

대기안정도 분류방법의 평가 및 실용화에 관한 연구

Evaluation of Atmospheric Stability Classification Methods for Practical Use

김정수 · 최덕일 · 최기덕 · 박일수

국립환경연구원 대기연구부

(1995년 9월 4일 접수, 1996년 6월 11일 채택)

Jeong-Soo Kim, Doug-il Choi, Ki-Duck Choi, Il-Soo Park

Atmospheric Research Department, National Institute of Environmental Research

(Received 4 September 1995; accepted 11 July 1996)

Abstract

Major atmospheric stability classification methods were evaluated with meteorological data obtained by acoustic sounding profiler (SODAR/RASS) in Seoul.

The Pasquill classification method, the method most widely uses because of its good agreement in respect of synoptic scope under the steady state, fails to describe the time lag, the response time on stability by heating or cooling caused by daily insolation or nocturnal surface radiation. Horizontal and vertical standard deviation of wind fluctuation (σ_A and σ_E) method tend to classify night-time stable condition (E, F class) into unstable condition (A, B class). The classification matrix tables for Vogt's vertical temperature difference and wind speed using method ($\Delta T \cdot U$) and bulk Richardson number (Rb) were amended for practical use over Seoul. The modified tables for $\Delta T \cdot U$ and Rb method were made by using comprehensive frequency distribution from Pasquill's method and other existing results, and the correlation coefficient(r) was equal to 0.829.

It was confirmed that atmospheric stability could be changed with monitoring site characteristics, height and vertical difference between sensors of monitoring station, and classification method itself.

Key words : atmospheric stability classification methods, Pasquill method, Richardson number (Rb)

1. 서 론

배출된 대기오염물질의 농도를 결정하는 인자는 크게 오염원으로부터의 배출량, 바람에 의한 이류희석, 대기안정 조건에 따른 수직·수평 방향으로의 확산으로 구분된다. 대기가 기상조건에 의해 확산되어 혼합되는 난류상태를 정량적으로 나타낸 것을 대기안정도라 하며, 특히 환경영향평가 등에 널리 쓰이는 국지 규모의 Gaussian

형 대기 확산모델에서는 필수적으로 고려되어야 한다. 현재 발전소 및 대규모 대기 배출시설 등에서는 대기안정도를 상시 감시함으로써 주변 지역에 미치는 악영향을 최소화하기 위해 기상관측 시스템을 운영하는 경우가 많으나 운영 목적에 다소 미흡한 사례가 있다.

대기안정도 분류에 관한 연구는 일찌기 Giblett (1932)에 의해 시작되어 Brookhaven National Laboratory (BNL)의 Smith (1951)를 거쳐 Pasquill (1961)에 의해 정립되었으며, 그 외 많은 연구자들에

의해 발전되어 왔다. 대기안정도를 계산하는데 필요한 기상인자로는 풍속, 풍향의 표준편차, 수직 온도차, 일사량, 지표 복사량, 운량, 온도, 현열 flux, 마찰속도 등이 있으며, 분류방법에 따라 이들 자료 중 일부를 직접 또는 보조적으로 이용하게 된다. 그러나 이러한 기상인자 중 일부는 보통의 기상관측 방법으로는 측정할 수 없거나, 지역별로 연속 측정이 이루어지지 않아 자료 획득이 곤란하여 이들 자료가 필요한 분류 방법은 이용할 수 없는 경우가 있다. 본 연구에서는 대기안정도 분류방법 중 많이 사용되는 Pasquill의 분류방법을 비롯하여 풍향 변동의 표준편차를 이용하는 방법, 수직 온도차와 풍속으로부터 구하는 방법, 그리고 Richardson Number를 이용하는 방법으로 서울의 불광동에서 관측한 자료로 대기안정도를 산정하고 각 분류 방법의 특성을 비교 분석하였다.

아울러 본 연구에서는 비교적 측정이 용이하고 정확한 결과를 구할 수 있는 방법에 대하여 분류표의 수정·보완을 통해 대기 확산모델 활용 및 발전소 등 대기안정도 산정이 필요한 주요 시설에서 실용화할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 대기안정도 분류방법

2.1 자 료

본 연구에서는 1995년 3월과 4월(2개월간)의 서울의 기상청 관측자료와 서울 은평구 불광동 소재 국립환경연구원에서 동시 측정 중인 고도별 자동기상 측정기(SODAR/RASS)와 지상 기상 관측기의 시간별 자료를 이용하였다. 국립환경연구원에서 가동 중인 SODAR/RASS(프랑스, REMTECH사)는 음파와 전자파를 상공으로 발사하여 대기 중에서 반사되어 온 수신파의 변화된 주파수를 도플러 효과의 원리로 분석하는 기기로서

음파를 사용하여 바람성분을 측정하는 SODAR(sonic detection and ranging)와 SODAR에 부착되어 전자파를 이용하여 기온을 측정하는 RASS(radio acoustic sounding system)로 구성되어 있으며 현재 고도 920 m까지의 풍향, 풍속, 수직풍속, 기온과 이들의 표준편차를 매 시간 측정하고 있다.

