

4차원 자료동화 기법을 이용한 해안가 대기 순환의 수치 실험

김철희 · 송창근*

국립환경연구원, 서울대학교 지구환경과학부*

Numerical Simulations of the local circulation in coastal area using Four-Dimensional Data Assimilation Technique

Kim, Cheol-Hee · Song, Chang-Keun*

National Institute of Environmental Research,
School of Earth and Environmental Science, Seoul National University *

Abstract

Four dimensional data assimilation (FDDA) technique was considered for 3 dimensional wind field in coastal area and a set of 3 numerical experiments including control experiments has been tested for the case of the synoptic weather pattern of the weak northerly geostrophic wind with the cloud amount of less than 5/10 in autumn.

A three dimensional land and sea breeze model with the sea surface temperature (SST) of 290K was performed without nudging the observed wind field and surface temperature of AWS (Automatic Weather System) for the control experiment. The results of the control experiment showed that the horizontal temperature gradient across the coastline was weakly simulated so that the strength of the sea breeze in the model was much weaker than that of observed one.

The experiment with only observed horizontal wind field showed that both the pattern of local change of wind direction and the times of starting and ending of the land-sea breeze were fairly well simulated. However, the horizontal wind speed and vertical motion in the convergence zone were weakly simulated. The experiment with nudgings of both the surface temperature and wind speed showed that both the pattern of local change of wind direction and the times of starting and ending of the land-sea breeze were fairly well simulated even though the ending time of the sea breeze was delayed due to oversimulated temperature gradient along the shoreline.

Key words : Four Dimensional Data Assimilation technique, 3 Dimensional Wind Field, Coastal Area

I 서론

최근 우리나라는 산업화와 도시집중화로 인하여 여러 곳에서 환경문제가 대두되고 있으며 특히 여러 환경오염원이 해안가에 주로 위치하고 있어 연안 도시 지역의 대기질에 대한 관심이 부각되고 있다. 국내에서는 대기질 모델링을 이용하여 연안 지역에 인접한 배출원이나 도시를 대상으로 환경영향평가와 대기질 관리 대책 수립을 세워 왔으나 대부분 지형이나 해륙풍 효과와 같은 영향을 고려하지 않은 연구가 많았다. 외국의 경우 오래 전부터 연안지역의 광화학 반응을 포함한 대기 오염 문제를 해결하기 위해서 그 지역의 국지 기상 및 지형을 고려한 바람장 모델과 광화학 모델을 이용하여¹⁾ 대기질 관리 대책 수립 및 환경영향 평가를 하고 있다. 우리나라는 특히 내륙의 산악 지형이 복잡하고 인접한 바다의 영향을 항상 받고 있으므로 대기질 예측 및 평가를 위하여 해안가의 특성을 충분히 반영하는 바람장의 연구가 선행되어야 한다.

연안지역의 대표적인 국지 규모의 기상현상으로는 해륙풍을 들 수 있다. 특히 해안선이 복잡하고 지형이 험한 지역은 종관 규모 역학에 의한 지균풍과 국지 규모의 해륙풍, 산곡풍이 복잡하게 나타나는데 이에 대한 연구는 국내·외적으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 이러한 연구들은 크게 예단적(prognostic) 방법과 진단적(diagnostic) 방법으로 분류될 수 있으나 최근에는 각각의 장점을 다 살리는 4 차원 자료 동화(4-Dimensional Data Assimilation, 이하 FDDA) 기법을 활용하는 연구가 진행되어 왔다²⁾³⁾. 대표적으로 Yamada et al.(1989)²⁾은 Anthes(1974)³⁾에 의해 제안된 FDDA 기법을 이용하여 Rocky 산맥의 서쪽해안에서 동쪽에 이르는 바람장을 구하여 대기질을 수치모의하였다. 그러나 우리나라의 경우 지금까지 관측 자료의 양과 질이 대기 질 연구에 충분히 제공하지 못하고 있는 실정이나 대기의 짧은 주기와 큰

해상도를 갖는 바람장의 자료로서 AWS (Automatic Weather System)의 활용 방안을 생각할 수 있다.

본 연구에서는 이상의 필요성에 따라서 FDDA 기법을 응용하여 국내의 남서해안 지역의 국지 순환을 수치모의 하고자 한다. 이를 위해서 국내에서 운영중인 AWS를 통해 관측되는 바람자료를 3차원 해륙풍 모델에 FDDA 기법으로 너징(Nudging)시킨 경우와 그렇지 않은 경우의 바람장의 결과를 비교하여 FDDA 기법에 의해 국지 순환이 복잡한 해안가에서의 3 차원 바람장이 얼마만큼 개선되는지를 살펴보고자 한다. 또한 AWS 자료의 일변화에 의해 동화되는 해륙풍의 강도와 영향 범위 등을 FDDA 기법의 활용도 측면에서 토의하고자 한다.

II. 연구 방법

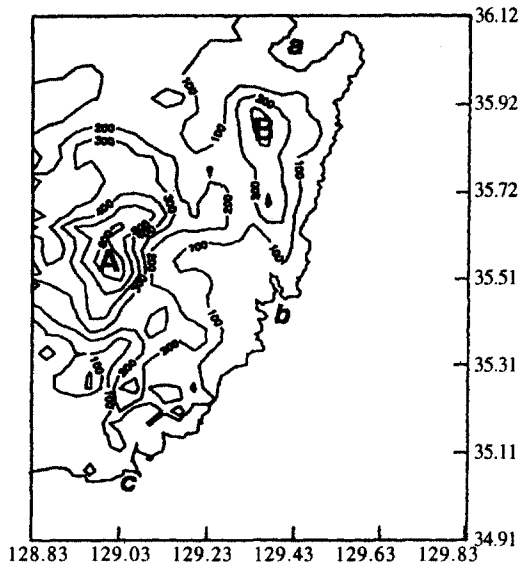
AWS를 비롯한 한반도에 시·공간적으로 산재되어있는 지상 기상관측자료는 성질이 서로 다른 규모의 다양한 역학으로부터 영향을 받은 자료이다. 예를 들어 매일의 일기와 관련이 있는 종관 규모 바람, 해륙풍 또는 산곡풍과 같은 중규모 혹은 지역 규모의 바람, 지표면으로부터 전달되는 여러 가지 플러스에 의한 미기상학적 역학 등 다양한 영향을 받은 자료이다. 따라서 종관 규모의 영향인자를 먼저 세분하여 동일한 종관 기상상태하의 자료들만을 골라내어야 해륙풍과 같은 국지 규모의 연구가 가능해진다.

