

Research Paper

CFD 모델을 이용한 도시 재정비 사업에 의한 NO_x 분포 변화 모의

김지현* · 김연욱* · 도현석** · 곽경환***

강원대학교 환경의생명융합학과*, 강원대학교 환경학과**, 강원대학교 환경융합학부***

CFD Simulation of Changes in NO_x Distribution according to an Urban Renewal Project

Ji-Hyun Kim* · Yeon-Uk Kim* · Heon-Seok Do** · Kyung-Hwan Kwak***

Department of Environmental and Biomedical Convergence, Kangwon National University*

Department of Environmental Science, Kangwon National University**

School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University***

요약: 본 연구에서는 전산유체역학(CFD) 모델을 이용한 수치 모의에서 춘천시 약사지구 도시 재정비 사업에 의한 약사천 복원과 아파트 단지 건설이 주변 지역의 오염물질 농도에 미치는 영향을 분석하였다. 사업에 의한 영향을 비교하기 위해 도시재정비 사업 전과 후인 2011년과 2017년의 지형 자료를 이용하여 바람장과 오염물질 농도장을 모의하였다. 수치 실험에서 아파트 단지 건설의 영향과 하천 복원의 효과를 구분하여 분석하도록 시나리오를 구성하였다. 대상 지역의 평균적인 배경 바람장을 반영하기 위해 춘천 중관 기상관측소(ASOS)의 풍향 및 풍속 자료를 유입 경계 조건으로 사용하고, 모의 결과를 유입 풍향의 8방위별 빈도에 따라 가중평균하였다. 시나리오 간 건물·지형 변화에 따른 풍속과 NO_x 농도 분포의 차이를 비교하였다. 그 결과 주변 도로에서 배출된 NO_x 농도는 아파트 단지 건설에 의해 증가하였으며, 아파트 단지 건설과 하천 복원을 함께 고려한 결과에서는 증가 폭이 감소하였다. 이를 지점별로 나누어볼 때, 복원한 하천 주변으로는 NO_x 농도가 감소하는 한편, 건설한 아파트 단지 주변으로는 농도가 크게 증가하였다. 아파트 단지 주변의 NO_x 농도 증가는 풍향을 기준으로 아파트 단지의 후면에 위치한 곳에서 더욱 뚜렷하였으며, 그 영향은 건물 높이까지 나타났다. 이러한 결과를 통해 사업 대상 지역의 주풍향에 대한 아파트 단지 건설과 하천 복원의 상대적인 배치가 주변 대기질을 결정하는 주요 요소임을 확인하였다.

주요어: 도시 재정비 사업, 아파트 건설, 하천 복원, 질소산화물, CFD 모델

Abstract: In this study, the effect of the restoration of Yaksa stream and the construction of an apartment complex by the urban renewal project in the Yaksa district of Chuncheon on air quality in the surrounding area was evaluated using computational fluid dynamics (CFD) model simulations. In order to compare the impact of the project, wind and pollutant concentration fields were simulated

First Author: Ji-Hyun Kim, Tel: +82-33-257-8575, E-mail: jhi2d@kangwon.ac.kr, ORCID: 0000-0002-9238-5774

Corresponding Author: Kyung-Hwan Kwak, Tel: +82-33-250-8575, E-mail: khkwak@kangwon.ac.kr, ORCID: 0000-0001-6651-6059

Co-Authors: Yeon-Uk Kim, Tel: +82-33-257-8575, E-mail: yukim@kangwon.ac.kr, ORCID: 0000-0003-2933-9051

Heon-Seok Do, Tel: +82-33-257-8575, E-mail: dotordi@kangwon.ac.kr, ORCID: 0000-0002-3702-9822

Received: 31 January, 2021. Revised: 25 May, 2021. Accepted: 26 May, 2021.

using topographic data in 2011 and 2017, which stand for the periods before and after the urban renewal project, respectively. In the numerical experiments, the scenarios were set to analyze the effect of the construction of the apartment complex and the effect of stream restoration. Wind direction and wind speed data obtained from the Chuncheon Automated Synoptic Observing System (ASOS) were used as the inflow boundary conditions, and the simulation results were weighted according to the frequencies of the eight-directional inflow wind directions. The changes in wind speed and NO_x concentration distribution according to the changes in building and terrain between scenarios were compared. As a result, the concentration of NO_x emitted from the surrounding roads increased by the construction of the apartment complex, and the magnitude of the increase was reduced as the result of including the effect of stream restoration. The concentration of NO_x decreased around the restored stream, while the concentration increased significantly around the constructed apartment complex. The increase in the concentration of NO_x around the apartment complex was more pronounced in the place located in the rear of the wind direction to the apartment complex, and the effect remains up to the height of the building. In conclusion, it was confirmed that the relative arrangement of apartment complex construction and stream restoration in relation to the main wind direction of the target area was one of the major factors in determining the surrounding air quality.

Keywords : Urban renewal project, Apartment construction, Stream restoration, Nitrogen oxides, CFD model

I. 서론

우리나라는 급속한 발전과 인구증가로 인해 고층 건물들이 밀집하고 차량에서 배출되는 대기오염물질이 증가하는 등 도시 환경 문제가 심각해지고 있다. 도시의 대기 흐름과 확산은 지형과 건물의 배치, 형태, 밀도에 따라 매우 복잡하게 나타난다(Bady et al. 2008; Lin et al. 2014). 도시 지역의 건물은 바람이 수렴하거나 거의 불지 않는 등의 형태로 도시 내 오염물질의 확산을 약화 또는 강화하여 보행자의 풍환경을 저해하는 요소로 작용한다(Kwon & Kim 2014). 또한, 도심은 차량 통행이 많은 지역으로 차량에서 배출된 대기오염물질이 오랜 시간 동안 정체한다. 차량들이 배출하는 대기오염물질에서 NO_x 는 가장 큰 비중(58%)을 차지한다(National Center for Fine Dust Information 2017). NO_x 는 호흡기 및 심혈관 질환 등을 유발함으로써 인체에 악영향을 주는 것으로 알려져 있다(Depayras et al. 2018). 이를 종합해볼 때, 도심 내에 복잡한 구조와 차량에 의한 다량의 NO_x 배출은 도시민의 건강에 악영향을 미치는 요인이다.

최근 도시 개발에 의한 도시 환경 문제를 해결하기 위해 친환경적인 도시환경 조성 사업을 추진하고 있다(Jo et al. 2009; Yang 2013). 친환경적인 도시환경 조성 사업은 대기질을 개선시키고자 바람길을 조성하거나 복개 하천을 복원하는 등의 형태를 의미하며, 대규모 주거 단지 개발에 주로 적용하고 있다. 이러한 도시 환경의 변화는 주변 지역의 미기상과 대기환경의 변화를 가져온다(Kim & Baik 2005). 대표적으로 바람길은 공간 지형적 요소에 의해 결정된다. 따라서 바람 생성에 영향이 있는 지역을 적절히 선정하고, 바람길이 도심까지 연결되어 도시 외곽으로부터 깨끗하고 찬 바람이 도심 지역까지 유입될 수 있는 지 확인해야 한다. 바람길 생성에 대표적인 사례인 청계천 복원 사업은 주변 지역의 기온을 1.0~1.5℃ 정도 낮추는 효과가 있는 것으로 알려져 있다(Park et al. 2019).

