

강릉지역 2009~2018년 해풍 발생 특성

황혜원^{1),2)} · 은승희¹⁾ · 김병곤^{1)*} · 박상종²⁾ · 박균명³⁾

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾한국해양과학기술원 부설 극지연구소,
³⁾강원지방기상청 관측과

(접수일: 2020년 5월 11일, 수정일: 2020년 7월 3일, 게재확정일: 2020년 7월 16일)

Occurrence Characteristics of Sea Breeze in the Gangneung Region for 2009~2018

Hyewon Hwang^{1),2)}, Seung-Hee Eun¹⁾, Byung-Gon Kim^{1)*}, Sang-Jong Park²⁾, and Gyun-Myeong Park³⁾

¹⁾Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

²⁾Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon, Korea

³⁾Observation Division, Gangwon Regional Meteorological Office, KMA, Gangneung, Korea

(Manuscript received 11 May 2020; revised 3 July 2020; accepted 16 July 2020)

Abstract The Gangneung region has the complicated geographical characteristics being adjacent to East Sea and Taebak mountains, and thus sea breeze could play an important role in local weather in various aspects. This study aims to understand overall characteristics of sea breeze largely based on long-term (2009~2018) ground-based observation data. We also propose a selection criteria of sea breeze occurrence day; 1) daily precipitation is less than 10 mm, 2) surface wind direction is 0~110° (northerly to easterly) for more than 3 hours during the daytime, 3) wind direction is 110~360° for more than 3 hours during the nighttime, and 4) land and sea temperature difference is positive during the daytime, 5) sea and land sea-level pressure difference is more than 0.5 hPa. As a result, a total of 595 days was selected for the past 10 years. The occurrence of sea breeze is the highest in late Spring to early Summer (May to June). The passage time of sea breeze at the inland station (1.6 km farther inland) is one hour later than the coastal station. On the typical sea breeze event of April 12, 2019, the passage speed and duration of sea breeze was 15 km hr⁻¹ and about 9 hours, respectively, with its depth of about 500 m and its head swelling. The current results emphasize the critical role of sea breeze in forecasting surface temperature and wind, and contribute to relieve heat wave especially in summer in the Yeongdong region.

Key words: Sea breeze, East Sea, occurrence, Gangneung

1. 서 론

해풍은 연안지역을 중심으로 비교적 구름이 없는 날 일사에 의한 지표면 차등가열에 의해 육지의 표면

이 바다보다 더 빨리 가열될 때 발생한다. 이러한 비열차로 인해 바다에서 육지로 향하는 국지적인 수평 기압 경도력을 유도하여 바다위의 차고 습한 공기가 내륙으로 진입하게 된다(Simpson, 1994; Masselink, 1998; Miller et al., 2003). 따라서 해풍의 진입은 해안지역의 무더운 날씨를 경감시키는 역할(Simpson, 1994; Camberlin and Planchon, 1997)을 하며, 해풍진입 거리 및 강도에 따라 하층대기의 기온과 바람의 일변화에도 영향을 준다(Prakash et al., 1992; Chiba,

*Corresponding Author: Byung-Gon Kim, Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukhungil, Gangneung 25457, Korea.
Phone: +82-33-640-2326, Fax: +82-33-640-2320
E-mail: bgk@gwnu.ac.kr

1993). 또한 연안지역을 중심으로 공장이나 대도시가 조성된 경우 대기질에 영향을 주기도 한다(Physick and Abbs, 1992; Jung et al., 2001; Gangoiti et al., 2002; Lee et al., 2002; Papanastasiou et al., 2009). 따라서 해풍은 국지적인 기상현상을 이해하는 데 필수적이며, 지역 일기예보 정확도 향상을 위해서도 중요하다.

유럽의 주요 해안가에서는 해풍의 특성을 이해하기 위한 연구가 진행되었는데, Borne et al. (1988)은 스웨덴 서쪽 해안가 특성에 따른 6단계의 해풍 선정기준으로 해풍 발생일을 분석하였고, Furberg et al. (2002)은 이탈리아 Sardinia섬의 12개 해안 관측소에서 해풍의 기후학적 특성을 제시하였는데, 대부분의 관측소에서 평균적으로 5~8월에 해풍 발생빈도가 높았으며, 해풍의 시작은 일출 후 4시간 이후에, 종료는 일몰 1시간 이내에 나타났다. Papanastasiou et al. (2009)은 그리스 Volos 지역에서의 5년간의 해풍 특성을 조사하고 오존 및 PM₁₀ 농도와와의 연관성에 대해 분석하였는데, 해풍 시작시간이 9~11시, 종료시간이 20~22시로 각각 나타났다. 또한 해풍 발생시 풍속의 평균값이 감소하여 오존과 PM₁₀ 농도가 해풍 발생일에 더 높다고 보고한 바 있다. Azorin-Molina et al. (2011)은 스페인 남동부에 위치한 Alicante 만에서 19개 관측소를 활용하여 6년간 총 475개의 해풍일을 분석하였는데, 해풍이 평균적으로 최대 10~11시간 지속되었으며 진입거리는 6월에 약 120 km, 12월에 35 km로 계절적 차이를 보였다.

한편 국내 해륙풍 관련 연구로는 Jung et al. (2001)이 부산 연안지역에서 나타나는 해륙풍을 대상으로 지형 및 지리적 효과에 대해서 집중적으로 살펴보고 해륙풍 순환 특성을 분석하였는데, 일반적으로 해안선에 가까운 지점일수록 해풍의 시작이 빠르다는 점(Simpson, 1994)과 다르게, 부산 내륙의 지형경사와 해안선의 굴곡이 해풍의 시작시간에 영향을 줄 수 있다는 결과를 보였다. Lee and Park (2002)은 남동해안 공업단지에서 발생한 해풍으로 대기오염물질(O₃, SO₂) 농도가 남해안과 동해안에서 각각 다르게 변화하는 모습을 보여주었다. 그리고 최근 Lim and Lee (2019)은 보성 종합기상관측탑에서 지상부터 300 m의 11개 층에서 관측된 바람과 기온자료를 통해 해풍 유입 시 해풍구조와 특징을 나타냈는데, 해풍 선정기준을 제시하여 4년간의 분석기간 중 총 569일이 선정되었으며, 5월과 9월에 높은 발생빈도를 보였다. 강원 영동 지역에서 발생한 해풍 연구를 살펴보면, Cho (1994)는 강릉지점이 해안근처에 위치한 속초, 동해지점보다 해풍의 영향을 덜 받으며, 온도가 더 높은 것으로 보고한 바 있다. 또한 Lee et al. (1998)은 영동지역 봄철에 해풍이 발생할 때는 풍향이 오전 8~10시경에

변하기 시작됨을 확인하였다. Ha and Lee (2011)은 WRF 모델을 통해 영동 해안지역을 대상으로 지면 피복정보에 따른 해풍 유입과 유입고도를 확인한 바 있다. Namgung et al. (2005)은 강릉지역에 역전층이 해풍의 발달을 억제하며 내륙으로 진입거리를 제한한다고 보고하였다.

그러나 이와 같이 국내의 활발한 해륙풍 연구에도 불구하고 국내 해륙풍 관련 연구들은 일부 에피소드 분석이나 수치모델링 연구에 주로 한정되어 있었다. 특히 강릉지역의 대기 흐름은 해풍의 영향을 많이 받고 있지만, 이 지역에 적합한 해풍 선정 방법과 장기간 기후학적 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 장기간(2009~2018년) 관측자료를 활용하여 (1) 강릉지역의 해풍 선정 방법을 제시하고, (2) 해풍 발생일의 장기간 특성과 대표적인 해풍사례의 연직 및 수평 구조를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 관측 지점 및 자료

강릉지역의 해풍 선정방법을 제시하고 장기간 해풍 특성을 분석하기 위하여 2009년부터 2018년까지 10년간 주로 강릉(GN)과 북강릉(BGN) 지점을 대상으로 지상관측자료를 사용하였으며, 추가로 강릉원주대학교(GWNU) 지점에서는 운영중인 자기온도계 자료를 참조하였다. Figure 1은 주요 관측 지점의 위치와 강릉지역의 지형을 함께 나타낸 것이다. 분석영역의 동쪽으로 동해가 인접해 있고, 서쪽으로는 태백산맥이 위치하고 있다. 강릉지점은 1911년부터 2008년까지 강원지방기상청이 위치하였고, 현재는 무인 관측소로 운영되고 있다. 강릉 지점은 해안선으로부터 직선거리로 5.2 km 정도 떨어져 있으며, 강릉 시내 도심지역에 위치하고 있다. 북강릉 지점은 2008년부터 현재까지 강원지방기상청이 위치한 곳이며, 도심 번두리지역으로 해안선으로부터 3.6 km 떨어져 있다. 본 연구에서 제시한 3개 관측지점 중에서 해안가와 가장 근접하여 위치하고 있다. 마지막으로 강릉원주대학교 지점은 강릉과 북강릉 관측소의 중간에 위치하고 있으며, 해안선으로부터 5.3 km 떨어진 곳에 위치한다. 이와 더불어 동 기간에 동해상에 위치하는 동해 부이자료도 사용하였다. 동해 부이는 해안선으로부터 동쪽으로 약 70 km 떨어진 지점에 위치한다. 지점별 위치 및 상세정보는 Table 1에 제시하였다.