본 연구에서는 먼저 종관 규모의 영향 인자를 지난 몇 년간의 일본기상청 격자자료(GPV)를 사용하여 850hPa의 지균풍향과 풍속 그리고 운량에 따라 종관 기상상태를 분류하였다⁴⁾. 그 중 지균풍이 약한 북풍이 부는 맑은 가을날을 본 연구의 사례로 선택하였으며 선택된 날의 평균 지균풍향과 풍속은 3 차원 해륙풍 모델의 입력자료로 사용하였다. 이 사례에 관측된 AWS 자료는 시간

별 평균하여 해륙풍 모델에 너징시켰다. 그 결과를 너징하지 않은 기준 해륙풍 수치 실험과 비교하여 FDDA 기법에 의한 결과의 차이점을 살펴 보고자 한다.

1. 영역

연구대상 영역은 부산 연안을 포함한 한반도 남동쪽으로서 Fig. 1에 지형과 지명을 나타내었다. A지역은 가지산 부근을 나타내며 이 지역에는 가지산(해발 1240m), 신불산(해발 1209m)과 운문산(해발 1188m)의 고산지역이며 이 지역의 동쪽에 울산이 위치한다. B지역은 토함산이며 해발 745m이다. 이 지역의 서쪽에는 경주가 위치한다. a지역은 영일만이며 이 지역의 오른쪽에 장기곶, 왼쪽에 포항이 위치한다. b지역은 울산만, c지역은 부산만을 나타낸다.



- A: 가지산 부근(가지산, 운문산, 신불산)
- B: 토함산
- a: 영일만
- b: 울산만
- c: 부산 연안

Fig. 1. The model domain and topography with the geographical locations of interesting site

2. 모델 수행 및 자료의 너징

본 연구에 사용될 예단 모델은 서울대학교 지구환경과학부 대기경계층실험실에서 개발한 3차원 해륙풍 수치모델이다. 사용된 예측 모델의 방정식은 박순웅(1994)⁵⁾, 김철희와 전종갑(1992)⁶⁾, Pielke(1974)⁷⁾, Neuman and Mahrer(1971)⁸⁾ 등에 잘 수록되어 있으며 4 차원 자료 동화법은 Yamada et al²⁾의 방법을 그대로 적용하였다.

모델 영역은 수평 31×46 격자($\Delta x = \Delta y = 3\text{Km}$)와 연직 5Km 이내 13개층으로 구성하였다. 모델의 상층 경계조건으로서 모델 꼭대기에서의 수평 바람은 사례의 날에 평균한 지균풍이 사용된다. 너징에 사용된 관측자료로는 3년간 (1993-1995) AWS (대상 지역에서 31개소)에서 매시간 또는 3시간 간격으로 관측된 바람장을 시간별로 평균하여 사용하였다.

3. 모델의 설계 및 모델 영역내의 관측 자료 분석

선택한 사례는 가을철 850hPa의 지균풍향이 북풍이며 풍속이 < 5m/s (평균 풍속=2.7m/s, 평균 풍향=351°)인 맑은날 (운량 < 50%)로서 한번의 기준실험(control run)과 FDDA 기법에 의한 너징 효과를 알아보기 위하여 AWS에 의해 관측된 바람장을 너징시킨 경우와 바람장과 온도장을 모두 너징한 경우의 수치 실험을 각각 수행하였다. Table 1에 수치 실험 조건을 간략히 요약하였다. 모델의 초기 적분 시각은 0700LST이며 계산의 불

Table 1. Descriptions and conditions of numerical experiment

안정을 막기 위하여 지형고도를 평활(smoothing) 시켰다.

Fig. 2는 모델 영역내의 국지순환을 이해하기 위하여 선택된 사례의 날들에 대해 관측된 AWS 자료의 바람장에 대해 평균하여 시간대별로 나타낸 것이다. 관측된 바람장은 09LST부터 가지산 동남쪽의 높은 지대를 중심으로 곡풍이 나타나 해륙풍보다 산곡풍이 먼저 나타났다가⁹⁾, 12LST에 해안선을 따라 육풍이 해풍으로 바뀌기 시작하였으며 해풍의 강도가 강화되어 한랭한 바다 쪽의 공기가 육지로 이루어지고 있고, 특히 울산만 부근의 저지대까지 해풍이 이르고 있다. 그러나 부산연안은 종관풍인 북풍계열의 바람을 상쇄할 정도의 해풍(남풍)이 발달하지 못하여 해풍으로 변환되는 중간단계에서 동풍계열로 바뀌고 있다. 해풍이 최고의 강도에 도달하는 시간은 15LST이며 이때 해풍은 저지대인 포항지역과 비교적 높지 않은 토함산 지역을 통과하고 있으며 저지대인 울산지역에서는 가지산의 동쪽 사면까지 도달하고 있다. 이는 산악효과가 국지순환에 지배적

인 역할을 함을 알 수 있다¹⁰⁾.

일몰(18LST) 후 육지가 냉각되어 바다보다 온도가 더 낮아져서 해풍이 육풍계열로 바뀌기 시작하여 21LST부터는 기온과 바람이 모두 다시 야간의 분포 양상으로 돌아감을 볼 수 있다.

관측된 온도장(Fig. 3)은 야간(21LST-07LST)의 경우 육지의 복사냉각으로 대체적으로 해안선에 평행하게 등온선이 분포하며 특별히 해안쪽으로 영일만, 울산만, 부산연안에 온난 영역(warm region)이 나타나고 있으며 토함산의 남쪽과 울산만과 부산연안사이에 한랭영역(cold region)이 존재하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 북풍계열의 종관풍으로 인하여 내륙으로부터의 한랭이류가 가지산(해발1240m)부근의 높은 산들의 북쪽 사면까지 이르고 있어 가지산 북쪽은 한랭영역이 형성되는 반면에 가지산의 남쪽 지역은 등온선 모양이 등고선의 모양과 거의 유사하게 나타나고 있다.

