

종관 특성에 따른 지상 및 연직 관측자료 동화가 수평 및 연직 확산장에 미치는 영향

The Effect of Surface and Vertical Observation Data Assimilation on the Horizontal and Vertical Flow Fields Depending on the Upper Wind Conditions

최 현 정 · 이 화 운* · 김 민 정

부산대학교 지구환경시스템학부

(2010년 1월 21일 접수, 2010년 3월 4일 수정, 2010년 3월 29일 채택)

Hyun-Jung Choi, Hwa Woon Lee* and Min-Jung Kim

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan, Korea

(Received 21 January 2010, revised 4 March 2010, accepted 29 March 2010)

Abstract

In order to incorporate correctly the large or local scale circulation in an atmospheric model, a nudging term is introduced into the equation of motion. The MM5 model was used to assess the meteorological values differences in each case, during ozone episode days in Gwangyang bay. The main objective of this study is to investigate the effect of horizontal and vertical flow fields according to the surface and vertical observation data assimilation by upper wind conditions. Therefore, we carried out several numerical experiments with various parameterization methods for nudging coefficient considering the upper wind conditions (synoptic or asynoptic condition). Nudging considering the synoptic and asynoptic nudging coefficient does have a clear advantage over dynamic initialization, therefore appropriate limitation of these nudging coefficient values on its upper wind conditions is necessary before making an assessment. Obviously, under the weak synoptic wind, there was apparent advantage associated with nudging coefficient by the regional difference. The accuracy for the prediction of the meteorological values has been improved by applying the appropriate PBL (Planetary Boundary Layer) limitation of circulation.

Key words : Surface and vertical observation, MM5, Nudging, PBL, Upper wind condition

1. 서 론

오염 물질의 확산과 수송은 기온의 연직 열적 구

조에 의해 좌우되기 때문에 대기 혼합층 발달을 지표 열속과 관련하여 분석할 필요가 있다(Coulter, 1979). 이 고도는 대기 안정도와 난류 에너지의 크기에 의해 변화하며, 하루 정도의 시간규모로 지면과 대기 사이의 상호작용으로 풍속, 온도, 습도와 같은 기상요소 등이 급격히 변동한다. 특히 지표면에 가까운 층일수

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-510-2291, E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

록 지표면의 영향을 많이 받게 되며 (Daul and Fielke, 1993), 혼합층 내에서 모든 대기와 지면 사이의 운동량의 교환과 열 교환이 일어나기 때문에 대기 운동학적, 열역학적으로 뿐만 아니라 오염의 이유와 확산의 강도에 영향을 줄 수 있어 중요한 층으로 간주된다 (Stull, 1992). 일반적으로 일출과 함께 지표면은 가열되어 열적 난류에 의해 혼합고가 높아지고, 일사가 점점 강하게 되어 혼합층 내의 온도는 급격하게 올라가지만 혼합층 높이는 그에 비례하여 높이 성장하지는 않는다 (Nieuwestadt, 1984). 야간에는 지면부근 바람의 층밀리기 (shear)에 의한 역학적 난류에 의하여 낮은 혼합층을 형성하지만, 대기 안정도에 따라 그 고도가 현저히 변화하게 된다. 최대 혼합고는 그 날 아침의 연직 기온분포, 일중 최고 기온으로 결정되므로 일사가 가장 강한 시간에 높이가 최대가 된다. 하지만 오염물질의 확산과 이유강도를 예측하기 위해 시간에 따라 변하는 혼합고를 모델을 통한 수치모의를 통해 그 높이를 산정하기가 어려운 현실이다. 더욱이 복잡한 도심규모를 수치모의 할 중규모 기상장 모델은 초기화 방법 (initialization)이나, 모수화 (parameterization), 해상도 등 각각의 모델이 가지고 있는 물리적 한계를 가지고 있다. 이에 중규모 모델에서는 관측 자료를 통한 객관분석 (objective analysis)의 중요성이 점차 대두되면서 자료동화 과정 (Data assimilation)은 기상모델과 그에 수반되는 대기질 모델의 수행을 향상시키는 방안으로 활발히 연구되고 있다 (Choi *et al.*, 2009; Umeda and Martien, 2000; Smolarkiewicz and Grell, 1992). 이들은 지상 및 상층 관측자료 내삽을 통해서 기온장과 바람장 뿐 아니라 오염물질의 농도에 지대한 영향을 미치는 혼합층의 고도 또한 실제 관측과 유사하게 개선할 수 있다는 것을 보였다. 특히 산악 지역이나 복잡한 연안지역에서는 지상 및 고층 관측 자료가 희박하고 관측소의 고도변화는 매우 심하므로 상대적으로 객관 분석된 기상장에 큰 오차를 발생시키는 원인이 된다 (Choi *et al.*, 2009; Stauffer and Seaman, 1999). 이러한 대기 경계층의 연직구조를 조사하고 이를 바탕으로 혼합층의 고도를 결정하는 것은 대기의 미기상학적 현상을 규명하고 대기오염 농도 변화를 모사하며, 오염도를 예측하는 데 필수적인 과정이 된다. 따라서 이러한 지역에 대한 실제 관측이 이뤄져 모델 내 자료동화 되어 실제 확산장에 미치는 영향을 수평 및 연직으로 살펴볼 필요가 있다.

연구대상 지역인 광양만은 대표적인 연안지역으로 해륙풍 순환계, 내륙의 복잡한 지형 형태 및 심한 경사 등으로 인한 산곡풍 순환계 등 중규모 순환계 및 복합적인 국지규모 순환계가 모두 나타나는 지역이다 (Lee *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2004). 특히 이 지역은 연안지역의 혼합고 및 해륙풍의 발달 강도 (Kondo and Gambo, 1979), 정체고기압 영향 하의 해풍과 지형에 의한 국지풍 등이 연안지역의 고농도 오존 현상과 깊은 관련이 있다. 더욱이 해풍 발달에 의해 해안가에 위치한 공업도시들로부터 배출된 오염물질들은 내륙 깊숙이 수송되는 경우 (Lee *et al.*, 2008; Betchtold *et al.*, 1991)도 있어 연구의 중요성이 확인되고 있다.

따라서 본 연구에서는 종관 특성에 따른 이 지역 오염물질의 확산과 이유에 관한 분석력 향상을 위하여 연구 대상 지역에서 지상 및 연직 관측자료에 대한 약 40일 간의 집중관측이 이루어졌다. 획득된 다양한 기상요소 정보에 대해 중규모 모델을 이용한 자료동화를 실시하여 국지적인 수평 및 연직 확산의 구조를 파악하여 오염물질의 수송에 대한 기여도를 설명하는데 신뢰 있는 분석을 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 기상장 모델 및 기초자료

복잡한 연안의 대기 순환 묘사에 필요한 3차원 바람장을 높은 해상도로 수치모의 하기 위하여 중규모 기상장 모델인 MM5 (PSU/NCAR mesoscale model)를 이용하였다. 사용된 모델의 초기 및 경계 입력자료는 3시간 단위 KMA/RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System)를 기본 입력 자료로 사용하였으며, 모델링의 초기 바람장 개선을 위해 QuikSCAT 위성자료로 한반도 주변의 연안 바람장을 개선하였고, 연안 해수온 자료는 NGSST (New Generation Sea Surface Temperature, $dx=20$ km)를 사용하였다. 상세 지형에 대한 국지기상장 수치모의를 위해 환경부 지리정보시스템의 해상도 3초 (90m) 지형고도 자료 (Ministry of Environment, Digital Elevation Model)와 해상도 1초 (30 m)의 대분류 토지피복지도 (축척 1:50,000)를 본 연구에 안정적으로 모델 내에 적용하여 수치모의 하였다.