대기안정도 분류시 Pasquill의 방법은 야간의 운량과 온도가 필요하므로 기상청의 자료를, 풍향의 표준편차에 의한 방법에는 SODAR의 50 m 자료를, 수직 온도차와 풍속으로 구하는 방법(이하 $\Delta T \cdot U$ 법)과 Richardson Number에 의한 분류시는 RASS의 200 m 기온과 연 구원 옥상 위 2 m 고도의 기온 및 풍속을 이용하였다. 참고로 국립환경연구원측의 해발고도는 약 45 m이고 건물 높이는 25 m 정도이며, 본 연구에서 제시된 측정고도는 옥상 바닥으로부터 각 측정기의 감지부까지의 높이이다. 한편, 대기안정도 분류 방법중 비교적 정확한 방법으로 알려진 Monin-Obukhov Length(L)는 감음 시간이 빠른 난류측정기에 의한 현열 flux 측정치가 필요하고 자료를 지속적으로 획득하기 곤란하므로 본 연구에서는 제외하였다. 표 1에는 각 분류 방법에 사용된 기상 자료의 목록을 정리하였다.

2.2 Pasquill 대기안정도

Pasquill의 안정도 등급은 표 2에 나타난 바와 같이 일사량(야간에는 운량)과 풍속과의 관계로부터 매우 불안정한 'A' 등급부터 매우 안정한 'F' 등급의 6개 단계로 구분한 것으로서, 이 대기안정도 분류 방법에는 다소의 단점이 있음에도 불구하고 자료획득의 용이성과 정상 상태(steady-state)하의 종관적인 대기안정도를 비교적 정확히 표현할 수 있는 장점때문에 가장 널리 사용되고 있다.

이의 계산방법으로써 Turner(1961, 1964)는

Table 1. Meteorological data profiles associated with stability classification methods.

Classification Method	Selected Meteorological Data				Remark
	Wind Speed	Wind Direction	Temperature	Other	
Pasquill	at 10.6 m	-	-	cloudiness	KMA*
σ_A, σ_E	-	at 50 m	-	-	NIER**
$\Delta T \cdot U$	at 2 m	-	at 2 and 200 m	-	"
Rb	at 2 m	-	at 2 and 200 m	-	"

σ_A and σ_E represent standard deviation of the horizontal and vertical wind direction fluctuations, respectively.

$\Delta T \cdot U$ denotes the method using vertical temperature lapse rate and wind speed.

Rb means the method using bulk Richardson number.

* KMA : Korea Meteorological Administration

** NIER : National Institute of Environmental Research of Korea

Pasquill의 방법을 일사량 대신 자료 획득이 쉬운 태양 고도각과 운량·운고로 구할 수 있도록 하였으며, 아울러 분류 등급을 매우 불안정한 '1' 부터 매우 안정한 '7' 까지로 구분하였다. 그러나 Pasquill등급의 A~E는 1~5와 동일하다는 그의 주장과는 달리 Golder (1972)는 많은 지역에서의 연구를 통해 두 분류 등급간에는 약간의 차이가 있으며 각각의 등급은 A→1, B→2, C→3, D→4, E→6, F→7의 관계가 있다고 주장하였다.

표 2에서 알 수 있는 바와 같이, Pasquill 방법의 단점은 주·야간이 바뀌는 무렵의 안정도 변화가 너무 급격하다는 것이다. 예를 들어 표 2에서, 풍속이 2m/s 이하인 저녁에 일몰 전에는 B등급이던 것이 일몰 후 E등급으로 갑자기 바뀌게 되며 일출 전후에는 반대의 현상이 생기게 된다. 이는 본 분류 방법이 대기의 열용량에 의해 대기안정도 변화가 다소 늦어지는 것을 감안하지 못하는 데서 기인되는 것으로서 시골지역에서는 잘 일치하지만, 도시지역에서는 배출고도가 높은 많은 건물들이 있고 또한 자동차에 의한 강제 확산도 활발하므로 지표 부근 수십 m까지는 고온 혼합층을 이루게 되어 급격한 안정도 변화가 일어날 가능성이 매우 적게 된다.

