

# 해풍시작에 영향을 미치는 지형성 강풍현상에 대한 수치실험

정우식\* · 이화운

부산대학교 대기과학과, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

## Numerical Experiments on the Terrain Following Strong Wind Phenomenon Effecting to the Onset of Sea Breeze

Woo-Sik Jung\* · Hwa Woon Lee

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**Abstract:** The onset time of sea breeze at Haeundae is faster than that at Suyoung in spite of the observation site at Suyoung being 5m and that of Haeundae being 1km away from the coastline. We therefore simulate the effects of terrain on the onset time of sea breeze at Suyoung and Haeundae districts by using the LCM(Local Circulation Model). This phenomenon is due to the nighttime density flow, which is created by nighttime radiative cooling. It follows the slope of the highlands surrounding the urban area, gathers at a central area of Busan, and then flows out to a lower area like Suyoung river. This process continues after sunrise. In researching the AWS wind speed, we find an important thing. That is to say, the nighttime mean wind speed at Suyoung is three times greater than that at Haeundae. This property shows that Suyoung is an outflow channel of nighttime air mass. The above observed data shows that terrain effect has a important role on the onset of sea breeze.

Keywords: strong wind phenomenon, onset time, sea breeze, LCM

**요약:** 관측지점의 위치를 살펴보면 해안으로부터 수영은 약 5m 정도이고 해운대는 약 1km 정도 떨어져 있다. 하지만 해운대에서의 해풍시작시간이 수영보다 빨리 나타난다. 따라서 국지순환모형인 LCM을 이용하여 수영과 해운대에서 해풍시작시간에 대한 지형의 효과를 수치모의 하였다. 이러한 현상은 야간의 복사냉각에 의해 형성된 흐름에 의한 것으로 분석되었는데, 도심지를 둘러싸고 있는 고지대의 경사면을 따라서 수렴된 공기가 가장 저지대인 수영지역으로 흘러가기 때문에 나타난 것으로 이러한 현상은 일출 후에도 나타난다. AWS자료를 분석한 결과, 수영에서 해운대에 비해 약 3배 정도 강한 강풍현상이 나타났는데, 이는 수영지역이 야간공기의 유출구이기 때문이다. 이를 통해 지형조건이 해풍의 시작에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

주요어: 강풍현상, 시작시간, 해풍, LCM

### 서론

지역적 국지순환계의 특징과 저층 대기의 움직임에 영향을 미치는 요인은 여러 가지가 있다. 그 중에서도 가장 중요하고 큰 영향을 미치는 요소는 바로 '지형효과' 라고 할 수 있다. 이것에 대해 여러 가지 측면에서 그 중요성에 대한 여러 연구들이 수행되어 온 바 있다. 이승우와 이동규(1998)는 경기도 일부를

포함하는 수도권역을 대상으로 지형 및 지표효과에 대한 국지순환계 수치모의를 수행하여 지형경사와 지표특성 변화가 국지순환계 형성에 미치는 영향을 살펴본 바가 있으며 Banta와 Cotton(1981)은 미국 콜로라도의 넓은 산악분지지역에서 지형적 특징에 따라 주간 경계층에서 3가지의 형태의 풍계가 나타난다는 것을 살펴본 바가 있다. Müller와 Whiteman(1988)은 야간 기온역전의 소멸에 대한 연구에서 협곡(canyon)의 형태가 매우 큰 영향으로 작용한다는 것을 밝혔는데, 특히 3가지 가장 지형에 대해 바닥지형의 폭을 또 다른 변수로 하여 이들 각각에서 역전층의 하강에 따른 소멸과 대기경계층의 성장에 의한 역전층의

\*Corresponding author: wsjung1@pusan.ac.kr  
Phone: 82-51-583-2651  
Fax: 82-51-515-1689

소멸과정이 다르게 작용한다는 것을 고찰하였으며 Sakiyame(1990)는 지형적 특징이 상이한 두 협곡(평탄하게 열려 있는 분지형 협곡과 좁고 깊은 협곡)에서 배사류(drainage flow)의 특징과 기온역전의 소멸 과정에 대해 지형적 특징이 미치는 영향을 분석한 바가 있다. 또한 많은 연구자들이 지형적 특징에 따른 기류의 이동이나 대기오염물질의 수송을 살펴보기 위해 수치모형을 이용한 수치실험을 많이 하였는데, 이들은 실제지형에서의 관측결과와 가상지형에서의 수치결과를 통해 국지순환계의 특징 및 대기오염물질의 거동을 예측하였다(Stephan *et al.*, 1988; Kimura and Kuwagara, 1993; Bossert, 1997). 이외에도 Kimura (1986)는 일본 관동평야지역에서 형성되는 야간 중규모 소용돌이(vortex)가 이 지역을 둘러싼 고지대의 풍하층에 있기 때문에 나타나는 현상이라는 것을 밝혀 지리적, 지형적 중요성을 다시 한번 강조하였다. 이와 같이 여러 연구들을 통해서 국지순환계에 미치는 지형효과의 중요성이 지속적으로 강조되어 왔다.

과거부터 지금까지 국내외에 걸쳐 국지순환계의 특징에 대해서는 해륙풍을 대상으로 많은 연구들이 이루어져 왔다(Helmis *et al.*, 1987; 현종훈과 이동규, 1990). 이것은 해륙풍의 형성원리와 특징이 일찍이 잘 알려져 왔고 분석이 용이하였기 때문으로 볼 수 있다. 또한 인간생활에 영향을 미치는 대기오염에 대한 관심이 증가되면서 대기오염물질의 이동과 확산 그리고 수송에 중요한 영향을 미치는 국지순환계의 이해가 필수적으로 요구되었고 이에 가장 효과적으로 다룰

수 있던 것이 해륙풍순환계였기 때문으로 볼 수 있다.

우리나라의 경우, 삼면이 바다로 둘러싸여 있고 복잡 다양한 굴곡의 해안선과 지형경사가 심한 연안지역을 보편적으로 볼 수 있다. 따라서 이와 같이 독특한 지형효과를 가지고 있는 우리나라 연안지역 전역에 걸쳐 해륙풍순환계와 연관된 특징적인 현상이 나타날 가능성이 매우 크다고 예상할 수 있다.

이 연구에서는 앞서 선행연구에서 관측자료를 이용하여 확인한 강풍현상의 형태와 특징을 바탕으로 이러한 현상의 형성 메커니즘을 좀 더 구체적으로 분석하기 위해 대기유동장 수치모형을 이용하여 상세한 저층대기 바람장을 살펴보고자 한다. 이 연구에서는 바다를 포함하고 있는 부산지역을 대상으로 하여 연구를 진행하였다.

