

ORIGINAL ARTICLE

## 부산지역 대기경계층 고도의 계절 변화 특성-수도권과의 비교 연구(VI)

김민성<sup>1)</sup> · 오상석<sup>1)</sup> · 박문수<sup>2)</sup> · 강민수<sup>2)</sup> · 엄준식<sup>1,3)</sup> · 조현영<sup>3)</sup> · 김철희<sup>1,3)\*</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 대기환경과학과, <sup>2)</sup>세종대학교 기후환경융합학과, <sup>3)</sup>부산대학교 환경연구원

### Characteristics of Seasonal Variations of Planetary Boundary Layer Heights in Busan – A Comparative Study of Busan vs. Seoul Metropolitan Area (VI)

Min-Seong Kim<sup>1)</sup>, Sang-Seok Oh<sup>1)</sup>, Moon-Soo Park<sup>2)</sup>, Minsoo Kang<sup>2)</sup>, Junshik Um<sup>1,3)</sup>,  
Hyun-Young Jo<sup>3)</sup>, Cheol-Hee Kim<sup>1,3)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

<sup>2)</sup>Department of Climate and Environment, Sejong University, Seoul 05006, Korea

<sup>3)</sup>Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 46241, Korea

#### Abstract

This study explores the planetary boundary layer height (PBLH) in Busan during 2020 and compares it with that of Seoul, with a focus on how regional characteristics influence PBLH. Monthly and daily PBLH variations were analyzed using both ECMWF Reanalysis 5<sup>th</sup> generation (ERA5) data and ceilometer measurements. The Weather Research Forecast (WRF) model was also utilized to simulate PBLH for season-representative cases across the year. The results indicate that the PBLH in Seoul tends to be higher than that in Busan likely due to Seoul's inland location, while Busan, being a coastal city heavily influenced by the ocean, exhibits lower PBLH, particularly in summer. WRF model simulations revealed that the high humidity advected from the ocean contributes to a more stable atmosphere in Busan, suppressing local PBLH growth. Notably, during summer, the PBLH in Busan was more than twice as low as that in Seoul, despite there being no significant differences in key micrometeorological factors such as friction velocity and sensible heat flux between the two cities. This suggests that the PBLH in Busan is affected primarily by high humidity and marine boundary layer advection, especially during onshore wind flows during the summertime. This study provides valuable insights into how regional characteristics impact PBLH in both inland and coastal cities, offering a foundation for improving regional air pollution forecasting in coastal areas such as Busan.

**Key words** : PBLH, Marine boundary layer, Coastal city, ERA5, Ceilometer, WRF

#### 1. 서 론

대기경계층(Planetary boundary layer, PBL)은 지표의 마찰 및 열적인 영향에 의해 형성되어 변화하는 대기의 하층으로서, 난류운동을 통한 지표면과 대기의

상호작용이 매우 활발하여 지표 근처의 대기의 연직 혼합의 정도를 조절하는 핵심적인 요소이다. 따라서 PBL은 대기오염, 기상 예측뿐만 아니라 기후학 등에도 중요하게 연구되고 있다. 대기경계층 고도 (Planetary boundary layer height, PBLH)는 PBL의 높이로서

Received 20 September, 2024; Revised 13 November, 2024;

Accepted 19 November, 2024

\*Corresponding author : Cheol-Hee Kim, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Phone : +82-51-510-3687

E-mail : chkim2@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

PBLH 내에서는 대기오염물질을 포함한 대기 연직 혼합이 일변화 주기로 매우 활발하며, 지표면에서의 열, 습도, 운동량 교환 등의 일변화 특성이 PBLH 상부인 자유대기(Free atmosphere)와 확연히 구별된다.

PBLH의 결정은 지표에서의 플럭스 등의 크기 및 대기의 안정도에 의해 결정되며, 국지 기상조건, 지형, 기후 등에 따라서도 달라진다. 따라서 PBLH의 지역적 특성을 파악하기 위해서는 지표에서의 에너지 플럭스뿐만 아니라 지역 고유의 국지 순환이나 지형 및 기후 조건을 잘 이해하여야 한다. 최근에는 미세먼지 등 대기오염물질의 예보를 수행하는 과정에서 연직 확산에 대한 연구의 중요성이 커지고 있으며, 한반도 주변의 대기오염물질의 항공기 관측 등 대규모 대기오염물질 관측 캠페인이 활발해지면서 국내에서도 대기오염물질의 연직 구조와 연관된 PBL의 특성 및 PBLH에 대한 관측 및 모델링 연구 또한 중요해지고 있다.

PBLH에 관한 선행 연구들은 각 지역 특성 및 기상 조건에 따라 크게 달라지는 것을 끊임없이 지적해 왔다(Steyn, 1980; Emeis et al., 2004; Chen et al., 2023). 이러한 연구들은 각 지역별 대기경계층의 특성이 반영된 PBLH의 변화를 보고한 연구였으나, 장기 관측을 통한 기후적 측면의 PBLH 연구 또한 계속 보고되고 있다. 예를 들어 Stull(1988)은 PBLH의 일변화 및 계절변화가 지역적 기후에 크게 의존하며, 이러한 변화는 대기오염 확산과 같은 환경 문제에 중요한 영향을 미친다고 강조하였다. Seidel et al.(2012)의 연구에서는 PBLH의 장기적인 변화 경향을 분석하여, 기후 변화가 대기경계층의 구조에 미치는 영향을 분석하였다. 반면, 국내 연구의 경우 짧은 특정기간의 특별관측 등 일부 연구 결과를 찾아볼 수 있으나(Park et al., 1989) 전반적인 지역별 PBLH 특성에 대한 국내 연구는 매우 미약하다. 특히 대기오염이 심각한 대도시 별 고유의 지역 특성과 PBLH와의 연관성을 분석하는 관측 및 모델링 결과를 종합한 연구는 한국의 향후 대기오염 문제를 고려할 때, 더욱 절실하다고 판단된다.

부산지역은 풍상측의 해양 특성이 존재하는 해안 도시지역으로서 해륙풍 등 국지순환이 활발하며 풍상측으로부터의 해양 특성의 대기의 이류(Advection) 효과가 부산지역 PBL내의 평균 운위에 영향을 미쳐 혼합층 성장에 크게 영향을 줄 수 있다(Steyn, 1980). 따라서 해안 도시인 부산의 PBLH 특성, 특히 해양의 특성과의 연관성 연구의 필요성은 매우 크다. 반면 서울지역은 내

륙을 대표하는 도시로서, 해양의 영향을 자주 받는 부산 지역과 구별된다. 즉, 서울지역은 강한 태양 복사로 인한 활발한 대기 혼합이 PBLH의 지역적 특성을 잘 반영하는 반면, 부산지역은 해양의 영향으로 특히 여름철 높은 습도의 이류와 더불어 해양경계층(Marine boundary layer, MBL) 및 해양경계층 고도(Marine boundary layer height, MBLH)의 영향을 강하게 받을 수 있다. 부산지역이 서울지역에 비해 MBL의 영향을 월등히 크게 받고 있을 가능성은 국외 여러 연구로부터 확인된다. 그 예시로 Liu and Liang(2010)은 중국 내륙과 연안 지역에서의 관측 자료를 이용하여 PBLH의 지역별 계절변화 특성은 내륙과 해안지역 간의 기후적 차이로 해석할 수 있음을 정량적으로 제시하였고, 특히 높은 습도와 MBLH의 영향이 해양 근접 지역의 PBLH의 성장을 어떻게 조절하는지를 보여주었다. 그 밖에도 다양한 해외 연구들(Angevine et al., 2008; Tomasi et al., 2011; Alvarez-Valencia et al., 2024)은 해안 지역의 PBLH가 내륙과는 차이가 있음을 다양한 지역에서 보여주었다. 이러한 맥락에서 국내 대도시인 서울과 부산지역의 PBLH의 계절 변화는 해안 지역의 MBLH의 영향을 받을 가능성이 매우 커서, 대기 오염도가 높은 대도시 중심의 지역별 특성 연구를 집중적으로 연구할 필요가 있으며, 이로 인한 지역별 차이는 대기 오염 확산, 기상 예측의 정확도 등에도 중요한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 연구 대상으로서의 두 도시, 즉 우리나라를 대표하면서 고유한 지역적 특성을 가지는 두 대도시인 서울 및 부산지역을 대상으로 비교 분석하는 연구는 매우 의미 있다고 볼 수 있다.

본 연구는 해안지역인 부산과 내륙지역인 서울을 대상으로 연간 PBLH 변화를 비교 분석하고, 두 도시 간 PBLH의 차이를 규명하는 데 목적을 두었다. 이를 위해 ERA5 (ECMWF Reanalysis 5<sup>th</sup> generation) 재분석 자료와 운고계(Ceilometer) 자료를 활용하여, 두 지역의 PBLH의 월별 및 일별 변화를 비교 분석하고, 또한 중규모 기상모델인 WRF (Weather research forecast) 모델을 통해 서울과 부산의 지역 특성이 PBLH에 미치는 영향을 계절별 대표사례 분석을 통해 살펴보았다. 모델링 대표사례로서 계절별 전체 평균 결과와 가장 유사한 기압 패턴을 가진 사례들을 선정하였다. 각 계절별 사례, 즉 계절별 가장 빈번히 일어나는 기상조건 하에서의 지역별 PBLH와 이와 연관되는 미기상학적인 물리량을 분석함으로써, 두 도시의 지역적 특

성이 PBLH 형성에 어떻게 작용하는지를 살펴보았다. 본 연구를 통해 내륙성과 해양성을 대표하는 대도시인 서울과 부산의 지역 특성에 따른 PBLH 변화를 이해하고, 이를 통해 지역별 기상 예측 및 대기오염 관리에 기초 자료를 제공하는 데 기여할 것으로 기대한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구 내용 및 대상 지역

본 연구는 2020년 서울지역(이하 ‘서울’로 표기)과 부산지역(이하 ‘부산’으로 표기)의 PBLH의 계절 및 일변화 특성을 분석하고, 이에 영향을 미치는 종관 및 미기상적 요인으로 규명하는 데 초점을 맞추었다. 먼저 재분석 기후자료와 두 지역에서 관측된 온도계 자료를 사용하여 두 도시의 PBLH의 계절변화를 통계적으로 비교 및 분석하였으며, 계절별 대표 사례일을 선정하여 서울과 부산의 PBLH의 일변화 경향을 WRF 모델링을 통해 자세히 분석하였다.