이러한 온도장은 국지적인 바람장과 일치하여 종관풍이 북풍계열이지만 영일만부근은 서풍계열

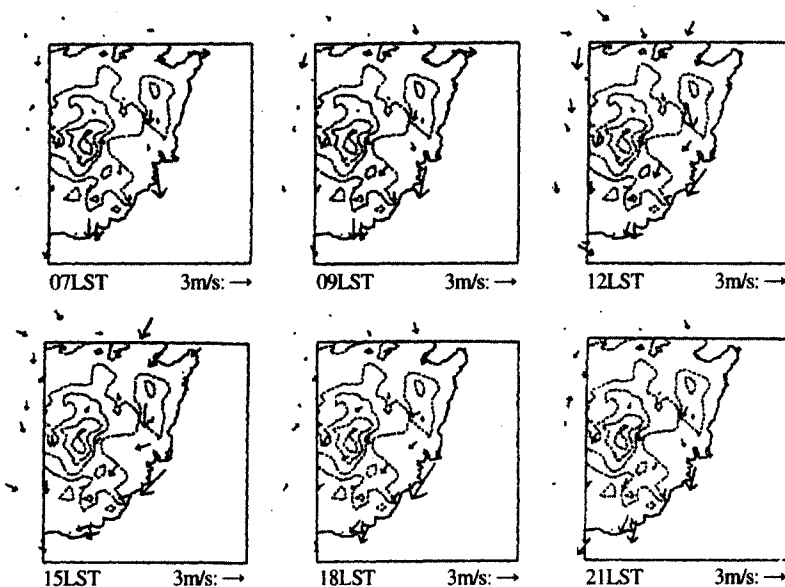


Fig. 2. Horizontal distributions of observed surface winds at 10m height in Automatic Weather System (AWS)

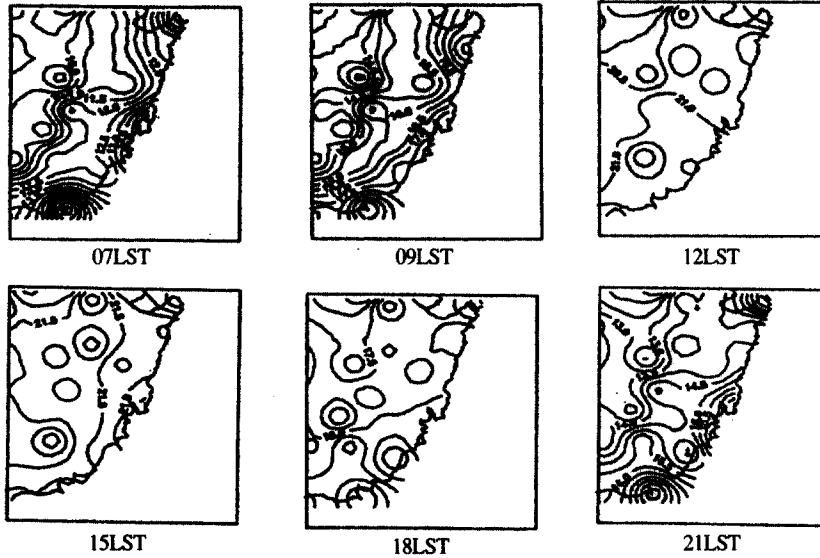


Fig. 3. Horizontal distributions of observed surface temperature at 10m height in Automatic Weather System (AWS)

이 지배적이다. 그리고 육지쪽은 바람이 상대적으로 차가운 지역에서 따뜻한 지역으로 향해 북풍계열이 지배적임을 볼 수 있다.

일출 이후 1-2시간 후(8-9LST)에는 가지산과 토함산의 동쪽사면부터 가열되는 것을 볼 수 있다. 그리고 육지가 전반적으로 가열되면서 12LST에는 육지의 온도와 바다의 온도가 거의 같아진다. 결국 하층 바람장은 야간에는 종관풍과 지형 효과가 복합되어 나타나고 주간에는 열적강제력과 바람에 의한 이류에 의해 형성된 온도장, 종관풍 그리고 지형적인 효과가 함께 작용하여 국지적인 순환이 발달함을 알 수 있다.

III. 모델결과 분석

한번의 기준실험(no nudging)과 너징(nudging) 효과를 알아보기 위하여 지상바람장만 nudging시킨 경우와 지상바람장과 온도장을 모두 nudging한 경우에 대하여 두 번의 자료 동화실험과 해륙풍의 강제력으로 작용하는 바다와 육지의 온도차의 변화가 해륙풍 순환 미치는지 영향을 알아보기

위하여 SST변화에 따른 두 번의 수치 실험을 각 각 수행하여 그 결과의 차이를 비교 분석하였다.

1. 기준 실험

Fig. 4는 너징을 하지 않은 경우에 순수한 해륙풍 예단 모델에 대해 수치 실험을 수행한 지상 10m에서 수평 바람장 분포의 결과를 나타낸 것이다. 초기 적분시각인 07LST에는 지군풍이 상층에서 북풍계열이므로 하층 지표 근처에는 지면의 마찰로 북서풍계열이 나타났으며 12LST에는 해안선을 따라서 풍속이 약해지면서 해풍으로 풍향이 변하는 중간단계인 북풍계열이 지배적이지만 부산지역과 그 연안은 북서풍계열의 풍향을 유지하면서 풍속만 약해지는 것을 볼 수 있다.

15LST에는 수평 온도 경도가 강해지면서(약 2°K/27Km로 모의) 영일만과 포항지역에 해안선에 수직인 북북동풍 계열의 해풍이 나타나 토함산 북서쪽의 저지대를 따라 가지산 북쪽사면에까지 이르고 있다. 반면 울산만 지역의 저지대에서는 영일만과 포항지역에서 보다 동풍계열의 해풍

