대기 안정도와 지표면 온도가 미세규모 국지 흐름에 미치는 영향: 수문지역을 대상으로

박수진¹⁾ · 김도용²⁾ · 김재진^{1),*}

¹⁾부경대학교 환경대기과학과

²⁾부경대학교 BK21 지구환경시스템사업단

(접수: 2012년 9월 23일, 수정: 2012년 11월 16일, 게재확정일: 2012년 12월 5일)

Effects of Atmospheric Stability and Surface Temperature on Microscale Local Airflow in a Hydrological Suburban Area

Soo-Jin Park¹⁾, Do-Yong Kim²⁾, and Jae-Jin Kim^{1),*}

¹⁾Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²⁾BK21 Graduate School of Earth Environmental System, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

(Received: 23 September 2012, Revised: 16 November 2012, Accepted: 5 December 2012)

Abstract In this study, the effects of atmospheric stability and surface temperature on the microscale local airflow are investigated in a hydrological suburban area using a computational fluid dynamics (CFD) model. The model domain includes the river and industrial complex for analyzing the effect of water system and topography on local airflow. The surface boundary condition is constructed using a geographic information system (GIS) data in order to more accurately build topography and buildings. In the control experiment, it is shown that the topography and buildings mainly determine the microscale airflow (wind speed and wind direction). The sensitivity experiments of atmospheric stability (neutral, stable, and unstable conditions) represent the slight changes in wind speed with the increase in vertical temperature gradient. The differential heating of ground and water surfaces influences on the local meteorological factors such as air temperature, heat flow, and airflow. These results consequentially suggest that the meteorological impact assessment is accompanied by the changes of background land and atmospheric conditions. It is also demonstrated that the numerical experiments with very high spatial resolution can be useful for understanding microscale local meteorology.

Key words: Atmospheric stability, CFD model, microscale local airflow, surface temperature

1. 서 론

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸인 반도이며, 국토의 약 70%가 산악지역인 복잡한 지형적 특성을 갖고 있다. 또한, 하천 및 호수 등의 수계도 곳곳에 분포

해 있다. 이러한 복잡한 지형과 수계의 분포 때문에, 국지 기상 현상은 종관 규모의 대기 현상과는 달리, 지형적 요인, 지표면의 물리적 특성, 대기 안정도 등의 영향을 받아 지역에 따라 다양하게 나타난다. 대표적인 국지 기상 현상으로는 바다와 인접해 있는 연안 지역에서 바다와 육지의 열적 성질의 차이로 인하여 발달하는 해륙풍과 산악 및 그 주변 지역에서 지형의 영향으로 발달하는 산곡풍 등을 들 수 있다. 더욱이, 지속적인 경제·산업 발전으로 인한 무분별한 토지 개발과 도시화 등은 지형적 요인과 토지 이용도

*Corresponding Author: Jae-Jin Kim, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, 599-1, Daeyeon 3-Dong, Nam-Gu, Busan 608-737, Korea.

Phone : +82-51-629-6645, Fax : +82-51-629-6638

E-mail : jjkim@pknu.ac.kr

를 변화시켰고, 이는 도시 열섬 현상에 의한 열대야, 국지적 집중호우에 의한 하천의 범람과 산사태 등을 유발시키는 요소로 작용하였다. 따라서, 국지 순환 및 국지 기상 특성을 이해하고, 이로 인하여 발생하는 돌발적 국지 기상 재해로부터의 피해를 최소화 하기 위하여, 지속적인 감시와 진단이 필요하다. 특히 하천 유역 등 수계를 포함한 수문지역의 경우는 대기 중 수분 증가와 열적 요인 (수면과 지면의 열적 성질의 차이)으로 인한 국지 기상 현상이 나타나며, 항시 돌발적 재해에 노출되어 있기 때문에, 종합적이고 체계적인 관리와 적절한 실태 및 예보를 필요로 한다.