## 부산지역의 지형지세와 기상자료 분석

Fig. 1은 수영과 해운대에 설치된 자동기상관측장비(Automatic Weather System, 이하 AWS)의 위치와 부산지역의 지형지세를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 부산지역은 도시의 전면부가 남서-북동 방향으로 바다에 접해 있으며 도시내륙으로는 높이 500m 정도의 비교적 높은 고지대가 남서-북동방향으로 길게 형성되어 있고 도시의 오른쪽으로도 비교적 고지대의 복잡한 지형적 특징을 나타내고 있다. 이러한 고지대를 배경으로 부산의 도심부가 저지대의 분지형태로 형성되어 있는데 특히, 부산의 도심부를 보

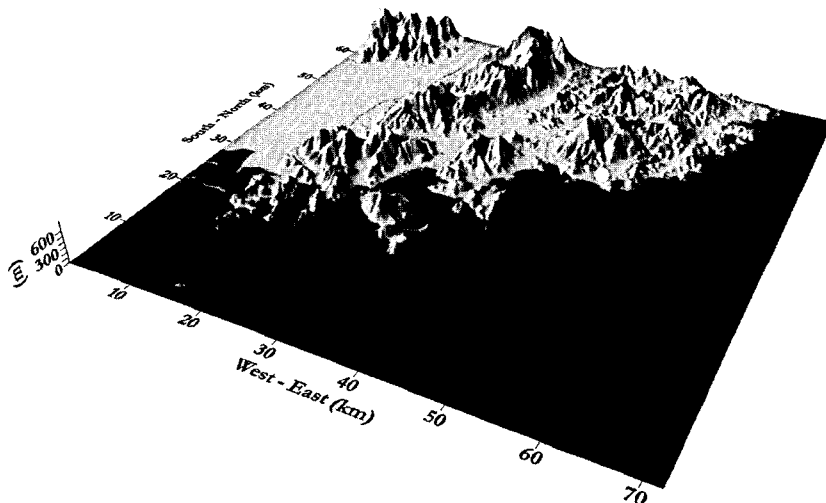


Fig. 1. Study area and observation points of AWS within the Busan coastal area. (Suyoung: ▼, Haeundae: ●)

면 해발고도가 매우 낮은 평지 형태를 하고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 부산 도심부는 주변이 높은 산으로 둘러싸고 있는 지지대 분지 형태를 하고 있다. 그림을 살펴보면 수영(▼)과 해운대(●)의 관측지점 위치가 모두 연안부근에 설치되어 있는데 수영의 관측지점은 해안으로부터 약 5m 떨어진 지점에 위치하고 있으며 해운대의 관측지점은 해안으로부터 약 1km 정도 떨어진 지점에 위치하고 있다.

Fig. 2는 연구 대상으로 선정된 해풍발생일 20일에 대해서 각 날의 해풍시작시간과 두 지점(수영과 해운대)간 해풍 시작시간의 차이를 나타낸 것이다. 그림을 보면 분석 대상일 20일 모두 해운대의 해풍시작시간이 수영보다 빠르다는 것을 알 수 있으며 두 지점간 해풍시작시간의 차이는 어떠한 일정한 경향을 보이고 있지는 않으나 평균 약 1시간 정도로 나타나고 있다. 그리고 두 지점 모두 하계로 갈수록 해풍의 시작시간이 빨라지는 것을 분명히 알 수 있는데 이는 하계로

갈수록 일출시간이 빨라지는 때문으로 볼 수 있다.

이상의 결과를 보면, 수영의 관측지점이 해안으로부터 약 5m 정도 떨어져 있고 해운대의 관측지점이 해안으로부터 약 1km 정도 떨어져 있음에도 불구하고 해운대에서 해풍이 빨리 시작하고 있다는 점이다. 이는 일반적으로 알려져 있는 사실인 해안으로부터 가까운 거리에 있을수록 해풍의 시작이 빨리 나타난다는 것과 반대의 현상인 것이다. 즉, 해안으로부터의 거리만을 고려해 본다면 야간 육풍에서 해풍으로의 전환이 있는 시간대에 수영보다 해운대에서 약 10~15분 정도 늦게 해풍이 시작되어야 하지만 반대로 해운대에서 더 빨리 시작하고 있는 것이다.

Fig. 3은 선정된 해풍일의 시간별 평균풍속을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 수영의 야간(OOLST~일출전까지)평균풍속이 해운대보다 3배정도 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 주간의 풍속을 살펴보면 더라도 수영이 해운대보다 약 1m/s정도 강한 것을

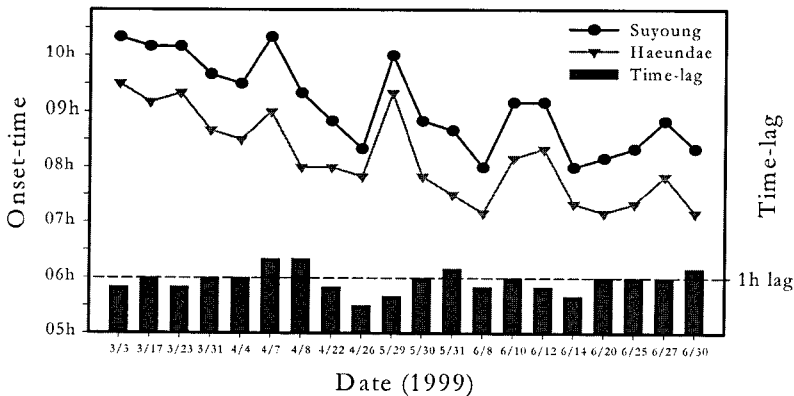


Fig. 2. Onset time of a sea breeze and time-lag.

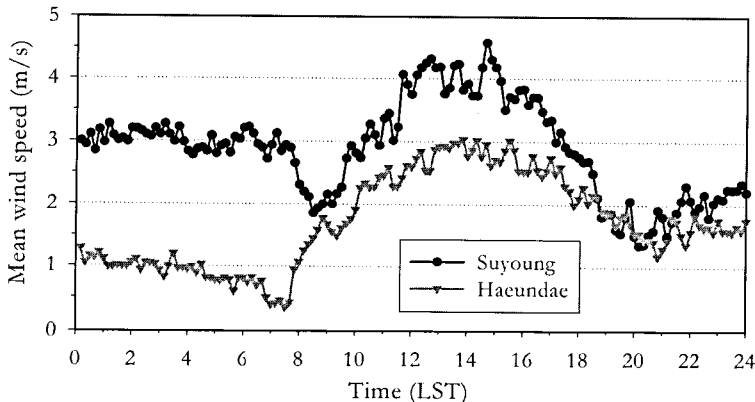


Fig. 3. Mean wind speed at Suyoung and Haeundae.

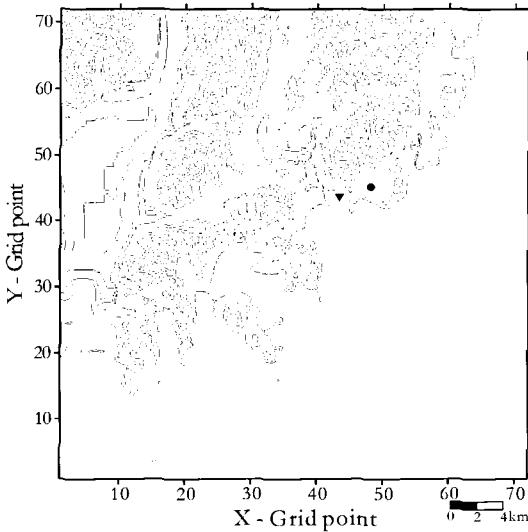


Fig. 4. Computational domain for numerical simulation. The first inner contour represents 100m above the sea level.

볼 수 있다.

그렇다면 이러한 현상이 부산지역의 지형적 특징과 어떠한 관계가 있는지 대기 유동장 수치모형을 이용하여 상세히 분석해 보았다.

