

# Pasquill 安定度階級の 評價와 安定度 Parameter 推定方法의 開發

## Evaluation of Pasquill Stability Class with Monin-Obukhov Length and Estimation Scheme of Stability Parameter

李 鍾 範 · 金 龍 國

江原大學校 環境學科  
(원고접수 : 1990. 9. 22)

Chong Bum Lee, Yong Goog Kim

Dept. of Environmental Science, Kangweon National University  
(Received 22 September 1990)

### Abstract

Pasquill stability class (PSC) was evaluated with Monin-Obukhov length (L) using the data observed at a height of 213 m meteorological tower in Tsukuba, Japan.

PSC was determined with wind speed and insolation (net radiation at night), and L was calculated with the heat flux and the friction velocity obtained at 25 m by the eddy correlation method. To evaluate PSC with L, for every class of Pasquill stability (from A to F class), percentiles and median of L were used.

Results show that for every class of Pasquill stability, L varies so widely that PSC does not adequately represent the atmospheric stability conditions.

The scheme which estimates L using air temperature at two levels and wind speed at single level was developed. Comparison between estimated L by the scheme and observed L reveals that the scheme is better than PSC. Furthermore, the scheme is more advantageous than PSC because it uses air temperature at two levels instead of insolation which is more difficult to observe in the field than air temperature.

### 1. 서 론

현재 대부분의 Gaussian형의 대기오염 확산모델에서는 Pasquill 안정도계급 (Pasquill stability class; PSC), 또는 Turner 안정도계급을 이용하여 오염물질의 수평확산폭 및 수직확산폭을 산출하여 오염농도를 계산하도록 되어 있다. 그러므로 계산의 정확도를 향상시키기 위하여는 대기안정

도를 가급적 정확하게 산출할 필요가 있다. 그러나, Pasquill 안정도계급은 풍속과 지표면의 가열 또는 냉각을 좌우하는 일사의 강도 또는 운량만을 이용하여 결정되므로, 실제 대기오염물질이 확산되는 지상 수십미터 또는 그 상층의 안정도를 대표하지 못하는 경우가 있다. 또한, 대기의 난류구조를 결정짓는 중요한 요소인 지표면의 거칠기길이의 지역적 차이를 고려하지 않으므로 실제 대기안정도와는 차이가 날 수 있다(Signal et al.,

1989).

한편, 대기의 안정도를 나타내는 parameter 중에서도 특히 Monin-Obukhov 길이(L)와 고도(z)로부터 구해지는 z/L은 접지층의 난류구조를 기술하는데 가장 기본적인 요소이다. Golder (1972)는 L과 PSC의 관계를 제시하였으며, 이 관계를 이용하면 L로부터 PSC를 산출할 수 있게 된다. 그러나, L을 구하기 위하여서는 현열 flux와 운동량 flux가 필요하지만, 이들 flux를 측정하기 위하여서는 감응시간이 빠른 난류측정장치가 필요하므로 일상적으로 측정하기에는 어려움이 있다. 따라서, 측정이 용이한 기상자료만으로 L을 추정하는 방법이 요구된다.

본 연구에서는 기상탑에서 측정된 난류자료로 구한 L(L<sub>obs</sub>)과 PSC를 비교하였으며, 또한 두 고도의 기온과 한 고도의 풍속만을 이용하여 L을 추정하는 방법을 작성하고, 추정된 L(L<sub>est</sub>)과 L<sub>obs</sub>을 비교하여 이 추정방법을 평가하였다.

## 2. 방 법

### 2.1 자 료

본 연구에서는 일본 기상연구소의 213 m 기상탑에서 측정된 자료를 사용하였다. 기상탑의 측정고도는 지상 10, 25, 50, 100, 150, 200 m의 총 6 고도이며, 기온, 습도, 풍향, 풍속 등의 평균치 이외에 3차원 초음파풍속온도계로 난류변동량도 측정된다(Hanafusa et al., 1979). 분석에는 10 m의 풍속, 10 m와 50 m의 기온, 25 m의 마찰속도와 현열 flux, 일사량, 순복사량 자료를 이용하였으며, 1983년 겨울의 7일간, 여름의 10일간, 가을

의 9일간의 총 26일중 결측기간 및 부적당한 자료를 제외한 총 363시간의 매시간 자료이다.

