한국환경과학회지 제14권(제6호), 555~563, 2005
Journal of the Environmental Sciences

Tethersonde와 기상탑 관측 자료를 이용한 울산지역 야간 역전에 따른 대기오염도 변화와의 관계

임 윤 규 · 김 유 근 · 오 인 보 · 송 상 근
부산대학교 대기과학과
(*2005*년 *3*월 *7*일 접수; *2005*년 *6*월 *14*일 채택)

Nocturnal Inversion Layer observed by Tethersonde and AWS System and its Relation to Air Pollution at Ulsan

Yun-Kyu Lim, Yoo-Keun Kim, In-Bo Oh and Sang-Keun Song
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
(Manuscript received 7 March, 2005; accepted 14 June, 2005)

This study presents the characteristics of nocturnal inversion layer and their effect on the concentration variations of surface air pollutants using tethersonde and automatic weather station (AWS, 2 layer tower) system in Ulsan during 2003. The method for the distinction of inversion intensity was decided based on the sum of nocturnal temperature gradient. As the results, there was a close correlation (correlation coefficient of 0.76) between the maximum inversion height obtained from tethersonde and the sum of nocturnal temperature gradient. The air pollutant concentration was also directly proportional to the inversion intensity. When the inversion intensity was strong in the nighttime, ozone (O_3) concentration was lower, while nitrogen dioxide (NO_2) concentration was higher. The carbon monoxide (CO) concentration was gradually higher according to the nocturnal inversion intensity, whereas sulfur dioxide (SO_2) concentration was relatively constant. In addition, we found that there was no correlation between the inversion intensity and TSP concentration.

Key Words : Nocturnal inversion layer, Tethersonde, 2 layer tower, Inversion intensity, Air pollutants

1. 서 론

역전층(inversion layer)은 절대 안정층으로써 공기의 연직운동을 억제시켜 지표 부근의 오염된 공기가 상공으로 빠져나가지 못하게 된다. 따라서 지표 부근에 역전층이 생기면 오염 물질이 축적되어 대기층이 뿌옇게 보이며, 오염 물질이 많이 배출되는 대도시에 역전층이 나타나면 스모그(smog)가 발생하기도 한다. 만약 역전층이 상공에 발생하면 지표 근처에서 대류현상이 있더라도 대기 저층에서 발생한 오염물질은 상공의 역전층에 갇혀 고농도를 유발하게 된다.

역전층에 관한 연구는 저층 대기의 상태를 파악하여 대기 오염물질의 분산 및 확산과정을 알아보기 위한 것이다. 역전층에 관한 최초의 연구로는 Hosler[1]가 미국 내에서 접지역전층의 발생빈도를 각 계절별로 조사하여 기상학적 특징에 따라 7개의 권으로 분류하였고, Lie[2] 등은 연안지역의 경우 해륙풍순환에 의한 국지적 효과는 오전의 대기정체와 함께 고농도 발생에 깊은 관련이 있다고 하였다. 일반적으로 해풍이 발생할 때는 기압의 차이가 적어 대기가 안정하고 역전층 고도가 낮으며 약한 풍속과 낮은 혼합고로 인해 대기의 확산 능력이 저하된다(Mantis)[3]. 이와 같이 연안지역 대기오염 농도는 김유근[4] 등이 밝힌바와 같이 지역규모의 순환 및 역전층 발달 특성에 따라 많은 차이를 보인다. 또한 이태영[5]이 역전층에 의해 해륙풍순환의 수직 깊이를 얇게 하고 저녁 시간의 해풍전선 속도를 감소시킨다고 하였다. 이지연[6] 등은 연직 기상요소 및 대기질 관측을 통해 풍속보다는 기온역전 현상이 도

Corresponding Author : Yoo-Keun Kim, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-510-2282
E-mail: kimyk@pusan.ac.kr

시경계층의 상하에서 고농도 오존생성에 유리한 것과 기온역전 정도에 따라 오존농도와 양의 상관을 보인다고 하였다.

일반적으로 역전층은 여름에 가장 낮고 가을과 겨울에 높은 계절변화를 보이지만 각 지역마다 지형 및 기후 등의 조건이 다르므로 계절별 전형적인 역전층 발생일과 높이 등은 다르게 나타난다. 이러한 역전층의 발생과 높이에 따라 대기오염 특성도 다르게 나타나기 때문에 각 계절별 전형적인 역전층 발생일을 정의하고 그때의 대기오염 농도 특성을 파악함으로써, 역전층에 따른 고농도 대기오염 발생정도를 예측 할 수 있다. 특히, 울산지역과 같은 대도시 연안공업지역의 경우, 날로 심각해지는 도시 대기오염 현상을 개선하기 위한 정책적인 연구의 일환으로 역전층의 발달 정도에 따른 대기오염도에 관한 사전연구가 반드시 필요하다고 할 수 있다. 하지만, 역전층의 발생 및 발달정도를 파악하기 위해서는 매시간 저층대기관측이 꾸준히 이루어져야 하나, 현시점에서 매번 상층관측을 통한 역전층 파악은 힘든 실정이다.

