CFD-WRF 접합 모델을 이용한 도시 지역 화재 시나리오별 확산 특성 연구

최희욱¹⁾ · 김도용²⁾ · 김재진^{1)*} · 김기영³⁾ · 우정현⁴⁾

¹⁾부경대학교 환경대기과학과

²⁾부경대학교 BK21 지구환경시스템사업단

³⁾주환경예측연구소

⁴⁾건국대학교 신기술융합학과

(접수: 2011년 11월 16일, 수정: 2012년 1월 13일, 게재확정일: 2012년 1월 25일)

Study on Dispersion Characteristics for Fire Scenarios in an Urban Area Using a CFD-WRF Coupled Model

Hee-Wook Choi¹⁾, Do-Yong Kim²⁾, Jae-Jin Kim^{1)*}, Ki-Young Kim³⁾, and Jung-Hun Woo⁴⁾

¹⁾Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University

²⁾BK21 Graduate School of Earth Environmental System, Pukyong National University

³⁾Environmental Prediction Research Inc.

⁴⁾Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University

(Received: 16 November 2011, Revised: 13 January 2012, Accepted: 25 January 2012)

Abstract The characteristics of flow and pollutant dispersion for fire scenarios in an urban area are numerically investigated. A computational fluid dynamics (CFD) model coupled to a mesoscale weather research and forecasting (WRF) model is used in this study. In order to more accurately represent the effect of topography and buildings, the geographic information system (GIS) data is used as an input data of the CFD model. Considering prevailing wind, firing time, and firing points, four fire scenarios are setup in April 2008 when fire events occurred most frequently in recent five years. It is shown that the building configuration mainly determines wind speed and direction in the urban area. The pollutant dispersion patterns are different for each fire scenario, because of the influence of the detailed flow. The pollutant concentration is high in the horse-shoe vortex and recirculation zones (caused by buildings) close to the fire point. It thus means that the potential damage areas are different for each fire scenario due to the different flow and dispersion patterns. These results suggest that the accurate understanding of the urban flow is important to assess the effect of the pollutant dispersion caused by fire in an urban area. The present study also demonstrates that CFD model can be useful for the assessment of urban environment.

Keywords: Fire scenario, CFD-WRF coupled model, flow and pollutant dispersion, urban area

1. 서 론

우리나라는 1970년대 이후로 오늘날에 이르기까지

급속한 경제산업의 성장을 이루어 왔다. 성장위주의 경제산업정책에 따른 안전의식의 미약, 생활환경의 변화, 소방대상물의 급격한 증가, 에너지 사용의 증가 등의 화재유발인자의 다양화는 국내 화재 건수의 급격한 증가의 원인으로 분석되고 있다 (김명배 등, 2009; 소방방재청, 2009). 우리나라의 화재발생 추이를 분석해 보면, 1980년대 중반까지 1만 건 이내에서 완만한 증가 추세를 보이던 국내 연간 화재발생 건수는 1994

*Corresponding Author: Jae-Jin Kim, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, 599-1, Daeyeon 3-Dong, Nam-Gu, 608-737, Busan, Korea.
Phone : +82-51-629-6645, Fax : +82-51-629-6638
E-mail: jjkim@pknu.ac.kr

년에 2만 건을 넘어섰고, 1998년에는 3만 건 시대에 접어들었으며, 최근에는 4만 건 이상으로 급격하게 증가하였다 (소방방재청, 2009). 또한, 지속적인 도시화로 인하여 도시 지역의 인구 및 건물밀도가 높아지면서, 주택아파트 등의 주거 지역을 비롯한 대도시의 화재발생이 증가하고 있으며, 이로 인한 인적물적 피해 역시 증가하고 있는 실정이다 (김명배 등, 2009). 화재에 의하여 배출되는 유독성 가스와 미세먼지 등은 시계약화 및 대기오염을 일으키며, 신체활동 장애에서부터 사망에 이르기까지 인체에 매우 유해하다 (박정은 등, 2005; 전홍균 등, 2007). 특히, 대형마트, 백화점, 아파트, 학교, 병원 등의 시설이 밀집되어 있는 도시 지역의 경우는 건물들이 상세 규모 (건물, 도시 규모 등)의 대기 흐름에 영향을 미치고 (김재진과 백종진, 2005; 이영수와 김재진, 2011), 이는 오염물질의 확산 속도 및 방향 변화, 심지어 역류 및 정체현상을 일으키기 때문에, 결과적으로 화재가 발생할 경우, 화재 발생지뿐만 아니라 주변 고층 건물단지도 막대한 피해를 입을 수 있다. 그러므로 날로 증가하고 있는 인구밀도가 높은 도시 지역에서의 화재와 그로 인한 대기오염에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 건물에 영향을 받는 도시 지역의 상세흐름과 오염물질의 확산특성을 파악할 필요가 있다.

