

1E1) 울산광역시 동계 접지역전층의 특성

Characteristics of Surface Inversion Layer Observed in Winter at Ulsan Metropolitan City

박종길¹⁾ · 이희정²⁾ · 김재석²⁾ · 김종명²⁾

¹⁾인제대학교 낙동강유역환경연구센터, 대기환경정보연구센터,

²⁾인제대학교 교육대학원

1. 서 론

해가 지면서 지표면이 냉각되고 지표면의 냉각은 지표부근의 대기를 냉각시켜 상부의 대기보다 차가워지면서 대기의 상태가 안정 상태가 되는데 이 때를 접지 역전층이라고도 하고 야간 경계층이라고도 한다. 야간 경계층은 다음 날 해가 뜨기 전까지 계속 지속되는데 그 고도는 지상 수백m까지 확장될 수도 있다. 이러한 현상은 배출된 대기 오염 물질이 형성된 역전층에 의해 확산이나 수송이 방해받게 된다. 역전층 상태에서의 오염물질의 배출은 직접적으로 영향을 미치지 않으나, 일출 이후 일사에 의한 지표의 가열로 역전층이 파괴되면서 역전층위의 고농도의 오염물질이 지상으로 유입되어 지표부근에 고농도의 오염을 유발할 수 있다.

저층대기에 관한 관측결과 분석으로 문승의 등(1984)에 의해 고리 원자력 발전소의 입지 타당성을 조사하기 위해 역전층의 발생빈도, 시작, 소멸 및 지속시간에 관한 조사가 있으며, 박순용 등(1989)은 해륙풍의 순환과 연관된 혼합층의 일 변화 과정을 살펴보기 위하여 중부 서해안과 그 내륙지방에서 지상, 에어 존데 및 파이발의 특별관측을 실시하여 혼합층이 해풍 진입 전에는 빨리 성장하며 해풍 진입과 동시에 그 성장속도가 둔해짐을 확인하였다. 또, 기상연구소(1975, 1980a, 1980b, 1981)에 의해 남 서해 지역과 임해공업단지로 지정된 아산만 지역을 대상으로 오염물질의 확산과정을 예측하기 위해 접지 기상관측을 실시한 바 있다. 문승의 등(1998)은 집중관측을 통한 서해연안의 대기 수직구조 특성에서 종관 규모 기압계의 변화에 따른 풍향의 변화가 일어나는 고도에서 풍속 증가가 뒷받침될 경우 그 고도에서 바람 쉬어가 최대로 나타나 저층 대기의 수직 구조에 영향을 미친다고 하였다. 이와 같이 접지 역전층은 지표의 복사냉각, 해풍과 같은 증력파의 유입 등 다양한 mechanism을 갖는다. 이들의 연구는 모두 역전층이 잘 생성되는 추동계에 관측이 이루어 졌으며 일년동안 집중관측을 통한 대기의 수직적 구조의 특성에 대한 관측 적 연구는 거의 없는 실정이다.

이에 본 연구는 공업단지가 형성된 울산광역시내의 혼합층과 야간 기온 역전층의 생성과 소멸 등 그들의 연직 구조의 특성을 일년동안의 집중관측을 통하여 조사함으로써 공단이 조성된 후의 역전층의 특성과 해안과 인접한 지역에서의 바람쉬어가 역전층에 미치는 영향에 대하여 알아봄으로써 연중 역전층의 형성과 소멸 시 저층 대기의 수직구조의 변화에 미치는 요소와 역전층의 형성에 따른 계절적 특성을 파악하므로 대기 오염물질의 확산과 수송에 대한 자료를 생산하고자한다.

2. 관측개요 및 분석방법

2.1 관측개요

본 연구는 울산광역시에서 발생하는 역전층의 특성을 정확히 파악하기 위하여 각 계절별 전형적인 기상 패턴이 나타나는 날을 선정하여 관측을 실시하였으며, 관측장소는 경상남도 울산광역시 남구 여천동 해안 가에 인접한 BNG steel 공장부지 (35.5°N, 129.4°E, Base로 표시)에서 실시하였다(그림 1 참조).