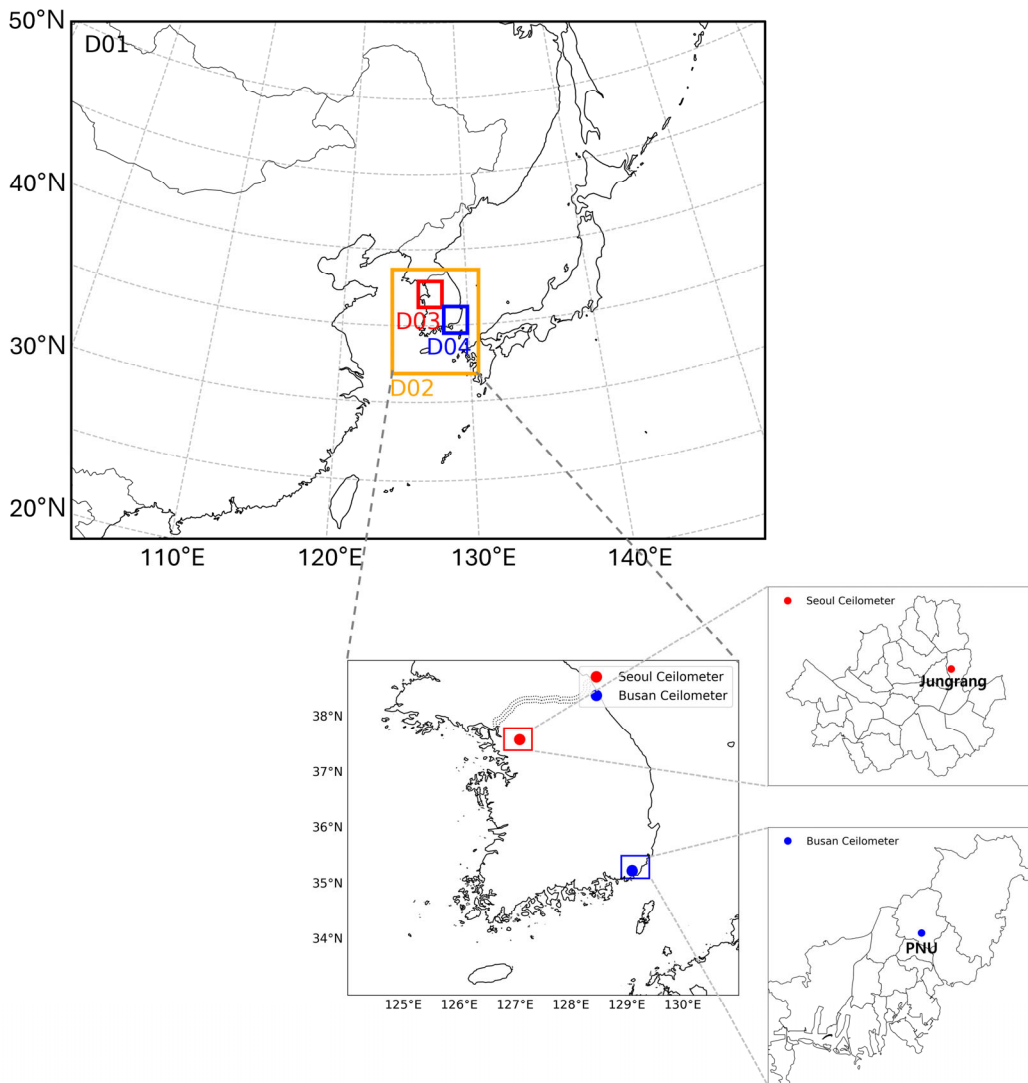


Fig. 1. Model domains and locations of the ceilometers in Seoul and Busan.

대표 사례일은 각각 계절별로 종관 기상을 대표할 수 있는 기간을 계절 전체평균 결과로부터 선정하였다. 선정된 사례는 4월 25-27일(봄), 7월 18-20일(여름), 10월 17-19일(가을), 12월 12-14일(겨울)이고 각 선정된 사례는 약한 서풍이 있는 이동성 고기압 사례(봄), 고온 다습한 남동풍이 우세한 북태평양 고기압 사례(여름), 북서풍 사례(가을철), 북서풍이 우세한 시베리아 고기압 우세사례(겨울)를 잘 반영하도록 선정하였다. WRF 모델링 영역은 동북아시아, 한반도, 서울, 부산을 충분히 포함하도록 설정하였고, 사례일의 상세한 종관 및 미기상 변수 자료를 충분히 반영하도록 설계하였다.

## 2.2. 사용한 자료

본 연구의 두 지역의 PBLH의 계절변화 특성을 살펴 보기 위해 사용된 재분석 자료는 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)의 전지구 재분석 자료인 ERA5(ERA5 Reanalysis 5<sup>th</sup> generation) 재분석 자료이다. ERA5는 전 세계 관측 데이터와 ECMWF Integrated forecast system (IFS) 모델 데이터를 결합하여 생산하는 전지구 재분석 자료로서 0.25° × 0.25°의 공간 해상도를 가지고 있다. 서울과 부산에 가장 가까운 격자점에서의 PBLH를 추출하여 사용하였다. ERA5에서는 IFS 모델 데이터와 관측 데이터를 동화시키고, 이를 이용하여 리차드슨 수(Richardson number,  $R_i$ )를 계산하고, 계산한  $R_i$  값은 임계값인 0.25를 넘는 첫 번째 고도를 PBLH로 정의한다.

관측 기반의 PBLH의 계절 및 일변화 분석을 위해, 두 지역의 현장 관측 자료인 운고계 자료를 사용하였다. 운고계가 설치된 장소는 서울의 경우 서울 중랑구에 위치한 중랑 도시기상관측소(37.5906° N, 127.0794° E)에 위치해 있으며(Park et al., 2017), 부산은 부산대학교 자연대연구실협동 옥상(35.2349° N, 129.0927° E)에 설치되어 있다(Fig. 1). 서울 운고계는 Vaisala 사의 CL51 운고계이며, 부산의 경우 Campbell 사의 CS135 운고계이며, CL51의 경우 910 nm의 파장을 가진 다이오드 레이저를 10 m의 공간 해상도로 발사되면 레이저가 구름 입자나 작은 입자와 만나면 빛의 일부가 산란되고 그 중 되돌아오는 후방산란을 관측하며, CS135의 경우 912 nm의 파장을 가진 다이오드 레이저를 이용하여 5 m의 공간 해상도로 후방산란을 관측하여 PBLH를 결정한다.

운고계에서의 PBLH 산출은 관측한 후방산란자료를 알고리즘을 통해 결정된다. 운고계는 레이저 빔을 발사하여 대기 중의 입자나 에어로졸에서 반사된 신호를 측정하고, 경도법에 기반한 알고리즘을 통하여 대기 중 다양한 층의 경계를 구별하게 된다. 본 연구에서는 서울은 Min at al.(2020)이 사용한 경도법을 기반으로 하는 알고리즘을, 부산은 운고계 자체 알고리즘으로 산출된 PBLH를 사용하였다. 운고계는 대기 중의 입자 농도의 변화에 따라 PBLH를 판별하기 때문에 대기 하층에 구름이 있거나 강수가 존재하는 경우 계산값에 오차가 발생할 수 있으므로, 강수일과 운량이 높은 날은 본 연구에서 제외하였다. 이를 위해 기상청 종관기상관측장비(Automated surface observing system, ASOS) 관측값 혹은 ERA5에서 강수가 존재하거나 운량이 5.5 이상인 날은 제거하였다.

## 2.3. WRF 모델

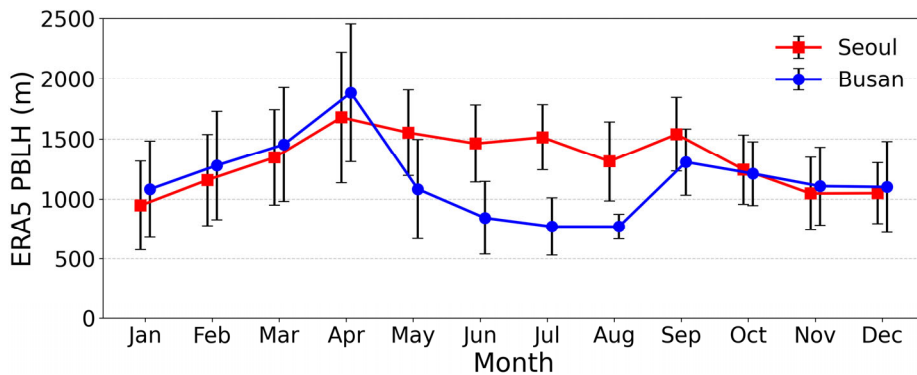
재분석 자료와 관측자료에서 나타난 PBLH가 서울과 부산의 지역적 차이를 대표사례별로 보다 자세히 분석하기 위하여 3차원 중규모 기상 모델인 WRF 모델을 사용하였다. WRF모델은 미국 국립대기연구센터(National Center for Atmospheric Research, NCAR)에서 개발한 중규모 기상모델로서, 본 연구에서는 버전 4.0.3을 사용하였다.