각 지점에서 사용된 관측장비 및 사양은 Table 2에 제시하였다. 장기간 해풍 선정 및 일변화 분석을 위해 강릉과 북강릉 지점에서는 중관기상관측시스템(Automated Synoptic Observed system; 이하 ASOS)에서 관측되는 1분 평균 기온, 풍향, 풍속, 강수량, 해면

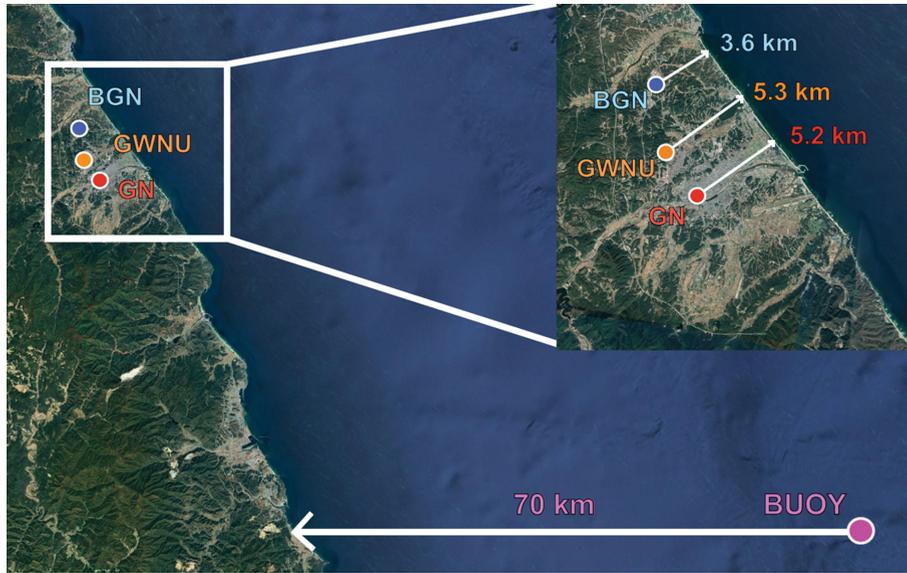


Fig. 1. Location of the main observation sites. GN and BGN are for Gangneung and Bukgangneung, respectively. GWNU is for Gangeung-Wonju National University.

Table 1. Detailed information of the analysis stations.

Site	Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)	Distance from the coast (km)	Instruments
Gangneung (GN)	37.75	128.89	27	5.2	ASOS*
Bukgangneung (BGN)	37.80	128.86	76.9	3.6	ASOS* Wind profiler
Gangneung Wonju National University (GWNU)	37.77	128.87	18.8	5.3	Thermograph Rawinsonde** Weather Sensor
East sea	37.54	130.0	-	70	Buoy

*ASOS (Automatic Synoptic Observed System).

**Rawinsonde launched on 3 May 2019 only.

기압 자료 등을 사용하였다. 또한 해풍의 연직구조를 분석하기 위하여 북강릉 지점의 수직측풍장비(Wind profiler) 10분 평균 바람자료를 활용하였다. 강릉과 북강릉 지점의 중간지점인 강릉원주대학교 지점은 2009년부터 현재까지 관측중인 자기온도계 자료를 이용하여 해풍 발생 여부를 이중 점검하였다. 또한 특정 해풍 에피소드 분석 기간 동안 강릉원주대학교에서 레윈존데 관측을 실시하여 해풍의 진입확인 및 북강릉 지점의 수직측풍장비와의 연직 바람을 비교하였다. 마지막으로 해풍 진입 시 육지와 해양의 온도와 기압차를 분석하기 위하여 동해 부이(Buoy)의 해수면 온도, 기온 그리고 기압자료가 사용되었다.

마지막으로 강릉지역 해풍 진입 시 내륙으로 진입 여부와 해풍 진입거리 및 속도를 분석하기 위하여 강원 중부 산지 및 동해안 지역의 24개의 고해상도 기상관측센서를 활용하였는데, 강원지역 24개 지점에 대한 정보는 Table 3에 제시하였다.

2.2 강릉지역 해풍 선정 방법

해풍은 해안지역에서 비교적 구름이 없는 맑은 날 주간에 육지와 해양의 차등가열에 의해서 형성되는 열적 수평 기압경도력에 의해 바다에서 내륙으로 부는 바람이다(Miller et al., 2003). 특히 강릉지역 서쪽으로는 태백산맥이 위치하고 있고, 동쪽으로는 동해

Table 2. Specification of the instruments used for this study.

	Thermograph	ASOS	Weather sensor	Rawinsonde	Wind profiler	Buoy
Model	NSII-Q (Quartz type)	-	WS500-UMB	DFM-09 (GRAW)	LAP-3000 (Scintec AG)	-
Variable	T (°C)	T (°C) SLP (hPa) WD (deg) WS (m s ⁻¹) Precip (mm)	T (°C) WD (deg) WS (m s ⁻¹)	T (°C) RH (%) P (hPa) WD (deg) WS (m s ⁻¹)	WD (deg) WS (m s ⁻¹)	T (°C), SLP (hPa)
Observation height (m)	1.5	10	18.8	About every 5 m	Low (150~4000 m) High (1000~6000 m)	Sea level
Time resolution	**	1 min	1 min	1 sec	10 min	1 hour
Analysis period	2009.1.1~ 2018.12.31	2009.1.1~ 2018.12.31	2018.11.23~ 2019.7.31	2019.5.3	2017.1.1~ 2018.12.31	2009.1.1~ 2018.12.31

SLP Sea level pressure; WD Wind speed; WS Wind Speed.

**Thermograph sheet is replaced once a week since 2009.

Table 3. Location information of 24 integrated meteorological stations.

Site		Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)
AIH	Aninhang	37.74	128.99	21.6
GNH	Gangneunghang	37.77	128.95	5.6
GP	Gyeongpoho	37.80	128.90	1.7
SCH	Sacheonhang	37.84	128.88	3.3
YJH	Yeongjinhang	37.87	128.84	11.5
HSDR	Hasidong-ri	37.74	128.95	2.8
BGN	Bukgangneung	37.80	128.86	76.9
SCSK	Sacheon-seokgyo	37.84	128.82	53.6
GJG	Gujeong-geumgwang	37.72	128.92	17.9
GWNU	Gangneung-wonju National University	37.77	128.87	18.8
DS	Damsan	37.71	128.90	47.2
GJUD	Gujeong-eodan	37.70	128.90	100.7
SSSA	Seongsan-songam	37.77	128.84	130.4
SSGS	Seongsan-gusan	37.72	128.84	49.7
GN	Gangneung-hyugesoo	37.76	128.81	322.6
SGMR	Sagimak-ri	37.79	128.79	140.0
SSSB	Seongsan-sanbuk	37.70	128.83	154.5
WSDM	Wangsan-doma	37.66	128.85	164.9
SSUH	Seongsan-eoheul	37.72	128.78	458.1
WSR	Wangsan-ri	37.67	128.80	210.2
SCSB	Sachinsibi	37.69	128.76	771.2
UYJ	Uiyaji	37.69	128.72	761.3
CHR	Chahang-ri	37.69	128.67	787.9
BWS	Balwangsang	37.61	128.67	1438.9

바다와 인접해 있는 지형적인 특성을 가지고 있다. 따라서 강릉 지역의 지형 특성에 적합한 해풍 선정 방법과 이를 통한 장기간의 해풍발생 특성 이해가 필요하다.

우선 전형적인 해풍 발생일의 온도의 일변화 특성을 제시하고자 한다. Figure 2는 2019년 4월 12일과 5월 3일의 자기온도계(Thermograph)로 관측한 온도의 시간변화를 나타낸 것이다. 해풍이 내륙으로 유입될

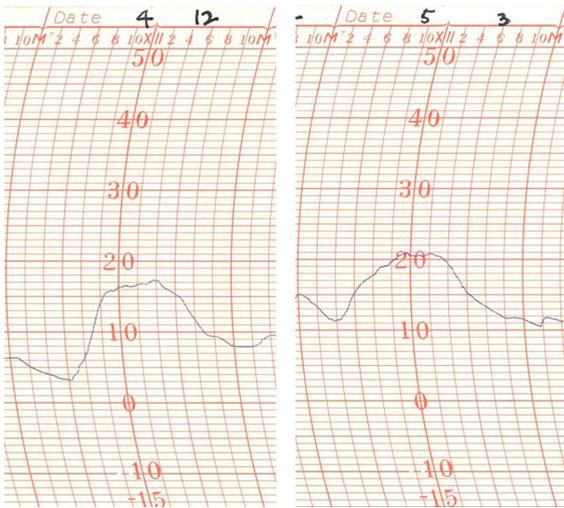


Fig. 2. Examples of temperature variations observed with thermograph at GWNU for a typical sea breeze occurrence day such as 12 April 2019 and 3 May 2019.

경우, 강릉 지역은 오전 10~11시경에 온도가 더 이상 상승하지 못하고 온도상승이 둔화되거나 온도가 일정해지는 경향을 보였다. 이는 낮 시간대에 태양 남중 고도가 증가함에도 불구하고 상대적으로 차가운 해풍에 의해 강릉의 온도 상승이 억제되기 때문으로 생각된다. 이러한 강릉지역 해풍 특성을 참조하고, 해풍의 정의, 기존 선행연구, 강릉지역의 지형 특성 등을 고려하여 크게 5가지 절차를 통해 해풍발생일을 선정하였다. 그리고, 선정된 해풍일의 자기온도계 온도변화 그래프를 통해 다시 한번 해풍 발생 여부를 검토하였다.

