

ORIGINAL ARTICLE

## 한국 남동연안의 냉수대 영향에 의한 해풍순환과 오존농도의 사례 연구

지효은 · 이순환<sup>1)</sup> · 박창현 · 이화운<sup>2)\*</sup>

부산대학교 환경연구원, <sup>1)</sup>부산대학교 지구과학 교육학과, <sup>2)</sup>부산대학교 지구환경시스템 학부\*

### A Case Study on Sea Breeze Circulation and Ozone Concentration due to the Effect of Cold Water in the Southeastern Coastal Area of Korea

Hyo Eun Ji, Soon-Hwan Lee<sup>1)</sup>, Changhyoun Park, Hwa Woon Lee<sup>2)\*</sup>

*Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, South Korea*

<sup>1)</sup>*Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, South Korea*

<sup>2)</sup>*Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, South Korea*

#### Abstract

This work investigates the relationship between the sea breeze circulation and ozone concentrations during cold water events in the southeastern coastal area of the Korean Peninsula, where coastal upwelling frequently occur.

This analysis was performed based on the classification of two categories, such as cold water and non-cold water events, over the period of 2000-2009. The low air temperature (0.5°C), low SST (5°C) and the wind direction(southerly) are the features of the cold water events in the Southeastern coastal area. Moreover, ozone concentrations in the cases of the sea breeze circulation and cold water events were significantly lower (below 30 ppb) than those (70~100 ppb) in the non-cold water events, because of the low air temperature (10~20°C) and high wind speed (3~5 m/s) around the southeastern coastal area.

**Key words** : Cold water, Sea-land breeze, Ozone, Southeastern coast

#### 1. 서론

한반도 남동 연안지역에서는 해수면 온도(sea surface temperature, SST)의 변화로서 냉수대 현상이 발생한다. 일반적으로 냉수대는 국립수산과학원에서 주변과의 SST 차이가 3~5°C 이상 일 때 판단하여 주의보 및 경보를 내린다. 한반도의 경우 남동 연안지역에서 발

생하는 냉수대는 6월에서 8월 사이 지속적인 강한 남서풍이 불 경우, 표층의 해수가 외해로 끌려 나가고 예크만 수송에 의해 차가운 중·저층의 해수가 표층으로 용승하여 생긴다. Lee(1983)는 울기-감포 연안에서 냉수대 발생을 조사한 결과 강한 남서풍이 3일 이상 지속되었을 때 나타나며, 그 지속기간은 평균적으로 10일이며, 이때 수평바람의 평균풍속이 4.0 m/s 라

Received 17 September, 2013; Revised 18 November, 2013;

Accepted 20 November, 2013

\*Corresponding author: Hwa Woon Lee, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea  
Phone: +82-10-8556-2291  
E-mail: hwlee@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.

고 하였다. 냉수대의 또 다른 발생 원인으로 Kim과 Kim(1983)은 북으로부터 남하하는 북한한류가 동해 연안지역의 저층 냉수대의 기원으로 SST를 하강시킨다 하였다. 또한 이와 비슷한 시기에 대한 해협 사이로 북상하는 대마난류는 북한한류와 만나 주변과의 SST 차이가 크게 된다(Lee, 1978). Lee and Na(1985)는 울기-감포에서 바람에 의한 냉수대 발생이 지역적 차이를 보이는 이유가 동한난류로 인한 등온선의 경압성 기울기로 인하여 강하게 나타나며, 그리고 동해 연안의 형성된 대륙붕이 냉수대 발달을 돕는다고 하였다.

이러한 냉수대 발생은 연안지역의 기상장 강도와 상호관계 하여 지역의 대기환경을 변화시킨다(Mizzi and Pielke, 1984). 미국 캘리포니아에서는 관측장비를 통한 해풍순환에 의한 국지적 냉수대 영향을 연구한 결과가 있었다. 그들은 서풍의 해풍순환이 에크만 수송을 유도하여 국지적 용승을 나타나게 하는데 이런 결과로 가장 더운 정오 시간에 냉수대로 인한 SST는 급격히 하강한다. 하지만 반대로 밤과 이른 아침에는 SST가 상승한다고 하였다(Woodson et al., 2007). 이와 달리 냉수대가 해풍순환에 미치는 영향으로 브라질에서 나타난 연안 용승과 국지바람을 분석한 결과 강한 북동풍으로 인한 연안 용승이 육지와 해양사이의 온도경도가 해풍순환을 강화시켰다는 결과도 있었다(Franchito et al., 2008).

이렇게 해외에서는 냉수대와 중규모 순환과의 관계에 대해 연구가 이루어지고 있는 반면 한국에서는 연구가 거의 수행되지 않았다. 따라서 냉수대 발생이 대륙붕 발달, 해류에 의해 발달된 냉수대인 경우 동반될 수 있는 중규모 순환의 관계에 대해 연구하였다. 이와 동시에 연안지역의 대기환경에 미치는 변화도 함께 살펴보아야 한다. 이러한 배경에서 이 연구에서는 SST의 변화가 뚜렷한 냉수대에 대해 조사하고, 그 특성으로 인한 기상 변화 및 해풍발달과 이에 따른 오존 관계를 분석하였다.

## 2. 연구 및 방법

### 2.1. 대상지역

일반적으로 한반도에서 냉수대는 동해 연안을 따라 발생하며, 기장, 울산, 감포에서 발생 빈도가 높다

(Suh와 Hwang, 2005). 발생 시기는 6월 말부터 8월 말까지이며, 불규칙적이다(Fig. 1). 그러므로, 본 연구에서는 감포, 울기, 기장을 중심으로 냉수대 발생에 대해 연구하였다(Fig. 2(a)). 그리고 대기환경 변화의 분석을 위해서는 관심이 가장 높은 울기, 울산 지역으로 하였다. 울산지역(Fig. 2(b))은 한반도 남동연안에 위치해 있으며, 대규모의 국가 산업단지가 발달해 있는 대표적인 도시이다. 특히 여천과 부곡지점은 산업단지가 밀집해 있어 각종 오염물질이 배출되는 곳이고, 대송과 성남지점은 주택지구 및 도심지가 발달하여 많은 인구활동이 이루어진다. 그 대상 물질은 오존이며, 빛에 민감한 광화학 대기 오염물질로서 일사와 기온 등의 기상요소에 의해 생성과 소멸이 크게 좌우 된다.

냉수대 정보는 국립수산과학원 해양연구과 원격탐사실에서 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 인공위성의 적외선 밴드채널을 이용하여 실시간 SST정보를 직접 수신, 분석함으로써 얻어진다. 분석 이후, 냉수대의 출현, 변동, 소멸 등에 대한 상황을 판단하고, 주의보 및 경보를 발령한다.