모델 도메인은 총 4개의 도메인으로 구성하였다(Fig. 1). D01은 동아시아 영역, D02는 한반도 영역, D03은 수도권(서울) 영역, D04는 남동권(부산) 영역으로 구성하였다. 도메인의 격자수는 각각 185×139 (D01), 70×85 (D02), 58×64 (D03), 58×64 (D04)로 구성하였고 격자의 해상도는 D01~D04 각 27 km, 9 km, 3 km, 3 km로 구성하고 연직 격자는 29개의 층으로 구성하였다(Table 1).

WRF의 초기조건 및 경계조건으로 미국 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 재분석 자료인 FNL 재분석 자료를 사용하였다. FNL 자료의 시간 해상도는 6시간이고 수평 해상도는 1° × 1°이다. 모델링 사례 기간은 Spin-up time을 고려하여 사례 기간 이전 이후로 각각 5일씩 추가하여 봄철 사례는 2020-04-20 00 UTC ~ 2020-05-03 00 UTC, 여름 2020-07-13 00 UTC ~ 2020-07-26 00 UTC, 가을 2020-10-12 00 UTC ~ 2020-10-25 00 UTC, 겨울 2020-12-07 00 UTC ~ 2020-

**Table 1.** Model domain, grid structures, resolutions, and physics options of WRF model used in this study

Model domain	D01	D02	D03	D04
Horizontal grid	185×139	70×85	58×64	58×64
Horizontal resolution (km)	27	9	3	3
Vertical layer	29			
Physics option	Adapted option			
Microphysics	WSM5			
Longwave radiation	RRTM			
Shortwave radiation	Goddard			
Planetary boundary layer	YSU scheme			
Surface layer	MM5 similarity			
Land surface	Noah land surface model			
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch scheme			



**Fig. 2.** Monthly variations of the average daily maximum planetary boundary layer height (PBLH) from ERA5 in Seoul and Busan.

12-19 00 UTC로 설정하였고 WRF 모델에 사용한 물리 옵션은 Table 1에 정리하였다. WRF에서 모의된 서울과 부산의 PBLH 값을 사용하기 위해 운고계가 위치한 좌표와 가장 근접한 격자의 PBLH 값을 추출하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1. 지역별 대기경계층 고도의 월변화 특성

Fig. 2는 ERA5에서 도출한 서울과 부산의 일 최고 PBLH의 월변화 경향을 나타낸 그림이다. 서울의 일 최고 PBLH는 4월에 월평균 약 1,800 m로 연중 가장 높게 나타났으며, 이는 봄철 대기 불안정성이 크게 작용하였음

혼합이 매우 활발하게 일어났음을 시사한다. 여름철인 6월부터 8월까지의 일 최고 PBLH는 약 1,500 m 내외로 봄철 및 가을철에 비해 상대적으로 낮게 조사되었으며 이는 여름철 강한 태양 복사에너지의 영향으로 지표면의 온도가 매우 높아졌음에도 불구하고 운량 등 상대적으로 다양한 대기 난류 억제 효과가 작용한 것으로 판단되나, 이에 대한 추가적인 요인분석이 필요해 보인다. 겨울철인 (1~2월 및 12월)의 일 최고 PBLH는 약 1,000 m로 사계절 중 가장 낮아, 겨울철의 안정된 대기 상태를 반영하였다. 월 평균 뿐만 아니라 PBLH의 변동성 또한 서울은 4월에 가장 크게 나타났으며(표준편차 = 610 m), 이는 봄철 대기 불안정성이 크게 작용하였음

을 암시한다. 여름철에는 편차가 324~418 m, 겨울에는 389~425 m 로서 월 변동성이 유사하게 나타났으며, 이는 여름철 운량이 적은 사례를 제외한 것이 주요 원인으로 보이며, 강수일 및 운량이 많은 사례들을 모두 포함하면 겨울철에 비해 여름철 변동성은 상대적으로 훨씬 크게 나타날 것으로 판단된다.

부산의 일 최고 PBLH는 서울과 마찬가지로 4월에 월 평균 약 1,900 m로 최고치를 보였다. 이는 서울과 동일하게 봄철 난류 활동의 활발함을 암시하는 결과로 해석된다. 그러나 여름철인 7월과 8월의 경우 서울과는 달리 경우 약 1,000 m 내외로 낮은 값을 보였는데, 이는 여름철 습도 등 해양의 영향으로 추측되며, 따라서 부산은 다른 계절에 비해 여름철이 상대적으로 해양의 영향을 많이 받고 있음을 암시하며, 기후학적으로도 서울보다는 부산에서 여름철 북태평양 기단의 영향으로 남동계절풍 영향에 더 많이 노출된 것에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 상황에서는 해양 기원의 대기 중 수증기가 부산으로 이루어져 대기 하층을 안정화시키는 경우 여름철 일 최고 PBLH가 낮아질 가능성이 높으며, 이러한 현상은 이전 연구에서도 언급된 바 있다(Liu and Liang, 2010).

### 3.2. 계절별 경계층 고도의 일변화 특성

Fig. 3은 서울과 부산의 ERA5와 운고계에서 도출한 계절별 일 최고 PBLH의 시간평균 변화를 표준편차와 함께 나타낸 그림이다. 서울의 ERA5에서 도출된 PBLH는 봄철 최고 1,430 m(야간의 경우 250 m), 여름철 최고 1,210 m(야간의 경우 100 m), 가을철 최고 1,190 m(야간의 경우 200 m), 겨울철 최고 990 m(야간의 경우 250 m)로 나타나, 당일 PBLH의 주-야간 고도차는 봄철 1,180 m, 여름철 1,100 m, 가을철 990 m, 겨울철 740 m로서 봄, 여름, 가을, 겨울 순으로 나타났다.

운고계에서 도출된 서울의 PBLH는 봄철 최고 1,490 m(야간의 경우 500 m), 여름철 최고 1,400 m(야간의 경우 600 m), 가을철 최고 1,390 m(야간의 경우 550 m), 겨울철 최고 1,000 m(야간의 경우 500 m)로 나타나, 당일 PBLH의 주-야간 고도차는 봄철 990 m, 여름철 800 m, 가을철 740 m, 겨울철 500 m로 ERA5의 PBLH와 마찬가지로 나타났다. 봄철 및 여름철은 중간에 강한 일사량으로 인한 대기 혼합의 활성화로 다른 계절에 비해 상승폭이 크게 나타난 것으로 해석

된다. 가을철과 겨울철 일변화는 봄과 여름에 비해 덜 뚜렷하게 나타났다. 이는 상대적으로 가을 및 겨울의 안정적인 대기 상태를 반영한 것으로 해석되며, 특히 일사량이 적은 겨울철에 그 경향이 뚜렷하였다.

ERA5에서 도출한 야간의 최고 PBLH는 운고계에서 관측한 최고 PBLH 보다 낮게 나타났으며 그 차이는 계절에 따라 큰 차이를 보였다. 예를 들어 봄철 편차 250 m(운고계 500 m, ERA5 250 m), 여름철 편차 450 m(운고계 550 m, ERA5 100 m), 가을철 편차 307 m(운고계 507 m, ERA5 200 m), 겨울철 편차 250 m(운고계 500 m, ERA5 250 m)으로 나타나서, 여름철 최고 편차를 포함하여 전체 260~450 m의 큰 차이를 보였다. 이러한 오차는 대기질 모델에서 야간의 낮은 PBLH의 추정으로 인해 대기질 농도를 높게 예측하여 상당한 대기질 예보 결과의 차이를 유발하는 결과를 보이므로(Lee et al., 2023), 운고계와 ERA5의 야간 PBLH 차이를 고려했을 때 정확한 대기질 예보를 위한 야외 관측 등 다양한 야간 대기의 난류특성 연구가 필요할 것으로 판단된다.

부산의 일 최고 PBLH는 해양의 PBLH와 연관되어 나타났다. 해양에서의 PBLH 특징은 육지와 비교하여 상대적으로 고도가 낮고 변화가 적다(Zeng, 2004). 이는 해양의 경우 높은 열용량과 이로 인한 낮은 일변화로 인해 해수면 위의 하층 대기는 기온 일변화 변동이 적고 육지 대기에 비해 상대적으로 매우 안정된 것이 주요 특성이다(Diaz, 2019). 따라서 해양지역의 PBLH, 즉 MBLH는 대기-해양 간의 에너지 교환, 해수면의 풍속 및 파고 등에 따른 변동이 있을 수 있으나 그 변동폭이 작으며, 일변화 없이 거의 일정하게 유지된다(Hanley and Belcher, 2008; Liu et al., 2022).