첫째, 일 강수량은 10 mm 미만으로 제한하였는데 (Lim and Lee, 2019), 이는 해풍은 지역풍(local wind)이기 때문에 종관장의 영향을 최소화하기 위한 기준이다. 둘째, 주간에 연속으로 3시간 이상 풍향이 0~110° (북풍~동풍)으로 유지될 때를 해풍 발생일로 선정하였다. 강원 영동지방의 해안선은 북쪽으로는 북서방향, 남쪽으로는 남동방향으로 형성되어 있기 때문에 북풍이 진입하더라도 해풍의 영향을 받을 수 있다 (Gangwon Regional Meteorological Office, 2004). 하지만 해풍 진입 시 육지 및 주변 산지의 영향을 최대한 배제하기 위하여 0~110°를 해풍의 풍향 기준으로 정하였다. 셋째, 일몰 이후에는 해양과 내륙 간의 비열차이로 인해 발생하는 육풍으로 전환 여부를 확인하기 위하여 연속으로 3시간 이상 풍향이 110~360°로 유지되는 사례를 선정하였다. 이 조건은 주간 해풍이 야간에는 육풍으로 변하여, 종관 강제력의 영향을 받지 않는 해풍 발생일만을 선정하기 위한 것이다. 넷째, 육지(관측지점)와 해양(부이) 온도차($T_{Land} - T_{sea}$)

에 의한 해풍 발생을 고려하기 위하여 육지 관측소가 해양(부이)보다 기온이 높은 경우만을 고려하였다(Borne et al., 1998; Furberg et al., 2002). 마지막으로, 해풍은 해양과 내륙의 차등가열로 발생하는 수평 기압경도력에 의해 바다에서 육지로 부는 바람이기 때문에 해면기압 차이($SLP_{sea} - SLP_{land}$)가 0.5 hPa 이상인 사례만을 선정하였다. 여기서 SLP_{sea} 와 SLP_{land} 는 각각 해양(부이)과 육지 관측소의 해면기압을 의미한다. 그리고 0.5 hPa는 해면기압차 빈도분포를 조사하고 이를 고려하여 주관적으로 결정하였지만 임계값의 차이가 해풍특성 결과에 큰 영향을 주지는 않는 것으로 판단된다. 선정방법에서 풍향, 기압 등 기상변수 변화를 살펴볼 때 연속으로 3시간 이상 지속되는 사례들만 고려하였는데, 이는 풍향 또는 기압의 일시적인 변화로 인해 발생하는 사례들을 분석에서 제외하기 위함이다(Lim and Lee, 2019). 또한 모든 조건에서 해풍이 발생하는 시간은 현지 일출시간(Local Sun Rise: LSR) 1시간 이후부터 현지 일몰시간(Local Sun Set: LSS)으로 정하였다. 해풍은 주간에 육지와 해양의 비열차로 발생하는 바람으로, 태양 복사에 의한 차등가열은 일출시간에 바로 나타나는 것이 아니라 시간 경과가 필요하기 때문에 현지 일출시간 1시간 이후부터 현지 일몰시간까지 해풍 발생여부를 판단하였다. 그리고 위 조건을 거쳐 최종적으로 해풍 발생일로 선정된 사례들의 계절별 주요 종관장 특징을 살펴보았다. 이상의 강릉지역 해풍 선정방법을 간략하게 정리하여 Fig. 3에 제시하였다.

3. 연구결과

3.1 해풍 발생 시 계절별 종관패턴 특성

해풍 발생시 종관적 특징을 살펴보기 위해 계절별 해풍일의 종관 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-Interim 자료를 사용하였고, 해풍 사례일(봄 252일, 여름 188일, 가을 106일, 겨울 49일)의 낮 시간대인 0600 UTC(1500 KST)의 1000 hPa와 850 hPa 지위고도의 합성환(composite) 수평 분포 유형을 Figs. 4, 5에 각각 제시하였다.

Figure 4는 1000 hPa 지위고도의 수평분포를 계절별로 나타낸 것인데, 계절별로 지배하는 종관장의 특징은 조금씩 다르지만 전반적으로 한반도 주변은 등고선의 간격이 넓고 주로 기압능의 영향을 받고 있다. 그리고 한반도 주변의 바람은 약 2 m s^{-1} 이하로 매우 약한 것을 확인할 수 있다. 850 hPa 지위고도(Fig. 5)에서도 약한 기압경도력이 잘 나타나 있지만, 여름철의 경우는 한반도가 북태평양 고기압 영향권에 있으면서 기압경도력이 가장 약하게 나타났다. 또한 한

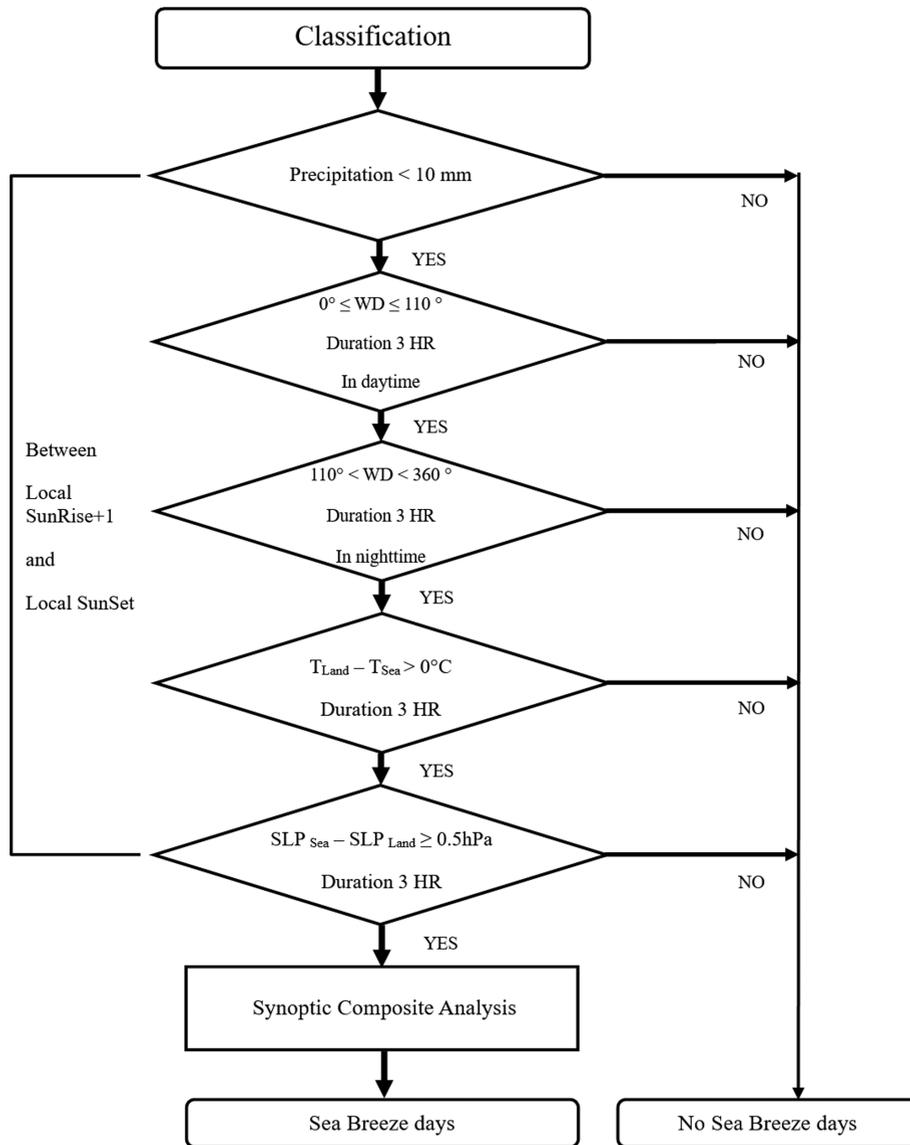


Fig. 3. Flow chart to select sea breeze occurrence days in the Gangneung region.

반도 주변에서 등고선이 동서방향으로(zonal) 배열된 유사한 경향을 보였으며, 해풍이 발달할 사례일들의 경우 기압경도력의 약화로 인해 중관풍 역시 감소한 것을 확인할 수 있다.

3.2 강릉지역 해풍 선정 및 장기간 발생특성 분석

2절 연구 방법에서 장기간(2009~2018년) 관측자료를 활용하여 강릉지역의 해풍 선정방법을 제시하였고, 이를 기반으로 강릉과 북강릉 관측소의 해풍 발생일을 각각 선정하였다. 본 절에서는 지난 10년간 선정

된 해풍의 기후학적 특성과 더불어 해풍의 발생빈도, 해풍의 진입 및 종료시간, 지속시간 등을 분석하였다.

