

## 풍동실험을 이용한 도시거리협곡에서의 대기오염확산모델의 개발

박성규<sup>†</sup> · 김신도 · 이희관\*

서울시립대학교 환경공학과 · \*인천대학교 토목환경시스템공학과

(2005년 1월 20일 접수, 2005년 8월 15일 채택)

### Development of Empirical Model for the Air Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons Using Wind Tunnel Test

Seong-Kyu Park<sup>†</sup> · Shin-Do Kim · Heekwan Lee\*

Department of Environmental Engineering, University of Seoul

\*Department of Civil and Environmental Engineering, University of Incheon

**ABSTRACT** : Modeling techniques for air quality are useful tools in air quality management. Especially, the air quality in urban area is significantly influenced by local surroundings such as buildings and traffic. When considering the air quality in a street canyon, which is usually formed by a series of consecutive buildings and a street, currently available air dispersion model have a number of limitations to predict the air quality properly.

In this study, it is aimed to propose an empirical model for the air quality in urban street canyons. A series of wind tunnel tests, followed by statistical analysis, were conducted. In conclusion, it is found that a wide street canyon and a perpendicular external wind to the street canyon are beneficial to achieve an enhanced air quality in street canyon environment. The model prediction using the proposed model also shows reliable correlations to the wind tunnel test results.

**Key Words** : Urban Street Canyon, Vehicle Emission, Air Pollutant Dispersion, Wind Tunnel Test, Street Canyon Model

**요약** : 대기질 예측 모델링은 대기질 관리의 유용한 도구이다. 특히, 도시지역에서 대기질은 건물과 자동차와 같은 국부적인 장애물에 의해 크게 영향을 받는다. 일반적으로 도로를 따라 건물이 연속적으로 형성되어있는 도시거리협곡에서의 대기질을 예측하고자 할 때 현재 이용 가능한 대기확산모델은 대기질을 정확하게 예측하는데 많은 한계점을 가지고 있다.

본 연구에서는 도시거리협곡에서 대기질 예측을 위한 경험적인 모델을 제안하고자 하였다. 이를 위해 풍동실험을 수행하고, 그 결과를 통계적으로 분석하였다. 풍동실험 결과 넓은 협곡인 경우와 도로축과 직각을 이루는 바람일 때 도시거리협곡의 대기질을 향상시키는 데 유용하다는 것을 확인하였다. 또한, 제안한 모델을 이용한 모델 예측치는 풍동실험 결과와 상관성이 양호하게 나타났다.

**주제어** : 도시거리협곡, 자동차 대기오염물질, 대기오염확산, 풍동실험, 거리협곡 모델

## 1. 서론

대기질 관리 측면에서 대기오염확산모델은 오염물질의 배출과 그에 의해 형성되는 대기질과의 관계를 해석하는 도구로 널리 활용되고 있다. 이와 같은 모델은 그 연산 알고리즘과 적용대상에 따라 대규모(macro-scale), 중규모(meso-scale), 소규모(micro-scale)로 대별될 수 있다. 이와 같은 확산모델을 도시지역에 적용하는 경우, 도시지역 전체를 고려하는 도시규모(urban scale)와 일부 지역만을 대상으로 하는 국지규모(local scale)로 구분된다.

도시규모를 대상으로 하는 모델링에 있어서는 대상지역에 위치하고 있는 건물과 기타 구조물 등이 지면거칠기(surface roughness)에 의해 단순화 되어 처리되는 것이 일

반적이며, 현재 널리 이용되고 있는 가우시안 확산모델을 그 대표적인 예로 들 수 있다. 이 경우, 모델의 구조상 국부적인 또는 지형적인 오염원에 의한 영향을 파악하는 것이 매우 제한적이다.

특히, 도시지역에서 건물들에 의해 형성되는 거리협곡(street canyon)내에서의 대기오염의 확산은 도시규모와는 매우 다른 것으로 알려지고 있다. 도시규모에서 대기오염의 확산이 주로 해당지역의 주풍에 의해 이루어지는 것에 반해, 국소 규모인 도시협곡의 경우는 주풍에 의해 협곡 내에 형성되는 2차 기류에 의한 대기오염 확산이 지배적이다. 이는 그간의 여러 연구를 통해 분석/모형화되고 있으나 아직도 그 정확도면에서 많은 개선이 요구되고 있는 실정이다.<sup>1,2)</sup>

따라서, 본 연구에서는 도시지역 거리협곡 내부의 대기오염 확산예측을 위한 모델을 개선/제안하고자 하였다. 이를 위해 도시거리협곡을 재현한 모형이 제작되어 풍동실험에 이용되었으며, 다양한 기류 조건이 실험과정에 적용/검토되었다.


