

지형적 특징이 해풍시작에 미치는 영향에 대한 연구

A Study on Modification of Geographical Features Affecting Onset of Sea Breeze

정 우 식* · 이 화 운

부산대학교 대기과학과

(2003년 4월 16일 접수, 2003년 9월 30일 채택)

Woo-Sik Jung* and Hwa Woon Lee

Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

(Received 16 April 2003, accepted 30 September 2003)

Abstract

We simulate the geographical effects on the onset time of sea breeze at Suyoung and Haeundae districts by using the LCM (Local Circulation Model). The following can be found out from the numerical simulation on Case I (real terrain) which considered the real geography of Busan metropolitan area. Especially, as a result of analyzing the land breeze path, it could be found along the coastline as it flows out through low land coastal area. To find out more about the effects of terrain and geography on the onset time of sea breeze, the results of numerical simulation of virtual geography are as follows. In Case II (flat terrain), to find out how the terrain slope affects the onset of sea breeze, flat land and the ocean was considered. As a result, convergence of nighttime air mass at a Suyoung area and nighttime strong wind speed phenomenon was not shown. In Case III (modified flat terrain), to find out the effects of the irregularity of coastline affecting the onset of sea breeze, numerical simulation was carried out by simplifying the complex coastline into segments of straight coastline. So land breeze system and changing process of sea breeze after sunrise at Suyoung and Haeundae was simulated almost in a similar manner. Through this we could find the effects of coastal irregularities on onset of sea breeze.

Key words : Onset time, Sea breeze, LCM (Local Circulation Model), Geographical features

1. 서 론

우리나라의 경우, 일반적으로 알려진 바와 같이 전 국토의 대부분이 산악지형을 형성하고 있고 바다

와 접해 있는 연안지역도 복잡한 굴곡을 나타내는 지형적 특징을 하고 있으며 또한 삼면이 바다와 접해 있는 지리적 조건을 형성하고 있다. 이와 같은 조건과 특징은 종관장의 영향이 약한 날, 연안지역을 중심으로 대표적인 중규모 국지순환계인 해륙풍을 형성할 수 있으며 내륙 지역에는 지형의 경사면을 따라서 가열과 냉각에 의해 형성되는 산곡풍이 나타

* Corresponding author

Tel : +82-(0)51-583-2651, E-mail : wsjung1@pusan.ac.kr

날 수 있다.

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 Banta and Cotton(1981)은 미국 콜로라도의 넓은 산악분지지역에서 지형적 특징에 따라 주간 경계층에서 3가지의 형태의 풍계가 나타난다는 것을 살펴본 바가 있다. Müller and Whiteman(1988)은 야간 기온역전의 소멸에 대한 연구에서 협곡(canyon)의 형태가 매우 큰 영향으로 작용한다는 것을 밝혔는데, 특히 3가지 가상 지형에 대해 바닥지형의 폭을 또 다른 변수로 하여 이들 각각에서 역전층의 하강에 따른 소멸과 대기경계층의 성장에 의한 역전층의 소멸과정이 다르게 작용한다는 것을 고찰하였으며 Sakiyama(1990)는 지형적 특징이 상이한 두 협곡(평탄하게 열려 있는 분지형 협곡과 좁고 깊은 협곡)에서 배사류(drainage flow)의 특징과 기온역전의 소멸과정에 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(Bossert, 1997; Kimura and Kuwagata, 1993; Stephan *et al.*, 1988). 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 지형효과와 중요성이 지속적으로 강조되어 왔다.

과거부터 지금까지 국내외에 걸쳐 국지순환계의 특징에 대해서는 해륙풍을 대상으로 많은 연구들이 이루어져 왔다(현종훈과 이동규, 1990; Helmis *et al.*, 1987). 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 연안 지역을 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.

이에 본 연구에서는 관측자료를 이용하여 확인한 해풍 시작시간의 지연과 강풍현상의 특징을 바탕으로 이러한 현상의 형성 메커니즘을 좀 더 구체적으로 분석하기 위해 대기유동장 수치모형을 이용하여 상세히 살펴보고자 한다. 본 연구에서는 바다를 포함하고 있는 부산지역을 대상으로 하여 연구를 진행하였다.

2. 부산지역의 지형지세와 기상자료 분석

그림 1은 수영과 해운대에 설치된 AWS의 위치와 부산지역의 지형지세를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 부산지역은 도시의 전면부가 남서-북동방향으로 바다에 접해 있으며 도시내륙으로는 높이 500 m 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 보면 해발고도가 매우 낮은 평지 형태를 하고 있는 것을 볼 수 있다. 즉, 부산 도심부는 주변이 높은 산으로 둘러싸고 있는 저지대 분지 형태를 하고 있다. 그림을 살펴보면 수영(●)과 해운대(▼)의 관측지점 위치가 모두 연안부근에 설치되어 있는데 수영의 관측지점은 해안으로부터 약 5 m 떨어진 지점에 위치하고 있으며 해운대의 관측지점은 해안으로부터 약 1 km 정도 떨어진 지점에 위치하고 있다.

본 연구에서는 두 지점에서의 해풍 시작시간을 분석하기 위하여 1999년 3월에서 6월까지 종관기상장

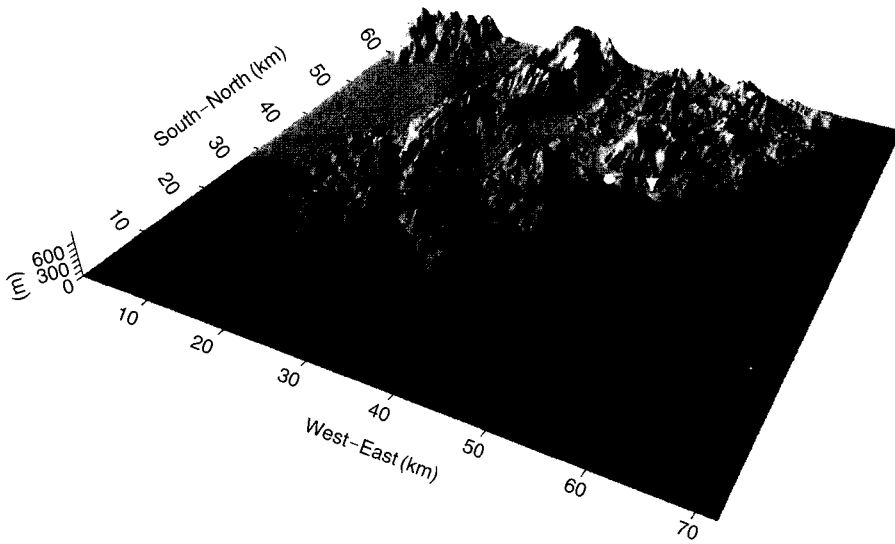


Fig. 1. Study area and observation points of AWS within the Busan coastal area. (Suyoung : ●, Haeundae : ▼)

의 영향이 비교적 적어서 해풍의 발생이 뚜렷이 보였던 20일을 대상으로 분석하였다. 이들 20일은 임현호(2000)의 해륙풍일 결정방법을 이용하여 선정한 전형적인 해륙풍일으로서, 임현호(2000)의 방법에서는 기본적으로 주요 시간대별 풍향, 풍속, 기온, 습도, 운량, 일사량, 강수 등을 고려하여 해륙풍일을 정확히 결정할 수 있다.

