

계류기구로 관측한 대구시 야간 안정층 특성에 관한 사례연구

김희종·윤일희^{*}·권병혁^{**}·허만천^{***}
경북대학교 자연과학대학 천문대기학과 · 경북대학교 사범대학 지구과학교육과
^{*}알라고아스대학교 기상학과 · ^{**}대구지방환경청 측정분석과
(2001년 2월 23일 접수; 2002년 3월 20일 채택)

Characteristic of the Nocturnal Inversion Layer observed by Tethersonde in Daegu

Hee-Jong Kim, Ill-Hee Yoon^{*}, Byung-Hyuk Kwon^{**} and Man-Chun Heo^{***}

Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

^{}Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea*

*^{**}Departamento. de Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil*

*^{***}Daegu Regional Environment Office, Daegu 706-706, Korea*

(Manuscript received 23 February, 2001; accepted 20 March, 2002)

Using measured data at Daegu by tethersonde for the period of 1984~1987, we have investigated the lower atmospheric boundary layer structure including relationships between inversion layer and meteorological factors(wind and temperature), and the inversion strength and inversion height. The inversion layer was defined from the vertical temperature profile and its strength was analyzed with the wind shear as well as the vertical temperature gradient.

From October to January, measured inversion layer isn't destroyed, however, in June, after sun rise, it is destroyed by surface heating and mixed layer is developed from surface. According to Pasquill stability classes, the moderately stable cases dominated.

It's the larger vertical temperature gradient, the lower SBL height. We have introduced B(bulk turbulence scale) which indicated SBL height. It's larger B, the higher SBL height and vice versa. It was noted that the bulk turbulence scale (B) is appropriate to determine the stable boundary layer height.

Key words : lower atmospheric construction, inversion layer, inversion strength, inversion height, Pasquill stability, bulk turbulence scale

1. 서론

대기 상태는 지면에서 배출되는 오염 물질의 확산과 수송에 지대한 영향을 미친다. 특히 인간이 직접 호흡하고 생활하는 부분인 지상 1 km까지의 대기 경계층(Atmospheric Boundary Layer; ABL)은 많은 관심과 연구의 대상이 되고 있다. 대기 중에 배출된 오염물질은 대기의 운동에 의해서 확산이나

수송이 되기 때문에 대기 경계층에 대한 연구는 대기오염 연구에서 기본적으로 또한 필수적이다. 대기가 안정한 경우에는 대기의 운동이 비교적 적기 때문에 대기오염 물질의 확산 및 수송이 잘 이루어지지 않는다. 지금까지 발생한 대부분의 대규모 대기오염 사건(예, 런던 스모그 등)들이 확산과 수송이 잘 일어나지 않는 역전층이 오랜 기간 지속되는 상태에서 발생하였다는 점은 이미 알려진 사실이다. 따라서 경계층 내에서 형성되는 역전층에 관한 연구는 대기 환경에 있어서 매우 중요하다.

해가 지면서 지표면은 냉각된다. 지표면의 냉각은 지표 부근의 대기를 냉각시켜 상부의 대기보다 차

Corresponding Author : Ill-Hee Yoon, Dept. of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea
Phone : +82-53-950-5922
E-mail : ihyoon@knu.ac.kr

가워진다. 따라서 한낮의 혼합층 아래에 안정층 (Stable Boundary Layer; SBL)이 생성되는 데 이를 지상 역전층(Surface Inversion Layer)이라 하며, 야간 경계층(Nocturnal Boundary Layer; NBL)이라고도 한다.¹⁾ 야간 경계층은 다음 날 해가 뜨기 전까지 계속 지속하는데 그 고도는 바람, 습도 등과 같은 주변 기상 상태에 따라 다르지만, 수 백 m 까지 확장될 수 있다. 이러한 현상은 배출된 대기 오염 물질이 형성된 역전층에 의해 확산이나 수송이 방해받게 된다.