Table 4와 Table 5는 강릉지역 해풍 선정방법에 따른 강릉과 북강릉 각각의 월별 해풍발생일을 제시한 것이다. 2009~2018년 동안 강릉의 해풍 발생일수는 595일(연평균 59일)이며, 봄 252일, 여름 188일, 가을 106일, 겨울 49일로 나타났다. 그리고 같은 기간 북강릉의 해풍 발생일수는 총 893일(연평균 89일)이며, 봄 358일, 여름 279일, 가을 184일, 겨울 72일로 나타났다. 전반적으로 강릉과 북강릉 지점은 늦봄과 초여름

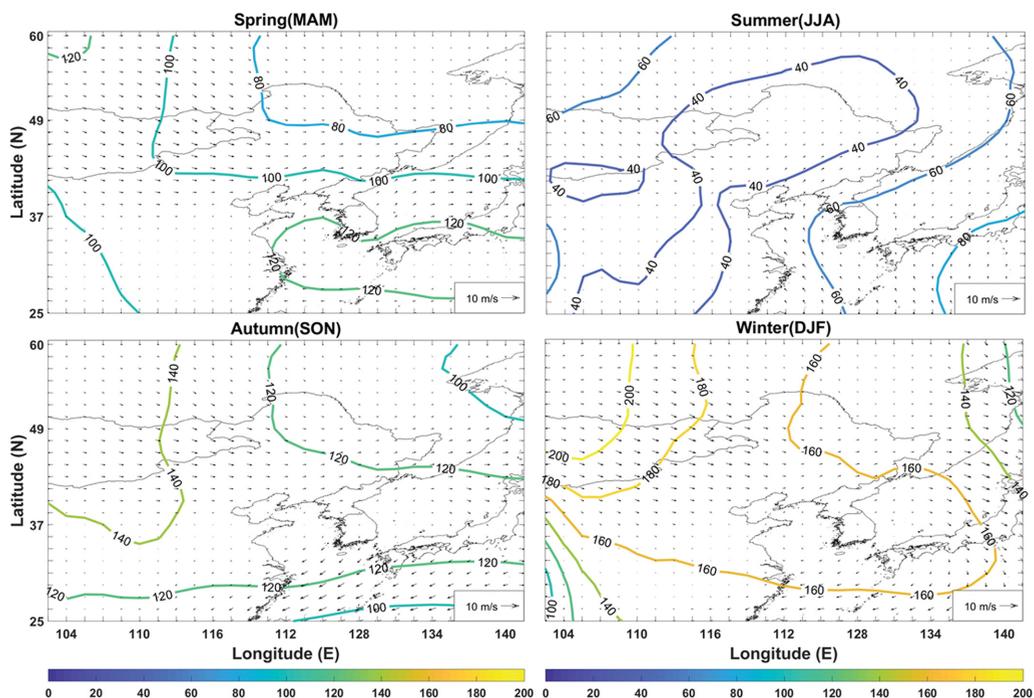


Fig. 4. Seasonal composite maps of 1000 hPa geopotential height (gpm) fields for the sea breeze days, being overlaid with the wind vector fields. MAM indicates March, April, and May. Similarly, JJA June, July, and August; SON September, October, and November; DJF December, January, and February.

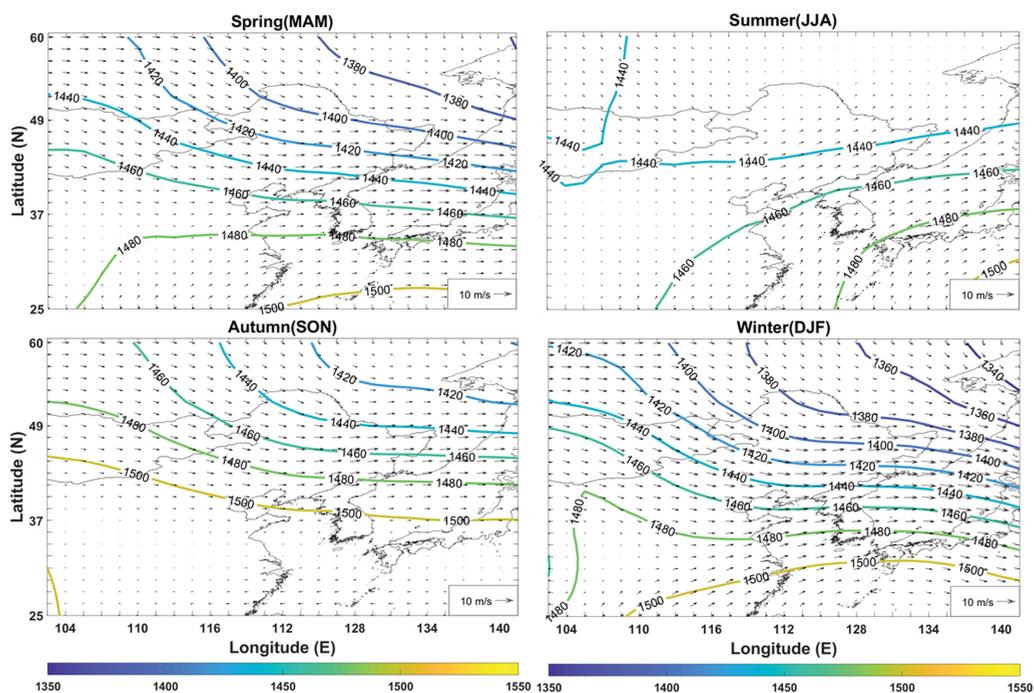


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for 850 hPa.

Table 4. The number of sea breeze occurrence days at GN from 2009 to 2018.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Sum
2009	2	10	9	14	16	6	11	10	16	12	2	2	110
2010	1	6	8	12	10	15	0	0	0	1	2	1	56
2011	0	3	12	9	9	9	11	5	10	5	3	0	76
2012	0	4	6	13	18	16	10	6	9	8	1	0	91
2013	2	7	13	6	6	7	3	4	3	2	0	0	53
2014	0	1	2	6	10	4	1	0	4	0	0	0	28
2015	0	0	6	3	5	3	3	3	1	1	1	0	26
2016	1	0	3	4	8	2	4	4	3	0	0	1	30
2017	0	1	5	5	4	9	2	2	1	2	4	2	37
2018	0	2	9	12	9	18	11	9	2	6	7	3	88
Sum	6	34	73	84	95	89	56	43	49	37	20	9	595

Table 5. Same as Table 4 except for BGN.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Sum
2009	1	6	10	14	16	5	11	9	12	10	4	0	98
2010	2	6	3	10	11	11	0	0	0	0	4	4	51
2011	0	3	12	9	8	11	8	5	8	9	3	0	76
2012	0	7	9	9	18	9	13	5	9	12	1	0	92
2013	4	5	13	6	16	13	11	14	8	8	3	1	102
2014	2	1	8	13	13	5	10	7	13	1	4	1	78
2015	3	4	14	8	14	11	15	13	11	13	3	0	109
2016	0	3	16	15	19	13	9	11	4	5	1	1	97
2017	2	5	11	16	15	15	8	3	11	4	3	4	97
2018	1	5	8	10	14	18	12	4	4	9	7	1	93
Sum	15	45	104	110	144	111	97	71	80	71	33	12	893

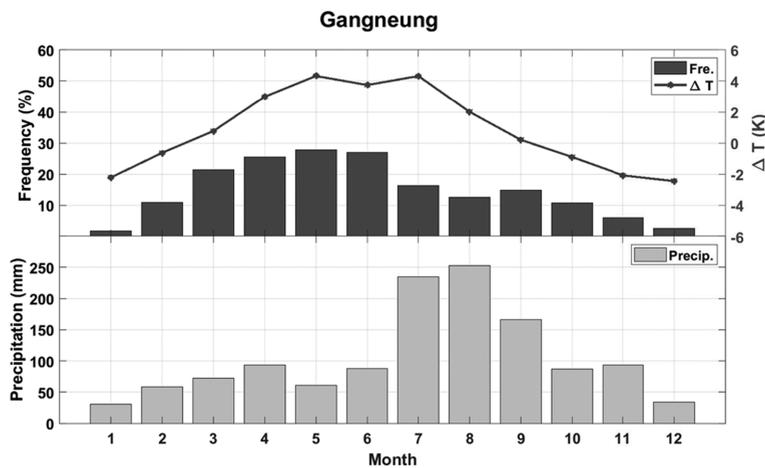


Fig. 6. Annual variations of sea breeze occurrence days (black bars), land-sea temperature difference (black line) and monthly precipitation (mm) (gray bars). ΔT denotes the difference between air temperature of GN and sea surface temperature of Buoy.

(5~6월)에 해풍의 발생빈도가 높은 것으로 나타났고, 겨울철에 감소하여 뚜렷한 연변화를 보였다. 또한 북

강릉의 해풍 발생일수가 강릉보다 많았는데, 이는 북강릉이 강릉 지점보다 해안선에 약 1.6 km 더 가까워

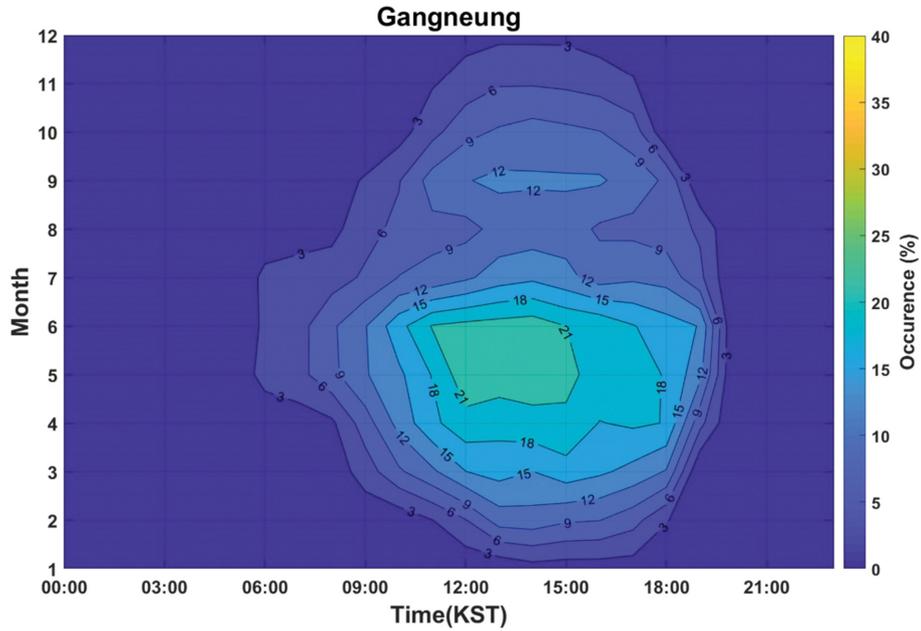


Fig. 7. Annual variation of diurnal frequency (%) of sea breeze occurrence at GN.

