

大氣安定도와 地形條件에 따른 風向變動幅의 特性

Influence of Atmospheric Stability and Topography on the Wind Direction Fluctuations

金 龍 國 · 李 鍾 範

江原大學校 環境學科

(원고접수 : 1992년 4월 20일)

Yong Goog Kim and Chong Bum Lee

Department of Environmental Science, Kangweon National University

(Received 20 April 1992)

Abstract

Dependence of the standard deviation of wind direction fluctuations, σ_θ , on atmospheric stability, averaging time and topography were analysed with the data measured at three sites, Youngjongdo beach of the Yellow Sea, Chuncheon basin and Doam-Dam valley.

The results show that the mean value of σ_θ is large in complex terrain, the Doam-Dam site. It is notable that the large value of σ_θ at night is associated with the low wind speed and the strong stable condition.

In order to study the long-period fluctuations of the wind direction, σ_θ for longer than 10 minutes averaging time was further analysed using the data obtained at the Chuncheon basin.

At the averaging time shorter than 60 minutes, larger σ_θ is associated with longer averaging time in the strong stable condition. However, σ_θ was not affected significantly by wind speed and averaging time in neutral conditions.

The results of the spectrum analysis for the time series data of wind direction showed that low-frequency fluctuations ranging from 10 to 60 minutes were dominated at the Chuncheon basin in strong stable condition.

1. 서 론

현재 대기오염 예측을 위한 확산모델로서 Gaussian plume 모델이 널리 쓰이고 있으나 계산결과는 기상조건 및 지역에 따라 오차가 크게 나타나는 경우가 있으며, 이러한 오차의 주 요인중의 하나는 plume의 수평확산폭(σ_y) 및 연직확산폭(σ_z)이므로 모델의 결과를 향상시키기 위하여서는 이들을 정확히 산출할 필요가 있다.

σ_y 및 σ_z 를 산출하는 방법은 대기안정도를 이용하여 Pasquill-Gifford(P-G) scheme에 의하여 구하는

방법(Turner, 1964)과 풍향의 변동성분을 직접 이용하는 방법(Hanna et al., 1977; Irwin, 1983)으로 구분할 수 있다.

현재 사용되는 Gaussian 확산모델에서는 P-G scheme으로부터 σ_y 및 σ_z 를 계산하는 것이 대부분이며 이 경우 대기안정도는 Pasquill 안정도계급(Pasquill, 1961)을 사용한다.

그러나 Pasquill 안정도계급은 실제의 대기안정도와 큰 차이를 보이는 경우가 많으므로(이와 김, 1990) 이를 이용하여 산출되는 σ_y 및 σ_z 도 오차가 크게 나타날 수 있다.

풍향의 변동성분을 직접 이용하는 경우 σ_s 는 다음과 같은 관계식으로부터 구할 수 있다(Pasquill, 1976).

$$\sigma_s = \tan \sigma_\theta \times F_s(x) \quad (1)$$

여기서 σ_θ 는 풍향변동의 표준편차(standard deviation of wind direction fluctuation)이며 x 는 풍하거리, $F_s(x)$ 는 확산실험으로부터 결정되는 무차원 함수이다.

P-G scheme에 의하여 산출된 σ_s 를 이용하는 경우 연기의 확산폭은 대기가 안정할 수록 작아지나, 강안정한 대기상태에서는 내부중력파(internal gravity wave), vortex 등에 의한 풍향의 meandering이 자주 발생하여(Etling, 1990) 실제 σ_s 는 P-G scheme에 의한 값보다 2-6배 크게 나타날 수 있으므로, 이 경우 Gaussian 확산모델에 의하여 계산되는 plume 중심축에서의 농도는 과대평가될 수 있다(Hanna, 1981). 또한 야간 계곡지형의 경우 사면냉기류(cold air drainage flow)에 기인되어 20분 정도의 주기를 가진 진동이 관측된 예가 있으며(Porch and Clements, 1990), 넓은 해안지역에서도 중규모 와동(mesoscale eddy) 등에 의한 풍향의 meandering이 자주 발생할 수 있다(Raynor and Hayes, 1984; Sethuraman, 1980). 그러므로 σ_s 는 지형적인 영향에 의하여 지역에 따라 큰 차이를 나타내게 된다.