<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: mincheon@chollian.net

Tel: 02-2210-2315

Fax: 02-2242-4962

**Table 1.** Classification of street canyons in urban environments

Symmetry of canyon			
	deep	regular	wide
Aspect ratio of street canyon(W/H)	< 0.5	1	> 2
Length of canyon(L/H)	short	medium	long
	3	5	7

## 2. 이론적 고찰

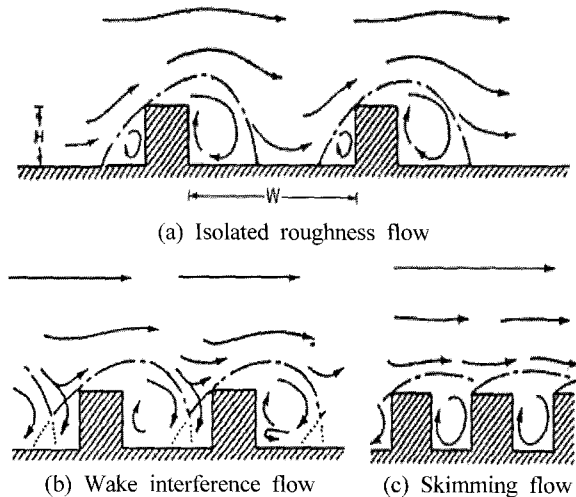
### 2.1. 도시거리협곡과 대기오염의 확산

일반적으로 거리협곡이란 도로를 중심으로 양쪽에 건물이 연속적으로 있는 도시거리(urban street)를 의미한다. 이와 같은 거리협곡의 형태는 협곡의 폭(width, W)과 높이(height, H)에 의한 형상비(aspect ratio = W/H)에 의해 표현된다. 형상비(W/H)가 1이고, 양면에 위치한 건물간의 사이가 넓게 떨어지지 않은 경우를 보통 협곡(regular canyon)으로 분류한다. 형상비(W/H)가 2이상인 경우는 넓은 협곡(wide canyon), 형상비(W/H)가 0.5정도인 경우는 깊은 협곡(deep canyon)으로 분류하고 있다. 협곡의 길이(Length, L)에 따라서는 2개의 주요 교차로 사이의 도로길이를 표현하고, 짧은 협곡(short canyon)은 L/H=3이하, 중간 협곡(medium canyon)은 L/H=5 이하, 긴 협곡(long canyon) L/H=7 이하로 구분하는 것이 일반적이다(Table 1 참조).<sup>3-5)</sup>

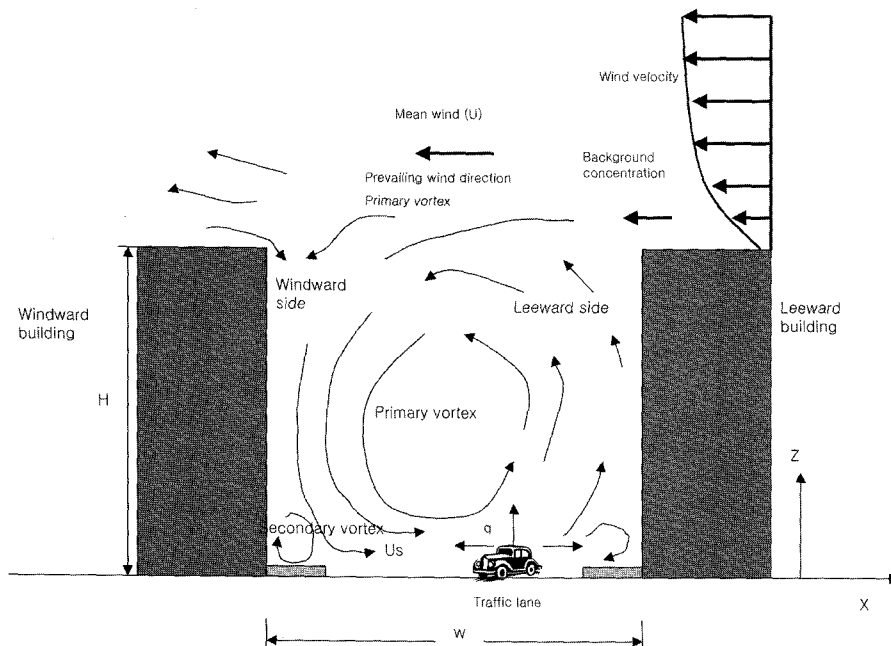
고층 건물이 밀집되어 있는 도시지역에서의 대기오염 확산은 평탄한 지형이나 도심지의 저층 건물이 밀집해 있는 지형과는 기본적으로 다르다. Fig. 1은 전형적인 도시거리협곡으로 주풍향이 오른쪽에서 불어오는 도로방향과 수직인 바람은 오른쪽에 위치하는 건물에 의해 흐름이 방해를