### 국지순환모형

이 연구에서 사용한 모형(Local Circulation Model, 이하 LCM)의 기초방정식은 Kikuchi 등(1981)이 개발하여 Kimura와 Arakawa(1983)가 개선한 것으로 Kang et al.(1998)과 이화운 등(2000)의 연구에서 LCM에 대한 상세한 설명과 모형의 수행능력을 살펴본 바 있다.

대기유동장 수치모의 영역은 Fig. 4에 나타내었다. 부산광역시지역을 대상으로 수평방향(,)으로는 격자간격 500m로 하여 각각 72격자점을 사용하였고 연직방향으로는 40개 층으로 나누어 지표부근에서는 최소 5m 간격에서 상층으로 갈수록 넓어지도록 두었다.

측면경계조건으로는 Orlanski(1976)의 복사경계조건을 사용하였고 측면경계에서 생성되는 계산오차를 억제하기 위해 수평확산계수는 경계로 갈수록 지수적으로 증가시켰다. 하지만 최대값은 모형 중앙부에서의 값의 10배를 초과하지는 않도록 하였는데, 이는 지나치게 큰 값은 다시 계산을 불안정하게 할 수 있기 때문이다. 상면경계조건으로는 저층에서 형성되어

상층으로 진행되는 내부중력파를 반사하지 않고 효과적으로 흡수할 수 있는 Klemp와 Durran(1983)의 복사조건을 사용하였다. 난류과정은 Mellor-Yamada (1982)의 Closure model을 적용하였는데 계산기의 성능을 고려해 난류에너지를 진단방정식으로부터 계산하는 Level-2를 적용하였다. 초기 연직기온감율은 대기의 평균적 상황을 고려해 6.5°C/1000m를 두었으며 계산대상 영역이 정상상태에 있다고 가정하고 수평방향의 풍속은 지균풍이 없는 경우로 가정하였다. 그리고 봄철 우리나라 남동해안의 평균해수면 온도인 13.5°C를 고려하였으며 부산지방 5월의 평균투과도인 0.675와 5월의 평균 적위를 고려하였다.

### 바람장 수치모의 결과

Fig. 5는  $z^* \approx 15m$  고도에서의 수평바람장을 나타낸 것이다. 야간시간대를 나타내는 0000LST와 0600LST, 그리고 해풍의 시작 및 육풍이 존재하는 시간대 부근인 0900LST와 해풍의 발달과정과 진행이 잘 나타난 1200LST의 결과를 나타내었다. Fig. 5(a)는 0000LST의 수평 바람장을 나타낸 것이다.

이 그림에서 야간 지표냉각의 영향으로 고지대의 지표부근 공기가 저지대로 흘러가는 것을 볼 수 있다. 또한 바다를 접하고 있는 해안지역 전반에 걸쳐 육지에서 바다로 불어 나가는 육풍을 뚜렷이 모사하고 있다. 이러한 산풍과 육풍의 흐름은 새벽으로 갈수록 그 경향이 강화되는 것을 알 수 있는데(Fig. 5(b)), 이는 지속적인 지면 복사냉각에 의한 수평온도차의 강화에 의한 것으로 볼 수 있다. 여기서 주목할 것이 야간시간대에 육지에서 바다로 빠져나가는 육풍의 경로이다. 새벽시간대에 대부분의 해안을 따라 바다로 불어 나가는 육풍의 존재를 살펴볼 수 있지만, 특히 지형고도가 낮은 저지대를 형성하고 있는 해안지역을 통해 강한 흐름을 분명하게 볼 수 있다. 즉, 낙동강 하구가 위치하고 있는 부산서부지역의 저지대와 이 연구에서 연구대상으로 삼고 있는 수영천이 흐르는 수영지역을 통해 그 흐름이 분명하게 나타나고 있다. 수영지역은 서쪽과 동쪽에 각각 황령산(423m)과 장산(634m)이 위치하고 있고 이들 고지대의 가운데에 수영천이 흐르는 저지대를 형성하고 있는데, 빠르고 강한 육풍의 흐름은 이 저지대의 전반에 걸쳐 나타나고 있다.

Fig. 5(c)는 0900LST의 결과를 나타낸 것으로, 일

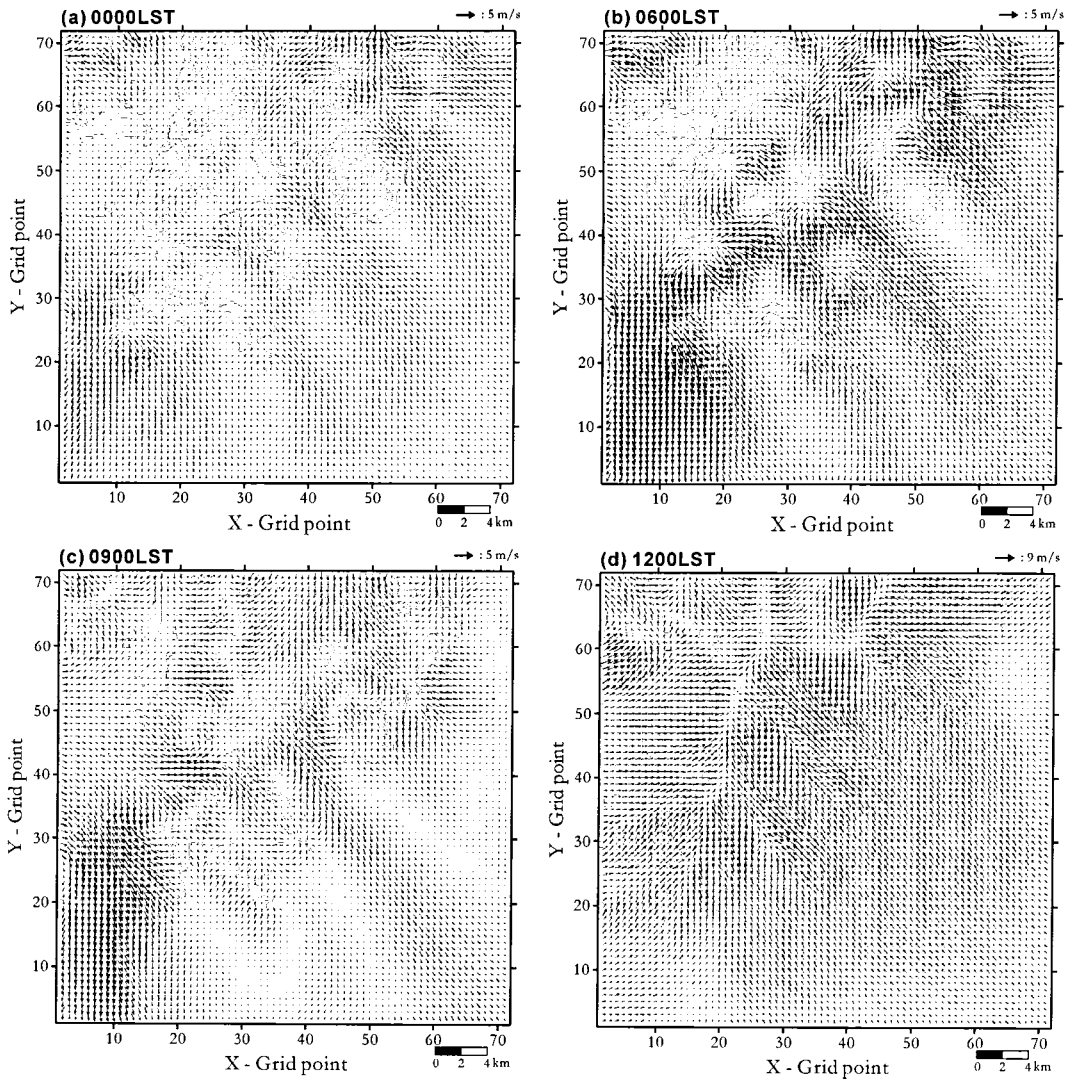


Fig. 5. Distributions of simulated wind field at (a) 0000LST, (b) 0600LST, (c) 0900LST, and (d) 1200LST, respectively.