2.2 사례일 선정 및 집중 관측 자료

지역을 대표하는 바람장에 대한 조사결과는 대기 오염 물질의 수송 및 확산 예측을 위한 중요한 자료가 된다. 이는 풍향과 풍속을 통해 대기오염물질의 정체 및 확산 정도를 파악할 수 있기 때문이다. 또한 바람장은 지리적 여건에 따라 크게 변할 수 있다. 이러한 변화의 파악이 상층풍 관측의 주목적이다(Kim *et al.*, 1997). 연구대상 지역인 광양만에서 수치모의 내 자료동화에 입력될 관측자료를 얻기 위하여 지상 및 연직 기상요소에 대해 집중 관측이 실시되었다. 측정 실시시간은 2009년 5월 9일에서 6월 19일(40일)간이며, 전남 광양시 태인동과 묘도(127°42'14", 347°53'6"), 여수 국가산업단지 인근 등 3지점에서 테더존데(Tethersonde), 오존존데(Ozonsonde), 파이발(Pibal), AWS(자동기상관측장비) 등의 장비를 이용하여 지상 및 연직 기상요소(풍향, 풍속, 기온, 습도자료 등)

관측이 이뤄졌다.

본 연구에서의 수치실험은 집중 관측기간 내 관측된 지상 및 상층자료가 종관 상태에 따라 모델에 자료동화되어 수치모의된 결과로 이 지역 오염물질의 수평, 연직 수송 및 축적 과정에 미치는 영향을 파악하기 위하여 설계되었으며, 국지규모의 기상조건, 바람장의 수평 및 연직 변화 등에 대해 자료동화의 효과를 비교 검증하기로 한다. 이를 위해 종관장의 영향이 비교적 강하게 나타나는 사례일과 국지규모의 대기운동이 활발하게 일어나는 약한 종관 사례일로 구분하여 수치모의 하였다. 모델링 수행 기간은 2009년 5월 19일부터 6월 7일간이며, Kondo *et al.*(1989)에서 제안한 약한 상층풍 조건($WS_{850} < 5 \text{ m/s}$, $dT_{850}/dt < \pm 3 \text{ K/12 h}$)과 강한 상층풍 조건($WS_{850} > 5 \text{ m/s}$, $dT_{850}/dt > \pm 3 \text{ K/12 h}$)에 의하여 분류하였다. 이 지역에서 관측된 고농도 오존사례일 중, 강한 종관 사례일은 5월

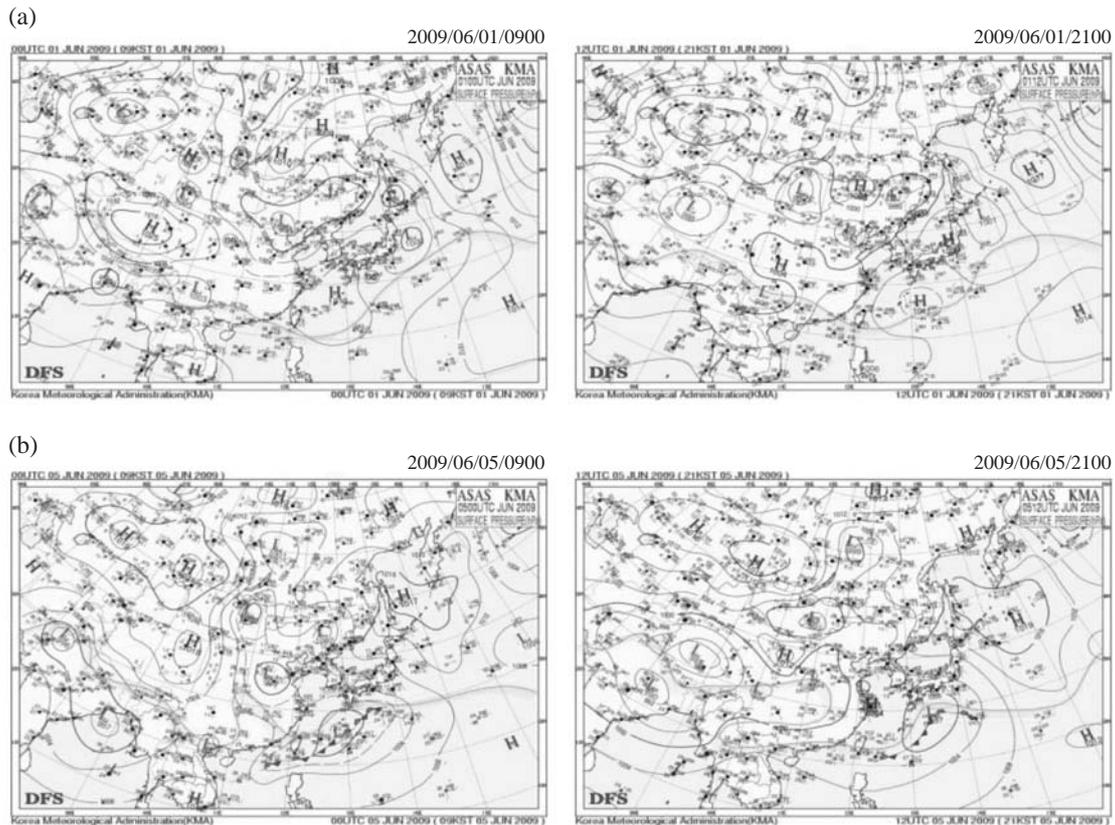


Fig. 1. The surface weather chart for synoptic (a) and asynoptic (b) upper wind conditions.

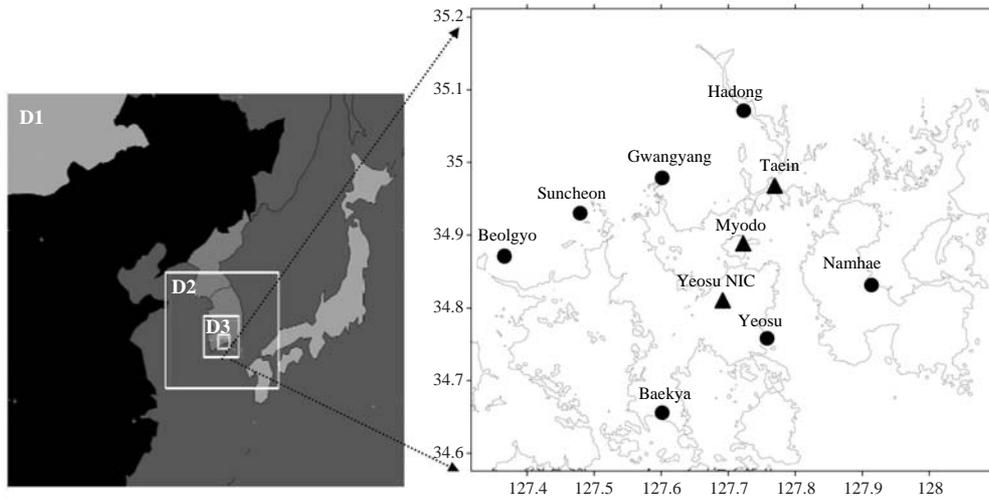


Fig. 2. The coarse and nested grid domains used in this study (The analyzed weather sites (●) and observed sites (▲)).

