

## 1D1) 도시 도로 협곡에서 흐름과 반응 오염물질 분산에 미치는 열적 효과

### Thermal Effects on Flow and Reactive Pollutant Dispersion in an Urban Street Canyon

강윤소 · 백종진 · 김재진<sup>1)</sup>

서울대학교 대기과학과, <sup>1)</sup>부경대학교 환경대기과학과

#### 1. 서 론

CFD 모형은 도시 도로 협곡에서의 흐름과 오염물질 분산을 고찰하기 위하여 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 도시의 오염물질 대부분이 화학 반응을 일으키는 물질인 반면, 지금까지의 많은 연구에서는 반응하지 않는 오염물질을 고려하여왔다. 최근 Baker et al. (2004)은 LES 모형을 이용하여 반응하는 오염물질의 분산을 연구함으로써 더욱 현실적인 상황을 고려하였다. 하지만 태양 복사에 의해 도로 바닥과 건물 벽에 주어진 가열이 도로 협곡에서의 흐름과 오염물질의 분산에 미치는 영향을 고려하기 위해서는, Baker et al. (2004)이 고려하지 않은 열역학 에너지 방정식을 방정식계에 포함시켜야 한다.

본 연구에서는 열역학 에너지 방정식과 간단한 광화학 방정식을 포함하는 CFD 모형을 사용하여 도시 도로 협곡에서 흐름과 반응 오염물질 분산에 미치는 열적 효과를 분석하였다.

#### 2. 수치 모형과 실험 설계

본 연구를 위하여 Kim and Baik (2004)이 개발한 수치 모형에 열역학 에너지 방정식과 간단한 광화학 과정을 포함하는 일산화질소, 이산화질소, 오존에 대한 예단 방정식들을 첨가한다. 이 때 산소 원자의 반응속도는 매우 빠르므로 산소 원자의 생성율과 소멸율은 거의 같다고 가정하였다. 그리고 광화학 반응들에 관계하는 이산화질소의 광분해속도  $J_{NO_2}$ 와 반응속도 상수  $k_3$ 는 온도에 관한 함수로 표현하였다 (Seinfeld and Pandis, 1998; Shetter et al., 1988; Baker et al., 2004).

도시 도로 협곡이 무한대로 뻗어 있다고 하고 주변 바람의 방향을 도로 협곡 방향에 수직으로 둔다. 좌표계의 원점을 도시 도로 협곡 바닥의 중심에 두고 주변 바람의 방향을  $x$ , 도시 도로 협곡의 방향을  $y$ , 연직 방향을  $z$  방향이라고 한다. 도로 길이  $L$ 은 50 m, 건물 높이  $H$ 와 두 건물 사이의 도로 너비  $W$ 가 각각 20 m, 건물 너비  $B$ 가 10 m로 도로 외관비(aspect ratio)  $H/W$ 는 1이고 전체 계산 영역의 크기는  $40\text{ m} \times 50\text{ m} \times 60\text{ m}$ 이다. 수평 방향으로는 균일 격자계를, 연직 방향으로는 1.1의 팽창률을 가진 비균일 격자계를 사용하였다. 0.1초의 시간 간격으로 2시간까지 적분하였다. 오염물질의 방출원은 도시 도로 협곡의 전체 지표면 바로 위에 있는 격자들의 중심에 위치한다. 즉, 면적 오염원을 고려하며 그 높이는 0.25 m이다. 반응 오염물질의 농도를 Baker et al. (2004)이 제시한 방법에 따라 초기화하였고, 최종 60분 동안 일산화질소와 이산화질소를 격자마다 매 초당 각각 50 ppb, 5 ppb씩 배출시켰다. 초기와 유입 경계의 대기 온도는 25°C이고 도시 도로 협곡 바닥과 대기 사이의 온도 차이는 1°C에서 15°C까지 1°C 간격으로 변화시켰다. 따라서 가열이 주어지지 않는 경우까지 포함하여 16가지 경우를 고려하였다.

#### 3. 결과 및 고찰

도시 도로 협곡 바닥에 가열이 없을 때는 도로 협곡 안에서  $y$  방향을 축으로 시계 방향으로 회전하는 주 소용돌이와 협곡 바닥의 풍하 측 모서리 근처에서 시계 반대 방향으로 회전하는 작은 소용돌이가 거의 변하지 않는 준정상 상태를 이루고 있다. 반면에 가열이 있을 때는 협곡 안의 소용돌이와 온도 분포가 계속 변화한다. 그러나 도로 협곡 안의 주 소용돌이는 계속 존재하며, 협곡 하부 영역의 역방향 흐름에 의해 풍상 측으로 온도 이류가 일어나 대체적으로 풍상 측 벽 근처 온도가 풍하 측 벽 근처 온도보다 높게 유지된다.