그림에서 151은 울산 공장 기상관측소와 152는 울산 기상관측소를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 울산은 남동부가 바다와 접해 있고 북서쪽에는 높은 산으로 둘러 싸여 해풍이 유입될 경우 울산 전 도시 내에 영향을 줄 수 있는 지형적 조건을 갖고 있다.

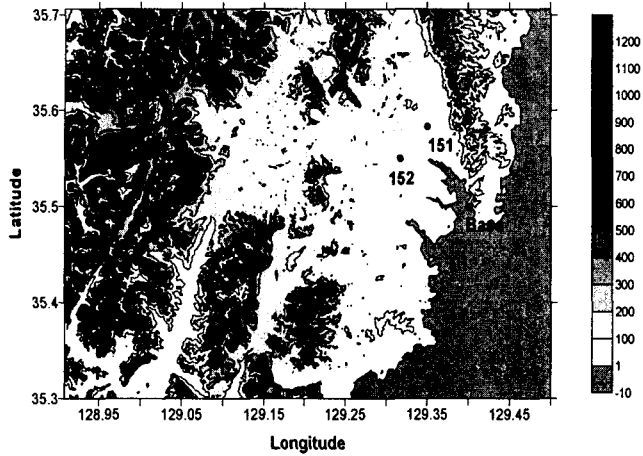


Fig. 1. Topography of Ulsan Metropolitan City. The symbol 151 indicates Ulsan airport station and 152 indicates Ulsan weather station. Base indicates an observation site.

Tethersonde와 radiosonde를 통해 관측된 요소는 radiosonde의 경우 고도별 건구 온도와 노점온도, 압, 습도, 풍향, 풍속을 측정하였고, tethersonde는 저층 대기의 건구 온도와 습구 온도, 기압, 풍향, 풍속, 습도를 측정하였다. 관측시간은 표 1과 같이 14일 1800LST부터 다음날 0800LST까지 측정하였으며 분석에 사용한 관측 고도는 비양 시간이 달라 비교적 동일시간대로 간주되는 450m 고도로 제한하여 자료를 분석하였다. 표에서 알 수 있듯이 balloon의 비양 시간은 radiosonde의 경우 34~100분으로 1시간 내외였으며, tethersonde의 경우 10~23분이었다. 현지 해면 기압은 다른 계절과 마찬가지로 매시간 미국 Atmospheric Instrument Research Co.의 AIR-HB-2A기압계를 이용하여 보정하였다.

Table 1. Running contents of tethersonde and radiosonde system in winter at Ulsan metropolitan city

run no.	date	running time (LST)	duration (min)	run no.	date	running time (LST)	duration (min)
1	Jan. 14, 2003	1745*	50	10	Jan. 15, 2003	1747*	100
2	Jan. 14, 2003	2006	10	11	Jan. 15, 2003	2003	14
3	Jan. 14, 2003	2221	18	12	Jan. 15, 2003	2222	10
4	Jan. 14, 2003	0100*	13	13	Jan. 15, 2003	2348*	49
5	Jan. 15, 2003	0203	14	14	Jan. 16, 2003	0202	23
6	Jan. 15, 2003	0409	14	15	Jan. 16, 2003	0400	23
7	Jan. 15, 2003	0631*	34	16	Jan. 16, 2003	0545*	39
8	Jan. 15, 2003	0810	19	17	Jan. 16, 2003	0815	12
9	Jan. 15, 2003	0851*	83	18	Jan. 16, 2003	0853*	57

*: measured by radiosonde

2. 2 분석 방법

울산광역시 BNG Steel에서 실시된 계절별 특별관측자료를 이용하여 역전층의 발생 및 소멸 특성을 알아보기 위하여 분석한 요소는 다음과 같다.