### 2.2 Pasquill 안정도계급과 Monin-Obukhov 길이

Pasquill (1961)은 일사강도(야간에는 운량) 및 풍속에 따른 대기의 안정도를 6계급으로 구분하였으며, Turner (1964)는 태양고도각과 운량, 운고에 따른 일사량계급 및 순복사량 지수로부터 안정도계급을 결정하는 방법을 작성하였다. 이 방법들은 일사의 강도, 운량 등 주관적인 자료를 사용하므로, 본 연구에서는 표 1(日本氣象廳, 1976)에 의하여 일사강도와 운량 대신 일사량과 순복사량 자료로부터 PSC를 결정하였다. 표 1에서 A-B, B-C, C-D는 두 계급의 중간을 나타내나 본 연구에서는 각각 A, B, C 계급으로 간주하였다.

한편, L은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = - \frac{\rho c_p u_*^3 \bar{\theta}}{kgH} \quad (1)$$

여기에서, g는 중력가속도, ρ는 공기의밀도, c<sub>p</sub>는 정압비열,  $\bar{\theta}$ 는 온위, k는 Von-Karman's constant (=0.4), H는 현열 flux, u\*는 마찰속도이다. 마찰속도 및 현열 flux는 난류측정 자료로부터 다음과 같은 eddy correlation method를 이용하여 구할 수 있다.

$$u_*^2 = -(\overline{w'u'}) \quad (2)$$

$$H = \rho c_p (\overline{w'\theta'}) \quad (3)$$

여기에서, w' 및 u'는 각각 수직풍속과 수평풍

Table 1. Key to Pasquill stability categories(日本氣象廳, 1976).

Wind speed at 10 m (m/s)	Insolation (Daytime) (cal cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> )				Net radiation (Nighttime) (cal cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> )		
	≥ .83	.83 > ≥ .42	.42 > ≥ .21	.21 >	< .03	.03 ≤ < .06	.06 ≤
u < 2	A	A-B	B	D	D	G	G
2 ≤ u < 3	A-B	B	C	D	D	E	F
3 ≤ u < 4	B	B-C	C	D	D	D	E
4 ≤ u < 6	C	C-D	D	D	D	D	D
6 ≤ u	C	D	D	D	D	D	D

속의 변동량이며,  $\theta'$ 는 온위의 변동량으로서 고도 25 m에서의  $w'$ ,  $u'$ ,  $\theta'$  자료로부터 (2) 식과 (3) 식에 의하여  $u_*$ 와  $H$ 를 구하고 (1) 식을 이용하여  $L_{obs}$ 를 산출하였다.

### 2.3 Monin-Obukhov 길이 추정방법

식 (1)에서 보인 바와 같이,  $L$ 은 현열 flux와 마찰속도의 측정자료로부터 구하여지지만, 온도와 풍속의 변동량을 측정하기 위하여서는 반응시간이 매우 빠른 측기가 필요하여, 일상적으로 측정하기는 어려우므로, 풍속과 기온의 평균치만으로  $L$ 을 추정하는 방법이 필요하다.

대기의 안정도를 나타내는 gradient Richardson number (Ri)는 다음 식으로 정의된다.

$$Ri = \frac{g(\partial\theta/\partial z)}{\theta(\partial u/\partial z)^2} \quad (4)$$

여기에서,  $\theta$ 는 온위이며  $u$ 는 풍속,  $z$ 는 고도를 나타낸다.

식 (4)에서 나타낸 바와 같이, Ri는 변동량 측정치 대신 두 고도의 풍속과 기온으로부터 구해지므로 측정이 용이한 장점이 있으며, 많은 야외실험결과 Ri와  $L$ 의 관계가 밝혀져 있으므로 (Paulson, 1970; McVehil, 1964), 두 고도의 풍속과 기온을 측정하면  $L$ 을 구할 수 있다. 그러나, Ri는 고도에 따른 풍속의 기울기의 2승에 반비례하므로 풍속 측정상의 오차에 매우 민감하게 영향을 받게 된다. 이러한 문제때문에 두 고도의 기온과 한 고도의 풍속만을 이용하는 bulk Richardson number (Rb)가 이용되기도 하며, 또한 Rb와 그 지역의 거칠기 길이로부터  $L$ 을 구하는 방법이 제시되어 있다 (Schultz, 1979; Louis, 1979; Wratt, 1987).