이러한 도시 지역의 상세 규모 대기 흐름과 오염물질 확산 현상을 이해하기 위하여 지금까지 여러 가지 형태의 연구가 수행되어 왔다. 먼저, 실험적 방법으로는 야외 실험, 풍동 실험, 수조 실험 등이 있다 (DePaul and Sheih, 1985, 1986; Nakamura and Oke, 1988; Rotach, 1995; Meroney *et al.*, 1996; Baik *et al.*, 2000; Brown *et al.*, 2000; Uehara *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2003; Kim and Baik, 2005). 실험적 방법은 실제상황 및 그와 유사한 상황을 재현하여 상세 흐름과 확산의 자료를 취득함으로써 그 특징을 파악할 수 있다는 점에서 매우 실제적인 방법이지만, 많은 비용을 필요로 하고 다양한 조건으로의 적용 한계성을 가지고 있다 (김재진과 백종진, 2005). 이러한 한계를 극복하고 보다 경제적이면서 실용적인 방법으로는 수치 해석적 방법이 있다 (Lee and Park, 1994; Sini *et al.*, 1996; Baik and Kim, 1999; Kim and Baik, 1999, 2001; Liu and Barth, 2002; Baik *et al.*, 2003; Cheng and Hu, 2005). 수치 모델로는 주로 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델이 이용되고 있으며, 이는 CFD 모델이 기존의 기상 모델이나 대기확산 모델에 비해 고분해능의 계산이 가능하여 상세 규모의 흐름과 확산을 해석할 수 있다는 장점이 있기 때문이다 (김재진과 백종진, 2005; 이영수와 김재진, 2011; Baik *et al.*, 2003). 최근에는 지리정보시스템 (Geographical Information System, GIS) 자료로부터 정확하고 세밀

한 지형 정보 취득이 가능해지면서, GIS 자료를 수치 모델의 기초 입력 자료로 사용하여 도시 지역의 흐름 및 오염물질 확산을 보다 상세하고 정확하게 해석하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 (이영수와 김재진, 2011; Baik *et al.*, 2009). 또한, 계산기 성능의 향상과 컴퓨팅 자원의 증가, 그리고 중규모 기상 모델의 정확도 향상 등으로 인하여, 중규모 기상 모델과 CFD 모델의 결합이 가능해지면서, 중규모 모델로부터 실질적이고 연속적인 CFD 모델의 경계조건을 획득할 수 있게 되었다 (Cox *et al.*, 2000; Ehrhard *et al.*, 2000; Baik *et al.*, 2009).

이 연구에서는 도시 지역 화재 발생에 따른 피해를 최소화하기 위한 노력의 일환으로, 우리나라의 대표적인 대도시인 서울시의 도심지역을 대상으로, 가상의 화재 발생 시나리오에 의한 도심지역 내 오염물질의 확산 특성을 분석하고자 한다. 이를 위하여, GIS 자료를 이용하여 대상 지역의 3차원 상세 지형을 구축하고, 중규모 기상 모델과 CFD 모델의 결합 방법을 사용하여, 상세 규모 대기 흐름과 오염물질 확산을 수치모의 하였다. 수치모의 결과를 바탕으로, 건물에 영향을 받는 도시 지역의 상세 규모 대기 흐름을 분석하고, 또한 화재에 의하여 배출되는 오염물질이 대기 흐름에 따라 확산되는 패턴과 피해 예상 지역 등을 고찰하였다. 이 논문은 총 5장으로 구성되며, 연구의 배경 및 필요성에 대하여는 상기의 제1장에서 이미 서술하였으며, 제2장에서는 연구방법으로써 이 연구에 사용된 수치모델과 수치실험 설계에 대하여 서술한다. 제3장에서는 화재 시나리오를 설정하고, 제4장에서는 각 시나리오 별 수치모의 결과를 분석하고 고찰한다. 마지막 장에서는 이 연구의 전반적인 요약 및 결론, 그리고 향후 연구 방향에 대하여 서술한다.

2. 연구방법

2.1. 모델개요

이 연구에서 사용한 CFD 모델은 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식계에 기초한 모델로써, 3차원 비정수 (nonhydrostatic), 비회전 (nonrotating), 비압축 (incompressible) 대기 흐름계를 가정하며, 코리올리 효과를 배제한다. 난류 모수화를 위하여 재규격화군 (renormalization group, RNG) 이론에 기초한 $k-\epsilon$ 난류 종결 방법을 사용하였다 (Yakhot *et al.*, 1992). 지배 방정식계는 유한 체적법 (finite volume method) 과 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘 (Patankar, 1980)을 사용하여 엇갈림 격자계 (staggered grid system)에서 수치적으로 풀이된다. 또한, 벽면 경계 근처에서 벽면함수 (wall function)를 사용하여 벽면 경계 근처에서 나타