이와 같이 야간 강안정층 상태하에서의 대기경계층의 구조와 확산현상은 지형적인 요인과 기상학적인 요인이 관여하며 현재까지 명확하게 밝혀지지 못한 부분이 많이 남아있다. 본 연구에서는 지형의 특징이 서로 다른 3개 지역에서 측정된 자료를 이용하여 σ_s 의 지형요인에 따른 차이와 대기안정도 및 풍속에 따른 변동특성, 평균화시간(averaging time)에 따른 특징 및 야간 강안정상태하에서의 풍향의 변동주기 등을 분석함을 목적으로 하였다.

2. 기상특징

본 연구에서는 지형의 특징이 서로 다른 지역에 기상탑을 설치하여 기온, 풍향, 풍속, σ_θ 등을 측정하고 이 자료들을 분석하였다. 측정지점은 비교적 평탄한 지형인 서해상의 인천 영종도해안가와 춘천 분지 내의 춘천추후소 노장 그리고 대관령주변의 도암댐계곡 등 3개 지역으로 그림 1은 각 지점에 설치된 기상탑주변의 지형을 나타낸 것이다. 기상측기에서 측정된 자료는 자료수록장치(Model 명: CR10, 미국 Campbell 사)에 의하여 자동으로 수록되도록 하였다.

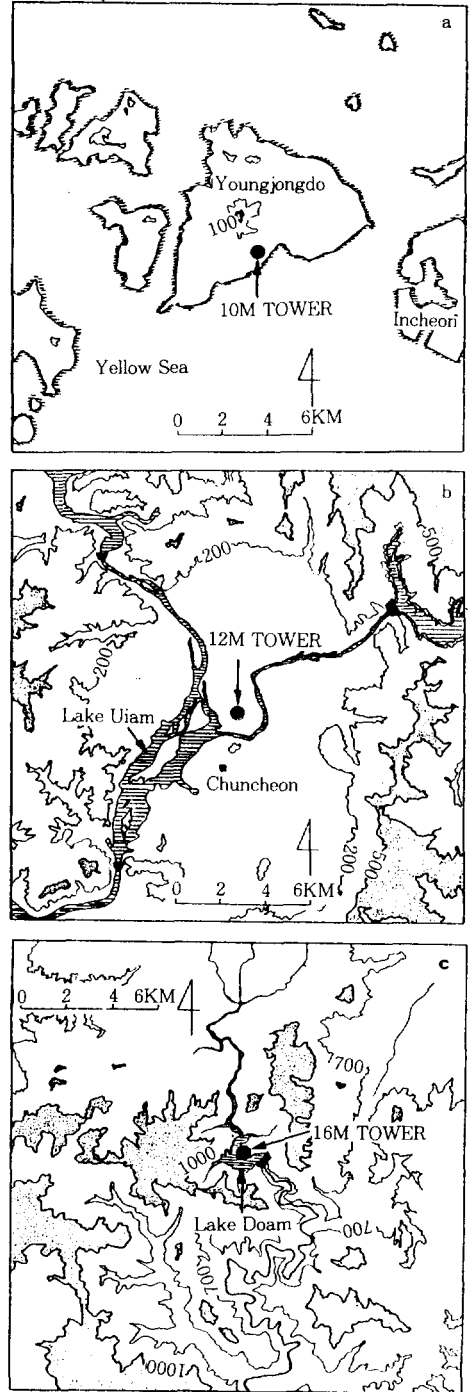


Fig. 1. Topography of the observation sites and surroundings of the Youngjongdo beach(a), the Chuncheon basin(b) and the Doam-Dam valley(c).

2.1 영종도해안가 기상탑

영종도는 인천의 서해상에 위치한 작은 섬으로서, 육지에 근접해 있어 해륙풍의 영향을 크게 받는 지역이며 기상탑은 이 지역의 해안가에 설치하였다. 본 연구에서는 3m 및 10m 고도에서의 기온과 풍속 그리고 10m의 풍향 및 σ_θ 를 이용하였으며, 측정 기간은 1991년 6월부터 8월까지의 92일간이다. 이들 자료의 측정시간은 1분으로 하였으며, 평균화시간은 60분으로하여, 매 시간 평균치를 수록하였다.

2.2 춘천분지 기상탑

춘천지역은 전형적인 분지형태를 갖춘 지형으로 분지의 중심부인 비교적 평탄한 춘천측후소 노장에 12m 높이의 기상탑을 설치하였다.

기상탑으로부터 약 2km 거리에는 의암호(수표면적 20km²)가 위치하고 있으며, 반경 약 5km 거리에는 해발 500m 내외의 높고 낮은 산들로 둘러싸여 있다. 측정요소 및 측정방법은 영종도해안가 기상탑 자료와 동일하며, 각각 3m와 12m 고도에서 측정된 1991년 3월부터 5월 6일까지 67일간의 매 시간의 평균자료를 이용하였다.