2.2.1. 기상학적 요소

대기 경계층 내의 기상학적인 제 요소는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \log_{10} Ew &= -7.902(T_s/T-1) + 5.028081 \log_{10}(T_s/T) \\ &\quad - 1.3816 \times 10^{-7} (10^{11.344(1-T/T_s)} - 1) \\ &\quad + 8.1328 \times 10^{-3} (10^{3.19149(T_s/T-1)} - 1) \\ &\quad + \log_{10} E_{ws} \end{aligned}$$

을 이용하여 포화수증기압(E_w, mb)를 계산하였으며, 여기서 T_s 는 비등점인 373.16K이며, T 는 기온, E_{ws} 는 1013.16mb로, 373.16K에서 순수한 물의 수증기압이다. 그리고 지상기압 P_0 로 혼합비 W 는 다음 식에 의해서 구해진다.

$$\begin{aligned} W_s &= 0.622 \times (E_w/P_0) \\ W &= W_s \times RH \end{aligned}$$

다음에 공기의 밀도를 구하기 위해 가온도 T_v 를 아래식에서 구하고,

$$T_v = T \times (1 + 0.61 \times W)$$

공기의 밀도는 아래 식과 같이 구한다.

$$\rho = 0.34843 \times (P/T_v)$$

그리고 고도(Z)는 정역학 방정식과 상태방정식을 이용한 측고 방정식을 이용하였다.

$$Z = Z_o + ((R_d \times T_v)/g) \times \ln(P/P_o)$$

여기서 $Z_o(m)$ 는 관측장소의 지표면 해발고도(46.0m)를 사용했으며, R_d 는 $287m^2/sec^2/deg$ 로, 중력가속도 g 는 $9.8(m/sec^2)$, P_o 는 관측장소의 지상기압(mb)이며, P 는 임의고도에서의 기압(mb)이다. 고도에 따른 은위(potential temperature)는 다음 식으로 구하였다.

$$\theta = T \times (P_o/P)^{0.285}$$

2.2.2 대기 안정도

울산광역시 저층대기의 안정도를 평가하기 위하여 본 연구에서 사용된 방법은 기온의 연직 분포를 이용하는 경우로 표 2와 같으며 역전층의 고도는 연직 변화가 안정에서 중립이나 불안정으로 변하는 변곡점의 고도로 정한다.

Table 2. Pasquill stability classes in terms of vertical temperature difference

Range of vertical temperature gradient (°C/100m)	Inversion intensity	Pasquill stability classes
$\Delta T < -1.9$	Very unstable	A
$-1.9 \leq \Delta T < -1.7$	Moderately unstable	B
$-1.7 \leq \Delta T < -1.5$	Slightly unstable	C
$-1.5 \leq \Delta T < -0.5$	Neutral	D
$-0.5 \leq \Delta T < 1.5$	Slightly stable	E
$1.5 \leq \Delta T < 4.0$	Moderately stable	F
$4.0 \leq \Delta T$	Very stable	G

2.2.3 Vertical wind shear

역전층의 발달과 소멸에 영향을 미치는 바람의 연직 시어는 풍속이 급변하는 곳에서 나타나며 연직 시어의 값이 클수록 이른 아침 일사량에 의해 가열된 지면의 열적 요란보다 강한 바람에 의한 기계적 난류의 영향을 많이 받고 있음을 나타낸다.

울산 공단지역은 해안과 인접한 지형조건을 갖추고 있으므로 해풍의 영향을 많이 받아 바람 시어의 효과가 크게 나타날 수 있으므로, 고도별 연직시어를 다음의 식을 이용하여 분석하였다.

$$SH = \frac{\sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}}{\Delta z}$$

여기서 Δz 는 두 층 간의 고도차이며 Δu 와 Δv 는 두 층에서 부는 바람의 동서성분과 남북성분을 각각 의미한다(Leftwich and Wu, 1988).

3. 결과 및 고찰

14일의 1800LST의 고도에 따른 기온분포는 약한 불안정층을 나타내고 있으며(그림 2 참조), 2000LST에는 100m 부근과 170~200m 부근에 안정층을 형성하였으며 그 사이는 중립의 층을 유지하였다. 2200LST에는 지표부근에 중립 또는 안정층을 나타내었고, 지상 150m부근까지 역전층을 형성하였다. 2400LST에는 풍속은 약하였으나 풍향이 남동에서 북동으로 바뀌면서 찬바람이 유입되어 기온은 더욱 하강하였다. 그리고 전 시간대에 존재하던 역전층은 더 발달하지 못하고 중립의 상태를 유지하였으며, 상부에는 약한 안정상태의 층이 나타났다. 0200LST에는 상부의 안정층은 깊어졌으나 150m 고도이하에 북동 내지 남동풍의 바람이 강해져 중립의 층을 유지하였으며, 0400LST에는 전 시간대에 비해 상부의 안정층은 더 깊어져 230~350m까지 역전층을 유지하였으나 하부는 강한 바람으로 여전히 중립상태를 나타내었다. 0600LST에는 지상부근의 풍속이 강해지면서 상부 역전층도 300~350m으로 축소되었고 하부는 고도에 따라 중립과 안정을 반복하면서 역전층이 파괴되어짐을 알 수 있었다. 0800LST에는 전 시간대보다는 약했으나 바람이 강하여 하부 역전층은 파괴되었고 상부 역전층은 250m까지 하강하였다.