나는 난류 경계층 효과를 잘 반영하도록 하였다 (Versteeg and Malalasekera, 1995). CFD 모델의 보다 자세한 설명은 김재진 (2007)을 참고하라. CFD 모델의 경계 조건을 얻기 위하여 사용된 중규모 기상 모델은 WRF (Weather Research and Forecasting) v3.2.1로 NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 연구 및 현업용 모델이다 (<http://www.wrf-model.org>). WRF 모델의 시간적분은 Runge-Kutta 3rd order로 하였으며, 미세물리과정은 WSM 6-class graupel scheme (Hong and Lim, 2006)을 사용하였다. 또한 장 · 단파 복사는 각각 RRTM scheme (Mlawer *et al.*, 1997)과 Dudhia scheme (Dudhia, 1996)을 사용하였다. 지표면은 Monin-Obukhov (Janjic) scheme을 적용하였고, 지면과정에 대해서는 Unified Noah Land-Surface Model (Mitchell, 2005)을 사용하였다. 그리고, 경계층은 Mellor-Yamada Janjic TKE scheme (Janjic, 1994)을 사용하였으며, 적운 모수화에 대해서는 Kain-Fritsch Eta scheme (Kain and Fritsch, 1993)을 사용하였다.

2.2. 실험설계

WRF 모의 영역은 한반도를 중심으로 27, 9, 3, 1 km 수평해상도를 갖는 4개 영역으로 등지격자계를 구성하였고 (Fig. 1(a)), 각각 179×143 , 93×147 , 69×69 , 60×48 의 격자수를 갖는다. 연직 층은 27개의 층으로 구성하였다. WRF 모델의 초기 입력자료는 1° 간격의 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) FNL (Final) 재분석자료를 이용하였다. 이 연구에서는 WRF 모의 영역 중 4번째 영역인 수도권 영역 (Fig. 1(b)) 내의 X, Y 격자를 구하고, 각 격자점에서의 바람성분과 난류운동에너지 (Turbulence Kinetic Energy, TKE)를 수평 내삽한 후, CFD 모델의 시간에 따른 초기 조건 및 유입 경계 조건으로 사용하였다. WRF 모델의 연직층은 지형을 따르는 시그마 좌표계로 되어있으며, 이를 CFD 모델의 연직 격자고도로 변환시켜 주었다.

Fig. 1. Experimental domains for WRF (a and b) and CFD (c). Circle A, B, C, and D are the fire points. Dot represents

Fig. 2. Three-dimensional numerical topography and buildings of CFD domain shown in Fig. 1c.

이 때, 35 m 이상의 경우는 WRF 자료를 그대로 사용하고, CFD 연직층에 해당하는 35 m 미만의 경우는 wind profile power law의 지수를 계산하여, 각 시간 대별로 예측된 지수를 바탕으로 바람성분을 계산하였다. TKE는 선형 보간법을 사용하여 경계 자료를 구축하였다. 이 연구의 분석 대상 영역인 CFD 모의 영역은 수도권 영역의 중앙부에 위치한 대학, 병원, 백화점, 아파트 단지가 존재하는 전형적인 인구 밀집형 도심지역으로, 수치도면의 크기는 동서방향으로 1500 m, 남북방향으로 1500 m이며, 수평해상도는 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 로 설정하였다 (Fig. 1(c)). 지상으로부터 연직 고도 210 m까지는 7 m로 일정하게 설정하였고, 210 m부터 354.74 m까지는 1.1배로 증가하도록 설정하였다. 또한, 그 이상의 고도부터 모델 연직 높이인 851.98 m까지는 다시 19.97 m로 일정하게 증가하도록 설정하였다. CFD 모델에서 입력 자료로 사용하는 대상 지역의 지형자료는 하나의 수치 격자 내에 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 의 공간 해상도를 갖는 GIS 자료로부터 추출한 건물이 55% 이상을 차지할 경우, 수치 건물로 인식하도록 하여 구축하였다. 이러한 과정을 통하여 구축된 CFD 대상지역의 3차원 수치 지형은 Fig. 2와 같다. 대상 영역 중심부에 위치한 아파트 단지 등의 고층 건물들이 상세히 구현되어 있음을 알 수 있다.

2.3. 화재 시나리오 설정

소방방재청 국가화재정보센터의 화재통계에 따르면 (<http://www.nfds.go.kr>), 서울시의 최근 5년간 연평균 화재 발생 건수는 약 6000여건에 달한다. 그 중 2008년도 6731건으로 가장 많았으며, 월별 발생 추이를 분석해 보면 그 해 4월이 651건으로 가장 많은 화재가 발생하였다. 따라서, 이 연구에서는 2008년 4월 1일부터 10일까지의 대상 지역 내에 존재하는 AWS (Automatic Weather Station, Fig. 1c의 흑점 ●) 관측자료를 분석하여, 상이한 풍계를 보이는 4개의 날을 대상으로 하였다. 선택된 대상일은 5일, 8일, 9일, 10일이며, 주풍 (주된 풍향)은 각각 서풍, 남동풍,

Table 1. Summary of four fire scenarios in this study.