지금까지 국지 기상 현상을 이해하기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 신동빈과 이태영 (1989)은 2차원 중규모 수치 모델을 이용하여 우리나라 중부지방의 지형이 해륙풍 순환에 미치는 영향을 조사한 바 있으며, 이승우와 이동규 (1998)는 지표 및 지형 효과에 따른 수도권 지역 국지 규모 대기 순환의 특성을 파악하기 위하여 3차원 중규모 수치실험을 수행하였다. 조강표 등 (2006)은 풍동실험을 수행하여 3차원 산악지형에서의 풍속할증현상을 정량적으로 평가하였고, 장옥과 전해영 (2008)은 강릉지역의 강풍 발생에 관하여 통계적 분석 및 수치실험을 수행하였다. 또한, 대류 현상에 직접적인 영향을 주어 주변 지역의 국지 기상에 영향을 미칠 수 있는 대기 안정도에 대한 이해와 활용을 위하여, 잠재 증발 (Potential evaporation)이 대기 안정도에 미치는 영향 (Mahrt and Ek, 1984), Froude 수에 의해 결정되는 대기 안정도의 변화 (Zhang *et al.*, 1996), Monin-Obukhov 길이, 기온 정도, 풍속 등에 따른 대기 안정도 평가 (Mohan and Siddiqui, 1998) 등의 연구가 수행되어 왔으며, 이재규와 인소라 (2009)는 대기 안정도에 따라 역전층이 풍하측 강풍에 미치는 영향을 알아보기 위하여 영동지역을 대상으로 수치실험을 실시한 바 있다. 이러한 기존 연구들은 대부분 관측자료의 통계적 분석이나, 중규모 수치모델을 이용한 수 km 수평 해상도의 수치실험 방법을 이용하였다. 하지만, 국지 기상의 특성과 그 영향을 보다 상세히 평가하기 위해서는 미세규모의 흐름을 파악할 필요가 있다. 이를 위하여 최근에는 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델이 이용되고 있다. 이는 CFD 모델이 수십 m 수평 해상도의 고분해능 계산이 가능하며, 정확하고 세밀한 지형 정보를 입력하여 미세규모의 흐름을 상세히 해석할 수 있다는 장점이 있기 때문이다 (김재진과 백종진, 2005; 김재진, 2007; Baik *et al.*, 2009; 이영수와 김재진, 2011).

따라서, 이 연구에서는 국지 기상 영향에 관한 상세한 진단 및 예측을 위한 노력의 일환으로, 수계 (하천)가 존재하는 대구광역시 강정보 지역 일대를 대상

으로 CFD모델을 이용하여 초고해상도 미세규모 수치모의를 수행하고, 대기 안정도와 지표면 (수면·지면) 온도가 미세규모 국지 흐름패턴에 미치는 영향을 분석하여 국지 기상 영향의 정량적 평가를 위한 기틀을 마련하고자 한다. 이 논문은 총 4장으로 구성되며, 연구의 배경 및 필요성에 대하여는 상기의 제1장에서 이미 서술하였으며, 제2장에서는 연구방법으로써 이 연구에 사용된 CFD모델과 수치실험 설계에 대하여 서술한다. 제3장에서는 수치모의 결과를 분석하고 고찰한다. 마지막 장에서는 이 연구의 전반적인 요약 및 결론에 대하여 서술한다.

2. 연구방법

이 연구에서 사용한 CFD 모델은 김재진 (2007)이 사용한 것과 동일하다. 이 모델은 3차원 비정상, 비압축 대기 흐름계를 고려하고 코리올리 효과를 배제한다. 난류 모수화를 위하여 재규격화군이론에 근거한 RNG (renormalization group theory) $k-\epsilon$ 난류 종결 방법을 사용하였다 (Yakhot *et al.*, 1992). 이 방법은 비선형 변형률 (strain rate)을 설명하기 위해 난류 운동 에너지의 소멸률 방정식에 소실 항을 추가하고 다른 모델 상수값을 사용한다는 점에서 전통적인 $k-\epsilon$ 난류 종결 모형과 다르다. 또한, 유한 체적법 (finite volume method)과 엇갈림 격자계 (staggered grid system)를 사용하여 지배 방정식계의 수치해를 구한다. 이 모델은 벽면 경계 근처에서의 난류 경계층 효과를 잘 반영 하도록 벽면 함수 (wall function)를 사용하였다 (Versteeg and Malalasekera, 1995). 지배 방정식의 차분화는 Patankar (1980)가 제안한 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 이용한다. 이 알고리즘은 매 수치 적분 단계의 가정된 압력장 하에서 임시적인 수평 및 연직 성분 바람을 구한다. 그리고 바람장의 조정을 통하여 질량 보존 방정식을 만족시키는 데 필요한 압력 변화를 계산한다. 이와 같이 계산된 압력 변화량으로부터 수평 및 연직 성분 바람의 섭동량을 구하고 바람과 압력장을 계산한다. 이 CFD 모델에 대한 더 자세한 수치 과정은 김재진 (2007)에 제시되어 있다.

이 연구에서는 CFD 모델을 이용하여 대기 안정도와 지표면 (수면·지면) 온도가 미세규모 국지 흐름 패턴에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수계 (하천)가 존재하는 수문지역을 대상으로 하였다. 대상 지역은 대구광역시 강정보 지역 일대로써, 동서방향으로 2.5 km, 남북방향으로 2 km의 영역이다 (Fig. 1(a)). 이 지역은 낙동강과 금호강이 합류되기 전의 하천 유역으로 낙동강과 금호강의 동쪽에는 성서 공업 단지가 위치하고, 남서쪽에는 주로 경작지로 이루어진 호촌

Fig. 1. (a) The picture around Gangjungbo, Daegu and (b) three-dimensional numerical topography and buildings for the experimental domain.