겨울철 관측 첫째 날의 대기는 지표면의 복사냉각으로 기온은 감소폭이 컸으나 바람이 다소 강하였으므로 인해 지면부근의 접지 역전층은 형성이 어려웠다. 첫째 날 역전층의 최고 고도는 2400LST에 150m 정도였으나, 새벽에는 지표부근의 요란으로 인하여 상부 230~350m 고도사이에 역전층이 형성되었다.

관측 이틀째는 대체로 지상 300m 이내에서는 풍속이 3m/s 이내로 약하였으며 전 날에 비해 역전층이 비교적 잘 형성되었다(그림 3 참조). 15일 1800LST에는 바람이 약하고 복사냉각이 시작되어 지상 80m 고도까지 역전층이 형성되었고 그 위층에서는 불안정한 상태를 나타내었다. 2000LST에도 전 시간대와 유사한 분포였으나 풍향이 변하면서 대기상태도 안정과 중립이 교대로 나타나 전반적으로 다소 불안정하였다. 2200LST에는 복사냉각이 심해져 지면부근의 온도가 1℃로 감소하였으며 210m 고도까지 역전층을 형성하였다. 2400LST에는 차가운 북서풍이 지표면까지 불어 기온은 더욱 하강하였고 역전층은 230m까지 형성되었다. 또한 상부 270~320m 층에도 안정층이 형성되어 사실상 역전층은 320m 고도까지 형성되었으며 이 상태는 0600LST까지 지속되었다. 0800LST에는 북동 내지 남동풍이 유입되면서 지표면의 기온은 1℃로 상승하였고 대기는 하층부터 역전층이 해소되기 시작하였다. 온위의 분포에서도 이러한 현상이 잘 나타났다.

겨울철 관측결과 전날에 비해 풍속이 약하고 복사냉각이 심하여 역전층이 잘 나타났으며 최고 고도는 320m 였다. 아침에는 해안에서 불어오는 다소 따뜻한 바람에 의해 지상의 기온이 상승하고 일출이후 일사량의 증가로 역전층이 파괴되는 것을 알 수 있었다. 또한 다른 지역에서는 볼 수 없는 해안에서 불어오는 바람은 기압계에 의한 것과 도심과 외곽의 기온차, 해륙의 온도차 등으로 대별되므로 차후 이에 대한 연구도 이루어져야 할 것으로 생각한다.