Fire scenario	Date	Fire time (LST)	Prevailing Wind (wind direction)	Fire point (shown in Fig. 1(c))
Scenario 1	05 April 2008	0700~1400	West	A
Scenario 2	08 April 2008	0500~1200	South-East	B
Scenario 3	09 April 2008	1100~1800	North-East	C
Scenario 4	10 April 2008	1400~2100	East	D

Fig. 3. Wind roses for (a) 5, (b) 8, (c) 9, and (d) 10 April 2008 from AWS observations in CFD domain.

북동풍, 동풍이었다 (Fig. 3). 참고로, 대상 지역은 건물 등의 지표면 거칠기에 따라 매우 복잡한 풍계를 보이는 도시지역이기 때문에, 주풍이 명확히 동, 서, 남, 북 방향인 날을 추출하기는 어려웠다. 화재 발생 시간은 각 대상일의 주풍이 부는 시간대를 대상으로 하였으며, 모두 7시간 동안 화재가 발생한 것으로 하여, 5일은 0700~1400 LST, 8일은 0500~1200 LST, 9일은 1100~1800 LST, 10일은 1400~2100 LST를 화재 발생 시간으로 가정하였다 (Fig. 4). 각 시간대별 평균 풍속은 다소 차이는 있으나 약 2~5 ms⁻¹로 오염물질의 확산이 이루어지기에 충분하다고 판단된다.

이 연구의 대상 지역의 중앙부는 백화점, 병원, 아파트 단지가 위치하고 있고, 특히 이 아파트 단지는 실버타운이다. 따라서, 이 지역은 몸이 불편한 환자 및 노인 분들이 많이 생활하고 있기 때문에, 화재 발생 시 대피에 어려움이 있으며 오염물질에 노출되었을 때의 영향이 클 것으로 예상되므로, 화재 발생에 따른 직간접적인 피해가 우려된다. 그러므로, 이 연구에서는 상기에서 지적한 병원 및 실버타운 등이 위치한 대상 지역의 중앙부를 화재 발생으로 배출되는 오염물질의 확산에 의한 피해 예상 지역으로 고려하여, 가상의 화재 발생 지점, A, B, C, D지점 (Fig. 1(c))을 설정하였다. A지점은 피해 예상 지역의 서쪽에 위치하

Fig. 4. Inflow wind direction and speed for (a) 5, (b) 8, (c) 9, and (d) 10 April 2008. Dash lines represent the fire time ranges for each scenario.

고 있어 서풍이 부는 날에 화재가 발생하면 피해가 클 것으로 예상되므로, 대상일 중 주풍이 서풍인 4월 5일의 경우에 대하여 화재 발생을 가정하였다. 같은 원리로 8일은 B지점, 9일은 C지점, 10일은 D지점의 화재 발생을 가정하였다. 상기의 설정 사항을 화재 발생 시나리오 별로 정리하면 Table 1과 같다. Scenario 1은 주풍이 서풍인 4월 5일 0700~1400 LST까지 A지점에서 화재가 발생하였을 경우, Scenario 2는 주풍이 남동풍인 4월 8일 0500~1200 LST까지 B지점에서 화재가 발생하였을 경우, Scenario 3은 주풍이 북동풍인 4월 9일 1100~1800 LST까지 C지점에서 화재가 발생하였을 경우, Scenario 4는 주풍이 동풍인 4월 10일 1400~2100 LST까지 D지점에서 화재가 발생하였을 경우를 가정한 시나리오이다. 또한, 이 연구에서는 화재에 의하여 발생하는 오염물질의 순수한 스칼라 확산 특성을 분석하기 위하여, 화학 반응을 고려하지 않은 미세 입자상 물질을 대상으로 화재 발생 시간 동안 초당 1000 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 배출을 가정하였다.

3. 결과 및 고찰

이 장에서는 Table 1의 각 시나리오에 대하여 수치 모의를 수행하고, 그 결과로써 대상 지역 내의 고층 건물이 주변 흐름에 미치는 영향을 포함한 도시 지역

Fig. 5. Wind vector fields (a and b) and pollutant concentration fields (c and d) at $z = 3.5$ m for Scenario 1.

상세 규모 대기 흐름과 화재에 의하여 배출되는 오염물질의 확산 특성을 분석한다. 특히, 앞 장에서 지적한 바와 같이 오염물질 확산에 의한 큰 피해가 예상되는 병원, 백화점, 아파트 단지 등을 중점적으로 고찰한다.

