

中部地方 各地의 大氣汚染潛在力에 관한 研究

A Study on the Air Pollution Potential in the Central Part of Korea

李 鍾 範

江原大學校 環境學科
 (원고접수 : 1991. 2. 23)

Lee, Chong Bum

Department of Environmental Science Kangweon National University, Chuncheon 200-701, Korea
 (Received 23, February 1991)

Abstract

Air pollution potentials of the 7 cities in the central part of Korea were obtained with the mean wind speed within the mixed layer and the mixed layer height calculated by the Jump Model.

Seasonal variation of the afternoon mixed layer height in Seoul area shows that low in winter and high in summer. Annual mean of the morning air pollution potential was lowest in Incheon and highest in Wonju. On the other hand annual mean of the afternoon air pollution potential was lowest in Incheon and highest in Chuncheon. Relatively low air pollution potential in Incheon can be explained as high mixed layer height and the effect of sea breeze.

1. 서 론

공업단지조성 등 국토개발 계획시에는 가급적 기상조건이 대기오염물질의 확산에 유리한 지역을 선정하는 것이 바람직하다. 그러므로 이와같은 지역선정의 참고자료로 활용하기 위하여 여러 지역에 대하여 대기오염의 상대농도(단위 배출량에 대한 대기오염농도)를 산출하여 가상적인 대기오염의 잠재력(APP: air pollution potential)의 지역차를 비교할 필요성이 있다. 대기오염의 확산에는 여러가지 기상요소가 관여하지만 도시 또는 공업단지와 같이 넓은 지역의 평균적인 오염농도는 주로 혼합층고도와 혼합층내의 풍속이 중요한 요소가 되며 이들 자료로부터 대기오염의 상대농도를 구할 수 있다.

대기중으로 배출된 대기오염물질은 대기의 수평적인 이류에 따라 풍하측으로 이동되면서 대기난류에 의하여 혼합, 희석된다. 이때 대기경계층 상부에

존재하는 기온역전층은 강한 안정층으로서 수직적인 혼합을 억제하므로 대기오염물질의 분포는 기온역전층 하부에 국한되게 된다. 지표면에서 이러한 기온역전층 까지의 높이를 혼합층고도(MH: mixed layer height)라 하며 1일중 MH의 최저치는 수 10 m~수 100 m 정도로서 일출경에 나타나며 일출후 지면으로부터의 가열에 의하여 점차로 높아져서 일 최고기온의 발생시각 부근에 최고치를 나타내며 그 고도는 수 100 m~수 1,000 m 정도로 계절 및 지역에 따라 다르게 나타난다. 일최저 및 최고 MH는 아침의 기온연직분포 측정자료와 일최저기온과 일최고기온으로 구하는 Holzworth(1964)의 방법이 있으며 간단하므로 널리 이용되어 왔다.

Holzworth(1972)는 이 방법을 이용하여 미국 전역의 MH를 산출하여 APP를 조사하였다. 그러나 이 방법은 간단한 반면에 실측된 MH와 비교하여 보면 오차가 크다.

소위 0-Order Jump Model(Jump Model)은 지

표면으로부터의 현열 flux로부터 MH의 발달을 계산하는 모델로서 Carson(1973), Tennekes(1973) 등이 개발한 후 많은 연구자에 의하여 사용되었다.

본 연구에서는 Lee(1986)가 개선한 Jump Model을 이용하여 중부지방 각지의 1년간의 MH를 구하고 혼합층내의 평균풍속을 산출하여 이들 값으로부터 일일중 최고농도 발생시각에 해당된다고 생각되는 아침과 최저농도 발생시각에 해당된다고 생각되는 오후의 APP를 매일 계산하여 각지의 특성을 비교 분석하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구방법

2.1 혼합층고도 산출모델

Jump Model의 기본식은 다음과 같다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{(\overline{w'\theta'})_s - (\overline{w'\theta'})_h}{h} \tag{1}$$

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = \gamma \frac{dh}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \tag{2}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{(\overline{w'\theta'})_h}{\Delta\theta} \tag{3}$$

$$(\overline{w'\theta'})_h = -Ce (\overline{w'\theta'})_s \tag{4}$$

여기에서 θ 는 온위(potential temperature), θ' 는 온위의 변동성분의 편차, w' 는 연직풍속의 변동성분의 편차, t 는 시간, h 는 MH, $\Delta\theta$ 는 혼합층 상부에서의 온위 jump, γ 는 혼합층의 상층의 온위의 연직구배, Ce 는 entrainment ratio이며 첨자 s 와 h 는 지표와 고도 h 에서의 값을 나타낸다.