부산의 ERA5에서 도출된 PBLH는 봄철 최고 1,380 m(야간의 경우 450 m), 여름철 최고 700 m(야간의 경우 200 m), 가을철 최고 1,050 m(야간의 경우 450 m), 겨울철 최고 1,040 m(야간의 경우 450 m)로 나타나, 당일 PBLH 주-야간 고도차는 봄철 930 m, 여름철 500 m, 가을철 600 m, 겨울철 590 m로서 봄, 가을, 겨울, 여름 순으로 PBLH의 주-야간 고도차는 서울과는 상이하게 나타났다. 특히, 부산의 야간 PBLH가 서울에 비해 상대적으로 매우 높게 나타났음을 확인할 수 있으며 이는 동일한 이유, 즉 변동폭이 적은 MBLH의 영향으로 해석할 수 있다(Fig. 3). 계절별로 자세히 살펴보면, 봄철 부산에서는 서울에 비해 높은 야간의 PBLH를

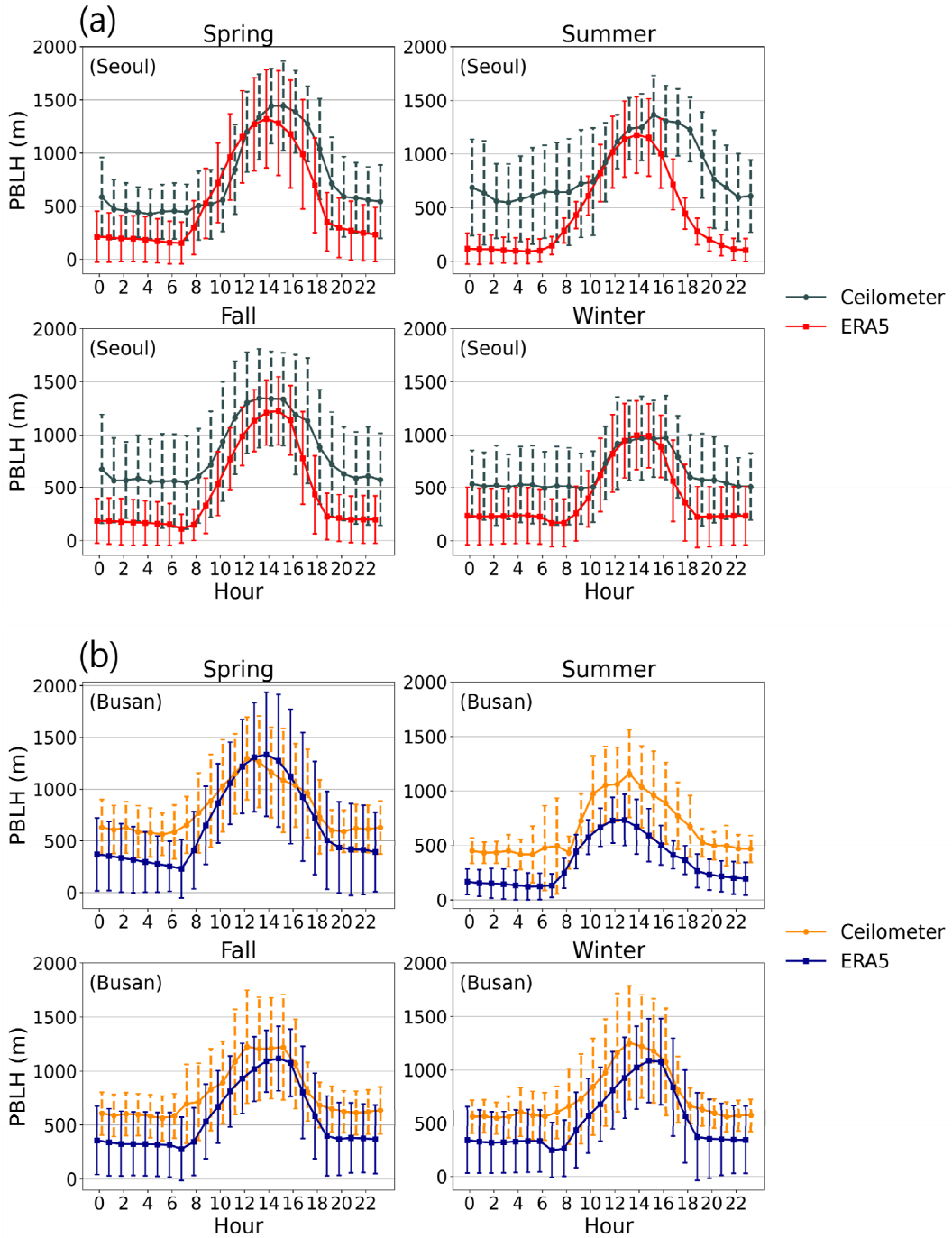


Fig. 3. Diurnal variations of PBLH in (a) Seoul and (b) Busan in four seasons obtained from ERA5 and ceilometers.

확인할 수 있고(서울: 250 m, 부산: 450 m), 주간에는 일출시간인 오전 7시경부터 PBLH가 급격히 상승하였고 그 최고치는 서울과 유사하거나 소폭 작게 나타났다(서울: 1,400 m, 부산: 1,380 m). 여름철의 경우 야간 PBLH는 두 지역 간 크지 않았으나 주간의 고도차는 서울 1,200 m, 부산 700 m으로 그 차이가 매우 크게 나타났다. 이는 특히 남풍계열이 우세한 여름철 MBL의 영향이 크게 작용한 것으로 해석된다. 또한 최고치를 보였던 PBLH가 오후에 서울 혹은 다른 계절에 비해 매우 완만하게 감소하는 양상을 보였고, 이 또한 MBLH의 영향으로 추측되나 그 원인을 파악하기 위한 더 자세한 MBLH 관측연구가 필요해 보인다. 가을 및 겨울철의 경우 봄철과 유사한 양상으로 서울보다 야간 PBLH가 높게, 주간 또한 서울과 유사한 결과를 보였다.

운고계에서 도출된 부산의 PBLH는 봄철 최고 1,360 m(야간의 경우 600 m), 여름철 최고 1,100 m(야간의 경우 500 m), 가을철 최고 1,270 m(야간의 경우 550 m), 겨울철 최고 1,280 m(야간의 경우 550 m)로 나타나, 당일 PBLH 주·야간 고도차는 봄철 760 m, 여름철 600 m, 가을철 720 m, 겨울철 730 m로 봄, 겨울, 가을, 여름 순으로 나타났으나 계절 평균  $703 \pm 70$  m로 그 차이는 크지 않았다. 운고계 관측에서도 주목할 만한 특징은 여름철 낮은 주간의 다른 계절 혹은 서울에 비해 상대적으로 낮은 PBLH가 관측되었고 이는 해안 지역인 부산의 PBLH의 특징으로 MBLH의 영향을 특히 많이 받고 있음을 재차 확인할 수 있다.

### 3.3. 선정된 사례의 대기경계층 고도 분석

Fig. 4는 선정된 각 계절별 대표 사례일의 00 UTC (09 KST)시간의 850 hPa 상층 일기도이다. 봄철 사례(4월 26일)의 경우 한반도는 대체로 이동성 고기압의 영향 하에 있으며, 한반도 전역에서 서풍 또는 서북서풍의 기류가 주류를 이루고 있음을 알 수 있다. 이는 한반도 북서쪽에 위치한 이동성 고기압의 영향으로 기인한 풍계로서 동북아시아의 건조한 바람의 영향이 서울 및 부산 전역을 지배하고 있는 것이 특징이다. 여름철 사례(7월 19일)는 한반도 주변의 풍계는 남서풍이 지배적인 것으로 나타났다. 이는 한반도 남서쪽에 약한 이동성 저기압이 위치해 있으나, 일본 동쪽에 위치한 해양의 특성을 가진 아열대성 고기압의 영향으로 고온 다습한 남서풍이 한반도를 지배하는 전형적인 우리나라 여름철 사례로 판단된다.

가을철 사례(10월 18일)는 중국 동쪽에 광범위하게 고기압이 자리 잡고 있어서 한반도는 서북서풍의 풍계가 우세하였으나 기압경도력이 작아서 풍속은 다소 약하게 나타났다. 이 사례에는 여전히 일본 동쪽 해양의 해양 고기압이 위치해 있어서 대륙의 영향 하에서도 해양의 영향을 동시에 받을 수 있는 종관기상상태로 해석할 수 있다. 이러한 약한 풍속 하에서는 두 지역 모두 외부 영향보다는 지역 고유의 PBLH가 성장한 결과를 확인할 수 있다. 겨울철 사례(12월 13일)는 한반도 전역에 강한 북서풍의 영향권에 놓여 있는 것으로 나타났다. 이는 한반도 북서쪽에 위치한 강한 대륙의 성질을 가진 고기압과 북동쪽 해상에 위치한 저기압으로 형성된 기압 경도력으로 북서풍 혹은 북북서풍의 풍계를 예상할 수 있다. 북서풍 계열의 풍계로 차고 건조한 대륙성 공기가 한반도로 유입되어 한반도 전역에서 기온이 낮고 건조한 기상 조건을 가진 사례로 해석된다.

Table 2는 사례기간 ERA5에 나타난 계절별 서울과 부산의 주·야간을 포함한 일평균 PBLH와 두 지역간 차이를 나타낸 표이다. 부산을 기준으로 한 일평균 특성 또한 앞 절의 계절별, 지역별 특징, 예를 들어 서울 대비 여름철 주간의 낮은 PBLH 또는 겨울철 야간의 높은 PBLH 등의 일변화 특징을 반영하는 결과임을 알 수 있었다(Fig. 3 참조). 특히 여름철 사례(7월 18~20일)의 부산의 일평균 PBLH는 서울과 비교하여 일관되게 낮은 PBLH의 값을 확인할 수 있다(Table 2). 7월 18일 PBLH가 서울 351.1 m, 부산 333.5 m로 두 지역 간 차이는 17.5 m로 다소 나타났으나, 7월 19일과 20일에는 각각 177.3 m와 126.8 m로 그 차이가 크게 증가하였다. 역시 여름철 부산의 경우 사례 기간의 바람장의 특징(Fig. 4)으로 볼 때 MBLH의 영향을 크게 받았음을 유추할 수 있다. 겨울철의 서울이 부산에 비해 일평균 PBLH가 상대적으로 낮게 나타난 것(Table 2)은 부산의 낮은 야간 PBLH가 일부 기여한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 계절별 각 사례일 WRF 모델이 모의한 10시, 13시, 16시의 PBLH의 공간분포와 바람벡터를 나타낸 그림이다. 4월 26일 사례의 경우, 서울 PBLH는 10시 약 1,000 m, 13시 약 1,750 m, 16시 약 2,000 m로 시간에 따라 증가하였다. 이는 지표면이 가열되면서 불안정해져 서울 경계층이 더 높게 성장한 것으로서 13시까지 북서풍계의 상대적으로 건조한 공기가 서울로 일부 유입되는 것으로 모의되었고, 이는 해양의 영향 없이 육지의 일변화를 잘 보여주는 것으로 해석된다. 16