특히 굴뚝에서 오염 물질이 지상 역전층 내에 배출되었을 경우, 지상 부근의 오염 물질의 농도에는 직접적으로 영향을 미치지 않으나, 일출 이후 일사에 의한 지표의 가열로 역전층이 파괴되면서 역전층 위에 고농도의 오염 물질이 지상으로 유입되어 지표 부근에 고농도 오염을 유발할 수 있다. 따라서 기온 역전층은 산업 입지의 선정, 도시 계획의 정책이나 대기환경영향평가를 준비함에 있어 매우 중요하다.^{2,3)} 이와 같이, 대기의 상태는 지면에서 배출되는 오염 물질의 확산과 수송에 지대한 영향을 주기 때문에, 하층 대기에 대한 연구가 많이 수행되고 있다.⁴⁾

역전층에 대한 선행 연구를 살펴보면, 최초로 Hosler⁵⁾가 미국 내에서 대기 하층의 지상 역전층 발생 빈도를 계절별로 조사하여 기상학적 특징에 따라 7개의 영역으로 분류하였으며, Yoshino⁶⁾는 일본 내에서 발생한 야간 지상 역전층의 특성을 조사하였다. 또 Kawamoto 와 Ishizaka⁷⁾는 극동 지역의 라디오존데 자료를 이용하여 지표 역전의 평균 고도를 추정하였다. Yorisaki⁸⁾는 기상 관측탑에서 관측한 지표 역전층의 특성에서 역전 강도의 변화와 기상 인자와의 관계를 고찰하였다. 그리고 Garratt 와 Physick⁹⁾는 호주 내륙 관측 지점에서 야간에 형성되는 역전층과 해풍과의 관계를 설명하였다. Honda 와 Fujita¹⁰⁾는 동지나 해상의 계절별 역전층 형성과 그 특성을 라디오존데 자료를 이용하여 살펴보았다.

한편 국내의 경우 기상청¹¹⁾이 공업단지 조성 시 오염 물질의 확산 과정을 예측하기 위해 아산만 등지에서 연직 기온 분포를 조사하였으며, 문승의 외²⁾는 고리 원자력 발전소 입지 타당성 조사를 위해 역전층의 발생 빈도, 시작, 소멸, 지속 시간에 관한 조사를 하였다. 황수진¹²⁾은 계류기구(tethersonde)를 이용하여 지상 역전층의 생성과 소멸에 관한 연구를 했다. 또한 박종길과 원경미⁴⁾는 주택지와 공업단지가 형성되는 지역에서 관측한 기온 역전층의 구조 및 특성을 조사하였으며, 박종길 외¹³⁾는 지표 경

계층 내 역전층의 특성과 안정도 및 열수지의 변화를 조사하였다. 전병일과 김유근¹⁴⁾은 계류기구를 이용하여 해안에서의 지상 역전층 생성과 소멸, 규모 등의 저층 대기 구조의 특성을 알아보고, 각 기상 요소 사이의 관련성에 대해 연구하였다. 그러나 국내의 연구의 경우 연구 대상 지역이 한정되어 있으며 특히 대구의 경우는 에어존데와 파이발을 이용하여 기온, 혼합비 그리고 바람 벡터의 연직 분포를 분석한 Yoon¹⁵⁾의 연구를 제외하고는 거의 없는 실정이다.

이 연구에서는 1984~1987년 동안 대구지방환경청에서 계류기구로 측정된 자료를 이용하여 대기의 하층 구조를 살펴보고, 안정층과 기상 인자(바람과 기온)의 관계 및 안정도와 안정층 고도와의 관계를 살펴보고자 한다.

2. 관측 자료

이 연구에 이용된 자료는 1984년 10월부터 1987년 10월까지 대구시 서구 중리동에 위치한 섬유기술진흥원 옥상에서 대구지방환경청에 의해 관측된 자료이다. 관측 일수는 총 41일이며, 1일 2~3회 관측이 이루어졌다. 이 중 야간 경계층의 특성을 알아보기 위해 역전층이 발생했거나 야간 안정층이 소멸되기 전인 일몰 후나 일출 전에 실시된 관측값을 이용하였다. 이 중 전형적인 야간 역전층이 나타난 1984년 10월 31일과 11월 5일과 6일, 12월 4일, 1985년 1월 18일과 1987년 10월 6일 자료 등 총 6회의 자료를 택하여 이 연구에 이용하였다. 관측은 계류기구를 이용하였으며, 관측값은 고도, 기압, 건구 온도, 혼합비, 풍향 그리고 풍속 등이다.