3.1. Scenario 1

먼저, Scenario 1의 경우, 화재 발생 3시간과 7시간 후의 상세 흐름장을 살펴 보면 (Fig. 5(a) and 5(b)), 전체적으로 서쪽에서 동쪽으로의 서풍계열의 흐름을 볼 수 있는데, 병원 건물과 아파트 단지 사이에서는 channeling 효과에 의해 풍속이 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 병원이 위치하고 있는 곳의 풍상측에서는 흐름이 분리되고, 말편자 소용돌이 (horse-shoe vortex)가 나타나 병원 건물을 감싸고 도는 흐름이 형성되었음을 확인할 수 있다. 또한, 백화점과 아파트 단지 주변에서는 더욱 복잡한 흐름이 형성되는데, 백화점 건물에 부딪힌 흐름은 말편자 소용돌이를 만들고, 아파트 단지 풍상측에서는 흐름이 분리되면서 역류 (reverse flow)가 생기고, 풍하측에서는 재순환 지역 (recirculation zone)이 형성되어 남풍계열의 흐름이 발생한다. 화재 발생을 가정한 A지점은 지하철역과 교차로가 위치하

는 곳으로 차량과 인구의 이동량이 많은 매우 번잡한 곳이며, 병원, 백화점, 아파트 단지에도 매우 인접한 곳이다. 이러한 A지점에서의 화재 발생에 의한 오염물질의 확산 양상은 Fig. 5(c) 및 5(d)와 같다. 전반적으로 오염물질은 서풍계열의 바람을 타고 화재 발생 지점에서부터 대학교가 위치한 동쪽 방향으로의 확산 양상을 보인다. 오염물질의 확산 경로에 위치한 병원 및 인접 지역은 병원 건물 주변에서 발생하는 말편자 소용돌이 때문에 높은 농도 값을 보여, 오염물질 확산으로 인한 큰 피해가 예상된다. 반면, 화재 발생 지점의 남쪽에 위치한 백화점과 아파트 단지는 흐름 분리 및 역류, 그리고 화재 발생 지점에서의 서풍계열의 바람 등으로 인하여, 오염물질의 남쪽으로 확산이 거의 이루어 지지 않아서, 그 영향이 작을 것으로 예상된다.

3.2. Scenario 2

Scenario 2의 경우의 유입류는 남동풍계열이며, 화재 발생 초반에는 풍속이 약하였으나, 1200 LST에는 약 5 m s^{-1} 의 강한 풍속을 보였다. 상세 흐름장 변화를 살펴 보면 (Fig. 6(a) and 6(b)), 남동쪽으로부터의 흐름은 아파트 건물들에 부딪혀 분리되고 역류하여,

Fig. 6. Wind vector fields (a and b) and pollutant concentration fields (c and d) at $z = 3.5$ m for Scenario 2.

아파트 단지 아래쪽으로 북풍계열의 흐름이 발생한 것을 알 수 있다. 마찬가지로 백화점 건물 주변에도 역류가 발생하고 말편자 소용돌이가 나타난다. 따라서, 유입류의 풍향이 남동풍임에도 불구하고 대상 지역의 남쪽에는 역류에 의한 북풍계열의 흐름의 영향으로 매우 복잡한 흐름을 형성하고 있다. 이러한 흐름의 영향으로 남쪽에 위치한 B지점에서의 화재 발생에 의한 오염물질은 화재 발생 초반에는 남동풍의 흐름을 타고 북서방향으로 확산되어 나가다가 아파트 단지 주변에서 높은 농도를 보이며, 더 이상 북상하지 못하고 서쪽으로 빠져나가는 것을 확인할 수 있다 (Fig. 6(c) and 6(d)). 또한, 풍속이 약한 화재 발생 중반까지는 아파트 건물들에 의한 역류의 풍속 역시 약하기 때문에 아파트 단지 및 인접지역에 오염물질이 정체되어 높은 농도를 보이거나 (Fig. 6(c)), 시간이 지남에 따라 풍속이 점점 강해지고, 역류 역시 강해지기 때문에 오염물질은 아파트 단지 쪽으로 들어오지 못하고 서쪽으로 확산되어 나가는 것을 알 수 있다 (Fig. 6(d)). 결과적으로, 이 경우에는 아파트 단지가 화재 발생에 의한 오염물질 확산으로 큰 피해를 입을 것으로 예상되고, 그 보다 북쪽에 위치한 병원은 거의 영향을 받지 않을 것으로 예상된다.