연구대상으로 선정한 두 곳의 AWS 지점에서 해풍의 시작시간을 찾아내기 위하여 분석대상으로 연구 대상일의 10분 간격 기상자료를 이용하였다. 여러 연구에서 분석한 바와 같이 해풍이 도달하였을 경우 나타나는 기상요소의 변화로는 풍향의 급변, 풍속의 증가, 기온의 하강 또는 상승폭의 둔화 그리고 습도의 증가 등을 들 수가 있다(Chiba, 1993; Winston *et al.*, 1992; Ramdas, 1931). 따라서 본 연구에서는 이들 기상요소의 변화를 기준으로 각 지점별, 각 날별 해풍의 시작시간을 결정하였다.

그림 2는 연구 대상일의 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 대략 1시간 정도로 나타나고 있다. 그리고 두 지점 모두 하계로 갈수록

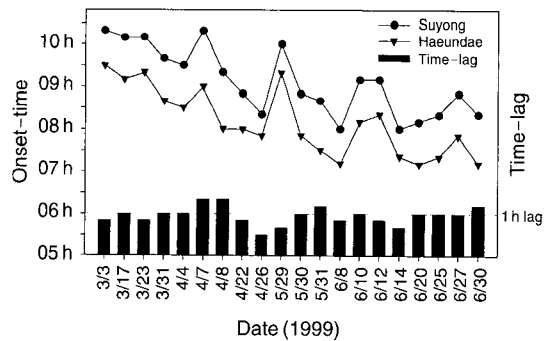


Fig. 2. Onset time of a sea breeze and time-lag.

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

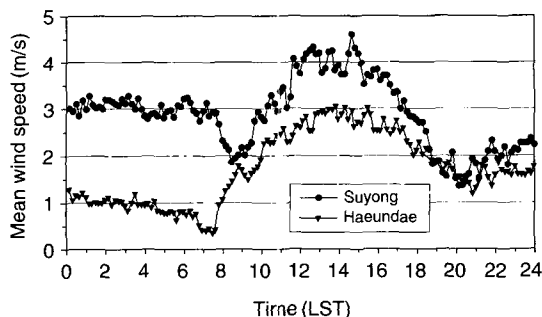


Fig. 3. Mean wind speed at Suyong and Haeundae.

약 10~15분 정도 늦게 해풍이 시작되어야 하지만 반대로 해운대에서 더 빨리 시작하고 있는 것이다.

그림 3은 선정된 해풍일의 시간별 평균풍속을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 수영의 야간(00시~일출 전까지) 평균풍속이 해운대보다 3배 정도 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 주간의 풍속을 살펴보다라도 수영이 해운대보다 약 1 m/s 정도 강한 것을 볼 수 있다.

그렇다면 이러한 해풍시작시간의 지연현상과 수영지역을 중심으로 나타나는 야간 강풍현상이 부산 지역의 지형적, 지리적 특징과 어떠한 관계가 있는지 분석해 볼 필요가 있다.

3. 해풍 시작시간의 지연과 지형성 강풍 현상

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(그림 4의 화살표) 되고 따라서 넓은 지역에 걸쳐서 수렴된 많은 공기가 좁은 수영지

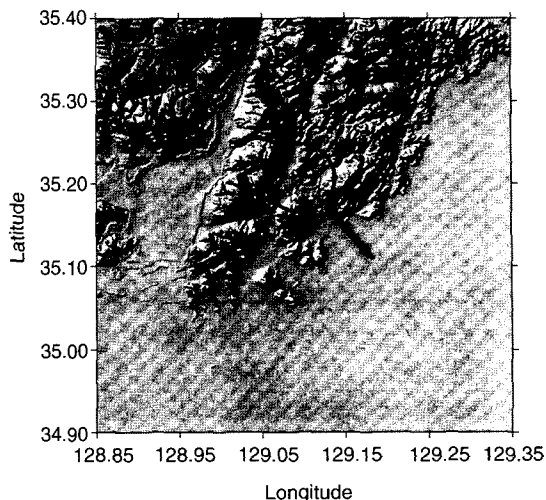


Fig. 4. Schematic representation of the Busan coastal area. The circle and arrow indicates the urban area and the channel of nighttime wind flow.

역을 통해 불어 나가기 때문에 이 지역에서는 강한 풍속을 관측할 수 있게 되는 것이다. 또한 수영천을 통한 빠른 유출은 야간시간대의 지표냉각작용이 지속되는 동안 계속적으로 이루어지기 때문에 다음날 일출과 더불어 지면 가열에 의한 해풍으로의 변환이 있는 시점까지 지속될 수 있다. 이후 일출에 따른 지면가열에 의한 온도상승으로 해풍의 시작이 있다 하더라도 수영천 주변은 여전히 야간에 형성된 잔여공기의 유출로 인해 해풍의 시작과 발달이 억제되고 인접해 있는 해운대 지역은 해풍이 시작되어 약 1 km 정도 내륙까지 진행을 하게 된다. 또한 수영천은 시간이 지남에 따라 야간 육지공기의 유출이 점차 없어지게 되면서 수영에서도 해풍의 시작이 뚜렷이 나타나게 되는 것이다. 이러한 해석은 앞에서 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 주간의 풍속을 살펴보더라도 수영이 해운대보다 약 1 m/s 정도 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.

그렇다면 이러한 현상들이 부산지역의 지형적, 지리적 특징과 어떠한 관계가 있는지 대기 유동장 수치모형을 이용하여 구체적으로 분석해 보고자 한다.

4. 대기유동장 수치모의

본 연구에서 사용한 모형 (Local Circulation Model, 이하 LCM)의 기초방정식은 Kikuchi *et al.* (1981)이

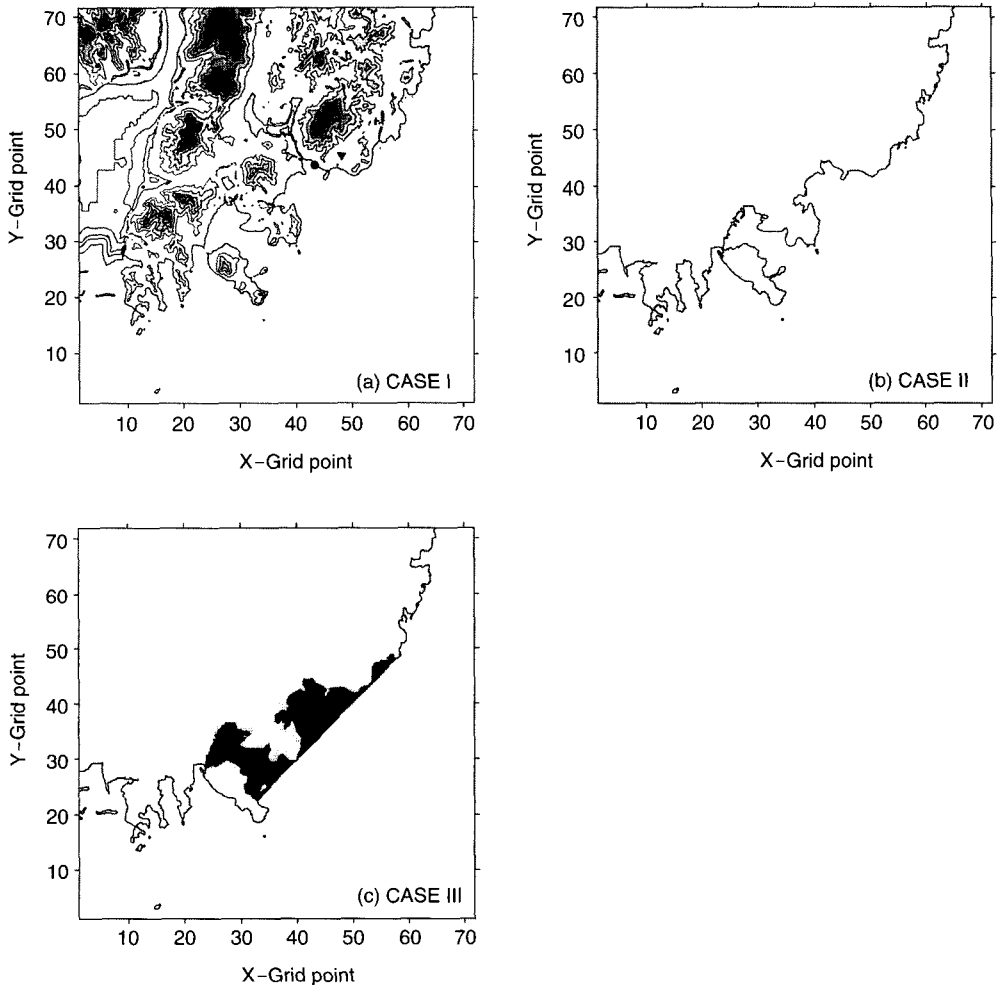


Fig. 5. Computational domain for (a) CASE I, (b) CASE II and (c) CASE III, respectively.