Table 1. The grid system of the horizontal dimensions for model integration and physical parameterization in Fig. 2.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Horizontal grid	120 × 100	97 × 85	91 × 82	70 × 70
Horizontal resolution	27 km	9 km	3 km	1 km
Vertical grid	33 layers			
Physical options	MRF PBL Scheme Grell Cumulus Scheme Mixed phase Scheme RRTM Longwave Scheme			
Initial data	NCEP/NCAR CDAS Reanalysis data			
Time period	2009. 05. 19. 1200UTC ~ 2009. 06. 07. 0000UTC			

31일에서 6월 1일, 약한 종관 사례일은 6월 4일에서 5일이며 이 사례에 대한 수치모의로 자료동화의 효과를 집중 분석하기로 하였다(그림 1).

2.3 모델링 영역 및 수행조건

모델의 등지격자 도메인을 이용하여 Lambert-conformal 격자 투영법으로 광양만을 포함한 영역을 대상으로 국지 기상장 수치모의를 실행하였다. 먼저, 경계 조건 등으로 인한 수치모델링의 계산 오차를 줄이고, 대규모 영역의 계산부터 시작하여 관심지역의 영역까지 계산을 하는 등지격자 도메인을 이용하는 nesting 방법을 도입하였다. 등지격자 모델의 외부경계조건을 생성하기 위해서 two-way interacting nested grid sys-

tem을 사용하였다. 모델링 영역은 그림 2에 나타내었으며, 마지막 도메인의 격자는 1 km 해상도로 수치모의 하였다. 사용된 물리과정 중 구름 모수화 과정 (cloud physics and precipitation processes)과 강수과정 (precipitation processes)은 각각 상승·하강운동 그리고 보상운동을 고려하는 모수화 방법 (Grell *et al.*, 1995)과 Reisner scheme (Reisner *et al.*, 1998)을 사용하였다. 복사과정은 명시적 구름(explicit cloud)과 장파 및 단파복사의 상호작용을 충분히 고려한 구름-복사 방안을 사용하였다. 또한 Radiation scheme으로 RRTM long wave scheme (Mahrer and Pielke, 1977)을, surface scheme으로는 Pleim-Xiu Land-Surface scheme (Pleim-Xiu Land-Surface Model coupled to the Pleim-Xiu PBL

Table 2. The description of MM5 numerical experiment for each case.

		Case	Radius of influence (km)
MM5	Base		
	FD	Default nudging coefficient (10^{-4} s^{-1})	2
	FD_NCR	NCR0.5 Strong syn. NCR6.0 Weak syn.	Nudging regard of coefficient (10^{-4} s^{-1}) 2

and combined land-surface and PBL model)이 선택되었다(표 1).

3. 수치모의 결과

집중 관측 기간 동안 3지점에 관측된 기상 및 연직 관측자료를 수치모의에 동화한 결과를 종관 상태에 따라 분석하여 국지적인 수평 및 연직 확산의 차이와 함께 오염물질의 연직 확산에 대한 기여도를 분석하고자 한다. 먼저, 관측자료를 수치모의에 동화할 경우 이들 자료의 영향 반경을 정해주고 자료 동화를 하여야 한다. 또한 복잡한 해안지역에서 자료동화시 동화의 반경뿐만 아니라 효율적인 동화 강도의 계수도 검증해야 한다(Choi *et al.*, 2009). 이에 본 사례연구에서는 수치모의에 자료동화를 실시하지 않은 Base case와 자료동화를 하되 동화의 강도를 종관의 상태를 고려하지 않은 default값을 사용한 FD case, 종관의 상태를 고려해 각각 자료동화의 강도를 조절하여 나타낸 FD_NCR case로 나누어 수치모의 하였다. 자료의 동화반경은 FD case와 FD_NCR case에서는 동일하게 설정하였다(표 2). 통계분석(Root mean square error, RMSE)을 통하여 수치모의를 통한 자료동화의 효율성을 검증하였다.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{1/2}$$

여기서 P_i 와 O_i 는 각각 i 에서의 모델 치와 관측치이며 N 은 총 자료의 수이다. 먼저 광양지역 7개의 기상관측지점(광양, 남해, 여수, 순천, 벌교, 진주, 백야)을 포함한 집중관측지역에서 분석한 수치모의 결과의 민감도 분석에서, 기온과 풍속은 FD_NCR case에서 가장 낮은 RMSE값을 나타내어 관측 값을 가장 잘 모사하는 통계결과를 보였다. 특히 자료동화를 한 사례와 종관 상태에 따라 자료동화의 강도를 효율적

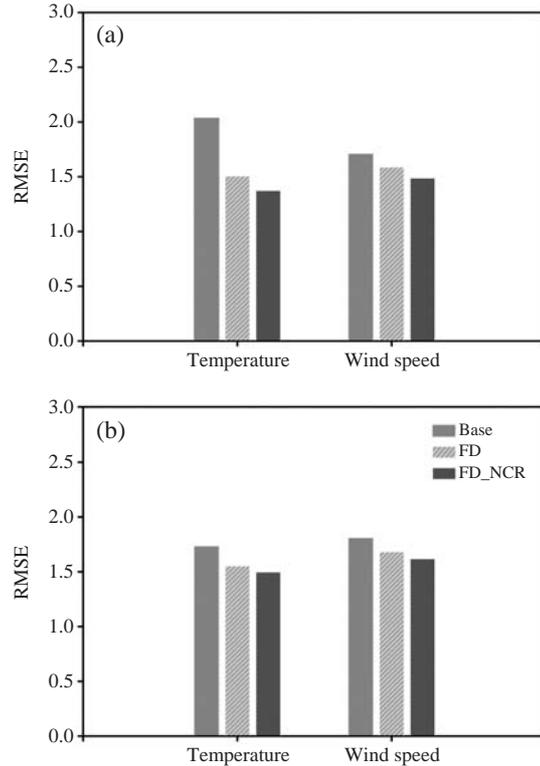


Fig. 3. The RMSE value between simulated by each runs and observed value on a weak synoptic day (a) and strong synoptic day (b).

