

碩士學位論文

제주지역에서 관측된 고층기상자료를  
활용한 대기혼합고 산정에 관한 연구

指導教授 李 起 浩



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

姜 太 眞

2000

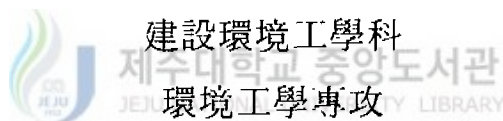
# 제주지역에서 관측된 고층기상자료를 활용한 대기혼합고 산정에 관한 연구

指導教授 李 起 浩

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2000년 6월 일

濟州大學校 産業大學院



姜 太 眞

姜太眞의 工學碩士學位 論文을 認准함

2000년 6월 일

審査委員長 許 喆 九 印

委 員 甘 相 奎 印

委 員 李 起 浩 印

**A Study on the Estimation of Atmospheric Mixing Height  
by using Upper air meteorological observation data in Cheju Region**

Tae-Jin Kang

*DEPARTMENT OF CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL INDUSTRIAL  
ENGINEERING GRADUATE SCHOOL  
of CHEJU NATIONAL UNIVERSITY  
Supervised by Professor Ki-Ho Lee*

**Summary**

The mixing height and the atmospheric ventilation factor within the mixing layer are calculated twice for each day of an one-year record of upper air observation at Gosan station in Cheju Island, Korea, by using the Holzworth method. The time of day of these calculations are morning and mid-afternoon.

In the first phase of this study, the original Holzworth method is applied to estimate monthly and seasonal mixing heights for the data gathered at upper-air station of Gosan, Cheju Island. Result indicates that the morning and the afternoon mixing heights are maximum in January and minimum in May. Compared with the estimated the morning and the afternoon mixing heights, these calculated heights are very similar and capture the seasonal variations. The morning mixing heights are believed to be overestimated, so the application of an adjustment factor to account for the heat-island effects by the original Holzworth method to data obtained at Cheju region still contains uncertainties.

The ventilation factors estimated in this study are maximum in January and minimum in May, with an annual average of 7500m<sup>3</sup>/s. This result indicates that the atmospheric environment of Cheju region has a large potential for dispersal of air pollutants.

In the second phase, efforts are made, more properly, to calculate the urban morning mixing heights of Cheju City. On the basis of urban-rural differences of minimum surface temperatures, it can be shown that the adjustment factor of 1 °C instead of 5 °C applied by the original Holzworth method is more reliable to account for the heat-island effects on Cheju region.



# 목 차

Summary .....	i
I. 서론 .....	1
II. 이론적 배경 .....	3
II.1. 대류 혼합층의 발달 과정 .....	3
II.2. 혼합고 산정 방법 .....	6
II.3 대기 환기량 평가 .....	9
III. 연구방법 .....	11
III.1. 기상 관측 자료 .....	11
III.2. 혼합고 산정방법 .....	13
III.3. 혼합층 풍속 산정 .....	15
III.4. 혼합비 산정 .....	15
IV. 결과 및 고찰 .....	16
IV.1. 고도별 기상 개황 .....	16
IV.2. 혼합고 평가 .....	18
IV.2.1 오전 및 오후 혼합고 평가 .....	18
IV.2.2 고층기상 관측시각에 따른 혼합고 비교 .....	23
IV.2.3. 대기 환기량 평가 .....	23
IV.2.4. 사례 분석 .....	26
IV.3. 제주도 지역의 혼합고 산출 .....	27
V. 결 론 .....	35
참고문헌 .....	37
Appendix .....	39

## List of Figures

- Fig. 2.1. The convective boundary layer capped by an elevated inversion. The profiles of potential temperature and turbulent heat flux are displayed.
- Fig. 2.2. The convective boundary layer under a weakly stratification: (a) temperature versus altitude; (b) potential temperature versus altitude; (c) turbulent heat flux versus altitude.
- Fig. 2.3. Definition of morning( $H_{am}$ ) and afternoon( $H_{pm}$ ) mixing height.  $T_{min}$  is the minimum surface temperature observed between 0200 and 0600 local time;  $T_{max}$  is the maximum surface temperature observed between 1200 and 1600 local time.
- Fig. 4.1. The location of Cheju upper-air and radar meteorological observatory
- Fig. 4.2. Monthly variation of morning and afternoon mixing height.
- Fig. 4.3. Seasonal morning and afternoon mixing heights.
- Fig. 4.4. Frequencies of morning and afternoon mixing heights.
- Fig. 4.5. Comparison of mixing heights according to the difference of upper-air data; (a) morning, (b) afternoon.
- Fig. 4.6. The effect of application of 18UTC upper air data on the estimation of mixing heights.
- Fig. 4.7. Typical profiles of potential temperature(upper), wind speed(middle), and mixing ratio(low) when both of the morning and afternoon mixing heights are high.

Fig. 4.8. Typical profiles of potential temperature(upper), wind speed(middle), and mixing ratio(low) when both of the morning and afternoon mixing heights are extremely low.

Fig. 4.9 Monthly variation of afternoon mixing height estimated at Cheju City.

Fig. 4.10. Comparison of seasonal afternoon mixing heights between Cheju city and Gosan area.

Fig. 4.11. Monthly variation of morning mixing height estimated at Cheju city.

Fig. 4.12 Monthly difference of surface minimum temperatures between Cheju city and Gosan area.

Fig. 4.13. Comparison of two cases regarding to correction of the heat island effect.

Fig. 4.14. Comparison of seasonal-averaged morning mixing heights for both cases.



## List of Tables

Table 2.1 Air pollution dispersal index

Table 3.1. Example of received data from Radio Sonde(Type A data)

Table 3.2. Example of data format in monthly Upper Air Report(Type B data)

Table 4.1. Rank of atmospheric ventilation

Table 4.2. Estimation of atmospheric ventilation

Table 4.3. Number of days with and without morning mixing height occurrence.





## I. 서론

우리의 생활권에 근접한 하층의 대기에서는 지표 기온이 일 변화를 하고 역진층, 혼합층 및 불안정한 접지층 등으로 불리는 고유의 층을 형성하게 된다. 그리고 각 층의 높이는 밤낮으로 달라지지만 계절에 따라서도 달라지고 지표 특성 및 지형에 의해서도 영향을 받게 된다. 그러므로 대기오염 물질의 분산은 이들 각 층의 고유한 특성 및 그 높이에 따라 크게 영향을 받을 수밖에 없다. 이들 각 층의 높이는 대기오염물질의 수직적 이동 거리를 제한하므로 대기오염물질의 회석에 중요한 역할을 한다. 이처럼 지표면에서 상공으로 대기오염물질이 수직으로 이동할 수 있는 거리를 대기 혼합고라고 부르며, 대기오염물질의 분산을 예측하기 위한 모형 개발에 필수적인 고려사항이기도 하다(Aron, 1983). 그리고 이 혼합층의 두께 내에서의 평균풍속자료와 함께 대기에서 오염물질의 혼합용량을 평가하는 대기 환기량을 산출하는 자료로도 활용될 수 있다.

대기 혼합고는 비행기나 기구 등을 이용하여 직접 측정할 수도 있지만 간접적 방법으로 산정하기 위한 많은 노력이 이루어지고 있다. 이 간접적 방법에는 대기 혼합고 변화를 지배하는 각종 방정식을 조합한 적분 모델을 이용하는 방법(Carson, 1973; Tennekes, 1973; Driedonke, 1982; Lee, 1986)과 Holzworth 방법(Holzworth, 1967, 1972, 최와 백, 1998)이 널리 이용되고 있다. 전자의 적분 모델을 이용하기 위해서는 시간에 따른 지면에서의 열 flux와 마찰 속도를 알아야 하는데, 이런 요소는 직접 측정이 매우 곤란하므로 별도의 에너지 수지 모델이 필요하게 된다. 최근 이 에너지 수지 모델의 개발이 활발하게 이루어지고는 있지만 지면의 특성을 모수화하는 어려움으로 인해 많은 불확실성을 내포하고 있다. 특히 대륙과 해양의 성질을 동시에 지니는 해안가 또는 산림 등과 같은 지형이 복잡한 곳에서의 적용에는 무리가 따른다(김 등, 1997). 후자의 Holzworth 방법은 적분 모델을 이용함에 따른 각종 어려움을 극복하면서도 간편하고 실용적으로 혼합고를 산정할 수 있는 방식이다. 이 방법에 의하면 실제 관측과는 다소 차이

는 있지만 기후학적 관점으로 볼 때 관심 대상 지역에 대한 훌륭한 지표로서 활용할 수 있으므로 미국 환경 보호청(U.S. EPA)에서 대기질 평가에 필요한 혼합고 산정의 표준 방식으로 채택되고 있다(U.S. EPA, 1990; 이, 1991). Holzworth가 미국 전역에 소재한 62개 고층 관측소에서의 온도와 바람 관련 자료를 토대로 일련의 연구를 수행한 이래로 대기오염과 혼합과의 관련성에 관한 많은 연구가 수행되었다(Holzworth, 1967, 1972; Aron, 1983; U.S. EPA, 1981, 1990). 우리나라의 경우 그 동안 고층기상관측 자료의 가용성 문제로 인해 자료 이용에 어려움이 많아 혼합고 산정에 관한 연구가 극히 제한적이었다(이, 1990; 신, 1994; Chang, 1997; 최와 백, 1998). 따라서 대기 혼합고 자료에 관한 체계적 측정이나 분석이 매우 미비하여 대기오염 잠재성을 평가하거나 대기 분산 모델을 선정하고 이용함에 있어 많은 제약 요소가 되어 왔다(최와 백, 1998). 특히 우리나라는 산과 구릉지, 평지 등이 혼할 뿐 아니라 해양으로 둘러싸여 있는 등 지표면 특성이 아주 다양함에도 불구하고 전국에서 4 곳에서만 고층기상관측이 이루어지고 있어 이를 이용하여 특정 대상 지역에서의 혼합고를 평가함에 신중해야 한다. 특히 요즈음 최근 도시의 팽창이 급속한 추세이고 그린벨트 지역의 해제 등과 같은 국가 정책 변화에 따른 지표면 특성 변화가 더욱 클 것으로 예상되어 특정 지역의 대기 혼합층 변화에 관여하는 인자들은 현재와 더욱 큰 차이를 보일 것이다. 특히 제주지역은 주변이 해양으로 둘러싸여 있어 대기 혼합고도에 직·간접적인 영향을 미칠 것이므로, 제주지역에 관한 혼합고의 산정은 지역 대기질 관리와 대기오염분산 모델의 선정 및 적용에 실제적인 자료 제공을 위해 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 제주도 서부지역에서 관측된 고층기상관측 자료에 Holzworth가 제시한 방식을 적용하여 대기 혼합고를 산정하고, 그 시간적 변동 특성, 혼합고별 발생빈도 및 사례분석을 실시하고, 대기 환기량을 파악해 보고자 한다. 또한 이를 바탕으로 도시 지역인 제주시에서의 혼합고 추정에 관한 타당성을 살펴보고자 했다.

## II. 이론적 배경

### II.1. 대류 혼합층의 발달 과정

맑은 날 일출시에 대기 경계층은 통상 야간 복사열의 유출로 인해 정적인 안정도를 나타나게 된다. 일사량이 증가함에 따라서 지표가 가열되고 이어서 접지층 내 공기가 가열된다. 지면 가열이 심해지면 공기가 대류 가열되면서 강한 상승 기류가 발달하게 된다. 이러한 대류로 인해 발생하는 흐름으로 인해 효과적인 상하 혼합이 일어나면서 대기 경계층 내로 발달하게 된다(한, 1993). 이 상승 높이는 지면에서 방출된 오염물질이 분산될 수 있는 공기의 체적을 결정하기 때문에 혼합층의 높이를 예상하는 능력은 아주 중요하다. 그렇지만 불행하게도 대류 경계층은 시간에 따라 변동하므로 쉽게 예상 할 수 없다. 여기서는 대류 경계층에 대한 일부 관측 및 이론적 연구를 중심으로 혼합층의 발달을 평가하는 과정을 살펴보기로 한다.

강한 국부적인 역전으로 씌워져 있으면서 발달하고 있는 대기 경계층 내에서 온위와 난류 열 flux의 분포도는 Fig. 2.1과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보면, 바람과 온도의 수직 전단(vertical shear)이 크고 기계적으로 일어나는 난류 운동에 의해 열수송이 지배되는 과단열적인 층(superadiabatic layer)인 접지층(surface layer)이 지면 근처에 얇게 위치하고 있고, 그 위에는 부력이 지배적인 완전한 난류 혼합이 존재하는 자유 대류층(free convection layer)이 위치한다. 이 자유 대류층에는 약한 안정인 경우가, 특히 이 층의 윗 부분에서, 자주 관찰되기도 하지만, 실질적인 온위의 분포(profile)가 고도와는 무관하다고 볼 수 있다. 이 자유 대류층 상부에는 역전층으로 덮여져 있다. 이러한 상태하에서 작용하고 있는 메카니즘을 구체적으로 살펴보기로 한다.

태양이 지표면을 가열하면 접지층 내 공기는 열 flux( $q_{20}^T$ )를 제공받게 된다. 이 열 flux는 일사와 지면의 흡수와 재복사로 인한 열 사이의 차이로서 나타난

다. 이런 난류 열 flux 때문에 접지층 내에서 온위 경사는 음(-)이 된다. 그러나 난류 혼합이 효과적이고 열의 와류(eddy) 확산이 큰 높은 고도에서는 온위 경사가 작아지게 된다. 난류 열 flux는 혼합층 내의 공기가 거의 균일하게 가열되기 때문에 고도증가에 따라 직선적으로 감소한다.  $z = H_m$ 인 지점에서 혼합층의 상부 경계에 고공 역전이 형성되며 이는 Fig. 2.1에서 온위의 불연속적인 변화로서 나타난다.

혼합층 내에서의 난류는 대류의 침투 작용을 통해서 혼합층의 상부 경계를 나타내는 역전층 내에서도 혼합이 일어나도록 할 수 있다. 아래의 난류의 활동을 통해서 아래로부터 역전층 내로 통과하여 침투하면 상부의 공기 일부를 둘러싸게 된다. 이 과정에서 포획된 공기 덩어리(air parcels)는 혼합층 내로 재빠르게 분산된다. 이런 과정으로 혼합층의 높이는 증가하게 된다. 경계(interface)를 통과하여 공기가 난류 유입(turbulent entrainment)되므로 인해 따뜻한 공기를 아래 쪽으로 가져가므로써 혼합층 내의 공기를 가열시키기는 국부적으로 음(-)의 열 flux가 나타난다. 혼합층 상부에서 온위 경사  $d\theta/dz$  는 양(+)이 되고 이는 강한 국부 역전 위에는 약한 안정 성층이 존재하고 있음을 나타내는 것이다.

시간이 지나면서, 지표로부터의 난류 열 flux와 경계로부터의 난류 유입으로 인해 열이 혼합층으로 공급되므로,  $H_m$ 과  $\Delta$ 가 증가되는 반면 Fig. 2.1에 나타냈듯이 역전 강도(the strength of the inversion;  $\Delta$ )는 감소한다.

고공 역전이 덮여 있지 않고 약한 안정 성층이 존재하는 경우에는 난류 유입이 없으며 혼합층으로의 열 flux는 지면에서 대류 가열에 의해서만 일어난다. 이런 경우에 대해서 Fig. 2.2에 나타냈다. 이런 경우의 대기 경계층에 관한 동역학은 간단한 열수지만으로 완전하게 설명될 수 있다.