그림 1은 도시 도로 협곡의 전체 영역과 60분 동안 평균한 온도와 반응 오염물질들의 농도를 도시 도

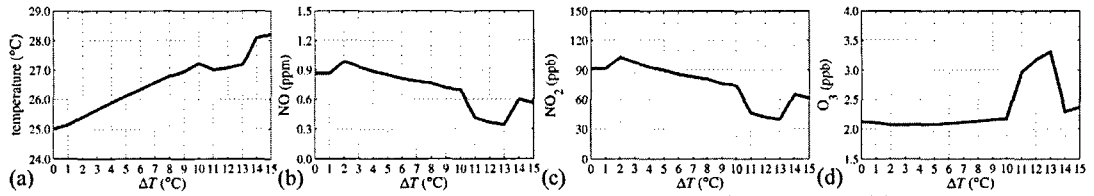


Fig. 1. Entire-canyon- and 60 min-averaged (a) temperature, (b) NO, (c) NO<sub>2</sub>, and (d) O<sub>3</sub> concentrations versus the bottom heating intensity.

로 협곡 바닥과 유입 경계의 대기 사이의 온도 차에 따라 나타낸 것이다. 즉, 이 값들은  $-0.5 \leq x/H \leq 0.5$ ,  $-1.25 \leq y/H \leq 1.25$ ,  $0 \leq z/H \leq 1$  영역과 60.5분에서 120분까지의 60분 동안의 자료들을 평균한 것이다. 협곡 바닥과 대기 사이의 온도 차가 증가할수록 협곡 내부의 평균 온도가 증가하고 일산화질소와 이산화질소의 농도가 감소하며 오존 농도는 증가한다. 그러나 도시 도로 협곡 바닥과 대기 사이의 온도 차가 5°C 이상일 때만 일산화질소와 이산화질소의 농도가 협곡 바닥에 가열이 없을 때의 농도보다 낮아지며 오존 농도의 경우에는 온도 차가 8°C 이상일 때 가열이 없는 경우의 농도보다 높아졌다.

$x-z$  단면에서의 소용돌이 중심 위치를 16가지 경우에 대해서 조사해 본 결과, 도시 도로 협곡의 양 끝부분에서 간혹 주 소용돌이가 나타나지 않았다. 따라서 도시 도로 협곡의 일부 영역  $-0.5 \leq x/H \leq 0.5$ ,  $-1 \leq y/H \leq 1$ ,  $0 \leq z/H \leq 1$ 과 60분 자료를 평균한 소용돌이 중심의 수평과 연직 위치를 협곡 바닥과 유입 경계의 대기 사이의 온도 차이에 따라 나타냈다. 소용돌이 중심의 평균 위치가 11~13°C 구간을 제외하고는 바닥에 가열이 없는 경우를 포함하여 풍상 측 건물 쪽에 위치하는 반면에 11~13°C 구간에서는 풍상 측 건물 쪽에 위치한다. 그리고 협곡 바닥과 대기 사이의 온도 차가 1°C일 때는 바닥에 가열이 없을 때보다 소용돌이 중심이 상승하다가 온도 차가 증가할수록 중심이 하강하는 경향을 보이나 11~13°C 구간에서는 이러한 경향성보다 더욱 하강한다. 이 온도 구간의 소용돌이선의 시간과 공간에 따른 변화를 살펴보면, 어느 시간 이후에는 시간과 공간 모두에 대하여 정지하고 있다. 또한 이 구간은 그림 1에서 상향 온도 이류가 매우 크고 일산화질소와 이산화질소의 농도가 크게 낮아지며 오존 농도가 급격히 높아지는 구간이며  $y/H = -0.625, 0.025, 0.625$  세 위치의  $x-z$  단면에서 협곡 내부 평균한 반응 오염물질들의 농도를 시계열로 나타내어 주기분석 하였을 때 주기성이 사라지는 구간이다. 즉, 11~13°C 구간에서는 역학적으로 유도된 흐름과 열적으로 유도된 흐름이 결합하여 생성된 소용돌이가 풍상 측에서 강한 상승기류를, 협곡 하부에서 비교적 강한 역방향 흐름을 가진다. 따라서 소용돌이 중심이 풍상 측과 협곡 하부로 이동하는 동시에 협곡 바닥에 각각 열원과 오염물질 배출원을 가지고 있는 온도와 일산화질소, 이산화질소가 크게 감소하며 협곡 외부에서 공급되는 오존이 크게 증가하는 것이다.

### 참 고 문 헌

- Baker, J., H.L. Walker, and X. Cai (2004) A study of the dispersion and transport of reactive pollutants in and above street canyons a large eddy simulation, *Atmos. Environ.*, 38, 6883-6892.
- Kim, J.-J. and J.-J. Baik (2004) A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG  $k-\epsilon$  turbulence model, *Atmos. Environ.*, 38, 3039-3048.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics*, Wiley-Interscience, New York.
- Shetter, R.E., J.A. Davidson, C.A. Cantrell, N.J. Burzynski Jr., and J.G. Calvert (1988) Temperature dependence of the atmospheric photolysis rate coefficient for NO<sub>2</sub>, *J. Geophys. Res.*, 93, 7113-7118.