그림 1은 Jump Model에서의 온위와 현열 flux의 연직분포의 개략도이다. entrainment ratio는 풍속이 약한 대류상태에서는 보통 0.2(Yamada and Berman, 1979)를 사용하지만 풍속이 커서 역학적 난류가 클 경우 Driedonks(1982)는 다음 식을 제안하였다.

$$Ce = -\left(0.2 + \frac{5 u_*^3 T}{g h (\overline{w'\theta'})_s}\right) \tag{5}$$

여기에서 u_* 는 마찰속도, T 는 기온, g 는 중력가속도이다.

한편 중관기상규모(synoptic scale)의 대규모기단의 침강이나 상승운동이 존재할 경우, 이러한 연직운동이 혼합층의 상부의 온위구배를 변화시키며 또한 다음식과 같이 MH의 성장율도 달라진다(Lee, 1986). 연직운동을 고려할 경우 MH의 성장율을 구하는 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{(\overline{w'\theta'})_h}{\theta} + W_h \tag{6}$$

여기에서 W_h 는 대규모의 기단의 연직운동속도이다.

본 연구에서는 이상과 같은 모델을 이용하여 MH를 산출하였다.

2.2 현열 flux 추정방법

혼합층고도 모델의 중요한 입력자료인 현열 flux는 기상대의 측후소에서 일상적으로 관측하는 기상

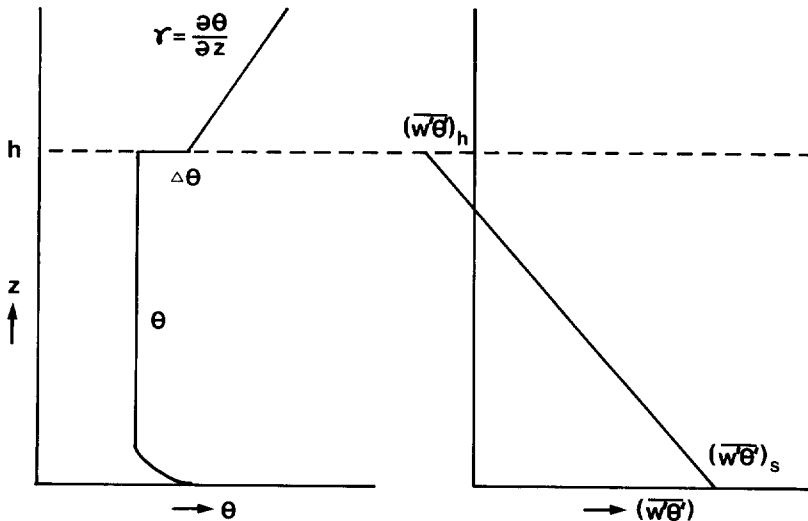


Fig. 1. Schematic diagram of the profiles of potential temperature and heat flux distribution of the Jump model.

요소가 아니며 실제 측정하는데는 복잡한 난류측정 장치가 필요하다. 본 연구에서는 현열 flux를 기상대의 측후소에서 측정하고 있는 기온, 일사량 등의 일상기상관측 요소만으로 추정하는 경험식을 작성하였다.