리가 위치하고 있다. 따라서, 하천, 지형, 건물 등이 국지적 미세규모 흐름에 미치는 영향을 종합적으로 분석할 수 있는 지역이다. 초고해상도 미세규모 수치 모의를 위하여, 모델 격자 ($x \times y \times z$)는 $10 \times 10 \times 5$ m의 등격자계로 $250 \times 200 \times 26$ 개로 설정하였으며, 이에 부합하는 상세 지형자료는 지리정보시스템 (Geographical Information System, GIS) 자료를 사용하여 구축하였다. GIS 자료는 정확하고 상세한 지형 정보 취득이 용이하기 때문에, 최근 미세규모의 흐름을 보다 상세하게 해석하기 위한 수치 모델의 기초 입력 자료를 구축하는 데 사용되고 있다 (Baik *et al.*, 2009; 이영수와 김재진, 2011; 최희욱 등, 2012). 이 연구에서 사용한 GIS 자료의 수평 해상도는 1×1 m로써, 상기에서 설정한 모델 해상도보다 높기 때문에, GIS 자료의 해상도를 1/10로 축소하여 CFD 모델의 지표 경계 입력 자료로 사용하였다. 대상 지역의 건물 자료 구현 방법은 이주현 등 (2009)과 같은 방식으로 각각의 CFD 모델 격자에서 GIS 자료로부터 추출한 건물이 55%를 초과하는 경우를 수치 건물로 인식하도록 하였다. 이러한 과정을 통하여 구축된 연구 대상 지역의 3차원 수치 지형은 Fig. 1(b)와 같다.

바람 (U, V, W), 난류 운동 에너지 (k), 그리고 그 소멸률 (ε)에 대한 유입 경계 조건은 CFD 모델을 이용하여 상세 대기 흐름을 연구한 기존 연구들 (이주현 등, 2009; 이영수와 김재진, 2011)을 참조하여, Castro and Apsley (1997)의 연직 분포를 사용하였다. 이에 대한 개요는 다음과 같다.

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cos \theta \quad (1)$$

$$V(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \sin \theta \quad (2)$$

$$W(z) = 0 \quad (3)$$

$$k(z) = \frac{U_*^2}{c_\mu^{1/2}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{c_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa z} \quad (5)$$

여기서, $U_*, z_0, \delta, \kappa, \theta$ 는 각각 마찰 속도, 거칠기 길이 ($= 0.05$ m), 경계층 두께 ($= 1000$ m), von Karman 상수 ($= 0.4$), 풍향을 나타낸다. c_μ 는 난류 운동 에너지와 그 소멸률에 대한 유입 경계 조건의 계산에 사용되는 경험적 상수 ($= 0.0845$)이다 (Yakhot *et al.*, 1992). 따라서 모델 유입류의 풍속은 마찰속도 고정에 의한 경계조건을 부여하였으며, 풍향은 대상 지역의 수계가 동쪽에 위치한 성서 공업 단지에 미치는 영향을 분석하기 위하여 서풍 (270°)으로 설정하였다.

대기 안정도와 지표면 온도 변화에 따른 민감도 분석을 위한 수치 실험은 Table 1과 같이 설계하였다. 지표면의 열적 속성과 대기 안정도 등은 온도, 바람 구조, 난류장 등에 영향을 미치기 때문에, 현실적으로는 그 효과를 종합적으로 보는 것이 타당하다. 그러나

Table 1. Summary of experimental designs.

Experiments	Atmospheric stability	Surface heating	
		Water	Ground
CTRL	Neutral	-	-
EXP1	Stable (5°C km^{-1})	-	-
EXP2	Stable (10°C km^{-1})	-	-
EXP3	Unstable (-5°C km^{-1})	-	-
EXP4	Unstable ($-10^\circ\text{C km}^{-1}$)	-	-
EXP5	Neutral	15°C	50°C
EXP6	Neutral	20°C	50°C
EXP7	Neutral	30°C	50°C
EXP8	Neutral	-	50°C