출 이후 지면에 도달한 태양일사의 가열에 의해 새로운 풍계가 형성되고 있음을 볼 수 있다. 즉, 일출 후 내륙지역에서는 산사면과 저지대의 불균등 가열에 의해 산 정상상을 향하는 곡풍이 형성되고 있음을 볼 수 있으며 연안지역에 걸쳐서는 해안선을 따라 해풍의 시작을 볼 수 있고 야간시간에 바다로 불어 나간 육풍이 해안부근에서 강화된 기온경도에 의해 해안부근의 육지로 되돌아 들어오는 해풍으로 변환되는 과정도 볼 수 있다. 특히, 수영보다 더욱 내륙(약 1km)에 위치해 있는 해운대에서는 이미 분명하게 해풍이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이 시간대의 결과에서 해풍의 시작단계에는 해안선 부근에서 일률적인

풍향을 가지는 것이 아니라 해안선에 직각인 방향으로 시작하는 것을 알 수 있으며 일출 직후 내륙지역에서의 곡풍과 해안지역을 중심으로 해풍이 독립적으로 형성되는 것을 분명히 확인할 수 있다. 이와 더불어 이 시간대의 결과에서도 중요하게 살펴보아야 하는 것은, 전반적으로 지면가열과 관련된 해풍과 곡풍이 분명하게 나타나고 있지만 앞 시간대에서 강한 육풍이 확인된 수영지역에는 여전히 육풍이 뚜렷하게 형성되어 있다는 점이다. Fig. 5(d)는 1200LST의 바람분포를 나타낸 것으로 0900LST에 형성되었던 곡풍과 해풍이 지속적인 지면가열의 영향에 의해 전반적으로 발달한 것을 볼 수 있다. 즉, 내륙 고지대에

서는 앞 시간대보다 더욱 분명하게 곽풍을 확인 할 수 있으며 0900LST에서 나타났던 해안선을 따라 발달한 해풍이 발달하여 내륙으로 멀리 진행해 들어간 것을 볼 수 있다. 이러한 해풍의 진행을 좀 더 자세히 살펴보면 앞서 육풍의 경우와 마찬가지로 저지대로 열려 있는 수영지역에서 다른 지역에 비해 균일하고 분명한 해풍의 형태를 보이고 있으며 그 강도 또한 주변지역보다 다소 강하게 나타나고 있다.

이상에서 확인한 수영지역의 곽풍 구조를 좀 더 분명히 분석하기 위해 풍속의 연직분포를 살펴보았다. Fig. 6은 바람장의 연직분포를 상세히 살펴보기 위한 단면의 위치를 나타낸 것이다. 동서방향으로 주어져 있는 점선 A, B, C, D는 각각의 위치에서 수평 풍속의 연직분포를 살펴보기 위해 설정한 단면이다.

Fig. 7은 0600LST에 계산된 풍속분포를 나타낸 것으로 앞서 Fig. 6에서 표시한 점선(y=35(선A), 40(선B), 45(선C), 50격자(선D))에서의 수평풍속의 연직분포를 나타낸 것이다. 여기서 확인할 수 있는 중요한 사실은 앞서 수평바람장 수치모의를 통해 확인한 바와 같이 수영지역(x=40격자점 부근)에서 강한 풍속 분포를 확인할 수 있다는 점이다. D단면에서 풍속의 연직분포를 보면 그다지 뚜렷한 차이를 보이고 있지 않은데, 이는 수영의 위치에서 볼 때 D단면은 수영을 통해 불어 나가는 바람들이 시작되는 지역으로 수영의 양옆에 위치해 있는 고지대의 영향을 덜 받는 지역이기 때문으로 생각된다. 하지만 C단면을 보면 수영이 위치한 지역에서 강한 풍속대(zone)가 뚜

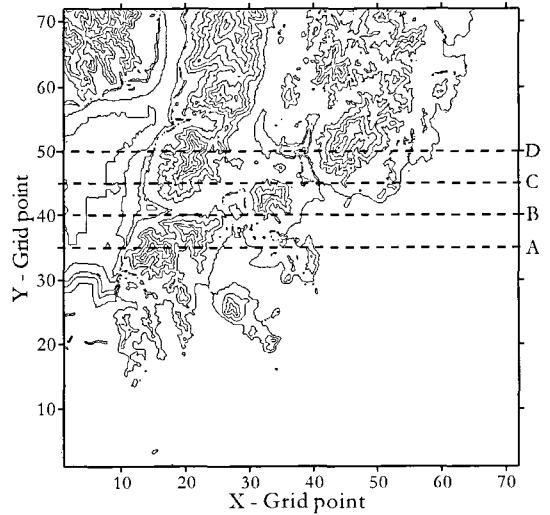


Fig. 6. Cross lines to view the vertical planes of calculation domain.

렷이 나타나며 고지대 사이에 위치한 수영을 막 벗어나서 바다에 도달한 바람을 나타낸 B단면에도 이러한 곽풍대가 잘 나타나고 있다. 이들 그림에서, 남쪽으로 갈수록 곽풍대의 중심이 동쪽으로 이동하는 것은 앞서 수평바람장에서 볼 수 있었던 바와 같이 수영에서 불어 나가는 육풍의 풍향이 약 330° 정도 (북서풍)이므로 바다로 진행할수록 점차적으로 남동 방향으로 향하기 때문에 나타난 것인데, 이는 해풍일에 수영지역에서 관측되는 자료에서도 분명하게 나타

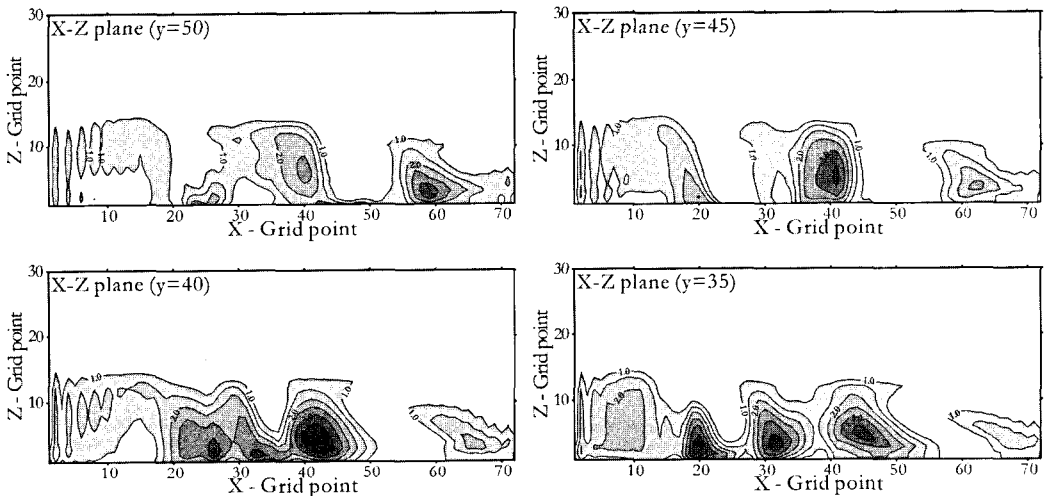


Fig. 7. Vertical cross sections of the wind speed above the lines D, C, B and A at 0600LST, respectively.