으로 적용한 사례분석에서는 강한 종관 사례일보다 약한 종관 상태에서 통계적으로 더 낮은 RMSE 값을 나타내어 관측 값에 더 근접한 결과를 갖게 하였다(그림 3). 따라서 복잡한 연안지역에서의 종관 상태를 고려한 최적의 동화계수를 선정하는 것이 국지적 순환패턴에서 중요한 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 그림 4에서는 이러한 FD_NCR에 의해 구현한 수평 기상장을 나타내고 있다. 한편, 종관에 따른 자료 동화의 반경과 강도를 조정할 사례분석 실험에서 연

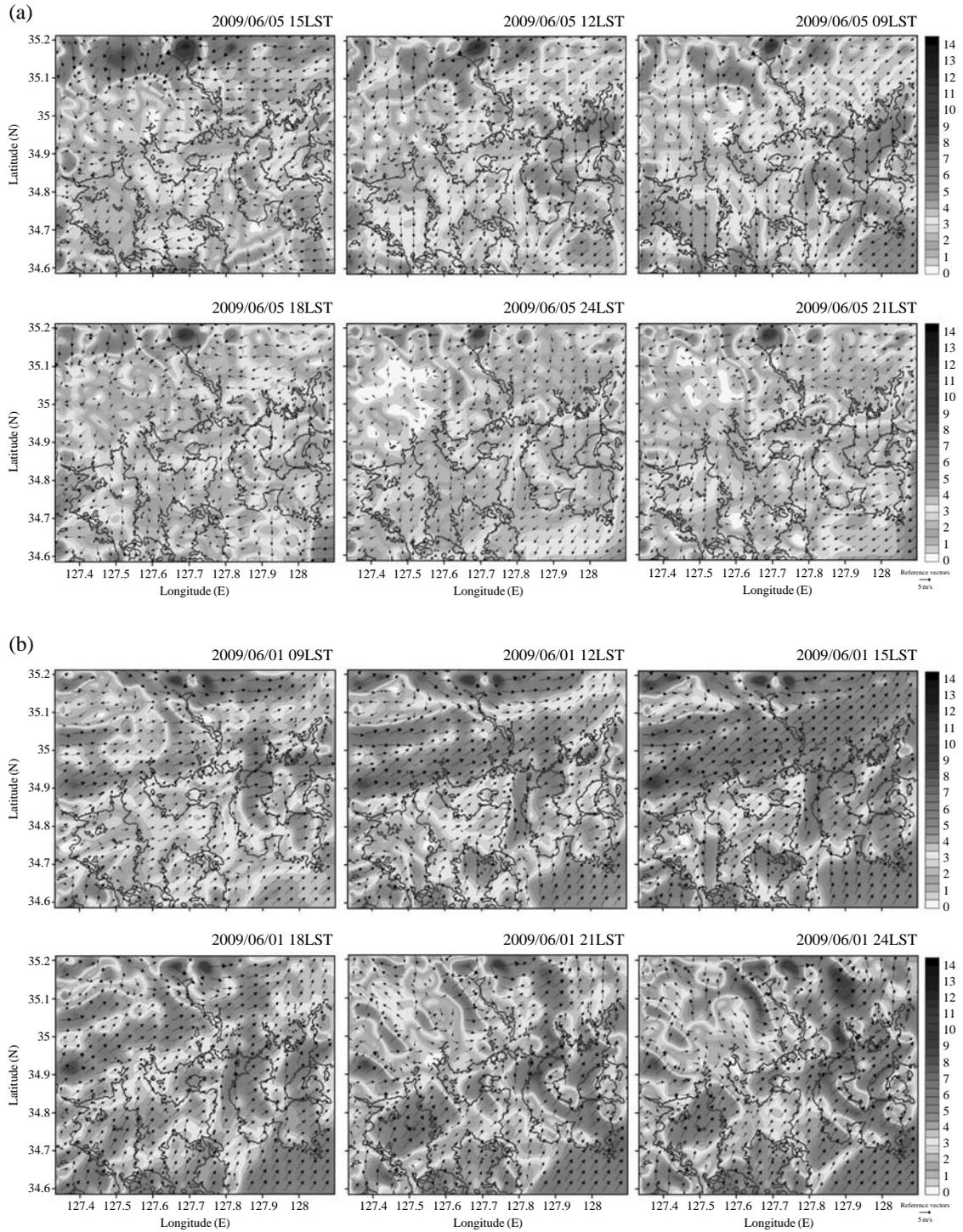


Fig. 4. The horizontal distribution of wind field on a weak synoptic day (a) and strong synoptic day (b) by FD_NCR case.

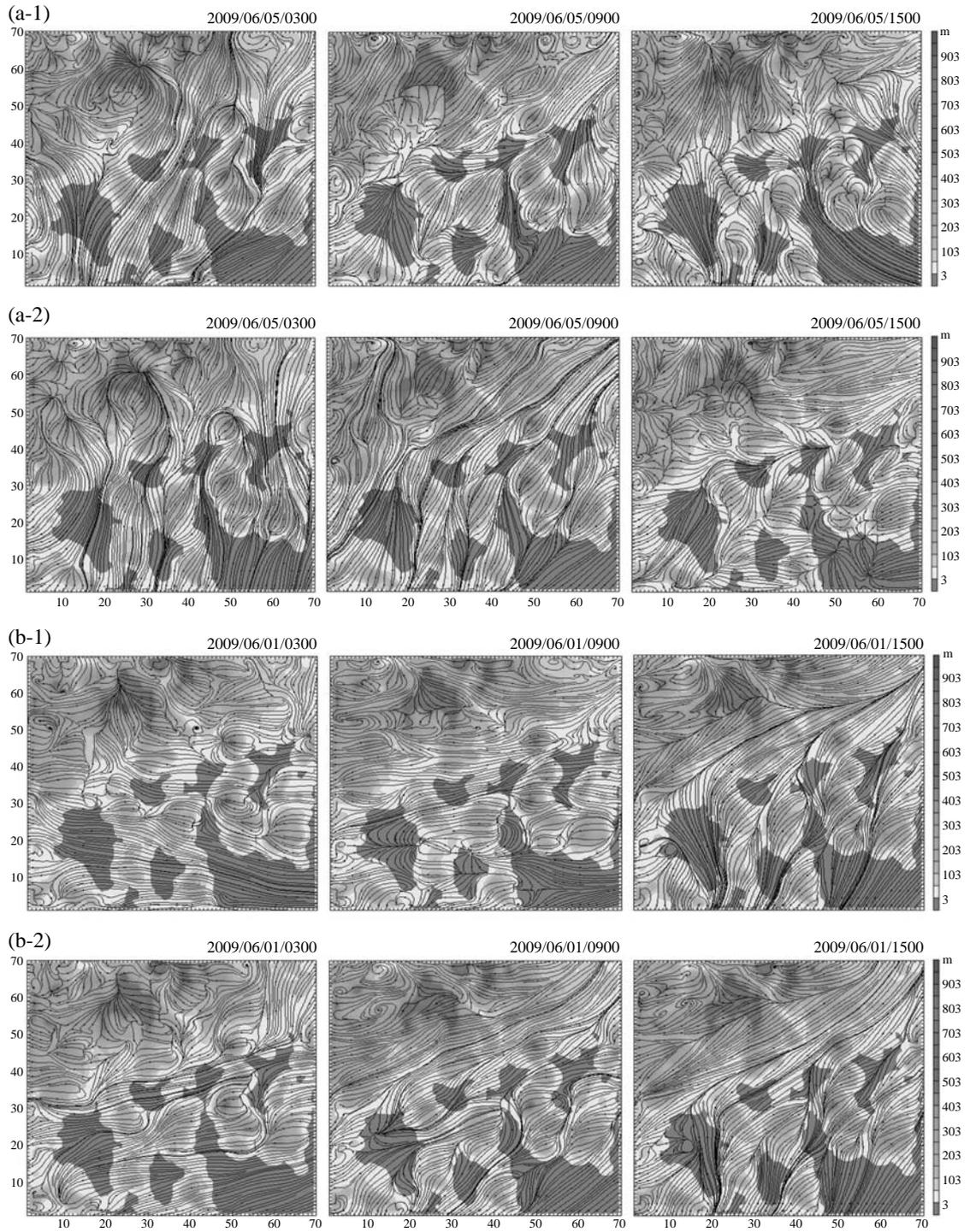


Fig. 5. (a) The horizontal wind stream line between Base (1) and FD_NCR (2) case on a weak synoptic day. (b) The same as in Fig. 5(a) in case of on a strong synoptic day.