만일 역전의 강도가 아주 크면 난류유입은 무시할 수가 있는데, 주로 이른 아침에는 혼합층내 난류는 운동 에너지가 부족하여 상부 경계로까지 침투하지 못하게 된다. 따라서 혼합층 높이는 일정하게 된다. 물론 지면에서 공급된 난류 열로 인해 유입(entrainment)이 일어날 수 있는 지점까지 역전이 약화되었다면 혼합층 높이는 변하게 될 것이다.

대류 경계층의 동적학(dynamics)에 대해서는 Tennekes(1973)에 의해서 거론된 바 있다. Tennekes(1973)는 시간에 따른  $H_m$ 과  $\Delta$ 의 전개를 기술하는 방정식을 제시했다. 이 방정식은 컴퓨터에 의한 수치적 해석이 필요한데, 일반적으로 역전

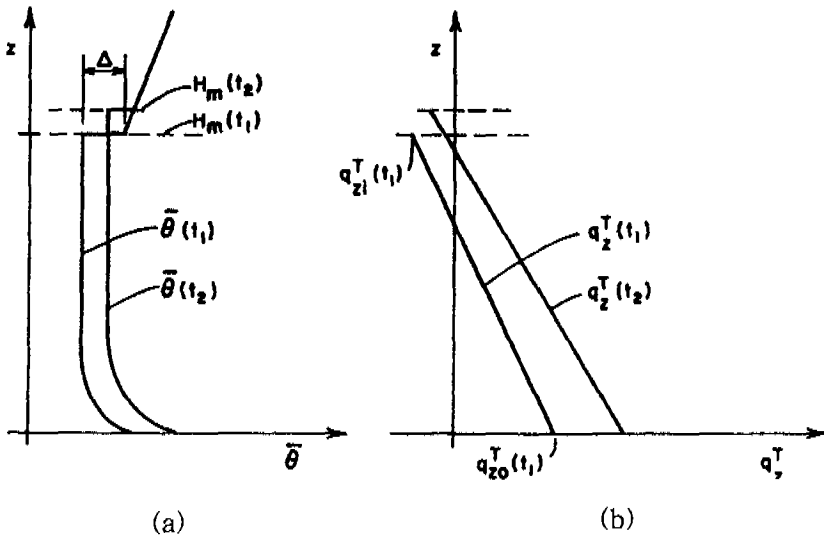


Fig. 2.1 The convective boundary layer capped by an elevated inversion: (a) profiles of potential temperature; (b) turbulent heat flux versus altitude.

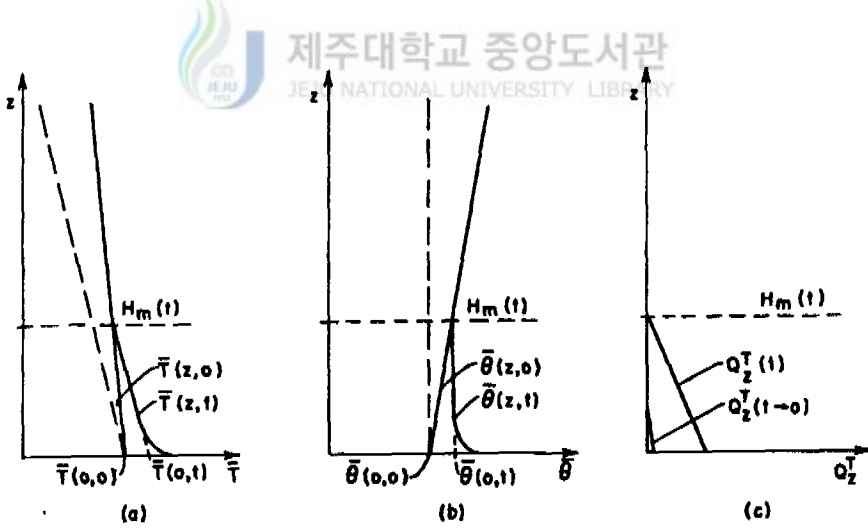


Fig. 2.2. The convective boundary layer under a weakly stratification: (a) temperature versus altitude; (b) potential temperature versus altitude; (c) turbulent heat flux versus altitude.

의 강도 ( $\Delta$ )는 아침 시간대에는 감소하고 나중에는 증가하는 반면에 혼합층의 높이 ( $H_m$ )은 비록 일정한 속도로는 아니지만 꾸준히 증가하게 된다. 대규모의 기상학적 현상(events)으로 초래되는 대기에서의 침강(subsidence) 그리고 수분의 존재는 혼합층의 발달에 역시 영향을 주고 있다.

## II.2. 혼합고 산정 방법

### II.2.1 직접적 산정 방법

혼합고를 산정하는 데는 직접적인 방법과 간접적인 방법이 이용될 수 있다. 혼합고의 직접 측정은 비행기, 기구, 혹은 높은 탑에 난류 측정 센서를 부착하여 이루어진다. 이 고도별 관측에서는 난류가 현저하게 감소하는 위치까지를 혼합고로 정의하게 된다.

### II.2.2 간접적 산정 방법

#### 가. SODAR 관측



간접적인 산정 방법에는 최근에 원격 감시 Dopplar SODAR를 이용하기도 하는데, 이는 바람, 난류 및 온도의 대기에서 수직 구조에 관해 연속적인 실시간 관측자료를 제시하도록 설계된 장비인데, 혼합고의 산정이 비교적 정확하므로 점차 사용 빈도가 커지고 있다. 그러나 아직까지는 배경 신호음(background noise), 전기적 방해, 높이에의 제약(지상 약 1 km 정도까지), 그리고 비싼 경비 문제 등의 극복해야 할 장애 요인이 남아 있다.

#### 나. 적분 모델 방법

그리고 혼합고를 산정하는 간접적 방법으로서 1차원 적분 모델을 이용하는 방법이 있다. 이러한 모델들은 통상 미분 방정식으로 조합된 형태를 지니면서 역전의 높이(즉, 혼합고)와 역전의 강도( $\Delta$ )를 시간의 함수로써 제공하게 된다. 이러한 모델은 통상 이른 아침에 이루어지는 수 km까지의 고층 관측에서 제공되는 초기 온도 분포도 및 시간에 따른 지면 열 flux와 마찰 속도(friction velocity) 자

료가 필요하게 된다. 이러한 적분 모델은 Tennekes(1977), Driedonke(1982), Paumer 와 Irwin, 1991, 그리고 Lee(1986) 등이 발표한 바 있다 이 중에서 가장 간단하면서도 가장 엄밀하게 검증된 모델은 수정 Carson model이라고 할 수 있으며 이는 Complex Terrain Dispersion Model 의 기상 전처리 프로그램으로 선정되어 있다(Perry 등, 1989). 그 외에도 역전에서 난류 유입에 대해 보다 정교하게 처리하는 등 여러 모델들도 제시되고 있지만 혼합고 관측에 대해 아직은 보다 철저한 검증이 필요하다. 적분 모델은 혼합고를 산정하는데 아주 유용한 도구 이기는 하지만 혼합고 추정에 적분 모델을 적용함에는 지면 열 flux를 산정하기 위한 별도의 에너지 수지 모델이 필요하다. 물론 최근 들어 에너지 수지 모델들이 개발되고 있지만, 우려할 만한 불확실성이 입증되기도 했다. 특히 도시지역이나 지면 상태가 불균일한 지역에서는 지면 특성을 모수화하는 어려움으로 인해 이러한 불확실성이 더욱 커지고 있다. 이와 같이 적분 모델을 이용하여 혼합층 고도의 변화를 알기 위해서는 현열 방출량을 알아야 한다. 그렇지만 현열의 방출을 직접적으로 관측하기란 매우 힘든 작업이기 때문에 현열 방출량을 추정함에 있어서는 지표에서의 온도와 지상에서의 온도를 관측해서 사용하기도 한다. 이럴 경우 지표(해수면 또는 지면)에서의 온도 등이 필요하게 된다. 그러나 대륙과 해양의 성질을 동시에 가지는 해안가 또는 산림과 같이 지형이 비교적 복잡한 곳에서는 이러한 방법을 이용함에는 무리가 따르게 된다(김 등, 1997)

#### 다. Holzworth 방법

또 다른 간접 산정방법으로서 Holzworth 방법이 있다. 이 방법은 1972년 Holzworth가 제시한 이래로, 미국환경보호청(U.S EPA)에서 대기질 평가에 필요한 혼합고 산정에 있어서 표준방식으로 채택하고 있다. 본 논문에서도 이 방법을 적용하고자 한다. 특정 지역 내에서도 지표면의 열 flux와 온도는 대단히 불균일하기 때문에 지역 내 몇몇 지점에서 관측된 자료만을 이용하여 특정 지역의 대표적 혼합층 고도를 정확하게 산출하는 데는 많은 어려움이 있다 그럼에도 불구하고 기후학적 관점으로 볼 때, 혼합고도는 비록 절대적이지는 않겠지만 관심대상 지역에 대한 훌륭한 지표(indicator)로서 역할을 제공할 수 있다(Dobbins, 1979).

Holzworth(1967, 1972)는 62개 고층기상관측소에서 정기적으로 관측하는 온도

와 바람에 관한 자료를 토대로 미국 전역을 대상으로 대기 경계층 특성에 대한 일련의 연구를 수행한 바 있다. 그는 아침 혼합고(morning mixing height), 오후 혼합고(afternoon mixing height), 그리고 혼합층 풍속(mixing layer wind speed) 이라고 정의한 요소들에 대해서 자세하게 검토하였다. Holzworth가 제시한 혼합고의 개념을 Fig. 23에 나타냈다.

아침 혼합고 ( $H_{am}$ )는 아침 출근시간에 혼합층의 높이를 산출하고자 하는 의도로서, 02LST(local standard time, 지방표준시)에서 06LST사이에서 관측된 지상최저기온( $T_{min}$ )에 대한 정보와 아침에 실시된 고층기상관측자료에서 작성된 고도별 기온분포에 관한 정보를 토대로 산출된다. 이 때 관측된 지상최저기온에  $5^{\circ}\text{C}$ 를 더한 지표기온에서부터 건조단열선을 작성하게 된다. 이 과정은 다음의 가정들을 근거로 하고 있다. (1) 12GMT(Greenwich mean time)에 작성된 고도별 분포선(profile)의 아래 부분은 교통량이 최대인 시간대에 적용할 수 있다. (2)  $T_{min} + 5^{\circ}\text{C}$ 는 이 시간에 실제 도시의 지표 기온을 대표한다. (3) 평형 대류 혼합층(equilibrium convective mixed layer)은 재빠르게 달성된다. 여기서 지표최저기온에 대한  $5^{\circ}\text{C}$ 의 보정은 일출 후 지표면의 태양에 의한 가열 그리고 아침 지표기온에 있어 도시와 농촌간의 차이에 관해 보정하기 위한 것이다. 물론 이 과정에 대해서는 (1) 12GMT가 지역마다 지방표준시로서는 차이가 있으며, (2) 일출시간과 최대 교통량 발생 시간대 사이의 상관관계가 계절마다 차이가 있을 것이고, (3) 모든 지역과 계절에 대해서 최저기온에 대한 단일 보정값을 부여하는 문제 등과 같은 수많은 반론이 제기될 수 있다. 그렇지만 현실적으로는 이런 과정을 보다 세련되게 해결할 수 있는 구체적인 정보는 없는 형편이다(Dobbins, 1979).

오후 혼합고 ( $H_{pm}$ )는 12GMT에 실시한 고층 기상관측자료에서 결정된 고도별 온도 분포선과 12LST에서 16LST사이에서 지상근처에서 관측된 최고 기온( $T_{max}$ )에서 연장된 단열선과의 교점에 대한 지상 높이라고 정의하고 있다. 이 오후 혼합고를 산정하는 과정에 대해서는 보다 신빙성이 있는 것으로 나타나고 있다. 이 과정은 앞에서 논의한 혼합층 고도 ( $H_m$ )에 보다 더 근접한 것으로 나타나고 있다.

끝으로 혼합층 풍속은 지상 그리고 혼합층 고도와 동일 고도까지 관측된 바람을 평균하므로써 계산된다. 이 방법은 실측된 혼합고와 비교하여 오차가 비교적 크지만 간편하면서도 실용적이므로 널리 사용되고 있다.



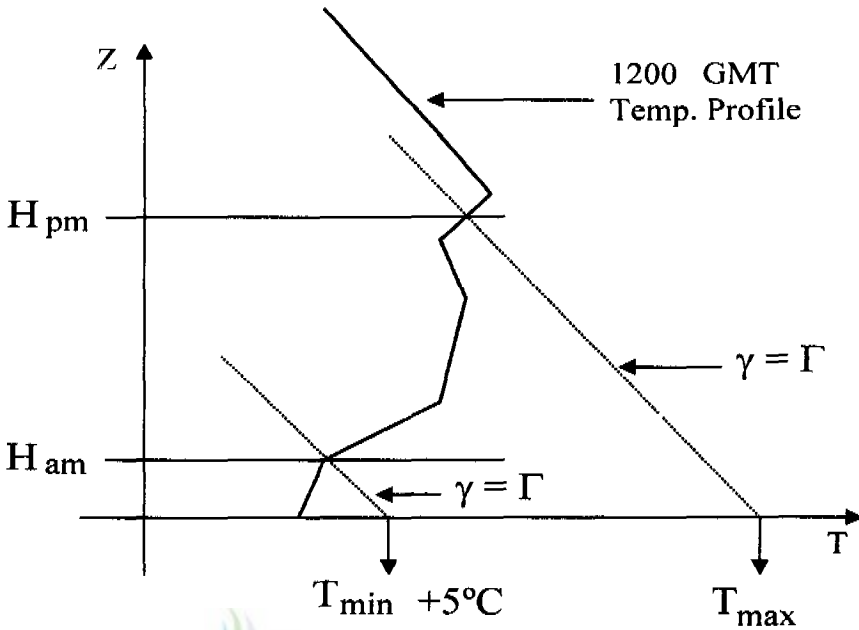


Fig 2.3. Definition of morning( $H_{am}$ ) and afternoon( $H_{pm}$ ) mixing height:  $T_{min}$  is the minimum surface temperature observed between 02LST and 06LST;  $T_{max}$  is the maximum surface temperature observed between 12LST and 16LST local time;  $\gamma$  is the lapse rates of atmosphere, and  $\Gamma$  is the dry adiabatic lapse rate

### II.3 대기 환기량 평가

미국 국립기상대는 대기오염물질의 분산에 악조건 상태가 될 수 있는 날씨를 예보하는 프로그램을 운영하고 있다(Dobbins, 1979). 그렇지만 여기서는 대기 환기량의 방법에 대해서 소개하기로 한다

**가. 혼합층 풍속**

혼합층 내의 평균 풍속을 말하는데, 대기오염물질을 희석시키고 분산시킴에 있어서 낮은 대기층에서 바람의 효율성을 결정하는 요소가 된다. 이 혼합층 풍속은 다음과 같이 정의한다.

$$q_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{bi}(z_i), \quad \text{m/s}$$

여기서  $q_{bi}(z_i)$ 는 라디오존데로서 혼합층 내  $i$  번째 고도에서 관측으로 측정된 풍속을 말한다.