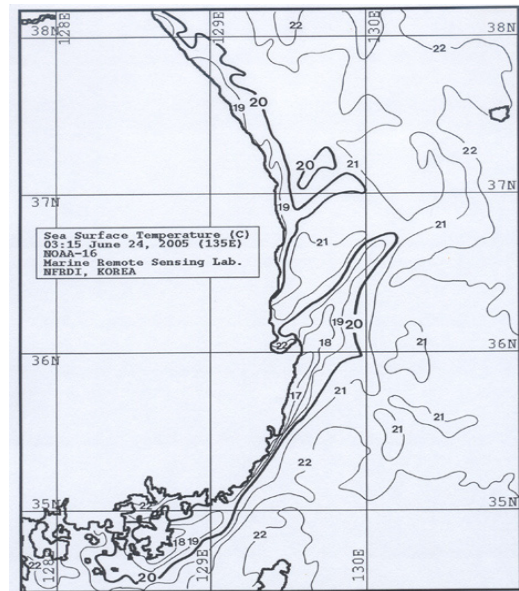
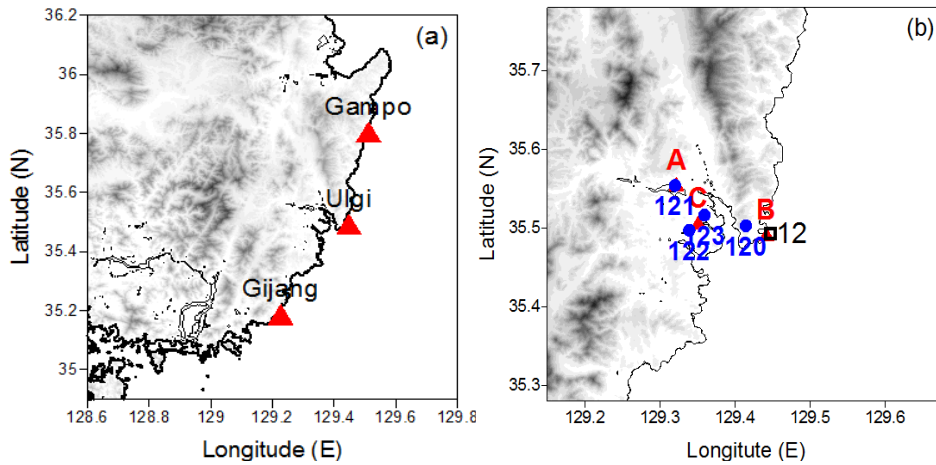


Fig. 1. The NOAA satellite image of SST on the southeast coast of Korea on June 24, 2005. The SST around the coastal area is below 20°C due to cold water events.



**Fig. 2.** The location of observation sites. (a) Three automatic weather stations along the southeastern coastal Korea. (b) Three meteorological monitoring sites (Ulsan (A), Ulgi (B), and Gongdan (C)), four air quality monitoring sites (Daesong (120), Seongnam (121), Bugok (122), and Yecheon (123)), and one coastal oceanographic data station (Ulgi (12)) in the Ulgi coastal area.

2.2. 연구방법

먼저 남동 연안지역에서 냉수대 발생 빈도를 조사하여 냉수대 발생일과 비발생일을 분류하였다. 그런 다음 각각의 분류된 날에서 평균 SST와 기온을 분석하였다. 냉수대 발생일은 국립수산과학원에서 냉수대 발생 주의보 및 경보를 발령한 날로 정의하였고, 2000년~2009년, 6월~8월동안 연안정지 관측소에서 측정된 자료(coastal oceanographic data, COD)와 자동기상관측 자료(automatic weather system, AWS)를 이용하여 분석하였다. 그 다음으로 냉수대 발생이 중규모 순환에 미치는 변화를 살펴보았다. 냉수대 영향이 없는 연안지역의 대기환경의 변화를 보기 위해 냉

수대가 나타나기 전인 첫 번째 사례(BF1)와 두 번째 사례(BF2)를 선택하였다. 그리고 냉수로 인한 중규모의 영향을 조사하기 위해 두 현상이 동시에 나타난 첫 번째 사례(PS1)와 두 번째 사례(PS2)를 조사하였다. 각 사례일에서 SST 및 기상변화 그리고 이에 따른 오존변화를 비교·분석하였고, 이들의 간략한 연구방법 분류를 Table 1에 제시하였다.

3. 결과

3.1 냉수대의 발달과 기상변화

남동 연안지역에서 냉수대 발생 빈도를 알아보기

**Table 1.** Configuration for case studies

	Case studies	Features of SST
Case 1	Before cold water event(BF1) Aug 8, 2006	<ul style="list-style-type: none"> <li>● No cold water event</li> <li>● Distribution of high SST</li> <li>● Low SST gradient</li> </ul>
	Cold water event(PS1) Aug 14, 2006	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Cold water event &amp; sea-land breeze</li> <li>● High SST gradient due to low SST in coastal area</li> </ul>
Case 2	Before cold water event(BF2) Jul 31, 2008	<ul style="list-style-type: none"> <li>● No cold water event</li> <li>● Distribution of high SST</li> <li>● Low SST gradient</li> </ul>
	Cold water event(PS2) Aug 8, 2008	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Cold water event &amp; sea-land breeze</li> <li>● High SST gradient due to low SST in coastal area</li> </ul>

위해 냉수대 발생일을 조사하였다. 위의 연구 기간 동안 각 지점(Fig. 2(a))에서 발생하는 냉수대 발생을 월별로 나타내었다(Table 2). 냉수대 발생 빈도일 수는 지점별, 월별로 편차가 컸다. 6월 말부터 출현하는 냉수대의 특성으로 6월은 최저(15회)로 가장 발생 빈도가 낮았다. 그리고 7월(124회)은 냉수대의 빈도수가 가장 높았는데, 이 이유는 장마와 함께 동반되는 저기압성 남서풍이 냉수대 발생을 이끌었다고 분석되었다. 각 지점에 발생 빈도일수를 조사하였을 때 울기(207일)와 기장(197일)에서 거의 200일의 발생빈도를 보였다.

**Table 2.** Frequency of days when cold water events occurred at each coastal oceanographic data station from June to August during 2000-2009

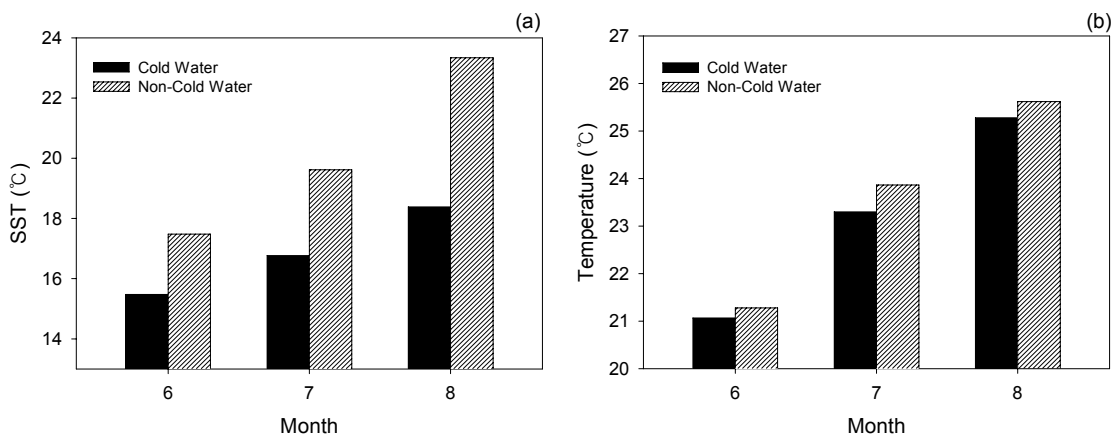
Station Month	Gampo	Ulgi	Gijang
6	15	22	16
7	78	124	119
8	44	61	62

Fig. 3은 냉수대의 발생일과 비발생일의 분류하였을 때 관측된 SST와 기온을 월별 평균하여 나타낸 것이다. 냉수대 발생 여부에 따라 SST(Fig. 3(a))는 현저한 차이를 나타내었다. 냉수대 발생시 SST는 평균적으로 2~5°C 더 낮았고, 특히 8월(18.3°C)에 그 차이가 가장 컸다. 이런 원인에는 북상하는 대마난류가 8월에

가장 세력이 강한 것에 원인이 있다. 해상 위의 기온(Fig. 3(b))도 SST와 마찬가지로 대기-해양 사이의 현열 플럭스 상호교환으로 두 분류간의 차이가 뚜렷하였다. 즉, 냉수대가 발생하였을 때 해양 위의 기온이 월 평균 0.5°C 정도 더 낮게 나타났다. 그러나 냉수대가 직접적으로 미치는 온도 변화는 아니었으므로 SST보다는 냉수대 발생과 비발생간의 차이가 작았다.