De Bruin and Holtslag(1982)는 지표면에서의 증발에 의한 잠열 flux(LE)를 순복사량(Rn)으로부터 구하는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$LE = \frac{a}{1 + (\lambda/s)} (Rn - G) + b \quad (7)$$

여기에서 G는 지중열 flux, s는 해당기온에서의 기온에 따른 포화비습의 기울기($s = \partial q_s / \partial T$), λ 는 psychrometric constant, a와 b는 상수이다. 식 (7)을 지표면의 열수지식

$$Rn = H + LE + G \quad (8)$$

를 이용하여 현열 flux에 대하여 정리하면

$$H = \frac{1 - a + (\lambda/s)}{1 + (\lambda/s)} (Rn - G) - b \quad (9)$$

여기에서 a는 토양의 수분에 의존하므로 우리나라와 같이 계절에 따른 습도의 변화가 큰 경우 Lee (1986)는 기온의 함수인 λ/s 로

$$a = C_1 + C_2(\lambda/s) + B \quad (10)$$

와 같이 나타낼 수 있음을 보였다. 여기에서 C_1 와 C_2 는 상수이며 B는 토양수분의 건습정도의 1일 중의 변화에 관계하는 계수이다. 이상과 같이 토양수분의 계절변화를 λ/s 의 함수로 하고 일변화를 시간의 sin 함수로 나타내어 정리하면

$$H = \frac{C_1 + (C_2 + C_3 \sin \tau)(\lambda/s)}{1 + (\lambda/s)} (Rn - G) - b \quad (11)$$

이다. 여기에서 τ 는

$$\tau = (t - t_r) \pi / t_d - \pi / 2 \quad (12)$$

이며 t는 시각, t_r 은 일출시각, t_d 는 낮의 길이이다. 식 (11)은 Rn, G와 기온으로부터 지표에서의 현열 flux를 구하는 식이다(Lee, 1985).

순복사량은 일반적인 측후소에서 측정하지 않으므로 식 (11)을 그대로 이용할 수는 없으나 Rn이나 G는 일사량과 대체로 직선적인 관계가 있으므로 본 연구에서는 식 (11)의 Rn-G 대신 다음식과 같이 일사량(I_s)으로 대체하였다.

$$H = \frac{a_1 + (a_2 + a_3 \sin \tau)(\lambda/s)}{1 + (\lambda/s)} I_s - a_4 \quad (13)$$

여기에서 a_1, a_2, a_3, a_4 는 상수로서 일본의 기상연

구소 213 m 기상탑에서 측정된 08시부터 16시 사이의 시간별 현열 flux와 일사량, 기온자료를 이용하여 Stepwise selection method에 의하여 $\sin \tau, \lambda/s$ 와 I_s 를 독립변수로 하고 H를 종속변수로 하는 중회귀식을 결정하여 정리한 결과는 다음과 같다.

$$H = \frac{0.33 + (1.233 - 0.661 \sin \tau)(\lambda/s)}{1 + (\lambda/s)} I_s - 22.1 \quad (14)$$

여기에서 H의 단위는 $W m^{-2}$ 이며 I_s 의 단위는 일반기상관측소의 일사량 자료와 일치시키기 위하여 1시간 동안의 일사량을 $0.01 \text{ Mega joule } m^{-2}$ 로 하였다.

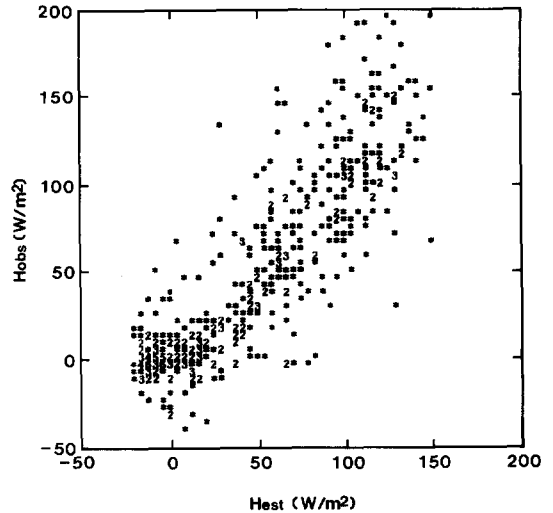


Fig. 2. Comparison between observed sensible heat flux (H_{obs}) and estimated sensible heat flux (H_{est}) by eq. (14).

이 식을 결정하는데 총 452시간의 매시간 자료를 사용하였으며 그림 2는 현열 flux의 측정치와 계산치를 비교한 결과로서 중상관계수(multiple correlation coefficient)는 0.86이었다.