이러한 효과를 정량적으로 평가하는 방법으로 기상 및 대기질 모델링이 활용되고 있다(Joo et al. 2006; Shin et al. 2020). 보다 정밀한 대기 흐름 및 오염물질 확산을 모의하기 위해 복잡한 도심의 지역의 상세

한 흐름과 확산에 대해 상세한 규모(수 m~ 수십 m)로 해석할 수 있는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델을 많이 활용하고 있다(Baik et al. 2003; Lee et al. 2009; Kumar et al. 2011; Kim et al. 2018). 여러 사전 연구에 따르면, 고층 건물의 건설은 바람을 정체시키고 대기 오염물질의 확산을 약화하여 도로상에서 배출된 오염물질의 농도를 증가시키는 것으로 보고되고 있다(Kwak et al. 2015; Liu et al. 2018; Lee & Kwak 2020). 서울특별시 은평구 뉴타운 건설 사업에 따른 기상 변화를 평가한 연구에서는 주변 산지에서 불어오는 바람이 아파트 건물에 방해받는 영향이 있음을 확인한 바가 있다(Cho et al. 2011). 또한, Kim et al. (2017)은 CFD 모델을 이용하여 서울특별시 강남역 인근 지역을 대상으로 위험물질 확산 정보와 보행자환경을 평가한 바 있다.

춘천시는 북한강과 소양강이 만나는 의암호 주변으로 시가지가 형성되어 있으며, 높은 산으로 둘러싸인 분지 지형의 특성을 보인다. 강원도의 도청 소재지이면서 2010년대부터 구도심을 활성화하기 위한 도시 재정비 사업을 추진하고 있다. 도시 개발 사업이 춘천시의 미기상과 대기질에 미치는 영향을 사전에 파악하고, 실제 사업이 이루어진 지역을 대상으로 사후 평가를 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 춘천시 약사지구 도시 재정비 사업이 이루어진 지역을 대상으로 CFD 모델을 이용하여 하천 복원과 아파트 단지 건설에 따른 NO_x 분포 변화를 비교함으로써 도시 재정비 사업이 기상과 대기질에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

II. 연구방법

1. 대상 지역 선정

본 연구의 대상 지역은 강원도 춘천시 효자동과 약사동(37.87°N, 127.73°E) 일대로 선정했다(Figure 1-(A)). 이 지역은 춘천시 약사지구 도시재정비 사업이 추진되어 약사천 복원사업과 도시개발사업이 진행된 바 있다. 북쪽과 서쪽으로는 소양강과 의암호로 둘러싸여 있고, 북쪽으로는 해발고도 약 302 m인 봉의산

이 위치하고 있다. Figure 1-(B)와 1-(C)는 도시 개발 전후에 각각 찍은 위성 사진이다. 두 그림을 비교해보면 도시 개발 이후 ㉔지점에 하천 복원 후 수변공원을 조성하였고, ㉖지점에 20층 내외의 아파트 단지(약 30,000 m²)를 건설하였다. 또한 주변 도로는 각각 4차선에서 7차선으로, 3차선에서 6차선으로 확장하였다.

2. 수치 실험 설계

도시 개발에 따른 오염물질 분포 변화를 알아보기 위해 CFD 모델을 사용하여 수치 모의를 수행하였다. 사용한 CFD 코드는 Baik et al. (2007)과 Park et al. (2016) 등 많은 사전 연구에서 사용되어 검증되어왔다. 본 연구에서 사용한 CFD 모델은 3차원, 비정수, 비압축 흐름계를 가정한 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식계로 구성된다(Baik et al. 2003). 지배방정식 계의 해를 계산하기 위하여 엇갈림 격자계(staggered grid system)에서 유한체적법(Finite Volume Method)과 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 알고리즘을 이용하였다. 격자 크기 이하의 난류 모수화를 위해 RNG(Renormalization group) $k-\epsilon$ 난류 종결 방법을 사용하였다.

이 모델은 건물에 의한 흐름 분리와 역류를 잘 모사할 수 있어 도시 내부 협곡 흐름과 오염물질 확산을 연구하는 데 활용되어왔다(Koo et al. 2009; Cho et al. 2011; Lee & Kim 2011; Mun & Kim 2018). 본 연구에서 사용한 모의 지역의 건물·지형·도로 자료는 국토지리정보원에서 제공하는 연속수치지형도를 사용했다. 이 자료로부터 CFD 모델 영역의 지형 자료를 구축하기 위해 ArcGIS 프로그램에서 SHP 파일을 ASCII 파일 형태로 변환하였다. 모의 대상 지역의 수평 영역은 춘천시 효자동 춘천문화예술회관을 중심으로 한 2 km × 2 km 이며, 연직 영역은 지상으로부터 0.58 km 고도까지이다(Figure 1). 계산 영역 설정 기준은 COST (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research)의 권장 사항을 참고하여 연직 계산 영역 높이를 모의 지역 내 건물의 최고 높이의 5배 이상으로 설정하였다(Franke

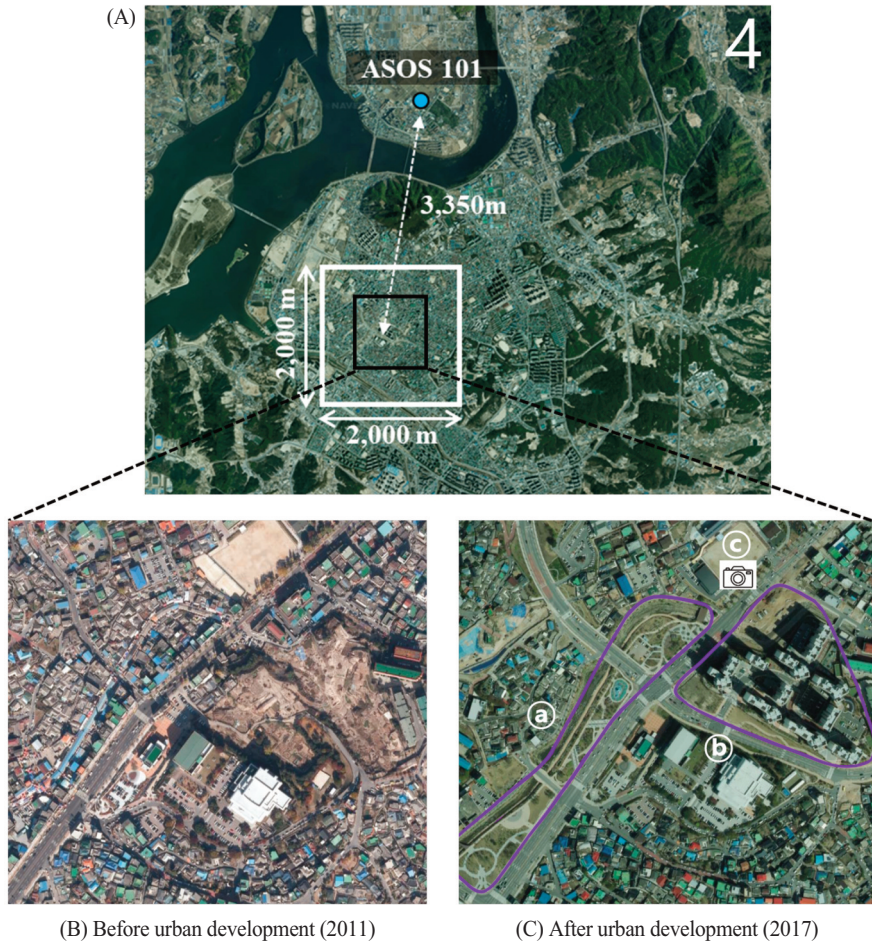


Figure 1. (A) A satellite image of Chuncheon, Gangwon-do from the Google Earth, and satellite images in (B) 2011 and (C) 2017.

et al. 2011). 격자 크기는 수평 방향으로 10 m이며, 연직 방향으로 지상으로부터 고도 126 m까지는 3 m로 등격자계이고, 고도 127 m 이상에서는 일정 비율로 증가하는 비균등격자계다.