3. 분석 결과

3.1. 안정도

안정층 고도를 결정하는 기준에는 여러 가지가 있다.¹⁾ 기온의 연직 분포를 이용하는 경우 연직 변화가 안정에서 중립이나 불안정으로 변하는 변곡점의 고도로 정한다. 온위의 경우 연직 분포가 일정하거나 약간 증가하는 고도로 이 이하의 고도에서는 온위가 고도에 따라 증가한다. 이 고도 위에는 보통 잔류층이 존재한다. 또한 풍속으로는 풍속이 최대가 되는 고도를 안정층 고도로 정의한다. 풍속은 지상에서 고도와 함께 증가하고 안정층의 최상부 부근에서 최고를 나타낸다. 이 풍속이 때로는 지균풍보다 빠르며, 따라서 이를 야간 제트라고 부르기도 한다. 이와 같은 기준으로 관측한 자료에서 안정층 고도를 결정하였다.

Fig. 1의 건구 온도 특성을 살펴보면, 1984년 11월 5

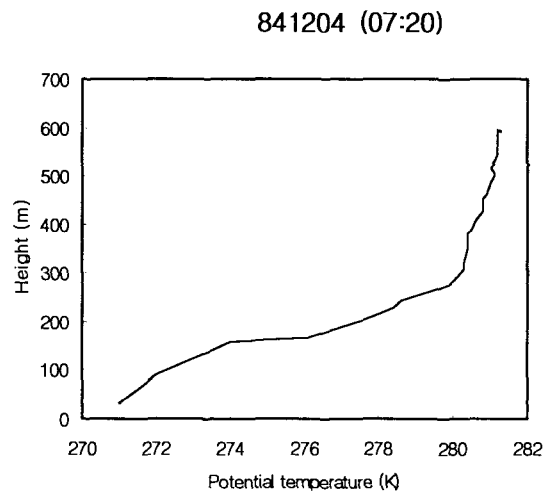
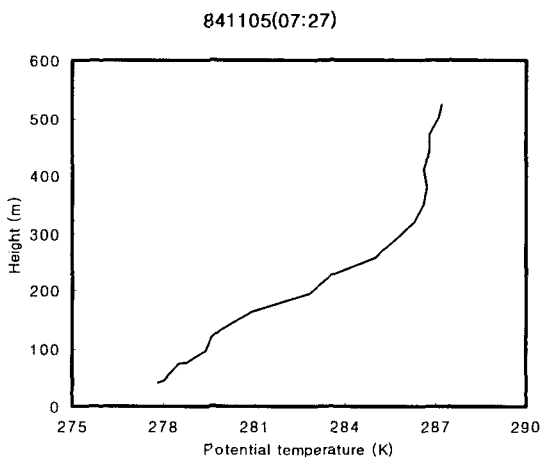
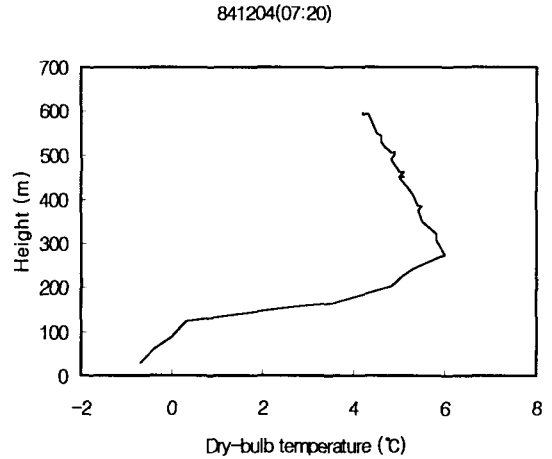
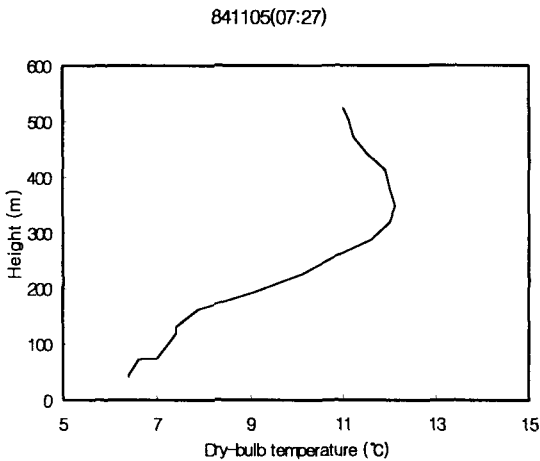


Fig. 1. The vertical profile of air temperature and potential temperature on 5 Nov. 1984.