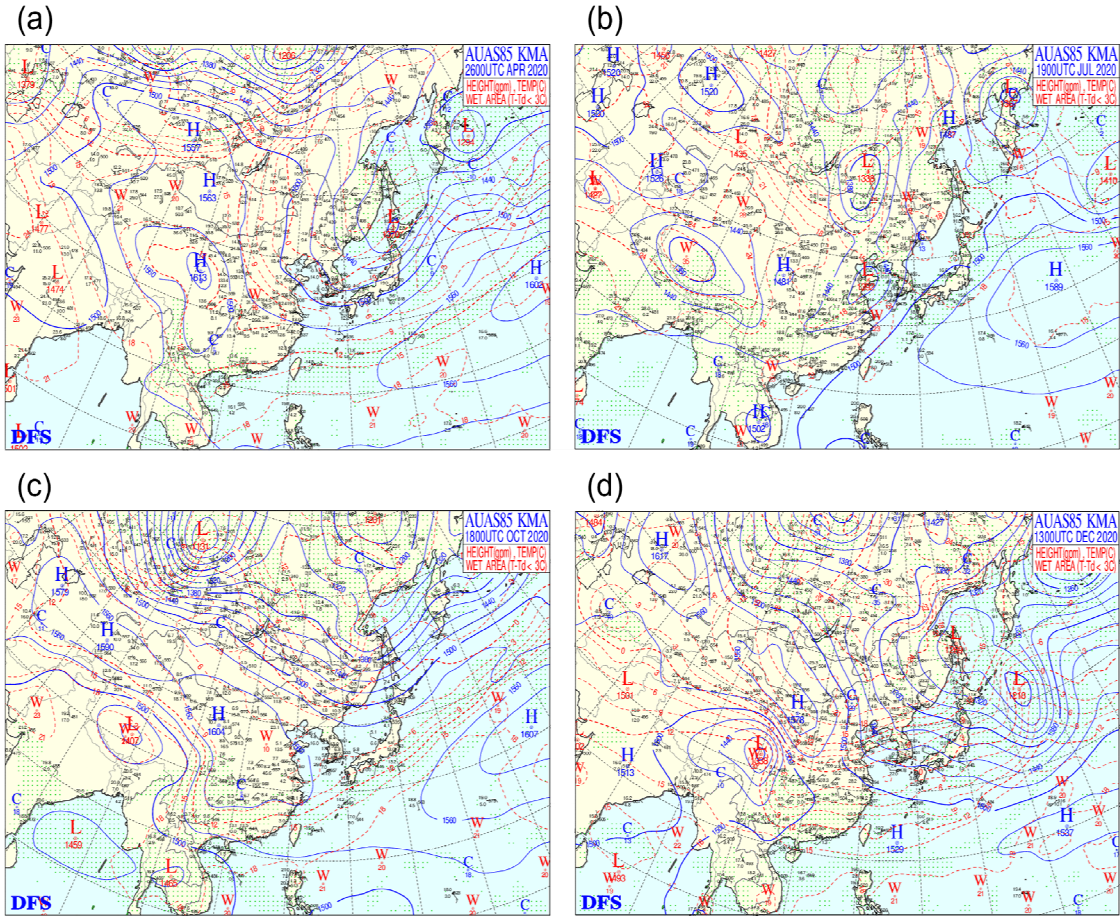


Fig. 4. Weather maps for 00 UTC at 850 hPa level in season-representative four cases: (a) April 26, (b) July 19, (c) October 18, and (d) December 13.

시경부터 서풍계열의 풍향으로 인천과 같은 해안 인접 지역의 MBL 영향은 일부 확인된다. 부산의 경우 PBLH는 10시 약 750 m로 서울보다 상대적으로 낮게 나타났으나, 13시 1,250 m, 16시 약 1,500 m로 역시 증가하는 추세를 보였다. 부산의 풍계 또한 서울과 동일한 북서풍의 영향으로 주간 육지의 높은 PBLH 특성을 보이는 것으로 모의되었다.

여름철인 7월 19일의 경우, 두 지역 간 차이는 현저하게 다르게 나타났다. 서울의 경우 PBLH는 10시 약 1,000 m, 13시 약 1,600 m, 16시 약 1,800 m로 봄철 사례보다는 소폭 낮게 나타났으며, 여름철 또한 남동(육지)쪽에서 PBLH가 이루어지는 양상을 보였으며 여전히 육지의 특성인 강한 일변화를 보였다. 반면 부산에서

는 10시 약 750 m, 13시 약 1,125 m, 16시 약 1,300 m로, 남동풍의 영향으로 해양의 특성이 이루어지는 것으로 모의되어 매우 낮은 PBLH를 보였으며, 야간에도 상대적으로 낮은 경우를 고려해 볼 때(Fig. 3), 서울과는 달리 부산은 여름철 해양성 기후의 영향을 직접적으로 받고 있음을 모델 결과에서도 일부 보여준다. 운고계 관측 자료에서는 모델링 결과와 다르게 야간 PBLH가 서울이 부산보다 일부 높게 나타난 것은 야간의 운고계 관측 결과가 야간의 안정적인 PBLH와 야간 잔류층 고도의 정확한 구분이 되지 않은 것에 일부 기인한 것으로서(예: Park et al., 2017) 계속적인 관측 기기 및 야간 안정층 관측에 대한 연구가 필요해 보인다.

10월 18일에는 남서쪽 해양의 북풍계열이 우세한

**Table 2.** Summary of PBLHs in Seoul and Busan for season-representative four cases

Season	Datetime	Seoul PBLH (m)	Busan PBLH (m)	Seoul - Busan (m)
Spring	2020-04-25	830.5	1005.1	-174.5
	2020-04-26	864.7	897.3	-32.6
	2020-04-27	778.8	711.1	67.8
Summer	2020-07-18	351.1	333.5	17.5
	2020-07-19	521.8	344.5	177.3
	2020-07-20	758.2	631.4	126.8
Fall	2020-10-17	371.9	468.6	-96.7
	2020-10-18	414.5	324.7	89.9
	2020-10-19	300.8	438.1	-137.3
Winter	2020-12-12	326.0	506.8	-180.7
	2020-12-13	412.0	593.5	-181.5
	2020-12-14	956.2	1058.3	-102.1

가운데, 전반적으로 한반도 전역의 풍속은 매우 약하게 모의되었다. 따라서 두 지역 모두 PBLH는 외부의 영향보다는 지역적으로 자체 성장된 PBLH의 일변화를 보였다. 이에 따라 서울의 경우 PBLH가 10시 약 850 m, 13시 약 1,500 m, 16시 약 1,960 m로 주간 최고값이 매우 높은 양상이 모의되었고, 부산의 경우, 10시 약 600 m, 13시 약 1,200 m, 16시 약 1,750 m로, 부산 역시 다른 계절에 비해 주간에 다소 높은 고도까지 성장하는 양상이 모의되었다. 겨울철인 12월 13일의 경우, 서울의 PBLH는 10시에 약 500 m, 13시에 약 1,000 m, 16시에 약 1,500 m로, 겨울철 PBLH는 여름과는 상이하게, 봄철 및 가을철과는 유사한 경향을 보인 것으로 해석하였다. 이 시기에 서울의 풍계는 오전에 서풍계열이 존재하였으나 오후에는 북서풍 계열의 풍계가 지배함에 따라 육지에서 높게 성장한 PBLH의 분포 특성이 서울을 포함하여 한반도 북서쪽에서 남동쪽을 횡단하는 공간분포 양상이 모의되었다(Fig. 5). 부산의 경우도 10시 약 250 m, 13시 약 600 m, 16시 약 1,000 m로 겨울철은 여름철보다는 높으나 다른 계절에 비해서는 상대적으로 낮은 값을 보였다. 겨울철 이러한 특성은 두 지역 모두 육지의 PBLH 특성을 보였음에도 불구하고 다른 계절에 비해 상대적으로 약한 일사량이 저조한 PBLH의 성장과 연관된 것으로 해석된다.

Fig. 6은 각 사례별 WRF 모델에 의해 모의된 상대습도의 공간 분포로 나타낸 그림이다. 여기서도 Fig. 5와 마찬가지로 10시, 13시, 16시의 모의 결과를 평균하였

다. Fig. 5뿐만 아니라 Fig. 6에서도 PBLH의 두 지역 간 명확한 계절적 변화 특성을 확인할 수 있다. 서울의 경우, 봄철 상대 습도가 30~40%. 여름철 80~90%, 가을철과 겨울철 약 50%의 수준으로 사계절 모두 건조한 육지 특성을 보였다. 반면 부산의 경우 봄철 50~60%, 여름철 90~95%, 가을철과 겨울철 40~50%로서 서울에 비해 여름철에 높은 습도를 보였고, 여름을 제외한 다른 계절에는 유사하거나 높은 값이 모의되었고, 이러한 여름철 습도의 차이는 두 지역의 PBLH의 결과에 큰 영향을 미친 것으로 확인되었다(Table 2와 Fig. 3). 서울은 상대적으로 낮은 상대 습도로 인해 하층 대기가 불안정해지고, 이는 강한 지표 현열플럭스와 함께 대류의 발달을 유도하여 PBLH 성장을 촉진한다. 부산의 경우 상대적으로 해양의 특성이 우세하여 MBLH와 높은 습도의 이유로 인하여 하층 대기가 상대적으로 더 안정화되어 PBLH가 낮게 나타날 수 있고(Allabakash and Lim, 2020; Li et al., 2023), 이러한 사실은 본 연구 사례를 통해서도 잘 확인된다.