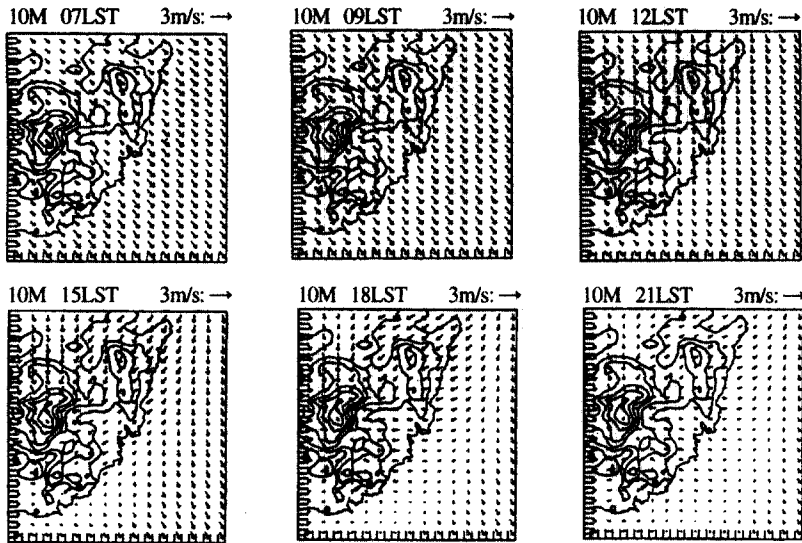


Fig. 4. Horizontal distributions of simulated wind fields on the control run under the weak northerly geostrophic wind with the cloud amount of less than 5/10 in autumn

의 강도가 다소 약하게 나타나고 있다. 그러나 가지산 동쪽사면에는 동풍의 곡풍과 합해져서 동풍계열의 풍속이 다른 지역보다 상대적으로 강하게 나타나고 있으며 서쪽사면에서도 역시 곡풍을 확인할 수 있다. 이 시각의 부산지역은 해풍의 영향으로 풍속이 현저히 약화되었으나 북풍계열의 풍향을 상쇄하고 남풍계열의 해풍이 될 정도로는 발달하지 못하였다.

18LST에는 15LST보다 해풍의 강도가 더욱 강해져서 울산만 지역의 풍향이 완전히 동풍으로 변하고 풍속도 강해졌으며 부산지역 동쪽에도 풍속은 매우 약하나 남풍계열의 해풍으로 변하였다. 그러나 이 시각에는 태양의 고도가 낮아지면서 온도경도는 2°K/60Km 정도로 약해졌으나 오히려 해풍의 강도는 강하게 모의되었다. 이는 모델이 온도경도는 15LST에 최대로 모의하고 이에 상응하는 해풍의 강도는 18LST에 모의됨으로써 온도 경도가 직접적인 해륙풍 강도로 전달될 때까지의 시간 규모가 약 $1/f$ (여기서 f 는 Coriolis 파라미터($2\Omega \sin\phi \approx 10^{-3} \text{sec}^{-1}$))로서, Ω 는 지구자전 각

속도, ϕ 는 위도를 나타냄) 정도임을 확인할 수 있다. 이것은 모델의 바람장이 온도장에 조절되는 시간규모가 근사적으로 종관규모의 시간규모임을 의미하며 따라서 국지규모의 현상을 모의하는데는 현 해륙풍 모델이 효과적으로 작용하지 못함을 알 수 있었다. 일몰 후 21LST에는 육지와 바다의 온도경도가 약해져 이에 따라 해풍이 전반적으로 약화되었다.

하층의 온위의 분포(Fig 5)는 토함산의 정상을 중심으로 육지의 영향을 받는 서쪽과 해풍의 영향을 받는 동쪽이 서로 다르다. 결국 해안선에서 육지로 이르는 15Km~45Km 지역(가지산 정상과 토함산 정상 사이 지역)은 상층에 곡풍과 해풍이 복합되어 연직 운동이 나타나고 있다. 이층은 바다의 영향을 받아 바다와 같은 온위 분포를 나타내고 있다. 이러한 온위 분포를 가지는 지역은 해풍순환이 최대 강도에 이르는 15LST~18LST에는 해안선으로부터 20Km~45Km 육지 쪽으로 진입하여 나타나고 있다. 그리고 18LST 이후부터 육지가 냉각되면서 육지쪽에 내부 경계층이 형성되

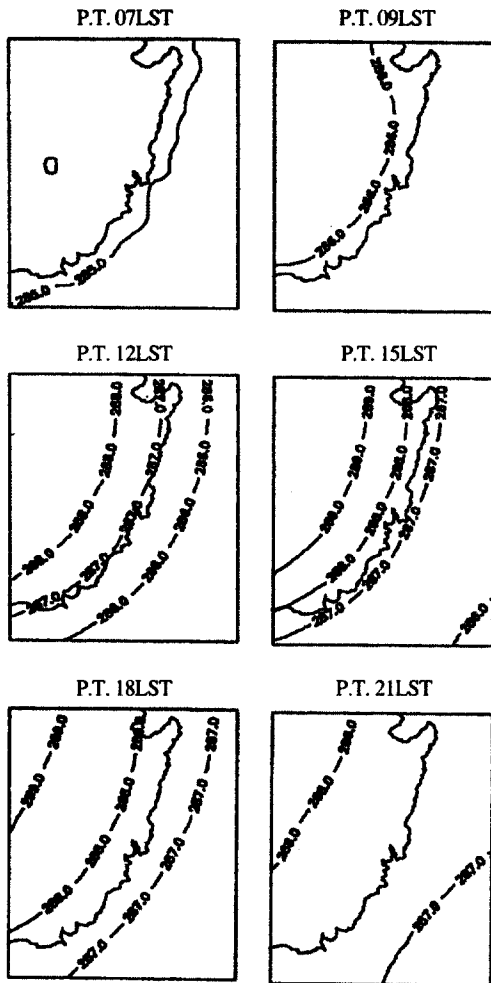


Fig. 5. Horizontal distributions of simulated temperature fields on the control run under the weak northerly geostrophic wind with the cloud amount of less than 5/10 in autumn

는 것을 제외하고는 육지와 바다의 온위 분포가 서로 비슷해지는 경향을 보였다.

이상의 기준 실험을 통해 나타난 결과를 관측 자료와 비교해 보면 전체적으로 주간에 해풍의 강도가 관측치에 비해 약하게 모의되었다. 또 발달하는 해풍의 최대강도가 나타나는 시간이 관측되는 시간보다 약 2~3시간 정도 지연되어 나타났다(Fig. 2 Fig. 5). 이러한 문제점이 AWS 관측 자료에 의한 FDDA 기법에 의해 개선 될 수 있

을지를 확인하기 위하여 바람장만을 너징한 실험과 바람장과 온도장 모두 너징한 경우의 실험을 수행하였다.