따라서 본 연구에서는 tethersonde에 의해 관측된 역전층고도와 2층 기상탑의 연직 온도차와의 관계를 밝히고, 역전강도에 따른 대기오염물질 농도 경향을 2층 기상탑의 연직 기온차이를 통하여 간접적으로 추정하고자 한다. 향후 장기적인 역전발달 정도와 대기오염물질 농도와의 상호관계는 대기오염예보 시스템 구축에 있어 지역 대기안정도를 대변하는 대기오염 포텐셜의 중요한 인자로 적용 가능할 것이다.

2. 대상지역 및 자료

본 연구의 대상지역인 울산지역은 한반도의 동남단에 위치하고 있고 바다와 인접하고 있어 해양성 기후를 나타내고 있으며, 내륙지방에 비해 기온의 차가 그리 심하지 않는 특성을 지니고 있다. 특히, 남동쪽으로 트인 지형으로 남동내지 북서풍 계열의 국지순환계가 잘 나타나는 곳이며, 또한 연안지역에 많은 공업단지가 형성되어 있어 대기오염물질의 고농도 현상이 빈번하게 발생할 수 있는 조건에 있다. 본 연구에서는 이러한 울산지역의 특성을 감안하여 연안지역이면서 공단들이 밀집된 여천동(Fig. 1) 지점에 2002년 6월부터 2층 기상탑을 설치하여 각 2층(2m, 10m)의 기상요소를 측정하고 있다. 본 연구에

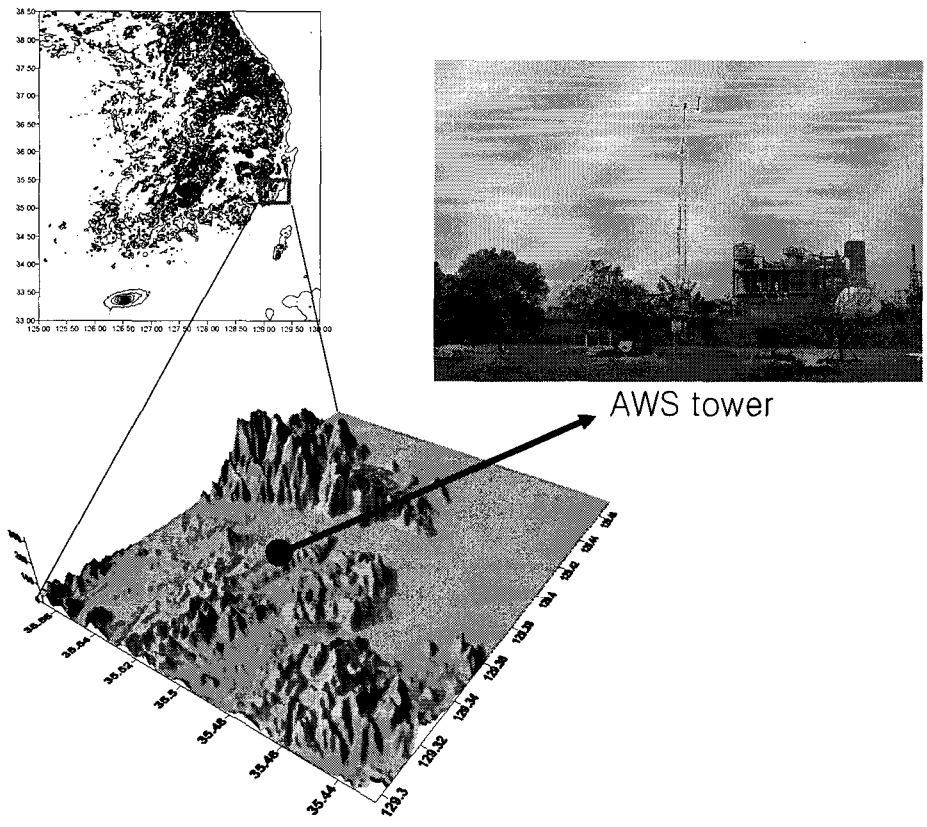

Fig. 1. Map of Ulsan metropolitan city (dark circle indicates the position of AWS tower).

서 사용한 2층 기상탑의 온도센서는 Campbell 사에서 제작한 HMP 45AC 모델로 ± 0.1 ℃ 오차를 가지고 있다. 또한 tethersonde를 이용하여 2002년 7월부터 2003년 5월까지 각 계절별 2회씩 야간(1800~0800 LST) 8회 관측을 실시하여 계절별 16개의 역전층고도 자료를 확보하였다. Tethersonde에 쓰인 온도계는 TTS111 모델로 -50~60 ℃ 범위의 온도를 측정할 수 있고 0.1 ℃ 정확도를 가지고 있다. 관측기간의 종관기상특징 및 관측기간을 Table 1에 나타내었다. 각 계절을 대표하는 전형적인 종관상태일 경우와 변형적인 종관상태일 경우를 선택하여 각 계절에 발생하는 역전층의 오차범위를 포함시켰다. Table 1에 제시된 야간 tethersonde 관측일과 2층 기상탑의 연직 기온과의 상관분석을 실시하였는데, tethersonde의 2002년 가을 2회 관측결과와 2002년 겨울철 1회 관측결과는 2층 기상탑 자료의 누락으로 인해 분석에서 제외하였다. 2층 기상탑의 기온자료를 이용한 역전 발달과 대기오염물질(오존, TSP, SO_2, NO_2, CO) 농도와의 관계를 밝히기 위해 양호한 관측결과가 포함된 2003년 1월~2003년 12월 동안의 2층 기상탑 자료와 기상탑 인근지역에 위치한 여천동 대기질 자료(환경부)를 사용하였다.