Fig. 2. The same as n Fig. 1 except for 4 Dec. 1984.

일 0727 LST에 지상 안정층이 350 m 고도까지 이르고 있으며, 기온의 연직 경도는 1.8°C/100 m이었다. 이 때의 풍속도 350 m에서 가장 컸다. 다음날인 1984년 11월 6일 0700 LST에서도 역시 약 320 m까지 안정층이 형성되어 있었다. 1984년 11월 5일 0727 LST의 온위 연직 분포를 보면 건구 온도 특성과 마찬가지로 350 m까지 안정층이 형성되어 있음을 알 수 있다. 1984년 12월 4일 0720 LST에서의 건구 온도 연직 구조를 보면 안정층이 약 300 m까지 이르고 있었으며, 안정층의 기온 경도는 2.3°C/100 m였다(Fig. 2). 또한 온위의 연직 구조를 살펴 보면, 건구 온도 구조와 마찬가지로 약 300 m 지점에서 변곡점을 나타내고 있다. 해가 빨리 뜨는 여름철에는 1985년 6월 19일 0658 LST에서와 같이 일출 후 지면이 가열되면서 지면의 온도가 지면 부근 대기의 온도보다 높아지면서 그만큼 안정층이 일찍

파괴되어 대기 하층으로부터 혼합층이 발달하고 있으며 상부에 안정층이 잔류하고 있다(Fig. 3). 이러한 안정층 파괴는 일출 후 지면의 가열로 급격하게 일어나게 된다.

안정층의 높이 뿐만 아니라 안정층의 특성을 나타내는 중요한 인자로 안정도가 있다. 안정도는 고도에 따른 온도 변화율로 나타낸다. 즉 온도의 연직 경도를 나타내며, 다음과 같이 주어진다.

$$\text{안정도} = \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (1)$$

안정도를 나타내는 방법에는 여러 기준이 있으며, 이 연구에서는 기온의 연직 경도만을 이용한 파스킬 안정도 등급을 사용하여 알아보았다. 파스킬 안정도 등급은 Table 1과 같이 고도가 100 m 변할 때의 온도 변화(ΔT (°C)/100 m)로서 나타낸다. Table

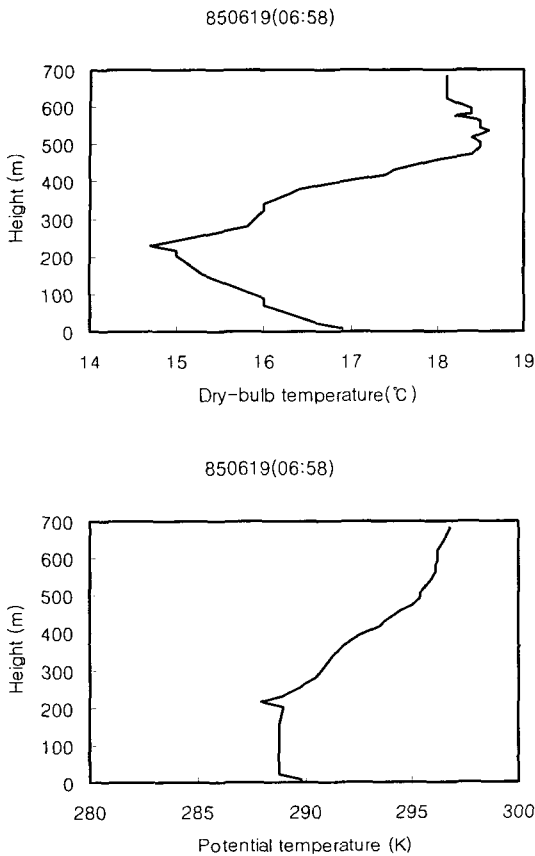


Fig. 3. The same as n Fig. 1 except for Jun. 19. 1986.

1에서 보는 바와 같이, A~C 등급은 불안정한 등급을 나타내고, E~G 등급은 안정한 등급을 나타낸다.