본 연구에서는 장기 대기확산모델의 기상 입력자료인 Joint Frequency Function 계산용 프로그램인 STAR (stability array)를 수정하여 시간별 안정도를 구하였는데 이 STAR 프로그램은 주간의 일사량을 태양고도

와 운량·운고로 계산하는 Turner의 계산방법을 접목한 것이다.

2.3 풍향의 표준편차

풍향의 변화가 크면 대기오염물질은 사방으로 쉽게 흩어지게 되어 대기가 불안정한 상태와 유사하게 된다. 또한 풍향의 표준편차는 측정이 매우 용이하고 대기안정도 와 밀접한 연관성이 있음이 확인되어 그로부터 대기안정도를 구하는 방법이 Cramer (1957), Irwin *et al.* (1980)에 의해 제시되었다. 원래 대기안정도는 수평방향과 수직방향의 확산정도를 모두 고려하여야 하므로, 이 방법에서도 수평 풍향의 표준편차 (σ_A)와 수직풍 변동각의 표준편차 (σ_E)를 모두 이용하여야 하나 σ_E 는 측정이 어려워 σ_A 만으로 구하는 경우가 많다 (NRC, 1972). 본 연구에서는 수직풍속의 표준편차 (σ_w)가 측정 가능하므로 $\sigma_E = \sigma_w / U$ 의 관계식을 이용하여 표 3에 나타낸 Irwin (1980)이 분류한 방법에 따라 계산하였다. Irwin이 채택한 값은 거칠기 길이 (Z_0)가 15 cm인 지형에서 구한 값이므로 식 (1)로 구한 인자를 곱하여 보정하여야 한다 (Smedman-Hogstrom and Hogstrom, 1978).

$$f = (Z_0 / 15 \text{ cm})^{0.2} \tag{1}$$

본 연구에서는 기존의 불광동 지역에 대한 거칠기 길

Table 2. Meteorological conditions defining Pasquill stability categories.

Surface Wind Speed(m/s)	Daytime Insolation			Nighttime Cloudiness	
	Strong	Moderate	Slight	Thin(>4/8)	Heavy(≤3/8)
<2	A	A-B	B	(E)	(F)
2	A-B	B	C	E	F
4	B	B-C	C	D	E
6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

- A : Extremely unstable conditions
- B : Moderately unstable conditions
- C : Slightly unstable conditions
- D : Neutral conditions
- E : Slightly stable conditions
- F : Moderately stable conditions

Table 3. Wind fluctuation criteria for estimating Pasquill stability categories.

Stability Category	σ_A (in degree)		σ_E (in degree)	
	IRWIN	SEOUL	IRWIN	SEOUL
A	>22.5	>35.6	>11.5	>18.2
B	17.5~22.5	27.7~35.6	10.0~11.5	15.8~18.2
C	12.5~17.5	19.8~27.7	7.8~10.0	12.3~15.8
D	7.5~12.5	11.9~19.8	5.0~7.8	7.9~12.3
E	3.8~7.5	6.0~11.9	2.4~5.0	3.8~7.9
F	<3.8	<6.0	<2.4	<3.8

이 산정결과 (나진균 등, 1985)인 144 cm를 적용하여 표 3과 같이 보정하여 분류하였다.

2.4 수직 온도차와 풍속 이용법 ($\Delta T \cdot U$ 법)

$\Delta T \cdot U$ 법은 상하 두 층간의 기온차를 이용한 수직 방향의 대기혼합 상태와 풍속에 의한 수평 방향의 이동 확산을 함께 고려하는 방법이며, 비교적 간단한 측정으로 정확한 안정도 분류를 할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 Vogt (1971)가 작성한 아래의 표 4를 이용하였으며 본 표의 특징은 풍속 2 m/s 미만의 경우를 1 m/s 미만과 1.0~1.9 m/s로 세분한 것과 20 m와 120 m 간의 기온차를 이용한 것이다. 한편 이 방법에 대한 분류표는 연구자에 따라 기온차의 범위 설정에서 다소의 차이가 있는데, 이는 기상 측정지점 부근의 특징과 기상측정고도에 크게 의존하기 때문이다. 즉, 도시지역은 시골보다 건물에 의한 영향으로 지표가 쉽게 가열되고 냉각되므로 기온감율의 변화폭이 크게 나타나며, 일반적으로 기온의 변화폭은 지표부근에서 가장 크고 또한 상공으로 올라갈 수록 기온감율은 평균적인 값(약 0.6°C/100 m)에 가까워지는 경향이 있으므로 대상지역과 측정고도에 따라 분류표의 내용을 수정하여야 할 것이다.

