

Research Paper

기상조건에 따른 도시내 위험물질 확산정보와 보행자환경 위험영향평가

김은령 · 이광진[†] · 이채연

한국의국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단

Dispersal of Hazardous Substance in a City Environment Based on Weather Conditions and Its Risk Assessment at the Pedestrian Level

Eun-Ryoung Kim · Gwang-Jin Lee[†] · Chaeyeon Yi

Weather Information Service Engine project, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Korea

요약 : 본 연구에서는 위험물질 누출 사고로 인한 영향을 예측하고 피해를 줄이기 위한 대응 방안으로 기상장(풍향·풍속)과 실제 도시 구조를 고려한 가상의 사고 시나리오를 구축하였다. 위험물질 확산에 대한 시나리오를 기반으로 서울시 강남 지역을 대상으로 보행자 환경에서의 위험특성을 분석하였다. 풍향과 풍속 조건에 따라 48개의 시나리오를 가정하였으며, 스칼라 물질의 확산 특성을 분석하기 위한 위험물질로써 불화수소를 가정하였다. CFD_NIMR_SNU 모델을 이용하여 모의한 기상장(풍향·풍속) 평가를 실시하여 모든 검증 지수가 유효한 범위 내에 나타남을 보였다. 보행자 고도에서 모의된 확산장 분석 결과, 도시의 인공적 구조에 의해 기상장의 조건에 따라 상세 흐름이 변화하며 위험물질이 확산되는 경향에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 유입류의 풍속이 가장 약한 조건의 경우, 하층에서 유입방향의 역방향으로 흐름이 형성되어 보행자 고도에서의 물질 이동경로가 변화함을 보였다. 본 연구에서는 도시 지역의 난류흐름 형성에 도시의 인공적 구조가 매우 중요한 영향을 미치는 것을 보였다. 본 연구에 사용된 기술은 향후 실제 위험물질을 취급하는 도시 내 산업단지에 확산모의 실험과 보행자 환경에서의 위험성 평가에 유용할 것으로 기대된다.

주요어 : CFD 모델, 보행자 환경, 위험물질 확산, 도시 지역, 위험영향평가

Abstract : In this paper, dispersion scenarios concerning various meteorological conditions and real urban structures were made to estimate the impacts of hazardous substance leakage accidents and to reduce damages. Based on the scenario of the hazardous substance dispersion, the characteristics of the risk in the pedestrian environment were analyzed in Gangnam, Seoul. The

First Author: Eun-Ryoung Kim, WISE project, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin-si, Gyeonggi-do 17035, South Korea, Tel: +82-70-4617-4649, E-mail: ryoung@hufs.ac.kr

Corresponding Author: Gwang-Jin Lee, WISE project, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin-si, Gyeonggi-do 17035, South Korea, Tel: +82-70-4617-6475, E-mail: gwangjin410@hufs.ac.kr

Co-Authors: Chaeyeon Yi, WISE project, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin-si, Gyeonggi-do 17035, South Korea, Tel: +82-70-4617-7384, E-mail: prpr.chaeyeon@gmail.com

Received: 7 March, 2017. Revised: 29 June, 2017. Accepted: 3 August, 2017.

scenarios are composed of 48 cases according to the meteorological conditions of wind direction and wind speed. In order to analyze the dispersion characteristics of the hazardous substances, simulations were conducted using a computational fluid dynamic (CFD) model with hydrogen fluoride releases. The validation for the simulated wind was conducted at a specific period, and all the calculated verification indices were within the valid range. As a result of simulated dispersion field at pedestrian level, it was found that the dispersion pattern was influenced by the flow, which was affected by the artificial obstacles. Also, in the case of the weakest wind speed of the inflow, the dispersion of the hazardous substance appeared in the direction of the windward side at the pedestrian level due to the reverse flow occurred at lower layers. Through this study, it can be seen that the artificial structures forming the city have a major impact on the flow formed in urban areas. The proposed approach can be used to simulate the dispersion of the hazardous substances and to assess the risk to pedestrians in the industrial complexes dealing with actual hazardous substances in the future.

Keywords : CFD model, Pedestrian environment, Hazardous substance's dispersion, Complex urban area

I. 서론

경제적 환경의 변화와 함께 삶의 질 향상을 추구하게 되면서 대기질에 대한 관심이 높아졌다. 그러나, 산업 발전과 더불어 국내 여러 지역에 조성되면서 대규모 화학 공단으로부터 유해물질 누출 사고가 잇따라 발생하여 유해화학물질 사고 및 안전에 대한 사회적 관심도 증가되었다(You & Chung 2014; Lee et al. 2015). 특히, 대도시 내 고층건물 밀집지역은 많은 인구가 집중적으로 활동하여 자연재해나 인위적 재난에 취약한 구조를 나타내기 때문에, 도시 지역에서 유해화학물질 사고 발생 시 대형사고로 이어질 가능성이 매우 높다. 가스누출, 화재, 폭발 등으로 발생하는 재산과 인명 피해는 큰 잠재 위험을 지니고 있지만, 예측되지 못한 사고 발생 시 실시간 관측이 어렵다. 이러한 배경으로 도시계획에 있어서 기상 요소 및 대기질의 평가에 관한 많은 연구가 수행되어 왔지만, 인간의 활동에 직접적인 영향을 미치는 영역인 보행자 높이에서의 평가는 미비한 실정이다(Joo et al. 2013; Koh et al. 2014).

실제 도시 지역을 대상으로 수행된 선행 연구를 살펴보면, Ko et al.(2015)은 LES를 이용한 전산해석을 수행하여 실제 불산 누출 사고에 대해 수치모델링을 수행하여 유해화학물질의 확산 위험성을 평가하였

으며, Pontiggia et al.(2011)은 전산유체역학 모델을 이용하여 LPG 가스 누출에 의한 확산에 대하여 도시의 인공적 요소의 영향을 모의한 바 있다. 또한, Lee et al.(2009), De melo et al.(2012)와 Tartakovsky et al.(2013)는 중규모 기상 모델 MM5 및 AERMOD와 CALPUFF를 사용하여 복잡한 지형에서의 입자상 물질에 대한 확산을 모의하고 확산 반경을 산출하였으며, 풍동 실험 및 관측값과 비교를 통해 검증하는 연구를 수행하였다. 그러나, 도시 이상의 규모를 대상으로 하는 모델은 건물과 같은 주요 인공구조물 등이 단순화되어 처리되는 것이 일반적이기 때문에 고해상도의 결과를 얻기 힘들며 보행자 환경에서의 위험물질 위험성을 상세히 평가하기 부적절하다. 건물과 같은 인공적 요소의 형태와 배치 유형은 다양하고 복잡한 흐름 패턴을 유발시키기 때문에 상세 규모의 대기 흐름 변화와 오염물질 확산에 중요한 영향을 미친다(Oke 1988; Jeong & Park 1999; Britter & Hanna 2003; Zhou et al. 2006). 또한, 도시화에 따른 인공 구조물들에 의해 지표면에서 가속화된 마찰은 국지적으로 풍속을 변화시켜 도시의 환기 능력에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 도시지역 위험물질 확산 특성을 분석하기 위해 상세규모의 흐름과 확산을 해석할 수 있

는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)모델을 사용하였고(Kim & Baik 2005; Hanna et al. 2006; Choi et al. 2012; Yang & Kim 2015) 중규모 모델과 연계하여 관측자료를 이용한 검증을 수행하였다. 인구밀집 지역인 서울 강남지역을 대상으로, 기상조건과 실제 도시 구조가 적용된 상세 바람장 및 확산장을 모의하여 보행자환경에서의 확산 거리 및 지속시간 특성을 분석하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 연구대상지역