또한 대기안정도와 평균화시간에 따른 σ_θ 의 특징 및 야간 강안정 상태하에서의 σ_θ 의 주기분석을 위해, 평균화시간을 10분으로 하여 1991년 5월 9일부터 12일까지 10분간격으로 수록한 4일간의 자료와, 평균화시간을 5분으로 하여 5분간격으로 수록한 13일부터 16일까지 4일간의 자료를 각각 이용하였으며 측정시간은 5초로 하였다.

2.3 도암댐계곡 기상탑

도암댐은 대관령 주변의 해발 약 700m 고도에 위치해 있으며 이 계곡의 도암호 연안에 16m 높이의 기상탑을 설치하였다. 기상요소는 4m 및 8m, 16m 고도에서 기온, 풍속, 풍향 등이 측정되며 각각의 표준편차 또한 계산하여 수록되게 하였다. 본 연구에서는 1991년 5월 1일부터 7월 24일까지 84일간의 매시간 4m, 16m의 기온 및 풍속자료와 16m에서 측정된 σ_θ 자료를 분석에 이용하였다.

3. 분석방법

3.1 안정도계급의 추정

본 연구에서는 대기상태를 안정도에 따라 분류하고 각 안정도계급별 σ_θ 의 특징을 분석하였다. 일반적으로 널리 사용되는 Pasquill 안정도계급은 풍속과 일사량, 운량자료 만으로 대기안정도를 구하므로 간단하여 실용적으로 사용하기 편리한 장점이 있으

나 실제의 대기안정도와는 큰 차이를 보이는 경우가 많으므로(이와 김, 1990), 두 고도의 기온과 한 고도의 풍속자료만으로 Paulson(1970)의 flux-profile method를 변형하여 Monin-Obukhov 길이(L)를 추정하여 Golder(1972)가 제시한 L과 Pasquill 안정도계급과의 관계로부터 Pasquill 안정도계급을 추정하는 방법(Lee et al., 1991)을 이용하였다. 이 방법에서는 지표의 거칠기 길이(roughness length, z_0)가 필요한 바 다음과 같은 과정으로 지역별 z_0 를 구하였다.

대상지역들은 방위에 따른 지표면 상태의 차이가 있으므로 16개의 방위로 세분하였고 대상시간은 대체로 한 계절이었으므로 계절에 따른 차이는 고려하지 않았다. 대기상태가 중립인 경우 하층풍속(u_1)과 상층풍속(u_2)으로부터 z_0 는

$$z_0 = \exp \left\{ \left[(u_2/u_1) \ln z_1 - \ln z_2 \right] / \left[(u_2/u_1) - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

에서 구하여지며 여기에서 z_1 은 하층의 고도, z_2 는 상층의 고도이다. 계산과정은 우선 기상탑의 두 고도에서 측정된 기온자료를 이용하여 온위의 차가 0.2℃ 이내인 경우를 중립상태로 간주하여 중립상태인 경우만을 선택한 후, 두 고도의 풍속자료로 시간별 z_0 를 식 (2)에서 계산하고 풍향에 따라 16방위로 세분하여 각 방위별로 z_0 의 평균값을 구하였다.

3.2 긴 평균화시간에 대한 σ_θ 의 계산

평균화시간에 따른 σ_θ 의 특징을 고찰하기 위하여 춘천지역에 설치한 기상탑에서 측정된 1991년 5월 9일부터 16일까지 8일간의 매 10분간 측정된 풍향 성분자료를 이용하여 다음 식에 의하여 긴 평균화시간에 대한 σ_θ 를 계산하였다.

$$\sigma_\theta^2 = [\overline{\sigma_{\theta 0}}]^2 + [\sigma(\bar{\theta})]^2 \quad (3)$$

여기서 $\overline{\sigma_{\theta 0}}$ 는 매 10분간의 풍향의 표준편차를 원하는 긴 평균화시간 동안 평균한 값으로서 10분이내의 단주기 변동성분을 나타내며, $\sigma(\bar{\theta})$ 는 매 10분간의 평균풍향에 대한 표준편차로서 10분이상의 장주기 변동성분을 나타낸다.

8일간의 자료중 평균화시간을 5분으로하여 수록한 4일간의 자료는 식 (3)에 의하여 10분으로 평균화한 후 분석하였다.