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.

여기서는 해풍시작시간의 지연현상과 야간 강풍현상에 영향을 미치는 지형적, 지리적 특징을 상세히 알아보기 위하여 3가지의 지형조건 (그림 5)에 대한 수치모의를 수행하였다.

CASE I은 부산광역시지역의 실제 지형을 대상으로 전형적인 해륙풍일의 조건을 고려한 수치모의이다 (그림 5a). 이를 통해 이 지역에서 발생하는 해풍의 시작시간에 대한 특징을 세밀하게 살펴볼 수 있고 또한 전체적인 국지순환계의 분포와 변화경향을 볼 수 있을 것이다.

CASE II는 부산광역시지역의 복잡한 지형경사가 없는 평탄지형에 대한 수치모의한 경우로서 (그림 5b) 지형적으로는 바다와 육지라는 조건만을 고려한 경우이다. 이를 통해 도심 인공과 연안에 형성되어 있는 복잡한 지형의 경사가 해풍시작에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 살펴볼 수 있을 것이다.

CASE III은 연안지역 해안의 굴곡 형태가 해풍시작에 미치는 영향을 살펴보기 위해 CASE II의 지형을 대상으로 하여 수영과 해운대 일대의 복잡한 해안선을 일직선의 굴곡이 없는 형태로 가정하여 수치모의를 수행한 경우이다 (그림 5c).

이상의 과정을 통해 부산광역시지역의 지형경사와 해안선의 굴곡이 해풍시작에 미치는 영향을 살펴볼 수 있을 것이다.

4.1 계산영역과 경계조건

대기유동장 수치모의는 부산광역시지역을 대상으로 수평방향 (x, y)으로는 격자간격 500 m로 하여 각각 72격자점을 사용하였고 연직방향으로는 40개 층으로 나누어 지표부근에서는 최소 5 m 간격에서 상층으로 갈수록 넓어지도록 두었다.

측면경계조건으로는 Orlandi (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 형성

되어 상층으로 진행되는 내부중력파를 반사하지 않고 효과적으로 흡수할 수 있는 Klemp and 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 $6.5^{\circ}\text{C}/1,000\text{ m}$ 를 두었으며 계산대상 영역이 정상상태에 있다고 가정하고 수평방향의 풍속은 지균풍이 없는 경우로 가정하였다. 그리고 봄철 우리나라 남동해안의 평균해수면 온도인 13.5°C 를 고려하였으며 부산지방 5월의 평균투과도인 0.675와 5월의 평균 적위를 고려하였다.

4.2 CASE I 수치모의 결과

그림 6은 $z^*=15\text{ m}$ 고도에서의 수평바람장을 나타낸 것이다. 야간시간대를 나타내는 0000 LST와 0600 LST, 그리고 해풍의 시작 및 육풍이 존재하는 시간대 부근인 0900 LST와 해풍이 잘 발달한 1200 LST의 결과를 나타내었다. 그림 6(a)는 0000 LST의 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 (그림 6(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 본 연구에서 연구대상으로 삼고 있는 수영천이 흐르는 수영지역을 통해 그 흐름이 분명하게 나타나고 있다. 수영지역은 서쪽과 동쪽에 각각 황령산 (423 m)과 장산 (634 m)이 위치하고 있고 이들 고지대의 사이에 수영천이 흐르는 저지대를 형성하고 있는데, 빠르고 강한 육풍의 흐름은 이 저지대의 전반에 걸쳐 나타나고 있다.

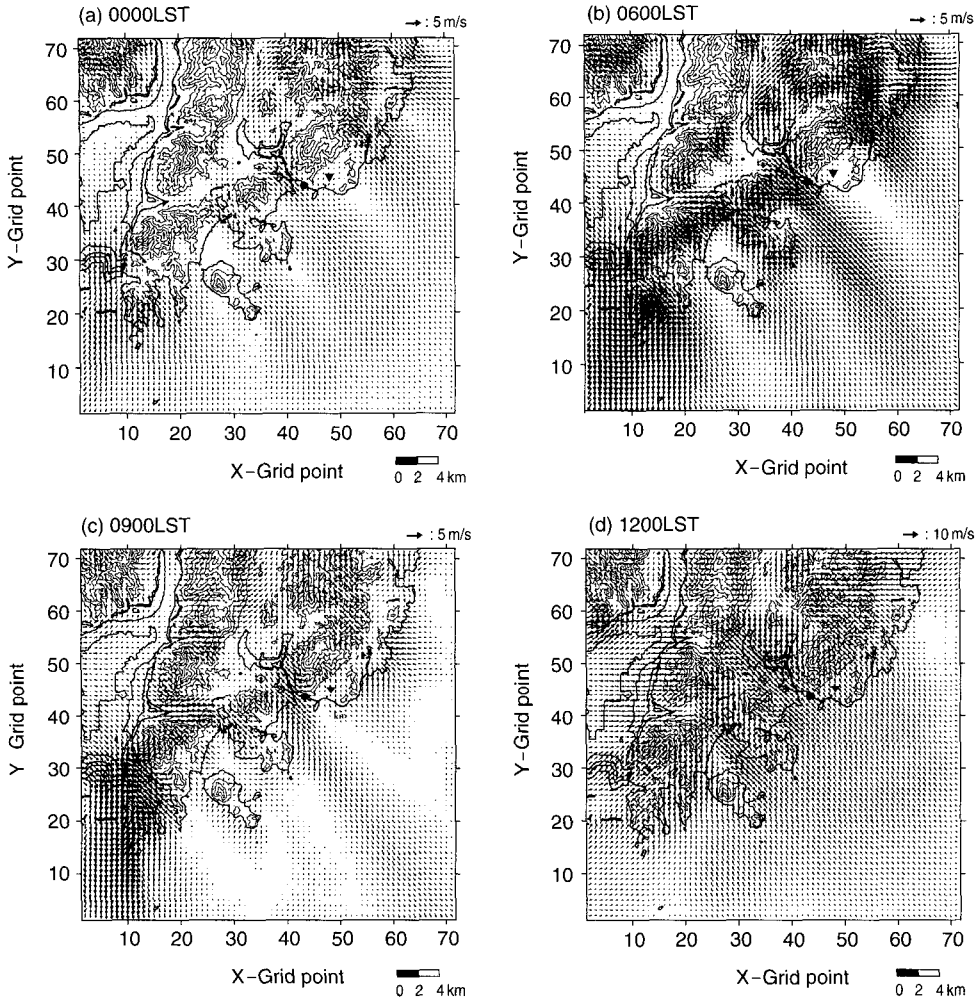


Fig. 6. Distributions of simulated wind field at (a) 0000LST, (b) 0600LST, (c) 0900LST, and (d) 1200LST, respectively.