유동 인구가 많은 우리나라 대표 도시 지역인 강남역을 중심으로 3 km × 3 km 수평 영역을 대상 지역으로 선정하였다(Figure 1). 도메인 내에는 검증에 사용될 자동기상관측기기(automatic weather station, AWS) 401 지점(위도 37.48889°, 경도 127.0155556°)과 시나리오 구축을 위한 기상 자료의 기반이 될 SK텔레콤 기지국 인프라에 기상관측 센서를 설치하여 구축한 고해상도 기상 관측망 중 10035 지점(위도 37.49356389°, 경도 127.0301556°)을 포함하며, 관측망 해발고도는 각각 35 m, 72.5 m 이다. 대상 지역은 북동쪽이 상대적으로 높으며 최고 96.47 m의 지형 위로 낮은 주거 및 상가 지역이 위

치한다. 강남역을 중심으로 동북동-서남서 방향과 북북서-남남동 방향으로 도로가 위치한다. 대상지역의 북서쪽은 높은 아파트 단지가 위치해 있으며 최고 202.9 m의 높은 건물들이 강남역을 중심으로 사거리를 따라 줄지어 위치하며 협곡을 형성한다. 본 연구에서는 대상 지역의 다양하고 복잡한 도시의 실제 지형과 건물 정보를 이용하여 확산 정보를 산출하기 위해, 모델의 지표 경계 입력자료로써 국토교통부의 국가공간정보포털(<http://www.nsic.go.kr>)에서 제공하는 도로명주소 전자지도를 이용하여 건물자료를 구축하였고(Kwon et al. 2015), 지형자료는 국토지리정보원 항공라이다 지형자료를 사용하였다(Yi et al. 2012). 대상 지역에 대한 shape file (.SHP) 형태의 GIS 자료로부터 ASCII (American Standard Code for Information Interchange) 형태의 3차원 상세 지형을 구축하였다. 수평 해상도는 10 m, 연직 해상도 5 m로 설정하였으며 x-, y-, z- 방향으로 각각 300, 300, 160개의 격자를 고려하였다.

2. 수치 모델

본 연구에서는 기상연구소와 서울대학교가 공동으로 개발한 전산유체역학 모델(CFD_NIMR_SNU)을 사용하였다. 본 연구에 사용된 CFD_NIMR_SNU 모델은 3차원, 비정수, 비회전, 비압축 대기 흐름계를

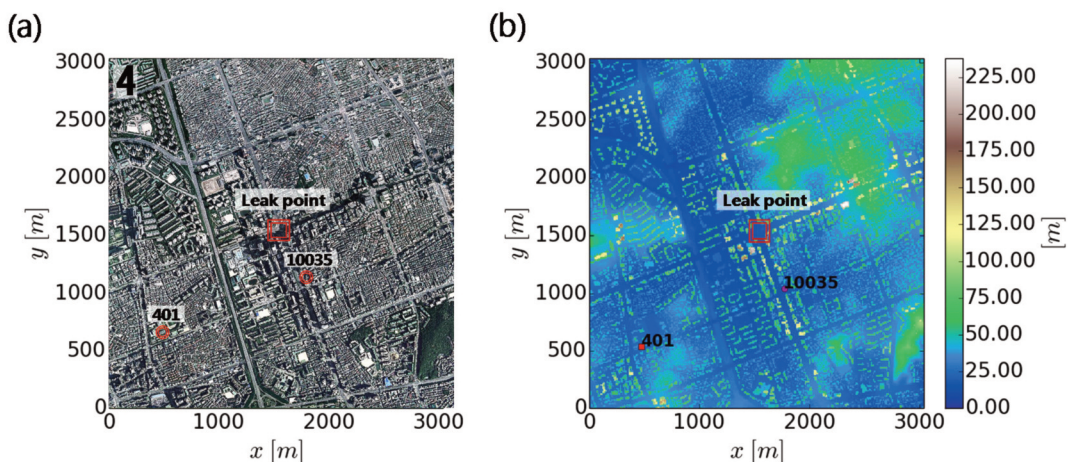


Figure 1. A picture of (a) target area and (b) topography around Gangnam station including KMA AWS 401 and SK Techx AWS 10035.

고려한 것으로 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식에 기초한 지배방정식 계를 가정한다. 지배방정식 계의 수치해는 유한체적법(Finite Volume Method)과 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) 알고리즘을 이용하여 엇갈림 격자계(staggered grid system)에서 수치적으로 풀이된다(Patankar 1980). 바람에 대한 유입 경계 조건은 대기 중립 상태를 가정하여 로그함수를 사용하였으며, 난류운동에너지와 소멸률에 대한 CFD_NIMR_SNU 모델의 유입 경계 조건은 다음 식 (1)~(5)와 같다(Castro & Apsley 1997).

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \cos \theta, \tag{1}$$

$$V(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \sin \theta, \tag{2}$$

$$W(z) = 0, \tag{3}$$

$$k(z) = \frac{u^{*2}}{C_\mu^{1/2}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^2, \tag{4}$$

$$\varepsilon(z) = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa z}, \tag{5}$$

여기서, u^* , z_0 , κ , δ , θ 는 각각 마찰 속도, 거칠기 길이(= 0.05 m), von Karman 상수(= 0.4), 경계층 길이(= 1000 m), 풍향을 나타낸다. C_μ 는 난류 운동 에너지와 소멸률에 대한 경험적 상수(= 0.0845)이다 (Yakhot et al. 1992).

3. 실험 설정

도메인 중앙에 가장 가까이 위치하는 SK Techx 10035 지점에서 2015년 1월 2일부터 2015년 12월 31일 까지 1년 간 풍향·풍속을 이용하여 Box-plot method 통계 분석을 실시하였다. 그 중 1사분위수 (1.1 m s⁻¹)와 3사분위수(2.8 m s⁻¹), 그리고 최대값 (5.3 m s⁻¹)에 가까운 정수를 산정하여 1 m s⁻¹부터 5 m s⁻¹까지 2 m s⁻¹간격으로 풍속을 설정하고 16방위의 풍향을 고려하여 총 48개의 시나리오를 생성하였다. SK Techx 10035 관측 기기 높이에서 각각의 시나리오에 해당하는 풍속을 이용하여 위에서 나타

낸 식(1)과 식(2)에 해당하는 마찰 속도(u^*)를 계산하였다.

본 연구에서는 가스 누출 사고 시 위험물질의 순수한 스칼라 특성을 분석하기 위해서 화학 반응을 고려하지 않은 입자상 물질로써 불화수소(Hydrogen Fluoride, HF)를 가정하였다. 보행자 고도에서의 위험 기준을 선정하기 위해 2012년 9월 발생한 구미지역 불산(Hydrofluoric Acid) 저장탱크 폭발 사고 당시 최고 14.7 ppm으로 추산되는 Gu et al. (2013)의 연구 결과에 따라 불화수소는 도메인 중앙인 강남역을 중심으로 총 9개의 격자에서 각 격자당 44 ppb s⁻¹의 방출률로 방출되도록 가정하였다(Figure 1). 불화수소 방출 시간은 총 3600초의 모의 시간 중 600초간 방출되도록 설정하였다. 불화수소의 위험 기준은 우리나라 노동부 산업안전보건법(제39조제2항 및 제42조, 시행규칙 제81조의2)의 화학물질 노출기준인 천정값 허용농도(최고 허용농도) 3 ppm으로 설정하였다. 보행자 고도는 최하층 연직 격자의 중앙 지점인 2.5 m로 설정하여 위험물질 확산 정보를 산출하였다.