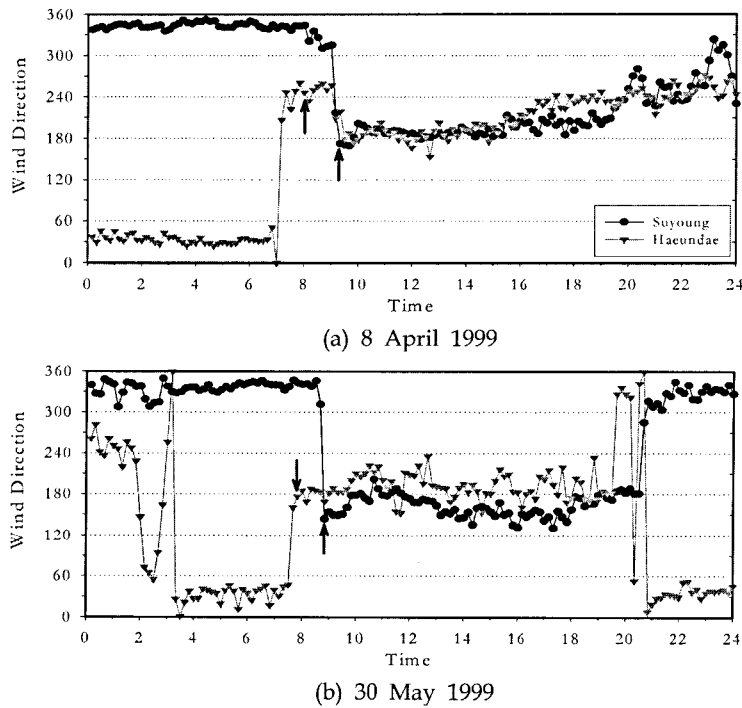


Fig. 8. Diurnal variations of the observed wind direction. Arrows indicate the onset time of sea breeze.

나는 점이다(Fig. 8). 또한 이들 그림을 분석해 보면 수영지역에서 나타나는 강풍대의 규모는 연직적으로 약 600m의 높이를 가지고 있는 것으로 분석된다. 이상의 결과를 통해 수평바람장에서 파악한 강풍대의 존재와 분포를 입체적이고 좀 더 구체적으로 분석할 수 있었다.

### 모형결과와 관측값과의 비교

LCM을 사용하여 복잡한 지형을 형성하고 있는 부산광역시역을 대상으로 수치모의한 계산값에 대한 정확성을 살펴보기 위하여 관측값과 비교해 보았다. 비교를 위해 선정한 날은 종관장의 영향이 비교적 약해 맑은 날과 우리나라 부근으로 약한 기압경도와 약한 풍속이 지속되었던 1998년 5월 19일에서 22일 까지 4일간이며 이날의 종관 기상상태는 Fig. 9를 통해 상세히 살펴볼 수 있다.

Fig. 10은 선정한 4일간의 시간별 평균풍속값과 국지순환모형을 사용해 수치모의한 시간별 풍속값을 비교해서 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 관측값과 계산값이 아주 잘 일치하는 것을 볼 수 있는

데, 특히 야간시간대에 수영에서의 풍속이 해운대에서의 풍속보다 강한 관측적 특징을 잘 제한하는 것을 알 수 있다. 또한 수영에서 해풍과 육풍의 전환시간대가 각각 0800LST경, 2000LST경으로 나타나는데 계산결과에서 보면 약간의 차이를 보이고 있기는 하지만 이 시간부근으로 뚜렷한 변화경향을 잘 나타내는 것을 알 수 있다. 해운대에서도 마찬가지로 모든 시간에 걸쳐 해풍 시작시간과 풍속의 크기 및 일변화 경향을 잘 모사하고 있다. 특히 두 지점 모두에서 정오시간대 이후의 풍속의 크기와 변화경향이 관측값에 상당히 정확하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

그렇다면 이상에서 확인한 수영지역 강풍대의 형성이 지형경사와 어떻게 연관이 있는지를 좀 더 조사해 볼 필요가 있다.

### 강풍대와 관련된 지형경사의 영향

여기서는 강풍대와 관련된 지형의 영향을 좀 더 자세히 살펴보기 위한 수치모의를 수행하고자 한다. 이를 위해 지형의 경사가 해풍시작에 어떠한 영향을 미치는지 모형전체의 걸쳐 평탄지형의 육지와 바다를

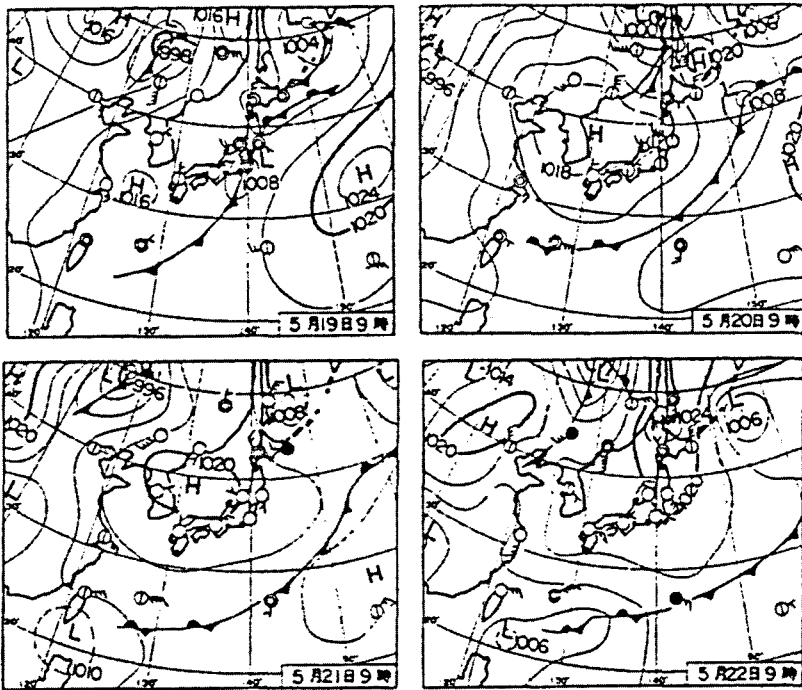


Fig. 9. Synoptic weather charts at 0900LST on 19, 20, 21 and 22 May 1998.