다음은 같은 기간동안 냉수대 발생일과 비발생일에서 위의 세 지점(Fig. 2(a))에서 관측된 바람을 조사하였다. 바람을 분석하기 위한 방법으로는 각 지점의 풍향과 풍속 자료에서  $u$ ,  $v$ 를 각각 평균하여 분석되었다(Table 3).

먼저, 냉수대 발생일 경우 감포, 울기, 그리고 기장에서 시간 변화없이 남풍성분이 지속되는 경향을 보였다. 게다가 풍속 역시 1200~1500 LST에 1.0 m/s 이상으로 강화되어 냉수대 발생일 일 때 남풍이 우세한 것을 알 수 있었다. 그러나, 냉수대 비발생일 경우는 감포와 기장에서 0900 LST~1800 LST 동안 동풍성분의 바람이 1800 LST 이후 다시 서풍성분으로 바뀌는 특징을 보였다. 울기는 1200 LST 부터 약 0.2 m/s의 남풍성분이 관측되었고, 이 지점은 2100 LST까지 0.3 m/s 이하의 약한 남풍의 영향을 받았다(Table 3). 하지만 이내 곧 24시에 북풍으로 바뀌는 모습을 나타내었다. 그러므로 냉수대 비발생일 경우 시간에 따라 북풍성분에서 남풍성분으로, 그리고 다시 북풍성분으로 바뀌어 해륙풍의 특징이 나타남을 알



**Fig. 3.** (a) The SST and (b) the temperature monthly averaged during cold water and non-cold water events.

**Table 3.** Hourly mean  $u$  and  $v$  components during cold water and non-cold water events at Gampo, Ulgi and Gijang stations, respectively

Station	LST	Cold water events		Non-cold water events	
		$u$ (m/s)	$v$ (m/s)	$u$ (m/s)	$v$ (m/s)
Gampo	3	0.4	0.1	0.3	-0.8
	6	0.3	-0.1	0.3	-0.9
	9	-0.1	0.6	-0.2	-0.4
	12	-0.4	1.3	-0.6	0.3
	15	-0.2	1.5	-0.6	0.3
	18	0.0	0.9	-0.2	-0.1
	21	0.3	-0.1	0.3	-0.6
	24	0.4	0.0	0.3	-0.7
Ulgi	3	0.8	0.6	0.2	-0.2
	6	0.7	0.5	0.2	-0.2
	9	0.5	0.7	-0.1	-0.1
	12	0.7	0.9	0.0	0.2
	15	1.0	1.1	0.2	0.3
	18	1.0	1.1	0.3	0.2
	21	0.8	0.7	0.3	0.0
	24	0.8	0.6	0.3	-0.1
Gijang	3	0.3	0.5	0.3	-0.5
	6	0.2	0.5	0.2	-0.6
	9	-0.2	0.8	-0.3	-0.6
	12	-0.6	1.2	-1.2	0.0
	15	-0.6	1.6	-1.0	0.2
	18	-0.2	1.0	-0.3	-0.2
	21	0.3	0.5	0.2	-0.5
	24	0.3	0.4	0.3	-0.5

수 있다.

바람을 분석하기 위한 방법으로 풍향 빈도수를 조사하였다. Fig. 4는 각 지점의 매시간 마다 분석된 각 풍향별 빈도수 분포이다. 냉수대 발생일 경우(Fig.4(a~c)), 울기는 40~60회로 매 시간마다 남서풍의 발생 빈도를 나타내었다. 이와 함께 약 30회의 북동풍도 함께 나타났다. 그리고 감포와 기장에서 0900~2100 LST 동안 남풍, 남서풍이 30~40회의 발생빈도를 보였다. 그러므로, 세 지점의 풍향 분포는 발생시간의 분포에서 차이가 있을 뿐, 냉수대가 발생할 경우 평균적으로 남서풍이 다른 풍향보다 발생빈도가 높은 것으로 조사되었다. 반면, 냉수대 비발생일에서는(Fig. 4(d

~f)), 울기를 제외한 두 지점에서 시간에 따른 풍향별 발생빈도에서 차이가 나타났다. 즉, 야간시간에는 서풍과 북풍이, 낮시간에는 북동풍과 남풍이 100회 이상으로 발생빈도가 높았다. 울기(Fig.4(e))도 다른 지점과 같이 남서풍의 발생이 0900 LST~1800 LST 동안 130회가 넘게 조사되었다. 그러나 시간에 관계없이 북동풍의 발생빈도 또한 100 이상으로 높았다. 이것은 지형에 따른 관측지점의 영향 때문이라고 분석되었다. 그러므로, 바람 분석결과 냉수대 발생과 비발생일에서 나타나는 풍향 빈도수 분포는 Table 3의 냉수대 발생과 비발생일에서 분석된 시간 변화에 따른  $u$ ,  $v$ 의 성분변화와 일치한다.

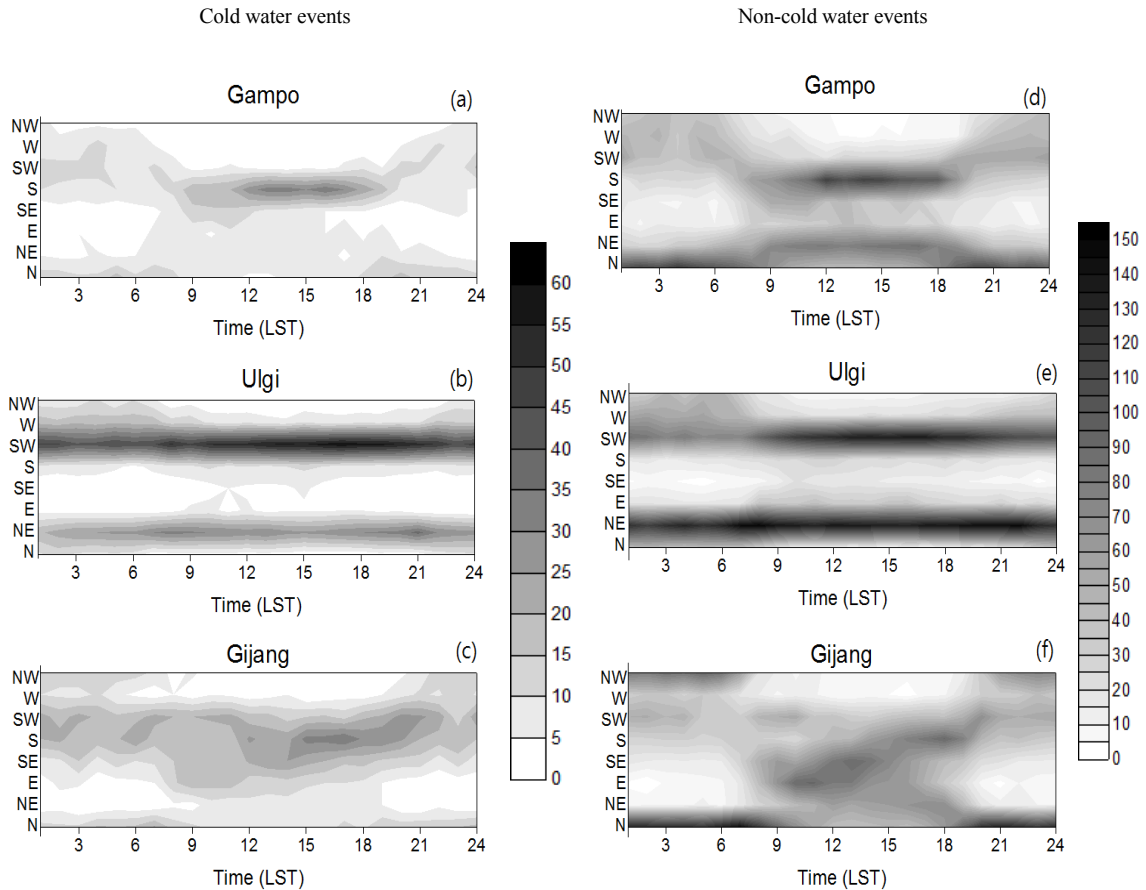


Fig. 4. Frequency distribution of wind direction during cold water and non-cold water events at Gampo(a, d), Ulgi(b, e), and Gijang (c, f) station, respectively.