모의에 필요한 바람 입력 자료는 모의 지역과 가장 가까이 위치한 춘천의 종관기상관측(ASOS, Automated Synoptic Observing System) 자료를 이용했다. 입력 경계 조건으로 사용한 바람 자료의 기간은 2018년 1월부터 12월까지 주간 시간대(06-18 KST) 1시간 간격 자료로 평균적인 춘천 미기상 조건을 반영하였다. 바람 자료는 1시간 간격 풍향에 따라 8방위(N, NE, E, SE, S, SW, W, NW)로 나누었으며, 동일 풍향 내에서 풍속의 평균과 풍향의 빈도

를 구하였다. 이때, 풍속이 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 미만인 자료는 정온으로 분류하여 8방위 풍향에서 제외하였다. 풍향별 평균 풍속은 계산 영역의 풍향별 입력 경계 조건으로 사용하였고, 이후 풍향별 CFD 모의 결과는 풍향별 빈도에 따라 가중 평균하여 종합적인 바람장과 농도장을 산출하였다. 가중 평균의 방법은 식 (1)과 같다. 여기에서 n 은 8방위 풍향, M_n 은 각 풍향별 모의 풍속과 농도, w_{dn} 은 풍향별 비율이다. 계산 영역 내 10 m 고도의 풍속을 기준으로 입력 경계에서의 연직 풍속 분포를 식 (2)와 같은 로그함수 분포로 가정하여 입력하였다. 여기에서 u_s 는 마찰속도, k 는 von Karman 상수, z_0 는 지면 거칠기 길이, z 는 격자 점의 고도다.

$$\sum_{n=1}^8 (M_n \times wd_n) \quad (1)$$

$$U(z) = \left(\frac{u_*}{k}\right) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2)$$

모의에 필요한 배출량 자료인 NOx 배출율은 현장에서 촬영한 교통량 측정 자료와 환경부에서 제공하는 대기 정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS) (National Institute of Environmental Research 2015) 배출 계수를 이용하여 산정했다. CFD 계산 영역 내 도로상 격자점에서 NOx가 배출된다고 가정하였으며, 입력한 배출율은 시간당 통행량, 배출계수, 차량의 속도, 이동거리 등을 고려하여 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$C = E \times D \times N \quad (3)$$

C(ppbv·s⁻¹)는 시간 당 배출율, E(g·km⁻¹)는 주행 거리 당 배출량, D(km·car⁻¹)는 차량 한 대 당 이동거리, N(car·s⁻¹·m⁻³)은 CFD 격자 부피 안에 있는 초당 차량 대수다. 차량 대수를 파악하기 위해 2018년 7월 24-25일에 출퇴근 시간이 포함되는 오전 6시부터 오후 6시까지 교통량 영상을 촬영하였다. 촬영 위치는 Figure 1-(C)의 ㉔지점이며, 영상은 30분마다 신호 2주기(약 320초)를 포함하는 분량으로 총 26회 촬영했다. 촬영한 영상을 이용하여 차종별(일반 승용차, SUV, 택시, 트럭, 시내버스) 시간당 교통량을 파악했다. E(g·km⁻¹)는 환경부에서 제공하고 있는 CAPSS 차종별 배출 계수이며, 실제 도로상황에 해당하는 차종 및 차속을 사용하여 계산했다. 차속은 통계청에서 제공하는 광역시별 승용차 평균 주행속도를 참고하여 30 km·h⁻¹로 가정했다. 차량 이동 거리(D)는 모델의 수평 격자 크기인 10 m를 적용하였다. 이때 차량 대수(N)는 최악의 상황을 반영하기 위해 배출량이 가장 많은 시간대(7월 25일 13시)로 설정하였다. 배출율의 단위를 부피비로 환산하는 과정에서 NO:NO₂ = 1:1로 NOx의 분자량은 38 g·mol⁻¹을 가정하였다. 구한 배출율은 계산 영역 내 3차선 이상인 도로에 해당하는 모든 격자에 적용하되, 모의 영역 경계로부터 동서남북 각 200 m까지는 제외하였다. 유입 경계에서의 NOx 배경 농도는 75 ppbv로 설정하여 배출량과

마찬가지로 고농도 시 조건을 반영하였다. CFD 모델의 모의 시간은 3600초, 계산 시간 간격은 1초다. 결과 분석 시 모델 내 흐름이 충분히 안정화된 이후인 3600 초의 모의 결과를 분석하였다. CFD 모델 내 광화학 반응과 지표가열로 인한 열적 현상은 배제하고, 바람에 의한 오염물질 확산만 반영하였다.

3. 시나리오

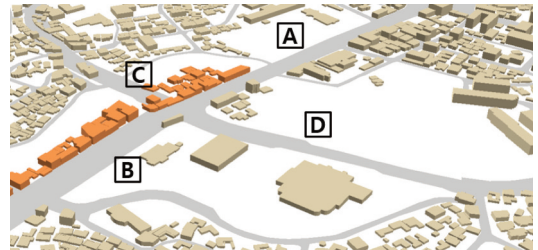
모의 시나리오는 하천 복원과 아파트 단지 건설에 따른 흐름과 대기질 변화를 보기 위해 세 가지로 구성하였다. 첫 번째 시나리오는 기준 실험으로 도시 개



(A) Year 2017_Real (stream + an apartment complex)



(B) Year 2017_no APT (stream + no apartment complex)



(C) Year 2011_Real (no stream + no apartment complex)

Figure 2. Three scenarios in this study. (A) Topography for restoration of stream and construction of an apartment complex in 2017, (B) topography for restoration of stream but removal of an apartment complex in 2017, and (C) topography before apartment complex construction and stream restoration in 2011.

발 이후 아파트 단지가 건설되고 하천이 복원된 2017년도 지형을 이용한 실험(2017_Real)이며, 두 번째 시나리오는 첫 번째 시나리오와 동일하나 2017년 지형에서 아파트 단지를 제거한 실험(2017_no APT)이며, 세 번째 시나리오는 도시 개발이 이루어지기 전인 2011년도 지형을 이용한 실험(2011_Real)으로 구성하였다(Figure 2). 수치 모의 실험에서 사용한 세 가지 입력 자료(지형, 바람, 배출량) 중 지형 외 다른 자료는 모든 시나리오에서 동일하게 입력함으로써 세 가지 시나리오에서는 지형(건물 및 하천)의 영향만을 비교하였다. 도로상 배출 분포에 영향을 미치는 도로 자료 또한 Figure 2에서와 같이 모든 시나리오에서 동일하게 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 기상 조건 분석

Figure 3은 2018년 1월부터 12월까지 춘천 ASOS 지점의 주간 시간대(06-18 KST) 평균 풍향과 풍속 분

포를 보여주는 바람장미다. 8방위 풍향에서 가장 높은 빈도를 보인 풍향은 북풍(27.5%)과 서풍(20.5%) 순이며, 가장 낮은 빈도를 보인 풍향은 남동풍(1.7%)과 북서풍(6.7%) 순이다. 각 풍향별로 평균한 풍속은 각각 $1.36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (북풍), $2.46 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (북동풍), $1.63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (동풍), $1.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (남동풍), $1.93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (남풍), $2.49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (남서풍), $2.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (서풍), $1.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (북서풍)이었다.