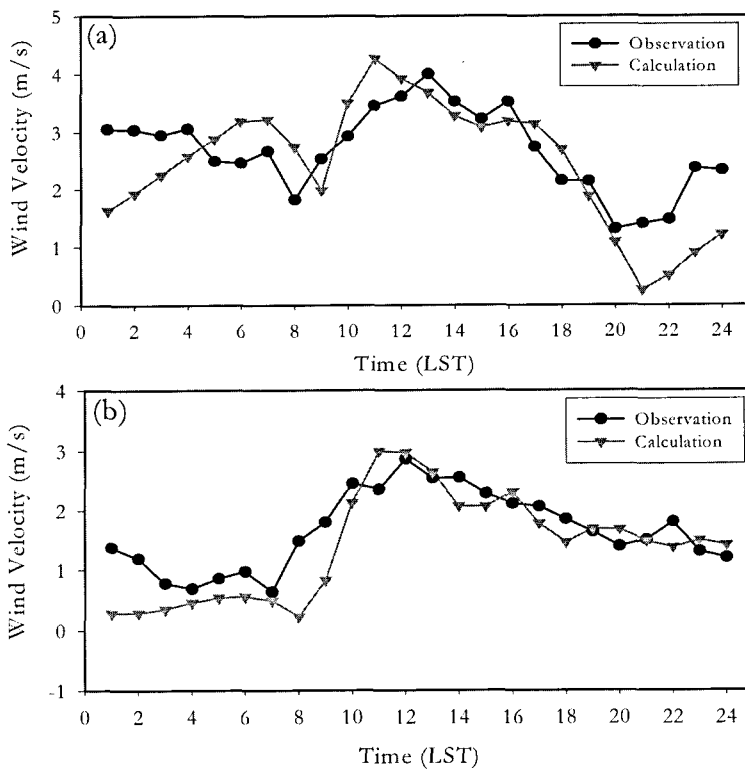


Fig. 10. Comparison of the observed mean velocity with the simulated velocity at (a) Suyoung and (b) Haeundae.



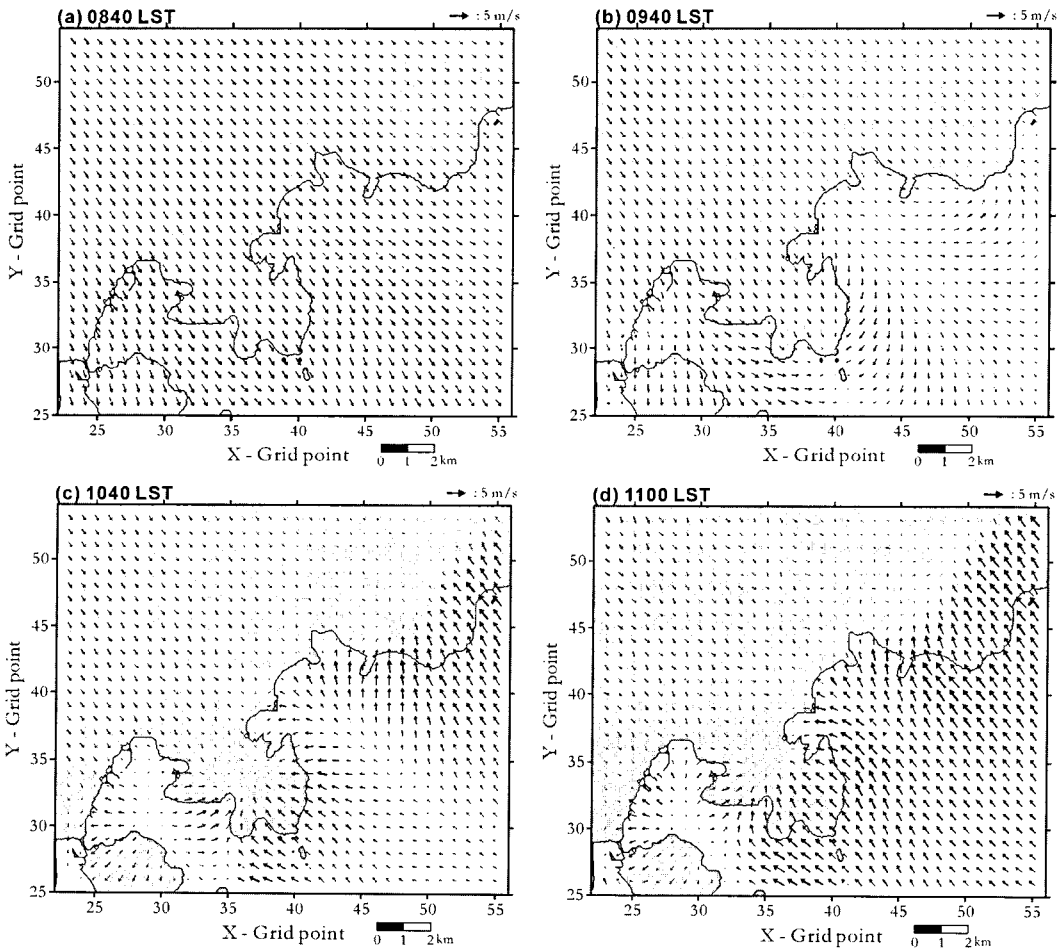


Fig. 11. Simulated wind fields for FLAT CASE.

고려한 지형조건(FLAT CASE)을 이용하였다. 평탄지형의 해발고도를 전 영역에 걸쳐 '3m'로 고려하였으므로 도심 내륙과 연안에 형성되어 있는 복잡한 지형의 경사가 없는 경우에 해풍시작 및 강풍대가 어떻게 변화하는지 잘 살펴볼 수 있을 것이다. 지표면 지형고도를 제외한 모든 조건은 앞서 수행한 수치모의와 동일하게 두었다.

Fig. 11은  $z^* = 15m$ 에서의 수평바람장 결과를 나타낸 것이다. 여기서 0840LST보다 이전 시간대에서의 야간 풍계는 이와 거의 동일한 경향을 가지므로 이 시간대의 바람장부터 제시하였다. 시간이 지날수록 전반적으로 연안지역을 중심으로 육풍의 풍계에서 해풍으로의 전환이 나타나는 것을 살펴볼 수 있는데 육지에서는 전체적으로 시간대에 관계없이 거의 균일한 풍향과 풍속을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바

와 같이 0840LST에는 대상영역의 전반에 걸쳐 육지에서 불어 나오는 육풍이 지배적임을 알 수 있다. 그러나 앞서 지형의 경사를 고려한 수치모의와는 달리 대상영역에서의 바람이 전 영역에 걸쳐 균일한 풍계를 나타내고 있으며 전체적으로 풍속의 분포가 유사하게 나타나고 있다. 시간이 지나면서 이러한 육풍의 일정한 풍계는 해안선을 따라 서서히 해풍으로 변화하는 것을 볼 수 있다(0940LST). 1040LST가 되면 돌출된 해안지역을 중심으로 해풍의 발달이 진행되어 1100LST가 되면 전반적으로 육지와 바다의 경계인 남서-북동방향에 직각으로 해풍이 균일한 풍계를 형성하며 육지로 불어 들어가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 지형 경사를 고려하지 않은 경우, 앞서 Fig. 7에서 살펴본 단면에서의 연직 풍속분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 지형경사

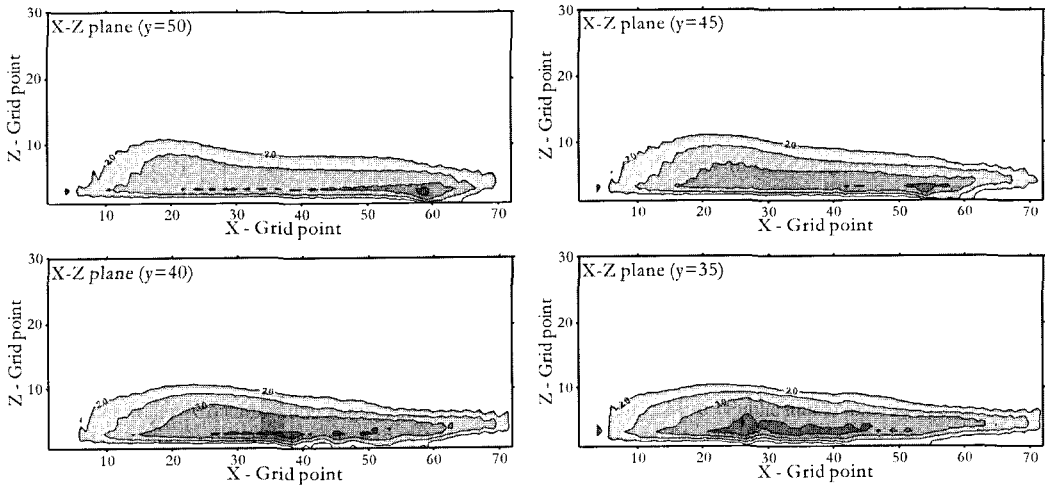


Fig. 12. As in Fig. 7 except for FLAT CASE.