이 식은 일본에서의 자료를 사용하여 결정하였으나 우리나라와 일본은 동일한 계절풍기후 지역에 속하여 있고 토양, 식생조건 등도 유사하므로 우리나라에서도 적용가능하다고 생각된다. 단 적용시간대는 08시부터 16시까지이다.

2.3 혼합층내의 평균풍속

각지의 지상 10 m의 풍속과 라디오 존데에서 관측

된 오전 09시의 풍속의 연직분포자료로부터 다음과 같은 방법으로 각지의 혼합층 내의 평균풍속을 구하였다.

MH에서의 풍속을 풍속의 연직분포자료로부터 내삽법을 이용하여 구하고 각지의 해당시각의 지상 10 m의 풍속과 상층풍속으로부터 MH까지의 풍속연직분포곡선의 면적을 구한 후 이 면적을 MH로 나누어 혼합층내의 평균풍속으로 하였다.

2.4 대기오염잠재력 산출모델

본 연구에서는 도시와 같은 넓은 지역내의 평균적인 농도를 산출하는 다음과 같은 모델(Holzworth, 1972)을 이용하여 C/Q(이하 APP로 간주함)를 구하였다.

$$L/u \leq 0.471 h^{1.13} \text{인 경우에는} \\ C/Q = 3.994 (L/u)^{0.115} \quad (15)$$

이며

$$L/u \geq 0.471 h^{1.13} \text{인 경우에는} \\ C/Q = 3.613 h^{0.13} + \frac{L}{2uh} \frac{0.088 uh^{1.26}}{L} \quad (16)$$

이다.

여기에서 L은 도시의 길이(m), u는 풍속($m \text{ sec}^{-1}$), h는 MH(m), C는 농도($\mu g \text{ m}^{-3}$), Q는 배출량($\mu g \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$)이다.

2.5 각지의 대기오염잠재력 산출방법

지상기상관측자료로서는 중부지방의 7개 측후소(서울, 인천, 수원, 춘천, 원주, 청주, 대전)의 1988년도 1년간 매시간 기상자료를 이용하였으며 기상요소는 기온, 풍속, 일사량이다. 상층기상관측자료는 오산에서 측정된 1988년도 1년간 매일 09시의 라디오존데 자료를 이용하였으며 기상요소는 기압, 기온, 노점온도, 풍속이다.

09시의 상층기상관측은 실제로 08시 30분에 시작하므로 대기하층부의 자료는 대개 08시 30분의 상태로 볼 수 있으므로 Jump Model 모델의 계산은 매일 08시 30분에 시작하여 15시 30분까지 7시간씩 실행하였다. 이와같이 하여 1988년도의 1년간 매일의 08시 30분의 MH(아침 MH로 표기)와 15시 30분의 MH(오후 MH로 표기)를 계산하고 7개 지점의 해당일 08시 30분과 15시 30분의 경계층의 평균풍속을 구하여 식 (15) 또는 식 (16)에 의하여 08시 30분의 APP(아침 APP로 표기)와 15시 30분의 APP(오후 APP로 표기)를 구하였다. 단 MH의 초기치는 50 m로 하였으며 08시 30분의 아침 MH의 계산치는 실제로는 30초의 시간간격으로 10회 계산한 후의 값을 사

용하였다.

도시의 길이는 가상적으로 7개 지역 모두 일정하게 20 km로 하였다. 즉 C/Q값은 도시의 길이가 20 km이며 오염물질 배출량이 $1 \mu g \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 인 경우 그 지역의 평균오염농도($\mu g \text{ m}^{-3}$)를 나타낸다. 단, 이와같은 대기오염 산출방법에는 도시의 열섬효과(heat island effect)나 도시내의 순환 등의 도시기후현상 등은 고려되지 않았다.