3.3 주기분석

풍향의 변동은 풍속, 안정도 및 대상지역의 지형요인에 크게 좌우될 수 있다. 특히 야간의 경우 대기상태는 대체로 안정한 상태를 유지하게 되고 주간에 비하여 비교적 약한 풍속을 나타내게 된다. 이

러한 경우에는 지형의 특성에 기인된 일정한 주기를 가진 풍향의 meandering에 의하여 풍향의 변동이 크게 나타날 수 있다(Leyl and Panofsky, 1983; Einaudi and Finnigan, 1981).

본 연구에서는 Maximum Entropy Method (MEM)를 이용하여 분지인 춘천지역에서 야간에 측정된 풍향의 시계열 자료로 주기분석을 실시하였다. 주기분석은 측정된 자료중 강안정한 대기상태를 유지하였던 1991년 5월 14일의 20:05부터 15일 06:00까지 10시간의 매 5분간 측정된 총 120개의 평균풍향자료를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 대기안정도 및 지형요인에 따른 σ_θ 의 변동특징

그림 2는 지형의 특징이 서로 다른 영종도해안가, 춘천분지, 도암댐계곡 등의 3개 지역별 Pasquill안정도계급에 따른 σ_θ 를 비교한 결과이다. 여기에서 사용된 자료는 평균화시간을 60분으로 하였다.

지역에 따른 특징을 보면 σ_θ 는 비교적 평탄한 지형인 영종도해안가에서 대체로 작게 나타났으며 지형이 복잡한 도암댐계곡에서 가장 크게 나타났다.

대기의 안정도에 따른 특징을 보면 σ_θ 는 불안정한 경우와 안정된 경우에 큰 값을 나타내었으나 중

립인 경우에 최소였다. 특히 강안정인 F계급에서 크게 나타나, 표 1에 제시한 대기안정도와 σ_θ 의 관계(Nuclear Regulatory Commission, 1979)와는 큰

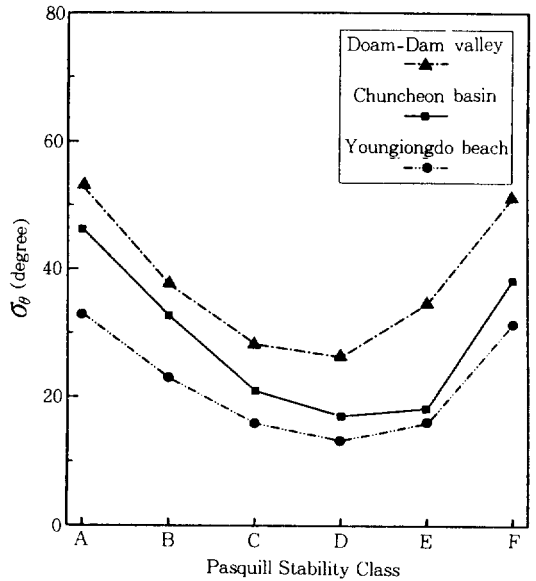


Fig. 2. Comparison of σ_θ at 3 different sites for 1 hour averaging time.

Table 1. Standard deviation of wind direction fluctuation related to Pasquill-Gifford stability(Nuclear Regulatory Commission, 1979).

Pasquill-Gifford stability class	Unstable A	B	C	Neutral D	Stable E	F
σ_θ (deg)	>22.5	17.5-22.5	12.5-17.5	7.5-12.5	3.8-7.5	<3.8

Table 2. Mean and standard deviation(SD) of σ_θ for various stability classes at 3 sites for 1 hour averaging time. () : number of cases.

Site		σ_θ (degree)					
		A	B	C	D	E	F
Youngjongdo beach	mean	32.8	22.9	15.8	13.2	15.9	31.3
	SD	15.2	9.4	7.6	5.9	9.8	18.0
		(100)	(370)	(516)	(562)	(172)	(431)
Chuncheon basin	mean	46.2	32.6	20.9	17.0	18.2	38.2
	SD	15.1	15.0	8.7	6.9	9.5	17.8
		(228)	(124)	(162)	(323)	(157)	(613)
Doam-Dam valley	mean	52.9	37.4	28.2	26.2	34.6	51.1
	SD	22.7	18.6	16.1	15.5	25.5	24.5
		(227)	(184)	(276)	(563)	(259)	(309)