이 연구에서는 각각의 요소가 미세규모 국지흐름에 미치는 영향에 대한 민감도를 조사하기 위하여, 다소 비현실적이라 할지라도 각각의 민감도 실험에서 컨트롤 대상 요소를 제외한 다른 조건들은 무시 또는 일정하다고 가정하여 실험을 하였다. 우선, 대기 안정도가 중립 상태이고 지표면 가열이 없는 경우를 기준 실험 (CTRL)으로 하였다. 대기 안정도에 대한 민감도 실험에서는 지표면 가열이 없는 경우에 대하여, 연직 기온 경도 (온위 경도: $\pm 5^{\circ}\text{C km}^{-1}$, $\pm 10^{\circ}\text{C km}^{-1}$)를 고려한 안정 대기 (EXP1, EXP2)와 불안정 대기 (EXP3, EXP4) 상태를 가정하였다. 지표면 온도 변화에 대한 민감도 실험에서는 중립 상태의 대기에서 수면과 지면을 차등 가열시켰다. 이 실험에서는 수면과 지면의 온도 차이에 의한 미세규모의 흐름장과 온도장의 변화를 보기 위하여, 지면 온도는 50°C 로 고정시키고 수면 온도를 15°C (EXP5), 20°C (EXP6), 30°C (EXP7)로 변화시켰다. 또한, 강물이 없는 경우 (EXP8)를 가정하였고, 이 경우에는 하천을 지면으로 간주하였다. 모델 수행은 지표면 가열 등의 민감도 실험 조건에 따른 모델결과와 평형상태 도달을 고려하여, 모든 경우에 대하여 시간 간격을 1초로 하여 총 3600초 동안 수치 적분하였다 (Kim and Baik, 2001, 2010).

3. 결과 및 고찰

3.1. 기준 실험

Table 1에서 보였듯이 기준 실험에서는 중립 대기에 대하여 지표면 가열이 없는 상태에서 서쪽으로부터 바람이 유입되었을 경우를 가정하고 수치모의를 수행했다. 이 기준 실험에서는 지표면 가열을 고려하지 않았기 때문에, 수면과 지면의 열적 성질의 차이에 의한 흐름 변화는 분석할 수 없으나, 대상 지역의 지형 및 건물에 의한 지표 바람의 미세규모 흐름 양상을 볼 수 있다. Fig. 2는 기준 실험에 의해 수치모의된 지표 (지면으로부터의 첫 번째 고도, $z = 2.5\text{ m}$) 바람의 공간 분포를 나타낸 것이다. 풍향은 전체적으로 유입류 (270° , 서풍)와 비슷한 풍향을 나타내지만, 낙동강과 금호강의 강변 부근에서는 강둑을 따라 경사면이 가파른 지형을 따르는 흐름이 나타난다. 낙동강의 왼쪽, 즉 대상 지역의 남서쪽에 위치한 호촌리로부터 낙동강 방향으로의 흐름은 경사면을 따라 북서풍 (315°)으로 변화하였지만, 수계 (낙동강과 금호강)를 지나면서 다시 서풍 (270°)으로 흐름이 회복되었다. 금호강 중류에서는 낙동강과 금호강 사이에 위치한 낮은 언덕을 돌아가는 흐름의 영향으로 언덕의 풍하측에서 서북서풍 (292.5°)의 지표 바람이 나타난다. 금호강에서 성서 공업 단지로의 흐름은 강둑을 따라 서북서풍 (292.5°)이 나타나고, 금호강의 하류에서 강

Fig. 2. Wind vector fields at $z = 2.5\text{ m}$ in the CTRL experiment. The inner box represents a built-up area of Seongseo industrial complex.

둑을 넘어 저지대로 진입하면서 북서풍 계열의 바람이 나타난다. 또한, 금호강 동쪽에 위치한 성서 공업 단지에서는 건물이 지형 장애물로 작용하여 유입류와 다른 복잡한 흐름이 발생함을 알 수 있다. 특히, Fig. 2에 붉은 선으로 표시된 상자 영역을 살펴보면, 비교적 높은 건물들이 있는 성서 공업 단지 우측 내부 지역에서 건물에 의하여 풍속이 약해지고 흐름이 분리되는 현상이 나타났다.

이러한 대상 지역의 흐름 양상을 지표 바람의 수평 및 연직 성분의 속도 분포로부터 살펴 보면, Fig. 3과 같다. 먼저, 대상 지역의 북서쪽 언덕에서 금호강으로의 흐름, 중앙부에서 나타나는 낙동강과 금호강 사이의 언덕을 지나 금호강으로 유입되는 흐름, 남서쪽에 위치한 호촌리로부터 낙동강 하류로의 흐름에서 수평 성분 속도가 감소하는 것을 알 수 있으며, 이 흐름은 강을 가로지르면서 점차 회복된다 (Fig. 3(a)). 이와 같은 수평 성분 속도의 감소는 지형에 영향으로써, 서쪽에서 동쪽으로의 흐름이 언덕이나 강둑을 지나면서 지형의 경사면을 타고 오르거나 넘어가게 되는데, 이 과정에서 연직 상승 및 하강 속도가 증가하기 때문이다 (Fig. 3(b)). 이러한 현상은 금호강 우측의 강둑 경사면을 따르는 흐름에서도 뚜렷이 나타난다. 또한, 대상 지역의 동쪽에 위치한 성서 공업 단지에서도 연직 속도가 증가 또는 감소하고, 이로 인해 수평 성분 속도가 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 건물들이 지형 장애물로 작용하며 지표 거칠기 (마찰)가 커지기 때문이다. 뿐만 아니라, 성서 공업 단지 내부에서는 주변보다 높은 건물들의 영향으로 흐름이 분리되고 풍향이 급변하여 편자 소용돌이 (horse-shoe vortex)가 형성되기 때문에 (김재진과 백종진, 2005), 수평 성분