3. 결과 및 토의

그림 3은 서울의 오후 MH, 아침 APP와 오후 APP의 1년간의 변화를 나타낸 것이다. 오후 MH의 년평균은 1,230 m이며 날에 따른 변동이 커서 최저치는 174 m, 최고치는 6,226 m이며 표준편차는 803 m이다. 아침 APP의 년평균은 93.8 sec m^{-1} 이며 최저치는 9.74 sec m^{-1} , 최고치는 310.3 sec m^{-1} , 표준편차는 55.6 sec m^{-1} 이다. 오후 APP의 년평균은 11.7 sec m^{-1} 이며 최저치는 8.99 sec m^{-1} , 최고치는 43.9 sec m^{-1} , 표준편차는 3.19 sec m^{-1} 이다.

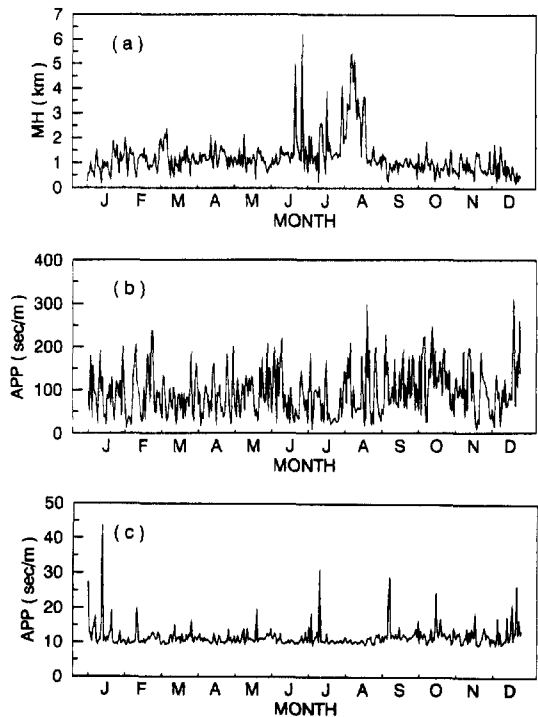


Fig. 3. Annual variation of the afternoon mixed layer height (a), the morning APP (b) and the afternoon APP (c) in Seoul area.

Table 1. Monthly mean values of the afternoon mixed layer height (MH), morning APP, afternoon APP in Seoul area.

Month	Afternoon MH (m)	APP (sec m ⁻¹)	
		Morning	Afternoon
		1	920
2	1110	94.5	11.1
3	1243	75.4	11.0
4	1236	83.0	10.7
5	1141	94.2	11.3
6	1520	91.4	10.8
7	1472	64.5	11.6
8	2651	100.7	10.5
9	950	97.1	12.6
10	868	134.2	12.6
11	897	99.4	11.8
12	745	97.4	12.7

표 1에 서울의 오후 MH, 아침 APP, 오후 APP의 월평균 값을 보였다. 오후 MH는 일반적으로 동계에 낮고 하계에 높으며 최소치는 12월의 745 m, 최대치는 8월의 2,651 m이다. 한편 아침 APP 및 오후 APP는 월에 따라 변동하지만 계절적인 특징은 뚜렷하지 않다.

1988년도 1년간에 대하여 중부지방 7개 지역의 오후 MH, 아침 APP, 오후 APP의 평균, 최소, 최대, 표준편차와 25, 50, 75 percentile을 표 2~4에 나타내었다. 오후 MH의 년평균치를 보면 원주가 가장 낮은 1,171 m이며 인천이 가장 높은 1,303 m이다. 표준편차는 782 m에서 1,081 m까지로서 일에 따른 변동이 큰 것을 알 수 있다.

아침 APP는 인천이 가장 낮은 77.6 sec m⁻¹이며 원주가 가장 높은 182.6 sec m⁻¹로 나타났으며 표준

Table 2. Afternoon mixed layer height (m) in the 7 cities in 1988.

	Mean	Min	Max	SD	Percentile		
					25	50	75
					Seoul	1231	174
Incheon	1303	264	6766	824	832	1170	1432
Suwon	1174	121	5785	782	776	1019	1288
Chuncheon	1255	94	7053	1081	712	1010	1362
Wonju	1171	72	5622	877	727	994	1275
Cheongju	1269	87	6315	980	781	1057	1361
Daejeon	1257	80	6200	969	765	1028	1321

Table 3. Morning APP (sec m⁻¹) in the 7 cities in 1988.