Fig. 7, 8에 두 도시의 계절별 사례일의 운고계에 인접한 WRF 격자점에서의 PBLH, 바람, 상대 습도, 마찰 속도, 현열 플럭스, 잠열 플럭스의 일변화를 나타내었다. 먼저 PBLH의 경우 모든 계절에서 뚜렷한 일변화를 보였다. 서울 및 부산 두 지역 모두 이른 아침 시간에 낮은 PBLH가 모의되었고 오후 14~16시에 최고치를 보였다. 특히 여름철의 경우 마찬가지로 PBLH의 최고값은 서울 1,800 m 부산 800 m로서, 부산이 서울보다 2

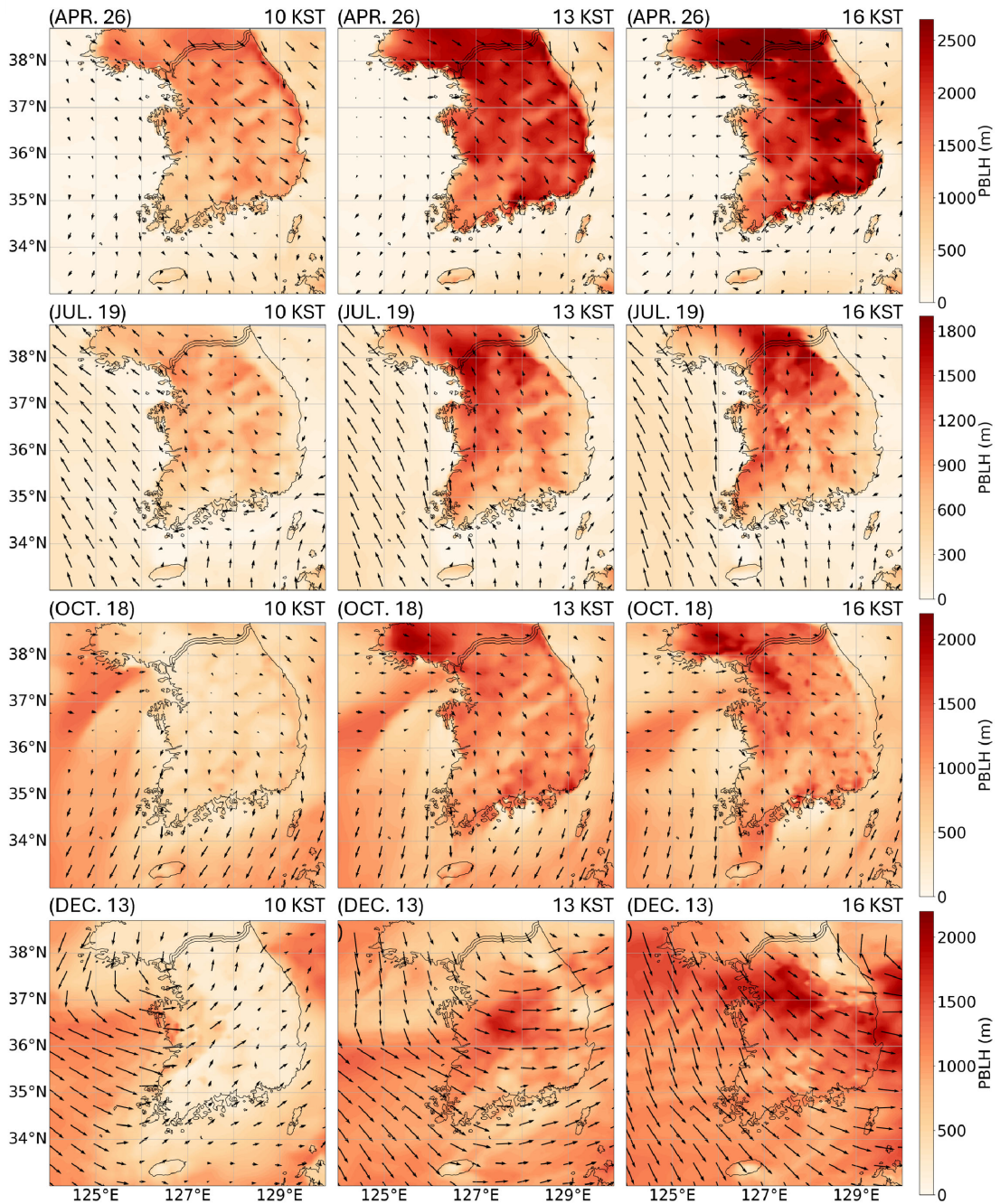


Fig. 5. WRF-simulated spatial PBLH distributions and wind fields for representative four cases: April 26, July 19, October 18 and December 13 at 10, 13, and 16 KST.

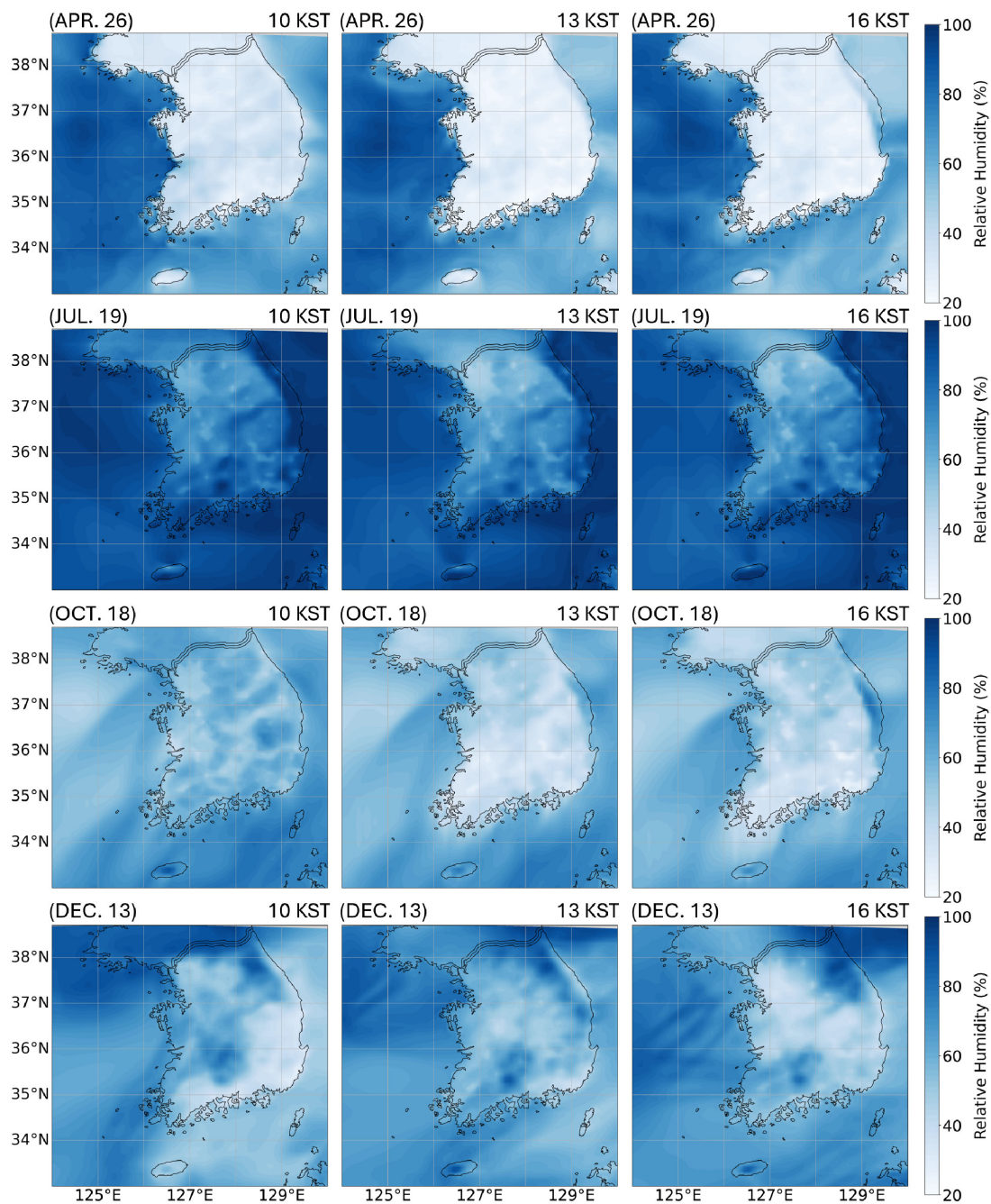


Fig. 6. WRF simulated spatial relative humidity for representative four cases: April 26, July 19, October 18 and December 13 at 10, 13, and 16 KST.