2. 바람장 및 농도장 분석

분석 결과는 모의 시간 3600초에 수치 도면 내의 결과를 8방위 풍향의 빈도에 따라 가중 평균한 값이다. 시나리오 1에 해당하는 2017년도 지형(2017_Real)을 고려한 실험에서 모의 영역 내 보행자 고도인 1.5 m 높이의 수평 바람장과 농도장을 살펴보았다. 모의 영역 전체의 평균 풍속은 $0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, NO_x 농도는 171.6 ppbv이다. Figure 4-(A)의 수평 바람장을 보면 바람은 넓은 도로를 따라 평행하게 불었다. 특히 건물과 언덕과 같은 장애물이 없는 쪽으로 불어나가

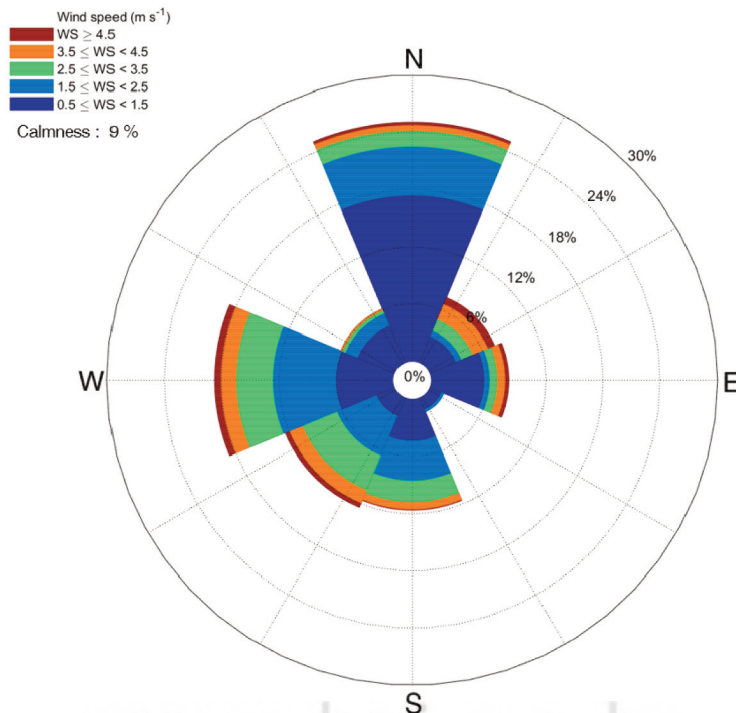


Figure 3. Wind rose diagram observed in Chuncheon ASOS for the period of January – December in 2018.

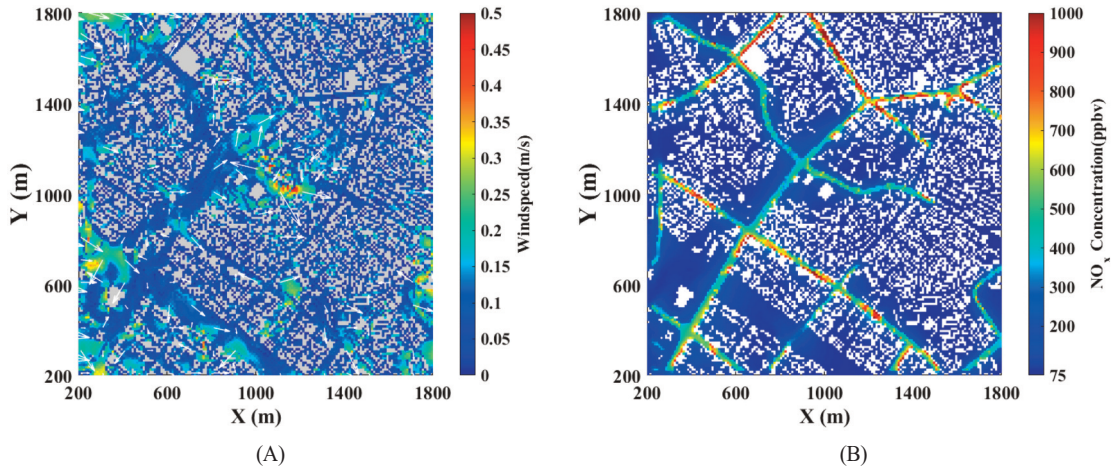


Figure 4. The horizontal fields of (A) wind speed and (B) NO_x concentration in the 2017_Real scenario.

면서 하천이나 넓은 도로에서는 평균 이상의 높은 풍속을 보였다. Figure 4-(B)의 NO_x 농도장을 보면 도로에서 배출된 NO_x가 바람을 따라 주변 지역으로 확산되는 형태를 보였으며, 특히 확산이 원활하지 않은 좁은 도로와 교차로 등에서 고농도를 나타내었다. 이와 같은 분포는 도로상 배출량이 일정한 조건에서도 도로 폭이나 도로변 건물의 배치가 NO_x 농도를 결정하는 요인임을 의미한다. 한 예로, 모의 영역 내 북쪽 도로는 NO_x 배출량이 작음에도 도로 폭이 좁아서 고농도를 보이는 반면, 남서쪽으로 이어지는 폭이 넓은 도로에서는 NO_x 배출량이 큼에도 불구하고 비교적

낮은 농도를 보인다. 이는 폭이 넓은 도로에서 도로와 평행하게 부는 바람에 의해 NO_x 확산이 잘 이루어지기 때문으로 판단된다. 이는 CFD 모델 내 도로 격자에서 부는 수평 풍속과 NO_x 농도의 상관 관계를 나타낸 Figure 5에서도 명확히 확인할 수 있다. 대체적으로 낮은 풍속을 보이는 지점에서 NO_x 농도가 높은 상관성이 뚜렷하다.

3. 도시 재정비 사업에 따른 변화

1) 수평 분포 변화 비교

시나리오별 수평 풍속장과 농도장의 차이는 건설

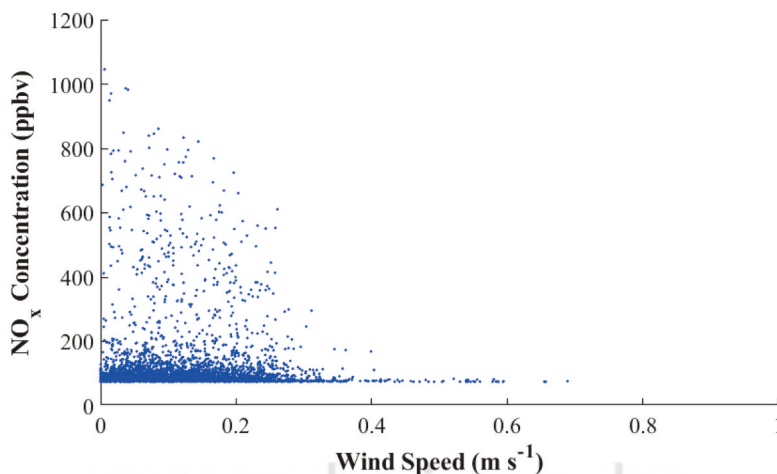


Figure 5. Correlation between wind speed and NO_x concentration on the road in CFD model.