3. 연구방법

역전층의 유무를 판단하기 위해 가장 널리 쓰이는 방법으로 기온의 연직구배를 이용한 방법이 있다. Kondo[7]가 제안한 역전층 판단기준으로 완만하게 온도구배가 변할 경우의 판정 조건인 $T_{i+1} - T_i \geq 0$이 가장 일반적이다. 이때 T는 온도, i는 고도를 나타내는 첨수이다. 즉, 연직 온도구배($T_{i+1} - T_i$)가 양수면 역전의 형태이며 반대로 음일 경우 대기가 불안정한 경우로 해석할 수 있다. 이러한 기온관측을 통해 역전층의 유무를 파악하는 것은 대기하층의 기상상태를 정확히 파악할 수 있으며, 이는 짧은 시간간격의 지속적인 연직기상관측을 통해 가능한 부분이다. 본 연구에서 수행한 계절별 두 차례 tethersonde 관측결과를 이용하여 역전층의 발달 유무 정도에 따른 지표 대기오염물질의 특징들을 분석할 수 있으나, 이러한 연구는 사례일 정도의 일시적인 분석방법일 뿐이다. 즉, 어느 특정지역에서 역전층 발달과 대기오염물질들의 특성을 보다 객관적인 방법으로 분석하기 위해서는 장기간의 역전층에 관한 정보가 제공되어져야 한다. 그러나 현 시점에서 장기간 상층관측은 경제적으로나 인력적인 면에서 상당한 비용을 필요로 하기 때문에 많은 어려움이 따른다.

따라서 무인자동관측시스템을 이용한 역전층 발달정도를 어느 정도 산출하기 위한 방법으로 본 연구에서는 2층 구조를 지닌 기상탑 기온자료와 tethersonde 관측 결과인 최대 역전고도와 상관분석을 실시하여, 2층 무인자동관측시스템을 통한 역전층 발달정도를 추정하였다. 또한 이러한 방법으로 산정된 역전강도별 각 대기오염물질과의 관계분석 수행을 통해 단기관측으로 분석이 불가능한 역전강도별 대기오염농도 특성에 관한 전반적인 경향을 파악하였다.

4. 2층 온도구배를 이용한 역전강도 추정

Tethersonde로부터 측정된 연직기온과 기상탑 연직기온차이의 관계 분석을 실시하였다. Fig. 2는 tethersonde 관측일중 각 계절을 대표하는 날을 대상으로 이날의 2층 기상탑 연직기온차이와 같이 나타낸 것으로 가을철관측 결과는 2층 기상탑 자료의 누락으로 생략되었다. 4계절 중 가장 높은 역전층 고도를 나타낸 봄철의 경우 일몰 후 지표냉각에 따른 역전층의 발달이 뚜렷이 보이며 기상탑 연직온도차에 따른 역전층의 발달 모습을 잘 나타내고 있다. 여름의 경우 가장 낮은 역전층 고도를 보이는 계절로 tethersonde에 의한 연직 기온을 보면 지표부근과 상층(고도 약 150m)부근의 온도차가 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 야간의 지표냉각효과로 인해 지표기온이 낮아져도 상층 기온이 상대적으로 더 낮기 때문에 역전층이 발달하기 힘든 조건이라고 할 수 있다. 다시 말해서 2층 기상탑의 상·하층(10m · 2m) 온도차가 아주 작은 값을 나타내어 지표와 상층의 기온차가 크지 않음을 알 수 있고, 역

Table 1. Synoptic conditions during tethersonde observation period

Season	Observation period (LST)	Synoptic condition
Spring	2003. 4. 26 1500~2003. 4. 28 1200	Effect of migratory cold tropical anticyclone
	2003. 5. 3 1200~2003. 5. 5 0900	Effect of cyclone back of marginal anticyclone
Summer	2002. 7. 24 1200~2002. 7. 25 1500	Effect of typhoon later marine tropical air mass
	2002. 8. 20 1800~2002. 8. 23 0900	Effect of marine tropical air mass
Winter	2003. 1. 14 1500~2003. 1. 16 1200	Effect of migratory anticyclone separated from cold polar anticyclone

전층의 발달도 상당히 느리게 진행될 것을 짐작할 수 있다. 겨울철의 경우 하층의 냉각속도와 상층의 냉각속도 둘 다 상당히 빠르게 진행되는 것을 알 수 있다. 봄철의 경우, 상층에 비해 하층의 냉각속도가 더 빠르게 나타나기 때문에 역전층이 상당히 발달할 수 있는 조건이 될 수 있지만, 겨울철의 경우 일몰 후 지표냉각과 동시에 상층의 기온도 빠르게 낮아지기 때문에 상하층 온도 경도가 발달할 수 있는