	Mean	Min	Max	SD	Percentile		
					25	50	75
					Seoul	93.8	9.7
Incheon	77.6	9.6	363	55.4	37.4	62.4	104.7
Suwon	139.5	19.8	366	75.5	75.0	127.5	198.5
Chuncheon	150.7	13.3	342	72.1	91.4	147.3	203.5
Wonju	182.6	19.8	400	79.4	116.5	185.7	248.1
Cheongju	133.2	15.6	371	71.3	73.7	125.6	186.5
Daejeon	158.5	16.9	371	83.3	87.2	159.3	223.3

Table 4. Afternoon APP (sec m⁻¹) in the 7 cities in 1988.

	Mean	Min	Max	SD	Percentile		
					25	50	75
					Seoul	11.7	8.99
Incheon	11.3	8.88	29.8	2.17	10.0	10.7	11.8
Suwon	12.1	9.09	65.6	4.99	10.2	11.0	12.3
Chuncheon	13.6	9.27	127.7	10.76	10.1	11.0	12.6
Wonju	13.2	9.27	126.2	9.64	10.3	11.1	12.5
Cheongju	12.4	8.96	146.0	8.23	10.1	10.9	12.1
Daejeon	12.4	8.93	69.5	6.06	10.2	10.9	12.1

편차는 55.4~83.3 sec m⁻¹로서 역시 일에 따른 변동이 크다. 오후 APP는 인천이 가장 낮은 11.3 sec m⁻¹이며 춘천이 가장 높은 13.6 sec m⁻¹로 나타났으며 표준편차는 2.17~10.8 sec m⁻¹이다.

평균치와 표준편차는 특이한 날의 값의 영향을 받으므로 이러한 영향을 제외한 대표적인 값과 변동폭을 나타내기 위하여 표 2, 3, 4에는 50 percentile (median) 및 25 percentile과 75 percentile의 값을 각각 제시하였다. 해안가인 인천에서 APP가 특히 작은 것은 MH가 비교적 높고 해륙풍에 의한 영향을 받기 때문으로 생각된다.

7개 지역의 아침 APP의 평균은 133.6 sec m⁻¹로서 이는 20 km×20 km의 면적에서 400 g sec⁻¹의 오염물질 배출량이 있을 때 오염농도는 133.6 μg m⁻³이 됨을 뜻한다. 한편 7개 지역의 오후 APP의 평균은 12.4 sec m⁻¹로서 아침의 약 9%에 해당한다.

그림 4는 각 지역의 오후 MH의 빈도분포를 나타낸 것으로서 내륙에 위치한 춘천, 원주, 청주, 대전의 경우는 비슷한 특징을 나타내고 있으나 해안가에 가까운 인천, 수원, 서울의 경우는 내륙지방에 비해