본 연구에서는 Paulson(1970)의 flux-profile method를 변형하여, 두 고도의 기온 및 한 고도에서의 풍속만으로 iteration method를 사용하여, 다음과 같이  $L$ 을 추정하는 방법을 작성하였다.

$H$ 는 고도  $z_1$ 과  $z_2$ 에서의 온위  $\theta_1$ 과  $\theta_2$  및 고도  $z_3$ 에서의 풍속  $u_3$ 로부터 다음 식에서 구해진다 (Panofsky and Dutton, 1984).

$$H = \frac{-\rho C_p k^2 u_3 (\theta_2 - \theta_1)}{(\ln(z_3/z_0) - \psi_{m3}) (\ln(z_2/z_1) - \psi_{h2} + \psi_{h1})} \quad (5)$$

여기에서,  $z_0$ 는 지표면 거칠기길이이며  $\psi_{m3}$ ,  $\psi_{h1}$ ,  $\psi_{h2}$ 는 각각 안정도의 함수로서 첨자  $m$ 과  $h$ 는 각각 운동량과 열에 대한 값임을 뜻하며, 첨자 1,2,3은 각각 고도  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$ 에 대한 값이다. 고도  $z$ 에 대한  $\psi_m$ 과  $\psi_h$ 는 안정인 경우

$$\psi_m = -5z/L \quad (6)$$

$$\psi_h = -5z/L \quad (7)$$

이고, 불안정인 경우에는

$$\psi_m = 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2\tan^{-1}x + \pi/2 \quad (8)$$

$$\psi_h = 2\ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) \quad (9)$$

이며, 여기에서,  $x = [1 - 16(z/L)]^{1/4}$ 이다. 또한  $u_*$ 는 마찰속도로서

$$u_* = \frac{ku}{\ln(z/z_0) - \psi_m} \quad (10)$$

이다.  $H$  및  $u_*$ 를 위의 (5) 식과 (10) 식에서 구하게 되면 (1) 식에서  $L$ 을 구할 수 있으나, (5) 식과 (10) 식에는  $L$ 이 필요하다. 즉,  $L$ 을 구하기 위하여서는  $L$ 을 알아야 하므로 본 연구에서는 다음과 같이 반복법(iteration method)에 의하여  $L$ 을 구하였다. 우선  $L = \infty$  (neutral)로 하여  $\psi_m$ ,  $\psi_h$ 를 구하고, (5) 식, (10) 식에 의하여  $H$ 와  $u_*$ 를 구한 후 (1) 식에 대입하여 새로운  $L$ 을 구한다. 이렇게 구한  $L$ 로서 (5) 식, (10) 식, (1) 식에 의하여 다시 새로운  $L$ 을 구한다. 이러한 계산과정에서 구해지는  $L$ 의 변동이 1% 이내가 될 때까지 반복을 계속하여 최종적인  $L$ 을 얻는다.

안정도 parameter  $L$ 을 구하는 계산과정을 그림 1에 나타내었다.

한편, 계산과정 중 계산상의 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 처리과정을 추가하였다.

1) 두 고도의 온위의 차이가 매우 작은 경우에는 계산이 불가능하므로, 두 고도의 온위의 차이가 0.01 K보다 작은 경우에는 항상 중립으로 하였다.