한편, DeMarrais (1958)와 Touma (1977)는 대기 안정도별 풍속지수를 구하는 과정에서 고도별 기온차만을 이용한 사례도 있다. 이 경우도 풍속까지 고려한 경우와 유사한 결과를 얻을 수 있는데, 이는 풍속과 기온감율간에도 밀접한 상관관계가 있기 때문이지만, 보다 정확한 결과를 위해서는 풍속도 동시에 고려하여야 한다.

2.5 Richardson 수

Richardson number에 의한 분류 방법은 두 고도에서의 풍속과 기온측정치를 이용하며 앞에서 기술한 $\Delta T \cdot U$ 법과 유사하나 Matrix 형태의 분류표에 의하지 않고 다음의 관계식으로 구한다. 식 (2)는 gradient Richardson number (Ri)을 정의하는 식으로써 음의

값을 가지면 이류(advection) 보다 대류(convection)에 의한 확산이 크고, 양의 값일 경우는 대기 역전 등 수직 확산은 거의 일어나지 않게 됨을 뜻한다.

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

여기에서, θ 는 온위 (K)이고, z 는 고도 (m), g 는 중력가속도 (9.8 m/s²), T 는 대기층의 평균기온 (K)을 나타낸다. 그러나 이 식은 두 고도간 풍속 변화량의 제곱에 반비례하므로 풍속 측정치의 정확도에 매우 민감하게 영향을 받게 되고, 기온의 기울기(temperature gradient)는 수직 확산을 잘 설명할 수 있으나, 풍속의 기울기(wind gradient)는 변동폭도 크고 대기확산과의 상관성도 낮으므로 전반적인 Ri 계산 결과에 오차를 유발할 수 있다. 또한 윗식은 바람의 쓸림(wind shear, $\partial u/\partial z$)이 이론적으로 항상 양의 값을 갖는 것을 전제로 하나, 실제 대기는 항상 균질하지만은 않고 지면 거칠기 상태에 따라 변화가 크므로 음의 값을 갖는 경우도 있다. 따라서 이러한 문제점 때문에 두 고도의 기온과 한 고도의 풍속만을 이용하는 식 (3)의 bulk Richardson number (Rb)를 사용하기도 한다.

$$Rb = \frac{g}{T} \frac{(\partial\theta/\partial z)}{u^2} z^2 \tag{3}$$

Table 5. Range of bulk Richardson number (Rb) corresponding to Pasquill stability categories (APTI, 1981).

Categories	Range	Remarks
A	Rb < -0.04	Convective mixing dominate
B	-0.04 ≤ Rb < -0.03	"
C	-0.03 ≤ Rb < 0	Mechanical and convectional mixing
D	Rb = 0	Mechanical turbulence only
E	0 ≤ Rb < 0.25	Weak mechanical turbulence
F	Rb ≥ 0.25	No vertical mixing

Table 4. Determination method of the stability categories from lapse rate and wind speed (Vogt, 1971).

Lapse rate Wind speed	°C/100 m, m/s)						
	≤ -1.5	-1.4 ~ -1.2	-1.1 ~ -0.9	-0.8 ~ -0.7	-0.6 ~ -0.0	0.1 ~ 2.0	> 2.0
U < 1	A	A	B	C	D	F	F
1 ≤ U < 2	A	B	B	C	D	F	F
2 ≤ U < 3	A	B	B	C	D	E	F
3 ≤ U < 5	B	B	C	C	D	D	E
5 ≤ U < 7	C	C	D	D	D	D	E
7 ≤ U	D	D	D	D	D	D	D

본 연구에서는 식 (3)을 이용하였으며, Pasquill등급과의 관계가 명확하게 규명되지는 않았으나 확산정도에 따라 유사하게 구분된 표 5에 따라 계산하였다 (APTI, 1981). 표 5의 내용 중 D등급 (중립)은 본래 $R_b=0$ 인 경우이나 발생 범위를 감안하여 $R_b=\pm 0.01$ 로 하였다.

3. 분류 결과

앞에 제시한 각 방법의 분류표에 따라 유효 측정자료만으로 구한 1995년 3, 4월의 시간별 대기안정도의 등급별 발생 빈도를 표 6에 제시하였다.