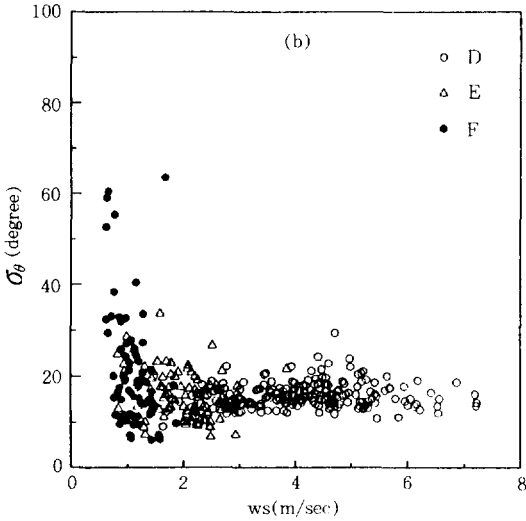
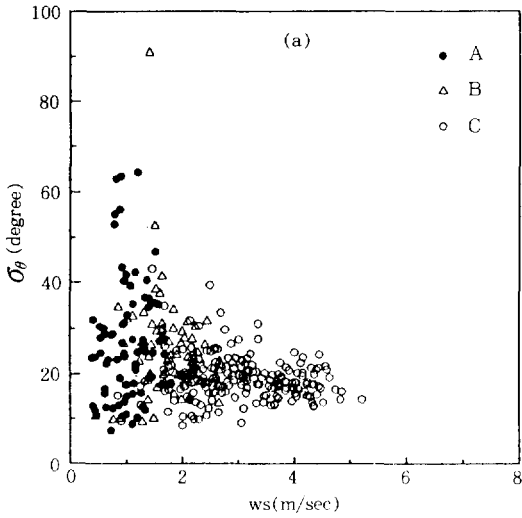


Fig. 3. σ_θ for various stability classes at the Chuncheon basin for 10 minutes averaging time.

차이를 보였다. 표 1은 평탄한 지역에서의 결과이나 본 연구의 결과는 복잡한 지형의 영향을 받았기 때문으로 생각된다.

각 안정도별 σ_θ 값의 표준편차는 표 2에 보인 바와 같이 평균값보다 작았다.

춘천지역에서 측정된 평균화시간이 10분인 자료를 이용하여 풍속과 σ_θ 의 관계를 분석한 결과는 그림 3과 같다.

대기가 불안정한 경우와 강안정한 경우에 σ_θ 는 풍속이 약할 수록 분산이 커지는 경향을 보

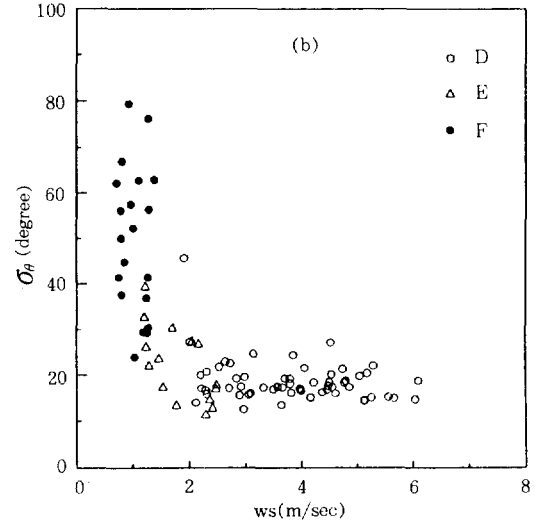
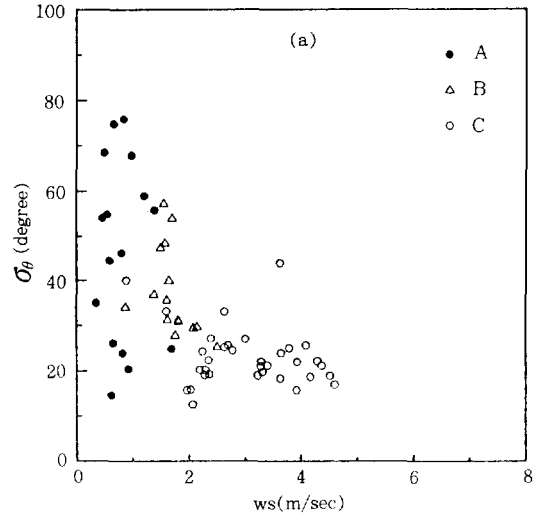


Fig. 4. Same as Fig. 3, but for 1 hour averaging time.

였으나, 대기상태가 중립인 경우에는 풍속과 무관한 일정한 값을 나타내었다.

4.2 평균화시간에 따른 σ_θ 의 변동특징

그림 4는 춘천에서 측정된 매 10분간의 σ_θ 측정자료를 이용하여, 식 (3)에 의하여 평균화시간을 1시간으로 하여 계산한 σ_θ 를 대기안정도 및 풍속에 따라 나타낸 것이다.