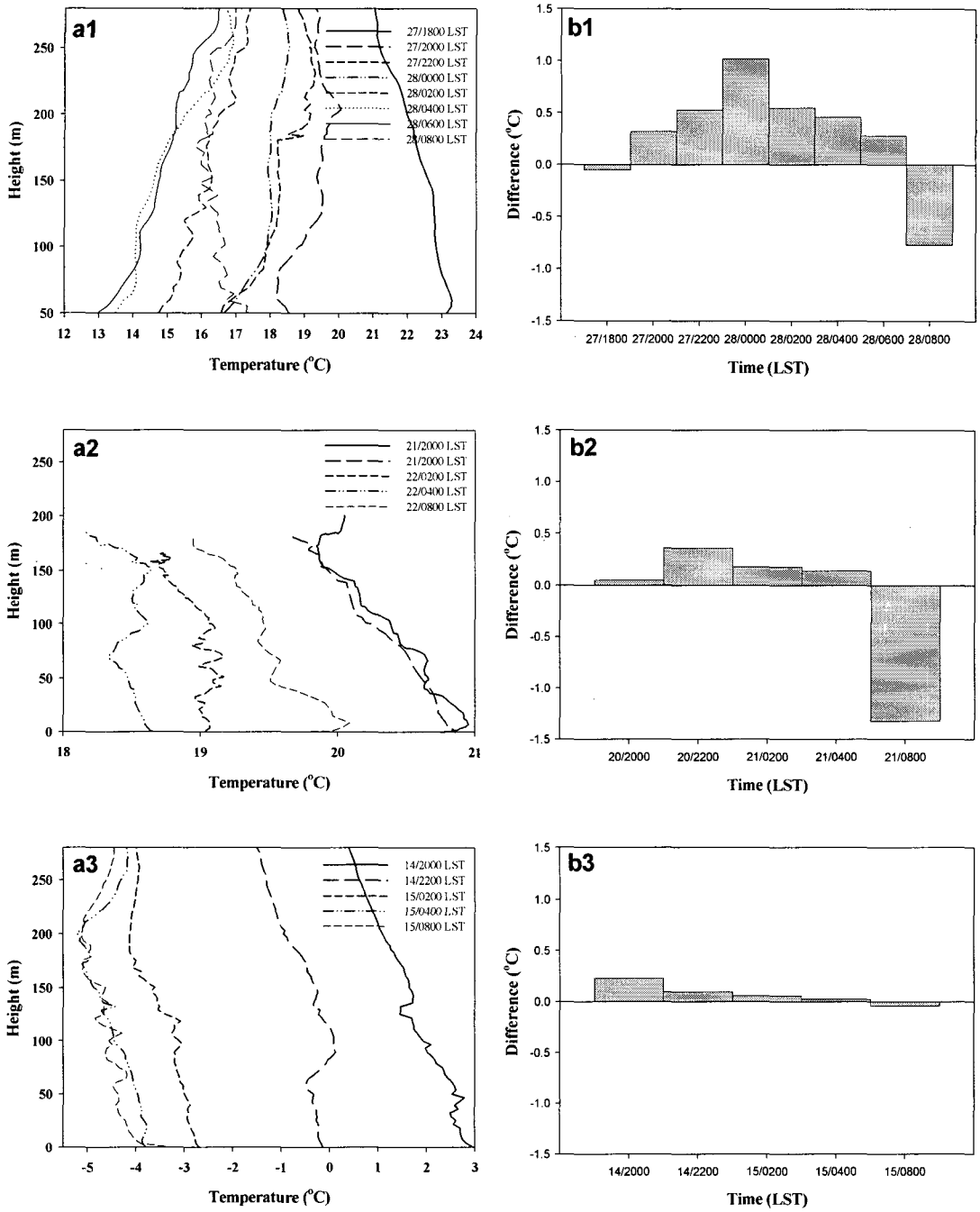

Fig. 2. Nocturnal variation of (a) vertical profile of air temperature using tethersonde system and (b) DT(the temperature at 10m minus that at 2m level) using AWS (2 layer tower) (a1 and b1: 27-28 April 2003, a2 and b2: 21-22 August 2002, a3 and b3: 14-15 January 2003).

조건이 될 수 없다. 이와 같이 tethersonde로부터 측정된 시간별 연직기온 변화와 2층 기상탑 연직 기온차의 비교를 통해 역전층 발달 정도를 추론할 수 있었다. 이상의 결과에서 tethersonde의 역전층 발달 과정과 2층 기상탑 연직 기온차와 상당한 관련이 있음을 나타낸다.