### 3.2. 냉수대 발생과 중규모 순환의 영향

본 연구지역에서 냉수대 발생과 해풍순환의 상호 관계를 분석하기 위해 BF1, BF2와 PS1, PS2에 해당하는 SST 수평분포, 기온의 일변화, 바람 그리고 오존 농도를 살펴보았다.

먼저 BF(1, 2)와 PS(1, 2)의 SST 수평장을 나타내어 SST 분포 차이를 살펴보았다(Fig. 5). 이 자료는 국립수산과학원에서 NOAA 위성으로부터 제공받은 영상을 보정과 합성과정(일, 5일, 월, 년 평균)을 통한 처리한 것이다. 첫 번째 사례로서 BF1과 PS1의 수평적 SST 분포를 Fig. 5(a, b)에 나타내었다. BF1의 경우 NOAA 위성 이미지로 본 울기 연안과 연안에서 약 10 km 떨어진 곳의 SST는 20~22°C로 그 차이가 2°C 내

외이다. 그러나 PS1의 경우 SST 분포 차이가 10°C로 주위보다 연안에서 온도가 낮아 냉수대가 형성되었음을 알 수 있다. 이와 더불어 연안정지 관측소에서 측정된 감포와 울기의 SST는 각각 16.5°C, 21.0°C로 감포 연안의 SST가 주변보다 꽤 낮았다. 여기서는 나타내지 않았지만 이 경우의 냉수대는 동해 연안을 따라 내려와 감포에서 13일에 소멸되었고, 15일에는 울기(16.9°C)를 거쳐 16일에 기장(22°C)에서 소멸되었다. 따라서, 첫 번째 사례의 냉수대는 포항에서 시작하여 울기, 기장 연안을 따라 출현한 경우로, 남서풍에 의해 발생하는 경우보다는 북한한류와 대마난류에 의해 발생한 사례이다. 그러므로 PS1에서 지속적인 남서풍이 아니라 중규모 순환인 해풍순환을 관측할 수 있는 날

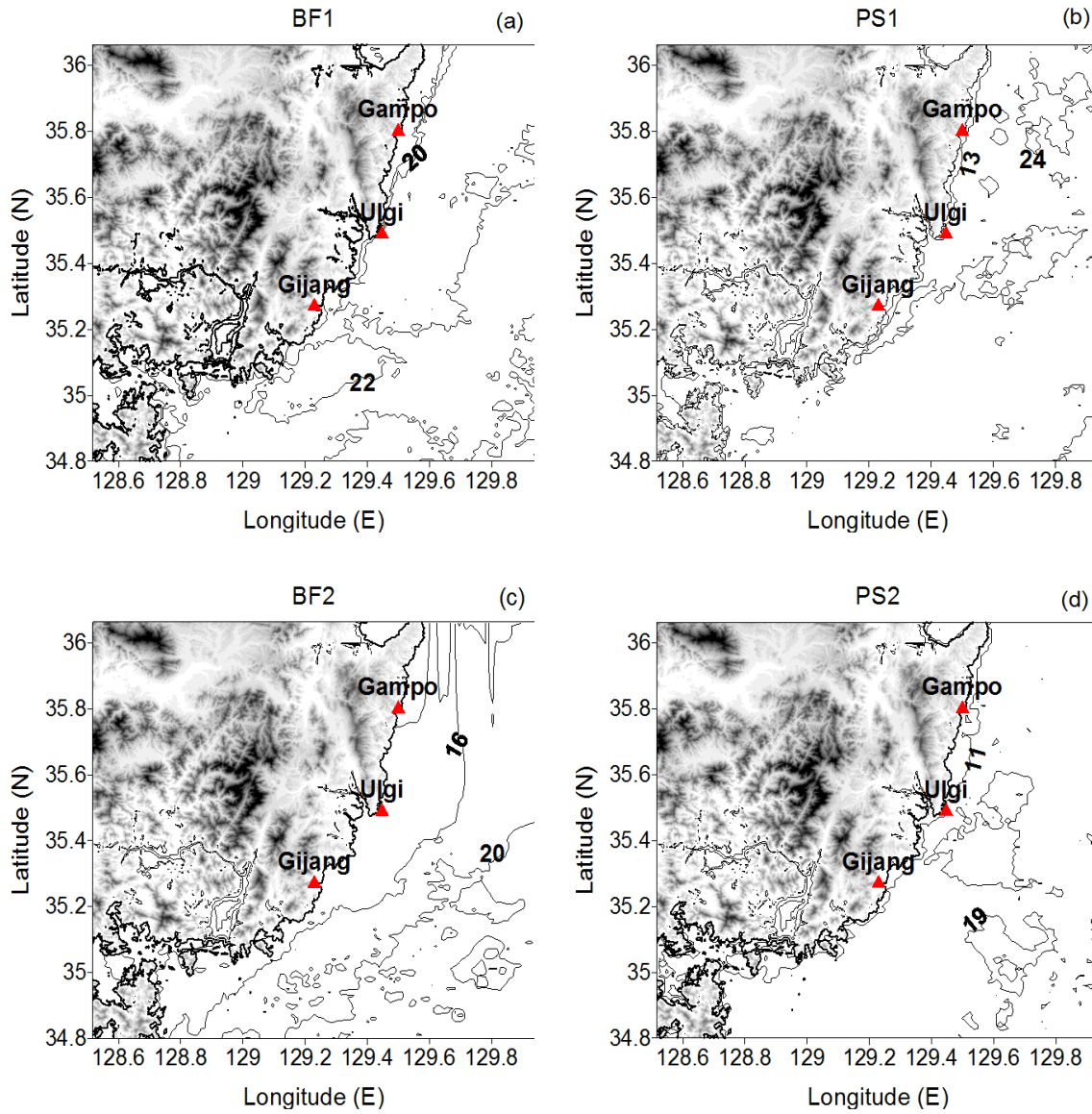


Fig. 5. The spatial distribution of the observed SST in (a) BF1, (b) BF2, (c) PS1, and (d) PS2.

이었다.

두 번째 사례의 BF2와 PS2의 SST 분포는 다음과 같다(Fig. 5(c, d)). BF2의 SST의 모습은 동해상의 구름으로 연안 근처에 SST분포가 잘 나타나 있지 않았으나 구름 사이에서 나타난 SST 자료를 분석한 결과 16~20°C의 분포가 나타났다. 이것은 7월의 평균 SST(Fig. 3(a))와 일치한다. 반면 PS2(Fig. 5(d))는 울

기 연안 가까이에서 SST가 점점 더 하강되어 형성됨으로써 먼 연안과의 SST차이가 더 컸다. 이 사례의 냉수대는 8월 4일에 기장(15.4°C), 울기(18.0°C)로 기장에서 냉수대가 나타났고, 8월 6일에는 울기(15.5°C)와 기장(17.5°C)에서 각각 낮은 SST 분포를 나타내 울기에서 냉수대를 이루었다. 이후 8월 7일에는 감포, 울기, 기장 모두 수온이 20°C 이상을 기록함으로써 냉수

대가 소멸하는 경우이었다. 이렇게 냉수대가 소멸되어 가는 8월 6일은 약해진 종관장 세력 대신 중규모 순환이 발달되어 냉수대와 해풍순환 동시에 존재하는 사례일 것이다.