그림 6(c)는 0900 LST의 결과를 나타낸 것으로, 일출 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 고풍이 형성되고 있음을 볼 수 있으며 연안지역에 걸쳐서는 해안선을 따라 해풍의 시작을 볼 수 있고 야간시간에 바다로 불어나간 육풍이 해안부근에서 강화된 기온경도에 의해 해안 부근의 육지로 되돌아 들어오는 해풍으로 변환되는 과정도 볼 수 있다. 특히, 수영보다 더욱 내륙(약 1 km)에 위치해 있는 해운대에서는 이미 분명하

게 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 고풍과 해안지역을 중심으로 해풍이 독립적으로 형성되는 것을 분명히 확인할 수 있다. 이와 더불어 이 시간대의 결과에서도 중요하게 살펴 보아야 하는 것은, 전반적으로 지면가열과 관련된 해풍과 고풍이 분명하게 나타나고 있지만 앞 시간대에서 강한 육풍이 확인된 수영지역에는 여전히 육풍이 뚜렷하게 형성되어 있다는 점이다. 그림 6(d)는 1200

LST의 바람분포를 나타낸 것으로 0900 LST에 형성되었던 곶풍과 해풍이 지속적인 지면가열의 영향에 의해 전반적으로 발달한 것을 볼 수 있다. 즉, 내륙 고지대에서는 앞 시간대보다 더욱 분명하게 곶풍을 확인 할 수 있으며 0900 LST에서 나타났던 해안선을 따라 발달한 해풍이 발달하여 내륙으로 멀리 진

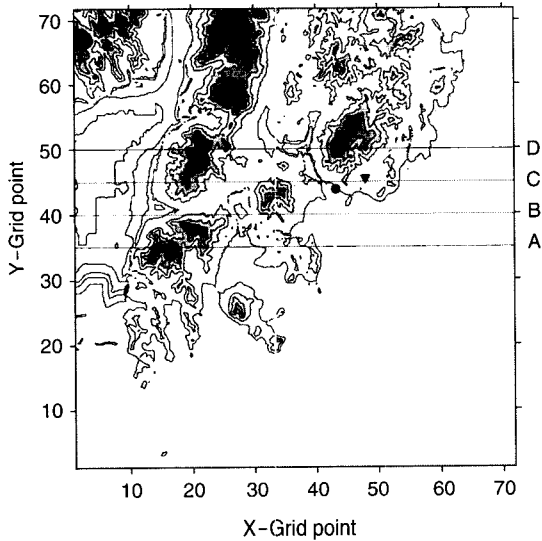


Fig. 7. Cross lines to view the vertical planes of calculation domain.

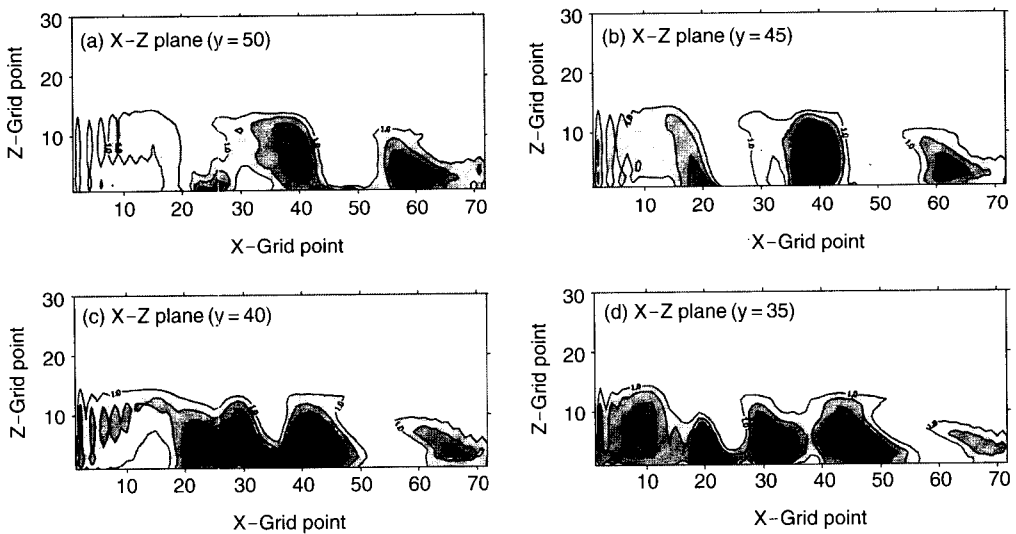


Fig. 8. Vertical cross sections of the wind speed above the lines A, B, C and D at 0600 LST.

행해 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 곶풍 구조를 좀 더 분명히 분석하기 위해 풍속의 연직분포를 살펴보았다. 그림 7은 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.

그림 8은 0600 LST에 계산된 풍속분포를 나타낸 것으로 앞서 그림 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 D 단면은 수영을 통해 불어 나가는 바람들이 시작되는 지역으로 수영의 양옆에 위치해 있는 고지대의 영향을 덜 받는 지역이기 때문으로 분석된다. 하지만 C

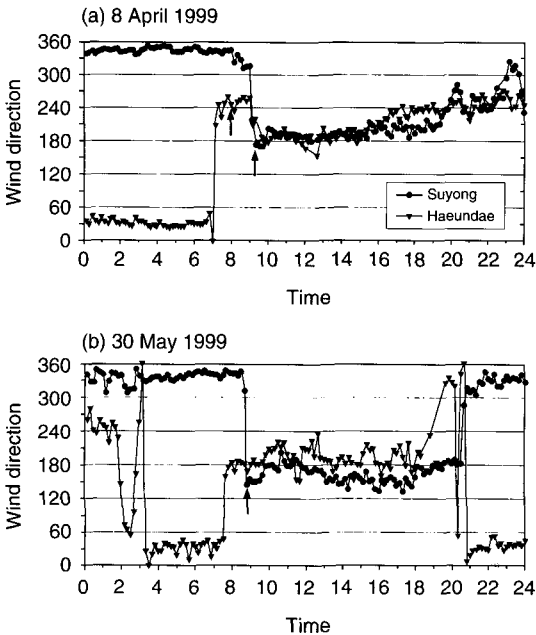


Fig. 9. Diurnal variations of the observed wind direction. Arrows indicate the onset time of sea breeze.

단면을 보면 수영이 위치한 지역에서 강한 풍속대(zone)가 뚜렷이 나타나며 고지대 사이에 위치한 수영을 막 벗어나서 바다에 도달한 바람을 나타낸 B 단면에도 이러한 강풍대가 잘 나타나고 있다.

이들 그림에서, 남쪽으로 갈수록 강풍대의 중심이 동쪽으로 이동하는 것은 앞서 수평바람장에서 볼 수 있었던 바와 같이 수영에서 불어 나가는 육풍의 풍향이 약 330° 정도(북서풍)이므로 바다로 진행할수록 점차적으로 남동방향으로 향하기 때문에 나타난 것인데, 이는 해풍일에 수영지역에서 관측되는 자료에서도 분명하게 나타나는 점이다(그림 9). 또한 이들 그림을 분석해 보면 수영지역에서 나타나는 강풍대(1.0 m/s 이상)의 규모는 연직적으로 약 500~600 m(z-grid point : 13~14)의 높이를 가지고 있는 것으로 분석된다. 이상의 결과를 통해 수평바람장에서 파악한 강풍대의 존재와 분포를 입체적이고 좀 더 구체적으로 분석할 수 있었다.