전술한 바와 같이 Pasquill의 분류방법은 필요한 자료가 기상청에서 전국 측정망을 통해 상시 관측되고 있으므로 획득이 용이하고, 정상 상태하의 종관적인 대기의 안정도를 비교적 정확히 표현할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 일출 또는 일몰 직후의 전이시간 (transition time)대에 두드러진 일사량 또는 야간 복사 냉각의 급격한 변화가 대기의 열용량에 의해 대기안정도에 미치는 걸리는 시간 (time lag)를 고려하지 못하고, 또한 대기의 기계적 난류 (mechanical turbulence)에 중요한 영향을 주는 지면의 거칠기길이 (Z_0) 등을 고려하지 못하는 등의 단점이 있다. 그리고 발생빈도가 D등급 보다도 F등급이 36.48%로 가장 많은 것은 이 방법에서 야간으로 분류되는 시간이 많았기 때문으로 판단된다. 즉, 대상기간인 3, 4월은 낮과 밤의 길이가 거의 같으나 Pasquill의 방법에서는 일출후 1시간과 일몰전 1시간을 야간으로 간주하며, 야간의 경우에는 대부분 E, F등급이 나타나고, 특히 야간에는 풍속이 약하므로 그러한 조건에서는 F등급의 빈도가 높게 되기 때문이다. 본 연구 기간에 대한 Pasquill 방법에 의한 시간대별 대기안정도를 나타낸 그림 1에서 알 수 있듯이 이 방법은 다른 분류 방법보다도 야간과 주간의 대기안정도 구분이 뚜렷하고, 타 분류 방법이 일사량 또는 복사 냉

각의 결과에 의해 나타난 대기의 기온이나 바람자료로부터 계산되는데 반해 일사량 등으로부터 직접 구하므로 (time lag를 고려하지 않으므로) 그림과 같이 일사량과 지표 복사량에 의한 에너지가 최대가 되는 시간인 14시 전후 보다 태양이 남중하는 12시경에서 가장 불안정한 대기 상태를 나타내게 된다. 따라서 이 방법은 단 기간의 결과를 활용하기 위해서는 보완할 필요가 있으나 장기적인 안정도별 발생 빈도는 위에 언급한 오차가 서로 상쇄되어 전반적으로 잘 맞을 것으로 판단된다.

풍향의 표준편차를 이용하는 방법은 각각 수평 방향과 수직 방향의 확산 정도를 표현하는 σ_A 와 σ_E 에 의한 분류 결과가 다소 다르게 나타났다. 즉, σ_A 에 의한 결과는 불안정한 조건의 발생빈도가 높고 매우 안정한 F등급의 발생빈도는 매우 낮았으나, σ_E 에 의한 결과는 안정한 조건의 빈도가 비교적 높았으며, 특히 E등급의 빈도가 매우 높고 (50.4%) F등급은 매우 낮은 특징을 나타냈다. 또한 이들 두 방법으로 분류된 결과간의 관계는 그다지 높은 상관관계 ($[\sigma_E]=2.467+0.514[\sigma_A]$, $r=0.6$)를 보이지 못하였는데 이는 지면 거칠기에 의한 난류의 특징이 σ_A 와 σ_E 로 연관성 있게 적절히 표현되지 못하기 때

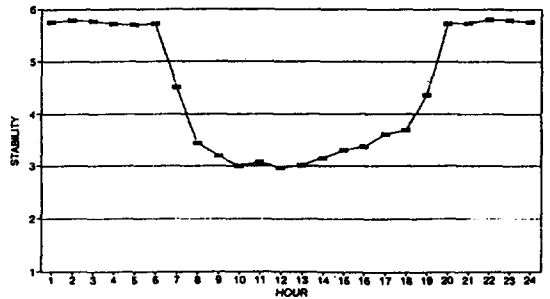


Fig. 1. Averaged hourly stability classes by Pasquill's method in Seoul, March~April, 1995.

Table 6. Number of occurrences for stability categories over discrete atmospheric stability classification method.

Stability Categories	Pasquill Method	Wind Fluctuation		Wind & Temperature Gradient ($\Delta T \cdot U$)	Richardson Number (R_b)
		σ_A	σ_E		
A	7 (0.48)	121 (9.15)	65 (4.81)	119 (10.96)	127 (12.00)
B	129 (8.81)	124 (9.38)	28 (2.07)	121 (11.14)	39 (3.69)
C	237 (16.19)	285 (21.56)	119 (8.81)	84 (7.73)	165 (15.60)
D	378 (25.82)	520 (39.33)	394 (29.16)	437 (40.24)	512 (48.39)
E	179 (12.23)	186 (14.07)	681 (50.41)	84 (7.73)	179 (16.92)
F	534 (36.48)	86 (6.51)	64 (4.74)	241 (22.19)	36 (3.40)
Total	1,464	1,322	1,351	1,086	1,058

- The numbers in parentheses denote percent value

문으로 생각된다.