Table 2는 2003년 1월~2003년 12월까지 각 시간대별 2층 기상탑의 평균 연직온도차를 나타낸 것이다. 야간 연직온도차의 최대치가 일 최저기온을 기록하는 0600~0800 LST에 나타나는 것이 아니라 2400 LST에 나타나고 있어, 도시의 야간 복사냉각에 의한 역전층 발달을 방해하는 요인이 작용한다고 추론 할 수 있다. 이러한 작용으로 최대 역전층고도 발달 시간이 0600~0800 LST 보다는 2200~0400 LST 사이에 존재하게 된다. 즉, 역전층 발달 정도는 하루 중 일사의 영향에 의한 지표면 냉각효과뿐만 아니라, 도시화에 따른 간접영향과도 밀접한 관련이 있다. 따라서 최대 역전층고도는 야간시간에 발달하는 안정층의 특성과 밀접한 관련이 있음을 가정하고 야간 특정시간 구간동안의 연직온도차(DT)의 차이와 최대 역전층고도와의 상관관계를 조사하였다(table 3). DT의 시간별 차이에서 0200 LST의 DT에서 2000 LST의 DT를 뺀 값과 최대 역전층고도 값의 상관이 96.9%의 유의 확률로 67.8%의 정의상관을 보였고 0300 LST와 2000 LST의 경우는 96.5% 유의 확률로 66.8% 정의상관을 보였으며 나머지 시간대에서는 상관성이 없는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 단지 연직 온도차에 의한 것으로 야간 승온효과 및 난류 요란 등과 같은 밤사이에 역전층 발달에 영향을 미친 많은 요소들이 누락되었을 가능성이 높다. 이와 같이 역전 발달에 영향을 미치는 요소들을 고려해서 적용한 방법으로 야간 온도기울기의 총합을 이용한 방법을 썼을 경우 시간이 누적될수록 최대 역전층고도와의 상관이 높아짐을 알 수 있다(table 3). 즉, 야간의 연직온도차(DT)의 크기가 역전층고도 발달과 직접적인 관련이 있으나, 특정시간의 DT만으로 야간 전시간에 걸쳐 발달하는 역전현상을 설명하기는 부족하다 할 수 있다. 따라서 야간에 발달하는 최대 역전층고도를 추정하는 방법으로 2000 LST에서 0600 LST까지의 DT 총합을 이용하여 분석한 결과 98.8% 유의 확률로 약 76% 정의상관성을 가지는 것으로 나타났다.

이상의 결과로 역전층고도를 추정하기 위한 방법으로 tethersonde로 측정한 역전층고도와 2층 기상탑의 야간 연직 온도차의 총합을 이용한 방법이 가장 상관성이 높은 것으로 나타났다. 다시 말하면, tethersonde 관측이 없는 날의 경우 역전층 발달정도를 2층 기상탑에서 관측된 야간 온도차의 총합 정도에 따라 추정가능하다.

4.1. Tether sonde 최대 역전고도와 대기오염물질과의 관계

Table 4는 tethersonde 관측일의 최대 역전층고도와 각 대기오염물질 농도의 상관관계를 나타낸 것으로 일최대 오존농도에서 유의수준 99% 이상으로 약 78% 정도의 상관을 보이고 다른 물질들은 상관성이 없는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 야간에 발생한 역전층이 상층 오존의 적정작용을 방해하여 다음날 주간농도에 영향을 미치는 것으로 해석될 수 있다. 오존을 제외한 SO_2와 TSP, CO 등은 역전층이 발생한 시점에 농도변화가 다소 발생할 가능성이 있을 뿐 주간농도 변화에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 해석된다. NO_2는 오존과 더불어 화학반응을 일으키나 주 배출원이 역전층 아래

Table 2. Hourly variation of mean DT* for each time during 2003

Time (LST)	2000	2100	2200	2300	2400	0100	0200	0300	0400	0500	0600
DT(℃)	0.19	0.23	0.25	0.28	0.30	0.19	0.19	0.19	0.18	0.19	0.15

DT*: the temperature at 10m minus that at 2m level

Table 3. Correlation analysis between maximum inversion height and difference of DT and between that and the sum of DT in a different time range

	Difference of DT (A-B : difference of B from A)								Sum of DT (A~B : sum from A to B)				
Time range	24-20	06-24	01-20	06-01	02-20	06-02	03-20	06-03	20~24	20~01	20~02	20~03	20~06
Correlation	.559	.065	.479	.253	.678	.066	.668	-.338	.495	.533	.614	.659	.755
Significant probability	.093	.859	.161	.481	.031	.856	.035	.339	.146	.112	.059	.038	.012

에 존재하기 때문에 역전 발생시에 다소 농도변화가 있을 것이나, 역전층 해소에 따른 농도변화 요인은 크지 않을 것으로 사료된다. 이러한 결과로 역전층과 각 대기오염물질간의 농도특성에 대한 전반적인 경향을 설명하기엔 통계분석에 필요한 자료의 수가 다소 부족하다. 또한 역전층과 대기오염물질 농도와의 관계에서 각 대기오염물질의 계절적인 변동요인을 제거시키고 순수 역전층만의 관계를 도출하기에는 보다 많은 자료가 필요하다고 할 수 있다. 따라서 앞서 제시된 2층 기상탑 자료를 이용하여 역전과 대기오염물질농도와의 관계에 대해서 보다 객관적인 결과를 제시하고자 하였다.