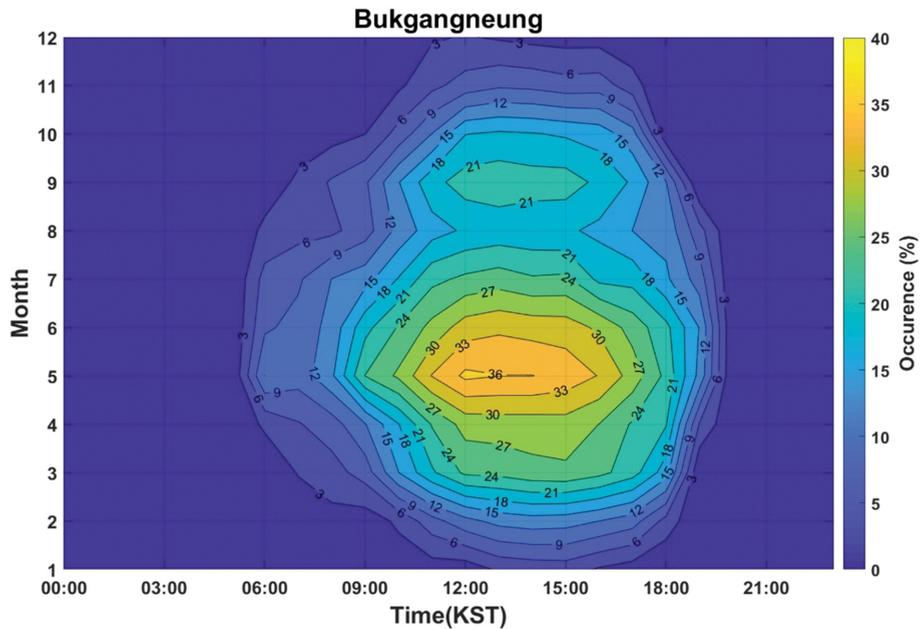


Fig. 8. Same as Fig. 7 except for BGN.

해풍의 영향에 더 민감한 것으로 판단된다.

Figure 6은 강릉의 월별 해풍 발생빈도를 나타낸 것이다. 상단 그림의 검은 막대그래프는 해풍의 발생일수, 하단의 회색 막대그래프는 강수량을 나타내며, 실

선은 해풍 발생 기간동안 육지 관측소와 해양(부이)의 기온차($T_{Land} - T_{sea}$)를 나타낸 것이다. 강릉과 북강릉 지점의 해풍 발생빈도는 5월과 6월에 높게 나타났는데, 이는 해풍 순환의 주 원인이 되는 육지와 해양

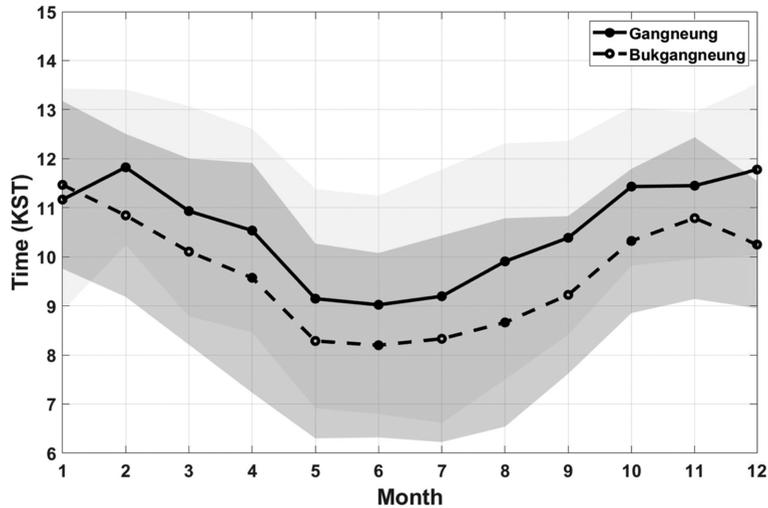


Fig. 9. Passage time of sea breeze for each month at GN (solid line) and BGN (dashed line). Shading denotes standard deviation of the passage time for each month.

의 기온차가 높게 나타났기 때문으로 생각된다. 그리고 상대적으로 해풍발생빈도가 낮은 겨울철(12, 1, 2월)은 육지의 온도가 해양에 비해 낮아 육지와 해양의 기온차가 음수로 유지되는 경향도 보였다. 하지만 7월과 8월은 육지와 해양의 기온차가 크게 증가하였는데도 불구하고 해풍 발생빈도가 적게 나타났는데 이는 여름철 잦은 강수와 장마나 태풍과 같은 종관 강제력이 상대적으로 크게 작용하기 때문으로 추정된다. 최근 보성의 해풍발생일 분석 결과(Lim and Lee, 2019)를 보면 해풍발생빈도가 5월에 가장 높고(57%) 겨울에 감소하는 경향은 본 연구와 일치하나, 보성에서는 4년간 총 569일의 해풍일이 발생하여 본 연구에 비해 해풍발생빈도가 높게 나타났는데, 이는 보성과 강릉의 지형적인 특징, 바다의 위치(남해와 동해), 해안선으로부터의 거리, 해수온도 차이 등 여러가지 요인이 작용하였을 것으로 추정된다. 한반도는 삼면이 바다로 둘러싸여 있기 때문에 향후 같은 종관조건에서 황해, 남해 그리고 동해 각각의 해안가에서 해풍 발생빈도 비교 연구가 필요하다.

Figures 7, 8은 강릉과 북강릉 지점에서 나타난 해풍 사례의 월별 시간에 따른 해풍발생빈도를 나타낸 것인데, 일차적으로 앞서 제시한 해풍의 빈도분포(Fig. 6)와 유사한 패턴을 보인다. 해풍의 지속시간은 뚜렷한 계절 변화를 보이며, 강릉과 북강릉 두 지점 모두 5월과 6월에 해풍이 가장 이른 시간부터 발달하여 오랫동안 유지되는 것을 잘 보여주고 있다. 특히 오후 12시부터 15시까지 발생 빈도가 가장 높게 나타났다. 반면 7월과 8월은 여름철 잦은 강수로 인해 해풍발생빈도가 전반적으로 감소하였다. 또한 여름은 일출시

간이 빨라지고 일몰시간이 늦어지므로 해풍의 시작 시간이 빨라지고, 종료시간이 늦어지는데, 겨울철에는 해풍의 시작시간이 늦어지면서 종료시간은 빨라지는 것으로 나타났다. 그리고 해풍은 일년 중 거의 대부분 일몰시기에 맞춰서 종료됨을 알 수 있었다. Figure 9는 강릉과 북강릉 지점의 해풍의 월평균 진입시간을 나타낸 것이다. 실선은 강릉, 파선은 북강릉 지점의 해풍 진입시간을 의미하며, 북강릉이 강릉보다 진입 시간이 약 1시간 정도 빠른 경향을 보인다. 또한 5~7월의 평균 진입시간이 가장 빠른 것을 알 수 있다.

3.3 해풍의 연직 구조 특성

강릉지역에서 해풍으로 선정된 사례 중에서 해풍 진입 기간 바람의 연직 구조를 살펴보기 위하여 북강릉 지점의 수직측풍장비(wind profiler)를 활용하였고, 한 개 해풍 사례에는 강릉원주대학교 지점에서 레인존데 관측을 추가로 수행하였다. 첫 번째 사례 2018년 4월 16~18일은 3일간 해풍이 뚜렷하게 발달한 사례이다. Figure 10은 북강릉 지점에서 바람 연직 구조의 시간변화를 나타낸 것으로 9~10시경에 서풍에서 동풍계열로 바뀌면서 해풍이 진입한 것이 잘 나타나고 있으며, 이후 19~20시경에 다시 동풍에서 서풍계열로 변하여 해풍이 육풍으로 변하는 것도 확인할 수 있었다. 또한 해풍의 진입고도는 3일간 해풍 기단의 머리(Head)에 해당하는 부분이 약 1 km까지 부풀어 올라 관측되었고, 16일에서 18일로 시간이 경과함에 따라 해풍의 두께와 강도가 점차 감소하는 경향이 있었다. Figure 11은 두번째 해풍 에피소드인 2019년 4월 12일 바람의 연직구조를 나타낸 것이다. 첫번째 사