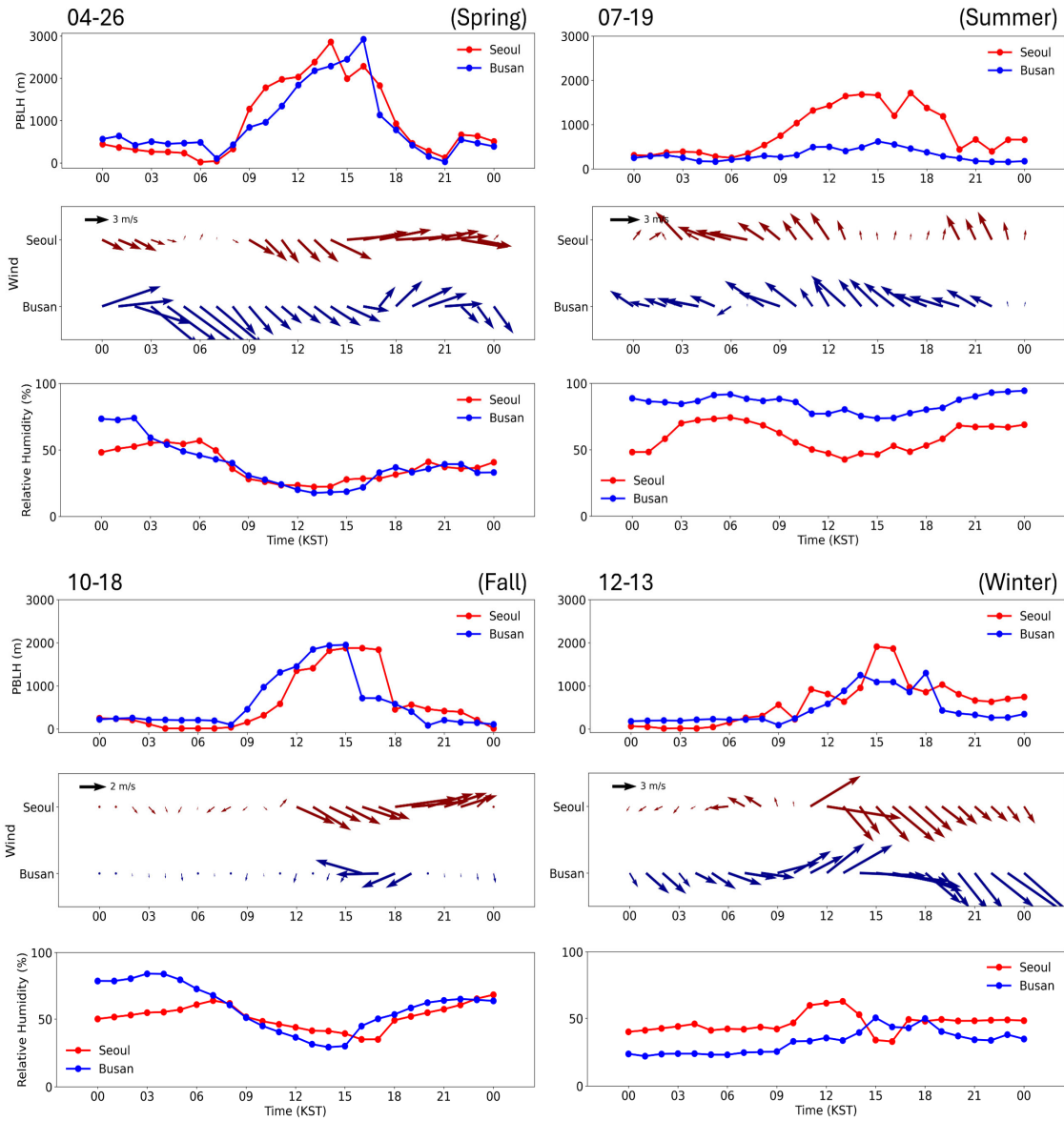
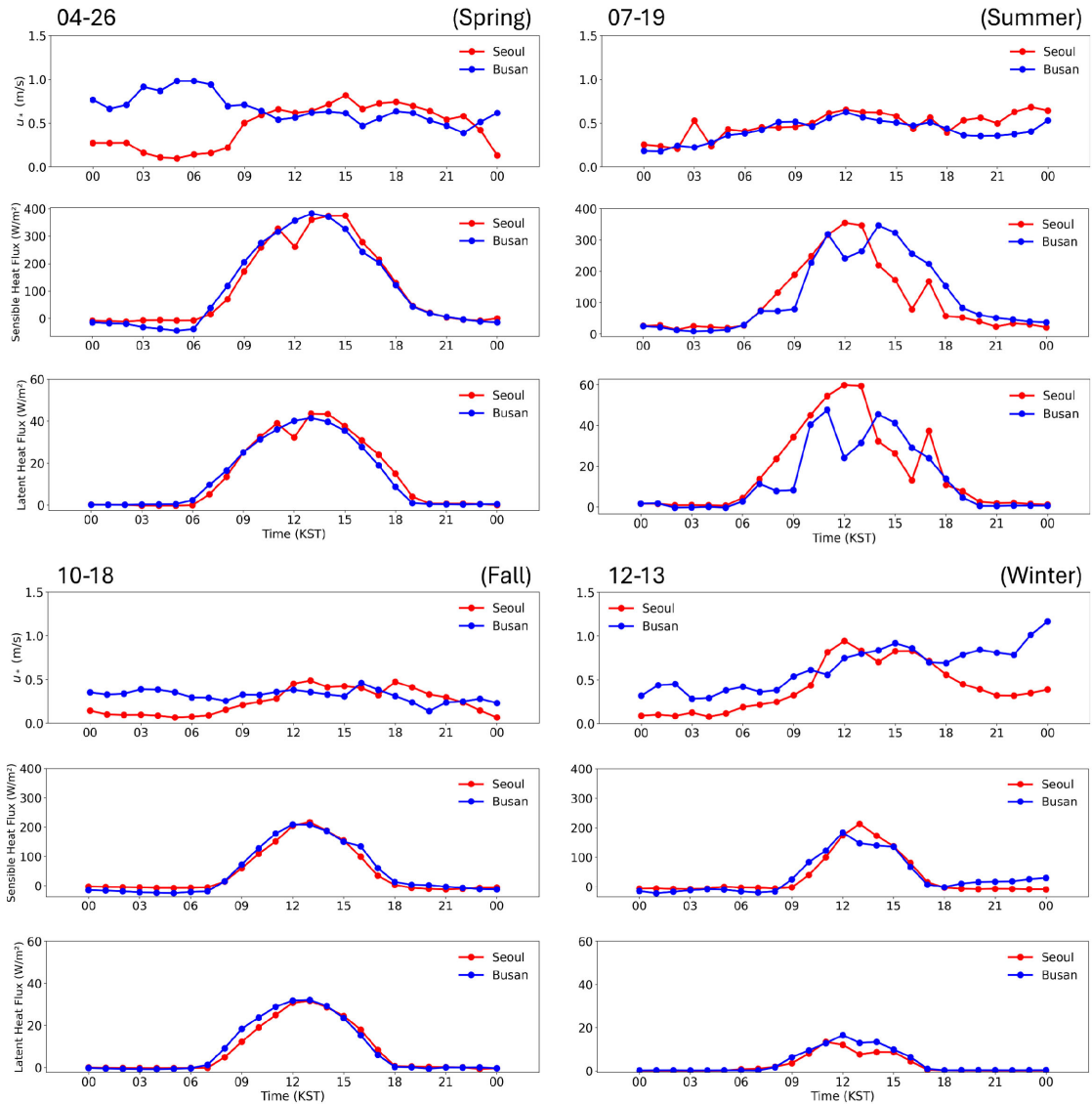


Fig. 7. Daily variations of PBLH, wind, relative humidity simulated by WRF model for representative four cases: April 26, July 19, October 18 and December 13, respectively.

배 이상 낮게 나타났다. 계절별 풍속 및 풍향은 Fig. 5과 크게 다르지 않게 나타났다. 즉, 봄철과 겨울철의 경우, 서울에서는 강한 북서풍이 모의되었고, 여름철에는 전반적으로 남동풍의 우세하였으며 서울의 풍속이 부산에 비해 상대적으로 낮게 모의되었으며, 부산의 경우 북

서풍이, 여름에는 남동풍이 우세함을 확인되었다. 상대 습도 또한 마찬가지로 Fig. 6과 크게 다르지 않게 나타났다. 특히 여름철의 경우 특정 지역에 무관하게 한반도 전체에서 남동풍 혹은 남풍 계열이 모의된 것은 지역적 특성이 반영되는 해륙풍 혹은 산곡풍과 같은 국지 순환



**Fig. 8.** Daily variations of friction velocity ( $u^*$ ), sensible heat flux, latent heat flux simulated by WRF model for season-representative four cases: April 26, July 19, October 18 and December 13, respectively.

보다 종관풍의 영향이 훨씬 우세한 것으로 판단된다.

마찰 속도는 풍속에 비례하여 모의되었고, 서울의 경우 겨울에 전반적으로 높게 모의되었으나 최고값은 주간 풍속이 강한 겨울철에 나타났다. 부산의 경우 주간의 마찰속도는 서울에 비하여 전반적으로 마찰 속도가 소폭 낮게 나타났으나 그 차이는 크지 않았다(Fig. 8). 따라서 두 지역 간 자체 PBLH 성장에 기여하는 바람 쉬어

(Shear)에 의해 발생하는 기계적 난류에 의한 기여도의 차이는 크지 않을 것으로 예상할 수 있다. 현열 플럭스 및 잠열 플럭스 또한 일사량이 강해지는 아침부터 증가하기 시작하여, 오후에 최고치를 보이는 일변화 과정에서 부산이 서울지역에 비해 큰 차이를 보이지 않음을 그림에서 확인할 수 있다. 두 지역의 자체 열플럭스의 유사함에도 불구하고 여름철의 경우 부산의 PBLH는 서

울지역에 비해 현저히 낮은 결과를 보인 것은 결국 해안 지역에서는 육지방향의 국지 순환 혹은 종관기상장이 PBLH를 결정하는 중요한 인자임을 확인할 수 있다. 이러한 양상은 여름철 수평 바람 분포를 나타낸 Fig. 5와 습도의 이류를 나타낸 Fig. 6으로부터 이러한 사실이 잘 확인된다.