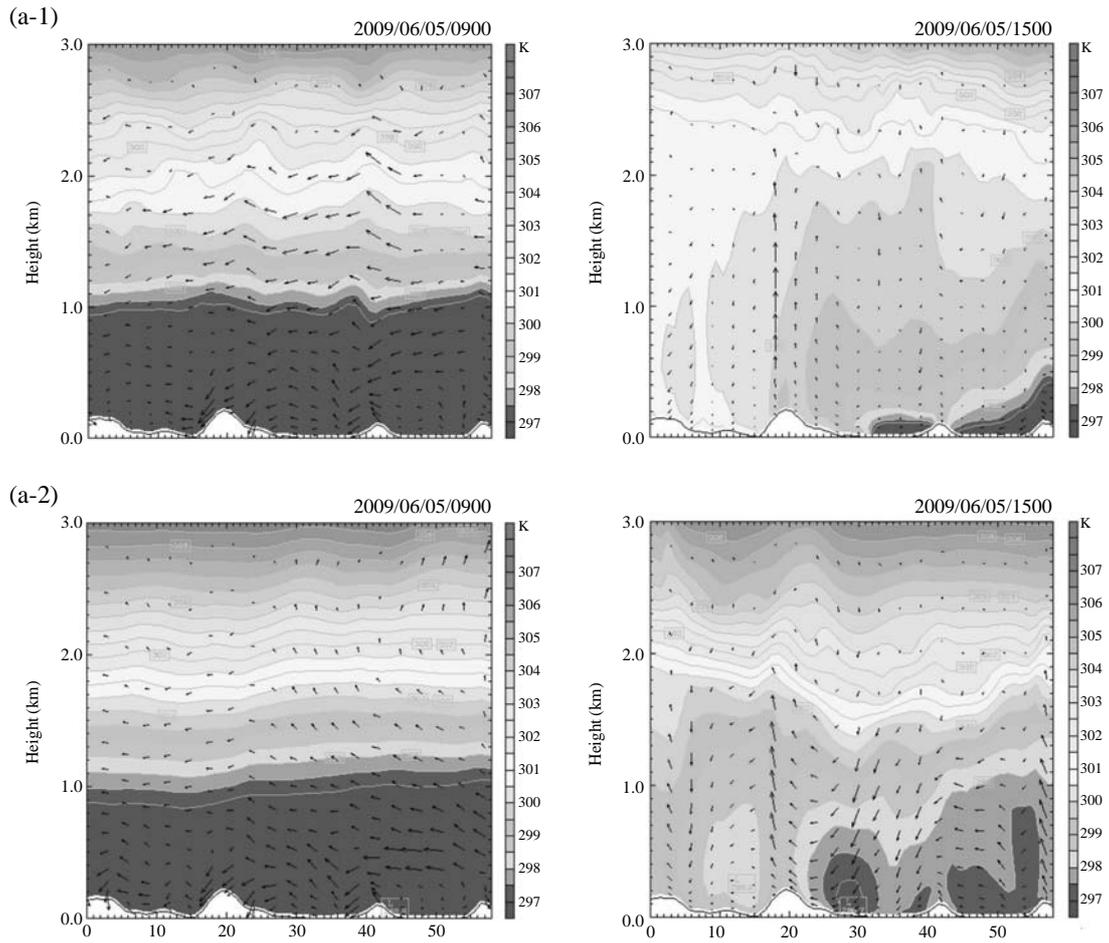


Fig. 6(a). The vertical flux and temperature field between Base (1) and FD_NCR (2) case on a weak synoptic day (WE-cross section).

안 역을 중심으로 이러한 자료동화의 반경과 강도를 고려한 결과 값과의 차이가 두드러지게 나타나고 있다. 또한 국지적 순환패턴에서 그 수렴의 폭과 위치에도 집중관측자료의 동화 영향이 크게 나타나고 있음을 기류분석에서 알 수 있었다(그림 5). 자료동화의 효율을 연직적인 확산패턴 상에서 살펴보기 위하여 묘도를 중심으로 동서(EW) 및 남북(NS) 방향의 연직 단면(cross section)상에서 연직 온도장과 확산속도를 분석한 결과를 그림 6과 7에 나타내었다. 자료동화 강도의 효율에 따른 수치모의 결과, 약한 중관 상태의 경우 야간 냉각이 진행되는 시간대에 자료동화를 고

려하지 않은 경우(Base case)는 FD_NCR case와 비교하여 분지바닥에 한랭한 공기를 더 축적하여 큰 복사 냉각율과 관계 깊은 한랭한 공기호를 형성하고 있었다. 이와 함께 야간냉각을 강화시키며, 이 층 내에서는 FD_NCR case에 비해 바람 벡터도 감소되어 있음을 나타내었다. 이후 1500 LST에서는 각 case에서 모두 연직속도의 최대 증가를 볼 수 있으며, 이것은 혼합층의 생성속도를 빠르게 하며, 혼합의 지속시간을 지속시키는 것으로 볼 수 있다. 낮 시간 동안 Base case에서 지면 가열에 의한 연직속도의 상승으로 FD_NCR case에 비해 혼합층의 고도가 급격히 상승하고 있는