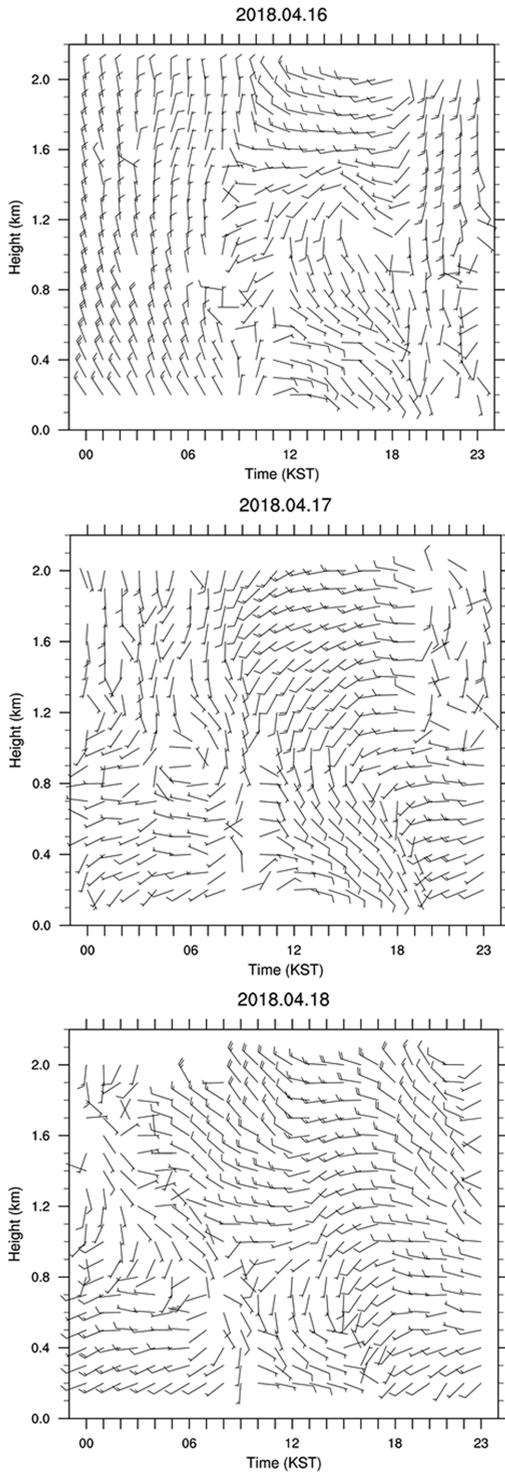


Fig. 10. Diurnal variations of vertical profile of horizontal wind obtained from a wind profiler at BGN for 16~18 April 2018.

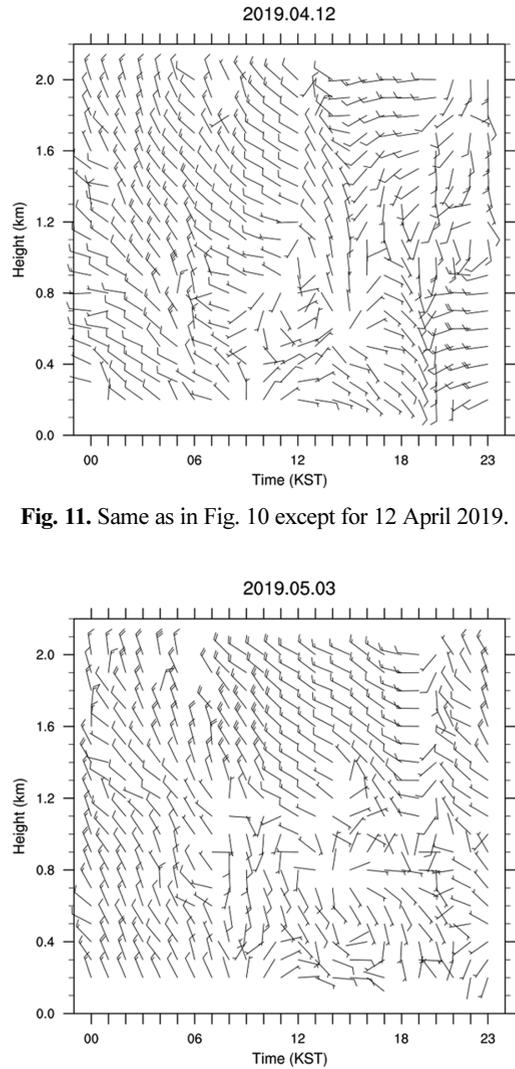


Fig. 11. Same as in Fig. 10 except for 12 April 2019.

Fig. 12. Same as in Fig. 10 except for 3 May 2019.

례와 마찬가지로 오전 9~10시 사이에 해풍이(동풍 계열) 진입하였으며, 해풍의 유입고도는 약 500 m로써 첫 번째 사례에 비해 해풍의 발달 규모는 작았던 것으로 판단된다. 마지막 사례(2019년 5월 3일)에는 일출시간이 빨라짐에 따라 4월 해풍사례보다 1시간 이른 8~9시 사이에 해풍이 진입된 것으로 판단되며, 해풍 유입 기간(9~15시)에 북동풍 계열이 유지되었다. 해풍의 머리 부분이 약 1 km까지 부풀어 올랐고 이후 약 800 m 이내로 감소하였다(Fig. 12). 같은 기간에 강릉원주대학교에서 총 4회(9시, 11시, 14시, 16시)의 레인존데 관측한 결과를 Fig. 13에 제시하였다. 수직층 풍장비 분석결과(Fig. 12)와 유사하게 오전 9시경에 약 400~500 m에서 동풍 계열의 해풍이 나타났으며,

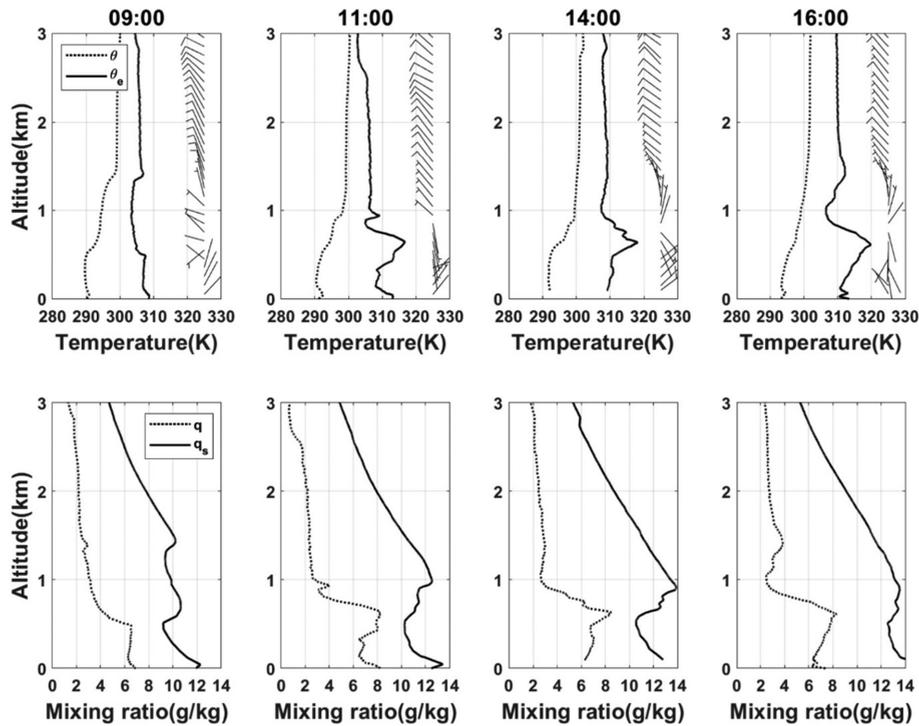


Fig. 13. Vertical profiles of potential temperature (θ) and equivalent potential temperature (θ_e) along with wind (upper panel), and those of mixing ratio (q) and saturation mixing ratio (q_s) (lower panel) in GWNU at 0900, 1100, 1400 and 1600 KST on 03 May 2019.

이후 16시까지 대략 900 m 이내에서 해풍이 진입하고 있음을 잘 보여준다. 수증기의 혼합비와 포화혼합비 연직구조 분석결과, 오전 9시경에는 하나의 해풍이 관측지점을 통과하였지만, 이후 11시경부터는 500 m 이하 층에서는 북동풍 계열이 부는 반면에, 약 500~900 m 층에서는 남동풍 계열의 바람이 나타나 해풍이 두 층 구조를 보이고 있다. 결국 2019년 5월 3일 해풍은 500 m 아래층은 상대적으로 덜 습하고 상당온위 역시 낮은 반면에, 바로 위 층은 습하고 상당온위는 높은 두 층 구조를 보였다. 이러한 두 층 구조의 해풍이 발생한 원인은 아직 정확히 단정지을 수는 없지만, 일출 후 해풍이 발달하고 태양고도가 증가함에 따라 인접한 태백산맥 동쪽사면의 가열에 의한 산풍이 추가로 발달하면서 아래 해풍 층위에 산풍과 해풍이 결합한 이중 구조의 층이 나타난 것으로 추정하고 있다. 해풍의 연직구조 분석이 하나의 에피소드 사례이기 때문에 정확한 메커니즘을 설명할 수는 없고 향후 추가 사례분석이나 모델링 연구 등이 필요하다.

하지만 4월과 5월의 3가지 해풍 연직구조를 종합해 보면, 해풍 진입 고도는 최대 1 km까지 발달하고 낮 시간대에 주로 약 900 m 이내 고도에서 해풍층이 유

지되는 것을 알 수 있었다.