대기상태가 중립인 경우에 σ_θ 는 풍속에 따른 차이가 없었으며 평균화시간을 10분으로한 그

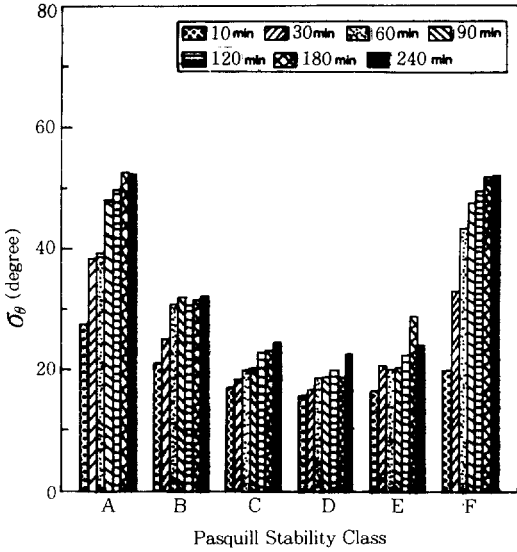


Fig. 5. Mean values of σ_θ for various averaging time and Pasquill stability class at the Chuncheon basin.

림 3의 결과와 일치하였다. 따라서 평균화시간이 1시간으로 길어지더라도 풍속에 따른 차이는 없는 것으로 나타났다.

그러나 대기의 상태가 강안정인 F계급의 경우, σ_θ 는 그림 3에서 보인 바와 같이 평균화시간이 10분인 경우에는 5도-63도의 범위이나 평균화시간을 1시간으로 하여 계산한 경우에는 22도-80도의 범위(그림 4)로서, 평균화 시간이 길어지고 또한 풍속이 약해짐에 따라 σ_θ 가 커지는 것을 알 수 있다.

평균화시간 10분의 자료로부터 식 (3)에 의하여 평균화시간 30, 60, 90, 120, 180, 240분에 대한 σ_θ 를 산출하여 각 안정도별로 평균한 결과는 그림 5와 같다. 평균화시간이 길어짐에 따라 σ_θ 는 커지는 경향을 보이며, 특히 강안정인 F계급의 경우 평균화 시간을 10분에서 60분으로 증가시킴에 따라 σ_θ 는 2배 이상 증가하였다. 그러나 평균화시간이 60분 이상 길어지면 σ_θ 의 증가는 차츰 둔화되므로 춘천지역에서 야간의 풍향의 meandering 주기는 대체로 60분 이내임을 알 수 있다.

한편, 중립인 D계급의 경우 평균화시간에 따른 σ_θ 의 큰 차이는 없었으며 그 값 또한 최소로 나타났다.

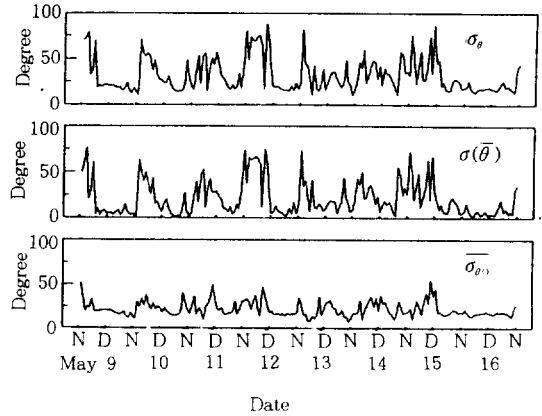


Fig. 6. Time series of σ_θ , $\sigma(\bar{\theta})$ and $\overline{\sigma_\theta}$ for 1 hour averaging time at the Chuncheon basin. N and D denote midnight and noon respectively.

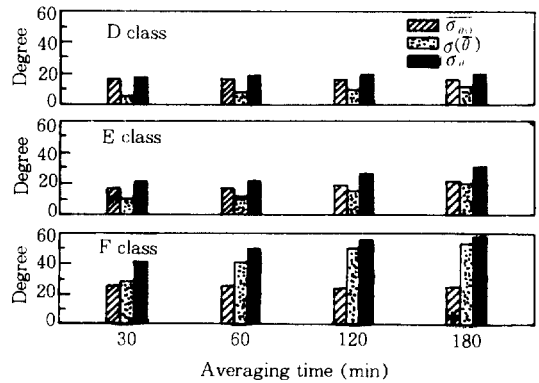


Fig. 7. Comparison between $\overline{\sigma_\theta}$, $\sigma(\bar{\theta})$ and σ_θ for various averaging time and Pasquill stability class.