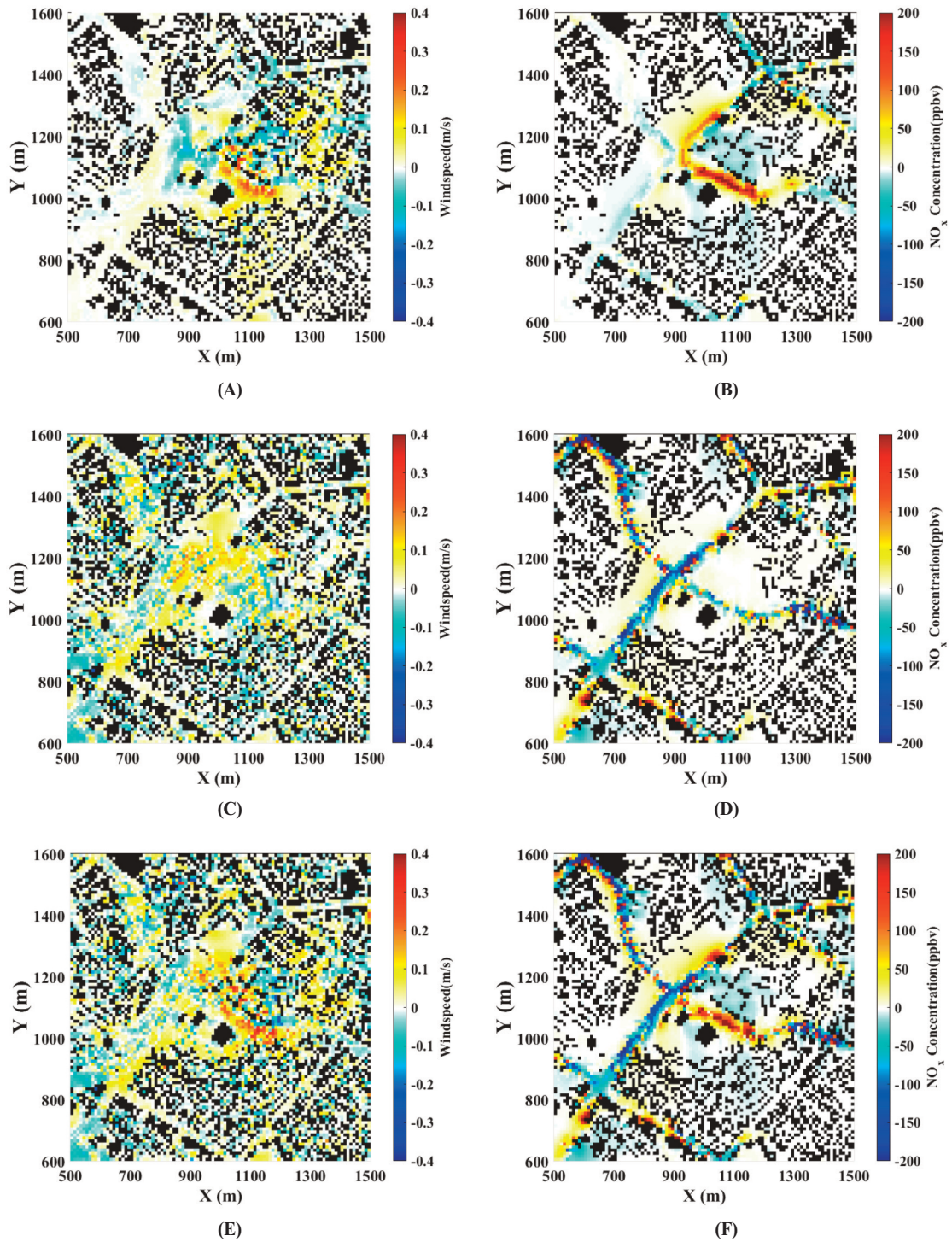


Figure 6. The horizontal cross-section fields showing the difference in near-surface wind speed (left) and NO_x concentration (right) between scenarios corresponding to (A, B) Apartment construction effect, (C, D) Stream restoration effect, and (E, F) Both apartment and stream effects.

된 아파트 단지와 복원된 하천 주변을 중심으로 나타났다. Figure 6은 시나리오 간 풍속장과 농도장의 차이이며, 새로 건설된 아파트는 X 방향으로 900-1200 m 와 Y 방향으로 1000-1300 m, 복원된 하천은 X 방향으로 650-1000 m 와 Y 방향으로 850-1200 m 내 남서에서 북동 방향으로 길게 위치해있다. 도시 재정비 사업으로 인한 도심 내 풍속과 NO_x 농도의 변화는 아파트 건설로 인한 변화(2017_Real과 2017_no APT 비교), 하천 복원으로 인한 변화(2017_no APT 와 2011_Real 비교), 아파트 건설과 하천 복원에 따른 변화(2017_Real과 2011_Real 비교) 등 세 가지로 구분하였다.

Figure 6-(A)와 (B)는 아파트 단지 주변의 풍속과 농도의 변화를 보여준다. 아파트 단지 내부에 최대 0.28 m·s⁻¹의 풍속 감소가 나타나며, 아파트 단지 외부에 최대 0.35 m·s⁻¹ 정도의 풍속 증가가 보인다. 이와 같은 풍속의 변화는 NO_x 농도 분포에도 영향을 주었다. 아파트 단지 내부의 농도는 최대 22 ppbv까지 감소한 반면, 아파트 단지 외부에서 특히 남쪽과 서쪽 경계 지점의 농도가 257 ppbv까지 크게 증가하여 아파트 단지 안과 밖으로 상반되는 농도 변화를 보인다. 따라서 14-20층 높이의 아파트 단지는 도로와 아파트 내부를 가로막는 장애물 역할을 하여 안과 밖의 원활한 흐름을 방해하고 있음을 알 수 있다.

Figure 6-(C)와 (D)는 아파트 단지 건설의 영향을 배제하고, 하천 복원에 의한 주변 풍속과 농도의 변화를 나타낸다. 풍속은 하천이 위치한 지점에서 최대 0.2 m·s⁻¹ 증가하며, 하천으로부터 거리가 떨어진 도로변에서는 최대 0.17 m·s⁻¹ 감소한다. 이와 같은 흐름 변화에 따라 도로상의 농도는 200 ppbv 이상 크

게 감소하였고, 오히려 확산에 의해 도로변 농도는 100 ppbv 이하 수준에서 증가한 모습이었다.

Figure 6-(E)와 (F)는 아파트 건설과 하천 복원 모두에 의한 주변 풍속과 농도 변화를 나타낸다. 이는 앞서 비교했던 아파트 건설과 하천 복원 효과의 주요 특징이 함께 나타난 모습이다. 아파트 단지 주변의 풍속은 아파트 건설 효과만 반영한 결과보다 하천 복원의 효과까지 반영한 결과에서 다소 증가했다. 하천 복원에 의해 원활해진 대기 흐름으로 아파트의 서쪽 부근으로 NO_x 농도가 전반적으로 감소한 반면, 아파트의 남쪽 도로변에서는 아파트 건설의 영향으로 여전히 NO_x 농도가 증가한 모습이다.

2) 지점별 변화 비교

Table 1은 세 가지(아파트 건설, 하천 복원, 아파트 건설과 하천 복원) 효과에 의한 풍속과 농도의 변화를 각 지점별로 비교한 표다. 비교 지점은 Figure 2-(C)에 표시한 아파트와 하천이 지나가는 사거리를 기준으로 북동쪽의 A 지점, 남서쪽의 B 지점, 북서쪽의 C 지점, 남동쪽의 D 지점 등 4곳을 선정했다. 지점별 풍속은 아파트 건설 효과에 의해 C 지점을 제외한 다른 지점에서 모두 감소했다. 풍속이 증가한 C 지점은 아파트와 거리가 떨어져 있는 지점이다. 일반적으로 풍속이 증가한 지점에서 NO_x 농도가 감소하는 음의 상관관계를 보였다. 하천 복원 효과에 의한 차이에서는 하천과 나란한 방향에 위치한 A와 B 지점의 풍속이 증가한 반면, 하천과의 거리가 먼 C와 D 지점의 풍속은 감소했다. 네 지점의 농도는 오히려 하천 효과로 강화된 도로변 확산에 의해 10% 내외로 증가하였다.