3.4 해풍의 내륙 진입 특성

강릉지역 해풍 진입 시 내륙으로 진입여부와 해풍 진입거리 및 속도를 분석하기 위하여 강원 중부 산지 및 동해안 지역의 24개의 고해상도 기상관측센서를 활용하였다(Table 3). Figure 14는 2019년 4월 12일에 발생한 해풍 사례의 시간별 기온과 바람의 수평분포를 나타냈다. 오전 8시까지 전반적으로 서풍계열의 바람이 나타나고 있으며 오전 9시부터 강릉지역의 북쪽에 위치한 영진항(YJH), 사천항(SCH) 부근에서 동풍계열의 바람이 관측되었다. 이후 오전 10시부터는 높은 산지를 제외하고는 강릉 주변 지역 전체에서 북동풍 내지 동풍계열이 관측되어 한 시간만에 해풍이 해안으로부터 약 15~20 km 내륙까지 빠른 속도로 통과한 것을 알 수 있다. 3.3절 수직측풍장비 분석결과(Fig. 11)에서 제시된 9~10시 사이에 북강릉 지점을 해풍이 통과한 것과 일맥상통하는 결과이다. 이러한 바람의 수평 분포는 15시까지 유지되었고, 해풍 유입으로 인해 기온이 10시 이후 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 일몰시간인 18시 이후 내륙에서부터 서풍 계

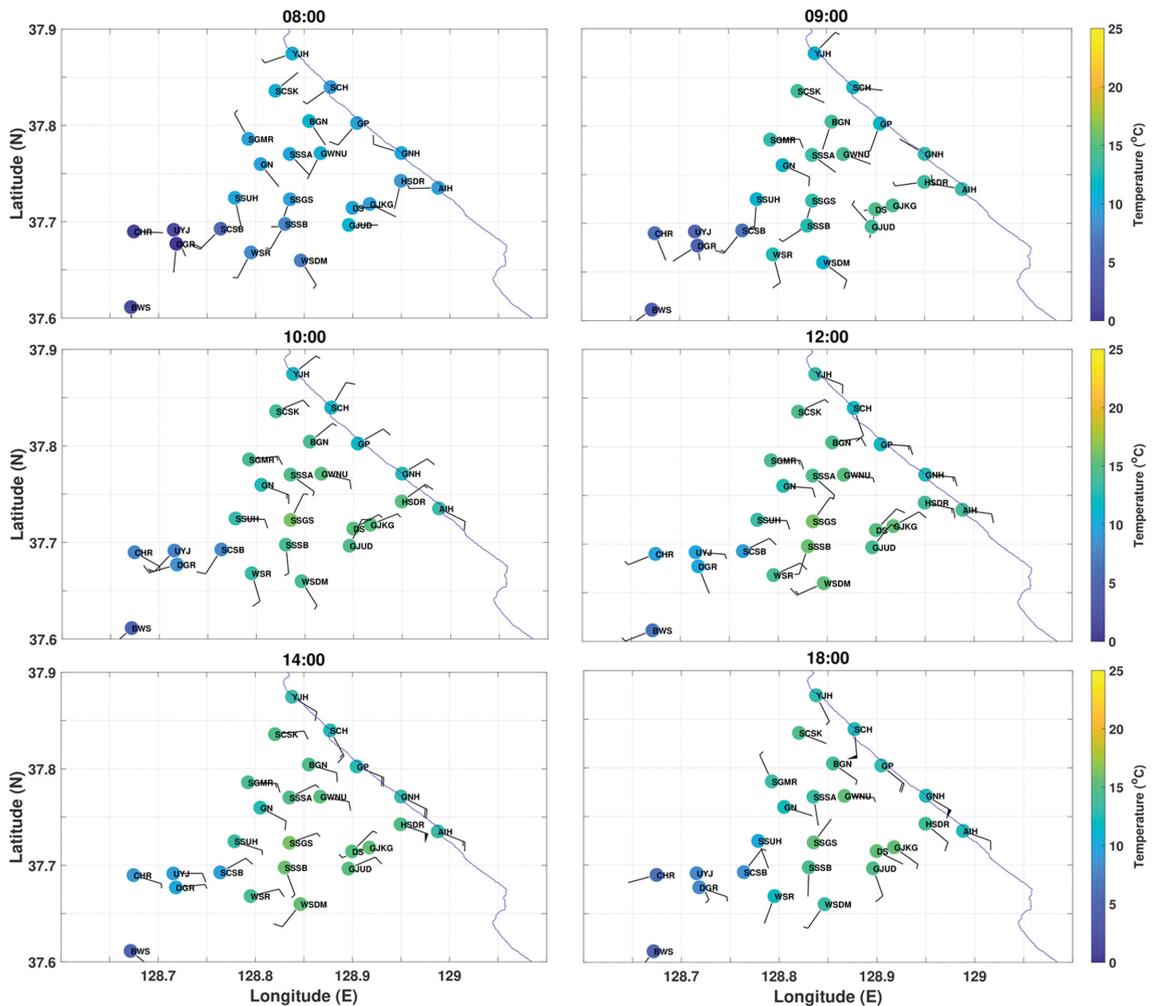


Fig. 14. Horizontal distribution of wind field and temperature at 0800, 0900, 1000, 1200, 1400 and 1800 KST on the sea breeze occurrence day (12 April 2019). Detailed information about the Gangwon 24 station is shown in Table 5.

열의 바람으로 전환되는 것으로 나타났다.

2019년 5월 3일의 해풍사례의 경우(Fig. 15)는 2019년 4월 12일 사례보다 이른 시간인 오전 8시 이전부터 해안가 북쪽에서부터 이미 해풍이 진입하고 있는 것으로 나타났다. 3.3절의 수직층장비 분석결과(Fig. 12)에서도 5월달의 해풍진입시간이 4월에 비해 약 1시간 가량 이른 것을 확인할 수 있었는데, 이는 일출시간이 빨라지면서 해풍발달시간 역시 앞당겨지는 것으로 판단된다. 결국 오전 9시경에는 내륙에 있는 성산어항(SSUH: 해안선으로부터 직선거리로 13 km) 지점까지 깊숙이 진입하였다. 이상의 바람 수평분포의 시간변화(Figs. 14, 15)를 고려하여 해풍의 진입특성을 종합해 보면, 일출(5~6시) 후 3~4시간이 경과한 8~10시경에 약 10~13 km hr⁻¹로 빠르게 강릉 평지를 통과

하여 산지 중턱까지 진입하는 것으로 추정할 수 있다. 단, 여기서 해풍진입시간과 속도는 관측지점의 풍향 변화만을 고려하여 추정한 수치이다.

4. 토의 및 결론

본 연구는 강릉 지역의 장기간 지상 관측 자료를 기반으로 해풍의 선정 방법을 제시하고, 해풍의 기후학적 특성과 3가지 에피소드에 대한 해풍의 구조를 분석하였다. 관측지점은 강릉, 북강릉, 강릉원주대학교, 부이 지점을 대상으로 하였다. 본 연구에서 제시한 해풍 선정방법은 다음과 같다. 일 강수량 10 mm 이하인 조건, 풍향이 0~110°의 바람이 주간에 연속으로 3시간 이상 지속되는 경우, 야간에는 반대 방향의

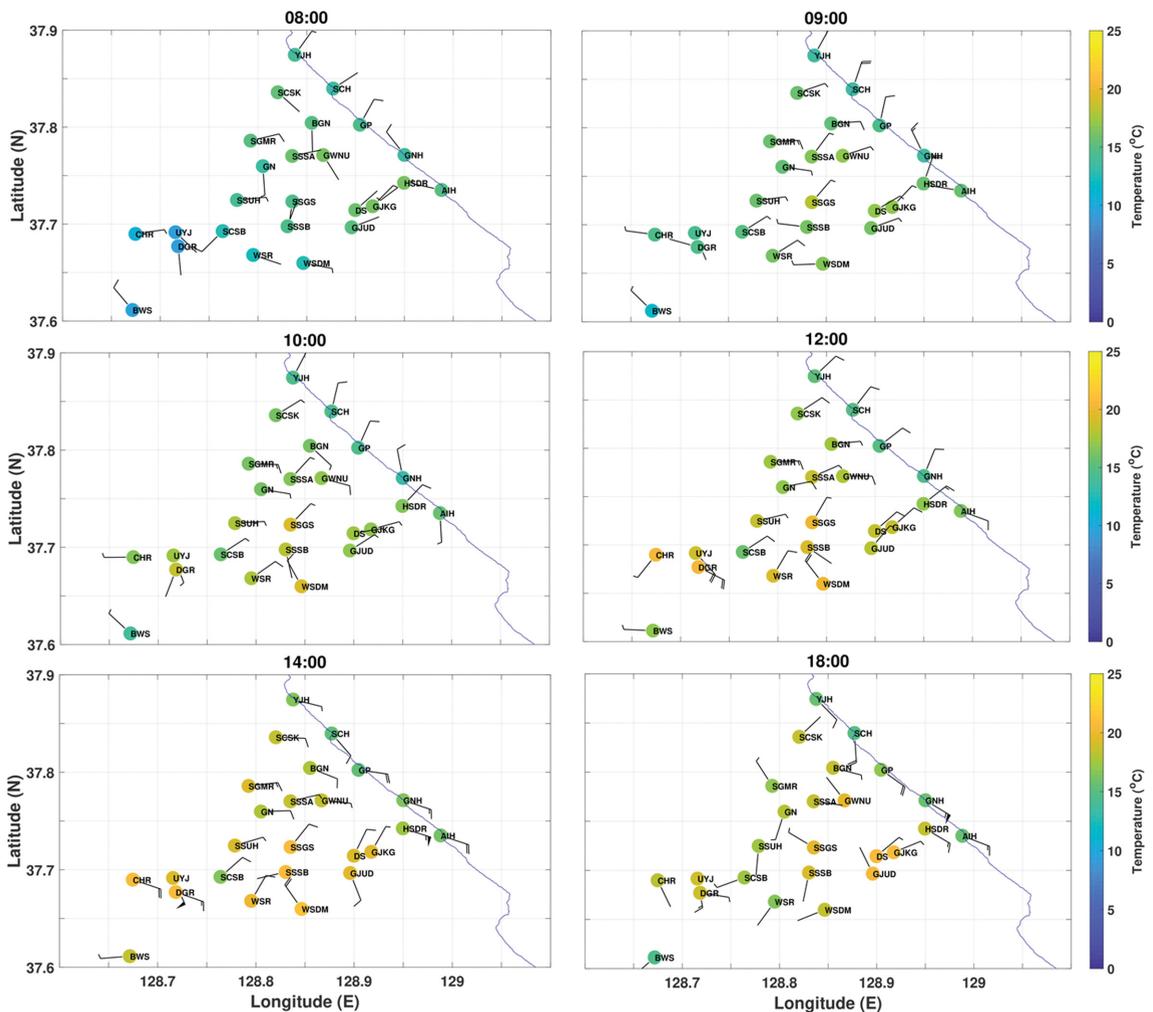


Fig. 15. Same as in Fig. 14 except for 3 May 2019.