2 바람장 너징 효과

기준실험에서 모델이 국지적인 현상을 충분히 모의하지 못하므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 국지적인 강제력이 필요하다. 그 방법의 하나로서 관측자료를 국지적인 강제력으로 작용시키는 FDDA 기법을 이용할 수 있다. 따라서 두 번째 실험에서는 너징방법을 이용하여 AWS 바람 관측자료 (u, v component)를 모델의 바람장에 동화시켜 보았다. 이 때 관측치는 지상에서 2 m의 고도에서 관측된 결과라고 가정하고 모델에서 계산된 지표층(surface layer)의 높이, 경계층(boundary layer)의 높이 그리고 마찰속도(u^*)를 비롯한 여러 변수를 이용하여 지표층까지는 Monin-Obukhov 상사법 그리고 지표층에서 경계층까지는 Rossby수 상사법을 이용하여 관측자료를 모델의 하층 4개 층의 고도에 해당하는 자료로 만들어 사용하였고¹¹⁾ 바다표면온도(SST)는 기준실험과 같은 290°K로 고정시켰다.

Fig. 6은 이러한 FDDA 기법을 이용하여 도출된 10 m에서의 수평바람장의 분포를 나타낸 것이다. 전반적인 바람장은 관측된 바람장에 의해 잘 동화되었음을 볼 수 있으나 너징을 하지 않은 경우, 해풍의 강도가 2~3시간 늦게 나타났던 기준 실험에서의 문제점이 너징에 의해 개선되었음을 알 수 있다.

그 개선된 효과를 집중적으로 알아보기 위하여 해풍 강도의 시간적 변화를 포함, 울산 및 부산 지역에 대해서 관측된 자료와 비교하여 FDDA 기법에 의해 도출된 바람 자료를 Fig. 7에 제시하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 해풍의 발달/소멸의 시간적 변화는 기준실험에 비해 많이 개선되었음을 알 수 있는데 포함지

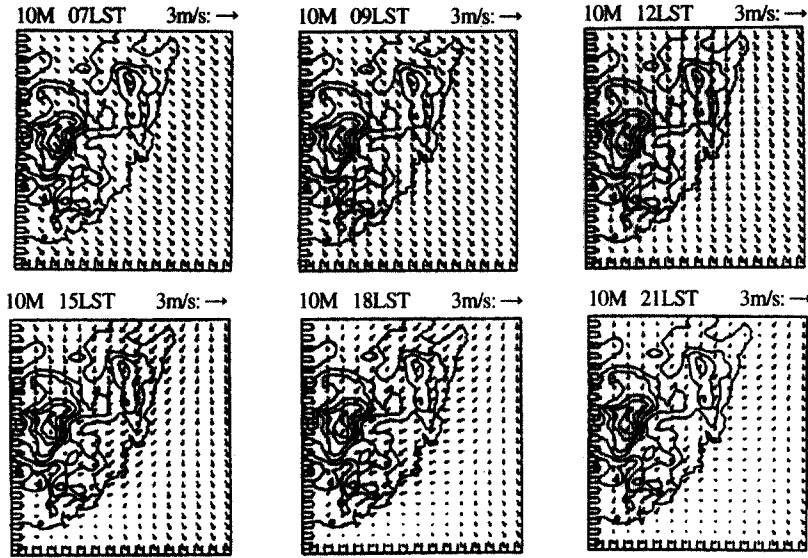


Fig. 6. Same as Fig. 3 except for nudging the observed wind field

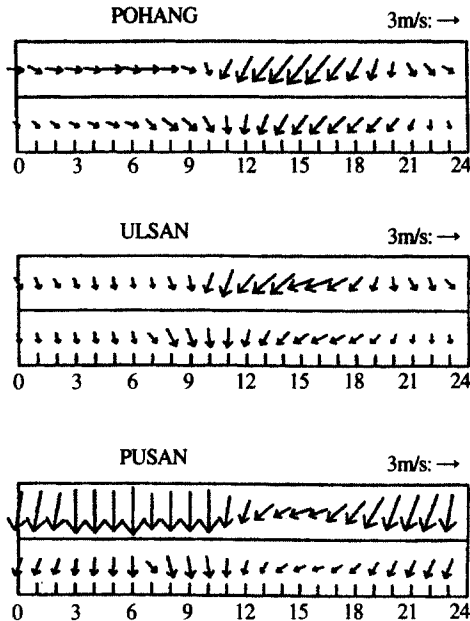


Fig. 7. Diurnal variations of observed and simulated sea breezes with nudging the observed wind field at Pohang, Ulsan, and Pusan under the weak northerly geostrophic wind with the cloud amount of less than 5/10 in autumn

역의 경우 해풍 시작시간이 관측자료(11LST)보다 1시간 늦게(12LST) 모의되며 육풍 시작시간이 관측자료(21LST)보다 2시간 늦게(23LST) 모의되었다. 울산지역도 관측자료(10LST:20LST)보다 역시 1시간 늦게(11LST:21LST) 모의되었다. 그러나 전반적으로 규준 실험과 비교해 보면 비교적 해륙풍의 발달/소멸 시간이 관측치와 비교하여 FDDA 기법에 의해 많이 개선되었음을 알 수 있다.

그러나 풍속은 관측된 결과보다 조금 약하게 모의되었다. 그 이유는 온도장의 분포는 너징되지 않고 규준실험의 결과와 동일하여 온도경도가 관측보다 현저히 약하기 때문에 주간과 야간에 모두 열적 강제력이 약하게 작용하기 때문이다. 결국 모델에서는 동화되지 않은 온도장과 관측자료에 의해 동화된 바람장의 역학적인 적응의 결과가 전체적인 풍속의 약화로 나타난다. 이는 FDDA 기법을 응용할 때에 바람장의 자료뿐만 아니라 온도장을 함께 동화시킨다면 이러한 역학적인 문제도 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 바람장과 온도장 너징 효과

바람장과 온도장을 동시에 동화시켜 해륙풍의 발달과정을 살펴보았다. Stauffer와 Seaman (1990)¹²⁾은 바람장과 온도장을 동시에 고려하는 것이 더 좋은 결과를 줄 수 있음을 보인 적이 있는데 본 실험에서도 바람장은 3.1 절의 방법으로 동화시키고 온도장은 모델 하층 맨 아래 1개층에 Monin-Obukhov 상사법을 이용하여 관측자료를 모델의 하층 맨 아래 1개층의 고도에 해당하는 자료로 만들어 사용하였다. 또 바다표면온도(SST)는 기준실험과 같은 290°K로 고정시켰다.