마찰 속도, 현열 플럭스, 그리고 잠열 플럭스는 PBL의 국지적 성장에 있어 매우 중요한 인자이다. 이러한 인자들은 일사량, 지표 특성 등과 밀접하게 연관되어 대기오염물질의 연직 혼합에 직접적으로 관여하게 된다. 그러나 해안지역의 경우 지역적 차이 이외에도 해양의 MBLH 및 수증기 이류와 연관된 국지 순환 혹은 종관기상상태와 매우 연관성이 많으며 이러한 결과는 여름철 부산에서 나타났듯이 지역 PBL의 특징을 설명하는데 중요한 시사점을 제공한다. 따라서 해안지역의 공단지역과 같은 대규모 공단 밀집 지역의 경우 이러한 해안지역의 PBL 특성을 잘 이해하여야 하며, 동일한 차원에서 부산 또한 더 다양한 사례와 상세한 PBL 분석이 필요할 것으로 판단된다.

결론적으로, 해양에 인접한 도시인 부산의 경우, 여름철 해륙풍과 같은 남서풍이 항상 우세하여 MBL의 지역적 특성이 기후적 요소로 작용할 수 있다. 해양은 열용량이 높아서 해수면 온도의 일변화가 거의 없으므로 MBLH는 육지에 비해 낮고 그 일변화 또한 무시할 수 있다. 이에 따라 MBL 내에서는 대기 중의 수증기 함량이 높아서, 종관풍 혹은 해륙풍 등의 순환에 의해 해양에서 육지로 이루어져 PBLH가 낮게 유지되는 요인이 될 뿐만 아니라, 이류된 수증기로 대기가 상대적으로 더 안정화되며 높은 수분 함량으로 인해 지표로부터의 플럭스의 양을 조절하여 지역 PBLH의 낮은 성장을 유도하게 된다(Fabry, 2006; Zeng et al, 2024). 부산의 경우 WRF에서의 계절을 대표하는 각 사례에 대한 바람장모의 결과에서 나타났듯 해륙풍뿐만 아니라 여름철 남풍의 우세한 종관풍에 의해 낮은 PBLH의 특성이 확인되었으며, 이는 남풍계열의 종관풍에 의해 해양의 대기가 육지로 이동할 경우, 부산과 같은 해안 도시지역의 PBLH에 폭넓게 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 서울과 부산지역을 대상으로 2020년을 대상으로 PBLH의 변화를 분석하고, 두 도시 간의 지

역적 특성을 PBLH와 연관시켜 분석하였다. 먼저 ERA5 재분석 자료와 운고계 데이터로부터 도출한 두 지역의 일 최고 PBLH의 월 및 일별 변화를 비교하였고, 각 계절별 대표사례를 선정하여 일기도와 WRF 모델에서 모의되는 결과를 통해 지역별 PBLH와 연관되는 종관 및 미기상 특성을 분석하였다.

연구 결과, 서울과 부산의 PBLH는 지역 특성에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 서울은 사계절 내륙의 영향을 보여서 PBLH가 부산보다 높게 나타나는 경향을 보였으며, 이러한 경향은 특히 여름철에 특히 더 현저하게 나타났다. 부산은 해안 도시로서 여름철에는 해양의 영향으로 서울에 비해 2배 이상 낮은 PBLH를 보였다.

WRF 모델링 결과에서도 이러한 경향이 잘 확인되었다. 즉, 서울은 대체로 낮고 상대적으로 더 건조하여 하층 대기가 불안정해지면서 PBLH의 성장이 활발한 반면, 부산은 이류된 높은 습도로 인해 대기가 상대적으로 더 안정화되어 PBLH의 발달이 억제되는 경향을 보였다. 이러한 차이는 계절별로 더 두드러지게 나타났으며, 특히 여름철 부산의 PBLH는 MBLH의 영향을 강하게 받는 계절로 확인되었다.

본 연구는 내륙과 해안을 대표하는 서울과 부산지역의 지역적 특성에 따른 PBLH의 차이를 이해하는 데 중요한 시사점을 제공하며, 지역별 기상 예측 및 대기오염 관리에 유용한 기초 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 현 연구 결과를 바탕으로 보다 다양한 사례별 분석을 통해 부산지역의 국지순환과 PBLH 관계를 더 심도 있게 분석할 필요가 있다. 특히 부산지역의 높은 오존 농도는 해안지역의 특성상 국지 재순환에 의한 효과가 우세한 지역으로 오염물질의 이류와 연직 확산에 대한 연구가 필수적인 지역이다. 이를 통해 부산지역의 대기오염 확산 예측 및 기상 모델의 정확성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2020R111A2075417). 본 논문을 세심하게 심사해 주신 심사위원분들께 감사드립니다.

## REFERENCES

- Allabakash, S., Lim, S., 2020, Climatology of planetary boundary layer height-controlling meteorological parameters over the Korean peninsula, *Remote Sens.*, 12, 2571-2591.
- Alvarez-Valencia, A., Colon-Perez, J. L., Jury, M. R., Jimenez, H. J., 2024, Meteorological modulation of atmospheric boundary layer height over a Caribbean island, *Atmosphere*, 15, 1007-1021.
- Angevine, W. M., 2008, Transitional, entraining, cloudy, and coastal boundary layers, *Acta Geophysica*, 56, 2-20.
- Chen, X., Schofield, R., Keywood, M., Cleland, S., Williams, A. G., Wilson, S., Griffiths, A., Xiang, Y., 2023, Observations of the boundary layer in the Cape Grim coastal region: Interaction with wind and the influences of continental sources, *Remote Sens.*, 15, 461-477.
- Diaz, J. P., Exposito, F. J., Perez, J. C., Gonzalez, A., Wang, Y., Haimberger, L., Wang, J., 2019, Long-term trends in marine boundary layer properties over the Atlantic ocean, *J. Climate*, 32, 2991-3004.
- Emeis, S., Munkel, C., Vogt, S., Muller, W. J., Schafer, K., 2004, Atmospheric boundary-layer structure from simultaneous SODAR, RASS, and ceilometer measurements, *Atmos. Environ.*, 38, 273-286.
- Fabry, F., 2006, The spatial variability of moisture in the boundary layer and its effect on convection initiation: Project-long characterization, *Mon. Weather Rev.*, 134, 79-91.
- Hanley, K., Belcher, S. E., 2008, Wave-driven wind jets in the marine atmospheric boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 65, 2646-2660.
- Lee, H. J., Jo, H. Y., Kim, J. M., Bak, J. S., Park, M. S., Kim, J. K., Jo, Y. J., and Kim, C. H., 2023, Nocturnal boundary layer height uncertainty in particulate matter simulations during the KORUS-AQ Campaign, *Remote Sens.*, 15, 300-312.
- Li, X., Dong, Y., Zhang, Y., Shi, Z., Yao, J., 2023, Climatology of planetary boundary layer height over Jiangsu, China, based on ERA5 reanalysis data, *Atmosphere*, 14, 1330-1336.
- Liu, C., Li, X., Song, J., Zou, Z., Huang, J., Zhang, J. A., Jie, G., Wang, J., 2022, Characteristics of the marine atmospheric boundary layer under the influence of ocean surface waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 52, 1261-1276.
- Liu, S., Liang, X. Z., 2010, Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height, *J. Climate*, 23, 5790-5809.
- Min, J. S., Park, M. S., Chae, J. H., Kang, M., 2020, Integrated system for atmospheric boundary layer height estimation (ISABLE) using a ceilometer and microwave radiometer, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 6965-6987.
- Park, M. S., Park, S. H., Chae, J. H., Choi, M. H., Song, Y., Kang, M., Roh, J. W., 2017, High-resolution urban observation network for user-specific meteorological information service in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 1575-1594.
- Park, S. U., Lee, Y. U., Bong, J. H., 1989, Special observations for the growth of the mixed layer, *J. Korean Met. Soc.*, 25, 138-147.
- Seidel, D. J., Zhang, Y., Beljaars, A., Golaz, J. C., Jacobson, A. R., Medeiros, B., 2012, Climatology of the planetary boundary layer over the continental United States and Europe, *J. Geophys. Res.*, 117, D17106.
- Steyn, D. G., 1980, Turbulence, diffusion and the daytime mixed layer depth over a coastal city, Ph. D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Stull, R. B., 1988, *An Introduction to boundary layer meteorology*, 1st ed., Springer, 19-23.
- Tomasi, F. D., Miglietta, M. M., Perrone, M. R., 2011, The Growth of the planetary boundary layer at a coastal site: A Case study, *Boundary-Layer Meteorol.*, 139, 521-541.
- Zeng, X., Brunke, M. A., Zhou, M., Fairall, C., Bond, N. A., Lenschow, D. H., 2004, Marine atmospheric boundary layer height over the eastern Pacific: Data analysis and model evaluation, *J. Climate*, 17, 4159-4170.
- Zeng, X. M., Li, C., Wang, N., Ullah, I., 2024, Impacts of land-atmosphere interactions on boundary layer variables: A Classification perspective from modeling approaches, *Atmosphere*, 15, 650-658.



- 
- Master's course. Min-Seong Kim  
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University  
soeng0923@gmail.com
  - Master's course. Sang-Seok Oh  
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University  
tkdtjr501@pusan.ac.kr
  - Professor. Moon-Soo Park  
Department of Climate and Environment, Sejong University  
moonsoo@sejong.ac.kr
  - Doctor. Minsoo Kang  
Department of Climate and Environment, Sejong

- 
- University  
kangms8995@sejong.ac.kr
  - Professor. Junshik Um  
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University  
jjunum@pusan.ac.kr
  - Doctor. Hyun-Young Jo  
Institute of Environmental Studies, Pusan National University  
hycho@pusan.ac.kr
  - Professor. Cheol-Hee Kim  
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University  
chkim2@pusan.ac.kr