다음으로 각 사례일에 해당하는 기온을 분석하였다(Fig. 6). 먼저 첫 번째 사례일인 BF1의 경우, 세 지점 중 가장 내륙에 위치해 있는 울산 지점과 가장 연안에 위치해 있는 울기 지점은 최대 기온이 각각 35.1°C (1200 LST), 31.7°C(1300 LST)로 그 차이가 약 3°C를 나타내었다(Fig. 6(a)). 냉수대가 발달한 PS1(Fig. 6b))은 가장 연안에 위치한 울기지점에서 최대 기온이 28.4°C(1000 LST)이었고, 가장 내륙 안에 위치한 울

산 지점에서 33.1°C(1100 LST)으로 두 지점 사이의 기온차이가 컸다. 이 기온 차이는 BF1의 것보다 크다. BF2 역시 모든 지점의 최대 기온이 30°C가 넘는 날이었다. 연안인 울기와 내륙인 울산에서 최대 기온이 각각 31.9°C와 33.8°C로 기온차이가 2°C보다 작았다(Fig. 6(c)). 반면 PS2는, 특히 울기 경우 최대 기온이 25.7°C(1200 LST) 이었고, 연안에서 다소 떨어진 울산에서는 최대 29.2°C(1100 LST)를 기록하였다. 즉, PS2에서 내륙-해양간의 기온차이는 3.5°C로 BF2의 것 보다 크다. 그러므로 냉수대 사례일인 PS1과 PS2는 BF1과 BF2 보다 전 지점의 기온이 모두 더 낮았으며, 특히 연안에 가까이 위치해 있는 울기 지점이 더

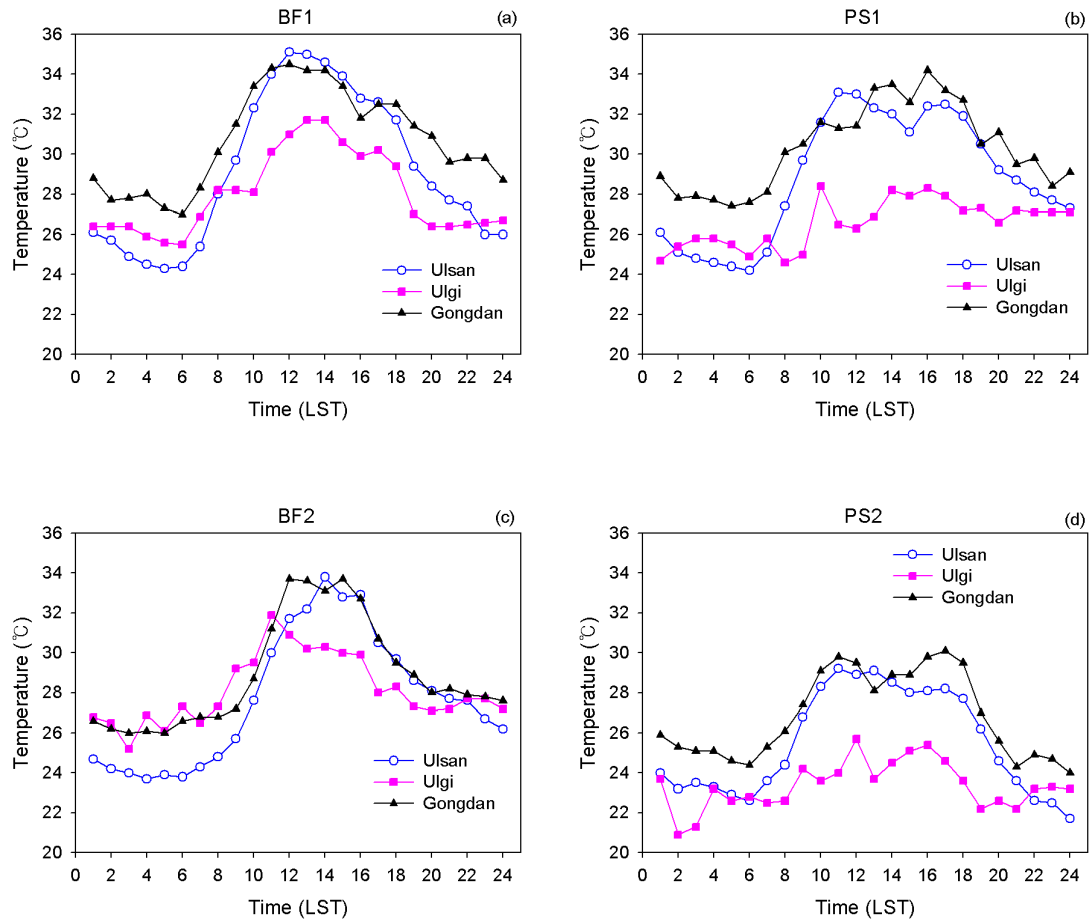


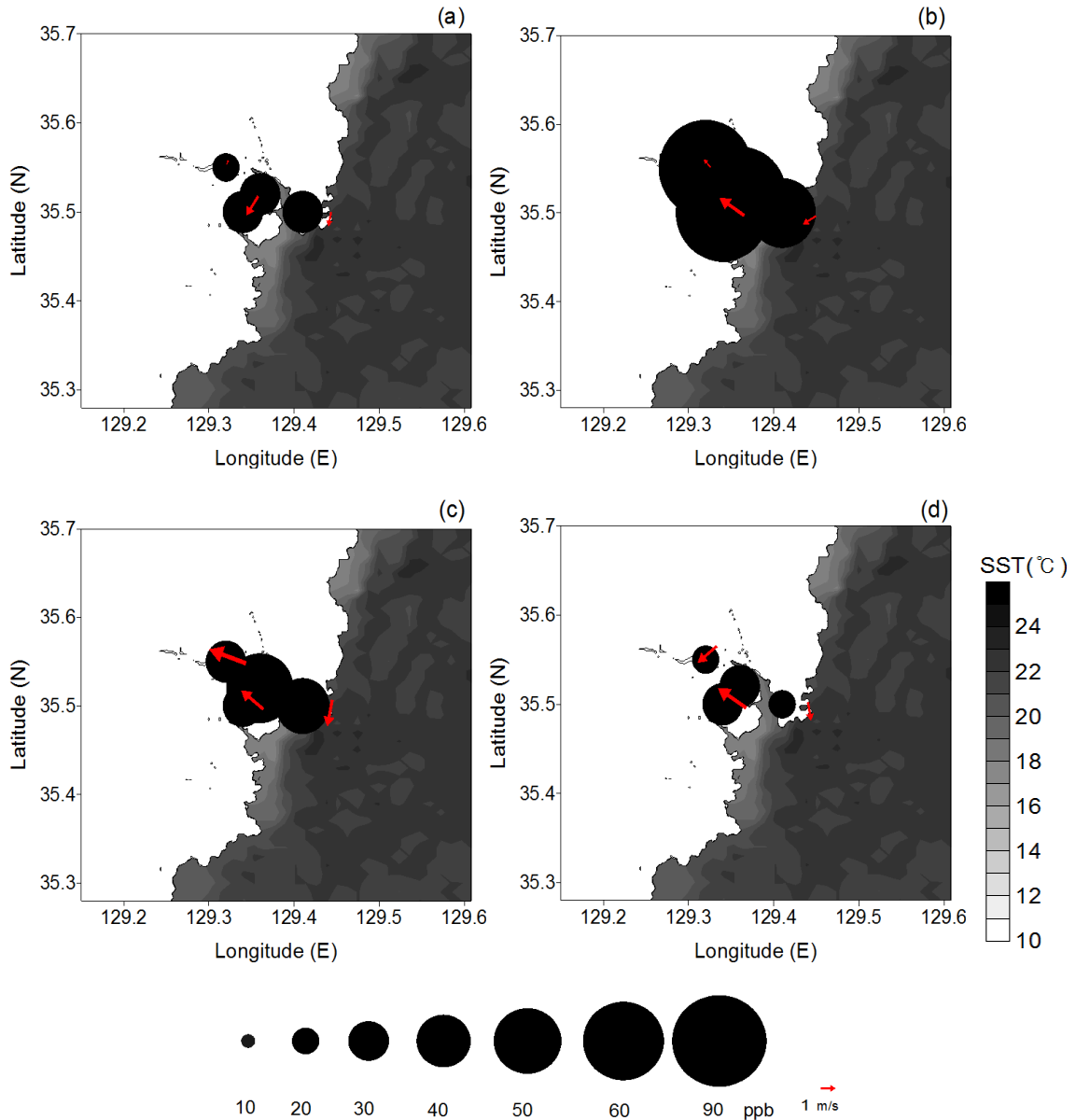
Fig. 6. Time series of the temperature for (a) BF1, (b) PS1, (c) BF2 and (d) PS2 at 3 stations.