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

4.3 CASE II, CASE III 수치모의 결과

여기서는 해풍지연현상 및 강풍대와 관련하여 지형경사 및 해안선의 형태가 어떠한 영향을 미치는지 좀 더 자세히 살펴보기 위한 수치모의를 수행하였다. 이를 위해 CASE II(그림 5b)에서는 지형의 경사가 해풍시작에 어떠한 영향을 미치는지 모형전체의 걸쳐 평탄지형의 육지와 바다를 고려한 지형조건을 이용하였다. 평탄지형의 해발고도를 전 영역에 걸쳐 '3 m'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 CASE I과 동일하게 고려하였다. 그리고 CASE III는 해안선의 복잡한 형태가 이와 같은 현상들에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보기 위한 것으로, 해안선의 형태를 단순하게 변형한 지형조건을 고려하였는데 해안선의 형태를 그림 6(c)와 같이 수정한 것을 제외하고는 모든 조건을 CASE II와 동일하게 고려하였다.

그림 10은 CASE II의 경우에 대해서 $z^* = 15$ m에서의 수평바람장 결과를 나타낸 것이다. 여기서 0840 LST보다 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 시간에 관계없이 거의 균일한 풍계를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 0840 LST에는 대상영역의 전반에 걸쳐 육지에서 불어나오는 육풍이 지배적임을 알 수 있다. 그러나 앞서 지형의 경사를 고려한 CASE I에서와 달리 대상영역에서의 바람이 전반적으로 균일한 풍계를 나타내고 있으며 전체적으로 풍속의 분포가 유사하게 나타나고 있다. 이는 야간에 지형의 경사를 따라 흘러가는 특별한 경로가 존재하지 않기 때문이며 이로 인해 저지대에 야간 공기의 수렴과 이와 연관된 강풍현상이 없다는 것을 나타내고 있는 것이다. 이것은 매우 중요한 의미를 가지는 것인데, 앞서 관측과 CASE I의 수치모의를 통해 살펴본 바와 같이 수영에서 해운대보다 해풍의 시작이 늦게 나타나는 가장 큰 이유는 야간에 부산 도심지의 주위를 둘러싸고 있는 고지대 경사면을 따라 흘

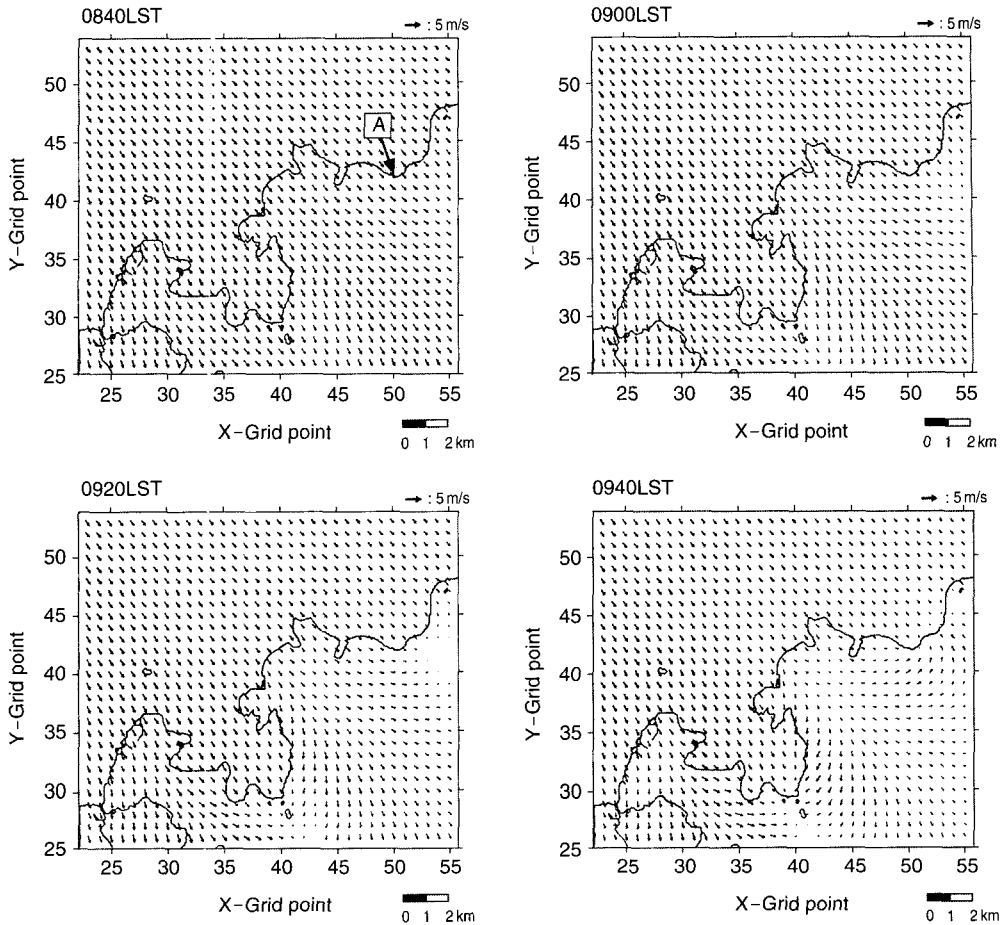


Fig. 10. Simulated wind fields for CASE II.

러내린 공기의 저지대 수렴과 이후 수렴된 공기가 가장 저지대로 바다와 접해있는 수영을 통해서 불어 나가기 때문이라는 것을 살펴본 바 있다. 이는 관측 자료(그림 3)에 나타나 있는 바와 같이 수영에서의 야간 풍속이 해운대보다 약 3배 정도 강하다는 것을 통해 확인할 수 있었던 점이다. 따라서 CASE II와 같이 지형의 경사가 없는 경우, 특정지역에서의 수렴 현상과 이로 인한 강풍현상이 나타나지 않게 되고 이는 두 지점에서 해풍시작시간에 차이가 나지 않는 이유가 된다. 시간이 지나면서 이러한 육풍의 일정한 풍계는 해안선을 따라서 해풍의 시작이 나타나는 것을 살펴볼 수 있다. 1000LST가 되면 돌출된 해안지역을 중심으로 해풍의 시작이 나타나서 1100LST가

되면 전반적으로 육지와 바다의 경계인 남서-북동 방향에 직각으로 해풍이 균일한 풍계를 형성하며 육지로 불어 들어가는 것을 볼 수 있다.

그림 11은 지형 경사를 고려하지 않은 경우, 앞서 그림 7에서 살펴본 단면에서의 연직 풍속분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 지형 경사를 고려한 경우, 수영지역에서 뚜렷하게 형성되었던 강풍 현상이 보이지 않음을 알 수 있다.