4.2. 2층 기상탑을 이용한 역전강도와 대기오염물질과의 관계

앞서 제시한 2층 기상탑 자료를 이용하여 전형적인 역전층 발생일을 산정하고 이를 대상으로 대기오염물질농도와의 관계 분석을 통해 역전현상이 대기오염물질에 미치는 영향에 대해서 고찰하였다. 우선 강수에 의한 세정효과를 제거하기 위해 비강수일을 대상으로 역전일과 비역전일을 분류하고자 역전강도를 정의하였다. 역전강도는 야간 DT의 합에 따라 0 미만인 비역전일과 0 이상인 역전일로 선정하였다. 역전일중 강도에 따라 3개로 분리하여 table 5에 나타내었다. 비역전일은 DT의 총합이 0이하인 날로 춘계 8회, 하계 11회, 추계 8회, 동계 6회로 하계가 가장 많았고, 역전일은 DT의 총합이 0초과인 날로 춘계가 51회, 하계 34회, 추계 57회, 동계가 64회로 역시 추계가 가장 많은 발생빈도를 보였다. 비강수일을 대상으로 하였기 때문에 하계의 경우 사례가 많지 않아, 통계분석에 다소 오차가 발생할 수 있지만, 본 연구의 목적에는 크게 벗어나지 않을 것으로 판단된다. 대체적으로 강한 역전층 발생빈도는 봄철이 가장 높으며, 가을과 겨울철에는 group 2에 해당되는 역전빈도 발생이 가장 높아 꾸준한 역전발생 확률을 보인다고 할 수 있다. 특히, 여름철의 경우 비역전 발생일이 타 계절에 비해 가장 높아 계절적인 특징인 지표가열로 인한 대기혼합의 영향이 야간에도 효과가 유지된다고 할 수 있다.

Fig. 3은 관측기간 동안 역전일과 비역전일 및 역전강도별 대기오염물질 농도 변화를 시간별로 나타낸 것이다. 오존의 경우 야간에는 비역전일이 역전일보다 높게 나타나고 있는데, 이러한 결과는 tehtersonde 관측결과와 잘 일치하는 것으로, 오인보[8]의 연구에서도 밝혔듯이 비역전일의 경우 상 · 하층 대기가 잘 섞여있는 상태로 상층의 비교적 높은 농도의 오존이 하층에 영향을 줄 수 있으나, 역전일의 경우는 상 · 하층 공기교환이 거의 일어나지 않는 절대 안정층이기 때문에 상대적으로 높은 오존이 발생할 수 있다. 또한 주간의 오존농도의 차이에서 나타나듯이 역전일의 경우가 비역전일보다 높은 농도를 보이는 것은 역전일의 경우 하층에서 축적될 수 있는 오존전구물질의 양이 비역전일보다 훨씬 많기 때문이다. 이러한 결과는 역전강도별 대기오염농도

Table 4. Correlation analysis between maximum inversion height and air pollutant concentration during tethersonde observation period

Air pollutants	O_3			TSP			SO_2			NO_2			CO		
	Max	Min	Ave.	Max	Min	Ave.	Max	Min	Ave.	Max	Min	Ave.	Max	Min	Ave.
Correlation	0.779	0.209	0.552	-0.095	-0.002	-0.098	-0.318	0.009	-0.208	-0.348	-0.312	-0.363	-0.341	0.483	0.178
Significant probability	0.001	0.473	0.041	0.747	0.996	0.738	0.268	0.976	0.47	0.223	0.278	0.202	0.233	0.080	0.542

Table 5. Frequency related to inversion intensity for each season except for rainy days during 2003(TSUM : the sum of DT from 2000 to 0600 LST)

	Non-inversion	Inversion		
	Group 0 (TSUM ≤ 0)	Group 1 (0 < TSUM ≤ 1)	Group 2 (1 < TSUM ≤ 3)	Group 3 (3 ≤ TSUM)
Spring (59)	8	11	28	12
Summer (45)	11	12	15	7
Fall (65)	8	18	32	7
Winter (70)	6	18	36	10
Total (239)	33	59	111	36