큰 영향을 받았다. 또한 PS1과 PS2에서 냉수대 영향으로 내륙-해양간의 기온차이가 더 크게 나타났다.

냉수대 영향으로 인한 해풍순환과 오존과의 관계를 Fig. 7~Fig. 10에 나타내었다. BF1(Fig. 7)을 먼저

살펴보면, 울기지역에서 0900 LST이전 남서풍에서 약 2~3 m/s의 북동풍으로 전환되어 해풍이 나타나고, 이후 공단에서 해풍이 나타나며, 마지막으로 1200 LST에 울산을 통과하였다. 이와 함께 오존은 0900



**Fig. 7.** Variation of wind vectors (arrow, m/s) and ozone concentrations (black circle, ppb) observed at 3 meteorological and 4 air quality monitoring sites at (a) 0900 LST, (b) 1200 LST, (c) 1500 LST, and (d) 1800 LST in BF1, with the SST(°C) on August 8, 2006.

LST에 전 지점에서 평균 20 ppb이었다. 정오가 되자 오존은 울산과 공단지점에서 약 34℃의 높은 기온으로 생성되었고, 2 m/s 이하의 약한 해풍은 오존수송과 확산을 억제시켰다. 그 결과 Fig. 2(b)에서 표시한 부곡동과 여천동에서 오존이 80~100 ppb로 증가하였다(Fig. 7(b)). 울산을 통과하던 해풍은 1800 LST에 2

m/s의 약한 육풍으로 전환되었으나 공단에서는 여전히 3 m/s의 남동풍을 나타내었다. 이에 오존 농도도 점점 낮은 기온과 공단의 남동풍은 내륙으로 오존을 확산시켜 이전보다 약 20~40 ppb으로 점점 더 낮아지는 모습을 보였다(Fig. 7(d)).

냉수대가 발달한 PS1(Fig. 8)의 경우, 남동풍의 해

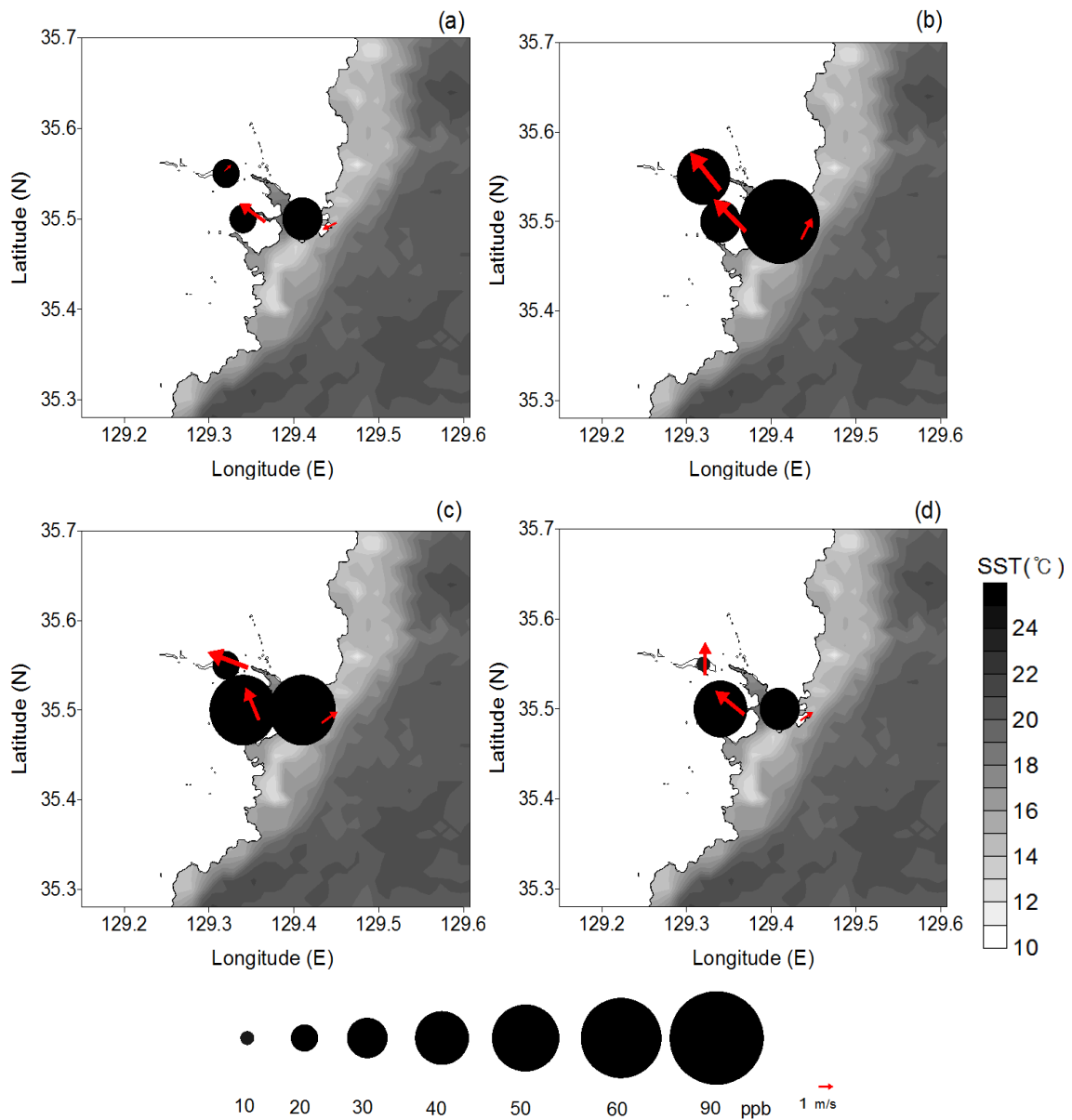


Fig. 8. Same as in Fig. 7, except for PS1 with the SST(℃) on August 14, 2006.