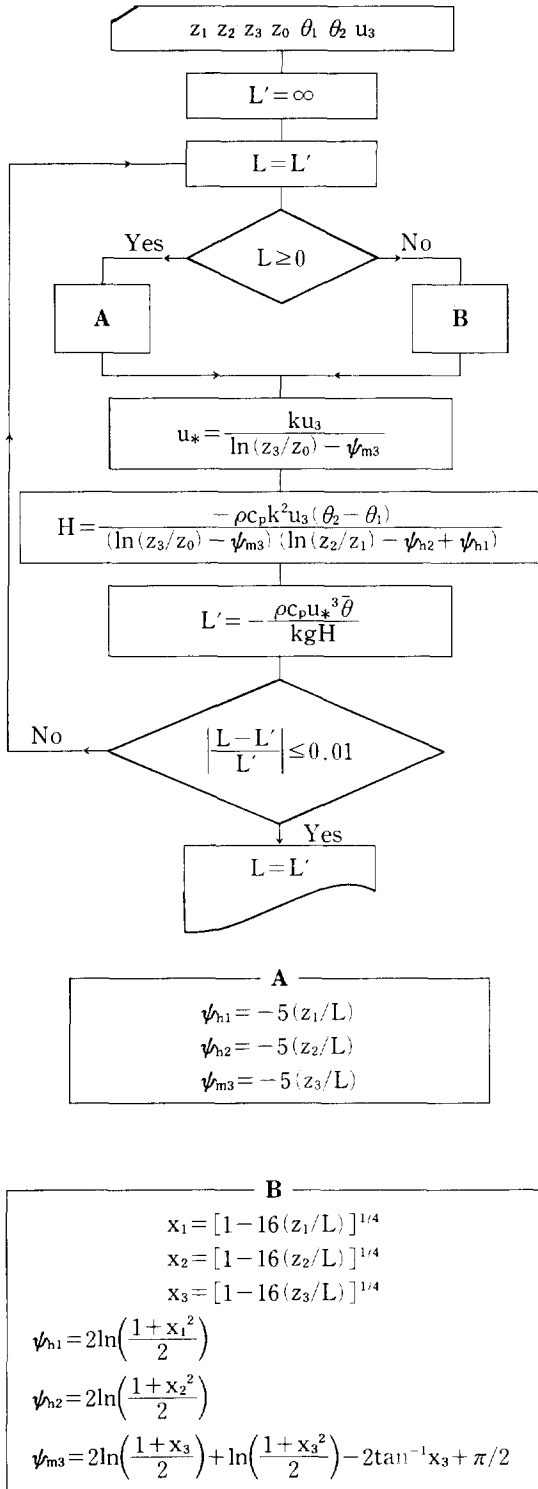


Fig. 1. Flow diagram of estimation scheme of L.

2)  $u_*$ 는 안정도에 따라서 달라지지만 대체로 풍속의 10% 내외의 값이 되며 풍속이 작은 경우  $u_*$ 도 작아진다(Stern, 1976). 이와 같이  $u_*$ 값이 작은 경우, L값은  $u_*$ 의 3승에 비례하게 되어 매우 작아져서 비 현실적인 값이 되므로, 풍속이 0.2 m/sec보다 작은 경우는 0.2 m/sec로 하였으며, 또한  $u_*$ 에 대하여서도 0.01 m/sec 보다 작은 경우는 0.01 m/sec 보다 작아지지 않도록 제한하였다.

3) 계산상의 불안정을 없애기 위하여 반복계산 중 먼저 구한  $\psi_m$ ,  $\psi_h$ 에는 각각 80%, 새로 구해지는  $\psi_m$ ,  $\psi_h$ 에는 각각 20%의 가중치를 두어 평균한 값으로 다음 계산을 수행하였다.

여기에서 이용한 자료는 각각 10 m, 50 m에서의 기온 및 10 m에서의 풍속자료이며, 거칠기길이는 동일한 풍속자료를 이용하여 계산한 Hanafusa et al.(1986)의 결과를 참고하여 0.34 m로 하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 Pasquill 안정도 계급과 Monin-Obukhov 길이의 비교