Fig. 3. (a) Horizontal and (b) vertical wind speeds at $z = 2.5$ m in the CTRL experiment.

속도가 급격히 감소하고 심지어 음의 값을 보이기도 한다.

3.2. 대기 안정도 민감도 실험

대기 안정도 변화에 따른 민감도 실험에서는 안정 대기와 불안정 대기 상태에 대하여 수치모의를 수행하고, 중립 대기를 가정한 기준 실험과 비교·분석하였다. 안정 대기를 가정한 EXP1과 EXP2에서는 연직 기온 경도를 각각 $5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 와 $10^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 로 설정하였고, 불안정 대기를 가정한 EXP3과 EXP4에서는 연직 기온 경도를 각각 $-5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 와 $-10^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 로 설정하였다. 민감도 실험 결과, 대상 지역의 미세규모 흐름의 전반적인 양상은 기준 실험과 비교하여 거의 차이를 보이지 않았으며 (그림 생략), 심지어 건물의 영향으로 흐름의 변화가 크게 나타나는 성서 공업 단지에서도 대기 안정도 변화에 따른 지표 흐름 양상의 두드러진 차이는 나타나지 않았다 (Fig. 4).

풍속의 연직 분포에서도 마찬가지로 큰 변화는 보이지 않았으나 (Fig. 5의 왼쪽 그림), 고도별 풍속 구간을 확대하여 상세히 살펴본 결과, 대기 안정도 변

Fig. 4. Wind vector fields at $z = 2.5$ m in the built-up area of Seongseo industrial complex (indicated by the inner box in Fig. 2) in the CTRL, EXP1, EXP2, EXP3, and EXP4 cases.

Fig. 5. Vertical profiles of wind speed averaged over the built-up area of Seongseo industrial complex (indicated by the inner box in Fig. 2) in the CTRL, EXP1, EXP2, EXP3, and EXP4 cases.

화에 따른 풍속의 변화를 확인할 수 있었다 (Fig. 5의 오른쪽 그림). 먼저, 연직 기온 경도의 부호, 즉 안정(+)과 불안정(-) 대기 상태에 따른 풍속의 연직 변화량의 차이를 살펴보면, 대기 불안정도가 커질수록 그 변화량이 큰 것을 알 수 있다. 이는 대기 안정도에 따른 하층 대기의 난류규모와 바람시어의 변화에 따른 영향으로 사료된다.

다음으로, 중립 대기를 가정한 기준 실험과 비교한 풍속의 변화를 살펴보았다. 기준 실험과 비교하여, 안정 또는 불안정 상태의 대기를 가정한 실험에서 풍속이 감소하였고, 연직 기온 경도가 큰 경우 (EXP2, EXP4)에 그 변화량이 커졌다. 또한, 건물의 영향을 받아 복잡한 흐름 양상을 보이는 지표 부근보다 상층에서 좀더 뚜렷한 양상을 보였다. 이는 대기 상태가 중립에서 안정 또는 불안정으로 향할수록 연직 바람 속도의 증가에 따라 수평 바람 성분의 풍속이 약해지기 때문이라고 할 수 있다 (김용국과 이종범, 1992). 이 연구에서는 $\pm 5^\circ\text{C km}^{-1}$ 와 $\pm 10^\circ\text{C km}^{-1}$ 의 연직 기온 경도를 고려하여 민감도 실험을 수행하였고, 그 결과 풍속 변화의 미세한 차이 (0.1 m s^{-1} 미만)만을 확인할 수 있었다. 따라서 그 변화의 경향을 단정할 수는 없다. 그러나 연직 기온 경도가 커질수록 기온 경도의

부호에 따른 풍속의 연직 변화량의 차이와 연직 상승 또는 하강 속도의 증가에 따른 풍속의 변화도 더욱 뚜렷해질 것으로 사료된다 (Zhang *et al.*, 1996).