4. 모델 성능평가를 위한 설정

시나리오 신뢰도 확보를 위해 CFD 모델 평가를 실시하였다. 대상 지역의 기상 특성을 반영한 CFD 모델의 경계 조건을 얻기 위해 NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서 개발되어 연구 및 현업용 모델로 사용되고 있는 중규모 기상 모델 WRF (Weather Research and Forecasting) Version 3.8을 사용하였다. 재분석 자료로는 1°×1°의 해상도를 가지는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) Final Analysis (FNL) 6시간 간격 재분석자료를 이용하였다. 모의 기간은 강수가 없고 풍향이 비교적 일정한 기상장을 고려하였으며, 검증에 사용될 관측 기기인 KMA AWS 401의 관측 자료가 연속적으로 존재하는 기간에 해당하는 2015년 3월 10일 0000 UTC부터 3월 12일 2300 UTC까지로 선정하였다. 대상지역의 TM (Transverse Mercator) 좌표를 이용하여 도메인 중앙을 중심으

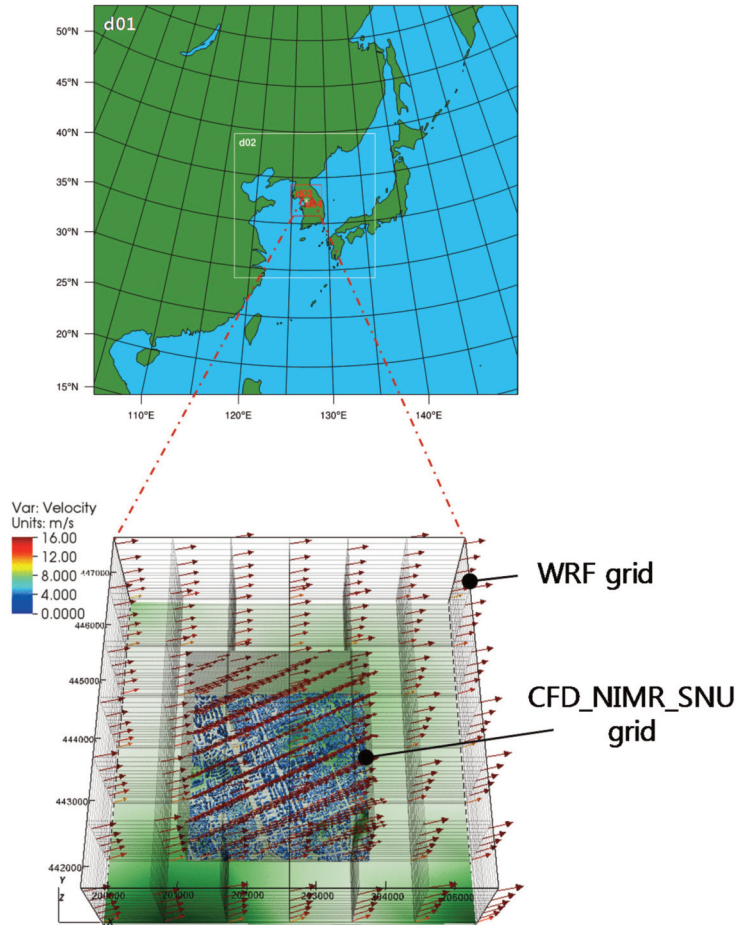


Figure 2. Schematic diagram of interpolation process for WRF and CFD_NIMR_SNU model grid.

로 고도별 풍속(U, V, W), 난류운동에너지(TKE) 성분을 WRF 결과 자료로부터 추출하였다(Figure 2). 추출한 성분은 CFD_NIMR_SNU 모델의 수평·연직 격자계만큼 조밀한 정보를 가지지 않기 때문에 선형 내삽과 Power law 외삽법을 실시하여 검증에 위한 CFD_NIMR_SNU 모델의 기초 입력 자료로 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. CFD 모델 바람장 평가

대상지역 내 위치한 KMA AWS 401 지점에서 풍향 및 풍속 평가를 실시하였다. WRF와 CFD_NIMR_SNU 모델을 이용하여 모의된 결과에서 스핀 업 시간

을 제외하고 시간에 따른 풍향·풍속 결과와 관측값을 KMA AWS 401 지점의 관측 높이(42.53 m)에서 나타냈다(Figure 3). 관측값은 매 정시의 10분 평균값을 사용하였다. 초기 경계장으로 사용된 WRF 풍속 결과는 2015년 3월 10일 늦은 밤부터 11일 오전까지 관측값과 비교적 가깝게 모의되었으며, 시간에 따른 풍속 변화 경향을 잘 보여준다. 그러나 풍속은 최고 12.68 m s^{-1} 로 과대모의 되었으며, 관측값과의 RMSE가 6.34 m s^{-1} 로 매우 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. CFD_NIMR_SNU 모델의 풍속 모의 결과, 3월 10일 오전에는 관측값에 비해 풍속이 다소 과소 모의된 경향은 있으나 이후 풍속 변화 경향을 잘 따르는 것을 알 수 있다. 전체적으로 마찰 효과로 인해 유입류의 풍속에 비해 현저히 감소되어 RMSE는

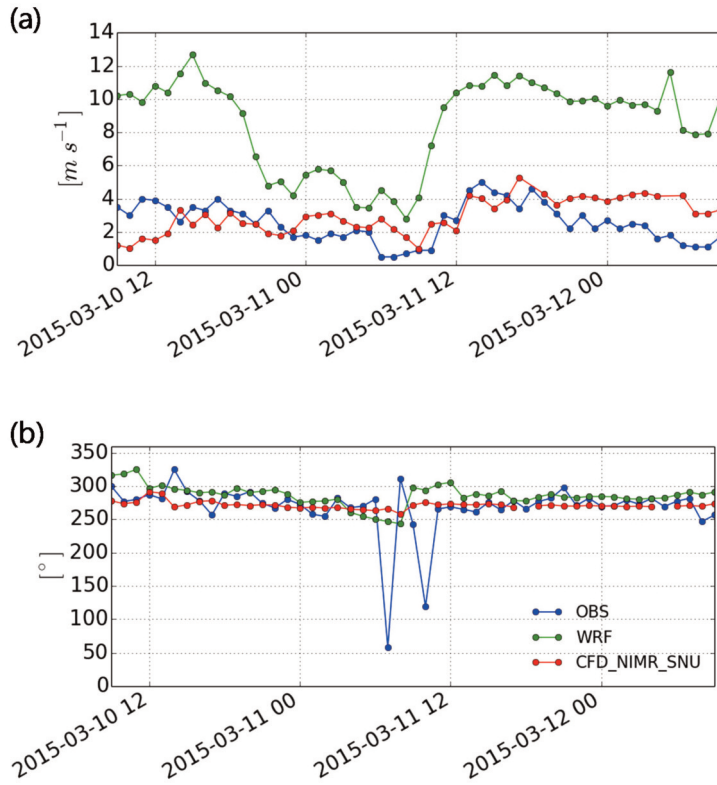


Figure 3. Time series of (a) wind speed and (b) wind direction for KMA AWS 401 observations, WRF and CFD_NIMR_SNU model simulation for 10 to 12 March 2015.