PSC와  $1/L_{obs}$ 의 대응관계를 조사하기 위하여

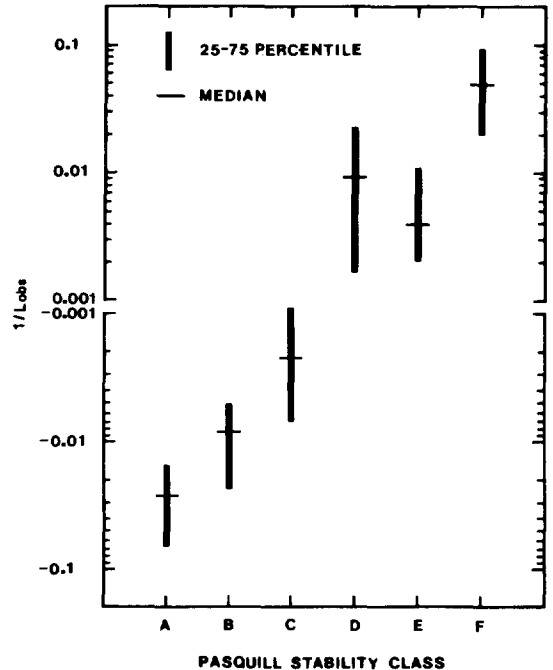


Fig. 2. Comparison between  $1/L_{obs}$  and PSC.

총 363시간 자료를 PSC에 따라 6 그룹으로 구분하여 각 계급별  $1/L_{obs}$ 의 범위를 나타내었다.  $1/L_{obs}$ 의 범위는 최소, 최대값이나 표준편차로 나타낼 수도 있겠으나, 이러한 값들은 소수의 극단적인 값에 크게 좌우될 수 있어 대체적인 범위를 나타내는데 적합하지 못하므로 본 연구에서는 percentile을 사용하였다. 그림 2는 각 PSC별로  $1/L_{obs}$ 의 25 percentile부터 75 percentile까지의 범위를 막대로 나타낸 것이다. 또한, 각 PSC별  $1/L_{obs}$ 의 대표치로서도 평균값 대신 중앙값(50 percentile)을 사용하였다.

PSC가 A에서 F로 갈수록  $1/L_{obs}$ 가 커지는 경향은 뚜렷이 나타나지만, D계급의 중앙값에 비하여 E계급의 중앙값이 오히려 작게 나타났다. 또한, E계급의 경우  $1/L_{obs}$ 의 25~75 percentile 값은 D계급값의 범위내에 모두 포함되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 많은 부분이 중첩되는 것은, 실

제 대기의 안정도상태를 잘 나타낸다고 할 수 있는  $1/L_{obs}$ 이 같은 값인 경우에도 PSC는 다른 계급으로 구해지는 경우가 많아서,  $1/L_{obs}$ 에 대하여 PSC가 1대 1로 대응되지 못하는 것을 뜻하는 것이다.

이러한 차이의 대부분은 주로 야간 및 일출, 일몰 전후시간에 해당되는 바, 일몰후에 지표부근에 접지역전이 형성되기 시작할 때 PSC로서는 안정상태를 나타내지만, 아직 L의 측정고도인 25 m까지는 접지역전층이 성장하지 못하여 이 고도의 상태는 중립 또는 불안정상태로 남아있는 경우와, 일출직후의 경우 지표면가열로 혼합층이 지표부근에 발달하기 시작할 때 접지역전층이 잔류하고 있는 상층은 안정한 상태를 유지하나, 일출후 일사량이 있으므로 PSC는 불안정으로 구해지기 때문이라고 생각된다.