Table 1. 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

이용한 자료의 횟수가 6회로 안정도 등급을 대표할 수는 없겠지만, 이 연구에 이용한 자료의 파스킬 등급은 E~G 인 경우에 해당하며 그 빈도를 Table 2에 나타내었다. Table 2와 같이, 중간 정도의 안정

도에 해당하는 F 등급이 4회로 가장 많이 나타났으며, E 등급과 G 등급은 1회를 나타내고 있다. 김해지방의 지표 역전층을 관측한 박종길 과 원경미⁴⁾의 연구에서는 안정층 고도를 30 m 간격의 층으로 나누어 각 층의 파스킬 안정도 등급을 나타내었으며, 본 연구에서 관측이 실행된 시간에 해당하는 결과와 비교하여 보면 역시 F 등급이 가장 많음을 알 수 있다. 이 연구에서는 층을 나누지 않고, 안정층이 형성된 고도 전체에 걸친 온도 경도로서 안정도 등급을 나누었다.

Table 2. Number of cases by Pasquill stability classes

Pasquill stability classes	number of cases
E (-0.5~1.5)	1
F (1.5~4.0)	4
G (4.0<)	1

3.2. 안정층 특성

3.2.1. 안정층과 기상 인자와의 관계

안정층 고도를 결정하는 기상 인자 중에서 풍속, 기온과 안정층 고도와의 관계를 살펴보고, 풍속과 기온으로 안정층 고도를 추정하는 인자에 대한 검증을 하고자 한다.

Fig. 4는 풍속과 안정층의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 U_{10} 은 지상 고도 10 m에서의 풍속이다. 대체적으로 풍속이 높을수록 안정층 고도가 낮은 반비례 관계를 나타낸다. 이는 강한 풍속이 지상 혼합을 촉진시키게 되므로 중립층을 발달시키게 된다.

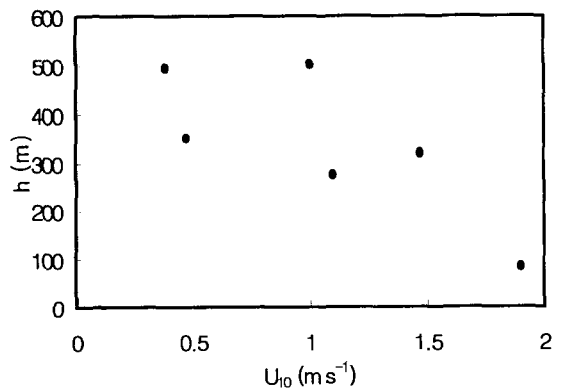


Fig. 4. Relationship between SBL height and wind speed at 10 m height.

안정도와 안정층 고도와의 관계를 Fig. 5에 나타

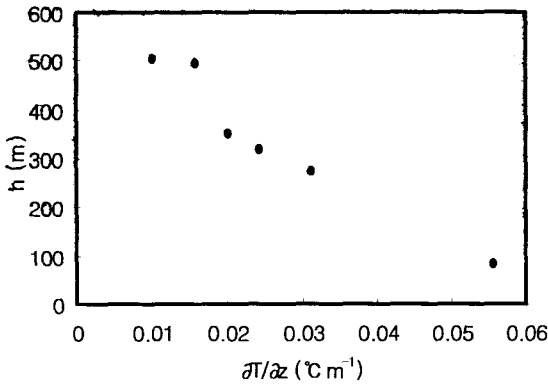


Fig. 5. Relationship between SBL height and vertical temperature gradient.

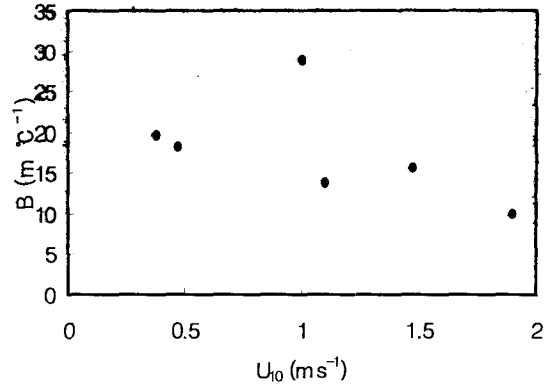


Fig. 8. Relationship between B and wind speed at 10 m height.