Fig. 8은 모델의 수평바람장의 분포를 나타내며 Fig. 9는 수평온도장의 분포를, 수평바람의 24시간 분포를 포함, 울산 그리고 부산지역의 정규관측소 5년간(1988-1992)의 관측자료에서 이 실험에 해당하는 종관 기상 상태만 선택하여 평균장을 만들어 이 실험의 결과와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다.

먼저 Fig. 8을 살펴보면 주간에 울산만과 부산

연안 사이에 과대 평가된 온도경도에 의하여 해안선에서 바다쪽으로 약 30Km정도까지 해풍대가 형성되나 이러한 해풍대가 야간에 소멸되지 않고 지속되는 경향을 보인다. 그러나 이 지역의 육지 쪽은 관측된 바람장의 동화로 육풍을 잘 모의하고 있다. 결국 이 지역의 해안선 근처에 강한 수렴대가 형성되어 물리적으로 부합되지 않은 현상이 발생되었다. 수평 온도장의 분포 또한 관측된 온도장의 국지적인 특징을 잘 모의하였음을 알 수 있다(Fig. 3, Fig. 9). 결국 모델을 바람장과 온도장을 동시에 동화시키는 방법이 물리적, 역학적으로 더 타당한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었고 이러한 방법은 짧은 주기와 큰 해상도를 갖는 기상장의 자료를 산출하는 데에 적합한 방법이 될 것이다.

그러나 관측된 바다 위의 대기 온도는 약 287°K에서 약 293°K 정도의 일변화를 보이는 반면 모델에서는 바다표면온도를 290°K로 고정시켰으므로 바다 위의 대기온도는 주간에 충분히 가열되지 못하여 주간에 해안가의 온도경도가 과대

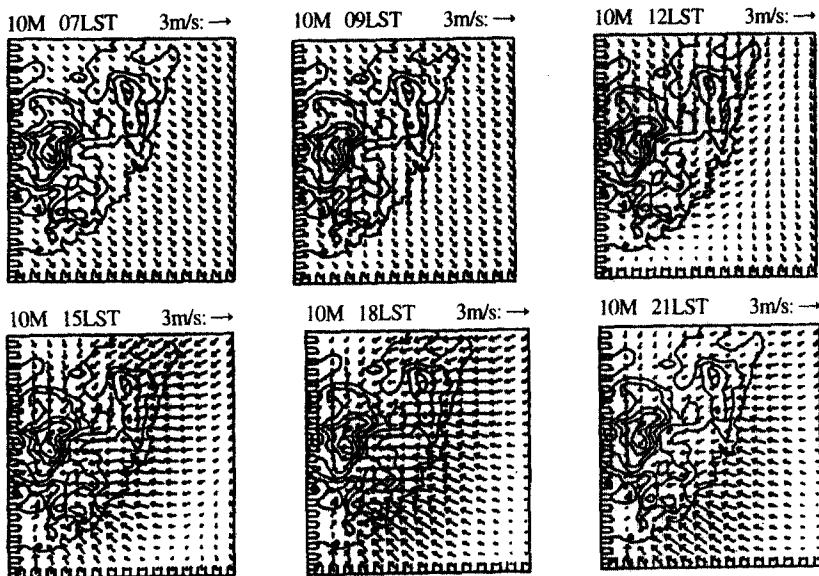


Fig. 8. Same as Fig. 3 except for nudging both the observed wind and temperature fields

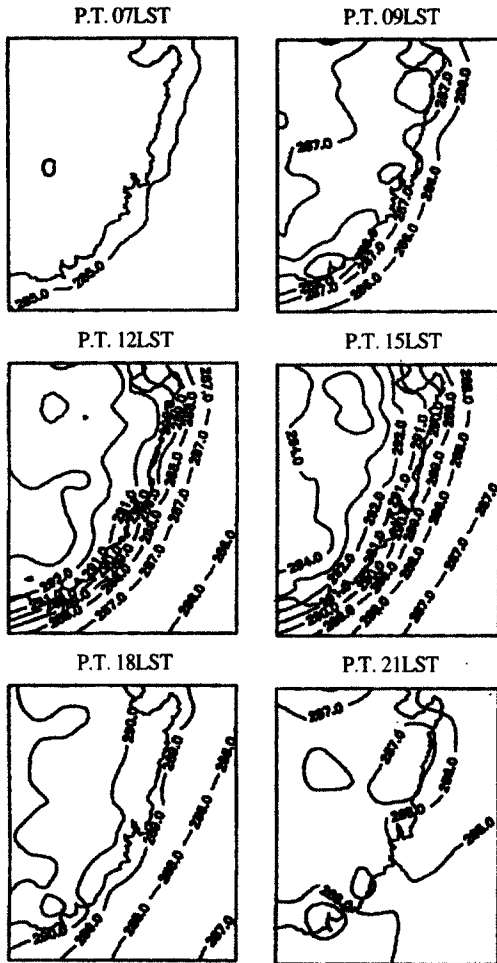


Fig. 9. Same as Fig. 5 except for both the observed wind and temperature fields

평가되는 경향을 나타내었다. 이에 따라 해풍의 시작 시점은 관측치와 비교할 때 비슷하게 시작되고 있으나 해풍이 소멸시간이 3시간정도 늦어짐을 알 수 있었다(Fig. 10).

4. 바람의 연직 구조

영일만과 울산만의 중간지점인 35.72N 위도선을 따라 동서로 절단하여 각 실험별 해풍이 가장 활발하다고 생각되는 12LST와 15LST에서의 온

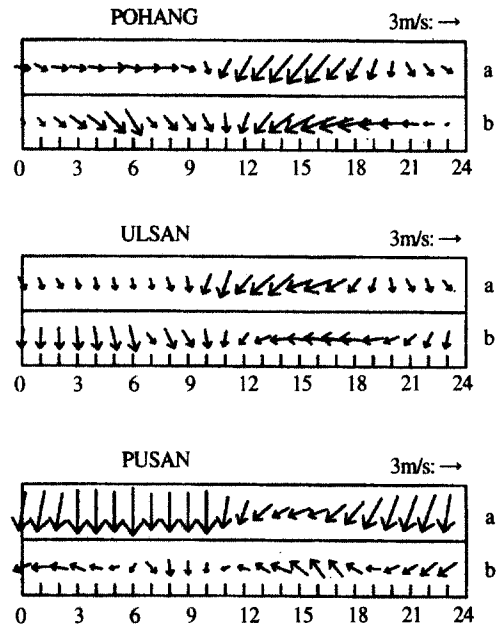


Fig. 10. Same as Fig. 7 except for both the observed wind and temperature fields.