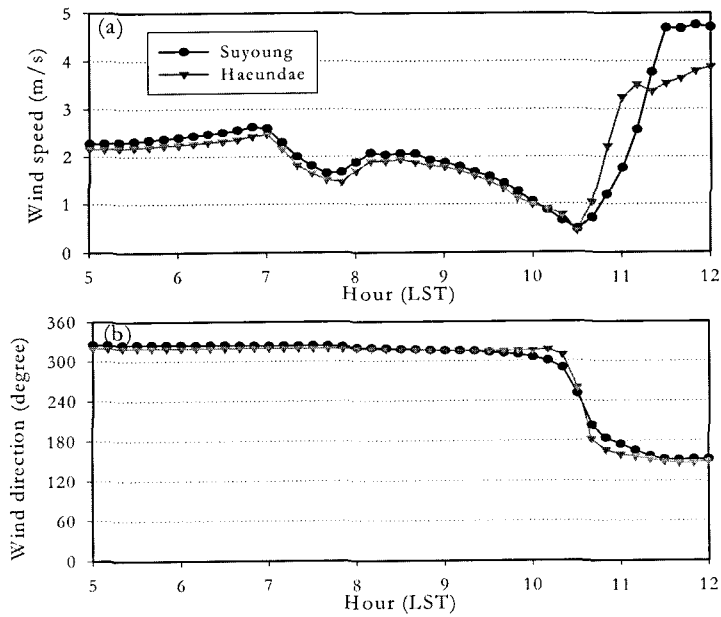


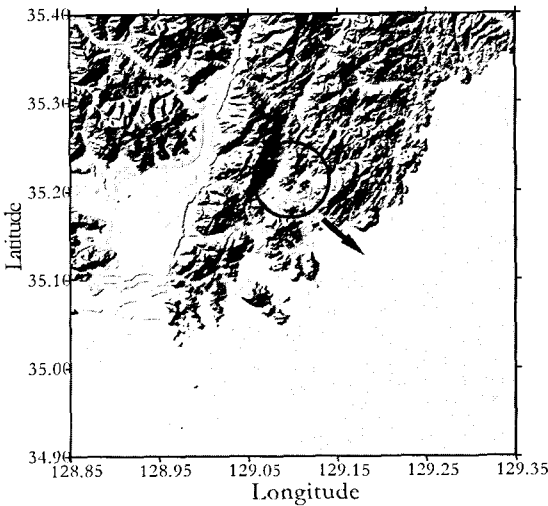
Fig. 13. Comparison of the (a) wind speed and (b) wind direction for FLAT CASE.

를 고려한 경우, 수영지역에서 뚜렷하게 형성되었던 강풍 현상이 보이지 않음을 알 수 있다.

Fig. 13은 FLAT CASE의 경우에 육풍에서 해풍으로의 전환을 자세히 살펴보기 위하여 0500~1200LST의 풍속, 풍향의 변화를 10분 간격으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 수영과 해운대에서의 기상요소별 변화경향과 강도가 상당히 유사하게 나타나고 있다.

풍속의 경우를 살펴보면 앞서 관측자료(Fig. 3)에서

나타났던 수영에서의 야간 강풍현상이 보이지 않는다. 더욱이 야간에 수영과 해운대의 야간 풍속의 변화 경향과 크기가 거의 유사하게 나타나고 있으며 해풍의 시작시간도 거의 차이를 보이지 않고 있다. 또한 야간 풍향의 변화를 살펴보면 앞서 관측자료의 결과와는 달리 수영과 해운대의 야간 풍향이 거의 동일하게 나타나고 있다. 이러한 결과는 관측 및 앞선 수치모의 결과와 다른 경향을 나타내는 것으로, 앞서 살펴본 관측(Fig. 8참조) 및 수치모의 결과(Fig. 5참



**Fig. 14.** Schematic representation of the Busan coastal area. The circle and arrow indicate the urban area and the channel of nighttime wind flow, respectively.

조)에서는 수영의 야간 풍속이 수영지역의 북서방향에 형성되어 있는 유출구를 통한 육풍의 유출로 인해 북서(NW)계열의 바람이 나타났고 해운대에서는 북쪽에 위치한 장산 등 고지대의 영향으로 북동(NE) 계열의 바람이 나타났었다. 그러나 FLAT CASE의 수치모의에서는 두 지역에서의 풍향과 그 변화경향이 동일한 형태로 나타나고 있다.

### 해풍시작과 지형성 강풍현상의 관계

이상의 관측자료 분석과 바람장 수치모의에서 해풍 시작시 나타나는 국지적 강풍현상을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 강풍현상에 있어 지형적 조건이 어떠한 영향을 미치는가에 대해서도 상세히 살펴보았다. 따라서 이상의 자료를 통해 확인한 해풍시작시 강풍현상은 다음과 같이 해석할 수 있다.

야간의 공기괴가 지면의 복사냉각에 의해 냉각되어 고지대 지형 경사면을 따라서 밀도류의 형태로 가장 저지대에 수렴하게 된다는 점을 고려할 때 부산의 경우, 도시중심부 주위로 높은 고지대 산들이 전체적으로 둘러싸고 있어 야간의 지표냉각에 의해 주위 고지대의 지형 경사면을 따라서 저지대 분지의 형태를 하고 있는 도시중심부로 공기의 수렴이 있게 된다. 이러한 과정을 통해 수렴된 공기는 또 다시 지속적으로 더욱 저지대를 향해 흘러가게 되는데, 결국은