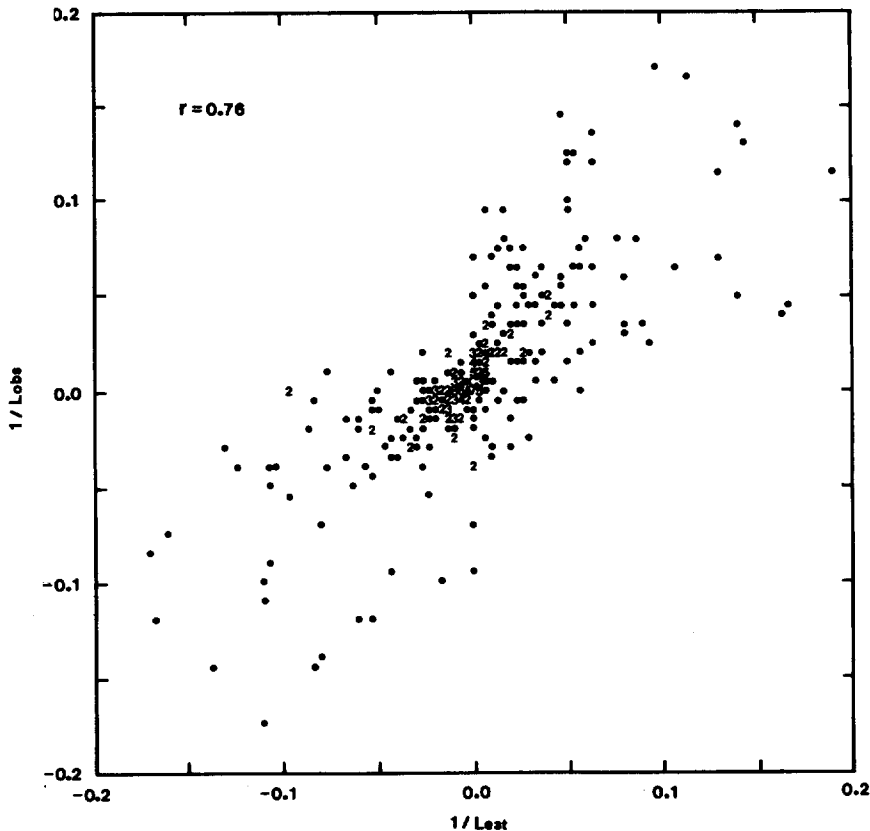


Fig. 3. Comparison between  $1/L_{obs}$  and  $1/L_{est}$ .

### 3.2 안정도 추정방법의 평가

$1/L_{obs}$ 로서 두 고도의 기온 및 한 고도의 풍속자료만으로 추정된  $1/L_{est}$ 을 평가하여 보면 그림 3과 같이 대체로 잘 대응되는 것을 알 수 있다. 또한, 일사량 또는 운량의 측정보다는 간단한 기상탑을 이용하면 두 고도의 기온측정이 용이하다는 점에서, 두 고도의 기온 및 풍속만으로 추정된  $1/L_{est}$ 은 지표층의 대기상태를 잘 대표할 수 있다고 사료된다.

$1/L_{est}$ 와  $1/L_{obs}$ 가 차이가 나는 이유중의 하나로서는, 10m와 50m 기온으로 이 층내의 온위경도를 구하여 L을 추정하는데 있어서 일출, 일몰전후와 같이 역전층의 생성 또는 소멸초기의 경우 온위경도가 고도에 따라 크게 달라질 수 있기 때문으로 생각된다. 또한, 야간에 자주 발생하는 극단적인 강안정상태의 경우에  $1/L_{est}$ 와  $1/L_{obs}$ 가 차이가 크게 나타나는 경우가 있었다. 그러므로 강안정층의 경우 이 추정방법의 적용은 한계가 있으므로 강안정층의 경우에 대한 보완이 필요하다고 생각된다.

한편, Irwin과 Binkowski(1981)는 두 고도의 자료로  $R_b$ 를 구하고, 그로부터 L을 추정할 경우, 2m와 8m 고도의 자료를 이용할 때 좋은 결과가 얻어짐을 보였다. 그 이유는  $R_b$ 는 두 고도사이의 온위기울기로부터 구하므로, 온위의 기울기가 크

게 나타나는 지표면 부근의 경우, 기온측정상의 오차가 결과에 민감하게 영향을 미치지 않기 때문이다. 그러나, 일출시나 일몰시와 같이 안정도의 변동이 큰 경우, 접지역전층의 생성 또는 소멸에 의하여 지표면 부근에서 고도에 따라 안정도가 다르게 나타나므로, 골뚱으로부터 배출되는 대기오염물질이 확산되는 지상 수십미터 또는 그 이상의 고도에서의 안정도가 요구되는 확산모델의 입력자료로 사용되는 안정도의 경우, 추정시의 오차가 다소 커지더라도 본 연구에서와 같이 기온측정고도를 좀 높게 선택할 필요가 있다고 생각된다.

이와같이 추정되는 L은 대기확산모델의 입력자료 이외에도 접지층의 대기난류의 중요한 요소이며, 계산과정중에 구해지는  $u_*$  및 H와 더불어 연구에 유용하게 이용될 것으로 생각된다.