거칠기 길이가 다른 3지역에서 Monin-Obukhov Length (L)로 구한 대기안정도에 따른 풍향 변동폭의 발생 특성을 조사한 김용국 등 (1992)의 결과에서는 중립 (D등급)에서 최소값을 보이고 A등급과 F등급으로 갈 수록 변동폭이 커지는 것으로 나타났다(그림 2). 이는 일반적인 결과로써 풍속이 매우 약해지면 풍속의 변동폭이 커지기 때문이며 주로 E, F등급으로 분류되는 야간의 저풍속 상태가 이에 해당된다. 그러한 결과는 본 연구에서 다른 풍향의 표준편차를 이용한 대기안정도 분류 방법의 결정적인 단점을 지적하는 것이다. 따라서 이들 방법 중 하나 또는 두가지 모두를 이용하고자 할 때에는 그러한 특성을 감안하여 사용하여야 하겠지만, 가급적 사용 자체를 자제하는 것이 바람직하다.

$\Delta T \cdot U$ 법과 Richardson number (Rb)에 의한 방법은 고도별 기온차와 풍속을 이용한다는 점에서는 공통점이 있으나, Rb는 풍속에 대한 고도별 온도 변화량으로 부터 계산된 값을 분류하여 사용하는데 반해 $\Delta T \cdot U$ 는 고도별 기온변화량과 풍속을 각각 등급화하여 사용한다.

따라서 두 방법은 입력자료의 측정과 수직·수평 방

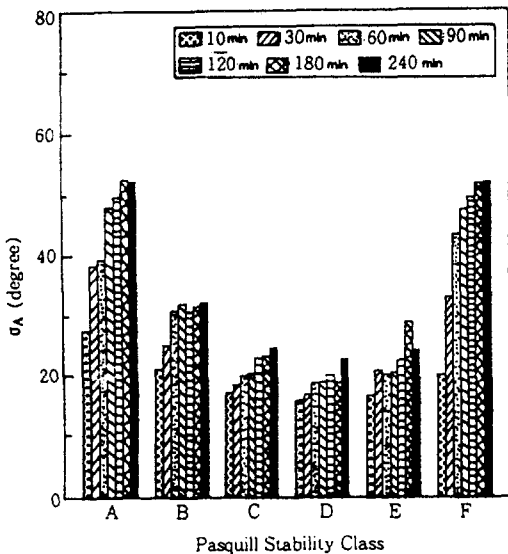


Fig. 2. Mean values of σ_A for various averaging time and Pasquill stability class obtained by Monin-Obukhov Length (L) at Chuncheon (Kim and Lee, 1992). The figure indicates the possibility of confusion to classify the stable condition with σ_A value.

향의 난류를 모두 고려한다는 측면에서 근본적으로 동일 하지만 Rb에 의한 방법은 풍속의 제곱에 반비례하므로 측정시의 작은 오차에도 매우 민감하게 작용하는 단점이 있다.

4. 새로운 분류표 작성

본 연구에서는 비교적 정확한 대기안정도 분류 방법인 $\Delta T \cdot U$ 법과 bulk Richardson number (Rb)에 의한 방법을 중심으로 서울에서 관측한 자료와 기존의 연구 결과들을 바탕으로 수정 보완하였다. 이를 위해 다음의 두가지 전제를 만족시키려 노력하였다. 첫째, 어떤 시점의 대기 상태에 대해서는 어떠한 분류 방법으로도 동일 (또는 유사)한 대기안정도를 나타내어야 하며, 둘째, 기존의 분류 결과와 유사한 안정도별 발생빈도를 나타내어야 한다. 전자는 이론의 여지가 없는 전제로써, 본 연구에서는 그 산정방법이 가장 다른 풍향의 표준편차를 이용하는 방법은 이 전제에 가장 미흡하므로 개선 대상에서 제외시켰으며, $\Delta T \cdot U$ 법과 Rb에 의한 방법은 고도별 기온과 풍속을 이용한다는 점에서 동일한 결과가 예상되므로 두 방법간의 상관성을 중시하여 분석하였다. 그 과정에서 $\Delta T \cdot U$ 법의 기온 감률과 풍속 등급에 대한 대기안정도간에는 그림 3과 같은 관계가 있음을 알 수 있었다.

후자의 내용은 반드시 발생빈도를 증시할 필요는 없겠으나 발생빈도가 낮은 실제 등급에 편중되는 모순된 결과를 피하기 위함이며, 본 연구의 Pasquill 방법에 의한 빈도와 외국의 사례 등을 참조하여 적절한 빈도를 유지하도록 하였다. 이상의 내용에 따라 새롭게 작성한 분류표는 표 7 및 8과 같다.