Table 1. Rates of wind speed and NO_x concentration changes at the point A, B, C, and D.

		A	B	C	D
Wind Speed	Apartment effect	-18 %	-7 %	99 %	-47 %
	Stream effect	103 %	57 %	-87 %	-45 %
	Apartment + Stream effects	66 %	46 %	-74 %	-71 %
NO _x Concentration	Apartment effect	16 %	4 %	-4 %	16 %
	Stream effect	2 %	10 %	7 %	3 %
	Apartment + Stream effects	18 %	14 %	2 %	20 %

아파트 건설과 하천 복원 효과를 함께 반영한 결과에서는 아파트 건설 효과와 하천 복원 효과의 영향을 더하여 서로 상쇄되는 형태로 나타남을 확인하였다. 결과적으로 도시 재정비 사업에 의해 A와 B 지점의 풍속은 증가하고 NO_x 농도도 함께 증가하였으며, C와 D 지점의 풍속은 감소하고 NO_x 농도는 증가하였다.

3) 연직 분포 변화 비교

복잡한 지형에 위치한 지역에서 고층 건물을 건설하는 도시 개발은 대기 흐름의 연직 구조에도 영향을 준다. Figure 7은 모의 지역의 주풍인 북풍(Y-Z 단면도)과 서풍(X-Z 단면도) 실험에 대한 연직 단면도를 보여준다. Figure 7-(A), (B), (C)는 각각 아파트 단지 건설의 효과, 하천 복원의 효과, 아파트 건설과 하천 복원의 효과를 의미한다. Figure 7-(A)에서 아파트 단지는 Y 방향으로 1100 m에서 1200 m 사이에

위치하고 있다. 이 아파트를 기준으로 풍상과 풍하 측으로 나누어 보면, 북풍이 불 때 아파트 단지를 지나면서 풍속이 0.5 m·s⁻¹ 이상 크게 감소하였다. 풍속은 아파트 건물의 높이보다 높은 최대 Z = 120 m 고도까지 감소하였다. 이렇게 풍속이 감소함에 따라 아파트 단지의 남쪽인 풍하 측 도로에서 배출된 NO_x가 원활하게 확산되지 못하고 정체하면서 주변 농도를 증가시킨 것으로 판단된다. Figure 7-(B)에서 복원된 하천은 Y 방향으로 1000 m에서 1200 m 사이에 위치하고 있다. 하천을 중심으로 지면 부근에서 최대 0.5 m·s⁻¹까지 풍속이 증가하였으며, 이는 하천의 풍하측(남쪽)이 비교적 낮고 단순한 지형이어서 복원된 하천 주변으로 바람의 흐름이 원활했음을 의미한다. 하천 주변의 도로에서 배출된 NO_x는 하천 주변의 원활해진 확산에 의해 낮은 농도를 유지한 것으로 판단된다. Figure 7-(C)에서 아파트는 X 방향으로 1000

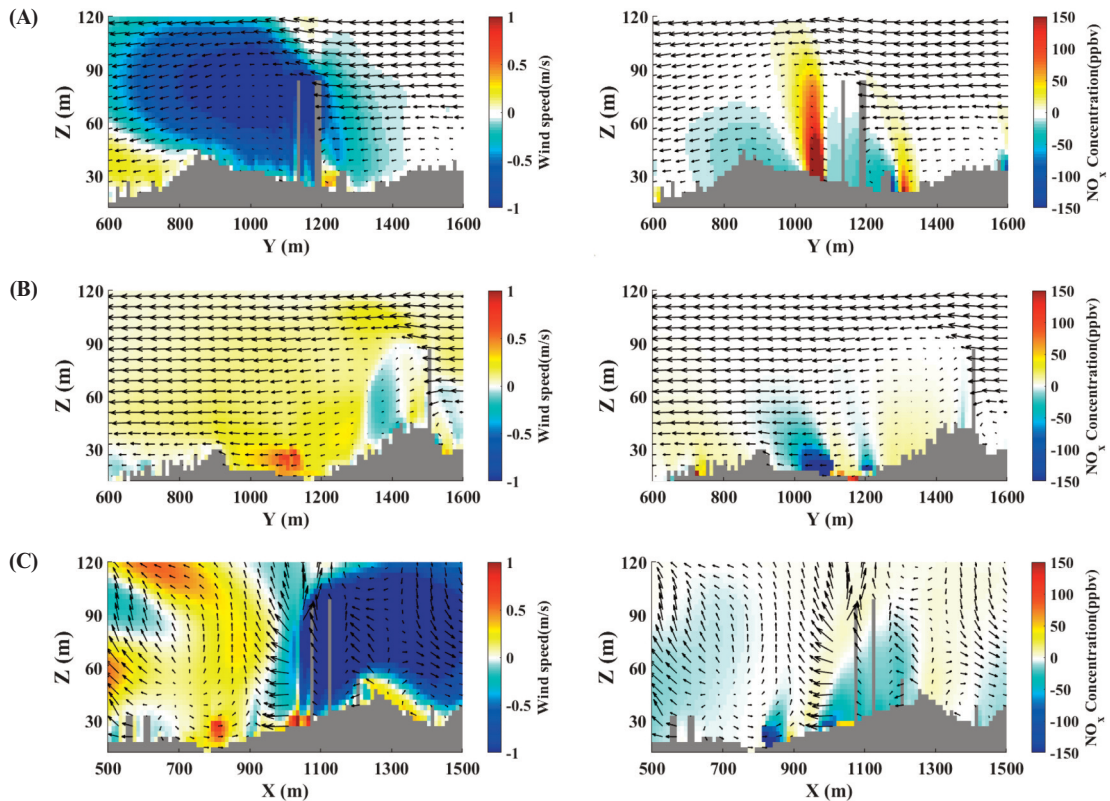


Figure 7. Vertical cross-section fields showing the difference in wind speed and NO_x concentration by subtracting scenarios at (A) X = 1060 m, (B) X = 820 m, and (C) Y = 1090 m. Wind vectors indicate the wind components for scenarios including apartment construction and/or stream restoration effects.

m에서 1200 m 사이, 복원된 하천은 X 방향으로 700 m에서 800 m 사이에 위치하고 있다. 아파트를 기준으로 풍상 측에 위치한 하천 주변의 풍속은 증가하며 장애물이 없는 하천을 주변으로 수렴하는 흐름을 보인다. 빨라진 흐름은 아파트 건물에 부딪히면서 역류를 형성한다. 반면, 아파트를 기준으로 풍하측의 풍속은 급격하게 감소를 보이며, 아파트 높이 이상인 120 m까지 영향을 주었다. 결과적으로 하천 주변에서는 풍속이 증가하나, 아파트 건물 주변에서는 풍속이 감소하는 차이를 확인하였다. 이러한 풍속의 변화

에 의해 NO_x 농도 또한 풍상측 하천 주변에서는 감소하였으며, 아파트 주변에서도 다소 감소하였다. 아파트 주변의 농도 감소는 아파트 건물이 오염물질 수송을 차단한 결과로 판단된다.