그림 12는 CASE II의 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 나

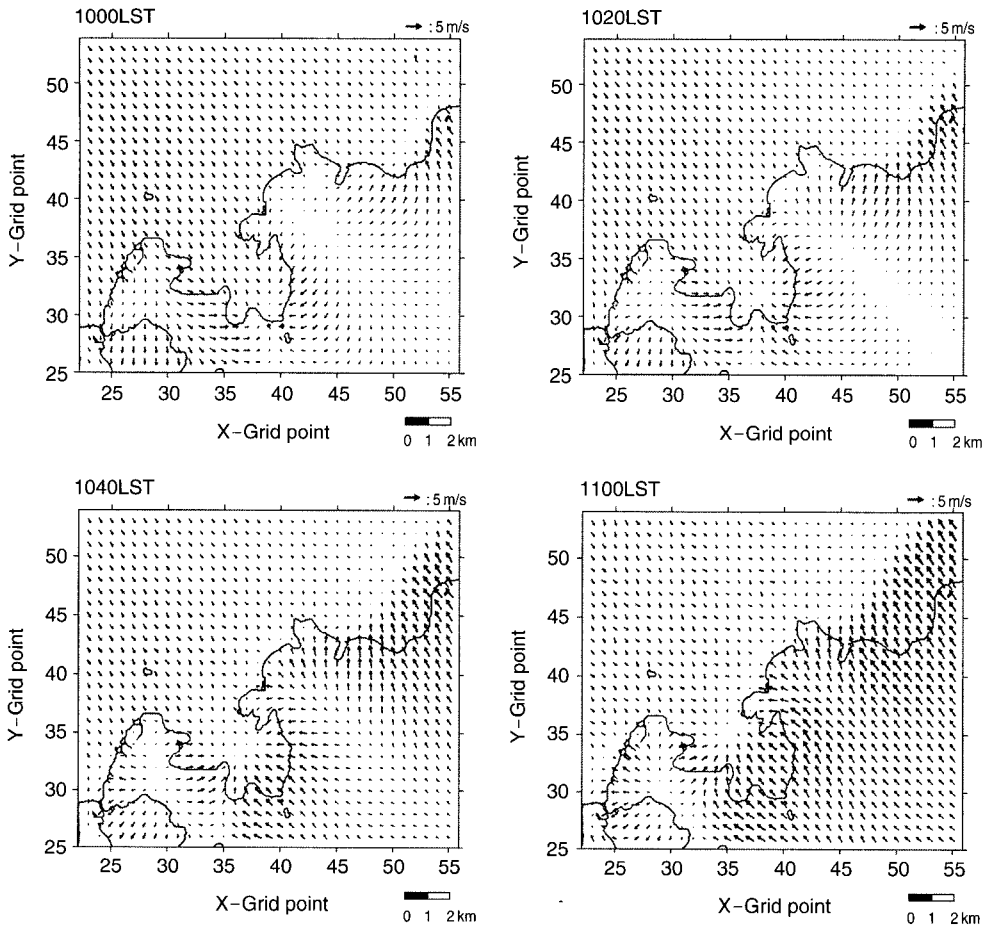


Fig. 10. Continued.

타나고 있다.

풍속의 경우를 살펴보면 앞서 관측자료(그림 3)에서 나타났던 수영에서의 야간 강풍현상이 여기서는 보이지 않고 있다. 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 있으며 풍속과 마찬가지로 해풍의 시작시간과 변화경향이 거의 동일하게 나타나고 있다. 이것도 관측자료의 결과와 다른 경향을 나타내는 것으로, 관측자료에서는 수영의 야간 풍속이 북서방향의 유출구를 통한 육풍의 유출로

인해 북서계열의 바람이 나타났고 해운대에서는 북쪽에 위치한 장산 등 고지대의 영향으로 북동계열의 바람이 나타났었다. 그러나 그림 12의 CASE II 결과에서는 지형적으로 동일한 조건을 고려한 까닭에 두 지역모두 동일한 풍계를 나타내고, 해풍시작시간이 관측자료에서 살펴본 바와 같이 큰 차이가 나타나지 않는 것이다. 기온의 경우에도 마찬가지로 야간시간대의 기온의 값과 변화경향이 수영과 해운대에서 거의 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이상의 그림에서 알 수 있는 바와 같이 지형의 경사가 없는 경우 특정지역을 통한 야간공기의 수렴이 집중되지 않고 수렴된 공기가 좁은 지역을 빠져나오는 지형조건이 없기 때문에 해풍의 시작이 거의 유

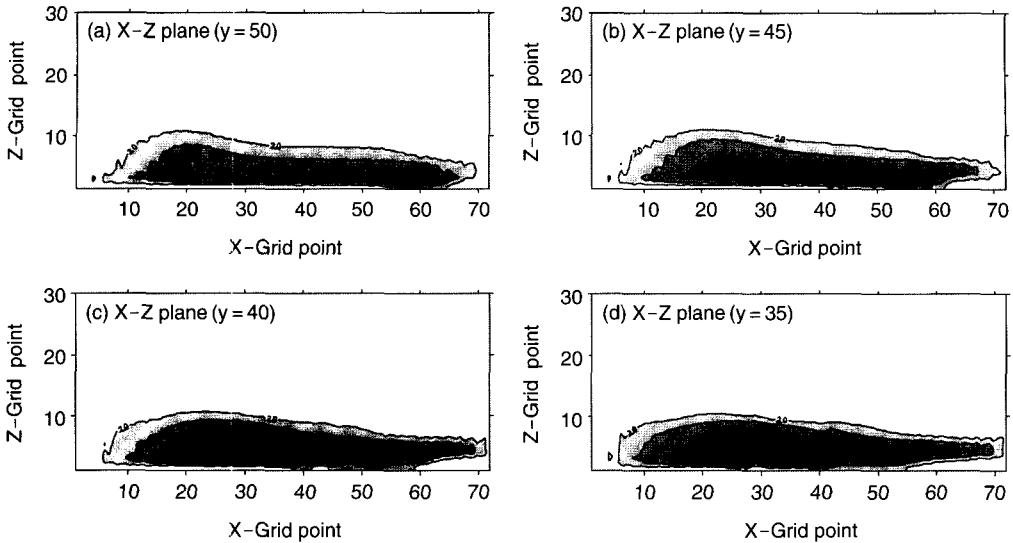


Fig. 11. As in Figure 7 except for CASE I.

사하게 나타난다는 것을 알 수 있다. 그러나 해운대의 경우 연안에서 약 1km 정도 떨어져 있음에도 불구하고 수염과 동일한 시간대에 해풍의 시작이 나타나는 것인가에 대한 의문이 생길 수 있다. 관측과 수치모의 결과를 바탕으로 유추한다면 해운대에서 약 10~20분가량 늦게 해풍이 나타나야함에도 불구하고 CASE II의 결과에서는 거의 동일한 시간에 해풍의 시작이 나타나고 있는 것이다. 이것은 앞서 그림 10의 결과들을 다시 한번 자세히 살펴보면 알 수 있는데, 수평바람장을 자세히 살펴보면 해풍시작에 있어서 지형의 경사뿐만 아니라 저지대 해안선의 굴곡 또한 해풍시작에 영향을 준다는 것을 알 수 있는 것이다. 0900 LST가 되면 해안선의 형태가 바다로 돌출되어 있는 지역을 중심으로 바람이 약하게 수렴되기 시작하여 시간이 지날수록 바람의 수렴은 더욱 뚜렷이 나타나게 된다. 이러한 돌출부를 향해 해풍의 시작이 빨리 나타나는 이유는 일출과 더불어 지면이 가열되면서 육지와 바다와의 수평온도차가 생기는데 이러한 온도경도는 해안선을 따라서 뚜렷하게 나타나게 된다. 이때 저온인 바다에서 고온인 육지로의 흐름이 나타나게 되는데 이때 바람이 불어가는 방향은 수평기온경도가 가장 강한 등온선의 직각방향으로 불어 들어가기 때문이다. 따라서 육지에서 빠져나가는 육풍이 주위의 돌출부에서 형성된 기온경도의

영향을 받아 돌출부가 형성된 방향으로 굴절이 되고 여러방향에서 굴절된 공기는 돌출부의 끝부분에서 강한 수렴을 나타내게 된다. 이후 수렴된 공기의 전반적인 풍계는 가열된 육지방향을 향하게 된다. 이를 통해 돌출부에서 해풍의 시작이 빨리 나타나게 되는 것이다. 즉, 거리상으로만 본다면 수영이 해운대보다 빨리 해풍이 시작되어야 하지만 이와 같이 해운대가 바다로 돌출된 지역에 위치하고 있기 때문에 수영보다 약 10~20분 빨리 해풍이 시작해서 결국은 수영과 거의 동일한 시간대에 해풍이 시작되는 것으로 수치모의를 통해 알 수 있다. 그러나 해안으로부터 떨어진 거리가 동일한 돌출부의 한 지점(그림 10의 0840LST에 표시된 "A"지점)과 굴곡된 만의 형태를 띄고 있는 수영에서의 기상요소를 서로 비교해 보면 뚜렷하게 해풍시작에 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 이 두 지점에서의 기상요소 변화를 그림 13에 상세히 나타냈는데, 그림에서 보는 바와 같이 해안으로부터 떨어진 거리가 동일함에도 불구하고 A지점에서의 해풍시작이 수영보다 약 40~50분 정도 빨리 나타나는 것을 뚜렷이 볼 수 있다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 지형의 경사가 없는 동일한 지형조건이지만 A지점이 해안의 돌출부에 위치하고 있기 때문에 해풍의 시작이 빨리 나타나는 것이다.