3.3. Scenario 3

유입류의 주풍이 북동풍인 Scenario 3은 화재 발생 시간 동안의 풍속이 $3.5\sim6.5\text{ m s}^{-1}$ 로 다른 시나리오들에 비하여 대체적으로 강한 경우로써, 대상 지역 내의 흐름 변화가 더욱 뚜렷하게 나타났다 (Fig. 7(a) and 7(b)). 북동쪽으로부터의 흐름은 병원 풍상측에서 분리되며 말편자 소용돌이가 생기고, 역류가 발생함을 알 수 있다. 또한, 아파트 단지에서는 고층 건물들의 영향으로 강한 역류가 나타났다. 화재 발생을 가정한 C지점은 대상 지역의 북동쪽의 대학교가 위치한 곳으로, 이 지점에서 화재 발생에 의한 오염물질은 북동풍계열의 바람을 타고 화재 발생 지점에서부터 대상 지역의 중앙부로 확산되는 양상을 보인다(Fig. 7(c) and 7(d)). 이로 인하여, 오염물질의 확산 경로에 위치한 병원, 백화점, 아파트 단지가 모두 확산으로 인한 영향을 받는데, C지점은 중앙부로부터 어느 정도 떨어진 곳에 위치해 있어, 다른 시나리오에 비하여 피해 예상 지역의 농도 값은 낮게 나타났다. 또한, 풍속이 강할 때에는 아파트 단지에서 발생하는 강한 역류 때문에, 오염물질이 아파트 단지 쪽으로 확산되지 못하고, 병원 건물을 돌아 나가는 흐름을 따라 확산되는 것을 알 수 있다 (Fig. 7(c)). 그러나 화재 발생 후반부의 풍속이 다소 약할 경우에는 아파트 단지 부근의 역류가 약해지면서 아파트 단지 쪽으로 확산되어 나가지만, 유입류가 원활하게 빠져나가면서 오

Fig. 6. Wind vector fields (a and b) and pollutant concentration fields (c and d) at $z = 3.5\text{ m}$ for Scenario 7

염물질의 농도는 그리 높지 않은 것을 볼 수 있다 (Fig. 7(d)). 따라서, 이 경우에는 대상 지역의 중앙부가 전체적으로 화재 발생에 의한 오염물질 확산에 영향을 받을 것으로 예상되나, 병원 건물 주변을 제외한 다른 지역의 피해는 그리 크지 않을 것으로 사료된다.

3.4. Scenario 4

마지막으로, Scenario 4의 경우는 다른 시나리오들에 비하여 대체적으로 풍속이 약하여 대상 지역 내의 흐름 변화가 뚜렷하지는 않지만, 전체적으로 동쪽에서 서쪽으로의 동풍계열의 흐름을 볼 수 있다 (Fig. 8(a) and 8(b)). 상세 흐름장 변화를 살펴 보면, 아파트 단지 동편, 병원, 백화점의 각 풍상측에서 말편자 소용돌이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 아파트 단지 동편 건물들의 풍상측에서는 역류가 나타나고, 풍하측에서는 재순환 지역이 생기는 것을 알 수 있다. 또한, 병원과 백화점의 풍상측에서는 약한 역류와 함께 정체점이 생기는 것을 볼 수 있으며, 백화점과 아파트 단지 서편 건물 사이 및 아파트 단지 중앙에서는 channeling 효과에 의해 풍속이 증가함을 알 수 있다. 화재 발생을 가정한 D지점은 주유소와 대형 마트가 위치하는 곳으로 화재 발생 시 유독가스의 배출 등이 우려되는 곳이다. 이러한 D지점에서의 화재 발생에 의한 오염

Fig. 8. Wind vector fields (a and b) and pollutant concentration fields (c and d) at $z = 3.5$ m for Scenario 4.

물질의 확산 양상은 Fig. 8(c) 및 8(d)와 같다. 전반적으로 오염물질은 동풍계열의 바람을 타고 화재 발생 지점에서부터 아파트가 위치한 서쪽 방향으로의 확산 양상을 보인다. 이에 따라, 아파트 동편 건물 풍상측에서 농도가 높게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 풍상측에서 생긴 말편자 소용돌이가 제대로 빠져나가지 못하기 때문이다. 백화점과 아파트 단지 서편 건물 주변에서는 다른 지역에 비해 농도가 낮은 것을 볼 수 있는데, 이것은 channeling 효과에 의한 풍속 증가가 농도를 빠르게 확산 시키는 역할을 하기 때문으로 사료된다. 또한, 아파트 단지 남서쪽의 북풍계열 바람과 풍속 감소는 오염물질이 서쪽으로 더 이상 확산되지 못하게 막고 있는 것으로 보인다. 따라서, 이 경우에는 오염물질의 확산 경로에 위치한 아파트 단지의 피해가 가장 클 것으로 예상되는 반면, 아파트 단지의 북쪽에 위치하는 병원의 경우는 병원 건물에 부딪힌 흐름이 남쪽으로부터의 확산을 막고 있기 때문에, 오염물질의 확산으로 인한 영향을 거의 받지 않을 것으로 예상된다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 서울시의 도심지역을 대상으로, 대

상 지역 내의 고층 건물이 주변 흐름에 미치는 영향을 포함한 도시 지역 상세 규모 대기 흐름과 가상의 화재 발생 시나리오에 의한 도심지역 내 오염물질의 확산 특성을 분석하였다. 연구 방법으로는 중규모 기상 모델 WRF와 CFD 모델의 결합 방법을 사용하였으며, 보다 상세한 지형 효과를 반영하기 위하여 고해상도 GIS 자료를 이용하여 대상 지역의 3차원 상세 지형을 구축하여 CFD 모델의 입력자료로 사용하였다. 최근 5년간 서울시의 화재 발생 건수가 가장 많았던 2008년 4월을 대상으로, 풍계 및 화재 발생 지점, 그리고 오염물질 확산에 의한 피해 예상 지역 등을 고려하여 4개의 화재 발생 시나리오를 설정하고, 수치모의를 수행하였다. 수치모의 결과는 백화점, 병원, 아파트 단지 (실버타운)가 위치하고 있어 화재로 인하여 발생하는 오염물질의 확산에 의한 피해가 클 것으로 예상되는 대상 지역의 중앙부를 중점적으로 고찰하였다.