**나. 환기 인자**

배출원에서 나온 대기오염물질의 분산에 대한 기초적 이론으로서 대기 중 오염물질의 농도는 혼합층 고도와 풍속의 곱에 대해서 반비례 관계가 있다는 것이다. 환기 인자(ventilation factor)는  $q_T \cdot H_m$  (m<sup>2</sup>/s) 으로 정의되며 이 양이 얼마나 적은가는 대기오염물질의 분산에 대한 악조건인 척도로서 활용될 수 있다 이 개념을 예보를 목적으로 대기오염분산지수로 이용하기도 한다 예보에 사용되는 환기 인자의 범주를 표 2.1 에 나타냈다(윤, 1998).

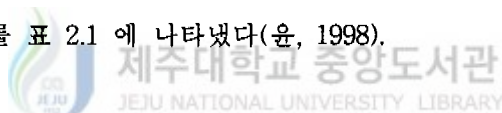


Table 2.1 Air pollution dispersal index

Dispersion	Ventilation(m <sup>2</sup> /s)
Bad	0 ~ 2000
Fair	2001 ~ 4000
Good	4001 ~ 6000
Excellent	> 6001

### Ⅲ. 연구방법

#### Ⅲ.1. 기상 관측 자료

##### 가. 고층기상관측

우리나라의 고층기상을 관측하는 4곳 중의 한 곳인 제주고층 레이더 기상대는 Fig. 3.1에서 보는 바와 같이 동경 126° 10', 북위 33° 17', 해발 72m 에 위치하며 행정적으로는 제주도 남제주군 한경면 고산리의 바닷가에 위치한다 이 곳에서는 지상기상과 고층기상을 동일한 위치에서 실시하고 있으며 고층 기상관측은 매일 2회 오전 9시(00GMT)와 오후 9시(12GMT)에 정기적으로 실시하고 있다. 그리고 1997년부터는 기상방재 기간동안(주로 6월과 7월)에는 한시적으로 1일 4회, 오전 3시(18GMT), 오전 9시(00GMT), 오후 3시(06GMT) 및 오후 9시(12GMT)에 관측을 실시하고 있다. 고층기상 관측시에는 기압, 기온, 이슬점 온도, 풍향, 풍속의 5가지 기상요소가 관측이 되고, 기압면의 고도 자료가 제공된다. 고층 기상 관측시 쏜데의 부양은 통상 기준시각의 30여분 전에 실시하고 쏜데에서 발신되는 발신 신호를 지상에서 매 10초 간격으로 수신하여 database에 저장된다.

우리나라 기상청에서는 10초 간격 수신된 이 자료에서 표준 등압면 고도에 대한 기상자료를 환산하여 일반인에게 월보로서 정기적으로 제공하고 있다. Appendix A에는 10초 간격으로 수신된 고층 관측자료의 일부를 나타냈으며, Appendix B에는 기상월보에 제시된 자료의 일부를 제시하였다. 본 연구에서는 10초 간격으로 저장된 고층기상 관측자료를 Type A data로, 기상월보에 표준등압면 고도별로 제시된 자료를 Type B data로 명명하여 사용한다. 그러나 현재 제주고층레이더 기상대에서 10초 간격으로 저장된 고층기상 관측자료(Type A data)를 확보할 수 있는 관측 시기는 극히 제한적인데, 본 연구에서는 1997년 11월부터 1998년 10월까지 1년 동안의 10초 간격 관측자료와 동일 기간에 표준등

압면 고도자료(Type B data)에서 지상에서부터 500hPa 등압면까지의 자료만을 선택하여 이용하였다. Type A data인 경우 지상으로부터 대략 40~50m 간격의 고도별로 기상 정보가 제공되지만 Type B data인 경우에는 지상 및 지상으로부터 대략 130m, 1500m, 3000m, 5580m에서의 정보만 제공되는 차이점이 있다.

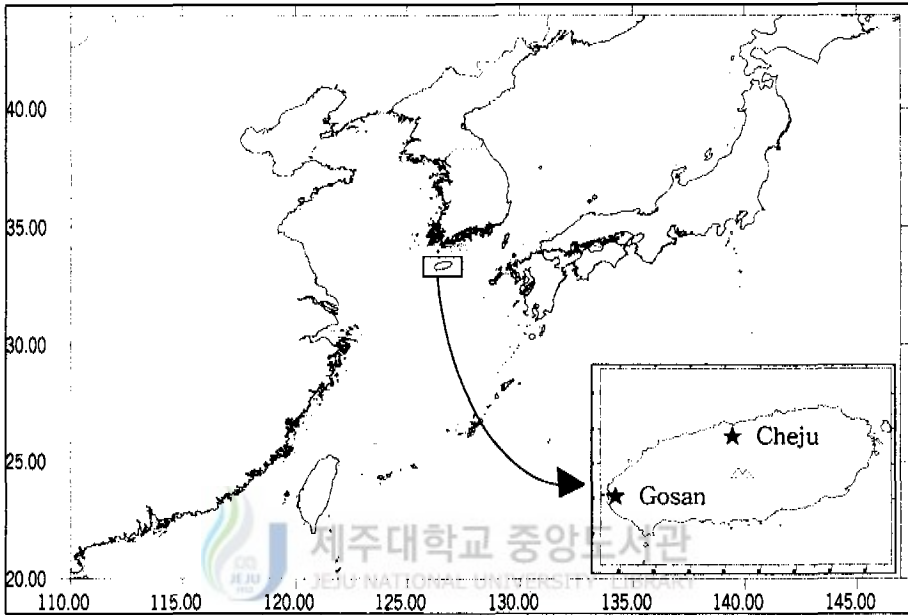


Fig. 3.1. The location of Cheju upper-air & radar weather station (Gosan) and Cheju regional meteorological office(Cheju).

#### 나. 지상관측자료

제주지역에서는 제주고층 레이더 기상대에에도 여러 곳에서 매일 매시간 지상 기상 관측을 실시하고 있으며 이 자료를 토대로 일 기상 통계표를 작성한다. 일 기상 통계자료에는 풍향, 풍속만 매 시간 제시되고 기온 및 습도 등은 3시간 단위로 제공된다. 그렇지만 풍향, 풍속, 기온 및 습도에 관한 관측자료는 매시간 단위로 database에 수록되어 보관되고 있다. 따라서 본 연구에서는 고산과 제주시에서 관측한 기온, 습도 및 바람자료로서 database에 수록된 매시간 자료를 활용하였다.

## 다. 자료의 결측

본 연구에서 수집된 1997년 11월부터 1년간 매일 2회씩 관측된 고층관측 자료 중 기기의 장애 및 보관 자료의 손실 등으로 인해 정상적인 10초 간격 관측 기록이 확보되지 못한 일수를 제외한 총 349일의 자료를 이용하였다. 기상관측 자료는 고층기상 관측자료가 정상적으로 확보된 날과 짝을 이룰 수 있도록 정리하여 사용하였다.

## III.2. 혼합고 산정방법

Holzworth(1972)는 미국에서 1200GMT에 얻어진 고층기상관측 자료와 매시간 지상기상 관측자료에 근거하여 매일 2회의 혼합고 즉 오전 혼합고와 오후 혼합고를 산정하는 방법을 제시하였다. 그러나 Holzworth가 기준으로 삼은 일출 직전의 고층기상관측 시각으로서는 12GMT였지만 우리나라의 경우에는 일출 후 2~4 시간이 경과한 후인 09LST(00GMT)에 이루어진 관측된 자료를 이용하여 혼합고를 산정했다.

Holzworth방식을 보면 오전 혼합고(morning mixing height)는 0200LST부터 0600LST 사이에 관측된 지상 최저 기온에 5℃를 더한 값에서 시작된 건조단열감률선과 관측된 수직온도 분포선과의 교점까지의 지상높이로서 계산된다. 여기서 5℃를 더한 것은 지상관측은 통상 도시지역 내에서 실시되는 반면에 고층기상관측은 교외 또는 전원 지역에서 실시되고 있어 열섬 효과(heat island effect)를 고려하기 위한 목적이다.

오후 혼합고(afternoon mixing height)는 1200LST에서 1600LST사이에 관측된 지상최고 기온에서 시작된 건조단열감률선과 관측된 수직온도 분포선과의 교점까지의 지상 높이로서 선정된다.

본 연구에서 사용한 혼합고 산정 과정은 Holzworth 방식으로서 지상 온위보다도 온위가 높아지는 최저고도로서 정의된다.

단계 1 : 지상 기상 관측자료에서 0200LST에서 0600LST 사이에서의 최저기온을 찾아 5℃를 더하고, 1200LST에서 1600LST사이에서의 최고 기온

을 찾는다. 그리고 다음의 방정식을 이용하여 지상에서의 오전과 오후의 온위를 계산한다.

$$\theta_{SFC} = T_{SFC} \left( \frac{P_{SFC}}{1000} \right)^{-R/C_p}$$

여기서,  $\theta_{SFC}$ 와  $T_{SFC}$ 의 단위는 절대온도(K)이고,  $P_{SFC}$ 의 단위는 hPa이다. 그리고 R과  $C_p$ 는 각각 공기의 기체상수와 정압 비열이다.

단계 2 : 고층기온 관측자료를 이용하여 고층관측 기압 자료 중에서 지상기압 ( $P_{SFC}$ )보다 낮으면서도 가장 높은 기압고도를 찾는다.

단계 3 : 단계 2에서의 고도에 대한 압력과 온도를 이용하여 다음 방정식을 적용하여 온위를 계산한다.

$$\theta_P = T_P \left( \frac{P_P}{1000} \right)^{-R/C_p}$$

여기서  $\theta_P$ 와  $T_P$ 는 절대온도(K)이고  $P_P$ 는 기압이다.

단계 4 : 온위  $\theta_P$ 가 지상온위  $\theta_{SFC}$ 보다 더 높으면 이 날에는 혼합고도를 찾을 수가 없으며, 다음 날로 넘어간다. 만일  $\theta_P$ 가  $\theta_{SFC}$ 보다 낮으면  $\theta_{SFC}$ 보다  $\theta_P$ 가 커질때까지 계속하여 다음 고도로 넘어가면서 단계 3의 계산과정을 반복하게 된다.  $\theta_P$ 가  $\theta_{SFC}$ 보다 커지면 단계 5로 넘어간다.

단계 5 : 혼합고는 단계 4에서 마지막으로 처리된 두 고도 사이에 위치하게 된다 따라서 마지막 두 고도 사이에서 geopotential height와 온위를 이용하여 직선적인 내삽을 통해 혼합고도(해면기준)를 찾게 된다.

단계 6 . 단계 5에서 계산된 해면기준 혼합고도에서 지상관측지점 해발고도를 빼주면 그 지역의 혼합고가 된다.

### III.3. 혼합층 풍속 산정

풍속은 오전과 오후의 풍속으로 나누어 계산하였다. 풍속은 지상 풍속 및 앞에서 산정된 혼합고도까지 관측된 고도별 풍속들을 기준으로 앞서 2장에서 정의한 수식으로 계산하였다. 오전 풍속은 00GMT에 관측된 고층 풍속자료와 0200LST에서 0600LST사이에 관측된 지상 풍속을 근거로 계산하였다. 오후 풍속은 12GMT에 관측된 고층 풍속자료와 1200LST에서 1600LST사이에 관측된 지상 풍속을 근거로 계산하였다. 이렇게 계산된 평균 풍속을 편의상 오전 풍속과 오후 풍속이라고 표현한다.

### III.4. 혼합비 산정

혼합비  $\chi$ 는 다음 식으로 계산하였다.

$$\chi = \frac{0.622 e}{P - e}$$

여기서 P는 고도에 따른 기압(hPa)이고, e는 수증기압으로서 상대습도(RH, %)와 포화수증기압( $e_s$ , hPa)로서 산출된다.

$$e = \frac{RH \times e_s}{100}$$

포화수증기압( $e_s$ )은 다음과 같이 구했다.

$$e_s = 6.1078 \exp\left(\frac{2.302 \times 7.5 \times T}{273.3 + T}\right)$$

여기서 T는 각 고도에서의 건구 온도(°C)를 말한다.

## IV. 결과 및 고찰

### IV.1. 고도별 기상 개황

1997년 11월부터 1998년 10월까지 1년간 제주 고산에서 00GMT에 관측된 고층기상자료를 기상요소별로 고도 100m 구간씩 평균하여 계절별로 Fig. 4.1에 나타냈다.

고도별 기온분포를 보면 상공으로 갈수록 기온은 낮아지는 일반적 형태를 보이지만 지구대기의 평균기온감률( $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ) 보다는 낮은 감률을 보였다. 그리고 고도별 기온분포를 계절별로 보면 겨울, 봄, 가을, 여름의 순으로 4계절의 특성이 뚜렷하게 나타났다.

상대습도는 전반적으로 고도 증가에 따라 낮아지는 일반적인 경향을 보였다. 여름철 고도별 상대 습도분포는 거의 일정한 비율로 감소하고 있으나, 다른 계절의 경우 고도 1000m 부터 2500m 부근에서 크게 감소하고 2500m 이상에서는 대체로 일정한 경향을 보였다. 지상부근에서는 여름과 겨울철의 상대 습도는 큰 차이를 보이고 가을과 봄철은 비슷한 분포를 보였다. 이로써 보면 제주 지역은 여름철에 고온 다습하고 겨울철에 저온 건조해지는 기후를 보이는 특성을 이해할 수가 있다.

풍속의 계절별 변화를 보면 지상 풍속은 여름철에 비해 겨울철이 훨씬 크고 봄과 가을은 비슷한 수준이면서 여름과 겨울철의 중간정도 수준을 보임을 알 수 있다. 그리고 지표에서 상부로 갈수록 풍속은 증가하는 경향을 보이지만 고도 2000m 이하의 대기 하층부를 보면 봄과 여름 그리고 가을과 겨울의 고도별 풍속 변화가 서로 비슷한 형태를 보임을 알 수 있다. 이 고도별 풍속 변화 형태를 토대로 볼 때 하부 대기층의 안정도는 봄과 여름철보다는 가을과 겨울철에 더욱 안정해지는 경향을 알 수가 있다.