실제 대부분의 대기오염 확산모델에서는 입력자료로서 PSC가 필요하므로, 그림 4에 보인 PSC와  $1/L$ 의 관계(Golder, 1972)를 이용하여  $1/L_{est}$ 로부터 다시 PSC를 추정하였다. 여기에서  $z_0$ 는 0.34m를 사용하였다.

그림 5는 이와같이 추정된 PSC의 계급별로  $1/L_{obs}$ 의 25~75 percentile을 나타낸 것이다. 그림 2에 비하여 그림 5는 PSC별  $1/L_{obs}$ 의 분산이 작았으며, 또한 추정된 PSC가 불안정에서 안정으로 갈수록  $1/L_{obs}$ 의 중앙값 역시 대체로 일정하게

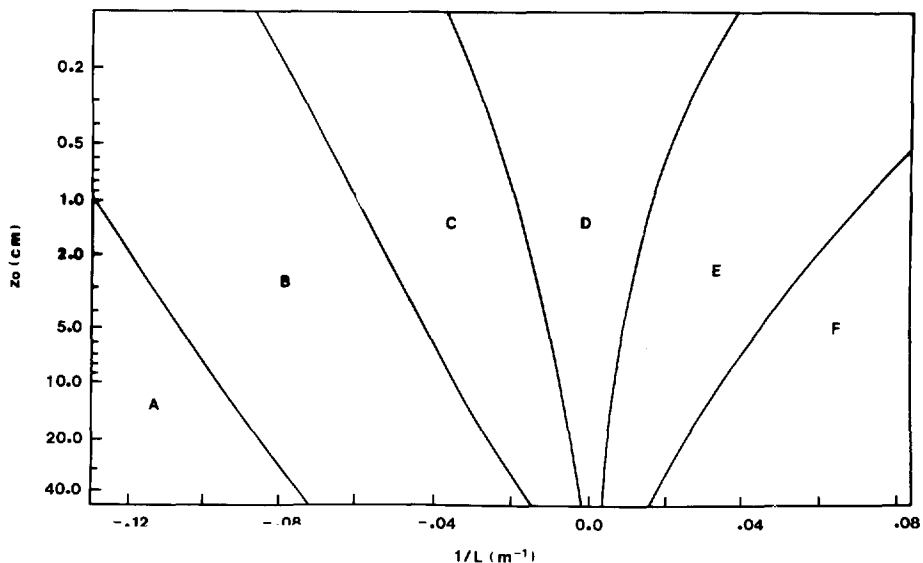


Fig. 4.  $1/L$  as a function of Pasquill classes and  $z_0$  (Golder, 1972).

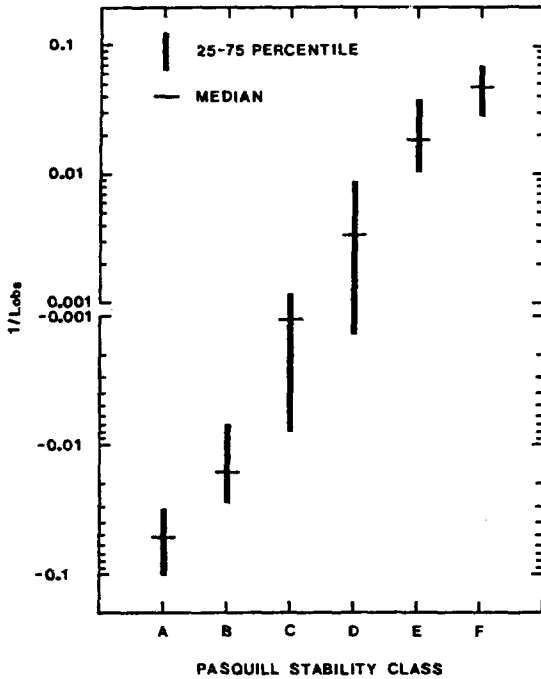


Fig. 5. Comparison between  $1/L_{obs}$  and estimated PSC from  $1/L_{est}$ .

증가함을 보였다.