1.47 $m s^{-1}$ 로 나타나며 관측값과 가깝게 모의되었다. CFD_NIMR_SNU 모델 모의 결과, 풍향은 유입류와 마찬가지로 대상 기간 내 서풍이 지배적으로 나타났으며 관측값과 유사한 경향으로 모의되었다.

CFD_NIMR_SNU 모델의 풍속 모의 결과와 관측값을 이용하여 여러 검증 지수(index of agreement (IOA), root mean squared error (RMSE), normalized mean square error (NMSE), fractional bias (FB),

geometric mean bias (MG), fraction of predictions within a factor of two of observations (FAC2))를 통해 검증하였다. 모델 검증 유효 기준은 $NMSE < 4$, $-0.3 < FB < 0.3$, $0.7 < MG < 1.3$, $FAC2 > 0.5$ 로써 Hanna et al. (2004)에 자세히 정의되어 있다. 모의 결과, NMSE는 1.47, FB는 -0.15, MG는 1.23, FAC2는 0.72이며, 모의된 풍속으로부터 산출된 모든 검증 지수가 유효한 범위 내에서 나타났다(Table 1).

Table 1. The verification indexes calculated with observed wind speed and simulated wind speed using WRF model and CFD_NIMR_SNU model.

Performance measure	WRF	CFD_NIMR_SNU	Acceptance criteria
IOA	0.45	0.47	-
RMSE	6.34	1.47	-
NMSE	1.82	0.29	< 4
FB	-1.07	-0.15	$-0.3 < FB < 0.3$
MG	3.53	1.23	$0.7 < MG < 1.3$
FAC2	0.06	0.72	< 0.5

2. 기상 조건에 따른 확산장 분석

보행자에게 영향을 미치는 위험물질의 확산 정보를 알아보기 위해 불산 농도 위험 기준(3 ppm) 이상의 농도에 대하여 풍향·풍속 시나리오에 따라 분석하였다. 풍속 시나리오에 따른 평균 시간과 누출 위치로부터 최대로 확산되는 평균 수평 거리를 분석하였다(Figure 4). Figure 4a는 각 풍속 시나리오에 해당하는 모든 풍향에서 나타나는 위험물질의 최대 확산 거리를 평균하여 풍속 시나리오(세로축)에 따른 보행자 고도에서의 최대 확산 거리(가로축)를 나타낸다. 3 ppm 이상의 농도가 나타나는 평균 최대 확산 거리는 1 m s^{-1} 일 때 108.09 m, 3 m s^{-1} 일 때 97.39 m, 5 m s^{-1} 일 때 79.9 m로 나타났다. 풍속이 강하게 나타날수록 위험 기준 이상의 농도가 나타나는 확산 거리가 짧아지는 결과가 나타남을 알 수 있다. Figure 4b는 각 풍속 시나리오에 해당하는 모든 풍향에서 위험기준 이상의 농도가 나타나는 최장 시간에 대하여 평균하여 풍속 시나리오(세로축)에 따른 최대 확산 시간(가로축)을 나타내었다. 위험 농도가 나타나는 평균 시간은 1 m s^{-1} 일 때 약 48분(2887.5초), 3 m s^{-1}

s^{-1} 일 때 약 23분(1425초), 5 m s^{-1} 일 때 약 16분(1000초)으로 나타났다. 마찬가지로, 풍속이 강할수록 위험 기준 이상의 농도가 나타나는 평균 확산 시간이 짧아지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 대상 지역으로 유입되는 풍속이 강하게 유입될수록 강남역에서 누출된 위험물질을 빠르게 환기시킴을 나타낸다.

풍향 시나리오에 따른 보행자 고도에서의 위험물질 확산 특성을 분석하기 위해 보행자 고도에서 위험물질이 풍향에 따라 확산되는 최대 거리를 산출하였다(Figure 5). Figure 5a는 각각의 풍향·풍속 시나리오에 해당하는 위험물질의 최대 확산 거리를 나타내며, Figure 5b에는 각 풍향 시나리오에 해당하는 모든 풍속 시나리오에서 나타나는 위험물질의 최대 확산 거리를 평균하여 풍향(가로축)에 따른 최대 확산 거리(세로축)으로 나타내었다. 즉, 풍속 조건이 같을 때, 해당 지역에 유입되는 바람이 건물 및 지형구조에 의해 16방위 풍향에 따른 풍압, 마찰, 이동 영향을 나타낸다. 유입류의 풍속이 강할수록 대부분의 풍향 시나리오에서 최대 확산 거리가 감소하는 경향이 나

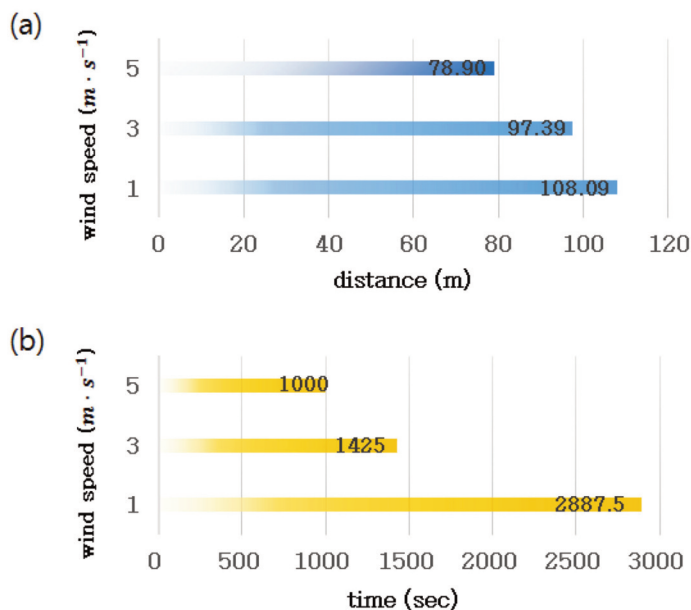


Figure 4. A diagram of (a) the maximum distance and (b) the maximum time of hazardous substance dispersion averaged over the scenarios of 16 cardinal directions at the pedestrian height with respect to the scenarios of different wind speeds.

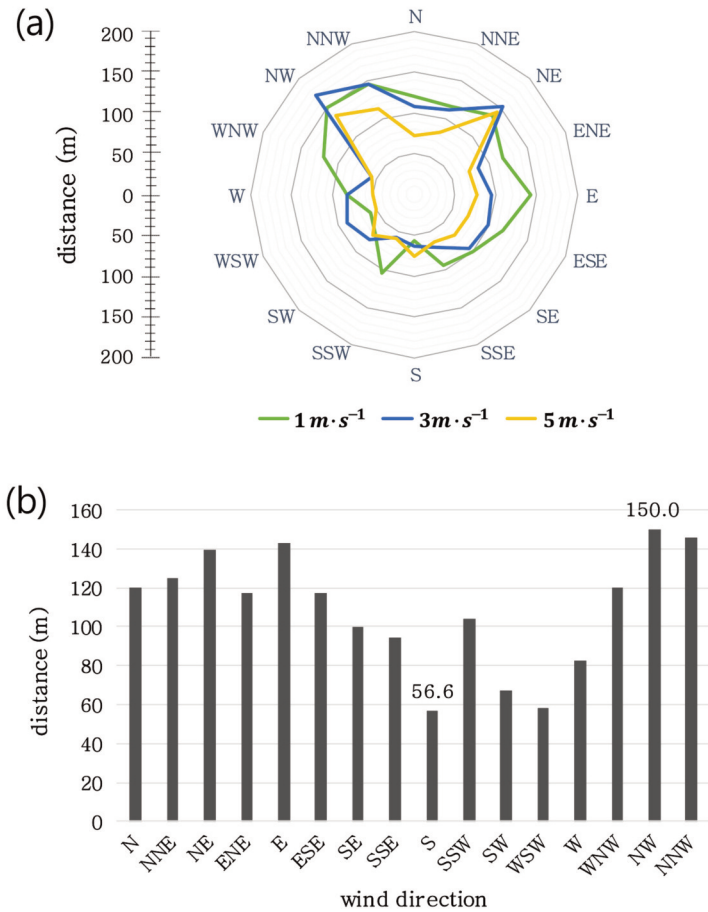


Figure 5. (a) The maximum distance of hazardous substance dispersion with respect to the scenarios of different wind speeds and 16 cardinal directions, and (b) the maximum distance averaged over the scenarios of different wind speeds with respect to the scenarios of 16 cardinal wind directions.