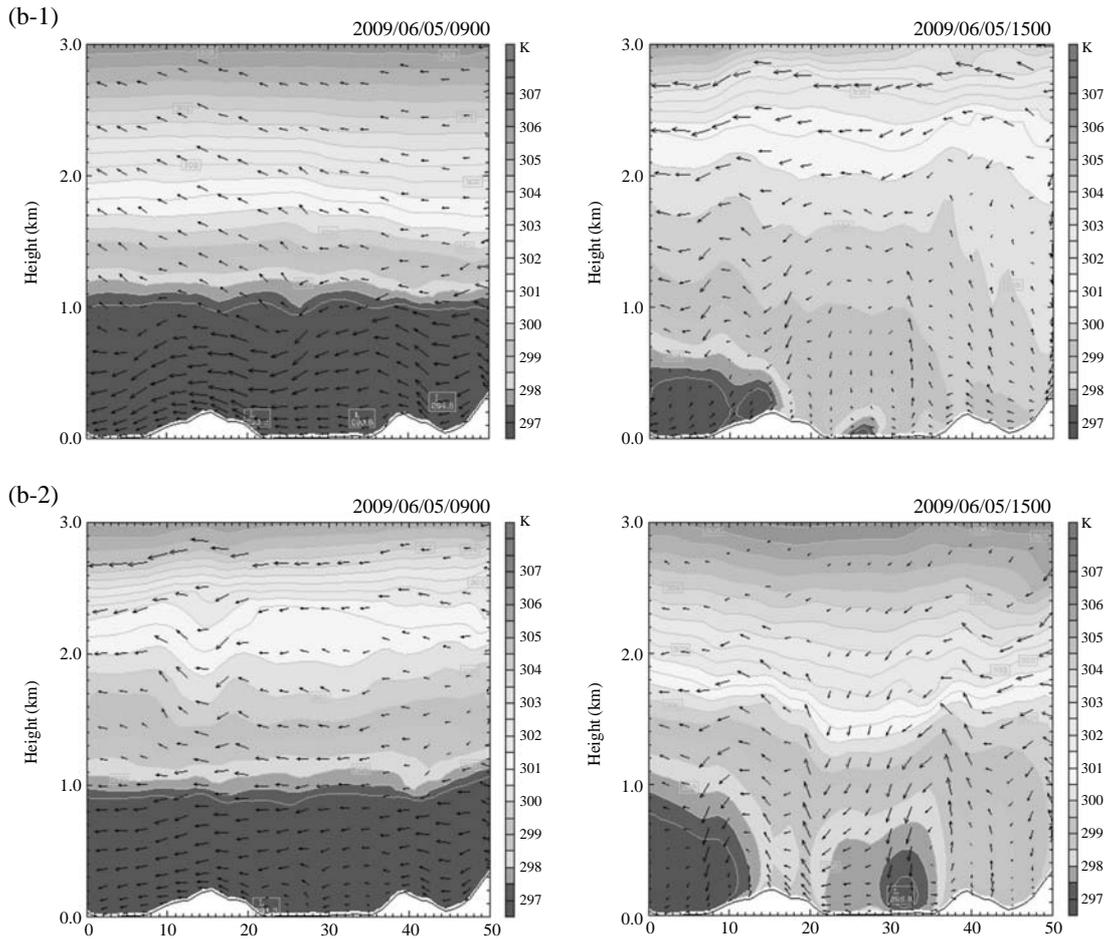


Fig. 6(b). The same as in Fig. 6(a) in case NS-cross section.

것을 볼 수 있으며, 혼합층 내 연직 shear에 의해 약한 하강류도 형성되고 있었다. 종관풍이 강한 사례일에서도 이와 같은 패턴이 나타나고 있었으나 상승과 하강의 보상작용을 위한 순환세포들이 약한 종관 사례일에 비해 제대로 발달하고 있지는 못한 상황이었다 (그림 6, 7).

수치모의를 통하여 여수 산단과 태인동 지역에서 산출한 대기경계층고도 (Planetary Boundary Layer, PBL)의 변화를 그림 8에 나타내었다. 일출 후 0900 LST에 태양복사의 증가에 따라 지면 온도가 상승하고, 따라서 지면 근처의 활발한 연직운동으로 인해 대기의 혼합이 이루어짐으로(대류성 혼합) 대기 하층에

혼합층이 형성되어진다. 일출 후 일사에 의한 지면 가열에 의해 혼합층이 점차 발달하고 있음을 볼 수 있다. 이때, 지표면 현열속의 증가로 인하여 연직 혼합고가 높아지는 효과를 보여 주고 있다. 즉 현열 속의 증가와 감소는 열적 난류의 증가와 감소를 대변하고 있으며, 특히 지표면의 가열로 생긴 부력에 의해 혼합층이 대류적으로 발달했음을 시사한다. 이후 시간이 지날수록 지면 냉각 효과가 서서히 일어나기 때문에 연직적으로 혼합될 수 있는 에너지가 작아져서 혼합고가 낮아지게 되는 것이다.

주간 FD_NCR case에서는 Base case에 비해 낮게 수치모의된 혼합고를 나타내고 있었으며 야간에는

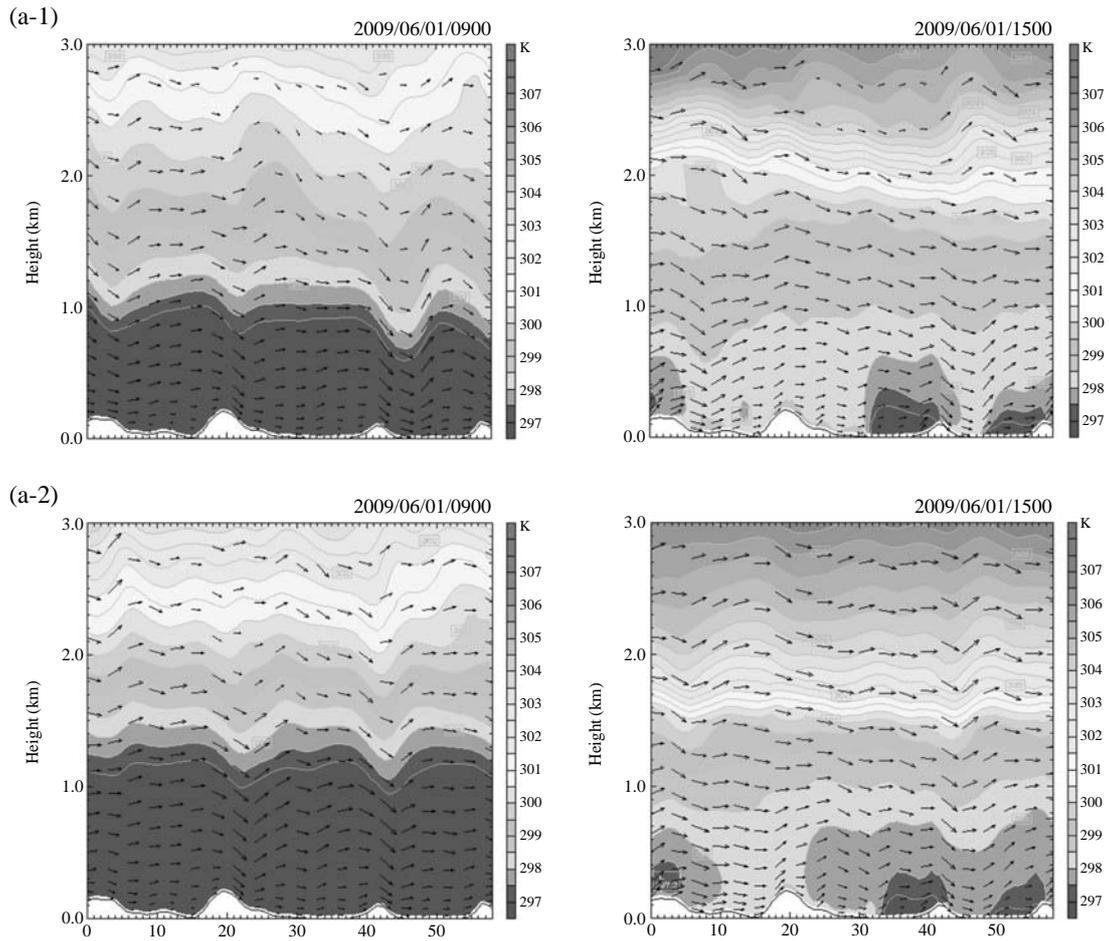


Fig. 7(a). The vertical flux and temperature field between Base (1) and FD_NCR (2) case on a strong synoptic day (WE-cross section).