위와 u-w 바람벡터를 Fig. 11에 나타내었다. 이 연직 단면도의 동·서로 지형을 살펴보면 해안선에서 내륙으로 15Km 지점에 토함산 남쪽사면이, 그리고 45Km 지점에 가지산의 북쪽사면이 위치하고 있다(Fig. 1).

먼저 규준 실험에서의 연직 단면도(Fig. 11(a), Fig. 11(b))는 바람장만을 너징한 Fig. 11(c), Fig. 11(d)와 비교하여 거의 차이점을 발견하기 힘들다. 그 이유는 해륙풍의 기본 역학이 지표 가열로 인한 지표면의 온도 변화이므로 기본적으로 온도장에 의한 대기 경계층의 성장은 동일하게 나타나며 다만 너징한 바람장의 효과에 의해 연직 속도가 차이가 나기 때문이다. 따라서 곡풍과 해풍이 나타나기 전인 12LST에서의 바람과 온위의 연직구조는 육지쪽에 전체적으로 약 700m 정도의 혼합층이 유지되나 15LST에는 토함산의 동쪽사면에 곡풍과 해풍, 서쪽사면에는 곡풍순환이 연직으로 나타나고 가지산에는 동쪽과 서쪽 양 사

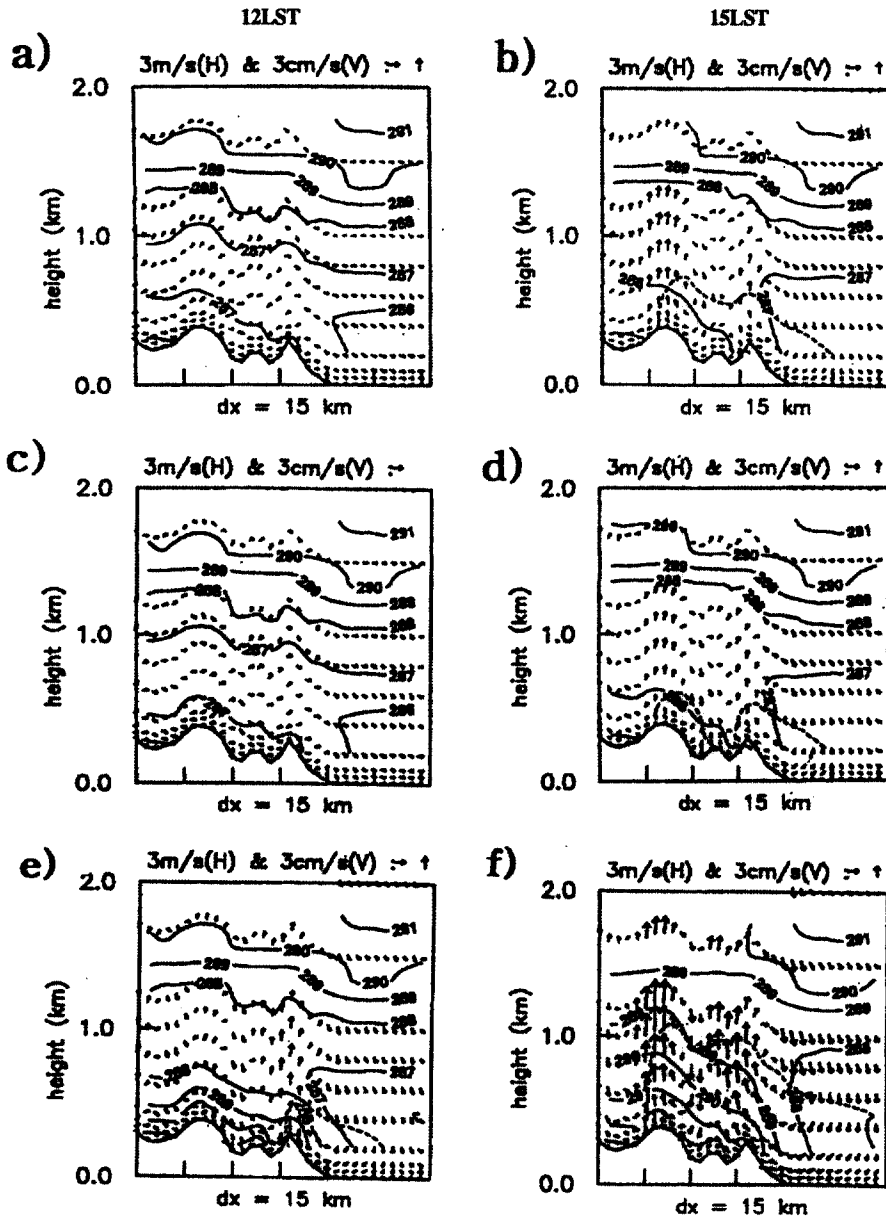


Fig. 11. Same as Fig. 7 except for both the observed wind and temperature fields

면에 곡풍의 순환이 나타나 가지산 서쪽에서는 혼합층의 높이가 약1000m, 가지산 동쪽에서 해안선까지는 그보다 약간 적은 고도까지 이르고 있다(Fig. 11(b), Fig. 11(d)).

그러나 하층의 온도 분포는 토함산의 정상울

중심으로 육지의 영향을 받는 서쪽과 해풍의 영향을 받는 동쪽이 서로 다르다. 결국 해안선에서 육지로 이르는 15Km~45Km지역(가지산 정상과 토함산 정상 사이 지역)은 상층에 곡풍과 해풍이 복합되어 연직 운동이 나타나고 있다. 이층은 바

다의 영향을 받아 바다와 같은 온위 분포를 나타내고 있다. 이러한 온위 분포를 가지는 지역은 해풍순환이 최대 강도에 이르는 15LST~18LST에는 해안선으로부터 20Km~45Km 육지쪽으로 진입하여 나타나고 있다. 그리고 야간으로 접어들면서 육지가 냉각되어 육지쪽에 내부경계층이 형성되는 것을 제외하고는 육지와 바다의 온위 분포가 서로 비슷해지는 경향을 보인다.