이와 같이 해풍시작과 관련해서 해안선이 굴곡이

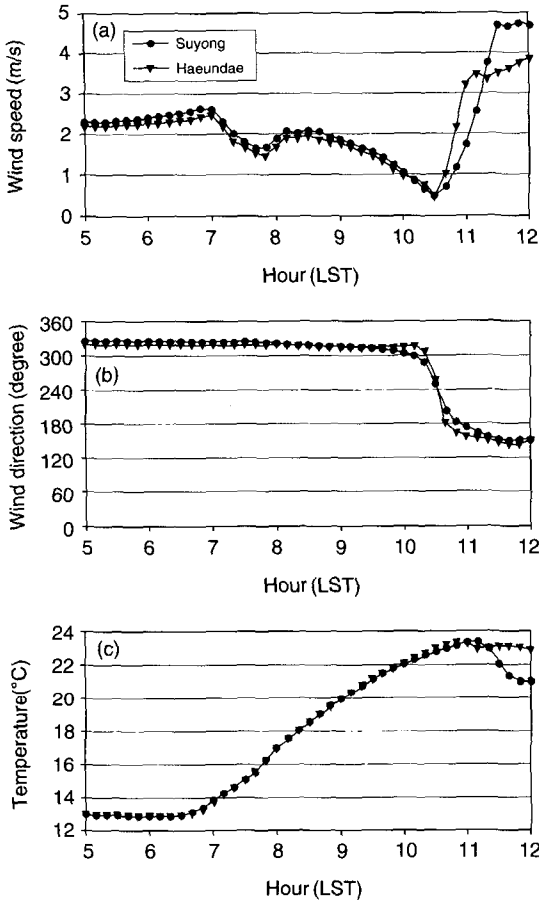


Fig. 12. Comparison of the (a) wind speed and (b) wind direction, (c) temperature for CASE II.

어느정도 해풍시작에 영향을 주는지 살펴보기 위하여 해운대와 수영을 포함한 지역의 복잡한 해안선 형태를 일직선의 형태로 변형하여 지형 굴곡의 영향을 제거한 CASE III에 대해서 수치모의를 수행하였다.

그림 14는 CASE III의 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 해안선의 굴곡이 없는 지역에서 육풍의 유출경로에 차이가 없이 일정하게 나타나고 있으며 해풍의 시작이 나타나는 시간에도 해풍의 시작과 강도가 거의 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 CASE II에서 살펴본 바와 같이 해풍의 시작에 있어서 해안선의 굴곡이 해풍의 시작에 영향을 미친다는 것을 보여주는 것이라 할 수 있다.

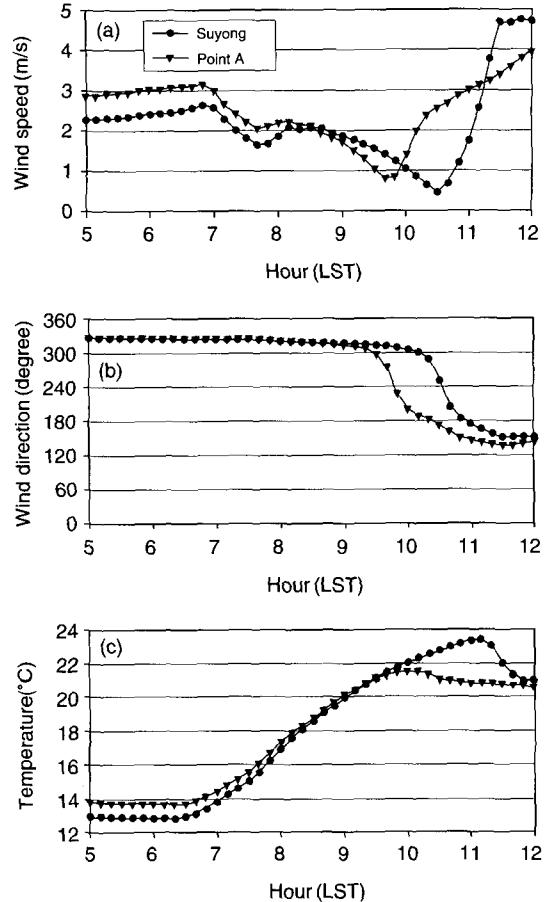


Fig. 13. As in Figure 12 but at Suyong and A point.

이를 통해 지형의 경사와 굴곡이 해풍시작에 미치는 영향을 살펴볼 수 있었다. 즉, 수영과 해운대에서 나타나는 해풍시작시간의 차이에는 주위에 형성되어 있는 지형적, 지리적 조건이 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

5. 요약 및 토의

본 연구에서는 해륙풍일을 대상으로 부산의 수영 지역에서 나타나는 해풍시작의 지연현상과 야간 강풍현상에 대해 살펴보았다. 이를 위해 본 연구에서는 구체적인 방안으로 해풍시작시간의 특징을 분석하고 상세한 국지순환계의 특성과 변화경향을 살펴보기