4월 5일 0700~1400 LST까지 대상 지역 서편의 지하철역과 교차로가 위치해 있는 A지점에서의 화재를 가정한 Scenario 1의 경우는 전체적으로 서쪽에서 동쪽으로의 서풍계열의 흐름이 나타났으며, 화재 발생 지점의 인근 동쪽에 위치한 병원 건물에서는 말편자 소용돌이, 아파트 단지 풍상측에서는 역류 현상이 나타났다. 이러한 흐름의 영향으로 화재로 인한 오염물질의 확산 경로에 위치한 병원 및 인접 지역에서는 높은 농도 값을 보여, 오염물질 확산으로 인한 큰 피해가 예상되었으며, 화재 발생 지점의 남쪽에 위치한 백화점과 아파트 단지의 경우는 오염물질이 남쪽으로 거의 확산되지 않아서 그 영향이 작을 것으로 사료되었다. Scenario 2는 주풍이 남동풍인 4월 8일 0500~1200 LST까지 대상 지역의 남쪽에 위치한 B지점에서 화재 발생을 가정한 경우이다. 이 경우 남동쪽으로부터의 흐름은 아파트 건물들에 부딪혀 분리되고 역류하기 때문에, 화재 발생에 의한 오염물질은 아파트 단지 주변에서 높은 농도를 보였으며, 그 보다 북쪽에 위치한 병원은 거의 영향을 받지 않을 것으로 예측되었다. Scenario 3은 주풍이 북동풍인 4월 9일 1100~1800 LST까지 대상 지역 북동쪽의 대학교가 위치한 C지점에서의 화재 발생을 가정한 경우이다. 화재 발생에 의한 오염물질은 북동풍계열의 바람을 타고 화재 발생 지점에서부터 대상 지역의 중앙부로 확산되는 양상을 보여, 대상 지역의 중앙부가 전체적으로 화재 발생에 의한 오염물질 확산에 영향을 받을 것으로 예상되었으나, 아파트 단지 부근의 역류가 약할 경우는 오염물질이 원활하게 아파트 단지를 빠져나가므로, 병원 건물 주변을 제외한 다른 지역의 피해는 그리 크지 않을 것으로 사료된다. Scenario 4는 주풍이 동풍인 4월 10일 1400~2100 LST까지 대상 지역 동편

의 주유소와 대형 마트가 위치한 D지점에서 화재가 발생하였을 경우를 가정한 시나리오이다. 이 경우의 동풍계열의 흐름은 아파트 단지에 부딪혀 역류하고 재순환 지역이 발생하기 때문에, 오염물질의 확산 경로에 위치한 아파트 단지의 피해가 가장 클 것으로 예측되었으며, 반면 아파트 단지의 북쪽에 위치하는 병원의 경우는 오염물질의 확산으로 인한 영향을 거의 받지 않을 것으로 예측되었다.

결론적으로, 도심 지역의 상세 흐름장은 건물의 영향을 받아 매우 복잡한 양상을 보였으며, 유입류의 풍향에 따라 다양한 흐름 패턴을 보였다. 이러한 흐름의 영향으로 오염물질의 확산 경로 및 피해 예상 지역도 상이함을 확인할 수 있었다. 따라서, 도시 지역의 상세 대기 흐름을 파악하는 것은 화재를 비롯한 오염물질의 배출/확산에 의한 영향을 평가하고 피해 최소화를 위한 대비에 있어서 매우 중요한 부분이라고 할 수 있으며, 또한 이 연구에서 사용한 수치모의 기법은 이를 위한 유용한 수단이 될 수 있으리라 기대된다. 다음 연구에서는 화재 발생에 의한 인공 열원의 생성과 그에 따른 흐름장의 변화, 그리고 화학 반응을 포함한 가스상 오염물질의 확산 모의를 통하여, 보다 실용적이고 여러 목적에 활용될 수 있는 수치 실험을 수행 하고자 한다. 뿐만 아니라 이 연구는 가상의 화재 시나리오를 대상으로 수행한 연구이기 때문에, 향후 실제 화재 발생 사례에 대한 실측자료를 확보하고, 보다 현실성 있는 초기경계 조건을 적용한 수치모의를 수행하여 그 결과에 대한 상세한 검증 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(CATER 2007-3307)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김명배, 한용식, 최병일, 도규형, 2009: 공동주택 실물화재 실험. *한국화재소방학회 논문지*, **23**, 104-111.
- 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.
- 박정은, 이철규, 이한림, 정진상, 이권호, 김정은, 김영준, 2005: 중국 동부 지역 화재로 인한 광주의 대기질에 대한 영향. *대한환경공학회 2005 추계학술연구발표회 논문집*, 681-683.
- 소방방재청, 2009: 2009년도 화재통계연감. *소방방재청 국*

가화재정보센터 (<http://www.nfds.go.kr/>).