받는 현상을 보여주고 있다. 이때 1차 와류가 협곡 내에서 발생하여 협곡 내의 대기오염물질을 정체 또는 재순환시키게 된다. 따라서, 도시거리협곡에서는 주위의 바람에 의한 오염물질의 희석/환기 효과가 충분하지 않게 되며, 이로 인해 동일한 오염물질이 발생하는 평지조건에 비해 고농도 영역이 쉽게 형성될 수 있다.<sup>6,7)</sup>

또한, 동일한 주풍조건하에서 Fig. 2에도 보여진 바와 같이 적용대상이 되고 있는 거리협곡의 형태에 따라 그 협곡 내부에 형성되는 공기의 흐름이 매우 다른 것을 알 수 있다. 예를 들면, 동일 주풍이 좁은 협곡의 상부에 존재하는 경우 그림 (c)에 나타난 바와 같이 skimming flow가 형성되어 협곡내의 확산이 (a)의 넓은 협곡의 경우에 비해 불리한 것을 보여주고 있다.



**Fig. 2.** Air flow regimes in urban street canyons(Oke, 1988).<sup>8)</sup>



**Fig. 1.** Schematic diagram of a typical urban street canyon.

2.2. 도시거리협곡에서의 대기오염확산 모델링

거리협곡내의 대기오염확산 모델링은 협곡 내부의 와류 확산 효과를 해석하는 2차원적인 접근 방식에서 시작되었다. 그 대표적인 모델로 STREET과 OSPM(operational street pollution model) 등을 예로 들 수 있다. 이 모델을 협곡내에서의 바람과 난류장을 경험적으로 구분한 매개변수를 이용하여 오염의 확산을 해석하도록 하고 있다.<sup>5,9)</sup>

STREET 모델에서는 협곡 내의 오염농도를 자동차로부터 배출된 농도와 협곡 주변의 배경농도로 구분하여 계산하고 있다. 도로에서 발생한 오염물질 농도(C)는 협곡 내의 자동차에서 배출된 오염물질(C<sub>s</sub>)과 도시의 배경농도(C<sub>b</sub>)로 구분하고, C<sub>s</sub>는 leeward side(C<sub>sl</sub>)와 windward side(C<sub>sw</sub>), 그리고 도로상의 중간 지점(center, C<sub>sc</sub>)으로 구분하여 오염물의 농도를 계산하고 있다.

$$C = C_s + C_b \tag{1}$$

특히, Johnson 등(1973)은 도시거리협곡에서의 오염물질 농도 예측식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\text{Leeward side : } C_{sl} = \frac{K \cdot q}{(U_H + U_s) \cdot [(x^2 + z^2)^{1/2} + h_0]} \tag{2}$$

$$\text{Windward side : } C_{sw} = \frac{K \cdot q \cdot (H - z)}{(U_H + U_s) \cdot HB} \tag{3}$$

$$\text{Center : } C_{sc} = \frac{1}{2}(C_{sl} + C_{sw}) \tag{4}$$

- where, q : Rate of tracer gas flow in the street canyon (mg/m · s)
- U<sub>H</sub> : Roof level wind speed of street canyon(m/s)
- U<sub>s</sub> : Constant that accounts for the additional air movement induced by vehicle traffic(empirical value = 0.5 m/s)
- x : Horizontal distance between the receptor and the center of the nearest traffic lane(m)
- z : Height of the receptor(m)
- h<sub>0</sub> : Constant that accounts for the height of initial pollutant dispersion(empirical value = 2 m)
- K : Empirical constant(7)
- H : Height of the canyon(m)
- HB : Height to width ratio(H/B = 1)