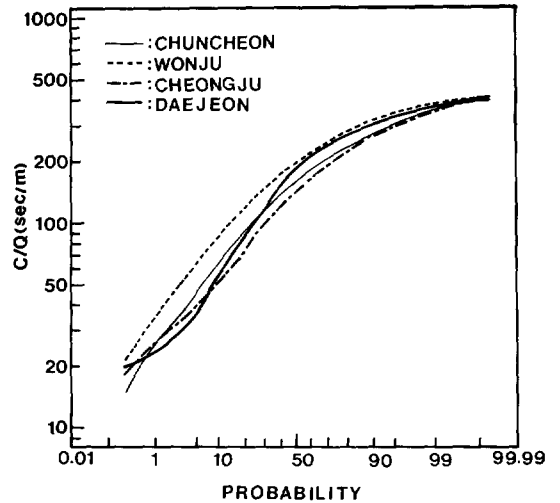
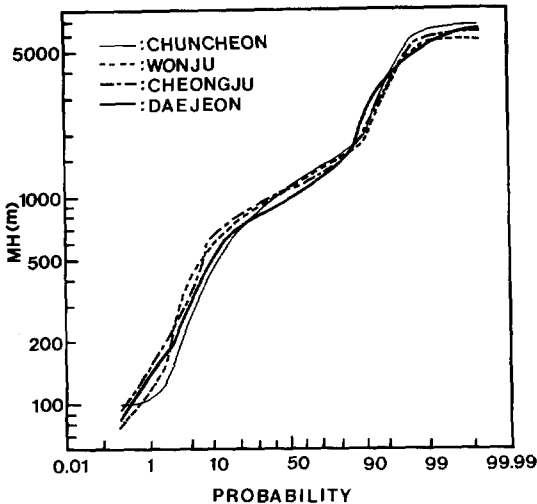
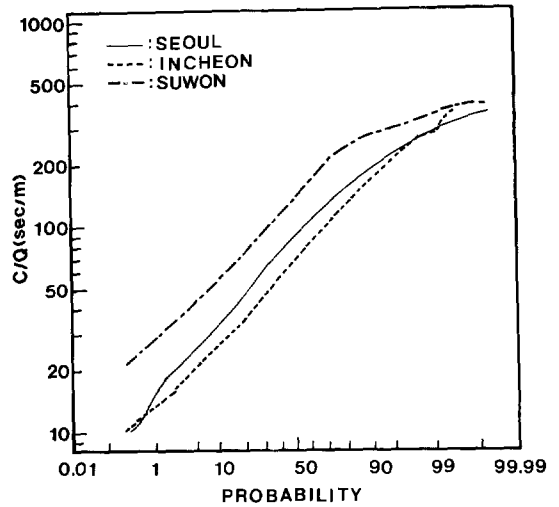
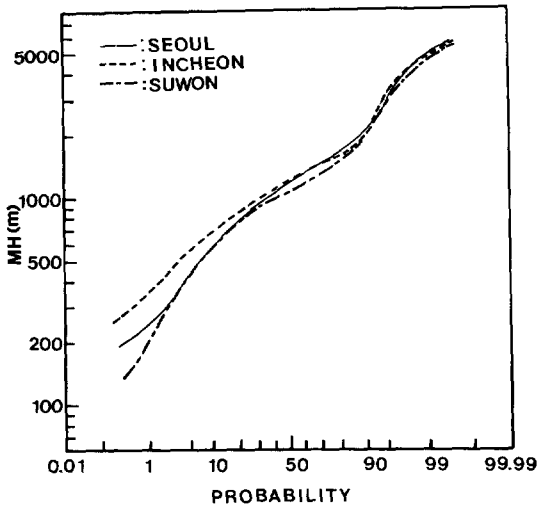


Fig. 4. Probability distribution of the afternoon mixed layer height.

Fig. 5. Probability distribution of the morning APP.

여 오후 MH가 낮은 경우가 적은 것을 알 수 있으며 특히 인천의 경우가 가장 적다.

그림 5는 7개 지역의 오전 APP의 빈도분포로서 인천의 경우가 가장 낮으며 다음으로 서울이며 또한 인천과 서울의 경우 빈도분포곡선은 대체로 직선이므로 대수정규분포(log normal distribution)에 가까우나 그외의 지역은 고농도층에서 기울기가 작아 지므로 대수정규분포에 비하면 극단적인 고농도의 경우의 빈도가 적은 것을 알 수 있다.

그림 6은 7개 지역의 오후 APP의 빈도분포로서 발생빈도확률이 약 90%까지는 APP의 증가가 작으

나 90% 이상에서는 급격히 커지며 특히 90% 이상의 경우에 오후 APP는 인천이 가장 작으며 다음으로 서울이 작다. 그 외의 지역은 대체로 비슷한 특징을 보인다. 오후 APP의 발생빈도는 정규분포와 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

혼합층고도 모델로 계산된 아침과 오후의 혼합층고도와 혼합층내의 평균풍속으로 중부지방의 7개 지역의 1년간 대기오염잠재력을 산출하였다. 서울의 경우 오후의 혼합층고도는 일반적으로 동계에 낮