타났다. 북풍(N)과 동풍(E) 계열 유입류의 경우 가장 멀리까지 확산 되었으며, 북서풍(NW)의 경우 150 m로 확산 거리가 가장 길게 나타났다. 남풍 계열 유입류의 경우, 최대 확산 거리가 대체로 짧게 나타나며 남풍(S)이 유입류인 경우 최대 확산 거리가 56.6 m로 가장 짧다. 최대 확산 거리가 가장 먼 유입류가 북서풍인 경우와 가장 짧은 남풍인 경우에 대하여 다음장에서 자세히 분석하였다.

3. 북서풍과 남풍 조건 상세 분석

1) 풍속에 따른 보행자고도의 확산장

누출 지점으로부터 위험물질의 최대 확산 거리

가장 먼 유입류가 북서풍인 경우와 가장 짧은 남풍인 경우에 보행자 고도에서 풍속 시나리오에 따른 농도 분포를 나타냈다(Figure 6). 풍속이 가장 약한 1 m s⁻¹와 가장 강한 5 m s⁻¹의 풍속 시나리오에 대하여 나타내었으며, 전체 농도 분포가 잘 나타나도록 Log 단위를 사용하였다. 유입류의 풍속이 5 m s⁻¹ 일 때 북서풍인 경우, 풍하측(남동쪽)으로 확산되는 경향을 보이며, 위험물질은 누출 지점으로부터 최대 136 m까지 확산되며 확산 면적이 넓게 나타나는 것을 알 수 있다(Figure 6c). 또한, 강남역 부근을 둘러싼 높은 건물로 의해 형성된 협곡으로 인하여, 위험기준 이상의 물질은 건물 밀집지역 안으로 확산되지 못하고 강남역 중심으로 북북서, 동북동, 남남동 방향에

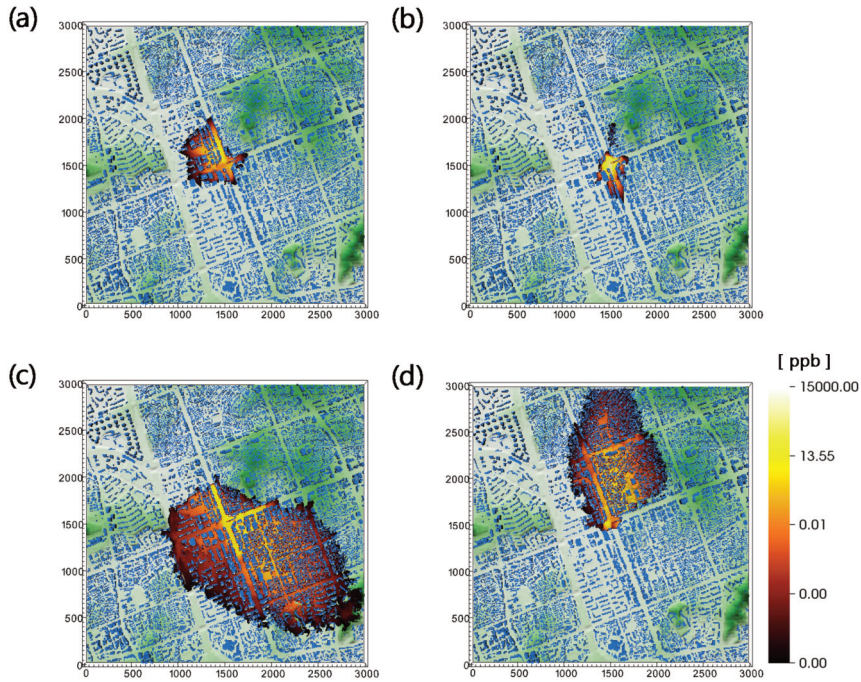


Figure 6. The distribution of hazardous substance concentration at the pedestrian height with respect to the scenarios of the northwest direction [left panel (a) and (c)] and the south directions [right panel (b) and (d)], and with respect to the scenario of 1 m s^{-1} [upper panel (a) and (b)] and 5 m s^{-1} [lower panel (c) and (d)].

서 높은 농도를 나타냈다. 유입류의 풍속이 5 m s^{-1} 일 때 남풍인 경우, 강남역에서 누출된 위험물질은 풍하측(북쪽)으로 확산되어 북북서 방향으로 위험물질이 분포하며 건물이 밀집된 영역에서 고농도의 위험물질이 나타났다(Figure 6d). 또한, 유입류가 북서풍인 경우와 다르게 확산이 단방향으로 진행되며 확산 면적이 비교적 좁게 나타났다. 위험물질이 도로변을 따라 나타나지 않으며 유입류가 남서풍인 경우에는 도로변을 따라 형성된 협곡은 확산에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나, 유입류의 풍속이 1 m s^{-1} 이며 북서풍인 경우, 위험물질은 오히려 누출 위치로부터 풍상측(북서쪽)으로 확산되는 경향이 나타났으며 전체적인 물질의 확산은 풍속이 5 m s^{-1} 일 때에 비해 좁은 영역에서 나타났다(Figure 6a). 그러나 위험 기준 이상 농도의 최대 확산 거리는 150 m로 풍속이 5 m s^{-1} 인 경우보다 먼 거리까지 나타났다. 유입류의 풍향이 남풍인 경우에도 마찬가지로 풍상측(남쪽)으로 확산이 나타났다

(Figure 6b). 위험물질은 유입류가 북서풍인 경우보다 더욱 좁은 영역으로 확산되어 누출된 지점으로부터 최고 56 m까지 위험 기준 이상의 농도가 나타나며, 누출 지점인 강남역 교차로 부근에서 정체되어 높은 농도를 나타낸다.