풍향이 연속으로 3시간 이상 지속되는 조건, 내륙의 관측소와 해양의 부이 온도차가 양일 때, 그리고 마지막으로 해양의 부이와 내륙의 해면 기압차가 0.5 hPa 이상일 때를 해풍 발생일로 선정하였다.

제시된 선정 방법을 통해 선정된 해풍 발생일은 지난 10년간(2009~2018년) 강릉에서는 총 595일(봄 252일, 여름 188일, 가을 106일, 겨울 49일)로 나타나 연평균 59일이었으며, 북강릉은 동 기간에 총 893일(봄 358일, 여름 279일, 가을 184일, 겨울 72일)로 연평균 89일로 강릉보다 1.5배 증가하였다. 이는 북강릉 관측소가 강릉 관측소보다 해안선에서 1.6 km 정도 가깝기 때문에 해풍의 영향을 약 50% 정도 더 받고 있음을 알 수 있었다. 또한 해풍 발생 빈도는 5~6월에 가장 높게 나타났는데, 이는 내륙과 해양의 기온차가 가

장 크기 때문에 판단된다. 그러나 7~8월에도 내륙과 해양의 기온차가 큰 편이지만 잦은 강수로 인해 해풍의 발생빈도는 감소하였다. 그리고 겨울에서 여름으로 갈수록 해풍 발생시간이 빨라지고, 해풍 지속 시간도 증가하여 해풍 발생빈도와 지속시간은 뚜렷한 연변화를 보였다.

세가지 해풍 발생일을 선정하여 해풍의 연직구조와 내륙 진입 특성을 분석하였다. 첫 번째 해풍 일인 2018년 4월 16~18일에는 해풍은 북강릉 관측소를 오전 9시에 통과한 이후 강릉 관측소를 통과하였으며 이후 두 지점 모두 온도 상승이 둔화되는 경향을 보였다. 그리고 바람의 연직 구조를 분석한 결과, 3일간 해풍 기단의 머리(Head) 부분이 약 1km까지 부풀어 올라 관측되었고, 16일에서 18일로 시간이 경과함에 따라

해풍의 두께와 강도는 감소하는 경향이 있었다. 두 번째 2019년 4월 12일 사례도 오전 8시에는 전반적으로 서풍계열의 바람이 나타났으나 오전 9시에서 10시 사이에 강릉 주변 전체 평지에서 풍계가 동풍 계열로 바뀌어 해풍이 산 중턱까지 진입한 것으로 판단된다. 또한 바람의 연직구조 분석결과 해풍 고도는 약 500 m로 낮게 나타났다. 마지막 해풍 발생일(2019년 5월 3일)의 경우는 해풍의 머리가 약 1 km까지 부풀어 올랐고, 이후 시간에는 약 900 m까지 해풍고도가 유지되었다. 2019년 5월 3일 사례는 4월 사례보다 한 시간 이른 오전 8-9시 사이에 해풍이 내륙으로 깊숙이 진입한 것으로 나타났다. 결론적으로 해풍의 진입은 약 1시간 동안 10~13 km의 거리를 빠르게 주파하는 것으로 추정되며, 이후 강릉 평지는 주간동안 해풍 영향권에 있었다.

이상의 해풍 발생특성 분석 결과는 강릉지역 해풍 발생시 온도나 바람의 예보 정확도 향상에 활용될 수 있을 것이며, 특히 해풍은 여름철 폭염 발생 시 온도의 시간 변화에 크게 영향을 주기 때문에 폭염 예보 개선에도 기여할 수 있을 것이다. 또한 강릉지역에서의 레저나 스포츠 분야 기상서비스, 그리고 해안지역에 위치한 도시 및 공장 주변의 대기질 예보 등에도 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

우선 본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분 심사위원께 감사드립니다. 본 연구는 강원지방기상청의 ‘강원 중부 산지 동해안 지역의 고해상도 기상 관측망 기반 복잡지형내 바람장 특성연구’의 지원으로 수행되었습니다. 또한 본 연구는 한국 연구재단의 부분적인 지원을 받아 수행된 연구입니다 (NO. 2019R1F1A1041122).

REFERENCES

- Azorin-Molina, C., D. Chen, S. Tijn, and M. Baldi, 2011: A multi-year study of sea breezes in a Mediterranean coastal site: Alicante (Spain). *Int. J. Climatol.*, **31**, 468-486, doi:10.1002/joc.2064.
- Borne, K., D. Chen, and M. Nunez, 1998: A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. *Int. J. Climatol.*, **18**, 901-914.
- Camberlin, P., and O. Planchon, 1997: Coastal precipitation regimes in Kenya. *Geogr. Ann. A*, **79**, 109-119.
- Chiba, O., 1993: The turbulent characteristics in the lowest part of the sea breeze front in the atmospheric surface layer. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **65**, 181-195.
- Cho, U.-J., 1994: The effects of sea breeze on the highest temperature in the Yeongdong coastal region. *Gangwon Local Characteristic Collection*, **5**, 86-94.
- Furberg, M., D. G. Steyn, and M. Baldi, 2002: The climatology of sea breezes on Sardinia. *Int. J. Climatol.*, **22**, 917-932.
- Gangoiti, G., and Coauthors, 2002: Regional transport of pollutants over the Bay of Biscay: Analysis of an ozone episode under a blocking anticyclone in west-central Europe. *Atmos. Environ.*, **36**, 1349-1361.
- Gangwon Regional Meteorological Office, 2004: A study on the wind characteristics around Gangneung city. Gangwon Regional Meteorological Office, Korea Meteorological Administration, MR042A25, 84 pp (in Korean).
- Ha, W.-S., and J.-G. Lee, 2011: WRF sensitivity experiments on the choice of land cover data for an event of sea breeze over the Yeongdong region. *Atmosphere*, **21**, 373-389 (in Korean with English abstract).
- Jung, W.-S., H.-W. Lee, and Y.-K. Kim, 2001: Analysis of geographic characteristics related to the formation of land-sea breeze in the Busan coastal region. *Atmosphere*, **11**, 113-116 (in Korean).
- Lee, E.-H., and S.-W. Park, 2002: Influence of the circulation of the sea and land breeze on pollutant concentration in the southeast coast of the Korea peninsula. *Atmosphere*, **12**, 250-253 (in Korean).
- Lee, H. W., J. H. Park, W.-S. Jung, and H. H. Leem, 2002: Sea breeze criterion and the climatological characteristics of the short-time sea breeze in Gangneung coastal area. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **23**, 436-441 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.-B., S.-K. Lee, J.-S. Lim, C.-U. Heo, and Y.-S. Shin, 1998: Effects of sea breeze on the Yeongdong region in spring. *Gangwon Local Characteristic Collection*, **7**, 211-224.
- Lim, H.-J., and Y.-H. Lee, 2019: Characteristics of sea breezes at coastal area in Boseong. *Atmosphere*, **29**, 41-51, doi:10.14191/Atmos.2019.29.1.041 (in Korean with English abstract).
- Masselink, G., 1998: The effect of sea breeze on beach morphology, surf zone hydrodynamics and sediment resuspension. *Mar. Geol.*, **146**, 115-135.
- Miller, S. T. K., B. D. Keim, R. W. Talbot, and H. Mao, 2003: Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts. *Rev. Geophys.*, **41**, 1011, doi:10.1029/2003RG000124.
- NamGung, J.-Y., J.-H. Yu, N.-W. Kim, M.-K. Choi, D.-J. Ham, H.-S. Kim, Y.-J. Jang, and E.-K. Choi, 2005:

- The effect of inversion layer on the land and sea breeze circulations near the Gangneung. *Atmosphere*, **15**, 229-239 (in Korean with English abstract).
- Papanastasiou, D. K., and D. Melas, 2009: Climatology and impact on air quality of sea breeze in an urban coastal environment. *Int. J. Climatol.*, **29**, 305-315.
- Physick, W. L., and D. J. Abbs, 1992: Flow and plume dispersion in a coastal valley. *J. Appl. Meteor.*, **31**, 64-73.
- Prakash, J. W. J., R. Ramachandran, K. N. Nair, K. S. Gupta, and P. K. Kunhikrishnan, 1992: On the structure of sea-breeze fronts observed near the coastline of Thumba, India. *Bound.-Layer Meteor.*, **59**, 111-124.
- Ramdas, L. A., 1931: The sea breeze at Karachi. *India Meteor. Dept. Sci.*, **4**, 115-124.
- Simpson, J. E., 1994: *Sea breeze and local wind*. Cambridge University Press, 234 pp.