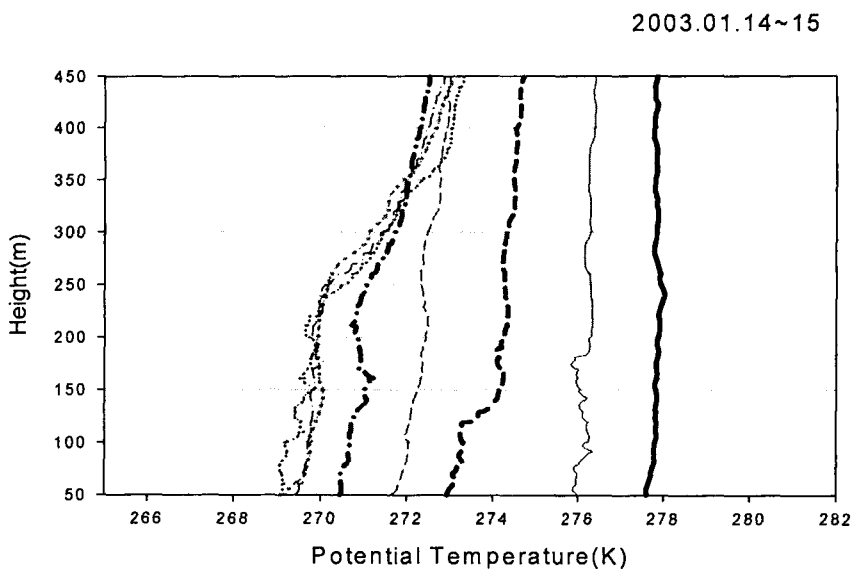
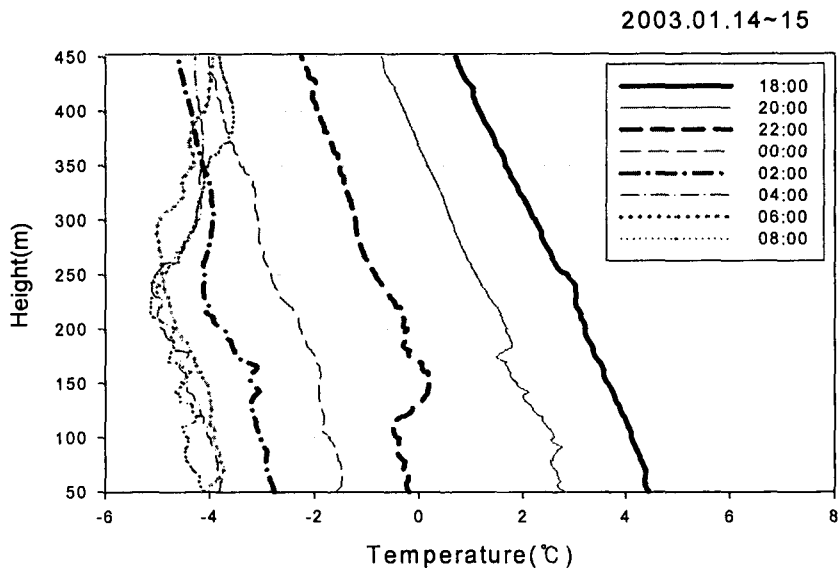


Fig. 2. The profiles of air temperature(up) and potential temperature (down) at each run from Jan. 14 to 15, 2003.

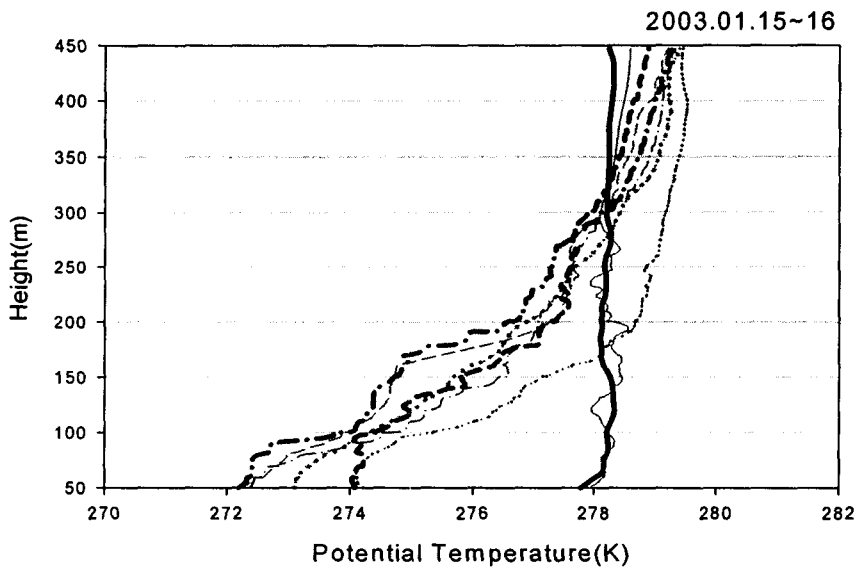
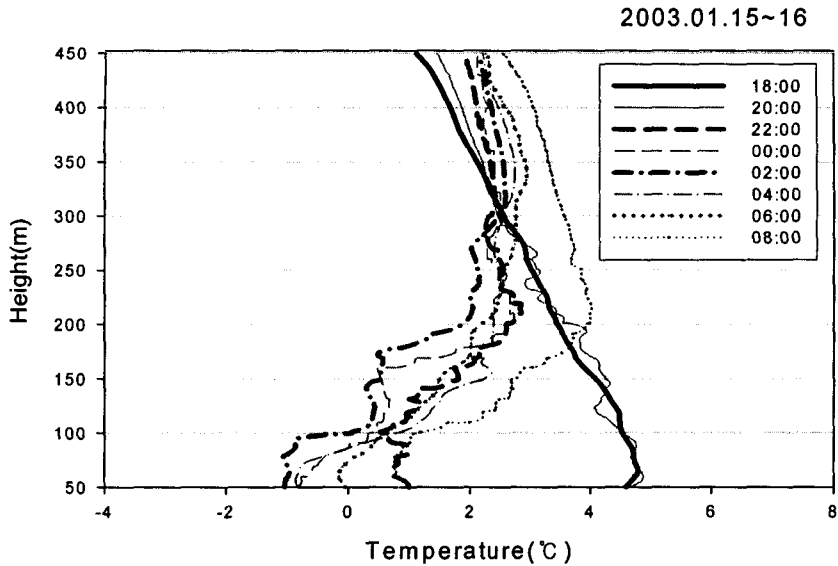