그림 6은 춘천에서 측정된 자료를 이용하여 식(3)에서 평균화시간을 60분으로 하였을 때 계산된 각 항의 매시간 값의 시간 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 σ_θ 는 새벽시간에 크며 $\sigma(\bar{\theta})$ 의 변화패턴과 σ_θ 의 변화패턴이 유사한 것으로 보아 σ_θ 는 장주기 풍향변동에 크게 좌우됨을 알 수 있다. 또한 그림 7에 보인 바와 같이 강안정한 대기상태하에서 평균화시간이 길어질수록 장주기 풍향변동의 영향을 크게 받아서 σ_θ 가 커지는 것을 알 수 있다.

4.3 주기분석

춘천지역에서 야간중 풍속이 약했던 5월 14일과 강했던 5월 15일의 풍향변화를 그림 8에 나타내었다. 풍속이 약했던 5월 14일의 경우 풍향은 주기적으로 크게 변동하는 특징을 나타내었으나 풍속이 강했던 5월 15일의 경우 풍향 변화는 작았다.

본 연구에서는 풍향변동이 컸던 5월 14일의 야간중 10시간 동안에 측정된 풍향의 시계열 자료를 이용하여 주기분석을 실시하였다. 이 시간동안 12m고도의 벡터풍속은 평균 0.77m/sec 였으며 접지면적이 발달하여 12m 고도와 3m 고도의 기온차는 평균 0.55°C로 나타났다.

주기분석의 결과는 그림 9에 나타낸 바와 같이 60분과 100분 정도의 비교적 주기가 긴 풍향변동이 나타났고 이 결과는 그림 5에서의 결과와 유사하다.

기상탑이 설치된 지점은 비교적 평탄한 농경지가 인접해 있으나, 기상탑으로부터 다소 떨어진 곳에 춘천호, 의암호, 소양호 등이 있고, 또한 높고 낮은 산들이 산재해 있다. 따라서 호류풍 및 산곡풍이 존재할 수 있으며, 춘천지역에서 나타나는 풍향변동의 주기는 이들의 복합적인 영향에 의하여 나타난 결과로 사료된다.

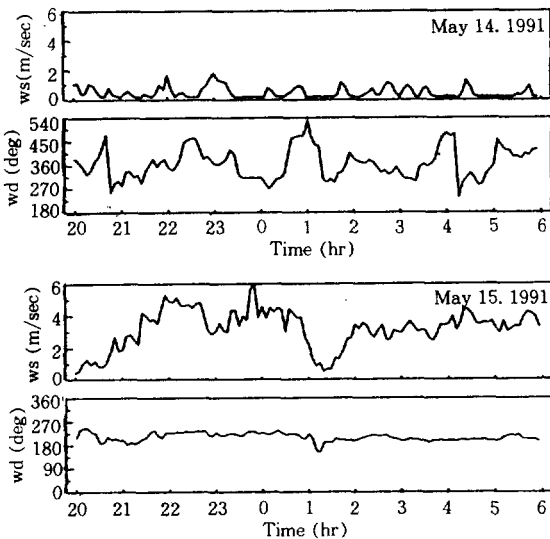


Fig. 8. Variations of wind direction for weak and strong wind conditions during the nighttime.

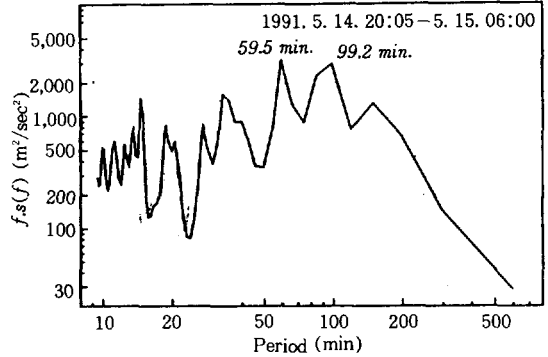


Fig. 9. Spectrum analysis of the wind direction. Data were sampled every 5 minutes at the Chuncheon basin.

5. 결 론

본 연구에서는 지형의 특성이 서로 다른 서해상의 영종도해안가, 춘천분지 및 계곡지형인 도암댐계곡 등 3개 지역에서 측정된 기상탑자료를 이용하여 풍향변동폭(σ_θ)의 특징에 대하여 고찰하였다.