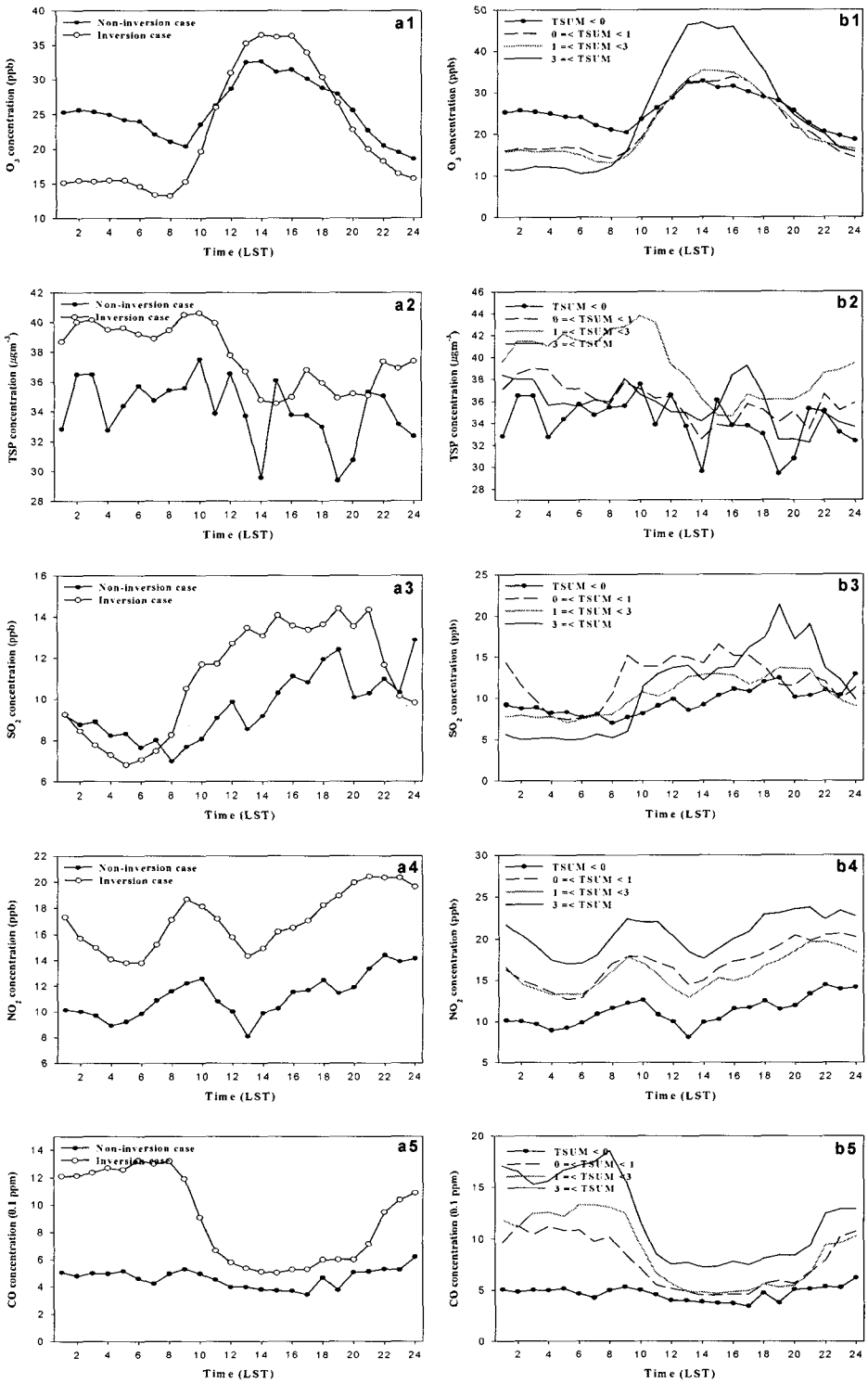

Fig. 3. Diurnal variation of air pollutant concentration (a) at inversion and non-inversion case and (b) with TSUM(a1 and b1: O3, a2 and b2: TSP, a3 and b3: SO2, a4 and b4: NO2, a5 and b5: CO) during 2003.

와의 관계분석에서 더욱 뚜렷이 살펴볼 수 있다. 역전강도가 셀수록 야간 오존농도는 낮고, 다음날 일최고 오존농도는 높은 값을 나타내고 있다. 또한 야간 역전층이 약한 날인 경우 야간 혼합에 의한 농도가 상대적으로 강한 역전층이 형성된 날보다 높으며, 다음날 주간의 오존농도 역시 높은 값을 유지하지 못하는 것을 알 수 있다.

TSP는 역전이 일어난 야간의 경우 비역전보다 평균적으로 높은 농도를 보인다. 역전강도별 농도분포를 살펴보면, 역전의 강도와 TSP 농도와의 뚜렷한 경향을 분석하기는 어려우나, 혼합이 발달한 주간의 경우 역전과 비역전 모두 농도가 비슷해지는 경향을 보이지만 역전이 발달한 야간의 경우 농도가 더 큰 것을 알 수 있다. 즉, 야간 안정층이 형성되었을때 지표 근처에서 높은 농도가 발생할 수 있음을 시사한다.

SO_2의 경우, 역전이 일어난 야간에는 비역전일보다 낮은 농도 경향을 보이고 있으며, 주간에 다소 높은 농도경향을 띈다. 역전 강도별 변화를 살펴본 경우 야간에는 역전강도가 클수록 낮은 농도를 나타내며, 주간의 경우 역전강도와 농도값 사이에 특이한 상관관계를 찾을 수 없다.

NO_2의 경우는 역전일과 비역전일의 농도분포 형태로 하루 중 농도 경향은 비슷하지만, 농도에 있어서 역전일이 다소 높은 값을 나타내고 있다. 즉, NO_2의 많은 배출원이 지표근처에서 발생하기 때문에 역전현상으로 인해 연직으로 잘 확산되지 못해 상대적으로 높은 농도를 유지할 수 있다. 이는 오존농도 변화와 더불어 주간 오존농도 발생에도 유리한 역할로 작용할 것이다. 역전강도별 분포에서 역전현상이 농도에 민감하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

CO의 경우도 NO_2와 비슷한 결과를 나타내는 것을 알 수 있는데, 역전이 발생했을 경우가 비역전일보다 야간농도에서 훨씬 높은 값을 보이며, 주간에는 비슷해지는 경향을 보인다. 역전강도별 농도 분포에서 보다 뚜렷이 나타나는데, 역전강도가 강할수록 하루 중 CO 농도가 높게 나타나며, 특히 야간의 경우 비발생일 보다 3배 이상 차이가 나타난다.