온도장을 함께 너징한 경우(Fig. 11(e), Fig. 11(f)) 육지에서는 혼합층의 높이가 2Km를 넘게까지 성장하였으며 12LST에는 가지산 동쪽사면에 곡풍 순환이 그리고 토함산 동쪽사면에 해풍과 곡풍순환이 발달하여 토함산 산정에 상승운동이 강화되었다(Fig. 11(e)). 그리고 14LST에 이르면 하층 해풍이 가지산 동쪽사면에까지 진입하여 가지산 산정에 상승운동이 곡풍과 해풍이 합해져서 상당히 강화되었다. 이러한 경향은 15~16LST에 이르러 최대의 강도를 가지며 그림으로 나타내지는 않았지만 18LST에 이르면 가지산 동쪽의 곡풍순환이 약화되면서 가지산 동쪽의 국지순환이 토함산 동쪽의 순환 세포와 합해지는 경향을 모의하였다.

IV. 요약 및 결론

4차원 자료동화 기법을 이용하여 가을철 종관풍이 약하고 맑은날 (평균풍속=2.7m/s, 평균풍향=351°, 운량 < 50%)인 경우에 대하여 규준실험과 AWS 자료 중 바람 자료를 너징한 경우를 수치모의하여 비교하였다.

자료동화를 하지 않고 모의한 규준실험의 경우는 바다의 온도를 290°K로 하여 수치실험을 수행하였는데 그 결과 국지적인 수평온도 분포를 효과적으로 모의하지 못하였고 육지와 바다사이의 온도경도가 약하게 모의되어 주간 해풍의 강도가 관측치에 비해 약하게 모의되었다. 또 해풍의 강도가 AWS에 의해 관측된 결과보다 2~3시간

늦게 나타나는 문제점을 보였다. 이것은 모델의 바람장이 온도장에 조절되는 시간규모가 종관규모의 시간규모로서 국지규모의 현상을 모의하는데는 모델이 효과적으로 작용하지 못함을 알 수 있었다.

따라서 규준실험에서 모델이 국지적인 현상을 충분히 모의하지 못하므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 AWS 자료를 국지적인 강제력으로 하는 실험을 수행하였다. 즉 AWS 자료 중에서 시간별 관측된 바람 자료를 모델의 하층 4개 층에 대해 추정된 다음 해륙풍 모델에 동화시켰다. 그 결과 규준 실험에서 문제점으로 나타났던 풍향과 해륙풍의 발달·소멸 시간은 잘 모의되었으며 수평 바람장은 관측 결과와 비교해 볼 때 국지적인 변화경향을 잘 모의하였고 해풍의 강도도 관측 결과와 거의 일치하였다.

결론적으로 지상 바람장을 동화시킨 실험에서는 수평 바람장의 국지적인 변화 경향, 풍향 그리고 해륙풍의 발달·소멸 시간은 잘 모의할 수 있어서 예측적인 해륙풍 모델에서 정확히 모의하지 못했던 국지적 바람 구조를 많이 개선할 수 있었다. 그러나 전체적인 풍속이 약하게 모의되었으며 또한 수평 온도장이 국지순환의 구조적 특징에 일치되게 모의되지 못하여 연직 구조에서 곡풍의 순환이 뚜렷이 나타나지 않고 수렴대에서의 상승 기류가 약하게 모의되는 문제점이 있었다.

그러나 수평 바람장과 온도장을 모두 동화시킨 결과 육지에서는 주간 해풍만을 너징한 경우의 문제점이 전반적으로 개선되었으며 해풍·곡풍순환과 야간에 육풍·산풍순환이 발달하는 것과 해풍의 시작시간이 잘 모의되었다. 온도장의 너징에 의한 보다 정확한 지역 순환을 모의하기 위하여 해수면 온도에 따른 여러 바람장의 구조도 동일한 모델과 방법으로 연구를 계속 할 계획이다. 이러한 FDDA 기법은 향후 한반도의 국지기상의 특성을 반영해야 하는 사업 혹은 3 차원 바람자료가 필요한 여러 대기질 모델 연구 및 환

경영향 평가 등에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Vukovich, F. M., 1995, Regional scale boundary layer ozone variations in the Eastern United States and their association with meteorological variation, *Atmospheric Environment*, 29(17), 2259-2273.
2. Yamada, T. C., C.-Y. J. Kao, and S. Bunker, 1989, Airflow and air quality simulations over the western mountainous region with a four dimensional data assimilation technique, *Atmospheric Environment*, 23(3), 539-554.
3. Anthes, R. A., 1974, Data assimilation and initialization of hurricane prediction models, *Journal of Atmospheric Science*, 31, 702-719.
4. 박순웅, 윤일희, 1991, 한반도의 국지 기상 특징, *한국기상학회지*, 27(2), 88-118.
5. 박순웅, 1990, 한반도에서의 3 차원 해륙풍 모델의 결과, *한국기상학회지*, 26(2), 66-77.
6. 김철희, 전종갑, 1992, 종관바람을 고려한 한반도에서의 3차원 해륙풍 수치모의, *한국기상학회지*, 28(2), 165-181.
7. Pielke, R. A., 1974, A three-dimensional numerical model of the sea breeze phenomena over South Florida, *Monthly Weather Review*, 102, 115-139.
8. Neuman, J. and Y. Mahrer, 1971, A theoretical study of the sea and land breeze circulation, *Journal of Atmospheric Science*, 28, 532-542.
9. 정관영, 1989, 지형을 포함한 2차원 해륙풍 모델과 이를 이용한 오염 확산, 서울대학교대학원 석사학위논문, 56pp.
10. Park. S.-U., I.-H. Yoon, 1987, Diurnal and seasonal variations of radiative fluxes on inclined surfaces, *J. Korean Meteor. Soc.*, 23(3), 40-53.
11. 김병곤, 박순웅, 1993, 대기경계층내의 바람과 기온의 연직 구조에 관한 진단적 모델링, *한국기상학회지*, 29(4), 281-305.
12. Stauffer, D. R., and N. L. Seaman, 1990, Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I : Experiments with synoptic data, *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1250-1277.