지역에 따른 σ_θ 의 특징을 보면 σ_θ 는 복잡한 지형인 도암댐계곡 지역에서 가장 크게 나타났고 평탄한 영종도해안가 지역에서 작게 나타나 지형이 복잡할 수록 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.

대기상태가 중립인 경우 σ_θ 는 최소의 값을 나타내었으며 풍속에 따른 차이가 없었으나 중립에서 불안정 또는 안정으로 향할 수록 풍속이 약해짐에 따라 현저히 큰 값을 보였다.

한편, 분지인 춘천지역의 자료를 분석한 결과 대기가 불안정인 경우와 강안정인 경우 평균화시간이 길어질 수록 σ_θ 는 크게 증가함을 나타내었다. 강안정인 경우 σ_θ 는 역학적인 난류에 의한 단주기 풍향변동 보다는 지형의 영향에 의한 장주기 풍향변동에 의하여 큰 값을 나타내었다. 특히 강안정인 F계급의 경우 평균화시간에 따른 σ_θ 의 증가폭은 평균화시간이 60분 이내에서 크며 그 이상에서는 증가의 폭이 작았다. 그러므로 분지인 춘천지역에서 야간의 풍향의 meandering의 주기는 대체로 60분 이내로 생각된다.

우리나라는 산악이 많고 해안선이 복잡하며 평야가 넓지 않아서 σ_θ 는 지역에 따라 큰 차이를 나타낼 것으로 생각되므로 대기오염 확산모델의 정확도를 향상시키기 위하여서는 가급적 대상지역에서 σ_θ 를 직접 측정하여 대기오염모델의 입력자료로 사용

하는 것이 바람직하다고 사료된다.

참 고 문 헌

- 이종범, 김용국(1990) Pasquill 안정도계급의 평가와 안정도 parameter 추정방법의 개발. 한국 대기보전학회지, 6(2), 168-175.
- Einaudi F. and J. J. Finnigan(1981) The interaction between internal gravity waves and the planetary boundary layer. Part I : The linear analysis. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 107, 793-806.
- Etling, D.(1990) On plume meandering under stable stratification. Atmospheric Environment, 24A, 1979-1985.
- Golder, D.(1972) Relations among stability parameters in the surface layer. Boundary-Layer Meteorology, 3, 47-58.
- Hanna, S. R.(1981) Diurnal variation of horizontal wind direction fluctuations in complex terrain at Geysers, Cal. Boundary-Layer Meteorology, 21, 207-213.
- Hanna, S. R., G. A. Briggs, J. Deardorff, B. A. Egan, F. A. Gifford and F. Pasquill(1977) AMS-Workshop on stability classification schemes and sigma curves - Summary of recommendations. Bull. Atmospheric Meteorological Soc., 58, 1305-1309.
- Irwin, J. S.(1983) Estimating plume dispersion - A comparison of several sigma schemes. J. Climate and Applied Meteorology, 22, 92-114.
- Lee, C. B., Y. G. Kim and T. Hanafusa(1991) Relationships between atmospheric stability parameters and fluctuation of wind direction. Proc. 2nd IUAPPA Regional Conference on Air Pollution, Seoul, Korea, 2, 319-327.
- Leyl Z. and H. A. Panofsky(1983) Wind fluctuations in stable air at the boulder tower. Boundary-Layer Meteorology, 24, 353-362.
- Nuclear Regulatory Commission(1979) Atmospheric dispersion models for potential accident consequence assessments at nuclear power plants. Reg. Guide 1.145, U.S. NRC.
- Pasquill, F.(1961) The Estimation of the dispersion of windborne material. Meteorological Magazine, 90, 33-49.
- Pasquill, F.(1976) Atmospheric dispersion parameters in Gaussian plume modelling : Part II. Possible requirements for change in the Turner workbook values. Rep. EPA-600/4-760306, U.S. EPA, 44pp.
- Paulson, C. A. (1970) The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. J. Climate and Applied Meteorology, 9, 857-861.
- Porch W. M. and W. E. Clements(1990) Nighttime valley waves. J. Applied Meteorology, 30, 145-156.
- Raynor G. S. and J. V. Hayes(1984) Wind direction meander at a coastal site during on-shore flows. J. Climate and Applied Meteorology, 23, 967-978.
- Sethuraman S.(1980) A case of persistent breaking of internal gravity waves in the atmospheric surface layer over the ocean. Boundary-Layer Meteorology, 19, 67-80.
- Turner, D. B.(1964) A diffusion stability model for an urban area. J. Climate and applied Meteorology, 3, 83-91.