4) 풍향별 영향

앞서 분석한 풍속과 NO_x 농도의 변화는 풍향에 따라 크게 달라진다. Figure 8은 네 지점(A, B, C, D)의 아파트 건설과 하천 복원 효과에 의한 NO_x 농도 변화율을 유입 경계 풍향에 따라 비교한 오염장미다.

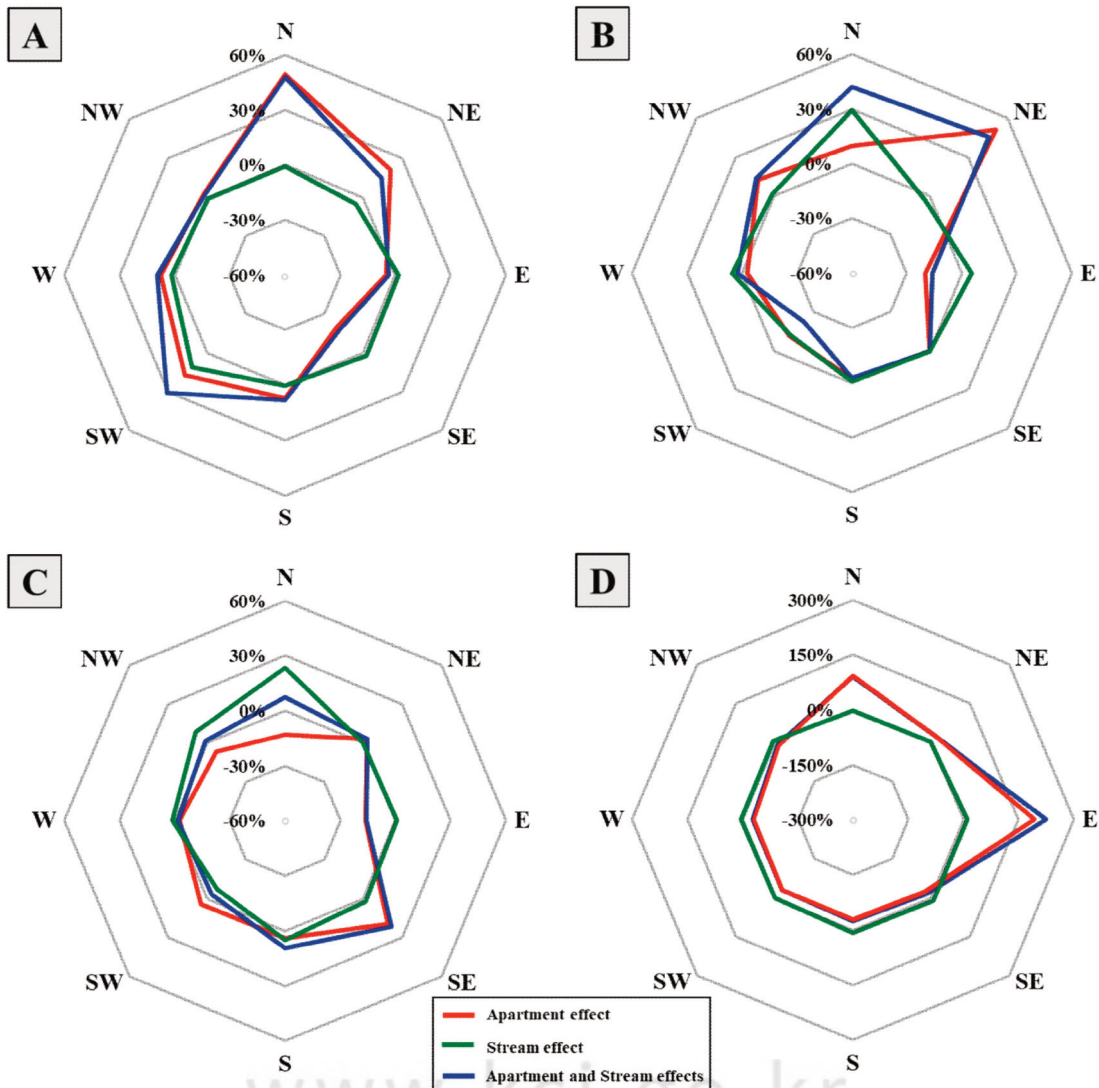


Figure 8. Ratios of NO_x concentration changes at point A, B, C and D for eight inflow wind directions.

A 지점에서 아파트 효과와 아파트+하천 효과의 NO_x 농도는 동풍과 남동풍을 제외한 풍향에서 비슷한 증가 형태를 보이며, 하천 효과에 따른 NO_x 농도 변화는 상대적으로 작았다. 또한 아파트+하천 효과의 경우 남서풍에서 농도 증가 폭이 아파트 효과에 비해 컸다. 이는 남서풍이 유입될 때 하천 효과가 아파트 효과에 의한 NO_x 농도 증가를 더욱 강화시킨 것으로 보인다. 반대로 북동풍이 유입될 때 하천 효과는 아파트 효과에 의한 NO_x 농도 증가를 일부 상쇄하는 것으로 보인다. B 지점은 아파트+하천 효과에서 풍향에 따라 크게 다른 농도 변화율을 보였으며, 특히 북풍 계열(북풍, 북서풍, 북동풍)과 동풍에서 아파트 건설과 하천 복원에 의한 NO_x 농도 변화가 심했다. 북서풍, 북동풍, 동풍의 경우, 하천 효과에 의한 농도 변화는 작은 반면, 아파트 효과가 지배적이었다. 반대로 북풍의 경우, 아파트+하천의 효과의 농도 증가는 아파트 효과보다 하천 효과의 영향을 더욱 크게 받았다. 이는 북풍일 때 B 지점이 대로의 풍하측에 위치하기 때문으로 보인다. C 지점은 상대적으로 아파트 건설 및 하천 복원에 의한 NO_x 농도 변화가 작았다. 이 중에서 북서풍, 북풍, 동풍의 경우 주로 하천의 효과로 NO_x 농도가 증가했으며, 남동풍의 경우 주로 아파트 건설의 영향으로 NO_x 농도가 증가한 것으로 보인다. D 지점은 하천 복원에 의한 NO_x 농도 변화가 거의 없었던 지점으로, 대부분의 농도 변화는 아파트 건설의 영향을 받았다. 북풍, 북동풍, 동풍의 경우 특히 아파트 건설에 의해 NO_x 농도가 크게 증가하는 특징을 보였다. 이를 종합해볼 때, A와 D 지점은 풍향에 관계없이 아파트 건설에 의한 효과가 지배적인 반면, B와 C 지점은 풍향에 따라 아파트와 하천의 영향이 가변적으로 나타났다. 또한, 하천 복원 효과에 비해 아파트 건설 효과가 풍향에 훨씬 민감하게 변화함을 확인하였다.