2) 건물캐노피와 보행자 고도의 확산장

유입류의 풍속이 가장 약한 1 m s^{-1} 의 경우, 풍상측 방향으로 나타나는 확산에 대해 자세히 분석하기 위해, 유입류의 풍속이 1 m s^{-1} 인 경우에 대하여 SK Techx 10035 지점의 관측 높이($z = 72.5 \text{ m}$)와 보행자 고도($z = 2.5 \text{ m}$)에서 수평 바람장을 $x-y$ 단면으로 나타냈다(Figure 7). 유입류가 북서풍인 경우, 상층에서는 유입류 방향인 북서풍 계열의 흐름이 지배적으로 나타나며 높은 건물들에 의해 흐름 분리가 발생한다. 또한, 건물의 풍하측(남동쪽)에서 무풍에 가깝게 풍속이 굉장히 낮게 나타나는 것을 알 수 있다(Figure 7a). 그러나 보행자 고도에서는 많은 건물들로 인해 발생한 마찰에 의해 대체적으로 상층보다 풍

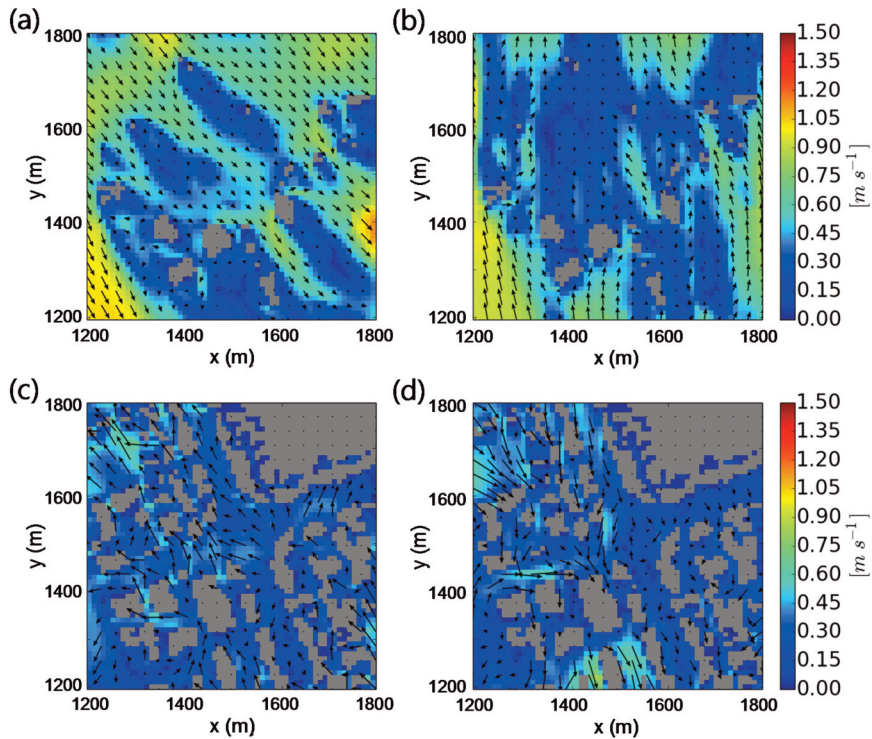


Figure 7. Wind vectors at the pedestrian with respect to the scenarios of the northwest direction [left panel (a) and (c)] and south direction [right panel (b) and (d)] at the observation height(72.5 m) [upper panel (a) and (b)] and the pedestrian height(5 m) [lower panel (c) and (d)] for the 1 m s^{-1} wind speed scenario.

속이 낮게 분포하며, 상층의 흐름과 반대로 유입류(북서풍)의 역방향인 남동풍 계열 바람이 나타나는 것을 볼 수 있다(Figure 7c). 강남역 부근의 교차로로부터 북북서-남남동 방향 도로를 따라 남동풍이 나타났다. 유입류가 남풍인 경우도 마찬가지로 상층에서는 유입류와 같은 남풍 계열의 흐름이 나타나며, 건물의 풍하측(북쪽)에서 매우 낮은 풍속 분포가 나타났다(Figure 7b). 하층에서는 유입류(남풍)의 역방향인 북풍 계열 바람이 지배적으로 나타나는 것을 확인하였다(Figure 7d). 강남역 교차로 부근에서 북북서-남남동 방향의 협곡을 따라 주로 북풍 또는 북서풍 계열의 흐름이 형성되며 상대적으로 낮은 건물이 위치하는 북서 방향에서 풍속이 강하게 나타났다.

3) 동서 및 남북방향 연직분포

다음으로 위험물질이 누출되는 위치인 강남역 교차로 부근을 중심으로 x-z와 y-z 연직 단면을 통해

흐름에 따른 확산을 살펴보았다. 유입류가 북서풍인 경우, 풍속이 가장 약한 1 m s^{-1} 와 가장 강한 5 m s^{-1} 의 풍속 시나리오에 대하여 x-z와 y-z 단면에서 연직 유선 분포와 확산 분포를 나타냈다(Figure 8). 전체 농도 분포를 잘 나타내기 위해서 Log 단위를 사용하였다. 유입류의 풍속이 1 m s^{-1} 인 경우에 x-z 단면을 살펴보면, 높은 건물 ㉠에 의해 하강하는 흐름이 형성되며 강남역 교차로 부근에서 풍하측(동쪽)으로 치우친 시계방향 소용돌이를 형성하게 된다. 건물 ㉠의 풍상측(서쪽)에서 발생한 소용돌이는 지표 부근에서 누출되는 위험물질을 건물 높이까지 상승시켜 풍상측(서쪽)과 풍하측(동쪽)으로 나누어 수송하기 때문에 보행자 고도에서 보다 건물 꼭대기 높이에서 높은 농도를 나타내는 것을 알 수 있다(Figure 8a). 유입류의 풍속이 1 m s^{-1} 인 경우에 도메인 중앙인 강남역 교차로 중심으로 y-z 단면을 살펴보면, 건물 ㉡와 ㉢에 의해 형성된 협곡 내 상층에서 반시계 방향

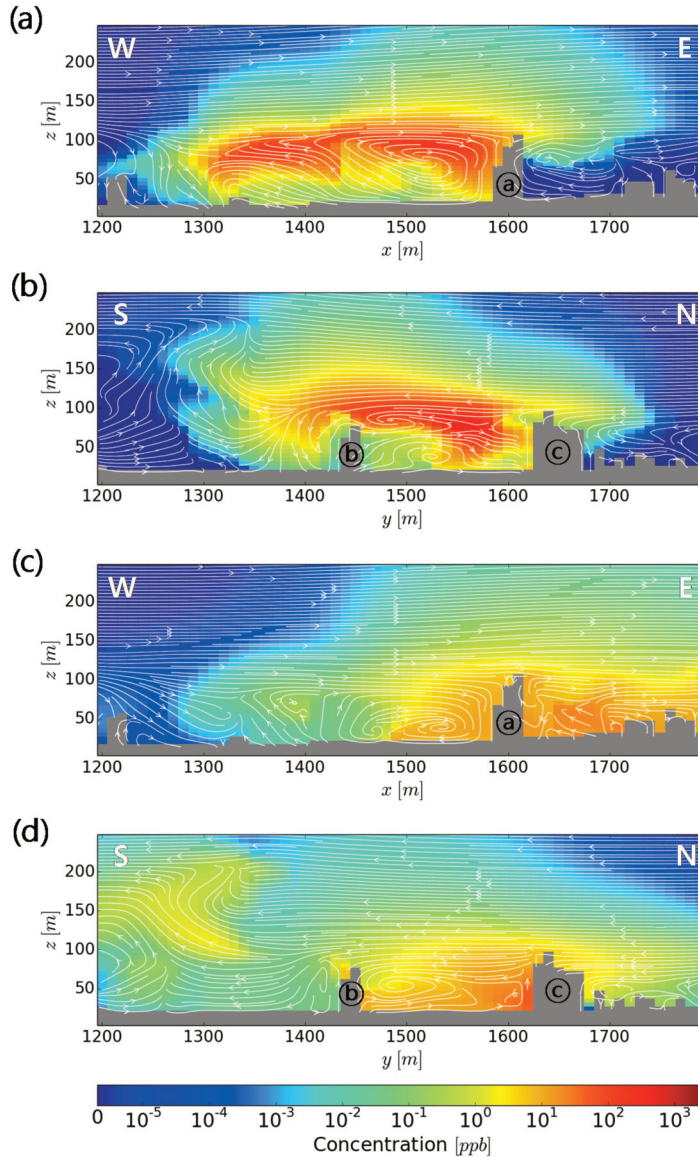


Figure 8. Vertical stream line and distribution with respect to the scenarios of northwest direction for the 1 m s^{-1} wind speed scenario [upper panel (a) and (b)] and the 5 m s^{-1} wind speed scenario [lower panel (c) and (d)] at the center of Gangnam station.