Fig. 3. The profiles of air temperature(up) and potential temperature (down) at each run from Jan. 15 to 16, 2003.

그 외 상대습도 및 공기의 밀도, 풍향 및 풍속의 분포, 안정도, Vertical wind shear를 분석하였으나 여기서는 나타내지 않았다.

따라서 겨울철 집중관측을 통해 본 울산광역시 집지 역전층은 서고 동저형의 전형적인 기압 배치 하에 130~180m 고도에서 역전층이 형성되었으며, 역전층내의 풍속은 4m/s이하였고 지상으로 유입되는 차가운 바람이 있을 경우 역전층은 더 발달하지 못하였으나, 풍속이 약해질 경우 320~350m 고도까지 역전층이 발달하였다. 일반기압계에 의해 바람이 강하지 않을 경우 울산지방은 해안으로부터 유입되는 따뜻한 바람에 의해 지표면 기온이 상승하여 역전층이 파괴되며, 여기에 일출이후 일사량 증가로 인한 기온상승이 가미되는 경우도 역전층을 파괴시키는 요인으로 작용하였다.

참 고 문 헌

- 기상연구소(1995) 접지역전층 현상의 실험적 연구. 59pp.
- 기상청(1981) 해안지방의 접지기후 연구. 84pp.
- 김성삼(1967) 우리나라 중부지구 저공층 대기의 확산능에 관하여. 원자력 연구 논문집 7(1), 17~24.
- 김유근, 황수진(1985) 접지 경계층 내의 제 변산 계수와 대기 안정도에 관하여.
- 김희종, 윤일희, 권병혁, 허만천(2002) 계류기구로 관측한 대구시 야간 안정층 특성에 관한 사례연구, 한국환경과학회지, 11(3), 155-160.
- 문승의, 유혜주, 김유근(1984) 고리 지역의 접지역전에 관한 기후 환경학적 연구. 부산대학교 환경문제연구소 환경연구보 2, 66~77.
- 박연경, 1993. 야간접지 역전층 상부의 기상요소 변화에 대한 관측적 연구. 부산대.
- 박종길, 원경미, 1994, 김해에서 관측한 접지역전층의 특성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 3(4), 305-315.
- 박종길, 이화운, 김유근, 이순환, 1997, 김해지방의 지표 경계층 내의 열수지 및 안정도 변화에 관한 연구. 한국대기환경학회지, 13(2), 103~113.
- 오운택, 1992. 합천군 적중지역의 접지 기온 역전층에 관한 연구. 부산대.
- 윤일희, 대구지역에서 에어로졸과 파이발을 이용하여 기온과 혼합비, 바람의 연직분포를 조사.
- 이화운, 김유근, 박종길, 이순환, 원경미, 지표면의 특성을 고려한 대기 경계층 내의 열수지 parameter 측정.

사 사

본 연구는 환경부 지정 울산지역 환경기술개발센터의 연구비로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.