3.3. 지표면 온도 민감도 실험

지표면 온도 변화에 따른 미세규모 흐름의 양상과 속도 분포의 변화를 조사하기 위하여, 이 연구에서는 Table 1의 EXP5~EXP8과 같이 중립 대기 (초기조건)에 대하여 지면과 수면을 차등 가열하여 수치모의를 수행하였다. 우선, EXP5, EXP6, EXP7에서는 지면 온도를 50°C 로 고정시키고 수면 온도를 각각 15°C , 20°C , 30°C 로 설정하여, 지면과 수면의 온도 차이가 각각 35°C , 30°C , 20°C 가 되도록 하였다. 또한, EXP8은 강물이 없는 경우를 가정하여 하천이 위치한 지역을 지면과 동일한 가열 조건인 50°C 로 설정하였고, 이에 따라 하천과 주변 지역간의 지표면 온도 차이가 없는 경우에 대하여 수치모의를 수행하였다. Fig. 6은 지표면 온도 변화에 따른 지표 부근 (지면으로부터의 첫 번째 고도, $z = 2.5 \text{ m}$)에서의 바람 벡터와 연직 성분 속도의 공간 분포를 나타낸 것이다. 모든 실험에 대하여 흐름의 양상은 유입류 (서풍)의 영향을 받아 서풍 계열의 바람을 보였으며, 강둑, 언덕, 건물 등 지

Fig. 6. Horizontal wind vectors and vertical wind speed at $z = 2.5 \text{ m}$ in the (a) EXP5, (b) EXP6, (c) EXP7, and (d) EXP8 cases.

Fig. 7. Horizontal wind speed at $z = 2.5$ m in the (a) EXP5, (b) EXP6, (c) EXP7, and (d) EXP8 cases.

Fig. 8. Air temperature fields at $z = 2.5$ m in the (a) EXP5, (b) EXP6, (c) EXP7, and (d) EXP8 cases.

형에 의한 흐름 양상의 변화 및 연직 성분 속도의 증감은 전반적으로 Fig. 2와 Fig. 3(b)에서 보인 기준 실험의 경우와 유사하였다. 그러나 지표면 가열에 의하여 하천지역 및 성서 공업 단지에서의 연직 성분 속도의 변화가 나타났으며, 하천을 지나는 바람이 강변에 가까워지면서 흐름의 변화를 보였고, 성서 공업 단지 내부의 흐름의 분리 및 변화는 더욱 강화되었다. 또한, 하천의 폭이 넓은 금호강 유역에서는 수면 온도가 상승함에 따라 하천의 오른쪽에 위치한 강변 및 성서 공업 단지로 향하는 서풍 계열 흐름의 변화가 강화되었다. 이러한 흐름의 양상을 수평 성분 속도의 공간 분포로부터 살펴 보면 (Fig. 7), 지표면 가열로 인하여 Fig. 3(a)에 보인 기준 실험의 경우보다 전체적으로 수평 성분 속도가 증가하였고, 이는 수면 온도가 증가할수록 더욱 강화되었다. 성서 공업 단지에서는 도로 협곡을 따라 흐름이 집중되어 수평 성분 속도가 강하게 나타났고, 건물의 풍하측 지역에서는 기준 실험과 마찬가지로 편자 소용돌이가 형성되어 수평 성분 속도가 감소하거나 역풍이 부는 지역이 나타났다. 또한, 수면 온도 증가에 따른 흐름의 변화가 나타나는 금호강 유역에서는 수평 성분 속도의 증가가 뚜렷하게 나타났으며, 특히 강물이 없다고 가정하여 하천지역의 지표면 온도를 지면과 동일하게 50°C로 설정한 EXP8의 경우 (Fig. 7(d))에 수평 성분 속도가 가장 크게 나타났다.