- 이영수, 김재진, 2011: 도시 지역에서 아파트 단지가 흐름과 확산에 미치는 영향. *대기*, **21**, 95-108.
- 전홍균, 최영상, 추홍록, 2007: 다세대주택의 화재안전평가에 대한 수치해석 연구-계단실 개구부의 개폐가 화재 특성에 미치는 영향. *한국화재소방학회 논문지*, **21**, 15-23.
- Baik, J.-J., and J.-J. Kim, 1999: A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 1576-1589.
- _____, R.-S. Park, H.-Y. Chun, and J.-J. Kim, 2000: A laboratory model of urban street-canyon flows. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 1592-1600.
- _____, J.-J. Kim, and H. J. S. Fernando, 2003: A CFD model for simulating urban flow and dispersion. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1636-1648.
- _____, 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.
- Brown, M. J., R. E. Lawson Jr., D. S. DeCroix, and R. L. Lee, 2000: Mean flow and turbulence measurements around a 2-D array of buildings in a wind tunnel. *11th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA*, Long Beach, CA, USA, 35-40.
- Cheng, X., and F. Hu, 2005: Numerical studies on flow fields around buildings in an urban street canyon and cross-road. *Adv. Atmos. Sci.*, **22**, 290-299.
- Cox, C. F., B. Z. Cybyk, J. P. Boris, Y. T. Fung, and S. W. Chang, 2000: Coupled microscale-mesoscale modeling of contaminant transport in urban environments. Preprints, *Third Symp. On the Urban Environment*, Davis, CA, Amer. Meteor. Soc., 8.2. [Available online at http://ams.confex.com/ams/AugDavis/techprogram/paper_15208.htm]
- DePaul, F. T., and C. M. Sheih, 1985: A tracer study of dispersion in an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, **19**, 555-559.
- _____, and _____, 1986: Measurements of wind velocities in a street canyon. *Atmos. Environ.*, **20**, 455-459.
- Dudhia, J., 1996: A multi-layer soil temperature model for MM5. *6th Annual PSU/NCAR Mesoscale Model (MM5) Users Workshop*, Penn. State Univ., Boulder, CO., USA.
- Ehrhard, J., I. A. Khatib, C. Winkler, R. Kunz, N. Moussiopoulos, and G. Ernst, 2000: The microscale

- model MIMO: Development and assessment. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **85**, 163-176.
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151.
- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927-945.
- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1993: *Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, The representation of cumulus convection in numerical models*. Edited by K. A. Emanuel and D. J. Raymond, Am. Meteorol. Soc., Boston, MA., USA, 246 pp.
- Kim, J.-J., and J.-J. Baik, 1999: A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 1249-1261.
- _____, and _____, 2001: Urban street-canyon flows with bottom heating. *Atmos. Environ.*, **35**, 3395-3404.
- _____, and _____, 2005: Physical experiments to investigate the effects of street bottom heating and inflow turbulence on urban street-canyon flow. *Adv. Atmos. Sci.*, **22**, 230-237.
- Lee, I. Y., and H. M. Park, 1994: Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons. *Atmos. Environ.*, **28**, 2343-2349.
- Liu, C.-H., and M. C. Barth, 2002: Large-eddy simulation of flow and scalar transport in a modeled street canyon. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 660-673.
- Liu, H. Z., B. Liang, F. R. Zhu, B. Y. Zhang, and J. G. Sang, 2003: A laboratory model for the flow in urban street canyons induced by bottom heating. *Adv. Atmos. Sci.*, **20**, 554-564.
- Meroney, R. N., M. Pavageau, S. Rafailidis, and M. Schatzmann, 1996: Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyon. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **62**, 37-56.
- Mitchell, K., 2005: The community Noah Land-Surface Model (LSM). [Available online at ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/mmb/gcp/ldas/noahls/ver_2.7.1]
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. *J. Geophys. Res.*, **102**(D14), 16663-16682.
- Nakamura, Y., and T. R. Oke, 1988: Wind, temperature, and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmos. Environ.*, **22**, 2691-2700.
- Patankar, S. V., 1980: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill, New York, 197 pp.
- Rotach, M. W., 1995: Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, **29**, 1473-1486.
- Sini, J.-F., S. Anquetin, and P. G. Mestayer, 1996: Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmos. Environ.*, **30**, 2659-2677.
- Uehara, K., S. Murakami, S. Oikawa, and S. Wakamatsu, 2000: Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. *Atmos. Environ.*, **34**, 1553-1562.
- 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.