풍은 공단(0800 LST)과 울산(1000 LST)으로 침투하였다. 그리고 해풍은 두 지점에서 각각 3.3 m/s와 3.5 m/s로서 1200 LST에 통과하며 4~5 시간 지속되었다. 공단은 늦은 시간까지 남동풍으로 유지되었고, 울산은 해륙풍 순환으로 인한 풍향변화를 보였다. 0900 LST, 오존농도는 10~30 ppb로 BF1과 비슷한 수준

이었다(Fig. 8(a)). 1200 LST 이후에도 기온이 30°C 이상(울산, 공단)으로 상승하여 오존이 형성되기 쉬었으나 오존농도가 최대로 나타나는 1200~1500 LST의 농도는 약 40~60 ppb 이었다(Fig. 8 (b, c)). 그리고 지속적인 남풍은 오존을 내륙으로 수송시켜 농도는 각 지점에서 이전 시간보다 10~20 ppb로 낮아졌다

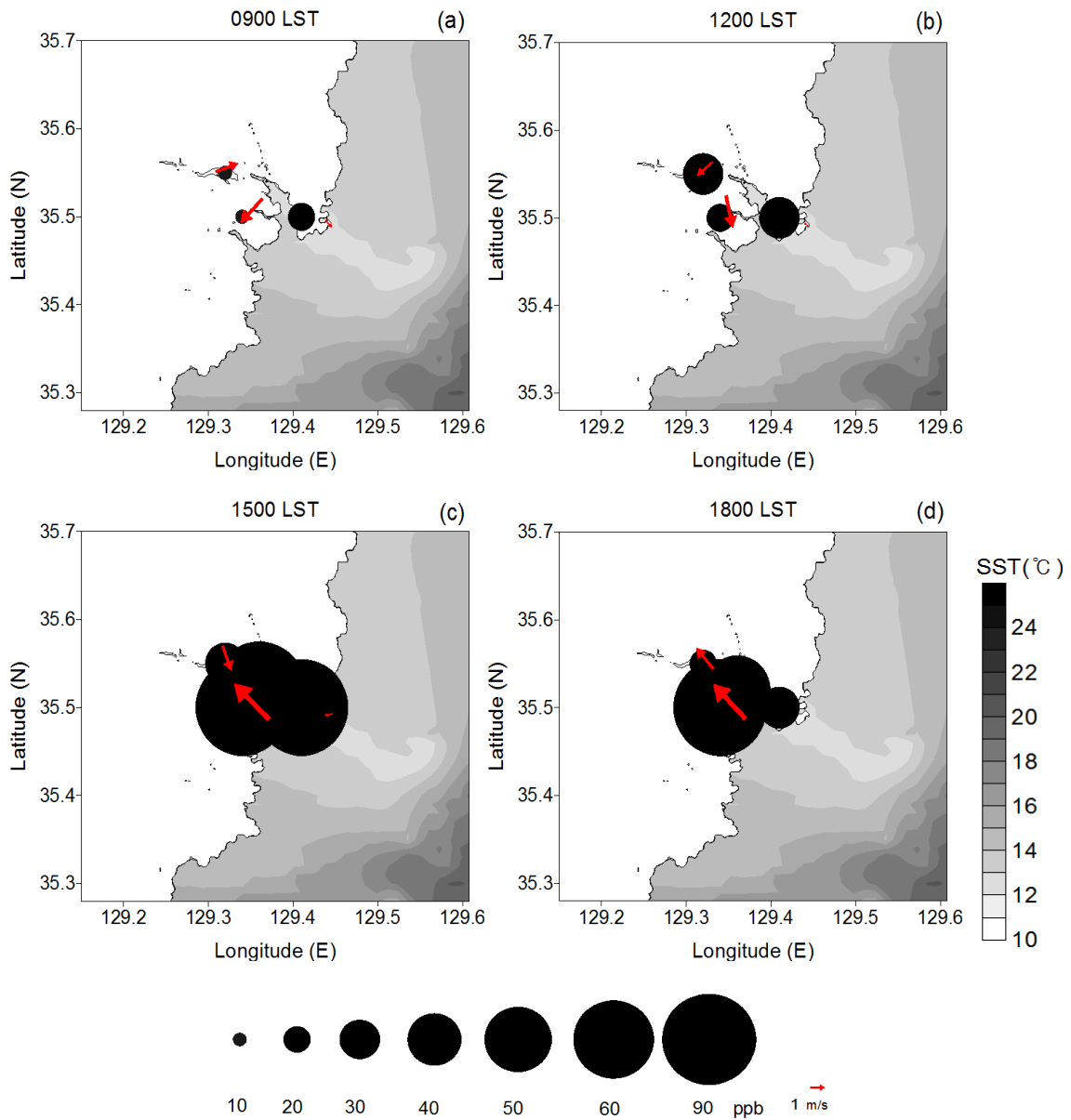


Fig. 9. Same as in Fig. 7, except for BF2 with the SST(°C) on July 31, 2008.

(Fig. 8(d)).

두 번째 사례일인 BF2(Fig. 9)는 육풍(북동, 북서풍)이 전 지점에서 1200 LST까지 나타났다. 이후 해풍은 1500 LST에 공단에서 3.7 m/s의 남동풍으로 침투되었으며, 이후 공단과 울산에서 2~3 m/s로 계속 유지되었다. 오존농도는 1200 LST에 평균 20 ppb의

분포를 보였으나, 3시간 뒤에는 울기와 공단이 위치해 있는 곳인 대송동, 여천동, 부곡동에서 최대 100 ppb로 오존이 급격히 증가하였다(Fig. 9(c)). 이렇게 높게 증가한 농도는 1200~1500 LST의 높은 기온이 원인을 제공하였다(Fig. 6(c)). 또한 공단의 남동풍과 울산에서 부는 북서 바람으로 인한 수렴이 오존의 확산을