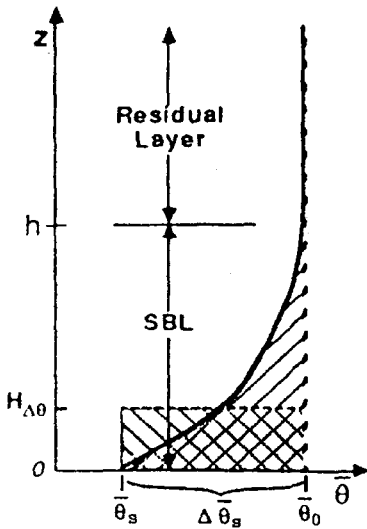


Fig. 6. Definitions of the SBL strength, $\Delta \bar{\theta}_s$, and integral depth scale, $H_{\Delta \theta}$ (Stull, 1988).

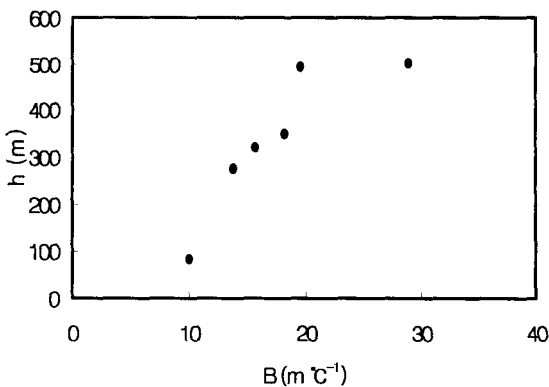


Fig. 7. Relationship between SBL height and B.

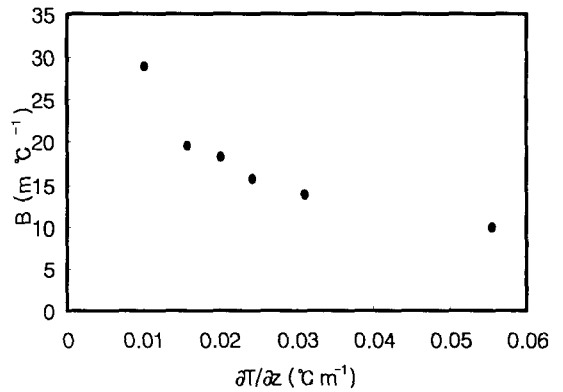


Fig. 9. Relationship between B and vertical temperature gradient.

내었다. 그림에서와 같이 안정도와 안정층 고도는 안정도가 클수록 안정층 고도가 낮은 반비례 관계를 나타내었다.

대부분의 물리량은 안정층과 잔류층과의 경계에서 급격하게 그 양이 변하지 않기 때문에 안정층 고도를 결정하기가 어렵다. 본 연구에서는 벌크 난류 규모(bulk turbulence scale), B를 이용하여 안정층의 고도를 정의하고자 하였다.

안정층 상부에 있는 잔류층의 온위와 지면 근처 공기의 온위 차를 이용하여 안정층 강도(SBL strength)를 정의한다.

$$\Delta \bar{\theta}_s = \bar{\theta}_o - \bar{\theta}_s \quad (2)$$

여기서 $\bar{\theta}_o$ 는 잔류층의 온위이고, $\bar{\theta}_s$ 는 지면 근처 공기 온위이다. 이 안정층 강도와 적분 깊이 규모(Integral depth scale)로 만들어진 새로운 인자 Bulk 난류 규모, B라 한다.

$$B = \frac{H_{\Delta\theta}}{\Delta\theta_s} \quad (3)$$

여기서 $H_{\Delta\theta}$ 는 Fig. 6에서와 같이 두 개의 사선 영역이 같아지는 고도로 정하였다.

위의 식들을 살펴보면, $\Delta\theta_s$ 가 작아지면, B값은 커지며, 이 경우 안정층 고도가 높아진다. 반면에 $\Delta\theta_s$ 가 커지면 B값은 작아지고, 이 경우 안정층 고도는 낮아진다. Fig. 7은 안정층 고도와 B값과의 관계를 나타낸 그림으로 위의 결과와 잘 일치하고 있다.