후에 Dabberat 등(1973)은 협곡내 풍하측에서 외기 유입에 의한 희석 효과를 고려하기 위하여 풍하측의 농도 모델을 식(5)와 같이 수정하여 대기오염 확산에 적용하였다.<sup>9-11)</sup>

$$C_{sw} = \frac{K \cdot q}{W \cdot (U_H + 0.5)} \cdot \frac{H - z}{H} \tag{5}$$

where, W : Width of the canyon(m)

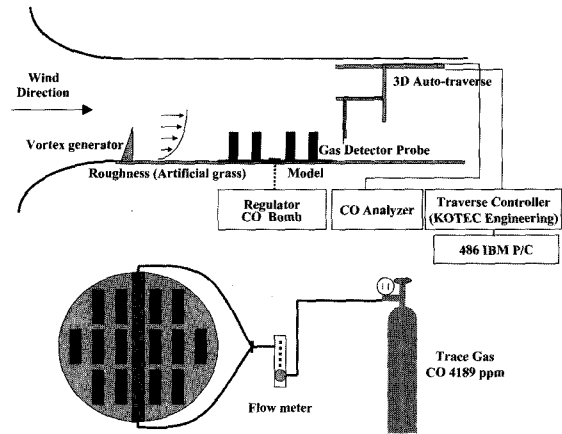


Fig. 3. Wind tunnel set up and street canyon model.

3. 풍동실험

3.1. 실험 개요

본 연구에서는 실제 현장에서 넓은 협곡(W/H=2.38), 보통 협곡(W/H=1.39), 좁은 협곡(W/H=0.64)에 해당하는 지역을 선정하고 이를 바탕으로 하여 1/500의 축소 모형을 각각 제작하였다. 본 연구에 이용된 풍동은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 개방 토출형 환경풍동(wind tunnel)으로 형상부의 바람 재현은 경계층 상층부의 풍속 2 m/s를 기준으로 하였다. 이때 생성된 경계층의 높이는 24 cm이고, power-law에 대한 지수 값은 약 0.25로 도시지역의 중립상태에 해당되는 바람을 재현하도록 하였다.<sup>12,13)</sup>

제작된 협곡모형을 순서에 따라 풍동내의 회전판에 설치/실험이 수행되었으며, CO 추적가스를 협곡 중심부에서 선상으로 발생시켜 움직이는 자동차로부터의 오염발생을 재현하였다. 풍동 모형실험에서 협곡 내부는 leeward side, center, windward side로 구분하여 각각의 지점에서 측정된 농도 값은 표준화(normalization)하여 나타내었으며, 본 연구에서는 다음 식(6)과 같이 풍동에서 측정된 농도 값을 이용하여 무차원화 하여 사용하였다.<sup>12,13)</sup>

$$C^* = C_m \times \frac{H_c \times W_c \times U_0}{Q} \times 10^{-6} \tag{6}$$

- where, C\* : Dimensionless normalized concentration
- C<sub>m</sub> : Measured concentration in the wind tunnel(g/m<sup>3</sup>)
- H<sub>c</sub> : Height of street canyon(m)
- W<sub>c</sub> : Width of street canyon(m)
- U<sub>0</sub> : Gradient wind velocity(m/s)
- Q : Line source emission rate(g/s)

3.2. 형상비(W/H)에 따른 농도 확산

도로 협곡 내 오염확산에 미치는 영향을 파악하기 위하여 먼저 협곡의 형상비(W/H=2.38, 1.39, 0.64)에 따른 협곡내의 대기오염변화를 파악하였다. Fig. 4에서와 같이 협곡 내부 오염물질의 평균농도(leeward side, center, windward side

각각의 지점에서 측정된 값의 평균)는 협곡의 형상비가 클수록(좁은 협곡 → 넓은 협곡) 협곡내의 오염도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 도로협곡이 깊어질수록 협곡 내의 풍속이 감소하여 체류시간이 길어지고, 희석효과가 감소하여 오염농도가 높아지는 것을 보여주고 있다.<sup>7)</sup>

앞에서의 실험결과를 정성적으로 확인하기 위하여 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 협곡내의 기류를 가시화하였다. 그림에 나타난 바와 같이 거리 협곡 상부의 주풍에 의한 기류가 windward 측으로부터 협곡내로 유입되고 있으며, 이로 인해 협곡 내에 시계방향(clock-wise)의 와류가 형성되는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(b)는 협곡 내에서 leeward side와 도로 중심(center), windward side 각각의 지점에서의 수직 농

도 분포를 나타내고 있다. 바람각이 90°인 경우 각 지점에서의 농도는 leeward 측이 높게, windward 측이 낮게 나타나고 있다.<sup>14)</sup>

