma_\theta$ 의 측정자료를 이용하여 구한  $\sigma_y$ 와 Pasquill-Gifford Scheme(P-G scheme)에 의한  $\sigma_y$ 를 비교하여 제시한 것이다.  $\sigma_\theta$ 에 의하여 구한  $\sigma_y$ 를 P-G scheme에 의하여 구한  $\sigma_y$ 값과 비교하면  $\sigma_\theta$ 에 의하여 구한  $\sigma_y$ 값이 대체로 크게 나타난다. 특히 중립상태에는 두배 이상 작은 특징을 볼 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 춘천기상대에 설치한 기상탑에서 장기간 측정된 풍향변동량 자료의 특징을 고찰하였다. 또한 풍향변동량 자료를 이용한 수평확산폭을 산출하였다. 춘천지역에서 측정된  $\sigma_\theta$ 의 특징을 살펴보면 평균화시간이 10분인 경우를 제외하고는 약불안정과 중립에서 최소를 나타내었다. 또한 대기의 안정도가 중립인 경우 풍속에 따른 차이는 없었으나 대기의 안정도가 각각 불안정과 안정으로 갈수록, 그리고 풍속이 강한 경우 보다는 약한 경우에 풍향변동폭이 크게 나타남을 보였다. 한편, 대기의 안정도가 불안정과 강안정인 경우 평균화시간이 길어짐에 따라  $\sigma_\theta$ 가 크게 증가함을 나타냈다. 이것은 단주기 풍향변동 보다는 지형에 의해 나타나는 장주기 풍향변동에 기인한 것으로 사료된다.

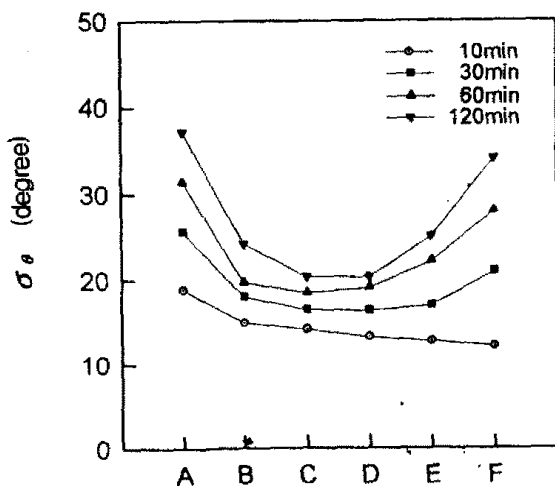
지역적 특성에 맞는  $\sigma_y$ 를 산출하기 위해서  $\sigma_\theta$ 를 이용하여 대기안정도별로 분류한 후  $\sigma_y$ 를 계산한 결과 일반적으로 P-G curve에서 구한  $\sigma_y$ 보다는 작은 특징을 볼 수 있다. 특히 대기의 상태가 중립(D 계급)과 안정(E, F 계급)일때 풍하거리가 커짐에  $\sigma_y$ 의 값은 크게 감소하는 특징을 보였다.

앞으로 더욱 정확한  $\sigma_y$ 의 산출을 위해서는 확산실험의 결과와의 비교가 필요할 것으로 생각된다. 본 논문에서 적용한 함수는 평탄한 지역에서 확산실험을 통하여 산출한 식으로서 우리나라와 같이 산악지대가 많고 평탄지의 규모가 작은 지형에서는 큰 차이를 나타낼 것으로 생각되며 더욱 개선할 필요가 있다.

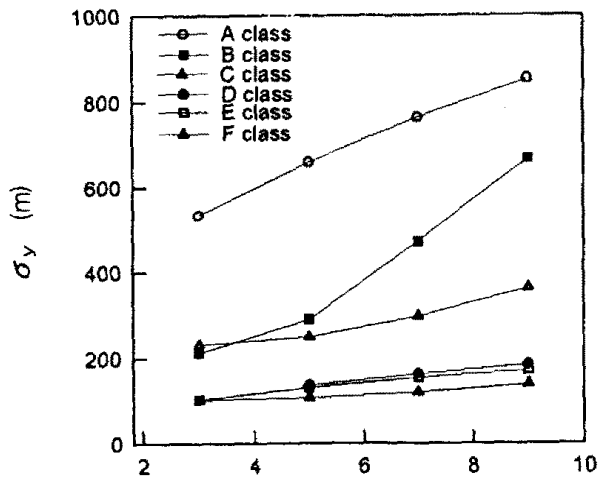
#### 참고문헌

김용국, 이종범 (1992) 대기안정도와 지형조건에 따른 풍향변동폭의 특성, 한국대기보전학회지, 8(2), 138-145

Hanna S.R.(1982) Application in modeling. In Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling(edited by Nieuwstadt F.T.M. and Van Dop H.), pp.275-310.



Pasquill stability class



Distance from source (km)

Fig. 1.  $\sigma_\theta$  for various stability classes at the Chuncheon basin for various averaging time.

Fig. 2.  $\sigma_y$  for various stability classes at the Chuncheon basin for 1 hour averaging time.