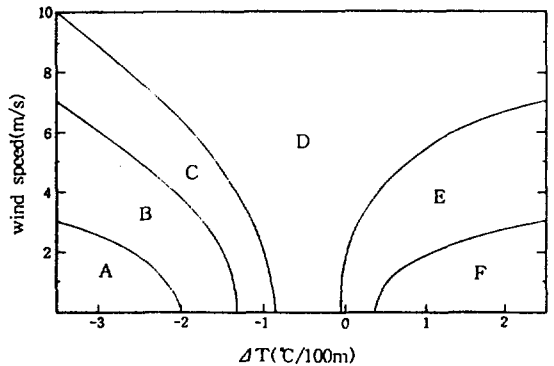


Fig. 3. Stability categories as a function of wind speed and vertical temperature lapse rate.

Table 7. Amended stability classification method using temperature lapse rate and wind speed.

Lapse Rate Wind Speed	(°C/100 m, m/s)							
	≤ -3	-3~ -2.3	-2.2~ -1.5	-1.4~ -0.9	-0.8~ -0.1	0~0.3	0.4~0.9	>1.0
U<1	A	A	B	C	D	E	F	F
1≤U<2	A	B	B	C	D	E	F	F
2≤U<3	A	B	C	C	D	E	E	F
3≤U<5	B	B	C	C	D	D	E	E
5≤U<7	B	B	C	D	D	D	D	E
7≤U<10	C	C	C	D	D	D	D	E
U≥10	D	D	D	D	D	D	D	D

Table 8. Adjusted range of bulk Richardson number for stability categories.

Stability Category	A	B	C	D	E	F
Range of Rb	< -0.1	-0.1 ~ -0.03	-0.03 ~ -0.005	-0.005 ~ 0.005	0.005 ~ 0.05	≥ 0.05

안정도별 발생 빈도를 고려하여 구한 위의 개정된 표들의 특징은 기존의 분류표 보다 불안정한 조건의 범위를 확대한 것이다. 이는 본 연구의 대상 지역이 대도시의 주택가이며, 콘크리트 건물 위에서 관측된 자료를 이용하므로 주간에는 지표 복사에 의한 기온 감율이 더욱 커지기 때문으로 추정된다.

이들 표로 구한 안정도별 발생 빈도를 Pasquill의 방법으로 구한 빈도와 비교한 결과는 표 9와 같다. 이 결과에 따르면 Pasquill 법은 F등급이 36.48%로 가장 많고 D등급은 25.82%이었으나, ΔT·U법에 의한 경우는 D등급이 가장 많은 35.54%이고 F등급은 18.51%을 나타내어 다소의 차이를 보였다. Rb에 의한 결과는 ΔT·U법에 의한 결과와 유사하나, 절대 중립(Rb=0)을 중심으로 불안정한 경우의 발생 빈도가 많은 것이 눈에 띈다.

한편 ΔT·U법과 Richardson number에 의한 결과 간에는 Pasquill 안정도 등급을 숫자로 환산하여 [ΔT·U=0.97+0.837(Rb)]의 관계식과 R=0.829

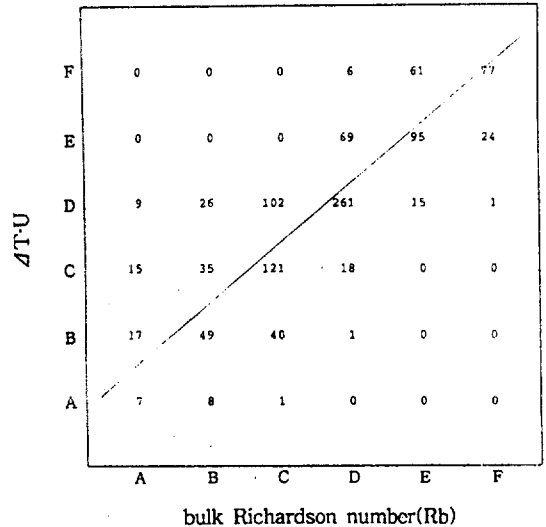


Fig. 4. Correlation scheme between amended results of ΔT·U and Rb method.

의 비교적 높은 상관계수를 나타내었다 (그림 4).

Table 9. Comparison of frequencies among 3 stability classification methods.

Stability Categories	Pasquill Method	Wind & Temperature Gradient(ΔT·U)	Richardson Number(Rb)
A	7 (0.48)	17 (1.57)	48 (4.54)
B	129 (8.81)	107 (9.85)	118 (11.15)
C	237 (16.19)	190 (17.50)	264 (24.95)
D	378 (25.82)	386 (35.54)	355 (33.56)
E	179 (12.23)	185 (17.03)	171 (16.16)
F	534 (36.48)	201 (18.51)	102 (9.64)

5. 결 론

서울에서 관측된 기상 자료를 이용하여 대기안정도 분류시 널리 사용되고 있는 4가지 방법에 의한 산정 결과를 비교 평가하였다. 그 결과 Pasquill의 방법, 풍향의 표준편차 이용법, ΔT·U법, bulk Richardson number (Rb)에 의한 계산 결과는 서로 약간의 차이를 나타