### 3.3. 풍향(WD)에 따른 확산 특성

Fig. 6은 바람각에 따른 협곡 내의 오염농도 변화를 나타낸 것으로 바람각이 도로와 평행한 바람(0°)일수록 도로와 수직을 이루는 바람(90°)일 때 보다 농도가 증가함을 알 수 있다. 이는 도로와 풍향이 이루는 각이 도로와 평행이 될수록 확산이 잘 이루어지지 않아 협곡 내의 오염도가 증가함을 알 수 있다. 반대로 도로와 바람이 이루는 각이 도로와 직각에 가까울수록 확산이 잘 이루어져 협곡 내의 오염물질 농도가 낮게 나타나고 있다.

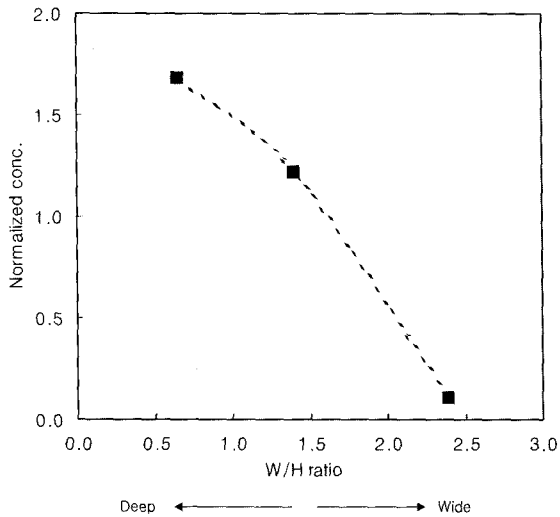


Fig. 4. Distribution of air pollutant due to different W/H canyon ratio.

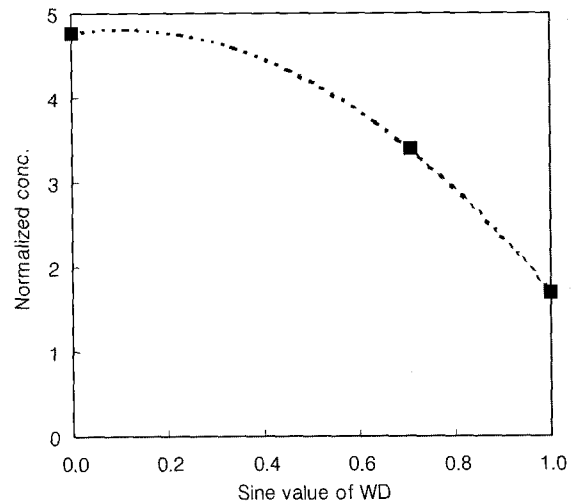


Fig. 6. Distribution of average concentrations vs. wind direction.

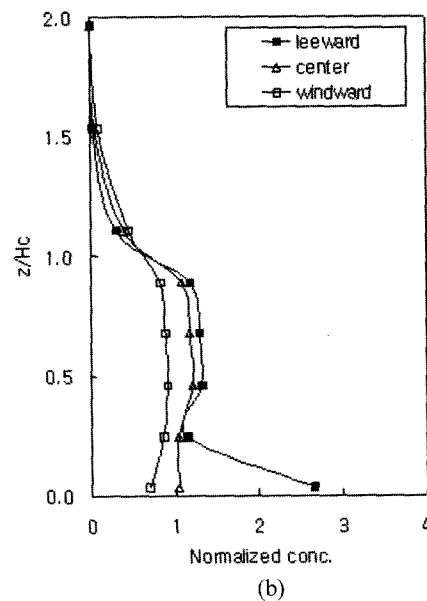
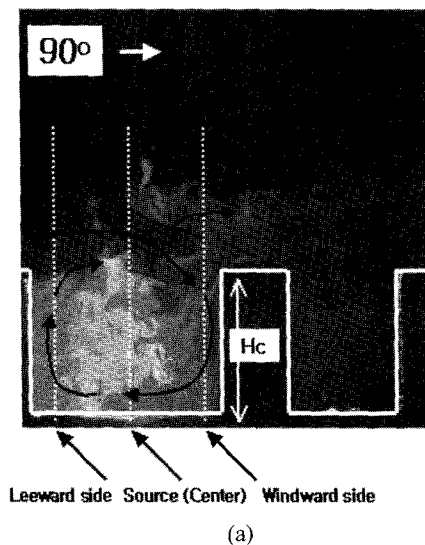