이상의 각 대기오염물질별 역전강도와 일농도 변화를 살펴본 결과 역전강도에 따른 대기오염물질의 농도 차이가 뚜렷이 나타남을 알 수 있었고, 역전이 발생한 야간시간대와 다음날 낮 시간대에 나타나는 농도 차이 역시 확연함을 알 수 있었다. 즉, 오존의 경우 역전이 발생한 야간보다 다음날 주간에 더 높은 농도를 보이는 반면, CO의 경우는 역전이 발생한 야간에 더욱 높은 농도가 나타났다. 이와 같이 역전발생 유무에 따른 각 대기오염물질별 농도분포 특성에 있어 역전현상이 발생한 야간과 다음날 주간의 농도 차이가 각 물질마다 다른 특성을 보이고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 울산지역의 역전층 특성 및 대기오염물질과의 관계를 파악하기 위한 일환으로 tethersonde 최대 역전층고도와 2층 기상탑 연직기온자료의 상관관계분석을 실시하였다. 조사결과 역전층을 판별하기 위한 가장 기본적인 요소인 연직 온도기울기만 가지고 역전층 발달정도를 판단하는 것 보다 야간 연직온도차의 총합을 이용하여 결정하는 것이 보다 정확한 것으로 나타났다(R=0.76). 야간 연직온도차의 총합을 이용하여 역전층 발달정도를 구분하였으며, 이에 따른 대기오염물질과 관계를 분석한 결과 각 대기오염 물질별 역전강도에 따라서 농도분포 특성이 다르게 나타남을 알 수 있었다. 특히, 오존의 경우 역전이 발생한 야간은 낮은 농도를 보이지만, 최대농도에 있어서 역전강도에 따라 더 큰 값을 보인다. NO_2는 전반적으로 역전이 발생한 경우가 발생하지 않은 경우와 비교하여 보다 높은 농도를 유지하는 것으로 나타났으며, 역전강도에 비례하여 그 차이가 더 크게 나타남을 알 수 있었다. CO는 역전이 발생한 야간에 상대적으로 높은 농도를 보이고 주간에는 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다. SO_2 역시 역전정도에 따라 농도 차이가 나타나는데, 야간역전현상이 뚜렷이 존재할 경우 주간의 농도가 높이 올라간다는 것으로 조사되었다. TSP는 역전강도에 따른 뚜렷한 농도변화 특성을 찾기가 힘들었으나, 역전발생일의 야간이 비발생일보다 더 높다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 제시한 역전층 발달정도를 2층 기상탑 자료만을 가지고 산정하였지만, 3층 기상탑 자료를 이용한 Flux의 양적인 관계를 통한 보다 세밀한 연구와 실제 연직 대기오염농도 관측을 통한 역전층강도에 따른 대기오염농도 특성에 따른 연구가 향후 보완되어져야 할 것이다.

이상의 결과, 기온역전 강도에 따른 대기오염물질과의 관계 분석은 향후 도심지역 오존오염 경보체제 구축에 있어 좋은 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 지정 울산지역 환경기술개발센터의 연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) Hosler, C. R., 1961, Low level inversion frequency in the contiguous United States, Mon. Wea Rev., 89, 319-339.

2) Liu, C. M., S. C. Liu and S. H. Shen, 1990, A study of Taipei ozone problem, Atmos. Environ., 24(6), 1641-1472.
3) Mantis, H. T., C. C. Pepapis, C. S. Zerefos and J. C. Ziomas, 1992, Assessment of the potential for photochemical air pollution in Athens : A comparison of emissions and air-pollutant levels in Athens with those in Los Angeles, J. Appl. Meteor., 31, 1467-1476.
4) 김유근, 문윤섭, 오인보, 황미경, 2002, 서울 및 부산지역에서 기온과 국지풍이 지표고농도 오존발생에 미치는 영향, 한국기상학회지, 38(4), 319-331.
5) 이태영, 1986, 역전층이 해륙풍 순환에 미치는 영향, 한국기상학회지, 22(2), 48-61.
6) 이지연, 이동인, 한영호, 옥곤, 1997, 기온 역전 발생에 따른 대기경계층에서의 O3, NO2 농도의 연직분포, 한국기상학회지, 33(2), 315-326.
7) Kondo, H., T. Mizuno, M. Hayashi, S. Yamamoto, H. Yoshikado and O. Yokayama, 1991, A tubulent inversion layer observed at Kasima, Tenki, 38(3), 151-156(in Japanese).
8) 오인보, 2003, 대도시지역 고농도 오존발생의 기상학적 메카니즘: 관측자료 분석과 수치모델링 연구, 부산대학교 대학원 박사학위논문.