B값과 풍속은 상관관계가 없었으며(Fig. 8), 반면에 고도에 따른 온도 경도와는 반비례 관계를 나타내었다(Fig. 9).

4. 요약 및 결론

1984~1987년 대구 지방에서 계류기기로 측정된 자료를 이용하여 대기의 하층 구조를 살펴보고, 안정층과 기상 인자(바람·기온)와의 관계를 알아보고, 안정도와 안정층 고도와의 관계를 살펴본 결과는 다음과 같다.

선택한 경우 중 10월과 1월 0720~0730 LST에 관측한 안정층은 파괴되지 않았지만, 6월에 관측한 경우에는 일출 후 지표면의 가열에 의해 안정층이 파괴되어 지면에서부터 혼합층이 발달하였다. 10월과 1월 사이에 선택한 6개의 경우 중 5개 경우가 276 m에서부터 최대 500 m 까지 안정층이 성장하였으며, 1개 경우는 84 m로 비교적 낮았다. 선택한 자료에서의 안정도 등급은 중간 정도의 안정도를 나타내는 F 등급이 4회로 가장 많이 차지하고 있다.

이 연구에서 이용한 3년간의 자료 중 가용 자료가 6회밖에 되지 않아 일반적인 결론을 내릴 수는 없으나, 연직 온도 변화율이 클수록 안정층 고도는 낮았으며, 이 안정층 고도를 나타내는 인자로서 B를 도입하여 본 결과, B가 클수록 안정층 고도는 높고, 작을수록 안정층 고도가 낮은 관계를 보였다. 따라서 이 값을 안정층 고도를 나타내는 변수로 이용 가능하리라고 생각된다.

안정층 발달(고도, 강도)과 기상 인자와의 관계를 규명하는 연구가 필요하며, 이를 위해서는 지속적이며 집중적인 관측이 필요하다. 또한 안정층 고도와 강도에 따른 대기오염 물질의 농도 변화를 조사하는 연구도 이루어져야 할 것이다.

참고 문헌

1) Stull, R. N., 1988, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, 499 pp.

2) 문승의, 유혜주, 김유근, 1984, 고리지역의 접지역전에 관한 기후환경학적 연구, 부산대학교 환경문제연구소 환경연구보, 2, 69-77.

3) Lui, F. H., 1990, Climatological Study of Temperature Inversion Layers in the Northern Hemispheric Troposphere, Climatological Note, 39.

4) 박종길, 원경미, 1994, 김해에서 관측한 접지역전층의 특성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 3(4), 305-315.

5) Holser, C. R., 1961, Low-level inversion frequency in the contiguous United States, *Mon. Wea. Rev.*, 89, 319-332.

6) Yoshino, M., 1968, Extremely low air temperature and development of inversion layer in the Tsukuba Environmental Research Center, 6, 35-44.

7) Kawamoto, T. and S. Ishizaka, 1968, Inversion layer, Technical Report of the Japan Meteorological Agency, 66, 77-84.

8) Yorisaki, A., H. Tamita, and K. Kai, 1982, Some aspects on the surface inversion observed by the 30 m meteorological tower at the environmental research center during the cold half year, The University of Tsukuba Environmental Research Center, 6, 45-52.

9) Garratt, J. R. and W. L. Physick, 1985, The inland boundary layer at low latitude: 2 sea-breeze influences, *Boundary Layer Meteorology*, 33, 209-231.

10) Honda, N. and T. Fujita, 1985, Statistics on inversion layer in the cold outbreak over the East China Sea, *Tenki*, 33, 113-118.

11) 기상청, 1981, 해안지방의 접지기후 연구, 84 pp.

12) 황수진, 1989, 산곡내의 야간 접지역전층의 생성 소멸에 관한 연구, 부산대학교 자연과학논문집, 48, 161-179.

13) 박종길, 이화운, 김유근, 이순환, 1997, 김해지방의 지표경계층내의 열수지 및 안정도 변화에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 13(2), 103-113.

14) 전병일, 김유근, 1998, 부산연안에서 관측된 저층대기의 특성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 7(2), 195-201.

15) Yoon, I. H., 1994, Vertical profiles of meteorological parameters over Taegu city, *Korean J. Geophysical Research*, 22, 24-32.