Fig. 5. Smoke visualized airflow (a) and vertical profiles of contaminant concentration (b) in the regular street canyon(W/H = 1.39) with perpendicular wind flow. (Note:  $z/H_c = 1$  in the subplot(b) is corresponding to the building height marked in the subplot(a))

특히, 풍향이 거리 협곡과 평행인 경우에는 협곡 내에서 발생된 오염물질이 협곡 외부로 배출되기 전에 긴 협곡을 따라 이동하면서 고농도 영역을 형성하기도 하는데 이를 계곡효과(valley effect)라고도 한다.<sup>7)</sup> 따라서 협곡내의 유리한 환기조건을 위해서는 협곡이 대상지역의 주 풍향과 큰 각(즉 90°)을 이루도록 하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

이상의 결과를 종합해 보면 동일한 주풍 조건하에서 협곡 내의 오염농도는 W/H 값이 작은 깊은 협곡에서 증가하고, 바람이 도로와 평행하게 불면 오염도가 증가함을 알 수 있다. 바꾸어 말하면 큰 W/H의 협곡에 대한 직각풍이 협곡내 대기오염확산에 유리하다는 것을 의미하기도 한다.

#### 4. 도시거리협곡 확산모델식의 검증

##### 4.1. 확산모델식의 정립

기존의 STREET 모델은 주로 형상비가 W/H = 1인 대칭형 협곡, 도로와 바람각이 90°인 경우에 대한 모델식으로 협곡의 대칭성, 형상비, 도로와 이루는 바람각의 변화에 따른 농도 예측이 어렵다. 또한, STREET 협곡 모델에서 적용하고 있는 식 (2)와 (5)의 경험상수 K에 대해 Johnson 등(1973)과 Chan and Hung(1995),<sup>10)</sup> Vardoulakis 등(2002a)은 7로,<sup>9)</sup> Mukherjee and Viswanathan(2001)은 10으로,<sup>15)</sup> Uehara 등(1997)은 동일 조건에서 6.11을<sup>16)</sup> 제시하고 있다.

본 연구에서는 풍동실험을 통하여 협곡 내부의 농도에 큰 영향을 미치는 인자로 협곡의 형상비(W/H)와 도로와의 바람각(WD)임을 확인하였다. 따라서, windward 측과 leeward 측의 농도 예측식에서 선행 연구자들에 의해 경험적으로 제시된 경험상수 K에 대하여 W/H 값과 WD의 변화에 대한 각각의 실험 결과를 토대로 Uehara 등(1997)의<sup>16)</sup> 방법을 적용하여 W/H 값이 0.64~2.38의 범위에서 WD가 0°~90°일 때 K 값은 6.1~9.4의 범위로 나타났다. 또한, 이 결과를 Design case 3.0의 분산분석을 통하여 상수 K 값을

W/H와 WD에 따른 모델식 K' 식 (7)을 도출하였다.

$$K' = 10.6525 - 1.8908 \times W/H - 2.7373 \times \sin(WD) + 1.1345 \times W/H \times \sin(WD) \quad (7)$$

where, W/H : Ratio of width to height(0.64 ≤ W/H ≤ 2.38)

WD : Degree of wind direction to street axis(0° ≤ WD ≤ 90°)

먼저, 수직 바람인 경우 leeward 측에는 식 (8)과 windward 측에는 식 (9)과 같이 제안하였으며, 도로와 평행한 바람인 경우 발생원에서 이류거리와 수직적인 농도감소를 고려하기 위하여 식 (10)과 같이 제안하였다. 특히, 도로와 평행한 협곡 내의 평행풍에 대한 모델식을 제안함으로써 도시협곡 내부의 좀더 세밀한 예측결과를 제시 할 수 있을 것으로 판단된다.