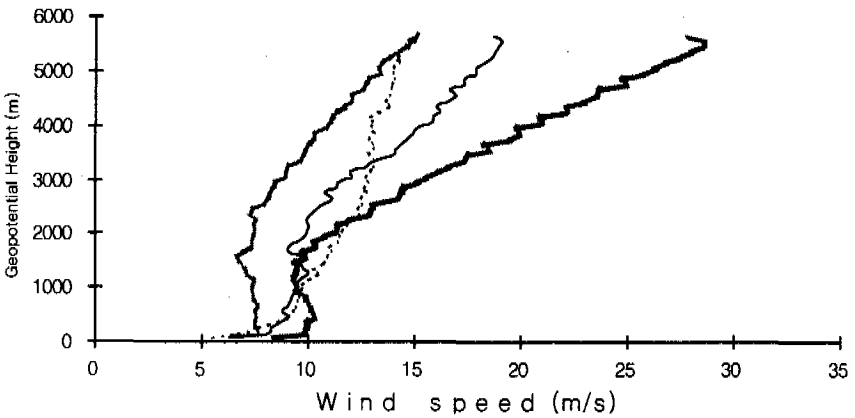
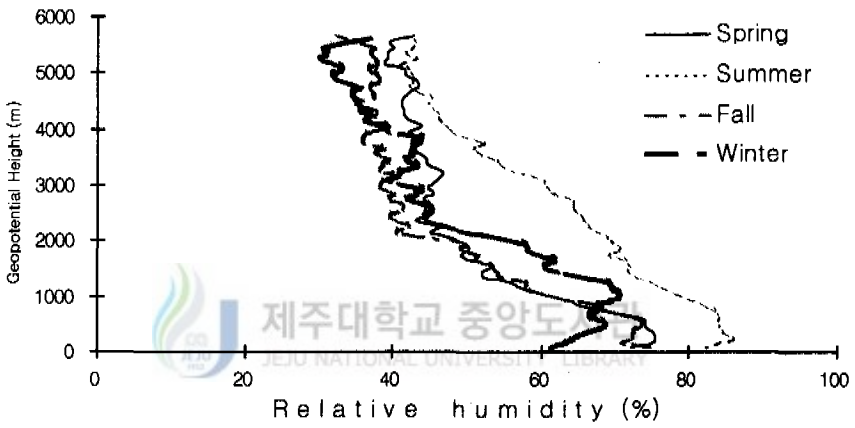
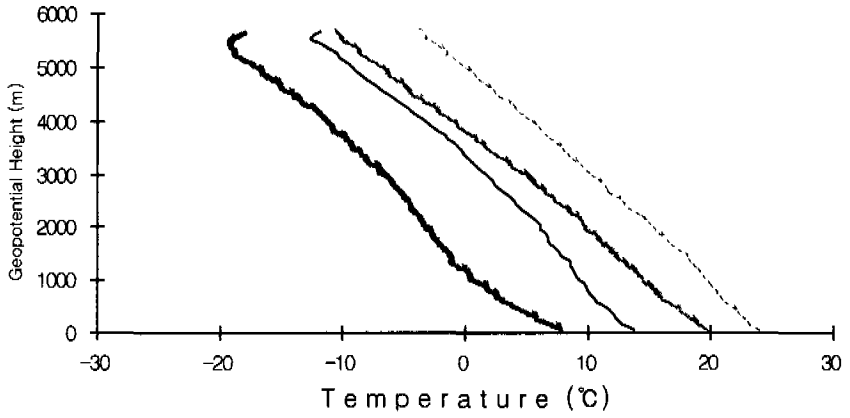


Fig. 4.1. Seasonal variation of temperature, relative humidity, and wind speed according to the geopotential height.

## IV.2. 혼합고 평가

지상 및 고층 기상 관측 자료를 이용하여 제주도 서부 고산지역에서의 Holzworth(1972)가 제시한 방식에 따라 혼합고를 산정한 결과를 우선 살펴보았다

### IV.2.1 오전 및 오후 혼합고 평가

Fig. 4.2는 Holzworth가 제시한 방식에 따라 산정된 오전 및 오후 혼합고의 월별 변동을 나타낸 것이다. 오전 혼합고는 00GMT에 관측된 고도별 기온자료와 02LST에서 06LST 사이에 나타난 지표최저기온에 5 °C를 더한 기온자료로부터 산출되었으며, 오후 혼합고는 00GMT에 관측된 고도별 기온자료와 12LST에서 16LST 사이에 나타난 지표 최고 기온자료로부터 산출되었다. 오전 혼합고의 월별 변동 특성을 보면 11월부터 증가하여 12월과 1월에는 거의 같은 수준으로 최고값을 보인 후 크게 감소하여 5월에는 364m로서 최저값을 나타냈고 다시 점차 증가하여 9월, 10월중에는 거의 일정해지는 변동 특성을 나타냈다.

오후 혼합고의 전반적인 월별 변동 특성은 오전 혼합고와 비슷한 형태를 보임을 알 수 있다. 11월부터 1월까지 증가하여 1월에 1359m로 최고값을 보인 후 크게 감소하여 5월에 532m로서 최저값을 보이고 여름철과 가을철로 가면서 점차 증가함을 볼 수 있다.

이를 계절별로 평균하여 보면(Fig. 4.3 참고), 오전 혼합고는 봄철이 가장 낮고 여름, 가을, 겨울철로 가면서 높아져 겨울철이 가장 높은 값을 보임을 알 수 있다. 오후 혼합고는 오전 혼합고의 계절별 변화와 같은 변동 형태이지만, 봄과 여름철은 거의 같은 수준의 값을 보임을 알 수 있다.

Fig. 4.2에 나타낸 오전 혼합고와 오후 혼합고의 월별 변동을 비교해 보면, 11월부터 1월까지 변동을 보면 오전 혼합고가 오후 혼합고보다 오히려 높게 나타나고 2월부터 5월까지는 오전 혼합고가 오후 혼합고에 비해 다소 낮아지는 경향을 보이며 6월을 기점으로 다시 오전 혼합고가 높아지는 경향이었으나 9월과 10월에는 다시 반전되는 경향을 보였다. 그리고 계절별로 오전 및 오후 혼합고도는 거의 비슷한 수준임을 볼 수 있다. 이처럼 오전 혼합고와 오후 혼합고가 비슷한

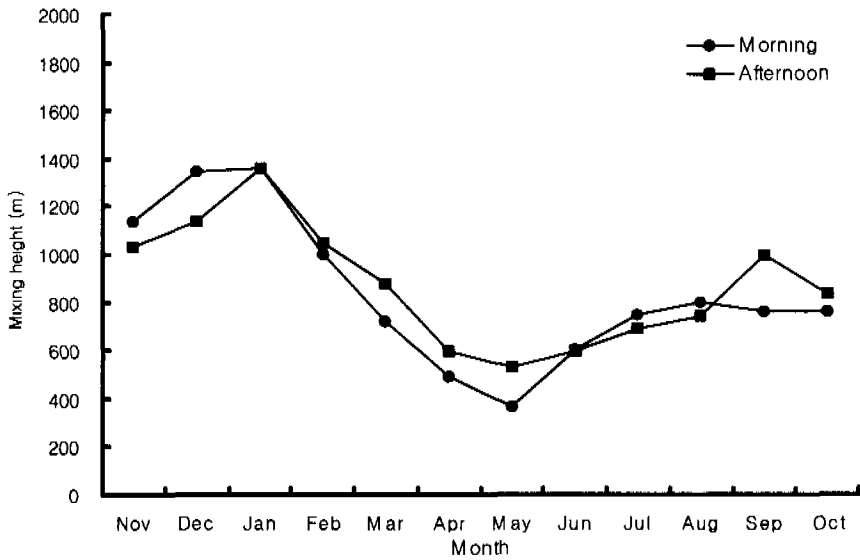


Fig. 4.2. Monthly variations of morning and afternoon mixing heights.

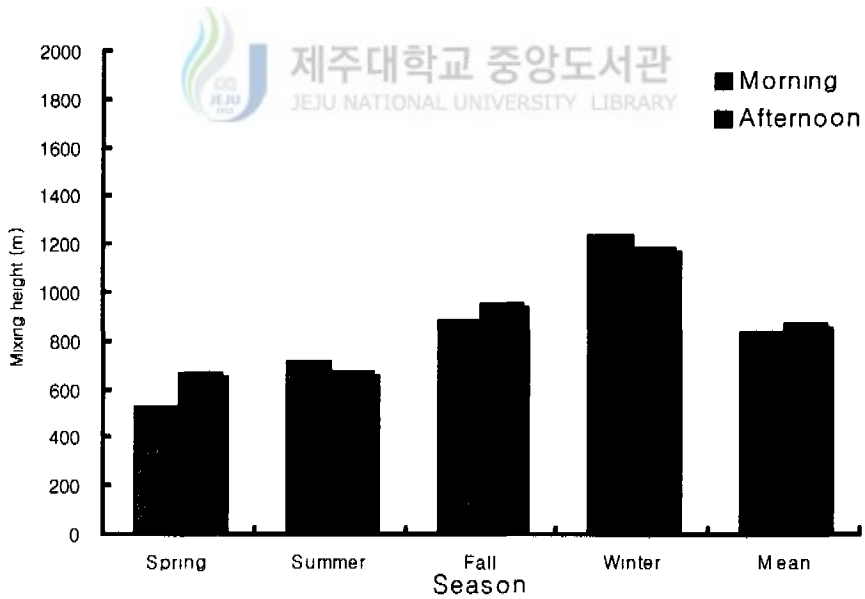


Fig. 4.3 Seasonal morning and afternoon mixing heights.

수준을 보이는데 이는 Holzworth(1972)가 제시한 도시 열섬 효과에 대한 최저 기온 보정값인 5 °C는 제주도의 지형 및 지표 특성 등이 많이 다르기 때문에 제주 지역에 그대로 적용하는 데 무리가 있다고 판단된다. 따라서 이에 대해서는 보다 면밀한 검토가 필요하다고 판단된다.

Fig. 44는 선정된 혼합고를 고도 구간으로 구분하여 각 구간별 출현 빈도를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 전반적으로 오전 혼합고와 오후 혼합고의 발생 빈도는 각 구간별로 비슷한 형태를 보임을 알 수 있다. 봄철에는 대부분이 1000m 이하의 고도에서 발생하면서 오전 혼합고의 경우 200~400m 고도에 출현 빈도가 가장 높으나 오후 혼합고는 600~800m 고도에서 출현 빈도가 가장 많았다. 여름철의 경우에는 오전 혼합고와 오후 혼합고의 고도 구간 출현 빈도는 비슷한 분포를 보이면서 1400m 이상의 고도 구간에서는 전혀 출현하지 않음을 알 수 있다. 가을철에서 겨울철로 가면서 각 구간별 출현이 봄과 여름철에 비해 비교적 골고루 분포함을 알 수 있다. 특히 겨울철의 경우 1400m 이상의 고도 구간에서 출현 빈도가 높아짐을 알 수 있다. 특히 겨울철에 오후 혼합고의 경우 타 계절에 비해 800m 이하의 고도 구간에서는 출현 빈도가 모두 5% 이하로 크게 감소하면서 1000m 이상인 고도 구간에서의 출현 빈도가 증가하고, 특히 2000m 이상의 고도 계급에서의 출현 빈도가 10% 이상으로서 타 계절에 비해 크게 증가함을 알 수 있다.

혼합고를 산정함에 있어서 필요한 고층 기상관측 자료를 수집함에 있어 10초마다 수신된 관측 자료를 활용하는 데는 많은 제약이 따른다. 통상 고층 기상관측자료는 매달 발간되는 고층 기상월보를 통해서 지상 및 표준 등압면 고도(1000mb, 925mb, 800mb, 700mb, 500mb)에서의 기상관측 자료를 입수할 수 있다. 따라서 이런 기초 자료의 차이로 인해 혼합고 산정 결과가 달라질 가능성이 있기 때문에 본 연구에서는 두 가지 형태의 자료를 이용해서 혼합고를 산정하여 그 결과를 Fig.4.5에 나타냈다. 여기서 Type A는 고층 기상 관측시 10초마다(고도 40~50m에 해당) 수신된 고층기상관측자료를 활용한 결과이고 Type B는 표준등압면 고도에서의 자료만을 활용한 결과이다. 그림에서 보면 Type A자료로 이용한 경우의 혼합고가 Type B자료를 이용한 경우보다 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 특히 겨울철과 여름철의 혼합고도의 차이가 다른 계절에 비해 비교적 크게 나타났다. 오전 및 오후 혼합고 모두 기초 자료의 차이에 따른 혼합고도의

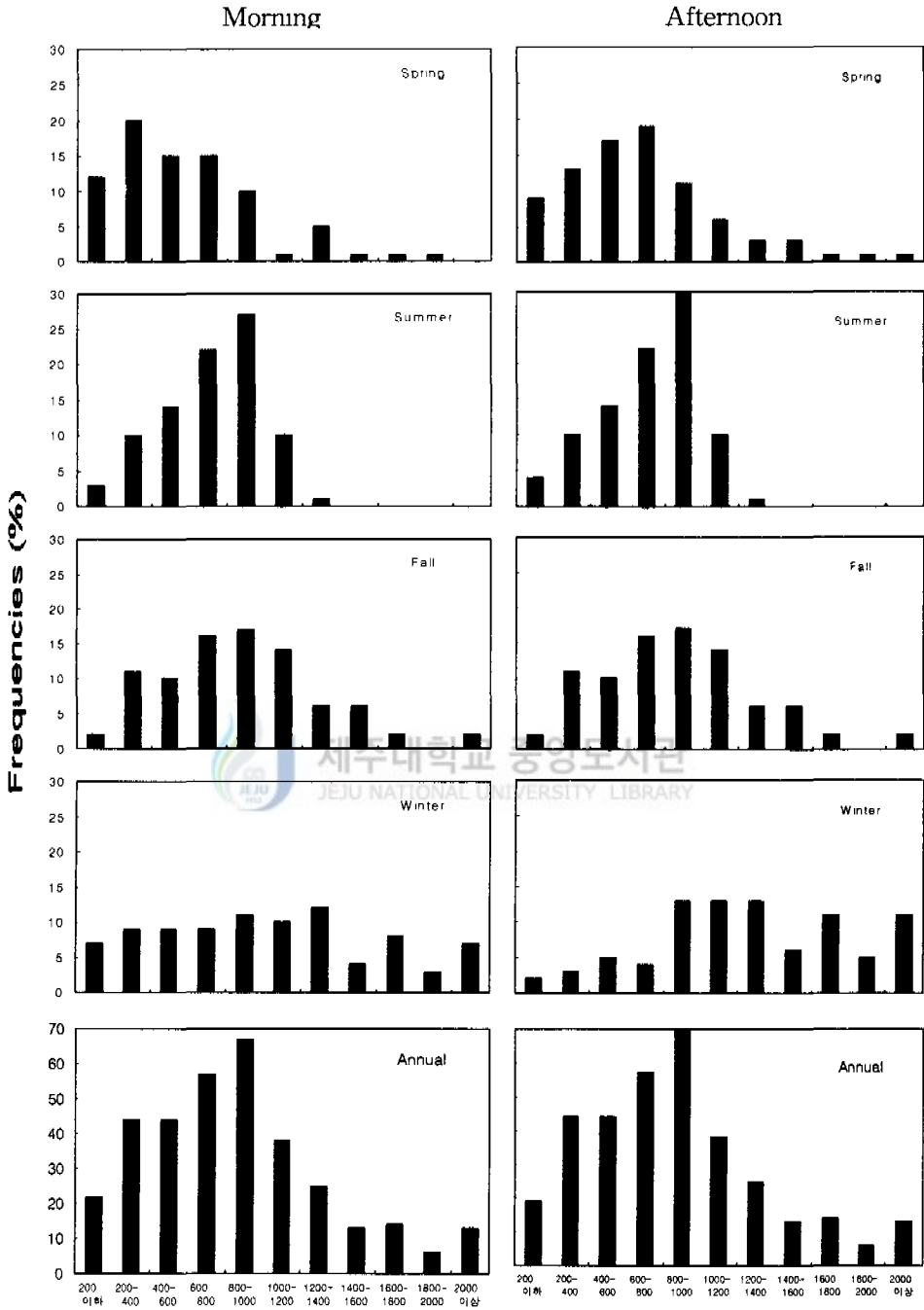


Fig. 4.4 Frequencies of morning and afternoon mixing heights.