내었으며, Pasquill의 방법을 제외한 모든 경우에서 매우 불안정한 A등급의 발생빈도가 높게 산정되었다. 가장 널리 사용되고 있는 Pasquill의 방법은 기초자료 입수가 용이하고 정상 상태하의 종관적인 대기안정 상태를 잘 표현할 수 있는 장점이 있으나, 일사 또는 지표 복사 냉각의 변화가 대기안정도에 미치는 영향을 고려하지 못하는 단점이 있었다. 서울의 저철기 길이에 따라 보정하여 구한 σ_A 와 σ_E 에 의한 산정 결과는 상관계수가 0.6 정도로 그다지 잘 일치하지 않았으며 안정한 E, F등급이 불안정한 A, B등급으로 분류될 가능성이 있는 것으로 나타났다. 수직 온도차와 풍속을 이용한다는 점에서 유사한 $\Delta T \cdot U$ 법과 Rb법은 기상 관측 기기의 고도와 기기간의 고도차에 따라 큰 차이가 생길 수 있으며 기존의 분류표에 의한 결과도 서로 다르게 나타났으나, 보정작업을 통해 상관성을 높이므로써 서울지역에서 실용화할 수 있는 새로운 분류표를 작성하였다. 새로운 분류표는 Pasquill의 방법과 기존 연구 결과들에서 나타난 안정도별 발생빈도를 감안하여 분류되도록 하되 $\Delta T \cdot U$ 법과 Rb법의 분류 결과가 최대한 일치하도록 하였다. 그 결과 Rb에 의한 결과에서 약간 불안정한 조건의 빈도가 높았으나 상관계수는 0.829로 매우 높게 나타났다.

끝으로, 대기안정도는 기상관측 지역의 여건, 관측 기기의 고도 및 간격, 분류 방법 등에 따라 상이한 결과가 나타날 수 있음을 확인하였다. 따라서 대상 지역과 활용방법에 따라 분류표를 수정하여 사용하는 것이 바람직할 것이다.

참 고 문 헌

- 김용국, 이종범 (1992) 대기안정도와 지형 조건에 따른 풍향 변동폭의 특성, 한국대기보전학회지, 8(2), 138-145.
- 나진균, 김양균, 이석조, 권영수, 김명식, 김진규, 조천호 (1985) 대기오염 예측모델 개발을 위한 수직, 수평 확산 계수 산정에 관한 연구, 국립환경연구소보, 7, 75-83.
- APTI (1981) Dispersion of air pollution : Theory and model application, Course 423-student workbook, 2.1-2.4.
- Cramer, H.E. (1957) A practical method for estimating the dispersal of atmospheric contaminants, in Proceedings of the First National Conference on Applied Meteorology, Section C, 33-55, American Meteorological Society, Hartford, Conn.
- DeMarrais, G.A. (1959) Wind-speed profiles at Brookhaven National Laboratory, Journal of Meteorology, 16, 181-190.
- Giblett, M.A. (1932) The structure of wind over level country, Meteorological Office Geophysical Memoirs, No. 54, 6(4), Her Majesty's Stationery Office, London.
- Golder, D. (1972) Relations among stability parameters in the surface layer, Boundary-Layer Meteorology, 3, 47-58.
- Irwin, J. S. (1980) Dispersion estimate suggestion #8 : Estimation of Pasquill stability categories, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC., (Docket Reference No. II-B-10).
- Nuclear Regulatory Commission. (1972) Meteorological programs in support of nuclear power plants, Regulatory Guide 1.23 (Draft), U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Standards Development, Washington, D.C., (Docket Reference No. II-P-11).
- Pasquill, F. (1961) The estimation of the dispersion of windborne material, Meteorological Magazine, 90, 33-49.
- Smith, M.E. (1951) The forecasting of micro-meteorological variables, Meteorological Monography, 4, 50-55.
- Snedman-Hogstrom, A. and V. Hogstrom (1978) A practical method for determining with frequency distributions for the lowest 200m from routine meteorological data, Journal of Applied Meteorology, 17(7), 942-953.
- Touma, J.S. (1977) Dependence of the winds profile power law on stability for various locations, Journal of the Air Pollution Control Association, 27(9), 863-866.
- Turner, D.B. (1961) Relationships between 24-hour mean air quality measurements and meteorological factors in Nashville, Tenn., Journal of Air Pollution Control Association, 11, 483-489.
- Turner, D.B. (1964) A diffusion model for an urban area, Journal of Applied Meteorology, 3(1), 83-91.
- Vogt, R.J. et al. (1971) FRG Report, Jul-807-ST.