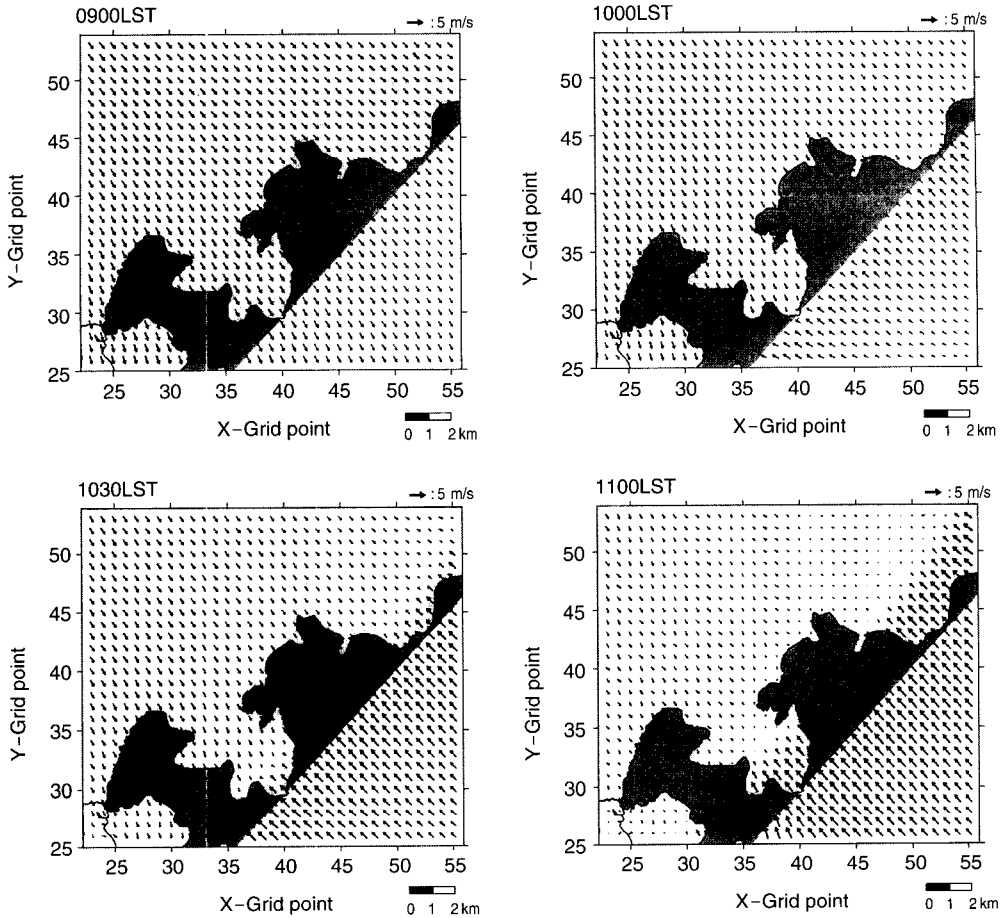


Fig. 14. As in Figure 10 but for CASE III.

위하여 국지순환모형인 LCM을 이용하여 수치모의 해 보았다.

먼저 관측자료를 분석해 본 결과, 일반적으로 알려진 사실인 해안에서 떨어진 거리가 가까운 곳일수록 해풍의 시작이 빨리 나타난다는 것과는 달리 내륙으로 약 1 km 정도 떨어진 해운대에서 수영보다 해풍이 빨리 시작하는 것을 알 수 있었다. 따라서 수치모형을 이용하여 해풍시작시간에 따른 특징과 해풍순환계의 변화경향을 살펴보았다.

실제 부산광역시 지역의 지형을 대상으로 수치모의한 CASE I에서 육풍의 경로를 살펴본 결과, 대부분의 해안을 따라 육풍의 존재를 살펴볼 수 있었지만, 특히 저지대의 해안지역을 통해 주로 빠져나가고

는 것을 볼 수 있었으며 수영지역을 중심으로 매우 뚜렷하게 잘 나타나고 있는 것을 알 수 있었다.

해풍시작시간에 영향을 미치는 지형의 영향을 더욱 자세히 살펴보기 위하여 가상지형에 대한 수치모의를 수행한 결과 다음을 알 수 있었다.

CASE II는 지형의 경사가 해풍시작에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기 위하여 지형경사가 없는 평탄한 육지와 바다를 고려한 경우로서, 풍속의 경우 야간시간대에 수영에서 나타났던 강풍현상이 나타나지 않고 해운대와 거의 동일한 풍속의 크기와 변화경향이 나타남을 볼 수 있었고 지형적 원인에 의해 차이가 나타났던 수영의 북서계열의 야간 풍향과 해운대의 북동계열의 야간 풍향도 거의 동일한 풍향과

변화경향을 나타냈으며 기온의 경우에 있어서도 풍속과 풍향의 경우와 거의 유사한 결과를 나타내었다. 이들 기상요소의 변화를 종합적으로 살펴보면 수영과 해운대에서 해풍시작이 거의 동일한 시점에서 나타난다는 점이다.

그러나 해운대가 해안으로부터 약 1 km 정도 떨어져 있다는 점을 상기해 보면 수영과 해운대에서 해풍의 시작이 동일하다는 것에는 또 다른 요인이 있음을 알 수 있다. 이는 해풍시작에 있어서 지형의 경사 뿐만 아니라 저지대 해안선의 굴곡 또한 해풍시작에 영향을 준다는 점이다. 이것이 해풍시작에 영향을 주는 이유는 일출 후 육지와 바다와의 수평온도차가 생기는데 이로 인해 저온인 바다에서 고온인 육지로의 흐름이 나타나게 되고 바람이 불어가는 방향은 수평기온경도가 가장 강한 등온선의 직각방향으로 불어 들어가기 때문이다. 이와 같이 해안선의 굴곡이 해풍시작에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 CASE III에서는 복잡한 해안선의 형태를 일직선의 단순한 형태로 가정한 지형에 대하여 수치모의를 수행한 결과, 수영과 해운대부근 지역에서 육풍의 풍계와 일출후 해풍으로의 변화과정이 동일하게 나타나는 등 해안선의 차이에 따른 변화가 나타나지 않았다. 이와 같이 지형의 경사와 해안선의 굴곡이 해풍시작에 상당히 큰 영향을 미친다는 것을 정확히 알 수 있었다.

이상의 논의를 통해 해풍시작에 영향을 미치는 지형적, 지리적 특징을 자세히 살펴볼 수 있었다. 이후 본 연구의 결과를 바탕으로 해서, 해풍시작과 강도에 영향을 미칠 수 있는 지표면 열수지 관련 요소들인, 토양피복도와 인공열원에 대한 정보를 더 추가하여 해풍시작 관련 연구를 수행한다면 추가적으로 정량적 분석결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 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.

참 고 문 헌

이승우, 이동규(1998) 수도권 지역에서 지표 및 지형 효과에 따른 국지규모 대기순환의 수치실험. 한국기

상학회지, 34(1), 1-19.

이화운, 김유근, 정우식(2000) 연안부근 복잡지형의 대기유동장 수치실험 I -선형이론을 이용한 국지순환 모형의 타당성 검토-, 한국환경과학회지, 8(5), 555-558.

임현호(2000) 부산지역에서 해륙풍일의 선정과 기후학적인 특성에 관한 연구, 부산대학교 일반대학원 석사학위논문, 14pp.

현중훈, 이동규(1990) 3차원 중규모 모델을 이용한 제주도에서의 해륙풍 모의. 한국 기상학회지, 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. J. Appl. Meteor., 20, 1255-1266.

Bossert, J.E. (1997) An Investigation of Flow Regimes Affecting the Mexico City Region. J. Appl. Meteor., 36, 119-140.

Helmis, C.G., D.N. Asimakopoulos, and D.G. Deligiorgi (1987) Observations of Sea-Breeze Fronts Near the Shoreline. Bound.-Layer Meteor., 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. J. Meteor. Soc. Japan, 76, 925-935.

Kimura, F. (1986) Formation Mechanism of the Nocturnal Mesoscale Vortex in Kanto Plain. J. Meteor. Soc. Japan, 64, 857-869.

Kimura, F. and S. Arakawa (1983) A numerical experiment of the nocturnal low level jet over the Kanto Plain. J. Meteor. Soc. Japan, 61, 848-861.

Kimura, F. and T. Kuwagata (1993) Thermally Induced Wind Passing from Plain to Basin over a Mountain Range. J. Appl. Meteor., 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. Mon. Wea. Rev., 111, 430-444.

Mellor, G.L. and T. Yamada (1982) Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.

Muller, H. and C.D. Whiteman (1988) Breakup of a Nocturnal Temperature Inversion on the Dischma Valley during DISKUS. J. Appl. Meteor., 27, 188-194.

Orlanski, I. (1976) A simple boundary condition for unbound-

- ed hyperbolic flows. *J. Comp. Phys.*, 21, 251-269.
- Sakiyama, S.K. (1990) Drainage Flow Characteristics and Inversion Breakup in Two Alberta Mountain Valleys. *J. Appl. Meteor.*, 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. *J. Appl. Meteor.*, 37, 606-622.