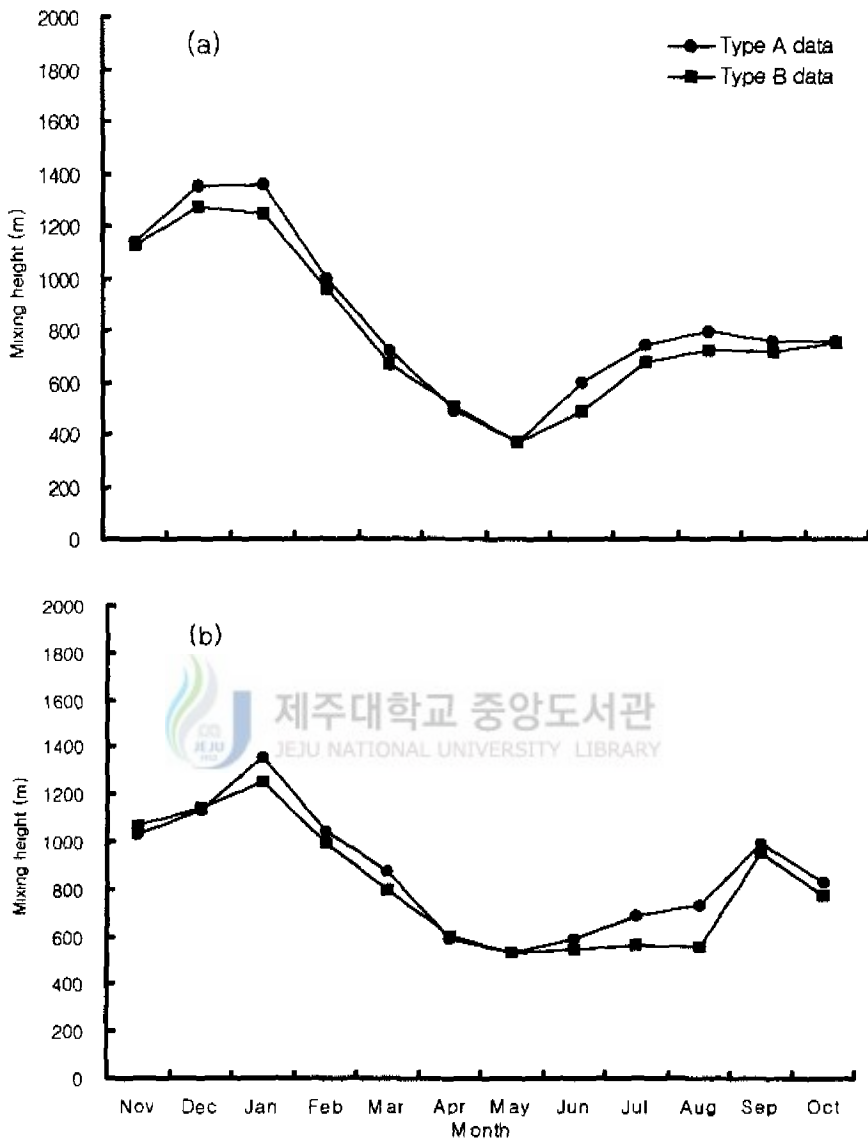


Fig. 4.5. Comparison of mixing heights according to the difference of upper-air data ; (a) morning, (b) afternoon.

차이는 미미하면서 월별 변동 특성 또한 큰 차이를 보기 어려웠다. 이로서 볼 때, Chang 등(1997)은 보다 세분화된 고도별 관측자료를 사용하지 않음으로서 혼합고 산정에 큰 차이를 유발할 수 있다고 우려했으나 이 지적은 크게 염려할 수준이 아닌 것으로 판단된다

#### IV.2.2 고층기상 관측시각에 따른 혼합고 비교

우리나라에서는 매일 00GMT와 12GMT에 고층기상관측을 실시하는데, 00GMT는 09LST로서 일출 이후 2~4 시간이 경과한 시간이므로 지표 역전이 가장 잘 발달되는 일출 직전의 고도별 기온 분포를 대표하지 못할 것이라고 판단된다 따라서 18GMT(03LST)에 관측된 고층 기상관측으로서 혼합고를 산정하여 이를 00GMT에 관측된 자료에서 산정된 혼합고와 비교하여 Fig. 4.6에 나타냈다. 우리나라에서는 고층 기상 관측을 1일 4회 실시하는 경우는 주로 6월과 7월로 한정되어 있다. 본 연구 대상 기간 중 관측일수가 6월에는 6회 7월에는 8회에 지나지 않아 신뢰성을 부여하기에 무리가 있지만 그림에서 6월과 7월에 18GMT관측 자료와 00GMT 관측자료로서 계산된 혼합고 자료의 차이를 비교하면, 오전 혼합고의 경우 6월에 237m, 7월에 8m의 차이를 보이고 오후 혼합고의 경우 6월에 124m, 7월에 56m의 차이를 보임을 알 수 있다. 이로서 볼 때, 18GMT 자료와 00GMT 자료간의 차이가 오후 혼합고 산출시 보다는 오전 혼합고 산출시에 더 큰 편차를 보임을 알 수 있다. 이런 경향은 Chang 등(1997)의 결과와도 유사한 경향임을 알 수 있다. 그렇지만 본 연구에서 활용한 6월의 18GMT 자료는 관측 당일에 강수 현상이 있었음을 고려 할 때 불확실성이 내재되어 있다고 판단되므로 이에 대한 면밀한 관측과 검토가 필요할 것이다.

#### IV.2.3. 대기 환기량 평가

혼합고와 풍속은 여러 지역에서 기후학적 관점에서 대기오염 잠재성(air pollution potential)을 평가하는데 큰 도움이 된다. 이런 대기오염 잠재성은 오염 물질의 분산과 관련지을 때는 혼합고의 개별적 개념과 풍속 뿐 아니라 풍속과 오후 혼합고로 계산되는 대기 환기에 기초를 두게 된다. 따라서 본 연구에서는

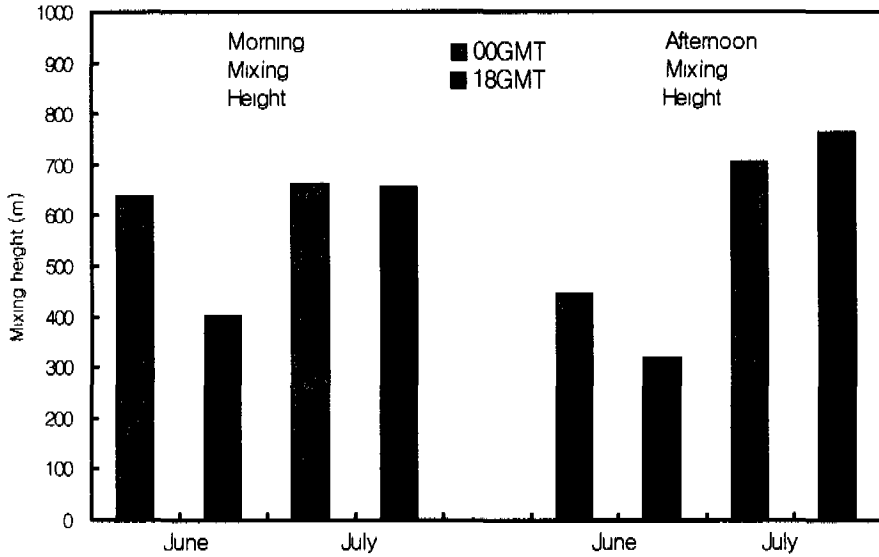


Fig 46. The effect of application of 18GMT upper air data on the estimation of mixing height.

오후 풍속과 오후 혼합고를 각 계급별로 분류하여 Table 4.1에 나타냈다. Table 4.1에서 보면 환기량이  $6000\text{m}^3/\text{s}$  이하인 일수를 산출해 보면 겨울철에 15%, 봄철에 51%, 여름철과 가을철에 42%로 나타났다. 그리고  $4000\text{m}^3/\text{s}$  이하인 일수는 겨울철에 6.8%, 봄철에 28.6%, 여름철에 14%, 가을철에 16%로서 연간 16.2%였다. 또한 대기의 분산 상태가 아주 나쁘게 평가될 수 있는  $2000\text{m}^3/\text{s}$  이하인 경우는 연간 3.8%인 13일로 나타났다. 제주 지역 대기의 오염물질 분산 능력은 전반적으로 아주 양호하다고 평가할 수 있다.

혼합고와 평균 풍속을 토대로 대기 환기량을 산출한 결과를 Table 4.2에 나타냈다. 표에서 보듯이 봄철의 환기량이 가장 낮고 월별로는 5월의 환기량이 가장 낮게 평가되었다. 그리고 겨울철의 환기량이 가장 높고, 그 중에서도 1월의 환기량이 가장 높은 것으로 평가되었다. 그리고 혼합고 측정 당일 강우 현상이 있었던 날의 환기량이 그렇지 않은 경우에 비해 대체로 크게 나타남을 알 수 있다.



Table 4.1. Rank of atmospheric ventilation

(unit : day)

Season	Averaged wind speed (m/s)	Mixing height (m)				
		≤500	≤1000	<1500	≤2000	>2000
Winter	≤2					0
	≤4			2	1	0
	<6		2	7	3	0
	≤8		8	7	2	0
	≤10	2	7	6	0	1
	≤12	1	2	2	2	0
	>12	0	6	10	6	5
Spring	≤2					0
	≤4			0	0	0
	≤6		11	3	0	0
	≤8		10	3	1	0
	≤10	3	5	0	0	0
	≤12	5	5	4	1	0
	>12	3	4	1	0	1
Summer	≤2					0
	≤4			5	0	0
	≤6			0	0	0
	<8		8	1	0	0
	≤10	6	14	6	0	0
	≤12	2	9	2	0	0
	>12	1	12	1	0	0
Fall	≤2					0
	≤4			6	2	0
	≤6		11	7	3	0
	≤8		4	5	0	0
	≤10	2	5	3	0	1
	≤12	1	4	3	1	0
	>12	1	3	2	3	0
Annual	≤2					0
	≤4			13	3	0
	≤6		36	17	6	0
	≤8		30	16	3	0
	≤10	13	31	15	0	2
	≤12	9	20	11	4	0
	>12	5	25	14	9	6

Table 4.2. Estimation of atmospheric ventilation

(unit : m<sup>3</sup>/s)

Year	Morning			Afternoon		
	All	Precipitation	Non-Precipitation	All	Precipitation	Non-Precipitation
Jan	16033.6	24134.9	11691.9	14589.27	17456.6	12753.2
Feb.	10944.9	18846.2	14553.2	11606.08	15637.3	11047.7
Mar	8567.3	5358.2	11916.5	8030.22	9679.0	7404.4
Apr.	4093.9	10681.9	8229.0	4695.9	2621.1	5033.2
May.	2855.0	4143.8	4070.4	2877.7	2703.1	2803.6
Jun.	4008.5	4329.1	2653.9	4157.1	4825.5	3789.2
Jul.	7109.7	5927.3	3241.0	6229.0	6438.6	5959.7
Aug.	6537.9	7397.9	7078.9	5813.1	4450.4	5710.5
Sep.	6033.1	6687.6	6527.6	6880.1	7385.6	6524.2
Oct.	5618.2	2481.2	6459.4	5221.1	5564.7	4981.0
Nov.	11608.2	11409.3	4950.0	9064.8	7278.7	9140.3
Dec.	13351.0	9976.7	11962.9	10129.8	14794.9	8664.1
Mean	8063.4	9281.1	7777.9	7441.16	8236.3	6984.2
Spring	5172.0	6728.0	8072.0	5201.3	5001.1	5080.4
Summer	5885.4	5884.6	4324.6	5399.7	5238.2	5153.1
Fall	7753.2	6859.4	5979.0	7055.3	6743.0	6881.8
Winter	13443.1	17652.6	12736.0	12108.4	15962.9	10821.6

#### IV.2.4. 사례 분석

오전 및 오후 혼합고가 모두 2000m 이상으로 높게 평가되는 경우(case H)와 오전 및 오후 혼합고가 출현하지 않거나 모두 낮게 평가되는 경우(case L)에 대해서 고도별 기상 요소에 대한 사례 분석을 실시하였다.

#### 가. Case H

오전 및 오후 혼합고가 2000m 이상 모두 높게 평가된 날의 고도별 온위, 풍속, 혼합비 분포를 Fig. 4.7과 Appendix C 에 나타냈다. 이런 경우는 겨울철이 대부분이고 지상에서 혼합고도(2100~2200m 범위)까지의 온위 변화가 거의 없고 그 이상의 고도에서 기온의 역전이 나타남을 알 수 있다. 이런 경우 고도별 풍속의 변화가 다른 날에 비해 비교적 작으며 온위의 고도별 변동과 비슷한 형태를 보인다. 그리고 혼합비 역시 혼합고도까지 비교적 일정하게 유지되고 그 이상의 고도에서는 크게 감소하는 형태를 보임을 알 수가 있다. 이로써 보면 혼합층 내에서 상하의 혼합이 원활히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

#### 나. Case L

오전 및 오후 혼합고가 모두 아주 낮게 또는 산출되지 않는 것으로 평가된 날의 고도별 온위, 풍속, 혼합비 분포를 Fig. 4.8과 Appendix D 에 나타냈다. 이런 경우는 봄철이 대부분이 집중되고 있는데, 지표로부터 고도가 증가함에 따라 온위가 점진적으로 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이런 경우 고도별 풍속 분포를 보면 지표면 근처에서 고도별 풍속 변화가 심하게 나타날 뿐 아니라 전체 대기에서 고도별 풍속 변동이 심하게 나타남을 알 수 있다. 또한 혼합비의 고도별 변화를 보면 지면 근처에서는 고도별 혼합비 변화가 대체로 심하지만 전반적으로 고도 증가에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 이처럼 오전 및 오후 혼합고도가 전반적으로 낮을 경우는 대개 00GMT 전후에 짙은 안개가 관측된 날이 대부분이었다. 안개 현상이 없는 경우(3월 29일)에는 지표 부근에서 혼합비는 고도 증가에 따라 급격히 감소함을 볼 수 있었다.

### IV.3. 제주시 지역의 혼합고 산출

제주 지역에서 가장 도시화된 제주시 지역의 혼합고를 산정하기 위해 제주시 지역에서 관측된 지상기온자료와 제주시 기상 관측소로부터 약 37km 떨어진 제주 서부 시골 지역에 위치한 고산에서 00GMT에 관측된 고층기상관측 자료를 토대로 오전 및 오후 혼합고를 산정한 결과를 Fig. 4.9~Fig. 4.12에 나타냈다.