For perpendicular air flow(30° ≤ WD ≤ 90°)

i) Leeward side :  $C_{leeward} = \frac{K' \cdot q}{(U_H + U_s) \cdot [(x^2 + z^2)^{1/2} + 2]} \quad (8)$

ii) Windward side :  $C_{windward} = \frac{K' \cdot q}{W \cdot (U_H + 0.5)} \cdot \frac{H-z}{H} \quad (9)$

For non-vortex and parallel air flow(0° ≤ WD < 30°)

$$C_{par} = \frac{K' \cdot q}{(U_H + U_s) \cdot [(x^2 + z^2)^{1/2} + 2]} \cdot \frac{H-z}{H} \quad (10)$$

##### 4.2. 제안된 모델식의 검증

Fig. 7은 넓은 협곡, 보통 협곡, 깊은 협곡에 대하여 바람 각이 30° 이상인 경우와 30° 미만의 도로측과 평행한 바람에 대하여 앞에서 제안한 모델 예측치와 풍동 실험치에 대한 상관관계를 나타낸 것이다. 바람각이 30° 이상인 경우는

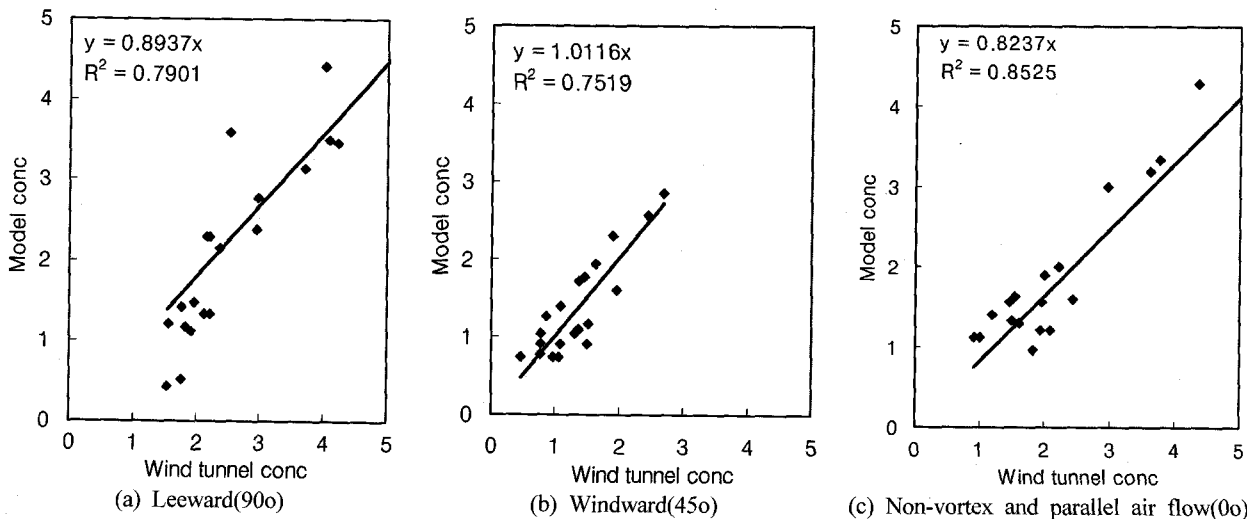


Fig. 7. Correlation analysis between wind tunnel measured and predicted concentrations using regular canyon(W/H = 1.39). (Note: The concentration on both axes are normalized.)

leeward 측과 windward 측 모델식에 대한 예측치와 풍동 실험치를 구분하여 적용하였다. 모델식의 예측농도는 전체적으로는 상관성이 양호하게 나타났으며, 넓은 협곡(W/H = 2.38)에서 상관성이 상대적으로 낮게 나타났다.

따라서, 바람각에 따라 협곡 내의 완전한 와류가 형성되는 30° 이상에서는 leeward 측과 windward 측의 대기오염 물질 확산 특성을 고려한 모델식과 30° 미만의 평행풍을 고려한 모델식으로 각각 구분하여 적용한다면, 협곡 내의 자동차에서 배출된 대기오염도의 예측성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 도시거리협곡의 자동차에서 배출되는 대기오염물질의 확산 특성 파악과 배출된 대기오염물질의 농도 예측을 위한 도시거리협곡 모델의 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 풍동실험 결과를 토대로 하여 도시거리협곡에서 자동차에 의한 대기오염물질 농도 예측 모델식을 제시하고, 풍동 실험치와 비교하여 제안한 모델식의 적정성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 협곡 내의 오염농도는 W/H 값이 작은 깊은 협곡(deep canyon)일수록 증가하고, W/H 값이 큰 넓은 협곡(wide canyon)일수록 감소하는 것으로 나타나 넓은 협곡일수록 자동차에서 발생한 대기오염물질의 확산이 양호한 것으로 나타났다.

2) 도로 측과 이루는 바람각(WD)의 실험에서는 WD가 90° (바람각이 직각)에서 오염농도는 감소하고, 0°에서는 오염농도가 증가하는 것으로 나타나 바람각이 도로 측과 평행할 때보다는 직각에 가까울수록 협곡 내부의 오염물질 확산은 유리한 것으로 나타났다.