지표 흐름은 지표면 온도, 하층 대기의 열적 효과, 열의 수송, 온도경도, 기압경도 등이 상호 복합적으로 작용하여 나타난다고 할 수 있다. 따라서 상기의 지표면 온도 변화에 따른 흐름 변화의 양상을 지표 부근 ($z=2.5$ m)에서의 기온의 공간 분포로부터 고찰하여 보았다 (Fig. 8). 호춘리 강변 및 낙동강과 금호강 사이의 언덕 등 풍하측 방향으로 아래로 경사진 지형에서는 경사 아래쪽의 하천지역보다 비교적 높은 기온이 나타나는데, 이는 유입류 (서풍)와 반대 방향으로 작용하는 운동량을 증가시켜, 결과적으로 Figs. 6과 7에 보인 바와 같이 그 지역의 수평 성분 속도의 감소 및 풍향의 변화를 초래한다. 그러나 하천지역과 오른쪽 풍하측에 위치한 성서 공업 단지 간의 전반적인 경향을 살펴보면, 수면 온도 증가에 따른 하천지역의 광범위한 기온 상승은 성서 공업 단지로 이루어진 열량을 증가시키고, 결과적으로 성서 공업 단지의 기온 상승을 가중시키는 현상이 나타났다. 이에 따라 대기 하층의 열적 불안정도가 커지면서 운동량 전달이 커지고, 결국 풍하측으로 흐르는 흐름이 강화 (Figs. 6, 7)된 것으로 사료된다. 따라서 수면 온도의 상승은 하천지역의 기온 상승과 열 수송량의 증가, 그리고 이로 인한 풍하측 지역의 기온 상승 등을 유발하여 수문지역의 미세규모 흐름에 영향을 미친다고 할 수 있다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 하천, 지형, 건물 등이 국지적 미세규모 흐름에 미치는 영향을 종합적으로 분석할 수 있는 대구광역시 강정보 지역 일대를 대상으로, 대기 안정도와 지표면 온도 변화가 미세규모 국지 흐름에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 방법으로는 CFD 모델을 사용하였으며, GIS 자료로부터 대상 지역에 대한 3차원 상세 지형 자료 (지표 경계 입력 자료)를 구축하고, 10 m 수평해상도의 초고해상도 미세규모 수치모의를 실시하였다. 모델 유입류는 대상 지역의 수계가 유입류의 풍하측에 위치한 성서 공업 단지에 미치는 영향을 분석하기 위하여 서풍으로 설정하였다. 이 연구에서는 중립 상태의 대기에서 지표면 가열이 없는 경우를 기준 실험으로 하고, 연직 기온 경도 ($\pm 5^{\circ}\text{C km}^{-1}$, $\pm 10^{\circ}\text{C km}^{-1}$)를 고려하여 안정 대기와 불안정 대기 상태를 가정한 대기 안정도에 대한 민감도 실험과 중립 상태의 대기에서 수면과 지면의 차등 가열 (강물이 없는 경우 포함)을 가정한 지표면 온도 변화에 따른 민감도 실험을 수행하였다. 수치모의 결과는 대상 지역의 지형적 특징을 고려하여, 하천 (낙동강과 금호강) 일대와 성서 공업 단지를 중점적으로 고찰하였다.

기준 실험의 경우, 풍향은 전체적으로 유입류 (서풍)와 비슷한 풍향이 나타났지만, 강둑과 성서 공업 단지에서는 지형 및 건물 영향에 의한 흐름이 나타났다. 호춘리에서 낙동강으로의 강둑을 지나면서 지형을 따르는 흐름의 변화가 나타났으나 하천을 지나면서 흐름이 점차 회복되고, 금호강에서 성서 공업 단지로의 강둑을 지나면서 다시 흐름의 변화가 나타났다. 또한, 성서 공업 단지에서는 건물에 의한 복잡한 흐름 패턴이 나타났다. 풍속의 경우, 강둑 등 경사 지형에서는 연직 속도의 증가로 인하여 수평 풍속이 약해지고, 성서 공단 내부에서는 건물에 의한 흐름 분리 현상과 풍속 감소 현상이 나타났다. 즉, CFD 모델은 전형적인 지형 및 건물에 의한 흐름의 양상을 잘 모의했다. 대기 안정도에 대한 민감도 실험의 경우, 대상 지역에서 전체적인 미세규모 흐름은 기준 실험과 비교하여 거의 차이가 나타나지 않았고, 미세규모 흐름 변화에 가장 큰 영향을 미치는 요인인 건물이 복잡하게 밀집되어 있는 성서 공업 단지에서도 차이가 거의 나타나지 않았다. 풍속의 연직 분포에서는 대기가 불안정할수록 고도에 따른 풍속 증가량이 컸다. 또한, 건물의 영향을 받는 성서 공업 단지에서는 안정 또는 불안정 대기 상태의 경우 중립 대기와 비교하여 풍속이 감소하였고, 연직 기온 경도가 증가할수록 그 변화량이 크게 나타났다. 그러나 그 변화가 0.1 m s^{-1} 미만으로 매우 미세하여, 변화의 경향을 단정할 수는 없었다. 지표면 온도 변화에 따른 민감도 실험의 경우,

풍향은 전체적으로 유입류의 영향을 받아 서풍 계열의 바람이 나타났고, 지형에 의한 흐름 양상은 표준 실험의 경우와 유사하게 나타났다. 그러나 수면 온도가 증가할수록 하천 및 성서 공업 단지에서 흐름의 변화가 나타났고, 하천의 오른쪽에 위치한 강변 및 성서 공업 단지로 향하는 흐름이 강화되었다. 이러한 지표면 온도 변화에 의한 국지 흐름의 변화는 지표면 온도 증가에 따른 기온 상승, 따뜻한 공기의 이류 등 대기 가열에 의한 열적 효과가 미세규모의 흐름에 영향을 미친 결과라고 할 수 있다.