Fig. 4.9는 제주시 지역의 지표 최고 기온과 고산에서 관측된 고층기상관측자

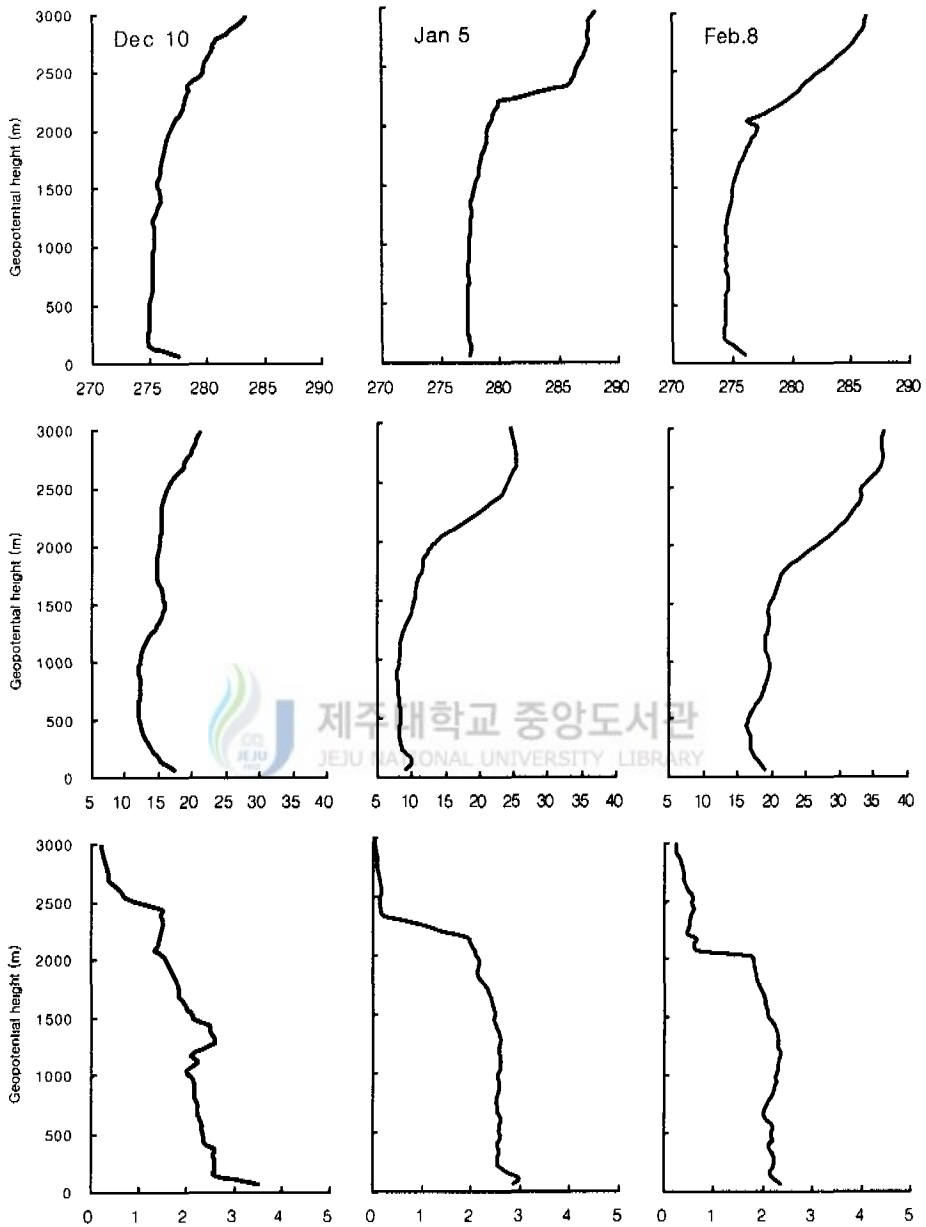


Fig. 4.7. Typical profiles of potential temperature (upper), wind speed (middle), and mixing ratio (low) when both of the morning and afternoon mixing heights are high

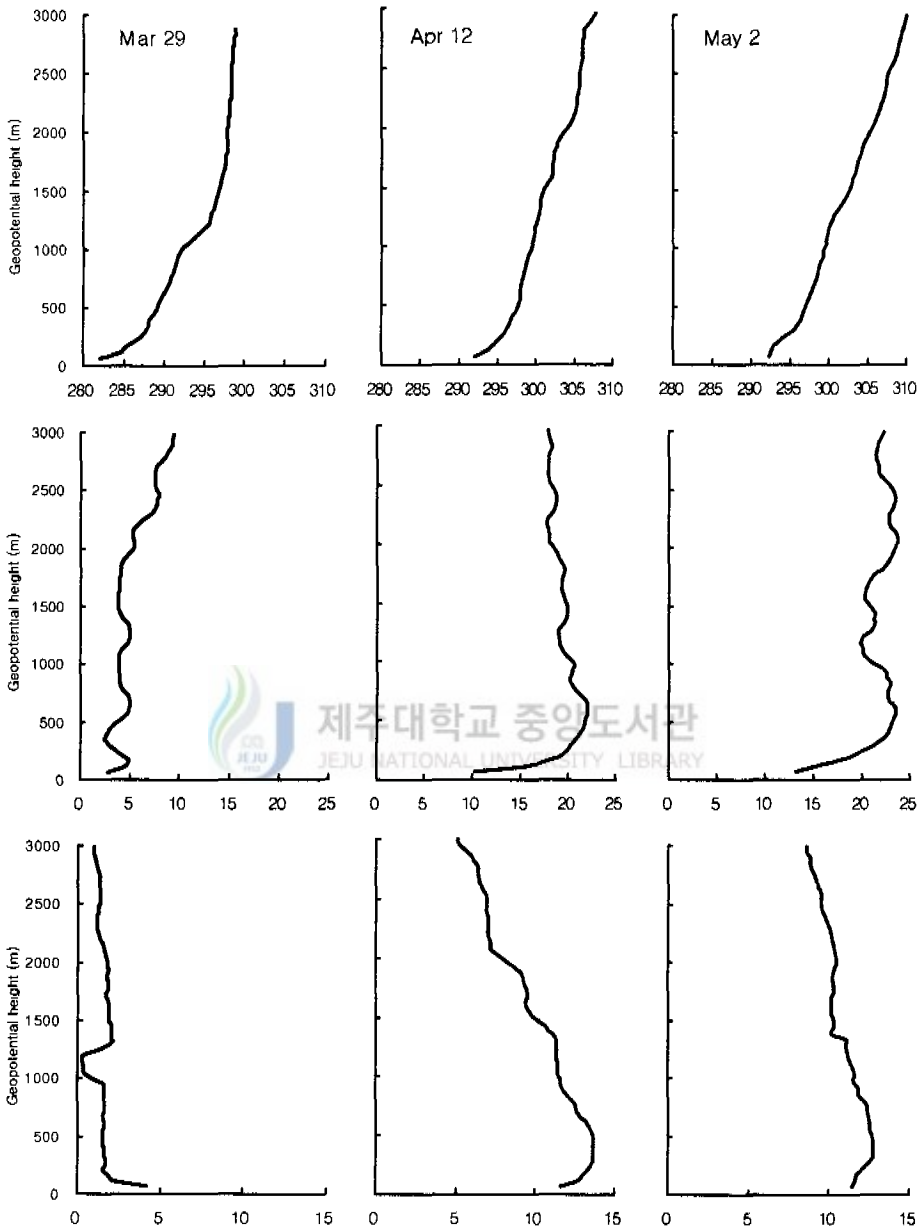


Fig. 48 Typical profiles of potential temperature (upper), wind speed (middle), and mixing ratio (low) when both of the morning and afternoon mixing heights are extremely low.

료를 이용하여 오후 혼합고를 산정하여 월별로 나타낸 그림이다. 제주시 지역 혼합고는 11월, 12월, 1월 사이에 비교적 큰 변동을 보이며 1월에 최고값(1200m)을 보인 후 점차 감소하여 5월에 최저값을 보이고, 다시 증가하여 8월에는 다시 정점(1100m 수준)을 보인 후 다시 감소하고 늦가을부터 다시 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이를 계절별로 평균하여 고산지역 혼합고와 비교해 보면(Fig. 4.10참고), 봄과 여름은 제주시 지역이 고산지역보다는 다소 낮게 평가되고, 가을과 겨울에는 그 반대의 경향을 나타냄을 알 수 있다. 그렇지만 연간으로 보면 이들 두 지역의 혼합고는 거의 같은 수준임을 알 수 있다.

Fig. 4.11는 제주시지역에서 관측된 지표 최저기온자료를 이용하여 오전 혼합고를 산출한 결과를 월별로 나타낸 것이다. 여기서 오전 혼합고 산정시에는 지표 최저 기온에 5 °C를 더하지 않았다 그림에서 보면 11월에서 1월 사이에는 오전 혼합고가 큰 폭으로 증가하여 1월에 최고값을 보인 후 다시 큰 폭으로 감소하여 6월에 최소값을 보인 후 다시 증가하는 경향을 보였다. Holzworth(1972)는 고층 기상관측이 교외 또는 시골지역에서 이루어지는 경우에 열섬의 영향을 고려하기 위해 지표최저기온에 5 °C를 더해주는 방법을 제시한 바 있다. 그렇지만 열섬의 효과는 지표면 특성이나 도시의 규모 등 여러 인자가 복잡하게 관련되어 있어 지역에 따라서 달리 적용할 필요가 있다(Chang, 1997). 따라서 본 연구에서는 우선 오전 혼합고 산정시 제주시와 고산지역에서 02~06LST 사이에 나타난 지표 최저 기온의 차이를 산출하여 Fig. 4.12에 나타냈다. 그림에서 두 지역에 최저 기온의 차이를 보면 11월과 12월에는 제주시지역의 지표 최저 기온이 고산지역보다 낮은 것으로 나타났지만 그 외의 달에는 제주시의 최저 기온이 고산지역보다 평균 1 °C정도 높은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 제주시지역에서 도시와 시골지역 사이의 최저 기온은 1 °C정도의 차이를 보이는 것으로 판단하였다.

Table 4.3에는 열섬 효과를 고려하기 위한 온도 보정값을 달리하여 적용했을 때 각 경우에 따라 오전 혼합고가 산출되는 일수와 산출되지 못한 일수를 정리하여 나타냈다. 표에서 Case A는 제주시에서 관측된 지표 최저 기온값을 보정없이 그대로 적용한 경우이고, Case B는 고산에서 관측된 지표 최저 기온값을 보정없이 적용한 경우, Case C는 고산에서의 지표 최저 기온에 1 °C를 더한 경우, 끝으로 Case D는 고산에서의 지표 최저 기온에 Holzworth 방식을 따라 5 °C를 더하여 적용한 경우이다 Table 4.3에서 보면 Case A와 Case C의 경우에는

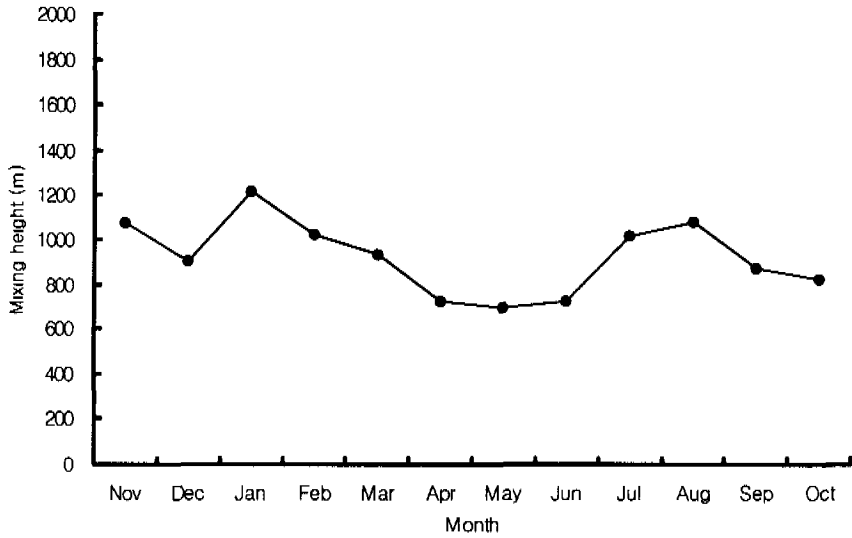


Fig. 4.9. Monthly variation of afternoon mixing height estimated at Cheju city.

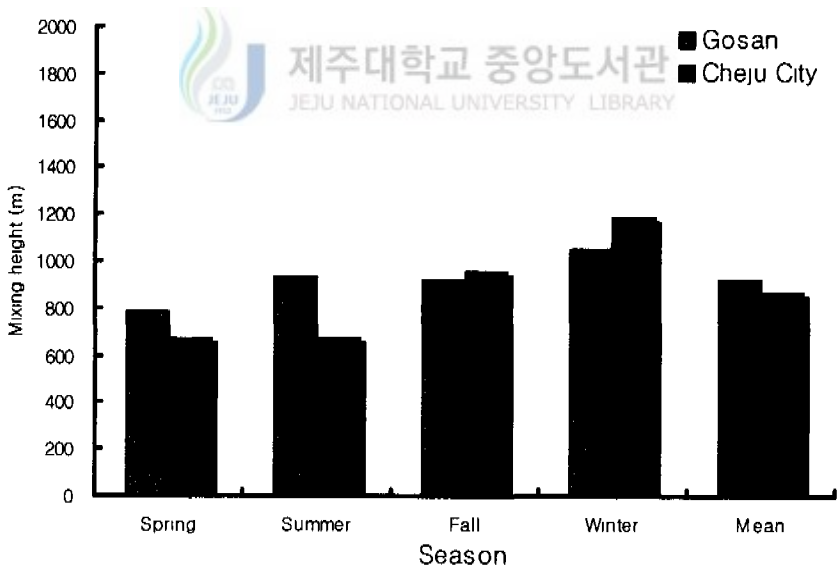


Fig. 4.10. Comparison of seasonal afternoon mixing heights between Cheju city and Gosan area.

Table 4.3. Number of days with and without morning mixing height occurrence

Month	Days of each case							
	Case A		Case B		Case C		Case D	
	HT	M	HT	M	HT	M	HT	M
Nov.	9	19	8	20	14	14	28	0
Dec.	10	21	11	20	17	14	30	1
Jan.	14	16	0	30	9	21	29	1
Feb.	21	16	0	28	8	20	27	1
Mar.	11	19	0	30	9	21	29	1
Apr.	9	19	0	28	9	19	25	3
May.	5	25	0	30	3	27	25	5
Jun.	7	23	0	30	11	19	28	0
Jul.	13	18	3	28	19	12	31	0
Aug.	17	14	0	31	4	27	31	0
Sep.	4	25	0	29	6	23	28	1
Oct.	5	24	0	29	5	24	29	0

HT Morning mixing height can be estimated

M Morning mixing height can not be estimated

Case A Application of  $T_{min}$  observed at Cheju City without temperature correction

Case B Application of  $T_{min}$  observed at Gosan without temperature correction

Case C Application of  $T_{min}+1^{\circ}\text{C}$  using data observed at Gosan

Case D Application of  $T_{min}+5^{\circ}\text{C}$  using data observed at Gosan

Case B와 Case D와는 아주 다르게 혼합고 산정 일수와 산정 불가 일수가 거의 비슷하게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 4.13에는 Case A와 Case C의 경우에 대해 산정된 오전 혼합고만을 기준으로 월별 평균하여 정리하였다. 산정된 월별 평균 오전 혼합고를 비교해 보면, 1월, 3월, 10월을 제외하고는 두 경우 모두 비슷한 혼합고 수준을 보임을 알 수 있다 이를 계절별로 보면(Fig. 4.14 참고), 겨울철을 제외한 타 계절에는 거의 비슷한 수준을 보임을 알 수 있다. 겨울철에 오전 혼합고가 다소 큰 차이를 보이는 것은 해양의 역할과 제주도 지역의 인공열 방출 효과 등에 따른 도시와 시골간의 열 수지의 차이 때문으로 판단된다. 이런 결과로만 볼 때, 고산에서 관측한 고층 기상 자료를 이용하여 제주도 지역 오전 혼합고를 산정하고자 할 경우에 열섬 효과는  $1^{\circ}\text{C}$  정도를 고려함이 바람직하다고 판단되지만, 제주지역 열섬 효과에 관한 보다 세심한 검토는 이루어져야 할 것이다.