IV. 정리 및 결론

본 연구에서는 CFD 모델을 이용한 미기상과 대기질 모의를 통해 아파트 단지 건설과 하천 복원이 이루어진 강원도 춘천시 약사지구 도시 재정비 사업의 영

향을 분석하였다. 아파트 단지 건설과 하천 복원을 모두 반영하는 2017년 기준 실험에서 대상 모의 지역의 수평 바람장은 복원한 하천과 차선 수가 많은 넓은 도로를 따라 평행하게 불고 평균보다 높은 풍속을 보여 주었다. 차선 수가 많은 도로에서 다량으로 배출되는 NO_x는 도로 주변의 대기 확산이 원활한 조건에서 비교적 낮은 농도를 보인 반면, 차선 수가 적은 좁은 도로에서는 비교적 높은 농도를 보였다. 세 가지 시나리오의 실험 결과를 비교하여 아파트 건설 효과, 하천 복원 효과, 아파트 건설과 하천 복원 효과를 정량적으로 분석하였다. 아파트 효과는 아파트 주변의 좁은 지역에서 NO_x 농도를 크게 증가시켰다. 또한 연직적인 대기 흐름을 강화시켜 아파트 높이 이상까지 풍속 감소와 NO_x 농도 증가에 기여하였다. 반면, 하천 효과는 넓은 범위의 풍속을 완만히 증가시키면서 대기 확산을 강화하여 NO_x 농도를 감소시키는 경향을 보였으며, 연직 범위는 상대적으로 지면 부근으로 제한되었다. 한편, 일부 도로변 지점에서는 도로로부터의 수송이 강화되면서 NO_x 농도가 증가하는 현상을 보이기도 했다.

본 연구를 통해 도시 재정비 사업에 의한 아파트 건설과 하천 복원이 주변 지역의 풍환경과 대기질에 미치는 영향을 살펴보았다. 일반적으로 하천 복원은 바람길을 형성하여 도심 지역의 열환경과 대기질을 개선하는 것으로 알려져 있다. 그러나 복원 하천 주위로 고층 건물을 함께 건설한다면 이러한 긍정적인 효과가 상쇄되거나 오히려 악영향으로 바뀔 우려가 있다. 이러한 풍속 및 NO_x 농도 변화 경향은 8방위 풍향에 따라 상이하게 나타나므로 도시 재정비 사업에 의한 아파트 건설 및 하천 복원을 계획할 때 해당 지역의 주풍을 고려한 배치가 필수적임을 확인하였다.

사사

본 연구는 2020년 대학혁신지원사업 도전 연구비 지원 프로그램과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(NRF-2020R1C1C1012354)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Bady M, Kato S, Huang H. 2008. Towards the application of indoor ventilation efficiency indices to evaluate the air quality of urban areas. *Building and Environment* 43(12): 1991-2004.
- Baik J-J, Kim J-J, Fernando H-J-S. 2003. A CFD model for simulating urban flow and dispersion. *Journal of Applied Meteorology* 42: 1636-1648.
- Baik J-J, Kang YS, Kim J-J. 2007. Modeling reactive pollutant dispersion in an urban street canyon. *Atmospheric Environment* 41(5): 934-949.
- Cho KM, Koo HJ, Kim KR, Choi YJ. 2011. Wind field change simulation before and after the regional development of the Eunpyeong area at Seoul using a CFD_NIMR_SNU model. *Journal of Environmental Impact Assessment* 20(4): 539-555. [Korean Literature]
- Depayras S, Kondakova T, Heipieper HJ, Feuilleley MG, Orange N, Duclairoir-Poc C. 2018. The hidden face of nitrogen oxides species: from toxic effects to potential cure? *Emerging Pollutants: Some Strategies for the Quality Preservation of Our Environment* 19-42.
- Jung E-H, Kim D-W, Ryu J-W, Cha J-G, Son K-S. 2008. Evaluation of Spatial Characteristic of Wind Corridor Formation in Daegu Area using Satellite Data. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 11(2): 73-84. [Korean Literature]
- Franke J, Hellsten A, Schlunzen KH, Carissimo B. 2011. The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary, *Int. J. Environ. Pollut.* 44: 419-427.
- Jo MH, Jo Y-W, Kim S-J. 2009. The application of ASTER TIR satellite imagery data for surface temperature change analysis – A case study of cheonggye stream restoration project. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 12(1): 73-80. [Korean Literature]
- Joo H-S, Kim S-C, Ban J-Y, Choi S-S. 2006. Study on wind flow and air quality in urban terrain. Korea Environment Institute, pp. 1-235. [Korean Literature]
- Kim DJ, Wang J-W, Park S-J, Kim J-J. 2018. A study on the effects of wind fence on the dispersion of the particles emitted from the construction site using GIS and a CFD model. *Korean Journal of Remote Sensing* 34(5): 763-775. [Korean Literature]
- Kim E-R, Lee G-J, Yi C. 2017. Dispersal of hazardous substance in a city environment based on weather conditions and its risk assessment at the pedestrian level. *Journal of Environmental Impact Assessment* 26(4): 242-256. [Korean Literature]
- Kim Y-H, Baik J-J. 2005. Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 44: 591-605.
- Koo HJ, Choi Y-J, Kim K-R, Byon JY. 2009. Simulation of detailed wind flow over a locally heated mountain area using a computational fluid dynamics model, CFD_NIMR_SNU – a fire case at Mt. Hwawang. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 11(4): 192-205. [Korean Literature]
- Kumar P, Ketzler M, Vardoulakis S, Pirjola L, Britter R. 2011. Dynamics and dispersion modelling of nanoparticles from road

- traffic in the urban atmospheric environment – A review. *Journal of Aerosol Science* 42: 580-603.
- Kwak K-H, Baik J-J, Ryu Y-H, Lee S-H. 2015. Urban air quality simulation in a high-rise building area using a CFD model coupled with mesoscale meteorological and chemistry-transport models. *Atmospheric Environment* 100: 167-177.
- Kwon AR, Kim J-J. 2014. Study on detailed air flows in urban areas using GIS data in a vector format and a CFD model. *Korean Journal of Remote Sensing* 30(6): 755-767. [Korean Literature]
- Lin M, Hang J, Li Y, Luo Z, Sandberg M. 2014. Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density. *Building and environment* 79: 152-167.
- Liu S, Pan W, Zhao X, Zhang H, Long Z, Chen Q. 2018. Influence of surrounding buildings on wind flow around a building predicted by CFD simulations. *Building and Environment* 140: 1-10.
- Lee JH, Choi J-W, Kim J-J, Suh Y-C. 2009. The effects of an urban renewal plan on detailed air flows in an urban area. *Journal of The Korean Association of Geographic Information Studies* 12(2): 69-81. [Korean Literature]
- Lee S-H, Kwak K-H. 2020. Assessing 3-D spatial extent of near-road air pollution around a signalized intersection using drone monitoring and WRF-CFD modeling. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17: 6915.
- Lee YS, Kim J-J. 2011. Effects of an apartment complex on flow and dispersion in an urban area. *Atmosphere* 21(1): 95-108. [Korean Literature]
- Mun DS, Kim J-J. 2018. A study on the flow changes around building construction area using a GIS data. *Korean Journal of Remote Sensing* 34(6-1): 879-891. [Korean Literature]
- National Center for Fine Dust Information. 2017. National air pollutants emission, pp. 1-164. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research. 2015. Air pollutant emission factor – 2012 Air pollutant emission standards, pp. 1-158. [Korean Literature]
- Park CY, Lee DK, Asawa T, Murakami A, Kim HG, Lee MK, Lee HS. 2019. Influence of urban form on the cooling effect of a small urban river. *Landscape and Urban Planning* 183: 26-35.
- Park S-J, Choi W, Kim J-J, Kim MJ, Park RJ, Han K-S, Kang G. 2016. Effects of building-roof cooling on the flow and dispersion of reactive pollutants in an idealized urban street canyon. *Building and Environment* 109: 175-189.
- Shin M, Dong J, Ha J. 2020. A case study on the health impact assessment of residential development projects. *Journal of Environmental Impact Assessment* 29(5): 391-402 [Korean Literature]
- Yang JU. 2013. Regional regeneration through restoration of urban river. *Busan Development Institute* 1-16. [Korean Literature]