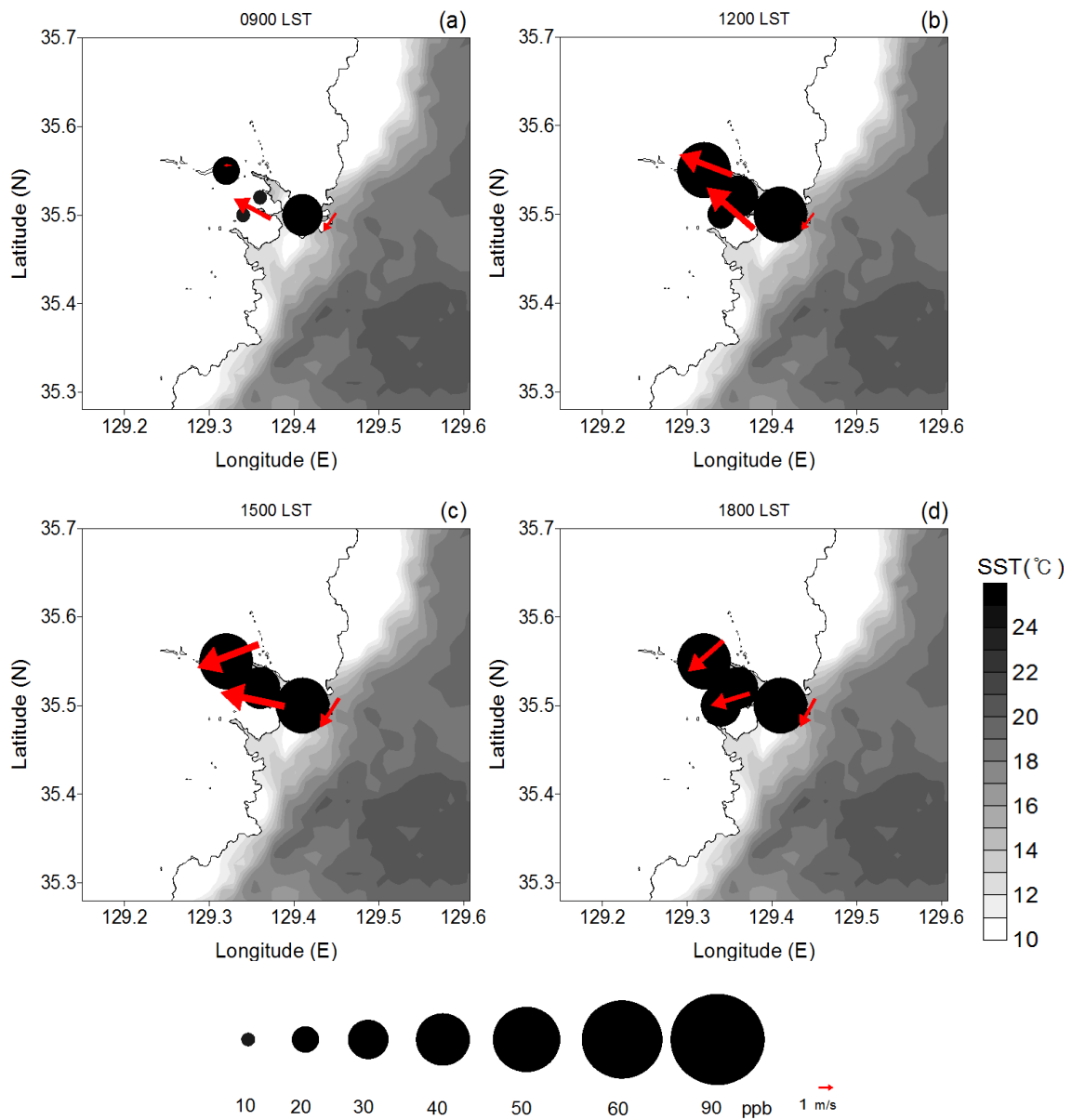


Fig. 10. Same as in Fig. 9, except for PS2 with the SST(°C) on August 6, 2008.

방해하여 성남을 제외한 세 지점에서 농도가 늦은 시간까지 고농도를 나타내었다(Fig. 6(d)). 이에 비해 PS2(Fig. 10)의 경우, 해풍은 0900 LST에 공단에서 2 m/s 남동풍이 나타나 BF2 보다 일찍 해풍이 침투되었다. 1200~1500 LST에는 4~5 m/s 이상의 남동풍인 해풍이 울산과 공단을 통과하였다. 이것은 BF2의 해풍 풍속보다 강한 것으로, 이후 1800 LST에는 북동풍으로 바뀌었으나 풍속은 3 m/s 이상으로 여전히 풍속이 강한 사례이었다. PS2의 오존농도는 0900~1200 LST에 BF2의 수준과 비슷하였다. 그러나 BF2와 달리 1500 LST에도 오존농도는 더 이상 증가 않고 약 40 ppb 이하이었다. 이것은 PS2의 낮 시간동안 상대적으로 낮은 기온으로 인해 오존형성이 어려웠기 때문이며, 또한 1200~1800 LST 동안 4 m/s 이상의 동풍 계열의 강한 바람이 오존을 내륙으로 수송하여 낮았기 때문이다.

#### 4. 결론

남동 연안지역에 나타나는 SST 변화로서 냉수대 발생과 이것으로 인한 중규모 순환의 영향을 분석하였다. 냉수대 발생은 여름철인 6월~8월 동안 나타났고, 그 중 7월에 가장 발생횟수가 높았다. 발생횟수는 최근 10년 동안 울기에서 연평균 20일로 가장 많았다. 특히, 2005년은 모든 지점에서 30회 이상으로 빈번히 출현하였으며, 7일 이상 지속되는 기간도 나타나 냉수대가 강하게 발달된 해 이었다. 냉수대 발생에 의한 기상변화를 살펴보기 위해 냉수대 발생일과 비발생일을 분류하여 세 지점(감포, 울기, 기장)에서 각각 조사하였다. 그 결과 냉수대 발생기간에는 SST와 해상 위의 기온이 하강하는 모습을 보였고, 냉수대 발생-비발생기간의 SST와 기온차이가 각각 5°C와 0.5°C 이었다. 또한 바람의 변화도 뚜렷한 차이를 보여 냉수대가 발생할 때의 주풍은 남풍이었고, 비발생일 동안은 낮시간 동안 4~5 m/s의 동풍 계열을 나타내었다.

냉수대 발생으로 인한 중규모 순환의 영향을 보기 위해 사례일 분석을 실시한 결과 BF1과 BF2에서 SST는 평균 15~20°C 정도의 분포를 보였다. 그리고, 30°C 이상으로 상승된 기온과 1~3 m/s의 약한 남동풍은 오존농도를 70~100 ppb까지 증가시키며, 대송동과

부곡동에서는 계속 높은 농도를 유지하는 결과를 보였다. 하지만 PS1과 PS2의 경우 SST는 약 10~20°C로 큰 SST 경도를 나타내었다. 그리고 낮은 기온으로 오존 농도도 낮았고, 게다가 3~5 m/s의 강한 풍속은 오존을 내륙으로 확산시켜 늦은 오후까지 30 ppb 이하의 농도 수준을 유지하는데 도움을 주었다.

이렇게 연안 냉수대 발생으로 연안에서 낮은 기온과 증가된 풍속은 저농도 오존 형성에 영향을 주었다. 그러므로 연안에서 나타나는 여러 환경적 요인을 고려하는 것이 지역대기를 연구하는 것에 도움이 되리라 사료된다. 앞으로는 적절한 배출량과 대기질을 고려한 방법으로 수행하여 대기환경 부분에서 더 명확한 결과가 도출되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2012R1A1A3014517).

#### 참고 문헌

- Kim, C. H., Kim, G., 1983, Characteristics and origin of the cold water mass along the east coast of Korea, J. Oceanol. Soc. Korea, 18(1), 73-83.
- Franchito, S. H., Oda, T. O., Rao, V. B., Kayano, M. T., 2008, Interaction between coastal upwelling and local winds at Cabo Frio, Brazil: an observational study, J. Appl. Meteor. Climatol., 47(6), 1590-1598.
- Mizzi, A. P., Pielke, R. A., 1984, A numerical study of the mesoscale atmospheric circulation observed during a coastal upwelling event on 23 August, 1972, Part I: Sensitivity studies, Mon. Wea. Rev., 112, 76-90.
- Lee, C. J., Na, J. Y., 1985, Structure of Upwelling off the Southeast Coast of Korea, J. Oceanol. Soc. Korea, 20(3), 6-19.
- Lee, J. C., 1983, Variations of Sea Level and Sea Surface Temperature Associated with Wind - Induced Upwelling in the Southeast Coast of Korea in Summer, J. Oceanol. Soc. Korea, 18(2), 149-160.
- Lee, K. B., 1978, Study on the coastal cold water near

- Ulsan, J. *Oceanol. Soc. Korea*, 13(2), 5-10.
- Suh, Y. S., Hwang, J. D., 2005, Study on the Cold Mass Occurrence in the Eastern Coast of the Korean Peninsula in Summer, *J. Environ. Sci.*, 14(10), 945-953.
- Woodson, C. B., Eerkes-Medrano, D. I., Flores-Morales, A., Foley, M. M., Henkel, S. K., Hessing-Lewis, M., Jacinto, D., Needles, L., Nishizaki, M. T., O'Leary, J., Ostrander, C. E., Pespeni, M., Schwager, K. B., Tyburczy, J. A., Weersing, K. A., Kirincich, A. R., Barth, J. A., McManus, M. A., Washburn, L., 2007, Local diurnal upwelling driven by sea breezes in northern Monterey Bay, *Cont. Shelf Res.* 27, 2289-2302.