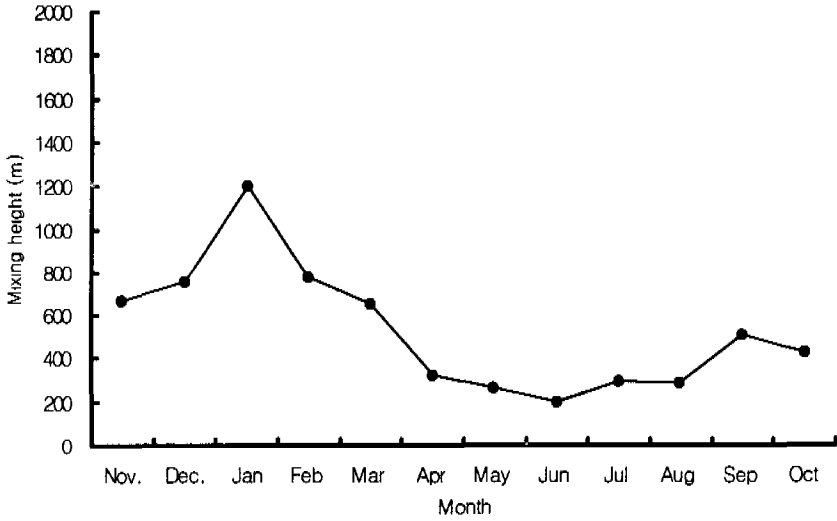


Fig. 4.11. Monthly variation of morning mixing height estimated at Cheju city.

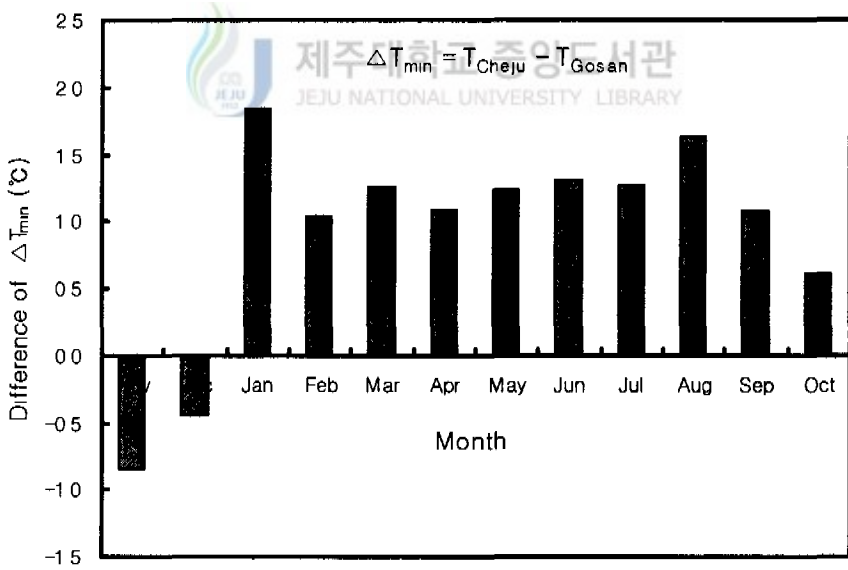


Fig. 4.12. Monthly difference of surface minimum temperatures between Chuju city and Gosan area.

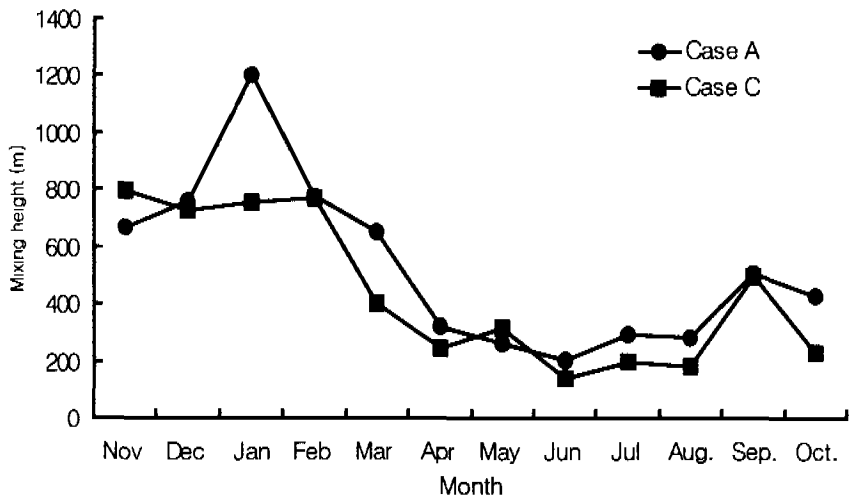


Fig. 4.13. Comparison of case A and case C shown in Table 4.3.

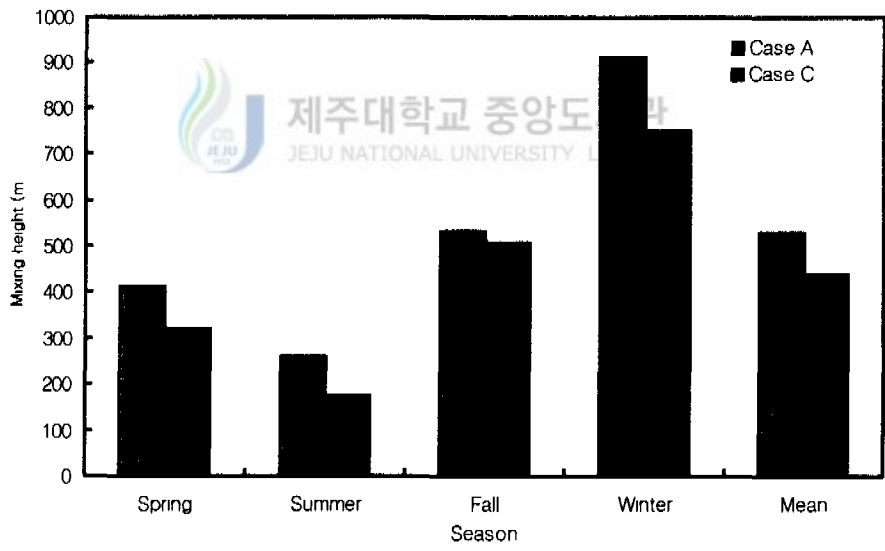


Fig. 4.14. Comparison of seasonal-averaged morning mixing heights for case A and case C shown in Table 4.3.

## V. 결 론

1997년 11월부터 1998년 10월까지 제주도 고산에서 관측된 고층기상관측자료와 지상관측자료, 제주시의 지상관측자료를 이용하여 Holzworth방식에 준한 제주지역 혼합고를 산출하여 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Holzworth가 제시한 방법을 적용하여 산출된 오전 혼합고와 오후 혼합고는 월별 계절별 변동형태 뿐 아니라 혼합고도도 거의 비슷한 수준을 보여, 오전 혼합고가 과대 평가되고 있다고 생각된다. 이로서 보면 제주도의 지형적인 특성이 Holzworth가 제시한 도시 열섬 효과에 대한 기온 보정값(5 ℃)을 그대로 적용하기에는 무리가 있다고 판단된다.

2. 오전 혼합고와 오후 혼합고의 고도별 출현 빈도는 각 계급별로 비슷한 형태를 보였다. 계절별로 보면 봄철에는 대부분이 1000m 이하에서 출현하고, 여름철에는 1400m 이상의 고도 계급에서는 전혀 출현하지 않았다. 그리고 가을과 겨울철에는 봄철과 여름철에 비해 각 고도 계급에서 비교적 골고루 출현하는 경향을 나타냈다.

3. 산출된 혼합고와 평균 풍속을 토대로 산출된 대기 환기량은 월별로 5월이 가장 낮았고 1월이 가장 높게 나타났으며, 대기 분산상태가 아주 나쁘다고 판단되는 2000m/s 의 대기 환기량을 보인 일 수는 연간 3.8 %인 13일 정도이지만, 연간 평균 환기량이 7500m<sup>3</sup>/s 수준인 것으로 나타나 제주 지역 대기의 오염물질 분산 능력은 전반적으로 아주 양호하다고 평가할 수 있었다

4. 오전 및 오후 혼합고가 2000m 이상으로 높게 산정된 날은 주로 겨울철에 나타났으며, 이 경우 혼합고도 내에서 온위 및 풍속의 고도 변화가 작았고 혼합비 역시 거의 일정하게 유지되는 형태를 보이는데 주로 겨울철에 나타났다.

반면에 두 혼합고가 모두 아주 낮게 또는 산출하지 않는 날은 주로 봄철에 집중되어 있으며 고도별 온위는 점진적으로 증가되는 경향을 보였고 풍속은 고도별 변동이 비교적 심하였으며 혼합비는 고도에 따라 감소하는 경향을 보였다.

5. 도시지역인 제주시의 혼합고를 평가함에 있어서 시골지역에서 관측된 고층 기상자료를 활용하고자 할 경우 열섬효과를 보정하기 위한 기온 보정값은 Holzworth가 제시한 값보다는 훨씬 낮은 1 ℃정도가 적절하다고 판단되나, 이에 대한 종합적인 검토는 있어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- 최진수, 백성옥, 1998, 오산, 포항, 광주지역 일 최대혼합고 추정, 한국대기보전학회지, 14(4), 379-385.
- 이만근, 1990, 국내 대기혼합고의 지역별, 계절별 변화 추이에 관한 연구, 석사학위논문, 영남대학교, 34pp.
- 이종범, 1991, 중부지방 각지의 대기오염 잠재력에 관한 연구, 대기보전학회지, 7(1), 41-47.
- 한영호, 1993, 미기상학, 지구문화사, 86-100
- 홍성길, 1998, 기상분석과 일기예보(개정판), 교학연구사, pp 101-227.
- 김유근, 문승의, 안중배, 1997, 대기혼합층 모사를 위한 1차원 수치모형 : 득량만에서의 적용, 한국환경과학회지, 6(5), 425-435.
- 신재현, 1994, 오산, 포항, 광주지역 일 최대혼합고 추정, 석사학위논문, 영남대학교, 38pp.
- 윤일희, 1998, 대기오염기상학, 시그마프레스, 33-38.
- Aron, R. 1983. Mixing height - an inconsistent indicator of potential air pollution concentrations, Atmos Environment, 17, 2193-2197.
- Carson, D.J., 1973, The development of a dry inversion-capped convectively unstable boundary layer, Quart. J. R. Met Soc., 99, 450-467.
- Chang, Y S., Brown, D.F., Ghim, Y.S. 1997. Estimation of Mixing Heights Using the Holzworth Method in Korea, KAPRA, 13(5), 35-46.
- Dobbins, R.A, 1979, Atmospheric motion and air pollution, John Wiley & Sons, 95-139, 283-293.
- Driedonks, A.G.M., 1982, Models and observations of the growth of the atmospheric boundary layer, Boundary Layer Meteorology , 23, 283-306.

- EPA, 1981, User's Manual for Mixing Height Computer Program, EPA-450/4-81-022, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, N.C.
- EPA, 1990, User's Guide for the urban air shed model, PB91-131227, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, N.C.
- Holzworth, G.C., 1967, Mixing Depths, in Wind Speeds and Air Pollution Potential for Selected Locations in the United States, J. Appl. Meteorol., 6, 1039-1044.
- Holzworth, G.C., 1972, Mixing Heights, Wind Speeds and Potential Throughout the Contiguous United States, Office of Air Programs Pub. No. AP-101, Environment Protection Agency, Research Triangle Park, N.C.
- Lee, C.B. 1986. Simple model and climatological aspects of the structure of the convective boundary layer, Atmos. Environment, 20, 705-714.
- Paumier, J.O. and J.S. Irwin, 1991, Comparison of modified Carson and EPA mixing height estimates using data from five field experiment, Seventh Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology with AWMA, New Orleans, La., 282-285.
- Perry, S.G., D.J. Burns, L.H. Adams, R.J. Paine, M.G. Dennis, M.T. Mills, D.G. Strimaitis, R.J. Yamartino, and E.M. Insley, 1989, User's Guide to the Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations(CTDMPLUS). Volume I: Model Descriptions and User Instructions, U.S. EPA, EPA/600/8-89-041, Research Triangle Park, N.C.
- Tennekes, H., 1973, A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer, J Atmos. Sci., 30, 558-567.

Appendix A. Example of received data from Radio sonde (Type A data)

Dec. 1. 1997; 00GMT.

min	s	hPa	gpm	deg C	%	deg C	Auto-Oper- matic	ator	min	s	hPa	gpm	m	m/s	deg	Auto-Oper- matic	ator	
0	0	1016.5	72	10.8	53	1.8	TU	TU	0	0	1016.5	72	////	12.2	20	dfv	dfv	
0	10	1010.8	119	9.6	49	-0.6			0	10	1010.8	119	////	13.2	17	dv	dv	
0	20	1005.8	159	9.3	49	-0.9			0	20	1005.8	159	////	13.4	16			
0	30	1000.9	200	9.0	49	-1.1			0	30	1000.9	200	////	13.6	16			
0	40	995.8	242	8.7	51	-0.9			0	40	995.8	242	////	13.8	15			
0	50	990.5	286	8.2	53	-0.8			0	50	990.5	286	////	13.8	16			
1	0	984.7	335	7.7	56	-0.5			1	0	984.7	335	////	13.8	17			
1	10	979.2	381	7.2	59	-0.3			1	10	979.2	381	////	13.8	18			
1	20	973.7	427	6.8	59	-0.6			1	20	973.7	427	////	13.7	19			
1	30	968.5	471	6.4	60	-0.8			1	30	968.5	471	////	13.6	18			
1	40	962.8	519	6.0	62	-0.7			1	40	962.8	519	////	13.3	18			
1	50	957.4	565	5.5	62	-1.2	TU	TU	1	50	957.4	565	////	12.9	16			
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
9	50	700.3	3076	-4.4	46	-14.3			9	50	700.3	3076	////	7.7	36			
10	0	695.2	3133	-4.3	39	-16.2			10	0	695.2	3133	////	7.5	39			
10	10	690.1	3191	-4.3	43	-15.0	TU	TU	10	10	690.1	3191	////	13.2	17			
10	20	685.3	3247	-4.6	47	-14.2			10	20	685.3	3247	////	13.4	16			
10	30	680.3	3305	-5.0	50	-13.8			10	30	680.3	3305	////	13.6	16			
10	40	675.3	3362	-5.5	51	-14.0			10	40	675.3	3362	////	13.8	15			
10	50	670.5	3418	-6.0	52	-14.3	U	U	10	50	670.5	3418	////	13.8	16			
11	0	665.8	3473	-6.5	65	-12.0	U	U	11	0	665.8	3473	////	13.8	17			
11	10	661.3	3526	-7.0	84	-9.2	U	U	11	10	661.3	3526	////	13.8	18			
11	20	656.8	3580	-7.3	85	-9.4			11	20	656.8	3580	////	13.7	19			
11	30	652.4	3631	-7.7	86	-9.6			11	30	652.4	3631	////	13.6	18			
11	40	648.0	3684	-8.0	87	-9.8			11	40	648.0	3684	////	13.3	18			
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
15	40	544.9	5025	-12.0	12	-35.8			15	40	544.9	5025	////	24.8	260			
15	50	540.8	5082	-12.4	12	-36.1			15	50	540.8	5082	////	25.2	259			
16	0	536.5	5142	-12.9	12	-36.5	TU	TU	16	0	536.5	5142	////	25.7	257			
16	10	532.4	5202	-13.3	14	-35.3			16	10	532.4	5202	////	26.3	257			
16	20	528.4	5259	-13.7	14	-35.6			16	20	528.4	5259	////	26.9	256			
16	30	524.4	5317	-14.1	13	-36.7			16	30	524.4	5317	////	27.4	255			
16	40	520.5	5372	-14.5	12	-37.8			16	40	520.5	5372	////	27.9	255			
16	50	516.9	5426	-14.9	12	-38.1			16	50	516.9	5426	////	28.3	254			
17	0	513.1	5481	-15.3	11	-39.3			17	0	513.1	5481	////	28.6	254			
17	10	509.4	5536	-16.0	15	-36.8			17	10	509.4	5536	////	29.0	253			
17	20	505.6	5591	-16.5	15	-37.2			17	20	505.6	5591	////	29.4	253			
17	30	502.0	5646	-16.9	15	-37.6			17	30	502.0	5646	////	29.9	252			
:	:	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Appendix B. Example of data format in Monthly Upper Air Report (Type B data)