1차 소용돌이가 형성되며, 하층에서는 시계 방향의 2차 소용돌이가 형성되었다(Figure 8b). 누출된 위험물질은 이중 소용돌이를 따라 상층으로 이동하여 건물 꼭대기 높이에서 높은 농도를 나타낸다.

유입류의 풍속이 5 m s^{-1} 인 경우에 x - z 단면을 살펴보면, 건물 ㉠에 의해 하강한 흐름이 건물 ㉠의 풍상측(서쪽)에서 중심이 두 개인 시계방향 소용돌이를

형성하는 것을 볼 수 있지만, 협곡 중앙에서 상승한 위험물질은 강한 풍속으로 인해 유입류 방향으로 확산되어 위험물질이 누출되는 강남역 교차로의 동쪽에 위치한 건물이 밀집된 영역에서 높은 농도가 나타났다(Figure 8c). y - z 단면에서는 건물 ㉡와 ㉢에 의해 형성된 협곡 내로 유입된 흐름이 반시계 방향 소용돌이를 형성하며, 하층에서 풍상측(북쪽) 방향의

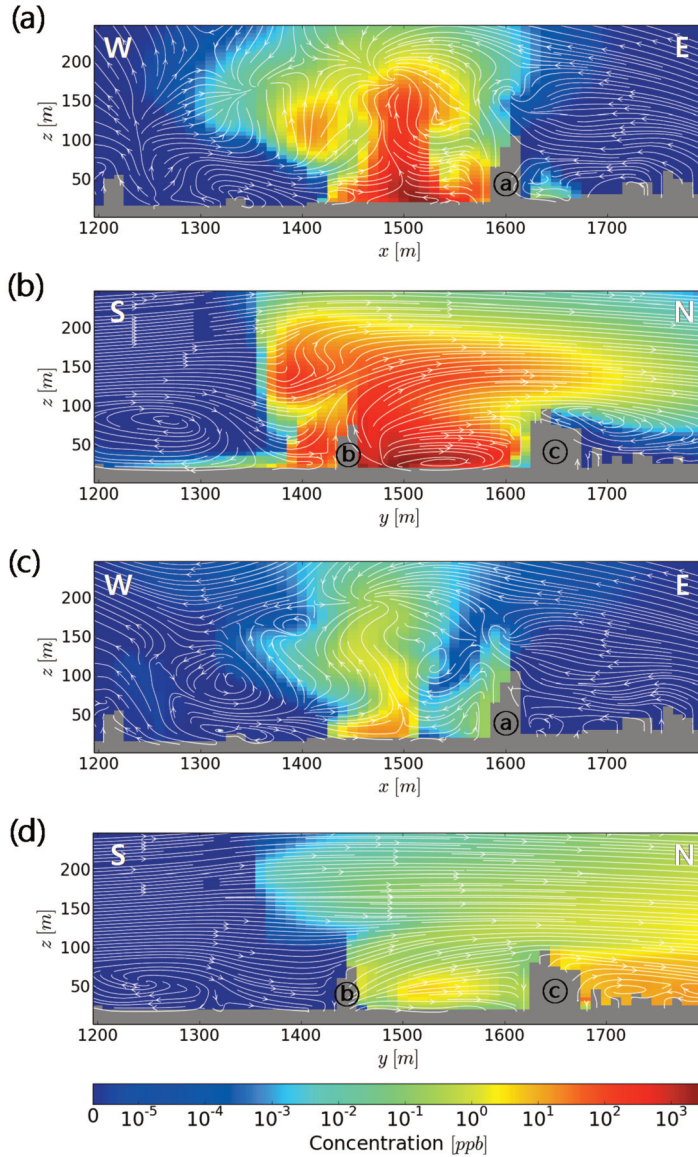


Figure 9. The same as in Figure 8 except with respect to the scenarios of south direction.

흐름이 형성되는 것을 볼 수 있다(Figure 8d). 위험물질은 이러한 흐름을 따라 풍상측(북쪽)으로 이동하며 건물 ㉓에 의해 하층에 갇혀 나타나는 것을 알 수 있다.

최대 확산 거리가 가장 짧게 나타나는 유입류가 남풍인 경우에 풍속이 가장 약한 1 m s^{-1} 와 가장 강한 5 m s^{-1} 풍속 시나리오에 대하여 강남역 교차로 부근 x-z와 y-z 단면에서 연직 유선 분포와 확산 분포를 나타냈다(Figure 9). 유입류의 풍속이 1 m s^{-1} 인 경

우에 x-z 단면을 먼저 살펴보면, 유입류가 강남역 중앙 부근에 위치한 높은 건물 ㉓에 의해 소용돌이가 형성되기 보다는 연직 성분에 의한 흐름이 복잡하게 나타나는 것을 알 수 있다(Figure 9a). 위험물질의 수평 확산보다 연직 확산이 나타나기 때문에 누출 위치 부근에서 위험물질의 농도가 높게 나타나며 건물 높이 이상의 상층까지 높은 농도가 나타났다. 이러한 연직 확산은 y-z 단면에서 확인할 수 있다. 건물 ㉓와 ㉔사이 협곡에서 하나의 시계 방향의 소용돌이가

형성되며, 건물 ⑥의 풍하측(북쪽)에서 상승기류가 나타난다. 지면 부근에서 누출된 위험물질은 협곡 내 흐름을 따라 건물 ⑥의 풍하측(북쪽)에서 상승하며 높은 농도를 나타낸다(Figure 9b). 협곡 내 흐름을 따라 지표면보다 건물 중간 높이에서 위험물질의 농도가 높게 나타나며 소용돌이에 의해 협곡 내에서 갇혀 나타나기 때문에 확산 거리가 짧게 나타나는 것을 알 수 있다. 유입류의 풍속이 5 m s^{-1} 인 경우에 $y-z$ 단면을 살펴 봤을 때, 1 m s^{-1} 와 마찬가지로 강남역 교차로에 흐름이 도달하기전에 풍상측(남쪽) 방향에 위치한 건물 ⑥에 의해 흐름의 분리와 재부착이 발생하여 복잡한 연직 흐름이 주로 나타나 위험물질의 연직 확산이 주로 발생했지만, 강한 풍속으로 인해 빠르게 환기됨을 알 수 있다(Figure 9c). $y-z$ 단면에서는 강남역 교차로에 위치한 건물 ⑥와 ③사이 협곡 내에서 강한 풍속으로 인해 소용돌이가 발생하지 않고 지면 부근에서도 유입류 방향의 수평 흐름이 나타났다(Figure 9d). 이에 따라 위험물질은 풍하측(북쪽)으로 확산되어 누출 지점으로부터 북쪽에 위치한 건물이 밀집된 지역에서 높은 농도가 나타나며 멀리까지 확산되는 것을 확인하였다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 빈도가 증가하고 있는 위험물질 누출 사고로 인한 영향을 예측하고 피해를 줄이기 위한 대응 방안으로 불산 누출 사고를 가정한 가상의 사고 시나리오를 모의하였다. 인공적 요소들로 이루어진 우리나라 대표 도시로써 서울시 강남을 대상 지역으로 선정하여 풍향·풍속이 고려된 시나리오를 기반으로 위험물질 확산에 대한 보행자 환경 특성을 분석하였다. CFD_NIMR_SNU 모델을 이용하여 모의한 기상장(풍향·풍속) 평가 결과, 유입류에 비해 관측값과 유사한 경향으로 모의하는 것을 확인하였으며, 모든 검증 지수가 유효한 범위 내에 나타남을 보였다. 각 풍향에 따른 풍속 시나리오 결과를 평균하여 보행자 고도에서 풍향에 따라 확산되는 최대 거리를 분석한 결과, 풍향이 북서풍일 때 최대 확산 거리가 가장 멀리 나타나며 남풍일 때 가장 짧게 나타남을