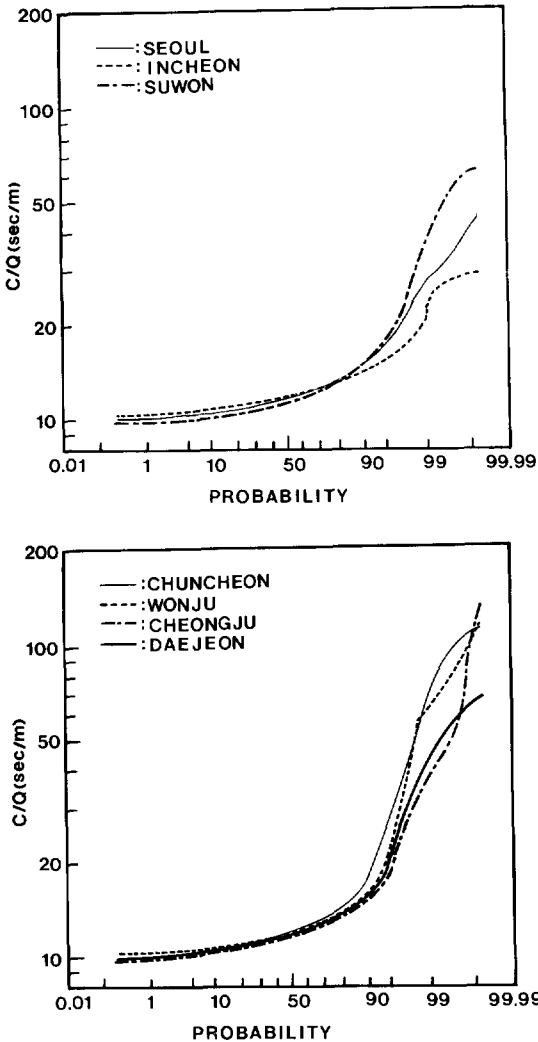


Fig. 6. Probability distribution of the afternoon APP.

고 하계에 높으며 12월에 가장 낮고 8월에 가장 높다. 서울의 대기오염잠재력은 월에 따라 변동하지만 계절적인 특징은 뚜렷하지 않다.

중부지방 7개 지역의 1년간 오후의 혼합층고도를 구한 결과 일에 따라 변동이 크며 년평균은 원주가 가장 낮으며 인천이 가장 높다. 아침에는 혼합층고도가 낮아 대기오염잠재력은 매우 크며 오후에는 혼합층의 발달로 대기오염잠재력은 아침의 9% 정도로 작다.

아침의 대기오염잠재력은 인천이 가장 낮으며 다음으로 서울이 낮다. 아침의 대기오염잠재력이 가장 높은 지역은 원주로 나타났다. 오후의 대기오염잠재력은 인천이 가장 낮으며 춘천이 가장 높은 것으로 나타났다. 인천의 대기오염잠재력이 낮은 것은 해륙풍에 의한 영향으로 생각되며 내륙지방의 경우는 혼합층고도가 낮고 풍속이 약하여 대기오염잠재력이 상대적으로 높다.

(본 연구는 1989년도 환경과학연구비의 지원에 의하여 수행되었음.)

참 고 문 헌

Carson, D.J. (1973) The development of a dry inversion-capped convectively unstable boundary layer. *Quart. J.R. Met. Soc.*, 99, 450 - 467.

De Bruin, H.A. and A.A.M. Holtslag (1982) A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-Monteith concept. *J. Appl. Meteor.*, 21, 1610 - 1621.

Driedonks, A.G.M. (1982) Models and observations of the growth of the atmospheric boundary layer. *Bound. Layer Meteor.*, 23, 283 - 306.

Holzworth, H.C. (1964) Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States. *Mon. Wea. Rev.*, 92, 235 - 242.

Holzworth, H.C. (1972) Mixing heights, wind speeds, and potential for urban air pollution throughout the contiguous United States. Environmental Protection Agency Report AP-101., pp. 130.

Lee, C.B. (1985) Modelling and climatological aspects of convective boundary layer. Ph. D. dissertation, The University of Tsukuba.

Lee, C.B. (1986) Simple model and climatological aspects of the structure of the convective boundary layer. *Atm. Env.*, 20, 705 - 714.

Tennekes, H. (1973) A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 30, 558 - 567.

Yamada, T. and S. Berman (1979) A critical evaluation of a simple mixed layer model with penetrative convection. *J. Appl. Meteor.*, 18, 781 - 786.