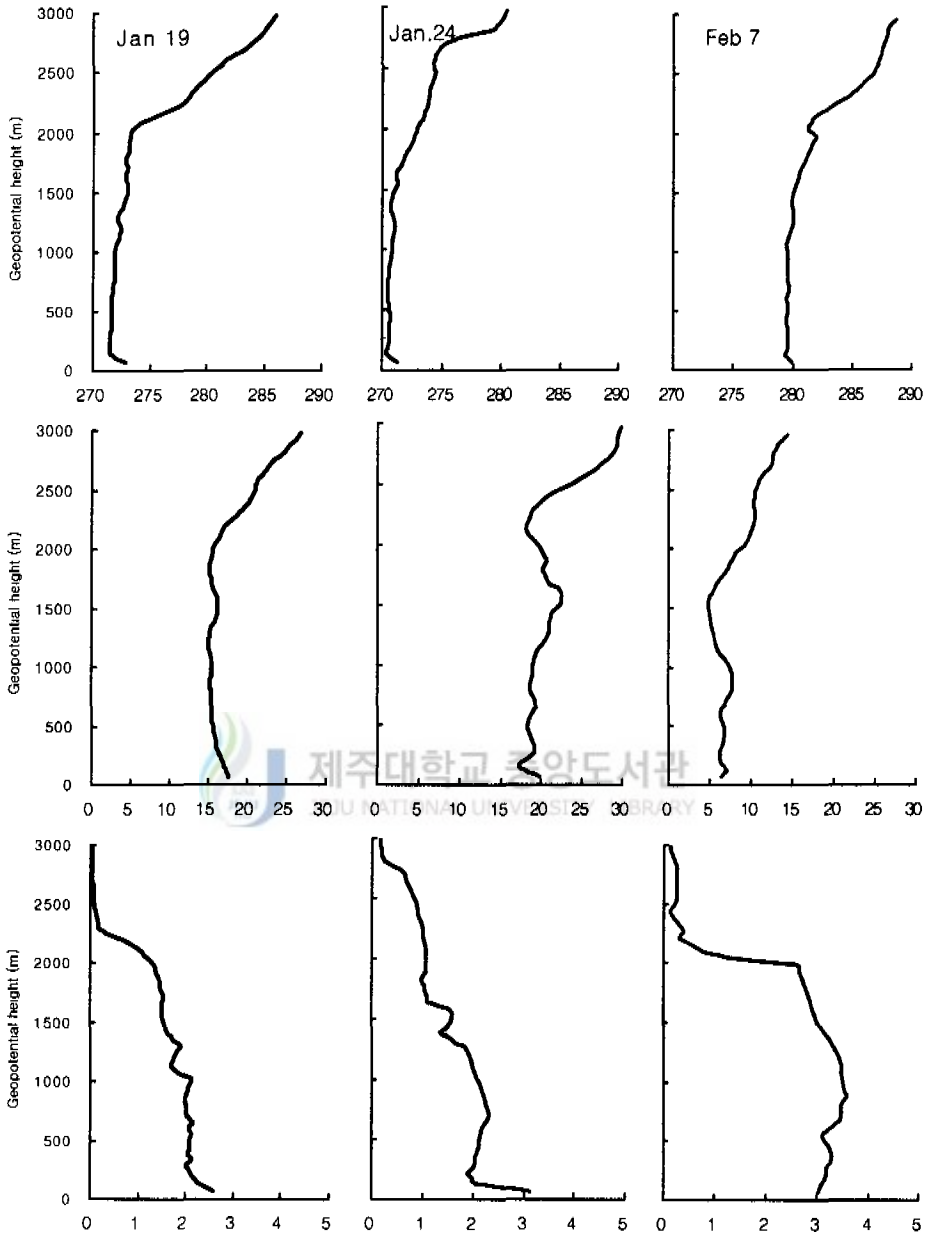
47185 제주 CHEJU OOUT

Dec. 1997; 00GMT.

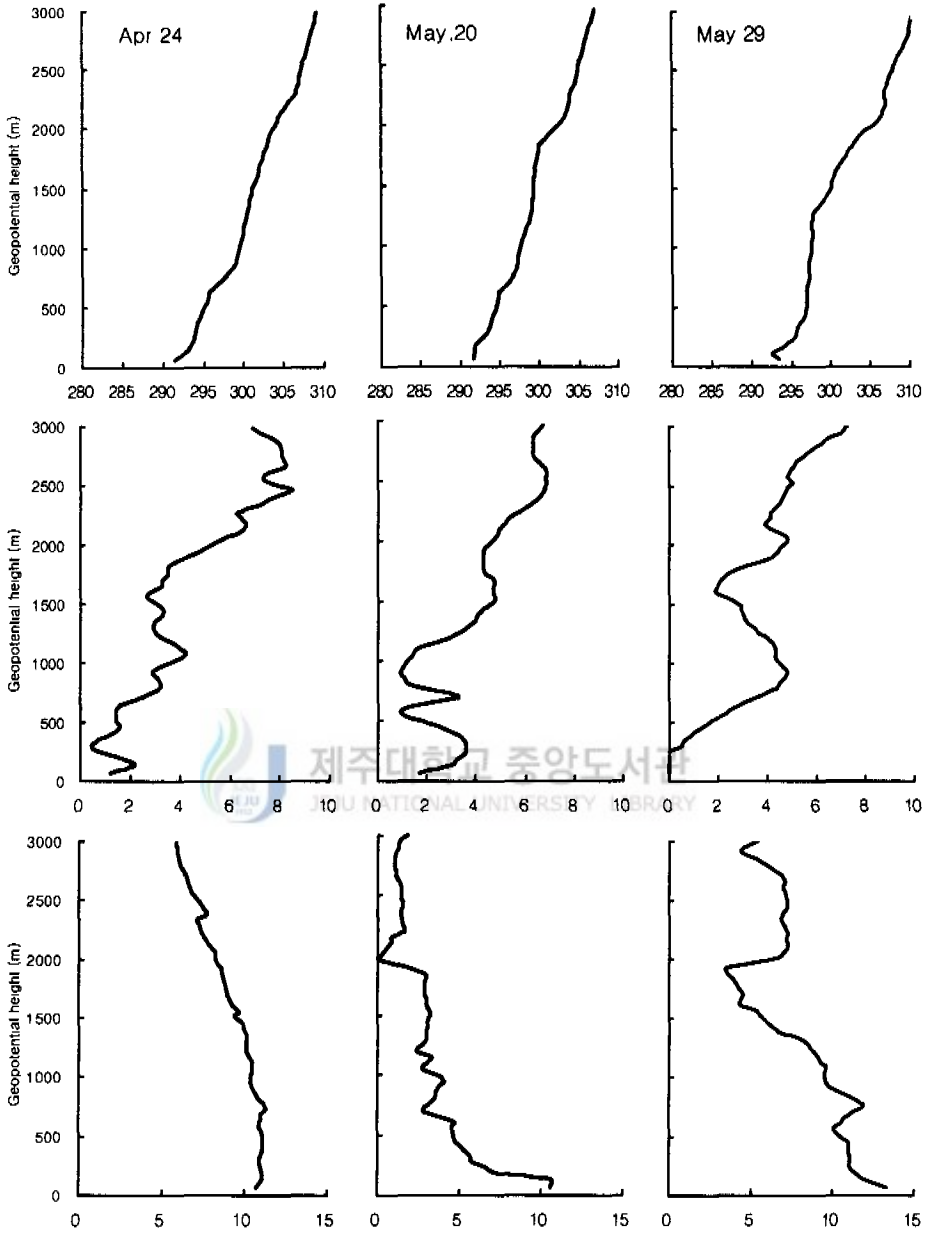
날짜 Date	지상 SURFACE					1000 hPa					925 hPa				
	기압 P	기온 T	이슬점 Td	풍향 d	풍속 v	고도 gh	기온 T	이슬점 Td	풍향 d	풍속 v	고도 gh	기온 T	이슬점 Td	풍향 d	풍속 v
1	1017	108	18	20	12	208	88	-12	15	13	847	64	-216	5	10
2	1021	60	-20	340	16	239	32	-58	315	18	863	-29	-89	320	16
3	1027	40	-40	50	8	282	4	-44	15	12	902	-51	-62	360	12
4	1026	42	-8	70	8	280	32	3	25	8	909	-1	-23	200	6
5	1024	102	22	110	6	266	98	18	100	6	909	58	-42	235	2
13	1019	70	-40	20	6	224	52	-58	350	6	853	-9	-69	350	7
14	1019	94	-6	270	4	225	80	-20	260	7	861	18	-32	260	4
15	1017	108	28	340	8	210	96	6	340	7	849	34	-14	325	7
16	1015	100	0	70	8	193	112	12	70	5	840	68	-52	155	4
19	1007	116	111	140	5	131	112	110	130	7	782	92	90	240	10
29	1019	96	36	50	7	226	90	30	30	9	866	46	-14	360	9
30	1021	94	-6	20	9	243	68	-2	325	10	877	20	-70	345	10
29	1017	86	-44	70	7	209	88	-52	80	6	848	40	-20	165	5
30	1013	74	-36	20	12	176	60	-50	15	14	806	2	-98	360	13
31	1016	76	-14	50	5	198	64	-16	10	8	830	6	-94	345	9
NO.	31	31	31		31	31	31	31		31	31	31		31	
Mean	1016	94	18		9	205	83	7		9	845	34	-35		9
1	W	E	S	N		W	E	S	N		W	E	S	N	
2	42	-97	23	-166		78	-77	28	-186		10	-23	56	-165	
3	10.0	21.0	6.0	25.0		13.0	18.0	5.5	25.5		21.0	9.5	10.0	21.0	
4	WBAR	SBAR	VWD	VWS		WBAR	SBAR	VWD	VWS		WBAR	SBAR	VWD	VWS	
5	-2	-5	21	5		0	-5	360	5		3	-4	323	4	

날짜 Date	850 hPa					700 hPa					500 hPa				
	고도 gh	기온 T	이슬점 Td	풍향 d	풍속 v	고도 gh	기온 T	이슬점 Td	풍향 d	풍속 v	고도 gh	기온 T	이슬점 Td	풍향 d	풍속 v
1	1536	22	-258	335	3	3079	-45	-145	245	13	5680	-171	-381	250	30
2	1526	-89	-96	315	16	3007	-137	-267	290	31	5540	-201	-631	265	48
3	1560	-95	-102	350	11	3070	-81	-561	310	16	5630	-203	-363	280	28
4	1582	0	-490	265	4	3121	-69	-319	260	7	5680	-183	-563	275	22
5	1599	30	-40	315	4	3152	-29	-309	265	8	5750	-183	-333	270	18
13	1520	-75	-87	340	7	3041	-83	-333	285	8	5580	-223	-283	270	19
14	1535	-11	-161	255	7	3080	-35	-375	275	16	5650	-225	-335	275	31
15	1534	36	-324	300	9	3092	-31	-521	295	16	5680	-191	-311	275	29
16	1531	52	-338	185	2	3091	-51	-171	225	4	5690	-165	-194	275	23
19	1480	52	50	240	11	3039	-51	-56	245	14	5620	-215	-315	255	26
29	1553	14	-17	280	10	3098	-39	-529	305	9	5670	-225	-395	290	23
30	1556	-13	-83	310	13	3099	-61	-96	275	18	5670	-195	-245	275	31
29	1532	16	-84	190	2	3080	-45	-57	250	14	5670	-187	-212	255	24
30	1485	-5	-245	350	10	3017	-57	-127	280	12	5580	-213	-293	255	27
31	1510	24	-306	320	8	3059	-55	-445	295	13	5610	-219	-256	275	29
NO.	31	31	30		31	31	31	31		31	31	31		31	
Mean	1525	1	-144		9	3063	-60	-252		13	5628	-207	-372		25
1	W	E	S	N		W	E	S	N		W	E	S	N	
2	165	-8	37	-126		353	0	58	-87		754	0	80	-53	
3	29.0	2.0	8.5	22.5		31.0	0.0	12.0	19.0		31.0	0.0	15.0	16.0	
4	WBAR	SBAR	VWD	VWS		WBAR	SBAR	VWD	VWS		WBAR	SBAR	VWD	VWS	
5	5	-3	300	6		11	-1	275	11		24	1	268	24	





Appendix C. Typical profiles of potential temperature (upper), wind speed (middle), and mixing ratio (low) when both of the morning and afternoon mixing heights are high.



Appendix D. Typical profiles of potential temperature (upper), wind speed (middle), and mixing ratio (low) when both of the morning and afternoon mixing heights are extremely low.

## 감 사 의 글

초등학교, 중·고등학교 그리고 대학까지 어려서부터 소년, 청년시대를 거의 학업을 하는데 보냈으며, 전문(專門)과 주력(注力)의 정도 차이는 있을 망정 지금도 계속 학업의 길을 걷고 있다. 끝없는 학업의 길이란 말을 다시 한번 깨달으며, 하나의 길을 가면 다음 길이 궁금함을 느끼고 들어가면 무한정 펼쳐있는 길을 끝까지 펼쳐보지도 못하는 아쉬움을 남기면서 이 한편의 『눈물』을 내놓습니다.

먼저 이 눈물을 위해 시종 아낌없는 지도로 결실을 맺게 해주신 이기호 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 눈물 십사를 맡아 많은 조언과 면밀한 검토를 하여주신 허철규 교수님, 감상규 교수님, 그리고 많은 격려와 관심을 보여주신 오윤근 교수님, 허복 교수님, 이용득 교수님, 조운일 교수님께 감사를 드립니다. 항상 배편외중에서도 최윤부러 교정작업에 이르기 까지 험씨즌 이창기 동생과 대기실형실 후배들에게 고마움을 전합니다.

아울러 직장에서 격려와 따뜻한 위로로 이끌어 주신 박중주 제주지방기상청장님, 파장님, 예보관님께 감사드립니다. 또한 업무에 바쁘신 가운데 자료 수집에 험씨즌 직원 여러분께 지면으로가 고마움을 전합니다.

오늘날 까지 받는 것 없이 베풀기만 하시면서 학비까지 보태주시는 부모님, 집안일에 소홀했던 저를 이해 해주신 형님나외분과 누님 동생들에게 고마움을 전합니다. 또한 울 초에 라개하실 장인어른께 이 한편의 책을 바칩니다.

끝으로 지난 2년 반 동안 지치고 힘든 삶 속에서 희망과 믿음으로 나에게 힘을 준 나의 영원한 벗인 아내 현계순에게, 그리고 배쁘다는 이유로 함께 지내지 못해 늘 미안한 사랑스러운 아들 명훈이와 토끼 같이 키여운 딸 다희에게 나의 사랑을 이 눈물로 대신합니다.

2000년 6월

강 태 진