이와는 반대로 더 높은 혼합고를 예측하고 있었다. 이러한 패턴은 종관이 약한 사례일의 경우 강한 종관 사례일에 비해 그 차이가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이때 연직 단면 분석에서도 나타난 바와 같이 종관이 강한 사례에 비해 약한 종관사례일에서는 다소 높은 낮시간대의 PBL 고도를 나타내고 있었으며 야간의 난류혼합에 의한 확산가능성도 약한 종관상태에서 다소 높게 나타날 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 혼합고의 차이는 오염물질의 연직 확산에 대한 기여도를 설명하는 데 중요한 차이가 된다. 이때, 상층에는 주간에 형성되었던 혼합층의 잔여층이 존재하게 되는데 이를 ‘야간 잔류층’으로 볼 수

있다. 하지만 이 층에도 주간만큼 활발한 혼합작용이 존재하지는 않지만 비교적 활동적인 혼합작용이 존재하고 있으므로 혼합층으로 볼 수 있다. 따라서 이 시간대에 나타나고 있는 혼합고는 일사에 의한 혼합으로 나타난 고도라기보다는 낮 동안 생성되었던 혼합층이 점차 낮아지면서 소멸되는 단계에서 나타난 야간 잔류층이라고 볼 수 있다. 이층에서는 상대적으로 적은 혼합이 일어나 오염물질들을 잡아 두는 역할을 하기 때문에 지표근처에서의 오염물질 농도에 영향을 주며, 이러한 야간 안정경계층에서의 고도를 예측하는 것은 중요하다(Lee et al., 2008). 따라서 자료동화 강도의 효율을 종관의 상태에 따라 검증하여 나타

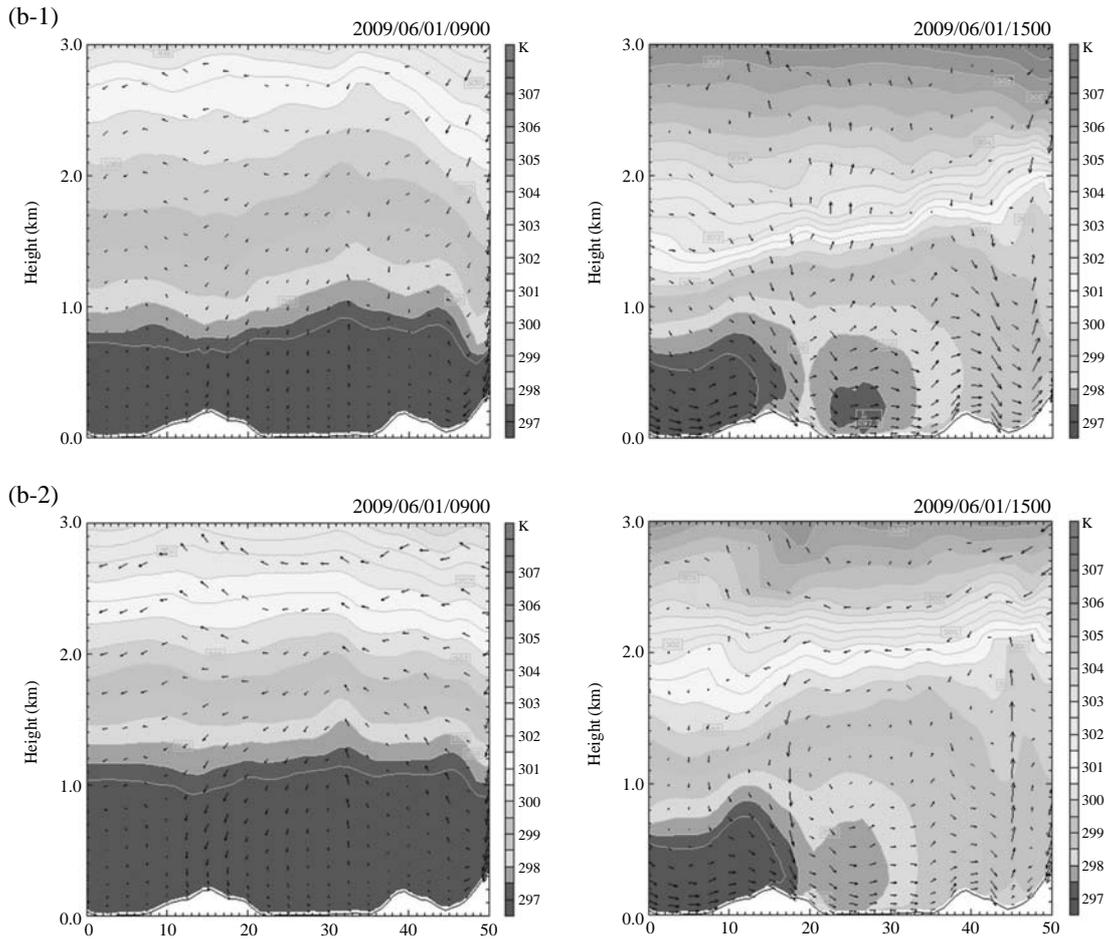


Fig. 7(b). The same as in Fig. 7(a) in case NS-cross section.

낸 결과는 이러한 연안지역 오염물질의 거동에 대한 해석에 유의한 정보를 제공하고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 종관 특성에 따른 이 지역 오염물질의 확산과 이류에 관한 분석력 향상을 위하여 연구 대상 지역에서 지상 및 연직 관측자료에 대한 집중관측을 실시 하였다. 획득된 다양한 기상요소 정보에 대해 중규모 모델을 이용한 자료동화를 실시하여 국지적인 수평 및 연직 확산의 차이와 함께 오염물질의 연직 확산에 대한 기여도를 설명하는데 신뢰 있는 분

석을 제공하고자 하였다. 종관 상태에 따라 자료동화의 강도를 효율적으로 적용한 사례분석에서는 강한 종관 사례일보다 약한 종관 상태에서 통계적으로 더 유의한 결과를 나타내었다. 따라서 복잡한 연안지역에서의 종관 상태를 고려한 최적의 동화계수를 선정하는 것이 국지적 순환패턴에서 중요한 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 또한 연안의 국지적 순환패턴에서 집중관측자료를 통한 관측자료 동화는 그 수렴의 폭과 위치에도 영향을 주고 있음을 기류분석에서 알 수 있었다. 묘도를 중심으로 동서 및 남북 방향의 연직 단면에서 살펴본 결과에서, 낮시간 동안 지면 가열에 의한 연직속도의 상승으로 과대 모사된 혼합층의 고도를 자료동화를 통해 안정적으로 모사할 수 있