이상의 결과에서 보면, 두 고도의 기온 및 한 고도의 풍속자료가 있을 경우 이들 자료만으로  $L$ 을 추정하고 다시 이  $L$ 로부터 PSC를 산출하여 대기 오염 확산모델에 이용하는 방법이 풍속과 일사량 또는 운량 자료로 PSC를 구하는 방법보다 확산모델의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 또한, PSC 산출에 필요한 운량은 자동계측이 불가능하므로 정규 기상관측소가 없는 지역에서 Pasquill 방법을 적용하기는 곤란하다. 그러나, 본 연구에서 작성한 방법은 기온과 풍속만을 자동 측정장비로 측정하여 PSC를 구할 수 있으므로 정규 기상관측소가 없는 지역에서 유용하게 이용될 수 있다고 생각된다.

## 5. 결 론

대기오염 확산모델에 흔히 이용되는 Pasquill 안정도계급을 난류변동량 측정자료로부터 구해지는 Monin-Obukhov 길이와 비교하여 평가한 결과, Pasquill 안정도계급은 실제의 대기안정도 상

태와 차이가 큰 경우가 많았으며, 두 고도의 기온과 한 고도의 풍속자료로 Monin-Obukhov 길이를 추정하는 방법을 작성하고 측정치와 비교한 결과 대체로 만족한 결과를 얻었다.

또한, Monin-Obukhov 길이 추정치로부터 결정된 Pasquill 안정도계급은 일사량, 운량과 풍속으로부터 구한 Pasquill 안정도계급 보다 실제의 대기안정도 상태에 근접하였다.

Monin-Obukhov 길이를 추정하는 방법은 정규 기상관측소가 없어 운량의 관측자료 입수가 곤란한 지역에서도 자동계측에 의하여 풍속과 두 고도에서의 기온만을 측정할 경우 풍속과 두 고도에서의 기온자료만 필요하므로 대기안정도를 추정하기 위하여 실용적으로도 사용가능하다.

## 참 고 문 헌

- 日本氣象廳(1976) 秋田灣地域 大氣環境調査報告書, 第3章 秋田灣地域の接地氣候, pp. 41.
- Golder, D. (1972) Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 3, 47 — 58.
- Hanafusa, T., C.B. Lee and A.K. Lo (1986) Dependence of the exponent in power law wind profiles on stability and height interval. *Atmospheric Environment*, 20, 2059 — 2066.
- Hanafusa, T., T. Fujitani, N. Banno and H. Uozu (1979) On the meteorological tower and its observational system at Tsukuba Science City. *Tech. Rep. MRI*, 3.
- Irwin, J.S. and F.S. Binkowski (1981) Estimation of the Monin-Obukhov scaling length using on-site instrumentation. *Atmospheric Environment*, 15, 1091 — 1094.
- Irwin, J.S. and F.S. Binkowski (1982) Erratum. *Atmospheric Environment*, 16, 887.
- Louis, J.F. (1979) A parametric model of the vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology*, 17, 187 — 202.
- McVehil, G.A. (1964) Wind and temperature profiles near the ground in stable stratification. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 90, 136 — 146.
- Panofsky, H.A. and J.A. Dutton (1984) *Atmospheric turbulence*, John Wiley & Sons,

- New York.
- Pasquill, F. (1961) The Estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorological Magazine*, 90, 33 — 49.
- Paulson, C.A. (1970) The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Applied Meteorology*, 9, 857 — 861.
- Schultz, P. (1979) Estimation of surface stress from wind. *Boundary-Layer Meteorology*, 17, 265 — 267.
- Signal, S.P., E.W.D. Lewthwaite and D.S. Wratt (1989) Estimating atmospheric stability from monostatic acoustic sounder records. *Atmospheric Environment*, 23, 2079 — 2084.
- Strom, G.H. (1976) Transport and diffusion of stack effluents. in A.C. Stern (Ed.), "Air pollution," 3rd ed., Vol. I, "Air pollutants, their transformation and transport." Academic Press, New York, pp. 401 — 501.
- Turner, D.B. (1964) A diffusion model for urban area. *J. Applied Meteorology*, 3, 83 — 91.
- Wratt, D.S. (1987) An experimental investigation of some methods of estimating turbulence parameters for use in dispersion models. *Atmospheric Environment*, 21, 2599 — 2608.