이들 도시중심부에 수렴된 공기가 흘러 나갈 수 있는 통로는 수영천이 형성되어 있으며 바다와 닿아 있는 수영지역이(Fig. 14의 화살표) 되고 따라서 넓은 지역에 걸쳐서 수렴된 많은 공기가 좁은 수영지역을 통해 불어 나가기 때문에 이 지역에서는 강한 풍속을 관측할 수 있게 되는 것이다. 이러한 해석은 수영지역의 서쪽과 동쪽에 형성되어 있던 지형경사를 제거한 수치모의 결과와 비교해 보면 분명하게 이해할 수 있다. 또한 이러한 수영천을 통한 빠른 유출은 야간시간대의 지표냉각작용이 지속되는 동안 계속적으로 이루어지기 때문에 다음날 일출과 더불어 지면 가열에 의한 해풍으로의 변화가 있는 시점까지 지속될 수 있다. 이후 일출에 따른 지면가열에 의한 온도 상승으로 해풍의 시작이 있다 하더라도 수영천 주변은 여전히 야간에 형성된 잔여공기의 유출로 인해 지면가열에 의한 해풍의 시작과 발달이 억제되고, 인접해 있는 해운대 지역은 해풍이 시작되어 약 1km 정도 내륙까지 진행을 하게 되며 시간이 지나 수영천을 통한 야간 육지공기의 유출이 없어지고 일사에 의한 지면가열이 지속적으로 진행되면서 수영에서도 해풍의 시작이 뚜렷이 나타나게 되는 것이다. 이러한 해석은 앞서에서도 제시한 관측자료를 통해 확인할 수 있었는데, 우선 앞서 언급한 바와 같이 야간에 지표냉각에 의해 냉각된 공기가 밀도류 형태로 저지대에 모여 유출구를 통해서 빠르게 불어 나간다는 것을 야간 풍속의 분포로 확인할 수 있었다. 즉, 도시중심부의 분지를 둘러싸고 있는 경사면에서 공기가 흘러 내려와 수렴을 한 후, 좁은 수영천이 있는 저지대를 통해서 유출이 되기 때문에 이러한 유출구에 있는 지점인 수영에서의 풍속이 해운대보다 약 3배 정도 강하게 나타난 것이다.

이것을 통해 수영이 야간 공기의 유출구라는 것을 뒷받침할 수 있으며 수영에서의 해풍시작시간이 해운대보다 늦게 나타나는 것을 알 수 있는 것이다. 또한 주간 풍속을 살펴보다도 수영이 해운대보다 약 1m/s정도 강한 것을 볼 수 있는데, 이것도 야간과 마찬가지로 지형적 영향인 것이다. 이 현상 또한 다음과 같이 해석할 수 있는데, 해운대의 앞쪽(남동쪽)에는 나지막한 고지대가 가로막고 있고 수영은 저지대로서 지형적 장애가 없는 지역이다. 따라서 해풍이 불어올 때 해운대의 앞쪽 고지대는 진행을 방해하는 차단벽의 역할을 하게 되며 수영은 그러한 지형적 차단이 없을 뿐만 아니라 해운대로 진행하던 해풍이

지형에 의해 돌아가는 경로가 되는 것이다. 이와 같은 이유로 해운대의 해풍이 수영의 경우보다 약하게 나타나게 되는 것이다.

## 결론

이 연구에서는 야간 강풍현상과 해풍시작시간이 어떻게 연관되어 있는지를 살펴보기 위하여 부산지역에 위치하고 있으며 인접한 두 연안 지점인 수영과 해운대를 대상으로 분석하였다.

먼저, 수영과 해운대의 해풍시작시간을 살펴본 결과, 일반적인 사실과 달리 해안에 인접한 수영보다 내륙 약 1km 정도에 위치한 해운대에서 해풍이 빨리 시작하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 야간의 지표냉각에 의해 저지대인 도시중심부에 수렴된 공기가 수영천을 통해 일출이후까지 강하게 불어 나가기 때문에 해운대보다 해풍의 시작시간이 늦어지는 것으로 분석되었다. 수영과 해운대에 설치된 AWS 풍속자료에서 수영의 야간 평균풍속이 해운대보다 약 3배 정도 강하게 나타난 것은 수영지역의 서쪽과 동쪽에 위치하고 있는 고지대의 영향으로 분석되었는데, 이들 지형을 고려하지 않은 경우의 수치모의 결과에서 이와 같은 강한 풍속은 나타나지 않았고 따라서 수영에서 더 빠른 해풍 시작 현상도 나타나지 않았다. 따라서 수영에서 관측되는 늦은 해풍시작 현상은 이 지역을 통해 불어 나가는 강한 야간 육풍과 매우 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있었다.

이상의 논의를 통해 해풍에 영향을 미치는 지형적, 지리적 특징을 자세히 살펴볼 수 있었다. 더불어 지형적, 지리적 영향을 크게 받는 국지순환계는 지역별로 배출된 대기오염물질의 중거리 수송에도 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로 이와 같은 국지순환계의 특성과 이에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 분석은 매우 중요하다고 하겠다.

## 참고문헌

- 이승우, 이동규, 1998, 수도권 지역에서 지표 및 지형 효과에 따른 국지규모 대기순환의 수치실험, 한국기상학회지, 34(1), 1-19.
- 이화운, 김유근, 정우식, 2000, 연안부근 복잡지형의 대기운동장 수치실험 I - 선형이론을 이용한 국지순환 모형의 타당성 검토 -, 한국환경과학회지, 8(5), 555-558.
- 현중훈, 이동규, 1990, 3차원 중규모 모형을 이용한 제주도에서의 해륙풍 모의, 한국기상학회지, 26(2), 121-136.
- Banta, R., and W. R. Cotton, 1981, An analysis of the structure of local wind systems in a broad mountain basin, *Journal of Applied Meteorology*, 20, 1255-1266.
- Bossert, J. E., 1997, An Investigation of Flow Regimes Affecting the Mexico City Region, *Journal of Applied Meteorology*, 36, 119-140.
- Helmis, C. G., D. N. Asimakopoulos, and D. G. Deligiorgi, 1987, Observations of Sea-Breeze Fronts Near the Shoreline, *Boundary-Layer Meteorology*, 38, 395-410.
- Kang, S.-D., F. Kimura, and S. Takahashi, 1998, A Numerical study in the Karman vortex generated by divergence of momentum flux in flow past an isolated mountain, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 76, 925-935.
- Mellor, G. L., and Yamada, T., 1982, Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems, *Rev. Geophysical Space Physics*, 20, 851-875.
- Müller, H., and C. D. Whiteman, 1988, Breakup of a Nocturnal Temperature Inversion on the Dischma Valley during DISKUS, *Journal of Applied Meteorology*, 27, 188-194.
- Kimura, F., 1986, Formation Mechanism of the Nocturnal Mesoscale Vortex in Kanto Plain, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 64, 857-869.
- Kimura, F. and S. Arakawa, 1983, A numerical experiment of the nocturnal low level jet over the Kanto Plain, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 61, 848-861.
- Kimura, F. and T. Kuwagata, 1993, Thermally Induced Wind Passing from Plain to Basin over a Mountain Range, *Journal of Applied Meteorology*, 32, 1538-1547.
- Kikuchi, Y., 1975, Kairikufu no suchi simulation (Numerical simulation of land and sea breeze), *Kisho-Kenkyu Note*, 125, 21-49.
- Klemp, J. B., and D. R. Durran, 1983, An Upper Boundary Condition Permitting Internal Gravity Wave Radiation in Numerical Mesoscale Models, *Monthly Weather Review*, 111, 430-444.
- Orlanski, I., 1976, A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows, *Journal of Computational Physics*, 21, 251-269.
- Sakiyama, S. K., 1990, Drainage Flow Characteristics and Inversion Breakup in Two Alberta Mountain Valleys, *Journal of Applied Meteorology*, 29, 1015-1030.
- Stephan, F. J. De Wekker, Z. Shiyuan, D. F. Jerome, and W. David, 1998, A Numerical Study of the Thermally Plain-to-Basin Wind over Idealized Basin Topographies, *Journal of Applied Meteorology*, 37, 606-622.

2003년 4월 10일 원고 접수  
2003년 5월 24일 수정원고 접수  
2003년 5월 24일 원고 채택