3) 기존의 STREET 모델에서 식 (2)와 (5)의 경험상수 K를 보완하기 위하여 협곡의 형상비 W/H와 도로와 바람각 WD를 고려한 식 (7) K' 모델을 개발하고 이를 포함하는 모델을 제안하였다. 또한 도시거리협곡의 내부에 대기오염물질이 정체 및 재순환 되도록 하는 와류가 형성되는 협곡의 측과 이루는 바람각이 30° 이상인 수직 바람인 경우(식 (8)과 (9))와 바람각이 30° 미만인 평행한 바람인 경우(식 (10))로 모델식을 각각 구분하여 제안하였을 때 도시거리협곡 내의 자동차에서 배출된 대기오염도의 예측성을 좀 더 향상시킬 수 있는 것으로 평가되었다.

4) 본 연구에서는 대칭형 협곡에 대한 오염물질의 확산 특성과 농도 예측에 대한 연구였지만, 앞으로는 비대칭형 도시거리협곡에 대한 확산 특성과 이에 대한 대기오염 농도 예측식의 제안도 필요한 것으로 나타났다.

### 참고문헌

1. Stern, R. and Yamartino, R. J., "Development and first

evaluation of micro-calgrid: a 3-D urban-canopy-scale photochemical model," *Atmospheric Environment*, **35**(Supplement 1), S149~S165(2001).

2. Berkowicz, R., Palmgren, F., Hertel, O., and Vignati, E., "Using measurements of air pollution in streets for evaluation of urban air quality-meteorological analysis and model calculations," *The Science of the Total Environment*, **189/190**, 259~265(1996).

3. Yamartino, R. J., Strimaitis, D. G., and Messier, T. A., "Modification of highway air pollution models for complex site geometries (CPB3 : Canyon Plume Box Model 3) Volume I : Data analysis and model development," Federal Highway Administration, Washington D. C., USA(2002).

4. Hayden, R. E., et al., "Modification of highway air pollution models for complex site geometries(CPB3 : Canyon Plume Box Model 3) Volume II : Wind Tunnel Test Program," Federal Highway Administration, Washington D. C., USA(2002).

5. Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., and Pericleous, K., "Modeling air quality in street canyon : a review," *Atmospheric Environment*, **37**, 155~182(2003).

6. Kastner-Klein, P., Fedorovich, E., and Rotach, M. W., "A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **89**, 849~861(2001).

7. Buckland, A. T. and Middleton, D. R., "Nomograms for calculating pollution within street canyons," *Atmospheric Environment*, **33**, 1017~1036(1999).

8. Sini, J. F., Anquetin, S., and Mestayer, P. G., "Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons," *Atmospheric Environment*, **30**(3), 2659~2677(1996).

9. Vardoulakis, S., Gonzalez-Flesca, N., and Fisher, B. E. A., "Assessment of traffic-related air pollution in two street canyons," *Atmospheric Environment*, **36**, 1025~1039(2002a).

10. Chan, L. Y., Hung, W. T., and Qin, Y., "Assessment of vehicular emission dispersion models applied in street canyons in Guangzhou, PRC," *Environment International*, **21**(1), 39~46(1995).

11. Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., and Gonzalez-Flesca, N., "Model sensitivity and uncertainty analysis using roadside air quality measurement," *Atmospheric Environment*, **36**, 2121~2134(2002b).

12. Park, S. K., "Dispersion characteristics and concentration prediction of vehicle air pollutants in urban street canyons," Ph.D. thesis, The University of Seoul, Seoul(2003).

13. Park, S. K., Kim, S. D., and Lee, H. K., "Dispersion characteristics of vehicle emission in urban street canyon," *The Science of Total Environment*, **323**, 263~271(2004).

14. Zoumakis, N. M., "A note on average vertical profiles

- of vehicular pollutant concentrations in urban street canyons," *Atmospheric Environment*, **29**(24), 3719~3725(1995).
15. Mukherjee, P. and Viswanathan, S., "Carbon monoxide modeling from transportation sources," *Chemosphere*, **45**, 1071 ~ 1083(2001).
  16. Uehara, K., Murakami, S., Oikawa, S., and Wakamatsu, S., "Wind tunnel test of concentration fields around street canyons within the stratified urban canyon layer," *Journal of Architecture Planning Environment Engineering*, **499**, 9 ~ 16(1997).