결론적으로, 이 연구를 통하여 대기 안정도 및 지표면의 온도 변화가 대상 지역의 국지 기상에 직·간접적으로 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 하천 유역 등 수계를 포함한 수문지역의 경우는 수면과 지면의 열적 성질의 차이로 인하여 지표면의 온도 변화가 미세규모의 국지 기상에 영향을 미치기 때문에, 이에 따른 국지 기상 변화 양상을 지속적으로 감시하고 진단할 필요가 있음이 시사되었다. 또한, 국지 기상에 관한 상세 진단과 영향 평가를 수행하는데 있어서, 이 연구에서의 초고해상도 수치모델을 이용한 예측 기법은 매우 유용한 수단이 될 수 있으리라 기대된다. 하지만, 국지 기상에 대한 이해 및 정량적 평가를 향상 시키기 위해서는 토지 개발과 도시화 등에 의한 지표 특성의 변화를 고려한 다양한 영향 인자에 대한 민감도 분석이 필요하며, 체계적이고 연속적인 관측 자료의 확보와 이를 활용한 검증 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A2004806).

참고문헌

- 김용국, 이종범, 1992: 대기안정도와 지형조건에 따른 풍향 변동폭의 특성. *한국대기보전학회지*, **8**, 138-145.
- 김재진, 2007: 장애물 외관비가 주변 흐름에 미치는 영향. *대기*, **17**, 381-391.
- _____, 백종진, 2005: CFD 모형을 이용한 도시 지역 흐름 및 스칼라 분산 연구. *한국기상학회지*, **41**, 821-837.
- 신동빈, 이태영, 1989: 한반도 중부 지방에서의 해륙풍 순환에 미치는 지형의 영향. *한국기상학회지*, **25**, 56-69.
- 이승우, 이동규, 1998: 수도권 지역에서 지표 및 지형 효과에 따른 국지 규모 대기 순환의 수치실험. *한국기상학회지*, **34**, 1-19.
- 이영수, 김재진, 2011: 도시 지역에서 아파트 단지가 흐름과 확산에 미치는 영향. *대기*, **21**, 95-108.
- 이재규, 인소라, 2009: 역전층이 영동 지역의 활강풍에 미치는 영향에 관한 민감도 수치실험 연구. *대기*, **19**, 331-344.
- 이주현, 최재원, 김재진, 서용철, 2009: 도시 재개발이 도시 지역 상세 대기 흐름에 미치는 영향. *한국지리정보학회지*, **12**, 69-81.
- 장욱, 전해영, 2008: 봄철 강릉지역에서 발생하는 강풍에 대한 연구. *대기*, **18**, 207-224.
- 조강표, 홍성일, 조기성, 2006: 3차원 산악지형의 풍속할증 영향에 관한 연구. *한국풍공학학회지*, **10**, 241-251.
- 최희욱, 김도용, 김재진, 김기영, 우정현, 2012: CFD-WRF 접합 모델을 이용한 도시 지역 화재 시나리오별 확산 특성 연구. *대기*, **22**, 47-55.
- Baik, J.-J., S.-B. Park, and J.-J. Kim, 2009: Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **48**, 1667-1681.
- Castro, I. P. and D. D. Apsley, 1997: Flow and dispersion over topography: a comparison between numerical and laboratory data for two-dimensional flow. *Atmos. Environ.*, **31**, 893-850.
- Kim, J.-J. and J.-J. Baik, 2001: Urban street-canyon flows with bottom heating. *Atmos. Environ.*, **35**, 3395-3404.
- _____, and _____, 2010: Effects of street-bottom and building-roof heating on flow in three-dimensional street canyon. *Adv. Atmos. Sci.*, **27**, 513-527.
- Mahrt, L. and M. Ek, 1984: The influence of atmospheric stability on potential evaporation. *J. Climate Appl. Meteor.*, **23**, 222-234.
- Mohan, M. and T. A. Siddiqui, 1998: Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification. *Atmos. Environ.*, **32**, 3775-3781.
- Patankar, S. V., 1980: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill, New York, 197 pp.
- Versteeg, H. K. and W. Malalasekera, 1995: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Longman, Malaysia, 257 pp.
- Yakhot, V., S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, and C. G. Speziale, 1992: Development of turbulence models for shear flow by a double expansion technique. *Physics of Fluids*, **4**, 1510-1520.
- Zhang, Y. Q., S. P. Arya, and W. H. Snyder, 1996: A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building. *Atmos. Environ.*, **30**, 1327-1345.