확인하였다. 이러한 결과는, 위험물질이 누출되는 강남역 주변에 위치한 인공적 요소들에 의해 유입류의 방향이 변화함에 따라 다양하게 형성되는 흐름이 위험물질이 확산되는 패턴에 영향을 미침을 나타낸다. 또한, 유입류의 풍속이 가장 약한 1 m s^{-1} 의 경우, 대상 지역을 이루는 인공적 요소들에 의해 보행자 고도에서는 유입류의 역방향으로 흐름이 형성되어 풍상측 방향으로 위험물질의 확산이 나타남을 보였다.

본 연구에서는 보행자 환경에 초점을 맞추어 위험물질 확산에 대해 수평 및 연직 특성을 분석하였다. 고해상도의 CFD_NIMR_SNU 모델을 이용한 기상장 및 확산장 모의 결과를 통해 도시를 이루는 입체적인 인공적 요소가 도시 난류 흐름 형성에 매우 중요한 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 향후 실제 위험물질을 취급하는 도시 내 산업단지에 이 기술을 적용하여 위험물질 확산 모의 실험과 위험성 평가를 수행할 수 있으며, 특히 산업단지과 인접한 주거지역의 도시·환경 계획을 위한 환경영향평가에서 실제 지형과 도시 구조가 반영된 보행자 환경의 위험성이 평가되어야 한다.

사사

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원께 감사드립니다. 이 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업(KMIPA-2012-0001-1)의 지원으로 수행되었습니다. 기상청 슈퍼컴퓨터가 활용되도록 지원해준 기상청 관측기반국 국가기상슈퍼컴퓨터센터에 특별히 감사드립니다.

References

- Britter RE, Hanna SR. 2003. Flow and dispersion in urban areas. *Annu. Rev. Fluid Mech* 2003. 35: 469-496.
- Castro IP, Apsley DD. 1997. Flow and dispersion over topography: a comparison between numerical and laboratory data for two-

- dimensional flow. Atmospheric Environment. 31: 893-850.
- Choi HW, Kim DY, Kim J.-J. Kim KY, Woo JH. 2012. Study on Dispersion Characteristics for Fire Scenarios in an Urban Area Using a CFD-WRF Coupled Model. Atmosphere. 22(1): 47-55.
- De Melo AMV, Santos JM, Mavroidis I, Junior NCR. 2012. Modelling of odour dispersion around a pig farm building complex using AERMOD and CALPUFF. Comparison with wind tunnel results. Building and Environment. 56: 8-20.
- Gu SG, Choi IJ, Kim W, Sun ON, Kim SB, Lee YG. 2013. Study on the Distribution of Fluorides in Plants and the Estimation of Ambient Concentration of Hydrogen Fluoride Around the Area of the Accidental Release of Hydrogen Fluoride in Gumi. J. Environ Health Sci. 39: 346-353.
- Hanna SR, Brown MJ, Camell FE, Chan ST, Coirier WJ, Hansen OR, Huber AH, Kim S, Reynolds RM. 2006. Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan: An application of five computational fluid dynamics models. Bull. Amer. Meteor. Soc. 12: 1713-1726.
- Hanna SR, Hansen OR, Dharmavaram S. 2004. FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. Atmospheric Environment. 38(28): 4675-4687.
- Jeong SJ, Park OH. 1999. Development of a New E-ε turbulence model for analysing the air flow field within an urban street canyon. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 15(3): 281-289.
- Joo HS, Lee YS, Lim OJ, Yoo JM. 2013. A study on the Improvement of Environmental Impact Assessment of Industrial Complexes Based on Risk Assessment of Chemical Leakage Accidents. Korea Environment Institute (KEI). [Korean Literature]
- Kim J.-J., Baik J.-J. 2005. An investigation of flow and scalar dispersion in an urban area using a CFD model. Atmosphere. 41: 821-837.
- Ko MW, Oh CB, Han YS, Choi BI, Do KH, Kim MB, Kim TH. 2015. Large Eddy Simulation for the Prediction of Unsteady Dispersion Behavior of Hydrogen Fluoride. Journal of the Korean Society of Safety. 30(1): 14-20.
- Koh DH, Kim JS, Choi KH. 2014. Defining Area of Damage of 2012 Hydrofluoric Acid Spill Accident in Gumi, Korea. J. Environ Health Sci., 40: 27-37.
- Kwon HG, Yang HJ, Yi C, Kim YH, Choi YJ. 2015. Urban climate impact assessment reflecting urban planning scenarios-Connecting green network across the north and south in Seoul. Journal of Environmental Impact Assessment. 24(2): 134-153.
- Lee CB, Kim JC. 2009. Evaluation of the calpuff model using improved meteorological fields in complex terrain of east sea coast. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 25(1): 15-25.
- Lee TH, Park JD, Lee SJ, Bang BS, Kim KP, Kim MS, Park JS. 2015. Characteristics of chemical substance accident in Korea. Korean Journal of Hazardous Materials. 3(1): 37-41
- Oke TR. 1988. Street design and urban canopy layer climate. Energy and buildings, 11(1): 103-113.
- Patankar SV. 1980. Numerical Heat Transfer and

- Fluid Flow. McGraw-Hill, New York, 197 pp.
- Pontiggia M, Landucci G, Busini V, Derudi M, Alba M, Scaioni M, Bonvicini S, Cozzani V, Rota R. 2011. CFD model simulation of LPG dispersion in urban areas. *Atmospheric environment*. 45(24): 3913-3923.
- Tartakovsky D, Broday DM, Stern E. 2013. Evaluation of AERMOD and CALPUFF for predicting ambient concentrations of total suspended particulate matter (TSP) emissions from a quarry in complex terrain. *Environmental Pollution*. 179: 138-145.
- Yakhot V, Orszag SA, Thangam S, Gatski TB, Speziale CG. 1992. Development of turbulence models for shear flow by a double expansion technique. *Phys. Fluids*. 4: 1510-1520.
- Yang HJ, Kim J.-J. 2015. Assessment of Observation Environment for Surface Wind in Urban Areas Using a CFD model. *Atmosphere*. 25(3): 449-459.
- Yi CY, An SM, Kim KR, Choi YJ, Scherer D. 2012. Improvement of Air Temperature Analysis by Precise Spatial Data on a Local-scale-A Case Study of Eunpyeong New Town in Seoul. *Journal of the Korean association of geographic information studies*. 15(1): 144-158.
- You J, Chung Y.-J. 2014. Case Analysis of the Harmful Chemical Substances' Spill. *FIRE SCIENCE AND ENGINEERING*. 28(6): 90-98.
- Zhou Y, Levy JI, Evans JS, Hammitt JK. 2006. The influence of geographic location on population exposure to emissions from power plants throughout China. *Environment International*. 32(3): 365-373.