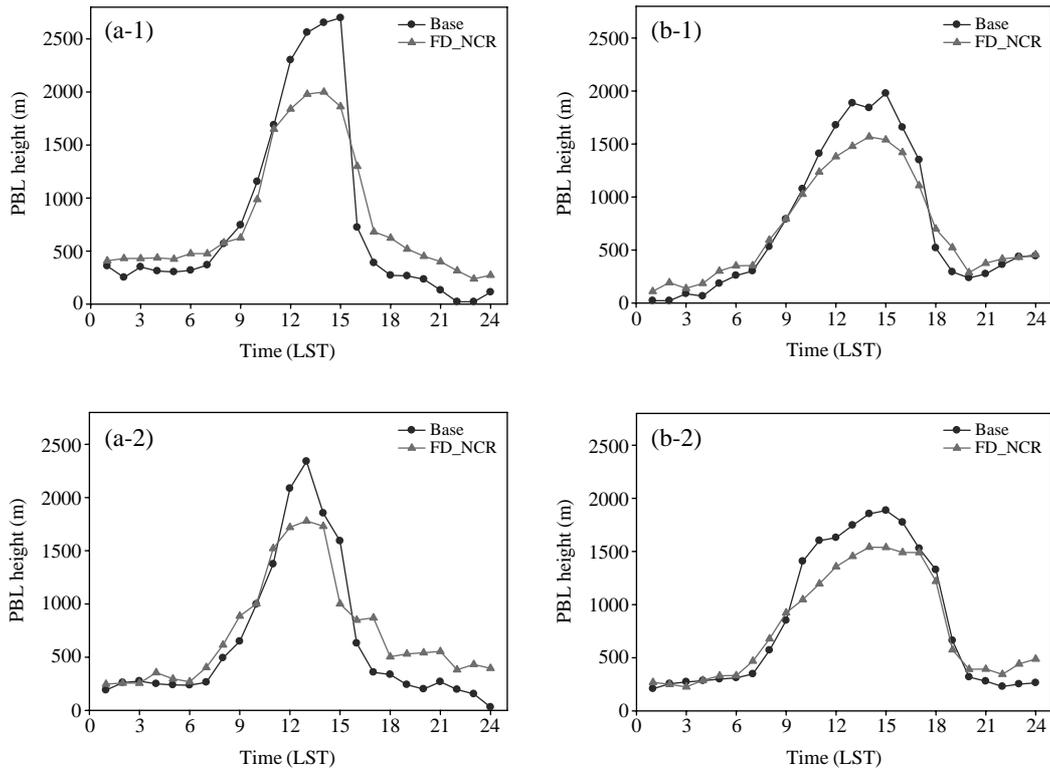


Fig. 8. (a) The diurnal variations of PBL height in Yeosu (1), Gwangyang (2) on a weak synoptic day. (b) The same as in Fig. 8(a) in case of on a strong synoptic day.

며, 야간에도 주간만큼 활발한 혼합작용이 존재하지는 않지만 비교적 활동적인 혼합작용이 잔재하고 있음을 수치모의를 통해 분석할 수 있었다. 종관이 강한 사례에 비해 약한 종관 사례일에서는 다소 높은 낮시간대의 PBL 고도를 나타내고 있었으며 야간의 난류혼합에 의한 확산가능성도 약한 종관 상태에서 다소 높게 나타날 수 있음을 확인 할 수 있었다. 따라서 수치모의를 통해 자료동화의 강도를 종관의 상태에 따라 검증하여 나타낸 결과는 이러한 연안지역 오염물질의 거동에 대한 해석에 유의한 정보를 제공하고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진개발사업 (CATER2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

Betchtold, P., J.P. Pinty, and P. Mascart (1991) A numerical investigation of the influence of large-scale winds on sea breeze/inland-breeze type circulations, *Journal of applied meteorology*, 30(2), 1268-1279.

Choi, H.J., H.W. Lee, K.H. Sung, and M.J. Kim (2009) The effect of atmospheric flow field according to the radius influence and nudging coefficient of the objective analysis on complex area, *Journal of the environmental Sciences*, 18(3), 271-281.

Choi, H.J., H.W. Lee, K.H. Sung, M.J. Kim, Y.K. Kim, and W.S. Jung (2009) The impact of nudging coefficient for the initialization on the atmospheric flow field and the photochemical ozone concentration of Seoul, Korea, *Atmospheric environment*, 43(27), 4124-4136.

Coulter, R.I. (1979) A comparison of three methods for measur-

- ing mixing-layer height, *Journal of American meteorological society*, 18, 1495-1499.
- Daul, G.A. and R.A. Pielke (1993) Vertical heat fluxes generated by mesoscale atmospheric flow induced by thermal inhomogeneities in PBL, *Journal of atmospheric sciences*, 50(6), 919-928.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer (1995) A Description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric research, 107.
- Kim, S.W., S.U. Park, and B.R. Lee (1997) Variations of SO₂, NO_x, CO and O₃ concentrations in association with synoptic meteorological conditions, *Asia-Pacific Journal of atmospheric sciences*, 33(2), 273-287.
- Kondo, H. and K. Gambo (1979) The effect of the mixing layer on the sea breeze circulation and the diffusion of pollutants associated with land-sea breezes, *Journal of meteorology society (Japan)*, 57(6), 369-575.
- Kondo, J., T. Kuwagata, and S. Haginoya (1989) Heat budget analysis of nocturnal cooling and daytime heating in a basin, *Journal of American meteorological society*, 46(19), 742-752.
- Lee, H.W., H.Y. Won, and H.J. Choi (2004) Numerical simulation of atmospheric flow fields using surface observational data in the complex coastal regions, *Journal of Korean society for atmospheric environment*, 20(5), 633-645.
- Lee, H.W., H.J. Choi, and K.Y. Lee (2005) Numerical interpolation on the simulation of air flow field and the effect of data quality control in complex terrain, *Journal of Korean society for atmospheric environment*, 21(1), 97-105.
- Lee, H.W., H.J. Choi, K.H. Sung, S.H. Lee, Y.K. Kim, and W.S. Jung (2008) The impact of topography and urban building parameterization on the photochemical ozone concentration of Seoul, Korea, *Atmospheric environment*, 42(18), 4232-4246.
- Mahrer, Y. and R.A. Pielke (1977) The effects of topography on sea and land breezes in a two-dimensional numerical model, *Monthly weather review*, 105, 1151-1162.
- Nieuwstadt, F.T.M. (1984) The turbulent structure of the stable, nocturnal boundary, *Journal of atmospheric science*, 41(11), 2202-2216.
- Reisner, J., R.J. Rasmussen, and R.T. Bruintjes (1998) Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, *Q. J. R., Journal of meteorology society*, 124B, 1071-1107.
- Smolarkiewicz, P.K. and G.A. Grell (1992) A class of monotone interpolation schemes. *Journal of computational physics*, 101, 431-440.
- Stauffer, D.R. and N.L. Seaman (1999) Multiscale-four dimensional data assimilation, *Journal of applied meteorology*, 33(14), 416-426.
- Stull, R.B. (1992) *An introduction to boundary layer meteorology*, Kluwer academic publisher, 666pp.
- Umeda, T. and P.T. Martien (2000) Evaluation of a data assimilation technique for a mesoscale meteorological model used for air quality modeling, *Journal of applied meteorology*, 41(2), 21-29.